

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI



ĐINH HỮU TÀI

**NGHIÊN CỨU TĂNG CƯỜNG KHẢ NĂNG CHỊU LỰC DỌC KẾT HỢP
CHỐNG ĂN MÒN CHO CỘT BÊ TÔNG CỐT THÉP CÓ CỘT ĐÃ BỊ GỈ BẰNG
BÊ TÔNG CỐT LƯỚI DỆT**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ

HÀ NỘI, 2026

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI

**NGHIÊN CỨU TĂNG CƯỜNG KHẢ NĂNG CHỊU LỰC DỌC KẾT HỢP
CHỐNG ĂN MÒN CHO CỘT BÊ TÔNG CỐT THÉP CÓ CỘT ĐÃ BỊ GỈ BẰNG
BÊ TÔNG CỐT LƯỚI DỆT**

NGÀNH : KỸ THUẬT XÂY DỰNG CÔNG TRÌNH GIAO THÔNG

MÃ NGÀNH : 9580205

Nghiên cứu sinh: Đinh Hữu Tài

Giáo viên hướng dẫn: GS.TS Ngô Đăng Quang

PGS.TS Nguyễn Duy Tiến

HÀ NỘI, 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan rằng luận án này là công trình nghiên cứu khoa học độc lập của tôi. Số liệu và kết quả nghiên cứu trong luận án này là trung thực, chưa hề được sử dụng để bảo vệ một học vị nào. Tôi cũng xin cam đoan rằng mọi sự tham khảo cho việc thực hiện luận án đã được chỉ rõ nguồn gốc.

Hà Nội, ngày tháng năm 2026

Đinh Hữu Tài

LỜI CẢM ƠN

Luận án tiến sĩ kỹ thuật ngành Kỹ thuật xây dựng công trình giao thông “*Nghiên cứu tăng cường khả năng chịu lực dọc và chống ăn mòn cho cột bê tông cốt thép có cốt đã bị gỉ bằng bê tông cốt lưới dệt*” là kết quả của quá trình nghiên cứu, cố gắng không ngừng của tôi trong suốt thời gian qua với sự giúp đỡ tận tình của các thầy, cô giáo Trường Đại học Giao thông vận tải, các nhà khoa học trong ngành Kỹ thuật xây dựng, Kỹ thuật xây dựng công trình giao thông, bạn bè, đồng nghiệp và gia đình.

Tôi xin gửi lời cảm ơn sâu sắc tới Ban Giám hiệu Trường Đại học Giao thông vận tải, Phòng Đào tạo Sau đại học, Ban lãnh đạo Khoa Công trình, Khoa Kỹ thuật xây dựng, Ban chủ nhiệm và tập thể các thầy, cô giáo Bộ môn Cầu Hầm, Bộ môn Kết cấu xây dựng cùng các thầy, cô giáo trong Trường Đại học Giao thông vận tải, Trường Đại học Xây dựng, Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải, Viện Khoa học và Công nghệ Giao thông vận tải đã quan tâm, tạo điều kiện giúp đỡ để tôi hoàn thành luận án tiến sĩ của mình.

Tôi xin bày tỏ lòng kính trọng và biết ơn sâu sắc tới Tập thể giáo viên hướng dẫn: GS.TS Ngô Đăng Quang và PGS.TS. Nguyễn Duy Tiến đã trực tiếp hướng dẫn tận tình, cung cấp tài liệu và các thông tin cần thiết cho tôi cũng như thường xuyên đôn đốc tôi làm việc và hoàn thành luận án tiến sĩ của mình đúng thời hạn. Tôi xin trân trọng cảm ơn Ban Giám hiệu Trường Đại học Giao thông vận tải, các anh, chị, bạn bè đồng nghiệp, các nhà khoa học trong ngành Kỹ thuật xây dựng công trình giao thông và các ngành khác có liên quan đã tạo điều kiện giúp đỡ tôi trong suốt thời gian học tập và làm luận án. Qua đây, tôi cũng xin cảm ơn gia đình đã luôn ở bên cạnh và động viên trong suốt thời gian qua để tôi hoàn thành tốt công việc nghiên cứu khoa học của mình.

Đinh Hữu Tài

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
DANH MỤC HÌNH ẢNH	vi
DANH MỤC BẢNG BIỂU	xi
DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT.....	xiii
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU.....	xv
PHẦN MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU.....	12
1.1 TỔNG QUAN VỀ CÁC PHƯƠNG PHÁP TĂNG CƯỜNG KHẢ NĂNG CHỊU LỰC CHO CỘT BÊ TÔNG CỐT THÉP CÓ CỐT ĐÃ BỊ ĂN MÒN	12
1.1.1 Các nguyên nhân chính gây suy giảm khả năng chịu lực của các cấu kiện cột bê tông cốt thép	12
1.1.2 Các phương pháp tăng cường khả năng chịu lực phổ biến	16
1.1.3 Tình hình nghiên cứu và ứng dụng bê tông cốt lưới dệt trong tăng cường cột bê tông cốt thép	18
1.1.4 Mô hình tính toán khả năng chịu lực của cột BTCT được tăng cường bằng BTCLD.....	19
1.2 TỔNG QUAN VỀ CHỐNG ĂN MÒN CỐT THÉP	25
1.2.1 Cơ chế hình thành và phát triển quá trình ăn mòn cốt thép trong bê tông	25
1.2.2 Các phương pháp gia tốc ăn mòn.....	27
1.2.3 Các phương pháp chống ăn mòn kim loại phổ biến.....	31
1.2.4 Khả năng của cốt lưới dệt sợi các bon với vai trò là anốt trợ trong hệ thống bảo vệ chống ăn mòn cốt thép bằng phương pháp bảo vệ catốt sử dụng dòng điện ngoài.....	34
1.3 KẾT LUẬN CHƯƠNG 1	36
CHƯƠNG 2: NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG GIẢI PHÁP TĂNG CƯỜNG KHẢ NĂNG CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỰC KẾT HỢP CHỐNG ĂN MÒN CỐT THÉP CHO CỘT BÊ TÔNG CỐT THÉP CÓ CỐT ĐÃ BỊ GỈ BẰNG BÊ TÔNG CỐT LƯỚI DỆT SỢI CÁC BON	39
2.1 MỤC ĐÍCH NGHIÊN CỨU.....	39

2.2	CƠ SỞ LÝ THUYẾT.....	40
2.2.1	Mô hình ứng xử cơ học của các loại vật liệu	40
2.2.2	Ảnh hưởng của quá trình ăn mòn cốt thép lên cấu kiện bê tông cốt thép.....	46
2.2.3	Chống ăn mòn cốt thép trong bê tông bằng phương pháp bảo vệ catốt sử dụng anốt trợ và dòng điện ngoài.....	52
2.3	XÂY DỰNG MÔ HÌNH TÍNH TOÁN KHẢ NĂNG CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỰC CỦA CỘT BTCT CÓ CỐT ĐÃ BỊ GỈ ĐƯỢC TĂNG CƯỜNG BẰNG BTCLD.....	55
2.3.1	Các giả thiết tính toán	56
2.3.2	Mô hình tính toán khả năng chịu lực nén dọc trục còn lại của cột bê tông cốt thép có cốt đã bị ăn mòn	58
2.3.3	Mô hình lý thuyết tính toán sức kháng nén dọc trục của cột BTCT sau khi được tăng cường bằng bê tông cốt lưới dệt.....	60
2.3.4	Mô hình lý thuyết tính toán khả năng tăng cường chống mất ổn định cho cột thép dọc trong cột BTCT của bê tông cốt lưới dệt.....	61
2.4	XÂY DỰNG GIẢI PHÁP KẾT HỢP VỪA TĂNG CƯỜNG KHẢ NĂNG CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỰC ĐÚNG TÂM VỪA CHỐNG ĂN MÒN CỐT THÉP CHO CỘT BÊ TÔNG CỐT THÉP CÓ CỐT ĐÃ BỊ GỈ.....	62
2.4.1	Cấu tạo chung của giải pháp	63
2.4.2	Tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục cho cột bê tông cốt thép có cốt đã bị gỉ của bê tông cốt lưới dệt	65
2.4.3	Bảo vệ catốt để chống ăn mòn cốt thép	69
2.5	KẾT LUẬN CHƯƠNG 2	73
CHƯƠNG 3: NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM VỀ ỨNG XỬ CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỰC VÀ HIỆU QUẢ CHỐNG ĂN MÒN CỐT THÉP CHO CỘT BÊ TÔNG CỐT THÉP CÓ CỐT ĐÃ BỊ GỈ BẰNG BÊ TÔNG CỐT LƯỚI DỆT SỢI CÁC BON.....		75
3.1	MỤC ĐÍCH NGHIÊN CỨU.....	75

3.2	NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ TĂNG CƯỜNG KHẢ NĂNG CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỰC CHO CỘT BTCT CÓ CỘT ĐÃ BỊ GỈ BẰNG BTCLD SỢI CÁC BON	76
3.2.1	Xây dựng mô hình thí nghiệm	76
3.2.2	Tính chất vật liệu.....	78
3.2.3	Quá trình thí nghiệm	80
3.2.4	Kết quả tính toán theo mô hình lý thuyết.....	85
3.2.5	Phân tích, đánh giá hiệu quả tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục cho cột bê tông cốt thép có cột đã bị ăn mòn bằng bê tông cốt lưới dệt sợi các bon ...	87
3.3	NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM VỀ ỨNG XỬ CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỰC VÀ HIỆU QUẢ CHỐNG ĂN MÒN CỘT THÉP	97
3.3.1	Các thí nghiệm kiểm tra khả năng trở thành anốt trợ trong hệ thống bảo vệ cốt thép của lưới sợi các bon.....	97
3.3.2	Nghiên cứu thực nghiệm xác định mức độ ăn mòn của cốt thép trong bê tông bằng phương pháp đo điện thế nửa pin theo thời gian.....	101
3.3.3	Nghiên cứu thực nghiệm xác định hiệu quả tăng cường khả năng chịu dọc trục và chống ăn mòn cốt thép cho cột bê tông cốt thép có cột đã bị gỉ bằng bê tông cốt lưới dệt sợi các bon sử dụng phương pháp bảo vệ catốt	104
3.4	SO SÁNH KẾT QUẢ TÍNH TOÁN TỪ MÔ HÌNH LÝ THUYẾT VÀ KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM	118
3.5	KẾT LUẬN CHƯƠNG 3	119
CHƯƠNG 4: NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG SỐ VỀ ỨNG XỬ CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỰC CHO KẾT CẤU CỘT BÊ TÔNG CỐT THÉP CÓ CỘT ĐÃ BỊ GỈ BẰNG BÊ TÔNG CỐT LƯỚI DỆT SỢI CÁC BON.....		123
4.1	MỤC ĐÍCH NGHIÊN CỨU.....	123
4.2	GIỚI THIỆU PHẦN MỀM PHẦN TỬ HỮU HẠN ATENA 3D	123
4.3	XÂY DỰNG MÔ HÌNH MÔ PHỎNG SỐ BẰNG PHẦN MỀM PHẦN TỬ HỮU HẠN ATENA 3D.....	124
4.3.1	Phương pháp mô phỏng	124

4.3.2	Mô hình vật liệu của bê tông, cốt thép và bê tông cốt lưới dệt	125
4.3.3	Mô hình hình học	127
4.3.4	Mô hình hóa quá trình ăn mòn	129
4.3.5	Quá trình phân tích.....	130
4.4	KẾT QUẢ MÔ PHỎNG	131
4.4.1	Kết quả đường cong quan hệ tải trọng-chuyển vị	131
4.4.2	Kết quả lực nén dọc trục lớn nhất	133
4.5	SỬ DỤNG MÔ HÌNH MÔ PHỎNG ĐỂ KHẢO SÁT MỘT SỐ THAM SỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN HIỆU QUẢ TĂNG CƯỜNG KHẢ NĂNG CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỤC	134
4.5.1	Khảo sát về ảnh hưởng của mức độ mất mát khối lượng do ăn mòn cốt thép dọc ảnh hưởng đến hiệu quả tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục	134
4.5.2	Khảo sát tham số về ảnh hưởng của số lớp bê tông cốt lưới dệt sợi các bon ảnh hưởng đến hiệu quả tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục	139
4.6	KẾT LUẬN CHƯƠNG 4	141
	KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....	144
	DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH, BÀI BÁO KHOA HỌC ĐÃ ĐƯỢC CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN	149
	TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	151
	PHỤ LỤC.....	157

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1.1: Quá trình ăn mòn cốt thép trong cấu kiện BTCT.....	15
Hình 1.2: Các phương pháp tăng cường, sửa chữa cột BTCT phổ biến.....	16
Hình 1.3: Tác động của ion clorua lên cấu kiện BTCT	25
Hình 1.4: Quá trình suy thoái do ăn mòn của cốt thép trong cấu kiện BTCT	26
Hình 1.5: Sơ đồ thí nghiệm gia tốc ăn mòn bằng dòng điện ngoài.....	27
Hình 1.6: Mặt cắt cốt thép trước và sau khi bị ăn mòn.....	30
Hình 1.7: Quá trình ăn mòn điện hóa kim loại	32
Hình 1.8: Sơ đồ phương pháp bảo vệ catốt sử dụng anốt hy sinh	32
Hình 1.9: Sơ đồ phương pháp bảo vệ catốt sử dụng dòng điện ngoài.....	33
Hình 1.10: Đường quan hệ giữa dòng điện và điện thế của vật liệu làm điện cực [41] ..	33
Hình 2.1: Giải pháp tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục kết hợp chống ăn mòn cốt thép cho cột BTCT có cốt đã bị gỉ bằng BTCLD sợi các bon	40
Hình 2.2: Quan hệ ứng suất – biến dạng của lưới sợi dệt [76]	41
Hình 2.3: Quan hệ ứng suất – biến dạng của BTHM.....	42
Hình 2.4: Biểu đồ thực nghiệm tỉ lệ thể tích tăng cường [54]	43
Hình 2.5: Quan hệ ứng suất – biến dạng của vật liệu BTCLD	43
Hình 2.6: Quan hệ ứng suất – biến dạng của các vật liệu thép	45
Hình 2.7: Quan hệ ứng suất – biến dạng của vật liệu bê tông lõi cột khi có hiệu ứng kiểm chế của BTCLD	45
Hình 2.8: Thép bị mất ổn định khi nén	47
Hình 2.9: Ứng xử chịu nén của thép sau khi bị mất ổn định.....	48
Hình 2.10: Nứt bê tông do sự nở ra của sản phẩm gỉ sét [59]	49
Hình 2.11: Sơ đồ bong tróc bê tông bảo vệ do ăn mòn cốt thép [60]	50
Hình 2.12: Sơ đồ phương pháp bảo vệ catốt sử dụng anốt trơ và dòng điện ngoài	52
Hình 2.13: Biểu đồ Pourbaix dành cho sắt [64]	54

Hình 2.14: Mô hình tăng cường khả năng chịu lực cho cột BTCT bằng BTCLD	56
Hình 2.15: Sơ đồ tính toán sức kháng nén còn lại của cột BTCT có cốt đã bị ăn mòn	58
Hình 2.16: Sơ đồ tính toán sức kháng nén cho cột BTCT có cốt đã bị ăn mòn được tăng cường bằng BTCLD.....	60
Hình 2.17: Mô hình tăng cường chống mất ổn định cho cốt thép cột của BTCLD	62
Hình 2.18: Mô hình tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục kết hợp chống ăn mòn cốt thép cho cột BTCT sử dụng BTCLD sợi các bon	63
Hình 2.19: Phương pháp thiết kế cho giải pháp kết hợp	65
Hình 2.20: Sơ đồ tính toán hệ thống bảo vệ chống ăn mòn	69
Hình 2.21: Sơ đồ lắp đặt hệ thống kiểm tra và đánh giá hiệu quả bảo vệ chống ăn mòn cốt thép	72
Hình 3.1: Cấu tạo các cột BTCT thí nghiệm (đơn vị mm)	76
Hình 3.2: Chế tạo mẫu cột BTCT.....	79
Hình 3.3: Cốt thép dọc, cốt thép đai của cột và lưới sợi dệt các bon	80
Hình 3.4: Chế tạo lồng cốt thép, gắn dây điện và lá điện trở đo biến dạng	81
Hình 3.5: Bảo dưỡng các mẫu cột bê tông cốt thép	82
Hình 3.6: Thí nghiệm gia tốc ăn mòn.....	83
Hình 3.7: Cốt thép cột bị ăn mòn khoảng 8% sau thí nghiệm gia tốc ăn mòn	83
Hình 3.8: Cốt thép cột bị ăn mòn khoảng 22% sau thí nghiệm gia tốc ăn mòn	83
Hình 3.9: Các bước tăng cường cho cột bằng BTCLD.....	84
Hình 3.10: Thiết lập hệ thống đo và thí nghiệm cột chịu nén đúng tâm	85
Hình 3.11: Cốt thép đai của cột sau khi bị ăn mòn 8% và 22%	86
Hình 3.12: Quan hệ lực - chuyển vị dọc trục của các cột thí nghiệm	88
Hình 3.13: Tính toán độ cứng của các cột bị ăn mòn 8% và cột không bị ăn mòn	88
Hình 3.14: Dạng phá hoại của cột đối chứng C0-N1, C0-N2 và C0-N3 (cột không bị ăn mòn)	89
Hình 3.15: Dạng phá hoại của cột đối chứng C1-L0-N1 và C1-L0-N2 (cột bị ăn mòn, không được tăng cường)	90

Hình 3.16: Dạng phá hoại của cột C1-L1-N1 và C1-L1-N2 (cột bị ăn mòn và được tăng cường bằng 1 lớp lưới sợi)	91
Hình 3.17: Dạng phá hoại của cột C1-L2-N1, C1-L2-N2 (cột bị ăn mòn, tăng cường 2 lớp BTCLD)	91
Hình 3.18: Biểu đồ quan hệ lực – biến dạng dọc và ngang của bê tông các cột C0-N1, C1-L1-N1 và C1-L2-N1	92
Hình 3.19: Biểu đồ quan hệ lực – biến dạng dọc của bê tông và cốt thép cột C0-N1 và C1-L0-N1	93
Hình 3.20: Quan hệ lực - chuyển vị của các cột bị ăn mòn 22% so với cột đối chứng	94
Hình 3.21: Tính toán độ cứng của các cột bị ăn mòn 22% và cột không bị ăn mòn	94
Hình 3.22: Dạng phá hoại của cột đối chứng C2-L0-N1 và C2-L0-N2 (bị ăn mòn 22%, không được tăng cường).	95
Hình 3.23: Dạng phá hoại của cột C2-L1-N1, C2-L1-N2 (ăn mòn 22%, tăng cường 1 lớp BTCLD)	95
Hình 3.24: Dạng phá hoại của cột C2-L2-N1 và C2-L2-N2 (cột bị ăn mòn 22%, tăng cường 2 lớp BTCLD)	96
Hình 3.25: Lưới sợi các bon SITgrid017.....	97
Hình 3.26: Sơ đồ và dụng cụ thí nghiệm đo phân cực lưới sợi các bon	97
Hình 3.27: Kết quả đo phân cực lưới sợi các bon (a) và điện cực Platin (b)	98
Hình 3.28: Sơ đồ thí nghiệm.....	99
Hình 3.29: Kết quả sau 30 ngày thí nghiệm	100
Hình 3.30: Cấu tạo mẫu thí nghiệm ăn mòn (đơn vị: mm)	101
Hình 3.31: Gia tốc ăn mòn các mẫu thí nghiệm	101
Hình 3.32: Thí nghiệm đo thể mạch hở của các mẫu thí nghiệm.....	102
Hình 3.33: Thí nghiệm cân lượng thép còn lại.....	102
Hình 3.34: Đường quan hệ Điện thế - Mức độ ăn mòn cốt thép.....	103
Hình 3.35: Cấu tạo các cột BTCT thí nghiệm (đơn vị: mm)	104
Hình 3.36: Chế tạo cột BTCT.....	106
Hình 3.37: Thí nghiệm gia tốc ăn mòn.....	107

<i>Hình 3.38: Cột bê tông trong chu kỳ ướt và chu kỳ khô.....</i>	<i>108</i>
<i>Hình 3.39: Quy trình bảo vệ catốt.....</i>	<i>108</i>
<i>Hình 3.40: Đo điện thế cốt thép</i>	<i>109</i>
<i>Hình 3.41: Thiết lập hệ thống đo và thí nghiệm cột chịu nén đúng tâm</i>	<i>109</i>
<i>Hình 3.42: So sánh mức độ ăn mòn cốt thép dọc</i>	<i>112</i>
<i>Hình 3.43: Quan hệ lực - chuyển vị dọc trục của các cột bị ăn mòn so với cột đối chứng</i>	<i>113</i>
<i>Hình 3.44: Dạng phá hoại của cột đối chứng C3-N1 và C3-N2 (cột không bị ăn mòn)</i>	<i>114</i>
<i>Hình 3.45: Dạng phá hoại của cột bị ăn mòn C3-L0-N1 và C3-L0-N2.....</i>	<i>114</i>
<i>Hình 3.46: Ăn mòn cốt thép trên cột C3-L0-N1 và C3-L0-N2</i>	<i>115</i>
<i>Hình 3.47: Dạng phá hoại của cột bị ăn mòn, được tăng cường (C3-L1-N1 và C3-L1-N2)</i>	<i>115</i>
<i>Hình 3.48: Ăn mòn cốt thép trên cột C3-L1-N1 và C3-L1-N2</i>	<i>116</i>
<i>Hình 3.49: Dạng phá hoại của các cột được bảo vệ catốt (C3-L1B-N1 và C3-L1B-N2)</i>	<i>116</i>
<i>Hình 3.50: Ăn mòn cốt thép trên cột C3-L1B-N1.....</i>	<i>117</i>
<i>Hình 4.1: Mô hình phần tử hữu hạn của cột bị ăn mòn và được tăng cường bằng BTCLD</i>	<i>124</i>
<i>Hình 4.2: Mô hình vật liệu của bê tông lõi, lưới sợi dệt các bon và BTHM</i>	<i>126</i>
<i>Hình 4.3: Mô hình vật liệu của cốt thép</i>	<i>127</i>
<i>Hình 4.4: Mô hình hóa dính bám giữa bê tông và cốt thép trong phần mềm ATENA 3D</i>	<i>127</i>
<i>Hình 4.5: Mô hình chia lưới phần tử cho cột</i>	<i>128</i>
<i>Hình 4.6: Mô phỏng tải trọng nén lên đầu cột</i>	<i>128</i>
<i>Hình 4.7: Các thông số vật liệu cốt thép bị ăn mòn trong phần mềm ATENA</i>	<i>129</i>
<i>Hình 4.8: Biến dạng do giãn nở của sản phẩm gỉ sét trên bề mặt cốt thép</i>	<i>129</i>
<i>Hình 4.9: Phương pháp tính toán quá trình ăn mòn cốt thép và nén dọc trục cột</i>	<i>131</i>
<i>Hình 4.10: Đo chuyển vị ở đỉnh và phản lực ở đáy cột.....</i>	<i>131</i>

<i>Hình 4.11: So sánh kết quả đường cong quan hệ tải trọng- chuyển vị của cột BTCT mô phỏng và thí nghiệm cho cột ăn mòn 8%</i>	<i>131</i>
<i>Hình 4.12: So sánh kết quả đường cong tải trọng- chuyển vị của cột BTCT mô phỏng và thí nghiệm cho cột ăn mòn 22%</i>	<i>132</i>
<i>Hình 4.13: Tính toán độ cứng của cột BTCT mô phỏng</i>	<i>136</i>
<i>Hình 4.14: Biểu đồ đường cong quan hệ tải trọng – chuyển vị của cột BTCT được tăng cường 1 lớp BTCLD sợi các bon mô phỏng với các cấp độ ăn mòn khác nhau</i>	<i>138</i>
<i>Hình 4.15: Mô hình cột không được tăng cường và được tăng cường 5 lớp BTCLD sợi các bon.....</i>	<i>139</i>
<i>Hình 4.16: Đường cong quan hệ lực – chuyển vị của các cột được mô phỏng</i>	<i>141</i>

DANH MỤC BẢNG BIỂU

<i>Bảng 1.1: Tốc độ ăn mòn cốt thép [35].....</i>	<i>26</i>
<i>Bảng 1.2: So sánh đặc tính của các loại anốt trơ</i>	<i>34</i>
<i>Bảng 1.3: Mục tiêu và nội dung chính của luận án</i>	<i>38</i>
<i>Bảng 2.1: Công thức tính toán hệ số κ.....</i>	<i>43</i>
<i>Bảng 2.2: Mật độ dòng điện bảo vệ theo điều kiện môi trường [63].....</i>	<i>53</i>
<i>Bảng 2.3: Điện trở suất của bê tông</i>	<i>71</i>
<i>Bảng 3.1: Nội dung chính của các thí nghiệm đã được thực hiện trong chương 3</i>	<i>75</i>
<i>Bảng 3.2: Danh sách các mẫu thí nghiệm.....</i>	<i>77</i>
<i>Bảng 3.3: Thành phần cấp phối BTHM</i>	<i>78</i>
<i>Bảng 3.4: Tính chất cơ học của vật liệu bê tông.....</i>	<i>79</i>
<i>Bảng 3.5: Thông số vật liệu cốt thép và lưới sợi dệt các bon</i>	<i>80</i>
<i>Bảng 3.6: Kết quả tính toán ứng suất tới hạn của thép dọc.....</i>	<i>86</i>
<i>Bảng 3.7: Kết quả tính toán ứng suất tới hạn của cốt thép khi được tăng cường BTCLD sợi các bon.....</i>	<i>87</i>
<i>Bảng 3.8: Kết quả tính toán sức kháng nén dọc trục đúng tâm</i>	<i>87</i>
<i>Bảng 3.9: Dự kiến thời gian ăn mòn và mất mát khối lượng</i>	<i>102</i>
<i>Bảng 3.10: Kết quả đo điện thế cốt thép sau khi bị ăn mòn.....</i>	<i>103</i>
<i>Bảng 3.11: Danh sách các mẫu thí nghiệm.....</i>	<i>105</i>
<i>Bảng 3.12: Kết quả đo điện thế cốt thép so với điện cực đối chứng Bạc – Clorua</i>	<i>110</i>
<i>Bảng 3.13: Kết quả mức độ ăn mòn khối lượng cốt thép dọc</i>	<i>111</i>
<i>Bảng 3.14: Kết quả lực nén dọc trục lớn nhất và mức độ ăn mòn cốt thép dọc</i>	<i>112</i>
<i>Bảng 3.15: So sánh kết quả lực nén dọc trục lớn nhất từ tính toán lý thuyết và nghiên cứu thực nghiệm</i>	<i>118</i>
<i>Bảng 4.1: Thông số đầu vào của vật liệu bê tông và BTHM</i>	<i>126</i>
<i>Bảng 4.2: So sánh lực nén dọc trục lớn nhất từ mô phỏng, tính toán lý thuyết và thí nghiệm</i>	<i>133</i>

<i>Bảng 4.3: Giá trị của cường độ kéo chảy và biến dạng tự do trên bề mặt của thép dọc do ăn mòn</i>	<i>135</i>
<i>Bảng 4.4: Kết quả lực nén dọc trục lớn nhất và độ cứng của cột BTCT</i>	<i>135</i>
<i>Bảng 4.5: Kết quả lực nén dọc trục lớn nhất của cột BTCT được tăng cường 1 lớp BTCLD sợi các bon</i>	<i>137</i>
<i>Bảng 4.6: Kết quả lực nén dọc trục lớn nhất của cột BTCT</i>	<i>140</i>

DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT

ACI: Hiệp hội Bê tông Mỹ (American Concrete Institute)

ASTM: Hiệp hội thí nghiệm và vật liệu Hoa Kỳ (American Society for Testing and Masterials)

BT: Bê tông

BTCLD: Bê tông cốt lưới dệt

BTCT: Bê tông cốt thép

BTHM: Bê tông hạt mịn

CSH: Canxi Silicat Hydrate

DEF: Delayed Ettringite Formation

FEM: Finite element method

FRP: Fiber Reinforced Polimer

ISO: Tổ chức Tiêu chuẩn hóa Quốc tế (International Organization for Standardization)

HPFRC: High Performance Fibre Reinforced Concrete

MMO: Mixed Metal Oxide

NCS: Nghiên cứu sinh

PAN: Polyacrylonitrile

Pl: Platin

RC: Reinforced concrete

RILEM: Liên đoàn thế giới của các phòng thí nghiệm và chuyên gia trong lĩnh vực vật liệu xây dựng, hệ thống và kết cấu (The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures)

SBR: Styrene Butadiene Rubber

SHE: Standard Hydrogen Electrode

TCVN: Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam

TCCS: Tiêu chuẩn cơ sở

Ti: Titan

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU

α : Hệ số nở ra của sản phẩm ăn mòn trên cốt thép

β : Góc nghiêng của vết nứt phát triển tại vị trí cốt thép dọc

β_s : Hệ số suy giảm cường độ cốt thép do ăn mòn

Δw : Khối lượng cốt thép bị suy giảm sau khi ăn mòn (%)

ε'_c : Biến dạng cực hạn của bê tông lõi cột

ε'_{cf} : Biến dạng cực hạn của bê tông hạt mịn

ε_{ccu} : Biến dạng nén cực hạn của bê tông lõi cột khi được tăng cường bằng BTCLD

ε_{cr} : Biến dạng nén của BTCLD khi nứt

ε_{fe} : Biến dạng có hiệu của vật liệu lưới sợi dệt

ε_s : Biến dạng của thép

ε_{sc} : Biến dạng tự do do sự giãn nở của sản phẩm ăn mòn

σ_{th} : Ứng suất tới hạn khi bị mất ổn định của cốt thép dọc

ρ_w : Hệ số tỷ lệ thể tích cốt lưới dệt tăng cường

ρ_g : Hàm lượng cốt thép dọc so với mặt cắt nguyên của cột

E_{cf} : Mô đun đàn hồi của BTHM

E_f : Mô đun đàn hồi của vật liệu cốt lưới dệt

E_t : Mô đun đàn hồi của BTCLD sau khi bị kéo nứt

E_s : Mô đun đàn hồi của cốt thép

f'_c : Cường độ chịu nén của bê tông cột

f'_{ccf} : Cường độ chịu nén của bê tông lõi khi được tăng cường bằng BTCLD

f'_{cf} : Cường độ chịu nén của bê tông hạt mịn

f_f : Cường độ chịu kéo của lưới sợi dệt

f_l : Ứng suất kiểm chế nở ngang của lưới sợi dệt

f_y : Giới hạn chảy của cốt thép khi chưa bị ăn mòn

f_{yc} : Giới hạn chảy của cốt thép sau khi bị ăn mòn

r_c : Bán kính cung tròn bo góc cột khi tăng cường

Φ : Góc nghiêng của vết nứt tại vị trí cốt thép đai trong cấu kiện.

γ : Góc nghiêng của lực tác dụng so với hướng của lưới sợi dệt

A_c : Diện tích mặt cắt chịu nén của bê tông cột

A_e : Diện tích mặt cắt phần bê tông cột bị kiểm chế bởi lưới sợi dệt

A_{cc} : Diện tích mặt cắt ngang của cột sau khi bị suy giảm do bong tách lớp bê tông bảo vệ

A_{cf} : Diện tích mặt cắt ngang của lớp bê tông hạt mịn

A_g : Diện tích mặt cắt nguyên của cột

A_{sc} : Diện tích mặt cắt ngang của cốt thép dọc sau khi bị ăn mòn

b : Chiều rộng mặt cắt cột khi chưa bị ăn mòn

c : Chiều dày lớp bê tông bảo vệ lúc chưa bị ăn mòn

b_{eff} : Chiều rộng mặt cắt cột sau khi bị ăn mòn

c_{eff} : Chiều dày lớp bê tông bảo vệ sau khi bị ăn mòn

h_{eff} : Chiều cao mặt cắt cột khi sau khi bị ăn mòn

$\bar{b}_{eff}$: Chiều rộng của mặt cắt cột sau khi bị suy giảm do ăn mòn cốt thép đai và cốt thép dọc.

$\bar{h}_{eff}$: Chiều cao của mặt cắt cột sau khi bị suy giảm do ăn mòn cốt thép đai và cốt thép dọc

$\bar{t}_{eff}$: Độ dài của phần bê tông bị bong tách do ăn mòn cốt thép đai và cốt thép dọc

D_s : Đường kính của thanh cốt thép ban đầu khi chưa bị ăn mòn

D_{sc} : Đường kính của thanh cốt thép sau khi bị ăn mòn.

d_v : Đường kính cốt thép đai

h : Chiều cao mặt cắt cột khi chưa bị ăn mòn

κ : Hệ số suy giảm cường độ chịu nén của bê tông hạt mịn dưới tác dụng của lưới sợi dệt

P_{cc} : Sức kháng nén tính toán của cột sau khi bị ăn mòn

P_{ccf} : Sức kháng nén của bê tông cột sau khi được tăng cường BTCLD

P_{cf} : Sức kháng nén của bê tông hạt mịn

P_{cs} : Sức kháng nén của cột sau khi được tăng cường BTCLD

P_s : Sức kháng nén của cốt thép dọc

s : Khoảng cách bố trí cốt thép đai

C_3A : Canxi aluminat

$CaCO_3$: Khoáng calcite

CO_2 : Các bon đi ô xít

E : Điện thế

F : Hằng số Faraday

I : Cường độ dòng điện

PHẦN MỞ ĐẦU

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các công trình xây dựng hiện nay đều có hệ kết cấu chịu lực để bảo đảm khả năng làm việc một cách hiệu quả và an toàn trong suốt vòng đời khai thác. Trong hệ chịu lực này, cột bê tông cốt thép (BTCT) là loại cấu kiện quan trọng vì đảm nhiệm chức năng truyền tải trọng từ phía trên xuống nền móng. Cột BTCT được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực xây dựng như công trình dân dụng, công nghiệp, giao thông và hạ tầng cảng biển.

Cơ chế làm việc của cột BTCT có thể thay đổi dựa theo đặc điểm của các loại tải trọng tác dụng và được phân thành hai dạng cơ bản là cột chịu nén đúng tâm và cột chịu nén lệch tâm. Trong trường hợp, cột ở trạng thái chịu lực nén lệch tâm thường gặp ở các loại cột nhà cao tầng và các trụ chịu lực chính của cầu, nơi lực nén dọc trục đồng thời tồn tại với mô men uốn phát sinh do tải trọng khai thác hoặc các điều kiện làm việc bất lợi. Ngược lại, đối với những cấu kiện mà tải trọng dọc trục đóng vai trò chi phối, **phạm vi ứng dụng chủ yếu bao gồm các trụ trung gian có chiều cao nhỏ của cầu vượt, hệ cột đỡ sàn trong công trình cầu cảng – bến cảng và các cọc BTCT thuộc hệ móng.**

Trong quá trình sử dụng, cột BTCT không duy trì ổn định khả năng làm việc mà có xu hướng suy giảm theo thời gian. Nguyên nhân của hiện tượng này thường do tác động của các loại tải trọng, môi trường xâm thực và sự lão hóa của các loại vật liệu cấu thành. Từ đây, nhiều dạng hư hỏng có thể hình thành trên cấu kiện, làm giảm sức kháng của cột, ảnh hưởng đến độ bền cũng như thời gian khai thác của cả cấu kiện cũng như toàn bộ công trình. Nếu các hư hỏng này không được sửa chữa kịp thời, chúng sẽ tiếp tục phát triển, làm gia tăng nguy cơ mất an toàn kết cấu và gây ảnh hưởng bất lợi đến hiệu quả khai thác trong thời gian dài.

Thực trạng suy giảm chất lượng của các cột BTCT hiện hữu đặt ra yêu cầu cấp thiết đối với việc nghiên cứu và phát triển các phương pháp sửa chữa phù hợp. Ngoài việc sửa chữa về sức kháng của cấu kiện, các phương pháp này cũng cần chú ý việc kéo dài tuổi thọ và nâng cao độ an toàn khi khai thác công trình. Vì vậy, việc nghiên cứu các cơ sở khoa học phục vụ đánh giá hiện trạng, lựa chọn giải pháp tăng cường và nâng cao độ bền lâu của cột

BTCT không chỉ có ý nghĩa về mặt học thuật mà còn mang giá trị thực tiễn cao đối với công tác quản lý, bảo trì và khai thác các công trình xây dựng hiện nay.

Sự xuống cấp của cốt BTCT có thể là do sự gia tăng tải trọng làm việc so với các giả thiết thiết kế ban đầu. Quá trình khai thác có thể làm phát sinh các tải trọng lớn hơn giá trị dự kiến hoặc làm thay đổi hướng tác động của lực khiến cấu kiện phải làm việc trong trạng thái bất lợi và chịu ứng suất cao hơn thiết kế. Bên cạnh tác nhân cơ học, môi trường xung quanh cũng có tác động lớn đến quá trình suy thoái của kết cấu. Đối với các công trình làm việc trong điều kiện có độ ẩm cao hoặc môi trường biển, sự xâm nhập của các tác nhân gây ăn mòn như ion clorua (Cl^-), ion sunfat (SO_4^{2-}) và khí cacbonic (CO_2) có thể đẩy nhanh quá trình xuống cấp của bê tông (BT) và thúc đẩy phản ứng ôxy hóa của phần thép bên trong.

Sự suy giảm chất lượng của các vật liệu BTCT thường diễn ra đồng thời và có mối quan hệ tương hỗ trong vấn đề hư hỏng các cấu kiện chịu lực. Các biểu hiện phổ biến của bê tông bị suy thoái bao gồm có vết nứt, hiện tượng bong tróc lớp bảo vệ và sự suy giảm cường độ chịu nén. Trong khi đó, cốt thép thường bị oxi hóa dẫn đến diện tích tiết diện thanh thép bị giảm. Đồng thời, liên kết dính bám giữa thép và bê tông cũng bị ảnh hưởng lớn. Những biến đổi này ảnh hưởng đến khả năng làm việc của cấu kiện, dẫn đến độ cứng giảm, sức kháng và không đảm bảo an toàn trong quá trình khai thác. Nếu không có biện pháp can thiệp phù hợp, các hư hỏng sẽ tiếp tục tích lũy theo thời gian, rút ngắn tuổi thọ khai thác và làm gia tăng chi phí bảo trì cũng như sửa chữa công trình.

Để khôi phục khả năng làm việc của các cấu kiện BTCT đã bị hư hỏng, nhiều giải pháp sửa chữa và tăng cường đã được nghiên cứu, phát triển và áp dụng trong thực tế. Mỗi phương pháp có cơ chế làm việc khác nhau, phù hợp với từng mức độ hư hỏng và yêu cầu khai thác của công trình. Trong số đó, các giải pháp được sử dụng phổ biến hiện nay bao gồm bọc bổ sung BTCT, tăng cường bằng bản thép và sử dụng vật liệu composite cốt sợi (Fiber Reinforced Polymer – FRP).

Giải pháp bọc BTCT và tăng cường bằng bản thép đã được áp dụng trong thời gian dài nhờ khả năng nâng cao sức kháng của cấu kiện và ưu điểm về phương thức thi công dễ dàng. Tuy nhiên, việc bổ sung thêm vật liệu lên bề mặt thường làm tăng kích thước thông

thủy của cầu kiện, gia tăng sức nặng của bản thân và kéo theo khối lượng thi công lớn. Những đặc điểm này có thể gây khó khăn trong quá trình cải tạo các công trình đang khai thác hoặc tại những vị trí có không gian thi công hạn chế. FRP là vật liệu composite được đánh giá là có hiệu quả cao đối với việc tăng cường sức kháng cho kết cấu BTCT. Ưu điểm của FRP là rất nhẹ đi kèm với cường độ chịu lực tốt và khó bị ăn mòn trong môi trường xâm thực. Mặc dù vậy, lớp tăng cường FRP vẫn chịu ảnh hưởng bởi các điều kiện môi trường bất lợi. Nhiệt độ cao, độ ẩm kéo dài hoặc bức xạ cực tím có thể làm suy giảm tính chất của vật liệu và ảnh hưởng đến hiệu quả làm việc của hệ thống tăng cường trong quá trình khai thác lâu dài.

Các giải pháp nêu trên đều đã chứng minh được hiệu quả trong việc nâng cao sức kháng cho các cầu kiện BTCT, phần lớn vẫn tập trung vào khía cạnh cơ học mà chưa giải quyết triệt để vấn đề ăn mòn cốt thép. Trong khi đó, các kết cấu một khi đã xuất hiện ăn mòn, việc chỉ gia tăng khả năng chịu lực mà không kiểm soát được quá trình suy thoái của cốt thép sẽ làm hạn chế hiệu quả lâu dài của công tác sửa chữa.

Để hạn chế quá trình ăn mòn cốt thép, một số phương pháp bảo vệ đã được áp dụng như sử dụng cốt thép không bị gỉ, bổ sung chất ức chế quá trình oxi hóa hoặc phủ các lớp vật liệu bảo vệ nhằm ngăn cản sự tiếp xúc với các môi trường bất lợi. Tuy nhiên, các giải pháp này chủ yếu thích hợp đối với công trình mới hoặc các chi tiết kim loại có thể tiếp cận trực tiếp. Đối với các kết cấu bê tông cốt thép đang khai thác và đã bị ăn mòn, các phương pháp điện hóa, đặc biệt là phương pháp bảo vệ catốt có sử dụng dòng điện ngoài được cho là hiệu quả hơn nhiều.

Bê tông cốt lưới dệt (BTCLD) đã và đang thu hút sự quan tâm đáng kể của các nhà nghiên cứu trong lĩnh vực cải tạo và sửa chữa cho các kết cấu BTCT. So với các giải pháp truyền thống đã kể ở trên, BTCLD mang lại một số ưu điểm về hiệu quả tăng sức kháng, tính tương thích với kết cấu hiện hữu và khả năng chống chịu trong các điều kiện làm việc bất lợi như có môi trường xâm thực, có tia cực tím. Nhờ những đặc tính đó, BTCLD đang bắt đầu được sử dụng tại Việt Nam cũng như trên thế giới nhằm phục hồi và kéo dài thời gian khai thác của các kết cấu BTCT bị suy giảm chất lượng [11].

Về cấu tạo, BTCLD là vật liệu composite xi măng, trong đó lớp bê tông hạt mịn (BTHM) là chất nền liên kết, còn hệ lưới sợi dệt đảm nhiệm chức năng chịu lực kéo chính. Thành phần của BTHM thường bao gồm xi măng, nước và cốt liệu mịn kết hợp với các phụ gia khoáng hoạt tính (tro bay, muối silic) cùng các chất phụ gia để cải thiện cường độ, tính công tác, độ đặc chắc và khả năng chống thấm. Phần cốt chịu lực được hình thành từ các bó sợi phi kim có đường kính nhỏ, được sắp xếp theo dạng lưới nhằm phát huy hiệu quả chịu kéo. Tùy theo yêu cầu sử dụng, lưới dệt có thể được chế tạo từ sợi các bon, sợi bazan hoặc sợi thủy tinh, là những sợi có cường độ kéo cao và khả năng làm việc ổn định trong môi trường xâm thực.

Trong số các loại cốt lưới hiện đang được nghiên cứu, lưới sợi các bon được đánh giá là có nhiều ưu điểm nổi bật nhờ vừa sở hữu cường độ cơ học lớn, vừa có khả năng dẫn điện tốt. Đặc điểm này mở ra khả năng khai thác đồng thời hai chức năng trong cùng một hệ vật liệu. Khi được kết hợp một dòng điện ngoài, lưới sợi các bon không chỉ tham gia chịu lực cho lớp BTCLD mà còn có thể đảm nhiệm vai trò của anốt trợ trong hệ thống điện hóa [12]. Nhờ vậy, lớp tăng cường vừa góp phần nâng cao sức kháng của cấu kiện, vừa hỗ trợ kiểm soát sự ăn mòn của cốt thép mà không cần bố trí thêm một hệ thống anốt độc lập.

Mặc dù BTCLD có tiềm năng lớn, hiệu quả làm việc của BTCLD kết hợp bảo vệ catốt vẫn còn chịu nhiều ảnh hưởng từ các điều kiện sử dụng thực tế. Tính chất của vật liệu, phương án bố trí lớp lưới, chiều dày lớp BTHM cũng như mức độ ăn mòn ban đầu của cốt thép đều có thể làm thay đổi hiệu quả tăng cường về sức kháng và khả năng chống chịu lại ăn mòn của hệ thống. Do đó, vấn đề nghiên cứu một cách đầy đủ ảnh hưởng của các yếu tố này là cơ sở quan trọng để xây dựng các giải pháp thiết kế và ứng dụng phù hợp.

Mặt khác, phần lớn các nghiên cứu đã công bố hiện nay thường chỉ tập trung vào một trong hai mục tiêu, hoặc nâng cao khả năng chịu lực của cấu kiện, hoặc kiểm soát quá trình gỉ sét của cốt thép. Những nghiên cứu xem xét đồng thời cả hai chức năng trên trong cùng một hệ thống tăng cường còn tương đối hạn chế, đặc biệt đối với các cột BTCT đã bị hư hỏng do ăn mòn. Khoảng trống này cho thấy vẫn cần có thêm các nghiên cứu nhằm làm rõ cơ chế làm việc cũng như đánh giá hiệu quả tổng hợp của giải pháp BTCLD sử dụng lưới sợi các bon đối với các cấu kiện chịu nén dọc trục.

Việt Nam có điều kiện khí hậu nhiệt đới ẩm và tạo ra nhiều thách thức đối với thời gian sử dụng lâu dài của các kết cấu BTCT. Với đường bờ biển dài, độ ẩm không khí cao và nhiều khu vực thường xuyên chịu tác động của hơi muối, các công trình BTCT, đặc biệt là các công trình giao thông, cảng biển và ở ven biển, luôn phải làm việc trong môi trường có khả năng gây ăn mòn mạnh. Đây là một trong những nguyên nhân quan trọng làm gia tăng tốc độ suy thoái của thép và rút ngắn tuổi thọ khai thác của kết cấu.

Nhiều khảo sát và thống kê đã chỉ ra rằng hiện tượng ăn mòn cốt thép đang là dạng hư hỏng phổ biến đối với các công trình bê tông cốt thép tại Việt Nam. Hơn 50% bộ phận kết cấu BTCT xuất hiện các biểu hiện hư hỏng nghiêm trọng hoặc mất khả năng làm việc sau khoảng 30 năm khai thác [1]. Thực trạng này phản ánh ảnh hưởng lâu dài của môi trường xâm thực đối với các công trình thường xuyên tiếp xúc với không khí ẩm, hơi muối hoặc nước biển, đồng thời cho thấy nhu cầu ngày càng lớn về các giải pháp sửa chữa và bảo trì có hiệu quả lâu dài.

Trong bối cảnh số lượng công trình xuống cấp ngày càng gia tăng, việc chỉ khôi phục khả năng chịu lực của cấu kiện không còn phù hợp với vấn đề đặt ra trong khai thác đối với các kết cấu hiện hữu. Các giải pháp sửa chữa hiện đại cần đồng thời giải quyết hai vấn đề cốt lõi, bao gồm nâng cao sức kháng và kiểm soát ăn mòn của cốt thép nhằm hạn chế sự phát triển tiếp theo của hư hỏng. Đây cũng là xu hướng nghiên cứu đang được nhiều nhóm nghiên cứu trên thế giới quan tâm trong lĩnh vực bảo trì và kéo dài thời gian sử dụng cho các công trình BTCT.

Xuất phát từ những yêu cầu thực tiễn nêu trên, luận án “*Nghiên cứu tăng cường khả năng chịu lực dọc kết hợp chống ăn mòn cho cột bê tông cốt thép có cốt đã bị gỉ bằng bê tông cốt lưới dệt*” được lựa chọn để nghiên cứu giải pháp sử dụng BTCLD kết hợp lưới sợi các bon nhằm đồng thời thực hiện chức năng tăng cường sức kháng cơ học và bảo vệ chống ăn mòn cho cột BTCT đã bị gỉ cốt thép. Nội dung nghiên cứu tập trung làm rõ cơ chế làm việc của giải pháp, đánh giá hiệu quả tăng cường sức kháng cơ học và xác định khả năng bảo vệ catốt của lưới sợi các bon khi làm việc như anốt trợ. Kết quả nghiên cứu được kỳ vọng sẽ bổ sung cơ sở khoa học cho việc thiết kế và ứng dụng giải pháp này trong sửa chữa, các kết cấu BTCT, đồng thời góp phần nâng cao độ bền, tuổi thọ và mức độ an toàn

của các công trình BTCT đang phải làm việc trong các điều kiện bất lợi, đặc biệt là trong môi trường xâm thực.

2. MỤC TIÊU NGHIÊN CỨU

Luận án hướng tới mục tiêu nghiên cứu chính như sau:

- **Mục tiêu chính:** Nghiên cứu và phát triển một giải pháp kỹ thuật sử dụng BTCLD sợi các bon nhằm đồng thời tăng cường khả năng chịu nén dọc trục và hạn chế quá trình ăn mòn cốt thép đối với các cấu kiện cột bê tông cốt thép đã bị suy giảm chất lượng do hiện tượng gỉ cốt thép.

Để thực hiện được mục tiêu chính kể trên, hai mục tiêu chi tiết hơn được đề xuất trong luận án như sau:

- **Mục tiêu 1:** Xây dựng được giải pháp tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục cho cột BTCT có cốt đã bị ăn mòn bằng BTCLD sợi các bon có cốt thép đã bị hư hỏng do hiện tượng gỉ cốt thép.
- **Mục tiêu 2:** Xây dựng được giải pháp bảo vệ chống ăn mòn cốt thép cho cột BTCT có cốt đã bị gỉ bằng phương pháp bảo vệ catốt sử dụng BTCLD sợi các bon làm anốt trơ.

3. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHẠM VI NGHIÊN CỨU

Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của luận án là:

- **Đối tượng nghiên cứu:** Các mẫu cấu kiện cột BTCT kích thước nhỏ phù hợp với điều kiện của phòng thí nghiệm, có cốt thép đã bị ăn mòn, làm việc theo sơ đồ chịu nén dọc trục đúng tâm.
- **Phạm Vi nghiên cứu:**
 - Cốt thép dọc của các mẫu cột được gia tốc ăn mòn nhằm đạt hai mức độ ăn mòn thiết kế, tương ứng với tỷ lệ suy giảm khối lượng thép khoảng 10% và 20%.
 - Cột có kích thước phù hợp với dạng cột ngắn, chịu nén đúng tâm.
 - BTCLD được tăng cường từ 1 đến 2 lớp bằng cách trát thủ công.

4. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Các phương pháp nghiên cứu được sử dụng trong luận án bao gồm:

- **Nghiên cứu lý thuyết:** Nội dung được thực hiện trên cơ sở tổng quan, phân tích và đánh giá có hệ thống các tài liệu khoa học trong và ngoài nước liên quan đến công nghệ tăng cường kết cấu BTCT bằng BTCLD, sự suy giảm khả năng chịu lực của cấu kiện do ăn mòn cốt thép, cũng như các giải pháp bảo vệ điện hóa cho kết cấu bê tông cốt thép. Kết quả nghiên cứu là cơ sở để đề xuất giải pháp sử dụng BTCLD sợi các bon nhằm thực hiện đồng thời hai chức năng gồm tăng cường khả năng chịu nén dọc trục và bảo vệ chống ăn mòn cho cốt thép hiện hữu. Trên nền tảng đó, luận án xây dựng các mô hình tính toán khả năng chịu lực của cấu kiện sau tăng cường và đề xuất phương pháp xác định các tham số kỹ thuật của hệ thống bảo vệ catốt sử dụng lưới sợi các bon làm anốt trợ.
- **Nghiên cứu thực nghiệm:** được triển khai nhằm kiểm chứng và đánh giá mức độ phù hợp của các mô hình lý thuyết được đề xuất trong luận án. Chương trình thí nghiệm được thực hiện trong điều kiện phòng thí nghiệm với mục tiêu khảo sát đặc trưng làm việc của các cột bê tông cốt thép có cốt thép bị ăn mòn khi chịu nén dọc trục sau khi được tăng cường bằng BTCLD. Kết quả thu được được so sánh với các mẫu đối chứng không áp dụng biện pháp tăng cường nhằm làm rõ hiệu quả của giải pháp đề xuất đối với khả năng chịu lực của cấu kiện. Ngoài việc đánh giá hiệu quả tăng cường, nghiên cứu thực nghiệm còn tập trung xem xét khả năng bảo vệ chống ăn mòn của hệ thống bảo vệ catốt bằng dòng điện ngoài. Thông qua các thí nghiệm chuyên biệt, hiệu quả làm việc của lưới sợi các bon trong vai trò điện cực anốt được phân tích và đánh giá, từ đó xác định khả năng hạn chế quá trình ăn mòn của cốt thép trong cấu kiện bê tông cốt thép.
- **Nghiên cứu mô phỏng số:** được triển khai bằng phần mềm phần tử hữu hạn với mô hình đã được hiệu chỉnh từ kết quả thực nghiệm. Mô hình mô phỏng số được sử dụng để nghiên cứu ứng xử cơ học của cột bê tông cốt thép có cốt thép bị ăn mòn khi được tăng cường bằng BTCLD sợi các bon và chịu tác dụng của lực nén dọc trục. Thông qua mô hình này, luận án thực hiện các phân tích tham số nhằm đánh

giá mức độ ảnh hưởng của các yếu tố cấu tạo và vật liệu đến hiệu quả tăng cường của hệ BTCLD. Các kết quả thu được là cơ sở để nhận diện các yếu tố chi phối khả năng chịu lực của cầu kiện, đồng thời đề xuất các khuyến nghị kỹ thuật phục vụ công tác sửa chữa và tăng cường cột bê tông cốt thép bị ăn mòn trong thực tiễn.

5. CẤU TRÚC CỦA LUẬN ÁN

Luận án được trình bày với cấu trúc gồm các phần:

- **Phần mở đầu:**

Khái quát bối cảnh nghiên cứu và những vấn đề thực tiễn đặt ra, từ đó làm rõ lý do lựa chọn đề tài. Nội dung phần này cũng xác định các mục tiêu cần đạt được, đối tượng và phạm vi nghiên cứu, trình bày định hướng và phương pháp tiếp cận nghiên cứu, đồng thời nêu bật giá trị khoa học và tiềm năng ứng dụng của luận án trong thực tiễn.

- **Chương 1:** Tổng quan về tình hình nghiên cứu

Trình bày kết quả tổng quan tài liệu nhằm làm rõ hiện trạng nghiên cứu liên quan đến các giải pháp tăng cường khả năng chịu lực và bảo vệ chống ăn mòn đối với cột bê tông cốt thép có cốt thép bị ăn mòn. Bên cạnh đó, các nghiên cứu về đặc tính, khả năng ứng dụng và hiệu quả của BTCLD sợi các bon trong sửa chữa và tăng cường kết cấu cũng được hệ thống hóa và phân tích. Từ việc đánh giá các kết quả nghiên cứu hiện có, luận án chỉ ra những vấn đề còn tồn tại, xác định khoảng trống khoa học cần tiếp tục nghiên cứu và đề xuất hướng tiếp cận phù hợp cho đề tài.

- **Chương 2:** Nghiên cứu xây dựng giải pháp tăng cường khả năng chịu lực nén dọc kết hợp chống ăn mòn cốt thép cho cột BTCT có cốt đã bị gỉ bằng BTCLD sợi các bon

Nội dung chương tập trung xây dựng cơ sở khoa học cho giải pháp tích hợp giữa tăng cường kết cấu và bảo vệ chống ăn mòn đối với cột bê tông cốt thép có cốt thép bị ăn mòn. Giải pháp đề xuất sử dụng BTCLD sợi các bon như một lớp tăng cường chịu lực, đồng thời khai thác khả năng dẫn điện của lưới sợi các bon để làm điện cực anốt trong hệ thống bảo vệ catốt bằng dòng điện ngoài. Trên cơ sở đó, các mô hình tính toán được thiết lập nhằm dự báo khả năng chịu lực của cầu kiện sau tăng cường, đồng thời

xác định các thông số đặc trưng của hệ thống bảo vệ điện hóa và xây dựng các tiêu chí phục vụ đánh giá hiệu quả làm việc tổng thể của giải pháp đề xuất.

- **Chương 3:** Nghiên cứu thực nghiệm về hiệu quả tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục kết hợp chống ăn mòn cốt thép cho cột bê tông cốt thép có cốt đã bị gỉ bằng BTCLD sợi các bon

Chương 3 tập trung xây dựng và triển khai chương trình thực nghiệm nhằm nghiên cứu ứng xử chịu lực của cột bê tông cốt thép có cốt thép bị ăn mòn khi được tăng cường bằng BTCLD sợi các bon. Bên cạnh việc đánh giá hiệu quả nâng cao khả năng chịu nén dọc trục của cấu kiện, chương này còn khảo sát khả năng kiểm soát quá trình ăn mòn cốt thép thông qua hệ thống bảo vệ catốt sử dụng lưới sợi các bon làm anốt trợ. Trên cơ sở các dữ liệu thu nhận từ thí nghiệm, luận án tiến hành đối chiếu với các kết quả tính toán lý thuyết, từ đó hiệu chỉnh các mô hình dự báo và hoàn thiện cơ sở khoa học cho giải pháp tăng cường kết hợp bảo vệ chống ăn mòn được đề xuất.

- **Chương 4:** Nghiên cứu mô phỏng số về hiệu quả tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục cho kết cấu cột bê tông cốt thép có cốt đã bị gỉ bằng BTCLD sợi các bon

Chương 4 tập trung phát triển mô hình phân tích phần tử hữu hạn phục vụ nghiên cứu ứng xử cơ học của cột bê tông cốt thép có cốt thép bị ăn mòn sau khi được tăng cường bằng BTCLD sợi các bon. Độ tin cậy của mô hình được đánh giá thông qua quá trình hiệu chuẩn và so sánh với các kết quả tính toán lý thuyết cũng như dữ liệu thực nghiệm đã được thiết lập trong các chương trước. Sau khi được xác thực, mô hình được sử dụng để thực hiện các phân tích tham số, nhằm làm rõ mức độ ảnh hưởng của tỷ lệ ăn mòn cốt thép và số lớp lưới dệt sợi các bon đến hiệu quả tăng cường và khả năng chịu nén dọc trục của cấu kiện.

- **Phân kết luận, kiến nghị:**

Tổng kết các nội dung nghiên cứu và những kết quả chính của luận án, qua đó khẳng định cơ sở khoa học và tính khả thi của giải pháp được đề xuất. Bên cạnh đó, các vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu và các định hướng phát triển tiếp theo cũng được xem xét nhằm hoàn thiện và nâng cao hiệu quả ứng dụng của kết quả nghiên cứu trong thực tiễn.

6. ĐÓNG GÓP MỚI VỀ MẶT KHOA HỌC

Về phương diện khoa học, luận án đã đạt được một số đóng góp mới như sau:

- Phát triển một giải pháp kỹ thuật cho phép thực hiện đồng thời hai mục tiêu gồm nâng cao khả năng chịu nén dọc trục và bảo vệ chống ăn mòn đối với cột bê tông cốt thép có cốt thép bị suy giảm do gỉ. Giải pháp được xây dựng trên cơ sở sử dụng BTCLD sợi các bon làm lớp tăng cường kết hợp với hệ thống bảo vệ catốt bằng dòng điện ngoài, trong đó lưới sợi các bon được khai thác như một điện cực anot có độ bền cao và ổn định trong môi trường làm việc.
- Thiết lập mô hình tính toán dự báo khả năng chịu lực dọc trục của cột bê tông cốt thép bị ăn mòn sau khi được tăng cường bằng BTCLD sợi các bon. Mô hình được xây dựng trên cơ sở xem xét đồng thời nhiều cơ chế làm việc của cấu kiện, bao gồm hiệu ứng kiểm chế ngang của lớp tăng cường, khả năng phục hồi vùng bê tông chịu nén bị suy giảm, cũng như vai trò của lớp BTCLD trong việc cải thiện điều kiện làm việc và hạn chế hiện tượng mất ổn định của cốt thép dọc. Nhờ đó, mô hình có khả năng phản ánh đầy đủ hơn ảnh hưởng của giải pháp tăng cường đến sức chịu tải của cấu kiện.
- Đề xuất phương pháp xác định các tham số vận hành chủ yếu của hệ thống bảo vệ catốt sử dụng dòng điện ngoài, bao gồm mật độ dòng điện bảo vệ và hiệu điện thế làm việc. Đồng thời, luận án xây dựng hệ tiêu chí đánh giá mức độ hiệu quả của giải pháp bảo vệ chống ăn mòn đối với cột bê tông cốt thép có cốt thép bị gỉ khi lưới sợi các bon được sử dụng với chức năng anot trợ.
- Xây dựng được cơ sở dữ liệu thực nghiệm phục vụ nghiên cứu và ứng dụng giải pháp đề xuất, bao gồm các kết quả về đặc trưng cơ học của BTHM và lưới sợi các bon; đặc tính dẫn điện, khả năng phân cực và hiệu quả làm việc của lưới sợi các bon trong vai trò điện cực anot của hệ thống bảo vệ catốt; ứng xử chịu nén dọc trục của cột bê tông cốt thép bị ăn mòn sau khi được tăng cường bằng BTCLD sử dụng vật liệu chế tạo trong nước; cùng với mối quan hệ giữa mức độ ăn mòn của cốt thép và giá trị điện thế nửa pin. Các kết quả này góp phần bổ sung nguồn dữ liệu tham khảo

cho công tác nghiên cứu, biên soạn tiêu chuẩn kỹ thuật và phát triển các giải pháp sửa chữa, tăng cường kết cấu bê tông cốt thép bị ăn mòn trong tương lai.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU

1.1 TỔNG QUAN VỀ CÁC PHƯƠNG PHÁP TĂNG CƯỜNG KHẢ NĂNG CHỊU LỰC CHO CỘT BÊ TÔNG CỐT THÉP CÓ CỐT ĐÃ BỊ ĂN MÒN

1.1.1 Các nguyên nhân chính gây suy giảm khả năng chịu lực của các cấu kiện cột bê tông cốt thép

a) Quá trình suy thoái của bê tông

Độ bền lâu của bê tông trong các cấu kiện BTCT chịu ảnh hưởng trực tiếp bởi điều kiện môi trường trong suốt quá trình sử dụng công trình. Khi làm việc lâu dài với các tác nhân xâm thực từ bên ngoài, cấu trúc vi mô của vật liệu dần thay đổi do sự xuất hiện của các phản ứng hóa học và hóa lý bất lợi. Các tác nhân này không những làm biến đổi thành phần của vữa xi măng mà còn thay đổi cả cấu trúc tinh thể của hệ vật liệu, từ đó làm suy giảm khả năng làm việc và tuổi thọ của kết cấu.

Mức độ suy thoái của bê tông phụ thuộc vào bản chất của môi trường xâm thực cũng như chất lượng của vật liệu. Trong thực tế, các tác nhân như khí cacbonic (CO_2), ion sunfat (SO_4^{2-}), nước chứa muối hòa tan và các hợp chất có tính xâm thực khác có thể thâm nhập vào hệ mao quản của bê tông và kích hoạt nhiều cơ chế phá hủy khác nhau. Sự tương tác giữa các chất này với các sản phẩm thủy hóa của xi măng làm thay đổi thành phần khoáng, phá vỡ cân bằng hóa học ban đầu và thúc đẩy sự hư hỏng vật liệu qua thời gian sử dụng.

Các cơ chế hư hỏng của bê tông có thể diễn ra dưới nhiều dạng, trong đó có thể kể đến một số dạng như quá trình cacbonat hóa, sự hình thành ettringite muộn (Delayed Ettringite Formation – DEF), quá trình tạo khoáng thaumasite và phản ứng kiềm – cốt liệu. Mặc dù mỗi cơ chế có nguồn gốc và điều kiện phát sinh riêng, điểm chung là đều làm thay đổi các liên kết vi mô của BT, tạo ra biến dạng và ứng suất cục bộ hoặc làm suy giảm các pha liên kết trong BT. Hệ quả là vật liệu dần mất đi độ đặc chắc, xuất hiện các hư hỏng như vi nứt, gia tăng độ rỗng, suy giảm cường độ và bong tróc các lớp BT.

Sự phát triển của những hư hỏng trong bê tông không chỉ ảnh hưởng đến bản thân vật liệu mà còn làm giảm hiệu quả bảo vệ cốt thép khỏi môi trường xâm thực. Khi hệ thống mao quản và các vết nứt phát triển, tốc độ thâm nhập của các tác nhân ăn mòn tăng lên, tạo

điều kiện cho hiện tượng gỉ sét cốt thép diễn ra nhanh hơn. Do đó, sự suy thoái của BT và hiện tượng oxi hóa cốt thép thường tồn tại đồng thời, tương tác lẫn nhau và làm gia tăng tốc độ hư hại của các cấu kiện BTCT.

Việc nhận diện đầy đủ các cơ chế suy thoái của BT giúp cho việc tác đánh giá hư hại và lựa chọn phương pháp sửa chữa chính xác hơn. Trên cơ sở xác định đúng nguyên nhân gây hư hỏng, vật liệu và công nghệ sửa chữa có thể được lựa chọn vừa giúp khôi phục sức kháng vừa có thể nâng cao độ bền lâu và khả năng chống chịu của kết cấu trước các tác động của môi trường trong giai đoạn khai thác tiếp theo.

- Cacbonat hóa BT: xuất phát từ sự xuất hiện của khí CO_2 vào trong cấu kiện BTCT. Khí CO_2 phản ứng với canxi từ canxi hydroxit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) và canxi silicat hydrate (CSH) là những thành phần chính của xi măng để tạo ra chất khoáng calcite (CaCO_3). Khi hàm lượng CO_2 tăng lên, khoáng calcite sẽ tiếp tục chuyển hóa thành $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Đây là một hợp chất kém ổn định, do đó chúng làm cho bê dễ bị rửa trôi dưới tác dụng của các dòng chảy hoặc bị hòa tan trong các môi trường ẩm ướt, có nhiệt độ cao [2].
- Quá trình hình thành “Ettringite” muộn: “Ettringite” là một loại khoáng canxi sulfo–aluminate hình thành trong giai đoạn đầu của quá trình hydrat hóa xi măng portland khi sulfate (từ thạch cao và các phụ gia) phản ứng với C_3A . Ettringite nguyên sinh đóng vai trò kiểm soát tốc độ đông kết và hỗ trợ phát triển cường độ ban đầu. Tuy nhiên, trong một số điều kiện bất lợi ví dụ như độ ẩm lớn, nhiệt độ cao hoặc sự xâm nhập ion sunfat từ môi trường, Ettringite có thể tái kết tinh sau khi bê tông đã đông cứng, hình thành ettringite muộn (DEF). DEF gây tăng thể tích cục bộ, phá vỡ cấu trúc vi mô ban đầu, tạo ra ứng suất kéo nội bộ và dẫn đến nứt vi mô lan rộng. Do đó, sự hình thành ettringite muộn không chỉ gây suy giảm độ bền của bê tông mà còn tăng nguy cơ ăn mòn cốt thép và các dạng phá hoại thứ cấp trong cấu kiện BTCT [13].
- Quá trình hình thành Thaumasite: Tương tự như “Ettringite” muộn, hợp chất “Thaumasite” (công thức hóa học là $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$) được tạo ra do sự ăn mòn sun phát cũng có thể gây nguy hiểm cho bê tông. Thaumasite được hình

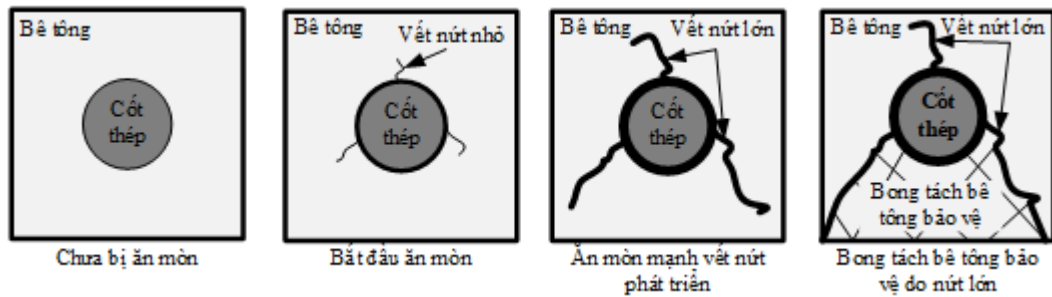
thành trực tiếp từ phản ứng giữa ion sun phat và các khoáng C-S-H. Do vậy, quá trình này hòa tan khoáng C-S-H. Dẫn đến, cấu kiện bê tông dễ bị rạn nứt hoặc bị phá hủy [14].

- Phản ứng kiềm – cốt liệu: xảy ra theo thời gian trong bê tông giữa khoáng kiềm (Na_2O và K_2O) có trong xi măng và phản ứng vô định hình (phi tinh thể) kết tinh silica trong cốt liệu trong môi trường ẩm ướt. Phản ứng hóa học có hại này gây ra sự giãn nở của cốt liệu bị thay đổi do hình thành chất hòa tan và các loại gel của Natri silicat ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ hoặc N-S-H). Các loại gel này hấp thụ nước để tăng thể tích, do vậy, tạo ra một áp suất lớn bên trong cấu kiện bê tông và gây nứt cũng như phá hoại cấu kiện BTCT [15].

Sự xuống cấp của BT làm thay đổi ảnh hưởng nhiều đến hiệu quả làm việc của cấu kiện BTCT. Các phản ứng hóa học bất lợi cùng với sự phát triển của hệ thống vết nứt và lỗ rỗng vừa làm giảm sức kháng và sự đặc chắc của cấu kiện vừa có thể khiến các ions gây hại thẩm thấu vào trong kết cấu. Điều này làm suy giảm hiệu quả làm việc của cấu kiện BTCT. Do đó, việc sửa chữa các cấu kiện BTCT đã bị suy thoái vừa phải bù đắp được thành phần bị hư hỏng vừa cần nâng cao khả năng chống chịu trước các tác động của môi trường trong giai đoạn khai thác tiếp theo. Vật liệu được dùng trong sửa chữa cần tương thích với BT cũ, có độ bền cao và giúp BT tránh các tác nhân gây hại. Đồng thời, đối với các kết cấu đã xuất hiện ăn mòn cốt thép, giải pháp sửa chữa cần hướng tới việc kết hợp giữa khôi phục sức kháng và kiểm soát ăn mòn nhằm giúp cho công trình làm việc hiệu quả một cách lâu dài sau khi sửa chữa.

b) Cơ chế ăn mòn của BTCT

Cốt thép bị ăn mòn được xem là tác nhân nguy hiểm nhất làm suy giảm độ bền lâu và khả năng chịu lực của kết cấu BTCT. Khi quá trình này phát triển, hiệu quả sử dụng của cấu kiện giảm dần do nhiều cơ chế tác động đồng thời, bao gồm sự suy giảm diện tích chịu lực của cốt thép, sự phá hủy dính bám giữa thép và BT cũng như sự bong tróc lớp BT bảo vệ dưới áp lực giãn nở của sản phẩm gỉ. Nếu không được kiểm soát kịp thời, các hư hỏng này sẽ tiếp tục lan rộng và làm gia tăng nguy cơ mất an toàn đối với kết cấu.



Hình 1.1: Quá trình ăn mòn cốt thép trong cấu kiện BTCT

Ăn mòn cốt thép là quá trình mà các phản ứng điện hóa xảy ra khi môi trường xung quanh không thể đảm bảo được khả năng bảo vệ thụ động. Quá trình này chủ yếu đến từ hai nguyên nhân chính, bao gồm: sự giảm độ kiềm của bê tông phá hủy lớp màng bảo vệ. Sau khi lớp màng thụ động bị mất, phản ứng ôxy hóa diễn ra mạnh hơn, làm giảm khối lượng và diện tích của thanh cốt thép và thúc đẩy sự hình thành chất gỉ sét có thể tích lớn hơn nhiều lần chất liệu thép trước khi gỉ. Áp lực từ quá trình giãn nở này gây nứt và bong tróc BT, và làm hư hỏng cấu kiện BTCT.

Nhiều công trình nghiên cứu đã chứng minh mối quan hệ chặt chẽ giữa mức độ ăn mòn và sự suy giảm sức kháng trên các cấu kiện BTCT. Từ nghiên cứu của Nguyễn Công Luyên [3] cho thấy sự hư hỏng có trong cấu kiện không thể được đánh giá đầy đủ chỉ thông qua các quan sát các vết nứt ở bên ngoài BT, bởi sự phát triển của chúng còn phụ thuộc vào nhiều yếu tố liên quan đến bố trí cấu tạo như độ lớn lớp BT bảo vệ, cấu tạo cốt thép và độ nghiêm trọng của việc bị ăn mòn. Việc cấu kiện BTCT bị ăn mòn cũng làm giảm dính bám giữa các loại vật liệu thành phần.

Nguyễn Đăng Nguyên và cộng sự [4] đã mô hình hóa cột BTCT có cốt bị gỉ sét bằng phần mềm Xtract 3.0.8 và kết luận rằng: sức kháng nén của cấu kiện giảm theo cả mức độ mất mát tiết diện và vị trí cốt thép. Trong phạm vi tỷ lệ mất mát khối lượng cốt thép từ 5% đến 50%, sức chịu tải của cột giảm khoảng 2,5–25%. Đồng thời, sự giãn nở của lớp gỉ làm xuất hiện bong tróc lớp BT bảo vệ, góp phần làm giảm hiệu quả làm việc của cấu kiện.

Xu hướng tương tự cũng được Jin Xia và cộng sự [16] ghi nhận thông qua các thí nghiệm gia tốc ăn mòn trong dung dịch chứa NaCl 3,5%. Khi mức độ ăn mòn tăng lên, độ rộng vết nứt trên bề mặt phát triển rõ rệt, trong khi độ cứng và sức chịu tải cực hạn của cột giảm

đáng kể. Kết quả này tiếp tục khẳng định rằng sự hư hỏng của cột BTCT có quan hệ trực tiếp với mức độ mất mát khối lượng do ăn mòn của cốt thép.

1.1.2 Các phương pháp tăng cường khả năng chịu lực phổ biến

Giải pháp sửa chữa cột BTCT hiện nay có thể chia thành ba nhóm chính, gồm bọc bổ sung BTCT (Hình 1.2a), tăng cường bằng bản thép (Hình 1.2b) và tăng cường bằng FRP (composite cốt sợi) (Hình 1.2c). Mặc dù đều hướng tới mục tiêu nâng cao sức kháng cho cấu kiện, mỗi cách làm trên đều được phát triển dựa trên cơ chế làm việc khác nhau và vì vậy đều có nhiều điểm mạnh và đi kèm các tồn tại riêng.



(a) Bọc BTCT

(b) Bọc bản thép

(c) Bọc polime cốt sợi

Hình 1.2: Các phương pháp tăng cường, sửa chữa cột BTCT phổ biến

a) Tăng cường cột BTCT bằng BTCT và bằng bản thép

Giải pháp truyền thống bọc BTCT và dựa trên nguyên tắc tăng khả năng chịu lực thông qua việc bổ sung lớp BTCT bên ngoài để làm việc đồng thời với cấu kiện hiện hữu. Đối với phương pháp bọc bê tông cốt thép, sức chịu tải được cải thiện nhờ tăng diện tích tiết diện và hình thành lớp bê tông mới liên kết với cấu kiện cũ bằng lực dính bám kết hợp với các liên kết cơ học. Nhiều nghiên cứu thực nghiệm đã xác nhận hiệu quả của giải pháp này trong việc nâng cao sức chịu nén và hạn chế biến dạng của cột BTCT. Vadoros và Dritsos [17] ghi nhận sự cải thiện về sức kháng và độ dẻo cho các cấu kiện sau khi tăng cường, trong khi Praveen Anand và cộng sự [18] cho thấy sức chịu tải dọc trục có thể tăng tới khoảng 156%, mặc dù hiệu quả giảm dần khi chiều dày lớp áo bê tông nhỏ dần.

Tăng cường bằng bản thép cũng có hiệu quả đáng kể nhờ sự tham gia chịu lực của các tấm thép được bố trí bên ngoài cấu kiện. Wang và cộng sự [19] cho biết rằng sức kháng

và độ dẻo dai của cột được cải thiện lần lượt khoảng 115% và 140% khi sử dụng hệ thống bản thép tiền chế. So với bọc BTCT, phương pháp này thi công nhanh gọn hơn và kích thước tiết diện ít thay đổi hơn [20]. Tuy nhiên, cả hai giải pháp truyền thống đều gặp những hạn chế nhất định. Việc bổ sung bê tông làm tăng khối lượng và kích thước cấu kiện, trong khi bản thép đòi hỏi chất lượng liên kết cao và có nguy cơ bị ăn mòn trong môi trường xâm thực. Ngoài ra, hiện tượng bong tách tại bề mặt tiếp xúc gây phá hoại đến trước khi vật liệu đạt tới giới hạn chịu lực.

b) Tăng cường cột BTCT bằng FRP

Vật liệu FRP đã đem lại một giải pháp rất mới trong tăng cường kết cấu. Nhờ cường độ chịu kéo lớn, khối lượng nhẹ và khả năng chống ăn mòn tốt, FRP được ứng dụng rộng rãi để phục hồi sức kháng mà hầu như không tăng kích thước của cấu kiện. Các nghiên cứu của Liu và Sheikh [21], Harajli và Dagher [22] đã chỉ ra rằng lớp bọc FRP tạo hiệu ứng kiềm chế đối với bê tông, qua đó cải thiện độ dẻo dai, sức chịu tải và hạn chế phân tán năng lượng của cột. Ngoài ra, Zhou và cộng sự [23] cho thấy FRP còn góp phần hạn chế sự phát triển của vết nứt của cấu kiện thông qua phương pháp dự ứng lực.

Tuy vậy, chất lượng liên kết giữa lớp composite và BT nền gây suy giảm hiệu quả của lớp FRP. Cột có tiết diện vuông hoặc chữ nhật có hiện tượng tập trung ứng suất tại các góc có thể gây bong tách cục bộ và ảnh hưởng xấu đến khả năng làm việc của lớp tăng cường [24]. Ngoài ra, FRP cũng khó khai thác hết sức chịu kéo do giới hạn của lớp keo dán và ảnh hưởng của các tác nhân độc hại như nhiệt độ, tia cực tím,... [25]. Quan trọng hơn, giải pháp này chủ yếu tăng cường sức kháng cơ học chứ không thay thế được phần bê tông đã bị suy thoái, đồng thời lớp vật liệu bao bọc bên ngoài cũng gây khó khăn cho việc kiểm tra trực quan và đánh giá tình trạng bề mặt cấu kiện khi sử dụng thực tế.

Các giải pháp sửa chữa kể trên hiện đang chủ yếu có khả năng phục hồi tốt cho sức kháng cơ học của cột BTCT. Tuy nhiên, phần lớn các giải pháp mới chỉ tập trung vào việc phục hồi sức kháng nén cơ học, trong khi khả năng kiểm soát quá trình ôxi hóa cốt thép và nâng cao độ bền của kết cấu vẫn còn là vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu. Đây cũng chính là khoảng trống khoa học tạo tiền đề cho việc phát triển các giải pháp sửa chữa mới có thể tích hợp giữa tăng cường sức kháng với chống lại ăn mòn trên cột BTCT.

1.1.3 Tình hình nghiên cứu và ứng dụng bê tông cốt lưới dệt trong tăng cường cột bê tông cốt thép

BTCLD đang được cho là giải pháp sửa chữa mới có nhiều triển vọng dành cho các kết cấu BTCT trong đó có cấu kiện cột BTCT chịu lực nén. Cơ chế tăng cường chủ yếu của vật liệu này là tạo hiệu ứng kiểm chế đối với bê tông lõi, qua đó cải thiện trạng thái ứng suất ba trục, nâng cao khả năng chịu nén và tăng độ dẻo của cấu kiện sau tăng cường.

Hiệu quả của lớp BTCLD chịu ảnh hưởng bởi nhiều thông số khác nhau. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng hình dạng tiết diện, số lượng lớp lưới dệt, đặc tính cơ học của lưới sợi và chất lượng BTHM đều quyết định mức độ tăng cường của hệ tăng cường. Trong đó, các cột có tiết diện tròn thường đạt hiệu quả kiểm chế cao hơn do ứng suất được phân bố tương đối đồng đều, trong khi tại các tiết diện vuông hoặc chữ nhật, có ứng suất phức tạp và tập trung ở cạnh góc làm giảm khả năng khai thác cường độ của lưới sợi [26], [27].

BTCLD có khả năng cải thiện rõ rệt khả năng chịu lực của cột BTCT. Abegaz và cộng sự [28] ghi nhận sức chịu nén của cột tăng tới khoảng 71% sau khi tăng cường. Tương tự, nghiên cứu của Ngo Dang Quang và cộng sự [29] cho thấy tải trọng phá hoại tăng khoảng 32% khi tăng cường bằng một lớp BTCLD sợi các bon và khoảng 45% khi tăng lên hai lớp. Tuy nhiên, hiệu quả làm việc của lưới tại vùng góc vẫn là hạn chế đáng chú ý do hiện tượng uốn cong cục bộ làm giảm cường độ kéo hữu hiệu. Kết quả này phù hợp với nghiên cứu của Hoai Ho và cộng sự [30], trong đó khả năng chịu kéo của lưới tại vùng góc bị uốn cong chỉ đạt khoảng 33–48% so với mẫu thẳng dành cho lưới sợi các bon và lưới sợi thủy tinh.

Khi sửa chữa các cột BTCT có cột bị gỉ, BTCLD vẫn thể hiện khả năng nâng cao sức chịu tải và độ dẻo thông qua cơ chế bó hông của lớp tăng cường. Tuy nhiên, hiệu quả lâu dài của hệ thống chịu ảnh hưởng đáng kể bởi điều kiện môi trường và mức độ hư hỏng ban đầu của cấu kiện. Các nghiên cứu của Yin Shi-ping và cộng sự [31], [32] cho thấy sự hiện diện của ion clorua, chu trình khô – ướt và tải trọng duy trì gây suy giảm chất lượng dính bám giữa lớp BTCLD và bê tông nền, từ đó làm giảm hiệu quả tăng cường kháng nén trong quá trình khai thác.

Luận án “Nghiên cứu ứng xử chịu nén đúng tâm của cột bê tông cốt thép gia cường bằng bê tông cốt lưới dệt” của NCS Cao Minh Quyền [5] có liên quan đến hướng nghiên cứu của luận án. Tuy nhiên, luận án của NCS Cao Minh Quyền chủ yếu đi theo hướng chỉ làm rõ hiệu quả tăng cường khả năng chịu nén đúng tâm của cột BTCT của BTCLD dưới sự ảnh hưởng của các dạng tiết diện hình học của cột khác nhau (cột tiết diện tròn và tiết diện vuông) mà chưa đề cập đến ảnh hưởng của các hư hỏng do quá trình ăn mòn cốt thép bên trong cấu kiện gây ra. Bên cạnh đó, luận án trên cũng chưa đề cập đến giải pháp chống lại quá trình ăn mòn cốt thép cho cột BTCT sau khi tăng cường. Hơn nữa, luận án này cũng sử dụng loại lưới sợi dệt khác (sợi thủy tinh) trong tính toán và nghiên cứu thực nghiệm. Loại sợi này cũng có nhiều khác biệt về đặc tính cơ học, đặc tính điện hóa so với sợi các bon mà luận án đề xuất nghiên cứu.

Có thể thấy rằng BTCLD sợi các bon rất tiềm năng trong việc phục hồi và nâng cao sức kháng cơ học cho cột BTCT. Tuy nhiên, đa phần các công bố vẫn tập trung vào cấu kiện chưa bị ăn mòn hoặc chỉ chịu mức độ ăn mòn thấp. Các công bố có nhận định về ứng xử khi bị nén của cột BTCL có cốt bị gỉ nghiêm trọng và được tăng cường bằng BTCLD vẫn còn tương đối ít, đặc biệt là các công bố có xem xét đến sự ảnh hưởng đến hiệu quả tăng cường của các mức độ mất mát khối lượng cốt thép khác nhau do ăn mòn.

1.1.4 Mô hình tính toán khả năng chịu lực của cột BTCT được tăng cường bằng BTCLD

Các phương pháp dự báo sức kháng nén của cột BTCT được tăng cường bằng BTCLD hiện vẫn chưa được hoàn thiện nhiều như các phương pháp tăng cường truyền thống. Một số tiêu chuẩn như Zulassung Z-31.10-182 [75], CNR-DT 215 [33], và ACI 549.4R-20 [34] đã đề xuất quy trình xác định sức chịu tải của cấu kiện theo trạng thái giới hạn, cùng với giả thiết biến dạng giữa BT, BTCLD và cốt thép là tương đương. Tại các mô hình này, hiệu quả tăng cường được phản ánh chủ yếu thông qua tác dụng kiềm chế ngang của lớp BTCLD đối với bê tông lõi.

Mặc dù đã tạo nền tảng cho việc thiết kế cấu kiện tăng cường bằng BTCLD, các mô hình hiện hành chủ yếu được xây dựng cho cột BTCT chưa xuất hiện ăn mòn. Những thay đổi về đặc tính cơ học của cấu kiện như giảm tiết diện và cường độ cốt thép, suy yếu dính

bám giữa BT và cốt thép hoặc tác động từ các vết nứt do sản phẩm gỉ gây ra chưa được tích hợp trong tính toán. Vì vậy, các mô hình lý thuyết này khó sử dụng trên cột BTCT đã bị ăn mòn và cần được tiếp tục đổi mới và phát triển thêm.

a) Mô hình tính toán khả năng chịu nén của cột BTCT tăng cường bằng BTCLD theo Zulassung Z-31.10-182

Trong số các tài liệu hướng dẫn hiện có, Zulassung Z-31.10-182 [75] là một trong những tiêu chuẩn có mô hình lý thuyết tương đối đầy đủ cho cột BTCT được bọc BTCLD. Tiêu chuẩn này xem xét sự làm việc đồng thời của BT lõi cột, cốt thép và lớp BTCLD bao quanh cấu kiện, đồng thời lượng hóa hiệu ứng kiểm chế nở ngang cũng như sức kháng nén của cột sau tăng cường. Các công thức tính toán của tiêu chuẩn Zulassung Z-31.10-182 được trình bày như sau:

$$N_u = \max(N_{u1}, N_{u2}) \quad (1.1)$$

Trong đó:

N_{u1} : Khả năng chịu lực của tiết diện trong trường hợp chưa xét đến tác động kiểm chế ngang của lớp BTCLD;

N_{u2} : Khả năng chịu lực bổ sung do bê tông lõi được đặt trong trạng thái ứng suất nén ba trục dưới tác dụng bó hông của lớp gia cường.

N_{u1} được tính toán như sau:

$$N_{u1} = N_c + N_{cf} = 0,85 f'_c \times A_c + A_s f_y + 0,27 f'_{cf} A_{cf} \quad (1.2)$$

Với: A_c và A_{cf} lần lượt là diện tích tiết diện của bê tông lõi và lớp bê tông hạt mịn gia cường; A_s và f_y biểu thị tổng diện tích và cường độ chảy của cốt thép dọc; f'_c và f'_{cf} tương ứng với cường độ chịu nén danh định của bê tông lõi và bê tông hạt mịn được sử dụng trong lớp BTCLD.

N_{u2} được tính toán như sau:

$$N_{u2} = A_c \times f'_{ccf} \quad (1.3)$$

Với: f'_{ccf} là cường độ chịu nén của bê tông lõi khi chịu tác dụng kiểm chế biến dạng ngang từ lớp gia cường và được xác định như sau:

$$\frac{f'_{ccf}}{f'_c} = 1 + 0,27 \times \frac{\sigma_l}{f'_c} + 5,55 \times \left(\frac{\sigma_l}{f'_c} \right)^2 - 3,51 \times \left(\frac{\sigma_l}{f'_c} \right)^3 \quad (1.4)$$

Với: f'_{ccf} và f'_c lần lượt là cường độ chịu nén của bê tông trong trạng thái có và không có sự kiểm chế ngang; Tham số σ_l biểu thị ứng suất bó hông tương đương do hệ lưới sợi dệt tạo ra và được xác định theo biểu thức, được xác định theo công thức:

$$\sigma_l = k_e \times \frac{(b+d)}{b \times d} \times A_f \times n \times f_f \quad (1.5)$$

Trong công thức này, hệ số có hiệu k_e , được xác định như sau:

$$k_e = 1 - \frac{b_n^2 + d_n^2}{3A_c} \quad (1.6)$$

Với: A_f là diện tích tiết diện của một lớp lưới sợi dệt quy đổi trên một mét chiều cao cột; n_f là số lớp lưới dệt tham gia gia cường; f_f à cường độ chịu kéo tính toán của lưới sợi dệt; b và d tương ứng là chiều rộng và chiều cao của tiết diện cột trước khi xử lý góc, trong khi b_n và d_n là các kích thước tương ứng của tiết diện sau khi các góc được bo tròn.

A_c được tính toán thông qua diện tích mặt cắt cột trừ đi diện tích cốt thép chiếm chỗ.

Cần lưu ý rằng công thức xác định ứng suất kiểm chế ngang theo biểu thức (1.5) chỉ được áp dụng khi điều kiện hình học của tiết diện thỏa mãn yêu cầu quy định trong tiêu chuẩn, cụ thể là điều kiện $\frac{\sigma_l}{f'_{ccf}} < 0,8$.

b) Tiêu chuẩn CNR- DT- 215

Tiêu chuẩn cơ sở của Italia, CNR- DT- 215 [33] đã xây dựng công thức như sau:

$$N_u = A_c \times f'_{ccf} + A_s \times f_s \quad (1.7)$$

Với: A_c biểu thị diện tích tiết diện của phần bê tông lõi tham gia chịu lực; A_s và f_s lần lượt là diện tích tiết diện và giới hạn chảy của cốt thép dọc. f'_{ccf} là cường độ chịu nén của bê tông lõi khi chịu tác dụng kiểm chế ngang từ lớp BTCLD. f'_{ccf} được xác định theo công thức sau:

$$\frac{f'_{cf}}{f'_c} = 1 + 0,26 \times \left(\frac{k_h \times f_l}{f'_c} \right)^{2/3} \quad (1.8)$$

Trong đó: k_h là hệ số hình dạng, có thể tính toán theo công thức (1.9) hoặc (1.10).

Đối với cột có tiết diện chữ nhật có kích thước $b \times h$ và r_c tương ứng là bán kính của góc cột được bo tròn:

$$k_h = 1 - \frac{(b - 2 \times r_c)^2 + (h - 2 \times r_c)^2}{3 \times b \times h} \quad (1.9)$$

f_l được tính toán theo công thức (1.10) hoặc (1.11) như sau:

Cột có mặt cắt tiết diện hình tròn đường kính D :

$$f_l = \frac{(2n_t E_f \varepsilon_t)}{D} \quad (1.10)$$

Cột có mặt cắt tiết diện hình chữ nhật với b, h là chiều dài 2 cạnh:

$$f_l = \frac{(2n_t E_f \varepsilon_t)}{\sqrt{b^2 + h^2}} \quad (1.11)$$

n_f biểu thị số lớp lưới dệt, t_f là chiều dày quy đổi của mỗi lớp lưới sợi, E_f là mô đun đàn hồi của vật liệu sợi và ε_t là biến dạng của BTCLD, được xác định theo công thức sau:

$$\varepsilon_t = \min \left(k_{mat} \times \eta_a \times \frac{\varepsilon_f}{1,5}; 0,004 \right) \quad (1.12)$$

Đối với cột có tiết diện hình tròn: $k_{mat} = 0,217 \times \left(\frac{4 \times t}{D} \times \frac{f'_{cf}}{f'_c} \right)$; Đối với cột có mặt cắt tiết diện hình chữ nhật: $k_{mat} = 0,217 \times \left(\frac{4 \times t}{\sqrt{b^2 + h^2}} \times \frac{f'_{cf}}{f'_c} \right)$; trong đó: t là chiều dày lớp BTCLD; Các đại lượng f'_{cf} và f'_c tương ứng biểu thị cường độ chịu nén của bê tông hạt mịn và cường độ của bê tông lõi khi chưa xét đến hiệu ứng kiềm chế nở ngang;

η_a : hệ số môi trường, $\eta_a = 0,9$; ε_f biểu thị biến dạng cực hạn của vật liệu cốt lưới dệt.

c) Tiêu chuẩn ACI 549.4R-20

Trong khi đó, tiêu chuẩn của Mỹ ACI 549.4R-20 [34] đưa ra mô hình lý thuyết khác.

Do có cơ sở lý thuyết tương đối phù hợp với mục tiêu đã được đề ra bởi luận án, tiêu chuẩn này được lựa chọn làm nền tảng để phát triển các mô hình lý thuyết tính toán trong luận án. Sức kháng nén của cột BTCT tăng cường bằng BTCLD được tính toán như sau:

$$P_n = A_c f'_{ccf} + A_s f_y \quad (1.13)$$

Cường độ chịu nén của bê tông khi được tăng cường bằng bê tông cốt lưới dệt:

$$f'_{ccf} = f'_c + 3,1\kappa_a f_l \quad (1.14)$$

f_l là ứng suất bó hông do lớp BTCLD gây ra lên bê tông lõi, được xác định như sau:

Đối với cột có tiết diện hình tròn:

$$f_l = \frac{(2nA_f E_f \varepsilon_{fe})}{D} \quad (1.15)$$

Đối với cột có tiết diện hình chữ nhật:

$$f_l = \frac{(2nA_f E_f \varepsilon_{fe})}{\sqrt{(b^2 + h^2)}} \quad (1.16)$$

Trong đó, D là đường kính của tiết diện tròn; b, h lần lượt là chiều dài cạnh ngắn và cạnh dài của tiết diện chữ nhật, n_f là số lớp lưới dệt tham gia gia cường, A_f là diện tích của một lớp lưới quy đổi theo một đơn vị chiều dài, E_f và ε_{fe} lần lượt là mô đun đàn hồi và biến dạng có hiệu của vật liệu lưới sợi dệt.

Biến dạng làm việc hữu hiệu của hệ cốt lưới dệt trong BTCLD:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd} \leq 0,012 \quad (1.17)$$

Biến dạng nén cực hạn của bê tông khi được tăng cường bằng bê tông cốt lưới dệt

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon'_c \left(1,5 + 12\kappa_b \frac{f_l}{f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon'_c} \right)^{0,45} \right) \leq 0,01 \quad (1.18)$$

Trong đó, κ_a, κ_b là hệ số phản ánh ảnh hưởng hình học của tiết diện cột:

$$\kappa_a = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h} \right)^2 \quad (1.19)$$

$$\kappa_b = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{h}{b} \right)^2 \quad (1.20)$$

$k_a = k_b = 1$ trong trường hợp cột có tiết diện chữ nhật.

Quan hệ giữa diện tích mặt cắt hiệu dụng A_e và diện tích mặt cắt bê tông A_c :

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \frac{\left[\left(\frac{b}{h} \right) (h - 2r_c)^2 + \left(\frac{h}{b} \right) (b - 2r_c)^2 \right]}{3A_g} - \rho_g}{1 - \rho_g} \quad (1.21)$$

Với: A_g biểu thị cho diện tích mặt cắt nguyên, ρ_g là hàm lượng cốt thép dọc.

Cả ba tiêu chuẩn trên đều có thể được phân tích trên cơ sở cơ chế kiềm chế nở ngang của bê tông khi cột chịu nén dọc trục. Tuy nhiên, các giả thiết và cách định lượng hiệu ứng này không hoàn toàn giống nhau. Thứ nhất, cùng xem xét ảnh hưởng của lớp gia cường bên ngoài đến cường độ chịu nén của bê tông. Khi cột chịu tải trọng nén, bê tông có xu hướng giãn nở theo phương ngang. Lớp BTCLD bao quanh tiết diện tạo ra áp lực kiềm chế, làm thay đổi trạng thái ứng suất của bê tông và có thể làm tăng cường độ chịu nén của phần bê tông được kiềm chế. Thứ hai, đều xem xét đặc trưng cơ học của vật liệu gia cường. Số lớp lưới dệt, độ cứng kéo, khả năng biến dạng của lưới và tính chất của nền xi măng là những yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả bó hông. CNR-DT 215 và ACI 549.4R-20 thể hiện ảnh hưởng này thông qua áp lực kiềm chế và các hệ số hiệu quả; tiêu chuẩn của Đức cũng sử dụng ứng suất kiềm chế và hệ số xét đến hình học tiết diện. Thứ ba, đều phải xét đến hình dạng tiết diện và điều kiện làm việc của cột. Hiệu quả bó hông của tiết diện tròn thường thuận lợi hơn tiết diện vuông hoặc chữ nhật, bởi áp lực kiềm chế phân bố đồng đều hơn. Đối với tiết diện chữ nhật, các vùng góc và phần bê tông ở giữa các cạnh có thể không được kiềm chế hiệu quả như nhau. Thứ tư, sức kháng nén của cột không chỉ phụ thuộc vào bê tông được kiềm chế. Khi tính toán sức kháng của tiết diện BTCT, cần xét thêm phần đóng góp của cốt thép dọc và sử dụng đúng diện tích bê tông, cường độ vật liệu cũng như hệ số an toàn theo phương pháp tương ứng. Tuy nhiên, với tiêu chuẩn Zulassung Z-31.10-182 sử dụng cách tiếp cận so sánh hai trạng thái sức kháng, đồng thời xem xét phần BTHM

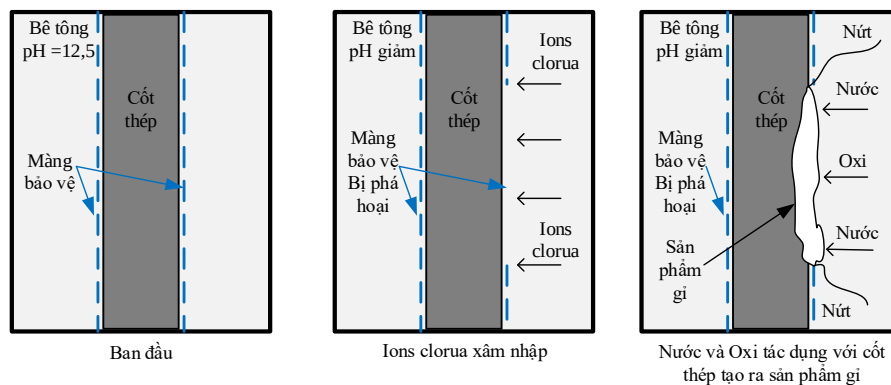
bổ sung ở lớp vỏ gia cường. Vì vậy, cần phân biệt rõ diện tích bê tông lõi và diện tích lớp vỏ khi áp dụng công thức. CNR-DT 215 xây dựng quy trình tương đối tường minh từ áp lực kiểm chế đến cường độ bê tông được kiểm chế, sau đó cộng đóng góp của cốt thép dọc để xác định sức kháng nén tính toán. Phương pháp cũng xét đến ảnh hưởng của nền xi măng thông qua hệ số hiệu quả của vật liệu BTCLD. ACI 549.4R-20 tiếp cận vấn đề theo hướng xác định áp lực bó hông, cường độ bê tông được kiểm chế và sức kháng danh định của tiết diện, đồng thời gắn với các yêu cầu thiết kế, cấu tạo và thi công lớp BTCLD.

Đến nay, tại Việt Nam **chưa có nhiều các công bố** xây dựng mô hình dự báo sức kháng nén dọc trục cho cột BTCT có cốt bị ăn mòn và được tăng cường bằng BTCLD trên cơ sở xem xét đồng thời ảnh hưởng của sự ăn mòn cốt thép, **sự mất ổn định của cốt thép** và hiệu ứng kiểm chế nở hông. Khoảng trống nghiên cứu này đặt ra nhu cầu thiết yếu phải phát triển một mô hình tính toán phù hợp hơn nhằm phục vụ đánh giá và thiết kế đối với các kết cấu đã bị suy giảm chất lượng do ăn mòn cốt thép. Đây cũng chính là một trong những điểm mới được đề xuất trong luận án này.

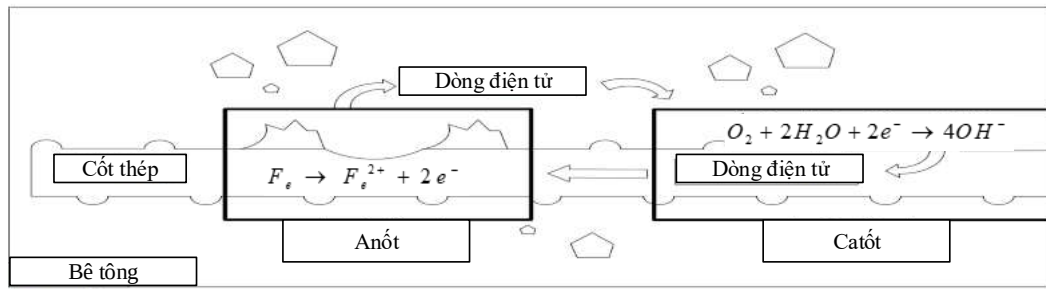
1.2 TỔNG QUAN VỀ CHỐNG ĂN MÒN CỐT THÉP

1.2.1 Cơ chế hình thành và phát triển quá trình ăn mòn cốt thép trong bê tông

Sự ăn mòn của cốt thép trong kết cấu BTCT là ăn mòn điện hóa, khác với cơ chế ăn mòn hóa học vốn chỉ hình thành do phản ứng trực tiếp giữa kim loại và các chất độc hại có trong môi trường. Ăn mòn điện hóa chỉ xuất hiện khi trên bề mặt cốt thép tồn tại đồng thời vùng anốt, vùng catốt và môi trường điện ly, tạo thành một hệ pin ăn mòn khép kín. BT thông thường có tính kiềm cao (pH khoảng 13 hoặc lớn hơn) giúp tạo ra lớp màng ôxit bảo vệ cốt thép, nhờ đó hạn chế các phản ứng ôxy hóa của kim loại.



Hình 1.3: Tác động của ion clorua lên cấu kiện BTCT



Hình 1.4: Quá trình suy thoái do ăn mòn của cốt thép trong cấu kiện BTCT

Lớp màng bảo vệ này bị phá hoại khi BT giảm tính kiềm do quá trình cacbonat hóa hoặc do ion Cl^- xâm nhập từ bên ngoài. Tại vùng anốt, sắt bị oxy hóa và giải phóng các ion kim loại, trong khi phản ứng khử diễn ra đồng thời tại vùng catốt nhằm duy trì cân bằng điện tích của hệ. Gỉ sét hình thành thông qua phản ứng giữa ion sắt với oxy và nước, tạo nên lớp gỉ có thể tích lớn hơn nhiều so với kim loại ban đầu. Sự giãn nở của lớp gỉ này làm phát sinh ứng suất bên trong bê tông, thúc đẩy sự hình thành các vết nứt và làm gia tăng tốc độ suy thoái của cấu kiện (Hình 1.3 và Hình 1.4).



Bảng 1.1: Tốc độ ăn mòn cốt thép [35]

Mật độ dòng điện ($\mu A/cm^2$)	Tốc độ ăn mòn (mm/năm)	Cấp độ ăn mòn
$\leq 0,1$	$\leq 0,001$	Không đáng kể
0,1 – 0,5	0,001 – 0,005	Yếu
0,5 - 1	0,005 – 0,01	Trung bình
> 1	$> 0,01$	Cao

Mức độ phát triển của quá trình ăn mòn được biểu thị qua mật độ dòng điện của hệ thống điện hóa. Theo khuyến nghị của RILEM TC 154-EMC [35], đại lượng này có quan hệ trực tiếp với tốc độ ăn mòn và được sử dụng làm cơ sở để phân loại các mức độ ăn mòn từ rất thấp đến cao. Các giá trị giới hạn tương ứng được trình bày trong Bảng 1.1 và thường được sử dụng trong đánh giá cũng như tính toán độ bền của cấu kiện BTCT.

1.2.2 Các phương pháp gia tốc ăn mòn

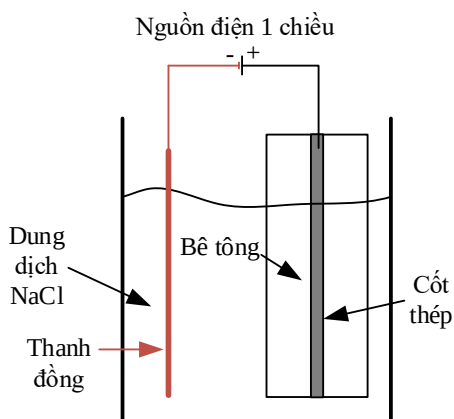
Trong môi trường tự nhiên, ăn mòn thường diễn ra chậm và cần nhiều năm mới gây ảnh hưởng rõ rệt đến kết cấu BTCT. Vì vậy, các nghiên cứu trong phòng thí nghiệm thường áp dụng kỹ thuật gia tốc ăn mòn để tái tạo mức độ hư hỏng mong muốn trong thời gian ngắn hơn.

Hiện nay, các phương pháp gia tốc phổ biến bao gồm: Tạo môi trường xâm thực (Cl^- , CO_2 , độ ẩm), gia tăng nhiệt độ, sử dụng dòng điện ngoài, và chu trình khô – ướt trong môi trường chứa ion clorua. Trong nghiên cứu này, hai phương pháp được lựa chọn là gia tốc ăn mòn bằng dòng điện ngoài và chu trình khô – ướt trong môi trường clorua, do đây là các phương pháp có khả năng kiểm soát mức độ ăn mòn tốt và phù hợp với các phòng thí nghiệm.

a) Phương pháp gia tốc ăn mòn bằng dòng điện ngoài

- Nguyên lý thí nghiệm

Nguyên lý của phương pháp này là cung cấp một dòng điện cho hệ thống theo hướng có thể đẩy mạnh quá trình mất điện tử từ cốt thép thông qua đó tạo ra oxit sắt và hòa tan nó vào môi trường điện ly. Dung dịch điện ly thường được sử dụng là dung dịch muối NaCl. Với sự xuất hiện của ion Cl^- , màng thụ động bảo vệ cốt thép sẽ nhanh chóng bị phá hủy và quá trình ăn mòn được thúc đẩy mạnh hơn.



Hình 1.5: Sơ đồ thí nghiệm gia tốc ăn mòn bằng dòng điện ngoài

Trong mô hình gia này, dòng điện một chiều được thiết lập giữa thanh cốt thép và một điện cực có tính trơ (như đồng hoặc thép không gỉ). Khi cốt thép được sử dụng

làm anốt của hệ điện hóa, quá trình ôxy hóa kim loại được thúc đẩy, qua đó làm tăng tốc độ ăn mòn so với điều kiện tự nhiên. Theo Nguyễn Ngọc Tân và cộng sự [6], dung dịch NaCl nồng độ 3,5% thường được sử dụng nhằm mô phỏng điều kiện nước biển.

- Phương pháp tính mức độ mất mát khối lượng cốt thép do ăn mòn

Khối lượng thép bị hòa tan theo thời gian và cường độ dòng điện áp dụng tính toán theo Faraday như sau:

$$\Delta m = \frac{A \times I \times t}{n \times F} \quad (1.25)$$

Trong đó:

Δm : khối lượng thép bị hòa tan ở điện cực (gam);

A : khối lượng mol nguyên tử của chất thu được ở điện cực;

n : số điện tử mà nguyên tử hoặc ion đã cho hoặc nhận;

I : cường độ dòng điện (A);

t : thời gian điện phân (s);

F : hằng số Faraday là điện tích của 1 mol điện tử hay điện lượng cần thiết để 1 mol điện tử chuyển dời trong mạch ở catốt hoặc ở anốt ($F = 96500 \text{ C/mol}$).

Mức độ mất mát khối lượng do ăn mòn thường được đặc trưng bằng tỷ lệ phần trăm khối lượng thép bị hao hụt sau quá trình ăn mòn ($w(\%)$) so ban đầu. Đại lượng này được tính toán như sau:

$$w(\%) = \frac{\Delta m}{m_0} = \frac{A \times I \times t}{n \times F \times m_0} \quad (1.26)$$

Với: m_0 là khối lượng cốt thép ban đầu (gam).

Giá trị dòng điện áp dụng được xác định căn cứ vào tỷ lệ hao hụt khối lượng cốt thép cần đạt trong khoảng thời gian thí nghiệm dự kiến, qua đó bảo đảm tạo ra mức độ ăn mòn theo mục tiêu đề ra.

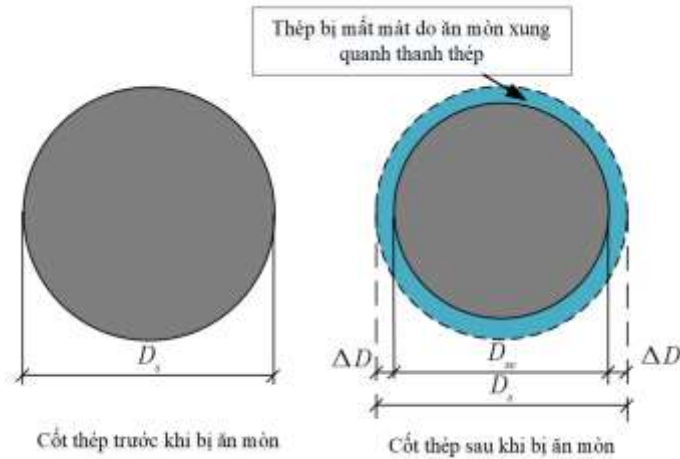
b) Phương pháp gia tốc ăn mòn bằng chu trình khô – ướt trong môi trường Clorua

- Nguyên lý thí nghiệm:

Chu trình xen kẽ giữa trạng thái ngâm ướt và làm khô trong môi trường chứa ion Cl^- được dùng để tăng tốc ăn mòn của cốt thép, được xây dựng trên cơ sở mô phỏng điều kiện môi trường nước biển với sự thay đổi độ ẩm theo chu kỳ. Trong giai đoạn ngâm, dung dịch clorua thấm sâu vào hệ lỗ rỗng của bê tông dưới tác động của hiện tượng mao dẫn, làm tăng hàm lượng ion xâm nhập đến bề mặt cốt thép. Khi mẫu chuyển sang giai đoạn làm khô, lượng oxy đi vào bên trong bê tông tăng lên, khiến phản ứng điện hóa tiếp tục diễn ra nhanh hơn. Sự luân phiên giữa hai giai đoạn này làm quá trình ăn mòn phát triển nhanh hơn đáng kể so với điều kiện tự nhiên [36]. Theo chỉ dẫn của ASTM - G109 [37], chu kỳ ướt thường được thực hiện bằng cách ngâm cấu kiện trong nước muối NaCl nồng độ từ 3 đến 5% hoặc phun muối lên bề mặt trong phòng kín cho đến khi độ ẩm đạt được trong các cấu kiện thường hơn 95%. Chu kỳ khô được thực hiện bằng cách loại bỏ dung dịch clorua và để cho mẫu khô tự nhiên hoặc sấy mẫu ở nhiệt độ cao cho đến khi các mẫu bê tông khô hoàn toàn. Tuy nhiên, phương pháp sấy mẫu ở nhiệt độ cao không thật sự được khuyến khích do nhiệt độ cao có thể gây ra hư hỏng cấu trúc vi mô của bê tông và ảnh hưởng quá trình chịu lực sau này của cấu kiện.

Hiệu quả của phương pháp này bị ảnh hưởng lớn bởi môi trường trong từng giai đoạn của chu trình, trong đó nồng độ ion Cl^- , thời gian duy trì trạng thái ẩm và chế độ làm khô là những thông số có ảnh hưởng quan trọng. MaLumbela [38] đã phát hiện ra rằng, tỷ lệ ăn mòn trong các mẫu đầm bê tông cốt thép tăng đến 52% khi tăng thời gian của chu kỳ khô từ 2 ngày lên 4 ngày trong khi thời gian của chu kỳ ướt vẫn giữ nguyên 2 ngày với dung dịch muối có nồng độ NaCl là 5%. Điều này được giải thích là do thời gian khô tăng lên đủ để oxy có thể đi qua bê tông phủ vào thép; Trong giai đoạn bão hòa ẩm, ion Cl^- có khả năng dịch chuyển và tích tụ trong mạng lỗ rỗng của bê tông. Ngược lại, khi bê tông được làm khô, sự gia tăng khả năng cung cấp oxy trong vùng gần cốt thép thúc đẩy các phản ứng điện hóa và tạo điều kiện hình thành các sản phẩm ăn mòn bền vững hơn [39]. Dựa trên kết quả khảo sát mức độ suy giảm vật liệu sau mỗi chu kỳ, Jin-Jun Guo và cộng sự [40] nhận thấy thời gian của một chu kỳ khô – ướt cần được lựa chọn phù hợp để bảo đảm sự phát triển ăn mòn xảy ra ổn định. Các tác giả đề xuất khoảng thời gian từ 7 đến 14 ngày cho mỗi chu kỳ khi tiến hành thí nghiệm trong điều kiện làm khô tự nhiên đối với BT thông thường.

- Tính toán tốc độ ăn mòn cốt thép sau chu kỳ khô - ướt:



Hình 1.6: Mặt cắt cốt thép trước và sau khi bị ăn mòn

Công thức tính mất mát khối lượng cốt thép như sau:

$$\Delta w = \frac{\Delta m}{m_0} = 1 - \frac{\frac{\pi \times d_1^2}{4} \times l \times \rho}{\frac{\pi \times d_0^2}{4} \times l \times \rho} = 1 - \frac{d_1^2}{d_0^2} \quad (1.27)$$

Trong đó:

m_0 : Khối lượng cốt thép ban đầu (gam);

l : chiều dài của thanh cốt thép dọc (m);

ρ : Khối lượng riêng của thép;

D_s : đường kính thép trước khi bị ăn mòn;

D_{sc} : đường kính thép sau khi bị ăn mòn.

Chênh lệch đường kính của thanh thép trước và sau khi bị ăn mòn được tính như sau:

$$\Delta d = \frac{d_0 - d_1}{2} = \frac{d_0 \times (1 - \sqrt{1 - \Delta w})}{2} \quad (1.28)$$

Do vậy, tốc độ ăn mòn cốt thép được tính như sau:

$$r = \frac{\Delta d}{n_{ck} \times T_{ck}} = \frac{d_0 \times (1 - \sqrt{1 - \Delta w})}{2 \times n_{ck} \times T_{ck}} \quad (1.29)$$

Tổng thời gian thực hiện chu kỳ khô – ướt được tính như sau:

$$n_{ck} \times T_{ck} = \frac{d_0 \times (1 - \sqrt{1 - \Delta w})}{2 \times r} \quad (1.30)$$

r : Tốc độ ăn mòn cốt thép (mm/năm), xác định qua *Bảng 1.1*;

n_{ck} : Số chu kỳ khô – ướt cần thực hiện;

T_{ck} : Thời gian thực hiện 1 chu kỳ khô - ướt.

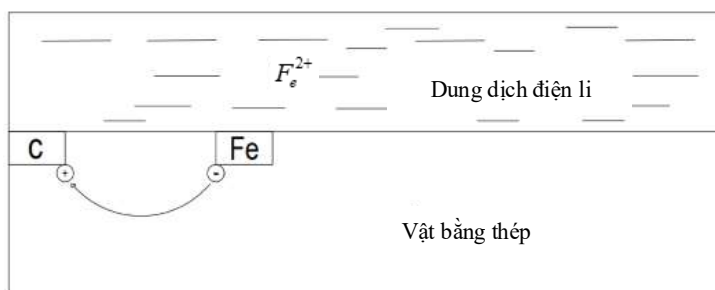
1.2.3 Các phương pháp chống ăn mòn kim loại phổ biến

Giải pháp kiểm soát ăn mòn cốt thép trong kết cấu BTCT hiện nay được phát triển theo hai hướng chính: hạn chế kim loại tiếp xúc với các tác nhân hóa học gây hại hoặc điều chỉnh các phản ứng hóa học xảy ra ở cốt thép. Nhóm giải pháp thứ nhất sử dụng phổ biến các vật liệu kim loại có khả năng chống ăn mòn cao, hoặc tạo lớp ngăn cách bảo vệ và bổ sung các chất ức chế ăn mòn. Việc thay thế cốt thép thông thường bằng các loại kim loại như thép không gỉ, thép mạ kẽm hoặc một số hợp kim đặc biệt có thể nâng cao độ bền của cốt thép. Tuy nhiên, chi phí vật liệu lớn cùng với những nghi ngại về khả năng tương thích cơ học, đặc biệt là khả năng dính bám và hệ số giãn nở nhiệt của kim loại và BT, đã hạn chế phạm vi ứng dụng của giải pháp này. Việc thay thế hoàn toàn hệ cốt thép trong các cấu kiện BTCT đã được chế tạo trước thường không khả thi do yêu cầu thi công phức tạp và ảnh hưởng lớn đến công trình xung quanh.

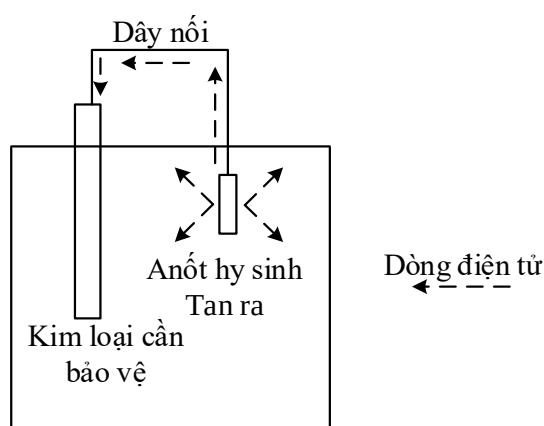
Một cách làm khác là dùng các lớp phủ bảo vệ hoặc chất ức chế nhằm làm giảm quá trình ăn mòn. Lớp phủ bề mặt tạo ra một hàng rào vật lý, hạn chế sự xâm nhập của các tác nhân gây hại từ môi trường, trong khi chất ức chế có khả năng làm giảm tốc độ phản ứng điện hóa thông qua cơ chế hấp phụ hoặc hình thành lớp màng bảo vệ trên bề mặt kim loại. Mặc dù các giải pháp này có hiệu quả đối với một số trường hợp nhất định, khả năng áp dụng đối với các cấu kiện BTCT đã bị suy giảm do ăn mòn còn hạn chế. Ngoài ra, sự tồn tại của các lớp vật liệu bổ sung gây suy giảm dính bám của cốt thép và BT, cũng như khiến việc đánh giá tình trạng hư hỏng bên trong cấu kiện trở nên khó khăn hơn.

Khác với các phương pháp kiểm soát ăn mòn theo hướng cách ly kim loại khỏi môi trường, bảo vệ catốt tác động trực tiếp đến quá trình điện hóa tại bề mặt cốt thép (*Hình 1.7*). Nguyên lý của phương pháp này dựa trên việc cung cấp thêm điện tử cho kim loại

cần bảo vệ, làm giảm xu hướng xảy ra phản ứng ôxy hóa tại vùng anốt và chuyển cốt thép sang trạng thái làm việc như một điện cực catốt trong hệ điện hóa. Khi đó, tốc độ hòa tan kim loại được kiểm soát, qua đó ức chế ăn mòn và kéo dài tuổi thọ của kết cấu.



Hình 1.7: Quá trình ăn mòn điện hóa kim loại

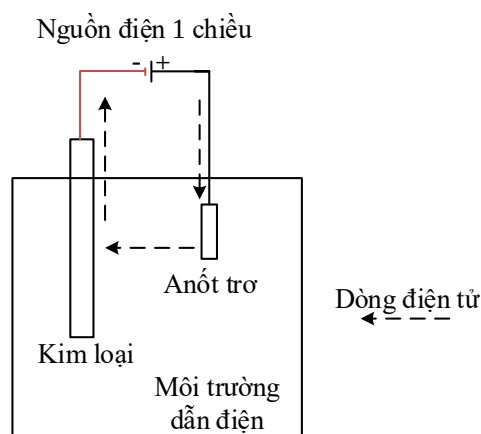


Hình 1.8: Sơ đồ phương pháp bảo vệ catốt sử dụng anốt hy sinh

Trong hệ thống bảo vệ chống ăn mòn, hai phương pháp chính gồm sử dụng anốt hy sinh và sử dụng nguồn điện ngoài để cung cấp điện tử (Hình 1.8). Đối với anốt hy sinh, dòng bảo vệ được tạo ra nhờ sự chênh lệch điện thế giữa cốt thép và một kim loại có khả năng phân rã tốt hơn sắt như kẽm hoặc magie. Ưu điểm của phương pháp này là cấu tạo đơn giản và không cần nguồn điện bên ngoài. Tuy nhiên, khả năng ứng dụng đối với các kết cấu BTCT lớn thường bị hạn chế do tuổi thọ anốt thấp, khó kiểm soát mức độ bảo vệ và yêu cầu thay thế định kỳ trong quá trình khai thác.

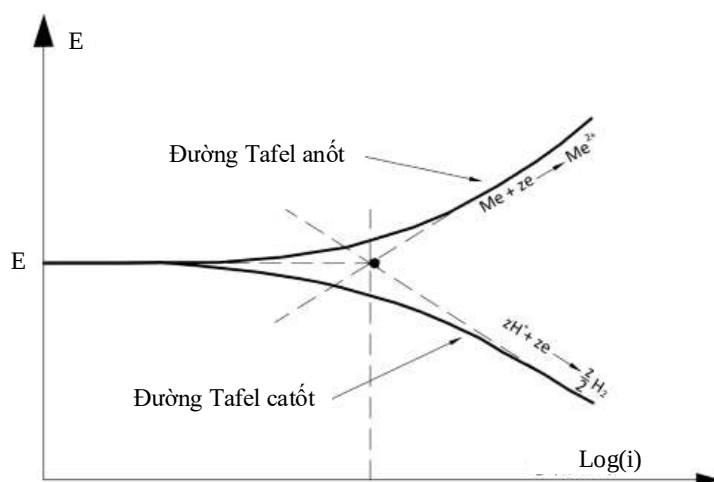
Giải pháp sử dụng nguồn điện ngoài thường được sử dụng phổ biến hơn cho BTCT nhờ khả năng điều chỉnh chủ động dòng điện cung cấp cho hệ thống. Trong phương pháp này, một nguồn điện một chiều được sử dụng để duy trì dòng điện tử đi vào cốt thép thông qua các anốt bố trí trong kết cấu (Hình 1.9). Hiệu quả bảo vệ phụ thuộc vào đặc tính điện hóa

của vật liệu anốt, trong đó khả năng dẫn điện, độ bền phân cực và mức độ ổn định trong môi trường làm việc là các yêu cầu quan trọng [41].



Hình 1.9: Sơ đồ phương pháp bảo vệ catốt sử dụng dòng điện ngoài

Đặc tính phân cực của điện cực được xác định thông qua mối quan hệ giữa mật độ dòng điện và điện thế điện cực. Hình 1.10 phản ánh trạng thái cân bằng giữa các phản ứng điện hóa tại vùng anốt và catốt. Sự thay đổi của mật độ dòng điện sẽ làm dịch chuyển đường cong phân cực tương ứng. Những vật liệu có điện thế phân cực quá cao thường có thể gây ảnh hưởng không mong muốn đến môi trường và an toàn sử dụng. Phương pháp này có ưu điểm là cho phép điều chỉnh chủ động dòng bảo vệ, không phụ thuộc vào điện thế tự nhiên của vật liệu anốt. Vì vậy, hệ thống có thể làm việc dưới nhiều điều kiện phức tạp khác nhau, bao gồm môi trường có điện trở suất lớn hoặc kết cấu có lớp phủ bảo vệ.



Hình 1.10: Đường quan hệ giữa dòng điện và điện thế của vật liệu làm điện cực [41]

Theo ISO 12696:2016 [42], Các loại anốt trơ thường được dùng cho bảo vệ catốt bao gồm titan phủ oxit kim loại hỗn hợp (Ti–MMO), than chì, Pt/Ti–Pt và vật liệu các bon dạng

lưới. Trong số đó, lưới sợi các bon có thể dẫn điện tốt, hoạt động ổn định ở mật độ dòng thấp và khả năng tích hợp với vật liệu BTCLD. Do vậy, có thể sử dụng đồng thời lưới các bon như một thành phần chịu lực và một điện cực anốt trong hệ thống bảo vệ catốt. Khi được vận hành trong giới hạn mật độ dòng thích hợp (không vượt quá khoảng 50 mA/m^2), hệ thống anốt các bon có thể đạt tuổi thọ sử dụng dài, phù hợp với yêu cầu bảo vệ lâu dài cho các kết cấu BTCT làm việc trong môi trường xâm thực.

Bảng 1.2: So sánh đặc tính của các loại anốt trơ

Tiêu chí đánh giá	Lưới sợi dệt các-bon	Anốt Titan–MMO	Anốt than chì	Anốt Platin (Pt / Ti–Pt)
Bản chất vật liệu	Composite sợi các-bon	Titan phủ oxit kim loại	Carbon tinh thể	Titan phủ Platin hoặc Platin khối
Mục đích ban đầu	Tăng cường kết cấu	Bảo vệ catốt	Bảo vệ catốt	Bảo vệ catốt cao cấp
Tính trơ điện hóa	Trung bình	Rất cao	Trung bình	Cực kỳ cao
Tuổi thọ khi cấp dòng	20–25 năm	25–50 năm	5–15 năm	>50 năm
Mật độ dòng cho phép	Thấp (dưới 50 mA/m^2)	Cao	Trung bình	Rất cao
Khả năng chịu lực	Rất cao	Không	Không	Không
Tiêu chuẩn ICCP	Chưa có	ISO/EN/NACE	Hạn chế	ISO/EN/NACE

1.2.4 Khả năng của cốt lưới dệt sợi các bon với vai trò là anốt trơ trong hệ thống bảo vệ chống ăn mòn cốt thép bằng phương pháp bảo vệ catốt sử dụng dòng điện ngoài

Trong vật liệu BTCLD, lưới sợi các bon được xem là loại cốt có nhiều ưu điểm nổi bật nhờ sự kết hợp giữa khả năng chịu kéo cao, khối lượng nhỏ và tính dẫn điện tốt. Thành phần các bon trong loại sợi này thường chiếm tỷ lệ lớn (trên 92%), được sản xuất từ các tiền chất polyme như polyacrylonitrile (PAN) thông qua quá trình xử lý nhiệt thích hợp. Khác với các loại sợi tăng cường không dẫn điện, đặc tính điện học của sợi các bon cho phép vật liệu này tham gia vào quá trình trao đổi điện hóa, mở ra khả năng sử dụng đồng thời như một thành phần chịu lực và một điện cực anốt trơ cho quá trình chống ăn mòn bằng phương pháp bảo vệ catốt.

Khả năng làm việc của lưới sợi các bon với vai trò anốt đã được chứng minh thông qua nhiều nghiên cứu thực nghiệm về đặc tính phân cực điện hóa. Một số nghiên cứu trước đây chỉ ra rằng: lưới sợi các bon có khả năng duy trì trạng thái phân cực ổn định trong môi

trường kiểm tương tự môi trường bên trong bê tông. Mork và cộng sự [43] khi khảo sát vật liệu CarboCath – một dạng vật liệu các bon được phát triển sớm cho mục đích bảo vệ catốt – đã xác nhận khả năng phân cực anốt ổn định ở mức điện thế cao trong dung dịch kiềm. Từ các thử nghiệm ứng dụng thực tế trên cầu, nhà để xe và công trình cảng biển, hệ thống sử dụng Carboncath có thể bảo vệ cốt thép với thời gian dài [44].

Bên cạnh khả năng phân cực, độ ổn định cơ học của lưới sợi các bon sau quá trình vận hành điện hóa cũng rất quan trọng để có thể sử dụng giải pháp một cách lâu dài. Nghiên cứu của Amir Asgharzadeh và cộng sự [45] cho thấy lưới sợi các bon có thể duy trì trạng thái hoạt động anốt ở điện thế cao trong môi trường điện phân mà không làm suy giảm đáng kể đặc tính cơ học. Tương tự, Ran Feng và cộng sự [46] thông qua các thí nghiệm đánh giá cường độ kéo sau phân cực đã dự báo tuổi thọ làm việc của lưới sợi các bon có thể đạt trên 20 năm khi vận hành ở mật độ dòng phù hợp.

Việc xác định giới hạn dòng điện bảo vệ là rất cần thiết nhằm bảo đảm sự ổn định của hệ thống anốt các bon. Kết quả nghiên cứu của Paul Lambert và cộng sự [47] chỉ ra rằng mật độ dòng điện cần được kiểm soát dưới một giới hạn nhất định để tránh ảnh hưởng bất lợi đến độ bền của vật liệu. Đồng thời, nghiên cứu này cũng chứng minh rằng BTCLD sử dụng lưới các bon có thể tạo ra hiệu quả kép khi vừa nâng cao khả năng chịu lực của cầu kiện, vừa kiểm soát quá trình ăn mòn điện hóa của cốt thép thông qua cơ chế bảo vệ catốt.

Khả năng kết hợp giữa chức năng tăng cường cơ học và chống ăn mòn có thể khẳng định trong một số nghiên cứu [48]. Lee-Orantes và cộng sự [49] cho thấy lưới sợi các bon vẫn duy trì được vai trò cốt chịu lực sau thời gian dài vận hành trong hệ bảo vệ catốt, ngay cả khi áp dụng các mức mật độ dòng khác nhau. Carla Driessen và Michael Raupach [50] cũng nhận thấy vật liệu lưới sợi các bon có khả năng phân cực phù hợp để làm anốt trong các ứng dụng cho bản mặt cầu, đồng thời hiệu quả phân cực có thể thay đổi theo cấu tạo của lưới và lớp phủ bảo vệ trên bề mặt sợi.

Nhìn chung, các kết quả nghiên cứu hiện có đã chứng minh được tiềm năng của lưới sợi các bon trong vai trò anốt trợ cho hệ thống bảo vệ chống ăn mòn. Khả năng tích hợp hai chức năng trong cùng một hệ thống, bao gồm tăng cường khả năng chịu lực thông qua hiệu ứng tăng cường của BTCLD và hạn chế ăn mòn bằng tác động điện hóa là ưu điểm nổi bật

của vật liệu này. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu hiện nay mới tập trung vào đặc tính điện hóa của lưới sợi các bon hoặc sử dụng trên các cấu kiện dạng dầm, bản. Việc đánh giá toàn diện khả năng sử dụng BTCLD sợi các bon như một giải pháp tích hợp tăng cường và bảo vệ catốt cho các cột, trụ BTCT đã bị suy giảm do ăn mòn vẫn còn là vấn đề cần được tiếp tục nghiên cứu.

1.3 KẾT LUẬN CHƯƠNG 1

Các nghiên cứu hiện nay về phục hồi và nâng cao độ bền cho cột BTCT bị suy giảm chất lượng do ăn mòn đang có xu hướng chuyển từ các giải pháp xử lý riêng lẻ sang các phương án tích hợp nhiều chức năng. Trong đó, hai yêu cầu quan trọng được đặt ra gồm khôi phục khả năng chịu lực của cấu kiện và ngăn chặn sự phát triển của quá trình ăn mòn cốt thép tại giai đoạn khai thác.

Các kỹ thuật tăng cường phổ biến như bọc lớp áo BTCT, sử dụng bản thép bên ngoài hoặc bọc vật liệu composite FRP đã được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi. Cơ chế tăng cường của các kỹ thuật này chủ yếu là bổ sung thêm vật liệu chịu lực hoặc tạo ra hiệu ứng kiềm chế nở ngang trên BT lõi. Tuy nhiên, các giải pháp trên phần lớn chỉ tác động đến khả năng chịu tải của cấu kiện mà chưa giải quyết được vấn đề về ăn mòn cốt thép đang tiếp diễn trong cấu kiện BTCT tại các môi trường có tính xâm thực.

BTCLD được xem là một hướng tiếp cận có nhiều triển vọng nhờ khả năng tạo lớp tăng cường mỏng, khối lượng nhỏ và làm việc hiệu quả trong môi trường bất lợi. Đối với cột BTCT chịu nén, tác dụng chủ yếu của lớp BTCLD là hạn chế sự phát triển nở ngang của BT lõi, từ đó làm tăng sức kháng nén và cải thiện tính dẻo của cấu kiện. Ngo Dang Quang và cộng sự [29] đã kết luận rằng: việc sử dụng một và hai lớp BTCLD có thể giúp sức chịu tải của cột chịu nén đúng tâm tăng lần lượt khoảng 33% và 45%. Đối với cột BTCT bị nén lệch tâm, Jin Xia và cộng sự [16] cũng ghi nhận sự cải thiện về sức chịu tải khi áp dụng giải pháp này. Tuy nhiên, mức độ hiệu quả của BTCLD không chỉ phụ thuộc vào số lượng lớp tăng cường mà còn chịu ảnh hưởng bởi dạng cấu kiện, đặc tính vật liệu sợi, điều kiện ban đầu của bê tông và mức độ suy giảm do ăn mòn.

Một vấn đề cần đặc biệt quan tâm trong việc ứng dụng BTCLD là sự thay đổi khả năng làm việc của lưới sợi tại các vị trí hình học bất lợi, đặc biệt là khu vực góc của cột. Khi lớp

tăng cường phải chuyển hướng theo hình dạng tiết diện, lưới sợi có thể chịu tác động đồng thời của kéo và uốn cục bộ, làm giảm khả năng huy động cường độ của vật liệu. Theo Hoai Ho và cộng sự [30], đối với các mẫu có bán kính bo góc từ 60 đến 120 mm, cường độ kéo hữu hiệu của lưới sợi các bon chỉ đạt khoảng 33–48% so với trường hợp chịu kéo thẳng. Kết quả này cho thấy ảnh hưởng của cấu tạo hình học cần được xem xét khi đánh giá hiệu quả tăng cường bằng BTCLD.

Song song với các nghiên cứu thực nghiệm, một số tài liệu như Zulassung Z-31.10-182 [75], CNR-DT 215 [33] và ACI 549.4R-20 [34] đã đề xuất mô hình lý thuyết tính toán sức kháng nén cho cột BTCT tăng cường bằng BTCLD. Các mô hình này chủ yếu dựa trên giả thiết cấu kiện ban đầu chưa bị suy giảm do ăn mòn và đánh giá khả năng tăng cường từ tác dụng tọa hiệu ứng bó hông của lớp BTCLD. Do đó, các yếu tố đặc trưng của cấu kiện bị ăn mòn như sự giảm diện tích cốt thép, suy giảm cường độ thanh thép, suy yếu dính bám giữa BT và CT, cũng như ảnh hưởng của lớp bê tông bị phá hủy vẫn chưa được phản ánh đầy đủ trong các mô hình hiện có. **Bên cạnh đó, vấn đề về mất ổn định cốt thép dọc vẫn chưa được xem xét đến.**

Bên cạnh khả năng tăng cường cơ học, đặc tính dẫn điện của lưới sợi các bon trong BTCLD mở ra hướng ứng dụng mới khi kết hợp với hệ thống bảo vệ chống ăn mòn bằng nguồn điện ngoài. Trong trường hợp này, lưới các bon không chỉ đóng vai trò là thành phần chịu lực mà còn có thể hoạt động như một anốt trợ, cung cấp dòng bảo vệ nhằm hạn chế phản ứng ăn mòn của cốt thép. Mặc dù nhiều nghiên cứu đã chứng minh khả năng phân cực điện hóa và tính ổn định của vật liệu các bon, các kết quả hiện nay chủ yếu tập trung vào đánh giá đặc tính điện hóa của vật liệu hoặc ứng dụng trên các dạng kết cấu đơn giản như bản và dầm. Những vấn đề liên quan đến lựa chọn thông số vận hành, sự tương tác giữa quá trình tăng cường cơ học và bảo vệ điện hóa cho cột BTCT có cốt đã bị gỉ vẫn chưa được nghiên cứu một cách chuyên sâu.

Các hướng nghiên cứu hiện nay vẫn đang được phát triển theo hai nhánh tương đối độc lập: nâng cao sức kháng cơ học hoặc kiểm soát ăn mòn. Việc xây dựng một giải pháp tích hợp có khả năng đồng thời phục hồi sức chịu tải và bảo vệ lâu dài cho cột BTCT đã bị suy giảm do ăn mòn bằng BTCLD sợi các bon vẫn còn là một hướng đi mới và đầy cấp thiết.

Khoảng trống nghiên cứu này là cơ sở cho hướng phát triển chính cho luận án, trong đó đề xuất sử dụng BTCLD sợi các bon kết hợp với bảo vệ chống ăn mòn bằng nguồn điện ngoài. Với giải pháp này, lưới sợi các bon được khai thác đồng thời theo hai chức năng: tạo hiệu ứng tăng cường nhằm nâng cao sức kháng nén cho cột BTCT và đóng vai trò anốt trợ để kiểm soát sự phát triển của phản ứng ôxi hóa của thép bên trong BTCT. Các mục tiêu nghiên cứu chính, phương pháp tiếp cận và nội dung của luận án được tổng hợp trong *Bảng 1.3*.

Bảng 1.3: Mục tiêu và nội dung chính của luận án

MỤC TIÊU CHÍNH CỦA LUẬN ÁN Xây dựng một giải pháp tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục đồng thời chống ăn mòn cốt thép bằng phương pháp bảo vệ catốt cho cột BTCT có cốt đã bị gỉ bằng việc sử dụng bê tông cốt lưới dệt sợi các bon	
• Xây dựng giải pháp tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục cho cột BTCT có cốt đã bị gỉ bằng BTCLD sợi các bon. • Xây dựng mô hình tính toán sức kháng nén dọc trục đúng tâm cho cột BTCT có cốt đã bị gỉ bằng BTCLD sợi các bon bằng cách kế thừa, tổng hợp và phát triển từ tiêu chuẩn ACI 549.4R-20 [32]. • Xây dựng hệ thống kết hợp vừa tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục vừa chống ăn mòn cốt thép bằng phương pháp bảo vệ ca tốt sử dụng cốt lưới dệt làm anốt trợ. • Xây dựng các tiêu chí kỹ thuật cho hệ thống bảo vệ ca tốt và phương án kiểm soát mức độ hiệu quả của hệ thống.	
NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM • Nghiên cứu thực nghiệm về ứng xử chịu nén dọc trục đúng tâm của cột BTCT có cốt đã bị ăn mòn được tăng cường 1 và 2 lớp BTCLD sợi các bon qua đó đánh giá hiệu quả tăng cường. So sánh với kết quả từ mô hình lý thuyết và hiệu chỉnh mô hình. • Nghiên cứu thực nghiệm đánh giá hiệu quả bảo vệ chống ăn mòn cốt thép bằng phương pháp bảo vệ ca tốt sử dụng lưới sợi dệt các bon làm anốt. • Nghiên cứu thực nghiệm đánh giá hiệu quả của giải pháp kết hợp vừa tăng cường khả năng chịu lực vừa chống ăn mòn cốt thép cho cột BTCT có cốt đã bị gỉ bằng BTCLD sợi các bon.	NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG SỐ • Xây dựng mô hình PTHH xác định ứng xử chịu nén dọc trục đúng tâm cho cột BTCT có cốt đã bị gỉ được tăng cường bằng BTCLD sợi các bon. Hiệu chỉnh mô hình thông qua các kết quả nghiên cứu thực nghiệm. • Khảo sát ảnh hưởng của các tham số mức độ ăn mòn cốt thép dọc và số lượng lớp lưới sợi lên hiệu quả tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục cho cột BTCT có cốt đã bị ăn mòn của BTCLD sợi các bon.

Kết quả nghiên cứu của Chương 1 được sử dụng trong các phần tổng quan và đặt vấn đề cho toàn bộ các công trình bài báo quốc tế, bài báo trong nước, hội thảo quốc tế và giải pháp hữu ích đã đề cập tại Danh mục các công trình, bài báo khoa học của luận án.

CHƯƠNG 2: NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG GIẢI PHÁP TĂNG CƯỜNG KHẢ NĂNG CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỤC KẾT HỢP CHỐNG ĂN MÒN CỐT THÉP CHO CỘT BÊ TÔNG CỐT THÉP CÓ CỐT ĐÃ BỊ GỈ BẰNG BÊ TÔNG CỐT LƯỚI DỆT SỢI CÁC BON

2.1 MỤC ĐÍCH NGHIÊN CỨU

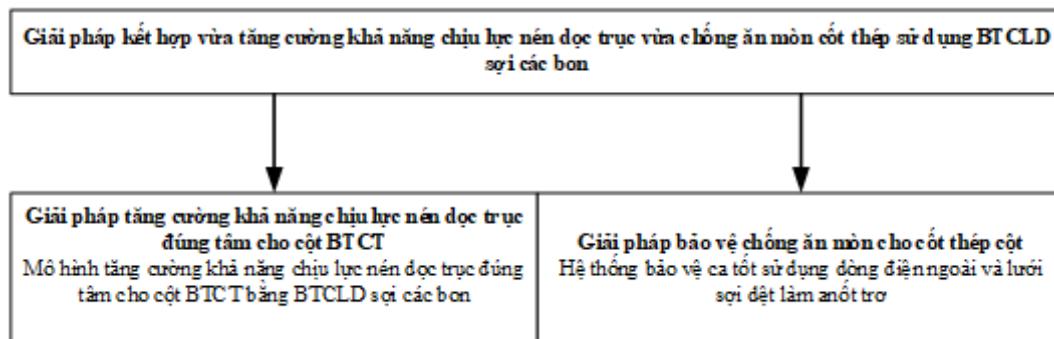
Nội dung chương này trình bày cơ sở xây dựng một giải pháp kỹ thuật tích hợp nhằm phục hồi và cải thiện sức kháng nén của các BTCT bị suy giảm do hiện tượng ôxi hóa cốt thép. Điểm khác biệt của giải pháp là sự kết hợp giữa vật liệu BTCLD sử dụng sợi các bon và hệ thống chống ăn mòn bằng nguồn điện ngoài. Lưới sợi các bon được khai thác với hai vai trò đồng thời: tham gia chịu lực trong lớp BTCLD và hoạt động như một điện cực anốt nhằm duy trì trạng thái bảo vệ điện hóa cho cốt thép bên trong cấu kiện.

So với các phương pháp tăng cường truyền thống chỉ hướng đến khôi phục khả năng chịu lực hoặc các giải pháp chống ăn mòn riêng biệt, cách tiếp cận trên hướng tới việc xử lý đồng thời hai cơ chế suy giảm chính của cột BTCT bị hư hỏng, bao gồm sự suy giảm năng lực chịu tải và sự tiếp tục phát triển của quá trình ăn mòn. Đây cũng là hướng nghiên cứu còn hạn chế tại Việt Nam, đặc biệt đối với việc ứng dụng BTCLD sợi các bon kết hợp bảo vệ chống ăn mòn cho cột BTCT đã bị suy giảm chất lượng do ăn mòn.

Trên cơ sở giải pháp vật liệu đề xuất, nghiên cứu tiếp tục phát triển các công thức tính toán sức kháng nén của cột BTCT tăng cường BTCLD, trong đó có tính đến tình trạng hư hỏng do ăn mòn của cấu kiện. Đồng thời, các nội dung liên quan đến nguyên lý bố trí hệ thống bảo vệ catốt, lựa chọn thông số vận hành và điều kiện đảm bảo hiệu quả bảo vệ lâu dài cũng được phân tích nhằm đảm bảo áp dụng giải pháp vào thực tế.

Mô hình tổng quát của giải pháp tích hợp được thể hiện trong *Hình 2.1*. Về mặt cơ học, lớp BTCLD sợi các bon bao bọc bên ngoài giúp hạn chế nở ngang cho BT lõi, qua đó nâng cao sức kháng nén và cải thiện khả năng làm việc của cột. Về mặt điện hóa, lưới sợi các bon được kết nối với hệ thống bảo vệ chống ăn mòn bằng nguồn điện ngoài nhằm cung cấp dòng điện tử bảo vệ, ức chế các phản ứng điện hóa tại cốt thép. Việc xây dựng giải pháp được triển khai theo chuỗi các bước liên kết, bắt đầu từ phân tích yêu cầu làm việc của cấu

kiện, lựa chọn đặc tính vật liệu phù hợp, xác định mô hình tính toán để thiết lập thông số cho hệ thống chống ăn mòn. Cách tiếp cận này nhằm bảo đảm sự tương thích giữa yêu cầu tăng cường chịu lực và mục tiêu kiểm soát ăn mòn trong cùng một hệ thống sửa chữa, phục hồi kết cấu.



Hình 2.1: Giải pháp tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục kết hợp chống ăn mòn cốt thép cho cột BTCT có cốt đã bị gỉ bằng BTCLD sợi các bon

2.2 CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.2.1 Mô hình ứng xử cơ học của các loại vật liệu

a) Bê tông cốt lưới dệt

Việc đánh giá sự làm việc của lớp BTCLD có thể được tiếp cận theo hai hướng khác nhau tùy thuộc vào mức độ đơn giản hóa trong mô hình tính toán. Cách thứ nhất xem BTCLD là một hệ vật liệu gồm hai thành phần riêng biệt, trong đó BTHM cũng như lưới sợi dệt có thể phân tích theo đặc tính chịu lực riêng của từng vật liệu. Cách tiếp cận thứ hai coi BTCLD như một lớp vật liệu composite đồng nhất có khả năng tham gia chịu lực cùng với cấu kiện BTCT.

Đối với cả hai cách tiếp cận này, sự truyền lực giữa các thành phần được giả thiết thông qua cơ chế liên kết dính bám lý tưởng. Theo đó, không xét đến hiện tượng bị kéo trượt tương đối của lưới sợi trong BTHM cũng như giữa lớp BTCLD và BT lõi của cột. Giả thiết này cho phép mô phỏng sự tương thích biến dạng giữa các thành phần khi chịu tải.

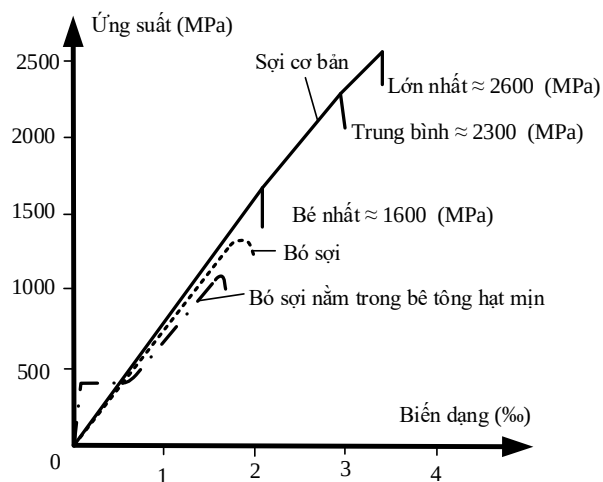
- Mô hình BTCLD xét BTHM và lưới sợi dệt làm việc độc lập:

Trong trường hợp xem xét từng thành phần vật liệu riêng biệt, khả năng tăng cường của BTCLD được hình thành từ sự phối hợp giữa hai cơ chế chịu lực chính BTHM

đảm nhận khả năng chịu nén và truyền ứng suất, trong khi lưới sợi dệt giữ vai trò là thành phần chịu kéo khi BT bị nứt. Do đó, hiệu quả của BTCLD bị ảnh hưởng không chỉ vào khả năng chịu lực của từng vật liệu mà còn liên quan đến khả năng phối hợp biến dạng và mức độ truyền lực tại vùng tiếp xúc giữa các thành phần.

Theo Brameshuber [51], cấu tạo của lưới sợi dệt bao gồm nhiều bó sợi nhỏ liên kết song song với nhau. Khi chịu tác dụng kéo, vật liệu có xu hướng làm việc theo dạng gần như là đàn hồi tuyến tính đến đứt. Tuy nhiên, việc ứng suất giữa các sợi thành phần phân bố không đồng đều, một số sợi có thể đạt trạng thái giới hạn trước các sợi còn lại, dẫn đến việc không thể huy động toàn bộ khả năng chịu kéo lý thuyết của bó sợi.

Curbach [76] đã cho thấy rằng lưới sợi thường có cường độ kéo thực tế thấp hơn tổng cường độ của các sợi riêng lẻ. Đặc biệt, khi bê tông xuất hiện vết nứt, các sợi nằm ở vị trí ngoài cùng thường chịu sự tập trung ứng suất lớn hơn và có thể bị phá hoại trước. Quan hệ ứng suất – biến dạng điển hình của lưới sợi dệt được trình bày tại Hình 2.2.

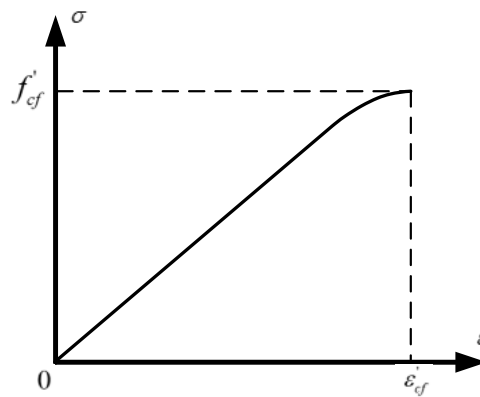


Hình 2.2: Quan hệ ứng suất – biến dạng của lưới sợi dệt [76]

Đối với các vùng có hình dạng hình học phức tạp, khả năng khai thác cường độ của lưới sợi còn chịu ảnh hưởng bởi trạng thái uốn cong của vật liệu. Hoai Ho và cộng sự [30] đã nghiên cứu ảnh hưởng của bán kính cong đến khả năng chịu kéo của các loại lưới khác nhau (sợi các bon và sợi thủy tinh) tại các vùng chịu tác động đồng thời của kéo và nén. Lưới các bon chỉ đạt khoảng 33–48% cường độ mẫu kéo thẳng.

Giá trị này của lưới thủy tinh dao động trong khoảng 27–41%. Điều này chứng minh rằng điều kiện hình học của lớp tăng cường có tác động đến hiệu quả và các làm việc của BTCLD.

Bên cạnh thành phần lưới sợi, đặc tính của BTHM cũng cần được nghiên cứu khi sử dụng BTCLD. BTHM sử dụng cốt liệu có kích thước nhỏ, thường dưới 1 mm, với cấu trúc tương tự hỗn hợp vữa cường độ cao. Quan hệ ứng suất – biến dạng khi chịu nén của loại bê tông này có thể được xác định theo mô hình đề xuất trong Eurocode 2 [52] (Hình 2.3).



Hình 2.3: Quan hệ ứng suất – biến dạng của BTHM

Cường độ chịu nén của BTHM được tính toán như sau:

$$\sigma = f'_{cf} \times \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon'_{cf}} \right)^n \right], 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon'_{cf} \quad (2.1)$$

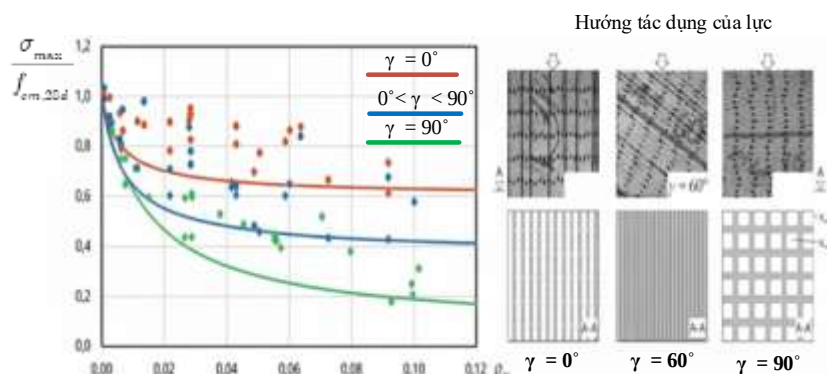
Với: ε'_{cf} , f'_{cf} là biến dạng cực hạn và cường độ chịu nén của bê tông hạt mịn.

Theo Bochmann và cộng sự [53] với các loại bê tông hạt mịn có cường độ chịu nén dưới 100 MPa, $n = 1,4$.

Một đặc điểm cần xem xét khi sử dụng BTHM trong BTCLD là BTHM bị giảm cường độ chịu nén do ảnh hưởng của các lớp lưới dệt nằm bên trong cấu trúc bê tông. Các lớp lưới này có thể làm gián đoạn tính liên tục của vật liệu, ảnh hưởng đến khả năng truyền ứng suất trong vùng chịu nén. Bochmann [54] đã đề xuất hệ số suy giảm κ để tính toán sự suy giảm cường độ của BTHM. Hệ số này bị ảnh hưởng bởi góc đến của tải trọng so với phương bố trí lưới sợi γ và tỷ lệ thể tích cốt lưới dệt (ρ_w). Các biểu thức xác định hệ số κ được trình bày trong Bảng 2.1 sau đây:

Bảng 2.1: Công thức tính toán hệ số κ

$\gamma = 0^\circ$	$0^\circ < \gamma < 90^\circ$	$\gamma = 90^\circ$
$\kappa = \frac{0,0026}{0,0076 + 1,15 \times \rho_w} + 0,652$	$\kappa = \frac{0,0027}{0,0031 + 0,22 \times \rho_w} + 0,115$	$\kappa = \frac{0,0002}{0,0003 + 0,05 \times \rho_w} + 0,420$

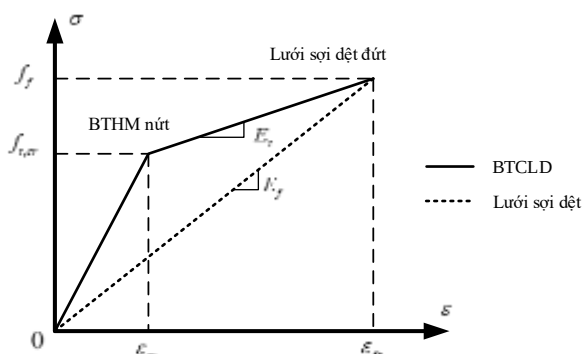


Hình 2.4: Biểu đồ thực nghiệm tỉ lệ thể tích tăng cường [54]

Dựa trên kết quả thực nghiệm, tỷ lệ thể tích tăng cường được xác định theo đường cong hệ thể hiện trong Hình 2.4. Trong các mô hình tính toán, BT thông thường có tỷ lệ được lựa chọn trong khoảng 0,85–0,90.

- BTCLD làm việc như một vật liệu composite:

Một cách tiếp cận khác là xem toàn bộ lớp BTCLD như một vật liệu composite có khả năng tham gia chịu lực cùng với cột BTCT. Mô hình này có xét đến quá trình hình thành vết nứt trong BTHM và khả năng tiếp tục truyền lực của vùng vật liệu nằm giữa các vết nứt (Hình 2.5).



Hình 2.5: Quan hệ ứng suất – biến dạng của vật liệu BTCLD

Theo mô hình của Cuong Huy Nguyen[55], quá trình chịu kéo của BTCLD có thể chia thành ba trạng thái chính. Ở giai đoạn đầu, BTHM chưa bị nứt, BTHM và lưới sợi cùng chịu tải, do đó BTCLD có độ cứng ban đầu lớn và ứng xử gần đàn hồi

tuyến tính. Khi ứng suất tăng đến mức hình thành vết nứt, lực kéo dần được chuyển sang hệ lưới sợi. Tuy nhiên, nhờ sự tồn tại của liên kết dính bám, phần BTHM giữa các vết nứt vẫn có khả năng tham gia truyền ứng suất, làm cho quá trình suy giảm độ cứng diễn ra từ từ. Ở trạng thái cuối cùng, lưới sợi đạt đến giới hạn kéo đứt, các bó sợi bị phá hoại và vật liệu mất khả năng tiếp tục chịu kéo. Do đặc tính của vật liệu sợi không xuất hiện giai đoạn chảy dẻo, quá trình phá hoại xảy ra tương đối đột ngột. Với giả thiết liên kết giữa BTHM và lưới sợi không xảy ra trượt, biến dạng và ứng suất tại trạng thái nứt của BTCLD được tính toán như sau:

$$\varepsilon_{cr} = \varepsilon'_{cf} = \frac{f'_{cf}}{E_{cf}} \quad (2.2)$$

$$f_{t,cr} = \frac{N_{cr}}{A_t} = \frac{f'_{cf} \times A_{cf} + \varepsilon_{cr} \times E_f \times A_f}{A_t} \quad (2.3)$$

Với: A_t và $f_{t,cr}$ là diện tích và ứng suất kéo khi bị nứt của BTCLD; A_{cf} , f'_{cf} và E_{cf} lần lượt là diện tích, cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi của BTHM; f_f , A_f và E_f là cường độ chịu kéo, diện tích và mô đun đàn hồi của cốt lưới dệt. Tấm composite BTCLD bị phá hoại tại thời điểm lưới sợi bị kéo đứt. Do đó, biến dạng kéo của tấm composite BTCLD bị phá hoại được xác định theo công thức sau:

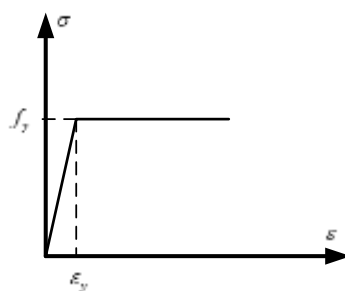
$$\varepsilon_{fe} = \frac{f_f}{E_f} \quad (2.4)$$

(E_t) là mô đun đàn hồi của BTCLD sau khi bị kéo nứt:

$$E_t = \frac{f_f - f_{t,cr}}{\varepsilon_{fe} - \varepsilon_{cr}} \quad (2.5)$$

b) Cốt thép dọc của cột

Cốt thép dọc làm việc theo dạng vật liệu đàn hồi – dẻo lý tưởng. Theo giả thiết này, thép đàn hồi tuyến tính trước khi đến thêm chảy. Sau đó, ứng suất trong thép gần như không đổi dù biến dạng tiếp tục tăng. Biểu đồ ứng suất – biến dạng của cốt thép được mô tả trong Hình 2.6.



Hình 2.6: Quan hệ ứng suất – biến dạng của các vật liệu thép

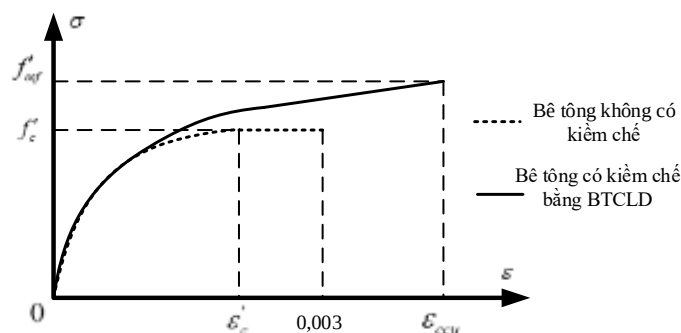
Quan hệ ứng suất – biến dạng của cốt thép được mô tả theo công thức sau:

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (2.6)$$

Trong đó: E_s là mô đun đàn hồi của thép; f_y là cường độ chịu kéo chảy của thép; ε_s là biến dạng của thép; σ_s là ứng suất của thép.

c) Bê tông lõi cột

Sự có mặt của lớp BTCLD bên ngoài tạo ra hiệu ứng kiểm chế nở ngang lên BT lõi, làm thay đổi trạng thái ứng suất và cải thiện cường độ nén của BT lõi cột. Biểu đồ ứng suất – biến dạng của BT lõi cột có được xây dựng theo hướng dẫn của tiêu chuẩn ACI 549.4R-20 [34] và được trình bày trong Hình 2.7.



Hình 2.7: Quan hệ ứng suất – biến dạng của vật liệu bê tông lõi cột khi có hiệu ứng kiểm chế của BTCLD

Trong đó:

f'_c , ε'_c là cường độ chịu nén và biến dạng cực hạn của bê tông lõi cột không có hiệu ứng kiểm chế; f'_{ccf} là cường độ chịu nén của bê tông lõi cột khi được tăng cường bằng BTCLD được tính toán theo công thức (1.8) và ε_{ccu} là biến dạng nén cực hạn của bê tông lõi cột khi được tăng cường bằng BTCLD được tính toán theo công thức (1.12). **Giá trị**

biến dạng của bê tông theo ACI 549.4R-20 thường được lấy là 3‰.

2.2.2 Ảnh hưởng của quá trình ăn mòn cốt thép lên cấu kiện bê tông cốt thép

Quá trình ăn mòn cốt thép trong cột BTCT không chỉ làm suy giảm chất lượng vật liệu mà còn gây biến đổi đáng kể về đặc tính hình học và cơ chế truyền lực của cấu kiện. Khi cốt thép bị ăn mòn, diện tích tiết diện hữu hiệu của thanh thép giảm, đồng thời các thông số cơ học của thép cũng bị ảnh hưởng. Đối với cột chịu nén, những thay đổi này đặc biệt bất lợi do cốt thép dọc giữ vai trò quan trọng trong việc tham gia kháng nén và duy trì trạng thái ổn định của cấu kiện. Hơn nữa, sự suy yếu của thép đai làm giảm hiệu quả hạn chế biến dạng ngang của bê tông lõi và khiến cho cốt thép dọc có thể bị mất ổn định, dẫn đến sự hư hỏng nhanh chóng của cột BTCT.

a) Sự suy giảm diện tích mặt cắt và cường độ chịu lực của cốt thép dọc

Ảnh hưởng của ăn mòn đối với cốt thép không chỉ thể hiện thông qua sự hao hụt khối lượng mà còn liên quan trực tiếp đến sự thay đổi các đặc tính cơ học của vật liệu. Khi lớp kim loại bên ngoài bị hòa tan trong quá trình ăn mòn, đường kính thanh thép giảm dần, kéo theo sự suy giảm diện tích tiết diện chịu lực. Đồng thời, quá trình này làm giảm cường độ chịu kéo, giới hạn chảy và của cốt thép. Do vậy, ảnh hưởng đến hiệu quả kháng nén chung của cột BTCT.

Dựa trên các kết quả nghiên cứu thực nghiệm, Du và cộng sự [56] đã thiết lập các công thức tính toán nhằm mô tả sự thay đổi các thông số cường độ chịu kéo, diện tích chịu lực của thép khi bị ăn mòn. Các công thức này cho phép đánh giá mức độ suy giảm khả năng làm việc của cốt thép khi cốt bị gỉ sét. Các công thức tính toán như sau:

$$f_{yc} = (1 - \beta_s \times \Delta w) \times f_y \quad (2.7)$$

$$A_{sc} = \pi \times \frac{D_s^2}{4} \times (1 - 0,01 \times \Delta w) \quad (2.8)$$

Trong đó:

A_{sc} và f_{yc} lần lượt là diện tích mặt cắt ngang và cường độ kéo chảy của cốt thép sau khi bị ăn mòn;

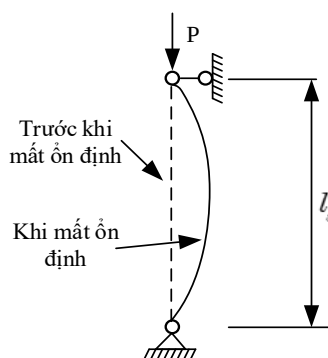
β_s là hệ số suy giảm cường độ cốt thép do ăn mòn, $\beta_s = 0,0015$ cho cốt thép có vân và $\beta_s = 0,0065$ cho cốt thép trơn;

Δw là khối lượng cốt thép bị suy giảm sau khi ăn mòn (%);

D_s và f_y lần lượt là đường kính và cường độ chảy của thanh thép không bị ăn mòn.

b) Sự suy giảm ứng suất tới hạn khi mất ổn định của cốt thép dọc

Bên cạnh sự suy giảm về sức kháng của vật liệu thép, hiện tượng ăn mòn còn làm thay đổi sự ổn định của các thanh thép dọc trong cột. Xét một thanh thép chịu lực nén đúng tâm P với chiều dài tính toán l_s , hai đầu liên kết dạng khớp, khi tải trọng đạt đến giá trị giới hạn, thanh thép có xu hướng chuyển từ trạng thái nén thẳng sang trạng thái mất ổn định uốn (Hình 2.8).



Hình 2.8: Thép bị mất ổn định khi nén

Ứng suất lớn nhất để thép không bị mất ổn định trong giai đoạn đàn hồi phụ thuộc chủ yếu vào mô men quán tính của tiết diện và chiều dài tính toán của thanh. Khi xảy ra ăn mòn, đường kính cốt thép bị thu nhỏ làm giảm mô men quán tính tiết diện, dẫn đến sự suy giảm trực tiếp của ứng suất tới hạn này. Giá trị tải trọng tới hạn của thanh thép được xác định theo lý thuyết mất ổn định của Euler như sau:

$$P_{th} = \frac{\pi^2 \times E_s \times I_s}{l_s^2} \quad (2.9)$$

Với:

I_s và E_s lần lượt là mô men quán tính và mô đun đàn hồi của cốt thép;

l_s là **chiều dài tự do của cốt thép không chịu hiệu ứng kiềm chế của cốt thép đai và bê tông.**

Ứng suất lớn nhất của thanh thép để không bị mất ổn định được tính toán theo công thức như:

$$\sigma_{th} = \frac{P_{th}}{A_s} = \frac{\pi^2 \times E_s \times I_s}{l_s^2 \times A_s} \quad (2.10)$$

Trong đó:

A_s là diện tích mặt cắt của cốt thép;

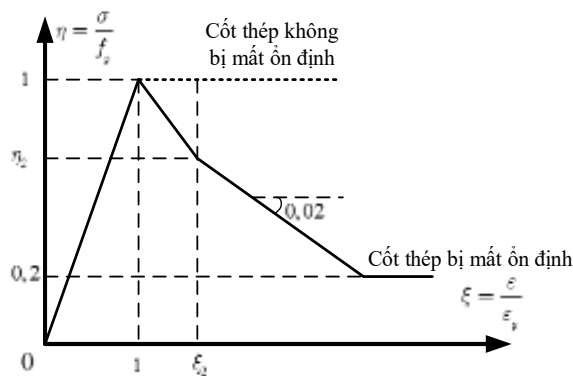
Thép có tiết diện tròn khi chưa bị ăn mòn: $I_s = \frac{\pi \times D_s^2}{64}$.

Ngoài ảnh hưởng đến tiết diện thanh thép, sự phá hủy hoặc suy yếu thép đai do gỉ sét cũng làm giảm tính ổn định của lęps dọc. Khi cốt đai không còn đảm bảo khả năng liên kết ngang, chiều dài tự do của thanh thép dọc tăng lên, làm giảm khả năng chống uốn dọc và thúc đẩy quá trình phá hoại sớm trong cột chịu nén.

Đường kính thép sau ăn mòn có thể được tính theo công thức sau:

$$D_{sc} = D_s \times \sqrt{1 - \Delta w} \quad (2.11)$$

Dựa trên nghiên cứu về ứng xử sau mất ổn định của cốt thép, Dhakal–Maekawa [57] đã đề xuất biểu đồ mô tả quan hệ ứng suất – biến dạng của thanh thép trong giai đoạn này:



Hình 2.9: Ứng xử chịu nén của thép sau khi bị mất ổn định

Biểu đồ ứng suất – biến dạng của thép lúc mất ổn định theo giả thiết trên được biểu diễn bằng phương trình sau:

$$\eta = \begin{cases} \xi; \xi \leq 1 \\ \frac{(\eta_2 - 1)}{\xi_2 - 1} \times (\xi - 1) + 1; 1 < \xi < \xi_2 \\ \eta_2 - 0,02 \times (\xi - \xi_2); \xi_2 \leq \xi \text{ và } \eta \geq 0,2 \\ 0,2; \text{khác} \end{cases}$$

$$(2.12)$$

$$\xi_2 = 55 - 2,3 \times \lambda_p; \xi_2 \geq 7 \quad (2.13)$$

$$\eta_2 = \alpha \times (1,1 - 0,016 \times \lambda_p); \eta_2 \geq 0,2 \quad (2.14)$$

Với:

$$\lambda_p = \frac{l_s}{D_s} \sqrt{\frac{f_y}{100}} \quad (2.15)$$

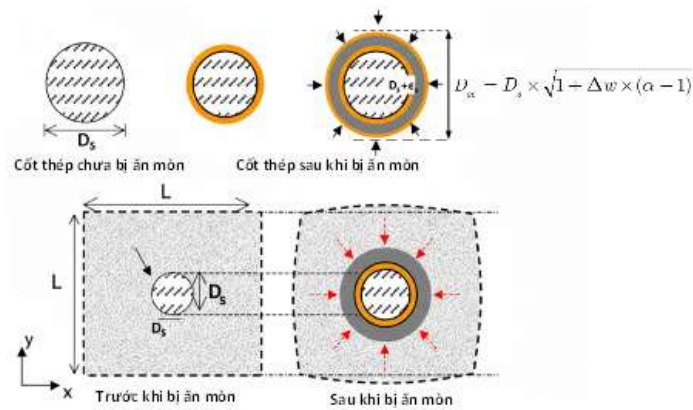
Trong đó: α là hệ số mềm hóa, và phụ thuộc vào mức độ tái bền của cốt thép. Dhakal và Maekawa [57] đã chỉ ra rằng đối với cốt thép đàn hồi – dẻo lý tưởng thì $\alpha = 0,75$, còn đối với cốt thép có tái bền tuyến tính thì $\alpha = 1$. l_s, D_s, f_y là chiều dài tự do, đường kính và cường độ chảy của thanh thép chưa bị ăn mòn.

Với các cột bị ăn mòn, đường kính (D_{sc}) và cường độ chảy (f_{yc}) của thanh thép sẽ bị suy giảm do quá trình ăn mòn được tính toán theo các công thức (2.11) và (2.7).

Theo Kashani và các cộng sự [58], sau khi xảy ra hiện tượng mất ổn định, cốt thép dọc có xu hướng phát triển biến dạng nhanh và khả năng chịu lực của thép suy giảm đáng kể, chỉ còn xấp xỉ 20% so với cường độ ban đầu.

c) *Sự suy giảm diện tích bê tông do sự bong tróc của lớp bê tông bảo vệ*

Quá trình gỉ sét của cốt thép còn gây ra các tác động bất lợi đối với phần bê tông bao quanh. Nguyên nhân chủ yếu xuất phát từ sự nở ra của thép do ăn mòn, tạo ra áp lực giãn nở hướng xuyên tâm tại vùng tiếp xúc giữa BT và cốt thép.



Hình 2.10: Nứt bê tông do sự nở ra của sản phẩm gỉ sét [59]

Theo công thức của Toongoenthong và Maekawa [60], sự gia tăng kích thước hình học của thép sau ăn mòn được mô tả thông qua đường kính tương đương sau khi xuất hiện sản phẩm gỉ:

$$D_{se} = D_s \times \left(\sqrt{1 + \Delta w \times (\alpha - 1)} \right) \quad (2.16)$$

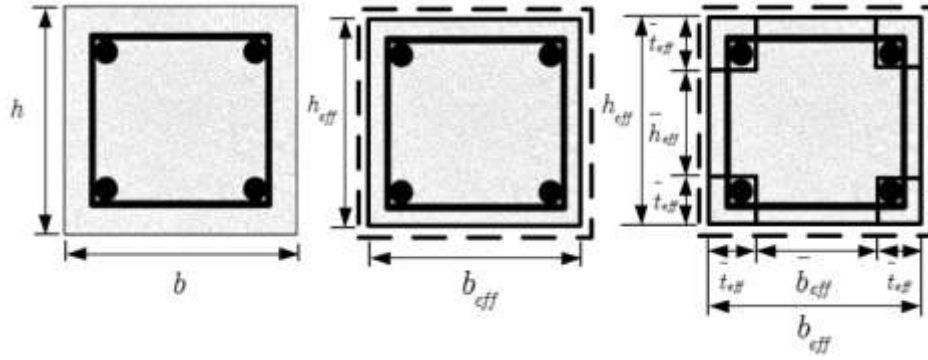
Với: D_{se} là đường kính của thanh cốt thép sau khi bị ăn mòn.

α là hệ số nở ra của sản phẩm ăn mòn trên cốt thép. Trong nghiên cứu này, $\alpha = 2$ theo chỉ dẫn từ nghiên cứu của Morikawa và các cộng sự [61].

Khi quá trình ăn mòn tiếp tục phát triển, các vết nứt mở rộng, làm suy giảm khả năng liên kết giữa BT và cốt thép. Điều này có thể làm lớp BT bên ngoài thép bị bong tróc. Hậu quả là diện tích bê tông thực sự tham gia chịu nén trong tiết diện cột bị giảm. Biến dạng tự do do sự giãn nở của sản phẩm ăn mòn được tính theo biểu thức:

$$\varepsilon_s = D_s \times (\sqrt{1 + \Delta w \times (\alpha - 1)} - 1) \quad (2.17)$$

Kết quả nghiên cứu của Xia và cộng sự [62] cho thấy mức độ suy giảm diện tích BT do bong tróc có xu hướng tăng nhanh trong giai đoạn đầu của quá trình ăn mòn. Khi mức độ mất khối lượng cốt thép đạt đến một giới hạn nhất định, mức độ ảnh hưởng của hiện tượng bong tách bê tông có xu hướng ổn định hơn (Hình 2.11).



Hình 2.11: Sơ đồ bong tróc bê tông bảo vệ do ăn mòn cốt thép [60]

Kích thước phần BT bong tróc do ảnh hưởng của việc gỉ sét thép đai được tính toán như sau:

$$h_{eff} = \begin{cases} h - 2(c + d_v) + \frac{s \times \tan \Phi}{2} \rightarrow s < 2c \times \cot \Phi \\ h - \frac{2}{s \times \tan \Phi} (c + d_v)^2 \rightarrow s \geq 2c \times \cot \Phi \end{cases} \quad (2.18)$$

$$b_{eff} = \begin{cases} b - 2(c + d_v) + \frac{s \times \tan \Phi}{2} \rightarrow s < 2c \times \cot \Phi \\ b - \frac{2}{s \times \tan \Phi} (c + d_v)^2 \rightarrow s \geq 2c \times \cot \Phi \end{cases} \quad (2.19)$$

$$c_{eff} = \begin{cases} (c + d_v) - \frac{s \times \tan \Phi}{4} \rightarrow s < 2c \times \cot \Phi \\ \frac{1}{s \times \tan \Phi} (c + d_v)^2 \rightarrow s \geq 2c \times \cot \Phi \end{cases} \quad (2.20)$$

Trong đó:

b , h và c lần lượt là chiều rộng, chiều cao tiết diện cột và chiều dày lớp bê tông bảo vệ trong trạng thái ban đầu (chưa xét đến ảnh hưởng của ăn mòn).

b_{eff} , h_{eff} và c_{eff} tương ứng biểu thị chiều rộng, chiều cao tiết diện và chiều dày lớp bê tông bảo vệ hữu hiệu sau khi bị suy giảm do ảnh hưởng của ăn mòn cốt thép đai.

d_v và s lần lượt là đường kính cốt thép đai và khoảng cách bố trí cốt thép đai.

Φ biểu thị góc nghiêng của vết nứt tại vị trí cốt thép đai trong cầu kiện.

Kích thước phần BT bong tróc do ảnh hưởng của việc gỉ sét thép dọc được tính toán như sau:

$$\bar{h}_{eff} = \{h_{eff} - (2 + \cot \beta)(c_{eff} + d_l)\} \quad (2.21)$$

$$\bar{b}_{eff} = \{b_{eff} - (2 + \cot \beta)(c_{eff} + d_l)\} \quad (2.22)$$

$$\bar{t}_{eff} = \left\{ \left(1 + \frac{\cot \beta}{2}\right)(c_{eff} + d_l) \right\} \quad (2.23)$$

Trong đó:

$\bar{b}_{eff}$, $\bar{h}_{eff}$ lần lượt là chiều rộng và chiều cao của tiết diện cột sau khi xét đến sự suy giảm do đồng thời ảnh hưởng của ăn mòn cốt thép đai và cốt thép dọc.

$\bar{t}_{eff}$ là chiều dài đặc trưng của vùng bê tông bị bong tách do tác động kết hợp của ăn mòn cốt thép đai và cốt thép dọc.

D_s biểu thị đường kính cốt thép dọc trước khi xảy ra ăn mòn.

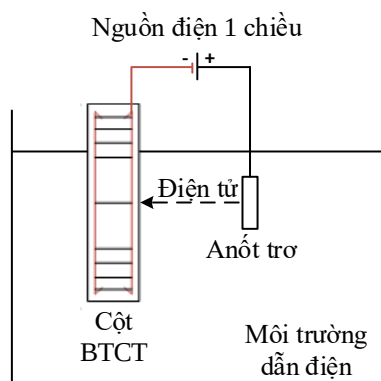
β là góc nghiêng của vết nứt phát triển tại vị trí cốt thép dọc trong cầu kiện.

2.2.3 Chống ăn mòn cốt thép trong bê tông bằng phương pháp bảo vệ catốt sử dụng anốt trợ và dòng điện ngoài

a) Cơ chế hoạt động của hệ thống bảo vệ catốt bằng dòng điện ngoài

Bảo vệ catốt bằng dòng điện ngoài là một phương pháp điện hóa nhằm kiểm soát quá trình hòa tan kim loại bằng cách điều chỉnh trạng thái điện thế của cốt thép trong kết cấu BTCT (Hình 2.12). Khác với trạng thái ăn mòn tự nhiên, trong hệ thống này cốt thép được cưỡng bức trở thành điện cực catốt thông qua việc nối với cực âm của nguồn điện một chiều. Ngược lại, các điện cực anốt được kết nối vào cực dương của nguồn nhằm cung cấp điện tử cho cốt thép qua môi trường điện ly trong bê tông.

Dòng điện từ anốt di chuyển qua lớp bê tông ẩm đến bề mặt cốt thép, làm thay đổi cân bằng điện hóa tại vùng tiếp xúc giữa thép và bê tông. Khi lượng điện tử được bổ sung liên tục vào cốt thép, các phản ứng oxy hóa tại vùng anốt bị hạn chế, từ đó làm chậm hoặc ngăn cản quá trình ăn mòn.



Hình 2.12: Sơ đồ phương pháp bảo vệ catốt sử dụng anốt trợ và dòng điện ngoài

Trong thực tế, để đảm bảo dòng điện được phân bố đồng đều trên toàn bộ vùng cần bảo vệ, hệ thống thường sử dụng nhiều anốt bố trí theo sơ đồ phù hợp với kích thước, hình dạng và môi trường của cấu kiện. Hệ thống này thường bao gồm các bộ phận chính như nguồn cấp điện, hệ thống dây dẫn và các điện cực anốt.

Nguồn điện cung cấp cho hệ thống có thể được lấy từ nhiều nguồn khác nhau như bộ biến áp điện một chiều, pin, ắc quy hoặc các nguồn năng lượng tái tạo như năng lượng mặt trời. Trong đó, nguồn điện cần duy trì khả năng cung cấp dòng điện ổn định trong suốt thời gian bảo vệ.

Vật liệu sử dụng làm anốt phải đồng thời thỏa mãn về tính dẫn điện, độ ổn định điện hóa, không bị hòa tan trong môi trường làm việc. Ngoài ra, vật liệu anốt cũng cần hoạt động ổn định dưới các mức mật độ dòng điện khác nhau, đặc biệt trong giai đoạn đầu khi bề mặt điện cực chưa hình thành lớp oxit bảo vệ ổn định. Một số vật liệu anốt trơ thường được sử dụng gồm titan phủ oxit kim loại hỗn hợp (Ti–MMO), titan phủ platin (Ti–Pt), platin nguyên chất, các bon và than chì.

b) Xác định mật độ dòng điện bảo vệ

Mật độ dòng điện cấp cho hệ thống có thể quyết định khả năng duy trì trạng thái bảo vệ của cốt thép trong suốt vòng đời khai thác. Giá trị này không có một giới hạn cố định cho mọi trường hợp mà thay đổi phụ thuộc vào nhiều yếu tố như mức độ xâm thực của môi trường, điện trở suất của bê tông, trạng thái bề mặt cốt thép và đặc điểm hình học của cấu kiện.

Về nguyên tắc, dòng điện bảo vệ cần được lựa chọn sao cho đủ khả năng dịch chuyển điện thế của cốt thép về vùng trạng thái điện hóa an toàn nhưng không gây ra các tác động bất lợi như tiêu hao nhanh vật liệu anốt hoặc phát sinh các phản ứng phụ trong bê tông.

Trong thiết kế thực tế, mật độ dòng điện thường được xác định thông qua mối quan hệ giữa tổng dòng điện cung cấp bởi hệ thống anốt và diện tích mặt ngoài của cốt thép cần được bảo vệ. Hướng dẫn số 37 của Hiệp hội Bê tông Hoa Kỳ (ACI) [63] và tiêu chuẩn ISO 12696:2016 [41] là tài liệu được sử dụng phổ biến để xác định mật độ dòng điện.

Bảng 2.2: Mật độ dòng điện bảo vệ theo điều kiện môi trường [63]

Môi trường xung quanh cốt thép	Mật độ dòng điện (mA/m ² của cốt thép)
Kiểm, không xảy ra hiện tượng ăn mòn, lượng oxy cung cấp thấp	0,1
Kiểm, không xảy ra ăn mòn, kết cấu lộ thiên	1-3
Bê tông kiểm, xuất hiện ion clorua, khô, chất lượng tốt, độ che phủ cao, quan sát thấy ăn mòn nhẹ trên cốt thép	3-7
Xuất hiện ion Clorua, ẩm ướt, môi trường bê tông chất lượng kém - rỗ lan rộng và ăn mòn chung trên thép	8-20
Nồng độ clorua cao, môi trường ẩm ướt thay đổi, nồng độ oxy cao, nóng, ăn mòn thép nghiêm trọng, độ che phủ thấp	30-50

Bảng 2.2 trình bày các khoảng giá trị mật độ dòng điện bảo vệ tương ứng với những điều kiện môi trường làm việc khác nhau.

c) *Đánh giá hiệu quả của hệ thống bảo vệ catốt*

Theo ISO 12696:2016 [42], việc đánh giá có thể thực hiện dựa trên ba tiêu chí sau:

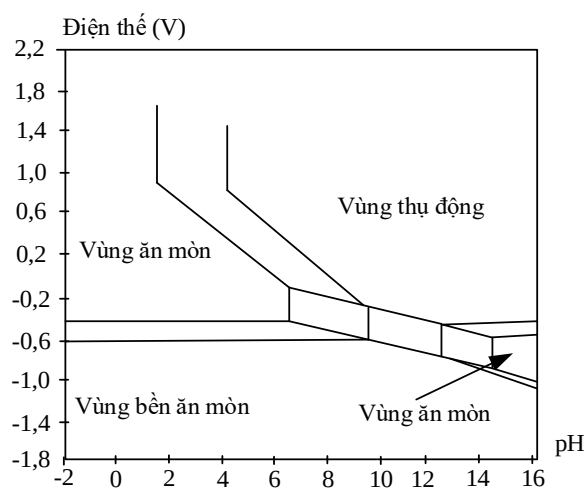
- Xác định trạng thái điện thế của cốt thép;
- Đánh giá mức độ sụt giảm điện thế trong cốt thép sau khi ngừng cấp dòng điện 24h;
- Đánh giá mức độ sụt giảm điện thế trong cốt thép sau khi ngừng cấp dòng điện hơn 24h.

Trong đó ISO 12696:2016 cũng nêu rõ, hệ thống được đánh giá là hiệu quả khi đạt được một trong ba tiêu chí trên.

Tiêu chí thứ nhất dựa trên cơ sở nhiệt động học điện hóa, trong đó điện thế của thép được điều chỉnh để đưa vào vùng miễn nhiễm ăn mòn trên biểu đồ Pourbaix. **Tiêu chí thứ hai và thứ ba dựa trên hiện tượng khử cực, tức là theo dõi sự sụt giảm điện thế của cốt thép sau khi hệ thống bảo vệ được ngắt trong các khoảng thời gian khác nhau (24h sau khi ngắt mạch và hơn 24h sau khi ngắt mạch).**

Các phép đo điện thế của thép thường sử dụng điện cực so sánh như điện cực đồng–sunfat đồng (Cu/CuSO_4), bạc–clorua bạc ($\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{KCl}$) hoặc điện cực kẽm Zn.

- **Đánh giá thông qua điện thế của cốt thép:** điện thế an toàn là giá trị điện thế tại đó phản ứng hòa tan kim loại về mặt nhiệt động học bị hạn chế, do kim loại được đưa vào vùng ổn định trên giản đồ điện hóa.



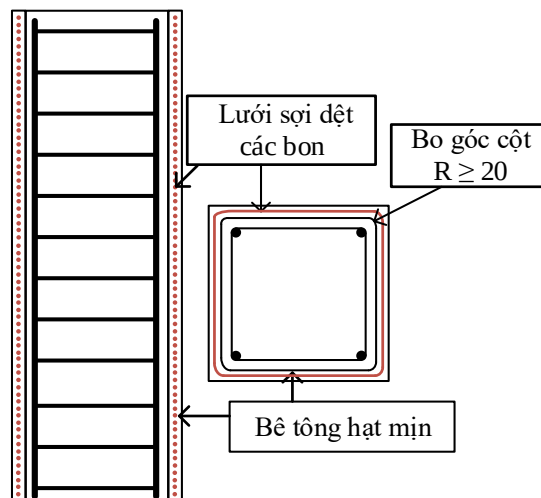
Hình 2.13: Biểu đồ Pourbaix dành cho sắt [64]

- **Đánh giá thông qua phép đo khử cực (độ sụt thế theo thời gian):** Bên cạnh việc kiểm tra điện thế tức thời, hiệu quả bảo vệ còn được đánh giá thông qua quá trình khử cực của cốt thép sau khi ngắt nguồn điện bảo vệ. Cơ sở của phương pháp này dựa trên sự thay đổi trạng thái điện hóa tại vùng tiếp xúc giữa thép và bê tông khi dòng điện cưỡng bức bị loại bỏ. Trong thời gian hệ thống hoạt động, điện thế cốt thép được duy trì ở mức thấp hơn so với trạng thái ăn mòn tự nhiên. Khi nguồn điện được ngắt, điện thế của thép có xu hướng quay trở lại giá trị cân bằng ban đầu. Mức độ thay đổi điện thế theo thời gian phản ánh khả năng kiểm soát quá trình ăn mòn của hệ thống bảo vệ. Để thực hiện phép đo này, các điện cực tham chiếu được bố trí tại vị trí gần vùng cốt thép cần theo dõi, có thể đặt trên bề mặt bê tông hoặc lắp đặt cố định bên trong cấu kiện. Theo tiêu chí đánh giá được sử dụng phổ biến trong ISO 12696:2016 [42], hệ thống được xem là đáp ứng yêu cầu bảo vệ khi độ suy giảm điện thế của cốt thép ≥ 100 mV sau 24 giờ kể từ thời điểm ngắt dòng hoặc ≥ 150 mV sau hơn 24 giờ kể từ thời điểm ngắt dòng.

2.3 XÂY DỰNG MÔ HÌNH TÍNH TOÁN KHẢ NĂNG CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỰC CỦA CỘT BTCT CÓ CỐT ĐÃ BỊ GỈ ĐƯỢC TĂNG CƯỜNG BẰNG BTCLD

Theo các tiêu chuẩn như Zulassung Z-31.10-182 [75], CNR-DT-215 [33] và ACI 549.4R-20 [34], sức kháng nén đúng tâm của cột BTCT được hình thành từ sự tham gia chịu lực của phần bê tông và hệ cốt thép dọc. Tuy nhiên, đối với các cấu kiện BTCT đã bị gỉ sét, khả năng chịu lực này không còn được duy trì do đồng thời xuất hiện nhiều cơ chế suy giảm như giảm diện tích cốt thép, suy yếu các thông số cơ học của thép, bong tróc BT bảo vệ và giảm hiệu quả liên kết giữa các thành phần vật liệu. Bên cạnh đó, cốt thép bị mất ổn định do ảnh hưởng của ăn mòn cũng làm gia tăng nguy cơ phá hoại sớm trong giai đoạn chịu nén. Xuất phát từ những ảnh hưởng bất lợi nêu trên, giải pháp sử dụng lớp vỏ BTCLD sợi các bon bao quanh cột BTCT bị ăn mòn được đề xuất như Hình 2.14. Cơ chế làm việc của hệ tăng cường dựa trên sự phối hợp của hai thành phần chính. Lớp BTHM bên ngoài có nhiệm vụ phục hồi phần bê tông bị suy giảm, bổ sung diện tích chịu nén và cải thiện độ đặc chắc của vùng biên cấu kiện. Trong khi đó, lưới sợi các bon đảm nhận vai trò tạo lực

kiềm chế ngang cho BT lõi, từ đó nâng cao sức kháng cho cột. Đồng thời, hiệu ứng bó hông do lớp BTCLD tạo ra còn góp phần hạn chế hiện tượng mất ổn định của các thanh cốt thép dọc trong quá trình chịu nén. Theo các kết quả nghiên cứu đã trình bày tại Mục 1.1.3, lớp BTCLD sợi các bon có thể được bố trí liên tục trên toàn bộ chiều cao và chu vi cột thông qua các phương pháp thi công như trát thủ công hoặc phun phủ. Sự liên kết giữa lưới sợi và lớp bê tông nền được đảm bảo nhờ khả năng bám dính của BTHM, tạo thành một hệ vật liệu composite có khả năng cùng tham gia chịu lực. Hiệu quả của giải pháp tăng cường phụ thuộc đáng kể vào đặc điểm hình học của tiết diện cột. Đối với cấu kiện có tiết diện tròn, lực kiềm chế từ lớp BTCLD được phân bố tương đối đồng đều quanh chu vi nên hiệu quả tăng cường thường cao hơn so với cột có tiết diện vuông hoặc chữ nhật [26]. Ngược lại, tại các vị trí góc của cột, hiện tượng thay đổi hướng của lưới sợi làm phát sinh vùng chịu kéo – nén phức tạp, gây giảm khả năng khai thác cường độ của sợi các bon [30]. Mức suy giảm này trở nên rõ rệt hơn khi bán kính bo góc nhỏ. Vì vậy, việc xử lý bo tròn các góc cạnh trước khi thi công lớp BTCLD là yêu cầu cần thiết nhằm hạn chế tập trung ứng suất và nâng cao hiệu quả làm việc của hệ tăng cường.



Hình 2.14: Mô hình tăng cường khả năng chịu lực cho cột BTCT bằng BTCLD

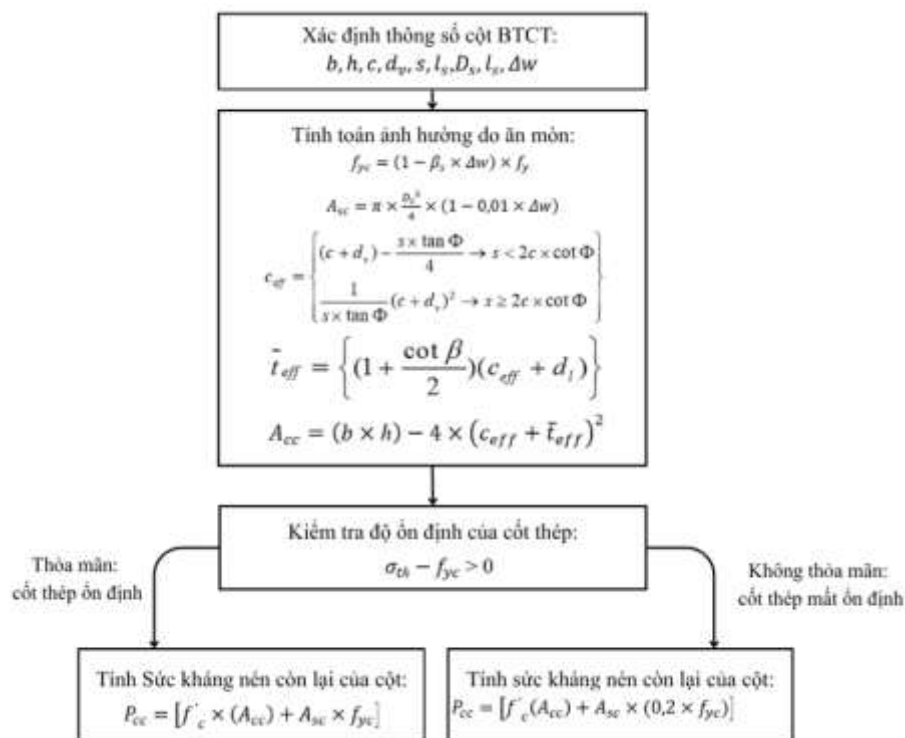
2.3.1 Các giả thiết tính toán

Các tiêu chuẩn TCVN 5574:2018 [7], ACI 318-25 [65] và BS EN 1992-1-1:2023 [66] đều quy định nguyên tắc tính toán khả năng kháng nén của cột BTCT dựa trên điều kiện cân bằng nội lực và sức kháng của vật liệu trong tiết diện. Về cơ bản, sức kháng nén được xác định từ tổng đóng góp của BT và cốt thép dọc, trong đó diện tích BT được xét phù hợp

với quy ước tính toán của từng tiêu chuẩn. Các phương pháp tính toán dựa trên giả thiết vật liệu đáp ứng các đặc trưng cơ học thiết kế, tiết diện và cốt thép bảo đảm yêu cầu cấu tạo. Tuy nhiên, các tiêu chuẩn có sự khác biệt về cách xác định cường độ tính toán của vật liệu, hệ số sức kháng và điều kiện giới hạn của cấu kiện. Để tăng sự nhất quán, luận án sử dụng các giải thiết tính toán theo ACI 549.4R-20 [34]. Đối với cột BTCT chịu nén đúng tâm, các giả thiết cơ bản về sự làm việc, tương tác giữa các loại vật liệu và cơ chế truyền lực được đề xuất nhằm phản ánh ứng xử thực tế của cấu kiện sau tăng cường, các giả thiết cơ bản được sử dụng bao gồm:

- Giả thiết mặt cắt phẳng: biến dạng trên tiết diện ngang của cấu kiện chịu nén được coi là phân bố tuyến tính; đối với trường hợp nén đúng tâm, biến dạng tại mọi điểm trên mặt cắt được xem là như nhau.
- Biến dạng nén cực hạn của **bê tông và bê tông hạt mịn** tại thời điểm phá hoại lấy **bằng 3‰**; tại mức biến dạng này, cốt thép thông thường đã đạt trạng thái chảy dẻo.
- Bỏ qua khả năng chịu kéo của bê tông và không xét đến ảnh hưởng độ mảnh của cột trong phân tích.
- Biến dạng kéo cực hạn của lưới sợi dệt các bon thường trong khoảng $15 \div 18‰$, nhỏ hơn biến dạng của cốt thép tại thời điểm bắt đầu giai đoạn tái bền (khoảng $23 \div 27‰$) và thấp hơn đáng kể so với biến dạng kéo đứt của cốt thép (có thể đạt tới $120‰$). Điều này cho thấy trong phần lớn trường hợp, lớp BTCLD sẽ phá hoại trước khi cốt thép dọc đạt đến giai đoạn tái bền. Vì vậy, tại thời điểm phá hoại của cấu kiện, cốt thép dọc vẫn chủ yếu làm việc trong giai đoạn chảy dẻo ổn định, chưa khai thác đáng kể khả năng tăng cường ứng suất ở vùng tái bền. Do đó, trong mô hình tính toán, ứng suất của cốt thép sau khi chảy dẻo được giả thiết là không đổi hoặc tăng không đáng kể, nhằm đơn giản hóa bài toán nhưng vẫn đảm bảo độ chính xác và độ tin cậy của kết quả phân tích.

2.3.2 Mô hình tính toán khả năng chịu lực nén dọc trục còn lại của cột bê tông cốt thép có cốt đã bị ăn mòn



Hình 2.15: Sơ đồ tính toán sức kháng nén còn lại của cột BTCT có cốt đã bị ăn mòn

Hình 2.15 thể hiện sơ đồ tính toán sức kháng nén còn lại của cột BTCT có cốt đã bị gỉ. Trước khi tính toán hiệu quả của BTCLD, cần xác định sức kháng nén còn lại của cột BTCT ở trạng thái sau ăn mòn. Quá trình phân tích được thực hiện dựa trên các đặc trưng suy giảm của cấu kiện, bao gồm sự thay đổi về diện tích chịu lực, tính chất cơ học của vật liệu và mức độ hư hỏng của BT bảo vệ.

Cột ngắn BTCT chịu nén đúng tâm có sức kháng tổng thể được tạo thành từ hai bộ phận chính là BT và cốt thép dọc. Khi vật liệu chưa bị suy giảm, khả năng chịu lực có thể được xác định theo các mô hình đã được đề xuất trong các tiêu chuẩn như Zulassung Z-31.10-182 [75], CNR-DT-215 [33] và ACI 549.4R-20 [34].

Tuy nhiên, khi cốt thép bị gỉ sét, mô hình tính toán cần được hiệu chỉnh để xét đến các ảnh hưởng đặc trưng của quá trình suy thoái, bao gồm sự mất mát tiết diện thép, sự giảm cường độ vật liệu, hiện tượng bong tróc BT bảo vệ và sự mất ổn định của cốt thép dọc. Trên cơ sở các quan hệ từ (2.7) đến (2.23), sức kháng nén còn lại của cột được xác định bằng cách tổng hợp các cơ chế suy giảm này.

Sức kháng nén của BTCT có cốt đã bị gỉ sét được phân tích theo hai trạng thái làm việc:

- Trường hợp 1: Cốt thép dọc vẫn duy trì trạng thái ổn định trong quá trình chịu nén.

Khi ứng suất tới hạn của cốt thép dọc lớn hơn cường độ kéo chảy của cốt thép dọc thì cốt thép sẽ đạt giới hạn chảy mà không bị mất ổn định: $\sigma_{th} \geq f_{yc}$.

Với:

σ_{th} : Ứng suất tới hạn khi mất ổn định của cốt thép dọc, tính theo công thức (2.10);

f_{yc} : Cường độ chảy của cốt thép dọc sau khi bị ăn mòn, tính theo công thức (2.7).

Cốt thép dọc sẽ làm việc trong giai đoạn đàn hồi đến giới hạn chảy của chúng. Sức kháng nén của cột lúc này được tính toán theo công thức:

$$P_{cc} = [f'_c(A_{cc}) + A_{sc} \times f_{yc}] \quad (2.24)$$

- Trường hợp 2: Cốt thép dọc xảy ra hiện tượng mất ổn định trước khi đạt khả năng chịu lực giới hạn:

Khi ứng suất tới hạn của cốt thép dọc bé hơn cường độ chảy của cốt thép dọc thì cốt thép sẽ bị mất ổn định: $\sigma_{th} < f_{yc}$. Khi bị mất ổn định, cốt thép dọc bị biến dạng lớn và suy giảm cường độ còn khoảng 20% cường độ chảy của cốt thép trước khi mất ổn định theo nghiên cứu của Kashani và cộng sự [58].

Sức kháng nén của cột bê tông cốt thép có thể được tính toán theo công thức sau:

$$P_{cc} = [f'_c(A_{cc}) + A_{sc} \times (0,2 \times f_{yc})] \quad (2.25)$$

Trong đó:

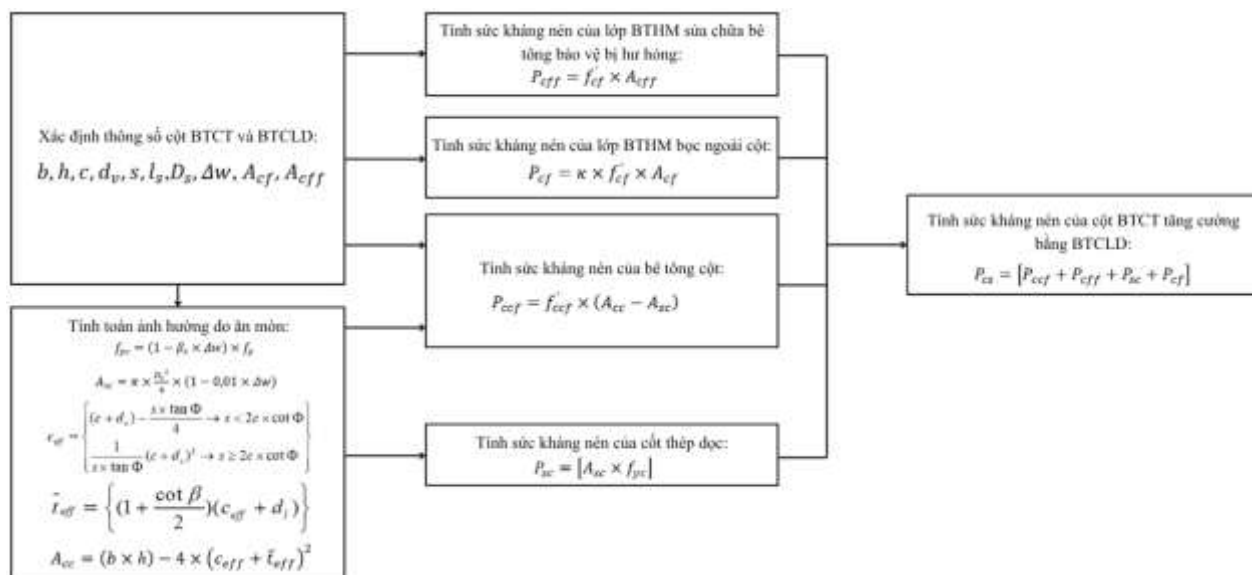
f'_c : Cường độ chịu nén của bê tông;

A_{sc} : Diện tích mặt cắt ngang của cốt thép dọc sau khi bị ăn mòn, tính theo công thức (2.8);

A_{cc} : Diện tích mặt cắt ngang của cột sau khi bị suy giảm do bong tách lớp bê tông bảo vệ, tính theo công thức từ (2.18) đến (2.23).

2.3.3 Mô hình lý thuyết tính toán sức kháng nén dọc trục của cột BTCT sau khi được tăng cường bằng bê tông cốt lưới dệt

Hình 2.16 thể hiện sơ đồ tính toán sức kháng nén cho cột BTCT có cốt đã bị gỉ được tăng cường bằng BTCLD.



Hình 2.16: Sơ đồ tính toán sức kháng nén cho cột BTCT có cốt đã bị ăn mòn được tăng cường bằng BTCLD

Cơ chế phá hoại của cột ngắn BTCT nén đúng tâm chủ yếu liên quan đến sự giới hạn sức kháng nén của các vật liệu cấu thành. Vì vậy, sức kháng nén của cột BTCT có cốt đã bị gỉ tăng cường BTCLD sợi các bon được tính toán dựa trên sự đóng góp của bốn thành phần chịu lực chính:

- Sức kháng nén của bê tông cốt (P_{ccf}) sau khi tăng cường bằng BTCLD: thành phần này được xác định trên cơ sở xét đến hiệu ứng kiểm chế biến dạng nở ngang của lớp lưới sợi dệt, từ đó làm tăng cường độ chịu nén của bê tông lõi theo hướng dẫn của ACI 549.4R-20 [34].
- Sức kháng nén của lớp BTHM (P_{cf}): thành phần này được xác định có xét đến sự suy giảm cường độ chịu nén do ảnh hưởng tương tác với lớp lưới sợi dệt (Mục 2.2.1).
- Sức kháng nén của cốt thép dọc của cột (P_{sc}): được tính toán có xét đến sự suy giảm cả về cường độ vật liệu và diện tích tiết diện do ảnh hưởng của ăn mòn (Mục 2.2.2).

Đồng thời, mô hình cũng xem xét ảnh hưởng của hiện tượng mất ổn định của cốt thép dọc do ăn mòn đến khả năng chịu lực của thép.

- Sức kháng nén của phần BTHM dùng để hoàn nguyên lớp bê tông bảo vệ bị bong tróc do quá trình ăn mòn cốt thép (P_{cff}) (Mục 2.2.2).

Trên cơ sở đó, sức kháng nén dọc trục của cột BTCT có cốt bị gỉ tăng cường BTCLD khi sợi các bon được xác định theo công thức sau:

$$P_{cs} = [P_{ccf} + P_{cff} + P_{sc} + P_{cf}] \quad (2.26)$$

Đối với các cột BTCT đúc mới, chưa bị ăn mòn các thành phần lực kháng nén của cột sau khi được tăng cường có thể được tính toán theo các mô hình lý thuyết trong các tiêu chuẩn hiện hành như tiêu chuẩn Zulassung Z-31.10-182 [75] của Đức, tiêu chuẩn CNR-DT- 215 [33] của Italia và ACI 549.4R-20 [34] của Mỹ.

Với các cột có cốt đã bị ăn mòn:

$$P_{sc} = [A_{sc} \times f_{yc}] \quad (2.27)$$

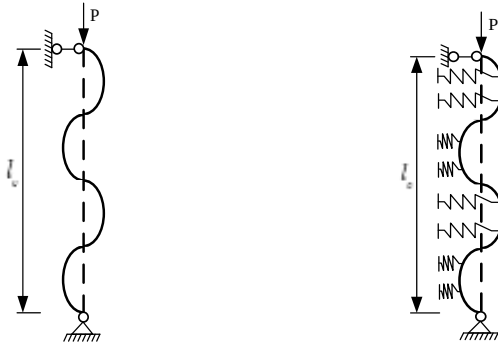
$$P_{cff} = f'_{cf} \times A_{cff} \quad (2.28)$$

$$P_{ccf} = f'_{ccf} \times (A_{cc} - A_{sc}) \quad (2.29)$$

$$P_{cf} = \kappa \times f'_{cf} \times A_{cf} \quad (2.30)$$

2.3.4 Mô hình lý thuyết tính toán khả năng tăng cường chống mất ổn định cho cốt thép dọc trong cột BTCT của bê tông cốt lưới dệt

Ngoài tác dụng nâng cao sức kháng nén của tiết diện, lớp BTCLD bao quanh cột còn có khả năng tăng sự ổn định của thép dọc. Cơ chế này hình thành do lực kiềm chế ngang từ lớp tăng cường tác dụng lên thanh thép, đặc biệt tại các khu vực có khoảng cách cốt đai lớn hoặc cốt đai bị hư hỏng. Mô hình tính toán được đề xuất dựa trên lý thuyết ổn định của thanh chịu nén trên nền đàn hồi. Trong đó, lớp BTCLD được quy đổi thành hệ các liên kết đàn hồi phân bố theo phương ngang, có tác dụng hạn chế chuyển vị ngang của thanh thép và làm tăng giá trị tải trọng lớn nhất để thép không bị mất ổn định (Hình 2.17).



(a) Cột thép không tăng cường

(b) Cột thép được tăng cường BTCLD

Hình 2.17: Mô hình tăng cường chống mất ổn định cho cột thép cột của BTCLD

Theo mô hình Winkler, lực nén tới hạn của thanh thép dọc sau khi được bao bọc bởi lớp BTCLD được xác định dựa trên độ cứng đàn hồi tương đương của hệ tăng cường như sau:

$$P_{th} = 2 \times \sqrt{k_f \times E_s \times I_s \times n_s} \quad (2.31)$$

Với: k_f : Hằng số đàn hồi của các lớp BTCLD;

n_s : số lượng cốt thép dọc của cột.

Ứng suất lớn nhất để không mất ổn định thép trong cột BTCT được tính toán như sau:

$$\sigma_{th} = \frac{P_{th}}{n_s \times A_s} = 2 \times \frac{\sqrt{k_f \times E_s \times I_s \times n_s}}{n_s \times A_s} \quad (2.32)$$

Hằng số đàn hồi của lớp BTCLD được tính theo công thức (2.33) hoặc (2.34) theo Giamundo và cộng sự [67] như sau:

Cột có mặt cắt tiết diện hình chữ nhật:

$$k_f = \frac{2 \times E_t \times t_f}{b} \quad (2.33)$$

Với: t_f là chiều dày của các lớp lưới sợi dệt;

Cột có mặt cắt tiết diện hình tròn:

$$k_f = \frac{4 \times \pi \times E_t \times t_f}{D} \quad (2.34)$$

2.4 XÂY DỰNG GIẢI PHÁP KẾT HỢP VỪA TĂNG CƯỜNG KHẢ NĂNG CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỤC ĐÚNG TÂM VỪA CHỐNG ĂN MÒN CỐT THÉP CHO CỘT BÊ TÔNG CỐT THÉP CÓ CỐT ĐÃ BỊ GI

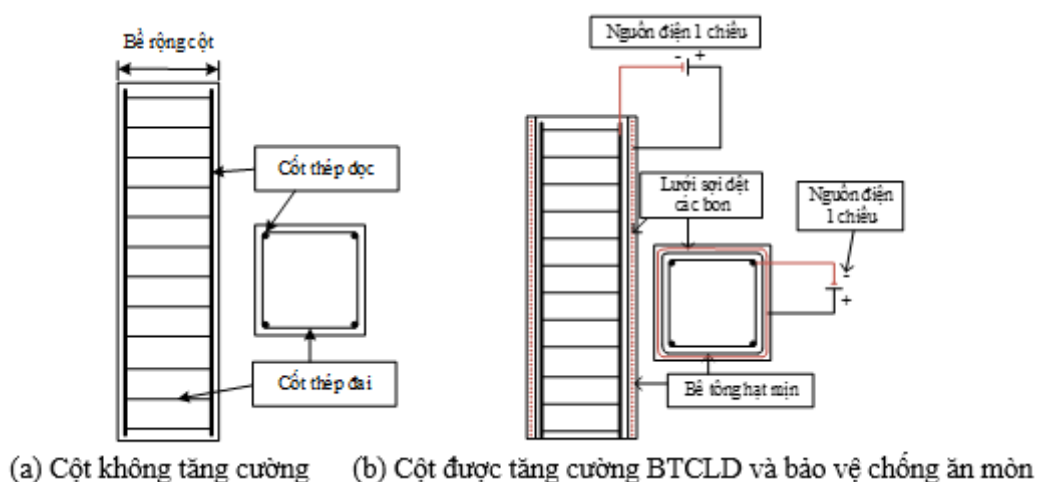
Trên cơ sở phương án tăng cường kháng nén cho cột BTCT bằng BTCLD và nguyên lý bảo vệ chống ăn mòn bằng phương pháp bảo vệ catốt sử dụng nguồn điện ngoài, một giải

pháp tích hợp được đề xuất nhằm kết hợp đồng thời hai chức năng: phục hồi khả năng chịu lực và hạn chế quá trình ăn mòn cốt thép. Trong giải pháp này, BTCLD sợi các bon không chỉ đóng vai trò là lớp vật liệu tăng cường bên ngoài mà còn được khai thác như một thành phần trong hệ thống chống ăn mòn cho kết cấu cột BTCT.

2.4.1 Cấu tạo chung của giải pháp

Mô hình sửa chữa tích hợp được đề xuất nhằm giải quyết đồng thời hai vấn đề chính của cột BTCT bị suy giảm: phục hồi khả năng chịu lực và kéo dài tuổi thọ thông qua việc kiểm soát ăn mòn cốt thép. Trong mô hình này, lưới sợi các bon trong lớp BTCLD được khai thác với hai chức năng song song: tham gia chịu lực như một thành phần tăng cường composite và hoạt động như điện cực anốt trợ trong hệ thống chống ăn mòn dùng nguồn điện ngoài.

Cấu tạo tổng thể của giải pháp kết hợp được trình bày trong Hình 2.18. Khác với các phương pháp sửa chữa truyền thống chỉ tập trung khôi phục khả năng chịu lực, phương án đề xuất tích hợp đồng thời cơ chế tăng cường kết cấu và cơ chế kiểm soát quá trình suy thoái vật liệu trong cùng một hệ thống.



Hình 2.18: Mô hình tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục kết hợp chống ăn mòn cốt thép cho cột BTCT sử dụng BTCLD sợi các bon

Đối với cột BTCT ban đầu (Hình 2.18a), khả năng chịu nén chủ yếu đến từ sự phối hợp giữa BT cột, cốt thép dọc và hệ cốt thép đai. Sau khi áp dụng giải pháp tích hợp (Hình 2.18b), toàn bộ vùng suy yếu của cột được bao phủ bởi lớp BTCLD sợi các bon. Hệ vật liệu mới này hoạt động như một lớp vỏ composite bên ngoài, trong đó BTHM có nhiệm vụ

phục hồi phần bê tông bị tổn thương, bổ sung diện tích chịu nén và tạo môi trường liên kết cho lưới sợi. Đồng thời, lưới sợi các bon phát huy khả năng chịu kéo, tạo hiệu ứng bó hông nhằm chống nở ngang BT lõi, qua đó nâng cao sức kháng nén và độ ổn định của cấu kiện.

Ngoài chức năng cơ học, lưới sợi các bon còn được sử dụng như một anốt trợ trong hệ thống bảo vệ chống ăn mòn sử dụng nguồn điện ngoài. Trong hệ thống này, cốt thép bên trong cột được nối vào cực âm của nguồn điện, trong khi lưới các bon đóng vai trò cực dương. Khi dòng điện bảo vệ được truyền qua môi trường bê tông, cốt thép được phân cực theo hướng catốt, làm đổi chiều phản ứng hòa tan kim loại và hạn chế sự phát triển tiếp theo của quá trình ăn mòn.

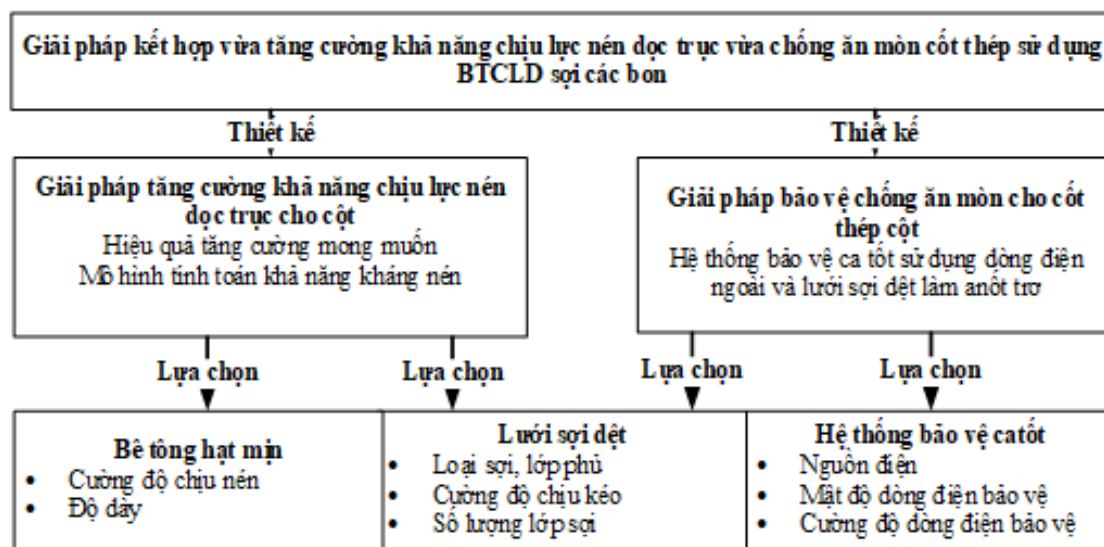
Theo Madhavi và cộng sự [68], khả năng truyền dòng điện trong bê tông chịu ảnh hưởng lớn bởi trạng thái ẩm của vật liệu. Khi bê tông có độ ẩm cao, điện trở suất giảm và điều kiện dẫn truyền dòng điện được cải thiện; ngược lại, trong trạng thái khô, điện trở suất tăng mạnh làm giảm hiệu quả của hệ thống bảo vệ. Do vậy, điều kiện môi trường khai thác và trạng thái ẩm của cấu kiện là các yếu tố quan trọng cần xem xét trong quá trình thiết kế hệ thống bảo vệ catốt.

Giải pháp tích hợp BTCLD sợi các bon và bảo vệ catốt có ưu điểm nổi bật là sử dụng một hệ vật liệu duy nhất để thực hiện đồng thời hai nhiệm vụ: tăng cường khả năng chịu lực và kiểm soát ăn mòn. Việc kết hợp này giúp giảm sự phụ thuộc vào các hệ thống sửa chữa riêng biệt, đồng thời thuận lợi hơn trong công tác thi công, kiểm tra và bảo trì do các thành phần chính của hệ thống đều được bố trí tại vùng bề mặt ngoài của cấu kiện. Đây là hướng tiếp cận phù hợp đối với các cấu kiện cột BTCT làm việc trong điều kiện môi trường biển, khu vực có độ ẩm cao hoặc các vùng có nhiều tác nhân gây ăn mòn.

Hình 2.19 trình bày trình tự thiết kế tổng thể của hệ thống BTCLD sợi các bon kết hợp bảo vệ catốt nhằm phục hồi và bảo vệ cột BTCT bị suy giảm. Quá trình thiết kế tính đến hai nhóm yêu cầu: yêu cầu về khả năng chịu lực sau tăng cường và yêu cầu duy trì trạng thái bảo vệ chống ăn mòn trong suốt thời gian khai thác.

Đối với nhiệm vụ tăng cường cơ học, các thông số thiết kế được xác định dựa trên sức kháng nén yêu cầu của cấu kiện sau sửa chữa. Việc lựa chọn cấu tạo lớp BTCLD được thực hiện thông qua mô hình tính toán sức kháng của cột khi bổ sung lớp vật liệu composite

BTCLD bên ngoài. Các tham số ảnh hưởng chính bao gồm cường độ và chiều dày lớp BTHM, đặc tính cơ học của lưới sợi các bon, số lượng lớp bố trí cũng như điều kiện làm việc của cấu kiện hiện hữu.



Hình 2.19: Phương pháp thiết kế cho giải pháp kết hợp

Đối với nhiệm vụ bảo vệ chống ăn mòn, hệ thống chống ăn mòn được thiết kế dựa trên đặc điểm môi trường và mức độ suy giảm hiện trạng của cốt thép. Trong phương án này, lưới các bon trong lớp BTCLD đồng thời đảm nhận vai trò truyền dòng bảo vệ đến cốt thép, giúp duy trì điện thế làm việc trong vùng hạn chế ăn mòn.

Việc thiết kế hệ thống điện hóa bao gồm lựa chọn loại lưới sợi các bon, xác định nguồn điện cung cấp và tính toán các thông số vận hành như mật độ dòng điện bảo vệ, cường độ điện yêu cầu và điện áp làm việc của hệ thống. Các thông số này cần được kiểm soát nhằm bảo đảm quá trình phân cực cốt thép ổn định và khả năng bảo vệ trong suốt thời gian sử dụng giải pháp.

2.4.2 Tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục cho cột bê tông cốt thép có cốt đã bị gỉ của bê tông cốt lưới dệt

Dựa trên các thông tin đánh giá hiện trạng của cấu kiện như kích thước hình học, mức độ suy giảm cốt thép, đặc tính vật liệu và điều kiện môi trường làm việc, sức kháng nén còn lại của cột BTCT sau ăn mòn được xác định theo các mô hình tính toán trình bày tại Mục 2.3.3. Kết quả này là cơ sở để đánh giá mức độ tổn thương của cấu kiện và lựa chọn mức độ tăng cường phù hợp.

Việc xác định chính xác khả năng chịu lực hiện hữu có ý nghĩa quan trọng trong thiết kế lớp BTCLD, bởi đây là thông số đầu vào để đánh giá mức độ cải thiện sức kháng nén sau sửa chữa.

a) Hiệu quả tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục

Hiệu quả tăng cường được xác định thông qua tỷ lệ gia tăng sức kháng nén của cột sau khi bổ sung lớp BTCLD. Từ yêu cầu về sức chịu lực mục tiêu, có thể xác định lần lượt các thông số thiết kế gồm diện tích lưới sợi cần thiết, số lớp lưới bố trí và chiều dày lớp BTHM bao phủ bên ngoài:

$$\eta(\%) = \frac{\Delta P}{P_{cc}} \times 100\% = \frac{P_{cs} - P_{cc}}{P_{cc}} \times 100\% \quad (2.35)$$

Trong đó:

$\eta(\%)$: hiệu quả tăng cường.

ΔP : Chênh lệch sức kháng nén dọc trục của cột trước và sau khi tăng cường

Hiệu quả tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục cho cột BTCT có cốt đã bị gi được xác định thông qua yêu cầu về việc gia tăng khả năng chịu lực nén dọc trục của cấu kiện ở giai đoạn khai thác tiếp theo sau khi tăng cường, sửa chữa cấu kiện. Hiệu quả tăng cường phụ thuộc trực tiếp vào các thông số kỹ thuật của vật liệu BTCLD, bao gồm:

- Loại sợi dệt (các bon, ba zan hoặc thủy tinh), trong đó sợi các bon có ưu thế vượt trội về cường độ kéo, mô đun đàn hồi và khả năng bền hóa học;
- Số lượng lớp lưới sợi dệt, ảnh hưởng trực tiếp đến độ cứng và khả năng tạo hiệu ứng kiểm chế nở ngang;
- Cường độ và mô đun đàn hồi của bê tông hạt mịn, quyết định mức độ bám dính và khả năng truyền lực giữa lớp BTCLD và lõi bê tông.

b) Tính toán diện tích lưới sợi dệt, số lượng lớp lưới sợi dệt và chiều dày lớp BTHM

- Xác định sức kháng nén dọc trục của cột sau khi tăng cường:

Từ công thức (2.35) ta có:

$$P_{cs} = P_{cc} \times \left(1 + \frac{\eta(\%)}{100}\right) \quad (2.36)$$

- Xác định diện tích và số lớp lưới sợi dệt theo điều kiện chịu lực dọc:

Từ công thức (2.36) có thể tính được thành phần sức kháng nén dọc trục của phần BT cột:

$$P_{ccf} = P_{cs} - [P_{cff} + P_{sc} + P_{cf}] \quad (2.37)$$

Từ các công thức (2.37) và (1.15) ứng suất kiểm chế nở ngang của lưới sợi dệt (f_l) yêu cầu có thể được xác định theo công thức sau:

$$f_l = \frac{f'_{ccf} - f'_c}{3,1 \times k_a} = \frac{\frac{P_{ccf}}{(A_{cc} - A_{sc})} - f'_c}{3,1 \times k_a} \quad (2.38)$$

Từ ứng suất kiểm chế nở ngang của lưới sợi dệt cần thiết tính được từ công thức (2.38), diện tích lưới sợi dệt yêu cầu để thỏa mãn yêu cầu về khả năng kháng nén của cột sau khi được tăng cường được tính theo công thức (2.39) hoặc (2.40). Từ đây có thể xác định được số lớp lưới sợi dệt dựa trên diện tích của 1 lớp lưới sợi.

Với cột có mặt cắt tiết diện hình chữ nhật:

$$(n_f \times A_f \times l_f) = \frac{f_l \times \sqrt{(b^2 + h^2)}}{(2 \times E_f \times \epsilon_{fe})} \quad (2.39)$$

Với cột có mặt cắt tiết diện hình tròn đường kính D :

$$(n_f \times A_f \times l_f) = \frac{f_l \times D}{(2 \times E_f \times \epsilon_{fe})} \quad (2.40)$$

- Xác định diện tích và số lớp lưới sợi dệt theo điều kiện đảm bảo cốt thép dọc không bị mất ổn định: Từ công thức (2.33) và (2.34), chiều dày lớp lưới dệt cần sử dụng có thể được xác định như sau:

$$k_{fs} = \frac{n_s \times (A_{sc} \times f_{sc})^2}{4 \times E_s \times I_{sc}} \quad (2.41)$$

Quan hệ giữa chiều dày lớp lưới sợi cần tăng cường và độ cứng cần thiết của lưới sợi dệt được thể hiện tại công thức (2.33) cho cột có mặt cắt tiết diện hình chữ nhật và công thức (2.34) cho cột có mặt cắt tiết diện hình tròn. Từ đây, số lượng lớp lưới sợi cần tăng cường có thể được xác định theo công thức:

$$n_f = \frac{t_f}{A_f} \quad (2.42)$$

Trong đó:

n_f : Số lớp lưới sợi dệt cần tăng cường;

t_f : Chiều dày của các lớp lưới sợi dệt cần tăng cường;

A_f : Diện tích 1 lớp lưới tính trên một đơn vị chiều dài.

- Xác định chiều dày của lớp BTHM:

Chiều dày của lớp BTHM được bọc xung quanh cột được tính toán như sau:

$$D_{cf} = (n_f + 1) \times d_{cf} \quad (2.43)$$

Trong đó:

D_{cf} : Chiều dày tổng của lớp BTHM;

n_f : Số lớp lưới sợi dệt;

d_{cf} : Độ dày mỗi lớp BTHM thường lấy từ 3 đến 5 mm theo ACI 549.4R-20 [33].

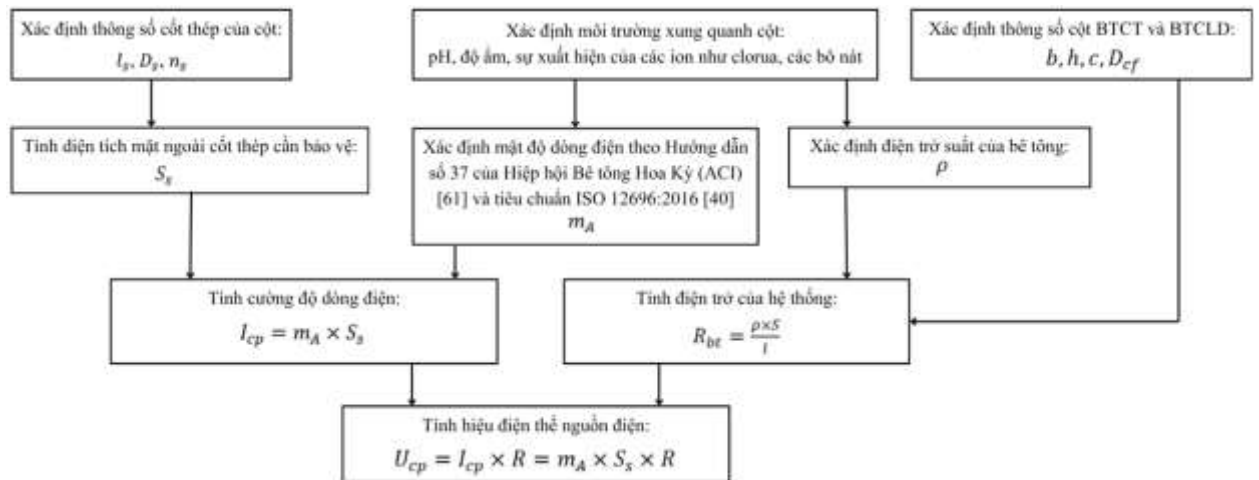
Khi tăng số lượng lớp lưới các bon, khả năng bó hông đối với bê tông lõi được cải thiện đồng thời phần BTHM bổ sung cũng tham gia chịu nén nhiều hơn. Tuy nhiên, số lớp tăng cường và chiều dày lớp BTCLD cần được lựa chọn phù hợp với điều kiện thực tế, tránh làm thay đổi quá lớn kích thước tiết diện hoặc ảnh hưởng đến không gian khai thác của công trình.

Vì vậy, các thông số thiết kế như diện tích lưới sợi, số lớp tăng cường và chiều dày lớp BTHM cần được xác định phù hợp nhằm tạo sự cân bằng giữa hiệu ứng bó hông của lưới sợi các bon đối với BT lõi và khả năng chịu nén của lớp BTCLD bổ sung. Trên cơ sở các hướng dẫn kỹ thuật hiện hành, một số yêu cầu thiết kế chính được xem xét như sau:

- Số lớp lưới sợi dệt sử dụng trong lớp BTCLD nên được giới hạn không quá 4 lớp theo khuyến nghị của TCCS 01:2022/ĐHGTVT [8].
- Chiều dày mỗi lớp BTHM nên nằm trong khoảng 3–5 mm nhằm bảo đảm khả năng liên kết với nền bê tông nền. Theo ACI 549.4R-20 [34], mỗi lớp lưới sợi

cần được bố trí xen giữa các lớp BTHM để duy trì điều kiện làm việc đồng nhất và hiệu quả của hệ vật liệu composite BTCLD.

2.4.3 Bảo vệ catốt để chống ăn mòn cốt thép



Hình 2.20: Sơ đồ tính toán hệ thống bảo vệ chống ăn mòn

Bên cạnh việc phục hồi khả năng chịu lực, việc duy trì trạng thái bảo vệ cốt thép là yêu cầu quan trọng nhằm bảo đảm độ bền lâu của cấu kiện sau sửa chữa. Do đó, hệ thống chống ăn mòn sử dụng lưới các bon làm anốt trợ được tích hợp trong lớp BTCLD. Hình 2.20 thể hiện sơ đồ tính toán hệ thống bảo vệ chống ăn mòn cho cột BTCT.

a) Xác định cường độ dòng điện bảo vệ

Dòng điện cung cấp cho hệ thống bảo vệ catốt được xác định dựa trên mật độ dòng điện yêu cầu và diện tích bề mặt cốt thép cần bảo vệ. Cường độ dòng điện bảo vệ thường được tính toán dựa trên mật độ dòng điện trong cốt thép cần được bảo vệ dựa trên công thức:

$$I_{cp} = m_A \times S_s \quad (2.44)$$

Trong đó:

I_{cp} : Cường độ dòng điện bảo vệ (A);

m_A : Mật độ dòng điện (A/m²);

S_s : Diện tích cốt thép cần bảo vệ (m²).

Dòng điện bảo vệ trong hệ thống được tính theo hai thông số sau:

- Mật độ dòng điện bảo vệ: được lựa chọn theo môi trường làm việc, đặc biệt là sự hiện diện của các tác nhân gây ăn mòn như ion Cl^- . Giá trị này có thể được xác định dựa trên hướng dẫn kỹ thuật như Báo cáo kỹ thuật số 37 của Hiệp hội bê tông [63] và tiêu chuẩn ISO 12696:2016 [42].
- Diện tích bề mặt cốt thép: đây là cơ sở để quy đổi từ mật độ dòng điện yêu cầu sang tổng cường độ dòng điện cấp cho toàn bộ hệ thống.

b) Lựa chọn nguồn điện

Nguồn điện trong hệ thống cần có thể điều chỉnh dòng điện hoặc điện áp nhằm duy trì chế độ làm việc ổn định. Các nguồn cấp thường được dùng gồm nguồn điện một chiều từ bộ chỉnh lưu, pin, ắc quy hoặc hệ thống năng lượng mặt trời.

Hiệu điện thế cần thiết của nguồn điện thường được tính toán theo công thức sau:

$$U_{cp} = I_{cp} \times R = m_A \times S_s \times R \quad (2.45)$$

Với:

U_{cp} : Hiệu điện thế của nguồn điện ngoài (V);

I_{cp} : Cường độ dòng điện bảo vệ (A);

m_A : Mật độ dòng điện (A/m²);

R : Điện trở hệ thống (Ohm);

S_s : Diện tích cốt thép cần bảo vệ (m²).

Tại nhiệt độ dưới 100°C, điện trở suất của thép là khoảng 1×10^{-7} Ohm.m [69] và điện trở suất của sợi các bon là khoảng 2×10^{-5} Ohm.m [70].

Do điện trở suất của cốt thép và lưới sợi các bon thấp hơn nhiều so với bê tông, nên khả năng dẫn điện của toàn bộ hệ thống bảo vệ catốt chủ yếu bị chi phối bởi điện trở của lớp bê tông trung gian giữa anốt và catốt. Các thành phần ảnh hưởng chính bao gồm lớp bê tông bảo vệ cốt thép và lớp BTHM trong hệ BTCLD. Điện trở của các lớp bê tông này được tính toán theo công thức:

$$R_{bt} = \frac{\rho \times S}{l} \quad (2.46)$$

Trong đó:

R_{bt} : Điện trở bê tông (Ohm);

S : Diện tích mặt cắt của lớp bê tông (m^2);

l : Khoảng cách 2 điểm cần đo điện trở (m);

ρ : Điện trở suất của bê tông (Ohm.m).

Bảng 2.3: Điện trở suất của bê tông

Môi Trường xung quanh	Điện trở suất của bê tông (Ohm.m)	
	Bê tông thường (Portland)	Bê tông sử dụng xỉ lò cao, tro bay và silica fume
Ngập nước, rất ẩm ướt và bắn nước thường xuyên (độ ẩm > 80%)	50-200	300-1000
Ngoài trời, lộ thiên (độ ẩm > 80%)	100-400	500-2000
Ngoài trời, được che chắn hoặc có lớp phủ, không có các bộ nát hóa (độ ẩm < 80%)	200-500	1000-4000
Ngoài trời, được che chắn hoặc có lớp phủ, có các bộ nát hóa (độ ẩm < 80%)	1000 trở lên	2000-6000 trở lên
Trong nhà (độ ẩm < 50%)	3000 trở lên	4000-10000 trở lên

Để hệ thống bảo vệ catốt làm việc hiệu quả thì điện trở của các lớp BT giữa cốt thép và lưới sợi các bon không được quá lớn (các lớp bê tông có độ ẩm cao). Còn nếu độ ẩm quá thấp (bê tông bị khô và điện trở quá cao) hệ thống bảo vệ catốt sẽ không hoạt động.

Quá trình điều chỉnh dòng điện trong hệ thống có thể được thực hiện thông qua hai phương pháp:

- Điều chỉnh theo cường độ dòng điện, đảm bảo duy trì dòng bảo vệ không bị thay đổi;
- Điều chỉnh theo hiệu điện thế nguồn điện, duy trì điện thế trên cốt thép ở mức tối ưu.

Trong thực tế, phương pháp điều khiển theo dòng điện thường được ưu tiên do khả năng duy trì mức bảo vệ ổn định trong suốt thời gian sử dụng.

c) Hệ thống kiểm tra và đánh giá hiệu quả bảo vệ

Hiệu quả của hệ thống bảo vệ catốt được đánh giá thông qua hai chỉ tiêu chính:

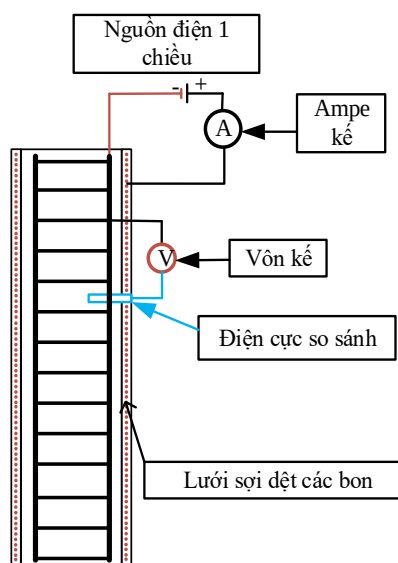
- Điện thế nửa pin tức thời của cốt thép;

- Độ sụt thế sau 24 giờ ngừng cấp dòng điện bảo vệ.

Theo ISO 12696:2016 [42], hệ thống được xem là đáp ứng yêu cầu khi thỏa mãn 1 trong 3 điều kiện sau: điện thế cốt thép được đưa về vùng điện hóa an toàn, độ giảm điện thế sau 24 giờ ngắt mạch bảo vệ ≥ 100 mV hoặc độ giảm điện thế sau hơn 24 giờ ngắt mạch bảo vệ ≥ 150 mV

Sơ đồ lắp đặt hệ thống kiểm tra, đánh giá hiệu quả bảo vệ chống ăn mòn cốt thép cho hệ thống bảo vệ ca tốt được đề xuất như Hình 2.21. Hệ thống kiểm tra này bao gồm:

- 1 Ampe kế được lắp đặt nối tiếp với nguồn điện của hệ thống để kiểm tra và điều chỉnh cường độ dòng điện bảo vệ;
- 1 Vôn kế được lắp đặt giữa cốt thép của cột và một điện cực so sánh để kiểm tra điện thế của cốt thép;
- 1 điện cực so sánh làm điện cực tham chiếu để đo điện thế của cốt thép, có thể sử dụng điện cực Bạc – Clorua hoặc điện cực Đồng – Sunfat.



Hình 2.21: Sơ đồ lắp đặt hệ thống kiểm tra và đánh giá hiệu quả bảo vệ chống ăn mòn cốt thép

Việc tích hợp BTCLD sợi các bon với hệ thống bảo vệ chống ăn mòn sử dụng nguồn điện ngoài tạo ra một giải pháp sửa chữa đa chức năng, trong đó lớp vật liệu tăng cường vừa gia tăng sức kháng, vừa tham gia kiểm soát quá trình ăn mòn. Sự kết hợp này mở ra khả năng ứng dụng hiệu quả cho các cột BTCT bị suy giảm trong môi trường nước biển, có độ ẩm cao và các khu vực chịu ảnh hưởng lâu dài của các tác nhân gây hại.

2.5 KẾT LUẬN CHƯƠNG 2

Dựa trên sự kết hợp giữa cơ chế tăng cường cơ học của BTCLD và phương pháp bảo vệ chống ăn mòn sử dụng nguồn điện ngoài, luận án đề xuất một hệ thống sửa chữa tích hợp dành cho cột BTCT bị suy giảm do ăn mòn. Giải pháp này hướng đến việc xử lý đồng thời hai vấn đề tồn tại gồm: khôi phục khả năng sức kháng nén và hạn chế quá trình oxi hóa thép trong giai đoạn khai thác sau sửa chữa.

Trong hệ thống đề xuất, lớp BTCLD sợi các bon được bố trí bao quanh bề mặt ngoài của cột và đảm nhận hai chức năng bổ trợ lẫn nhau. Về mặt cơ học, sự kết hợp giữa BTHM và lưới sợi các bon tạo thành một lớp vật liệu composite có khả năng bổ sung phần tiết diện bị suy giảm, tăng khả năng chịu nén của cấu kiện và tạo hiệu ứng chống biến dạng ngang cho BT lõi. Về mặt điện hóa, lưới sợi các bon nhờ đặc tính dẫn điện và độ ổn định cao được sử dụng như một anốt trợ trong hệ thống chống ăn mòn bằng nguồn điện ngoài, qua đó duy trì trạng thái thu động ăn mòn cho cốt thép.

Bên cạnh việc xây dựng cấu tạo của hệ thống tích hợp, luận án đã phát triển các mô hình tính toán nhằm đánh giá sức kháng nén còn lại của cột BTCT có cốt bị gỉ và hiệu quả cải thiện khi áp dụng lớp BTCLD. Các mô hình này tính đến những bất lợi do sự oxi hóa thép gây ra, bao gồm sự suy giảm diện tích và đặc tính cơ học của cốt thép, sự phá hủy lớp BT bảo vệ cũng như nguy cơ cốt thép dọc bị mất ổn định khi chịu nén. Trên cơ sở đó, phương pháp xác định các thông số thiết kế chính của lớp tăng cường như diện tích lưới sợi, số lượng lớp lưới và chiều dày lớp BTHM được đề xuất cho cấu kiện cần sửa chữa.

Đối với chức năng chống ăn mòn, các công thức tính toán xác định thông số vận hành của hệ thống cũng được thiết lập trên cơ sở đặc điểm hình học của cột, diện tích cốt thép cần bảo vệ và điều kiện môi trường khai thác. Các thông số quan trọng như mật độ dòng điện bảo vệ, tổng dòng điện cung cấp và điện áp làm việc của hệ thống được xem xét nhằm bảo đảm quá trình phân cực cốt thép diễn ra ổn định, đồng thời duy trì sự ổn định của hệ thống trong thời gian dài.

Trong phạm vi nghiên cứu của luận án, giải pháp được áp dụng đối với nhóm cột BTCT ngắn chịu tải trọng nén đúng tâm, có kích thước tiết diện nhỏ và chịu tác động từ sự suy giảm do cốt thép bị gỉ sét. Các kết quả thu được không chỉ cung cấp cơ sở khoa học cho

việc đánh giá hiệu quả của hệ thống BTCLD sợi các bon kết hợp bảo vệ catốt mà còn là tiền đề để nghiên cứu mở rộng cho các dạng cấu kiện BTCT khác trong điều kiện khai thác thực tế.

Ngoài ra, các tiêu chí đánh giá mức độ hiệu quả của hệ thống bảo vệ catốt cũng được tổng hợp và phân tích nhằm làm rõ khả năng kiểm soát quá trình gỉ sét của cốt thép trong các môi trường có các ions gây ăn mòn. Đặc biệt, đối với các công trình nằm trong khu vực ven biển hoặc môi trường có độ ẩm lớn và sự hiện diện của ion Cl^- , giải pháp tích hợp BTCLD sợi các bon kết hợp chống ăn mòn bằng nguồn điện ngoài cho thấy tiềm năng trong việc nâng cao đồng thời sức kháng cơ học và độ bền của kết cấu BTCT.

Kết quả nghiên cứu của Chương 2 được sử dụng trong đề xuất giải pháp, phương án thiết kế cũng như xây dựng mô hình tính toán sức kháng nén cho cột BTCT tăng cường bằng BTCLD sợi các bon có trong các công trình khoa học của luận án như sau:

- Đinh Hữu Tài, Vũ Văn Hiệp, Đặng Việt Tuấn (2026), *Nghiên cứu mô hình lý thuyết tính toán khả năng chịu lực nén dọc trục cho cột bê tông cốt thép có cốt đã bị ăn mòn được gia cường bằng bê tông cốt lưới dệt sợi các bon*, Tạp chí Người xây dựng, số 408 tháng 4.
- Đinh Hữu Tài, Ngô Đăng Quang, Nguyễn Huy Cường (2024), *Cột bê tông cốt thép sử dụng bê tông cốt lưới dệt sợi các bon được bảo vệ chống ăn mòn*, Cục sở hữu trí tuệ - Được công nhận quyền bảo hộ -Tác giả chính (Người nộp đơn).
- Hồ Thị Hoài, Đinh Hữu Tài (2024), *Nghiên cứu mô phỏng khả năng chịu lực của cột bê tông cốt thép bị ăn mòn được gia cường bằng bê tông cốt lưới dệt*, tạp chí Cầu đường Việt Nam, số (7/2024) – Tác giả tham gia.
- Huu Tai Dinh, Dang Quang Ngo, Hoai Ho and Huy Cuong Nguyen (2023), *Experimental and numerical evaluation of axial compression strengthening for corroded reinforced concrete columns by carbon textile reinforced concrete*, The 4th International Conference on Transportation Infrastructure and Sustainable Development (TISDIC 2023) - Tác giả chính, Tác giả báo cáo tại hội thảo khoa học quốc tế.

CHƯƠNG 3: NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM VỀ ỨNG XỬ CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỰC VÀ HIỆU QUẢ CHỐNG ĂN MÒN CỐT THÉP CHO CỘT BÊ TÔNG CỐT THÉP CÓ CỐT ĐÃ BỊ GỈ BẰNG BÊ TÔNG CỐT LƯỚI DỆT SỢI CÁC BON

3.1 MỤC ĐÍCH NGHIÊN CỨU

Mục tiêu của Chương 3 là, trên cơ sở các kết quả thu được từ các nghiên cứu thực nghiệm, tiến hành đánh giá hiệu quả sử dụng của các mô hình tính toán đã đề xuất tại Chương 2. Các nội dung thí nghiệm được thực hiện trong Chương 3 được tổng hợp và trình bày tại *Bảng 3.1*.

Bảng 3.1: Nội dung chính của các thí nghiệm đã được thực hiện trong chương 3

ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ TĂNG CƯỜNG KHẢ NĂNG CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỰC CHO CỘT BTCT có cốt đã bị gỉ BẰNG BTCLD SỢI CÁC BON - Thí nghiệm nén dọc trục đúng tâm 15 cột BTCT: 3 cột đối chứng không bị ăn mòn và không được tăng cường. 6 cột dự kiến bị ăn mòn 10% với 2 cột không được tăng cường, 2 cột được tăng cường 1 lớp BTCLD sợi các bon, 2 cột được tăng cường 2 lớp BTCLD sợi các bon. 6 cột dự kiến bị ăn mòn 20% với 2 cột không được tăng cường, 2 cột được tăng cường 1 lớp BTCLD sợi các bon, 2 cột được tăng cường 2 lớp BTCLD sợi các bon.	ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ CỦA GIẢI PHÁP KẾT HỢP VỮA TĂNG CƯỜNG KHẢ NĂNG CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỰC VỮA BẢO VỆ CHỐNG ĂN MÒN CỐT THÉP CHO CỘT BTCT BẰNG BTCLD SỢI CÁC BON - Đo điện thế nửa pin và độ sụt thế sau 24h của cốt thép sau khi ngắt mạch bảo vệ cho các cột BTCT được bảo vệ chống ăn mòn cốt thép. - Thí nghiệm nén dọc trục đúng tâm trên 8 cột BTCT: 2 cột không bị ăn mòn, không được tăng cường chịu lực và không được bảo vệ chống ăn mòn cốt thép. 2 cột bị ăn mòn, không được tăng cường chịu lực và không được bảo vệ chống ăn mòn cốt thép. 2 cột bị ăn mòn, được tăng cường 1 lớp BTCLD sợi các bon và không được bảo vệ chống ăn mòn cốt thép. 2 cột bị ăn mòn, được tăng cường 1 lớp BTCLD sợi các bon và được bảo vệ chống ăn mòn cốt thép.
ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG LÀM A NỐT TRƯ TRONG HỆ THỐNG BẢO VỆ CATOT CỦA LƯỚI SỢI DỆT CÁC BON VÀ BTCLD SỢI CÁC BON - Thí nghiệm đo phân cực lưới sợi dệt các bon. - Thí nghiệm làm anốt trơ trong hệ thống bảo vệ ca tốt của lưới sợi dệt các bon. - Thí nghiệm bảo vệ ca tốt cho cột BTCT sử dụng BTCLD sợi các bon.	
KHẢO SÁT MỐI QUAN HỆ GIỮA ĐIỆN THẾ NỬA PIN VÀ MỨC ĐỘ MẤT MẮT KHỐI LƯỢNG DO ĂN MÒN CỐT THÉP Thí nghiệm đo điện thế nửa pin và mức độ mất mát khối lượng do ăn mòn của cốt thép trong bê tông tại các mức độ ăn mòn khác nhau.	

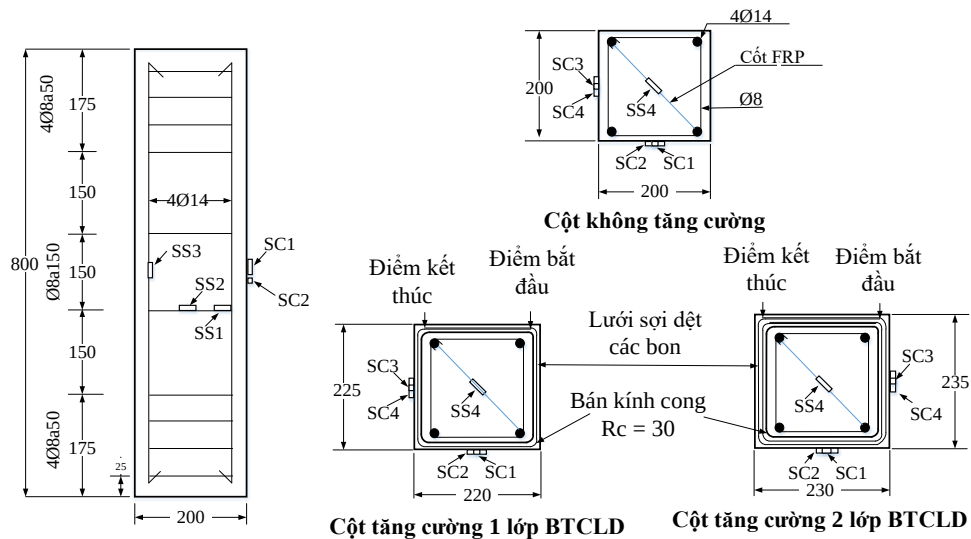
Trong luận án này, bốn nhóm thí nghiệm đã được thiết kế và triển khai. Các thí nghiệm được thực hiện tại Phòng thí nghiệm Vật liệu và Kết cấu cùng Phòng thí nghiệm Hóa học, Trường Đại học Giao thông Vận tải như sau:

- Nhóm thí nghiệm thứ nhất tập trung khảo sát khả năng nâng cao sức chịu nén dọc trục của cột BTCT khi được tăng cường bằng BTCLD sợi các bon.

- Nhóm thí nghiệm thứ hai được thực hiện để đánh giá khả năng làm việc của lưới sợi các bon với vai trò anốt trợ trong hệ thống bảo vệ catốt.
- Nhóm thí nghiệm thứ ba nhằm xác định mối tương quan giữa giá trị điện thế nửa pin và mức độ suy giảm khối lượng cốt thép do quá trình ăn mòn trong kết cấu BTCT.
- Nhóm thí nghiệm cuối cùng được xây dựng để kiểm chứng hiệu quả tích hợp của giải pháp BTCLD sợi các bon trong việc vừa cải thiện khả năng chịu nén dọc trục của cột BTCT, vừa hạn chế quá trình ăn mòn cốt thép thông qua cơ chế bảo vệ điện hóa.

3.2 NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ TĂNG CƯỜNG KHẢ NĂNG CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỤC CHO CỘT BTCT CÓ CỐT ĐÃ BỊ GỈ BẰNG BTCLD SỢI CÁC BON

3.2.1 Xây dựng mô hình thí nghiệm



Hình 3.1: Cấu tạo các cột BTCT thí nghiệm (đơn vị mm)

15 mẫu cột BTCT có danh mục được liệt kê tại Bảng 3.2, với kích thước hình học $200 \times 200 \times 800$ mm đã được chế tạo và thí nghiệm nén dọc trục đúng tâm. Kích thước của các mẫu được quyết định để đảm bảo thích hợp với khả năng làm việc của thiết bị nén SANS có sức nén 3000 kN, đồng thời đại diện cho nhóm cột ngắn có kích thước nhỏ thường gặp trong các công trình giao thông và cầu cảng. Các mẫu cột BTCT này đều có 04 thanh thép

dọc Ø14 chịu nén, cùng cốt đai sử dụng loại đường kính Ø8 mm. Cốt đai được xếp dày tại hai đầu và thưa hơn ở khu vực giữa thân cột nhằm định hướng vùng phá hoại xảy ra chủ yếu tại vùng giữa chiều cao cột. Trên bề mặt ngoài của mẫu, bốn lá điện trở strain gauge ký hiệu SC1, SC2, SC3 và SC4 được dán trên hai mặt đối diện theo cả phương ngang và phương dọc, phục vụ đo biến dạng bê tông tại khu vực giữa cột. Hai cảm biến SS1 và SS2 được gắn lên cốt đai để xác định biến dạng tại vị trí góc và vị trí giữa của đai thép. Lá điện trở SS3 được gắn dọc theo chiều dài thanh thép dọc nhằm đo biến dạng dọc của cốt thép tại vùng giữa cột. Trong khi đó, SS4 được gắn trên thanh cốt FRP để ghi nhận biến dạng của lõi bê tông, với giả thiết liên kết giữa FRP và bê tông lõi là liên kết dính bám hoàn toàn. Sơ đồ cấu tạo của các mẫu thí nghiệm được trình bày trong *Hình 3.1*.

Bảng 3.2: Danh sách các mẫu thí nghiệm

STT	Cấp độ ăn mòn dự kiến	Số lớp BTCLD tăng cường	Tên mẫu
1	0%	0	C0-N1
2			C0-N2
3			C0-N3
4	10%	0	C1-L0-N1
5			C1-L0-N2
6		1	C1-L1-N1
7			C1-L1-N2
8		2	C1-L2-N1
9			C1-L2-N2
10	20%	0	C2-L0-N1
11			C2-L0-N2
12		1	C2-L1-N1
13			C2-L1-N2
14		2	C2-L2-N1
15			C2-L2-N2

Các mẫu được đặt tên dạng Cx-Ly-Nz theo quy ước sau:

- C: column (cột);
- L: layer (số lớp BTCLD);
- N: number (số thứ tự trong nhóm);
- x là nhóm mẫu, gồm các giá trị: 0 – không bị ăn mòn, 1 – cấp ăn mòn 1 (10% khối lượng) và 2 – cấp ăn mòn 2 (20% khối lượng);

- y: số lớp BTCLD : 0 – không được tăng cường, 1 – có 1 lớp BTCLD, 2 – có 2 lớp BTCLD;
- z: số thứ tự trong nhóm: 1 – mẫu số 1 trong nhóm, 2 – mẫu số 2 trong nhóm, 3 – mẫu số 3 trong nhóm.

Các mẫu thí nghiệm được phân chia thành năm nhóm chính, cụ thể như sau:

- Nhóm các mẫu cột đối chứng, gồm 3 mẫu C0 – N1, C0 - N2 và C0 - N3;
- Nhóm mẫu cột có mức độ ăn mòn 10% và không được tăng cường bằng BTCLD, bao gồm 02 mẫu: C1-L0-N1 và C1-L0-N2;
- Nhóm mẫu cột có mức độ ăn mòn 10% và được tăng cường bằng BTCLD, trong đó gồm 02 mẫu tăng cường 01 lớp BTCLD (C1-L1-N1 và C1-L1-N2) và 02 mẫu tăng cường 02 lớp BTCLD (C1-L2-N1 và C1-L2-N2);
- Nhóm mẫu cột có mức độ ăn mòn 20% và không được tăng cường bằng BTCLD, gồm 02 mẫu: C2-L0-N1 và C2-L0-N2;
- Nhóm mẫu cột có mức độ ăn mòn 20% và được tăng cường bằng BTCLD, bao gồm 02 mẫu tăng cường 01 lớp BTCLD (C2-L1-N1 và C2-L1-N2) và 02 mẫu tăng cường 02 lớp BTCLD (C2-L2-N1 và C2-L2-N2).

3.2.2 Tính chất vật liệu

a. Bê tông thường và BTHM

Bảng 3.3: Thành phần cấp phối BTHM

Vật liệu	Ký hiệu	Nguồn gốc	Loại	Tỷ lệ (kg/m ³)
Xi măng	X	BUT SON	PC40 (OPC)	600
			Rn28 = 43 MPa	
			Ru28 = 7 MPa	
Tro bay	TB	Pha Lai	F	110
Cát thô	CT		0,3:0,6 mm	950
Cát mịn	CM		0,1:0,3 mm	610
Nước	N	Tap		230
Phụ gia	PGSD	SIKA	Plasticizer	2,4

Bê tông chế tạo cột có cường độ chịu nén trung bình đạt 22,2 Mpa tại 28 ngày tuổi được cung cấp từ các trạm trộn bê tông thương phẩm. Giá trị này được xác định trên mẫu thí nghiệm hình lập phương ($150 \times 150 \times 150$ mm) theo quy định của TCVN 3105:2022 [9]. Vật liệu BTHM phối trộn từ xi măng Poóc lăng PC40, cốt liệu mịn có kích thước nhỏ ($< 0,6$ mm), nước, phụ gia và một số thành phần khác. Cấp phối của hỗn hợp BTHM được lựa chọn để phù hợp với cường độ yêu cầu và khả năng thi công, các thành phần cụ thể được trình bày trong *Bảng 3.3*. Các thông tin cơ học của BTHM được xác định trên mẫu lăng trụ ($40 \times 40 \times 160$ mm) theo TCVN 6016:2011 [10]. Sau khi đúc, toàn bộ mẫu được bảo dưỡng trong điều kiện tiêu chuẩn và chỉ tiến hành thí nghiệm khi đạt tuổi 28 ngày nhằm bảo đảm tính đồng nhất của kết quả đánh giá.



Hình 3.2: Chế tạo mẫu cột BTCT

Sau khi đúc mẫu 28 ngày, BTHM có cường độ chịu nén trung bình 38,62 MPa. Các thông số cơ học đặc trưng của BT và BTHM được tổng hợp tại *Bảng 3.4*.

Bảng 3.4: Tính chất cơ học của vật liệu bê tông

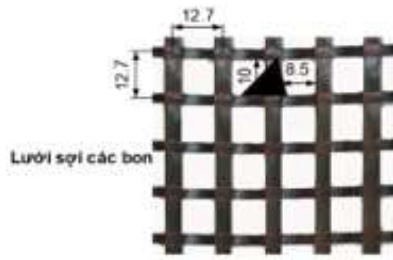
STT	Thông số	Kí hiệu	Bê tông cột	Bê tông hạt mịn	Đơn vị
1	Cường độ chịu nén	f'_c	22,2	38,62	MPa
2	Mô đun đàn hồi	E_c	25,7	17	GPa

b. Cốt thép cột và lưới sợi các bon

Giới hạn chảy trung bình của cốt thép dọc đường kính Ø14 là 429,4 MPa và cốt đai đường kính Ø8 tương ứng là 363,1 MPa. Giá trị mô đun đàn hồi của các loại thép kể trên được xác định bằng 210 GPa và được sử dụng trong các phân tích thực nghiệm cũng như mô phỏng số.



(a) Cốt thép cột



(b) Lưới sợi dệt các bon SITGrid017

Hình 3.3: Cốt thép dọc, cốt thép đai của cột và lưới sợi dệt các bon

Lưới sợi được sử dụng là loại lưới các bon có mã số SITgrid017. Lưới sợi này được sản xuất bởi Công ty V. FRAAS (Đức). Độ mịn của các bó sợi thành phần là 3200 tex. Lưới sợi có hai phương ($0^\circ/90^\circ$), với bước lưới 12,7 mm theo cả hai phương (Hình 3.3b). Mỗi bó gồm khoảng 48.000 sợi đơn, tạo nên diện tích tiết diện ngang $1,808 \text{ mm}^2$, tương ứng khoảng 142 mm^2 trên mỗi mét bề rộng lưới. Khối lượng riêng của lưới đạt 578 g/m^2 . Thông tin cơ học của cốt thép và lưới sợi các bon được trình bày chi tiết trong Bảng 3.5.

Bảng 3.5: Thông số vật liệu cốt thép và lưới sợi dệt các bon

STT	Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Cốt thép đai	Cốt thép dọc	Lưới sợi dệt các bon
1	Đường kính	D	mm	8	14	
2	Diện tích	A_f	m^2/m			0,00014
3	Khoảng cách	d_v	mm	150		
4	Cường độ chịu kéo	f_s, f_f	Mpa	363,1	429,4	2895
5	Mô đun đàn hồi	E	Gpa	210	210	185

3.2.3 Quá trình thí nghiệm

Ở giai đoạn đầu, tất cả các mẫu cột được chế tạo và đem đi ngâm bảo dưỡng đến tuổi 28 ngày trước khi thực hiện các bước nghiên cứu tiếp theo. Giai đoạn thứ hai gia tốc tạo trạng thái ăn mòn nhân tạo cho cốt thép bằng điện hóa. Trong số đó, sáu mẫu được xử lý để đạt mức suy giảm khối lượng cốt thép dọc khoảng 10% sau 60 ngày, trong khi sáu mẫu còn lại được tiếp tục gia tốc ăn mòn trong 90 ngày nhằm đạt mức tổn hao khối lượng khoảng 20%. Ba mẫu đối chứng còn lại bảo quản trong phòng thí nghiệm để không bị gia tốc ăn mòn.

Các mẫu thuộc nhóm tăng cường được chuyển sang giai đoạn thứ ba. BTCLD được thi công bao bọc toàn bộ bề mặt xung quanh thân cột theo cả chu vi và chiều dài cấu kiện.

Trong chương trình thí nghiệm, bốn mẫu được tăng cường bằng một lớp BTCLD, trong khi bốn mẫu khác được bọc hai lớp.

Ở giai đoạn cuối, toàn bộ 15 mẫu cột được thí nghiệm nén đúng tâm để xác định khả năng chịu lực và đặc trưng biến dạng sau khi chịu tác động của ăn mòn và sau khi tăng cường. Cuối cùng, cần xác định mức độ ăn mòn thực tế của các loại cốt thép thông qua suy giảm khối lượng, từ đó đối chiếu với giá trị mục tiêu cũng như kết quả phân tích trong nghiên cứu.

a. Giai đoạn một: Chế tạo mẫu thí nghiệm

Trong quá trình chế tạo mẫu ở giai đoạn đầu, các thanh cốt thép được gia công, lắp ráp thành khung cốt thép hoàn chỉnh trước khi đổ bê tông. Đồng thời, các loại cốt thép được gắn cảm biến để đo biến dạng (strain gauge) (Hình 3.4) tại các vị trí giữa thanh và góc. Để theo dõi biến dạng của bê tông lõi, một thanh FRP có dạng chữ U được lắp đặt tại vùng giữa chiều cao cột và giả thiết tồn tại sự liên kết dính bám hoàn toàn giữa FRP với bê tông. Bên cạnh đó, phục vụ quá trình gia tốc ăn mòn điện hóa, hệ thống dây dẫn được kết nối trực tiếp với các thanh cốt thép tại khu vực giữa cột. Cách bố trí này để phân bố dòng điện một cách tương đối đồng đều trên thép.



Hình 3.4: Chế tạo lồng cốt thép, gắn dây điện và lá điện trở đo biến dạng

Sau khi hoàn thành công tác chế tạo, toàn bộ 15 mẫu cột BTCT được đúc trong cùng một đợt và đem đi bảo dưỡng đến khi đạt tuổi 28 ngày trước khi chuyển sang các bước thí nghiệm tiếp theo (Hình 3.5).



Hình 3.5: Bảo dưỡng các mẫu cột bê tông cốt thép

b. Giai đoạn hai: Gia tốc ăn mòn

Quá trình ăn mòn được đẩy nhanh ngay sau khi các mẫu đạt đủ tuổi bảo dưỡng. Các cột được ngâm trong các bình lớn có NaCl 3,5%, với mực dung dịch duy trì ổn định ở khoảng hai phần ba chiều cao cột (khoảng 550 mm). Hệ cốt thép bên trong mẫu được cung cấp điện tử từ cực dương của nguồn điện một chiều, trong khi cực âm được liên kết với điện cực đồng bố trí trong cùng môi trường điện phân (xem Mục 1.2.2a). Sáu mẫu gồm C1-L0-N1, C1-L0-N2, C1-L1-N1, C1-L1-N2, C1-L2-N1 và C1-L2-N2 được gia tốc để đạt mức suy giảm khối lượng cốt thép dọc khoảng 10% (trong 60 ngày). Sáu mẫu còn lại (C2-L0-N1, C2-L0-N2, C2-L1-N1, C2-L1-N2, C2-L2-N1 và C2-L2-N2) tiếp tục được duy trì trong môi trường điện phân trong 90 ngày để hướng tới mức suy giảm khối lượng khoảng 20%.

Điện áp của hệ thống được kiểm tra và ghi nhận hằng ngày nhằm bảo đảm điều kiện làm việc ổn định. Định kỳ mỗi tuần, quan sát các mẫu để xác định sự phát triển của các vết nứt và bề rộng vết nứt. Để hạn chế hiện tượng ăn mòn cục bộ và duy trì sự phân bố tương đối đồng đều của dòng điện trong dung dịch, bể ngâm được trang bị thiết bị sục khí liên tục. Bên cạnh đó, dung dịch NaCl được thay mới sau mỗi hai tuần nhằm duy trì nồng độ ion ổn định. Trước khi bắt đầu, phần chân cột được bọc màng PE kết hợp với băng keo chống thấm nhằm hạn chế sự xâm nhập của dung dịch điện phân vào khu vực không mong muốn (Hình 3.6). Cường độ dòng điện áp dụng trong chương trình gia tốc ăn mòn được xác định là 0,42 A theo các công thức (1.25) và (1.26).



Hình 3.6: Thí nghiệm gia tốc ăn mòn

Sau khoảng hai tháng, các vết nứt dọc trùng với vị trí của cốt thép dọc bắt đầu xuất hiện. Đồng thời, một số vết nứt theo phương ngang cũng được quan sát tại khu vực bố trí cốt đai.



Hình 3.7: Cốt thép cột bị ăn mòn khoảng 8% sau thí nghiệm gia tốc ăn mòn



Hình 3.8: Cốt thép cột bị ăn mòn khoảng 22% sau thí nghiệm gia tốc ăn mòn

Sau khi nén mẫu thí nghiệm ở giai đoạn cuối, cốt thép được tách khỏi bê tông, làm sạch sản phẩm ăn mòn và cân lại để xác định mức độ suy giảm khối lượng thực tế. Kết quả cho thấy hai nhóm mẫu đạt tỷ lệ tổn hao khối lượng trung bình khoảng 8% và 22%, tương ứng với hai cấp độ ăn mòn đã thiết kế. Mặc dù có sai lệch nhất định so với giá trị dự kiến theo định luật Faraday (10% và 20%), mức chênh lệch này tương đối nhỏ và vẫn nằm trong giới hạn chấp nhận được.

c. Giai đoạn ba: Tăng cường cột bằng BTCLD sợi các bon

Các mẫu cột thuộc hai mức độ ăn mòn thực tế khoảng 8% và 22% được bố trí thành ba nhóm để thực hiện chương trình tăng cường. Đối với mỗi mức độ ăn mòn, hai mẫu được giữ nguyên hiện trạng nhằm làm cơ sở đối chứng, hai mẫu được bọc một lớp BTCLD, và hai lớp BTCLD được tăng cường trên 2 mẫu còn lại. Toàn bộ quá trình thi công lớp BTCLD được thực hiện theo các khuyến nghị của ACI 549.4R-20 [34] và TCCS 01:2022/ĐHGTVT [8]. Trước khi thi công, bề mặt bê tông của cột được mài tạo nhám kết hợp với việc tạo các rãnh dính bám dạng hình quả trám trên thân cột. Ngoài ra, toàn bộ bốn cạnh của tiết diện được bo tròn với trước khi tiến hành bọc BTCLD. Bán kính bo tròn là $R_c = 30 \text{ mm}$ (Hình 3.9).



Hình 3.9: Các bước tăng cường cho cột bằng BTCLD

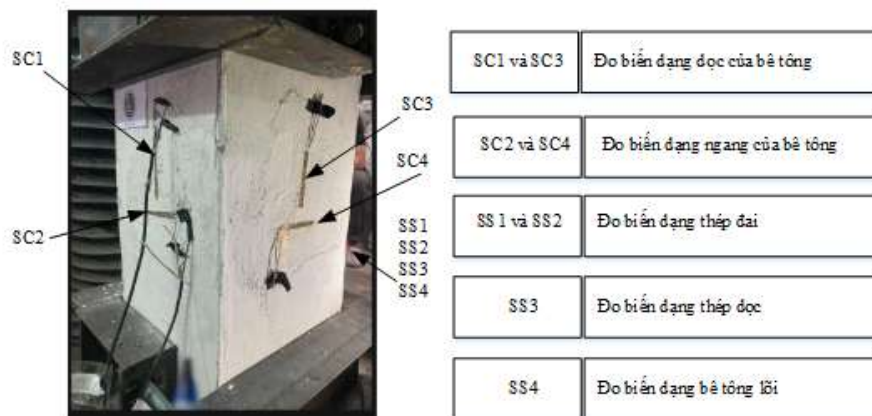
Phương pháp trát thủ công được sử dụng để tăng cường các mẫu cột được thực hiện. Chiều dày của mỗi lớp trát khoảng 5 mm. Lớp BTHM đầu tiên được phủ đều lên toàn bộ bề mặt cấu kiện. Tiếp theo, lưới sợi các bon được đặt và quấn liên tục bao quanh bốn mặt của tiết diện cột. Sau khi cố định lớp lưới, một lớp BTHM tiếp theo được thi công để bao bọc hoàn toàn vật liệu tăng cường. Đối với các mẫu sử dụng một lớp lưới, phần cuối của

lưới được bố trí chồng mí tại vị trí neo và tiếp tục quấn sang mặt kế. Quy trình thi công được lặp lại thêm một lần, tạo thành hai lớp lưới quấn liên tiếp trên toàn bộ chu vi cột cho các mẫu tăng cường hai lớp.

d. Giai đoạn bốn: Thí nghiệm nén đúng tâm

Sau khi hoàn thành công tác tăng cường và bảo dưỡng, Các mẫu được thực hiện nén đúng tâm gia tải bằng chuyển vị (tốc độ 0,2 mm/phút) với máy nén SANS có tải trọng danh định 3000 kN. Sơ đồ bố trí thiết bị và hệ thống đo được trình bày trong Hình 3.10. Đầu cột và chân cột được tăng cường bằng hệ thép hình trước khi tiến hành gia tải nhằm tránh hiện tượng phá hoại cục bộ tại hai đầu cấu kiện và bảo đảm vùng phá hoại tập trung chủ yếu ở phần thân cột.

Biến dạng của bê tông được theo dõi thông qua bốn cảm biến strain gauge ký hiệu SC1, SC2, SC3 và SC4 gắn trên bề mặt cột. Ngoài ra, bốn cảm biến SS1, SS2, SS3 và SS4 được lắp đặt tại cốt thép dọc, cốt đai và thanh FRP.



Hình 3.10: Thiết lập hệ thống đo và thí nghiệm cột chịu nén đúng tâm

3.2.4 Kết quả tính toán theo mô hình lý thuyết

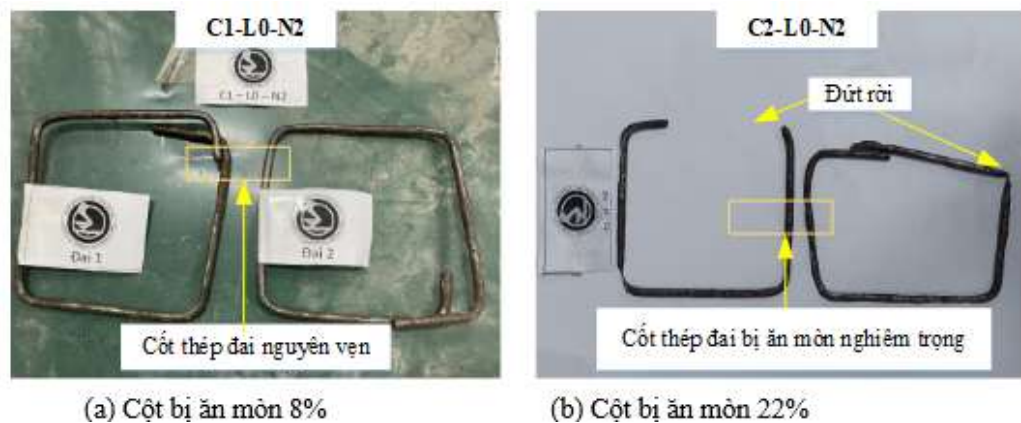
- Thông số đầu vào:

Các mẫu cột đã sử dụng trong chương trình thực nghiệm (Mục 3.3.2) được tính toán theo mô hình lý thuyết ở chương 2. Những thông số chi tiết phục vụ quá trình phân tích thể hiện tại Bảng PL1.1 của Phụ lục 1.

- Tính toán ứng suất lớn nhất có thể gây ra hiện tượng mất ổn định trên các thanh cốt thép dọc:

Chiều dài tự do của các thanh cốt thép dọc được tính toán theo mức độ suy giảm của hệ cốt đai do ăn mòn. Cột ăn mòn ít (8%) hoặc không ăn mòn, cốt đai vẫn duy trì khả năng làm việc và chưa xuất hiện hư hỏng đáng kể. Vì vậy, khoảng cách giữa hai điểm giữ ổn định của cốt thép dọc được giả thiết bằng khoảng cách giữa hai cốt đai liên tiếp, tương ứng với chiều dài tự do $l_s = 150 \text{ mm}$.

Cột ăn mòn nhiều (22%) có sự suy giảm tiết diện của cốt đai tại vùng giữa cột diễn ra rõ rệt, nhiều vị trí xuất hiện hiện tượng đứt cục bộ làm giảm đáng kể hiệu quả giữ ổn định của cốt thép dọc. Trong trường hợp này, $l_s = 300 \text{ mm}$ để phản ánh ảnh hưởng của sự mất khả năng liên kết ngang. Các thông số của cốt thép được trình bày trong *Bảng PL1.2* của Phụ lục 1.



Hình 3.11: Cốt thép đai của cột sau khi bị ăn mòn 8% và 22%

Kết quả tính toán cho các nhóm mẫu nghiên cứu được trình bày trong *Bảng 3.6*. Khả năng ổn định của thanh cốt thép phụ thuộc nhiều vào mức độ mất mát do ăn mòn cũng như điều kiện kiểm chế ngang của cầu kiện.

Bảng 3.6: Kết quả tính toán ứng suất tới hạn của thép dọc

Mức độ ăn mòn	Lực tới hạn (kN)	Ứng suất tới hạn (MPa)	Mức độ suy giảm ứng suất	Tình trạng cốt thép dọc
0%	173,7	1128,4	0%	Không bị mất ổn định
8%	147,0	1038,2	8%	Không bị mất ổn định
22%	26,4	202,4	82%	Mất ổn định

- Xác định khả năng kiểm chế mất ổn định của BTCLD:

Giá trị ứng suất lớn nhất có thể gây ra hiện tượng mất ổn định trên các thanh cốt thép dọc sau khi được tăng cường bằng BTCLD được thể hiện trong *Bảng 3.7*. Sự gia tăng ứng suất tới hạn là kết quả của hiệu ứng kiềm chế do lớp BTCLD bao bọc xung quanh tiết diện cột.

Bảng 3.7: Kết quả tính toán ứng suất tới hạn của cốt thép khi được tăng cường BTCLD sợi các bon

Mức độ ăn mòn	Số lớp lưới sợi	Chiều dày lưới sợi (mm)	Hằng số đàn hồi	Ứng suất tới hạn (MPa)	Tình trạng cốt thép dọc
22%	1	0,14	192	1790,3	Không bị mất ổn định
22%	2	0,28	384	2531,9	Không bị mất ổn định

- Tính toán sức kháng nén của các cột:

Các hệ số tính toán tương ứng được tổng hợp trong *Bảng PL1.3* của Phụ lục 1. Kết quả tính toán được thể hiện trong *Bảng 3.8*:

Bảng 3.8: Kết quả tính toán sức kháng nén dọc trục đúng tâm

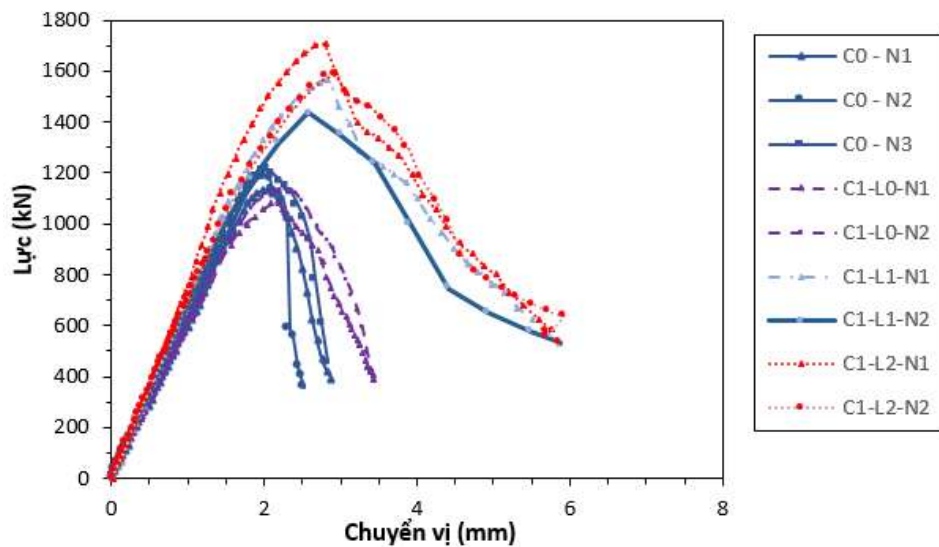
STT	Tên cột	Cấp độ ăn mòn cốt thép	Số lớp BTCLD	P_c (kN)	P_{sc} (kN)	P_{cf} (kN)	P_{cff} (kN)	Lực nén tính toán (kN)
1	Cột C0	0%	0	887,8	264,2			1152,0
2	Cột C1-L0	8%	0	814,8	240,1			1054,9
3	Cột C2-L0	22%	0	814,8	39,8			854,7
4	Cột C1-L1	8%	1	883,1	240,1	217,3	127,0	1467,5
5	Cột C1-L2	8%	2	951,6	240,1	333,8	127,0	1652,4
6	Cột C2-L1	22%	1	883,2	199,2	217,3	127,0	1426,7
7	Cột C2-L2	22%	2	951,6	199,2	333,8	127,0	1611,5

3.2.5 Phân tích, đánh giá hiệu quả tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục cho cột bê tông cốt thép có cốt đã bị ăn mòn bằng bê tông cốt lưới dệt sợi các bon

- a. *Kết quả tăng cường cột BTCT có cốt đã bị ăn mòn với mất mát 8% khối lượng cốt thép dọc bằng BTCLD sợi các bon*

Kết quả thí nghiệm nén đúng tâm các cột bị ăn mòn 8% được thể hiện trên *Hình 3.12*. các phá hoại của nhóm mẫu này được trình bày chi tiết từ *Hình 3.14* cho đến *Hình 3.17*. Kết quả trên *Hình 3.12* cho thấy các mẫu cột có quy luật làm việc tương đối giống nhau trong giai đoạn chịu tải. Trước khi đạt giá trị tải trọng cực đại, đồ thị lực – chuyển vị của

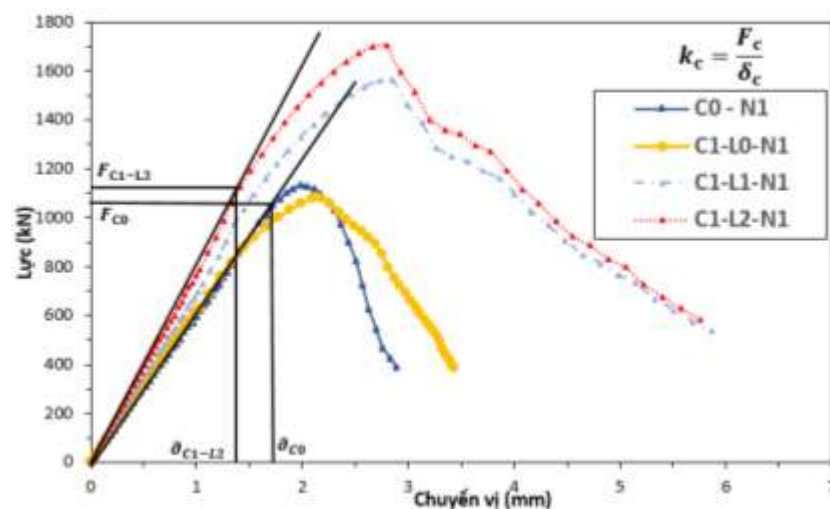
các mẫu đều tăng tuyến tính, phản ánh ứng xử đàn hồi chiếm ưu thế trong giai đoạn đầu của quá trình thí nghiệm. Do mức độ ăn mòn nhỏ (khoảng 8%), độ cứng ban đầu của các mẫu bị ảnh hưởng không đáng kể.



Hình 3.12: Quan hệ lực - chuyển vị dọc trục của các cột thí nghiệm

Đường cong lực – chuyển vị của nhóm này tương đồng với các mẫu đối chứng. Mặc dù vậy, lớp BTCLD đã làm tăng đáng kể khả năng chịu lực tổng thể của cấu kiện. Hiệu quả này thể hiện rõ hơn khi số lớp lưới tăng lên, do lớp tăng cường không chỉ bổ sung khả năng chịu lực của tiết diện bê tông, mà còn tạo thêm hiệu ứng kiềm chế chống nở ngang cho cột.

Các mẫu không đối chứng (C0-N1, C0-N2 và C0-N3), các vết nứt dọc có bề rộng nhỏ bắt đầu xuất hiện trên bề mặt thân cột khi tải trọng đạt khoảng 900 kN. Cấu kiện bị phá hoại ở mức tải trọng trung bình khoảng 1179 kN.



Hình 3.13: Tính toán độ cứng của các cột bị ăn mòn 8% và cột không bị ăn mòn

Độ cứng của cột được xác định theo biểu thức $k_c = \frac{F_c}{\delta_c}$ (trong đó F_c và δ_c lần lượt là lực nén và chuyển vị dọc trục tại điểm giao đường tiếp tuyến của đoạn ứng xử đàn hồi trên đường cong lực – chuyển vị). Kết quả tính toán cho thấy nhóm cột có mức độ ăn mòn khoảng 8% vẫn duy trì độ cứng gần tương đương với nhóm cột không bị ăn mòn, với giá trị trung bình khoảng 632,1 kN/mm. Ngược lại, khi các mẫu cột đã bị ăn mòn được tăng cường bằng BTCLD, độ cứng của cấu kiện tăng lên đáng kể, đạt xấp xỉ 820 kN/mm. Giá trị này lớn hơn khoảng 37% so với cột không tăng cường, cho thấy lớp BTCLD không chỉ cải thiện khả năng chịu lực mà còn làm tăng đáng kể độ cứng của cột.



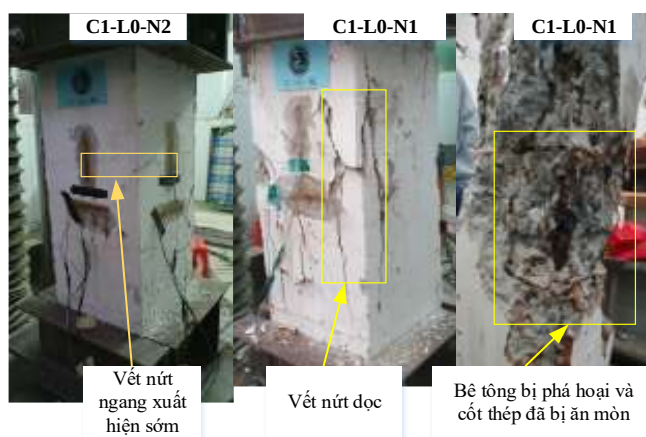
Hình 3.14: Dạng phá hoại của cột đối chứng C0-N1, C0-N2 và C0-N3 (cột không bị ăn mòn)

Khi tải trọng tăng lên đến cực hạn, hệ thống vết nứt dọc trên thân cột phát triển nhanh cả về chiều dài lẫn bề rộng. Đồng thời, các thanh cốt thép dọc bắt đầu bị uốn do mất ổn định, chủ yếu tại vùng giữa chiều cao cột, nơi khoảng cách giữa các cốt đai là 150 mm nên khả năng kiềm chế ngang của cốt thép dọc giảm đáng kể (Hình 3.14). Sự phát triển của quá trình phá hoại kéo theo sự ép vỡ bê tông lõi và làm lớp bê tông bảo vệ bị bong tróc khỏi bề mặt cấu kiện.

Các mẫu cột bị ăn mòn nhưng không được tăng cường (C1-L0-N1 và C1-L0-N2), dạng phá hoại quan sát được về cơ bản tương tự nhóm mẫu đối chứng. Tuy nhiên, giá trị tải trọng tại thời điểm phá hoại chỉ đạt khoảng 1112 kN, thấp hơn khoảng 5,7% so với các cột đối chứng.

Một hiện tượng đáng chú ý khác là ở các mẫu đã trải qua quá trình gia tốc ăn mòn, các vết nứt theo phương ngang tại vị trí cốt đai xuất hiện sớm hơn so với nhóm đối chứng. Các vết nứt này thực chất đã được hình thành do sự giãn nở của sản phẩm gỉ quanh cốt đai. Khi chịu tải nén, chúng tiếp tục mở rộng và phát triển cùng với quá trình gia tải. Mặc dù vậy, ở thời điểm phá hoại cuối cùng, cơ chế phá hoại vẫn là do các vết nứt dọc trên thân cột cùng với phá hoại do mất ổn định của cốt thép dọc.

Sau khi kết thúc thí nghiệm, các thanh thép được lấy ra và loại bỏ hoàn toàn lớp gỉ bám trên bề mặt trước khi xác định lại khối lượng nhằm đánh giá mức độ ăn mòn thực tế. Kết quả quan sát trên *Hình 3.15* cho thấy cả hai loại cốt thép đều bị hư hỏng, trong đó khu vực giao giữa 2 loại cốt thép tại các góc cột là nơi chịu ảnh hưởng nghiêm trọng nhất.

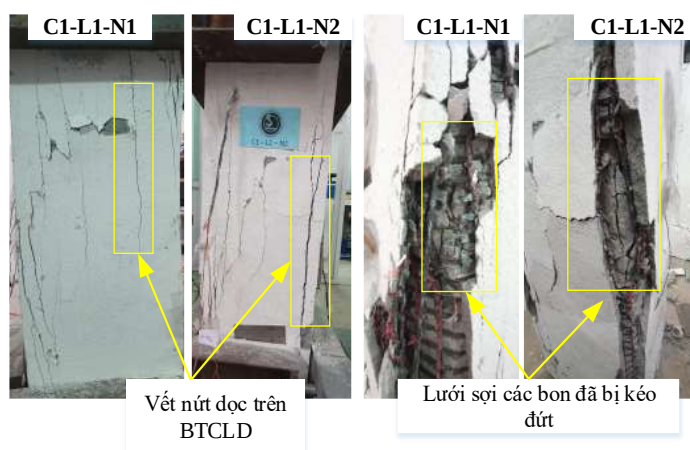


Hình 3.15: Dạng phá hoại của cột đối chứng C1-L0-N1 và C1-L0-N2 (cột bị ăn mòn, không được tăng cường)

Các mẫu cột được tăng cường bằng một và hai lớp BTCLD đều có dạng phá hoại gần tương đồng. Hệ thống vết nứt chủ yếu phát triển theo phương dọc trục của cấu kiện và phân bố tập trung nhiều tại các vùng lân cận góc tiết diện, nơi ứng suất kiểm chế có xu hướng lớn hơn (*Hình 3.16* và *Hình 3.17*). Đối với nhóm mẫu sử dụng một lớp lưới sợi các bon (C1-L1-N1 và C1-L1-N2), các vết nứt đầu tiên được ghi nhận khi tải trọng đạt khoảng 950 kN. So với các mẫu không được tăng cường, các cột bọc BTCLD xuất hiện nhiều vết nứt hơn nhưng mỗi vết nứt có bề rộng nhỏ hơn rõ rệt. Điều này cho thấy lớp BTCLD đã phân tán biến dạng hiệu quả, góp phần kiểm soát sự phát triển của các khe nứt và giúp lớp bê tông bảo vệ ổn định hơn. Giải pháp tăng cường bằng BTCLD mang lại hiệu quả rõ rệt về khả năng chịu lực. So với nhóm cột bị ăn mòn nhưng không được tăng cường, tải trọng

chịu nén cực hạn của các mẫu sử dụng một lớp lưới sợi tăng trung bình khoảng 36,2%, trong khi các mẫu sử dụng hai lớp lưới đạt mức tăng khoảng 48,6%. Sự cải thiện này là kết quả của hai cơ chế làm việc đồng thời: lớp BTHM làm tăng diện tích tiết diện chịu nén của cấu kiện, còn lưới sợi các bon giúp tăng khả năng kiềm chế biến dạng nở ngang của cột.

Sau khi bóc bỏ phần bê tông bị phá hủy, các bó sợi theo phương ngang tại vùng góc tiết diện ở giữa cột đã bị đứt do chịu lực kéo lớn (Hình 3.16). Mặc dù bê tông lõi tại các vị trí này đã xuất hiện hiện tượng nghiền cục bộ, lớp vỏ BTCLD bên ngoài vẫn duy trì được khả năng bao bọc và chưa xuất hiện các vết nứt mở rộng hoặc bong tách đáng kể.



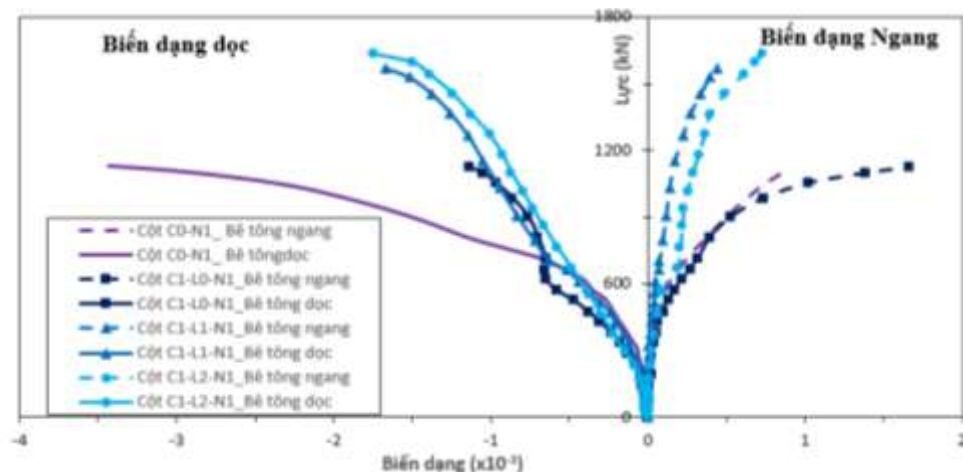
Hình 3.16: Dạng phá hoại của cột C1-L1-N1 và C1-L1-N2 (cột bị ăn mòn và được tăng cường bằng 1 lớp lưới sợi)



Hình 3.17: Dạng phá hoại của cột C1-L2-N1, C1-L2-N2 (cột bị ăn mòn, tăng cường 2 lớp BTCLD)

Nhóm mẫu cột được tăng cường bằng hai lớp BTCLD, gồm C1-L2-N1 và C1-L2-N2, có dạng phá hoại tương tự nhóm tăng cường một lớp. Tại điểm phá hoại, các bó sợi các bon theo phương ngang tại các góc tiết diện bắt đầu bị đứt do chịu ứng suất kéo lớn. Hiện tượng này xảy ra rõ nhất ở giữa cột và tại lớp lưới ngoài cùng (Hình 3.17). Đồng thời, các thanh cốt thép dọc xuất hiện hiện tượng mất ổn định kèm theo dấu hiệu ăn mòn rõ rệt. Quan sát sau phá hoại cho thấy bê tông lõi bị nghiền nát tại vùng chịu nén lớn, trong khi xung quanh cốt thép dọc và cốt đai xuất hiện nhiều dải màu sẫm do sản phẩm ăn mòn tích tụ, phản ánh mức độ ăn mòn phát triển mạnh trong quá trình thí nghiệm.

Quan hệ giữa tải trọng và biến dạng của các mẫu cột được trình bày trên Hình 3.18 thể hiện trạng thái biến dạng giữa các nhóm mẫu có nhiều sự khác biệt. Đối với cột đối chứng C0, biến dạng dọc trực đạt khoảng 3,2‰ lúc phá hoại, biến dạng ngang lúc này chỉ khoảng 0,86‰. Điều này phản ánh hệ cốt thép vẫn được duy trì chống nở ngang tốt trong điều kiện không xảy ra ăn mòn.

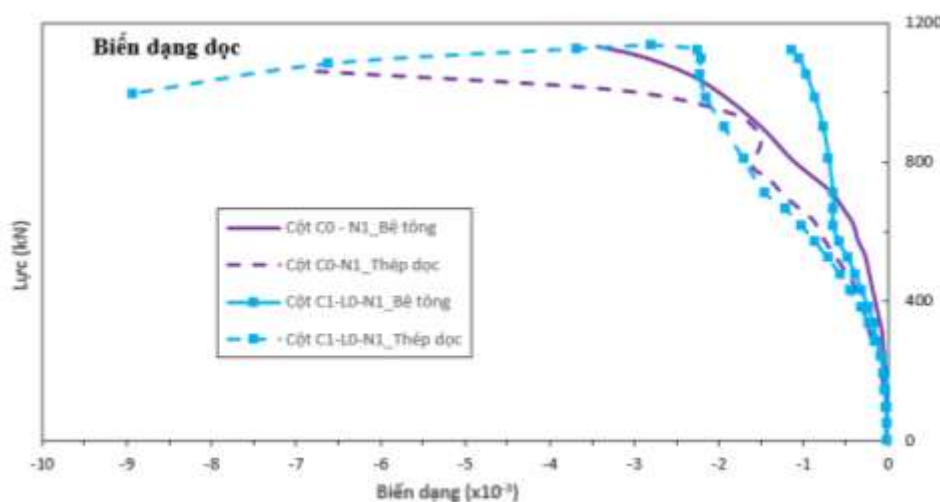


Hình 3.18: Biểu đồ quan hệ lực – biến dạng dọc và ngang của bê tông các cột C0-N1, C1-L1-N1 và C1-L2-N1

Ngược lại, ở mẫu C1-L0-N1 có mức độ ăn mòn khoảng 8% và không được tăng cường, sự suy giảm của thép do ăn mòn làm giảm đáng kể sự kiềm chế nở ngang cho bê tông lõi cột. Bên cạnh đó, lớp bê tông bảo vệ bị suy yếu và bắt đầu bong tách khỏi cấu kiện khi chịu tải. Vì vậy, biến dạng ngang của mẫu tăng nhanh và đạt khoảng 1,6‰ tại thời điểm phá hoại, lớn hơn đáng kể so với biến dạng dọc đo được (khoảng 1,14‰). Đối với các mẫu được tăng cường bằng BTCLD sử dụng lưới sợi các bon, trạng thái biến dạng của cấu kiện có sự cải thiện rõ rệt. Biến dạng dọc trực tại thời điểm phá hoại tăng lên khoảng 1,67‰ đối

với nhóm tăng cường một lớp và khoảng 1,75‰ đối với nhóm tăng cường hai lớp. Ngược lại, biến dạng ngang giảm đáng kể, chỉ còn khoảng 0,44‰ và 0,73‰ tương ứng với hai phương án tăng cường. Kết quả này chứng minh rằng lớp BTCLD đã phát huy hiệu quả trong việc kiểm chế sự nở ngang của bê tông lõi.

Biến dạng dọc trục được ghi nhận đồng thời tại bề mặt ngoài và thép dọc của cột. Hình 3.19 cho thấy, tại thời điểm bê tông bị nứt, thép ở cả hai mẫu C0-N1 và C1-L0-N1 đều bị biến dạng vượt quá giá trị biến dạng chảy của vật liệu. Điều này chứng tỏ cốt thép vẫn tiếp tục tham gia chịu lực sau khi bê tông bắt đầu phá hoại và đã làm việc trong miền chảy dẻo trước khi cấu kiện mất khả năng chịu tải hoàn toàn. So với cột C0-N1, cột C1-L0-N1 đạt trạng thái chảy dẻo của cốt thép sớm hơn. Cụ thể, biến dạng tại thời điểm bê tông nứt của cốt thép cột chỉ khoảng 2,25‰ đối với mẫu C1-L0-N1, trong khi mẫu C0-N1 đạt khoảng 3‰. Sự khác biệt này phản ánh ảnh hưởng bất lợi của ăn mòn đến cốt thép, bao gồm sự suy giảm giới hạn chảy, tiết diện chịu lực và cường độ chịu nén.

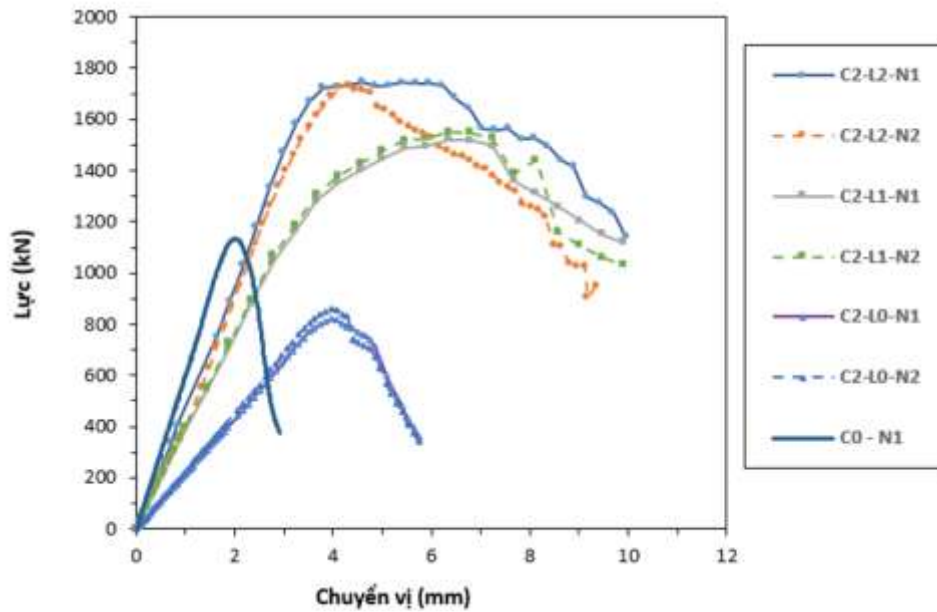


Hình 3.19: Biểu đồ quan hệ lực – biến dạng dọc trục của bê tông và cốt thép cột C0-N1 và C1-L0-N1

b. Kết quả tăng cường cột BTCT có cốt đã bị ăn mòn với mất mát 22% khối lượng cốt thép dọc bằng BTCLD sợi carbon

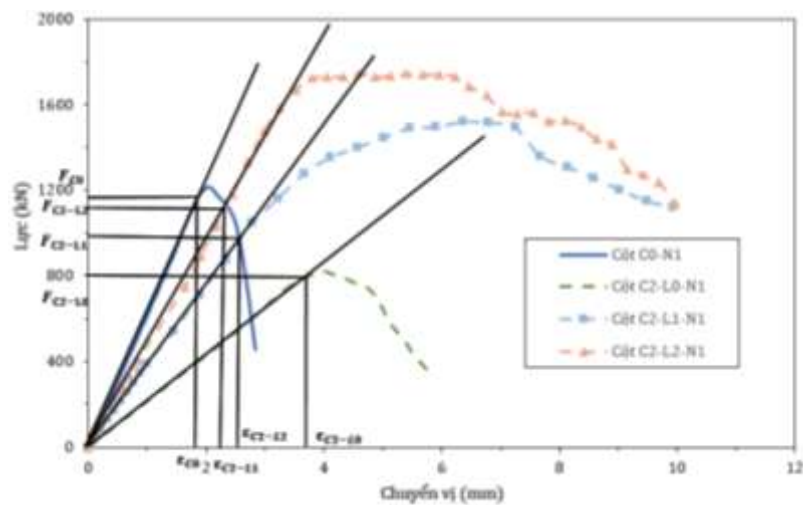
Kết quả thu được từ thí nghiệm tại Hình 3.20 cho thấy dạng đường cong lực – chuyển vị của các mẫu bị ăn mòn 22% có xu hướng tương tự nhóm cột bị ăn mòn khoảng 8%, phản ánh quy luật làm việc chung của cấu kiện dưới tác dụng của tải trọng nén đúng tâm. Tuy nhiên, mức độ ăn mòn càng nghiêm trọng, càng ảnh hưởng bất lợi đến khả năng chịu lực

trở nên rõ rệt hơn. Đối với các mẫu C2-L0-N1 và C2-L0-N2, tải trọng cực hạn chỉ đạt khoảng 860 kN, thấp hơn khoảng 28,8% so với các cột đối chứng.



Hình 3.20: Quan hệ lực - chuyển vị của các cột bị ăn mòn 22% so với cột đối chứng

Kết quả tổng hợp từ Hình 3.21 cho thấy khi cốt thép bị ăn mòn, chúng có thể làm suy giảm độ cứng của cột. Độ cứng của mẫu đối chứng C0-N1 đạt khoảng 632,1 kN/mm, trong khi giá trị này ở mẫu C2-L0-N1 (ăn mòn khoảng 22% và không tăng cường) chỉ còn 219,7 kN/mm, tương ứng mức suy giảm xấp xỉ 65%. Sau khi tăng cường bằng BTCLD sử dụng lưới sợi carbon, độ cứng của các mẫu đã được phục hồi rất nhiều. Cụ thể, các mẫu tăng cường một lớp và hai lớp BTCLD đạt giá trị tương ứng khoảng 360 kN/mm và 480 kN/mm, cho thấy khả năng phục hồi độ cứng của cấu kiện nhờ lớp tăng cường là rất đáng kể.



Hình 3.21: Tính toán độ cứng của các cột bị ăn mòn 22% và cột không bị ăn mòn

Các cột bị ăn mòn khoảng 22% nhưng không được tăng cường có kiểu phá hoại về cơ bản giống với nhóm mẫu có mức ăn mòn thấp hơn. Hệ thống vết nứt chủ yếu phát triển theo phương dọc thân cột và mở rộng dần trong quá trình gia tải, tập trung nhiều tại các vùng góc của tiết diện. Quá trình ăn mòn cốt thép đai cũng được thể hiện qua các vết nứt ngang xuất hiện sớm. Quan sát sau phá hoại cho thấy các thanh thép bên trong đều bị suy giảm nghiêm trọng. Đặc biệt, tại các góc cột, nhiều đoạn cốt đai đã bị ăn mòn đến mức đứt hoàn toàn, trong khi một số thanh cốt thép dọc bị giảm mạnh tiết diện, biến dạng và không còn giữ được hình dạng ban đầu (Hình 3.22).

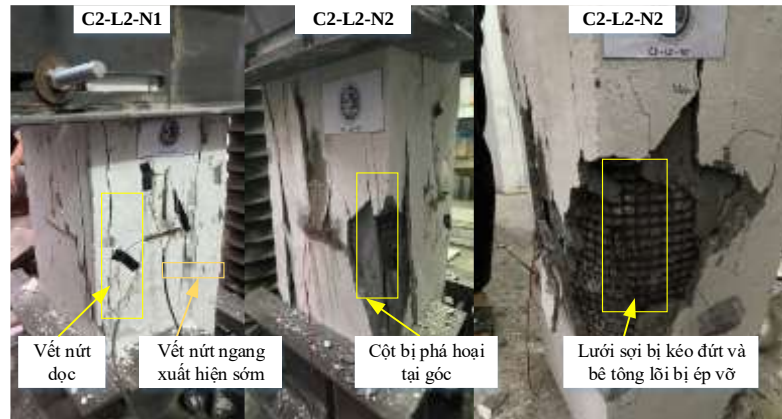


Hình 3.22: Dạng phá hoại của cột đối chứng C2-L0-N1 và C2-L0-N2 (bị ăn mòn 22%, không được tăng cường).



Hình 3.23: Dạng phá hoại của cột C2-L1-N1, C2-L1-N2 (ăn mòn 22%, tăng cường 1 lớp BTCLD)

Với các mẫu có BTCLD bọc bên ngoài, cơ chế phá hoại cũng tương đồng với nhóm cột tăng cường ở cấp độ ăn mòn khoảng 8%. Trong thí nghiệm nén, trên lớp BTCLD có xuất hiện các vết nứt dọc và dẫn đến sự bong tách của lớp BTHM tại khu vực góc tiết diện. Khi tải trọng đạt đến giá trị cực hạn, các bó sợi các bon bắt đầu bị kéo đứt, đồng thời bê tông lõi bên trong xuất hiện hiện tượng nghiền cục bộ (Hình 3.23 và Hình 3.24).



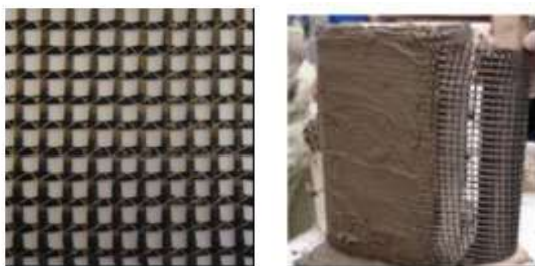
Hình 3.24: Dạng phá hoại của cột C2-L2-N1 và C2-L2-N2 (cột bị ăn mòn 22%, tăng cường 2 lớp BTCLD)

Kết quả thí nghiệm cho thấy hiệu quả của giải pháp BTCLD càng rõ rệt khi ăn mòn cốt thép càng nghiêm trọng. So với nhóm cột C2-L0-N1 và C2-L0-N2, tải trọng chịu nén cực hạn của các mẫu sử dụng một lớp lưới sợi tăng khoảng 82,7%, trong khi nhóm sử dụng hai lớp lưới đạt mức tăng khoảng 107%. Mức tăng này cao hơn đáng kể so với trường hợp các mẫu chỉ bị ăn mòn khoảng 8%. Hiệu quả tăng cường nêu trên có thể được lý giải là: Ở mức độ ăn mòn khoảng 22%, lớp bê tông bảo vệ đã bong tách đáng kể và dính bám giữa thép và bê tông đã bị ảnh hưởng mạnh, làm giảm sự làm việc đồng thời của hai vật liệu. Trong điều kiện đó, lớp BTCLD không chỉ bổ sung phần tiết diện chịu lực và tăng kiểm chế biến dạng nở ngang của cột mà còn thay thế một phần bê tông bảo vệ đã bị bong tróc. Nhờ sự kết hợp của các cơ chế này, độ cứng như lực nén lớn nhất của cột được tăng cường BTCLD cũng được phục hồi rõ rệt. So với mẫu C2-L0-N1 không tăng cường, các cột được tăng cường BTCLD có độ cứng tăng tương ứng khoảng 20% và 50% lần lượt cho tăng cường 1 lớp và 2 lớp, tiến gần hơn đến độ cứng của cột chưa bị ăn mòn.

3.3 NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM VỀ ỨNG XỬ CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỤC VÀ HIỆU QUẢ CHỐNG ẼN MÒN CỐT THÉP

3.3.1 Các thí nghiệm kiểm tra khả năng trở thành anốt trợ trong hệ thống bảo vệ cốt thép của lưới sợi các bon

Lưới các bon có mã hiệu SITgrid017 với lớp phủ styrene butadiene rubber (SBR), do Công ty V.FRAAS (Đức) sản xuất (Hình 3.25), được dùng trong chương trình thí nghiệm tại Mục 3.2. Trên cơ sở các kết quả đạt được, loại lưới này tiếp tục được lựa chọn để nghiên cứu khả năng làm anốt trợ và chống ẽn mòn cốt thép trong giai đoạn nghiên cứu tiếp theo.

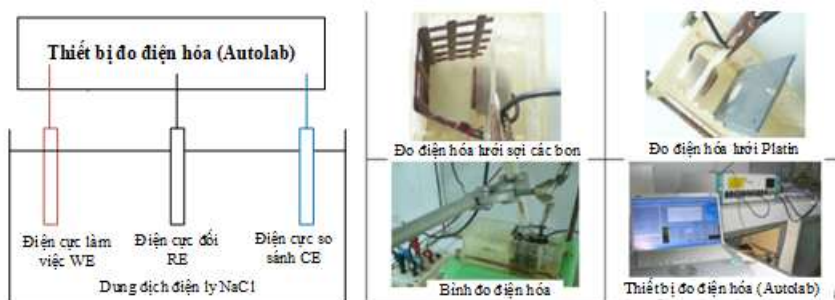


Hình 3.25: Lưới sợi các bon SITgrid017

a. Thí nghiệm kiểm tra khả năng phân cực của lưới sợi các bon

- Sơ đồ thiết lập và các dụng cụ thí nghiệm:

Để nghiên cứu khả năng phân cực điện hóa của lưới sợi các bon, thí nghiệm đo điện hóa được bố trí theo sơ đồ như Hình 3.26.



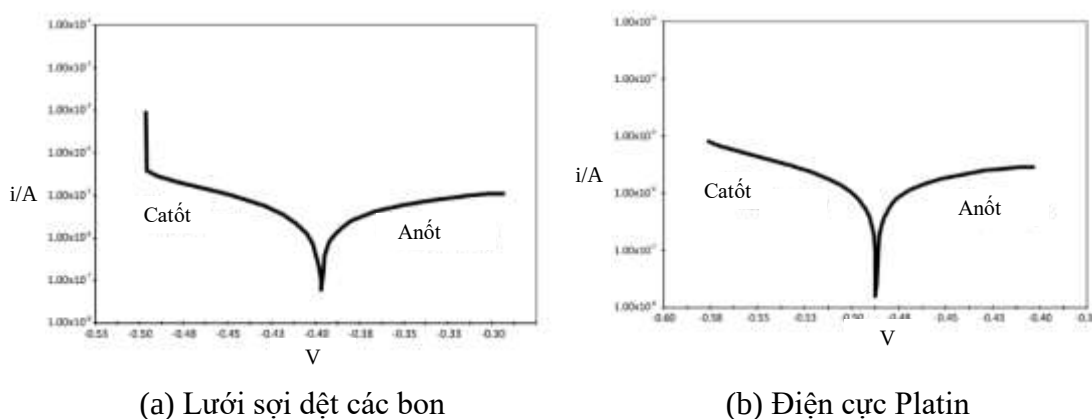
Hình 3.26: Sơ đồ và dụng cụ thí nghiệm đo phân cực lưới sợi các bon

Các phép đo được thực hiện bằng hệ thống đo điện hóa Autolab. Hệ thống đo lần lượt khả năng phân cực của các điện cực đối là: lưới sợi các bon SITgrid017 và điện cực platin (Pt) so với điện cực làm việc là cốt thép. Bên cạnh đó, điện cực bạc/bạc clorua Ag/AgCl/KCl 3,0 M được sử dụng làm điện cực so sánh, đo điện thế của

điểm phân cực. Môi trường điện phân sử dụng trong thí nghiệm là dung dịch NaCl có pH trung tính ($\text{pH} \approx 7$), được chuẩn bị từ hỗn hợp gồm 2 g thạch agar, 3 g NaCl và một lượng nhỏ tinh thể kali ferricyanua $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$. Hệ thống điện cực sử dụng trong thí nghiệm bao gồm:

- Điện cực làm việc (WE): thanh cốt thép đường kính 1,2 mm. **Đóng vai trò làm điện cực diễn ra phản ứng catốt trong thí nghiệm phân cực.**
 - Điện cực đối (CE): lưới sợi các bon SITgrid017 và điện cực platin (Pt). **Đóng vai trò điện cực diễn ra phản ứng anốt trong thí nghiệm phân cực.**
 - Điện cực so sánh (RE): điện cực bạc/bạc clorua $\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{KCl}$ 3,0 M. **Để đo điện thế của hệ thống khi cân bằng phản ứng catốt và phản ứng anốt.**
- Kết quả thí nghiệm:

Hình 3.27 thể hiện đường cong quan hệ điện cực – dòng điện trong mạch.



Hình 3.27: Kết quả đo phân cực lưới sợi các bon (a) và điện cực Platin (b)

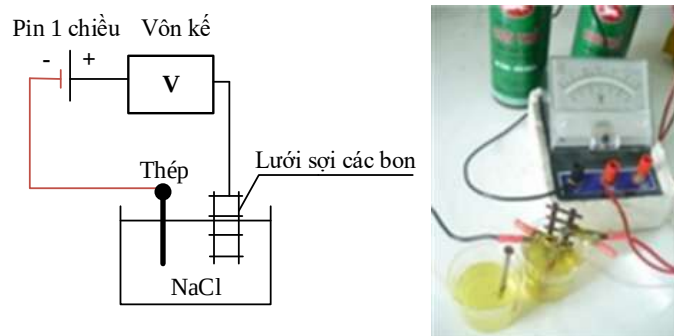
Phân tích biểu đồ cho thấy lưới sợi các bon SITgrid017 có đặc tính điện hóa tương đối giống với điện cực platin (Pt), vốn là loại điện cực đối được sử dụng phổ biến trong các hệ thống điện hóa. Sự tương đồng về hình dạng của các đường cong phân cực cho thấy sợi các bon có khả năng hình thành quá trình phân cực ổn định. Hơn nữa, điện thế tại điểm phân cực của lưới sợi các bon đạt khoảng $-0,40 \text{ V}$, trong khi giá trị tương ứng của điện cực platin là khoảng $-0,49 \text{ V}$. Sự khác biệt này cho thấy lưới sợi các bon phân cực ổn định hơn và ít có xu hướng tham gia vào các phản ứng ăn mòn hơn cả điện cực platin. Do vậy, lưới sợi các bon SITgrid017 có khả năng

dẫn điện, đặc tính phân cực tốt khi so sánh với điện cực thép. Đồng thời, giá trị điện thế phân cực tương đối thấp (khoảng $-0,40\text{ V}$) cho thấy vật liệu này khi dùng làm anốt trơ chống ăn mòn sẽ không gây bất lợi đến quá trình làm việc của kết cấu cũng như môi trường và con người xung quanh.

b. *Thí nghiệm kiểm tra khả năng chống ăn mòn thép của lưới sợi cacbon bằng phương pháp bảo vệ catốt sử dụng dòng điện ngoài*

- Thiết lập thí nghiệm

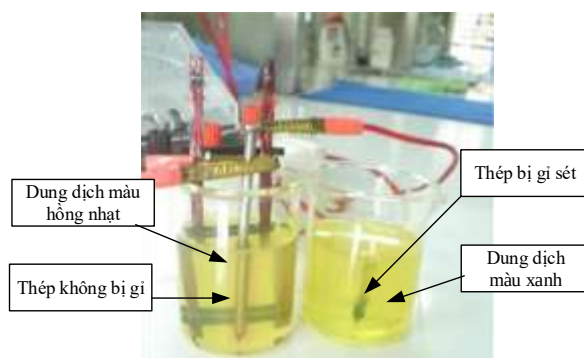
Thí nghiệm kiểm tra khả năng làm điện cực đối của lưới sợi cacbon được tiến hành theo sơ đồ Hình 3.28.



Hình 3.28: Sơ đồ thí nghiệm

Các thiết bị chính được sử dụng như sau:

- Nguồn điện một chiều sử dụng pin có điện áp danh định 3 V .
 - Thanh thép đường kính $1,2\text{ mm}$ được kết nối với cực âm của nguồn điện và đóng vai trò điện cực cần bảo vệ.
 - Lưới sợi cacbon SITgrid017 được nối với cực dương của nguồn điện một chiều để làm điện cực anốt.
 - Môi trường điện phân sử dụng dung dịch tương tự thí nghiệm trình bày tại Mục 3.2. Ngoài ra, dung dịch được bổ sung chỉ thị phenolphthalein nhằm hỗ trợ quan sát các phản ứng điện hóa xảy ra trong quá trình thí nghiệm. Trong môi trường kiềm (có OH^-), nó sẽ có màu hồng nhạt và, khi có mặt ion Fe^{2+} (oxit sắt), nó sẽ chuyển sang màu xanh đặc trưng.
- Kết quả thí nghiệm



Hình 3.29: Kết quả sau 30 ngày thí nghiệm

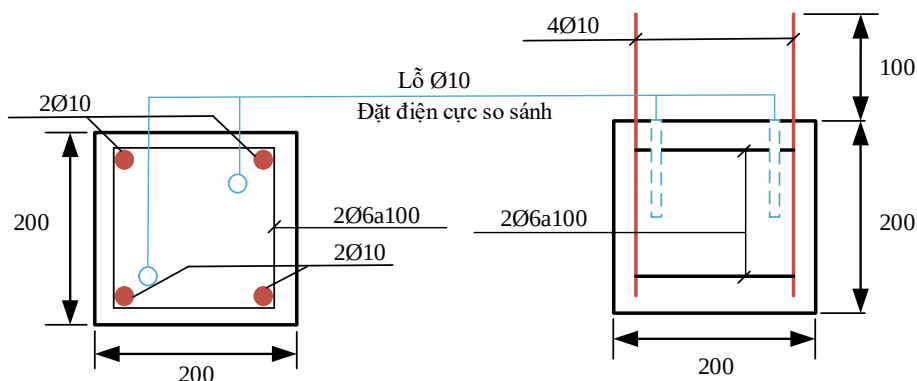
Sau khoảng 30 ngày ngâm đồng thời hai mẫu thép trong môi trường ăn mòn, mẫu thép được bảo vệ và không được bảo vệ đã được ghi nhận các sự khác biệt.

Đối với mẫu thép được bảo vệ catốt sử dụng lưới sợi các bon làm anốt, bề mặt thép hầu như không xuất hiện dấu hiệu ăn mòn. Đồng thời, dung dịch xung quanh thanh thép duy trì màu hồng nhạt của phenolphthalein, cho thấy sự hình thành ion OH^- do phản ứng catốt diễn ra trên bề mặt thép được bảo vệ. Kết quả này chứng minh rằng dòng điện bảo vệ đã phát huy hiệu quả.

Ngược lại, đối với mẫu thép không được áp dụng hệ thống bảo vệ, bề mặt kim loại bắt đầu bị ăn mòn. Sự thay đổi màu sắc của dung dịch từ hồng nhạt sang xanh là dấu hiệu cho thấy các ion sắt sinh ra trong quá trình oxy hóa thép đã xuất hiện. Hiện tượng này phản ánh quá trình ăn mòn điện hóa đã diễn ra và phát triển trong môi trường chứa ion clorua (Hình 3.29).

Kết luận: Kết quả thí nghiệm cho thấy lưới sợi các bon SITgrid017 có khả năng hoạt động hiệu quả với vai trò là anốt trợ để chống ăn mòn bằng phương pháp bảo vệ catốt sử dụng dòng điện ngoài. Việc sử dụng loại vật liệu này giúp duy trì trạng thái thụ động của thép, làm giảm hoặc ngăn chặn quá trình ăn mòn thép trong môi trường có chứa NaCl 3,5%.

3.3.2 Nghiên cứu thực nghiệm xác định mức độ ăn mòn của cốt thép trong bê tông bằng phương pháp đo điện thế nửa pin theo thời gian



Hình 3.30: Cấu tạo mẫu thí nghiệm ăn mòn (đơn vị: mm)

Chương trình thí nghiệm được thực hiện trên 10 mẫu bê tông cốt thép có dạng khối lập phương, kích thước mỗi mẫu 200×200×200 mm. Cấu tạo cốt thép bên trong gồm: thép dọc là bốn thanh Ø10 mm và thép đai là hai thanh Ø6A100. Để phục vụ việc theo dõi điện thế các thanh cốt thép, trên mặt trên của mỗi mẫu được bố trí hai lỗ khoan Ø10 mm và sâu 100 mm. Các vị trí này được sử dụng để lắp đặt điện cực so sánh Ag/AgCl/3M KCl trong quá trình đo điện thế. Bê tông có cường độ nén 27,3 Mpa sau 28 ngày. Các mẫu được ngâm và gia tốc ăn mòn bằng phương pháp điện hóa (Mục 1.2.2a) kết hợp môi trường ăn mòn mạnh (có NaCl 3,5%) (Hình 3.31).



Hình 3.31: Gia tốc ăn mòn các mẫu thí nghiệm

Dòng điện áp dụng có giá trị 0,45 (A) dựa theo công thức (1.26) tại Mục 1.2.2a với các mốc thời gian ăn mòn tính toán như Bảng 3.9:

Bảng 3.9: Dự kiến thời gian ăn mòn và mất mát khối lượng

STT	Tên mẫu	Thời gian cho ăn mòn	Mất mát khối lượng dự kiến (%)
1	M1-1 và M1-2	15 ngày	5
2	M2-1 và M2-2	30 ngày	10
3	M3-1 và M3-2	45 ngày	15
4	M4-1 và M4-2	60 ngày	20
5	M5-1 và M5-2	75 ngày	25

Sau khi kết thúc các giai đoạn gia tốc ăn mòn, các mẫu thí nghiệm được tiến hành đo xác định điện thế cốt thép thông qua điện cực đo là Ag/AgCl/KCl 3,0M (Hình 3.32).



Hình 3.32: Thí nghiệm đo thế mạch hở của các mẫu thí nghiệm

Đồng thời, các thanh cốt thép được tháo ra khỏi mẫu, làm sạch và xác định lại khối lượng nhằm đánh giá mức độ suy giảm khối lượng (Hình 3.33).

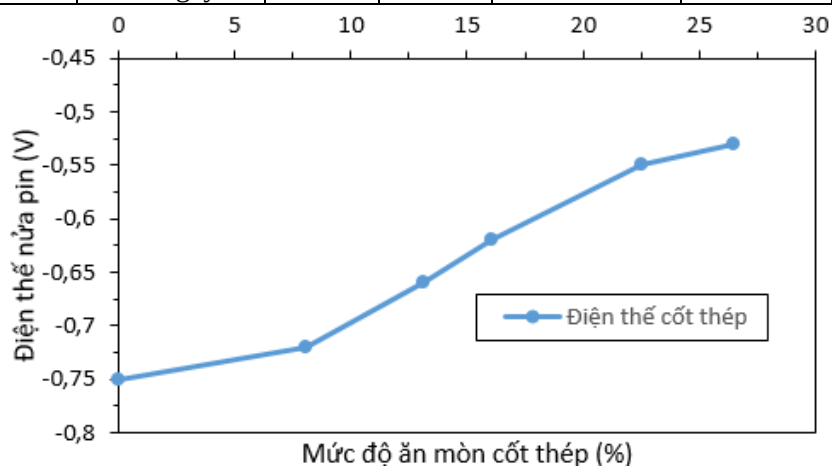


Hình 3.33: Thí nghiệm cân lượng thép còn lại

Kết quả đo điện thế mạch hở của các mẫu BTCT được tổng hợp tại Bảng 3.10. Bên cạnh đó, biểu đồ thể hiện mối quan hệ giữa điện thế và mức độ mất mát khối lượng do ăn mòn cốt thép cũng được trình bày trong Hình 3.34.

Bảng 3.10: Kết quả đo điện thế cốt thép sau khi bị ăn mòn

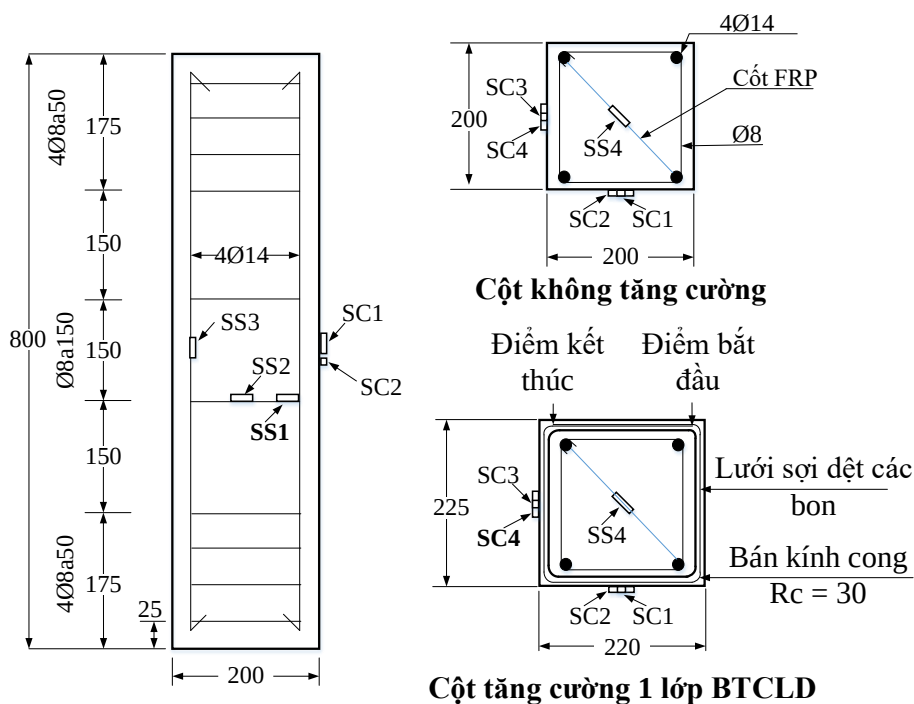
STT	Tên mẫu	Thời gian cho ăn mòn	Điểm đo 1 (V)	Điểm đo 2 (V)	Điện thế trung bình 1 cột (V)	Điện thế trung bình (V)	Mất mát khối lượng trung bình (%)
1	Mẫu M1 - N1	15 ngày	-0,72	-0,71	-0,715	-0,72	8,1
2	Mẫu M1 - N2	15 ngày	-0,73	-0,72	-0,725		
3	Mẫu M2 - N1	30 ngày	-0,7	-0,67	-0,685	-0,67	13,1
4	Mẫu M2 - N2	30 ngày	-0,67	-0,62	-0,645		
5	Mẫu M3 - N1	45 ngày	-0,65	-0,58	-0,615	-0,62	16,1
6	Mẫu M3 - N2	45 ngày	-0,64	-0,62	-0,63		
7	Mẫu M4 - N1	60 ngày	-0,59	-0,54	-0,565	-0,55	22,5
8	Mẫu M4 - N2	60 ngày	-0,56	-0,52	-0,54		
9	Mẫu M5 - N1	75 ngày	-0,56	-0,54	-0,55	-0,53	26,2
10	Mẫu M5 - N2	75 ngày	-0,52	-0,51	-0,515		



Hình 3.34: Đường quan hệ Điện thế - Mức độ ăn mòn cốt thép

Trong trường hợp cốt thép chưa bị ăn mòn, điện thế cốt thép lớn hơn $-0,75$ V so với Ag/AgCl/KCl 3,0M. Theo tiêu chí đánh giá dựa trên biểu đồ Pourbaix, mức điện thế này tương ứng với trạng thái cốt thép nằm trong vùng ổn định hoặc miễn nhiễm ăn mòn. Ngược lại, khi mức độ suy giảm khối lượng cốt thép tăng lên do quá trình ăn mòn, giá trị điện thế mạch hở có xu hướng thay đổi theo chiều bất lợi và dịch chuyển dần về vùng hoạt động ăn mòn mạnh của thép. Đường cong quan hệ điện thế - mức độ mất mát khối lượng do ăn mòn cho thấy xu hướng biến thiên gần tuyến tính, thể hiện sự phụ thuộc rõ rệt của trạng thái điện hóa cốt thép vào mức độ hư hỏng do ăn mòn.

3.3.3 Nghiên cứu thực nghiệm xác định hiệu quả tăng cường khả năng chịu dọc trục và chống ăn mòn cốt thép cho cột bê tông cốt thép có cốt đã bị gỉ bằng bê tông cốt lưới dệt sợi các bon sử dụng phương pháp bảo vệ catốt



Hình 3.35: Cấu tạo các cột BTCT thí nghiệm (đơn vị: mm)

Tám mẫu cột BTCT có kích thước được lựa chọn tương đồng với hệ mẫu đã sử dụng trong chương trình thí nghiệm tại Mục 3.2, qua đó đảm bảo sự đồng nhất khi so sánh và phân tích kết quả. Bên cạnh đó, hệ thống đo biến dạng của cốt thép và vùng lõi bê tông được thiết lập thông qua các cảm biến SS. Hai cảm biến SS1 và SS2 được lắp đặt trên cốt đai tại các vị trí giữa và góc đai để đánh giá trạng thái biến dạng của cốt thép ngang. Cảm biến SS3 được bố trí trực tiếp trên thanh cốt thép dọc tại vị trí giữa chiều cao cột nhằm xác định biến dạng của cốt thép chủ trong quá trình chịu lực. Đối với vùng bê tông lõi, cảm biến SS4 được sử dụng kết hợp với thanh FRP đặt tại tâm tiết diện để đo sự biến dạng của khu vực bên trong cấu kiện.

Các mẫu thí nghiệm được chia thành 4 nhóm như *Bảng 3.11*, cụ thể như sau:

- Nhóm cột đối chứng không bị ăn mòn, bao gồm 02 mẫu: C3–N1 và C3–N2;
- Nhóm cột bị ăn mòn 15%, không được tăng cường bằng BTCLD và không áp dụng biện pháp bảo vệ chống ăn mòn cốt thép, gồm 02 mẫu: C3–L0–N1 và C3–L0–N2;

- Nhóm cột bị ăn mòn 15%, được tăng cường bằng 01 lớp BTCLD nhưng không áp dụng biện pháp bảo vệ chống ăn mòn cốt thép, gồm 02 mẫu: C3–L1–N1 và C3–L1–N2;
- Nhóm cột bị ăn mòn 15%, được tăng cường bằng 01 lớp BTCLD nhưng không áp dụng biện pháp bảo vệ chống ăn mòn cốt thép, gồm 02 mẫu: C3–L1–N1 và C3–L1–N2.

Các mẫu cột BTCT có hệ cốt thép dọc gồm bốn thanh đường kính Ø14, có nhiệm vụ chịu lực nén chính trong cấu kiện. Các thanh đai đường kính Ø8 có bố trí dày tại vùng hai đầu cột nhằm tăng khả năng ổn định cục bộ, trong khi khu vực giữa thân cột bố trí cốt đai thưa hơn để định hướng vị trí phá hoại xảy ra trong vùng giữa chiều cao cột. Chi tiết cấu tạo được minh họa trong *Hình 3.35*.

Bảng 3.11: Danh sách các mẫu thí nghiệm

STT	Cấp độ ăn mòn cốt thép dự kiến ban đầu	Số lớp BTCLD	Bảo vệ chống ăn mòn cốt thép	Tên mẫu
1	0%	0	Không	C3-N1
2			Không	C3-N2
3	15%	0	Không	C3-L0-N1
4			Không	C3-L0-N2
5		1	Không	C3-L1-N1
6			Không	C3-L1-N2
7		1	Có	C3-L1B-N1
8			Có	C3-L1B-N2

a. Tính chất vật liệu

Thành phần cấp phối, cường độ và các đặc trưng cơ học liên quan của hai loại bê tông được sử dụng đã được trình bày chi tiết tại *Bảng 3.3* và *Bảng 3.4* trong Mục 3.2.2.

Hệ cốt thép và Lưới sợi dệt các bon SITgrid017 sử dụng trong nghiên cứu này cũng tương tự như thí nghiệm Mục 3.2. Các thông số cơ học của thép cũng như lưới sợi các bon được tổng hợp trong *Bảng 3.5* tại Mục 3.2.2.

b. Quá trình thí nghiệm

Thí nghiệm được tiến hành một cách tuần tự qua năm bước chính như sau:

Trong bước đầu tiên, tám mẫu cột được chế tạo hoàn chỉnh và tiến hành ngâm bảo dưỡng với điều kiện tiêu chuẩn đến khi đạt tuổi 28 ngày. Sau đó, bước thứ hai là gia tốc tạo ăn mòn bằng phương pháp điện hóa. Sáu mẫu cột được tạo ăn mòn trong khoảng 45 ngày, với mức suy giảm khối lượng cốt thép dọc mục tiêu khoảng 15%. Sau khi đạt mức độ ăn mòn yêu cầu, bước thứ ba được tiến hành, trong đó bốn mẫu cột bị suy giảm được bọc tăng cường bằng một lớp BTCLD sử dụng lưới sợi các bon. Tiếp theo, ở bước thứ tư, sáu cột được ngâm trong môi trường dung dịch NaCl nồng độ 3,5% kết hợp với các chu kỳ thay đổi trạng thái khô – ướt để đẩy mạnh quá trình ăn mòn. Trong giai đoạn này, hai mẫu cột được áp dụng hệ thống bảo vệ catốt bằng dòng điện ngoài. Bước cuối cùng, các cột được đo điện thế cốt thép so với Ag/AgCl/KCl 3,0M. Sau đó, toàn bộ 08 mẫu cột được nén dọc trục đúng tâm trên máy SANS 3000 KN để xác định ứng xử chịu nén của chúng. Cuối cùng, Các thanh thép được thu hồi từ các mẫu bê tông, tiến hành làm sạch và cân đo khối lượng.



Hình 3.36: Chế tạo cột BTCT

Giai đoạn 1 – Chế tạo và chuẩn bị mẫu thí nghiệm:

Trong bước chuẩn bị mẫu, các khung cốt thép được gia công theo đúng cấu tạo thiết kế, sau đó tiến hành lắp đặt hoàn chỉnh và bố trí hệ thống cảm biến. Quy trình lắp đặt cảm biến được thực hiện tương tự phương pháp đã áp dụng trong thí nghiệm tại Mục 3.2.3. Bên cạnh đó, các đường dây điện của hệ thống đo điện thế cũng như hệ thống bảo vệ catốt được bố trí theo thiết kế. Sau khi hoàn thiện hệ cốt thép và thiết bị đo, toàn bộ mẫu cột được đúc và bảo dưỡng đúng theo quy định cho đến sau 28 ngày tuổi, trước khi chuyển sang giai đoạn xử lý tiếp theo.

Giai đoạn 2 – Tạo ăn mòn gia tốc bằng dòng điện ngoài:

Sáu cột được tạo ăn mòn bằng phương pháp điện hóa, theo nguyên lý đã trình bày tại Mục 1.2.2a. Dưới tác dụng của dòng điện một chiều, sự xâm nhập và dịch chuyển của ion Cl^- trong môi trường bê tông được tăng cường, đồng thời đẩy nhanh quá trình tạo sản phẩm gỉ sét trong cấu kiện.

Sáu mẫu cột gồm C3-L0-N1, C3-L0-N2, C3-L1-N1, C3-L1-N2, C3-L1B-N1 và C3-L1B-N2 được ngâm trong thời gian 45 ngày nhằm tạo ra mức suy giảm khối lượng cốt thép dọc mục tiêu khoảng 15%. Trước khi tiến hành ngâm, khu vực chân cột được chống thấm bằng cách dán băng keo chuyên dụng và bọc màng PE (Hình 3.37).

Trong suốt thời gian gia tốc ăn mòn, điện áp của hệ thống được kiểm tra và ghi nhận định kỳ hàng ngày. Các mẫu được quan sát sự phát triển và độ rộng vết nứt theo chu kỳ một tuần một lần. Ngoài ra, hệ thống cấp khí được sử dụng liên tục trong bể ngâm nhằm cải thiện sự đồng đều của quá trình ăn mòn, đồng thời dung dịch NaCl được thay mới sau mỗi hai tuần để duy trì điều kiện điện hóa ổn định.



Hình 3.37: Thí nghiệm gia tốc ăn mòn

Giai đoạn 3 – Trát tăng cường lớp BTCLD sợi các bon:

Bốn trong tổng số sáu mẫu bị ăn mòn được lựa chọn để thực hiện tăng cường bằng một lớp BTCLD sợi các bon. Trình tự thi công được thực hiện theo hướng dẫn của ACI 549.4R-20 [33] và tương đồng với quy trình tăng cường đã áp dụng trong nghiên cứu tại Mục 3.2.3. Phương pháp tăng cường được thực hiện bằng kỹ thuật trát nhiều lớp, với chiều dày mỗi lớp vật liệu khoảng 5 mm.

Giai đoạn 4 – Gia tốc ăn mòn trong điều kiện hoạt động của chu kỳ khô – ướt:

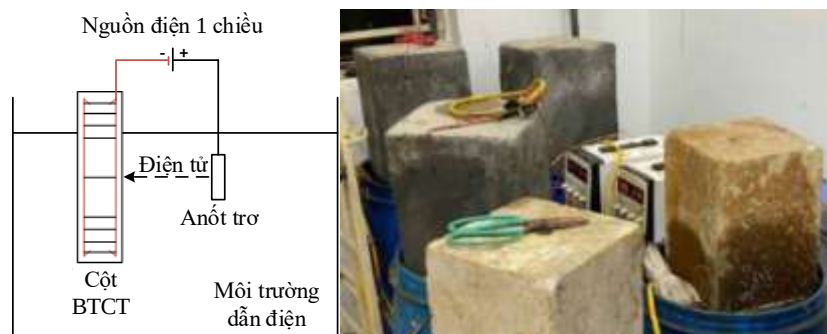
Sau khi được xử lý ăn mòn ban đầu và tăng cường (đối với các mẫu tương ứng), toàn bộ sáu mẫu tiếp tục được ngâm trong dung dịch NaCl 3,5% và có các chu kỳ khô – ướt để gia

tốc ăn mòn dựa trên nguyên lý trình bày tại Mục 1.2.2b. Mỗi chu kỳ gồm hai giai đoạn liên tiếp: ngâm mẫu trong dung dịch NaCl trong 7 ngày để đạt trạng thái bão hòa ẩm với độ ẩm lớn hơn 95%, sau đó đưa mẫu ra ngoài môi trường tự nhiên trong 7 ngày để thực hiện quá trình khô hóa. Sau khi kết thúc mỗi chu kỳ 14 ngày, dung dịch NaCl được bổ sung trở lại nhằm duy trì điều kiện ăn mòn cho các chu kỳ tiếp theo.



Hình 3.38: Cột bê tông trong chu kỳ ướt và chu kỳ khô

Trong giai đoạn này, hai mẫu C3-L1B-N1 và C3-L1B-N2 được tích hợp hệ thống bảo vệ catốt bằng dòng điện ngoài với lưới sợi các bon làm anốt trợ (Hình 3.39). Trong đó, cực âm của nguồn điện một chiều được nối với cột thép để trở thành điện cực được bảo vệ, còn lưới sợi các bon SITgrid017 được nối với cực dương và đóng vai trò anốt cung cấp điện tử.

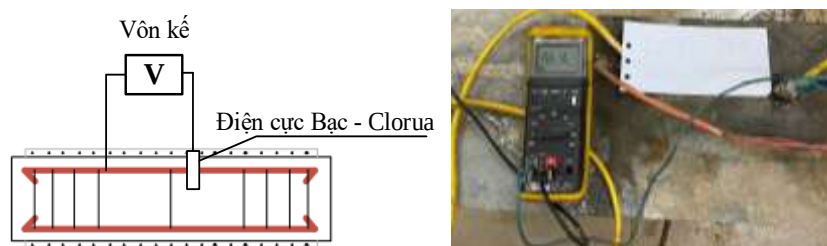


Hình 3.39: Quy trình bảo vệ catốt

Mật độ dòng điện bảo vệ được lựa chọn bằng 20 mA/m^2 . Giá trị này được lựa chọn dựa trên các khuyến nghị trong Báo cáo kỹ thuật số 37 của Hiệp hội Bê tông [63] và tiêu chuẩn ISO 12696:2016 [42].

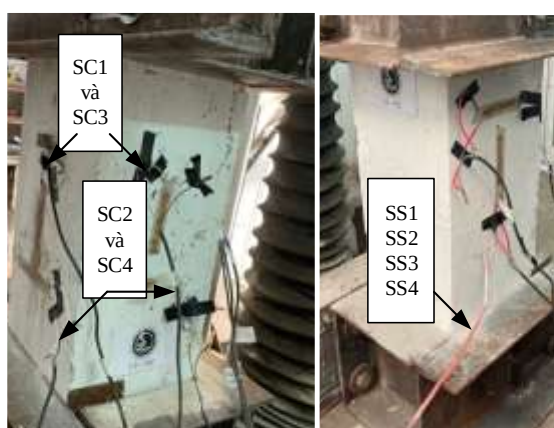
Giai đoạn 5 – Đánh giá hiệu quả bảo vệ:

Sau 23 chu kỳ khô – ướt, tương ứng với thời gian thí nghiệm khoảng 322 ngày, hai nhóm thí nghiệm được tiến hành nhằm xác định khả năng duy trì trạng thái không bị ăn mòn của cốt thép và ứng xử chịu lực nén đúng tâm của cột:



Hình 3.40: Đo điện thế cốt thép

- **Thí nghiệm xác định điện thế cốt thép:** Điện thế của cốt thép được đo qua điện cực so sánh Ag/AgCl/KCl 3,0M như minh họa trên (Hình 3.40). Đối với hai mẫu cột được áp dụng hệ thống bảo vệ catốt, quá trình biến đổi điện thế của cốt thép được theo dõi tại các khoảng thời gian 2, 4, 8, 16 và 24 giờ sau khi ngắt nguồn bảo vệ. Việc lựa chọn các thời điểm đo này nhằm đánh giá khả năng duy trì trạng thái phân cực của cốt thép sau khi loại bỏ tác động của dòng điện ngoài, đồng thời kiểm tra hiệu quả bảo vệ theo các tiêu chí được trình bày tại Mục 2.2.3.



Hình 3.41: Thiết lập hệ thống đo và thí nghiệm cột chịu nén đúng tâm

- **Thí nghiệm nén dọc trục đúng tâm:** Sử dụng máy nén – kéo SANS có tải trọng tối đa 3000 kN với tốc độ gia tải bằng chuyển vị là 0,3 mm/phút (Hình 3.41)

c. *Kết quả đo điện thế cốt thép*

Kết quả đo điện thế cốt thép sau quá trình gia tốc ăn mòn bằng chu kỳ khô – ướt được tổng hợp trong Bảng 3.12.

Bảng 3.12: Kết quả đo điện thế cốt thép so với điện cực đối chứng Bạc – Clorua

STT	Thời gian đo	Tên cột					
		C3-L0-N1	C3-L0-N2	C3-L1-N1	C3-L1-N2	C3-L1B-N1	C3-L1B-N2
1	Sau 2h	-0,562	-0,545	-0,616	-0,641	-0,994	-0,945
2	Sau 4h	-0,561	-0,547	-0,622	-0,632	-0,980	-0,937
3	Sau 8h	-0,557	-0,524	-0,611	-0,638	-0,973	-0,930
4	Sau 18h	-0,56	-0,495	-0,623	-0,637	-0,969	-0,909
5	Sau 24h	-0,544	-0,553	-0,623	-0,640	-0,934	-0,903

Kết quả đo điện thế cốt thép cho thấy rằng:

- Đối với nhóm mẫu không được áp dụng bảo vệ catốt, giá trị điện thế đo sau 2 giờ dao động trong khoảng từ -0,55 V đến -0,63 V so với điện cực Ag/AgCl/KCl 3,0M. Theo biểu đồ trạng thái điện hóa Pourbaix của hệ thép trong môi trường kiềm, các giá trị này nằm trong vùng hoạt động ăn mòn, cho thấy cốt thép vẫn tiếp tục bị ăn mòn. Mức độ suy giảm khối lượng cốt thép dự đoán từ thí nghiệm tại Mục 3.3.2, với giá trị tương ứng khoảng 16–18% là tương đồng với điện thế đo được. Sau khoảng thời gian 24 giờ, điện thế của nhóm mẫu này gần như không thay đổi đáng kể, phản ánh tốc độ biến đổi điện thế chậm khi không có tác động của hệ thống bảo vệ.
- Ngược lại, các mẫu cột được bảo vệ catốt bằng hệ thống sử dụng lưới sợi các bon làm điện cực anốt có điện thế cốt thép nằm trong khoảng từ -0,909 V đến -0,994 V. Theo biểu đồ Pourbaix và tiêu chuẩn ISO 12696:2016, các giá trị này thuộc vùng ổn định, trong đó cốt thép được duy trì ở trạng thái không bị hòa tan điện hóa. Sau khi ngắt nguồn bảo vệ, độ suy giảm điện thế đo được chỉ khoảng 8–14 mV sau 4 giờ và 40–60 mV sau 24 giờ. **Độ suy giảm điện thế sau 24 giờ nhỏ hơn 100 mV chưa đạt theo tiêu chuẩn ISO 12696:2016. Điều này có thể được giải thích là do điện thế cốt thép được đo tại thời điểm chu kỳ ướt, dẫn đến cột đang bị bão hòa và thiếu**

ô xi để trao đổi điện tử. Hệ thống bảo vệ sử dụng lưới sợi các bon SITgrid017 đóng vai trò anốt trợ kết hợp với mật độ dòng điện ngoài 20 mA/m² có khả năng duy trì trạng thái bảo vệ chống ăn mòn ổn định cho thép cột trong dung dịch NaCl.

d. Kết quả cân khối lượng cốt thép

Sau giai đoạn thí nghiệm cơ học, lớp bê tông bao quanh được loại bỏ nhằm thu hồi hệ cốt thép bên trong cấu kiện. Các thanh cốt thép sau đó được làm sạch bề mặt, xác định khối lượng còn lại.

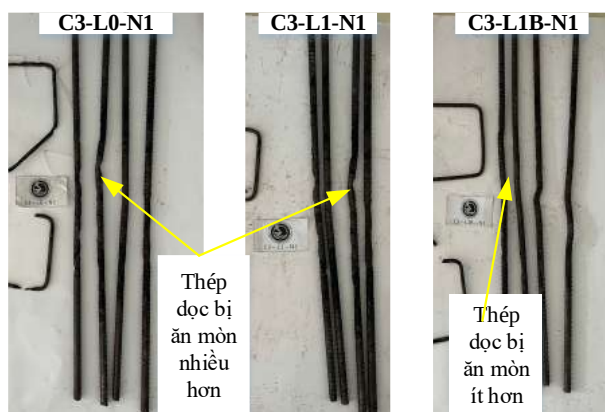
Mức độ hao hụt đường kính, tỷ lệ suy giảm khối lượng và tốc độ ăn mòn trung bình của cốt thép được tính theo công thức (1.27) và (1.28). Kết quả tổng hợp được trình bày trong *Bảng 3.13*.

Bảng 3.13: Kết quả mức độ ăn mòn khối lượng cốt thép dọc

STT	Tên mẫu	Mất mát khối lượng cốt thép dọc (%)	Mất mát khối lượng cốt thép dọc trung bình (%)	Chênh lệch sau 23 chu kỳ khô – ướt (%)	Mức độ suy giảm đường kính cốt thép sau 23 chu kỳ khô – ướt (mm)	Tốc độ ăn mòn cốt thép do chu kỳ khô – ướt (mm/năm)
1	C3 - L0 - N1	17%	18%	4%	0,14	0,16
2	C3 - L0 - N2	18%				
3	C3 - L1 - N1	16%	17%	3%	0,11	0,13
4	C3 - L1 - N2	17%				
5	C3 - L1B - N1	13%	14%	0%		
6	C3 - L1B - N2	14%				

Các mẫu cột không được bảo vệ catốt (nhóm C3-L0 và C3-L1) tiếp tục xuất hiện quá trình ăn mòn phát triển dưới ảnh hưởng của chu trình khô – ướt trong môi trường chứa ion Cl⁻. Cụ thể, mức suy giảm khối lượng cốt thép tăng thêm khoảng 3–4%, tương ứng ăn mòn khoảng 0,15 mm/năm. Các cột được áp dụng đồng thời giải pháp tăng cường BTCLD và bảo vệ catốt (C3-L1B), mức độ suy giảm khối lượng cốt thép gần như không thay đổi đáng kể trong suốt thời gian thí nghiệm. Quan sát trực tiếp sau khi tháo dỡ mẫu (*Hình 3.42*), cũng cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa hai nhóm cấu kiện. Đối với các cột không được bảo vệ điện hóa, bề mặt cốt thép xuất hiện nhiều vị trí bị ăn mòn sâu, đặc biệt tại vùng giao nhau giữa cốt thép dọc và cốt đai – nơi thường xảy ra hiện tượng tích tụ sản phẩm ăn mòn và suy giảm cục bộ tiết diện thép. Ngược lại, các thanh thép trong nhóm C3-L1B vẫn duy

trì được hình dạng ban đầu, mức độ ăn mòn quan sát được nhỏ hơn đáng kể và không bị phá hoại nghiêm trọng. Như vậy, BTCLD không chỉ mang lại hiệu quả về mặt tăng cường cơ học mà lưới sợi các bon còn có khả năng đảm nhận vai trò làm điện cực anốt trong hệ thống chống ăn mòn bằng dòng điện ngoài. Sự phối hợp giữa hai chức năng này giúp hạn chế quá trình ăn mòn của cốt thép, từ đó góp phần kéo dài tuổi thọ làm việc của cấu kiện BTCT trong môi trường có nguy cơ xâm nhập ion Cl^- .



Hình 3.42: So sánh mức độ ăn mòn cốt thép dọc

Kết quả này cho thấy hệ thống bảo vệ catốt sử dụng lưới dệt sợi các bon có khả năng duy trì hiệu quả kiểm soát ăn mòn trong thời gian dài (khoảng 322 ngày), nếu được áp dụng với cấu hình vật liệu và điều kiện môi trường như nghiên cứu.

e. Kết quả nén dọc trục

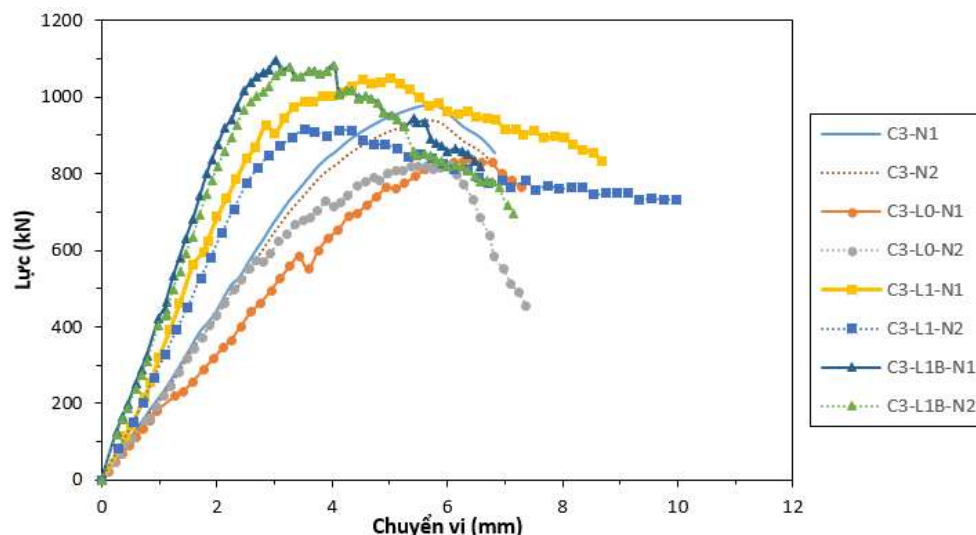
Kết quả nén dọc trục đúng tâm các cột được tổng hợp trong Bảng 3.14.

Bảng 3.14: Kết quả lực nén dọc trục lớn nhất và mức độ ăn mòn cốt thép dọc

STT	Tên mẫu	Mất mát khối lượng cốt thép dọc (%)	Mất mát khối lượng cốt thép dọc trung bình (%)	Lực nén lớn nhất (kN)	Lực nén trung bình (kN)	Tỷ lệ	Chênh lệch (%)
1	C3 - N1	0	0%	978,55	958,98	1	0
2	C3 - N2	0		939,41			
3	C3 - L0 - N1	17%	18%	834,85	828,26	0,86	-14%
4	C3 - L0 - N2	18%		821,68			
5	C3 - L1 - N1	16%	17%	1049,50	982,21	1,02	2%
6	C3 - L1 - N2	17%		914,91			
7	C3 - L1B - N1	13%	14%	1097,94	1089,80	1,14	14%
8	C3 - L1B - N2	14%		1081,67			

Hình 3.43 thể hiện đường cong quan hệ lực – chuyển vị, trong khi từ Hình 3.44 cho đến Hình 3.50 trình bày các dạng phá hoại cũng như các vết nứt xuất hiện trên các mẫu cột. Dù chịu các điều kiện xử lý khác nhau, các nhóm cột đều thể hiện quy luật làm việc tương đồng. Chuyển vị dọc trục tăng gần tuyến tính theo sự gia tăng của lực nén, thể hiện trạng thái làm việc chủ yếu trong miền đàn hồi. Sự khác biệt giữa các nhóm mẫu thể hiện rõ hơn khi tải trọng tăng dần đến cực hạn, phụ thuộc vào mức độ suy giảm cốt thép và sự xuất hiện của lớp BTCLD tăng cường.

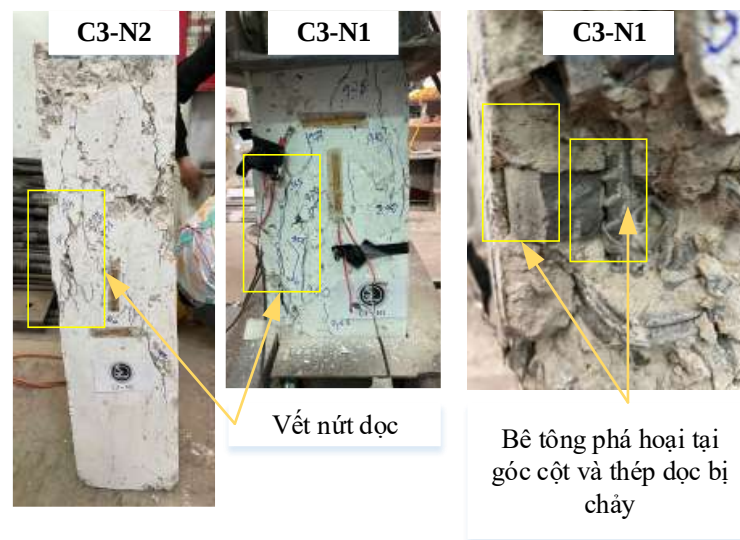
Các cột đối chứng C3-N1, C3-N2 và C3-N3 có các vết nứt theo phương dọc xuất hiện tại tải trọng khoảng 650 kN. Các vết nứt này phát triển dọc theo chiều cao cấu kiện, đồng thời bề rộng vết nứt tăng nhanh trước khi xảy ra phá hoại. Giá trị tải trọng lớn nhất của nhóm này đạt khoảng 960 kN.



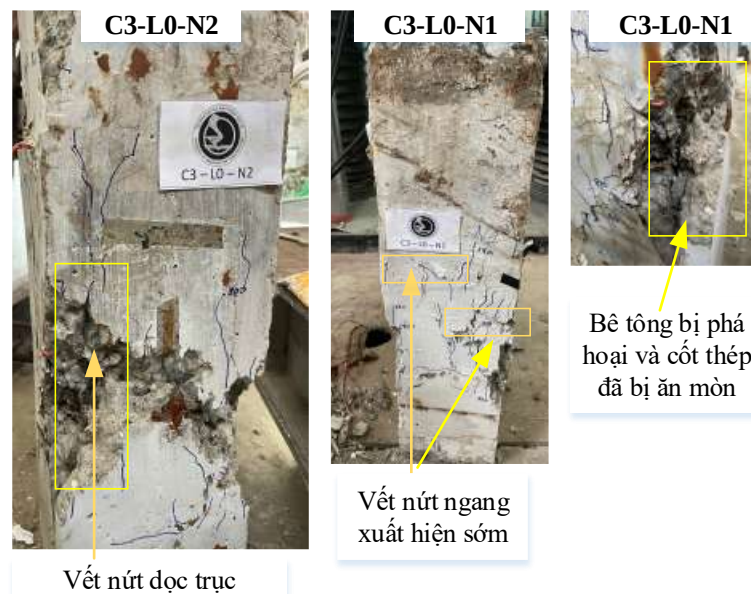
Hình 3.43: Quan hệ lực - chuyển vị dọc trục của các cột bị ăn mòn so với cột đối chứng

Tại trạng thái giới hạn cuối cùng, sự phá hoại tập trung chủ yếu tại vùng giữa chiều cao cột, nơi các cốt đai được bố trí thưa (150 mm). Ở đây, bê tông cột chịu ứng suất nén lớn dẫn đến hiện tượng nghiền cục bộ, trong khi lớp bê tông bảo vệ phía ngoài bị mất liên kết và bong tách khỏi thân cột. Đồng thời, các thanh cốt thép dọc xuất hiện hiện tượng mất ổn định (Hình 3.44). Các cột C3-L0-N1 và C3-L0-N2 có dạng phá hoại nhìn chung tương tự nhóm đối chứng (Hình 3.45). Tuy nhiên, quá trình ăn mòn trước đó đã làm suy giảm đáng kể về sức kháng nén. Lực nén cực hạn trung bình của nhóm này chỉ đạt khoảng 828 kN, thấp hơn khoảng 14% so với nhóm cột không bị ăn mòn.

Một điểm khác biệt quan trọng của các mẫu đã bị ăn mòn là sự xuất hiện sớm của các vết nứt theo phương ngang tại vị cốt thép đai. Nguyên nhân xuất phát từ áp lực giãn nở của sản phẩm ăn mòn hình thành xung quanh cốt đai. Khi chịu tác dụng của lực nén từ tải trọng, các vết nứt theo phương ngang có bề rộng tăng nhanh, làm giảm hiệu quả kiềm chế ngang của cốt đai. Tuy nhiên, cơ chế chi phối các dạng phá hoại cuối của cột vẫn là sự phát triển của các vết nứt dọc lớn trong thân cột.



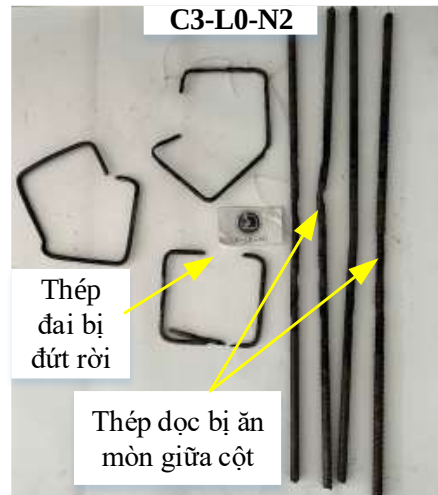
Hình 3.44: Dạng phá hoại của cột đối chứng C3-N1 và C3-N2 (cột không bị ăn mòn)



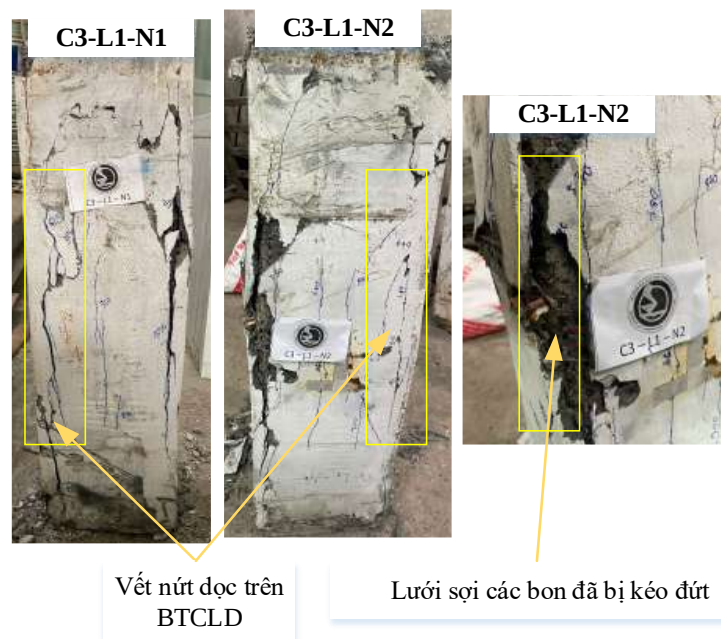
Hình 3.45: Dạng phá hoại của cột bị ăn mòn C3-L0-N1 và C3-L0-N2

Các thanh thép được thu hồi, làm sạch và cân lại để đánh giá mức độ suy giảm khối lượng sau thí nghiệm nén dọc trục. Kết quả quan sát (Hình 3.46) cho thấy các thanh cốt

thép đều bị hư hỏng nặng do ăn mòn. Mức độ hư hỏng nghiêm trọng nhất tập trung tại các vị trí giao nhau giữa thép dọc và thép đai, trong đó xuất hiện hiện tượng ăn mòn cục bộ dạng điểm trên cốt đai. Khối lượng cốt thép bị mất mát xác định được lần lượt khoảng 18% đối với cốt thép dọc và 13% đối với cốt thép đai.

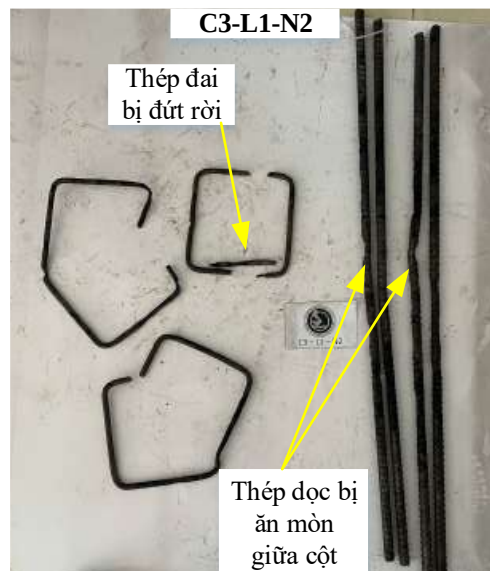


Hình 3.46: Ăn mòn cốt thép trên cột C3-L0-N1 và C3-L0-N2



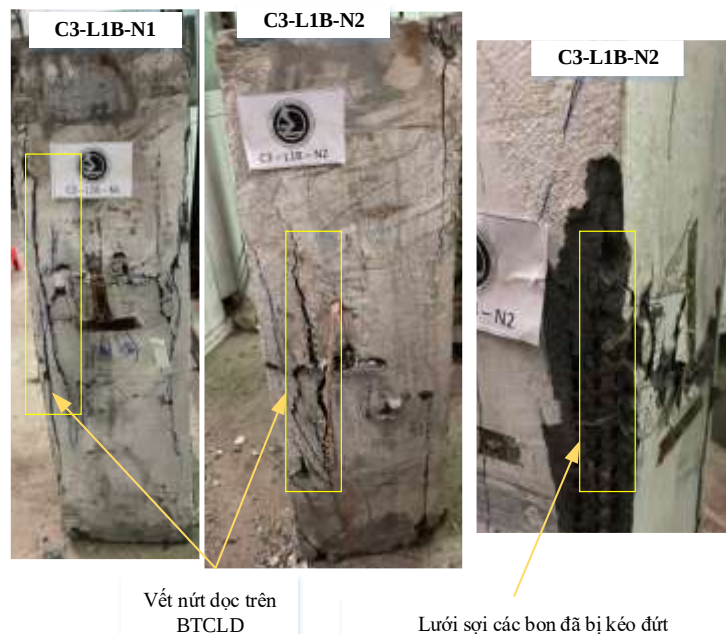
Hình 3.47: Dạng phá hoại của cột bị ăn mòn, được tăng cường (C3-L1-N1 và C3-L1-N2)

Các cột C3-L1-N1 và C3-L1-N2 có các vết nứt thép phương dọc ở tải trọng 750 kN. Nhờ lớp vỏ BTCLD, bề mặt ngoài của cột được duy trì tương đối nguyên vẹn, không xuất hiện hiện tượng vỡ vụn hoặc bong tách lớp như ở các mẫu không được tăng cường (Hình 3.47).



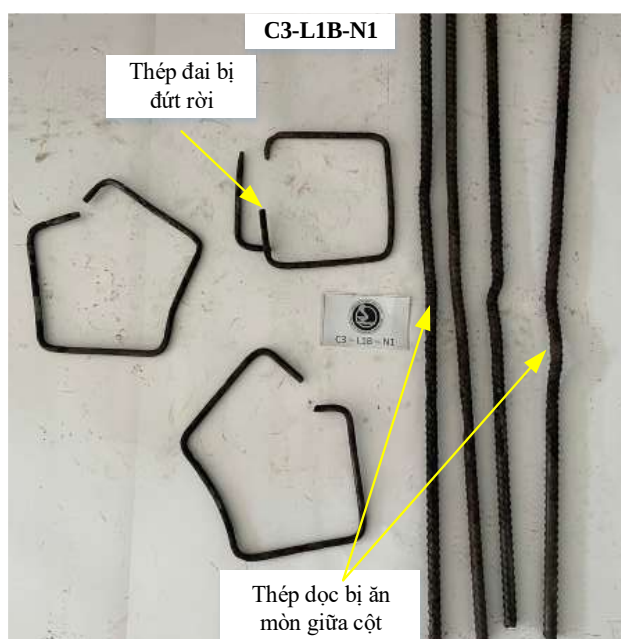
Hình 3.48: Ăn mòn cốt thép trên cột C3-L1-N1 và C3-L1-N2

Sau khi thu hồi cốt thép để kiểm tra mức độ mất mát khối lượng, kết quả cho thấy các thanh thép trong nhóm C3-L1 vẫn tiếp tục bị ăn mòn. Tỷ lệ mất mát khối lượng đo được lần lượt đạt khoảng 17% cho thép dọc và 12% cho thép đai (Hình 3.48). Các giá trị này gần tương đương với nhóm cột không được tăng cường C3-L0, chứng tỏ việc sử dụng lớp BTCLD đơn thuần chủ yếu phát huy tác dụng cải thiện khả năng chịu lực mà chưa tạo ra hiệu quả bảo vệ chống ăn mòn đáng kể khi không kết hợp với hệ thống bảo vệ.



Hình 3.49: Dạng phá hoại của các cột được bảo vệ catốt (C3-L1B-N1 và C3-L1B-N2)

Các mẫu C3-L1B-N1 và C3-L1B-N2 là nhóm cột đồng thời chịu tác động của hai giải pháp: tăng cường bằng BTCLD sợi các bon và bảo vệ chống ăn mòn cốt thép sử dụng dòng điện ngoài. Kết quả quan sát cho thấy dạng phá hoại của nhóm mẫu này nhìn chung tương đồng với các nhóm cột đã phân tích trước đó. Các cột đều có các vết nứt theo phương dọc và hiện tượng phá hoại vùng lõi bê tông (Hình 3.49). Tuy nhiên, khả năng chịu lực của nhóm cột này được duy trì ở mức cao hơn rõ rệt. Giá trị lực nén cực hạn trung bình đạt khoảng 1090 kN, tăng khoảng 12% so với nhóm cột chỉ tăng cường bằng BTCLD nhưng không áp dụng bảo vệ catốt (C3-L1), đồng thời cao hơn khoảng 26% so với nhóm cột đối chứng C3-L0.



Hình 3.50: Ăn mòn cốt thép trên cột C3-L1B-N1

Kết quả đánh giá sau thí nghiệm (Hình 3.50) cho thấy mức suy giảm khối lượng cốt thép dọc của nhóm C3-L1B chỉ khoảng 14%, trong khi cốt thép đai giảm khoảng 8%. Các giá trị này thấp hơn đáng kể so với nhóm mẫu cột đối chứng và không được bảo vệ. Quan sát trực tiếp cho thấy các thanh thép vẫn giữ được hình dạng tương đối nguyên vẹn, không xuất hiện hiện tượng ăn mòn sâu hoặc phá hủy cục bộ nghiêm trọng.

Như vậy, hệ BTCLD sử dụng lưới sợi các bon đã thể hiện khả năng đảm nhận đồng thời hai chức năng: (i) tăng cường khả năng chịu nén thông qua hiệu ứng bao bọc và kiểm chế biến dạng ngang; (ii) đóng vai trò là một anốt trợ trong hệ thống bảo vệ catốt nhằm kiểm soát quá trình ăn mòn cốt thép. Đây là ưu điểm nổi bật của giải pháp tích hợp được đề xuất

trong nghiên cứu này so với các phương pháp tăng cường truyền thống chỉ tập trung vào khía cạnh cơ học.

3.4 SO SÁNH KẾT QUẢ TÍNH TOÁN TỪ MÔ HÌNH LÝ THUYẾT VÀ KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Bảng 3.15 trình bày sự so sánh giữa sức kháng nén cực hạn xác định từ thí nghiệm và kết quả dự báo theo mô hình tính toán được xây dựng trong Chương 2. Nhìn chung, mô hình lý thuyết cho thấy mức độ tương thích tốt với kết quả thực nghiệm trong toàn bộ các trường hợp khảo sát.

Bảng 3.15: So sánh kết quả lực nén dọc trục lớn nhất từ tính toán lý thuyết và nghiên cứu thực nghiệm

Loại cột	Giá trị tải trọng lớn nhất P_u		
	Thực nghiệm (kN)	Tính toán (kN)	Sai số tính toán (%)
Cột không bị ăn mòn C0	1186,0	1152,0	-3%
Cột bị ăn mòn 8% không gia cường C1 - L0	1112,0	1054,9	-5%
Cột bị ăn mòn 22% không gia cường C2 - L0	862,5	854,7	-1%
Cột bị ăn mòn 8% có gia cường 1 lớp BTCLD C1- L1	1513,0	1467,5	-3%
Cột bị ăn mòn 8% có gia cường 2 lớp BTCLD C1 - L2	1704,2	1652,4	-3%
Cột bị ăn mòn 22% có gia cường 1 lớp BTCLD C2 - L1	1475,0	1426,7	-3%
Cột bị ăn mòn 22% có gia cường 2 lớp BTCLD C2 - L2	1739,2	1611,5	-7%

Các cột đối chứng không bị ăn mòn, giá trị sức kháng tính toán thấp hơn kết quả thực nghiệm khoảng 3%. Với nhóm cột bị ăn mòn ở mức 8%, với sai số giữa hai phương pháp khoảng 5%. Điều này cho thấy mô hình đã phản ánh tương đối chính xác ảnh hưởng của sự suy giảm tiết diện cốt thép cũng như sự thay đổi khả năng chịu lực của cấu kiện sau quá trình ăn mòn.

Đối với các mẫu cột bị ăn mòn 8% và được tăng cường bằng BTCLD sợi các bon, sai lệch giữa tính toán và thực nghiệm duy trì ở mức thấp, khoảng 3% cho cả hai trường hợp tăng cường một lớp và hai lớp lưới sợi. Kết quả này chứng minh khả năng của mô hình trong việc mô phỏng hiệu ứng gia tăng sức kháng do lớp BTHM và cơ chế kiểm chế của lưới sợi dệt.

Đối với nhóm cột bị ăn mòn nặng hơn (22%), kết quả tính toán tiếp tục thể hiện sự phù hợp với thực nghiệm. Sai số đạt khoảng 1% đối với mẫu không tăng cường, khoảng 3%

đối với mẫu tăng cường một lớp và tăng lên khoảng 7% đối với trường hợp tăng cường hai lớp BTCLD. Mặc dù mức sai lệch có xu hướng tăng khi mức độ tăng cường lớn hơn, toàn bộ kết quả vẫn nằm trong phạm vi chấp nhận được đối với mô hình dự báo sức kháng của kết cấu bê tông cốt thép bị suy giảm do ăn mòn.

Kết quả đo điện thế cốt thép thu được trong quá trình thí nghiệm cho thấy có sự tương quan rõ ràng giữa trạng thái điện hóa của cốt thép và mức độ suy giảm do ăn mòn. Khi đối chiếu giá trị điện thế đo được với trạng thái ổn định của hệ thép – bê tông theo biểu đồ Pourbaix, có thể nhận thấy các giá trị điện thế phản ánh phù hợp sự chuyển dịch của cốt thép từ trạng thái ổn định sang trạng thái hoạt động ăn mòn.

Đối với các mẫu cột không được bảo vệ, khi mức độ suy giảm khối lượng cốt thép tăng lên, điện thế của cốt thép có xu hướng dịch chuyển theo hướng dương hơn, từ khoảng -0,75 V đến khoảng -0,53 V. Sự thay đổi này thể hiện quá trình mất ổn định điện hóa của lớp màng bảo vệ tự nhiên trên bề mặt thép và sự gia tăng hoạt động ăn mòn trong môi trường chứa ion Cl^- .

Mối quan hệ giữa điện thế cốt thép và mức độ ăn mòn có xu hướng gần tuyến tính trong phạm vi nghiên cứu. Điều này cho thấy phép đo điện thế có thể được xem là một chỉ báo gián tiếp hữu ích để đánh giá tình trạng ăn mòn của cốt thép trong các cấu kiện BTCT hiện hữu. Ngược lại, trong điều kiện thực tế khi chưa thể xác định trực tiếp mức độ suy giảm tiết diện thép, giá trị điện thế đo được có thể được sử dụng để hỗ trợ dự báo mức độ hư hỏng và lựa chọn giải pháp xử lý phù hợp.

Kết quả này có ý nghĩa quan trọng trong công tác đánh giá hiện trạng công trình, đặc biệt đối với các kết cấu BTCT làm việc trong môi trường biển, khu vực ven biển hoặc các vị trí chịu tác động thường xuyên của ion Cl^- . Phương pháp đo điện thế không chỉ có ưu điểm về tính đơn giản và khả năng áp dụng tại hiện trường mà còn cho phép theo dõi hiệu quả hoạt động của các hệ thống bảo vệ chống ăn mòn sau khi triển khai.

3.5 KẾT LUẬN CHƯƠNG 3

Trên cơ sở kết quả thí nghiệm về khả năng tăng cường chịu nén, hiệu quả bảo vệ chống ăn mòn và sự đối chiếu với mô hình tính toán lý thuyết, một số nhận xét chính được rút ra như sau:

- Quá trình ăn mòn cốt thép gây ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng chịu nén dọc trục và độ cứng của cột BTCT. Khi mức suy giảm khối lượng cốt thép ở mức thấp khoảng 8%, sức kháng nén của cột chỉ giảm khoảng 5,7% so với mẫu đối chứng. Tuy nhiên, khi mức độ ăn mòn tăng lên khoảng 22%, khả năng chịu lực giảm mạnh đến khoảng 28,8%, đồng thời độ cứng cấu kiện giảm khoảng 65%. Sự suy giảm này không chỉ xuất phát từ việc giảm diện tích tiết diện thép mà còn liên quan đến sự phá hủy lớp bê tông bảo vệ, suy giảm liên kết giữa bê tông và cốt thép, cũng như sự giảm hiệu quả kiểm chế ngang của hệ cốt đai do ăn mòn.
- Việc sử dụng BTCLD sợi các bon giúp cải thiện đáng kể khả năng chịu lực của cột BTCT bị suy giảm do ăn mòn. Đối với nhóm cột có mức ăn mòn khoảng 8%, sức kháng nén tăng lần lượt khoảng 36,2% và 48,6% khi sử dụng một lớp và hai lớp lưới sợi so với mẫu bị ăn mòn không tăng cường. Đối với nhóm cột chịu mức ăn mòn cao hơn khoảng 22%, hiệu quả tăng cường thể hiện rõ hơn, với mức tăng sức chịu lực tương ứng khoảng 82,7% và 107% cho trường hợp tăng cường một lớp và hai lớp BTCLD. Cơ chế nâng cao khả năng chịu lực của BTCLD được giải thích bởi sự kết hợp của nhiều yếu tố: bổ sung diện tích tiết diện chịu lực, phục hồi lớp bảo vệ bên ngoài, tăng khả năng bao bọc bê tông lõi và hạn chế biến dạng ngang thông qua sự làm việc của lưới sợi dệt. Đồng thời, lớp BTCLD còn góp phần làm giảm nguy cơ mất ổn định của cốt thép dọc trong giai đoạn chịu tải lớn.
- Mô hình lý thuyết được xây dựng trong Chương 2 dựa trên nguyên lý đóng góp riêng của bê tông lõi, cốt thép bị suy giảm do ăn mòn và lớp BTCLD tăng cường đã thể hiện sự phù hợp tốt với kết quả thực nghiệm. Sai số giữa giá trị dự báo và kết quả thí nghiệm nằm trong **khoảng 1% đến 7%**, đồng thời phần lớn kết quả tính toán có xu hướng thấp hơn thực nghiệm. Điều này cho thấy mô hình có tính bảo thủ phù hợp, có thể sử dụng để dự báo khả năng chịu lực của cột BTCT bị ăn mòn được tăng cường bằng BTCLD sợi các bon.
- Kết quả khảo sát đặc tính điện hóa cho thấy lưới sợi các bon SITgrid017 phủ SBR có khả năng dẫn điện và phân cực ổn định trong môi trường chứa ion Cl^- . Điện thế phân cực của vật liệu đạt khoảng -0,4 V, chứng minh khả năng hoạt động tương tự

một điện cực anot trơ. Khi được tích hợp trong hệ thống bảo vệ catốt, lưới sợi các bon giúp duy trì trạng thái điện hóa an toàn cho cốt thép và hạn chế quá trình ăn mòn phát triển trong điều kiện môi trường khô – ướt chứa NaCl.

- Phương pháp gia tốc ăn mòn bằng dòng điện ngoài cho phép rút ngắn đáng kể thời gian hình thành mức độ suy giảm cốt thép mong muốn. Trong phạm vi nghiên cứu, khi mức mất mát khối lượng thép tăng từ 0% đến khoảng 26%, điện thế cốt thép thay đổi từ khoảng -0,75 V đến -0,53 V, thể hiện sự dịch chuyển từ trạng thái ổn định sang vùng ăn mòn mạnh theo biểu đồ Pourbaix. Kết quả này khẳng định khả năng sử dụng phép đo điện thế như một công cụ đánh giá nhanh mức độ suy giảm của cốt thép trong các cấu kiện BTCT.
- Trong điều kiện thí nghiệm gồm 23 chu kỳ khô – ướt trong dung dịch NaCl 3,5%, các mẫu không được bảo vệ tiếp tục gia tăng mức độ ăn mòn từ khoảng 14% lên 17%, tương ứng tốc độ ăn mòn trung bình khoảng 0,15 mm/năm. **Ngược lại, nhóm cốt sử dụng BTCLD sợi các bon kết hợp bảo vệ catốt với mật độ dòng điện 20 mA/m² hầu như không ghi nhận sự gia tăng đáng kể về mức độ ăn mòn.** Điều này chứng minh hiệu quả của giải pháp tích hợp trong việc vừa phục hồi khả năng chịu lực vừa kiểm soát quá trình suy giảm do ăn mòn của kết cấu BTCT.

Kết quả nghiên cứu của Chương 3 được sử dụng trong các phần thí nghiệm và so sánh kết quả giữa mô hình lý thuyết, mô hình phần tử hữu hạn với thực nghiệm trong các công trình khoa học của luận án như sau:

- Đinh Hữu Tài, Vũ Văn Hiệp, Đặng Việt Tuấn (2026), *Nghiên cứu mô hình lý thuyết tính toán khả năng chịu lực nén dọc trục cho cột bê tông cốt thép có cốt đã bị ăn mòn được gia cường bằng bê tông cốt lưới dệt sợi các bon*, Tạp chí Người xây dựng, số 408 tháng 4.
- Đinh Hữu Tài, Bùi Quang Tuấn (2024), *Nghiên cứu thực nghiệm đánh giá hiệu quả bảo vệ chống ăn mòn cốt thép trong bê tông của bê tông cốt lưới dệt sợi các bon*, tạp chí Giao thông vận tải, số 8 (2024) – Tác giả chính.

- Hồ Thị Hoài, Đinh Hữu Tài (2024), *Nghiên cứu mô phỏng khả năng chịu lực của cột bê tông cốt thép bị ăn mòn được gia cường bằng bê tông cốt lưới dệt*, tạp chí Cầu đường Việt Nam, số (7/2024) – Tác giả tham gia.
- Huu Tai Dinh, Dang Quang Ngo, Hoai Ho and Huy Cuong Nguyen (2023), *Experimental and numerical evaluation of axial compression strengthening for corroded reinforced concrete columns by carbon textile reinforced concrete*, The 4th International Conference on Transportation Infrastructure and Sustainable Development (TISDIC 2023) - Tác giả chính, Tác giả báo cáo tại hội thảo khoa học quốc tế.

CHƯƠNG 4: NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG SỐ VỀ ỨNG XỬ CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỰC CHO KẾT CẤU CỘT BÊ TÔNG CỐT THÉP CÓ CỐT ĐÃ BỊ GỈ BẰNG BÊ TÔNG CỐT LƯỚI DỆT SỢI CÁC BON

4.1 MỤC ĐÍCH NGHIÊN CỨU

Chương này trình bày việc áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) nhằm xây dựng mô hình số cho các thí nghiệm nén dọc trục đúng tâm của cột BTCT có cốt bị gỉ sét và bọc tăng cường bằng BTCLD sợi các bon. Các mô hình mô phỏng này được hiệu chỉnh dựa trên kết quả thực nghiệm đã trình bày ở Chương 3. Ngoài ra, kết quả từ mô hình được sử dụng để kiểm chứng ứng xử chịu lực nén dọc trục của các cấu kiện. Sau khi mô hình được hiệu chỉnh và xác nhận, ảnh hưởng của hai nhóm tham số chính được tìm hiểu, gồm mức độ ăn mòn của cốt thép dọc và số lớp BTCLD sợi các bon bố trí để tăng cường. Trên cơ sở kết quả thu được, luận án đánh giá hiệu quả phục hồi và nâng cao sức kháng nén của cột BTCT theo từng mẫu khảo sát, đồng thời đề xuất các khuyến nghị phục vụ việc lựa chọn phương án sửa chữa thích hợp đối với cột BTCT có cốt bị gỉ bằng BTCLD sợi các bon.

4.2 GIỚI THIỆU PHẦN MỀM PHẦN TỬ HỮU HẠN ATENA 3D

ATENA 3D là phần mềm chuyên dụng cho phân tích phi tuyến cho cấu kiện BTCT. Phần mềm có giao diện trực quan, tạo thuận lợi cho quá trình thiết lập và xử lý mô hình. Phần mềm phát triển dựa trên sự kết hợp giữa phương pháp phần tử hữu hạn và lý thuyết cơ học phá hủy, cho phép mô phỏng chi tiết ứng xử cơ học của kết cấu BTCT cũng như các vật liệu bị phá hoại giòn. Thông qua ATENA 3D, có thể tái hiện quá trình làm việc của kết cấu khi chịu tác dụng của tải trọng, theo dõi sự hình thành và lan truyền của các vết nứt trong bê tông, đồng thời đánh giá quá trình biến dạng và phá hoại của cốt thép. Bên cạnh khả năng mô hình hóa các vật liệu và kết cấu thông dụng như BT, BTCT, gạch và khối xây, phần mềm còn hỗ trợ mô phỏng nhiều hệ vật liệu tiên tiến, trong đó có BTCLD, lưới sợi dệt và các loại vật liệu composite phục vụ nghiên cứu kết cấu hiện đại.

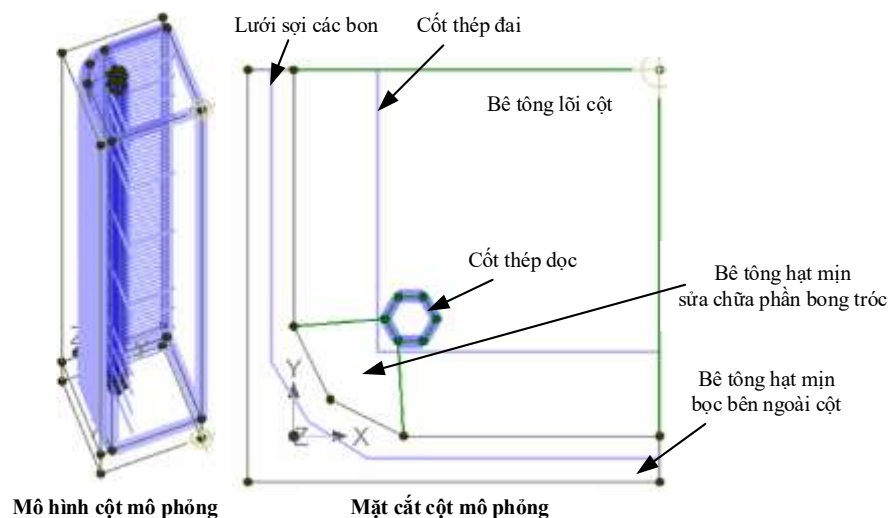
4.3 XÂY DỰNG MÔ HÌNH MÔ PHỎNG SỐ BẰNG PHẦN MỀM PHẦN TỬ HỮU HẠN ATENA 3D

4.3.1 Phương pháp mô phỏng

Mô hình cột BTCT có mặt cắt tiết diện vuông đã được thí nghiệm ở Mục 3.2 được sử dụng để mô hình hóa trong phần mềm PTHH. Trên nền tảng ATENA Engineering 3D, các mô hình số của cột BTCT có cốt bị gỉ và được bọc bằng BTCLD sợi các bon được thiết lập nhằm tái hiện điều kiện thí nghiệm.

Do tiết diện cột có tính đối xứng theo hai phương, mô hình tính toán được rút gọn còn một phần tư kết cấu nhằm giảm số lượng phần tử, qua đó tăng độ chính xác của tính toán và giảm số lần phân tích. Trên các mặt phẳng đối xứng, điều kiện biên đối xứng được áp dụng bằng cách khống chế chuyển vị theo hai phương ngang (X và Y), trong khi chuyển vị theo phương thẳng đứng (Z) vẫn được phép phát triển khi chịu tải.

Mô hình PTHH của cột BTCT tăng cường bằng BTCLD sợi các bon trong ATENA Engineering 3D được minh họa ở Hình 4.1.



Hình 4.1: Mô hình phần tử hữu hạn của cột bị ăn mòn và được tăng cường bằng BTCLD

BT lõi và lớp BTHM được biểu diễn bằng các phần tử khối (solid elements), còn cốt thép chịu lực và lưới sợi các bon được mô hình hóa bằng các phần tử thanh (truss/beam elements). Điều kiện liên kết tại chân cột được thiết lập bằng cách cố định hoàn toàn các nút ở mặt đáy, tức mọi bậc tự do chuyển vị đều được triệt tiêu ($u = 0$), nhằm mô phỏng trạng thái ngàm của mẫu thí nghiệm.

Ba nhóm mô hình PTHH được xây dựng, bao gồm:

- Nhóm 1: Mô hình C0-FEM đại diện cho cột không bị ăn mòn.
- Nhóm 2: Các mô hình C1-FEM, C1L1-FEM và C1L2-FEM tương ứng với mức suy giảm khối lượng cốt thép khoảng 8%, trong đó lần lượt không tăng cường, tăng cường bằng một lớp và hai lớp BTCLD sợi các bon.
- Nhóm 3: Các mô hình C2-FEM, C2L1-FEM và C2L2-FEM tương ứng với mức ăn mòn khoảng 22%, bao gồm các trường hợp không tăng cường, tăng cường một lớp và tăng cường hai lớp BTCLD sợi các bon.

Quá trình phân tích số được thực hiện theo hai giai đoạn liên tiếp nhằm phản ánh đúng diễn biến của thí nghiệm. Trong **Construction Case 1**, tác hại do ăn mòn cốt thép gây ra được mô phỏng thông qua việc giảm các chỉ tiêu cơ học của cốt thép, đồng thời xét đến áp lực do sự giãn nở của sắt bị gỉ sét tác động lên lớp bê tông bao quanh. Sau khi hoàn thành giai đoạn này, mô hình được chuyển sang **Construction Case 2**, trong đó lực nén dọc trục được áp dụng theo phương pháp điều khiển chuyển vị để mô phỏng quá trình thí nghiệm đã thực hiện ở Chương 3.

4.3.2 Mô hình vật liệu của bê tông, cốt thép và bê tông cốt lưới dệt

Trong mô hình số PTHH, BT lõi của cột và lớp BTHM được mô tả thông qua mô hình vật liệu “CC3DnonLinCementitious2” [69] (*Hình 4.2a và Hình 4.2c*). Đây là mô hình vật liệu phi tuyến có thể mô tả toàn diện ứng xử của bê tông từ giai đoạn đàn hồi, giai đoạn phát triển vết nứt, đến quá trình hóa dẻo và phá hoại cuối cùng. Để phản ánh ảnh hưởng của lớp BTCLD đối với sự hạn chế biến dạng nở ngang của BT lõi cột, hệ số giãn nở dẻo của BT được lấy bằng 0,3 theo chỉ dẫn từ Vassilis và cộng sự [73]. Đối với lớp BTHM, cường độ chịu nén được giả định giảm khoảng 25% so với giá trị thí nghiệm do ảnh hưởng lưới sợi dệt, phù hợp với khuyến nghị của Bochmann [54]. Các thông số của hai mô hình vật liệu này được tổng hợp trong *Bảng 4.1*.

Bảng 4.1: Thông số đầu vào của vật liệu bê tông và BTHM

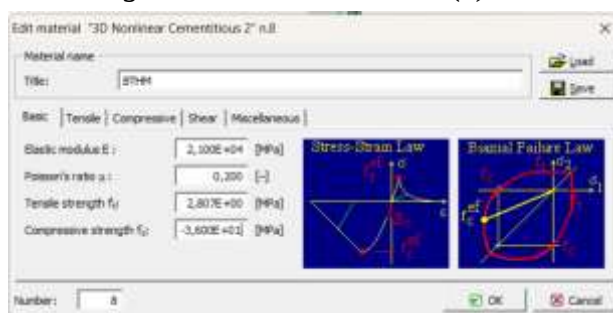
Thông số	Kí hiệu	Bê tông lõi	Bê tông hạt mịn	Đơn vị
Cường độ chịu nén	f'_c	22,2	38,2	MPa
Mô đun đàn hồi	E_c	25,7	21	GPa
Hệ số Poisson	ν	0,2	0,2	
Biến dạng dẻo khi đạt cường độ chịu nén	ϵ_{cp}	0,00088	0,018	
Độ lệch tâm	e	0,52	0,52	
Hệ số giãn nở dẻo	β	0,3	0	

Lưới sợi các bon được mô hình hóa bằng mô hình đa tuyến tính (Multilinear), với cường độ chịu lớn nhất bằng 2890 MPa, biến dạng tới hạn đạt 15,6‰ và mô đun đàn hồi 185 GPa (Hình 4.2b). Tuy nhiên, tại các góc bo của cột, sự uốn cong của bó sợi làm giảm đáng kể khả năng chịu kéo của vật liệu. Vì vậy, phần lưới nằm trong vùng chuyển tiếp tại góc cột được mô hình hóa riêng với chiều dài tương ứng chu vi cung bo góc và được gán các đặc trưng cơ học đã suy giảm. Theo chỉ dẫn từ Hoai Ho và cộng sự [30], khi bán kính bo góc bằng 30 mm, cường độ chịu kéo hữu hiệu của lưới sợi trong khu vực này được lấy bằng 900 MPa, tương đương khoảng 33% giá trị của sợi thẳng.



(a) Mô hình bê tông lõi cột

(b) Mô hình lưới sợi dệt

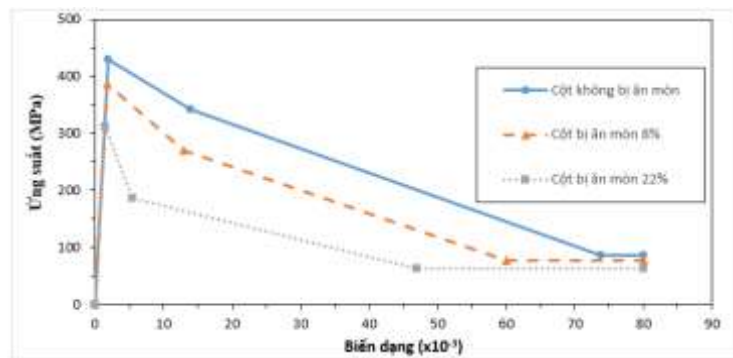


(c) Mô hình BTHM

Hình 4.2: Mô hình vật liệu của bê tông lõi, lưới sợi dệt các bon và BTHM

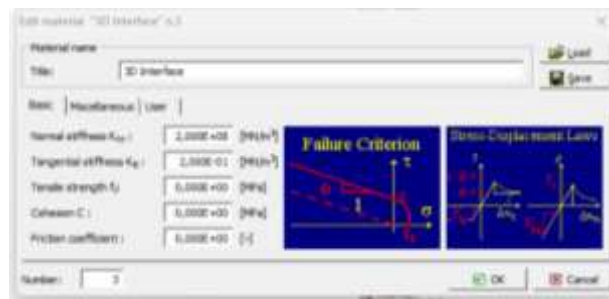
Cốt thép dọc và cốt đai cũng được mô hình hóa bằng mô hình vật liệu đa tuyến tính và có xét đến sự suy giảm diện tích tiết diện, giới hạn kéo chảy được tính toán theo các công thức (2.7) và (2.8) và sự mất ổn định được xác định theo các công thức (2.12) đến (2.15)

của mô hình Dhakal–Maekawa [57] tương ứng với ba trạng thái gồm không bị ăn mòn, ăn mòn 8% và ăn mòn 22%, biểu đồ ứng suất – biến dạng được xây dựng riêng biệt trên Hình 4.3.



Hình 4.3: Mô hình vật liệu của cốt thép

Đối với cột không bị ăn mòn, liên kết giữa BT và cốt thép cũng như giữa BTHM và lưới sợi các bon được giả thiết là dính bám tuyệt đối. Trong khi đó, trong các trường hợp bị ăn mòn còn lại, mô hình sử dụng phần tử giao diện ba chiều (3D interface element), như trình bày ở Hình 4.4.



Hình 4.4: Mô hình hóa dính bám giữa bê tông và cốt thép trong phần mềm ATENA 3D

Mô hình Mohr–Coulomb được sử dụng, trong đó ứng suất dính bám được xác định theo chuyển vị trượt tương đối giữa hai bề mặt. Khi bắt đầu chịu lực các mô hình được giả định tuân theo quy luật đàn hồi tuyến tính; khi ứng suất tiếp xúc đạt giá trị cực hạn, hiện tượng trượt và tách lớp bắt đầu xuất hiện, làm giảm sự truyền lực và phá hoại liên kết tại bề mặt tiếp xúc.

4.3.3 Mô hình hình học

Trong quá trình mô hình hóa, cốt thép và lưới sợi các bon được khai báo là các phần tử thanh(embedded elements) nằm trong các phần tử khối ba chiều đại diện cho BT lõi

BTHM. Cách tiếp cận này giúp đảm bảo sự tương thích biến dạng giữa các vật liệu, đồng thời phản ánh chính xác cơ chế làm việc đồng thời của hệ kết cấu..

Để nâng cao độ tin cậy của kết quả phân tích, toàn bộ mô hình được chia lưới bằng các phần tử tứ diện (tetrahedral elements), với mật độ lưới được tăng cường tại những khu vực có khả năng xuất hiện gradient ứng suất lớn, chẳng hạn như vùng góc cột, vị trí tiếp giáp giữa lớp BTCLD và bê tông lõi hoặc các khu vực dự kiến hình thành vết nứt.



Hình 4.5: Mô hình chia lưới phần tử cho cột

Sơ đồ chia lưới và kích thước phần tử sử dụng trong nghiên cứu được trình bày ở Hình 4.5.

Điều kiện gia tải được thiết lập theo phương pháp điều khiển chuyển vị. Chuyển vị cưỡng bức theo phương thẳng đứng được áp dụng đồng thời lên toàn bộ mặt trên của mô hình, bao gồm cả bê tông lõi và lớp BTCLD tăng cường (

Hình 4.6), nhằm tái hiện sát nhất điều kiện thí nghiệm nén đúng tâm đã thực hiện trong Chương 3.

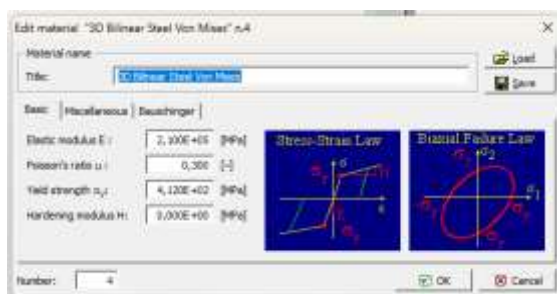


Hình 4.6: Mô phỏng tải trọng nén lên đầu cột

4.3.4 Mô hình hóa quá trình ăn mòn

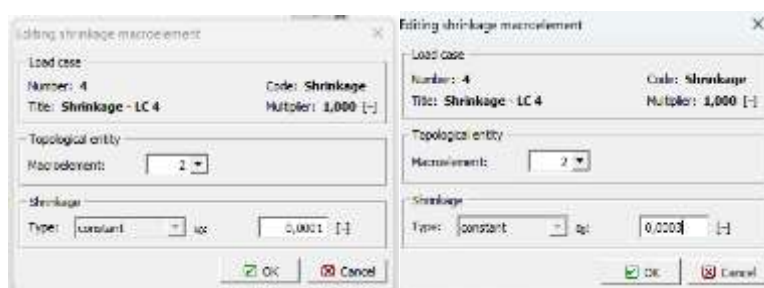
Sự ôxi hóa cốt thép không chỉ làm giảm tiết diện và sức kháng cơ học của thanh thép mà còn ảnh hưởng tiêu cực đến tính chất cơ học của bê tông bao quanh cũng như khả năng truyền lực tại vùng giữa BT và cốt thép. Để phản ánh các tác động này trong mô hình PTHH, nghiên cứu đã xây dựng một số giả thiết phù hợp với cơ chế ăn mòn và điều kiện thí nghiệm.

Quá trình ăn mòn được giả định phân bố đồng đều trên toàn bộ chiều dài và chu vi của thanh cốt thép. Theo giả thiết này, sự suy giảm diện tích tiết diện và các chỉ tiêu cơ học của cốt thép được xác định từ tỷ lệ hao hụt khối lượng thông qua các biểu thức (2.7) và (2.8) ở Mục 2.2.2.



Hình 4.7: Các thông số vật liệu cốt thép bị ăn mòn trong phần mềm ATENA

Bên cạnh đó, sản phẩm gỉ sét với thể tích lớn hơn thép ban đầu làm phát sinh hiện tượng giãn nở tại bề mặt cốt thép. Áp lực do sự giãn nở này truyền sang bê tông xung quanh, tạo ứng suất trong lớp BT bảo vệ, gây ra các vết nứt và từng bước làm suy giảm khả năng dính bám giữa hai vật liệu.



Hình 4.8: Biến dạng do giãn nở của sản phẩm gỉ sét trên bề mặt cốt thép

Trong ATENA Engineering 3D, ảnh hưởng của sự giãn nở do sản phẩm ăn mòn được mô phỏng thông qua tải trọng “**Shrinkage**”, dưới dạng biến dạng tự do đẳng hướng. Giá trị biến dạng tự do (ϵ) được xác định theo công thức (2.17) ở Mục 2.2.2 và được phân bổ

thành năm bước tính liên tiếp. Biến dạng áp dụng cho mỗi bước được lấy bằng $\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon}{5}$, tương ứng với 0,0001 m với mức ăn mòn 8% và 0,0003 m đối với mức ăn mòn 22%. Các biến dạng này được gán lên bề mặt các thanh cốt thép dọc dưới dạng biến dạng tương đối, như minh họa trong (Hình 4.8).

Trong mô hình số, vùng tiếp xúc giữa hai vật liệu được biểu diễn bằng phần tử giao diện ba chiều (3D interface element) sử dụng tiêu chuẩn phá hoại Mohr–Coulomb. Khả năng truyền lực tại bề mặt tiếp xúc được đặc trưng với các tham số: cường độ chịu kéo (f_t), hệ số dính bám (C), hệ số ma sát, độ cứng pháp tuyến (K_{nn}) và độ cứng tiếp tuyến (K_{tt}).

Cốt thép bị ăn mòn khoảng 8%, các giá trị (K_{nn}) và (K_{tt}) lần lượt được lựa chọn bằng 3×10^6 MN/m³ và 1×10^{-3} MN/m³ theo khuyến nghị của Peter Koteš [74]. Đồng thời, lực dính bám, cường độ chịu kéo và hệ số ma sát tại bề mặt tiếp xúc đều được giả thiết bằng không nhằm phản ánh sự suy giảm đáng kể của cơ chế liên kết do tác động của ăn mòn.

Khi mức độ mất mát khối lượng tăng lên khoảng 22%, dính bám của cốt thép và BT được xem là gần như mất hoàn toàn. Để mô phỏng trạng thái này, cả độ cứng pháp tuyến và độ cứng tiếp tuyến của phần tử giao diện đều được giảm xuống còn 1×10^{-3} MN/m³ và 1×10^{-3} MN/m. Việc lựa chọn các giá trị rất nhỏ này cho phép mô hình phản ánh đúng hiện tượng suy giảm gần như hoàn toàn khả năng truyền lực giữa cốt thép và BT ở giai đoạn cốt thép bị gỉ nghiêm trọng.

4.3.5 Quá trình phân tích

Trong nghiên cứu này, quá trình phân tích phi tuyến được thực hiện bằng thuật toán lặp Newton–Raphson (Hình 4.9). Lực nén dọc trục theo phương thẳng đứng được nâng cao dần cho đến phá hoại.

Tải trọng nén dọc trục được áp dụng theo phương pháp điều khiển chuyển vị và tăng dần theo từng bước cho đến khi mô hình bị phá hoại hoàn toàn. Để theo dõi ứng xử của cột BTCT trong suốt quá trình phân tích, các điểm quan trắc (monitoring points) được bố trí tại đỉnh cột nhằm ghi nhận chuyển vị và tại đáy cột để xác định phản lực tương ứng (Hình 4.10). Kết quả từ các điểm này được dùng để xây dựng đường cong quan hệ tải trọng – chuyển vị và đánh giá sự thay đổi độ cứng của các mẫu cột thuộc các nhóm khảo sát.



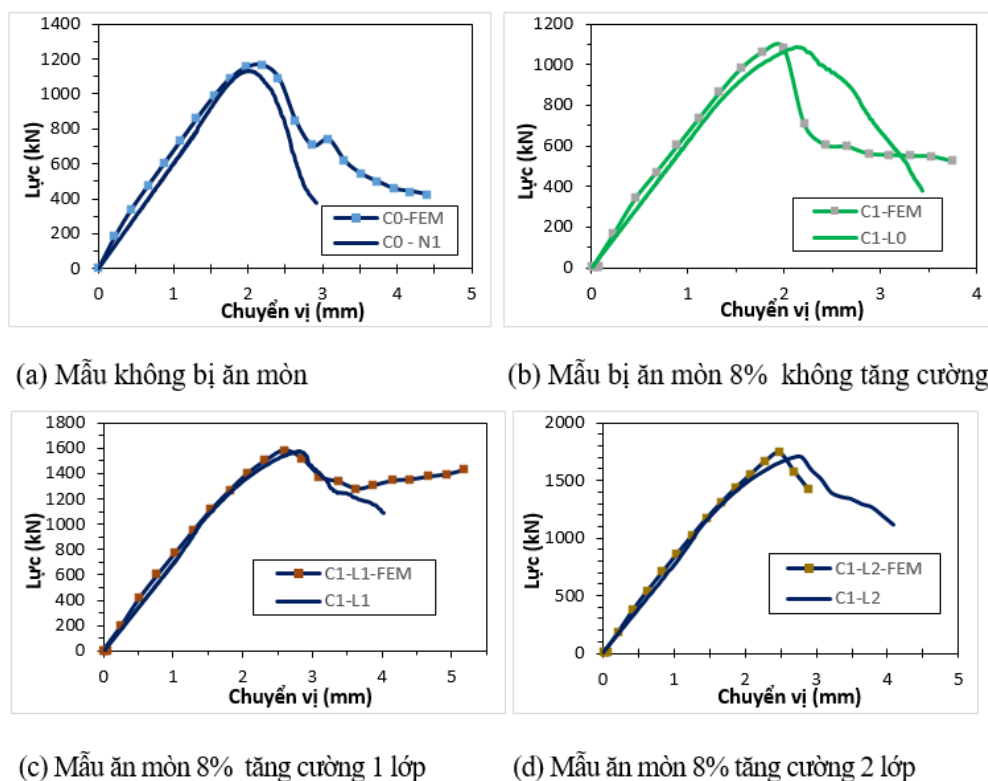
Hình 4.9: Phương pháp tính toán quá trình ăn mòn cốt thép và nén dọc trục cột

Number	Title	Type	Quantity - Item
1	Monitor 1	Value at node	Displacements - Component 3
2	Monitor 2	Value at node	Reactions - Component 3

Hình 4.10: Đo chuyển vị ở đỉnh và phản lực ở đáy cột

4.4 KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

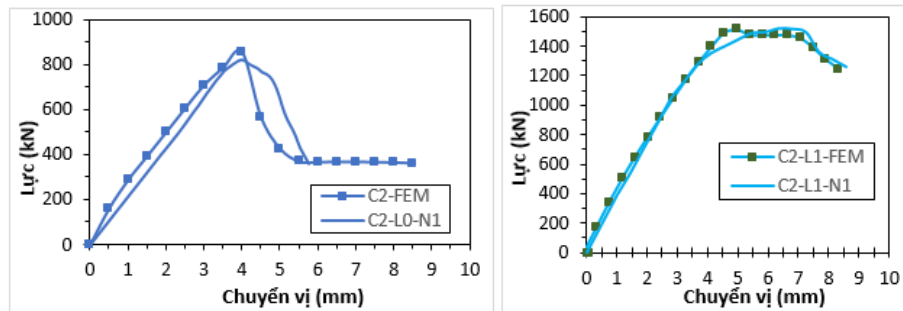
4.4.1 Kết quả đường cong quan hệ tải trọng-chuyển vị



Hình 4.11: So sánh kết quả đường cong quan hệ tải trọng- chuyển vị của cột BTCT mô phỏng và thí nghiệm cho cột ăn mòn 8%

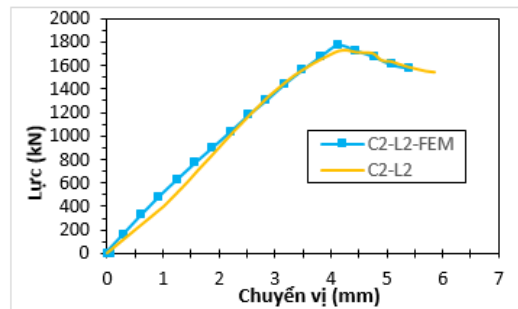
Mô hình PTHH cho kết quả là đường cong tải trọng – chuyển vị của tất cả các mẫu cột BTCT đều trải qua hai giai đoạn đặc trưng. Ở giai đoạn thứ nhất, tải trọng và chuyển vị tăng gần như theo quan hệ tuyến tính, phản ánh trạng thái đàn hồi của kết cấu. Đến tải trọng lớn nhất, cột BTCT chuyển sang giai đoạn sau đàn hồi, trong đó chuyển vị tiếp tục gia tăng nhưng lực nén giảm cho đến khi xảy ra phá hoại toàn bộ.

Đối với các cột có cốt bị gỉ nhưng không được bọc BTCLD, sau khi đạt tải trọng cực đại, sức chịu tải suy giảm nhanh hơn đáng kể so với các cột không bị ăn mòn hoặc các cột đã được tăng cường. Xu hướng này xuất phát từ giả thiết mô hình hóa, trong đó ăn mòn được xem là phân bố đều trên bề mặt cốt thép. Đồng thời, sự giãn nở của các sản phẩm ăn mòn cũng được giả định diễn ra đồng nhất, làm cho ứng suất kéo tại vùng tiếp xúc giữa cốt thép và BT phát triển gần như đồng thời trên toàn bộ chu vi thanh thép. Kết quả là liên kết dính bám bị suy giảm nhanh ngay sau phá hoại, kéo theo hiện tượng bong tách lớp BT bảo vệ xảy ra đột ngột trong mô hình số.



(a) Mẫu ăn mòn 22% không tăng cường

(b) Mẫu ăn mòn 22% tăng cường 1 lớp



(c) Mẫu ăn mòn 22% tăng cường 2 lớp

Hình 4.12: So sánh kết quả đường cong tải trọng- chuyển vị của cột BTCT mô phỏng và thí nghiệm cho cột ăn mòn 22%

Do sự mất liên kết giữa bê tông và cốt thép diễn ra trong thời gian rất ngắn, sức kháng nén của cột giảm mạnh sau điểm cực đại, tạo nên dạng phá hoại mang tính giòn rõ rệt.

Ngược lại, ở các cột được bọc bằng BTCLD, lớp lưới sợi các bon có tác dụng kiềm chế nở ngang của BT, hạn chế sự lan rộng của các vết nứt và duy trì chịu tải dù BT đã nứt. Nhờ đó, quá trình suy giảm tải trọng diễn ra từ từ hơn và cấu kiện thể hiện khả năng làm việc sau đỉnh tải tốt hơn.

4.4.2 Kết quả lực nén dọc trục lớn nhất

Bảng 4.2: So sánh lực nén dọc trục lớn nhất từ mô phỏng, tính toán lý thuyết và thí nghiệm

Loại cột	Giá trị tải trọng lớn nhất P_u (kN)				
	Thí nghiệm	Tính toán lý thuyết	Mô phỏng PTHH	Sai số của tính toán lý thuyết so với thí nghiệm (%)	Sai số của mô phỏng PTHH so với thí nghiệm (%)
Cột không bị ăn mòn C0	1186,0	1152,0	1162	-3%	-2%
Cột bị ăn mòn 8% không gia cường C1 - L0	1112,0	1054,9	1085	-5%	-2%
Cột bị ăn mòn 22% không gia cường C2 - L0	862,5	854,7	827	-1%	-4%
Cột bị ăn mòn 8% có gia cường 1 lớp BTCLD C1- L1	1513,0	1467,5	1580	-3%	4%
Cột bị ăn mòn 8% có gia cường 2 lớp BTCLD C1 - L2	1704,2	1652,4	1834	-3%	8%
Cột bị ăn mòn 22% có gia cường 1 lớp BTCLD C2 - L1	1475,0	1426,7	1520	-3%	3%
Cột bị ăn mòn 22% có gia cường 2 lớp BTCLD C2 - L2	1739,2	1611,5	1778	-7%	2%

Bảng 4.2 tổng hợp giá trị tải trọng nén cực đại của các mẫu cột thu được từ ba phương pháp gồm mô phỏng PTHH, tính toán lý thuyết và thí nghiệm. Kết quả phân tích số cho thấy tải trọng phá hoại của các cột không tăng cường C0, C1 và C2 lần lượt đạt 1162 kN, 1085 kN và 827 kN. So sánh giữa các trường hợp cho thấy khi mất mát khối lượng của cốt thép dọc xấp xỉ 8%, ảnh hưởng đến sức chịu tải của cột chưa rõ ràng. Khi mức độ ăn mòn tăng lên khoảng 22%, khả năng chịu nén của cấu kiện giảm rõ rệt do sự suy giảm đồng thời của tiết diện cốt thép, cường độ vật liệu và liên kết dính bám.

Cột ăn mòn 8%, việc tăng cường một và hai lớp BTCLD giúp tải trọng cực đại tăng lên lần lượt đạt 1580 kN và 1834 kN, tương ứng cao hơn khoảng 45% và 70% so với mẫu bị ăn mòn nhưng không được tăng cường. Hiệu quả tăng cường còn thể hiện rõ hơn ở nhóm cột có mức ăn mòn 22%, khi tải trọng phá hoại đạt 1520 kN đối với một lớp BTCLD và 1778 kN đối với hai lớp BTCLD, tương ứng tăng khoảng 84% và 114% so với cột đối chứng cùng mức ăn mòn.

So sánh kết quả từ mô hình PTHH và thực nghiệm có chỉ ra rằng: mô phỏng bằng phần mềm ATENA 3D tái hiện khá chính xác ứng xử chịu nén của cột BTCT, **với sai số nhỏ hơn 8% đối với tải trọng cực đại**. Trong khi đó, mô hình tính toán lý thuyết cho kết quả nhỏ hơn, sai lệch so với thực nghiệm trong **khoảng 1–7%**. Những kết quả này khẳng định độ tin cậy của mô hình PTHH đã xây dựng, đồng thời cho thấy ATENA 3D phù hợp để thực hiện các nghiên cứu tham số và phân tích mở rộng đối với cột BTCT có cốt bị gỉ bọc bằng BTCLD sợi các bon.

4.5 SỬ DỤNG MÔ HÌNH MÔ PHỎNG ĐỂ KHẢO SÁT MỘT SỐ THAM SỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN HIỆU QUẢ TĂNG CƯỜNG KHẢ NĂNG CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỤC

4.5.1 Khảo sát về ảnh hưởng của mức độ mất mát khối lượng do ăn mòn cốt thép dọc ảnh hưởng đến hiệu quả tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục

Để đánh giá ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép dọc đến khả năng chịu nén của cột BTCT, nghiên cứu tiến hành thực hiện khảo sát trên các mô hình PTHH trên phần mềm ATENA Engineering 3D với hai nhóm khảo sát:

- Nhóm thứ nhất gồm các cột không được tăng cường, bao gồm các mô hình C0-FEM, C5-FEM, C8-FEM, C10-FEM, C15-FEM, C22-FEM, C25-FEM và C30-FEM, tương ứng với tỷ lệ mất mát khối lượng cốt thép dọc bằng 0%, 5%, 8%, 10%, 15%, 22%, 25% và 30%.
- Nhóm thứ hai bao gồm các mô hình C0L1-FEM, C5L1-FEM, C8L1-FEM, C10L1-FEM, C15L1-FEM, C22L1-FEM, C25L1-FEM và C30L1-FEM. Các mô hình này có cùng mức độ ăn mòn tương ứng với nhóm đối chứng nhưng được tăng cường

thêm một lớp BTCLD sợi các bon nhằm đánh giá hiệu quả của giải pháp khi cốt thép bị hư hỏng bởi ăn mòn.

Các giả thiết và phương pháp để mô hình hóa quá trình ăn mòn cũng tương tự nội dung đã trình bày tại Mục 4.3.4. Theo đó, mức độ ăn mòn được thay đổi trong khoảng từ 0% đến 30%, kéo theo sự suy giảm tương ứng của diện tích tiết diện và cường độ chịu kéo chảy của cốt thép. Đồng thời, sự giãn nở của sản phẩm ăn mòn được mô phỏng thông qua tải trọng **Shrinkage**, phản ánh áp lực nở thể tích do lớp gỉ tạo. Các thông số vật liệu và giá trị biến dạng được xác định theo các công thức (2.7), (2.8) và (2.17) ở Mục 2.2.2, đồng thời được tổng hợp trong *Bảng 4.3*.

Bảng 4.3: Giá trị của cường độ kéo chảy và biến dạng tự do trên bề mặt của thép dọc do ăn mòn

STT	Cột	Mức độ ăn mòn (%)	f_{sc} (MPa)	A_{sc} (m ²)	ε_s (m)
1	C0-FEM	0	429,4	0,000616	0
2	C5-FEM	5	418,665	0,000585	0,000346
3	C8-FEM	8	412,224	0,000566	0,000549
4	C10-FEM	10	407,93	0,000554	0,000683
5	C15-FEM	15	397,195	0,000523	0,001013
6	C22-FEM	22	382,166	0,00048	0,001464
7	C25-FEM	25	375,725	0,000462	0,001652
8	C30-FEM	30	364,99	0,000431	0,001962

a) *Khảo sát ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép đến ứng xử chịu lực nén dọc trục của cột BTC*

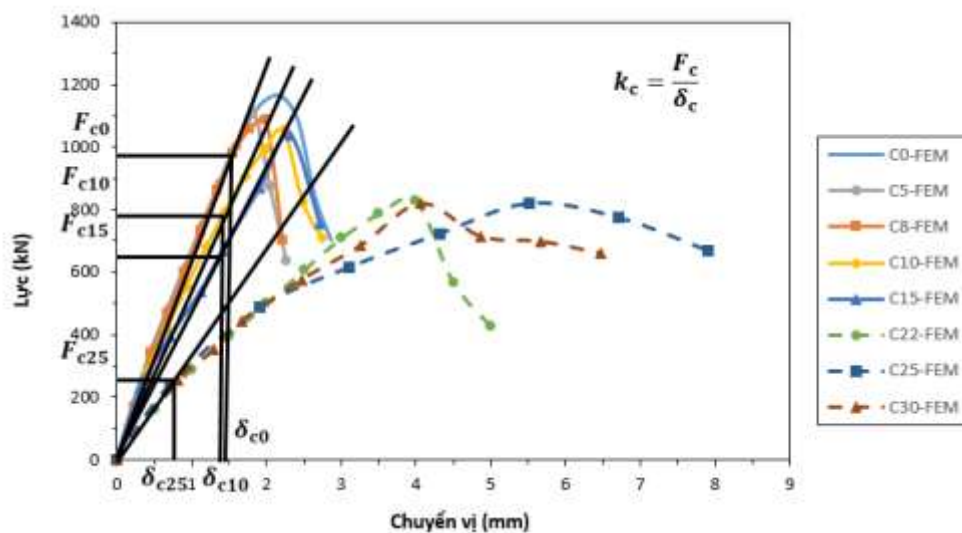
Bảng 4.4: Kết quả lực nén dọc trục lớn nhất và độ cứng của cột BTCT

STT	Cột	Mức độ ăn mòn (%)	Giá trị lực nén lớn nhất			Suy giảm khả năng chịu lực (%)	Độ cứng K (kN/mm)	Suy giảm độ cứng (%)
			Theo PTHH (kN)	Theo tính toán lý thuyết (kN)	Sai số (%)			
1	C0-FEM	0	1162,8	1152,0	1%	0	625	0%
2	C5-FEM	5	1112	1081,8	3%	4%		
3	C8-FEM	8	1085,6	1048,1	4%	7%		
4	C10-FEM	10	1052,8	1040,7	1%	9%	472	24%
5	C15-FEM	15	1039,6	1022,5	2%	11%	405	35%
6	C22-FEM	22	827	814,8	1%	29%	250	60%
7	C25-FEM	25	822	814,8	1%	29%		
8	C30-FEM	30	820	814,8	1%	30%		

Kết quả phân tích số được đánh giá thông qua tải trọng nén cực đại và độ cứng của các mẫu cột, như trình bày trong *Bảng 4.4*.

Đối chiếu kết quả mô phỏng với mô hình tính toán lý thuyết cho thấy hai phương pháp có sự phù hợp khá tốt, với sai lệch chỉ dao động trong khoảng từ 1% đến 4%. Điều này cho thấy mô hình PTHH đã thể hiện chính xác xu hướng làm việc của cột BTCT có cốt đã bị gỉ.

Sức kháng nén dọc trục của cột giảm dần khi mức độ ăn mòn tăng lên. Trong khoảng từ 0% đến 15%, sự suy giảm sức kháng diễn ra tương đối chậm, với mức giảm chỉ khoảng 11% so với cột đối chứng. Tuy nhiên, khi mức độ mất mát khối lượng cốt thép đạt từ 22% trở lên, tải trọng cực đại giảm nhanh và chỉ còn khoảng 70% giá trị ban đầu. Sau ngưỡng này, mặc dù mức độ ăn mòn tiếp tục tăng đến 25% và 30%, Sức chịu tải của cột hầu như đổi. Nguyên nhân của hiện tượng trên là ở các cấp độ ăn mòn lớn, lớp BT bảo vệ đã có nhiều vết nứt và bị bong tách trên diện rộng, trong khi liên kết giữa cốt thép và bê tông gần như bị phá hủy hoàn toàn. Do vậy, cốt thép bị hạn chế đáng kể việc chịu lực và sức kháng nén của cấu kiện chủ yếu là dựa vào phần bê tông còn lại. Do cơ chế chịu lực đã thay đổi, tốc độ suy giảm sức kháng nén có xu hướng chậm lại mặc dù mức độ ăn mòn vẫn tiếp tục tăng.



Hình 4.13: Tính toán độ cứng của cột BTCT mô phỏng

Đường cong tải trọng – chuyển vị cũng phản ánh rõ tác động của mức độ ăn mòn đến ứng xử cơ học của cột. Cột có mức độ ăn mòn từ 0% đến khoảng 10%, hình dạng đường

cong gần tương tự cột nguyên vẹn, cho thấy độ cứng của cấu kiện chỉ bị ảnh hưởng không đáng kể. Khi mức độ ăn mòn tăng lên khoảng 10–15%, cột bắt đầu giảm độ cứng, với mức suy giảm khoảng 24–35%. Ở các trường hợp ăn mòn nhiều (15–30%), độ cứng của cấu kiện giảm mạnh, có thể đạt khoảng 60% so với mẫu không bị ăn mòn. Đồng thời, quá trình phá hoại diễn ra nhanh hơn, trong khi chuyển vị sau đỉnh tải tăng đáng kể, thể hiện khả năng làm việc sau phá hoại của cột bị suy giảm rõ rệt (Hình 4.13).

b) Khảo sát ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép đến hiệu quả tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục của BTCLD sợi các bon

Lực nén cực đại của từng mô hình, được tổng hợp trong Bảng 4.5. Ngoài ra, Hình 4.14 thể hiện đường cong quan hệ lực – chuyển vị.

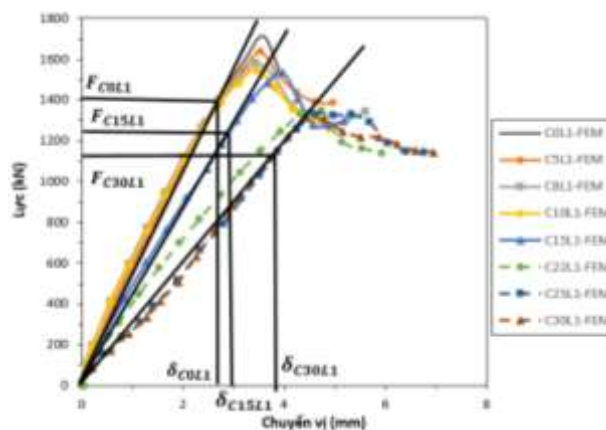
Bảng 4.5: Kết quả lực nén dọc trục lớn nhất của cột BTCT được tăng cường 1 lớp BTCLD sợi các bon

STT	Cột	Mức độ ăn mòn (%)	Giá trị lực nén lớn nhất (kN)			Lực nén lớn nhất khi không được tăng cường theo PTHH (kN)	Hiệu quả tăng cường theo PTHH (%)
			Theo PTHH	Theo tính toán lý thuyết	Sai số (%)		
1	C0L1-FEM	0	1712	1636,5	5%	1162,8	47%
2	C5L1-FEM	5	1635,8	1617,0	2%	1112	47%
3	C8L1-FEM	8	1580,8	1605,7	-2%	1085,6	46%
4	C10L1-FEM	10	1547,91	1598,2	-3%	1052,8	47%
5	C15L1-FEM	15	1532	1580,0	-3%	1039,6	47%
6	C22L1-FEM	22	1453	1372,4	-2%	827	63%
7	C25L1-FEM	25	1334	1372,4	-3%	822	62%
8	C30L1-FEM	30	1122,8	1372,4	-4%	820	60%

Các kết quả thu được cho thấy hiệu quả tăng cường bằng BTCLD sợi các bon chịu ảnh hưởng đáng kể bởi mức độ ăn mòn của cốt thép dọc. Trong dải ăn mòn từ 0% đến khoảng 15%, việc sử dụng một lớp BTCLD mang lại hiệu quả tăng cường khá ổn định. Sức kháng nén trục của cột sau tăng cường cao hơn trung bình khoảng 47% so với các mẫu không được tăng cường có cùng mức độ ăn mòn. Điều này cho thấy ở giai đoạn ăn mòn nhẹ và trung bình, cốt thép vẫn còn duy trì được một phần đáng kể khả năng chịu lực, trong khi lớp BTCLD chủ yếu đóng vai trò gia tăng khả năng kiểm chế biến dạng ngang và cải thiện trạng thái ứng suất của bê tông. Khi mức độ ăn mòn tăng lên từ khoảng 22% đến 30%, hiệu

quả của giải pháp tăng cường trở nên rõ rệt hơn. Kết quả mô phỏng cho thấy sức chịu tải của các cột được bọc một lớp BTCLD cao hơn khoảng 62% so với các cột không tăng cường. Nguyên nhân là ở mức độ ăn mòn nghiêm trọng, các mẫu đối chứng đã bị suy giảm đáng kể khả năng chịu lực do lớp bê tông bảo vệ nứt và bong tách trên diện rộng, diện tích bê tông hữu hiệu giảm, đồng thời liên kết giữa cốt thép và bê tông gần như mất hoàn toàn, khiến cốt thép không còn phát huy hiệu quả chịu nén. Trong điều kiện này, lớp BTCLD sợi các bon trở thành bộ phận chịu lực quan trọng, đồng thời tạo hiệu ứng bó hãm bê tông, góp phần duy trì khả năng làm việc của cấu kiện.

Đường cong tải trọng – chuyển vị cũng cho thấy sự thay đổi đáng kể về độ cứng của các mẫu cột sau khi được tăng cường. Đối với các trường hợp có mức độ ăn mòn nhỏ hơn khoảng 8%, độ cứng của cột sau tăng cường gần như tương đương với mẫu không bị ăn mòn. Khi mức độ ăn mòn nằm trong khoảng từ 8% đến 15%, mặc dù độ cứng ban đầu đã suy giảm, lớp BTCLD vẫn giúp phục hồi phần lớn khả năng chống biến dạng của cấu kiện. Tuy nhiên, đối với các mẫu có mức độ ăn mòn từ 22% trở lên, hiệu quả cải thiện độ cứng giảm rõ rệt. Mặc dù sức chịu tải cực đại vẫn tăng đáng kể nhờ tác dụng của lớp BTCLD, cột không được khôi phục độ cứng nhiều do phần BT và cốt thép bên trong đã bị phá hoại nghiêm trọng.



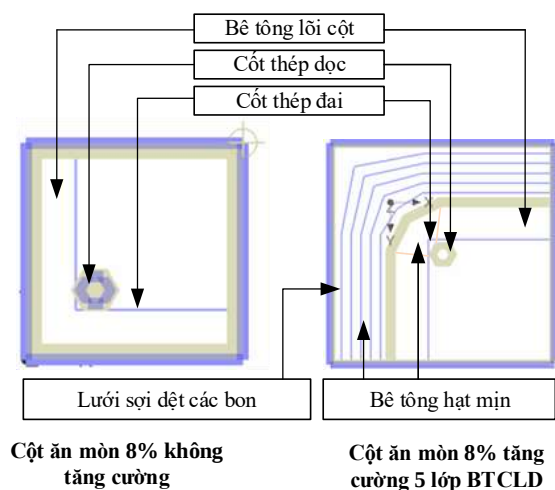
Hình 4.14: Biểu đồ đường cong quan hệ tải trọng – chuyển vị của cột BTCT được tăng cường 1 lớp BTCLD sợi các bon mô phỏng với các cấp độ ăn mòn khác nhau

4.5.2 Khảo sát tham số về ảnh hưởng của số lớp bê tông cốt lưới dệt sợi các bon ảnh hưởng đến hiệu quả tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục

Tiếp theo, nghiên cứu xây dựng hai nhóm mô hình PTHH gồm bảy mẫu cột tiết diện vuông và tiến hành phân tích trên phần mềm ATENA Engineering 3D:

- Nhóm cột không được tăng cường: C8L0-FEM là mẫu cột BTCT có mức độ ăn mòn cốt thép dọc 8% và không được tăng cường khả năng chịu lực;
- Nhóm cột được tăng cường bằng BTCLD sợi các bon: gồm các mô hình C8L1-FEM, C8L2-FEM, C8L3-FEM, C8L4-FEM và C8L5-FEM, tương ứng với cột BTCT có mức độ ăn mòn cốt thép dọc 8% và được tăng cường lần lượt 1, 2, 3, 4 và 5 lớp BTCLD sợi các bon bao quanh tiết diện cột.

Trong tất cả các trường hợp khảo sát, mức độ ăn mòn của cốt thép dọc được giữ không đổi ở giá trị mất mát khối lượng 8% nhằm loại bỏ ảnh hưởng của biến số ăn mòn, qua đó tập trung đánh giá riêng tác động của số lớp BTCLD. Các mô hình vật liệu của BTHM và lưới sợi các bon được sử dụng thống nhất theo các thông số đã trình bày tại Mục 4.3.2. Khi tăng số lớp BTCLD, chiều dày lớp BTHM bao bọc cũng được điều chỉnh tương ứng để đảm bảo các lớp tăng cường làm việc đồng thời và duy trì điều kiện liên kết hợp lý giữa các vật liệu (Hình 4.15).



Hình 4.15: Mô hình cột không được tăng cường và được tăng cường 5 lớp BTCLD sợi các bon

Kết quả mô phỏng được thể hiện thông qua các đường cong quan hệ tải trọng – chuyển vị (Hình 4.16) cùng với giá trị lực nén cực đại của từng mô hình. So sánh với kết quả

tính toán theo mô hình lý thuyết đã xây dựng ở Chương 2 và được kiểm chứng trong Chương 3 cho thấy sự tương đồng tốt giữa hai phương pháp, với sai lệch dao động trong khoảng từ 2% đến 8%. Điều này tiếp tục khẳng định mô hình PTHH đã dự báo chính xác đối với ứng xử chịu nén của cột BTCT được bọc bằng BTCLD.

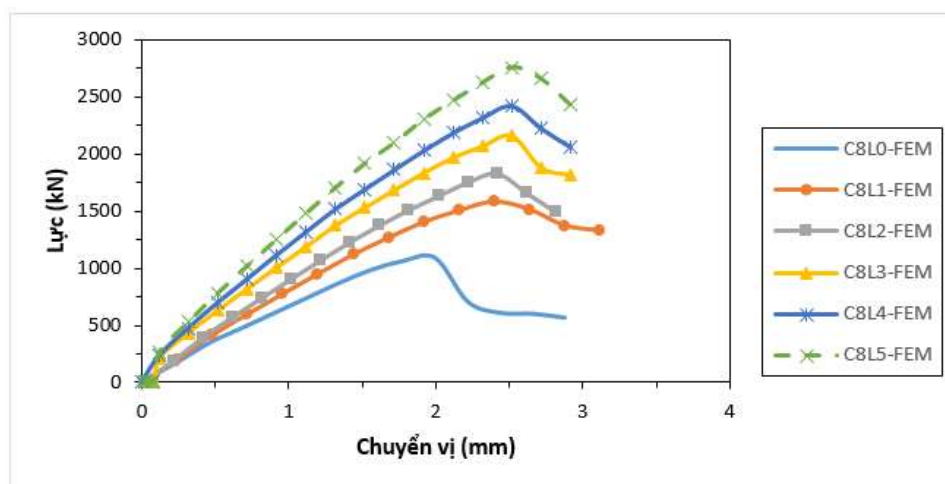
Bảng 4.6: Kết quả lực nén dọc trục lớn nhất của cột BTCT

STT	Cột	Số lớp BTCLD tăng cường	Giá trị lực nén lớn nhất (kN)			Hiệu quả tăng cường theo PTHH(%)
			Theo PTHH	Theo tính toán lý thuyết	Sai số (%)	
1	C8L0	0	1085,6	1048,14	4%	0
2	C8L1	1	1580,8	1505,66	5%	46%
3	C8L2	2	1832	1733,07	6%	69%
4	C8L3	3	2161,6	2066,65	5%	99%
5	C8L4	4	2423,6	2334,5	4%	123%
6	C8L5	5	2759,98	2552,9	5%	154%

Trong điều kiện mức độ ăn mòn ở khoảng 8%, tải trọng nén cực đại tăng dần theo số lớp BTCLD. Hiệu quả tăng cường dao động từ khoảng 46% đối với trường hợp sử dụng một lớp BTCLD và đạt tới khoảng 154% khi tăng lên năm lớp. Xu hướng này cho thấy mỗi lớp BTCLD bổ sung đều góp phần nâng cao khả năng chịu lực của cột thông qua việc tăng cường hiệu ứng kiềm chế nở ngang và hạn chế sự phát triển của các biến dạng ngang của bê tông lõi cột.

Bên cạnh sự gia tăng về sức chịu tải, độ cứng của cột đã được phục hồi sau khi tăng cường. Khi số lớp BTCLD tăng lên, khả năng chống biến dạng của cấu kiện được nâng cao rõ rệt so với mẫu không tăng cường, chứng tỏ giải pháp này không chỉ làm tăng tải trọng phá hoại mà còn góp phần phục hồi độ cứng đã bị suy giảm do quá trình ăn mòn cốt thép. Mặc dù việc tăng số lớp BTCLD giúp cải thiện đáng kể khả năng chịu lực, hiệu quả này không tăng mãi mà cần được thỏa mãn cả ới các yêu cầu về khai thác và thiết kế công trình. Khi lớp tăng cường trở nên quá dày, kích thước và khối lượng của cấu kiện sẽ tăng lên, có thể ảnh hưởng đến không gian kiến trúc, đồng thời làm gia tăng tải trọng bản thân tác dụng lên hệ kết cấu. Ngoài ra, độ cứng của lớp vỏ BTCLD cũng tăng theo số lớp sợi các bon, làm giảm khả năng biến dạng dẻo của cột. Trong một số trường hợp, sự chênh lệch lớn về độ cứng giữa lớp tăng cường và BT lõi có thể làm BT bên trong bị phá hoại sớm dưới trạng

thái nén ba trục, dẫn đến dạng phá hoại giòn và giảm độ an toàn của kết cấu sau khi sửa chữa.



Hình 4.16: Đường cong quan hệ lực – chuyển vị của các cột được mô phỏng

Vì vậy, việc lựa chọn số lớp BTCLD cần được cân nhắc trên cơ sở cân bằng giữa hiệu quả tăng cường và yêu cầu khai thác thực tế. Theo khuyến nghị của tiêu chuẩn TCCS 01:2022/ĐHGTVT [7], số lớp lưới sợi các bon sử dụng cho giải pháp tăng cường không nên vượt quá bốn lớp nhằm đảm bảo hiệu quả, tính kinh tế và độ an toàn của công trình.

4.6 KẾT LUẬN CHƯƠNG 4

Trên cơ sở các kết quả từ phần mềm PTHH ATENA Engineering 3D đối với cột BTCT có cốt đã bị gỉ được tăng cường BTCLD sợi các bon, có thể rút ra một số nhận xét chính như sau:

- Mô hình PTHH được xây dựng có khả năng mô phỏng chính xác ứng xử chịu nén của các mẫu cột BTCT. Sai số của mô hình PTHH nhỏ (từ 2% đến 8%) so với thí nghiệm, tương đương với sai số của mô hình tính toán lý thuyết. ATENA 3D là công cụ có độ tin cậy cao để nghiên cứu cột BTCT có cốt đã bị gỉ và đánh giá hiệu quả của giải pháp tăng cường BTCLD sợi các bon.
- Mức độ ăn mòn của cốt thép dọc là tham số có tác động đáng kể đến sức chịu nén và độ cứng của cấu kiện. Khi tỷ lệ mất mát khối lượng cốt thép nằm trong khoảng 0–15%, khả năng chịu lực chỉ giảm ở mức tương đối nhỏ (khoảng 0–11%), trong khi cơ chế phá hoại vẫn gần giống với cột không bị ăn mòn. Ngược lại, khi mức độ

ăn mòn tăng lên 15–30%, sự suy giảm sức chịu tải diễn ra nhanh hơn, đạt khoảng 11–30%, đồng thời độ cứng của cột giảm mạnh, có thể lên tới khoảng 60%, phản ánh ảnh hưởng rõ rệt của sự suy giảm liên kết giữa bê tông và cốt thép.

- Hiệu quả tăng cường của BTCLD phụ thuộc chặt chẽ vào mức độ hư hỏng của cầu kiện. Đối với các cột có tỷ lệ ăn mòn từ 0% đến 15%, việc sử dụng một lớp BTCLD giúp tăng khả năng chịu nén khoảng 47%. Khi mức độ ăn mòn tăng lên trong khoảng 15–30%, hiệu quả tăng cường tiếp tục được cải thiện và đạt khoảng 62%. Kết quả này chứng tỏ BTCLD đặc biệt phát huy hiệu quả đối với các cột BTCT đã bị suy yếu do ăn mòn.
- Nghiên cứu tham số cũng cho thấy sức kháng nén của cột tăng dần khi số lớp BTCLD được bổ sung nhiều hơn. Ăn mòn khoảng 8%, hiệu quả tăng cường tăng từ khoảng 46% khi sử dụng một lớp BTCLD lên khoảng 154% đối với năm lớp tăng cường. Mặc dù vậy, việc tăng số lớp BTCLD cần được cân nhắc trên cơ sở yêu cầu kỹ thuật và điều kiện khai thác thực tế. Theo khuyến nghị của TCCS 01:2022/ĐHGTVT [8], số lớp lưới sợi các bon nên được giới hạn ở không quá 4 lớp nhằm bảo đảm hiệu quả tăng cường, tính kinh tế và duy trì phá hoại dẻo của cầu kiện sau khi sửa chữa.

Kết quả nghiên cứu của Chương 4 được sử dụng trong các phần nghiên cứu mô phỏng số trong các công trình khoa học của luận án như sau:

- Đinh Hữu Tài, Vũ Văn Hiệp, Đặng Việt Tuấn (2026), *Nghiên cứu mô hình lý thuyết tính toán khả năng chịu lực nén dọc trục cho cột bê tông cốt thép có cốt đã bị ăn mòn được gia cường bằng bê tông cốt lưới dệt sợi các bon*, Tạp chí Người xây dựng, số 408 tháng 4.
- Hồ Thị Hoài, Đinh Hữu Tài (2024), *Nghiên cứu mô phỏng khả năng chịu lực của cột bê tông cốt thép bị ăn mòn được gia cường bằng bê tông cốt lưới dệt*, tạp chí Cầu đường Việt Nam, số (7/2024) – Tác giả tham gia.
- Huu Tai Dinh, Dang Quang Ngo, Hoai Ho and Huy Cuong Nguyen (2023), *Experimental and numerical evaluation of axial compression strengthening for*

corroded reinforced concrete columns by carbon textile reinforced concrete, The 4th International Conference on Transportation Infrastructure and Sustainable Development (TISDIC 2023) - Tác giả chính, Tác giả báo cáo tại hội thảo khoa học quốc tế.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. KẾT LUẬN

Trên cơ sở tổng hợp các nghiên cứu lý thuyết, thực nghiệm và mô phỏng số, luận án đã đề xuất một giải pháp tích hợp nhằm đồng thời nâng cao khả năng chịu lực và kiểm soát quá trình ăn mòn đối với cột BTCT có cốt thép bị gỉ. Giải pháp sử dụng lớp BTCLD sợi các bon bao bọc bên ngoài cột để phục hồi và tăng cường khả năng chịu lực, đồng thời kết hợp với hệ thống bảo vệ catốt sử dụng dòng điện ngoài, trong đó lưới sợi các bon đóng vai trò là anốt trợ. Hiệu quả tăng cường đạt được nhờ sự phục hồi phần bê tông bảo vệ bị bong tách, sự gia tăng tiết diện chịu nén bởi lớp BTHM và tác dụng kiểm chế biến dạng ngang của lớp BTCLD đối với bê tông lõi. Đối với hệ thống bảo vệ chống ăn mòn, mật độ dòng điện được lựa chọn theo khuyến nghị của Hiệp hội Bê tông Mỹ [63] và tiêu chuẩn ISO 12696:2016 [42], với giá trị thích hợp cho điều kiện môi trường ven biển Việt Nam nằm trong khoảng 20–30 mA/m².

Luận án cũng đã xây dựng mô hình lý thuyết dự báo sức kháng nén dọc trục của cột BTCT bị ăn mòn sau khi được tăng cường bằng BTCLD sợi các bon. Mô hình được thiết lập trên cơ sở xem xét đồng thời bốn thành phần chịu lực của cấu kiện, bao gồm: (i) bê tông lõi có xét đến hiệu ứng bó hãm của lớp BTCLD; (ii) cốt thép dọc bị ăn mòn với sự suy giảm tiết diện, cường độ cơ học và trường hợp mất ổn định của cốt thép dọc; (iii) lớp BTHM trong hệ BTCLD có kể đến ảnh hưởng của lưới sợi các bon; và (iv) lớp BTHM dùng để phục hồi phần bê tông bảo vệ đã bị hư hỏng. Kết quả tính toán từ mô hình có xu hướng an toàn, phù hợp với kết quả thực nghiệm, với sai số dao động trong khoảng 1–7%, đồng thời có thể áp dụng cho cả cột BTCT bị ăn mòn và cột chưa bị ăn mòn.

Một đóng góp khác của luận án là **đề xuất và kiểm chứng** tiêu chí đánh giá hiệu quả bảo vệ chống ăn mòn của hệ thống catốt. Việc đánh giá được thực hiện trên cơ sở kết hợp kết quả đo điện thế nửa pin của cốt thép với biểu đồ Pourbaix, tiêu chuẩn ISO 12696:2016 cùng quá trình **so sánh mức độ mất mát khối lượng do ăn mòn sau khi thí nghiệm**. Các kết quả thu được đã xác nhận khả năng làm việc hiệu quả của hệ thống bảo vệ catốt sử dụng lưới sợi các bon làm anốt trợ trong môi trường bê tông chứa ion Cl⁻.

Bên cạnh các nghiên cứu lý thuyết, luận án còn xây dựng được một bộ dữ liệu thực nghiệm tương đối đầy đủ phục vụ cho việc nghiên cứu và thiết kế giải pháp tăng cường. Bộ dữ liệu bao gồm các đặc trưng cơ học của BTHM chế tạo từ vật liệu trong nước; đặc tính cơ học và điện hóa của lưới sợi các bon SITgrid017 phủ SBR; các tính chất cơ học của vật liệu BTCLD; ứng xử chịu nén của cột BTCT bị ăn mòn sau khi tăng cường; cùng với các kết quả thí nghiệm về hiệu quả bảo vệ chống ăn mòn bằng hệ thống catốt.

Kết quả thực nghiệm cho thấy giải pháp BTCLD mang lại hiệu quả rõ rệt trong việc phục hồi sức chịu tải và độ cứng của cột BTCT bị ăn mòn. Đối với các mẫu có mức ăn mòn khoảng 8%, khả năng chịu nén tăng 36,2% khi sử dụng một lớp BTCLD và 48,6% khi sử dụng hai lớp. Với các mẫu có mức ăn mòn khoảng 22%, mức tăng tương ứng đạt 82,7% và 107%. Đồng thời, độ cứng của cấu kiện cũng được cải thiện đáng kể, với mức tăng khoảng 20% đối với một lớp và 50% đối với hai lớp tăng cường.

Các thí nghiệm gia tốc ăn mòn theo chu kỳ khô – ướt cũng chứng minh hiệu quả của hệ thống bảo vệ catốt. Khi áp dụng mật độ dòng điện bảo vệ 20 mA/m², các mẫu được bảo vệ hầu như không xuất hiện thêm hiện tượng ăn mòn trong suốt quá trình thí nghiệm, trong khi các mẫu không được bảo vệ tiếp tục bị suy giảm nhanh cả về trạng thái bề mặt và khả năng chịu lực.

Từ những kết quả nghiên cứu đạt được, luận án có thể khái quát các đóng góp khoa học chủ yếu như sau:

- Đề xuất một giải pháp tích hợp giữa tăng cường kết cấu và bảo vệ chống ăn mòn cho cột BTCT có cốt thép bị gỉ bằng cách kết hợp BTCLD sợi các bon với hệ thống bảo vệ catốt sử dụng dòng điện ngoài.
- Xây dựng mô hình tính toán sức kháng nén dọc trục của cột BTCT bị ăn mòn có xét đồng thời hiệu ứng bó hãm của BTCLD, sự suy giảm cơ học của cốt thép do ăn mòn và hiện tượng mất ổn định của cốt thép chịu nén; mô hình đã được kiểm chứng bằng kết quả thực nghiệm.

- Đề xuất phương pháp xác định các thông số thiết kế cho hệ thống bảo vệ catốt và xây dựng tiêu chí đánh giá mức độ ăn mòn của cốt thép dựa trên điện thế nửa pin kết hợp tiêu chuẩn ISO 12696:2016.
- Xây dựng bộ dữ liệu thực nghiệm phục vụ nghiên cứu, tính toán và thiết kế tăng cường cột BTCT bị ăn mòn bằng BTCLD sợi các bon trong điều kiện vật liệu và môi trường Việt Nam.

Bao gồm tính chất cơ học của BTHM sản xuất tại Việt Nam, tính chất cơ học và điện hóa của lưới sợi các bon SITgrid017 phủ SBR, tính chất của BTCLD, ứng xử nén dọc trục của cột BTCT bị ăn mòn có tăng cường, cũng như hành vi bảo vệ chống ăn mòn bằng hệ thống catốt.

Kết quả cho thấy giải pháp giúp phục hồi đáng kể khả năng chịu lực và độ cứng của cột: với mức ăn mòn 8%, khả năng chịu nén tăng 36,2% và 48,6% khi tăng cường 1 và 2 lớp BTCLD; với mức ăn mòn 22%, mức tăng tương ứng đạt 82,7% và 107%. Đồng thời, độ cứng được cải thiện khoảng 20% và 50%.

Thí nghiệm gia tốc ăn mòn chu kỳ khô–ướt cho thấy với mật độ dòng điện bảo vệ 20 mA/m², các cấu kiện được bảo vệ catốt hầu như không phát triển thêm ăn mòn, trong khi các mẫu không bảo vệ bị suy giảm nhanh hơn đáng kể.

Trên cơ sở các kết quả đạt được, luận án đã có những đóng góp khoa học mới như sau:

- Đề xuất giải pháp kết hợp giữa tăng cường kết cấu và bảo vệ chống ăn mòn cốt thép cho cột BTCT bị suy giảm do ăn mòn, sử dụng BTCLD sợi các bon kết hợp hệ thống catốt.
- Xây dựng mô hình tính toán sức kháng nén dọc trục có xét đồng thời hiệu ứng kiềm chế của BTCLD, **sự suy giảm cơ học và mất ổn định cốt thép do ăn mòn**, được kiểm chứng bằng thực nghiệm.
- Đề xuất phương pháp xác định thông số kỹ thuật của hệ thống bảo vệ catốt và tiêu chí đánh giá tình trạng ăn mòn cốt thép dựa trên điện thế nửa pin.
- Xây dựng bộ dữ liệu thực nghiệm phục vụ nghiên cứu và thiết kế tăng cường cột BTCT bị ăn mòn bằng BTCLD sợi các bon.

Mặc dù chương trình thực nghiệm vẫn còn những hạn chế nhất định về số lượng mẫu thử, kích thước cấu kiện và thời gian theo dõi, các kết quả của luận án đã cung cấp cơ sở khoa học ban đầu có giá trị cho việc phát triển và ứng dụng công nghệ sửa chữa, tăng cường khả năng chịu lực kết hợp bảo vệ chống ăn mòn đối với cột và trụ BTCT có cốt thép bị gỉ bằng giải pháp bọc ngoài bằng BTCLD sợi các bon. Đây cũng là tiền đề cho các nghiên cứu tiếp theo nhằm hoàn thiện cơ sở tính toán và **mở rộng phạm vi ứng dụng của giải pháp trong thực tế cho các cột trụ sử dụng trong công trình dân dụng hoặc các công trình giao thông.**

2. KIẾN NGHỊ

Để mở rộng khả năng ứng dụng của giải pháp tăng cường kết hợp bảo vệ chống ăn mòn cho cột BTCT, cần tiếp tục thực hiện các nghiên cứu theo nhiều hướng khác nhau. Trước hết, cần khảo sát thêm các loại lưới sợi các bon có đặc tính cơ học, hình học và điện hóa khác nhau nhằm đánh giá ảnh hưởng của từng loại vật liệu đến hiệu quả tăng cường cũng như khả năng bảo vệ chống ăn mòn. Song song với đó, cần nghiên cứu độ bền lâu và khả năng làm việc trong thời gian dài của hệ BTCLD sợi các bon khi đồng thời thực hiện hai chức năng là tăng cường khả năng chịu lực và đóng vai trò anốt trợ trong hệ thống bảo vệ catốt. Những nghiên cứu này nên được tiến hành dưới nhiều điều kiện môi trường khác nhau, đặc biệt là các môi trường có tính xâm thực cao, để làm rõ khả năng duy trì hiệu quả của giải pháp trong suốt vòng đời khai thác công trình. Ngoài ra, **luận án cũng cần mở rộng nghiên cứu về các cấu kiện làm việc dưới các điều kiện khắc nghiệt khác bên ngoài thực tế như: nắng, mưa, mài mòn, va chạm,...**

Các kết quả của luận án chủ yếu được xây dựng trên cơ sở các mẫu cột ngắn chịu nén đúng tâm. Vì vậy, trong thời gian tới cần mở rộng phạm vi nghiên cứu đối với các cấu kiện có kích thước lớn hơn, cột chịu nén lệch tâm, chịu tải trọng lặp hoặc tải trọng động, cũng như các điều kiện làm việc phức tạp thường gặp trong thực tế. Bên cạnh đó, cần tiến hành các nghiên cứu trên các kết cấu BTCT đã bị ăn mòn nhưng vẫn đang làm việc dưới tải trọng khai thác, đồng thời được sửa chữa, tăng cường và bảo vệ bằng hệ BTCLD sợi các bon. Hướng nghiên cứu này sẽ góp phần làm sáng tỏ sự tương tác giữa quá trình ăn mòn,

cơ chế tăng cường và khả năng làm việc lâu dài của kết cấu trong điều kiện khai thác thực tế.

Bên cạnh đó, luận án cần mở rộng các đối tượng nghiên cứu trên mô hình PTHH từ dạng cột cơ bản thành các kết cấu gần hơn với thực tế đang áp dụng trong các công trình giao thông như cọc, đài móng hay trụ cầu.

Ngoài các nghiên cứu về mặt cơ học và độ bền, việc hoàn thiện cơ sở kỹ thuật cho ứng dụng thực tiễn cũng là một yêu cầu quan trọng. Trong thời gian tới cần xây dựng các chỉ dẫn kỹ thuật phục vụ đánh giá hiệu quả của giải pháp BTCLD sợi các bon trong sửa chữa và tăng cường cột BTCT có cốt thép bị gỉ. Đồng thời, cần phát triển quy trình thiết kế, thi công, kiểm tra và nghiệm thu phù hợp với hệ thống tiêu chuẩn hiện hành cũng như điều kiện vật liệu, thiết bị và trình độ công nghệ tại Việt Nam, tạo tiền đề cho việc ứng dụng rộng rãi giải pháp này trong thực tiễn xây dựng.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH, BÀI BÁO KHOA HỌC ĐÃ ĐƯỢC CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. BÀI BÁO TRÊN TẠP CHÍ KHOA HỌC QUỐC TẾ

[1] Hoai Ho, Huy Cuong Nguyen, Huu Tai Dinh, Dang Quang Ngo, Dang Dung Le (2023), *Experimental study on the tensile strength degradation of curved alkali resistant glass and carbon textile as concrete reinforcement under complex loading*, Case Studies in Construction Materials, Volume 18 (2023) - Tác giả chính.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01947>

[2] Dang Quang Ngo, Huy Cuong Nguyen, Huu Tai Dinh, Duy Tien Nguyen, Dinh Loc Mai (2022), *Effectiveness of carbon textile reinforced concrete in shear strengthening short-span corroded reinforced concrete beams*, Case Studies in Construction Materials, Volume 16 (June 2022) – Tác giả tham gia.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00932>

2. BÀI BÁO TRÊN TẠP CHÍ KHOA HỌC TRONG NƯỚC

[1] Đinh Hữu Tài, Vũ Văn Hiệp, Đặng Việt Tuấn (2026), *Nghiên cứu mô hình lý thuyết tính toán khả năng chịu lực nén dọc trục cho cột bê tông cốt thép có cốt đã bị ăn mòn được gia cường bằng bê tông cốt lưới dệt sợi các bon*, Tạp chí Người xây dựng, số 408 tháng 4 – Tác giả chính.

[2] Đinh Hữu Tài, Bùi Quang Tuấn (2024), *Nghiên cứu thực nghiệm đánh giá hiệu quả bảo vệ chống ăn mòn cốt thép trong bê tông của bê tông cốt lưới dệt sợi các bon*, tạp chí Giao thông vận tải, số 8 (2024) – Tác giả chính.

[3] Hồ Thị Hoài, Đinh Hữu Tài, Nguyễn Huy Cường, Phạm Thị Thanh Thủy (2023), *Nghiên cứu thực nghiệm xác định cường độ chịu kéo của lưới sợi các bon trong bê tông cốt lưới dệt khi chịu tải trọng kéo và nén đồng thời* - Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, Tập 74 số 2 (2023) - Tác giả chính.

DOI: <https://doi.org/10.47869/tcsj.74.2.8>

[4] Hồ Thị Hoài, Đinh Hữu Tài (2024), *Nghiên cứu mô phỏng khả năng chịu lực của cột bê tông cốt thép bị ăn mòn được gia cường bằng bê tông cốt lưới dệt*, tạp chí Cầu đường Việt Nam, số (7/2024) – Tác giả tham gia.

[5] Hoài Ho, Huy Cuong Nguyen, Huu Tai Dinh, Dang Dung Le, Thanh Tam Nguyen (2022), *Experimental Investigation on the tensile strength degradation in curved reinforcement of textile reinforced concrete* - Transport and Communications Science Journal, Tập 73 số 7 (2022) – Tác giả tham gia.

DOI: <https://doi.org/10.47869/tcsj.73.7.4>

3. HỘI THẢO KHOA HỌC QUỐC TẾ

[1] Huu Tai Dinh, Dang Quang Ngo, Hoài Ho and Huy Cuong Nguyen (2023), *Experimental and numerical evaluation of axial compression strengthening for corroded reinforced concrete columns by carbon textile reinforced concrete*, The 4th International Conference on Transportation Infrastructure and Sustainable Development (TISDIC 2023) - Tác giả chính, Tác giả báo cáo tại hội thảo khoa học quốc tế. **Hội thảo được tổ chức tại TP. Đà Nẵng, từ ngày 26 đến ngày 28 tháng 8 năm 2023.**

DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1289/1/012083>

4. SÁNG KIẾN, GIẢI PHÁP HỮU ÍCH

[1] Đinh Hữu Tài, Ngô Đăng Quang, Nguyễn Huy Cường (2026), *Cột bê tông cốt thép sử dụng bê tông cốt lưới dệt sợi các bon được bảo vệ chống ăn mòn*, Cục sở hữu trí tuệ - Được công bố quyền bảo hộ -Tác giả chính.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

TIẾNG VIỆT

- [1] Đồng Kim Hạnh, Dương Thị Thanh Hiền (2011), *Tình trạng ăn mòn bê tông cốt thép và giải pháp chống ăn mòn cho công trình bê tông cốt thép trong môi trường biển việt nam*, Tạp chí Khoa học kỹ thuật thủy lợi và môi trường, số đặc biệt 11/2011.
- [2] Vũ Quốc Hưng (2020), *Nghiên cứu nguyên nhân hư hỏng của các cấu kiện bê tông cốt thép trong công trình cảng dưới tác động của môi trường biển và các biện pháp xử lý*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng tập 14 (2V), tr. 107-121.
- [3] Nguyễn Công Luyện (2018), *Nghiên cứu ảnh hưởng của hiện tượng ăn mòn cốt thép đến kết cấu bê tông cốt thép bằng mô hình 3d-rbsm*, Tạp chí Khoa học kỹ thuật thủy lợi và môi trường, Số 26 (9/2018), tr. 17-24.
- [4] Nguyễn Đăng Nguyên, Nguyễn Ngọc Tân (2019), *Dự báo khả năng chịu lực còn lại của cột btct chịu nén lệch tâm phẳng có cốt thép dọc bị ăn mòn*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng tập 13 (2V), tr. 53-62.
- [5] Cao Minh Quyền (2022), *Nghiên cứu ứng xử chịu nén đúng tâm của cột bê tông cốt thép gia cường bằng bê tông cốt lưới dệt*, Luận án tiến sĩ.
- [6] Nguyễn Ngọc Tân, Trần Anh Dũng, Nguyễn Công Thế, Trịnh Bá Tuấn, Lương Tuấn Anh (2018), *Nghiên cứu thực nghiệm xác định ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép đến ứng suất bám dính giữa bê tông và cốt thép*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng NUCE.
- [7] TCVN 5574-2018 (2018), *Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép*.
- [8] TCCS 01:2022/ĐHGTVT (2022), *Tiêu chuẩn cơ sở về thi công và nghiệm thu bê tông cốt lưới dệt trong sửa chữa, tăng cường kết cấu bê tông cốt thép*.
- [9] TCVN 3105-2022-T57 (2022), *Hỗn hợp bê tông và bê tông nặng - Lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu thử*.
- [10] TCVN 6016-2011 (2011), *Xi măng – Phương pháp thí nghiệm – Xác định cường độ*.

TIẾNG ANH

- [11] ACI Committee (2013), *ACI 549.4R-13: Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures*, American Concrete Institute.
- [12] Paul M.Chess (2019), *Cathodic Protection for Reinforced Concrete Structures*, CRC Press.
- [13] Diamond S. (1996), *Delayed ettringite formation — Processes and problems*, Cement and Concrete Composites, vol. 18, no. 3, pp. 205–215.
- [14] Chinchón-Payá S., Aguado A., Nugterenc H. W., and Chinchón S. (2015), *External sulfate attack in dam concretes with thaumasite formation*, Mater. construcc., vol. 65, no. 317, p. e042, doi: 10.3989/mc.2015.10513.

- [15] Johnson R. And Shehata (2016), *The efficacy of accelerated test methods to evaluate alkali silica reactivity of recycled concrete aggregates*, Construction and Building Materials, 112, pp. 518-528.
- [16] Jin Xia, Wei Liang Jin, Long Yuan Li (2015), *Performance of Corroded Reinforced Concrete Columns under the Action of Eccentric Loads*, Journal of Materials in Civil Engineering 28(1).
- [17] Vadoros K., Dritsos S. (2008), *Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns*, Construction and Building Materials.
- [18] Praveen Anand, Ajay Kumar Sinha (2020), *Effect of Reinforced Concrete Jacketing on Axial Load Capacity of Reinforced Concrete Column*, Civil Engineering Journal Vol. 6, No. 7.
- [19] Lu Wang, Ray Kai-Leung Su (2013), *Axial Behaviour of Post-Fire RC Columns Strengthened with Post-Compressed Steel Plates*, Design, Fabrication and Economy of Metal Structures, pp 413–419.
- [20] Ezz-Eldeen H. A. (2016), *Steel Jacketing Technique used in Strengthening Reinforced Concrete Rectangular Columns under Eccentricity for Practical Design Applications*, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 35 Number 5.
- [21] Liu J. & Sheikh S. A. (2013), *Fiber-Reinforced Polymer Confined Circular Columns under Simulated Seismic Loads*, ACI structural journal, pp. 110.
- [22] Mohamed H. Harajli, Farid Dagher (2008), *Seismic strengthening of bond-critical regions in rectangular reinforced concrete columns using fiber-reinforced polymer wraps*, Aci Structural Journal 105(1), pp. 68-77.
- [23] Hao Zhou, Jose Manuel Urgel, Richard Emberley (2017), *Behaviour of the FRP-to-Steel Bonded Joints Under Elevated Temperature*, Conference: 6th Asia-Pacific Conference on FRP in Structures.
- [24] Medhat A. Haroun, Hussein M. Elsanadedy (2005), *Fiber-Reinforced Plastic Jackets for Ductility Enhancement of Reinforced Concrete Bridge Columns with Poor Lap-Splice Detailing*, Journal of Bridge Engineering 10(6).
- [25] Koosha Khorramiana, Pedram Sadeghianb (2021), *New mechanics-based confinement model and stress–strain relationship for analysis and design of concrete columns wrapped with FRP composites*, Structures, Volume 33, pp. 2659-2674.
- [26] Hausding J., Lorenz E., Ortlepp R., Lundahl A., Cherif C. (2011), *Application of stitch-bonded multi-ply made by using the extended warp knitting process: reinforcements with symmetrical layer arrangement for concrete*, Journal of the Textile Institute, vol. 102, n° 8, pp. 726-738.
- [27] Triantafillou T.C., Papanicolaou C.G., Zissimopoulos P., and Laourdekis T. (2006), *Concrete confinement with textile-reinforced mortar jackets*, ACI Structural Journal, Vol. 103, No.1, pp. 28–37.
- [28] Abegaz A., Suaris W., De Luca A. and Nanni A. (2012), *Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composites as Confining Systems for Reinforced Concrete Columns*, X International Symposium on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites (FERRO 10), Havana, Cuba.
- [29] Ngo Dang Quang, Nguyen Huy Cuong, Mai Dinh Loc, Vu Van Hiep (2020), *Experimental and numerical evaluation of concentrically loaded reinforced concrete*

- columns strengthening by carbon textile reinforced concrete jacketing, *Civil Engineering Journal* (indexed in ESCI).
- [30] Hoai Ho, Huy Cuong Nguyen, Huu Tai Dinh, Dang Quang Ngo, Dang Dung Le (2023), Experimental study on the tensile strength degradation of curved alkali resistant glass and carbon textile as concrete reinforcement under complex loading, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 18.
 - [31] Shiping Yin, Yao Li, Zhe-yu Jin, Peng-hao Li (2018), *Interfacial Properties of Textile-Reinforced Concrete and Concrete in Chloride Freezing-and-Thawing Cycle*, *Aci Materials Journal* 115(2).
 - [32] ShiPing Yin, Chi Peng, and Zhe-Yu Jin (2016), *Research on Mechanical Properties of Axial-Compressive Concrete Columns Strengthened with TRC under a Conventional and Chloride Wet-Dry Cycle Environment*, *Journal of Composites for Construction*, Volume 21, Issue 1.
 - [33] CNR-DT-215 (2018), *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded Fibre Reinforced Inorganic Matrix Systems for Strengthening Existing Structures*.
 - [34] ACI 549.4R-20 (2020), *Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix and Steel-Reinforced Grout Systems for Repair and Strengthening of Concrete Structures*.
 - [35] Andrade C., Alonso C. (2004), RILEM TC 154-EMC: *Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion, Recommendations Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method*, *Materials and Structures / Matériaux et Constructions*, Vol. 37, pp. 623-643.
 - [36] Otieno M., Golden G., Alexander M. G., Beushausen H. (2019), *Acceleration of steel corrosion in concrete by cyclic wetting and drying: effect of drying duration and concrete quality*, *Materials and Structures* (2019) 52:50.
 - [37] ASTM-G109 (2007), *Standard test method for determining effects of chemical admixtures on corrosion of embedded steel reinforcement in concrete exposed to chloride environments*, ASTM International, West Conshohocken.
 - [38] Malumbela G. (2010), *Measurable parameters for performance of corroded and repaired RC beams under load*. Ph.D. Thesis, Department of civil engineering, University of Cape Town.
 - [39] Care S., Nguyen Q.T., L'Hostis V., Berthaud Y. (2008), *Mechanical properties if the rust layer induced by impressed current method in reinforced mortar*. *Cem Concr Res* 38(8–9):1079–1091.
 - [40] Jin-Jun Guo, Peng-Qiang Liu, Cun-Liang Wu và Kun Wang (2021), *Effect of Dry–Wet Cycle Periods on Properties of Concrete under Sulfate Attack*, *Appl. Sci.* 2021, 11,pp. 888.
 - [41] Victor Chaker (1916), *Corrosion Forms and control for Infrastructure*, ASTM.
 - [42] ISO 12696:2016 (2016), *Cathodic protection of steel in concrete*, 2016.
 - [43] Mork J. H., Hauh R. (2006), *Cathodic protection of reinforced concrete - a system with woven carbon mesh*, *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*.
 - [44] Mork J. H., Mayer S., Asheim R. (2007), *Efficacite de la protection cathodique dans le port et sur la jetee de Honningsvag en Norvege*.

- [45] Asgharzadeh A., Raupach M. (2016), *Development of a test Method for the Durability of Carbon Textiles under Anodic polarisation*, Service Life and Durability of Reinforced Concrete: 8th International RILEM PhD Workshop held in Marne-la-Vallée, Paris 2016.
- [46] Ran Feng, Jing zhou, Zhanga Ji-Hua Zhu, Feng Xing (2020), *Experimental study on the behavior of carbon-fabric reinforced cementitious matrix composites in impressed current cathodic protection*, Construction and Building Materials, Volume 264.
- [47] Paul Lambert, Chinh Van Nguyen, Pritpal S. Mangat, Finbar J. O’Flaherty, Graeme Jones (2015), *Dual function carbon fibre fabric strengthening and impressed current cathodic protection (ICCP) anode for reinforced concrete structures*, Materials and Structures volume 48, pp. 2157-2167.
- [48] Ji-hua Zhu, Mei-ni Su, Jia-yi Huang, Tamon Ueda, Feng Xing (2018), *The ICCP-SS technique for retrofitting reinforced concrete compressive members subjected to corrosion*, Construction and Building Materials, Volume 167, pp. 669-679.
- [49] Lee-Orantes, Torres-Acosta, Martínez-Madrid, López-Cajún (2007), *Cathodic Protection in Reinforced Concrete Elements, using Carbon Fibers Base Composites*, ECS Trans, vol. 3, pp. 93–98.
- [50] Carla Driessen, Michael Raupach (2015), *Corrosion Protection of Bridges Using a Textile Reinforced Concrete Interlayer*, European Corrosion Congress 2015, Graz, Austria, EUROCORR 2015.
- [51] Brameshuber W. (2006), *Textile Reinforced Concrete. State-of-the Art*, Report of RILEM Technical Committee 201-TRC, 1st ed. Bagneux, vol. 36: RILEM Publications S.A.R.L., ISBN 2-912143-99-3.
- [52] EN 1992: 2011-01 (2011), *Design of concrete structures*, Eurocode 2011.
- [53] Jakob Bochmann, Manfred Curbach, Frank Jesse (2017), *Experimental Determination of the Stress-Strain Relation of Fine Grained Concrete under Compression*, Conference: Eleventh High Performance concrete (11th HPC) and the Second Concrete Innovation Conference (2nd CIC).
- [54] Jakob Bochmann, Manfred Curbach and Frank Jesse (2018), *Textile reinforced concrete under compression – Part 2: Influence of textiles and their alignment*, Carbonbeton unter Druck 113.
- [55] Cuong Huy Nguyen, Quang Dang Ngo (2020), *Flexural and Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Textile Reinforced Concrete*, Archives of Civil Engineering (indexed in ISI), Vol. 66, No 3, pp. 407-426.
- [56] Du Y. G., Clark L. A., Chan A. H. C. (2005), *Residual capacity of corroded reinforcing bars* (Mag Concrete Res 7(3):135), pp. 47.
- [57] Dhakal R. P., Maekawa K. (2022), *Modeling for postyield buckling of reinforcement*. J Struct Eng 2002;128(9):1139–47.
- [58] Mohammad M. Kashani, Adam J. Crewe, Nicholas A. Alexander (2013), *Nonlinear stress–strain behaviour of corrosion-damaged reinforcing bars including inelastic buckling*, Engineering Structures 48 (2013), pp. 417–429.
- [59] Yongqin Liang, Licheng Wang (2020), *Prediction of corrosion-induced cracking of concrete cover: A critical review for thick-walled cylinder models*, Ocean Engineering, Volume 213.

- [60] Kukrit Toongoenthong and Koichi Maekawa (2005), *Simulation of Coupled Corrosive Product Formation, Migration into Crack and Propagation in Reinforced Concrete*, Sections Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 3, No. 2, pp. 253-265.
- [61] Morikawa M., Seki H. và Okamura Y. (1988), *Basic study on cracking of concrete due to expansion by rebar corrosion*, Concrete Library of JSCE, JSCE, 11, June, pp. 83-105.
- [62] Jin Xia, Wei Liang Jin abd Long Yuan Li (2016), *Performance of Corroded Reinforced Concrete Columns under the Action of Eccentric Loads*, Journal of Materials in Civil Engineering, 28(1): 04015087.
- [63] Concrete Society (1991), *Model specification for cathodic protection of reinforced concrete*, Concrete society and Corrosion engineering association report No 37, London.
- [64] Pourbaix M. (1973), *Lectures on corrosion*, Plenum, Press, New York.
- [65] ACI 318-25 (2025), *Building Code for Structural Concrete - Code Requirements and Commentary*.
- [66] BS EN 1992-1-1:2023 (2023), *Eurocode 2: Design of concrete structures. General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures*.
- [67] Giamundo V., Lignola G. P., Prota A. & Manfredi G. (2012), *Restraining bars buckling by means of FRP wrapping: an analytical approach*, 15th World conference on earthquake engineering.
- [68] Madhavi T. Ch. and Annamalai S. (2016), *Electrical conductivity of concrete*, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 11, no. 9, pp. 5979– 5982.
- [69] Banthia N., Djeridane S., Pigeon M. (1992), *Electrical resistivity of carbon and steel micro-fiber reinforced cements*, Cement and Concrete Research, Volume 22, Issue 5, pp. 804-814.
- [70] Ibrahim M. Alarifi (2019), *Investigation the conductivity of carbon fiber composites focusing on measurement techniques under dynamic and static loads*, Journal of Materials Research and Technology, Volume 8, Issue 5, pp. 4863-4893.
- [71] Luca Bertolini, Bernhard Elsener, Pietro Pedeferi, Rob Polder (2004), *Corrosion of steel in concrete*; WILEY-VCH 2004.
- [72] Cervenka V., Jendele L. and Cervenka J. (2004), *ATENA computational program for nonlinear finite element analysis of reinforced concrete structures*, Program Documentation, Prague.
- [73] Vassilis K. P. and Andreas J. K. (2005), *Modelling confinement in concrete columns and bridge piers through 3D nonlinear finite element analysis*, fib Symposium “Keep Concrete Attractive”, Budapest.
- [74] Peter Kotes (2013), *Influence of corrosion on crack width and pattern in an RC beam*, Concrete and concrete structure conference Procedia Engineering 65, pp. 311-320.

TIẾNG ĐỨC

- [75] Zulassung Z-31.10-182 (2015), *Gegenstand: Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit TUDALIT (Textilbewehrter Beton)*, Prüfstelle: DIBt, Antragsteller: TUDAG TU Dresden Aktiengesellschaft.
- [76] Manfred Curbach (2002), *SFB 528: Textile Bewehrungen zur Bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung*, Arbeits- und Ergebnisbericht für die Periode II/1999 - I/2002.

PHỤ LỤC

PHỤ LỤC 1: SỐ LIỆU ĐẦU VÀO VÀ CÁC THÔNG SỐ VẬT LIỆU BỊ ẢNH HƯỞNG BỞI QUÁ TRÌNH ĂN MÒN

Bảng PL1.1: Thông số vật liệu đầu vào

STT	Loại	Tên	ký hiệu	Số liệu	Đơn vị
1	Kích thước cột	Bề rộng tiết diện	b	0,2	m
2		Chiều cao tiết diện	h	0,2	m
3		Chiều cao cột	l	0,8	m
4		Bề dày bê tông bảo vệ	c	0,025	m
5		Bán kính bo góc	r_c	0,03	m
6	Bê tông lõi cột	Diện tích nguyên	A_c	0,04	m ²
7		Cường độ bê tông lõi	f'_c	22,20	MPa
8	Cốt thép dọc	Đường kính khi chưa bị ăn mòn	D_s	0,014	m
9		Diện tích khi chưa bị ăn mòn	A_s	0,00062	m ²
10		Cường độ chảy khi chưa bị ăn mòn	f_s	429,0	MPa
11	Cốt thép đai	Đường kính	d_v	0,008	m
12		Khoảng cách đai ở giữa	s	0,15	m
13		Chiều dày	D_f	0,05	m
14	Bê tông hạt mịn	Diện tích chịu lực	A_f	0,04	m ²
15		Cường độ BTHM	f'_{cf}	38,62	MPa
16		Module đàn hồi	E_{cf}	21	GPa
17	Lưới sợi các bon	Diện tích lưới sợi	A_f	0,00014	m ² /m
18		Cường độ chịu kéo	f_f	2750	MPa
19		Module đàn hồi	E_f	185	GPa

Bảng PL1.2: Các thông số vật lý cốt thép dọc của cột

Mức độ ăn mòn	Mô đun đàn hồi (Gpa)	Đường kính (mm)	Mô men quán tính (mm ⁴)	Diện tích mặt cắt (mm ²)
0%	210	14	1885,74	153,94
8%	210	13,43	1596,09	141,62
22%	210	12,36	1147,28	120,07

Bảng PL1.3: Thông số kích thước và vật liệu cột sau khi bị ăn mòn

STT	Tên tham số	Ký hiệu	Đơn vị	Cột ăn mòn 8%	Cột ăn mòn 22%
1	Hệ số suy giảm cường độ	κ		0,67	0,67
2	Diện tích cốt thép	A_{sc}	m ²	0,00057	0,00048
3	Hàm lượng diện tích cốt thép dọc ρ_g	ρ_g		0,01416	0,01201
4	Tỉ lệ $\frac{A_e}{A_c}$	$\frac{A_e}{A_c}$		0,66864	0,66936
5	Hệ số hình dạng k_a	k_a		0,66864	0,66936
6	Hệ số hình dạng k_b	k_b		0,66864	0,66936
7	Cường độ chảy cốt thép	f_{sc}	MPa	423,852	414,843
8	Độ dày bê tông bảo vệ bị suy giảm	C_{eff}	m	0,00448	0,00448
9	Phần bê tông bị bong tách	t_{eff}	m	0,02419	0,02419
10	Tổng độ dày bê tông bị bong tách	t	m	0,02867	0,02867

Bảng PL1.4: Các thông số sau khi tăng cường

STT	Tên	Kí hiệu	Đơn vị	Số liệu cho 1 lớp tăng cường	Số liệu cho 2 lớp tăng cường
1	Ứng suất kiểm chế nờ ngang của lưới sợi dệt	f_l	MPa	0.9	1.79
2	Diện tích mặt cắt ngang của lớp BTHM	A_{cf}	m ²	0.0084	0.0129
3	Cường độ chịu nén của BT lõi cột khi bị kiểm chế	f'_{cf}	MPa	24.06	25.919

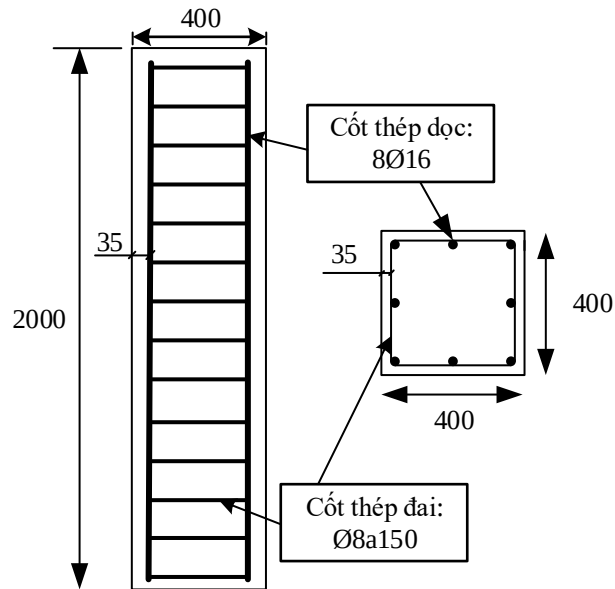
PHỤ LỤC 2: TÍNH TOÁN DÒNG ĐIỆN BẢO VỆ CATÔT

Bảng PL2.1: Thông số cường độ dòng điện trong hệ thống bảo vệ catốt

Thép dọc			Thép đai			Diện tích mặt thép dọc (cm ²)	Diện tích mặt thép đai (cm ²)	Tổng diện tích mặt cốt thép (m ²)	Mật độ dòng điện (mA/m ²)	Cường độ dòng (A)
Bán kính (cm)	Chiều dài (cm)	Số lượng	Bán kính (cm)	Chiều dài (cm)	Số lượng					
0,7	75	4	0,4	85	10	1419,03	1637,82	0,31	20	0,006

PHỤ LỤC 3: VÍ DỤ THIẾT KẾ GIẢI PHÁP KẾT HỢP TĂNG CƯỜNG KHẢ NĂNG CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỰC VÀ BẢO VỆ CHỐNG ẮN MÒN CỐT THÉP CHO TRỤ CẦU BÊ TÔNG CỐT THÉP CÓ CỐT ĐÃ BỊ GỈ BẰNG BÊ TÔNG CỐT LƯỚI DỆT SỢI CÁC BON

1. CÁC THÔNG SỐ HIỆN TRẠNG CỦA TRỤ CẦU BÊ TÔNG CỐT THÉP



Hình PL 3.1. Cấu tạo trụ cầu bê tông cốt thép hiện trạng (đơn vị: mm)

Trụ cầu bê tông cốt thép có cấu tạo được thể hiện như Hình PL3.1, bao gồm:

- Trụ có tiết diện hình chữ nhật kích thước:
 - $b \times h = 0,4 \times 0,4 \text{ m}$
 - Chiều cao trụ cần tăng cường và bảo vệ là 2 m.
- Cấu tạo thép của trụ:
 - Thép dọc: 8 thanh $\text{Ø}16$ bố trí đều theo chu vi trụ (hàm lượng cốt thép là 1%).
 - Thép đai: $\text{Ø}8$, khoảng cách đai 150 mm.
- Cấu tạo bê tông của trụ:
 - Lớp bê tông bảo vệ ban đầu: dày 35 mm.
 - Cường độ chịu nén của bê tông ban đầu theo hồ sơ thiết kế của trụ cầu là 25 MPa.

- Các kết quả khảo sát hiện trạng sau khi bị ăn mòn: Các khảo sát hiện trường được thực hiện bằng một số phương pháp cơ bản như gõ búa, khoan lõi, siêu âm, đo điện thế tự ăn mòn.
- Lớp bê tông bảo vệ bong tróc nhiều tại 4 cạnh của cột.
- Nứt dọc theo thân trụ, tập trung tại các vị trí trùng với vị trí bố trí thép dọc – dấu hiệu điển hình của giãn nở sản phẩm rỉ thép.
- Điện thế ăn mòn đo được dao động từ –380 đến –480 mV (so với điện cực Cu/CuSO₄), tương đương mức ăn mòn đang hoạt động.
- Mức độ mất mát tiết diện trung bình của thép dọc đo được khoảng 20% tùy vị trí, xác định bằng siêu âm và kiểm tra trực tiếp tại các lỗ khoan.
- Cường độ bê tông lõi không bị suy giảm so với bê tông ban đầu, theo kết quả nén mẫu khoan.
- Trụ nằm trong khu vực ngập và bắn nước biển. Do vậy, khu vực cần bảo vệ của trụ thường xuyên ẩm ướt và liên tục xuất hiện ion Clorua.

2. THIẾT KẾ TĂNG CƯỜNG KHẢ NĂNG CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỤC

- Xác định sức kháng nén của trụ cầu sau khi bị ăn mòn:

Ảnh hưởng của quá trình ăn mòn lên các vật liệu bê tông và cốt thép của trụ với mất mát khối lượng do ăn mòn cốt thép dọc khoảng 20% được tính toán theo các công thức (2.7), (2.8) và từ (2.18) đến (2.23) được thể hiện trong *Bảng PL3.1*.

Bảng PL3.1: Các thông số ảnh hưởng của quá trình ăn mòn cốt thép

STT	Thông số	Mất mát khối lượng do ăn mòn (%)	Giá trị	Đơn vị
1	Diện tích cốt thép sau khi bị ăn mòn	20	0,00129	m ²
2	Hệ số hàm lượng cốt thép sau khi ăn mòn (pg)		0,00804	
3	Cường độ kéo chảy cốt thép		386,1	MPa
4	Độ dày bê tông bảo vệ bị suy giảm do ăn mòn cốt đai		0,00761	m
5	Độ dày bê tông bảo vệ bị suy giảm do ăn mòn thép dọc		0,02094	m
6	Tổng độ dày bê tông bị bong tróc		0,02855	m
7	Diện tích phần bê tông bị bong tróc		0,00326	m ²

Kiểm tra sự mất ổn định của cốt thép dọc được thể hiện tại *Bảng PL3.2*:

Bảng PL3.2: Sức kháng nén của trụ trước và sau khi bị ăn mòn

Mức độ ăn mòn	Mô đun đàn hồi (Gpa)	Đường kính (m)	Mô men quán tính (mm ⁴)	Diện tích (mm ²)	Ứng suất tới hạn (MPa)	Tình trạng cốt thép dọc
20%	210	14,31	2058,87	160,85	294,8	Mất ổn định

Sức kháng nén còn lại của trụ sau khi bị ăn mòn với mất mát khối lượng do ăn mòn cốt thép dọc 20% được tính theo công thức (2.24). Kết quả được thể hiện tại *Bảng PL3.3*:

Bảng PL3.3: Sức kháng nén của trụ trước và sau khi bị ăn mòn

STT	Tên	Mức độ ăn mòn cốt thép	Sức kháng nén của bê tông trụ (N)	Sức kháng nén của cốt thép (N)	Sức kháng nén của trụ (N)	Tỷ lệ
1	Trụ chưa bị ăn mòn	0%	3959,8	690,0	4649,8	
2	Trụ sau khi bị ăn mòn	20%	3886,3	99,4	3985,7	-14%

Như vậy khi cốt thép dọc của trụ bị ăn mòn với mất mát khối lượng cốt thép dọc do ăn mòn là 20% thì sức kháng nén của trụ đã bị suy giảm khoảng 14% so với trụ chưa bị ăn mòn. Đây là mức suy giảm lớn và nên tăng cường sửa chữa cho trụ.

- Lựa chọn sơ bộ bê tông hạt mịn:

Thông số cơ học của bê tông hạt mịn được lựa chọn thể hiện trong *Bảng PL3.4*:

Bảng PL3.4: Thông số cơ học của bê tông hạt mịn

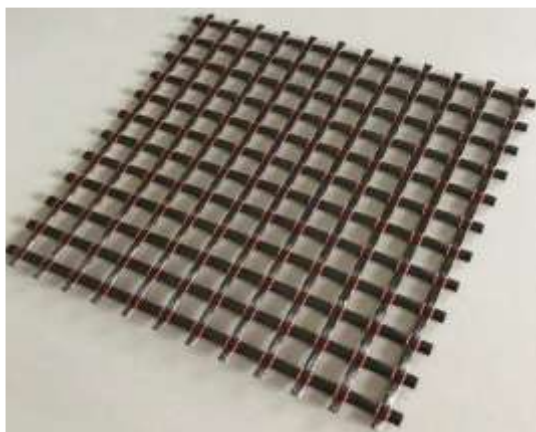
STT	Loại	Thông số cơ học	ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Bê tông hạt mịn	Cường độ BTHM	f'_{cf}	40	MPa
2		Module đàn hồi	E_{cf}	21	GPa

- Lựa chọn loại lưới sợi các bon:

Trong trường hợp này, 2 loại lưới sợi các bon SITgrid017 (Hình PL 3.2a) và SITgrid041 (Hình PL 3.2a) cùng được sản xuất bởi công ty V.FRAAS (Đức) được lựa chọn để so sánh khả năng tăng cường sức kháng nén cho trụ. Thông số cơ học của 2 loại lưới này được thể hiện trong Bảng PL3.4:

Bảng PL3.5: Thông số cơ học của các loại lưới sợi các bon

STT	Thông số cơ học	Đơn vị	Lưới sợi SITgrid017	Lưới sợi SITgrid042
1	Diện tích lưới sợi	m ² /m	0,000141	0,00007051
2	Cường độ chịu kéo	MPa	2750	2200
3	Module đàn hồi	GPa	185	185



(a) Lưới sợi các bon SITgrid017



(b) Lưới sợi các bon SITgrid042

Hình PL 3.2. Lưới sợi các bon SITgrid017 và SITgrid042

- Tính toán sức kháng nén của trụ sau khi được tăng cường:

Các thông số liên quan đến khả năng tăng cường chịu lực nén dọc trục cho trụ được tính toán theo các công thức (1.17) đến (1.21) được thể hiện trong Bảng PL3.6:

Bảng PL3.6: Các hệ số liên quan đến khả năng tăng cường chịu lực nén dọc trục

STT	Thông số	Giá trị
1	Hệ số suy giảm cường độ	0,67
2	Tỉ lệ $\frac{A_e}{A_c}$	0,514428133
3	Hệ số hình dạng k_a	0,514428133
4	Hệ số hình dạng k_b	0,514428133

Thông qua các hệ số này, Ứng suất kiểm chế nở ngang của lưới sợi dệt các bon và cường độ chịu nén của bê tông lõi trụ được tính toán theo các công thức (1.14). Bên cạnh

đó chiều dày lớp BTHM cũng được tính toán dựa trên số lượng lớp lưới sợi các bon tăng cường theo công thức (2.44). Kết quả được thể hiện trong *Bảng PL3.7*.

Bảng PL3.7: Ứng suất kiểm chế nở ngang và cường độ chịu nén của bê tông lõi trụ

ST T	Số lớp lưới sợi dệt	Chiều dày BTH M	Diện Tích BTH M	Ứng suất kiểm chế nở ngang	Đơn vị	Lưới sợi SITgrid01 7	Lưới sợi SITgrid04 2
1	1	0,01	0,0164	Ứng suất kiểm chế nở ngang	MPa	1,49	0,75
				Cường độ bê tông lõi sau tăng cường	MPa	27,38	26,19
2	2	0,015	0,0249	Ứng suất kiểm chế nở ngang	MPa	2,99	1,49
				Cường độ bê tông lõi sau tăng cường	MPa	29,77	27,38
3	3	0,02	0,0336	Ứng suất kiểm chế nở ngang	MPa	4,48	2,24
				Cường độ bê tông lõi sau tăng cường	MPa	32,15	28,57
4	4	0,025	0,0425	Ứng suất kiểm chế nở ngang	MPa	5,98	2,99
				Cường độ bê tông lõi sau tăng cường	MPa	34,53	29,77

Ứng suất tối hạn của cốt thép dọc sau khi được tăng cường BTCLD tính toán theo công thức (2.33) được trình bày trong *Bảng Pl 3.8*.

Bảng PL3.8: Ứng suất tối hạn của cột

STT	Số lớp lưới sợi dệt	Ứng suất tối hạn chưa được tăng cường (Mpa)	Lưới sợi SITgrid017			Lưới sợi SITgrid042		
			Hằng số đàn hồi	Ứng suất tối hạn (Mpa)	Tình trạng cốt thép dọc	Hằng số đàn hồi	Ứng suất tối hạn (Mpa)	Tình trạng cốt thép dọc
1	0	294,8						
2	1		70,5	2427,1	Không bị mất ổn định	35,3	1716,3	Không bị mất ổn định
3	2		141,0	3432,4	Không bị mất ổn định	70,5	2427,3	Không bị mất ổn định
4	3		211,5	4203,8	Không bị mất ổn định	105,8	2972,8	Không bị mất ổn định
5	4		282,0	4854,2	Không bị mất ổn định	141,0	3432,7	Không bị mất ổn định

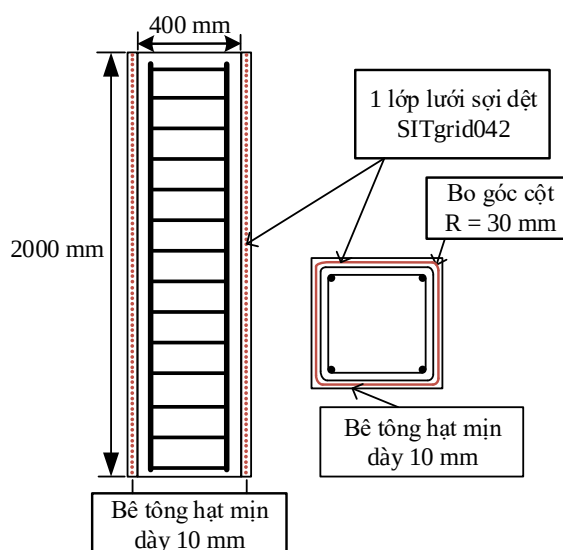
Sức kháng nén của trụ sau khi được tăng cường BTCLD sợi các bon được tính toán theo công thức (2.26) và được trình bày trong *Bảng PL3.9*.

Bảng PL3.9: Sức kháng nén của trụ sau khi tăng cường bằng BTCLD sợi các bon

STT	Số lớp lưới sợi dệt	Sức kháng nén của trụ chưa tăng cường (N)	Lưới sợi SITgrid017		Lưới sợi SITgrid042	
			Sức kháng nén (N)	Tỷ lệ tăng cường	Sức kháng nén (N)	Tỷ lệ tăng cường
1	0	4383,2				
2	1		5539,9	29%	5354,8	24%
3	2		6250,3	47%	5880,0	31%
4	3		6968,7	65%	6413,2	58%
5	4		7695,1	83%	6954,4	65%

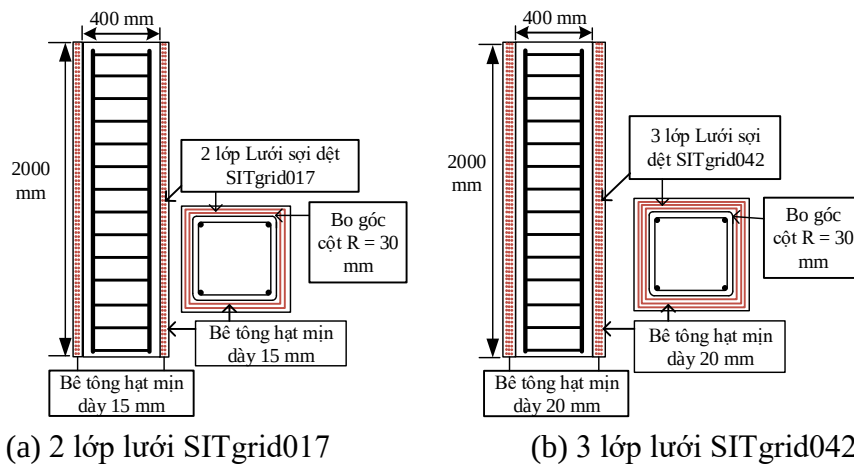
Dựa trên yêu cầu về khả năng kháng nén của trụ BTCT sau khi tăng cường bằng BTCLD sợi các bon và giới hạn về thông thủy sử dụng sau khi tăng cường, có thể lựa chọn số lượng lớp lưới sợi dệt phù hợp với loại lưới sợi dệt tương ứng.

Ví dụ, với yêu cầu tăng cường sức kháng nén cho trụ lên đến hơn 20% so với trụ bị ăn mòn có thể sử dụng BTCLD với 1 lớp lưới sợi dệt SITgrid042, cấu tạo BTCLD sợi các bon được thể hiện trong Hình PL 3.3.



Hình PL 3.3. Cấu tạo BTCLD sợi các bon tăng cường 20% sức kháng nén cho trụ

Với yêu cầu tăng cường sức kháng nén cho trụ lên hơn 40% so với trụ bị ăn mòn có thể sử dụng BTCLD với 2 lớp lưới sợi dệt SITgrid017 hoặc 3 lớp lưới sợi dệt SITgrid042, cấu tạo BTCLD sợi các bon được thể hiện trong Hình PL 3.4.



Hình PL 3.4. Cấu tạo BTCLD sợi các bon tăng cường 40% sức kháng nén cho trụ

3. THIẾT KẾ HỆ THỐNG BẢO VỆ CATÔT SỬ DỤNG DÒNG ĐIỆN NGOÀI

Với lưới sợi các bon và bê tông hạt mịn đã lựa chọn ở phần tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục cần tính toán hệ thống bảo vệ catốt để chống ăn mòn cho cốt thép trong giai đoạn sử dụng tiếp theo. Yêu cầu chung của lưới sợi các bon: cần đảm bảo rằng loại lưới sợi các bon được lựa chọn có khả năng dẫn điện và phân cực tốt. Nên sử dụng các loại sợi các bon sản xuất chuyên dụng cho hệ thống bảo vệ catốt. Ngoài ra, cũng có thể sử dụng loại lưới sợi dệt các bon có lớp phủ SBR hoặc Epoxy vì các loại lớp phủ này không ảnh hưởng đến khả năng dẫn điện của sợi, đồng thời bảo vệ lưới sợi khỏi các tác nhân xấu từ môi trường.

- Tính toán dòng điện bảo vệ:

Dòng điện bảo vệ được tính toán dựa trên diện tích bề mặt phần cốt thép cần bảo vệ chống ăn mòn và mật độ dòng điện. với điều kiện cấu kiện làm việc ở khu vực ngập, bắn nước và thường xuyên có ion clorua, mật độ dòng điện được đề xuất áp dụng là 20 mA/m^2 . Dòng điện cần áp dụng trong hệ thống được tính toán theo công thức (2.45). Kết quả tính toán được trình bày tại Bảng PL3.10:

Bảng PL3.10: Cường độ dòng điện bảo vệ cần thiết cho hệ thống bảo vệ catốt

Thép dọc			Thép đai			Diện tích mặt thép dọc (m^2)	Diện tích mặt thép đai (m^2)	Tổng diện tích (m^2)	Mật độ dòng điện (mA/m^2)	Cường độ dòng (A)
Đường kính (m)	Chiều dài (m)	Số lượng	Đường kính (m)	Chiều dài (m)	Số lượng					
0,016	2	8	0,008	1,5	14	0,804	0,528	1,332	20	0,027

- Lựa chọn nguồn điện bảo vệ:

Nguồn điện bảo vệ phụ thuộc vào điện trở của các lớp bê tông nằm giữa cốt thép và lưới sợi dệt các bon. Trong môi trường ngập và bắn nước, điện trở suất của bê tông thường khoảng từ 50 -200 ohm.m, do vậy điện trở của bê tông cũng là điện trở của hệ thống được tính toán theo công thức (2.47) và hiệu điện thế tối thiểu của nguồn điện 1 chiều được tính toán theo công thức (2.46). Kết quả tính toán được trình bày trong *Bảng PL3.11*:

Bảng PL3.11: Hiệu điện thế nguồn điện cần thiết cho hệ thống bảo vệ catốt

Diện tích bê tông ở giữa catốt và anốt (m ²)	Khoảng cách (m)	Điện trở suất bê tông (Ohm.m)	Điện trở hệ thống (Ohm)	Cường độ dòng điện (A)	Hiệu điện thế nguồn (V)
0,8	0,355	50-200	113-450	0,027	3-12V

Vậy có thể chọn loại nguồn điện 12V-1A để lắp đặt vào hệ thống bảo vệ catốt.

- Lắp đặt hệ thống:

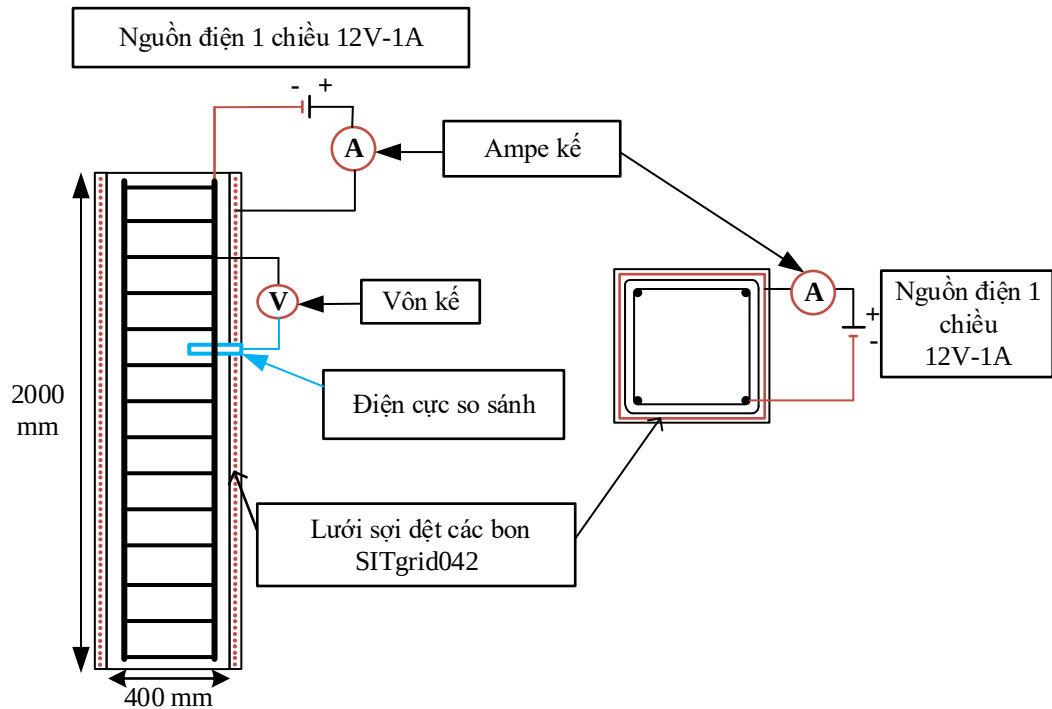
Hệ thống được lắp đặt với cực âm của nguồn điện nối với cốt thép cần bảo vệ và cực dương nối với lưới sợi dệt các bon như hình. Bên cạnh đó, cần bổ sung thêm các thiết bị kiểm tra và đánh giá hiệu quả chống ăn mòn theo **Mục 2.4.3**. Cấu tạo hệ thống bảo vệ catốt chống ăn mòn cốt thép kết hợp tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục cho trụ sử dụng BTCLD với 1 lớp lưới sợi các bon SITgrid042 được thể hiện trong *Hình PL 3.5*.

Với các phương án sử dụng 2 hay 3 lớp lưới sợi dệt các bon, thì hệ thống bảo vệ catốt cũng được thiết lập tương tự như phương án sử dụng 1 lớp lưới sợi dệt các bon.

Trong quá trình vận hành hệ thống bảo vệ catốt, điện trở của bê tông giữa cốt thép và lưới sợi dệt sẽ thay đổi theo độ ẩm của các lớp bê tông này. Do vậy, cần sử dụng bộ biến áp để giúp điều chỉnh và ổn định cường độ dòng điện trong hệ thống.

Bên cạnh đó, cần phải thường xuyên đo điện thế cốt thép thông qua Vôn kế và điện cực so sánh (có thể dùng điện cực Bạc-Clorua hoặc Đồng – Sun phát). Điện thế nửa pin của cốt thép có giá trị ≤ -720 mV (so với Cu/CuSO₄) và độ sụt thế ≤ 100 mV sau 24h ngắt nguồn bảo vệ theo chỉ dẫn từ tiêu chuẩn ISO 12696:2016 [42] và biểu đồ Pourbaix dành

cho thép [64], để đảm bảo rằng hệ thống bảo vệ catốt hoạt động hiệu quả và chứng minh được rằng cốt thép đã được phân cực đủ mức để ngăn chặn quá trình ăn mòn.



Hình PL 3.5. Cấu tạo giải pháp kết hợp tăng cường khả năng chịu lực nén dọc trục và chống ăn mòn cốt thép cho trụ sử dụng 1 lớp lưới sợi các bon SITgrid042

PHỤ LỤC 4: BẢN MÔ TẢ GIẢI PHÁP HỮU ÍCH

1. LĨNH VỰC KỸ THUẬT CỦA GIẢI PHÁP HỮU ÍCH

Giải pháp hữu ích đề cập đến cột bê tông cốt thép được bảo vệ chống ăn mòn bằng hệ thống bảo vệ ca tốt. Cụ thể hơn, giải pháp hữu ích đề cập đến cột bê tông cốt thép sử dụng lưới dệt sợi các bon nối với cực dương của hệ thống bảo vệ ca tốt và cực âm của hệ thống này nối với cốt thép để bảo vệ chống ăn mòn cho cột bê tông.

2. TÌNH TRẠNG KỸ THUẬT CỦA GIẢI PHÁP HỮU ÍCH

Trong các loại nguyên nhân làm suy giảm khả năng chịu lực của cấu kiện BTCT thì ăn mòn cốt thép chính là một quá trình phá hoại nghiêm trọng và phổ biến nhất trên các công trình xây dựng hiện nay, đặc biệt là các công trình nằm trong các vùng có môi trường xâm thực mạnh như các vùng ven biển, công trình ngầm,... Theo thống kê tại Việt Nam, có hơn 50% bộ phận kết cấu bê tông và BTCT bị ăn mòn, hư hỏng nặng hoặc bị phá hủy chỉ sau từ 10-30 năm sử dụng (xem trong bài báo: Tình trạng ăn mòn bê tông cốt thép và giải pháp chống ăn mòn cho công trình bê tông cốt thép trong môi trường biển Việt Nam, Tạp chí Khoa học kỹ thuật thủy lợi và môi trường, số đặc biệt 11/2011 của tác giả Đồng Kim Hạnh, Dương Thị Thanh Hiền). Ăn mòn do Clorua gây ra xảy ra ở các vùng nước mặn và nước lợ, gây ra hư hỏng đáng kể về kết cấu đối với cột cầu cốt thép, kết cấu nền biển, ban công bê tông và các kết cấu bê tông cốt thép khác. Ăn mòn cốt thép, được nhúng vào kết cấu bê tông để truyền cường độ cho bê tông, là một vấn đề đã biết rõ trong lĩnh vực kỹ thuật này. Bê tông bao gồm nhiều cột cầu, công trình phụ, trụ cầu, cầu cảng và những thứ tương tự thường xốp và cho phép nước mặn xâm nhập. Trong môi trường nhiệt đới và cận nhiệt đới, nhiệt độ ẩm làm tăng tốc độ khuếch tán của clorua (bao gồm muối) về phía các thành phần cốt thép. Nhiệt độ ẩm cũng có thể làm khô một phần kết cấu, dẫn đến hiện tượng khô bay hơi làm tăng nồng độ clorua trong kết cấu bê tông cốt thép. Ngoài ra, nhiệt độ ẩm đẩy nhanh quá trình khuếch tán oxy trong khí quyển vào bê tông xốp. Khi nồng độ clorua đạt khoảng 0,6 đến 0,8 kg trên mét khối, lượng clorua sẽ có đủ để bắt đầu quá trình ăn mòn, đặc biệt là ăn mòn sắt có trong các thanh cốt thép.

Các hợp chất oxit sắt quen thuộc (thường được gọi là rỉ sét) hình thành do phản ứng của sắt với oxy trong khí quyển khi có nước, chiếm thể tích lớn hơn đáng kể so với sắt gốc có

trong thép. Do lượng không gian dành cho việc tăng thể tích có hạn nên chỉ cần ăn mòn 0,002 inch (2 mm) trên bề mặt của các bộ phận gia cố là đủ để tạo ra ứng suất kéo cực lớn lên bê tông lân cận. Khi ứng suất tác dụng vượt quá cường độ kéo của bê tông, bê tông có thể bị nứt và vỡ nghiêm trọng. Cuối cùng, tính toàn vẹn cơ học của kết cấu bị tổn hại đến mức cần phải sửa chữa tổn kém hoặc thay thế hoàn toàn.

Một số kỹ thuật hiện đang được sử dụng để ức chế hoặc ngăn chặn hoàn toàn quá trình ăn mòn có hại được mô tả ở trên. Vì quá trình ăn mòn có bản chất là oxy hóa, nên việc tạo ra catốt thép (tức là đặt thép ở trạng thái khử) sẽ ngăn cản quá trình oxy hóa xảy ra một cách hiệu quả. Điều này được thực hiện bằng cách cung cấp điện tử cho các thành phần cốt thép để quá trình oxy hóa thép không xảy ra. Thay vào đó, oxy ở bề mặt thép bị khử điện hóa. Nói cách khác, nếu các điện tử được cung cấp để thay thế những điện tử thường bị mất trong phản ứng ăn mòn (trong đó sắt mất điện tử khi bị oxy hóa), sắt sẽ không bị oxy hóa. Điện tử (tức là chúng không tạo ra dòng điện đến các bộ phận gia cố bằng thép) phải cung cấp nguồn điện bên ngoài để cung cấp dòng điện ấn tượng giữa cực dương và thép gia cố (cực âm). Thông thường, dòng điện này được cung cấp bằng cách kết nối cực âm của nguồn điện (tức là nguồn điện tử) với thép gia cố và cực dương của nguồn điện với cực dương titan được xúc tác. Trong ứng dụng cột, mạch điện được hoàn thiện bằng nước muối thấm vào bê tông tồn tại giữa cực dương và cốt thép cần bảo vệ. Sau khi được cấu hình theo cách này, việc cấp điện cho nguồn điện sẽ tạo ra dòng điện chạy tới cốt thép. Trong các hệ thống dòng điện ấn tượng trước đây, các bộ nguồn một chiều (DC) có thể điều khiển lấy nguồn điện xoay chiều (AC) có bán trên thị trường và chỉnh lưu thành nguồn DC đã được sử dụng. Việc chỉnh lưu nguồn AC này được thực hiện thông qua việc sử dụng một hoặc nhiều bộ chỉnh lưu.

3. BẢN CHẤT KỸ THUẬT CỦA GIẢI PHÁP HỮU ÍCH

Thông thường, cột (cột) bê tông cốt thép hoặc ống thép được bố trí trong nước biển (nước điện phân) để đỡ cầu, đường, giàn khoan ngoài khơi, bến cảng, cơ sở tiêu tán sóng, và những thứ tương tự.

Khi cột chìm trong nước biển, sắt trong thép hoặc thanh cốt thép của cột bị ion hóa và chảy vào nước biển, ăn mòn cột. Để ngăn chặn sự ăn mòn này, một bộ phận tạo ra dòng

điện như cực dương hy sinh được bố trí trên cột để tạo ra dòng điện một chiều đủ để khắc phục dòng điện ăn mòn.

Trong kết cấu bảo vệ catốt này, bề mặt của cột bê tông được gia cố bằng sợi. Sau đó, nó được phủ bằng các vật liệu bên ngoài bằng bê tông hạt mịn. Vật liệu hấp thụ dòng điện được bố trí sao cho phần dưới của nó chìm trong nước biển. Hơn nữa, cực dương điện được nối với phần cột bê tông chìm trong nước biển.

Theo cấu trúc bảo vệ catốt này, lớp phủ dẫn điện đóng vai trò là điện cực phân tán để bảo vệ catốt và vật liệu hấp thụ dòng điện hấp thụ nước biển che chắn cột bê tông khỏi khí quyển, giúp bảo vệ đồng đều cột bê tông khỏi bị ăn mòn trên diện rộng ... Người ta nói rằng nó có thể được thực hiện.

Ngoài ra, nói chung, sự ăn mòn được tăng tốc đáng kể ở một phần của cột (phạm vi thủy triều) lặp lại trạng thái khô trong khí quyển và trạng thái chìm trong nước biển do sự lên xuống của dòng chảy của mặt biển. Vì lý do này, việc bảo vệ chống ăn mòn cho cột chủ yếu được thực hiện trong phạm vi thủy triều này. Bê tông cốt lưới dệt được tạo thành từ sự kết hợp giữa hai loại vật liệu chính đó là: lớp bê tông hạt mịn bao bọc bên ngoài và lớp cốt làm từ các lưới sợi dệt. Bê tông hạt mịn là hỗn hợp bao gồm các thành phần cơ bản là xi măng, nước, cốt liệu nhỏ ($D_{max} < 1\text{mm}$) cùng một số loại phụ gia khoáng (tro bay, muối silic) và các loại phụ gia siêu dẻo khác.

Trong số các loại sợi dệt được sử dụng phổ biến để làm cốt, vật liệu lưới sợi các bon với tỉ lệ thành phần là 92% hợp chất các bon. Chúng có thể được sản xuất từ các loại polyme khác nhau, phổ biến nhất là sản xuất từ polyacrylonitrile (PAN) có tính dẫn điện nên, với một dòng điện được cấp phù hợp, cốt sợi các bon trong BTCLD có đầy đủ các tính chất cần thiết để có thể trở thành một anốt trợ bảo vệ cho cốt thép khỏi bị ăn mòn dựa trên lý thuyết của phương pháp bảo vệ catốt (xem giáo trình Tự động hoá các quá trình công nghệ hoá học, Đại học Bách khoa Hà Nội, của tác giả Nguyễn Minh Hệ). Trong một nghiên cứu với mục tiêu sử dụng BTCLD sợi các bon để bảo vệ chống ăn mòn cốt thép cho bản mặt cầu, các tác giả Carla Driessen và Michael Raupach đã khảo sát sự phân cực của sợi các bon với 2 kích cỡ mắt lưới là 21 và 38 mm dưới tác dụng của dòng điện áp dưới 1V. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, khả năng phân cực của lưới sợi các bon hoàn toàn đủ điều kiện

để có thể trở thành một anốt bảo vệ chống ăn mòn cốt thép (xem trong bài báo: Corrosion Protection of Bridges Using a Textile Reinforced Concrete Interlayer, European Corrosion Congress 2015, Graz, Austria, EUROCORR 2015, của tác giả trong Carla Driessen, Michael Raupach).

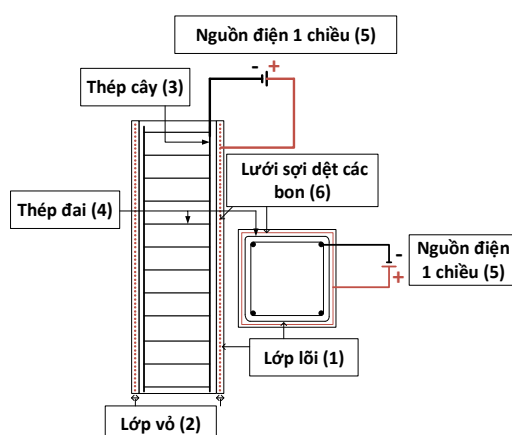
Giải pháp hữu ích đề cập đến hệ thống bảo vệ catốt để ức chế quá trình oxy hóa của phần gia cố được bố trí bên trong kết cấu xi măng. Hệ thống này bao gồm một pin nhỏ gọn, tự động được điều chỉnh để gắn vào cấu trúc xi măng ở vị trí ngoài trời, pin có cực dương và cực âm, một dây dẫn được điều chỉnh để nối điện cực âm của pin với bộ phận gia cố của kết cấu xi măng, vỏ anốt được làm bằng vật liệu kết dính và được điều chỉnh để đặt tiếp xúc vật lý với kết cấu xi măng, và anốt được bố trí bên trong vỏ anốt và được điều chỉnh để được bố trí gần với một phần của phần gia cố được bố trí bên trong cấu trúc xi măng cần được bảo vệ bằng catốt, cực dương được nối điện với cực dương của pin.

Giải pháp hữu ích đề xuất cột bê tông cốt thép sử dụng bê tông cốt lưới dệt sợi các bon được bảo vệ chống ăn mòn, trong đó cột này bao gồm: lớp lõi (1) và lớp vỏ (2).

Lớp lõi (1) cấu tạo bằng bê tông với lõi thép, lớp lõi (1) bao gồm các thép cây (3) được đặt tạo thành khung và được giữ bởi các thép đai (4) theo chiều dài của cột, thép cây (3) được nối với cực âm của hệ thống bảo vệ catốt, sau đó đổ bê tông tạo thành lớp lõi.

Lớp vỏ (2) là phần tiếp giáp với lớp lõi (1), trong đó lớp lõi (1) được bao quanh bởi lớp vỏ (2), lớp vỏ 2 được cấu tạo từ bê tông cốt lưới dệt các bon, trong đó các tấm lưới sợi các bon được tiếp xúc trực tiếp với lớp lõi (1) sau đó đổ bê tông.

4. MÔ TẢ HÌNH ẢNH



Hình PL 4.1. Giải pháp bảo vệ chống ăn mòn cốt thép

5. MÔ TẢ CHI TIẾT GIẢI PHÁP HỮU ÍCH

Với việc tham chiếu đến các hình trong đó các chữ số giống như biểu thị các bộ phận tương ứng trong một số chế độ xem, *Hình PL 4.1* minh họa một phương án của hệ thống bảo vệ catốt được xây dựng theo các nguyên tắc của giải pháp hữu ích. Đặc biệt hơn, *Hình PL 4.1* minh họa hệ thống bảo vệ catốt được áp dụng cho cột. Mặc dù các khái niệm trình bày ở đây sẽ được thảo luận dưới dạng cột, nhưng phải hiểu rằng hệ thống hiện tại về cơ bản có thể được sử dụng trong bất kỳ ứng dụng nào trong đó bảo vệ catốt cho cốt thép trong kết cấu bê tông bất kỳ. Như đã biết trong lĩnh vực kỹ thuật này, cột bê tông cốt thép sử dụng bê tông cốt lưới dệt sợi các bon được bảo vệ chống ăn mòn, trong đó cột này bao gồm: lớp lõi (1) và lớp vỏ (2).

Lớp lõi (1) cấu tạo bằng bê tông với lõi thép, lớp lõi (1) bao gồm các thép cây được đặt tạo thành khung và được giữ bởi các thép đai theo chiều dài của cột, thép cây được nối với cực âm của hệ thống bảo vệ ca tốt, sau đó đổ bê tông tạo thành lớp lõi.

Lớp vỏ (2) là phần tiếp giáp với lớp lõi (1), trong đó lớp lõi (1) được bao quanh bởi lớp vỏ 2 không thấm nước được tạo thành từ bê tông không thấm nước và không khí tạo thành một lớp vỏ bọc không thấm nước và không khí, lớp vỏ (2) được cấu tạo từ bê tông cốt sợi các bon, trong đó các tấm lưới sợi các bon được tiếp xúc trực tiếp với lớp lõi (1) sau đó đổ bê tông, lớp vỏ 2 có chiều dày từ 3 đến 5 cm.

Các bó sợi các bon 4 có độ mịn 3200 tex, được dệt đều theo cả 2 phương ($0/90^\circ$), với khoảng cách giữa các bó sợi là 12,7 mm, mỗi bó sợi được tổ hợp từ 48.000 sợi cơ bản, có diện tích tiết diện mỗi bó sợi là 1,808 mm², lưới sợi có khối lượng trên đơn vị diện tích là 578g/m², cực dương của hệ thống bảo vệ catốt 10 được nối vào lưới sợi các bon 4 sau đó đổ bê tông hạt mịn lên để tạo ra lớp vỏ.

Bê tông hạt mịn của lớp vỏ (2) bao gồm xi măng, muối silic, xỉ lò cao, cát, bột đá, nước và phụ gia kết dính có thành phần cấp phối lần lượt là: 21,1%; 1,8%; 6,8%; 40,4%; 20,2%; 9,3%; 0,4% theo khối lượng.

Mặc dù có khả năng bố trí thay thế, cột 1 thể hiện trên *Hình PL 4.1* thường có dạng hình trụ, tuy nhiên cột này có thể bao gồm, ví dụ, cột có mặt cắt ngang nói chung là hình chữ nhật, hoặc mặt cắt ngang có hình dạng hình học khác.

Hệ thống bảo vệ catốt thường bao gồm nguồn điện 1 chiều (5) hay còn gọi là pin (tự cung cấp), như được biểu thị trên *Hình PL 4.1*, có thể được gắn vào cột ở vị trí cao trên mức nước và cực dương được nối với lớp vỏ (2), cực âm được nối với cốt thép của lớp lõi (1). Kích thước và trọng lượng cũng như điện áp, của pin sẽ khác nhau tùy thuộc vào ứng dụng cụ thể mà hệ thống bảo vệ catốt được ứng dụng. Ví dụ, pin có thể bao gồm pin 1,5 vôn, 1.200 ampe giờ nhỏ gọn, ví dụ: khoảng 4 inch x 4 inch x 9 inch và nặng dưới 10 lbs, sao cho nó phù hợp thích hợp để gắn vào kết cấu cầu trong môi trường ngoài trời.

Tốt hơn là, pin bao gồm pin kim loại-không khí như pin kẽm-không khí. Vì những lý do được thảo luận bên dưới, pin này tốt nhất nên chứa dung dịch điện phân dạng gel, hoạt động hoàn toàn (không được hiển thị). Kéo dài ra bên ngoài từ pin là cực âm và cực dương. Được hình thành ở phần trên của pin là các lỗ thông hơi (không được hiển thị) qua đó không khí có thể đi vào pin để cung cấp oxy cho cực âm không khí chứa trong đó. Cực âm không khí này có khả năng phản ứng với oxy và nước trong khí quyển để tạo thành các ion hydroxyl. Cùng với cực dương chứa kẽm (tức là điện cực âm của pin), cực âm không khí bao gồm điện cực dương của pin.

Mặc dù các phương án cụ thể của giải pháp hữu ích đã được bộc lộ chi tiết trong phần mô tả và hình vẽ nêu trên nhằm mục đích làm ví dụ, những người có hiểu biết về lĩnh vực này sẽ hiểu rằng có thể thực hiện các biến thể và sửa đổi mà không đi chệch khỏi tinh thần và phạm vi của giải pháp hữu ích. như được nêu trong các yêu cầu bồi thường sau đây.

6. YÊU CẦU BẢO HỘ

Cột bê tông cốt thép sử dụng bê tông cốt lưới dệt sợi các bon được bảo vệ chống ăn mòn bao gồm: lớp lõi (1) và lớp vỏ (2), trong đó:

Lớp lõi (1) cấu tạo bằng bê tông với lõi thép, lớp lõi (1) bao gồm các thép cây (3) được đặt tạo thành khung và được giữ bởi các thép đai (4) theo chiều dài của cột, thép cây (3) được nối với cực âm của nguồn phát điện 1 chiều (5) sau đó đổ bê tông tạo thành lớp lõi, Phần dây nối cực âm được bảo vệ bằng lớp vỏ cách điện, điểm nối với cốt thép được bảo vệ bằng băng dán cách điện.

Lớp vỏ (2) là phần tiếp giáp với lớp lõi (1), trong đó lớp lõi (1) được bao quanh bởi lớp vỏ (2) không thấm nước được tạo thành từ bê tông không thấm nước và không khí tạo

thành một lớp vỏ bọc không thấm nước và không khí, lớp vỏ (2) được cấu tạo từ bê tông cốt sợi các bon, trong đó các tấm lưới sợi các bon được tiếp xúc trực tiếp với lớp lõi (1) sau đó đổ bê tông, lớp vỏ (2) có chiều dày từ 3 đến 5 cm, các bó sợi các bon (6) có độ mịn 3200 tex, được dệt đều theo cả 2 phương ($0/90^\circ$), với khoảng cách giữa các bó sợi là 12,7 mm, mỗi bó sợi được tổ hợp từ 48.000 sợi cơ bản, có diện tích tiết diện mỗi bó sợi là 1,808 mm², lưới sợi có khối lượng trên đơn vị diện tích là 578g/m², cực dương của nguồn điện được nối vào lưới sợi các bon (7) sau đó đổ bê tông hạt mịn lên để tạo ra lớp vỏ, khác biệt ở chỗ, bê tông hạt mịn bao gồm xi măng, muối silic, xỉ lò cao, cát, bột đá, nước và phụ gia kết dính có thành phần cấp phối lần lượt là: 21,1%; 1,8%; 6,8%; 40,4%; 20,2%; 9,3%; 0,4% theo khối lượng.