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

**NGUYỄN HẢI HÀ**

# NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ CỦA TRỤ VẬT LIỆU HẠT RỜI KẾT HỢP LƯỚI ĐỊA KỸ THUẬT XỬ LÝ NỀN ĐẤT YẾU CHO XÂY DỰNG CÔNG TRÌNH GIAO THÔNG

**Ngành: Kỹ thuật xây dựng công trình giao thông**
**Mã số: 9580205**

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ**

**HÀ NỘI – 2026**

Công trình được hoàn thành tại:
Trường Đại học Giao thông Vận tải

**Người hường dẫn khoa học:**

1. **PGS.TS Nguyễn Đức Mạnh**
   Trường Đại học Giao thông Vận tải
2. **PGS. TS Đặng Hồng Lam**
   Trường Đại học Giao thông Vận tải

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án cấp Trường họp tại Trường Đại học Giao thông Vận tải vào hồi … giờ …ngày tháng năm …..

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

**Thư viện Quốc Gia Việt Nam**

**Thư viện Trường Đại học Giao thông Vận tải**

# MỞ ĐẦU

## 1. Tính cấp thiết của đề tài

Hệ thống kết cấu hạ tầng giao thông Việt Nam đang được đầu tư rất lớn, nhất là mạng lưới đường bộ cao tốc và đường sắt tốc độ cao. Sự có mặt của các tầng đất yếu rộng khắp ở đồng bằng Bắc Bộ, ven biển miền Trung và đồng bằng sông Cửu Long tạo ra những thách thức đáng kể trong xây dựng công trình giao thông (CTGT), đặc biệt khi bề dày đất yếu lớn trên (15–20) m.

Bên cạnh các biện pháp truyền thống (gia tải trước, bấc thấm, cọc cát, trụ đất xi măng, cọc bê tông cốt thép), giải pháp trụ vật liệu hạt rời (VLHR)- phổ biến là trụ đá (Stone column) kết hợp lưới địa kỹ thuật (ĐKT) trải trên đỉnh trụ đã và đang được quan tâm nghiên cứu, ứng dụng rộng rãi trên thế giới. Hệ trụ–lưới này thuộc nhóm giải pháp nền đắp trên trụ gia cường bằng vật liệu ĐKT (Geosynthetic Reinforced Column-Supported embankment – GRCS), trong đó trụ VLHR đóng vai trò phần tử chịu lực chính, còn lưới ĐKT trải trên đỉnh các trụ tạo thành lớp truyền tải phân bố đều tải trọng từ khối đắp xuống hệ trụ và đất nền xung quanh.

Cơ chế làm việc của hệ GRCS dựa trên sự kết hợp giữa hiệu ứng vòm hình thành trong khối đắp phía trên lớp truyền tải, giúp tập trung tải trọng lên đầu trụ; và hiệu ứng màng của lớp lưới ĐKT, cho phép truyền thêm tải trọng từ vùng đất nền giữa các trụ lên đầu trụ thông qua lực căng trong lưới. Giải pháp này có nhiều ưu điểm: xử lý hiệu quả nền đất yếu bề dày lớn, tốc độ thi công nhanh, chi phí thấp hơn cọc cứng, đồng thời giảm thiểu độ lún và độ lún lệch trên bề mặt nền đắp.

Giải pháp nền đắp trên trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT đã được ứng dụng thành công tại nhiều quốc gia: tuyến đường sắt Berlin–Hamburg (Đức), đường cao tốc M60 (Anh), các dự án đường bộ–đường sắt tại Nhật Bản. Các tiêu chuẩn thiết kế EBGEO (Đức), BS 8006 (Anh), FHWA (Mỹ) đã hướng dẫn khá chi tiết về tính toán thiết kế hệ GRCS.

Tại Việt Nam, trụ VLHR đã được áp dụng trong một vài công trình xử lý nền đất yếu, nhưng việc kết hợp trụ VLHR với lưới ĐKT trong hệ hoàn chỉnh vẫn rất ít nghiên cứu và chưa có hướng dẫn tính toán thiết kế phù hợp với điều kiện nước ta. Còn nhiều vấn đề tồn tại: về lý thuyết, các phương pháp hiện có về hiệu ứng vòm cho kết quả chênh lệch (20÷40)%; việc xác định hệ số tập trung ứng suất cho trụ VLHR còn tranh cãi do đặc tính biến dạng khác biệt so với cọc cứng. Về thực nghiệm, thiếu dữ liệu hệ thống trong điều kiện Việt Nam. Về ứng dụng, chưa có quy trình tính toán thiết kế phù hợp.

Xuất phát từ những phân tích trên, đề tài luận án *"Nghiên cứu ứng xử của trụ vật liệu hạt rời kết hợp lưới địa kỹ thuật xử lý nền đất yếu cho xây dựng công trình giao thông"* được thực hiện nhằm sáng tỏ cơ chế làm việc của hệ nền đất–trụ VLHR–lưới ĐKT, đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố chính đến hiệu quả truyền tải, đề xuất các công thức hiệu chỉnh tính toán phù hợp hơn, và cung cấp cơ sở khoa học cho việc ứng dụng giải pháp này tại Việt Nam.

**2. Mục tiêu nghiên cứu**

- Làm rõ cơ chế làm việc và ứng xử của hệ trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT dưới tác dụng của tải trọng khối đắp, có xét đến hiệu ứng vòm, ứng xử của lưới ĐKT trong lớp truyền tải, sự phân bố ứng suất giữa trụ và đất nền, cũng như quan hệ tải trọng–độ lún của hệ.

- Đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố chính đến hiệu quả làm việc bao gồm: đặc tính vật liệu (vật liệu trụ, đất nền, lưới ĐKT), cấu trúc bố trí trụ (trụ đơn/nhóm trụ, tỷ lệ s/D), cấu tạo lớp truyền tải và chiều cao khối đắp.

- Đề xuất các công thức tính toán phù hợp để xác định hệ số tập trung ứng suất (TTƯS) và sức chịu tải (SCT) của hệ trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT, được kiểm chứng bằng kết quả thực nghiệm và mô phỏng số, phục vụ thiết kế xử lý nền đất yếu cho xây dựng CTGT tại Việt Nam.

**3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu**

**Đối tượng nghiên cứu:** Hệ nền đất yếu – trụ VLHR (trụ đá) – lưới ĐKT dưới tác dụng của tải trọng khối đắp trong xây dựng CTGT. Lớp lưới ĐKT trải trên đỉnh trụ đóng vai trò lớp truyền tải từ khối đắp.

**Phạm vi nghiên cứu:**

- Về phương pháp: kết hợp thí nghiệm mô hình vật lý (MHVL) thu nhỏ tỷ lệ 1:20 trong phòng thí nghiệm và phân tích mô hình số (MHS) ba chiều bằng phần mềm phần tử hữu hạn Plaxis 3D.

- Về điều kiện thí nghiệm: trụ đơn VLHR thông thường và trụ đơn VLHR kết hợp lưới ĐKT trong nền đất sét pha ở ba trạng thái ($I_L$ = 0,78; 1,0; 1,5); nhóm trụ VLHR (bố trí 2×2) kết hợp lưới ĐKT trong nền đất sét pha ở trạng thái dẻo chảy ($I_L$ = 0,78) với ba tỷ lệ s/D = 2,5; 3,0; 3,5. Vật liệu trụ: đá dăm nghiền. Tải trọng: thẳng đứng tĩnh.

- Luận án chưa xem xét ảnh hưởng của tải trọng ngang, tải trọng động, cấu trúc địa chất nhiều lớp, hiện tượng ma sát âm, ổn định tổng thể nền đường, dao động mực nước ngầm theo thời gian và trường hợp trụ VLHR được bọc lưới ĐKT.

**4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn**

**Ý nghĩa khoa học:**

- Xây dựng được bộ dữ liệu thực nghiệm có hệ thống về ứng xử cơ học (tải trọng–độ lún–phân bố ứng suất–hệ số tập trung ứng suất) của hệ trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT cho điều kiện nền đất yếu đại diện tại Việt Nam trên MHVL tỷ lệ 1:20.

- Làm rõ quy luật ảnh hưởng của tỷ lệ khoảng cách giữa các trụ (s/D), trạng thái vật lý đất nền ($I_L$) và sự có mặt của lưới ĐKT đến hệ số tập trung ứng suất, hệ số giảm lún và sức chịu tải của hệ.

- Đề xuất các công thức hiệu chỉnh dự tính sức chịu tải giới hạn, hệ số tập trung ứng suất (n) và hệ số giảm lún (β) phù hợp với đối tượng và phạm vi nghiên cứu.

**Ý nghĩa thực tiễn:**

- Cung cấp cơ sở khoa học và dữ liệu thực chứng cho việc ứng dụng giải pháp trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT tại Việt Nam, đặc biệt trong xây dựng nền đường trên đất yếu.

- Kết quả nghiên cứu có thể phục vụ bổ sung vào tiêu chuẩn thiết kế nền đất yếu hiện hành, đồng thời là tài liệu tham khảo cho công tác giảng dạy, đào tạo trong lĩnh vực Địa kỹ thuật.

**5. Bố cục luận án**

Ngoài phần mở đầu và kết luận, nội dung luận án gồm bốn chương:

- Chương 1: Tổng quan nghiên cứu về trụ vật liệu hạt rời kết hợp lưới địa kỹ thuật trong xử lý nền đất yếu.

- Chương 2: Cơ sở lý thuyết tính toán và mô hình hóa hệ trụ vật liệu hạt rời kết hợp lưới địa kỹ thuật.

- Chương 3: Nghiên cứu thực nghiệm trụ vật liệu hạt rời kết hợp lưới địa kỹ thuật trên mô hình vật lý trong phòng.

- Chương 4: Ứng xử của trụ vật liệu hạt rời kết hợp lưới địa kỹ thuật trong xử lý nền đất yếu dưới khối đắp.

# CHƯƠNG 1
# TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU VỀ TRỤ VẬT LIỆU HẠT RỜI KẾT HỢP LƯỚI ĐỊA KỸ THUẬT TRONG XỬ LÝ NỀN ĐẤT YẾU

## 1.1. Tổng quan về nền đất yếu trong công trình giao thông

### *1.1.1. Đất yếu và phân loại đất yếu*

Nền đất yếu với đặc trưng cường độ kháng cắt không thoát nước thấp ($c_u$ < 25 kPa), mô đun biến dạng nhỏ (E < 10 MPa) và tính nén lún lớn, luôn là thách thức trong xây dựng CTGT tại Việt Nam. Các lớp đất sét mềm yếu bão hòa, bùn sét và than bùn phân bố rộng ở vùng đồng bằng sông Cửu Long, sông Hồng và dải ven biển miền Trung, với bề dày thường từ 10 m đến trên 30 m.

Theo Terzaghi và Peck (1996), đất sét yếu có $S_u$ < 25 kPa và $N_{SPT}$ < 4. Tiêu chuẩn TCCS 41:2022/TCĐBVN quy định đất sét rất yếu có e ≥ 1,5, đất sét pha mềm có e ≥ 1,0; cường độ kháng cắt ≤ 15 kPa và góc ma sát trong $\varphi_u$ < 10° hoặc $S_u$ ≤ 35 kPa. Chỉ số độ sệt $I_L$ là chỉ tiêu quan trọng: khi $I_L \approx 1$, đất chuyển từ trạng thái dẻo chảy sang chảy; khi $I_L > 1$, đất ở trạng thái gần như lỏng.

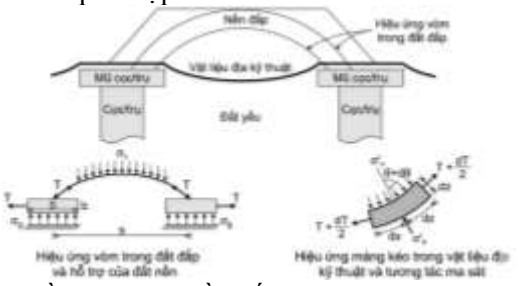
Phân loại đất yếu trong xây dựng CTGT có thể tiếp cận đa chiều: theo thành phần hạt và chỉ tiêu Atterberg (hệ thống USCS – ASTM D2487); theo độ sệt $I_L$ để đánh giá trạng thái; theo nguồn gốc hình thành (trầm tích biển, châu thổ, đất hữu cơ/than bùn) để dự báo xu thế nén lún dài hạn; và tổ hợp các chỉ tiêu cơ học ($S_u$, $N_{SPT}$, E, $C_c$, $k_v$, OCR) để lượng hóa rủi ro, lựa chọn giải pháp xử lý phù hợp.

### *1.1.2. Giải pháp xử lý nền đất yếu khi bề dày lớp đất yếu lớn*

Khi lớp đất yếu có bề dày vượt khoảng (10–15) m, các biện pháp đơn giản như thay đất, gia tải trước thường không còn hiệu quả. Các hướng dẫn thiết kế hiện nay phân nhóm giải pháp theo cơ chế làm việc chính gồm: (1) gia tải trước kết hợp thoát nước thẳng đứng; (2) sử dụng cọc hoặc trụ tạo nền hỗn hợp; (3)

giảm tải và nền đắp đặc biệt; và (4) ổn định đất tại chỗ.

Trong đó, dạng nền đắp trên cọc/trụ kết hợp lớp truyền tải gia cường bằng vật liệu ĐKT ngày càng phổ biến. Hệ được chia thành hai nhánh chính: hệ GRPS (Geosynthetic Reinforced Pile-Supported embankment)- nền đắp trên cọc cứng gia cường lưới ĐKT; và hệ GRCS (Geosynthetic Reinforced Column-Supported embankment)-nền đắp trên trụ VLHR gia cường lưới ĐKT. Hai hệ có đặc điểm khác biệt về khả năng chịu lực và phân bố tải trọng, cần được nghiên cứu chi tiết để tính toán thiết kế phù hợp.




*Hình 1.1 Cơ chế truyền tải trọng nền đắp trên hệ trụ có gia cường vật liệu ĐKT*

### *1.1.3. Xu hướng phát triển và định hướng nghiên cứu*

Trụ VLHR kết hợp vật liệu ĐKT, bao gồm dạng bọc quanh trụ (GESC) và dạng lưới ĐKT trải ngang trên đỉnh nhóm trụ (GRCS), được xem là giải pháp có tiềm năng cân bằng giữa yếu tố kinh tế và kỹ thuật, đặc biệt cho các tuyến đường dài trên nền sét mềm dày. Theo EBGEO (2011), khi thiết kế cần xem xét đồng thời ba cơ chế: hiệu ứng vòm trong nền đắp, hiệu ứng màng của lớp gia cường lưới ĐKT, và khả năng chịu tải của vùng đất yếu giữa các trụ.

## 1.2. Tổng quan các nghiên cứu về trụ vật liệu hạt rời

### *1.2.1. Trụ VLHR và ứng dụng trong xử lý nền đất yếu*

Trong phạm vi luận án, thuật ngữ "trụ VLHR" được sử dụng thống nhất để chỉ trụ đá (stone column) thi công bằng công nghệ rung sâu với cốt liệu đá dăm nghiền. Trụ VLHR có mô đun biến dạng thường trong khoảng (25–40) MPa, một số trường hợp đạt (30–70) MPa khi vật liệu được đầm chặt tốt.

Cơ chế làm việc chính của trụ VLHR bao gồm: (i) thay thế đất yếu và tập trung ứng suất; (ii) gia cường và hạn chế biến dạng ngang; (iii) thoát nước và tăng tốc cố kết. Các dạng phá hoại chính gồm: phình nở, cắt xuyên, phá hoại tổng thể và phá hoại khối. Hughes và Withers (1974) mô tả vùng phình nở tập trung ở độ sâu khoảng (2–4)D tính từ đỉnh trụ. McKelvey và cs (2004) xác nhận phình nở xảy ra trên toàn thân trụ khi $L/D < 6$ và chỉ ở phần trên khi $L/D > 10$.

### *1.2.2. Nghiên cứu trụ VLHR trên thế giới và ở Việt Nam*

Công nghệ trụ VLHR ra đời tại châu Âu, khởi nguồn từ phương pháp rung sâu được phát triển bởi Keller vào thập niên 1930 tại Đức. Từ thập niên 1970, Hughes và Withers (1974) đề xuất công thức tính SCT giới hạn; Barksdale và Bachus (1983) thiết lập hệ số $N_c \approx 5$ và hệ số TTƯS = 2,5–5,0 cho FHWA.

Priebe (1995) đề xuất phương pháp tính hệ số cải thiện nền dựa trên ô đơn vị. Balaam và Booker (1981, 1985) đưa ra nghiệm giải tích cho bài toán tương tác trụ–đất. Giai đoạn từ 2000, nghiên cứu tập trung vào mô hình phần tử hữu hạn 3D và kết hợp trụ VLHR với vật liệu ĐKT.

Trụ VLHR đã được áp dụng tại một số công trình ở Việt Nam như nhà máy hóa lọc dầu Nghi Sơn (Thanh Hóa) và PTSC Vũng Tàu. Tuy nhiên, nghiên cứu trong nước chủ yếu mới dừng ở mức tổng quan lý thuyết hoặc phân tích số đơn giản về trụ VLHR đơn thuần, chưa có nghiên cứu thực nghiệm chuyên sâu về ứng xử của hệ trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT.

***1.2.3. Nghiên cứu trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT dưới nền đắp***

Cơ chế làm việc của hệ GRCS được chi phối bởi ba yếu tố chính: hiệu ứng vòm trong khối đắp và lớp đệm; khả năng chịu lực–biến dạng của trụ VLHR trong đất yếu; và cơ chế màng phát sinh khi lưới ĐKT võng giữa các đỉnh trụ. Các tiêu chuẩn BS 8006-1:2010, EBGEO (2011) đã đưa ra khung tính toán cho nền đắp trên trụ có lớp gia cường lưới ĐKT, chủ yếu tập trung mô hình hóa hiệu ứng vòm và lực kéo trong lưới. Tuy nhiên, các công bố khoa học riêng về trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT chuyên cho nền đường đắp vẫn còn rất ít, đặc biệt tại Việt Nam.

**1.3. Một số vấn đề tồn tại**

Từ tổng quan, các tồn tại chính được nhận diện:

- Về phân loại và mô hình hóa: chưa có khung phân biệt rõ vai trò giữa trụ VLHR bọc vải ĐKT (GESC) và trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT trải trên đỉnh (GRCS).

- Về công thức hiệu ứng vòm và lực kéo lưới: các công thức trong BS 8006-1, EBGEO chủ yếu được xây dựng cho cọc cứng với giả thiết đỉnh trụ là gối tựa cứng, không xét biến dạng nén–phình ngang đáng kể của trụ VLHR.

- Về hệ số TTƯS biến thiên đáng kể trong đất yếu thay vì giữ giá trị hằng như tiêu chuẩn giả định; phạm vi biến thiên khá rộng (từ 1,5–6,0 theo McCabe và cs, 2009).

- Về thực trạng tại Việt Nam: chưa có dữ liệu thực nghiệm hệ thống về hệ trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT; chưa có quy trình tính toán thiết kế phù hợp điều kiện nước ta.

**1.4. Nhận xét và đề xuất các vấn đề nghiên cứu**

Trụ VLHR là giải pháp xử lý nền đất yếu sâu có nhiều ưu điểm: vừa đóng vai trò phần tử chịu lực, vừa là "giếng thoát nước đứng". Việc kết hợp trụ VLHR với lưới ĐKT trải trên đỉnh nhóm trụ tận dụng đồng thời hiệu ứng vòm và hiệu ứng màng kéo, tối ưu hóa phân bố tải, đặc biệt phù hợp với nền đắp diện rộng. Tuy nhiên, phần lớn công thức thiết kế hiện hành (FHWA, BS 8006, EBGEO) được xây dựng cho cọc cứng, ứng xử của hệ trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT theo trạng thái đất nền chưa được kiểm chứng đầy đủ.

Từ các phân tích trên, bốn vấn đề nghiên cứu chính được xác định:

(1) Nghiên cứu thực nghiệm trên MHVL trụ đơn và nhóm trụ (2×2) VLHR

kết hợp lưới ĐKT trong đất sét điển hình đồng bằng Bắc Bộ với ba trạng thái vật lý ($I_L$ = 0,78; 1,0; 1,5) và khoảng cách trụ thay đổi (s/D = 2,5; 3,0; 3,5).

(2) Phân tích định lượng ảnh hưởng của các thông số chính (s/D, J, $E_c$, $I_L$) đến hiệu quả xử lý nền thông qua MHVL và MHS.

(3) Xây dựng và kiểm chứng MHS 3D trên nền tảng Plaxis, hiệu chỉnh với kết quả thực nghiệm, mở rộng khảo sát tham số.

(4) Đánh giá mức độ phù hợp các công thức và tiêu chuẩn hiện hành, đề xuất hiệu chỉnh phục vụ thiết kế.

### 1.5. Cách tiếp cận và phương pháp nghiên cứu

Luận án sử dụng cách tiếp cận tổng hợp theo bốn bước: (1) hệ thống hóa lý thuyết → (2) nghiên cứu thực nghiệm trên MHVL thu nhỏ tỷ lệ 1:20 → (3) phân tích MHS 3D bằng Plaxis 3D → (4) tổng hợp, phân tích hồi quy và đề xuất công thức tính toán. Sự kết hợp giữa MHVL và MHS tạo thành hệ phương pháp luận chính, trong đó MHVL cung cấp dữ liệu thực chứng để hiệu chỉnh MHS, còn MHS cho phép mở rộng khảo sát tham số và khái quát hóa kết quả.

## CHƯƠNG 2
## CƠ SỞ LÝ THUYẾT TÍNH TOÁN VÀ MÔ HÌNH HÓA HỆ TRỤ VẬT LIỆU HẠT RỜI KẾT HỢP LƯỚI ĐỊA KỸ THUẬT

Chương 2 trình bày hệ thống cơ sở lý thuyết cho việc tính toán và mô hình hóa hệ trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT trong xử lý nền đất yếu dưới khối đắp (GRCS), trong đó trụ VLHR đóng vai trò phần tử chịu tải chính, còn lưới ĐKT trải trên đỉnh trụ hoạt động như lớp truyền tải. Ba cơ chế truyền tải chính đồng thời hoạt động gồm: hiệu ứng vòm trong khối đắp, hiệu ứng màng của lưới ĐKT, và sự tập trung ứng suất do chênh lệch độ cứng giữa trụ và đất nền.

### 2.1. Các thông số trụ VLHR và phương pháp xác định

Ba thông số quan trọng nhất chi phối hiệu quả gia cố gồm: mô đun biến dạng trụ $E_c$, hệ số TTƯS n, và độ cứng lưới ĐKT J.

**Mô đun biến dạng $E_c$:** Theo Barksdale và Bachus (1983), $E_c$ = (30–58) MPa cho trụ VLHR; McCabe và cs (2009) mở rộng tới 70 MPa. Với $E_s$ của đất sét mềm khoảng (1,5–5) MPa, tỷ số $E_c/E_s$ thực tế khoảng 6–47. Khác với bê tông, VLHR thể hiện ứng xử phi tuyến rõ rệt, độ cứng tăng lên khi áp lực giam hãm tăng, được mô tả bởi quan hệ lũy thừa:

$$E_c = E_{ref}\left(\frac{\sigma_3'}{p_{ref}}\right)^m \qquad (2\text{-}1)$$

trong đó: $E_{ref}$: mô đun biến dạng tham chiếu, từ (30–50) MPa cho đá dăm đầm chặt; $p_{ref}$: áp lực tham chiếu (thường 100 kPa); $\sigma'_3$: áp lực ngang hữu hiệu; m: hệ số mũ (m ≈ 0,5 cho vật liệu rời theo Janbu, 1963).

**Hệ số TTƯS n:** Được định nghĩa là tỷ số giữa ứng suất trên đỉnh trụ $\sigma_c$ và ứng suất trên đất nền $\sigma_s$: $n = \sigma_c / \sigma_s$ . Hệ số n không phải hằng số mà là biến số phụ thuộc vào thời gian và trạng thái làm việc. Trong giai đoạn gia tải tức thời,

n thường có giá trị thấp (n = 2÷3); trong giai đoạn ổn định sau cố kết, n có thể đạt từ 4 đến 6 hoặc cao hơn. Theo FHWA (1983), mối quan hệ tuyến tính giữa n và tỷ số độ cứng: $n = \alpha \cdot (E_c/E_s)$ với $\alpha = 0{,}2 \div 0{,}4$. Khi có lưới ĐKT, n luôn lớn hơn hệ không lưới do ảnh hưởng của hiệu ứng màng, và là hàm phụ thuộc $n = f(J, \delta, E_c, E_s)$.

**Độ cứng lưới ĐKT J:** Được xác định bằng độ dốc đường cong quan hệ lực kéo–biến dạng: $J = T/\varepsilon$ (kN/m). Hiệu quả gia cường tăng mạnh khi J tăng từ 0 đến 2000 kN/m; khi J > 4000 kN/m, hiệu quả tăng thêm không đáng kể.

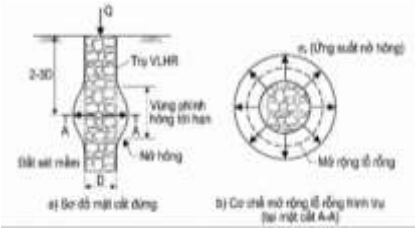
## 2.2. Lý thuyết sức chịu tải giới hạn trụ VLHR

### *2.2.1. Trụ đơn VLHR*

Theo lý thuyết giãn nở hốc hình trụ (Hughes và Withers, 1974), sức chịu tải giới hạn $q_{ult}$ của trụ đơn chủ yếu bị chi phối bởi phá hoại phình thân:

$$q_{ult} = \sigma_{rL} \cdot K_p = \sigma_{rL} \cdot \tan^2(45° + \varphi_c/2) \quad (2\text{-}2)$$

trong đó: $K_p$: hệ số áp lực đất bị động; $\varphi_c$: góc ma sát trong của vật liệu trụ; $\sigma_{rL}$: áp lực giới hạn hông của đất nền. Áp lực hông cực hạn $\sigma_{rL}$ được xác định theo lý thuyết đàn hồi–dẻo (Gibson và Anderson, 1961):




*Hình 2.1 Cơ chế phá hoại phình hông của trụ đơn VLHR trong đất sét mềm*

$$\sigma_{rL} = \sigma_{ro} + c_u \cdot [1 + \ln(E_s / (2 \cdot (1+\nu) \cdot c_u))] \quad (2\text{-}3)$$

Vùng phình nở tập trung trong khoảng (1–2)D, với độ sâu tối đa đến 4D. FHWA (1983) đề xuất công thức đơn giản hóa: $q_{ult} = N_c \cdot c_u$ với $N_c \approx 5$.

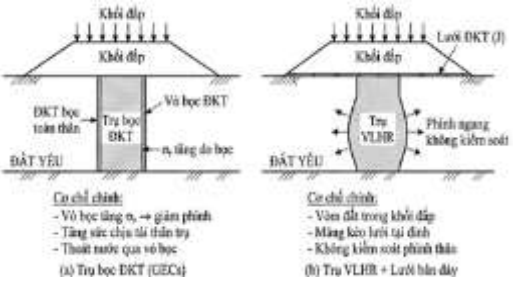
### *2.2.2. Nhóm trụ VLHR*

Đối với nhóm trụ không có lưới ĐKT, phương pháp Priebe (1995) dựa trên ô đơn vị với phương trình cân bằng ứng suất:

$$\sigma = \sigma_c \cdot a_s + \sigma_s \cdot (1 - a_s) \quad (2\text{-}4)$$

trong đó: $a_s$: tỷ diện thay thế.

Khi có lưới ĐKT trên đỉnh trụ, hai cơ chế bổ sung xuất hiện: hiệu ứng màng và hiệu ứng bó hãm. Lưới bị võng phát sinh lực kéo T, giảm áp lực lên đất yếu và truyền tải về phía đầu trụ. Phương trình cân bằng lực thẳng đứng trên phân tố lưới:




*Hình 2.2 Các cơ chế làm việc của lưới ĐKT trên đỉnh trụ*

$$2T \sin\theta = (p_s - p_p).(s - D) \quad (2\text{-}5)$$

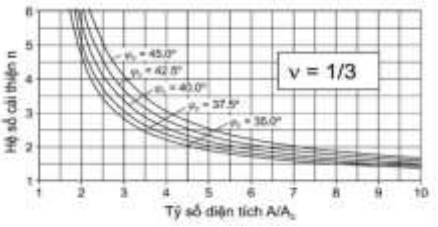
trong đó: T: lực kéo trong lưới; θ: góc xoay tại mép trụ; $p_s$: ứng suất đứng phía dưới lưới; $p_p$: ứng suất trên đỉnh trụ; s: khoảng cách tim trụ; D: đường kính trụ.

## 2.3. Dự báo lún trụ VLHR trong xử lý nền đất yếu

### *2.3.1. Phương pháp hệ số cải thiện nền Priebe (1995)*

Độ lún nền gia cố $S_t$ được tính từ độ lún nền thiên nhiên $S_o$ thông qua hệ số cải thiện cơ bản $n_0$: $S_t = S_o / n_0$ (2-6)

Với hệ số Poisson ν = 1/3, $n_0$ được xác định phụ thuộc vào tỷ diện thay thế $a_s$ và hệ số áp lực đất chủ động $K_a$ của vật liệu trụ. Hạn chế: giả thiết phình nở đều toàn chiều dài trụ không phù hợp thực tế (vùng phình nở tập trung ở 2–4D).




*Hình 2.3 Quan hệ tỷ số diện tích với hệ số cải thiện cơ bản*

### *2.3.2. Phương pháp Aboshi (1979) và Balaam–Booker (1981, 1985)*

Aboshi và cs (1979) đề xuất tỷ số giảm lún dựa trên ô đơn vị và cố kết một chiều: $S/S' = 1/[1 + a_s \cdot (n - 1)]$. FHWA (1983) khuyến nghị n = 3–5.

Balaam và Booker (1981, 1985) phát triển lời giải giải tích dựa trên lý thuyết mở rộng lỗ rỗng kết hợp khái niệm ô đơn vị với phân tích phần tử hữu hạn đối xứng trục giải tích đàn hồi–dẻo: $S_t = \beta \cdot S_0$ với $\beta = f(\nu, A_c/A)$. Phiên bản 1985 bổ sung ứng xử chảy dẻo theo Mohr-Coulomb với quy luật chảy không liên kết. Law (2015) so sánh với kết quả Plaxis 3D cho thấy phương pháp Balaam–Booker (1981) đánh giá quá cao hệ số cải thiện do giả thiết đàn hồi tuyến tính.

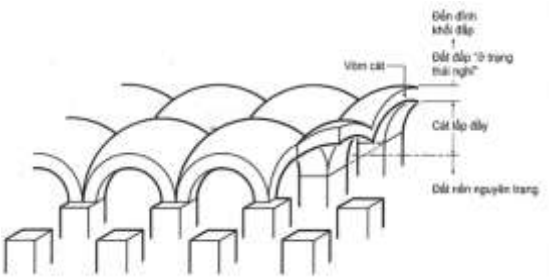
### *2.3.3. Ảnh hưởng của lưới ĐKT đến độ lún*

Khi có lưới ĐKT, độ lún tổng cộng và đặc biệt là độ lún lệch giữa trụ và đất giảm đáng kể. Lưới ĐKT giúp đồng đều hóa độ lún, hệ số n tăng lên đồng nghĩa trụ gánh nhiều tải hơn, giảm ứng suất nén lún lên đất yếu.

## 2.4. Lý thuyết về ứng xử hệ nền đắp–trụ VLHR–lưới ĐKT

### *2.4.1. Hiệu ứng vòm trong nền đắp*

Vòm hình thành khi đất yếu giữa các trụ cố kết và lún xuống trong khi đỉnh trụ duy trì vị trí ban đầu. Điều kiện hình thành: chênh lệch độ cứng đủ lớn giữa trụ và đất nền; chiều cao khối đắp *H* đủ lớn; vật liệu đắp có đặc tính ma sát nội tại.




*Hình 2.4 Cơ chế hình thành hiệu ứng vòm trong nền đắp*

Các mô hình lý thuyết chính gồm: (1) Hewlett và Randolph (1988), vòm bán cầu 3D, cân bằng giới hạn Mohr-Coulomb; (2) Low và cs (1994), vòm hình trụ 2D (Terzaghi); (3) EBGEO (2011), vòm đa lớp 3D theo Zaeske (2001); (4) BS 8006-1:2010, phương pháp Marston bán thực nghiệm khi $H < 1{,}4(s - a)$ và Hewlett–Randolph khi $H \geq 1{,}4(s - a)$.

Hai đại lượng đánh giá mức truyền tải: hệ số truyền tải $E_f = P_c/(\gamma H \cdot s^2)$ và hệ số giảm tải $\rho = \sigma_s/(\gamma H + q)$, liên hệ qua: $E_f = 1 - \rho \cdot (1 - a_s)$.

### *2.4.2. Hiệu ứng màng của lưới ĐKT*

Hiệu ứng màng được kích hoạt khi xuất hiện độ lún lệch ΔS giữa đất nền và đỉnh trụ. Lưới ĐKT biến dạng tạo dạng võng, phát sinh lực căng T và thành phần lực thẳng đứng hướng lên.

Các mô hình phân tích gồm: (1) Mô hình dây võng (BS 8006-1:2010), lưới chịu tải phân bố đều, biến dạng parabol; (2) Mô hình màng căng (Jones và cs, 1990), quan hệ phi tuyến $T = J \cdot \varepsilon$, xét tương tác với đất nền qua mô đun phản lực nền ks; (3) Mô hình kết hợp vòm–màng (Van Eekelen và cs, 2013), phân tích đồng thời hai hiệu ứng trên mô hình vòm đồng tâm.

$T_{rp} = W_T \cdot (s - a) / (2 \cdot a) \cdot (1/(1 + 1/(6\varepsilon)))^{0,5}$ (2-7)

Theo EBGEO (2011): $E_d = \sigma_{z,k} \cdot A_L / (2 \cdot (J \cdot \varepsilon_{max})^{0,5})$ (2-8)

### *2.4.3. Cơ chế tương tác đất–trụ–lưới*

Tổng tải trọng từ khối đắp được phân chia: phần truyền lên đỉnh trụ qua hiệu ứng vòm; phần truyền qua lưới ĐKT nhờ hiệu ứng màng; và phần tác dụng trực tiếp lên đất nền yếu. Phân tích ứng xử theo giai đoạn: (i) giai đoạn thi công, n chỉ đạt 2÷3; (ii) giai đoạn cố kết, n tăng lên 4÷6; (iii) giai đoạn ổn định, n dao động 4÷8, thấp hơn cọc cứng BTCT (n = 10÷20).

### *2.4.4. Các phương pháp thiết kế theo tiêu chuẩn*

EBGEO (2011): áp dụng mô hình vòm đa lớp Zaeske, phân biệt vòm hoàn chỉnh ($H \geq h_{cr}$) và chưa hoàn chỉnh, xét phản lực nền trong tính toán lực kéo lưới. BS 8006-1:2010: tính lực kéo dựa trên giả định lưới chịu toàn bộ tải trọng từ vùng đất giữa các trụ (không xét phản lực nền). Phiên bản BS 8006-1:2016 bổ sung phương pháp Van Eekelen (2013).

## 2.5. Lý thuyết mô hình vật lý và tỷ lệ mô hình

### *2.5.1. Các loại mô hình vật lý*

Mô hình vật lý (MHVL) là công cụ không thể thiếu trong địa kỹ thuật, gồm: mô hình trọng lực đơn (1g), mô hình ly tâm ($N$×g), và mô hình tỷ lệ thực (1:1).

**Bảng 2.1 So sánh mô hình 1g với mô hình ly tâm**

| Tiêu chí | Mô hình trọng lực đơn | Mô hình ly tâm |
|---|---|---|
| Gia tốc trọng trường | 1 g (tự nhiên) | N (20–200)g |
| Tỷ lệ kích thước | 1:10 – 1:50 | 1:50 – 1:200 |
| Mô phỏng ứng suất địa tầng | Xấp xỉ, kém chính xác ở độ sâu lớn | Gần đúng trường ứng suất nguyên mẫu |
| Chi phí thiết bị | Thấp - trung bình | Rất cao |
| Thời gian chuẩn bị | Ngắn (tuần) | Dài (tháng) |
| Khả năng quan sát | Tốt (trực tiếp, qua kính, camera) | Hạn chế, phụ thuộc hệ thống quay và ghi hình |
| Số kịch bản cần thực hiện | Lớn (10–20 kịch bản) | Ít (thường 3–5 kịch bản) |
| Bài toán điển hình | Móng nông, nhóm trụ nhỏ, nền đắp | Đập, hầm sâu, nền dày, bài toán động đất |

### *2.5.2. Tương tự mô hình và tỷ lệ*

Tương tự mô hình được xây dựng dựa trên phân tích thứ nguyên (Buckingham, 1914), cần thỏa mãn đồng thời ba loại: tương tự hình học ($\lambda_L = L_m/L_p$), tương tự động học, và tương tự động lực học. Với mô hình 1g, hệ số tỷ lệ ứng suất $\lambda_\sigma \approx 1$ ở vùng quan tâm, chấp nhận sai số trong vùng ứng suất thấp. Điều kiện biên: $D/d_{50} > 50$ (Muir Wood, 2004) hoặc $D/d_{50} \geq 20$ (Murugesan và Rajagopal, 2010).

## 2.6. Nhận xét chương 2

Chương 2 đã trình bày hệ thống cơ sở lý thuyết gồm: (i) ba thông số cốt lõi ($E_c$, n, J) và phương pháp xác định; (ii) lý thuyết sức chịu tải giới hạn trụ đơn và nhóm trụ; (iii) các phương pháp dự báo lún (Priebe, Aboshi, Balaam–Booker); (iv) lý thuyết hiệu ứng vòm (Hewlett–Randolph, EBGEO, BS 8006) và hiệu ứng màng (mô hình dây võng, mô hình màng căng, mô hình kết hợp Van Eekelen); (v) phương pháp thiết kế theo tiêu chuẩn quốc tế EBGEO (2011) và BS 8006-1:2010; (vi) lý thuyết mô hình vật lý và các định luật tương tự.

Phần lớn các phương pháp tính toán hiện hành được xây dựng cho cọc cứng BTCT, chưa phản ánh đầy đủ ứng xử của trụ VLHR có độ cứng thấp hơn, đặc biệt khi kết hợp lưới ĐKT trong xử lý nền đất yếu. Khoảng trống này cần được giải quyết thông qua thí nghiệm trên MHVL kết hợp MHS để kiểm chứng, hiệu chỉnh lý thuyết và đề xuất phương pháp tính toán phù hợp với điều kiện Việt Nam, đây là nội dung các Chương 3 và 4.

# CHƯƠNG 3
# NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM TRỤ VẬT LIỆU HẠT RỜI KẾT HỢP LƯỚI ĐỊA KỸ THUẬT TRÊN MÔ HÌNH VẬT LÝ TRONG PHÒNG

Chương 3 trình bày quá trình xây dựng và thực hiện thí nghiệm MHVL thu nhỏ để khảo sát ứng xử của hệ trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT trong nền đất yếu dưới khối đắp. Kết quả phân tích cung cấp bộ dữ liệu chuẩn để hiệu chỉnh và kiểm chứng MHS 3D trình bày trong Chương 4.

## 3.1. Xây dựng mô hình vật lý trong phòng thí nghiệm

### *3.1.1. Lựa chọn mô hình nghiên cứu*

Mô hình trọng lực đơn (1g) được lựa chọn vì phù hợp mục tiêu nghiên cứu (khảo sát cơ chế tương tác trụ–lưới–đất, phụ thuộc chủ yếu vào tỷ số các đại lượng cơ học và hình học), phù hợp điều kiện thiết bị phòng thí nghiệm, có cơ sở tham chiếu rộng rãi từ các nghiên cứu quốc tế (Hu, 1995; McKelvey và cs, 2004; Black và cs, 2011), và khả năng kiểm chứng bằng mô hình số.

### *3.1.2. Lựa chọn tỷ lệ mô hình vật lý 1:20*

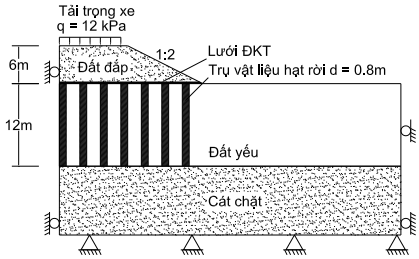
Ba phương án tỷ lệ 1:15, 1:20 và 1:25 được đề xuất để so sánh. Với đường kính hạt cốt liệu $d_{50} \approx 2$ mm, tỷ số $D/d_{50}$ lần lượt là 26,5; 20,0 và 16,0. Tỷ lệ 1:20 được lựa chọn vì: $D/d_{50} = 20,0$ đúng bằng giá trị tối thiểu theo khuyến nghị của Murugesan và Rajagopal (2010); kích thước thùng 1000×500×1000 mm đảm bảo điều kiện biên (khoảng cách trụ biên đến thành 6,25D > 5D, chiều dày đất

dưới mũi trụ 6,7D > 3D); phù hợp bố trí nhóm 4 trụ (2×2) với s/D = 2,5 đến 3,5.

Nguyên lý tương tự từng phần được áp dụng: (i) thông số hình học thu nhỏ theo n = 20; (ii) tải trọng giữ nguyên mức ứng suất nguyên mẫu ($q = \gamma_{đắp} \times H_{đắp} + q_{xe} = 18 \times 6 + 12 = 120$ kPa); (iii) tính chất đất nền giữ nguyên ($c_u$, φ, $E_s$); (iv) lưới ĐKT giữ nguyên làm biến đổi chứng (T* = 200 kN/m).

**Bảng 3.1 So sánh các phương án tỷ lệ mô hình vật lý thu nhỏ**

| Tiêu chí | Tỷ lệ 1:15 | Tỷ lệ 1:20 | Tỷ lệ 1:25 |
|---|---|---|---|
| Đường kính trụ D (mm) | 53 | 40 | 32 |
| Chiều dài trụ L (mm) | 800 | 600 | 480 |
| Tỷ số $D/d_{50}$ ($d_{50}$ = 2 mm) | 26,5 | 20,0 | 16,0 |
| Đánh giá $D/d_{50} \geq 20$ | Đạt tốt | Đạt | Không đạt |
| Kích thước thùng tối thiểu (mm) | 1330×665×1200 | 1000×500×1000 | 800×400×800 |
| Thể tích thùng ($m^3$) | 1,06 | 0,50 | 0,26 |
| Khối lượng đất yếu ước tính (kg) | ~1600 | ~750 | ~390 |
| Sai số mô hình dự kiến (%) | 5-8 | 8-12 | 15-20 |
| Khả năng bố trí trong PTN | Khó khăn | Phù hợp | Thuận lợi |
| **Đánh giá tổng hợp** | Tốt, cồng kềnh | **Cân bằng tối ưu** | Giảm chính xác |




*Hình 3.1 Mô hình thực hệ trụ vật liệu hạt rời kết hợp lưới Địa kỹ thuật*

Tính hợp lý của tỷ lệ 1:20 được kiểm chứng bằng mô phỏng số trên Plaxis 3D: so sánh mô hình nguyên mẫu 1:1 và mô hình thu nhỏ 1:20 cho thấy lý thuyết đồng dạng được thỏa mãn tốt về phân bố ứng suất, độ lún và hiệu ứng nhóm trụ.

**Bảng 3.2 Quy đổi thông số từ nguyên mẫu sang mô hình tỷ lệ 1:20**

| Thông số | Ký hiệu | Nguyên mẫu | MHVL1:20) | Nguyên tắc quy đổi | Đơn vị |
|---|---|---|---|---|---|
| Chiều dày nền đất yếu | $H_{đy}$ | 12.000 | 600 | Hình học (÷n) | mm |
| Chiều cao lớp đắp | $H_{đắp}$ | 6.000 | 300 | Hình học (÷n) | mm |
| Đường kính trụ | D | 800 | 40 | Hình học (÷n) | mm |
| Chiều dài trụ | L | 12.000 | 600 | Hình học (÷n) | mm |
| Tính chất đất nền | $c_u$, φ, $E_s$ | Giữ nguyên | Giữ nguyên | Bảo toàn tiêu chuẩn phá hoại | - |
| Độ cứng lưới ĐKT | J | 2.000 | 2.000 | Biến đổi chứng (giữ nguyên) | kN/m |
| Cường độ kéo lưới | T | 200 | 200 | Biến đổi chứng (giữ nguyên) | kN/m |
| Tải trọng phân bố | q* | - | 120 | Bảo toàn mức ứng suất | kPa |

### *3.1.3. Lắp đặt mô hình và hệ thống thực nghiệm*

**Vật liệu thí nghiệm:**

– Đất yếu: sét pha lấy tại độ sâu 3 m tại Thường Tín, Hà Nội, trạng thái dẻo chảy ($I_L$ = 0,78), đất yếu điển hình Hệ tầng Thái Bình vùng đồng bằng Bắc Bộ. Với trụ đơn, đất được chế bị thêm tại $I_L$ = 1,0 và $I_L$ = 1,5.

**Bảng 3.3 Một số chỉ tiêu vật lý cơ bản của đất yếu sử dụng nghiên cứu**

| Đặc trưng | Ký hiệu | Đơn vị | Giá trị |
|---|---|---|---|
| Độ ẩm tự nhiên | W | % | 46,8 |
| Giới hạn chảy | $W_L$ | % | 50,1 |
| Giới hạn dẻo | $W_P$ | % | 35,4 |
| Chỉ số dẻo | $I_P$ | % | 14,7 |
| Độ sệt | $I_L$ | - | 0,78 |
| Trọng lượng thể tích | $\gamma$ | kN/m³ | 16,6 |
| Hệ số rỗng ban đầu | $e_o$ | - | 1,313 |
| Thành phần hạt: | | | |
| đường kính hạt <0,005 mm | - | % | 26,1 |
| đường kính hạt (0,005 – 0,05) mm | - | % | 49,9 |
| đường kính hạt > 0,05 mm | - | % | 24 |

– Cốt liệu trụ VLHR: đá dăm nghiền, cấp phối 0,5–4,75 mm thu nhỏ từ cấp phối 20–75 mm, $d_{50}$ = 1,83 mm, góc ma sát $\varphi_c$ = 38°±2°, $\rho_s$ = 2,65 g/cm³, độ chặt tương đối $I_D$ = 0,96.

**Bảng 3.4 Tính chất vật lý của cốt liệu dùng làm trụ vật liệu hạt rời**

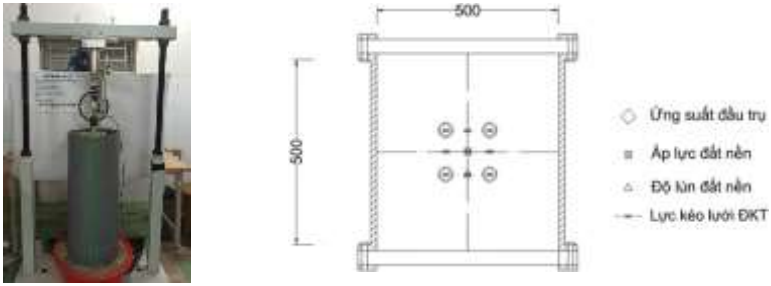
| TT | Chỉ tiêu | Ký hiệu | Đơn vị | Giá trị | Tiêu chuẩn |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Khối lượng riêng | $\rho_s$ | g/cm³ | 2,65 | TCVN 7572-4 |
| 2 | Khối lượng thể tích xốp | $\rho_{d,min}$ | g/cm³ | 1,42 | TCVN 7572-6 |
| 3 | Khối lượng thể tích chặt | $\rho_{d,max}$ | g/cm³ | 1,68 | TCVN 7572-6 |
| 4 | Góc ma sát trong | φ | độ | 38± 2 | Cắt hộp lớn |
| 5 | Độ mài mòn Los Angeles | LA | % | 22 | TCVN 7572-12 |

– Lưới ĐKT: cường độ chịu kéo danh định 200 kN/m (phương dọc: 209,4 kN/m; phương ngang: 105,7 kN/m), mô đun giãn dài tại ε = 2%: J = 2070 kN/m.

**Bảng 3.5 Thông số kỹ thuật lưới địa kỹ thuật**

| TT | Thông số | Thiết bị | Đơn vị | Giá trị |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Cường độ chịu kéo khi đứt theo phương dọc | X500-100 | kN/m | 209,4 |
| 2 | Độ giãn dài khi đứt theo phương dọc | X500-100 | % | 12 |
| 3 | Cường độ chịu kéo tại độ giãn dài 2% theo phương dọc | X500-100 | % | 41,4 |
| 4 | Cường độ chịu kéo tại độ giãn dài 5% theo phương dọc | X500-100 | kN/m | 78,7 |
| 5 | Cường độ chịu kéo khi đứt theo phương ngang | X500-100 | kN/m | 105,7 |
| 6 | Mô đun giãn dài tại độ giãn dài 2% | - | kN/m | 2070 |

**Hệ thống gia tải và đo lường:** Khung thép chịu lực 50 kN; vòng đo lực 0,01 mm/vạch; cảm biến LVDT đo độ lún; cảm biến biến dạng (strain gauge) đo biến dạng lưới và ứng suất đỉnh trụ; cảm biến tải trọng (load cell) đo áp lực đất nền; bộ thu thập dữ liệu (Data Logger) ghi nhận tự động.




*Hình 3.2 Khung gia tải và sơ đồ bố trí hệ thống các thiết bị trong MHVL*

### *3.1.4. Kiểm soát chất lượng mô hình*

Kiểm soát chất lượng đảm bảo ba nguyên tắc: tính nhất quán, tính lặp lại và tính truy xuất. Đất yếu kiểm soát qua tương quan độ ẩm–sức kháng cắt bằng thiết bị xuyên côn rơi Thụy Điển. Cốt liệu trụ kiểm soát $I_D \geq 0,95$. Sai số thí nghiệm lặp đạt < 5%, thấp hơn tiêu chí 10% của Garnier và cs (2007).

**Bảng 3.6 Tổng hợp các chỉ tiêu cơ bản của đất nền trong MHVL**

| TT | Chỉ tiêu | Ký hiệu | Đơn vị | Độ sệt | | | Dung sai |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 0,78 | 1,0 | 1,5 | |
| 1 | Độ ẩm | W | % | 46,7 | 50,1 | 57,8 | ±2% |
| 2 | Cường độ lực dính không thoát nước | $c_u$ | kPa | 20 | 10 | 5 | ±10% |
| 3 | Mô đun biến dạng | $E_s$ | kPa | 1450 | 1050 | 850 | ±15% |
| 4 | Trạng thái vật lý | - | - | Dẻo chảy | Chảy | Chảy | - |

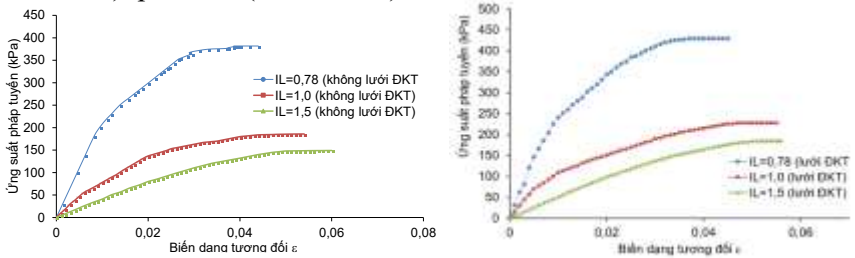
## 3.2. Nghiên cứu thực nghiệm trên MHVL

### *3.2.1. Ma trận thí nghiệm và quy trình gia tải*

Tổng cộng 9 kịch bản, mỗi kịch bản lặp 2 lần (18 lần thí nghiệm): 6 thí nghiệm trụ đơn (3 trạng thái $I_L$ × 2 kiểu có/không lưới ĐKT) và 3 thí nghiệm nhóm trụ 2×2 (3 tỷ lệ s/D = 2,5; 3,0; 3,5). Phương pháp nén CRP (Constant Rate of Penetration) với tốc độ 0,061 mm/phút, mỗi cấp tải duy trì 2,5 phút, tải tăng đến tổng độ lún đạt 40 mm (100% đường kính trụ).

### *3.2.2. Kết quả thí nghiệm trụ đơn VLHR*

Đường cong σ–ε thể hiện ba giai đoạn đặc trưng: đàn hồi (ε < 1–2%); chảy dẻo (ε = 2–4%); phá hoại (ε > 3,5–4%).




*Hình 3.3 Quan hệ ứng suất-biến dạng của trụ đơn VLHR trong đất nền*

Kết quả chính:
– Sức chịu tải giới hạn $q_{ult}$ giảm mạnh khi $I_L$ tăng: 378 kPa ($I_L$ = 0,78) → 187 kPa ($I_L$ = 1,0) → 148 kPa ($I_L$ = 1,5), tương ứng giảm 51,3% và 61,0%.
– Lưới ĐKT cải thiện sức chịu tải: tăng 12,7% ($I_L$ = 0,78), 21,4% ($I_L$ = 1,0), 27,0% ($I_L$ = 1,5), mức cải thiện cao hơn ở đất nền yếu hơn.
– Mô đun biến dạng ban đầu $E_i$ cải thiện mạnh hơn $\sigma_{max}$: tăng 45,9% tại $I_L$ = 0,78, cho thấy lưới ĐKT hiệu quả rõ rệt trong giai đoạn đàn hồi ($\varepsilon < 2\%$).
– Hệ số sức chịu tải $N_c = q_{ult}/c_u$ dao động 18,7–22,7 tại $I_L$ = 0,78 và 1,0 (trong phạm vi $N_c$ = 18–25 theo FHWA); tại $I_L$ = 1,5 đạt 29,6–37,6, vượt phạm vi khuyến nghị.

**Bảng 3.7 Tổng hợp kết quả thí nghiệm gia tải trụ đơn VLHR**

| Độ sệt $I_L$ | Lưới ĐKT | $\sigma_{max}$ (kPa) | $\varepsilon_{max}$ (%) | $E_i$ (kPa) | Tăng $\sigma_{max}$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,78 | Không | 381,76 | 3,87% | 19962 | - |
| | Có | 429,89 | 4,50% | 29134 | 12,6 |
| 1,0 | Không | 185,90 | 5,30% | 9400 | - |
| | Có | 227,80 | 5,50% | 14000 | 22,5 |
| 1,5 | Không | 149,04 | 5,90% | 4240 | |
| | Có | 186,00 | 5,60% | 5300 | 24,8 |

– Cơ chế phá hoại chủ đạo là phình nở, tại độ sâu 2,5D–4D từ đỉnh trụ, phù hợp với Hughes và Withers (1974) và Law (2015).



*Hình 3.4 Trụ đơn VLHR trong mô hình bị phá hoại sau khi thí nghiệm nén*

### *3.2.3. Kết quả thí nghiệm nhóm trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT*

Thí nghiệm nhóm 2×2 trụ D = 40 mm, L = 600 mm kết hợp lưới ĐKT 200 kN/m, trong nền đất sét pha $I_L$ = 0,78 với 3 tỷ lệ s/D = 2,5; 3,0; 3,5.
**Độ lún:** Giảm s/D từ 3,5 xuống 2,5 (tăng $a_s$ từ 6,41% lên 12,57%): độ lún giảm

52,6% tại 120 kPa (từ 17,32 mm xuống 8,21 mm). Tốc độ gia tăng độ lún dS/dp giảm từ 0,155 mm/kPa (s/D = 3,5) xuống 0,070 mm/kPa (s/D = 2,5).

**Bảng 3.8 Kết quả khảo sát độ lún của đất nền theo từng cấp áp lực trong MHVL nhóm trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT**

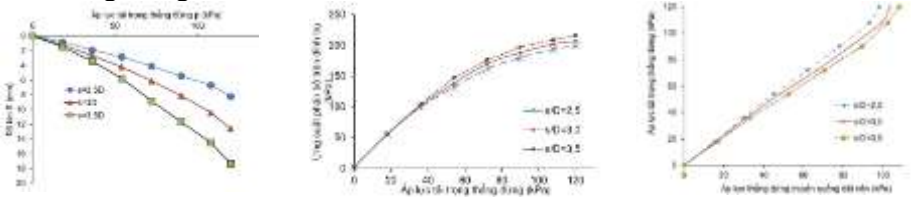
| s/D | Áp lực thẳng đứng (kPa) | 18 | 36 | 54 | 72 | 90 | 108 | 120 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2,5 | Độ lún đất nền (mm) | 0,845 | 1,92 | 2,86 | 4,136 | 5,45 | 6,68 | 8,21 |
| 3,0 | | 1,249 | 2,65 | 4,23 | 6,12 | 8,11 | 10,41 | 12,56 |
| 3,5 | | 1,49 | 3,42 | 5,8 | 8,82 | 11,65 | 14,48 | 17,32 |

**Bảng 3.9 Tổng hợp phân tích độ lún theo tỷ lệ s/D của nhóm trụ VLHR**

| s/D | $a_s$ (%) | S (mm) tại p=120 kPa | Tỷ lệ giảm với s/D=3,5 | Tốc độ lún theo tải trọng (mm/kPa) | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 2,5 | 12,57 | 8,21 | 52,6% | 0,070 | 0,988 |
| 3,0 | 8,73 | 12,56 | 27,5% | 0,109 | 0,986 |
| 3,5 | 6,41 | 17,32 | - | 0,155 | 0,992 |

**Ứng suất đỉnh trụ:** Khi *s/D* tăng từ 2,5 lên 3,5, $\sigma_c$ tại $p$ = 120 kPa tăng từ 199,02 kPa lên 216,05 kPa (tăng 8,6%) do vùng ảnh hưởng giữa các trụ ít chồng lấn.

**Áp lực đất nền:** Tại $p$ = 120 kPa, $\sigma_s$ khi *s/D* = 3,5 (108,07 kPa) cao hơn 10% so với *s/D* = 2,5 (98,06 kPa), phản ánh hiệu quả phân bố tải của hiệu ứng vòm và hiệu ứng màng.



*Hình 3.5 Độ lún, ứng suất phân bố trên đỉnh trụ VLHR và áp lực đất nền dưới các cấp áp lực nén*

**Biến dạng lưới ĐKT:** Lực căng tăng tuyến tính theo tải trọng và tỷ lệ thuận với khoảng cách trụ. Tại 120 kPa: 3,013 kN/m (*s/D* = 2,5) tăng lên 3,670 kN/m (*s/D* = 3,5), tăng 21,8%.

**Bảng 3.10 Biến dạng của lưới địa kỹ thuật theo từng cấp tải thí nghiệm**

| Áp lực (kPa) | 18 | 36 | 54 | 72 | 90 | 108 | 120 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| s/D= 2,5 | 0,45 | 0,89 | 1,35 | 1,78 | 2,25 | 2,72 | 3,01 |
| s/D= 3,0 | 0,52 | 1,02 | 1,56 | 2,06 | 2,57 | 3,08 | 3,44 |
| s/D= 3,5 | 0,57 | 1,12 | 1,67 | 2,18 | 2,748 | 3,31 | 3,67 |

### 3.3. Nhận xét chương 3

Chương 3 đã xây dựng và vận hành thành công MHVL tỷ lệ 1:20 với tổng cộng 18 thí nghiệm (9 kịch bản × 2 lần lặp), sai số lặp < 5%. Các kết quả chính:

– Trụ đơn VLHR: sức chịu tải giới hạn $q_{ult}$ dao động 148–426 kPa tùy trạng thái đất nền và sự có mặt của lưới ĐKT; lưới cải thiện sức chịu tải 12,7–27,0%,

hiệu quả cao hơn ở đất yếu hơn; cơ chế phá hoại phình nở tại 2,5*D*–4*D*.

– Nhóm trụ kết hợp lưới ĐKT: giảm *s*/*D* từ 3,5 xuống 2,5 giảm lún 52,6%; tốc độ lún giảm 2,2 lần; biến dạng lưới tăng 21,8% khi tăng khoảng cách trụ.

– Kết quả cung cấp bộ dữ liệu tin cậy để hiệu chỉnh tham số mô hình số Plaxis 3D và đề xuất công thức tính toán trong Chương 4.

# CHƯƠNG 4
# ỨNG XỬ CỦA TRỤ VẬT LIỆU HẠT RỜI KẾT HỢP LƯỚI ĐỊA KỸ THUẬT TRONG XỬ LÝ NỀN ĐẤT YẾU DƯỚI KHỐI ĐẮP

Chương 4 sử dụng cơ sở lý thuyết (Chương 2) và kết quả thực nghiệm MHVL (Chương 3) để phân tích ứng xử tổng thể của hệ nền đắp–trụ VLHR–lưới ĐKT trên mô hình số 3D bằng Plaxis 3D, từ đó đề xuất các công thức dự tính sức chịu tải giới hạn và hệ số tập trung ứng suất.

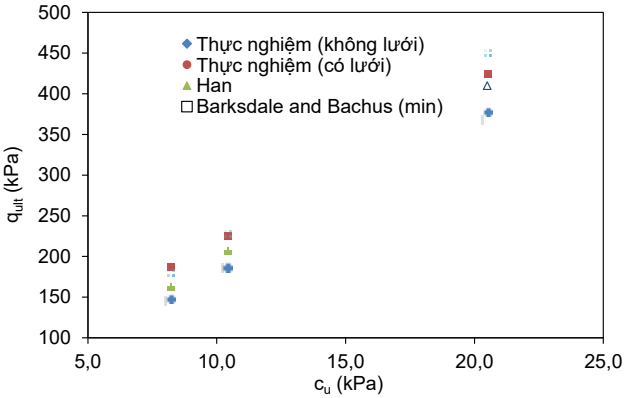
## 4.1. Ứng xử của trụ đơn VLHR kết hợp lưới ĐKT từ kết quả thực nghiệm

### *4.1.1. Sức chịu tải giới hạn ($q_{ult}$)*

Sức chịu tải giới hạn giảm mạnh khi $I_L$ tăng: từ 378 kPa ($I_L$ = 0,78) xuống 148 kPa ($I_L$ = 1,5). Lưới ĐKT cải thiện sức chịu tải 12,7% ($I_L$ = 0,78), 21,4% ($I_L$ = 1,0) và 27,0% ($I_L$ = 1,5). Hệ số $N_c = q_{ult}/c_u$ dao động 18,7–22,7 tại $I_L \le 1,0$, nằm trong phạm vi $N_c$ = 18–25 theo FHWA (1983); tại $I_L$ = 1,5 đạt 29,6–37,6 do cơ chế phá hoại chuyển dạng.

**Bảng 4.1 Kết quả tính toán sức chịu tải giới hạn của trụ đơn VLHR**

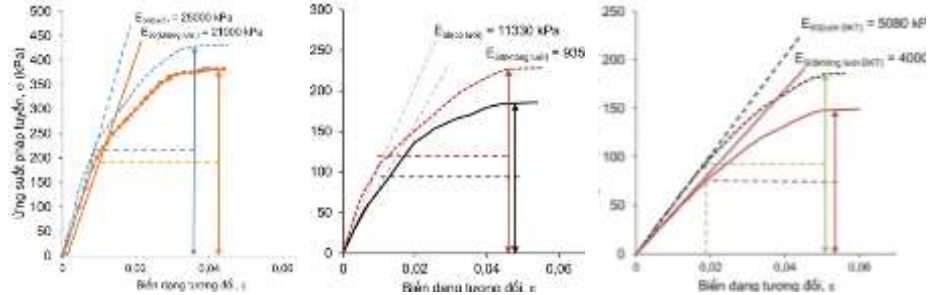
| $I_L$ | $c_u$ (kPa) | $E_s$ (kPa) | $q_{ult}$ (kPa) | | Δq (%) | $N_c=q_{ult}/c_u$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Không lưới ĐKT | Có lưới ĐKT | | |
| 0,78 | 20 | 1.450 | 378 | 426 | 12,70 | 18,9–21,3 |
| 1,0 | 10 | 1.050 | 187 | 227 | 21,39 | 18,7–22,7 |
| 1,5 | 5 | 850 | 148 | 188 | 27,03 | 29,6–37,6 |



*Hình 4.1. Tương quan giữa sức chịu tải giới hạn của trụ VLHR ($q_{ult}$) và sức kháng cắt không thoát nước của đất $c_u$*

### *4.1.2. Mô đun biến dạng cát tuyến $E_{50}$*

Mô đun $E_{50}$ xác định tại 50% cường độ cực hạn, phản ánh độ cứng tương đương trong điều kiện phòng thí nghiệm. Giá trị $E_{50}$ = (4000–25000) kPa từ mô hình nghiên cứu thấp hơn đáng kể kết quả xác định được từ thí nghiệm hiện trường tại dự án Long Sơn ((25000–70000) kPa) do điều kiện đất nền khác nhau, cụ thể: MHVL sử dụng đất sét yếu ($c_u$ = (5–20) kPa) trong khi Long Sơn là cát pha sét cứng hơn (SPT N = 10–11). Tuy nhiên, kết quả nghiên cứu trên MHVL và thí nghiệm hiện trường đều cho thấy E tăng khi đất nền xung quanh cứng hơn. Theo Dang và cs. (2025), E tăng từ (25–40) MPa (giai đoạn 1) lên 70 MPa (giai đoạn 2) sau khi cải thiện đất nền. Xu hướngKhi có lưới ĐKT, $E_{50}$ tăng từ 19% đến 27% tùy trạng thái đất nền.

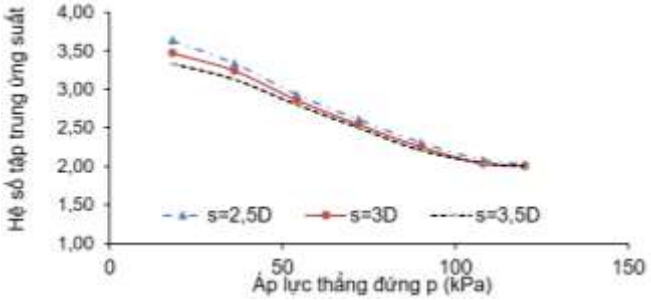



$I_L$=0,78 $I_L$=1,0 $I_L$=1,5

*Hình 4.2. Mô đun biến dạng $E_{50}$ của trụ VLHR tại 50% tải trọng giới hạn trong các trường hợp thí nghiệm $I_L$=0,78; $I_L$=1,0 và $I_L$=1,5*

## 4.2. Ứng xử của nhóm trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT

Hệ số TTƯS n = $\sigma_c/\sigma_s$ trong MHVL nhóm trụ dao động từ 1,83 đến 4,56, giảm dần khi tải trọng tăng. Tại p = 18 kPa, n đạt 3,64 (s/D = 2,5); tại p = 120 kPa, n giảm xuống 1,83–2,03. Xu hướng giảm n phản ánh cơ chế phân phối tải trọng: khi tải tăng, đất nền dần tham gia chịu lực, sự phân phối tải trọng cân bằng hơn giữa trụ và đất. Hệ số giảm lún $\beta = S_{\text{gia cố}} / S_{\text{không gia cố}}$ giảm khi tăng mật độ trụ, phù hợp với phương pháp Priebe (1995).




*Hình 4.3. Hệ số tập trung ứng suất trên mô hình vật lý*

## 4.3. Xây dựng và hiệu chỉnh mô hình số

### *4.3.1. Xây dựng mô hình số*

**Yếu tố hình học và điều kiện biên**

Mô hình số xây dựng trên khái niệm ô đơn vị 1/4 (Balaam và Booker, 1981), khai thác tính đối xứng kép. MHVL tỷ lệ 1:20 được tái hiện ở giai đoạn hiệu chỉnh: $D$ = 40 mm, $s$ = 100/120/140 mm. Điều kiện biên: đáy cố định hoàn toàn; biên bên hạn chế chuyển vị ngang; bề mặt tự do chịu tải phân bố đều 0–120 kPa.

**Chia lưới phần tử và phân tích độ nhạy**

Phần tử khối 15 nút, cấu hình Fine với tinh chỉnh cục bộ hệ số 0,5 tại vùng trụ. Sai lệch giữa Fine và Very Fine < 1,5% trong khi thời gian tính giảm 60%.

**Bảng 4.2 Kết quả phân tích độ nhạy lưới phần tử hữu hạn (s/D = 3,0; p = 120 kPa)**

| Cấu hình lưới | Số phần tử | Độ lún đỉnh trụ mm | Sai lệch so với cấu hình rất mịn (%) | Thời gian (phút) |
|---|---|---|---|---|
| Thô | 4 216 | 8,85 | +7,79 | 4 |
| Mịn | 9 638 | 8,32 | +1,34 | 11 |
| Rất mịn | 18 412 | 8,21 | Chuẩn so sánh | 26 |

**Mô hình vật liệu và tham số đầu vào**

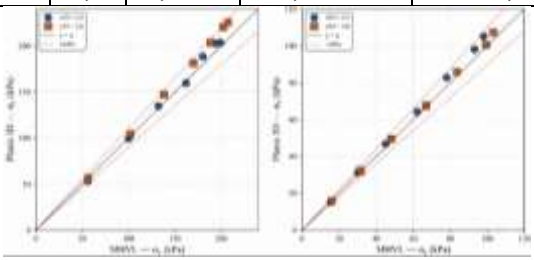
Đất nền và trụ VLHR: mô hình Mohr-Coulomb thoát nước (MC Drained). Lưới ĐKT: phần tử geogrid chỉ chịu kéo, EA = 2000 kN/m. Liên kết trụ–đất: $R_{inter}$ = 1,0 (liên kết hoàn hảo) theo Law (2015). Tham số chính: đất nền $\gamma$ = 16,6 kN/m³, c' = 8 kPa, $\varphi'$ = 20°, $E_{50}$ = 1,20 MPa, $\nu$ = 0,33; trụ VLHR $\gamma$ = 18,3 kN/m³, $\varphi'$ = 38°, $\psi$ = 8°, $E_c$ = 30 MPa, $\nu$ = 0,30.

### *4.3.2. Hiệu chỉnh và kiểm chứng*

Quy trình hiệu chỉnh ba bước: (1) hiệu chỉnh đất nền không trụ; (2) bổ sung trụ VLHR; (3) xác nhận với lưới ĐKT. Tiêu chí: $R^2 \geq 0,9$, RMSE < 10%. Kết quả: $R^2 > 0,94$ và RMSE < 7% cho tất cả trường hợp, xác nhận mô hình tái hiện tốt ứng xử của hệ.

**Bảng 4.3 Kết quả hiệu chỉnh và kiểm chứng mô hình số bằng Plaxis 3D**

| Đại lượng so sánh | s/D | $R^2$ | RMSE | RMSE (%) | Đánh giá |
|---|---|---|---|---|---|
| Ứng suất đỉnh trụ $\sigma_c$ | 2,5 | 0,9892 | 5,12 kPa | 2,57 | Đạt |
| Ứng suất đỉnh trụ $\sigma_c$ | 3,0 | 0,9415 | 12,62 kPa | 6,09 | Đạt |
| Áp lực đất nền $\sigma_s$ | 2,5 | 0,9828 | 3,84 kPa | 3,92 | Đạt |
| Áp lực đất nền $\sigma_s$ | 3,0 | 0,9966 | 1,81 kPa | 1,76 | Đạt |



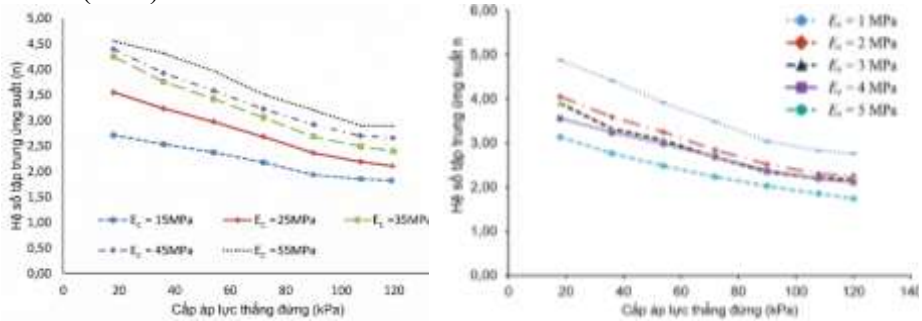
*Hình 4.4. Đối chiếu ứng suất đỉnh trụ và áp lực đất nền giữa MHVL và MHS*

### 4.4. Các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả làm việc trên mô hình số

Bốn yếu tố được khảo sát: mô đun biến dạng vật liệu trụ $E_c$ = (15–55 MPa), mô đun biến dạng đất nền $E_s$ =(1–5 MPa), độ cứng lưới ĐKT J= (1000–8000 kN/m) và tỷ số khoảng cách s/D =(2,5–3,5).

**Ảnh hưởng $E_c$:** Hệ số n tăng khi $E_c$ tăng. Tại p = 18 kPa: n tăng từ 2,72 ($E_c$ = 15 MPa) lên 4,56 ($E_c$ = 55 MPa), mức tăng 68%. Hiệu quả biên giảm dần khi $E_c$ > 35 MPa. Phạm vi n = 1,83–4,56 nằm trong khoảng n = 2,5–5 theo FHWA (1983).

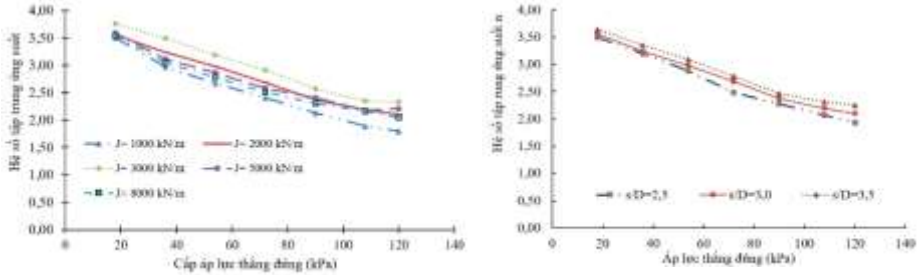
**Ảnh hưởng $E_s$:** Hệ số n giảm khi $E_s$ tăng. Tại p = 18 kPa: n giảm từ 4,87 ($E_s$ = 1 MPa) xuống 3,13 ($E_s$ = 5 MPa), mức giảm 36%. Phù hợp với Ambily và Gandhi (2007).




*Hình 4.5. Ảnh hưởng của $E_c$ và $E_s$ đến hệ số tập trung ứng suất*

**Ảnh hưởng J:** Hệ số n không tăng tuyến tính theo J. Giá trị J = 3000 kN/m cho n cao nhất trong hầu hết cấp tải. Khi J quá lớn, biến dạng ε giảm, hiệu ứng màng không được phát huy tối đa.

**Ảnh hưởng s/D:** Hệ số n tăng nhẹ khi s/D tăng (sai biệt < 15%). Phạm vi s/D = 2,5–3,0 được khuyến nghị cho thiết kế tối ưu.




*Hình 4.6. Ảnh hưởng của độ cứng của lưới ĐKT và tỷ số s/D đến hệ số TTƯS*

### 4.5. Đề xuất hiệu chỉnh công thức dự tính sức chịu tải và hệ số tập trung ứng suất của nhóm trụ vật liệu hạt rời kết hợp lưới địa kỹ thuật

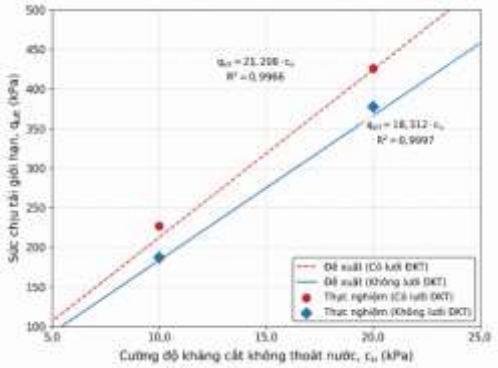
#### *4.5.1. Hiệu chỉnh công thức dự tính sức chịu tải giới hạn*

Hồi quy tuyến tính $q_{ult} = N_c \cdot c_u$ qua gốc tọa độ, sử dụng dữ liệu thực nghiệm tại $I_L$ = 0,78 và 1,0:

– Trụ VLHR không lưới ĐKT: $q_{ult}=18{,}312\cdot c_u$ ($R^2=0{,}9997$) ( 4-1 )
– Trụ VLHR có lưới ĐKT: $q_{ult}=21{,}208\cdot c_u$ ($R^2=0{,}9966$) ( 4-2 )

**Bảng 4.4 Kết quả phân tích hồi quy sức chịu tải giới hạn**

| Trường hợp | $N_c$ | $R^2$ | RMSE (kPa) | Mức độ cải thiện |
|---|---|---|---|---|
| Không lưới ĐKT | 18,312 | 0,9997 | 8,756 | Tăng 15,8% ($N_c$ hồi quy) |
| Có lưới ĐKT | 21,208 | 0,9966 | 10,630 | |




*Hình 4.7. Mối tương quan giữa SCT giới hạn và $c_u$ theo phân tích hồi quy*

Kiểm chứng lý thuyết: theo lý thuyết giãn nở hốc Hughes và Withers (1974) với $\varphi_c = 42°$ (thực nghiệm), hệ số lý thuyết $N_c = K_p \cdot [1 + \ln(E_s/(2(1+\nu)\cdot c_u))] \approx 18{,}31$, gần trùng khớp với hệ số hồi quy 18,312. Gia số $\Delta N_c \approx 2{,}9$ khi có lưới ĐKT thể hiện đóng góp của lực kéo lưới bổ sung áp lực bó hông.

### *4.5.2. Hiệu chỉnh công thức xác định hệ số tập trung ứng suất*

Hệ số n được xây dựng từ hai hàm thành phần $\sigma_c = f(s/D, p)$ và $\sigma_s = g(s/D, p)$, rồi lấy tỷ số: $n = \sigma_c / \sigma_s$ ( 4-3 )

Áp lực đất nền: $\sigma_s = (0{,}0543\cdot s/D + 0{,}7458) \cdot p$ ( 4-4 )

với $R^2 = 0{,}996$. Hệ số tăng khi s/D tăng, phản ánh phần tải phân phối cho đất nền nhiều hơn khi mật độ trụ thấp hơn.

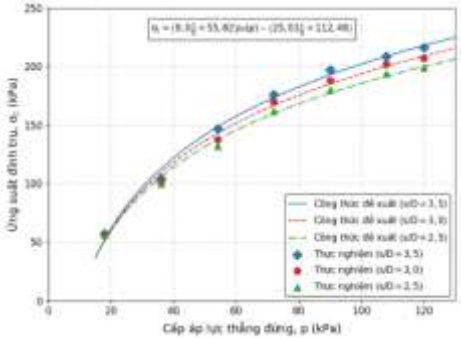
Ứng suất đỉnh trụ: $\sigma_c = A \cdot \ln(p) + B$ ( 4-5 )

với $A = 9\frac{s}{D} + 55{,}82$ và $B = -25{,}03\frac{s}{D} - 112{,}48$

Do đó, hệ số TTƯS $n = \frac{\left(9{,}\frac{s}{D} + 5582\right)\ln p - \left(25{,}03{,}\frac{s}{D} + 11248\right)}{\left(0{,}1{,}\frac{s}{D} + 0594\right)p}$ ( 4-6)

Hệ số $R^2 > 0{,}99$ cho tất cả s/D.

Kết quả: $R^2$ đạt 0,926–0,958 với RMSE < 0,14. Sai số so với thực nghiệm giảm từ 15–20% (theo hướng dẫn hiện hành Han và Ye, 2001) xuống dưới 8%. Công thức phản ánh được tính phi tuyến của n theo tải trọng p và ảnh hưởng của s/D.




*Hình 4.8 Kết quả so sánh ứng suất đỉnh trụ xác định từ thí nghiệm trên MHVL và xác định theo công thức đề xuất*

**Bảng 4.5 Hệ số xác định $R^2$ để đánh giá mức độ phù hợp của công thức đề xuất**

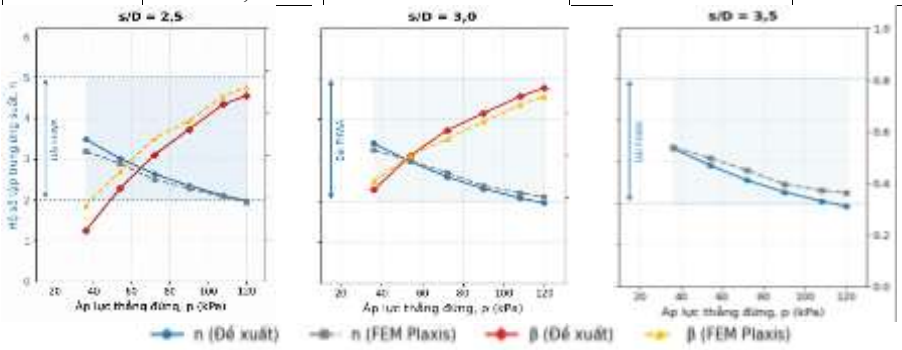
| Tỷ lệ s/D | MSE | RMSE | $R^2$ |
|---|---|---|---|
| 2,5 | 0,0141 | 0,119 | 0,958 |
| 3,0 | 0,0155 | 0,124 | 0,947 |
| 3,5 | 0,0178 | 0,133 | 0,926 |

## 4.6. Áp dụng tính toán hệ trụ vật liệu hạt rời kết hợp lưới Địa kỹ thuật xử lý nền đất yếu trong điều kiện công trình thực tế

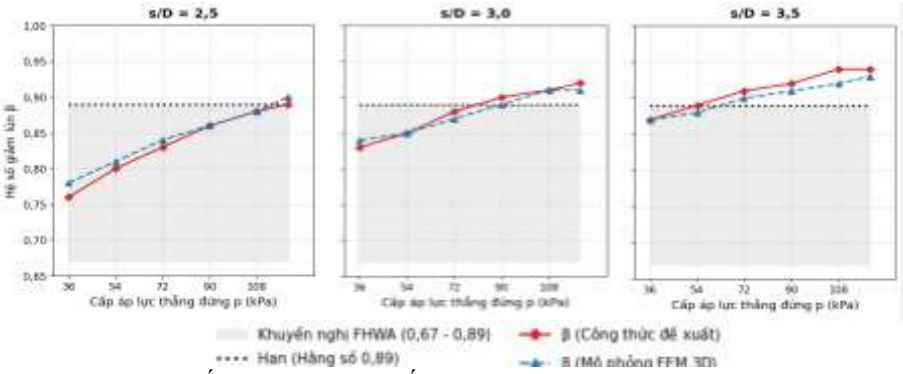
Luận án đã áp dụng các công thức đề xuất để tính toán cho điều kiện thực tế tại dự án đường giao thông ven Sông Lam từ cầu Ba Ra đến cầu Lưu Sơn, xã Đô Lương, tỉnh Nghệ An, đoạn km1+200 – km2+300, so sánh với kết quả tính theo FHWA và TCCS 41:2022/TCĐBVN, cho thấy các công thức đề xuất cho kết quả phù hợp với điều kiện thực tế.

**Bảng 4.6 Kết quả tính sức chịu tải giới hạn $q_{ult}$ của trụ VLHR**

| $c_u$ (kPa) | Đề xuất (kPa) | FHWA (min) (kPa) | FHWA (max) (kPa) | Han (2001) (kPa) |
|---|---|---|---|---|
| 12 | 254,5 | 216 | 264 | 240 |
| 15 | 318,1 | 270 | 330 | 300 |
| 20 | 424,2 | 360 | 440 | 400 |




*Hình 4.9 Kết quả xác định hệ số tập trung ứng suất theo các phương pháp khác nhau trong điều kiện bài toán thực tế điển hình*




*Hình 4.10 Kết quả xác định hệ số giảm lún theo các phương pháp khác nhau*

## 4.7. Nhận xét chương 4

- Mô hình số Plaxis 3D đã được xây dựng, hiệu chỉnh và kiểm chứng thành công với $R^2 > 0,94$ và RMSE < 7% cho tất cả trường hợp.
- Hai yếu tố ảnh hưởng quan trọng nhất: mô đun biến dạng trụ $E_c$ và đất nền $E_s$. Hệ số n = 1,83–4,56; phần lớn giá trị (ứng với mức tải thấp hơn) nằm trong khoảng khuyến nghị n = 2,5–5 của FHWA, riêng giá trị nhỏ nhất n = 1,83 (ghi nhận tại mức tải cao nhất) thấp hơn ngưỡng dưới, phản ánh xu hướng n giảm khi tải trọng tăng. Phạm vi s/D = 2,5–3,0 được khuyến nghị cho thiết kế trong phạm vi khảo sát.
- Đề xuất các công thức hiệu chỉnh: (1) $q_{ult}$ không lưới = $18,312 \cdot c_u$; (2) $q_{ult}$ có lưới = $21,208 \cdot c_u$ ; (3) $\sigma_s = f(s/D, p)$; (4) $\sigma_c = f(s/D, p)$, từ đó xác định $n = \sigma_c/\sigma_s$
- Phạm vi áp dụng: đất nền $0,75 \le I_L \le 1,0$ ($c_u$ = 5–25 kPa); trụ VLHR D = 0,6–1,0 m, s/D = 2,5–3,5, L/D ≥ 5; lưới ĐKT trên đỉnh trụ; tải trọng p = 18–120 kPa; nền đường và nền đắp diện rộng.

# KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

## I. Kết luận chính

Luận án thực hiện nghiên cứu tổng hợp về hệ trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT để xử lý nền đất yếu trong xây dựng CTGT, bằng các phương pháp nghiên cứu lý thuyết, thực nghiệm MHVL thu nhỏ tỷ lệ 1:20 kết hợp phân tích MHS bằng Plaxis 3D. Các kết luận chính như sau:

1. Đã làm rõ hơn cơ chế làm việc của hệ trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT thông qua MHVL kết hợp MHS. Hiệu quả của lưới ĐKT phụ thuộc vào trạng thái đất nền: mức cải thiện sức chịu tải tăng từ 12,7% (IL = 0,78) lên 27,0% ($I_L$ = 1,5). Với đất có $I_L > 1,0$, sức chịu tải tuyệt đối và độ cứng đất nền thấp làm giảm khả năng huy động đầy đủ cơ chế tạo vòm, do đó khuyến nghị áp dụng giải pháp cho điều kiện $I_L \le 1,0$.
2. Đã xác định mối quan hệ giữa tỷ lệ s/D và hiệu quả giảm lún. Khi giảm s/D từ 3,5 xuống 2,5 (tăng $a_s$ từ 6,41% lên 12,57%), độ lún giảm 52,6% tại mức tải 120 kPa (từ 17,32 mm xuống 8,21 mm). Tốc độ gia tăng độ lún dS/dp giảm từ 0,155 mm/kPa xuống 0,070 mm/kPa, cho thấy phạm vi s/D = 2,5–3,0 phù hợp

cho ứng dụng thực tiễn trong phạm vi khảo sát.

3. Phát hiện xu hướng quan trọng về hệ số tập trung ứng suất (n): giá trị n giảm khi tải trọng tăng, dao động từ n = 3,64 (MHVL) và 4,56 (MHS) tại 18 kPa xuống khoảng n = 1,83–2,03 tại 120 kPa. Kết quả cung cấp cơ sở để điều chỉnh phương pháp tính toán, đặc biệt trong ước tính phân bố tải trọng giữa trụ và đất nền tại các mức tải khác nhau.

4. Đã thực hiện thành công MHVL thu nhỏ tỷ lệ 1:20 với trụ VLHR D = 40 mm, L = 600 mm trong đất sét yếu điển hình vùng đồng bằng Bắc Bộ (Thường Tín, Hà Nội). Tổng cộng 9 kịch bản × 2 lần lặp = 18 thí nghiệm, sai số lặp < 5%.

5. Mô hình số Plaxis 3D đạt $R^2 > 0,9$ khi kiểm chứng với MHVL, cho phép mở rộng phân tích tham số. Hệ số n = 1,83–4,56; phần lớn giá trị nằm trong phạm vi n = 2,5–5 của Barksdale và Bachus (1983), riêng n = 1,83 tại mức tải cao nhất thấp hơn ngưỡng dưới của phạm vi này; hiệu quả biên giảm dần khi $E_c > 35$ MPa.

6. So sánh các phương pháp tính toán theo FHWA (1983), BS 8006-1:2010, EBGEO (2011) với kết quả thực nghiệm cho thấy các phương pháp hiện hành thường đánh giá thấp khả năng cải thiện sức chịu tải (15–25%) và chưa xét đầy đủ ảnh hưởng của lưới ĐKT. Đã hiệu chỉnh và phát triển thành công các công thức dự tính $q_{ult}$, n và β phù hợp với điều kiện đất yếu Việt Nam.

7. Sức chịu tải hệ trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT tăng 12,7–27,0% so với trụ VLHR không lưới, tùy theo $I_L$: tại $I_L = 0,78$ tăng 12,7% (378 → 426 kPa); tại $I_L = 1,0$ tăng 21,4% (187 → 227 kPa); tại $I_L = 1,5$ tăng 27,0% (148 → 188 kPa).

**II. Những đóng góp mới của luận án**

(1) Xây dựng được bộ dữ liệu thực nghiệm có hệ thống về ứng xử cơ học (tải trọng–độ lún–phân bố ứng suất–hệ số tập trung ứng suất) của hệ trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT cho điều kiện nền đất yếu đại diện tại Việt Nam trên MHVL tỷ lệ 1:20.

(2) Làm rõ quy luật ảnh hưởng của tỷ lệ s/D, trạng thái vật lý đất nền ($I_L$) và sự có mặt của lưới ĐKT đến hệ số tập trung ứng suất (n), hệ số giảm lún (β) và sức chịu tải của hệ.

(3) Lượng hóa mức cải thiện sức chịu tải theo trạng thái vật lý đất ($I_L$); cung cấp dữ liệu thực chứng cho ngưỡng $I_L = 1,0$ để lựa chọn áp dụng giải pháp.

(4) Đề xuất các công thức hiệu chỉnh dự tính $q_{ult}$ ($R^2 > 0,99$), n ($R^2 > 0,926$) và β cho hệ trụ VLHR kết hợp lưới ĐKT, được kiểm chứng bằng kết quả thực nghiệm, phân tích mô hình số và lý thuyết giải tích hiện có.

**III. Những hạn chế**

1. Thực nghiệm mới thực hiện trên MHVL và MHS, chưa có điều kiện thí nghiệm ngoài hiện trường quy mô thực tế. Thí nghiệm nhóm trụ mới thực hiện với một giá trị $I_L = 0,78$.

2. Tập trung một loại đất yếu cụ thể (sét pha dẻo chảy, Thường Tín, Hà Nội) với cấu trúc nền một lớp đồng nhất. Chưa xét nền nhiều lớp hoặc các loại vật liệu đắp khác.

3. Chưa xét ảnh hưởng yếu tố thời gian đến tính chất cơ học của trụ VLHR (lão

hóa, biến đổi độ chặt).
4. Mới xét bài toán trụ chống chịu tải thẳng đứng tĩnh, chưa xét trụ VLHR chiều dài thay đổi, tải trọng động, hóa lỏng và ổn định nền đường dốc.
5. Mô hình số sử dụng Mohr-Coulomb đơn giản hóa, chưa xét mô hình vật liệu tiên tiến hơn hoặc áp lực nước lỗ rỗng âm trong đất không bão hòa.

**IV. Kiến nghị**

1. Tiếp tục nghiên cứu thực nghiệm và quan trắc ngoài hiện trường trên mô hình tỷ lệ thực, theo dõi hệ số $n$, độ lún theo thời gian, lực căng lưới ĐKT và phân bố ứng suất theo chiều sâu.
2. Trong phạm vi điều kiện đã khảo sát ($cu$ = 5–25 kPa, IL ≤ 1,0), kết quả nghiên cứu cho thấy cấu hình trụ VLHR với s/D = 2,5–3,0 kết hợp lưới ĐKT cường độ kéo tối thiểu 50 kN/m có thể được xem xét áp dụng; cấu hình này cho giảm lún 45–55%, tăng sức chịu tải 13–27% và tiết kiệm 15–20% vật liệu so với s/D = 2,0 trong các kịch bản đã khảo sát, cần kiểm chứng thêm khi áp dụng ngoài phạm vi này.
3. Khuyến nghị bổ sung vào tiêu chuẩn TCCS 41:2022/TCĐBVN và TCCS 66:2015/IBST các quy định về sử dụng lưới ĐKT kết hợp trụ VLHR, bao gồm phương pháp xác định hệ số TTƯS có xét mức tải, điều kiện áp dụng theo $I_L$, yêu cầu cường độ lưới ĐKT và quy trình kiểm tra chất lượng thi công.
4. Phát triển phần mềm hỗ trợ thiết kế chuyên dụng tích hợp cơ sở dữ liệu đất yếu Việt Nam, các công thức hiệu chỉnh và module tối ưu hóa kinh tế–kỹ thuật.

**V. Hướng nghiên cứu tiếp theo**

1. Nghiên cứu ứng xử dài hạn: ảnh hưởng cố kết, suy giảm tính chất cơ học của vật liệu trụ, dự báo lún dư sau 5–10 năm khai thác.
2. Mở rộng nghiên cứu trong điều kiện địa chất phức tạp (nền nhiều lớp, đất hữu cơ, ven biển) và tải trọng đặc biệt (ngang, tuần hoàn, động đất).
3. So sánh ứng xử hệ trụ VLHR dạng trụ chống và trụ treo, tối ưu hóa chiều dài trụ theo đặc tính đất nền và tải trọng thiết kế.

# DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

1.. **Nguyễn Hải Hà**, Nguyễn Đức Mạnh, Đặng Hồng Lam, Nguyễn Thái Linh, Vũ Bách Tuấn. *Một số yếu tố ảnh hưởng tới sự làm việc của trụ vật liệu hạt rời trong cải tạo nền đất yếu*. Hội nghị Khoa học toàn quốc Vietgeo2023 (2023).

2. **Nguyễn Hải Hà**, Nguyễn Thái Linh. *Nghiên cứu hiệu quả gia tăng sức chịu tải của cọc đá nghiền kết hợp với vải địa kỹ thuật trên mô hình thực nghiệm*. Tạp chí Giao thông Vận tải, số 9/2023 (733) (2023).

3. Pham Thai Binh, Nguyen Duc Manh, **Nguyen Hai Ha**, Le Van Hiep, Nguyen Quang Phuc, Ho Sy An, Nguyen Thai Linh, Indra Prakash, Nguyen Cong Dinh, Nguyen Duc Dam. *Estimation of recompression coefficient of soil using a hybrid ANFIS-PSO machine learning model*. Journal of Engineering Research, Vol.11, Issue 3 (2023).

4. Nguyễn Thái Linh, **Nguyễn Hải Hà***. *Nghiên cứu lựa chọn hợp lý giá trị modul biến dạng của trụ vật liệu hạt rời trong xử lý nền đất yếu từ kết quả thực nghiệm*. Tạp chí Giao thông Vận tải, số 12/2024 (748) (2024).

5. **Nguyễn Hải Hà**, Nguyễn Đức Mạnh, Nguyễn Thái Linh, Lê Thị Hồng Vân. *Xây dựng mô hình thực nghiệm trong phòng khảo sát sự làm việc của nhóm trụ vật liệu hạt rời kết hợp với lưới địa kỹ thuật trong xử lý nền đất yếu*. Hội nghị Khoa học toàn quốc Vietgeo2025 (2025).

6. Nguyen Thai Linh, **Nguyen Hai Ha***, *Nguyen Duc Manh, Indra Prakash, Vu Anh Tuan. Experimental evaluation of a single geogrid-reinforced stone column under varying surrounding soil conditions: Effects on bearing capacity and elastic modulus*. Vietnam Journal of Earth Sciences, 48(2) (2026).

7. Hong Lam Dang, Dinh Cuong Nguyen, **Hai Ha Nguyen**. *A Case Study on the Young's Modulus of Stone Columns Built in Vietnam*. Engineering, Technology and Applied Science Research, Vol. 15, No. 6, 2025, pp. 28629–28634.

8. **Nguyễn Hải Hà**, Nguyễn Thái Linh, Nguyễn Đức Mạnh, Đặng Hồng Lam. *Nghiên cứu hệ số giảm lún của hệ trụ vật liệu rời xử lý nền đất yếu trên mô hình thực nghiệm*. Tạp chí Xây dựng, số 3/2026.

9. Nguyễn Hải Hà, Nguyễn Đức Vinh*. *Nghiên cứu cơ chế biến dạng của trụ đá kết hợp lưới địa kỹ thuật bằng mô hình số FLAC 3D và thực nghiệm.* Tạp chí Cầu đường Việt Nam, số 05/2026