LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu, kết quả nêu trong luận án là trung thực và chưa được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tác giả luận án

Nguyễn Đức Thị Thu Định

LỜI CẢM ƠN

Luận án thực hiện các phân tích nghiên cứu tại Bộ môn Công trình Giao thông thành phố, Khoa Công trình, Trung tâm thí nghiệm công trình, Trường Đại học Giao thông vận tải dưới sự hướng dẫn của GS.TS Nguyễn Viết Trung và các phân tích hướng dẫn từ TS Toshihiro Wakahara, Viện khoa học Công nghệ Shimizu, Nhật Bản.

Tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới hai Giáo sư hướng dẫn đã tận tình hướng dẫn khoa học trong quá trình thực hiện luận án.

Tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới Trung tâm thí nghiệm công trình, phòng thí nghiệm công trình Vilas 047 đã giúp đỡ tạo điều kiện cho tác giả tiến hành thí nghiệm trong quá trình thực hiện luận án.

Tác giả xin chân thành cảm ơn sự giúp đỡ của GS. TS Matsasugu Nagai, Khoa kết cấu và công trình trường Đại học Nagaoka – Nhật Bản đã tạo điều kiện giúp đỡ tác giả trong suốt 6 tháng thực tập tại Nhật Bản.

Tác giả xin chân thành cảm ơn Ban Giám Hiệu, Phòng Đào tạo sau Đại học, Khoa Công Trình, các thầy cô giáo trong Bộ môn Công trình giao thông thành phố và Công trình Thủy - Trường Đại học Giao thông vận tải, Viện khoa học công nghệ Shimizu Nhật Bản đã giúp đỡ và tạo điều kiện để hoàn thành luận án.

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

TLD : Hệ giảm chấn dùng chất lỏng

STLD : giảm chấn chất lỏng đơn tần số

MTLD : Giảm chấn chất lỏng đa tần số

NSD : mô hình TMD tương đương của mô hình TLD với độ cứng và tính cản phi tuyến

AMD : Giảm chất dùng khối lượng kiểu chủ động

TMD : Giảm chấn dùng khối lượng kiểu bị động

SD : giảm chấn thép,

SJD :giảm chấn nối thép,

LD : Giảm chấn dẫn hướng (Lead dampers),

FD : Giảm chấn ma sát,

VED : giảm chấn đàn hồi – nhớt,

VD : Giảm chấn nhớt,

OD : giảm chấn dầu,

AGS :Active Gyro Stabilizer,

AVS : Tác động thay đổi độ cứng (Active Variable Stiffness),

VOD : Variable Orifice Damper,

VFD :giảm chấn ma sát thay đổi.

E : Năng lượng

F : Ngoại lực tác động vào kết cấu

M : Mô men xoắn

C_T, C_N và C_M: các hệ số ứng với trị số lực ngang, lực nâng thẳng đứng và mô men xoắn

f : tần số dao động tự nhiên

L_{max}: Chiều dài nhịp lớn nhất

m_L : khối lượng chất lỏng

b : chiều rộng thùng chứa chất lỏng

L : chiều dài thùng chứa hình chữ nhật

D : đường kính của thùng chứa hình tròn

a : chiều cao của thùng chứa

h_0 : chiều sâu chất lỏng trong thùng chứa

x(t) : là chuyển dịch của mặt đất theo thời gian (chuyển dịch, vận tốc, gia tốc).

w_n : tần số góc thứ n

$F_{dọc}$ (t) : lực gió dọc tác động lên mô hình kết cấu

F_{ng} (t) :gió ngang tác động lên mô hình kết cấu

ρ_a :là mật độ không khí,

A_i :là diện tích chịu tác động gió;

V_{ave} :là vận tốc gió trung bình tại đỉnh của kết cấu trong điều kiện thiết kế;

θ_i :là góc giữa hướng tác động gió và hướng đi ra và

ρ :mật độ chất lỏng (kg/m3); ,

μ :hệ số nhớt của chất lỏng

M_s :Tổng khối lượng của kết cấu

H_s :Chiều cao của kết cấu (m)

f_s :Tần số dao động tự nhiên cửa kết cấu (Hz)

ζ_S :Tỷ số cản của kết cấu (%)

k : độ cứng

k_D : độ cứng của giảm chấn

k_S : độ cứng của kết cấu

k_W : độ cứng tuyến tính cơ sở của giảm chấn chất lỏng TLD

m :khối lượng

m_S :khối lượng của kết cấu

m_D :khối lượng của giảm chấn

C : Hệ số cản

c : Vận tốc pha sóng được định nghĩa

η :chuyển động tự do của chất lỏng (biến đổi theo thời gian t).

L :chiều dài sóng

H : chiều cao sóng

Φ :Hàm thế

W_m : khối lượng hình thái có hiệu

W_i : khối lượng hình thái có hiệu ứng với mode dao động thứ i

Φ_i : mode dao động thứ i của kết cấu

λ : bước sóng

g : gia tốc trọng trường

T : chu kỳ dao động

V : vận tốc

N : Số lượng thùng chứa chất lỏng trong giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD

f_i : tần số dao động của thùng chứa chất lỏng

f_0 : tần số dao động trung tâm của các thùng chứa chất lỏng trong giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD)

$\beta_i = f_{i+1} - f_i$: độ chênh các tần số của các thùng TLD trong giảm chấn chất lỏng đa tần số.

ΔR : bề rộng dải tần số trong giảm chấn chất lỏng đa tần số

β : Tỷ số tần số kích thích ($\beta = f_e/f_s$)

ε : Tỷ số chiều sâu chất lỏng (ε=h/L)

ϕ : Góc pha

γ : Tỷ số tần số giảm chấn ($\gamma = f_D/f_s$)

μ :Tỷ số khối lượng (m_D/m_s)

κ : Tỷ số cứng hóa độ cứng hay độ cứng không thứ nguyên của giảm chấn

ω : tần số góc

ω_e : Tần số góc của lực kích thích

ω_D : Tần số góc tự nhiên của giảm chấn

ω_S :Tần số góc tự nhiên của kết cấu

ξ : Tỷ số tần số

ζ : Tỷ số cản

ζ_S : Tỷ số cản của kết cấu

ζ_D : Tỷ số cản của giảm chấn

z : Cao độ mặt cầu

q : áp lực gió

V : Vận tốc gió thổi

ρ : mật độ không khí

η : chiều cao sóng hoặc cao độ mặt nước tự do

f_n,f_w: tần số tự nhiên của chất lỏng văng té trong 1 thùng hình chữa nhật, tần số tự nhiên cơ sở tuyến tính của TLD

ω_w : Tần số góc tự nhiên cơ sở tuyến tính của TLD

k_w : Độ cứng cơ sở tuyến tính của TLD

c_{cr} : độ cản giới hạn của TLD

ζ : tỷ số tần số

ξ : tỷ số giảm chấn

m_S : khối lượng của kết cấu trong thiết lập phương trình chuyển động

c_S :tính cản của kết cấu trong thiết lập phương trình chuyển động

k_S :độ cứng của kết cấu trong thiết lập phương trình chuyển động

w_S :tần số góc dao động riêng của kết cấu.

m_D :khối lượng của chất lỏng trong thùng giảm chấn chất lỏng TLD

c_D :tính cản của chất lỏng trong thùng TLD

k_D : độ cứng của chất lỏng trong thùng TLD

w_D :tần số góc dao động riêng của của TLD.

ξ_S ξ_D : tỷ số cản của kết cấu và tỷ số cản của TLD

F_e , f(t) :lực kích động vào kết cấu,

F_0 : biên độ của lực kích động

$H_S(w)$Hàm ứng xử tần số của hệ làm việc chung kết cấu và TLD

$H_0(w)$ Hàm ứng xử tần số của TLD khi hệ không cản

$F_{\eta I}$: lực thủy động tuyến tính

P_n và P_0 là lực ngang do chất lỏng gây ra (tổng áp lực) tác động lên các tường bên phải và bên trái của thùng

u(t) :chuyển vị

$\dot{u}(t)$:vận tốc

$\ddot{u}(t)$:gia tốc

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1. Các biện pháp giảm dao động cho kết cấu 29
Bảng 1.2. Xác định kiểu loại sóng trong thùng chứa 34
Bảng 1.3. Thống kê các công trình đã được lắp đặt TLD trên thế giới và Việt Nam ... 43
Bảng 1.4. Các đặc trưng động học của các tòa nhà khi không có TLD 46
Bảng 1.5. Các kích thước của 1 bình TLD và các đặc trưng của TLD 46
Bảng 4.1. Kết quả phân tích các mode dao động của mô hình cột thí nghiệm :. 105
Bảng 4.2. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp chỉ có 1 thùng cho mô hình cột thí nghiệm) 116
Bảng 4.3. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp chỉ có 3 thùng có tần số dao động giống nhau cho mô hình cột thí nghiệm) 116
Bảng 4.4. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp chỉ có 3 thùng có tần số dao động khác nhau cho mô hình cột thí nghiệm, ΔR=0.3) 117
Bảng 4.5. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp chỉ có 5 thùng có tần số dao động khác nhau cho mô hình cột thí nghiệm) 117
Bảng 4.6. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp chỉ có 7 thùng có tần số dao động khác nhau cho mô hình cột thí nghiệm) 118
Bảng 4.7. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp chỉ có 9 thùng có tần số dao động khác nhau cho mô hình cột thí nghiệm) 119
Bảng 4.8. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp chỉ có 11 thùng có tần số dao động khác nhau cho mô hình cột thí nghiệm) 120
Bảng 4.9. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp chỉ có 15 thùng có tần số dao động khác nhau cho mô hình cột thí nghiệm) 120
Bảng 4.10. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp chỉ có 3 thùng có tần số dao động khác nhau cho mô hình cột thí nghiệm, ΔR=0.2) 122
Bảng 4.11. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp chỉ có 3 thùng có tần số dao động khác nhau cho mô hình cột thí nghiệm, ΔR=0.1) 122
Bảng 4.12. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp có 7 thùng có tần số dao động khác nhau cho mô hình cột thí nghiệm, ΔR=0.3, f/fs =0.95) 123
Bảng 4.13. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp có 7 thùng có tần số dao động khác nhau cho mô hình cột thí nghiệm, ΔR=0.3, f/fs =1.05) 124
Bảng 5.1. Thông tin chi tiết của khối lượng chất lỏng của hệ TLD đã lắp đặt tại cầu Cầu Bãi Cháy như sau: 132
Bảng 5.2. Các thông số của TLD trong hệ MTLD có N=5 136
Bảng 5.3. Chi tiết số lớp mỗi TLD đơn trong hệ MTLD N=5 136
Bảng 5.4. Chi tiết vị trí thiết lập MTLD và các thùng đơn trong hệ MTLD, N=5 . 139
Bảng 5.5. Chi tiết tần số dao động của 6 mode đầu tiên phan tích dao động cho cầu Bãi Cháy trên phần mềm Midas Civil : 141
Bảng 5.6. Chi tiết mỗi TLD đơn trong hệ MTLD trường hợp f_{TLD} =0.2Hz: 143
Bảng 5.7. Chi tiết khối lượng của mỗi TLD đơn trong hệ MTLD N=5 và vị trí lắp đặt 1

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Hình 1.1: Một số cầu dây văng tại Việt Nam: Trần Thị Lý – Đà Nẵng, Cầu Cần Thơ – Cần Thơ, Cầu Bãi Cháy – Quảng Ninh và Cầu Nhật Tân – HàNội. 17

Hình 1.2: Các mode dao động điển hình của tháp khi thừa nhận sơ đồ tính toán tháp một đầu ngàm một đầu tự do. 20

Hình 1.3: Mô hình tác động của hoạt tải trên dầm có xét đến khối lượng của tải trọng di chuyển trên dầm [29]. 23

Hình 1.4: Mô tả các mô hình tính toán sự làm việc chung của kết cấu và các loại giảm chấn khác nhau (giảm chấn kiểu bị động, kiểu bán chủ động, kiểu chủ động) 30

Hình 1.5: Chuyển động chất lỏng trong 1 thùng chứa – 1 TLD và các kích thước 31

Hình 1.6: Mô hình cấu tạo thùng chứa chất lỏng hình chữ nhật và hình tròn 33

Hình 1.7: TLD hình chữ nhật. 34

Hình 1.8: TLD hình trụ tròn 34

Hình 1.9: Ứng dụng của TLD cho tháp Yokohama Marine tại Nhật Bản - kết cấu dàn thép cao 101.3m, tổng khối lượng tháp 440T 44

Hình 1.10: Ứng dụng hệ giảm chấn chất lỏng TLD cho tòa nhà cao tầng – khách sạn Shin Yokohama Prince – Nhật Bản 44

Hình 1.11: Hệ thống TLD lắp đặt tại cầu Sakitama – Nhật Bản 47

Hình 1.12: Hệ thống TLD lắp đặt tại cầu Bãi Cháy – Việt Nam 47

Hình 1.13: Sơ đồ thể hiện tư tưởng chính nghiên cứu về TLD 49

Hình 2.1: Định nghĩa các tham số trong chuyển động sóng 53

Hình 2.2: Mô hình TMD tương đương của TLD (mô hình NSD) 57

Hình 2.3: Hệ tương đương giữa mô hình gồm 1 bậc tự do của kết cấu và TLD và mô hình hai bậc tự do với độ cứng và tính cản phi tuyến (mô hình NSD)-[76] 58

Hình 2.4: Các kích thước cơ bản của thùng chứa hình chữ nhật dưới tác động của chuyển vị ngang. 59

Hình 2.5: Lực cắt cơ sở do chuyển động chất lỏng 62

Hình 2.6: Trắc dọc vận tốc chất lỏng thay đổi theo phương x và lớp biên bên ngoài 62

Hình 2.7: mô phỏng dao động của kết cấu biến đổi theo thời gian và theo tần số 70

Hình 3.1: Mô hình kết cấu và giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) 75

Hình 3.2: Mô hình đa bậc tự do mô phỏng cho các TLD đơn lẻ trong hệ MTLD 75

Hình 3.3: Mô hình tính toán cho hệ SLTD 79

Hình 3.4: Biểu đồ thể hiện trong mỗi trường hợp khảo sát. Trên hình là minh họa dạng của 3 đường đồ thị với các tham số giảm chấn tối ưu: đồ thị khi không gắn TLD,

khi gắn hệ giảm chấn đơn tần số (STLD) và khi gắn hệ giảm chấn đa tần số MTLD. .87

Hình 3.5: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=3,ΔR = 0.2 87

Hình 3.6: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=5,ΔR = 0.2 88

Hình 3.7: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=7,ΔR = 0.2 88

Hình 3.8: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=9,ΔR = 0.2 89

Hình 3.9: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=11,ΔR=0.2 89

Hình 3.10: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=15,ΔR=0.2 90

Hình 3.11: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=15,ΔR=0.2 90

Hình 3.12: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=3, bề rộng dải tần số thay đổi ΔR=0.1, 0.2, 0.3.....91

Hình 3.13: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=5, bề rộng dải tần số thay đổi ΔR=0.1, 0.2, 0.3.....92

Hình 3.14: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=7,bề rộng dải tần số thay đổi ΔR=0.1, 0.2, 0.3.....92

Hình 3.15: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=9, bề rộng dải tần số thay đổi ΔR=0.1, 0.2, 0.3.....93

Hình 3.16: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=11, bề rộng dải tần số thay đổi ΔR=0.1, 0.2, 0.3.....93

Hình 3.17: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=15, bề rộng dải tần số thay đổi ΔR=0.1, 0.2, 0.3.....94

Hình 3.18: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=21, bề rộng dải tần số thay đổi ΔR=0.1, 0.2, 0.3.....94

Hình 3.19: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số của hệ MTLD (N=7) với tỷ số của 2 tần số f_0/f_s = 0.95, bề rộng dải tấn số là ΔR=0.2.....96

Hình 3.20: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số của hệ MTLD tỷ số của 2 tần số f_0/f_s = 1.05, bề rộng dải tấn số là ΔR=0.2 96

Hình 3.21: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử của kết cấu với sự thay đổi của tỷ lệ tỷ số cản của kết cấu so với tỷ số cản của MTLD ứng với N=5 thùng.....97

Hình 3.22: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử của kết cấu vớ i sự thay đổi của tỷ lệ tỷ số

cản của kết cấu so với tỷ số cản của MTLD ứng với N=7 thùng.....97

Hình 3.23: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử của kết cấu với 1 Thùng TLD và nhiều thùng TLD có tần số dao động giống nhau. 98

Hình 3.24: Đồ thị khảo sát ảnh hưởng của khối lượng TLD có tần số trung tâm đến ứng xử của kết cấu 99

Hình 4.1: Sơ đồ hệ thống điều khiển bàn rung (shaking table) 101

Hình 4.2: Thiết bị bàn rung đặt tại phòng thí nghiệm trường Đại học GTVT ...101

Hình 4.3: Mô hình tương tác giữa TLD và kết cấu chịu tác động của chuyển động theo phương ngang 102

Hình 4.4: Mô hình tương tác giữa TLD và kết cấu chịu tác động của chuyển động xoay 102

Hình 4.5: Mô hình cột thí nghiệm dạng chữ H và sơ đồ bố trí điểm đo.....104

Hình 4.6: các mode dao động của cột thí nghiệm phân tích trên phần mềm Midas Civil 107

Hình 4.7: Quá trình chế tạo và lắp đặt mô hình lên bàn rung.....111

Hình 4.8: Thiết bị đo và các giảm chấn chất lỏng đặt trên đỉnh cột mô hình kết cấu thí nghiệm 111

Hình 4.9: Hiệu chỉnh mô hình kết cấu cho thí nghiệm.....112

Hình 4.10: Mô tả phân tích tính toán giá trị tần số dao động riêng thực của mô hình kết cấu trên cơ sở biến đổi Hilbert 113

Hình 4.11: hiệu quả giảm dao động cho mô hình kết cấu thí nghiệm khi không gắn TLD. 115

Hình 4.12: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 1 thùng TLD so ánh với trường hợp 3 thùng L.TLD giống nhau.....116

Hình 4.13: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 3 thùng TLD có tần số dao động khác nhau, ΔR=0.3 117

Hình 4.14: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 5 thùng TLD (tần số dao động của mỗi thùng khác nhau), ΔR=0.3.....118

Hình 4.15: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 7 thùng TLD (tần số dao động của mỗi thùng khác nhau, R=0.3, f/fs=1) 119

Hình 4.16: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 9 thùng TLD (tần số dao động của mỗi thùng khác nhau) 119

Hình 4.17: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 11 thùng TLD (tần số dao động của mỗi thùng khác nhau).....120

Hình 4.18: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 15 thùng TLD (tần số dao động của mỗi thùng khác nhau).....121

Hình 4.19: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 3 thùng TLD có tần số dao động khác nhau, R=0.2 122

Hình 4.20: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 3 thùng TLD có tần số dao động khác nhau, R=0.1 123

Hình 4.21: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 7 thùng TLD (tần số dao động của mỗi thùng khác nhau, R=0.3, f/fs=0.95) 124

Hình 4.22: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 7 thùng TLD (tần số dao động của mỗi thùng khác nhau, R=0.3, f/fs=1.05). 124

Hình 5.1 Toàn cảnh cầu Bãi Cháy - Quảng Ninh 126

Hình 5.2 Cầu dây văng Cầu Bãi Cháy – Quảng Ninh - Việt Nam và hệ giảm chấn chất lỏng TLD lắp đặt năm 2006 128

Hình 5.3 Chi tiết kích thước thiết kế thùng chứa TLD cho cầu dây văng Cầu Bãi Cháy – Quảng Ninh - Việt Nam lắp đặt năm 2006 129

Hình 5.4 Thiết kế TLD lắp đặt trong tháp cầu Bãi Cháy – Shimizu – Nhật Bản.. 130

Hình 5.5 Chi tiết số lượngt hùng chứa TLD và vị trí lắp đặt TLD dọc theo chiều cao tháp cầu dây văng Cầu Bãi Cháy – Quảng Ninh - Việt Nam (nguồn Shimizu).. 131

Hình 5.6 Đồ thị khảo sát ảnh hưởng của TLD lắp đặt tại các giai đoạn thi công của hệ TLD đã lắp đặt tại công trình cầu Bãi Cháy. 135

Hình 5.7 Sơ đồ bố trí MTLD gồm 5 TLD đơn trên mỗi vị trí dọc theo tháp cầu.. 136

Hình 5.8 Đồ thị khảo sát ứng xử của kết cấu với tỷ lệ khối lượng của TLD có tần số trung tâm với tổng khối lượng chất lỏng thay đổi 138

Hình 5.9 Đồ thị ứng xử của kết cấu khi so sánh hệ STLD và MTLD có xét đến khối lượng của TLD có tần số trung tâm (tỷ lệ giữa khối lượng của thùng có tần số trung tâm và tổng khối lượng chất lỏng lấy là 60%) 138

Hình 5.10 Kết quả phân tích dao động cầu Bãi Cháy trên phần mềm Midas Civil – mode dao động thứ 1 với tần số f=0.194Hz 140

Hình 5.11 Kết quả phân tích dao động cầu Bãi Cháy trên phần mềm Midas Civil – mode dao động thứ 2 với tần số f=0.205Hz 141

Hình 5.12 Đồ thị thể hiện sự đáp ứng tần số của hệ MTLD khi thay đổi tần số thiế kế chỉ đạo theo tần số kích động. 142

Hình 5.13 Đồ thị khảo sát hệ MTLD N=5 khi giá trị tần số thiế kế MTLD f=0.2Hz142

Hình 5.14 Sơ đồ hướng dẫn thiết kế hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD 144

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN 0
LỜI CẢM ƠN 1
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT 2
DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU 6
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ 7
MỤC LỤC 11
PHẦN MỞ ĐẦU 14
1. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài 15
2. Mục tiêu và tư tưởng chính của luận án 15
3. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu 16
CHƯƠNG 1 17
TỔNG QUAN VỀ CẦU DÂY VĂNG VÀ BÀI TOÁN ĐIỀU KHIỂN DAO ĐỘNG SỬ DỤNG THIẾT BỊ GIẢM CHẤN CHẤT LỎNG 17
1.1. Tổng quan về cầu dây văng và dao động của tháp cầu 17
1.2. Tác động gây dao động và bài toán điều khiển dao động 21
1.2.1. Tác động do hoạt tải 22
1.2.2. Tác động do động đất 23
1.2.3. Tác động do gió 24
1.3. Kiểm soát dao động cho kết cấu bằng thiết bị điều khiển dao động (thiết bị giảm chấn) 26
1.4. Tổng quan về hệ giảm chấn chất lỏng TLD 30
1.4.1. Thùng cứng chứa chất lỏng 32
1.4.2. Chất lỏng và ảnh hưởng của chuyển động chất lỏng trong thùng chứa chất lỏng TLD 34
1.5. Tình hình nghiên cứu và ứng dụng hệ giảm chấn dùng chất lỏng (TLD). 37
1.6. Phân tích, đánh giá các nghiên cứu và ứng dụng giảm chấn TLD 42
1.6.1. Tháp hàng không Nagasaki – Nhật Bản (NAT) 44
1.6.2. Tháp Yokohama Marine – Nhật Bản (YMT) 45
1.6.3. Khách sạn Shin - Yokohama Prince – Nhật Bản (SYPH) 45
1.6.4. Tháp sân bay quốc tế Tokyo (TIAT) 46
1.7. Những vấn đề còn tồn tại và hướng nghiên cứu chính của luận án 48
CHƯƠNG 2 52

CƠ SỞ LÝTHUYẾT TÍNH TOÁN GIẢM CHẤN CHẤT LỎNG VÀ HỆ TƯƠNG TÁC GIỮA KẾT CẤU VỚI GIẢM CHẤN CHẤT LỎNG (TLD) 52

2.1. Nguyên lý hoạt động cơ bản của giảm chấn chất lỏng (TLD) 52

2.2. Cơ sở lý thuyết phân tích chuyển động của chất lỏng trong thùng chứa để tạo hiệu quả giảm chấn..... 53

2.3. Mô hình tính toán hệ giảm chấn chất lỏng (TLD) và hệ tương tác giữa kết cấu và TLD. 56

2.4. Các tham số cơ bản và cơ chế tạo lực cản do chất lỏng chuyển động văng té trong giảm chấn chất lỏng (TLD)..... 59

2.5. Các phương pháp phân tích và giải bài toán làm việc chung giữa kết cấu và hệ giảm chấn chất lỏng TLD..... 66

2.5.1. Phương pháp truyền thống..... 67

Trong đó m, c, k lần lượt là khối lượng, tín hcản và độ cứng của kết cấu..... 67

2.5.2. Phương pháp năng lượng..... 67

2.6. Kết luận chương 2 73

CHƯƠNG 3 74

PHÂN TÍCH HIỆU QUẢ GIẢM DAO ĐỘNG CHO THÁP CẦU DÂY VĂNG KHI SỬ DỤNG HÀM ỨNG XỬ TẦN SỐ THIẾT LẬP CHO CÁC HỆ GIẢM CHẤN CHẤT LỎNG. 74

3.1 Giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD và các giả thiết cho xây dựng phương trình hàm ứng xử tần số..... 74

3.2 Xây dựng hàm ứng xử tần số cho hệ tương tác giữa kết cấu và giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD. 77

3.3 Phân tích, đánh giá hiệu quả của hệ MTLD so với STLD và kết cấu khi không có TLD thông qua hàm ứng xử tần số thiết lập..... 84

3.3.1 Các trường hợp đề xuất cho khảo sát ảnh hưởng của các tham số đến hiệu quả giảm chấn..... 85

3.3.2 Kết quả khảo sát ứng xử của kêt cấu khi gắn MTLD sử dụng phương trình hàm ứng xử tần số đã thiết lập 86

3.4 Kết luận chương 3 99

CHƯƠNG 4 100

THỰC HIỆN THÍ NGHIỆM MÔ HÌNH TRÊN BÀN RUNG NHẰM ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ GIẢM DAO ĐỘNG CỦA GIẢM CHẤN CHẤT LỎNG TLD 100

4.1. Tổng quan và mục đích thí nghiệm 100

4.2. Bàn rung và sự phù hợp của thiết bị cho thí nghiệm đối chứng..... 100

4.3. Lựa chọn mô hình thí nghiệm và mô hình kết cấu cho thí nghiệm..... 102

4.3.1. Mô hình thí nghiệm 102
4.3.2. Mô hình kết cấu cho thí nghiệm 103
4.4. Phân tích mô hình kết cấu cho thí nghiệm và các trường hợp thí nghiệm 105
4.4.1. Phân tích xác định tần số dao động riêng và các mode dao động của mô hình thí nghiệm sử dụng phần mềm phân tích kết cấu Midas Civil 105
4.4.2. Các trường hợp khảo sát thí nghiệm 107
4.5. Thực hiện thí nghiệm 110
4.6. Đánh giá kết quả đo đạc mô hình kết cấu thí nghiệm khi so sánh với phân tích sử dụng hàm ứng xử tần số thiết lập 114
Chi tiết kết quả thí nghiệm các trường hợp của mô hình kết cấu trên bàn rung: 115
4.7. Kết luận chương 4 125
CHƯƠNG 5 126
HỆ GIẢM CHẤN CHẤT LỎNG ÁP DỤNG CHO CÔNG TRÌNH CẦU BÃI CHÁY – VIỆT NAM 126
5.1. Tổng quan về cầu dây văng Bãi Cháy tại Việt Nam. 126
5.2. Gió và biện pháp giảm dao động do gió khi sử dụng thiết bị giảm chấn dùng chất lỏng TLD cho cầu dây văng Bãi Cháy – Việt Nam. 127
5.2.1. Gió và ảnh hưởng của gió đến sự làm việc của tháp cầu Bãi Cháy 127
5.2.2. Tổng quan về giảm chấn chất lỏng TLD hiện có tại cầu Bãi Cháy 128
5.3. Nghiên cứu tính toán kiểm chứng hiệu quả của giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) trên mô hình công trình cầu Bãi Cháy có xem xét ảnh hưởng của tần số dao động riêng của kết cấu tháp cầu. 134
5.2.3. Tính toán kiểm chứng, thiết kế giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) cho tháp cầu Bãi Cháy sử dụng tần số thiết kế chỉ đạo f_0 = 0.1886Hz lấy từ phân tích kết cấu trên phần mềm 134
5.2.4. Tính toán kiểm chứng, thiết kế MTLD cho tháp cầu Bãi Cháy sử dụng tần số thiết kế chỉ đạo f_0 = 0.2Hz. 140
5.4. Kết luận chương 5 143
KẾT LUẬN 145
KIẾN NGHỊ VỀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO 148
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU CỦA LUẬN ÁN 149
TÀI LIỆU THAM KHẢO 150

PHẦN MỞ ĐẦU

Ảnh hưởng của các tác động động lực học đối với các kết cấu nhạy cảm như các tòa nhà cao tầng, tháp hàng không, và cầu dây văng, dây võng luôn được quan tâm và xem xét trong các thiết kế. Thông qua nhiều nghiên cứu có thể dễ dàng nhận thấy rằng tác động động lực học gây dao động cho các kết cấu công trình làm tăng khả năng mất ổn định động lực do cộng hưởng, tăng nội lực và biến dạng trong các bộ phận kết cấu, đẩy nhanh tốc độ phá hoại do mỏi, gây hư hỏng và giảm tuổi thọ của các phương tiện, và đặc biệt là gây ra hiệu ứng tâm lý cho người sử dụng.

Đối với cầu dây văng, các tác động được kể đến này bao gồm: tác động thường xuyên do gió, tác động của hoạt tải và các tác động mang tính chất tức thời khác như động đất, va xô tàu bè hoặc ô tô vào trụ cầu.

Việc nghiên cứu ảnh hưởng động học chủ yếu được thực hiện đối với các kết cấu cầu dây văng và dây võng – các kết cấu đang được áp dụng rộng rãi bởi có tính thẩm mỹ cao và khả năng vượt nhịp lớn. Các kết cấu này khá thanh mảnh nên nhạy cảm với các tác động động, gây ra các vấn đề liên quan đến tính ổn định khí động học hoặc trạng thái mỏi do dao động như là: tác động của hoạt tải, tác động của gió và tác động của động đất… Mỗi loại tác động này mang những nét đặc trưng riêng khi tác động vào kết cấu.

Để giải quyết bài toán ổn định, giảm dao động bất lợi cho kết cấu, việc thiết kế kháng chấn đã trở thành yêu cầu bắt buộc trong quá trình thiết kế và xây dựng. Trong các giải pháp kháng chấn, giải pháp sử dụng thiết bị giảm chấn kiểu bị động nói chung và bộ giảm chấn dùng chất lỏng (TLD) nói riêng rất có hiệu quả bởi các lý do như khả năng hấp thụ cũng như tiêu tán năng lượng dao động cao ngay cả với các kích động nhỏ; dễ chế tạo và lắp đặt; giá thành thấp nên khá phù hợp trong điều kiện nước ta.

Trên thế giới việc áp dụng giảm chấn chất lỏng (TLD) để giảm dao động cho các công trình xây dựng nói chung và cho cầu dây văng nói riêng đã nhận được sự quan tâm của nhiều nhà khoa học. Ở Việt Nam, năm 2006, lần đầu tiên hệ giảm chấn chất lỏng được áp dụng để giảm dao động do gió cho tháp cầu dây văng Bãi Cháy. Hàng loạt các câu hỏi đặt ra về việc áp dụng hệ giảm chấn này và kèm theo là các nghiên cứu muốn tìm ra câu trả lời để các kỹ sữ Việt Nam có thể tính toán, thiết kế và áp dụng cho các công trình khác. Tại cầu Bãi cháy không chỉ có 1 thùng chất lỏng mà rất nhiều thùng nhỏ và lại được bố trí ở nhiều vị trí dọc theo chiều cao tháp. Tại các vị trí khác nhau số lượng các thùng lại khác nhau. Vậy hiệu quả của hệ giảm chấn dùng chất lỏng này thế nào và ảnh

hưởng của số lượng, cách bố trí các thùng đến hiệu quả giảm dao động thế nào là những câu hỏi cần được làm sáng tỏ.

Đề tài tập trung vào nghiên cứu TLD bao gồm: nghiên cứu tổng quan về cấu tạo, nguyên lý làm việc và nguyên lý chung tính toán hệ TLD khi được lắp đặt vào kết cấu. Nghiên cứu mô hình tính toán thiết kế TLD để nhằm khảo sát được sự ảnh hưởng của các tham số TLD đến hiệu quả giảm dao động của TLD cho các kết cấu dạng cột, từ đó thúc đẩy việc ứng dụng cho thiết kế kháng chấn cho tháp cầu dây văng. Luận án chỉ ra có 2 loại hệ TLD cơ bản là: Loại chỉ bao gồm 1 hoặc nhiều thùng chứa chất lỏng có cùng tần số dao động riêng – gọi là loại giảm chấn chất lỏng đơn tần số (viết tắt là STLD) và loại gồm nhiều thùng chứa chất lỏng với các thùng có tần số dao động riêng khác nhau trong một dải tần số tính toán nào đó – gọi là loại giảm chấn chất lỏng đa tần số (viết tắt là *MTLD*).Nghiên cứu về hệ STLD khá đầy đủ với nhiều nghiên cứu của các nhà khoa học trên thế giới, trong khi nghiên cứu về hệ MTLD còn sơ sài và chủ yếu là các nghiên cứu thực nghiệm, bán thực nghiệm. Để làm rõ hơn về khả năng áp dụng hệ MTLD thông qua việc phân tích tính toán mô hình làm việc chung giữa kết cấu và MTLD, là đối tượng nghiên cứu chính của luận án.

1. *Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài*

Giảm dao động có hại cho các kết cấu, tăng hiệu quả hoạt động của kết cấu là xu hướng luôn được quan tâm trong một xã hội phát triển. Việc nghiên cứu áp dụng hệ thiết bị giảm dao động - hệ giảm chấn – lắp đặt vào kết cấu nói chung và hệ giảm chấn chất lỏng nói riêng làm giảm dao động cho kết cấu là vấn đề được nhiều nhà khoa học quan tâm. Để theo kịp với trình độ phát triển khoa học công nghệ, làm sáng tỏ một hệ thiết bị mới và khả năng áp dụng tại Việt Nam – hệ giảm chấn chất lỏng TLD, tạo tài liệu tốt cho các nhà nghiên cứu, các kỹ sư trong việc thiết kế hệ TLD cho các kết cấu khác nhằm giảm dao động cho kết cấu dưới tác động động, việc nghiên cứu đề tài này sẽ là rất cần thiết. Đề tài đề cập tới các vấn đề nghiên cứu về lý thuyết các hệ giảm chấn dùng chất lỏng (viết tắt là TLD) nói chung và ứng dụng hệ giảm chấn này cho cầu dây văng là phù hợp với điều kiện tự nhiên cũng như kinh tế xã hội ở Việt Nam và thông qua đó mở ra khả năng có thể tính toán thiết kế và áp dụng hệ giảm chấn chất lỏng TLD cho các dạng kết cấu công trình khác nhau tại Việt Nam.

2. *Mục tiêu và tư tưởng chính của luận án*

Nghiên cứu chi tiết về hệ giảm chấn chất lỏng bao gồm: cấu tạo, đặc tính làm việc và các thông số có liên quan tới hiệu quả giảm dao động cho tháp cầu dây văng đặc biệt là cầu dây văng một mặt phẳng dây. Xây dựng hàm ứng xử tần số để đánh giá khả năng giảm dao động cho kết cấu khi có lắp đặt giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD). Khảo sát các trường hợp về ảnh hưởng của các tham số đến hiệu quả này. Xây dựng một thí nghiệm trên mô hình đặt trên bàn rung được tiến hành nhằm xây dựng cơ sở dữ liệu đối chứng với kết quả khảo sát lý thuyết trên hàm toán học đã xây dựng. Cuối cùng phân tích tính toán mô hình giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) trong trường hợp nếu sử dụng cho tháp cầu Bãi Cháy tại Việt Nam. Tính toán thiết kế này được so sánh với tính toán thiết kế theo mô hình hiện tại (hệ giảm chấn chất lỏng đơn tần số) đã lắp đặt tại đây.

Chi tiết các nội dung nghiên cứu trong luận án như sau:

- Nghiên cứu lý thuyết về hệ thống giảm chấn chất lỏng TLD. Các đặc tính của hệ đơn giảm chấn STLD và hệ đa giảm chấn MTLD và cơ chế tạo lực cản làm giảm dao động của kết cấu. Tính khả thi của việc áp dụng TLD cho thiết kế giảm chấn cho tháp cầu dây văng.
- Nghiên cứu thiết lập hàm ứng xử tần số phản ánh ứng xử của kết cấu theo tỷ lệ tần số kích động với tần số kết cấu trong các trường hợp kết cấu lắp đặt hệ STLD và MTLD.
- So sánh hiệu quả của hệ SLTD và hệ MTLD trong việc giảm dao động cho kết cấu.
- Xây dựng và tiến hành thí nghiệm trên mô hình thực nghiệm để đối chiếu với kết quả nghiên cứu lý thuyết.
- Khảo sát về một số tham số hợp lý cho hệ MTLD nhằm tăng hiệu quả giảm dao động cho hệ.
- Áp dụng các nghiên cứu về hệ MTLD tính toán kiểm chứng cho sơ đồ công trình cầu Bãi cháy. So sánh hiệu quả của hệ thiết kế mới (giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD) với hệ giảm chấn hiện có (giảm chấn chất lỏng đơn tần số STLD) tại công trình.

3. *Đối tượng, phạm vi nghiên cứu*

Phương pháp nghiên cứu là sự kết hợp giữa lý thuyết và thực nghiệm, phân tích lý thuyết và đối chiếu kết quả với thực tế. Phân tích lý thuyết chủ yếu dựa trên lý thuyết động học kết cấu. Các phân tích nhằm mục đích thiết kế hệ thống giảm chấn dùng chất lỏng (TLD). Kết quả nghiên cứu nhằm đánh giá giá trị của mô hình MTLD trong tiến trình phân tích lý thuyết và có đối chứng thông qua thí nghiệm mô hình trên bàn rung. Việc phân tích lý thuyết mô hình giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD được tính toán áp dụng cho công trình cầu Bãi Cháy.

CHƯƠNG 1

TỔNG QUAN VỀ CẦU DÂY VĂNG VÀ BÀI TOÁN ĐIỀU KHIỂN DAO ĐỘNG SỬ DỤNG THIẾT BỊ GIẢM CHẤN CHẤT LỎNG

1.1. Tổng quan về cầu dây văng và dao động của tháp cầu

Cầu dây văng ngày nay được áp dụng rộng rãi trên thế giới và tại Việt Nam bởi tính thẩm mỹ và khả năng vượt được khẩu độ lớn. Kết cấu cầu gồm các dầm cứng bằng BTCT DƯL, bằng thép liên hợp bê tông hay giàn thép. Một số công trình cầu dây văng điển hình tại Việt Nam như: Cầu Mỹ Thuận, Cầu Kiền, Cầu Bính, Cầu Bãi Cháy, Cầu Rạch Miễu, cầu Phú Mỹ, Cầu Cần Thơ, cầu Trần Thị Lý và Cầu Nhật Tân sắp khánh thành vào cuối năm 2014 này.

Hình 1.1: Một số cầu dây văng tại Việt Nam: Trần Thị Lý – Đà Nẵng, Cầu Cần Thơ – Cần Thơ, Cầu Bãi Cháy – Quảng Ninh và Cầu Nhật Tân – HàNội.

Cầu dây văng là một hệ làm việc phức tạp bao gồm sự tác động chịu lực qua lại của các bộ phận mà chủ yếu là: tháp cầu, dây văng và dầm. Với kết cấu hệ dây, tương ứng với chiều dài vượt nhịp lớn thì tháp cầu dây văng khá cao, chiều cao thông thường được lựa chọn trong khoảng từ (1/3 đến 1/7) chiều dài nhịp chính (L_{max}) nên vấn đề dao động đặc biệt được quan tâm hơn nữa vì kết cấu này rất nhạy cảm với các tác động động lực học

như hoạt tải xe, gió và động đất. Cả 3 tác động động lực học như gió, động đất và tác động của hoạt tải đều là vấn đề đáng quan tâm nghiên cứu của nhiều nhà khoa học. Mỗi tác động mang một tính chất khác nhau: tác động tức thời hay thường xuyên. Chính do tính chất này mà mỗi nghiên cứu sẽ cần tập trung giải quyết các vấn đề khác nhau trong việc giảm dao động cho kết cấu nói chung. Những kết quả thu được từ kết quả phân tích dao động giúp người kĩ sư có thể đánh giá được một phần nào đó sự làm việc của công trình cầu và tránh các rủi ro do tác động này gây ra.

Tháp cầu, chiều dài nhịp, hệ dây văng có mối quan hệ cấu tạo và chịu lực chặt chẽ với nhau. Dưới tác động của gió ngang, Tháp cầu còn chịu tác động của các bộ phận khác như hệ cáp văng, hệ dầm, và gây ra sự làm việc bất lợi đặc biệt. Tháp cầu còn có thể có những ảnh hưởng đáng kể đến kết cấu không chỉ khi vận tốc gió lớn mà thậm chí là ở vận tốc gió tương đối nhỏ [17].

Trong cầu dây văng Tháp đóng một vai trò rất quan trọng trong sự làm việc của cầu, với chiều cao tháp cầu khá lớn, kết cấu thanh mảnh và dưới tác động theo phương ngang ảnh hưởng lớn đến sự làm việc của kết cấu tháp nói riêng cũng như kết cấu cầu dây văng nói chung. Hơn nữa do ảnh hưởng của hệ dây, các dây văng được neo vào tháp, dầm tạo thành các tam giác chịu lực cơ bản và hình thành nên các gối đàn hồi trung gian. Nhờ các gối đàn hồi này mà nội lực, độ võng do tĩnh tải và hoạt tải được giảm đi rất nhiều.

Tháp của cầu dây văng còn được coi là tham gia chịu lực như một gối ảo của dầm cầu khi kết hợp với dây neo giúp dầm có độ cứng nhất định. Do vậy mà sự biến dạng của tháp cầu sẽ ảnh hưởng lớn đến sự làm việc của toàn bộ kết cấu [64].

Việc bố trí sơ đồ mặt phẳng dây cũng ảnh hưởng khá nhiều đến đặc tính truyền lực trong kết cấu cầu dây văng cũng như hình dạng của tháp cầu. Số lượng mặt phẳng dàn dây được bố trí trên mặt cắt ngang cầu, hình thức liên kết các dây văng vào trụ tháp sẽ tạo nên hình dáng kiến trúc cơ bản của tháp cầu. Các kết quả nghiên cứu đã cho thấy việc bố trí dàn dây xiên có lợi hơn về đảm bảo ổn định chống dao động ngang nhưng có nhược điểm tháp cầu thường cao hơn, ngoài ra chiều dài dây cũng lớn hơn và ảnh hưởng đến độ cứng của gối đàn hồi ở điểm neo dây.

Các cáp văng được neo một đầu vào tháp một đầu vào dầm nên khi các cáp văng dao động chẳng hạn dưới tác động của hoạt tải thì sẽ hình thành lực kéo làm cho đỉnh tháp có khả năng chuyển dịch theo phương dọc đặc biệt đối với các tháp dạng cột của cầu dây

văng có một mặt phẳng dây. Gió tác động trên đỉnh cột tháp kết hợp với các thành phần lực ngang do gió trên mặt phẳng giàn dây tạo nên hợp lực ngang tại đỉnh tháp và gây ra mô men lớn tại chân tháp. Độ cứng theo phương ngang của tháp thường nhỏ hơn phương dọc do ảnh hưởng của các dây văng neo vào tháp nên càng dễ gây nên sự mất ổn định.

Hơn nữa, càng lên cao tốc độ gió càng lớn [18], và gây ra chuyển vị lớn làm cho tháp tiến nhanh đến trạng thái mỏi hơn. Dao động chủ yếu của tháp là ở dạng dao động có qui tắc, dao động giật hoặc rung lắc ngẫu nhiên. Dưới tác dụng động lực học của gió thì chủ yếu là thông qua dao động dây và kết hợp với các xoáy khí hình thành sau lưng các mặt cắt ngang tháp mà tạo nên các dao động.

Dạng mặt cắt ngang của tháp do vậy mà cần được lựa chọn sao cho không là tác nhân tăng dao động dưới tác dụng của gió. Dạng mặt cắt tháp chủ yếu được biết đến có cấu tạo hình chữ nhật hoặc hình lục giác có kết hợp tạo vút hoặc vo tròn tại các góc theo phương ngang để gió thổi được êm thuận.

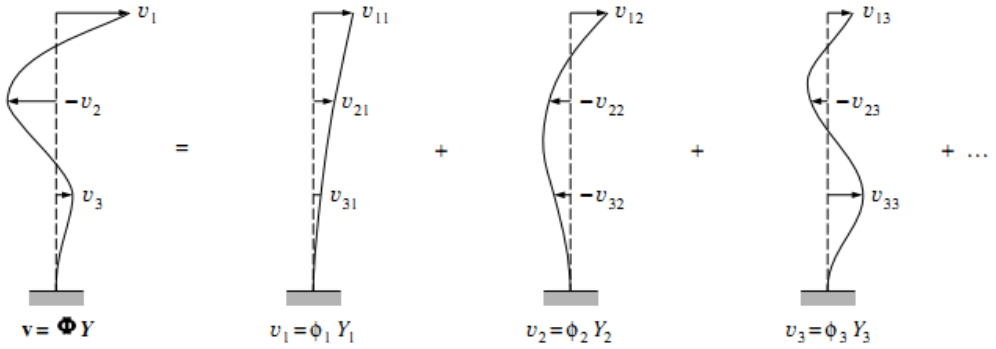
Để tránh trụ tháp bị uốn ngang cần tạo các liên kết của dây vào tháp như là gối di động ở một số điểm khác nhau trên tháp cầu. Cách thức liên kết của dây văng ngoài cùng (dây văng dài nhất) có ảnh hưởng lớn đến sự làm việc của tháp cầu và toàn bộ cầu. Cầu có dây neo vào mố sẽ giảm được các chuyển vị ngang của đỉnh trụ tháp nhờ đó mà giảm được trị số độ võng và mômen trong dầm cứng. Trong khi nếu không neo dây vào mố hay vào trụ bờ thì do biến dạng của dầm cứng khiến cho chuyển vị ngang của đầu trụ tháp lớn. Nhược điểm này có thể khắc phục bằng cách xây dựng các trụ tháp cứng, tuy nhiên sẽ đòi hỏi tốn kém về vật liệu và thời gian để xây dựng trụ tháp.

Theo Ray W. Clough [74], khi phân tích bài toán động học kết cấu, chẳng hạn phân tích dao động của tháp cầu, có rất nhiều dạng dao động (mode sharp). Xét hệ tuyến tính N bậc tự do nào đó, vị trí chuyển dịch được định nghĩa bởi N thành phần theo vecto v (hình 1.2).

Khi xét tháp không có sự liên kết với dầm và dây văng, tháp được xem như một cột ngàm mà biến dạng được thể hiện theo các thành phần của chuyển dịch. Và ứng với mỗi dạng dao động (mode shape) sẽ thể hiện chuyển dịch của kết cấu theo hướng nào đó đang xem xét. Do vậy mà khi xem xét kết cấu dao động theo phương nào thì ảnh hưởng của các tác động theo phương khác đến chuyển dịch theo phương xem xét là nhỏ và có thể bỏ qua [74].

Cụ thể, trong cầu dây văng, khi xét dao động của tháp theo phương ngang cầu chịu tác động của gió ngang, thì ảnh hưởng của yếu tố tháp khi có và không liên kết với dầm và

dây trong xem xét là không lớn và có thể được bỏ qua. Vì lý do này mà khi xem xét dao động của tháp cầu thì thường xét trường hợp làm việc bất lợi hơn là khi tháp cầu không có các liên kết với cáp văng và dầm. Lúc này tháp được sơ đồ như một cột một đầu ngàm, một đầu tự do.



Hình 1.2: Các mode dao động điển hình của tháp khi thừa nhận sơ đồ tính toán tháp một đầu ngàm một đầu tự do.

Thực tế khi tính toán cho một số tháp cầu cho thấy trường hợp mode dao động theo phương ngang khi có và không xem xét đến sự sự làm việc chung giữa tháp và cáp văng và dầm thì tần sô dao động riêng của tháp tại mode này không đổi. Theo phương dọc cầu tần số này tăng lên. Điều này có nghĩa là độ cứng của tháp theo phương dọc cầu có phần tăng lên khi có thêm các liên kết này.

Do vậy có thể thấy rằng, độ cứng của tháp cầu có ảnh hưởng rất lớn đến cấu tạo, cách bố trí cũng như khả năng chịu lực của toàn hệ thống. Độ cứng theo phương ngang của tháp cầu dây văng lại đóng vai trò quan trọng trong thiết kế đặc biệt là thiết kế kết cấu chịu tác động của các lực ngang như gió. Các mặt phẳng giàn dây hình thành nên một bề mặt chắn gió trong kết cấu, đối với kết cấu cầu 2 mặt phẳng dây thì do độ cứng theo phương ngang của tháp tương đối lớn, hai mặt phẳng giàn dây cùng chịu các tác động nên khả năng giữ ổn định, chịu tác động theo phương ngang là tương đối tốt [106].

Đối với cầu dây văng một mặt phẳng dây, mặt phẳng này chỉ có 2 liên kết vào tháp và dầm, tháp thường có dạng một cột thẳng đứng nằm giữa cầu. Theo phương dọc cầu tháp cầu có hệ cáp văng để tăng cường độ cứng còn theo phương ngang cầu không được tăng cường cho nên sự làm việc theo phương ngang cầu rất bất lợi đặc biệt khi chịu tác động của các lực ngang như gió. Theo phương ngang tháp bị nén uốn như một thanh một đầu ngàm, một đầu tự do nên yêu cầu kích thước tương đối lớn. Kích thước chân tháp lớn, nằm giữa cầu nên chiếm dụng diện tích phần xe chạy, tăng độ lệch tâm của hoạt tải, gây

bất lợi cho dầm chủ chịu xoắn. Và do vậy tháp cầu khi không có sự kết hợp của dầm dây là bất lợi nhất và việc nghiên cứu dao động của tháp cầu dây văng một mặt phẳng dây là hết sức cần thiết và có ý nghĩa.

1.2. Tác động gây dao động và bài toán điều khiển dao động

Dao động của hệ kết cấu có thể có ích cho sự làm việc của chúng cũng có thể gây nguy hại cho chính bản thân kết cấu. Việc thiết kế hoàn hảo một kết cấu làm việc có hiệu quả tốt hiện nay phải bao gồm cả việc xét đến các tác động động nhạy cảm như gió, động đất và hoạt tải. Do vậy mà điều khiển dao động có hại cho các hạng mục kết cấu nhằm nâng cao hiệu quả làm việc của hệ trước các tác động này là yêu cầu không thể thiếu. Bài toán điều khiển dao động được gọi là đạt hiệu quả khi chủ yếu có thể kiểm soát được biên độ dao động hoặc giảm thời gian tắt dao động (làm cho dao động tắt nhanh) [6], [60]:

- Giảm mức độ nhạy cảm với dao động
- Giảm mức độ nhạy cảm với tác động đầu ra
- Có khả năng điều khiển hệ thống băng thông rộng .
- Ổn định cho hệ không ổn định
- Điều khiển hệ thống ứng xử lan truyền

Do vậy, để có thể điều khiển được các dao động của kết cấu, việc làm rõ được các dạng dao động của kết cấu và xác định các loại tác động động đối với kết cấu là hết sức cần thiết. Ở trạng thái dao động, trong các bộ phận của kết cấu phát sinh hiệu ứng quán tính dẫn tới việc gia tăng trị số nội lực và biến dạng, gây khó khăn cho việc khai thác bình thường, thậm chí trong những điều kiện cụ thể hiệu ứng quán tính là nguyên nhân dẫn đến các sự cố công trình [23], [24], [27].

Một hiện tượng cần được đặc biệt quan tâm trong bài toán điều khiển dao động là hiện tượng cộng hưởng. Nhiều nghiên cứu cho thấy hiệu ứng động lực trong kết cấu sẽ tăng lên rất nhanh khi tần số kích động ở trong khoảng xấp xỉ hoặc là bội số của tần số dao động riêng của kết cấu.

Các tác dụng động lực thay đổi theo thời gian làm phát sinh hiện tượng dao động của công trình. Tác động động lực ảnh hưởng lớn đến dao động của các bộ phận kết cấu mà đáng quan tâm chủ yếu gồm: hoạt tải, động đất và gió. Do đặc tính của mỗi tác động là khác nhau mà sẽ gây ra các dạng dao động khác nhau cho kết cấu, thậm trí cùng một tác động ảnh hưởng đến các bộ phận khác nhau lại khác nhau vì vậy cần có sự nghiên cứu

điều khiển dao động cho phù hợp. Đặc biệt đối tượng nghiên cứu chính của luận án là cầu dây văng, một công trình có sự tham gia cùng chịu lực của nhiều bộ phận kết cấu thì ảnh hưởng của tác động động lực càng trở nên đáng quan tâm và bài toán điều khiển dao động càng trở nên phức tạp. Tuy nhiên việc áp dụng các công cụ tính toán hiện đại cho phép đưa các bài toán phức tạp này về bài toán cơ bản chịu tác động kích động của một hàm điều hòa để có thể khảo sát được đầy đủ ứng xử của kết cấu. Một trong những công cụ đó chính là phép biến đổi Fourier và biến đổi Laplace. Do vậy, luận án tập trung nghiên cứu xem xét khả năng áp dụng hệ thiết bị điều khiển dao động, ứng xử của kết cấu dưới tác động dạng hàm điều hòa cho phù hợp với tác động ngẫu nhiên do gió, động đất và tác động tức thời do hoạt tải. Lý do của việc xem xét này được giải thích cụ thể trong các mục 1.2.1, 1.2.2 và 1.2.3 của luận án.

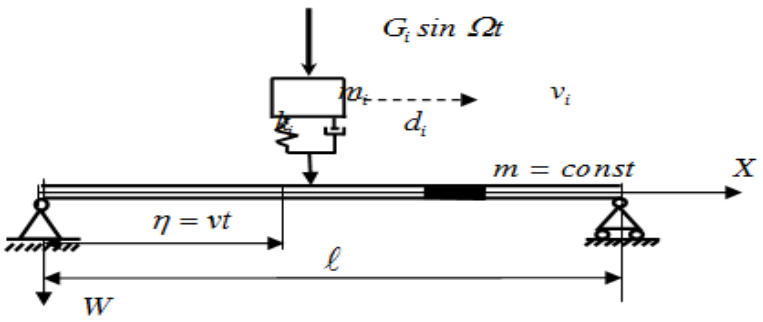
1.2.1. Tác động do hoạt tải

Đặc tính của hoạt tải tác động lên kết cấu công trình là mang tính tức thời. Hoạt tải tác động lên kết cấu công trình gây ra dao động cho kết cấu với các ảnh hưởng khác nhau tùy thuộc vào hoạt động giao thông trên cầu, tổ chức giao thông và phương tiện lưu hành. Bài toán xét đến tác động động lực của hoạt tải bao gồm việc có hay không xét đến trọng lượng của hoạt tải, tốc độ và vị trí di chuyển trên kết cấu.

Các bộ phận kết cấu cầu chịu tải trọng động do hoạt tải dưới các dạng khác nhau, ví dụ: truyền tải trực tiếp hay gián tiếp, thời gian tải trọng tác động là bao lâu, vv… Các hiệu ứng động cần được tính đến trong khi thiết kế cầu và đóng một vai trò quan trọng trong toàn bộ vòng đời của các bộ phận kết cấu của công trình.

Các mô hình tính toán tác động của hoạt tải ngày càng phát triển với xu hướng mô phỏng càng sát thực tế sự tác động của hoạt tải trên cầu và sự làm việc của kết cấu cầu bao nhiêu càng tốt, tuy nhiên đồng nghĩa với điều này là sự đòi hỏi có các công cụ tính toán với khối lượng lớn. Từ những năm 1970, mô hình xét đến khối lượng của hoạt tải và giả thiết tải trọng di chuyển dưới dạng hàm điều hòa cũng đã được đề cập bởi A.P. Philipov và A.G. Barchenkov (hình 1.3).

Mô hình trên hình 1.3 chỉ ra rằng hoạt tải di động tác động trên dầm có dạng hàm $P(t) = G\sin\Omega t$ là một hàm điều hòa. Như vậy bài toán phân tích ứng xử của kết cấu chịu tác động động lực học của hoạt tải trở thành bài toán xây dựng hàm ứng xử tần số của hệ kết cấu chịu tác động của hàm điều hòa.



Hình 1.3: Mô hình tác động của hoạt tải trên dầm có xét đến khối lượng của tải trọng di chuyển trên dầm [29].

1.2.2. Tác động do động đất

Động đất là hiện tượng xảy ra bất thường với xác xuất tùy thuộc vào các khu vực vùng địa chấn khác nhau. Quốc gia hứng chịu nhiều trận động đất nhất trên thế giới là Nhật Bản, còn tại Việt Nam, tuy các trận động đất xảy ra với số lượng không nhiều và độ mạnh ghi nhận không lớn như Nhật Bản nhưng việc thiết kế có xét đến ảnh hưởng của động đất là yêu cầu bắt buộc đã được qui định trong qui trình thiết kế các công trình xây dựng nói chung và công trình cầu nói riêng. Do vậy mà vấn đề nghiên cứu điều khiển dao động cho kết cấu chịu tác động của đất đất cũng hết sức cần thiết.

Động đất là tác động mang tính chất ngẫu nhiên gây mất ổn định mạnh cho kết cấu. Cách thông thường nhất để mô tả động đất là sự thể hiện chuyển động của mặt đất theo thời gian mà đặc trưng bởi 3 tham số: gia tốc, vận tốc hoặc chuyển dịch, hoặc cả 3 yếu tố tổ hợp lại. Khi xảy ra động đất, tác động của động đất lên kết cấu công trình thể hiện bởi sự tác động liên tiếp của các loại sóng dao động khác nhau. Lực do động đất có hướng bất kỳ trong không gian và thay đổi theo thời gian cả về hướng, tốc độ tác dụng và trị số. Các tác dụng động đất theo hướng ngang thường gây ra các dao động ngang nguy hiểm, làm cho công trình bị mất ổn định mạnh như lật đổ hay dịch trượt [3], [91].

Chuyển động theo thời gian của mặt đất ghi lại trong các trận động đất được sử dụng trực tiếp cho phân tích ứng xử theo thời gian của kết cấu. Các phương pháp phân tích ứng xử của kết cấu chịu tác động của động đất bao gồm: phân tích ứng xử theo thời gian, phân tích phổ ứng xử, và phân tích ứng xử theo tần số. Phân tích ứng xử theo thời gian được thực hiện để thiết lập ứng xử của kết cấu cho một phản ứng theo thời gian cụ thể của kích động khi sử dụng kỹ thuật vi phân như là tích phân Duhamel, tích phân số từng bước theo thời gian và biến đổi Fourier [5][65]. Phương pháp phân tích phổ ứng xử sử dụng dữ liệu

từ các trận động đất ghi nhận được và thiết lập một bộ của các lực tác động (lực ngang tương đương) vào kết cấu mà gây ảnh hưởng lớn nhất tới chuyển động của mặt đất. Phương pháp phân tích ứng xử theo tần số được thực hiện khi chuyển dịch của mặt đất được mô hình như một quá trình ngẫu nhiên ổn định. Sử dụng nguyên lý phân tích dao động ngẫu nhiên để đưa ra hàm mật độ phổ năng lượng cho phân tích bất kỳ tác động gây chuyển dịch mặt đất nào [49].

Các phương pháp này đều chỉ ra rằng khối lượng kết cấu, gia tốc động đất ảnh hưởng lớn đến ứng xử của kết cấu chịu tác động của động đất và thể hiện theo phương trình P(t) = m. a_g^2. Điều này có nghĩa là khối lượng kết cấu và gia tốc động đất càng lớn càng gây bất lợi cho kết cấu.

Cũng giống như bất kỳ kết cấu nào, tỷ số giữa tần số dao động riêng của kết cấu và tần số kích động là yếu tố quan trọng cần biết trong nghiên cứu về động đất. Theo phân tích miền tần số thì cách tiện lợi và dễ sử dụng nhất là dùng biến đổi Fourier từ hàm thời gian của chuyển động mặt đất. Và do vậy có thể thừa nhận rằng chuyển động của mặt đất theo thời gian lặp đi lặp lại với chu kỳ bằng với khoảng thời gian của chuyển động mặt đất và bằng tổng của số lượng hữu hạn các hàm điều hòa [91].

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n cos\, w_n t + b_n sin\, w_n t) \qquad (1.1)$$

Trong đó x(t) là chuyển động của mặt đất theo thời gian (chuyển dịch, vận tốc, gia tốc).

Và w_n: tần số góc thứ n

Do vậy, bài toán điều khiển dao động cho kết cấu dưới tác động của động đất cũng có thể xét từ bài toán cơ bản khi phân tích ứng xử của kết cấu chịu tác động kích động của một hàm điều hòa.

1.2.3. Tác động do gió

Nếu tác động của hoạt tải mang tính tức thời, động đất mang tính ngẫu nhiên thì tác động của gió lại mang tính thường xuyên.

Gió là hiện tượng diễn ra trong tự nhiên. Đặc trưng của dòng gió chủ yếu phụ thuộc vào địa hình gió đi qua, bề mặt chắn gió, vận tốc, gia tốc gió và các đặc tính của gió. Đặc tính biến động quan trọng của tốc độ gió là sự biến đổi của tốc độ gió theo chiều cao và theo mức độ gồ ghề của địa hình. Sự tăng tốc độ gió theo chiều cao là yếu tố đáng quan tâm đặc biệt đối với các kết cấu dạng tháp như tháp của kết cấu cầu dây [18].

Khi gió thổi qua các bộ phận kết cấu, tùy theo đặc điểm hình dạng mặt cắt của bộ phận kết cấu mà dạng xoáy khí hình thành khác nhau và tại giá trị vận tốc gió nào đó mà gây ra dao động và có thể gây phá hoại kết cấu công trình. Các nghiên cứu chỉ ra rằng dao động xoáy chỉ xuất hiện trong phạm vi tốc độ gió bị hạn chế tương đối thấp, dao động tiến triển nhanh và dao động tròng trành chỉ xuất hiện khi vượt quá tốc độ gió nào đó. Đối với ảnh hưởng của góc tác dụng, khi góc tác dụng càng lớn thì dao động xoáy hay dao động phát tán càng dễ xuất hiện [17]. Ảnh hưởng của cường độ hỗn loạn tuỳ thuộc vào hình dạng mặt cắt kết cấu mà khác nhau nhưng có các xu hướng sau đây được công nhận đối với nhiều kết cấu. Có nghĩa là khi cường độ hỗn loạn tăng lên thì:

- Biên độ dao động của phản ứng dao động giật tăng lên
- Biên độ dao động xuất hiện của dao động xoáy giảm đi
- Tốc độ gió xuất hiện của dao động phát tán tăng lên

Đối với các yếu tố liên quan đến đặc trưng khí động lực học thì hình dạng mặt cắt kết cấu rất quan trọng. Nguyên nhân của các dao động của kết cấu chịu tác động của gió là do khi gió tác dụng lên kết cấu xuất hiện lực cản do áp suất. Khi vận tốc dòng thổi tăng lên thì tại một thời điểm nào đó, sự chảy quay vật thay đổi đột ngột, đằng sau vật xuất hiện các xoáy được tách ra khỏi vật và bị dòng cuốn ra xa, tạo thành các rãnh xoáy và tan đi ở một nơi nào đó cách xa vật, chảy vòng quanh vật và rãnh xoáy là dòng chảy thành lớp. Với các vật có hình dạng đối xứng đằng sau vật thường hình thành hai xoáy có mômen xung lượng bằng nhau về môđun nhưng ngược chiều (theo định luật bảo toàn mômen xung lượng đối với hệ kín là vật – chất lưu).

Chuyển động này có đặc điểm là không quy luật và luôn thay đổi theo thời gian cũng như theo không gian. Trong tính toán công trình thường dùng giá trị trung bình danh định của tốc độ gió. Phương trình gió tác động lên kêt cấu được đề cập trong nhiều nghiên cứu với các tính toán chi tiết theo từng loại dao động do gió như dao động xoáy (vortex sheding), dao động tiến triển nhanh (galoping), dao động giật (gust). Tuy nhiên tác động do gió đều gồm hai phần là tác động gió điều hòa và tác động gió ngẫu nhiên. Một số nghiên cứu cơ bản đều thừa nhận gió là hàm điều hòa [96,97], một số khác đã chi tiết hóa khi xem xét tác động ngẫu nhiên do gió[2],[64].

Việc nghiên cứu ảnh hưởng của gió tác động lên kết cấu cầu chủ yếu được thực hiện đối với các kết cấu cầu dây văng và dây võng bởi đặc tính thanh mảnh và nhạy cảm với các

tác động động này. Thí nghiệm hầm gió là thí nghiệm phổ biến được thực hiện nhằm nghiên cứu ứng xử đặc trưng của kết cấu và xác định dao động do áp lực gió tác động trên bề mặt công trình. Các dữ liệu thu được từ thí nghiệm hầm gió được sử dụng trong các mô phỏng số phục vụ tính toán thiết kế công trình. Từ hệ số áp lực gió $C_f(t)$ xác định được, lực gió dọc và gió ngang tác động lên mô hình kết cấu có thể được tính toán theo Wakahara (1993) [95], [98], [100]:

$$F_{dọc}(t) = \sum_{i=1}^{n} P_i(t)\cos(\theta_i) = \frac{1}{2}\rho_a V_{ave}^2 \sum_{i=1}^{n} A_i\ C_{fi}(t)\cos(\theta_i) \tag{1.2}$$

$$F_{ng}(t) = -\sum_{i=1}^{n} P_i(t)\sin(\theta_i) = -\frac{1}{2}\rho_a V_{ave}^2 \sum_{i=1}^{n} A_i\ C_{fi}(t)\sin(\theta_i) \tag{1.3}$$

Trong đó: ρ_a là mật độ không khí, A_i là diện tích chịu tác động gió; V_{ave} là vận tốc gió trung bình tại đỉnh của kết cấu trong điều kiện thiết kế; θ_i là góc giữa hướng tác động gió và hướng đi ra và n là số áp lực tác động trên mỗi lớp của mô hình tính toán.

Phương trình trên chỉ ra rằng tác động của gió cũng có thể coi là tổng của các tác động điều hòa dạng hàm sin, cos và như vậy bài toán tương phân tích ứng xử của kết cấu dưới tác động do gió cũng chính là bài toán xây dựng hàm ứng xử tần số của hệ kết cấu chịu tác động điều hòa.

Như vậy, ứng xử của kết cấu chịu tác động của hàm điều hòa là bài toán cơ bản để có thể phân tích kiểm soát dao động của kết cấu chịu các tác động động lực học nói chung.

1.3. Kiểm soát dao động cho kết cấu bằng thiết bị điều khiển dao động (thiết bị giảm chấn)

Trong điều khiển dao động cho kết cấu xây dựng công trình, có hai xu hướng thường được áp dụng; hướng thứ nhất là điều khiển ứng xử kết cấu thông qua việc cải tiến đặc tính hình học của chính các bộ phận kết cấu như sử dụng cấu kiện có đủ cường độ, tăng độ cứng của cấu kiện, tăng tính đàn hồi, và do vậy mà tăng khả năng chịu tác động nhạy cảm như gió và động đất. Hướng này được thực hiện cụ thể bằng việc tổ hợp các thành phần kết cấu như thêm các tường chịu cắt, thêm các tấm giằng chống, tấm kháng mô men, dầm ngang, giàn ngang để tăng cường chịu tải trọng ngang cho hệ thống kết cấu. Cách tiếp cận này cũng có thể là xem xét đến hình dạng của kết cấu như thay đổi từ hình vuông, hình chữ nhật sang dạng các hình khác như L, U hoặc T. Việc chọn vật liệu cho

các cấu kiện cũng đóng vai trò khá quan trọng. Các vật liệu cần được bố trí vào vị trí làm việc hợp lý hơn của kết cấu nhờ đó mà hình dạng của các bộ phận kết cấu có thể thay đổi theo chiều hướng gọn nhẹ và thanh mảnh hơn. Do cách tiếp cận này có liên quan đến khả năng vốn có của kết cấu để phân tán các năng lượng sinh ra do các tác động động như động đất, gió… nên ở mức độ nào đó việc xảy ra biến dạng và phá hủy có thể sẽ được chấp nhận [18][50].

Nghiên cứu về việc giảm dao động cho kết cấu dưới tác động của gió và động đất đặc biệt là kết cấu cầu dây văng nhận được sự quan tâm khá nhiều của các nhà nghiên cứu với một số giải pháp được biết đến như: cải tiến trong thiết kế về cấu tạo cho các bộ phận kết cấu, chọn các thông số kỹ thuật cho phù mà điển hình là GS. Yozo Fujino – ĐH Tokyo Nhật Bản [116], GS. Matsasugu Nagai – ĐH Nagaoka Nhật Bản, GS Yamada – Trường Đại học Yokohama – Nhật Bản, TS. Toshihiro Wakahara – Viện công nghệ Shimizu – Nhật Bản [94].

Hướng thứ hai trong điều khiển ứng xử của kết cấu bao gồm việc sử dụng các thiết bị gắn thêm vào các bộ phận kết cấu nhằm giảm ứng xử của kết cấu như giảm dao động hay chuyển vị hoặc dưới các lực tác động lên kết cấu như là giảm gia tốc, vận tốc và chuyển vị. Các thiết bị này gọi chung là thiết bị giảm chấn[25][117]. Có thể phân loại các thiết bị này theo năng lượng tiêu tán gồm: thiết bị điều khiển dao động kiểu chủ động (active damper), kiểu bị đông (passive damper), và kiểu bán chủ động (semi active damper). Nhiều nghiên cứu về các loại thiết bị điều khiển này đã được quan tâm bởi các nhà khoa học Housner (1997), Spencer Jr. và Sain (1997), Soong và Spencer Jr. (2002) và Spencer Jr. và Nagarajaiah (2003)[6].

Hệ thống thiết bị điều khiển dao động cho kết cấu (gọi tắt là thiết bị giảm chấn) chủ yếu làm việc trên nguyên tắc tạo ra dao động nhằm giảm dao động cho kết cấu mà chính cách thức tạo ra dao động khác nhau của các giảm chấn hình thành nên sự phân loại như trên. Hiệu quả của việc áp dụng hệ thống giảm chấn cho các bộ phận kết cấu đã được chứng minh qua nhiều nghiên cứu trong và ngoài nước [21][88]. Có thể tóm tắt tính năng và nguyên lý hoạt động chung các loại giảm chấn như sau:

Thiết bị giảm chấn kiểu chủ động (active damper) hoạt động nhờ được cung cấp một năng lượng đáng kể từ bên ngoài để vận hành thiết bị, truyền lực điều khiển cho kết cấu. Thiết bị này sử dụng ứng xử kết cấu đo được để xác định lực điều khiển mong muốn. Tuy

nhiên, điều không mong đợi có thể xảy ra là do truyền năng lượng cho kết cấu nên có thể gây nên sự mất ổn định cho bản thân kết cấu. Thiết bị này có hiệu quả hơn các thiết bị bị động bởi khả năng thích ứng với các điều kiện tải trọng khác nhau và có thể điều khiển theo các mode dao động khác nhau. Tuy nhiên thì thiết bị này không thể hoạt động khi mất năng lượng cung cấp (như điện) đặc biệt trong các cơn địa chấn thì thiết bị giảm chấn kiểu bị động sẽ là hiệu quả hơn và giá thành duy tu bảo dưỡng của loại thiết bị này cũng khá tốn kém. Thiết bị này bao gồm: giảm chấn chủ động dùng khối lượng (Active mass damper, viết tắt là AMD), và thiết bị điều khiển dạng Hybrid (Hybrid Control Devices). Các nghiên cứu về các dạng thiết bị AMD phải kể tới là Kobori (1991), Sakamoto (1994), Spencer và Soong (1999) thực hiện cho tòa nhà Kyobashi Seiwa – Tokyo Nhật Bản dưới sự hỗ trợ của công ty Kajima. Spencer và Soong tiếp tuc với nghiên cứu về thiết bị điều khiển dạng Hybrid cho tháp hàng không quốc tế Osaka Nhật Bản và khu công nghiệp nặng Mitsubishi ở Yokohama Nhật Bản và khách sạn Rihga Royal ở Hiroshima Nhật bản.

Thiết bị giảm chấn kiểu bán chủ động (semi active damper) là thiết bị không truyền năng lượng vào hệ thống được điều khiển mà có tính chất cơ học để có thể điều khiển để cải thiện hiệu suất hay thay đổi tính chất cơ học của hệ thống trên cơ sở sự phản hồi thông tin (feedback) từ dữ liệu đo. Khi năng lượng bên ngoài được sử dụng để thay đổi đặc tính của thiết bị chẳng hạn như tính cản và độ cứng của thiết bị mà không tạo ra lực điều khiển, năng lượng yêu cầu thấp [80], [81], [82]. Thiết bị này có hiệu suất tốt hơn so với thiết bị điều khiển dạng bị động, tính linh hoạt và khả năng thích ứng của thiết bị hoạt động mà không có các yêu cầu điện lớn, mang tính ổn định có kế thừa, và độ tin cậy, vì chúng hoạt động như các thiết bị bị động trong trường hợp mất điện. Một vài nghiên cứu đáng kể về thiết bị dạng bán chủ động phải kể tới là Housner 1997, Spencer và Sain 1997, Symans 1994, Synmans và Constantinou 1999, Jonnson 1998, Yi và Dyke 2000 và Yoshida 2001.

Giảm chấn kiểu bị động (passive damper) làm phân tán năng lượng, giảm dao đông cho kết cấu nhờ chính chuyển động của kết cấu tạo ra chuyển động tương đối trong thiết bị điều khiển hoặc biến đổi động năng thành nhiệt nhằm tạo ra hiệu quả giảm dao động [19][22][89]. Giảm chấn bị động đặc biệt có ưu điểm là không dùng năng lượng từ bên ngoài cung cấp như điện nên hiệu quả thấy rõ khi mất điện đặc biệt rất hay xảy ra khi gặp

thiên tai như động đất, bão lũ v.v… Các thiết bị bị động được biết đến bao gồm: cách chấn (Base Isolation), giảm chấn dùng khối lượng (tuned mas damper, viết tắt là TMD), giảm chấn dùng chất lỏng (tuned liquid damper, viết tắt là TLD), giảm chấn dùng kim loại, giảm chấn nhớt và giảm chấn ma sát.

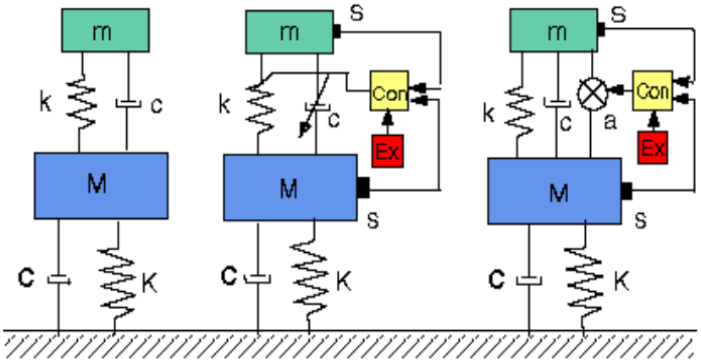
Các biện pháp giảm dao động cho kết cấu được tổng hợp trong bảng 1.1 dưới đây:

Bảng 1.1. Các biện pháp giảm dao động cho kết cấu

Phương thức	**Kiểu loại**	**Các phương pháp**	**Ghi chú**
thiết kế khí động học	Bị động	Tăng cường các đặc trưng khí động học để giảm hệ số lực gió	Làm vát góc và các lỗ hổng
Thiết kế kết cấu	Bị động	Tăng khối lượng của tòa nhà để giảm tỷ số khối lượng khí trên tòa nhà	Tăng chi phí nguyên liệu
		Tăng độ cứng hoặc tần số tự nhiên để giảm tốc độ gió không chiều hướng	Các tường giằng chống, các thành phần dầy
Thiết bị giảm chấn phụ trợ	Bị động	Thêm các vật liệu với các đặc trưng phân tán năng lượng, tăng tỷ số cản cho các tòa nhà.	SD, SJD, LD, FD, VED, VD, OD
		Thêm hệ thống khối lượng phụ trợ để tăng mức độ cản trở	TMD,TLD
	Chủ động	Tạo ra lực điều khiển khi sử dụng các hiệu ứng quán tính để giảm thiểu cá ứng xử.	AMD, AGS
		Tạo ra lực điều khiển khí động học để giảm hệ số lực cánh (biên) hoặc giảm thiểu ứng xử	Rotor máy bay phản lực, phần khí động học phụ thêm
		Thay đổi độ cứng để tránh cộng hưởng	AVS
	Hybrid	ứng dụng một tổ hợp của cả hai hệ thống điều khiển bị động và chủ động để giảm bớt một số hạn chế và giới hạn tồn tại khi mỗi hệ thống bị kích một hoạt một mình	Hybrid Base Isolation, Hybrid Mass Damper
	Bán chủ động	Không thể điều chỉnh năng lượng cơ học vào trong hệ thống kết cấu được điều khiển (chẳng hạn bao gồm kết cấu và thiết bị điều khiển), nhưng có các đặc trưng có thể được điều khiển theo thời gian để giảm ứng xử của hệ một cách tối ưu	VOD, VFD, TLCD,

Trong đó SD: giảm chấn thép, SJD:giảm chấn nối thép, LD: Giảm chấn dẫn hướng (Lead dampers), FD: Giảm chấn ma sát, VED: giảm chấn đàn hồi – nhớt, VD: Giảm chấn nhớt, OD: giảm chấn dầu, TMD:giảm chấn điều chỉnh dùng khối lượng, TLD: giảm

chấn dùng chất lỏng, AMD:giảm chấn điều chỉnh khối lượng chủ động, AGS:Active Gyro Stabilizer, AVS: Tác động thay đổi độ cứng (Active Variable Stiffness), VOD: Variable Orifice Damper, VFD:giảm chấn ma sát thay đổi.



Nguồn: wikipedia

Hình 1.4: Mô tả các mô hình tính toán sự làm việc chung của kết cấu và các loại giảm chấn khác nhau (giảm chấn kiểu bị động, kiểu bán chủ động, kiểu chủ động)

Tùy theo yêu cầu giảm dao động cho các bộ phận kết cấu dưới các tác động động học khác nhau mà linh hoạt áp dụng các loại thiết bị điều khiển dao động kể trên cho phù hợp. Tuy nhiên liên quan đến yếu tố kinh tế, giá thành khi lắp đặt các hệ thống và cả yếu tố linh hoạt có thể thay đổi khi các yếu tố tác động thay đổi như gió trong điều kiện biến đổi khí hậu mà luận án đề xuất tập chung nghiên cứu loại thiết bị giảm chấn kiểu bị động dùng chất lỏng - gọi tắt là TLD – để khẳng định tính ưu việt và khả năng áp dụng cho các công trình dạng tháp nói chung và áp dụng cho tháp cầu dây văng nói riêng tại Việt Nam.

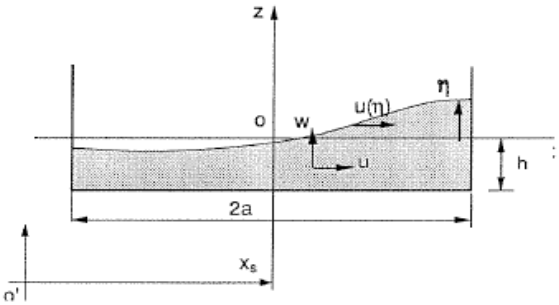
1.4. Tổng quan về hệ giảm chấn chất lỏng TLD

Hệ giảm chấn dùng chất lỏng là một dạng thiết bị điều khiển dao động kiểu bị động – gọi tắt là TLD (tuned liquid damper). Hệ thiết bị này có thể giảm các tác động động lực học như động đất, gió, bão hay hoạt tải khi thừa nhận các công nghệ làm tăng đặc tính cản cho kết cấu. Các giảm chấn được định nghĩa như khả năng của kết cấu để làm tiêu tan một phần năng lượng giải phóng khi chịu tải trọng động. Một hệ giảm chấn chất lỏng (TLD) thể hiện là có hiệu quả và là công nghệ đơn giản để tăng tính cản cho kết cấu.

Hoạt động của hệ thiết bị dựa trên cơ sở sự chuyển động văng té của chất lỏng trong một thùng cứng mà kết quả làm cho dao động của kết cấu phân tán một phần năng lượng do tác động của tải trọng động và do vậy tăng tính cản tương đương cho kết cấu.

Nguyên lý hoạt động cơ bản của hệ giảm chấn chất lỏng nói chung là dựa vào sự phát triển chuyển động sóng tại bề mặt tự do của chất lỏng để giải phóng một phần năng lượng động học. Trong hệ giảm chấn chất lỏng gồm các thùng thiết bị chứa chất lỏng với chiều

dài, chiều rộng thùng và chiều sâu chất lỏng tính toán phù hợp với việc tăng tính cản tương đương cần thiết cho kết cấu. Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng TLD có thể đáp ứng tốt dưới tác động của các dao động ở mức thấp còn ứng xử của chúng với các dao động lớn hơn là khá phức tạp đặc biệt với sự xuất hiện các hiện tượng của bề mặt sóng vỡ và khi đó hiệu quả của TLD sẽ giảm đi đáng kể [10][11][105].



Hình 1.5: Chuyển động chất lỏng trong 1 thùng chứa – 1 TLD và các kích thước

Đặc trưng của hệ giảm chấn chất lỏng TLD bao gồm các đặc tính phi tuyến do chuyển động của chất lỏng bên trong thùng chứa [33][86][93]. Chúng bị ảnh hưởng bởi các đặc trưng của các vật liệu của bản thân giảm chấn chất lỏng như là kích thước của thùng chứa chất lỏng, tỷ số chiều sâu chất lỏng và tính nhớt của chất lỏng .

Hệ giảm chấn chất lỏng (TLD) bao gồm sự tham gia của một hoặc nhiều thùng chứa chất lỏng vào sự làm việc của kết cấu. Nếu hệ gồm các thùng chứa chất lỏng mà các thùng cùng chứa một lượng chất lỏng với chiều sâu như nhau thì hệ này được gọi là hệ giảm chấn chất lỏng đơn tần số (STLD). Nếu hệ giảm chấn chất lỏng có sự tham gia của nhiều thùng chứa chất lỏng mà các thùng có tần số dao động riêng khác nhau với khoảng chênh lệch nhất định thì hệ này gọi là hệ giảm chấn chất lỏng đa tấn số (MTLD). Ưu điểm vượt trội phải kể đến của loại thiết bị giảm chấn chất lỏng này có thể là:

- Giá thành thấp,
- Dễ lắp đặt cho các cấu trúc hiện có và cả kết cấu mới;
- Có khả năng áp dụng cho các kết cấu phụ trợ; không giới hạn theo một hướng kích động duy nhất; và hiệu quả thậm trí cho các dao động có biên độ nhỏ.

Nhờ chuyển động của chất lỏng bên trong một thùng dạng hình chữ nhật hoặc hình tròn mà áp lực chất lỏng tạo ra do tính chất chuyển động liên tục của sóng nước sẽ làm tăng tính cản cho kết cấu dưới các tác động động lực học và thắng được tác động này.

Thiết bị TLD điều chỉnh dao động cho các hệ kết cấu dựa trên nguyên tắc chính là sự hoạt động của chất lỏng mà đặc biệt là sự văng té của chất lỏng bên trong thùng chứa để

tạo ra hiệu quả giảm dao động cho các kết cấu. Khi nước chuyển động, các sóng nước hình thành trong thùng sẽ va đập vào biên các thùng và tạo thành áp lực chất lỏng. Áp lực này được xác đinh là bằng nhưng ngược pha với tác động của ngoại tải thì hiệu quả giảm dao động được cho là tối ưu. Nếu áp lực này tạo ra không đủ lớn (trường hợp các sóng chuyển động mạnh và hình thành sóng vỡ) thì hiệu quả giảm dao động sẽ giảm đi [13],[32]. Như vậy các lực xuất hiện trong giảm chấn chất lỏng TLD khi nước chuyển động văng té hợp lại theo nguyên lý cộng tác dụng do tính chất chuyển động liên tục của sóng nước sẽ làm tăng tính cản cho kết cấu ứng với các điều kiện ràng buộc liên quan đến các đặc trưng của giảm chấn chất lỏng và cần được phân tích kỹ lưỡng. Cụ thể gồm:.

- mật độ, chiều sâu và khối lượng chất lỏng: ρ (kg/m3); h_0 (cm); m_t (kg)
- chiều rộng, chiều cao và chiều dài của thùng chứa: b (cm); a(cm); L(cm)

Bản chất sự làm việc của hệ giảm chấn chất lỏng là làm tiêu tan năng lượng bởi:

- Dao động của chất lỏng trong thùng chứa
- Ma sát giữa chất lỏng và tường của thùng cứng.
- Tần số dao động của chất lỏng trong thùng cứng được điều khiển phù hợp với tần số dao động riêng của kết cấu (thời điểm xảy ra cộng hưởng).

Với nguyên lý hoạt động đơn giản, vật liệu và thiết bị dễ chế tạo mà hiệu quả giảm chấn lại cao là lý do nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi hệ thiết bị này.

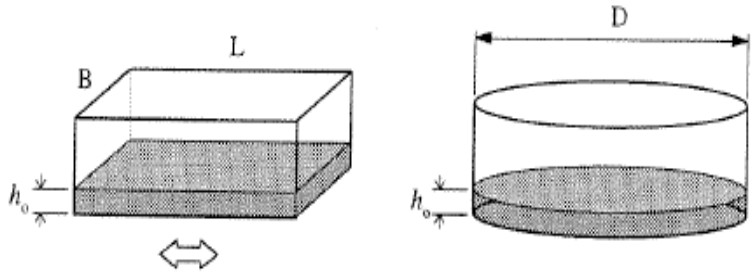
Trên cơ sở phân tích các đặc trưng của giảm chấn chất lỏng và bản chất sự làm việc mà cần nêu rõ các tham số lựa chọn khi sử dụng hệ giảm chấn chất lỏng nhằm giảm dao động cho các bộ phận kết cấu. Các tham số cấu tạo cơ bản của giảm chấn chất lỏng bao gồm: đặc điểm của thùng chứa chất lỏng và chất lỏng trong thùng chứa như sau.

1.4.1. Thùng cứng chứa chất lỏng

Thùng cứng chứa chất lỏng là một trong những nhân tố quan trọng quyết định đến hiệu quả hoạt động của giảm chấn chất lỏng. Các nghiên cứu về giảm chấn chất lỏng đều tập trung trong 2 dạng cho thùng chứa chất lỏng là hình tròn và hình chữ nhật (hình1.6). Thùng chứa hình chữ nhật được đặc trưng bởi kích thước chiều dài thùng L và chiều rộng B, còn thùng hình tròn đặc trưng bởi đường kính D.

Thùng chứa hình chữ nhật với 2 phương vuông góc theo 2 cạnh của hình chữ nhật tử ra là ưu việt khi áp dụng cho các kết cấu chịu tác động kích động theo 2 phương là chủ yếu. Trong khi đó, với thùng chứa hình tròn, chất lỏng trong thùng có thể chuyển động theo nhiều phương, do vậy mà mô hình TLD hình tròn có thể có nhiều thuận lợi hơn trong việc

giảm dao động so với thùng chứa hình chữ nhật. Tuy nhiên, các chuyển động sóng trong thùng chứa hình tròn là phức tạp hơn so với các thùng hình chữ nhật.



Hình 1.6: Mô hình cấu tạo thùng chứa chất lỏng hình chữ nhật và hình tròn

Trong trường hợp cụ thể của một số nghiên cứu, TLD có thùng chứa hình tròn thường được phân tích như một hệ TLD hình chữ nhật tương đương, Wakahara (1993)[98]. Sự chuyển của một TLD hình tròn thành TLD hình chữ nhật tương đương dựa trên tần số tự nhiên cơ sở của giảm chấn và khối lượng của hai hệ thống. Chiều dài của TLD hình chữ nhật tương đương, L được thiết lập theo đường kính của TLD hình tròn, D bởi công thức chuyển đổi:

$$L = \frac{3.141}{3.674} D \text{ và } B = \frac{\pi}{4L} D^2 \text{ (theo Wakahara [98])} \quad (1.4)$$

Như vậy tùy theo yêu cầu cần điều chỉnh dao động theo 2 hay nhiều phương mà lựa chọn thùng chứa dạng tròn hay chữ nhật. Thùng chứa hình chữ nhật với chuyển động của chất lỏng chỉ tập trung theo 2 phương sẽ phù hợp với những kết cấu có chuyển vị chủ yếu theo 2 phương lớn như kết cấu nhịp dầm, tháp cầu dây văng [95]. Còn thùng hình tròn thì chất lỏng có thể chuyển động theo đa phương sẽ thích hợp với những kết cấu dạng cột tháp như tháp đài truyền hình, tháp điều khiển không lưu hoặc các tòa nhà cao tầng .v.v... Tuy nhiên hoạt động phức tạp của chất lỏng trong thùng chứa hình tròn đòi hỏi tính toán hiệu quả cần chính xác và sử dụng lý thuyết động lực học chất lỏng để xác định.

Vật liệu của các thùng chứa chất lỏng thường được làm bằng loại vật liệu sợi tổng hợp cường độ cao để đảm bảo đủ độ cứng không biến dạng dưới tác động của nhiệt độ, ánh sáng mặt trời với cường độ mạnh tại vị trí đặt thiết bị, tránh tác động ăn mòn, gây rò gỉ dẫn tới ảnh hưởng đến chất lỏng trong thùng chứa.

Hình 1.7: TLD hình chữ nhật.

Nguồn: Shimizu – Nhật Bản[97]

Hình 1.8: TLD hình trụ tròn

1.4.2. Chất lỏng và ảnh hưởng của chuyển động chất lỏng trong thùng chứa chất lỏng TLD

Chất lỏng trong thùng chứa được đặc trưng bởi tính chất của chất lỏng và chiều sâu chất lỏng. Chiều sâu chất lỏng là nhân tố quan trọng trong việc tạo ra tần số dao động thiết kế cho mỗi thùng chứa chất lỏng, đặc biệt hiệu quả của hệ giảm chấn chất lỏng chịu ảnh hưởng rõ rệt của tỷ số h_o/L (chiều sâu chất lỏng/chiều dài thùng chứa chất lỏng). Do vậy thiết kế cấu tạo TLD đóng vai trò quan trọng và thường chiều dài thùng chứa được lựa chọn để sao cho tạo ra chuyển động của chất lỏng trong thùng chứa là dạng chuyển động của sóng nước nông [35], cụ thể tỷ lệ h_0 /L như sau:

Bảng 1.2. Xác định kiểu loại sóng trong thùng chứa

h_0 /L	1/20 – 1/25		½
Loại sóng	Sóng dài (Sóng nước rất nông)	Sóng nước nông	Sóng nước sâu (sóng mặt)
các tham số điều khiển	h_0 , h_0/L	h_0/L, H/h_0	h_0/L, L

Tỷ số giữa chiều sâu chất lỏng với chiều dài sóng theo hướng chuyển động trực tiếp sẽ tạo ra dạng chuyển động sóng của chất lỏng trong các thùng cứng. Có 2 dạng chuyển động chính là chuyển động sóng nông và sâu. Chiều sâu nước bị giới hạn trong khả năng giảm chấn của nó bởi phần lớn chất lỏng không tham gia trong cơ cấu giảm chấn nếu chiều sâu nước vượt quá một giá trị nào đó, tác động giảm chấn là có hiệu quả nhất ứng với chiều sâu chất lỏng nông nhất. Hiện tượng sóng vỡ có thể xuất hiện khi chất lỏng văng té trong TLD dưới tác động của chuyển động cơ sở biên độ dao động lớn và lúc này sự làm việc của TLD là rất phức tạp.

Chiều sâu của chất lỏng trong thùng được chọn đủ nhỏ để đặc trưng chuyển động của chất lỏng là chuyển động của sóng 2 chiều (không còn đặc trưng chuyển động hỗn loạn ba chiều). Khi sóng chuyển động, hoạt động văng té của chất lỏng gây ra áp lực tại biên thùng chứa, áp lực này được tính toán sao cho bằng nhưng ngược pha với áp lực do tác động kích động gây ra. Do vậy việc hạn chế chiều chuyển động sóng để tập trung được áp lực chất lỏng, cản trở áp lực do kích động gây ra là cơ cở cho việc quyết định hình dáng của thùng chứa.

Chất lỏng trong hệ TLD là nông để đạt được tính cản cao hơn và tần số tự nhiên thấp hơn để phù hợp với các kết cấu xây dựng công trình. Chất lỏng nông dẫn đến sự văng té của chất lỏng là có tính phi tuyến rất mạnh và lý thuyết tuyến tính là không thỏa mãn để giải quyết bài toán [89], [95].

Để tạo ra được hiệu quả giảm dao động của thiết bị giảm chấn chất lỏng người ta có thể bổ sung vào trong các thùng cứng một số các vật nổi trên mặt chất lỏng . Khi chất lỏng chuyển động, các vật nổi va vào nhau và va vào tường bên của bình chứa làm cho lực ma sát biên tường thùng tăng lên. Một phần năng lượng sẽ sinh ra làm tiêu tan năng lượng do dao động của tháp sinh ra, phần còn lại có tác dụng tác động trở lại kết cấu và do vậy mà hiệu quả giảm dao động cho tháp được thực hiện [96][98].

Tính chất của chất lỏng trong thùng chứa cần là loại không bay hơi hoặc khó bay hơi dưới tác động của bức xạ nhiệt bởi tác động này sẽ làm giảm lượng chất lỏng trong thùng (chiều sâu chất lỏng trong thùng). Khi chiều sâu chất lỏng giảm, dạng chuyển động của chất lỏng bên trong thùng chứa thay đổi và do vậy mà làm thay đổi hiệu quả giảm chấn. Với đặc điểm này thì chất lỏng trong thùng chứa thường được sử dụng là loại chất lỏng (có thể là nước thông thường) có độ nhớt và được pha thêm các hoạt chất gốc dầu. Các hoạt chất gốc dầu này sẽ tạo thành một lớp màng ngăn ngăn cản sự bay hơi của chất lỏng và do vậy mà hạn chế tác động của nhiệt đến chất lỏng trong thùng.

Cơ cấu giảm chấn trong chất lỏng được phát triển cơ sở bằng tác động của tính nhớt tại lớp biên gần với mặt bên dưới, tường bên của thùng và chuyển động văng té của chất lỏng tại bề mặt tự do của lớp chất lỏng. Độ nhớt và tính chất của chúng đảm bảo tạo áp lực biên thùng chứa gây ra hiệu quả giảm chấn cho kết cấu.

Trong các bài toán nghiên cứu về chất lỏng thường coi chất lỏng là lý tưởng để đơn giản cho việc giải bài toán và như vậy khi nghiên cứu về chuyển động của chất lỏng không

tính đến độ nhớt của nó. Thực tế các chất lỏng nói chung hay nước đại dương đều có tính nhớt, vì thế không thể không xét đến độ nhớt của chất lỏng khi nghiên cứu chất lỏng thực. Độ nhớt của chất lỏng là khả năng chống lại sự chuyển dịch tương đối giữa các phân tử của chất lỏng và chất khí. Độ nhớt chỉ xuất hiện trong chất lỏng chuyển động và đóng vai trò truyền động lượng từ lớp này sang lớp khác hay tạo nên trường vận tốc và một phần cơ năng biến thành nhiệt [35]. Độ nhớt rối xuất hiện do đặc trưng rối của chuyển động, tức là do sự trao đổi động lượng giữa các lớp chất lỏng hoặc chất khí chuyển động. Do chuyển động rối mà làm tăng ma sát trong chất lỏng. Nhiệt độ càng tăng thì độ nhớt của chất lỏng lại càng giảm .

Độ nhớt của nước thông thường có hệ số nhớt μ ở nhiệt độ 0^0C là: $\mu = 1.729.10^{-2}$ g/cm.s, còn ở 20^0C là $\mu = 1.005.10^{-2}$ g/cm.s (22TCN222-95: Tải trọng và tác động do sóng và do tàu tác động lên công trình Thủy).

Tại đáy bình chất lỏng phải đảm bảo điều kiện biên đáy (điều kiện không thấm). Chuyển động của chất lỏng trong thùng cứng có dạng chuyển động sóng. Khi chiều sâu chất lỏng đủ lớn để có thể coi là vô hạn thì người ta thấy rằng thế lưu tốc giảm theo chiều sâu theo qui luật hàm số mũ là do điều kiện liên tục chuyển động của chất lỏng. Khi biết hàm thế $\phi(x,y,z,t)$ thì có thể xác định được dạng mặt thoáng của chất lỏng chuyển động. Nếu sóng là phẳng hoặc sóng hai chiều thì chuyển động của sóng có biên độ của các thành phần vận tốc nằm ngang, thẳng đứng là bằng nhau và giảm theo độ sâu theo qui luật hàm số mũ. Quĩ đạo của các điểm chuyển động trong sóng biên độ nhỏ vô hạn trên bề mặt biển sâu là đường tròn và quay theo chiều kim đồng hồ.

Tại mặt chất lỏng, sự tiêu tán năng lượng trong không khí vượt trội hơn với sóng dài còn trong chất lỏng thì sự tiêu tán năng lượng lại vượt trội hơn với sóng ngắn. Sự tắt dần của sóng theo độ sâu xảy ra một cách có chọn lọc: các sóng ngắn hơn sẽ tắt nhanh hơn các sóng dài. Hiện tượng này gọi là chọn lọc thủy động [19].

Tỷ số khối lượng của hệ giảm chấn so với khối lượng của kết cấu là khá quan trọng trong đánh giá hiệu quả của hệ. Khối lượng của hệ ở đây là khối lượng của chất lỏng trong thùng, còn khối lượng của thùng chứa được tính cùng khối lượng của kết cấu. Trong tính toán các bài toán động học, khối lượng của kết cấu được sử dụng là khối lượng tính toán theo các mode dao dộng hay còn gọi là khối lượng hình thái của kết cấu. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng tổng khối lượng chất lỏng nằm trong tỷ số thiết kế tối ưu 1-5 % khối

lượng của kết cấu thì hiệu quả của giảm chấn chất lỏng là tốt nhất [101].

Tính cản của sự văng té chất lỏng là một tham số có ý nghĩa ảnh hưởng đến hiệu quả của TLD. Tính cản này được thiết lập trên cơ sở phương trình chuyển động mặt chất lỏng sẽ được trình bày chi tiết trong chương 2 của luận án này.

1.5. Tình hình nghiên cứu và ứng dụng hệ giảm chấn dùng chất lỏng (TLD).

Trên thế giới từ những năm 1950 các giảm chấn sử dụng chất lỏng đầu tiên đã được sử dụng trong các thùng chống lăn giữ cho sự ổn định do chuyển động lắc của các tàu biển. Tuy nhiên, ý tưởng của việc áp dụng hệ TLD để giảm dao động cho kết cấu trong ngành xây dựng công trình bắt đầu từ giữa những năm 1980, bởi Bauer [25], người mà đã đề xuất sử dụng các thùng chứa hình chữ nhật được lấp đầy hoàn toàn với hai chất lỏng không thể trộn lẫn để giảm ứng xử của kết cấu dưới tác động của một tải trọng động trong đó chuyển động của bề mặt có thể cản trở chuyển động kết cấu một cách có hiệu quả.

Những tác giả tiếp theo đặt nền móng cho sự nghiên cứu này là năm 1987, Kareem [43] với những nghiên cứu ban đầu về việc áp dụng các thùng chứa chất lỏng để giảm dao động ngẫu nhiên. Modi & Welt [103] với nghiên cứu đề xuất sử dụng TLD trong các tòa nhà để giảm ứng xử khi gió mạnh hoặc động đất năm 1987. Và sau này các nghiên cứu tiếp theo của ông gồm: *Modi & Munsi [105]* đã giới thiệu một nghiên cứu thực nghiệm để chứng minh hiệu quả của TLD bằng việc đề xuất một hệ cản hai chiều, và các kết quả chỉ ra rằng sự phân tán năng lượng lên tới 60%. *Modi & Seto [104]* đã giới thiệu nghiên cứu số trên hệ TLD hình chữ nhật, tính toán cho các hiệu ứng phi tuyến. Chúng bao gồm các hiệu ứng của sóng phân tán như là các lớp biên tại tường của thùng, tương tác giữa các vật nổi tại bề mặt và sóng vỡ. *Modi và các cộng sự [102]* đã khảo sát việc tăng cường hiệu quả phân tán năng lượng của 1 giảm chấn chất lỏng hình chữ nhật thông qua việc giới thiệu mô hình nêm hai chiều. Từ thí nghiệm này ông chỉ ra rằng nêm làm tăng hệ số cản và nêm nhám thì hệ số cản càng tăng hơn.

Năm 1991, các nghiên cứu của Fujii và các cộng sự [39,*100*,116], đã thể hiện việc thiết lập giảm chấn chất lỏng để giảm các dao động do gió của 2 tháp cao tầng, Nagasaki Airport Tower (chiều cao 42m) và Yokohama Marine Tower (chiều cao 101m), và kết quả chỉ ra rằng chuyển dịch của tháp giảm khoảng 1/2 so với khi không lắp đặt.

Mô hình đề xuất cho tính toán hệ này cũng nhận được sự quan tâm của nhiều nhà khoa học mào bao gồm cả các nghiên cứu nhằm hiệu chỉnh hoặc xác định giá trị tối ưu cho các

tham số ảnh hưởng đến hoạt động của hệ giảm chấn chất lỏng, điển hình là mà điển hình là: *Wakahara, và các cộng sự [94,99]* đã đưa ra những nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm để thiết kế tối ưu TLD và xác nhận TLD với ứng dụng chính xác cho 1 khách sạn cao tầng "Shin Yokohama Prince (SYP) Hotel" ở Yokohama. Mô hình tương tác được xem xét dựa trên phương pháp phần tử biên BEM cho mô phỏng chuyển động của chất lỏng trong 1 thùng TLD, và hệ đa bậc tự do MDOFs cho mô phỏng chuyển động của kết cấu. Việc thiết lập TLD trên tòa nhà có thể giảm ứng xử do gió tới 1 nửa giá trị ban đầu.

Kaneko & Ishikawa [76] đã giới thiệu nghiên cứu phân tích trên TLD với lưới ngập nước. Họ đã áp dụng một mô hình chất lỏng trên cơ sở lý thuyết sóng nước nông phi tuyến. Họ đã kiểm tra các kết quả của sự phân tán năng lượng một cách lý thuyết mà được thiết lập bằng thực nghiệm. Họ cũng đã thấy rằng hệ số cản tối ưu, như trường hợp của hệ TMD, có thể được lấy ra từ mạng lưới thiết lập cho chất lỏng bên trong thùng và cho thấy hệ TLD là có hiệu quả hơn trong việc giảm dao động cho kết cấu khi không có TLD. *Kaneko S. & Mizota Y. [77]* cũng đã mở rộng mô hình TLD nước sâu hình chữ nhật đã được phát triển [37] cho mô hình TLD nước sâu hình tròn với 1 mức nước ngập được thiết lập trong khoảng giữa thùng chất lỏng tròn. Trong phân tích ứng dụng lý thuyết sóng biên độ hữu hạn và phương pháp Galerkin trong trường hợp thùng hình tròn, họ đã thu được lực thủy động học và cao độ bề mặt tự do. Sau đó, sự tổ hợp các lực thủy động với phương trình chuyển động của kết cấu, tỷ số cản được tính toán. Các kết quả tính toán đã thiết lập do vậy được so sánh với các kết quả thí nghiệm, bởi vậy mà hiệu quả của phương pháp mô hình hóa được xác nhận.

Năm 1992 Sun, và các cộng sự [48,49] [83] đã đo chuyển động của chất lỏng trong hệ TLD nông, bao gồm thùng hình chữ nhật, hình tròn và thùng hình khuyên chịu tác động của kích động dạng điều hòa. Khi sử dụng TMD tương đương, họ đã hiệu chuẩn các tham số của TLD từ kết quả thí nghiệm. *Sun* tiếp tục phát triển thành công 1 mô hình phân tích cho TLD trên cơ sở lý thuyết sóng nước nông, điều mà được chứng minh là rất có hiệu quả nếu sóng không bị vỡ và mở rộng mô hình này để tính toán cho ảnh hưởng của sóng vỡ khi giới thiệu 2 hệ số cơ bản được xác định bằng thực nghiệm.

Tait và các cộng sự [53] đã thảo luận mô hình dòng số của ứng xử TLD bao gồm chuyển động bề mặt tự do mà kết quả là lực cắt cơ sở và năng lượng phân tán bởi TLD với các màng ngăn. Cả hai mô hình phân tích tuyến tính và phi tuyến cho TLD được kiểm tra và so sánh với dữ liệu thí nghiệm. Kết quả chỉ ra rằng mô hình tuyến tính là có khả năng

thiết lập đặc tính phân tán năng lượng của một TLD nhưng có thể không thiết lập được ứng xử thực của bề mặt tự do cho các biên độ khảo sát khác nhau trong thí nghiệm. Mô hình phi tuyến có thể mô tả chính xác chuyển động bề mặt tự do, kết quả là xác định được lực cắt cơ sở và năng lượng phân tán qua một dải các biên độ kích động. Mô hình phi tuyến có xem xét đén ảnh hưởng của nhiều màng ngăn và nhiều vị trí lắp đặt màng ngăn khác nhau bên trong thùng cứng đến hiệu quả giảm chấn.

Tait và các cộng sự [54][55] đã nghiên cứu khả năng của TLD để hoạt động theo 2 hướng. khi thực hiện thí nghiệm trên mô hình kết cấu – TLD (2D) - 2 hướng và thiết lập chuyển động của bề mặt tự do, kết quả là các lực cắt cơ sở được xác định cho các giảm chấn chất lỏng bị tác động 2 chiều (2D TLD) với kết cấu đơn giản và ứng xử chuyển vị và gia tốc của hệ kết cấu – TLD 2 chiều. Ứng xử của một hệ kết cấu – TLD 2D bị kích động 2 chiều cho thấy tương ứng với sự cộng tuyến tính trong 2 hệ kết cấu – TLD 1D. Nghiên cứu này chỉ ra rằng bằng cách chọn tỉ lệ thích hợp cho các TLD, chúng có thể được sử dụng để giảm các ứng xử kết cấu trong 2 mode của dao động một cách đồng thời theo hình dạng của nó.

Yamamoto & Kawahar [36] đã xem xét một mô hình dòng chất lỏng khi sử dụng phương trình Navier – stokes ở dạng công thức Euler-Lagrrang tùy ý (ALE). Cho tích phân phương trình Navier – stokes, họ đã sử dụng phương thức cân bằng ten sơ khuếch tán được cải tiến và phương pháp phân đoạn. Với sự ổn định của chương trình tính toán, làm mượt bề mặt tự do cũng đã được thực hiện. Phương pháp Newmark’s-β đã được sử dụng cho tích phân theo thời gian. Khi sử dụng một mô hình số của tháp Yokohama Marine để khảo sát hiệu quả của mô hình TLD, họ đã nhận thấy rằng mô hình này có thể phân tích hệ TLD một cách có hiệu quả.

Chang & Gu [9] đã nghiên cứu thực nghiệm điều khiển các hiệu ứng của hệ TLD hình chữ nhật được thiết lập trên tòa nhà cao tầng dao động do bị kích động xoáy (vortex). Họ đã nhận thấy rằng TLD hình chữ nhật là có hiệu quả trong việc giảm dao động dạng kích động xoáy cho các tòa nhà cao tầng, đặc biệt khi tần số của nó được điều chỉnh trong phạm vi dải tối ưu. Tần số tối ưu của TLD nằm trong dải giữa 0.9 và 1.0 của mô hình tòa nhà mà được xem xét với phân tích đưa ra ban đầu.

Biswal và các cộng sự [37] đã thực hiện phân tích dao động tự do của chất lỏng đổ trong thùng cứng hình tròn với các vách thông thường và so sánh với tần số tự nhiên của chất

lỏng trong thùng không có vách ngăn. Các tham số tần số văng té của chất lỏng được tính toán cho các khu vực khác nhau của màng ngăn trong thùng cứng. Kết quả cho thấy rằng các vách ngăn có ảnh hưởng đáng kể đến các thông số tần số văng té của chất lỏng khi được đặt rất gần với bề mặt tự do chất lỏng. Sau này *Biswal và các cộng sự [37,38]* đã nghiên cứu một mô hình phần tử hữu hạn 2 chiều phân tích cho đặc tính phân tích động của chất lỏng đổ trong thùng chứa hình chữ nhật với các màng ngăn sử dụng công thức thế lưu tốc và lý thuyết sóng nước tuyến tính. Tần số văng té của chất lỏng trong thùng hình chữ nhật khi không có và khi có màng ngăn (tấm hình chữ nhật mỏng) được xem xét đánh giá. Hệ thùng – màng ngăn được xem xét là cứng. Ứng xử văng té của chất lỏng được nghiên cứu dưới kích động cơ sở hình sin tĩnh ổn định. Các tần số văng té của chất lỏng được tính toán cho các kích thước khác nhau và các vị trí màng ngăn khác nhau.

Jin Kyu Yu và các cộng sự [32,33] đã đề xuất một mô hình giảm chấn khối lượng mà chúng có thể tham chiếu tới mô hình có độ cứng và tính cản phi tuyến (NSD) phù hợp với TLD. Mô hình này là một mở rộng của TMD. Chúng hiệu chuẩn các đặc trưng phi tuyến của mô hình NSD từ thí nghiệm bàn rung.

Banarji và các cộng sự [66] đã sử dụng các công thức được đề nghị bởi Sun và các cộng sự [48] để nghiên cứu hiệu quả của TLD hình chữ nhật trong việc giảm ứng xử của kết cấu chịu động đất với các giá trị khác nhau của chu kỳ tự nhiên và tỷ số cản của kết cấu. Hơn thế nữa, một nỗ lực được thực hiện để định nghĩa các tham số thiết kế phù hợp của TLD mà có hiệu quả trong điều khiển ứng xử của kết cấu chịu động đất. Các tham số này bao gồm tỷ số của sự văng té tuyến tính và tần số tự nhiên của kết cấu (gọi là tỷ số điều chỉnh), tỷ số của khối lượng nước / kết cấu (gọi là tỷ số khối lượng) và chiều sâu chất lỏng với tỷ số chiều dài thùng TLD (gọi là tỷ số chiều sâu).

Reed và các cộng sự [13, 16] đã giới thiệu các nghiên cứu để khảo sát hiệu quả và sự tiện dụng của TLD trên một dải rộng của các biên độ kích động. Từ các nghiên cứu đó, tác giả đã đưa ra tần số ứng xử của hệ TLD tăng khi biên độ kích động tăng. Cũng với thí nghiệm này đã hé lộ rằng ứng xử lớn nhất xuất hiện tại một tần số cao hơn cái đã được thiết lập bởi lý thuyết sóng nước tuyến tính. Một hệ quả của đặc trưng này là TLD phân tán năng lượng mạnh trên một phạm vi tần số rộng.

Tamura, và các cộng sự [108,109] đã chỉ ra rằng tỷ số cản của tháp hàng không Tokyo cao 77.6m được tăng thêm tới 7.6% từ 1% bởi việc sử dụng TLD.

Frandsen [30] đã thừa nhận một thùng 2D mang đầy đủ tính phi tuyến chuyển động theo cả 2 hướng nằm ngang và thẳng đứng bằng việc sử dụng hệ tọa độ chuyển đổi cho mô hình chất lỏng. Tác giả đã phân tích mô hình cho giá trị chiều cao chất lỏng khác nhau với TLD nước sâu và TLD nước nông. Tuy nhiên, mô hình ở trên bị giới hạn bởi việc sử dụng các giả định động năng dòng chảy, cả hai yếu tố là chuyển động văng té và chuyển động quay của chất lỏng không thể thấy được bởi mô hình đã giới thiệu ở trên.

Một số nghiên cứu khác về hệ giảm chấn chất lỏng như:

Soong & Dargush [88] đã định hướng nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm trên hệ TLD (STLD) và hệ tương tác TLD (STLD) và kết cấu.

Koh và các cộng sự [10] đã giới thiệu nghiên cứu số để khảo sát ảnh hưởng được tổ hợp khi sử dụng các giảm chấn chất lỏng mà được điều chỉnh cho các tần số dao động khác nhau của kết cấu nhiều bậc tự do. Một cách số, hiệu quả của các giảm chấn là phụ thuộc vào tần số của phổ động đất và các vị trí nơi các giảm chấn được lắp đặt.

Gardarsson và các cộng sự [75] đã mở rộng ý tưởng của việc tiêu hao năng lượng của các trận sóng thần bằng một phần của bờ biển cho thêm vào nghiên cứu 1 TLD với thùng có đáy dốc. Họ đã tính toán bởi thực nghiệm các đặc trưng văng té có liên quan đến TLD đáy dốc và đã so sánh với TLD trong hộp thông thường. Họ đã nhận thấy TLD đáy dốc là đặc biệt có hiệu quả khi được điều chỉnh với tần số cao hơn tần số ứng xử cơ sở của kết cấu. Tuy nhiên, họ nhận thấy có một vài vấn đề liên quan đến TLD đáy dốc như là mô men gây ra do TLD cơ bản sẽ lớn hơn.

*Olson & Reed [34]*đã nghiên cứu một TLD đáy dốc được đề xuất bởi Gardarsson và các cộng sự [75] khi sử dụng mô hình tính cản và độ cứng phi tuyến được phát triển bởi Yu và các cộng sự [33]. Các kết quả đã minh họa một cách rõ ràng một hệ mà được mô tả bởi tính đàn hồi mềm.

Pal và các cộng sự [58] đã khảo sát tính động học của sự văng té của chất lỏng đổ bên trong thùng chứa bằng thực nghiệm khi sử dụng phân tích PTHH 3 chiều. Các ảnh hưởng của sư văng té được tính toán theo miền thời gian sử dụng tích phân theo thời gian Newmark. Một thí nghiệm đơn giản được thiết kế để giới thiệu các thí nhiệm đo đạc một vài tham số cơ bản của sự văng té. Một thiết bị sensor được phát triển một cách đặc biệt để ghi nhận chiều cao sóng ở bề mặt tự do.

Li và các cộng sự [78] đã đề xuất một mô hình số cho việc thực hiện các TLD hình chữ

nhật nước nông nơi mà các đặc tính động của chất lỏng nông trong thùng chứa hình chữ nhật chịu tác động của dao động cưỡng bức theo phương ngang được phân tích một cách chính xác từ phương trình liên tục và động lượng của chất lỏng. Theo một số thừa nhận, họ thiết lập phương trình vi phân một phần phi tuyến mô tả chuyển động sóng của chất lỏng nông trong thùng chứa hình chữ nhật và đề xuất một quá trình số cho việc giải các phương trình này trên cơ sở phương pháp phần tử hữu hạn.

Ikeda [86] đã khảo sát dao động phi tuyến của 1 hệ mà trong đó thùng cứng hình chữ nhật chứa chất lỏng được đặt vào một kết cấu đàn hồi chịu tác động của một kích động dạng hình sin đứng. Người ta nhận thấy rằng các mô hình của đường cong cộng hưởng thay đổi rõ rệt tùy thuộc vào chiều sâu chất lỏng và biên độ chuyển động xuất hiện có tính chu kỳ và hỗn loạn tại khoảng thời gian nào đó của tần số kích động.

Ikeda & Ibrahim [87] đã phân tích số một cấu trúc đàn hồi cho một thùng chứa hình tròn được đổ một phần chất lỏng trong đó kết cấu bị tác động theo chiều dọc một kích động ngẫu nhiên trong một dải tần số hẹp. Họ đã giải quyết các phương trình hình dạng bằng phân tích số sử dụng mô phỏng Monte Carlo, và thiết lập phân tích ứng xử tĩnh của hệ.

Một vài loại khác của các giảm chấn chất lỏng cũng được đề xuất trong khoảng 2 thập kỷ, trong đó giảm chấn cột chất lỏng (TLCDs) [26, 31] cái mà làm tiêu tan chuyển động do gió bởi sự phân tán năng lượng thông qua chuyển động của khối lượng chất lỏng trong 1 ống giống như thùng chứa nhưng trong bị đục lỗ thông nhau. Tuy nhiên giảm chấn cột chất lỏng TLCD này không phải là thiết bị điều khiển dao động kiểu bị động mà thuộc loại thiết bị điều khiển dao động bán chủ động.

Ở Việt Nam, một số tác giả đã bắt đầu quan tâm nghiên cứu đến sự làm việc của hệ giảm chấn chấn lỏng kể từ khi hệ thống này được lắp đặt tại công trình cầu Bãi Cháy năm 2006, điển hình là GS. TS. Nguyên Đông Anh với cuốn sách chuyên khảo đẫ đề cập đến đặc trưng cơ lý cơ bản của hoạt động chất long trong thùng chứa [62], tiếp đó là đề tài nghiên cứu khoa học cấp viện khoa học và công nghệ (2009) [61], và các báo cáo trong đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường của chính nghiên cứu sinh (2010), đề tài NCKH cấp bộ Giáo Dục và Đào tạo của chính NCS là chủ nhiệm đề tài (2010).

1.6. Phân tích, đánh giá các nghiên cứu và ứng dụng giảm chấn TLD

Hầu hết các hệ giảm chấn chất lỏng được nghiên cứu ứng dụng cho các công trình xây dựng mà chủ yếu là công trình dân dụng với một số công trình dân dụng lớn điển hình

được áp dụng ở Nhật Bản như thống kê trong bảng 1.3 sau:

Bảng 1.3. Thống kê các công trình đã được lắp đặt TLD trên thế giới và Việt Nam

Tên và kiểu kết cấu	**Vị trí**	**Loại và số lượng TLD áp dụng**	**Năm lắp đặt**	**Các thông tin khác (tần số dao động tự nhiên, khối lượng giảm chấn có hiệu)**
Tháp hàng không Nagasaki (42m)	Nagasaki, Nhật Bản (NAT)	25 TLD (thùng chứa hình tròn)	1987	1.07 Hz, 1 t (approx.)
Tháp Yokohama Marine(105 m)	Yokohama, Nhật Bản (YMT)	39 TLD (thùng chứa hình tròn)	1987	0.55 Hz 1.6t
Tháp Gold (136m)	Udatsu, Nhật Bản	16 TLD (thùng hình chữ nhật)	1988	0.42 Hz 9.6t
Khách sạn ShinYokohama Prince (149m)	Yokohama, Nhật Bản (SYPH)	30 TLD (thùng chứa hình tròn)	1991	0.31 Hz 83.5t
Tháp Mount (104 m)	Hobart, Australia	80 TLD (thùng chứa hình tròn)	1992	0.7 Hz 0.6t
TYG Building (159 m)	Atsugi, Nhật Bản	720 TLD	1992	0.53 Hz 18.2 t
Tháp hàng không Narita Airport (87 m)	Narita, Nhật Bản	TLD (thùng chứa hình tròn)	1993	1.3 Hz 16.5 t
Tháp hàng không Haneda Airport (178 m)	Tokyo, Nhật Bản	TLD (thùng chứa hình tròn)	1993	0.77 Hz 21t
Tháp cầu Bãi Cháy (90m)	Quảng Ninh, Việt Nam	TLD (thùng chứa hình chữ nhật)	2006	0.32Hz

Khả năng áp dụng của giảm chấn chất lỏng có thể thấy rõ hơn thông qua phân tích một số công trình tháp thực tế đã được lắp đặt hệ giảm chấn chất lỏng nhằm có thể thấy rõ hiệu quả của chúng trong việc giảm dao động của các tháp dưới tác động do gió. Các trường hợp khảo sát ở đây đều là khảo sát hiệu quả giảm chấn của kết cấu với hệ STLD (số lượng thùng chứa chất lỏng đưa ra là các thùng được đổ cùng một lượng nước với tần số dao động riêng của các thùng là như nhau).

Hình 1.9: Ứng dụng của TLD cho tháp Yokohama Marine tại Nhật Bản - kết cấu dàn thép cao 101.3m, tổng khối lượng tháp 440T.

Hình 1.10: Ứng dụng hệ giảm chấn chất lỏng TLD cho tòa nhà cao tầng – khách sạn Shin Yokohama Prince – Nhật Bản

1.6.1. Tháp hàng không Nagasaki – Nhật Bản (NAT)

Tháp được xây dựng năm 1974 trên một hòn đảo lớn, được dùng như là một trạm điều khiển giao thông hàng không. Toàn bộ tháp là các kết cấu bằng thép tựa trên nền bằng BTCT có chiều cao nền là 4m và tổng chiều cao tháp là 42m. Một phòng điều khiển giao thông hàng không với mặt bằng vuông được đặt tại đỉnh của tòa tháp. Phòng điều khiển này đặt cách mặt đất là 38.5m. Tổng khối lượng của tháp là $M_s = 0.17x10^6$kg.

Hệ giảm chấn chất lỏng TLD được lắp đặt trên phòng này và trên cầu thang bộ lên đỉnh tòa tháp trong gần 2 tuần vào tháng 3 năm 1987. Đây có thể coi là hệ thống TLD đầu tiên được lắp vào kết cấu thực. TLD này là sự tập hợp của 25 bình hình trụ tròn chỉ chứa nước không có các vật nổi. Các bình hình trụ tròn bằng nhựa dẻo clo với chiều cao 0,5m và đường kính 0,38m. Mỗi bình được chia thành 7 lớp mà mỗi lớp cao 0.07m. Chiều sâu của nước trong thùng gồm trong mỗi lớp là 0.048m. Tần số tự nhiên cơ sở của chuyển động văng té của chất lỏng được điều chỉnh gần như là tần số tự nhiên của tháp. Tổng khối lượng nước trong một bình là khoảng 38kg. 25 bình TLD được lắp đặt có tổng khối lượng nước là khoảng 950kg, bằng 0.56 % tổng khối lượng hình thái của tháp.

Người ta đã tiến hành đo đạc kết cấu NAT khi xem xét trường hợp không gắn TLD và khi có gắn TLD với số lượng bình chứa lần lượt là 14, 19, 25 bình và nhận thấy:

- Khi không có TLD: biên độ là lớn nhất và tỷ số cản là nhỏ nhất;
- Khi có TLD tương ứng với 7 bình, 14 bình, 19 bình và 25 bình: biên độ giảm, tỷ số cản tăng lên;

Khi trọng lượng của nước tăng có thể giảm biên độ ban đầu tháp nhiều hơn, nhưng nó không có hiệu quả nhiều cho việc thực hiện cản cho tháp nếu tỷ số cản của chuyển động văng té của chất lỏng còn ở giá trị thấp.

1.6.2. Tháp Yokohama Marine – Nhật Bản (YMT)

Tháp dạng giàn thép cao 101.3m xây dựng trên cảng Yokohama năm 1961 với mặt cắt ngang dạng hình thập giác, và trên đỉnh tháp là ngọn đèn biển cao nhất thế giới. Khối lượng cơ sở Ms1 được thiết lập tại khoảng 0.157 $\times 10^6$ kg. Hệ giảm chấn chất lỏng được lắp đặt trên đỉnh tòa tháp này năm 1987 gồm 39 TLD có các bình chứa hình trụ tròn. TLD này có chiều cao 0.5m và đường kính 0.49m. Các bình được chia thành 10 lớp, chiều cao mỗi lớp là 0.05m. Các lớp bao gồm chất lỏng có chiều sâu 0.021m. Tần số văng té của chuyển động chất lỏng được điều chỉnh là sát với tần số tự nhiên thấp nhất của tháp. Tổng khối lượng của TLD là 1.54×10^3kg, xấp xỉ 1% của khối lượng hình thái của tháp.

Trong khi thực hiện việc đo tại YMT cho thấy, tỷ số cản là khoảng 4.5% khi có TLD và khi không có TLD là nhỏ bằng khoảng 7 lần. TLD mang lại một ý nghĩa trong việc giảm ứng xử cho cả các thành phần gió dọc và ngang cầu. TLD làm giảm giá trị bình phương tối thiểu của biên độ gia tốc tới 1/3 khi tốc độ gió chỉ là 20m/s.

1.6.3. Khách sạn Shin - Yokohama Prince – Nhật Bản (SYPH)

Khách sạn được xây dựng năm 1992 tại một vị trí gần với nhà ga Shin – Yokohama của tuyến đường mới Tokaido (Shinkansen). Tòa nhà là một cấu trúc hình trụ tròn với chiều cao 149m và đường kính 38.2m. Khối lượng tổng quát của tòa nhà là $M_{S1} = 10.5\times10^6$ kg.

Hệ giảm chấn chất lỏng được lắp đặt tại tòa nhà năm 1992 với 30 TLD có bình chứa hình trụ tròn đường kính 2m và chiều cao gần 2m. Mỗi bình lại được chia thành 9 lớp, mỗi lớp 0.22m. Mỗi lớp chỉ bao gồm chất lỏng nhưng có 12 vách chắn để ngăn chuyển động xoáy và để thiết lập thêm các năng lượng phân tán trong bình. Một chuỗi các thí nghiệm đã được tiến hành để xác định số bình và tần số văng té của chất lỏng trong bình. Chiều sâu chất lỏng trong mỗi lớp là 0.124m được điều chỉnh để có được tần số của hệ sát với tần số tự nhiên thấp nhất của tòa nhà. Tổng khối lượng nước là 101.7×10^3 kg, bằng 1% khối

lượng tổng quát của tòa nhà. Tỷ số cản của giảm chấn ζ_D đượctính toán bởi mô hình TLD được xem như là TMD tương đương để tối ưu hóa trong dải gia tốc 0.02 – 0.03 m/s^2.

Hiệu quả của TLD được thể hiện bằng việc so sánh về biên độ và giá trị bình phương tối thiểu của gia tốc. TLD có thể làm giảm dao động của kết cấu với giá trị bình phương tối thiểu của gia tốc khi tốc độ gió lớn hơn 25m/s tới 50%. Các đặc trưng thông thường của TLD với chất lỏng là chuyển động trở nên có hiêu quả hơn khi tốc độ gió lớn. Điều này có thể được giải thích rằng khả năng phân tán năng lượng của chất lỏng tại biên độ thấp duy trì không đủ, nhưng chúng tăng theo biên độ, do vậy trở nên tiến sát tới giá trị tối ưu.

1.6.4. Tháp sân bay quốc tế Tokyo (TIAT)

Tháp sân bay quốc tế Tokyo được xây dựng 1993 là một tháp điều khiển không lưu mới được xây dựng năm 1992 nằm trên vịnh Tokyo. Tháp điều khiển này cao 77.6m, khối lượng 3.24×10^6 kg. Tháp được chống bởi hai trụ thẳng đứng. Dao động của tháp bị chi phối chủ yếu theo phương x, phương vuông góc với bề rộng của trụ đứng. Sự tập trung chính là điều khiển dao động tập trung theo hướng này.

Hệ giảm chấn chất lỏng được lắp đặt tại tháp này năm 1993. Hệ TLD là tổ hợp của 1400 bình chất lỏng có các vật nổi trên và một lượng nhỏ chất bảo quản. Bình là một trụ tròn đường kính 0.6m và cao 0.125m. Tổng khối lượng của TLD gồm nước và các vật nổi là khoảng 3.5% của khối lượng tổng quát cơ sở của tháp theo hướng trục x. Khác với các TLD điển hình, TLD này gồm các vật nổi. Điều này nhằm mục đích giảm hiện tượng đập ở các TLD trước. Số lượng, mô hình và kích thước của các vật nổi được xác định trên cơ sở tối ưu khả năng phân tán năng lượng của TLD. Kết quả đo khi có TLD thể hiện tỷ số cản là 3.9%, có nghĩa là tăng 4.5 lần so với khi không có TLD. Thêm vào đó, hiện tượng đập mặc dù xuất hiện sau khi dao động ban đầu dừng, nhưng nó là rất nhỏ. Yêu cầu này đưa ra rằng cả hai được điều chỉnh theo tần số văng té và theo khả năng phân tán năng lượng bởi các vật nổi là khá thích đáng. Chi tiết các thông số của 4 dự án trên thể hiện trong 2 bảng sau:

Bảng 1.4. Các đặc trưng động học của các tòa nhà khi không có TLD

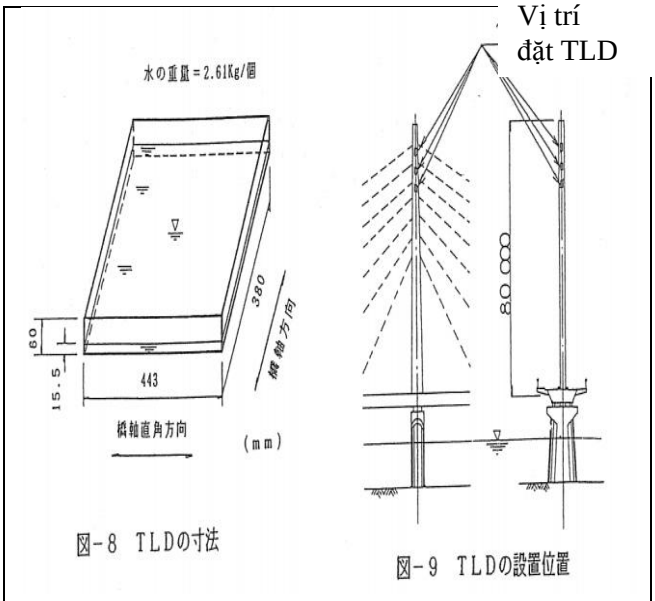
Tòa nhà	H_s (m)	M_s (kg)	f_s (Hz)			ζ_S (%)		TLD được lắp đặt
			hướng x	hướng y	Xoắn	hướng x	hướng y	
NAT	42.0	0.17×10^6	1.07	1.07	2.07	0.9	0.9	1987
YMT	101.3	0.54×10^6	0.55	0.55	1.40	0.6	0.6	1987
SYPH	149.4	26.40×10^6	0.31	0.32	0.56	1.0	1.0	1992
TIAT	77.6	3.24×10^6	0.77	0.98	1.40	0.84	1.24	1993

Bảng 1.5. Các kích thước của 1 bình TLD và các đặc trưng của TLD

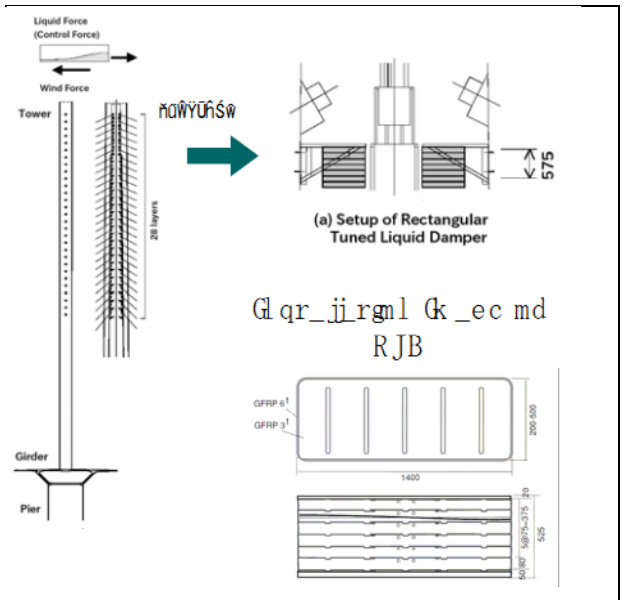
Tòa nhà	$D_D \times H_D$ (m×m)	n (số lớp)	N (số bình)	h_w (m)	f_D (Hz)	m_w (kg)	m_F (kg)	M_D (kg)	ϕ	μ (%)	μ_1 (%)
NAT	0.38×0.5	7	25	0.048	1.02	38.1	0	0.95×10^3	0.95	0.56	1.5
YMT	0.49×0.5	10	39	0.021	0.54	39.6	0	1.54×10^3	0.98	0.29	0.98
SYPH	2.0×2.01	9	30	0.12	0.31	3390.0	0	101.7×10^3	0.97	0.39	0.97
TIAT	0.6×0.125	1	1404	0.053	0.74	14.9	1.2	22.7×10^3	0.96	0.70	3.5

Việc đo khảo sát tại 4 tòa tháp dưới tác động của vận tốc gió nhỏ hơn 30m/s nhưng có thể dùng để suy luận cho các kết cấu khác trong giai đoạn khai thác dưới tác động của gió thường xuyên.

Với công trình cầu, việc áp dụng giảm chấn chất lỏng là chưa nhiều; các công trình được biết đến một cách điển hình trên thế giới và tại Việt Nam như cầu Sakitama – Nhật Bản (lắp đặt năm 1991) và cầu Bãi Cháy – Việt Nam (lắp đặt năm 2006).



Hình 1.11: Hệ thống TLD lắp đặt tại cầu Sakitama – Nhật Bản



Hình 1.12: Hệ thống TLD lắp đặt tại cầu Bãi Cháy – Việt Nam

Việc áp dụng hệ giảm chấn chất lỏng tại cầu Bãi Cháy – Quảng Ninh – Việt Nam từ năm 2006 đã đặt nền tảng cho các kỹ sữ, nhà khoa học Việt Nam trong các nghiên cứu sau này. Hệ giảm chấn chất lỏng lắp đặt tại cầu Bãi Cháy bao gồm 344 thùng có chiều dài 1400mm và chiều rộng thay đổi 300, 400, và 500mm được phân bổ cho 2 tháp. Các thùng này được đổ cùng một lượng chất lỏng (cùng chiều sâu chất lỏng như nhau) và được bố trí dọc theo chiều cao tháp. Hiệu quả của hệ này đã giảm chuyển vị đỉnh tháp xuống ½ giá trị lớn nhất dưới tác động của gió. Tuy nhiên, việc tính toán để xác định được hiệu

quả khi lắp đặt hệ TLD này và số lượng thùng có ý nghĩa gì, tại sao lại phải lắp đặt nhiều thùng như vậy và nếu các thùng không đổ lượng nước giống nhau thì hiệu quả sẽ thay đổi thế nào là vấn đề mà chưa một kỹ sư, nhà khoa học Việt Nam nào đề cập đến.

Thông qua việc áp dụng của hệ giảm chấn dùng chất lỏng này có thể thấy rằng:

Rõ ràng có thể thấy rằng việc ứng dụng hệ giảm chấn dùng chất lỏng (TLD) ở nước ta hiện nay còn ít, chủ yếu là nghiên cứu cơ bản và xác định hiệu quả, số ít các công trình thực tế áp dụng ở các dự án lại thường được thực hiện do các kỹ sư nước ngoài thiết kế. Các kỹ sư trong nước ít được tiếp cận hoặc chưa được đầu tư nghiên cứu nên hiểu biết trong tính toán thiết kế, bố trí, lắp đặt và lựa chọn là chưa nhiều.

1.7. Những vấn đề còn tồn tại và hướng nghiên cứu chính của luận án

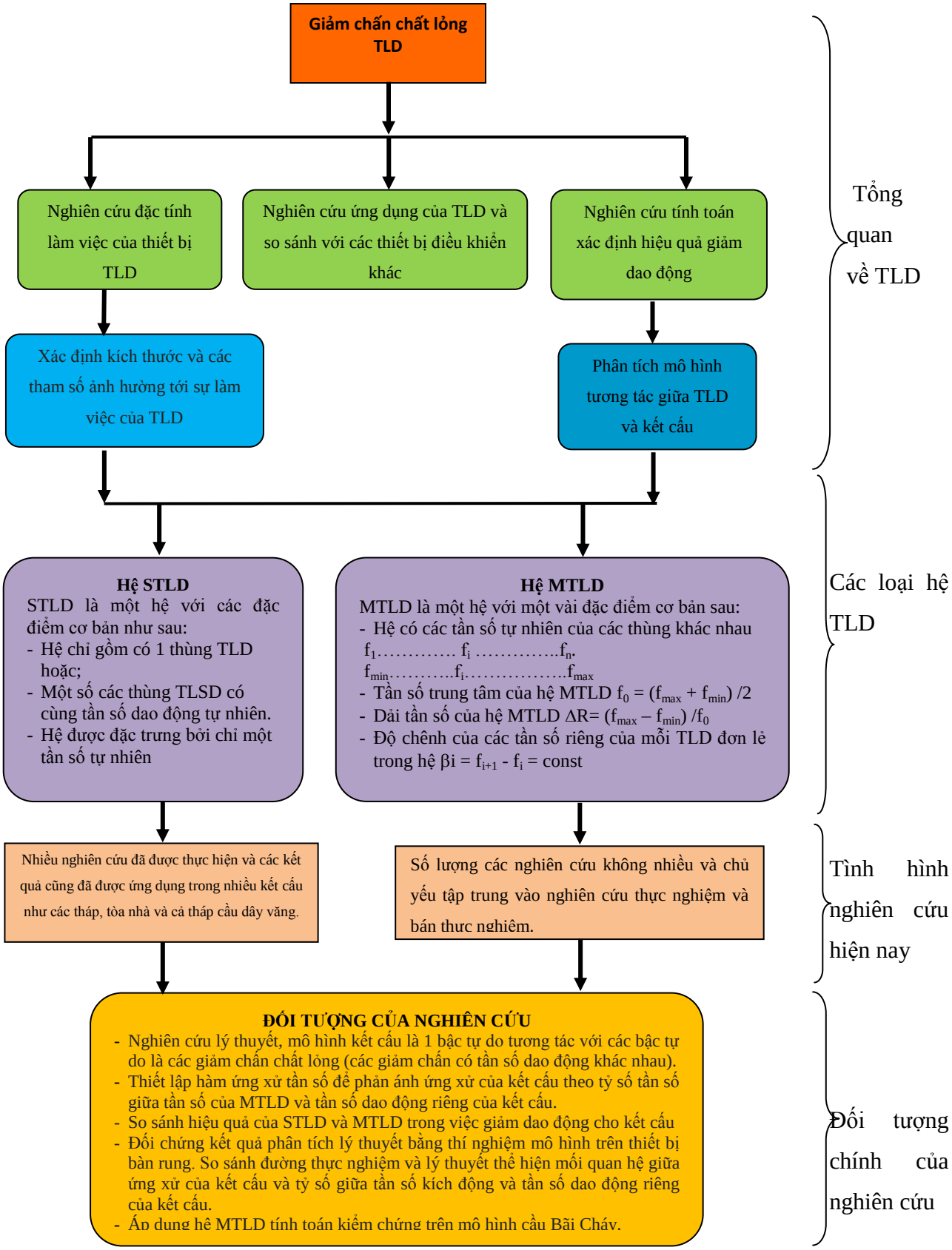
Quá trình hình thành hướng nghiên cứu của luận án được thể hiện thông qua việc phân tích tình hình nghiên cứu về hệ giảm chấn chất lỏng này và những vấn đề còn tồn tại của các nghiên cứu hiện có. Như vậy hiện nay có 3 hướng nghiên cứu chính về giảm chấn chất lỏng gồm:

(1) Các nghiên cứu về khả năng áp dụng, các đối tượng phù hợp cho việc áp dụng và xác định hiệu quả của giảm chấn trong việc giảm dao động cho kết cấu, đánh giá khả năng áp dụng khi so sánh với các thiết bị giảm chấn khác.

(2) Các nghiên cứu liên quan đến đặc trưng của giảm chấn chất lỏng gồm: nghiên cứu đặc điểm cấu tạo của thùng chứa TLD, của chất lỏng bên trong thùng. Trong nghiên cứu này chủ yếu là tìm cách xác định các yếu tố về hình dạng của thùng chứa chất lỏng và các tham số ảnh hưởng đến sự làm việc của giảm chấn chất lỏng như là chiều sâu chất lỏng, tỷ số giữa chiều sâu chất lỏng và chiều dài hoặc chiều rộng của thùng chứa.

(3) Các nghiên cứu liên quan đến sự hoàn thiện thiết bị trong đó là việc đề xuất các mô hình tính toán gồm cả mô hình tương tác giữa kết cấu và hệ giảm chấn và mô hình hoạt động chất lỏng bên trong thùng. Từ các nghiên cứu này đề xuất các giá trị tối ưu cho thiết kế hệ giảm chấn để giảm dao động cho kết cấu.

Có thể tóm tắt toàn bộ quá trình nghiên cứu về TLD từ trước tới nay, các vấn đề đã được quan tâm nghiên cứu chuyên sâu hay mới có với số lượng ít các nghiên cứu cùng với các nội dung nghiên cứu trong luận án được trình bày theo sơ đồ hình1.13:



Hình 1.13: Sơ đồ thể hiện tư tưởng chính nghiên cứu về TLD

Các nghiên cứu và ứng dụng của hệ giảm chấn chất lỏng từ trước tới nay đều tập trung vào hệ giảm chấn chất lỏng đơn tần số (STLD) – loại mà được định nghĩa là trên cùng

một hệ kết cấu có gắn nhiều thùng chứa chất lỏng TLD với cùng kích thước, cùng mực nước và cùng khối lượng hay nói cách khác là cùng gây ra 1 tần số dao động. Trong khi trường hợp các thùng giảm chấn chất lỏng TLD trong hệ không có cùng tần số dao động riêng (các thùng có kích thước khác nhau hoặc có kích thước giống nhau nhưng chiều cao mực nước bên trong thùng khác nhau) mà được gọi là hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) thì các nghiên cứu chi tiết và cả nghiên cứu ứng dụng còn chưa nhiều. Hiện có một số nghiên cứu về hệ giảm chấn đa tần số nhưng chủ yếu là nghiên cứu bán thực nghiệm.Vì vậy, để có thể nắm bắt được rõ hơn về hệ giảm chấn đa tần số (MTLD) nhằm xác định hiệu quả của hệ này trong việc giảm dao động cho các công trình thì cần có thêm các nghiên cứu và đây chính là nội dung chính mà luận án hướng tới.

Trên cơ sở nghiên cứu được thực hiện đối với giảm chấn khối lượng đa tần số (MTMD) bởi Igusa và Xu (1990, 1991, 1992) [85], người mà đã đề xuất hệ giảm chấn khối lượng đa tần số (MTMD) bao gồm một số lượng hữu hạn các giảm chấn khối lượng TMD đơn nhỏ có tần số tự nhiên phân bố theo một dải nào đó xung quanh tần số tự nhiên cơ sở của kết cấu. Tính hiệu quả và nhạy cảm của MTMD đã được khảo khảo sát số bởi Yamaguchi và Harpornchar (1992). Abe và Fujino (1993) đã đề xuất các công thức thiết kế dạng kín cho MTMD. Các nghiên cứu này đã khẳng định MTMD là rất có ý nghĩa, thậm chí khi tính cản của mỗi TMD riêng rẽ trong MTMD là thấp. Một hệ nhiều TMD là có hiệu quả hơn một TMD thông thường khi có sự đặt song song nhiều TMD để điều chỉnh tần số.

Những nghiên cứu này đã đặt nền tảng cho ý tưởng nghiên cứu hệ gồm nhiều giảm chấn chất lỏng MTLD đặt song song vào hệ kết cấu. Fujino và Sun(1993) [110] là những nhà nghiên cứu tiên phong khi nghiên cứu về hệ nhiều TLD. Nghiên cứu việc điều khiển dao động bởi hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) đã được thực hiện bước đầu bởi Fujino, L.M Sun (2010) [116]. Nghiên cứu khá chi tiết với các khảo sát bằng thực nghiệm về mối quan hệ của các tham số đến hiệu quả giảm dao động. Tuy nhiên các nghiên cứu còn sơ sài và dừng ở nghiên cứu bán thực nghiệm. Do vậy để có thể kiểm soát được hoạt động của hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số này, việc xây dựng một hàm ứng xử tần số để khảo sát ảnh hưởng của các tham số đặc trưng của giảm chấn chất lỏng đến hiệu quả giảm dao động cho kết cấu từ đó đề xuất cách thức thiết kế giảm dao động cho kết cấu khi sử dụng hệ này là hết sức cần thiết và là mục tiêu mong đợi mà luận án cần đạt được.

Hướng nghiên cứu và những nội dung chính của luận án

Từ các phân tích ở trên, hướng nghiên cứu của luận án được xác định bao gồm các nội dung sau:

- Nghiên cứu lý thuyết về mô hình đa bậc tự do cho tính toán tương tác giữa hệ MTLD và kết cấu.
- Xây dựng hàm ứng xử tần số phản ánh ứng xử của kết cấu khi có gắn hệ giảm chấn chất lỏng TLD so sánh với hệ khi không gắn hệ giảm chấn chất lỏng.
- Nghiên cứu đề xuất các tham số hợp lý tăng hiệu quả giảm chấn của hệ MTLD nhằm định hướng thiết kế giảm dao động cho kết cấu khi sử dụng MTLD. Đặc biệt nghiên cứu sự tương tác về khối lượng giữa các TLD đơn (đặc biệt là thùng TLD có tần số trung tâm) trong hệ giảm chấn chất lỏng đa tấn số MTLD với tổng khối lượng chất lỏng và ảnh hưởng của tỷ số này đến hiệu quả giảm dao động cho kết cấu.
- Nghiên cứu ảnh hưởng của vị trí lắp đặt đến hiệu quả của TLD
- So sánh hiệu quả của hệ giảm chấn đơn tần số STLD với hệ giảm chấn đa tần số MTLD trong việc giảm dao động cho kết cấu.
- Thực hiện thí nghiệm trên mô hình sử dụng thiết bị bàn rung nhằm kiểm chứng một phần các phân tích lý thuyết đã thực hiện. So sánh đường thực nghiệm và lý thuyết trong mối quan hệ giữa ứng xử của kết cấu và tỷ số giữa tần số kích động và tần số dao động riêng của kết cấu.
- Ứng dụng tính toán kiểm chứng hệ MTLD lắp đặt cho cầu Bãi Cháy trên cơ sở các phân tích chi tiết về hệ STLD hiện đang được lắp đặt tại công trình cầu.

CHƯƠNG 2

CƠ SỞ LÝTHUYẾT TÍNH TOÁN GIẢM CHẤN CHẤT LỎNG VÀ HỆ TƯƠNG TÁC GIỮA KẾT CẤU VỚI GIẢM CHẤN CHẤT LỎNG (TLD)

Áp lực chất lỏng trong thùng chứa chống lại ngoại lực tác dụng lên kết cấu gồm hai phần là tác dụng tĩnh và tác dụng động. Với các kết cấu nhẹ, dẻo và tính cản yếu như là tòa nhà cao tầng, các tháp cầu có chiều dài nhịp lớn, dao động do gió, động đất và các nhiễu loạn động học khác có thể gây ra các vấn đề khai thác hoặc an toàn cho kết cấu. Việc thiết lập các thiết bị bị động bao gồm các cơ cấu cản cũng là một lời giải và trở nên phổ thông để làm tiêu tan các dao động không mong muốn (Fujino 1990[110]).

Hiệu quả giảm dao động cho kết cấu chịu ảnh hưởng của các tham số giảm chấn trong đó có đặc điểm cấu tạo của hệ giảm chấn chất lỏng gồm: hình dạng và kích thước thùng chứa, loại và chiều sâu chất lỏng trong thùng, số lượng thùng, … tỷ số chiều sâu chất lỏng cần được phân tích kỹ lưỡng trên cơ sở phân tích sự làm việc của một giảm chấn đơn lẻ trong sự tương tác giữa hệ TLD và kết cấu. Cụ thể như sau:

2.1. Nguyên lý hoạt động cơ bản của giảm chấn chất lỏng (TLD)

Hoạt động cơ bản của giảm chấn chất lỏng TLD được hình thành trên cơ sở hoạt động của chất lỏng bên trong thùng chứa. Khi thiết bị giảm chấn chất lỏng TLD chuyển động (thường là do tác động của hệ kết cấu chuyển động kéo theo), nước trong thùng chứa chất lỏng chuyển động dạng chuyển động sóng. Các sóng nước hình thành có thể có dạng là một sóng tuyến tính, sóng dài, sóng nông và đôi khi là hình thành cả sóng vỡ. Ảnh hưởng của mỗi loại chuyển động sóng khác nhau sẽ tạo ra hiệu quả điều khiển dao động cho kết cấu của TLD là khác nhau. Hiệu quả này được đánh giá thông qua các lực xuất hiện trong hệ TLD khi nước chuyển động văng té hợp lại theo nguyên lý cộng tác dụng (tính chất chuyển động liên tục của sóng nước sẽ làm tăng tính cản cho kết cấu dưới tác dụng của gió [107][118]). Các lực hình thành nên do chuyển động sóng nước trong các thùng chứa gây ra các áp lực vào biên tường thùng và tạo ra các hiệu quả khác nhau trong việc giảm dao động đối với các kết cấu dạng tháp nói chung và tháp của các cầu dây nói riêng.

Đặc trưng của hệ giảm chấn chất lỏng TLD bao gồm các đặc tính phi tuyến của độ cứng

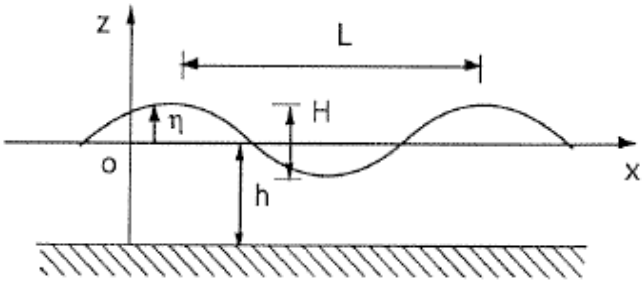
và tính cản bên trong giảm chấn. Chúng bị ảnh hưởng bởi các đặc trưng như vật liệu của bản thân giảm chấn chất lỏng, kích thước của thùng chứa chất lỏng, tỷ số chiều sâu chất lỏng so với kích thước thùng chứa và tính nhớt của chất lỏng.

Như vậy, bài toán nghiên cứu về sự làm việc của thiết bị TLD thực chất là một bài toán phi tuyến do chuyển động của chất lỏng bên trong thùng chứa mà thực chất là chuyển động của sóng. Việc tính toán một bài toán phi tuyến sẽ trở nên phức tạp hơn nhiều so với bài toán động học tuyến tính. Tuy nhiên nhiều nghiên cứu đã chứng tỏ được việc dùng bài toán động học tuyến tính tương đương để thay cho bài toán động học phi tuyến bằng việc sử dụng các tham số kết cấu trong hệ động học tuyến tính như c, k là các tham số phi tuyến[5], [74].

2.2. Cơ sở lý thuyết phân tích chuyển động của chất lỏng trong thùng chứa để tạo hiệu quả giảm chấn.

Việc tính toán tác động của chất lỏng trong thùng chứa dựa trên cơ sở lý thuyết sóng gồm các lý thuyết tuyến tính đối với các chuyển động của sóng được thể hiện nhằm mục đích hiểu rõ các đặc trưng cơ sở của chuyển động văng té của chất lỏng bên trong thùng chứa, chẳng hạn như tần số dao động tự nhiên, áp lực phân bố và sự phân tán có liên quan,.v.v…

Lý thuyết sóng nước nông tuyến tính



Hình 2.1: Định nghĩa các tham số trong chuyển động sóng

Xét dòng sóng có kích thước theo 2 phương như chỉ ra trên hình 2.1 (mặt phẳng x0z), chiêu sâu chất lỏng là h_0, và z=0 đặt tại bề mặt của chất lỏng khi mặt nước lặng (không có sóng), η mô tả mặt chuyển động tự do của chất lỏng, là một hàm của vị trí x biến đổi theo thời gian t. L và H thể hiện chiều dài sóng và chiều cao sóng. Biên độ sóng được giả định là rất nhỏ đến nỗi mà các chuyển động của sóng có thể coi là tuyến tính. Chuyển động của chất lỏng được giả thiết là nhớt, quay và không bị nén. Hàm thế Φ, do vậy, tồn tại và thỏa mãn phương trình Laplace,

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2}=0 \qquad (2.1)$$

Φ là hàm vị trí (x,z) và thời gian t. Phương trình này được giải theo các điều kiện biên. Giả thiết rằng hàm thế Φ có thể được viết dưới dạng như sau

$$\Phi(x,z,t)=X(x)Z(z)e^{-iwt} \qquad (2.2)$$

Trong đó w=2πf = 2π/T là tần số góc của chuyển động sóng, f và T là tần số tự nhiên và chu kỳ tự nhiên của chuyển động sóng.

Theo công thức (2.2) thay vào công thức (2.1), số hạng đầu tiên là đạo hàm riêng của x, và số hạng thứ hai là một đạo hàm riêng của z, do vậy mà có thể viết là

$$\frac{\partial^2 X}{\partial x^2}=-\frac{\partial^2 Z}{\partial z^2}=-k^2 \qquad (2.3)$$

Nghiệm X và Z được giả thiết là

$$\begin{aligned} X(x)&=Ae^{ikx}+Be^{-ikx}\\ Z(z)&=Ce^{kz}+De^{-kz}\end{aligned} \qquad (2.4)$$

Các hệ số, A, B, C, và D sẽ được xác định theo các điều kiện biên. Điều kiện biên dưới là

$$\omega=\frac{\partial\Phi}{\partial z}=0 \qquad (z=-h) \qquad (2.5)$$

Thay công thức.(2.4) và (2.5) vào công thức (2.3), có

$$Z(z)=2Ce^{-kh}\cosh\,(k(z+h)) \qquad (2.6)$$

Tại mặt tự do $z=\eta(x,t),$ có hai loại điều kiện biên; một là điều kiện biên động học

$$p=p_0=0 \qquad (z=\eta) \qquad (2.7)$$

Và còn lại là điều kiện biên động lực học

$$\frac{D\eta}{Dt}=\frac{\partial\eta}{\partial t}+u\frac{\partial\eta}{\partial x}=\omega \qquad (z=\eta) \qquad (2.8)$$

Trong đó, p_0 là áp lực trên mặt tự do. Phương trình Bernoulli thể hiện như hàm thế Φ:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t}=\frac{1}{2}\left\{\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)^2\right\}+\frac{p}{\rho}+g\eta=const, \qquad (2.9)$$

Trong đó, ρ là mật độ chất lỏng và g là gia tốc trọng trường. Chú ý rằng $\rho=\rho_0=0$ (công thức 2.7) tại mặt chất lỏng. Khi biên độ sóng nhỏ, các hạng mục phi tuyến có thể bỏ qua, sau đó chúng ta thiết lập.

$$\eta\cong-\frac{1}{g}\left(\frac{\partial\Phi}{\partial t}\right)_{z=n}\cong-\frac{1}{g}\left(\frac{\partial\Phi}{\partial t}\right)_{z=0} \qquad (2.10)$$

Mặt khác, việc bỏ qua hạng mục thứ hai từ công thức (2.8), ta có:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \qquad (z = 0) \qquad (2.11)$$

Lược bỏ η từ công thức (2.10) và (2.11), các điều kiện biên trên bề mặt tự do được viết lại là:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \qquad (z = 0) \qquad (2.12)$$

Thay công thức (2.2), (2.4) và (2.6) vào các công thức trên có:

$$\omega^2 = gk\tanh(kh) \qquad (2.13)$$

Công thức (2.13) là liên quan đến sự phân tán và sẽ được thảo luận như sau.
Đặt η dưới dạng

$$\eta = \frac{H}{2}\sin(kx - \omega t) \qquad (2.14)$$

Thay công thức (2.2), (2.4) và (2.6) vào công thức (2.10) và so sánh công thức (2.14) với công thức (2.10), các hệ số trong công thức (2.4) có thể được xác định là B=0 và

$$2ACe^{-kh} = -\frac{gH}{2\omega}\frac{1}{\cosh(kh)} \qquad (2.15)$$

Do vậy, hàm thế Φ có thể được thể hiện là

$$\Phi(x,z,t) \cong -\frac{gH}{2\omega}\frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)}\cos(kx - \omega t) \qquad (2.16)$$

Chú ý rằng mặt nghiêng của Φ dọc theo hướng z là một hàm của cosh(k(z+h)).
Với sự trợ giúp của công thức (2.9) và (2.16), áp lực phân bố được thể hiện là

$$p(x,z,t) = -pg\left(z - \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)}\eta\right) \qquad (2.17)$$

<u>Lý thuyết sóng nước sâu, sóng nước nông và sóng dài</u>

Chúng ta biết rằng dạng sóng được hình thành là do chiều sâu của nước trong hệ đang xét. Có hai trường hợp cực hạn, chiều sâu h là lớn hơn hoặc nhỏ hơn nhiều chiều dài sóng. Sóng đầu tiên xuất hiện gọi là sóng nước sâu (sóng mặt) và sau đó là sóng dài (hoặc sóng nước rất nông). Nói chung, các sóng nằm trong dải của h/L>1/2 và h/L<1/20-1/25 được coi là sóng nước sâu và sóng dài (xem bảng 1.2). Với sóng nước sâu, tần số tự nhiên trong công thức (2.13) không phụ thuộc vào chiều sâu chất lỏng, h và có thể được đơn giản hóa như:

$$\omega = \sqrt{\frac{2\pi g}{L}} \qquad (2.18)$$

Với sóng dài, tần số tự nhiên trong công thức được đơn giản là

$$\omega = \sqrt{gk^2 h} = k\sqrt{gh} \qquad (2.19)$$

Vận tốc pha sóng được định nghĩa là

$$c = \frac{\omega}{k} - \frac{L}{T} \qquad (2.20)$$

Hay

$$c \equiv c_0 = \sqrt{gh} \qquad (2.21)$$

Như vậy các đặc trưng chuyển động sóng được điều chỉnh chỉ theo chiểu sâu sóng h.

Lý thuyết sóng nước nông dựa trên cơ sở các công thức chiều sâu trung bình của định luật bảo toàn về khối lượng và động lượng. Việc đưa ra các công thức này bao gồm việc thừa nhận nước là dòng chất lỏng không nhớt và không bị nén, chiều sâu nước là rất nhỏ khi so sánh với chiều dài đặc trưng theo phương ngang của chuyển động, phần áp lực là thủy tĩnh tại mọi nơi, và vận tốc theo phương ngang là phân bố đều theo chiều sâu. Nếu sự truyền sóng theo một phương kích thước được xét đến, các công thức về sự bảo toàn nước nông về khối lượng và động lượng tương ứng là

$$h_t + (uh)_x \qquad (2.22)$$

Và $u_t + uu_x + gh_x = 0$ (2.23)

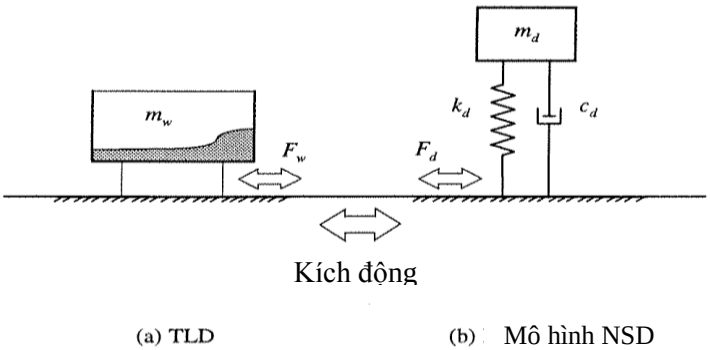
Một sóng được mô tả bởi các công thức sóng nước nông với tốc độ truyền sóng độc lập với chiều dài sóng của nó, nhưng phụ thuộc vào biên độ của nó: biên độ sóng cao hơn thì sự truyền sóng nhanh hơn. Mặt khác lý thuyết sóng nước nông thể hiện lại một hệ sóng không phân tán và có tính phi tuyến. Các mô hình tính toán dựa trên cơ sở sự không phân tán và các phương trình sóng nước nông phi tuyến hoàn toàn. Trên thực tế, đây chính là đặc trưng của lý thuyết sóng nông mà được thừa nhận để phân tích chuyển động văng té trong hệ TLD khi tập trung vào sự ứng xử dưới tác động của biên độ kích động lớn.

2.3. Mô hình tính toán hệ giảm chấn chất lỏng (TLD) và hệ tương tác giữa kết cấu và TLD.

Mô hình tính toán hệ giảm chấn chất lỏng TLD chủ yếu là các mô hình phi tuyến do hoạt động của chất lỏng trên cơ sở lý thuyết sóng nước nông (dưới tác dụng động của các lực kích thích). Có nhiều phương pháp mô phỏng sự làm việc tương tác giữa kết cấu và hệ TLD. Các mô hình này nhằm xác định ra lực cắt cơ sở tại biên thùng do tác động văng té của chất lỏng. Có 2 mô hình đã được áp dụng tính toán trong nhiều nghiên cứu như là: mô hình NSD (mô hình phi tuyến về độ cứng và tính cản) - mô hình TMD tương đương

của TLD, mô hình RCM - mô hình mô phỏng số dòng chất lỏng tính toán [33].

Mô hình TMD tương đương phát triển trên cơ sở kết hợp mô phỏng số của hệ TLD theo hai phương và các kết quả thí nghiệm (mô hình NSD – hình 2.2). Mô hình NSD là mô hình có sự kết hợp của mô hình giảm chấn khối lượng với độ cứng và tính cản phi tuyến để thể hiện các đặc trưng phi tuyến của TLD do hoạt động chất lỏng chuyển động bên trong các thùng chứa của TLD.



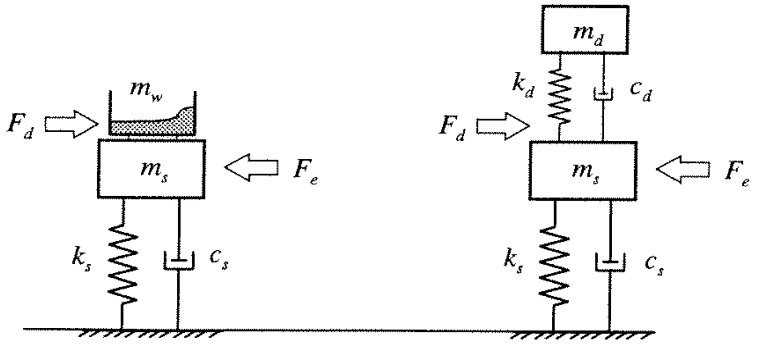
Hình 2.2: Mô hình TMD tương đương của TLD (mô hình NSD)

Mô hình TMD tương đương của TLD là mô hình mà có sự kết hợp chặt chẽ với các đặc trưng độ cứng và tính cản phi tuyến được phát triển trên cơ sở các kết quả thí nghiệm. Khi nước chuyển động văng té, khối lượng nước tác động trở lại đối với hoạt động của kết cấu theo cách tương tự như khối lượng của TMD. TLD thể hiện các đặc trưng cản và độ cứng mang tính kế thừa do chuyển động văng té của nó gây ra. Khi tính cản và độ cứng của TLD được xác định, thì TLD có thể được mô hình như hệ khối lượng đơn bậc tự do có độ cứng và cản. Điều này có nghĩa là hệ tương tác giữa TLD và kết cấu có hai bậc tự do, một bậc tự do là kết cấu và bậc tự do còn lại là TLD (Wakahara, 1993 [97]).

Mô hình thứ hai là mô hình dòng chất lỏng trên cơ sở phương trình sóng nước nông với các tính chất đặc trưng của chuyển động sóng nước khi sử dụng phương pháp lựa chọn ngẫu nhiên (mô hình RCM) là phương pháp được đề xuất bởi Gardarsson và Yeh (1994) [75]. Một chuỗi của các phân tích số được chỉ ra để sử dụng các mô hình này để mô phỏng chuyển động văng té của chất lỏng trong các thùng hình chữ nhật. Mô hình này cũng được đánh giá bằng các phân tích kết quả thí nghiệm khảo sát.

Phương pháp lựa chọn ngẫu nhiên RCM là một sự phối hợp bảo toàn va chạm; sự va chạm được thể hiện bằng sự không liên tục của cao độ bề mặt chất lỏng và vận tốc giữa hai điểm liền kề nhau trên bề mặt chất lỏng. Sự phối hợp này không gây ra sự phân tán hoặc tiêu tan năng lượng và không chính xác theo như tính toán của các công thức toán

học của lý thuyết sóng nước nông, nhưng có giá trị giới hạn trong mô phỏng chuyển động của chất lỏng thực, chẳng hạn chất lỏng chuyển động dưới tác động của môi trường, vùng sóng vỡ là không liên tục và trường áp lực không hoàn toàn là thủy tĩnh. Tuy nhiên mô hình thứ 2 tương đối phức tạp do cần tiến hành thí nghiệm nhiều lần với các khảo sát để so sánh và đưa ra kết luận.



(a) TLD khi được mô hình RCM (b TLD khi được mô hình NSD

Hình 2.3: Hệ tương đương giữa mô hình gồm 1 bậc tự do của kết cấu và TLD và mô hình hai bậc tự do với độ cứng và tính cản phi tuyến (mô hình NSD)-[76]

Việc sử dụng hệ thiết bị giảm chấn khối lượng (TMD) được đề cập trong nhiều nghiên cứu và hầu hết các nghiên cứu đều thiết lập một giảm chấn khối lượng TMD tương đương thay thế cho giảm chấn chất lỏng TLD nhưng có xét đến đặc trưng phi tuyến do chuyển động của dòng chất lỏng thông qua tham số độ cứng và tính cản của TMD tương đương mang tính chất phi tuyến trong phân tích và tính toán thiết kế. Thực tế đặc trưng phi tuyến của TLD là khá phức tạp và không thể bỏ qua trong thiết kế TLD để giảm dao động cho kết cấu. Để hiểu rõ việc có thể sử dụng mô hình TMD tương đương của TLD trong tính toán, cần thiết phải có các khảo sát, thậm chí thí tiến hành các thí nghiệm trên thiết bị bàn rung.

Không giống như TMD là một hệ tuyến tính, TLD có các đặc trưng phi tuyến nên phải được mô hình hóa như một hệ phi tuyến. Tham số độ cứng k_d, cản c_d và lực cắt cơ sở (hoặc lực cản) do TLD F_w, và lực giảm chấn F_d (mô hình TMD tương đương) cần được thể hiện rõ đặc tính phi tuyến của giảm chấn chất lỏng khi được áp dụng.

Dưới tác động của lực kích động, khối lượng trong giảm chấn khối lượng TMD chuyển động, hệ tương tác giữa kết cấu và TMD là tuyến tính. Trong khi đó nếu coi chất lỏng trong TLD như một khối lượng chuyển động thì cơ cấu hoạt động trong TLD không khác gì TMD. Tuy nhiên, không giống như TMD, chuyển động chất lỏng trong TLD mang đặc tính phi tuyến mạnh, chất lỏng bên trong TLD tham gia chuyển động với phương trình sóng nước khác nhau khi biên độ kích động khác nhau. Do vậy mà khi sử dụng TMD

tương đươngthay cho TLD [56], hệ được đặc trưng bởi 3 tham số: khối lượng có hiệu (khối lượng tương đương), tần số và tính cản. Khối lượng có hiệu, tần số và tính cản không phải là tham số tuyến tính, mà là một hàm mang đặc trưng phi tuyến. Hàm này phụ thuộc vào chuyển động sóng trong TLD, biên độ, tần số của lực kích thích và hình dạng của thùng chứa TLD.

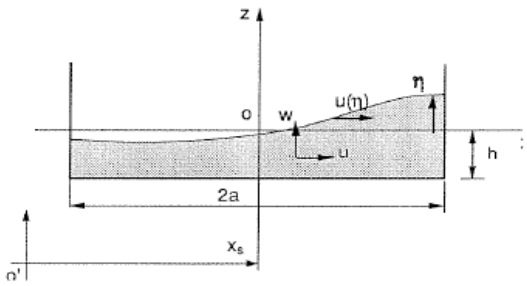
Khi biên độ kích động nhỏ, chuyển động chất lỏng trong TLD là chuyển động sóng mặt (lý thuyết sóng nước nông). Điều này có nghĩa là chỉ một phần chất lỏng tham gia chuyển động và tính cản của chất lỏng chuyển động là nhỏ.

Giá trị của tính cản tăng cùng với sự tăng của phần chất lỏng tham gia chuyển động bên trong thùng chứa. Khi biên độ kích động tăng, số lớp khối lượng chất lỏng tham gia chuyển động lớn và tiến gần đến tổng khối lượng của chất lỏng bên trong thùng TLD. Tuy nhiên, khi tổng khối lượng chuyển động thì hoạt động của TLD là khác với TMD. Do vậy cần phải xem xét hệ TMD tương đương dưới tác động của kích thích biên độ lớn. Tính cản của chuyển động chất lỏng sẽ tăng khi biên độ sóng tăng dưới tác động của kích thích biên độ lớn. Đặc tính phi tuyến của tính cản của chất lỏng xảy ra tại lớp biên và bề mặt chất lỏng và sóng vỡ (nếu xuất hiện), sẽ gây ra hiện tượng cản phi tuyến. Sóng vỡ xuất hiện, sự phân tán năng lượng xảy ra và do vậy tỷ số cản trở nên lớn và hiệu quả của TLD giảm. Mô hình tương tác giữa TMD tương đương và kết cấu sẽ chỉ có nghiệm là gần đúng [62].

Các tham số của hệ TMD tương đương được tính toán, phân tích theo chuyển động chất lỏng bên trong thùng chứa TLD với các tham số đặc trưng là tần số, khối lượng, độ cứng và tính cản, chi tiết trong mục 2.4 dưới đây.

2.4. Các tham số cơ bản và cơ chế tạo lực cản do chất lỏng chuyển động văng té trong giảm chấn chất lỏng (TLD).

Xét thùng cứng hình chữ nhật (hình 2.2) có chiều dài L=2a và chiều sâu trung bình của chất lỏng h_0. Thùng bị kích động theo phương ngang. Hệ tọa độ Đề Các (o-x-z) với gốc tọa độ của nó được đặt tại tâm của mặt trung bình của chất lỏng.



Hình 2.4: Các kích thước cơ bản của thùng chứa hình chữ nhật dưới tác động của chuyển vị ngang.

Sự văng té của chất lỏng trong thùng hình chữ nhật phải thỏa mãn các điều kiện biên trên tường bên thùng là:

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0 \qquad (x = \pm a) \qquad (2.24)$$

Khi các tường của thùng là thẳng đứng, chất lỏng văng té trong thùng có thể xem là sự cộng tác dụng của một sóng tiến tới và sóng dội lại của nó, ngược pha và chuyển động theo hướng ngược chiều. Chiều cao sóng có thể được xác định như sau:

$$\eta = \frac{H}{2}\{\sin(kx + \omega t) - \sin(kx - \omega t)\} = H\cos(kx)\sin(\omega t) \qquad (2.25)$$

Trong trường hợp xét chuyển động theo phương ngang của TLD, thì chiều cao sóng η có dạng:

$$\eta = H\sin(kx)\sin(\omega t) \qquad (2.26)$$

Tương ứng với điều này, hàm thế Φ được viết lại là:

$$\Phi(x,z,t) = \frac{gH}{\omega}\frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)}\sin(kx)\cos(\omega t) \qquad (2.27)$$

Để thoả mãn điều kiện biên theo công thức (2.24), Đặt

$$\cos(kx) = 0 \qquad (x = \pm a) \qquad (2.28)$$

$$k = \frac{2n-1}{2a}\pi \qquad (n = 1,2,.....) \qquad (2.29)$$

k là số sóng, và có thể được thể hiện bởi chiều dài sóng L là $k = \frac{2\pi}{L}$

Công thức (2.29), chỉ ra chiều dài sóng của mode văng té cơ sở là 2 lần của thùng L=4a; $\omega^2 = gk\tanh(kh)$

Như vậy, tần số tự nhiên của chất lỏng văng té trong một thùng hình chữ nhật sẽ là:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2n-1}{2a}\pi g\tanh(\frac{2n-1}{2a}\pi h)} \qquad (\pi = 1,2.....) \qquad (2.30)$$

Trong đó, n biểu thị các mode khác nhau của sự văng té chất lỏng. Tần số dao động tự nhiên cơ sở (n=1) là:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\pi g}{2a}\tanh(\frac{\pi h}{2a})} \qquad (2.31)$$

Công thức trên thể hiện cho ta thấy khi biên độ kích động cơ sở tăng thì:

- *Tần số cộng hưởng tăng*
- *Giá trị lớn nhất của chiều cao sóng lớn nhất tăng cùng với sự tăng của tần số*

Tần số tự nhiên của chất lỏng văng té trong thùng chứa hình chữ nhật tăng cùng với sự

tăng của biên độ kích thích. Khi biên độ kích thích là nhỏ hoặc tần số kích thích là khá xa với tần số cộng hưởng, biên độ sóng là nhỏ thì sóng vỡ không xuất hiện. Tần số dao động riêng của TLD và tham số cản của TLD là các hàm phụ thuộc chiều cao chất lỏng chuyển động văng té nên mang đặc trưng phi tuyến mạnh. Trong các khảo sát của luận án, để tránh hiện tượng công hưởng xảy ra gây khó khăn cho việc xác định các tham số này, thừa nhận biên độ kích động là nhỏ.

Gọi f_{TLD} là tần số dao động riêng của TLD và được xác định theo công thức

$$f_{TLD} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\pi g}{L}\tanh(\pi\frac{h_0}{L})} \text{ đối với thùng chứa hình chữa nhật} \quad (2.32)$$

Và $$f_{TLD} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1.17\pi g}{D}\tanh(\frac{1.17\pi h_0}{D})} \text{ đối với thùng chứa hình tròn.} \quad (2.33)$$

Khối lượng của hệ TMD tương đương được lấy theo mode dao động tại vị trí lắp đặt thiết bị giảm chấn. Khối lượng này gọi là khối lượng hình thái có hiệu W_m và được định nghĩa như công thức 2.34 dưới đây:

$$W_{nr} = \frac{\left[\sum_{i=1}^{N}\Phi_{im}W_i\right]^2}{\sum_{i=1}^{N}\Phi_{im}^2 W_i} \quad (2.34)$$

Trong đó: w_i: khối lượng của mode thứ i của kết cấu

Φ_{im} : giá trị mode dao động thứ i tại khối lượng thứ i của kết cấu

Điều này có thể được chứng minh bởi Clough và Penzien (1975) [72] bằng cách phân tích tổng các khối lượng hình thái có hiệu cho tất cả các mode dao động của tòa nhà là cân bằng với tổng khối lượng thiết kế của tòa nhà, do vậy có:

$$\sum_{m=1}^{N} W_m = \sum_{i=1}^{N} W_i \quad (2.35)$$

Công thức trên cho thấy sự tiện lợi nhất trong việc quyết định số lượng các mode dao động có ý nghĩa để xét cho thiết kế. Đặc biệt khi áp dụng phương pháp phân tích động học, thì tất cả các mode dao động có nghĩa của dao động được kể đến.Yêu cầu này có thể thỏa mãn số lượng chính xác các mode dao động sao cho tổng khối lượng hình thái có hiệu ít nhất là bằng 90% hoặc hơn của khối lượng thiết kế động học cho kết cấu. Hơn nữa điều này cũng thể hiện rõ sự khác nhau giữa mô hình TMD và TLD. Dưới tác động kích động toàn bộ

khối lượng của TMD chuyển động tham gia trong việc điều khiển dao động cho kết cấu, còn TLD thì khối lượng chất lỏng tham gia điều khiển dao động cho kết cấu phụ thuộc vào biên độ lực kích động, do vậy có thể chỉ có một phần khối lượng chất lỏng tham gia hoặc cả khối lượng chất lỏng tham gia.

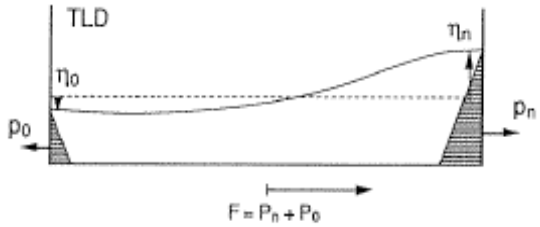
Sun và các cộng sự (1992) đã nhận thấy tính phi tuyến của TLD phụ phuộc vào tỷ số của chiều sâu chất lỏng trong TLD và chiều dài thùng. Tính cản của chuyển động văng té của nước nông là khó có thể xác định theo phép giải tích tích phân, đặc biệt với trường hợp sóng vỡ. Áp lực p có thể được thể hiện dưới dạng của công thức (2.36) là:

$$\frac{1}{\rho}(\rho.\rho_0) = g\left(\eta\frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)} - z\right) \qquad (2.36)$$

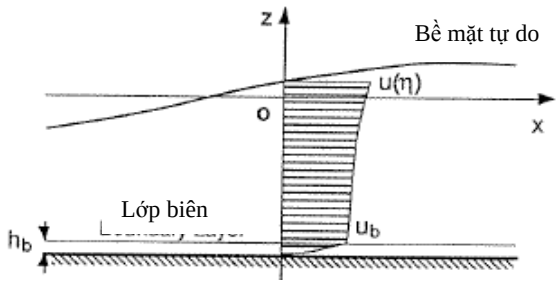
Kết hợp với công thức (2.27) theo z, tổng áp lực ngang P, lực tác động tại cuối tường của thùng TLD có thể tính được. Bỏ qua các ma sát của tường bên và đáy, lực cắt cơ sở, F=F(t) của thùng do chuyển động của chất lỏng là

$$F = P_n + P_0 \qquad (2.37)$$

P_n và P_0 là lực ngang do chất lỏng gây ra (tổng áp lực) tác động lên các tường bên phải và bên trái của thùng (hình. 2.5).



Hình 2.5: Lực cắt cơ sở do chuyển động chất lỏng



Hình 2.6: Trắc dọc vận tốc chất lỏng thay đổi theo phương x và lớp biên bên ngoài

Lực cản hình thành do chuyển động văng té của chất lỏng là một tham số có ý nghĩa trong việc thiết kế hệ giảm chấn chất lỏng. Tham số này hình thành do ma sát giữa chất lỏng tại lớp biên thùng và bề mặt tự do của chất lỏng. Kết cấu với TLD có tính cản thấp có ứng xử lớn tại tần số kích động nào đó. Khi tính cản của chất lỏng đạt giá trị tối ưu

trong TLD, dao động của kết cấu có thể bị phân tán trong một dải tần số rộng.

Ảnh hưởng của tính cản với tần số dao động tự nhiên được bỏ qua nếu chất lỏng bên trong TLD là nước vì nó chỉ ra tính cản rất thấp. Khi chất lỏng văng té với biên độ sóng lớn, tần số cộng hưởng khá xa với tần số tự nhiên và được tính toán theo công thức 2.31 do tính phi tuyến của sự văng té.

Bề mặt chất lỏng chuyển động với tần số cao hay thấp là do đặc tính phi tuyến của chất lỏng văng té tương ứng với tỷ số chiều sâu chất lỏng là nhỏ (<0.6) hoặc lớn hơn (>0.6).

Tần số tự nhiên của chất lỏng văng té phụ thuộc vào biên độ sóng. Không thể điều chỉnh một TLD hoàn hảo cho kết cấu với bất kỳ biên độ kích động nào. Tần số tự nhiên của TLD không tuyến tính như công thức 2.31 đã sử dụng, do vậy mà việc thiết kế TLD có tần số dao động bằng với tần số dao động riêng của kết cấu là khó đạt được và điều này có thể được hiểu là lỗi điều chỉnh.

Công thức 2.31 chỉ ra rằng tần số tự nhiên tuyến tính phụ thuộc vào kích thước thùng chứa và tỷ số chiều sâu chất lỏng ε. Trong các nghiên cứu thường khảo sát các thông số của TLD trong dải f_w<1Hz, a<200cm, và ε <1.

Cho TLD với tỷ số chiều sâu ε, tần số dao động tự nhiên f_w của TLD giảm khi kích thước thùng a lớn nên. Tần số dao động tự nhiên của TLD là tham số có ý nghĩa chịu ảnh hưởng bởi kích thước thùng khi thùng TLD nhỏ (a<50cm), khi thùng TLD là lớn (a>150cm) thì sự nhạy cảm với biến đổi của tần số kích động nhỏ. Như vậy, trong dải tỷ số chiều sâu, tần số f_w có thể thay đổi lớn với kích thước thùng nhỏ hơn.

Tỷ số giữa chiều sâu chất lỏng và chiều dài thùng lớn, kết quả cho tần số dao động tự nhiên của TLD kích thước a là cao. Tần số dao động tự nhiên là khá nhạy cảm khi tỷ số giữa chiều sâu chất lỏng và chiều dài thùng nhỏ. Nói chung, tần số tự nhiên chịu ảnh hưởng bởi kích thước thùng và tỷ số chiều sâu nhỏ. Tỷ số chiều sâu chất lỏng không nên quá lớn để tránh kích thước thùng quá lớn. Mặt khác, kích thước thùng nhỏ thì có thể sử dụng chất lỏng nông khi thiết kế TLD với tần số dao động tự nhiên cao.

Tính cản của chất lỏng văng té trong TLD ảnh hưởng đến hiệu quả và là tham số quan trọng trong thiết kế giảm chấn. Khi sử dụng nước bình thường tính cản chất lỏng rất thấp. Kết cấu với TLD tính cản thấp có ứng xử lớn tại tần số kích động nào đó. Khi tính cản của chất lỏng trong TLD tối ưu, dao động của kết cấu có thể phân tán trong một dải tần số rộng.

Với TLD sử dụng nước thường, tính cản của chất lỏng văng té do ma sát tại lớp biên và bề mặt chuyển động tự do của chất lỏng thấp.

Hệ số cản chịu ảnh hưởng bởi kích thước thùng a và chiều sâu chất lỏng ε. Để hiểu đơn giản, tỷ số cản ξ_w của chất lỏng văng té được xác định trên cơ sở lý thuyết sóng tuyến tính cụ thể được thể hiện theo một số tác giả như sau:

Tỷ số cản ξ_w giảm khi chiều sâu chất lỏng hoặc kích thước thùng chứa tăng. Tỷ số cản trở nên rất nhỏ, thậm trí nhỏ hơn 1% khi tỷ số chiều sâu chất lỏng lớn hơn 2. Giá trị cản này là nhỏ hơn nhiều giá trị tối ưu 6%.

Công thức cơ bản xác định tỷ số cản của kết cấu sử dụng trong xây dựng phương trình là

$$\xi_w = \frac{\lambda}{2\omega_w} \quad \text{và } \xi_S = \frac{c}{2mw_n} = \frac{c}{c_{cr}} \qquad (2.38)$$

Tham số cản của TLD, ξ_D được xác định theo công thức:

$$\xi_D = \frac{1}{h}\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\upsilon}{\pi f_{TLD}}}\left(1+\frac{h}{b}\right) \text{ Fujino (1993)} \qquad (2.39)$$

$$\xi_D = \frac{1}{h}\frac{1}{2}\frac{\sqrt{w\upsilon}\left(1+\frac{2h}{b}+S\right)}{2\sqrt{2}(\eta+h)w_D} \text{ Sun (1992) [109]} \qquad (2.40)$$

Trong đó chất lỏng sử dụng được thừa nhận là nước, do vậy mà độ nhớt v=0.01cm^2/s. Thừa nhận rằng biên độ sóng là nhỏ, chẳng hạn $\eta \ll h$ và thùng TLD có $\frac{2h}{b}$=20% và hệ số nhiễu loạn bề mặt có giá trị bằng 1. Tỷ số cản thể hiện là:

$$\xi_w = \frac{1}{a\varepsilon}\frac{\sqrt{2}}{2}\frac{1}{2}\frac{\sqrt{v}}{\omega_w}(1+0.2+1) \qquad (2.41)$$

Với chiều sâu chất lỏng ε<1, tỷ số cản tăng phần nào khi chiều sâu chất lỏng giảm. Do vậy chiều sâu chất lỏng là nông (tỷ số chiều sâu chất lỏng nhỏ) nên được sử dụng để thiết lập tính cản cao hơn cho chuyển động văng té của chất lỏng tiến gần đến giá trị cản tối ưu.

Tùy thuộc vào tần số kích động và biên độ sóng mà tính cản của chất lỏng văng té là tuyến tính hay phi tuyến. Nói chung, tính cản của chất lỏng văng té tăng khi biên độ kích động tăng. Sự văng té chất lỏng với sóng vỡ dưới tác động của biên độ kích động lớn, năng lượng phân tán do sóng vỡ là khác với chất lỏng văng té thông thường. Do vậy, cần thiết để tăng tính cản của chất lỏng văng té để tạo TLD có hiệu quả hơn.

Trong các tham số của TLD, tính cản của sự văng té ảnh hưởng đến hiệu quả của TLD. Nói chung, tính cản của chất lỏng văng té là nhỏ hơn giá trị tối ưu nếu chất lỏng trong

TLD là nước. Một vài phương thức được khảo sát để tăng tính cản của chất lỏng văng té như là sử dụng chất lỏng nông, chất lỏng có độ nhớt cao, hoặc thêm các vật nổi vào bề mặt chất lỏng.

Phương trình 2.36 chỉ ra rằng tỷ số cản của chất lỏng văng té lấy tỷ lệ nghịch với tỷ số chiều sâu chất lỏng theo kích thước thùng chứa của TLD. Tính cản cao có thể được thiết lập khi sử dụng chất lỏng nông (tỷ số chiều sâu chất lỏng nhỏ).

Thông qua kết quả thí nghiệm TLD với tỷ số chiều sâu chất lỏng nhỏ, Sun chỉ ra được hiệu quả trong việc giảm dao động là tốt hơn. Với cùng tỷ số khối lượng =1%, với kích thước thùng 2a =25cm (và h nông hơn) thì TLD có hiệu quả hơn loại giảm chấn có kích thước lớn hơn 2a =32cm. Điều này được hiểu là do tính cản của chuyển động chất lỏng khác nhau. Tỷ số chiều sâu chất lỏng cho các thùng loại 2a =25cm và loại 2a = 32cm là 0.17 và 0.23. Tính cản của chất lỏng văng té với tỷ số chiều sâu chất lỏng nhỏ hơn là cao hơn và gần với giá trị tính cản tối ưu hơn [109].

Chất lỏng nông trong TLD sẽ tạo ra tính cản của chất lỏng cao hơn để có được hình dạng tốt hơn cho thùng chứa chất lỏng của giảm chấn. Tuy nhiên, kích thước TLD nhỏ hơn thì phải sử dụng chất lỏng nông để có tần số tự nhiên nào đó, còn số lượng lớn TLD chỉ là để thiết lập tỷ số khối lượng. Đây là điều mà liên quan đến giá của các thùng TLD và khoảng yêu cầu có thể lắp đặt cho TLD. Mặt khác, các sóng trong TLD nước nông dễ bị vỡ trong chuyển động đặc biệt khi chịu biên độ kích động lớn. Tính cản của chất lỏng văng té khi sóng vỡ xảy ra là khó để xác định bằng phân tích lý thuyết. Mô hình đề xuất bởi Sun Limin cũng đã chỉ ra cách tính cho trường hợp sóng vỡ [81].

Thay cho việc phải thay đổi kích thước thùng chứa TLD và chiều sâu chất lỏng, tính cản của chất lỏng có thể được điều khiển bằng việc thay đổi độ nhớt của chất lỏng trong TLD. Sun limin đã thực hiện thí nghiệm trên bàn rung khi cho độ nhớt của chất lỏng trong TLD cao hơn. Kết quả thí nghiệm chỉ ra rằng cả cao độ bề mặt chất lỏng và lực cắt cơ sở đã giảm do độ nhớt chất lỏng tăng. Tính phi tuyến của chất lỏng văng té trở nên yếu hơn khi độ nhớt của chất lỏng tăng.

Mô hình TLD đề xuất trong tính toán cản của chất lỏng trong TLD chỉ ra trong công thức 2.40 của Sun là cho trường hợp chất lỏng có độ nhớt nhỏ như nước thông thường.

Bản chất hiệu quả giảm dao động của hệ TLD là lực cắt cơ sở tính toán trên cơ sở chiều cao sóng gần biên tường của thùng chứa hình chữ nhật. Lực cắt này được tính toán sao

cho có giá trị bằng nhưng ngược pha với lực kích động do gió (cân bằng trong phương trình động học).

TLD sinh ra lực thủy động do chuyển động văng té của chất lỏng. Các lực thủy động của TLD được tính toán trên cơ sở áp lực thủy tĩnh trên các tường bên thùng. Với biên độ nhỏ kích động, lực cắt cơ sở thường đạt đến xấp xỉ lực thủy động bởi áp lực thủy tĩnh trong các biên cuối của thùng chứa. Với biên độ kích động lớn, xuất hiện các sóng bị vỡ trong các vùng tần số nào đó. Khi xét tới áp lực thủy tĩnh của chất lỏng trong thùng thì có thể bỏ qua gia tốc theo phương đứng của phần tử nước.

Việc thừa nhận áp lực thủy tĩnh trong biên cuối thùng và bỏ qua gia tốc thẳng đứng của phần tử nước, lực thủy động của TLD, thì lực thủy động tuyến tính $F_{\eta I}$ có thể được tính toán (Jin Kyu Yu, 1997 [32]) như sau:

$$F_{\eta I} = \frac{1}{2}\rho g b(h_l^2 - h_r^2) \qquad (2.42)$$

Trong đó ρ là mật độ nước; g là gia tốc trọng trường; b là bề rộng thùng chứa, h_l và h_r là cao độ mặt nước tại các biên cuối tường.

Các lực thủy động phi tuyến, Fη thường được tính toán từ việc đo các chiều cao sóng tại biên cuối tường của thùng khi sử dụng công thức (2.25). Giá trị cực đại có thể đạt đến gần với tần số cộng hưởng. Điều này có thể được giải thích như sau: sau khi sóng cực đại va vào biên cuối tường, khối lượng còn lại của nước tăng nhanh tại biên thùng. Mặc dù việc tăng nhanh này sau đấy không có nghĩa làm tăng áp lực nước, nhưng lực phân rã của sóng từ chiều cao sóng tự nó đạt đến giá trị lớn nhất. Sau đó lực tính toán lớn nhất có thể bị cường điệu lên bởi khoảng tăng của sóng là ngắn khi có sự không đồng nhất giữa các giá trị như tính không đồng nhất về độ lớn của các lực cản gần tần số cộng hưởng (khoảng 10 tới 20%).

Tương tự khi phân tích ứng xử của chất lỏng trong thùng TLD hình tròn để tính toán sự làm việc của hệ sử dụng mô hình TMD tương đương xuất phát từ hệ TLD hình chữ nhật cho thấy: Khi kết cấu chuyển dịch theo nhiều hướng, TLD hình tròn có thể có ưu điểm trong việc làm giảm dao động do chuyển dịch theo nhiều phương hơn là chỉ theo hai phương như đối với TLD hình chữ nhật, và các đặc trưng độ cứng và tính cản phi tuyến của thùng hình tròn là tương tự đối với thùng hình chữ nhật tương đương.

2.5. Các phương pháp phân tích và giải bài toán làm việc chung giữa kết cấu và hệ giảm chấn chất lỏng TLD

Động học kết cấu là một bài toán xét đến sự thay đổi theo thời gian, không gian và ứng xử của chúng dưới các tác động động lực học như hoạt tải, động đất và gió động. Khi thiết kế một công trình cầu, để đảm bảo rằng công trình cầu đó có thể làm việc bình thường theo các giai đoạn thi công và khai thác cầu một cách bình thường thì người kỹ sư cần xét đến bài toán này nhằm đảm bảo kết cấu không xuất hiện dao động hoặc biến dạng quá lớn. Do vậy, nhiều thiết bị giảm chấn xuất hiện và phát triển rất nhanh cùng với sự phát triển của các công trình cầu lớn những năm gần đây.

Bản chất của bài toán thiết kế giảm chấn cho hệ kết cấu là bài toán phân tích động nhằm xác định tần số dao động riêng, biên độ dao động của kết cấu, từ đó lựa chọn các tham số của giảm chấn sao cho hệ kết cấu – giảm chấn ổn định với biên độ dao động không lớn và dao động là tắt nhanh dưới các tác động động học như gió, động đất và hoạt tải. Việc phân tích bài toán thực chất là đi xây dựng và tìm lời giải cho phương trình chuyển động của hệ chịu các tác động. Có thể tóm tắt một số phương pháp chủ yếu sau:

2.5.1. Phương pháp truyền thống

Dùng định luật 2 Newton về chuyển động: Nếu tác động một lực p(t) lên kết cấu thì trong kết cấu xuất hiện lực kháng bao gồm: lực kháng đàn hồi hoặc không đàn hồi f_s, và lực kháng chấn f_D. Nếu lực ngoài tác dụng p(t) được đặt ở vị trí theo hướng của trục x thì chuyển vị u(t) và vận tốc $\dot{u}(t)$ và gia tốc $\ddot{u}(t)$ cũng cùng hướng với lực tác dụng. Lực kháng đàn hồi và lực kháng chấn sẽ có hướng ngược với hướng lực tác động. Theo định luật II Newton ta có :

$$p - f_S - f_D = m\ddot{u} \qquad or \qquad m\ddot{u} + f_D + f_S = p \tag{2.43}$$

Sau khi biến đổi phương trình tổng quát có dạng:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \tag{2.44}$$

Trong đó m, c, k lần lượt là khối lượng, tín hcản và độ cứng của kết cấu.

2.5.2. Phương pháp năng lượng

Dùng phương trình cân bằng động học để thiết lập phương trình: Phương trình cân bằng động học được thiết lập trên cơ sở nguyên lý D'Alembert. Nguyên lý này dựa trên khái niệm của lực quán tính. Một lực cân bằng với tích của khối lượng và gia tốc thay đổi theo thời gian của nó và có hướng ngược với hướng của gia tốc. Trạng thái của nó là một hệ cân bằng tại mỗi thời điểm thiết lập. Các phép phân tích đưa đến phương trình chuyển

động như công thức 2.39.

Tùy theo dạng kết cấu là đơn bậc tự do hay đa bậc tư do và có chịu lực kích động hay không mà biểu đồ dao động hay phương trình dao động của kết cấu có các dạng khác nhau. Dưới đây chỉ trình bày một số dạng cơ bản.

Nghiệm của các phương trình được xác định được giải thông qua các phương pháp chính là: Với các điều kiện ban đầu là u(0), và vận tốc ban đầu $\dot{u}(0)$ tại thời điểm t = 0. Điển hình, kết cấu trước thời điểm chịu lực kích động thì vận tốc và chuyển vị ban đầu là bằng không. Có hai phương pháp giải phương trình vi phân nói trên là phương pháp miền thời gian và phương pháp miền tần số.

Phương pháp miền thời gian

Đây là một phương pháp truyền thống đã có từ lâu đời. Chúng gồm các phương pháp sau:

- Phương pháp cổ điển

Nghiệm đầy đủ của phương trình vi phân tuyến tính bậc hai bao gồm tổng của nghiệm bổ xung $u_C(t)$ và nghiệm riêng $u_p(t)$. Do vậy có: u(t) = $u_C(t) + u_p(t)$. Các hằng số tích phân được xác định từ điều kiện ban đầu.

- Tích phân Duhamel

Khác với cách tiếp cận như trên, Duhamel coi phương trình chuyển động của hệ đơn bậc tự do được xác định trên cơ sở của dãy các chuyển vị nhỏ có xung lực ngắn, Ứng xử của hệ với các lực tác dụng p(t) tại thời điển t được thiết lập bằng việc thêm các ứng xử của tất cả các ứng xử do các xung lực tại thời điểm đó.

Tích phân Duhamel là một cách để tính toán ứng xử của hệ tuyến tính hoặc kết cấu chịu tác động của kích động tùy ý thay đổi theo thời gian. Dạng:

$$x(t) = \frac{1}{\omega_D}.\int_0^t p(\bar{\tau}).e^{-\xi\omega(t-\tau)}.sin(\omega_D(t-\tau))d\tau \qquad (2.45)$$

Hoặc

$$u(t) = \frac{1}{m\omega_n}\int_0^t p(\tau)\sin[\omega_n \sin(t-\tau)]d\tau \qquad (2.46)$$

Phương trình này gọi là tích phân Duhamel là một dạng đặc biệt của tích phân cuộn.

Trong đó $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$

Phương pháp miền tần số

Biến đổi Laplace và Fourier là công cụ đắc lực để giải các phương trình vi phân tuyến

tính. Hai biến đổi là tương tự nhau, nên ở đây chỉ xin trình bày biến đổi Fourier để thể hiện phương pháp miền tần số trong phân tích động học kết cấu.

Biến đổi Fourier P(ω) của phương trình lực kích động p(t) được định nghĩa bởi:

$$p(\omega)=F\left[p(t)\right]=\int_{-\infty}^{+\infty} p(t)e^{-i\omega t} \qquad (2.47)$$

Biến đổi Fourier của nghiệm u(t) của phương trình vi phân có dạng:

$$U(\omega)=H(\omega)P(\omega) \qquad (2.48)$$

Trong đó hàm ứng xử tần số phức $H(\omega)$ mô tả ứng xử của hệ chịu tác động của lực kích động điều hòa. Cuối cùng nghiệm mong muốn u(t) được xác định bằng cách nghịch đảo biến đổi Fourier $U(\omega)$

$$u(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} H(\omega)P(\omega)e^{i\omega t}d\omega \qquad (2.49)$$

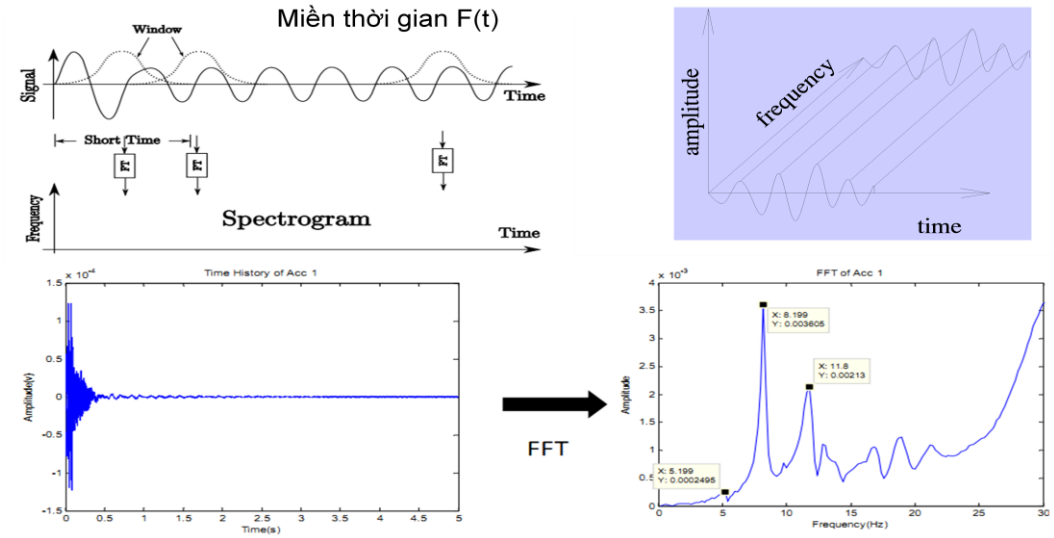
Biến đổi Fourier hiện nay là công cụ hữu hiệu cho phân tích động học của hệ tuyến tính chịu tác động của các lực kích động phức tạp p(t). Đặc trưng của lực p(t) này phụ thuộc vào tác động ngoài thực tế như là: động đất, gió, hoạt tải. Mật độ phổ của một quá trình ngẫu nhiên tĩnh là hàm ứng xử tần số Fourier của hàm tương tác.

Hiện nay việc phân tích ứng xử của kết cấu dưới các tác động ngẫu nhiên đều là sự cộng tác dụng của các tác động điều hòa hoặc có chu kỳ thông qua phân tích tích phân Fourier ở dạng

$$p(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} P(w)e^{iwt}dw \qquad (2.50)$$

$$P(w)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} p(t)e^{-iwt}dt \qquad (2.51)$$

Trong đó p(t) là hàm ứng xử tần số Fourier đảo của hàm tần số P(w)



Hình 2.7: mô phỏng dao động của kết cấu biến đổi theo thời gian và theo tần số

Giả thiết rằng p(t) được thể hiện là sự cộng tác dụng của các hàm điều hòa [P(w)/2π] e^{iwt} . Ứng xử hoặc chuyển vị của kết cấu chịu tác động của kích động tùy ý có thể được viết bằng phép sử dụng phương pháp miền tần số như đã nói ở trên như sau:

$$u(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} U(w)e^{iwt}dw \qquad (2.52)$$

$$U(w) = H(w)P(w) \qquad (2.53)$$

$$e^{iwt} = \cos wt + i\sin wt \qquad (2.54)$$

Chúng ta cũng có thể sử dụng phương pháp Fourier rời rạc để xác định hàm ứng xử tần số Fourier của p(t) và hàm ứng xử tần số Fourier đảo của U(w) như trên. Tích phân này được đánh giá bằng phân tích số cho các kích động thay đổi tùy ý theo thời gian, hệ dao động phức hoặc trường hợp ứng xử tần số phức được mô tả bằng phân tích số [1].

Có một sự biến đổi từ dải vô hạn về dải hữu hạn và trở nên tương đương với kích động thay đổi tùy ý theo thời gian bởi các hàm có chù kỳ. Chúng ta đã biết rằng kích động có chu kỳ có thể được thể hiện bởi một chuỗi Fourier phức như là :

$$p(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} P_j e^{i(jw_0)t} \qquad (2.55)$$

trong đó $w_0 = \dfrac{2\pi}{T_0}$

Sự kích động được mô tả hóa bằng việc xét chuyển động trong một khoảng thời gian nào đó. Nếu hệ bị kích động trong một khoảng thời gian t_d và khoảng thời gian được xem xét là $T_0 = t_d + T_n/2$. Do vậy, lực kích động trở thành :

$$p_n = \sum_{j=0}^{N-1} P_j e^{iwt_n} = \sum_{j=0}^{N-1} P_j e^{i(jw_0)t_n} = \sum_{j=0}^{N-1} P_j e^{i(2\pi nj/N)} \qquad (2.56)$$

$$P_j = \frac{1}{T_0}\sum_{n=0}^{N-1} p_n e^{-i(jw_0)t_n} \qquad \Delta t = \sum_{n=0}^{N-1} p_n e^{i(2\pi n j/N)} \qquad (2.57)$$

Các hàm ở trên chỉ được mở rộng ra một phía dương, tuy nhiên phía âm được xem là không có ý nghĩa vật lý w_{max} được chỉ ra

$$w_{\max} = \frac{N}{2} w_0 = \frac{\pi}{\Delta t} \ \left(w_0 = \frac{2\pi}{T_0} \text{ and } T_0 = N\Delta t \right) \qquad (2.58)$$

$$w_j = \begin{cases} jw_0 & 0 \le j \le N/2 \\ -(N-1)w_0 & N/2 < j \le N-1 \end{cases}$$

Sau đó có:

$$u_n = \sum_{j=0}^{N-1} U_j e^{i(jw_0)t_n} = \sum_{j=0}^{N-1} U_j e^{i(2\pi n j)t_n} \qquad (2.59)$$

Nhiều kết cấu thực có thể được thể hiện theo mô hình hệ đơn bậc tự do. Tuy nhiên hầu hết các kết cấu có vài bộ phận và vài sự cản trở nên có vài bậc tự do. Số bậc tự do của kết cấu cân bằng với số tọa độ độc lập cần để mô tả chuyển động của hệ. Khi không phần nào là cứng hoàn toàn, và không độ đàn hồi nào là không khối lượng, mọi kết cấu thực sẽ có nhiều hơn một bậc tự do. Khi tất cả các phần kết cấu chuyển dịch với cùng tần số, chúng đạt đến biên độ của chúng tại cùng một thời điểm thậm chí nếu không phải tất cả chuyển dịch theo cùng một hướng. Khi các chuyển dịch đó xuất hiện, tần số tương ứng tại đó được gọi là tần số tự nhiên của kết cấu và chuyển động đó là các mode dao động cơ sở của dao động. Số các tần số tự nhiên và các mode cơ sở mà một kết cấu có là bằng với số bậc tự do của kết cấu đó. Khai triển của kết cấu tại tần số tự nhiên thấp nhất hoặc đầu tiên được gọi là mode đầu tiên của nó, tại tần số tự nhiên thứ hai hoặc cao nhất được gọi là mode thứ hai và tương tự như vậy.

Một hệ kết cấu hai bậc tự do bao giờ cũng sẽ được xem xét đầu tiên bởi số bậc tự do tăng có nghĩa là thêm vào nhiều hơn các mode dao động và tăng công sức cho quá trình giải bài toán mà không đưa ra các nguyên lý tính toán mới.

Tác động vào kết cấu khác nhau sẽ hình thành nên các bài toán tổng thể khác nhau mà cụ thể là:

- Kết cấu chịu tác dụng của động đất, p(t) là ngẫu nhiên và không ổn định (trạng thái mất ổn định mạnh).
- Kết cấu chịu tác dụng của gió, p(t) là ngẫu nhiên và ở trạng thái ổn định yếu.
- Nếu kích động bằng cơ học, p(t) có thể là điều hòa và ổn định.

Tuy nhiên các tác động động lực này đều có thể phân tích và đưa về các tác động đều với phương trình tải trọng động tác dụng lên kết cấu công trình theo các dạng sau:

- Tải trọng thay đổi theo chu kỳ - loại tải trọng tác dụng có nhịp điệu biến thiên theo một qui luật xác định. Một trong những dạng cơ bản của loại này là tải trọng điều hòa, có biên độ và tần số biến đổi theo qui luật hình sin, cos, hoặc hàm mũ… Trong thực tế có nhiều tải trọng rung động, về hình thức tuy phức tạp nhưng nếu chấp nhận một số giả thiết tính toán và phương pháp cộng tác dụng thì có thể phân tích thành tập hợp của nhiều nguồn dao động điều hòa, có biên độ và tần số khác nhau, tác dụng đồng thời lên kết cấu thông qua phân tích chuỗi biến đổi Fourier.

$$p(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} P_j e^{iwt} \qquad (2.60)$$

- Tải trọng rung động không qui luật – loại tải trọng phụ thuộc vào các đặc trưng của những quá trình ngẫu nhiên tác dụng vào công trình như là gió, động đất. Với các tác động này ta có thể dùng phép phân tích tích phân Fourier để có được các lực điều hòa tác động lên kết cấu. Phương trình có dạng:

$$p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(w) e^{iwt} dw \qquad (2.61)$$

Trong đó

$$P(w) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) e^{iwt} dt \qquad (2.62)$$

Bằng phép biến đổi Fourier P(ω) của phương trình lực kích động p(t) được định nghĩa bởi:

$$p(\omega) = F[p(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} p(t) e^{-i\omega t} \qquad (2.63)$$

Biến đổi Fourier của nghiệm u(t) của phương trình vi phân có dạng:

$$U(\omega) = H(\omega) P(\omega) \qquad (2.64)$$

Trong đó hàm ứng xử tần số phức $H(\omega)$ mô tả ứng xử của hệ chịu tác động của lực kích động điều hòa.

Như vậy bằng cách xét bài toán cơ sở cho kết cấu chịu tác động đều như trên, thì cuối cùng nghiệm mong muốn u(t) được xác định bằng cách nghịch đảo biến đổi Fourier $U(\omega)$ và đây chính là công thức thể hiện mối quan hệ giữa chuyển vị của kết cấu và hàm ứng xử tần số phức – công thức 2.60 như sau:

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) P(\omega) e^{i\omega t} d\omega \qquad (2.65)$$

Biến đổi Fourier sẽ là công cụ hữu hiệu được sử dụng trong phân tích động học của hệ

tuyến tính chịu tác động của các lực kích động phức tạp p(t).

Như vậy có thể thiết lập phương trình hàm ứng xử tần số trên cơ sở xét hệ tương tác giữa TLD và kết cấu với phép phân tích Furier, phương trình Largrang.

2.6. Kết luận chương 2

Hệ TLD có các tính năng tốt cho việc giảm chấn cho kết cấu. Không giống như hệ TMD luôn làm việc tuyến tính thì hệ TLD làm việc phi tuyến do đặc tính của dòng chuyển động của chất lỏng chứa trong bình. Do vậy TLD phải được mô hình hóa như một hệ phi tuyến. Tham số độ cứng k_d và cản c_d và lực cắt cơ sở (hoặc lực cản) do TLD F_w, và lực giảm chấn F_d (mô hình TMD tương đương) thể hiện rõ đặc tính phi tuyến của giảm chấn chất lỏng phụ thuộc vào chiều cao chất lỏng chuyển động trong thùng chứa TLD.

Việc phân tích tính toán TLD có thể thực hiện theo mô hình TMD tương đương hay mô hình có xét cụ thể đặc tính dòng chất lỏng chuyển động theo lý thuyết sóng.

Tương tác giữa kết cấu với TLD được xem xét trên mô hình tổng quát gồm 2 bậc tự do gồm kết cấu và TLD. Từ các đặc điểm làm việc của TLD cũng như tương tác giữa TLD với kết cấu được trình bầy trong chương này là cơ sở để phân tích và xây dựng hàm ứng xử tần số phản ánh ứng xử của kết cấu với tỷ số giữa tần số kích động và tần số dao động riêng của kết cấu sẽ được trình bầy trong chương tiếp theo.

CHƯƠNG 3

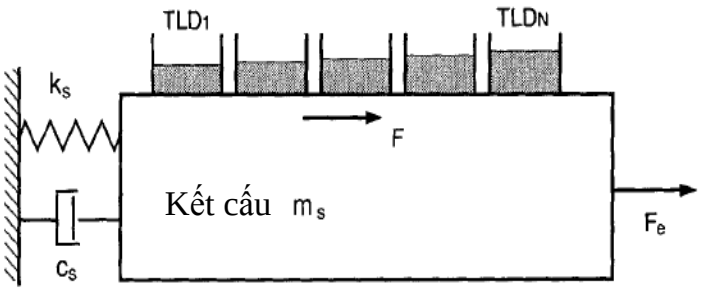
PHÂN TÍCH HIỆU QUẢ GIẢM DAO ĐỘNG CHO THÁP CẦU DÂY VĂNG KHI SỬ DỤNG HÀM ỨNG XỬ TẦN SỐ THIẾT LẬP CHO CÁC HỆ GIẢM CHẤN CHẤT LỎNG.

Ảnh hưởng của tác động động mang tính chất nhẫu nhiên như gió, động đất đã được đề cập trong chương 1 với rất nhiều phân tích về cả khả năng khai thác cũng như tuổi thọ công trình. Dưới các tác động động lực học này, kết cấu có thể ở vào trạng thái bất lợi và việc dùng thiết bị điều khiển dao động đã trở nên cần thiết cho các kỹ sư hiện nay. Hiệu quả của các thiết bị này được tính toán thông qua bài toán phân tích sự làm chung giữa kết cấu và hệ giảm chấn. Trong bài toán này, thiết bị giảm chấn thường được mô phỏng là một bậc tự do còn kết cấu là một bậc tự do hay nhiều bậc tự do tùy theo quan điểm và mục đích tính toán thiết kế. Tất nhiên kết cấu được mô phỏng với nhiều hơn một bậc tự do sẽ chính xác hơn và bài toán trở nên phức tạp hơn. Bài toán càng trở nên phức tạp khi kết cấu hoặc thiết bị giảm chấn mang trong nó các đặc tính phi tuyến và kết hợp với tác động đặt vào kết cấu mang tính ngẫu nhiên.

Hệ tương tác giữa giảm chấn và kết cấu trở thành bài toán quan trọng mà cần được giải một cách chính xác trong các thiết kế nói chung. Bài toán với kết cấu là một bậc tự do và giảm chấn là bậc tự do còn lại là mô hình tính toán cho hệ tương tác giữa kết cấu và giảm chấn chất lỏng đơn tần số STLD đã được đề cập và phân tích trong chương 1, chương 2 của luận án. Bài toán với kết cấu là một bậc tự do và giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD là đa bậc tự do được sử dụng cho mô hình tính toán hiệu quả giảm chấn thông qua việc thiết lập hàm ứng xử tần số phức cho hệ này là nội dung nghiên cứu chính được đề cập trong chương này.

3.1 Giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD và các giả thiết cho xây dựng phương trình hàm ứng xử tần số

Trong giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD, mỗi TLD được mô phỏng trong tính toán như là một giảm chấn khối lượng (TMD) tương đương đặt song song nhau trên kết cấu (hình 3.1) với các tham số về độ cứng và tính cản của TMD tương đương mang đặc tính phi tuyến.



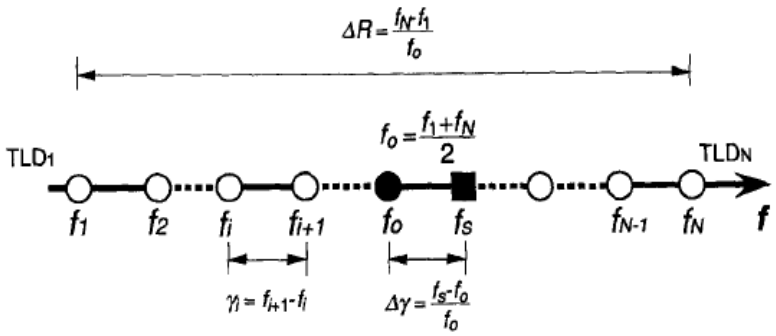
Hình 3.1: Mô hình kết cấu và giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD)

Tần số dao động riêng của mỗi thùng chứa chất lỏng được tạo ra là khác nhau bằng cách thay đổi kích thước hoặc lượng chất lỏng trong mỗi thùng. Thuận tiện cho việc chế tạo và lắp đặt hơn cả là cách thay đổi một lượng nhỏ chất lỏng trong mỗi thùng. Khi mỗi thùng TLD đơn trong giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD được đổ một lượng chất lỏng khác nhau sẽ tạo ra tần số dao động riêng của mỗi thùng TLD đơn là khác nhau. Tần số tự nhiên của mỗi TLD được thể hiện bởi lý thuyết tuyến tính xác định theo Wakahara và các cộng sự 1993 [93]:

$$f_i = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\pi g}{2a} tanh\left(\frac{\pi h_i}{2a}\right)} \tag{3.1}$$

Như chứng minh trong mục 2.4 chương 2, mỗi thùng TLD đơn này sẽ được mô hình như một TMD tương đương và có thể coi như một bậc tự do trong bài toán xét tương tác của kết cấu và giảm chấn chất lỏng đa tần số.

Như vậy, mỗi thùng TLD đơn lẻ có 1 tần số dao động riêng f_i là tần số văng té tự nhiên của TLD riêng rẽ thứ i trong giảm chấn chất lỏng đa tần số. Với f_1 = tần số dao động của thùng chất lỏng thứ 1 – tần số dao động riêng nhỏ nhất trong hệ, f_N = tần số dao động của thùng chất lỏng thứ N – tần số dao động riêng lớn nhất trong hệ.



Hình 3.2: Mô hình đa bậc tự do mô phỏng cho các TLD đơn lẻ trong hệ MTLD

Hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số khi thiết kế được đặc trưng bởi một tần số trung tâm của hệ f_0, tần số này được xác định là tần số trung bình của các TLD đơn trong hệ (tần số

dao động riêng của MTLD) xác định theo công thức 3.5 (theo Fujino 1993 [109]):

$$f_o = \frac{f_N + f_1}{2} \tag{3.2}$$

Độ chênh tần số dao động giữa các thùng chất lỏng TLD riêng rẽ trong hệ MTLD được thiết kế để tạo hệ có nhiều TLD riêng rẽ có khoảng tần số cân bằng,

$$\beta i = f_{i+1} - f_i = (f_N - f_1)/(N-1) = \beta. \tag{3.3}$$

Bề rộng dải tần số là khoảng tần số của các thùng TLD trong hệ MTLD

$$\Delta R = \frac{f_N - f_1}{f_0} \tag{3.4}$$

Trong một số trường hợp tần số dao động của hệ giảm chấn đa tần số (MTLD) - tần số trung tâm của hệ được tạo ra không như thiết kế ban đầu, cần thiết có một hệ số điều chỉnh để xét đến hiệu quả của hệ trong các trường hợp này. Hệ số điều chỉnh này là:

$$\Delta\gamma = \frac{f_s - f_o}{f_o} \tag{3.5}$$

Cụ thể các tham số đầu vào cơ bản của giảm chấn chất lỏng đa tần số gồm:

Tần số dao động riêng của hệ giảm chấn được tạo ra nhờ chọn chiều sâu chất lỏng sao cho chuyển động sóng nước là dạng sóng nước nông. Chiều sâu chất lỏng h_0 lấy lớn hơn 1/20 và nhỏ hớn ½ sao cho tạo ra được tần số dao động riêng của giảm chấn xấp xỉ với tần số dao động riêng của kết cấu, f_s. theo công thức của Sun [83] có:

$$\text{với } f_D = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\pi g}{2a} tanh\left(\frac{\pi h_0}{2a}\right)} \tag{3.6}$$

Và độ cứng của giảm chấn chất lỏng $k_D = m_D w_D^2 = (2\pi)^2 m_D f_D^2$ nên có

$$k_D = m_D\left(\frac{\pi g}{2a} tanh\left(\frac{\pi h_0}{2a}\right)\right) \tag{3.7}$$

Tham số cản của TLD, ξ_D được xác định theo công thức của Fujino (1993):

$$\xi_D = \frac{1}{h_0}\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\upsilon}{\pi f_D}}\left(1 + \frac{h_0}{b}\right) \tag{3.8}$$

Trong đó: f_D = tấn số tự nhiên của TLD; h và υ = chiều sâu chất lỏng và độ nhớt động của chất lỏng (Sun 1991). Chiều dài thùng chứa chất lỏng L = 2a, chiều rộng thùng chứa là b, g là gia tốc trọng trường, và các ký hiệu khác m_D, ξ_D, k_D, f_D lần lượt là khối lượng,

tham số cản, độ cứng và tần số dao động riêng của TLD.

Phương trình hàm ứng xử tần số của hệ tương tác giữa kết cấu và giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) thiết lập trên cơ sở các giả thiết cơ bản:

- Hàm ứng xử tần số được thiết lập từ phương trình Euler – Largrang viết cho hệ tương tác giữa kết cấu và giảm chấn chất lỏng đa tần số với các phép phân tích đại số tuyến tính cho biến đổi.
- Hệ làm việc chung giữa TLD và kết cấu là tuyến tính. Tính chất phi tuyến của hoạt động chất lỏng trong các thùng TLD được chứng minh trong nhiều nghiên cứu là được thay thế bằng độ cứng và tính cản mang tính chất phi tuyến của hệ TMD tương đương.
- Tỷ số khối lượng giữa tổng khối lượng chất lỏng trong các TLD so với khối lượng hình thái của kết cấu là $\mu=\sum \mu_i = 1\%$. (Wakahara, 1993 [93]).
- Dạng ma trận cản truyền thống là ma trận mà tỷ lệ giữa khối lượng kết cấu/tỷ lệ giảm chấn, tỷ lệ giữa độ cứng của kết cấu với độ cứng của giảm chấn, tỷ lệ giữa tính cản của kết cấu/tính cản của giảm chấn đều cùng lớn hơn 1 hoặc nhỏ hơn 1, mà thường là lớn hơn 1 (do đặc tính của kết cấu và giảm chấn). Tính cản của kết cấu là c_s, tính cản tới hạn của kết cấu là $c_{cr} = 2m_s w_n$ (với m_s là khối lượng hình thái của kết cấu và w_n là tần số dao động tự nhiên của kết cấu. Tỷ số cản của kết cấu sử dụng trong xây dựng phương trình là

$$\xi_S = \frac{c}{2mw_n} = \frac{c}{c_{cr}} \tag{3.9}$$

- Tác động động lực học xem xét trong thiết lập phương trình chỉ bao gồm tác động điều hòa dạng hàm sin, hoặc hàm cos hoặc hàm số logarit. Phần tác động mang tính chất ngẫu nhiên sẽ được xem xét trong nghiên cứu sau này. Các lực tác động này nằm ngang theo hướng của áp lực chất lỏng tác động vào tường biên thùng chứa, ngược chiều (ngược pha).

3.2 Xây dựng hàm ứng xử tần số cho hệ tương tác giữa kết cấu và giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD.

Hàm ứng xử tần số – Hàm thể hiện mối tương quan giữa ứng xử của kết cấu và tỷ số tần số (tỷ số giữa tần số kích động và tần số dao động riêng của kết cấu). Phân tích ảnh hưởng của các tham số trong hàm ứng xử tần số để có thể đánh giá hiệu quả giảm dao

động cho kết cấu công trình của hệ tương tác giữa kết cấu và giảm chấn là một trong những đóng góp của luận án. Đây là dữ liệu cơ sở hướng dẫn các kỹ sư sau này thiét kế giảm chấn cho các kết cấu nhạy cảm trước các tác động độc lực học.

Phương trình hàm ứng xử tần số được xây dựng và chỉ ra trong các nghiên cứu trước đây về TLD (Fujino, 1993[109]) được thể hiện dưới dạng ma trận là hàm ứng xử của hệ tương tác giữa kết cấu và giảm chấn chất lỏng đơn tần số STLD:

Từ phương trình động học:

$$\begin{bmatrix} m_S & 0 \\ 0 & m_D \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{x}_S \\ \ddot{x}_D \end{Bmatrix}+\begin{bmatrix} c_S+c_D & -c_D \\ -c_D & c_D \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \dot{x}_S \\ \dot{x}_D \end{Bmatrix}+\begin{bmatrix} k_S+k_D & -k_D \\ -k_D & k_D \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} x_S \\ x_D \end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix} f(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{3.10}$$

Trong đó:

m_S, c_S, k_S , w_S ,lần lượt là khối lượng, tính cản, độ cứng và tần số góc dao động riêng của kết cấu.

m_D, c_D, k_D, w_D ,lần lượt là khối lượng, tham số cản, độ cứng và tần số góc dao động riêng của của TLD.

F_e=f(t) lực kích động vào kết cấu, F_0 là biên độ kích động, w là tần số góc dao động của lực kích động

Hàm ứng xử tần số được thiết lập trong nghiên cứu của Fujino cho hệ tương tác giữa kết cấu và TLD đơn là:

- Dạng có thứ nguyên:

$$H_S(w) = \frac{F_0}{\left[(-w^2 m_S + iwc_S + k_S) - w^2 m_D \dfrac{(iwc_D + k_D)}{(-w^2 m_D + iwc_D + k_D)}\right]} \tag{3.11}$$

- Dạng không thứ nguyên:

$$\mathbf{H_S(w)} = \frac{\mathbf{F_0}}{\mathbf{k_s}}\frac{\mathbf{1}}{\left[\left(\mathbf{1}-\dfrac{\mathbf{w^2}}{\mathbf{w_s^2}}+\mathbf{2\xi_s i}\dfrac{\mathbf{w}}{\mathbf{w_s}}\right)-\boldsymbol{\mu}\dfrac{\mathbf{w^2}}{\mathbf{w_s^2}}\dfrac{\left(\mathbf{2i\xi_D}\dfrac{\mathbf{w}}{\mathbf{w_D}}+\mathbf{1}\right)}{\left(\mathbf{1}-\dfrac{\mathbf{w^2}}{\mathbf{w_D^2}}+\mathbf{2i\xi_D}\dfrac{\mathbf{w}}{\mathbf{w_D}}\right)}\right]} \tag{3.12}$$

$H_S(w)$Hàm ứng xử tần số của hệ làm việc chung kết cấu và TLD

ξ_S ξ_D: tỷ số cản của kết cấu và tỷ số cản của TLD

$H_0(w)$ Hàm ứng xử tần số của TLD khi hệ không cản

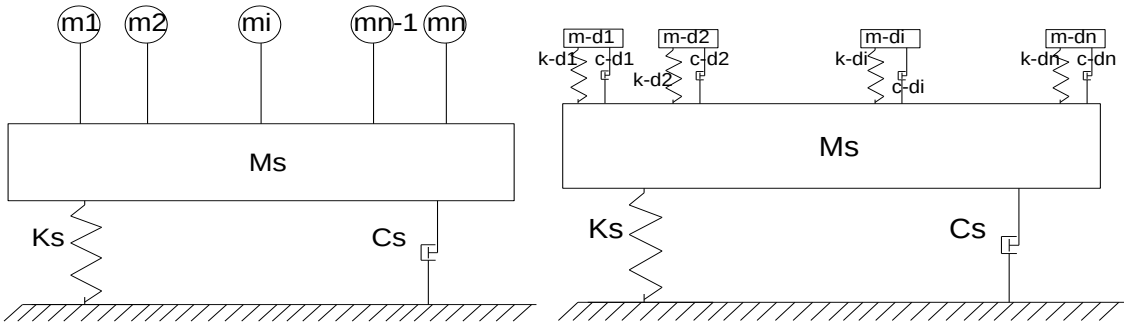
Hình 3.3: Mô hình tính toán cho hệ SLTD

Trong phương trình (3.15) này, dễ dàng nhận thấy rằng phương trình là thể hiện của 2 phần; phần thứ nhất chỉ bao gồm các tham số của kết cấu và kích động, phần thứ 2 gồm các tham số của giảm chấn và kích động. Khi hệ không giảm chấn, phương trình trở thành:

$$H_0(w) = \frac{F_0}{k_s}\frac{1}{\left[\left(1-\frac{w^2}{w_s^2}+2\xi_s i\frac{w}{w_s}\right)\right]} \tag{3.13}$$

Hàm ứng xử tần số cho hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) được tác giả nghiên cứu và thiết lập như sau:

Trên cơ sở cách thức biến đổi đại số khi thiết lập lại hàm ứng xử tần số cho giảm chấn chất lỏng đơn tần số (kết quả đã được so sánh tính chính xác với nghiên cứu của Fujino 1993[118]) với giả thiết kết cấu là một bậc tự do và TLD là một bậc tự do, tác giả kiến nghị cùng cách phân tích số này để xây dựng hàm ứng xử tần số cho hệ tương tác giữa kết cấu và nhiều TLD (hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số - MTLD). Trong hệ này kết cấu được coi là một bậc tự do và mỗi TLD đơn lẻ trong hệ MTLD là một bậc tự do, cụ thể như sau:



Hình 3.12: mô hình tính toán đề xuất cho hệ MTLD

w_s/w (hoặc f_s/f) là vecto tỷ số chỉ ra tỷ số giữa tần số của kết cấu và tần số kích động. w_i/w (hoặc f_i/f) là vecto chỉ ra tỷ số giữa tần số của các thùng TLD đơn lẻ của hệ MTLD và tần số kích động. Tùy thuộc vào số lượng của các thùng TLD đơn lẻ khác nhau trong hệ MTLD có:

w_1……. w_i ……..w_n, hoặc

w_{min}……..w_i……..w_{max}.

Tần số trung tâm của các TLD trong hệ MTLD là $w_0 = (w_{max} + w_{min})/2$

Bề rộng dải tần số $\Delta R = (w_{max} - w_{min})/w_0 = 0.2$ và $\beta_i = w_{i+1} - w_i = const$

Theo các phân tích thực nghiệm trong cứu của Fujino [118] về hệ MTLD, nhằm đánh giá kỹ hơn về sự tương tác giữa kết cấu và MTLD, tác giả luận án đã tập trung xây dựng phương trình động học cho hệ làm việc chung kết cấu – và MTLD dùng phương trình Lagrange có:

Động năng của hệ đa bậc tự do:

$$T = \frac{1}{2} m_s \dot{x}_s^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N} m_i \dot{x}_i^2 \tag{3.14}$$

Thế năng của hệ đa bậc tự do:

$$\pi = \frac{1}{2} k_s x_s^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N} k_i (x_i - x_s)^2 \tag{3.15}$$

Hao tán của hệ được tính là:

$$\varphi = \frac{1}{2} c_s \dot{x}_s^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N} c_i (\dot{x}_i - \dot{x}_s)^2 \tag{3.16}$$

Ta có:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} - \frac{\partial T}{\partial x_i} = Q_{x_i} + Q^*_{x_i} + F_e \qquad \text{for } i = s, 1, 2, \ldots.. N \tag{3.17}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_s} = m_s \dot{x}_s;\ \frac{\partial T}{\partial x_s} = 0;\ \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} = m_i \dot{x}_i;\ \frac{\partial T}{\partial x_i} = 0$$

$$==>\ Q_{x_s} = -\frac{\partial \pi}{\partial x_s} = -k_s x_s + \sum_{i=1}^{N} k_i (x_i - x_s) \tag{3.18}$$

$$Q^*_{x_s} = -\frac{\partial \varphi}{\partial \dot{x}_s} = -c_s \dot{x}_s + \sum_{i=1}^{N} c_i (\dot{x}_i - \dot{x}_s) \tag{3.19}$$

$$Q_{x_i} = -\frac{\partial \pi}{\partial x_i} = -\sum_{j=1}^{N} k_j (x_j - x_s) \delta_{ij} = -k_i (x_i - x_s) \tag{3.20}$$

$$Q^*_{x_s} = -\frac{\partial\varphi}{\partial\dot{x}_i} = -c_i(\dot{x}_i - \dot{x}_s) \tag{3.21}$$

Phương trình Lagrange viết lại là:

$$\frac{d}{dt}(m_s\dot{x}_s) - 0 = -k_s x_s + \sum_{i=1}^{N} k_i(x_i - x_s) - c_s\dot{x}_s + \sum_{i=1}^{N} c_i(\dot{x}_i - \dot{x}_s) + F_s(t) \tag{3.22}$$

$$m_s\ddot{x}_s + c_s\dot{x}_s + k_s x_s - \sum_{i=1}^{N}[k_i(x_i - x_s) + c_i(\dot{x}_i - \dot{x}_s)] = F_s \tag{3.23}$$

$$m_i\ddot{x}_i - 0 = -k_i(x_i - x_s) - c_i(\dot{x}_i - \dot{x}_s) \tag{3.24}$$

$$m_i\ddot{x}_i + k_i x_i + c_i\dot{x}_i - (k_i x_s) - (c_i\dot{x}_s) = 0 \ (i = 1..N) \tag{3.25}$$

Phương trình viết dưới dạng ma trận :

$$\begin{bmatrix} m_s & & & & & \\ & m_1 & & & & \\ & & m_2 & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & m_{n-1} & \\ & & & & & m_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_1 \\ \\ \ddot{x}_i \\ \\ \ddot{x}_n \end{Bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} c_s + \sum c_i & -c_1 & -c_2 & & & -c_n \\ -c_1 & c_1 & 0 & & & \\ -c_2 & 0 & c_2 & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & c_{n-1} & \\ -c_n & & & & & c_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_1 \\ \\ \dot{x}_i \\ \\ \dot{x}_n \end{Bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} k_s + \sum k_i & -k_1 & -k_2 & & & -k_n \\ -k_1 & k_1 & & & & \\ -k_2 & & k_2 & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & k_{n-1} & \\ -k_n & & & & & k_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_1 \\ \\ x_i \\ \\ x_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ 0 \\ \\ \\ \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{3.26}$$

Từ phương trình ma trận, dạng triển khai được viết thành hệ các phương trình (3.30) sau:

$$\begin{cases} m_s\ddot{x}_s + (C_s + \sum C_i)\dot{x}_s - c_1\dot{x}_1 - \ \dots - c_i\dot{x}_i \dots - c_n\dot{x}_n + (k_s + \sum k_i)\,x_s - k_1x_1 - \ \dots - k_ix_i \dots - k_nx_n = F_s \\ m_1\ddot{x}_1 - C_1\dot{x}_s + c_1\dot{x}_1 \ - k_1x_s + k_1x_1 \ = 0 \\ m_2\ddot{x}_2 - C_2\dot{x}_s + c_2\dot{x}_2 \ - k_2x_s + k_2x_2 \ = 0 \\ \\ m_n\ddot{x}_n - c_n\dot{x}_s + c_n\dot{x}_n \ - k_nx_s + k_nx_n \ = 0 \end{cases} \tag{3.27}$$

Từ phương trình 3.30 viết cho thùng chất lỏng thứ i trong hệ MTLD có:

$$m_i\ddot{x}_i - c_i\dot{x}_s + c_i\dot{x}_i - k_ix_s + k_ix_i \ = 0$$

$$m_i\ddot{x}_i + c_i\dot{x}_i \ + k_ix_i \ = C_i\dot{x}_s + k_ix_s \tag{3.28}$$

Ta gán (3.31) vào phương trình 1 trong hệ phương trình 3.30 viết lại có

$$m_s\ddot{x}_s + (c_s + \sum c_i)\dot{x}_s + (k_s + \sum k_i)\, x_s - \sum c_i\dot{x}_i - \sum k_i x_i = F_s$$

$$m_s\ddot{x}_s + c_s\dot{x}_s + k_s x_s + \sum (k_i\, x_s + C_i\dot{x}_s) - \sum c_i\dot{x}_i - \sum k_i x_i = F_s$$

$$m_s\ddot{x}_s + c_s\dot{x}_s + k_s x_s + \sum (m_i\ddot{x}_i + c_i\dot{x}_i + k_i x_i) - \sum (c_i\dot{x}_i + k_i x_i) = F_s$$

$$m_s\ddot{x}_s + c\dot{x}_s + k_s x_s + \sum (m_i\ddot{x}_i) = F_s \qquad (3.29)$$

Đặt:

$$x_s = H(w)e^{iwt} \qquad x_i = H(w_i)e^{iwt} \qquad F_s = F_0 e^{iwt}$$
$$\dot{x}_s = iwH(w)e^{iwt} \qquad \dot{x}_i = i\,w\,H(w_i)e^{iwt}$$
$$\ddot{x}_s = -w^2\,H(w)e^{iwt} \qquad \ddot{x}_i = -w^2\,H(w_i)e^{iwt} \qquad (3.30)$$

Thay các giá trị từ phương trình 3.33 trở lại (3.32) được:

$$-w^2\,m_s H(w)e^{iwt} + c_s iwH(w)e^{iwt} + k_s H(w)e^{iwt} + \sum (-w^2\,m_i H(w_i)e^{iwt}) = F_0 e^{iwt}$$

$$(-w^2\,m_s + c_s iw + k_s)H(w) - \sum w^2\,m_i H(w_i) = F_0 \qquad (3.31)$$

Từ phương trình 3.31 viết cho thùng chất lỏng thứ i có (3.30-i)

$$-m_i w^2\,H(w_i)e^{iwt} + c_i\,i\,w\,H(w_i)e^{iwt} + k_i H(w_i)e^{iwt} = c_i iwH(w)e^{iwt} + k_i H(w)e^{iwt}$$

$$H(w_i) = \frac{(c_i iw + k_i)}{(-m_i w^2 + c_i\,i\,w + k_i)} H(w) \qquad (3.32)$$

Thay (3.35) vào (3.34) được:

$$(-w^2\,m_s + c_s iw + k_s)H(w) - \sum w^2\,m_i \frac{(c_i iw + k_i)}{(-m_i w^2 + c_i\,i\,w + k_i)} H(w) = F_0$$

$$H(w) = \frac{F_0}{(-w^2\,m_s + c_s iw + k_s) - \sum w^2\,m_i \frac{(c_i iw + k_i)}{(-m_i w^2 + c_i\,i\,w + k_i)}} \qquad (3.33)$$

Trong đó:

Chia cả tử lẫn mẫu cho k_s, và thay $\xi = \frac{c}{2mw_n} = \frac{c}{c_{cr}} \Longrightarrow c = 2\xi m w_n$

$\xi_S = \frac{C_S}{2m_S w_n}$ ==> $c_S = 2\xi_S m_S w_s$`

$\xi_i = \frac{C_i}{2m_i w_n}$ ==> $c_i = 2\xi_i m_i w_i$

khi thừa nhận tần số dao động tự nhiên của hệ chính là của kết cấu

$$\frac{c_s}{k_s} = \frac{2\xi_s m_s w_s}{k_s} = \frac{2\xi_s}{w_s}$$

Hàm ứng xử tần số được xác định là:

$$H(w) = \frac{F_0}{k_s\left(-w^2\,\frac{m_s}{k_s} + 2\xi_S\,\frac{m_S}{k_s}w_s\ iw + 1\right) - k_s\sum_{i=1}^{N}\frac{\left(2\xi_i\,\frac{m_i}{k_s}w_i iw + \frac{k_i}{k_s}\right)}{\left(-1 + \frac{2i\xi_i m_i w_i w}{w^2\ m_i} + \frac{k_i}{w^2\ m_i}\right)}} \tag{3.34}$$

$\frac{k_i}{k_s} = \frac{w_i^2 m_i}{w_s^2 m_s} = \mu\,\frac{w_i^2}{w_s^2}$ and $\frac{m_i}{k_s} = \frac{m_i}{m_s}\frac{m_s}{k_s} = \mu\frac{1}{w_s^2}$

$$H(w) = \frac{F_0}{k_s\left[\left(-\frac{w^2}{w_s^2} + 2\xi_S i\frac{w}{w_s} + 1\right) - \sum_{i=1}^{N}\frac{w^2}{w_s^2}\mu_i\,\frac{\left(2\xi_i i\frac{w_i}{w} + \frac{w_i^2}{w^2}\right)}{\left(-1 + 2\xi_i i\frac{w_i}{w} + \frac{w_i^2}{w^2}\right)}\right]}$$

$$H(w) = \frac{F_0}{k_s}\frac{1}{\left[\left(1 - \frac{w^2}{w_s^2} + 2\xi_S i\frac{w}{w_s}\right) - \frac{w^2}{w_s^2}\sum_{i=1}^{N}\mu_i\frac{\left(2\xi_i i\frac{w}{w_i} + 1\right)}{\left(1 - \frac{w^2}{w_i^2} + 2\xi_i i\frac{w}{w_i}\right)}\right]} \tag{3.35}$$

H(w) được gọi là hàm ứng xử tần số không thứ nguyên của hệ MTLD:

$$\mathbf{H(2\pi f) = \frac{F_0}{k_s}\frac{1}{\left[\left(1 - \frac{f^2}{f_s^2} + 2\xi_S i\frac{f}{f_s}\right) - \frac{f^2}{f_s^2}\sum_{i=1}^{N}\mu_i\frac{\left(2\xi_i i\,\frac{f^2}{f_i^2} + 1\right)}{\left(1 - \frac{f^2}{f_i^2} + 2\xi_i i\,\frac{f^2}{w_i^2}\right)}\right]}} \tag{3.36}$$

Hàm ứng sử tần số thiết lập là hàm không thứ nguyên nên các phân tích cho hàm này là đúng với mọi ứng xử cho các biến khác nhau.

Trong phương trình này, dễ dàng nhận thấy rằng cũng giống như hàm ứng xử tần số của hệ đơn bậc tự do, mẫu số gồm 2 thành phần mà phần 1 chỉ phụ thuộc vào tỷ số giữa tần số kích động trên tần số kết cấu và phần 2 chỉ phụ thuộc vào tỷ số giữa tần số kích động trên tấn số của mỗi TLD đơn lẻ trong hệ. Phần thứ 2 của hàm ứng xử tần số hệ MTLD khác so với hàm ứng xử tần số của hệ SLTD bởi ảnh hưởng của nhiều giảm chấn chất lỏng trong hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD.

Tương tự với hệ STLD, khi kết cấu không có TLD, phương trình trở thành

$$H(2\pi f) = \frac{F_0}{k_s}\frac{1}{\left[\left(1 - \frac{f^2}{f_s^2} + 2\xi_S i\frac{f}{f_s}\right)\right]} \tag{3.37}$$

Trong phương trình trên, Giá trị lớn nhất của chuyển dịch tĩnh là $(x_{st})_0 = \frac{F_0}{k_S}$

Điều này có thể được hiểu như là chuyển vị tĩnh do biên độ F_0 của lực gây ra hay có thể coi $(x_{st})_0$ là chuyển vị tĩnh.

Hệ số trong ngoặc trong công thức (3.40) thể hiện mối quan hệ giữa tần số lực kích động f=f(t) và tần số dao động tự nhiên của kết cấu f_s. Với f/f_s <1 hay $f<f_s$ thì hệ số trên là dương và x(t) và f(t) có cùng dấu. Chuyển vị được gọi là cùng pha với lực tác dụng. Với $f/f_s > 1$ hay $f>f_s$ và x(t) và p(t) là ngược dấu. Với $f<f_S$ thì chuyển dịch biến đổi theo hàm sin(wt), cùng pha với lực tác dụng. Với $f>f_S$ thì chuyển vị biến đổi theo hàm – sin(wt), ngược pha với lực tác dụng.

Hệ số ứng xử chuyển vị R_d là tỷ số giữa biên độ x_0 của chuyển vị động với chuyển vị tĩnh $(x_{st})_0$. Nếu f/f_s là nhỏ thì lực là biến đổi chậm, $R_d > 1$ không đáng kể và biên độ của chuyển vị động về cơ bản có thể lấy là chuyển vị tĩnh. Nếu $f/f_s >$ thì $R_d < 1$ và biên độ chuyển vị động là nhỏ hơn biên độ chuyển vị tĩnh. Nếu f/f_s nằm ngoài phạm vi $\sqrt{2}$ thì nếu $f/f_s \rightarrow \infty$ thì R_d tiến tới 0, và nếu $f/f_s \rightarrow 1$ thì R_d lớn hơn 1 nhiều lần dẫn đến là biên độ chuyển vị động là lớn hơn nhiều so với chuyển vị tĩnh. Tần số cộng hưởng được định nghĩa là tần số lực tại thời điểm R_d là cực đại. Với hệ không có cản thì tần số cộng hưởng là w_n và R_d là vô cùng. Chuyển vị dao động không đạt đến vô cùng ngay lập tức mà từ từ như các phá hủy mà ta thường thấy.

3.3 Phân tích, đánh giá hiệu quả của hệ MTLD so với STLD và kết cấu khi không có TLD thông qua hàm ứng xử tần số thiết lập

Hiệu quả của hàm ứng xử tần số được đánh giá thông qua một số tiêu chí chính như:

- Giảm biên độ dao động cho kết cấu
- Giảm thời gian tắt dao động (dao động của hệ khi có gắn giảm chấn và khi không gắn giảm chấn).

Sử dụng hàm ứng xử tần số đã thiết lập cho hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) để khảo sát hiệu quả giảm chấn trong việc giảm dao động cho kết cấu, so sánh với hệ kết cấu khi gắn 1 TLD (STLD) đã đưa ra trong các nghiên cứu và xác định một số tham số hợp lý cho bài toán thiết kế giảm chấn như số lượng thùng chứa chất lỏng, bề rộng dải tần số, chệnh giữa tần số kích thích và tấn số kết cấu, chênh giữa tần số trung tâm của hệ kết cấu

khi gắn nhiều TLD (MTLD) và tần số kết cấu.

3.3.1 Các trường hợp đề xuất cho khảo sát ảnh hưởng của các tham số đến hiệu quả giảm chấn

Các trường hợp đưa ra trong luận án là dựa trên phương pháp suy luận, phân tích logic và thử dần, do đó những trường hợp kiến nghị được coi là khá hợp lý theo kết quả phân tích, so sánh với trường hợp kết cấu khi có gắn hệ STLD và khi không có giảm chấn. Trong các khảo sát, tần số dao động tự nhiên của kết cấu f_s giả sử lấy là, f_s = 0.38 Hz. Tần số trung tâm f_0 được lựa chọn giả thiết là có giá trị bằng tần số dao động riêng của kết cấu trong hầu hết các trường hợp khảo sát trừ trường hợp khảo sát tham số điều chỉnh với chênh lệch là 5% (f_0/f=0.95 và 1.05).

Kích thước thùng chứa chất lỏng trong khảo sát được thiết kế là dạng hình chữ nhật có kích thước:

L =	110	cm
b=	60	cm

Cụ thể các trường hợp khảo sát như sau:

Trường hợp 1: Khảo sát ảnh hưởng của số lượng thùng chứa chất lỏng N đến hiệu quả giảm chấn.

Chọn số thùng chứa chất lỏng trong khảo sát là một số lẻ bởi như vậy sẽ xuất hiện một thùng trung tâm có tần số bằng tấn số trung tâm của hệ MTLD và bằng với tần số của kết cấu khi giả thiết các TLD được thiết kế không có sai số tần số. Do vậy, số lượng của các thùng TLD đơn lẻ trong hệ MTLD trong khảo sát lần lượt thay đổi là N=3, 5, 7, 9, 11, 21 và các dữ liệu khác lựa chọn như sau:

Bề rộng dải tần số lấy là ΔR = 0.2, điều này có nghĩa là tỷ số giữa tần số kích động và tần số trung tâm của hệ MTLD f_0 nằm trong dải: $0.9 < f/f_0 < 1.10$.

Trường hợp 2: Khảo sát ảnh hưởng của bề rộng dải tần số ΔR đến hiệu quả giảm chấn.

Tiến hành khảo sát hiệu quả của giảm chấn khi hay đổi bề rộng dải tần số ΔR = 0.1 ($0.95 < f/f_s < 1.05$); ΔR = 0.2 ($0.90 < f/f_s < 1.05$); và ΔR = 0.3 ($0.80 < f/f_s < 1.2$) cho một số trường hợp của số lượng thùng chứa chất lỏng đã khảo sát trong trường hợp 1 mà tác giả nhận thấy hiệu quả của giảm chấn là tốt: N=3, 5,7, 9 và các tham số điều kiện khác được lựa chọn như trường hợp 1.

Trường hợp 3: Khảo sát ảnh hưởng của tham số điều chỉnh đến hiệu quả giảm chấn.

Xét hiệu quả của MTLD khi tỷ số giữa tần số trung tâm của hệ MTLD và kết cấu không bằng 1 (tỷ số của 2 tần số này là, f_0/f = 1.05, 0.95). Hay nói cách khác, trường hợp hiệu quả của hệ MTLD tạo ra không đạt được như tính toán do một số tác nhân khách quan như: chế tạo thiết bị giảm chấn (chiều sâu chất lỏng, kích thước thùng chứav.v…) chưa hoàn toàn chính xác, tần số dao động riêng của giảm chấn chỉ đạt xấp xỉ bằng với tần số dao động riêng của kết cấu hoặc do các kích động thay đổi không như dự đoán tính toán. Các tham số điều kiện khác lựa chọn như trường hợp 1.

Trường hợp 4: Khảo sát ảnh hưởng của tỷ số giữa tham số cản của giảm chấn với tham số cản của kết cấu.

Việc khảo sát này thực hiện với số lượng thùng chứa TLD tạo ra hiệu quả hợp lý nhất trong các trường hợp đã khảo sát về số lượng thùng chứa TLD, N =5, ΔR= 0.3.

Trường hợp 5: Khảo sát trường hợp đặc biệt của hệ MTLD.

Xét trường hợp đặc biệt của hệ MTLD chính là hệ STLD với nhiều thùng chứa: các thùng của hệ có tần số dao động riêng giống nhau hay có cùng chung một tần số dao động (các thùng với kích thước như nhau và chiều sâu chất lỏng trong mỗi thùng giống nhau).

Trường hợp 6: Khảo sát ảnh hưởng của tỷ lệ khối lượng giữa TLD có tần số trung tâm hoặc các TLD đơn khác với tổng khối lượng chất lỏng trong hệ MTLD.

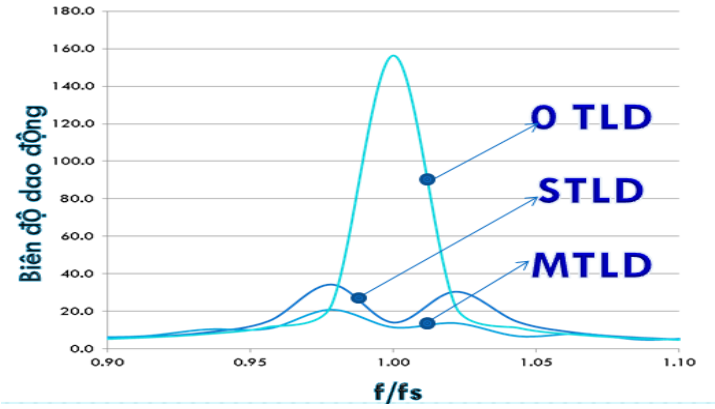
Việc khảo sát được thực hiện với việc lựa chọn số lớp (số thùng TLD) của mỗi TLD đơn trong hệ MTLD sao cho tạo ra được tỷ lệ về khối lượng giữa mỗi TLD đơn với tổng khối lượng chất lỏng trong hệ MTLD đặc biệt là tỷ lệ giữa TLD đơn có tần số trung tâm với tổng khối lượng chất lỏng trong hệ MTLD.

3.3.2 Kết quả khảo sát ứng xử của kêt cấu khi gắn MTLD sử dụng phương trình hàm ứng xử tần số đã thiết lập

Kết quả biểu diễn trên biểu đồ thể hiện mối quan hệ giữa ứng xử của kết cấu theo tỷ số tần số (tỷ số giữa tần số kích động và tần số dao động riêng của kết cấu). Trong mỗi trường hợp khảo sát gồm 3 đường biểu diễn: đường đồ thị ứng xử của kết cấu khi không gắn TLD, khi gắn hệ SLTD và hệ MTLD với N TLD đơn.

Trong hình 3.4, giảm chấn chất lỏng đơn tần số STLD là hệ được mô phỏng với một bậc tự do là kết cấu, một bậc tự do là giảm chấn nên đường độ thì thường xuất hiện với 2 đỉnh. Giá trị 2 đỉnh hoặc bằng nhau hoặc chênh lệch nhau, nằm xa giá trị tỷ số tần số bằng 1 (thời điểm xảy ra công hưởng) là do ảnh hưởng của các tham số giảm chấn. Hệ

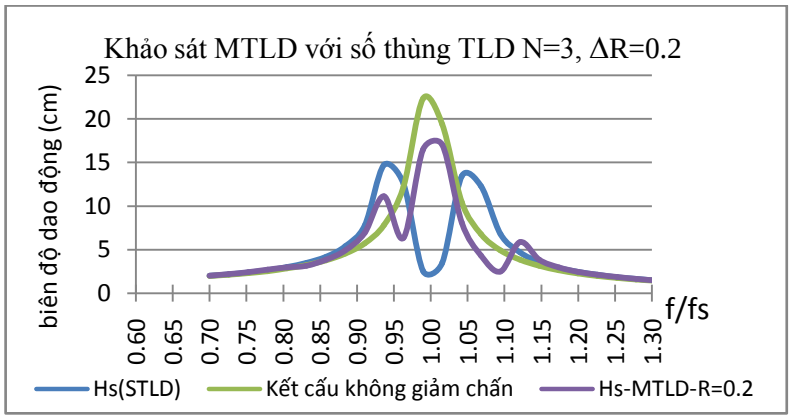
MTLD là hệ được mô phỏng cũng với kết cấu là một bậc tự do còn các giảm chấn còn lại là các bậc tự do khác nên đường đồ thị hợp lý sẽ xuất hiện nhiều đỉnh. Các đường đồ thị biến đổi không theo các dạng này có nghĩa là các tham số lựa chọn không hợp lý.



Hình 3.4: Biểu đồ thể hiện trong mỗi trường hợp khảo sát. Trên hình là minh họa dạng của 3 đường đồ thị với các tham số giảm chấn tối ưu: đồ thị khi không gắn TLD, khi gắn hệ giảm chấn đơn tần số (STLD) và khi gắn hệ giảm chấn đa tần số MTLD.

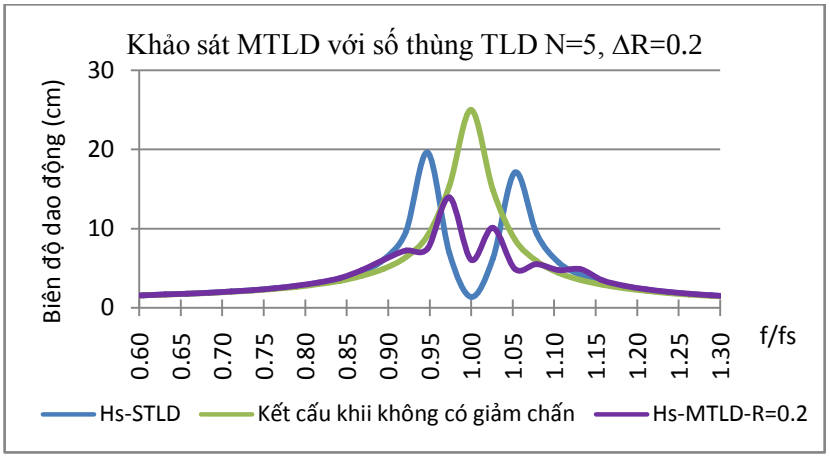
Chi tiết kết quả các trương hợp khảo sát như sau:

Kết quả khảo sát trường hợp 1: Với cùng bề rộng dải tần số (lấy trong khảo sát này là ΔR= 0.2) tiến hành khảo sát với số lượng thùng chứa chất lỏng thay đổi lần lượt N =3,5,7,9,…21. Cụ thể các trường hợp khảo sát như sau:



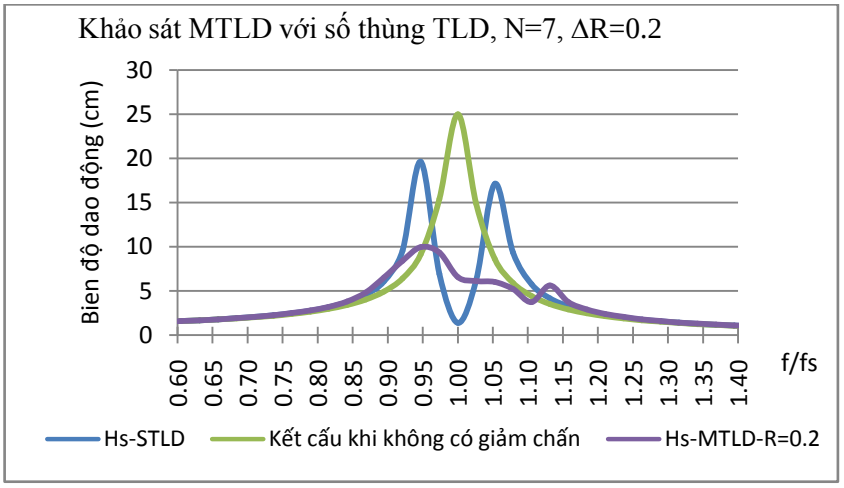
Hình 3.5: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=3,ΔR = 0.2

Khi số lượng của các TLD đơn lẻ trong hệ MTLD N=3 với bề rộng dải tần số ΔR = 0.2 cho thấy dạng biểu đồ của hệ kết cấu khi gắn STLD với 2 đỉnh rõ rệt và khi gắn MTLD với nhiều đỉnh. Tuy nhiên giá trị ứng xử của kết cấu trên biểu đồ của hệ khi gắn MTLD xuất hiện một đỉnh tại vị trí tỷ số tần số bằng 1 là lớn hơn hệ khi gắn STLD. Điều này có nghĩa là hiệu quả của MTLD so với STLD là kém hơn.



Hình 3.6: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=5,ΔR = 0.2

Khi số lượng của các TLD đơn trong hệ MTLD là N= 5, Đường đồ thị hình 3.6 của hệ MTLD với nhiều đỉnh và trong đó có 2 đỉnh có giá trị lớn hơn các giá trị đỉnh khác và nhỏ hơn so với giá trị đỉnh của đường đồ thị hệ STLD nhưng cùng dạng với đường đồ thị của hệ STLD. Vậy, hiệu quả của MTLD là tốt hơn so với STLD.

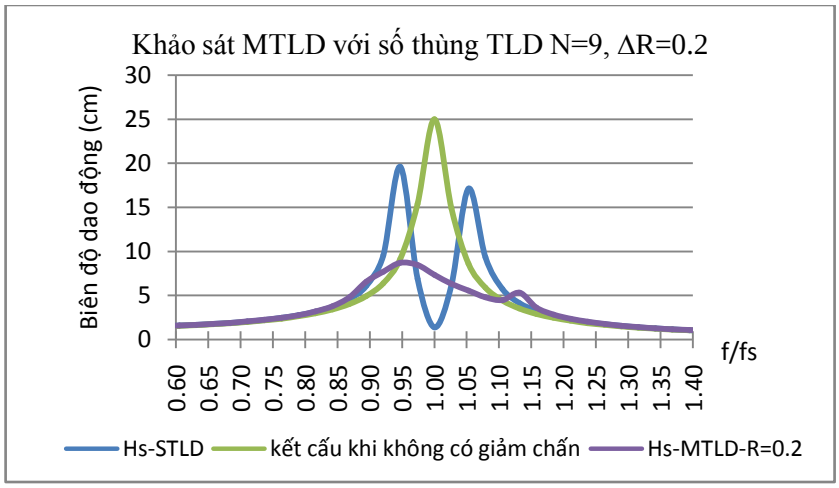


Hình 3.7: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=7,ΔR = 0.2

Khi số lượng của các TLD đơn trong hệ MTLD là N= 7, Đường đồ thị hình 3.7 của hệ MTLD với nhiều đỉnh và khá phẳng. Giá trị đỉnh của đường cong ứng xử tại vị trí tỷ số tần số bằng 1 giảm nhỏ và chênh giữa giá trị các đỉnh không lớn. Điều này có nghĩa hệ MTLD với 7 thùng có thể đáp ứng với dải rộng tần số đều có hiệu quả. Vậy, hiệu quả của MTLD là tốt hơn nhiều so với STLD.

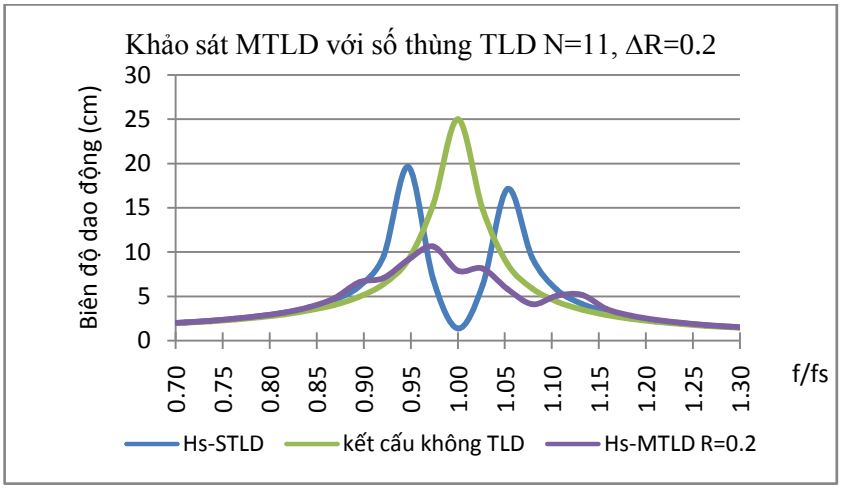
Trường hợp số lượng thùng chứa chất lỏng tăng lên N=9, đường đồ thị hình 3.8 càng trở nên phẳng hơn và với ít đỉnh hơn. Hiệu quả của hệ MTLD được giải thích tương tự như đối với hệ MTLD có N=7. Trong 2 trường hợp khảo sát hệ MTLD với số lượng thùng chứa đơn lẻ N=7 và N=9, đường đồ thị biến đổi không nhiều. Để thấy rõ hơn được ảnh

hưởng của số lượng thùng chứa TLD đơn lẻ cần thiết phải khảo sát khi tiếp tục tăng số lượng thùng chứa TLD lên.



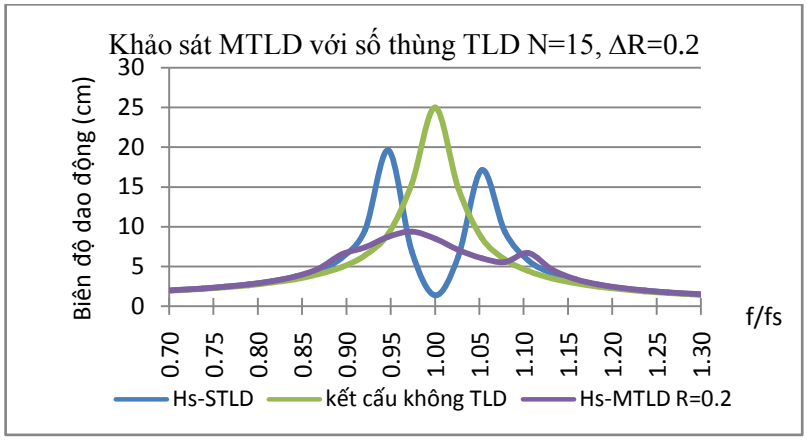
Hình 3.8: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=9,ΔR = 0.2

Tiếp tục tăng số lượng thùng chứa để khảo sát ảnh hưởng của số lượng thùng chứa TLD đơn lẻ đến hiệu quả giảm chấn của hệ kết cấu khi có gắn TLD cho thấy, khi số lượng thùng chứa N =11, 15 đường đồ thị của hệ MTLD không khác là mấy so với trường hợp số lượng thùng chứa N=9 với đường đồ thị khá phẳng.



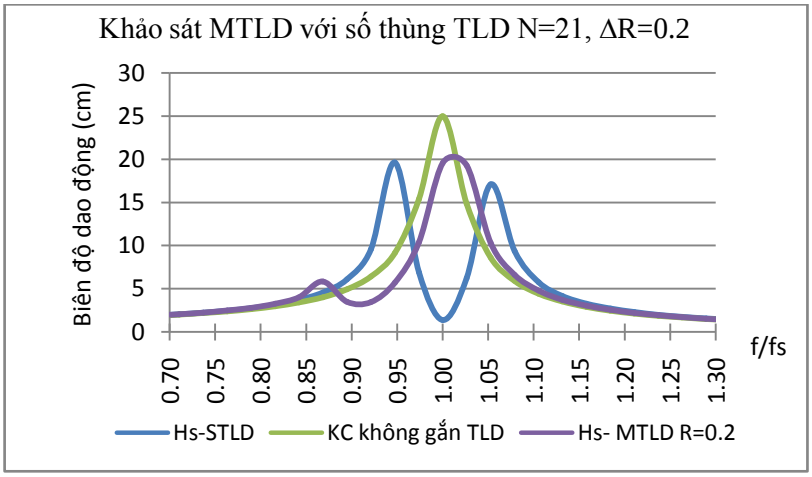
Hình 3.9: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=11,ΔR=0.2

Với số lượng thùng chứa TLD đơn N=11 còn có thể quan sát thấy nhiều đỉnh của đường đồ thị của hệ MTLD, nhưng khi N=15 thì các đỉnh thể hiện không tõ ràng và có xu hướng dần trở nên chỉ còn một đỉnh giống dạng đường đồ thị của hệ khi không gắn TLD. Vậy, hiệu quả của MTLD vẫn tốt hơn nhiều so với hệ STLD.



Hình 3.10: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=15,ΔR=0.2

Tiếp tục tăng số lượng thùng chứa chất lỏng, đồ thị ứng xử của kết cấu ứng với số lượng thùng chứa N=21 cho thấy đường đồ thị dạng một đỉnh cùng dạng và có giá trí xấp xỉ giá trị của đường đồ thị của hệ khi không gắn TLD.Điều này có nghĩa là hiệu quả trong giảm dao động cho kết cấu của hệ MTLD là không còn.



Hình 3.11: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=15,ΔR=0.2

Tóm lại, khi khảo sát ảnh hưởng của tham số số lượng thùng TLD đơn đến hiệu quả giảm dao động của hệ kết cấu khi gắn đa giảm chấn chất lỏng, kết quả cho thấy:

- Hệ MTLD là có hiệu quả hơn so với hệ khi không có TLD lắp đặt và có hiệu quả hơn hệ STLD trong giảm dao động khi và chỉ khi kết cấu lắp đặt ứng với số lượng nhất định của thùng chứa chất lỏng. Trong khảo sát số lượng hợp lý của TLD trong hệ giảm chấn đa tần số MTLD là từ 5-15 TLD đơn ứng với cùng bề rộng dải tần số là ΔR=0.2.
- Khi so sánh hiệu quả của MTLD với hệ STLD với cùng tỷ số khối lượng thì tùy thuộc vào số lượng các thùng TLD khác nhau mà hiệu quả là khác nhau. Trường hợp

số lượng thùng chứa chất lỏng N=21, hệ MTLD gần như không có hiệu quả thậm trí có xu hướng tạo hiệu quả không tốt.

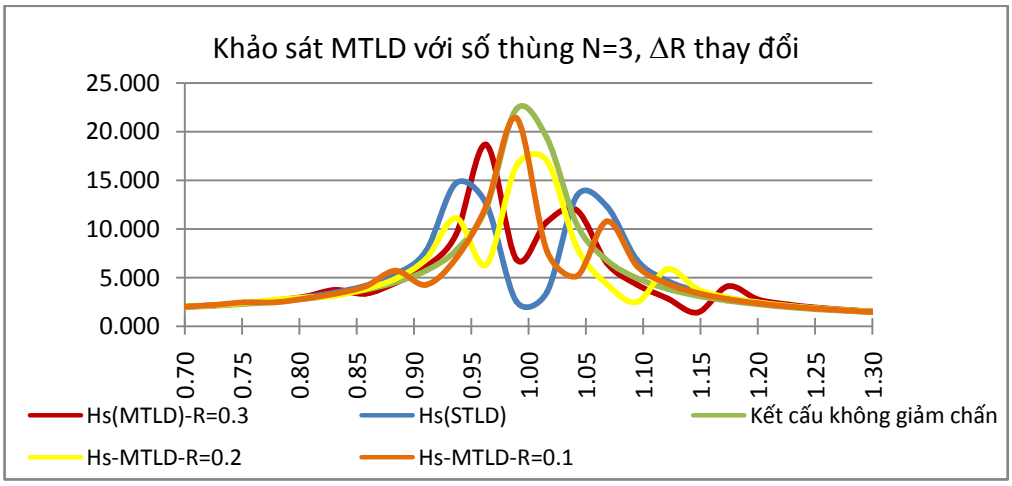
Như vậy, hệ MTLD chỉ có hiệu quả tốt đối với số lượng thùng TLD đơn lẻ nhất định, vượt quá số lượng tạo hiệu quả nhất này thì nếu tiếp tục tăng số lượng thùng TLD thì đồ thị không thể hiện rõ nữa và điều này có nghĩa là hiệu quả của hệ MTLD sẽ không tăng nữa thậm trí không còn hiệu quả giảm dao động cho kết cấu nữa. Số lượng thùng TLD hợp lý trong khảo sát là hệ MTLD gồm N=5-15 thùng TLD đơn lẻ. Hiệu quả của MTLD thể hiện rõ nhất khi đồ phẳng, các đỉnh có giá trị xấp xỉ nhau trên một dải tần số rộng.

Kết quả khảo sát trường hợp 2:

Bề rộng dải tần số là khoảng tần số của các thùng TLD trong hệ MTLD

$$\Delta R = \frac{f_N - f_1}{f_0} = \frac{f_N}{f_0} - \frac{f_1}{f_0}$$

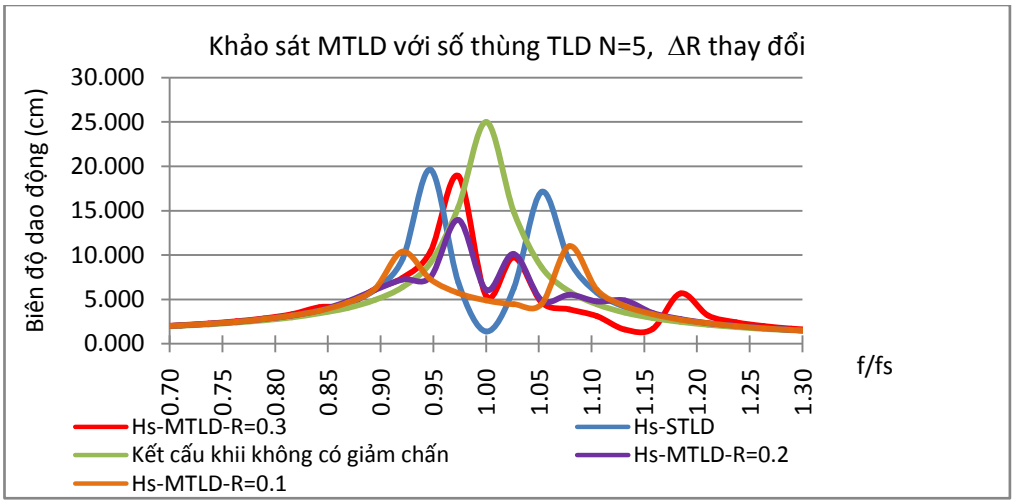
Trường hợp khảo sát ảnh hưởng của số lượng thùng chứa chất lỏng TLD đơn lẻ ở trên được lấy với bề rộng dải tần số ΔR=0.2. Khi thay đổi bề rộng dải tần số của các TLD trong hệ MTLD ΔR lần lượt là 0.1; 0.2; 0.3 ứng với mỗi trường hợp của số lượng thùng giảm chấn chất lỏng đơn lẻ N, thì kết quả cho thấy:



Hình 3.12: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=3, bề rộng dải tần số thay đổi ΔR=0.1, 0.2, 0.3

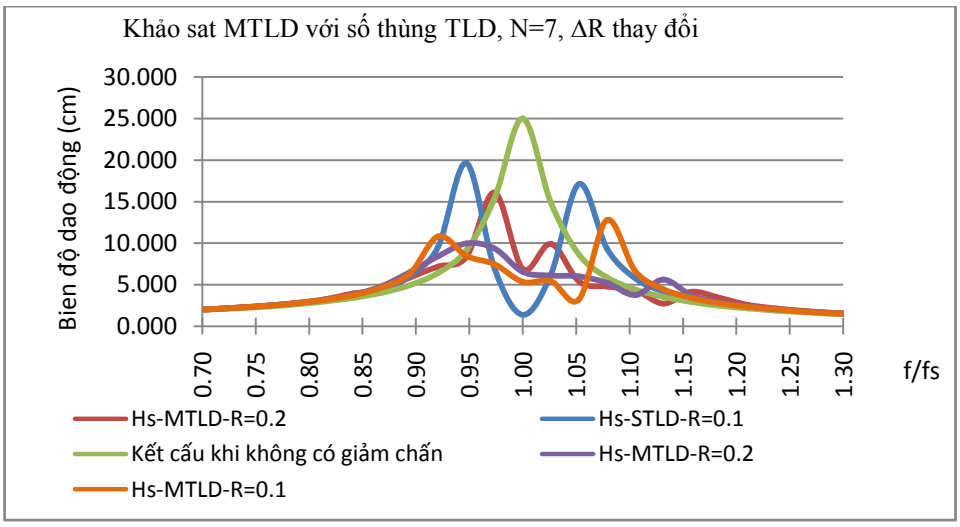
Ứng với số lượng thùng chứa TLD đơn N=3, đường đồ thị của hệ MTLD với nhiều đỉnh nhưng giá trị các đỉnh chênh lệch và tập trung giá trị lớn nhất tại vị trí có tỷ số tần số bằng 1 và cùng dạng với đường đồ thị của hệ khi không gắn TLD. Với ΔR=0.3 đường đồ thị có 2 đỉnh rõ rệt giống với đường đồ thị của hệ STLD. Hệ MTLD ứng với số lượng thùng chứa TLD N=3 có hiệu quả không lớn khi được gắn vào kết cấu cho dù thay đổi bề rộng dải tần số đáp ứng.

Khi số lượng thùng chứa là 5, với số lượng này sự thay đổi bề rộng dải tần số đã bắt đầu có ảnh hưởng tới hiệu quả giảm chấn. Hiệu quả tốt nhất ứng với trường hợp bề rộng dải là 0.2 khi mà đường đồ thị tập trung nằm trong đường đồ thị của hệ khi không gắn TLD với 2 đỉnh chính cùng dạng với đồ thị của hệ STLD. Khi bề rộng dải là 0.1, đường đồ thị thể hiện cũng với 2 đỉnh như hệ STLD, tuy nhiên giá trị lớn nhất của 2 đỉnh này nằm khá xa giá trị tỷ số tần số bằng 1 (giá trị tần số gây cộng hưởng) và do đó ứng xử của kết cấu tại các giá trị tỷ số tần chưa đạt đến công hưởng thấp hơn.



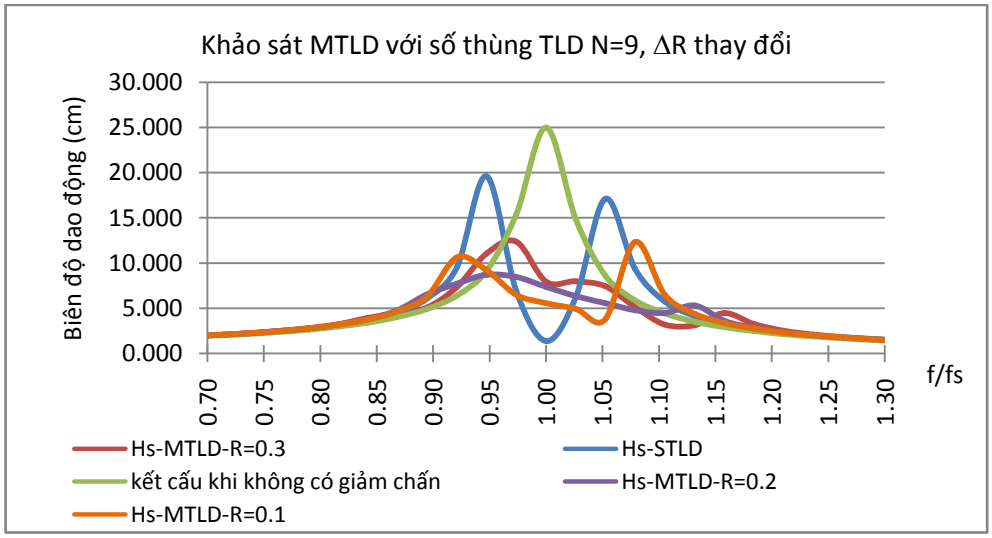
Hình 3.13: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=5, bề rộng dải tần số thay đổi ΔR=0.1, 0.2, 0.3

Với trường hợp số lượng thùng chứa N=7, các giá trị đỉnh trên các đường đồ thị ứng với bề rộng dải tần số thay đổi đã có xu hướng tiến gần nhau hơn và giá trị dải tần số để có hiệu quả giảm chấn nhất trong trường hợp này là 0.2 và 0.3 (2 đường xấp xỉ nhau).

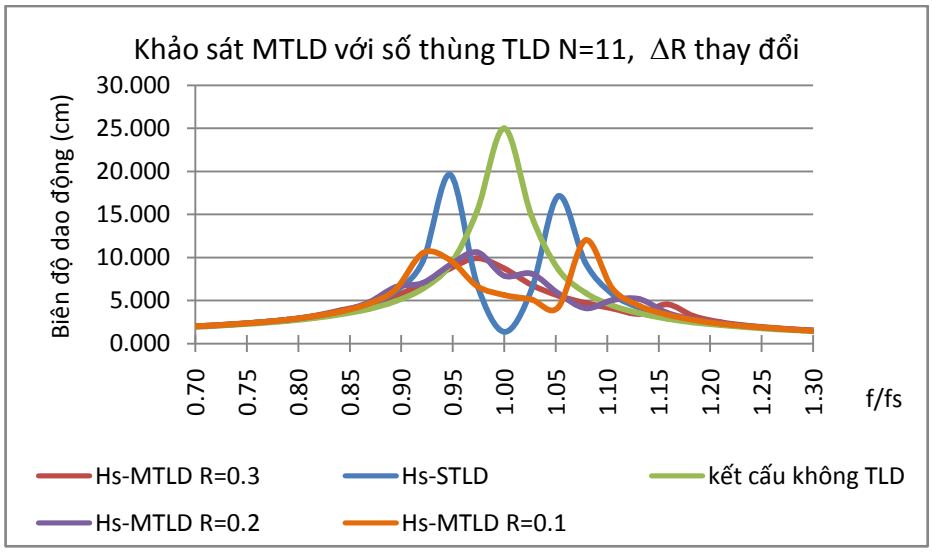


Hình 3.14: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=7,bề rộng dải tần số thay đổi ΔR=0.1, 0.2, 0.3

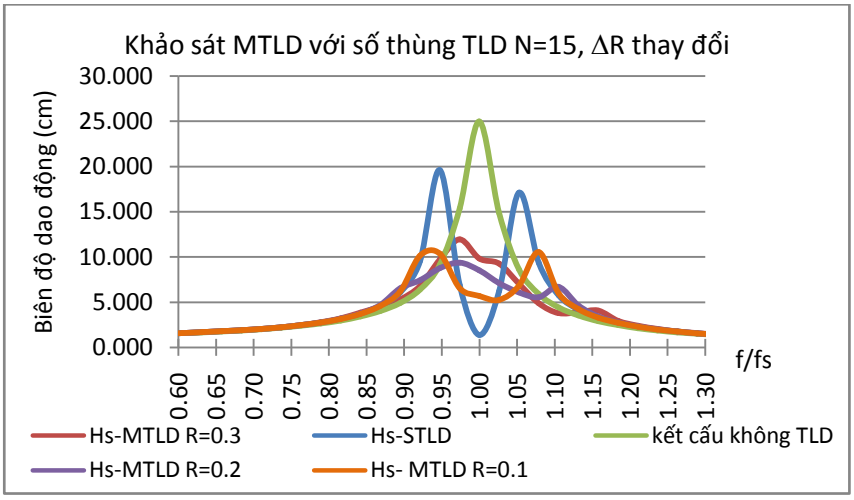
Khi tiếp tục khảo sát ảnh hưởng của sự thay đổi dải tần số với số lượng thùng chứa chất lỏng tăng thêm N=9 và 11, 15 dễ dàng nhận thấy đường đồ thị ứng với bề rộng dải tần số 0.2 và 0.3 tiến sát nhau hơn. Còn ứng với giá trị ΔR=0.1, đường đồ thị có dạng 2 đỉnh giống đường đồ thị của hệ STLD nhưng 2 đỉnh khá xa nhau và xa vị trí tỷ số tần số bằng 1. Điều này có thể hiểu là với số lượng thùng chứa TLD lớn nằm trong dải biến đổi hẹp tần số dao dộng, chênh lệch tần số dao động giữa các TLD đơn là nhỏ và nếu số lượng TLD tiếp tục tăng thì đường đồ thị có xu hướng tiến đến dạng của đường đồ thị hệ STLD.



Hình 3.15: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=9, bề rộng dải tần số thay đổi ΔR=0.1, 0.2, 0.3

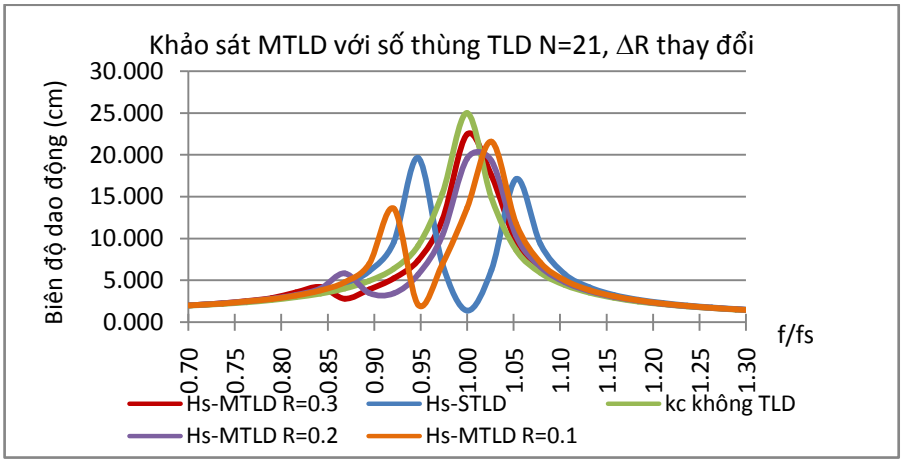


Hình 3.16: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=11, bề rộng dải tần số thay đổi ΔR=0.1, 0.2, 0.3



Hình 3.17: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=15, bề rộng dải tần số thay đổi ΔR=0.1, 0.2, 0.3

Và tương tự như khi phân tích ảnh hưởng của số lượng thùng chứa, sự thay đổi bề rộng dải tần số không có ý nghĩa gì nếu số lượng thùng TLD đơn không hợp lý. Số lượng thùng chứa N=21 với các đường đồ thị tại bất kỳ gái trị nào của bề rộng dải tần số đều thể hiện không cho hiệu quả giảm chấn tốt.



Hình 3.18: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số hệ MTLD ứng với số thùng TLD N=21, bề rộng dải tần số thay đổi ΔR=0.1, 0.2, 0.3

Tóm lại:

- Khi bề rộng dải tần số nhỏ (ΔR = 0.1), số lượng các thùng TLD đơn càng lớn thì giá trị tần số dao động của mỗi thùng TLD đơn lẻ trong hệ MTLD này càng gần nhau (chênh lệch tần số giữa các thùng TLD đơn lẻ nhỏ) và đường đồ thị hàm ứng xử tần số của hệ MTLD có hình dạng càng gần với đường đồ thị hàm ứng xử tần số của hệ STLD với 1 đỉnh. Đường đồ thị này ít thay đổi trong phạm vi biến đổi số lượng thùng chứa từ 5-15, số lượng thùng chứa nhỏ hoặc lớn hơn đường đồ thị bắt đầu xuất hiện sự thay đổi đáng

kể theo chiều hướng xấu. Như vậy có nghĩa là hiệu quả của MTLD thậm trí sẽ kém hơn với hệ STLD hoặc không còn hiệu quả nếu số lượng TLD đơn lẻ vượt ra ngoài khoảng hiệu quả. Điều này khẳng định rằng hệ MTLD chỉ có ý nghĩa khi tần số chênh lệch khác nhau của mỗi TLD đơn lẻ là đủ lớn trong giới hạn nhất định.

- Khi tăng bề rộng dải tần số lên ΔR =0.2, kết quả thu được là các đường đồ thị khá bằng phẳng với nhiều đỉnh có giá trị gần nhau trong khoảng số lượng thùng chứa từ 5-11 thùng. Đường đồ thị ứng với bề rộng dải tần số là 0.2 và 0.3 gần như trùng khít, điều này khẳng định một lần nữa MTLD chỉ có hiệu quả ứng với số lượng thùng chứa nhất định bởi khi số lượng thùng lớn chênh tần số giữa các thùng trong bề rộng dải bằng 0.2 và 0.3 là không nhiều và gần như là bằng nhau và như vậy hệ trở thành hệ STLD với đường đồ thị có 2 đỉnh.
- Sự thay đổi của bề rộng dải tần số cũng ảnh hưởng không nhiều đến hiệu quả giảm chấn khi mà số lượng thùng TLD đơn trong hệ MTLD là không hợp lý như phân tích trong trường hợp 1.

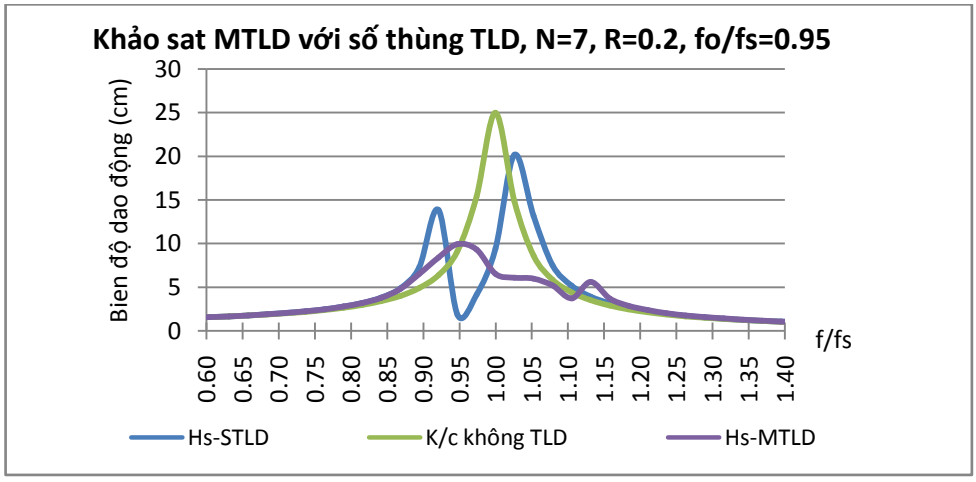
Do vậy, hiệu quả giảm dao động tốt nhất của hệ MTLD ứng với bề rộng dải tần số là 0.2 - 0.3 và độ chênh tần số giữa các thùng TLD đơn lẻ là β= 0.01 - 0.02.

Kết quả khảo sát trường hợp 3:

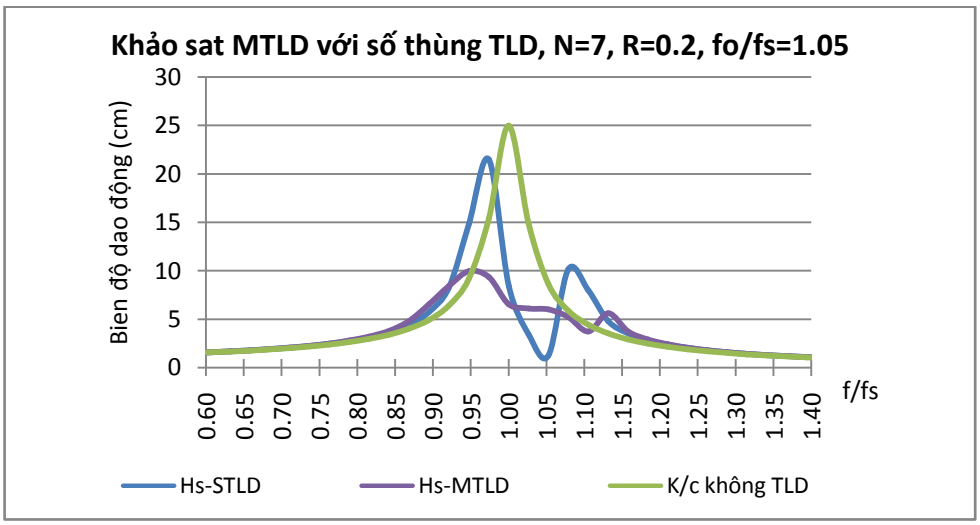
Hiệu quả của hệ MTLD khi tỷ số giữa tần số trung tâm của MTLD và kết cấu không bằng 1 (tỷ số của 2 tần số này là f_0/f = 0.95, 1.05). Các điều kiện ban đầu khác lựa chọn như trường hợp 2 và bề rộng dải tần số lấy là ΔR = 0.2, số lượng thùng TLD đơn của hệ giảm chấn đa tần số MTLD trong khảo sát là N =7.

Thường, TLD được thiết kế để điều chỉnh tới tần số tự nhiên của kết cấu. Tuy nhiên, việc không điều chỉnh có thể xuất hiện do các lý do khác nhau: Tính phi tuyến của kết cấu, thay đổi của tần số tự nhiên của kết cấu do sự thay đổi của hoạt tải, lỗi trong xác định tần số tự nhiên của kết cấu và tương tự như vậy khi tồn tại sự không điều chỉnh.

Khi khảo sát ảnh hưởng của sự chênh lệch tần số giữa tần số trung tâm của hệ MTLD và của kết cấu với số lượng thùng chứa N =7 cho thấy, đường đồ thị của hệ MTLD không thay đổi là mấy trong khi đó đường đồ thị của giảm chấn chất lỏng đơn tần số thay đổi rõ rệt. Cụ thể 2 đỉnh của đường đồ thị có giá trị không đối xứng qua đỉnh tỷ số tần số bằng 1 nữa mà nếu tần số của kết cấu nhỏ hơn tần số của hệ giảm chấn tạo ra thì đường đồ thị này có một đỉnh trội hơn hẳn tại giá trị tỷ số tần số bằng 0.95 và ngược lại khi tần số của kết cấu lớn hơn tần số của hệ giảm chấn thì đường đồ thị này lại có đỉnh trội hơn tại giá trị tỷ số tần số bằng 1.05.



Hình 3.19: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số của hệ MTLD (N=7) với tỷ số của 2 tần số f_0/f_s = 0.95, bề rộng dải tần số là ΔR=0.2



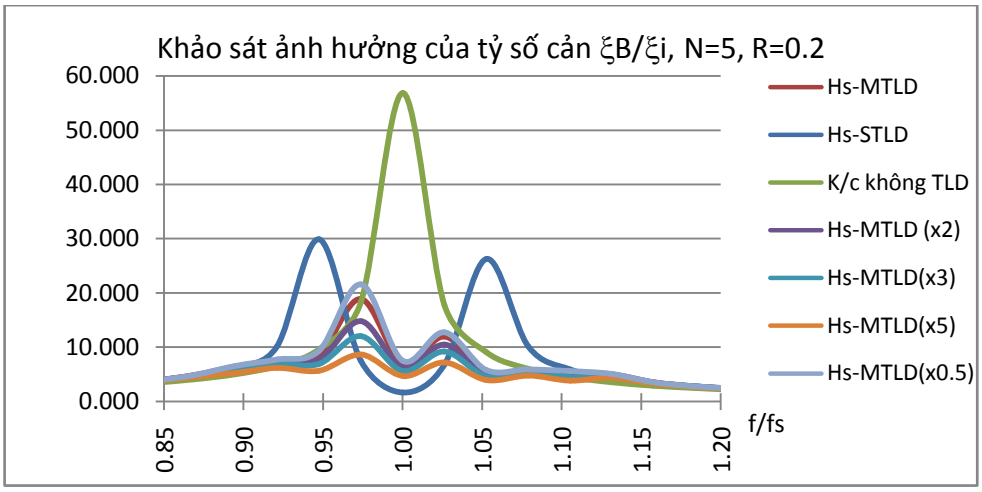
Hình 3.20: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử tần số của hệ MTLD tỷ số của 2 tần số f_0/f_s = 1.05, bề rộng dải tần số là ΔR=0.2

Khảo sát này chứng tỏ rằng MTLD là khá nhạy cảm với sự thay đổi dải tần số kích thích, tuy nhiên thì ứng xử với sự thay đổi này là tốt hơn hệ STLD.

Kết quả khảo sát trường hợp 4 – Khảo sát ảnh hưởng của tham số tỷ số cản (tỷ lệ giữa tỷ số cản của hệ MTLD so với tỷ số cản của kết cấu)

Việc dùng thiết bị giảm chấn thực chất chính là một cách thức nhằm tăng tính cản cho kết cấu, độ tăng thêm này do đặc điểm cấu tạo, nguyên lý làm việc của mỗi loại thiết bị giảm chấn tạo ra. Với hệ giảm chấn dùng chất lỏng nói chung và hệ giảm chấn dùng chất lỏng đa tần số nói riêng thì tính cản của giảm chấn được đặc trưng bởi nhiều tính cản đơn được tạo ra từ mỗi thùng TLD đơn trong hệ phụ thuộc vào kích thước thùng chứa hoặc chiều sâu chất lỏng tỏng mỗi thùng khác nhau. Tính tỷ số cản cho mỗi TLD đơn trong hệ

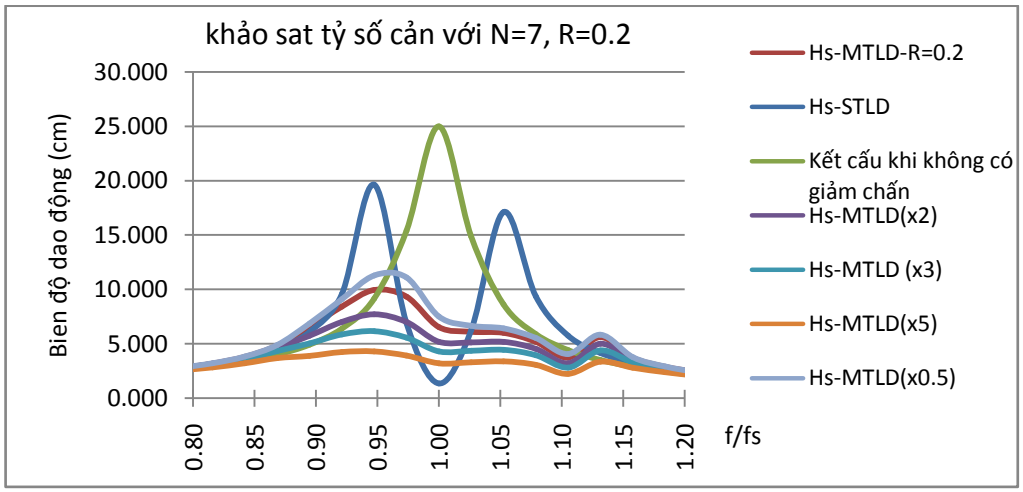
giảm chấn đa tần số MTLD được áp dụng theo Fujino (1993) - công thức 3.7.



Hình 3.21: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử của kết cấu với sự thay đổi của tỷ lệ tỷ số cản của kết cấu so với tỷ số cản của MTLD ứng với N=5 thùng.

Khi khảo sát ảnh hưởng của tỷ lệ giữa tỷ số cản trung bình của các giảm chấn đơn lẻ trong hệ MTLD và tỷ số cản của kết cấu ứng với số lượng thùng chứa đơn lẻ trong hệ MTLD N=5, tỷ số khối lượng μ =0.01, và bề rộng dải tần số lấy là 0.2, cho thấy:

Tỷ số giữa tỷ số cản của kết cấu trên tỷ số cản của MTLD càng lớn đường đồ thị càng trở nên phẳng hơn với 2 đỉnh có giá trị xấp xỉ nhau. Tỷ số này tăng đến 5 (tỷ số cản của kết cấu lớn gấp 5 lần tỷ số cản của giảm chấn) thì đồ thị với 2 đỉnh càng gần với dạng của đồ thị hàm STLD. Như vậy, chênh tỷ số cản càng lớn thì hiệu quả của MTLD càng giảm.

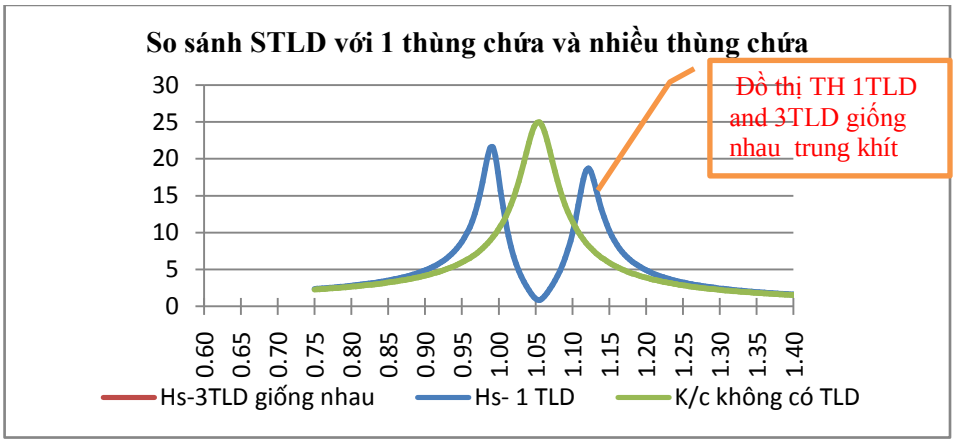


Hình 3.22: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử của kết cấu vớ i sự thay đổi của tỷ lệ tỷ số cản của kết cấu so với tỷ số cản của MTLD ứng với N=7 thùng.

Kết quả khảo sát trường hợp 5

Khảo sát hệ STLD khi sử dụng 1 thùng TLD đơn và khi sử dụng nhiều thùng TLD giống nhau. Với dữ liệu ban đầu như đã đề cập trong mục 3.1 ở trên, nghiên cứu được thực hiện

để kiểm tra hệ STLD khi sử dụng 1 thùng đơn với hệ STLD khi sử dụng nhiều thùng TLD đơn lẻ giống nhau. Kết quả cụ thể cho thấy:



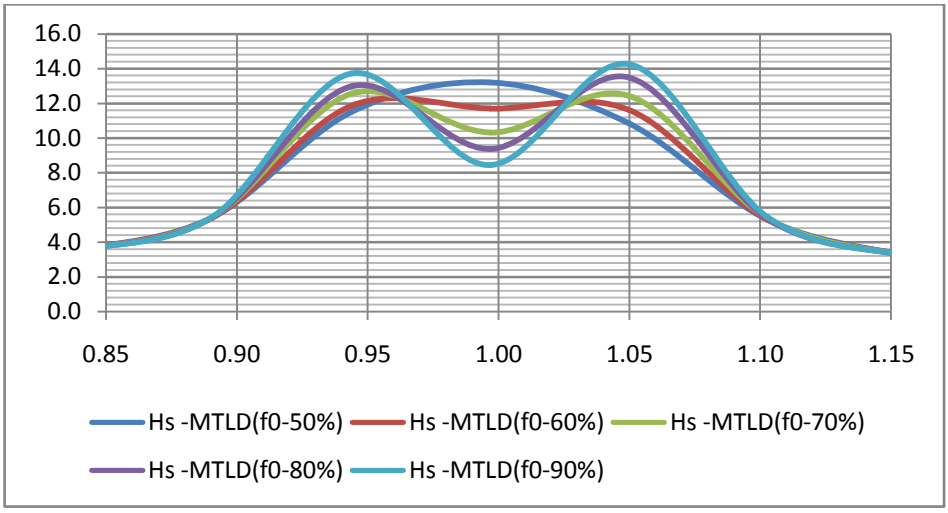
Hình 3.23: Đồ thị khảo sát hàm ứng xử của kết cấu với 1 Thùng TLD và nhiều thùng TLD có tần số dao động giống nhau.

- Trường hợp 1: STLD bao gồm chỉ 1 thùng TLD, khối lượng của chất lỏng trong thùng này là tổng khối lượng chất lỏng trong các thùng của trường hợp 2. Sử dụng hàm ứng xử tần số của hệ SLTD cho khảo sát
- Trường hợp 2: STLD gồm 3 thùng với cùng tần số dao động tự nhiên và cân bằng với tần số tự nhiên của thùng trong trường hợp 1.

  Kết quả ứng xử (biên độ dao động) của kết cấu trong 2 trường hợp trên là như nhau thể hiện 2 đường trung khít nhau. Điều này khẳng định việc tăng số lượng cácthùng TLD giống nhau trong hệ giảm chấn dùng chất lỏng chỉ mang ý nghĩa đảm bảo tỷ số khối lượng giữa giảm chấn và kết cấu.

Kết quả khảo sát trường hợp 6 – Khảo sát ảnh hưởng của tỷ lệ khối lượng của TLD đơn lẻ trong hệ MTLD so với tổng khối lượng chất lỏng của hệ (m_i/m_L).

Kết quả chỉ ra rằng, khối lượng của TLD có tần số trung tâm tăng lên thì hiệu quả của MTLD tăng lên. Ứng với giá trị nhất định nào đó thì đồ thị của hệ đi khá phẳng, điều này chứng tỏ ứng xử của kết cấu trở nên đáp ứng tốt với dải rộng tần số kích động. Khối lượng của TLD gần TLD có tần số trung tâm sẽ quyết định mối tương quan giữa giá trị 2 đỉnh của đồ thị (bằng nhau hoặc cao hơn hay thấp hơn). Hệ STLD với đồ thị có 2 đỉnh bằng nhau thể hiện các tham số thiết kế giảm chấn là hợp lý và hiệu quả giảm dao động cho kết cấu của giảm chấn là tốt). Các TLD có tần số càng xa TLD có tần số trung tâm càng ít ảnh hưởng đến hiệu quả giảm chấn (đường đồ thị không thay đổi nhiều khi giá trị khối lượng của các TLD này thay đổi).



Hình 3.24: Đồ thị khảo sát ảnh hưởng của khối lượng TLD có tần số trung tâm đến ứng xử của kết cấu

3.4 Kết luận chương 3

Phần nghiên cứu lý thuyết của luận án đã hoàn thành với các kết quả đạt được theo đúng mục tiêu nghiên cứu đã đề ra. Cụ thể như sau:

- Hàm ứng xử tần số của hệ tương tác giữa kết cấu và hệ giảm chấn đa tần số MTLD đã được thiết lập trên cở sử áp dụng phương trình Euler – Largrang cho thiết lập phương trình dao động của hệ
- Đề xuất các trường hợp khảo sát hàm ứng sử tần số thể thể hiện ứng xử của kết cấu khi các tham số của giảm chấn thay đổi mà cụ thể là số lượng thùng chứa chất lỏng để tạo ra các tần số khác nhau trong hệ giảm chấn đa tần số MTLD, bề rộng dải tần số, tỷ số khối lượng, tỷ số cản. Các trường hợp khảo sát được so sánh đánh giá với trường hợp hệ kết cấu không gắn giảm chấn chất lỏng TLD và gắn giảm chấn chất lỏng đơn tần số STLD.
- Kết quả khả sát các trường hợp chỉ ra rằng hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số chỉ có hiệu quả giảm chấn ứng với giá trị nhất định của một số tham số giảm chấn. Cụ thể: số lượng thùng TLD là N =5-15, chênh tần số giữa cá TLD đơn trong hệ là β= 0.01 - 0.02.
- Khối lượng của giảm chấn chất lỏng có tần số trung tâm trong hệ giảm chấn đa tần số có ảnh hưởng lớn đến hiệu quả của giảm chấn. Hiệu quả giảm chấn tăng khi khối lượng này tăng,
- Chênh tỷ số cản (tỷ lệ giữa tính cản của giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD và tỷ số cản của kết cấu) càng lớn thì hiệu quả của MTLD càng giảm.
- Việc tăng số lượng các thùng TLD giống nhau trong hệ giảm chấn dùng chất lỏng (hệ STLD) chỉ mang ý nghĩa đảm bảo tỷ số khối lượng giữa giảm chấn và kết cấu mà không ảnh hưởng đến hiệu quả giảm chấn.

CHƯƠNG 4

THỰC HIỆN THÍ NGHIỆM MÔ HÌNH TRÊN BÀN RUNG NHẰM ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ GIẢM DAO ĐỘNG CỦA GIẢM CHẤN CHẤT LỎNG TLD

4.1. Tổng quan và mục đích thí nghiệm

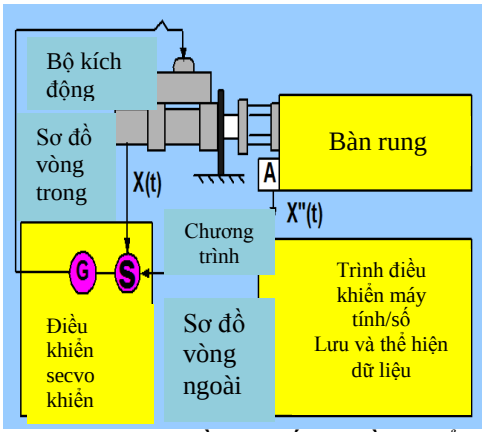
Nghiên cứu lý thuyết về tương tác giữa kết cấu với TLD mà cụ thể là giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) đã được tiến hành trong chương 3 thông qua phân tích ứng xử của kết cấu đáp ứng theo dải tần số kích động khác nhau khi sử dụng hàm ứng xử tần số thiết lập. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng viêc xây dựng được hàm ứng xử tần số và dùng hàm ứng xử này phân tích tính toán thiết kế giảm chấn dùng chất lỏng để giảm dao động cho kết cấu là rất hiệu quả.

Trong phân tích lý thuyết về giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD), phân tích sự tương tác giữa kết cấu và MTLD được hoàn thiện với việc thiết lập hàm ứng xử tần số bằng phân tích đại số để chỉ ra hiệu quả của MTLD với các tham số được lựa chọn hợp lý trong kiểm soát dao động cho kết cấu. Để xác nhận giá trị của hàm ứng xử tần số đã thiết lập và hiệu quả thực của MTLD, việc thí nghiệm trên mô hình thực sự là cần thiết. Các kết quả thí nghiệm đo được cần chỉ ra ứng xử của kết cấu theo tỷ số tần số (tỷ lệ giữa tần số lực kích động và tần số dao động riêng của kết cấu) và khẳng định sự phù hợp với các giá trị phân tích lý thuyết khi sử dụng hàm ứng xử tần số thiết lập.

4.2. Bàn rung và sự phù hợp của thiết bị cho thí nghiệm đối chứng

Thiết bị được sử dụng để thực hiện cho thí nghiệm kiểm chứng là hệ bàn rung (shaking table). Bàn rung là thiết bị tạo rung động phục vụ cho các thí nghiệm phân tích dao động của kết cấu dưới các tác động động thông qua hệ thống truyền kích động có điều khiển bằng hệ thống thủy lực đặt tại phòng thí nghiệm công trình nhà A10 – Trường Đại học Giao thông Vận Tải, được cung cấp bởi công ty ANCO – Mỹ.

Hệ bàn rung có thể bị kích động theo 2 phương nằm ngang. Hàm kích động có thể được định nghĩa bằng phần mềm điều khiển bàn rung cho phù hợp với mục đích nghiên cứu ứng xử của kết cấu dưới các tác động động lực học. Phần mềm bao gồm cả các hàm kích động mẫu như là các trận động đất điển hình trên thế giới hoặc các hàm tự định nghĩa.



Hình 4.1: Sơ đồ hệ thống điều khiển bàn rung (shaking table)

Hình 4.2: Thiết bị bàn rung đặt tại phòng thí nghiệm trường Đại học GTVT

Bàn rung gồm 2 phần:

- Phần1 – phần cơ khí gồm bàn rung với 2 kích thủy lực được cấp dầu cho phép kích động bàn rung dao động theo 2 phương
- Phần 2 – phần điều khiển. Phần điều khiển là một phần mềm cài đặt trên máy tính mà có thể điển khiển chế độ hoạt động của bàn rung theo các hàm định nghĩa sẵn hoặc tự định nghĩa hoặc các dữ liệu thu được từ các trận động đất v.v… và thu các dữ liệu đo được từ dao động của kết cấu đặt trên bàn rung.

Phần mềm DANCE được gọi là môi trường điều khiển số của thiết bị bàn rung cho phép thực một một số công việc cần thiết cho việc thí nghiệm mô hình như:

- Cho phép xác định tần số cộng hưởng bằng việc thay đổi dải các giá trị tần số kích động cho bàn rung dao động riêng.
- Thiết lập phổ (dữ liệu động đất theo thời gian). Phổ cho phép đưa ra dữ liệu động đất theo lý thuyết.
- Cho phép tự định nghĩa dạng của hàm kích động theo bất kỳ dạng dao động nào (hàm sóng ngẫu nhiên) tùy thuộc vào hàm dao động do người sử dụng nhập vào để truyền kích động tới bàn rung. Tuy nhiên việc tạo kích động dạng hàm điều hòa (hàm sin hoặc hàm cos) vào bàn rung phù hợp với việc nghiên cứu bài toán cơ bản của một kết cấu chịu tác động kích động của tác động động lực học như gió, động đất và hoạt tải như phân tích trong chương 1. Với hàm kích động này kết quả thu được sẽ là chuyển dịch của mô hình kết cấu tại tần số gây công hưởng và phù hợp cho việc đánh giá hiệu quả giảm chấn khi sử dụng giảm chấn chất lỏng (thiết kế cho trạng thái làm việc bất lợi nhất của kết cấu).

Như vậy có thể xây dựng đường thực nghiệm bằng thí nghiệm mô hình kết cấu trên bàn rung để làm dữ liệu đối chứng với đường lý thuyết khi khảo sát hàm ứng xử tần số đã thiết lập. Đường lý thuyết là thể hiện mối quan hệ giữa biên dộ dao động và tỷ số tần số giữa tần số kích động và tần số dao động riêng của kết cấu.

4.3. Lựa chọn mô hình thí nghiệm và mô hình kết cấu cho thí nghiệm

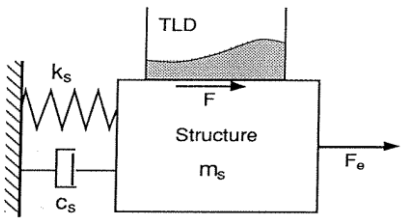
Mô hình thí nghiệm là mô hình mô phỏng sơ đồ hoạt động của mô hình kết cấu trong thí nghiệm. Mô hình kết cấu sử dụng cho thí nghiệm là cơ sở để có thể thu thập được số liệu cho việc so sánh, đối chứng với các kết quả phân tích lý thuyết. Chi tiết lựa chọn như sau:

4.3.1. *Mô hình thí nghiệm*

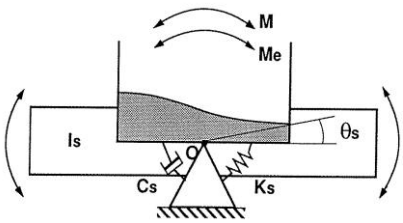
Hiện nay trên thế giới có 2 nghiên cứu thực nghiệm chính về giảm chấn chất lỏng (TLD) với 2 mô hình thí nghiệm trên bàn rung như sau:

- Mô hình thứ 1: Thí nghiệm bản thân thùng TLD để đánh giá các đặc tính động lực của TLD qua khảo sát chuyển động văng té của chất lỏng bên trong thùng so với mô phỏng số chuyển động dòng chất lỏng (Jin Kyu Yu 1997, M.J Tait 2005…).

  Mô hình này nhằm khảo sát chuyển động của dòng chất lỏng, tác động của dòng chất lỏng với kết cấu. Điển hình là mô hình dòng chất lỏng trên cơ sở phương trình sóng nước nông được đặc trưng khi sử dụng phương pháp lựa chọn ngẫu nhiên (mô hình RCM) là phương pháp được đề xuất bởi Gardarsson và Yeh (1994)[84].
- Mô hình thứ 2: thí nghiệm hệ tương tác kết cấu đơn bậc tự do và TLD. Mô hình kết cấu này với sự mô phỏng của kết cấu khi có và không có TLD nhằm đánh giá hiệu quả giảm dao động của TLD cho kết cấu.



Hình 4.3: Mô hình tương tác giữa TLD và kết cấu chịu tác động của chuyển động theo phương ngang



Hình 4.4: Mô hình tương tác giữa TLD và kết cấu chịu tác động của chuyển động xoay

Trên cơ sở các mô hình thí nghiệm đưa ra, tác giả luận án kiến nghị sử dụng thí nghiệm hệ tương tác chịu tác động của chuyển động theo phương ngang (hình 4.3). Thí nghiệm

này phù hợp với nội dung đề tài nghiên cứu ứng dụng giảm chấn chất lỏng để kiểm soát dao động cho kết câu. Phân tích lý thuyết ứng xử của kết cấu khi có và không có gắn giảm chấn chất lỏng TLD sử dụng hàm ứng xử tần số thiết lập cho hệ tương tác gồm kết cấu và nhiều TLD chịu tác động kích động của hàm điều hòa cần thiết có thêm một cơ sở dữ liệu nhằm đối chứng để có thể đánh giá giá trị của việc phân tích, thiết lập. Do vậy việc sử dụng thiết bị bàn rung là khá phù hợp cho mục đích đánh giá ứng xử của kết cấu làm cơ sở dữ liệu đối chiếu với kết quả phân tích lý thuyết.

4.3.2. *Mô hình kết cấu cho thí nghiệm*

Trên cở sở mục đích thí nghiệm cần đạt được, mô hình kết cấu phải đảm bảo các tiêu chí [28] như sau:

- mô hình thí nghiệm là một mô hình động học để có thể sử dụng cho nghiên cứu hiệu ứng dao động, thí nghiệm trên bàn rung.
- Sử dụng các vật liệu giản để có thể thu được số liệu đo đạc chính xác và dễ dàng cho việc xử lý.
- Biến dạng của mô hình phù hợp với thiế bị tạo rung động là bàn rung và phù hợp với khả năng đo ghi dữ liệu của thiết bị.

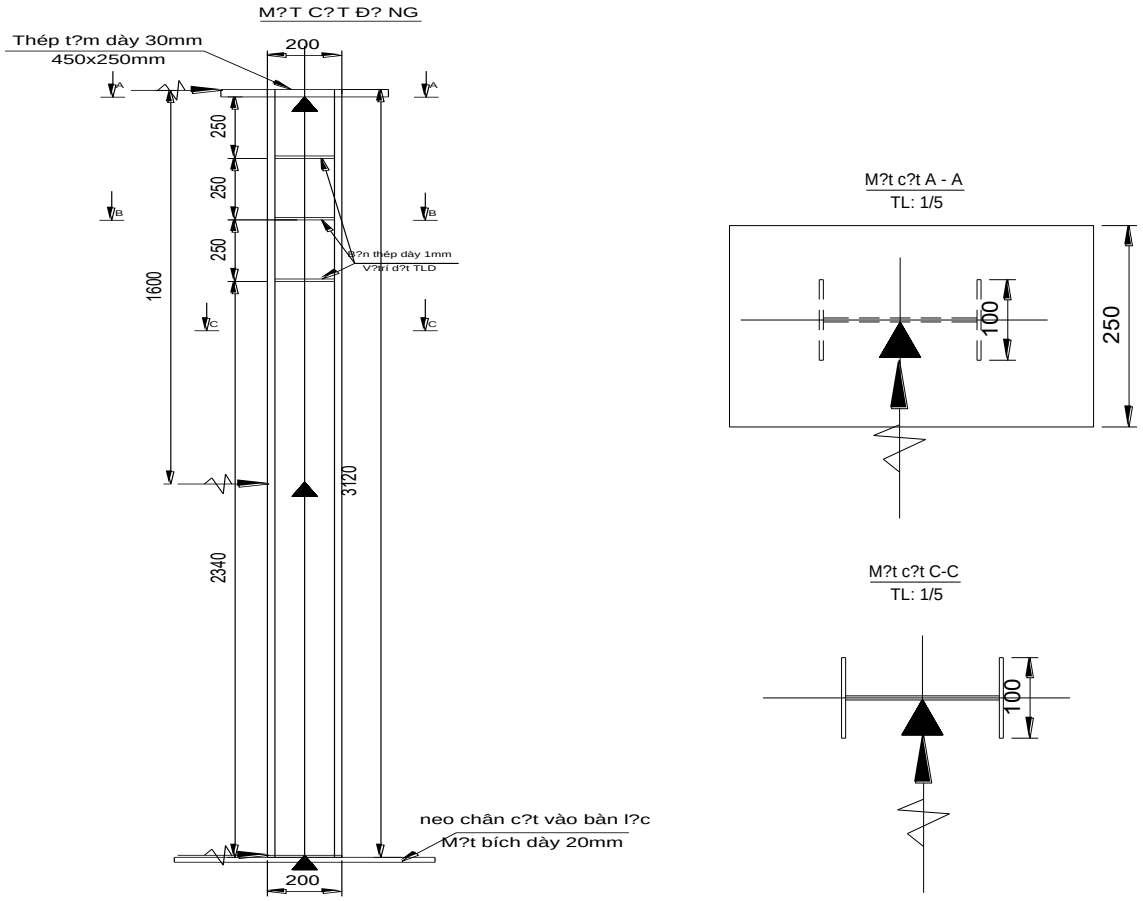
Kết cấu được lựa chọn cho thí nghiệm là một cột thép tổ hợp hình chữ H. Cột thép được phân tích trong chương trình phần mềm phân tích kết cấu Midas Civil. Các mode dao động, tần số dao động và biên độ dao động được chỉ ra từ phân tích trên phần mềm được sử dụng cho việc thiết kế MTLD. Các dữ liệu cơ sở này là dữ liệu ban đầu cho việc dùng hàm ứng xử tần số thiết lập để phân tích và đánh giá hiệu quả giảm dao động của cột khi có lắp đặt giảm chấn chất lỏng (TLD). Sau đó dữ liệu phân tích lý thuyết này được so sánh với dữ liệu thí nghiệm khi đặt mô hình cột trên bàn rung. Việc thiết kế MTLD cho mô hình sử dụng hàm ứng xử tần số và các tham số thích hợp được tiến hành theo cách tương tự như các trường hợp khảo sát lý thuyết đối với hàm ứng xử tần số từ chương 3.

Kết cấu cột dạng chữ H được lựa chọn cho nghiên cứu thực nghiệm làm việc theo sơ đồ cột một đầu ngàm một đầu tự do. Tần số dao động riêng của kết cấu theo các mode được tính toán bằng phần mềm phân tích kết cấu Midas Civil sau đó được xác định lại khi sử dụng thiết bị bàn rung. Đặc trưng hình học chính của cột mô hình như sau:

- Cấu tạo cột:
  - Chiều cao cột: H_s=3100mm;
  - Mặt cắt ngang cột: dạng chữ H được tổ hợp từ thép có cường độ chảy

fy=285Mpa;

Trên đỉnh cột đặt một bản thép có kích thước : A x B x t =250x450x30 ; Mục đích của việc bố trí khối lượng tập trung trên đỉnh cột này là tạo dao động biến dạng lớn tại đỉnh cột và phù hợp với việc thu thập dữ liệu đo.



Hình 4.5: Mô hình cột thí nghiệm dạng chữ H và sơ đồ bố trí điểm đo

Đặc trưng hình học của cột:

Diện tích: 1950.0mm^2. Chu vi: 790.0mm

Mô men quán tính: X: 835312.5 Y: 417441025.2

Bán kính trọng tâm: X: 20.7 Y: 462.7

⇨ Độ mảnh của cột theo hướng x là: $\lambda = 2*l/r = 2*3100/20.7 = 299.5$

Trong đó: *l* là chiều dài của cột và r là bán kính quán tính

Tổng khối lượng trong phân tích dao động của cột (bao gồm cả tấm thép đặt trên đỉnh là $m_s = 1950*3100*7.85*10^{-9} + 0.25*0.45*0.03= 0.05$ (T)

Tỷ số cản của mô hình kết cấu cột lựa chọn ban đầu cho phân tích là: 0.005.

Để có thể xác định được sự làm việc của mô hình kết cấu, tiến hành lắp đặt 3 đầu đo chuyển vị và 2 đầu đo gia tốc tại vị trí đỉnh của cột, giữa cột và chân cột. Chi tiết điểm đo thể hiện trong hình 4.5.

4.4. Phân tích mô hình kết cấu cho thí nghiệm và các trường hợp thí nghiệm

Nghiên cứu thực nghiệm được tiến hành trong phòng thí nghiệm Vilas 047 của trường Đại học GTVT. Nội dung chính của nghiên cứu thực nghiệm như sau:

- Xây dựng mô hình thí nghiệm gồm: kết cấu, hệ TLD và bàn rung;
- Tính toán các thông số đặc trưng về mặt cơ học và động học của kết cấu và TLD;
- Phân tích, khảo sát về mặt lý thuyết ứng xử của kết cấu khi giảm chấn chất lỏng TLD được gắn thêm vào; So sánh các trường hợp ứng xử của kết cấu chịu tác động của hàm điều hòa khi không gắn giảm chấn chất lỏng, khi có gắn giảm chấn chất lỏng đơn tần số và khi gắn giảm chấn chất lỏng đa tần số khi sử dụng hàm ứng xử tần số đã thiết lập cho hệ tương tác kết cấu và giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD).
- Tiến hành thí nghiệm theo các trường hợp đã phân tích lý thuyết cho mô hình khi sử dụng bàn rung tạo lực kích động. Đo biên độ dao động của hệ kết cấu khi có gắn TLD trên bàn rung và thiết lập biểu đồ quan hệ giữa biên độ dao động với tỷ số giữa tần số dao động riêng của TLD với tần số dao động riêng của kết cấu. Tiến hành thay đổi các thông số của hệ MTLD để khảo sát về các yếu tố tối ưu của hệ thống MTLD;
- Phân tích, đánh giá các kết quả thu được và so sánh với các tính toán lý thuyết;
- Kết luận và kiến nghị.

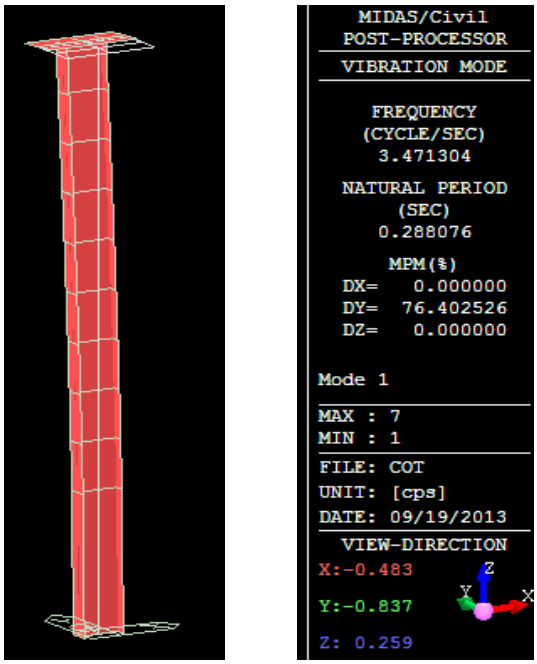
4.4.1. *Phân tích xác định tần số dao động riêng và các mode dao động của mô hình thí nghiệm sử dụng phần mềm phân tích kết cấu Midas Civil*

Tần số dao động tự nhiên của kết cấu lấy trong phân tích dao động theo kết quả phân tích mô hình trên phần mềm Midas Civil 7.0.1 cụ thể kết quả như sau:

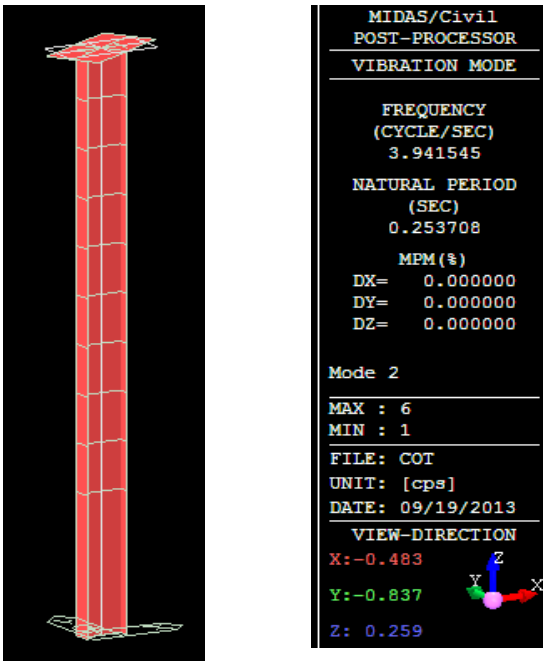
Bảng 4.1. Kết quả phân tích các mode dao động của mô hình cột thí nghiệm :

STT	Mode	Khối lượng kết cấu (Kg)	Tần số dao động tự nhiên (Hz)	Tỷ số cản
1	Mode 1	50.83	3.47	0.005
2	Mode 2	50.83	3.94	0.005
3	Mode 3	50.83	13.27	0.005
4	Mode 4	50.83	28.46	0.005
5	Mode 5	50.83	83.26	0.005
6	Mode 6	50.83	103.03	0.005

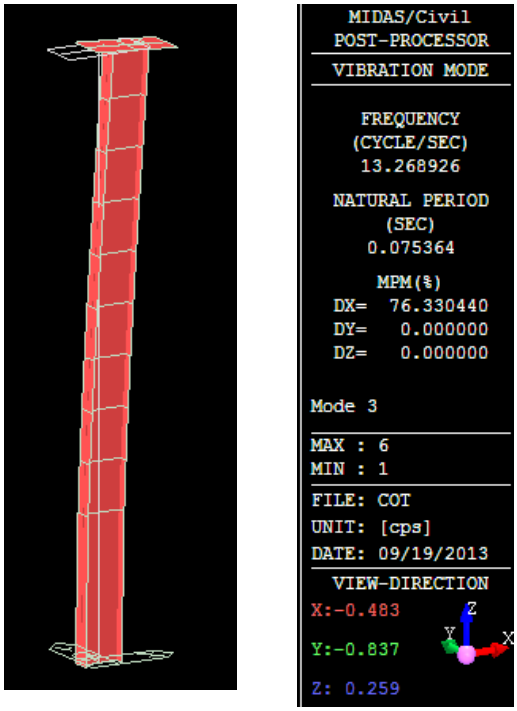
Trong thiết kế giảm chấn chất lỏng nhằm kiểm soát dao động cho mô hình lựa chọn mode dao động điển hình là mode 1,



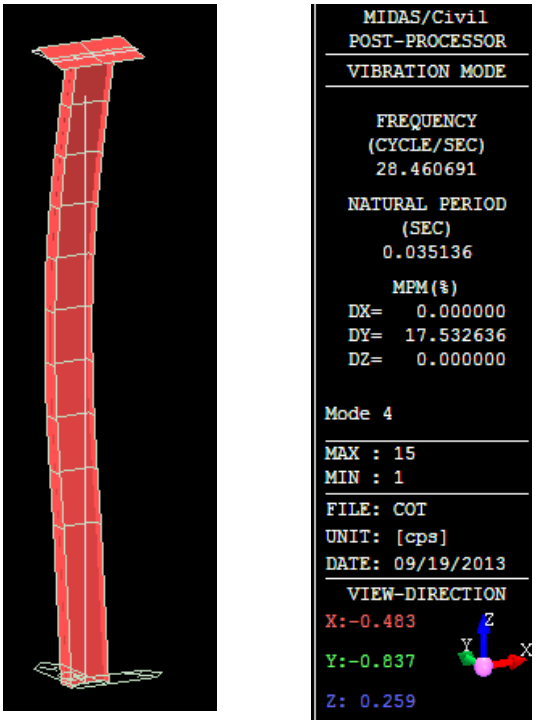
Mode 1 – natural frequency is 3.47 Hz



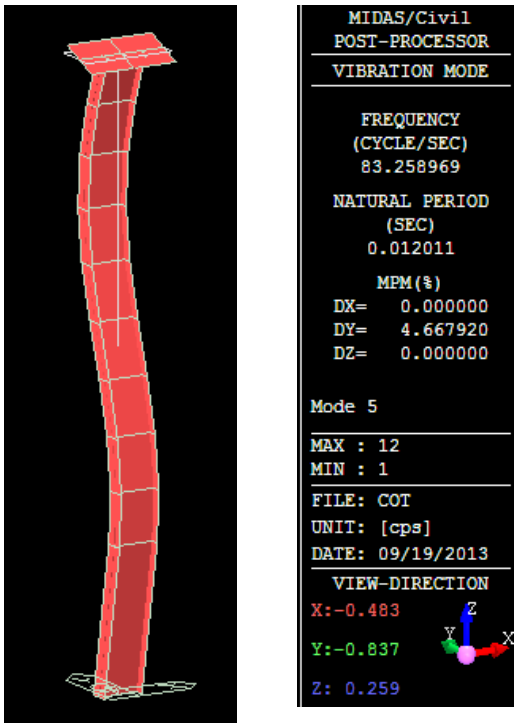
Mode 2 – natural frequency is 3.94 Hz

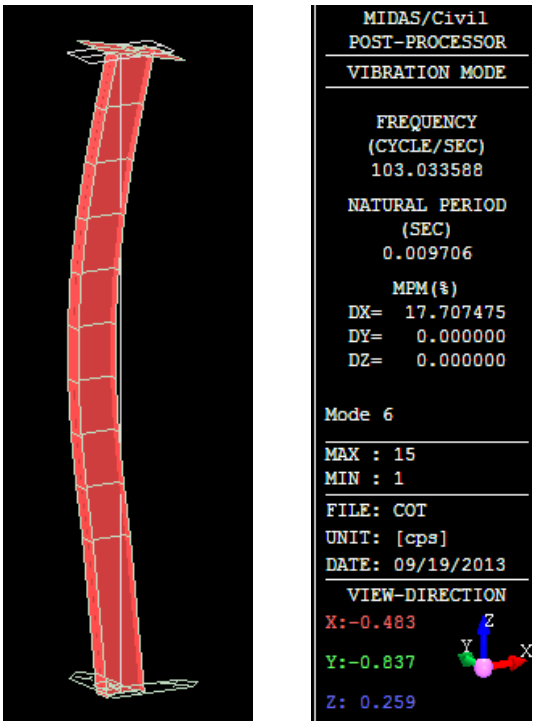


Mode 3 – natural frequency is 13.27 Hz



Mode 4 – natural frequency is 28.46 Hz





Mode 5 – natural frequency is 83.26 Hz Mode 6– natural frequency is 103.Hz

Hình 4.6: các mode dao động của cột thí nghiệm phân tích trên phần mềm Midas Civil

4.4.2. ***Các trường hợp khảo sát thí nghiệm***

Để có cơ sở dữ liệu so sánh đánh giá, trước khi tiến hành thí nghiệm, việc phân tích ứng xử của mô hình kết cấu được thực hiện với việc khảo sát các trường hợp dự kiến như thí nghiệm. Kích thước, lượng nước trong thùng giảm chấn chất lỏng được thiết kế, khảo sát thông qua phân tích lý thuyết xử dụng hàm ứng xử tần số đã thiết lập cho hệ tương tác giữa kết cấu và giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD). Mỗi biểu đồ sẽ thể hiện một trường hợp khảo sát với 2 đường đồ thị: 1 - là đường lý thuyết và 2 - là đường thực nghiệm.

Tạo kích động vào bàn rung lần lượt các giá trị tần số như đã định nghĩa trong phần mềm điều khiển bàn rung để khảo sát ứng xử của kết cấu khi không gắn TLD (mục 4.5.3). Trường hợp 1 đến 7 lần lượt là các trường hợp tương ứng với kết cấu có gắn TLD (STLD hoặc MTLD). Trường hợp kết cấu có gắn TLD lần lượt khảo sát về ảnh hưởng của số lượng thùng chứa, thay đổi bề rộng dải tần số ΔR cho một trường hợp của số lượng thùng TLD (trong thí nghiệm N=5), ảnh hưởng của tỷ số cản, và ảnh hưởng của tỷ số tần số trung tâm của hệ MTLD và tần số của kết cấu ứng với 1 trường hợp của số lượng thùng chứa TLD. Trong các trường hợp khảo sát này tỷ số khối lượng lấy là μ =1%. Cụ thể:

Trường hợp 0: Thực hiện thí nghiệm đo, xác định chuyển vị ngang của mô hình kết cấu

khi không gắn giảm chấn chất lỏng TLD.

Trường hợp 1: Khảo sát trường hợp đặt biệt khi kết cấu gắn 1 thùng TLD và 3 TLD giống nhau. Cụ thể

- Trường hợp 1a: Thực hiện thí nghiệm đo, xác định chuyển vị ngang của mô hình kết cấu khi chỉ gắn 1 thùng TLD.
- Trường hợp 1b: Thực hiện thí nghiệm đo, xác định chuyển vị ngang của mô hình kết cấu khi có gắn 3 thùng TLD của giảm chấn chất lỏng đơn tần số (3 thùng giống nhau được đổ lượng nước giống nhau – giảm chấn chất lỏng đơn tần số STLD). Bề rộng dải tần số $\Delta R = 0.3$ ($0.85 < f/f_0 < 1.15$).

Trường hợp 2: Khảo sát ảnh hưởng của số lượng thùng giảm chấn chất lỏng đến hiệu quả giảm dao động của giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD.

- Trường hợp 2a: Thực hiện thí nghiệm đo, xác định chuyển vị ngang của mô hình kết cấu khi có gắn 3 thùng TLD của giảm chấn chất lỏng đa tần số(3 thùng khác nhau được đổ lượng nước khác nhau để tạo ra các tần số dao động cho mỗi thùng khác nhau - giảm chấn chất lỏng đa tấn số). Bề rộng dải tần số $\Delta R = 0.3$ ($0.85 < f/f_0 < 1.15$).
- Trường hợp 2b: Thực hiện thí nghiệm đo, xác định chuyển vị ngang của mô hình kết cấu khi có gắn 5 thùng TLD của giảm chấn chất lỏng đa tần số (5 thùng khác nhau được đổ lượng nước khác nhau để tạo ra các tần số dao động cho mỗi thùng khác nhau). Bề rộng dải tần số $\Delta R = 0.3$ ($0.85 < f/f_0 < 1.15$).
- Trường hợp 2c: Thực hiện thí nghiệm đo, xác định chuyển vị ngang của mô hình kết cấu khi có gắn 7 thùng TLD của giảm chấn chất lỏng đa tần số (7 thùng khác nhau được đổ lượng nước khác nhau để tạo ra các tần số dao động cho mỗi thùng khác nhau). Bề rộng dải tần số $\Delta R = 0.3$ ($0.85< f/f_0 < 1.15$).
- Trường hợp 2d: Thực hiện thí nghiệm đo, xác định chuyển vị ngang của mô hình kết cấu khi có gắn 9 thùng TLD của giảm chấn chất lỏng đa tần số (9 thùng khác nhau được đổ lượng nước khác nhau để tạo ra các tần số dao động cho mỗi thùng khác nhau). Bề rộng dải tần số $\Delta R = 0.3$ ($0.85 < f/f_0 < 1.15$).
- Trường hợp 2e: Thực hiện thí nghiệm đo, xác định chuyển vị ngang của mô hình kết cấu khi có gắn 11 thùng TLD của giảm chấn chất lỏng đa tần số (11 thùng khác nhau được đổ lượng nước khác nhau để tạo ra các tần số dao động cho mỗi thùng

khác nhau). Bề rộng dải tần số $\Delta R = 0.3$ ($0.85 < f/f_0 < 1.15$).

- Trường hợp 2f: Thực hiện thí nghiệm đo, xác định chuyển vị ngang của mô hình kết cấu khi có gắn 15 thùng TLD của giảm chấn chất lỏng đa tần số (15 thùng khác nhau được đổ lượng nước khác nhau để tạo ra các tần số dao động cho mỗi thùng khác nhau). Bề rộng dải tần số $\Delta R = 0.3$ ($0.85 < f/f_0 < 1.15$).

Trường hợp 3: Khảo sát ảnh hưởng của bề rộng dải tần số đến hiệu quả giảm dao động của giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD.

Kết hợp với kết quả đo được từ trường hợp 2a, bổ sung đo thêm 2 trường hợp 3a và 3b để làm cơ sở đánh giá ảnh hưởng của việc thay đổi bề rộng dải tần số đến hiệu quả giảm dao động của giảm chấn chất lỏng đa tần số.

- Trường hợp 3a: Thực hiện thí nghiệm đo, xác định chuyển vị ngang của mô hình kết cấu khi có gắn 3 thùng TLD của giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) (3 thùng khác nhau được đổ lượng nước khác nhau để tạo ra các tần số dao động cho mỗi thùng khác nhau). Bề rộng dải tần số $\Delta R = 0.2$ ($0.9 < f/f_0 < 1.1$).
- Trường hợp 3b: Thực hiện thí nghiệm đo, xác định chuyển vị ngang của mô hình kết cấu khi có gắn 3 thùng TLD của giảm chấn chất lỏng đa tần số (3 thùng giống nhau được đổ lượng nước khác nhau để tạo ra các tần số dao động cho mỗi thùng khác nhau). Bề rộng dải tần số $\Delta R = 0.1$ ($0.95 < f/f_0 < 1.05$).

Trường hợp 4: Khảo sát ảnh hưởng của tỷ số tần số giảm chấn so với tần số dao động riêng của kết cấu đến hiệu quả giảm dao động của giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD.

Kết hợp với kết quả đo được từ trường hợp 2c, bổ sung đo thêm 2 trường hợp 4a và 4b để làm cơ sở đánh giá ảnh hưởng của tỷ số tần số đến hiệu quả giảm dao động của giảm chấn chất lỏng đa tần số.

- Trường hợp 4a: Thực hiện thí nghiệm đo, xác định chuyển vị ngang của mô hình kết cấu khi có gắn 7 thùng TLD của giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) (7 thùng khác nhau được đổ lượng nước khác nhau để tạo ra các tần số dao động cho mỗi thùng khác nhau). Bề rộng dải tần số $\Delta R = 0.3$ ($0.85 < f/f_0 < 1.15$) và tỷ số giữa tần số trung tâm của giảm chấn chất lỏng đa tần số và tần số dao động riêng của kết cấu là 0.95.
- Trường hợp 4b: Thực hiện thí nghiệm đo, xác định chuyển vị ngang của mô hình

kết cấu khi có gắn 7 thùng TLD của giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD (7 thùng giống nhau được đổ lượng nước khác nhau để tạo ra các tần số dao động cho mỗi thùng khác nhau). Bề rộng dải tần số $\Delta R = 0.3$ ($0.85 < f/f_0 < 1.15$) và tỷ số giữa tần số trung tâm của giảm chấn chất lỏng đa tần số và tần số dao động riêng của kết cấu là 1.05

4.5. Thực hiện thí nghiệm

Chi tiết các bước tiến hành thí nghiệm như sau:

- Chế tạo mô hình kết cấu cho thí nghiệm
- Chạy thử bàn rung khi chưa lắp đặt mô hình kết cấu nhằm kiểm tra hoạt động của thiết bị, đảm bảo thiết bị hoạt động bình thường, an toàn cho thí nghiệm.
- Đặt mô hình kết cấu cho thí nghiệm vào bàn rung, đảm bảo liên kết giữa kết cấu và bàn rung thật chắc (phần liên kết này nếu không đảm bảo sẽ ảnh hưởng lớn đến sự truyền rung động và số liệu đo đạc thu được).
- Hiệu chỉnh máy (việc hiệu chỉnh nhằm xác định hàm truyền dữ liệu từ bộ điều khiển đến bàn rung chính xác như mô phỏng cần kích động trên phần mềm điều khiển). Việc hiệu chỉnh này mất rất nhiều thời gian và khá phức tạp vì phụ thuộc và khối lượng mô hình kết cấu đặt trên bàn rung và số lần hiệu chỉnh.
- Xác định tần số dao động riêng thực của kết cấu bằng hỗ trợ của phần mềm điều khiển hoặc bằng các nghiên cứu khác (so sánh kiểm chứng giá trị thực của kết cấu và giá trị phân tích trên phần mềm phân tích kết cấu).
- Lắp đặt thiết bị đo (các đầu đo bố trí theo đúng thiết kế để thu được dữ liệu mong muốn) và kiểm tra hoạt động thiết bị đo.
- Khai báo hàm kích động bàn rung theo như thiết kế và phù hợp với phương trình hàm ứng xử tần số đã thiết lập trong chương 3.
- Chạy các trường hợp thí nghiệm nhiều lần để đảm bảo độ chính xác của phép đo.

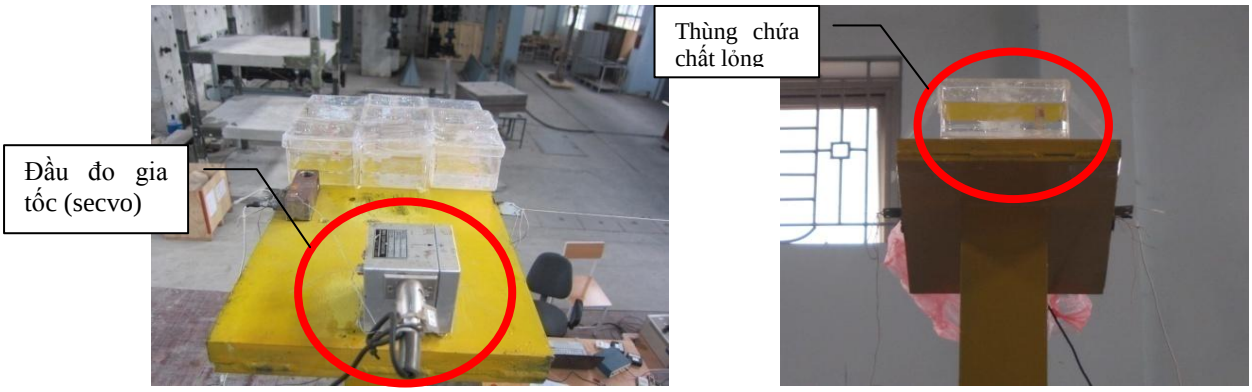
4.5.1. Chế tạo và lắp đặt mô hình kết cấu, thiết bị đo

Việc chế tạo mô hình được thực hiện bởi các giảng viên - kỹ sư cơ khí tại xưởng cơ khí nhà A7 trường Đại học Giao thông Vận Tải.

Một số hình ảnh của quá trình chế tạo và lắp đặt mô hình kết cấu.

Hình 4.7: Quá trình chế tạo và lắp đặt mô hình lên bàn rung

Dữ liệu đo cần thu thập là biến dạng của kết cấu theo thời gian chịu tác động của kích động là hàm điều hòa được định nghĩa từ phầmn ềm điều khiển bàn rung và phù hợp với các giả thiết lý thuyết khi thiết lập hàm ứng xử tần số. Do vậy các đầu đo lựa chọn trên cơ sở phân tích mô hình bằng phần mềm phân tích kết cấu về chuyển vị lớn nhất của kết cấu. Theo phân tích thì giá trị chuyển vị lớn nhất của mô hình ứng với kích động hàm sin, biên độ dao động A =1, tại tần số kích động gây cộng hưởng là 56cm. Với điều kiện về giới hạn của thiết bị đo chuyển vị tại phòng thí nghiệm cho phép khả năng đo chuyển vị lớn nhất là ±8cm. Do vậy mà hàm kích động được điều chỉnh với biên độ kích động A =0.1.

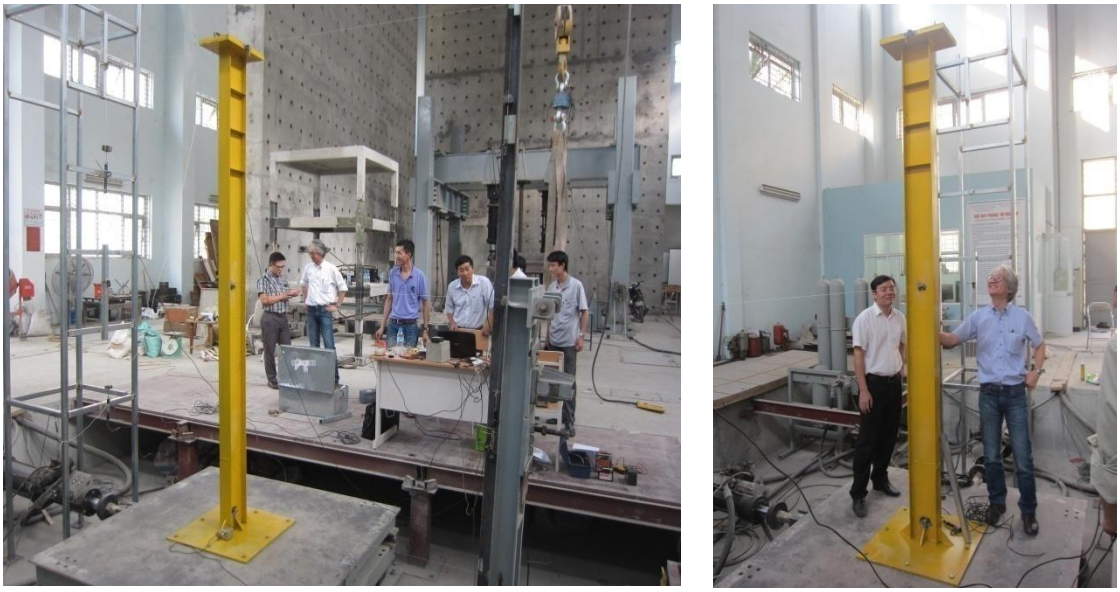


Hình 4.8: Thiết bị đo và các giảm chấn chất lỏng đặt trên đỉnh cột mô hình kết cấu thí nghiệm

4.5.2. Hiệu chỉnh bàn rung và xác định một số giá trị thực của mô hình

Do các vấn đề về sai số chế tạo, điều kiện liên kết mô hình kết cấu vào bàn rung sẽ ảnh hưởng đến dữ liệu đo và quá trình phân tích lý thuyết cho mô hình, nên vấn đề hiệu chỉnh mô hình kết cấu xác định giá trị thực là hết sức cần thiết. Giá trị thực cần xác định gồm: tần số dao động riêng thực của mô hình, tỷ số cản thực của mô hình. Có thể xác định theo 2 cách sau:

- Cách thứ 1: Trên cơ sở biến đổi Hilbert, tác giả đã xác định tham số tần số dao động riêng và hệ số cản của mô hình cột thí nghiệm từ kết quả đo chuyển vị dao động tự do. Kết quả tính toán ở đây có xét đến nhiễu trắng đã cho kết quả tương đối chính xác. Với kết quả này, các dạng kết cấu chỉ cần sử dụng kết quả chuyển vị của mô hình kết cấu, từ đó có thể xác định được hai tham số quan trọng của kết cấu đó là tần số dao động riêng và hệ số cản.
- Cách thứ 2: sử dụng chức năng trên phần mềm điều khiển bàn rung: cho kết cấu dao động trong một dải tần số (dự kiến xung quanh giá trị tính toán lý thuyết). Từ đó phản hồi từ bàn rung qua đầu đo gắn trên hệ thống bàn rung xác định được giá trị thực của mô hình. Tỷ số cản của mô hình được xác định bằng cách 1 thông qua dữ liệu đo chuyển vị thu được.

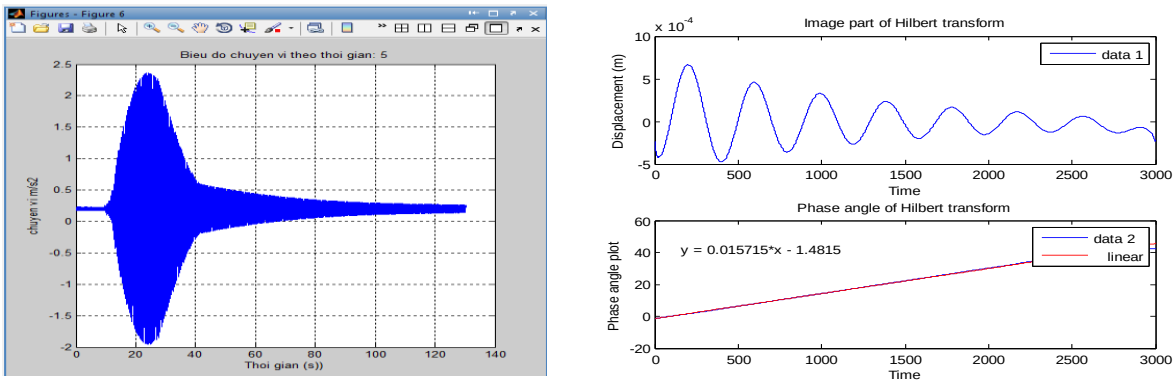


Hình 4.9: Hiệu chỉnh mô hình kết cấu cho thí nghiệm

Theo cách thứ nhất, sau khi tạo kích động cho bàn rung theo hàm định nghĩa với tần số kích động xung quanh giá trị tần số dao động riêng của kết cấu, số liệu thu được sẽ được phân tích khi dùng biến đổi Hilbert [63]. Kết quả phân tích cho thấy:

Giá trị tần số dao động riêng của mô hình kết cấu thực là: f = 2.85Hz.

Tỷ số cản tính toán thực là: 0.0018.



Hình 4.10: Mô tả phân tích tính toán giá trị tần số dao động riêng thực của mô hình kết cấu trên cơ sở biến đổi Hilbert

4.5.3. Lựa chọn hàm tác động bàn rung

Để thuận tiện cho quá trình xử lý số liệu, xây dựng đường lý thuyết như đã trình bày ở trên, dữ liệu kích động cho bàn rung lựa chọn là một hàm điều hòa dạng:

$y = A\sin(wt)$ hoặc $y = A\sin(2\pi f\ t)$

Tần số kích động cho bàn rung được lựa chọn sao cho trùng với tần số dao động riêng của kết cấu để đạt được giá trị chuyển vị cộng hưởng - chuyển vị lớn nhất của kết cấu. Ứng với mỗi giá trị của tần số kích động, với các đầu đo chuyển vị và gia tốc bố trí một cách hợp lý ta sẽ thu được giá trị biên độ dao động tương ứng. Như vậy cần phải tạo ra một kích động cho bàn rung với nhiều giá trị tần số dao động để có thể có chuyển dịch của mô hình kết cấu tương ứng để xây dựng được đường thực nghiệm. Theo phân tích lý thuyết tần số kích động được thay đổi trong dải: $0.8 \le \frac{f}{f_s} \le 1.2$

Chọn số điểm tần số kích động khảo sát là 9 điểm; f/f_s= 0.8; f/f_s= 0.85; f/f_s= 0.9; f/f_s= 0.95; f/f_s= 1; f/f_s= 1.05; f/f_s= 1.1; f/f_s= 1.15;f/f_s= 1.2.

Tần số kích động lựa chọn lần lượt là: f = 2.28; 2.42; 2.57; 2.71; 3.29; 2.85; 2.99; 3.14; 3.28; 3.42 (Hz).

Các giá trị tần số kích động thiết lập cho bàn rung như trên được giả thiết là giá trị tần số dao động riêng của TLD (tần số dao động của hệ STLD hoặc tần số dao động trung tâm của hệ MTLD) là bằng với tần số dao động riêng của kết cấu (tần số này xác định trên kết cấu thực). Như vậy trường hợp khi có sự chênh lệch về hiệu quả tạo dao động của hệ giảm chấn chất lỏng (TLD) không bằng với giá trị tần số dao động riêng của kết cấu thì cần có thêm các khảo sát:

– Chọn số điểm khảo sát là 3 điểm tương ứng với tỷ số tần số giữa tần số dao động trung tâm của giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) và tần số dao động

riêng của kết cấu: $f_0 / f_s = 1$; $f_0 / f_s = 0.95$; $f_0 / f_s = 1.05$;

– Biên độ dao động kích động được tạo ra sao cho chuyển động văng té của chất lỏng không trong vùng xảy ra phi tuyến mạnh và phù hợp với giới hạn đo của thiết bị đo, do vậy chọn: A = 0.1cm.

Các trường hợp khảo sát này đều lấy bề rộng dải tần số ΔR = 0.3.

4.6. Đánh giá kết quả đo đạc mô hình kết cấu thí nghiệm khi so sánh với phân tích sử dụng hàm ứng xử tần số thiết lập

Hàm kích động cho bàn rung cần được thiết lập phù hợp với lý thuyết nhằm xây dựng đường cong thí nghiệm phù hợp và có thể so sánh đối chứng với đường cong lý thuyết. Đảm bảo kiểm soát được sự truyền lực kích động từ phần mềm điều khiển bàn rung ra ngoài thiết bị cơ khí thủy lực tạo rung động cho bàn rung. Do vậy hiệu chỉnh bàn rung cần thực hiện nhiều lần trước khi tiến hành thí nghiệm đảm bảo khử tốt nhất các sai số có thể xuất hiện.

Để kiểm soát được dữ liệu đo, 2 đầu đo được gắn vào kích thủy lực điều khiển bàn rung. Chuyển vị của bàn rung được đo và so sánh với dữ liệu hàm kích động nhập vào máy. Từ dữ liệu chuyển vị cơ sở đo được từ thí nghiệm của các lần đo tương ứng với các trường hợp khảo sát lý thuyết trên hàm ứng xử tần số đã thiết lập, đường chuyển vị thực nghiệm của mô hình kết cấu được vẽ lại ứng với mỗi giá trị của tỷ số tần số giữa tần số dao động kích động từ bàn rung và tần số dao động riêng của kết cấu. Để có được số liệu về hiệu quả giảm dao động tốt nhất, giá trị tỷ số này nằm trong khoảng $08 < f/f_s < 1.2$. Lấy 9 điểm tỷ số này để thiết lập 9 hàm kích động trên bàn rung (mỗi hàm là 1 hàm sin với tần số dao động khác nhau trong khoảng $f = 0.8\text{-}1.2f_s$).

Để phù hợp với giới hạn của thiết bị đo chuyển vị (giá trị đo được lớn nhất trong khoảng ±8cm), hơn nữa điểm kích động là thời điểm cộng hưởng nên nghiên cứu của luận án chọn biên độ kích động A=0.1. Nếu muốn khảo sát ảnh hưởng của biên độ kích động (thay đổi giá trị của biên độ kích động A=1, 2, 5…) đến hoạt động của chất lỏng thì cần thay đổi giá trị này, xong, nếu tăng biên độ thì thiết bị đo chuyển vị không cho phép. Do vậy đây là hạn chế mà tác giả khi tiến hành thí nghiệm đã không thực hiện được như mong muốn.

Để thuận tiện cho quá trinh thí nghiệm, các thùng được đánh số và đổ chất lỏng với các chiều sâu đã tính toán trước. Chênh tần số khác nhau giữa các thùng là một hằng số.

Giá trị tần số chính cho thiết kế MTLD là tần số thực của kết cấu sau khi được xác định lại là 2.85Hz. Hệ giảm chấn chất lỏng trong thí nghiệm là các thùng hình chữ nhật bằng nhựa kính có kích thước theo tính toán là LxbxH = 80x60x60 (mm).

Tần số dao động riêng của mỗi thùng được điều chỉnh thông qua lượng nước đổ vào trong thùng và xác định theo công thức 3.5 chương 3:

$$f_D = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\pi g}{2a} tanh\left(\frac{\pi h_0}{2a}\right)}$$

Tỷ số cản của mỗi thùng được tính toán theo công thức 3.7 chương 3 (Sun - 1991[]) như:

$$\xi_D = \frac{1}{h_0}\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\upsilon}{\pi f_D}}\left(1 + \frac{h_0}{b}\right)$$

Độ chênh tần số dao động của mỗi thùng TLD là hằng số $\beta_i = w_{i+1} - w_i$.

Tần số trung tâm của MTLD hoặc tần số của STLD trong thiết kế cho mô hình thí nghiệm lấy bằng tần số dao động riêng của kết cấu là f_s = 2.85Hz.

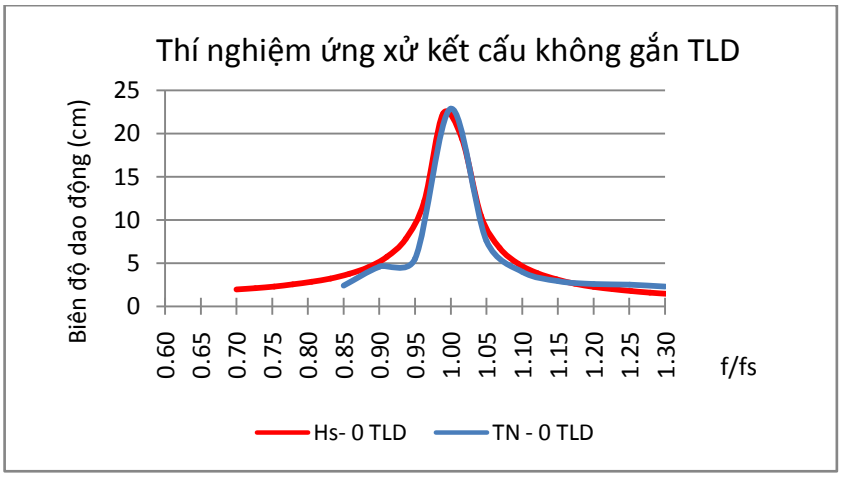
Tỷ số tần số giữa TLD thứ i trong MTLD và tần số trung tâm của MTLD nằm trong dải: $0.9 < f_i / f_0 < 1.1$ với bề rộng dải tần số $\Delta R = 0.3$.

Hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm khi phân tích hàm ứng xử tần số thực hiện với nhiều trường hợp cụ thể chỉ ra trong mục 4.7.

Chi tiết kết quả thí nghiệm các trường hợp của mô hình kết cấu trên bàn rung:

4.6.1. Kết quả khảo sát kết cấu khi không gắn giảm chấn chất lỏng TLD

Trường hợp 0 – Đo dao động, chuyển vị cột kết cấu thí nghiệm khi không gắn thiết bị TLD.



Hình 4.11: hiệu quả giảm dao động cho mô hình kết cấu thí nghiệm khi không gắn TLD.

Đồ thị với 2 đường lý thuyết và thí nghiệm thể hiện cho trường hợp kết cấu không gắn giảm chấn chất lỏng có dạng tương đồng và giá trị tương đối sát nhau cho thấy việc sử

dụng dữ liệu tần số dao động riêng của kết cấu thực đo được là phù hợp.

4.6.2. *Kết quả khảo sát trường hợp đặc biệt khi kết cấu chỉ gắn 1 thùng giảm chấn chất lỏng và khi gắn nhiều thùng giảm chấn giống nhau (giảm chấn chất lỏng đơn tần số STLD)*

Trường hợp 1a – Đo dao động, chuyển vị cột kết cấu thí nghiệm khi có lắp đặt 1 thùng TLD (giảm chấn chất lỏng đơn tần số - SLTD).

Bảng 4.2.Số liệu thiết kế TLD (trường hợp chỉ có 1 thùng cho mô hình cột thí nghiệm)

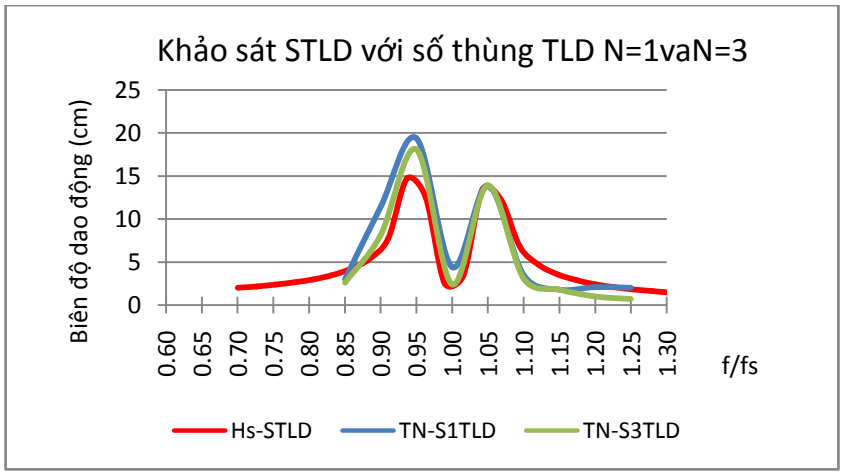
TT	Thùng TLD	Kích thước thùng LxB (mm)	Chiều cao chất lỏng (mm)	Trọng lượng nước trong thùng (T)	Tần số dao động tự nhiên của thùng (Hz)	Tỷ số cản
1	Tank 1	140x80x80	50.67	0.00057	2.85	0.005

Trường hợp 1b – Đo dao động, chuyển vị cột kết cấu thí nghiệm khi có lắp đặt 3 thùng TLD có tần số dao động như nhau (chiều sâu chất lỏng giống nhau - SLTD).

Bảng 4.3. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp chỉ có 3 thùng có tần số dao động giống nhau cho mô hình cột thí nghiệm)

TT	Thùng TLD	Kích thước thùng LxB (mm)	Chiều cao chất lỏng (mm)	Trọng lượng nước trong thùng (T)	Tần số dao động tự nhiên của thùng (Hz)	Tỷ số cản
1	Tank 1	80x60x60	22.66	0.00048	2.85	0.009
2	Tank 2	80x60x60	22.66	0.00048	2.85	0.009
3	Tank 3	80x60x60	22.66	0.00048	2.85	0.009

Kết quả so sánh giữa lý thuyết và kết quả đo



Hình 4.12: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 1 thùng TLD so ánh với trường hợp 3 thùng L.TLD giống nhau.

Đường đồ thị thể hiện kết quả thí nghiệm của 2 trường hợp kết cấu khi lắp đặt 1 thùng TLD và 3 thùng TLD có chiều sâu chất lỏng giống nhau có dạng tương đồng tuy nhiên

không hoàn toàn trung khít như như theo phân tích lý thuyết. Lý do được dự đoán do sai số chế tạo thùng chứa TLD, sai số chiều sâu chất lỏng khi đổ vào thùng.

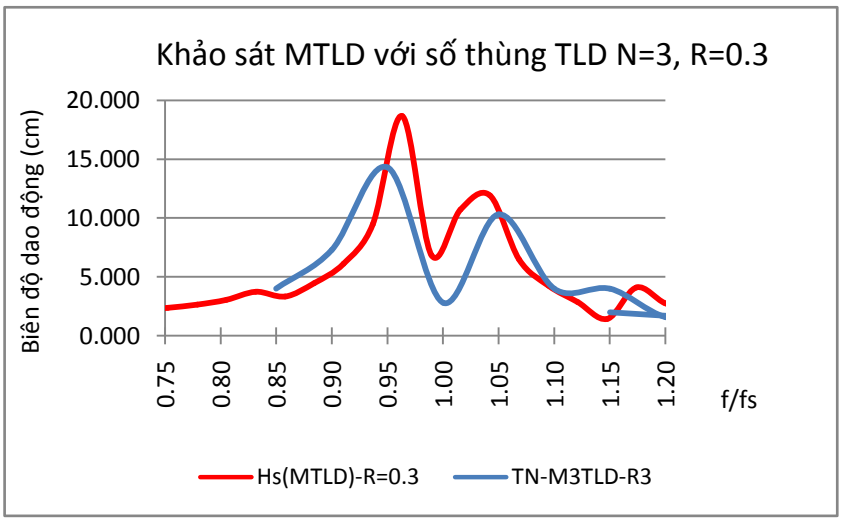
4.6.3. Kết quả khảo sát ảnh hưởng của số lượng thùng chứa chất lỏng khác nhau trong giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD đến hiệu quả giảm dao động

Trường hợp 2a – Đo dao động, chuyển vị cột kết cấu thí nghiệm khi có lắp đặt 3 thùng TLD có tần số dao động khác nhau (3 thùng có chiều sâu chất lỏng khác nhau - MLTD). Bề rộng dải tần số ΔR=0.3.

Bảng 4.4. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp chỉ có 3 thùng có tần số dao động khác nhau cho mô hình cột thí nghiệm, ΔR=0.3)

TT	Thùng TLD	Kích thước thùng LxB (mm)	Chiều cao chất lỏng (cm)	Trọng lượng nước trong thùng (T)	Tần số dao động tự nhiên của thùng (Hz)	Tỷ số cản
1	Tank 1	80x60x60	1.379	0.00007	2.423	0.016
2	Tank 2	80x60x60	1.768	0.00008	2.850	0.012
3	Tank 3	80x60x60	2.122	0.00010	3.278	0.010

Kết quả so sánh cụ thể:

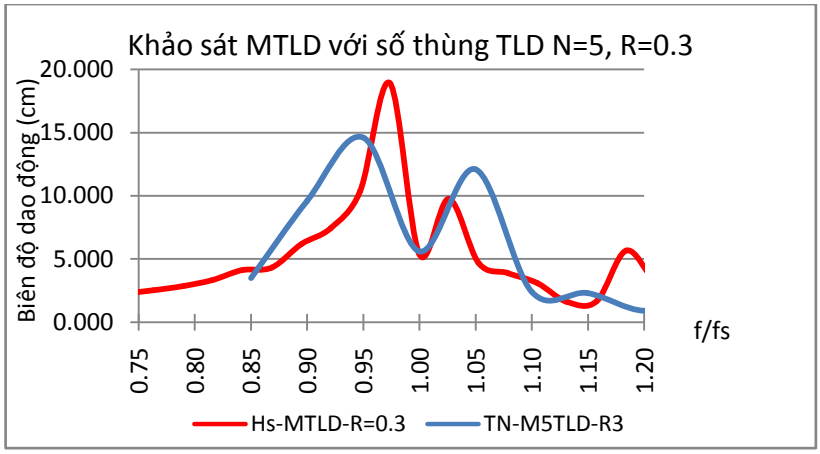


Hình 4.13: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 3 thùng TLD có tần số dao động khác nhau, ΔR=0.3

Trường hợp 2b - Đo dao động, chuyển vị cột kết cấu thí nghiệm khi có lắp đặt 5 thùng TLD có tần số dao động khác nhau (5 thùng có chiều sâu chát lỏng khác nhau), bề rộng dải tần số ΔR=0.3.

Bảng 4.5. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp chỉ có 5 thùng có tần số dao động khác nhau cho mô hình cột thí nghiệm)

STT	Thùng TLD	Kích thước thùng LxB (mm)	Chiều cao chất lỏng (mm)	Trọng lượng nước trong thùng (Kg)	Tần số dao động tự nhiên của thùng (Hz)	Tỷ số cản
1	Tank 1	80x60x60	1.379	0.07	2.423	0.016
2	Tank 2	80x60x60	1.576	0.08	2.636	0.014
3	Tank 3	80x60x60	1.768	0.08	2.850	0.012
4	Tank 4	80x60x60	1.951	0.09	3.064	0.011
5	Tank 5	80x60x60	2.122	0.10	3.278	0.010

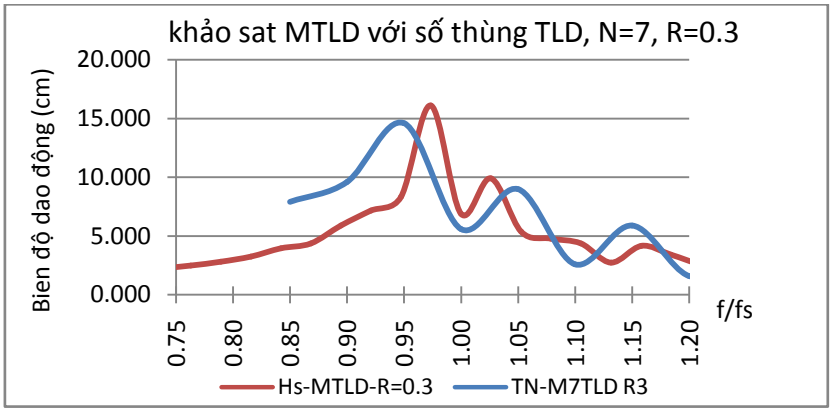


Hình 4.14: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 5 thùng TLD (tần số dao động của mỗi thùng khác nhau), ΔR=0.3

Trường hợp 2c - Đo dao động, chuyển vị cột kết cấu thí nghiệm khi có lắp đặt 7 thùng TLD có tần số dao động khác nhau, (chiều sâu chất lỏng của mỗi thùng trong giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD là khác), bề rộng dải tần số ΔR=0.3.

Bảng 4.6. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp chỉ có 7 thùng có tần số dao động khác nhau cho mô hình cột thí nghiệm)

STT	Thùng TLD	Kích thước thùng LxB (mm)	Chiều cao chất lỏng (mm)	Trọng lượng nước trong thùng (Kg)	Tần số dao động tự nhiên của thùng (Hz)	Tỷ số cản
1	Tank 1	80x60x60	1.379	0.00007	2.423	0.016
2	Tank 2	80x60x60	1.511	0.00007	2.565	0.015
3	Tank 3	80x60x60	1.641	0.00008	2.708	0.013
4	Tank 4	80x60x60	1.768	0.00008	2.850	0.012
5	Tank 5	80x60x60	1.891	0.00009	2.993	0.011
6	Tank 6	80x60x60	2.009	0.00010	3.135	0.011
7	Tank 7	80x60x60	2.122	0.00010	3.278	0.010

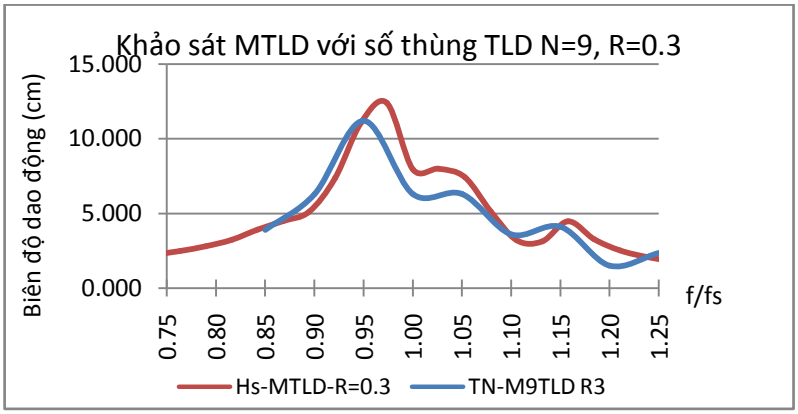


Hình 4.15: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 7 thùng TLD (tần số dao động của mỗi thùng khác nhau, R=0.3, f/fs=1)

Trường hợp 2d - Đo dao động, chuyển vị cột kết cấu thí nghiệm khi có lắp đặt 9 thùng TLD có tần số dao động khác nhau, (chiều sâu chất lỏng của mỗi thùng trong giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD là khác), bề rộng dải tần số ΔR=0.3.

Bảng 4.7. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp chỉ có 9 thùng có tần số dao động khác nhau cho mô hình cột thí nghiệm)

STT	Thùng TLD	Kích thước thùng LxB (mm)	Chiều cao chất lỏng (mm)	Trọng lượng nước trong thùng (Kg)	Tần số dao động tự nhiên của thùng (Hz)	Tỷ số cản
1	Tank 1	80x60x60	1.379	0.00007	2.423	0.016
2	Tank 2	80x60x60	1.478	0.00007	2.529	0.015
3	Tank 3	80x60x60	1.576	0.00008	2.636	0.014
4	Tank 4	80x60x60	1.673	0.00008	2.743	0.013
5	Tank 5	80x60x60	1.768	0.00008	2.850	0.012
6	Tank 6	80x60x60	1.860	0.00009	2.957	0.012
7	Tank 7	80x60x60	1.951	0.00009	3.064	0.011
8	Tank 8	80x60x60	2.038	0.00010	3.171	0.010
9	Tank 9	80x60x60	2.122	0.00010	3.278	0.010

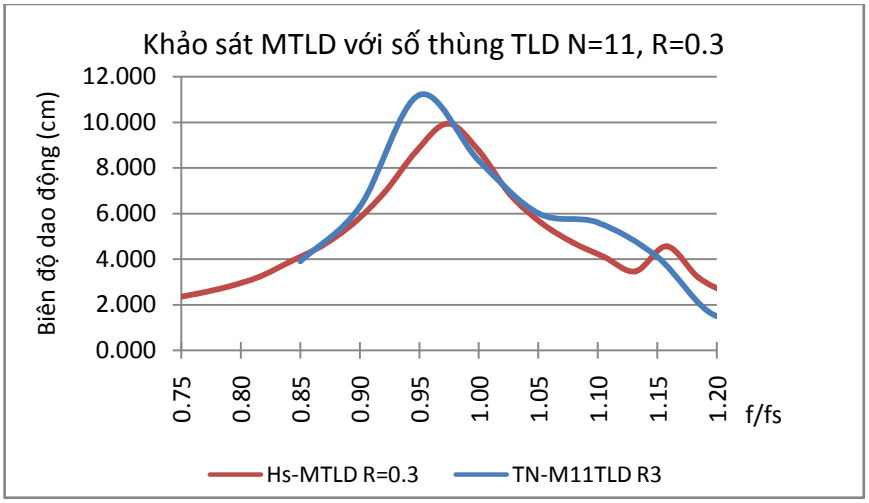


Hình 4.16: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 9 thùng TLD (tần số dao động của mỗi thùng khác nhau)

Trường hợp 2e - Đo dao động, chuyển vị cột kết cấu thí nghiệm khi có lắp đặt 11 thùng TLD có tần số dao động khác nhau, (chiều sâu chất lỏng của mỗi thùng trong giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD là khác), bề rộng dải tần số ΔR=0.3.

Bảng 4.8. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp chỉ có 11 thùng có tần số dao động khác nhau cho mô hình cột thí nghiệm)

STT	Thùng TLD	Kích thước thùng LxB (mm)	Chiều cao chất lỏng (mm)	Trọng lượng nước trong thùng (Kg)	Tần số dao động tự nhiên của thùng (Hz)	Tỷ số cản
1	Tank 1	80x60x60	5.111	0.03373	0.323	0.011
2	Tank 2	80x60x60	5.472	0.03612	0.334	0.010
3	Tank 3	80x60x60	5.845	0.03858	0.346	0.009
4	Tank 4	80x60x60	6.229	0.04111	0.357	0.008
5	Tank 5	80x60x60	6.623	0.04371	0.369	0.008
6	Tank 6	80x60x60	7.028	0.04639	0.380	0.007
7	Tank 7	80x60x60	7.444	0.04913	0.391	0.007
8	Tank 8	80x60x60	7.870	0.05194	0.403	0.006
9	Tank 9	80x60x60	8.305	0.05481	0.414	0.006
10	Tank 10	80x60x60	8.750	0.05775	0.426	0.006
11	Tank 11	80x60x60	9.204	0.06075	0.437	0.005

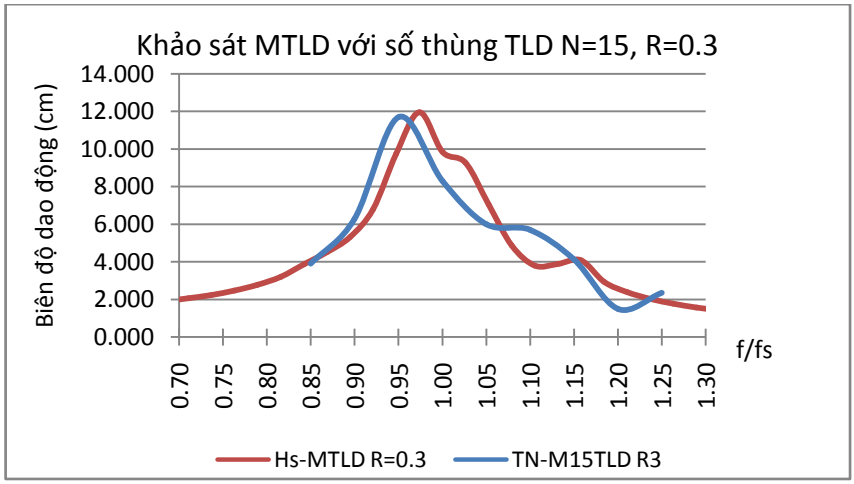


Hình 4.17: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 11 thùng TLD (tần số dao động của mỗi thùng khác nhau)

Trường hợp 2f - Đo dao động, chuyển vị cột kết cấu thí nghiệm khi có lắp đặt 15 thùng TLD có tần số dao động khác nhau, (chiều sâu chất lỏng của mỗi thùng trong giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD là khác), bề rộng dải tần số ΔR=0.3.

Bảng 4.9. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp chỉ có 15 thùng có tần số dao động khác nhau cho mô hình cột thí nghiệm)

STT	Thùng TLD	Kích thước thùng LxB (mm)	Chiều cao chất lỏng (mm)	Trọng lượng nước trong thùng (Kg)	Tần số dao động tự nhiên của thùng (Hz)	Tỷ số cản
1	Tank 1	80x60x60	5.111	0.03373	0.323	0.011
2	Tank 2	80x60x60	5.368	0.03543	0.331	0.010
3	Tank 3	80x60x60	5.630	0.03716	0.339	0.009
4	Tank 4	80x60x60	5.899	0.03893	0.347	0.009
5	Tank 5	80x60x60	6.173	0.04074	0.356	0.008
6	Tank 6	80x60x60	6.453	0.04259	0.364	0.008
7	Tank 7	80x60x60	6.738	0.04447	0.372	0.008
8	Tank 8	80x60x60	7.028	0.04639	0.380	0.007
9	Tank 9	80x60x60	7.324	0.04834	0.388	0.007
10	Tank 10	80x60x60	7.625	0.05033	0.396	0.007
11	Tank 11	80x60x60	7.931	0.05235	0.404	0.006
12	Tank 12	80x60x60	8.242	0.05440	0.413	0.006
13	Tank 13	80x60x60	8.558	0.05648	0.421	0.006
14	Tank 14	80x60x60	8.879	0.05860	0.429	0.006
15	Tank 15	80x60x60	9.204	0.06075	0.437	0.005



Hình 4.18: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 15 thùng TLD (tần số dao động của mỗi thùng khác nhau)

Đồ thị của các trường hợp khảo sát ảnh hưởng của số lượng thùng giảm chấn chất lỏng của giảm chấn chất lỏng đa tấn số MTLD đến hiệu quả giảm dao động cho thấy khá phù hợp về dạng so với đường đồ thị phân tích lý thuyết. Ứng xử của kết cấu tại vị trí tỷ số tần số bằng và xấp xỉ bằng 1so sánh giữa lý thuyết và thực nghiệm là khá gần nhau, càng xa giá trị tỷ số tần số bằng 1 các giá trị có xu hướng khác biệt nhiều hơn. Kết quả này một lần nữa khẳng định số lượng thùng chứa chất lỏng của giảm chấn chất lỏng đa tần số phù hợp nhất cho thiết kế khi nằm tỏng khoảng từ N =5-11 thùng.

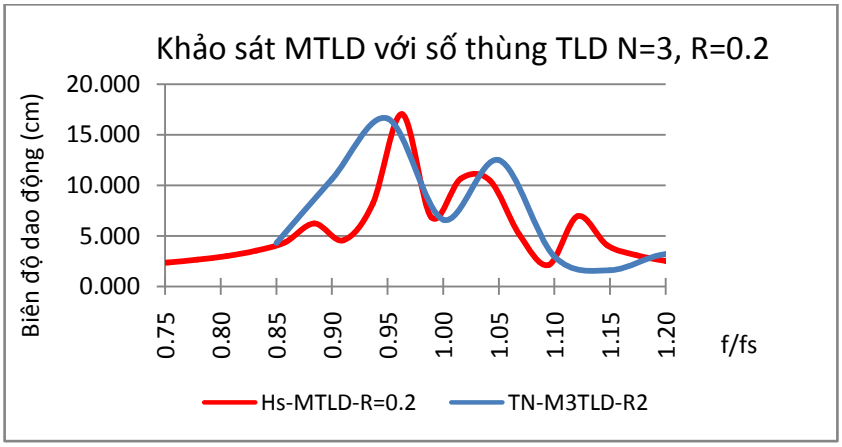
4.6.4. Kết quả khảo sát ảnh hưởng của bề rộng dải tần số của giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD đến hiệu quả giảm dao động

Trường hợp 3a - Trường hợp có 3 thùng giảm chấn chất lỏng TLD khác nhau (3 thùng được đổ lượng chất lỏng khác nhau), bề rộng dải tần số thay đổi so với trường hợp 2a, lấy là ΔR=0.2.

Bảng 4.10. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp chỉ có 3 thùng có tần số dao động khác nhau cho mô hình cột thí nghiệm, ΔR=0.2)

STT	Thùng TLD	Kích thước thùng LxB (mm)	Chiều cao chất lỏng (cm)	Trọng lượng nước trong thùng (Kg)	Tần số dao động tự nhiên của thùng (Hz)	Tỷ số cản
1	Tank 1	80x60x60	1.511	0.07	2.565	0.015
2	Tank 2	80x60x60	1.768	0.08	2.850	0.012
3	Tank 3	80x60x60	2.009	0.10	3.135	0.011

Kết quả so sánh thể hiện trên đồ thị :

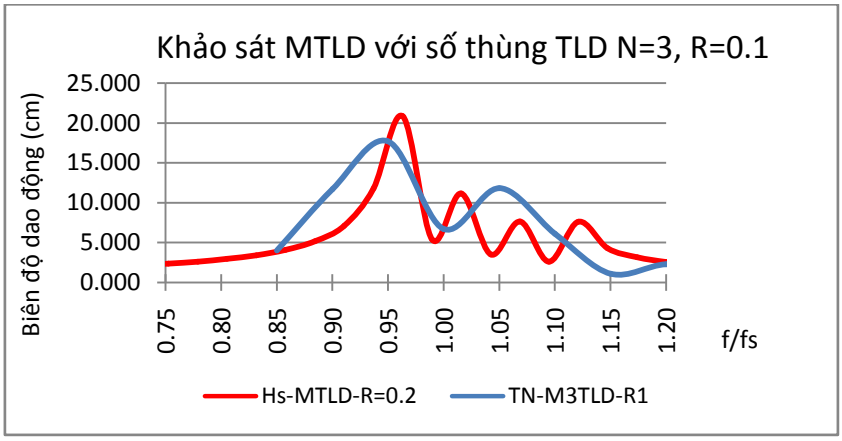


Hình 4.19: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 3 thùng TLD có tần số dao động khác nhau, R=0.2

Trường hợp 3b - Trường hợp có 3 thùng giảm chấn chất lỏng TLD khác nhau (3 thùng được đổ lượng chất lỏng khác nhau), bề rộng dải tần số thay đổi so với trường hợp 2a, lấy là ΔR=0.1.

Bảng 4.11. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp chỉ có 3 thùng có tần số dao động khác nhau cho mô hình cột thí nghiệm, ΔR=0.1)

STT	Thùng TLD	Kích thước thùng LxB (mm)	Chiều cao chất lỏng (mm)	Trọng lượng nước trong thùng (Kg)	Tần số dao động tự nhiên của thùng (Hz)	Tỷ số cản
1	Tank 1	80x60x60	1.641	0.08	2.708	0.013
2	Tank 2	80x60x60	1.768	0.08	2.850	0.012
3	Tank 3	80x60x60	1.891	0.09	2.993	0.011



Hình 4.20: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 3 thùng TLD có tần số dao động khác nhau, R=0.1

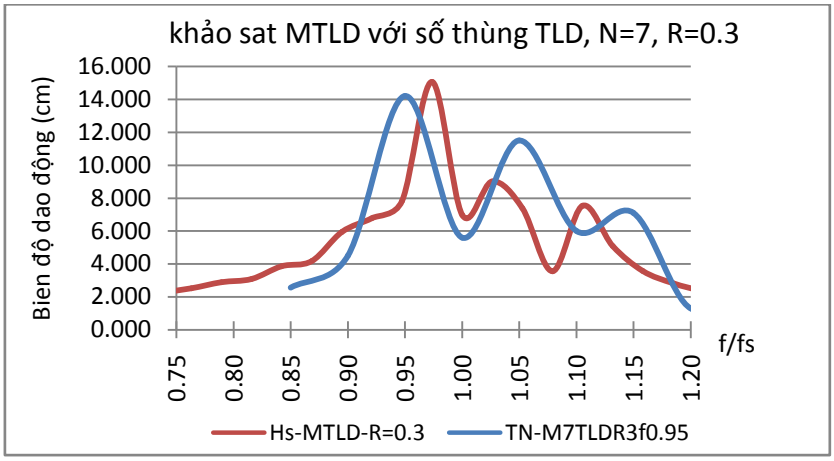
Khi bề rộng dải tần số thay đổi dữ liệu thí nghiệm thể hiện khá nhạy cảm với sự thay đổi này. Đường thực nghiệm có dạng giống đường lý thuyết tuy nhiên với ít đỉnh giá trị hơn. Điều này có thể được giải thích do việc hạn chế khi thực hiện thí nghiệm với số điểm kích động chưa đủ nhiều nên chưa thể hiện được các biến đổi của đồ thị.

4.6.5. Khảo sát giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD với tỷ số giữa tấn số trung tâm của giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD và tần số dao động riêng của kết cấu không bằng 1 khi số lượng thùng chứa chất lỏng N= 7 TLD.

Trường hợp 4a: Trường hợp có 7 thùng TLD (khác nhau), bề rộng dải tần số ΔR=0.3 và tỷ số giữa tần số trung tâm của giảm chấn chất lỏng MTLD và tần số dao động riêng của kết cấu f/fs =0.95.

Bảng 4.12. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp có 7 thùng có tần số dao động khác nhau cho mô hình cột thí nghiệm, ΔR=0.3, f/fs =0.95)

STT	Thùng TLD	Kích thước thùng LxB (mm)	Chiều cao chất lỏng (mm)	Trọng lượng nước trong thùng (Kg)	Tần số dao động tự nhiên của thùng (Hz)	Tỷ số cản
1	Tank 1	80x60x60	1.266	0.00006	2.301	0.018
2	Tank 2	80x60x60	1.392	0.00007	2.437	0.016
3	Tank 3	80x60x60	1.517	0.00007	2.572	0.015
4	Tank 4	80x60x60	1.641	0.00008	2.708	0.013
5	Tank 5	80x60x60	1.761	0.00008	2.843	0.012
6	Tank 6	80x60x60	1.879	0.00009	2.978	0.011
7	Tank 7	80x60x60	1.992	0.00010	3.114	0.011

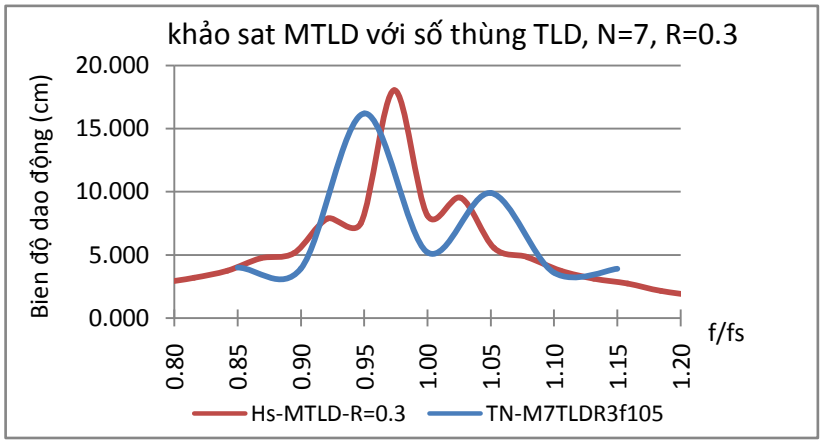


Hình 4.21: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 7 thùng TLD (tần số dao động của mỗi thùng khác nhau, R=0.3, f/fs=0.95)

Trường hợp 4b: Trường hợp có 7 thùng TLD (khác nhau), bề rộng dải tần số ΔR=0.3 và tỷ số giữa tần số trung tâm của giảm chấn chất lỏng đa tấn số MTLD và tần số dao động riêng của kết cấu f/fs =1.05.

Bảng 4.13. Số liệu thiết kế TLD (trường hợp có 7 thùng có tần số dao động khác nhau cho mô hình cột thí nghiệm, ΔR=0.3, f/fs =1.05)

STT	Thùng TLD	Kích thước thùng LxB (mm)	Chiều cao chất lỏng (mm)	Trọng lượng nước trong thùng (Kg)	Tần số dao động tự nhiên của thùng (Hz)	Tỷ số cản
1	Tank 1	80x60x60	1.491	0.00007	2.544	0.015
2	Tank 2	80x60x60	1.628	0.00008	2.693	0.013
3	Tank 3	80x60x60	1.761	0.00008	2.843	0.012
4	Tank 4	80x60x60	1.891	0.00009	2.993	0.011
5	Tank 5	80x60x60	2.015	0.00010	3.142	0.011
6	Tank 6	80x60x60	2.133	0.00010	3.292	0.010
7	Tank 7	80x60x60	2.245	0.00011	3.441	0.009



Hình 4.22: hiệu quả giảm dao động cho mô hình thí nghiệm với 7 thùng TLD (tần số dao động của mỗi thùng khác nhau, R=0.3, f/fs=1.05).

Khi tỷ số tần số giữa tần số kích động với tấn số dao động riêng của kết cấu không bằng một, đường đồ thị thực nghiệm thể hiện khá nhạy cảm với sự thay đổi này. Dạng của đường đồ thị thí gnhiệm và lý thuyết là khá phù hợp.

4.7. Kết luận chương 4

Trên cơ sở kết quả thu được qua các trường hợp thí nghiệm, phân tích hiệu quả giảm dao động của giảm chấn chất lỏng nói chung và giảm chấn chất lỏng đa tần số nói riêng khi sử dụng hàm ứng xử tần số đã thiết lập được khẳng định. Các trường hợp thí nghiệm được đặt ra là tương ứng với các trường hợp đã khảo sát khi sử dụng hàm ứng xử tần số lý thuyết và kết quả cho thấy là:

- Tương quan giữa tỷ số tần số và chuyển vị (theo tần số) là phù hợp về qui luật với kết quả lý thuyết đã phân tích cho mô hình cột thí nghiệm.
- Đường cong ứng xử của MTLD là khá phẳng, điều này chỉ ra rằng ứng xử của kết cấu có khả năng đáp ứng trên một dải rộng tần số và MTLD có tính cản cao hơn so với SLTD. Sự bằng phẳng này là do sự khác biệt pha nhỏ trong khoảng chuyển động của chất lỏng trong mỗi TLD của giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD. Do vậy, hiệu quả của TLD được khẳng định là tốt hơn SLTD khi sử dụng nhiều thùng TLD với chiều sâu chất lỏng khác nhau hay tần số dao động riêng khác nhau (hệ MTLD có 1 tần số trung tâm trong dải tần số tính toán thiết kế của các TLD).
- Kết quả tính toán sai số giữa kết quả lý thuyết và kết quả thí nghiệm nằm trong giới hạn cho phép là từ 7-11% (< 15%) là có thể chấp nhận được.

Các sai số này xuất hiện do một số lý do:

- Mô hình cột bằng thép được chế tạo xuất hiện sai số. Mặc dù phép đo thí nghiệm đã được xác lập trên cơ sở hiệu chỉnh ban đầu (xác định lại tần số và tỷ số cản thực của kết cấu mục 4.5.2)
- Thiết bị đo: do giới hạn của thiết bị đo và phép đo
- Do hạn chế trong điều chỉnh bàn rung với kích động nhỏ.

CHƯƠNG 5

HỆ GIẢM CHẤN CHẤT LỎNG ÁP DỤNG CHO CÔNG TRÌNH CẦU BÃI CHÁY – VIỆT NAM

5.1. Tổng quan về cầu dây văng Bãi Cháy tại Việt Nam.

Cầu Bãi Cháy – Việt Nam là cây cầu dây văng một mặt phẳng dây đầu tiên tại Việt Nam với chiều dài nhịp chính kỷ lục thế giới 435m. Một số thông số kỹ thuật chính của cầu:

Hình 5.1 Toàn cảnh cầu Bãi Cháy - Quảng Ninh

Cầu có tổng chiều dài 903m với chiều dài phần dầm là 902,5m.

Cầu chính có sơ đồ: (35,0+86,0+129,5+435,0+129,5+86,0)m gồm 6 nhịp liên tục, với 2 trụ tháp. Dầm chủ liên tục 6 nhịp, bố trí 1 mặt phẳng dây văng. Dầm chủ bằng BTCT DƯL dạng 1 hộp đơn hình thang ngược và được nối cứng với trụ tháp. Hai trụ tháp bằng BTCT DƯL có chiều cao tính từ mặt dầm chủ là 90m, tính từ mặt cắt bệ móng là 114,145m. Phần tháp dạng cột đơn lòng rỗng có kích thước theo phương ngang cầu là 3m và theo phương dọc cầu thay đổi từ 6,7m đến 5,2m . Phần trụ dạng hình bát giác có vát góc kích thước 8x8m. Trụ tháp P3 đặt trên móng giếng chìm hơi ép có kích thước 22x18x12m. Trụ tháp P4 đặt trên móng giếng chìm hơi ép có kích thước 19x17x26m.

Dây văng sử dụng loại bó cáp tao đơn đặt trong ống nén của hãng Freyssinet, gồm 28 cặp dây văng được bố trí thành 1 mặt phẳng dàn dây dạng rẻ quạt đối xứng từ mỗi trụ tháp. Số lượng các bó cáp thay đổi từ 35 đến 71 tao loại 15,7mm. Khoảng cách giữa các đầu neo trên tại vị trí trụ tháp là 1,75m và tại vị trí liên kết với 6,5m.

5.2. Gió và biện pháp giảm dao động do gió khi sử dụng thiết bị giảm chấn dùng chất lỏng TLD cho cầu dây văng Bãi Cháy – Việt Nam.

Năm 2006 cầu dây văng Bãi Cháy chính thức được đưa vào sử dụng cùng với hệ giảm chấn dùng chất lỏng được lắp đặt dọc theo chiều cao tháp. Kể từ đây mốc son lịch sử về nghiên cứu hệ giảm chấn chất lỏng (TLD) áp dụng cho các công trình xây dựng nói chung và công trình cầu dây nói riêng tại Việt nam bắt đầu.

Cầu Bãi Cháy nằm ở khu vực tinh Quảng Ninh, nơi những cơn bão nhiệt đới lại thường xuyên thay đổi đổ bộ vào từ tháng khoảng tháng 6 đến tháng 10 hàng năm, Vận gió trung bình tại cao độ bản vào khoảng 50m/s. Do vậy việc xem xét ảnh hưởng của gió đến các công rtình xây dựng nói chung mà đặc biệt là công trình cầu thanh mảnh có kết cấu nhạy cảm trước gió là hết sức cần thiết.

5.2.1. Gió và ảnh hưởng của gió đến sự làm việc của tháp cầu Bãi Cháy

Các biến dạng của trụ tháp do gió gây ra theo phương gió thiết kế vuông góc với nhịp cầu là lớn. Theo tính toán của đơn vị thiết kế chống gió cho công trình này giá trị tính toán (theo lý thuyết tuyến tính) biến dạng tại đỉnh là 2.41m. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với kết quả kiểm tra hầm gió của cầu. Các giá trị này thậm chí có thể phải xem xét tăng lên khi xét các tác động phi tuyến cho phù hợp với phân tích phi tuyến. Do vậy đây là lý do chính cho việc cần thiết phải bố trí một hệ thống thiết bị giảm chấn nhằm giảm dao động cho tháp cầu, đảm bảo an toàn khai thác giao thông trên cầu.

Phân tích khả năng chịu lực của kết cấu trụ tháp đối với tải trọng ngang do gió là công việc cần thiết đối với các kết cấu công trình cầu. Tại cầu Bãi Cháy theo kết quả phân tích gió do Viện khoa học công nghệ Shimizu thực hiện thì kết quả như sau:

- Xuất hiện hiện tượng lắc sinh ra do tải trọng gió (kết quả này phù hợp với các phân tích dự đoán do kết cấu tháp tương đối cao và chiều dài nhịp tương đối lớn. Dao động xoắn trong mô hình là phản đối xứng, và xuất hiện tại vận tốc gió thấp hơn tốc độ thiết kế.
- Tải trọng gió thiết kế ngang dọc theo bản mặt cầu được phân bố trong khoảng 10…18 kN/m.
- Tải trọng gió thiết kế ngang dọc theo trụ tháp (bao gồm tải trọng từ cáp văng) được phân bố trong khoảng 16…108 kN/m.
- Tần số tự nhiên tính toán trong mô hình xoắn của dầm, tháp là thấp hơn trong các báo

cáo thiết kế (0.61 Hz vs. 0.71 Hz). Giá trị hợp lý sẽ được lấy dựa trên mô hình hầm gió của cầu. Đây là giá trị quan trọng ảnh hưởng đến việc kiểm tra thiết kế cuối cùng.

- Dao động xoắn do gió xoáy gây ra của bản mặt cầu với vận tốc gió khoảng 25m/s tại cao độ bản, nó được dự tính với gia tốc dọc 0.3m/s2 (độ dịch chuyển dọc là 0.12m) trong các bản biên. Đã xem xét sự ảnh hưởng đến an toàn giao thông trên cầu.
- Sự lắc dọc của bản mặt cầu cũng được xem xét. Các biên độ dao động được tính toán tại điểm giữa của bản là 0.3m.

Các xem xét ảnh hưởng của gió đối với kết cấu công trình cần thực hiện cho cả giai đoạn thi công và khai thác. Xem xét đến cả góc tác động của gió lên kết cấu công trình.

5.2.2. Tổng quan về giảm chấn chất lỏng TLD hiện có tại cầu Bãi Cháy

Hình 5.2 Cầu dây văng Cầu Bãi Cháy – Quảng Ninh - Việt Nam và hệ giảm chấn chất lỏng TLD lắp đặt năm 2006

Hệ giảm chấn dùng chất lỏng TLD được lắp đặt tại công trình cầu Bãi cháy nhằm mục đích giảm bớt tác hại do gió đối với tháp cầu mà cụ thể là chuyển dịch đỉnh tháp theo phương ngang cầu. Giá trị này theo tính toán và thí nghiệm hầm gió do viện khoa học công nghệ Shimizu đưa ra là 2.41m. Hệ giảm chấn được lắp đặt tại đây gồm các thùng chứa hình chữ nhật, được đổ cùng một lượng nước như nhau nên chỉ có duy nhất một tần số dao động của hệ giảm chấn và như vậy đây chính là hệ giảm chấn đơn tần số STLD.

Trước khi lắp đặt hệ giảm chấn chất lỏng cho tháp cầu, thí nghiệm dao động dùng một cần cẩu trục tháp tạo rung động cho tháp đã được tiến hành. Thí nghiệm này đã chỉ ra tần số

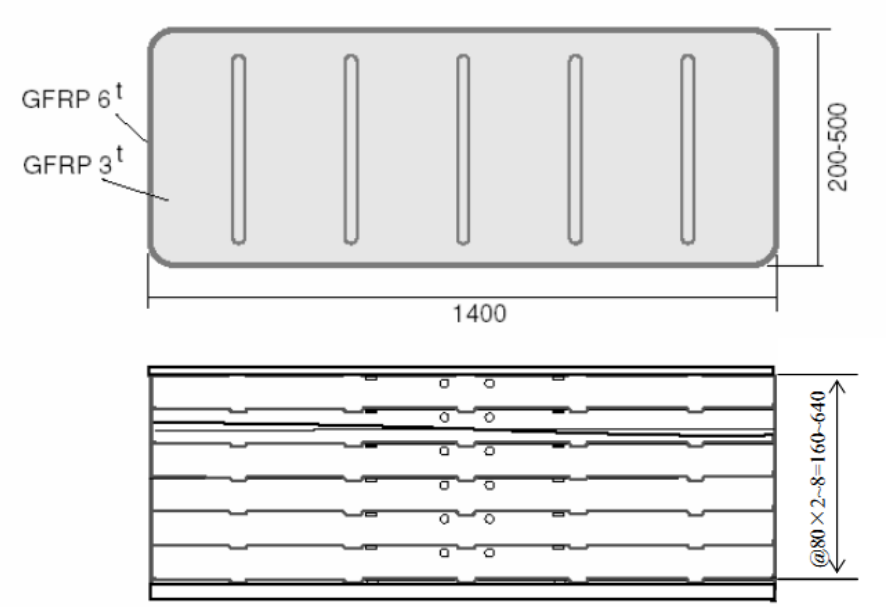
dao động riêng thực của tháp. Thời điểm thực hiện thí nghiệm, đơn vị thiết kế đã thiết kế hệ giảm chấn theo dữ liệu phân tích mô hình kết cấu trên phần mềm. Như vậy, việc thiết kế giảm chấn nhằm mục đích giảm dao động cho tháp cầu Bãi Cháy cần hiệu chỉnh lại khi có số liệu tần số dao động riêng của tháp xác định từ thí nghiệm dao động và cần có đánh giá về khả năng đáp ứng trước các dải tần số của hệ giảm chấn chất lỏng TLD này.

Chi tiết một vài đặc trưng của hệ giảm chấn chất lỏng hiện có gồm:

– Trên thực tế có 4 loại thùng TLD đã lắp đặt tại tháp Cầu Bãi Cháy. Kích thước của mỗi thùng có cùng chiều dài, chiều rộng thay đổi từ 200-500mm:
  - ✓ TLD loại 1 có kích thước L=1400, B= 500mm
  - ✓ TLD loại 2 có kích thước L=1400, B= 400mm
  - ✓ TLD loại 3 có kích thước L=1400, B= 300mm
  - ✓ TLD loại 4 có kích thước L=1400, B= 200mm

Tuy nhiên, việc thay đổi bề rộng của thùng chứa chất lỏng không có ý nghĩa cho việc thay đổi tấn số của hệ TLD. Chỉ có duy nhất một tần số được sử dụng cho thiết kế TLD ở Bãi Cháy, do vậy hệ TLD ở đây là giảm chấn chất lỏng đơn tần số (STLD).

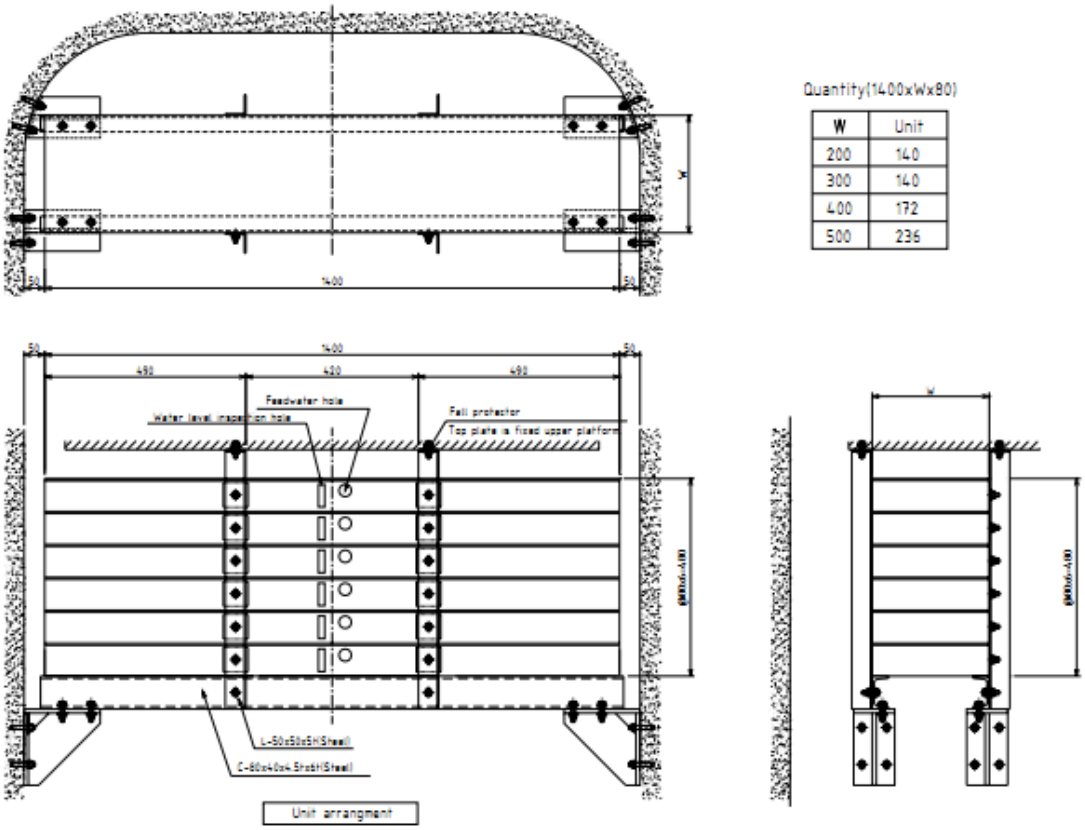
Để điều chỉnh tỷ số khối lượng cho hệ TLD và kết cấu tháp, mỗi loại của kích thước này được sử dụng nhiều lớp. Tỷ số khối lượng trong thiết kế TLD cho tháp Bãi Cháy đã lắp đặt là $\mu_L = m_L/m_S = 0.0047$.



Hình 5.3 Chi tiết kích thước thiết kế thùng chứa TLD cho cầu dây văng Cầu Bãi Cháy – Quảng Ninh - Việt Nam lắp đặt năm 2006

– Việc xác định tần số tự nhiên cho tháp cầu là vấn đề quan trọng nhất cho việc thiết kế hệ giảm chấn TLD. Tần số này được xác định theo 2 cách: cách thứ nhất sử

dụng phần mềm phân tích kết cấu và cách thứ 2 là dùng thí nghiệm dao động. Kết quả chỉ ra rằng tần số được sử dụng cho thiết kế ban đầu là lựa chọn theo tính toán trên phần mền phân tích kết cấu f = 0.1886Hz sau đó thiết kế TLD được điều chỉnh lại theo tần số xác định được từ thí nghiệm dao động cho tháp cầu Bãi Cháy f = 0.2Hz.



Hình 5.4 Thiết kế TLD lắp đặt trong tháp cầu Bãi Cháy – Shimizu – Nhật Bản.

– Chi tiết một vài tham số cho việc thiết kế TLD cho tháp cầu Bãi Cháy như sau:

  ✓ Chiều sâu chất lỏng trong thùng tính toán là h_0= 2.85cm

  ✓ Tổng khối lượng chất lỏng trong TLD m_L = 2.726T

  ✓ Khối lượng hình thái của tháp cầu m_s = 585.2T

  ✓ Tỷ số cản của kết cấu tháp cầu $\xi_s = 0.0031$

- Dọc theo chiều cao tháp, số lớp (số thùng) TLD được thiết lập cho mode dao động thứ 1 trong thiết kế hệ TLD. Việc thiết kế TLD được thực hiện theo các giai đoạn thi công cầu. Ứng với mỗi giai đoạn, số lớp TLD được lắp đặt của mỗi loại tùy thuộc vào các phân đoạn tháp đã được xây dựng. 4 loại TLD đã thiết lập tại cầu Bãi Cháy được thiết lập theo các giai đoạn thi công tại các vị trí khác nhau dọc theo chiều cao tháp. Cụ thể:

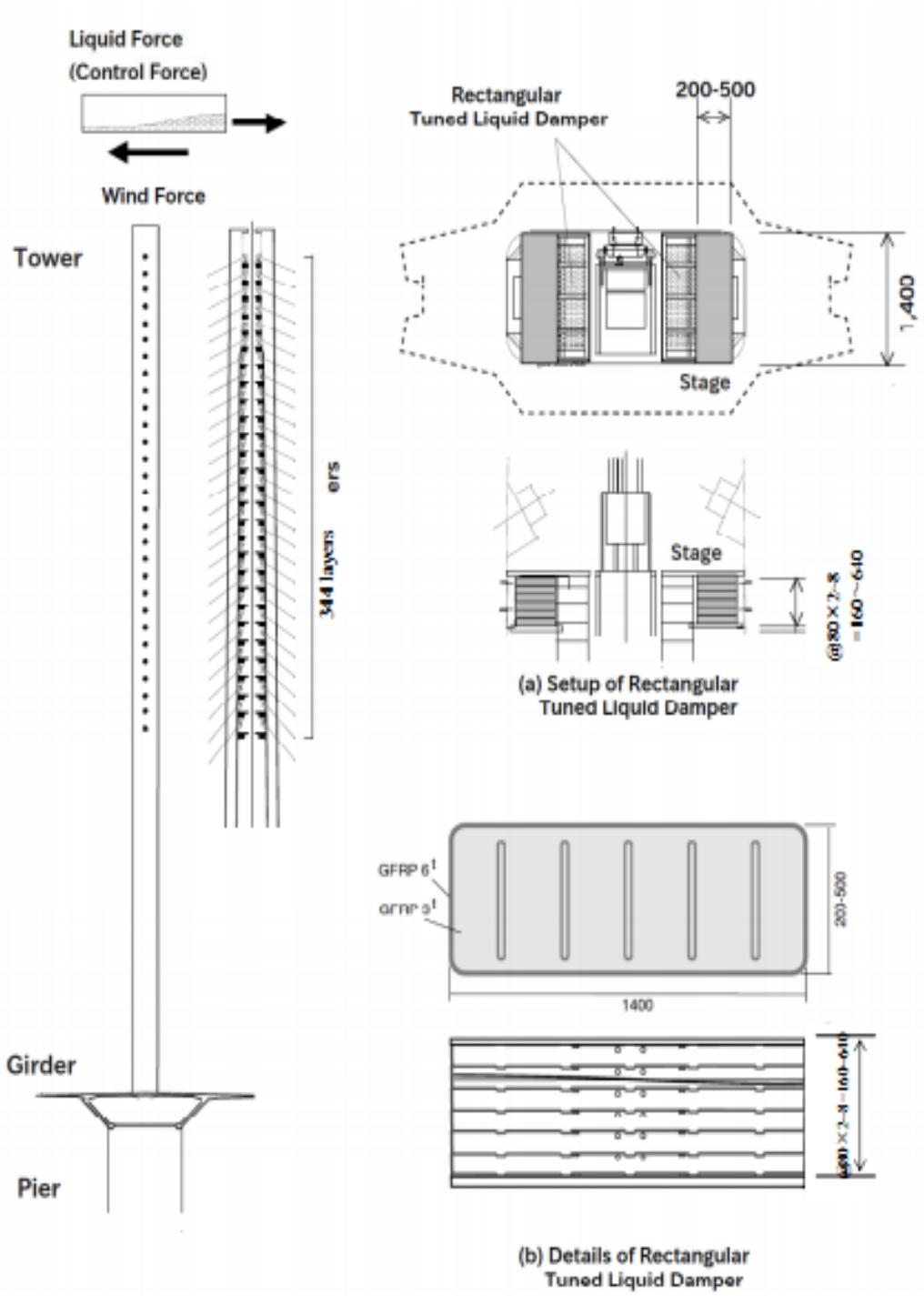
Giai đoạn thi công 36-43: nhóm 4 với 96 lớp TLD loại 1;

Giai đoạn thi công 30-35: nhóm 1 với 70 lớp TLD loại 2;

Giai đoạn thi công 23-29: nhóm 2 với 70 lớp TLD loại 3;

Giai đoạn thi công 16-22: nhóm 3 với 86 lớp TLD loại 4;

Giai đoạn thi công 14-15: nhóm 4 với 22 lớp TLD loại 1.



Hình 5.5 Chi tiết số lượngt hùng chứa TLD và vị trí lắp đặt TLD dọc theo chiều cao tháp cầu dây văng Cầu Bãi Cháy – Quảng Ninh - Việt Nam (nguồn Shimizu)

Bảng 5.1. Thông tin chi tiết của khối lượng chất lỏng của hệ TLD đã lắp đặt tại cầu Cầu Bãi Cháy như sau:

Tháp					Giảm chấn chất lỏng					
Giai đoạn thi công và cao độ		**Cao độ thi công**	**Mode**	**Bề rộng tháp tại vị trí TC**	**Chiều dài**	**Chiều rộng**	**Lớp**	**Chiều sâu chất lỏng**	**Khối lượng chất lỏng**	
Đỉnh tháp	142.49	90	1						1 thùng	Tổng khối lượng chất lỏng
Đáy trần	142.19	89.7	0.9933	510	1385	485	36	0.0285	0.0191	0.6846
GĐ 42	140.31	87.825	0.9523	526	1385	485	4	0.0285	0.0191	0.0729
GĐ 41	138.61	86.125	0.9157	540	1385	485	4	0.0285	0.0191	0.0701
GĐ40	136.91	84.425	0.8799	554	1385	485	6	0.0285	0.0191	0.1011
GĐ39	135.21	82.725	0.8449	568	1385	485	8	0.0285	0.0191	0.1294
GĐ38	133.51	81.025	0.8105	582	1385	485	10	0.0285	0.0191	0.1552
GĐ37	131.81	79.325	0.7768	596	1385	485	12	0.0285	0.0191	0.1785
GĐ36	130.11	77.625	0.7439	611	1385	485	16	0.0285	0.0191	0.2279
GĐ35	128.24	75.75	0.7084	214	1385	185	12	0.0285	0.0073	0.0621
GĐ34	126.45	73.97	0.6755	229	1385	185	12	0.0285	0.0073	0.0592
GĐ33	124.67	72.19	0.6434	243	1385	185	12	0.0285	0.0073	0.0564
GĐ 32	122.89	70.41	0.612	258	1385	185	12	0.0285	0.0073	0.0536
GĐ31	121.12	68.63	0.5815	273	1385	185	12	0.0285	0.0073	0.0510
GĐ30	119.34	66.85	0.5517	288	1385	185	10	0.0285	0.0073	0.0403
GĐ29	117.56	65.07	0.5227	303	1385	285	10	0.0285	0.0112	0.0588
GĐ28	115.77	63.29	0.4945	318	1385	285	10	0.0285	0.0112	0.0556
GĐ 27	113.99	61.51	0.4671	332	1385	285	10	0.0285	0.0112	0.0525
GĐ26	112.22	59.73	0.4405	347	1385	285	10	0.0285	0.0112	0.0496
GĐ25	110.44	57.95	0.4146	362	1385	285	10	0.0285	0.0112	0.0466
GĐ24	108.65	56.17	0.3895	377	1385	285	10	0.0285	0.0112	0.0438
GĐ23	106.87	54.39	0.3652	392	1385	285	10	0.0285	0.0112	0.0411
GĐ22	105.09	52.61	0.3417	407	1385	385	12	0.0285	0.0152	0.0623
GĐ21	103.32	50.83	0.319	421	1385	385	12	0.0285	0.0152	0.0582
GĐ20	101.54	49.05	0.297	436	1385	385	12	0.0285	0.0152	0.0542
GĐ19	99.685	47.2	0.275	452	1385	385	12	0.0285	0.0152	0.0501
GĐ18	97.835	45.35	0.2539	467	1385	385	12	0.0285	0.0152	0.0463
GĐ17	95.985	43.5	0.2336	483	1385	385	12	0.0285	0.0152	0.0426
GĐ16	94.135	41.65	0.2142	498	1385	385	14	0.0285	0.0152	0.0456
GĐ15	92.08	39.6	0.1936	515	1385	485	10	0.0285	0.0191	0.0371
GĐ14	90.035	37.55	0.1741	532	1385	485	12	0.0285	0.0191	0.0400
									0.4204	**2.7265**

Thậm trí với tổng số 344 lớp TLD (344 thùng gồm 4 loại kích thước thùng) được bố trí dọc theo chiều cao tháp từ giai đoạn thi công 14 đến giai đoạn thi công 42 là vị trí cách

đỉnh tháp 1.875m. Tuy nhiên, tần số dao động tự nhiên cho tất cả các loại TLD, và các lớp TLD là như nhau, do vậy đây là hệ giảm chấn chất lỏng đơn tần số STLD.

Số lượng lớp TLD trong mỗi vịt rí lắp đặt (mỗi giai đoạn thi công lắp đặt TLD) được tính toán tùy thuộc vào giá trị chuyển dịch của tháp và kích thước bên trong của tháp tại vị trí đó (khả năng có thể lắp đặt TLD bên trong tháp). Vị trí có số lượng TLD lớn nhất lắp đặt tại đỉnh tháp là 36 lớp (thùng) TLD loại 1.

Hệ TLD hiện có tại cầu Bãi Cháy là giải pháp tối ưu cho việc giảm dao động cho tháp cầu. Tuy nhiên vì mục đích nghiên cứu thiết kế, cần thiết phải khảo sát thêm hiệu quả giảm dao động cho tháp cầu trong một vài trường hợp khác khi thay đổi vị trí bố trí các thùng giảm chấn chất lỏng. Đặc biệt, trong trường hợp khảo sát tỷ số giữa khối lượng của mỗi thùng giảm chấn chất lỏng đơn trong hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) và tổng khối lượng chất lỏng thiết kế. Cuối cùng việc khảo sát hiệu quả giảm dao động cho tháp cầu khi sử dụng dữ liệu tần số dao động tự nhiên của tháp được xác định từ thí nghiệm dao động thực hiện cho cầu Bãi Cháy được tiến hành với việc áp dụng hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) này.

Các nội dung khảo sát cụ thể được tiến hành cho mục đích nghiên cứu ứng dụng hệ giảm chấn chất lỏng TLD cho công trình cầu Bãi Cháy gồm:

– *Nghiên cứu về hệ giảm chất chất lỏng đơn tần số (STLD)*

✓ Trường hợp tháp khi không có TLD;

✓ Trường hợp tháp vơi hệ TLD đã lắp đặt tại cầu Bãi Cháy;

✓ Khảo sát việc giảm số lượng nào đó thùng TLD thực hiện dọc theo tháp từ thấp đến cao hoặc bỏ qua các TLD lắp đặt tại giai đoạn lẻ (giãn khoảng cách lắp đặt các TLD).

– *Nghiên cứu về hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD)*

✓ Cố gắng thay đổi hệ giảm chấn chất lỏng đơn tần số (STLD) hiện đang lắp đặt tại cầu Bãi Cháy bằng hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) với 5 thùng có tần số khác nhau trong dải tần số thiết kế cho hệ.

✓ Nghiên cứu hiệu quả của tháp với hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) và so sánh hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) mới thiết kế trên mô hình cầu với hệ giảm chấn chất lỏng đơn tần số (SLTD) đã lắp đặt tại tháp cầu Bãi Cháy;

✓ Nghiên cứu tương tác về khối lượng giữa thùng có tần số trung tâm với các thùng có tần số khác trong hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) nhằm xác định hiệu quả

của việc bố trí các thùng giảm chấn đơn (số lượng thùng TLD cho mỗi loại tần số) trong hệ.

Cả hai nghiên cứu đều được thực hiện trong 2 trường hợp: khảo sát với tần số tự nhiên của tháp lấy từ việc phân tích kết cấu trên phần mềm (fs=0.1886 Hz) và khảo sát với dữ liệu tần số dao động tự nhiên của tháp xác định trên cơ sở thí nghiệm đã thực hiện cho cầu Bãi Cháy (fs=0.2 Hz).

5.3. Nghiên cứu tính toán kiểm chứng hiệu quả của giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) trên mô hình công trình cầu Bãi Cháy có xem xét ảnh hưởng của tần số dao động riêng của kết cấu tháp cầu.

Tất cả các xem xét được thực hiện với việc sử dụng hàm ứng xử tần số cho phân tích và việc phân tích lựa chọn tần số dao động chỉ đạo trong thiết kế MTLD với 2 đề xuất:

- Sử dụng kết quả phân tích tần số dao động riêng của kết cấu trên phần mềm phân tích kết cấu làm tần số chỉ đạo cho thiết kế MTLD, có nghĩa là mục đích thiết kế hệ MTLD sao cho đạt được tần số trung tâm f_0 = 0.1886Hz.
- Sử dụng kết quả phân tích tần số dao động riêng của kết cấu từ thí nghiệm đo dao động tháp cầu làm tần số chỉ đạo cho thiết kế MTLD, có nghĩa là mục đích thiết kế hệ MTLD sao cho đạt được tần số trung tâm f_0 = 0.2Hz.

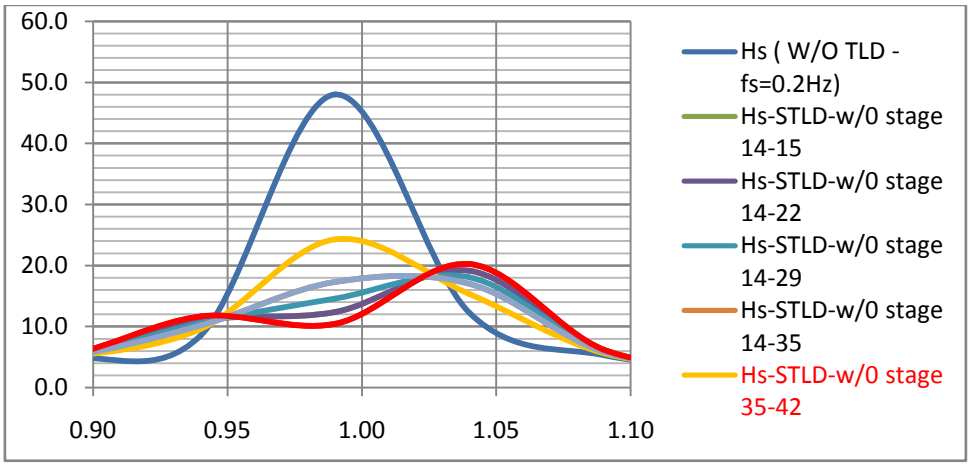
5.2.3. Tính toán kiểm chứng, thiết kế giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) cho tháp cầu Bãi Cháy sử dụng tần số thiết kế chỉ đạo f_0 = 0.1886Hz lấy từ phân tích kết cấu trên phần mềm.

Khảo sát với hệ STLD hiện đang lắp đặt tại công trình cầu Bãi Cháy

Một số trường hợp được thiết lập để khảo sát ứng xử của tháp cầu khi không có TLD và khi có chỉ một vài TLD trong các giai đoạn thi công như sau:

- Trường hợp 1: đồ thị ứng xử của tháp khi không có hệ TLD
- Trường hợp 2: đồ thị ứng xử của tháp khi không bố trí TLD cho giai đoạns 14-15;
- Trường hợp 3: đồ thị ứng xử của tháp khi không bố trí TLD cho giai đoạns 14-22;
- Trường hợp 4: đồ thị ứng xử của tháp khi không bố trí TLD cho giai đoạns 14-29;
- Trường hợp 5: đồ thị ứng xử của tháp khi không bố trí TLD cho giai đoạns 14-35;
- Trường hợp 6: đồ thị ứng xử của tháp khi không bố trí TLD cho giai đoạns 14-42;
- Trường hợp 7: đồ thị ứng xử của tháp khi không bố trí TLD cho các giai đoạn lẻ khi lắp đặt;

Hiệu quả của hệ TLD hiện đang lắp đặt tại cầu Bãi Cháy khi sử dụng hàm ứng xử tần số để phân tích như biểu đồ dưới đây:



Hình 5.6 Đồ thị khảo sát ảnh hưởng của TLD lắp đặt tại các giai đoạn thi công của hệ TLD đã lắp đặt tại công trình cầu Bãi Cháy.

Trên đồ thị, dễ dàng nhận ra rằng hệ giảm chấn chất lỏng (TLD) là có hiệu quả nhất khi được bố trí như hiện có tại cầu Bãi Cháy. Phương án thiết kế TLD cho cầu Bãi Cháy là tối ưu khi sử dụng SLTD như vậy trong việc giảm dao động cho tháp cầu. Nếu tiến hành thử nghiệm các trường hợp ứng với việc bỏ bớt một số lớp TLD tại một số giai đoạn như đã lắp đặt, thì biểu đồ cho thấy hiệu quả của hệ mới trong việc giảm dao động là thấp hơn. Đặc biệt, nếu bỏ qua các TLD lắp đặt tại vị trí đỉnh tháp ứng với giai đoạn thi công cuối, thì hiệu quả trong việc giảm dao động cho tháp cầu là thấp nhất với đồ thị chỉ có một đỉnh dạng giống như đồ thị ứng xử của kết cấu khi không lắp đặt TLD nhưng giá trị đỉnh hạ thấp hơn (có hiệu quả giảm dao động nhưng không cao)

Tóm lại:

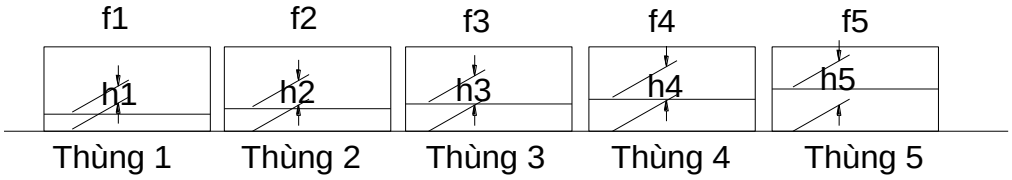
- Hiệu quả của TLD thể hiện rõ ràng hơn so với khi kết cấu không lắp đặt TLD.
- Số lượng của TLD và vị trí lắp đặt có ảnh hưởng khá nhạy với ứng xử của kết cấu
- Tại mode1 là mode được sử dụng cho thiết kế TLD, số lượng TLD lắp đặt càng gần vị trí đỉnh tháp thì hiệu quả trong việc giảm dao động cho kết cấu tháp là càng lớn
- Cần có thêm các trường hợp khảo sát để xem xét xem có khả năng điều chỉnh để hệ TLD để có hiệu quả cao hơn trong việc giảm dao động cho tháp cầu không.

Khảo sát với giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD)

Trong mục này, việc nghiên cứu giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) áp dụng cho cầu Bãi Cháy được thực hiện. Số lượng thùng TLD đơn trong hệ MTLD là N=5. Chi tiết các thông số của hệ MTLD như sau:

- Số lượng thùng TLD đơn lựa chọn cho thiết kế hệ MTLD là N =5.
- Tần số trung tâm được thiết kế bằng với tần số dao động tự nhiên của tháp cầu theo phân tích trên phần mềm f=0.1886 Hz;
- Bề rộng dải tần số ΔR=0.2.
- Khoảng tần số lấy cân bằng β=0.094 Hz;
- Kích thước của 5 thùng là như nhau là 1400x500 mm.
- Các tần số khác nhau được thiết lập bằng việc điều chỉnh chiều sâu chất lỏng trong mỗi thùng của hệ 5 thùng TLD thuộc hệ MTLD.

Nhóm 5 thùng trong mỗi vị trí thiết lập lắp đặt ở từng giai đoạn thi công tháp như sau:



Hình 5.7 Sơ đồ bố trí MTLD gồm 5 TLD đơn trên mỗi vị trí dọc theo tháp cầu

Tần số chỉ đạo sử dụng trong thiết kế giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) để đảm bảo tần số trung tâm của hệ MTLD xấp xỉ với tần số dao động tự nhiên của kết cấu tháp $f_0=f_3=f_s$. Tần số dao động và chiều sâu chất lỏng bên trong các thùng trong nhóm 5 thùng của hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) như sau:

Bảng 5.2. Các thông số của TLD trong hệ MTLD có N=5

STT	Thùng	Tần số dao động (Hz)	Chiều sâu chất lỏng (cm)	Tỷ số cản - ξ
1	m1	0.16974	2.301	0.031
2	m2	0.17917	2.563	0.027
3	m3	0.18860	2.839	0.024
4	m4	0.19803	3.129	0.022
5	m5	0.20746	3.433	0.019

Việc khảo sát ứng xử của kết cấu khi sử dụng hàm ứng xử tần số theo các trường hợp như:

Bảng 5.3. Chi tiết số lớp mỗi TLD đơn trong hệ MTLD N=5

STT	Thùng	Tỷ lệ % của khối lượng chất lỏng trong mỗi nhóm 5 thùng của hệ MTLD				
		Trường hợp 1	Trường hợp 2	Trường hợp 3	Trường hợp 4	Trường hợp5
1	m1	2	5	5	10	10
2	m2	3	5	10	10	15
3	m3	90	80	70	60	50
4	m4	3	5	10	10	15
5	m5	2	5	5	10	10

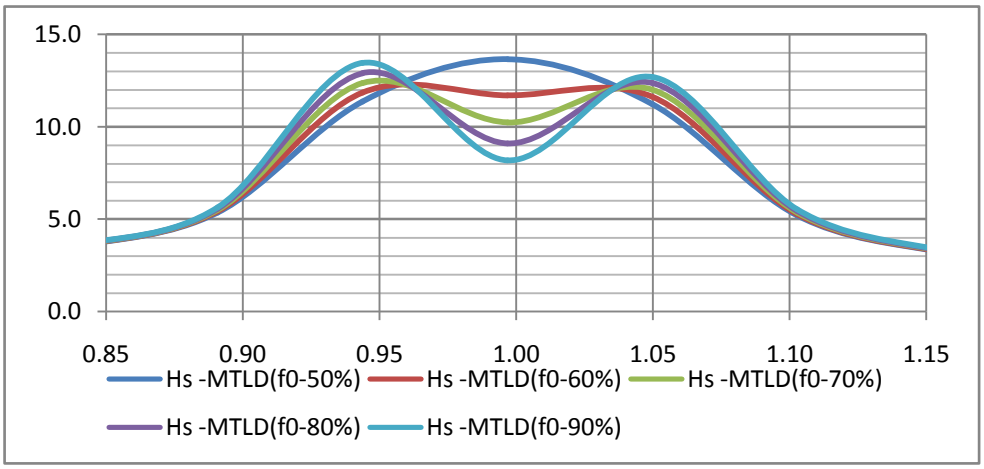
Trong hệ MTLD, tổng khối lượng chất lỏng $m_L = m_1+m_2+m_3+m_4+m_5$. Thừa nhận rằng mỗi khối lượng thứ i, m_i chiếm tỷ lệ nào đó trong tổng khối lượng. ***Câu hỏi đặt ra là mỗi TLD đơn trong hệ MTLD ảnh hưởng như thế nào đến ứng xử của hệ khi mỗi TLD đơn chiếm một tỷ lệ khác nhau trong tổng khối lượng của chất lỏng?***. Do vậy, Cần có sự khảo sát ảnh hưởng của giảm chấn đến ứng xử của kết cấu khi tỷ lệ khối lượng chất lỏng trong mỗi thùng chất lỏng đơn trong hệ MTLD so với khối lượng hình thái của kết cấu thay đổi. Các kết quả phân tích cho mỗi trường hợp này sẽ được so sánh với hiệu quả của hệ STLD hiện lắp đặt tại cầu Bãi Cháy. Các trường hợp cụ thể như sau:

- Trường hợp 1: Khối lượng chất lỏng của thùng có tần số trung tâm, m_3 lấy bằng 50% trong tổng số khối lượng chất lỏng trong hệ MTLD. Tỷ lệ khối lượng của các thùng có tần số khác nhau trong dải tần số thiết kế hệ MTLD là m1(10%), m2(15%), m4(15%), m5(10%).
- Trường hợp 2: Khối lượng chất lỏng của thùng có tần số trung tâm, m_3 lấy bằng 60% trong tổng số khối lượng chất lỏng trong hệ MTLD. Tỷ lệ khối lượng của các thùng có tần số khác nhau trong dải tần số thiết kế hệ MTLD là m1(10%), m2(10%), m4(10%), m5(10%).
- Trường hợp 3: Khối lượng chất lỏng của thùng có tần số trung tâm, m_3 lấy bằng 70% trong tổng số khối lượng chất lỏng trong hệ MTLD. Tỷ lệ khối lượng của các thùng có tần số khác nhau trong dải tần số thiết kế hệ MTLD là m1(5%), m2(10%), m4(10%), m5(5%).
- Trường hợp 4: Khối lượng chất lỏng của thùng có tần số trung tâm, m_3 lấy bằng 80% trong tổng số khối lượng chất lỏng trong hệ MTLD. Tỷ lệ khối lượng của các thùng có tần số khác nhau trong dải tần số thiết kế hệ MTLD là m1(5%), m2(5%), m4(5%), m5(5%).
- Trường hợp 5: Khối lượng chất lỏng của thùng có tần số trung tâm, m_3 lấy bằng 90% trong tổng số khối lượng chất lỏng trong hệ MTLD. Tỷ lệ khối lượng của các thùng có tần số khác nhau trong dải tần số thiết kế hệ MTLD là m1(2%), m2(3%), m4(3%), m5(2%).

Kết quả khảo sát thể hiện trên đồ thị với phân tích hàm ứng xử tần số như sau:

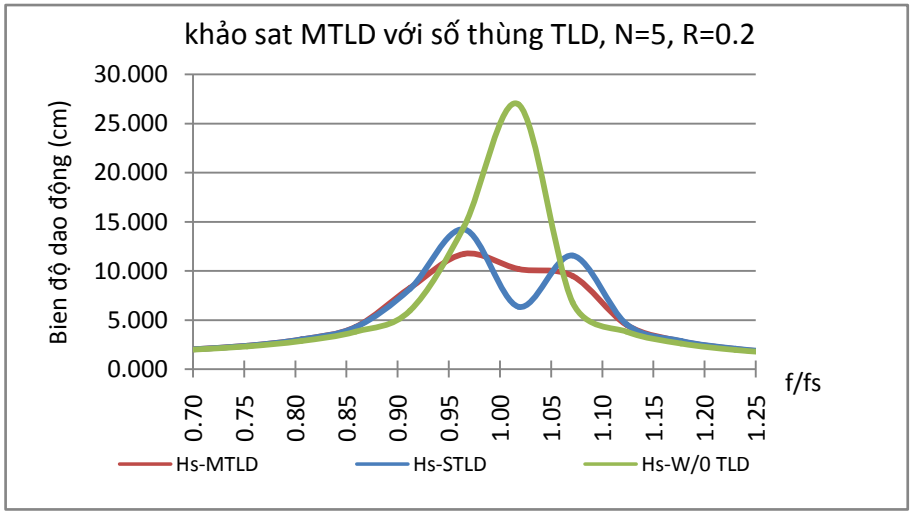
Kết quả thể hiện trên đồ thị 5.8 cho thấy, hiệu quả của MTLD ứng với tỷ lệ khối lượng chất lỏng của thùng có tần số trung tâm, m3 lấy bằng 50% trong tổng số khối lượng chất lỏng trong hệ MTLD chỉ có một đỉnh (dạng đồ thị giống như khi hệ không gắn TLD). Khi tỷ lệ này tăng lên, đường đồ thị thay đổi thành đường với 2 đỉnh rõ ràng và giá trị ứng xử tại vị trí tỷ số tần số bằng 1 là giảm nhỏ rõ rệt và lớn nhất khi giá trị khối lượng của thùng có tần số trung tâm đạt 90% tổng khối lượng chất lỏng

của hệ. Hiệu quả giảm chấn tốt nhất khi đường biểu diễn khá bằng phẳng hay các giá trị ứng xử xấp xỉ bằng nhau. Như vậy đồ thị chỉ ra rằng hiệu quả giảm chấn là tốt nhất ứng với giá trị tỷ lệ khối lượng giữa thùng có tần số trung tâm và tổng khối lượng của hệ là 60%.



Hình 5.8 Đồ thị khảo sát ứng xử của kết cấu với tỷ lệ khối lượng của TLD có tần số trung tâm với tổng khối lượng chất lỏng thay đổi

Ứng với giá trị này khi phân tích ứng xử của kết cấu có gắn giảm chấn chất lỏng đa tần số có xét đến tỷ lệ khối lượng giữa các TLD sử dụng hàm ứng xử tần số đã thiết lập trong chương 3 của hệ tương tác kết cấu và giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) thể hiện như sau:



Hình 5.9 Đồ thị ứng xử của kết cấu khi so sánh hệ STLD và MTLD có xét đến khối lượng của TLD có tần số trung tâm (tỷ lệ giữa khối lượng của thùng có tần số trung tâm và tổng khối lượng chất lỏng lấy là 60%)

Trên đồ thị, dễ dàng nhận thấy rằng hiệu quả của MTLD là tốt hơn trường hợp dùng hệ STLD với cùng các dữ liệu đầu vào và khi có sự điều chỉnh của việc sử dụng khối lượng

của các thùng có tần số khác nhau mà đặc biệt là thùng có tần số trung tâm.

Tỷ lệ khối lượng trong thiết kế được bảo đảm khi sử dụng nhiều thùng có cùng tần số cho mỗi loại thùng trong hệ MTLD. Số lượng mỗi thùng TLD đơn lẻ trong hệ MTLD là khác nhau cho mỗi loại thùng và mỗi vị trí. Cụ thể bố trí như bảng 5.4 dưới đây.

Bảng 5.4. Chi tiết vị trí thiết lập MTLD và các thùng đơn trong hệ MTLD, N=5

Thùng	Khối lượng chất lỏng trong 1 thùng	Khối lượng chất lỏng										
		Số lượng TLD giai đoạn 42	mode 1 vị trí giai đoạn 42: 0.993	Số lượng TLD giai đoạn 39	mode 1 vị trí giai đoạn39: 0.845	Số lượng TLD giai đoạn 36	0.mode 1 vị trí giai đoạn 36: 0.744	Số lượng TLD giai đoạn 30	mode 1 vị trí giai đoạn 30: 0.552	Số lượng TLD giai đoạn 25	mode 1 vị trí giai đoạn 25: 0.415	Tổng khối lượng chất lỏng (T)
m1	0.016	1	0.016	1	0.014	1	0.012	1	0.009	1	0.007	0.057
m2	0.018	14	0.249	10	0.152	10	0.133	10	0.099	12	1.242	1.876
m3	0.020	18	0.355	12	0.201	12	0.177	10	0.110	18	2.654	3.498
m4	0.022	2	0.044	1	0.019	1	0.016	1	0.012	1	0.018	0.108
m5	0.024	1	0.024	1	0.020	1	0.018	1	0.013	1	0.010	0.085
Tổng cộng		**36**	**0.688**	**25**	**0.405**	**25**	**0.357**	**23**	0.243	**33**	3.931	**5.624**
Tổng số thùng TLD												**142**

Hệ MTLD thiết kế được bố trí để lắp đặt tại 5 vị trí, mỗi vị trí là 1 hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số có 5 thùng có tần số dao động riêng mỗi thùng khác nhau là một giai đoạn cụ thể như trong bảng 5.1 là: giai đoạn 42, giai đoạn 39, giai đoạn 36, giai đoạn 30 và giai đoạn 25 theo mode 1. Tại mỗi vị trí, sẽ gồm 5 thùng TLD đơn có tần số khác nhau trong dải tần số thiết kế cho hệ MTLD. Tần số trung tâm của TLD được thiết kế sao cho bằng với tần số dao động tự nhiên của kết cấu tháp là 0.1886Hz tương tự như đã thiết kế cho hệ STLD đã lắp đặt cho cầu Bãi Cháy trước khi tiến hành thử nghiệm động đối với tháp cầu. Tại giai đoạn 42, sẽ có tổng số 36 thùng TLD, trong đó có 18 thùng khối lượng m_3 có tần số trung tâm là f_0 = 0.1886Hz, 14 thùng có khối lượng m_2 để điều chỉnh đường đồ thị ứng xử tần số của hệ đạt tới hiệu quả tốt nhất (đường đồ thị có 2 đỉnh có giá trị xấp xỉ bằng nhau). Cùng cách giải thích tương tự cho các trường hợp khảo sát còn lại.

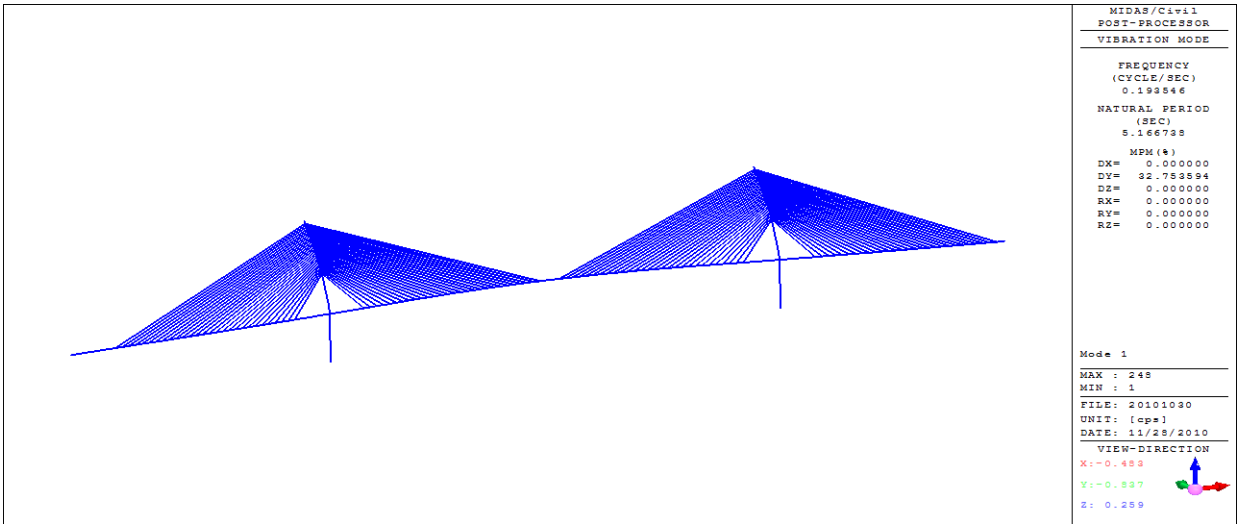
Với cách bố trí hệ MTLD dọc theo chiều cao tháp, hiệu quả của hệ tăng lên và tổng số lượng thùng TLD giảm đi so với hệ SLTD hiện có tại cầu Bãi Cháy. Một cách rõ ràng rằng có thể giảm số thùng TLD đơn lẻ khi thiết kế áp dụng hệ MTLD thay thế cho hệ STLD đang có tại cầu Bãi Cháy.

Tóm lại:

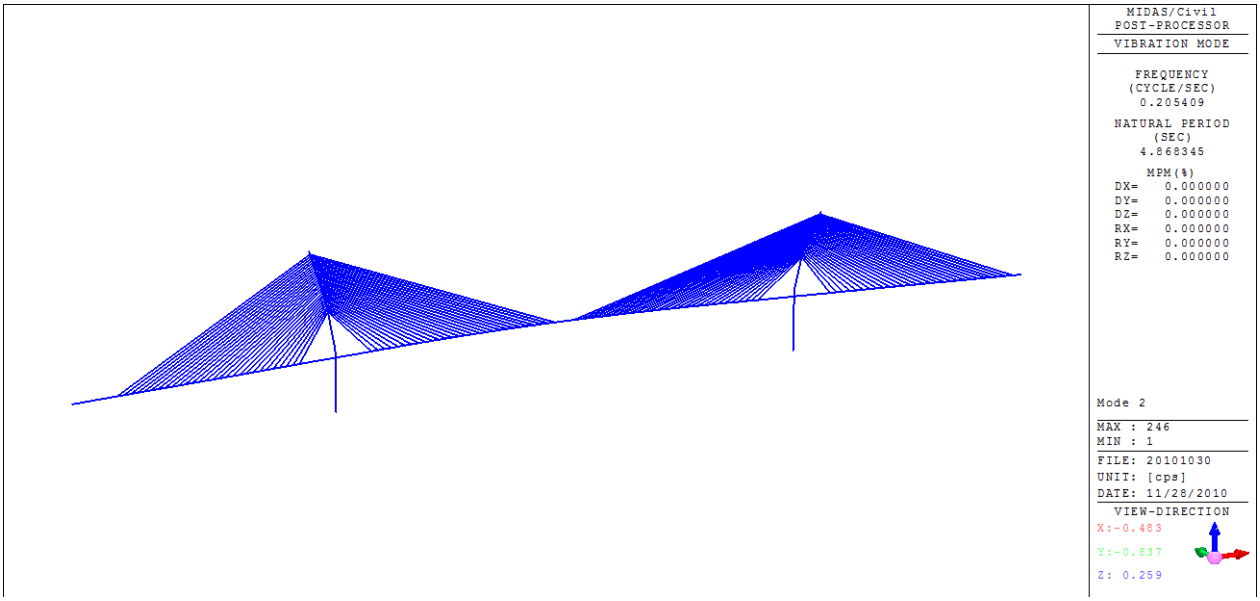
- Hiệu quả của hệ MTLD tốt nhất ứng với tỷ lệ nhất định của thùng chất lỏng có tần số trung tâm. Tỷ lệ này trong khảo sát là khoảng 60%.
- Để thiết lập tỷ lệ cho thùng TLD có tần số trung tâm, sử dụng số lượng các thùng giống nhau có cùng tần số trung tâm để bảo đảm tỷ số khối lượng như khảo sát.
- Khi tăng hoặc giảm số lượng thùng có tần số trung tâm trong hệ MTLD, đường đồ thị có 2 đỉnh rõ rệt nhưng giá trị của 2 đỉnh chênh lệch nhau (không cùng xấp xỉ một giá trị). Điều này có nghĩa là đáp ứng của giảm chấn với ứng xử của kết cấu tại các điểm tần số khác nhau là chênh lệch nhau và chúng ta khó có thể đạt được giá trị tối ưu trong hiệu quả giảm dao động cho tháp cầu.

5.2.4. Tính toán kiểm chứng, thiết kế MTLD cho tháp cầu Bãi Cháy sử dụng tần số thiết kế chỉ đạo f_0 = 0.2Hz.

Thí nghiệm dao động thực hiện cho cầu Bãi Cháy chỉ ra rằng tần số dao động riêng của tháp cầu là 0.2Hz và tần số này sẽ được sử dụng là tần số dao động chỉ đạo cho thiết kế giảm chấn cho tháp cầu. Và nhữ vậy những thiết kế ban đầu khi sử dụng tần số dao động riêng của tháp là 0.1886Hz cần được xem xét để điều chỉnh. Hơn nữa việc thay đổi tần số như vậy sẽ khẳng định sự đáp ứng tốt hay không của hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số đối với các dải tần số kích động khác nhau. Tần số dao động riêng của tháp cầu xác định từ thí nghiệm dao động 0.2Hz là khá phù hợp với kết quả phân tích bằng phần mềm phân tích kết cấu Midas Civil của tác giả luận án.



Hình 5.10 Kết quả phân tích dao động cầu Bãi Cháy trên phần mềm Midas Civil – mode dao động thứ 1 với tần số f=0.194Hz.



Hình 5.11 Kết quả phân tích dao động cầu Bãi Cháy trên phần mềm Midas Civil – mode dao động thứ 2 với tần số f=0.205Hz.

Bảng 5.5. Chi tiết tần số dao động của 6 mode đầu tiên phan tích dao động cho cầu Bãi Cháy trên phần mềm Midas Civil :

STT	Mode	Tần số dao động (Hz)
1	Mode 1	0.1935
2	Mode 2	0.2054
3	Mode 3	0.2499
4	Mode 4	0.3177
5	Mode 5	0.4547
6	Mode 6	0.6562

Dựa trên kết quả thí nghiệm này, so sánh với phân tích bằng phần mềm Midas Civil, tần số dao động của kết cấu tháp sử dụng trong thiết kế ứng dụng hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số kiểm chứng trên mô hình cầu Bãi Cháy chọn là f= 0.2Hz (mode1).

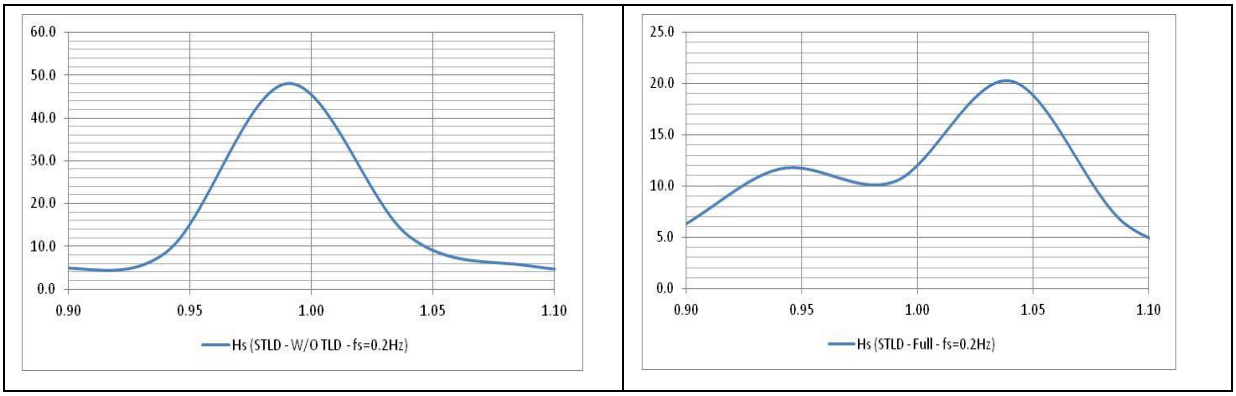
Khảo sát hệ STLD

Việc tính toán ứng xử của tháp tiến hành theo các trường hợp sau:

- Trường hợp 1: Kết cấu khi không có TLD.
- Trường hợp 2: Kết cấu khi có đầy đủ các giảm chấn chất lỏng TLD như hệ giảm chấn chất lỏng đơn tần số (STLD) đã lắp đặt tại cầu Bãi Cháy;

Kết quả đồ thị 5.12 chỉ ra rằng:

Tần số của tháp khi thay đổi từ 0.1886Hz sang 0.2Hz ảnh hưởng lớn đến ứng xử chuyển vị của tháp trong 2 trường hợp khi không có TLD và khi có gắn TLD.



Hình 5.12 Đồ thị thể hiện sự đáp ứng tần số của hệ MTLD khi thay đổi tần số thiế kế chỉ đạo theo tần số kích động.

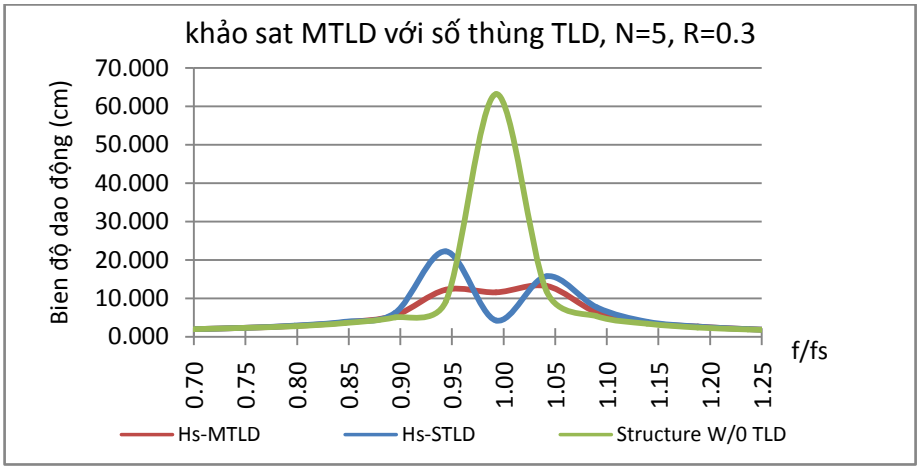
<u>Khảo sát hệ MTLD</u>

Kích thước thùng TLD và số lượng các thùng có cùng tần số trong hệ MTLD trong mỗi giai đoạn được lựa chọn tùy thuộc vào kích thước của tháp cho phép bố trí các thùng của giai đoạn đó. TLD thiết kế lại cho cầu Bãi Cháy có dạng thùng hình chữ nhật với kích thước : L = 1400mm, B=500mm, h=80mm.

Tần số chỉ đạo cho thiết kế MTLD (tần số trung tâm) f_0= 0.2Hz.

Chi tiết các thông số sử dụng cho việc thiết kế MTLD áp dụng tính toán kiểm chứng cho tháp cầu Bãi Cháy:

Tổng khối lượng chất lỏng	m_L = 2.876T
Khối lượng hình thái của tháp	m_s = 585.2T
Tỷ số cản của kết cấu tháp	$\xi_s = 0.0031$
Tỷ số khốilượng chất lỏng	$\mu_L = m_L/m_S = 0.005$
Bề rộng dải tần số	$\Delta R = 0.2$
Khoảng tần số	$\beta = 0.015$



Hình 5.13 Đồ thị khảo sát hệ MTLD N=5 khi giá trị tần số thiế kế MTLD f=0.2Hz

Đồ thị khảo sát khi sử dụng phân tích hàm ứng xử tần số cho thấy hiệu quả của hệ MTLD trong giảm dao động cho tháp cầu là tốt hơn khi dùng hệ SLTD ứng với các giá trị tham số giảm chấn như đã nêu trên.

Bảng 5.6. Chi tiết mỗi TLD đơn trong hệ MTLD trường hợp f_{TLD} =0.2Hz:

STT	nhóm	Tần số dao động (Hz)	Chiều sâu chất lỏng (cm)	Tỷ sốcản - ξ	Khối lượng chất lỏng trong 1 thùng (T)
1	m1	0.180	2.586	0.027	0.018
2	m2	0.190	2.881	0.024	0.020
3	m3	0.200	3.191	0.021	0.022
4	m4	0.210	3.517	0.019	0.025
5	m5	0.220	3.858	0.017	0.027

Mỗi nhóm 5 bình này sẽ được bố trí tại các vị trí theo các giai đoạn như đã thiết kế STLD. Tuy nhiên điều đặc biệt ở đây là, lần đầu tiên trong nghiên cứu này, tác giả kiến nghị áp dụng lắp đặt từng nhóm MTLD vào các vị trí với việc sử dụng tỷ số khối lượng của từng TLD đơn trong hệ MTLD so với khối lượng có hiệu của kết cầu để khảo sát.

Chi tiết về tỷ lệ khối lượng của mỗi TLD đơn trong nhóm 5 TLD thuộc hệ MTLD và số giai đoạn lắp đặt MTLD cho tháp cầu Bãi Cháy thiết kế theo mode 1 như bảng 5.7.

Tổng số thùng TLD lắp đặt chỉ còn 94 thùng trong đó số thùng có tần số trung tâm chiếm tỷ lệ khoảng 60% tổng khối lượng chát lỏng của cả hệ.

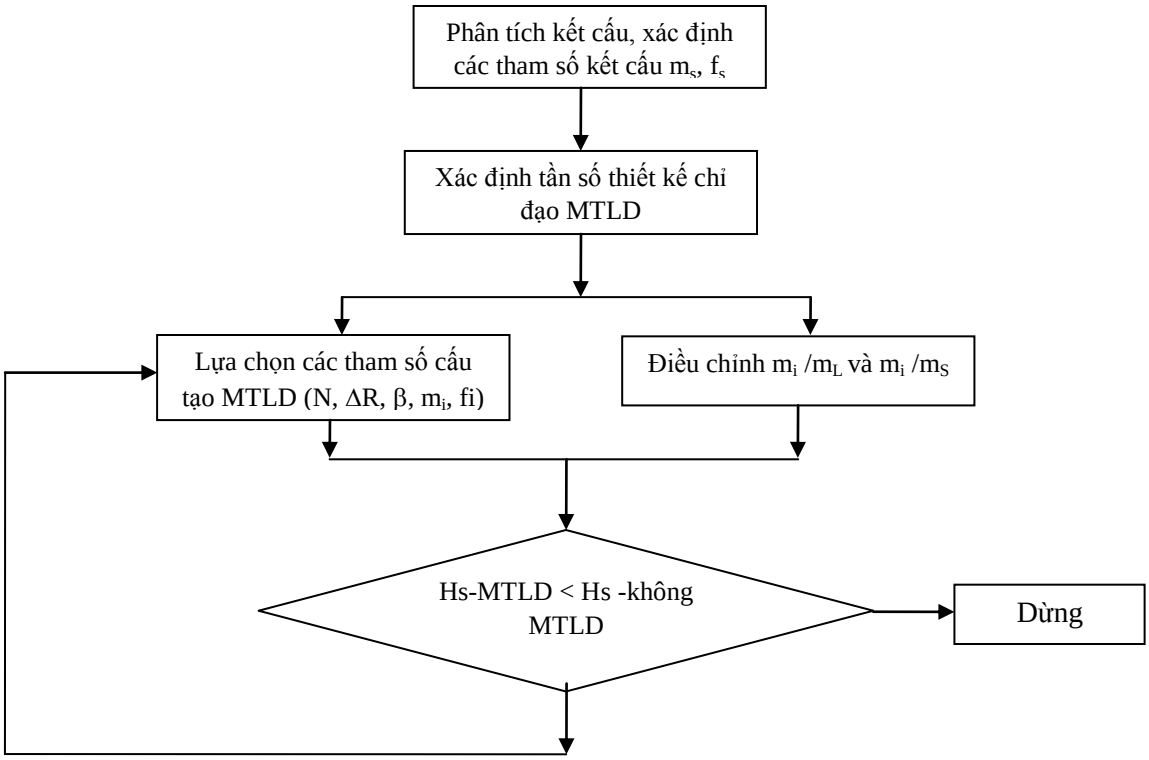
Bảng 5.7. Chi tiết khối lượng của mỗi TLD đơn trong hệ MTLD N=5 và vị trí lắp đặt

Thùng	**giai đoạn 42**		**giai đoạn 40**		**giai đoạn 37**		**giai đoạn 33**		**giai đoạn 30**		**giai đoạn 25**		**giai đoạn 22**		**Tổng khối lượng chất lỏng**
	mode 1	**0.9933**		**0.8799**		**0.7768**		**0.6434**		**0.5517**		**0.4146**		**0.3417**	
m1	1	0.018	1	0.016	1	0.014	1	0.012	1	0.012	1	0.007	1	0.006	0.084
m2	2	0.040	1	0.018	1	0.016	1	0.013	1	0.026	1	0.007	1	0.007	0.126
m3	10	0.222	8	0.157	8	0.139	8	0.115	6	0.857	6	0.391	6	0.046	1.927
m4	8	0.196	2	0.043	2	0.038	2	0.032	2	0.252	2	0.036	2	0.017	0.613
m5	1	0.027	1	0.024	1	0.021	1	0.017	1	0.017	1	0.010	1	0.009	0.125
Tổng	**22**	**0.502**	**13**	**0.258**	**13**	**0.228**	**13**	**0.18867**	**11**	**1.163**	**11**	**0.451**	**11**	**0.085**	**2.876**

5.4. Kết luận chương 5

– MTLD là khá nhạy cảm với sự thay đổi tần số tới ứng xử của kết cấu. Với một biến đổi nhỏ của tần số chỉ đạo sử dụng cho thiết kế MTLD (tần số này thường lấy theo tần số dao động tự nhiên của kết cấu), ứng xử của kết cấu là thay đổi rõ rệt.

- Ứng với tần số thiết kế MTLD là 0.2Hz các tham số của MTLD là biến đổi rõ rệt so với các tham số khi thiết kế ứng với tần số 0.1886Hz như: chiều sâu chất lỏng, tần số dao động và tỷ số cản của mỗi TLD đơn lẻ trong nhóm 5 thùng thuộc MTLD.
- Hiệu quả trong việc giảm dao động của MTLD tăng trong khi số lượng thùng chứa chất lỏng giảm còn 94TLD (giảm 250 TLD so với thiết kế cho hệ TLD hiện đang lắp đặt tại cầu là 344TLD). Điều này có nghĩa là việc áp dụng hệ SLTD trong phương án thiết kế cho hệ hiện có là tối ưu nhưng nếu thay hệ này bằng hệ MTLD thì hiệu quả tăng lên mà vẫn có khả năng tiết kiệm vật liệu.
- Trên cơ sở các phân tích và tính toán kiểm chứng trên mô hình cầu Bãi Cháy, đề xuất sơ đồ hướng dẫn thiết kế MTLD giảm dao động cho kết cấu dạng tháp như hình vẽ :



Hình 5.14 Sơ đồ hướng dẫn thiết kế hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số MTLD

KẾT LUẬN

1. Nghiên cứu ứng dụng hệ giảm chấn dùng chất lỏng trong điều khiển dao động cho cầu dây văng tại Việt Nam là hết sức cần thiết.
2. Luận án nghiên cứu lý thuyết về hệ thống giảm chấn chất lỏng TLD, xem xét các đặc tính và cơ chế tạo lực cản làm giảm dao động của kết cấu. Khẳng định tính khả thi của việc áp dụng giảm chấn chất lỏng TLD nhằm giảm dao động cho các tháp cầu dây dưới tác động động lực học do gió, động đất và hoạt tải.
3. Trên cơ sở các nghiên cứu về hệ giảm chấn khối lượng đa tần số (MTMD) của GS. Igusa và Xu (1990,1991,1992) và nghiên cứu sử dụng giảm chấn khối lượng TMD tương đương thay cho giảm chấn chất lỏng TLD của GS. Yozo Fujino, TS. Wakahara, TS. Sun Limin, nghiên cứu thiết lập hàm ứng xử tần số cho mô hình với kết cấu là 1 bậc tự do và các giảm chấn chất lỏng là các bậc tự do còn lại thể hiện hệ tương tác giữa giữa kết cấu và nhiều giảm chấn chất lỏng (MTLD) nhằm phản ánh ứng xử của kết cấu theo tỷ lệ giữa tần số lực kích động với tần số dao động riêng của kết cấu. Phân tích được ảnh hưởng của các tham số của hệ giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) đến hiệu quả giảm dao động cho kết cấu khi so sánh với hệ giảm chấn chất lỏng đơn tần số (STLD). Kết quả phân tích chỉ ra rằng hiệu quả của giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) cho kết cấu dạng tháp là tốt hơn giảm chấn chất lỏng đơn tần số STLD với giá trị nhất định của các tham số trong hệ.
4. Phân tích số hàm ứng xử tần số đã xây dựng để xác định được ảnh hưởng của các tham số đến hiệu quả giảm chấn như: số lượng thùng giảm chấn chất lỏng N, bề rộng dải tần số ΔR, và tỷ số tần số kích động và tần số dao động riêng của kết cấu. Cụ thể:

- Giảm chấn chất lỏng đơn tần số (STLD) thực tế là trường hợp đặc biệt của giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD). Trong giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) tần số của mỗi thùng đơn là khác nhau trong khi ở giảm chấn chất lỏng đơn tần số (SLTD) là giống nhau (thừa nhận tỷ số khối lượng giữa giảm chấn và kết cấu trong 2 hệ là như nhau).
- Khi so sánh giảm chấn chất lỏng đơn tần số (STLD) với 1 thùng giảm chấn đơn và giảm chấn chất lỏng đơn tần số (STLD) với số lượng thùng TLD nào đó (tần số

dao động tự do của 2 hệ là như nhau) cho thấy hiệu quả của 2 hệ là như nhau. Điều này có nghĩa rằng số lượng của các thùng đơn trong giảm chấn chất lỏng đơn tần số (STLD) được lựa chọn vừa nhằm phục vụ cho quá trình xây dựng, phù hợp với kích thước của kết cấu và tăng hiệu quả giảm dao động cho toàn hệ kết cấu (trường hợp thiết kế hiện tại của cầu Bãi Cháy).

– Khi khảo sát các trường hợp ảnh hưởng của bề rộng dải tần số đối với hiệu quả giảm dao động của giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) có thể thấy rằng nếu số lượng của TLD đơn là đủ lớn và bề rộng dải tần số là nhỏ ($\Delta R = 0.1$), chênh tần số giữa các TLD đơn nhỏ thì hiệu quả giảm dao động của MTLD là tương tự như SLTD. Mặt khác, khi số lượng của các TLD đơn là nhỏ và bề rộng dải tần số là đủ lớn ($\Delta R = 0.3$) thì hiệu quả của MTLD là tốt hơn của hệ SLTD. Do vậy, hiệu quả của hệ MTLD chỉ có thể đạt được tốt nhất ứng với giá trị nhất định nào đó của số lượng TLD đơn và bề rộng dải tần số phù hợp. Giá trị khảo sát kiến nghị là bề rộng dải tần số là 0.2 -0.3 và độ chênh tần số giữa các thùng TLD đơn lẻ là β= 0.01 - 0.02.

Đặc biệt, luận án đã chỉ ra được mối quan hệ về khối lượng giữa các thùng đơn lẻ trong 1 nhóm thùng có số lượng thiết kế của MTLD khi sử dụng hàm ứng xử tần số đã thiết lập. Trong hệ MTLD sẽ gồm N thùng chứa, mỗi thùng có 1 giá trị tần số riêng (1 TLD đơn) và các tần số cảu N thùng thuộc dải tần số thiết kế. Tỷ số giữa khối lượng của thùng có tần số trung tâm (tần số chủ đạo được lấy để thiết kế thường là bằng với tần số dao động tự nhiên của kết cấu) và tổng khối lượng chất lỏng trong giảm chấn chất lỏng đa tần số (MTLD) và tỷ số khối lượng của mỗi TLD đơn với khối lượng hình thái của kết cấu cũng được khảo sát trong luận án. Kết quả chỉ ra rằng hiệu quả giảm dao động tăng cùng với sự tăng khối lượng của TLD có tần số trung tâm. Các TLD khác ít ảnh hưởng đến hiệu quả chung nhưng ảnh hưởng đến việc tìm giá trị tối ưu cho giảm chấn.

5. Thí nghiệm mô phỏng ví dụ để minh chứng hiệu quả của hệ MTLD trong việc giảm dao động cho kết cấu dạng tháp khi sử dụng hàm ứng xử tần số đã thiết lập để phân tích được thực hiện với một mô hình cột đặt trên bàn rung .
6. Thực hiện thí nghiệm trên mô hình kết cấu cột bằng thép mô phỏng dạng chịu tác động kích động của hàm điều hòa với tổng số 189 trường hợp kích động kết cấu (21 trường hợp mỗi trường hợp tạo kích động cho bàn rung với 9 giá trị tần số dao

động khác nhau) và lặp đi lặp lại 3 lần để có kết quả minh chứng hiệu quả của giảm chấn chất lỏng trong việc giảm dao động cho kết cấu dạng tháp khi sử dụng hàm ứng xử tần số đã thiết lập. Kết quả chỉ ra rằng:

7. Việc tính toán thiết kế mô hình cột và thực hiện các trường hợp thí nghiệm được tính toán chi tiết để có thể so sánh kiểm chứng với các kết quả phân tích lý thuyết về hệ MTLD. Kết quả thí nghiệm được đánh giá, so sánh với hệ STLD và khẳng định:

– Tương quan giữa ứng xử của kết cấu (biên độ dao động) và tỷ số tần số là phù hợp với qui luật lý thuyết đã phân tích.
– Đánh giá sai số giữa kết quả lý thuyết và thực nghiệm trong phạm vi từ 7-11% là có thể chấp nhận được.

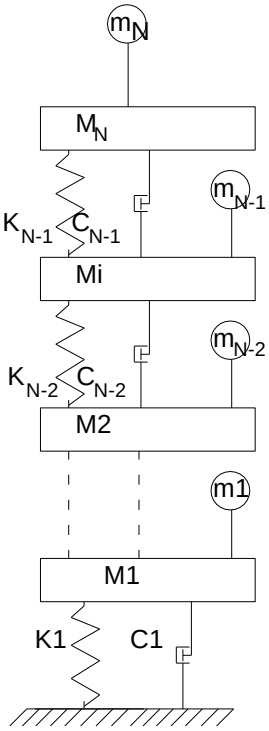
8. Ứng dụng kết quả nghiên cứu để làm rõ hiệu quả của hệ các TLD đã lắp đặt cho cầu Bãi Cháy tại Việt Nam trong các trường hợp gồm: (1) Nghiên cứu hệ STLD đã lắp đặt; (2) thay đổi cách bố trí các TLD trong hệ STLD để đánh giá tính hợp lý trong cách bố trí lắp đặt hệ; (3) nghiên cứu trong trường hợp thay thế hệ STLD bằng hệ MTLD sử dụng các tham số đề xuất. Việc nghiên cứu này được thực hiện trong cả 2 trường hợp sử dụng tần số dao động của tháp cầu lấy từ kết quả phân tích bằng phần mềm và sử dụng tần số từ thí nghiệm rung lắc. Các kết luận này là cơ sở cho các kỹ sư Việt Nam ứng dụng thiết kế hệ TLD cho kết cấu dạng tháp.

KIẾN NGHỊ VỀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

1. Đề tài là tài liệu tham khảo tốt cho các kỹ sư khi thiết kế cầu dây văng với bài toán giảm dao động cho kết cấu tháp cầu.
2. Bài toán đang nghiên cứu là hệ kết cấu là 1 bậc tự do, các giảm chấn mắc song song đặt trên kết cấu là đa bậc tự do chịu tác động của hàm kích thích dạng điều hòa – là dạng mà phương trình dao động và các bài toán cơ bản có thể dễ dàng xác định được chính xác nghiệm. Hướng nghiên cứu tiếp theo đề xuất nghiên cứu khảo sát tương tác của:

- Hệ mô hình tương tác giữa kết cấu và MTLD chịu tác động của 1 hàm kích thích ngẫu nhiên.
- Hệ mô hình tương tác của kết cấu đa bậc tự do với hệ MTLD chịu tác động của kích thích ngẫu nhiên.
- Xây dựng phương trình gió trên cơ sở phương trình dao động của hệ tương tác kết cấu và MTLD.

3. Mô hình tính toán đề xuất cho hướng nghiên cứu là các thùng TLD đơn trong hệ MTLD đặt nối tiếp vào kết cấu.



Mô hình đề xuất cho hướng nghiên cứu tiếp theo

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU CỦA LUẬN ÁN

1. GS. TS. Nguyễn Viết Trung, ThS. Nguyễn Đức Thị Thu Định, *Phân tích hiệu quả của giảm chấn chất lỏng áp dụng tại cầu dây văng một mặt phẳng dây Bãi Cháy Việt Nam*, Tạp chí kết cấu công nghệ xây dựng, số 1 quí 4 – 2009 và số 2 quí 1 năm 2010, ISSN 1859.3194.
2. GS. TS. Nguyễn Viết Trung, ThS. Nguyễn Đức Thị Thu Định, *Giảm chấn chất lỏng và khả năng áp dụng tại Việt Nam*, tạp chí khoa học GTVT, Trường Đại học GTVT, số 32 tháng 11, 2010, ISSN 1859 – 2724.
3. ThS. Nguyễn Đức Thị Thu Định, chủ trì đề tài nghiên cứu khoa cấp Bộ mã số B2010-04-119 Bộ GDĐT, "Nghiên cứu tính toán thiết kế hệ giảm chấn chất lỏng (TLD) để giảm dao động cho tháp cầu dây văng một mặt phẳng dây ở Việt Nam, 2010 – 2011.
4. ThS. Nguyễn Đức Thị Thu Định, GS. TS. Nguyễn Viết Trung, " Tuned Liquid damper and Possibility application in Viet Nam", kỷ yếu Hội thảo quốc tế tổ chức tại Đại học BK Hà Nội, " Dynamics and Progresive collapes in Cable-stayed Bridge", tháng 2, 2011, ISBN:9786049110030.
5. TS. Nguyễn Hữu Hưng, ThS. Nguyễn Đức Thị Thu Định, " Xác định tham số thực tế của công trình cầu thông qua kết quả phản ứng động lực học, kỷ yếu hội thảo 40 năm Việt Nhật, 2013, ISBN: 9786048200534.
6. ThS. Nguyễn Đức Thị Thu Định, TS. Nguyễn Hữu Hưng, "Research and estimation of dynamic behavior for Cable stayed bridge in Viet Nam", kỷ yếu hội thảo quốc tế tổ chức tại Đại học BK Hà Nội " Vibration and control of structures under wind actions", tháng 2, 2014, ISBN:978-604-911-943-9.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. A. Kareem, W.J. Sun (1987), "Stochastic Response of Structures with Fluid-Containing Appendages", *Journal of Sound and Vibration*, 119 (3), pp. 389-408.
2. A.A. Fediw, N. Isyumov, B.J. Vickery (1995), "Performance of a tuned sloshing water damper", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (57), pp. 237-247.
3. Agarwal, Pankaj, Shrikhande, Manish (2008), "Earthquake resistance design of structures", *New Delhi, PHI Learning*.
4. Akyiliz, Haken, Ünal, N. Erdem (2006), "Sloshing in a three dimensional rectangular tank: Numerical simulation and experimental validation", *Ocean Engineering*, Vol. 33, pp.2135-2149.
5. Anil K. Chopra (2001), *Dynamics of structures theory and applications to earthquake engineering*, Second edition printed in USA.
6. B.F.Jr. Spencer, K. Sain Michael (1997), "Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback", *Special Issue of the IEEE Control Systems Magazine on Emerging Technology*, 17 (6), pp. 19-35.
7. C.C. Chang (1999), "Mass dampers and their optimal designs for building vibration control", Engineering Structures, Vol. 21, pp. 454-463.
8. C.C. Chang, C.T. Hsu (1998), "Control performance of Liquid Column Vibration Abserbers", *Engineering Structures*, 20 (7), pp. 580-586.
9. C.C. Chang, M. Gu (1999), "Suppression of vortex-excited vibration of tall buildings using tuned liquid dampers", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 83, pp. 225-237.
10. C.G.Koh, S.Mahatma, C.M.Wang (1995), "Reduction of structural vibrations by multiple-mode liquid dampers", *Journal of Engineering Structures*, 17 (2), pp. 122-128.
11. C.Z. Wang, B.C. Khoo (2005), "Finite element analysis of two-dimensional nonlinear sloshing problems in random excitation", *Ocean Engineering*, Vol. 32, pp.107-133.
12. Craig, R. Roy (1981), *Structural Dynamics: An introduction to computer methods*, New York, John Wiley & Sons.
13. D. Reed, J. Yu, H. Yeh, S. Gardarsson (1998), "Investigation of Tuned Liquid Dampers under Large Amplitude excitation", *Journal of Engineering Mechanics*, 124 (4), pp. 405-413.
14. D. Sakamoto, N. Oshima, T. Fukuda (2001), "Tuned sloshing damper using electro-rheological fluid", *Smart Materials and Structures*, 10 (5), pp. 963-969.
15. D.E. Olson, D.A. Reed (2001), "A nonlinear numerical model for slopped-bottom Tuned Liquid Dampers", *Earthquake engineering and structural Dynamics*, (30), pp. 731-743.

16. Dorothy Reed, Harry Yeh, Jinkyu Yu, Sigurdur Gardarsson (1998), "Tuned liquid dampers under large amplitude excitation", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (74-76), pp. 923-930.
17. Einar N Strommer (2005), *Theory of bridge aerodynamics*, department of structural Engineering Norwegian University.
18. Emil Simiu, Robert H. Scanlan (1996), *Wind effects on structures fundamentals and applications to design*, Third edition of A wiley – interscience Publication, printed in the USA.
19. F. Casciati, A.D. Stefano, E. Matta (2003), "Simulating a conical tuned liquid damper", *Simulation Modelling Practice and Theory*, (11), pp. 353-370.
20. F. Sakai, S. Takaeda, T. Tamaki (1989), "Tuned Liquid Column Damper – New type device for suppression of building vibrations", *Proc. Of International conference on High-rise Buildings*, Vol. 2, Nanjing, China.
21. F. Sakai, S. Takaeda, T. Tamaki (1991), "Damping device for tower-like structure", *US Patent*, (5,070,663).
22. F.T. Dodge (2000), "The new dynamic behaviour of liquids in moving containers", *Southwest Research Institute.*
23. Gilles OUDIN (2004), "Stabilisation of an existing structure using a liquid damper", *Multitech Vibration Control, Paris, France.*
24. GS.TS Nguyễn Viết Trung (2004), *Thiết kế cầu treo dây võng*, Nhà XB XD.
25. H.F. Bauer (1984), "Oscillations of immiscible liquids in a rectangular container: A new damper for excited structures", *Journal of Sound and Vibration*, 93 (1), pp. 117-133.
26. H.Gao, K.S.C Kwok, B.Samali (1999), "Characteristics of multiple tuned liquid column dampers in suppressing structural vibration", *Engineering Structures*, (21), pp. 316-331.
27. H.N. Abramson (Ed) (1966), *The dynamic behavior of liquids in moving containers*, NASA SP-106.
28. Harry G. Harris và Gajanan M. Sabnis (1999), Model and experimental techniques, Second edition printed in USA.
29. Hoàng Hà, Trần Quang Vinh (1999), Nghiên cứu dao động uốn của kết cấu nhịp cầu dây văng dưới tác dụng của đoàn tải trọng ôtô di động, Báo cáo đề tài NCKH cấp Bộ, Mã số B98-35-59, Hà Nội.
30. J.B. Frandsen (2005), "Numerical predictions of tuned liquid tank structural systems", *Journal of Fluids and Structures*, (20), pp. 309–329.
31. J.Y. Wang, Y.Q. Ni, J.M. Ko, B.F.Jr. Spencer (2005), "Magneto-rheological tuned liquid column dampers (MR-TLCDs) for vibration mitigation of tall buildings: modelling and analysis of open-loop control", *Computers and Structures*, (83), pp. 2023–2034.
32. J.Y.K. Lou (1996), Actively Tuned Liquid Damper, US Patent, (5, 560, 161).
33. Jin Kyu Yu (1997), *Nonlinear characteristics of tuned liquid dampers*, Doctor of

Philosophy, University of Washington.
34. Jin-Kyu Yu, Toshihiro Wakahara, Dorothy A.Reed (1999), "A non-linear numerical model of the tuned liquid damper", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*,(28), pp. 671-686.
35. K. Horikawa (1978), "Costal Engineering", *University of Tokyo Press*, pp. 5-118.
36. K. Yamamoto, M. Kawahara (1999), "Structural Oscillation Control using Tuned Liquid Damper", *Computers and Structures*, (71), pp. 435-446.
37. K.C. Biswal, S. K. Bhattacharya, P.K. Sinha (2003), "Free vibration analysis of liquid filled tank with baffles", *Journal of Sound and vibration*, 259 (1), pp. 177-192.
38. K.C. Biswal, S.K. Bhattacharya, P. K. Sinha (2003), "Dynamic characteristics of liquid filled rectangular tank with baffles", *The Institution of Engineers (India)*, Vol. 84, pp. 145-148.
39. K.Fujii, Y.Tamura, T. Sato, T. Wakahara (1990), "Wind-induced vibration of tower and practical applications of Tuned Sloshing Damper", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (33), pp. 263-272.
40. K.J. Bathe (1996), *Finite element procedures*, Prentice-Hall of India Private Limited,.
41. K.M. Shum, Y.L. Xu, W.H. Guo (2008), "Wind-induced vibration control of long span cable-stayed bridges using multiple pressurized tuned liquid column dampers", *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, (96), pp. 166-192.
42. K.Shankar, T.Balendra (2002), "Application of the energy flow method to vibration control of buildings with multiple tuned liquid dampers", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (90), pp. 1893-1906.
43. Kareem Ahsan (1990), "Reduction of Wind Induced Motion Utilizing a Tuned Sloshing Damper", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (36), pp. 725-737.
44. Kareem Ahsan, Kijewski Tracy (1999), "Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications", *Wind and Structures*, Vol. 2 (3), pp. 201-251.
45. Kazuya Yamamoto, Mutsuto Kawahara (1999), "Structural oscillation control using tuned liquid damper", *Computers and Structures*, (71), pp. 435-446.
46. Kim Young Moon, You Ki-Pyo, Cho Ji-Eun, Hong Dong-Pyo (2006), "The Vibration Performance Experiment of Tuned Liquid Damper and Tuned Liquid Column Damper", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 20 (6), pp. 795-805.
47. L.L.Koss, W.H.Melbourne (1995), "Chain dampers for control of wind-induced vibration of tower and mast structures", *Engineering Strutures*, Vol. 17 (9), pp. 622-625.
48. L.M. Sun, Y. Fujino, B.M. Pacheco, P. Chaiseri (1992), "Modeling of Tuned Liquid Damper (TLD)", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (41-44), pp. 1883-1894.
49. L.M. Sun, Y. Fujino, P. Chaiseri, B.M. Pacheco (1995), "Properties of tuned liquid dampers using a TMD analogy", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*,

Vol. 24 (7), pp. 967-976.

50. M. Marivani, M.S. Hamed (2009), "Numerical simulation of structure response outfitted with a tuned liquid damper", *Computer and structure*, Vol. 87, pp. 1154-1165.
51. M.Ito, Y.Fujino, T.Miyata, N. Narita (1991), *Cable-Stayed Bridges-Recent Developments and their Future*, ELSEVIER.
52. M.J. Hochrainer (2007), "Tuned liquid column damper for structural control", *Acta Mechanical*, Vol. 175, pp. 57–76 72.
53. M.J. Tait, A.A. El. Damatty, N. Isyumov, M.R. Siddique (2005), "Numerical flow models to simulate tuned liquid dampers (TLD) with slat screens", *Journal of Fluids and Structures*, (20), pp. 1007-1023.
54. M.J. Tait, N. Isyumov, A.A.El. Damatty (2007), "Effectiveness of a 2D TLD and Its Numerical Modeling", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 133 (2), pp. 251-263.
55. M.J.Tait (2008), "Modelling and preliminary design of a structure–TLD system", *Engineering Structures*, (30), pp. 2644-2655.
56. M.J.Tait, A.A.El. Damatty, N.Isyumov (2002), "The Dynamic properties of a tuned liquid damper using an equivalent amplitude dependent tuned mass damper", *Structural Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*, Montreal, Quebec, Canada.
57. M.Marivani, M.S. Hamed (2009), "Numerical simulation of structure response outfitted with a tuned liquid damper", *Computers and Structures*, (87), pp. 1154-1165.
58. N.C. Pal, S.K. Bhattacharyya, R.K. Sinha 2001, "Experimental investigation of slosh dynamics of liquid-filled containers", *Experimental Mechanics*, Vol. 41 (1), pp. 63-69.
59. N.K.A. Attari, F.R. Rofooe (2008), "On lateral response of structures containing a cylindrical liquid tank under the effect of fluid/structure resonances", *Journal of Sound and Vibration*, (318), pp. 1154–1179.
60. Nguyễn Doãn Phước (2009), *Lý thuyết điều khiển tuyến tính*, NXB khoa học và kỹ thuật.
61. Nguyễn Đông Anh (2009), *Nghiên cứu ứng dụng giảm chấn chấn lỏng cho kết cấu tháp*, Đề tài Nghiên cứu khoa học cấp Nhà nước.
62. Nguyễn Đông Anh, Lã Đức Việt (2007), *Giảm dao động bằng thiết bị tiêu tán năng lượng*, Nhà xuất bản khoa học tự nhiên và công nghệ.
63. Nguyễn Đông Anh, Nguyễn Như Hiếu (2012), *The Duffing Oscillator under combined periodic and random excitations*, Probabilistic engineering mechanics 30, pp. 27 – 36.
64. Nguyễn Hữu Hưng (11/2008), "Phân tích sự làm việc theo phương ngang của tháp cầu dây văng một mặt phẳng dây dưới tác dụng của hoạt tải", *Tạp chí khoa học Giao thông vận tải*.
65. Nguyễn Văn Khang (1998), Dao động kỹ thuật, Nhà xuất bản Khoa học Kỹ thuật, Hà

Nội.

66. P. Banerji, M. Murudi, A.H. Shah, N. Popplewell (2000), "Tuned liquid dampers for controlling earthquake response of structures", *Earthquake Engng Struct. Dyn*, (29), pp. 587-602
67. P.M. Chang, J.Y.K. Lou, L.D. Lutes (1998), "Model identification and control of a tuned liquid damper", *Engineering Structures*, Vol. 20 (3), pp. 155-163.
68. P.Warnitchai, T.Pinkaew (1998), "Modelling of liquid sloshing in rectangular tanks with flow–dampening devices", *Engineering Structures*, Vol. 20 (7), pp. 593-600.
69. Paz, Mario (2004), *Structural Dynamics: Theory and computation*, New Delhi, CBS Publishers & Distributers.
70. Pradipta Banerji, Mohan Murudi, Arvind H.Shah, Neil Popplewell (2000), "Tuned liquid dampers for controlling earthquake response of structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (29), pp. 587-602.
71. Qiao Jin, Xin Li, Ning Sun, Jing Zhou, Jiong Guan (2007), "Experimental and numerical study on tuned liquid dampers for controlling earthquake response of jacket offshore platform", *Marine Structures*, (20), pp. 238-254.
72. R.C. Battista, E.M.L. Carvalho, R.D.A. Souza (2008), "Hybrid fluid-dynamic control devices to attenuate slender structures oscillations", *Engineering Structures*, (30), pp. 3513-3522.
73. R.D. Watkins (1991), *Tests on a Liquid Column Vibration Absorber for tall structures*, Proc. Int. Conf. on Steel and Aluminium Structures, Singapore.
74. Ray W. Clough (2003), Dynamics of structure, third edition, printed in USA.
75. S. Gardarsson, H. Yeh, D. Reed (2001), "Behavior of Sloped-Bottom Tuned Liquid Dampers", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 127 (3), pp. 266-271.
76. S. Kaneko, M. Ishikawa (1999), "Modelling of Tuned Liquid Damper with submerged nets", *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 121 (3), pp. 334-342.
77. S. Kaneko, Y. Mizota (2000), "Dynamical Modeling of Deepwater-Type Cylindrical Tuned Liquid Damper with a Submerged Net", *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 122, pp 96-104.
78. S.J. Li, G.Q. Li, J. Tang, Q.S. Li (2002), "Shallow rectangular TLD for structural control implementation", *Applied Acoustics*, (63), pp. 1125–1135.
79. S.K. Lee, E.C. Park, K.W. Min, S.H. Lee, L. Chung, J.H. Park (2007), "Real-time hybrid shaking table testing method for the performance evaluation of a tuned liquid damper controlling seismic response of building structures", *Journal of Sound and Vibration*, (302), pp. 596–612.
80. S.K. Yalla, A. Kareem (2003), "Semiactive Tuned Liquid Column Dampers: Experimental Study", *Journal of structural engineering*, Vol. 129 (7), pp. 960-971.
81. S.K. Yalla, A. Kareem, J.C. Kantor (2001), "Semi-active tuned liquid column dampers for vibration control of structures", *Engineering Structures*, (23), pp. 1469-1479.
82. Shang Chun-yu, Zhao Jin-cheng (2008), "Periods and Energy Dissipations of a Novel

TLD Rectangular Tank with Angle-adjustable Baffles", *Journal of Shanghai Jiaotong University*, (Sci.), Vol. 13 (2), pp. 139-141.

83. SUN Limin (1991), *Semi-analytical modelling of tuned liquid damper (TLD) with emphasis on damping of liquid sloshing*, Doctor of Engineering degree, University of Tokyo.
84. T. Balendra, C.M. Wang, N. Yan (2001), "Control of wind-excited towers by active tuned liquid column damper", *Engineering Structures*, (23), pp. 1054-1067.
85. T. Igusa, K. Xu, 25 August 1994, "Vibration Control Using Multiple Tuned Mass Dampers", *Journal of Sound and Vibration*, volume 175, Issue 4, pp 491-503.
86. T. Ikeda (2003), "Nonlinear Parametric Vibrations of an Elastic Structure with a Rectangular Liquid Tank", *Nonlinear Dynamics*, (33), pp.43–70.
87. T. Ikeda, R.A. Ibrahim (2004), "Nonlinear random responses of a structure parametrically coupled with liquid sloshing in a cylindrical tank", *Journal of Sound and Vibration*, (284), pp. 75–102.
88. T. T. Soong, Dargush, F. Gary (1997), "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", *John Wiley & Sons, Ltd. (UK)*.
89. T. Ueda, R. Nakagaki, K. Koshida (1992), "Supression of wind induced vibration by dynamic dampers in tower-like structures", *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, (41-44), pp. 1907-1918.
90. T. Wakahara, T. Ohyama, K. Fujii (1992), "Suppression of wind-induced vibration of a tall building using Tuned Liquid Damper", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 43, Issues 1-3, pp. 1895-1906.
91. T.K. Datta, Seimic analysis of structure, Jonh Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, ISBN 978-0-470-82461-0, 2010
92. T.R. Chandruptala, A.D. Beleguru (2008), *Introduction to finite elements in engineering*, Delhi, Pearson Education.
93. Takashi Ikeda (2010), "Non–linear dynamic responses of elastic two-story structures with partially filled liquid tanks", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, (45), pp. 263-278.
94. Toshihiro Wakahara (1993), "Wind-induced response of TLD-structure coupled system considering nonlinearity of liquid motion", *Shimizu Technology Research Bulletin*, (12).
95. Toshihiro Wakahara, Harry Yeh (1999), "Spectral characteristics of wind-induced forces on a rectangular column structure in a higher frequency range", *Journal of Wind Engineering*, (80), pp. 65-73.
96. Toshihiro Wakahara, Harry Yeh (1999), "Spectral characteristics of wind–induced forces on a rectangular column structure in a higher frequency range", *Journal of Wind Engineering*, (80), pp. 65-74.
97. Toshihiro Wakahara, Jun Kanda, Yukio Tamura, Kiyoshi Uesu (1993), "Estimation of across-wind response of tall buildings", *International colloquium Goteborg about Structural Serviceability*, Switzerland.

98. Toshihiro Wakahara, Kazuki Hibi, Takumi Ohyama, Hirotoshi Kikuchi, Kenji Shimada, Yang Meng, Masahiro Matsui, *Large scale tuned liquid damper for a super tall building*, Institute of technology, Shimizu Corporation, Tokyo, Japan.
99. Toshihiro Wakahara, Takumi Ohyama, Kunio Fujii (1991), "Wind response analysis of TLD-structure system considering non-linearity of liquid motion", *Journal of Struct. Constr. Engng*, (426), pp. 79-88.
100. Toshihiro Wakahara, Yozo Fujino (1998), "A simple estimation of across-wind response of tall buildings with tuned liquid damper", *Journal of Wind Engineering*, (76), pp. 37-54.
101. Toshihiro Wakahara, Yozo Fujino, *A simple prediction of across-wind response of tall buildings with TMD or TLD*, Tokyo, Japan.
102. V.J. Modi, A. Akinturk (2002), "An efficient liquid sloshing damper for control of wind-induced instabilities", *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, (90), pp. 1907-1918.
103. V.J. Modi, and F. Welt (1988), "Damping of wind induced oscillations through liquid sloshing", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (30), pp. 85-94.
104. V.J. Modi, M.L. Seto (1997), "Suppression of flow-induced oscillations using sloshing liquid dampers: analysis and experiments", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* (67,68), pp. 611-625.
105. V.J. Modi, S.R. Munshi (1998), "An efficient Liquid Sloshing Damper for Vibration Control", *Journal of Fluids & Structures*, (12), pp.1055-1071.
106. Walter Podolny, Jr.,Ph.D and John B. Scalzi, Sc.D (1986), *Construction and Design of Cable-stayed Bridges (second Editor)*, John Wiley&Son.
107. X.L. Xu, K.C.S. Kwok, B. Samali (1992), "The effect of tuned mass dampers and liquid dampers on cross-wind response of tall/slender structures", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (40), pp. 33-54.
108. Y. Tamura, K. Fujii, T. Ohtsuki, T. Wakahara, R. Kohsaka (1995), "Effectiveness of tuned liquid dampers under wind excitation", *Engineering Structures*, Vol. 17 (9), pp. 609-621.
109. Y. Tamura, R. Kohsaka, O. Nakamura, K. Miyashita, V.J. Modi (1996), "Wind induced responses of an airport tower- efficiency of tuned liquid damper", *Journal of Wind engineering and industrial aerodynamics*, (65), pp. 121-131.
110. Y.Fujino, L.M.Sun (1993), "Vibration Control by Multiple Tuned Liquid Dampers (MTLDs)", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119 (12), pp. 3482-3500.
111. Y.H. Chen (2005), "Propeller-Controlled Active Tuned Liquid Column Damper", US Patent No. (6,857,231), B2.
112. Y.H. Chen, W.S. Hwang, L.T. Chiu, S.M. Sheu (1995), "Flexibility of TLD to High-rise buildings by simple experiment and comparison", *Computers and structures*, Vol. 57 (5), pp. 855-861.
113. Y.Q. Ni, Z.G. Ying, J.Y. Wang, J.M. Ko, B.F. Jr. Spencer (2004), "Stochastic

optimal control of wind-excited tall buildings using semi-active MR-TLCDs", *Probabilistic Engineering Mechanics*, (19), pp. 269–277.

114. Y.S. Choun, C.B. Yun (1999), "Sloshing analysis of rectangular tanks with a submerged block by using small-amplitude water wave theory", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (28), pp. 763–783.
115. Young-Moon Kim, Ki –Pyo You, Nag-Ho Ko, Sung-Won Yoon (2006), "Use of TLD and MTLD for control of wind-induced vibration of tall buildings", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 20 (9), pp. 1346-1354.
116. Yozo Fujino, Limin Sun, Benito M.Pacheco, Piyawat Chaiseri (2010), "Tuned liquid damper (TLD) for suppressing horizontal motion of structures", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 118 (10), pp. 2017-2030.
117. Yozo Fujino, Nam Hoang (2008), "Design formulas for damping of a stay cable with a damper", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 134 (2), pp. 269-278.
118. Yu J.K, T. Wakahara, D.A. Reed (1999), "A non-linear Numerical Model of the Tuned Liquid Damer", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*", (28), pp. 671-686.
119. Yukio Tamura, Ryuichi Kohsaka, Osamu Nakamura, Koh-ichi Miyashita, Vinod J.Modi (1996), "Wind-induced responses of an airport tower–efficiency of tuned liquid damper", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (65), pp. 121-131.