BỌ GIAO DỤC VA ĐAO TẠO	BỌ QUOC PHONG
HỌC VIỆN KỸ THUẬT	QUÂN SỰ
VŨ NGOC AN	H
ĐE TAI:	
NGHIÊN CỨU ỨNG XỨ C	CÚA KÊT CÂU
CÔNG TRÌNH NG <b>ÀM CH</b> ỊU TÁC I	DỤNG CỦA ĐỘNG ĐẤT
VỚI GIẢN ĐỒ GIA TỐC	NHÂN TẠO
LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ	<b>THUÂT</b>
-	
HÀ NỘI - NĂM 2	021

# LỜI CẢM ƠN

Lời đầu tiên, tác giả xin phép được bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đối với TS Cao Chu Quang và GS,TS Nguyễn Quốc Bảo, sự hướng dẫn tận tình của các thầy là nguồn động lực to lớn giúp tác giả hoàn thành luận án này.

Tác giả trân trọng cảm ơn Bộ môn Xây dựng Công trình Quốc phòng, Viện Kỹ thuật Công trình đặc biệt, Phòng Sau đại học, Hệ quản lý học viên sau đại học, Học viện Kỹ thuật Quân sự đã tạo điều kiện giúp đỡ trong thời gian nghiên cứu. Tác giả cũng xin gửi lời cảm ơn chân thành tới các thầy giáo thuộc Bộ môn Xây dựng Công trình Quốc phòng, Viện Kỹ thuật Công trình đặc biệt và các bạn đồng nghiệp cùng các nghiên cứu sinh đã luôn đồng hành, hỗ trợ, động viên tác giả trong quá trình công tác.

Cuối cùng tác giả muốn bày tỏ lòng biết ơn với người thân trong gia đình đã luôn cảm thông, động viên và chia sẻ những khó khăn với tác giả trong suốt quá trình thực hiện luận án.

Tác giả

Vũ Ngọc Anh

# LỜI CAM ĐOAN

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

Tác giả

Vũ Ngọc Anh

# MỤC LỤC

LỜI CẨM ƠNi
LỜI CAM ĐOANii
MỤC LỤCiii
DANH MỤC VIẾT TẮTvii
DANH MỤC KÝ HIỆUviii
DANH MỤC BẢNG BIỄUx
DANH MỤC HÌNH VĨxi
MỞ ĐẦU1
Chương 1. TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU
1.1 Một số khái niệm chung về động đất3
1.1.1. Khái niệm chung3
1.1.2. Các tiêu chí đánh giá độ mạnh của động đất4
1.1.3. Một số đặc trưng của dao động nền6
1.2 Tổng quan về phân tích kết cấu công trình ngầm chịu tác dụng của động đất theo sơ đồ bài toán phẳng
1.2.1. Phương pháp phân tích tĩnh áp đặt chuyển vị biên
1.2.2. Phương pháp phân tích tĩnh đặt tải trọng trực tiếp lên kết cấu 12
1.2.3. Phương pháp phân tích động lực học12
1.3 Tổng quan về phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo14
1.3.1. Phương pháp phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo bằng cách hiệu
chỉnh giản đồ gia tốc sẵn có theo điều kiện khớp phổ phản ứng 15
1.3.2. Phương pháp phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc18
1.4 Các vấn đề rút ra từ tổng quan20

Chương 2. XÂY DỤNG CHƯƠNG TRÌNH PHÁT SINH GIẢN	ĐỒ GIA
TỐC NHÂN TẠO BẰNG CÁCH HIỆU CHỈNH GIẢN ĐỒ G	IA TỐC
SĂN CÓ THEO ĐIỀU KIỆN KHỚP PHỔ PHẢN ỨNG	
2.1 Phát sinh giản đồ gia tốc nền nhân tạo theo điều kiện l	khớp phổ
phản ứng theo phương pháp của Hancock	
2.1.1. Các khái niệm	
2.1.2. Phép biến đổi Wavelet	24
2.1.3. Cơ sở lý thuyết phát sinh giản đồ gia tốc nền nhân tạo	theo điều
kiện khớp phổ phản ứng theo phương pháp của Hancock	
2.1.4. Các bước thực hiện theo thuật toán của Hancock, sơ đồ k	hối 34
2.2 Xây dựng chương trình PG01	
2.2.1. Sơ đồ khối chương trình PG01	
2.2.2. Giao diện và tính năng của chương trình PG01	
2.3 Sử dụng chương trình PG01 tạo giản đồ gia tốc nhân tạo	trên nền
đá gốc theo điều kiện khớp phổ phản ứng	
2.3.1. Số liệu phổ phản ứng đàn hồi theo TCVN 9386-2012	
2.3.2. Lựa chọn giản đồ gia tốc đầu vào	
2.3.3. Sử dụng chương trình PG01 phát sinh các giản đồ gia tốc	c nhân tạo
trên nền đá gốc phù hợp với điều kiện Hà Nội	41
2.4 Kết luận chương 2	50
Chương 3. XÂY DỰNG CHƯƠNG TRÌNH PHÁT SINH NGÃI	U <b>NHIÊN</b>
GIẢN ĐỒ GIA TỐC NHÂN TẠO DỰA TRÊN HỆ PHƯƠNG TR	ÌNH HỒI
QUY	51
3.1 Cơ sở lý thuyết phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc	: theo hê
phương trình hồi quy bằng phương pháp của Yamamoto	
3.1.1. Các đặc trưng cơ bản của gói Wavelet	52
3.1.2. Phương pháp và hệ phương trình của Yamamoto	55

3.2 Nội dung thuật toán của Yamamoto57	
3.2.1. Xác định các tham số đặc trưng của Wavelet từ hệ phương trình	
hồi quy của Yamamoto57	
3.2.2. Phát sinh ngẫu nhiên các hệ số Wavelet 59	
3.2.3. Tái cấu trúc giản đồ gia tốc bằng biến đổi ngược gói Wavelet 63	
3.3 Cải biên thuật toán của Yamamoto, xây dựng chương trình PG0263	
3.3.1. Cải biên thuật toán của Yamamoto63	
3.3.2. Giao diện của chương trình PG0266	
3.4 Sử dụng chương trình PG02 phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo	
trên nền đá gốc67	
3.4.1. Lựa chọn nguồn phát sinh động đất với địa điểm khảo sát 67	
3.4.2. Sử dụng chương trình PG02 phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo tại	
nền đá gốc với đới động đất sông Hồng- sông Chảy 69	
3.5 Kết luận chương 372	
Chương 4. KHẢO SÁT ỨNG XỬ CỦA KẾT CẦU CÔNG TRÌNH	
NGÀM CHỊU TÁC DỤNG CỦA ĐỘNG ĐẤT TẠI HÀ NỘI VỚI GIẢN	
ĐỒ GIA TỐC NHÂN TẠO73	
4.1 Xây dựng mô hình bài toán trên phần mềm Plaxis khảo sát kết cấu công trình ngầm tại khu vực Hà Nội dưới tác dụng của động đất 73	
4.1.1. Đối tượng khảo sát73	
<ul><li>4.1.1. Đối tượng khảo sát</li></ul>	
<ul> <li>4.1.1. Đối tượng khảo sát</li></ul>	
<ul> <li>4.1.1. Đối tượng khảo sát</li></ul>	
<ul> <li>4.1.1. Đối tượng khảo sát</li></ul>	

4.2 Tính toán nội lực xuất hiện trong vỏ hầm khi tính toán với các giản đồ gia tốc nền nhân tạo khác nhau phát sinh từ chương trình
PG01 và PG0287
4.2.1. Tính toán với giản đồ gia tốc phát sinh bằng chương trình PG01 87
4.2.2. Tính toán công trình ngầm với giản đồ gia tốc nhân tạo được phát
sinh bằng chương trình PG0289
4.2.3. So sánh nội lực phát sinh khi phân tích động lực học kết cấu công
trình ngầm với gia tốc nhân tạo phát sinh bằng PG01 và PG0292
4.3 Khảo sát ảnh hưởng của liên kết nửa cứng giữa các phân tố vỏ hầm đến nội lực xuất hiện trong vỏ hầm93
4.3.1. Đặt bài toán93
4.3.2. Kết quả khảo sát và nhận xét93
4.4 Phân tích hồi quy đánh giá các ảnh hưởng của giản đồ gia tốc tới
nội lực cực đại xuất hiện trong kết cấu95
4.4.1. Đặt bài toán95
4.4.2. Kết quả khảo sát và nhận xét96
4.5 Kết luận chương 498
KÊT LUẬN
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ 101
TÀI LIỆU THAM KHẢO102

# DANH MỤC VIẾT TẮT

Bậc tự do
Biến đổi Wavelet liên tục (Continue Wavelet Transform)
Biến đổi Wavelet rời rạc (Discrete Wavelet Transform)
Mô hình nền Hardening Soil
Hệ phương trình hồi quy
Biến đổi Fourier nhanh (Fast Fourier Transform)
Hyperstatic Reaction Method
Hiệp hội hầm và không gian ngầm quốc tế (International Tunnelling and Underground Space Association)
Impose Seismic Ground Deformation
Biến đổi ngược gói Wavelet Packet (Inverse Wavelet Packet Transform)
Liên kết nửa cứng (semi rigid joint)
Mô hình nền Mohr-Coulomb
National Geospatial-Intelligence Agency
Gia tốc nền cực đại (Peak Ground Acceleration)
Vận tốc cực đại của nền (Peak Ground Velocity)
Chuyển vị cực đại của nền (Peak Ground Displacement)
Gia tốc ngang cực đại (Peak Horizon Acceleration)
Phần tử hữu hạn
Sai phân hữu hạn
Biến đổi Wavelet Packet (Wavelet Packet Transform)

# DANH MỤC KÝ HIỆU

a <sub>gR</sub>	Giá trị gia tốc đỉnh tham chiếu
a <sub>RMS</sub>	Gia tốc hiệu dụng
a(t)	Gia tốc theo thời gian
Es	Mô-đun đàn hồi của thép
E <sub>c</sub>	Mô-đun đàn hồi của bê tông
$E_{\mathrm{f}}$	Trọng tâm tính theo tần số của gói Wavelet
$E_t$	Trọng tâm tính theo thời gian của gói Wavelet
g	Gia tốc trọng trường
IA	Cường độ Arias
I <sub>MSK-64</sub>	Cường độ động đất tại điểm khảo sát theo thang MSK-64
I <sub>MM</sub>	Cường độ động đất tại điểm khảo sát theo thang MM
1 <sub>t</sub>	Chiều cao làm việc của liên kết giữa các phân tố vỏ hầm
$M_{\rm w}$	Độ lớn của động đất theo thang mô men (chấn cấp)
$M_s$	Độ lớn của động đất theo sóng bề mặt
n <sub>CK</sub>	Tổng số lượng hệ một BTD khảo sát để xây dựng đường phổ phản ứng đàn hồi
R <sub>inter</sub>	Hệ số tiếp xúc giữa kết cấu với môi trường
$R_{rup}$	Khoảng cách từ điểm khảo sát đến vết nứt gãy (tâm cự)
$R_{hyp}$	Độ sâu chấn tiêu
R	Khoảng cách từ điểm khảo sát đến chấn tiêu (tiêu cự)
S <sub>a</sub>	Phổ phản ứng đàn hồi ứng với gia tốc a(t)
$S_{a\_TK}$	Phổ phản ứng đàn hồi mục tiêu
$\mathbf{S}_{\mathbf{f}}$	Độ lệch chuẩn tính theo tần số của gói Wavelet

$\mathbf{S}_{t}$	Độ lệch chuẩn tính theo thời gian của gói Wavelet
S <sub>ij</sub>	Biên độ phản ứng đơn vị của hệ một BTD thứ i do thành phần wavelet thứ j gây ra
t <sub>5-95</sub>	Thời gian duy trì dao động mạnh
t <sub>D</sub>	Thời gian duy trì của động đất
V <sub>max</sub>	Vận tốc dao động cực đại của môi trường
Vs	Vận tốc lan truyền sóng cắt trong môi trường
V <sub>se</sub>	Vận tốc lan truyền hiệu quả của sóng cắt trong môi trường
V <sub>s,30</sub>	Vận tốc lan truyền sóng cắt trung bình của lớp đất có bề dày 30m tính từ mặt đất
$V_p$	Vận tốc lan truyền sóng dọc trong môi trường
$ ho_{t,f}$	Hệ số tương quan tần số và thời gian trong gói Wavelet
$\gamma_b$	Trọng lượng riêng của bê tông
γı	Hệ số tầm quan trọng của công trình
$\delta_a(t)$	Lượng hiệu chỉnh wavelet
$\Delta S_a$	Khoảng lệch phổ phản ứng

# DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1 Liên hệ giữa thang cường độ MSK-64, MM và gia tốc đỉnh	5
Bảng 2.1 Các bước thực hiện theo phương pháp của Hancock [47]	. 34
Bảng 2.2 Các tham số phổ phản ứng đàn hồi theo TCVN 9386-2012 [22]	. 38
Bảng 2.3 Bảng phân vùng gia tốc nền tham chiếu theo địa danh hành chính cho đ bàn Thành phố Hà Nội theo TCVN 9386-2012 [22]	<i>tia</i> . 38
Bảng 2.4 Bảng thông số các đới động đất khảo sát với vị trí trung tâm quận Ba Đình Hà Nội (tọa độ 21,030N; 105,824Đ) [19]	. 40
Bảng 2.5Giản đồ gia tốc đầu vào lựa chọn [19]	. 41
Bảng 2.6 Bảng kết quả xác định sai số độ lệch phổ phản ứng	. 43
Bảng 2.7 Bảng kết quả xác định sai số độ lệch phổ phản ứng	. 45
Bảng 2.8. Bảng tổng hợp các tham số của các giản đồ gia tốc nhân tạo	. 49
Bảng 3.1 Bảng hệ số của hệ phương trình hồi quy của Yamamoto[88]	. 58
Bảng 3.2 Các bước thực hiện thuật toán chương trình PG02	. 64
Bảng 3.3 Bảng thông số các đới động đất khảo sát với vị trí trung tâm quận Ba Đình Hà Nội (tọa độ 21,030N; 105,824Đ) [19]	. 67
Bảng 3.4 Giá trị gia tốc nền cực đại tính toán với vị trí trung tâm quận Ba Đình . Nội (tọa độ 21,030N, 105,824Đ)	Hà . 68
Bảng 3.5 Các tham số đặc trưng của giản đồ gia tốc nhân tạo phát sinh bằng chương trình PG02	. 70
Bảng 4.1 Bảng thống kê các lớp đất	. 77
Bảng 4.2 Các tham số của kết cấu vỏ hầm khai báo trong Plaxis 2D	. 78
Bảng 4.3 Bảng các tham số của các lớp đất đá theo mô hình HS	. 82
Bảng 4.4 Bảng tham số tỷ số cản của các lớp đất	. 84
Bảng 4.5 Bảng tổng hợp kết quả nội lực cực đại xuất hiện trong kết cấu	. 88
Bảng 4.6 Kết quả khảo sát nội lực cực đại xuất hiện trong vỏ hầm	. 90
Bảng 4.7 Kết quả các đặc trưng phân phối của nội lực tính toán	. 91
Bảng 4.8 So sánh kết quả nội lực tính toán theo các phương pháp	. 92
Bảng 4.9. So sánh kết quả nội lực tính toán	. 93
Bảng 4.10 Bảng số liệu đầu vào phân tích hồi quy	. 95

# DANH MỤC HÌNH VĨ

•
Hình 1.1. Biểu diễn thời gian duy trì dao động mạnh t5-957
Hình 1.2. Biến dạng của miền tự do (a) và áp đặt biến dạng lên cơ hệ kết cấu - môi trường (b)
Hình 1.3. Sơ đồ xác định biến dạng của kết cấu vỏ hầm
Hình 1.4. Mô hình bài toán công trình ngầm chịu động đất khi phân tích tĩnh bằng phương pháp số 11
Hình 1.5. Mô hình theo phương pháp phân tích động lực học13
Hình 2.1. Minh họa việc xây dựng phổ phản ứng đàn hồi gia tốc
Hình 2.2. Hình minh họa phổ phản ứng mục tiêu $(S_{a_TK})$ , phổ phản ứng gia tốc ban đầu $(S_a)$ và độ lệch phổ $(\Delta S_a)$
Hình 2.3 - Sự dịch chuyển và giãn nở của hàm Wavelet Morlet
Hình 2.4. Biểu diễn của biến đổi Wavelet liên tục (CWT)
Hình 2.5. Phổ phản ứng đàn hồi ứng với giản đồ gia tốc trước khi nhân với hệ số hiệu chỉnh
Hình 2.6. Phổ phản ứng đàn hồi ứng với giản đồ gia tốc sau khi nhân với hệ số hiệu chỉnh
Hình 2.7. Hệ một BTD chịu lực kích thích tạo bởi phần bù gia tốc
Hình 2.8. Sơ đồ khối chương trình PG01
Hình 2.9. Giao diện chương trình PG01
Hình 2.10. Định dạng phổ phản ứng đàn hồi theo TCVN 9386-2012 [22]
Hình 2.11. Băng gia tốc của động đất Điện Biên ngày 19/02/2001
Hình 2.12. Kết quả khớp phổ phản ứng với gia tốc nền đầu vào Điện Biên (giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh_01A)
Hình 2.13. Giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh_01A42
Hình 2.14. Năng lượng Arias gia tốc ban đầu và gia tốc nhân tạo BaDinh_01A 42
Hình 2.15. Phân bố năng lượng Arias với gia tốc nền đầu vào và giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh_01A
Hình 2.16. Giản đồ gia tốc nhân tạo thu được khi hiệu chỉnh bằng chương trình SeismoMatch (bản dùng thử)
Hình 2.17. Băng gia tốc 321 động đất Campano Lucano (Italy)
Hình 2.18. Kết quả khớp phổ phản ứng với gia tốc nền đầu vào Campano Lucano (Giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh_02A)
Hình 2.19.Giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh_02A

Hình 2.20. Năng lượng Arias với gia tốc nền đầu vào Giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh_02A	. 47
Hình 2.21. Phân bố năng lượng Arias với gia tốc nền đầu vào Giản đồ gia tốc nh tạo BaDinh_02A	ân . 47
Hình 2.22. Băng gia tốc ca064 trận động đất Lang Cang	. 47
Hình 2.23. Kết quả khớp phổ phản ứng với gia tốc nền đầu vào Lang Cang (Giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh_03A)	ı . 48
Hình 2.24. Giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh_03A	. 48
Hình 2.25. Năng lượng Arias với gia tốc nền đầu vào giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh_03A	. 48
Hình 2.26. Phân bố năng lượng Arias với gia tốc nền đầu vào giản đồ gia tốc như tạo BaDinh_03A	ân . 49
Hình 2.27. Giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh_01A, BaDinh_02A, BaDinh_03A	. 49
Hình 3.1. Bài toán phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc nền	. 51
Hình 3.2. Xác định liên hệ giữa giản đồ gia tốc và các đặc trưng của gói Waveler (Wavelet Packet- WP)	t . 52
Hình 3.3. Minh họa về mối liên hệ giữa biểu diễn trên miền thời gian, miền tần sơ và các hệ số gói Wavelet trên mặt phẳng thời gian- tần số [88]	ố . 59
Hình 3.4. Cơ sở để phát sinh các hệ số gói Wavelet từ các giá trị trọng tâm tính theo và độ lệch [88]	. 60
Hình 3.5. Sơ đồ thuật toán chương trình PG02	. 65
Hình 3.6. Giao diện chương trình PG02	. 66
Hình 3.7. Sơ đồ nguồn chấn đến điểm khảo sát	. 67
Hình 3.8. Giản đồ gia tốc nhân tạo bd01-01a	. 69
Hình 3.9. Giản đồ gia tốc nhân tạo bd01-02a	. 69
Hình 3.10. Giản đồ gia tốc nhân tạo bd01-03a	. 70
Hình 3.11. Giản đồ gia tốc nhân tạo bd01-04a	. 70
Hình 3.12. Giản đồ gia tốc nhân tạo bd01-05a	. 70
Hình 3.13. Phổ phản ứng đàn hồi của các giản đồ gia tốc nhân tạo	. 71
Hình 4.1. Mặt bằng tuyến đường sắt đô thị số 03 Nhổn-Ga Hà Nội	. 75
Hình 4.2. Mặt cắt ngang đường hầm các lớp địa chất tại vị trí khảo sát	. 77
Hình 4.3. Sơ đồ kết cấu vỏ hầm dạng lắp ghép tính toán	. 78
Hình 4.4. Mô hình liên kết theo Jassen [53]	. 80
Hình 4.5. Cấu tạo chi tiết liên kết giữa hai phân tố vỏ hầm (theo tài liệu thiết kế [23])	. 80

Hình 4.6. Khai báo liên kết nửa cứng trong phần mềm Plaxis2D	81
Hình 4.7. Khai báo giản đồ gia tốc tính toán phân tích động lực học công trình ngầm chịu động đất với phần mềm Plaxis2D	85
Hình 4.8 Mô hình bài toán được xây dựng trên phần mềm Plaxis 2D	. 86
Hình 4.9 Sơ đồ lưới phần tử của bài toán (giai đoạn đầu)	86
Hình 4.10. Giản đồ gia tốc tính toán BaDinh_01A	87
Hình 4.11. Giản đồ gia tốc tính toán BaDinh_02A	87
Hình 4.12. Giản đồ gia tốc tính toán BaDinh_03A	87
Hình 4.13. Gia tốc theo phương ngang tại đỉnh hầm ứng với 3 trường hợp	89
Hình 4.14. Vận tốc theo phương ngang tại đỉnh hầm ứng với 3 trường hợp	89
Hình 4.15.Biểu đồ hàm mật độ của mô men cực đại	91
Hình 4.16.Biểu đồ hàm mật độ của lực cắt cực đại	91
Hình 4.17. Sơ đồ tính của 2 trường hợp có xét và không xét đến liên kết nửa cứng trong kết cấu vỏ hầm	g 93
Hình 4.18. Kết quả xét ảnh hưởng của các tham số của giản đồ gia tốc nhân tạo mô men cực đại xuất hiện trong kết cấu	đến 97
Hình 4.19. Kết quả xét ảnh hưởng của các tham số của giản đồ gia tốc nhân tạo lực cắt cực đại xuất hiện trong kết cấu	đến 97

# MỞ ĐẦU

Công trình ngầm đã và đang được xây dựng trong nhiều lĩnh vực như: giao thông, thủy lợi, quốc phòng,... Việc tính toán, thiết kế công trình ngầm chịu các dạng tải trọng khác nhau, đặc biệt là tác dụng của động đất có ý nghĩa quan trọng trong lựa chọn giải pháp thiết kế kết cấu vỏ hầm nhằm đảm bảo sự an toàn của con người và phương tiện trong đường hầm.

Phân tích động lực học kết cấu công trình ngầm chịu động đất cần số liệu đầu vào là giản đồ gia tốc phù hợp với điều kiện địa chấn tại khu vực đặt công trình. Các khu vực trên cả nước chưa ghi nhận các trận động đất lớn nên số liệu giản đồ gia tốc tính toán còn hạn chế, do đó cần thiết phải sử dụng các giản đồ gia tốc nhân tạo. Các phương pháp tạo giản đồ gia tốc nền nhân tạo được áp dụng rộng rãi trên thế giới có thể chia thành hai hướng chính: các phương pháp hiệu chỉnh trực tiếp các bản ghi gia tốc nền có sẵn theo điều kiện khớp phổ phản ứng và phương pháp mô phỏng ngẫu nhiên giản đồ gia tốc dựa trên kết quả phân tích hồi quy các dữ liệu địa chấn.

Như vậy, cần nghiên cứu làm rõ cơ sở lý thuyết, xây dựng các công cụ phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo hỗ trợ cho việc thực hành tính toán công trình ngầm chịu tác dụng của động đất, phân tích ảnh hưởng của các giản đồ gia tốc này tới ứng xử của kết cấu công trình ngầm. Từ mục đích này, nghiên cứu sinh lựa chọn vấn đề cần nghiên cứu trong luận án là "Nghiên cứu ứng xử của kết cấu công trình ngầm chịu tác dụng của động đất với giản đồ gia tốc nhân tạo".

#### \* Mục đích, nhiệm vụ nghiên cứu của luận án

- Phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo theo điều kiện khớp phổ phản ứng bằng cách hiệu chỉnh trực tiếp các giản đồ gia tốc có sẵn làm số liệu tải trọng đầu vào phục vụ cho quá trình tính toán, thiết kế công trình ngầm chịu động đất tại thành phố Hà Nội. - Phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc nhân tạo dựa trên các kết quả của phân tích hồi quy của các tác giả đã công bố. Các giản đồ này là nguồn số liệu tải trọng đầu vào phục vụ cho các bài toán nghiên cứu, khảo sát công trình ngầm chịu động đất khu vực thành phố Hà Nội khi kể đến tính ngẫu nhiên của tải trọng.

 Sử dụng chương trình tính toán kết cấu thương phẩm để phân tích động lực học công trình ngầm chịu tác dụng của động đất với các giản đồ gia tốc nhân tạo.

# \* Đối tượng, phạm vi nghiên cứu của luận án

Đối tượng nghiên cứu: kết cấu công trình ngầm chịu tác dụng của động đất với giản đồ gia tốc nhân tạo.

Phạm vi nghiên cứu: nghiên cứu bài toán động lực học của công trình ngầm trên sơ đồ bài toán biến dạng phẳng.

#### \* Phương pháp nghiên cứu của luận án

Phương pháp nghiên cứu sử dụng trong luận án là nghiên cứu lý thuyết.

## \* Nội dung và bố cục của luận án

Mở đầu: Trình bày tính cấp thiết và bố cục của luận án.

Chương 1: Tổng quan về vấn đề nghiên cứu.

Chương 2: Xây dựng chương trình phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo bằng cách hiệu chỉnh giản đồ gia tốc sẵn có theo điều kiện khớp phổ phản ứng.

Chương 3: Xây dựng chương trình phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc nhân tạo dựa trên hệ phương trình hồi quy.

Chương 4: Khảo sát ứng xử của kết cấu công trình ngầm chịu tác dụng của động đất tại Hà Nội với giản đồ gia tốc nhân tạo.

Kết luận chung: Trình bày các kết quả chính và những đóng góp của luận án.

Phụ lục: Chương trình, kết quả tính.

#### Chương 1. TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỂ NGHIÊN CỨU

Với mục tiêu đã xác định trong phần mở đầu, nội dung tổng quan tập trung trình bày một số vấn đề: khái niệm về động đất, các phương pháp tính toán công trình ngầm chịu tác dụng của động đất và các phương pháp phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo.

#### 1.1 Một số khái niệm chung về động đất

Các vấn đề chung về động đất đã được nhiều tác giả trong và ngoài nước trình bày chi tiết. Trong phạm vi luận án, tác giả chỉ trích lược một số nội dung cơ bản có liên quan đến vấn đề nghiên cứu.

#### 1.1.1. Khái niệm chung

Động đất là sự rung chuyển bề mặt do sự giải phóng năng lượng bất ngờ ở lớp vỏ Trái đất và phát sinh ra sóng địa chấn [45]. Điểm sóng địa chấn được bắt đầu được gọi là chấn tiêu [11],[19],[20]. Hình chiếu của chấn tiêu lên mặt đất được gọi là chấn tâm. Khoảng cách từ chấn tâm đến chấn tiêu gọi là độ sâu chấn tiêu (R<sub>hyp</sub>). Khoảng cách từ chấn tâm và chấn tiêu đến điểm khảo sát tương ứng là tâm cự (R<sub>rup</sub>) và tiêu cự (R). Động đất tác dụng lên công trình thông qua sóng địa chấn lan truyền trong đất đá, sóng địa chấn gồm sóng khối và sóng bề mặt.

Sóng khối bao gồm sóng dọc và sóng ngang. Khi sóng dọc (còn được gọi là sóng sơ cấp hay sóng P) lan truyền, các hạt vật chất chuyển dịch theo phương trùng với phương truyền sóng. Môi trường có sóng đó lan truyền chịu các ứng suất nén và kéo kèm theo thay đổi thể tích. Đối với sóng ngang (còn được gọi là sóng thứ cấp hay sóng S), các hạt môi trường chuyển dịch vuông góc với phương truyền sóng. Sóng ngang tạo ra sự thay đổi hình dạng môi trường, nhưng giữ nguyên thể tích.

Sóng bề mặt bao gồm hai loại cơ bản: các sóng Rayleigh (dao động của vật chất theo phương thẳng đứng) và các sóng Love (dao động của vật chất theo phương ngang).

#### 1.1.2. Các tiêu chí đánh giá độ mạnh của động đất

Sức mạnh của động đất là một đại lượng quan trọng và có thể được định lượng theo nhiều cách khác nhau, tuy nhiên, có thể khái quát qua hai cách tiếp cận cơ bản là đánh giá thông qua thang cường độ và thang độ lớn. Vấn đề này đã được Kramer trình bày một cách hệ thống trong tài liệu [55].

#### 1.1.2.1. Thang độ lớn trận động đất

Các thang độ lớn thường được thể hiện bằng chữ số Ả Rập (1,2,3...) đặc trưng cho quy mô của một trận động đất bằng cách đo gián tiếp năng lượng được giải phóng. Thang độ lớn động đất cho biết thông tin về độ lớn tổng thể hoặc quy mô của trận động đất. Các thang độ lớn kể trên bao gồm hai nhóm: nhóm dựa trên các thông số về biên độ của bản ghi gia tốc (thang độ lớn địa phương -  $M_L$ ; độ lớn sóng khối -  $m_{b;}$  độ lớn sóng bề mặt -  $M_s$ ) và nhóm dựa vào năng lượng tổng thể của trận động đất (thang độ lớn mô men -  $M_w$ ).

Trong các thang kể trên, thang độ lớn mô men đưa ra ước lượng đáng tin cậy nhất về quy mô của trận động đất, kết quả thu được giúp so sánh kích thước của các trận động đất khác nhau dễ dàng hơn nên đang được sử dụng ngày càng phổ biến [55]. Thang độ lớn mô men được phát triển năm 1979 bởi Tom Hanks và Kanamori Hiroo [49] để kế tiếp thang độ lớn địa phương (thang Richter) nhằm so sánh năng lượng được phát ra bởi động đất. Độ lớn mô men là số không thứ nguyên được tính theo công thức:

$$M_{w} = \frac{2}{3}\log(M_{0}) - 6.1$$
(1.1)

trong đó:  $M_0$  là mô men địa chấn (N.m).

#### 1.1.2.2. Thang cường độ địa chấn

Trong khi thang độ lớn tập trung vào quy mô, sức mạnh của trận động đất tại nguồn phát sinh, thang cường độ địa chấn lại là cách đánh giá tác động của động đất đến một địa điểm nhất định, được định lượng thông qua sự phá hoại các dạng công trình và tác động đến con người tại địa điểm tiếp nhận động đất. Các thang cường độ hiện được sử dụng phổ biến như: thang đo Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK-64), thang đo Mercalli sửa đổi (MM)...

Thang cường độ Mercalli sửa đổi (MM), được đề xuất bởi nhà địa chấn Mercalli vào đầu thế kỷ 20 trên cơ sở sửa đổi thang đo Rossi Forel (1883). Thang Mercalli sửa đổi đánh giá độ mạnh của động đất dựa hoàn toàn vào hậu quả của động đất tác động đến con người, đồ vật, công trình xây dựng... thang đo này được sử dụng phổ biến tại các nước Châu Âu, Bắc Mỹ.

Thang MSK-64 với 12 cấp (đánh số bằng ký tự La Mã: I, II,..,XII) được đề xuất bởi ba nhà khoa học Medvedev, Sponhauer và Karnic (1964) dựa vào việc đánh giá biên độ dao động tương đối của con lắc chuẩn mô tả chuyển động địa chấn. Thang đo này dựa trên các kinh nghiệm có sẵn vào đầu thập niên 1960 từ việc áp dụng thang Mercalli sửa đổi (MM) và phiên bản năm 1953 của thang Medvedev và còn gọi là thang GEOFIAN. Với các sửa đổi nhỏ vào giữa thập niên 1970 và đầu thập niên 1980, thang MSK đã được áp dụng rộng rãi.

Tiêu chuẩn TCVN 9386-2012 [22] sử dụng đồng thời hai thang cường độ MSK-64 và Mercalli sửa đổi (MM). Liên hệ giữa hai thang cường độ này với gia tốc đỉnh được thể hiện trong bảng 1.1 dưới đây.

Thang MSK-64		Thang MM	
Cường độ động đất	PGA (g)	Cường độ động đất	PGA (g)
(I <sub>MSK-64</sub> )		(I <sub>MM</sub> )	

Bảng 1.1 Liên hệ giữa thang cường độ MSK-64, MM và gia tốc đỉnh

Thang MSK-64		Thang MM	
Cường độ động đất	PGA (g)	Cường độ động đất	PGA (g)
(I <sub>MSK-64</sub> )		(I <sub>MM</sub> )	
V	0,012 - 0,03	V	0,03 - 0,04
VI	0,03 - 0,06	VI	0,06 - 0,07
VII	0,06 - 0,12	VII	0,10 - 0,15
VIII	0,12 -0,24	VIII	0,25 - 0,30
IX	0,24 - 0,48	IX	0,50 - 0,55
Х	> 0,48	Х	> 0,60

# 1.1.3. Một số đặc trưng của dao động nền

Theo Kramer [55], dao động nền thường được chia thành hai nhóm cơ bản: các tham số đặc trưng về độ lớn và các tham số đặc trưng về sự biến đổi theo thời gian, tần số.

## 1.1.3.1. Các tham số đặc trưng về độ lớn cực đại của dao động nền

Giá trị gia tốc nền cực đại (PGA) là giá trị tuyệt đối lớn nhất của gia tốc dao động của nền. Vận tốc nền cực đại (PGV) là giá trị lớn nhất của trị tuyệt đối của vận tốc dao động của nền, có thể thu được bằng cách tích phân gia tốc nền. Chuyển dịch nền cực đại (PGD) là giá trị tuyệt đối lớn nhất của chuyển vị nền, thu được bằng cách tích phân vận tốc nền.

#### 1.1.3.2. Cường độ Arias (năng lượng Arias)

Cường độ Arias là khái niệm được Arias (1970) đề xuất trong tài liệu [30]. Được định nghĩa là tổng năng lượng trên một đơn vị trọng lượng lưu trữ trong các hệ một bậc tự do không cản khi trận động đất kết thúc. Cường độ Arias (ký hiệu là IA) được tính theo công thức:

$$IA(t_0) = \frac{2\pi}{g} \int_0^{t_0} [a(t)]^2 dt \quad (m/s)$$
(1.2)

trong đó: a(t) là gia tốc nền (m/s<sup>2</sup>);

 $t_0$  là tổng thời gian duy trì của dao động (s);

g là gia tốc trọng trường  $(m/s^2)$ ;

# 1.1.3.3. Hàm phân bố năng lượng Arias (hay hàm Husid)

Hàm phân bố năng lượng Arias hay còn được gọi hàm Husid [52] là đại lượng không thứ nguyên đặc trưng cho biến thiên tích lũy năng lượng của dao động và được tính theo công thức:

$$h(t) = \frac{\int_{0}^{t} a_{x}^{2}(t)dt}{\int_{0}^{t_{0}} a_{x}^{2}(t)dt} = \frac{IA(t)}{IA(t_{0})}$$
(1.3)

#### 1.1.3.4. Thời gian duy trì dao động mạnh

Thời gian duy trì dao động mạnh  $t_{5-95}$  là thời gian duy trì năng lượng trong khoảng từ 5% đến 95% [55]. Trên hình 1.1.a là biểu diễn giản đồ gia tốc, hình 1.1.b là biểu đồ năng lượng Arias tương ứng của gia tốc, hình 1.1.c là biểu đồ năng lượng Arias.



*Hình 1.1. Biểu diễn thời gian duy trì dao động mạnh*  $t_{5-95}$ Khoảng thời gian  $t_{5-95}$  được xác định theo công thức (1.4) với  $t_5$  và  $t_{95}$ 

lần lượt là thời điểm năng lượng Arias tích lũy đạt 5% và 95%.

 $t_{5-95} = t_{95} - t_5 \tag{1.4}$ 

# 1.1.3.5. Gia tốc hiệu dụng

Gia tốc nền hiệu dụng  $a_{RMS}$  (root mean square of acceleration) [55] là đại lượng được tính toán theo công thức (1.5):

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_D} \int_0^{t_D} a^2(t) dt}$$
 (1.5)

với  $t_D$  là thời gian duy trì tác dụng hiệu quả của gia tốc nền, trong nhiều trường hợp, có thể sử dụng  $t_{5.95}$  để tính toán giá trị gia tốc nền hiệu dụng. Khi đó công thức được viết lại:

$$a_{\text{RMS5-95}} = \sqrt{\frac{1}{t_{5-95}} \int_{t_5}^{t_{95}} a^2(t) dt}$$
(1.6)

# 1.2 Tổng quan về phân tích kết cấu công trình ngầm chịu tác dụng của động đất theo sơ đồ bài toán phẳng

Đường hầm thường có kích thước chiều dài dọc theo trục hầm lớn hơn nhiều lần kích thước các chiều còn lại và tiết diện ngang ít biến đổi nên có thể đưa về sơ đồ bài toán biến dạng phẳng. Căn cứ vào tính chất tác dụng của động đất có thể phân chia các phương pháp tính toán công trình chịu động đất về các nhóm cơ bản: nhóm phương pháp phân tích tĩnh áp đặt chuyển vị biên (ISGD), nhóm phương pháp phân tích tĩnh đặt tải trọng trực tiếp lên kết cấu (HRM) và nhóm phương pháp phân tích động lực học (phân tích theo lịch sử thời gian).

#### 1.2.1. Phương pháp phân tích tĩnh áp đặt chuyển vị biên

Xét cơ hệ kết cấu – môi trường chịu tác dụng của động đất (hình 1.2), cơ hệ này sẽ phát sinh biến dạng trượt, giá trị cực đại được ký hiệu là  $\gamma_{max}$ . Theo Wang [85], biến dạng này được cho là không phụ thuộc vào kết cấu nên được gọi là biến dạng của miền tự do (free field) và có thể được tính toán theo các công thức giải tích [85] hoặc thông qua lời giải của phương pháp số [15], [50]. Sau khi xác định được biến dạng cực đại, chuyển vị cưỡng bức được áp đặt lên cơ hệ kết cấu – môi trường để xác định nội lực xuất hiện trong kết cấu.



Hình 1.2. Biến dạng của miền tự do (a) và áp đặt biến dạng lên cơ hệ kết cấu - môi trường (b)

Bài toán có thể được khảo sát bằng phương pháp giải tích (Wang [85], Penzien và Wu [64]) hoặc lời phương pháp số ([9], [15], [24], [35]).

#### 1.2.1.1. Lời giải sử dụng các biến đổi giải tích

Lời giải bằng giải tích được xây dựng trên cơ sở giả thiết môi trường đất đá xung quanh công trình là đàn hồi, đồng nhất và đẳng hướng. Biến dạng trượt cực đại của miền tự do khi chịu tác dụng của động đất được ký hiệu là  $\gamma_{max}$  (hình 1.2.a). Dựa trên lời giải cho bài toán tấm phẳng có lỗ khoét chịu biến dạng trượt các tác giả Wang (1993) [85], Penzien và Wu (1998) [64], [65] đã đưa ra lời giải theo các bước cơ bản:

- Bước 1, xác định biến dạng của nền đất tự do tạo ra bởi sóng cắt truyền vuông góc với mặt đất từ nền đá cứng theo công thức (1.7):

$$\gamma_{\max} = \frac{V_{\max}}{V_{se}},\tag{1.7}$$

trong đó:

 $\gamma_{max}$  là biến dạng lớn nhất của miền tự do;  $v_{max}$  là vận tốc cực đại theo phương ngang tại mặt đất (m/s);  $V_{se}$  là vận tốc truyền hiệu quả của sóng cắt trong môi trường  $V_{se}=V_s$  với đá cứng,  $V_{se}=0,6-0,9V_s$  với đất (với  $V_s$  là vận tốc truyền sóng cắt trong môi trường đất đá).

- Bước 2, xác định giá trị của biến dạng  $\Delta D$  của kết cấu vỏ hầm từ biến dạng lớn nhất của miền tự do  $\gamma_{max}$  (hình 1.3).



## Hình 1.3. Sơ đồ xác định biến dạng của kết cấu vỏ hầm

- Bước 3, tính toán giá trị nội lực mô men, lực cắt, lực dọc cực đại  $M_{max}$ ,  $Q_{max}$ ,  $N_{max}$  xuất hiện trong kết cấu thông qua biến dạng  $\Delta D$ .

Như vậy, có thể thấy lời giải giải tích để tính toán công trình ngầm chịu tác dụng của động đất theo mô hình tĩnh dựa trên biến dạng của miền tự do được thực hiện bị giới hạn bởi các giả thiết về môi trường, hình dạng mặt cắt ngang công trình.

## 1.2.1.2. Lời giải bằng các phương pháp số

Lời giải của phương pháp số, trong đó phổ biến là phương pháp PTHH thường được sử dụng với bài toán khi môi trường đất đá có nhiều lớp khác nhau hoặc với hình dạng kết cấu bất kỳ. Tác dụng của động đất được đưa vào bài toán thông qua chuyển vị cưỡng bức theo phương ngang tại biên thẳng đứng của mô hình tính (hình 1.4). Các tác giả cũng đã sử dụng các lý thuyết khác nhau để xác định chuyển vị cưỡng bức tại biên khi giả thiết biên này không phải có dạng tuyến tính. Với phương pháp này, nhiều tác giả đã sử dụng các chương trình phân tích xây dựng trên cơ sở các phương pháp số như Plaxis2D (PTHH), Phase 2D (SPHH)... Tác giả Lê Bảo Quốc [15] đã xây dựng chương trình tính toán giá trị chuyển vị cưỡng bức trên biên sử dụng mô hình bài toán dao động của cột đất. Giải bài toán bằng phương pháp PTHH, sử dụng chương trình Plaxis2D, áp đặt chuyển vị cưỡng bức đã có lên biên nghiên cứu để xác định nội lực xuất hiện trong kết cấu công trình ngầm.



Hình 1.4. Mô hình bài toán công trình ngầm chịu động đất khi phân tích tĩnh bằng phương pháp số

Phương pháp áp đặt chuyển vị biên (ISGD) cho thấy hiệu quả do các bước tính toán đơn giản, thời gian tính toán nhanh chóng nên phù hợp với các thiết kế ở giai đoạn cơ sở. Tuy nhiên, do động đất là một dạng tải trọng biến đổi nhanh, trong khi phương pháp tính toán này chỉ kể tới gia tốc đỉnh (PGA) nên chưa kể tới ứng xử của kết cấu theo thời gian.

### 1.2.2. Phương pháp phân tích tĩnh đặt tải trọng trực tiếp lên kết cấu

Phương pháp HRM (Hyperstatic Reaction Method) là phương pháp tính toán dựa trên quan điểm mô hình hóa kết cấu công trình ngầm tách ra khỏi môi trường [1],[47]. Kết cấu được tách thành các phần tử dạng thanh, môi trường đất đá được thay thế bằng các liên kết đàn hồi (theo mô hình của Winkler), tải trọng được xác định bao gồm áp lực đất đá, áp lực nước và áp lực do động đất đặt trực tiếp lên kết cấu vỏ hầm.

Phương pháp HRM đã được một số tác giả như Duddeck và Erdmann (1985); Leca và Clough (1992); Oreste 2007 đề xuất và sử dụng để tính toán công trình ngầm chịu tác dụng của các loại tải trọng khác nhau. Các tác giả Đỗ Ngọc Anh [29], Gospodarikov và Nguyễn Chí Thanh [47] đã sử dụng phương pháp HRM để tính toán đường hầm của tuyến đường sắt đô thị số 03 tại Hà Nội chịu tác dụng của động đất, trong đó tác giả Đỗ Ngọc Anh [29] đã có những cải biên phù hợp để mô tả ứng xử của vỏ hầm lắp ghép. Mặc dù phương pháp HRM cần giả thiết môi trường là đồng nhất nên không xét đầy đủ ảnh hưởng của cấu tạo địa chất đến ứng xử của kết cấu nhưng ưu điểm của phương pháp này là thời gian tính toán nhanh, do đó phù hợp hơn với những bài toán cần tính toán trên mô hình không gian.

#### 1.2.3. Phương pháp phân tích động lực học

Khi phân tích động lực học công trình ngầm chịu động đất, tác dụng của trận động đất được thể hiện bằng lực quán tính tác dụng lên công trình ngầm và đất đá xung quanh công trình. Lời giải được nhiều tác giả lựa chọn là các lời giải số, trong đó phương pháp PTHH và phương pháp SPHH được sử dụng rộng rãi. Hashash cùng các cộng sự [50] đã giới thiệu tổng quan kết quả các nghiên cứu chính trong tính toán động lực học công trình ngầm chịu tác dụng của động đất bằng phương pháp số. Trong nghiên cứu cũng đề cập tới việc tính toán công trình ngầm chịu động đất với giản đồ gia tốc nền nhân tạo được phát sinh theo điều kiện khớp phổ phản ứng của St.John và Zarah [78]. Công trình cũng đã giới thiệu các công bố kết quả tính toán động lực học công trình ngầm chịu động đất với các phương pháp PTHH, SPHH với các chương trình FLAC<sup>3D</sup>, SASSI, ANSYS, ABAQUS, Plaxis... Trong các tính toán này, công trình ngầm được mô hình hóa cùng làm việc với một phần môi trường đất đá, gia tốc nền tính toán tạo ra dao động cưỡng bức cho cơ hệ được thiết lập trên nền đất đá cứng (bedrock), mô hình tính thể hiện trên hình 1.5.



#### Hình 1.5. Mô hình theo phương pháp phân tích động lực học

Các tác giả trong nước có một số nghiên cứu cụ thể như: công trình của tác giả Nguyễn Tương Lai [6] nghiên cứu tương tác động lực học phi tuyến của kết cấu và nền biến dạng có xét tính phi tuyến của môi trường dưới tác dụng của tải trọng điều hòa; tác giả Võ Thanh Lương [7] nghiên cứu kết cấu thanh chịu tác dụng động đất có kể đến tính dẻo của vật liệu... Trong lĩnh vực tính toán công trình ngầm chịu động đất nhóm nghiên cứu của tác giả Nguyễn Quang Phích đã công bố hiện trạng nghiên cứu thiết kế công trình ngầm có xét đến động đất [12]. Tác giả Mai Đức Minh [9] và tác giả Lê Bảo Quốc [15] đã sử dụng chương trình thương phẩm Plaxis 2D để tính toán các dạng công trình

ngầm trong điều kiện địa chất tại Thành phố Hồ Chí Minh. Tác giả Đỗ Ngọc Anh [29] đã sử dụng công cụ phương pháp SPHH tính toán công trình ngầm chịu tác dụng của động đất với lời giải tĩnh và lời giải động. zaVề hướng nghiên cứu thực nghiệm, tác giả Trần Thị Thu Hằng [4] đã nghiên cứu ứng xử động lực học của công trình ngầm dưới tác dụng của động đất bằng thực nghiệm trên mô hình vật lý thu nhỏ với các kích thích động đất mô phỏng tạo ra trên bàn rung trong phòng thí nghiệm. Đề xuất các khuyến nghị về sự cần thiết về tính toán kháng chấn cho các công trình ngầm trong điều kiện Việt Nam.

Qua nội dung tổng quan trên có thể thấy các nghiên cứu trong nước đã đạt được những kết quả mới, ứng dụng trong tính toán thiết kế, thi công các công trình ngầm và từng bước hoàn thiện phương pháp tính toán với điều kiện thực tế của Việt Nam. Tuy nhiên việc nghiên cứu tính toán công trình ngầm chịu tác động động đất trong điều kiện các đô thị tại Việt Nam vẫn còn nhiều vấn đề cấp thiết cần tiếp tục nghiên cứu, trong đó, việc bổ sung nguồn dữ liệu về hàm thời gian của tải trọng chính là các giản đồ gia tốc nhân tạo là một nội dung quan trọng.

## 1.3 Tổng quan về phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo

Qua các nội dung trình bày trong mục 1.2.3. có thể thấy, khi phân tích động lực học kết cấu công trình ngầm chịu động đất theo giản đồ gia tốc đặt tại nền đá cứng cần phải có các số liệu gia tốc của trận động đất (giản đồ gia tốc theo thời gian). Tuy nhiên, trong thực tế tính toán, gia tốc nền tại các khu vực thiết kế khó có được dữ liệu đầy đủ. Do vậy cần tạo ra giản đồ gia tốc nền phù hợp với điều kiện địa chấn của khu vực thiết kế và yêu cầu kháng chấn của công trình [17]. Các giải pháp để tạo ra giản đồ gia tốc nền phù hợp có thể được chia thành 2 nhóm:

-Phương pháp phát sinh giản đồ gia tốc dựa bằng cách hiệu chỉnh trực tiếp các giản đồ gia tốc sẵn có theo điều kiện ràng buộc về phổ phản ứng theo các Tiêu chuẩn thiết kế kháng chấn (điều kiện khớp phổ phản ứng).

-Phương pháp phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc như là các quá trình ngẫu nhiên "không dừng" dựa vào các công cụ toán học (như phép biến đổi Fourier hoặc biến đổi Wavelet) trên cơ sở quy luật rút ra từ kết quả phân tích hồi quy bộ số liệu với số liệu lớn các bản ghi gia tốc thu được từ các trận động đất đã diễn ra.

# 1.3.1. Phương pháp phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo bằng cách hiệu chỉnh giản đồ gia tốc sẵn có theo điều kiện khớp phổ phản ứng

Các tiêu chuẩn kháng chấn hiện hành đều cung cấp đầy đủ dữ liệu về phổ phản ứng đàn hồi yêu cầu, do đó phương pháp hiệu chỉnh trực tiếp các giản đồ gia tốc sẵn có theo các điều kiện khớp phổ phản ứng là nhóm các phương pháp được thực hiện một cách thuận lợi và tường minh. Để thực hiện được phương pháp này cần có các giản đồ gia tốc sẵn có (bản ghi từ các trạm đo đặt tại khu vực có điều kiện địa chấn tương đương với khu vực khảo sát hoặc giản đồ gia tốc được mô phỏng). Từ số liệu giản đồ gia tốc nền đã có, điều chỉnh bằng các cách khác nhau để giản đồ gia tốc thu được sau khi hiệu chỉnh có phổ phản ứng đàn hồi gần với phổ phản ứng đàn hồi yêu cầu. Đây được xem là ý tưởng cơ bản của phương pháp phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo bằng cách hiệu chỉnh các giản đồ gia tốc có sẵn theo điều kiện "khớp phổ phản ứng".

Khái niệm phổ phản ứng đàn hồi (phổ phản ứng) ở đây là biểu đồ các giá trị đỉnh của một đại lượng phản ứng như một hàm của chu kỳ dao động tự do T<sub>n</sub>. Khái niệm được giới thiệu đầu tiên vào năm 1932 bởi M. A. Biot, sau đó được Housner [51] phát triển và sử dụng như một phương tiện hữu hiệu để đánh giá ảnh hưởng của dao động nền lên kết cấu công trình. Mỗi phổ phản ứng đàn hồi được xây dựng với một hệ số độ cản ξ nhất định.

Phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo theo điều kiện khớp phổ phản ứng phản ứng có thể thực hiện theo hai hướng: hiệu chỉnh trên miền tần số và hiệu chỉnh trên miền thời gian.

## 1.3.1.1. Phương pháp điều chỉnh trực tiếp giản đồ gia tốc trên miền tần số

Đây là cách phổ biến để tạo giả gia tốc nền trong miền tần số thông qua việc hiệu chỉnh trực tiếp phổ biên độ Fourier và đã được các tác giả như Fahjan và Ozdemir giới thiệu [44]. Ý tưởng của phương pháp xuất phát từ biến đổi Fourier giản đồ gia tốc ban đầu. Sau đó, tính toán tỷ số giữa phổ phản ứng mục tiêu và phổ phản ứng thực, trong đó góc pha Fourier của chuỗi thời gian thực tham chiếu được giữ nguyên, do đó phương pháp này còn được gọi tên là phương pháp tỷ lệ giản đồ gia tốc.

Phương pháp tỷ lệ giản đồ gia tốc thực để tạo giản đồ gia tốc nhân tạo được xây dựng trên cơ sở chỉ khác giá trị về biên độ tương ứng với cùng tần số, nghĩa là biên độ của chuỗi Fourier của hàm thời gian thực được điều chỉnh trong khi pha của chuỗi Fourier được giữ nguyên [44]. Cách tạo hàm thời gian mới này trên cơ sở khớp hàm phổ phản ứng trong miền tần số sử dụng hàm thời gian thực để xây dựng hàm thời gian mới phù hợp nhất với phổ phản ứng mục tiêu. Hàm thời gian thực được lọc trong miền tần số bởi tỷ số phổ phản ứng với phổ phản ứng mục tiêu. Quá trình thực hiện được lặp lại cho đến khi thu được hàm phổ phản ứng phù hợp nhất với phổ mục tiêu [44].

Tại Việt Nam, phương pháp này đã được tác giả Nghiêm Mạnh Hiến [5] vận dụng để phát các gia tốc nền phù hợp với Tiêu chuẩn TCVN 9386-2012 [22] từ một số bản ghi thực của trận động đất Điện Biên, Lander 1992...

# 1.3.1.2. Phương pháp điều chỉnh trực tiếp giản đồ gia tốc trên miền thời gian

Phương pháp hiệu chỉnh trên miền thời gian dựa trên các tiếp cận thêm vào các phần bù bằng tín hiệu Wavelet. Mỗi tín hiệu Wavelet là một hàm toán học với thời gian duy trì hữu hạn, có giá trị trung bình bằng "0", biên độ của sóng Wavelet thường bắt đầu từ "0", tăng lên rồi giảm về "0". Việc thêm vào sóng rời rạc có chiều dài hữu hạn vào các bản ghi gia tốc có sẵn không làm thay đổi đặc tính không dừng của chuỗi thời gian ban đầu.

Phương pháp hiệu chỉnh trên miền thời gian lần đầu được giới thiệu bởi Lilhanand và Tseng (1987) [57], (1988) [58]. Lilhanand đề xuất thuật toán sử dụng hàm Wavelet dự trữ xung để hiệu chỉnh giản đồ gia tốc ban đầu. Giả thiết cơ sở của phương pháp này là thời gian đạt đỉnh của phản ứng không thay đổi khi bổ sung thêm phần Wavelet hiệu chỉnh. Trên cơ sở thuật toán này, GeoMotions, LLC đã xây dựng phần mềmm RspMatchEDT và RspMatch2005 [61].

Hancock (2006) [48] đã tiếp nối nghiên cứu của Lilhanand, sử dụng hàm Wavelet cơ sở "Cô-sin cải biên" làm tăng tốc độ hội tụ khi thực hành. Phương pháp của Hancock cũng là một cơ sở để xây dựng nên chương trình SeismoMatch [75]. Các tác giả Hoàng Hải [3], Hoàng Mạnh [8] đã sử dụng chương trình này để tạo giản đồ gia tốc nhân tạo.

Các chương trình như SeismoMatch, RspMatch... tích hợp phố phản ứng theo một số tiêu chuẩn kháng chấn như EuroCode 8, AS 1170... không có tùy chọn với TCVN 9386-2012. Với mong muốn làm chủ quá trình hiệu chỉnh giản đồ gia tốc theo điều kiện khớp phổ phản ứng, luận án sẽ tập trung tìm hiểu nội dung phương pháp của Hancock và xây dựng chương trình trên nền ngôn ngữ Matlab (chương trình PG01) phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo có phổ phản ứng "xấp xỉ" với phổ phản ứng theo TCVN 9386-201.

## 1.3.2. Phương pháp phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc

Nguyên lý chung của phương pháp này là tạo ra ngẫu nhiên các giản đồ gia tốc phổ phản ứng mục tiêu hoặc dựa vào các các hệ phương trình hồi quy. Hệ phương trình hồi quy là kết quả phân tích hồi quy số liệu giản đồ gia tốc nền để xây dựng mối liên hệ toán học giữa các thông số của trận động đất (thông số về chấn cấp, độ sâu chấn tiêu, đường truyền từ chấn tiêu đến điểm khảo sát, đặc điểm vùng khảo sát) với các đặc trưng toán học của giản đồ bản ghi gia tốc.

Thrainsson và Kiremidjian (2002) [82] sử dụng phân tích hồi quy kết hợp với biến đổi ngược Fourier để phát các quá trình ngẫu nhiên không dừng với thành phần biến đổi ngẫu nhiên là độ lệch pha của dao động ứng với các tần số khác nhau. Để đưa ra mô hình dự báo phù hợp, nhóm tác giả đã phân tích hồi quy dữ liệu của các trận động đất đã xảy ra tại khu vực California. Tham số lựa chọn cho phân tích hồi quy bao gồm: chấn cấp M dự kiến là đại lượng đặc trưng của nguồn phát, tâm cự R<sub>rup</sub> (khoảng cách đến chấn tâm) đặc trưng cho đường truyền, loại nền là thông số đặc trưng cho địa điểm khảo sát. Thông qua phân tích hồi quy, nhóm tác giả đã xây dựng được hàm phân bố độ lệch pha cho ba nhóm dao động thành phần (biến đổi Fourier của gia tốc nền): nhóm dao động biên độ nhỏ, nhóm dao động biên độ trung bình và nhóm dao động biên độ lớn. Trên cơ sở này, các tác giả đã phát ngẫu nhiên giản đồ gia tốc nhân tạo trên cơ sở phép biến đổi ngược Fourier với độ lệch pha được phát ngẫu nhiên.

Rezaeian [69] đã phát triển phương pháp phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc nhân tạo dựa trên việc hiệu chỉnh tín hiệu đầu vào là quá trình ngẫu nhiên "ồn trắng" ("white-noise process") để tạo ra quá trình ngẫu nhiên không dừng. Hàm hiệu chỉnh thu được từ việc phân tích hồi quy dữ liệu giản đồ gia tốc thu được từ các trận động đất đã có. Phân tích hồi quy này được tiến hành với biến mục tiêu là các đại lượng đặc trưng của giản đồ gia tốc nền bao gồm: cường độ Arias (IA), thời gian duy trì dao động mạnh ( $t_{5.95}$ ). Dữ liệu phân tích hồi quy của các trận động đất bao gồm: chấn cấp M là đại lượng đặc trưng của nguồn phát, tâm cự R<sub>rup</sub> (khoảng cách đến chấn tâm) đặc trưng cho đường truyền, vận tốc truyền sóng trung bình tính với 30m V<sub>s,30</sub> là thông số đặc trưng cho địa điểm khảo sát.

Yamamoto (2011) [89] đã đề xuất việc sử dụng biến đổi gói Wavelet trong việc mô phỏng ngẫu nhiên dao động của nền đất. Biến đổi gói Wavelet là một công cụ phân tích tín hiệu được phát triển từ biến đổi Fourier, đem lại hiệu quả đặc biệt với các tín hiệu là không dừng. Yamamoto đã tiến hành phân tích hồi quy dữ liệu giản đồ gia tốc thu được từ các trận động đất đã có. Phân tích hồi quy này được tiến hành với biến mục tiêu là 13 tham số đặc trưng của gói Wavelet (thu được từ biến đổi gói Wavelet các giản đồ gia tốc nền). Dữ liệu phân tích hồi quy của các trận động đất bao gồm: chấn cấp M, tâm cự và độ sâu chấn tiêu R<sub>rup</sub>, R<sub>hyp</sub>, vận tốc truyền sóng trung bình V<sub>s,30</sub> là thông số đặc trưng cho địa điểm khảo sát.

Vấn đề phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc nhân tạo cũng đã được một số tác giả trong nước quan tâm nghiên cứu. Tác giả Đinh Văn Thuật [18] đã sử dụng biến đổi Fourier để phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc xuất phát từ phổ phản ứng đàn hồi mục tiêu theo TCVN 375-2006. Phương pháp này giả thiết gia tốc là tổng của một chuỗi Fourier có phổ góc pha là đại lượng ngẫu nhiên phân bố chuẩn. Giản đồ gia tốc mới thu được bằng cách hiệu chỉnh phổ biên độ theo điều kiện khớp phổ phản ứng mục tiêu. Phương pháp này hoàn toán dựa theo phổ phản ứng mục tiêu, không xét tới các đặc trưng của nguồn phát sinh động đất. Trong các nghiên cứu kể trên, mô hình đề xuất bởi Yamamoto được dựa trên công cụ là biến đổi ngược gói Wavelet. Phép biến đổi toán học này là công cụ hiện đại, phù hợp để xử lý các quá trình ngẫu nhiên không dừng như động đất. Tuy nhiên, thuật toán của Yamamoto chưa quan tâm đến điều kiện ràng buộc về phổ phản ứng mục tiêu. Do đó, luận án xác định vấn đề nghiên cứu là tập trung nghiên cứu, cải biên thuật toán của Yamamoto, xây dựng chương trình phát sinh ngẫu nhiên các giản đồ gia tốc nhân tạo có phổ phản ứng đáp ứng theo TCVN 9386-2012.

#### 1.4 Các vấn đề rút ra từ tổng quan

Trong nội dung của chương 1 tác giả đã trình bày kết quả tìm hiểu về động đất, tính toán công trình ngầm chịu động đất và phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo theo các quan điểm khác nhau.

Về tính toán công trình ngầm chịu động đất. Qua tìm hiểu các công trình đã công bố trong và ngoài nước, tác giả nhận thấy, với mô hình bài toán phẳng có thể phân chia các mô hình tính toán công trình chịu động đất về ba nhóm, bao gồm: 1) các mô hình phân tích tĩnh dựa trên biến dạng của miền tự do; 2) các mô hình phân tích tĩnh dựa đặt trực tiếp tải trọng do động đất lên kết cấu; 3) các mô hình phân tích động lực học với tác dụng của động đất được thể hiện qua giản đồ gia tốc đặt tại nền đất đá gốc (phân tích theo lịch sử thời gian). Trong đó mô hình phân tích động lực học phản ánh đầy đủ ứng xử của kết cấu, phương pháp này có thể được một cách thuận lợi bằng các chương trình phân tích kết cấu. Với phương pháp phân tích này, giản đồ gia tốc tính toán là số liệu đầu vào quan trọng ảnh hưởng đến kết quả tính toán.

Về các phương pháp phát sinh giản đồ gia tốc nền nhân tạo làm số liệu đầu vào trong phân tích động lực học công trình ngầm chịu tác dụng của động đất. Việc sử dụng giản đồ gia tốc nhân tạo được quy định cụ thể trong mục 3.2.3 của Tiêu chuẩn TCVN 9386-2012 [22]. Trong các chương tiếp theo, tác giả sẽ tập trung vào các nội dung:

- Tập trung tìm hiểu phương pháp, thuật toán của Hancock [48]. Xây dựng chương trình phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo thông qua hiệu chỉnh giản đồ gia tốc đã có theo điều kiện "khớp phổ phản ứng".

 Nghiên cứu phương pháp của Yamamoto [89], cải biên thuật toán và xây dựng chương trình phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc nhân tạo trên cơ sở sử dụng hệ phương trình hồi quy.

Nội dung thử nghiệm số của luận án. Xây dựng dữ liệu giản đồ gia tốc nhân tạo trên nền đá gốc phù hợp với điều kiện khu vực Hà Nội đáp ứng theo yêu cầu TCVN 9386-2012. Sử dụng nguồn dữ liệu giản đồ gia tốc đã có để phân tích động lực học công trình ngầm, đối tượng nghiên cứu là đoạn ngầm thuộc tuyến đường sắt đô thị số 3, đoạn thử nghiệm Nhổn - Ga Hà Nội. Thông qua phân tích các kết quả số để đưa ra các kiến nghị trong khuôn khổ phạm vi nghiên cứu của luận án.

# Chương 2. XÂY DỰNG CHƯƠNG TRÌNH PHÁT SINH GIẢN ĐỔ GIA TỐC NHÂN TẠO BẰNG CÁCH HIỆU CHỈNH GIẢN ĐỒ GIA TỐC SẵN CÓ THEO ĐIỀU KIỆN KHỚP PHỔ PHẢN ỨNG

Trong tiêu chuẩn TCVN 9386-2012 [22], chuyển động của đất nền được biểu diễn bằng phổ phản ứng gia tốc đàn hồi, được gọi tắt là "phổ phản ứng đàn hồi". Phổ phản ứng đàn hồi của một gia tốc là phản ứng lớn nhất của các hệ một bậc tự do (cùng hệ số cản) có tần số khác nhau khi chịu dao động cưỡng bức tao ra bởi gia tốc đầu vào.

Như đã trình bày trong chương 1, giản đồ gia tốc nhân tạo đưa vào tính toán kết cấu công trình ngầm cần có phổ phản ứng phù hợp với các yêu cầu về phố phản ứng thiết kế, đây còn được gọi là điều kiện "khớp phổ phản ứng" (hay "khớp theo phổ phản ứng"). Phương pháp hiệu quả để phát sinh giản đồ gia tốc là hiệu chỉnh trực tiếp các giản đồ gia tốc sẵn có bằng cách bổ sung các phần bù gia tốc là tổng của các hàm Wavelet (hay còn được gọi là "lượng hiệu chỉnh Wavelet").

# 2.1 Phát sinh giản đồ gia tốc nền nhân tạo theo điều kiện khớp phổ phản ứng theo phương pháp của Hancock

#### 2.1.1. Các khái niệm

#### 2.1.1.1. Phổ phản ứng đàn hồi

Để xây dựng phổ phản ứng cho gia tốc nền a(t) với hệ số cản  $\xi$  trong một khoảng chu kỳ (hay tần số) trước tiên cần rời rạc khoảng chu kỳ cần thể hiện (các chu kỳ lần lượt từ T<sub>1</sub> đến T<sub>nCK</sub>). Sau đó giải lần lượt các hệ một bậc tự do có chu kỳ T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>,...,T<sub>nCK</sub> và hệ số cản  $\xi$  với cùng lực quán tính tạo ra do gia tốc a(t). Tập hợp quỹ tích các giá trị biên độ gia tốc đỉnh của các hệ một bậc tự do (ký hiệu lần lượt là S<sub>a1</sub>, S<sub>a2</sub>..., S<sub>an</sub>) tạo thành phổ phản ứng đàn hồi (hình 2.1).


Hình 2.1. Minh họa việc xây dựng phổ phản ứng đàn hồi gia tốc 2.1.1.2. Độ lệch phổ phản ứng

Độ lệch phổ phản ứng (hình 2.2) là chênh lệch giá trị tung độ trên biểu đồ phổ phản ứng của phổ phản ứng của gia tốc a(t) (S<sub>a</sub>) và phổ phản ứng mục tiêu (S<sub>a\_Tk</sub> - phổ phản ứng thiết kế quy định trong các tiêu chuẩn). Độ lệch phổ tại chu kỳ T(i) biểu diễn bằng công thức:



Hình 2.2. Hình minh họa phổ phản ứng mục tiêu  $(S_{a_{TK}})$ , phổ phản ứng gia tốc ban đầu  $(S_a)$  và độ lệch phổ  $(\Delta S_a)$ 

### 2.1.2. Phép biến đổi Wavelet

Phép biến đối Wavelet là một công cụ toán học được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật [3] như xử lý tín hiệu, nhận dạng và xử lý ảnh, phân tích tế bào..... Ý tưởng cơ bản của biến đổi Wavelet là sử dụng các hàm toán học chia tín hiệu thành các thành phần tần số khác nhau, nên có thể nói, biến đổi Wavelet là một cải biên của biến đổi Fourier. Trong việc phân tích các tín hiệu không dừng với thời gian duy trì ngắn (như dao động nền trong động đất, dao động nền khi chịu tác dụng của sóng xung kích...) phân tích Wavelet cho thấy những ưu điểm rõ rệt.

Phép biến đổi Wavelet bao gồm ba loại cơ bản: Biến đổi Wavelet liên tục (Continuous Wavelet Transfer - CWT), biến đổi Wavelet rời rạc (Discrete Wavelet Transfer - DWT) và biến đổi gói Wavelet (Wavelet Packet Transfer -WPT). Bên cạnh đó, mỗi phép biến đổi kể trên đều có phép biến đổi ngược tương ứng, trong luận án sử dụng phép biến đổi ngược gói Wavelet (Inverse Wavelet Packet Transfer - iWPT).

### 2.1.2.1. Biến đổi Fourier và biến đổi Wavelet liên tục

Biến đổi Fourier, được đặt tên theo nhà toán học người Pháp Joseph Fourier, là một biến đổi tích phân dùng để khai triển một quá trình theo thời gian theo các hàm điều hòa. Biến đổi Fourier của quá trình x(t), ký hiệu là X(f) và được xác định theo công thức:

$$X(f) = F(x(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$$
(2.2)

trong đó:

x(t) là quá trình theo thời gian cần biến đổi; X(f) là biến đổi Fourier của x(t);  $e^{-j \omega t}$  là hàm tích phân cơ sở; Phép biến đối Fourier đã được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực khoa học kỹ thuật nói chung, nhưng bên cạnh những ưu điểm, phép biến đổi Fourier tồn tại một số hạn chế:

- Thứ nhất là phép biến đối này loại bỏ thông tin thời gian của tín hiệu chỉ giữ lại những thông tin về tần số của tín hiệu. Chính điều này làm cho chúng ta không thể xác định được những điểm không liên tục, những thay đổi có tính quy luật của tín hiệu x(t) khi ta biết phổ X(f) của tín hiệu này.

- Thứ hai là phép biến đổi Fourier lấy tích phân trên miền vô hạn thời gian nên không thể xác định được điểm bắt đầu và kết thúc, do đó, phép biến đổi này chỉ phù hợp với các quá trình dừng sóng biển, gió... mà không thật phù hợp với các quá trình không dừng như động đất, sóng nổ...

Để khắc phục hạn chế của biến đổi Fourier đối với các quá trình không dừng các nhà khoa học đã đề xuất sử dụng phép biến đổi Wavelet [60]. Bản chất của phép biến đổi Wavelet thuận là thực hiện lấy tích phân của tích tín hiệu đã biết với hàm phân tích cơ sở, được gọi làm hàm Wavelet cơ sở (tương tự như hàm phân tích cơ sở là hàm mũ phức  $e^{-j\omega t}$  của biến đổi Fourier).

Các Wavelet trong một phép biến đổi có dạng tương tự nhau, sự khác nhau chỉ là sự dịch chuyển và giãn nở từ một hàm Wavelet gốc (hàm Wavelet mẹ hay hàm Wavelet cơ sở). Các hàm Wavelet được hình thành từ sự dịch chuyển và giãn nở là các hàm Wavelet mẹ được gọi là hàm Wavelet con. Hình 2.3 biểu diễn của hàm cơ sở Morlet [93].



Hình 2.3 - Sự dịch chuyển và giãn nở của hàm Wavelet Morlet Về mặt toán học, biến đổi Wavelet liên tục (CWT) được định nghĩa bởi công thức theo Mallat (1999) [60]:

$$c_{s,l} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) . \psi_{s,l}^{*}(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) . \frac{1}{\sqrt{s}} \psi(\frac{t-1}{s}) dt$$
(2.3)

trong đó:

 $c_{s,l}$  là hệ số Wavelet với l là chỉ số liên hệ với thời gian (khoảng dịch chuyển), s là chỉ số liên hệ với tỷ lệ tần số (hệ số tỷ lệ);

 $\psi(t)$  và  $\psi_{s,l}^{*}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi(\frac{t-l}{s})$  tương ứng là hàm Wavelet cơ sở và

hàm Wavelet con đã dịch chuyển khoảng 1 và thu phóng với tỷ lệ s.



Hình 2.4. Biểu diễn của biến đổi Wavelet liên tục (CWT) Biến đổi Wavelet liên tục thực hiện theo các bước cơ bản [60]:

- Bước 1: Lựa chọn loại Wavelet, và so sánh với đoạn đầu tiên của tín hiệu ban đầu (hình 2.4 a);
- Bước 2: Tính toán giá trị hệ số  $C_{s,l}$ , đây có thể coi là hệ số tương quan giữa đoạn tín hiệu với Wavelet, giá trị hệ số này càng lớn càng có sự tương tự giữa đoạn tín hiệu và Wavelet.
- Bước 3: Dịch Wavelet về phía phải của tín hiệu (hình 2.4 b), tiếp tục thực hiện bước 1 và bước 2 cho đến hết chiều dài tín hiệu;
- Bước 4: Định tỷ lệ Wavelet và lặp lại các bước 1,2 và 3;
- Bước 5: Lặp lại các bước kể trên cho mọi tỷ lệ.

Các hệ số biến đối Wavelet liên tục vẽ ra hình ảnh "thời gian - tỷ lệ" của tín hiệu.

### 2.1.2.2. Biến đổi Wavelet rời rạc

Như đã trình bày ở trên biến đổi Wavelet được thực hiện trên tất cả các tỷ lệ có thể, đo đó, nó tiêu tốn nhiều dữ liệu và đôi khi là không làm tăng đáng kể độ chính xác [3], [60]. Do đó, trong thực tiễn, các nhà nghiên cứu đề xuất sử dụng biến đổi Wavelet rời rạc (Discrete Wavelet Transform- DWT). Sự khác biệt chủ yếu của biến đổi rời rạc so với biến đổi Wavelet liên tục là hệ số tỷ lệ. Hệ số tỷ lệ trong biến đổi Wavelet rời rạc được xác định theo hàm mũ bậc 2,  $s=2^j$ , với j là mức tỷ lệ (j nhận các giá trị nguyên). Hàm Wavelet được viết lại theo công thức (2.4):

$$\psi_{j,k}^{*}(t) = \frac{1}{2^{-j/2}} \psi(2^{-j} \cdot t - k)$$
(2.4)

### 2.1.2.3. Biến đổi gói Wavelet

Tương tự như biến đối Wavelet liên tục và biến đối Wavelet rời rạc, biến đổi gói Wavelet thực chất là việc việc xác định các hệ số Wavelet  $c_{i,k}^{i}$ 

theo các công thức (2.5):

$$\mathbf{c}_{j,k}^{i} = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{x}(t) . \psi_{j,k}^{i}(t) dt$$
(2.5)

trong đó:

x(t) là chuỗi thời gian cần biến đổi;

 $c_{j,k}^{i}$  là ký hiệu Wavelet Packet với i là tham số vị trí trên trục tần số, j là độ phân giải của Wavelet trên miền tần số, k là tham số chỉ vị trí trên trục thời gian;

 $\psi^{i}_{j,k}(t)$  là hàm Wavelet cơ sở;

### 2.1.2.4. Biến đổi ngược gói Wavelet (iWPT)

Khi có các hệ số của gói Wavelet  $c_{j,k}^{i}$ , có thể tái cấu trúc chuỗi thời gian x(t) bằng việc sử dụng biến đổi ngược gói Wavelet (iWPT) theo công thức (2.6):

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^{2^{j}} \sum_{k=1}^{2^{N-j}} c_{j,k}^{i} \psi_{j,k}^{i}(t)$$
(2.6)

trong đó:

 $2^{N}$  là tổng số bước thời gian của x(t).

 $c_{j,k}^{i}$  là hệ số của gói Wavelet ứng với thời gian t<sub>k</sub> và tần số f<sub>i</sub> và mức tỷ lệ j.

 $\psi^{i}_{j,k}(t)$  là hàm Wavelet con tương ứng.

#### 2.1.2.5. Hàm Wavelet cơ sở

Biến đổi Wavelet là phương pháp để chuyển đổi một hàm (tín hiệu) đã biết thành dạng khác mà những đặc tính khó xác định của tín hiệu gốc được nghiên cứu dễ dàng hơn hoặc cho phép dữ liệu gốc được miêu tả ngắn gọn, cô đọng hơn. Để thực hiện phép biến đổi Wavelet chúng ta cần hàm cơ sở Wavelet (hàm Wavelet mẹ) [60], [3]. Hàm Wavelet con được hình thành thông qua quá trình dịch chuyển theo trục thời gian và sự co giãn của Wavelet cơ sở  $\Psi(t)$  theo tỷ lệ.

Có nhiều hàm cơ sở Wavelet có thể lựa chọn cho phân tích dữ liệu. Căn cứ lựa chọn một hàm cơ sở tốt nhất cho phép phân tích tín hiệu đã biết là dựa vào bản chất của tín hiệu và yêu cầu đặt ra với phép phân tích. Những hàm cơ sở Wavelet thường được sử dụng đó là: Gaussian Wave, Mexican hat, Haar, Morlet, Cosine hiệu chỉnh,... các hàm cơ sở này được đưa vào trong cơ sở dữ liệu của Matlab [60], [93]. Nghiên cứu của Hancock [48] đề xuất sử dụng hàm Wavelet Cosine hiệu chỉnh, đây là một hàm cải biên từ hàm Wavelet Cosine, với hàm số toán học như trong công thức (2.7).

$$\psi_{j}(t) = e^{-\left[\frac{(t-t_{j}+\Delta t_{j})}{\gamma_{j}}\right]^{2}} \cos\left(\omega'_{j}(t-t_{j}+\Delta t_{j})\right)$$
(2.7)

trong đó  $\Delta t_j$  là sự sai khác giữa thời gian đạt đỉnh phổ phản ứng và thời gian tham chiếu của Wavelet ( $t_j$ ). Hệ số hiệu chỉnh  $\gamma_j$  là hệ số phụ thuộc vào tần số dùng để hiệu chỉnh chu kỳ của hàm hiệu chỉnh và được tính theo công thức (2.8).

$$\gamma_{i} = 1.178 * f^{-0.93}$$
(2.8)

với f là tần số của hàm Wavelet cơ sở.

## 2.1.3. Cơ sở lý thuyết phát sinh giản đồ gia tốc nền nhân tạo theo điều kiện khớp phổ phản ứng theo phương pháp của Hancock

Trong công bố của mình, Hancock [48] đề xuất hiệu chỉnh giản đồ gia tốc theo các bước cơ bản:

-Bước 1: hiệu chỉnh sơ bộ giản đồ gia tốc theo điều kiện bình phương tối thiểu khoảng lệch phổ phản ứng;

-Bước 2: bổ sung lượng hiệu chỉnh Wavelet vào giản đồ gia tốc;

-Bước 3: kiểm tra phổ phản ứng của gia tốc sau khi hiệu chỉnh, nếu chưa đạt yêu cầu thì tiếp tục thực hiện lần lượt bước 1 và bước 2.

# 2.1.3.1. Hiệu chỉnh sơ bộ theo điều kiện bình phương tối thiểu khoảng lệch phổ phản ứng

Xác định hệ số tỷ lệ hiệu chỉnh ( $k_{hc}$ ) theo phương pháp bình phương tối thiểu. Theo đó, giản đồ gia tốc điều chỉnh  $a_1(t)$  được tính từ giản đồ gia tốc ban đầu  $a_0(t)$ :

$$a_1(t) = k_{hc} a_0(t)$$
 (2.9)

trong đó:

 $a_0(t)$  là gia tốc ban đầu có phổ phản ứng thể hiện trong hình 2.5;

 $a_1(t)$  có phổ phản ứng đàn hồi  $S_a(t)$  thể hiện trong hình 2.6;

 $k_{hc}$  là hệ số hiệu chỉnh, hệ số này được xác định để tổng bình phương độ lệch phổ phản ứng  $\sum_{i=1}^{nCK} (\Delta S_a(i))^2$  đạt giá trị nhỏ nhất.



Hình 2.5. Phổ phản ứng đàn hồi ứng với giản đồ gia tốc trước khi nhân với hệ số hiệu chỉnh



Hình 2.6. Phổ phản ứng đàn hồi ứng với giản đồ gia tốc sau khi nhân với hệ số hiệu chỉnh

Như vậy, sau khi hiệu chỉnh sơ bộ ta có thể thu được giản đồ gia tốc mới có phổ phản ứng "gần" với phổ phản ứng mục tiêu hơn. Đây chính là số liệu đầu vào cho bước hiệu chỉnh tiếp theo.

## 2.1.3.2. Hiệu chỉnh chính xác giản đồ gia tốc bằng cách bổ sung thêm lượng hiệu chỉnh Wavelet

Tiếp tục hiệu chỉnh giản đồ gia tốc thu được từ bước trên bằng cách bổ sung thêm một "lượng hiệu chỉnh Wavelet" là hàm thời gian  $\delta a(t)$ . Lượng hiệu chỉnh này được xác định trên cơ sở phản ứng tạo ra của nó trên các hệ 1BTD bằng với khoảng lệch phổ phản ứng. Nói cách khác, với giản đồ gia tốc mới cần có khoảng lệch gần bằng không,  $\Delta S_a(i) \rightarrow 0$  ( $\Delta S_a(i)$  là phản ứng của hệ một BTD có chu kỳ T(i)). Dựa trên nguyên lý của biến đổi Wavelet, phân tích lượng bù  $\delta a(t)$  thành tổng của các hàm Wavelet con.

$$\delta a(t) = b_1 \psi_1(t) + b_2 \psi_2(t) + \dots + b_{nCK} \psi_{nCK}(t)$$
(2.10)

hay:

$$\delta a(t) = \sum_{j=1}^{nCK} b_j \psi_j(t)$$
(2.11)

trong đó:

 $\psi_j(t)$  là hàm Wavelet thứ j khi có kể đến đỗ trễ thời gian t<sub>j</sub> được xác định là thời gian đạt đỉnh tương ứng với lực kích thích F=-m. $\delta a(t)$  tác dụng lên hệ một BTD có chu kỳ dao động T<sub>i</sub>;

b<sub>j</sub> là giá trị hệ số tỷ lệ ứng với hàm Wavelet cơ sở;

nCK là tổng số lượng hệ một bậc tự do được xét đến trong tính toán (số lượng này càng lớn thì kết quả tính càng chi tiết).

Như vậy, ẩn số cần tìm là các thành phần hệ số tỷ lệ b<sub>j</sub>, điều kiện để xác định các giá trị này là thành phần lực gây ra bởi phần bù gia tốc F=-m. $\delta a(t)$  tạo ra giá trị phản ứng bằng với khoảng lệch chu kỳ phổ phản ứng  $\Delta S_a$  với mỗi hệ một BTD (như trong hình 2.7). Các nội dung tiếp theo sẽ trình bày trình tự, phương pháp để xác định bộ hệ số này làm cơ sở để xác định phần bù hiệu chỉnh  $\delta a(t)$ .



Hình 2.7. Hệ một BTD chịu lực kích thích tạo bởi phần bù gia tốc

Sử dụng tích phân Duhamel để xác định hàm phản ứng gia tốc với hệ dao động đàn hồi có chu kỳ T<sub>i</sub>, đại lượng này được ký hiệu là  $\delta \Psi_i$  do phần bù gia tốc  $\delta a(t)$  gây ra. Trên cơ sở khảo sát dao động của hệ một bậc tự do với chu kỳ T<sub>i</sub> chịu tác dụng của hàm số hiệu chỉnh  $\delta a(t)$ , phản ứng của hệ tại thời gian t<sub>i</sub> được cho bởi công thức:

$$\delta \Psi_{i} = \int_{0}^{t_{i}} \delta a(\tau) h_{i}(t_{i} - \tau) d\tau$$
(2.12)

trong đó  $h_i(t)$  là phản ứng xung gia tốc của hệ dao động một bậc tự do với chu kỳ  $T_i$ . Thay thế (2.10)vào công thức (2.12) ta có:

$$\delta \Psi_{i} = \sum_{j=1}^{nCK} b_{j} \int_{0}^{t_{i}} \Psi_{j}(\tau) h_{i}(\tau_{i} - \tau) d\tau$$
(2.13)

Hàm phản ứng xung gia tốc  $h_i(t)$  được xác định bởi công thức (2.14):

$$h_{i}(t) = \frac{-\omega_{i}}{\sqrt{1-\zeta^{2}}} e^{(-\omega_{i}\zeta t)} \left[ \left( 2\zeta^{2} - 1 \right) \sin(\omega_{i}' t) - 2\zeta \sqrt{1-\zeta^{2}} \cos(\omega_{i}' t) \right]$$
(2.14)

trong đó  $\omega_i$  tần số góc ứng với chu kỳ T<sub>i</sub> và  $\omega'_i$  hệ số góc có kể tới cản ứng với chu kỳ T<sub>i</sub>,  $\zeta$  là hệ số cản.

Định nghĩa s<sub>ij</sub> là biên độ phản ứng gia tốc của hệ dao động một BTD với chu kỳ T<sub>i</sub> tại thời điểm t<sub>i</sub> tạo ra bởi hàm hiệu chỉnh  $\psi_j(t)$ , giá trị đại lượng này xác định theo công thức (2.15).

$$s_{ij} = \int_{0}^{t_i} \Psi_j(\tau) h_i(t_i - \tau) d\tau$$
(2.15)

Biên độ s<sub>ij</sub> là một biến số quan trọng, nó xác định lượng Wavelet hiệu chỉnh  $\psi_j(t)$  tác động lên phổ trong tần số T<sub>i</sub>. Thay công thức (2.15) vào công thức (2.13) thu được công thức sau:

$$\delta \Psi_{i} = \sum_{j=1}^{nCK} b_{j} s_{ij}$$
(2.16)

Công thức này còn ngầm chỉ ra sự thay đổi của phổ tại chu kỳ T<sub>i</sub> do toàn bộ hàm Wavelet hiệu chỉnh  $\Psi_j(t)$ . Với mục tiêu như đã trình bày ở phần trên, phản ứng của hàm hiệu chỉnh  $\delta \Psi_i$  tại thời điểm  $t_i$  tiến tới giá trị của khoảng lệch phổ phản ứng  $\Delta S_a(i)$ , do đó có thể viết lại như sau:

$$\Delta \mathbf{S}_{a}(\mathbf{i}) = \sum_{j=1}^{nCK} \mathbf{b}_{j} \mathbf{s}_{ij}$$
(2.17)

Hệ phương trình viết đầy đủ cho nCK hệ một bậc tự do:

$$\begin{bmatrix} s_{1,1} & s_{1,2} & \dots & s_{1,nCK} \\ s_{2,1} & s_{2,2} & \dots & s_{2,nCK} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{nCK,1} & s_{nCK,2} & \dots & s_{nCK,nCK} \end{bmatrix} * \begin{cases} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_{nCK} \end{cases} = \begin{cases} \Delta S_a(1) \\ \Delta S_a(2) \\ \dots \\ \Delta S_a(nCK) \end{cases}$$
(2.18)

Ma trận [S], với các thành phần s<sub>ij</sub> thể hiện giá trị phản ứng gia tốc tại thời điểm đạt đỉnh t<sub>j</sub> của hệ dao động một bậc tự do với chu kỳ T<sub>i</sub> do lượng Wavelet hiệu chỉnh  $\psi_j(t)$  thứ j, công thức (2.18) có thể viết lại:

$$\{\Delta S_a\} = [S]\{b\}$$
(2.19)

Hệ số tỷ lệ của mỗi hàm Wavelet cơ sở sử dụng trong lượng hiệu chỉnh được xác định bằng cách giải hệ phương trình được viết ở dạng ma trận như trong (2.20):

$$\left\{\mathbf{b}\right\} = \left[\mathbf{S}\right]^{-1} \left\{\Delta \mathbf{S}_{a}\right\}$$
(2.20)

Từ công thức (2.11) và công thức (2.20) có thể xác định được phần bù Wavelet hiệu chỉnh  $\delta a(t)$  từ ma trận phản ứng đơn vị [S] và véc tơ độ lệch phổ phản ứng { $\Delta S_a$ }.

### 2.1.4. Các bước thực hiện theo thuật toán của Hancock, sơ đồ khối

Với các nội dung cơ sở lý thuyết đã trình bày ở trên, Hancock [48] đề xuất thuật toán với các bước cơ bản được thể hiện trong bảng 2.1 dưới đây.

Thứ tự	Nội dung thực hiện
	Chuẩn bị bộ số liệu đầu vào (gia tốc thực đo được tại khu vực công
Bước 1	trình, phố phản ứng gia tốc giả thiết kế, sai số cho phép, hệ số cản, số
	vòng lặp lớn nhất, hàm Wavelet cơ sở,).
Burác 2	Xác định phổ phản ứng của gia tốc ban đầu theo phương pháp tích phân
Bube 2	Newmark.
<b>Βιτάο 2</b>	Xác định khoảng lệch phổ $\Delta S_a$ thông qua so sánh kết quả phổ phản ứng
Bube 5	tính với với phổ phản ứng mục tiêu (hình 2.2).
<b>Βιτάο</b> Δ	Xác định gia tốc hiệu chỉnh lần 1 theo điều kiện bình phương tối thiểu
Bube 4	của khoảng lệch phổ phản ứng.
Bước 5	Xây dựng ma trận [S].
Bước 6	Tính toán độ lớn của véc tơ hệ số tỷ lệ $\{b\}$ theo công thức (2.20).
Bước 7	Tính lượng hiệu chỉnh Wavelet: $\delta a(t) = \sum_{j=1}^{nCK} b_j \Psi_j(t)$
	Tính gia tốc theo công thức: $a^{r}(t) = a^{r-1}(t) + \delta a(t)$

Bảng 2.1 Các bước thực hiện theo phương pháp của Hancock [48]

Thứ tự	Nội dung thực hiện
Bước 8	Kiểm tra sai số lần lượt trên các chu kỳ. Lặp lại các bước trên đến khi sai số khoảng lệch phổ lớn nhất nhỏ hơn giá trị sai số cho phép.

### 2.2 Xây dựng chương trình PG01

### 2.2.1. Sơ đồ khối chương trình PG01

Trên cơ sở thuật toán của Hancock [48] như đã trình bày trên bảng 2.1, tác giả đã thiết lập chương trình PG01 trên nền ngôn ngữ Matlab phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo. Sơ đồ khối chương trình được thể hiện trên hình 2.8.



Hình 2.8. Sơ đồ khối chương trình PG01

### 2.2.2. Giao diện và tính năng của chương trình PG01

Trên cơ sở sơ đồ khối đã lập, tác giả đã xây dựng chương trình PG01 trên nền ngôn ngữ lập trình Matlab, giao diện của chương trình PG01 được thể hiện như trong hình 2.9.

Guide_PG01					_	×
CHƯƠNG TRÌNH PG01 GiẤn Đỏ Giả Tốc gốc Lựa chọn gia tốc gốc Chọn	PHẢN ỨNG ————					1
THÔNG SỐ PHỔ PHẢN ỨNG THEO TCVN 938         Loại nền       A       Gia tốc tham chiếu agR (m/s2)       0.0976         Hệ số tầm quan trọng       1.0       1.0						
DEU KHÉN 2 - Run 0 2 -	ÓC PHÁT SINH	1 1		1 I	_	
5			, ,	1 1		

### Hình 2.9. Giao diện chương trình PG01

Chương trình PG01 cho phép hiệu chỉnh giản đồ gia tốc trên cơ sở xác định phổ phản ứng mục tiêu theo các thông số đầu vào về phổ phản ứng bao gồm các tùy chọn:

- Loại nền: lựa chọn nền loại A, B, C,... theo TCVN 9386-2012;
- Gia tốc nền tham chiếu  $a_{gR}$ ;
- Hệ số tầm quan trọng của công trình  $\gamma_{I}.$

# 2.3 Sử dụng chương trình PG01 tạo giản đồ gia tốc nhân tạo trên nền đá gốc theo điều kiện khớp phổ phản ứng

Trong nội dung của phần này, tác giả sẽ sử dụng chương trình PG01 đã lập để phát sinh các giản đồ gia tốc nhân tạo có phổ phản ứng phù hợp với điều kiện thành phố Hà Nội xác định theo Tiêu chuẩn kháng chấn TCVN 9386-2012 [22]. Do khi tính toán động lực học công trình ngầm, giản đồ gia tốc được đặt trên nền đá gốc nên gia tốc nền nhân tạo được phát sinh với phổ phản ứng mục tiêu nền loại A.

### 2.3.1. Số liệu phổ phản ứng đàn hồi theo TCVN 9386-2012

Phổ phản ứng gia tốc đàn hồi mục tiêu theo Tiêu chuẩn TCVN 9386-2012 [22] được thể hiện như trong hình 2.10.



Hình 2.10. Định dạng phổ phản ứng đàn hồi theo TCVN 9386-2012 [22]

Giá trị của phổ phản ứng mục tiêu  $S_{a_TK}(T)$  được xác định theo các biểu thức sau:

$$0 \le T \le T_{\rm B}; \quad S_{a_{\rm T}k}(T) = a_{\rm g}.S.\left[1 + \frac{T}{T_{\rm B}}.(\eta.2, 5 - 1)\right]$$
 (2.21)

$$T_{\rm B} \le T \le T_{\rm C}; \quad S_{\rm a_Tk}(T) = a_{\rm g}.S.\eta.2,5$$
 (2.22)

$$T_{\rm C} \le T \le T_{\rm D}; \quad S_{a_{\rm T}k}(T) = a_{\rm g}.S.\eta.2, 5.\left[\frac{T_{\rm C}}{T}\right]$$

$$(2.23)$$

$$T_{\rm D} \le T_0 \le 4s; \quad S_{a_{\rm T}k}(T) = a_{\rm g} \cdot S \cdot \eta \cdot 2, 5 \cdot \left\lfloor \frac{T_{\rm C} \cdot T_{\rm D}}{T^2} \right\rfloor$$
(2.24)

trong đó:

 $S_{a_Tk}(T)$  là giá trị phổ phản ứng đàn hồi mục tiêu ứng chu kỳ T;

T là các chu kỳ dao động của hệ tuyến tính một BTD;

 $a_g$  là gia tốc nền thiết kế trên nền loại A ( $a_g = \gamma_I$ .  $a_{gR}$  với  $\gamma_I$  là hệ số tầm quan trọng của công trình;  $a_{gR}$  là gia tốc nền tham chiếu được xác định theo bản đồ phân vùng động đất, khu vực Hà Nội xác định theo bảng 2.3 dưới đây);

T<sub>B</sub>, T<sub>C</sub>, T<sub>D</sub> lần lượt các giá trị chu kỳ tại các đoạn chuyển (hình 2.10);

S là hệ số nền;

 $\eta$  là hệ số điều chỉnh độ cản ( $\eta = 1$  đối với độ cản nhớt 5%).

Loại nền đất	S	$T_B(s)$	$T_{\rm C}(s)$	T <sub>D</sub> (s)
А	1,0	0,15	0,4	2,0
В	1,2	0,15	0,5	2,0
С	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
Е	1,4	0,15	0,5	2,0

Bảng 2.2 Các tham số phổ phản ứng đàn hồi theo TCVN 9386-2012 [22]

Gia tốc đỉnh tham chiếu cho một số khu vực trên địa bàn thành phố Hà Nội được quy định trong TCVN 9386-2012 [22].

Bảng 2.3 Bảng phân vùng gia tốc nền tham chiếu theo địa danh hành chính cho địa bàn Thành phố Hà Nội theo TCVN 9386-2012 [22]

ТТ	Địa danh	Gia tốc nền tham chiếu (g)			
1	Q. Ba Đình	0,0976			
2	Q. Cầu Giấy	0,1032			

TT	Địa danh	Gia tốc nền tham chiếu (g)
3	Q. Đống Đa	0,0983
4	Q. Hai Bà Trưng	0,0959
5	Q. Hoàn Kiếm	0,0892
6	Q. Hoàng Mai	0,1001
7	Q. Long Biên	0,0747
8	Q. Tây Hồ	0,0819
9	Q. Thanh Xuân	0,1097
10	H. Đông Anh	0,0757
11	H. Gia Lâm	0,0769
12	H. Sóc Son	0,0962
13	H. Thanh Trì	0,1047
14	Q. Bắc Từ Liêm	0,1081

Sau đây, luận án sẽ trình bày kết quả thử nghiệm số với từng bản ghi cụ thể với khu vực xây dựng công trình đường hầm tàu điện ngầm tại quận Ba Đình. Số liệu phổ phản ứng mục tiêu bao gồm:

- Gia tốc nền tham chiếu lấy theo bảng 2.3:  $a_{gR}=0,0976g$ ; hệ số tầm quan trọng  $\gamma_I=1,0$  (tra cứu theo phụ lục E, TCVN 9386-2012 với dạng công trình là đường hầm tuyến đường sắt đô thị). Gia tốc nền thiết kế trên nền loại A,  $a_g=a_{gR}$ . $\gamma_I=0,0976(g)$ .

- Điều kiện nền loại A tính với nền đá có các thông số chu kỳ:  $T_1=0,05s; T_B=0,20s; T_C=0,60s; T_D=2,00s$  và  $T_0=4,00s$ .

- Rời rạc hóa chu kỳ với bước chia  $\Delta$ T=0,05s.

### 2.3.2. Lựa chọn giản đồ gia tốc đầu vào

Tiêu chuẩn thiết kế công trình chịu động đất TCVN 9386-2012 [22] quy định khi sử dụng giản đồ gia tốc nhân tạo thì số lượng cần thiết nhỏ nhất là 03 giản đồ. Do đó, tác giả sẽ tiến hành phát sinh giản đồ gia tốc nền nhân tạo theo điều kiện khớp phổ phản ứng bằng chương trình PG01 phù hợp với điều kiện khu vực thành phố Hà Nội với đầu vào là 03 bản ghi gia tốc thực.

Các giản đồ gia tốc đầu vào được chọn lựa từ các giản đồ gia tốc ghi được tại các điểm có điều kiện địa chấn tương tự khu vự Hà Nội. Theo kết quả nghiên cứu của tác giả Nguyễn Ngọc Thủy [19], khu vực Ba Đình- Hà Nội có thể chịu tác dụng của động đất phát sinh từ các nguồn cơ bản như thể hiện bảng 2.4.

TT	Đới phát sinh động đất	M <sub>w</sub>	R <sub>hyp</sub> (km)	R <sub>rup</sub> (km)			
1	Đới Tây Bắc	7,0	25	90			
2	Đới sông Đà	5,5	12	55			
3	Đới sông Hồng- sông Chảy	6,2	15	11			
4	Đới sông Lô	5,5	15	13			
5	Đới Đông Triều- Uông Bí	6,2	15	29			

Bảng 2.4 Bảng thông số các đới động đất khảo sát với vị trí trung tâm quận Ba Đình Hà Nội (tọa độ 21,030N; 105,824Đ) [19]

Qua bảng 2.4 có thể thấy, các nguồn phát sinh chủ yếu (trừ đới Tây Bắc ở khá xa địa điểm nghiên cứu) có độ sâu chấn tâm từ 12m đến 15km; chấn cấp trong khoảng từ 5,5 đến 6,2; tâm cự trong khoảng từ 11km đến 55km. Do vậy, từ các số liệu địa chấn của các bản ghi sẵn có, đề xuất sử dụng 03 gia tốc nền đầu bao gồm: bản ghi gia tốc Điện Biên ngày 19/02/2001, bản ghi gia tốc 321 của trận động đất Campano Lucano (Italy) ngày 16/01/1981, bản ghi gia tốc ca064 của trận động đất Lang Cang (Trung Quốc) ngày 27/11/1988 [19]. Các bản ghi này có các đặc trưng thể hiện trong bảng 2.5.

TT	Đới phát sinh động đất	M <sub>w</sub>	R <sub>hyp</sub> (km)	R <sub>rup</sub> (km)
1	Bản ghi gia tốc Điện Biên ngày 19/02/2001	5,3	12	19
2	Bån ghi gia tốc 321 Campano Lucano (Italy) ngày 16/01/1981	5,0	15	8
3	Bån ghi gia tốc ca064 Lang Cang (Trung Quốc) ngày 27/11/1988	6,3	12	13

Bảng 2.5. Giản đồ gia tốc đầu vào lựa chọn [19]

Trong nội dung tiếp theo, luận án sẽ sử dụng chương trình PG01 để hiệu chỉnh lần lượt 3 bản ghi này để thu về các giản đồ gia tốc tương ứng.

# 2.3.3. Sử dụng chương trình PG01 phát sinh các giản đồ gia tốc nhân tạo trên nền đá gốc phù hợp với điều kiện Hà Nội

### 2.3.3.1. Hiệu chỉnh giản đồ gia tốc đầu vào Điện Biên

Thực hiện hiệu chỉnh bản ghi sẵn có bằng chương trình PG01, gia tốc nền đầu vào để thực hiện hiệu chỉnh là bản ghi gia tốc Điện Biên (hình 2.11). Kết quả giản đồ gia tốc nhân tạo và phổ phản ứng tương ứng sau khi hiệu chỉnh cùng với biểu đồ cường độ Arias và biểu đồ phân bố năng lượng Arias được thể hiện trong các biểu đồ từ hình 2.12 đến hình 2.15.



Hình 2.11. Băng gia tốc của động đất Điện Biên ngày 19/02/2001



Hình 2.12. Kết quả khớp phổ phản ứng với gia tốc nền đầu vào Điện Biên (giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh\_01A)



Hình 2.13. Giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh\_01A



Hình 2.14. Năng lượng Arias gia tốc ban đầu và gia tốc nhân tạo BaDinh\_01A



Hình 2.15. Phân bố năng lượng Arias với gia tốc nền đầu vào và giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh\_01A

Đánh giá kết quả thử nghiệm: đánh giá giản đồ gia tốc nhân tạo thu được theo phổ phản ứng. Phổ phản ứng được kiểm tra theo các điều kiện theo TCVN 9386-2012 [22] (mục 3.2.3.1.2) với 2 điều kiện cơ bản:

- Các giá trị của phổ phản ứng đàn hồi trung bình ứng với tỷ số cản 5% tính được từ tất cả các khoảng thời gian không được nhỏ hơn 90% giá trị ứng với phổ phản ứng đàn hồi có tỷ số cản 5%.

Tại điểm bắt đầu giá trị phổ phản ứng lớn hơn giá trị phổ phản ứng yêu cầu, Sa(1)>Sa<sub>TK</sub>(1).

Qua bảng 2.4, có thể thấy phổ phản ứng sau khi hiệu chỉnh đáp ứng được hai yêu cầu kể trên.

TT	Sa	Sa <sub>TK</sub>	ΔSa	Sai số	TT	Sa	Satk	ΔSa	Sai số
	(g)	(g)	(g)	(%)		(g)	(g)	(g)	(%)
1	0,1436	0,0976	0,0460	47,13%	41	0,0452	0,0464	-0,0012	2,66%
2	0,1711	0,1708	0,0003	0,16%	42	0,0438	0,0443	-0,0005	1,03%
3	0,2443	0,2440	0,0003	0,13%	43	0,0421	0,0422	-0,0001	0,23%
4	0,2445	0,2440	0,0005	0,22%	44	0,0404	0,0403	0,0001	0,15%
5	0,2445	0,2440	0,0005	0,22%	45	0,0388	0,0386	0,0002	0,56%
6	0,2447	0,2440	0,0007	0,28%	46	0,0372	0,0369	0,0003	0,91%
7	0,2443	0,2440	0,0003	0,10%	47	0,0357	0,0353	0,0004	1,00%
8	0,2449	0,2440	0,0009	0,38%	48	0,0343	0,0339	0,0004	1,14%

Bảng 2.6 Bảng kết quả xác định sai số độ lệch phổ phản ứng

TT	Sa	Satk	ΔSa	Sai số	TT	Sa	Satk	ΔSa	Sai số
	(g)	(g)	(g)	(%)		(g)	(g)	(g)	(%)
9	0,2153	0,2169	-0,0016	0,73%	49	0,0329	0,0325	0,0004	1,20%
10	0,1996	0,1952	0,0044	2,23%	50	0,0316	0,0312	0,0003	1,07%
11	0,1751	0,1775	-0,0023	1,31%	51	0,0302	0,0300	0,0002	0,71%
12	0,1635	0,1627	0,0008	0,50%	52	0,0289	0,0289	0,0001	0,21%
13	0,1520	0,1502	0,0018	1,21%	53	0,0277	0,0278	-0,0001	0,49%
14	0,1400	0,1394	0,0006	0,41%	54	0,0265	0,0268	-0,0003	1,06%
15	0,1288	0,1301	-0,0013	1,02%	55	0,0253	0,0258	-0,0005	2,08%
16	0,1263	0,1220	0,0043	3,49%	56	0,0242	0,0249	-0,0007	2,79%
17	0,1160	0,1148	0,0012	1,03%	57	0,0237	0,0240	-0,0003	1,36%
18	0,1043	0,1084	-0,0042	3,85%	58	0,0231	0,0232	-0,0001	0,28%
19	0,1002	0,1027	-0,0025	2,43%	59	0,0225	0,0224	0,0001	0,44%
20	0,1002	0,0976	0,0026	2,62%	60	0,0219	0,0217	0,0002	0,81%
21	0,0960	0,0930	0,0030	3,25%	61	0,0212	0,0210	0,0002	0,92%
22	0,0902	0,0887	0,0015	1,71%	62	0,0205	0,0203	0,0002	0,83%
23	0,0839	0,0849	-0,0010	1,17%	63	0,0198	0,0197	0,0001	0,58%
24	0,0802	0,0813	-0,0011	1,34%	64	0,0191	0,0191	0,0000	0,23%
25	0,0775	0,0781	-0,0006	0,75%	65	0,0185	0,0185	0,0000	0,11%
26	0,0756	0,0751	0,0005	0,68%	66	0,0179	0,0179	-0,0001	0,40%
27	0,0732	0,0723	0,0009	1,23%	67	0,0173	0,0174	-0,0001	0,59%
28	0,0708	0,0697	0,0011	1,57%	68	0,0168	0,0169	-0,0001	0,67%
29	0,0674	0,0673	0,0000	0,06%	69	0,0163	0,0164	-0,0001	0,62%
30	0,0648	0,0651	-0,0003	0,48%	70	0,0159	0,0159	-0,0001	0,45%
31	0,0639	0,0630	0,0009	1,47%	71	0,0155	0,0155	0,0000	0,21%
32	0,0609	0,0610	-0,0001	0,14%	72	0,0151	0,0151	0,0000	0,08%
33	0,0580	0,0592	-0,0011	1,93%	73	0,0147	0,0147	0,0001	0,37%
34	0,0564	0,0574	-0,0011	1,85%	74	0,0143	0,0143	0,0001	0,61%
35	0,0559	0,0558	0,0001	0,17%	75	0,0140	0,0139	0,0001	0,75%
36	0,0557	0,0542	0,0015	2,74%	76	0,0136	0,0135	0,0001	0,76%
37	0,0550	0,0528	0,0023	4,30%	77	0,0132	0,0132	0,0001	0,59%
38	0,0534	0,0514	0,0020	3,87%	78	0,0129	0,0128	0,0000	0,21%
39	0,0503	0,0501	0,0003	0,59%	79	0,0125	0,0125	0,0000	0,39%
40	0,0463	0,0488	-0,0025	5,03%	80	0,0120	0,0122	-0,0002	1,26%
					TB				1,68%

Để làm đánh giá độ tin cậy của kết quả hiệu chỉnh theo chương trình PG01, tác giả sử dụng phần mềm SeismoMatch ver 2021 (Academic License) [75] để phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo với số liệu đầu vào tương tự (phổ mục tiêu vận dụng theo tiêu chuẩn Eurocode 8). Thu được giản đồ gia tốc nhân tạo cho trong hình 2.16 dưới đây.



Hình 2.16. Giản đồ gia tốc nhân tạo thu được khi hiệu chỉnh bằng chương trình SeismoMatch (bản dùng thử)

Số liệu so sánh một số đặc trưng của hai giản đồ gia tốc nhân tạo được thể hiện trong bảng 2.7, kết quả cho thấy sự sai khác nhỏ. Do vậy, giản đồ gia tốc phát sinh bằng chương trình PG01 có sơ sở để tin cậy.

ТТ	Chỉ tiêu so sánh	PG01 (A)	SeismoMatch (B)	Chênh lệch (A-B)/B (%)				
1	Gia tốc đỉnh PGA (cm/s <sup>2</sup> )	122,9	114,2	7,62%				
2	Năng lượng Arias- IA (m/s)	0,057	0,059	-3,39%				

Bảng 2.7 Bảng so sánh đặc trưng của giản đồ gia tốc phát sinh bằng PG01 và SeismoMatch

2.3.3.2. Hiệu chỉnh bản ghi Campano Lucano, giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh 02A

Gia tốc nền đầu vào để thực hiện hiệu chỉnh là bản ghi gia tốc 321 của trận động đất Campano Lucano (Italy) ngày 16/01/1981 (hình 2.17).



Hình 2.17. Băng gia tốc 321 động đất Campano Lucano (Italy)

Kết quả hiệu chỉnh bằng PG01 thu được giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh\_02A (hình 2.19) có phổ phản ứng thể hiện trên hình 2.18, cường độ năng lượng Arias và phân bố cường độ năng lượng được thể hiện lần lượt trên hình 2.20 và hình 2.21.



Hình 2.18. Kết quả khóp phổ phản ứng với gia tốc nền đầu vào Campano Lucano (Giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh\_02A)



Hình 2.19.Giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh\_02A



Hình 2.20. Năng lượng Arias với gia tốc nền đầu vào Giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh\_02A



Hình 2.21. Phân bố năng lượng Arias với gia tốc nền đầu vào Giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh\_02A

### 2.3.3.3. Hiệu chỉnh bản ghi gia tốc Lang Cang

Gia tốc nền đầu vào để thực hiện phân tích là bản ghi gia tốc ca064 ghi được từ trận động đất Lang Cang (Trung Quốc) ngày 27/11/1988. Bản ghi được thể hiện trong hình 2.22.



Hình 2.22. Băng gia tốc ca064 trận động đất Lang Cang

Kết quả hiệu chỉnh bằng PG01 thu được giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh\_03A (hình 2.24) có phổ phản ứng thể hiện trên hình 2.23, cường độ

năng lượng Arias và phân bố cường độ năng lượng được thể hiện lần lượt trên hình 2.25 và hình 2.26.



Hình 2.23. Kết quả khớp phổ phản ứng với gia tốc nền đầu vào Lang Cang (Giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh\_03A)





Hình 2.24. Giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh\_03A

Hình 2.25. Năng lượng Arias với gia tốc nền đầu vào giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh\_03A



Hình 2.26. Phân bố năng lượng Arias với gia tốc nền đầu vào giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh\_03A

## 2.3.3.4. Tổng hợp kết quả

Các giản đồ gia tốc nhân tạo được phát sinh bằng chương trình PG01 thỏa mãn cùng phổ mục tiêu theo TCVN 9386-2012 được thể hiện trên Hình 2.27, các tham số tương ứng được thể hiện trên bảng 2.8 dưới đây.



Hình 2.27. Giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh\_01A, BaDinh\_02A, BaDinh\_03A

TT	Giản đồ gia tốc nhân	Các tham số của giản đồ gia tốc					
	tạo	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGV (cm/s)	a <sub>RMS</sub> (cm/s <sup>2</sup> )	IA (cm/s)	t5-95 (s)	
1	BaDinh_01A	122,87	7,76	31,99	5,600	3,11	
2	BaDinh_02A	76,56	6,68	19,05	8,300	12,87	
3	BaDinh_03A	96,91	10,73	26,35	7,500	5,71	
	Trung bình	98,78	8,39	25,80	7,13	7,23	

Bảng 2.8. Bảng tổng hợp các tham số của các giản đồ gia tốc nhân tạo

### 2.4 Kết luận chương 2

Trong nội dung của chương 2 tác giả đã tìm hiểu cơ sở lý thuyết, thuật toán của Hancock công bố trong tài liệu [48] nhằm tạo ra các giản đồ gia tốc có phổ phản ứng "khớp" với phổ phản ứng mục tiêu bằng cách hiệu chỉnh các giản đồ gia tốc sẵn có. Trên nền ngôn ngữ lập trình Matlab, xây dựng chương trình PG01 trên cơ sở thuật toán của phương pháp đã nghiên cứu.

Do việc tính toán công trình chịu động đất cần tối thiểu 3 giản đồ gia tốc nhân tạo nên trong nội dung của chương 2 tác giả đã đề xuất lựa chọn 3 bản ghi phù hợp với điều kiện tại khu vực Hà Nội. Sử dụng chương trình PG01, hiệu chỉnh 3 bản ghi đã chọn để phát sinh 3 giản đồ gia tốc nhân tạo theo điều kiện khớp theo phản ứng quy định trong Tiêu chuẩn TCVN 9386-2012 [22]. Các giản đồ gia tốc nhân tạo này là nguồn số liệu cho việc phân tích động lực học công trình ngầm chịu động đất trong các nội dung tiếp theo của luận án.

## Chương 3. XÂY DỰNG CHƯƠNG TRÌNH PHÁT SINH NGÃU NHIÊN GIẢN ĐỎ GIA TỐC NHÂN TẠO DỰA TRÊN HỆ PHƯƠNG TRÌNH HỎI QUY

Phương pháp phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc bằng mô phỏng toán học thường dựa trên việc phân tích hồi quy nguồn dữ liệu gia tốc nền của các trận động đất đã diễn ra. Từ các hệ phương trình hồi quy thu được, có thể phát ngẫu nhiên nhiều giản đồ gia tốc từ các nguồn động đất lân cận khu vực khảo sát (các nguồn này được gọi là đới phát sinh động đất hay vết nứt gãy địa chấn [19]). Mỗi nguồn phát sinh này có các thông tin cơ bản như chấn cấp M (thường cho ở thang độ mạnh mô men M<sub>w</sub>, độ sâu chấn tiêu R<sub>hyp</sub>) còn được gọi là các tham số dự báo của trận động đất (hình 3.1).



Hình 3.1. Bài toán phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc nền

Yamamoto [89] sử dụng biến đổi gói Wavelet kết hợp phân tích hồi quy làm cơ sở để phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc nhân tạo. Quá trình này bao gồm hai nội dung chính:

- Xây dựng hệ phương trình hồi quy (mang ý nghĩa dự báo). Lựa chọn bộ số liệu giản đồ gia tốc ghi được, sử dụng các phương pháp phân tích hồi quy để xác định các phương trình hồi quy với các tham biến mục tiêu là các tham số của gói Wavelet tương ứng với giản đồ gia tốc, biến đầu vào là các tham số của giản đồ gia tốc gắn với trận động đất như: cấp động đất theo

thang đo mô men  $M_w$  (chấn cấp M); độ sâu chấn tiêu ( $R_{hyp}$ ); tâm cự ( $R_{rup}$ ); vận tốc truyền sóng cắt ( $V_{s,30}$ ).

- Sử dụng hệ phương trình hồi quy đã được xây dựng để phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo một cách ngẫu nhiên. Yamamoto đã đề xuất việc sử dụng hệ phương trình hồi quy đã xây dựng kết hợp với phép biến đổi ngược gói Wavelet để mô phỏng ngẫu nhiên giản đồ gia tốc nhân tạo.

Luận án sẽ tập trung tìm hiểu và trình bày việc sử dụng hệ phương trình hồi quy đã có để phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo theo phương pháp của Yamamoto. Bên cạnh đó, để giản đồ gia tốc thu được đáp ứng được các yêu cầu TCVN 9386-2012, luận án sẽ cải biên một phần thuật toán đã có của Yamamoto, trên cơ sở đó lập chương trình PG02 trên nền ngôn ngữ Matlab.

# 3.1 Cơ sở lý thuyết phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc theo hệ phương trình hồi quy bằng phương pháp của Yamamoto

#### 3.1.1. Các đặc trưng cơ bản của gói Wavelet

Để định lượng một giản đồ gia tốc, Yamamoto đề xuất sử dụng các tham số của gói Wavelet tương ứng. Mỗi giản đồ gia tốc, thông qua biến đổi gói Wavelet, sẽ được định lượng bằng các tham số định vị tính theo thời gian và tần số (các đặc trưng của gói Wavelet), quá trình này được mô tả trên hình 3.2.



Hình 3.2. Xác định liên hệ giữa giản đồ gia tốc và các đặc trưng của gói Wavelet (Wavelet Packet- WP)

Các tham số định vị tính theo thời gian và tần số của gói Wavelet bao gồm: trọng tâm tính theo thời gian  $E_t$ ; độ lệch chuẩn tính theo thời gian  $S_t$ ;

trọng tâm tính theo tần số  $E_{f}$ ; độ lệch chuẩn tính theo tần số  $S_{t}$ ; hệ số tương quan tần số và thời gian  $\rho_{t,f}$ . Theo [89], các đặc trưng này được tính toán thông qua các hệ số gói Wavelet theo các công thức từ (3.1) đến (3.5):

$$E_{t} = \frac{\sum_{i=1}^{2^{j}} \sum_{k=1}^{2^{N-j}} t_{k} \left| c_{j,k}^{i} \right|^{2}}{E_{acc}}$$
(3.1)

$$S_{t}^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{2^{j}} \sum_{k=1}^{2^{N-j}} \{t_{k} - E_{t}\}^{2} |c_{j,k}^{i}|^{2}}{E_{acc}}$$
(3.2)

$$E_{f} = \frac{\sum_{i=1}^{2^{j}} \sum_{k=1}^{2^{N-j}} f_{i} \left| c_{j,k}^{i} \right|^{2}}{E_{acc}}$$
(3.3)

$$S_{f}^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{2^{j}} \sum_{k=1}^{2^{N-j}} \left\{ f_{i} - E_{f} \right\}^{2} \left| c_{j,k}^{i} \right|^{2}}{E_{acc}}$$
(3.4)

$$\rho_{t,f} = \frac{\sum_{i=1}^{2^{j}} \sum_{k=1}^{2^{N-j}} \{t_{k} - E_{t}\} \{f_{i} - E_{f}\} |c_{j,k}^{i}|^{2}}{S_{t} \cdot S_{f} \cdot E_{acc}}$$
(3.5)

Năng lượng của cả quá trình cũng được xác định thông qua các hệ số gói Wavelet theo công thức (3.6):

$$E_{acc} = \sum_{i=1}^{2^{j}} \sum_{k=1}^{2^{N-j}} \left| c_{j,k}^{i} \right|^{2}$$
(3.6)

Trong các công thức trên,  $2^N$  là số lượng phần tử của chuỗi thời gian, các hệ số  $c_{j,k}^i$  là các hệ số của gói Wavelet. Như vậy từ các hệ số gói Wavelet

(thu được từ phân tích gói Wavelet một chuỗi thời gian) có thể tính toán các đặc trưng của chuỗi thời gian.

Các hệ số gói Wavelet, theo Yamamoto, có thể được tách thành hai nhóm: nhóm các gói Wavelet chính (major Wavelet packets) và nhóm các gói Wavelet phụ (minor Wavelet packets). Nhóm chính là nhóm các gói có biên độ lớn, dù chỉ chiếm chưa đến 1% về số lượng nhưng lại chứa tới 70% tổng năng lượng và quyết định xu hướng biến đổi của gia tốc, gói Wavelet phụ chiếm 99% về số lượng nhưng chỉ chiếm 30% năng lượng của gia tốc nền [79], [82], [89]. Có thể viết như công thức (3.7) về mối quan hệ này:

$$\frac{\sum_{i=1}^{2^{j}}\sum_{k=1}^{2^{N-j}} \left| c_{j,k,maj}^{i} \right|^{2}}{\sum_{i=1}^{2^{j}}\sum_{k=1}^{2^{N-j}} \left| c_{j,k}^{i} \right|^{2}} = 0,7$$
(3.7)

trong đó:

c<sup>i</sup><sub>j,k,maj</sub> là các hệ số gói Wavelet nhóm chính;
c<sup>i</sup><sub>j,k,min</sub> là các hệ số gói Wavelet nhóm phụ.

Năng lượng tổng của cả quá trình là tổng năng lượng của nhóm chính và nhóm phụ, biểu diễn bằng công thức (3.8):

$$E_{acc} = \sum_{i=1}^{2^{j}} \sum_{k=1}^{2^{N-j}} \left| c_{j,k,maj}^{i} \right|^{2} + \sum_{i=1}^{2^{j}} \sum_{k=1}^{2^{N-j}} \left| c_{j,k,min}^{i} \right|^{2}$$
(3.8)

Ký hiệu  $Ea_{maj}$  và  $Ea_{min}$  lần lượt là năng lượng của thành phần nhóm chính và thành phần nhóm phụ, công thức (3.7) được viết lại như (3.9).

$$\begin{cases} Ea_{maj} = 0, 7.E_{acc} \\ Ea_{min} = 0, 3.E_{acc} \end{cases}$$
(3.9)

#### 3.1.2. Phương pháp và hệ phương trình của Yamamoto

#### 3.1.2.1. Các bước tiến hành cơ bản của phương pháp Yamamoto

Phương pháp của Yamamoto là phương pháp mô phỏng toán học giản đồ gia tốc nền nhân tạo từ hệ phương trình hồi quy. Hệ phương trình hồi quy là đặc trưng của mô hình dự báo cho các trận động đất xảy ra trong tương lai, thể hiện mối liên hệ giữa giản đồ gia tốc với các thông số của trận động đất. Phương pháp phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo từ hệ phương trình hồi quy bao gồm các bước cơ bản:

+ Xác định kịch bản của trận động đất đối với điểm khảo sát (xác định các nguồn gây động đất gần khu vực khảo sát, cấp động đất có thể xảy ra, chiều sâu chấn tiêu dự kiến ứng với trận động đất, khoảng cách từ điểm khảo sát đến chấn tâm...). Bước này nhằm mục đích tạo số liệu đầu vào cho bài toán (bao gồm các đại lượng: M,  $R_{hyp}$ ,  $R_{rup}$ ,  $V_{s30}$ );

 + Tính toán các tham số của gói Wavelet dựa trên hệ phương trình hồi quy và các số liệu của trận động đất dự kiến;

+ Phát sinh giản đồ gia tốc nền nhân tạo bằng phép biến đổi ngược gói Wavelet.

### 3.1.2.2. Bộ tham số đặc trưng của gói Wavelet

Trong [89] Yamamoto đã đề xuất sử dụng các đặc trưng gói Wavelet (gắn với các giản đồ gia tốc) làm biến mục tiêu để tiến hành phân tích hồi quy, 13 tham số đặc trưng cho một gia tốc nền được khảo sát bao gồm:

- Các tham số của nhóm các gói Wavelet phụ:  $E_{t,min}$  là trọng tâm tính theo thời gian;  $S_{t,min}$  là độ lệch chuẩn tính theo thời gian;  $E_{f,min}$  là trọng tâm tính theo tần số;  $S_{f,min}$  là độ lệch chuẩn tính theo tần số;  $\rho_{t,f,min}$  là hệ số tương quan tần số và thời gian trong nhóm các gói Wavelet phụ, các tham số này được tính toán theo các công thức từ (3.1) đến (3.5) và được ký hiệu tương ứng  $Y_1$  đến  $Y_5$ .

- Các tham số của nhóm các gói Wavelet chính:  $E_{t,maj}$  là trọng tâm tính theo thời gian;  $S_{t,maj}$  là độ lệch chuẩn tính theo thời gian;  $E_{f,maj}$  là trọng tâm tính theo tần số;  $S_{f,maj}$  là độ lệch chuẩn tính theo tần số;  $\rho_{t,f,maj}$  là hệ số tương quan tần số và thời gian trong nhóm các gói Wavelet chính, các tham số này

được tính toán theo các công thức từ (3.1) đến (3.5) và được ký hiệu tương ứng  $Y_6$  đến  $Y_{10}$ .

-  $E[a^{i}_{j,k,maj}]$  là kỳ vọng của bình phương biên độ hệ số gói Wavelet chính với  $a^{i}_{j,k,maj} = |c^{i}_{j,k,maj}|^{2}$  (tương ứng với tham số Y<sub>11</sub>);

- E<sub>acc</sub> là năng lượng tổng cộng (tương ứng với tham số Y<sub>12</sub>);

-  $\xi_{k,i}$  là đại lượng ngẫu nhiên phân bố chuẩn logarít của biến ngẫu nhiên với giá trị trung bình bằng "0" của phần dư trong nhóm các gói Wavelet phụ (tương ứng với tham số Y<sub>13</sub>).

Như vậy, bằng cách biểu diễn quá trình ngẫu nhiên thông quá các gói Wavelet (trên hệ trục thời gian- tần số) ta tìm được 13 tham số đặc trưng cho một giản đồ gia tốc.

### 3.1.2.3. Hệ phương trình hồi quy của Yamamoto

Trên cơ sở mô hình phát giả của Boore (2008) [33], Yamamoto đã xây dựng hệ phương trình hồi quy công thức (3.10):

$$\{Y\} = [R].\{X\} + \{\eta\} + \{\epsilon\}$$
(3.10)

trong đó:

{Y} là véc tơ các logarit tự nhiên của 13 tham số đặc trưng gói Wavelet của giản đồ gia tốc được diễn giải trong mục 3.1.2.2;

{X} là véc tơ các tham số của trận động đất, với  $X_1=1$ ,  $X_2=M$ ,  $X_3=\ln(M)$ ,  $X_4=e^M$ ,  $X_5=(R_{hyp}-R_{rup})$ ,  $X_6=\ln(R_{rup})$ ,  $X_7=\ln(V_{s,30})$ ;

[R] là ma trận các hệ số thu được từ phân tích hồi quy;

{ $\eta$ } và { $\epsilon$ } là các đại lượng ngẫu nhiên tuân phân bổ chuẩn với giá trị kỳ vọng bằng "0", độ lệch chuẩn tương ứng là  $\sigma_i$  và  $\tau_i$  xác định theo bảng 3.1.

Yamamoto đã phân tích dữ liệu của 1408 bản ghi gia tốc (ghi được từ 25 trận động đất gần đây) để xây dựng được hệ phương trình liên hệ giữa 13

tham số với 5 thông số gắn với trận động đất nhằm xây dựng hệ phương trình dự báo. Các hệ số của ma trận [R] trong công thức (3.10) được xác định tương ứng với từng tham số cần xác định.

Trong phạm vi luận án, tác giả sử dụng hệ phương trình hồi quy đã được Yamamoto xây dựng trong [89] để xây dựng thuật toán và chương trình phát sinh giản đồ gia tốc, làm cơ sở để thực hiện các tính toán, khảo sát sau này.

#### 3.2 Nội dung thuật toán của Yamamoto

Chương trình PG02 được xây dựng trên cơ sở thuật toán của Yamamoto có bổ sung thêm nội dung hiệu chỉnh giản đồ gia tốc nhân tạo thu được theo điều kiện phổ phản ứng mục tiêu xác định từ [22], bao gồm một số nội dung cơ bản:

- Xác định các tham số đặc trưng của gói Wavelet từ các dữ liệu của trận động đất (M,  $R_{hyp}$ ,  $R_{rup}$ ,  $V_{s,30}$ ) thông qua hệ phương trình hồi quy. Nội dung này sẽ được trình bày chi tiết trong mục 3.2.1.

- Xác định các hệ số  $c_{j,k}^{i}$  của gói Wavelet thông qua việc phát sinh ngẫu nhiên các hệ số của nhóm phụ  $c_{j,k,min}^{i}$  và hệ số của nhóm chính  $c_{j,k,maj}^{i}$ .

- Tái cấu trúc véc tơ giản đồ gia tốc bằng biến đổi ngược gói Wavelet.

# 3.2.1. Xác định các tham số đặc trưng của Wavelet từ hệ phương trình hồi quy của Yamamoto

Từ các giá trị đầu vào mô phỏng: M,  $R_{hyp}$ ,  $R_{rup}$ ,  $V_{s,30}$  tiến hành tính toán các tham số đặc trưng gói Wavelet theo công thức (3.11):

$$\begin{cases} Y_{1} \\ Y_{2} \\ \vdots \\ Y_{13} \end{cases} = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \dots & r_{1,7} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \dots & r_{2,7} \\ \vdots \\ r_{1,3,1} & r_{1,3,2} & \dots & r_{13,7} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{1} \\ X_{2} \\ \vdots \\ X_{7} \end{bmatrix} + \begin{cases} \eta_{1} \\ \eta_{2} \\ \vdots \\ \eta_{1} \\ \eta_{3} \end{bmatrix} + \begin{cases} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \vdots \\ \varepsilon_{13} \end{bmatrix}$$
(3.11)

trong đó:

 $Y_i$  là logarit tự nhiên của các tham số đặc trưng của các hệ số gói Wavelet (với i=1,2,..,13) như đã trình bày ở phần trên;

 $X_i$  với i=1,2,...,7 là các tham số của trận động đất dự kiến và đã được giải thích trong mục 3.1.2.3.

 $r_{i,j}$  là các tham số thu được từ phân tích hồi quy của Yamamoto được cho trong bảng 3.1;

 $\eta_i$  và  $\epsilon_i$  là các đại lượng ngẫu nhiên tuân phân bố chuẩn với giá trị kỳ vọng bằng 0 và độ lệch chuẩn tương ứng là  $\sigma_i$  và  $\tau_i$ .

Các hệ số hồi quy của Yamamoto được thể hiện qua bảng 3.1, ký hiệu $R_{\rm h}=R_{\rm hyp}-R_{\rm rup}\,.$ 

	0	0.		• 1	0	1.	·			
i	Tham số		М	ln(M)	e <sup>M</sup>	R <sub>h</sub>	ln(R <sub>np</sub> )	In(Vs,30)	σi	$ au_i$
	$(Y_i)$	$\mathbf{r}_{i,l}$	r <sub>i,2</sub>	$r_{i,3}$	r <sub>i,4</sub>	r <sub>i,5</sub>	r <sub>i,6</sub>	r <sub>i,7</sub>		
1	$ln(E_{t,min})$	2,64	0	0	0,0004	-0,001	0,22	-0,16	0,18	0,21
2	$ln(S_{t,min})$	3,06	0	0	0,0004	-0,005	0,11	-0,17	0,21	0,23
3	ln(E <sub>f,min</sub> )	1,29	-0,14	0	0	-0,004	-0,23	0,36	0,35	0,26
4	$ln(S_{f,min})$	1,48	-0,005	0	0	-0,003	-0,29	0,24	0,40	0,29
5	$ln(\rho_{tf,min})$	-0,36	0,01	0	0	-0,000056	-0,03	0,04	0,06	0,03
6	ln(E <sub>t,maj</sub> )	1,95	0	0	0,0006	-0,002	0,34	-0,20	0,27	0,30
7	$ln(S_{t, maj})$	1,82	0	0	0,0006	-0,006	0,22	-0,20	0,34	0,33
8	ln(E <sub>f, maj</sub> )	0,81	-0,26	0	0	-0,004	-0,16	0,44	0,41	0,26
9	$ln(S_{f, maj})$	0,14	-0,12	0	0	-0,002	-0,24	0,39	0,56	0,37
10	$ln(\rho_{tf,\ maj})$	-0,54	0,01	0	0	-0,00008	-0,08	0,09	0,21	0,07
11	$\ln(E\left[a_{j,k,maj}^{i}\right])$	-38,02	-4,52	37,30	0	0	-1,74	-0,94	1,13	0,71
12	ln(E <sub>acc</sub> )	-27,40	-2,58	27,00	0	0	-1,61	-0,88	0,85	0,46
13	$ln(S[\xi_{k,i}])$	1,29							0,07	

Bảng 3.1 Bảng hệ số của hệ phương trình hồi quy của Yamamoto[89]
Như vậy, từ các thông số của trận động đất ( $M_w$ ,  $V_{s,30}$ ,  $R_{rup}$ ,  $R_{hyp}$ ) có thể xác định các tham số đặc trưng của gói Wavelet thông qua công thức (3.11) và số liệu cho trong bảng 3.1.

#### 3.2.2. Phát sinh ngẫu nhiên các hệ số Wavelet



Hình 3.3. Minh họa về mối liên hệ giữa biểu diễn trên miền thời gian, miền tần số và các hệ số gói Wavelet trên mặt phẳng thời gian- tần số [89]

Thiết lập hệ trục theo thời gian và tần số, khoảng chia thời gian và tần số của gói Wavelet được ký hiệu lần lượt là dt<sub>w</sub> và df<sub>w</sub>. Hình 3.3 biểu diễn mối quan hệ giữa biểu đồ theo thời gian của gia tốc (a), biểu diễn phổ biên độ (b) và thể hiện của các gói Wavelet trên mặt phẳng thời gian - tần số (c). Các giá trị này được xác định bởi công thức (3.12) và (3.13) phụ thuộc vào bước thời gian (dt), số bước thời gian dự kiến của giản đồ gia tốc ( $2^N$ ) và độ phân giải của tần số (j).

$$dt_{w} = \frac{2^{N} dt}{2^{N-j}} = 2^{j} dt$$
(3.12)

$$df_{w} = \frac{f_{N}}{2^{j}} = \frac{1}{2dt} \cdot \frac{1}{2^{j}}$$
(3.13)

Ký hiệu t<sub>k</sub>, f<sub>i</sub> lần lượt là tọa độ trọng tâm tính theo tần số và thời gian của gói Wavelet  $c_{j,k}^{i}$ , hàm Wavelet con  $\psi_{j,k}^{i}(t)$  định vị tại thời gian t<sub>k</sub> và tần số f<sub>i</sub>. Trong các công thức trên,  $2^N$  là số lượng bước thời gian của gia tốc theo thời gian, dt là bước thời gian trong chuỗi gia tốc (trong các ví dụ lấy dt=0,01s),  $f_N$  là tần số Nyquist; hệ số j là hệ số tỷ lệ. Từ giá trị dt<sub>w</sub> và df<sub>w</sub> cơ bản trên, thiết lập hệ tọa độ cho gói Wavelet của nhóm chính (t<sub>k,maj</sub>, f<sub>i,maj</sub>) và nhóm phụ (t<sub>k,min</sub>, f<sub>i,min</sub>).

#### 3.2.2.1. Phát sinh các hệ số của nhóm phụ

Dựa trên cơ sở nghiên cứu của Thrainsson [82], Yamamoto đã đề xuất sử dụng phân phối loga chuẩn song biến (thời gian và tần số) để phát các thể nghiệm ngẫu nhiên là giá trị các hệ số gói Wavelet nhóm phụ.



Hình 3.4. Cơ sở để phát sinh các hệ số gói Wavelet từ các giá trị trọng tâm tính theo và độ lệch [89]

Các đặc trưng phân phối cơ bản bao gồm:

- Giá trị trung bình theo thời gian  $E_{t,min}$  (ứng với tham số  $Y_1$ );
- Giá trị độ lệch chuẩn tính theo theo thời gian  $S_{t,min}$  (ứng với tham số  $Y_2$ );
- Giá trị trọng tâm tính theo theo tần số  $E_{f,min}$  (ứng với tham số  $Y_3$ );
- Giá trị độ lệch chuẩn tính theo theo tần số  $S_{f,min}$  (ứng với tham số  $Y_4$ );
- Hệ số tương quan giữa thời gian và tần số của các gói Wavelet thuộc nhóm phụ ρ<sub>tf,min</sub> (ứng với tham số Y<sub>5</sub>);

- Độ lệch chuẩn của hệ số suy giảm biên độ của hệ số gói phụ S[ξ<sub>k,i</sub>] (ứng với tham số Y<sub>13</sub>);
- Giá trị năng lượng tổng cộng của nhóm phụ Ea<sub>min</sub> =0,3.E<sub>acc</sub> (E<sub>acc</sub> là giá trị năng lượng tổng cộng của cả quá trình ứng với tham số Y<sub>12</sub>).

Ký hiệu  $t_{k,min}$ ,  $f_{i,min}$  lần lượt là tọa độ trọng tâm của gói Wavelet  $c_{j,k,min}^{i}$ . Ký hiệu  $X_{min}$  và  $Y_{min}$  là logarit tự nhiên của tọa độ theo thời gian và tần số xác định theo công thức (3.14):

$$X_{\min} = \ln(t_{k,\min}); \quad Y_{\min} = \ln(f_{i,\min})$$
(3.14)

Gọi A và B lần lượt là các tham số chuẩn hóa của biến ngẫu nhiên  $X_{min}$  và  $Y_{min}$ , được xác định theo công thức (3.15):

$$A = \frac{X_{\min} - E[X_{\min}]}{S[X_{\min}]}; \quad B = \frac{Y_{\min} - E[Y_{\min}]}{S[Y_{\min}]}$$
(3.15)

trong đó:

 $E[X_{min}]$  và  $E[Y_{min}]$  tương ứng là giá trị kỳ vọng của  $X_{min}$  và  $Y_{min}$  được xác định từ  $E_{t,min}$  và  $E_{f,min}$ ;

$$\begin{split} S[X_{min}] \ va \ S[Y_{min}] \ tương \ ťng là độ lệch chuẩn của ln(t_{k,min}) và ln(f_{i,min}) \\ \\ & \text{được xác định từ } S_{t,min} \ va \ S_{f,min}; \end{split}$$

Giá trị bình phương hệ số của các gói Wavelet thuộc nhóm phụ  $\left|c_{j,k,min}^{i}\right|^{2}$  được xác định theo công thức (3.16):

$$\left|\mathbf{c}_{j,k,\min}^{i}\right|^{2} = \frac{1}{2\pi S(X_{\min}).S(Y_{\min}).\sqrt{1-\rho(X_{\min},Y_{\min})^{2}}.t_{\min}.f_{\min}}} e^{\left\{\frac{A^{2}-2\rho(X_{\min},Y_{\min}).AB+B^{2}}{1-\rho(X_{\min},Y_{\min})^{2}}\right\}}.0,3.E_{acc}.\xi_{k,i}$$
(3.16)

với  $\rho(X_{min}, Y_{min})$  là hệ số tương quan của cặp biến  $X_{min}$  và  $Y_{min}$ , được xác định từ  $R_{xv,min}$ ;

Các đặc trưng phân phối cơ bản để phát sinh các hệ số của nhóm chính bao gồm:

- Giá trị trọng tâm tính theo theo thời gian  $E_{t,maj}$  (ứng với tham số  $Y_6$ );
- Giá trị độ lệch chuẩn tính theo theo thời gian  $S_{t,maj}$  (ứng với tham số  $Y_7$ );
- Giá trị trọng tâm tính theo theo tần số  $E_{f,maj}$  (ứng với tham số  $Y_8$ );
- Giá trị độ lệch chuẩn tính theo theo tần số  $S_{f,mai}$  (ứng với tham số  $Y_9$ );
- Hệ số tương quan giữa thời gian và tần số của các gói Wavelet thuộc nhóm phụ ρ<sub>tf,maj</sub> (ứng với tham số Y<sub>10</sub>);
- Kỳ vọng của bình phương biên độ hệ số gói Wavelet chính  $E[a_{j,k,maj}^i]$  (ứng với tham số  $Y_{11}$ ).

Trọng tâm tính theo thời gian, tần số  $(t_{k,maj} và f_{i,maj}) về$  hệ trục logarít tự nhiên là  $X_{maj}$  và  $Y_{maj}$  theo công thức:

$$X_{maj} = \ln(t_{maj}); Y_{maj} = \ln(f_{maj})$$
 (3.17)

Theo nghiên cứu của Yamamoto [89], tọa độ thời gian ( $t_{k,maj}$ ) và tọa độ tần số ( $f_{i,maj}$ ) của các gói Wavelet thuộc nhóm chính là các tham số phụ thuộc lẫn nhau, tuy nhiên các tham số này độc lập hoàn toàn với biên độ tương ứng ( $|c_{j,k,maj}^{i}|$ ). Do đó, tham số vị trí ( $t_{k,maj}$ ,  $f_{i,maj}$ ) và tham số biên độ bình phương của các hệ số nhóm chính ( $a_{j,k,maj}^{i} = |c_{j,k,maj}^{i}|^{2}$ ) được phát sinh độc lập.

Tọa độ thời gian và tần số có thể coi là đại lượng ngẫu nhiên có phân phối loga chuẩn xác định theo (3.18):

$$(t_{k,maj} \quad f_{i,maj}) \sim \text{Lognormal}(M_{maj}, \Sigma_{maj})$$
 (3.18)

trong đó  $M_{maj}$ ,  $\Sigma_{maj}$  lần lượt là kỳ vọng và ma trận tương quan được xác định theo công thức (3.19) và (3.20):

$$M_{maj} = \begin{bmatrix} E[X_{maj}] & E[Y_{maj}] \end{bmatrix}$$
(3.19)

$$\Sigma_{maj} = \begin{bmatrix} S^{2}(X_{maj}) & Cov(X_{maj}, Y_{maj}) \\ Cov(X_{maj}, Y_{maj}) & S^{2}(Y_{maj}) \end{bmatrix}$$
(3.20)

Bình phương độ lớn hệ số Wavelet là đại lượng ngẫu nhiên có phân phối e-mũ biểu diễn theo công thức (3.21):

$$(c_{j,k,maj}^{i})^{2} \sim \text{Exponential}(\mathbb{E}\left[a_{j,k,maj}^{i}\right])$$
 (3.21)

#### 3.2.2.3. Tính toán các hệ số của gói Wavelet

Từ các hệ số gói Wavelet nhóm chính và nhóm phụ đã xác định được, ta tính toán các hệ số gói Wavelet tổng hợp theo công thức (3.22):

$$c_{j,k}^{i} = \sqrt{(c_{j,k,\min}^{i})^{2} + (c_{j,k,\max}^{i})^{2}}$$
(3.22)

### 3.2.3. Tái cấu trúc giản đồ gia tốc bằng biến đổi ngược gói Wavelet

Khi có các hệ số của gói Wavelet  $c_{j,k}^{i}$ , có thể tái cấu trúc chuỗi thời gian x(t) bằng việc sử dụng biến đổi ngược gói Wavelet (iWPT) bằng cách sử dụng hàm biến đổi ngược *wprec* sẵn có trong thư viện phần mềm Matlab 7.0 theo công thức (3.23):

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^{2^{j}} \sum_{k=1}^{2^{N-j}} c^{i}_{j,k} \psi^{i}_{j,k}(t)$$
(3.23)

#### 3.3 Cải biên thuật toán của Yamamoto, xây dựng chương trình PG02

#### 3.3.1. Cải biên thuật toán của Yamamoto

Giản đồ gia tốc nhân tạo thu được bằng biến đổi ngược theo phương pháp của Yamamoto là một thể nghiệm ngẫu nhiên, nên cần kiểm tra và hiệu chỉnh để gia tốc nền phù hợp với phổ phản ứng thỏa mãn các yêu cầu của Tiêu chuẩn TCVN 9386-2012 [22].

Giản đồ gia tốc sau hiệu chỉnh cần có phổ phản ứng với mỗi chu kỳ tính toán không nhỏ hơn 90% phổ phản ứng mục tiêu Tiêu chuẩn quy định. Bên cạnh đó, để hạn chế việc giản đồ gia tốc có phổ phản ứng sai khác nhiều với phổ mục tiêu, trong thuật toán đề xuất cũng giới hạn độ lệch phổ tương đối ≤10%.

$$\left|\frac{\mathbf{S}\mathbf{a}_{\mathrm{TK}} - \mathbf{S}\mathbf{a}}{\mathbf{S}\mathbf{a}_{\mathrm{TK}}}\right| = \left|\frac{\Delta \mathbf{S}\mathbf{a}}{\mathbf{S}\mathbf{a}_{\mathrm{TK}}}\right| \le 0,1 \tag{3.24}$$

Trên cơ sở thuật toán của Yamamoto [89], tác giả đề xuất bổ sung nội dung hiệu chỉnh giản đồ gia tốc nhân tạo theo điều kiện về phổ phản ứng theo TCVN 9386-2012 [22]. Bằng ngôn ngữ lập trình Matlab để lập chương trình PG02 với các nội dung cần thực hiện được thể hiện trong bảng 3.2.

Thứ tự	Nội dung công việc thực hiện	Hàm thực hiện
Bước 1	Nhập dữ liệu đầu vào.	ThietlapSLV
Bước 2	Xác định các tham số đặc trưng của gói Wavelet thông qua hệ phương trình hồi quy	TinhHsoTquanFcn
Bước 3	Phát các hệ số của nhóm phụ của gói Wavelet theo các công thức từ (3.14) đến (3.16).	TinhhsoMinorFcn
Bước 4	Phát giá trị các hệ số của nhóm chính gói Wavelet theo các công thức từ (3.17) đến (3.20).	TinhhsoMajorFcn
Bước 5	Tính hệ số gói Wavelet theo các công thức (3.22).	TinhhsoWaveletFcn
Bước 6	Chọn hàm Wavelet và tái cấu trúc giản đồ gia tốc theo thời gian bằng phép biến đổi ngược gói Wavelet, thể hiện qua công thức (3.23).	- TaicautrucAccFcn - wprec

Bảng 3.2 Các bước thực hiện thuật toán chương trình PG02

Thứ tự	Nội dung công việc thực hiện	Hàm thực hiện
Bước 7	Hiệu chỉnh giản đồ gia tốc theo điều kiện khớp phổ phản ứng	Khop_PPu
Bước 8	Tính toán các đặc trưng của giản đồ gia tốc (PGA, a <sub>RMS</sub> , t <sub>5-95</sub> )	Tinh_Arias_aRMS
Bước 9	Kết thúc, lưu kết quả	

Sơ đồ khối của chương trình PG02 được thể hiện trong hình 3.5.



Hình 3.5. Sơ đồ thuật toán chương trình PG02

#### 3.3.2. Giao diện của chương trình PG02

Trên cơ sở sơ đồ thuật toán đã trình bày trong hình 3.5, trên nền ngôn ngữ lập trình Matlab tác giả đã xây dựng chương trình PG02 có giao diện thể hiện như trong hình 3.6.



#### Hình 3.6. Giao diện chương trình PG02

Các thông số cần nhập vào chương trình PG02 bao gồm 2 nhóm dữ liệu:

- Các thông số về nguồn và đường truyền (hình 3.7): chấn cấp ( $M_w$ ), độ sâu chấn tiêu ( $R_{hyp}$ ), tâm cự ( $R_{rup}$ ), vận tốc truyền sóng cắt của môi trường ( $V_{s30}$ ).

- Các thông số về phổ phản ứng theo tiêu chuẩn: loại nền, gia tốc đỉnh tham chiếu ( $a_{gR}$ ), hệ số tầm quan trọng của công trình ( $\gamma_I$ ).



Hình 3.7. Sơ đồ nguồn chấn đến điểm khảo sát

## 3.4 Sử dụng chương trình PG02 phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo trên nền đá gốc

#### 3.4.1. Lựa chọn nguồn phát sinh động đất với địa điểm khảo sát

Theo tài liệu [19], việc đánh giá lựa chọn nguồn phát sinh có thể được thực hiện theo các bước:

- Xác định các nguồn phát sinh xung quanh khu vực khảo sát;

- Xác định động đất cực đại có thể phát sinh từ nguồn;

- Xác định giá trị gia tốc đỉnh (PGA) tại các điểm khảo sát;

- So sánh giá trị PGA dự kiến ứng với các nguồn để lựa chọn nguồn động đất đưa vào mô phỏng.

Khảo sát với một vị trí trung tâm tại khu vực quận Ba Đình, thành phố Hà Nội, các nguồn phát sinh động đất lân cận khu vực này được lấy theo [19] và được thể hiện trong bảng 3.3.

Bảng 3.3 Bảng thông số các đới động đất khảo sát với vị trí trung tâm quận Ba Đình Hà Nội (tọa độ 21,030N; 105,824Đ) [19]

TT	Đới phát sinh động đất	Chấn cấp M	Độ sâu chấn tiêu R <sub>hyp</sub> (km)	Khoảng cách từ chấn tâm đến vị trí khảo sát R <sub>rup</sub> (km)
01	Đới Tây Bắc	7,0	25	90
02	Đới sông Đà	5,5	12	55
03	Đới sông Hồng - sông Chảy	6,2	15	11
04	Đới sông Lô	5,5	15	13

TT	Đới phát sinh	Chấn	Độ sâu chấn	Khoảng cách từ chấn tâm
	động đất	cấp M	tiêu R <sub>hyp</sub> (km)	đến vị trí khảo sát R <sub>rup</sub> (km)
05	Đới Đông Triều - Uông Bí	6,2	15	29

Để xác định đới dộng đất đưa vào thử nghiệm số chương trình PG02, tác giả so sánh giá trị gia tốc đỉnh (giá trị gia tốc nền cực đại) có thể hình thành do các đới động đất kể trên. Giá trị gia tốc nền cực đại theo phương ngang PGA có thể xác định theo các công thức thực nghiệm phụ thuộc vào chấn cấp M theo công thức của Campell [19]:

$$PGA = e^{-3.512+0.904.M - 1.328.\ln \sqrt{R^2 + (0.149.e^{0.647M})^2}} (cm/s^2) \quad (3.25)$$

trong đó: M<sub>w</sub> là chấn cấp; R<sub>hyp</sub>(km) là độ sâu chấn tiêu; R<sub>rup</sub>(km) là khoảng cách đến chấn tâm; R là khoảng cách từ điểm xét đến chấn tiêu $R = \sqrt{R_{rup}^2 + R_{hyp}^2}$ (km).

Kết quả tính toán giá trị gia tốc cực đại được thể hiện trong bảng 3.4.

Bảng 3.4 Giá trị gia tốc nền cực đại tính toán với vị trí trung tâm quận Ba Đình Hà Nội (tọa độ 21,030N, 105,824Đ)

TT	Đới sinh động đất	Chấn cấp M	Gia tốc đỉnh tính theo Campell (cm/s <sup>2</sup> )
1	Tây Bắc	7,0	39,06
2	Sông Đà	5,5	19,89
3	Sông Hồng- sông Chảy	6,2	145,57
4	Sông Lô	5,5	76,38
5	Đông Triều- Uông Bí	6,2	74,54

Từ bảng 3.4, có thể thấy nguồn phát sinh động đất đáng kể với khu vực Ba Đình là đới đứt gãy Sông Hồng - Sông Chảy, với giá trị gia tốc đỉnh dự kiến theo tính toán lớn hơn các nguồn phát sinh còn lại. Do đó, trong nội dung tiếp theo của luận án, tác giả sẽ sử dụng chương trình PG02 để phát sinh ngẫu nhiên các giản đồ gia tốc với nguồn phát sinh này.

# 3.4.2. Sử dụng chương trình PG02 phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo tại nền đá gốc với đới động đất sông Hồng- sông Chảy

Sử dụng chương trình PG02 đã lập để phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo ứng với các trận động đất có thể xảy ra tại các địa điểm trên địa bàn Hà Nội từ nguồn phát là đới Sông Hồng - Sông Chảy. Gia tốc nhân tạo được phát sinh theo điều kiện của thành phố Hà Nội, vị trí lựa chọn là vị trí trung tâm quận Ba Đình (tọa độ 21,030N; 105,824Đ).

Đới đứt gãy Sông Hồng- Sông Chảy có các thông số nguồn phát bao gồm: chấn cấp  $M_w$ =6,2 và độ sâu chấn tiêu là  $R_{hyp}$ =15km. Khoảng cách từ điểm xét đến chấn tâm là  $R_{rup}$ =11km; vận tốc truyền sóng cắt trung bình của đất đá tại khu vực xét với bề dày 30m giả thiết là  $V_{s,30}$ =800m/s. Điều kiện phổ phản ứng mục tiêu ứng với nền đất loại A theo [22].

Thực hiện 18 lần phát giả khác nhau để thu về bộ số liệu phục vụ nghiên cứu, đồng thời tính toán và biểu diễn phân bố năng lượng theo thời gian. Các giản đồ gia tốc nhân tạo được ký hiệu lần lượt từ bd01-01a đến bd01-18a và được thể hiện trên các hình từ hình 3.8 đến hình 3.12, các giản đồ gia tốc còn lại được thể hiện chi tiết trong phụ lục D.



Hình 3.9. Giản đồ gia tốc nhân tạo bd01-02a



Hình 3.12. Giản đồ gia tốc nhân tạo bd01-05a

Các đặc trưng của 18 giản đồ gia tốc nhân tạo như: gia tốc đỉnh (PGA), gia tốc hiệu dụng (a<sub>RMS</sub>), cường độ Arias (IA)... được tính toán và thể hiện trong bảng 3.5 dưới đây.

			Tham số						
TT	Giản đồ gia tốc nhân tạo	PGA	PGV	a <sub>RMS</sub>	IA	t5-95			
		$(cm/s^2)$	(cm/s)	$(cm/s^2)$	(cm/s)	<b>(s)</b>			
1	bd01-01a	93,73	6,21	25,63	10,800	9,28			
2	bd01-02a	104,57	6,62	25,71	12,500	10,62			
3	bd01-03a	73,69	6,89	27,99	9,450	6,78			
4	bd01-04a	102,86	6,41	30,84	12,700	7,51			
5	bd01-05a	92,15	8,05	27,74	10,600	7,73			
6	bd01-06a	102,64	7,87	30,29	9,900	6,09			
7	bd01-07a	94,65	7,53	29,15	11,700	7,72			
8	bd01-08a	102,01	5,61	27,58	9,500	7,02			
9	bd01-09a	105,74	7,93	32,82	10,900	5,70			

Bảng 3.5 Các tham số đặc trưng của giản đồ gia tốc nhân tạo phát sinh bằng chương trình PG02

				Tham số		
TT	Giản đồ gia tốc nhân tạo	PGA	PGV	a <sub>RMS</sub>	IA	t5-95
		$(cm/s^2)$	(cm/s)	$(cm/s^2)$	(cm/s)	<b>(s)</b>
10	bd01-10a	101,60	6,03	27,95	9,900	7,13
11	bd01-11a	104,24	6,49	26,95	9,900	7,67
12	bd01-12a	98,04	6,31	24,89	8,900	8,06
13	bd01-13a	76,83	6,86	28,99	12,200	8,16
14	bd01-14a	93,59	7,54	28,95	11,000	7,36
15	bd01-15a	88,56	8,31	28,85	9,500	6,43
16	bd01-16a	101,51	7,24	29,54	14,400	9,28
17	bd01-17a	99,88	8,18	30,89	10,200	5,98
18	bd01-18a	76,57	7,84	25,85	8,600	7,25
	Trung bình	95,16	7,11	28,37	10,70	7,54
	Nhỏ nhất	73,69	5,61	24,89	8,60	5,70
	Lớn nhất	105,74	8,31	32,82	14,40	10,62

Sa\_TK là phổ phản ứng mục tiêu và Sa\_TB là và phổ phản ứng trung bình của 18 giản đồ gia tốc (hình 3.13).



Hình 3.13. Phổ phản ứng đàn hồi của các giản đồ gia tốc nhân tạo

#### 3.5 Kết luận chương 3

Trong chương 3, tác giả tìm hiểu cơ sở lý thuyết của phương pháp phát sinh giản đồ gia tốc trên cơ sở hệ phương trình hồi quy. Cải biên thuật toán của Yamamoto để xây dựng chương trình PG02 trên nền ngôn ngữ lập trình Matlab có phổ phản ứng mục tiêu xác định theo TCVN 9386-2012.

Thử nghiệm số với chương trình PG02 phát sinh các giản đồ gia tốc nhân tạo ứng với vị trí trung tâm quận Ba Đình, thành phố Hà Nội với nguồn động đất là đới đứt gãy Sông Hồng - Sông Chảy. Kết quả của thử nghiệm số thu được 18 giản đồ gia tốc nhân tạo phù hợp với các yêu cầu tính toán công trình ngầm chịu động đất.

### Chương 4. KHẢO SÁT ỨNG XỬ CỦA KẾT CẦU CÔNG TRÌNH NGẦM CHỊU TÁC DỤNG CỦA ĐỘNG ĐẤT TẠI HÀ NỘI VỚI GIẢN ĐỒ GIA TỐC NHÂN TẠO

Trong chương 4, luận án sẽ tập trung khảo sát ứng xử của kết cấu công trình ngầm được xây dựng tại thành phố Hà Nội với giản đồ gia tốc nền nhân tao được phát sinh bằng hai chương trình PG01 và PG02. Qua nôi dung tổng quan tại chương 1, có thể thấy, việc phân tích động lực học công trình ngầm nói chung và tính toán công trình ngầm chịu động đất nói riêng có thể được thực hiện bằng nhiều công cụ là các phần mềm dựa trên nền tảng của các phương pháp số như phần mềm Abaqus, Ansys, Phase, Flac3D,... Trong đó phần mềm thương phẩm Plaxis 2D, là phần mềm được nhiều tác giả sử dụng [14], [15], [16]... Uu điểm nội bật của phần mềm là thư viện vật liệu môi trường và kết cấu phong phú, phù hợp với bài toán công trình ngầm trong đất, các điều kiên biên tiêu chuẩn cũng được thiết lập tao điều kiên cho người dùng có thể mô hình hóa bài toán môt các thuân lơi và tránh được các sai sót không đáng có. Từ đối tượng và mục tiêu đã xác định từ nội dung tổng quan, tác giả lựa chọn phần mềm Plaxis 2D để tính toán nội lực xuất hiện trong kết cấu công trình ngầm chịu tác dụng của động đất, các vấn đề chi tiết sẽ được trình bày trong nội dung của chương 4 sau đây.

## 4.1 Xây dựng mô hình bài toán trên phần mềm Plaxis khảo sát kết cấu công trình ngầm tại khu vực Hà Nội dưới tác dụng của động đất

#### 4.1.1. Đối tượng khảo sát

Đối tượng luận án tập trung khảo sát là đoạn ngầm trong dự án "Đường sắt đô thị (Metro) số 3, Nhổn- Ga Hà Nội" nằm tại trung tâm quận Ba Đình. Dự án đường sắt đô thị thí điểm Hà Nội có tổng chiều dài khoảng 12,5 km từ ga Nhổn (quận Từ Liêm) đến ga cuối cùng - ga Hà Nội tại đường Trần Hưng Đạo (phía trước ga Hà Nội). Tuyến này bao gồm khoảng 8,5 km trên cao và 4km đi ngầm với 8 nhà ga trên mặt đất (S1 đến S8) và 4 nhà ga ngầm (S9 đến S12), mặt bằng tuyến được thể hiện trên hình 4.1. Giải pháp thiết kế tuyến ngầm là hai đường hầm ray đơn chạy song song. Tại vị trí dự kiến khảo khoảng cách giữa tim hai tuyến hầm là 35m. Do trong luận án không tập trung vào việc khảo sát ảnh hưởng lẫn nhau giữa hai nhánh hầm và để giảm khối lượng, thời gian tính toán nên sơ đồ tính được xây dựng cho bài toán một đường hầm đơn.

Để giải quyết bài toán tương tác của kết cấu công trình ngầm và môi trường xung quanh chịu tác dụng của động đất, do chiều dài công trình lớn hơn nhiều các kích thước còn lại nên giả thiết hệ kết cấu - môi trường làm việc theo sơ đồ biến dạng phẳng. Khi tính toán thừa nhận các giả thiết sau:

 Hệ kết cấu và môi trường làm việc trong điều kiện của bài toán biến dạng phẳng, mô hình bài toán được xây dựng trong giai đoạn khai thác sử dụng và không mô tả quá trình thi công của đường hầm;

 Điều kiện biên của chu vi của miền khảo sát, hai bên trái và phải được mô tả là biên hấp thụ không phản xạ sóng;

 Việc tính toán tác dụng của động đất được thực hiện theo hướng dẫn của ITA và Hashash [50] thể hiện trên mô hình tính bằng việc áp đặt dịch chuyển cưỡng bức của nền đất đá cứng (bedrock). Dịch chuyển này tạo bởi gia tốc theo phương ngang, vuông góc với trục hầm;

- Vật liệu của kết cấu làm việc trong giai đoạn đàn hồi.



Hình 4.1. Mặt bằng tuyến đường sắt đô thị số 03 Nhổn-Ga Hà Nội **4.1.2. Xác định miền nghiên cứu và điều kiện biên của bài toán** 

Mô hình bài toán phẳng chịu tác động của tải trọng động đất của hệ kết cấu hầm – nền đất. Chiều cao của miền tính toán được định là khoảng cách từ mặt đất đến nền đất đá cứng (bedrock). Với điều kiện địa chất khu vực Hà Nội nền đất đá cứng là tầng sỏi cuội ở độ sâu trong khoảng từ 33m đến 75m tính từ mặt đất [68]. Theo hồ sơ khảo sát trong [23] có thể lấy độ sâu lớp đất đá gốc đưa vào tính toán là 60m. Căn cứ vào một số nghiên cứu tương tự [15] [80], bề rộng miền khảo sát được xác định để đảm bảo khoảng cách từ đường hầm đến hai phía trong khoảng 8D đến 10D, trong ví dụ khảo sát tác giả lấy chiều rộng miền khảo sát là 130m.

Sử dụng điều kiện biên chuẩn của Plaxis. Mặt trái và mặt phải của miền tính toán cần thỏa mãn điều kiện "biên hấp thụ" (absorbent boundary) hạn chế sự phản xạ của các loại sóng truyền trong môi trường khi đi qua biên. Điều kiện biên của mô hình được thiết lập tự động trong phần mềm Plaxis với hai chế độ "Load\Standard absorbent boundaries" cho "biên hấp thụ" và "Load\Standard earthquake boundaries" để cho phép gán gia tốc lên đáy của mô hình (bedrock) [35] [81].

Mô hình toán "biên hấp thụ" được mô tả theo Lysmer và Kuhlemayer [59], trong đó, thành phần ứng suất pháp và ứng suất tiếp theo phương ngang được xác định theo công thức (4.1):

$$\begin{cases} \sigma_{n} = -c_{1}.\rho.V_{p}.\dot{u}_{x} \\ \tau = -c_{2}.\rho.V_{s}.\dot{u}_{y} \end{cases}$$

$$(4.1)$$

trong đó:

 $c_1$  và  $c_2$  là các hệ số cản trên biên, giá trị đề xuất theo [35] là  $c_1=0,25$  và  $c_2=1$ ;

 $\rho$  là trọng lượng thể tích của đất đá (kN/m<sup>3</sup>);

 $V_P$  và  $V_s$  lần lượt là vận tốc lan truyền sóng nén và sóng cắt trong đất (m/s);

 $\dot{u}_x$ ; $\dot{u}_v$  lần lượt là vận tốc của nút theo phương x và phương y (m/s).

- Đáy của miền tính toán, nền đá cứng được gán chuyển vị cưỡng bức ban đầu ( $U_x=0,01m$  và  $U_y=0$ ).

Sơ đồ bài toán cần khảo sát được thể hiện như trong hình 4.2, đường hầm bằng BTCT có dạng tròn đường kính trong là 5,7m và chiều dày kết cấu là 0,3m. Địa chất từ mặt đất đến đến đáy có chiều dày 60m, bao gồm 6 lớp địa chất (được ký hiệu từ L1 đến L6). Tâm đường hầm được đặt ở độ sâu 25m tính tới mặt đất. Mực nước ngầm sâu 5,0m tính từ mặt đất (mực nước ngầm tính toán được xác định theo kết quả khảo sát địa chất trung bình, ảnh hưởng của mực nước ngầm đến sự làm việc của kết cấu công trình ngầm chịu động đất trong điều kiện Việt Nam đã được tác giả Lê Bảo Quốc trình bày trong [15], [16]).



Hình 4.2. Mặt cắt ngang đường hầm các lớp địa chất tại vị trí khảo sát Bảng 4.1 Bảng thống kê các lớp đất

T T	Ký hiệu lớp đất	Loại đất	Bề dày tương ứng (m)	Kết quả thí nghiệm SPT (Nspt)
1	L1	Sét pha trạng thái dẻo cứng	2,5	11
2	L2	Sét pha trạng thái dẻo mềm	15	7
3	L3	Cát, kết cấu chặt vừa	3,5	21
4	L4	Cát, kết cấu chặt	15,0	41
5	L5	Cát hạt thô lẫn sỏi	11,0	50
6	L6	Sỏi sạn cuội, kết cấu rất chặt	13,0	100

### 4.1.3. Mô hình hóa kết cấu vỏ hầm

Đoạn hầm trong tuyến tàu điện ngầm Metro số 03 được thi công bằng tổ hợp TBM có kết cấu vỏ dạng lắp ghép [23] nên có thể mô hình hóa ở 2 dạng khác nhau:

- Mô hình hóa kết cấu ở dạng một vòng tròn liên tục;

- Mô hình hóa kết cấu sát với thực tế, kết cấu dạng lắp ghép.

Trong phạm vi luận án, tác giả khảo sát lần lượt hai sơ đồ theo các mô hình hóa kết cấu vỏ hầm kể trên.

Theo hồ sơ thiết kế của tuyến Metro số 03 [23], mỗi đốt hầm bao gồm 6 phân tố (segment), trong đó, phân tố khóa (key segment) có kích thước nhỏ hơn các phân tố còn lại. Để đơn giản sơ đồ tính toán, nghiên cứu sinh giả thiết vỏ hầm cấu tạo từ 6 phân tố có cùng kích thước [29], sơ đồ kết cấu tính toán được thể hiện như trong hình 4.3.



### Hình 4.3. Sơ đồ kết cấu vỏ hầm dạng lắp ghép tính toán

Mô hình vật liệu kết cấu hầm giả thiết là đồng nhất và làm việc theo mô hình đàn hồi tuyến tính, các đặc trưng tiết diện kết cấu và vật liệu vỏ hầm được giả thiết như trong bảng 4.1.

TT	Tham số	Ký hiệu	Tròn	Đơn vị
1	Kích thước trong của vỏ hầm	$D_{tr}$	5,70	m
2	Kích thước ngoài của vỏ hầm	D <sub>ng</sub>	6,30	m

Bảng 4.2 Các tham số của kết cấu vỏ hầm khai báo trong Plaxis 2D

TT	Tham số	Ký hiệu	Tròn	Đơn vị
3	Mô-đun đàn hồi của bê tông vỏ hầm	Ec	2,5.107	kN/m <sup>2</sup>
4	Hệ số Poisson của bê tông	ν	0,15	
5	Bề dày của kết cấu vỏ hầm	t	0,30	m
6	Bề rộng dải kết cấu khảo sát	b	1,00	m
7	Độ cứng dọc trục	EA	7,50.10 <sup>6</sup>	kN/m
8	Độ cứng kháng uốn	EI	5,62.10 <sup>4</sup>	kNm <sup>2</sup> /m
9	Trọng lượng đơn vị theo chiều dài	W	7,50	kN/m/m

Các phân tố của vỏ hầm được liên kết tại các nút và được giả thiết làm việc theo mô hình dạng liên kết nửa cứng (LKNC) của Jassen [54] thể hiện như trong hình 4.4. Jassen đã mô hình hóa liên kết giữa các phân tố bằng ba liên kết đàn hồi:

- Liên kết đàn hồi kháng uốn với độ cứng  $C_r$ , liên kết này đặc trưng cho khả năng truyền mô men từ miếng ghép này sang miếng ghép kia. Giá trị  $C_r$  cũng là thông số cơ bản trong mô hình Jassen.

- Liên kết đàn hồi theo phương pháp tuyến với độ cứng  $k_{\rm r}$ 

- Liên kết đàn hồi theo phương tiếp tuyến với độ cứng  $k_t$ .

Trong thực tiễn tính toán, giá trị liên kết đàn hồi theo phương pháp tuyến  $(k_r)$  và tiếp tuyến  $(k_t)$  thường được giả thiết là rất lớn. Khi tính toán theo phần mềm Plaxis 2D, liên kết Janssen được mô tả tương đương với khớp lý tưởng có liên kết kháng uốn với độ cứng C<sub>r</sub>.

Giá trị độ cứng kháng uốn  $C_r$  của liên kết (giả thiết trong giai đoạn liên kết đóng kín) được xác định theo công thức (4.2) [54]:

$$C_{\rm r} = \frac{b.l_{\rm t}^2.E_{\rm c}}{12}$$
(4.2)

trong đó: lt là chiều cao làm việc của liên kết;

E<sub>c</sub> là mô đun đàn hồi của bê tông;

b là chiều dài đoạn hầm, b=1m.



Hình 4.4. Mô hình liên kết theo Jassen [54]

Chiều cao vùng tiếp xúc được xác định theo chi tiết cấu tạo liên kết như trên hình 4.5:  $l_t=110,0+75,0=185$ mm=0,185m.



Hình 4.5. Cấu tạo chi tiết liên kết giữa hai phân tố vỏ hầm (theo tài liệu thiết kế [23])

Thay vào công thức (4.2) ta xác định được độ cứng kháng uốn của liên kết giữa các phân tố:

$$C_r = \frac{b.l_t^2.E_c}{12} = \frac{1.0,185^2.2,5.10^7}{12} = 71302 \text{ (kNm/rad)}$$

Xây dựng sơ đồ kết cấu vỏ hầm và tiến hành khai báo độ cứng cho LKNC, việc khai báo được thực hiện trong Plaxis 2D thông qua giao diện thẻ "Hinges and rotation spring" như trong hình 4.6.



Hình 4.6. Khai báo liên kết nửa cứng trong phần mềm Plaxis2D **4.1.4. Mô hình vật liệu môi trường** 

Trên cơ sở tham khảo nghiên cứu của Ahmad (2010) [27], tác giả lựa chọn mô hình Hardening Soil (HS) để mô hình hóa các lớp đất để tính toán bằng mềm Plaxis. Mô hình HS do Shanz và các công sự (1999) [73] cải tiến và phát triển dựa trên cơ sở lý thuyết đàn hồi- dẻo cổ điển để mô phỏng tính ứng xử đàn hồi và dẻo của đất nền. Theo Brinkgreve và Broere (2006) [35] các tham số cần khai báo mô hình này trong Plaxis được bao gồm các tham số:

- Dung trọng tự nhiên của đất  $\gamma_{unsat}$  (kN/m<sup>3</sup>);
- Dung trọng bão hòa nước của đất  $\gamma_{sat}$  (kN/m<sup>3</sup>);

- Góc ma sát trong  $\varphi(\mathbf{d}\hat{\varphi})$ ;
- Cường độ lực dính c (kN/m<sup>2</sup>);
- Góc trương nở ψ (với đất cố kết nặng, đất sét có thể lấy ψ≈0; với đất cát có φ>30° có ψ≈φ-30°; với các loại đất có φ<30° lấy ψ=0 [35]).</li>

- Tham số  $E_{50}^{ref}$  là mô-đun cát tuyến ứng với 50%;

- Tham số  $E_{oed}^{ref}$  là mô-đun tiếp tuyến xác định từ thí nghiệm nén đơn trục không thoát nước;

- Tham số  $E_{\rm ur}^{\rm ref}$  là mô-đun biến dạng của đất khi dỡ và gia tải lại.

Các tham số của đất nền được tham khảo từ tài liệu khảo sát địa chất thuộc dự án tàu điện đô thị số 03 [23] và được thể hiện như trong bảng 4.3 dưới đây.

	Dung 1.5 Dung cuc main so cuu cuc rop uur uu meo mo mini 115							
тт	τμόνς εό	KÝ	TÊN LỚP					
11	I HUNG SU	HIỆU	L1	L2	L3	L4	L5	L6
1	Bề dày lớp địa chất (m)		2,5	15	3,5	15,0	11,0	13,0
2	Loại đất		L1	L2	L3	L4	L5	L6
3	Mô hình vật liệu		HS	HS	HS	HS	HS	HS
4	Dung trọng bão hòa nước (kN/m <sup>3</sup> )	γsat	18	17,8	19,4	20,0	21,0	23,0
5	Dung trọng tự nhiên (kN/m <sup>3</sup> )	γunsat	17	16,8	19,4	20,0	21,0	23,0
6	Mô đun biến dạng đơn trục (kN/m <sup>2</sup> )	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	5.100	3.600	16.200	25.200	48.800	131.000
7	Mô đun biến dạng cát tuyến (kN/m <sup>2</sup> )	$E_{50}^{\text{ref}}$	5.100	3.600	16.200	25.200	48.800	131.000

Bảng 4.3 Bảng các tham số của các lớp đất đá theo mô hình HS

тт	THÔNG SỐ	KÝ	TÊN LỚP					
11		HIỆU	L1	L2	L3	L4	L5	L6
8	Mô đun biến dạng chất-dỡ tải (kN/m <sup>2</sup> )	E <sup>ref</sup> <sub>ur</sub>	15.300	10.800	48.600	75.600	146.400	393.000
9	Hệ số Poisson	ν	0,3	0,35	0,3	0,3	0,3	0,28
10	Lực dính c (kN/m <sup>2</sup> )	с	55	30	0,1	0,1	0,1	0,1
11	Góc ma sát trong φ (độ)	φ	20	12	31	37	39	45
12	Hệ số R <sub>inter</sub>	Rinter	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7

Các tham số cản Rayleigh  $\alpha_R$  và  $\beta_R$  của mô hình vật liệu đất đá được xác định từ phương trình:

$$\xi_{i} = \frac{\alpha_{R}}{2\omega_{i}} + \frac{\beta_{R}.\omega_{i}}{2}$$
(4.3)

trong đó  $\xi_i$  và  $\omega_i$  lần lượt là tỷ số cản và tần số góc ứng với dạng dao động thứ i. Để xác định cặp hệ số cản, giả thiết tỷ số cản  $\xi_i=0,5\%$  đến 2% (theo Brinkgreve [35]), từ hệ phương trình viết cho tần số thứ m và n ta tính được cặp tham số cản Rayleigh theo công thức (3.41):

$$\begin{cases} \alpha_{\rm R} = \frac{2.\omega_{\rm m}.\omega_{\rm n}.(\xi_{\rm n}.\omega_{\rm m} - \xi_{\rm m}.\omega_{\rm n})}{\omega_{\rm m}^2 - \omega_{\rm n}^2} \\ \beta_{\rm R} = \frac{2.(\xi_{\rm m}.\omega_{\rm m} - \xi_{\rm n}.\omega_{\rm n})}{\omega_{\rm m}^2 - \omega_{\rm n}^2} \end{cases}$$
(4.4)

Theo Kramer [55], tần số góc thứ n của lớp đất có bề dày H được tính theo công thức:

$$\omega_{\rm n} = \frac{v_{\rm s}}{\rm H} \left( {\rm n}.\pi - \frac{\pi}{2} \right) \tag{4.5}$$

Trong thực hành tính toán, chủ yếu quan tâm đến hai dạng dao động ứng

với hai tần số đầu tiên  $\omega_1$  và  $\omega_2$  [55].

$$\begin{cases} \alpha_{\rm R} = \frac{2.\omega_1.\omega_2.(\xi_2.\omega_1 - \xi_1.\omega_2)}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \\ \beta_{\rm R} = \frac{2.(\xi_1.\omega_1 - \xi_2.\omega_2)}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \end{cases}$$
(4.6)

Như vậy cần xác định giá trị  $\omega_1$  và  $\omega_2$  cho các lớp đất:

$$\begin{cases} \omega_{1} = \frac{\pi}{2} \frac{V_{s}}{H} \\ \omega_{2} = \frac{3\pi}{2} \frac{V_{s}}{H} \end{cases}$$
(4.7)

trong đó:  $v_s$  là vận tốc truyền sóng cắt trong lớp đất, được xác định theo công thức của Imai (1977) [53] phụ thuộc vào kết quả thí nghiệm SPT theo công thức:

$$V_{s} = 91.(N_{SPT})^{0.337}$$
(4.8)

Thay vào công thức (4.4) ta tính toán được tham số cản Rayleigh cho từng lớp như kết quả thể hiện trong bảng 4.4 dưới đây.

KH	Lóp đất	H	NSPT	Vs	ξ	ω1	ω2	αr	βR
		(m)		(m/s)					x10 <sup>-5</sup>
L1	Sét pha trạng thái dẻo cứng	2,5	11	204,17	0,05	128,28	384,85	9,62	0,19
L2	Sét pha trạng thái dẻo mềm	15	7	175,32	0,05	18,36	55,08	1,38	1,36
L3	Cát, kết cấu chặt vừa	3,5	21	253,88	0,05	113,94	341,82	8,55	0,22
L4	Cát, kết cấu chặt	15,0	41	318,09	0,05	33,31	99,93	2,50	0,75
L5	Cát hạt thô lẫn sỏi	11,0	50	340,09	0,05	48,56	145,69	3,64	0,51

Bảng 4.4 Bảng tham số tỷ số cản của các lớp đất

KH	Lóp đất	H (m)	NSPT	Vs (m/s)	۳	ωı	ω2	αr	β <sub>R</sub> x10 <sup>-3</sup>
L6	Sỏi sạn cuội, kết cấu rất chặt	13,0	100	429,58	0,05	51,91	155,72	3,89	0,48

### 4.1.5. Thiết lập dữ liệu giản đồ gia tốc tính toán

Với bài toán phân tích công trình chịu tác dụng của động đất có thể lựa chọn file \*.smc hoặc sử dụng các tệp dữ liệu dạng \*.txt, \*.dat... được ghi theo định dạng ASCII, bao gồm 2 cột, thời gian và giá trị gia tốc. Các bước thiết lập được thể hiện trong hình 4.7 lần lượt theo các bước như sau:

- Chọn mục "Mdisp multiplier" trong phần thiết lập tải trọng.

- Lựa chọn mục "Load multiplier from data file".

- Chọn tệp dữ liệu giản đồ gia tốc tính toán.



Hình 4.7. Khai báo giản đồ gia tốc tính toán phân tích động lực học công trình ngầm chịu động đất với phần mềm Plaxis2D

#### 4.1.6. Kết quả xây dựng mô hình bài toán trên phần mềm Plaxis 2D

Trên cơ sở số liệu kết cấu và địa chất công trình, tiến hành mô hình hóa bằng phần mềm Plaxis 8.2:

-Mô hình hóa kết cấu: sử dụng phần tử dạng dầm 5 nút, mô hình vật liệu đàn hồi tuyến tính;

-Mô hình hóa môi trường: lựa chọn phần tử dạng tam giác 15 nút để mô hình hóa môi trường đất xung quanh khoang hầm, mô hình vật liệu HS; -Điều kiện biên và kích thước miền nghiên cứu: xác định như mục 4.1.2. Sử dụng điều kiện biên tiêu chuẩn cho bài toán khảo sát công trình chịu tác dụng của động đất (biên của mô hình được thiết lập tự động trong phần mềm Plaxis với hai chế độ Load\Standard absorbent boundaries và Load\Standard earthquake boundaries) [35] [81]. Mô hình bài toán và sơ đồ chia lưới được thể hiện lần lượt trong hình 4.8 và hình 4.9 dưới đây.



Hình 4.8 Mô hình bài toán được xây dựng trên phần mềm Plaxis 2D



Hình 4.9 Sơ đồ lưới phần tử của bài toán (giai đoạn đầu)

4.2 Tính toán nội lực xuất hiện trong vỏ hầm khi tính toán với các giản đồ gia tốc nền nhân tạo khác nhau phát sinh từ chương trình PG01 và PG02

#### 4.2.1. Tính toán với giản đồ gia tốc phát sinh bằng chương trình PG01

Sử dụng phần mềm Plaxis 2D với mô hình bài toán đã xây dựng trong phần 4.1, kết cấu vỏ hầm được mô hình hóa ở dạng kết cấu lắp ghép với liên kết giữa các phân tố vỏ hầm là LKNC tuân theo giả thiết Jannsen. Gia tốc nền đưa vào tính toán là ba gia tốc nền nhân tạo BaDinh\_01A, BaDinh\_02A, BaDinh\_03A thu được từ các thử nghiệm trong mục 2.3.3.1 và được thể hiện trong hình 4.10, hình 4.11 và hình 4.12.



Hình 4.10. Giản đồ gia tốc tính toán BaDinh\_01A



Hình 4.11. Giản đồ gia tốc tính toán BaDinh\_02A



Hình 4.12. Giản đồ gia tốc tính toán BaDinh\_03A

Quá trình phân tích của phần mềm Plaxis 2D được tiến hành với 2 giai đoạn (phase):

- Giai đoạn phân tích khi công trình chịu tải trọng tĩnh (phase 1), kết quả được trình bày trong phần E.1 thuộc phụ lục E.
- Giai đoạn công trình chịu tác dụng của động đất (phase 2), các kết quả được trình bày chi tiết trong phụ lục E.

Kết quả biểu đồ bao mô men của kết cấu được thể hiện trong phần E.2 thuộc phụ lục E. Bảng tổng hợp kết quả nội lực cực đại xuất hiện trong kết cấu khi tính với ba trường hợp tải trọng khác nhau được thể hiện trên bảng 4.4 dưới đây.

			Tham s	ố ảnh h	Nội lực cực đại				
TT	Trường hợp khảo sát	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGV (cm/s)	aRMS (cm/s <sup>2</sup> )	IA (cm/s)	t595 (S)	Mômen (kNm)	Lực cắt (kN)	Lực dọc (kN)
1	BaDinh 01A	122,87	7,76	31,99	5,600	3,11	133,80	100,75	765,25
2	BaDinh_02A	76,56	6,68	19,05	8,300	12,87	135,19	102,67	764,91
3	BaDinh_03A	96,91	10,73	26,35	7,500	5,71	135,81	105,30	773,98
	Trung bình	98,78	8,39	25,80	7,13	7,23	134,93	102,91	768,05
	Nhỏ nhất	76,56	6,68	19,05	5,60	3,11	133,80	100,75	764,91
	Lớn nhất	122,87	10,73	31,99	8,30	12,87	135,81	105,30	773,98

Bảng 4.5 Bảng tổng hợp kết quả nội lực cực đại xuất hiện trong kết cấu

Nhận xét kết quả:

- Giản đồ gia tốc nền BaDinh\_02A có giá trị gia tốc đỉnh (PGA) nhỏ nhưng mô men và lực cắt cực đại xuất hiện trong vỏ hầm lớn hơn so với kết quả tính với BaDinh\_01A. Do đó, có thể thấy nội lực cực đại còn chịu ảnh hưởng bởi các tham số khác của giản đồ gia tốc.

- Giá trị nội lực tính toán có sai lệch nhỏ (<2%) khi tính với các giản đồ gia tốc nhân tạo được phát sinh theo cùng một phổ phản ứng mục tiêu.

- Kết quả gia tốc và vận tốc theo phương ngang tại vị trí đỉnh hầm được

thể hiện lần lượt trên hình 4.13 và hình 4.14. Qua biểu đồ có thể thấy, dù giản đồ BaDinh\_01A có PGA lớn, nhưng do thời gian duy trì dao động mạnh nhỏ nên gia tốc và vận tốc cực đại thu được tương ứng tại vị trí đỉnh hầm đều nhỏ hơn kết quả khi tính với giản đồ gia tốc BaDinh\_03A.



Hình 4.13. Gia tốc theo phương ngang tại đỉnh hầm ứng với 3 trường hợp



## Hình 4.14. Vận tốc theo phương ngang tại đỉnh hầm ứng với 3 trường hợp 4.2.2. Tính toán công trình ngầm với giản đồ gia tốc nhân tạo được phát sinh bằng chương trình PG02

Với mô hình bài toán được xây dựng trong mục 4.1, lần lượt tính với các giản đồ gia tốc được phát sinh từ chương trình PG02 (từ bd01\_01a đến

bd01\_18a). Kết quả biểu đồ bao nội lực xuất hiện trong kết cấu được trình bày trong phụ lục F của luận án, giá trị nội lực cực đại được tổng hợp và thể hiện trong bảng 4.5.

	Th	am số củ	a giản đ	ồ gia tố	e	Nội	lực cực	đại
Gian đó gia tốc nhân tạo	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGV (cm/s)	a <sub>RMS</sub> (cm/s <sup>2</sup> )	IA (cm/s)	t595 (S)	Mômen (kNm)	Lực cắt (kN)	Lực dọc (kN)
bd01-01a	93,73	6,21	25,63	10,800	9,28	138,96	105,08	765,54
bd01-02a	104,57	6,62	25,71	12,500	10,62	135,19	102,67	764,91
bd01-03a	73,69	6,89	27,99	9,450	6,78	138,98	105,61	765,54
bd01-04a	102,86	6,41	30,84	12,700	7,51	138,82	103,92	766,73
bd01-05a	92,15	8,05	27,74	10,600	7,73	140,02	106,45	766,91
bd01-06a	102,64	7,87	30,29	9,900	6,09	138,41	104,80	769,77
bd01-07a	94,65	7,53	29,15	11,700	7,72	138,50	105,12	768,06
bd01-08a	102,01	5,61	27,58	9,500	7,02	134,25	101,53	763,17
bd01-09a	105,74	7,93	32,82	10,900	5,70	142,04	105,70	769,45
bd01-10a	101,60	6,03	27,95	9,900	7,13	135,30	102,99	765,32
bd01-11a	104,24	6,49	26,95	9,900	7,67	136,07	103,28	767,08
bd01-12a	98,04	6,31	24,89	8,900	8,06	137,16	103,67	764,33
bd01-13a	76,83	6,86	28,99	12,200	8,16	140,42	106,26	764,62
bd01-14a	93,59	7,54	28,95	11,000	7,36	140,31	106,08	765,56
bd01-15a	88,56	8,31	28,85	9,500	6,43	136,96	103,17	768,53
bd01-16a	101,51	7,24	29,54	14,400	9,28	138,60	103,55	769,30
bd01-17a	99,88	8,18	30,89	10,200	5,98	142,33	107,34	769,57
bd01-18a	76,57	7,84	25,85	8,600	7,25	136,40	102,27	764,63
Trung bình						138,26	104,42	766,61
Nhỏ nhất	73,69	5,61	24,89	8,60	5,70	134,25	101,53	763,17
Lớn nhất	105,74	8,31	32,82	14,40	10,62	142,33	107,34	769,77

Bảng 4.6 Kết quả khảo sát nội lực cực đại xuất hiện trong vỏ hầm

Qua kết quả thể hiện trong bảng 4.6 có thể thấy giá trị lực dọc xuất hiện trong kết cấu biến đổi với lượng rất nhỏ (0,86%), khoảng biến đổi mô men cực đại và lực cắt cực đại là lớn hơn so với lực dọc (5,84% và 5,56%). Do đó, có thể thấy, lực dọc cực đại chịu ảnh hưởng lớn bởi áp lực đất đá và áp lực nước tác dụng lên công trình và ít chịu ảnh hưởng khi thay đổi giản đồ gia tốc nền. Từ nhận định này, trong các nội dung còn lại, tác giả chủ yếu tập trung khảo sát sự biến đổi giá trị mô men và lực cắt.

Tiến hành tính toán các tham số thống kê với 18 thể nghiệm trong bảng 4.6 và giả thiết quy luật phân bố là phân phối chuẩn. Các đặc trưng xác suất thể hiện trong bảng 4.7.

TT	Biến ngẫu nhiên khảo sát	Đơn vị	Kỳ vọng (μ)	Độ lệch chuẩn (σ)	Khoảng g ngẫu nhiên nhận	iá trị biến có xác suất 95%
					(μ-2σ)	(μ+2σ)
1	Mô men cực đại	kNm	138,26	2,29	133,68	142,84
2	Lực cắt cực đại	kN	104,42	1,64	101,14	107,70

Bảng 4.7 Kết quả các đặc trưng phân phối của nội lực tính toán



#### Hình 4.15.Biểu đồ hàm mật độ của mô men cực đại



Hình 4.16.Biểu đồ hàm mật độ của lực cắt cực đại

# 4.2.3. So sánh nội lực phát sinh khi phân tích động lực học kết cấu công trình ngầm với gia tốc nhân tạo phát sinh bằng PG01 và PG02

So sánh kết quả tính toán là giá trị trung bình của mô men và lực cắt tính theo phương pháp động lực học với các kết quả tính phương pháp áp đặt chuyển vị trên biên ISGD. Số liệu đầu vào khi tính toán theo phương pháp tĩnh ISGD theo tài liệu [23] bao gồm:

- Gia tốc đỉnh: PGA  $=a_{gR}^*S=0,0976^{*}1,15=0,11g;$
- Thông số nguồn:  $M_w = 6,5$ ;  $R_{rup} = 50$ km.
- Vận tốc truyền sóng cắt trung bình của lớp đất nơi đặt công trình phía trên nền đá gốc:  $V_s=120$ m/s.

Kết quả so sánh được thể hiện trong bảng 4.8 dưới đây.

TT	Nội lực cực đại so	Đ.vị	Kết quả với 18 giản đồ gia tốc phát sinh bằng PG02			Kết qu	oc phát	Kết quả tính theo		
	sanh		μ	μ-2σ	μ+2σ	BaDinh _01A	BaDinh _02A	BaDinh _03A	Giá trị TB	ISGD
1	Mômen	kNm	138,26	133,68	142,84	133,80	135,19	135,81	134,93	135,20
2	Lực cắt	kN	104,42	101,14	107,70	100,75	102,67	105,30	102,91	94,20

Bảng 4.8 So sánh kết quả nội lực tính toán theo các phương pháp

Từ kết quả so sánh có thể thấy, Kết quả nội lực cực đại trung bình với giản đồ gia tốc phát sinh bằng chương trình PG01, PG02 và nội lực cực đại tính theo phương pháp ISGD chênh lệch nhỏ (kết quả với cả Mô men, Lực cắt đều có chênh lệch <5%). Khoảng kết quả tính với giản đồ gia tốc phát sinh bởi PG02 đã bao hàm được các kết quả tính theo giản đồ phát sinh bởi PG01 và phân tích tĩnh. Tác giả sẽ tiếp tục sử dụng bộ số liệu giản đồ gia tốc với PG02 trong các tính toán tiếp theo.

# 4.3 Khảo sát ảnh hưởng của liên kết nửa cứng giữa các phân tố vỏ hầm đến nội lực xuất hiện trong vỏ hầm

#### 4.3.1. Đặt bài toán

Để đánh giá ảnh hưởng của liên kết nửa cứng đến ứng xử của kết cấu, tác giả lần lượt tính toán với hai sơ đồ kết cấu: sơ đồ kết cấu liên tục (hình 4.17.a) và sơ đồ kết cấu có kể đến tính phân mảnh (sơ đồ tính có xét tới các liên kết nửa cứng - hình 4.17.b).



a) Kết cấu vỏ hầm không kể đến LKNC b) Kết cấu vỏ hầm có kể đến LKNC Hình 4.17. Sơ đồ tính của 2 trường hợp có xét và không xét đến liên kết nửa cứng trong kết cấu vỏ hầm

## 4.3.2. Kết quả khảo sát và nhận xét

Khi mô hình hóa kể đến LKNC, nội lực cực đại trong kết cấu đều giảm. Như vậy, sự ảnh hưởng của LKNC đến ứng xử của kết cấu thể hiện qua tỷ số giảm nội lực là tỷ lệ giữa nội lực cực đại khi có kể tới LKNC và đại lượng tương ứng khi xét kết cấu là nguyên khối. Giá trị của tỷ số giảm nội lực ứng với từng trường hợp tải trọng được thể hiện như trong bảng

тт	Giản đồ gia tốc	Trường h kể tới l	ợp không LKNC	Trường l tới L	ιợp có kể KNC	Tỷ số giảm nội lực	
11	tính toán	Mô men (kNm)	Lực cắt (kN)	Mô men (kNm)	Lực cắt (kN)	Mô men	Lực cắt
1	bd01-01a	149,83	111,94	138,96	105,08	0,927	0,939

Bảng 4.9. So sánh kết quả nội lực tính toán

	Giản đồ gia tốc	Trường h kể tới l	ợp không LKNC	Trường h tới L	ượp có kể KNC	Tỷ số giảm nội lực		
TT	tính toán	Mô men	Lực cắt	Mô men	Lực cắt	Mô	Lực	
		(kNm)	(kN)	(kNm)	(kN)	men	cắt	
2	bd01-02a	146,68	109,15	135,19	102,67	0,922	0,941	
3	bd01-03a	149,93	112,60	138,98	105,61	0,927	0,938	
4	bd01-04a	149,74	110,85	138,82	103,92	0,927	0,937	
5	bd01-05a	151,05	113,51	140,02	106,45	0,927	0,938	
6	bd01-06a	149,33	111,77	138,41	104,80	0,927	0,938	
7	bd01-07a	149,42	112,14	138,50	105,12	0,927	0,937	
8	bd01-08a	144,77	108,29	134,25	101,53	0,927	0,938	
9	bd01-09a	154,44	112,84	142,04	105,70	0,920	0,937	
10	bd01-10a	145,88	109,81	135,30	102,99	0,927	0,938	
11	bd01-11a	146,68	110,11	136,07	103,28	0,928	0,938	
12	bd01-12a	147,97	110,49	137,16	103,67	0,927	0,938	
13	bd01-13a	151,43	113,18	140,42	106,26	0,927	0,939	
14	bd01-14a	151,35	113,18	140,31	106,08	0,927	0,937	
15	bd01-15a	147,66	110,05	136,96	103,17	0,928	0,937	
16	bd01-16a	149,55	110,41	138,60	103,55	0,927	0,938	
17	bd01-17a	153,64	114,47	142,33	107,34	0,926	0,938	
18	bd01-18a	147,13	106,15	136,40	102,27	0,927	0,963	
*	Trung bình	149,25	111,16	138,26	104,42	0,926	0,939	
*	Nhỏ nhất	144,77	106,15	134,25	101,53	0,920	0,937	
*	Lớn nhất	154,44	114,47	142,33	107,34	0,928	0,963	

Kết quả tính toán kiểm tra ảnh hưởng của liên kết nửa cứng cho thấy: khi chịu tác dụng của động đất nội lực trong kết cấu khi có kể đến liên kết nửa cứng giữa các phân tốc có giá trị nhỏ hơn so với kết cấu liền khối. Tỷ lệ giảm nội lực cực đại thay đổi không đáng kể khi sử dụng các giản đồ gia tốc khác nhau.
## 4.4 Phân tích hồi quy đánh giá các ảnh hưởng của giản đồ gia tốc tới nội lực cực đại xuất hiện trong kết cấu

#### 4.4.1. Đặt bài toán

Để xác định vai trò ảnh hưởng của các đặc trưng của giản đồ gia tốc đến giá trị nội lực cực đại xuất hiện trong kết cấu vỏ hầm cần tiến hành phân tích hồi quy. Công cụ sử dụng để phân tích là phần mềm thương phẩm IBM SPSS (viết tắt của Statistical Package for the Social Sciences). Phần mềm IBM SPSS hỗ trợ xử lý và phân tích dữ liệu sơ cấp đặc biệt hữu dụng trong phân tích hồi quy và tương quan [70].

Số liệu phân tích hồi quy sử dụng được thể hiện trong bảng 4.14 bao gồm hai nhóm:

- Dữ liệu các biến độc lập: gia tốc đỉnh (PGA), cường độ Arias (IA), thời gian duy trì dao động mạnh (t<sub>5-95</sub>), gia tốc hiệu dụng (a<sub>RMS</sub>) và vận tốc đỉnh (PGV);

- Dữ liệu biến phụ thuộc: mô men cực đại và lực cắt cực đại xuất hiện trong kết cấu tính với kết cấu vỏ hầm khi không kể tới LKNC.

ТТ	Giản đồ		Các	Các biến phụ thuộc				
	gia toc	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGV (cm/s)	aRMS (cm/s <sup>2</sup> )	IA (cm/s)	t5-95 (S)	Mô men (kNm)	Lực cắt (kN)
1	bd01-01a	93,73	6,21	25,63	10,800	9,28	149,83	111,94
2	bd01-02a	104,57	6,62	25,71	12,500	10,62	146,68	109,15
3	bd01-03a	73,69	6,89	27,99	9,450	6,78	149,93	112,60
4	bd01-04a	102,86	6,41	30,84	12,700	7,51	149,74	110,85
5	bd01-05a	92,15	8,05	27,74	10,600	7,73	151,05	113,51

Bảng 4.10 Bảng số liệu đầu vào phân tích hồi quy

ТТ	Giản đồ		Các	biến độc	lập		Các biến	Các biến phụ thuộc		
	gia toc	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGV (cm/s)	aRMS (cm/s <sup>2</sup> )	IA (cm/s)	t5-95 (S)	Mô men (kNm)	Lực cắt (kN)		
6	bd01-06a	102,64	7,87	30,29	9,900	6,09	149,33	111,77		
7	bd01-07a	94,65	7,53	29,15	11,700	7,72	149,42	112,14		
8	bd01-08a	102,01	5,61	27,58	9,500	7,02	144,77	108,29		
9	bd01-09a	105,74	7,93	32,82	10,900	5,70	154,44	112,84		
10	bd01-10a	101,60	6,03	27,95	9,900	7,13	145,88	109,81		
11	bd01-11a	104,24	6,49	26,95	9,900	7,67	146,68	110,11		
12	bd01-12a	98,04	6,31	24,89	8,900	8,06	147,97	110,49		
13	bd01-13a	76,83	6,86	28,99	12,200	8,16	151,43	113,18		
14	bd01-14a	93,59	7,54	28,95	11,000	7,36	151,35	113,18		
15	bd01-15a	88,56	8,31	28,85	9,500	6,43	147,66	110,05		
16	bd01-16a	101,51	7,24	29,54	14,400	9,28	149,55	110,41		
17	bd01-17a	99,88	8,18	30,89	10,200	5,98	153,64	114,47		
18	bd01-18a	76,57	7,84	25,85	8,600	7,25	147,13	106,15		

#### 4.4.2. Kết quả khảo sát và nhận xét

Phân tích bằng IBM SPSS, thông qua hệ số hồi quy, tiến hành đánh giá được mức độ ảnh hưởng tương đối của các tham số đặc trưng của hàm thời gian đến lần lượt các đại lượng: mô men cực đại, lực cắt cực đại xuất hiện trong kết cấu. Biểu đồ mức độ ảnh hưởng biểu diễn ở dạng tỷ lệ % được thể hiện trong hình 4.18 và hình 4.19.



Hình 4.18. Kết quả xét ảnh hưởng của các tham số của giản đồ gia tốc nhân tạo đến mô men cực đại xuất hiện trong kết cấu



Hình 4.19. Kết quả xét ảnh hưởng của các tham số của giản đồ gia tốc nhân tạo đến lực cắt cực đại xuất hiện trong kết cấu

Qua kết quả phân tích trên hình 4.18, hình 4.19 có thể thấy:

- Vận tốc đỉnh (PGV) và gia tốc đỉnh (PGA) ảnh hưởng đáng kể đến giá trị mô men và lực dọc nhưng có ảnh hưởng không lớn lên giá trị lực cắt cực đại.

 Các đặc trưng như cường độ Arias (IA) và thời gian duy trì dao động mạnh t5-95 đều có ảnh hưởng đáng chú ý đến cả ba thành phần nội lực cực đại xuất hiện trong kết cấu.

#### 4.5 Kết luận chương 4

Nghiên cứu bằng số thông qua phân tích động lực học kết cấu công trình ngầm chịu tác dụng của động đất với giản đồ gia tốc nhân tạo phù hợp với điều kiện thành phố Hà Nội. Tác giả có một số nhận xét:

- Về việc lựa chọn giản đồ gia tốc tính toán công trình ngầm. Trong khuôn khổ giới hạn khảo sát của luận án, nhận thấy: kết quả tính với giản đồ gia tốc phát sinh bởi PG02 đã bao hàm được các kết quả tính theo giản đồ phát sinh bởi PG01 và phân tích tĩnh. Nên có thể sử dụng bộ số liệu giản đồ gia tốc được phát sinh bằng chương trình PG02 để tính toán công trình ngầm chịu động đất tại khu vực Hà Nội. Để đảm bảo an toàn trong tính toán, đề xuất bổ sung hệ số an toàn khi phân tích theo phương pháp ISGD.

- Về ảnh hưởng khi kể tới liên kết nửa cứng giữa các phân tố vỏ hầm. Trong giới hạn khảo sát của luận án, nhận thấy khi chịu tác dụng của động đất, nội lực trong kết cấu khi có kể đến liên kết nửa cứng giữa các phân tốc có giá trị nhỏ hơn so với kết cấu liền khối. Bên cạnh đó, tỷ lệ giảm nội lực cực đại thay đổi không đáng kể khi sử dụng các giản đồ gia tốc khác nhau.

- Về ảnh hưởng của các đặc trưng hàm thời gian đến nội lực xuất hiện trong vỏ hầm. Kết qủa khảo sát với các gia tốc nền được mô phỏng bằng chương trình PG02 tính với kết cấu công trình ngầm chịu động đất cho thấy: giá trị gia tốc đỉnh (PGA) không phải là yếu tố duy nhất ảnh hưởng đến nội lực của kết cấu các đặc trưng như PGV, thời gian duy trì dao động mạnh t<sub>5-95</sub>, cường độ Arias (IA) và gia tốc hiệu dụng (a<sub>RMS</sub>) đều có ảnh hưởng nhất đến nội lực cực đại xuất hiện trong kết cấu. Để đánh giá chính xác các ảnh hưởng này cần có nhiều nghiên cứu chi tiết với số lượng lớn các thử nghiệm cũng như với các số liệu về địa chất và kết cấu hơn nữa.

#### KÉT LUÂN

#### 1. Những đóng góp của luận án

Luận án tập trung nghiên cứu phương pháp, thuật toán của Hancock, tiêu chuẩn TCVN 9386-2012, phép biến đổi Wavelet. Trên cơ sở đó đã xây dựng chương trình PG01 phát sinh giản đồ gia tốc theo điều kiện khớp phổ phản ứng trên nền ngôn ngữ lập trình Matlab. Phân tích, lựa chọn các bản ghi gia tốc phù hợp với điều kiện Hà Nội làm số liệu đầu vào cho chương trình PG01.

Luận án nghiên cứu và cải biên thuật toán của Yamamoto. Trên cơ sở đó xây dựng chương trình PG02 phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc nhân tạo có phổ phản ứng phù hợp với tiêu chuẩn TCVN 9386-2012.

Sử dụng chương trình PG01, PG02 đã lập để xây dựng bộ số liệu giản đồ gia tốc nhân tạo trên nền đá gốc tại khu vực quận Ba Đình, thành phố Hà Nội. Bộ giản đồ gia tốc thu được có phổ phản ứng thỏa mãn các yêu cầu của TCVN 9386-2012.

Bằng chương trình Plaxis 2D, tác giả đã tính toán công trình ngầm chịu động đất với giản đồ gia tốc nhân tạo, thu được các biểu đồ bao nội lực xuất hiện trong kết cấu. Từ kết quả tính toán tác giả đã đưa ra một số nhận xét và đề xuất trong phạm vi khuôn khổ của luận án.

#### 2. Hướng nghiên cứu phát triển tiếp theo

- Khảo sát các trường hợp mô hình hóa bài toán với hai tuyến hầm chạy song song để đánh giá ảnh hưởng của khoảng cách giữa các tuyến hầm đến nội lực xuất hiện trong kết cấu.

- Khảo sát, đánh giá ảnh hưởng của mô hình vật liệu áp dụng cho đất đến trạng thái nội lực phát sinh trong kết cấu.

- Khảo sát, đánh giá khả năng sử dụng các loại vật liệu làm lớp giảm

chấn, cách chấn cho công trình ngầm và ứng xử của kết cấu khi kể tới các lớp này khi chịu tác dụng của động đất trong điều kiện Hà Nội.

 Nghiên cứu khảo sát ứng xử của kết cấu công trình ngầm tại những đoạn giao cắt theo mô hình làm việc trên không gian 3 chiều bằng các phần mềm chuyên dụng như: Flac3D, Plaxis 3D, Abaqus,...

 Mở rộng việc khảo sát đánh giá vai trò các tham số của giản đồ gia tốc ảnh hưởng đến nội lực cực đại xuất hiện trong kết cấu.

- Bổ sung cơ sở dữ liệu là số lượng lớn bản ghi các trận động đất đã có để hiệu chỉnh các hệ số của hệ phương trình hồi quy của Yamamoto áp dụng tốt hơn trong điều kiện tại Hà Nội.

#### DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

- [1] Lê Bảo Quốc, Mai Đức Minh, Vũ Ngọc Anh (2015), "Nghiên cứu tính toán kết cấu công trình ngầm trong môi trường đất yếu chịu tác động của động đất", Tạp chí Giao thông Vận tải ISSN 2354 0818, số tháng 07 2015, Bộ Giao thông Vận tải.
- [2] Vũ Ngọc Anh, Cao Chu Quang, Nguyễn Quốc Bảo (2017), "Phát tạo giản đồ gia tốc nhân tạo theo điều kiện khớp phổ phản ứng sử dụng phương pháp hiệu chỉnh bằng Wavelet", Số 7/2017 - Tạp chí Xây dựng Việt Nam- ISSN 0086-0762.
- [3] Vũ Ngọc Anh, Cao Chu Quang, Nguyễn Quốc Bảo (2019), "Tạo giản đồ gia tốc nền từ hệ phương trình hồi quy sử dụng phép biến đổi gói Wavelet", Số 7/2019 - Tạp chí KHKT- ISSN 1859-0209.
- [4] Vũ Ngọc Anh, Nguyễn Quốc Bảo, Cao Chu Quang, Nguyễn Hữu Hà (2021), "Nghiên cứu sự làm việc của kết cấu công trình ngầm chịu tác dụng của động đất với giản đồ gia tốc phát sinh ngẫu nhiên", Tạp chí Vật liệu và Xây dựng, số tháng 2/2021.
- [5] Vu Ngoc Anh, Cao Chu Quang (2021), "A seismic analysis of segmental tunnel lining using artificial acceleration", Số 7/2021 - Tạp chí KHKT-ISSN 1859-0209.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

#### **Tiếng Việt**

- [1] Đỗ Ngọc Anh (2016), Mô phỏng số kết cấu chống lắp ghép trong công trình ngầm chịu tải trọng động đất, Tuyển tập các công trình khoa học kỷ niệm 50 năm thành lập Bộ môn "Xây dựng Công trình ngầm và Mỏ". ISBN: 978-604-913-445-6.
- [2] Nguyễn Đăng Bích (2007), Một số vấn đề nghiên cứu trong biên soạn Tiêu chuẩn thiết kế công trình chịu động đất TCXDVN 375:2006, Tạp chí IBST.
- [3] Nguyễn Hoàng Hải, Nguyễn Việt Anh, Phạm Minh Toàn, Hà Trần Đức (2005), Công cụ phân tích Wavelet và ứng dụng trong Matlab, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.
- [4] Trần Thị Thu Hằng (2019), Nghiên cứu ảnh hưởng của động đất tới ứng xử động lực học của công trình ngầm trong điều kiện Việt Nam, Báo cáo tổng kết đề tài khoa học và công nghệ cấp Bộ GTVT.
- [5] Nghiêm Mạnh Hiến, SSISOFT Company (2015), Xây dựng hàm thời gian động đất theo phương pháp tỷ lệ trong miền tần số, Tạp chí Xây dựng, số 11/2015.
- [6] Nguyễn Tương Lai (2005), Nghiên cứu tương tác động lực học phi tuyến của kết cấu và nền biến dạng, Luận án tiến sỹ kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội.
- [7] Võ Thanh Lương (2006), Tính toán động lực học nhà cao tầng dạng kết cấu thanh chịu tác dụng động đất có kể đến tính dẻo của vật liệu, Luận án tiến sỹ kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội.
- [8] Hoàng Mạnh (2018), Nghiên cứu thực nghiệm mô hình nhà cao tầng bê tông cốt thép bán lắp ghép chịu tải trọng động đất, Luận án tiến sỹ kỹ thuật, Viện KHCN Xây dựng.
- [9] Mai Đức Minh (2011), Tính toán hầm trong điều kiện động đất, Luận án tiến sỹ kỹ thuật, Đại học Mỏ Mát-x-cơ-va, Liên bang Nga.
- [10] Trần Minh Nhật và các công sự (2018), Mô phỏng chuỗi phản ứng động đất với đặc tính vùng địa hình ở Việt nam, Tạp chí xây dựng số 2/2018.
- [11] Nguyễn Lê Ninh, 2007, Động đất và thiết kế công trình chịu động đất, Nhà xuất bản xây dựng.

- [12] Nguyễn Quang Phích, Nguyễn Văn Trí, Nguyễn Văn Mạnh, Phạm Ngọc Anh, Dương Đức Hùng. Hiện trạng nghiên cứu, thiết kế công trình ngầm có chú ý động đất. Đại học Mỏ - Địa chất Hà Nội.
- [13] Nguyễn Hồng Phương, Phạm Thế Truyền (2015), Tập bản đồ xác suất nguy hiểm động đất Việt Nam và Biển Đông, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Biển; Tập 15, Số 1.
- [14] Lê Bảo Quốc, Nghiêm Mạnh Hiến, Vũ Đình Lợi (2015). "Tác động động đất đối với công trình ngầm đô thị trong tầng đất mềm nhiều lớp trên nền đá cứng", Tạp chí Xây dựng ISSN 0866 – 0762, số tháng 08 – 2015, Bộ Xây dựng, trang 189 – 191.
- [15] Lê Bảo Quốc (2015), Tính toán công trình ngầm đô thị chịu động đất, Luận án tiến sỹ kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội.
- [16] Lê Bảo Quốc (2018), Tính toán kết cấu công trình ngầm chịu động đất trong môi trường đất yếu theo phương pháp tạo giả giản đồ gia tốc nền, Tạp chí Xây dựng, số 01/2018.
- [17] Đinh Văn Thuật (2011), Phân tích ứng xử phi tuyến của khung nhà nhiều tầng được thiết kế theo SNip II-7-81 chịu các băng gia tốc nền nhân tạo, Tạp chí Kết cấu Công nghệ Xây dựng.
- [18] Đinh Văn Thuật (2011), Tạo băng gia tốc nền từ phổ phản ứng gia tốc đàn hồi sử dụng chuỗi Fourier, Tạp chí Kết cấu Công nghệ Xây dựng, số 10/9-2011.
- [19] Nguyễn Ngọc Thủy, Nguyễn Minh Sinh (2004), Nghiên cứu bổ sung và hoàn chỉnh bản đồ phân vùng nhỏ động đất thành phố Hà Nội mở rộng, tỷ lệ 1:25.000, lập cơ sở dữ liệu về đặc trưng dao động nền đất ở Hà Nội ứng với bản đồ trên, Sở Xây dựng Hà Nội.
- [20] Nguyễn Đình Xuyên (2015), Nghiên cứu dự báo động đất và dao động nền ở Việt Nam.
- [21] QCVN 02:2009/BXD Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về số liệu điều kiện tự nhiên dùng trong xây dựng, chương 6.
- [22] Tiêu chuẩn TCVN 9386: 2012 Thiết kế công trình chịu động đất.
- [23] Hồ sơ Thiết kế sơ bộ tuyến Metro số 03, Ban quản lý Đường sắt đô thị Hà Nội, <u>https://mrb.hanoi.gov.vn/</u>

#### Tiếng Anh

- [24] AFPS/AFTES (2001), *Earthquake design and protection of underground structures*, version 1 Approved Technical committee.
- [25] Abrahamson, N.A. (1993), *Non-Stationary Spectral Matching Program* RSPMATCH, User Manual.
- [26] Ahmad Fahimifar, Arash Vakilzadeh (2009), Numerical and Analytical Solutions for Ovaling Deformation in Circular Tunnels Under Seismic Loading, International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol. 1, No. 6.
- [27] Ahmad J.B., Yasmin Ashaari (2010), The modelling of lateral movement of soft soil using finite element analysis and laboratory model, UiTM, Shah Alma.
- [28] Amiri, G.G. and Asadi, A., 2010, Generating an Artificial Ground Motion Using (RBF) Neural Network And Wavelet Analysis, 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, 222.
- [29] Anh Do Ngoc, 2014, Numerical Analyses of segmental tunnel lining under static and dynamic loads, PhD thesis.
- [30] Arias (1970), A measure of earthquake intensity, in: Seismic Design for Nuclear Power Plants, Hansen, R. J., MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 438–483.
- [31] Baker, J. W., 2011, "Conditional Mean Spectrum: Tool for Ground Motion Selection," ASCE Journal of Structural Engineering (in press)
- [32] Bathe K.J. (1982), *Finite elements procedures in engineering analysis*, Prentice-Hall Inc, Englewood Cliff, New Jersey, USA.
- [33] Boore, D. M., and G. M. Atkinson (2008), Ground-Motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5% damped PSA at spectral periods between 0,01s and 10,0s, Earthq. Spectra no. 1, 99–138.
- [34] Bozorgina and Campbell (2004), Earthquake engineering- From engineering seismology to performance- Base engineering, CRC Press.
- [35] Brinkgreve R.B.J. and Broere W. (2006), *Plaxis manual version 8*, Delft University of technology & Plaxis b.v., The Netherlands.

- [36] Broyden, C.G., 1965, "A Class of Methods for Solving Nonlinear Simultaneous Equations", Mathematics of Computation, Vol. 19, No. 92, 577-593.
- [37] BSSC (2003), NEHRP recommended provision for seismic regulation for new buildings and other structures (FEMA 450), Part 1: Provisions, Building Safety seismic council for the federal Emergency Management Agency, Washington D. C; 2003.
- [38] C. Jeremy Hung, James Monsees, Nasri Munfah, John Wisniewski, Technical manual for design and construction of road tunnels – civil elements. Parsons Brinekerhoff, Inc. One Penn Plaza, New York, NY 10119.
- [39] Chopra A. (2007), Dynamics of Structures: Theory and Application to Earthquake Engineering. Prentice Hall, New Jersey.
- [40] Chung N.T, Hoang Hai, Shin Sang Hee (2016), Dynamic analysis of high building with cracks in column subjected to eathquake loading, American Journal of Civil Engineering, No.4(5), pp, 233-240.
- [41] CEN, 2004. EN 1998-1:2004, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. European committee for standardization, Brussels, Belgium.
- [42] Clough RW and Penzien J (1993), *Dynamics of Structures, 2nd Ed.*, McGraw-Hill Book Company, New York.
- [43] Douglas, J. & H. Aochi (2008). A survey of techniques for predicting earthquake ground motions for engineering purposes. Surveys in Geophysics 29(3), 187–220,
- [44] Fahjan Y. M., and Ozdemir Z., (2008), Scaling of Earthquake Acceleration for Nonlinear Dynamic Analyses to Match the Earthquake Design Spectra. The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- [45] FHWA (Federal Highway Administration), 2009. Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels - Civil Element, Publication No. FHWA-NHI-10-034.
- [46] Francesco Castelli, Michele Maugeri, Dynamic Clay Properties By In Situ And Laboratory Tests For An Industrial Building In Catania (Italy), Second international conference on performance-based design in earthquake geotechnical engineering, 2012.

- [47] Gospodarikov Alexandr, Thanh Nguyen Chi (2018), Behaviour of segmental tunnel linings under the impact of earthquakes: A case study from the tunnel of Hanoi metro system, International Journal of GEOMATE, Jan., Vol.15, Issue 48, 2018, pp. 91-98.
- [48] Hancock, J. et al, 2006, "The Influence of Duration and the Selection and Scaling of Accelerograms in Engineering Design and Assessment," PhD thesis, University of London.
- [49] Hanks, Thomas C.; Kanamori, Hiroo (10 tháng 5 năm 1979), "A Moment magnitude scale", Journal of Geophysical Research.
- [50] Hashash, Y.M., Hook, J.J., Schimidt, B., &Yao, J.I. (2001), Seismic design and analysis of underground structures, Tunneling and Underground Space Technology, 247-293.
- [51] Housner GW, Jennings PC (1964). *Generation of artificial earthquake*. Journal of Engineering Mechanics Division (ASCE), 90:113-150,
- [52] Husid, R., 'Gravity Effects on the Earthquake Response of Yielding Structures', Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, 1967.
- [53] Imai, T., 1977. P and S wave velocities of the ground in Japan. Proceeding of IX International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2, 127-132.
- [54] Janssen, P., 1983. Tragverhalten von Tunnelausbauten mit Gelenktübbings, Load carrying behavior of segmented tunnel linings, (Ph.D. thesis). Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, (in German).
- [55] Kramer S.L. (1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, New Jersey.
- [56] Kyriazis Pitilakis, Sotiris Argyroudis, Grigoris Tsinidis (2011), Seismic design and risk assessment of underground long structure, Aristotle University.
- [57] Lilhanand, K. and Tseng, W. S., 1987, "Generation of Synthetic Time Histories Compatible with Multiple Damping Response Spectra," SMiRT-9, Lausanne K2/10,
- [58] Lilhanand, K., and Tseng, W.S., 1988, "Development and Application of

Realistic Earthquake Time Histories Compatible with Multiple Damping Response Spectra" 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, Vol 2, 819–824.

- [59] Lysmer J. Kuhlmeyer R.L, 1969, Finite dynamic model for infinite media, Journal of Engineering Mechanics Division, vol. 95: 859-877.
- [60] Mallat, S.G., 1999, "A Wavelet Tour of Signal Processing", second ed. Academic Press, London, United Kingdom.
- [61] Manual for Program: RSPMatch2005, 2005
- [62] Manual for ProShake, 2017, *Ground Response Analysis Program*, EduPro Civil Systems.
- [63] Niyaziertuğrul, Analysis of seismic behavior of underground structures: A case study on Bolu tunnels, Middle East Technical University, 2010,
- [64] Penzien J., Wu C., Stresses in linings of bored tunnels. Journal of Earthquake Eng. Structural Dynamics 27, 1998, pp. 283–300,
- [65] Penzien, J. (2000), *Seismically incluced racking of tunnel linings*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 29.
- [66] Power M.S., Chang C.-Y., Idriss I.M., Kennedy R.P., *Engineering Characterization of Ground Motion*. NUREG/CR-3805, Vol. 5. 1986.
- [67] Power M.S., Rosidi, D., Kaneshiro, J., 1996. Vol. III. Strawman: screening, evaluation, and retrofit design of tunnels. Report Draft. National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.
- [68] Quang, N.V at al (2020), A Site-Specific Response Analysis: A Case Study in Hanoi, Vietnam, MDPI/Applied Sciences.
- [69] Rezaeian, S. (2010). Stochastic modeling and simulation of ground motions for performance-based earthquake engineering, PEER Report 2010/02, Pacific Earthquake Engineering Reseach Center, College of Engineering, University of California, Bekeley.
- [70] Sabine Landau and Brian S. Everitt (2004), A Handbook of Statistical Analyses using IBM SPSS, Chapman & Hall/CRC Press LLC.
- [71] Schnabel P., Seed H.B., Lysmer J, *Modification of seismograph records for effects of local soil conditions*, Bull. Seism. Soc. Am., 62, 6, 1649-1664, 1972.

- [72] Schnabel P., Seed H.B., Lysmer J., *Modification of seismograph records for effects of local soil conditions*, Bull. Seism. Soc. Am., 62, 6, 1649-1664, 1972.
- [73] Shanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. and Brinkgreve R.B.J. (1999), *Hardening Soil Model: Formulation and Verification*, Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Balkema, Rotterdam.
- [74] Seismic Retrofitting Manual for Highway structures: part 2 *Retaining structures, slopes, tunnels, culverts, and Roadways.* US. Department of Transportation. 2004.
- [75] SeismoSoft, SeismoMatch help, <u>https://seismosoft.com</u>
- [76] SeismoSoft, SeismoArtif help, https://seismosoft.com/product/seismoartif/
- [77] Silva, W. J. and Lee, K., 1987, "WES RASCAL Code for Synthesizing Earthquake Ground Motions," State-of-the-Art for Assessing Earthquake Hazards in the United Stated, Report 24, Miscellaneous Paper S-73-1. US Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.
- [78] St. John, C.M., Zahrah, T.F. *A seismic design of underground structures*. Tunneling Underground Space Technol. 2 (2), 1987, 165 – 197.
- [79] Suarez, L.E. and Montejo, L.A., 2005, "Generation of Artificial Earthquakes via the Wavelet Transform," International Journal of Solids and Structures 42 (2005), 5905–5919.
- [80] Tateishi A. "A study on seismic analysis methods in the cross section of underground structures using static finite element method"[J]. Structural Engineering/Earthquake Engineering, JSCE, 2005.
- [81] Tsnidis G., et al, (2020), *Seismic behaviour of tunnels: From experiments to analysis*, Tunnelling and Underground Space Technology 99 (2020).
- [82] Thrainsson H., Kiremidjian A., 2000, Modelling of Earthquake ground motion in the frequency domain, Stanford University.
- [83] The South Carolina Department of Transportation (SCDOT), *Geotechnical Design Manual–version 1.1 (2010)–Chapter 12: Geotechnical earthquake engineering*, http://www.scdot.org/doing/structural geotechnical.aspx.
- [84] Verruijt A. (1994, 2008), Soil dynamics, Delft University of Technology.
- [85] Wang, J (1993). Seismic design of tunnels. A Simple state of the Art design

Approach. Monograph 7, Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas Inc, New York.

- [86] Wang J., Munfakh (2001). *Seismic design of tunnels*. Transactions on the built environment Vol 57, ISSN 1743-3509.
- [87] Wood, J. H., "Earthquake-Induced Soil Pressures on Structures," Report No. EERL 73-05, 1973, California Institute of Technology.
- [88] Wood, J.H (2004), Earthquake design procedures for rectangular underground structure, Project Report to Earthquake Commission, EQ Project No.01/470, Rev B July 2004.
- [89] Yamamoto (2011), Stochannstic model for earthquake ground motion using Wavelet packets, PhD thesis, Stanford University.
- [90] Youssef M.A. Hashash, Jeffrey J. Hook, Birger Schmidt, John I-Chiang Yao (2001), Seismic design and analysis of underground structures, Tunnelling and Underground Space Technology 16, 247 – 293.
- [91] Zienkiewicz O.C. and Taylor R.L. (2000), *The Finite Element Method, Vol 2: Solid Machanics*, Butterworth-Heinemann, A division of Reed Education and Professional Pulishing Ltd.
- [92] Zhou, Z., and Adeli, H., 2003, "Time-Frequency Signal Analysis of Earthquake Records Using Mexican Hat Wavelets" Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering," 18(5), 379-89.
- [93] <u>https://www.mathworks.com/help/wavelet/</u>

### MỞ ĐẦU

### 1. Tính cấp thiết của đề tài

Công trình ngầm đã và đang được xây dựng trong nhiều lĩnh vực như: giao thông, thủy lợi, quốc phòng... Việc tính toán, thiết kế công trình ngầm chịu các dạng tải trọng khác nhau, đặc biệt là tác dụng của động đất có ý nghĩa quan trọng trong lựa chọn giải pháp thiết kế kết cấu vỏ hầm nhằm đảm bảo sự an toàn của con người và phương tiện trong đường hầm.

Phân tích động lực học kết cấu công trình ngầm chịu động đất cần số liệu đầu vào là giản đồ gia tốc phù hợp với điều kiện địa chấn tại khu vực đặt công trình. Khu vực thành phố Hà Nội chưa ghi nhận các trận động đất lớn nên số liệu giản đồ gia tốc tính toán còn hạn chế phải sử dụng các giản đồ gia tốc nhân tạo. Vì lẽ đó, việc nghiên cứu làm rõ cơ sở lý thuyết và xây dựng các công cụ phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo hỗ trợ cho việc thực hành tính toán công trình ngầm chịu tác dụng của động đất cũng như phân tích ảnh hưởng của các giản đồ gia tốc này tới ứng xử của kết cấu công trình ngầm là cần thiết. Từ động lực này, nghiên cứu sinh đã xác định vấn đề làm rõ trong luận án là "Nghiên cứu ứng xử của kết cấu công trình ngầm chịu tác dụng của động đất với giản đồ gia tốc nhân tạo".

### 2. Mục đích nghiên cứu của luận án

Luận án tập trung tìm hiểu giải pháp phát sinh số liệu giản đồ gia tốc nhân tạo phù hợp với yêu cầu thiết kế. Vận dụng số liệu giản đồ gia tốc đã xây dựng để khảo sát bài toán phân tích động lực học kết cấu công trình ngầm chịu tác dụng của động đất.

### 3. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu của luận án

Đối tượng nghiên cứu: kết cấu công trình ngầm chịu tác dụng của động đất với giản đồ gia tốc nhân tạo.

Phạm vi nghiên cứu: nghiên cứu bài toán động lực học của công trình ngầm theo sơ đồ bài toán biến dạng phẳng chịu tác dụng của động đất.

### 4. Phương pháp nghiên cứu của luận án

Phương pháp nghiên cứu sử dụng trong luận án là nghiên cứu lý thuyết kết hợp thử nghiệm số trên máy tính.

### 5. Nội dung và bố cục của luận án

Nội dung luận án gồm:

Mở đầu: Trình bày tính cấp thiết và bố cục của luận án.

Chương 1: Tổng quan về vấn đề nghiên cứu.

Chương 2: Xây dựng chương trình phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo bằng cách hiệu chỉnh giản đồ gia tốc sẵn có theo điều kiện khớp phổ phản ứng.

Chương 3: Xây dựng chương trình phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc nhân tạo dựa trên hệ phương trình hồi quy.

Chương 4: Khảo sát ứng xử của kết cấu công trình ngầm chịu tác dụng của động đất tại Hà Nội với giản đồ gia tốc nhân tạo.

Kết luận: Trình bày các kết quả chính và những đóng góp của luận án. Phụ lục: Chương trình, kết quả tính.

#### Chương 1. TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU 1.1 Một số khái niệm chung về động đất

Trong nội dung này, luận án trình bày một số vấn đề về: 1) Khái niệm chung về động đất; 2) Các tiêu chí đánh giá độ mạnh của động đất; 3) Một số đặc trưng của dao động nền (các tham số của giản đồ gia tốc).

## 1.2 Tổng quan về phân tích kết cấu công trình ngầm chịu tác dụng của động đất theo sơ đồ bài toán phẳng

Tính toán công trình ngầm có thể được thực hiện theo phương pháp phân tích tĩnh (phương pháp áp đặt chuyển vị biên và phương pháp HRM) hoặc phân tích động lực học (phân tích theo lịch sử thời gian). Trong đó, phương pháp phân tích động lực học phản ánh đầy đủ hơn ứng xử của kết cấu, tuy nhiên phương pháp này cần nguồn dữ liệu đầu vào là các giản đồ gia tốc tính toán. Việc sử dụng các giản đồ gia tốc nhân tạo có phổ phản ứng phù hợp với các tiêu chuẩn kháng chấn là một yêu cầu quan trọng đặt ra trong các bài toán thiết kế công trình ngầm.

### 1.3 Tổng quan về phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo

Trong nội dung này, luận án trình bày tổng quan về: phương pháp phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo bằng cách hiệu chỉnh giản đồ gia tốc sẵn có theo điều kiện khớp phổ phản ứng và phương pháp phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc.

### 1.4 Các vấn đề rút ra từ tổng quan

Trên cơ sở nghiên cứu tổng quan về tính toán công trình ngầm chịu động đất, luận án tập trung giải quyết một số nội dung:

1. Tìm hiểu phương pháp, thuật toán của Hancock. Xây dựng chương

trình phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo thông qua hiệu chỉnh giản đồ gia tốc đã có theo điều kiện "khớp phổ phản ứng".

2. Nghiên cứu phương pháp của Yamamoto, cải biên thuật toán và xây dựng chương trình phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc nhân tạo trên cơ sở sử dụng hệ phương trình hồi quy.

3. Xây dựng dữ liệu giản đồ gia tốc nhân tạo trên nền đá gốc phù hợp với điều kiện khu vực Hà Nội đáp ứng theo TCVN 9386-2012.

4. Sử dụng nguồn dữ liệu giản đồ gia tốc đã phát sinh làm dữ liệu đầu vào trong phân tích động lực học công trình ngầm, phân tích các kết quả để đưa ra các kiến nghị trong khuôn khổ, phạm vi nghiên cứu.

#### Chương 2. XÂY DỰNG CHƯƠNG TRÌNH PHÁT SINH GIẢN ĐỒ GIA TỐC NHÂN TẠO BẰNG CÁCH HIỆU CHỈNH GIẢN ĐỒ GIA TỐC SẵN CÓ THEO ĐIỀU KIỆN KHỚP PHỔ PHẢN ỨNG

Trong tiêu chuẩn TCVN 9386-2012, chuyển động của đất nền được biểu diễn bằng phổ phản ứng gia tốc đàn hồi, được gọi tắt là "phổ phản ứng đàn hồi". Giản đồ gia tốc nhân tạo đưa vào tính toán kết cấu công trình ngầm cần có phổ phản ứng phù hợp với các yêu cầu về phố phản ứng thiết kế (điều kiện "khớp phổ phản ứng"). Trong chương 2, luận án trình bày phương pháp phát sinh giản đồ gia tốc bằng cách hiệu chỉnh trực tiếp các giản đồ gia tốc sẵn có bằng cách bổ sung các phần bù gia tốc là tổng của các hàm Wavelet (hay "lượng hiệu chỉnh Wavelet").

## 2.1 Phát sinh giản đồ gia tốc nền nhân tạo theo điều kiện khớp phổ phản ứng theo phương pháp của Hancock

Trong công bố của mình, Hancock đề xuất hiệu chỉnh giản đồ gia tốc theo các bước cơ bản:

**Bước 1:** Hiệu chỉnh sơ bộ theo điều kiện bình phương tối thiểu khoảng lệch phổ phản ứng. Xác định hệ số tỷ lệ hiệu chỉnh ( $k_{hc}$ ) theo phương pháp bình phương tối thiểu. Theo đó, gia tốc điều chỉnh  $a_1(t)$  được tính từ giản đồ gia tốc ban đầu  $a_0(t)$ :

$$a_1(t) = k_{hc} a_0(t)$$
 (2.9)

trong đó:  $a_0(t)$  là gia tốc ban đầu;  $a_1(t)$  là gia tốc sau hiệu chỉnh, có phổ phản ứng đàn hồi  $S_a(i)$ ;  $k_{hc}$  là hệ số hiệu chỉnh, hệ số này được xác định để tổng bình phương độ lệch phổ phản ứng  $\sum_{i=1}^{nCK} (\Delta S_a(i))^2$  đạt giá trị nhỏ nhất.

**Bước 2:** Hiệu chỉnh giản đồ gia tốc thu được từ bước trên bằng cách bổ sung thêm một "lượng hiệu chỉnh Wavelet" là hàm thời gian δa(t) được xác định trên cơ sở khoảng lệch phổ phản ứng. Dựa trên nguyên lý của biến đổi Wavelet, phân tích lượng bù δa(t) thành tổng của các hàm Wavelet con.

$$\delta a(t) = b_1 \psi_1(t) + b_2 \psi_2(t) + \dots + b_{nCK} \psi_{nCK}(t)$$
(2.10)

hay 
$$\delta a(t) = \sum_{j=1}^{nCK} b_j \psi_j(t)$$
 (2.11)

trong đó:  $\psi_j(t)$  là hàm Wavelet thứ j; b<sub>j</sub> là giá trị hệ số tỷ lệ ứng với hàm Wavelet cơ sở; nCK là tổng số hệ một bậc tự do (BTD).

Định nghĩa s<sub>ij</sub> là biên độ phản ứng gia tốc của hệ dao động một BTD với chu kỳ T<sub>i</sub> tại thời điểm t<sub>i</sub> tạo ra bởi hàm hiệu chỉnh  $\psi_j(t)$ :

$$\delta \Psi_{i} = \sum_{j=1}^{nCK} b_{j} \mathbf{s}_{ij}$$
(2.16)

Công thức này còn ngầm chỉ ra sự thay đối của phố tại chu kỳ T<sub>i</sub> do toàn bộ hàm Wavelet hiệu chỉnh  $\Psi_j(t)$ . Với mục tiêu như đã trình bày ở phần trên, phản ứng của hàm hiệu chỉnh  $\delta \Psi_i$  tại thời điểm  $t_i$  tiến tới giá trị của khoảng lệch phổ phản ứng  $\Delta S_a(i)$ , do đó có thể viết lại như sau:

$$\Delta S_{a}(i) = \sum_{j=1}^{nCK} b_{j} s_{ij}$$
(2.17)

Hệ phương trình viết đầy đủ cho nCK hệ một BTD:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{s}_{1,1} & \mathbf{s}_{1,2} & \dots & \mathbf{s}_{1,nCK} \\ \mathbf{s}_{2,1} & \mathbf{s}_{2,2} & \dots & \mathbf{s}_{2,nCK} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{s}_{nCK,1} & \mathbf{s}_{nCK,2} & \dots & \mathbf{s}_{nCK,nCK} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \\ \dots \\ \mathbf{b}_{nCK} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{S}_{a}(1) \\ \Delta \mathbf{S}_{a}(2) \\ \dots \\ \Delta \mathbf{S}_{a}(nCK) \end{bmatrix}$$
(2.18)

Ma trận [S], với các thành phần s<sub>ij</sub> thể hiện giá trị phản ứng gia tốc tại thời điểm đạt đỉnh t<sub>j</sub> của hệ dao động một BTD với chu kỳ T<sub>i</sub> do lượng Wavelet hiệu chỉnh  $\psi_j(t)$  thứ j, công thức (2.18) có thể viết lại:

$$[\Delta S_a] = [S] \{b\}$$
(2.19)

Hệ số tỷ lệ được xác định thông qua việc giải hệ phương trình (2.19) theo công thức:

$$\{\mathbf{b}\} = \left[\mathbf{S}\right]^{-1} \{\Delta \mathbf{S}_{\mathbf{a}}\}$$
(2.20)

**Bước 3:** Kiểm tra phổ phản ứng của gia tốc sau khi hiệu chỉnh, nếu chưa đạt yêu cầu thì tiếp tục thực hiện lần lượt bước 1 và bước 2.

#### 2.2 Xây dựng chương trình PG01

Trên cơ sở thuật toán của Hancock, tác giả đã thiết lập chương trình PG01 trên nền ngôn ngữ Matlab phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo. Sơ đồ khối chương trình được thể hiện trên hình 2.8.



Hình 2.8. Sơ đồ khối chương trình PG01

## 2.3 Sử dụng chương trình PG01 tạo giản đồ gia tốc nhân tạo trên nền đá gốc theo điều kiện khớp phổ phản ứng

#### 1. Phổ phản ứng mục tiêu theo TCVN 9386-2012

Phổ phản ứng mục tiêu xác định Tiêu chuẩn kháng chấn TCVN 9386-2012, bao gồm các thông số:

- Gia tốc nền tham chiếu lấy với khu vực quận Ba Đình: agR=0,0976g;

hệ số tầm quan trọng  $\gamma_I$ =1,0 (theo phụ lục E, TCVN 9386-2012 với dạng công trình là đường hầm tuyến đường sắt đô thị). Gia tốc nền thiết kế trên nền loại A,  $a_g = a_{gR} \cdot \gamma_I = 0,0976g$ .

- Điều kiện nền loại A có các thông số chu kỳ: T<sub>1</sub>=0,05s; T<sub>B</sub>=0,20s; T<sub>C</sub>=0,60s; T<sub>D</sub>=2,00s và T<sub>0</sub>=4,00s.

- Rời rạc hóa chu kỳ với bước chia  $\Delta T=0,05$ s.

### 2. Giản đồ gia tốc đầu vào

Tiêu chuẩn thiết kế công trình chịu động đất TCVN 9386-2012 quy định khi sử dụng giản đồ gia tốc nhân tạo thì số lượng tối thiểu là 03 giản đồ. Do đó tiến hành phát sinh giản đồ gia tốc nền nhân tạo theo điều kiện khớp phổ phản ứng bằng chương trình PG01 phù hợp với điều kiện khu vực thành phố Hà Nội với đầu vào là 03 bản ghi gia tốc thực. Các giản đồ gia tốc đầu vào được chọn lựa từ các giản đồ gia tốc ghi được tại các điểm có điều kiện địa chấn tương tự khu vự Hà Nội được lựa chọn theo kết quả nghiên cứu của tác giả Nguyễn Ngọc Thủy và thể hiện bảng 2.5.

TT	Đới phát sinh động đất	$\mathbf{M}_{\mathbf{w}}$	<b>R</b> <sub>hyp</sub>	R <sub>rup</sub>
			(km)	(km)
1	Bản ghi gia tốc Điện Biên ngày 19/02/2001	5,3	12	19
2	Bản ghi gia tốc 321 Campano Lucano (Italy)	5,0	15	8
	ngày 16/01/1981			
3	Bản ghi gia tốc ca064 Lang Cang (Trung	6,3	12	13
	Quốc) ngày 27/11/1988			

Bảng 2.5. Giản đồ gia tốc đầu vào để thực hiện hiệu chỉnh bằng PG01

### 3. Hiệu chỉnh bản ghi Điện Biên bằng PG01

Hiệu chỉnh bản ghi sẵn có bằng chương trình PG01, gia tốc nền đầu vào để thực hiện hiệu chỉnh là bản ghi gia tốc Điện Biên (giản đồ gia tốc được thể hiện trên hình 2.11).



Hình 2.11. Băng gia tốc của động đất Điện Biên ngày 19/02/2001

Kết quả hiệu chỉnh thu được: giản đồ gia tốc nhân tạo (ký hiệu là BaDinh\_01A); phổ phản ứng và biểu đồ phân bố năng lượng Arias được thể hiện lần lượt trên các hình 2.12, hình 2.13 và hình 2.14 dưới đây.



Hình 2.12. Kết quả khớp phổ phản ứng với gia tốc nền đầu vào Điện Biên (giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh\_01A)



Hình 2.13. Giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh\_01A



Hình 2.14. Phân bố năng lượng Arias với gia tốc nền đầu vào và giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh\_01A

Giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh\_01A có phổ phản ứng thỏa mãn các điều kiện theo TCVN 9386-2012, cụ thể: các giá trị của phổ phản ứng đàn hồi trung bình tính được từ tất cả các khoảng thời gian không được nhỏ

hơn 90% giá trị ứng với phổ phản ứng đàn hồi; tại điểm bắt đầu giá trị phổ phản ứng lớn hơn giá trị phổ phản ứng yêu cầu, Sa(1)>Sa<sub>TK</sub>(1).

So sánh với kết quả sử dụng phần mềm SeismoMatch ver 2021.



Hình 2.16. Giản đồ gia tốc nhân tạo thu được khi hiệu chỉnh bằng chương trình SeismoMatch

Số liệu so sánh một số đặc trưng của hai giản đồ gia tốc nhân tạo được thể hiện trong bảng 2.7, kết quả cho thấy sự sai khác nhỏ. Do vậy, giản đồ gia tốc phát sinh bằng chương trình PG01 có sơ sở để tin cậy.

Bảng 2.7 Bảng so sánh đặc trưng của giản đồ gia tốc phát sinh bằng PG01 và SeismoMatch

TT	Chỉ tiêu so sánh	PG01 (A)	SeismoMatch (B)	Chênh lệch (A-B)/B (%)
1	Gia tốc đỉnh PGA (cm/s <sup>2</sup> )	122,9	114,2	7,62%
2	Năng lượng Arias- IA (m/s)	0,057	0,059	-3,39%

### 4. Hiệu chỉnh các bản ghi Campano Lucano và Lang Cang

Hiệu chỉnh hai bản ghi Campano Lucano, Lang Cang thu được giản đồ gia tốc nhân tạo BaDinh\_02A, BaDinh\_03A. Các giản đồ gia tốc nhân tạo được phát sinh bằng chương trình PG01 có phổ phản ứngthỏa mãn điều kiện phổ mục tiêu theo TCVN 9386-2012 được thể hiện trên hình 2.27, các tham số tương ứng được thể hiện trong bảng 2.8.



Hình 2.27. Biểu diễn 03 giản đồ gia tốc nhân tạo phát sinh bằng PG01

TT	Giản đồ gia tốc		Các tham số của giản đồ gia tốc								
	nhân tạo	PGA	PGV	arms	IA	t5-95					
		$(cm/s^2)$	(cm/s)	$(cm/s^2)$	(cm/s)	<b>(s)</b>					
1	BaDinh_01A	122,87	7,76	31,99	5,600	3,11					
2	BaDinh_02A	76,56	6,68	19,05	8,300	12,87					
3	BaDinh_03A	96,91	10,73	26,35	7,500	5,71					
	Trung bình	98,78	8,39	25,80	7,13	7,23					

Bảng 2.8. Bảng tổng hợp các tham số của các giản đồ gia tốc nhân tạo

#### 2.4 Kết luận chương 2

Trong nội dung của chương 2 tác giả đã nghiên cứu sử dụng cơ sở lý thuyết, thuật toán của Hancock nhằm tạo ra các giản đồ gia tốc có phổ phản ứng "khớp" với phổ phản ứng mục tiêu bằng cách hiệu chỉnh các giản đồ gia tốc sẵn có. Trên nền ngôn ngữ lập trình Matlab, xây dựng chương trình PG01 trên cơ sở thuật toán của phương pháp đã nghiên cứu.

Trong nội dung của chương, tác giả cũng đã lựa chọn 3 bản ghi phù hợp với điều kiện tại khu vực Hà Nội. Sử dụng chương trình PG01, hiệu chỉnh 3 bản ghi đã chọn để phát sinh 3 giản đồ gia tốc nhân tạo trên nền đá gốc có phổ phản ứng thỏa mãn Tiêu chuẩn TCVN 9386-2012.

### Chương 3. XÂY DỰNG CHƯƠNG TRÌNH PHÁT SINH NGÃU NHIÊN GIẢN ĐỒ GIA TỐC NHÂN TẠO DỰA TRÊN HỆ PHƯƠNG TRÌNH HỒI QUY

# 3.1 Cơ sở lý thuyết phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc theo hệ phương trình hồi quy bằng phương pháp của Yamamoto

1. Các đặc trưng cơ bản của gói Wavelet

Để định lượng một giản đồ gia tốc, Yamamoto đề xuất sử dụng các tham số của gói Wavelet tương ứng. Mỗi giản đồ gia tốc, thông qua biến đổi gói Wavelet, sẽ được định lượng bằng các tham số định vị tính theo thời gian và tần số (các đặc trưng của gói Wavelet). Các đặc trưng này bao gồm: trọng tâm tính theo thời gian  $E_t$ ; độ lệch chuẩn tính theo thời gian  $S_t$ ; trọng tâm tính theo tần số  $E_f$ ; độ lệch chuẩn tính theo tần số  $S_f$ ; hệ số tương quan tần số và thời gian  $\rho_{t,f}$ . Các đặc trưng này được tính toán thông qua các hệ số gói Wavelet.

#### 2. Phương pháp và hệ phương trình của Yamamoto

Hệ phương trình hồi quy là liên hệ giữa giản đồ gia tốc nền với các thông số của trận động đất và các thông số địa chấn tại địa điểm khảo sát. Phương pháp phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo từ hệ phương trình hồi quy

bao gồm các nhiệm vụ cơ bản:

+ Xác định kịch bản của trận động đất (xác định các nguồn gây động đất gần khu vực khảo sát, cấp động đất có thể xảy ra, chiều sâu chấn tiêu dự kiến ứng với trận động đất, khoảng cách từ điểm khảo sát đến chấn tâm...). Bước này nhằm mục đích tạo số liệu đầu vào cho bài toán (bao gồm các đại lượng: M,  $R_{hyp}$ ,  $R_{rup}$ ,  $V_{s30}$ );

+ Tính toán các tham số của gói Wavelet dựa trên hệ phương trình hồi quy và các số liệu của trận động đất dự kiến;

+ Phát sinh giản đồ gia tốc nền nhân tạo bằng phép biến đổi ngược gói Wavelet.

Yamamoto đã đề xuất sử dụng các đặc trưng gói Wavelet (gắn với các giản đồ gia tốc) làm biến mục tiêu để tiến hành phân tích hồi quy, 13 tham số đặc trưng cho một gia tốc nền được khảo sát bao gồm:

- Các tham số của nhóm các gói Wavelet phụ:  $E_{t,min}$  là trọng tâm tính theo thời gian;  $S_{t,min}$  là độ lệch chuẩn tính theo thời gian;  $E_{f,min}$  là trọng tâm tính theo tần số;  $S_{f,min}$  là độ lệch chuẩn tính theo tần số;  $\rho_{t,f,min}$  là hệ số tương quan tần số và thời gian trong nhóm các gói Wavelet phụ, được ký hiệu tương ứng  $Y_1$  đến  $Y_5$ .

- Các tham số của nhóm các gói Wavelet chính:  $E_{t,maj}$  là trọng tâm tính theo thời gian;  $S_{t,maj}$  là độ lệch chuẩn tính theo thời gian;  $E_{f,maj}$  là trọng tâm tính theo tần số;  $S_{f,maj}$  là độ lệch chuẩn tính theo tần số;  $\rho_{t,f,maj}$  là hệ số tương quan tần số và thời gian trong nhóm các gói Wavelet chính, các tham số này được ký hiệu tương ứng Y<sub>6</sub> đến Y<sub>10</sub>.

-  $E[a_{j,k,maj}^{i}]$  là kỳ vọng của bình phương biên độ hệ số gói Wavelet chính với  $a_{j,k,maj}^{i} = |c_{j,k,maj}^{i}|^{2}$  (tương ứng với tham số Y<sub>11</sub>);

-  $E_{acc}$  là năng lượng tổng cộng (tương ứng với tham số  $Y_{12}$ );

-  $\xi_{k,i}$  là đại lượng ngẫu nhiên phân bố chuẩn logarít của biến ngẫu nhiên với giá trị trung bình bằng "0" của phần dư trong nhóm các gói Wavelet phụ (tương ứng với tham số Y<sub>13</sub>).

Như vậy, bằng cách biểu diễn quá trình ngẫu nhiên thông qua các gói Wavelet (trên hệ trục thời gian- tần số) ta tìm được 13 tham số đặc trưng cho một giản đồ gia tốc. Yamamoto đã xây dựng hệ phương trình hồi quy trên cơ sở phân tích dữ liệu của 1408 bản ghi gia tốc, hệ phương trình này thể hiện như trên công thức (3.11):

$$\begin{cases} Y_{1} \\ Y_{2} \\ \dots \\ Y_{13} \end{cases} = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \dots & r_{1,7} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \dots & r_{2,7} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{13,1} & r_{13,2} & \dots & r_{13,7} \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} X_{1} \\ X_{2} \\ \dots \\ X_{7} \end{cases} + \begin{cases} \eta_{1} \\ \eta_{2} \\ \dots \\ \eta_{13} \end{cases} + \begin{cases} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \dots \\ \varepsilon_{13} \end{cases}$$
(3.11)  
hay  $\{Y\} = [R] \cdot \{X\} + \{\eta\} + \{\varepsilon\}$ 

trong đó: {Y} là véc tơ các logarit tự nhiên của 13 tham số đặc trưng gói Wavelet của giản đồ gia tốc; {X} là véc tơ các tham số của trận động đất, với X<sub>1</sub>=1, X<sub>2</sub>=M, X<sub>3</sub>=ln(M), X<sub>4</sub>=e<sup>M</sup>, X<sub>5</sub>=(R<sub>hyp</sub>-R<sub>rup</sub>), X<sub>6</sub>=ln(R<sub>rup</sub>), X<sub>7</sub>=ln(V<sub>s,30</sub>); [R] là ma trận các hệ số thu được từ phân tích hồi quy thể hiện trong bảng 3.1; { $\eta$ } và { $\epsilon$ } là các đại lượng ngẫu nhiên tuân theo phân bố chuẩn với giá trị kỳ vọng bằng "0", độ lệch chuẩn tương ứng là  $\sigma_i$  và  $\tau_i$  xác định theo bảng 3.1.

i	Tham số	$\mathbf{r}_{i,1}$	Μ	ln(M)	e <sup>M</sup>	$R_h$	ln(R <sub>np</sub> )	In(V <sub>s,30</sub> )	$\sigma_i$	$ au_i$
	$(\mathbf{Y}_i)$		$r_{i,2}$	$r_{i,3}$	r <sub>i,4</sub>	$r_{i,5}$	r <sub>i,6</sub>	r <sub>i,7</sub>		
					x10 <sup>4</sup>	x10 <sup>-3</sup>				
1	$ln(E_{t,min})$	2,64	0	0	0,4	-1	0,22	-0,16	0,18	0,21
2	$ln(S_{t,min})$	3,06	0	0	0,4	-5	0,11	-0,17	0,21	0,23
3	ln(E <sub>f,min</sub> )	1,29	-0,14	0	0	-4	-0,23	0,36	0,35	0,26
4	$\ln(S_{f,min})$	1,48	-0,005	0	0	-3	-0,29	0,24	0,40	0,29
5	$ln(\rho_{tf,min})$	-0,36	0,01	0	0	-0,056	-0,03	0,04	0,06	0,03
6	ln(E <sub>t,maj</sub> )	1,95	0	0	0,6	-2	0,34	-0,20	0,27	0,30
7	$ln(S_{t, maj})$	1,82	0	0	0,6	-6	0,22	-0,20	0,34	0,33
8	ln(E <sub>f, maj</sub> )	0,81	-0,26	0	0	-4	-0,16	0,44	0,41	0,26
9	$ln(S_{f, maj})$	0,14	-0,12	0	0	-2	-0,24	0,39	0,56	0,37
10	$ln(\rho_{tf,\ maj})$	-0,54	0,01	0	0	-0,08	-0,08	0,09	0,21	0,07
11	$\ln(E[a^{i}_{j,k,maj}])$	-38,02	-4,52	37,30	0	0	-1,74	-0,94	1,13	0,71
12	$ln(E_{acc})$	-27,40	-2,58	27,00	0	0	-1,61	-0,88	0,85	0,46
13	$\ln(S[\xi_{k,i}])$	1,29							0,07	

Bảng 3.1 Bảng hệ số của hệ phương trình hồi quy của Yamamoto

#### 3.2 Nội dung thuật toán của Yamamoto

Thuật toán của Yamamoto bao gồm một số nội dung cơ bản:

- Xác định các tham số đặc trưng của gói Wavelet từ các dữ liệu của trận động đất (M,  $R_{hyp}$ ,  $R_{rup}$ ,  $V_{s,30}$ ) thông qua hệ phương trình hồi quy.

- Xác định các hệ số gói Wavelet  $c_{j,k}^{i}$  thông qua việc phát sinh ngẫu nhiên các hệ số nhóm phụ và nhóm chính ( $c_{j,k,min}^{i}$ ,  $c_{j,k,maj}^{i}$ ).

- Tái cấu trúc giản đồ gia tốc bằng biến đổi ngược gói Wavelet.

#### 3.3 Cải biên thuật toán của Yamamoto, xây dựng chương trình PG02

Giản đồ gia tốc nhân tạo thu được theo phương pháp của Yamamoto là các thể nghiệm ngẫu nhiên, cần hiệu chỉnh để phù hợp với Tiêu chuẩn TCVN 9386-2012. Trên cơ sở thuật toán của Yamamoto, tác giả đề xuất cải biên bằng cách bổ sung việc hiệu chỉnh giản đồ gia tốc nhân tạo thỏa mãn TCVN 9386-2012. Bằng ngôn ngữ lập trình Matlab để lập chương trình PG02, sơ đồ khối được thể hiện trong hình 3.5.



Hình 3.5. Sơ đồ thuật toán chương trình PG02

Các thông số cần nhập vào chương trình PG02 bao gồm 2 nhóm dữ liệu: 1) Các thông số về nguồn và đường truyền: chấn cấp ( $M_w$ ), độ sâu chấn tiêu ( $R_{hyp}$ ), tâm cự ( $R_{rup}$ ), vận tốc truyền sóng cắt của môi trường ( $V_{s30}$ ). 2) Các thông số về phổ phản ứng theo tiêu chuẩn: loại nền, gia tốc đỉnh tham chiếu ( $a_{gR}$ ), hệ số tầm quan trọng của công trình ( $\gamma_I$ ).

## 3.4 Sử dụng chương trình PG02 phát sinh giản đồ gia tốc nhân tạo trên nền đá gốc với đới động đất sông Hồng- sông Chảy

Sử dụng chương trình PG02 đã lập để phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc tại vị trí trung tâm quận Ba Đình (tọa độ 21,030N; 105,824Đ). Nguồn phát sinh là đới động đất Sông Hồng - Sông Chảy: chấn cấp M=6,2; độ sâu chấn tiêu là  $R_{hyp}=15$ km; khoảng cách từ điểm xét đến chấn tâm là  $R_{rup}=11$ km; vận tốc truyền sóng cắt trung bình của đất đá tại nền là  $V_{s,30}=800$ m/s. Điều kiện phổ phản ứng mục tiêu ứng với nền đất loại A.

Thực hiện 18 lần phát giả khác nhau thu được các giản đồ gia tốc nhân tạo được ký hiệu lần lượt từ bd01-01a đến bd01-18a. Các giản đồ gia tốc từ bd01-01a đến bd01-14a được trình bày trên các hình từ 3.4 đến 3.7. Các đặc trưng của 18 giản đồ như: gia tốc đỉnh (PGA), gia tốc hiệu dụng (a<sub>RMS</sub>), cường độ Arias (IA)... được tính toán và thể hiện trong bảng 3.5.



Hình 3.10. Giản đồ gia tốc bd01-03a Hình 3.11. Giản đồ gia tốc bd01-04a Bảng 3.5. Các tham số đặc trưng của giản đồ gia tốc nhân tạo phát sinh bằng chương trình PG02

TT	Giản đồ gia tốc nhân	Tham số							
	tạo	PGA	PGA PGV		IA	t5-95			
		$(\mathrm{cm/s^2})$	(cm/s)	$(cm/s^2)$	(cm/s)	<b>(S)</b>			
1	bd01-01a	93,73	6,21	25,63	10,800	9,28			
2	bd01-02a	104,57	6,62	25,71	12,500	10,62			
3	bd01-03a	73,69	6,89	27,99	9,450	6,78			

TT	Giản đồ gia tốc nhân			Tham số		
	tạo	PGA	PGV	arms	IA	t5-95
		$(cm/s^2)$	(cm/s)	$(cm/s^2)$	(cm/s)	<b>(s)</b>
4	bd01-04a	102,86	6,41	30,84	12,700	7,51
5	bd01-05a	92,15	8,05	27,74	10,600	7,73
6	bd01-06a	102,64	7,87	30,29	9,900	6,09
7	bd01-07a	94,65	7,53	29,15	11,700	7,72
8	bd01-08a	102,01	5,61	27,58	9,500	7,02
9	bd01-09a	105,74	7,93	32,82	10,900	5,70
10	bd01-10a	101,60	6,03	27,95	9,900	7,13
11	bd01-11a	104,24	6,49	26,95	9,900	7,67
12	bd01-12a	98,04	6,31	24,89	8,900	8,06
13	bd01-13a	76,83	6,86	28,99	12,200	8,16
14	bd01-14a	93,59	7,54	28,95	11,000	7,36
15	bd01-15a	88,56	8,31	28,85	9,500	6,43
16	bd01-16a	101,51	7,24	29,54	14,400	9,28
17	bd01-17a	99,88	8,18	30,89	10,200	5,98
18	bd01-18a	76,57	7,84	25,85	8,600	7,25
	Trung bình	95,16	7,11	28,37	10,70	7,54

Phổ phản ứng đàn hồi của các giản đồ gia tốc được thể hiện trên hình 3.13, trong đó Sa\_TK và Sa\_TB lần lượt là phổ phản ứng mục tiêu và phổ phản ứng trung bình của 18 giản đồ gia tốc.



Hình 3.13. Phổ phản ứng đàn hồi của các giản đồ gia tốc nhân tạo phát sinh bằng chương trình PG02

#### 3.5 Kết luận chương 3

Trong chương 3, tác giả tìm hiểu cơ sở lý thuyết và cải biên thuật toán của Yamamoto để xây dựng chương trình PG02 trên nền ngôn ngữ lập trình Matlab. Sử dụng chương trình PG02 phát các thể nghiệm ngẫu nhiên ứng với vị trí trung tâm quận Ba Đình, thành phố Hà Nội, nguồn động đất là đới đứt gãy Sông Hồng - Sông Chảy, phổ mục tiêu xác định theo TCVN 9386-2012. Kết quả của thử nghiệm số thu được 18 giản đồ gia tốc nhân tạo phù hợp với các yêu cầu tính toán công trình ngầm chịu động đất.

#### Chương 4. KHẢO SÁT ỨNG XỬ CỦA CÔNG TRÌNH NGẦM CHỊU ĐỘNG ĐẤT TẠI HÀ NỘI VỚI GIẢN ĐỎ GIA TỐC NHÂN TẠO 4.1 Xây dưng mô hình bài toán trên phần mềm Plaxis

Mô hình vật liệu kết cấu hầm giả thiết là đồng nhất và làm việc theo mô hình đàn hồi tuyến tính, các đặc trưng tiết diện kết cấu và vật liệu vỏ hầm được giả thiết như trong bảng 4.1.

TT	Tham số	Ký hiệu	Tròn	Đơn vị
1	Kích thước trong của vỏ hầm	D <sub>tr</sub>	5,70	m
2	Kích thước ngoài của vỏ hầm	D <sub>ng</sub>	6,30	m
3	Mô-đun đàn hồi của bê tông vỏ hầm	Ec	$2,5.10^{7}$	kN/m <sup>2</sup>
4	Hệ số Poisson của bê tông	ν	0,15	
5	Bề dày của kết cấu vỏ hầm	t	0,30	m
6	Bề rộng dải kết cấu khảo sát	b	1,00	m
7	Độ cứng dọc trục	EA	$7,50.10^{6}$	kN/m
8	Độ cứng kháng uốn	EI	5,62.104	kNm <sup>2</sup> /m
9	Trọng lượng đơn vị theo chiều dài	W	7,50	kN/m/m

Bảng 4.1. Bảng các tham số của kết cấu vỏ hầm khai báo trong Plaxis 2D

Các phân tố của vỏ hầm được liên kết tại các nút và được giả thiết làm việc theo mô hình dạng liên kết nửa cứng (LKNC) của Jassen, độ cứng kháng uốn được xác định theo công thức:

$$C_r = \frac{b.l_t^2.E_c}{12} = \frac{1.0,185^2.2,5.10^7}{12} = 71302 \text{ (kNm/rad)}$$
(4.2)

trong đó:  $E_c$  là mô đun đàn hồi của bê tông; b là bề rộng dải cắt đoạn hầm, b=1m; l<sub>t</sub> là chiều cao vùng tiếp xúc: l<sub>t</sub>=0,185m (tham khảo theo tài liệu thiết kế tuyến đường sắt đô thị số 3 tại Hà Nội).

Mô hình làm việc của môi trường giả thiết là Hardening Soil (HS). Các tham số của đất nền được tham khảo từ tài liệu khảo sát địa chất dự án xây dựng tuyến đường sắt đô thị số 3 và được thể hiện như trong bảng 4.2.

Dung												
τμόνς εό	Ký			TEN	N LOP							
I HUNG SU	hiệu	L1	L2	L3	L4	L5	L6					
Bề dày lớp địa chất (m)	$h_i$	2,5	15	3,5	15,0	11,0	13,0					
Dung trọng bão hòa nước (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{ m sat}$	18	17,8	19,4	20,0	21,0	23,0					
Dung trọng tự nhiên (kN/m <sup>3</sup> )	γunsat	17	16,8	19,4	20,0	21,0	23,0					
Mô đun biến dạng đơn trục (kN/m <sup>2</sup> )	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	5.100	3.600	16.200	25.200	48.800	131.000					
Mô đun biến dạng cát tuyến (kN/m <sup>2</sup> )	$E_{50}^{\text{ref}}$	5.100	3.600	16.200	25.200	48.800	131.000					
Mô đun biến dạng chất-dỡ tải (kN/m <sup>2</sup> )	$E_{\rm ur}^{\rm ref}$	15.300	10.800	48.600	75.600	146.400	393.000					
Hệ số Poisson	ν	0,3	0,35	0,3	0,3	0,3	0,28					
Lực dính c (kN/m <sup>2</sup> )	c	55	30	0,1	0,1	0,1	0,1					
Góc ma sát trong (độ)	φ	20	12	31	37	39	45					
Hệ số R <sub>inter</sub>	Rinter	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7					
<b>T1</b>	αr	9,62	1,38	8,55	2,50	3,64	3,89					
Rayleigh	$\beta_{R}$ (x10 <sup>-3</sup> )	0,19	1,36	0,22	0,19	0,51	0,48					

Bảng 4.2. Bảng các tham số của các lớp đất đá



Hình 4.8. Mô hình bài toán được xây dựng trên phần mềm Plaxis 2D

Mô hình hóa bằng phần mềm Plaxis 2D: Mô hình hóa kết cấu sử dụng phần tử dạng dầm 5 nút, mô hình vật liệu đàn hồi tuyến tính; Mô hình hóa môi trường bằng phần tử dạng tam giác 15 nút. Sử dụng điều kiện biên tiêu chuẩn cho bài toán khảo sát công trình chịu tác dụng của động đất. 4.2 Tính toán nội lực xuất hiện trong vỏ hầm với các giản đồ gia tốc nền nhân tạo khác nhau phát sinh từ chương trình PG01 và PG02 1. Tính toán với giản đồ gia tốc phát sinh bằng chương trình PG01

Để khảo sát ứng xử của kết cấu vỏ hầm khi chịu các gia tốc nền nhân tạo đáp ứng theo điều kiện khớp phổ phản ứng, với cùng các thông số đầu vào của phổ phản ứng yêu cầu với đầu vào khác nhau ta tiến hành tính toán bằng phần mềm Plaxis 2D. Mô hình môi trường đất và kết cấu được xây dựng tương tự như bài toán đặt ra trong mục 4.1. Gia tốc nền đưa vào tính toán là ba gia tốc nền nhân tạo BaDinh\_01A, BaDinh\_02A, BaDinh\_03A.

Kết quả tổng hợp kết quả nội lực cực đại xuất hiện trong kết cấu khi tính với ba trường hợp tải trọng khác nhau được thể hiện trên bảng 4.4.

			Tham	số ảnh h	Nội lực cực đại				
TT	Trường họp khảo sát	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGV (cm/s)	aRMS (cm/s <sup>2</sup> )	IA (cm/s)	t5-95 (S)	Mômen (kNm)	Lực cắt (kN)	Lực dọc (kN)
1	BaDinh_01A	122,87	7,76	31,99	5,600	3,11	133,80	100,75	765,25
2	BaDinh_02A	76,56	6,68	19,05	8,300	12,87	135,19	102,67	764,91
3	BaDinh_03A	96,91	10,73	26,35	7,500	5,71	135,81	105,30	773,98
	Trung bình	98,78	8,39	25,80	7,13	7,23	134,93	102,91	768,05
	Nhỏ nhất	76,56	6,68	19,05	5,60	3,11	133,80	100,75	764,91
	Lớn nhất	122,87	10,73	31,99	8,30	12,87	135,81	105,30	773,98

Bảng 4.4. Bảng tổng hợp kết quả nội lực cực đại

Nhận xét kết quả:

- Giản đồ gia tốc nền BaDinh\_02A có giá trị gia tốc đỉnh (PGA) nhỏ nhưng mô men và lực cắt cực đại xuất hiện trong vỏ hầm lớn hơn so với kết quả tính với BaDinh\_01A. Do đó, có thể thấy nội lực cực đại còn chịu ảnh hưởng bởi các tham số khác của giản đồ gia tốc.

- Giá trị nội lực tính toán có sai lệch nhỏ (<2%) khi tính với các giản đồ gia tốc nhân tạo được phát sinh theo cùng một phổ phản ứng mục tiêu.

# 2. Tính toán công trình ngầm với giản đồ gia tốc nhân tạo được phát sinh bằng chương trình PG02

Với mô hình bài toán trong mục 4.1, lần lượt tính với các giản đồ gia tốc được phát sinh từ chương trình PG02 (từ bd01\_01a đến bd01\_18a). Kết quả nội lực cực đại được tổng hợp trong bảng 4.5.

Ciản đầ gia tấa	Th	am số củ	a giản ở	ic	Nội lực cực đại			
nhân tạo	PGA	PGV	arms	IA	t5-95	Mômen	Lực cắt	Lực dọc
nnan tạo	$(cm/s^2)$	(cm/s)	$(cm/s^2)$	(cm/s)	<b>(s)</b>	(kNm)	(kN)	(kN)
bd01-01a	93,73	6,21	25,63	10,800	9,28	138,96	105,08	765,54
bd01-02a	104,57	6,62	25,71	12,500	10,62	135,19	102,67	764,91
bd01-03a	73,69	6,89	27,99	9,450	6,78	138,98	105,61	765,54
bd01-04a	102,86	6,41	30,84	12,700	7,51	138,82	103,92	766,73
bd01-05a	92,15	8,05	27,74	10,600	7,73	140,02	106,45	766,91
bd01-06a	102,64	7,87	30,29	9,900	6,09	138,41	104,80	769,77
bd01-07a	94,65	7,53	29,15	11,700	7,72	138,50	105,12	768,06
bd01-08a	102,01	5,61	27,58	9,500	7,02	134,25	101,53	763,17
bd01-09a	105,74	7,93	32,82	10,900	5,70	142,04	105,70	769,45
bd01-10a	101,60	6,03	27,95	9,900	7,13	135,30	102,99	765,32
bd01-11a	104,24	6,49	26,95	9,900	7,67	136,07	103,28	767,08
bd01-12a	98,04	6,31	24,89	8,900	8,06	137,16	103,67	764,33
bd01-13a	76,83	6,86	28,99	12,200	8,16	140,42	106,26	764,62
bd01-14a	93,59	7,54	28,95	11,000	7,36	140,31	106,08	765,56
bd01-15a	88,56	8,31	28,85	9,500	6,43	136,96	103,17	768,53
bd01-16a	101,51	7,24	29,54	14,400	9,28	138,60	103,55	769,30
bd01-17a	99,88	8,18	30,89	10,200	5,98	142,33	107,34	769,57
bd01-18a	76,57	7,84	25,85	8,600	7,25	136,40	102,27	764,63
Trung bình						138,26	104,42	766,61
Nhỏ nhất	73,69	5,61	24,89	8,60	5,70	134,25	101,53	763,17
Lớn nhất	105,74	8,31	32,82	14,40	10,62	142,33	107,34	769,77

18 Bảng 4.5. Kết quả nội lực cực đại xuất hiện trong vỏ hầm

Qua kết quả thể hiện trong bảng 4.6 có thể thấy giá trị lực dọc xuất hiện trong kết cấu biến đổi với lượng rất nhỏ (0,86%), khoảng biến đổi mô men cực đại và lực cắt cực đại lớn hơn (5,84% và 5,56%). Có thể thấy, lực dọc cực đại chịu ảnh hưởng lớn bởi áp lực đất đá và áp lực nước tác dụng lên công trình và ít chịu ảnh hưởng khi thay đổi giản đồ gia tốc nền. Từ nhận định này, trong các nội dung còn lại, tác giả chủ yếu tập trung khảo sát sự biến đổi giá trị mô men và lực cắt. Trên cơ sở số liệu thu được, tính toán các đặc trưng xác suất với giả thiết nội lực cực đại thỏa mãn phân phối chuẩn, kết quả tính toán được thể hiện trong bảng 4.6.

TT	Biến ngẫu nhiên khảo sát	Ð.vị	Kỳ vọng	Độ lệch chuẩn	Khoảng giá trị biến ngẫ nhiên có xác suất nhận 95	
			(μ)	(σ)	(μ-2σ)	(μ+2σ)
1	Mô men cực đại	kNm	138,26	2,29	133,68	142,84
2	Lực cắt cực đại	kN	104,42	1,64	101,14	107,70

Bảng 4.6. Kết quả các đặc trưng phân phối của nội lực tính toán

Xây dựng biểu đồ hàm mật độ xác xuất của mô men, lực cắt, kết quả được thể hiện trên hình 4.15 và hình 4.16.



Hình 4.15. Biểu đồ hàm mật độ của mô men cực đại



Hình 4.16. Biểu đồ hàm mật độ của lực cắt cực đại

## 3. So sánh nội lực phát sinh khi phân tích động lực học kết cấu công trình ngầm với gia tốc nhân tạo phát sinh bằng PG01 và PG02

So sánh kết quả tính toán là giá trị trung bình của Mô men và lực cắt tính theo phương pháp động lực học với các kết quả tính phương pháp áp đặt chuyển vị trên biên ISGD. Số liệu đầu vào khi tính toán theo phương pháp tĩnh bao gồm các thông số: Chấn cấp  $M_w=6,5$ ; Gia tốc đỉnh PGA=0,11g (PGA= $a_{gR}$ \*S=0,0976\*1,15). Kết quả so sánh được thể hiện trong bảng 4.7 dưới đây.

TT	Nội lực cực đại so sánh	Đ.vị	Kết quả với 18 giản đồ gia tốc phát sinh bằng PG02			Kết quả với giản đồ gia tốc phát sinh bằng PG01				Kết quả tính theo ISGD
			μ	μ-2σ	μ+2σ	BaDinh _01A	BaDinh _02A	BaDinh _03A	Giá trị TB	
1	Mô men	kNm	138,26	133,68	142,84	133,80	135,19	135,81	134,93	135,20
2	Lực cắt	kN	104,42	101,14	107,70	100,75	102,67	105,30	102,91	94,20

So sánh giá trị nội lực cực đại với xác suất xuất hiện 95% khi tính theo số liệu giản đồ gia tốc phát sinh bằng chương trình PG02 và kết quả tính theo ISGD (bảng 4.7), nhận thấy giá trị tính toán động lực học với giản đồ gia tốc ngẫu nhiên cho giá trị lớn hơn kết quả tính toán tĩnh.

#### 4.3 Khảo sát ảnh hưởng của liên kết nửa cứng giữa các phân tố vỏ hầm đến nội lực xuất hiện trong vỏ hầm

Tiến hành tính toán với cả hai sơ đồ kết cấu: sơ đồ kết cấu liên tục và sơ đồ kết cấu có kể đến tính phân mảnh (sơ đồ tính có xét tới các liên kết nửa cứng). Giá trị của tỷ số giảm nội lực ứng với từng trường hợp tải trọng được thể hiện như trong bảng 4.8.

TT	Giản đồ gia tốc tính toán	Trườn không LK	ng hợp kể tới NC	Trường l tới L	nợp có kể KNC	Tỷ số giảm nội lực	
		Mô men (kNm)	Lực cắt (kN)	Mô men (kNm)	Lực cắt (kN)	Mô men	Lực cắt
1	bd01-01a	149.83	111,94	138,96	105.08	0.927	0.939
2	bd01-02a	146,68	109,15	135,19	102,67	0,922	0,941
3	bd01-03a	149,93	112,60	138,98	105,61	0,927	0,938
4	bd01-04a	149,74	110,85	138,82	103,92	0,927	0,937
5	bd01-05a	151,05	113,51	140,02	106,45	0,927	0,938
6	bd01-06a	149,33	111,77	138,41	104,80	0,927	0,938
7	bd01-07a	149,42	112,14	138,50	105,12	0,927	0,937
8	bd01-08a	144,77	108,29	134,25	101,53	0,927	0,938
9	bd01-09a	154,44	112,84	142,04	105,70	0,920	0,937
10	bd01-10a	145,88	109,81	135,30	102,99	0,927	0,938
11	bd01-11a	146,68	110,11	136,07	103,28	0,928	0,938
12	bd01-12a	147,97	110,49	137,16	103,67	0,927	0,938

Bảng 4.8. Kết quả nội lực tính toán ứng với hai sơ đồ kết cấu

TT	Giản đồ gia tốc tính toán	Trườn không LK	ng hợp kể tới NC	Trường l tới L	nợp có kể KNC	Tỷ số giảm nội lực	
		Mô men	Lực cắt	Mô men	Lực cắt	Mô	Lực
		(kNm)	(kN)	(kNm)	(kN)	men	cắt
13	bd01-13a	151,43	113,18	140,42	106,26	0,927	0,939
14	bd01-14a	151,35	113,18	140,31	106,08	0,927	0,937
15	bd01-15a	147,66	110,05	136,96	103,17	0,928	0,937
16	bd01-16a	149,55	110,41	138,60	103,55	0,927	0,938
17	bd01-17a	153,64	114,47	142,33	107,34	0,926	0,938
18	bd01-18a	147,13	106,15	136,40	102,27	0,927	0,963
	Trung bình	149,25	111,16	138,26	104,42	0,926	0,939
	Nhỏ nhất	144,77	106,15	134,25	101,53	0,920	0,937
	Lớn nhất	154,44	114,47	142,33	107,34	0,928	0,963

Nhận xét: khi chịu tác dụng của động đất, nội lực trong kết cấu khi có kể đến liên kết nửa cứng giữa các phân tốc có giá trị nhỏ hơn so với kết cấu liền khối. Bên cạnh đó, tỷ lệ giảm nội lực cực đại thay đổi không đáng kể khi sử dụng các giản đồ gia tốc khác nhau.

## 4.4 Phân tích hồi quy đánh giá các ảnh hưởng của giản đồ gia tốc tới nội lực cực đại xuất hiện trong kết cấu

Công cụ sử dụng sử dụng để phân tích hồi quy là phần mềm IBM SPSS. Số liệu phân tích hồi quy sử dụng được thể hiện trong bảng 4.9.

TT	Giản đồ	Các biến độc lập					Các biến phụ thuộc		
	gia tốc	PGA	PGV	arms	IA	t5-95	Mô men	Lực cắt	
		$(cm/s^2)$	(cm/s)	$(cm/s^2)$	(cm/s)	<b>(s)</b>	(kNm)	(kN)	
1	bd01-01a	93,73	6,21	25,63	10,800	9,28	149,83	111,94	
2	bd01-02a	104,57	6,62	25,71	12,500	10,62	146,68	109,15	
3	bd01-03a	73,69	6,89	27,99	9,450	6,78	149,93	112,60	
4	bd01-04a	102,86	6,41	30,84	12,700	7,51	149,74	110,85	
5	bd01-05a	92,15	8,05	27,74	10,600	7,73	151,05	113,51	
6	bd01-06a	102,64	7,87	30,29	9,900	6,09	149,33	111,77	
7	bd01-07a	94,65	7,53	29,15	11,700	7,72	149,42	112,14	
8	bd01-08a	102,01	5,61	27,58	9,500	7,02	144,77	108,29	
9	bd01-09a	105,74	7,93	32,82	10,900	5,70	154,44	112,84	
10	bd01-10a	101,60	6,03	27,95	9,900	7,13	145,88	109,81	
11	bd01-11a	104,24	6,49	26,95	9,900	7,67	146,68	110,11	
12	bd01-12a	98,04	6,31	24,89	8,900	8,06	147,97	110,49	
13	bd01-13a	76,83	6,86	28,99	12,200	8,16	151,43	113,18	

Bảng 4.9. Bảng số liệu đầu vào phân tích hồi quy
TT	Giản đồ	Các biến độc lập					Các biến phụ thuộc	
	gia tốc	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGV (cm/s)	a <sub>RMS</sub> (cm/s <sup>2</sup> )	IA (cm/s)	t5-95 (S)	Mô men (kNm)	Lực cắt (kN)
14	bd01-14a	93,59	7,54	28,95	11,000	7,36	151,35	113,18
15	bd01-15a	88,56	8,31	28,85	9,500	6,43	147,66	110,05
16	bd01-16a	101,51	7,24	29,54	14,400	9,28	149,55	110,41
17	bd01-17a	99,88	8,18	30,89	10,200	5,98	153,64	114,47
18	bd01-18a	76,57	7,84	25,85	8,600	7,25	147,13	106,15

Thông qua hệ số hồi quy, đánh giá mức độ ảnh hưởng tương đối của các tham số đặc trưng của hàm thời gian đến nội lực cực đại. Kết quả được thể hiện trong hình 4.18 và hình 4.19.



Hình 4.18. Kết quả xét ảnh hưởng của các tham số của giản đồ gia tốc đến mô men cực đại xuất hiện trong kết cấu



Hình 4.19. Kết quả xét ảnh hưởng của các tham số của giản đồ gia tốc đến lực cắt cực đại xuất hiện trong kết cấu

Qua kết quả phân tích có thể thấy:

 Vận tốc đỉnh (PGV) và gia tốc đỉnh (PGA) ảnh hưởng đáng kể đến giá trị mô men và lực dọc nhưng có ảnh hưởng không lớn lên giá trị lực cắt cực đại. - Các đặc trưng như cường độ Arias (IA) và thời gian duy trì dao động mạnh t<sub>5-95</sub> đều có ảnh hưởng đáng chú ý đến cả ba thành phần nội lực cực đại xuất hiện trong kết cấu.

## 4.5 Kết luận chương 4

Nghiên cứu bằng số thông qua phân tích động lực học kết cấu công trình ngầm chịu tác dụng của động đất với giản đồ gia tốc nhân tạo phù hợp với điều kiện thành phố Hà Nội. Tác giả có một số nhận xét:

- Về việc lựa chọn giản đồ gia tốc tính toán công trình ngầm. Trong khuôn khổ giới hạn khảo sát của luận án, nhận thấy: kết quả tính với giản đồ gia tốc phát sinh bởi PG02 đã bao hàm được các kết quả tính theo giản đồ phát sinh bởi PG01 và phân tích tĩnh. Do đó, có thể sử dụng bộ số liệu giản đồ gia tốc được phát sinh bằng chương trình PG02 để tính toán công trình ngầm chịu động đất tại khu vực Hà Nội.

- Về ảnh hưởng khi kể tới liên kết nửa cứng giữa các phân tố vỏ hầm. Trong giới hạn khảo sát của luận án, nhận thấy khi chịu tác dụng của động đất, nội lực trong kết cấu khi có kể đến liên kết nửa cứng giữa các phân tốc có giá trị nhỏ hơn so với kết cấu liền khối. Bên cạnh đó, tỷ lệ giảm nội lực cực đại thay đổi không đáng kể khi sử dụng các giản đồ gia tốc khác nhau.

- Về ảnh hưởng của các đặc trưng hàm thời gian đến nội lực xuất hiện trong vỏ hầm. Kết qủa khảo sát với các gia tốc nền được mô phỏng bằng chương trình PG02 tính với kết cấu công trình ngầm chịu động đất cho thấy: giá trị gia tốc đỉnh (PGA) không phải là yếu tố duy nhất ảnh hưởng đến nội lực của kết cấu các đặc trưng như PGV, thời gian duy trì dao động mạnh t<sub>5-95</sub>, cường độ Arias (IA) và gia tốc hiệu dụng (a<sub>RMS</sub>) đều có ảnh hưởng nhất đến nội lực cực đại xuất hiện trong kết cấu.

## KÉT LUÂN

## 5.1. Những đóng góp của luận án

1. Nghiên cứu phương pháp, thuật toán của Hancock, tiêu chuẩn TCVN 9386-2012, phép biến đổi Wavelet để xây dựng chương trình PG01 phát sinh giản đồ gia tốc theo điều kiện khớp phổ phản ứng trên nền ngôn ngữ lập trình Matlab. Phân tích, lựa chọn các bản ghi gia tốc phù hợp với điều kiện Hà Nội làm số liệu đầu vào cho chương trình PG01 phát sinh 03 giản đồ gia tốc nhân tạo đáp ứng tiêu chuẩn TCVN 9386-2012.

2. Luận án nghiên cứu và cải biên thuật toán của Yamamoto. Trên cơ sở đó xây dựng chương trình PG02 phát sinh ngẫu nhiên giản đồ gia tốc

nhân tạo có phổ phản ứng phù hợp với tiêu chuẩn TCVN 9386-2012. Sử dụng chương trình PG02 đã lập để xây dựng bộ số liệu giản đồ gia tốc nhân tạo trên nền đá gốc tại khu vực quận Ba Đình, thành phố Hà Nội. Bộ giản đồ gia tốc thu được có phổ phản ứng thỏa mãn các yêu cầu của TCVN 9386-2012.

3. Bằng chương trình Plaxis 2D, tác giả đã tính toán công trình ngầm chịu động đất với giản đồ gia tốc nhân tạo, thu được các biểu đồ bao nội lực xuất hiện trong kết cấu. Từ kết quả tính toán tác giả đã đưa ra một số nhận xét và đề xuất trong phạm vi luận án.

## 5.2. Hướng nghiên cứu phát triển tiếp theo

1. Khảo sát các trường hợp mô hình hóa bài toán với hai tuyến hầm chạy song song để đánh giá ảnh hưởng của khoảng cách giữa các tuyến hầm đến nội lực xuất hiện trong kết cấu.

2. Khảo sát, đánh giá ảnh hưởng của mô hình vật liệu áp dụng cho đất đến trạng thái nội lực phát sinh trong kết cấu.

3. Khảo sát, đánh giá khả năng sử dụng các loại vật liệu làm lớp giảm chấn, cách chấn cho công trình ngầm và ứng xử của kết cấu khi kể tới các lớp này khi chịu tác dụng của động đất trong điều kiện Hà Nội.

4. Nghiên cứu khảo sát ứng xử của kết cấu công trình ngầm tại những đoạn giao cắt theo mô hình làm việc trên không gian 3 chiều bằng các phần mềm chuyên dụng như: Flac3D, Plaxis 3D, Abaqus,...

5. Mở rộng việc khảo sát đánh giá vai trò các tham số của giản đồ gia tốc ảnh hưởng đến nội lực cực đại xuất hiện trong kết cấu.

6. Bổ sung cơ sở dữ liệu là số lượng lớn bản ghi các trận động đất đã có để hiệu chỉnh các hệ số của hệ phương trình hồi quy của Yamamoto áp dụng tốt hơn trong điều kiện tại Hà Nội.