



ANALYSIS BEHAVIOR OF CAISSON TYPE QUAY WALL DURING EARTHQUAKE INCLUDED LIQUEFACTION: A CASE STUDY IN QUANG NINH PROVINCE, VIETNAM

Nguyen Anh Dan*, Nguyen Viet Thanh

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 16/03/2025

Revised: 10/05/2025

Accepted: 10/06/2025

Published online: 15/06/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.5.6>

* *Corresponding author*

Email: nadan@utc.edu.vn

Abstract. The caisson type quay wall is commonly used in the ports, it is suitable for locations with good soil or rock geology. In reality, when an earthquake occurs, this structure often tends to tilt and the backfill behind the wall can liquefy. Therefore, it is very important to analyze and predict problems that may occur with caisson berths to serve the design calculations of these structures. This study used the Plaxis software based on the finite element method to examine the behavior of the quay wall during the earthquake and predict the possibility of liquefaction for the backfill behind the wall. The paper focus on examining the deformation and displacement of the caisson structure and the soil behind the quay wall, and assessing the possibility of liquefaction of the soil through the change of pore water pressure during the earthquake. The results showed that, under the effect of earthquake force, the caisson structure displaced vertically, horizontally and rotated towards the sea. The earthquake response acceleration increased gradually from bedrock to the port surface. The pore water pressure in the backfill area near the quaywall increased slightly, and further from the caisson, the pore water pressure increased more strongly, approaching the value where soil liquefaction may occur.

Keywords: Caisson type quay wall, earthquake, liquefaction, Plaxis, finite element method

@ 2025 University of Transport and Communications



PHÂN TÍCH ỨNG XỬ CỦA BẾN THÙNG CHÌM TRONG QUÁ TRÌNH ĐỘNG ĐẤT CÓ XEM XÉT HIỆN TƯỢNG HÓA LỎNG: VÍ DỤ CÔNG TRÌNH TẠI QUẢNG NINH, VIỆT NAM

Nguyễn Anh Dân*, Nguyễn Viết Thanh

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 16/03/2025

Ngày nhận bài sửa: 10/05/2025

Ngày chấp nhận đăng: 10/06/2025

Ngày xuất bản Online: 15/06/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.5.6>

* Tác giả liên hệ

Email: nadan@utc.edu.vn

Tóm tắt. Bến thùng chìm sử dụng phổ biến tại các cảng, nó phù hợp cho những khu vực địa chất đất tốt hoặc nền đá. Thực tế cho thấy khi động đất xảy ra kết cấu này thường có xu hướng bị nghiêng lệch và nền đất lấp phía sau bến có thể xảy ra hóa lỏng. Do đó, việc nghiên cứu phân tích để dự báo các vấn đề có thể xảy ra với bến thùng chìm để phục vụ cho tính toán thiết kế các công trình là rất quan trọng. Nghiên cứu này sử dụng phần mềm Plaxis 2D trên cơ sở phương pháp phần tử hữu hạn để xem xét ứng xử của bến trong quá trình xảy ra động đất cũng như dự báo khả năng xảy ra hóa lỏng đối với đất lấp sau bến. Bài báo đã tập trung xem xét biến dạng, chuyển vị của kết cấu thùng chìm và đất sau bến đồng thời đánh giá khả năng hóa lỏng của đất thông qua sự biến đổi của áp lực nước lỗ rỗng trong quá trình động đất. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng, dưới tác dụng của lực động đất, kết cấu thùng chìm bị chuyển vị theo cả phương đứng, phương ngang và bị xoay về phía trước bến. Gia tốc phản ứng của trận động đất tăng dần từ đá gốc lên đến mặt bến. Khu vực đất lấp gần bến áp lực nước lỗ rỗng có tăng nhẹ, ở xa phía sau bến áp lực nước lỗ rỗng tăng mạnh hơn tiệm cận đến giá trị có thể xảy ra hóa lỏng của đất.

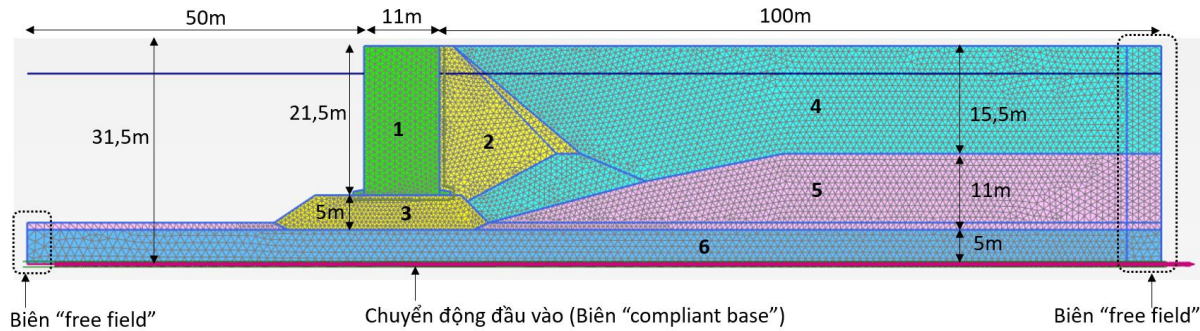
Từ khóa: Bến thùng chìm, động đất, hóa lỏng, Plaxis, phần tử hữu hạn

@ 2025 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Kết cấu bến có nhiều loại như đầm bản trên nền cọc, tường cừ, mái nghiêng, trọng lực...trong đó thùng chìm là một dạng của kết cấu trọng lực. Thông thường thùng chìm được đặt ở những nơi có đất nền là đá hoặc đất tốt, những khu vực đất yếu cũng có thể áp dụng loại này nhưng cần cải tạo nền đất để tăng khả năng chịu lực của nền. Nghiên cứu đánh giá khả năng chịu lực và ứng xử của công trình bến dạng thùng chìm đã được thực hiện bởi nhiều tác giả với nhiều phương pháp khác nhau như: khảo sát thực tế sau động đất, mô hình số, thí nghiệm bàn rung, thí nghiệm máy ly tâm. Trên thế giới, Inagaki và cộng sự đã thực hiện các khảo sát tại cảng Kobe sau trận động đất Hyogoken-Nambu năm 1995 để đánh giá các thiệt hại và hư hỏng của kết cấu bến thùng chìm. Sau đó thí nghiệm bàn rung đã được thực hiện để phân tích quá trình và hiểu được cơ chế biến dạng của các kết cấu trong khi động đất [1]. Cũng sau trận động đất này Towhata và cộng sự đã tiến hành khảo sát nhưng tập trung vào xem xét hiện tượng hóa lỏng xảy ra phía sau bến [2]. Sau đó dựa trên các kết quả khảo sát này một số các nhà nghiên cứu khác đã mô phỏng số để xem xét chi tiết những hiện tượng xảy ra như nghiên cứu của Dakoulas và cộng sự [3], Lai và cộng sự [4], và Galavi và cộng sự [5]. Để làm rõ ảnh hưởng của tương tác của nước biển – kết cấu, Arablouei và cộng sự đã mô hình hóa và phân tích sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn bằng phần mềm ADINA [6]. Lee và cộng sự đã đánh giá hệ số địa chấn dựa trên hiệu suất cho cầu cảng loại trọng lực thông qua các thử nghiệm bằng máy ly tâm [7]. Kim và Nguyen đã đánh giá xem xét ứng xử động của bến trọng lực được nâng cấp nhằm gia tăng độ sâu nước trước bến bằng các thử nghiệm máy ly tâm và mô hình số [8,9]. Tại Việt Nam trong thời gian qua cũng có một số nghiên cứu liên quan đến vấn đề động đất và kháng chấn cho công trình bến cảng như nghiên cứu của Nguyễn Thị Bạch Dương về phương pháp phân tích tĩnh và động cho các công trình bến cầu tàu [10]. Nguyễn Thành Trung tổng quan về phương pháp thiết kế kháng chấn theo tính năng cho các công trình bến cảng [11] và phân tích ứng xử động của công trình bến dạng lai ghép dưới tác dụng của tải trọng động đất [12]. Nguyễn Anh Dân và Nguyễn Viết Thanh thực hiện tính toán bến tường cừ chịu động đất theo phương pháp lịch sử thời gian [13].

Như vậy có thể thấy rằng các nghiên cứu liên quan đến động đất và kháng chấn cho công trình bến trọng lực, cụ thể là kết cấu thùng chìm trên thế giới đã được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm và thực hiện. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu này tập trung vào việc mô tả lại các công trình sau khi bị động đất để giải thích các hiện tượng xảy ra trong thực tế. Các nghiên cứu phục vụ dự báo phục vụ cho việc thiết kế và xây dựng mới các công trình phù hợp với các tiêu chuẩn của từng khu vực còn khá hạn chế. Ở Việt Nam, hầu hết các nghiên cứu còn mang tính chất định hướng chung và chưa có nghiên cứu cụ thể cho bến thùng chìm. Xuất phát từ thực tế đó, trong nghiên cứu này các tác giả tập trung giới thiệu phương pháp phân tích động của bến thùng chìm dưới tác dụng của tải trọng động đất bằng phương pháp số sử dụng phần mềm Plaxis 2D và mô hình nền UBC3D-PLM phù hợp cho quá trình gia tải tuần hoàn. Nội dung của bài báo làm rõ quy trình và phương pháp phân tích theo phương pháp lịch sử thời gian, phù hợp với quy định và phổ thiết kế theo tiêu chuẩn cụ thể. Bài báo lấy ví dụ đối với công trình giả thiết đặt ở Quảng Ninh, Việt Nam và được phân tích với phổ thiết kế theo tiêu chuẩn Việt Nam. Kết quả bài báo, bên cạnh việc xem xét các phản ứng của kết cấu thùng chìm, nghiên cứu cũng đánh giá sự gia tăng áp lực nước lỗ rỗng và khả năng xảy ra hóa lỏng ở đất lấp sau bến. Quy trình tính toán và kết quả bài báo có thể sử dụng làm tài liệu tham khảo để áp dụng cho việc phân tích, dự báo các hiện tượng có thể xảy ra khi thiết kế mới hoặc sửa chữa các công trình bến thùng chìm.



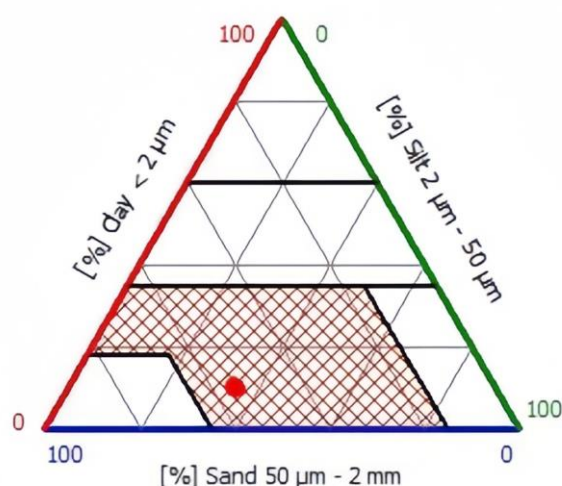
Hình 2. Mô hình số bằng phần mềm Plaxis 2D.

3.2 Thông số đầu vào của vật liệu

Mô hình trước hết được phân tích tĩnh để tạo ra ứng suất bản thân trong đất trước khi chuyển sang phân tích động. Trong mô hình, kết cấu thùng chìm (1) và đá gốc (6) được mô hình hóa bằng mô hình đàn hồi tuyến tính. Lớp bùn sét (5) sử dụng mô hình Mohr-Coulomb. Đối với các lớp lăng thể đá sau bến (2), móng đá (3) và lớp cát lấp sau bến (4) mô hình nền Hardning soil được áp dụng trong giai đoạn phân tích tĩnh và mô hình UBC3D-PLM được gán khi phân tích động.

Mô hình Hardning soil được khuyến cáo áp dụng cho các lớp đất rời, tuy nhiên nó phù hợp cho phân tích tĩnh để tạo ra ứng suất và biến dạng trước khi chuyển sang phân tích động. Đối với phân tích động đất, mô hình này không xem xét được sự gia tăng của áp lực nước lỗ rỗng trong đất, do đó cần sử dụng mô hình nền phù hợp hơn. Mô hình UBC3D-PLM được phát triển để mô tả ứng xử động và khả năng hóa lỏng của đất cát dưới tác dụng của tải trọng động đất [16]. Mô hình này được phát triển dựa trên mô hình UBCSAND (University of British Columbia Sand) đề xuất bởi Puebla và cộng sự [17]. Mô hình sử dụng các quy tắc làm cứng động học đơn giản và đẳng hướng cho các bề mặt chịu lực chính và phụ, nhằm tính đến tác động của quá trình nén chặt đất và dự đoán quá trình chuyển đổi sang trạng thái hóa lỏng trong quá trình tải trọng tuần hoàn không thoát nước. Bằng cách sử dụng lý thuyết giãn nở ứng suất đơn giản hóa, mô hình có khả năng mô hình hóa quá trình hóa lỏng tuần hoàn cho các đường ứng suất khác nhau. Ứng xử sau hóa lỏng của cát rời và tính di động tuần hoàn của cát đặc có thể được mô hình hóa theo quy tắc suy giảm độ cứng. Chi tiết về lý thuyết mô hình UBC3D-PLM có thể tham khảo trong [5,16].

Cát lấp sau bến được sử dụng là loại SM với thành phần hạt như thể hiện trong Hình 3. Bảng 1 – 3 trình bày các thông số của mô hình vật liệu sử dụng trong các bước phân tích của nghiên cứu này. Các thông số của mô hình Hardning soil và UBC3D-PLM được xác định dựa trên độ chặt tương đối (relative density) của đất theo các công thức tương quan đề xuất trong [16,18–21].



Hình 3. Thành phần hạt của đất lấp sau bến sử dụng trong phân tích.

Bảng 1. Mô hình và thông số của thùng chìm và đá gốc.

Vật liệu	Mô hình	Trọng lượng riêng γ (KN/m ³)	Mô đun đàn hồi E (GPa)	Hệ số Poisson ν
Thùng chìm (1)	Đàn hồi	18,6	30,0	0,2
Đá gốc (6)	Đàn hồi	27,5	7,0	0,2

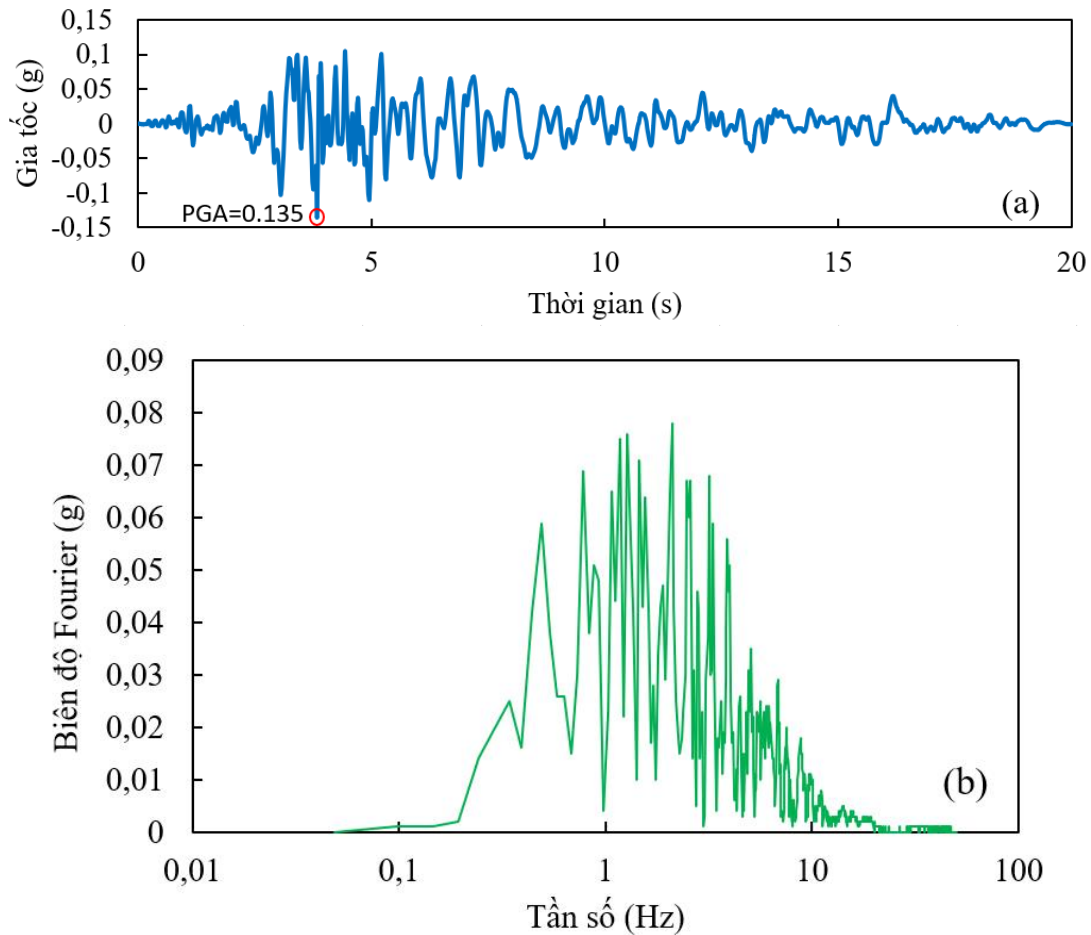
Bảng 2. Mô hình và thông số của các lớp đất ở bước phân tích tĩnh.

Thông số	Ký hiệu	Lớp 2,3	Lớp 4	Lớp 5	Đơn vị
		Đá hộc	Cát	Bùn sét	
Mô hình nền		HS	HS	MC	
Độ chặt tương đối	D_r	70	60	-	%
Trọng lượng riêng tự nhiên	γ_{unsat}	18	18	17	kN/m ³
Trọng lượng riêng bão hòa	γ_{sat}	20	20	19	kN/m ³
Góc ma sát trong	ϕ	40	30	10	Độ
Lực dính/ sức kháng cắt không thoát nước	c	-	-	50	kPa
Góc giãn nở	ψ	10	0	0	Độ
Mô đun đàn hồi	E	-	-	40000	kPa
Mô đun cát tuyến tham chiếu	E_{50}^{ref}	42000	36000	-	kPa
Mô đun oedometer tham chiếu	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	42000	36000	-	kPa
Mô đun gia tải/ dỡ tải tham chiếu	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	126000	108000	-	kPa
Hệ số mũ độ cứng phụ thuộc ứng suất	m	0,500	0,500	-	-
Hệ số thấm	k	4×10^{-4}	4×10^{-5}	10^{-7}	m/s

Bảng 3. Các thông số mô hình UBC3D-PLM cho lớp đá học và cát lấp trong phân tích động.

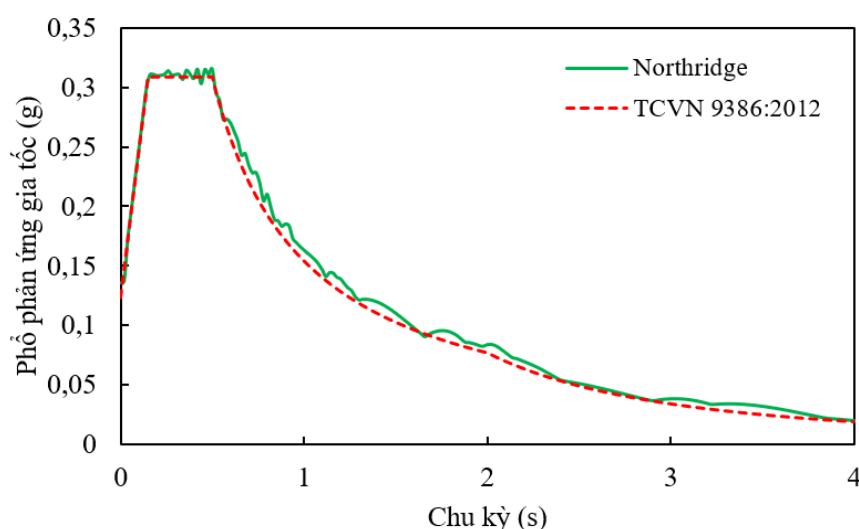
	Ký hiệu	Lớp 2,3	Lớp 4	Unit
Độ chặt	D_r	70	60	%
Số búa SPT hiệu chỉnh	$(N_1)_{60}$	22,54	16,56	-
Hệ số mô đun thể tích đàn hồi	k_B^{*e}	858	774	-
Hệ số mô đun cắt đàn hồi	k_G^{*e}	1226	1106	-
Hệ số mô đun cắt dẻo	k_B^{*p}	1969	1010	-
Góc ma sát ở thể tích tới hạn	φ_{cv}	33	33	Độ
Góc ma sát đỉnh	φ_p	36,76	34,97	Độ
Hệ số phụ thuộc ứng suất vào mô đun thể tích đàn hồi	m_e	0,5	0,5	-
Hệ số phụ thuộc ứng suất vào mô đun cắt đàn hồi	n_e	0,5	0,5	-
Hệ số phụ thuộc ứng suất vào mô đun cắt dẻo	n_p	0,4	0,4	-
Hệ số làm chặt	f_{dens}	0,45	0,45	-
Hệ số sau hóa lỏng	f_{Epost}	0,02	0,02	-
Hệ số phá hoại	R_f	0,69	0,72	-
Hệ số thấm	k	4×10^{-4}	4×10^{-5}	m/s

3.3 Chuyển động động đất đầu vào



Hình 4. Chuyển động động đất đầu vào: (a) Trong miền thời gian; (b) Trong miền tần số.

Nghiên cứu sử dụng phương pháp phân tích theo lịch sử thời gian. Tải trọng động đất được gán tại biên đáy của mô hình số dưới dạng hàm gia tốc. Với giả thiết công trình đặt tại Quảng Ninh, phổ thiết kế được xác định theo tiêu chuẩn TCVN 9386:2012 [22]. Dữ liệu được chọn là trận động đất Northridge được thu thập từ website của Trung tâm nghiên cứu kỹ thuật động đất Thái Bình Dương [23]. Trước khi gán vào mô hình, bản ghi gia tốc này đã được điều chỉnh để có phổ phù hợp với phổ thiết kế của công trình. Phương pháp điều chỉnh được thực hiện bằng phần mềm SeimoMatch trên cơ sở lý thuyết đề xuất bởi Lilhanand and Tseng [24,25] và sau đó phát triển bởi Hancock và các cộng sự [26]. Hình 4 (a) và (b) lần lượt biểu thị chuyển động động đất đầu vào (sau khi điều chỉnh) trong miền thời gian và miền tần số. Hình 5 là phổ phản ứng của gia tốc sau khi điều chỉnh được so sánh với phổ phản ứng thiết kế.

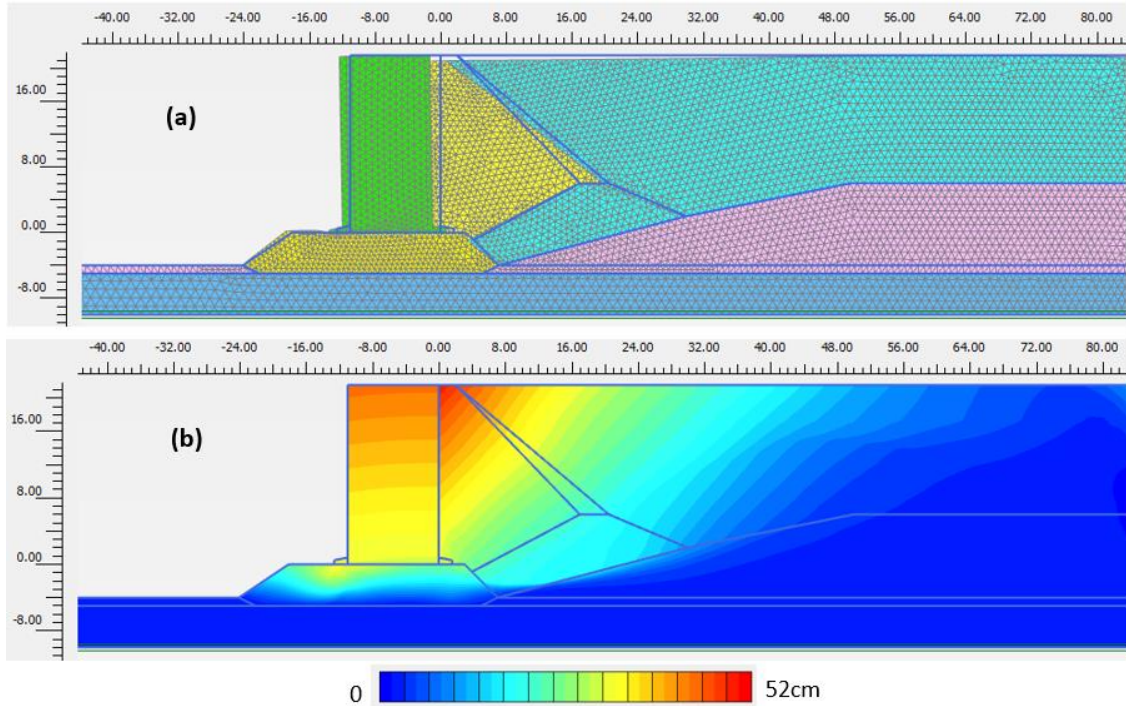


Hình 5. Phổ phản ứng đầu vào sau khi khớp với phổ phản ứng thiết kế theo TCVN 9386:2012.

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ PHÂN TÍCH

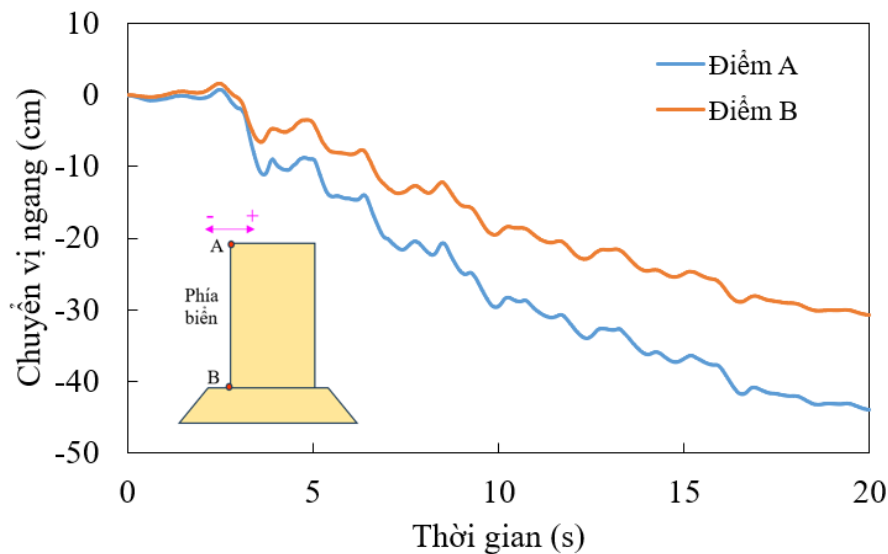
4.1 Biến dạng và chuyển vị của thùng chìm

Lưới biến dạng tổng thể và thang màu dịch chuyển của bến ở thời điểm kết thúc động đất lần lượt được biểu thị trên Hình 6 (a) và (b). Có thể thấy rằng thùng chìm đã bị dịch chuyển về phía trước bến, càng lên cao độ dịch chuyển càng lớn. Lớp móng đá dưới chân trước của thùng chìm đã bị mất ổn định khiến cho thùng chìm bị nghiêng. Việc này đã dẫn đến lớp đất đá phía sau tường cũng bị lún xuống. Phạm vi ảnh hưởng phía bãi cảng sau thùng chìm là khoảng 60 m kể từ lưng thùng. Hình dạng biến dạng của công trình hoàn toàn phù hợp với những đo đạc của Inagaki và cộng sự [1] tại cảng Kobe cũng như các phân tích và thử nghiệm khác đã được thực hiện trước đây [3–5].

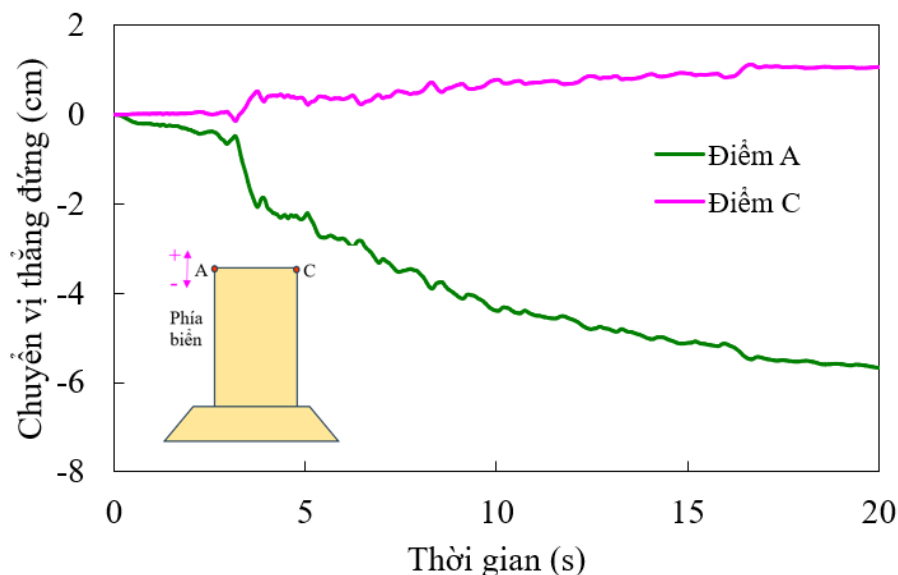


Hình 6. Biến dạng tổng thể của bến sau khi động đất (tỷ lệ x3).

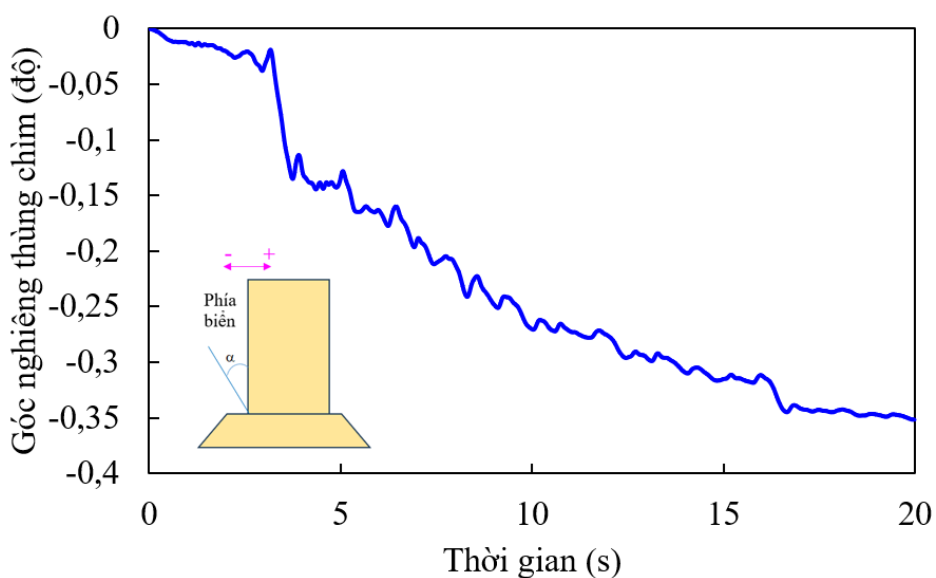
Hình 7 cho thấy chuyển vị của thùng chìm theo thời gian tại điểm góc trên phía trước bến (điểm A) và góc dưới phía trước bến (điểm B) trong quá trình xảy ra động đất. Chuyển vị ngang của thùng chìm tăng dần theo thời gian và lên cao thì càng chuyển vị nhiều. Kết thúc động đất chuyển vị tại A là khoảng 44 cm trong khi đó chuyển vị tại điểm B là khoảng 31 cm. Hình 8 so sánh chuyển vị theo phương thẳng đứng tại hai điểm góc A và C trên bề mặt thùng chìm. Có thể thấy điểm A bị lún xuống khoảng gần 6 cm, trong khi điểm C bị nhô lên khỏi mặt đất khoảng 1 cm. Như vậy là thùng chìm bị nghiêng về phía trước với góc nghiêng khoảng 0,35 độ như thể hiện trên Hình 9.



Hình 7. Chuyển vị ngang tại điểm A và B trong quá trình động đất



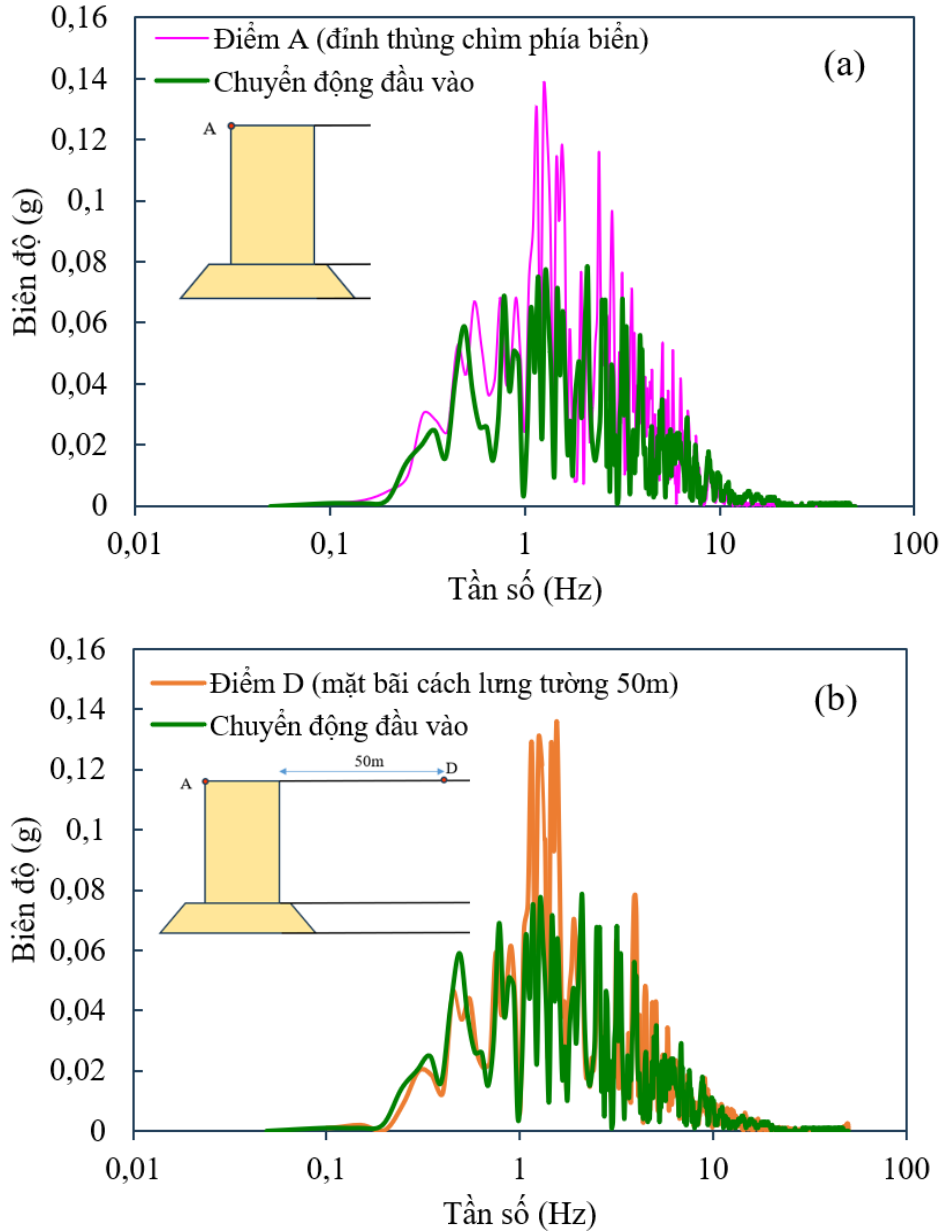
Hình 8. Chuyển vị thẳng đứng của thùng chìm trong quá trình động đất.



Hình 9. Chuyển vị xoay của thùng chìm.

4.2 Gia tốc phản ứng

Hình 10 (a) và (b) so sánh gia tốc trong miền tần số của chuyển động đầu vào đặt tại đáy mô hình với gia tốc phản ứng tại hai điểm trên mặt bên bao gồm: điểm A (góc trên phía trước bên) và điểm D (cách lưng tường 50m). Kết quả cho thấy biên độ sóng động đất có xu hướng tăng dần khi lan truyền lên phía trên mặt đất. Gia tốc trên mặt thùng chìm có xu hướng tăng mạnh hơn trên mặt đất. Dải tần số tăng mạnh nhất là khoảng 1 đến 10 Hz. Biên độ lớn nhất thu được tại mặt đất gấp khoảng 2 lần so với biên độ dao động của chuyển động đầu vào.



Hình 10. Gia tốc phản ứng tại một số điểm trên mặt bến so với chuyển động đầu vào

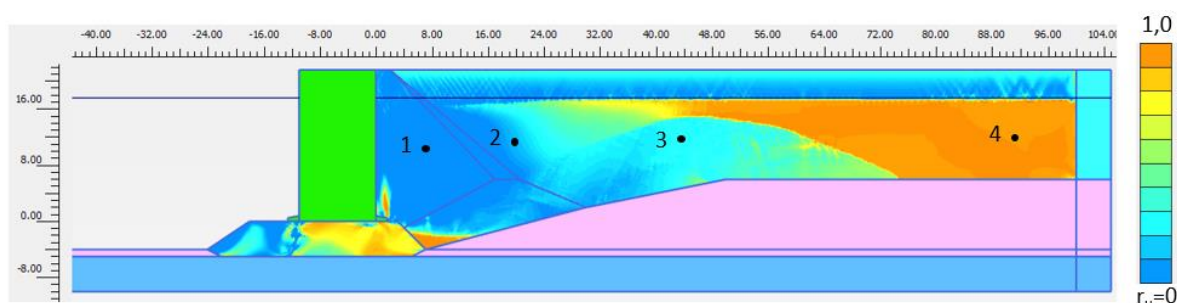
4.3 Sự gia tăng áp lực nước lỗ rỗng

Để đánh giá khả năng hóa lỏng của lớp đất lấp sau tường, bài báo này sử dụng phương pháp đánh giá dựa trên hệ số áp lực nước lỗ rỗng dư, r_u , (the excess pore water pressure ratio) [5,16]:

$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}} = \frac{\sigma'_{v0} - \sigma'_{vt}}{\sigma'_{v0}} \quad (1)$$

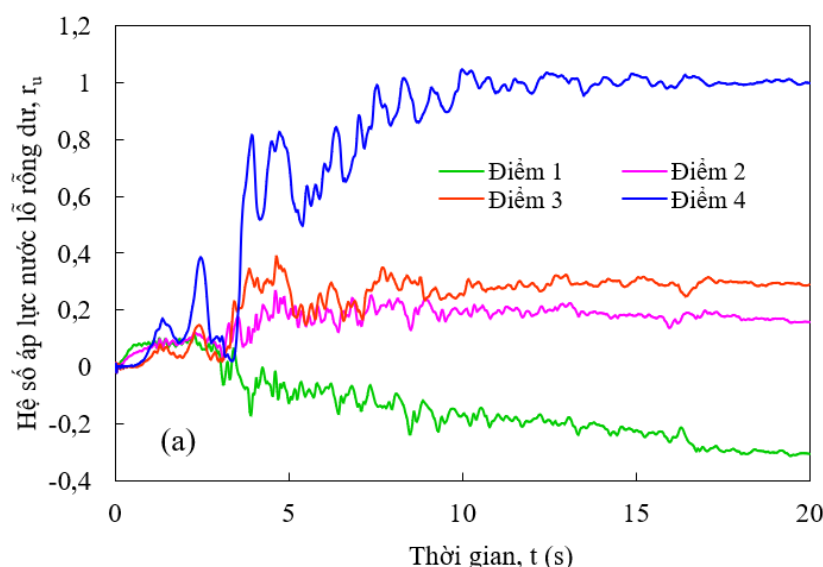
Trong đó Δu là áp lực nước lỗ rỗng dư, σ'_{vt} là ứng suất hiệu quả của đất ở thời điểm t , và σ'_{v0} là ứng suất hiệu quả ban đầu (ở thời điểm bắt đầu động đất). Nếu áp lực nước lỗ rỗng dư gia tăng bằng với ứng suất hiệu quả ban đầu thì hệ số áp lực nước lỗ rỗng dư bằng 1,0 và đất bị hóa lỏng.

Hệ số áp lực nước lỗ rỗng trong đất ở thời điểm động đất kết thúc được thể hiện trên Hình 11. Kết quả cho thấy áp lực nước lỗ rỗng gia tăng mạnh trong lớp đất cát lấp phía xa bến và tăng nhẹ hơn ở khu vực giáp thùng chìm, do đó hiện tượng hóa lỏng xảy ra chủ yếu ở đất phía trong xa bến, không quan sát thấy hóa lỏng ở khu vực ngay phía sau thùng chìm. Hiện tượng này là do thùng chìm và đất ngay sát thùng chìm bị dịch chuyển mạnh trong quá trình động đất, thể tích lỗ rỗng trong đất tăng lên; do đó áp lực nước lỗ rỗng không tăng mạnh. Kết quả này cũng phù hợp với các kết quả khảo sát sau khi động đất tại cảng Kobe do Inagaki và cộng sự thực hiện [1] và các nghiên cứu khác [2,3].



Hình 11. Sự phân bố hệ số áp lực nước lỗ rỗng trong đất.

Hình 12 (a) cho thấy chi tiết quá trình gia tăng hệ số áp lực nước lỗ rỗng trong quá trình động đất tại một số các điểm 1,2,3,4 ở giữa lớp đất lấp sau bến. Tại điểm 1 là khu vực đá hộc đổ sau bến, áp lực nước lỗ rỗng dư có xu hướng giảm mạnh do độ dịch chuyển lớn của thùng chìm. Điểm 2 (cách lưng tường 20m) và điểm 3 (cách lưng tường 45m) cho thấy áp lực nước lỗ rỗng có sự gia tăng nhẹ nhưng chưa đạt đến giá trị 1. Ở điểm 4 cách xa bến (cách lưng tường 90m), giá trị hệ số áp lực nước lỗ rỗng dư có xu hướng tăng mạnh sát tới 1,0, cho thấy đất ở khu vực này có khả năng xảy ra hóa lỏng.



Hình 12. Sự gia tăng áp lực nước lỗ rỗng tại một số điểm.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phương pháp đánh giá phản ứng động của bến thùng chìm trong quá

trình động đất. Nghiên cứu được thực hiện bằng phương pháp mô phỏng số sử dụng phần mềm Plaxis 2D. Phương pháp mô hình hóa, mô hình nền áp dụng, phương pháp xử lý số liệu đầu vào đã được giới thiệu và mô tả. Kết quả nghiên cứu đã phân tích các đặc trưng cơ bản của thùng chìm như biến dạng, chuyển vị, gia tốc phản ứng, và khả năng xảy ra hóa lỏng của đất lấp sau bến.

Bài báo cũng đã thực hiện tính toán cụ cho trường hợp cụ thể của công trình bến thùng chìm có chiều cao 21,5m trong điều kiện Việt Nam. Các kết quả phân tích cho thấy:

- Dưới tác dụng của tải trọng động đất, thùng chìm bị dịch chuyển cả theo phương ngang và phương đứng và có xu hướng bị nghiêng về phía trước bến. Kết thúc động đất chuyển vị ngang và đứng của thùng chìm lần lượt là khoảng 44 cm và 6cm, thùng chìm cũng bị nghiêng khoảng 0,35 độ so với phương đứng.

- Gia tốc của trận động đất tăng dần từ đá gốc lên mặt bến. So với chuyển động đầu vào đặt ở đáy mô hình, biên độ Fourier tại các điểm thu được ở mặt đất tăng khoảng 2 lần. Dải tần số tăng mạnh nhất là từ 1 – 10Hz.

- Trong quá trình động đất, áp lực nước lỗ rỗng gia tăng dẫn đến khả năng xảy ra hóa lỏng tại khu vực đất lấp sau bến. Dựa trên phân tích hệ số áp lực nước lỗ rỗng, khu vực đất lấp gần bến áp lực nước lỗ rỗng có tăng nhẹ, ở xa phía sau bến hệ số áp lực nước lỗ rỗng tăng mạnh hơn tiệm cận đến giá trị có thể xảy ra hóa lỏng của đất.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi trường Đại học Giao thông Vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài mã số T2025-CT-002.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. H. Inagaki, S. Iai, T. Sugano, H. Yamazaki, T. Inatomi, Performance of caisson type quay walls at Kobe Port, Soils Found, 36 (1996) 119–136. https://doi.org/10.3208/sandf.36.special_119
- [2]. I. Towhata, A. Ghalandarazadeh, K.P. Sundarraj, W.V. Monge, Dynamic failures of subsoil observed in waterfront areas, Soils Found., (1996) 149–160
- [3]. P. Dakoulas, G. Gazetas, Insight into seismic earth and water pressures against caisson quay walls, Geotechnique, 58 (2008) 95–111. <https://doi.org/10.1680/geot.2008.58.2.95>
- [4]. S. Iai, K. Ichii, H. Liu, T. Morita, Effective stress analyses of port structures, Soils Found., 38 (1998) 97–114
- [5]. V. Galavi, A. Petalas, R.B.J. Brinkgreve, Finite Element Modelling of Seismic Liquefaction in Soils, Geotech. Eng., 44 (2013) 55–64
- [6]. A. Arablouei, A.R.M. Gharabaghi, A. Ghalandarzadeh, K. Abedi, I. Ishibashi, Effects of seawater-structure-soil interaction on seismic performance of caisson-type quay wall, Comput. Struct., 89 (2011) 2439–2459. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.06.005>
- [7]. M.G. Lee, J.G. Ha, S. Manandhar, H.J. Park, D.S. Kim, Evaluation of performance-based seismic coefficient for gravity-type quay wall via centrifuge tests, Soil Dyn. Earthq. Eng., 123 (2019) 292–303. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.05.011>
- [8]. Y.S. Kim, A.D. Nguyen, G.O. Kang, Seismic behavior of caisson - type gravity quay wall renovated by rubble mound grouting and deepening, Geomech. Eng., 27 (2021) 447–463. <https://doi.org/10.12989/gae.2021.27.5.447>
- [9]. A.D. Nguyen, Y.S. Kim, Earthquake Resistance of Caisson-Type Quay Wall Renovated by Grouting and Deepening: Geo-Centrifuge Test, in: Proc. 4th Int. Conf. Sustain. Civ. Eng., Hanoi,

Vietnam, 2022, pp. 463–471

- [10]. T.B.D. Nguyễn, Phân tích tĩnh và động cho kết cấu bến cầu tàu chịu ảnh hưởng động đất, Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Hàng Hải, 27 (2011) 74–78
- [11]. T.T. Nguyễn, Thiết kế kháng chấn động đất theo tính năng cho kết cấu công trình cảng, Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Hàng Hải, 44 (2015) 2–6
- [12]. T.T. Nguyễn, Phân tích sự làm việc kháng chấn của kết cấu bến bệ cọc lai ghép trọng lực, Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng, 2 (2017) 13–19
- [13]. A.D. Nguyễn, V.T. Nguyễn, Mô hình số đánh giá phản ứng của kết cấu bến tường cừ dưới tác dụng của tải trọng động đất theo phương pháp lịch sử thời gian, Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng, 4 (2022) 49–55
- [14]. A. Athanasopoulos -Zekkos, V.S. Vlachakis, G.A. Athanasopoulos, Phasing issues in the seismic response of yielding, gravity-type earth retaining walls - Overview and results from a FEM study, Soil Dyn. Earthq. Eng., 55 (2013) 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.08.004>
- [15]. J. Lysmer, R.L. Kuhlemeyer, Finite Dynamic Model For Infinite Media, J. Eng. Mech. Div., 96 (1969) 859–876.
- [16]. Bentley, Plaxis V21 manuals, 2021.
- [17]. H. Puebla, M. Byrne, P. Phillips, Analysis of canlex liquefaction embankments prototype and centrifuge models, Can. Geotech. J., 34 (1997) 641–657.
- [18]. R.B.J. Brinkgreve, E. Engin, H.K. Engin, Validation of Empirical Formulas to Derive Model Parameters for Sands, in: 7th Eur. Conf. Numer. Methods Geotech. Eng. (NUMGE), At Trondheim, Norway, 2010, pp. 137–147.
- [19]. I.M. Idriss, R.W. Boulanger, Soil liquefaction during earthquakes, Oakland, CA, 2008.
- [20]. P. Dakoulas, P. Vazouras, P. Kallioglou, G. Gazetas, Effective-stress seismic analysis of a gravity multi-block quay wall, Soil Dyn. Earthq. Eng., 115 (2018) 378–393. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.08.032>
- [21]. N. Gerolymos, P. Tasiopoulou, G. Gazetas, Seismic Performance of Block-Type Gravity Quay-Wall : Numerical Modeling Versus Centrifuge Experiment, in: Earthq. Risk Eng. Towar. a Resilient World, Cambridge UK, 2015.
- [22]. Bộ Xây dựng, TCVN 9386:2012 Thiết kế công trình chịu động đất, 2012.
- [23]. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER ground motion data base, <https://ngawest2.berkeley.edu/site>
- [24]. K. Lilhanadn, S. Tseng, Generation of synthetic time histories compatible with multiple-damping design response spectra, in: Trans. 9th Int. Conf. Struct. Mech. React. Technol., Lausanne, 1987, pp. 105–110
- [25]. K. Lilhanadn, S. Tseng, Development and application of realistic earthquake time histories compatible with multiple-damping design spectra, in: Proc. 9th World Conf. Earthq. Eng., Tokyo Japan, 1988, pp. 819–824
- [26]. J. Hancock, J. Watson-Lamprey, N.A. Abrahamson, J.J. Bommer, A. Markatis, E.M.M.A. McCoy, R. Mendis, An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets, J. Earthq. Eng., 10 (2006) 67–89. <https://doi.org/10.1080/13632460609350629>