



SETTING UP AN EXPERIMENTAL MODEL TO STUDY ON THE SOIL-STRUCTURE INTERACTION UNDER SEISMIC LOADING

Nguyen Trung Kien, Huynh Van Quan*, Nguyen Thanh Tam

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

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 23/5/2020

Revised: 17/7/2020

Accepted: 27/7/2020

Published online: 28/8/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.6.4>

* *Corresponding author*

Email: hvquan@utc2.edu.vn; Tel: 0986503205

Abstract. In this paper, based on the real structure and the existing equipments, the experimental set-up will be detailedly presented to ensure the accuracy of results. With the proposed experimentation, the seismic excitation simulated by the shaking table, a soil container placed on a shaking table to simulate the soil medium, the superstructure was replaced by a lumped mass. Experimental results are the time histories of superstructure's displacement. In addition, the influence of embedded depth of foundation on responses of the superstructure is also investigated.

Keywords: experimentation, soil-structure interaction, footing embedment, earthquake, shaking table test.



XÂY DỰNG MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM NGHIÊN CỨU TƯƠNG TÁC ĐẤT NỀN-KẾT CẤU DƯỚI TẢI TRỌNG ĐỘNG ĐẤT

Nguyễn Trung Kiên, Huỳnh Văn Quân*, Nguyễn Thành Tâm

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: 23/5/2020

Ngày nhận bài sửa: 17/7/2020

Ngày chấp nhận đăng: 27/7/2020

Ngày xuất bản Online: 28/8/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.6.4>

* Tác giả liên hệ

Email: hvquan@utc2.edu.vn; Tel: 0986503205

Tóm tắt. Trên cơ sở kết cấu thực và các thiết bị hiện có trong phòng thí nghiệm, bài báo sẽ trình bày một cách chi tiết quá trình xây dựng mô hình thực nghiệm để đảm bảo tính chính xác của kết quả. Trong thí nghiệm đề xuất, tải trọng động đất được thay thế bằng bàn rung gia tải, địa chất công trình được thay thế bằng hộp đất dạng tường cứng, kết cấu phần trên có dạng khối lượng tập trung. Kết quả thực nghiệm là lịch sử chuyển vị của kết cấu phần trên. Ngoài ra, ảnh hưởng của chiều sâu chôn móng đến ứng xử của kết cấu phần trên cũng được khảo sát trong bài báo này.

Từ khóa: thực nghiệm, tương tác đất nền-kết cấu, chôn móng, động đất, thí nghiệm bàn rung.

© 2020 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong kỹ thuật công trình, thực nghiệm là một trong những phương pháp nghiên cứu khi ứng xử của kết cấu nguyên mẫu phức tạp hoặc để tìm hiểu sâu hơn về ứng xử thực của hệ [13]. Thực nghiệm có thể tiến hành bằng cách quan sát trên kết cấu thực hoặc trên mô hình thu nhỏ [6]. Nghiên cứu thực nghiệm ứng xử của hệ dưới tải trọng động đất thường được tiến hành trên mô hình thu nhỏ. Thực nghiệm này thường được ứng dụng để nghiên cứu về sự thay đổi của áp lực nước lỗ rỗng trong đất, tính chất phi tuyến của đất, khả năng xuất hiện các phá hoại và đặc biệt là bài toán tương tác đất nền-kết cấu (SSI) [13].

Thực nghiệm với mô hình thu nhỏ được chia ra làm hai loại: (i) thực nghiệm trong trường

trọng lực hay còn gọi là thực nghiệm bàn rung; (ii) thực nghiệm với trường trọng lực cao hay còn gọi là thực nghiệm ly tâm [13]. Nghiên cứu SSI thường được tiến hành với thực nghiệm bàn rung vì có nhiều ưu điểm: biên độ điều chỉnh lớn, kích thích có thể thực hiện trên nhiều phương, số liệu đo ổn định, có nhiều tỷ lệ được lựa chọn, phù hợp với xu hướng của thế giới [11]. Thông tin thu được từ thực nghiệm giúp các nhà thiết kế đưa ra các giải pháp đảm bảo về tính kinh tế và kỹ thuật [14, 15, 16].

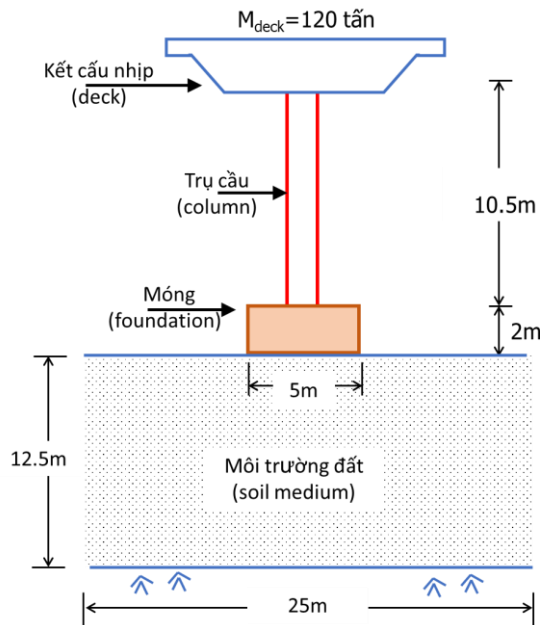
Tại Việt Nam, nghiên cứu tương tác đất nền-kết cấu đã được một số tác giả thực hiện dưới dạng các phân tích lý thuyết [18, 21] hay nghiên cứu thực nghiệm đối với công trình ngầm [19, 20]. Trên thế giới, nghiên cứu thực nghiệm với bàn rung đã được một số tác giả thực hiện. Trong tài liệu [6] Maugeri và các cộng sự thực hiện nghiên cứu trên mô hình đất nền-móng nhưng kết cấu phần trên vẫn hiện diện dưới dạng tải trọng tương đương, bố trí kích thước tương đối theo phương cạnh ngăn giữa móng và hộp đất không hợp lý. Các nghiên cứu của Anastasopoulos và cộng sự [4, 5] về hệ số an toàn cho móng dưới tải trọng theo chu kỳ. Những năm gần đây, có các nghiên cứu thực nghiệm trên mô hình đất nền-móng của Won [10] về mối quan hệ ứng suất-biến dạng của đáy móng đặt trên cát rời bằng phương pháp hiệu chỉnh tổng ứng suất, hay nghiên cứu của Liu [8] về khả năng chịu lực cực hạn của móng nông đặt trên đất sét đóng băng.

Tuy nhiên, thực nghiệm SSI vẫn còn hạn chế về số lượng, đặc biệt là khi xét đến ảnh hưởng của kết cấu phần trên. Trên cơ sở kết cấu cầu nguyên mẫu theo phương ngang, trong khuôn khổ bài báo này, nhóm tác giả thực hiện nghiên cứu thực nghiệm SSI như sau: (1) thực hiện với mô hình thu nhỏ để phù hợp kích thước bàn rung nhưng vẫn đảm bảo tính chính xác của kết quả, (2) tải trọng động đất được kích thích bằng bàn rung, (3) địa chất được mô hình bằng hộp đất dạng tường cứng gắn chặt vào bàn rung, (4) ứng xử của kết cấu phần trên dưới dạng chuyển vị theo lịch sử thời gian, (5) ảnh hưởng của chiều sâu chôn móng đến các ứng xử này cũng được khảo sát.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM

2.1 Cơ sở xây dựng mô hình thực nghiệm

Khảo sát một kết cấu cầu nguyên mẫu theo phương ngang có khối lượng kết cấu nhịp 120 tấn, chiều cao có hiệu của hệ 12.5m, móng nông đặt trên nền đất có mặt cắt ngang hình vuông cạnh $B=5\text{m}$ và cao 2m. Đất nền dưới đáy móng là cát chặt, khoảng cách theo điều kiện biên của đất nền theo phương ngang và chiều sâu đến nền đá cứng tương ứng là 25m ($5 \times B = 5 \times 5\text{m} = 25\text{m}$) và 12.5m (hình 1). Tải trọng tác dụng lên công trình là gia tốc động đất dưới dạng lịch sử thời gian. Phòng thí nghiệm công trình - Trường Đại học Giao thông vận tải được trang bị bàn rung R202(UTC) có kích thước $2\text{m} \times 2\text{m}$. Năng lực bàn rung R202(UTC) được mô tả như trong bảng 1.



Hình 1. Kích thước cơ bản của công trình cầu nguyên mẫu.

Bảng 1. Các thông số kỹ thuật của bàn rung R202(UTC).

Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị
Kích thước	2m×2m	Biên độ chuyển vị	±0.125m
Biên độ tần số	0÷50 Hz	Gia tốc cực đại	3g
Vận tốc tối đa	1.2m/s	Tải trọng tối đa	20T

2.2 Xác định kích thước mô hình

Với tương quan giữa kết cấu nguyên mẫu và bàn rung như trên, thực nghiệm sẽ được tiến hành với mô hình thu nhỏ. Việc xác định hệ số tỷ lệ hình học ($\lambda=1/n$) phù hợp cho mẫu thí nghiệm là một bước hết sức quan trọng trong việc xây dựng mô hình thu nhỏ trên bàn rung. Hệ số tỷ lệ càng bé càng tiết kiệm chi phí nhưng độ chính xác của kết quả thí nghiệm sẽ giảm. Do đó, cần lựa chọn hệ số tỷ lệ lớn nhất có thể để nâng cao tính chính xác của kết quả thực nghiệm.

Có ba mức độ tương đồng giữa mô hình và kết cấu thực: mức độ thực (true), mức độ phù hợp (adequate) và mức độ sai lệch/méo mó (distorted). Trong thực nghiệm, để thuận lợi cho việc xây dựng mô hình nhưng vẫn đảm bảo tính chính xác, mức độ tương đồng phù hợp được khuyến cáo áp dụng để đảm bảo tính tương tự so với kết cấu nguyên mẫu (tương tự hình học, động học và động lực học) [2]. Trong mức độ phù hợp, các yếu tố thứ yếu cho phép sai lệch nhưng không ảnh hưởng nhiều đến đại lượng nghiên cứu [17]. Khi đó, một số hệ số tỷ lệ cơ bản có thể biểu diễn thông qua hệ số λ như bảng 2 [3].

Bảng 2. Hệ số tỷ lệ của các đại lượng xác định theo $\lambda = 1/n$ khi xây dựng mô hình thu nhỏ.

Đại lượng	Giá trị	Đại lượng	Giá trị	Đại lượng	Giá trị
Khối lượng riêng	1	Gia tốc	1	Chiều dài	1/n
Vận tốc sóng cắt	$1/(n^{1/2})$	Biến dạng	1		

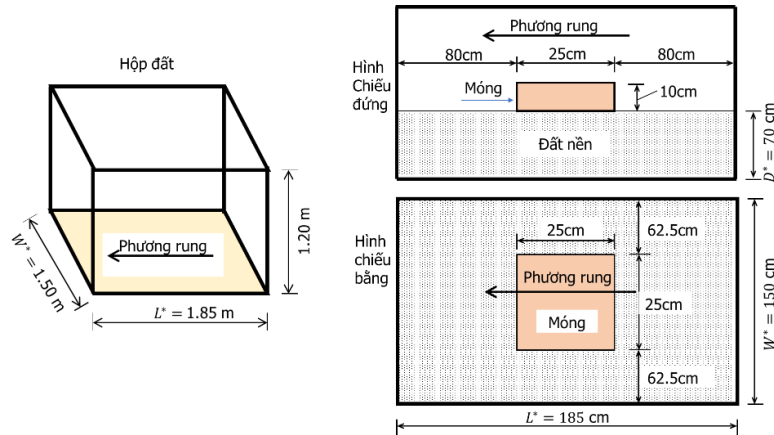
Lựa chọn sơ bộ kích thước mô hình: trên cơ sở kích thước kết cấu nguyên mẫu và bàn rung R202(UTC), bảng 2 đưa ra một số khả năng lựa chọn cho hệ số λ khác nhau. Nhóm tác giả chọn $\lambda = 1:20$ ($n = 20$) tương ứng với kích thước móng $B \times B = 25cm \times 25cm$, $h_f = 10cm$. Các kích thước sơ bộ: tường dài hộp đất 125cm, tường ngăn 75cm, bề dày lớp đất địa chất 62.5cm, chiều cao có hiệu của hệ móng-kết cấu phần trên 52.5cm.

Bảng 3. Kích thước dự kiến của mô hình theo các hệ số tỷ lệ khác nhau.

Hệ số tỷ lệ λ	Bề rộng móng B' (m)	Chiều cao móng h'_f (m)	Tường dài L' (m)	Tường ngăn W' (m)	Bề dày lớp đất D' (m)	Chiều cao có hiệu H' (m)
1:1	5	2	25	15	12.5	10.5
1:15	0.333	0.133	1.667	1.00	0.833	0.70
1:20	0.25	0.10	1.25	0.750	0.625	0.525
1:25	0.20	0.0	1.00	0.6	0.500	0.42

Xác định kích thước hộp đất: trên cơ sở kích thước móng đã được chọn, yêu cầu kích thước tối thiểu trong mối tương quan giữa hộp đất và móng: tường dài $5B = 5 \times 25 = 125cm$, tường ngăn $3B = 3 \times 25 = 75cm$, bề dày lớp đất địa chất $3h_f = 3 \times 10 = 30cm$. Để đảm bảo diện tích công tác, tính chính xác của thí nghiệm cũng như xét đến sai số do chế tạo, nhóm tác giả lựa chọn kích thước tối đa của hộp đất. Hộp đất sau khi hoàn thành có kích thước như trong hình 2. Bảng 4 so sánh và kiểm tra các yêu cầu về kích thước: khoảng cách tối thiểu từ đáy hộp đến đáy móng $3h_f = 3 \times 10 = 30cm$. Bề dày thực tế lớp đất $D^* = 70cm > 3h_f = 30cm$; trong trường hợp bất lợi, chôn móng 100% chiều cao, bề dày lớp đất còn lại $D^* = 70 - 10 = 60cm > 3h_f = 30cm$; tỷ lệ kích thước cạnh dài và cạnh ngắn theo yêu cầu $W^*/L^* \geq 2/3 = 0.667$, thực tế $W^*/L^* = 150/185 = 0.811$. Như vậy kích thước của hộp đất đạt yêu cầu.

Căn cứ vào kết cấu nguyên mẫu (hình 1), hệ số tỷ lệ hình học $\lambda = 1/20$ ($n = 20$) đã chọn, mô hình có khối lượng kết cấu phần trên $20000kg/n^3 = 120000kg/20^3 = 150kg$ [1, 16], chiều cao có hiệu $h/n = 10.5m/20 = 0.525m$.



Hình 2. Chi tiết kích thước thực tế hộp đất được chế tạo.

Bảng 4. Lựa chọn kích thước hộp đất.

Kích thước	B' (m)	h'_f (m)	L' (m)	W' (m)	D' (m)
Nguyên mẫu	5	2	25	15	12.5
Tỷ lệ $\lambda = 1:20$	0.25	0.1	1.25	0.75	0.625
Tối thiểu	-	-	1.25	0.75	0.3
Thực tế chế tạo	$B = 0.25$	$h_f = 0.1$	$L^* = 1.85$	$W^* = 1.50$	$D^* = 0.7$

2.3. Vật liệu cấu tạo mô hình và vật liệu thí nghiệm

Hộp đất: bộ khung cứng của hộp đất được chế tạo bằng các thanh thép hộp, cố định vào bàn rung bằng các bu-lông. Để thuận lợi cho quá trình quan sát và đảm bảo khả năng chịu lực [9], tường hộp đất làm bằng vật liệu nhựa polycarbonate trong suốt với chiều dày 10 mm (xem hình 3).



Hình 3. Hộp đất được cố định vào bàn rung.

Đất thí nghiệm: để tạo môi trường đất mà móng đặt lên trên nó như kết cấu nguyên mẫu, đất được cho vào hộp là cát vàng sông Hồng, bề dày 0.7m (hình 3). Để đảm bảo điều kiện tương tự động lực học giữa kết cấu nguyên mẫu và mô hình, điều kiện Cauchy xác định tỷ số vận tốc sóng cắt V_S theo phương trình $\frac{(V_S)_p}{(V_S)_m} = \sqrt{\lambda}$ phải bằng 1 [3] (chỉ số dưới p là nguyên mẫu, m là mô hình). Chính vì vậy, các thông số về tính chất của đất hiện trường và đất trong phòng thí nghiệm là tương đương nhau. Với công trình cầu có kết cấu móng nông, giải pháp nền móng này chỉ có thể áp dụng với điều kiện địa chất đất nền là đất tốt. Do đó, trong nghiên cứu thực nghiệm của bài báo này, tác giả sử dụng đất cát chặt. Các tính chất cơ lý của cát được xác định

bởi phòng thí nghiệm kỹ thuật công trình và môi trường (LAS-XD381) của Trường Đại học Thủy lợi Hà Nội. Độ chặt tương đối $D_r = 82\%$, khối lượng riêng $\rho = 2.68 \text{ g/cm}^3$ và góc ma sát trong $\varphi = 42.6^\circ$, kích thước hạt cực đại 18mm, kích thước trung bình $D_{50} = 0.42\text{mm}$, hệ số đồng đều 4.67, hệ số thấm $2.69 \times 10^{-04} \text{ cm/s}$.

Vật liệu móng: để đơn giản cho quá trình chế tạo và phù hợp với tình hình thực tế, móng được đúc bằng bê tông đúng kích thước đã được lựa chọn, mặt cắt ngang hình vuông cạnh 0.25m và chiều cao móng 0.1m.

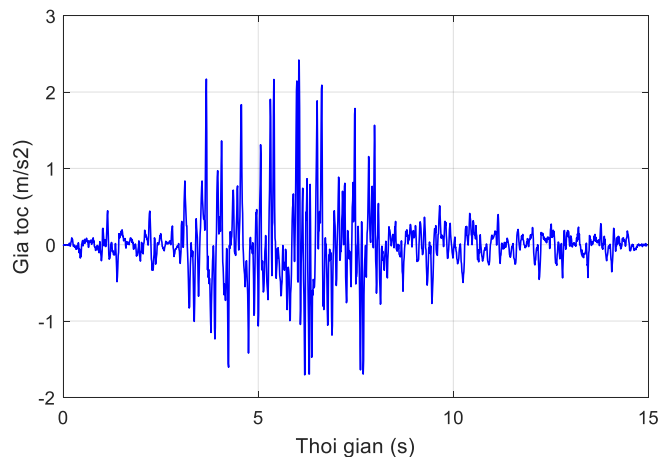
Kết cấu phần trên được chế tạo để đảm bảo phù hợp với mô hình dạng khối lượng tập trung. Vật liệu làm bằng thép, dạng trụ tròn, chiều cao 0.25m. Cột nối giữa móng với kết cấu phần trên được chế tạo bằng thép hình H100, chiều cao 0.4 m (hình 4). Khi đó, chiều cao có hiệu của kết cấu: $0.4 \text{ m} + \frac{0.25}{2} \text{ m} = 0.525 \text{ m}$, đúng theo chiều cao đã được dự kiến.



Hình 4. Mô hình thực nghiệm.

2.4. Tải trọng thực nghiệm

Nếu gọi a là gia tốc, g là gia tốc trọng trường, để đảm bảo điều kiện tương tự động lực học thì tỷ số không thứ nguyên Froude (a/g) phải giữ bằng hệ số đơn vị [3, 17]. Do đó, hệ số tỷ lệ của gia tốc bàn rung so với nguyên mẫu là $\lambda = 1$.



Hình 5. Lịch sử gia tốc động đất Tolmezzo.

Lịch sử gia tốc kích thích bàn rung là gia tốc Tolmezzo (Friuly, Italia) như hình 5. Gia tốc này được bài báo lựa chọn vì phổ phản ứng phù hợp với tiêu chuẩn kháng chấn của Việt Nam [12, 20]. Để mở rộng kết quả nghiên cứu, trong bài báo này nhóm tác giả tiến hành thực nghiệm với nhiều trường hợp độ lớn gia tốc Tolmezzo khác nhau, 6 lần gia tải, giá trị độ lớn cực đại

của tải trọng động đất tăng dần theo thứ tự: $0.1 m/s^2$, $0.2 m/s^2$, $0.4 m/s^2$, $0.8 m/s^2$, $1.4 m/s^2$ và $2.0 m/s^2$ tương ứng với ký hiệu T1 đến T6 (bảng 5).

Bảng 5. Ký hiệu các trường hợp thực nghiệm.

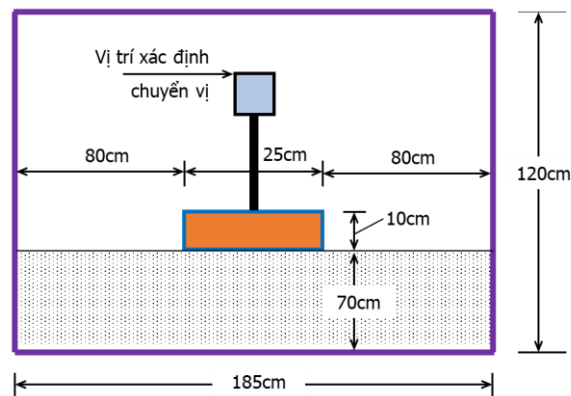
Chiều sâu chôn móng	Độ lớn cực đại gia tốc kích thích bàn rung					
	$0.1m/s^2$	$0.2m/s^2$	$0.4m/s^2$	$0.8m/s^2$	$1.4m/s^2$	$2.0m/s^2$
0cm	T1-00	T2-00	T3-00	T4-00	T5-00	T6-00
5cm	T1-50	T2-50	T3-50	T4-50	T5-50	T6-50
10cm	T1-100	T2-100	T3-100	T4-100	T5-100	T6-100

2.5. Thiết bị và quá trình thực nghiệm

Bàn rung gia tải R202(UTC) tại Trường đại học Giao thông vận tải có các thông số như trong bảng 1.

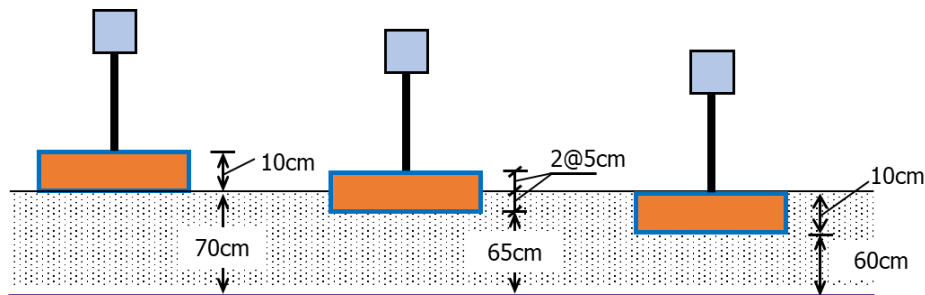
Thiết bị đo: chuyển vị kế dùng để đo chuyển vị của đỉnh kết cấu phần trên theo phương gia tốc bàn rung (hình 6).

Thiết bị ghi nhận tín hiệu đo: tín hiệu đo sẽ được truyền trực tiếp vào thiết bị thu nhận tín hiệu, bộ phận này được kết nối với máy vi tính giúp lưu dữ liệu vào bộ nhớ và quan sát trực tiếp tín hiệu đo tại hiện trường.



Hình 6. Bố trí chung mẫu thí nghiệm và vị trí xác định chuyển vị.

Để nghiên cứu ảnh hưởng của chiều sâu chôn móng đến ứng xử của kết cấu phần trên, nhóm tác giả tiến hành với ba trường hợp chôn móng: móng đặt trên bề mặt đất, chôn một nửa móng và chôn toàn bộ móng (hình 7). Ứng với mỗi trường hợp chôn móng, tải trọng tác dụng là 6 lịch sử gia tốc động đất với độ lớn tăng dần tác dụng vào bàn rung (bảng 5).



Hình 7. Các trường hợp chôn móng: đặt trên mặt đất, ngầm 50% chiều cao, ngầm 100% chiều cao.

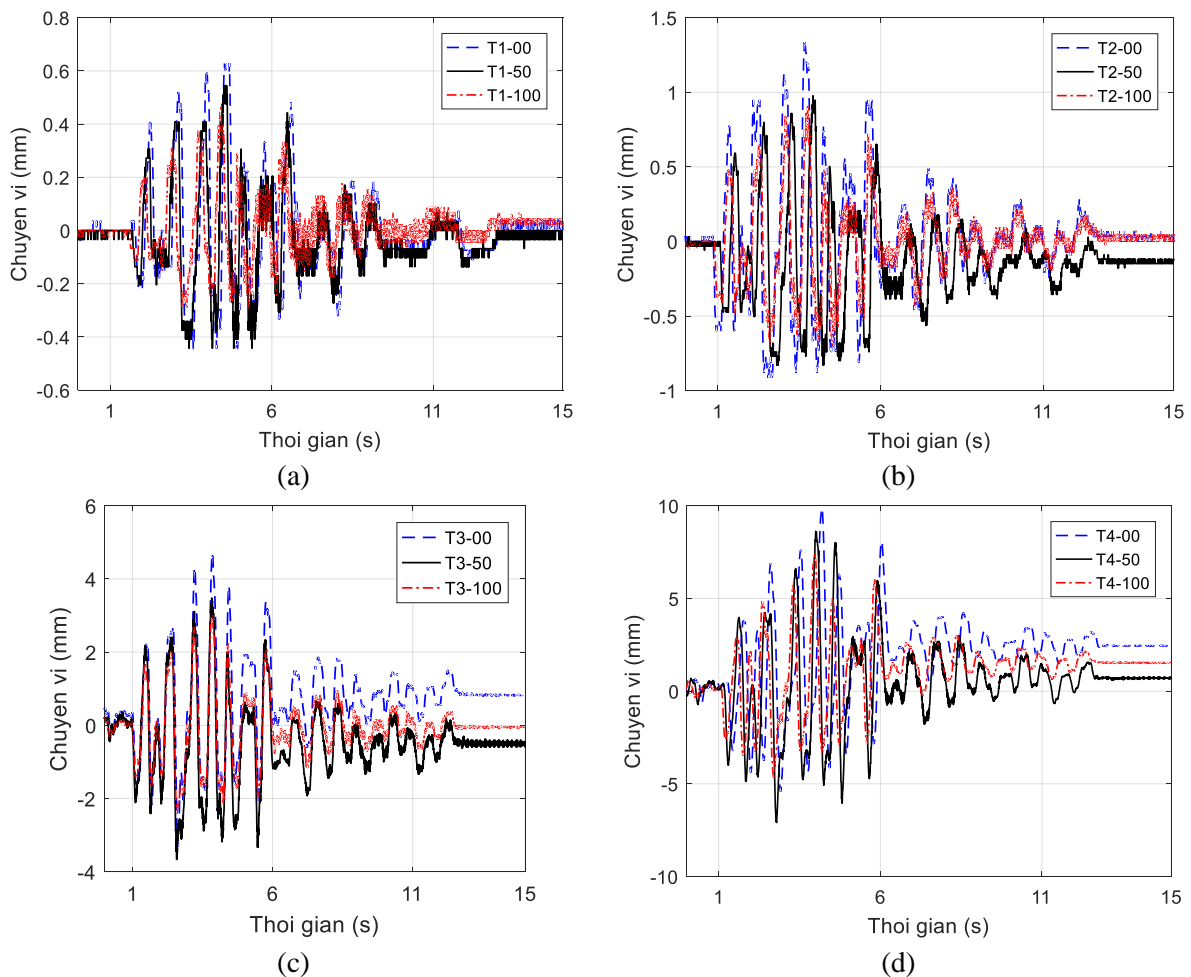
Việc điều chỉnh cấp tải trọng truyền vào bàn rung do phòng điều khiển trung tâm thực hiện, quá trình này được lặp lại cho các trường hợp chôn móng tiếp theo. Ngay khi phòng điều khiển trung tâm vận hành bàn rung, thiết bị đo chuyển vị truyền tín hiệu đến bộ thu đa kênh đã được kết nối với hệ thống máy vi tính để lưu dữ liệu vào bộ nhớ. Khi đó, thí nghiệm viên có thể quan sát trực tiếp giá trị đo ngay trên màn hình vi tính để phản hồi về phòng điều khiển trung tâm về việc ghi nhận dữ liệu đo.

3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Tương ứng với mỗi tải trọng kích thích nền, có ba trường hợp chôn móng được khảo sát: móng đặt trên mặt đất, móng chôn 5cm và 10cm tương ứng 0%, 50% và 100% chiều cao móng. Hình 8, 9 thể hiện chuyển vị kết cấu phần trên với các chiều sâu chôn móng khác nhau khi hệ chịu tác động của kích thích nền.

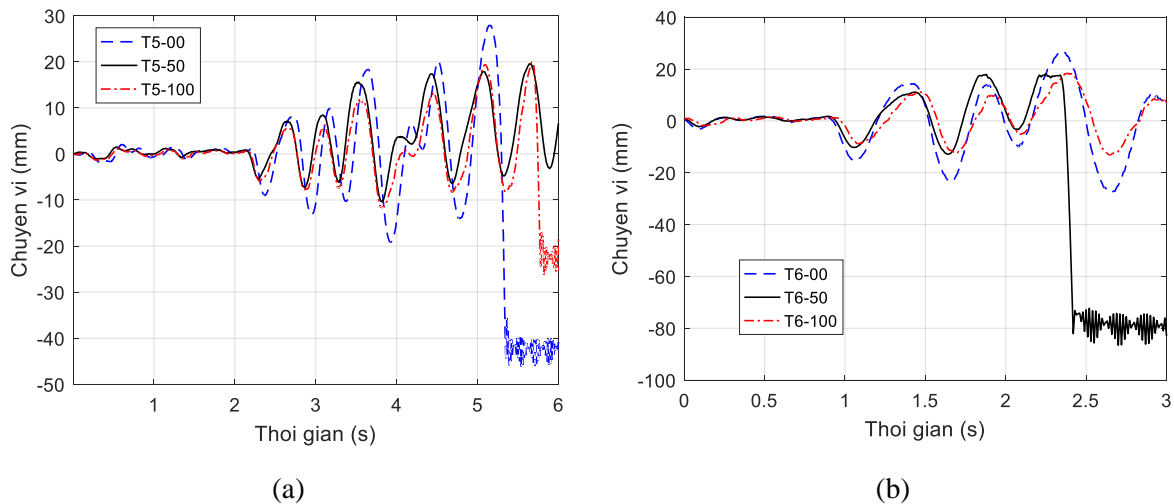
Với trường hợp gia tải đầu tiên T1 ($a_{max} = 0.1m/s^2$), biểu đồ chuyển vị của ba trường hợp chôn móng khá tương đồng nhau về hình dạng và vị trí tọa độ trong suốt 15s thí nghiệm.

Với ba trường hợp gia tải tiếp theo từ T2 đến T4 ($a_{max} = 0.2m/s^2, 0.4m/s^2, 0.8m/s^2$), hình 8(b, c, d), trong khoảng thời gian 6s đầu tiên, biểu đồ chuyển vị hầu như trùng nhau giữa ba trường hợp chôn móng.



Hình 8. Lịch sử chuyển vị đỉnh kết cấu phần trên: (a) T1 ($a_{max} = 0.1m/s^2$), (b) T2 ($a_{max} = 0.2m/s^2$), (c) T3 ($a_{max} = 0.4m/s^2$), (d) T4 ($a_{max} = 0.8m/s^2$).

Với hai trường hợp gia tải còn lại từ T5 đến T6 ($a_{max} = 1.4m/s^2, 2.0m/s^2$), hình 9(a, b), do kết cấu chuyển vị lớn nên thiết bị đo bị xô lệch. Do đó, tín hiệu không liên tục, biểu đồ chuyển vị xuất hiện bước nhảy.



Hình 9. Lịch sử chuyển vị đỉnh kết cấu phần trên: (a) T5 ($a_{max} = 1.4m/s^2$), (b) T6 ($a_{max} = 2.0m/s^2$).

Kết quả thống kê tại bảng 6 cho thấy, với bốn trường hợp gia tải thực nghiệm đầu tiên, chuyển vị cực đại tại đỉnh kết cấu phần trên trong hai trường hợp chôn móng đều có giá trị bé hơn so với trường hợp móng đặt trên mặt đất; trường hợp gia tải thứ ba, móng được chôn 100% chiều cao có độ lệch lớn nhất so với trường hợp móng đặt trên mặt đất (36.33%); chiều sâu chôn móng làm giảm chuyển vị của kết cấu phần trên.

Bảng 6. Độ lệch chuyển vị cực đại tại đỉnh kết cấu phần trên giữa trường hợp chôn móng với trường hợp không chôn móng.

Chuyển vị (mm)	Chuyển vị (mm)	Độ lệch (%)	Chuyển vị (mm)	Độ lệch (%)
$CV_{T1-00} = 0.6290$	$CV_{T1-50} = 0.5446$	13.42	$CV_{T1-100} = 0.4662$	25.88
$CV_{T2-00} = 1.336$	$CV_{T2-50} = 0.9768$	26.89	$CV_{T2-100} = 0.9136$	31.62
$CV_{T3-00} = 4.707$	$CV_{T3-50} = 3.478$	26.11	$CV_{T3-100} = 2.997$	36.33
$CV_{T4-00} = 9.878$	$CV_{T4-50} = 8.629$	12.64	$CV_{T4-100} = 7.489$	24.19

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày chi tiết quá trình xây dựng mô hình thực nghiệm tương tác đất nền-kết cấu cho một công trình cầu dưới tải trọng động đất. Nội dung thực nghiệm đã được mở rộng cho ba trường hợp móng đặt trên mặt đất, chôn móng 50% và 100% chiều cao. Độ lệch tương đối của chuyển vị kết cấu phần trên do ảnh hưởng của chôn móng thay đổi trong phạm vi khá rộng, từ 13.42% đến 36.33%. Các kết quả thu được từ thực nghiệm làm cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo về thực nghiệm cũng như nghiên cứu lý thuyết. Nghiên cứu thực nghiệm trong

bài báo này mới chỉ dừng lại đối với công trình cầu đặt trên móng nông, kết quả dưới dạng gia tốc và chuyển vị theo phương ngang của kết cấu phần trên. Do đó, trong thời gian tiếp theo, cần tiếp tục mở rộng đối tượng cũng như phạm vi nghiên cứu.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2020-CT-023. Tác giả xin chân thành cảm ơn các thí nghiệm viên Trung tâm khoa học công nghệ đã hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu thực nghiệm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. D.M. Wood, Geotechnical Modelling, 1st ed., CRC Press, UK, 2004.
- [2]. H. Langhaar, Dimensional analysis and theory of models, John Willey & Son Inc., New York, 1951.
- [3]. Hamid Reza Tabatabaiefar, Detail design and construction procedure of laminar soil containers for experimental shaking table tests, International Journal of Geotechnical Engineering, 10 (2016) 328-336. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1145419>
- [4]. I. Anastasopoulos, M. Loli, T. Georgarakos, V. Drosos, Shaking table testing of rocking-isolated bridge pier on sand, Journal of Earthquake Engineering, 17 (2013) 1-32. <https://doi.org/10.1080/13632469.2012.705225>
- [5]. I. Anastasopoulos, T. Kontoroupi, Simplified approximate method for analysis of rocking systems accounting for soil inelasticity and foundation uplifting, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 56 (2014) 28–43. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.10.001>
- [6]. M.A. Heib, F. Emeriault, M. Caudron, L. Nghiem, S. Hor, Large-scale soil-structure physical model (1g) - assessment of structure damages, International Journal of Physical Modelling, 4, 13 (2013) 138-152. <https://doi.org/10.1680/ijpmg.13.00007>
- [7]. M. Maugeria, G. Musumeci, D. Novita, C.A. Taylor, Shaking table test of failure of a shallow foundation subjected to an eccentric load, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 20 (2000) 435–444. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(00\)00091-9](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(00)00091-9)
- [8]. S. Liu, Z. Yao, Y. Shang, Ultimate bearing capacity of circular shallow foundations in frozen clay, Journal of Vibroengineering, 4, 21 (2019) 1030-1044. <https://doi.org/10.21595/jve.2019.20476>
- [9]. S. Prasad, I. Towhata, G. Chandradhara, P. Nanjundaswamy, Shaking table tests in earthquake geotechnical engineering, Current science, 10, 87 (2004) 1398-1404.
- [10]. T.A Won, K.V. Sai, Modeling the stress versus settlement behavior of shallow foundations in unsaturated cohesive soils extending the modified total stress approach, Soils and Foundations, 58 (2018) 382–397. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.02.008>
- [11]. X. Qin, Y. Chen, N. Chouw, Effect of uplift and soil nonlinearity on plastic hinge development and induced vibrations in structures, Advances in Structural Engineering, 1, 16 (2013) 135-147. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.16.1.135>
- [12]. Van Quan Huynh, Xuan Huy Nguyen, Trung Kien Nguyen, A macro-element for modeling the non-linear interaction of soil-shallow foundation under seismic loading, Civil Engineering Journal, 6, 4 (2020), 714-723. <http://dx.doi.org/10.28991/cej-2020-03091503>
- [13]. V. Sheshov, J. Bojadjeva, K. Edip, T. Kitanovski, J. Chaneva, D. Ivanovski, Physical modeling

- and 1-G testing using the new type of a laminar container, in Proceedings of Geotechnical Engineering foundation of the future, 2019, CRC Press, pp. 1-8. <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-0966>
- [14]. M. Caudron, F. Emeriault, M. Alheib, Contribution of the experimental and numerical modelling to the understanding of the soil–structure interaction during the event of a sinkhole, in Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Millepress science, 2007, Rotterdam, pp. 943-948.
- [15]. B. Hor, M. Caudron, M. Alheib, Experimental analysis of the impact of ground movements on surface structure, Proceedings of Pan-America Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, NC Press, 2011, Toronto, pp. 1-9.
- [16]. A. Abbass-Fayad, Mode 'lisation Numérique et Analytique de la Monte 'e de Cloche des Carrie`res a` Faible Profondeur. Etude de l'Interaction Sol–structure due aux Mouvements du Terrain Induits par des Fontis, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2004.
- [17]. P. Moncarz, H. Krawinkler, Theory and application of experimental model analysis in earthquake, Stanford Univ.: Report No. 50, John Blume Earthquake Engineering Ctr., 1981.
- [18]. Đào Văn Hưng, Phùng Văn Ngọc, Phạm Thanh Tâm, Nghiên cứu tính toán trạng thái ứng suất trong hệ bản cọc làm việc đồng thời, Tạp chí Khoa học và Công nghệ thủy lợi, 38 (2017) 1-8.
- [19]. Lê Văn Tuấn, Zheng Yong-Lai, Thí nghiệm bàn rung nghiên cứu ứng xử của công trình ngầm dưới tác dụng của động đất, Kết cấu – Công nghệ xây dựng, 1 (2016) 15-24.
- [20]. Trần Thu Hằng, Nguyễn Hữu Hưng, Nguyễn Xuân Tùng, Nguyễn Xuân Huy, Nguyễn Thành Tâm, Nguyễn Châu Lâm, Xây dựng mô hình để nghiên cứu ảnh hưởng của động đất đến công trình ngầm bằng thí nghiệm bàn rung, Tạp chí Cầu đường, 8 (2019) 25-32.
- [21]. Vũ Minh Ngọc, Phạm Văn Thuyết, Xác định độ cứng lò xo cọc khi thiết kế hệ móng cọc đài thấp theo mô hình nền Winkler, Tạp chí Khoa học và Công nghệ lâm nghiệp, 4 (2019) 134-143.