

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM VÀ MÔ PHỎNG ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU TƯỜNG BÊ TÔNG ĐẤT CHỊU TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG NGOÀI MẶT PHẪNG

EXPERIMENTAL STUDY AND SIMULATION OF BEHAVIOR OF SOIL CONCRETE WALL STRUCTURES UNDER THE ACTION OF OUT-OF- PLANE LOADS

TRẦN ĐỨC CƯỜNG

Học viên cao học, khoa kỹ thuật xây dựng, Trường đại học Giao thông vận tải
Ban quản lý khu vực phát triển đô thị Bắc Ninh

TS. BUI THỊ LOAN

Khoa kỹ thuật xây dựng, Trường đại học Giao thông vận tải

*Tác giả liên hệ, email: buithiloan@utc.edu.vn

Tóm tắt: Gần đây, các kết cấu xây dựng dựa trên đất với nhiều ưu điểm liên quan tới vấn đề môi trường và năng lượng ngày càng được quan tâm. Nghiên cứu này tập trung vào ứng xử cơ học của kết cấu tường bê tông đất chịu tác dụng của tải trọng ngoài mặt phẳng. Nghiên cứu này được thực hiện từ thực nghiệm tới mô phỏng. Ở phần thực nghiệm, một kết cấu tường có kích thước 1m x 1m x 0,3m đúc toàn khối trong ván khuôn và bảo dưỡng trong điều kiện bình thường được thí nghiệm xác định ứng xử chịu uốn ngoài mặt phẳng. Kết quả chỉ ra rằng kết cấu tường bê tông đất này có ứng xử giòn chỉ một pha tuyến tính với đỉnh đường cong tương ứng với sự phá hủy đột ngột của tường. Phần mô phỏng được thực hiện bằng phương pháp phần tử hữu hạn thông qua phần mềm ANSYS. Kết quả mô phỏng được đối chiếu với kết quả thí nghiệm cho thấy sự phù hợp của mô hình số.

Từ khóa: Tường bê tông đất, ứng xử ngoài mặt phẳng, nghiên cứu thực nghiệm, mô phỏng số

Abstract: This study focuses on the mechanical behavior of earth-concrete wall subjected to out-of plane loading. This study is performed both by experimental and numerical approaches. In the experimental part, a wall made by a new ecological earth-concrete material with the dimension of 1mx1mx0.3m was test under out-of plane loading. It was found that the wall behaves in a brittle behavior and failure occurred by a sudden collapse. The experimental results were then compared to that predicted using the finite element approach in ANSYS software to confirm the suitability of the model used.

Keywords: Earth concrete wall, out-of plane behavior, experimental approach, numerical simulation

1. Đặt vấn đề

Đất hoặc đất "thô" - đã được sử dụng làm vật liệu xây dựng hàng nghìn năm trên quy mô toàn cầu và ngày nay vẫn được sử dụng rộng rãi. Nó tạo ra sự đa dạng đáng ngạc nhiên của các kỹ thuật xây dựng bao gồm: phen liếp trát bùn đất, đất trộn rơm, gạch bùn (adobe) hoặc khối đất đá nén (CEB), và đất nện (RE). Hiện nay gần 50% dân số thế giới sống trong các căn nhà làm từ đất [1]. Vật liệu xây dựng bằng đất mang lại những lợi thế môi trường đáng kể. Việc tái chế nó là không giới hạn và thường được thực hiện ngay trên công trường, nên sẽ tiết kiệm chi phí vận chuyển và hạn chế tác động tới môi trường. Ngoài đặc tính không độc hại và không gây ô nhiễm, đất thô còn có khả năng hấp phụ lớn các hợp chất dễ bay hơi, nhờ trong thành phần của nó có chứa các hạt sét. Các tòa nhà làm từ đất khi đưa vào vận hành cũng có chế độ nhiệt ẩm rất tốt nhờ tính dẫn nhiệt tương đối thấp, nhiệt lượng lớn và "khả năng trao đổi" mạnh (có khả năng vận chuyển nước và hơi một cách dễ dàng) [10].

Với sự gia tăng nhận thức về các vấn đề môi trường và năng lượng, việc sử dụng vật liệu xây dựng từ đất thô đang thu hút sự quan tâm mới là không có gì đáng ngạc nhiên. Tuy nhiên, vấn đề này cũng phải đối mặt với những thách thức lớn, nhiều trong số đó là do việc sử dụng vật liệu loại này còn đang rất hạn chế trong lĩnh vực xây dựng hiện đại [11]. Hạn chế đó đầu tiên là do nhược điểm cố hữu của đất như đặc tính kém ổn định nước và các đặc trưng cơ lý thấp, tiếp đến là do các kỹ thuật xây dựng từ vật liệu đất không hiện đại (thủ công và mất thời gian). Để giải quyết đồng thời các hạn chế đó, gần đây có một số nghiên cứu ([2,3,4,5,6,7,9]) đã

đề xuất một loại vật liệu mới lai giữa đất và bê tông đó là “bê tông đất” mới.

Loại “bê tông đất” mới này có thành phần chính gồm cốt liệu (cốt liệu lớn, cốt liệu nhỏ), “đất thô”, nước, phụ gia và một lượng nhỏ xi măng Portland để “ổn định” đất (chỉ khoảng 4-5% thay vì 15% như trong bê tông thông thường) để cải thiện các đặc tính cơ lý [9]. Vật liệu mới này sẽ vừa có những ưu điểm giống như của đất thô như năng lượng tiêu thụ thấp và ứng xử nhiệt-ẩm tốt, đồng thời vừa có những ưu điểm giống bê tông thông thường nên cường độ, độ bền và khả năng chống xói mòn là tốt hơn nhiều so với đất thô và đặc biệt là có thể ứng dụng công nghệ thi công hiện đại như bê tông truyền thống giúp đẩy nhanh thời gian thi công (có thể trộn bằng máy và thi công khối lớn trong ván khuôn và cho phép tháo ván khuôn sớm) [9]. Tuy nhiên, những nghiên cứu về vật liệu mới này cũng như những nghiên cứu về ứng xử của kết cấu sử dụng vật liệu này, đặc biệt là ứng xử ngoài mặt phẳng vẫn còn rất ít và cần thiết được thực hiện.

Nghiên cứu này đầu tiên sẽ tiến hành bằng phương pháp thực nghiệm nhằm xác định ứng xử của kết cấu tường bê tông đất chịu tác dụng của tải

trọng ngoài mặt phẳng. Đồng thời, một nghiên cứu mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) cũng được thực hiện. Kết quả mô phỏng được đối chiếu với kết quả thực nghiệm nhằm xác minh sự phù hợp của mô hình.

2. Nghiên cứu thực nghiệm

2.1 Vật liệu bê tông đất

Thành phần của loại bê tông đất dùng trong nghiên cứu này bao gồm:

- “Đất thô” chính là phế thải từ việc rửa cốt liệu của mỏ đá ở Lương Sơn, Hòa Bình, Việt Nam. Thành phần khoáng chính của loại đất này là CaCO_3 ;
- Cốt liệu thô là đá dăm với đường kính cỡ hạt lớn nhất 19mm, thỏa mãn tiêu chuẩn ASTM C33;
- Cốt liệu mịn là cát tự nhiên với mô đun độ lớn 2,63; thỏa mãn tiêu chuẩn ASTM C33;
- Xi măng Pooc Lăng Bút Sơn PC40, thỏa mãn tiêu chuẩn TCVN 2682:2009;
- Phụ gia siêu dẻo Sika NN.

Tỷ lệ phối trộn các vật liệu thành phần của loại “bê tông đất” này được cho trong Bảng 1.

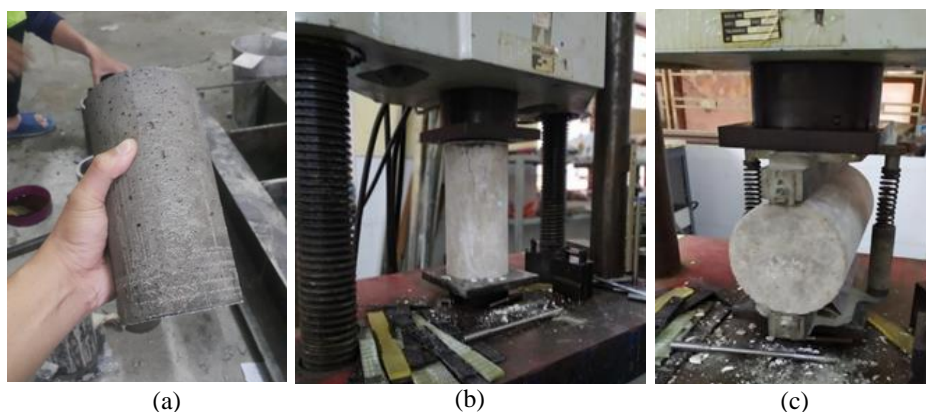
Bảng 1. Tỷ lệ phối trộn các vật liệu thành phần trong “bê tông đất”

Thành phần	Cốt liệu thô	Cốt liệu mịn	“Đất thô”	Xi măng	Nước	Phụ gia siêu dẻo
Hàm lượng	920 (kg)	900 (kg)	258 (kg)	145 (kg)	160 (kg)	12 (l)

2.2 Đặc tính cơ học của “bê tông đất”

Đặc trưng cơ học của loại “bê tông đất” này được xác định thông qua các thí nghiệm nén (theo tiêu chuẩn TCVN 3118-1993) và thí nghiệm ép chệch (theo tiêu chuẩn TCVN 8885 :2011) trên các mẫu hình trụ

tròn đường kính $\Phi 15-30$, Hình 1. Kết quả thí nghiệm nén 3 mẫu (ở 28 ngày tuổi) cho giá trị cường độ chịu nén trung bình là 15 MPa và mô đun đàn hồi trung bình là 12 GPa. Cường độ chịu kéo trung bình xác định từ thí nghiệm ép chệch là 2,45 MPa.



Hình 1. (a) mẫu “bê tông đất” thí nghiệm; (b) thí nghiệm nén và (c) thí nghiệm ép chệch

2.3 Đúc tường thí nghiệm

Kích thước tường được thiết kế dựa trên hai điều kiện: điều kiện thứ nhất là đảm bảo tỷ lệ chiều cao trên chiều rộng (H/L) bằng 1 (tỷ lệ của phần không nhỏ các bức tường trong thực tế); điều kiện thứ hai là đảm bảo phù hợp với khả năng của thiết bị trong phòng thí nghiệm. Với tiêu chí đó, tường bê tông đất được thiết kế kích thước 1,16m x 1,25m x 0,3m (LxHxt) đã được

đúc để thí nghiệm xác định ứng xử chịu uốn ngoài mặt phẳng. Tường được thi công toàn khối trong ván khuôn và được đầm thủ công bằng đầm dùi, hình 2(a). Sau khi thi công xong, bảo dưỡng trong điều kiện thường trong khoảng 24h thì tháo ván khuôn (hình 2(b)). Tiếp tục bảo dưỡng trong điều kiện thường sau 100 ngày tuổi thì tiến hành thí nghiệm ứng xử uốn ngoài mặt phẳng của các tường.

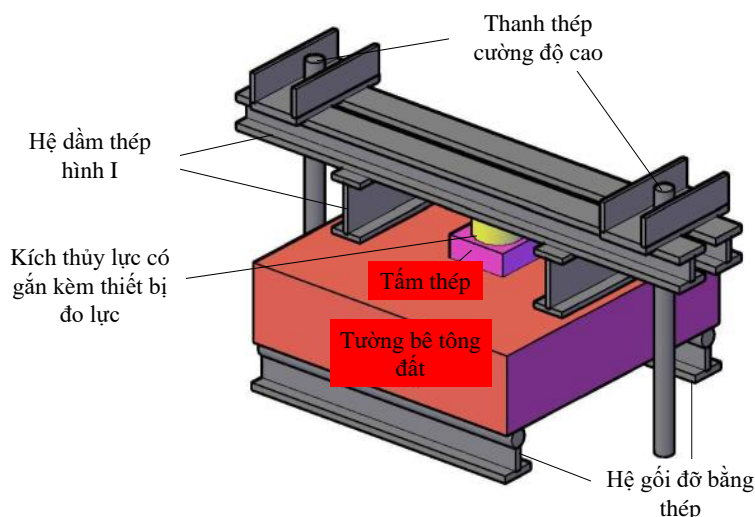


Hình 2. Đổ, đầm bê tông tường bằng đầm dùi (a); tường bê tông đất sau khi tháo ván khuôn (b)

2.4 Lắp đặt thiết bị thí nghiệm và gia tải

Thiết bị thí nghiệm nhằm xác định ứng xử uốn ngoài mặt phẳng của kết cấu tường bê tông đất được thể hiện trên Hình 3. Tường bê tông đất được kê trên hai gối kê bằng thép theo phương bề rộng của tường. Tải trọng uốn ngoài mặt phẳng được tác dụng lên tấm thép đặt giữa tường. Tải trọng này được tạo bởi một kích thủy lực gắn kèm với một thiết bị đo lực đặt trên tấm thép. Phía trên kích thủy lực này là một

hệ thép hình I đóng vai trò là hệ phản lực. Hệ này được neo chặt vào nền đất thông qua hệ thanh thép đường kính D50 có tiện gen, được khóa chặt hai đầu bằng bu lông. Tải trọng này tác dụng tăng dần tới khi tường bị phá hủy hoàn toàn. Để đánh giá ứng xử uốn ngoài mặt phẳng của kết cấu tường này, ngoài thiết bị đo lực loadcell trên thì còn có một đầu đo chuyển vị đặt ngay cạnh vị trí tác dụng lực. Kết quả thí nghiệm này được trình bày cụ thể ở phía dưới đây.

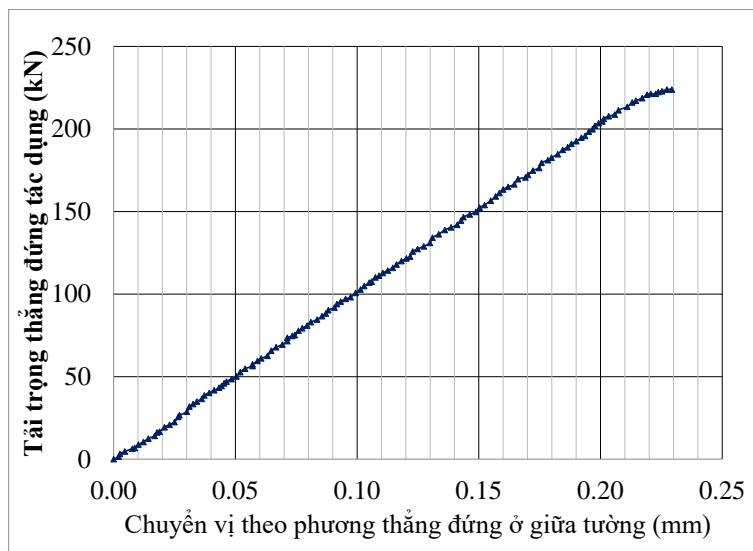


Hình 3. Mô hình thí nghiệm xác định ứng xử chịu uốn ngoài mặt phẳng của kết cấu tường "bê tông đất"

2.5 Kết quả thí nghiệm

Ứng xử uốn ngoài mặt phẳng của kết cấu tường bê tông đất trong thí nghiệm trên được thể hiện thông qua đường cong quan hệ lực - độ võng giữa tường, Hình 4. Có thể thấy rằng, đường cong này thể hiện ứng xử khá “giòn” của kết cấu tường bê

tông đất với chỉ một pha tuyến tính. Đỉnh của đường cong tương ứng với sự phá hủy đột ngột của tường. Ứng xử này là ứng xử rất đặc trưng của loại kết cấu làm bằng vật liệu giòn như bê tông, không có cốt thép dưới tác dụng của tải trọng uốn ngoài mặt phẳng.



Hình 4. Ứng xử uốn ngoài mặt phẳng của kết cấu tường bê tông đất

Dạng phá hủy của kết cấu tường bê tông đất dưới tác dụng của tải trọng uốn ngoài mặt phẳng được thể hiện trên Hình 5. Đây là dạng phá hủy do uốn, sự phá hủy này bắt nguồn từ sự nứt ở thớ dưới của dầm do ứng suất kéo gây ra. Tuy nhiên, sự phá hủy của kết cấu tường diễn ra rất nhanh (đột ngột) ngay khi vết nứt xuất hiện mà không có sự lan truyền nứt ra khu vực lân cận. Sự phá hủy này thể hiện ứng xử giòn của kết cấu tường bê tông đất như đã phân tích ở trên.



Hình 5. Dạng phá hủy của tường bê tông đất dưới tác dụng của tải trọng uốn ngoài mặt phẳng

3. Mô phỏng ứng xử uốn ngoài mặt phẳng của kết cấu tường bê tông đất

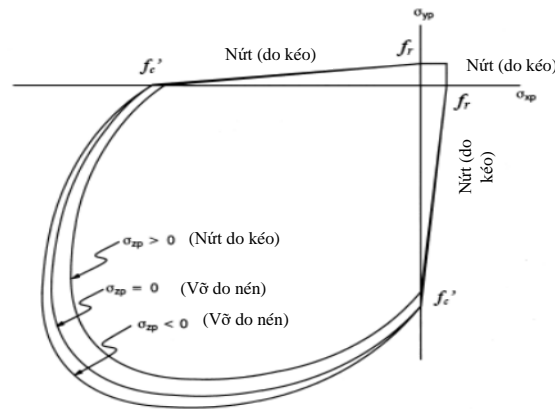
Trong phần này, đầu tiên ứng xử của kết cấu tường bê tông đất dưới tác dụng của tải trọng ngoài

mặt phẳng sẽ được nghiên cứu bằng mô hình hóa dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn thông qua phần mềm ANSYS. Kết quả mô phỏng được đối chiếu với kết quả thực nghiệm nhằm xác minh sự phù hợp của mô hình. Mô hình này sau đó được sử dụng để nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số khác nhau.

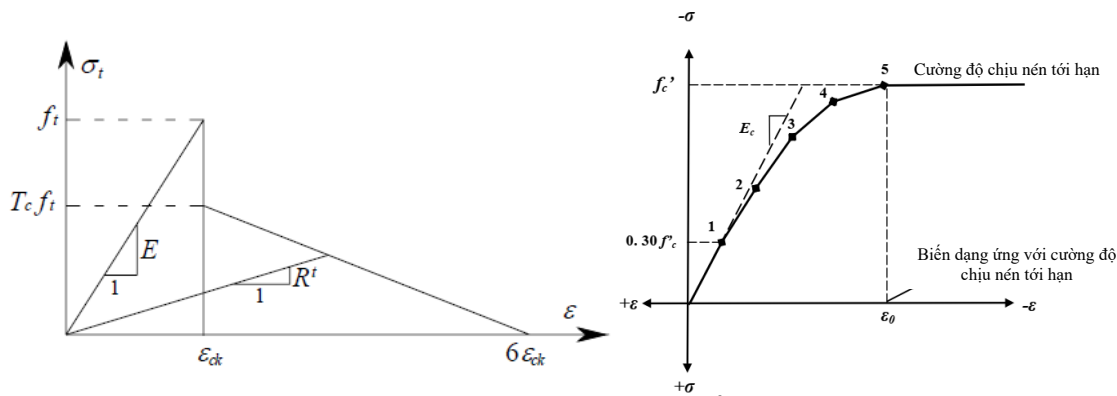
3.1 Lựa chọn mô hình vật liệu, phần tử, tải trọng tác dụng và điều kiện biên

Mô hình đề xuất để mô phỏng ứng xử của loại “bê tông đất” ở đây là mô hình “concrete” (Hình 6) có sẵn trong phần mềm ANSYS. Mô hình này có khả năng kể tới cả hai dạng phá hủy do kéo và do nén của bê tông. Cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo là hai thông số xác định mặt phẳng phá hủy của bê tông.

Ứng xử chịu nén của “bê tông đất” tuân theo mô hình được đề xuất bởi Desayi và Krishnan ([4]) áp dụng cho bê tông truyền thống, Hình 7. Ứng xử này được xác định bởi giá trị cường độ chịu nén của bê tông f'_c và biến dạng tương ứng $\epsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c}$ (điểm 5). Điểm đầu tiên tương ứng với ứng suất bằng 30% cường độ chịu nén lớn nhất ($0,3f'_c$) và biến dạng tương ứng xác định theo định luật Hooke ($\epsilon_1 = \frac{0,3f'_c}{E_c}$). Các điểm khác được xác định thông qua mối quan hệ $f = \frac{E_c \cdot \epsilon}{1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^2}$.



Hình 6. Mặt phẳng phá hoại trong mô hình "concrete" trong ANSYS



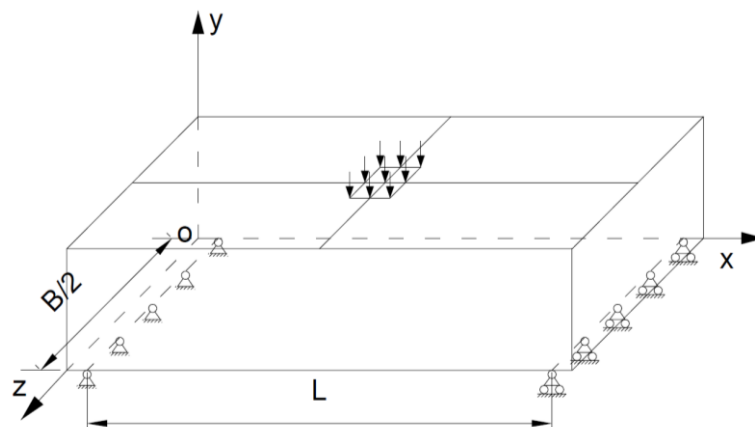
Hình 7. Ứng xử chịu kéo (a) và chịu nén của "bê tông đất" trong mô hình "concrete"

Giá trị của các thông số đưa vào trong mô hình "concrete" này không phải là các giá trị đặc trưng cơ học được xác định từ thí nghiệm ở trên do bởi ngày bảo dưỡng mẫu tường thí nghiệm lâu hơn nhiều so với ngày bảo dưỡng các mẫu hình trụ. Thay vào đó, để đảm bảo sự chính xác của các kết quả mô phỏng, các tham số đầu vào này được xác định từ thí nghiệm chịu nén và ép chèn của các mẫu hình trụ được khoan trực tiếp từ tường thí nghiệm (sau thí nghiệm uốn ngoài mặt phẳng). Kết quả của các thí nghiệm này như sau: Mô đun đàn hồi ($E_c = 15000$ MPa); hệ số Poisson ($\nu_c = 0.3$); cường độ chịu nén ($f_c = 30$ (MPa)). Giá trị trung bình của cường độ chịu kéo xác định từ thí nghiệm ép chèn là 2,1 MPa. Tuy nhiên, giá trị tham số cường độ chịu kéo của mô hình "concrete" phải là giá trị cường độ chịu kéo khi uốn, được xác định bằng 1,6 lần giá trị cường độ chịu kéo do ép chèn (theo ACI 363, áp dụng cho bê tông truyền thống), $f_t = 3.36$ (MPa). Giá trị của

hai hệ số cắt β_t và β_c ứng với khi vết nứt mở và đóng được tham khảo trong Kachlakev, 2001 [8].

Kết cấu tường bê tông đất này được rời rạc hóa và mô phỏng bởi phần tử Solid65. Đây là phần tử khối 3D gồm 8 nút với 3 bậc tự do ở mỗi nút (ứng với chuyển vị nút theo 3 phương x, y, z). Phần tử này cho phép mô phỏng biến dạng dẻo và nứt theo 3 phương trục giao, và cho phép mô phỏng ứng xử dẻo tuyến tính nhiều pha khi chịu nén.

Lưới phần tử được chia có kích thước 20 x 20 x 50 (mm³). Hệ gối đỡ được mô phỏng theo cách để kết cấu được coi như tựa trên một gối cố định và một gối di động. Tải trọng thẳng đứng được áp thông qua chuyển vị thẳng đứng của các nút của mặt phẳng phía trên tường, ứng với phần diện tích của tấm thép áp tải ở vị trí giữa tường. Để tiết kiệm thời gian tính toán bằng cách giảm số lượng phần tử, kết cấu tường này được mô phỏng đối xứng theo phương z qua mặt phẳng Oxy, Hình 8.

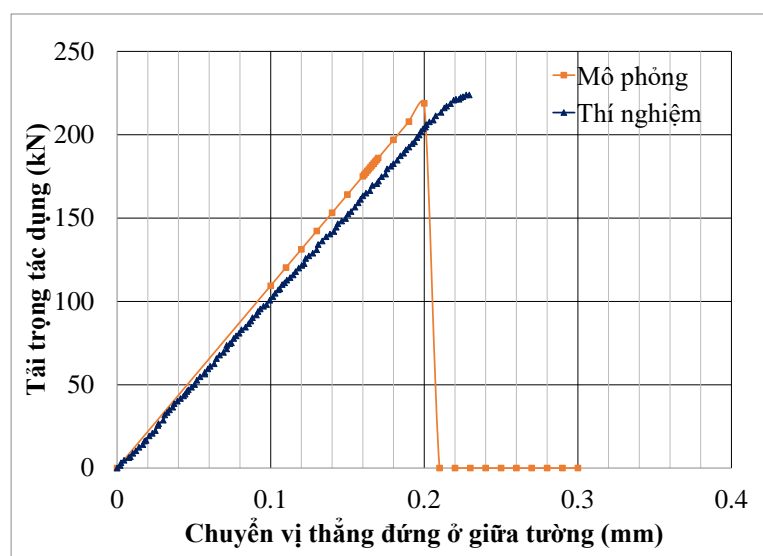


Hình 8. Điều kiện biên và tải trọng tác dụng

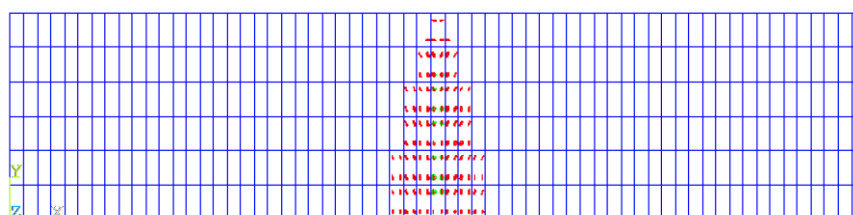
3.2 Kết quả mô phỏng

Kết quả mô phỏng được đối chiếu với kết quả thực nghiệm trên Hình 9. Kết quả mô phỏng phản ánh chính xác ứng xử giòn dưới tải trọng uốn ngoài mặt phẳng của kết cấu tường bê tông đã xác định từ thí nghiệm. Cả độ cứng chịu uốn và cường

độ chịu uốn lớn nhất của kết quả mô phỏng đều gần sát với kết quả thí nghiệm (chỉ sai lệch khoảng 5%). Hơn thế nữa, các giá trị này cũng chính bằng các giá trị tính toán theo công thức giải tích (độ cứng $K = \frac{48EI}{l^3}$ và sức chịu tải $P_{max} = \frac{2bh^2}{3Lf_t}$).



Hình 9. Quan hệ tải trọng - chuyển vị giữa tường: kết quả mô phỏng và kết quả thí nghiệm



Hình 10. Dạng phá hủy xác định được từ mô phỏng

Dạng phá hủy xác định thông qua mô phỏng được thể hiện thông qua các vết nứt (Hình 10). Dạng phá hủy này hoàn toàn tương tự như dạng phá hủy xác định từ thực nghiệm (Hình 5). Các vết nứt xuất hiện đầu tiên ở thớ dưới tại vị trí giữa tường và sau đó rất nhanh chóng lan truyền dọc theo mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng tường,

gây ra sự phá hủy đột ngột của tường dưới tác dụng của tải trọng uốn ngoài mặt phẳng.

Sự trùng khớp giữa kết quả mô phỏng và kết quả thí nghiệm cả về đường cong ứng xử lẫn dạng phá hủy cho thấy mô hình “concrete” này là phù hợp để mô phỏng ứng xử ngoài mặt phẳng của kết cấu tường bê tông đất.

4. Kết luận

Như vậy, nghiên cứu này đã đóng góp thêm dữ liệu khoa học quan trọng về ứng xử của kết cấu làm từ bê tông đất dưới tác dụng của tải trọng uốn ngoài mặt phẳng. Kết quả thí nghiệm cho thấy ứng xử uốn ngoài mặt phẳng của kết cấu tường bê tông đất là ứng xử giòn tuyến tính với dạng phá hủy đột ngột. Đây là dạng ứng xử rất đặc trưng của kết cấu làm từ vật liệu giòn giống như bê tông truyền thống và không có cốt thép gia cường. Kết quả mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn với mô hình "concrete" hoàn toàn trùng khớp với kết quả thực nghiệm đã xác nhận sự phù hợp của mô hình. Sự phù hợp của mô hình này để mô phỏng ứng xử của kết cấu bê tông đất chịu tác dụng của các tải trọng khác nhau sẽ tiếp tục được kiểm chứng ở các nghiên cứu tiếp theo trong tương lai gần.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi trường Đại học Giao thông vận tải, thông qua đề tài cấp trường mã số: T2021-XD-006.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Avrami E, Guillaud H, Hardy M, (2008). "Terra literature review-an overview of research in earthen architecture conservation", *Los Angeles (United States), The Getty Conservation Institute*; p. 21–31.
2. Bui Thi Loan, Nguyen Xuan Huy, Nguyen Tien Dung, Le Minh Cuong, Bui Tan Trung (2019): "Experimental study on the compressive behavior of earth concrete walls", *Transport and Communications Science Journal, Vol 70, Issue 4 (10/2019)*, 296-305.
3. C.M. Ouellet-Plamondon, G. Habert (2016). "Self-compacted clay-based concrete (SCCC): proof-of-concept", *J. Clean. Prod.* 117, 160–168.
4. Desayi P. and Krishnan S. (1964). "Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete", *Journal of the American Concrete Institute*, 61, pp. 345-350.
5. G. Landrou, C.M. Ouellet-Plamondon, C. Brumaud, G. Habert (2014). "Development of a selfcompacted clay-based concrete: rheological, mechanical and environmental investigations", *World SB14*.
6. H. Hwang (2011). "Presentation and Demonstration at the Terre Asia 2011", *the 2011 International Conference on Earthen Architecture in Asia, Mokpo, South Korea*.
7. Kanema, J. M., Eid, J., & Taibi, S (2016). "Shrinkage of earth concrete amended with recycled aggregates and superplasticizer: Impact on mechanical properties and cracks", *Materials & Design*, 109(Supplement C), 378–389.
8. Kachlakev D. (2001). "Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates", *Technical Report*.
9. M. Calkins. (2007). "Chapter 6 in Materials for Sustainable Sites. A Complete Guide to the Evaluation, Selection, and Use of Sustainable Construction Materials", *John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA*, (457 pp.)
10. Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S.: Earth construction (2012). "Lessons from the past for future eco-efficient construction", *Construction and Building Materials*, 29 (Supplement C), 512–519.
11. Van Damme, H., & Houben, H. (2017). "Earth concrete: Stabilization revisited", *Cement and Concrete Research*.

Ngày nhận bài: 02/6/2021.

Ngày nhận bài sửa: 22/6/2021.

Ngày chấp nhận đăng: 03/7/2021.