



FINITE ELEMENT MODEL FOR DEFORMATION ANALYSIS OF GEOGRID-REINFORCED EARTH RETAINING WALLS

Pham Ngoc Thach^{1*}, Hoang Khac Tuan²

¹Hochiminh City University of Transport, Hochiminh City, Vietnam

²Boydens Vietnam Part Of Sweco, Hochiminh City, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 08/01/2024

Revised: 08/03/2024

Accepted: 10/04/2024

Published online: 15/04/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.3.9>

* *Corresponding author*

Email: thach.pham@ut.edu.vn

Abstract. Reinforced soil retaining wall system is composed of wall face blocks, backfill soil and reinforced geotextile layers. The interaction between these components makes the behavior of the reinforced retaining wall system complex. This paper presents a finite element model (FEM) for the deformation analysis of reinforced soil retaining walls. The model considers the contact behavior between wall face blocks, backfill soil and reinforcement layers. The FEM model is verified by experimental measurement results on a reinforced soil retaining wall system in a previously published study. The verification shows that the wall displacement and the deformation of reinforcement layers from the FEM model are consistent with the experimental measurement results. The verification suggests that the FEM model in this paper can be used as an effective tool to conduct further research on the influence of wall geometric characteristics, backfill soil strength, strength and length of geotextile layers, etc. on the behavior of reinforced earth retaining walls.

Keywords: Soil retaining wall, geotextile, finite element model

@ 2024 University of Transport and Communications



MÔ HÌNH PHẦN TỬ HỮU HẠN PHÂN TÍCH BIẾN DẠNG TƯỜNG CHẮN ĐẤT ĐƯỢC GIA CƯỜNG LƯỚI ĐỊA KỸ THUẬT

Phạm Ngọc Thạch^{1*}, Hoàng Khắc Tuấn²

¹Trường Đại học Giao thông vận tải TP. Hồ Chí Minh, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Công ty TNHH Boydens Vietnam Part Of Sweco, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 08/01/2024

Ngày nhận bài sửa: 08/03/2024

Ngày chấp nhận đăng: 10/04/2024

Ngày xuất bản Online: 15/04/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.3.9>

* Tác giả liên hệ

Email: thach.pham@ut.edu.vn

Tóm tắt. Tường chắn đất có cốt được tạo thành từ các khối bê tông mặt tường, đất đắp sau tường và các lớp cốt gia cường làm bằng lưới địa kỹ thuật. Sự tương tác giữa các thành phần vật liệu này làm cho ứng xử biến dạng của hệ khá phức tạp. Bài báo trình bày mô hình phần tử hữu hạn (PTHH) phân tích biến dạng của hệ tường chắn đất có cốt. Mô hình có xét đến sự tương tác giữa các khối bê tông tường, đất đắp và các lớp cốt gia cường. Để kiểm chứng mô hình, tác giả sử dụng kết quả đo đạc thực nghiệm trên hệ tường chắn đất có cốt trong một nghiên cứu đã công bố trước đây. So sánh kết quả mô phỏng với kết quả thực nghiệm cho thấy rằng: biến dạng trong các lớp cốt chênh lệch trung bình khoảng 10%; chuyển vị ngang dọc theo mặt tường chênh lệch trung bình khoảng 5%; đặc biệt tại khu vực giữa chiều cao tường, chuyển vị ngang lớn nhất của mặt tường chênh lệch chỉ 1,4%. Kết quả kiểm chứng ngụ ý rằng mô hình PTHH có thể phục vụ hiệu quả cho các nghiên cứu tiếp theo về ảnh hưởng của các đặc trưng hình học mặt tường, cường độ của đất đắp, cường độ và chiều dài lớp cốt gia cường, v.v. đến ứng xử của hệ tường chắn đất có cốt.

Từ khóa: Tường chắn đất, lưới địa kỹ thuật, mô hình phần tử hữu hạn

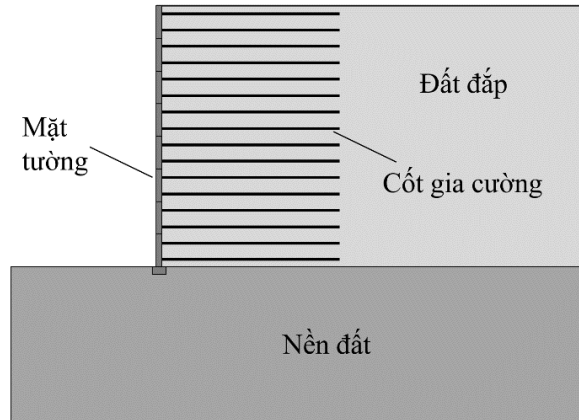
@ 2024 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tường chắn đất có cốt được tạo thành từ kết cấu mặt tường, đất đắp sau tường và các lớp cốt gia cường làm bằng lưới hoặc vải địa kỹ thuật (hình 1). Cốt gia cường chịu kéo tốt; đất đắp sau tường chịu nén tốt; mặt tường được tạo nên từ các khối bê tông đúc sẵn có độ cứng lớn; do vậy, khi làm việc kết hợp với nhau, chúng sẽ tạo nên một hệ tường chắn đất có độ ổn định cao.

Nhờ đặc điểm này, tường chắn đất có cốt ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong các công trình giao thông như: đường đắp cao, đường dẫn đầu cầu, mố cầu, kè chống xói lở, v.v. [1-4].

Tính toán thiết kế tường chắn đất có cốt hiện nay chủ yếu dựa trên phương pháp phân tích cân bằng giới hạn truyền thống [1,2,4-6]. Theo cách tiếp cận này, ổn định của công trình có thể được đánh giá dựa trên các phương trình cân bằng lực của các khối trượt giả định khi hệ làm việc ở trạng thái cân bằng giới hạn. Tuy nhiên do dựa trên giả thiết các khối trượt tuyệt đối cứng nên phương pháp này không phân tích được ứng xử biến dạng của mặt tường, đất đắp và cốt gia cường khi chịu tải.



Hình 1. Minh họa tường chắn đất có cốt.

Sự tương tác giữa các khối bê tông mặt tường, giữa mặt tường và đất đắp, giữa đất đắp và cốt gia cường làm cho ứng xử biến dạng của hệ tường chắn có cốt phức tạp. Để nghiên cứu ứng xử biến dạng của hệ này, chúng ta có thể tiếp cận bài toán bằng cách mô phỏng phần tử hữu hạn (PTHH). Trong nước, ngày càng có nhiều nghiên cứu được thực hiện theo cách tiếp cận này. Trong số đó có các nghiên cứu [7-10]; trong đó, phương pháp PTHH đã được sử dụng để khảo sát ảnh hưởng của các tham số khác nhau đến ứng xử biến dạng của tường chắn có cốt. Tuy nhiên, các nghiên cứu này vẫn còn một số hạn chế: [7-9] không mô tả chi tiết cách xây dựng mô hình PTHH; [10] chưa xét đến ứng xử tiếp xúc giữa các khối bê tông mặt tường. Ngoài ra, [7-10] không trình bày nội dung kiểm chứng mô hình PTHH.

Bài báo này trình bày mô hình PTHH phân tích biến dạng của hệ tường chắn đất có cốt. Mô hình có xét đến sự tương tác giữa các khối bê tông mặt tường, đất đắp và các lớp cốt gia cường. Để kiểm chứng mô hình, tác giả sử dụng kết quả đo đạc thực nghiệm trên một hệ tường chắn đất có cốt trong nghiên cứu [11].

2. MÔ HÌNH PHẦN TỬ HỮU HẠN

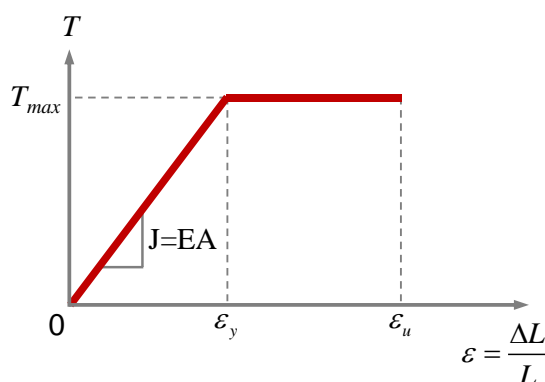
Hệ tường chắn đất thường có tuyến trải dài, đồng thời có mặt cắt ngang và tải trọng không đổi theo chiều dọc tuyến. Do vậy, nghiên cứu này sử dụng giả thuyết mô hình hai chiều biến dạng phẳng. Ứng xử biến dạng của hệ được mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) với sự trợ giúp của phần mềm Abaqus [12]. Các thành phần chính khi xây dựng mô hình PTHH bao gồm: mô hình vật liệu; lưới phần tử hữu hạn; tương tác giữa các khối bê tông mặt tường, đất đắp và cốt gia cường; tải trọng và các giai đoạn mô phỏng.

2.1. Mô hình vật liệu

Đất đắp sau tường là loại vật liệu rời. Đối với vật liệu này, tác giả sử dụng mô hình vật liệu đàn

hồi - dẻo lý tưởng Mohr - Coulomb (MC). Ứng xử đàn hồi được đặc trưng bằng mô hình vật liệu đàn hồi tuyến tính với 2 tham số là mô đun đàn hồi (E) và hệ số Poisson (ν). Ứng xử dẻo được đặc trưng bằng chuẩn dẻo Mohr - Coulomb với hai tham số cường độ là góc ma sát trong (φ) và lực dính (c). Ngoài ra, khi dùng mô hình MC cho đất rời được đảm bảo, ứng suất cắt có thể làm cho đất MC bị giãn nở quá mức so với ứng xử của đất thực tế. Để khắc phục vấn đề này, Abaqus tích hợp tham số góc giãn nở ψ vào mô hình MC [12]. Góc ψ được dùng để kiểm soát lượng biến dạng dẻo thể tích khi đất MC chịu ứng suất cắt. Đối với đất có $\varphi > 30^\circ$, góc ψ thường được xấp xỉ bằng quan hệ $\psi = \varphi - 30^\circ$; đối với đất có $\varphi \leq 30^\circ$, $\psi \approx 0^\circ$ [13,14].

Cốt gia cường làm bằng lưới hoặc vải địa kỹ thuật. Vật liệu này chỉ làm việc chịu kéo và không làm việc chịu nén. Ứng xử chịu kéo của cốt được đặc trưng bằng mô hình vật liệu đàn hồi và dẻo lý tưởng với các tham số: mô đun đàn hồi (E), hệ số Poisson (ν) và cường độ chịu kéo T_{max} [12]. Lực kéo và biến dạng của cốt có quan hệ như trên Hình 2. Tích EA là độ cứng chịu kéo của cốt, $EA = T_{max}/\epsilon_y$. Trong đó, A là diện tích mặt cắt ngang, ϵ_y là biến dạng lúc cốt vừa bắt đầu chảy dẻo và ϵ_u là biến dạng dẻo giới hạn lúc cốt bị đứt hoàn toàn. Các tham số T_{max} , ϵ_y và ϵ_u được xác định từ thí nghiệm kéo cốt và thường được cho trong quy chuẩn kỹ thuật của nhà sản xuất.



Hình 2. Mô hình vật liệu của cốt gia cường.

Mặt tường được tạo nên từ các khối bê tông đúc sẵn xếp chồng lên nhau. Do các khối bê tông có độ cứng lớn hơn nhiều so với đất đắp và cốt gia cường nên chúng được giả định có ứng xử đàn hồi tuyến tính với các tham số vật liệu là mô đun đàn hồi (E) và hệ số Poisson (ν).

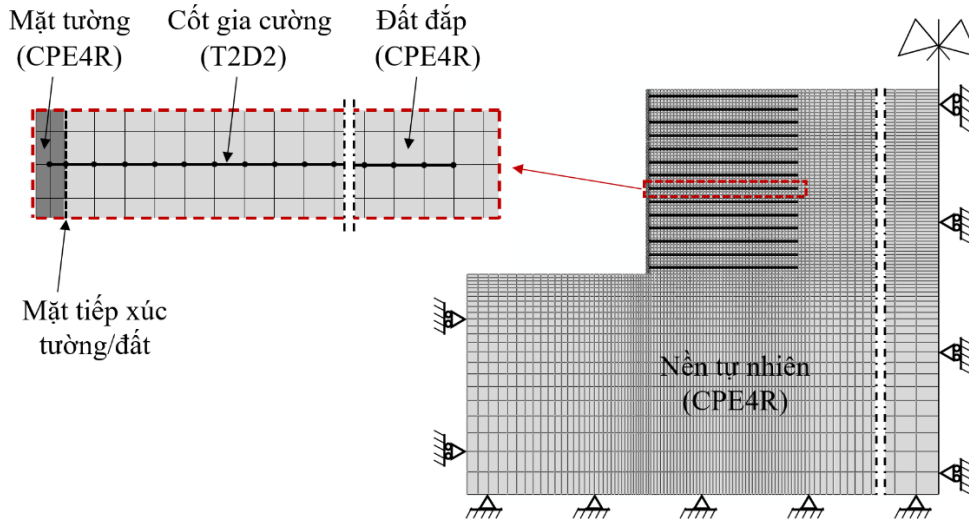
2.2. Lưới phần tử hữu hạn

Hình 3 minh họa lưới phần tử hữu hạn của hệ tường chắn đất có cốt. Loại phần tử được dùng cho đất đắp và các khối bê tông mặt tường là phần tử biến dạng phẳng tứ giác đẳng tham số CPE4R (quadrilateral plane-strain isoparametric element) [12]. Phần tử này có 4 nút, trường chuyển vị bậc 1 và được tích hợp 2 thuật toán tích phân thu gọn (reduced integration) và kiểm soát hiệu ứng đồng hồ cát (hourglass control). Theo [15], hai thuật toán này giúp tối ưu khối lượng tính toán và tăng độ chính xác khi tính toán ma trận độ cứng phần tử. Các khối bê tông mặt tường có kích thước khá lớn. Để mô phỏng đủ tốt biến dạng của các khối cũng như chuyển vị ngang của mặt tường, mỗi khối được chia thành nhiều phần tử hữu hạn và ít nhất có 2 phần tử CPE4R cho mỗi phương ngang và đứng như minh họa trên hình 3.

Cốt gia cường có ứng xử giống như phần tử màng mỏng trong không gian ba chiều. Tuy nhiên, trong không gian hai chiều biến dạng phẳng, cốt có ứng xử giống như phần tử có 2 bậc tự do ở 2 đầu và chỉ chịu biến dạng dọc trục. Do vậy, loại phần tử được dùng cho lớp cốt gia cường là phần tử thanh giàn T2D2 [12,15]. Phần tử này có 2 nút và trường chuyển vị bậc 1. Ngoài ra, để phần tử T2D2 mô tả được ứng xử của cốt, chỉ có độ cứng chống kéo của phần tử được kích hoạt, nghĩa là phần tử

chỉ chịu kéo và không chịu nén. Mỗi lớp cốt được chia thành nhiều phần tử hữu hạn như minh họa trên hình 3.

Lưới PTHH được tạo với mật độ mịn tại khu vực mặt tường và cốt gia cường. Tại các khu vực lân cận, lưới PTHH có mật độ thưa hơn (hình 3). Tại biên trái và phải, điều kiện biên chống chuyển vị theo phương ngang được sử dụng. Tại đáy mô hình, điều kiện biên ngàm được sử dụng, nghĩa là chống chuyển vị theo cả hai phương ngang và đứng.



Hình 3. Lưới PTHH hệ tường chắn đất có cốt.

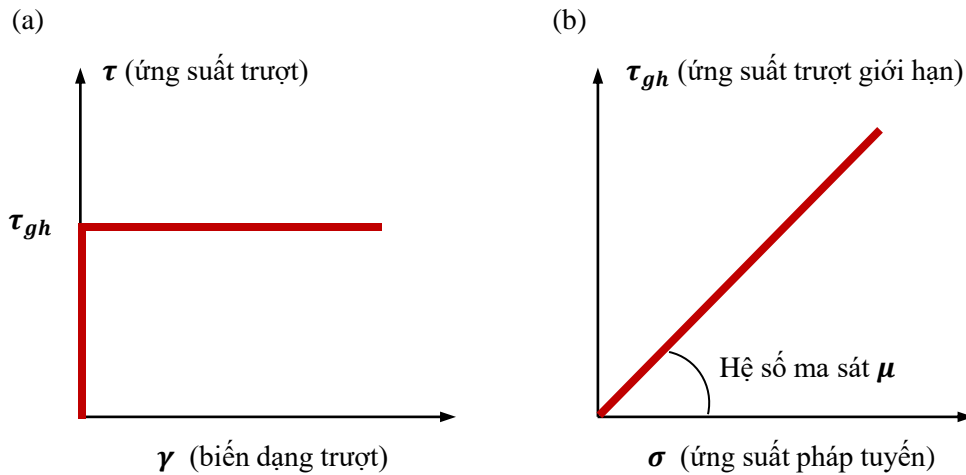
2.3. Tương tác giữa các khối bê tông mặt tường, đất đắp và cốt gia cường

Giữa mặt tường và đất đắp có ứng xử tương tác phức tạp. Tương tự, giữa các khối bê tông mặt tường cũng có sự tương tác tại các mặt tiếp xúc giữa chúng. Trong phần mềm Abaqus, tương tác giữa 2 mặt tiếp xúc được tạo ra bằng phần tử tiếp xúc (contact element) [12,15] có 2 ứng xử theo phương tiếp tuyến và pháp tuyến:

+ Theo phương tiếp tuyến giữa hai mặt tiếp xúc, mô hình ma sát Coulomb được sử dụng (hình 4). Theo mô hình này, khi ứng suất trượt (τ) giữa 2 mặt tiếp xúc nhỏ hơn một giá trị giới hạn (τ_{gh}) thì hai mặt tiếp xúc sẽ không trượt tương đối lẫn nhau (hình 4a). Khi ứng suất trượt bằng giá trị giới hạn ($\tau = \tau_{gh}$) thì hai mặt sẽ trượt tương đối lẫn nhau. Ứng suất trượt giới hạn (τ_{gh}) có quan hệ với ứng suất pháp tuyến giữa 2 mặt (σ) như trên hình 4b; trong đó $\mu = \tan(\delta)$ là hệ số ma sát trượt, với δ là góc ma sát giữa 2 vật liệu tiếp xúc.

+ Theo phương pháp tuyến giữa hai mặt tiếp xúc, mô hình tiếp xúc cứng “hard contact” được sử dụng (hình 5). Theo mô hình này, ứng suất pháp tuyến chỉ tồn tại khi 2 mặt tiếp xúc với nhau (khoảng hở giữa 2 mặt bằng 0), nghĩa là có sự truyền lực qua lại giữa 2 vật thể tiếp xúc. Ngược lại, khi 2 mặt không tiếp xúc (khoảng hở giữa 2 mặt lớn hơn 0) thì ứng suất pháp tuyến bằng 0, nghĩa là không có sự truyền lực qua lại giữa 2 vật thể tiếp xúc.

Các lớp cốt và đất đắp được giả định có ứng xử tiếp xúc lý tưởng, nghĩa là không có sự trượt tương đối giữa chúng. Ứng xử này được mô tả bằng cách liên kết chặt các nút của phần tử cốt T2D2 với các nút của phần tử đất CPE4R (hình 3). Ngoài ra, đầu của các lớp cốt được buộc chặt vào các khối bê tông mặt tường bằng các chi tiết neo hoặc ốc vít. Ứng xử này được mô tả bằng cách liên kết chặt các nút của phần tử cốt T2D2 đầu tiên vào nút của phần tử CPE4R trên mặt tường (hình 3).



Hình 4. Mô hình ma sát Coulomb.



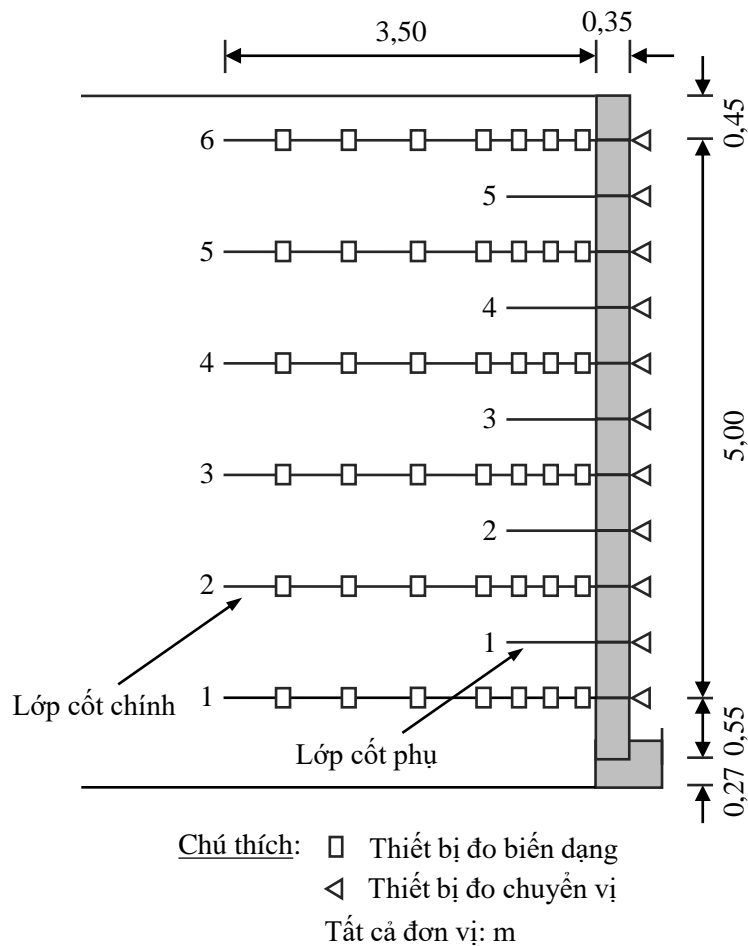
Hình 5. Mô hình tiếp xúc cứng “hard contact”.

2.4. Tải trọng và các giai đoạn mô phỏng

Tải trọng tác dụng lên hệ gồm có tải trọng trong quá trình xây dựng và tải trọng trong quá trình khai thác. Tải trọng trong quá trình xây dựng bao gồm trọng lượng bản thân của đất đắp, các lớp cốt và các khối bê tông mặt tường. Do các tải trọng này tác dụng lên hệ theo trình tự xây dựng, nên ứng xử của hệ cần được mô phỏng theo nhiều giai đoạn. Giai đoạn đầu tiên là mô phỏng trường ứng suất hữu hiệu của nền đất tự nhiên trước khi xây dựng, còn gọi là trường ứng suất địa tĩnh (geostatic) [12]. Tiếp theo là mô phỏng ứng xử của hệ theo các giai đoạn xây dựng, mỗi giai đoạn là một lớp vật liệu bao gồm đất đắp, cốt gia cường và khối bê tông mặt tường. Sau đó là giai đoạn mô phỏng ứng xử của hệ dưới tác dụng của tải trọng trong quá trình khai thác (ví dụ như hoạt tải xe).

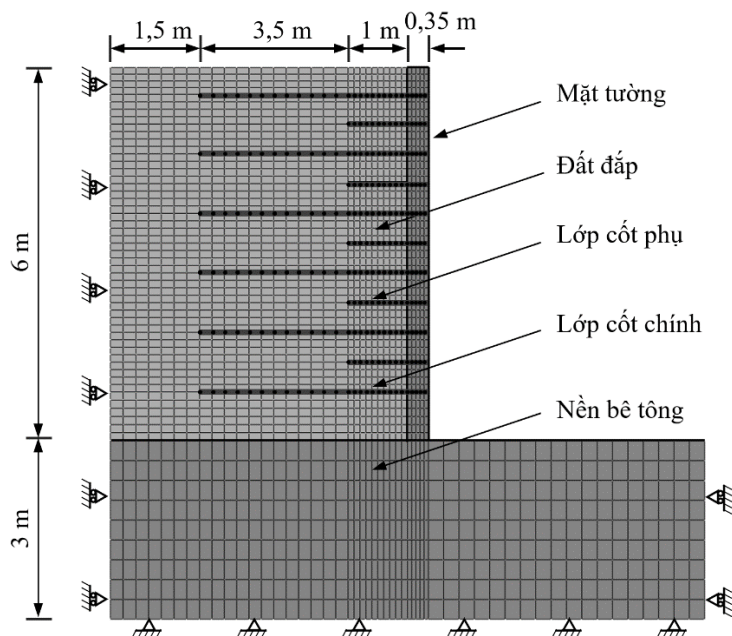
3. KIỂM CHỨNG MÔ HÌNH

Để kiểm chứng mô hình PTHH, tác giả sử dụng kết quả đo đạc thực nghiệm trong nghiên cứu [11]. Hệ là một tường chắn có cốt được xây dựng trên nền bê tông (hình 6). Đất đắp sau tường có chiều cao 6 m và chiều rộng 5 m. Hệ có tổng cộng 11 lớp lưới địa kỹ thuật có cường độ chịu kéo 55 kN/m (Tensar SR55). Các lớp lưới dài 3,5 m được bố trí xen kẽ với các lớp lưới dài 1,0 m. Mặt tường được làm từ các khối bê tông có kích thước 0,50 m x 0,35 m tại chân tường và 0,45 m x 0,55 m trên thân tường. Các thiết bị đo được bố trí trên hệ nhằm đo đạc chuyển vị ngang mặt tường và biến dạng trong các lớp cốt (hình 6).



Hình 6. Hệ tường chắn đất có cốt trong [11].

Hình 7 trình bày mô hình PTHH của hệ. Mô hình PTHH này được xây dựng theo nội dung đã trình bày trong phần 2. Phần tử CPE4R được dùng cho đất đắp, mặt tường và nền. Phần tử T2D2 được dùng cho các lớp cốt. Mỗi lớp cốt được chia thành nhiều phần tử hữu hạn. Các nút của phần tử cốt T2D2 liên kết chặt với các nút của phần tử CPE4R của đất đắp và mặt tường. Mô hình Mohr-Coulomb được sử dụng cho đất đắp. Mô hình đàn hồi dẻo lý tưởng (hình 2) được sử dụng cho các lớp cốt. Mô hình đàn hồi tuyến tính được sử dụng cho các khối bê tông mặt tường và nền bê tông phía dưới tường chắn. Các tham số vật liệu được cho trong bảng 1. Mô hình ma sát Coulomb và tiếp xúc cứng “hard contact” được sử dụng để mô tả ứng xử tiếp xúc giữa đất với các khối bê tông và giữa các khối bê tông với nhau. Góc ma sát trượt giữa các vật liệu được cho trong bảng 1. Biên trái và biên phải của mô hình được áp dụng điều kiện biên chống chuyển vị theo phương ngang. Đáy mô hình được áp dụng điều kiện biên chống chuyển vị theo cả hai phương ngang và đứng. Tổng số phần tử trong mô hình là 2342. Tải trọng tác dụng bao gồm trọng lượng bản thân của các vật liệu trong hệ. Ứng xử của hệ được mô phỏng qua 12 giai đoạn tương ứng với trình tự xây dựng, mỗi giai đoạn là một lớp vật liệu bao gồm đất đắp, cốt gia cường và khối bê tông mặt tường.



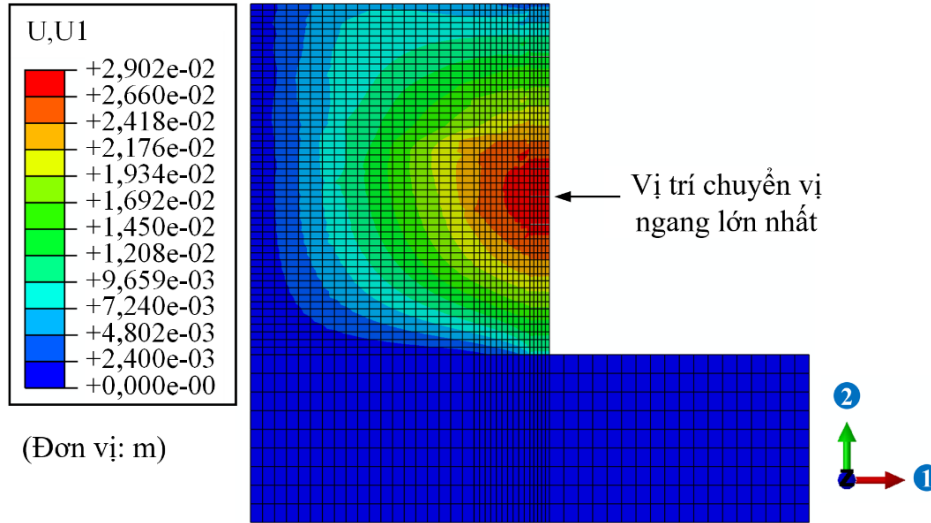
Hình 7. Mô hình PTHH.

Bảng 1. Tham số vật liệu [11].

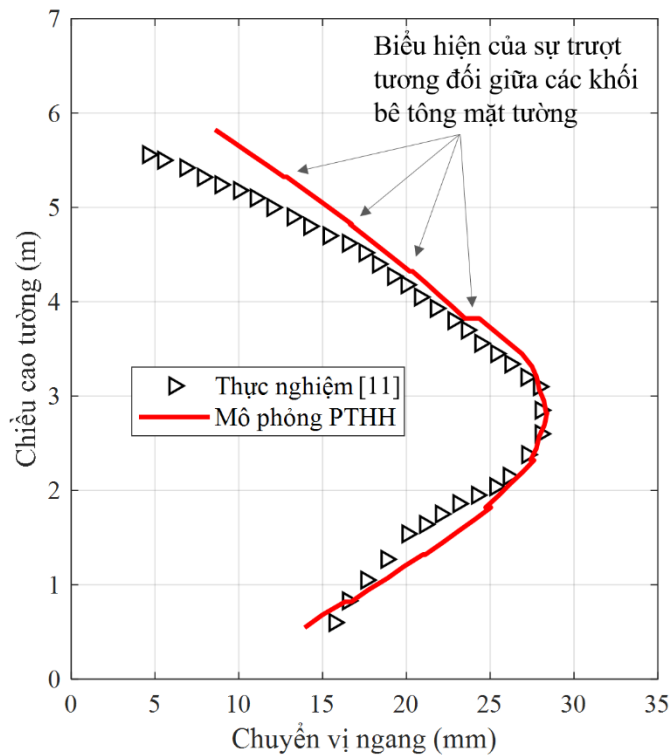
Bê tông	
Mô đun đàn hồi E (kPa)	2×10^6
Hệ số Poisson ν	0,17
Trọng lượng riêng (kN/m ³)	23
Lưới địa kỹ thuật Tensar SR55	
Mô đun đàn hồi E (kPa)	$1,57 \times 10^6$
Hệ số Poisson ν	0,30
Cường độ kéo T_{\max} (kN/m)	54,6
Biến dạng chảy dẻo ε_y (%)	12
Đất đắp sau tường	
Mô đun đàn hồi E (kPa)	1×10^4
Hệ số Poisson ν	0,42
Góc ma sát trong φ (°)	45
Góc giãn nở ψ (°)	15
Lực dính c (kPa)	0
Trọng lượng riêng (kN/m ³)	16
Góc ma sát trượt giữa các vật liệu	
Góc ma sát bê tông / bê tông (°)	19,6
Góc ma sát đất / bê tông (°)	16,5

Kết quả mô phỏng trường chuyển vị ngang của toàn hệ được trình bày trên hình 8. Dọc theo bề mặt tường trên hình 8, chuyển vị ngang được ghi lại và trình bày trên hình 9 dưới dạng sự phân bố chuyển vị ngang theo chiều cao mặt tường. Kết quả biến dạng dọc trục của 5 lớp lưới địa kỹ thuật (lớp cốt chính trên hình 6) được trình bày trên hình 10. Kết quả đo đạc thực nghiệm trong [11] cũng

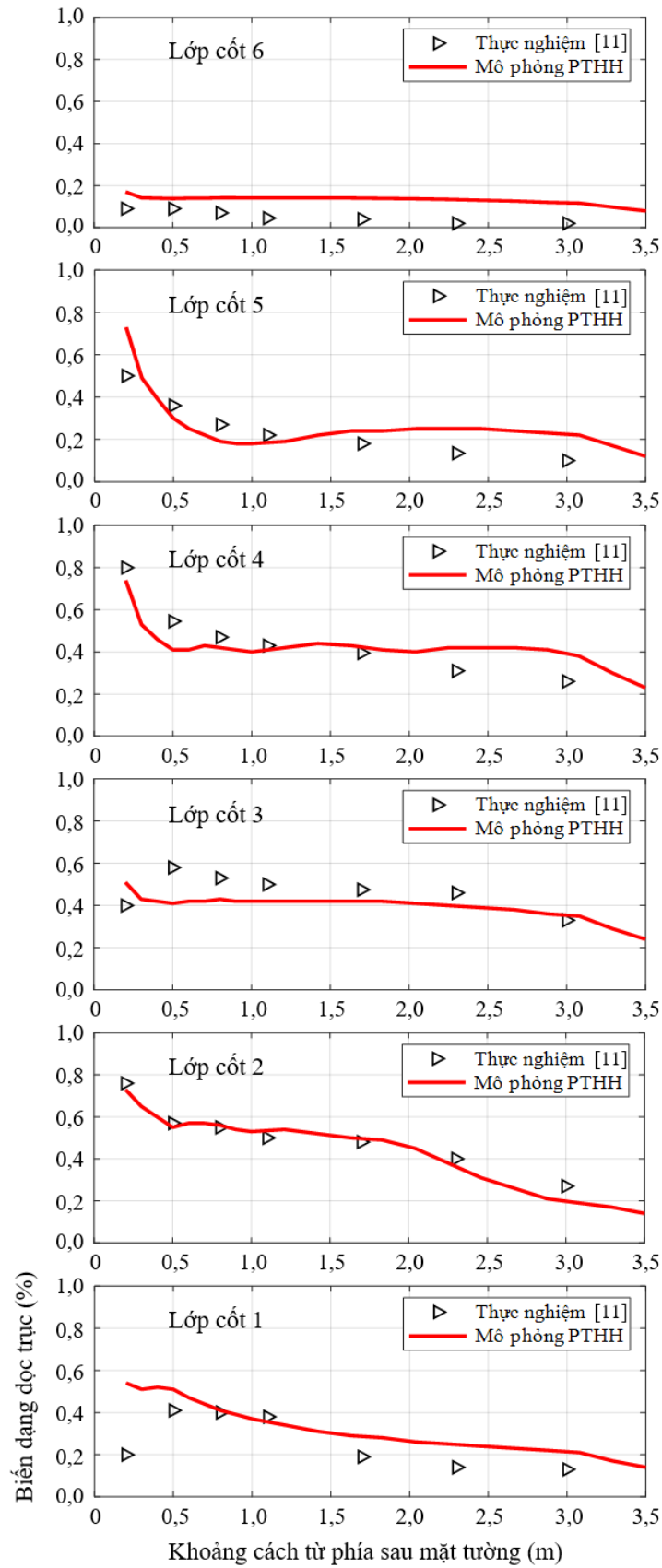
được đưa lên hình 9 và hình 10. So sánh kết quả mô phỏng PTHH và đo đạc thực nghiệm trên hình 9 và hình 10 cho thấy rằng kết quả từ mô hình PTHH tương đối phù hợp với kết quả đo đạc thực nghiệm. Trong đó, biến dạng trong các lớp cốt chênh lệch trung bình khoảng 10% so với kết quả đo đạc thực nghiệm; chuyển vị ngang mặt tường chênh lệch trung bình khoảng 5% so với kết quả đo đạc thực nghiệm. Đặc biệt tại khu vực giữa chiều cao tường, chuyển vị ngang lớn nhất của mặt tường từ mô phỏng PTHH và đo đạc thực nghiệm lần lượt là 28,4 mm (tại vị trí 2,82 m tính từ chân tường) và 28,0 mm (tại vị trí 2,85 m tính từ chân tường), chênh lệch chỉ khoảng 1,4%.



Hình 8. Trường chuyển vị ngang toàn hệ.



Hình 9. Chuyển vị ngang của mặt tường.



Hình 10. Biến dạng dọc trục của các lớp cốt chính.

Quan sát kết quả mô phỏng trên hình 9 cho thấy rằng chuyển vị ngang lớn nhất của mặt tường không xảy ra ở vùng đỉnh tường mà xảy ra ở vùng giữa tường. Trong khi đó, [10] đã mô phỏng ứng xử của một hệ tường chắn có cột cao 9 m với mặt tường cũng được làm từ các khối bê tông; kết quả cho thấy rằng chuyển vị ngang lớn nhất của mặt tường xảy ra ở đỉnh tường hoặc vùng lân cận đỉnh tường. Sự khác nhau về vị trí xuất hiện chuyển vị ngang lớn nhất giữa [10] và nghiên cứu này có thể được giải thích như sau:

+ Trong [10], toàn bộ mặt tường được mô tả như là một kết cấu liên tục, nghĩa là giả định bỏ qua sự tương tác giữa các khối bê tông và mặt tường có ứng xử gần giống với một tấm công-son có độ cứng chống uốn lớn. Vì đặc điểm này, vị trí chuyển vị ngang lớn nhất có xu hướng xuất hiện về phía đỉnh tường. Đồng thời, chuyển vị mặt tường bị ảnh hưởng chủ yếu bởi độ cứng chống uốn của tấm mặt tường và độ cứng chống kéo của các lớp cốt gia cường.

+ Ngược lại, trong nghiên cứu này, các khối bê tông được mô tả riêng biệt và sự tương tác giữa các khối được xét trong mô hình. Do các khối có thể trượt tương đối lẫn nhau (xem hình 9), nên mặt tường có ứng xử mềm hơn so với một kết cấu liên tục. Vì đặc điểm này, vị trí chuyển vị ngang lớn nhất có xu hướng xuất hiện về phía giữa tường. Đồng thời, chuyển vị mặt tường phụ thuộc chủ yếu vào độ cứng chống kéo của các lớp cốt và sức kháng trượt giữa các khối bê tông.

Qua đó cho thấy rằng khi xây dựng mô hình PTHH cho một hệ tường chắn đất có cột, việc mô tả hợp lý ứng xử tiếp xúc giữa các khối bê tông mặt tường giữ vai trò quan trọng, có ảnh hưởng đến sự làm việc của toàn hệ.

4. KẾT LUẬN

Kết quả kiểm chứng cho thấy rằng chuyển vị ngang mặt tường và biến dạng trong các lớp cốt từ mô hình PTHH tương đối phù hợp với kết quả đo đạc thực nghiệm. Theo tác giả, sự phù hợp này có được từ những đặc trưng sau của mô hình PTHH:

+ Mô hình đất Mohr-Coulomb với tham số góc giãn nở ψ (được dùng để kiểm soát lượng biến dạng dẻo thể tích khi đất chịu ứng suất cắt) cùng với phần tử tứ giác đẳng tham số CPE4R đã mô tả phù hợp ứng xử biến dạng của đất đắp.

+ Phần tử thanh giàn T2D2 với 2 bậc tự do chịu kéo cùng với mô hình vật liệu đàn hồi - dẻo lý tưởng đã mô tả phù hợp ứng xử biến dạng chịu kéo của các lớp cốt gia cường.

+ Mô hình ma sát Coulomb và tiếp xúc cứng “hard contact” đã mô tả được ứng xử tiếp xúc phức tạp giữa đất với các khối bê tông mặt tường và giữa các khối bê tông mặt tường với nhau.

Kết quả kiểm chứng ngụ ý rằng mô hình PTHH trong bài báo này có thể phục vụ hiệu quả cho các nghiên cứu tiếp theo về ảnh hưởng của các đặc trưng hình học mặt tường, cường độ của đất đắp, cường độ và chiều dài lớp cốt gia cường, v.v. đến ứng xử của hệ tường chắn đất có cột.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. J. Evans, D. Ruffing, D. Elton, Fundamentals of Ground Improvement Engineering, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2022.
- [2]. J. Han, Principles and Practice of Ground Improvement, Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2015.
- [3]. N.T. Hà, C.T. Linh, N.V. Hùng, H.T. Dương, V.Đ. Phụng, Phân tích ổn định tường chắn đất có cột trên mô hình thực nghiệm và mô hình số FLAC 2D, Tạp chí Giao thông vận tải, 6 (2022) 22-27.
- [4]. D.N. Hải, Thiết kế và thi công tường chắn và đất có cột, NXB Xây dựng, Hà Nội, 2017.
- [5]. N.N. Bích, Các phương pháp cải tạo đất yếu trong xây dựng, NXB Xây dựng, Hà Nội, 2010.

- [6]. N.Q. Chiêu, Thiết kế tường chắn đất, NXB Giao thông vận tải, Hà Nội, 2004.
- [7]. P.T.T. Trúc, L.B. Khánh, Nghiên cứu ảnh hưởng các thông số đến ứng xử của tường có cốt, Tạp chí khoa học công nghệ xây dựng, 4 (2014) 46-52.
- [8]. N.T. Ngân, P.Q. Thắng, Phân tích các thông số ảnh hưởng đến ứng xử của tường chắn đất có cốt, Tạp chí khoa học công nghệ xây dựng, 4 (2016) 71-79.
- [9]. N.M. Hà, P.T. Thanh, Nghiên cứu sự làm việc của tường chắn đất có cốt sau mó có chức năng riêng biệt trong điều kiện Việt Nam, Tạp chí cầu đường Việt Nam, 9 (2021) 10-15.
- [10]. N.T. Sơn, T.N. Thiện, N.T. Quyền, Mô hình số phân tích ứng xử của tường chắn đất có cốt sử dụng các loại vật liệu đất đắp tại chỗ khác nhau, Tạp chí khoa học công nghệ xây dựng, 17 (2023) 123-138. [https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17\(4V\)-11](https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17(4V)-11)
- [11]. H. Ling, C. Cardany, L. Sun, Hashimoto, Finite element study of a geosynthetic-reinforced soil retaining wall with concrete block facing, Geosynthetics international, 7 (2000) 137-162. <https://doi.org/10.1680/gein.7.0170>
- [12]. Dassault Systèmes, ABAQUS 6.14 theory manuals, Providence, RI, USA, 2014.
- [13]. M. Bolton, The strength and dilatancy of sands, Géotechnique, 36 (1986) 65-78. <https://doi.org/10.1680/geot.1986.36.1.65>
- [14]. E. Hosseininia, A. Ashjaee, Numerical simulation of two-tier geosynthetic-reinforced-soil walls using two-phase approach, Computers and Geotechnics, 100 (2018) 15-29. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.04.003>
- [15]. T. Belytschko, W. Liu, B. Moran, K. Elkhodary, Nonlinear finite elements for continua and structures, John Wiley & Sons, NJ, USA, 2014.