

MÔ HÌNH SỐ PHÂN TÍCH ỨNG XỬ CỦA TƯỜNG CHẮN ĐẤT CÓ CỐT SỬ DỤNG CÁC LOẠI VẬT LIỆU ĐẤT ĐẤP TẠI CHỖ KHÁC NHAU

Nguyễn Thanh Sơn^{a,*}, Trần Ngọc Thiện^b, Nguyễn Thế Quyền^b

^aKhoa Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,

55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^bBan Quản lý và Đào tạo kỹ sư chất lượng cao, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,

55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 27/7/2023, Sửa xong 18/9/2023, Chấp nhận đăng 21/9/2023

Tóm tắt

Trong bài báo này, ứng xử của tường chắn đất gia cố bằng lưới địa kỹ thuật (GRSW) sử dụng vật liệu đất đắp tại chỗ khác nhau đã được nghiên cứu thông qua một chuỗi các phân tích số bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Ảnh hưởng của các tham số thiết kế khác nhau như cường độ kéo của lưới, chiều dài lưới, và khoảng cách lưới theo phương đứng đến chuyển dịch ngang và dạng mặt phá hoại của tường GRSW đã được phân tích và thảo luận. Kết quả cho thấy dịch chuyển ngang mặt tường tăng lên đáng kể khi vật liệu đất đắp có tính dính cao được sử dụng. Với đất đắp có tính dính cao, việc sử dụng lưới có độ cứng dọc trục cao sẽ có vai trò giúp giảm chuyển dịch ngang tường hơn là mục đích để mà nhằm tăng độ ổn định tổng thể. Trong khi đó, cường độ và chiều dài lưới địa kỹ thuật có ảnh hưởng lớn đến chuyển vị ngang và ổn định tổng thể của tường GRSW khi đất đắp rời được sử dụng. Sự phát triển mặt phá hoại sau tường cũng cho thấy khác nhau khi mà sử dụng vật liệu đất đắp khác nhau.

Từ khóa: đất đắp dính; lưới địa kỹ thuật; tường chắn đất có cốt; phân tích phần tử hữu hạn; biến dạng.

NUMERICAL ANALYSIS OF MECHANICAL BEHAVIOUR OF REINFORCED SOIL-RETAINING WALL STRUCTURES WITH LOCALLY AVAILABLE BACKFILL MATERIALS

Abstract

In this study, a series of numerical simulations was performed to investigate the behaviour of geosynthetic reinforced soil-retaining wall (GRSW) structures with different backfill materials using the finite element method. Effect of different parameters involved in the design of reinforced soil retaining walls such as tensile strength, reinforcement length, and reinforcement vertical spacing on the deformation and failure mode of GRSWs are analysed and discussed. Numerical results showed that the facing lateral displacement of GRSWs significantly increased as the fine content increased. With cohesive backfill soil, the use of higher geogrid stiffness helps to reduce lateral wall movement rather than to increase the overall stability factor; meanwhile, the reinforcement stiffness and reinforcement length have a great influence on the horizontal facing displacement and the overall stability of the GRSWs when granular backfill is used. The development of critical failure surface behind the GRSWs also shows differences when different backfill materials are used.

Keywords: cohesive backfill; geosynthetics; reinforced soil wall; finite-element analysis; deformation.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17\(4V\)-11](https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17(4V)-11) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

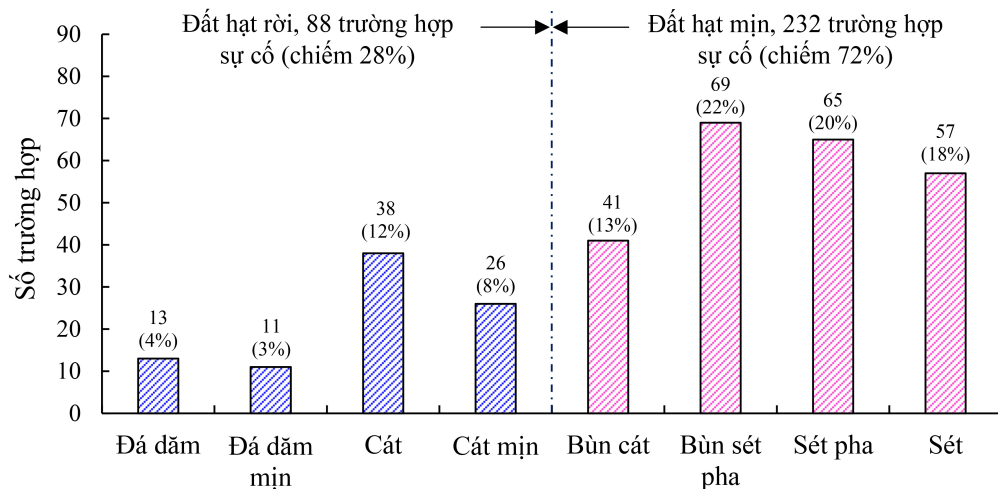
1. Giới thiệu

Ngày nay kết cấu tường chắn đất gia cố bằng lưới địa kỹ thuật (GRSW) ngày càng được áp dụng rộng rãi trong các dự án công trình giao thông, các công trình gia cố, ổn định taluy đường, mố cầu. So

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: sonnt@huce.edu.vn (Son, N. T.)

với giải pháp tường chắn bê tông cốt thép trọng lực hoặc bán trọng lực truyền thống, giải pháp này có nhiều ưu điểm nổi bật như có khả năng chịu tải trọng động tốt, giảm ảnh hưởng lún chênh lệch ở đỉnh tường, thời gian thi công nhanh, chi phí thi công thấp do tận dụng được các nguồn lực tại chỗ, thân thiện môi trường và có khả năng cải thiện tính thẩm mỹ cao [1, 2]. Một kết cấu GRSW thường bao gồm bốn thành phần chính: đất đắp, lưới địa kỹ thuật, bề mặt tường và hệ thống thoát nước sau tường. Mỗi thành phần có các tùy chọn vật liệu khác nhau điều này có thể dẫn đến hiệu suất của cấu trúc GRSW cũng khác nhau. Hiện nay, các tiêu chuẩn, chỉ dẫn thiết kế cho GRSW đều khuyến nghị sử dụng vật liệu đắp là vật liệu hạt rời (hàm lượng % hạt mịn thấp). Đặc tính của chúng là có sức chống cắt cao, khả năng thoát nước tốt, và đặc tính kỹ thuật nhất quán ít thay đổi theo thời gian của chúng trong quá trình khai thác. Điển hình như tiêu chuẩn AASHTO [3] và FHWA [4] yêu cầu hàm lượng hạt mịn (hạt có đường kính nhỏ hơn 0.075mm theo phân loại của USCS) là dưới 15% và chỉ số dẻo dưới 6% cho tường có cốt; NCMA [5] khuyến nghị hàm lượng hạt mịn cho đất đắp là dưới 35%. Tuy nhiên, sự sẵn có của các loại vật liệu dạng hạt chất lượng cao theo yêu cầu thiết kế thường bị hạn chế do yêu cầu về giá thành (ít kinh tế), cũng như các vấn đề liên quan đến vận chuyển. Điều này dẫn đến nhu cầu khai thác, sử dụng vật liệu đắp tại chỗ cho công trình trở nên phổ biến hơn. Nhiều nghiên cứu từ [6, 7] cho thấy rằng việc sử dụng vật liệu tại chỗ làm đất đắp, đặc biệt đất dính với hàm lượng hạt mịn cao có thể tiết kiệm từ 30-40%, thậm chí 60% tổng chi phí xây dựng công trình.

Mặc dù giải pháp tường chắn GRSW có nhiều ưu điểm, các sự cố phá hoại của các cấu trúc này vẫn thường xuyên được ghi nhận trong nhiều các báo cáo [8]. Koerner và Koerner đã tiến hành điều tra 320 trường hợp hư hỏng của các cấu trúc tường GRS do bị sụp đổ hoặc biến dạng quá mức cho phép [8]. Dữ liệu thu được cho thấy 226 trường hợp sự cố (chiếm 71%) là các bức tường cao từ 4 đến 12 m, 232 trường hợp (chiếm 72%) sự cố tường hư hỏng là liên quan đến việc sử dụng vật liệu tại chỗ có cường độ thấp (đất hạt mịn) làm vật liệu đắp gia cố, 63% sự cố là do ảnh hưởng của nước bên trong hoặc bên ngoài gây ra, và 99% là do thiết kế hoặc thi công không phù hợp (Hình 1). Hình 2 là hình ảnh hai sự cố công trình tường chắn đất có cốt xảy ra được ghi nhận gần đây.



Hình 1. Dữ liệu thống kê liên quan đến loại vật liệu đắp sử dụng trong 320 sự cố công trình tường GRSW theo [8]

Cho đến nay, rất nhiều các nghiên cứu đã được thực hiện để nghiên cứu các yếu tố chi phối ứng xử của kết cấu tường GRSW sử dụng mô hình thí nghiệm trong phòng [11], mô hình kích thước lớn (full-scale test) [12, 13], và mô hình số [14, 15]. Các kết quả đo đạc từ thực nghiệm sử dụng đất đắp vật liệu rời cho tường GRSW trong một số nghiên cứu cho thấy lực kéo lớn nhất huy động trong lưới



(a) Thổ Nhĩ Kỳ (26/03/2021) [9]



(b) I-295, New Jersey (03/2021) [10]

Hình 2. Một số sự cố công trình liên quan đến tường chắn đất có cốt sử dụng cho các tuyến đường cao tốc được ghi nhận gần đây

không phải là tăng tuyến tính theo độ sâu như trong các tài liệu hướng dẫn thiết kế hiện hành và thực tế chúng thường nhỏ hơn so với giá trị tính theo thiết kế [16, 17]. Nghiên cứu trong [18] cho thấy độ cứng chống uốn của bề mặt tường GRSW có thể giúp giảm biến dạng và tăng độ ổn định của tường, cái mà thường bị bỏ qua trong tiêu chuẩn thiết kế. Bilgin [19] đã nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dài lưới địa đến sự hình thành mặt phá hoại và sự ổn định của tường chắn đất có cốt. Ling và Leshchinsky [20], Huang và cs. [21] đã sử dụng các mô hình nền khác nhau để mô phỏng ứng xử của một bức tường modun block và so sánh với kết quả quan trắc hiện trường. Các kết quả đều cho thấy sự phù hợp về giá trị áp lực ngang đất, biến dạng của lưới, và chuyển vị ngang giữa kết quả mô phỏng số và đo đạc thực tế. Phan và Lê [22] đã sử dụng mô phỏng số để nghiên cứu ảnh hưởng của độ cứng nền móng dưới tường chắn đến ứng xử của tường chắn đất có cốt (sự phân bố ứng suất trong khối đất). Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu trước đây tập trung vào nghiên cứu ứng xử tường chắn sử dụng vật liệu đắp dạng rời. Ảnh hưởng sức kháng cắt của vật liệu đắp khác nhau, cường độ lưới, khoảng cách lưới, chiều dài lưới thiết kế lên ứng xử của tường GRSW như chuyển vị ngang, lực kéo huy động, cơ chế phá hoại... vẫn còn ít được nghiên cứu thảo luận.

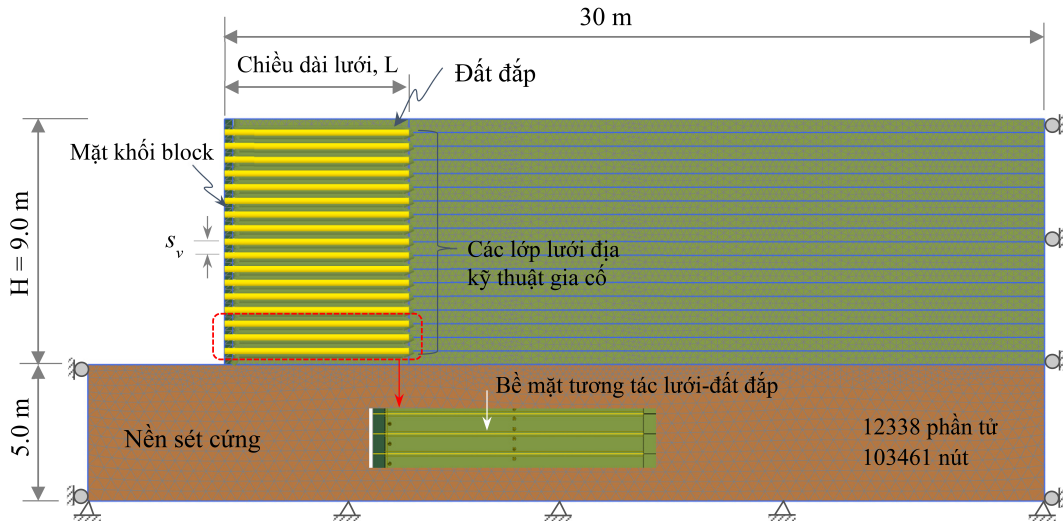
Dựa trên những điều đã trình bày bên trên, một chuỗi các mô phỏng số sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) trong phần mềm PLAXIS 2D [23] đã được tiến hành để nghiên cứu ứng xử của tường GRSW với bề mặt thiết kế là khối block định hình. Ảnh hưởng của các thông số đầu vào như loại vật liệu đất đắp, chiều dài lưới, khoảng cách lưới, cường độ lưới đến ứng xử của tường GRSW (ví dụ chuyển vị ngang tường) cũng đã được khảo sát, phân tích. Lực căng trong lưới dự báo từ mô hình số đã được so sánh với các giá trị tính toán được đề xuất trong chỉ dẫn thiết kế của FHWA. Kết quả thu được từ nghiên cứu này có thể giúp cải thiện đáng kể sự hiểu biết về ứng xử bên trong của tường GRSW trong công tác tính toán thiết kế khi mà các loại vật liệu đất đắp tại chỗ khác nhau được sử dụng.

2. Mô hình nghiên cứu

2.1. Sơ đồ hình học và thông số vật liệu

Một bức tường GRSW cao 9,0 m đặt trên nền đất cứng đã được lựa chọn nghiên cứu tính toán. Hình 3 trình bày mô hình số hai chiều (2D), biến dạng phẳng của kết cấu GRSW, bao gồm tổng cộng 103461 nút và 12338 phần tử tam giác. Kích thước của lưới được chia mịn với khoảng 0,1 m theo cả hai phương đã được áp dụng cho phần đất đắp sau tường, nơi mà biến dạng lớn được dự đoán sẽ xảy ra. Trong bài toán cơ bản, mười bảy lớp lưới địa kỹ thuật gia cố được thiết kế với khoảng cách

theo phương đứng là 0,5 m và chiều dài lưới $L = 6,75$ m ($L/H = 0,75$) được áp dụng cho tất cả các lớp lưới như khuyến nghị trong chỉ dẫn thiết kế của FHWA [4, 24] và NCMA [5]. Giả thiết rằng đất đắp trong phạm vi gia cố và đất được giữ lại sau tường có cùng tính chất. Trong nghiên cứu này, mực nước ngầm được giả thiết nằm rất sâu và ảnh hưởng của nó không được xét đến trong quá trình phân tích. Ảnh hưởng của tải trọng đầm nén trong quá trình thi công từng lớp đất giả thiết là bỏ qua.



Hình 3. Sơ đồ hình học và mô hình tường GRSW sử dụng trong phân tích số

Liên quan đến điều kiện biên của mô hình, một điều kiện biên cố định theo phương ngang đã được gán cho biên bên trái và bên phải của mô hình. Nó cho phép đất đắp có thể chuyển dịch tự do theo phương đứng. Ngoài ra, một điều kiện biên cố định theo cả hai hướng ngang và dọc đã được sử dụng ở phía biên dưới cùng của móng. Các mô hình tường GRSW được phân tích trong từng giai đoạn xây dựng (từng bước thi công các lớp lưới). Trong pha đầu tiên bao gồm việc tạo ứng suất ban đầu sử dụng K_0 – procedure cho trường hợp mặt đất nằm ngang. Các pha tiếp theo là giai đoạn tính toán dẻo để phân tích ứng suất - biến dạng của kết cấu trong quá trình thi công. Hệ số an toàn tổng thể của tường GRSW sau khi thi công đã được tính toán sử dụng phương pháp giảm ϕ/c (ϕ - c reduction) trong phần mềm PLAXIS [23]. Giá trị hệ số an toàn tổng thể được xác định trong thuật ngữ của ΣM_{sf} .

2.2. Thông số vật liệu

Đất đắp tại chỗ sử dụng trong nghiên cứu này được chia làm ba loại (Loại A, Loại B, Loại C) dựa trên sự khác nhau về thành phần hạt mịn. Cường độ kháng cắt của đất đắp được lựa chọn dựa trên những tài liệu đã được công bố ứng với ba loại đất khác nhau [25]. Ảnh hưởng của việc lựa chọn mô hình nền đến ứng xử của tường GRSW đã được thảo luận trong nghiên cứu của [21]. Kết quả cho thấy mô hình đất đàn hồi-dẻo dẻo lý tưởng Mohr-Coulomb (MC) là phù hợp nhất cho việc phân tích các tường GRSW ở giai đoạn đầu phá hoại. Do đó để đơn giản hóa trong việc xác định các thông số đầu vào, trong bài báo này, vật liệu đất đắp và nền đất được mô hình hóa sử dụng mô hình MC; trong đó các tham số đầu vào của mô hình bao gồm mô đun đàn hồi (E), hệ số Poisson (ν), lực dính (c), góc ma sát trong (ϕ), và góc giãn nở (ψ). Để cho thuận tiện trong phân tích và không làm mất tính tổng quát trong các kết luận, tất cả ba loại đất đắp giả thiết là có chung trọng lượng riêng $\gamma = 16,8$ kN/m³ và hệ số Poisson $\nu = 0,3$. Với vật liệu đắp hạt rời (Loại A), một giá trị nhỏ của lực dính $c' = 1$ kPa đã được sử dụng để tránh mất ổn định cục bộ của mô hình trong quá trình mô phỏng gây ra bởi biến dạng chảy dẻo của các vùng đất chịu ứng suất giới hạn thấp [14, 15]. Nền móng phía dưới tường chôn dày 5,0 m là lớp sét cứng được mô tả với các thông số kháng cắt cao để ngăn chặn bất kỳ sự phá hoại trượt sâu

nào có thể xảy ra trong quá trình tính toán theo như khuyến nghị của [26]. Bảng 1 trình bày các đặc tính vật liệu được sử dụng cho các mô phỏng số (FE).

Bảng 1. Thông số vật liệu đất đắp sử dụng trong nghiên cứu này

Thông số	Đơn vị	Móng (sét cứng)	Đất đắp sau tường		
			Loại A	Loại B	Loại C
Trọng lượng riêng	(kN/m ³)	22	16,8	16,8	16,8
Mô đun đàn hồi, (E)	(kN/m ²)	200000	50000	20000	6000
Hệ số nở hông, (ν)	(-)	0,2	0,3	0,3	0,3
Góc ma sát trong hữu hiệu, (ϕ')	(°)	30	45	30	15
Lực dính hữu hiệu, (c')	(kN/m ²)	1000	1	15	30
Góc giãn nở, (ψ)	(°)	0	15	0	0

Ghi ý: góc giãn nở $\psi = \phi' - 30^\circ$ khi góc ma sát trong $\phi' > 30^\circ$ theo [23]

Bề mặt tường thiết kế bằng các khối bê tông xây dạng block. Các khối mô đun bê tông được mô hình hóa là vật liệu đàn hồi tuyến tính, đồng nhất đẳng hướng với mô đun đàn hồi $E = 23$ GPa và $\nu = 0,15$. Mặt tiếp xúc giữa các khối block với đất đắp, giữa lưới địa kỹ thuật-nền đất được mô hình hóa sử dụng hệ số R_{inter} ($R_{inter} \leq 1$) và được thực hiện khi khai báo đặc trưng cho đất đắp trong PLAXIS. Các thuộc tính bề mặt tiếp xúc liên quan trực tiếp đến tính chất cơ học của đất hình thành lên mặt phân cách được định nghĩa như sau [27]:

$$c_i = R_{inter} \cdot c_{soil} \quad (1)$$

$$\tan \phi_i = R_{inter} \cdot \tan \phi_{soil} \quad (2)$$

trong đó c_{soil} và ϕ_{soil} là lực dính và góc ma sát của đất xung quanh. Hệ số R_{inter} được lấy lần lượt bằng 0,9; 0,7 và 0,5 cho các đất đắp Loại A, Loại B, và Loại C theo như khuyến nghị trong [1, 23]. Mặt trước của lưới địa kỹ thuật được liên kết cố định với các khối block để tránh hiện tượng trượt của lưới gia cố. Trong nghiên cứu này, để đơn giản hóa trong phân tích, sự tương tác giữa các khối block được bỏ qua.

Lưới địa kỹ thuật gia cố được sử dụng chỉ có chức năng duy trì lực kéo và không có độ cứng kháng uốn. Trong PLAXIS, đặc tính vật liệu của lưới gia cố được mô tả thông qua độ cứng đàn hồi dọc trục (EA). Bảng 2 tổng hợp các thông số cường độ lưới một trục được sử dụng trong phân tích. Trong nghiên cứu này, độ cứng của lưới được tính toán tương ứng với biến dạng lưới $\varepsilon = 5\%$ theo kết quả thí nghiệm trong phòng.

Bảng 2. Thông số cường độ lưới địa kỹ thuật sử dụng trong nghiên cứu này

Thông số	Loại lưới (theo catalogue của hãng ACE)			
	GG40	GG80	GG120	GG200
Cường độ lưới cực hạn, T_{ult} (kN)	40	80	120	200
Cường độ lưới tại biến dạng 5%	20	40	62,5	100
Độ cứng $J = EA$, (kN/m)	400	800	1250	2000

Ảnh hưởng của các tham số như loại đất đắp, độ cứng của lưới địa kỹ thuật, khoảng cách lưới, và chiều dài lưới lên chuyển dịch ngang của tường đã được tiến hành phân tích, trong đó khi một thông số thay đổi thì các thông số khác được giữ nguyên. Bảng 3 mô tả các trường hợp nghiên cứu. Tổng cộng có khoảng 45 bài toán được mô phỏng trong nghiên cứu này.

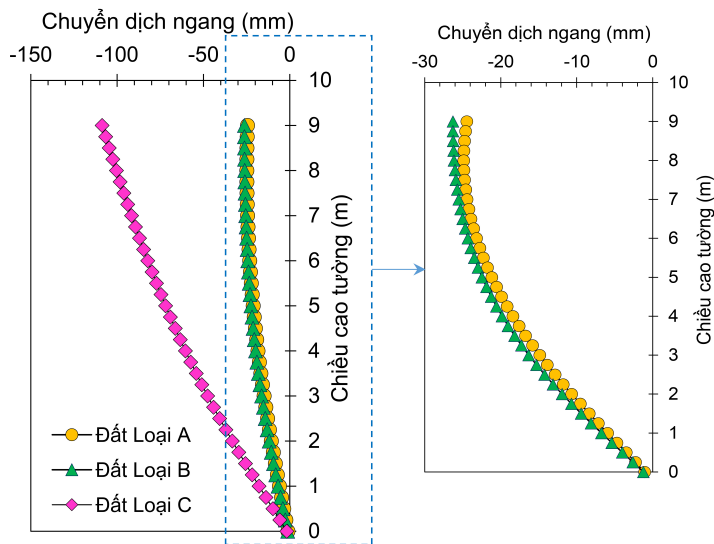
Bảng 3. Nghiên cứu ảnh hưởng các tham số

Tham số	Trường hợp cơ bản	Giá trị thay đổi
Đất đắp	Loại A, B, và C	Loại A, B, và C
Độ cứng dọc trục của lưới, J (kN/m)	800	400; 800; 1250; 2000
Khoảng cách lưới, s_v (m)	0,5	$s_v = 0,3; 0,6; 0,8; 1,0$
Chiều dài lưới, L (m)	$L/H = 0,75$	$L/H = 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 1,0; 1,2$

3. Kết quả và thảo luận

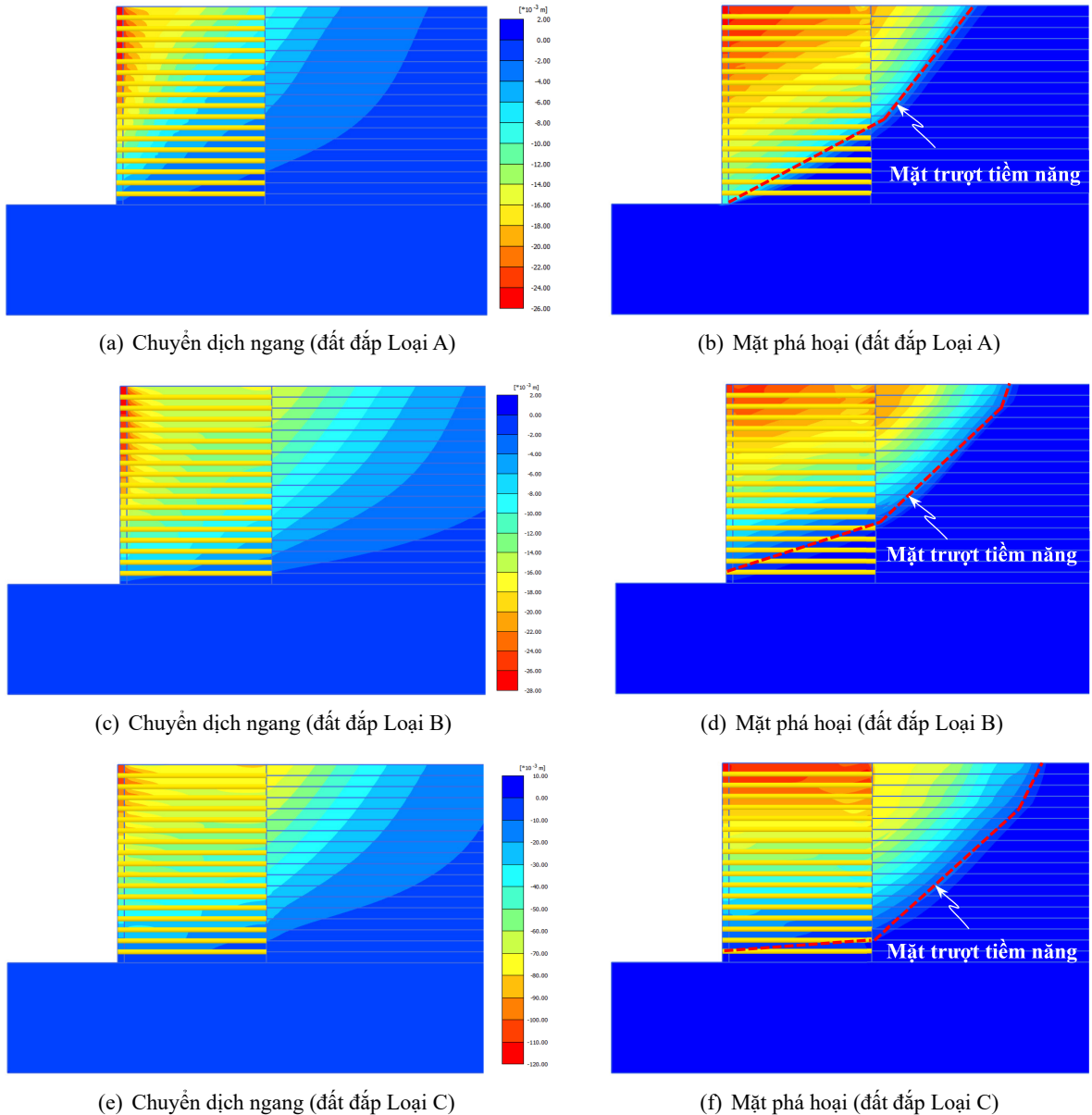
3.1. Ảnh hưởng của loại vật liệu đắp

Mô hình phân tích có các thông số cố định bao gồm chiều cao tường $H = 9$ m; $L/H = 0,75$, độ cứng của lưới $J = 800$ kN/m, và khoảng cách lưới $s_v = 0,5$ m. Hình 4 biểu diễn chuyển dịch ngang dọc theo mặt tường với các loại đất đắp khác nhau và Hình 5 biểu diễn biến dạng ngang tổng thể và hình dạng mặt trượt của tường GRSW. Kết quả mô phỏng số cho thấy rằng, chuyển vị ngang lớn nhất xảy ra ở đỉnh tường chắn cho đất đắp Loại C với hình dạng đường chuyển vị gần như tăng tuyến tính đối với chiều cao tường; trong khi đó nó lại được quan sát xuất hiện ở giữa tường chắn khi sử dụng đất đắp Loại A và B. Rõ ràng việc sử dụng đất đắp địa phương (ví dụ Loại C) cho kết quả chuyển vị ngang lớn hơn so với đất đắp dạng hạt (Loại A).



Hình 4. Chuyển dịch ngang của mặt tường với các loại đất đắp khác nhau

Hình 5(b), (d), và (f) thể hiện cơ chế phá hoại có thể xảy ra của tường GRSW trong thuật ngữ dịch chuyển gia tăng cho các trường hợp đất đắp khác nhau. Với đất đắp Loại A (Hình 5(b)), nó được quan sát thấy rằng bề mặt phá hoại gần như cắt qua tất cả các lớp lưới gia cố. Ngược lại, mặt phá hoại hỗn hợp (chia làm hai phần) đã được quan sát thấy trong đất đắp Loại B và C (Hình 5(d) và 5(f)). Đặc biệt với trường hợp đất đắp Loại C, bề mặt phá hoại tiềm năng được mở rộng sâu vào phần đất được giữ lại sau vùng gia cố và mặt trượt đi song song với lớp lưới dưới chân tường. Kết quả là dẫn đến khả năng chịu kéo của lưới địa trong vùng gia cố ít được huy động, hạn chế sự đóng góp của lưới gia cố đối với sự ổn định tổng thể tường. Điều này được giải thích là do cường độ kháng cắt của đất Loại C thấp hơn so với cường độ chịu kéo của lưới, dẫn đến mặt trượt mở rộng ra bên ngoài phạm vi vùng gia cố.

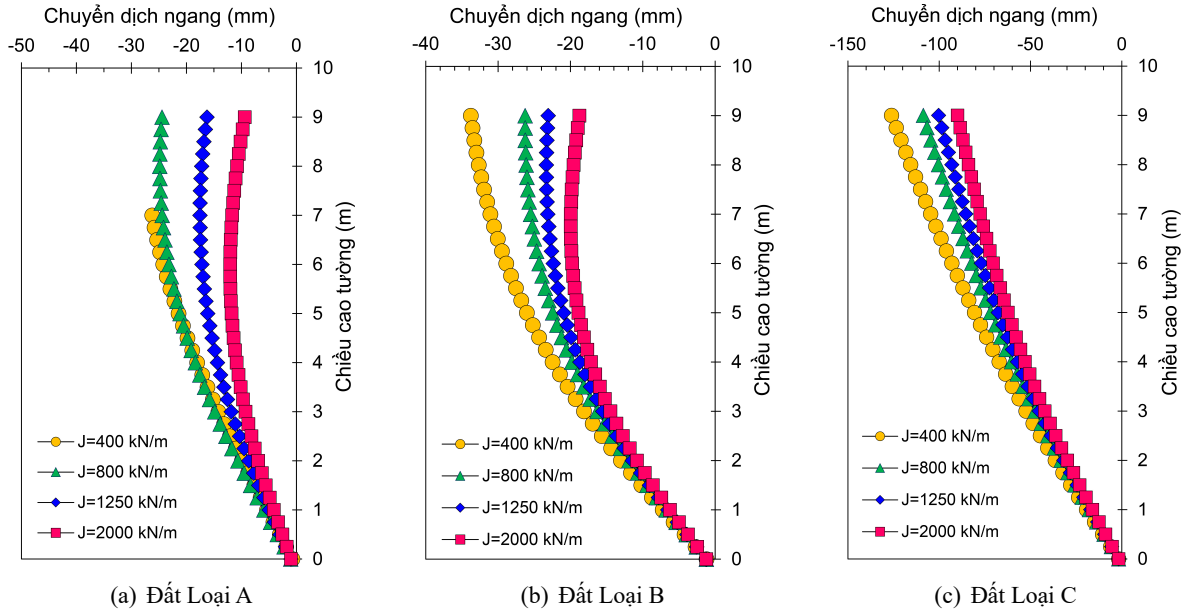


Hình 5. Biến dạng ngang tổng thể và mặt trượt tiềm năng của tường GRSW trong thuật ngữ của dịch chuyển gia tăng với ba loại đất đắp khác nhau

3.2. Ảnh hưởng của cường độ lưới

Hình 6 so sánh chuyển dịch ngang của tường cuối giai đoạn thi công cho cả bốn giá trị độ cứng khác nhau của lưới tương ứng với ba loại vật liệu đất đắp. Đúng như dự đoán, chuyển dịch ngang đỉnh tường giảm đáng kể khi mà độ cứng của lưới tăng với cả ba loại đất đắp. Chuyển vị ngang đỉnh tường giảm khoảng 22% và 14% khi cường độ lưới, T_{ult} tăng từ 40 kN (GG40) đến 80 kN (GG80) tương ứng với trường hợp đất Loại B, và C được sử dụng.

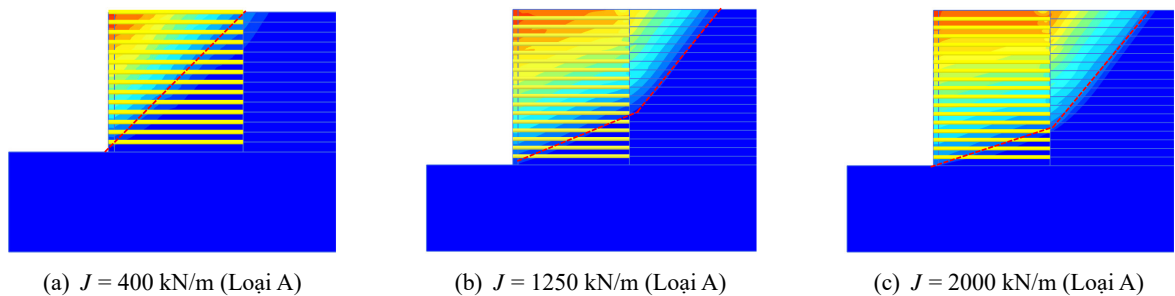
Với đất đắp Loại A, khi độ cứng lưới $J \leq 400$ kN/m sự không hội tụ trong phân tích đã xảy ở giai đoạn thi công đắp đất đến chiều cao tường 7,5 m. Kết quả trên Hình 6(a) cho thấy so với trường hợp cơ bản (như trong Bảng 3) chuyển vị đỉnh tường giảm 33% và 62% khi cường độ lưới $T_{ult} = 120$ kN

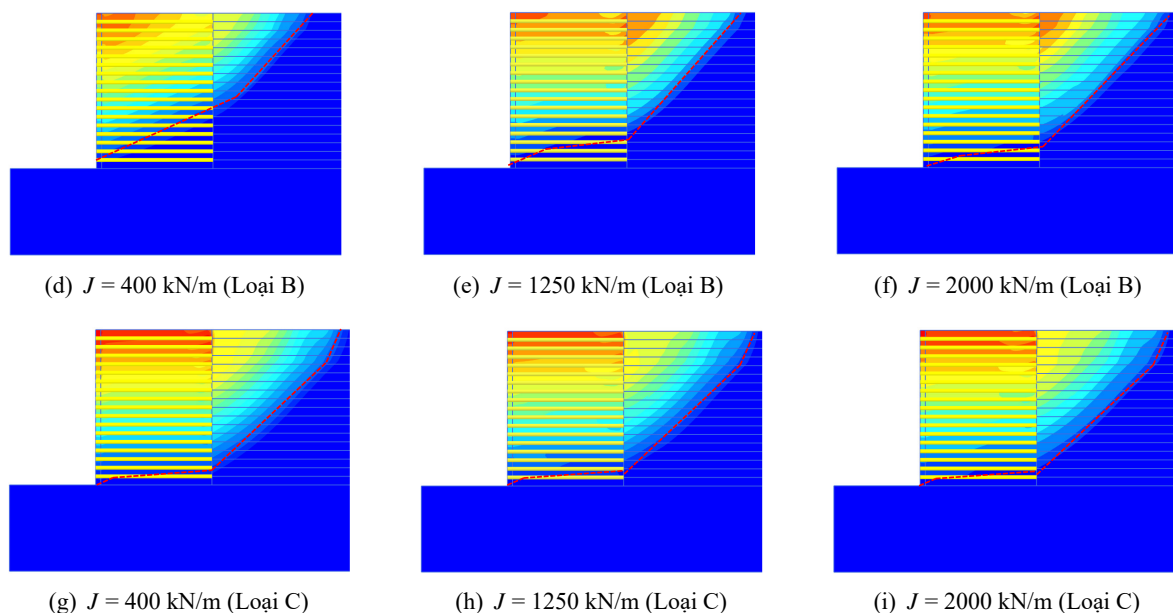


Hình 6. Chuyển dịch ngang của mặt tường với các độ cứng khác nhau của lưới địa

(GG120) và 200 kN (GG200) được sử dụng. Chuyển dịch ngang tường có xu hướng chuyển từ hình dạng công xôn về hình dạng parabol khi mà độ cứng của lưới tăng lên (Hình 6(a), (b)). Kết quả thu được từ nghiên cứu này chỉ ra rằng độ cứng dọc trục của lưới địa thấp không nên được sử dụng trong thực tế thiết kế để tránh sự gia tăng chuyển dịch ngang mặt tường, đặc biệt là khi vật liệu đất đắp có tính dính cao được sử dụng (đất đắp Loại C). Phát hiện thu được từ nghiên cứu này là tương tự với những công bố của Rowe và Ho [28].

Hình 7 thể hiện cơ chế phá hoại có thể xảy ra của tường GRSW trong thuật ngữ dịch chuyển gia tăng với các cường độ lưới và đất đắp sử dụng khác nhau. Với đất đắp Loại A, nó được quan sát thấy rằng bề mặt phá hoại gần như cắt qua tất cả các lớp lưới gia cố (global failure) trong trường hợp sử dụng lưới GG40. Mặt phẳng phá hoại hợp với phương ngang một góc tương tự như lý thuyết của Rankine (góc $(45^\circ + \phi/2)$). Ngược lại, mặt phá hoại đã được quan sát thấy mở rộng ra sau khối gia cố (sliding failure) khi cường độ lưới địa kỹ thuật tăng lên (Hình 7(b), 7(c)) khi cường độ lưới tăng lên. Điều này được giải thích là do cường độ lưới cao làm tăng đáng kể tính ổn định trong của tường. Kết quả mô phỏng trên Hình 7(c), (f), và (i) cho thấy khi độ cứng lưới $J = 2000$ kN/m được sử dụng, vùng tập trung gia tăng chuyển dịch ở phía sát chân tường trở nên kém rõ ràng so với khi sử dụng lưới cường độ thấp. Đáng chú ý, với đất đắp Loại C, hình dạng mặt phá hoại (đường nét đứt màu đỏ) không thay đổi khi mà cường độ lưới tăng. Nói cách khác, mặt trượt tiềm năng không bị ảnh hưởng





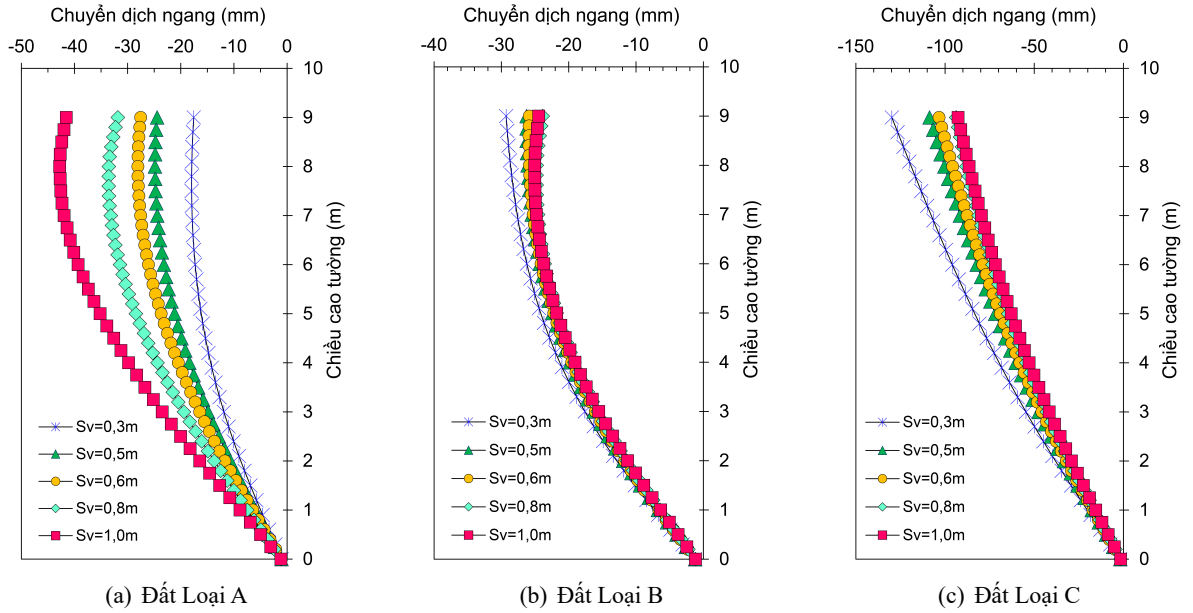
Hình 7. Hình dạng mặt trượt trong thuật ngữ của dịch chuyển gia tăng với các loại đất đắp khác nhau và cường độ lưới khác nhau

bởi cường độ lưới địa sử dụng.

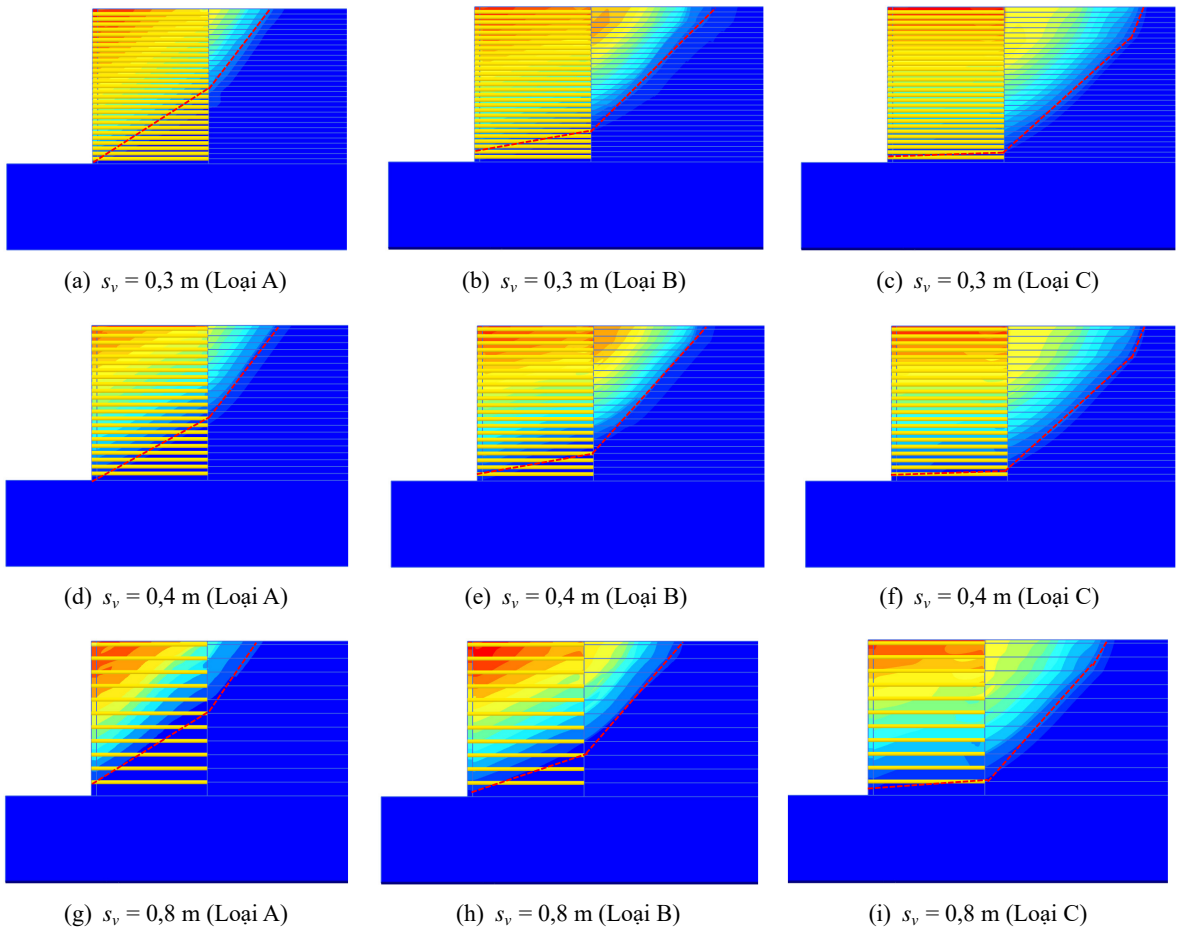
3.3. Ảnh hưởng của khoảng cách lưới, s_v

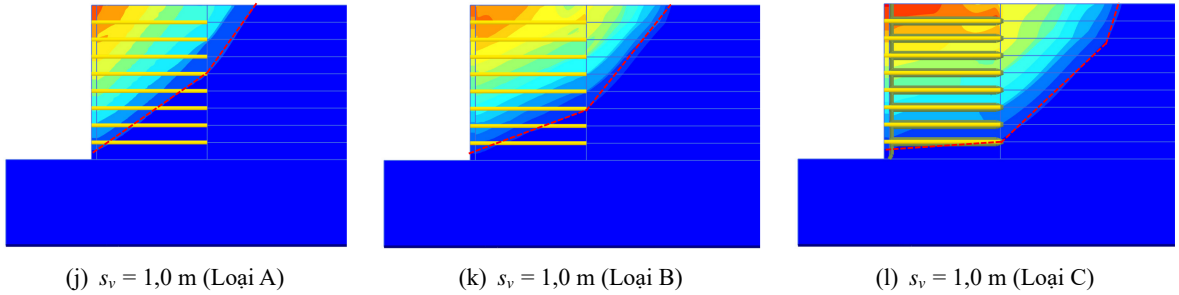
Trong phần này, tác giả sẽ đi phân tích ảnh hưởng của khoảng cách lưới tới chuyển dịch tường, lưới sử dụng là loại GG80 có $J = 800$ kN/m, chiều cao tường $H = 9$ m, và $L/H = 0,75$. Hình 8 biểu diễn chuyển dịch ngang mặt tường với các khoảng cách lưới $s_v = 0,3$ đến 1,0 m mặc dù tiêu chuẩn AASHTO [3] yêu cầu khoảng cách lưới theo phương đứng không được vượt quá 0,8 m. Kết quả cho thấy rằng khoảng cách lưới địa ảnh hưởng rõ rệt đến chuyển vị ngang mặt tường đối với đất đắp Loại A. Với đất đắp Loại A, chuyển dịch ngang đỉnh tường tăng 30,2% khi khoảng cách lưới s_v tăng từ 0,5 m lên 0,8 m. Trong khi đó nó cho thấy ít ảnh hưởng đối với đất Loại B và C. Điều này có thể giải thích là do ảnh hưởng của hệ số bề mặt tiếp xúc giữa các lưới địa-đất đắp (R_{inter}) khai báo trong phân tích. Khi tương tác đất-lưới địa $R_{inter} \leq 0,7$ (đất Loại B và C), sự dịch chuyển phần lớn là do mặt phá hoại trượt giữa lưới địa và đất đắp. Lúc này vai trò của số lớp lưới địa gia cố ít có tác dụng trong việc hỗ trợ giảm chuyển dịch ngang của tường. Kết quả nghiên cứu này là phù hợp với những nghiên cứu trước đây được báo cáo bởi Sukmak và cs. [1]. Ngoài ra, từ kết quả nghiên cứu này có thể khuyến nghị rằng khoảng cách lưới theo phương đứng cho đất đắp vật liệu rời chọn lọc là không nên vượt quá 0,6 m ($s_v \leq 0,6$ m).

Hình 9 mô tả mặt trượt tiềm năng có thể xảy ra của tường GRSW trong thuật ngữ dải màu dịch chuyển gia tăng với các khoảng cách lưới khác nhau. Nó được quan sát thấy rằng với cùng một loại đất đắp, hình dạng mặt trượt tiềm năng ít bị ảnh hưởng khi khoảng cách lưới địa thay đổi. Điều này tương tự với kết luận được đưa ra trong [19] khi chỉ ra rằng sự thay đổi khoảng cách lưới theo phương đứng không ảnh hưởng đến cơ chế phá hoại ngoài của tường khi tỷ số L/H lớn hơn giá trị yêu cầu tối thiểu. Với đất đắp Loại A, ứng suất cắt tập trung chủ yếu trong vùng gia cố. Mặt phá hoại tiềm năng bao gồm một phần tuyến tính và một phần song tuyến tính, và mở rộng ra bên ngoài vùng gia cố. Với đất đắp Loại C, mặt trượt vẫn là khối cắt qua phần đất nằm sau phạm vi lưới gia cố bất kể khoảng cách lưới thay đổi khác nhau.



Hình 8. Chuyển dịch ngang của mặt tường với sự thay đổi của khoảng cách lưới, s_v



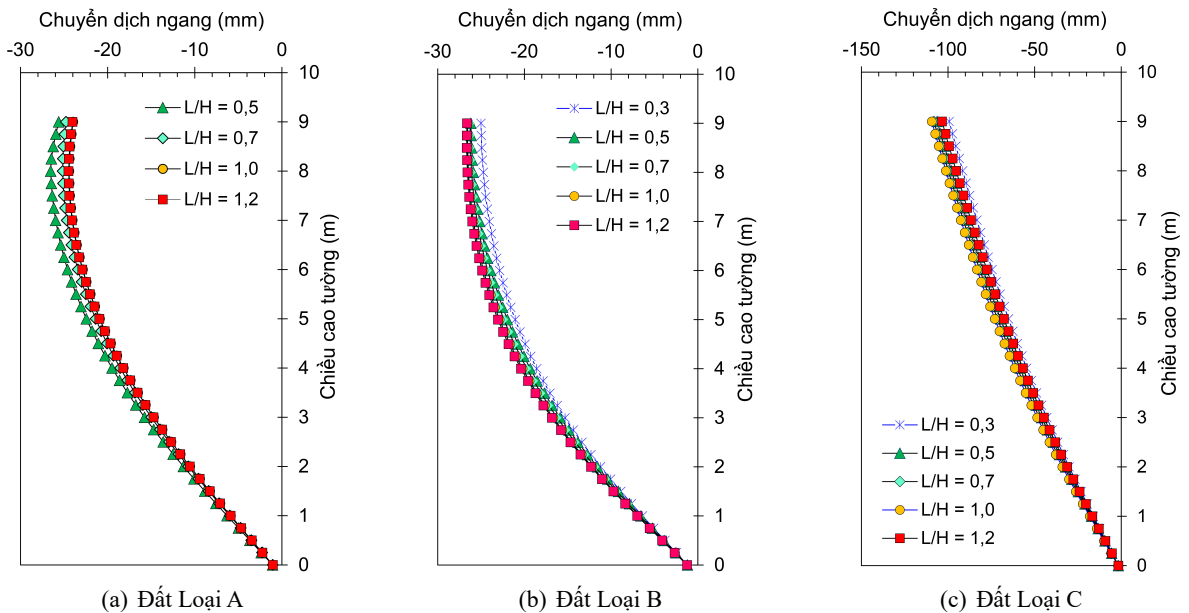


Hình 9. Hình dạng mặt trượt trong thuật ngữ của dịch chuyển gia tăng với các loại đất đắp khác nhau và khoảng cách lưới khác nhau

3.4. Ảnh hưởng của chiều dài lưới

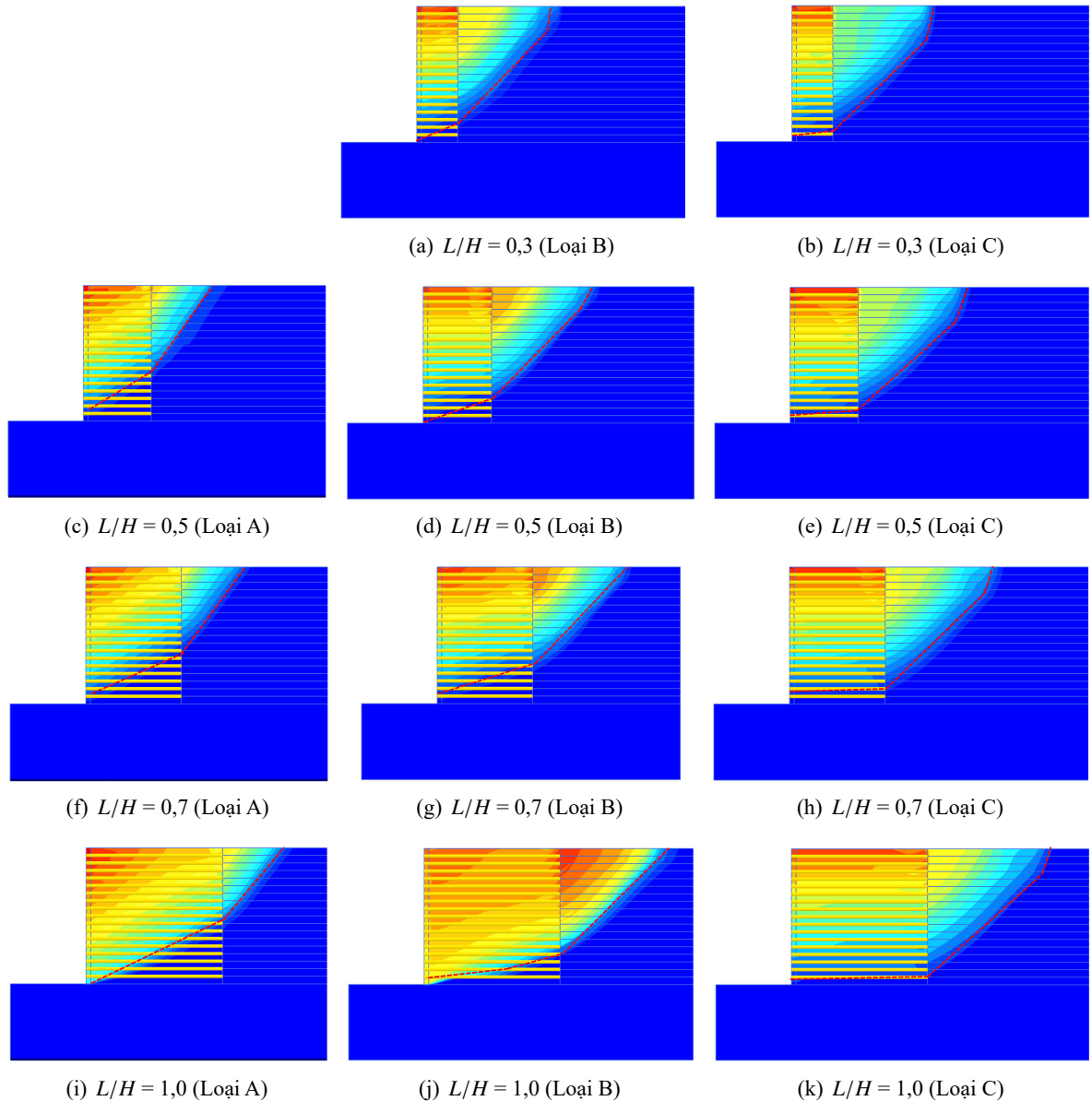
Ảnh hưởng của chiều dài lưới được khảo sát với các giá trị khác nhau của tỷ số L/H (ví dụ $L/H = 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 1,0$; và $1,2$) cho cả ba trường hợp đất đắp khác nhau. Hình 10 biểu diễn chuyển dịch ngang của tường với các giá trị khác nhau của L/H . Kết quả mô phỏng cho thấy chiều dài lưới (thông qua tỷ số L/H) ít ảnh hưởng lên dịch chuyển ngang tường. Với đất đắp Loại A (Hình 10(a)), khi $L/H \leq 0,4$, kết quả phân tích không đạt được độ hội tụ (tường bị mất ổn định). Chuyển dịch đỉnh tường tăng xấp xỉ 3,3% khi chiều dài lưới giảm từ $0,7H$ xuống $0,5H$. Với trường hợp đất đắp có tính dính (Loại B và C), ảnh hưởng của chiều dài lưới tới chuyển vị ngang mặt tường là rất ít (Hình 10(b), 10(c)). Khi tỷ lệ chiều dài lưới trên chiều cao tường tăng lên $L/H \geq 0,7$ theo giá trị khuyến nghị thiết kế, nhìn chung chuyển dịch ngang tường không thay đổi đáng kể cho cả 3 trường hợp đất đắp khác nhau. Kết quả phân tích cho thấy việc sử dụng vật liệu đắp có đặc tính sức kháng cắt tốt có thể giúp giảm biến dạng ngang của tường và bù đắp cho việc sử dụng chiều dài lưới ngắn hơn.

Hình 11 biểu diễn mặt trượt tiềm năng của tường trong phân tích giảm phi/c với các chiều dài lưới địa khác nhau. Khi tỷ số $L/H \leq 0,3$, mặt phá hoại quan sát thấy là dạng phá hoại lật (overturning) khi mặt trượt mở rộng ra sau khối gia cố (Hình 11(a) và 11(b)). Khi $0,3 < L/H \leq 0,7$, cơ chế hình thành



Hình 10. Chuyển dịch ngang của mặt tường với các giá trị khác nhau của L/H và với vật liệu đất đắp khác nhau

mặt trượt chuyển từ phá hoại lật sang phá hoại trượt (sliding failure). Đặc biệt khi $L/H \leq 1,0$, cùng trượt rõ ràng mở rộng sâu vào phía trong của khối đất đắp Loại B và C. Mặt phá hoại phát triển dọc theo đáy tường chắn gia tăng vùng trượt vào phía sau tường, như thể hiện trong Hình 11.



Hình 11. Hình dạng mặt trượt với các giá trị khác nhau của L/H với các loại đất đắp khác nhau và khoảng cách lưới khác nhau

3.5. Hệ số ổn định tổng thể (FS)

Hình 12 thể hiện mối quan hệ giữa hệ số ổn định tổng thể (FS) với sự thay đổi các thông số đầu vào là cường độ lưới, khoảng cách lưới và chiều dài lưới. Tương tự như kết quả chuyển vị ngang của mặt tường đã thảo luận phía trên (Hình 6), hệ số FS của tường GRSW với đất đắp Loại A và B tăng lên đáng kể khi cường độ lưới tăng (Hình 12(a)). Trong khi đó, với đất đắp Loại C, hệ số FS không

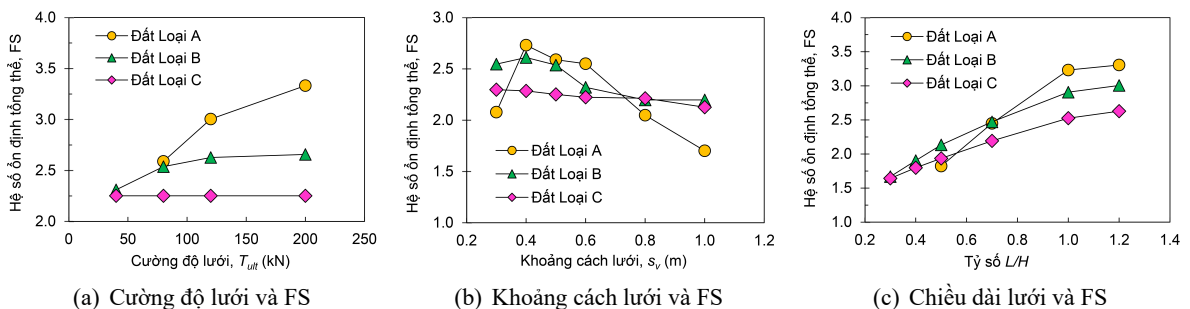
thay đổi khi cường độ lưới tăng. Điều này được giải thích tại sao vị trí mặt trượt là không đổi trong các phân tích (Hình 7(c)). Kết quả phân tích đã chỉ ra một điều thú vị là việc sử dụng lưới địa có độ cứng dọc trục cao sẽ có vai trò giúp giảm chuyển dịch ngang tường hơn là mục đích nhằm tăng hệ số ổn định tổng thể. Ngoài ra, khi sử dụng vật liệu đắp rời (Loại A), việc thiết kế khoảng cách lưới $s_v < 0,4$ m là không nên được khuyến nghị.

Liên quan tới sự ảnh hưởng của khoảng cách lưới đến hệ số ổn định tổng thể, kết quả trên Hình 12(b) cho thấy với đất đắp dạng rời (Loại A), hệ số FS giảm rõ rệt khi khoảng cách lưới $s_v > 0,6$ m. Đáng chú ý, nó được quan sát thấy rằng với khoảng cách lưới $s_v = 0,4$ m thì hệ số FS đạt giá trị cao nhất cho trường hợp đất đắp Loại A và B, khi $s_v > 0,4$ m, hệ số FS bắt đầu giảm dần. Điều này có thể là do khi đó có sự chuyển đổi của hình dạng mặt trượt sau tường từ lật (overturning failure) sang trượt (sliding failure).

Về ảnh hưởng của chiều dài lưới địa (thông qua tỷ số L/H) đến hệ số ổn định tổng thể, kết quả mô phỏng cho thấy chiều dài lưới địa có ảnh hưởng đáng kể đến hệ số ổn định tổng thể (Hình 12(c)). Hệ số ổn định FS gần như tăng tuyến tính khi $L/H < 1,0$. Điều này được giải thích là thực tế khi tỷ số L/H tăng lên, mặt trượt hình thành và được mở rộng hơn ra phía ngoài vùng gia cố. Kết quả là sức kháng cắt tăng lên do chiều dài cung trượt tăng (như thể hiện trên Hình 11). Với đất Loại B và C, kết quả trên Hình 12(c) chỉ ra rằng khi $L/H \leq 0,4$ hệ số ổn định thấp ($FS < 2$), ngược lại khi $L/H \geq 1,0$, hệ số ổn định tăng lên rất ít. Điều này phù hợp với khuyến nghị trong chỉ dẫn của FHWA [4, 24] khi yêu cầu tỷ số $L/H \leq 0,7$.

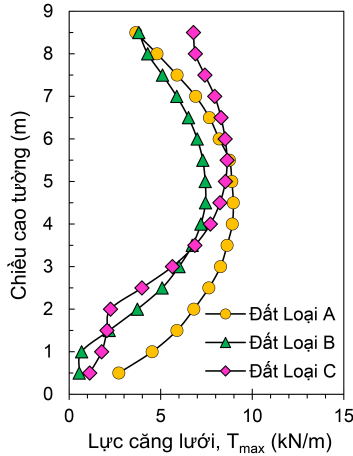
3.6. Sự phân bố lực kéo trong các lớp lưới địa kỹ thuật

Hình 13 biểu diễn sự thay đổi của lực căng T_{max} trong lưới địa kỹ thuật theo độ sâu tường với trường hợp cơ bản, sử dụng lưới GG80. Kết quả mô phỏng cho thấy lực kéo trong lưới địa ở cuối giai đoạn thi công nằm trong khoảng 1,0 kN/m đến 9,0 kN/m. Điều này chỉ ra rằng việc lưới bị phá hoại do rách sẽ gần như không xảy ra do cường độ chịu kéo của lưới thiết kế là lớn. Ngoài ra kết quả trên Hình 13 cho thấy rằng lực căng lớn nhất trong lưới địa xảy ra ở vị trí các lớp lưới địa ở giữa tường chắn đối với tường sử dụng mặt khối xếp. Sự phân bố lực căng lớn nhất trong các lưới dọc theo chiều cao tường có hình dạng parabol, đặc biệt đối với trường hợp nền đất đắp dạng hạt tương đối rời rạc (đất Loại A). Hình dạng phân bố lực căng phù hợp với những kết quả đo đạc thực tế tại hiện trường được báo cáo bởi Allen và cs. [29] và kết quả mô hình thực nghiệm của Bathurst và cs. [30].

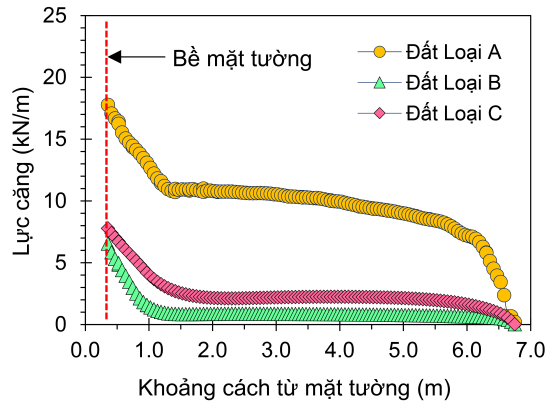


Hình 12. Mối tương quan giữa hệ số ổn định tổng thể với sự thay đổi của cường độ lưới, khoảng cách lưới và chiều dài lưới

Hình 14 biểu diễn sự phân bố lực kéo trong lớp lưới địa thứ 9 tính từ đỉnh tường xuống. Nó được quan sát trên Hình 14 thấy rằng sự huy động lực kéo trong lưới địa kỹ thuật sử dụng đất đắp Loại B và C là ít hơn nhiều so với trường hợp tường sử dụng đất đắp vật liệu rời (Loại A).



Hình 13. Phân bố lực kéo lớn nhất trong lưới địa theo chiều cao tường



Hình 14. Phân bố lực kéo trong lớp lưới địa thứ 9 tính từ đỉnh tường xuống

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, một chuỗi các mô phỏng số sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn đã được tiến hành để nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số như đặc tính đất đắp, cường độ lưới địa kỹ thuật, khoảng cách lưới, chiều dài lưới đến ứng xử của tường GRSWs như chuyển dịch ngang mặt tường, hình dạng mặt phá hoại, hệ số ổn định tổng thể, và sự phân bố lực căng trong lưới. Dưới đây là một số kết luận chính được rút ra:

(i) Dịch chuyển ngang mặt tường tăng lên đáng kể khi đất dính được sử dụng làm vật liệu đắp. Không có cơ chế phá hoại bên trong nào được quan sát thấy đối đất đắp có lực dính cao (đất Loại C). Trong khi đó, kết quả cho thấy mặt phá hoại của tường có xu hướng mất ổn định bên trong thay vì mặt trượt phá hoại bên ngoài đối với tường sử dụng đất đắp dạng rời (đất Loại A).

(ii) Độ cứng của lưới đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát biến dạng ngang mặt tường. Kết quả phân tích cho thấy rằng cường độ lưới thấp không nên được sử dụng trong thực tế thiết kế, đặc biệt là khi vật liệu đất đắp là đất có tính dính cao (đất đắp Loại C). Điều này có thể dẫn đến dịch chuyển ngang vượt quá mức cho phép của tường. Nghiên cứu cho thấy việc sử dụng lưới có độ cứng dọc trục cao sẽ có vai trò giúp giảm chuyển dịch ngang tường hơn là để tăng hệ số ổn định tổng thể.

(iii) Nghiên cứu cho thấy chiều dài lưới địa kỹ thuật (thông qua tỷ số L/H) ít ảnh hưởng tới chuyển dịch ngang của tường. Với đất đắp loại A, khi $L/H \geq 0,7$ chuyển dịch ngang dường như không thay đổi. Tuy nhiên, chiều dài lưới lại có ảnh hưởng lớn đến hệ số ổn định tổng thể (FS) của tường. Khi tỷ số $L/H < 0,7$, hệ số FS giảm đi rõ rệt cho tất cả ba trường hợp đất đắp.

(iv) Với đất đắp sử dụng vật liệu rời (Loại A), kết quả tính toán cho thấy chuyển dịch ngang mặt tường tăng nhanh khi khoảng cách lưới theo phương đứng tăng. Hệ số FS cũng giảm khi khoảng cách lưới tăng. Ngược lại, hệ số FS của tường với đất đắp Loại B và C cho thấy giá trị gần như không đổi khi khoảng cách lưới $s_v \leq 0,6$ m. Đặc biệt, hệ số FS của tường GRSW sử dụng đất đắp Loại A và B cho thấy đạt giá trị lớn nhất khi khoảng cách lưới theo phương đứng bằng 0,4 m; trong khi đó tường GRSWs cho thấy sự ít hiệu quả hơn khi khoảng cách lưới thiết kế $s_v < 0,4$ m.

(v) Sự phân bố lực căng lớn nhất trong các lớp lưới địa dọc theo chiều cao tường có hình dạng parabol. Trong đó, sự huy động lực kéo trong lưới địa kỹ thuật sử dụng đất đắp có tính dính cho thấy ít hơn nhiều so với trường hợp tường sử dụng đất đắp vật liệu rời.

Kết quả thu được từ nghiên cứu này có thể cung cấp những thông tin hữu ích cho người kỹ sư trong việc đưa ra giải pháp tối ưu khi thiết kế tường GRSW. Tuy nhiên, ứng xử của tường GRSWs có

thể bị ảnh hưởng bởi đặc tính nền đất dưới chân tường, độ cứng của bề mặt tường, tải trọng đầm nén trong quá trình thi công, nước ngầm và lượng nước mưa xâm nhập bên trong tường, biến dạng theo thời gian. Những yếu tố này chưa được xét đến trong nghiên cứu hiện tại.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này là một phần nằm trong đề tài “Khoa học và Công nghệ Sinh viên”, mã số CLC-2023-02 được tài trợ bởi Trường Đại học Xây dựng Hà Nội. Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn.

Tài liệu tham khảo

- [1] Sukmak, K., Han, J., Sukmak, P., Horpibulsuk, S. (2016). [Numerical parametric study on behavior of bearing reinforcement earth walls with different backfill material properties](#). *Geosynthetics International*, 23(6):435–451.
- [2] Yang, K.-H., Thuo, J. N., Huynh, V. D. A., Nguyen, T. S., Portelinha, F. H. M. (2018). [Numerical evaluation of reinforced slopes with various backfill-reinforcement-drainage systems subject to rainfall infiltration](#). *Computers and Geotechnics*, 96:25–39.
- [3] AASHTO (2012). *AASHTO LRFD Bridge design specifications*. Washington, D.C, USA.
- [4] Elias, V., Christopher, B. R., Berg, R. (2001). *Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes design and construction guidelines*. National Highway Institute, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- [5] NCMA (2010). *Design manual for segmental retaining walls*. Herndon, Virginia, USA: National Concrete Masonry Association.
- [6] Christopher, B., Stulgis, R. (2005). Low permeable backfill soils in geosynthetic reinforced soil walls: state-of-the-practice in North America. *Proceedings of North American Geo-synthetics Conference (NAGS 2005/GR-19), Cooperative Conference*, Las Vegas, NV, USA.
- [7] Koerner, R. M., Koerner, G. R. (2011). The importance of drainage control for geosynthetic reinforced mechanically stabilized earth walls. *Journal of GeoEngineering*, 6(1):3–13.
- [8] Koerner, R. M., Koerner, G. R. (2018). [An extended data base and recommendations regarding 320 failed geosynthetic reinforced mechanically stabilized earth \(MSE\) walls](#). *Geotextiles and Geomembranes*, 46(6):904–912.
- [9] Petley, D. (2021). *Düzce Zonguldak: a spectacular retaining wall failure on a highway in Turkey*.
- [10] Higgs, L. (2021). [Legislators want public meeting for DOT to explain I-295 wall collapse to drivers \(30/3/2021\)](#).
- [11] Juran, I., Christopher, B. (1989). [Laboratory model study on geosynthetic reinforced soil retaining walls](#). *Journal of geotechnical engineering*, 115(7):905–926.
- [12] Allen, T. M., Bathurst, R. J. (2014). [Design and Performance of 6.3-m-High, Block-Faced Geogrid Wall Designed Using K-Stiffness Method](#). *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(2).
- [13] Allen, T. M., Bathurst, R. J. (2014). [Performance of an 11 m high block-faced geogrid wall designed using the K-stiffness method](#). *Canadian Geotechnical Journal*, 51(1):16–29.
- [14] Guler, E., Hamderi, M., Demirkan, M. M. (2007). [Numerical analysis of reinforced soil-retaining wall structures with cohesive and granular backfills](#). *Geosynthetics International*, 14(6):330–345.
- [15] Hatami, K., Bathurst, R. J. (2005). [Development and verification of a numerical model for the analysis of geosynthetic-reinforced soil segmental walls under working stress conditions](#). *Canadian Geotechnical Journal*, 42(4):1066–1085.
- [16] Allen, T. M., Bathurst, R. J. (2015). [Improved simplified method for prediction of loads in reinforced soil walls](#). *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(11).
- [17] Allen, T. M., Bathurst, R. J., Holtz, R. D., Lee, W. F., Walters, D. (2004). [New method for prediction of loads in steel reinforced soil walls](#). *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(11): 1109–1120.
- [18] Ehrlich, M., Mirmoradi, S. H. (2013). [Evaluation of the effects of facing stiffness and toe resistance on the behavior of GRS walls](#). *Geotextiles and Geomembranes*, 40:28–36.

- [19] Ömer Bilgin (2009). [Failure mechanisms governing reinforcement length of geogrid reinforced soil retaining walls](#). *Engineering Structures*, 31(9):1967–1975.
- [20] Ling, H. I., Leshchinsky, D. (2003). [Finite element parametric study of the behavior of segmental block reinforced-soil retaining walls](#). *Geosynthetics International*, 10(3):77–94.
- [21] Huang, B., Bathurst, R. J., Hatami, K. (2009). [Numerical study of reinforced soil segmental walls using three different constitutive soil models](#). *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, 135(10):1486–1498.
- [22] Phan, T. T. T., Lê, B. K. (2014). Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số đến ứng xử của tường có cốt. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 4:46–52.
- [23] Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., Swolfs, W. M. (2020). *PLAXIS 2020 manual*. PLAXIS bv, Delft, Netherlands.
- [24] Berg, R., Christopher, B. R., Samtani, N. (2009). *Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes*. National Highway Institute, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA.
- [25] Hatami, K., Bathurst, R. J. (2005). Parametric analysis of reinforced soil walls with different backfill material properties. *NAGS conference*, Las Vegas, Nevada.
- [26] Djabri, M., Benmebarek, S. (2016). [FEM analysis of back-to-back geosynthetic-reinforced soil retaining walls](#). *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2(3).
- [27] Yu, Y., Damians, I. P., Bathurst, R. J. (2015). [Influence of choice of FLAC and PLAXIS interface models on reinforced soil–structure interactions](#). *Computers and Geotechnics*, 65:164–174.
- [28] Rowe, R. K., Ho, S. K. (1998). [Horizontal deformation in reinforced soil walls](#). *Canadian Geotechnical Journal*, 35(2):312–327.
- [29] Allen, T. M., Bathurst, R. J., Holtz, R. D., Walters, D., Lee, W. F. (2003). [A new working stress method for prediction of reinforcement loads in geosynthetic walls](#). *Canadian Geotechnical Journal*, 40(5):976–994.
- [30] Bathurst, R. J., Walters, D., Vlachopoulos, N., Burgess, P., Allen, T. M. (2000). Full scale testing of geosynthetic reinforced walls. *Advances in Transportation and Geoenvironmental Systems Using Geosynthetics*, American Society of Civil Engineers.