

# Khảo sát giải pháp sử dụng tường cọc thép kết hợp trong giảm thiểu ảnh hưởng của nền đường đắp lên các công trình lân cận bằng phần mềm Plaxis

## Survey on the solution of using combined steel pile walls to minimize the impact of embankment on neighboring structures using Plaxis software

Nguyễn Văn Công<sup>1</sup>, Thịnh Văn Thanh<sup>1\*</sup>, Đỗ Thành Huê<sup>1</sup> và Lê Đức Linh<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bộ môn Công Sự / Khoa Công trình, Trường Sĩ quan Công binh;

\* Tác giả liên hệ: Thanhz756@gmail.com

■ Nhận bài: 27/06/2025 ■ Sửa bài: 01/08/2025 ■ Duyệt đăng: 02/09/2025

### TÓM TẮT

Việc đánh giá ảnh hưởng của nền đường đắp đến biến dạng lún khu vực lân cận là cần thiết, đặc biệt trong trường hợp tồn tại các công trình nhạy cảm với biến dạng lún và lún lệch. Giải pháp tường cọc thép gồm cọc ván hoặc cọc ống với chiều dài đồng nhất hoặc không được xem xét như một biện pháp kiểm soát biến dạng lún. Việc sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để phân tích các mô hình bằng phần mềm Plaxis cho thấy tường cọc kết hợp có hiệu quả rõ rệt trong việc giảm thiểu tác động của nền đắp đến khu vực lân cận.

**Từ khóa:** Biến dạng lún, nền đường đắp, tường cọc thép, tường cọc thép kết hợp

### ABSTRACT

The assessment of the impact of the embankment on settlement deformation in the surrounding area is necessary, especially in the case of structures that are sensitive to settlement and differential settlement. Steel pile wall solutions consisting of sheet piles or pipe piles with uniform or no length are considered as a settlement deformation control measure. The use of finite element method to analyze Plaxis software models shows that the combined pile wall is significantly effective in minimizing the impact of the embankment on the surrounding area.

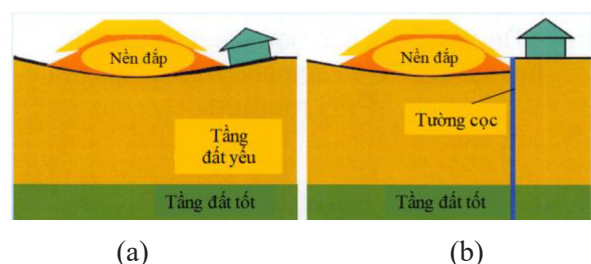
**Keywords:** Settlement deformation, embankment, steel pile wall, combined steel pile wall

## 1. GIỚI THIỆU

Giải pháp sử dụng tường cọc để giảm thiểu ảnh hưởng của nền đường đắp lên công trình lân cận sẽ đảm bảo sự an toàn cho công trình. Khi không sử dụng hệ thống tường cọc (Hình 1a), tải trọng nền đắp gây ra độ lún của nền và ảnh hưởng đến công trình lân cận. Khi sử dụng hệ thống tường cọc (Hình 1b) công trình an toàn.

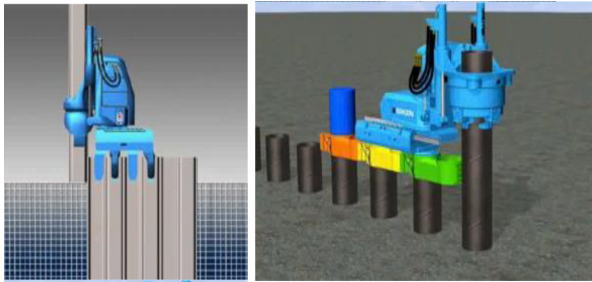
Tường cọc có thể được thi công từ cọc ván hoặc cọc ống thép. Sự phát triển của khoa học công nghệ, đặc biệt là sự xuất hiện của công nghệ thi công cọc Press-in, đã mang lại khả năng lắp đặt hệ tường cọc một cách nhanh

chóng, chính xác, đồng thời đáp ứng các yêu cầu về kỹ thuật, thẩm mỹ (Hình 2).



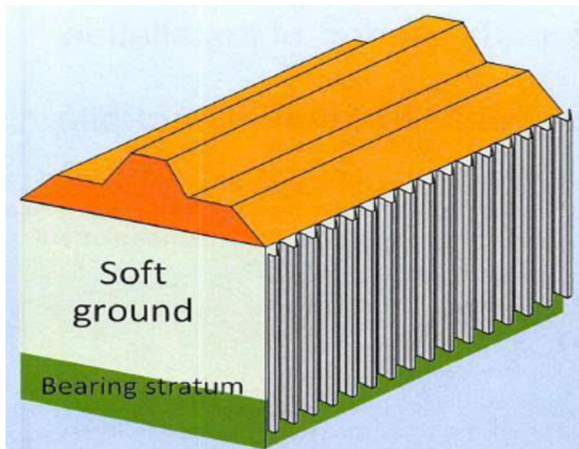
**Hình 1.** Minh họa hệ thống tường cọc để giảm thiểu ảnh hưởng của nền đắp lên công trình

Đáng chú ý, công nghệ Press-in cho phép thi công cọc ống thép xuyên qua các lớp đất đá có độ cứng cao mà các phương pháp truyền thống không thể thực hiện.



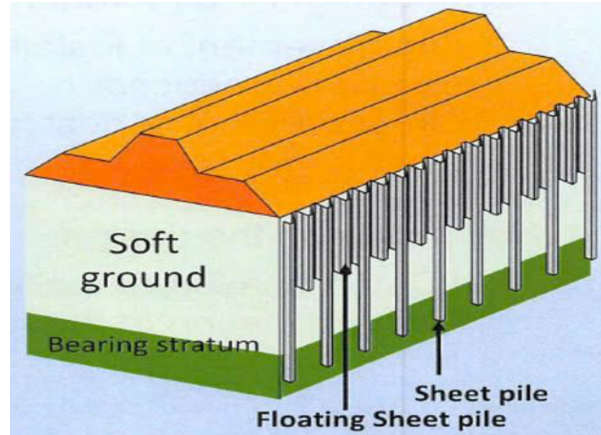
**Hình 2.** Công nghệ Press-in trong thi công tường cọc ống thép và tường cọc ván thép

Hệ tường cọc thường được thiết kế với các cọc có chiều dài đồng nhất (Hình 3), trong đó mũi cọc có thể xuyên hoặc không xuyên vào tầng đất chịu lực. Khi mũi cọc được cắm vào lớp đất chịu lực, hệ tường cọc đạt hiệu quả làm việc cao hơn do tăng khả năng chịu tải và ổn định. Tuy nhiên, điều này làm tăng chiều dài cọc, dẫn đến chi phí thi công cao. Ngược lại, nếu mũi cọc không xuyên vào tầng chịu lực, chi phí xây dựng được giảm, nhưng hiệu quả chịu lực và ổn định của hệ tường có thể bị suy giảm.



**Hình 3.** Giải pháp tường cọc truyền thống với các cọc có chiều dài đồng nhất

Một giải pháp cải tiến [1] được đề xuất và áp dụng là hệ tường cọc kết hợp, trong đó tường được cấu tạo từ hai loại cọc có chiều dài khác nhau. Các cọc ngắn, không xuyên vào tầng đất chịu lực, được bố trí xen kẽ với các cọc dài có mũi cắm sâu vào lớp đất chịu lực nhằm tăng cường khả năng chịu tải tổng thể của hệ kết cấu (Hình 4). Vừa đảm bảo hiệu quả làm việc, vừa tối ưu hóa vật liệu và giảm chi phí thi công.



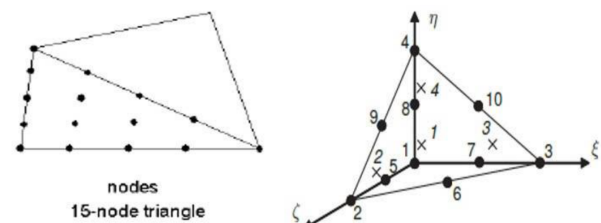
**Hình 4.** Giải pháp tường cọc với các cọc có chiều dài không đồng nhất

**2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU**

Một số nghiên cứu [2], [3], [4], [5], [6], [7] nghiên cứu tường cọc chỉ ra phương pháp phân tử hữu hạn (PTHH) được áp dụng để phân tích ảnh hưởng của nền đường đắp đến các công trình lân cận. Đối với các trường hợp không áp dụng biện pháp gia cố hoặc sử dụng tường cọc có chiều dài đồng nhất, bài toán được đưa về bài toán phẳng và mô phỏng bằng mô hình PTHH hai chiều (2D) sử dụng phần mềm PLAXIS 2D. Ngược lại, với trường hợp tường cọc có chiều dài khác nhau, mô hình ba chiều (3D) được xây dựng và tính toán bằng PLAXIS 3D [8], [9] nhằm phản ánh chính xác hơn điều kiện làm việc không đối xứng của hệ kết cấu.

**2.1. Mô hình đất nền**

Trong mô hình hai chiều (2D), nền đất được rời rạc hóa bằng các phần tử tam giác với 15 nút (Hình 5a). Đối với mô hình ba chiều (3D), quá trình rời rạc hóa được thực hiện bằng các phần tử tứ diện có 10 nút (Hình 5b). Cách lựa chọn phần tử hữu hạn cho phép mô tả chính xác hơn sự phân bố ứng suất và biến dạng [10] trong khối đất nền dưới tác động của tải trọng và điều kiện biên.



(a) Phần tử 2D (b) Phần tử 3D

**Hình 5.** Các dạng phần tử sử dụng trong mô hình hóa nền đất

2.2. Mô hình kết cấu tường cọc:

Các phần tử tấm (plate elements) được sử dụng để mô phỏng ứng xử cơ học của hệ tường cọc trong mô hình số. Mô hình vật liệu áp dụng cho tường cọc được giả thiết là đàn hồi tuyến tính nhằm phản ánh đặc tính ứng xử tuyến tính trong giai đoạn làm việc ban đầu. Chiều dày quy đổi của phần tử tấm được xác định theo công thức sau:

$$d_{eq} = \sqrt{12 \frac{EI}{EA}} \tag{1}$$

trong đó:  $d_{eq}$  là chiều dày quy đổi (mm);  $EI$  là độ cứng chống uốn ( $N.m^2$ );  $EA$  độ cứng chống kéo nén ( $N/m^2$ ).

Để mô phỏng sự trượt tách giữa tường cọc và đất nền sử dụng phần tử tiếp xúc tại bề mặt tường cọc, thông qua đặc tính của đất nền xung quanh có xét đến hệ số giảm cường độ  $R_{inter}$ , theo các công thức sau:

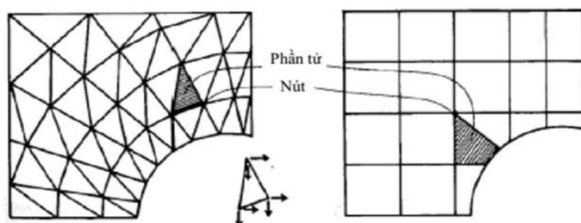
$$c_i = R_{inter} c_{soil} \tag{2}$$

$$\tan \varphi_i = R_{inter} \tan \varphi_{soil} \tag{3}$$

trong đó:  $R_{inter}$  là hệ số giảm cường độ;  $C_i$  là cường độ dính kết tại mặt tiếp xúc;  $c_{soil}$  là lực dính kết ( $kN/m^2$ );  $\varphi_{soil}$  là góc nội ma sát (độ).

2.3. Lưới phần tử và điều kiện biên:

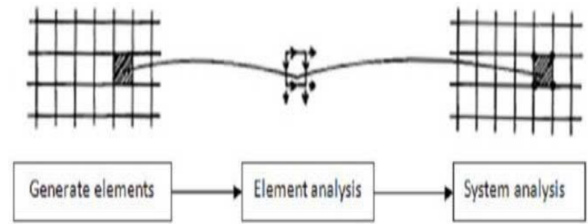
Trong quá trình phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn, miền hình học của bài toán được rời rạc hóa thành các phần tử nhỏ hơn thông qua quá trình chia lưới. Đối với mô hình hai chiều (2D), mỗi nút có hai bậc tự do, tương ứng với chuyển vị theo phương  $x$  và  $y$  (Hình 6). Trong khi đó, ở mô hình ba chiều (3D), mỗi nút sở hữu ba bậc tự do, bao gồm chuyển vị theo các phương  $x, y$  và  $z$ , dẫn đến hệ phương trình đại số có kích thước lớn hơn và yêu cầu tính toán cao hơn.



Hình 6. Các phần tử và nút trong một mô hình 2D

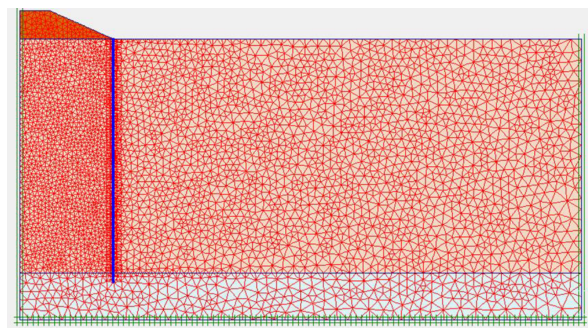
Phân tích phần tử hữu hạn sẽ tiến hành

theo ba bước của Wiberg, 1974 [11] như (Hình 7).

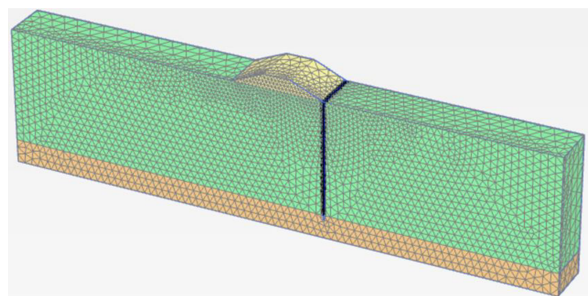


Hình 7. Các bước phân tích phần tử hữu hạn

Trong phần mềm PLAXIS, các tùy chọn thiết lập mặc định cho kích thước lưới bao gồm: lưới rất thô, lưới thô, lưới mịn và lưới rất mịn (Hình 8a, 8b). Nếu cần độ chính xác cao hơn thì cần tăng độ mịn của lưới. Nếu toàn bộ mô hình cần được làm mịn, thì sử dụng chức năng Global coarseness để thay đổi kích thước phần tử cả phương đứng và ngang với khoảng từ rất thô đến rất mịn.



(a) Mô hình 2D

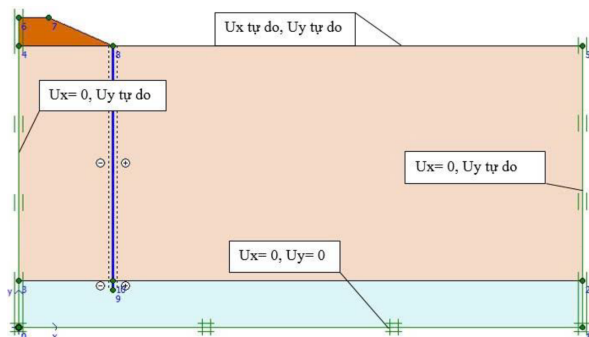


(b) Mô hình 3D

Hình 8. Lưới phần tử của mô hình

Các điều kiện biên trong mô hình 2D và 3D được thiết lập tuân theo nguyên tắc cơ học để đảm bảo mô phỏng chính xác ứng xử thực tế. Cụ thể, tại các mặt phẳng biên đứng, chuyển vị theo phương ngang được khống chế trong khi vẫn cho phép chuyển vị tự do theo phương đứng. Biên đáy mô hình bị khống chế chuyển vị theo cả hai (2D) hoặc ba phương (3D), nhằm mô phỏng lớp nền cố định. Mặt

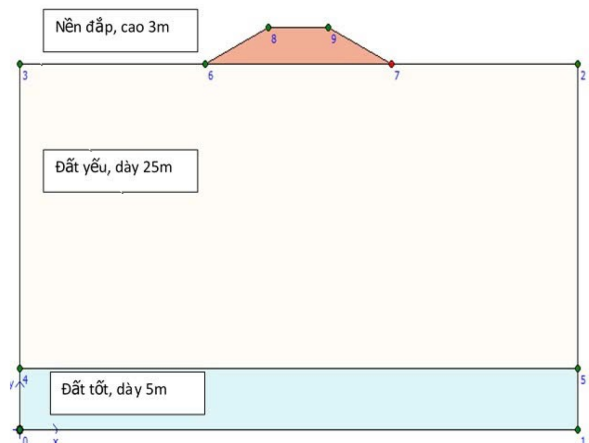
biên trên được để tự do, cho phép chuyển vị theo tất cả các phương, đảm bảo phản ánh đúng tác động của tải trọng ngoài (Hình 9).



Hình 9. Điều kiện biên Mô hình 2D, 3D

### 3. PHÂN TÍCH SỐ PHẦN TỬ HỮU HẠN

Bài toán: Nền đắp có bề rộng đỉnh 6m; bề rộng đáy 20m; chiều cao nền đắp 3m; chiều dày lớp đất yếu 25m; chiều dày lớp đất tốt 5m (Hình 10).



Hình 10. Mô hình nền đường đắp

Số liệu cơ lý của các lớp đất (Bảng 1, 2 và 3).

Bảng 1: Số liệu của đất tốt

Thông số	Ký hiệu	Loại đất	Đơn vị
Mô hình vật liệu	Model	MC	-
Tính chất thoát nước	Type	-	-
Dung trọng riêng TN	$\gamma_{unsat}$	18,0	kN/m <sup>3</sup>
Dung trọng riêng BH	$\gamma_{sat}$	19,0	kN/m <sup>3</sup>
Hệ số thấm theo X	$k_x$	1,0	m/day
Hệ số thấm theo Y	$k_y$	1,0	m/day
Mô đun biến dạng	$E_{ref}$	$1,12 \cdot 10^5$	kN/m <sup>2</sup>
Hệ số poisson	$\nu$	0,3	-
Lực dính đơn vị	$c_{ref}$	20,0	kN/m <sup>2</sup>

Thông số	Ký hiệu	Loại đất	Đơn vị
Góc ma sát trong	$\phi$	25,0	độ
Góc trương nở	$\psi$	0,0	độ
Hệ số giảm cường độ	$R_{inter}$	0,67	-

Bảng 2: Số liệu đất yếu

Thông số	Ký hiệu	Loại đất	Đơn vị
Mô hình vật liệu	Model	MC	-
Tính chất thoát nước	Type	-	-
Dung trọng riêng TN	$\gamma_{unsat}$	17,0	kN/m <sup>3</sup>
Dung trọng riêng BH	$\gamma_{sat}$	18,5	kN/m <sup>3</sup>
Hệ số thấm theo X	$k_x$	1,0	m/day
Hệ số thấm theo Y	$k_y$	1,0	m/day
Mô đun biến dạng	$E_{ref}$	$56.10^2$	kN/m <sup>2</sup>
Hệ số poisson	$\nu$	0,3	-
Lực dính đơn vị	$c_{ref}$	10,0	kN/m <sup>2</sup>
Góc ma sát trong	$\phi$	2,0	độ
Góc trương nở	$\psi$	0,0	độ
Hệ số giảm cường độ	$R_{inter}$	0,67	-

Bảng 3: Số liệu đất đắp

Thông số	Ký hiệu	Loại đất	Đơn vị
Mô hình vật liệu	Model	MC	-
Tính chất thoát nước	Type	-	-
Dung trọng riêng TN	$\gamma_{unsat}$	17,8	kN/m <sup>3</sup>
Dung trọng riêng BH	$\gamma_{sat}$	18,8	kN/m <sup>3</sup>
Hệ số thấm theo X	$k_x$	1,0	m/day
Hệ số thấm theo Y	$k_y$	1,0	m/day
Mô đun biến dạng	$E_{ref}$	$2.15 \cdot 10^4$	kN/m <sup>2</sup>
Hệ số poisson	$\nu$	0,3	-
Lực dính đơn vị	$c_{ref}$	1,0	kN/m <sup>2</sup>
Góc ma sát trong	$\phi$	30,0	độ
Góc trương nở	$\psi$	0,0	độ
Hệ số giảm cường độ	$R_{inter}$	0,67	-

#### 3.1 Phân tích số PTHH nghiên cứu ảnh hưởng của nền đường đắp đối với công trình lân cận

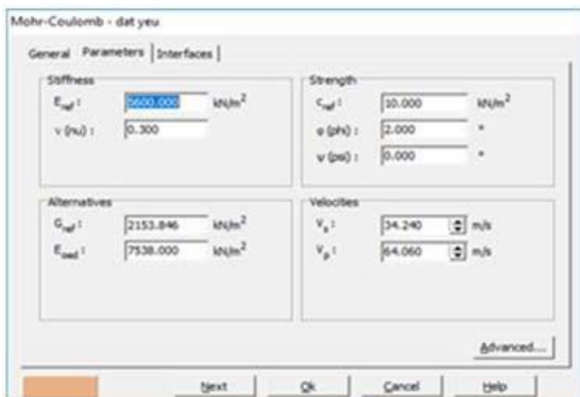
Mô hình đàn dẻo lý tưởng Mohr–Coulomb được lựa chọn để mô phỏng ứng xử cơ học của nền đất, với năm tham số cơ bản: mô đun biến dạng  $E$ , hệ số Poisson  $\nu$ , góc ma sát trong

$\phi$ , lực dính  $c$ , và góc giãn nở  $\psi$  (Hình 11).

Sau khi thiết lập đầy đủ các thông số đầu vào, bài toán được rút gọn và mô hình hóa một nửa miền tính toán nhờ tính đối xứng qua tim nền đường. Quá trình phân tích nhằm đánh giá ảnh hưởng của việc thi công nền đắp đến chuyển vị các điểm A, B, C, D, E và F trên mặt nền tự nhiên, tại các vị trí cách chân ta-luy như Bảng 4.

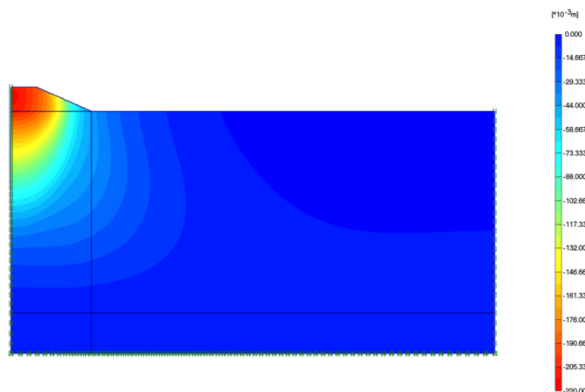
Bảng 4: Khoảng cách các điểm đến chân ta luy

Điểm	$H_d$ (m)	Khoảng cách các điểm (m)
A	3m	$0,5H=1,5m$
B	3m	$H=3m$
C	3m	$2H=6m$
D	3m	$3H=9m$
E	3m	$4H=12m$
F	3m	$5H=15m$



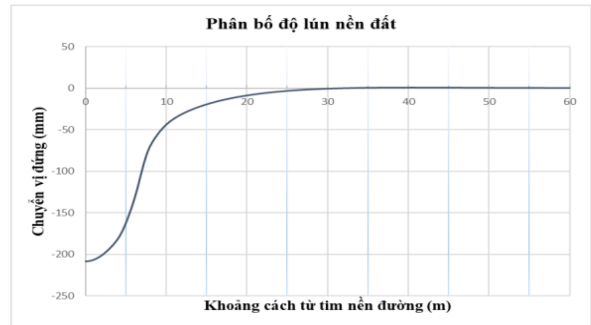
Hình 11. Các thông số của mô hình Mohr-Coulomb

Nhận thấy chuyển vị lớn nhất của nền xảy ra tại vị trí tim nền đường, và càng ra xa chuyển vị càng giảm (Hình 12).



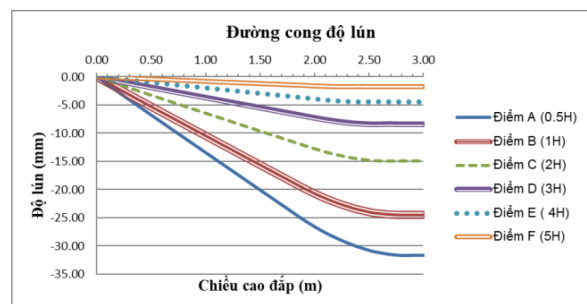
Hình 12. Phân bố chuyển vị của nền đất dưới tác dụng của tải đắp

Biểu đồ phân bố độ lún chỉ ra rằng, tại khoảng cách khoảng 30m tính từ tim đường độ lún nền gần như triệt tiêu (Hình 13). Tại biên mô hình khoảng cách 60m, nền đất không ghi nhận chuyển vị theo phương thẳng đứng, cho thấy bề rộng mô hình được lựa chọn là đủ lớn để loại trừ ảnh hưởng của điều kiện biên đến kết quả tính toán.



Hình 13. Phân bố độ lún của nền đất

Kết quả phân tích cho thấy chuyển vị đứng tại các điểm khảo sát có xu hướng tăng tuyến tính theo chiều cao nền đắp và đạt cực đại khi nền đắp đến chiều cao thiết kế (Hình 14). Tại các vị trí A, B, C và D, tương ứng với khoảng cách đến chân ta-luy là  $0.5H$ ,  $1H$ ,  $2H$  và  $3H$ , độ lún ghi nhận được lần lượt là 32mm, 25mm, 15mm và 8.5mm, phản ánh rõ rệt ảnh hưởng của nền đường đắp đến nền đất lân cận. Trong khi đó, tại các vị trí E và F (cách chân ta-luy lần lượt  $4H$  và  $5H$ ), độ lún giảm đáng kể, chỉ còn 4.9mm và 1.8mm, cho thấy mức độ ảnh hưởng của nền đắp đến chuyển vị nền đất suy giảm nhanh theo khoảng cách.

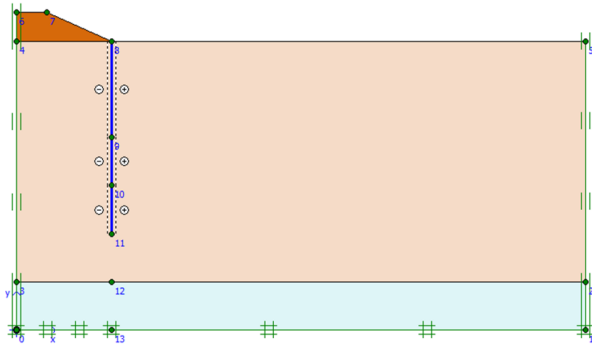


Hình 14. Đường cong độ lún điểm A, B, C, D, E, F

### 3.2 Phân tích số PTHH giải pháp sử dụng tường cọc thép có chiều dài bằng nhau

Các thông số hình học và đặc trưng cơ học

của nền đất cũng như vật liệu đắp được giữ nguyên như đã trình bày ở các phần trước. Hệ tường cọc thép có chiều dài 20m được bố trí tại vị trí chân ta-luy và cắm sâu vào nền đất nhằm tăng cường ổn định cho khối đắp (Hình 15). Các thông số kỹ thuật đầu vào của tường cọc trong phần mềm PLAXIS được trình bày trong (Hình 16). Bài toán được tiến hành phân tích bằng mô hình phần tử hữu hạn hai chiều (2D) với lưới rời rạc hóa phù hợp.



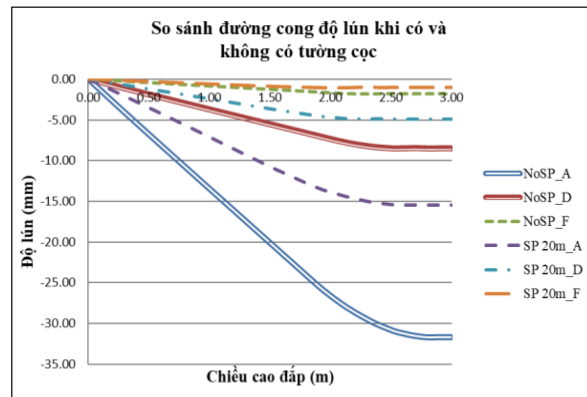
Hình 15. Mô hình hóa bài toán tường cọc thép

Property	Unit	Value
<b>Material set</b>		
Identification		SP-3W
Comments		
Colour		RGB 0, 0, 255
<b>Properties</b>		
d	m	0.1160
$\gamma$	$\text{kN/m}^3$	49.00
Linear		<input checked="" type="checkbox"/>
Isotropic		<input checked="" type="checkbox"/>
End bearing		<input type="checkbox"/>
$E_1$	$\text{kN/m}^2$	210.0E6
$E_2$	$\text{kN/m}^2$	210.0E6
$\nu_{12}$		0.3100
$G_{12}$	$\text{kN/m}^2$	80.15E6
$G_{13}$	$\text{kN/m}^2$	80.15E6
$G_{23}$	$\text{kN/m}^2$	80.15E6
Rayleigh $\alpha$		0.000
Rayleigh $\beta$		0.000

Hình 16. Đặc tính cơ lý của tường cọc thép

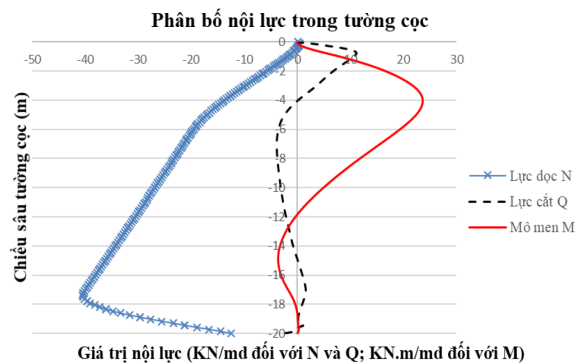
Đường cong quan hệ giữa độ lún và chiều cao nền đắp tại các vị trí A, D và F được so sánh trong Hình 17. Kết quả cho thấy việc sử dụng tường cọc mang lại hiệu quả rõ rệt trong việc giảm thiểu chuyển vị lún của nền đất lân cận, với mức độ suy giảm lên đến khoảng

50% so với trường hợp không áp dụng giải pháp gia cố bằng tường cọc.



Hình 17. So sánh đường cong độ lún khi có và không có tường cọc

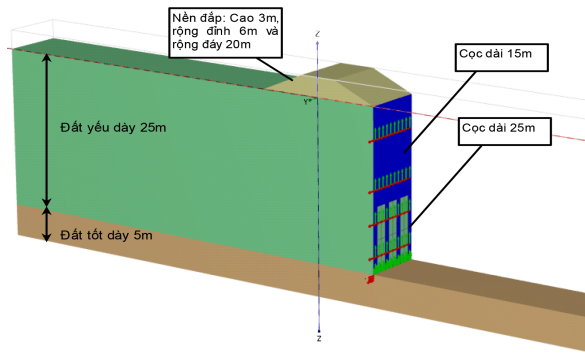
Bên cạnh đó, nội lực dọc trong tường cọc có xu hướng tăng gần tuyến tính theo chiều sâu và đạt giá trị cực đại tại khu vực gần mũi cọc. Mô men uốn trong cọc đạt giá trị lớn nhất tại vùng cách đỉnh cọc khoảng 1/5 chiều dài cọc, phản ánh vị trí chịu uốn lớn nhất do tương tác giữa nền đất và kết cấu cọc (Hình 18).



Hình 18. Phân bố nội lực tường cọc theo chiều sâu

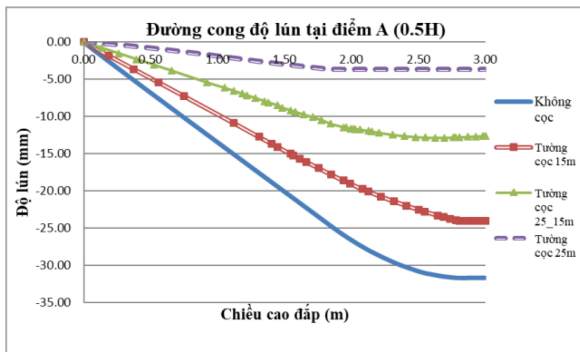
### 3.3 Phân tích số PTHH giải pháp sử dụng tường cọc thép có chiều dài không bằng nhau

Các thông số hình học, đặc tính vật liệu của đất nền và đất đắp đã được trình bày ở trên. Tường cọc thép kết hợp bởi cọc có chiều dài 25m và 15m bố trí tại chân ta luy của nền đắp như (Hình 19). Sử dụng mô hình 3D các phần tử tiếp xúc được gán dọc theo tường cọc để mô phỏng sự trượt tách giữa tường cọc và nền đất.

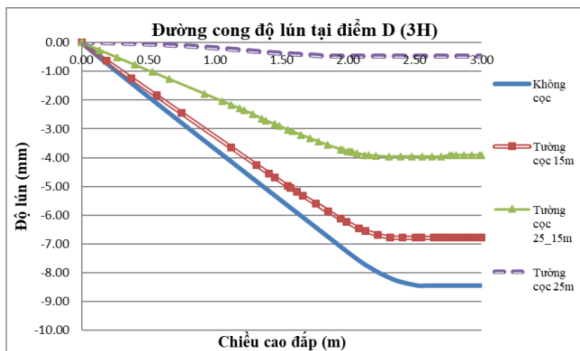


Hình 19. Giải pháp sử dụng tường cọc kết hợp

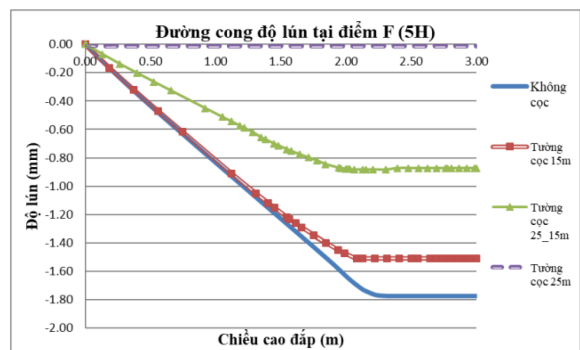
Kết quả cho thấy hiệu quả của tường cọc dạng kết hợp giảm thiểu ảnh hưởng của nền đắp đến chuyển vị lún của các điểm A, D, F là rõ rệt thể hiện ở (Hình 20, 21 và 22).



Hình 20. Đường cong lún tại điểm A khi sử dụng các giải pháp tường cọc khác nhau



Hình 21. Đường cong lún tại điểm D khi sử dụng các giải pháp tường cọc khác nhau



Hình 22. Đường cong lún tại điểm F khi sử dụng các giải pháp tường cọc khác nhau

#### 4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) nhằm phân tích ảnh hưởng của nền đắp đến biến dạng lún tại khu vực lân cận, đặc biệt trong bối cảnh có sự hiện diện của các công trình nhạy cảm với lún tổng và lún lệch. Việc đánh giá chính xác mức độ ảnh hưởng là cơ sở quan trọng để đề xuất các giải pháp kiểm soát biến dạng trong quá trình xây dựng nền đường.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất giải pháp sử dụng tường cọc thép nhằm giảm thiểu tác động bất lợi của nền đắp đường ô tô đến các công trình lân cận. Hệ tường cọc có thể được thi công từ cọc ván hoặc cọc ống thép, với chiều dài đồng nhất hoặc không đồng nhất tùy thuộc vào điều kiện địa chất và yêu cầu kỹ thuật.

Đầu tiên, mô hình PTHH hai chiều (2D) được sử dụng để đánh giá hiệu quả kỹ thuật của phương án tường cọc có chiều dài đồng nhất. Kết quả phân tích cho thấy giải pháp này giúp giảm đáng kể biến dạng lún trong khu vực lân cận, đồng thời đảm bảo hiệu quả về mặt ổn định và kiểm soát dịch chuyển nền đất.

Tiếp theo, mô hình PTHH ba chiều (3D) được áp dụng để phân tích phương án tường cọc kết hợp có chiều dài không đồng nhất. Kết quả cho thấy phương án này mang lại hiệu quả kỹ thuật vượt trội trong việc giảm thiểu biến dạng lún, đặc biệt trong các điều kiện địa hình và địa chất phức tạp, qua đó khẳng định tính khả thi và ưu việt của giải pháp tường cọc kết hợp trong thực tiễn thi công nền đắp đường giao thông.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Châu Ngọc Ân, Lê Văn Pha, “Tính toán hệ kết cấu bảo vệ hố móng sâu bằng phương pháp xét sự làm việc đồng thời giữa nền đất và kết cấu”, *Tạp chí Phát triển KH&CN*, Tập 10, 2007.

[2] Almedia M. S. S., Hosseinpour I., Riccio M. and Alexiew D., “Behavior of geotextile-encased granula columns supporting test embankment on soft deposit”, *Journal*

- of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(3), 2014, p.04014116.
- [3] Baykal G., Edincliler A. and Saygili A., “Highway embankment construction using fly ash in cold regions”, *Resources Conservation and Recycling*, 42, 2009, pp.209-222.
- [4] Hosseinpour I., Almedia M. S. S., and Riccio M., “Full-scale load test and finite-element analysis of soft ground improved by geotextile-encased granular columns”, *Geosynthetics International*, 22(6), 2015, pp. 428-438.
- [5] Indraratna B., Kan M. E., Potts D., Rujikiatkamjorn C. and Sloan S. W., “Analytical solution and numerical simulation of vacuum consolidation by vertical drains beneath circular embankments”, *Computers and Geotechnics*, 80, 2016, pp. 83-96.
- [6] Zheng J. J., Chen B. G., Lu Y. E., Abusharar S. W. and Yin J. H., “The performance of an embankment on soft ground reinforced with geosynthetics and pile walls”, *Geosynthetics International*, 16(1), 2009, pp.1-10.
- [7] Yoon S., Prezzi M., Siddiki N. Z. and Kim B., “Construction of a test embankment using a sand-tire shred mixture as fill material”, *Waste Management*, 26, 2006, pp.1033-1044.
- [8] Plaxis BV., “*Plaxis 3D*”, Netherlands User Manuals, 2013.
- [9] Nguyễn Việt Trung, Nguyễn Thị Bạch Dương, “*Phân tích kết cấu hầm và tường cừ bằng phần mềm Plaxis*”, Nhà xuất bản Giao thông vận tải, Hà Nội, năm 2009.
- [10] Võ Phán, Ngô Đức Trung, “Phân tích chuyển vị tường chắn ổn định hố đào sâu”, *Tạp chí Xây dựng*, Hà Nội, 2015.
- [11] Wiberg N.E., “Matrix structural analysis with mixed variables”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 8(1), 1974, pp. 167-194.