

**NGHIÊN CỨU SỰ TƯƠNG TÁC GIỮA KẾT CẤU - ĐẤT NỀN
CHO MÓ CẦU ĐƯỢC XÂY DỰNG TRÊN MÓNG CỌC
QUA NỀN ĐẤT YẾU TỪ MÔ PHỎNG SỐ 3D**

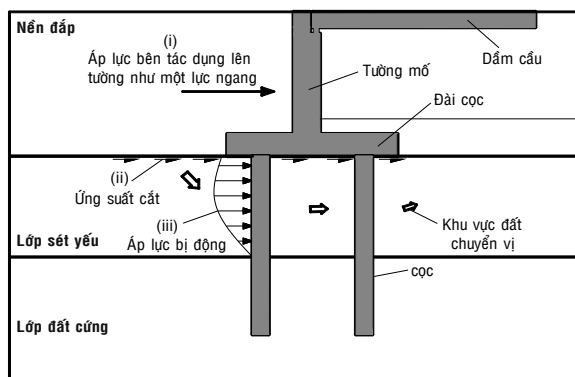
Phạm Anh Tuấn¹

Tóm tắt: Sự tương tác giữa các bộ phận kết cấu với đất nền liên quan đến sự làm việc của móng cầu được xây dựng trên móng cọc đi qua nền đất yếu là một vấn đề phức tạp và thách thức với các kỹ sư thiết kế. Phạm vi của bài báo này sẽ tập trung vào việc phân tích móng cầu chấn nền đắp cao với phần mềm số sẵn có thông qua phương pháp phần tử hữu hạn và các mô hình đất cải tiến. Các dữ liệu về thí nghiệm centrifuge được sử dụng như một nguồn kết quả tham khảo. Chuyển vị và momen uốn của cọc, và momen uốn của tường chắn là được lựa chọn cho việc so sánh, thảo luận bởi vì chúng là những thông số quan trọng nhất cho việc quan trắc theo dõi và thiết kế. Các kỹ thuật mô hình đặc biệt và các mô hình đất cải tiến đã được sử dụng trong nghiên cứu số để xem xét các ứng xử đại diện. Tuy nhiên, khi mà các phần tử mã hay kỹ thuật sử dụng trong phân tích FE của hệ chưa dễ dàng để tiếp cận với thực tế, thì nó vẫn là khó khăn để làm việc với chúng trong quá trình thiết kế. Do đó, kết quả của nghiên cứu này hướng đến cung cấp một số hướng dẫn cơ bản và mang lại cái nhìn thực tế hơn về cơ chế tương tác vào trong quá trình thiết kế.

Từ khóa: Phương pháp số 3D, móng cầu đắp cao, tương tác kết cấu-đất nền, momen uốn.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Vấn đề thiết kế móng cầu chấn nền đắp cao trên móng cọc đi qua nền đất yếu là một vấn đề khó khăn và thách thức đối với các kỹ sư địa kỹ thuật bởi cường độ chịu nén và kháng cắt thấp, tính nén lún cao và hệ số thấm thấp của nền sét yếu (Stewart et.al, 1993), (De Beer et.al, 1972). Mức độ cố kết của lớp sét yếu bởi tải trọng phía trên và hiện tượng dồn đất giữa các cọc là những nguyên nhân gây ra chuyển vị và momen uốn của cọc. Trong một số trường hợp thì khả năng chịu tải bị vượt quá giới hạn và sự phá hoại kết cấu là xảy ra.



Hình 1. Mô hình áp lực bên tác dụng lên tường móng

Các nghiên cứu dựa trên mô hình vật lý đã giúp mở rộng sự hiểu biết về tương tác giữa cọc và đất nền dưới tải trọng liên tục (Tschebotarioff, 1973). Nó đã giúp đỡ để tập trung nỗ lực vào việc xây dựng mô hình số gần với thực tế để đạt được kết quả tốt hơn và tạo ra những đóng góp hữu ích hơn cho quá trình mô

¹ Khoa Xây dựng Cầu đường, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng

hình số của một mô cầu có móng cọc hỗ trợ. Vì vậy các phần tử liên kết đã được yêu cầu cụ thể và chặt chẽ để cho phép thể hiện được việc truyền tải giữa đất và tường cũng như kết quả. Thêm vào đó, (Ellis and Springman, 2001), và (Branbys and Springman, 1996) đã định nghĩa ứng xử của đất sét bằng một mô hình phức tạp thay thế gọi là SDMCC(Strain Dependent Modified Cam-Clay).

Một trong những mục tiêu của bài báo này là sử dụng phần mềm phần tử hữu hạn có sẵn và các mô hình đất để phân tích cho các vấn đề mô cầu. Mô hình không gian 3 chiều được tiếp cận và sử dụng để tránh sử dụng phương pháp tương đương 2D của Randolph. Springman đã có những nghiên cứu về phần mềm FE 3D với một số kết quả thành công đã cung cấp một cái nhìn lạc quan trong việc sử dụng những phần mềm FE sẵn có. Plaxis 3D V2.1 được lựa chọn để phân tích trong nghiên cứu này.

Các dữ liệu thí nghiệm từ 4 thí nghiệm ly tâm khác nhau (centrifuge tests)(Ellis EA, 1997) đã được sử dụng như là một kết quả tham khảo. Kết quả mô phỏng số (FE) cho chuyển vị đứng và chuyển vị ngang của nền đất, chuyển vị ngang và momen uốn của cọc, momen uốn của tường móng là được trình bày trong bài báo này.

2. MÔ HÌNH THÍ NGHIỆM VÀ MÔ PHỎNG SỐ 3D

2.1. Mô hình thí nghiệm

4 thí nghiệm centrifuge (EAE4-EAE5-EAE6-EAE7) đã được tiến hành để nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày của lớp sét và tỷ lệ chiều cao nền đắp xây dựng sau lưng tường móng cầu. Việc thoát nước thẳng đứng đã được sử dụng trong toàn bộ thí nghiệm nhưng một trong những mục đích là để đẩy nhanh quá trình phân tán áp lực nước lỗ rỗng. (Ellis, 1997), (Ellis and Springman, 2001) đã mô tả chi tiết của chương trình thí nghiệm, những hướng dẫn và quá trình mô hình. Thời kỳ cố kết cuối cùng được tính toán là 1000 ngày kể từ lúc bắt đầu xây dựng (tương đương 2.4h đối với tỷ lệ của mô hình) cho toàn bộ thí nghiệm.

2.2. Mô hình phần tử hữu hạn (FE Model)

Toàn bộ bốn mô hình thí nghiệm centrifuge (EAE4-EAE5-EAE6-EAE7) đã được mô hình và phân tích với việc sử dụng phần mềm FE Plaxis 3D Foundation v2.1(Brinkgreve, 1997). Sơ đồ địa chất, các phần tử kết cấu và thoát nước thẳng đứng được minh họa trên hình 2.

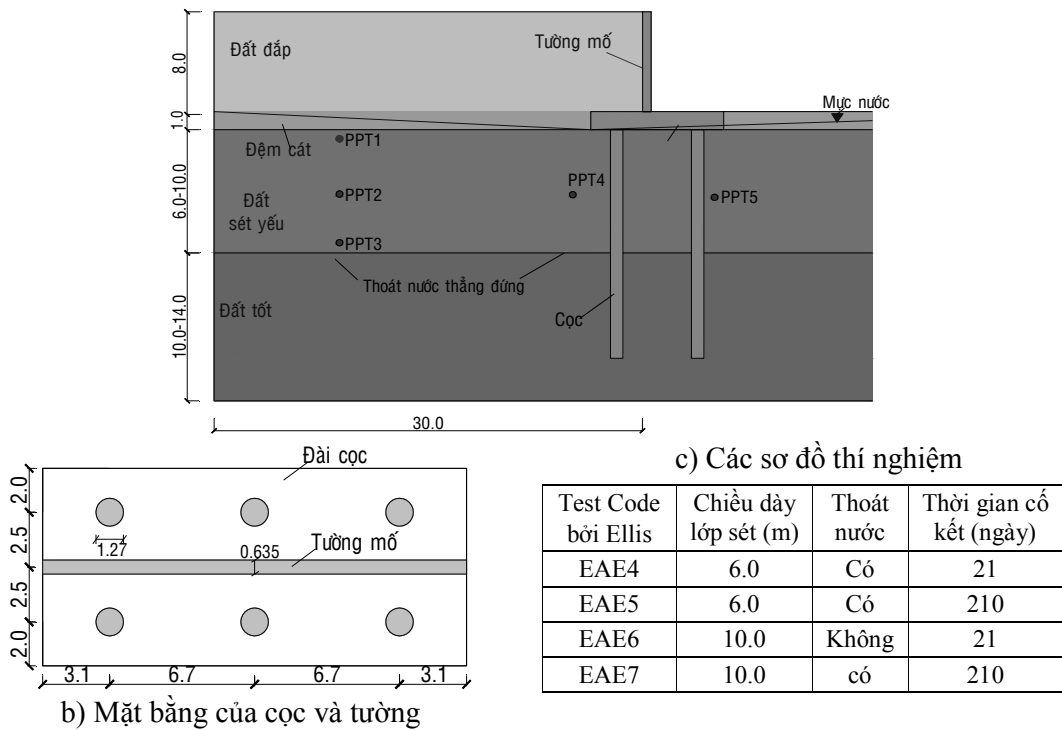
2.3. Các lớp đất

Mô hình đất Mohr-coulomb đàn hồi dẻo tuyến tính được lựa chọn cho nền đất đắp, lớp đệm cát và lớp đất tốt như được đề xuất bởi (Kelesoglu and Springman, 2011). Cơ bản dựa trên các khuyến nghị của (Ellis, 1997) và (Stroud, 1971) về việc mô hình cường độ của lớp đất đắp và lớp đất tốt với góc ma sát là 35° . Độ cứng của các lớp đất ở đây được định nghĩa là sử dụng giá trị của modulus kháng cắt đạt được từ mối quan hệ hyper-bolic dựa trên mức độ biến dạng dự đoán và tỷ lệ tăng ứng suất hiệu quả theo chiều sâu đã được cố định. (Ellis and Springman, 2001) đã biến đổi công thức Boltons để dự tính modulus đàn hồi lớn nhất và dữ liệu từ Isawaki et al. cũng đã được sử dụng để xác định sự thay đổi modulus kháng cắt theo sự tăng biến dạng cắt. $G_s (MN/m^2) = 10+3z$ với z là chiều sâu thẳng đứng tính từ đỉnh lớp sét (m). Modulus của đất đắp được định nghĩa như $G_c(MN/m^2) = 4+0.5Z$ với Z tính từ bề mặt nền đắp và các giá trị này được sử dụng trong mô hình 3D. Hệ số poisson được chọn bằng 0.3 và dung trọng đơn vị của đất đắp là $17.5kN/m^3$

Lớp đất sét yếu được mô hình theo cả Hardening soil (HS) và mô hình Soft soil creep. (Ellis, 1997) đã cung cấp thông số cho cả hai mô hình trong bảng 1. Tỷ lệ C_a/C_c được xác định nằm giữa 0.012 và 0.015, ở đây C_a và C_c tương ứng là các chỉ số nén cố kết sơ cấp và thứ cấp.

2.4. Mô hình ứng suất ban đầu và các giai đoạn gia tải

Hệ số quá cố kết OCR đạt được ở giữa lớp sét dày 6m và 10m lần lượt tương ứng là 6.5 và 4.9. Lớp đệm cát, thoát nước thẳng đứng (bắc thắm), kết cấu được phân tích theo giai đoạn.

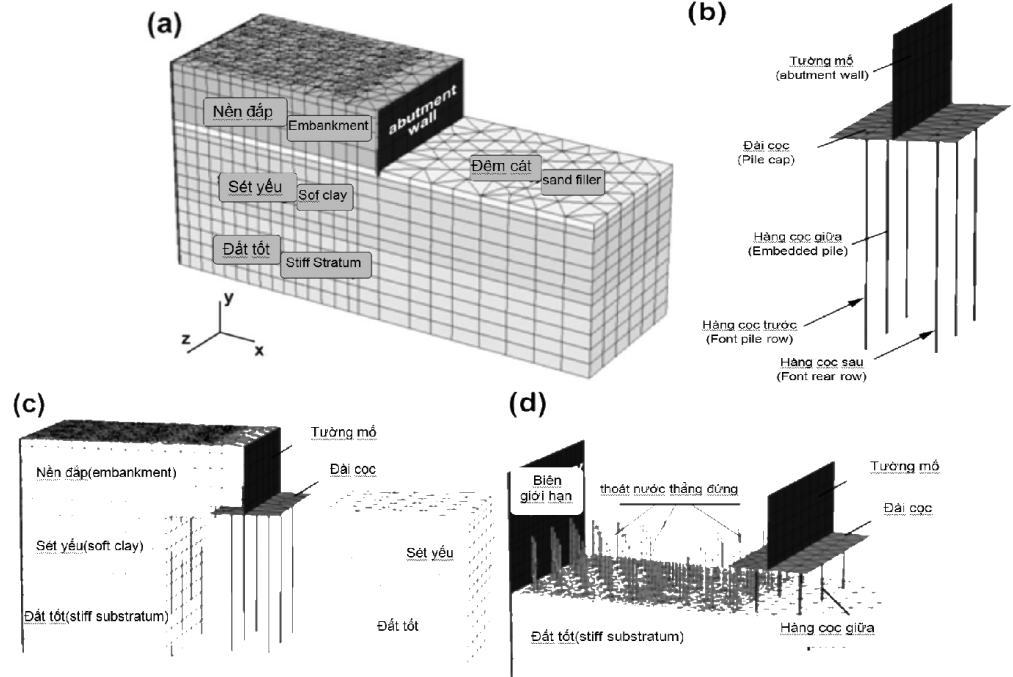


Hình 2. Trình bày sơ lược mô hình thí nghiệm centrifuge (mô hình gốc của Ellis, 1997)

2.5. Các phần tử kết cấu

Momen quán tính của các phần tử cọc, mũ cọc và tường mố lần lượt tương ứng là 0.073, 0.0833, 0.0213 m⁴. Giá trị Young modulus được sử dụng cho vật liệu kết cấu là 70GN/m², độ

cứng chống uốn là được tính toán lần lượt là 5.11, 5.83, và 1.49 GNm² cho cọc, đài cọc và tường mố; những giá trị này tương đối hợp lý với các giá trị tương đương cho kết cấu bê tông cốt thép theo mô hình thực.



Hình 3. Mô hình phân tích trong phần mềm FE Plaxis 3D Foundation v2.1

Bảng 1. Các thông số của đất và kết cấu được sử dụng trong phân tích số FE

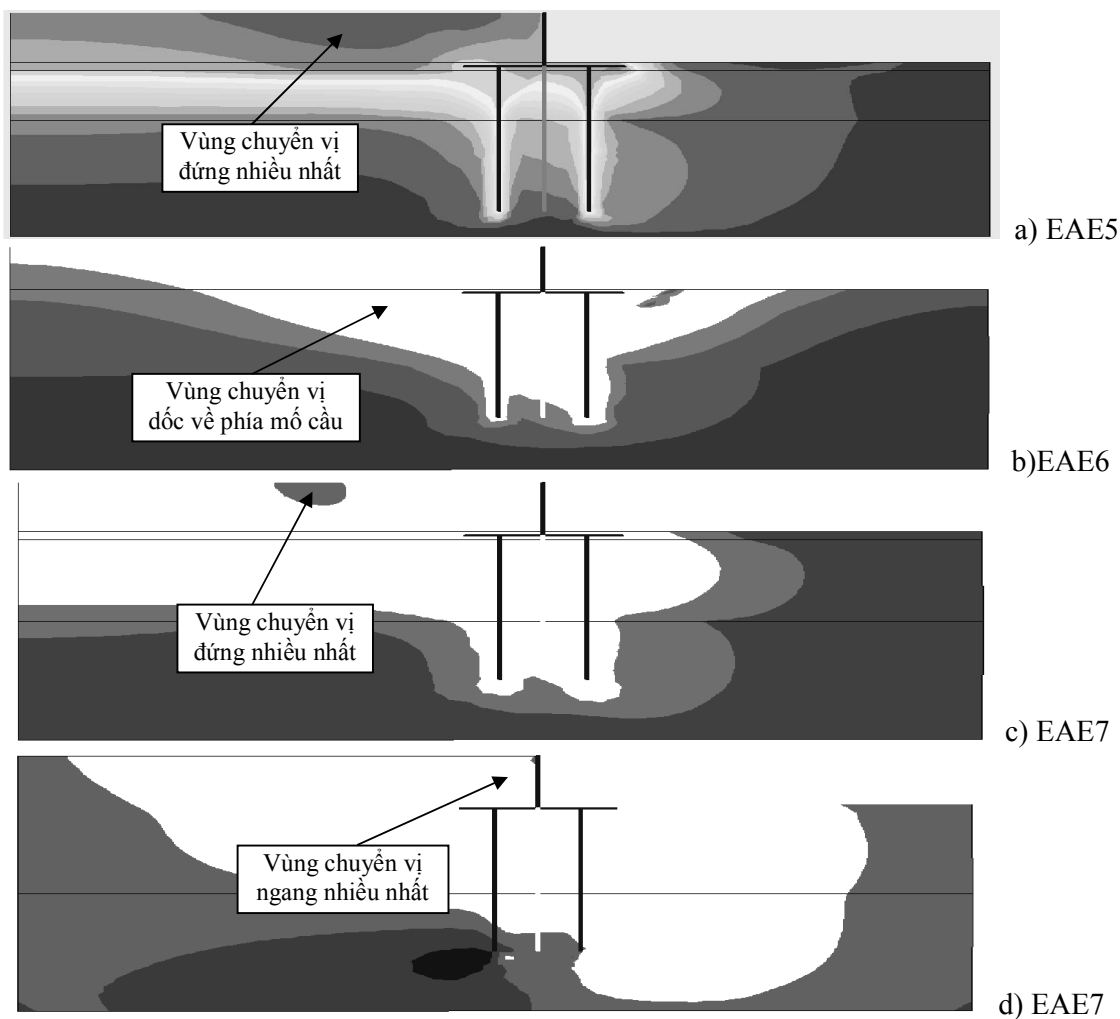
	γ (kN/m ³)	k_x, k_z (m/s)	k_y (m/s)	C_c	C_s	C_α	e_{init}	c' (kPa)	ϕ' (°)	ψ (°)	ν
Lớp Sét	16.6	2.66×10^{-9}	1.33×10^{-9}	0.43	0.07	0.006	1.33	1.0	23	0.0	0.35
	γ (kN/m ³)	k_x, k_z, k_y (m/s)	E_{ref}^* (kPa)	E_{inc} (kPa)	e_{init}	c' (kPa)	ϕ' (°)	ψ (°)	ν		
Đất Cát	19.5	Drain material	26.0/57.0	7.8	0.67	1.0	35	5	0.3		
Đất đắp	17.5	Drain material	10.5	1.3	0.50	1.0	35	5	0.3		

3. CÁC KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Sự phân bố ứng suất và chuyển vị

Hình 4a và 4b đã thể hiện vùng bao của biến dạng và chuyển vị ở thời điểm cuối của quá trình xây dựng và quá trình cố kết tương

ứng. Kết quả cho phép đưa đến một số kết luận rằng: Hiệu ứng vòm đã phát triển bao quanh cả lớp cát phía trên lớp sét và là nguyên nhân làm giảm ứng suất theo phương ngang dưới nó.



Hình 4. Sự phân bố ứng suất và chuyển vị đứng trong các trường hợp EAE5-EAE6-EAE7

Các biểu đồ bao chuyển vị trên hình 4 đã thể hiện sự khác biệt trong việc phân bố ứng suất giữa các mô hình. Với mô hình EAE5, cơ chế phân bố ứng suất tập trung nhiều nhất vào gần khu vực gần móng cầu nhưng khi chiều dày lớp sét tăng lên thì sự phát triển ứng suất về chiều sâu

càng lớn thay thế cho sự phát triển về bề rộng (EAE7). Ngược lại, sự phát triển ứng suất tập trung mạnh theo hướng đẩy dòn về phía móng cầu trong mô hình không có thoát nước (EAE6). Trong khi đó, chuyển vị ngang xuất hiện lớn nhất lại tập trung tại vị trí tường chắn của móng

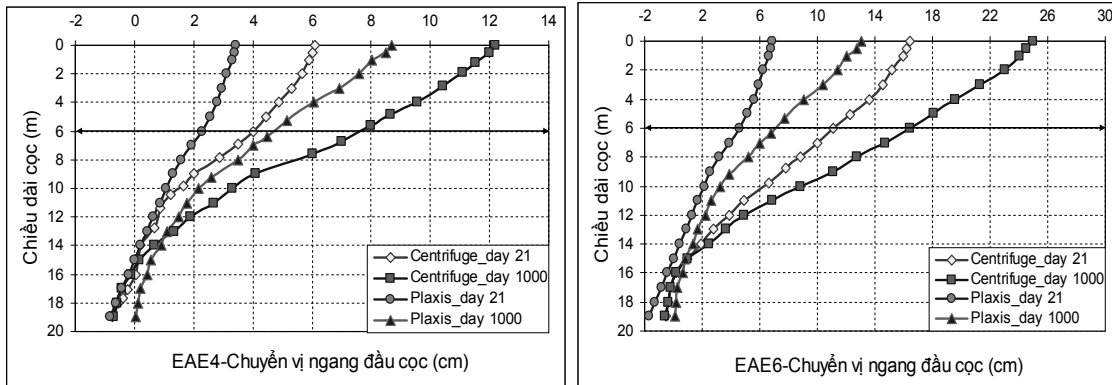
cầu và biểu đồ chuyển vị khá gần với biểu đồ momen uốn của tường chắn (hình 4d).

3.2. Chuyển vị ngang của cọc

Hình 5 thể hiện kết quả sơ lược về chuyển vị ngang của cọc từ dữ liệu thí nghiệm centrifuge và phần mềm Plaxis 3D cho hàng cọc phía trước (front row) xuyên qua các lớp sét dày 6m và 10m ở cuối giai đoạn xây dựng (21 ngày) và ở cuối giai đoạn cố kết (1000 ngày) tương ứng. Tuy nhiên đã có một sự sai khác nhiều giữa kết quả tính toán (Plaxis 3D) và đo đạc (centrifuge) cho chuyển vị ngang đầu cọc. Sự khác biệt giữa hai kết quả tính toán và đo đạc chuyển vị ngang đầu cọc là khoảng 50 ÷ 65%, điều này là có một mối liên kết chặt chẽ với chuyển vị ngang của đất (50 ÷ 60%). Mô hình đất đẳng hướng không đầy đủ SSC đã ảnh hưởng mạnh mẽ đến việc

tính toán chuyển vị ngang đầu cọc khi mô phỏng nền đất sét ứng xử dị hướng.

Giá trị chuyển vị trên hình 5 cũng cho thấy chuyển vị ngang đầu cọc trong trường hợp không thoát nước (EAE6) là cao hơn đáng kể so với mô hình thoát nước (EAE4) ở cả thời điểm cuối giai đoạn xây dựng và giai đoạn cố kết, trong khoảng như sau: ($\approx 64\%$ - centrifuge - 21 ngày), ($\approx 46\%$ - Plaxis - 1000 ngày), ($\approx 50\%$ - centrifuge-1000 ngày), ($\approx 35\%$ - Plaxis - 1000 ngày). Bên cạnh đó, trong mô hình không thoát nước (EAE6), chuyển vị đầu cọc là lớn hơn do sự phân bố ứng suất dốc phía mũi cọc và vị trí trục trung hòa nằm trong chiều sâu từ 12-16m đối với cả mô hình EAE4 và EAE6. Kết quả này có một sự phù hợp tốt với biểu đồ phân bố ứng suất trong hình 5.



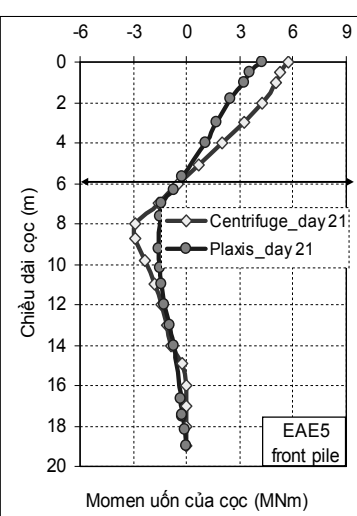
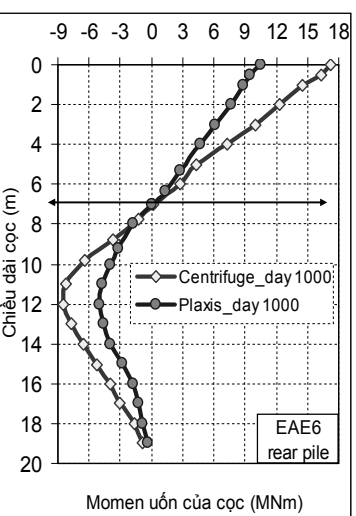
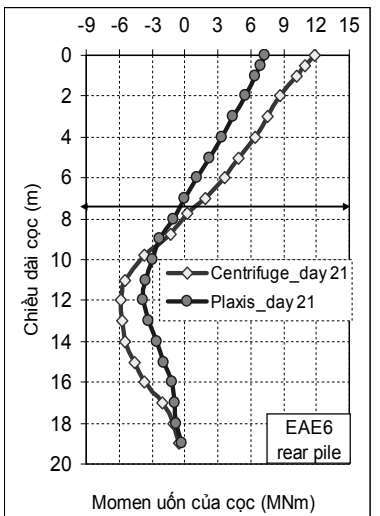
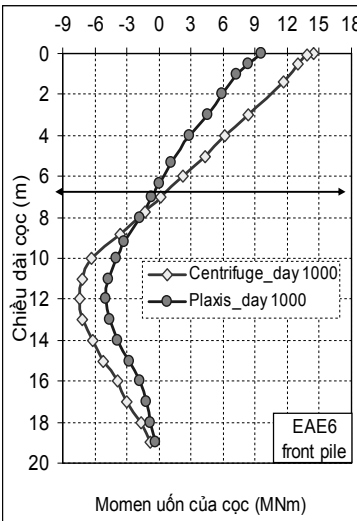
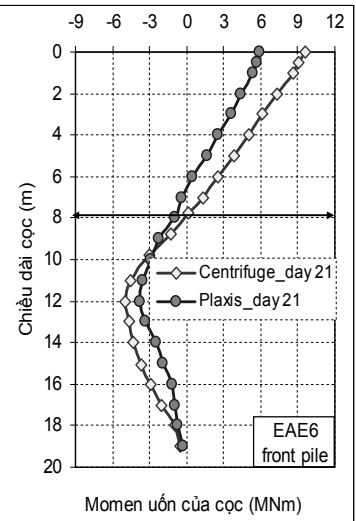
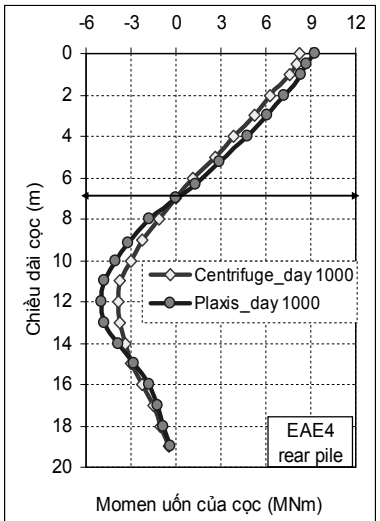
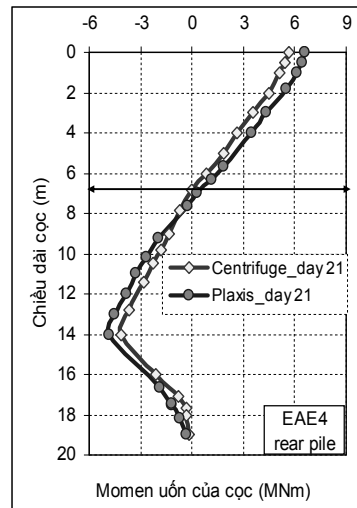
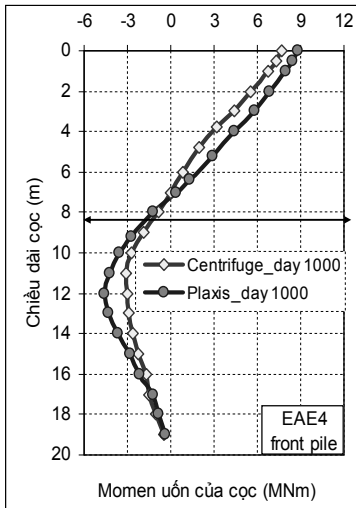
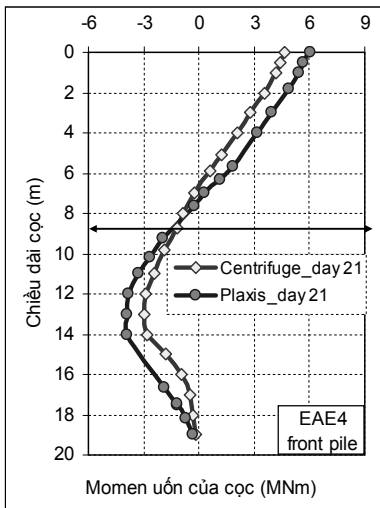
Hình 5. Chuyển vị ngang đầu cọc cho trường hợp EAE4 và EAE6

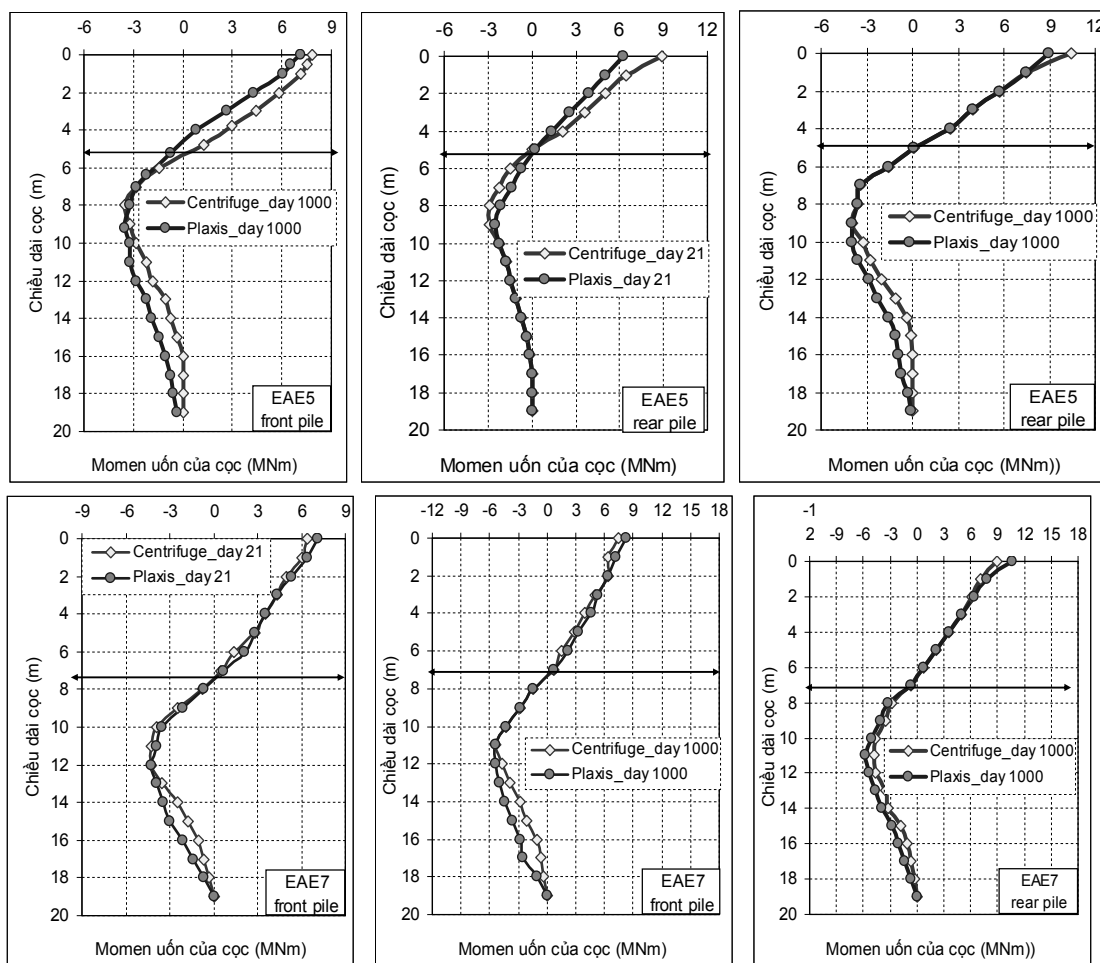
3.3. Momen uốn của cọc

Momen uốn của hàng cọc trước và hàng cọc sau trong mô cầu đạt được từ hai phương pháp khác nhau (centrifuge-Plaxis 3D) là được gửi đến trong hình 6 cho quá trình đập nhanh và đập chậm tương ứng, cũng như cho thời điểm cuối giai đoạn xây dựng và cố kết. Không giống như kết quả trước đây (sự phân bố áp lực nước lỗ rỗng, chuyển vị ngang của đất hay của cọc), sự phân bố momen uốn của cọc theo kết quả đo đạc và tính toán là khá tương tự. Các kết quả thí nghiệm centrifuge thể hiện rằng momen uốn của cọc có mối liên hệ chặt chẽ với nền đất sét yếu và nền đất tốt phía dưới mũi cọc.

Thêm vào đó, giá trị momen uốn lớn nhất là cao hơn ở hàng cọc phía sau (rear row) so với

hàng cọc phía trước (front pile) trong tất cả các kết quả tính toán. Điều này đã bị ảnh hưởng bởi vị trí số lực cắt ở trên đỉnh của hàng cọc sau cao hơn hàng cọc trước và vì áp lực đất bị động trong lớp sét. Giá trị momen uốn ở trên đỉnh cọc đã tăng lên vào cuối giai đoạn cố kết $\approx 43 \div 56\%$ cho nền sét dày 6m và $\approx 22 \div 53\%$ cho nền sét dày 10m, đập nhanh. Mức tăng này là khoảng 16 ÷ 22% cho nền đập chậm, trong khi giá trị momen uốn ở cuối giai đoạn cố kết trong mô hình đập chậm lại nhỏ hơn so với mô hình đập nhanh. Vị trí trục trung hòa gần như nằm tại vị trí 6-7m trong tất cả các biểu đồ. Mặc dù kết quả chuyển vị ngang có sự khác biệt đáng kể thì giá trị momen uốn lại có sự phù hợp chặt chẽ giữa kết quả tính toán và đo đạc.





Hình 6. Momen uốn của cọc cho mô hình đắp nhanh EAE4-EAE6(21 ngày) và đắp chậm EAE5-EAE7 (210 ngày) ở thời điểm 21 ngày và 1000 ngày

4. NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ TRONG MÔ HÌNH

Trong một số trường hợp, sự thiếu chính xác trong việc dự tính các thông số của đất có thể dẫn đến sự khác biệt về kết quả giữa tính toán và đo đạc trở nên nhiều hơn. Do đó, một nghiên cứu dựa trên một tỷ lệ thu nhỏ đã được tiến hành để xem xét mức độ ảnh hưởng của các thông số đất nền đến kết quả chuyển vị, momen uốn của cọc và đất nền. Trong đó, mô hình EAE6 được lựa chọn như một mô hình tham khảo, ở đây các thông số về cường độ và độ cứng của nền đắp, của nền sét yếu và lớp đất tốt sẽ được thay đổi để xem xét.

- Độ cứng của nền đắp đã được định nghĩa theo $G_e=4+0.5Z$ (MN/m^2), ở đây G_e là mô đun kháng cắt của vật liệu nền đắp và tăng tuyến

tính theo chiều sâu. Khi mô đun kháng cắt thay đổi từ 4 đến 8 MN/m^2 thì chuyển vị ngang của lớp sét yếu, cọc, tường mô và momen uốn của cọc đã tăng lên trong khoảng 3 đến 7%. Kết quả này cũng đạt được tương tự khi thay thế góc trượt nở ψ từ 5^0 lên 10^0 .

- Chỉ số nén thứ cấp của đất sét đã có một ảnh hưởng đáng kể lên chuyển vị ngang của nền đất. Nếu như chỉ số C_α tăng lên 3 lần so với giá trị ban đầu ($C_\alpha=0.0018$) thì chuyển vị ngang của đất và cọc trong phân tích số đã tăng lên, vượt đến giá trị gần với thí nghiệm centrifuge. Chuyển vị ngang đầu cọc đã tăng lên đến 32% (từ 15.9 lên 21.1cm) và chuyển vị ngang của nền đất tăng 58% (từ 23.8 lên 37.7cm).

- (Ellis, 1997) đã định nghĩa độ cứng của nền đất tốt sử dụng phương trình cân bằng

$G_s=10+3Z$ (MN/m²). Nghiên cứu ở đây đã được tiến hành để xem xét ảnh hưởng của cả giá trị độ cứng ban đầu (10MN/m²) và giá trị thay đổi theo chiều sâu (3Z). Kết quả cho thấy cả hai giá trị này đều có ảnh hưởng đến chuyển vị ngang của đất và cọc. Việc giảm giá trị độ cứng ban đầu có thể dẫn đến chuyển vị ngang tăng lên (10%), trong khi đó trị số 3Z chỉ ảnh hưởng khoảng 3%.

- Những thảo luận ở trên đã xác nhận sự thiếu chính xác trong việc dự tính chuyển vị của nền đất-cọc và momen uốn của cọc khi sử dụng các mô hình đất nền đơn giản. Tuy nhiên, nó là rõ ràng rằng việc tính toán hợp lý các thông số độ cứng và cường độ của nền đất tốt có thể mang lại kết quả tốt hơn khi so sánh với dữ liệu từ centrifuge (10%).

5. KẾT LUẬN

Một số kết luận tóm tắt của bài báo sau khi phân tích, so sánh và thảo luận kết quả như sau:

- Không chỉ duy nhất chuyển vị ngang của nền đất mà giá trị chuyển vị ngang của cọc từ mô phỏng số cũng nhỏ hơn so với giá trị đo đạc. Bởi vì trong mô hình đã giả thiết là không có sự xoay nghiêng ở đầu cọc. Một kết quả thích hợp hơn có thể đạt được nếu bổ sung thêm điều kiện này vào mô hình.

- Kết quả mô hình số đã cho thấy rằng hiệu ứng vòm đã có một tác động đáng kể đến sự phân bố tải trọng dọc theo thân lưng tường mố trong thời kỳ dài hạn.

- Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số đã cho thấy giá trị chỉ số nén thứ cấp của lớp sét yếu và độ cứng của nền đất tốt có một ảnh hưởng đáng kể lên chuyển vị cọc-đất và momen uốn của cọc, do đó việc sử dụng giá trị này thích hợp sẽ mang lại kết quả phù hợp hơn với ứng xử thực tế của hệ.

- Sự phân bố momen uốn trên các hàng cọc trước và sau là có sự phù hợp tốt với dữ liệu thí nghiệm centrifuge. Thêm vào đó, giá trị momen uốn lớn nhất ở hàng cọc phía sau (rear pile row) là cao hơn so với hàng cọc phía trước (front pile row) trong tất cả các kết quả tính toán. Điều này là bởi vì trị số lực cắt ở trên đỉnh của hàng cọc sau cao hơn hàng cọc trước. Trị số momen uốn của tường đạt được từ phân tích số FE là hoàn toàn thích hợp với kết quả đo đạc.

- Quá trình đáp nhanh thoát nước đưa đến kết quả chuyển vị ngang và momen uốn của cọc nhỏ hơn so với quá trình đáp chậm không thoát nước, nhưng giá trị momen uốn ở cuối giai đoạn cố kết trong mô hình đáp chậm lại nhỏ hơn so với mô hình đáp nhanh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Bransby MF, Springman SM (1996). *Finite element analysis of pile groups adjacent to surcharge loads*. Compute geotech, 1996, 19, 301-324.
- Brinkgreve RBJ (1997). *Plaxis 3D foundation manual*. Netherlands: Plaxis bv; 1997.
- De Beer EE, Wallays M. (1972). *Forces induced in piles by unsymmetrical surcharges on the soil around the piles*. In: Proceedings of 5th European conference on soilmechanics and foundation engineering, Madrid, 1972. p. 325–32.
- Ellis EA (1997). *Soil-structure interaction for full-height piled bridge abutments constructed on soft clay*. PhD thesis, University of Cambridge; 1997.
- Ellis EA, Springman SM (2001). *Full-height bridge abutments constructed on soft clay Geotechnique* 2001;51:3–14.
- Kelesoglu. K.M, Springman S.M (2011). *Analytical and 3D numerical modelling of full-height bridge abutments constructed on pile foundations trough soft soil*. Computers and Geotechnics 38 (2011), 934-938.
- Stewart DP, Jewell RJ, Randolph MF (1993). *Numerical modelling of piles bridge abutments on soft grounds*. Comput Geotech 1993;15:21–46.

Stroud MA. *The behaviour of sand at low stress levels in the simple shear apparatus*. PhD thesis, University of Cambridge; 1971.

Tschebotarioff GP (1973). *Foundations, retaining and earth structures*. 2nd ed. New York:

Abstract:

**STUDY SOIL-STRUCTURE INTERACTION FOR FULL-HEIGHT PILED BRIDGE
ABUTMENTS CONSTRUCTED ON SOFT SOIL BY NUMERICAL ANALYSIS**

The soil-structure interaction in full-height piled bridge abutments constructed on soft soil is a complex problem and challenge for geotechnical engineers. The scope of this paper is the analysis of full-height bridge abutments on pile foundations, installed through soft soils, with a commercially available finite element software and soil model. Well-documented centrifuge test data were used as reference. Horizontal movements of the soft clay, pile displacements and bending moments, and abutment wall bending moments were chosen for comparison, since they are the most critical parameters for observation and design. This soil-structure interaction problem has been investigated over the last three decades, using either field or centrifuge tests, accompanied by FE analyses. Special modelling techniques and advanced soil models were used in these numerical studies to establish the most representative field behaviour. However, since the codes or techniques used in these advanced FE analyses are neither very practical nor easily accessible, it is difficult to employ them consistently in design. Thus, the results of this study are intended to provide some guidelines for designers, and to bring insight about the interacting mechanisms into the design process.

Keywords: Numerical analysis, piled bridged abutment, soil-structure interaction.

BBT nhận bài: 06/01/2016

Phản biện xong: 10/6/2016