



Nghiên cứu ứng xử của cọc ống thép chịu tải dọc trục sử dụng các mô hình nền khác nhau

■ **ThS. NGUYỄN THANH SANG; PGS. TS. NGUYỄN TƯƠNG LAI**
PGS. TS. HOÀNG QUỐC LONG[✉]; TS. PHẠM ĐỨC TIỆP

Học viện Kỹ thuật Quân sự

Email: [✉]hoanglongcse@gmail.com

TÓM TẮT: Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu sự làm việc của cọc ống thép trong nền đất bão hòa chịu tải trọng dọc trục trong các trường hợp mô hình nền khác nhau, bao gồm mô hình đàn hồi tuyến tính, mô hình đàn dẻo lý tưởng Mohr-Coulomb, mô hình tái bền đơn giản Hardening Soil và mô hình tái bền động học Hypoplastic. Để giải quyết vấn đề đặt ra, nhóm tác giả sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) (FEM) trong môi trường phần mềm Plaxis 3D. Kết quả nhận được cho thấy, khi tính toán theo các mô hình nền khác nhau thì sức kháng của cọc có sự tương đồng khi biến dạng rất nhỏ và nhỏ, nhưng khi biến dạng trung bình và lớn thì sức kháng của cọc trong nền có sự khác biệt đáng kể. Kết quả thu được có giá trị trong nghiên cứu tương tác giữa cọc và đất nói riêng, cũng như trong nghiên cứu móng cọc nói chung.

TỪ KHÓA: Cọc ống thép, ứng xử, cọc chịu kéo, mô hình đàn hồi tuyến tính, mô hình Mohr-Coulomb, mô hình Hardening Soil, mô hình Hypoplastic.

ABSTRACT: This paper presents results to study the work of steel pipe pile in saturated soil subjected to the axially load when application different models for soils. Inclusion, linear elastic model, Mohr-Coulomb model, Hardening Soil model and Hypoplastic model. In order to solve the problem, we rely on a numerical approach with the support of the finite element method (FEM) on Plaxis 3D. The results show that when accounting for different models for soils, the responses of the pile and soil are significantly difference. The results obtained will be worth in the study on the pile-soil interaction as well as in the study on the pile foundation work.

KEYWORDS: Steel pipe pile, responses, tension pile, linear elastic model, Mohr-Coulomb model, Hardening Soil model and Hypoplastic model.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Móng cọc làm việc trong nền hình thành trên cơ chế tương tác giữa đài cọc - cọc - đất nền, bao gồm: sự tương tác giữa cọc và đất; tương tác giữa cọc và cọc; tương tác giữa đất và đài móng và tương tác giữa cọc và đài móng [2]. Trong đó,

tương tác giữa cọc và nền có ảnh hưởng và ý nghĩa rất lớn đến sự làm việc của móng cọc. Tương tác này chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố như đặc điểm của kết cấu công trình, dạng tải trọng tác dụng và đặc biệt là tính chất của nền đất. Để phản ánh một cách khách quan và phù hợp với thực tế tương tác của cọc với nền thì một vấn đề rất quan trọng là xác định và tính toán theo mô hình cơ học vật liệu nền phù hợp [1].

Bài báo trình bày khái quát về nguyên tắc, đặc trưng, các thành phần và khả năng ứng dụng của một số mô hình vật liệu nền, từ đó vận dụng để tính toán sức kháng của cọc ống thép với nền khi chịu kéo tại đỉnh cọc, bao gồm: mô hình đàn hồi tuyến tính, mô hình đàn dẻo lý tưởng Mohr-Coulomb, mô hình đàn dẻo tái bền đơn giản Hardening Soil [1] và mô hình đàn dẻo tái bền động học nâng cao Hypoplastic [2, 3] theo phương pháp PTHH trong môi trường Plaxis 3D.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT BÀI TOÁN SỨC KHÁNG CỦA CỌC TRONG NỀN

Đã có những nghiên cứu và vận dụng mô hình cơ học vật liệu để mô hình hóa quan hệ ứng suất-biến dạng của đất khi tính toán các bài toán tương tác giữa nền đất với kết cấu trong điều kiện đối xứng trục, biến dạng phẳng hoặc điều kiện ba chiều theo phương pháp PTHH hoặc sai phân hữu hạn. Các mô hình này được hình thành trên cơ sở các nguyên lý cơ học dựa trên kết quả thực nghiệm hoặc theo các nguyên tắc lý thuyết. Khả năng và những hạn chế của các mô hình này không phải lúc nào cũng dễ dàng xác định và các yêu cầu để xác định các tham số của mô hình cũng khó thống nhất. Việc nghiên cứu phát triển và hoàn thiện các mô hình vật liệu nền phù hợp với các điều kiện làm việc của công trình trong thực tiễn vẫn đang được các nhà khoa học và các cơ sở nghiên cứu quan tâm đầu tư. Đối với các ứng dụng thực tiễn, việc phân tích để cân đối giữa sự phức tạp của mô hình vật liệu và độ chính xác cần thiết của mô hình tính là vấn đề có ý nghĩa rất quan trọng.

2.1. Mô hình vật liệu nền đàn hồi tuyến tính

Mô hình xét biến dạng của vật liệu nền trong giai đoạn đàn hồi và có ứng xử tuyến tính. Hai tham số cơ bản của mô hình này gồm mô-đun đàn hồi E và hệ số Poisson ν khi vật liệu đẳng hướng. Theo mô hình này, quan hệ ứng suất biến dạng của vật liệu nền tuân theo định luật Hook và có dạng như biểu thức 1 sau: $\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\}$ (1)

Trong đó: Các vector ứng suất $\{\sigma\}$, biến dạng $\{\epsilon\}$ và ma trận vật liệu $[D]$ sẽ có dạng khác nhau tùy theo trạng thái ứng suất - biến dạng của điểm khảo sát.

Đây là mô hình nền cơ bản nhất của môi trường biến dạng. Tuy nhiên, các lời giải theo các mô hình vật liệu khác thường được xây dựng trên cơ sở lời giải của mô hình đàn hồi tuyến tính. Nền đất thường khó thỏa mãn tính chất đàn hồi tuyến tính, nhưng trong thực hành tính toán thường khảo sát lời giải đàn hồi tuyến tính trước khi tiến hành khảo sát với các mô hình phức tạp khác. Mô hình có ý nghĩa vật lý xác định biến dạng đàn hồi khi có sự thay đổi của ứng suất và để tính toán. Nhược điểm mô hình là không mô phỏng được sự giảm bền có thoát nước của đất, khi chịu tải trọng có tính lặp [1].

2.2. Mô hình nền Mohr-Coulomb

Mô hình Mohr-Coulomb là mô hình đàn hồi - thuần dẻo (đàn dẻo lý tưởng) dựa trên cơ sở định luật Hook kết hợp với tiêu chuẩn phá hoại Mohr - Coulomb, thường được sử dụng để mô hình hóa ứng xử của đất và được coi như một mô hình bậc nhất. Theo mô hình này, biến dạng và tốc độ biến dạng được phân tích thành hai thành phần: phần đàn hồi và phần thuần dẻo, với 5 tham số cơ bản, trong đó 2 tham số xác định từ định luật Hooke để thể hiện mối quan hệ giữa gia tăng ứng suất và biến dạng (mô-đun Young E , hệ số Poisson ν), 2 tham số xác định tiêu chuẩn phá hoại (góc ma sát trong φ và cường độ lực dính c) và 1 tham số để mô tả quy luật chảy dẻo (góc trượt nở ψ xuất phát từ việc sử dụng quy luật chảy không liên hợp được sử dụng để mô hình hóa một sự thay đổi thực tế không thể phục hồi về thể tích do cắt).

Để giải các bài toán đàn-dẻo cần thay cho ma trận $[D]$ trong quan hệ ứng suất biến dạng bởi ma trận $[D^{ep}]$ theo quan hệ số gia ứng suất và số gia biến dạng như biểu thức 2: $\{d\sigma\} = [D^{ep}] \cdot \{d\epsilon\}$

Trong đó: $[D^{ep}]$ - Ma trận vật liệu đàn dẻo; $\{d\sigma\}$ - Số gia ứng suất và $\{d\epsilon\}$ - Số gia biến dạng.

2.3. Mô hình nền Hardening Soil

Đây là mô hình đàn dẻo tái bền (tăng bền) dạng Hyperbolic, sử dụng lý thuyết dẻo thay vì lý thuyết đàn hồi, có xét đến đặc tính chảy của đất và biến phá hoại. Mô hình này bao gồm việc tăng cứng ma sát để mô tả biến dạng cắt dẻo trong điều kiện chất tải tăng ứng suất lệch để mô tả biến dạng dẻo thể tích trong điều kiện chất tải đẳng hướng.

Mô hình tuân theo định luật Hook với các tham số (n ; M ; I); hàm tiêu chuẩn bền với các tham số (h_c ; m ; a); hàm thể dẻo với các tham số (m , ψ); hàm tiêu chuẩn dẻo với các tham số (h ; a) và mô-đun tái bền, giảm bền với tham số (C , p). Mô hình có thể khắc phục được nhược điểm của mô hình Mohr - Coulomb trong mô tả ứng xử của đất nền khi làm việc chịu tải - dỡ tải - gia tải lại, có thể mô phỏng ứng xử 3 chiều của phần nền, mô phỏng được sự tăng bền do ứng suất tiếp và ứng suất pháp. Hạn chế của mô hình là không giải thích được sự giảm bền do đặc tính chảy của đất.

2.4. Mô hình nền Hypoplastic

Các mô hình vật liệu đàn dẻo cơ bản cho phép mô phỏng ứng xử phi đàn hồi của vật liệu nền đất thông qua quan hệ giữa tốc độ ứng suất và tốc độ biến dạng của vật liệu, độ cứng của vật liệu biến thiên phụ thuộc vào mức ứng suất hình thành trong vật liệu.

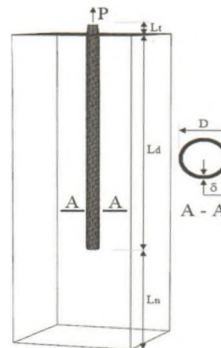
Mô hình có thể mô phỏng tính chất giảm bền có thoát nước, khi chịu tải lặp, mô phỏng được áp lực nước lỗ rỗng và các ứng xử 3 chiều. Các tham số của mô hình có thể từ 8

đến 15 tham số đối với cả nền đất sét và đất cát như (φ_c ; h_c ; n ; e_{do} ; e_{co} ; e_{io} ; α ; β ; m_R ; m_r ; R_{max} ; β_R ; χ and e). Các tham số này có thể được xác định từ thí nghiệm [1, 3, 4].

3. MÔ HÌNH SỐ BÀI TOÁN SỨC KHÁNG CỌC THÉP TRONG NỀN

3.1. Mô hình cọc

Trong bài báo này, nhóm tác giả mô hình cọc ống thép có chiều dài là 25 m (24 m trong nền và 1 m ngoài nền). Đường kính ngoài của cọc là 1 m, chiều dày thành cọc là 0,015 m. Tham số của mô hình cọc được thể hiện như Hình 3.1 và Bảng 3.1 [1, 5].



Hình 3.1: Mô hình cọc nghiên cứu

Bảng 3.1. Tham số của mô hình cọc [1, 5]

Young's modulus	E (kN/m ²)	2.00E+8
Shear's modulus	G (kN/m ²)	7.69E+7
Unit weight	γ (kN/m ³)	78,00
Poisson's ratio	ν	0,300
Pile length	L (m)	25,00
Pile length in soil	L_n (m)	24,00
Pile length on soil	L_{ti} (m)	1,00
Outside diameter	D (m)	1,00
Thickness wall of the pile	t (m)	0,015
Axial stiffness	EA (kN)	1,53E+7
Bending stiffness	EI (kN.m ²)	1,82E+6

3.2. Mô hình nền

Đối tượng nghiên cứu là nền được giả thiết ứng xử theo các mô hình khác nhau như: đàn hồi tuyến tính, Mohr-coulomb, Hardening Soil và Hypoplastic. Tham số của mô hình được xác định trên cơ sở thực nghiệm và các nghiên cứu đã công bố [1, 5, 6] và được thể hiện trong Bảng 3.2 như sau:

Bảng 3.2. Tham số nền theo các mô hình khác nhau [1, 5, 6]

Đàn hồi tuyến tính	-	-	-	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{unsat} (kN/m ³)	n	E (kN/m ²)
	-	-	-	26,16	19,08	0,34	30,86E+3
Mô hình Mohr-Coulomb	ψ (độ)	φ (độ)	c (kN/m ²)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{unsat} (kN/m ³)	n	E (kN/m ²)
	9,52	46,49	1,0	20,38	16,80	0,34	30,86E+3
	-	-	-	-	-	E_{sat} (kN/m ²)	G (kN/m ²)
	-	-	-	-	-	27,78E+3	10,42E+3
Mô hình Hardening Soil	ψ (độ)	φ (độ)	c (kN/m ²)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{unsat} (kN/m ³)	E_{oed}^{ref} (kN/m ²)	E_{so}^{ref} (kN/m ²)
	9,52	46,49	1,00	20,38	16,80	15,0E+3	23,0E+3
	-	-	e_{init}	C_s	C_c	Power (m)	E_{ur}^{ref} (kN/m ²)
	-	-	0,56	4,416E-3	0,029	0,50	90,0E+3
Mô hình Hypoplastic	e_{io}	φ (độ)	e_{co}	e_{do}	n	h_c (kN/m ²)	p_i (kN/m ²)
	1,45	46,49	0,98	0,769	0,18	100E+3	1,00
	e_{co}	β_r	R_{max}	c	m_r ; m_R	β	α
	0,56	0,80	0,40E-3	5,00	7,0; 2,5	1,80	0,35

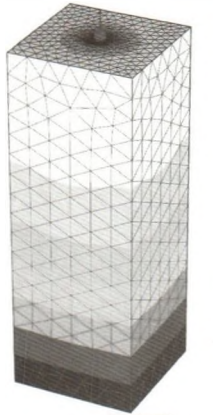
3.3. Tải trọng tác dụng

Nghiên cứu trường hợp tải trọng tác dụng dạng chuyển vị cưỡng bức kéo tại đỉnh cọc theo phương dọc trục và tăng từng cấp như Bảng 3.3 sau:

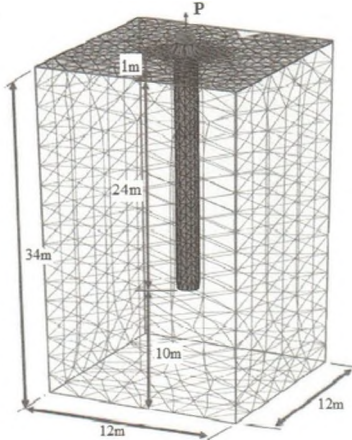
Bảng 3.3. Tải trọng dạng chuyển vị cưỡng bức tại đỉnh cọc

Chuyển vị	Cấp 1	Cấp 2	Cấp 3	Cấp 4	Cấp 5	Cấp 6	Cấp 7	Cấp 8
U_z (mm)	5	8	10	20	30	40	50	100

Với tham số cọc, nền tải trọng như trên, tổng hợp mô hình số tính toán trong bài báo này được thể hiện như Hình 3.2 và Hình 3.3 dưới đây:



Hình 3.2: Mô hình số cọc-nền



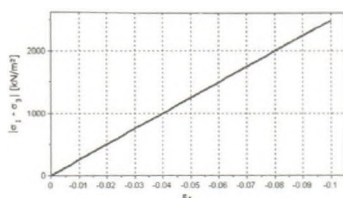
Hình 3.3: Kích thước mô hình cọc trong nền

4. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN

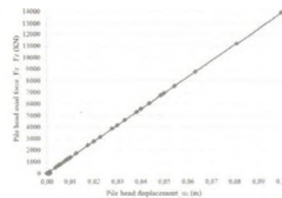
4.1. Quan hệ chuyển vị và nội lực đỉnh cọc

4.1.1. Khi xét theo mô hình nền đàn hồi tuyến tính

Với tham số nền theo mô hình này như trong Bảng 3.2, nhóm tác giả xác định được mối quan hệ giữa biến dạng dọc trục với ứng suất lệch trong mô hình lý thuyết 3 trục, thể hiện như Hình 4.1a. Kết quả tính toán sau khi gia tải là bảng giá trị quan hệ lực dọc với chuyển vị tải đỉnh cọc và được thể hiện như trên Hình 4.1b dưới đây:



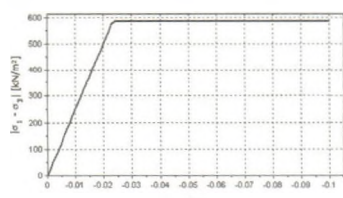
Hình 4.1a: Quan hệ biến dạng dọc trục và ứng suất lệch



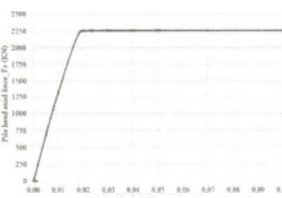
Hình 4.1b: Quan hệ lực dọc và chuyển vị đỉnh cọc

4.1.2. Theo mô hình nền Mohr-Coulomb

Quan hệ giữa biến dạng dọc trục với ứng suất lệch trong mô hình lý thuyết 3 trục, thể hiện như Hình 4.2a. Đồ thị xác định lực dọc với chuyển vị tải đỉnh cọc và được thể hiện như trên Hình 4.2b:



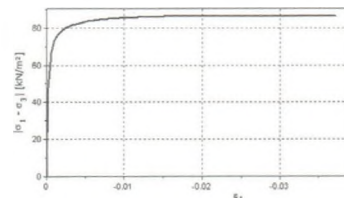
Hình 4.2a: Quan hệ biến dạng dọc trục và ứng suất lệch



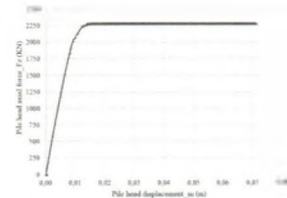
Hình 4.2b: Quan hệ lực dọc và chuyển vị đỉnh cọc

4.1.3. Trường hợp mô hình nền Hardening Soil

Xây dựng mối liên hệ giữa biến dạng dọc trục với ứng suất lệch như Hình 4.3a và giữa lực dọc với chuyển vị tải đỉnh cọc Hình 4.3b sau:



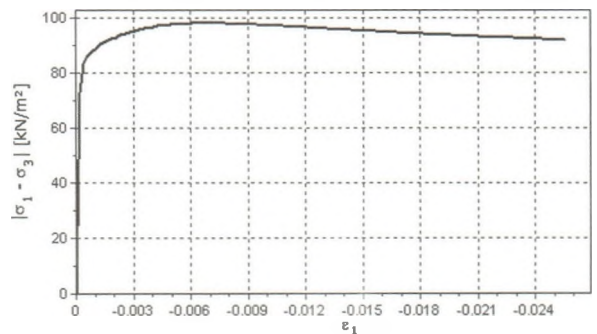
Hình 4.3a: Quan hệ biến dạng dọc trục và ứng suất lệch



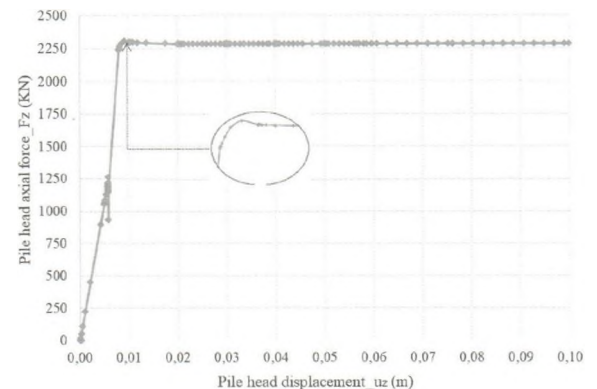
Hình 4.3b: Quan hệ lực dọc và chuyển vị đỉnh cọc

4.1.4. Với nền ứng xử theo mô hình Hypoplastic

Đồ thị quan hệ giữa biến dạng dọc trục với ứng suất lệch thể hiện ở Hình 4.4a. Đồng thời, lực dọc với chuyển vị tải đỉnh cọc có quan hệ phi tuyến như trên Hình 4.4b sau đây:



Hình 4.4a: Quan hệ biến dạng dọc trục và ứng suất lệch

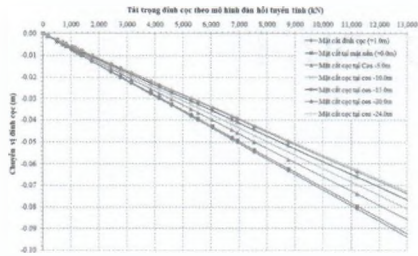


Hình 4.4b: Quan hệ lực dọc và chuyển vị đỉnh cọc

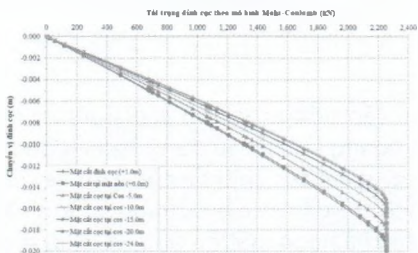
So sánh kết quả mỗi quan hệ biến dạng dọc trục và ứng suất lệch theo mô hình lý thuyết như Hình 4.4a và theo mô hình thực nghiệm [6], có thể nhận thấy quy luật ứng xử vật liệu nền theo mô hình Hypoplastic phản ánh khá phù hợp và tương ứng quy luật giữa lý thuyết và thực nghiệm.

4.2. Sự thay đổi lực dọc trong cọc theo chiều sâu

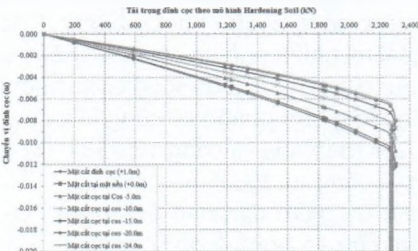
Kết quả tính toán nhận được lực dọc trong cọc thay đổi theo chiều sâu tương ứng của cọc, lập đồ thị biến diễn mối quan hệ theo thời gian ở mỗi thời điểm chuyển vị đỉnh cọc do chuyển vị cưỡng bức gây ra với lực dọc trong cọc tại 7 mặt cắt cọc dọc theo chiều sâu của 4 mô hình nền như trên, thể hiện như Hình 4.5a, 4.5b, 4.5c và 4.5d dưới đây:



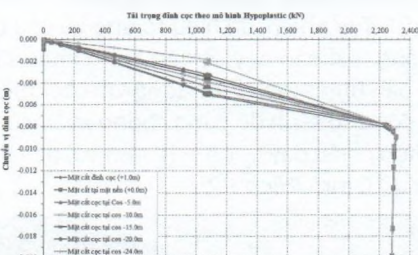
Hình 4.5a: Quan hệ lực dọc theo chiều sâu với chuyển vị đỉnh cọc (mô hình DHTT)



Hình 4.5b: Quan hệ lực dọc theo chiều sâu với chuyển vị đỉnh cọc (mô hình Mohr-Coulomb)



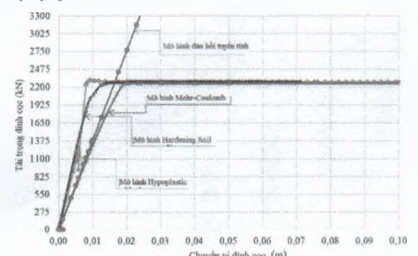
Hình 4.5c: Quan hệ lực dọc theo chiều sâu với chuyển vị đỉnh cọc (mô hình Hardening Soil)



Hình 4.5d: Quan hệ lực dọc theo chiều sâu với chuyển vị đỉnh cọc (mô hình Hypoplastic)

4.3. So sánh quan hệ chuyển vị-nội lực đỉnh cọc tương ứng các mô hình nền

Từ kết quả như trên Hình 4.1b, 4.2b, 4.3b và 4.4b, lập đồ thị biểu diễn mối quan hệ giữa lực dọc và chuyển vị đỉnh cọc khi xét theo 4 mô hình nền: Đàn hồi tuyến tính; mô hình Mohr-Coulomb; mô hình Hardening Soil và Hypoplastic, thể hiện như trên Hình 4.6:



Hình 4.6: Quan hệ chuyển vị và nội lực đỉnh cọc theo các mô hình nền khác nhau

5. KẾT LUẬN

- Việc lựa chọn mô hình cơ học của vật liệu nền cho bài toán tương tác của cọc với nền phụ thuộc vào dạng tương tác, mức độ quan trọng của bài toán, công cụ tính toán và khả năng thí nghiệm xác định các tham số của mô hình tính. Kết quả tính toán với mỗi mô hình lựa chọn ảnh hưởng đến sự làm việc của cọc trong nền.

- Do đất là vật liệu rời và có tính đàn dẻo phi tuyến, nên theo đồ thị các hình trên cho thấy lựa chọn mô hình nền Hypoplastic, Hardening Soil và mô hình Mohr-Coulomb phản ánh quy luật ứng xử của nền và tương tác cọc-nền khi cọc chịu tác dụng của tải trọng phù hợp hơn so với mô hình nền đàn hồi tuyến tính.

- Tải trọng giới hạn trong bài toán tương tác cọc-nền khi chịu tải kéo theo các mô hình nền Hypoplastic, Hardening Soil và mô hình Mohr-Coulomb có giá trị cơ bản tương đồng. Tuy nhiên, từ các đồ thị này có thể nhận thấy khi tính toán theo mô hình Mohr-Coulomb thì tải trọng giới hạn của cọc đạt đến chậm hơn so (khi chuyển vị đỉnh cọc là 19 mm) với mô hình Hardening Soil (khi chuyển vị đỉnh cọc là 14 mm) và mô hình Hypoplastic (khi chuyển vị đỉnh cọc là 8 mm).

- Khi xây dựng và tính toán bài toán cọc trơn làm việc trong nền chịu tác dụng của tải trọng cần căn cứ vào các kết quả thí nghiệm mô hình nền để lựa chọn dạng cơ học của vật liệu nền phù hợp trong bài toán tương tác kết cấu với môi trường nền đó.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Anh-Tuan Vu, Tatsunori Matsumoto, *Numerical Analysis on Behaviours of Winged Monopile Subjected to Cyclic Loading in a Calcareous Ground*.
- [2]. Poulos, H.G. (2000), *Practical design procedures for piled raft foundations*, J. A. Hemsley.
- [3]. David masín (2015), *Hypoplasticity for Practical*, PhD course on hypoplasticity Zhejiang University;
- [4]. Wolffersdorff, P.A. (1996), *A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface*, Mech, Cohesive Frict., Mater, 1, 251-271.
- [5]. Kusumaningsih, D.A., Vu, A.T., Matsumoto, T. (2016), *Numerical study on behaviour of single piles in a coral sand*, In: Proceedings of the Soft Soils 2016 Conference Bandung, pp.D1-1-D1-6.
- [6]. Cao Van Hoa, Vu Anh Tuan, Nguyen Thanh Sang, Nguyen Tuong Lai, Pham Duc Tiep, *Effect of Grain Size on Shear Strength of Coral Gravel Sand*. LECTURE NOTE IN CIVIL ENGINEERING.

Ngày nhận bài: 07/11/2022

Ngày chấp nhận đăng: 01/12/2022

Người phản biện: TS. Nguyễn Mạnh Thường

TS. Nguyễn Trọng Chức