TÍNH TOÁN SỨC CHỊU TẢI CỦA CỌC THEO TIÊU CHUẨN VỀ ĐỘ TIN CẬY

Trần Văn Nam*, Phạm Đức Tiệp
Học viện KTQS

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu phương pháp tính toán sức chịu tải của cọc theo lý thuyết độ tin cậy sử dụng công cụ mô phỏng số Monte-Carlo. Trên cơ sở phương pháp xác định sức chịu tải của cọc theo mô hình hệ số nền, kết hợp phương pháp mô phỏng Monte-Carlo các tác giả đã xây dựng chương trình tự động hóa xác định sức chịu tải của cọc căn cứ theo tiêu chuẩn về thiết kế công trình theo độ tin cậy. Một ví dụ số được thực hiện theo 2 cách: Bằng công thức giải tích của Meyerhof và bằng chương trình đã thiết lập, kết quả là xấp xỉ nhau cho thấy chương trình có thể sử dụng được.

Từ khóa: *Sức chịu tải; độ tin cậy; Monte-Carlo.*

1. Đặt vấn đề

Do bản chất của quá trình hình thành mà nền đất thường có đặc trưng cơ lý phân tán rất ngẫu nhiên và đa dạng; tuy nhiên tiêu chuẩn thiết kế hiện hành của Việt Nam TCVN 1034:2014 "Móng cọc - Tiêu chuẩn thiết kế" sử dụng các số liệu trung bình của các đặc trưng cơ lý của nền đất trong tính toán và hiệu chỉnh bằng các hệ số an toàn cao; trong khi đó, xu hướng trên thế giới đã và đang đi theo hướng thiết kế theo lý thuyết độ tin cậy.

Việc tính toán ra một giá trị sức chịu tải của cọc theo đất nền với quan điểm tính toán tiền định như trong tiêu chuẩn hiện hành của Việt Nam chưa cho phép đánh giá chính xác ảnh hưởng của các tham số tham gia vào quá trình hình thành khả năng chịu tải, do đó người thiết kế khó có thể đưa ra giải pháp phù hợp trong các điều kiện khác nhau của nền đất và công trình. Dưới đây trình bày kết quả nghiên cứu thuật toán và xây dựng chương trình tự động hóa tính toán khả năng chịu tải của cọc theo lý thuyết độ tin cậy, việc xác định sức chịu tải của cọc theo đất nền với quan điểm tiền định có thể thực hiện bằng các phương pháp khác nhau, trong nghiên cứu này, các tác giả sử dụng phương pháp hệ số nền để xác định sức chịu tải của cọc, bản chất của phương pháp hệ số nền là đưa vào các lò xo thẳng đứng biểu hiện sức kháng ma sát của cọc (đường cong t - z) và lò xo ở mũi cọc (đường cong Q - z) biểu hiện sức kháng mũi. Sau khi có được trình tự tính toán sức chịu tải của cọc theo phương pháp hệ số nền, kết hợp với phương pháp mô phỏng số Monte-Carlo để xây dựng thuật toán chương trình xác định sức chịu tải của cọc căn cứ theo tiêu chuẩn về thiết kế công trình theo độ tin cậy.

* Email: vannamhvktqs@gmail.com

https://doi.org/10.56651/lqdtu.jst.v2.n01.322.sce

2. Tính toán sức chịu tải của cọc theo phương pháp hệ số nền

Phương trình tổng quát về sức chịu tải (SCT) dọc trục của cọc khi cọc làm việc an toàn là (SCT cho phép):

$$[P]=Q_P+Q_f \quad (1)$$

trong đó: $Q_f = u\sum f_i \Delta z_i$ - sức kháng bên của cọc, ở đây u - chu vi thân cọc, f_i - ma sát bên đơn vị (sức kháng bên đơn vị) của cọc và là hằng số trên chiều dài phân bố cọc Δz_i và u; Δz_i - diện tích xung quanh của đoạn phân bố cọc; $Q_P = q_p A_c$ - sức kháng mũi, ở đây q_p - sức kháng mũi đơn vị của cọc, A_c - tiết diện ngang của mũi cọc.

Mô hình tính toán sức chịu tải dọc trục của cọc theo hệ số nền còn gọi là mô hình cọc - nền làm việc đồng thời. Theo đó, khi biến dạng của nền đất không lớn, cọc chịu tải trọng dọc trục ta có thể sử dụng mô hình các gối đàn hồi thẳng đứng để thay thế phản lực của đất gồm: gối đàn hồi thân cọc (đại diện cho sức kháng bên) và gối đàn hồi mũi cọc (đại diện cho sức kháng mũi). Các gối đàn hồi này đặc trưng cho tương tác giữa cọc và đất nền, sự làm việc của chúng là độc lập với nhau, số lượng các gối đàn hồi phụ thuộc vào cách chia số phần tử trên chiều dài của cọc. Quy cách chia số phân tử trên chiều dài cọc là dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn, tức là ta chia càng nhiều phần tử cọc càng tốt và chia mau ở phía trên cọc, thưa ở phía dưới cọc nhưng cũng có thể tiến hành chia thành các phần tử có cùng chiều dài để thuận tiện cho việc tính toán và xây dựng chương trình tính bằng ngôn ngữ lập trình.

Theo [4] và từ phương trình (1) ta sẽ xác định sức kháng bên và sức kháng mũi của cọc thông qua "đường cong t - z" và "đường cong Q - z". Các đường cong này biểu thị quan hệ giữa phản lực và chuyển vị của các gối đàn hồi đứng ở các vị trí khác nhau sẽ khác nhau, đồng thời ứng với các loại đất khác nhau cũng khác nhau.

Xét cọc có đường kính D, khi chịu tải trọng dọc trục sẽ có chuyển vị đứng là z. Theo tiêu chuẩn TCVN 9393:2012 [1] thì chuyển vị cho phép của đầu cọc để xác định sức chịu tải cực hạn là 10% D. Cũng theo tiêu chuẩn này, dùng hệ số an toàn FS = 2 để xác định sức chịu tải cho phép, vì vậy chuyển vị giới hạn của đầu cọc để xác định sức chịu tải cho phép là U_{max} = 5% D. Đây là căn cứ để xác định sức chịu tải cho phép của cọc khi xác định bằng phương pháp hệ số nền.

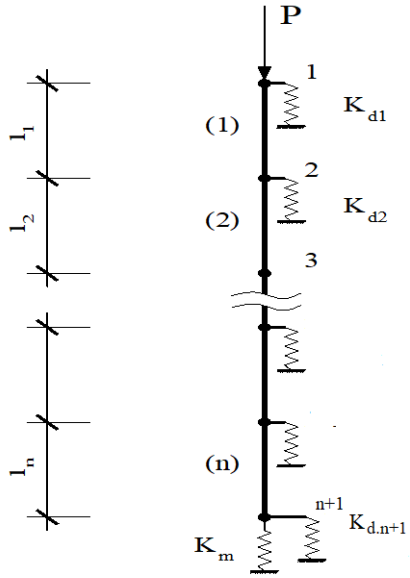
Cách xác định độ cứng K_{di} như sau:

- Nếu chuyển vị tại nút i, $U(i) \le 2{,}5$ mm thì: $$K_{di} = \frac{t_{\max} F_{di}}{2{,}5.10^{-3}} \quad (2)$$

trong đó, F_{di} - diện tích xung quanh đoạn cọc trong phạm vi quy đổi về nút i, xác định theo công thức:

$$F_{di} = \pi D \frac{l_{i-1} + l_i}{2} \quad (3)$$

- Nếu chuyển vị tại nút i, U(i) > 2,5 mm thì K_{di} = 0. Các độ cứng Kdi xác định theo cong t-z ứng với mỗi lớp đất cọc đi qua (Hình 2).



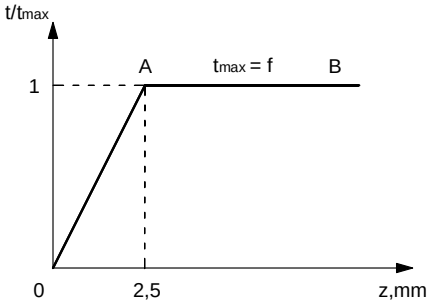
Hình 1. Mô hình cọc nền làm việc đồng thời của bài toán khi cọc chỉ chịu tải trọng dọc trục

2.1. Đường cong t – z với sức kháng bên (theo tiêu chuẩn API [4])

Với đất rời thì lực dính c = 0 nên sức kháng bên thoát nước (sức kháng bên giữa đất rời và cọc) được tính theo công thức:

$$t_{max} = f = \beta.\sigma_V^{'}.\text{tg}(\varphi - 5^o) = 0,8.\sigma_V^{'}.\text{tg}(\varphi - 5^o) \quad (4)$$

trong đó: $\sigma_V^{'} = \sum \gamma_i h_i$ là ứng suất hữu hiệu theo phương đứng tại đoạn cọc đang xét; β = 0,8 là hệ số áp lực ngang sau khi đóng cọc, theo cơ học đất thì ta thường lấy; φ là góc ma sát trong của đất nền.



Hình 2. Đường cong t – z của cọc với ma sát bên đất rời.

2.2. Đường cong Q - z với sức kháng mũi (theo tiêu chuẩn API [4])

Sức kháng mũi đơn vị của cọc trong đất rời được xác định theo kiến nghị của Thurman [4] như sau:

$$q_P = N_q \sigma_v^{'} \tag{5}$$

$$N_q = e^{\Pi \tan\varphi} \tan^2\left(45^o + \frac{\varphi}{2}\right) \tag{6}$$

trong đó: N_q - hệ số SCT phụ thuộc vào góc ma sát trong φ; $\sigma_v^{'}$ - ứng suất hữu hiệu tại mũi cọc, nếu lớn hơn 150 (kPa) thì chỉ lấy $\sigma_v^{'}$ = 150 (kPa).

Từ đó, ta xác định được lực tác dụng lên lò xo tại mũi cọc như sau:

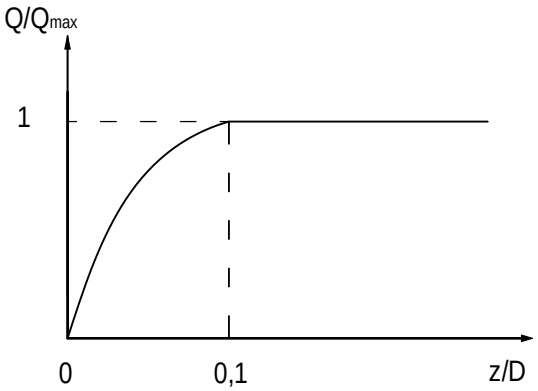
$$Q_{\max} = q_P \times \frac{\pi \times D^2}{4} \tag{7}$$

Đường cong Q - z biểu thị quan hệ giữa tải trọng đứng và chuyển vị đứng tại mũi cọc được thể hiện như hình 3.

Đoạn cong OA có phương trình: $\frac{Q}{Q_{max}} = \left(\frac{z}{z_{cr}}\right)^{1/3}$. Đoạn cong được xây dựng từ bảng 1.

Bảng 1. Số liệu xây dựng đường cong Q - z theo tiêu chuẩn API [4]

z/D	0	0,002	0,013	0,042	0,073	0,1
Q/Q_{max}	0	0,25	0,50	0,75	0,9	1,0

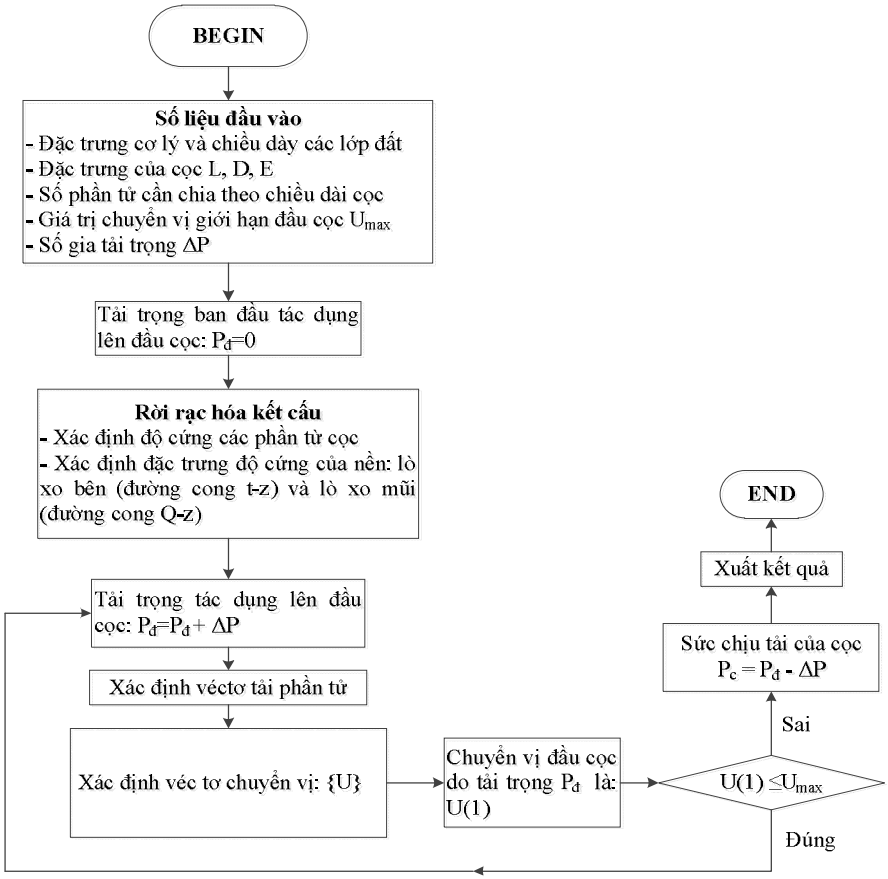


Hình 3. Đường cong Q - z của cọc với sức kháng mũi

2.3. Xây dựng chương trình tính sức chịu tải của cọc theo mô hình hệ số nền

Từ mối quan hệ giữa phản lực và chuyển vị thông qua các đường cong t - z và Q - z, nhóm tác giả đã xây dựng nên đường đặc tính P - U của lò xo tại các điểm chia phần tử trên cọc, sử dụng thuật toán lặp Newton-Raphson để giải bài toán phi tuyến, từ

đó xác định được SCT của cọc dựa vào độ lệch giữa chuyển vị do tải trọng P tác dụng gây nên so với U_{max}, giá trị U_{max} có thể thay đổi tùy thuộc vào các tiêu chuẩn mà mỗi nước hay mỗi ngành áp dụng vào để tính toán kết cấu. Sơ đồ khối của chương trình được thể hiện như hình 4.



Hình 4. Sơ đồ khối của chương trình tính sức chịu tải của cọc theo mô hình hệ số nền

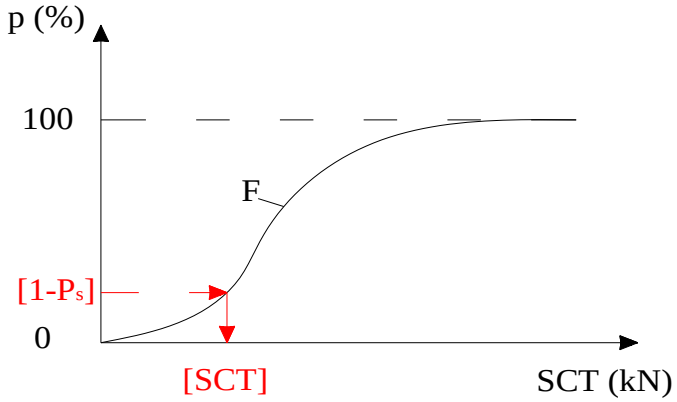
3. Tính toán sức chịu tải của cọc theo tiêu chuẩn về độ tin cậy

Độ tin cậy sức chịu tải của cọc là xác suất mà cọc đó bảo đảm chất lượng sử dụng như thiết kế đề ra trong suốt thời kỳ tính toán của nó. Các đại lượng ngẫu nhiên ảnh hưởng đến sức chịu tải của cọc là: Trọng lượng riêng tự nhiên γ , góc ma sát trong φ, lực dính *c*, chính vì vậy sức chịu tải của cọc cũng là một đại lượng ngẫu nhiên và nhiệm vụ của bài báo là cần phải xác định được quy luật phân bố sức chịu tải của cọc, từ đó xác định được hàm mật độ *f* và hàm phân phối tích lũy *F* của đại lượng sức chịu tải dọc trục cọc.

Vậy phương trình để xác định sức chịu tải của cọc theo lý thuyết độ tin cậy là:

$$[\mathrm{SCT}] = F^{-1}(1-\mathrm{P}_s) \quad (8)$$

trong đó: [SCT] - sức chịu tải của cọc theo lý thuyết độ tin cậy; P_s - xác suất an toàn theo tiêu chuẩn GB 50153-2008 [6] tùy thuộc vào cấp của công trình; F - hàm phân phối tích lũy của [SCT].



Hình 5. Hàm phân phối tích lũy

Như vậy, nếu đã biết xác suất an toàn và hàm phân phối tích lũy thì việc xác định sức chịu tải là hết sức đơn giản.

Bảng 2. Phân cấp mức độ an toàn theo GB 50153-2008 [6]

Đặc trưng phá hoại	**Cấp an toàn**					
	Cấp I (Rất nghiêm trọng)		Cấp II (Nghiêm trọng)		Cấp III (Không nghiêm trọng)	
	β	P_s	β	P_s	β	P_s
Từ từ	3,7	0,99989	3,2	0,9993189	2,7	0,996533
Đột ngột	4,2	0,99998665	3,7	0,99989	3,2	0,9993189

Trong bảng 2: β - chỉ số độ tin cậy; P_s - xác suất an toàn.

3.1. Lựa chọn các biến ngẫu nhiên

Tính toán sức chịu tải của cọc theo đất nền liên quan đến nhiều yếu tố ngẫu nhiên như: Đặc trưng cơ lý của các lớp đất (trọng lượng riêng tự nhiên, góc ma sát trong, lực dính). Tính ngẫu nhiên của các tham số trên kéo theo SCT của cọc cũng trở thành ngẫu nhiên. Khi mô hình hóa cần chú ý phân biệt các yếu tố ngẫu nhiên "cơ bản" và các yếu tố ngẫu nhiên "dẫn xuất". Các yếu tố ngẫu nhiên được coi là cơ bản thường là các yếu tố độc lập được dùng như yếu tố đầu vào. Các đặc trưng xác suất của chúng dễ xác định bằng thực nghiệm và được sử dụng rộng rãi. Số lượng các biến ngẫu nhiên cơ bản đưa vào mô hình thường được lựa chọn sao cho có thể giảm được khối lượng tính toán. Với

ý nghĩa như vậy, các yếu tố ngẫu nhiên có tản mát rất nhỏ so với giá trị kỳ vọng có thể coi là tiền định. Từ sự phân tích trên, bài báo lựa chọn các biến ngẫu nhiên sau đây làm các biến cơ bản: Trọng lượng riêng tự nhiên, góc ma sát trong và lực dính của các lớp đất. Giả sử các đại lượng ngẫu nhiên có quy luật phân bố chuẩn, để mô hình hóa các biến ngẫu nhiên nhóm tác giả sử dụng thuật toán hàm ngược (inverse transform) để phát biến ngẫu nhiên, chi tiết thuật toán thể hiện trong [3].

3.2. Ứng dụng phương pháp mô phỏng số Monte-Carlo để tính sức chịu tải của cọc

3.2.1. Nội dung của phương pháp

- **Giai đoạn 1:** Mô hình hóa các biến ngẫu nhiên đầu vào từ các hàm mật độ hoặc hàm phân phối xác suất cho trước của chúng (sử dụng thuật toán hàm ngược đã mô tả ở trên).

- **Giai đoạn 2:** Tính toán tiền định theo các thể hiện đầu vào để nhận các thể hiện đầu ra; cụ thể mỗi thể hiện đầu vào $\overline{X} = (\gamma_1, \varphi_1, c_1, ..., \gamma_n, \varphi_n, c_n)$ ta sẽ tính toán được các thể hiện đầu ra tương ứng là:

SCT của cọc: [SCT] $= f(\gamma_1, \varphi_2, c_1 ..., \gamma_n, \varphi_n, c_n)$ (9)

- **Giai đoạn 3:** Xử lý thống kê các thể hiện đầu ra để tìm các đặc trưng xác suất của nó và kiểm tra các giả thiết thống kê. Nếu số thể hiện (phép thử) được tạo ra càng lớn thì kết quả càng tin cậy.

Trình tự các bước khi xử lý thống kê các thể hiện đầu ra như sau:

Bước 1: Thu thập, ghi chép các số liệu ban đầu.

Bước 2: Kiểm tra chất lượng các số liệu.

Bước 3: Xây dựng hàm phân phối thực nghiệm, trên cơ sở đó đưa ra một giả thuyết về luật phân phối chính xác.

Bước 4: Kiểm tra sự phù hợp giữa phân phối thực nghiệm và phân phối chính xác.

Trong nghiên cứu này dùng tiêu chuẩn χ^2 do Pearson đề xuất.

Bước 5: Ước lượng thống kê các tham số của phân phối để xây dựng hàm phân phối F(SCT).

3.2.2. Xây dựng chương trình tính sức chịu tải của cọc theo độ tin cậy

Dựa vào sơ đồ khối như hình 6 và ngôn ngữ lập trình Matlab để xây dựng chương trình tính sức chịu tải của cọc theo lý thuyết độ tin cậy (SCTDTC) với các mô đun như sau:

- *Đặc trưng đất nền:* Khai báo các dữ liệu đầu vào như số lượng lớp đất, đặc trưng

các lớp đất (Kỳ vọng μ và độ lệch σ của góc ma sát trong φ, trọng lượng riêng tự nhiên γ và lực dính c của các lớp đất), chiều dày các lớp đất.

- *Đặc trưng cọc:* Chiều dài cọc L_c, đường kính cọc d_c, mô đun đàn hồi E.

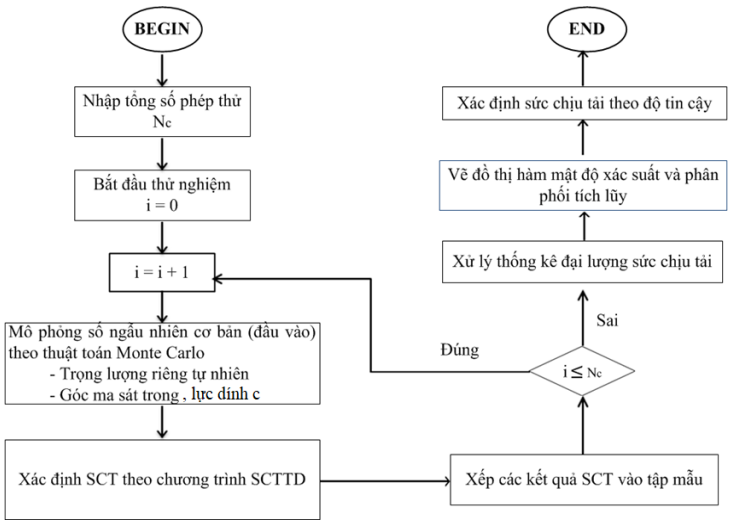
- *Mô đun biểu diễn các lớp đất và số lượng phần tử.*

- *Khai báo khác:* Số phần tử chia N, chuyển vị đầu cọc cho phép (U_{max}), số phép thử Monte-Carlo, cấp công trình theo GB 50153-2008 [6].

- *Mô đun biểu diễn đồ thị hàm mật độ xác suất và đồ thị hàm phân phối tích lũy.*

- *Mô đun bảng tính kết quả các lần thử*: SCT max, SCT min, kỳ vọng SCT, độ lệch SCT.

- *Mô đun tính kết quả SCT theo độ tin cậy.*



Hình 6. Sơ đồ khối chương trình

4. Thử nghiệm số chương trình SCTDTC

Thử nghiệm số ở đây các tác giả lấy số liệu đầu vào từ công trình kè thuộc đơn vị Hải quân ở Cam Ranh - Khánh Hòa với giải pháp kè được gia cố bởi cọc BTCT.

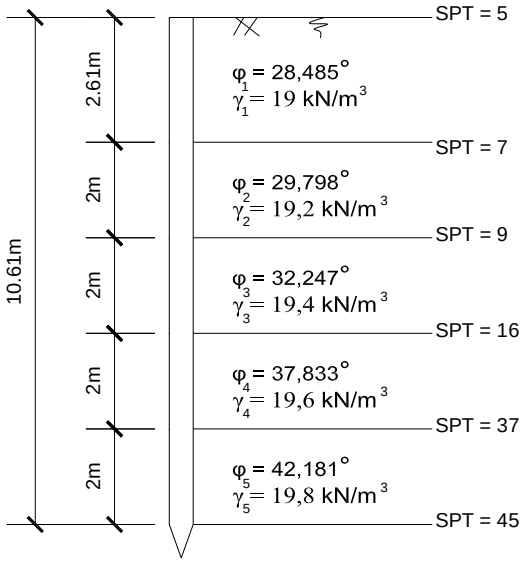
4.1. Số liệu đầu vào

- Đặc điểm cọc: Cọc bê tông cốt thép hình vuông với cạnh a = 35 cm.

4.2. Tính toán sức chịu tải của cọc theo công thức của Meyerhof [2]

$$Q_u = K_1 N A_p + K_2 N_{tb} A_s \quad (10)$$

trong đó: K_1 - hệ số lấy bằng 400 cho cọc đóng, 120 cho cọc khoan nhồi; K_2 - hệ số lấy bằng 2 cho cọc đóng, bằng 1 cho cọc khoan nhồi;



Hình 7. Số liệu địa chất và chiều dài cọc

N - số SPT trung bình trong khoảng 1d dưới mũi cọc và 4d trên mũi cọc; N_{tb} - số SPT trung bình dọc thân cọc trong phạm vi lớp đất rời; A_p - diện tích mũi cọc; A_s - diện tích mặt bên cọc trong phạm vi lớp đất rời.

Thay số liệu đầu vào (Hình 7) và áp dụng công thức (4) nhận được các giá trị sau:

- Sức chịu tải cực hạn Q_u = 1601,92 KN.

- Sức chịu tải tính toán của cọc theo đất nền P_n = 534 kN = 53,4 T.

4.3. Tính toán sức chịu tải của cọc theo tiêu chuẩn về độ tin cậy (sử dụng chương trình nhóm tác giả thiết lập)

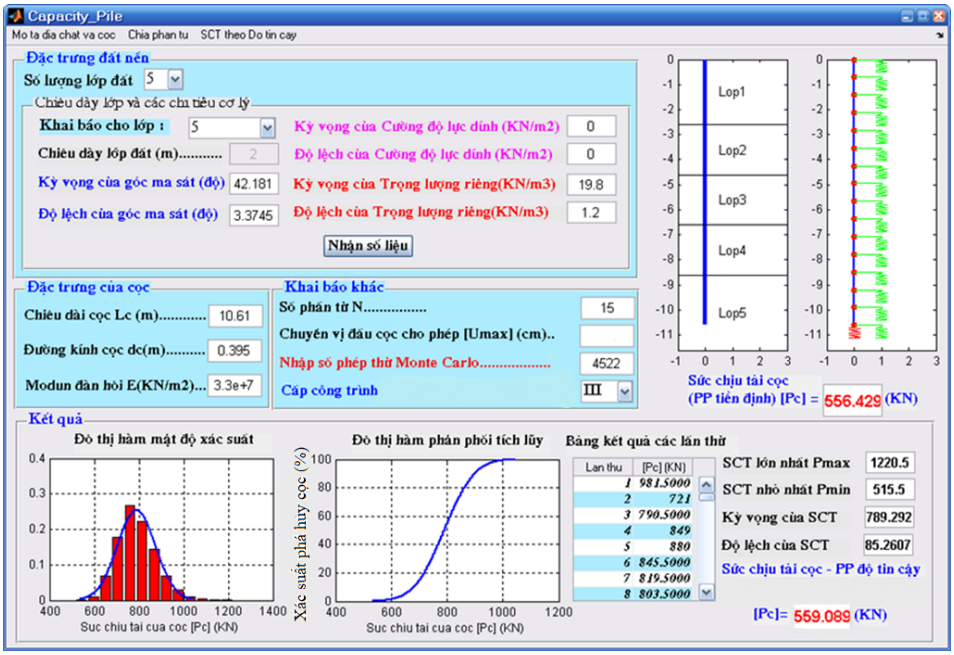
Số liệu để đưa vào **chương trình SCTDTC** được lấy như sau: Các giá trị về kỳ vọng của trọng lượng riêng và góc ma sát trong lấy với giá trị trung bình trong báo cáo khảo sát địa chất, còn độ lệch được xác định căn cứ vào bảng độ nhạy của Baecher và Khristian [5].

Bảng 3. Số liệu đầu vào của dự án khi tính sức chịu tải của cọc theo độ tin cậy

STT	Tên lớp	μ_γ (kN/m^3)	σ_γ (kN/m^3)	COV$_\gamma$	μ_φ (độ)	σ_φ (độ)	COV$_\varphi$
1	Lớp 1	19,00	1,20	0,06316	28,49	2,2788	0,08
2	Lớp 2	19,20	1,20	0,06250	29,80	2,3838	0,08
3	Lớp 3	19,40	1,20	0,06186	32,25	2,5798	0,08
4	Lớp 4	19,60	1,20	0,06122	37,83	3,0266	0,08
5	Lớp 5	19,80	1,20	0,06061	42,18	3,3745	0,08

Bảng 4. Kết quả tính sức chịu tải của cọc theo các phương pháp khác nhau

Phương pháp tính toán		Đơn vị	Giá trị sức chịu tải
Phương pháp tiền định	Áp dụng công thức của Meyerhof	T	53,40
	Tính theo mô hình hệ số nền	T	55,64
Tính theo lý thuyết độ tin cậy		T	55,91



Hình 8. Kết quả tính toán sức chịu tải của cọc bằng chương trình SCTDTC

Từ kết quả tính toán như hình 8 và bảng 4, có thể đưa ra các nhận xét sau đây:

- Giá trị sức chịu tải theo phương pháp tiền định với việc áp dụng công thức của Meyerhof và tính theo mô hình hệ số nền lệch nhau không đáng kể.

- Khi tính theo phương pháp tiền định, ta chỉ tìm được một giá trị sức chịu tải ứng với số liệu tại thời điểm khảo sát và sự phân tán của chỉ tiêu cơ lý được xét đến chỉ thông qua một hệ số an toàn là FS mà chưa kể đến mức độ phân tán là ít hay nhiều của từng tham số ngẫu nhiên đầu vào. Còn với phương pháp tính theo tiêu chuẩn về độ tin cậy sẽ có bức tranh tổng thể về sự phân bố của giá trị sức chịu tải như: Hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy của nó.

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày cách tính toán sức chịu tải của cọc theo phương pháp hệ số nền và kết hợp phương pháp mô phỏng Monte-Carlo đã xây dựng thuật toán, chương trình tự động hóa xác định sức chịu tải của cọc căn cứ theo tiêu chuẩn về thiết kế công

trình theo độ tin cậy với các biến ngẫu nhiên như trọng lượng riêng của đất, góc ma sát trong và cường độ lực dính. Kết quả thử nghiệm số cho thấy giá trị sức chịu tải của cọc theo tiêu chuẩn về độ tin cậy có giá trị lớn hơn so với hai phương pháp tiền định (phương pháp hệ số nền và phương pháp của Meyerhof) và độ chênh lệch giữa các phương pháp không đáng kể, từ đó khẳng định được tính chính xác của chương trình đã thiết lập và khả năng ứng dụng của chương trình cho các công trình thực tế mà vẫn đảm bảo an toàn theo tiêu chuẩn về thiết kế công trình theo độ tin cậy.

Tài liệu tham khảo

1. Bộ Khoa học và công nghệ (2012). *TCVN 9393:2012 Cọc - Phương pháp thử nghiệm hiện trường bằng tải trọng tĩnh ép dọc trục.*
2. Bộ Khoa học và Công nghệ (2014). *TCVN 10304:2014 Móng cọc - Tiêu chuẩn thiết kế.*
3. Averill M. Law & W. David Kelton (1991). *Simulation Modeling and Analysis* (2nd ed.), McGraw-Hill, Inc.
4. American Petroleum Institute (2002). *API Recommended Practice 2A-WSD - Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design* (21st ed.).
5. Baecher, G.B., and Christian, J.T. (2003). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, West Sussex, UK.
6. National Standard of the PRC. *GB 50153-2008 Unified standard for reliability design of engineering structures*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.

EVALUATING PILE BEARING CAPACITY BASED ON STANDARD FOR RELIABILITY DESIGN

Abstract: *This paper presents the research on pile bearing capacity according to reliability theory using Monte-Carlo numerical simulation method. Based on the subgrade reaction coefficient method and Monte-Carlo simulation method, the authors developed a program to determine the pile bearing capacity according to the standard of construction design following reliability. A case study solved by the analytical formula proposed by Meyerhof and by the developed program is presented. The agreement between the results indicates that the program developed by the authors is reliable.*

Keywords: Pile bearing capacity; reliability; Monte-Carlo.

Ngày nhận bài: 20/3/2019; *Ngày nhận bản sửa lần cuối:* 21/5/2019; *Ngày duyệt đăng:* 01/7/2019

❑