

NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP LÝ THUYẾT XÁC ĐỊNH CÁC THÀNH PHẦN LỰC CẢN ĐỘNG CỦA NỀN ĐẤT TÁC DỤNG LÊN CỌC THÉP TRONG QUÁ TRÌNH HẠ CỌC BẰNG BÚA RUNG

THEORETICAL METHOD FOR DETERMINING THE DYNAMIC RESISTANCE OF SOIL ACTING ON STEEL PILES DRIVING BY VIBRATOR

Vũ Văn Trung*, Nguyễn Anh Ngọc

Trường Đại học Giao thông vận tải

*Email liên hệ: trungvv@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất phương pháp lý thuyết xác định các thành phần lực cản động của nền đất tác dụng lên cọc thép trong quá trình hạ cọc bằng búa rung. Phương pháp này xem xét tương tác giữa cọc thép và đất, bao gồm lực cản thành cọc và lực cản mũi cọc, dựa trên các mô hình cơ học đất: đàn hồi tuyến tính, đàn hồi phi tuyến, đàn-dẻo và đàn-dẻo-nhớt. Kết quả tính toán minh họa quá trình hạ cọc ván thép bằng búa rung, cho thấy lực cản động thay đổi theo chiều sâu và đặc trưng đất. Phương pháp đề xuất có thể sử dụng để tính toán thiết kế hoặc lựa chọn búa rung phù hợp trong thi công cọc thép tại Việt Nam.

Từ khóa: Búa rung; Lực cản động; Sức kháng động; Cọc thép; Cọc cừ.

ABSTRACT

This paper proposes a theoretical method to determine the dynamic soil resistance acting on steel piles during vibratory pile driving. The method considers the interaction between the steel pile and the soil, including shaft resistance and toe resistance, based on soil mechanical models: linear elastic, nonlinear elastic, elasto-plastic, and visco-elasto-plastic. Calculation results illustrate the vibratory driving process of steel sheet piles, showing how dynamic resistance varies with pile depth and soil characteristics. The proposed method can be applied for design calculations or selection of appropriate vibratory hammers for steel pile construction in Vietnam.

Keywords: Vibrator; Dynamic toe resistance; Dynamic shaft resistance; Steel pile; Sheet pile.

1. GIỚI THIỆU

Công nghệ hạ cọc thép bằng búa rung được sử dụng phổ biến trong thi công các công trình hạ tầng tại Việt Nam. Tuy nhiên, việc xác định lực cản động của nền đất tác dụng lên cọc vẫn chủ yếu dựa trên kinh nghiệm, do thiếu các nghiên cứu lý thuyết chuyên sâu. Lực cản động phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm tính chất cơ lý đất, đặc tính cọc và thông số búa rung.

Trong phạm vi bài báo này, các tác giả nghiên cứu phương pháp lý thuyết xác định lực cản động thành cọc và mũi cọc, nhằm xây dựng cơ sở tính toán thiết kế hoặc lựa chọn búa rung phù hợp. Nghiên cứu được triển khai dựa trên các mô hình cơ học đất tiêu chuẩn, kết hợp với cơ chế tương tác giữa cọc thép và đất dưới tác động lực rung, để đánh giá chính xác lực cản động trong thực tế.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Các mô hình đặc tính của đất

Đất là một hệ ba pha, rời rạc, có tính thấm và không đồng nhất, tùy vào mục đích nghiên cứu mà đưa ra những mô hình đơn giản hóa gọi là mô hình cơ học của đất. Hiện nay, để tính toán lực cản nền đất lên các loại cọc, trên thế giới thường sử dụng một số mô hình tính toán sau:

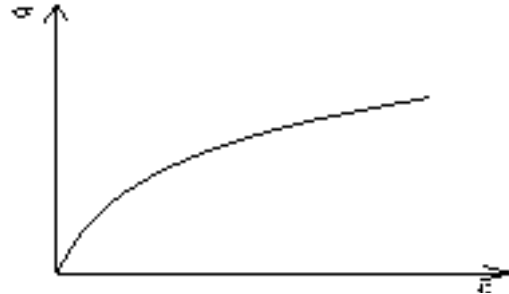
* Mô hình đàn hồi tuyến tính đẳng hướng giả thiết quan hệ ứng suất và biến dạng của đất theo tỷ lệ thuận, cường độ là vô hạn như trên hình 4. Mô hình này có ưu điểm là đơn giản nhưng không mô tả được đặc tính tương tác thực giữa đất và cọc đặc biệt trong trường hợp sử dụng lực rung động để hạ cọc. Khi đó, mối quan hệ này được biểu diễn bằng công thức:

$$[\sigma] = [D] \cdot [\varepsilon] \quad (1)$$

Trong đó: $[\sigma]$ - Ma trận ứng suất;

$[\varepsilon]$ - Ma trận biến dạng;

$[D]$ - Ma trận đàn hồi, được xác định như sau:



Hình 1. Mô hình đàn hồi tuyến tính

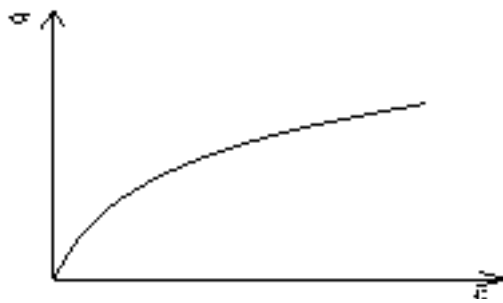
$$[D] = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 1-\mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & 1-\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Quan hệ giữa E , η và K , G có thể tính đổi bằng công thức sau:

$$\left. \begin{aligned} E &= \frac{9KG}{3K+G} \\ \mu &= \frac{3K-2G}{2(3K+G)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

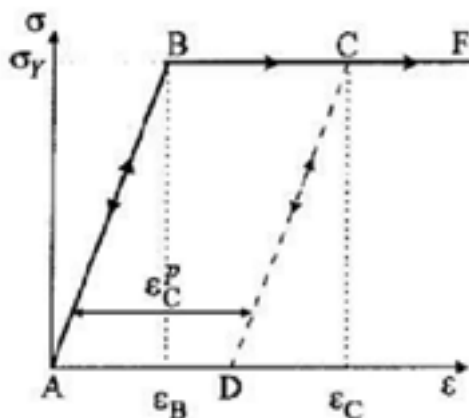
Trong đó: K , G - Mô đun biến dạng thể tích và mô đun cắt. Mô hình đàn hồi tuyến tính thường áp dụng để tính phân bố ứng suất thẳng đứng trong nền đất, tính chuyển vị và lún của nền đất trong trường hợp gia tải không thoát nước.

* Mô hình đàn hồi phi tuyến là phương pháp dùng để mô phỏng tình trạng biến dạng không tuyến tính sau khi bị chảy dẻo, nhưng đã bỏ qua ảnh hưởng của các nhân tố quan trọng như đường ứng suất, tức là giả thiết ứng suất-biến dạng biến đổi theo đường cong (hình 2), nó khác với mô hình đàn hồi tuyến tính ở chỗ mô đun đàn hồi biến đổi theo ứng suất.



Hình 2. Mô hình đàn hồi phi tuyến

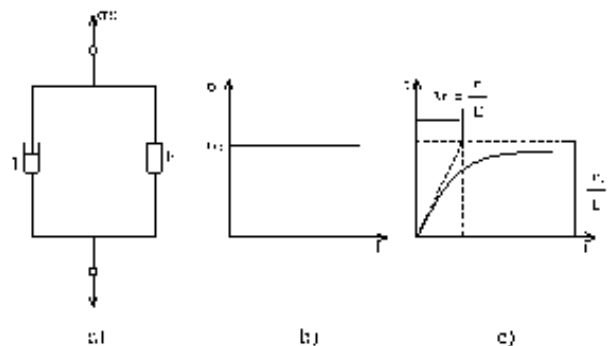
* Mô hình đàn-dẻo được xây dựng trên cơ sở lý thuyết dẻo thể hiện qua đường cong ứng suất-biến dạng ABCDCF như trên hình 3, đoạn AB thể hiện quan hệ tuyến tính theo định luật Hooke và được đặc trưng bởi mô đun đàn hồi E, đoạn BC thể hiện quan hệ biến dạng dẻo lúc này biến dạng tăng lên trong khi ứng suất không tăng, đoạn CD thể hiện quan hệ đàn hồi khi dỡ tải nhưng do đất đã bị biến dạng dẻo nên điểm D cách điểm A một lượng bằng giá trị biến dạng không phục hồi ϵ_C^p . Đường DC thể hiện quan hệ tuyến tính và đoạn CF thể hiện quan hệ biến dạng dẻo nếu đất được gia tải trở lại.



Hình 3. Mô hình đàn - dẻo

* Mô hình đàn-dẻo-nhót (hình 4) dưới tác động của tải trọng, biến dạng của đất mềm thay đổi theo thời gian. Khi tải trọng tác dụng luôn duy trì không đổi thì biến dạng sẽ không

phải là hằng số. Ngoài ra, khi tải trọng tăng dần, thì sự thay đổi biến dạng phụ thuộc vào tốc độ tăng tải, thể hiện rõ tính phụ thuộc vào thời gian, đến khi ứng suất càng gần với điểm chảy, tác động của nhân tố thời gian càng lớn, điều này thể hiện trong mô hình cơ bản về mối quan hệ ứng suất với biến dạng phải bao gồm cả thời gian. Tính chất biến dạng có quan hệ với thời gian của đất gọi là tính dẻo, lý thuyết đàn dẻo nhớt của đất thuộc phạm trù lưu biến học. Một số quan hệ cơ bản đàn dẻo nhớt được sử dụng hiện nay có: quan hệ đàn - nhớt, quan hệ đàn - nhớt - dẻo, quan hệ đàn - nhớt - dẻo phi tuyến.

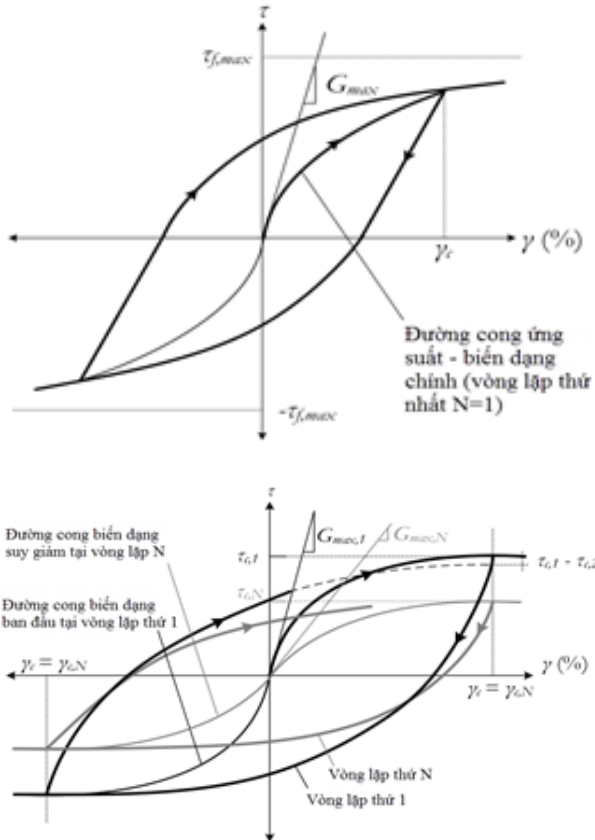


Hình 4. Mô hình và nguyên lý Kelvin-Voigt:
a) Mô hình cơ học; b) Quan hệ ứng suất - thời gian;
c) Quan hệ biến dạng - thời gian

2.2. Phân tích cơ chế tương tác giữa cọc thép và nền đất khi hạ cọc bằng lực rung động

Trong quá trình hạ cọc bằng búa rung, dưới tác động của lực rung động, cọc thép sẽ dao động theo phương thẳng đứng, khi đó vùng đất xung quanh thân cọc nhận được năng lượng của lực rung động do cọc thép truyền ra, lực rung động này có tính chất chu kỳ nên ứng suất và biến dạng cắt trong đất sẽ biến đổi theo quy luật động như trên hình 5 [2], [3], đồng thời đất phía dưới mũi cọc bị nén và có dạng chuyển động đối lưu khi cọc thép dao động. Với cơ chế tương tác như vậy, nên lực cản động thành cọc, mũi cọc là hàm quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của đất, trong đó các tính chất cơ lý của

đất là yếu tố quan trọng.



Hình 5. Quan hệ ứng suất-biến dạng của đất dạng hyperbolic khi chịu tải lặp

Từ quá trình nghiên cứu cơ chế tương tác của đất dưới tác dụng của tải trọng chu kỳ theo kết quả thí nghiệm nén 3 trục và cắt cánh hiện trường cho thấy, mối quan hệ phức tạp giữa biến dạng lớn - lực động và mối quan hệ ứng suất - biến dạng cắt khi chịu tải chu kỳ. Hình 5 thể hiện ứng xử của đất khi biên độ biến dạng chu kỳ γ_c thay đổi, trong đó G_{max} là mô đun cắt ban đầu (mô đun tiếp tuyến), τ_c là ứng suất cắt ứng với biến dạng γ_c , G_s là mô đun cắt tuyến và λ là hệ số giảm chấn trễ.

$$\lambda = \frac{\Delta W}{2\pi\gamma_c\tau_c} \quad (4)$$

Trong đó: ΔW là lượng năng lượng tổn thất trong một chu kỳ.

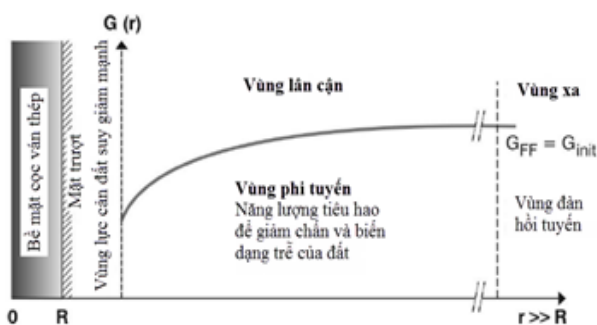
G_s và λ đều là các thông số phụ thuộc vào biến dạng, τ_{max} là ứng suất cắt lớn nhất tương ứng với biến dạng lớn nhất, τ_{max} và G_{max} giảm theo số chu kỳ lặp của tải. Mô đun cắt biến dạng nhỏ và cường độ cắt lớn nhất (G_{max} và τ_{max}) được xác định trong phòng thí nghiệm không phản ánh đúng tình trạng thực tế khi đất bị biến dạng do lực rung động nên hiện nay các giá trị này được xác định từ kết quả thí nghiệm xuyên tĩnh hiện trường (CPT) cho phép xác định các giá trị trên sát với giá trị thực.

* Quy luật suy giảm của đất khi chịu tác dụng của tải động chu kỳ: Theo [2], [4] dưới tác dụng của một số chu kỳ biến dạng lớn đối với đất không thoát nước, cấu trúc của đất liên tục bị phá vỡ, áp lực nước lỗ rỗng tăng lên và mô đun cắt tuyến giảm theo số chu kỳ của tải, hiện tượng này là hiện tượng “suy giảm độ cứng chu kỳ”. Khi biến dạng lớn ($\gamma_c > 10^{-2}$ mm), sự suy giảm liên tục của đất do sự môi đối với đất dính (sét) và sự suy giảm ứng suất hiệu quả trong đất dạng hạt (cát, sỏi) do áp lực nước lỗ rỗng tăng lên, dẫn đến độ cứng của đất bị giảm và hệ số giảm chấn tăng lên như trên hình 5, đất có chỉ số dẻo càng lớn thì càng dễ suy giảm, các loại đất cát - á sét không dẻo dễ bị suy giảm do các hạt sắp xếp lại và mất liên kết giữa các hạt do tải rung động; đối với đất sét, liên kết giữa các hạt đất chắc chắn hơn nên giữ được đặc tính đàn hồi đến mức biến dạng lớn hơn và ít bị nhạy cảm với sự suy giảm độ cứng chu kỳ.

* Hiện tượng hóa lỏng [2], [5], [6]: Trong điều kiện bão hòa khi hạ cọc thép bằng lực rung động vào nền đất cát bão hòa nước sẽ làm cho các hạt đất xung quanh thân cọc nhận được năng lượng và dao động, khi đó chúng sẽ sắp xếp lại và làm thể tích giảm, đồng thời làm tăng áp lực nước lỗ rỗng trong đất theo từng chu kỳ của tải trọng động, khi mà áp lực nước lỗ rỗng này đủ lớn và lớn hơn trọng lượng của các hạt đất (ứng suất hiệu quả giảm dần đến

0) sẽ làm cho chúng bị đẩy nổi và phá vỡ liên kết giữa các hạt dẫn đến cấu trúc đất bị phá vỡ, chính vì vậy sẽ làm giảm hoặc mất hoàn toàn khả năng chịu lực của đất. Trong điều kiện khô hoặc trường hợp thoát nước, ứng suất cắt trong đất bị giảm khi chịu tác động của lực rung với gia tốc lớn. Theo đó, đối với đất sét, ứng suất cắt liên quan chặt chẽ đến lực kháng cắt tại điểm tiếp xúc giữa các hạt, sự mất liên kết tại điểm tiếp xúc giữa các hạt chính là sự suy giảm ứng suất cắt và được gọi là hóa lỏng động.

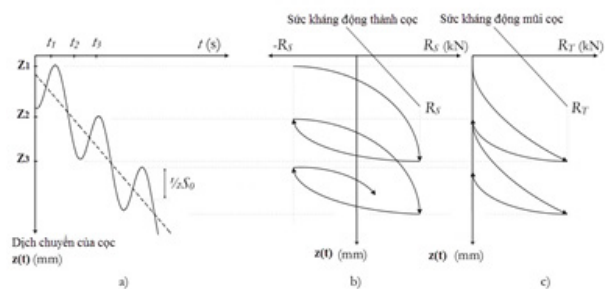
* Tương tác giữa bề mặt cọc với bề mặt đất: Trong quá trình hạ cọc thép vào nền đất, lực cản động của đất lên cọc thép phụ thuộc rất nhiều vào sự tương tác giữa đất với cọc cũng chính là phụ thuộc vào lượng năng lượng truyền đi, dạng sóng năng lượng truyền đi và vị trí truyền năng lượng (tại thành cọc hay tại mũi cọc), phụ thuộc vào các tính chất cơ lý của đất như loại đất, mức bão hòa, số lượng lớp đất và chiều dày các lớp, cũng như các thông số và nguyên lý hoạt động của búa rung. Vùng đất xung quanh cọc được chia thành 3 vùng như trên hình 6, tại vùng không chịu ảnh hưởng, đất biến dạng theo mô hình đàn hồi tuyến tính, mô đun cắt của đất không đổi mặc dù nhận được sóng dao động, tại vùng lân cận đất biến dạng theo mô hình phi tuyến, mô đun cắt của đất giảm dần, dọc theo bề mặt cọc thép (vùng chuyển động đối lưu), mô đun trượt tại vùng này rất khó xác định.



Hình 6. Sơ đồ phân vùng ứng xử của đất xung quanh cọc thép khi hạ bằng lực rung động

2.3. Mô hình toán xác định lực cản động của đất lên cọc thép

Các công trình nghiên cứu đã công bố cho thấy, lực cản động của đất lên cọc thép là yếu tố quan trọng nhất ảnh hưởng đến quá trình hạ cọc, lực cản động tác dụng lên cọc thép gồm hai thành phần là lực cản động thành cọc (R_s) và lực cản động mũi cọc (R_f) [2], [7]. Dưới tác động của tải trọng chu kỳ, các thành phần lực cản này có quy luật thay đổi như thể hiện trên hình 7.



Hình 7. Sơ đồ mô tả dịch chuyển của cọc thép (a), lực cản động thành cọc (b) và lực cản động mũi cọc (c)

Tổng lực cản động thành cọc (R_s) do các lớp đất tác dụng lên phần chiều dài cọc đã được hạ vào trong nền đất được xác định bằng công thức sau:

$$R_s = \text{sign}(\dot{z}_2) \chi \int_0^z \tau_d dz \text{ với } \text{sign}(\dot{z}_2) = \begin{cases} 1 & \text{khí } \dot{z}_2 > 0 \\ 0 & \text{khí } \dot{z}_2 = 0 \\ -1 & \text{khí } \dot{z}_2 < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Trong đó:

χ : Chu vi cọc thép, m;

τ_d : Sức kháng cắt động đơn vị tại thành cọc, kN/m²;

z : Chiều sâu dịch chuyển của đầu cọc vào đất, m;

$\dot{z}_2$: Vận tốc dịch chuyển của cọc, m/s.

Lực cản động mũi cọc (R_f) của lớp đất

hiện tại mà mũi cọc đang dịch chuyển vào được xác định bằng công thức sau:

$$R_t = \begin{cases} q_d \cdot A_t & \text{khí } \dot{z}_2 > 0 \\ 0 & \text{khí } \dot{z}_2 \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

Với:

A_t : Diện tích mũi cọc, m^2 ;

q_d : Sức kháng nén động đơn vị tại mũi cọc, kN/m^2 .

- Mô hình Vibdrive [2]: Áp dụng xác định sức kháng động thành cọc và mũi cọc đơn vị (τ_d và q_d) của các loại đất cát. Trong quá trình rung hạ cọc, các giá trị này (τ_d và q_d) phụ thuộc vào giá trị sức kháng tĩnh (q_s và τ_s) và các giá trị sức kháng hóa lỏng của đất (q_l và τ_l) cũng như sự giảm của gia tốc dao động theo hàm lũy thừa như sau:

$$q_d = (1 - e^{-\alpha})q_l + q_s e^{-\alpha} \quad (7)$$

$$\tau_d = (1 - e^{-\alpha})\tau_l + \tau_s e^{-\alpha} \quad (8)$$

Trong đó:

q_l : Sức kháng hóa lỏng đơn vị của đất tại mũi cọc, kN/m^2 ;

q_s : Sức kháng tĩnh đơn vị tại mũi cọc, kN/m^2 ;

τ_l : Sức kháng hóa lỏng đơn vị của đất dọc thành cọc, kN/m^2 ;

τ_s : Sức kháng tĩnh đơn vị của đất dọc thành cọc, kN/m^2 ;

$\alpha = a/g$: Tỷ suất gia tốc.

Cơ chế giảm cường độ thực nghiệm trong mô hình Vibdrive liên quan đến ảnh hưởng của việc tăng áp lực nước lỗ rỗng, cũng được mô hình bởi hàm mũ có chứa hệ số ma sát và thông số hóa lỏng và được xác định bằng công thức sau:

$$q_l = q_s \left[(1 - \psi) e^{-\frac{1}{R_f}} + \psi \right] \quad (9)$$

$$\tau_l = \tau_s \left[(1 - \psi) e^{-\frac{1}{R_f}} + \psi \right] \quad (10)$$

Trong đó:

ψ : Hệ số hóa lỏng thực nghiệm, $4 < (1/\psi) < 10$;

R_f : Tỷ lệ sức kháng ($f_s/q_c \cdot 100$) thu được từ kết quả thí nghiệm CPT, %.

- Mô hình Alain Holeyham [2]: Áp dụng xác định lực cản động của đất sét lên cọc thu được từ quá trình nội suy giữa giá trị sức kháng tĩnh và sức kháng suy giảm cuối. Giá trị tĩnh (q_s , τ_s) thu được từ các kết quả thí nghiệm CPT. Sức kháng động chảy lỏng đơn vị được xác định dựa trên quy luật hàm mũ như sau:

$$q_l = q_s \left[(1 - 1/\Lambda) e^{-\frac{3}{FR}} + 1/\Lambda \right] \quad (11)$$

$$\tau_l = \tau_s \left[(1 - 1/\Lambda) e^{-\frac{3}{FR}} + 1/\Lambda \right] \quad (12)$$

Trong đó:

Λ : Hệ số chảy lỏng thực nghiệm lấy trong khoảng $4 < \Lambda < 10$;

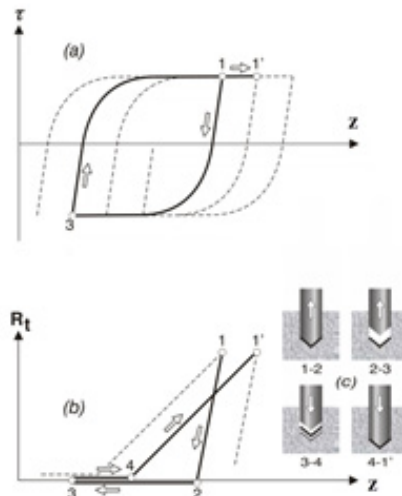
FR : Tỷ lệ sức kháng thu được từ kết quả thí nghiệm CPT, %.

Lực cản động đơn vị (q_d , τ_d) thu được từ lực cản tĩnh và sức kháng chảy lỏng phụ thuộc vào biên độ rung:

$$q_d = (q_s - q_l) e^{-\alpha} + q_l \quad (11)$$

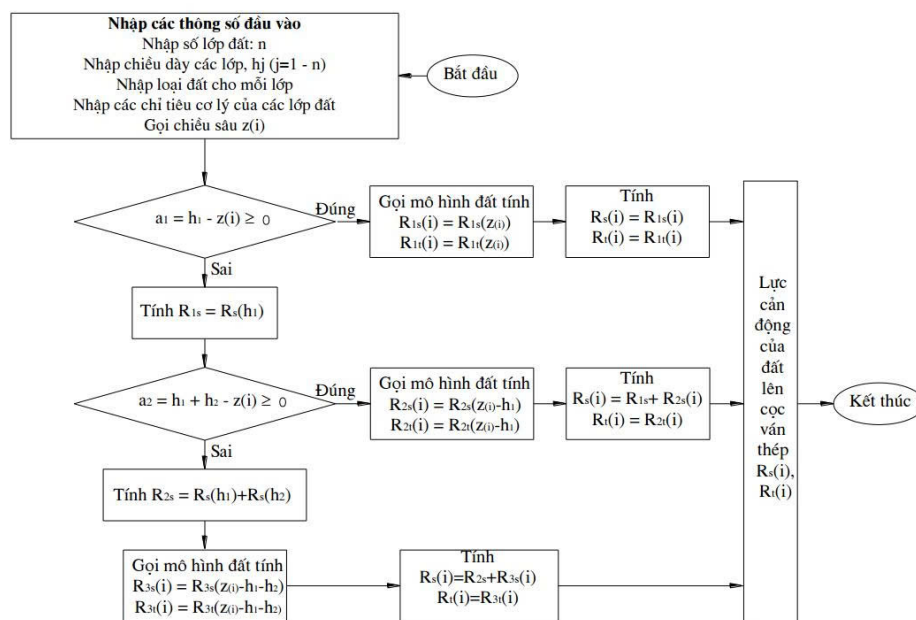
$$\tau_d = (\tau_s - \tau_l) e^{-\alpha} + \tau_l \quad (12)$$

Sức kháng của đất tại mũi cọc được coi gồm nhiều pha khác nhau phụ thuộc vào tương quan vị trí của cọc và đất như trên hình 8. 



Hình 8. Sự thay đổi sức kháng thành cọc (a) và sức kháng mũi cọc (b) theo chuyển vị của cọc

2.4. Xây dựng chương trình tính toán lực cản động của đất lên cọc thép khi hạ cọc bằng búa rung



Hình 9. Sơ đồ chương trình con tính lực cản động của các lớp đất lên cọc thép

2.5. Kết quả tính toán

Sử dụng chương trình tính toán được xây dựng ở trên để chạy với bài toán búa rung VH-QTUTC70 [1] để hạ cọc ván thép NSP-IIw vào các lớp đất có các thông số như sau:

- Lớp 1: Cát hạt nhỏ màu xám đen, chặt vừa, có chiều dày 2,07m, chỉ số SPT trung bình N = 15, có các chỉ tiêu cơ lý sau:

+ Sức kháng thành đơn vị theo thí nghiệm CPT, $f_s = 31 \text{ kN/m}^2$;

+ Sức kháng mũi côn đơn vị theo thí nghiệm CPT, $q_c = 3420 \text{ kN/m}^2$;

+ Sức kháng tĩnh đơn vị của đất dọc thành cọc, $\tau_s = 41 \text{ kN/m}^2$;

+ Sức kháng tĩnh đơn vị tại mũi cọc, $q_s = 3150 \text{ kN/m}^2$;

+ Khối lượng thể tích tự nhiên:

$\gamma = 1850 \text{ kg/m}^3$;

+ Góc ma sát, $\varphi = 28^\circ 42'$;

+ Cường độ kháng cắt không thoát nước trung bình, $S_u = 125 \text{ kN/m}^2$;

+ Cỡ hạt được thể hiện trong biểu đồ thành phần hạt (hình 11).

- Lớp 2: Sét pha màu xám nâu, trạng thái nửa cứng, có chiều dày 6,9m, có chỉ số SPT trung bình $N = 27$, có các chỉ tiêu cơ lý sau:

+ Sức kháng thành đơn vị theo thí nghiệm CPT, $f_s = 73 \text{ kN/m}^2$;

+ Sức kháng mũi côn đơn vị theo thí nghiệm CPT, $q_c = 5980 \text{ kN/m}^2$;

+ Sức kháng tĩnh đơn vị của đất dọc thành cọc, $\tau_s = 71 \text{ kN/m}^2$;

+ Sức kháng tĩnh đơn vị tại mũi cọc, $q_s = 5200 \text{ kN/m}^2$;

+ Khối lượng thể tích tự nhiên:

$\gamma = 1890 \text{ kg/m}^3$;

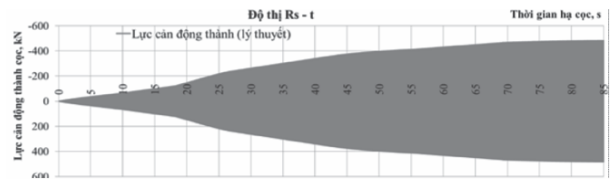
+ Chỉ số dẻo, $I_p = 14,7 \%$;

+ Lực dính kết, $c = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ kN/m}^2$;

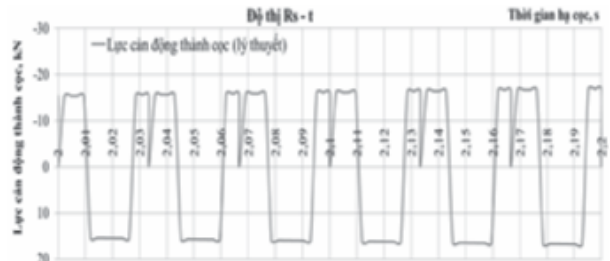
+ Hệ số lỗ rỗng, $e_0 = 0,849$;

+ Góc ma sát trong, $\varphi = 12^\circ 25'$;

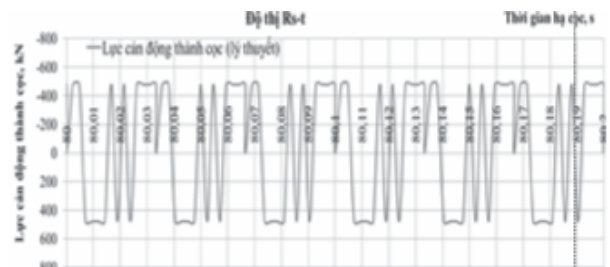
+ Cường độ kháng cắt không thoát nước trung bình, $S_u = 200 \text{ kN/m}^2$.



a) Lực cản động thành cọc tổng thể theo thời gian hạ cọc

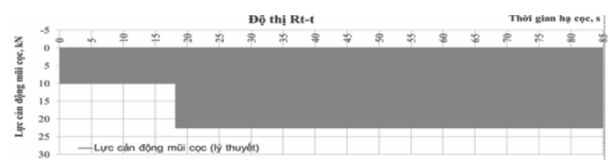


b) Lực cản động thành cọc khi $t = 2 \text{ s}$

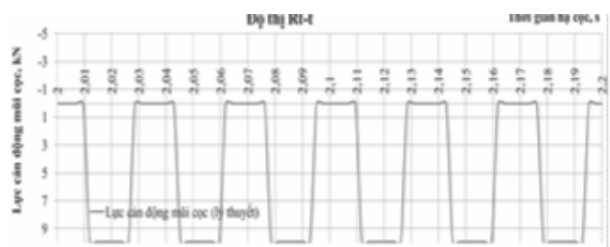


c) Lực cản động thành cọc khi $t = 80 \text{ s}$

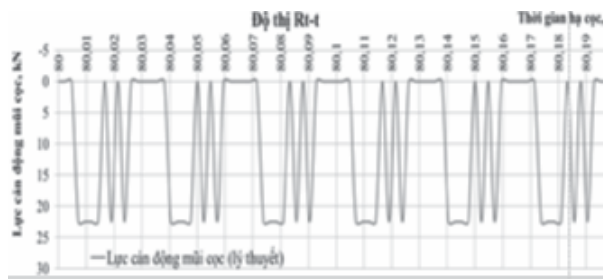
Hình 10. Lực cản động thành cọc ($f = 30\text{Hz}$)



a) Lực cản động mũi cọc tổng thể theo thời gian hạ cọc



b) Lực cản động mũi cọc tại $t = 2 \text{ s}$ (lớp 1)



c) Lực cản động mũi cọc tại $t = 80$ s (lớp 2)

Hình 11. Lực cản động mũi cọc ($f = 30$ Hz)

Từ kết quả trên ta thấy, lực cản động thành cọc có giá trị tăng dần theo chiều sâu hạ cọc (hình 10), giá trị của nó thay đổi có tính chất lặp theo chu kỳ dịch chuyển (dao động). Giá trị biên độ của lực cản động thành cọc thay đổi khi cọc dịch chuyển qua các lớp đất khác nhau, khi cọc được ấn xuống, giá trị lực cản này tăng, khi cọc được rút lên thì giá trị lực cản này giảm nhanh. Lực cản động mũi cọc (hình 10), giá trị của nó thay đổi khi qua các lớp đất khác nhau và gần như không thay đổi trong mỗi lớp đất. Trong mỗi chu kỳ dao động của cọc thì giá trị của nó tương ứng với quá trình cọc đi xuống và bằng 0 ứng với quá trình cọc đi lên. Từ đó cho thấy các thành phần lực cản động thành cọc/mũi cọc thu được từ quá trình tính toán phù hợp với mô hình lý thuyết đã phân tích ở trên.

3. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Xác định lực cản động của nền đất lên cọc thép là nhiệm vụ phức tạp và cần thiết trong quá trình hạ cọc bằng búa rung. Bài báo đã xây dựng phương pháp lý thuyết và chương trình tính toán để xác định các thành phần lực cản động thành cọc và mũi cọc. Kết quả tính toán cho thấy lực cản động thay đổi theo chiều sâu hạ cọc và đặc trưng của từng lớp đất, phù hợp với cơ chế lý thuyết đã đề xuất.

Phương pháp này có thể ứng dụng vào việc tính toán thiết kế hoặc lựa chọn búa rung

phù hợp cho các công trình thi công cọc thép tại Việt Nam, giúp nâng cao tính chính xác và hiệu quả trong quá trình thi công. Tuy nhiên, do sự đa dạng của các loại đất và các yếu tố địa chất tại các công trình khác nhau, cần có thêm nhiều nghiên cứu thực nghiệm để hoàn thiện và tối ưu hóa phương pháp này. ❖

Ngày nhận bài: **23/3/2026**

Ngày phản biện: **01/4/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Thái Hà Phi và tập thể (2014), “*Nghiên cứu, thiết kế chế thử búa rung thủy lực 70 tấn*”. Đề tài khoa học và công nghệ cấp Bộ Giáo dục và Đào tạo.
- [2]. Kenneth, Viking (2002), “*Vibro-driveability-a field study of vibratory driven sheet piles in non-cohesive soils*”. Byggvetenskap.
- [3]. Wang, Yinhui, et al. (2011), “*Soil-Pile Dynamic Interaction in the Viscous Damping Layered Soils*”. Open Civil Engineering Journal, 5, pp. 100-108.
- [4]. Vanden Berghe, JF (2001), “*Sand strength degradation within the framework of pile vibratory driving*”. Doctoral Thesis, Université Catholique de Louvain, Belgium.
- [5]. Bernhard, RK (1967), “*Fluidization phenomena in soils during vibro-compaction and vibro-pile-driving and-pulling*. Hanover, NH 1967, 58 pp”. US Army Cold Regions Research and Engineering.
- [6]. Billet, P and Sieffert, JG (1989), “*Soil-sheet pile interaction in vibro-piling*”. Journal of Geotechnical Engineering, 115(8), pp. 1085-1101.
- [7]. Guillemet, Claire (2013), “*Pile - Soil Interaction during Vibratory Sheet Pile Driving*”. Master of Science Thesis, Royal Institute of Technology.