

Ảnh hưởng của các thông số búa rung thủy lực đến lực cản của đất và độ dịch chuyển của cọc thép trong quá trình hạ cọc

Vũ Văn Trung^{1*}, Thái Hà Phi¹, Trần Quang Hùng²

¹Trường Đại học Giao thông Vận tải

²Học viện Kỹ thuật Quân sự

Ngày nhận bài 25/4/2017; ngày chuyển phản biện 28/4/2017; ngày nhận phản biện 5/6/2017; ngày chấp nhận đăng 12/6/2017

Tóm tắt:

Lựa chọn búa rung thủy lực phù hợp với cọc thép và nền đất có ý nghĩa kinh tế rất lớn trong quá trình thi công các công trình xây dựng dân dụng và công nghiệp. Để có sự tính toán đúng đắn cần thiết phải có sự phân tích đúng bản chất vật lý về tương tác giữa cọc thép với đất, động lực học của cơ hệ trong cả quá trình ép hạ cọc thép vào đất. Bài báo trình bày mô hình động lực học quá trình hạ cọc thép vào nền đất bằng búa rung thủy lực. Lập chương trình khảo sát ảnh hưởng của các thông số búa rung đến lực cản ép cọc, độ dịch chuyển cọc vào đất với một bộ thông số cụ thể, làm cơ sở để lựa chọn búa rung có thông số phù hợp với cọc và nền đất.

Từ khóa: Búa rung thủy lực, cọc thép, độ dịch chuyển cọc, lực cản ép cọc thép, thông số của búa.

Chỉ số phân loại: 2.1

Surveying the effect of hydraulic vibrator parameters on the resistance between steel piles and soils when installing

Van Trung Vu¹, Ha Phi Thai¹, Quang Hung Tran^{2*}

¹University of Transport and Communications

²Military Technical Academy

Received 25 April 2017; accepted 12 June 2017

Abstract:

The proper use of hydraulic vibrators in accordance with steel piles and soils results in a high economic efficiency. For the correct calculation, it is necessary to exactly analyse the physical nature of the mutual effect between steel piles and soils, system dynamics during pile driving into the soils. The article has shown the dynamics model in steel pile driving into the soils with hydraulic vibrators. The assessment on the impacts of vibrator specifications on the resistance and penetration of piles with specific specifications shall be used as a basis to select a proper hydraulic vibrator in accordance with piles and soils.

Keywords: Hydraulic vibrator, pile penetration, soil resistance, steel pile, vibrator parameters.

Classification number: 2.1

Đặt vấn đề

Công nghệ hạ cọc thép bằng búa rung được sử dụng khá phổ biến ở nước ta hiện nay để phục vụ thi công các công trình. Ưu điểm nổi bật của công nghệ này là giảm thời gian thi công, sử dụng được ở nhiều địa hình, không gây ảnh hưởng lớn đến các công trình lân cận, không phá hủy cọc trong quá trình hạ cọc... Búa rung có thể được dẫn động bằng cơ khí hoặc thủy lực, được lắp trên các máy cơ sở như máy xúc, cần trục hoặc máy chuyên dùng. Để quá trình hạ cọc có hiệu quả cần thiết phải có sự phù hợp giữa các thành phần như cần trục, búa rung, cọc thép và nền đất, hay nói cách khác, quá trình hạ cọc vào nền đất bằng búa rung phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố như các yếu tố của nền đất (các chỉ tiêu cơ lý của đất), các thông số của cọc và các thông số của búa rung (tần số, biên độ và giá trị lực kích thích, trọng lượng búa...). Tuy nhiên, tài liệu tính toán, thiết kế búa rung để hạ cọc hiện nay ở nước ta còn hiếm và không đầy đủ nên trong thực tế việc tính chọn máy cơ sở, búa rung, cọc ván thép đều dựa theo hướng dẫn sử dụng của nhà sản xuất hoặc theo tài liệu của các nước khác. Đã có một số công trình trong nước nghiên cứu về búa rung, nhưng có thể thấy hầu hết các công trình này mới chỉ dừng lại ở việc tính toán thiết kế, xây dựng bài toán động lực học và mô hình thực nghiệm nhằm xác định các thông số cơ bản của búa rung... mà chưa có công trình nào đề cập đến việc xây dựng mô hình động lực học khảo sát sự ảnh hưởng các thông số của búa rung đến quy luật thay đổi lực cản của nền đất tác dụng lên cọc trong

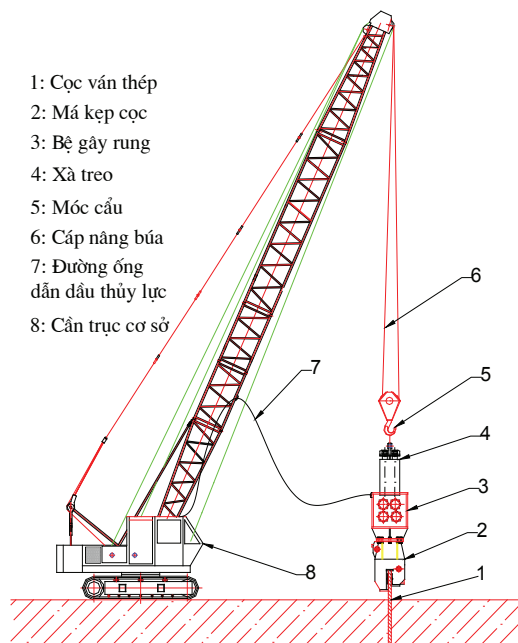
*Tác giả liên hệ: Email: Vuvantrungdhgtvt@yahoo.com

quá trình rung hạ cọc và độ dịch chuyển của cọc vào nền, để từ đó xác định các thông số hợp lý của búa rung trong quá trình tính toán, thiết kế và thi công cọc thép. Xuất phát từ yêu cầu trên, nhóm tác giả tiến hành xây dựng bài toán động lực học quá trình hạ cọc bằng búa rung, khảo sát ảnh hưởng của các thông số búa rung đến lực cân giữa cọc thép và đất, sự dịch chuyển của cọc nhằm mục đích tính toán lựa chọn búa rung phù hợp với cọc thép và nền đất, tăng năng suất, giảm chi phí năng lượng trong khi không làm hư hỏng cọc (cong, biến dạng cọc, lệch hướng đi thẳng của cọc).

Nội dung nghiên cứu

Công nghệ hạ cọc thép bằng búa rung

Công nghệ cọc thép đã được sử dụng khá phổ biến ở nước ta hiện nay để gia cố nền đất yếu hoặc làm tường vây. Ưu điểm nổi bật của công nghệ này là giảm thời gian thi công, sử dụng được ở nhiều địa hình, không gây ảnh hưởng lớn đến các công trình lân cận, không phá hủy cọc trong quá trình hạ cọc... (búa rung là một phương pháp phổ biến dùng để hạ cọc thép). Búa rung có thể được dẫn động bằng cơ khí hoặc thủy lực, được lắp trên các máy cơ sở như máy xúc, cần trục hoặc máy chuyên dùng. Một trong những thiết bị tương đối phổ biến được sử dụng để ép hạ cọc thép vào nền đất được mô tả như trên hình 1, gồm búa rung 3 được cấp dầu thủy lực bởi đường ống 7, búa được treo trên cáp 6 của máy cầu bánh xích 8 thông qua khung treo (xà treo) 4, cọc thép 1 được kẹp chặt với búa rung bằng bộ kẹp 2 khi làm việc.



Hình 1. Búa rung thủy lực lắp trên cần trục bánh xích.

Mô hình động lực học ép cọc thép bằng búa rung

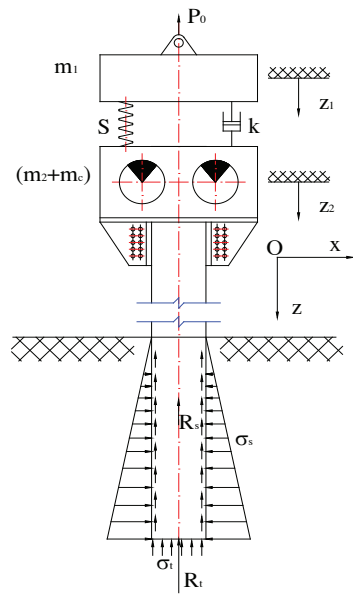
Khi sử dụng búa rung để hạ cọc thép vào nền đất, dưới tác dụng của lực rung động do búa rung gây ra và trọng lượng toàn bộ hệ búa - cọc tác dụng lên đầu cọc làm cho cọc có xu hướng dịch chuyển dần vào nền đất, quá trình hạ cọc này là một quá trình rất phức tạp, dưới tác dụng của lực rung động, các phần tử đất xung quanh thân cọc sẽ chuyển động theo, khi tần số rung đạt đến một giá trị nhất định thì liên kết giữa các hạt đất xung quanh và vùng lân cận sẽ bị phá vỡ nên lực cản của nền đất tác dụng lên cọc giảm so với lực cản tĩnh. Lực cản của nền đất lên cọc gồm có lực cản thành cọc và lực cản mũi cọc, để xác định các thành phần lực cản này cho đến nay trên thế giới có nhiều trường phái khác nhau, trong bài báo này nhóm tác giả sử dụng mô hình đàn hồi để xác định các thành phần lực cản của nền đất lên cọc [1, 2].

Xuất phát từ vấn đề trên, nhóm tác giả tiến hành xây dựng mô hình động lực học của hệ “búa rung - cọc - nền” nhằm khảo sát sự ảnh hưởng các thông số của búa rung đến quy luật thay đổi của lực cản giữa cọc với nền đất khi hạ cọc bằng lực rung động như trên hình 2 [3]. Trong đó búa rung được treo bằng cáp qua cơ cấu treo (khung treo) có khối lượng m_1 , cơ cấu gây rung có khối lượng m_2 và cọc có khối lượng m_c được kẹp chặt với cơ cấu gây rung tạo thành một liên kết cứng có khối lượng (m_2+m_c) . Búa và cọc được liên kết với khung treo qua hệ giảm chấn. Lực cản nền đất lên cọc bao gồm lực cản thành R_s và lực cản mũi cọc R_t .

Mô hình động lực học của hệ được xây dựng dựa trên các giả thiết:

- Cọc thép dịch chuyển vào đất theo hướng thẳng đứng, cọc không bị xoắn và uốn trong quá trình ép cọc;
- Coi cọc cứng tuyệt đối, các điểm trên thân cọc dao động với cùng biên độ và tần số;
- Các lớp đất có cùng tính chất cơ lý.

Mô hình động lực học búa rung hạ cọc thép là mô hình 2 khối lượng. Mô hình tương tác giữa cọc và đất được thể hiện qua quy luật biến đổi của các thành phần lực thân cọc và lực cản đầu cọc. Ở đó, lực cản thành bên phụ thuộc vào áp lực ngang của nền tác dụng lên cọc, hệ số ma sát cọc thép - đất và diện tích tiếp xúc giữa cọc với nền...; lực cản đầu cọc phụ thuộc vào diện tích mũi cọc, các tham số của nền và áp lực đứng của cọc trên nền.



Hình 2. Mô hình động lực học búa rung thủy lực hạ cọc thép 2 khối lượng.

P_0 - Lực kéo cáp nâng hạ búa (N); m_1 - Khối lượng khung treo (kg); m_2 - Khối lượng bệ gây rung (kg); m_c - Khối lượng cọc (kg); z_1 - Dịch chuyển của khung treo (m); z_2 - Dịch chuyển của bệ gây rung và cọc (m); S - Độ cứng của giảm chấn (N/m); k - Hệ số đập tắt dao động của hệ giảm chấn (N.s/m); R_s - Lực cản thành bên của cọc (N); R_t - Lực cản mũi cọc (N).

Theo Svetlana Polukoshko [4], các thành phần lực cản này được xác định như trong công thức (1):

$$\begin{cases} \tilde{R}_s = \int_0^z p \cdot \sigma_s(z) dz = \int_0^z (p \cdot \gamma \cdot k_0 \cdot z \cdot f_{c-t}) dz = p \cdot \gamma \cdot k_0 \cdot f_{c-t} \cdot \frac{z^2}{2} \\ \tilde{R}_t = f_s \cdot A_t \cdot \sigma_t \end{cases} \quad (1)$$

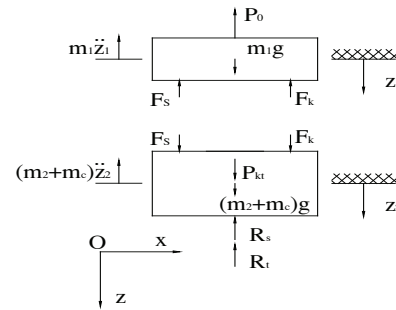
Trong đó: $\tilde{R}_s$ - Lực cản của đất tác dụng lên thành cọc (N); $\tilde{R}_t$ - Lực cản của đất tác dụng lên mũi cọc (N); p - Chu vị bề mặt ngoài của cọc (m); γ - Trọng lượng riêng của đất (N/m³); z - Độ dịch chuyển đầu cọc vào đất (m); f_s - Tham số của nền đất; A_t - Tiết diện mặt cắt cọc tại mũi cọc (m²); σ_t - Áp lực nền đất tại mũi cọc (N/m²); f_{c-t} - Hệ số ma sát giữa cọc thép với đất; k_0 - Hệ số áp lực hông của đất; $\sigma_s(z)$ - Áp lực nền đất phân bố dọc theo chiều sâu cọc (N/m²).

Thực tế cho thấy, lực cản của đất tác dụng lên thành cọc (R_s) chỉ xuất hiện khi cọc có chuyển động ($\dot{z}_2 \neq 0$) và chiều tác dụng của nó luôn có xu hướng ngược với chuyển động của cọc, khi cọc chuyển động đi xuống ($\dot{z}_2 > 0$), lực cản có hướng đi lên và khi cọc chuyển động đi lên ($\dot{z}_2 < 0$), lực cản có hướng đi xuống, lực cản này bằng 0 khi cọc có $\dot{z}_2 = 0$ (cọc không chuyển động). Còn thành phần lực cản tác dụng lên mũi cọc (R_t) chỉ xuất hiện khi cọc có chuyển

động đi xuống ($\dot{z}_2 > 0$), khi cọc đi lên ($\dot{z}_2 < 0$), lực cản mũi cọc bằng không. Từ đó, kết hợp với (1), ta xây dựng được phương trình các thành phần lực cản của đất tác dụng lên cọc có kể đến chiều tác dụng trong quá trình hạ cọc bằng búa rung như sau:

$$\begin{cases} R_s = \begin{cases} \tilde{R}_s & \text{khi } \dot{z}_2 > 0 \\ 0 & \text{khi } \dot{z}_2 = 0 \\ -\tilde{R}_s & \text{khi } \dot{z}_2 < 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_s = \tilde{R}_s \cdot \text{sgn}(\dot{z}_2) \\ R_t = 0,5 \tilde{R}_t [1 + \text{sgn}(\dot{z}_2)] \end{cases} \\ R_t = \begin{cases} \tilde{R}_t & \text{khi } \dot{z}_2 > 0 \\ 0,5 \tilde{R}_t & \text{khi } \dot{z}_2 = 0 \\ 0 & \text{khi } \dot{z}_2 < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

Từ mô hình động lực học của hệ búa rung thủy lực - cọc - nền (hình 2), ta xây dựng được sơ đồ phân tích mô hình động lực học như trên hình 3.



Hình 3. Sơ đồ phân tích mô hình động lực học.

Tiến hành phân tích lực và áp dụng nguyên lý D'Alembert ta thiết lập được hệ phương trình chuyển động của cơ hệ búa rung - cọc thép - nền như sau:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 + k(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + S(z_1 - z_2) + P_0 - m_1 g = 0 \\ (m_2 + m_c) \ddot{z}_2 - k(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - S(z_1 - z_2) - (m_2 + m_c) g = 0 \\ -P_{kt} + R_s + R_t = 0 \end{cases} \quad (3)$$

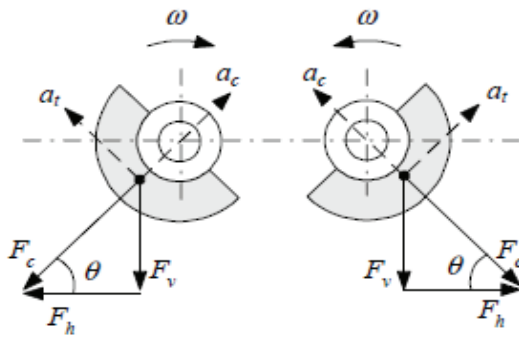
Trong đó: P_{kt} là lực kích rung của bộ gây rung; Lực kích thích của bộ gây rung được tạo ra bởi các bánh lệch tâm là hợp lực của các lực ly tâm do các bánh lệch tâm này gây ra khi quay theo phương thẳng đứng (hình 4) và được tính theo công thức:

$$P_{kt} = 2F_c \sin(\omega t) = 2m_e r_e \omega^2 \sin(\omega t) \quad (4)$$

F_c - Lực ly tâm của một khối lệch tâm là:

$$F_c = m_e r_e \omega^2 \quad (5)$$

Với: m_e - Khối lượng lệch tâm (kg); r_e - Bán kính lệch tâm (m); ω - Vận tốc góc trục lệch tâm (rad/s).



Hình 4. Sơ đồ tính lực kích thích của búa rung.

Thay các biểu thức (1), (2), (4) và (5) vào hệ phương trình (3) nhận được hệ sau:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 + k(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + S(z_1 - z_2) + P_0 - m_1 g = 0 \\ (m_2 + m_c) \ddot{z}_2 - k(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - S(z_1 - z_2) - (m_2 + m_c) g \\ -P_{kt} + R_s + R_t = 0 \end{cases} \quad (6)$$

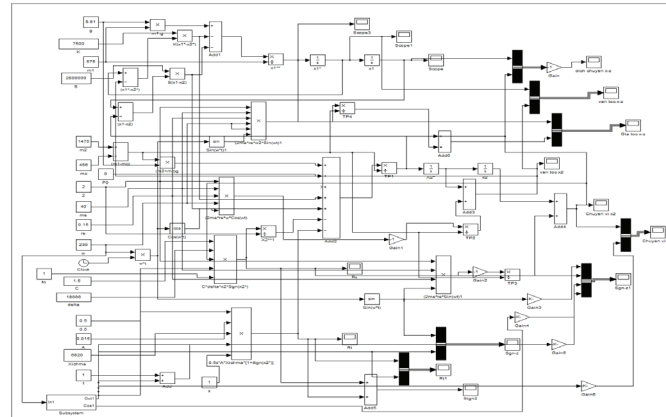
Xây dựng chương trình tính và khảo sát sự ảnh hưởng các thông số của búa rung đến sự thay đổi của lực cản nền lên cọc

Để khảo sát quy luật thay đổi lực cản của nền đất tác dụng lên cọc theo các thông số của búa rung, ta ứng dụng phần mềm Matlab để xây dựng chương trình tính toán cho hệ phương trình chuyển động (6) và tiến hành giải bài toán trên với bộ thông số đầu vào của đất, búa rung như trong bảng 1.

Bảng 1. Các thông số đầu vào của mô hình.

TT	Các thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
1	Khối lượng khung treo búa	m_1	kg	575
2	Khối lượng bộ gây rung	m_2	kg	1475
3	Khối lượng lệch tâm	m_c	kg	40
4	Hệ số độ cứng của nền	S	N/m	28.10^5
5	Hệ số giảm chấn của nền	k	N.s/m	7500
6	Tần số góc của bộ gây rung	ω	rad/s	230
7	Bán kính lệch tâm của bánh lệch tâm	r_c	m	0,15
8	Diện tích mặt cắt ngang của cọc	A_t	m ²	0,015
9	Chu vi mặt cắt cọc thép	p	m	1,5
10	Trọng lượng riêng của đất	γ	N/m ³	18.10^3
11	Ứng suất nén của đất	σ_t	N/m ²	6820.10^3
12	Hệ số ma sát giữa đất - cọc thép	f_{c-t}		0,5
13	Tham số của nền đất	f_s		1
14	Hệ số áp lực bên của đất	k_0		0,78
15	Khối lượng cọc	m_c	kg	456

Ứng dụng phần mềm Matlab, chương trình tính toán được trình bày ở hình 5.



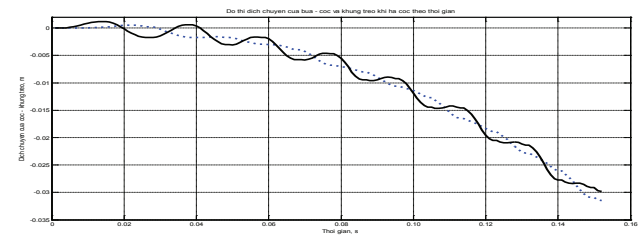
Hình 5. Chương trình tính toán trên phần mềm Matlab - Simulink.

Chạy chương trình với các thông số như trong bảng 1 với điều kiện đầu vào là:

- Thời điểm ban đầu $t = 0$; $z_{10} = 0$; $z_{20} = 0$ (khung treo và búa - cọc ở vị trí cân bằng tĩnh ban đầu, cọc nằm trên bề mặt nền đất);

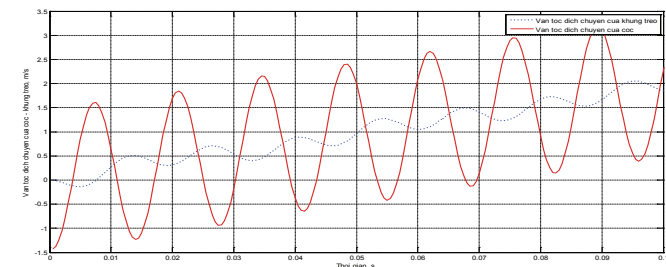
- Pha ban đầu của lực kích rung bằng không.

Kết quả được ghi trên các hình từ 6 đến 14.

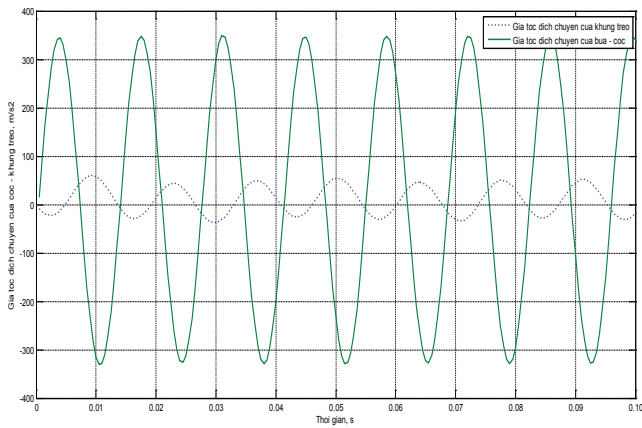


Hình 6. Đồ thị dịch chuyển của cọc và khung treo.

Kết quả dịch chuyển của khung treo và cọc trên đồ thị (hình 6) cho thấy, dịch chuyển của cọc (đường nét liền) và dịch chuyển của khung treo (đường nét đứt) bám sát nhau, khung treo có biên độ dao động nhỏ hơn biên độ dao động của cọc (vì giữa chúng có hệ giảm chấn), dịch chuyển của búa có xu hướng đi xuống, tức là theo chiều hạ cọc vào đất với vận tốc trung bình khoảng 0,035 m/0,15 s (23,3 m/s).



Hình 7. Đồ thị vận tốc dịch chuyển của cọc và khung treo.

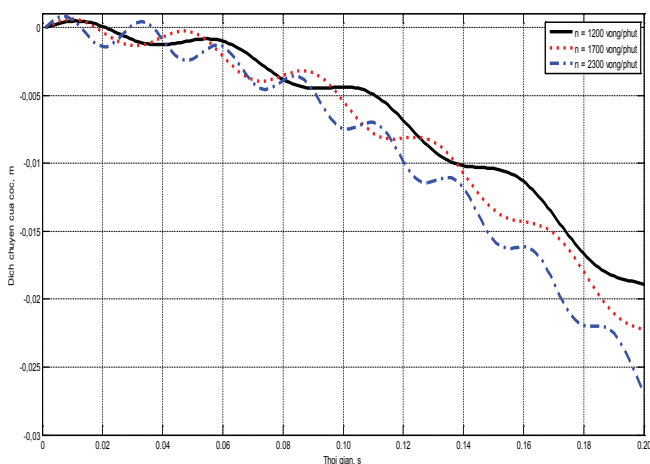


Hình 8. Đồ thị gia tốc dịch chuyển của cọc và khung treo.

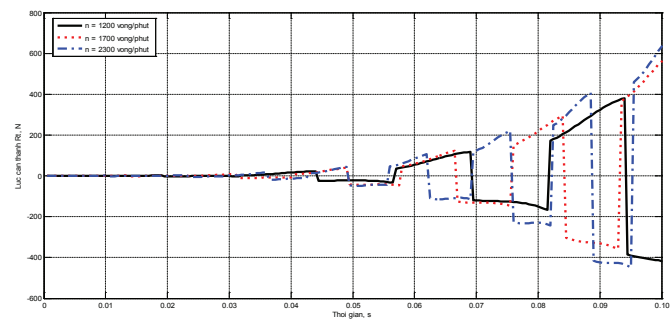
Kết quả nhận được trên hình 7 cho thấy, khung treo có biên độ vận tốc khoảng 0,4 m/s, thấp hơn biên độ vận tốc của cọc, 1,65 m/s. Từ kết quả độ dịch chuyển và vận tốc dao động của cọc thép cho thấy giá trị trung bình của độ dịch chuyển và vận tốc có giá trị lớn hơn không, điều này cho thấy độ dịch chuyển và vận tốc của cọc khi di chuyển đi lên nhỏ hơn độ dịch chuyển và vận tốc khi di chuyển đi xuống, vì vậy cọc được hạ sâu dần vào nền đất.

Đồ thị gia tốc của cọc và khung treo đều dao động ổn định quanh giá trị cân bằng (hình 8). Biên độ gia tốc của cọc thép 325 m/s² lớn hơn rất nhiều biên độ gia tốc của khung treo 60 m/s², từ đó cho thấy quy luật biến thiên các giá trị động lực học của mô hình thể hiện đúng quy luật thực tế quá trình làm việc của búa rung khi hạ cọc.

Trên cơ sở chương trình đã được xây dựng, tiến hành thay đổi các thông số làm việc của búa rung (tần số rung, mô men lệch tâm, lực kéo máy cơ sở) để khảo sát sự ảnh hưởng của chúng đến độ dịch chuyển của cọc và lực cản của nền đất lên cọc.

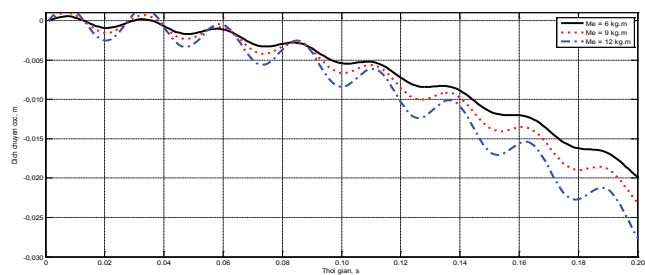


Hình 9. Dịch chuyển của cọc khi thay đổi tần số rung.

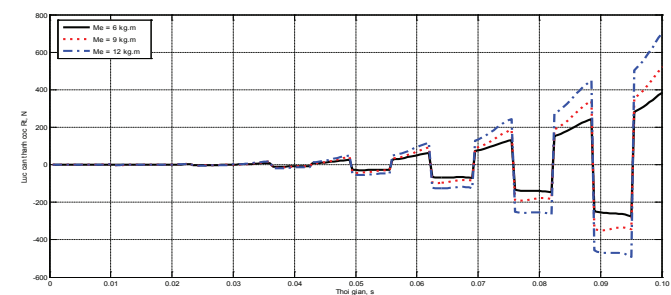


Hình 10. Sự thay đổi lực cản thành cọc khi thay đổi tần số rung.

Từ kết quả hình 9 và 10 cho thấy, khi tăng tần số rung (số vòng quay của trục gây rung) lần lượt là $n = 1200/1700/2200$ vòng/phút (với $M_c = 6 \text{ kg.m}$ và $P_0 = 0 \text{ kN}$) thì độ dịch chuyển của cọc tăng lên (hình 9) và lực cản thành cọc (R_s) giảm xuống (hình 10), điều đó nghĩa là tần số rung của búa tăng thì sẽ làm giảm lực cản thành cọc và tăng tốc độ hạ cọc vào đất.



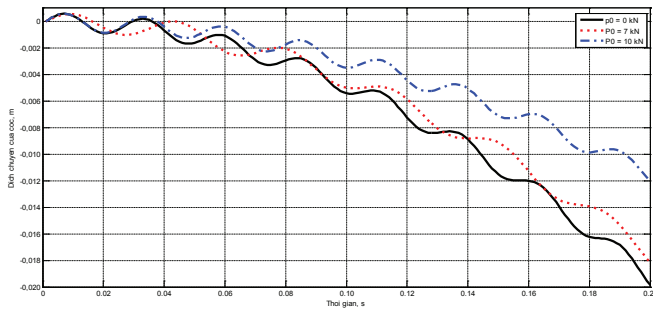
Hình 11. Dịch chuyển của cọc khi thay đổi mô men lệch tâm (M_c).



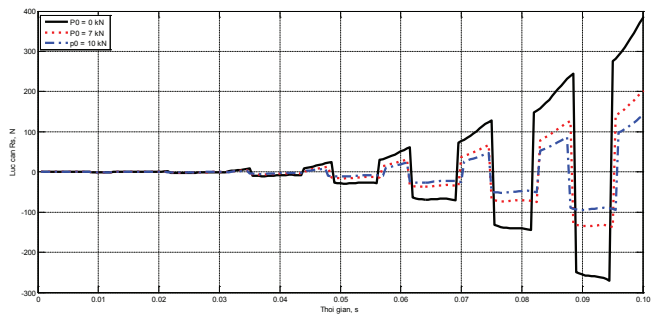
Hình 12. Sự thay đổi lực cản thành cọc khi thay đổi mô men lệch tâm (M_c).

Trên hình 11 và 12 thể hiện kết quả sự thay đổi độ dịch chuyển của cọc và lực cản thành cọc (R_s) khi lần lượt thay đổi mô men lệch tâm của búa rung là $M_c = 6/9/12 \text{ kg.m}$ (với $n = 2200$ vòng/phút và $P_0 = 0 \text{ kN}$). Từ đó có thể thấy độ dịch chuyển của cọc (hình 11) và lực cản thành cọc (R_s) (hình 12) đều tăng khi M_c tăng, điều này có nghĩa là khi M_c tăng làm cho giá trị lực kích thích tăng nên tốc độ dịch

chuyển của cọc vào đất tăng lên và làm cho lực cản thành cọc cũng tăng theo.

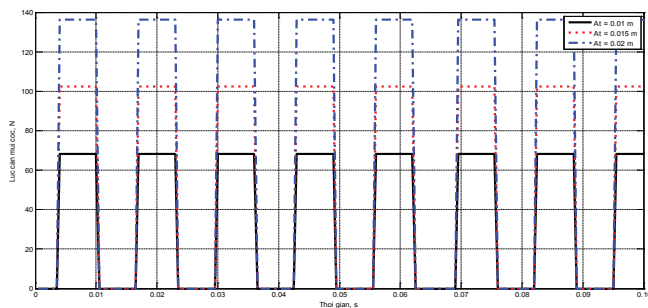


Hình 13. Sự thay đổi dịch chuyển của cọc khi thay đổi lực kéo của máy cơ sở.

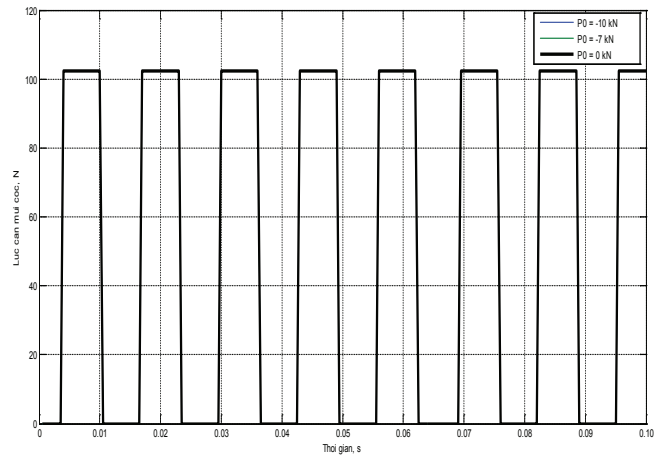


Hình 14. Sự thay đổi lực cản thành cọc khi thay đổi lực kéo của máy cơ sở.

Hình 13, 14 thể hiện kết quả về sự thay đổi độ dịch chuyển của cọc và lực cản thành cọc (R_s) khi lần lượt thay đổi lực kéo của máy cơ sở tương ứng là $P_0 = 0/7/10$ kN (với $M_c = 6$ kg.m và $n = 2200$ vòng/phút), từ đó cho thấy, lực kéo máy cơ sở tăng lên thì độ dịch chuyển của cọc (hình 13) và lực cản thành cọc (hình 14) giảm. Độ lớn của lực cản mũi cọc R_t không thay đổi theo chiều sâu cọc, giá trị lực này chỉ thay đổi khi tiết diện cọc thay đổi hoặc thay đổi các thông số của nền đất. Trên hình 15 cho thấy, khi tăng diện tích mũi cọc thì lực cản mũi cọc tăng theo. Hình 16 cho thấy, lực kéo máy cơ sở (P_0) gần như không ảnh hưởng đến lực cản mũi cọc.



Hình 15. Sự thay đổi lực cản mũi cọc theo tiết diện mũi cọc.



Hình 16. Sự thay đổi lực cản mũi cọc theo lực kéo máy cơ sở.

Kết luận

Nhóm nghiên cứu đã xây dựng được mô hình tính toán xác định sự ảnh hưởng của các thông số búa rung thủy lực (tần số rung, mô men lệch tâm, lực kéo máy cơ sở) đến các thành phần lực cản của đất và độ dịch chuyển của cọc thép trong quá trình hạ cọc, từ đó có thể ứng dụng trong quá trình tính toán thiết kế búa rung nói chung, búa rung thủy lực nói riêng và trong quá trình lựa chọn sử dụng búa rung thủy lực khi thi công.

Nghiên cứu bản chất ép cọc thép vào đất, nhóm tác giả đã xây dựng được mô hình động lực học quá trình ép cọc thép bằng búa rung thủy lực và mô hình xây dựng được phản ánh tương đối đầy đủ cơ chế tương tác giữa cọc và đất trong quá trình làm việc.

Nhóm nghiên cứu đã lập được chương trình khảo sát ảnh hưởng của các thông số búa rung đến độ dịch chuyển của cọc và lực cản của đất tác dụng lên cọc. Lực cản của đất tác dụng lên cọc và độ dịch chuyển của cọc thay đổi phụ thuộc vào các thông số búa rung. Kết quả nghiên cứu có thể làm tài liệu tham khảo để tính toán, lựa chọn các thông số của búa rung phù hợp phục vụ thi công cọc thép.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Văn Khang (2004), *Dao động kỹ thuật*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
- [2] Kenneth Viking (2002), *Vibro-Driveability - a field study of vibratory driven sheet piles in non-cohesive soils*, Doctoral thesis, Department of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [3] Kenneth Viking (2006), *Vibratory pile installation technique*, Transvib 2006. Gonin, Holeyman et Rocher-Lacoste (ed) 2006, Editions du LCPC, Paris, 8, pp.65-82.
- [4] Svetlana Polukoshko (2010), "Dynamical Effects in Process of Piles Vibrodriving", *Scientific Journal of Riga Technical University*, 8, pp.109-116.