

# Xây dựng phương pháp lý thuyết và thực nghiệm xác định các thành phần lực cản động của nền đất tác dụng lên cọc thép trong quá trình hạ bằng búa rung

Theoretical and experimental method measures the dynamic resistance of soil acting on steel pile driving by vibrator

> TS VŨ VĂN TRUNG

Trường Đại học Giao thông vận tải

Email: trungvv@utc.edu.vn

## TÓM TẮT

Xây dựng phương pháp lý thuyết và thực nghiệm để xác định các thành phần lực cản động của nền đất tác dụng lên cọc thép trong quá trình hạ cọc bằng búa rung, từ đó xây dựng cơ sở áp dụng vào quá trình tính chọn búa rung phù hợp trong quá trình thi công cọc ván thép tại Việt Nam.

**Từ khóa:** Búa rung, lực cản động, sức kháng động, cọc ván thép, cọc cừ, cọc thép.

## ABSTRACT

Developing theoretical and experimental methods to determine the dynamic resistances of soil acting on steel pile driving by vibrator and building a method for applying to select suitable vibrator driving steel pile in Vietnam.

**Keywords:** Vibrator, dynamic toe resistance, dynamic shaft resistance, sheet pile.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Công nghệ thi công hạ cọc thép, cọc thép bằng búa rung đã và đang được sử dụng nhiều trong thi công các công trình hạ tầng tại Việt Nam, tuy nhiên còn thiếu các nghiên cứu chuyên sâu về lý thuyết và thực nghiệm để xác định các thành phần lực cản động của nền đất lên cọc thép khi hạ cọc bằng búa rung, do đó việc tính toán, lựa chọn búa rung khi thi công vẫn hoàn toàn dựa trên kinh nghiệm của đơn vị thi công. Lực cản động của nền đất tác dụng lên cọc thép trong quá trình hạ cọc bằng búa rung là thành phần lực phức tạp và khó xác định vì nó phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố liên quan như các thông số của đất (loại đất và các chỉ tiêu cơ lý...), các thông số của búa rung (tần số, biên độ...) và các thông số của cọc thép (đặc trưng mặt cắt và tình trạng bề mặt cọc...). Trên thế giới đã có các nghiên cứu công bố về vấn đề này, song kết quả đạt được còn nhiều hạn chế và chỉ mang tính chất cục bộ ở từng địa phương. Ở nước ta, đến nay chưa có tác giả nào đề cập đến vấn đề này, qua đó việc xây dựng phương pháp lý thuyết và thực nghiệm để xác định các thành phần lực cản động của nền đất tác dụng lên cọc thép trong quá trình hạ cọc bằng búa rung là cần thiết và có ý nghĩa thực tế cao.

Như đã biết, các thành phần lực cản động của nền đất tác dụng lên cọc thép gồm lực cản động thành cọc và lực cản động

mũi cọc, giá trị của các thành phần lực cản động này luôn thay đổi trong quá trình làm việc thực tế và thường rất khác biệt so với giá trị tính toán theo lý thuyết cơ học đất, mà ở đó các tác giả tập trung xây dựng lý thuyết xác định các thành phần lực cản của nền đất để xác định sức chịu tải của các loại cọc khi chúng được hạ vào nền đất với mục đích làm hệ móng cho các công trình xây dựng và thường được tính toán dựa trên phương pháp tĩnh. Tuy nhiên, việc xác định các thành phần lực cản động của nền đất lên cọc khi hạ cọc bằng lực rung động đến nay vẫn chưa được nghiên cứu cụ thể. Với lý do trên, trong phạm vi bài báo này, tác giả đề cập đến việc nghiên cứu phương pháp lý thuyết và thực nghiệm để xác định các thành phần lực cản động của nền đất tác dụng lên cọc thép khi hạ cọc bằng búa rung, qua đó có những kiến nghị và khuyến cáo trong lựa chọn búa rung để thi công hạ các loại cọc thép, cọc ván thép.

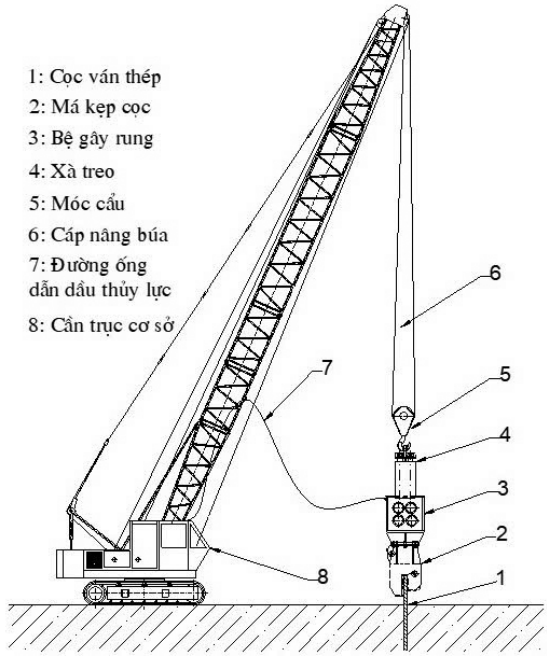
## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Phương pháp nghiên cứu lý thuyết

a) Xây dựng mô hình toán lý thuyết cho hệ "Búa rung - Cọc ván thép - Nền đất nhiều lớp"

Trong phạm vi bài báo, tác giả xây dựng mô hình tính toán hai khối lượng cho hệ "Búa rung - Cọc ván thép - Nền đất nhiều lớp",

có quan tâm đến sự tương tác giữa cọc ván thép với các lớp đất xung quanh để tính toán, xác định các thành phần lực cản động của chúng lên cọc ván thép trong quá trình hạ cọc là cần thiết, cho phép mô tả đúng điều kiện làm việc thực tế của hệ. Các đối tượng cụ thể của hệ "Búa rung - Cọc ván thép - Nền đất nhiều lớp" gồm: Búa rung là loại búa rung có kết cấu hai khối lượng (khung treo và thân búa riêng biệt), kiểu treo tự do trên cần trục cơ sở và điều chỉnh lực rung động thông qua điều chỉnh tần số rung; cọc ván thép là loại cọc có mặt cắt chữ U được đóng đơn; nền đất có cấu trúc nhiều lớp có chiều dày và tính chất cơ lý khác nhau, đồng thời lựa chọn mô hình Vibdrive (cho các loại đất cát) và mô hình Alain Holeyham (cho các loại đất sét) [4] để tính toán xác định các thành phần lực cản động của các lớp đất tác dụng lên cọc ván thép.



Hình 1. Sơ đồ cấu tạo tổng thể hệ búa rung thi công cọc ván thép lắp trên cần trục cơ sở

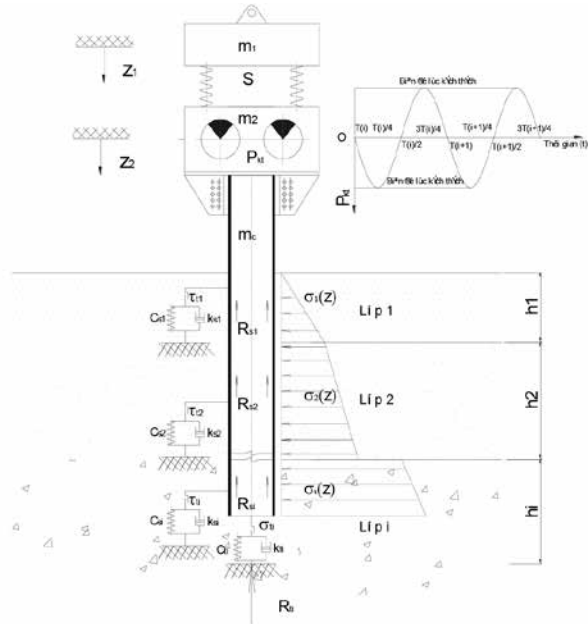
b) Mô hình tính toán lý thuyết cho hệ "Búa rung - Cọc ván thép - Nền đất nhiều lớp"

Các giả thiết xây dựng mô hình tính toán lý thuyết cho hệ "Búa rung - Cọc ván thép - Nền đất nhiều lớp":

- Cọc ván thép được liên kết cứng với thân búa qua má kẹp, mọi điểm trên búa và cọc ván thép có độ dịch chuyển, gia tốc, vận tốc và chuyển vị giống nhau.
- Cọc tổng lực của búa rung tác dụng lên cọc có phương thẳng đứng trùng với tim cọc và có điểm đặt tại đỉnh cọc.
- Chỉ xét quá trình hạ cọc khi lực căng cáp nâng búa bằng không và không xét quá trình kéo cọc.
- Búa rung thay đổi được tần số rung, không thay đổi được mô-men lệch tâm.
- Đất gồm nhiều lớp khác nhau có chiều dày lần lượt là  $h_1, h_2, \dots, h_r$ , coi trong mỗi lớp là đồng nhất và có các thông số cơ lý đặc trưng riêng. Mỗi lớp đất được đặc trưng bởi một mô hình đất để xác định các thành phần lực cản động lên cọc ván thép, giá trị của các thành phần lực cản động được xác định trong mỗi chu kỳ tác dụng của lực rung động, tương ứng với chiều sâu dịch chuyển của cọc trong các lớp đất đó.
- Cọc ván thép cứng tuyệt đối (vì có chiều dài nhỏ), chỉ dao động theo phương thẳng đứng và chỉ xét trường hợp cọc ván thép

được đóng đơn.

- Cọc môi trường tương tác của đất xung quanh cọc giống nhau theo mọi phương.



Hình 2. Mô hình tính toán lý thuyết hệ "Búa rung - Cọc ván thép - Đất nhiều lớp"

c) Xây dựng phương trình chuyển động cho hệ "Búa rung - Cọc ván thép - Nền đất nhiều lớp"

Áp dụng định luật Newton 2, ta được hệ phương trình chuyển động của hệ "Búa rung - Cọc ván thép - Nền đất nhiều lớp" như sau:

$$\begin{cases} P_{qt1} + F_s - m_1g = 0 \\ P_{qt2} - F_s - (m_2 + m_c)g - P_{kt} + R_s + R_t = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó:

- $z_1, z_2$  - Lần lượt là chuyển vị của khung treo búa rung và chuyển vị của thân búa - cọc ván thép, m;
- $m_1, m_2, m_c$  - Lần lượt là khối lượng khung treo, khối lượng thân búa (gồm cả khối lượng của bộ gây rung và khối lượng của má kẹp cọc) và khối lượng cọc ván thép, kg;
- $F_s$ : Lực đàn hồi của hệ lò xo, kN
- $P_{kt}$  - Lực rung động do búa rung tạo ra, kN;
- $P_{kt} = M_e \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) / 1000$
- $P_{qt1}, P_{qt2}$  - Lần lượt là lực quán tính của khung treo và của thân búa - cọc ván thép, kN

$$P_{qt1} = \frac{m_1 \cdot \ddot{z}_1}{1000} \quad (4)$$

$$P_{qt2} = \frac{(m_2 + m_c) \cdot \ddot{z}_2}{1000} \quad (5)$$

-  $R_s$  - Tổng lực cản động thành cọc do các lớp đất tác dụng lên phần chiều dài cọc đã được hạ vào trong nền đất [5]. Lực cản động thành cọc ( $R_s$ ) được mô hình bằng hàm bậc thang, mà ở đó hướng của lực cản thành luôn ngược với chiều chuyển động của cọc, do đó lực cản động thành cọc được xác định bằng công thức sau:

$$R_s = \text{sign}(\dot{z}_2) \chi \int_0^z \tau_d dz \quad \text{với} \quad \text{sign}(\dot{z}_2) = \begin{cases} 1 & \text{khi } \dot{z}_2 > 0 \\ 0 & \text{khi } \dot{z}_2 = 0 \\ -1 & \text{khi } \dot{z}_2 < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Với:

- $\chi$  - Chu vi cọc ván thép, m;
- $\tau_d$  - Sức kháng cắt động đơn vị tại thành cọc, kN/m<sup>2</sup>;

$z$  - Chiều sâu dịch chuyển của đầu cọc vào đất, m;  
 $\dot{z}_2$  - Vận tốc dịch chuyển của cọc, m/s;

$R_t$  - Lực cản động mũi cọc của lớp đất hiện tại mà mũi cọc đang dịch chuyển vào [5]. Lực cản động mũi cọc ( $R_t$ ) được thể hiện theo dạng đơn giản nhất và được mô hình hóa bằng hàm bậc thang mà ở đó  $R_t = 0$  khi cọc chuyển động đi lên (bằng hoặc nhỏ hơn 0) và dương khi cọc chuyển động đi xuống (lớn hơn 0), do đó lực cản động mũi cọc được xác định bằng công thức sau:

$$R_t = \begin{cases} q_d \cdot A_t & \text{khi } \dot{z}_2 > 0 \\ 0 & \text{khi } \dot{z}_2 \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

Với:

$A_t$  - Diện tích mũi cọc, m<sup>2</sup>;

$q_d$  - Sức kháng nén động đơn vị tại mũi cọc, kN/m<sup>2</sup>.

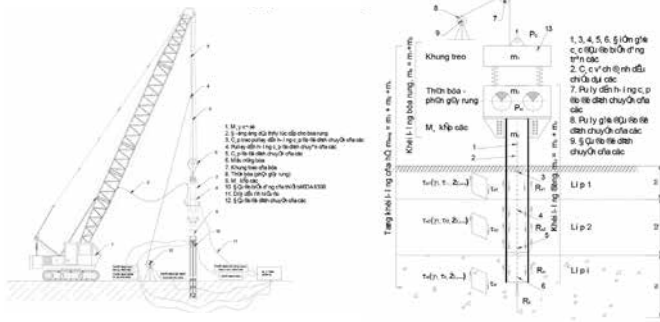
d) Giải phương trình chuyển động cho hệ “Búa rung - Cọc ván thép - Nền đất nhiều lớp”

Giải phương trình (1) ta sẽ xác định được các thành phần lực cản động của nền đất tác dụng lên cọc ván thép khi hạ bằng búa rung tại các chiều sâu khác nhau qua các lớp đất.

### 2.2. Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm [3]

a) Xây dựng mô hình thực nghiệm cho hệ “Búa rung - Cọc ván thép - Nền đất nhiều lớp”

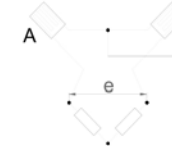
Mô hình thực nghiệm hệ “Búa rung - Cọc ván thép - Nền đất nhiều lớp” được mô tả như trên Hình 3, Hình 4, trên đó thể hiện vị trí bố trí các đầu đo trong quá trình thực nghiệm.



Hình 3. Sơ đồ bố trí thiết bị thực nghiệm

Hình 4. Mô hình thực nghiệm

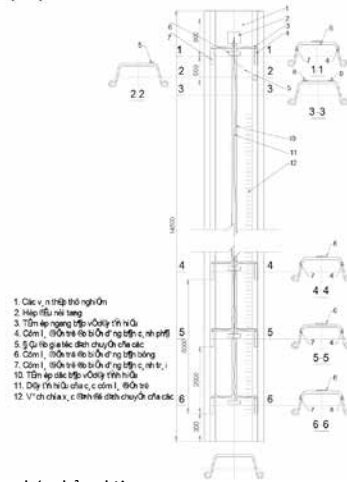
Cụm đầu 21, 20, 19, 18, 17, 16, 15, 14, 13, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1



Hình 5. Sơ đồ đầu lá điện trở

Để xác định các thành phần lực cản động của nền đất tác dụng lên cọc thép cần xác định được ứng suất (nội lực) tại các mặt cắt dọc theo cọc thép (Hình 6). Ở đây, tác giả sử dụng các lá điện trở (strain gauge) để đo biến dạng của cọc thép. Biến dạng của cọc thép dưới tác động của nội lực phát sinh trong cọc thép gây ra, nội lực này được tạo ra bởi các thành phần lực cản của nền đất tác dụng lên cọc trong quá trình hạ cọc.

Để đo biến dạng tại các mặt cắt trên cọc thép, tại mỗi mặt cắt cần đo bố trí 3 cụm đầu đo lá điện trở gồm 1 cụm bố trí trên bản bụng của cọc thép, 2 cụm còn lại bố trí trên 2 cánh của cọc thép (Hình 6) và tại mỗi cụm đầu đo sử dụng sơ đồ cấu đầu 1/2 với 2 lá điện trở như Hình 5. Ngoài ra, để có thể xác định chính xác giá trị lực cản động của nền đất ở các chiều sâu khác nhau, trong quá trình đo cần tiến hành đồng thời việc đo chiều sâu hạ cọc với việc đo lực cản động. Việc đo chiều sâu hạ cọc được thực hiện thông qua đầu đo encoder (Hình 4).



Hình 6. Cọc thép thử nghiệm

b) Thiết bị đo và đầu đo sử dụng trong thực nghiệm

Lá điện trở sử dụng loại có kích thước (30x2)mm; điện trở 120 Ω; hệ số độ nhạy 2,08±1% (A level) (Hình 7). Thiết bị đo SDA380C gồm 8 kênh đo, tần số lấy mẫu 10Hz, điện áp cầu đầu 2VDC, phạm vi biến dạng đo được ±19.999 με, độ phân giải ±1 με, độ chính xác của hệ thống ±0,3%Fs ± 2 με, biến dạng nhiệt nhỏ hơn 3 με/2h, phạm vi cân bằng ±15.000 με, phạm vi hiệu chuẩn chiều dài dây dẫn 0,0 ~ 100 Ω, công suất 220 V ± 10%; 50 Hz ± 2%.



Hình 7. Một số hình ảnh lắp đặt các lá điện trở trên cọc thép thử nghiệm



Hình 8. Thiết bị đo SDA380C

c) Cơ sở lý thuyết xử lý kết quả thực nghiệm

- Dạng tín hiệu thực nghiệm thu được từ thiết bị đo biến dạng của cọc thép (SDA380C) là giá trị điện áp biến thiên theo thời gian tại các vị trí đo với tần suất lấy mẫu thí nghiệm là 500 mẫu/s.

- Cơ sở lý thuyết tính toán các giá trị nội lực trong cọc thép:

$$\varepsilon_i = V_i \cdot X_{bd} \quad (8)$$

Với:  $\varepsilon_i$  - Biến dạng tương đối trung bình tại mặt cắt i;

$X_{bd}$  - Hệ số thiết lập chế độ đo của thiết bị trong quá trình thực nghiệm,  $X_{bd} = 1.000 \mu\epsilon/V$ ;

$V_i$  - Điện áp của đầu đo tại mặt cắt  $i$ .

+ Ứng suất tại các mặt cắt cọc thép bố trí đầu đo:

$$\sigma_i = E \cdot \varepsilon_i \quad (9)$$

Với:  $\sigma_i$  - Ứng suất trong cọc thép tại mặt cắt  $i$ , kN/m<sup>2</sup>;

$E$  - Mô-đun đàn hồi của vật liệu chế tạo cọc thép,  $E = 2,1 \cdot 10^8$  kN/m<sup>2</sup>.

+ Nội lực tại các mặt cắt cọc thép bố trí đầu đo:

$$N_i = \sigma_i \cdot A \quad (10)$$

Với:  $N_i$  - Nội lực của cọc thép tại mặt cắt  $i$ , kN;

$A$  - Diện tích mặt cắt ngang cọc thép, m<sup>2</sup>.

- Các thành phần lực cản động của nền đất tác dụng lên cọc thép:

+ Lực cản mũi cọc động: Gần đúng bằng giá trị nội lực tại mặt cắt 6-6 (Hình 6):

$$R_{tk} = N_{6k} = \sigma_{6k} \cdot A \quad (11)$$

Với:  $R_{tk}$  - Lực cản mũi cọc của lớp đất thứ  $k$ , kN;

$N_{6k}$  - Nội lực tại mặt cắt 6-6 của cọc thử nghiệm đối với lớp đất thứ  $k$ , kN;

$\sigma_{6k}$  - Ứng suất trong cọc thép tại mặt cắt 6-6 với lớp đất thứ  $k$ , kN/m<sup>2</sup>;

+ Lực cản thành cọc động: Là hiệu giữa nội lực trong cọc thép tại mặt cắt 1-1 (Hình 6) với nội lực đo được trong cọc thép tại mặt cắt 6-6 (Hình 6) và phần trọng lượng của cọc nằm giữa hai mặt cắt trên:

$$R_{sz} = N_{1z} - N_{6k} - G_{cvt(6)} = (\sigma_{1z} - \sigma_{6k}) \cdot A - g_{cvt} \cdot l_6 \quad (12)$$

Với:  $R_{sz}$  - Lực cản thành cọc động tại chiều sâu  $z$ , kN;

$G_{cvt(6)}$  - Phần trọng lượng đoạn cọc thép giữa hai mặt cắt 1-1 và 6-6, kN;

$\sigma_{1z}$  - Ứng suất trong cọc thép tại mặt cắt 1-1 tại chiều sâu  $z$ , kN/m<sup>2</sup>;

$g_{cvt}$  - Trọng lượng một mét dài của cọc thép, kN/m;

$l_6$  - Chiều dài cọc thép từ mũi cọc đến mặt cắt 1-1, m.

### 2.3. Thông số đầu vào để tính toán kiểm chứng

Để kiểm chứng giữa phương pháp lý thuyết và phương pháp thực nghiệm, tác giả sử dụng thông số địa chất thực nghiệm tại trụ T2 cầu Đồng Quang (Ba Vì, Hà Nội), cụ thể:

a) Búa rung VH-QTUTC70 [2] có các thông số như trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số của búa rung VH-QTUTC70

Tên thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Mô-men lệch tâm của trục gây rung	$M_e$	13,46	kg.m
Khối lượng phần treo của búa	$m_1$	300	kg
Khối lượng phần rung của búa	$m_2$	2.200	kg
Tần số rung	$f$	15-36	Hz
Độ cứng hệ lò xo giảm chấn	$S$	30	kN/m

b) Điều kiện địa chất tại vị trí làm thực nghiệm tại trụ T2 cầu Đồng Quang [1]

- Lớp 1: Cát hạt nhỏ lòng sông, có chiều dày nhỏ (0,03 m).

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

+ Sức kháng thành đơn vị theo thí nghiệm CPT,  $f_s = 31$  kN/m<sup>2</sup>;

+ Sức kháng mũi côn đơn vị theo thí nghiệm CPT,  $q_c = 3.420$  kN/m<sup>2</sup>;

+ Sức kháng tĩnh đơn vị của đất dọc thành cọc,  $\tau_s = 41$  kN/m<sup>2</sup>;

+ Sức kháng tĩnh đơn vị tại mũi cọc,  $q_s = 3.150$  kN/m<sup>2</sup>;

+ Khối lượng thể tích tự nhiên:  $\gamma = 1.850$  kg/m<sup>3</sup>;

+ Góc ma sát,  $\phi = 28^{\circ}42'$ ;

+ Cường độ kháng cắt không thoát nước trung bình,  $S_u = 125$  kN/m<sup>2</sup>;

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

- Lớp 3: Sét pha màu xám nâu, trạng thái nửa cứng, có chiều dày 6,9 m, có chỉ số SPT trung bình  $N = 27$ , có các chỉ tiêu cơ lý sau:

+ Sức kháng thành đơn vị theo thí nghiệm CPT,  $f_s = 73$  kN/m<sup>2</sup>;

+ Sức kháng mũi côn đơn vị theo thí nghiệm CPT,  $q_c = 5.980$  kN/m<sup>2</sup>;

+ Sức kháng tĩnh đơn vị của đất dọc thành cọc,  $\tau_s = 71$  kN/m<sup>2</sup>;

+ Sức kháng tĩnh đơn vị tại mũi cọc,  $q_s = 5.200$  kN/m<sup>2</sup>;

+ Khối lượng thể tích tự nhiên:  $\gamma = 1.890$  kg/m<sup>3</sup>;

+ Chỉ số dẻo,  $I_p = 14,7\%$ ;

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

+ Hệ số lỗ rỗng,  $e_o = 0,849$ ;

+ Góc ma sát trong,  $\phi = 12^{\circ}25'$ ;

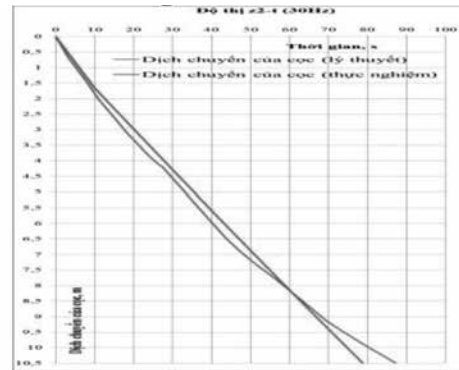
+ Cường độ kháng cắt không thoát nước trung bình,  $S_u = 200$  kN/m<sup>2</sup>.

c) Cọc thép thử nghiệm loại NSP-II<sub>w</sub> có thông số như trong Bảng 2.

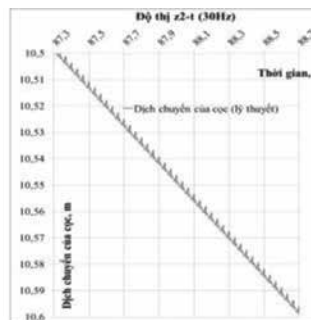
Bảng 2. Thông số của cọc thép NSP-II<sub>w</sub>

Tên thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Chu vi cọc thép	$\chi$	1,5	m
Diện tích mũi cọc thép	$A_t$	1,04E <sup>-02</sup>	m <sup>2</sup>
Chiều dài cọc	$l_{cọc}$	14,5	m
Khối lượng cọc thép	$m_c$	1.183,2	kg
Khối lượng 1m dài cọc thép	$g_{cvt}$	81,6	kg/m
Mô men quán tính cọc vắn	$J_{cvt}$	5,22E <sup>-05</sup>	m <sup>4</sup>

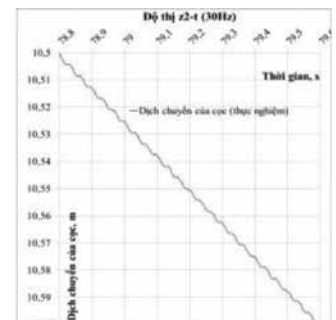
### 2.4. Kết quả nghiên cứu và đánh giá



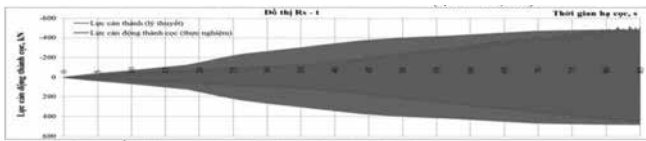
Hình 9. Đồ thị dịch chuyển tổng thể của cọc (lý thuyết - đỏ và thực nghiệm - xanh)



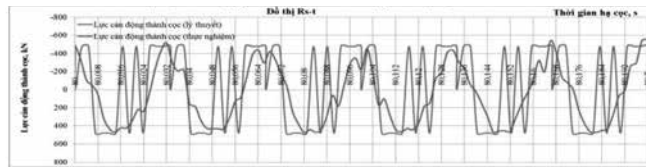
Hình 10. Độ dịch chuyển lý thuyết của cọc (tại  $z = 10,5$  m)



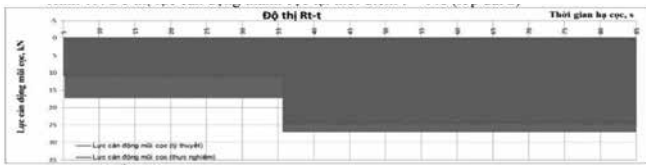
Hình 11. Độ dịch chuyển thực nghiệm của cọc (tại  $z = 10,5$  m)



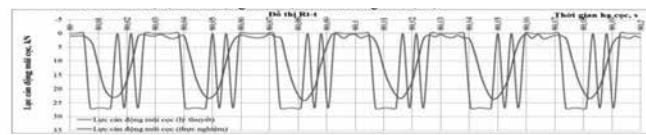
Hình 12. Đồ thị lực cản động thành cọc theo thời gian hạ cọc



Hình 13. Đồ thị lực cản động thành cọc tại thời điểm t = 80s (lớp đất 2)



Hình 14. Đồ thị lực cản động mũi cọc theo thời gian hạ cọc



Hình 15. Đồ thị lực cản động mũi cọc tại thời điểm t = 80s (lớp đất 2)

\* Nhận xét:

- Từ trên ta thấy, lực cản động thành cọc có giá trị tăng dần theo chiều sâu hạ cọc (Hình 12), giá trị của nó thay đổi có tính chất lặp theo chu kỳ dịch chuyển của cọc (chu kỳ của lực rung động, Hình 13). Giá trị biên độ của lực cản động thành cọc thay đổi khi cọc dịch chuyển qua các lớp đất khác nhau, điều đó cho thấy lực cản động thành cọc phụ thuộc vào tính chất cơ lý của các lớp đất theo chiều sâu hạ cọc. Khi cọc được ấn xuống, giá trị lực cản này tăng, khi cọc được rút lên thì giá trị lực cản này giảm nhanh. Mặt khác, với cùng một điều kiện địa chất giống nhau (cùng một vị trí thực nghiệm), khi tần số lực rung động thay đổi thì giá trị lực cản động thành cọc thay đổi tương đối nhiều, đặc biệt khi cọc nằm trong các lớp đất cát, điều đó cho thấy tần số rung và giá trị của lực rung động có ảnh hưởng rất lớn đến thành phần lực cản động thành cọc.

- Kết quả và độ sai lệch giữa tính toán lý thuyết và thực nghiệm của độ dịch chuyển của cọc như trên Hình 9, 10, 11 và Bảng 3.

Bảng 3. Sai số giữa độ dịch chuyển lý thuyết và thực nghiệm

Thời gian, s	10	20	30	40	50	60	70	80
Dịch chuyển lý thuyết, m	1,65	3,149	4,801	6,310	7,416	8,474	9,510	10,289
Dịch chuyển thực nghiệm, m	1,450	2,806	4,192	5,557	6,898	8,217	9,516	10,797
Sai lệch	12%	11%	13%	12%	7%	3%	0%	-5%

- Kết quả và độ sai lệch giữa tính toán lý thuyết và thực nghiệm của lực cản động thành cọc như trên Hình 12, 13 và Bảng 4.

Bảng 4. Sai số giữa lực cản động thành cọc lý thuyết và thực nghiệm

Thời gian, s	30	40	50	60	70	80
Lực cản động thành cọc lý thuyết, kN	261,69	338,70	396,72	429,24	466,57	478,57
Lực cản động thành cọc thực nghiệm, kN	228,31	298,15	347,15	383,63	412,04	492,94
Sai lệch	13%	12%	12%	11%	12%	-3%

- Kết quả và độ sai lệch giữa tính toán lý thuyết và thực nghiệm của lực cản động mũi cọc như trên Hình 14, 15 và Bảng 5.

Bảng 5. Sai số giữa lực cản động mũi cọc lý thuyết và thực nghiệm

Thời gian, s	30	40	50	60	70	80
Lực cản động mũi cọc lý thuyết, kN	17,13	26,84	26,84	26,84	26,84	26,84
Lực cản động mũi cọc thực nghiệm, kN	14,90	23,42	23,45	23,48	23,56	23,60
Sai lệch	13%	13%	13%	13%	12%	12%

### 3. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Xác định lực cản động của nền đất lên cọc thép là một việc phức tạp và khó khăn do tính chất và cấu trúc địa chất ở mỗi nơi là hoàn toàn khác nhau. Hiện nay, không chỉ ở nước ta mà cả trên thế giới, các nhà nghiên cứu vẫn đang nỗ lực nhằm tìm ra phương pháp đơn giản, hiệu quả và chính xác để xác định được các thành phần lực cản động này. Từ kết quả nghiên cứu, tác giả đưa ra một số kết luận như sau:

- Bảng lý thuyết và thực nghiệm có thể xác định được các thành phần lực cản động của nền đất lên cọc thép trong quá trình thi công bằng búa rung. Qua việc đối sánh giữa kết quả lý thuyết và kết quả thực nghiệm cho thấy việc xây dựng mô hình tính toán lý thuyết xác định các thành phần lực cản động của nền đất lên cọc thép khi hạ bằng lực rung động là một vấn đề khó và chỉ có tính chất gần đúng.

- Từ kết quả lý thuyết và thực nghiệm xác định thành phần lực cản động của nền đất lên cọc thép theo chiều sâu hạ cọc có thể tính toán được sức kháng đơn vị cho từng lớp đất.

- Trong quá trình làm thực nghiệm có thể thấy, khi cọc được hạ qua các lớp đất khác nhau thì lực cản của các lớp đất này lên cọc cũng thay đổi, tuy nhiên giá trị thay đổi tương đối phức tạp vì nó phụ thuộc vào nhiều yếu tố như búa rung, địa chất của các lớp đất...

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Công ty TNHH MTV Tư vấn & KSTKXD (2013), Hồ sơ thiết kế thi công dự án đầu tư xây dựng cầu Đồng Quang - Ba Vì - Hà Nội.
- [2]. 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.
- [3]. Nguyễn Thiệu Xuân (2014), Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm máy xây dựng, NXB. Xây dựng, Hà Nội.
- [4]. Holeyman, Alain and Whenham, Valerie (2010), Vibrodriving Prediction Models vs. Experimental Results.
- [5]. Kenneth, Viking (2002), Vibro-driveability-a field study of vibratory driven sheet piles in non-cohesive soils, Byggeteknik.