

MỘT SỐ VẤN ĐỀ LIÊN QUAN ĐẾN ỨNG SUẤT KÉO TRONG QUÁ TRÌNH THI CÔNG ĐÓNG CỌC BÊ TÔNG CỐT THÉP DỰ ỨNG LỰC

SEVERAL PROBLEMS RELATED TO TENSILE STRESS DURING THE CONSTRUCTION OF PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE PILES

ThS. **NGUYỄN NGỌC THUYẾT**

Saitama University, Nhật Bản

TS. **PHẠM THẮNG**

Civil Engineering Dept., University of Texas Rio Grande Valley, Mỹ

Bài báo có sử dụng một số tài liệu và kinh nghiệm của cố TS. Trịnh Việt Cường - nguyên Viện trưởng Viện KHCN Xây dựng.

Tóm tắt: Cọc bê tông cốt thép (BTCT) hạ bằng búa đóng là một phương án thi công khá phổ biến tại Việt Nam. Hình thức này hiện thường được áp dụng tại các công trình công nghiệp và hạ tầng với khối lượng lớn. Trong quá trình thi công đóng cọc tại một số công trình lớn ở Việt Nam, có những sự cố xuất hiện ngoài dự tính như hiện tượng nứt cọc khi thi công, hiện tượng cọc bị nghiêng khi đào móng,... ảnh hưởng lớn đến quá trình thi công và nghiệm thu công trình. Một trong những nguyên nhân là trong quá trình thiết kế, các kỹ sư Việt Nam hầu hết chỉ quan tâm đến khả năng chịu tải nén khi làm việc và khi hạ cọc cũng như khả năng chống nứt khi cẩu lắp, mà thường bỏ qua một thông số rất quan trọng là ứng suất kéo phát sinh trong quá trình đóng cọc. Vì vậy, trong thực tế thi công khi gặp tình huống ứng suất kéo lớn, các nhà thầu nhìn chung là lúng túng và thường phán đoán sai về nguyên nhân sự cố. Bài báo này phân tích một ví dụ điển hình của trường hợp ứng suất kéo lớn phát sinh khi thi công đóng cọc, đồng thời đưa ra một số kiến nghị giúp khắc phục tình trạng này.

Abstracts: Driven prestressed concrete piles are now very common in Vietnam. These pile foundations are often applied in industrial and infrastructure projects in large volumes. During installing piles at several major projects in Vietnam, there were unexpected incidents such as pile cracking during construction, piles tilted when digging the excavation of foundations, etc., which seriously affect to the construction and acceptance process of the projects. One of the reasons is related to the design process. Vietnamese engineers usually consider the compressive load

capacity when working and installing the piles, as well as the ability to resist cracking when carrying and transporting. A very important parameter that was neglected is the tensile stress that appears in piles during installing. Therefore, in practice, when faced with a high tensile stress situation, the contractors are generally confused and often misjudged the cause of the problem. This paper analyzes a typical example of an actual case with high tensile stress occurring during installing piles and then gives some recommendations to help overcome this problem.

Key words: PDA, tensile stress, prestressed concrete piles, pile installation.

1. Giới thiệu

Công trình được xem xét nghiên cứu trong bài báo này là hạng mục Boiler 2 thuộc Dự án “Nhà máy nhiệt điện Long Phú 1 với công suất 2x600 MW” được xây dựng vào năm 2016 tại ấp Thạnh Đức - xã Long Đức - huyện Long Phú - tỉnh Sóc Trăng - Việt Nam.

Theo phương án thiết kế đã được phê duyệt ban đầu, nhiều hạng mục của dự án này sử dụng cọc vuông BTCT dự ứng lực loại 0.5m×0.5m, bê tông cọc sử dụng là C50 (theo ASTM C39, bê tông có cường độ nén mẫu lăng trụ 150×300 mm $f'_c = 50$ Mpa), cốt thép sử dụng cho cọc là cáp đường kính 15,24mm có cường độ $f_{pu} = 1860$ Mpa, số cáp cho mỗi cọc là 4 sợi. Các tổ hợp cọc gồm 3 đốt cọc:

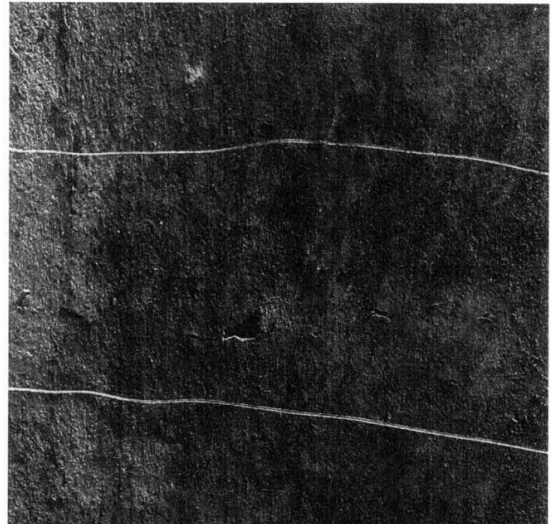
$$+ 18m + 18m + 17m = 53.0m;$$

$$+ 18m + 18m + 16m = 52.0m.$$

Trong quá trình thi công đóng cọc, một số cọc xảy ra hiện tượng nứt ngang thân cọc. Các vết nứt có dạng như trong hình 1 và hình 2 [5].

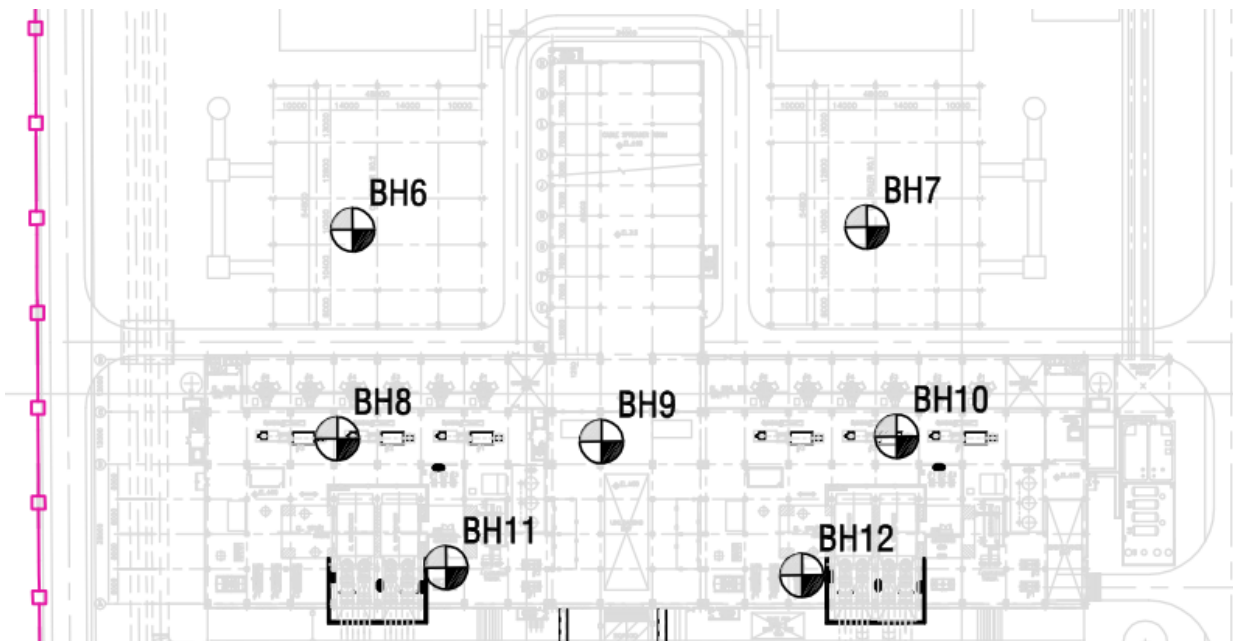


Hình 1. Vết nứt của cọc số hiệu 12HA415



Hình 2. Vết nứt của cọc số hiệu 12HA195

Các hạng mục công trình dự kiến sử dụng loại cọc nêu trên phân bố tương đối tập trung và chủ yếu nằm trong phạm vi khu vực nhà máy chính. Các hố khoan nằm trong phạm vi này là: BH6, BH7, BH8, BH9, BH 10, BH 11, BH 12, BH 13, BH 14, BH 23; các hố khoan sâu 50m, trừ hố khoan BH8; BH12 sâu 60m và hố khoan BH23 sâu 20m. Hố khoan BH7 nằm trong khu vực nghiền cừu (Boiler 2).



Hình 3. Mặt bằng bố trí hố khoan khảo sát địa chất công trình (ĐCCT) ban đầu trong khu vực Nhà máy chính

Theo báo cáo khảo sát ĐCCT, các lớp đất nền trong khu vực nhà máy nhiệt điện Long Phú như sau:

Bảng 1. Tóm tắt các lớp địa chất khu vực nhà máy nhiệt điện Long Phú 1

TT	Mô tả	Độ sâu đáy lớp		SPT (búa/30cm)	Khối lượng thể tích (kN/m ³)
		Từ	Đến		
1	Lớp 1: Cát lấp chặt vừa	2.8m	4.8m	4-22	20
2	Lớp 2: Sét dẻo	4.0m	6.4m	2-9	18
3	Lớp 3: Sét dẻo chảy đến dẻo	15.5m	17.5m	0-13	17

4	Lớp 4: Cát pha chặt vừa	19.0m	23.2 m	9-19	19
5	Lớp 5: Sét dẻo mềm đến dẻo cứng	38.5m	50.4m	8-30	19
6	Lớp 5a: Cát pha chặt vừa	33.6m	37.8m	9-25	19
7	Lớp 6: Cát pha chặt vừa	38.5m	49.0m	9-43	19
8	Lớp 7: Sét dẻo cứng	40.0m	49.0m	14-40	20

Hố khoan BH7 nằm trong khu vực nghiên cứu thể hiện các đặc điểm tương tự như các hố khoan còn lại trong phạm vi thi công nhà máy chính.

Loại búa chính được sử dụng là HD100 có các thông số như trình bày trong bảng 2.

Bảng 2. Thông số thiết bị hạ cọc

Loại búa	HD 100
Trọng lượng phần rơi (kg)	10000
Năng lượng mỗi nhát đóng (Nm)	340000-220000
Tần suất đập (nhát/phút)	36-45
Lực lớn nhất tác động lên đầu cọc (KN)	2600
Phù hợp để hạ cọc (kg)	40000
Tổng trọng lượng búa (kg)	20560
Chiều dài búa, a (mm)	6720
Chiều dài cọc búa - a1 (mm)	6720
Chiều cao rơi lớn nhất – L (mm)	4110

Ngoài ra, một loại búa khác cũng được sử dụng song song có trọng lượng 7,2T, chiều cao rơi là 2,5m.

Sau khi ghi nhận hiện tượng nứt cọc, Nhà thầu thi công đã tiến hành rà soát công tác sản xuất và thi công cọc, đồng thời đánh giá lại phương án thiết kế cọc ban đầu. Kết quả cho thấy những yếu tố sau đây không phải nguyên nhân gây nứt cọc [5], [11]:

- Chất lượng bê tông cọc (đảm bảo theo thiết kế);

- Sai sót trong việc chế tạo cọc (có thể gây nứt khi vận chuyển cầu lắp).

Nhà thầu tiến hành khảo sát địa chất bổ sung với lớp địa chất bề mặt có chiều dày khoảng 4m. Thực tế cho thấy điều kiện ĐCCT đã có sự thay đổi so với khảo sát ban đầu: lớp cát san nền có trạng thái chặt đến rất chặt (SPT N=17-45), sai khác với điều kiện địa chất ban đầu (SPT N=6-33), nguyên nhân có thể là do lớp san nền gần bề mặt có độ chặt tăng lên theo thời gian khi có tác dụng của các phương tiện hoạt động trong khu vực khảo sát.

Sau khi nghiên cứu quá trình khắc phục mà các

Nhà thầu đã tiến hành, nhóm tác giả nhận thấy một số điểm sau:

- Chất lượng bê tông đảm bảo các thông số như thiết kế đề ra;

- Các vết nứt đều theo phương ngang thân cọc nên nguyên nhân gây ra hiện tượng này đến từ ứng suất kéo (khi uốn hoặc kéo dọc trục) chứ không phải từ ứng suất nén;

- Các trường hợp gây uốn cọc (khi vận chuyển, cầu lắp, uốn dọc khi đóng) không phải là nguyên nhân (nhóm tác giả nhận thấy trường hợp Nhà thầu giảm độ mảnh của cọc trong quá trình đóng cọc, bằng phương pháp kẹp cọc, nhưng cọc vẫn bị nứt);

- Ứng suất kéo dọc trục là điều nhà thầu chưa tính đến và chưa được khảo sát đầy đủ.

Với những nhận định trên, nhóm tác giả kiến nghị kiểm tra ứng suất kéo trong cọc trong quá trình đóng và ủng hộ đề xuất thay đổi thiết kế cọc của nhà thầu, những đoạn cọc hay gặp sự cố sẽ được tăng số sợi cáp từ 4 sợi lên thành 8 sợi. Loại cáp được sử dụng có đường kính Ø15,24 mm.

Hai trường hợp cọc sử dụng 4 cáp (như ban đầu) và 8 cáp (như kiến nghị điều chỉnh) được

đánh giá khả năng chịu lực về vật liệu theo các tiêu chuẩn hiện hành. Tiêu chuẩn được áp dụng để tính toán là TCVN 7888:2014. Phương pháp tính được giữ nguyên, sử dụng tiết diện hình

học của cọc vuông đặc $50 \times 50\text{cm}$. Theo tiêu chuẩn này, cường độ chịu kéo của bê tông cọc bị bỏ qua. Kết quả tính toán được thể hiện trong bảng 3.

Bảng 3. Khả năng chịu lực của vật liệu cọc theo TCVN 7888:2014

Trường hợp	Khả năng chịu nén của BT cọc	Khả năng chịu kéo của BT cọc	
		Bỏ qua cường độ chịu kéo của BT	Kể đến cường độ chịu kéo của BT
	MPa	MPa	MPa
4 cấp	23.73	2.68	8.18
8 cấp	22.57	5.12	10.62

TCVN 7888:2014 bỏ qua ứng suất kéo của bê tông cọc. Tuy nhiên, có thể thấy cường độ chịu kéo của bê tông cọc là đáng kể. Tính toán theo ACI 543R cũng bỏ qua cường độ chịu kéo của bê tông cọc, khả năng chịu ứng suất kéo của cọc $50 \times 50\text{cm}$, 8 cấp là 1033 kN [4] tương đương 4,132 Mpa.

Ngoài ra một tiêu chuẩn Việt Nam khác cũng thường được sử dụng để tính toán cấu kiện BTCT là TCVN 5574:2012. Tiêu chuẩn này có đề cập đến việc tính toán cấu kiện bê tông ứng lực trước nhưng không quy định về việc tính ứng suất kéo trong cọc ứng suất trước có sử dụng cường độ kéo của bê tông hay không.

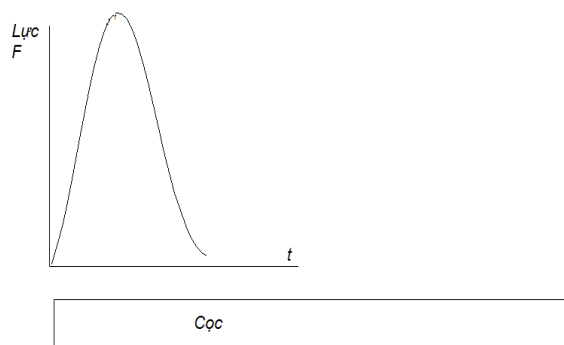
Tiếp theo, bài báo thảo luận về hiện tượng sóng ứng suất kéo phát sinh trong quá trình đóng cọc.

2. Lý thuyết chung về truyền sóng trong cọc

Khi búa tác dụng vào đầu cọc, xung lực do búa gây ra sóng nén lan truyền từ đầu cọc xuống phía mũi cọc. Tại thời điểm $t=L/c$ (L là tổng chiều dài truyền sóng, c là vận tốc truyền sóng trong vật liệu cọc) kể từ khi búa đập vào đầu cọc và phản hồi trở lại đầu cọc. Sức kháng của đất nền do ma sát và do sức kháng ở mũi cọc tác động đến cường độ và dạng của sóng phản hồi. Thông thường sóng phản hồi trở lại đầu cọc là sóng nén nhưng trong thực tế có những trường hợp sóng phản hồi là sóng kéo. Lý thuyết truyền sóng trong thanh đàn hồi được tóm tắt dưới đây.

2.1 Xung lực trên đầu cọc

Khi búa đập vào đầu cọc sẽ gây ra ứng suất nén tác động lên đầu cọc. Dạng điển hình của sự thay đổi ứng suất theo thời gian được thể hiện trên hình 4:



Hình 4. Xung lực tác động lên đầu cọc

Ban đầu tác động của búa chỉ ở đầu cọc rồi sau đó lan truyền xuống phía mũi cọc với tốc độ $c = \sqrt{E/\rho}$, trong đó E là mô đun đàn hồi và ρ là khối lượng riêng của vật liệu cọc. Giá trị đặc trưng của vận tốc truyền sóng là $c=3500\text{ m/s}$ đối với cọc BTCT và $c=5000\text{ m/s}$ với cọc thép.

Biên độ của xung lực do búa gây ra ở đầu cọc phụ thuộc vào những yếu tố như chiều cao rơi búa, trọng lượng búa, cấu tạo búa, các đặc trưng cơ học của đệm đầu cọc và tương quan về độ cứng giữa búa và cọc.

2.2 Quan hệ giữa vận tốc chất điểm và ứng suất

Đối với búa rơi tự do, vận tốc của quả búa khi tiếp xúc với đầu cọc xác định theo quan hệ:

$$V_o = \sqrt{2gHe_f} \quad (1)$$

trong đó: g - gia tốc trọng trường, e_f - hiệu suất của búa và H - chiều cao rơi búa.

Vận tốc của đầu cọc khi chịu tác động của va đập thường nhỏ hơn vận tốc của quả búa, chủ yếu do tác dụng giảm chấn của hệ thống đệm đầu cọc. Khi chịu tác động của xung lực, chất điểm trên thân cọc dịch chuyển một khoảng tương đối nhỏ (thường

ở mức vài mm đến vài cm) và thời gian xảy ra hiện tượng này cũng rất ngắn (thường ở mức vài chục ms). Có thể nhận xét là $V \ll c$, trong đó c là vận tốc lan truyền sóng trong cọc như đã nêu ở trên.

Quan hệ giữa vận tốc chất điểm và ứng suất được xác định theo:

$$\sigma_x = E \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2)$$

Từ $c = \sqrt{E/\rho}$, có được $\sqrt{E} = c \times \sqrt{\rho}$ và thế vào quan hệ trên:

$$\sigma_x = c\sqrt{E \cdot \rho} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3)$$

Vận tốc truyền sóng c là tốc độ lan truyền của sóng dọc thân cọc tác động của búa, do đó $c = \frac{dx}{dt}$.

Thế vào (3) thu được:

$$\sigma_x = \sqrt{E \cdot \rho} \cdot \frac{dx}{dt} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} = \sqrt{E \cdot \rho} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4)$$

Vì $\frac{\partial u}{\partial t} = v$ là vận tốc chất điểm nên:

$$\sigma_x = \sqrt{E \cdot \rho} \cdot v = \rho \cdot c \cdot v \quad (5)$$

Lực tác dụng lên cọc bằng:

$$F = A\sqrt{E \cdot \rho} \cdot v = A\sqrt{\frac{E^2}{E}} \cdot \rho \cdot v = AE\sqrt{\frac{1}{E}} \cdot \rho \cdot v$$

Từ đó xác định được quan hệ giữa lực và vận tốc chất điểm:

$$F = \frac{AE}{c} v = Zv \quad (6)$$

trong đó:

$$Z = \frac{AE}{c} \text{ - kháng trở cơ học của cọc.}$$

2.3 Phản xạ của sóng ứng suất tại đầu mút của thanh đàn hồi

Ứng xử của sóng ứng suất trong thanh đàn hồi khi lan truyền đến vị trí có sự thay đổi bất thường của kháng trở được xác định theo tương quan giữa độ cứng của các phần cọc ở vị trí đó (hình 5).

Cường độ sóng phản hồi F_R được xác định theo tương quan giữa kháng trở của phần cọc bên trên (Z_1) và bên dưới tiết diện có thay đổi kháng trở (Z_2):

$$F_R^\uparrow = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} F_1^\downarrow \quad (7)$$

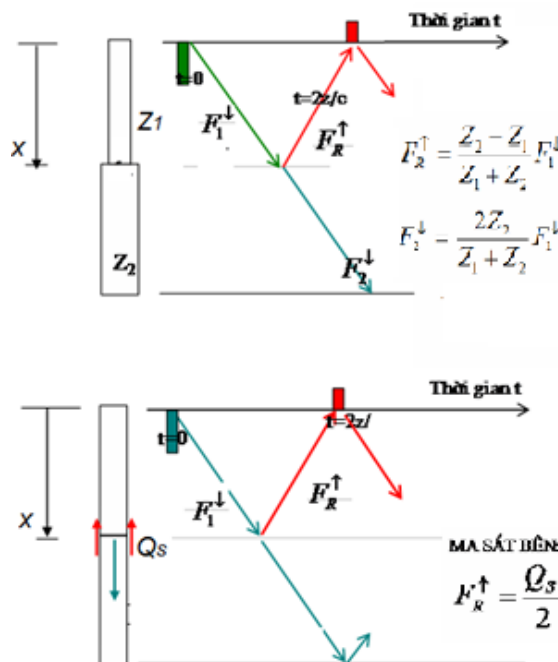
Trong thực tế có thể gặp các trường hợp:

- Khi $Z_2 = Z_1$ thì $F_R^\uparrow = 0$, khi đó không có sóng phản hồi;

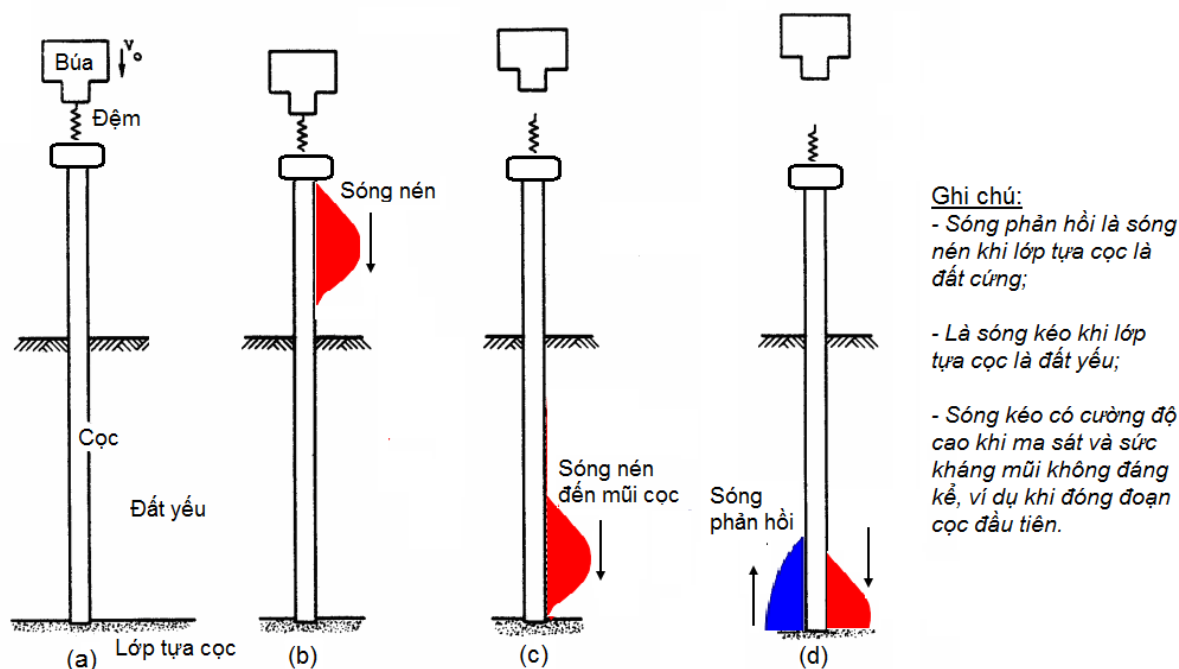
- Khi $Z_2 > Z_1$ thì $F_R^\uparrow = F_1^\downarrow$, khi đó một phần sóng sẽ phản hồi trở lại với dấu trùng với dấu của sóng ban đầu;

- Khi $Z_2 < Z_1$ thì $F_R^\uparrow = -F_1^\downarrow$, khi đó một phần sóng sẽ phản hồi trở lại với dấu ngược với sóng ban đầu.

Riêng khi $Z_2 \ll Z_1$ thì toàn bộ sóng sẽ phản hồi trở lại.



Hình 5. Sự lan truyền sóng ứng suất tại điểm thay đổi kháng trở



Hình 6. Truyền sóng ứng suất tại mũi cọc

2.4 Cơ chế của sự cố gãy cọc trong quá trình đóng trong đất yếu

Quá trình truyền sóng trong cọc được minh họa trên hình 6. Ban đầu búa gây ra ứng suất nén tác dụng lên đầu cọc và trong giai đoạn sóng lan truyền xuống mũi cọc thì ứng suất trong cọc là nén (hình 6a đến 6c). Giai đoạn tiếp theo, khi sóng truyền đến mũi cọc thì có thể xảy ra ba trường hợp về sóng phản hồi như đã đề cập đến ở phần trên. Đó là:

- Khi $Z_2 = Z_1$ thì không có sóng phản hồi: Trong thực tế có thể gặp trường hợp này khi độ cứng của đất dưới mũi cọc tương đương độ cứng của thân cọc. Trong khu vực nghiên cứu không gặp trường hợp này vì đất nền tương đối yếu;
- Khi $Z_2 > Z_1$ thì $F_R^\uparrow = F_1^\downarrow$ một phần sóng sẽ phản hồi trở lại dưới dạng sóng nén. Đặc biệt khi $Z_2 \gg Z_1$ thì toàn bộ sóng sẽ phản hồi trở lại. Trong thực tế xây dựng có gặp trường hợp này khi cọc được đóng vào nền rất cứng như các loại đá. Trong khu vực nghiên cứu không gặp trường hợp này do lớp tựa cọc có độ cứng tương đối thấp so với độ cứng của bê tông cọc;
- Khi $Z_2 \ll Z_1$ thì $F_R^\uparrow = -F_1^\downarrow$, tức là toàn bộ sóng sẽ phản hồi trở lại dưới dạng sóng kéo. Điều kiện này thường xuyên gặp trong thực tế đóng cọc, ví dụ:

+ Giai đoạn đầu đóng cọc trong lỗ khoan dẫn, khi mũi cọc chưa xuống đến đáy lỗ khoan và ma sát

bên tương đối nhỏ thì sức kháng của nền rất thấp. Điều kiện này xảy ra ở khu vực nghiên cứu nếu cọc được hạ trong lỗ khoan dẫn qua lớp cát san nền;

+ Cọc đóng qua lớp đất tương đối cứng, xuyên vào lớp đất yếu: Khi mũi cọc nằm trong lớp đất cứng thì sức kháng của nền tương đối cao nên búa diesel thường “nhảy” cao. Khi mũi cọc xuyên thủng lớp đất cứng thì sức kháng mũi giảm đột ngột trong khi xung lực do búa gây ra vẫn rất cao. Điều kiện này có thể xảy ra tại công trình khi đóng cọc qua nền đất gồm những lớp đất xen kẽ. Hiện tượng này cũng tương tự như trường hợp cọc đóng qua khu vực khoan dẫn (trong công trình này) với đường kính nhỏ hơn đường kính cọc sức kháng mũi (Z_2) rất nhỏ so với sức kháng bên.

Sóng kéo phát sinh trong cọc theo cơ chế nêu trên có thể gây nứt gãy cọc nếu ứng suất kéo vượt quá độ bền chịu kéo của vật liệu cọc. Trong trường hợp này, có thể tăng trọng lượng của búa (ram weight) đồng thời giảm độ cứng của miếng đệm (cushion) sẽ giảm thiểu được hiện tượng nứt cọc khi đóng.

3. Các phương pháp ước tính ứng suất phát sinh trong cọc khi đóng cọc hiện có tại Việt Nam

3.1 Dự báo theo tiêu chuẩn TCVN 9394:2012

3.1.1 Nội dung của phương pháp

Ứng suất do búa gây ra trong cọc khi đóng, gồm ứng suất nén và ứng suất kéo, được tìm theo phương pháp tra bảng.

Trị số ứng suất động nén σ_n , kéo σ_k lớn nhất trong thân cọc BTCT hạ bằng búa đi-ê-zen kiểu ống và búa hơi đơn động xác định theo công thức:

$$\sigma_{n/k} = KK_1K_2K_3K_4 \quad (8)$$

trong đó:

K - hệ số, ở đây $K=1.1$ cho ứng suất nén và $K=1.3$ cho ứng suất kéo;

K_1 - hệ số, xác định theo tỷ số Q/F , với Q là trọng lượng phần động của búa và F là diện tích tiết diện cọc, kG/cm^2 ;

K_2 - hệ số, phụ thuộc vào chiều cao rơi búa H ;

K_3 - hệ số, phụ thuộc vào độ cứng của vật liệu đệm đầu cọc;

K_4 - hệ số, phụ thuộc vào chiều dài L của cọc, và cường độ tiêu chuẩn, R_n , của đất nền dưới mũi cọc, tính theo các chỉ tiêu cường độ của đất nền, theo phương pháp tra bảng trong tiêu chuẩn thiết kế móng cọc (hiện nay là bảng C4 của TCVN 9394:2012).

3.1.2 Tính toán ứng suất khi đóng cọc bằng búa thủy lực trọng lượng 7,2 T

3.1.2.1 Trường hợp đóng đoạn cọc đầu tiên

a) Các số liệu ban đầu:

Trọng lượng phần động của búa: $Q=7200$ kg;

Chiều cao rơi búa: $H=2.5$ m;

Bề rộng tiết diện cọc: 50 cm;

b) Tính hệ số K_1 :

$$W/F = 7200/(50 \times 50) = 2.88 \text{ kG/cm}^2$$

Tra bảng C1 xác định được:

- Đối với ứng suất nén: $K_{1, \text{nén}} = 217 \text{ kG/cm}^2$;

- Đối với ứng suất kéo: $K_{1, \text{kéo}} = 14.8 \text{ kG/cm}^2$.

c) Tính hệ số K_2 :

Với chiều cao rơi búa $H=250$ cm, xác định được:

- Đối với ứng suất nén: $K_{2, \text{nén}} = 0.776$;

- Đối với ứng suất kéo: $K_{2, \text{kéo}} = 0.47$.

d) Tính hệ số K_3 :

Trong điều kiện không có số liệu chính xác về đệm đầu cọc, trong tính toán ở đây xác định K_3 tương ứng với điều kiện thường gặp là đệm đầu cọc làm bằng ván ép với tổng chiều dày 20 cm. Tra bảng xác định được:

+ Hệ số nén $K_{tt} = 0.7$;

+ Với giá trị giả định của ứng suất $\sigma=250 \text{ kG/cm}^2$, có $E_{tt} = 4800 \text{ kG/cm}^2$.

$$\text{Từ đó } K_p = \frac{E_{tt}}{K_{tt}l_b} = \frac{4800}{0.7 \times 20} = 342.8 \text{ kG/cm}^2$$

Giá trị của K_3 :

- Đối với ứng suất nén: $K_{3, \text{nén}} = 1.0668$

- Đối với ứng suất kéo: $K_{3, \text{kéo}} = 1.224$

e) Tính hệ số K_4 :

Khi đóng đoạn cọc đầu tiên thì sức kháng của đất rất nhỏ (cọc hạ trong lỗ khoan dẫn qua cát và sau đó xuyên vào lớp sét yếu), do đó trong tính toán lấy $R_n=50 \text{ T/m}^2$. Từ đó có được:

- Đối với ứng suất nén: $K_{4, \text{nén}} = 1.0$;

- Đối với ứng suất kéo: $K_{4, \text{kéo}} = 2.58$.

g) Tính toán ứng suất nén/kéo khi đóng đoạn cọc đầu tiên theo công thức: $\sigma_{n/k} = KK_1K_2K_3K_4$:

$$\sigma_{\text{nén}} = 254.64 \text{ kG/cm}^2 \text{ (25.5 MPa)}$$

$$\sigma_{\text{kéo}} = 60.76 \text{ kG/cm}^2 \text{ (6.1 MPa)}$$

3.1.2.2 Trường hợp đóng cọc đến độ sâu thiết kế (3 đoạn)

a) Tính hệ số K_1 :

Như trường hợp đóng đoạn cọc đầu tiên:

- Đối với ứng suất nén: $K_{1, \text{nén}} = 217 \text{ kG/cm}^2$;

- Đối với ứng suất kéo: $K_{1, \text{kéo}} = 14.8 \text{ kG/cm}^2$.

b) Tính hệ số K_2 :

Giống như trường hợp đóng đoạn cọc đầu tiên:

- Đối với ứng suất nén: $K_{2, \text{nén}} = 0.776$;

- Đối với ứng suất kéo: $K_{2, \text{kéo}} = 0.47$.

c) Tính hệ số K_3 :

Giống như trường hợp đóng đoạn cọc đầu tiên:

- Đối với ứng suất nén: $K_{3, \text{nén}} = 1.0668$;

- Đối với ứng suất kéo: $K_{3, \text{kéo}} = 1.224$.

d) Tính hệ số K_4 :

Khi đóng đoạn cọc đến độ sâu thiết kế, mũi cọc tựa vào lớp sét cứng ở độ sâu >35 m, do đó lấy $R_n=8000 \text{ kPa}$. Từ đó:

- Đối với ứng suất nén: $K_{4, \text{nén}} = 1.03$;

- Đối với ứng suất kéo: $K_{4, \text{kéo}} = 1.224$.

e) Tính toán ứng suất nén/kéo khi đóng cọc đến độ sâu thiết kế theo công thức:

$$\sigma_{n/k} = KK_1K_2K_3K_4:$$

$$\sigma_{\text{nén}} = 262.28 \text{ kG/cm}^2 (\approx 26.2 \text{ MPa})$$

$$\sigma_{\text{kéo}} = 15.54 \text{ kG/cm}^2 (\approx 1.55 \text{ MPa})$$

3.1.3 Tính toán ứng suất khi đóng cọc bằng búa diesel HD 100

a) Các số liệu ban đầu:

- Trọng lượng phần động của búa: $Q=10000 \text{ kg}$;

- Chiều cao rơi búa lấy theo báo cáo kết quả PDA (thí nghiệm cọc 12MA 3124): $H = 2,5\text{m}$, phù hợp với năng lượng của mỗi nhát đóng là 340000 Nm đến 220000 Nm.

Với trọng lượng búa 10000 kg, chiều cao rơi búa tương ứng là:

$$H=340000/(9.8 \times 10000) \text{ đến } 220000/(9.8 \times 10000) \approx 3,4 \text{ m đến } 2,2 \text{ m}.$$

Bề rộng tiết diện cọc: 50 cm.

b) Tính hệ số K_1 :

$W/A = 10000/(50 \times 50) = 4 \text{ kG/cm}^2$ lớn hơn mức cao nhất trong bảng C1 của TCVN 9394:2012. Như vậy việc sử dụng loại búa 10 tấn để đóng cọc nằm ngoài phạm vi điều chỉnh của tiêu chuẩn.

3.2 Dự báo theo phương pháp của Warrington [10]

a) Xác định vận tốc truyền sóng trong cọc:

$$c = \sqrt{E / \rho}$$

trong đó:

c - vận tốc truyền sóng, m/s;

ρ - khối lượng riêng của vật liệu cọc (bê tông), lấy bằng 2500 kg/m^3 ;

E - mô đun đàn hồi của vật liệu cọc, ở đây lấy $E = 3.10E10 \text{ Pa}$.

b) Tính toán kháng trở cơ học, Z, của tiết diện cọc

$$Z = \frac{AE}{c}$$

Với A là diện tích tiết diện cọc.

c) Xác định vận tốc của quả búa, V_o , khi đập vào đầu cọc:

$$V_o = \sqrt{2gH}$$

với: H= chiều cao rơi búa (m);

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2 \text{ (gia tốc trọng trường)}.$$

d) Tính toán kháng trở của quả búa Z_s :

$$Z_s = \sqrt{KM}$$

trong đó:

K - độ cứng của đệm đầu cọc;

M - khối lượng của quả búa, kg.

e) Tính hệ số Z' : $Z' = \frac{Z}{Z_s}$

g) Xác định lực lớn nhất F_{max} : $F_{\text{max}} = Z_s V_o$

Với V_o là vận tốc búa khi va chạm với cọc.

h) Tính toán lực tác dụng lên đầu cọc (Warrington, 1999):

$$F_{\text{pile}} = \frac{1.021}{1 + \frac{0.305}{Z'}} F_{\text{max}}$$

i) Ứng suất trong cọc khi đóng:

$$\sigma = \frac{F_{\text{pile}}}{A}$$

Các thông số của cọc bê tông cốt thép tiết diện vuông, cạnh bằng 0,5m như sau:

ρ - khối lượng riêng của vật liệu cọc, lấy bằng 2500 kg/m^3 ;

E - mô đun đàn hồi của vật liệu cọc, ở đây lấy $E = 3.10E10 \text{ Pa}$;

Diện tích tiết diện cọc: $A = 0.5 \times 0.5 = 0.25 \text{ m}^2$.

Các thông số khác khi xác định bằng phương pháp của Warrington cho hai trường hợp được thể hiện ở bảng 4:

Trường hợp 1: búa nặng 7,2T chiều cao rơi 2,5m;

Trường hợp 2: búa nặng 10T, chiều cao rơi 2,5m.

Bảng 4. Các thông số được xác định theo phương pháp của Warrington (1999) [10]

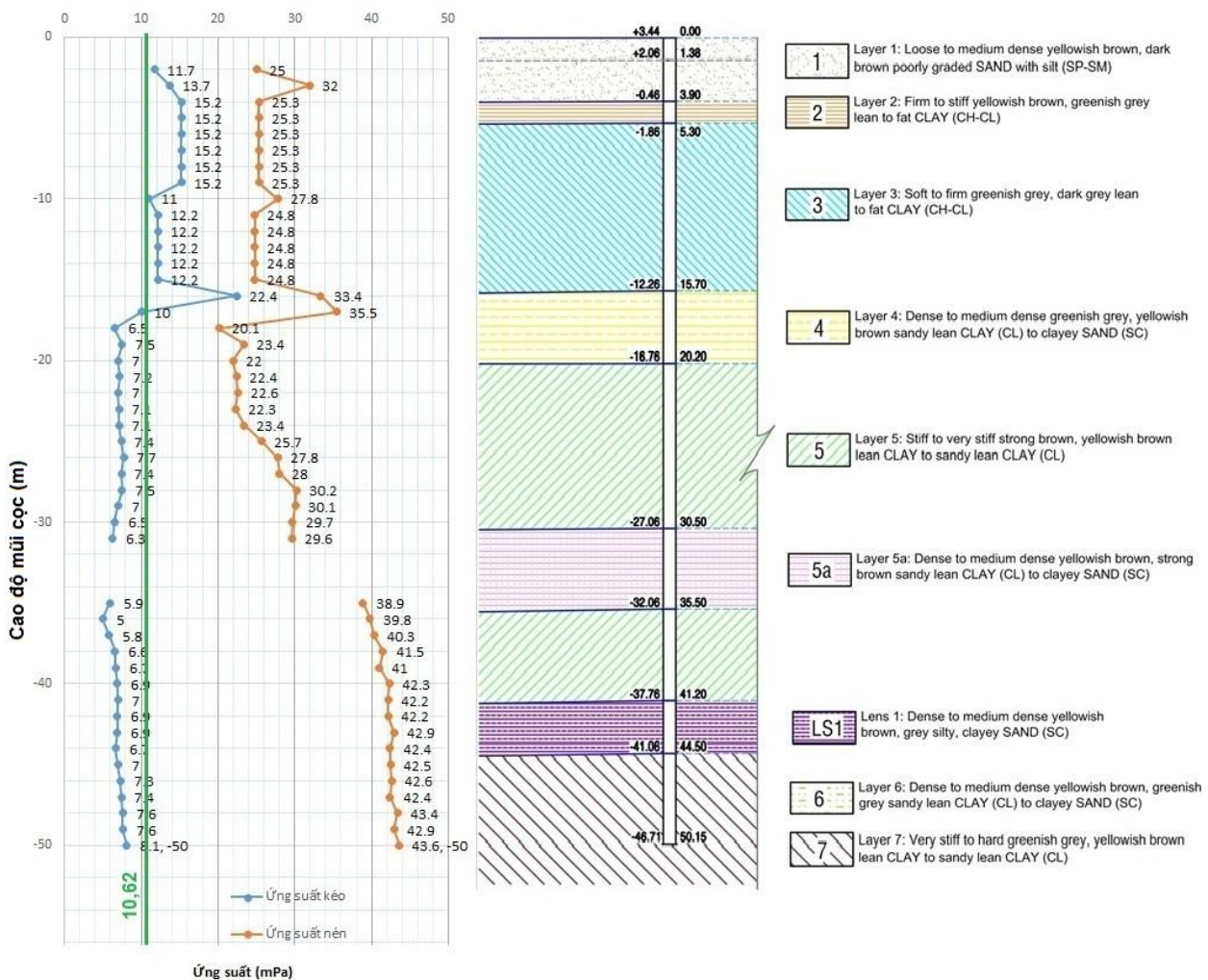
Thông số	Ký hiệu	T. hợp 1	T. hợp 2	Đơn vị
Vận tốc truyền sóng trong cọc	c	3521.363372		m/s
Kháng trở cơ học của cọc	Z	2200852.108		kGs/m
Trọng lượng quả búa	M	7200	10000	kG
Chiều cao rơi	H	2.5	2.5	m
Vận tốc búa khi va chạm	V_0	5.943	7.004	m/s
Độ cứng của đệm đầu cọc	K	3.00E+08	3.00E+08	N/m
Kháng trở của quả búa	Z_s	1.47E+06	1.73E+06	kGs/m
Hệ số Z'	Z'	1.50E+00	1.27E+00	
Lực lớn nhất	F_{max}	1.03E+07	1.21E+07	N
Lực tác động lên đầu cọc	F_{pile}	8.73E+06	9.99E+06	N
Ứng suất trong cọc khi đóng	σ	3.49E+01	4.00E+01	MPa

3.3 Thí nghiệm đo sóng ứng suất (thí nghiệm PDA)

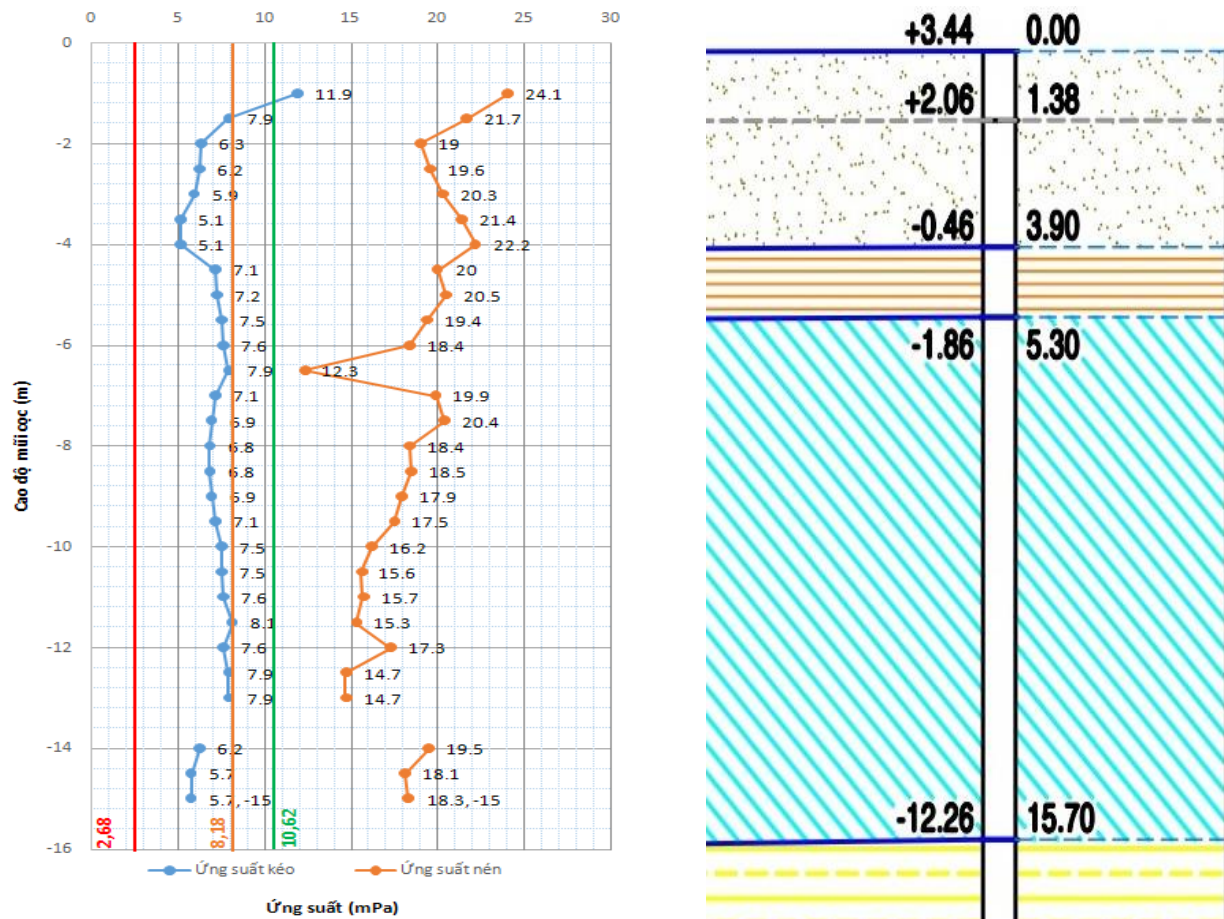
Tổng hợp kết quả đo sóng phát sinh trong thân cọc trong quá trình đóng cọc được thể hiện trong hình 7 (búa 10T) [2], hình 8 và 9 (búa 7,2T) [3].

Trụ địa chất được dùng để đối chiếu là của hố khoan BH7, (ký hiệu các lớp đất trong các hình 8 và 9 được giải thích đầy đủ trong hình 7).

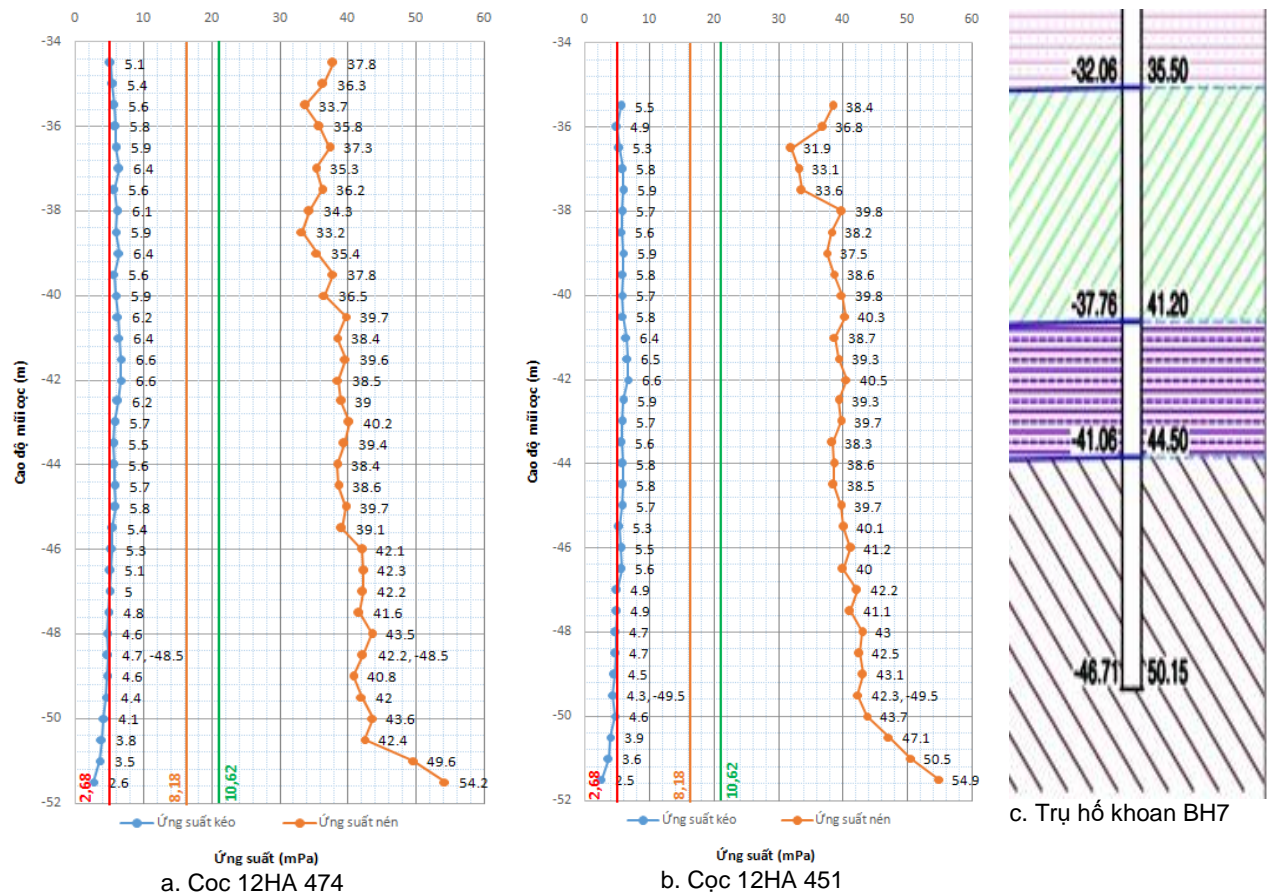
Ứng suất phát sinh khi đóng cọc bằng búa 10T



Hình 7. Kết quả đo sóng cọc 12MA 3124



Hình 8. Kết quả đo sóng ứng suất cọc 12HA 474 khi dùng búa 7,2 T cho đoạn cọc đầu tiên



a. Cọc 12HA 474

b. Cọc 12HA 451

c. Trụ hố khoan BH7

Hình 9. Kết quả đo sóng ứng suất khi dùng búa 7,2 T với đầy đủ 3 đoạn cọc

Nhận xét: kết quả đo tương đối phù hợp với lý thuyết chung về truyền sóng nêu trong mục 2, cụ thể là:

- Trừ một số trường hợp cọc phải xuyên qua những lớp đất cứng xen kẽ, trong điều kiện thông thường thì ứng suất nén trong cọc là cao nhất khi cọc được đóng đến độ sâu thiết kế, nơi nền đất tương đối tốt;

- Ứng suất kéo tăng khi mũi cọc chuyển từ lớp đất cứng (lớp 1) sang lớp đất yếu (lớp 2 và 3).

4. Phân tích kết quả đo sóng và các lý thuyết tính toán

4.1 So sánh sóng ứng suất phát sinh khi đóng cọc với khả năng chịu tải của cọc

Kết quả dự báo khả năng chịu ứng suất kéo của các loại cọc (bảng 3) được dùng để so sánh. Kết quả cho thấy:

a. Với búa 7,2T

- Trường hợp cọc 4 cấp và bỏ qua cường độ chịu kéo của bê tông, cọc có ứng suất kéo giới hạn là 2,68 MPa, nhỏ hơn tất cả các ứng suất kéo đo được. Theo đó, tất cả các đoạn cọc sẽ đều phải bị nứt. Tuy nhiên, thực tế cho thấy chỉ một số đoạn cọc bị nứt [11];

- Trường hợp cọc 4 cấp và kể đến cường độ chịu kéo của bê tông, cọc có ứng suất kéo giới hạn là 8,18 MPa, tương ứng với những sóng ứng suất kéo lớn nhất đo được. Cần lưu ý rằng việc chất lượng cọc không thể đồng đều hoàn toàn, nên thực tế thi công có những đoạn cọc bị nứt, số khác thì không là hoàn toàn hợp lô gic;

- Trường hợp cọc 8 cấp và kể đến cường độ chịu kéo của bê tông, cọc có ứng suất kéo giới hạn là 10,62 mPa, lớn hơn hầu hết sóng ứng suất kéo đo được (Chỉ nhất búa đầu tiên có ứng suất kéo lớn hơn, bằng 11,9MPa, nhưng nhiều khả năng đây là sai số đo đạc). Khi đó việc thi công sẽ khó xảy ra

nứt cọc do ứng suất kéo. Điều này phù hợp với thực tế thi công, các phương án điều chỉnh (tăng số cấp từ 4 thành 8 sợi) do Nhà thầu đề xuất là hợp lý, kết quả thi công thực tế hiện trường cũng cho thấy tỷ lệ cọc hư hỏng là chấp nhận được.

b. Với búa 10T

Hầu hết ứng suất kéo khi đóng đoạn cọc đầu tiên đều lớn hơn 11Mpa (phổ biến là 15,2Mpa) [2]. Trong khi đó, ngay cả với trường hợp có khả năng chịu ứng suất kéo lớn nhất cũng chỉ là 10,62 Mpa (8 cấp và kể đến cường độ chịu kéo của bê tông). Như vậy, búa 10T không phù hợp với trường hợp này.

Nhận xét:

- Khi không kể đến cường độ chịu kéo của bê tông cọc, khả năng chịu kéo của vật liệu cọc không đáp ứng được ứng suất sinh ra khi đóng, cho dù búa sử dụng là loại 7,2T hay 10T;

- Khi kể đến ứng suất kéo của bê tông cọc:

- Trường hợp 4 cấp đa số có thể đáp ứng được ứng suất sinh ra khi đóng cọc bằng búa 7.2T nhưng hệ số an toàn là rất thấp. Trường hợp này không thể đáp ứng với loại búa 10T;

- Trường hợp 8 cấp, có thể đáp ứng được ứng suất sinh ra khi đóng cọc bằng búa 7.2T với hệ số an toàn là chấp nhận được. Trường hợp này cũng không thể đáp ứng với loại búa 10T.

- Việc bỏ qua ứng suất kéo của bê tông khi đánh giá khả năng chịu ứng suất kéo của cọc là không hợp lý. Khi kể đến khả năng chịu kéo của bê tông cọc, kết quả tính toán tương đối phù hợp với thực tế.

4.2 So sánh giá trị ứng suất phát sinh khi đóng cọc theo dự báo và theo đo đạc tại hiện trường

Các kết quả tính toán lý thuyết và kết quả thực nghiệm được tập hợp trong bảng 4.

Bảng 4. Tổng hợp kết quả tính toán và đo ứng suất khi đóng cọc

Loại búa	Tính toán lý thuyết					Đo sóng ứng suất (PDA)			
	Ứng suất nén (MPa)		Ứng suất kéo (MPa)			Ứng suất nén max (MPa)		Ứng suất kéo max (MPa)	
	TCVN 9394		TCVN 9394			Đoạn đầu	Toàn bộ cọc	Đoạn đầu	Toàn bộ cọc
	Đoạn đầu	Toàn bộ cọc	Warrington	Đoạn đầu	Toàn bộ cọc				
7,2 T	25,5	26,2	34,92	6,08	1,55	24,1	54,9	7,9(11,9)*	6,6
10 T	-	-	40.05	-	-	35,5	43,6	22,4	8,1

Chú thích: (*) là số liệu bị nghi ngờ là sai số từ việc hiệu chỉnh máy

Nhận xét:

Tính toán ứng suất (cả kéo và nén) theo TCVN 9394:2012 cho kết quả như sau:

- Đoạn cọc đầu tương đối phù hợp với kết quả đo sóng ứng suất tại hiện trường;
- Đoạn cuối (toàn bộ cọc) thấp hơn đáng kể so với kết quả đo sóng tại hiện trường.

Nguyên nhân có thể do mức độ ảnh hưởng do ma sát bên được lấy cao hơn thực tế. Trong trường hợp cụ thể của Nhiệt điện Long Phú, khi đóng đoạn đầu cọc thì sức kháng của nền là không đáng kể nên sự chênh lệch giữa ứng suất nén và ứng suất kéo nhỏ hơn so với khi cọc đã được đóng sâu hơn;

Tính toán theo Warrington cho giá trị ứng suất nén tương đối phù hợp với kết quả thực nghiệm. Tuy vậy phương pháp này không đưa ra số liệu về ứng suất kéo trong cọc.

5. Kết luận và kiến nghị

Ứng suất kéo phát sinh trong quá trình đóng cọc là một thông số quan trọng, cần được quan tâm thỏa đáng ngay từ bước thiết kế để hạn chế những sự cố trong quá trình thi công.

Tính toán khả năng chịu kéo theo TCVN hiện tại, bỏ qua cường độ chịu kéo của bê tông cọc dự ứng lực là chưa thỏa đáng. Nên xem xét kể đến thông số này với một hệ số an toàn thích hợp.

Việc thiết kế cọc nên đảm bảo không hình thành vết nứt trong quá trình vận chuyển, cẩu lắp (làm mất khả năng chịu kéo của bê tông cọc).

Ảnh hưởng về sự thay đổi địa chất là có cơ sở, khi mà ứng suất kéo trong cọc khi đóng đoạn cọc đầu tiên (chuyển từ lớp cát chặt sang lớp đất yếu) là tương đối lớn. Để hạn chế các nguy cơ này, có thể giảm chiều cao rơi búa hoặc tăng chiều dày lớp đệm. Khi có hiện tượng nứt ngang thân cọc trong quá trình đóng, cần thực hiện một trong các biện pháp sau để xác định nguyên nhân và giảm thiểu sự cố: (1) đo ứng suất trong cọc khi đóng để phát hiện

ra chính xác nguyên nhân nứt cọc; (2) điều chỉnh lại thiết bị đóng cọc bằng cách tăng trọng lượng của búa đồng thời giảm độ cứng của miếng đệm; (3) tăng khả năng chịu kéo của cọc bằng cách tăng số lượng hoặc đường kính cốt thép chịu kéo trong cọc.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. ACI 543R. Guide to Design, Manufacture, and Installation of Concrete Piles.
2. FECON (2016). Báo cáo kết quả thí nghiệm PDA để tìm ứng suất trong quá trình đóng cọc thử.
3. FECON (2016). Báo cáo kết quả thí nghiệm biến dạng lớn (PDA) cọc BTCT 12HA451, cọc 12HA474.
4. Hồ Hữu Thắng, Nguyễn Hữu Quyền, Nguyễn Ngọc Huy (2016), Báo cáo kết quả thẩm tra thuyết minh tính toán và bản vẽ thiết kế cọc bê tông cốt thép dự ứng lực.
5. Long Phu 1 Power Plant Project Management Board, (2015), Non-conformance report for piling works of boiler foundation Unit 2 (Pile No. 12HA415, 12HA195).
6. Rausche, F., Likins, G., Miyasaka, T., Bullock, P., (2008), The effect of ram mass on pile stresses and pile penetration, *The 8th International Conference on the Application of stress wave theory to piles, Science, Technology and Practice*.
7. TCVN 7888:2014, Pretensioned spun concrete piles.
8. TCVN 5574:2012, Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép – tiêu chuẩn thiết kế.
9. TCVN 9394:2012, Đóng và ép cọc – Thi công và nghiệm thu.
10. Warrington (1999), Closed form solution of the wave equation for piles, *Master of Science Degree, The University of Tennessee at Chattanooga, USA*.
11. Ban Dự án nhiệt điện Long Phú PTSC (2016), Báo cáo phân tích nguyên nhân và đề xuất các giải pháp khắc phục trong công tác sản xuất và thi công cọc.

Ngày nhận bài: 6/5/2021.

Ngày nhận bài sửa: 17/5/2021.

Ngày chấp nhận đăng: 19/5/2021.