NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG CỌC TDM CHO CÁC NHÀ KHO CHỨA TRONG ĐIỀU KIỆN NỀN ĐẤT YẾU CỦA ĐỒNG BẰNG SÔNG CỬU LONG

Võ Anh Tuấn[1], Huỳnh Đoàn Thiện[2], Phạm Minh Đạo[3], Nguyễn Việt Tuấn[4]

[1,2,3,4]Phân Viện Khoa học công nghệ xây dựng miền Nam

Email: [1]voanhtuan.pm@gmail.com, 0932 011 711; [2]anhtuanpro.pm@gmail.com, 0939 362 530; [3]daopm.ibst@gmail.com, 0906 216 736; [4]tuanibst@gmail.com, 0904 109 876

DOI: https://doi.org/10.59382/hnkh17-ibst.2025.ses3-16

TÓM TẮT: Tại Đồng bằng sông Cửu Long do tính phức tạp của nền đất yếu (chiều dày lớp đất yếu tương đối lớn > 20 m), với các công trình thấp tầng (nhà ở riêng lẻ, nhà ở xã hội, nền kho bãi...) có tải trọng nhỏ đến trung bình (50 - 400 kN/m^2) chưa có giải pháp móng hợp lý do nếu sử dụng phương pháp móng cọc BTCT với mũi cọc tựa vào lớp đất tốt sâu bên dưới (20 - 25 m) thì bất lợi về hiệu quả kinh tế do dư thừa về khả năng chịu lực, còn nếu sử dụng phương pháp cải thiện bề mặt (gia cường đất phần trên 0,5 m ~ 1,0 m) thì rất khó kiểm soát độ lún của mặt đất yếu ở phía dưới. Bài viết đưa ra các nghiên cứu áp dụng Công nghệ cọc TDM làm giải pháp gia cố nền cho một công trình nhà kho có tải trọng thấp đến trung bình (50 - 400 kN/m^2) trên đất yếu tại Đồng bằng sông Cửu Long và cho kết quả tương đối khả quan. Hiệu quả kinh tế so với giải pháp móng cọc BTCT từ 15 - 30%.

TỪ KHÓA: Cọc TDM, gia cố nền, cọc BTCT.

ABSTRACT: In the Mekong Delta, due to the complexity of weak soil (weak soil layer thickness is relatively large > 20 m), for low-rise buildings (individual houses, social housing, warehouse foundations...) with small to medium loads (50-400kN/m^2), there is no reasonable foundation solution because if using the reinforced concrete pile foundation method with the pile tip resting on the good soil layer deep below (20 - 25 m), it is disadvantageous in economic efficiency due to excess load-bearing capacity, and if using the surface improvement method (reinforcing the soil above 0.5 m ~ 1.0m), it is very difficult to control the settlement of the weak ground below. The article presents studies on applying TDM pile technology as a foundation reinforcement solution for a warehouse project with low to medium loads (50 - 400 kN/m^2) on weak soil in the Mekong Delta and gives relatively positive results. Economic efficiency compared to reinforced concrete pile foundation solution from 15 - 30%.

KEYWORDS: TDM, soil improvement, concrete pile.

1. GIỚI THIỆU

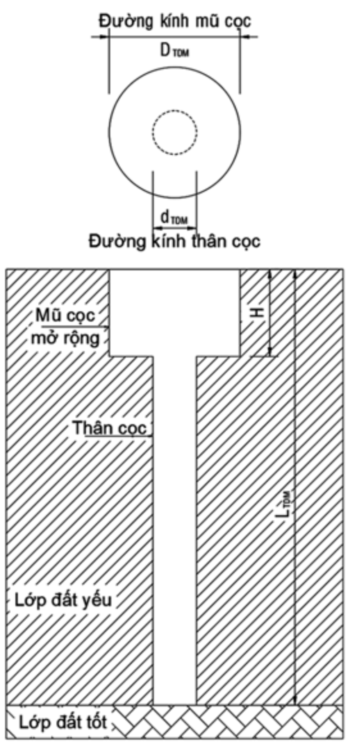
Việc xây dựng các công trình dân dụng, công nghiệp cũng như hạ tầng gắn liền với việc phát triển kinh tế xã hội. Các tỉnh Đồng bằng sông Cửu Long đất rộng, người thưa, có điều kiện để đẩy mạnh cơ sở hạ tầng phát triển kinh tế, xây dựng hệ thống nhà xưởng làm kho bãi hoặc lập các khu đô thị quy mô thấp tầng. Tuy nhiên, nói tới đồng bằng sông Cửu Long, người ta nghĩ tới điều kiện địa chất không thuận lợi với tầng đất yếu dày 20 - 25 m. Việc tìm kiếm một giải pháp nền móng phù hợp cho các công trình công nghiệp và nhà ở dân dụng thấp tầng là cần thiết.

2. TỔNG QUAN CÔNG NGHỆ CỌC TDM VÀ LÝ THUYẾT TÍNH TOÁN

2.1. Tổng quan công nghệ cọc TDM

Cột trộn sâu hình chữ T (T-shaped Deep Mixed Column - TDM) (Hình 1) là một hình dạng cột đất - xi măng mới được nghiên cứu và phát triển dựa trên phương pháp trộn sâu đất - xi măng (Cement Deep Mixing - CDM) nhằm khắc phục những hạn chế của loại cọc này.

Cọc CDM truyền thống với đường kính cột không đổi được sử dụng rộng rãi cho các dự án cơ sở hạ tầng có diện tích tải trọng lớn như đê, đập, kè, nơi áp dụng tính toán lún một chiều. Tuy nhiên, CDM đã bộc lộ những hạn chế khi áp dụng cho các công trình dân dụng sử dụng móng đơn hoặc móng bè (diện tích tải trọng giới hạn). Trong điều kiện tải trọng giới hạn, ứng suất phân bố đáng kể ở các lớp trên và giảm dần theo chiều sâu. Việc cải tạo đất đồng đều từ trên xuống dưới mà không tập trung vào các lớp yếu hơn (thường là các lớp trên) có thể dẫn đến việc tăng lún. Hơn nữa, cọc CDM thông thường thường bị phá hủy ở phần đầu cọc do ứng suất lớn nhất tập trung tại đây và việc tăng hàm lượng xi măng ở toàn bộ chiều dài cọc để khắc phục vấn đề này lại gây tốn kém không cần thiết cho phần cọc sâu hơn.



Hình 1: Cọc TDM

Cọc TDM với đường kính phần đầu được mở rộng làm tăng diện tích chịu tải nên tăng khả năng chịu lực và giảm độ lún cho tầng đất nông (thường là yếu). Việc thay đổi đường kính theo chiều sâu bằng thiết bị chuyên dụng, đôi khi giảm hàm lượng chất gia cố cho phần đất sâu sẽ tối ưu chi phí khi thi công so với cọc CDM truyền thống.

2.2. Lý thuyết tính toán cọc TDM

2.2.1. Cơ sở lý thuyết chung

Cơ sở lý thuyết chung để tính toán cọc TDM được xây dựng dựa trên các nguyên lý của phương pháp trộn sâu truyền thống (DM) nhưng có những điều chỉnh và xem xét đặc biệt do hình dạng của chúng.

2.2.2. Hình dạng và cơ chế truyền tải tải trọng

Cọc TDM có đường kính lớn hơn ở độ sâu nông (đầu cọc mở rộng) và đường kính nhỏ hơn ở độ sâu lớn hơn, tạo thành hình chữ "T". Đầu cọc mở rộng này tạo ra tỷ số thay thế diện tích (a_s) cao hơn ở độ sâu nông so với cọc CDM thông thường. Điều này rất quan trọng cho việc truyền tải từ bề mặt đất đắp.

Cơ chế truyền tải của nền đắp được hỗ trợ bởi cọc TDM được giả thuyết là gần với cơ chế của nền được hỗ trợ bởi cọc cứng do sự tương đồng về cấu hình hình học. Đầu cọc mở rộng hoạt động tương tự như mũ cọc, giúp tăng hiệu quả của cọc và giảm lún lệch trên bề mặt nền. Thiết kế này nhằm mục đích chuyển một phần lớn hơn tải trọng đắp đất lên cọc, từ đó giảm ứng suất phụ thêm lên đất xung quanh chưa được xử lý.

2.2.3. Các thông số thiết kế và khái niệm tương đương

Để so sánh cọc TDM với cọc CDM truyền thống và tính toán lượng xi măng sử dụng, một đường kính tương đương (D_e) và tỷ lệ thay thế diện tích (a_{es}) được đề xuất. D_e được tính toán dựa trên giả định rằng cọc TDM có thể tích tương đương với một cọc CDM thông thường có đường kính đồng nhất, theo công thức:

$$D_e = \sqrt{\frac{D_1^2 L_1 + D_2^2 (L - L_1)}{L}} \quad (1)$$

Trong đó:

D_e là đường kính cột tương đương;

D_1 là đường kính phần mở rộng của cột TDM;

D_2 là đường kính phần sâu hơn của cột TDM;

L_1 là chiều dài phần mở rộng của cột TDM;

L là tổng chiều dài của cột.

Tỷ lệ thay thế diện tích tương đương (a_{es}):

$$a_{es} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{D_e}{S} \right)^2 \quad (2)$$

2.2.4. Tính toán lún

Độ lún tổng S của nền gia cố được xác định bằng tổng độ lún của bản thân khối gia cố và độ lún của đất dưới khối gia cố:

$$S = S_1 + S_2 \quad (3)$$

Trong đó:

S_1 là độ lún bản thân khối gia cố;

S_2 là độ lún của đất chưa gia cố, dưới mũi trụ.

Độ lún của bản thân khối gia cố được tính theo công thức:

$$S_1 = \frac{qH}{E_{tb}} = \frac{qH}{aE_c + (1-a)E_s} \tag{4}$$

Trong đó:

q là tải trọng công trình truyền lên khối gia cố;

H là chiều sâu của khối gia cố;

a là tỷ số diện tích gia cố, a = (nA_c / BL);

n là tổng số trụ;

A_c là diện tích tiết diện trụ;

B, L là kích thước khu vực gia cố;

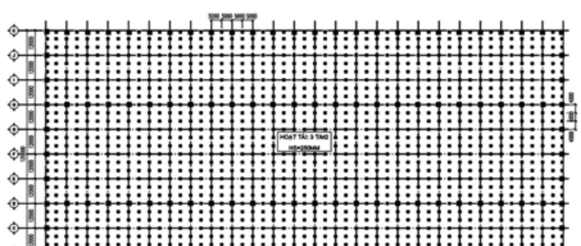
E_c là mô đun đàn hồi của vật liệu trụ. Có thể lấy E_c = (50 đến 100) C_{col} với C_{col} là sức kháng cắt của vật liệu trụ;

E_s là mô đun biến dạng của đất nền giữa các trụ. Có thể lấy theo công thức thực nghiệm $E_s = 250c_u$, với c_u là sức kháng cắt không thoát nước của đất nền.

Tóm lại: cơ sở lý thuyết tính toán cọc TDM là sự kết hợp của việc áp dụng các nguyên lý chung của gia cố nền bằng cột xi măng đất (như được nêu trong các tiêu chuẩn thiết kế chung) và những xem xét đặc biệt về hình dạng biến đổi của TDM. Những đặc điểm này, đặc biệt là vai trò của đầu cọc mở rộng, giúp tối ưu hóa cơ chế truyền tải tải trọng, cải thiện đáng kể sức chịu tải, giảm lún và tăng ổn định so với các loại cọc DM truyền thống.

3. ÁP DỤNG CÔNG NGHỆ CỌC TDM ĐỂ GIA CỐ NỀN NHÀ KHO

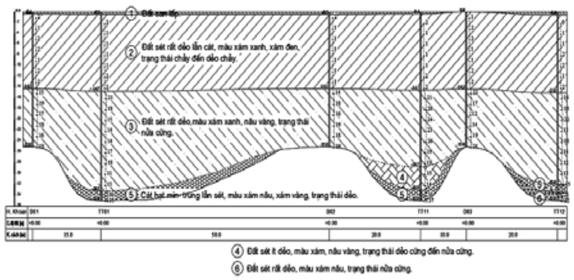
Một nhà kho dài 250 m, rộng 120 m. nhịp có nhu cầu tải trọng trên sàn 3 tấn/m^2 (30 kN/m^2) (Hình 2).



Hình 2: Sơ đồ bố trị cọc PHC và yêu cầu tải trọng

Theo kết quả khảo sát sâu 30 m, địa tầng có 04 lớp. Tuần tự từ trên xuống là lớp (1) - Đất san lấp, dày 0.5m; lớp (2) - Đất sét rất dẻo lẫn cát, trạng thái từ chảy đến dẻo chảy, dày 14,2 m; lớp (3) - Đất sét rất dẻo, trạng thái nửa cứng, dày 18,5 m; dưới cùng là lớp (5) - Cát hạt mịn-trung lẫn sét, trạng thái dẻo (Hình 3).

Giải pháp xử lý nền chịu tải kho bãi 30 kN/m^2: Nền kho BTCT dày 250 mm đặt trực tiếp trên lớp (1). TDM đường kính 0.8 m, khoảng cách 4 m.



Hình 3: Mặt cắt địa chất

4. ĐÁNH GIÁ CÁC GIẢI PHÁP NỀN MÓNG CỦA NHÀ KHO

4.1. Giải pháp cọc BTCT, móng, giằng móng

Cấu tạo nền kho, tuần tự từ trên xuống: sàn bê tông cốt thép dày 250 mm, đài cọc dày 800 mm, cọc PHC-A đường kính 500 mm, bố trí lưới 4 × 5 m (Hình 2), giằng móng theo chu vi tiết diện 400 × 600 mm. Mũi cọc đặt vào lớp số (3) - Đất sét rất dẻo, trạng thái nửa cứng, độ sâu mũi –26,45 m so với MĐTN, sức chịu tải thiết kế mỗi cọc 86 tấn (860 kN).

4.2. Giải pháp dùng cọc CDM gia cố nền

Nền nhà kho bằng bê tông cốt thép dày 250 mm. Cọc CDM bố trí đều 3 × 3 m, đường kính 1.000 mm. Mũi cọc CDM đặt trên lớp số (3) - Đất sét rất dẻo, trạng thái nửa cứng, ở độ sâu 14,7 m so với MĐTN.

4.3. Giải pháp dùng cọc TDM gia cố nền

Nền nhà kho bằng bê tông cốt thép dày 250 mm. Cọc TDM bố trí đều 4 × 4 m, đường kính 800 mm, phần đỉnh cọc mở rộng có đường kính 1.600 mm. Mũi cọc TDM đặt trên lớp số (3) - Đất sét rất dẻo, trạng thái nửa cứng, ở độ sâu 14,7 m so với MĐTN.

4.4. So sánh các phương án

4.4.1. So sánh về tính toán lún

Cọc PHC, cọc TDM và cọc CDM thông thường với tiết diện được mô hình hóa và phân tích bằng phần mềm Plaxis 2D. Các thông số đầu vào sử dụng trong tính toán xem trong Bảng 1 và Bảng 2.

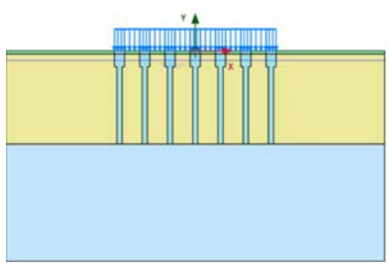
Bảng 1: Thông số các lớp đất nền sử dụng trong tính toán

		Lớp SL (Cát)	Lớp 1 (Sét dẻo chảy)	Lớp 2 (Sét dẻo cứng)	Cọc CDM và TDM
Type		Drained	Un-Drained (A)	Un-Drained (A)	Un-Drained (A)
		MC	MC	MC	MC
γ_{unsat}	kN/m³	18	14,9	19,1	19
γ_{sat}	kN/m³	18	15,1	19,5	19
E^{ref}	kN/m²	5.000	580	4.200	150.000
ν	-	0,3	0,3	0,3	0,3
c	kN/m²	0	7,1	30,8	250
φ	°	30	3,2	16,27	30

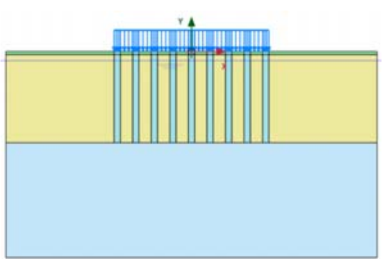
Bảng 2: Thông số của cọc TDM và cọc CDM

Loại cọc	Đường kính phần mở rộng đầu cọc (mm)	Chiều dài phần mở rộng (mm)	Đường thân cọc (mm)	Chiều dài cọc (m)	Bố trí cọc (m)	Thể tích 1 cọc (m^3)
TDM	1600	2500	800	14,7	4 × 4	11.2
CDM	-	-	1000	14,7	3 × 3	11.6
PHC	-	-	500	26,45	4 × 5	-

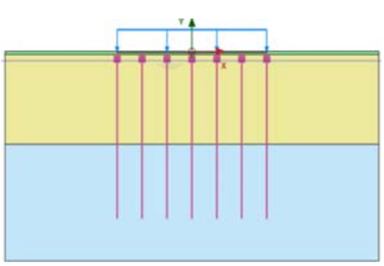
Mô hình tính toán



Hình 4a: Mô hình tính toán cọc TDM

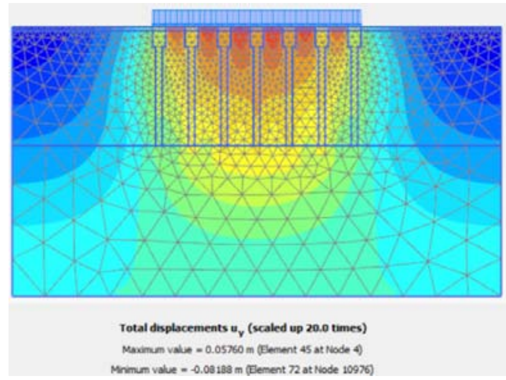


Hình 4b: Mô hình tính toán cọc CDM

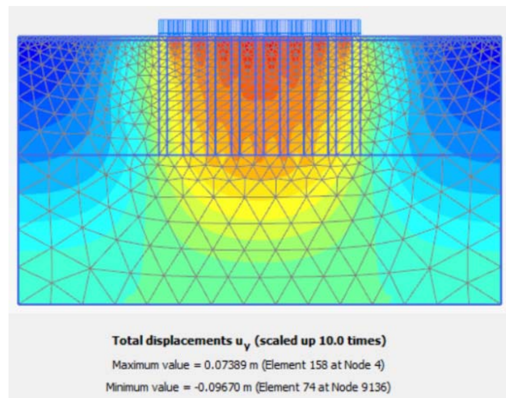


Hình 4c: Mô hình tính toán cọc PHC

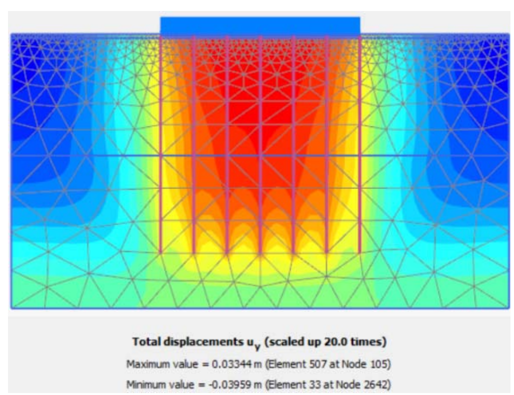
4.4.2. Kết quả tính toán kiểm tra lún



Hình 5a: Chuyển dịch theo phương đứng của đất, u_y = 82 mm khi dùng cọc TDM



Hình 5b: Chuyển dịch theo phương đứng của đất, u_y = 97 mm khi dùng cọc CDM



Hình 5c: Chuyển dịch theo phương đứng của đất, u_y = 40 mm khi dùng cọc PHC

Dựa trên các giá trị chuyển vị theo phương đứng của đất, phương án cọc PHC có chuyển vị theo phương đứng nhỏ nhất. Phương án cọc CDM cho chuyển vị lớn nhất. Trong khi phương án cọc TDM có chuyển vị trung bình so với 2 phương án cọc còn lại.

Phương án	TDM	CDM	Cọc PHC
Chuyển dịch u_y	82 mm	97 mm	40 mm

4.4.3. Kết quả tính toán so sánh kinh tế

Bảng 3: Tính toán giá trị kinh tế

STT	Tên công việc	Đ.vị	Số lượng	Đơn giá (VNĐ)	Thành tiền (VNĐ)
A	**Cọc PHC D500 lưới 4 × 5 m**				39.787.697.151
1	Thi công ép cọc (nhân công+ ca máy+ vật tư)	md	38.696	420.000	16.252.467.000
2	Thép gia cường nấm cọc	kg	84.384	22.000	1.856.445.351
3	Thép nền	kg	532.418	22.000	11.713.204.800
4	Bê tông nền + nấm	m^3	8.305	1.200.000	9.965.580.000
B	**Cọc CDM D1000, lưới 3 × 3 m**				35.641.128.300
1	Thi công CDM (khoan + bơm)	md	48.804	90.000	4.392.360.000
2	Vật liệu xi măng	kg	9.577.785	1.100	10.535.563.500
3	Thép nền	kg	532.418	22.000	11.713.204.800
4	Bê tông nền	m3	7.500	1.200.000	9.000.000.000
C	**Cọc TDM D800, lưới 4 × 4 m**				28.973.822.782
1	Thi công cọc TDM (khoan + bơm)	md	27.783	90.000	2.500.470.000
2	Vật liệu xi măng	kg	5.236.498	1.100	5.760.147.982
3	Thép nền	kg	532.418	22.000	11.713.204.800
4	Bê tông nền	m^3	7.500	1.200.000	9.000.000.000

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Từ kết quả phân tích đã chỉ ra rằng việc áp dụng công nghệ cọc TDM làm giải pháp gia cố nền cho các công trình nhà kho có tải trọng 30 kN/m^2 trên nền đất yếu dày 14,7 m của Đồng bằng sông Cửu Long mang lại kết quả tương đối khả quan.

Về hiệu quả kinh tế, giải pháp cọc TDM cho thấy lợi thế từ 15 - 30% so với giải pháp móng cọc bê tông cốt thép (BTCT). Cụ thể:

- Phương án cọc TDM (D800, lưới 4 × 4 m) có tổng chi phí là 28.973.822.782 VNĐ (tương đương 965.794 VNĐ/m^2).

- Phương án cọc PHC (D500, lưới 4 × 5 m) có tổng chi phí là 39.787.697.151 VNĐ (tương đương 1.326.257 VNĐ/m^2).

- Phương án cọc CDM (D1000, lưới 3 × 3 m) có tổng chi phí là 35.641.128.300 VNĐ (tương đương 1.188.038 VNĐ/m^2).

Khi so sánh hiệu suất giữa cọc TDM và cọc CDM thông thường bằng phương pháp phần tử hữu hạn:

- Độ lún của nền sử dụng cọc TDM giảm 15 mm (tương đương 16%) so với cọc CDM.

- Khối lượng xi măng cần dùng cho cọc TDM ít hơn 28% so với cọc CDM.

Như vậy, cọc TDM được thiết kế với đường kính lớn hơn ở độ sâu nông (đầu cọc mở rộng) và đường kính nhỏ hơn ở độ sâu lớn hơn, tạo thành hình chữ “T”, giúp tối ưu hóa cơ chế truyền tải tải trọng, tăng hiệu quả của cọc, giảm lún và tăng ổn định so với các loại cọc CDM truyền thống đồng thời tiết kiệm chi phí hơn so với việc sử dụng cọc BTCT. Đây có thể là một giải pháp có tính kinh tế để áp dụng cho các kho chứa có tải trọng thấp đến trung bình (50 - 400 kN/m^2) trên nền đất yếu của Đồng bằng sông Cửu Long.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Song-Yu Liu, Yan-Jun Du, Yao-Lin Yi, Anand J.Puppala - *Field Investigations on Performance of T-Shaped Deep Mixed Soil Cement Column - Supported Embankments over Soft Ground*, Journal of Geotechnical and geoenviromental Engineering, ASCE, June 2012.

[2] Chana Phutthananon, Pornkasem Jongpradist, Phatharaphong Yensri, Pitthaya Jamsawang - *Dependence of ultimate bearing capacity and failure behavior of T-shaped deep cement mixing piles on enlarged cap shape and pile strength.*

[3] Pengpeng Ni, Yaolin Yi, Songyu Liu - *Bearing capacity optimization of T-shaped soil-cement column-improved soft ground under soft fill.*