

**TÍNH TOÁN CỌC CHỊU TẢI TRỌNG NGANG LÀM VIỆC ĐỒNG THỜI VỚI NỀN ĐẤT**

ThS. **NGUYỄN ANH DÂN**

Trường Đại học Giao thông Vận tải

Tóm tắt: Khi tính toán móng cọc, nhiều mô hình liên kết giữa cọc và nền đã được sử dụng, trong đó mô hình làm việc đồng thời phản ánh chính xác hơn tương tác giữa cọc và nền đất. Bài báo này áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn kết hợp với mô hình Winkler để tính toán cọc chịu tải trọng ngang làm việc đồng thời với nền đất dựa trên đường cong quan hệ tải trọng – biến dạng và so sánh với phương pháp hiện hành.

**1. Đặt vấn đề**

Móng cọc là kết cấu được sử dụng phổ biến trong các công trình xây dựng. Trước đây, khi công nghệ máy tính chưa phát triển việc tính toán chủ yếu bằng thủ công với những mô hình đơn giản, liên kết cọc và nền được mô hình hóa theo các quy ước phù hợp nhưng chưa kể đến ảnh hưởng của đất nền hoặc có kể đến nhưng còn nhiều hạn chế dẫn đến chưa chính xác trong kết quả tính toán. Hiện nay, việc ứng dụng các phần mềm theo nguyên lý phần tử hữu hạn vào thiết kế nền móng đã tối ưu hóa các tính toán và cho kết quả đáng tin cậy hơn, cùng với đó việc nghiên cứu tính toán cọc làm việc đồng thời với nền cũng trở nên cấp thiết.

**2. Phương pháp tính toán cọc chịu tải trọng ngang theo tiêu chuẩn TCXD 205-1998**

Việc tính toán tải trọng ngang được trình bày trong phụ lục G của [1], phương pháp này được biên soạn dựa trên tiêu chuẩn SNIIP II – 17 – 77. Một trong những tham số cơ bản và quan trọng nhất khi tính

toán đó là hệ số biến dạng  $\alpha_{bd}$  ( $m^{-1}$ ) được xác định theo công thức:

$$\alpha_{bd} = \sqrt[3]{\frac{K \cdot b_c}{E \cdot I}} \tag{1}$$

Trong đó: K - hệ số tỷ lệ phụ thuộc vào loại đất, được xác định bằng cách tra bảng G1 của [1]; E - Môđun đàn hồi ban đầu của vật liệu cọc; I - mômen quán tính tiết diện ngang của cọc;  $b_c$  - chiều rộng quy ước của cọc, khi  $d \geq 0,8$  thì  $b_c = d + 1m$ ; khi  $d < 0,8m$  thì  $b_c = 1,5d + 0,5m$ .

- Chuyển vị ngang và xoay tại đầu cọc xác định theo công thức:

$$\Delta_n = y_o + \Psi_o \cdot l_o + \frac{H l_o^3}{3E_b I} + \frac{M l_o^2}{2E_b I} \quad \Psi = \Psi_o + \frac{H l_o^2}{2E_b I} + \frac{M l_o}{E_b I} \tag{2}$$

Trong đó: H và M - Giá trị tính toán của lực cắt và mômen uốn tại đầu cọc;  $l_o$  - Khoảng cách từ đáy đài cọc đến mặt đất;  $y_o$  và  $\varphi_o$  - Chuyển vị ngang, và góc xoay tiết diện ngang của cọc ở mặt đất với cọc đài cao, ở mức đáy đài với cọc đài thấp được xác định theo công thức:

$$y_o = H_o \delta_{HH} + M_o \delta_{HM} \quad \Psi_o = H_o \delta_{MH} + M_o \delta_{MM} \tag{3}$$

Với  $H_o = H$  - Giá trị tính toán của lực cắt;  $M_o = M + H l_o$  - Mômen uốn;  $\delta_{HH}$  - Chuyển vị ngang của tiết diện bởi lực  $H_o = 1$ ;  $\delta_{HM}$  - Chuyển vị ngang của tiết diện bởi mômen  $M_o = 1$ ;  $\delta_{MH}$  - Góc xoay của tiết diện bởi lực  $H_o = 1$ ;  $\delta_{MM}$  - Góc xoay của tiết diện bởi mômen  $M_o = 1$ .

Chuyển vị  $\delta_{HH}$ ,  $\delta_{MH} = \delta_{HM}$ ,  $\delta_{MM}$  được xác định theo công thức:

$$\delta_{HH} = \frac{1}{\alpha_{bd}^3 E_b I} A_o \quad \delta_{MH} = \delta_{HM} = \frac{1}{\alpha_{bd}^2 E_b I} C_o \quad \delta_{MM} = \frac{1}{\alpha_{bd} E_b I} C_o \tag{4}$$

$A_o, B_o, C_o$  - Những hệ số không thứ nguyên lấy theo bảng G2 của [1]

- Mô men  $M_z$ , lực cắt  $Q_z$ , lực dọc  $N_z$  trong các tiết diện của cọc tính theo công thức:

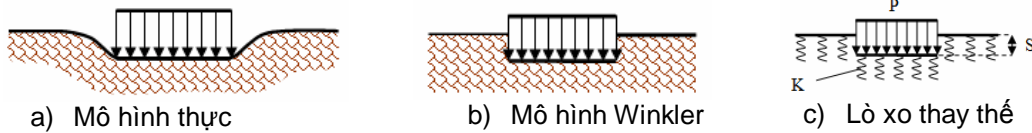
$$M_z = \alpha_{bd}^2 E_b I y_o A_3 - \alpha_{bd} E_b I \Psi_o B_3 + M_o C_3 + \frac{H_o}{\alpha_{bd}} D_3; \tag{5}$$

$$Q_z = \alpha_{bd}^3 E_b I y_o A_4 - \alpha_{bd}^2 E_b I \Psi_o B_4 + \alpha_{bd} M_o C_4 + H_o D_4; \tag{6}$$

$$N_z = N \tag{7}$$

Trong đó:  $z_e = \alpha_{bd}z$  - Chiều sâu tính đổi;  $A_3, B_3, C_3, D_3; A_4, B_4, C_4, D_4$  là các hệ số xác định bằng cách tra bảng G3 của [1]

- Nhận xét: Theo phương pháp này tương tác giữa nền và cọc được biểu diễn thông qua hệ số tỷ lệ  $K$ . Như vậy có thể thấy việc xác định và lựa chọn  $K$  mang tính chất quyết định đến tính chính xác của kết quả bài toán.



**Hình 1. Mô hình nền Winkler**

Theo mô hình này, quan hệ ứng suất - biến dạng được biểu diễn bằng quan hệ sau:

$$p = ks \tag{8}$$

Trong đó:  $p$  - tải trọng tác dụng;  $s$  - biến dạng của nền dưới tác dụng của tải trọng  $p$ ;  $k$  - hệ số đặc trưng cho độ cứng của nền còn được gọi là hệ số nền, hệ

**3. Phương pháp tính toán cọc và nền làm việc đồng thời dựa trên quan hệ tải trọng – biến dạng**

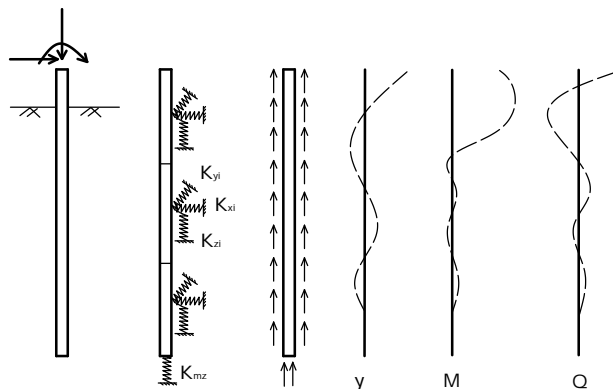
**3.1. Mô hình nền Winkler**

Mô hình Winkler là mô hình nền biến dạng cục bộ, nền đất được thay thế bằng các lò xo và chỉ biến dạng tại nơi có tải trọng, khu vực lân cận không bị biến dạng.

số nền  $k$  được phân thành hệ số nền theo phương ngang và hệ số nền theo phương đứng.

**3.2. Xác định độ cứng các lò xo**

Xét cọc có đường kính  $D$ , chiều dài trong đất  $L$ , chịu tác dụng đồng thời của tải trọng đứng, tải trọng ngang và mô men uốn, mô hình tính và sơ đồ chịu lực của cọc như hình 2.



**Hình 2. Mô hình cọc – nền đất và biểu đồ ứng xử của cọc**

Sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn kết hợp với mô hình Winkler phi tuyến, chia cọc thành các phần tử nhỏ, tương tác giữa cọc – đất được thay thế bởi các lò xo (gối đàn hồi). Xét một phần tử cọc nằm trong đất có chiều dài  $l_i$ , giả thiết đường kính và phản lực của đất lên cọc theo phương ngang  $p_y$ , theo phương đứng  $t_z$  không đổi trong phạm vi chiều dài phần tử cọc.

Dưới tác dụng của tải trọng ngang, phần tử cọc chuyển dịch theo phương  $y_1, y_2$ . Tổ hợp phản lực nền chính là phản lực ngang của đất  $P_{y1}, P_{y2}$  lên phần tử và đặt ở giữa phần tử cọc:

$$P_{y1} = D \times l_i \times p_{y1i} \quad P_{y2} = D \times l_i \times p_{y2i} \tag{9}$$

Dưới tác dụng của tải trọng thẳng đứng, phần tử cọc chuyển vị theo phương  $z$ . Tổ hợp phản lực nền chính là sức chống chuyển vị thẳng đứng  $T_z$  của đất lên phần tử cọc và đặt tại giữa phần tử cọc:

$$T_z = \pi D \times l_i \times t_{zi} \tag{10}$$

Theo (8) ta có:

$$P_{y1i} = k_{y1i} y_1 \quad P_{y2i} = k_{y2i} y_2 \quad t_{zi} = k_{zi} z \tag{11}$$

Trong đó:  $k_{y1}, k_{y2}$  - hệ số nền theo phương ngang;  $k_z$  - hệ số nền theo phương đứng.

Thay (11) vào (9), (10) ta có:

$$P_{y1i} = D \times l_1 \times k_{y1i} \times y_1 \quad P_{y2i} = D \times l_1 \times k_{y2i} \times y_2 \quad T_{zi} = \pi D \times l_1 \times k_{zi} \times z \quad (12)$$

Độ cứng lò xo theo phương ngang x, y và theo phương z được xác định như sau:

$$K_{y1i} = \frac{P_{y1i}}{y_1} = D \times l_1 \times k_{y1i}; \quad K_{y2i} = \frac{P_{y2i}}{y_2} = D \times l_1 \times k_{y2i}; \quad K_{zi} = \frac{T_{zi}}{z} = \pi D \times l_1 \times k_{zi} \quad (13)$$

Với phần tử mũi cọc, khi cọc chịu nén ngoài ba lò xo tại giữa cọc còn có lò xo chống ở mũi với độ cứng:

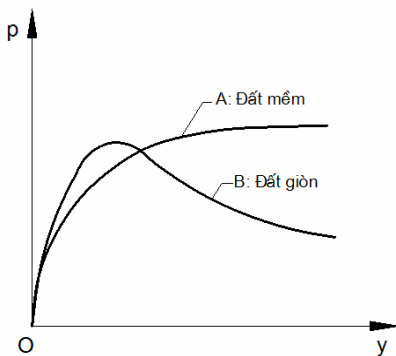
$$K_{mz} = A_m \times k_{mz} \quad (14)$$

Với  $A_m$  - diện tích tiết diện mũi cọc,  $k_{mz}$  - hệ số nền của đất ở mũi cọc.

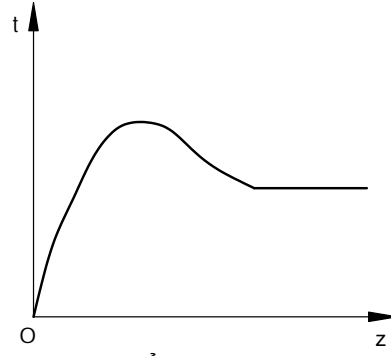
Từ (13) và (14) ta thấy để xác định được độ cứng của mỗi lò xo  $K_{y1i}$ ,  $K_{y2i}$ ,  $K_{mz}$  yêu cầu đặt ra là phải xác định được hệ số nền  $k_{y1i}$ ,  $k_{y2i}$ ,  $k_{mz}$ .

**3.3. Xác định hệ số nền dựa trên quan hệ tải trọng – biến dạng**

Từ phương trình (11) ta thấy hệ số nền k có thể xác định được khi biết quan hệ p – y, t – z. Vì đất không phải là vật liệu đàn hồi tuyến tính do đó hệ số nền không phải là hằng số mà thay đổi theo quan hệ phi tuyến như hình 3, hình 4. Các mục dưới đây sẽ giới thiệu các dạng đường cong p-y, t-z được kiến nghị trong [4].



Hình 3. Dạng điển hình của đường cong p-y



Hình 4. Dạng điển hình của đường cong t-z

**3.3.1. Đường cong t – z xác định hệ số nền theo phương đứng  $k_z$**

- Với cọc đóng vào trong đất sét sức kháng ma sát đơn vị thành bên xác định theo công thức:

$$\alpha = \frac{1}{2\sqrt{\psi}} \text{ (nếu } \psi \leq 1); \alpha = \frac{1}{2\sqrt[3]{\psi}} \text{ (nếu } \psi > 1); \text{ và } \alpha \leq 1 \quad (16)$$

Với  $\psi = c/p'_0$ ;  $p'_0$  là áp lực đất có hiệu tại vị trí tính toán.

- Sức kháng ma sát bên đơn vị thành bên của cọc trong đất cát xác định theo công thức:

$$f = \beta p'_0 \tan \delta \quad (17)$$

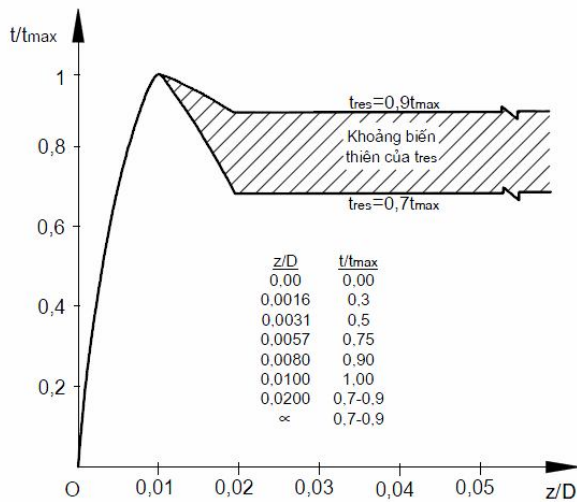
Trong đó:  $\beta = 0,8 - 1$  - Hệ số áp lực ngang của đất,  $\delta$  - Góc ma sát giữa cọc và đất.

$$f = \alpha c \quad (15)$$

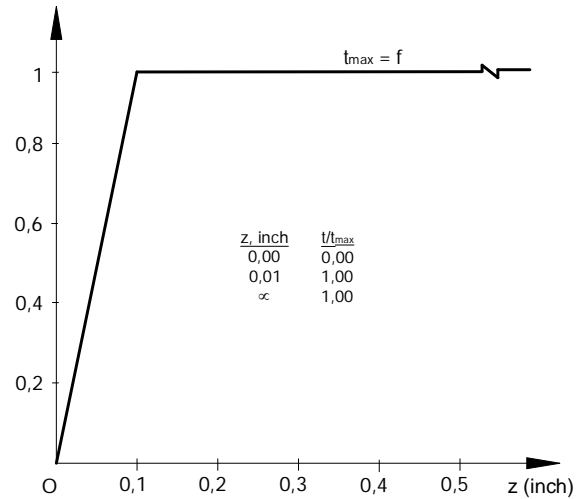
Trong đó: c- cường độ kháng cắt không thoát nước của đất;  $\alpha$ - hệ số không thứ nguyên, xác định như sau:

Đường cong t – z của đất dính gồm ba đoạn như trong hình 5. Tỷ số  $t_{res}/t_{max}$  biến thiên trong khoảng 0,7 – 0,9 tương ứng với sét mềm – sét cứng. Đường cong t – z của đất rời gồm hai đoạn đơn giản như hình 6.

Trong hình 5, hình 6:  $t_{res}$  - sức kháng dư;  $t_{max} = f$  - sức kháng bên đơn vị cực hạn của cọc.



**Hình 5.** Đường cong t-z với ma sát bên trong đất sét



**Hình 6.** Đường cong t-z với ma sát bên trong đất cát

**3.3.2. Đường cong Q – z xác định hệ số nền tại mũi cọc  $k_{mz}$**

Sức kháng mũi đơn vị cực hạn của cọc trong đất sét xác định theo công thức:  $q = 9c$  (18)

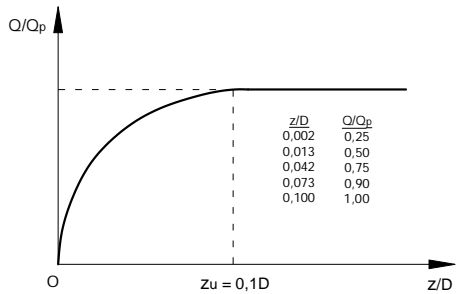
Sức kháng mũi đơn vị cực hạn của cọc trong đất cát xác định theo công thức:  $q = p'_0 N_q$  (19)

Trong đó: c - Sức kháng cắt không thoát nước của đất;

$N_q$  - Hệ số sức kháng mũi, xác định theo bảng 6.4.3-1 của [4].

Sức kháng mũi cực hạn của cọc xác định theo công thức:  $Q_p = qA$ , với A là diện tích tiết diện mũi cọc.

Đường cong Q-z với sức kháng mũi được thể hiện trong hình 7. Đoạn đường cong đầu tiên có phương trình  $Q = Q_p(z/z_u)^{1/3}$  với  $z_u$  là chuyển vị tới hạn tương ứng với  $Q_p$



**Hình 7.** Đường cong Q-z với sức kháng mũi

**3.3.3. Đường cong p – y xác định hệ số nền theo phương ngang  $k_y$**

a) Đối với đất sét

Khả năng chịu lực ngang đơn vị tới hạn  $p_u$  của đất sét mềm chịu tải trọng tĩnh biến thiên trong khoảng từ  $8c$  đến  $12c$ , xác định theo công thức:

$$p_u = 3c + p'_0 + J \frac{cz}{D} \quad \text{với } z < X_R; \quad p_u = 9c \quad \text{với } z \geq X_R \quad (20)$$

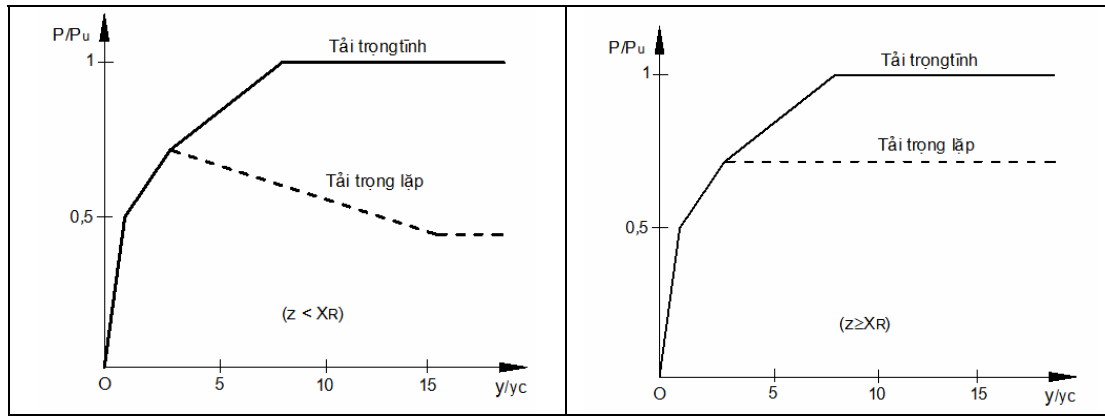
Trong đó: J = 0,25 – 0,5 là hệ số thực nghiệm không thứ nguyên,  $X_R$  xác định theo công thức (21) với  $\gamma'$  là trọng lượng riêng có hiệu của đất.

$$X_R = \frac{6D}{\frac{\gamma' D}{c} + J} \geq 2,5D \quad (21)$$

Quan hệ p – y với đất sét mềm chịu tải trọng tĩnh và tải trọng lặp như trong bảng 1 và hình 8, với  $y_c = \epsilon D$ ,  $\epsilon$  là biến dạng tương ứng khi áp lực do nền tác dụng lên cọc bằng 1/2 áp lực tới hạn.

**Bảng 1.** Quan hệ p – y với đất sét mềm

Tải trọng tĩnh		Tải trọng lặp			
		$z > X_R$		$z < X_R$	
p/p <sub>u</sub>	y/y <sub>c</sub>	p/p <sub>u</sub>	y/y <sub>c</sub>	p/p <sub>u</sub>	y/y <sub>c</sub>
0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0
0,05	1,0	0,05	1,0	0,05	1,0
0,72	3,0	0,72	3,0	0,72	3,0
1,00	8,0	0,72	∞	0,72z/X <sub>R</sub>	15,0
1,00	∞			0,72z/X <sub>R</sub>	∞



Hình 8. Đường cong p - y cho đất sét mềm

**b) Đối với đất cát**

Khả năng chịu lực ngang đơn vị tới hạn của đất cát  $p_u$  được lấy bằng giá trị nhỏ hơn trong hai giá trị sau:

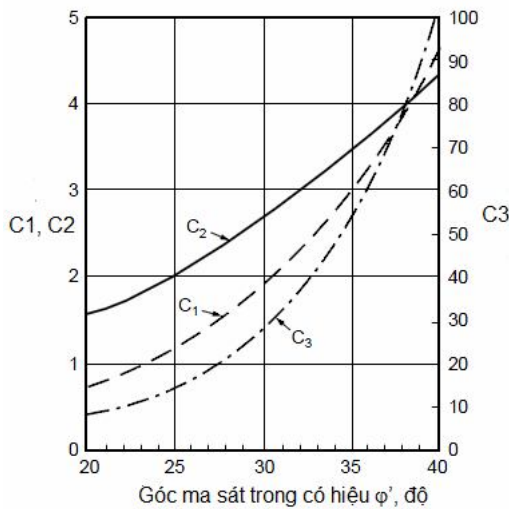
$$p_{us} = (C_1 z + C_2 D) p'_0 \quad P_{ud} = C_3 D p'_0 \quad (22)$$

Trong đó:  $C_1, C_2, C_3$  là hệ số phụ thuộc vào góc ma sát trong có hiệu của đất  $\phi'$ , xác định theo hình 9.

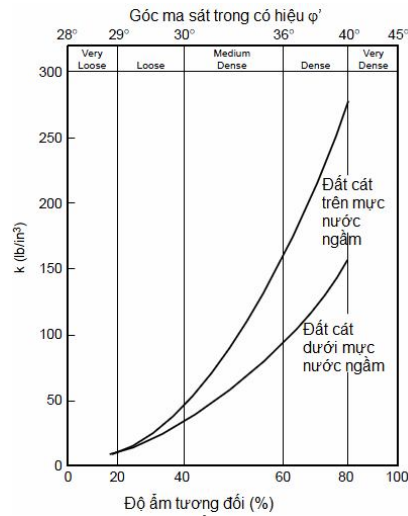
Phương trình quan hệ p - y của đất cát:

$$p = A \cdot p_u \cdot \tanh\left(\frac{k \cdot H}{A \cdot p_u} \cdot y\right) \quad (23)$$

Trong đó: A là hệ số phụ thuộc tính chất của tải trọng tác dụng:  $A = 0,9$  với tải trọng có chu kỳ và  $A = \left(3,0 - 0,8 \frac{H}{D}\right) \geq 0,9$  với tải trọng tĩnh; H là độ sâu tính toán; k là mô đun ban đầu, phụ thuộc góc ma sát trong của cát, xác định theo đồ thị hình 10.



Hình 9. Quan hệ giữa  $C_1, C_2, C_3$  và  $\phi'$



Hình 10. Đồ thị xác định k

**4. Bài toán**

Trong bài toán này chúng ta sẽ đi xem xét bài toán tính cọc đơn chịu tác dụng đồng thời của tải trọng đứng, tải trọng ngang và mô men như hình 12a. Số liệu như sau:

- Cọc ống thép: Đường kính ngoài  $D = 800\text{mm}$ , bề dày  $t = 12\text{mm}$ , dài 20m, được chế tạo từ thép SKK490 của Nhật;

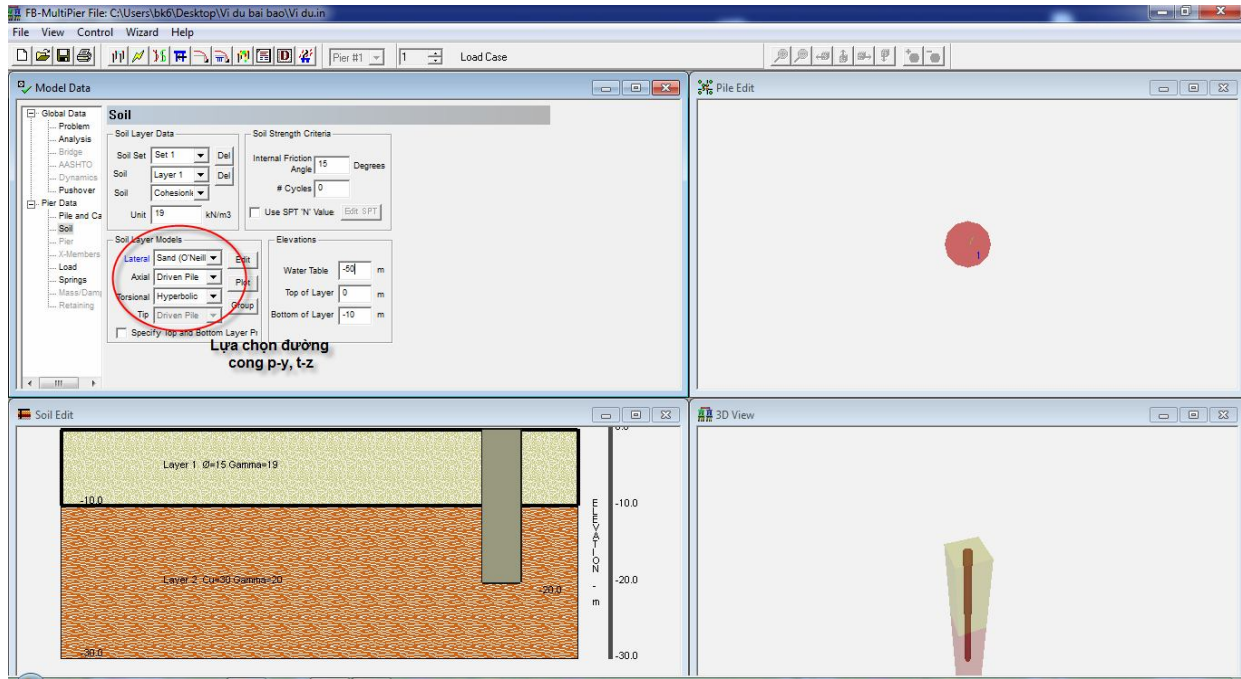
- Địa chất gồm 2 lớp: Lớp 1 dày 10m, cát hạt mịn, trọng lượng riêng  $\gamma = 19 \text{ KN/m}^3$ , góc ma sát trong  $15^\circ$ ; lớp 2, sét dẻo cứng, trọng lượng riêng  $\gamma = 20 \text{ KN/m}^3$ , sức kháng cắt  $c = 30 \text{ kPa}$ ;

- Tải trọng tác dụng lên đầu cọc: Lực đứng  $N = 100 \text{ kN}$ , lực ngang  $H = 100 \text{ kN}$ , mô men  $M = 50 \text{ kNm}$ .

Bài toán được thực hiện tính toán theo hai phương pháp:

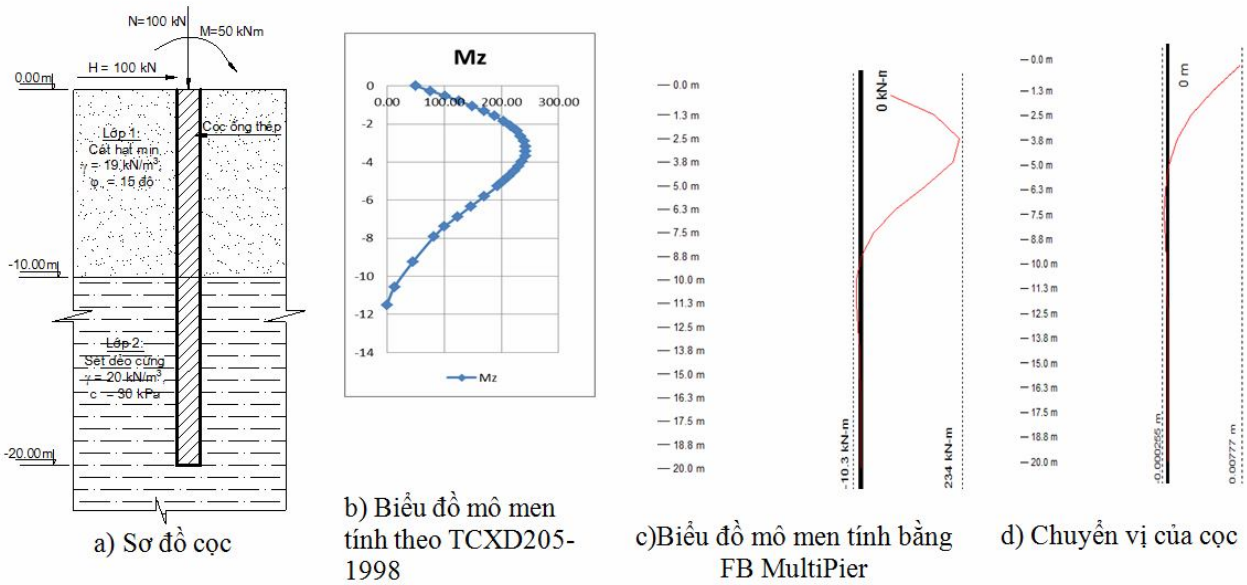
- Phương pháp trình bày trong phụ lục G của tiêu chuẩn TCXD 205-1998, trình tự tính toán theo mục 2;

- Phương pháp làm việc đồng thời sử dụng đường cong quan hệ tải trọng - biến dạng, tính toán bằng phần mềm FB Multi Pier. Mô hình tính toán như trong hình 11.



**Hình 11.** Mô hình tính toán bằng phần mềm FB Multi Pier

Kết quả tính toán theo hai phương pháp này được trình bày trong hình 12 và trong bảng 2.



**Hình 12.** Kết quả biểu đồ mô men, chuyển vị của cọc

**Bảng 2.** Bảng tổng hợp kết quả tính toán

Thành phần	Chuyển vị đầu cọc (mm)	Mô men lớn nhất (KNm)
Tính theo TCXD 205 - 1998	10	243
Tính bằng FB Multi Pier	8	234

Bài toán cho kết quả mô men và chuyển vị đầu cọc tính theo TCXD 205 - 1998 lớn hơn so với tính bằng phần mềm FB Multi Pier. Việc tính theo TCXD 205-1998 được thực hiện tương đối đơn giản theo các công thức đã lập, tuy nhiên có thể thấy tương tác giữa cọc và nền đất được xác định thông qua hệ số tỷ

lệ K, đây là hệ số chọn theo bảng, phụ thuộc vào loại đất và có phạm vi biến thiên khá rộng, do đó kết quả tính toán phụ thuộc nhiều vào độ chính xác của việc lựa chọn hệ số tỷ lệ K.

Phương pháp tính dựa trên các đường cong quan hệ tải trọng – biến dạng chính xác và khách quan hơn



do được tính toán dựa trên các thông số của đất như  $\gamma$ ,  $\phi$ ,  $c$ ; tuy nhiên phương pháp này cần sử dụng các phần mềm (như FB MultiPier) đã tích hợp sẵn thư viện các đường cong. Kết quả tính cũng cho thấy mô men uốn cực đại khá gần với đầu cọc và phần đất chống đỡ tải trọng ngang chủ yếu là lớp đất trên mặt, điều này phù hợp với thực tế và kết quả thí nghiệm đã được trình bày trong [2].

### 5. Kết luận

Bài báo đã áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn kết hợp với mô hình Winkler phân tích sự làm việc đồng thời giữa cọc chịu tải trọng ngang và nền đất, đây là phương pháp phản ánh chính xác sự tương tác giữa cọc và nền đất và ứng xử của cọc khi chịu tác dụng của tải trọng.

Đặc trưng tương tác giữa cọc và nền đất là hệ số nền. Phương pháp xác định hệ số nền sử dụng đường cong quan hệ  $p - y$ ,  $t - z$  là phương pháp hiện đại, khoa học và có độ tin cậy cao, đã được nhiều tổ chức kiến nghị sử dụng như FHWA, API. Hiện nay rất nhiều các phần mềm tính toán nền móng đã tích hợp sẵn thư viện các đường cong này, do đó việc tính toán khá thuận lợi và đơn giản.

Các đường cong  $p - y$ ,  $t - z$  trong bài báo này được kiến nghị trong tiêu chuẩn API [4], tính toán cọc

của các giàn khoan cố định. Các đường cong này thu được trên cơ sở nghiên cứu địa chất do Viện dầu mỏ Hoa Kỳ thực hiện, có thể áp dụng tính toán cho các cọc tại các vị trí có địa chất tương đồng với đường cong đó. Tuy nhiên, để có những kết quả tính toán chính xác trong điều kiện địa chất Việt Nam, cần có nhiều thí nghiệm để xây dựng thư viện đường cong  $p - y$ ,  $t - z$  đối với các khu vực địa chất khác nhau.

---

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

---

1. Bộ Xây dựng, TCXD 205-1998: Móng cọc – Tiêu chuẩn thiết kế, NXB Xây dựng, Hà Nội, 2002.
2. CHÂU NGỌC ẮN, Nền móng, NXB Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, 2002.
3. VŨ CÔNG NGŨ, NGUYỄN THÁI, Móng cọc – phân tích và thiết kế, NXB Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội, 2006.
4. American Petroleum Institute (API - RP2A - WSD): Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design - 21st Edition, USA, 2000.
5. JAE CHUNG, PH.D; ANAND PATIL, E.I.; HENRY BOLLMANN, P.E, FB Multiplier – API soil model validation, Bridge Software Institute (BSI), 2011.

**Ngày nhận bài sửa: 1/6/2014.**