

TÍNH TOÁN DÂY NEO KHÔNG GIAN CÓ VẬT TREO CHO CÔNG TRÌNH NỔI BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN THE CALCULATION OF THE SPACE MOORING LINE WITH HANGING OBJECTS FOR FLOATING STRUCTURES USING THE FINITE ELEMENT METHOD

ĐÀO VĂN TUẤN

Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: tuandv.ctt@vimar.edu.vn

Tóm tắt

Hiện nay việc tính toán dây neo có vật treo cho công trình nổi vẫn sử dụng lời giải giải tích gần đúng cho dây neo đơn, chưa phản ánh đúng sơ đồ làm việc không gian của hệ dây neo. Phương pháp phần tử hữu hạn (PPPTH) có thể để giải quyết vấn đề này một cách tổng quát. Nội dung bài báo trình bày mô hình hóa hệ dây neo như hệ giàn không gian, lập thuật toán và chương trình, áp dụng để tính toán thực tế, kết quả khẳng định tính đúng đắn của thuật toán và chương trình. Việc ứng dụng PPPTH đã giải quyết được bài toán tính toán hệ dây neo không gian có vật treo, theo đúng sơ đồ làm việc thực tế của hệ dây neo, chương trình đã lập giúp việc tính toán hệ dây neo có vật treo chính xác và hiệu quả.

Từ khóa: Dây neo không gian, công trình nổi, phần tử hữu hạn, vật treo, lực căng dây neo.

Abstract

Currently, the calculation of anchor lines with hanging objects for floating structures still uses approximate analytical solutions for single anchor lines, which do not accurately reflect the spatial working diagram of the anchor line system. The finite element method (FEM) can solve this problem in a general way. The content of the article presents the modeling of the anchor line system as a space truss system, establishes algorithms and programs, applies them to actual calculations, and the results confirm the correctness of the algorithms and programs. The application of FEM has solved the problem of calculating space anchor lines with hanging objects, according to the actual working diagram of the anchor line system, the established program helps to calculate the anchor line system with hanging objects accurately and effectively.

Keywords: Space mooring lines, floating structures, finite elements, hanging object, mooring line tension.

1. Mở đầu

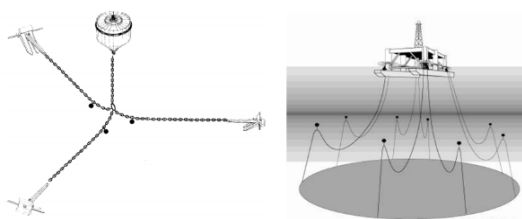
Các công trình nổi: Phao, bến nổi, ụ nổi, công trình ngoài khơi được giữ vị trí bằng hệ dây neo không gian, để giảm chuyển vị của công trình nổi, trên dây neo thường đặt các vật treo (phao hoặc vật nặng). Các dây neo chịu tải trọng bản thân và tải trọng tác dụng lên vật nổi do gió, dòng chảy và sóng. Hiện nay trong thiết kế hệ dây neo có vật treo, các tải trọng lên vật nổi được chia về các dây neo đơn, sau đó sử dụng các công thức gần đúng để tính toán cho từng dây neo. Trong chỉ dẫn thiết kế dây neo của Hải quân Mỹ [3] nêu cách tính dây neo đơn có một vật treo: Vật treo sẽ quy đổi thành một đoạn dây neo có cùng khối lượng, áp dụng lời giải của dây neo đơn không có vật treo để tính. Chỉ dẫn thiết kế của Nga [9] nêu cách tính bằng công thức gần đúng.

Các nghiên cứu công bố nước ngoài về dây neo có vật treo, điển hình có hai nghiên cứu. Ikpoto Enefiok Udoh [4] dựa vào bài toán dây neo đơn trong chỉ dẫn thiết kế của Mỹ, xây dựng đường cong quan hệ giữa độ dịch chuyển dây neo và lực ngang để xác định độ cứng của từng dây từ đó xác định độ cứng của hệ theo hai phương X, Y và dùng phương pháp thử dần để xác định độ dịch chuyển của vật nổi và lực căng trong các dây. Ever Coarits và Leonardo Flores [5], chia dây neo thành các đoạn tại vị trí đặt vật treo, sử dụng ma trận độ cứng là các hàm Lagrang chứa ẩn số lực căng, sử dụng hai vòng lặp để tính lực căng và chuyển vị, phù hợp với dây neo đơn. Cả hai thuật toán nêu trên phù hợp với hệ dây neo đơn giản.

Trong nước, tác giả Nguyễn Quốc Hòa [2] tính dây neo đơn có vật treo tương tự như cách tính trong chỉ dẫn của Hải quân Mỹ. Các nghiên cứu của các tác giả khác là những nghiên cứu tính toán dây neo không có vật treo. Chưa có nghiên cứu nào tính toán hệ dây neo không gian có vật treo bằng PPPTH. Nhìn chung

hiện nay cách tính dây neo có vật treo phổ biến vẫn dựa vào bài toán dây neo đơn, cách tính hệ không gian chưa tổng quát và thủ công. Việc tính toán hệ dây neo không gian có vật treo cần áp dụng PPPTHH, phương pháp này có thể giải bài toán này một cách tổng quát, cho phép tính toán hệ dây neo theo sơ đồ không gian có số vật treo tùy ý, sẽ thuận tiện để phát triển thuật toán tính dao động của hệ dây neo.

Hình 1 minh họa việc áp dụng các vật treo là vật nặng hoặc phao treo dây neo cho các công trình nổi.



Hình 1. Dây neo không gian có vật treo

2. Tính toán dây neo không gian có vật treo bằng PPPTHH

2.1. Mô hình hóa dây neo theo PPPTHH

Theo PPPTHH, hệ dây neo được mô hình hóa thành hệ giàn không gian bao gồm các thanh nối với nhau bằng khớp. Tải trọng tác dụng lên dây neo là tải trọng bản thân, tải trọng từ công trình nổi do sóng, gió và dòng chảy gây ra, các tải trọng này được quy về các lực đặt tại các nút. Tải trọng do các vật treo phao hoặc vật nặng gây ra được mô hình hóa thành các lực tập trung theo phương thẳng đứng đặt tại các nút có vật treo như Hình 2, chiều của các lực hướng lên trên nếu vật treo là phao, hướng xuống dưới nếu là vật nặng, việc này dễ dàng thực hiện được trong PPPTHH. Công trình nổi được mô hình bằng hệ giàn không biến

hình, công trình chỉ dịch chuyển trong mặt phẳng ngang XY không dịch chuyển theo phương đứng Z.

2.2. Ma trận độ cứng của phần tử dây neo

Theo [5], [6] do chuyển vị nút phần tử dây neo có giá trị lớn nên hệ dây neo là hệ mềm, chính vì vậy ma trận độ cứng của mỗi phần tử sẽ bằng tổng của độ cứng hình học và độ cứng đàn hồi, được xác định theo công thức (1):

$$[K]_e = [K_T]_e + [K_g]_e \quad (1)$$

Trong đó:

$[K_T]_e$ - Ma trận độ cứng đàn hồi đặc trưng bởi vật liệu dây neo;

$[K_g]_e$ - Ma trận độ cứng hình học.

Các ma trận này xác định theo các công thức (2), (3):

$$[K_T]_e = \frac{EF}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[K_g]_e = \frac{T}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

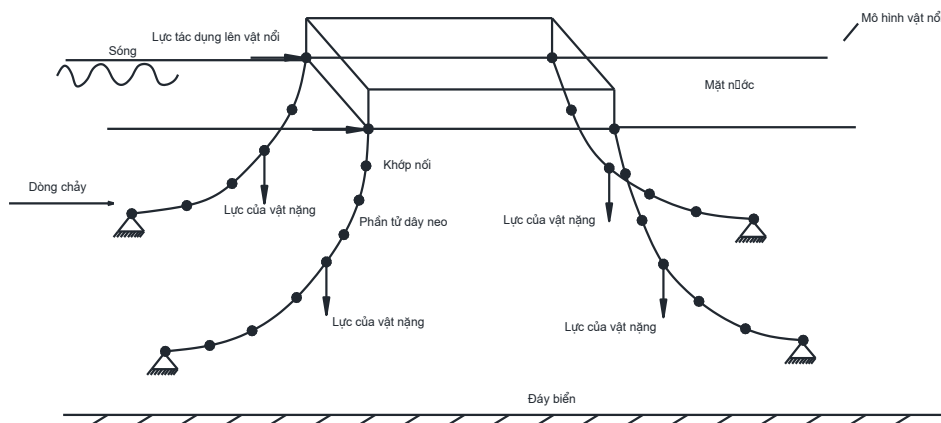
Trong đó:

E - Mô đun đàn hồi, đặc trưng bởi vật liệu phần tử;

F - Diện tích mặt cắt ngang phần tử;

L - Chiều dài phần tử;

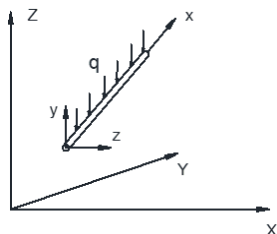
T - Lực căng của dây neo (phụ thuộc vào chuyển vị của dây neo, chưa xác định).



Hình 2. Mô hình hóa dây neo bằng PPPTHH

2.3. Tải trọng trên phần tử

Hiện nay trong thiết kế, dây neo chỉ chịu tải trọng bản thân nên tải trọng tác dụng lên phần tử chỉ là tải trọng bản thân. Xét một phần tử trong hệ tọa độ tổng thể XYZ, tải trọng bản thân là tải trọng phân bố đều, hướng xuống dưới theo phương thẳng đứng Z. Sơ đồ tải trọng phần tử được thể hiện như Hình 3.



Hình 3. Tải trọng bản thân tác động lên phần tử

Véc tơ tải trọng nút là các lực theo các phương X, Y, Z tại hai đầu được xác định theo công thức (4):

$$\{F\}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{qL}{2} \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{qL}{2} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Trong đó:

q - Tải trọng phân bố (là hằng số);

L - Chiều dài phần tử.

Do dây neo nằm trong nước nên tải trọng phân bố tính theo công thức (5):

$$q = \pi r^2 g (\rho_c - \rho_n) \quad (5)$$

Trong đó:

r - Bán kính dây neo;

ρ_c - Khối lượng riêng vật liệu;

ρ_n - Khối lượng riêng của nước.

2.4. Ma trận chuyển hệ trục tọa độ

Theo [1] ma trận chuyển hệ trục tọa độ của phần tử giàn không gian xác định theo công thức (6):

$$[T]_e = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x & 0 & 0 & 0 \\ l_y & m_y & n_y & 0 & 0 & 0 \\ l_z & m_z & n_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l_x & m_x & n_x \\ 0 & 0 & 0 & l_y & m_y & n_y \\ 0 & 0 & 0 & l_z & m_z & n_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

Trong đó: $l_x, m_x, n_x; l_y, m_y, n_y$ và l_z, m_z, n_z là các *cosin* chỉ phương của trục x, y, z trong hệ XYZ.

Để xác định được hệ trục tọa độ cục bộ cần xác định hướng của từng trục. Trục x được xác định dựa vào tọa độ nút đầu và nút cuối. Do phần tử dây neo có

tiết diện tròn nên trục z của các phần tử luôn đặt song song với mặt phẳng XY, ta có: $\vec{z} = \vec{x} \times \vec{y}$, trục y xác định theo công thức: $\vec{y} = \vec{z} \times \vec{x}$ khi biết hướng của trục z .

2.5. Tải trọng do công trình nổi và vật treo

Tải trọng do các vật treo và tải trọng được quy về tải trọng đặt tại nút và được cộng vào véc tơ $\{F\}$ tại các vị trí tương ứng với chỉ số chuyển vị.

2.6. Điều kiện biên

Điều kiện biên hệ dây neo được thể hiện tại các vị trí đặc trưng: Đầu dây nối với rùa neo trên mặt đất và cuối dây neo nối với vật nổi. Tại vị trí nối rùa neo, các chuyển vị theo X, Y, Z đều bằng 0. Tại vị trí cuối dây neo chuyển vị theo phương Z bằng 0.

2.7. Lực căng dây neo

Dây neo làm việc như phần tử giàn chỉ chịu kéo, lực căng được xác định dựa vào độ biến dạng dài của phần tử theo công thức (7):

$$T = \frac{E \cdot F \cdot \Delta L}{L} \quad (7)$$

Trong đó:

T - Lực căng;

E - Mô đun đàn hồi;

F - Diện tích mặt cắt ngang;

L - Chiều dài phần tử.

Lực căng được coi là hằng số trong mỗi phần tử, dựa vào lực căng ta xác định được véc tơ lực nút do nội lực gây ra. Điều kiện dây neo ở trạng thái cân bằng khi các véc tơ lực nút do ngoại lực và nội lực cân bằng nhau. Véc tơ lực nút phần tử do nội lực gây ra xác định theo công thức (8):

$$\{F_e\}_{nl} = [T]_e \begin{Bmatrix} -T \\ 0 \\ 0 \\ T \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

2.8. Hệ phương trình dây neo

Sau khi xử lý điều kiện biên, hệ phương trình cân bằng dây neo được xác định theo công thức (9):

$$[K]_b \{u\} = \{F\}_b \quad (9)$$

Trong đó:

$[K]_b$ - Ma trận độ cứng hệ dây neo sau khi xử lý điều kiện biên;

$\{u\}$ - Chuyển vị nút hệ dây neo cần tìm;

$\{F\}_b$ - Véc tơ lực nút hệ dây neo sau khi xử lý điều kiện biên.

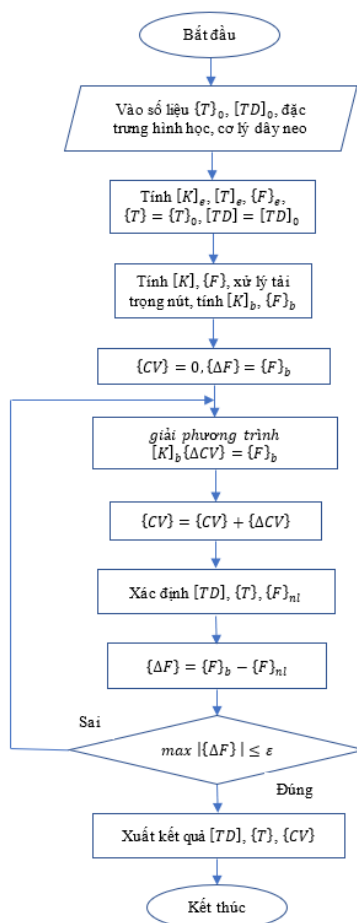
2.9. Giải hệ phương trình dây neo

Do ma trận độ cứng $[K]_b$ có chứa lực căng phần tử T là đại lượng chưa xác định, do đó $[K]_b, \{u\}$ đều chưa xác định. Để giải hệ phương trình này sử dụng phương pháp lặp, bằng cách giả định giá trị $\{T\}_0$ ban đầu, từ đó xác định được chuyển vị $\{u\}$, tính lại lực căng phần tử dây neo, sau mỗi bước sẽ kiểm tra điều kiện cân bằng nút, độ chênh lệch giữa nội lực và ngoại lực xác định theo công thức (10):

$$\{\Delta F\} = \{F\}_b - \{F\}_{nl} \quad (10)$$

Độ chênh lệch này dùng để tính chuyển vị và lực căng cho vòng lặp tiếp theo. Vòng lặp sẽ kết thúc khi $\{\Delta F\}$ đạt sai số cho phép. Dựa vào thuật toán trên tác giả lập chương trình tính trên Mathcad Prime.

Việc giải hệ phương trình (9) được thực hiện theo sơ đồ thuật toán trong Hình 4.



Hình 4. Sơ đồ thuật toán

Trong đó:

$\{T\}_0$ - Véc tơ lực căng giả định ban đầu;

$\{T\}$ - Véc tơ lực căng sau mỗi bước tính;

$[TD]_0$ - Ma trận tọa độ nút ban đầu;

$[TD]$ - Ma trận tọa độ nút sau mỗi bước tính;

$\{CV\}$ - Véc tơ chuyển vị nút sau mỗi bước tính;

$\{\Delta CV\}$ - Véc tơ số gia chuyển vị nút sau mỗi bước tính;

$\{\Delta F\}$ - Véc tơ lực chênh lệch giữa tải trọng do ngoại lực và nội lực tại các nút;

ε - Sai số cho phép.

Nội dung thuật toán có thể tóm tắt như sau:

- Bước 1: Vào các số liệu ban đầu: $\{T\}_0, [TD]_0$, đặc trưng hình học, cơ lý dây neo;

- Bước 2: Xác định các đại lượng: $[K]_e, [T]_e, \{F\}_e, [K], \{F\}, [K]_b, \{F\}_b$; cho $\{CV\} = 0$,

$\{\Delta F\} = \{F\}_b, \{T\} = \{T\}_0, [TD] = [TD]_0$;

Bước 3: Xác định $\{\Delta CV\}, \{CV\}, [TD], \{T\}, \{F\}_{nl}, \{\Delta F\} = \{F\}_b - \{F\}_{nl}$;

- Bước 4: Kiểm tra điều kiện cân bằng nút: $\max |\{\Delta F\}| \leq \varepsilon$;

- Nếu đúng thực hiện bước 5, sai quay về bước 3;

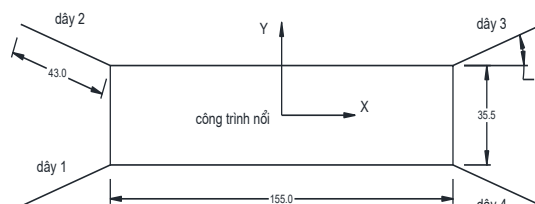
- Bước 5: Xuất kết quả $[TD], \{T\}, \{CV\}$.

3. Tính toán thực tế

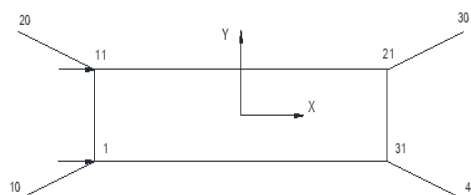
Để minh họa việc áp dụng PPPTHH cho thuật toán trên, tác giả lập chương trình, tính toán cho một công trình nổi thực tế - ụ tàu trên sông được neo bằng hệ dây neo không gian có vật treo.

3.1. Số liệu ban đầu

Kích thước và sơ đồ neo được nêu như Hình 5. Sơ đồ dây neo đối xứng qua trục X và Y, dây neo 3 hợp với trục X một góc 20° , khoảng cách trên mặt bằng từ công trình đến rùa neo bằng 43m, độ sâu khu nước bằng 20m, dây neo đường kính 5cm, dài 50m. Ụ nổi chịu tải trọng của dòng chảy dọc theo trục X bằng 26,26T (257,6kN).



Hình 5. Sơ đồ neo công trình nổi



Hình 6. Sơ đồ chỉ số nút

Áp dụng PPPTHH, các dây neo được chia thành 9 phần tử, sơ đồ chỉ số nút được thể hiện trên Hình 6 (để đơn giản các nút trung gian không thể hiện trên hình vẽ). Hệ trục tọa độ tổng thể đặt trên mặt nước, tại tâm ụ nổi trên mặt bằng. Tải trọng dòng chảy được phân đều và đặt tại các nút 1 và 11 theo phương X bằng 128,8kN.

3.2. Không có vật treo

Do kết quả có nhiều số liệu, tác giả chỉ nêu kết quả đặc trưng:

- Chuyển vị theo phương X của nút 1 và 11: 3,004m, thể hiện kết quả đối xứng do sơ đồ tải trọng và kết cấu đối xứng;

- Lực căng lớn nhất của dây 1 và dây 2: 152,82kN (15,578T);

Sau khi chuyển hệ tọa độ về mặt phẳng dây, ta có lực ngang tại nút 1 bằng 38,79kN (14,15T), lực này sẽ áp dụng để tính dây neo theo giải tích.

Để kiểm tra thuật toán và chương trình tự lập, tác giả so sánh kết quả với lời giải giải tích chính xác [4] theo công thức (11), (12), (13):

$$x(l) = a \left\{ \begin{matrix} \operatorname{arcsinh} \left[\frac{l}{a} + \tan(\theta_0) \right] \\ -\operatorname{arcsinh}[\tan(\theta_0)] \end{matrix} \right\} \quad (11)$$

$$z(x) = a \left\{ \begin{matrix} \cosh \left[\frac{x}{a} + \operatorname{arcsinh}(\tan(\theta_0)) \right] \\ -\cosh[\operatorname{arcsinh}(\tan(\theta_0))] \end{matrix} \right\} \quad (12)$$

$$T(l) = H \sqrt{1 + \left(\frac{l}{a} + \tan(\theta_0) \right)^2} \quad (13)$$

Trong đó:

$$a = \frac{H}{w};$$

H - Lực ngang tại đầu của dây neo;

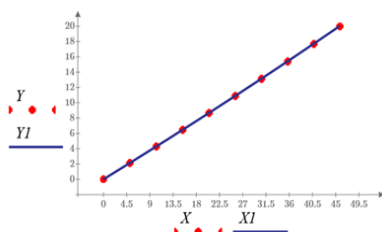
w - Trọng lượng dây neo trên một đơn vị chiều dài;

θ_0 - Góc tiếp đất của dây neo;

$x(l)$ - Tọa độ x dọc chiều dài dây neo l ;

$z(x)$ - Tọa độ z tại tọa độ x;

$T(l)$ - Lực căng tại chiều dài l .



Hình 7. Đồ thị hình dạng dây neo theo giải tích và PPPTHH

Kết quả tính toán cho thấy lực căng lớn nhất bằng 152,776kN (15,573T), so với PPPTHH sai số rất nhỏ: 0,003%. Đồ thị hình dạng dây neo theo hai phương pháp được thể hiện như Hình 7.

Đồ thị Y là hình dạng dây neo theo giải tích, YI theo phần tử hữu hạn, ta thấy hai đồ thị này trùng nhau. Dựa vào kết quả lực căng và hình dạng dây neo theo hai phương pháp tính ta thấy kết quả trùng khớp chứng tỏ thuật toán đúng và chương trình tính theo PPPTHH chính xác.

3.3. Có vật treo

Trường hợp trên dây neo có vật treo, trên mỗi dây đặt 3 vật treo, mỗi vật nặng 5T, đặt tại các vị trí cách đều nhau 13,1m tính từ điểm dây neo nối rùa neo trên mặt đất. Do có nhiều số liệu kết quả, tác giả chỉ nêu kết quả đặc trưng: Chuyển vị theo phương X của nút 1 và 11: 1,94m; Lực căng lớn nhất của dây 1 và dây 2: 299,13kN;

Từ kết quả chuyển vị cho thấy, khi có vật treo chuyển vị theo phương X của ụ nổi giảm: 3,004m-1,94m=1,064m. Đồ thị hình dạng dây neo 1 trong hai trường hợp có vật treo và không có vật treo được thể hiện trong Hình 8.

Đồ thị Y là đồ thị hình dạng dây neo không có vật treo, YI có vật treo.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn để mô hình hóa hệ dây neo như hệ giàn không gian, nêu được cách xác định véc tơ tải trọng nút, ma trận độ cứng, ma trận chuyển hệ trục tọa độ của phần tử dây neo không gian, lập được thuật toán giải hệ phương trình cân bằng bằng phương pháp lặp. Tác giả đã lập chương trình, tính toán cho một công trình, kết quả chính xác, cho thấy thuật toán và chương trình đảm bảo tin cậy, phục vụ tốt cho thiết kế, đóng góp vào việc nghiên cứu tính toán hệ dây neo có vật treo một cách tổng quát và hiệu quả.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số DT24-25.83.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Chu Quốc Thắng (1997), *Phương pháp phần tử hữu hạn (Dùng cho cao học đại học kỹ thuật)*, NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
- [2] Nguyễn Quốc Hòa (2013), *Tính toán đường dây neo có kể đến khối gia tải*. Tạp chí Khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường (Số 41), tr. 103.

- [3] Design Manual 26.5 (1985). *Fleet Mooring Basic Criteria and Planing Guidelines*, Naval Facilities Engineering Command, American.
- [4] Ikpoto Enefiok Udoh (2008), *Athesis Development of design tool for statically equivalent deepwater mooring systems*, Texas A&M University.
- [5] Ever Coaita, Leonardo Flores (2015), *Nonlinear Analysis of Structure CableTruss*, LACSIT International Journal of Engineering and Technology, Vol. 7, No. 3.
- [6] J.S. Przemieniecki (2015), *Large Deflection and Stability Analysis of Two-Dimensional truss and Frame*. USAF.
- [7] Saeed Moaveni (1999), *Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS*, Prentice Hall, New Jersey.
- [8] U.S. Army corps of engineers (2020), *Unified Facilities Criteria (ufc), moorings*, USA.
- [9] ВСП 33-01-99 МО РФ (2000), *Инструкция по расчету и проектированию плавучих якорных систем для плавучих объектов ВМФ*, Moscow.

Ngày nhận bài:	18/03/2025
Ngày nhận bản sửa:	14/04/2025
Ngày duyệt đăng:	15/04/2025