

Nghiên cứu động lực học của hệ thống đường ống - phao nổi dựa trên phương pháp tọa độ nút tuyệt đối

Numerical investigation on dynamics of the flexible riser - buoy system by applying absolute nodal coordinate formulation

Lưu Quang Hưng^{1,2}, Vũ Văn Tân¹,
Nguyễn Ngọc Đàm¹, Nguyễn Đức Hải^{1,3}

Email: luuquanghunggh@gmail.com

¹Trường Đại học Sao Đỏ

²Trường Đại học Công trình Cấp Nhĩ Tân, Trung Quốc

³Trường Đại học Hồ Nam, Trung Quốc

Ngày nhận bài: 9/10/2020

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 26/12/2020

Ngày chấp nhận đăng: 31/12/2020

Tóm tắt

Phản ứng động lực học của hệ thống đường ống - phao nổi dựa trên phương pháp tọa độ nút tuyệt đối (Absolute Nodal Coordinate Formulation: ANCF) đã được nghiên cứu trong bài báo này. Dựa trên nguyên lý biến đổi năng lượng, ma trận độ cứng, ma trận khối lượng và ma trận ngoại lực của các phần tử đã được xây dựng. Quá trình tính toán mô phỏng được thực hiện trong môi trường Matlab. Dưới tác dụng của ngoại lực lên hệ thống đường ống - phao nổi như chuyển động của tàu, sóng biển đã được thực hiện bằng phương pháp ANCF. Độ chính xác và đáng tin cậy của phương pháp ANCF cho thấy rằng nó hoàn toàn có thể mô phỏng kết cấu biển có biến dạng lớn với số lượng phần tử ít hơn so với các phương pháp tính toán khác.

Từ khóa: Phương pháp tọa độ nút tuyệt đối (ANCF); đường ống - phao nổi; điểm nút.

Abstract

The dynamic response of the flexible riser - buoy system based on the Absolute Nodal Coordinate Formulation (ANCF) method has been studied in this paper. Based on the principle of energy conversion, the stiffness matrix, mass matrix, and an external force matrix of the elements were constructed. The simulation calculation process was performed in the Matlab environment. Under the effect of external forces on the flexible riser - buoy system such as the ship's motion, wave force carried out by ANCF method. The accuracy and reliability of the ANCF method exhibit that it can completely simulate a large deformation structure in ocean engineering with fewer elements.

Keywords: Absolute nodal coordinate formulation (ANCF); flexible - buoy; end node.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Hệ thống đường ống - phao nổi là một trong những vấn đề thách thức trong kỹ thuật biển [1]. Hệ thống đường ống linh hoạt có chức năng chính là truyền tải các chất lỏng như dầu, khí hóa lỏng và các nguồn hydrocacbon khác từ các giếng khoan dưới nước đến các giàn khoan ngoài khơi hoặc các cơ sở trên bờ. Trong các ứng dụng ở độ sâu vừa phải, chúng thường được sử dụng như một cấu trúc nhầy bậc liên kết với phao nổi để giảm ứng suất cho chuyển động gây ra bởi phần ống thẳng đứng bên dưới mặt nước.

Nghiên cứu hệ thống đường ống linh hoạt hiện nay, chủ yếu bao gồm các phương pháp như khối lượng cục bộ (Lump - Mass Method: LMP) như Chen and Wang [2], Chai YT et al [3], phương pháp phần tử hữu hạn (Finite - Element Method) như McNamara et al [4], Yazdchi [1].

Phương pháp ANCF được đưa ra bởi Shabana [5], dựa trên phương pháp cơ học liên tục và lý thuyết về phần tử hữu hạn phi tuyến. Cho đến nay nó đã được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực kỹ thuật cơ khí, động lực học, kỹ thuật hàng không vũ trụ như: Čepón et al [6], Bulín et al [7], Yue et al [8]. Ứng dụng trong vật liệu Composite như Shen et al [9], các mô hình sợi mềm trong không gian ba chiều như Obrezkov et al [10].

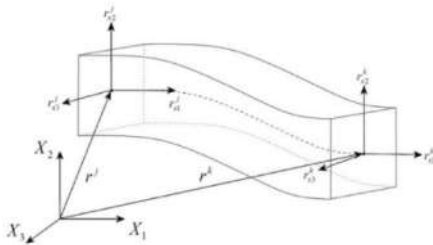
Người phản biện: 1. PGS. TS. Hoàng Văn Gọt
2. PGS. TS. Trần Vệ Quốc

Phương pháp ANCF gần đây đã được nghiên cứu để ứng dụng mô phỏng tính toán động lực học trong lĩnh vực đại dương, Zhang et al [11] đã ứng dụng phương pháp để tính toán hệ thống neo và cho thấy rằng phương pháp ANCF tính toán chính xác khi phân tích tĩnh và động đối với kết cấu nước sâu biến dạng lớn. Ma và Sun [12] đã mô tả các đặc điểm của hệ neo có độ quay lớn và biến dạng kéo trong không gian ba chiều bằng phương pháp ANCF và cho thấy rằng phương pháp này có độ chính xác và hội tụ cao hơn bằng cách phân tích tĩnh.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC CỦA ĐƯỜNG ỐNG DỰA TRÊN PHƯƠNG PHÁP ANCF

2.1. Tọa độ và tham số của phần tử

Trong phương pháp phần tử hữu hạn, kết cấu được chia thành các phần tử, số lượng nút và số tọa độ của mỗi nút trên mỗi phần tử được xác định bởi loại kết cấu và mức độ biến dạng tự do được xét đến, ảnh hưởng lớn đến độ chính xác của bài toán mô phỏng. Đối với phần tử chùm ba chiều, tọa độ của mỗi nút sẽ có 12 thành phần: 3 thành phần chuyển vị, 3 thành phần quay và 6 thành phần biến dạng.



Hình 1. Mô hình dầm 3D

Hình 1 thể hiện mô hình phần tử dầm 3 chiều (3D) với hai nút j and k , vectơ tọa độ của nút j được miêu tả như sau:

$$e^j = [r^j \quad r_{x1}^j \quad r_{x2}^j \quad r_{x3}^j]^T \quad (1)$$

Trong đó:

r^j vectơ vị trí của nút j trong tọa độ tổng thể;

$r_{x1}^j, r_{x2}^j, r_{x3}^j$ các vectơ nghiêng vị trí, được phân biệt bởi vectơ vị trí r^j trong tọa độ không gian tương

ứng là $x^j = [x_1^j \quad x_2^j \quad x_3^j]^T$. Do đó, vectơ tọa độ của nút j là:

$$e^j = \left[r^{j1} \quad r^{j2} \quad r^{j3} \quad \frac{\partial r^{j1}}{\partial x_1} \quad \dots \quad \frac{\partial r^{j3}}{\partial x_3} \right]^T \quad (2)$$

Do đó, trong phương pháp ANCF, mỗi phần tử dầm 3D có 24 nút tọa độ tuyệt đối:

$$e = [e_1 \quad e_2 \quad \dots \quad e_{24}] \quad (3)$$

Đối với kết cấu đường ống linh hoạt, biến dạng

cắt và biến dạng xoắn được bỏ qua [13,14]. Do đó, số lượng tọa độ trên mỗi nút sẽ giảm từ 12 còn 6 thành phần, với 3 thành phần đầu là chuyển vị, 3 thành phần sau là quay. Trong phương pháp ANCF, gọi q là tọa độ của hai nút trên một phần tử dầm 3D, tức là nó sẽ có 12 thành phần:

$$q = [q_1 \quad q_2 \dots q_{12}]^T \quad (4)$$

Vectơ vị trí của mỗi phần tử dầm 3D được biểu thị bằng đa thức nội suy như sau:

$$r = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_1^2 + a_3 x_1^3 \\ b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_1^2 + b_3 x_1^3 \\ c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_1^2 + c_3 x_1^3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Ngoài ra, mối liên hệ giữa tọa độ tuyệt đối q_i và vectơ vị trí r được thể hiện như sau:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = r^j(0,0,0), \quad \begin{bmatrix} q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{bmatrix} = r_{x1}^j(0,0,0) \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} q_7 \\ q_8 \\ q_9 \end{bmatrix} = r^k(l,0,0), \quad \begin{bmatrix} q_{10} \\ q_{11} \\ q_{12} \end{bmatrix} = r_{x1}^k(l,0,0)$$

Với l, x là chiều dài của phần tử và độ cong của phần tử trong tọa độ tổng thể, $x_1 \in [0, l]$, vectơ nghiêng vị trí r và tọa độ nút tuyệt đối q được biểu thị thông qua hàm hình dạng như sau:

$$r_{(x)} = S_{(x)} q \quad (7)$$

Với S là hàm hình dạng Hermite được thể hiện như sau:

$$S = [S_1 I \quad LS_2 I \quad S_3 I \quad LS_4 I] \quad (8)$$

Trong đó:

i là ma trận đơn vị 3×3 ;

hàm S_1, S_2, S_3 và S_4 được định nghĩa:

$$\begin{aligned} S_1 &= 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3, & S_2 &= \xi - 2\xi^2 + \xi^3 \\ S_3 &= 3\xi^2 - 2\xi^3, & S_4 &= -\xi^2 + \xi^3 \end{aligned} \quad (9)$$

Với $\xi = x/l, \zeta \in [0, 1]$, x và l là độ cong của tọa độ, chiều dài của phần tử dầm, $x = [0, l]$.

Từ công thức (7) cho thấy sự chuyển đổi giữa tọa độ của các nút và tọa độ tại bất kỳ điểm nào trên phần tử. Nói cách khác, nếu biết tọa độ tuyệt đối q của mỗi nút, thì vectơ vị trí của tất cả các điểm trên phần tử có thể nhận được thông qua hàm hình dạng nội suy Hermite, có thể mô phỏng tốt hình dạng cong phức tạp khi biến dạng của các kết cấu linh hoạt và giải pháp nội suy gần đúng được đảm bảo chính xác với nghiệm thực khi đủ số lượng phần tử.

2.2. Nội lực và ngoại lực tổng quát

Lực tác dụng lên kết cấu bao gồm nội lực Q_s , ngoại

lực Q_s và lực quán tính F_{qt} . Đối với kết cấu đường ống, nội lực Q_s bao gồm thành phần biến dạng dài và thành phần biến dạng cong. Dựa trên nguyên lý công ảo, công ảo của lực đàn hồi Q_s trên một phần tử là:

$$\delta W_s = \int_0^L EA \varepsilon \delta \varepsilon ds + \int_0^L EIK_\kappa \delta K_\kappa ds \quad (10)$$

Trong đó:

L chiều dài của kết cấu;

E môđun đàn hồi;

A diện tích mặt cắt ngang;

I mômen quán tính;

K_κ độ cong của chất điểm;

ε độ dãn dài;

ds chiều dài vô cùng nhỏ của kết cấu.

Tương tự nội lực, công ảo của ngoại lực tổng quát δW_e là:

$$\delta W_e = - \int_0^L f \cdot \delta r ds \quad (11)$$

Trong đó:

f ngoại lực tổng quát.

Kết hợp với biến lượng chuyển vị nút, thành phần biến dạng và chuyển vị được tính là:

$$\delta \varepsilon = \frac{\partial \varepsilon}{\partial q} \delta q, \delta K_\kappa = \frac{\partial K_\kappa}{\partial q} \delta q, \delta r = \frac{\partial r}{\partial q} \delta q \quad (12)$$

Trong phân tích tĩnh, độ lớn của ngoại lực và nội lực là bằng nhau, do đó:

$$\int_0^L EA \varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial q} \delta q ds + \int_0^L EIK_\kappa \frac{\partial K_\kappa}{\partial q} \delta q ds - \int_0^L f \cdot \frac{\partial r}{\partial q} \delta q ds = 0 \quad (13)$$

Hay

$$\left(\int_0^L EA \varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial q} ds + \int_0^L EIK_\kappa \frac{\partial K_\kappa}{\partial q} ds \right) \delta q - \left(\int_0^L f \cdot \frac{\partial r}{\partial q} ds \right) \delta q = 0 \quad (14)$$

Viết gọn như sau:

$$Q_s^T \delta q - Q_e^T \delta q = 0 \quad (15)$$

Với

$$Q_s^T = \int_0^L EA \varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial q} ds + \int_0^L EIK_\kappa \frac{\partial K_\kappa}{\partial q} ds \quad (16)$$

$$Q_e^T = \int_0^L f \cdot \frac{\partial r}{\partial q} ds \quad (17)$$

Chuyển vị có:

$$Q_s = \int_0^L EA \varepsilon \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial q} \right)^T ds + \int_0^L EIK_\kappa \left(\frac{\partial K_\kappa}{\partial q} \right)^T ds \quad (18)$$

$$Q_e = \int_0^L \left(\frac{\partial r}{\partial q} \right)^T \cdot f ds \quad (19)$$

2.3. Xây dựng ma trận độ cứng của phần tử

Ma trận độ cứng K được tính theo đạo hàm của nội lực Q_s theo nút tọa độ q như sau:

$$K = \frac{\partial Q_s}{\partial q} = \frac{\partial}{\partial q} \left(\int_0^L EA \varepsilon \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial q} \right)^T dx \right) + \frac{\partial}{\partial q} \left(\int_0^L EIK_\kappa \left(\frac{\partial K_\kappa}{\partial q} \right)^T dx \right) \quad (20)$$

Lực căng dọc trục ε và độ cong κ của dầm biến dạng lớn được tính theo:

$$\varepsilon = |r'| - 1 = \sqrt{r'^T r'} - 1 \quad (21)$$

$$\kappa = \frac{|r' \times r''|}{|r'|^3} \quad (22)$$

Trong công thức (20), gọi thành phần thứ nhất là độ cứng dãn dài dọc trục K_1 , thành phần thứ hai là độ cứng uốn cong K_2 . Do đó, thành phần K_i được biểu thị là:

$$K_1 = \frac{\partial}{\partial q} \left(\int_0^L EA \varepsilon \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial q} \right)^T dx \right) = \int_0^L \left(EA \frac{\partial \varepsilon}{\partial q} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial q} \right)^T \right) dx + \int_0^L \left(EA \varepsilon \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial q} \right)^T \right) dx \quad (23)$$

Trong đó:

$\varepsilon = \sqrt{r'^T r'} - 1$, $r = Sq$. Với S và q là các biến độc lập, do đó có:

$$\frac{\partial r}{\partial q} = S, r' = \frac{\partial r}{\partial s} = \frac{\partial S}{\partial s} \cdot q = S'q, r'' = S''q \quad (24)$$

Suy ra:

$$\frac{\partial r'}{\partial q} = S' \quad (25)$$

Suy ra:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial q} = \frac{\partial}{\partial q} (\sqrt{r'^T r'} - 1) = \frac{r'^T S'}{\sqrt{r'^T r'}} \cdot \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial q} \right)^T = \frac{S'^T r'}{\sqrt{r'^T r'}} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial q} \right)^T &= \frac{S'^T S'}{\sqrt{r'^T r'}} - \frac{S'^T r'}{r'^T r'} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial q} \\ &= \frac{S'^T S'}{\sqrt{r'^T r'}} - \frac{1}{\sqrt{r'^T r'}} \cdot \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial q} \right)^T \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial q} \end{aligned} \quad (27)$$

Do đó, K_1 được tính như sau:

$$K_1 = \int_0^L \left(EA \frac{\partial \varepsilon}{\partial q} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial q} \right)^T \right) dx + \int_0^L \left(EA \left(1 - \frac{1}{\sqrt{r'^T r'}} \right) \left(S'^T S' - \frac{\partial \varepsilon}{\partial q} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial q} \right)^T \right) \right) dx \quad (28)$$

Thành phần K_2 là:

$$K_2 = \frac{\partial}{\partial q} \left(\int_0^L EI K_{\kappa} \left(\frac{\partial K_{\kappa}}{\partial q} \right)^T dx \right) \quad (29)$$

$$= \int_0^L \left(EI \frac{\partial K_{\kappa}}{\partial q} \left(\frac{\partial K_{\kappa}}{\partial q} \right)^T \right) dx + \int_0^L \left(EI K_{\kappa} \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial K_{\kappa}}{\partial q} \right)^T \right) dx$$

Từ K_1 và K_2 thu được ma trận độ cứng $K = K_1 + K_2$.

2.4. Xây dựng ma trận khối lượng và ma trận ngoại lực

Dựa trên phương pháp ANCF, ma trận khối lượng phần tử không có phép biến đổi tọa độ, các thành phần của ma trận là hằng số. Do đó, ma trận phần tử của đường ống M được tính bởi [15]:

$$M = \int_0^L \rho S^T S dx \quad (30)$$

Trong đó:

L chiều dài của phần tử;

ρ mật độ khối lượng;

S hàm hình dạng Hermite.

Thay hàm hình dạng Hermite vào công thức (30) thu được:

$$M = \begin{bmatrix} \frac{13}{35} ml & \frac{11}{210} Lml & \frac{9}{70} ml & -\frac{13}{420} Lml \\ \frac{11}{210} Lml & \frac{1}{105} L^2 ml & \frac{13}{420} Lml & -\frac{1}{140} L^2 ml \\ \frac{9}{70} ml & \frac{13}{420} Lml & \frac{13}{35} ml & -\frac{11}{210} Lml \\ -\frac{13}{420} Lml & -\frac{1}{140} L^2 ml & -\frac{11}{210} Lml & \frac{1}{105} L^2 ml \end{bmatrix} \quad (31)$$

Trong đó:

m khối lượng phần tử;

I ma trận đơn vị 3×3 .

Ma trận ngoại lực được tính như sau:

$$Q_e = \int_0^L \left(\frac{\partial r}{\partial q} \right)^T \cdot f ds = \int_0^L S^T \cdot f ds \quad (32)$$

Với f là ngoại lực tác dụng theo trục x , y và z .

Do đó:

$$Q_e = \int_0^L \begin{bmatrix} S_1 I \\ LS_2 I \\ S_3 I \\ LS_4 I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} ds \quad (33)$$

Đối với kết cấu linh hoạt trên biển, khi phân tích tĩnh, ngoại lực tác dụng là:

$$f = f_g + f_b \quad (34)$$

Với $f_g = -(\rho_r A_r + \rho_i A_i) g e_y$ và $f_b = \rho_s A_0 g e_y$ lần lượt là

trọng lực và lực nổi trên mỗi phần tử. A_r , A_i và A_0 lần lượt là diện tích mặt cắt ngang, diện tích bên trong và diện tích bên ngoài của kết cấu. ρ_r , ρ_i và ρ_s lần lượt là mật độ khối lượng của kết cấu, mật độ nước trong ống và mật độ nước biển. g là gia tốc trọng trường, e_y là vectơ đơn vị theo phương y trong tọa độ tổng thể.

Trong phân tích động, ngoại lực bao gồm:

$$f = f_g + f_b + f_{wave} + f_{current} + f_{flow} \quad (35)$$

Trong đó:

f_{wave} , $f_{current}$ và f_{flow} lần lượt là lực của sóng, lực đẩy của dòng chảy và lực chất lỏng bên trong ống, áp dụng công thức Morrison:

$$f_{wave}(s, t) = \frac{1}{2} \rho_s C_d D N(v_s - \dot{r}) |N(v_s - \dot{r})| + \rho_s A_0 C_m N(\dot{v}_s - \ddot{r}) \quad (36)$$

$$f_{current}(s, t) = \frac{1}{2} \rho_s C_d D N(u_s - \dot{r}) |N(u_s - \dot{r})| - \rho_s A_0 C_m N(\dot{u}_s - \ddot{r}) \quad (37)$$

$$f_{flow} = -\rho_i A_i N \ddot{r} \quad (38)$$

Trong đó:

C_d, C_m là hệ số lực đẩy và hệ số khối lượng tăng thêm. \dot{r}, \ddot{r} là vận tốc và gia tốc của kết cấu. D, u_s, \dot{u}_s, v_s và \dot{v}_s lần lượt là đường kính kết cấu, vận tốc, gia tốc của chất lỏng, vận tốc và gia tốc của sóng. N là ma trận chuyển đổi ba chiều.

2.5. Phương pháp tính

Trong phân tích tĩnh, áp dụng phương pháp lặp Newton - Raphson để tính phương trình cân bằng, với mỗi chuyển vị vô cùng nhỏ, được tính như sau [16]:

$$\Delta q^{(n)} = \frac{Q_e - Q_s(q^{(n)})}{K(q^{(n)})} \quad (39)$$

$$q^{(n+1)} = q^{(n)} + \Delta q^{(n)} \quad (40)$$

Trong đó:

Nội lực Q_s là hàm số của chuyển vị q ;

Ngoại lực Q_e bao gồm trọng lực và lực nổi của kết cấu;

K là ma trận độ cứng phần tử.

Phương trình chuyển động vi phân tổng quát là:

$$M \ddot{q}(t) + C \dot{q}(t) + K q(t) = F(t) \quad (41)$$

Trong phân tích động lực học, áp dụng phương pháp Newmark để tính, chuyển vị, vận tốc và gia tốc của chất điểm tại thời điểm t và $t + \Delta t$ là:

$$q_{t+\Delta t} = q_t + \dot{q}_t \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \ddot{q}_t + \alpha \ddot{q}_{t+\Delta t} \right] \Delta t^2 \quad (42a)$$

$$\dot{q}_{t+\Delta t} = \dot{q}_t + [(1 - \delta) \ddot{q}_t + \delta \ddot{q}_{t+\Delta t}] \Delta t \quad (42b)$$

$$\ddot{q}_{t+\Delta t} = \frac{1}{\alpha \Delta t^2} (q_{t+\Delta t} - q_t) - \frac{1}{\alpha \Delta t} \dot{q}_t - \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{q}_t \quad (42c)$$

Trong đó:

α và δ là hệ số liên quan đến sự chính xác và ổn định. Khi $\delta \geq 0,5$ và $\alpha \geq 0,25(0,5 + \delta)^2$ thì phương pháp Newmark ổn định hoàn toàn.

Phương trình chuyển động tại thời điểm $t + \Delta t$ là:

$$M\ddot{q}_{t+\Delta t} + C\dot{q}_{t+\Delta t} + Kq_{t+\Delta t} = F_{t+\Delta t} \quad (43)$$

Thay công thức (42a), (42b) và (42c) vào công thức (43), được:

$$\left(K + \frac{1}{\alpha\Delta t^2}M + \frac{\delta}{\alpha\Delta t}C \right) q_{t+\Delta t} = F_{t+\Delta t} + M \left[\frac{1}{\alpha\Delta t^2}q_t + \frac{1}{\alpha\Delta t}\dot{q}_t + \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{q}_t \right] + C \left[\frac{\delta}{\alpha\Delta t}q_t + \left(\frac{\delta}{\alpha} - 1 \right) \dot{q}_t + \left(\frac{\delta}{2\alpha} - 1 \right) \Delta t \ddot{q}_t \right] \quad (44)$$

3. PHÂN TÍCH ĐỘNG LỰC HỌC CỦA HỆ THỐNG ĐƯỜNG ỐNG - PHAO NỔI

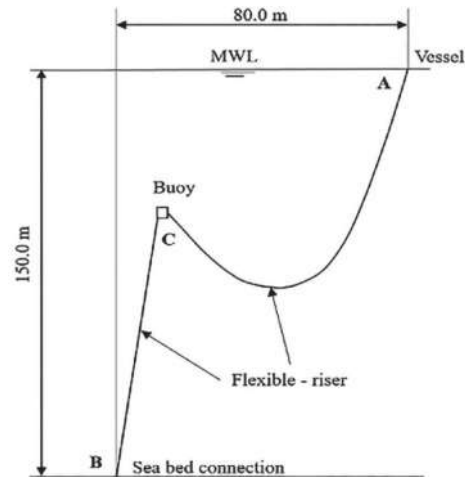
Hệ thống bao gồm có 3 phần chính (Bảng 1 và Hình 2): phần 1 là đường ống thẳng đứng, có chiều dài 100,0 m, đầu dưới được cố định với đáy biển tại điểm B, đầu trên được liên kết với một phao nổi tại điểm C; phần 2 là một phao nổi làm cầu nối và liên kết với hai đường ống; phần 3 là đường ống nằm ngang, có điểm trên cùng được nối với tàu tại điểm A, và đầu dưới liên kết với phao nổi, cả hai điểm có thể quay tự do. Góc tọa độ đặt tại điểm B, chiều dương y hướng lên trên mặt biển, chiều dương x từ trái sang phải.

3.1. Phân tích tĩnh

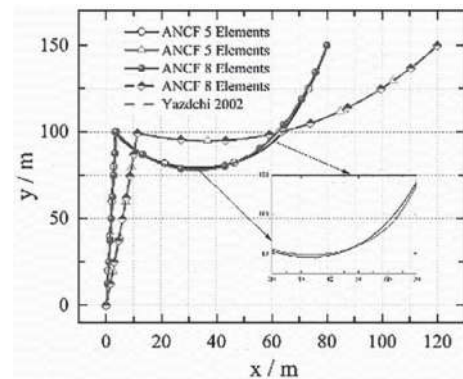
Trong phân tích tĩnh, hình dạng của hệ thống được so sánh bởi hai phương pháp. Trong phương pháp phần tử hữu hạn của Yazdchi et al.[1], hệ thống đường ống được chia thành 4 phần tử có chiều dài là 5,0 m, 21 phần tử có chiều dài 10,0 m. Trong khi đó số phần tử được chia trên mỗi đường ống trong phương pháp ANCF được chia thành hai trường hợp (5 phần tử và 8 phần tử). Trạng thái tĩnh của hệ thống được thể hiện trong Hình 3, nó cho thấy khi tàu nằm cách vị trí 120,0 m thì hình dạng của hệ thống là như nhau đối với 5 phần tử và 8 phần tử. Khi tàu dịch chuyển về phía góc tọa độ một khoảng 40,0 m thì nó có sự sai khác giữa 5 phần tử với 8 phần tử. Khi số phần tử là 8 thì nó hoàn toàn trùng khớp với hình dạng của Yazdchi et al [9], có sự sai khác khi số phần tử bằng 5, nguyên nhân là khi số phần tử bằng 5 thì khoảng cách giữa các nút là lớn, lần lượt trên hai đường ống là 20,0 m và 26,0 m, dẫn đến hàm số miêu tả vị trí $r(x) = S(x)q$ có sự sai khác, nhưng nó rất nhỏ (quan sát trong Hình 3). Vì vậy, trong phân tích động, để đảm bảo độ chính xác, số phần tử được lựa chọn để phân tích là 8.

Bảng 1. Thông số hệ thống đường ống - phao nổi và môi trường

Tổng chiều dài đường ống	230,0 m
Chiều dài từ đáy biển đến phao nổi	100,0 m
Chiều dài từ phao nổi đến tàu	130,0 m
Đường kính ngoài	0,26 m
Đường kính trong	0,20 m
Độ cứng uốn (EI)	$20,96 \times 10^3 \text{ Nm}^2$
Độ cứng dọc trục (EA)	$15,38 \times 10^8 \text{ N}$
Mật độ nước biển	$1025,0 \text{ kg/m}^3$
Trọng lượng khô/1 m chiều dài	$57,5 \text{ kg/m}^3$
Chiều sâu nước	150,0 m
Khối lượng phao nổi	6.000 kg
Lực nổi theo phương thẳng đứng	300 kN
Đường kính phao nổi	3,0 m
Chuyển động của tàu là:	
Theo hướng ngang	$4 \sin(0,393t)$
Theo phương thẳng đứng	$6 \sin(0,393t)$
Chiều cao sóng	20,0 m
Chu kỳ sóng	16 s

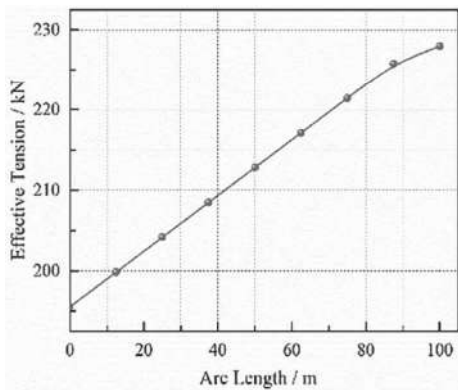


Hình 2. Mô hình hệ thống đường ống - phao nổi



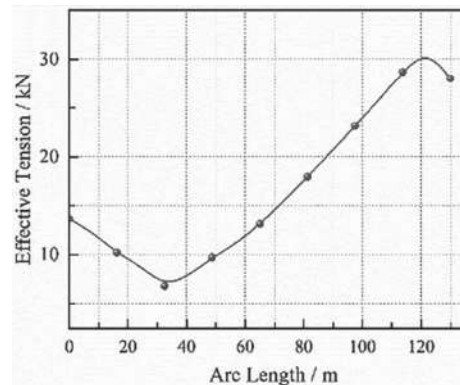
Hình 3. Trạng thái tĩnh của hệ thống khi tàu ở vị trí 80 và 120 theo phương x

Hình 4 thể hiện lực căng dọc trục trên hai đường ống, Hình 4 (a) là lực căng dọc trục trên đường ống thẳng đứng, giá trị của lực căng là tăng dần



(a) Đường ống thẳng đứng

theo chiều dài của đường ống (từ vị trí đáy biển đến phao nổi). Hình 4 (b) là lực căng dọc trục trên đường ống nằm ngang, nó có giá trị nhỏ nhất là 6,82 kN tại vị trí 32,5 m (vị trí uốn cong nhất).



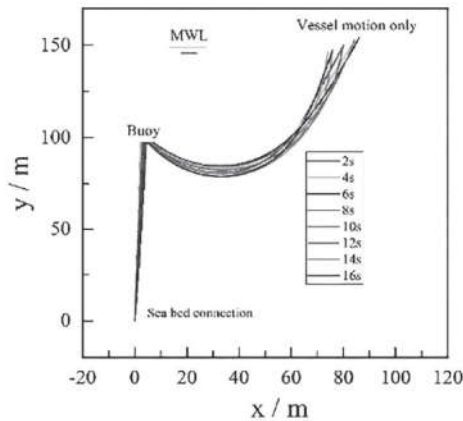
(b) Đường ống nằm ngang

Hình 4. Lực căng dọc theo đường ống đứng và ống nằm ngang

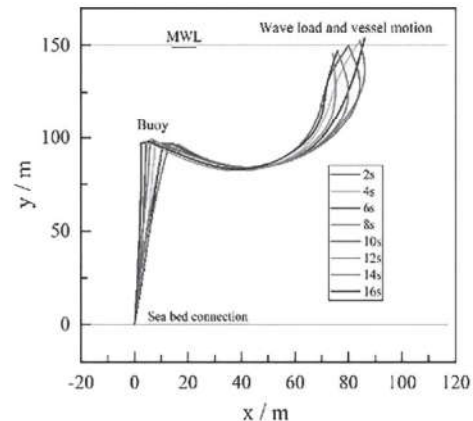
3.2. Phân tích động

Trong phân tích động sẽ xét hai trường hợp: Trường hợp 1, hệ thống đường ống - phao nổi chịu tác dụng khi tàu chuyển động theo phương ngang x với phương trình $x = 6 \sin(0,393t)$, theo phương

thẳng đứng $y = 4 \sin(0,393t)$. Trường hợp thứ 2 là ngoài sự chuyển động của tàu, ngoại lực của sóng biển chuyển động có quy tắc với biên độ là 20,0 m và chu kỳ là 16,0 s được áp dụng. Quá trình tính toán mô phỏng được thực hiện trong khoảng thời gian 200 s, bước thời gian là 1×10^{-4} s.



(a) Chỉ có tàu chuyển động

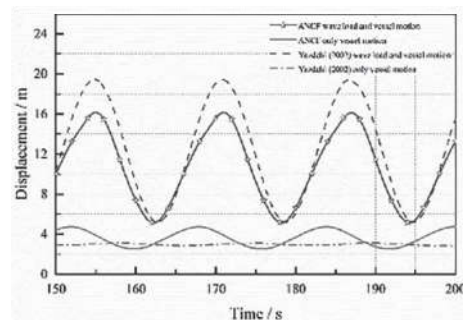


(b) Tác dụng của sóng và tàu chuyển động

Hình 5. Hình dạng chuyển động của hệ thống dưới tác dụng của ngoại lực

Hình 5 cho thấy hình dạng chuyển động của hệ thống đường ống - phao nổi, Hình 5 (a) khi chỉ có chuyển động của tàu, Hình 5 (b) có thêm sự tác dụng của lực sóng biển lên hệ thống. Từ hình vẽ cho thấy rằng, khi có sự tác động của sóng biển thì toàn bộ hệ thống có sự dịch chuyển theo phương ngang x là lớn hơn, nhưng theo phương thẳng đứng y thì nhỏ hơn, vị trí đó được thể hiện trong Hình 6.

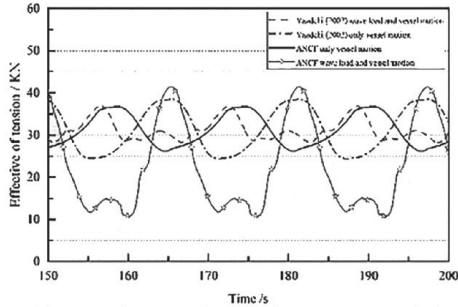
Còn sự dịch chuyển của điểm nút trên cùng A khi không có sóng và khi có sóng là như nhau, vì điểm A được gắn cố định cùng với sự chuyển động của tàu là: $x = 6 \sin(0,393t)$ và $y = 4 \sin(0,393t)$.



Hình 6. Sự dịch chuyển theo phương ngang tại nút C

Ảnh hưởng của lực căng dọc trục trên hệ thống khi tàu chuyển động và khi có thêm sự tác động của

sóng được thể hiện trong Hình 7, cho thấy lực căng dọc trục tại nút A khi có thêm lực sóng tác dụng thì lực căng dọc trục có giá trị lớn hơn. Các giá trị lớn nhất về độ dịch chuyển của nút C và lực căng dọc trục tại nút A được thể hiện trong Bảng 2.



Hình 7. Lực căng dọc trục tại nút A

Hơn nữa khi có thêm sóng biển thì tại mỗi chu kỳ của lực căng còn xuất hiện thêm hai đỉnh hình sin “double sine”. Nguyên nhân là do vận tốc và gia tốc tương ứng của ống sẽ tăng cùng với sự gia tăng của biên độ kích thích nếu chu kỳ chuyển động là nhất quán, khi đó ống sẽ xuất hiện hiện tượng trễ trong chuyển động đối với đặc điểm cấu trúc mảnh mai của nó, điều này sẽ ảnh hưởng thêm đến sự biến đổi của lực căng dọc trục của nút trên cùng.

Bảng 2. So sánh độ dịch chuyển lớn nhất theo phương x tại nút C và lực căng dọc trục lớn nhất tại nút A

Phương pháp	Tại nút C		Tại node A	
	Chi có tàu chuyển động/m	Tàu và sóng đồng thời/m	Chi có tàu chuyển động/KN	Tàu và sóng đồng thời/KN
ANCF	4.740	16.253	36.908	41.497
Yozdchi (2002) [1]	3.245	19.366	36.840	38.420
Mcnamara [4]	-	-	38.170	42.30

Từ các giá trị trên có thể thấy rằng phương pháp ANCF hoàn toàn có thể mô phỏng động lực học của hệ thống đường ống - phao nổi một cách chính xác với số phần tử là 16 (mỗi đường ống là 8 phần tử), ít hơn số phần tử trong phương pháp phần tử hữu hạn của McNamara et al.[4], Yazdchi [1], (26 phần tử).

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã thực hiện nghiên cứu phân ứng động lực học của hệ thống đường ống - phao nổi dưới sự tác động của chuyển động tàu và sóng, dựa trên phương pháp ANCF, các kết luận sau được rút ra như sau:

- Phân tích tĩnh và phân tích động của hệ thống được thực hiện một cách có hệ thống, cho thấy

tính chính xác và đáng tin cậy của phương pháp ANCF khi số lượng phần tử ít hơn so với phương pháp khác.

- Khi có sự tác động của sóng biển và chuyển động của tàu đồng thời thì lực căng, mômen và vị trí dịch chuyển theo phương x của các điểm nút trên mỗi đường ống đều tăng, nhưng theo phương thẳng đứng y thì nhỏ hơn.

- Có thể áp dụng phương pháp ANCF để tính toán cho hệ thống với chiều sâu lớn hơn, và có thể tính toán thêm nhiều ngoại lực tác dụng như dòng chảy, VIV... là một phương pháp hữu hiệu để mô phỏng, tính toán kết cấu biển có biến dạng lớn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Yazdchi, M. and M.A. Crisfield (2002), *Non-linear dynamic behaviour of flexible marine pipes and risers*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 54(9): p. 1265-1308.
- [2] Jiajing, C. and W. Dongjiao (1991), *Nonlinear Dynamic Analysis of Flexible Marine-Risers*, China Ocean Engineering: English version, Vol 5(4): p. 373-384.
- [3] Chai, Y.T., K.S. Varyani, and N. Barltrop (2002), *Three-dimensional Lump-Mass formulation of a catenary riser with bending, torsion and irregular seabed interaction effect*. Ocean Engineering, Vol 29(12): p. 1503-1525.
- [4] Mcnamara, J.F., P.J. O'Brien, and S.G. Gilroy (1988), *Nonlinear Analysis of Flexible Risers Using Hybrid Finite Elements*, Journal of Offshore Mechanics & Arctic Engineering, Vol 110(3): p. 197-204.
- [5] Shabana, A.A (1997), *Definition of the Slopes and the Finite Element Absolute Nodal Coordinate Formulation*, Multibody System Dynamics, Vol 1(3): p. 339-348.
- [6] Čepón, G. and M. Boltežar (2009), *Dynamics of a belt-drive system using a linear complementarity problem for the belt-pulley contact description*, Journal of Sound & Vibration, Vol 319(3-5): p. 1019-1035.
- [7] Bulín, R., M. Hajžman, and P. Polach (2017), *Nonlinear dynamics of a cable-pulley system using the absolute nodal coordinate formulation*, Mechanics Research Communications, Vol 82.

- [8] Yue, Z., et al. (2018), *Adaptive ANCF method and its application in planar flexible cables*, Acta Mechanica Sinica, Vol 34(1): p. 1-15.
- [9] A, Z.S., L.B. Cheng, and H.L. A (2020), *Viscoelastic analysis of bistable composite shells via absolute nodal coordinate formulation*, Composite Structures, 248.
- [10] Obrezkov, L.P., M.K. Matikainen, and A.B. Harish (2020), *A finite element for soft tissue deformation based on the absolute nodal coordinate formulation*, Acta Mechanica, Vol 231(4): p. 1519-1538.
- [11] Zhang, C., et al. (2019), *Mechanical modeling of deepwater flexible structures with large deformation based on absolute nodal coordinate formulation*, Journal of Marine Science and Technology, Vol (12): p. 1-15.
- [12] G, M. and S. L (2014), *Static analysis of the mooring line under large deformation by utilizing the global coordinate method*, J Harbin Eng Univ, Vol 6: p. 674-678.
- [13] Zhuang, K., et al (2018,), *A numerical investigation of two-degree-of-freedom VIV of a circular cylinder using the modified turbulence model*, Ocean Engineering.
- [14] Dmitrochenko, O (2008), *Finite elements using absolute nodal coordinates for large-deformation flexible multibody dynamics*, Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol 215: p. 368-377.
- [15] Gerstmayr, J. and A.A. Shabana (2006), *Analysis of thin beams and cables using the absolute nodal co-ordinate formulation*, Nonlinear Dynamics, Vol 45(1-2): p. 109-130.
- [16] Gautschi, W. (2012), *Numerical Analysis*, 274-278.

THÔNG TIN TÁC GIẢ



Lưu Quang Hưng

- Tóm tắt quá trình đào tạo, nghiên cứu: (thời điểm tốt nghiệp và chương trình đào tạo, nghiên cứu):
- + Năm 2010: Tốt nghiệp Đại học Hàng hải Việt Nam, chuyên ngành Đóng tàu.
- + Năm 2014: Tốt nghiệp Thạc sĩ ngành Kỹ thuật tàu thủy.
- + Năm 2016: Nghiên cứu sinh tại Trường Đại học Công trình Cấp Nhí Tân (Harbin Engineering University), thành phố Cấp Nhí Tân, tỉnh Hắc Long Giang, Trung Quốc.
- Tóm tắt công việc hiện tại: Chuyên viên phòng Kế hoạch, Đầu tư, Trường Đại học Sao Đỏ.
- Lĩnh vực quan tâm: Kết cấu tàu - công trình biển, thủy lực.
- Email: luuquanghunggh@gmail.com.



Vũ Văn Tấn

- Tóm tắt quá trình đào tạo, nghiên cứu: (thời điểm tốt nghiệp và chương trình đào tạo, nghiên cứu):
- + Năm 2005: Tốt nghiệp Đại học Nha Trang chuyên ngành Cơ khí tàu thuyền.
- + Năm 2009: Tốt nghiệp Thạc sĩ chuyên ngành Công nghệ kỹ thuật Cơ khí trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
- + Năm 2015: Tốt nghiệp Tiến sĩ tại Đại học công nghệ Vũ Hán - Trung Quốc.
- Tóm tắt công việc hiện tại: Trưởng phòng Đào tạo, Trường Đại học Sao Đỏ.
- Lĩnh vực quan tâm: Cơ học và sức bền vật liệu.
- Điện thoại: 02203587212.
- Email: vutannnn@gmail.com



Nguyễn Ngọc Đàm

- Tóm tắt quá trình đào tạo, nghiên cứu: (thời điểm tốt nghiệp và chương trình đào tạo, nghiên cứu):
- + Năm 2008: Tốt nghiệp Đại học Hàng hải Việt Nam, chuyên ngành Máy tàu biển.
- + Năm 2013: Tốt nghiệp Thạc sĩ ngành Khai thác và bảo trì tàu thủy.
- Tóm tắt công việc hiện tại: Giảng viên khoa Ô tô, Trường Đại học Sao Đỏ.
- Lĩnh vực quan tâm: Máy động lực, thủy lực.
- Email: ngocdam20101985@gmail.com.
- Điện thoại: 0985871085.



Nguyễn Đức Hải

- Tóm tắt quá trình đào tạo, nghiên cứu: (thời điểm tốt nghiệp và chương trình đào tạo, nghiên cứu):
- + Năm 2008: Tốt nghiệp Đại học Hàng hải Việt Nam, chuyên ngành Công nghệ đóng mới và sửa chữa tàu thủy.
- + Năm 2011: Tốt nghiệp Thạc sĩ ngành Kỹ thuật máy và thiết bị thủy khí chuyên ngành Tàu thủy, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
- + Năm 2016: Nghiên cứu sinh chuyên ngành Cơ khí, Trường Đại học Hồ Nam, Trung Quốc.
- Tóm tắt công việc hiện tại: Giảng viên khoa Cơ khí, Trường Đại học Sao Đỏ.
- Lĩnh vực quan tâm: Cơ học chất lỏng, cơ học và sức bền vật liệu.
- Email: shipbuiding_dta10@yahoo.com.