

Phân tích hệ bể chứa chất lỏng-đất nền dưới tải trọng động đất bằng MATLAB Simulink

Seismic analysis of a soil-liquid tank system using MATLAB Simulink

Huỳnh Văn Quân^{1,*}, Nguyễn Thị Hồng Phấn²

¹Trường Đại học Giao thông vận tải

²Trường Cao đẳng Xây dựng Thành phố Hồ Chí Minh

*Tác giả liên hệ: quanhv_ph@utc.edu.vn

Ngày nhận bài: 9/8/2023; Ngày chấp nhận đăng bài: 11/9/2023

Tóm tắt:

Bài báo đề xuất một mô hình phân tích ứng xử của hệ bể chứa chất lỏng chịu tải trọng động đất theo thời gian, có xét đến tương tác với đất nền. Bằng phương pháp kết cấu phụ, hệ bể chứa chất lỏng được mô hình dưới dạng thông số tập trung với hai bậc tự do, hệ đất nền và móng được mô hình dưới dạng sway-rocking với ba bậc tự do có xét đến bậc tự do vòng treo. Hệ phương trình vi phân chuyển động được tích phân số bằng công cụ MATLAB Simulink, cho phép quan sát được ứng xử của các bậc tự do, lực cắt và mô men tại chân bể theo thời gian. Với bể hình trụ đứng có bán kính 10 m, chứa khối nước cao 8 m, chịu kích thích nền là gia tốc động đất El Centro 1940; kết quả phân tích cho thấy, chuyển vị ngang khối chất lỏng đối lưu tăng 16,36%, lực cắt và mô men tăng đáng kể so với trường hợp bể liên kết cứng với đất nền.

Từ khóa: Bể chứa chất lỏng; Hệ bể chứa-nền đất; Tải trọng động đất; Tương tác kết cấu-đất nền; Phản ứng động.

Abstract:

In this paper, a model is proposed for analyzing the long-term responses of a liquid tank system to earthquake loads while taking soil interaction into account. Three degrees of freedom (DOFs) in the sway-rocking form and the monkey tail DOF are used to model the soil-foundation system, while the fluid in the tank is modeled as a two DOF lumped parameter using the substructure method. By using the MATLAB Simulink tool to numerically integrate the system of differential equations of motion, the response of the DOFs, shear force, and moment at the tank bottom can be tracked over time. The El Centro 1940 earthquake's acceleration excited a vertical cylindrical tank with a radius of 10 m and a water mass of 8 m; the results of the analysis show that the horizontal displacement of the convective mass increased by 16.36%, and the shear force and moment significantly increased in comparison to the case of the tank rigidly linked to the ground.

Keywords: Liquid storage tank; Soil-liquid tank system; Seismic loading; Soil-structure interaction; Dynamic response.

1. Giới thiệu

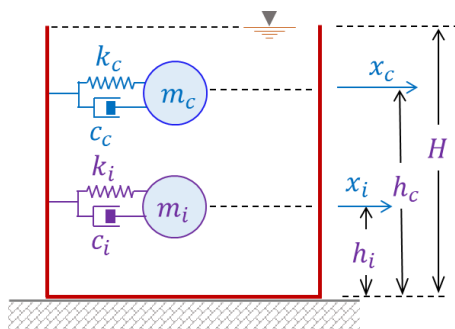
Do ảnh hưởng của sóng động đất, đất nền và móng chịu tác dụng của sóng tới, khi đó, nền đất biến dạng và thay đổi tính chất vật liệu (phi tuyến vật liệu), nên móng sẽ chuyển vị. Điều này ảnh hưởng đến ứng xử của kết cấu phần trên

(Superstructure). Đối với công trình bể chứa chất lỏng, bên cạnh ứng xử của kết cấu bể, còn có dao động của khối chất lỏng bên trong nên hệ chuyển động rất phức tạp.

Do đó, việc xét đồng thời hệ gồm kết cấu phần trên, móng và đất nền (Soil-Structure

Interaction, SSI) dưới tác dụng của tải trọng động đất là gần với thực tế [1].

Theo tiêu chuẩn API 650 [2], việc tính toán hệ bể chứa chất lỏng chưa xét đến biến dạng nền, bể được coi như gắn chặt vào nền đất, sóng động đất truyền trực tiếp vào bể gây ra dao động cho hệ (hình 1). Các tác giả [3]-[5] nghiên cứu với mô hình móng được cô lập với đất nền. Trong khi đó, một số nghiên cứu [6]-[8] đã xét đến biến dạng nền nhưng dừng lại ở bài toán tuyến tính và chỉ khảo sát bậc tự do của móng chuyển động theo phương ngang. Bakalis [9] sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để thực hiện nghiên cứu, trong đó, có xét đến đặc điểm phi tuyến hình học, nhô móng (Uplift) khỏi mặt tiếp xúc với đất. Lyu [10] phân tích hệ bể chứa chất lỏng hình trụ nằm ngang, có xét đến biến dạng nền bằng cách sử dụng mô hình do Khosravikia đề xuất [11], [12].



Hình 1. Mô hình hệ bể chứa chất lỏng khi chưa xét đến biến dạng nền.

Trong thời gian gần đây, tại Việt Nam, đã có nghiên cứu về ứng xử hệ bể chứa chất lỏng với mô hình thông số tập trung, xét đến đặc điểm địa chất và gia tốc kích thích nền [13]. Các tác giả [14], [15] nghiên cứu bài toán xét đến biến dạng nền bằng phương pháp lai (Hybrid Method), trong đó hệ đất nền và móng được mô hình bằng phần tử vĩ mô (Macro-Element).

Bể chứa chất lỏng là công trình thuộc phân cấp đặc biệt quan trọng, để thuận lợi cho quá trình vận chuyển nên thường được đặt ở khu vực ven biển, bến cảng, các khu công nghiệp. Vì vậy, bất kỳ sự cố hư hỏng nào của bể chứa đều dẫn đến tràn chất lỏng (ga, xăng, dầu, hóa chất,...), gây nguy hại rất lớn cho con người và môi trường xung quanh. Vì thế, việc tính toán

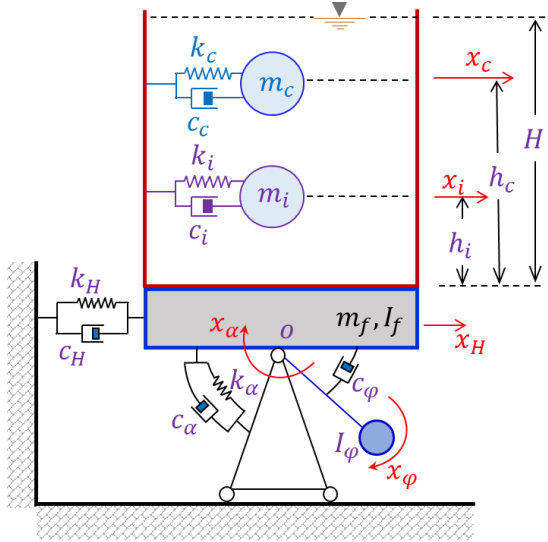
bể chứa có xét đến tương tác với đất nền giúp mô hình phân tích gần với điều kiện làm việc thực tế của công trình. Rất nhiều tác giả đã thực hiện nghiên cứu hệ móng bể và đất nền bằng các mô hình cơ học khác nhau, chẳng hạn như [3]-[15]. Tuy nhiên, mỗi mô hình đều có các ưu, nhược điểm nhất định [1].

Như đã phân tích ở trên, để đơn giản trong tính toán, các công trình được phân tích với sơ đồ ngàm vào đất, hay móng đặt trên các mô hình cô lập dao động, sơ đồ này đã bỏ qua tương tác với đất nền. Một số nghiên cứu thực hiện bằng phương pháp phần tử hữu hạn, tuy nhiên, tính chính xác của phương pháp phụ thuộc nhiều vào sơ đồ và khả năng mô phỏng, và đòi hỏi khối lượng tính toán rất lớn. Với đề xuất của Kausel [16] về việc ứng dụng nguyên lý chồng chất để giải bài toán SSI, bước tiến tiếp theo từ đề xuất này là phương pháp kết cấu phụ (Substructure Method) ra đời để thuận lợi hơn trong tính toán và phân tích. Trong phương pháp kết cấu phụ, nhiều mô hình khác nhau đã được các tác giả đề xuất như Khosravikia [11], [12], John [17], Gazetas [18], Mylonakis [19],... Thế nhưng, nội dung chủ yếu của phương pháp này là thay hệ đất nền và móng bằng các lò xo và vật cản ứng xử tuyến tính hoặc phi tuyến [1]. Trong bài báo này, bể chứa chất lỏng hình trụ đứng, đặt trên móng nông, chịu tải trọng động đất, có xét đến tương tác với đất nền sẽ được đề xuất khảo sát bằng phương pháp kết cấu phụ (xem hình 2). Trong đó, hệ đất nền và móng được mô hình dưới dạng thông số tập trung với sơ đồ sway-rocking, hệ ba bậc tự do, bằng cách áp dụng mô hình của Khosravikia [11], [12] vào bài toán bể chứa hình trụ đứng. Hệ được phân tích theo thời gian, dưới gia tốc kích thích nền của trận động đất El Centro 1940. Kết quả phân tích số, được thực hiện thông qua công cụ MATLAB Simulink, bài báo mô phỏng được biểu diễn theo thời gian gồm chuyển vị của các bậc tự do, lực cắt và mô men tại chân bể. Ngoài ra, kết quả phân tích còn được so sánh với trường hợp bể chứa chất lỏng có móng liên kết cứng với đất nền.

2. Mô hình hệ bể chứa chất lỏng, móng và đất nền

Khi phân tích bể chứa chịu tải trọng động đất, chất lỏng trong bể được phân ra làm hai phần tương ứng với hai dạng chuyển động [2]. Phần chất lỏng phía đỉnh bể, cùng với mặt tự do sẽ chuyển động dạng đối lưu, có khối lượng m_c . Phần chất lỏng còn lại, nằm phía dưới, chuyển động dạng xung kích, có khối lượng m_i [2]. Các thành phần này được mô hình dưới dạng khối lượng tập trung, chuyển động cùng với thành bể, xác định theo các công thức (1) - (3). Mỗi thành phần khối lượng tập trung liên kết với tường bể bằng một hệ gồm có lò xo và vật cản (Damper) nối song song, có độ cứng và hệ số cản tương đương như sau: $k_c = m_c \omega_c^2$, $k_i = m_i \omega_i^2$ và $c_c = 2\xi_c m_c \omega_c$, $c_i = 2\xi_i m_i \omega_i$. Với $D = 2R$ là đường kính, H là chiều cao cột chất lỏng trong bể hình trụ đứng; tần số vòng ω_i và

ω_c được suy ra từ $T_i = C_i H \sqrt{\frac{\rho D}{2tE}}$ và $T_c = C_c \sqrt{D}$, ξ_i và ξ_c là tỷ số cản nhớt, t và E là bề dày và mô đun đàn hồi của tường bể, ρ là khối lượng riêng của chất lỏng, hệ số C_i và C_c xác định theo bảng 1.



Hình 2. Đề xuất mô hình phân tích theo phương pháp kết cấu phụ.

$$\begin{cases} m_c = 0,230 \frac{D}{H} m \tanh\left(\frac{3,67H}{D}\right) \\ h_c = \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{3,67H}{D}\right) - 1}{\frac{3,67H}{D} \sinh\left(\frac{3,67H}{D}\right)}\right) H \end{cases} \quad (1)$$

Bể có $\frac{D}{H} \geq 1,333$, bể rộng:

$$\begin{cases} m_i = \frac{\tanh\left(0,866 \frac{D}{H}\right)}{0,866 \frac{D}{H}} m \\ h_i = 0,375H \end{cases} \quad (2)$$

Bể có $\frac{D}{H} < 1,333$, bể mảnh:

$$\begin{cases} m_i = \left(1 - 0,218 \frac{D}{H}\right) m \\ h_i = \left(0,5 - 0,094 \frac{D}{H}\right) H \end{cases} \quad (3)$$

Bảng 1. Tra các hệ số C_i và C_c theo tỷ số $\frac{H}{R}$ [2].

$\frac{H}{R}$	0,3	0,5	0,7	1	1,5
C_i	9,28	7,74	6,97	6,36	6,06
C_c $\left(\frac{s}{\sqrt{m}}\right)$	2,09	1,74	1,60	1,52	1,48

Theo Khosravikia [11], móng cứng có dạng hình tròn, đặt trên đất nền là bán không gian đàn hồi; hệ được mô hình với ba bậc tự do (hình 2). Móng được mô hình dưới dạng chuyển vị tịnh tiến và xoay (Sway and Rocking) được thu gọn về tâm O , móng được xem như tấm mỏng nên không có bề dày [12]. Cụ thể, hệ móng-đất nền gồm một bậc tự do có khối lượng m_f , chuyển động tịnh tiến theo phương ngang (Sway), xác định bằng tọa độ x_H ; và một bậc tự do chuyển vị góc xoay (Rocking), quay quanh điểm O , có mô men quán tính khối lượng I_f , xác định bằng tọa độ góc xoay x_α . Ngoài ra, hệ được bổ sung một bậc tự do dạng vòng treo (Monkey tail) có xét đến tương tác hệ đất nền và móng. Bậc tự do vòng treo quay quanh điểm O được mô hình bằng một khối lượng tập trung và bổ sung một thiết bị chống xoay, có mô men quán tính khối lượng I_ϕ , xác định bằng tọa độ góc xoay x_ϕ . Gọi r là bán kính móng, e là chiều sâu chôn móng; V_s , ν và ρ_s tương ứng là vận tốc sóng cắt, hệ số Poisson và khối lượng đơn vị của đất nền. Theo Lyu [10], độ cứng và hệ số cản tương đương của hệ móng và đất nền tương ứng các bậc tự do được xác định như sau:

$$k_H = \frac{8\rho_s V_s^2 r}{2-\nu} \left(1 + \frac{e}{r}\right) \quad (4)$$

$$k_\alpha = \frac{8\rho_s V_s^2 r^3}{3(1-\nu)} \left[1 + 2,3 \frac{e}{r} + 0,58 \left(\frac{e}{r}\right)^3\right] \quad (5)$$

$$c_\alpha = \frac{r}{V_s} \left[0,15631 \frac{e}{r} - 0,08906 \left(\frac{e}{r}\right)^2 - 0,00874 \left(\frac{e}{r}\right)^3\right] k_\alpha \quad (6)$$

$$c_\varphi = \frac{r}{V_s} \left[0,4 + 0,03 \left(\frac{e}{r}\right)^2\right] k_\alpha \quad (7)$$

$$I_\varphi = \left(\frac{r}{V_s}\right)^2 \left[0,33 + 0,1 \left(\frac{e}{r}\right)^2\right] k_\alpha \quad (8)$$

Trong hình 2, hệ được khảo sát với năm bậc tự do, chịu kích thích nền là gia tốc động đất theo phương ngang \ddot{x}_g . Áp dụng nguyên lý D'Alembert, sau đây là các phương trình vi phân chuyển động của hệ ứng với các bậc tự do.

Bậc tự do x_c :

$$k_H = \frac{8\rho_s V_s^2 r}{2-\nu} \left(1 + \frac{e}{r}\right) \quad (9)$$

$$m_c(\ddot{x}_c + \ddot{x}_f + h_c \ddot{x}_\alpha) + c_c(\dot{x}_c + h_c \dot{x}_\alpha) + k_c(x_c + h_c x_\alpha) = m_c \ddot{x}_g \quad (10)$$

Bậc tự do x_i :

$$m_i(\ddot{x}_i + \ddot{x}_f + h_i \ddot{x}_\alpha) + c_i(\dot{x}_i + h_i \dot{x}_\alpha) + k_i(x_i + h_i x_\alpha) = m_i \ddot{x}_g \quad (11)$$

Bậc tự do x_H :

$$m_f \ddot{x}_H - c_c(\dot{x}_c + h_c \dot{x}_\alpha) - c_i(\dot{x}_i + h_i \dot{x}_\alpha) + c_H \dot{x}_H - k_c(x_c + h_c x_\alpha) - k_i(x_i + h_i x_\alpha) + k_H x_H = m_f \ddot{x}_g \quad (12)$$

Bậc tự do x_α :

$$(I_f + I_\varphi) \ddot{x}_\alpha - c_c h_c(\dot{x}_c + h_c \dot{x}_\alpha) - c_i h_i(\dot{x}_i + h_i \dot{x}_\alpha) + c_\alpha \dot{x}_\alpha - c_\varphi(\dot{x}_\varphi - \dot{x}_\alpha) - k_c h_c(x_c + h_c x_\alpha) - k_i h_i(x_i + h_i x_\alpha) + k_\alpha x_\alpha = 0 \quad (13)$$

Bậc tự do x_φ :

$$I_\varphi \ddot{x}_\varphi + c_\varphi(\dot{x}_\varphi - \dot{x}_\alpha) = 0 \quad (14)$$

Hệ phương trình vi phân chuyển động (10)-(14) viết dưới dạng véc tơ thu gọn:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{P} \quad (15)$$

Trong đó:

$$\mathbf{x} = \{x_c \quad x_i \quad x_H \quad x_\alpha \quad x_\varphi\}^T$$

$$\mathbf{P} = [m_c \ddot{x}_g \quad m_i \ddot{x}_g \quad m_f \ddot{x}_g \quad 0 \quad 0]^T$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_c & 0 & m_c & m_c h_c & 0 \\ 0 & m_i & m_i & m_i h_i & 0 \\ 0 & 0 & m_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_f + I_\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_\varphi \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_c & 0 & 0 & c_c h_c & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_i h_i & 0 \\ -c_c & -c_i & c_H & -c_c h_c - c_i h_i & -c_\varphi \\ -c_c h_c & -c_i h_i & 0 & -c_c h_c^2 - c_i h_i^2 + c_\alpha + c_\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_\varphi & c_\varphi \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_c & 0 & 0 & k_c h_c & 0 \\ 0 & k_i & 0 & k_i h_i & 0 \\ -k_c & -k_i & k_H & -k_c h_c - k_i h_i & 0 \\ -k_c h_c & -k_i h_i & 0 & -k_c h_c^2 - k_i h_i^2 + k_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Tiến hành tích phân phương trình (15), kết quả thu được là vận tốc (\dot{x}_c, \dot{x}_i), chuyển vị (x_c, x_i). Khi chưa xét đến khối lượng tường và nắp bể, theo Farajian [8], ba đại lượng nghiên cứu chính trong phân tích bể chứa chất lỏng chịu động đất là lực cắt Q , mô men M và chuyển vị thẳng đứng của mặt chất lỏng tự do d :

$$S = k_c x_c + c_c \dot{x}_c + k_i x_i + c_i \dot{x}_i \quad (16)$$

$$M = (k_c x_c + c_c \dot{x}_c) h_c + (k_i x_i + c_i \dot{x}_i) h_i \quad (17)$$

$$d = 0,837R\omega_c^2 \frac{(x_c^{max} - x_f^{max})}{g} \quad (18)$$

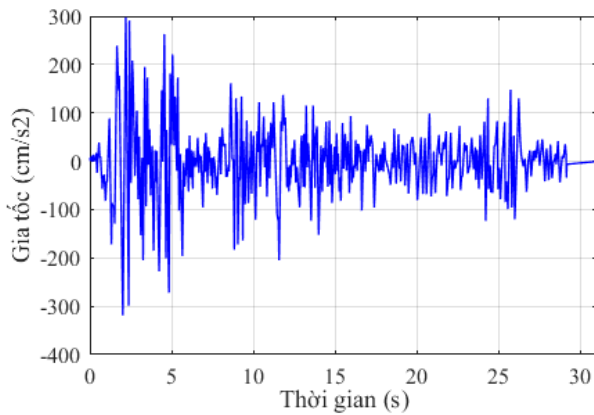
3. Phân tích số

3.1. Số liệu bài toán

Khảo sát bể có dạng hình trụ đứng, chất lỏng bên trong là nước, đường kính $D = 2R = 20$ m; tường làm bằng thép, dày $t = 15$ mm, mô đun đàn hồi $E = 200$ GPa; chiều cao mực chất lỏng trong bể $H = 8$ m; tỷ số cản $\xi_i = 2\%$ và $\xi_c = 0,5\%$; độ cứng tương đương của hệ bể chứa chất lỏng và các thông số của mô hình tập trung như bảng 2.

Theo [20], El Centro 1940 là trận động đất mạnh, đã gây ra thiệt hại lớn về người và của. Ngoài ra, số liệu của trận động đất được ghi nhận

khá hoàn chỉnh và được nhiều tác giả tin cậy sử dụng. Bể chứa chất lỏng là công trình quan trọng, đặt ở các vị trí trọng yếu như bến cảng hay khu công nghiệp, mọi sự cố có thể xảy ra đều được nghiên cứu và đánh giá trước khi đưa vào thi công và khai thác. Do đó, để có những nhận xét bước đầu về ảnh hưởng của tải trọng động đất đến công trình, bài báo lựa chọn gia tốc động đất El Centro 1940 để thực hiện tính toán, biểu đồ gia tốc theo phương ngang có dạng như hình 3.



Hình 3. Biểu đồ gia tốc động đất theo thời gian El Centro 1940 [20].

Bể đặt trên móng nông, có dạng hình tròn với bán kính $r = \frac{D}{2} + 1 = 11$ m [21], làm bằng vật liệu bê tông cốt thép với tỷ trọng $\gamma_f = 2500$ kg/m³; móng chôn vào nền đất với cao độ đỉnh móng bằng cao độ mặt đất tự nhiên, chiều sâu chôn móng $e = 1,5$ m. Khi đó, khối lượng móng như sau:

$$\begin{aligned} m_f &= \gamma_f(\pi r^2 e) = 2500(3,14 \cdot 11^2 \cdot 1,5) \\ &= 1,4 \cdot 10^6 \text{ kg} \end{aligned}$$

Mô men quán tính khối lượng, với:

$$\begin{aligned} I_f &= \frac{m_f}{12}(3r^2 + e^2) = \frac{1,4 \cdot 10^6}{12}(3 \cdot 11^2 + 1,5^2) \\ &= 43,37 \cdot 10^6 \text{ kg.m}^2 \end{aligned}$$

Đất nền là cát chặt, có bề dày vô hạn, vận tốc sóng cắt $V_s = 255$ m/s, hệ số Poisson $\nu = 0,4$, khối lượng đơn vị $\rho_s = 2,1 \cdot 10^3$ kg/m³. Các thông số tương đương về tính đàn hồi, tính cản, mô men quán tính vòng treo được tính toán và tổng hợp như bảng 3.

Bảng 2. Các thông số cơ bản hệ bể chứa-chất lỏng.

m_c (kg)	m_i (kg)	$C_c \left(\frac{s}{\sqrt{m}}\right)$	C_i
$13,59 \cdot 10^5$	$11,53 \cdot 10^5$	1,48	6,56
T_c (s)	T_i (s)	h_c (m)	h_i (m)
6,62	0,10	4,66	3,23
k_c (N/m)	k_i (N/m)	c_c (Ns/m)	c_i (Ns/m)
$21,79 \cdot 10^5$	$4,64 \cdot 10^9$	$12,12 \cdot 10^5$	$2,93 \cdot 10^8$

Bảng 3. Các thông số tương đương của hệ đất nền và móng.

k_H (N/m)	c_H (Ns/m)	k_α (Nm/rad)
$8,53 \cdot 10^9$	$3,28 \cdot 10^8$	$1,06 \cdot 10^{12}$
c_α (Nms/rad)	c_φ (Nms/rad)	I_φ (kg.m ²)
$7,23 \cdot 10^6$	$18,36 \cdot 10^9$	$6,56 \cdot 10^8$

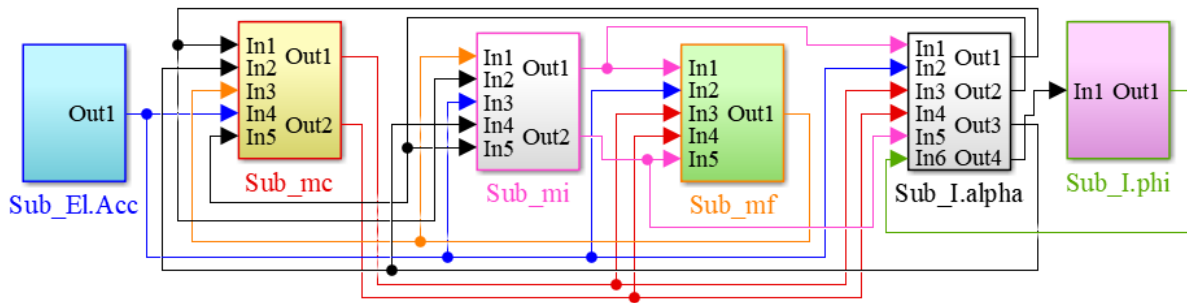
3.2. Mô phỏng với MATLAB Simulink

Simulink là bộ công cụ mô phỏng và mô hình hóa dạng đồ họa, nằm trong tổ hợp phần mềm MATLAB, được phát triển bởi MathWorks. Có thể tóm lược một số ưu điểm chính trong các tính năng của Simulink như sau [22]: (i) Có đồ họa trực quan, giúp dễ dàng hình dung và quản lý các thành phần; (ii) mô phỏng với thời gian thực, hỗ trợ đánh giá hiệu suất và độ tin cậy trước khi triển khai; (iii) tích hợp dễ dàng với MATLAB, cho phép kết hợp giữa tính toán và mô hình hóa trong một môi trường duy nhất; (iv) cung cấp nhiều thư viện mẫu và khung làm việc, giúp tiết kiệm thời gian và tăng năng suất; (v) kiểm tra và gỡ lỗi thuận tiện; (vi) tích hợp phần cứng, cho phép phát triển các ứng dụng nhúng; (vii) mở rộng và tùy chỉnh, thông qua việc viết mã code, tạo ra các khối chức năng độc đáo; (viii) hỗ trợ đa nền tảng, từ máy tính cá nhân đến hệ thống nhúng phức tạp.

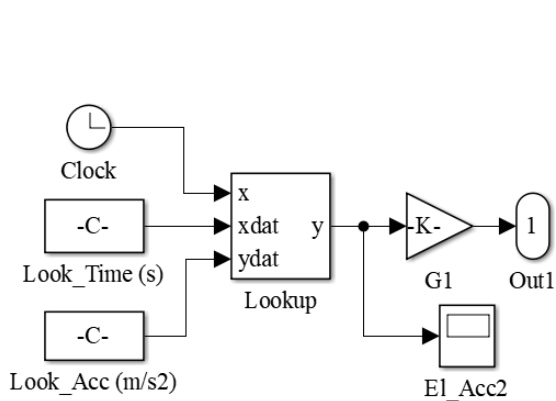
Với các bài toán kỹ thuật, bên cạnh việc mô phỏng theo phương pháp truyền thống bằng cách viết code cho các công thức tính toán phức tạp dưới dạng M-file của MATLAB, việc ứng dụng công cụ MATLAB Simulink để vận dụng tối đa các ưu điểm đã kể trên là một giải pháp

hữu hiệu và phù hợp với xu hướng hiện đại. Tại Việt Nam, [1] đã ứng dụng MATLAB Simulink để mô phỏng một cách có hiệu quả các phương trình vi phân động lực học phức tạp của bài toán tương tác kết cấu đất nền dưới tải trọng động đất. Chính vì vậy, trong bài báo này, bằng công cụ MATLAB Simulink, hệ phương trình vi phân chuyển động (15) được mô phỏng bằng sơ đồ với các khối chương trình phụ (Subsystem) được liên kết như hình 4. Trong đó, phép tích phân số được thực hiện thông qua phương pháp

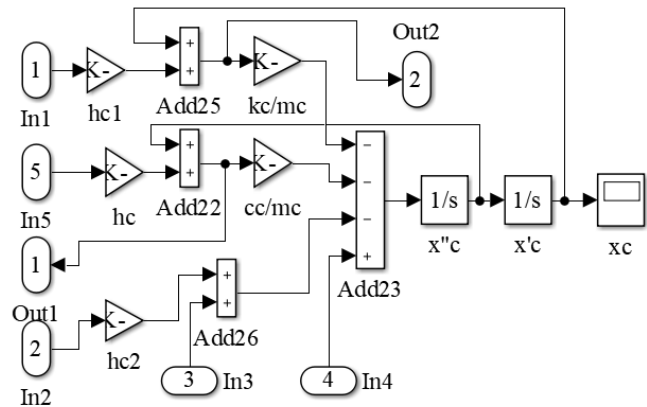
Runge Kutta; theo [23], trong tính toán kết cấu chịu tải trọng động đất theo thời gian, để đảm bảo tính chính xác, bước thời gian Δt nên bé hơn 0,1 s; bài báo chọn $\Delta t = 0,001$ s để thực hiện phân tích. Hình 5 là chương trình phụ, mô phỏng quá trình thực hiện chức năng gọi các giá trị gia tốc động đất theo từng bước thời gian tính toán. Chi tiết các chương trình phụ, tương ứng với mỗi bậc tự do được mô tả trong các phương trình vi phân chuyển động từ (10) đến (14), được mô phỏng như các hình 6-10.



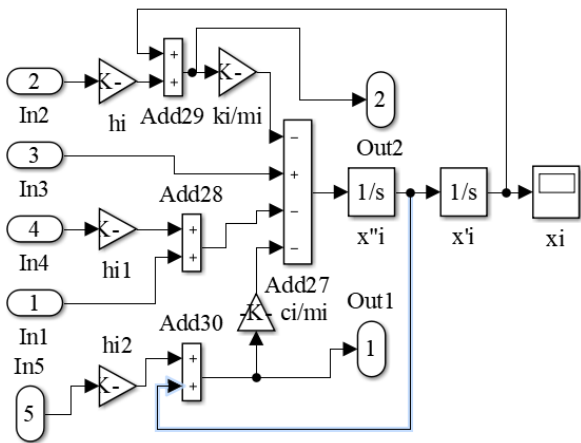
Hình 4. Sơ đồ tích phân hệ phương trình (15) với MATLAB Simulink.



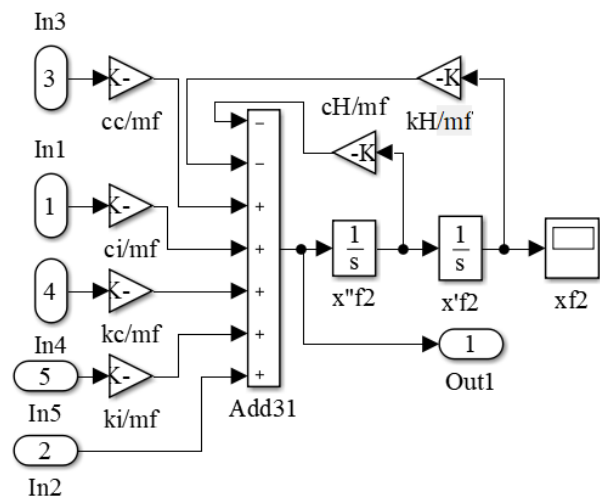
Hình 5. Chi tiết khối Sub_El. Acc.



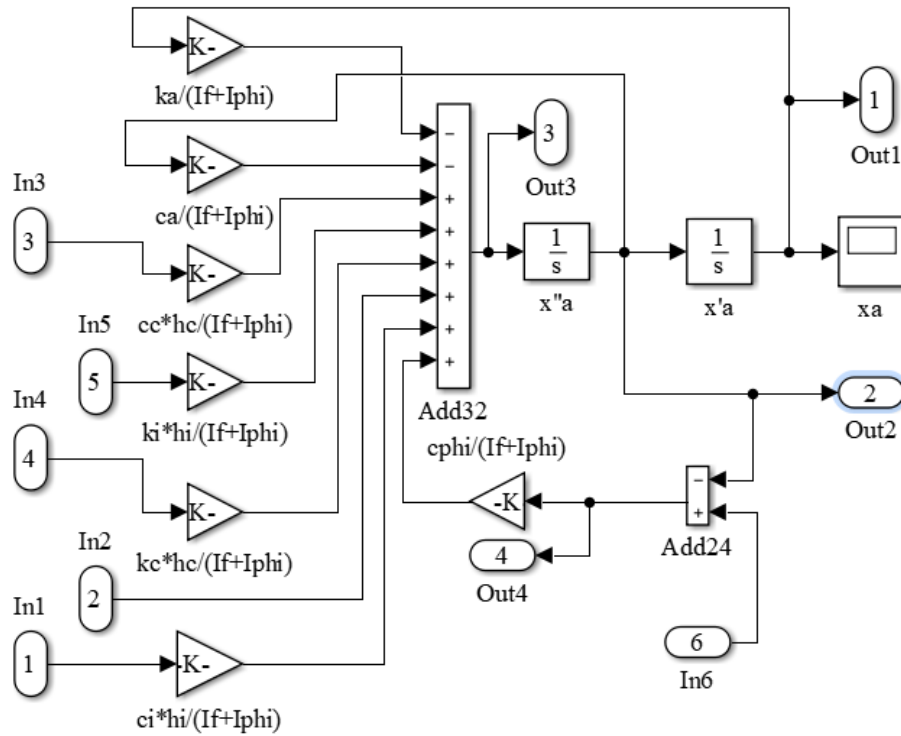
Hình 6. Chi tiết khối Sub_mc.



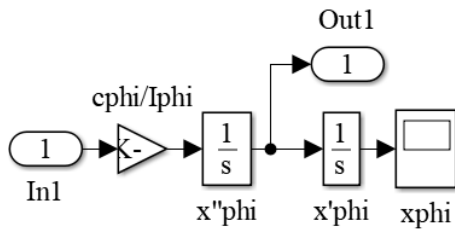
Hình 7. Chi tiết khối Sub_mi.



Hình 8. Chi tiết khối Sub_mf.



Hình 9. Chi tiết khối Sub_I.alpha.

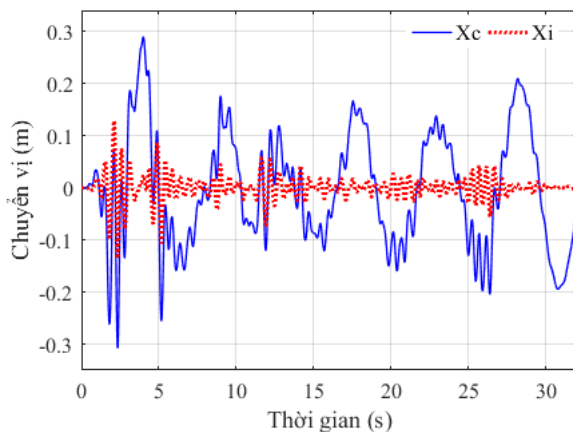


Hình 10. Chi tiết khối Sub_I.phi.

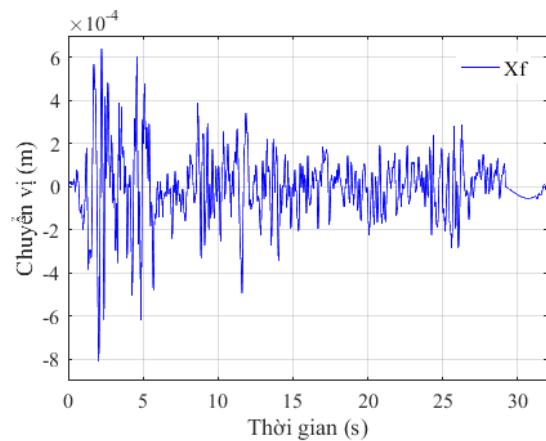
3.3. Kết quả phân tích

Kết quả có được từ mô phỏng số với MATLAB Simulink là các chuyển vị dạng đường và góc xoay của móng tương ứng với các bậc tự do, theo thời gian, như các hình 11 (a)-(c).

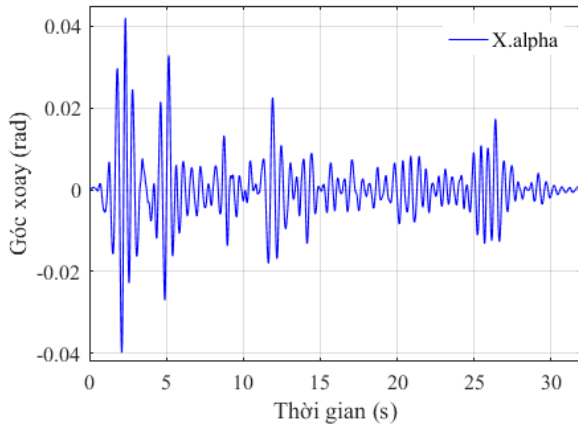
Thay các thông số của bài toán cùng với kết quả mô phỏng vào công thức (16) và (17), biểu đồ lực cắt S và mô men M theo thời gian như hình 11 (d).



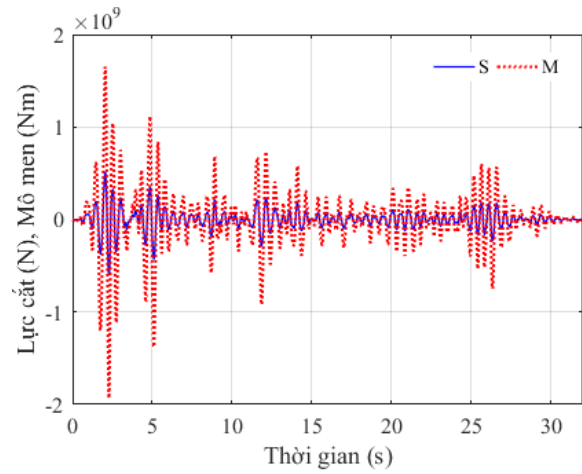
(a) Chuyển vị đối lưu (x_c) và xung kích (x_i).



(b) Chuyển vị móng (x_f).



(c) Chuyển vị góc xoay (x_α).



(d) Lực cắt (S) và mô men tại chân bả (M).

Hình 11. Kết quả phân tích được biểu diễn theo thời gian.

Giá trị cực đại của các chuyển vị, lực cắt và mô men được tổng hợp như cột (2) của bảng 4. Áp dụng công thức (18), giá trị chuyển vị thẳng đứng cực đại của mặt chất lỏng tự do xác định như sau:

$$d = 0,837R \left(\frac{2\pi}{T_c} \right)^2 \frac{(x_c^{max} - x_f^{max})}{g}$$

$$= 0,837 \cdot 11 \cdot \left(\frac{2,3,14}{6,62} \right)^2 \frac{(30,80 - 0,0809)}{9,81}$$

$$= 23,59 \text{ cm}$$

Bảng 4. Tổng hợp giá trị phản ứng cực đại.

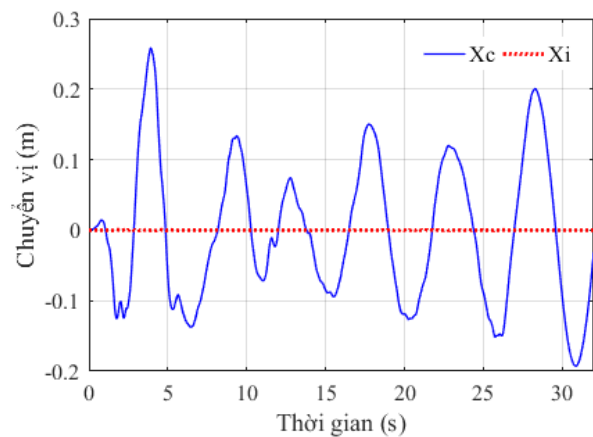
Thông số	Bài báo	Rigid link
(1)	(2)	(3)
x_{cmax} (cm)	30,80	25,80
x_{imax} (cm)	13,57	$69,03 \cdot 10^{-3}$
x_{fmax} (cm)	$80,90 \cdot 10^{-3}$	-
x_{amax} (rad)	$42,04 \cdot 10^{-3}$	-
S_{max} (N)	$5,97 \cdot 10^8$	$3,85 \cdot 10^6$
M_{max} (Nm)	$19,30 \cdot 10^8$	$12,76 \cdot 10^6$
d (cm)	23,59	-

Tiến hành so sánh kết quả phân tích ở trên với trường hợp bả chứa có liên kết cứng và đất nền (Rigid link). Khi đó, mô hình phân tích có dạng như hình 1, hệ hai bậc tự do. Kết quả phân tích chỉ thu được là chuyển vị của khối chất lỏng đối lưu (x_c) và xung kích (x_i), xem tại hình 12. Giá

trị phản ứng cực đại được tổng hợp như cột (3) của bảng 4. Mô hình này chưa xét đến sự làm việc của hệ đất nền và móng khi xảy ra động đất, nên:

(i) Không thu được chuyển vị dạng đường và góc quay của móng, vì vậy, không thể áp dụng công thức (18) để xác định chuyển vị thẳng đứng của mặt chất lỏng tự do;

(ii) Móng xem như liên kết cứng với đất nền, đất nền không chuyển động, chuyển vị của khối chất lỏng xung kích có giá trị rất bé, gần như bằng không; độ lệch giá trị chuyển vị cực đại của khối chất lỏng đối lưu giữa hai mô hình là $\frac{30,80 - 25,80}{30,80} \cdot 100\% = 16,23\%$; trong khi đó, giá trị lực cắt và mô men cực đại tại chân bả bé hơn rất nhiều (bảng 4).



Hình 12. Chuyển vị đối lưu (x_c) và xung kích (x_i) khi chưa xét đến biến dạng nền.

4. Kết luận

Bài báo đã áp dụng phương pháp kết cấu phụ để mô hình hệ bể chứa chất lỏng và đất nền, với năm bậc tự do, dưới dạng thông số tập trung, chịu tải trọng động đất. Đề tích phân số hệ phương trình vi phân chuyển động của hệ, mô phỏng số với MATLAB Simulink. Trong đó, mỗi phương trình vi phân được mô phỏng bằng một chương trình phụ, quá trình mô phỏng được trình bày một cách chi tiết.

Thực hiện phân tích số với bể hình trụ đứng có bán kính 10 m, cột nước cao 8 m, tường bể đồng chất có bề dày 15 mm; bể đặt trên móng nông hình trụ tròn có bán kính 11 m, cao 1,5 m, đất nền là cát chặt dày vô hạn; kích thích nền là gia tốc động đất El Centro 1940. Kết quả số thu được gồm phản ứng của hệ bể chứa chất lỏng và móng: Chuyển vị đường và góc xoay của các bậc tự do theo thời gian, kết hợp với vận tốc của các bậc tự do, suy ra được lực cắt và mô men tại chân bể. Khi so sánh với trường hợp bể có liên kết cứng với đất nền, độ lệch chuyển vị cực đại của khối chất lỏng đối lưu là 16,23%. Trong các nghiên cứu tiếp theo, mô hình kết cấu phụ nên được khảo sát với bài toán phi tuyến và chịu tải trọng động đất theo ba phương, bổ sung thêm so sánh kết quả phân tích với các phương pháp khác, đồng thời, đề xuất khảo sát đến ứng suất biến dạng của thành bể.

Tài liệu tham khảo

- [1] H. V. Quân và N. X. Huy, “*Tương tác kết cấu-đất nền dưới tải trọng động đất, Từ lý thuyết đến thực nghiệm*,” Hà Nội, Việt Nam: NXB GTVT, 2023.
- [2] *Welded Steel Tanks for Oil Storage*, API Standard 650, 11th ed. Washington, D.C., USA: American Petroleum Institute, 2007.
- [3] A. A. Seleemah and M. El-Sharkawy, “Seismic response of base isolated liquid storage ground tanks,” *ASEJ*, vol. 2, no. 1, pp. 33–42, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.asej.2011.05.001.
- [4] A. Rawat, V. A. Matsagar, and A. K. Nagpal, “Numerical study of base-isolated cylindrical liquid storage tanks using coupled acoustic-structural approach,” *Soil D. E. Eng.*, vol. 119, pp. 196-219, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.soildyn.2019.01.005.
- [5] A. Tsipianitis and Y. Tsompanakis, “Optimizing the seismic response of base-isolated liquid storage tanks using swarm intelligence algorithms,” *Comp. Struc.*, vol. 243, pp. 1-13, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.compstruc.2020.106407.
- [6] T. Larkin, “Seismic response of liquid storage tanks incorporating soil structure interaction,” *J. Geo. Geoen. Eng.*, vol. 134, no. 12, pp. 1804-1814, Dec. 2008, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:12(1804).
- [7] T. Larkin, “Earthquake response of liquid storage tanks on layered sites,” in *Soil-foundation-structure interaction*, London, U.K: CRC Press, 2010, pp. 155-161.
- [8] M. Farajian, M. I. Khodakarami, and D. P. N. Kontoni, “Evaluation of soil-structure interaction on the seismic response of liquid storage tanks under earthquake ground motions,” *Computation*, vol. 5, no. 1, pp. 1-17, Mar. 2017, doi: 10.3390/computation5010017.
- [9] K. Bakalis and S. A. Karamanos, “Uplift mechanics of unanchored liquid storage tanks subjected to lateral earthquake loading,” *T. Wal. Struc.*, vol. 158, pp. 1-33, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.tws.2020.107145.
- [10] Y. Lyu, J. Sun, Z. Sun, L. Cui, and Z. Wang, “Simplified mechanical model for seismic design of horizontal storage tank considering soil-tank-liquid interaction,” *O. Eng.*, vol. 198, Feb. 2020, Art. no. 106953, doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.106953.
- [11] F. Khosravikia, M. Mahsuli, and M. A. Ghannad, “The effect of soil-structure interaction on the seismic risk to buildings,” *Bull. Earth. Eng.*, vol. 16, pp. 3653-3673, Jan. 2018, doi: 10.1007/s10518-018-0314-z.
- [12] F. Khosravikia, M. Mahsuli and M. A. Ghannad, “Soil-structure interaction in seismic design code: Risk-based evaluation,” *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, vol. 4, no. 4, Jul. 2018, Art. no. 04018033, doi: 10.1061/AJRUA6.0000984.

- [13] H. V. Quân, “Phân tích tương tác hệ bê chứa-chất lỏng theo phổ phản ứng đàn hồi của tiêu chuẩn TCVN 9386:2012,” *TC KH GTVT*, vol. 73, no. 2, pp. 127-139, Feb. 2022, doi: 10.47869/tcsj.73.2.3.
- [14] H. V. Quân, P. N. Bảy, “Phân tích ứng xử của hệ bê chứa-chất lỏng dưới tải trọng động đất có xét đến biến dạng nền bằng phần tử vĩ mô,” *TC KH GTVT*, vol. 75, no. 8, pp. 833-844, Oct. 2022, doi: 10.47869/tcsj.73.8.7.
- [15] H. V. Quân, “Ảnh hưởng của chiều cao chất lỏng và biến dạng nền đến ứng xử của hệ bê chứa dưới tải trọng động đất tại Việt Nam,” *TC KHCN Đại học Thái Nguyên*, vol. 227, no. 16, pp. 197-206, Nov. 2022, doi: 10.34238/tnu-jst.6649.
- [16] E. Kausel, R.V. Whitman, P.P. Morray, and F. Elsabee, “The spring method for embedded foundations,” *Nuc. Eng. Des.*, vol. 48, pp. 377-392, Aug. 1978, doi: 10.1016/0029-5493(78)90085-7.
- [17] P. W. John, *Dynamic soil-structure interaction*, NJ, USA: Prentice-Hall Inc., 1985.
- [18] G. Gazetas, “Foundation vibrations,” in *Foundation Engineering Handbook*. Boston, MA, US: Springer, 1991, ch. 15, pp. 553-593.
- [19] G. Mylonakis, S. Nikolaoub, and G. Gazetas, “Footings under seismic loading: Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations,” *Soil Dy. Earth. Eng.*, vol. 26, pp. 824–853, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.soildyn.2005.12.005.
- [20] *Soilquake*, Geotechnical/SSI Simulation Tools, Accessed: Jul. 2023. [Online]. Available: <http://www.soilquake.net/>
- [21] R. Zhang, S. Chu, K. Sun, Z. Zhang, and H. Wang, “Effect of the directional components of earthquakes on the seismic behavior of an unanchored steel tank,” *App. Scien.*, vol. 10, no. 16, Art. no. 54892020, doi: 10.3390/app10165489.
- [22] *MATLAB Simulink*, Mathworks. Accessed: Aug. 2023. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>
- [23] A. K. Chopra, “*Dynamics of structures*,” NJ, USA: Prentice-Hall, 1995.