



SEISMIC ANALYSIS OF LIQUID-STORAGE TANK CONSIDERING SOIL-STRUCTURE INTERACTION WITH MACRO ELEMENT

Huynh Van Quan*, Pham Ngoc Bay

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 08/02/2022

Revised: 22/03/2022

Accepted: 19/04/2022

Published online: 15/10/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.73.8.7>

* *Corresponding author*

Email: quanhv_ph@utc.edu.vn; Tel: +84986503205

Abstract. Under earthquake ground shaking, the soil which supports the foundation will be deformed in order to comprise non-linearities of foundation and soil system: the uplift as the footing may get detached from the soil and/or soil yielding in the vicinity of the footing. This paper improves the lumped parameter model of the API 650 specification by considering soil-structure interaction (SSI). In the proposed model, the entire foundation-soil system is replaced by a single element called a macro element, which would help with huge reductions in computational cost. Seismic analysis of the liquid-storage tank system considering SSI is carried out with ground earthquake of El-Centro (1940) and intensities of TCVN 9386:2012 specification. This paper results help to observe the responses progressing over time and greater than 10% errors; on the other hand, this approach may help considerably in showing the influence of SSI.

Keywords: liquid-storage tank, macro element, seismic loading, soil-structure interaction, Newmark's method.



PHÂN TÍCH ỨNG XỬ CỦA HỆ BỂ CHỨA-CHẤT LỎNG DƯỚI TẢI TRỌNG ĐỘNG ĐẤT CÓ XÉT ĐẾN BIẾN DẠNG NỀN BẰNG PHẦN TỬ VĨ MÔ

Huỳnh Văn Quân*, Phạm Ngọc Bẩy

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 08/02/2022

Ngày nhận bài sửa: 22/03/2022

Ngày chấp nhận đăng: 21/04/2022

Ngày xuất bản Online: 15/10/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.73.8.7>

* Tác giả liên hệ

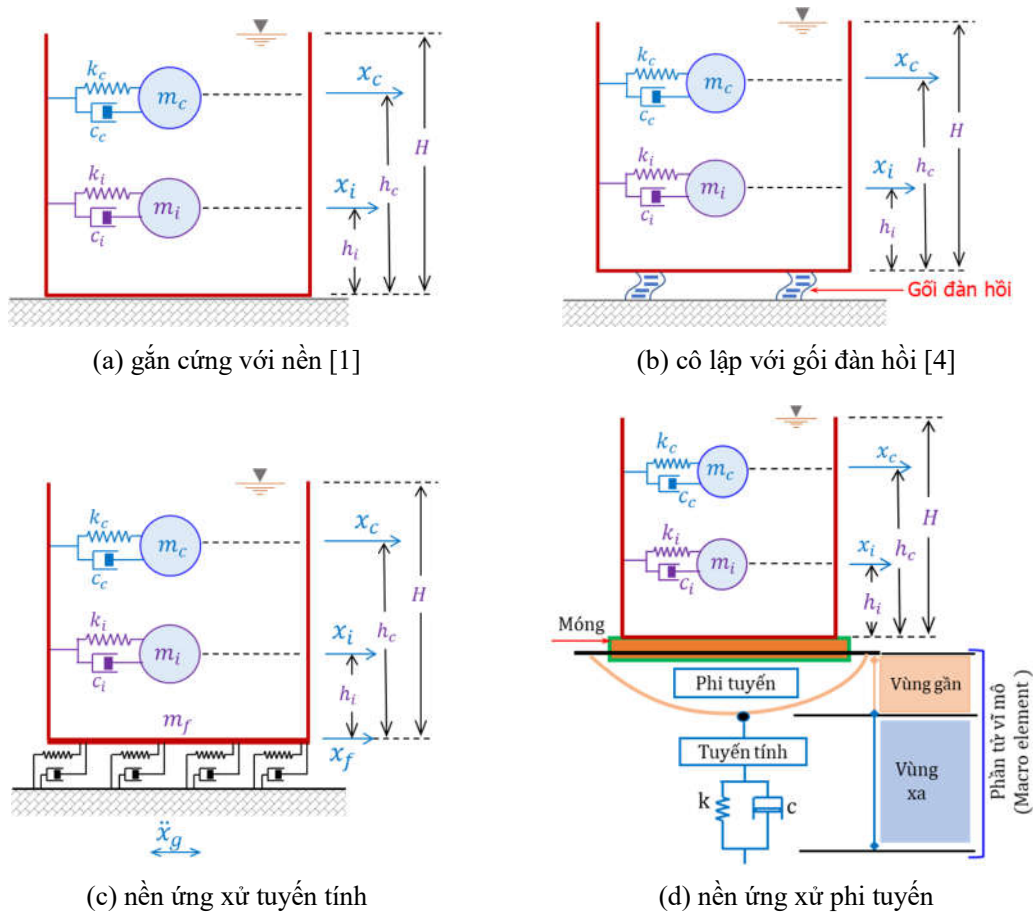
Email: quanhv_ph@utc.edu.vn; Tel: +84986503205

Tóm tắt. Dưới tác dụng lặp của tải trọng động đất, phần đất nền xung quanh móng sẽ biến dạng, có thể làm móng tách khỏi mặt tiếp xúc với nền đất (phi tuyến hình học) và/hoặc tính chất của đất thay đổi dẫn đến xuất hiện phi tuyến vật liệu. Bài báo cải tiến mô hình phân tích hệ bể chứa-chất lỏng dạng thông số tập trung của tiêu chuẩn API 650 dưới tải trọng động đất bằng cách xét đến tương tác kết cấu-đất nền (SSI) giúp ứng xử của hệ gần với thực tế. Trong đó, hệ móng-đất nền được thay bằng một mô hình tiên tiến là phần tử vĩ mô (macro element) nên bài toán được đơn giản hóa nhưng vẫn đảm bảo tính chính xác. Mô hình đề xuất gồm chất lỏng, bể chứa, móng và đất nền sẽ được phân tích dưới tải trọng động đất El-Centro (1940) với gia tốc đỉnh tra theo tiêu chuẩn TCVN 9386:2012. Kết quả phân tích được biểu diễn theo thời gian giúp quan sát diễn tiến của phản ứng so với chỉ thu được giá trị cực đại của tiêu chuẩn API 650 và độ lệch các giá trị phản ứng cực đại giữa hai phương pháp đều lớn hơn 10% đã phần nào thể hiện ảnh hưởng của việc xét đến SSI.

Từ khóa: bể chứa-chất lỏng, phần tử vĩ mô, tải trọng động, tương tác kết cấu-đất nền, phương pháp Newmark.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

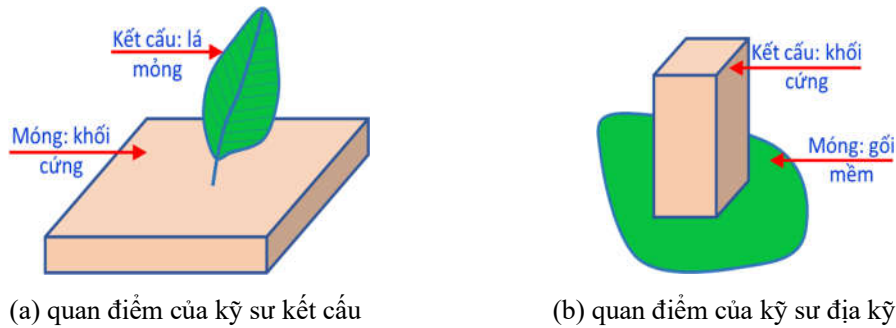
Do đặc thù vận chuyển nên các bể chứa chất lỏng (bể) như xăng dầu, hóa chất, ... thường được đặt trong các cảng biển ven bờ hoặc trong các khu chế xuất với xung quanh là các công trình quan trọng. Bất kỳ sự cố nào cũng gây ra tác hại lớn đến môi trường và thiệt hại về kinh tế. Dưới tác dụng của tải trọng động đất, chất lỏng cùng với tường bể sẽ chuyển động, làm phát sinh lực động và gây ra các hư hỏng tại chân bể, đỉnh bể hoặc phá hoại hoàn toàn [1-3]. Nghiên cứu ứng xử động giữa chất lỏng và thành bể dưới dạng thông số tập trung đã được nhiều tác giả thực hiện [4-9]. Kết quả nghiên cứu được tổng kết và đưa vào quy trình tính toán giản đơn của của tiêu chuẩn quốc gia Mỹ-API 650 [1]. Tiêu chuẩn này được [10] đề xuất áp dụng trong điều kiện Việt Nam theo phổ phản ứng đàn hồi TCVN 9386:2012. Tuy nhiên, các mô hình này chưa xét đến biến dạng nền nên nên liên kết giữa bể chứa và nền đất có dạng như Hình 1(a, b).



Hình 1. Các mô hình liên kết bể chứa với nền đất.

Theo quan điểm của các kỹ sư kết cấu, bằng các giải pháp thiết kế, móng được chôn vào nền đất nên độ cứng hệ móng-đất nền rất lớn; trong khi kết cấu có độ cứng rất bé nên được xem như một lá mỏng như hình 2(a). Theo quan điểm của các kỹ sư địa kỹ thuật, kết cấu được chủ động chế tạo để đủ khả năng chịu lực nên có độ cứng rất lớn trong khi móng đặt trên nền đất nên được xem như một gối mềm như hình 2(b). Với quan điểm kết cấu được xem như lá mỏng

hoặc nền móng như gói mềm, các kỹ sư đã chú tâm đến độ cứng từng bộ phận công trình thiết kế. Nếu một chuyển động rất bé cũng ảnh hưởng đến ứng xử của lá móng hoặc một số gia về lực cũng ảnh hưởng đến gói mềm [11]. Chính vì vậy, phân tích bài toán SSI dưới tải trọng động đất là cần thiết.



Hình 2. Quan điểm về tương quan giữa độ cứng kết cấu và móng [11].

Để xét đến ảnh hưởng của biến dạng nền, một số tác giả đã phân tích bài toán SSI bằng cách xét đồng thời hệ chất lỏng-bể chứa-móng-đất nền. Trong đó, móng và nền đất được thay thế bằng các lò xo làm việc tuyến tính như Hình 1(c) [12-14]. Với các trận động đất có cường độ khá lớn, công trình bị rung lắc mạnh, làm đất nền bị biến dạng: một phần diện tích móng có thể tách khỏi nền đất (phi tuyến hình học) và/hoặc tính chất của đất xung quanh móng bị thay đổi (phi tuyến vật liệu). Trong thực tế, móng bê có diện tích khá lớn và được neo vào nền đất nên khả năng xuất hiện phi tuyến hình học là rất thấp. Như đã biết, với phương pháp phân tử hữu hạn, bài toán khi kể đến phi tuyến đất nền sẽ tiêu tốn khá nhiều công sức và tính chính xác của kết quả phân tích còn phụ thuộc vào năng lực mô hình.

Ngày nay, phương pháp lai (hybrid method) được dùng để mô hình toàn bộ hệ móng-nền đất thành một phần tử giản đơn gọi là phần tử vĩ mô, giúp giảm đáng kể khối lượng tính toán nhưng đảm bảo ứng xử của hệ gắn với điều kiện làm việc thực tế [11]. Phần tử vĩ mô áp dụng vào bài toán phân tích bể chứa-chất lỏng có dạng như Hình 1(d), nội dung mô hình phần tử vĩ mô đã được [11] trình bày khá hoàn chỉnh, bài báo này chỉ trình bày một cách ngắn gọn trong mục 2.1. Độ chính xác của mô hình phần tử vĩ mô đã được các tác giả trên thế giới như [15-18] và trong nước như [11,19] kiểm chứng bằng lý thuyết và thực nghiệm. Do đó, bài báo ứng dụng mô hình phần tử vĩ mô của các tác giả vào mô hình đề xuất mà không thực hiện kiểm chứng lại.

Trong bài báo này, mô hình tổng thể của bài toán SSI gồm chất lỏng-bể chứa-móng-đất nền chịu tác dụng của tải trọng động đất sẽ được khảo sát. Trong đó, bể chứa có dạng hình trụ đứng, đặt trên mặt đất (bể nổi) được mô hình dưới dạng thông số tập trung của tiêu chuẩn API 650; hệ móng (nông)-đất nền được mô hình bằng phần tử vĩ mô với phi tuyến vật liệu đất nền; tải trọng tác dụng là gia tốc động đất theo thời gian El-Centro (1940). Bên cạnh kết quả phân tích theo thời gian thì giá trị phản ứng cực đại từ mô hình đề xuất sẽ được so sánh với kết quả tính toán theo tiêu chuẩn API 650 với gia tốc nền của tiêu chuẩn TCVN 9386:2012 để làm rõ ảnh hưởng của biến dạng nền đến ứng xử của hệ.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU

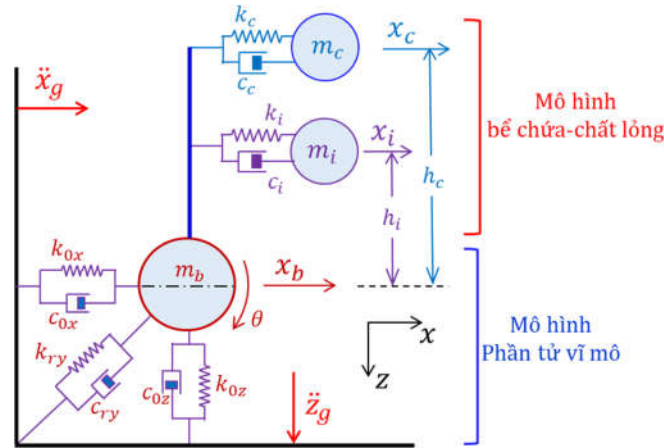
2.1. Mô hình hệ đất nền-móng

Phần tử vĩ mô cho phép thay toàn bộ hệ móng-đất nền bằng một phần tử đơn đặt tại chân kết cấu. Đất nền dưới móng được phân chia thành hai vùng, hình 1(d): vùng gần là phần diện tích đất ở lân cận móng, chứa các ứng xử phi tuyến hình học và vật liệu của tương tác móng-đất nền, vùng này chưa xét đến tính cản nhót của đất nên chỉ được mô hình bằng lò xo phi tuyến; vùng xa là vùng có vị trí khá xa so với móng tính từ vị trí mà phi tuyến của hệ móng-đất nền được bỏ qua, ứng xử của đất là tuyến tính, được mô hình bằng hệ lò xo và thiết bị cản nhót tuyến tính song song nhau. Phần tử vĩ mô thay thế toàn bộ hai vùng này, nên chứa các ứng xử tuyến tính của đất trong vùng xa và các ứng xử phi tuyến của hệ móng-đất nền trong vùng gần. Phần tử vĩ mô có liên kết là các lò xo, vật cản nhót và các chuyển vị như Hình 3. Như đã đề cập, để phù hợp với bài toán nghiên cứu, bài báo áp dụng mô hình phần tử vĩ mô xét đến phi tuyến tính chất vật liệu đất nền [17,19].

Véc-tơ phản lực và chuyển vị của phần tử vĩ mô: $\mathbf{F} = \{V \ M \ N\}^T$ và $\mathbf{u} = \{x_b \ \theta \ z\}^T$; trong đó, N , V và M là lực theo phương thẳng đứng, phương ngang và mô-men thu gọn; z , x_b và θ là chuyển vị theo phương đứng, ngang và góc xoay của móng. Ma trận độ cứng và ma trận cản nhót của phần tử vĩ mô có dạng đường chéo chính: $\mathbf{K}^{b0} = \text{diag}(k_{0x}, k_{ry}, k_{0z})$ và $\mathbf{C}^{b0} = \text{diag}(c_{0x}, c_{ry}, c_{0z})$; với (k_{0z}, k_{0x}, k_{ry}) và (c_{0z}, c_{0x}, c_{ry}) là giá trị độ cứng đàn hồi và hệ số cản nhót tương đương của hệ móng-đất nền theo phương đứng, phương ngang và góc xoay. Với phản ứng tuyến tính, các giá trị này được xác định theo [18,20]. Tại từng thời điểm, tùy thuộc vào giá trị độ lớn của véc-tơ phản lực nền \mathbf{F} mà ảnh hưởng của phi tuyến vật liệu đến ma trận độ cứng \mathbf{K}^b xác định theo một trong hai trường hợp sau [15]: nếu $f(\mathbf{F}) < 0$ hoặc $[f(\mathbf{F}) = 0$ và $df(\mathbf{F}) < 0]$ thì phản ứng của hệ là tuyến tính, $\mathbf{K}^b = \mathbf{K}^{b0}$; nếu $f(\mathbf{F}) \geq 0$ và $df(\mathbf{F}) \geq 0$ chảy dẻo sẽ xuất hiện, đất nền phản ứng phi tuyến, \mathbf{K}^b bị triệt giảm một lượng $d\mathbf{K}^b = \mathbf{K}^{b0} \left(\frac{\partial g}{\partial \mathbf{F}}\right) \left(\frac{\partial f}{\partial \mathbf{F}}\right)^T \mathbf{K}^{b0} \left[\left(\frac{\partial f}{\partial \mathbf{F}}\right)^T \mathbf{K}^{b0} \left(\frac{\partial g}{\partial \mathbf{F}}\right)\right]^{-1} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{F}}, \frac{\partial g}{\partial \mathbf{F}}$ là đạo hàm riêng của hàm dẻo và quy tắc chảy; hàm dẻo $f(\mathbf{F}) = h^2 + m^2 - v^2(1 - v)^{2\xi}$, quy tắc chảy $g(\mathbf{F}) = \lambda^2 h^2 + \chi^2 m^2 + v^2$ [16,17]. Ký hiệu $h = V^F / \mu N_{max}$, $m = M^F / \psi D_b N_{max}$, $v = N^F / N_{max}$, N_{max} là phản lực cực đại theo phương đứng, D_b là đường kính móng; ψ , μ , ξ , λ , χ là các tham số, lấy theo [17].

2.2. Mô hình hệ bể chứa-chất lỏng

Theo tiêu chuẩn API 650 của Mỹ [21], dưới tác dụng của tải trọng động đất, chất lỏng trong bể, khối lượng m , chuyển động theo các dạng: phần chất lỏng phía trên đỉnh thùng, khối lượng m_c , cùng với mặt tự do sẽ chuyển động dạng đối lưu (convective mode); phần chất lỏng phía dưới, khối lượng m_i , chuyển động dạng xung kích (impulsive mode); được mô hình dưới dạng khối lượng tập trung chuyển động cùng với tường bể, (Hình 3). Giá trị m_c và h_c xác định theo công thức (1), tùy thuộc vào tỷ số giữa đường kính bể và chiều cao chất lỏng mà m_i và h_i xác định theo (2) hoặc (3). Trong đó, D , R và H tương ứng là đường kính, bán kính và chiều cao chất lỏng trong bể. Các thành phần khối lượng liên kết với tường bể bằng các lò xo có độ cứng và hệ số cản nhót tương đương: $k_c = m_c \omega_c^2$, $k_i = m_i \omega_i^2$ và $c_c = 2\xi_c m_c \omega_c$, $c_i = 2\xi_i m_i \omega_i$.



Hình 3. Mô hình phân tích tổng thể hệ chất lỏng-bể chứa-móng-đất nền.

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

Trường hợp $D/H \geq 1,333$ (bể rộng):

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

Trường hợp $D/H < 1,333$ (bể mảnh):

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

2.3. Thành lập phương trình vi phân chuyển động cho mô hình đề xuất

Trên cơ sở mô hình hệ móng-đất nền bằng phần tử vĩ mô và mô hình hệ bể chứa-chất lỏng dạng thông số tập trung đã được đề cập, bài báo đề xuất mô hình phân tích tổng thể hệ chất lỏng-bể chứa-móng-đất nền dưới tải trọng động đất như Hình 3. Mô hình này có năm bậc tự do: 3 bậc tự do chuyển động theo phương ngang (x_c, x_i, x_b) của khối lượng chất lỏng m_c, m_i và khối lượng móng m_b ; 1 bậc tự do chuyển động theo phương đứng (z) và 1 bậc tự do chuyển động góc xoay (θ). Áp dụng nguyên lý Đa-lam-be, hệ phương trình vi phân chuyển động chịu tác dụng của gia tốc nền \ddot{x}_g và \ddot{z}_g như các công thức (4)-(8), viết dưới dạng véc-tơ thu gọn như công thức (9).

$$m_c(\ddot{x}_c + \ddot{x}_b + h_c\ddot{\theta}) + c_c(\dot{x}_c + h_c\dot{\theta}) + k_c(x_c + h_c\theta) = m_c\ddot{x}_g \quad (4)$$

$$m_i(\ddot{x}_i + \ddot{x}_b + h_i\ddot{\theta}) + c_i(\dot{x}_i + h_i\dot{\theta}) + k_i(x_i + h_i\theta) = m_i\ddot{x}_g \quad (5)$$

$$m_b\ddot{x}_b - c_c(\dot{x}_c + h_c\dot{\theta}) - c_i(\dot{x}_i + h_i\dot{\theta}) + c_{0x}\dot{x}_b - k_c(x_c + h_c\theta) - k_i(x_i + h_i\theta) + V = m_b\ddot{x}_g \quad (6)$$

$$J\ddot{\theta} - c_c h_c (\dot{x}_c + h_c \dot{\theta}) - c_i h_i (\dot{x}_i + h_i \dot{\theta}) + c_{ry} \dot{\theta} - k_c h_c (x_c + h_c \theta) - k_i h_i (x_i + h_i \theta) + M = 0 \quad (7)$$

$$(m_c + m_i + m_b)\ddot{z} + c_{0z}\dot{z} + N = (m_c + m_i + m_b)\ddot{z}_g \quad (8)$$

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}^S \mathbf{x} + \mathbf{F}^F = \mathbf{p} \quad (9)$$

Trong đó: J là tổng mô-men quán tính khối lượng của hệ đối với tâm phân tử vĩ mô, $\mathbf{x} = \{x_c \ x_i \ x_b \ \theta \ z\}^T$, $\mathbf{F}^F = [0 \ 0 \ V \ M \ N]^T$,

$$\mathbf{p} = [m_c \ddot{x}_g \ m_i \ddot{x}_g \ m_b \ddot{x}_g \ 0 \ (m_c + m_i + m_b)\ddot{z}_g]^T,$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_c & 0 & m_c & m_c h_c & 0 \\ 0 & m_i & m_i & m_i h_i & 0 \\ 0 & 0 & m_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (m_c + m_i + m_b) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_c & 0 & 0 & c_c h_c & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_i h_i & 0 \\ -c_c & -c_i & c_{0x} & (-c_c h_c - c_i h_i) & 0 \\ -c_c h_c & -c_i h_i & 0 & (-c_c h_c^2 - c_i h_i^2 + c_{ry}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{0z} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K}^S = \begin{bmatrix} k_c & 0 & 0 & k_c h_c & 0 \\ 0 & k_i & 0 & k_i h_i & 0 \\ -k_c & -k_i & 0 & (-k_c h_c - k_i h_i) & 0 \\ -k_c h_c & -k_i h_i & 0 & (-k_c h_c^2 - k_i h_i^2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

3. KẾT QUẢ PHÂN TÍCH SỐ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Mô tả bài toán nghiên cứu

Trong ví dụ này, các yếu tố đặc trưng của bể chứa và chất lỏng được tập hợp trong Bảng 1 [2]. Bể chứa: đặt trên mặt đất, hình trụ đứng, bán kính $R = 10$ m, làm từ vật liệu thép, tổng chiều cao 9,6 m. Chất lỏng: là nước, chiều cao $H = 8$ m, khối lượng $m = 2,512 \cdot 10^6$ kg. Tường bể: ghép từ 4 phân đoạn với mỗi phân đoạn cao 2,4 m, bể dày trung bình 9,68 mm. Bể chứa được đặt trên móng nông hình trụ tròn làm bằng vật liệu bê tông cốt thép, bán kính móng $R_b = R + 1 = 10 + 1 = 11$ m [22], chiều cao móng 1,0 m, khối lượng móng $m_b = 0,8 \cdot 10^6$ kg. Địa chất đất nền có bề dày $H_s = 25$ m đến tầng đá gốc, vận tốc sóng cắt $V_s = 255$ m/s, hệ số Poát-xông $\nu = 0,4$, khối lượng đơn vị $\rho = 2,1 \cdot 10^3$ kg/m³. Khối lượng của tường và mái bể khá bé so với khối lượng của chất lỏng và móng nên chưa được kể đến trong nghiên cứu này. Theo [18,20], các thông số về tính cản, đàn hồi tương đương của phần tử vĩ mô xác định như sau:

$$G = \rho V_s^2 = 2,1 \cdot 10^3 \cdot 255^2 = 136,55 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$k_{0x} = \frac{8GR_b}{2-\nu} \left(1 + 0,5 \frac{R_b}{H_s}\right) = \frac{8 \cdot 136,55 \cdot 10^6 \cdot 11}{2-0,4} \left(1 + \frac{0,5 \cdot 11}{25}\right) = 9,16 \cdot 10^9 \text{ N/m}$$

$$k_{0z} = \frac{4GR_b}{1-\nu} \left(1 + 1,3 \frac{R_b}{H_s}\right) = \frac{4 \cdot 136,55 \cdot 10^6 \cdot 11}{1-0,4} \left(1 + \frac{1,3 \cdot 11}{25}\right) = 15,74 \cdot 10^9 \text{ N/m}$$

$$k_{ry} = \frac{8GR_b}{3(1-\nu)} \left(1 + 0,17 \frac{R_b}{H_s}\right) = \frac{8.136,55.10^6.11}{3(1-0,4)} \left(1 + \frac{0,17.11}{25}\right) = 7,18. 10^9 \text{ Nm/rad}$$

$$c_{0x} = \rho V_s \pi R_b^2 = 2,1. 10^3. 255.3,14. 11^2 = 0,2. 10^9 \text{ Nsm}$$

$$c_{0z} = \frac{\rho 3,4 V_s R_b^2}{1-\nu} = \frac{2,1.10^3.3,4.255.11^2}{1-0,4} = 0,37. 10^9 \text{ Nsm}$$

$$c_{ry} = \frac{\rho 3,4 V_s R_b^4}{4(1-\nu)} = \frac{2,1.10^3.3,4.255.11^4}{4(1-0,4)} = 11,11. 10^9 \text{ Nsm/rad}$$

Bảng 1. Các yếu tố đặc trưng của bê chứa và chất lỏng [2].

H/R	m (kg)	m_i (kg)	m_c (kg)	T_i (s)	T_c (s)	h_i (m)	h_c (m)
0,8	$2,51.10^6$	$1,15.10^6$	$1,36.10^6$	0,123	4,96	3,23	4,66

3.2. So sánh kết quả với tiêu chuẩn API 650

Phương trình vi phân chuyển động (9) được tích phân từng bước theo phương pháp Newmark có dạng như phương trình (10) [11]. Vì hệ nhiều bậc tự do nên phương trình được giải theo phương pháp gia tốc trung bình, $\gamma = 1/2$ và $\beta = 1/4$ [23]. Để đảm bảo độ ổn định, tỷ số giữa bước thời gian Δt và chu kỳ dao động T_j có giới hạn $\Delta t/T_j = 1/\pi \leq 0,1$, ví dụ này thực hiện với tải trọng động đất nên $\Delta t = 0,02$ s [24]. Tại bước tính toán thứ k , nếu xảy ra phi tuyến tương tác hệ móng-đất nền, phương pháp Newton-Raphson hiệu chỉnh sẽ được khởi động, chọn 100 bước trong từng vòng lặp ($i = 1 \div 100$), hệ nhiều bậc tự do nên giá trị chuyển vị được chấp nhận khi thỏa mãn điều kiện $\frac{[\Delta R^i]^T \Delta u^i}{[\Delta \hat{p}_j]^T \Delta u} < \epsilon$. Trong đó, ΔR^i là véc-tơ lực hồi phục, Δu^i là số gia chuyển vị, $\Delta \hat{p}_j$ là lực tác dụng và Δu là tổng véc-tơ số gia chuyển vị hiện tại trong vòng lặp Newmark; ϵ là sai số cho phép, chọn $\epsilon = 10^{-5}$ [23].

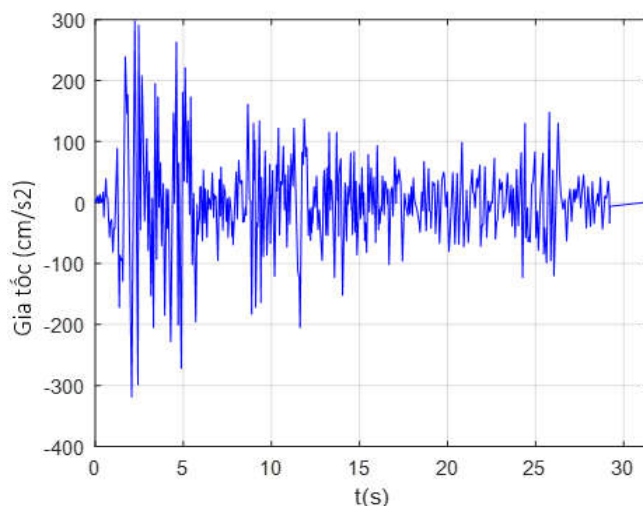
$$\left[\frac{M}{\beta(\Delta t)^2} + \frac{C\gamma}{\beta\Delta t} + K^S \right] \mathbf{x}_{n+1} + \mathbf{F}_{n+1}(\mathbf{x}_{n+1}) = \mathbf{p}_{n+1} + \mathbf{M} \left[\frac{1-2\beta}{2\beta} \ddot{\mathbf{x}}_n + \frac{\dot{\mathbf{x}}_n \Delta t + \mathbf{x}_n}{\beta(\Delta t)^2} \right] + \mathbf{C} \left[\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \dot{\mathbf{x}}_n \Delta t + \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1 \right) \mathbf{u}_n + \frac{\gamma}{\beta\Delta t} \mathbf{x}_n \right] \quad (10)$$

Thay các giá trị của Bảng 1 và các thông số tương đương của hệ móng-đất nền vào phương trình (10), tải trọng động đất El-Centro (1940) theo thời gian (xét 31 s đầu tiên) theo phương ngang như hình 4 [25], gia tốc đỉnh tra theo TCVN 9386:2012 tại hai địa danh có cường độ lớn nhất của cả nước là thị xã Sơn La ($a_g = 0,1893g$) và huyện Mường Lay ($a_g = 0,1516g$), hệ số tầm quan trọng $\gamma_I = 1,25$ [26]. Theo API 650, các phản ứng được chú tâm trong nghiên cứu bê chứa-chất lỏng là mô men (M), lực cắt tại chân bê (Q) và chuyển vị thẳng đứng cực đại (d) của bề mặt chất lỏng do hiện tượng đập dềnh của mặt tự do. Các phản ứng này được suy ra từ kết quả phân tích theo các công thức 11-13 của [14]. Với $\omega_c = c_c/(2\xi_c m_c)$, tỷ số cản nhớt $\xi_c = 0,5\%$ [27], g là gia tốc trọng trường; x_b^{max} và x_c^{max} là chuyển vị ngang cực đại của móng và khối chất lỏng chuyển động đôi lưu.

$$Q = k_c x_c + c_c \dot{x}_c + k_i x_i + c_c \dot{x}_i \quad (11)$$

$$M = (k_c x_c + c_c \dot{x}_c) h_c + (k_i x_i + c_c \dot{x}_i) h_i \quad (12)$$

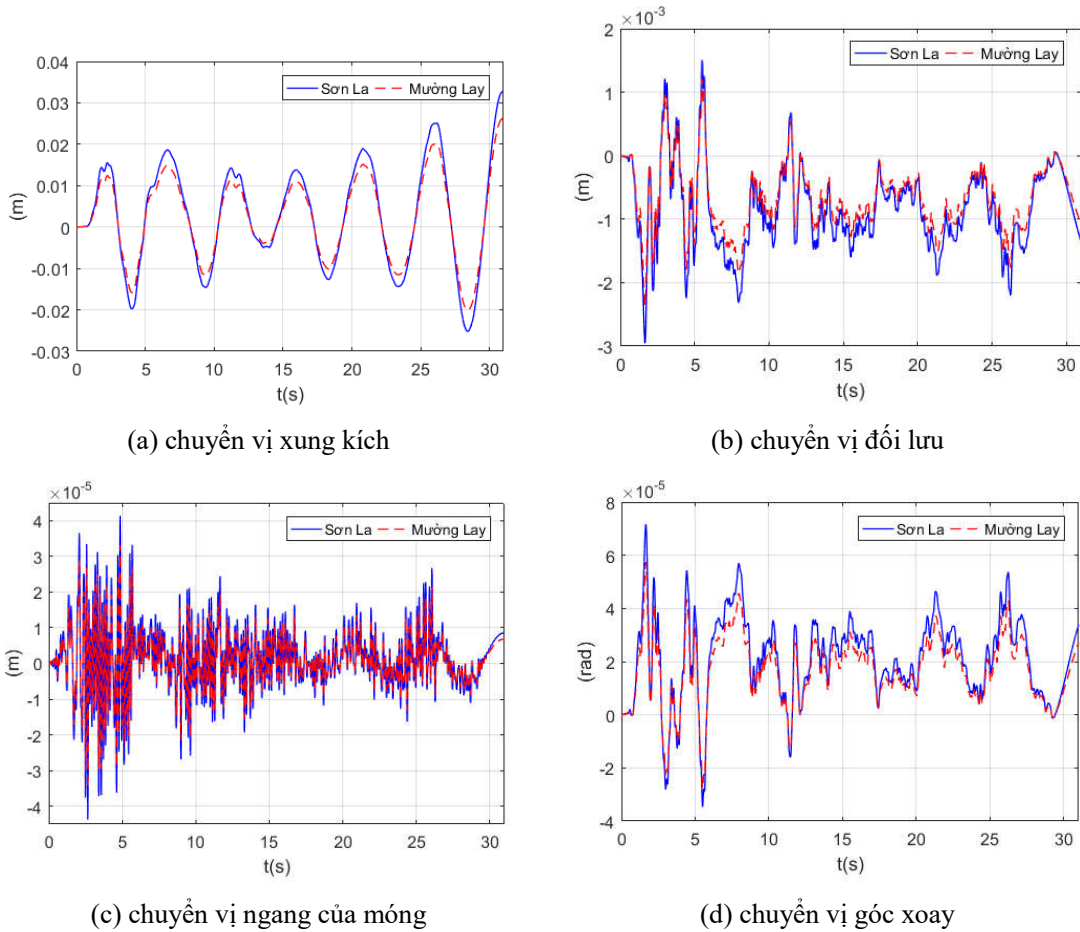
$$d = 0,837R \frac{\omega_c^2 (x_c^{max} - x_b^{max})}{g} \quad (13)$$



Hình 4. Gia tốc động đất El-Centro (1940) [25].

Kết quả phân tích, các biểu đồ phản ứng theo thời gian, của hệ được trình bày trong Hình 5. Các biểu đồ trên Hình 5(a-c) có tần số giảm dần từ móng đến các bậc tự do bên trên, kết quả này phù hợp với thực tế vì móng hấp thụ trực tiếp năng lượng động đất sau đó lan truyền đến đỉnh thùng. Ngoài ra, biểu đồ đã thể hiện rõ ảnh hưởng của độ lớn gia tốc nền đến phản ứng của hệ: các phản ứng với gia tốc nền tại Sơn La luôn lớn hơn tại Mường Lay. Trong Hình 5(a), chuyển vị ngang tại thời điểm 31 s của khối chất lỏng dao động đối lưu vẫn còn giá trị rất lớn trong khi tải trọng kích thích động đất đang giảm dần, điều này thể hiện sự nguy hiểm do động đất gây ra đến dao động ngang của đỉnh bê. Quá trình thực hiện phân tích với phương pháp đề xuất của bài báo khá phù hợp với kết quả đã được [11,19] kết luận: với cấu hình máy tính cá nhân thông dụng, thời gian để thực hiện theo phương pháp của bài báo chỉ tiêu tốn từ 15 s đến 20 s phân tích để có số liệu.

Bảng 2 so sánh giá trị phản ứng cực đại từ mô hình đề xuất với kết quả tính toán theo trình tự của tiêu chuẩn API 650. Về độ lệch giữa hai phương pháp: đối với mô-men M và lực cắt Q tại hai địa danh có giá trị gần tương đương nhau; đối với chuyển vị thẳng đứng của mặt chất lỏng tự do giữa hai phương pháp có độ lệch gần 2%, tại thị xã Sơn La là 16,270%, tại huyện Mường Lay là 14,602%. Như vậy, độ lớn gia tốc nền có ảnh hưởng đến tỷ lệ độ lệch giữa hai phương pháp. Về giá trị độ lớn của các phản ứng: việc xét đến biến dạng nền làm giảm phản ứng mô-men và lực cắt nhưng lại làm tăng chuyển vị thẳng đứng của mặt chất lỏng tự do. Theo tác giả, giữa hai phương pháp có giá trị lệch nhau khá xa như Bảng 2 là do phân tích theo phương pháp API 650 chưa xét đến biến dạng nền, điều này đã thể hiện ý nghĩa của mô hình đề xuất nghiên cứu.



Hình 5. Một số phản ứng của hệ theo thời gian.

Bảng 2. So sánh giá trị phản ứng cực đại giữa phương pháp đề xuất với tiêu chuẩn API 650.

Đại lượng	Tại thị xã Sơn La			Tại huyện Mường Lay		
	API 650 [10]	Mô hình đề xuất	Độ lệch (%)	API 650 [10]	Mô hình đề xuất	Độ lệch (%)
Q (MN)	10,29	8,90	-13,487	8,24	7,13	-13,479
M (MNm)	35,86	28,70	-19,976	28,72	22,98	-19,981
d (m)	0,048	0,056	16,270	0,039	0,045	14,602

Kết quả nghiên cứu ở Bảng 2 cũng chỉ mới dừng lại ở hai gia tốc nền khác nhau cũng như mới chỉ khảo sát ở một độ cứng nền tương đương (loại đất, bề dày lớp đất địa chất đặt móng) nên cần có các nghiên cứu bổ sung để có các nhận xét tiếp theo về tính chính xác của mô hình đề xuất từ đó có những kiến nghị đến quy trình tính toán của tiêu chuẩn API 650.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã thực hiện đã đề xuất mô hình phân tích tương tác hệ bể chứa-chất lỏng có xét đến biến dạng nền dưới tải trọng động đất. Trong đó, hệ móng-đất nền được thay thế bằng phần tử vĩ mô xét đến phi tuyến vật liệu, tải trọng là gia tốc động đất El-Centro (1940) theo phương ngang với gia tốc đỉnh tra theo tiêu chuẩn TCVN 9386:2012. Kết quả phân tích được so sánh với trường hợp tính toán với quy trình giản đơn của tiêu chuẩn API 650. Với hai trường hợp ví dụ đã khảo sát, độ lệch giá trị cực đại phản ứng dạng mô-men, lực cắt tại chân kết cấu và dao động thẳng đứng của mặt chất lỏng tự do giữa hai phương pháp luôn lớn hơn 10% và bé hơn 20%. Độ lệch này có thể giải thích là do mô hình đề xuất đã xét đến biến dạng nền, trong khi tiêu chuẩn API coi mô hình gắn cứng với nền đất. Qua đây cho thấy sự cần thiết phải xét đến biến dạng nền khi phân tích ứng xử hệ bể chứa-chất lỏng vì giá trị cực đại mô-men và lực cắt trong mô hình đề xuất giảm nhưng chuyển vị thẳng đứng của mặt chất lỏng tự do trong mô hình đề xuất lại tăng. Đồng thời, bài báo đề xuất thực hiện nghiên cứu với trường hợp có kích thích nền theo phương thẳng đứng cũng như nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ số D/H (bể rộng và bể mảnh) khi xét đến biến dạng nền, cũng như thực hiện nghiên cứu bằng phương pháp phần tử hữu hạn và phương pháp thực nghiệm để kiểm chứng và hoàn thiện mô hình đề xuất trong các nghiên cứu tiếp theo.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2022-PHII_CT-002. Tác giả xin chân thành cảm ơn Nhà trường và các đồng nghiệp đã hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. O. Miguel, T. Larkin, N. Chow, Comparison between standards for seismic design of liquid storage tanks with respect to soil-foundation-structure interaction and uplift, Bulletin of The New Zealand Society for Earthquake Engineering, 45 (2012) 40-46. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.45.1.40-46>
- [2]. P.K. Malhotra, T. Wenk, M. Wieland, Simple procedure for seismic analysis of liquid-storage tanks, Structural Engineering International, 10 (2018) 197-201. <https://doi.org/10.2749/101686600780481509>
- [3]. M. Yazdaniyan, J.M. Ingham, C. Kahanek, D. Dizhur, Damage to flat-based wine storage tanks in the 2013 and 2016 New Zealand earthquakes, Journal of Constructional Steel Research, 168 (2020) 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.105983>
- [4]. M.K. Shrimali, R.S. Jangid, Seismic response of liquid storage tanks isolated by sliding bearings, Engineering Structures, 24 (2002a) 909-921. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00009-3)
- [5]. M.K. Shrimali, R.S. Jangid, Non-linear seismic response of base-isolated liquid storage tanks to bi-directional excitation, Nuclear Engineering and Design, 217 (2002b) 1-20. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(02\)00134-6](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(02)00134-6)
- [6]. M.K. Shrimali, R.S. Jangid, Seismic analysis of base-isolated liquid storage tanks, Journal of Sound and Vibration, 275 (2004) 59-75. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00749-1](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00749-1)
- [7]. A.A. Seleemah, M. El-Sharkaw, Seismic analysis and modeling of isolated elevated liquid storage tanks, Earthquakes and Structures, 2 (2011a) 397-412. <http://dx.doi.org/10.12989/eas.2011.2.4.397>
- [8]. A.A.A. Seleemah, M. El-Sharkawy, Seismic response of base isolated liquid storage ground tanks, Ain Shams Engineering Journal, 2 (2011b) 33-42. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2011.05.001>
- [9]. S.K. Sahaa, V.A. Matsagarb, A.K. Jainc, Earthquake response of base-isolated liquid storage tanks for different isolator models, Journal of Earthquake and Tsunami, 8 (2014) 1-39.

<https://doi.org/10.1142/S1793431114500134>

[10]. H.V. Quân, Phân tích tương tác hệ bể chứa-chất lỏng theo phổ phản ứng đàn hồi của tiêu chuẩn TCVN 9386:2012, Tạp chí khoa học Giao thông Vận tải, 73(2) 127-139. <https://doi.org/10.47869/tcsj.73.2.3>

[11]. H.V. Quân, Nghiên cứu tương tác kết cấu-đất nền dưới tác dụng của tải trọng động đất bằng phần tử vĩ mô, Luận án Tiến sỹ Kỹ thuật, Trường Giao thông Vận tải, 2021.

[12]. T. Larkin, Seismic response of liquid storage tanks incorporating soil structure interaction, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 134 (2008) 1-12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:12\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:12(1804))

[13]. T. Larkin, Earthquake response of liquid storage tanks on layered sites, in: R.P. Orense, N. Chow, Michael J., Soil-foundation-structure interaction, 1st ed., CRC Press, London, 2010, pp. 155-161. <https://doi.org/10.1201/b10568>

[14]. M. Farajian, Evaluation of soil-structure interaction on the seismic response of liquid storage tanks under earthquake ground motions, Computation, 5 (2017) 1-17. <https://doi.org/10.3390/computation5010017>

[15]. R. Paolucci, Simplified evaluation of earthquake-induced permanent displacements of shallow foundations, Journal of Earthquake Engineering, 1 (1997) 563-579. <https://doi.org/10.1080/13632469708962378>

[16]. C. Cremer, A. Pecker, L. Davenne, Cyclic macro-element for soil-structure interaction: material and geometrical non-linearities, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech, 25 (2001) 1257-1284. <https://doi.org/10.1002/nag.175>

[17]. R. Paolucci, M. Shirato, M.T. Yilmaz, Seismic behavior of shallow foundations: Shaking table experiments vs numerical modelling, Earthquake engineering and structural dynamics, 37 (2008) 577-595. <https://doi.org/10.1002/eqe.773>

[18]. C.T. Chatzigogos, A. Pecker, J. Salencon, Macroelement modeling of shallow foundations, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29 (2009) 765-781. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.08.009>

[19]. H.V. Quân, N.X. Huy, N.T. Kiên, Ứng xử của kết cấu chịu tác dụng động đất có xét đến tương tác phi tuyến đất nền-kết cấu, Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ X, Hà Nội tháng 12 năm 2017, 918-925, ISBN: 978-604-913-722-8.

[20]. G. Gazetas, Foundation Vibrations in Foundation Engineering Handbook, second ed., Springer, Boston, MA, 2013. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3928-5_15

[21]. API, Welded Steel Tanks for Oil Storage, API Standard 650, 11th Ed., American Petroleum Institute, 2007.

[22]. R. Zhang, S. Chu, K. Sun, Z. Zhang, H. Wang, Effect of the directional components of earthquakes on the seismic behavior of an unanchored steel tank, Applied Sciences, 10 (2020), 1-13. <https://doi.org/10.3390/app10165489>

[23]. A.K. Chopra, Dynamics of structures, Prentice-Hall, New Jersey, 1995.

[24]. A. Zeybek, G.S.P. Madabhushi, L. Pelecanos, Seismic response of partially saturated soils beneath shallow foundations under sequential ground motions, Bulletin of Earthquake Engineering, 18 (2020) 1987-2002. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00792-5>

[25]. <http://www.soilquake.net/> (truy cập ngày 11/03/2022)

[26]. Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 9386:2012, Thiết kế công trình chịu động đất.

[27]. V.R. Panchal, R.S. Jangid, Seismic response of liquid storage steel tanks with variable frequency pendulum isolator, KSCE Journal of Civil Engineering, 15 (2011) 1041-1055. <https://doi.org/10.1007/s12205-011-0945-y>