

EFFECTS OF LIQUID HEIGHT AND SOIL DEFORMATION ON RESPONSES OF LIQUID STORAGE TANKS UNDER SEISMIC LOADING IN VIETNAM

Huynh Van Quan

University of Transport and Communications

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 12/10/2022 Revised: 22/11/2022 Published: 22/11/2022	The non-linearities can appear at the soil-foundation interface and liquid height can cause detrimental effects on structures under seismic loadings. In this paper, the responses of liquid storage tanks under earthquake which occurred in Vietnam were obtained by lumped parameter method of soil-structure-interaction (SSI) model. The influences of considering soil deformation and liquid height (H) on the responses of liquid storage tanks are investigated, and the maximum values are compared with the API 650 results. By employing five numerical simulations of different liquid heights, the SSI models indicate that the shear forces and moments above the tank base plate (Q and M) are 30% to 60% lower and the sloshing displacements are 30% higher than the API 650. These results also show that, Q and M are sensitive to the liquid height; in the case of two meter-height changes from $H = 10$ m, nearly a 30% reduction in $H = 8$ m and $H = 6$ m, a 100% increase in $H = 12$ m and $H = 14$ m.
KEYWORDS	
Liquid storage tank	
Soil-structure interaction	
Seismic loading	
Soil deformation	
Liquid height	

ẢNH HƯỞNG CỦA CHIỀU CAO CHẤT LỎNG VÀ BIẾN DẠNG NỀN ĐẾN ỨNG XỬ CỦA HỆ BỂ CHỨA DƯỚI TẢI TRỌNG ĐỘNG ĐẤT TẠI VIỆT NAM

Huỳnh Văn Quân

Trường Đại học Giao thông vận tải

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 12/10/2022 Ngày hoàn thiện: 22/11/2022 Ngày đăng: 22/11/2022	Dưới tác dụng của tải trọng động đất, hệ đất nền-móng có thể xuất hiện phi tuyến và mực chất lỏng cao có thể gây hiệu ứng bất lợi cho bể chứa. Bài báo nghiên cứu ứng xử của hệ bể chứa-chất lỏng khi xét đồng thời với hệ đất nền-móng, được mô hình dưới dạng thông số tập trung và chịu tải trọng động đất trong điều kiện Việt Nam. Khi đó, ảnh hưởng của việc xét đến hệ đất nền-móng, được mô hình bằng phần tử vĩ mô, và ảnh hưởng của chiều cao chất lỏng (H) đến ứng xử của hệ bể chứa sẽ được khảo sát; giá trị phản ứng cực đại được so sánh với kết quả của mô hình API 650. Qua 5 kết quả số, so với API 650, mô hình xét đến hệ đất nền-móng có lực cắt và mô-men tại chân bể (Q và M) bé hơn từ 30% đến 60%, nhưng chuyển vị của mặt chất lỏng tự do lớn hơn 30%. Kết quả phân tích cũng cho thấy, giá trị Q và M thay đổi lớn khi H thay đổi; lấy $H = 10$ m làm chuẩn, thay đổi 2 m, Q và M giảm 30% trong trường hợp $H = 8$ m và $H = 6$ m, ngược lại tăng gần 100% với $H = 12$ m và $H = 14$ m.
TỪ KHÓA	
Bể chứa chất lỏng	
Tương tác đất nền-kết cấu	
Tải trọng động đất	
Biến dạng nền	
Chiều cao chất lỏng	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.6649>

Email: quanhv_ph@utc.edu.vn

<http://jst.tnu.edu.vn>

197

Email: jst@tnu.edu.vn

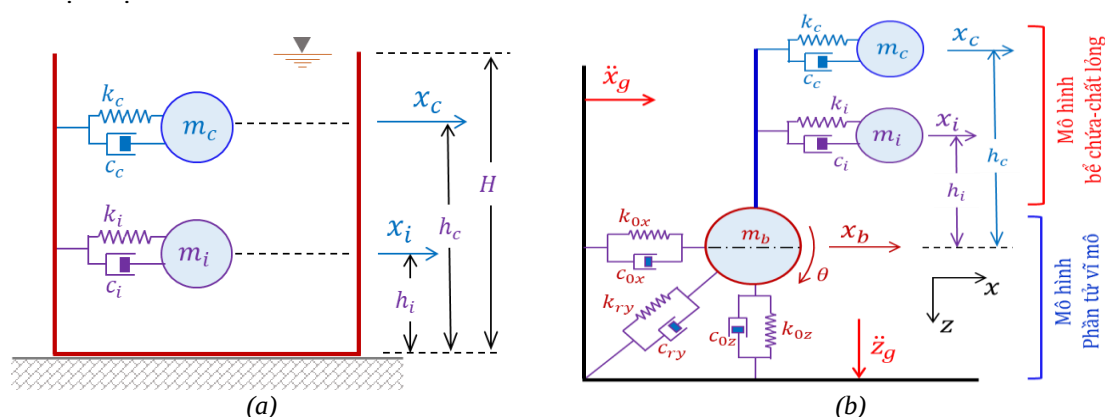
1. Giới thiệu

Theo tiêu chuẩn API 650 của Hoa Kỳ (mô hình API 650) [1], tải trọng động đất làm chất lỏng trong bể, khối lượng m , chuyển động theo hai dạng như sau: phần chất lỏng phía trên đỉnh bể cùng với mặt tự do thực hiện chuyển động đối lưu (convective mode); phần chất lỏng gần đáy bể thực hiện chuyển động dạng xung kích (impulsive mode). Các thành phần này được mô hình dưới dạng thông số tập trung, có giá trị không đổi và chuyển động cùng với thành bể (Hình 1); giá trị thông số của mô hình tra theo bảng 1, phụ thuộc vào tỷ số H/R , bán kính $R = D/2$, với D là đường kính bể. Qua đây cho thấy, chiều cao chất lỏng H có ảnh hưởng đến yếu tố đầu vào của mô hình.

Dưới tác dụng của tải trọng động đất có cường độ mạnh, bể chứa có thể bị phá hủy hoàn toàn [2]. Ngoài ra, bể có thể xuất hiện các hư hỏng thường gặp như mất ổn định tường bể, chân bể phình to dạng như chân voi, hư hỏng này do mô-men tại chân bể M gây ra ứng suất nén dọc trục trong tường bể quá lớn. Chuyển động của mặt chất lỏng tự do gây ra chuyển vị thẳng đứng d có thể gây ra hư hỏng cho mái bể hoặc đoạn tường quanh đỉnh bể. Nếu các giải pháp neo móng vào đất nền không đạt yêu cầu, lực cắt tại chân bể Q có giá trị lớn sẽ gây ra hư hỏng cho tường khu vực móng, hay làm bể trượt ngang do Q vượt quá lực ma sát thiết kế [3]. Chính vì vậy nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến Q, M, d dưới tải trọng động đất là cần thiết.

Về mô hình hệ bể chứa-chất lỏng dạng thông số tập trung, mô hình API 650 chưa xét đến biến dạng nền khi phân tích, Hình 1 (a). Nghiên cứu của Seleemah [4], Rawat [5] và Tsipianitis [6] thực hiện với mô hình cô lập móng của bể chứa chất lỏng khỏi nền đất. Một số tác giả khác đã thực hiện nghiên cứu ứng xử của hệ bể chứa-chất lỏng dưới tải trọng động đất có xét đến biến dạng nền, nhưng là bài toán tuyến tính như: Larkin [7] nghiên cứu trên mô hình giản đơn 2 bậc tự do, chuyển vị ngang và góc xoay; Larkin [8] bổ sung bậc tự do theo phương đứng; Farajian [9] thay thế hệ đất nền-móng bằng mô hình giản đơn có dạng khối lượng-lò xo, chỉ xét đến bậc tự do nằm ngang của phương pháp hình côn (cone method). Bakalis [10] thực hiện nghiên cứu theo hướng mới, xét đến phi tuyến hình học (móng nhỏ khỏi mặt tiếp xúc với đất), bằng phương pháp phần tử hữu hạn.

Trong nước, gần đây, Huỳnh [11] nghiên cứu ứng xử hệ bể chứa-chất lỏng với đặc trưng địa chất và gia tốc nền của Việt Nam; tuy nhiên, nghiên cứu này chưa xét đến SSI. Dưới tác dụng lặp của tải trọng động đất, đất nền xung quanh móng bị biến dạng: phần đất xung quanh móng thay đổi tính chất, tạo ra phi tuyến vật liệu; và/hoặc móng chuyển động tương đối so với đất nền, đáy móng tách khỏi mặt tiếp xúc với đất, tạo ra phi tuyến hình học. Ngày nay, mô hình phi tuyến này có thể thực hiện bằng phần tử vĩ mô (macro-element, PTVM). PTVM đã được [12] nghiên cứu trong điều kiện Việt Nam, được [13] đề xuất ứng dụng cho bài toán phân tích bể chứa chất lỏng chịu tải trọng động đất theo thời gian như Hình 1 (b). Như vậy, có thể thấy rằng, việc xem xét biến dạng nền với các phi tuyến phù hợp để hệ đất nền-móng-bể chứa-chất lỏng làm việc gần với điều kiện thực tế là rất cần thiết.



Hình 1. Mô hình bể chứa-chất lỏng: (a) theo API 650 [1] và (b) xét đến SSI với PTVM [13]

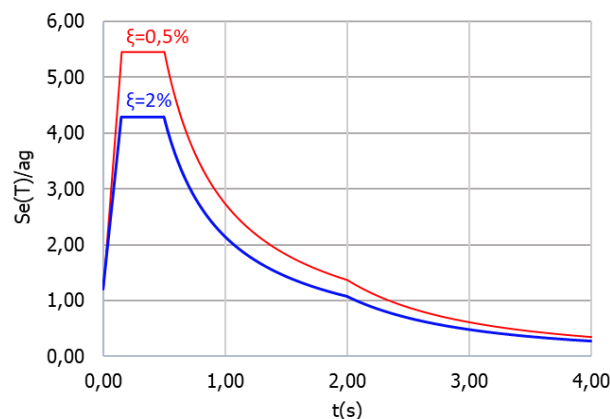
Bảng 1. Các thông số của mô hình hệ bể chứa tra theo H/R [2]

$\frac{H}{R}$	$\frac{m_i}{m}$	$\frac{m_c}{m}$	$\frac{h_i}{H}$	$\frac{h_c}{H}$	C_i	$C_c \left(\frac{s}{\sqrt{m}} \right)$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
0,3	0,176	0,824	0,400	0,521	9,28	2,09
0,5	0,300	0,700	0,400	0,543	7,74	1,74
0,7	0,414	0,586	0,401	0,571	6,97	1,60
1,0	0,548	0,452	0,419	0,616	6,36	1,52
1,5	0,686	0,314	0,439	0,690	6,06	1,48

Trong nghiên cứu này, mô hình gồm đất nền – móng - bể chứa - chất lỏng (mô hình SSI), dạng thông số tập trung, chịu tải trọng động đất do [13] đề xuất sẽ được sử dụng. Hệ đất nền-móng được mô hình bằng PTVM phi tuyến vật liệu. Để phù hợp với điều kiện Việt Nam, bài báo sử dụng hình dạng biểu đồ gia tốc kích thích nền theo thời gian của trận động đất El-Centro (1940), nhưng gia tốc đỉnh lấy theo tiêu chuẩn quốc gia TCVN 9386:2012 [14]. Bài báo có xét đến tính cản của chất lỏng khi phân tích số, các chuyển vị của hệ cùng với lực cắt và mô-men tại chân bể sẽ được biểu diễn theo thời gian. Để thấy được ảnh hưởng của biến dạng nền đến phản ứng của hệ, kết quả phân tích từ mô hình SSI sẽ được so sánh mô hình API 650. Bên cạnh đó, ảnh hưởng của chiều cao mực chất lỏng đến ứng xử của hệ sẽ được làm rõ vì đây là yếu tố quan trọng khi lựa chọn chiều cao bể và kết cấu mái bể.

2. Mô hình hệ bể chứa-chất lỏng khi phân tích với tải trọng động đất

2.1. Mô hình hệ bể chứa-chất lỏng theo API 650

**Hình 2.** Phổ phản ứng đàn hồi theo phương ngang, đất loại B-TCVN 9386:2012

Theo tiêu chuẩn API 650, tổng lực cắt và mô-men tại chân bể được xác định theo công thức (1) và (2); chuyển vị thẳng đứng cực đại, hiện tượng đập dềnh của mặt chất lỏng tự do, xác định theo công thức (3). Trong đó: m_w , h_w và m_r , h_r tương ứng là khối lượng và điểm đặt của tường bể và mái bể; g là gia tốc trọng trường; $S_e(T_i)$ và $S_e(T_c)$ là giá trị suy ra từ phổ gia tốc phản ứng đàn hồi theo phương ngang dạng xung kích và đối lưu, tương ứng tỷ số cản nhớt $\xi = 2\%$ và $\xi = 0,5\%$ [1]. Hình 2 là phổ phản ứng đàn hồi theo phương ngang, đất nền loại B, xác định theo TCVN 9386:2012; trong đó, $S = 1,2$, $T_B = 0,15$ s, $T_C = 0,5$ s và $T_D = 2,0$ s [14]. Chi tiết về mô hình và quá trình tính toán theo API 650 xem trong [11].

$$Q = (m_i + m_r + m_w)S_e(T_i) + m_c S_e(T_c) \quad (1)$$

$$M = (m_i h_i + m_r h_r + m_w h_w)S_e(T_i) + m_c h_c S_e(T_c) \quad (2)$$

$$d = R \frac{S_e(T_c)}{g} \quad (3)$$

2.2. Mô hình hệ bể chứa-chất lỏng xét đến SSI

Trong mô hình này, toàn bộ hệ đất nền-móng được thay bằng một phần tử đơn đặt tại chân kết cấu phần trên, gọi là PTVM như Hình 1 (b). Vùng diện tích đất ở lân cận móng chứa các phi tuyến của hệ đất nền-móng, được mô hình bằng các lò xo phi tuyến. Vùng có vị trí khá xa so với móng, có ứng xử hệ đất nền-móng là tuyến tính, mô hình bằng hệ lò xo và vật cản nhớt làm việc tuyến tính. Trong thực tế, móng bể có diện tích lớn và được neo vào nền đất nên khả năng xuất hiện phi tuyến hình học rất thấp. Do đó, nghiên cứu này thực hiện với PTVM chỉ xét đến phi tuyến vật liệu.

Véc-tơ phản lực và chuyển vị của PTVM tương ứng là $\mathbf{F} = \{V \ M \ N\}^T$ và $\mathbf{u} = \{x_b \ \theta \ z\}^T$. Ma trận độ cứng $\mathbf{K}^{b0} = \text{diag}(k_{0x}, k_{ry}, k_{0z})$ và ma trận cản $\mathbf{C}^{b0} = \text{diag}(c_{0x}, c_{ry}, c_{0z})$ đều có dạng đường chéo chính; với phản ứng tuyến tính, giá trị các thông số này xác định theo [15] (xem tính toán cụ thể tại mục 3.3). Tại từng thời điểm, ma trận độ cứng móng $\mathbf{K}^b$ xác định như sau: nếu $f(\mathbf{F}) < 0$ hoặc $[f(\mathbf{F}) = 0 \text{ và } df(\mathbf{F}) < 0]$, 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 xuất hiện, hệ phản ứng phi tuyến, $\mathbf{K}^b$ bị triệt giảm một lượng $d\mathbf{K}^b = \mathbf{K}^{b0} \left(\frac{\partial g}{\partial \mathbf{F}} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial \mathbf{F}} \right)^T \mathbf{K}^{b0} \left[\left(\frac{\partial f}{\partial \mathbf{F}} \right)^T \mathbf{K}^{b0} \left(\frac{\partial g}{\partial \mathbf{F}} \right) \right]^{-1}$. Trong đó, hàm dẻo $f(\mathbf{F}) = h^2 + m^2 - v^2(1 - v)^{2\xi}$ và quy tắc chảy $g(\mathbf{F}) = \lambda^2 h^2 + \chi^2 m^2 + v^2$; $h = V^F / \mu N_{max}$, $m = M^F / \psi D_b N_{max}$, $v = N^F / N_{max}$; λ, χ, μ, ψ là các tham số; D_b là đường kính móng [12].

Mô hình hệ đất nền-móng-bể chứa-chất lỏng có 5 bậc tự do, Hình 1 (b), chịu kích thích nền theo phương ngang $\ddot{x}_g$ và theo phương đứng $\ddot{z}_g$. Áp dụng nguyên lý Đa-lam-be để thành lập phương trình vi phân chuyển động của hệ [13]. Ba bậc tự do theo phương ngang (x_c, x_i, x_b) tương ứng với khối lượng m_c, m_i và khối lượng móng m_b , có phương trình vi phân chuyển động (4)-(6); bậc tự do góc xoay (θ) có phương trình vi phân chuyển động (7); và bậc tự do theo phương thẳng đứng (z) có phương trình vi phân chuyển động (8). Hệ phương trình vi phân chuyển động (4)-(8) viết dưới dạng véc-tơ như phương trình (9).

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

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

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

$$\begin{aligned} J\ddot{\theta} - c_ch_c(\dot{x}_c + h_c\dot{\theta}) - c_ih_i(\dot{x}_i + h_i\dot{\theta}) + c_{ry}\dot{\theta} - k_ch_c(x_c + h_c\theta) \\ - k_ih_i(x_i + h_i\theta) + M = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

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

Tiến hành tích phân phương trình (9), lần thứ nhất sẽ thu được vận tốc ($\dot{x}_c, \dot{x}_i$), lần thứ hai sẽ thu được chuyển vị (x_c, x_i) của các bậc tự do chuyển động đối lưu và chuyển động xung kích. Theo Farajian (2017) [9], các giá trị này được kết hợp với các thông số của mô hình cho phép suy ra đại lượng nghiên cứu là lực cắt Q , mô-men M và chuyển vị thẳng đứng của mặt chất lỏng tự do d theo các công thức (10)-(12).

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

$$Q = k_c x_c + c_c \dot{x}_c + k_i x_i + c_i \dot{x}_i \quad (10)$$

$$M = (k_c x_c + c_c \dot{x}_c) h_c + (k_i x_i + c_i \dot{x}_i) h_i \quad (11)$$

$$d = 0,837 R \omega_c^2 \frac{(x_c^{max} - x_b^{max})}{g} \quad (12)$$

Giải thích một số ký hiệu, độ cứng đàn hồi và hệ số cản tương đương của hệ bể chứa-chất lỏng xác định theo công thức: $k_c = m_c \omega_c^2$, $k_i = m_i \omega_i^2$ và $c_c = 2\xi_c m_c \omega_c$, $c_i = 2\xi_i m_i \omega_i$. Tần số vòng ω_i và ω_c được suy ra từ $T_i = C_i H \sqrt{\rho D / (2tE)}$ 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 tra theo bảng 1. Các véc-tơ, ma trận trong công thức (9) được định nghĩa như các công thức (13)-(18) dưới đây. Với J là tổng mô-men quán tính khối lượng đối với tâm PTVM.

$$\mathbf{x} = \{x_c \ x_i \ x_b \ \theta \ z\}^T \quad (13)$$

$$\mathbf{F}^F = [0 \ 0 \ V \ M \ N]^T \quad (14)$$

$$\mathbf{p} = [m_c \ddot{x}_g \ m_i \ddot{x}_g \ m_b \ddot{x}_g \ 0 \ (m_c + m_i + m_b) \ddot{z}_g]^T \quad (15)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_c & 0 & m_c & m_c h_c & 0 \\ 0 & m_i & m_i & m_i h_i & 0 \\ 0 & 0 & m_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (m_c + m_i + m_b) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_c & 0 & 0 & c_c h_c & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_i h_i & 0 \\ -c_c & -c_i & c_{0x} & (-c_c h_c - c_i h_i) & 0 \\ -c_c h_c & -c_i h_i & 0 & (-c_c h_c^2 - c_i h_i^2 + c_{ry}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{0z} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{K}^S = \begin{bmatrix} k_c & 0 & 0 & k_c h_c & 0 \\ 0 & k_i & 0 & k_i h_i & 0 \\ -k_c & -k_i & 0 & (-k_c h_c - k_i h_i) & 0 \\ -k_c h_c & -k_i h_i & 0 & (-k_c h_c^2 - k_i h_i^2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

3. Phân tích số với điều kiện Việt Nam

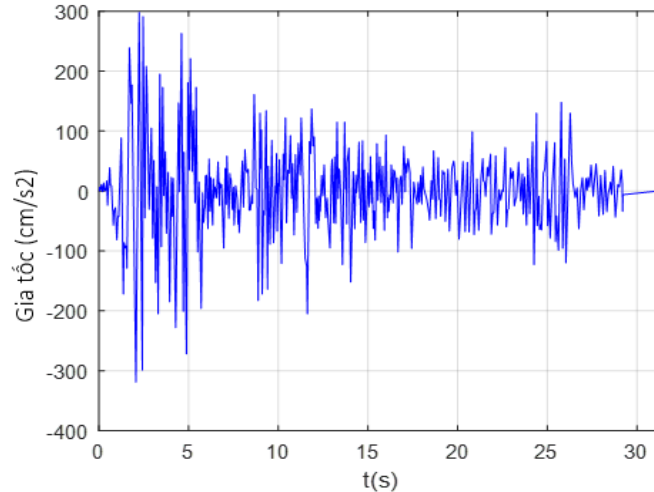
3.1. Mô tả bài toán

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

Thông số	H6	H8	H10	H12	H14
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
m (10^5 kg)	18,8	25,12	31,40	37,6	43,96
m_c (10^5 kg)	12,11	13,59	14,19	14,95	15,02
m_i (10^5 kg)	6,70	11,53	17,21	22,73	28,94
$C_c (s/\sqrt{m})$	1,67	1,48	1,52	1,50	1,49
C_i	7,36	6,56	6,36	6,24	6,12
T_c (s)	7,47	6,62	6,80	6,73	6,65
T_i (s)	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16
h_c (m)	3,34	4,66	6,16	7,75	9,45
h_i (m)	2,40	3,23	4,19	5,12	6,09

Khảo sát bể có dạng hình trụ đứng, đặt trên mặt đất, chất lỏng trong bể là nước, có khối lượng không đổi trong quá trình chuyển động. Đường kính bể được giữ cố định ($D = 20$ m); tường bể là thép, bề dày $t = 15$ mm [3], mô đun đàn hồi $E = 200$ GPa, khối lượng tường và mái bể chưa được kể đến. Bài toán khảo sát với 5 trường hợp chiều cao mực chất lỏng trong bể, mỗi ví dụ sẽ tăng 2 m, xuất phát từ $H = 6$ m; ký hiệu tương ứng là H6, H8, ..., H14. Tùy vào chiều cao mực chất lỏng, các thông số của mô hình tập trung trong bảng 2 được tra từ bảng 1. Trong bài toán này, tải trọng động đất mới chỉ xét theo một phương, là biểu đồ gia tốc ngang, theo thời gian của trận động đất El-Centro (1940) như Hình 3 [15]. Như đã đề cập ở mục Giới thiệu, tại Việt Nam, gia tốc đỉnh

$a_g = 0,1893g$ tra theo [14], xuất hiện tại thị xã Sơn La, nơi có cường độ động đất mạnh nhất của cả nước; hệ số tầm quan trọng $\gamma_I = 1,25$. Đưa gia tốc động đất tại Sơn La vào biểu đồ El-Centro (1940) bằng hệ số tỷ lệ, sao cho giá trị gia tốc đỉnh trên biểu đồ đúng bằng $0,1893g$.



Hình 3. Biểu đồ gia tốc động đất theo thời gian El-Centro (1940) [16]

3.2. Kết quả tính toán theo mô hình API 650

Các giá trị trong bảng 2, kết hợp với $S_e(T_c)/a_g$ và $S_e(T_i)/a_g$ suy ra từ Hình 2, được thay vào các công thức (1)-(3), phản ứng của từng trường hợp chiều cao mực chất lỏng cụ thể được tổng hợp trong bảng 3. Chu kỳ dao động tự do của chuyển vị đối lưu nằm ngoài phổ phản ứng đàn hồi, Hình 2, nên $S_e(T_c)/a_g$ và chuyển vị d tính theo công thức (3) của các trường hợp nghiên cứu đều bằng nhau.

Bảng 3. Kết quả tính toán theo mô hình API 650

Trường hợp	$\frac{S_e(T_c)}{a_g}$	$\frac{S_e(T_i)}{a_g}$	Q (10^6 N)	M (10^6 Nm)	d (cm)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
H6	0,34	2,85	4,41	11,33	65,8
H8	0,34	3,26	7,10	24,20	65,8
H10	0,34	3,67	10,20	44,54	65,8
H12	0,34	4,08	18,51	97,42	65,8
H14	0,34	4,29	24,47	152,31	65,8

3.3. Kết quả tính toán theo mô hình xét đến SSI

Trong nghiên cứu này, các trường hợp khảo sát có cùng đường kính bể nên phương án móng và địa chất đất nền không đổi: móng nông hình trụ tròn, vật liệu bê tông cốt thép, bán kính $R_b = D/2 + 1$ (m) [10]. Đất nền loại B, 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. Các thông số về tính cản, đàn hồi tương đương của PTVM xác định như sau (chi tiết xem trong [13]):

$$\begin{aligned}
 G &= \rho V_s^2 = 136,55 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \\
 k_{0x} &= \frac{8GR_b}{2-\nu} \left(1 + 0,5 \frac{R_b}{H_s}\right) = 9,16 \cdot 10^9 \text{ N/m} \\
 k_{0z} &= \frac{4GR_b}{1-\nu} \left(1 + 1,3 \frac{R_b}{H_s}\right) = 15,74 \cdot 10^9 \text{ N/m} \\
 k_{ry} &= \frac{8GR_b}{3(1-\nu)} \left(1 + 0,17 \frac{R_b}{H_s}\right) = 7,18 \cdot 10^9 \text{ Nm/rad}
 \end{aligned}$$

$$c_{0x} = \rho V_s \pi R_b^2 = 0,2 \cdot 10^9 \text{ Nsm}, c_{0z} = \frac{\rho 3,4 V_s R_b^2}{1-\nu} = 0,37 \cdot 10^9 \text{ Nsm}$$

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

Như đã chỉ ra ở mục 2.2, ứng với mỗi trường hợp chiều cao mực chất lỏng ở cột (1), bảng 4, giá trị chu kỳ và tần số của khối chất lỏng chuyển động xung kích (T_i, ω_i) và đối lưu (T_c, ω_c) sẽ được xác định. Khi đó, với tỷ số cản nhớt $\xi_i = 2\%$ và $\xi_c = 0,5\%$, độ cứng tương đương của hệ bể chứa-chất lỏng tính được như cột (2) và (3), hệ số cản tương đương như cột (4) và (5) của bảng 4.

Bảng 4. Độ cứng và hệ số cản tương đương của hệ bể chứa-chất lỏng

Trường hợp	k_c (10^5 N/m)	k_i (10^9 N/m)	c_c (10^5 Ns/m)	c_i (10^8 Ns/m)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
H6	8,56	4,04	10,20	2,09
H8	10,81	4,64	12,12	2,93
H10	12,11	4,71	13,11	3,60
H12	12,75	6,22	13,81	4,76
H14	13,39	4,46	14,18	4,54

Với các thông số của PTVM và của hệ bể chứa-chất lỏng (bảng 4) đã tính được, thực hiện tích phân số phương trình (9) theo phương pháp Newmark, kết hợp với phương pháp Newton-Raphson hiệu chỉnh [17]. Kết quả có được chuyển vị của các bậc tự do như các Hình 4 (a)-(d). Thay số liệu vào các công thức (10)-(12) để có được giá trị của lực cắt Q , mô-men M và chuyển vị mặt chất lỏng tự do d , biểu đồ theo thời gian của Q và M như các Hình 4 (e)-(f). Căn cứ vào biểu đồ gia tốc kích thích nền, Hình 3; và để thuận lợi cho quá trình quan sát: các biểu đồ phản ứng của hệ trong Hình 4 chỉ thể hiện 12 s đầu tiên và chỉ biểu diễn phản ứng của H6, H10 và H14. Giá trị cực đại của Q , M và d được tổng hợp trong bảng 5.

Bảng 5. Giá trị phản ứng cực đại theo mô hình SSI với chiều cao H khác nhau

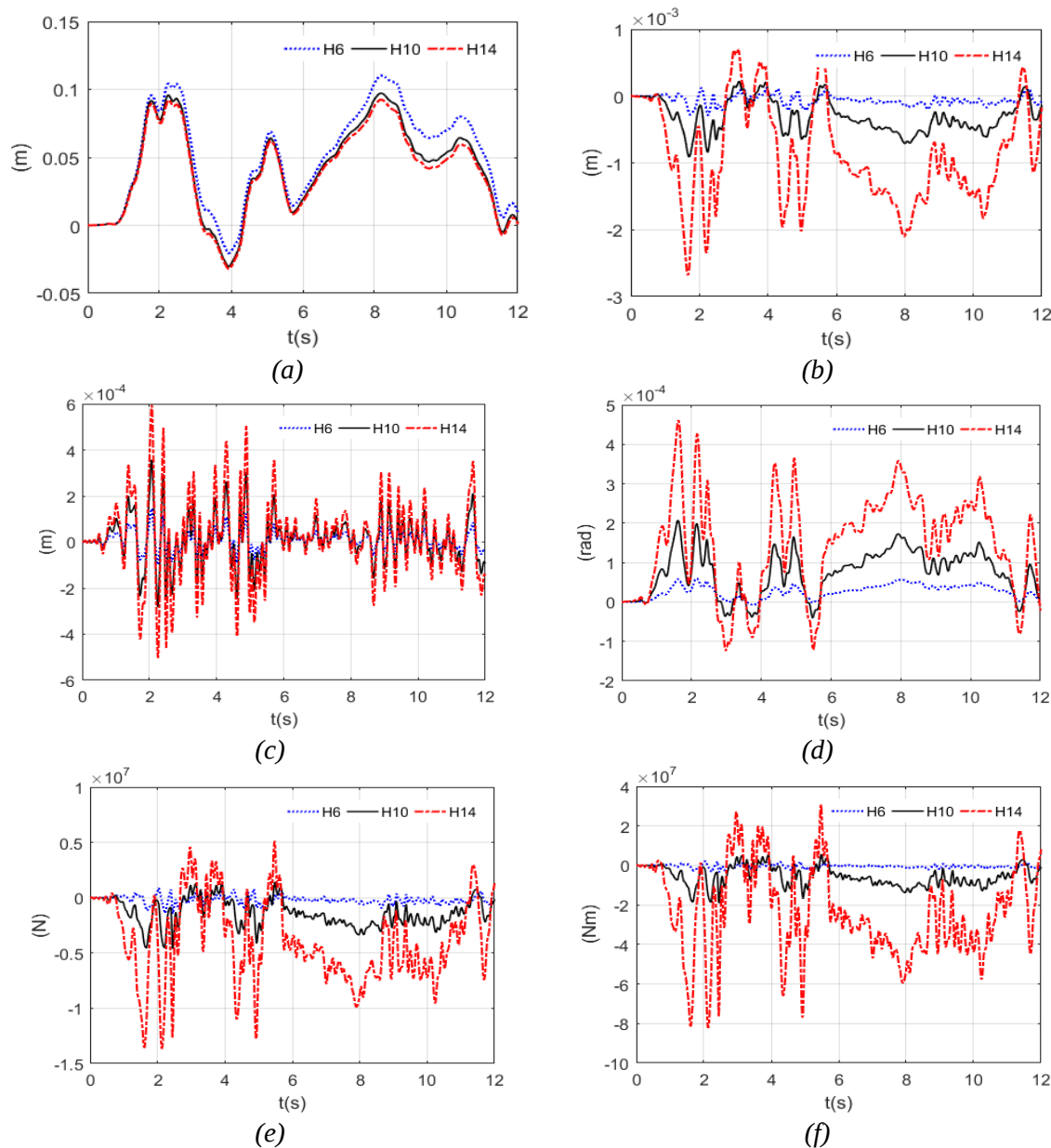
Trường hợp	H6	H8	H10	H12	H14
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
x_c (cm)	11,03	10,22	9,72	9,51	9,25
x_i (10^{-3} cm)	28,92	50,57	91,18	160,00	270,00
x_b (10^{-3} cm)	14,50	24,23	35,67	46,81	59,26
θ (10^{-3} rad)	5,97	11,74	20,69	31,92	46,09
Q (10^6 N)	1,82	3,53	5,77	13,19	17,04
M (10^6 Nm)	4,25	11,20	23,88	49,45	102,62
d (cm)	83,02	86,52	88,10	87,91	87,38

3.4. Bàn luận

So với mô hình API 650, mô hình SSI cho phép biểu diễn phản ứng của hệ theo thời gian như Hình 4, cho phép xác định được giá trị phản ứng ở từng thời điểm cụ thể cùng với giá trị cực đại như bảng 5.

Trong các Hình 4 (e)-(f), biểu đồ lực cắt và mô-men tại chân bể có hình dạng tương tự với biểu đồ chuyển vị xung kích, Hình 4 (b). Điều này chứng tỏ, ảnh hưởng của bậc tự do này đến lực cắt và mô-men tại chân bể chiếm tỷ trọng rất lớn, chi phối ảnh hưởng của các bậc tự do còn lại.

Trong bảng 5, các trường hợp H8-H14 có giá trị chuyển vị cực đại của bậc tự do đối lưu gần như bằng nhau; trong khi đó, chuyển vị của móng trong cả 5 trường hợp đều có giá trị khá bé, Hình 4 (a)-(e). Điều này dẫn đến kết quả tính giá trị d theo công thức (12) cho các trường hợp chiều cao mực chất lỏng thay đổi sẽ lệch nhau không nhiều. Kết quả này phù hợp tính theo mô hình của API 650, công thức (3), xem giá trị ở cột (6) của bảng 3.



Hình 4. Phản ứng của hệ theo chiều cao H khác nhau: (a) chuyển vị đối lưu (x_c), (b) chuyển vị xung kích (x_i), (c) chuyển vị móng (x_b), (d) chuyển vị góc xoay (θ), (e) lực cắt tại chân bệ (Q), (f) mô-men tại chân bệ (M)

Ngoài ra, tiến hành so sánh kết quả tính toán giữa API 650 (V_{API}) trong bảng 3 và giá trị cực đại của mô hình SSI (V_{SSI}) trong bảng 5 theo công thức $\frac{V_{SSI} - V_{API}}{V_{API}} \%$. Kết quả thể hiện độ lệch dưới dạng phần trăm như bảng 6. Trong 5 trường hợp nghiên cứu, giá trị lực cắt và mô-men cực đại tại chân bệ tính toán theo mô hình xét đến SSI bé hơn so với mô hình của API 650 từ 30% đến 60%, mực chất lỏng càng thấp thì độ lệch càng lớn. Theo bài báo, độ lệch này chứng tỏ: (i) tính toán theo mô hình API 650 thiên về giải pháp an toàn, (ii) việc kể đến biên dạng nền đã làm giảm lực cắt và mô-men tại chân bệ. Tuy nhiên, giá trị d tính theo mô hình xét đến SSI luôn lớn hơn khoảng 30% so với mô hình API 650 (riêng H6 là 26,16%).

Bảng 6. So sánh độ lệch giá trị phản ứng giữa mô hình API 650 với mô hình xét đến SSI

Trường hợp	Q (%)	M (%)	d (%)
(1)	(2)	(3)	(4)
H6	-58,82	-62,54	26,16
H8	-50,25	-53,72	31,49
H10	-43,36	-46,39	33,89
H12	-46,67	-49,24	33,60
H14	-30,39	-32,62	32,79

Về ảnh hưởng của chiều cao chất lỏng đến lực cắt và mô-men tại chân bể: trường hợp bài báo lấy H10 làm chuẩn (V_{H10}), các trường hợp khác (V_i) được so sánh với V_{H10} theo công thức $\frac{V_i - V_{H10}}{V_{H10}} \%$ cho cả hai mô hình, kết quả như bảng 7. Mặc dù chiều cao mực chất lỏng thay đổi là 2 m cho mỗi trường hợp, nhưng so với H10: trường hợp H12 và H14 có mức độ tăng M , Q rất nhanh, khoảng 100%; trong khi H6 và H8 giảm chậm hơn, giảm 30%; mô hình xét đến SSI có độ nhạy theo chiều cao tốt hơn mô hình API 650, xem cột (6) và (7) của bảng 7. Ngoài ra, có thể thấy, trong các Hình 4 (b), Hình 4 (e) và Hình 4 (f), biểu đồ phản ứng của H14 nằm rất xa so với biểu đồ H6.

Bảng 7. So sánh độ lệch giữa các trường hợp nghiên cứu với H10

Trường hợp	Mô hình API 650		Mô hình xét đến SSI		Độ lệch giữa hai mô hình (%)	
	Q (%)	M (%)	Q (%)	M (%)	(4)-(2)	(5)-(3)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
H6	-56,8	-74,6	-68,5	-82,2	-11,7	-7,6
H8	-30,4	-45,7	-38,8	-53,1	-8,4	-7,4
H10	-	-	-	-	-	-
H12	81,5	118,7	128,6	107,1	47,1	-11,7
H14	139,9	242,0	195,3	329,7	55,4	87,7

4. Kết luận

Với mô hình bể chứa-chất lỏng có xét đến SSI, bài báo đã phân tích và biểu diễn phản ứng theo thời gian của hệ dưới tải trọng động đất; đồng thời, thực hiện tính toán theo tiêu chuẩn API 650 để làm cơ sở so sánh. Trong đó, tương tác đất nền-móng được mô hình bằng PTVM xét đến phi tuyến vật liệu; phổ phản ứng đàn hồi theo phương ngang, độ lớn gia tốc đỉnh và địa chất nền đất được xây dựng theo TCVN 9386:2012. Mô hình xét đến SSI không chỉ cho phép biểu diễn phản ứng của hệ theo thời gian, mà còn tính toán được các giá trị cụ thể ở từng thời điểm; trong khi mô hình API 650 chỉ xác định được phản ứng cực đại của đại lượng nghiên cứu. Để nghiên cứu ảnh hưởng của SSI và chiều cao mực chất lỏng đến phản ứng của của hệ, bài báo thực hiện 5 ví dụ tính toán số. So sánh kết quả giữa hai mô hình cho thấy: việc xét đến biến dạng nền làm giảm lực cắt, mô-men nhưng lại làm tăng chuyển vị thẳng đứng của mặt chất lỏng tự do. Mô hình API 650 có độ nhạy về chiều cao kém hơn so với mô hình xét đến SSI, chuyển vị thẳng đứng của mặt chất lỏng tự do hầu như không đổi cho cả 5 trường hợp. Trong nghiên cứu tiếp theo, bài báo đề xuất cần thực hiện với hệ chịu tải trọng kích thích nền đồng thời theo các phương, và thực hiện nghiên cứu có xét đến tính phi tuyến hình học của hệ đất nền-móng.

Lời cảm ơn

Bài báo này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2022-PHII_CT-002.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] API, "Welded Steel Tanks for Oil Storage," in *API Standard 650*, 11th Ed., American Petroleum Institute, 2007.

-
- [2] O. Miguel, T. Larkin, and N. Chouw, "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*, vol. 45, no. 1, pp. 40-46, 2012.
- [3] P. K. T. Malhotra, T. Wenk, and M. Wieland, "Simple procedure for seismic analysis of liquid-storage tanks," *Structural Engineering International*, vol. 10, no. 3, pp. 197-201, 2000.
- [4] A. A. Seleemah and M. El-Sharkawy, "Seismic response of base isolated liquid storage ground tanks," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 33-42, 2011.
- [5] A. Rawat, V. A. Matsagar, and A. K. Nagpal, "Numerical study of base-isolated cylindrical liquid storage tanks using coupled acoustic-structural approach," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 119, pp. 196-219, 2019.
- [6] A. Tsipianitis and Y. Tsompanakis, "Optimizing the seismic response of base-isolated liquid storage tanks using swarm intelligence algorithms," *Computers and Structures*, vol. 243, pp. 1-13, 2021.
- [7] T. Larkin, "Seismic response of liquid storage tanks incorporating soil structure interaction," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 134, no. 12, pp. 1804-1814, 2008.
- [8] T. Larkin, "Earthquake response of liquid storage tanks on layered sites," in *Soil-foundation-structure interaction*, R. P. Orense, N. Chouw, J. Michael, 1st ed. London: CRC Press, 2010, pp. 155-161.
- [9] 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, 2017.
- [10] K. Bakalis and S. A. Karamanos, "Uplift mechanics of unanchored liquid storage tanks subjected to lateral earthquake loading," *Thin-Walled Structures*, vol. 158, pp. 1-33, 2021.
- [11] V. Q. Huynh, "Seismic analysis of liquid-storage tank with elastic response spectrum of TCVN 9386:2012 specification," (in Vietnamese), *Transport and Communications Science Journal*, vol. 73, no. 2, pp. 127-139, 2022.
- [12] V. Q. Huynh, "Studying the soil-structure interaction under seismic loading with macro-element," (in Vietnamese), PhD. Thesis, University of Transport and Communications, Hanoi, Vietnam, 2021.
- [13] V. Q. Huynh and N. B. Pham, "Seismic analysis of liquid-storage tank considering soil-structure interaction with macro element," (in Vietnamese) *Transport and Communications Science Journal*, vol. 75, no. 8, pp. 833-844, 2022.
- [14] National specification of Vietnam, "Design of structures for earthquake resistances," *TCVN 9386:2012*, 2012.
- [15] G. Gazetas, "Foundation Vibrations," in *Foundation Engineering Handbook*, 2nd ed. Boston: Springer, 2013.
- [16] Soilquake, "Geotechnical/SSI Simulation Tools." [Online]. Available: <http://www.soilquake.net/>. [Accessed Oct. 8, 2022].
- [17] A. K. Chopra, *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 3rd ed. India: Pearson Education, 2007.