

Ảnh hưởng của tương tác rần lỏng hai chiều đến đặc trưng động lực học bể chứa có thành mềm

Bùi Phạm Đức Tường^{1,*}, Nguyễn Văn Đoàn¹, Nguyễn Đăng Khôi¹, Phan Đức Huỳnh¹, Lương Văn Hải²

TÓM TẮT

Việc phân tích đặc trưng động lực học của sóng chất lỏng bên trong bể chứa hiện nay vẫn còn tồn tại rất nhiều thử thách vì vấn đề tương tác rần lỏng hai chiều tại mặt tương tác đặc biệt là đối với bể chứa thành mềm. Điều này dẫn đến các tiêu chuẩn thiết kế còn dựa vào một số công thức bán thực nghiệm kể cả các tiêu chuẩn tiên tiến như ACI 350.3-20, EC8 và IS 1893-2016. Tuy nhiên, trong một số trường hợp đặc biệt thì các tiêu chuẩn này không tiên lượng đúng áp lực của sóng lên thành bể, dẫn đến nguy hiểm khi thiết kế bể chứa. Bài báo này áp dụng phương pháp FVM/FEM và phân tích các đặc trưng riêng của bể chứa thành mềm bao gồm tần số dao động riêng f_{tank} , chiều cao cực đại η của sóng, áp lực động p_w của sóng chất lỏng trên thành bể mềm. Ngoài ra bài báo còn thực hiện các thí nghiệm phân tích dao động sóng chất lỏng bên trong bể chứa dưới tác dụng của tải trọng động. Kết quả thí nghiệm cho thấy chiều cao sóng chất lỏng cực đại tác dụng lên thành bể nhỏ ($\eta=12.1cm$) cho kết quả sai lệch không đáng kể (0.8%) so với mô phỏng số ($\eta=12.2cm$). Áp lực động lớn nhất tính toán từ FVM/FEM trong bể chứa kích thước lớn ($p_w = 38.19$ kPa) tương đồng với các kết quả của các tác giả trước đây với độ lệch < 5% ($p_w = 37.3$ kPa). Kết quả đồng nhất giữa phương pháp số và thí nghiệm cho thấy tính đúng đắn của phương pháp nghiên cứu.

Từ khoá: bể chất lỏng thành mềm, tương tác rần lỏng, áp lực thủy động, thí nghiệm bàn lắc

¹Khoa Xây Dựng, Trường Đại Học Sư Phạm Kỹ Thuật Tp.HCM, Tp. HCM, Việt Nam

²Khoa Xây Dựng, Trường Đại Học Bách Khoa Tp.HCM, Tp. HCM, Việt Nam

Liên hệ

Bùi Phạm Đức Tường, Khoa Xây Dựng, Trường Đại Học Sư Phạm Kỹ Thuật Tp.HCM, Tp. HCM, Việt Nam

Email: tuongbpd@hcmute.edu.vn

Lịch sử

- Ngày nhận: 13-2-2023
- Ngày chấp nhận: 07-8-2023
- Ngày đăng: 30-9-2023

DOI:

<https://doi.org/10.32508/stdjet.v6i3.1083>



Bản quyền

© ĐHQG Tp.HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



GIỚI THIỆU

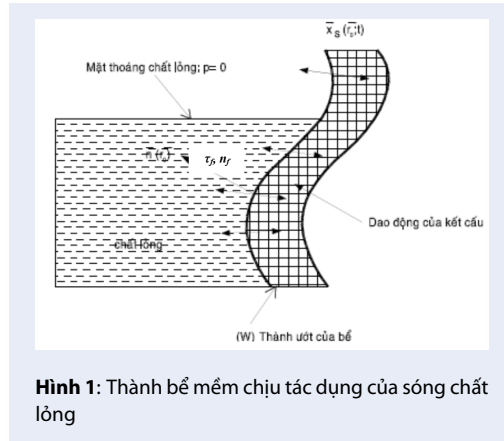
Vấn đề áp lực sóng chất lỏng tác dụng lên thành bể mềm (FSI) được đề cập lần đầu bởi Housner năm 1957 với việc phân tích áp lực động của sóng tác dụng lên thành bể, các công thức đơn giản được đề xuất cho thành bể chứa có tính chất đối xứng theo hai phương. Các công thức tính toán cho áp lực xung lẫn áp lực đối lưu¹. Sau đó, một số sự cố với bể chứa chất lỏng sau trận động đất ở Chile vào năm 1960 xảy ra. Đáng chú ý là bể chứa được thiết kế với cấp động đất lớn hơn thực tế, nhưng bể đã bị hư hỏng khi động đất xảy ra. Chính việc này đã làm cho các kỹ sư, nhà khoa học xem xét lại lý thuyết tính toán thành bể mềm trong thiết kế công nghiệp².

Sự ảnh hưởng của bể thành mềm đến ứng xử động của bể chứa chất lỏng được đề xuất giải quyết bởi Veletsos bằng phương pháp giải tích từ năm 1992³. Trong nghiên cứu này, tác giả phân tích sự dao động của thành bể mềm bằng cách chống chập dao động từ các hàm dạng riêng rẽ. Sau đó dựa vào điều kiện tổng tải trọng tác động cân bằng với nội lực bên trong bể, tác giả xác định được ứng suất của chất lỏng cũng như áp lực cực đại của sóng lên thành bể, và tải trọng truyền xuống đất nền của bể trong trường hợp thay đổi độ dày thành bể mềm. Kết quả rút ra là tổng áp

lực sóng chất lỏng lên bể thành cứng lớn hơn trong bể thành mềm⁴. Nhưng vấn đề phương trình dao động của sóng chất lỏng tại bề mặt tương tác vẫn chưa được giải quyết triệt để. Gần đây có một số nghiên cứu của nhiều nhóm tác giả khác nhau về vấn đề tương tác rần lỏng trong thành bể mềm, và các phương pháp nghiên cứu cũng đa dạng khác nhau⁵⁻⁹. Sự tương tác của chất lỏng - thành bể mềm như mô tả trên Hình 1 sẽ ảnh hưởng đến đặc trưng động lực học của bể. Điều này rất quan trọng đối với các bể chứa vỏ mỏng có kích thước lớn^{10,11} hoặc bể nước mái đóng vai trò như thiết bị giảm chấn (Tuned Liquid Damper-TLD) là thiết bị hoạt động dựa trên tần số dao động riêng của bể^{12,13}.

Để có thể tính toán được các bài toán lớn, phức tạp của bể chứa chất lỏng và giải phương trình tại bề mặt tương tác thì đòi hỏi sự cần thiết áp dụng phương pháp số. Việc áp dụng phương pháp số cổ điển như FEM gặp nhiều khó khăn trong việc chia lưới phần tử vì hai miền vật chất rắn và lỏng khác nhau nên dẫn đến nghiệm rời giải số có sai số lớn hoặc không hội tụ. Đặc biệt khi giải phương trình tương tác trên bề mặt tiếp xúc là khó khả thi¹⁴. Từ đó đã có nhiều đề xuất phối hợp để các phương pháp lai kết hợp đã được đề xuất để giải quyết các vấn đề nêu trên, trong đó finite

Trích dẫn bài báo này: Tường B P D, Đoàn N V, Khôi N D, Huỳnh P D, Hải L V. Ảnh hưởng của tương tác rần lỏng hai chiều đến đặc trưng động lực học bể chứa có thành mềm. *Sci. Tech. Dev. J. - Eng. Tech.* 2023; 6(3):1955-1966.



Hình 1: Thành bể mềm chịu tác dụng của sóng chất lỏng

element method - FEM sử dụng để mô phỏng miền chất rắn còn miền chất lỏng thì áp dụng các phương pháp như finite volume method - FVM¹⁵⁻¹⁷, boundary element method - BEM¹⁸⁻²⁰ và smooth particle method - SPH²¹⁻²⁶.

Bài báo này sử dụng phương pháp lai FVM/FEM để mô phỏng sự làm việc của sóng chất lỏng bên trong bể chứa sau đó xem xét sự ảnh hưởng của thành bể mềm có xét tương tác rắn-lỏng hai chiều (fluid-structure interaction - FSI) đến các đặc trưng động lực học cũng như ứng xử của bể chất lỏng dưới tác dụng của tải trọng động. Trong đó FVM được dùng để mô phỏng dao động của miền chất lỏng còn FEM được áp dụng cho miền kết cấu rắn là thành bể chứa. Phần mềm Ansys V18.2 được dùng để hỗ trợ tính toán và giải quyết phương trình tại bề mặt tương tác. Bên cạnh phân tích số, trong nghiên cứu này có thực hiện các thí nghiệm trên bàn lắc để so sánh kết quả.

Bố cục bài báo gồm năm phần, sau phần (1) giới thiệu các nghiên cứu đã thực hiện trước đây sẽ là phần (2) trình bày phương pháp FVM/FEM mô phỏng sóng chất lỏng dao động trong bể chứa thành mềm có xét tương tác rắn-lỏng hai chiều (FSI), phần (3) là thiết lập thí nghiệm kiểm chứng, đối sánh các đặc trưng động lực học của bể khi dao động để khẳng định tính đúng đắn của phương pháp số, từ đó đi đến phần (4) là khảo sát các tham số đặc trưng cho động lực học của bể chứa chất lỏng so sánh với các kết quả nghiên cứu trước đây và cuối cùng là (5) các kết luận.

PHƯƠNG PHÁP SỐ FVM/FEM

Để tính toán được sự tương tác rắn lỏng cho bể thành mềm, trong nghiên cứu này áp dụng phương pháp lai mới được nghiên cứu gần đây bằng cách kết hợp FEM và FVM (FVM/FEM), đã được giới thiệu ở phần 1. Trong FVM/FEM, các miền chất lỏng và chất rắn được rời rạc hóa một cách độc lập, tuy nhiên sự tương

tác giữa chúng được xác định bằng cách đồng bộ hóa dao động hai miền tại bề mặt tương tác (thành ướt ở Hình 1) với các bước thời gian so le nhau.

Miền chất lỏng

FVM có nhiều ưu điểm vì đây là phương pháp bảo toàn cục bộ từng phần do cách tiếp cận của phương pháp là “cân bằng”, sự cân bằng cục bộ được tính toán trên từng ô lưới được rời rạc hóa có tên “thể tích điều khiển” (control volume) như ở Hình 2.

Phương trình dao động của phần tử chất lỏng tuân theo định luật Navier-Stokes:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{v} &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) &= -\nabla p + \\ \nabla [\mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] &+ \mathbf{F} \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó \mathbf{v} là trường vận tốc; ρ và μ lần lượt là khối lượng riêng và độ nhớt, p là áp suất còn \mathbf{F} là lực thể tích. Các mô phỏng số được thực hiện trên nền tảng Ansys Workbench 18.2 với module CFX, là module tính toán lưu chất đa mục đích.

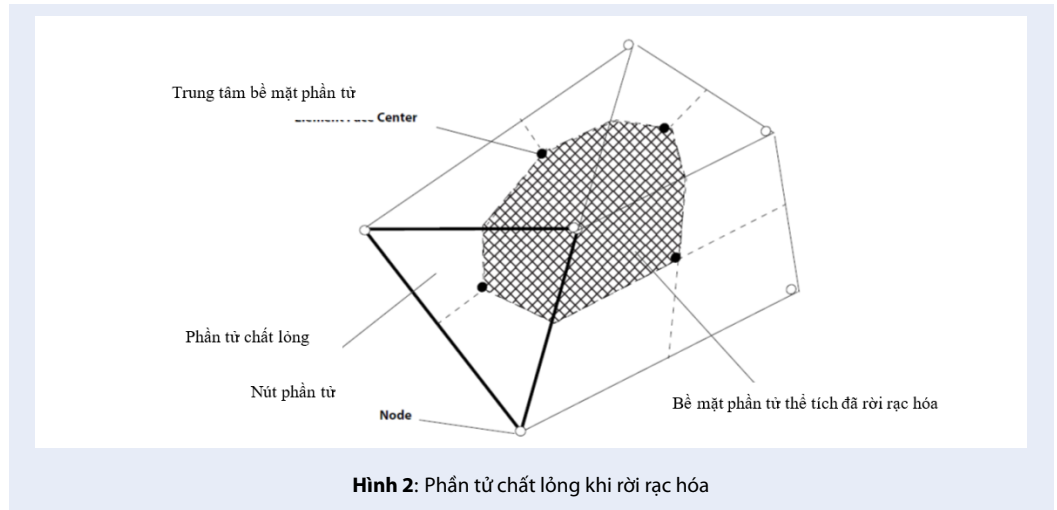
Phương trình tại bề mặt tương tác

Trước đây để bỏ qua sự phức tạp do tương tác rắn lỏng thì các nhà khoa học thường giả thiết thành bể tuyệt đối cứng. Gần đây, các phương pháp mới đề xuất đã xét đến sự ảnh hưởng của FSI tuy nhiên hầu hết có hạn chế là chỉ giải quyết được biến dạng của thành bể do sóng chất lỏng va đập vào (FSI một chiều)²⁷, chứ chưa xét được sự phản hồi ngược lại của thành bể đến miền chất lỏng (FSI hai chiều) như Hình 3. Và đối với thành bể mềm thì sự phản hồi cũng như mất ổn định khi dao động của miền chất rắn là đáng để xem xét. Để có được lời giải đúng cho bài toán bể chất lỏng thành mềm dao động thì FSI hai chiều cần được thực hiện. Áp suất chất lỏng và biến dạng thành bể được “truyền dữ liệu” vào nhau tại mặt tương tác của thành ướt bể, đây cũng chính là điều kiện biên của FSI.

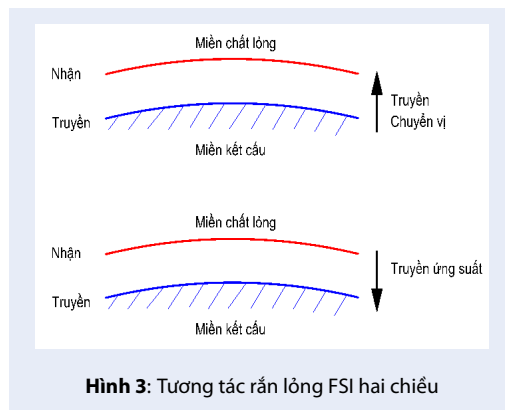
Tại bề mặt tương tác giữa hai miền rắn lỏng như trình bày ở Hình 1, phương trình động học cơ bản (điều kiện biên) được áp dụng:

$$\begin{cases} \tau_f \cdot \mathbf{n}_f = \tau_s \cdot \mathbf{n}_s \\ d_f = d_s \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó τ_f và τ_s là ứng suất tương ứng tại nút trên miền chất lỏng và thành bể, và là vec tơ chỉ hướng đơn vị tương ứng hai miền chất lỏng-kết cấu, d_s và d_f lần lượt là biến dạng của hai miền rắn-lỏng. Miền ướt của thành bể rắn và biên của miền chất lỏng tại mặt FSI sẽ thu-nhận trường áp suất-trường biến dạng; để giảm sai số do sự thu-nhận này, các lưới phần tử



Hình 2: Phần tử chất lỏng khi rời rạc hóa



Hình 3: Tương tác rắn lỏng FSI hai chiều

trên mặt FSI được chia cùng kích thước. Trong hệ phương trình trên, bước thời gian 0,01 s được chọn cho phân tích trên miền chất lỏng bằng FVM trong mô đun CFX lần miền kết cấu bằng FEM trong mô đun Mechanical của Ansys Workbench. Sau đó với năm lần ghép nối ma trận và hai mươi lăm lần lặp tối đa trên miền chất lỏng tại mỗi bước thời gian Δt được sử dụng để đảm bảo độ chính xác. Chỉ khi miền chất lỏng và miền kết cấu hội tụ cùng một bước hoặc đạt đến số lần lặp tối đa, hệ phương trình trường cập đôi sẽ tiến hành với bước thời gian kế tiếp như ở Hình 4. Tại Việt Nam chưa có nhiều các nghiên cứu về bể chứa chất lỏng thành mềm chịu tải trọng động đặc biệt và sự tương tác rắn lỏng hai chiều thường được bỏ qua nhằm đơn giản hóa việc tính toán.

Tiêu chuẩn hội tụ

Để đánh giá sự hội tụ của việc truyền dữ liệu ở mặt tương tác, mỗi bước lặp cần được tính toán lại so với bước lặp liền trước. Điều kiện hội tụ là sự thay đổi

trong tất cả các giá trị truyền dữ liệu giữa hai lần lặp kế tiếp được giảm nhỏ hơn giá trị dung sai cho phép (còn gọi là mục tiêu hội tụ)

Giá trị mục tiêu hội tụ mặc định trong ANSYS là 1e-2, tuy nhiên hoàn toàn có thể thay đổi cho phù hợp với từng bài toán. Sự hội tụ được xác định bằng công thức:

$$\epsilon^* = \frac{\log(\epsilon/\epsilon_{toler})}{\log(10.0/\epsilon_{toler})} \tag{3}$$

Trong đó ϵ_{toler} là giá trị mục tiêu hội tụ. ϵ là giá trị thay đổi chuẩn tại mặt tiếp xúc, được xác định:

$$\epsilon = \|\varphi_{new} - \varphi_{pre}\| / \|\varphi_{new}\| \tag{4}$$

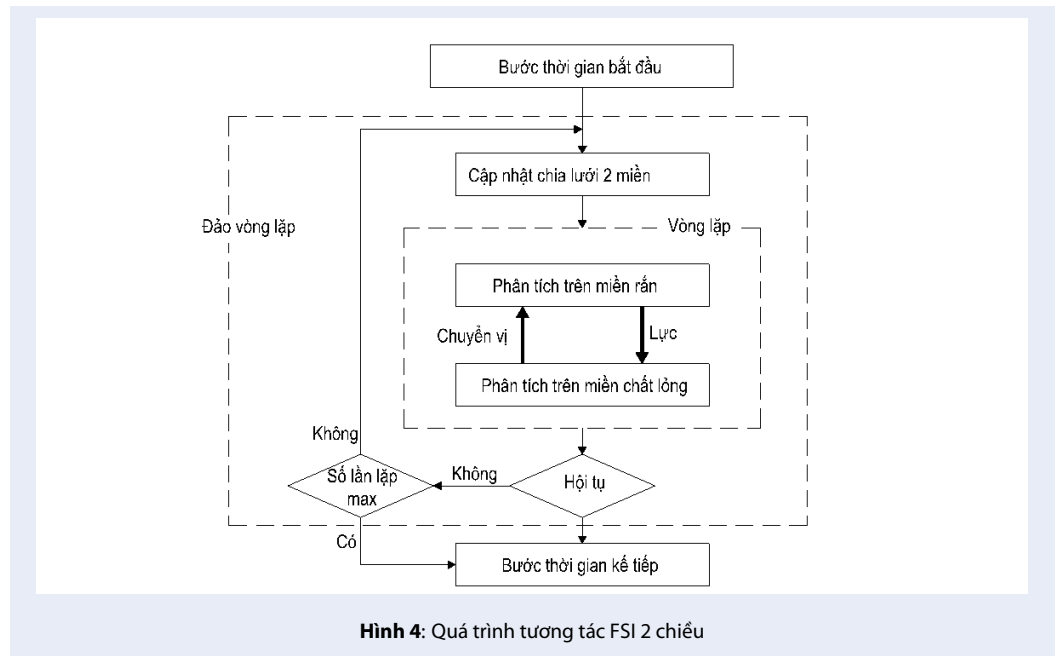
Với φ_{new} là véc tơ dữ liệu mới từ trường vật lý khác, φ_{pre} là véc tơ dữ liệu áp dụng lên trường tương tác ở bước lặp trước. Giá trị ở thời điểm hiện tại được xác định:

$$\varphi = \varphi_{pre} + \alpha(\varphi_{new} - \varphi_{pre}) \tag{5}$$

Trong đó α là hệ số “chùng” (relaxation factor), đây là hằng số dùng trong phương pháp lặp. Hằng số này giúp cho quá trình giải lặp được nhanh chóng hội tụ, và gần như chỉ có thể chọn hiệu quả bằng phương pháp thử và sai. Theo cơ sở lý thuyết của Ansys²⁸, điều kiện hội tụ để dừng vòng lặp là:

$$\epsilon^* \leq 0$$

Trong nghiên cứu này sau khi thử và sai thì chọn $\alpha = 1e-5$ và Ansys Workbench thực hiện tự động tính toán nhằm có được hai thông số quan trọng là (1) áp suất của chất lỏng tác dụng lên thành bể và (2) chuyển vị của thành bể mềm khi chịu tải trọng động



Hình 4: Quá trình tương tác FSI 2 chiều

KẾT QUẢ MÔ PHỎNG SỐ

Bể chứa với kích thước $0.2m \times 0.3m$ có chiều cao chất lỏng $h=5\text{ cm}$ như ở Hình 5 chịu kích thích dao động nền điều hoà $X(t) = X_0 \sin \omega t = 3mm \times \sin(2\pi \cdot 1.11 \times t)$. Ứng xử động xác định tần số dao động riêng f_{tank} bể chứa và chiều cao η của sóng chất lỏng được thực hiện.

Các thông số đầu vào cho bài toán bể T02x03 chịu tải điều hoà

Các thông số vật lý được trình bày ở Bảng 1.

Kết quả mô phỏng

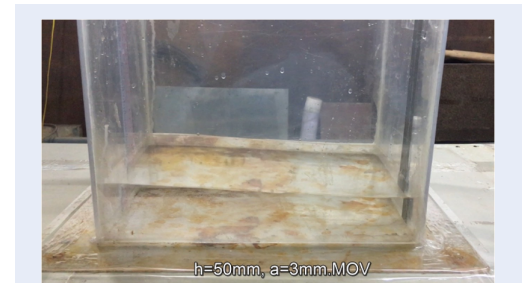
Kết quả tính toán được trình bày trong phần 3 khi so sánh với thí nghiệm và cho thấy kết quả giữa mô phỏng và thí nghiệm là tương đồng.

THÍ NGHIỆM

Các thí nghiệm được tiến hành trên bể bằng mica với chất lỏng bên trong và thực hiện tại Phòng thí nghiệm động đất tại Khoa Xây Dựng, Trường Đại Học Sư Phạm Kỹ Thuật Tp.HCM. Hệ thống bàn lắc khả năng chịu lực lên đến 300kg với kích thước mặt bàn $0.4m \times 1.2m$. Gia tốc, vận tốc, tần số và biên độ tối đa cho phép được cung cấp làm đầu vào lần lượt là 1.5g, 0.9 m/s, 25 Hz và $\pm 50\text{ mm}$.

Mục đích thí nghiệm để xem xét ứng xử động của bể chất lỏng chịu tải trọng động, thí nghiệm để khẳng định phương pháp FVM/FEM giữa lý thuyết và thực nghiệm là tương đồng. Thí nghiệm được tiến hành

trên bể chứa có kích thước $0.2 \times 0.3m$ với chiều cao chất lỏng là 50 mm chịu kích thích điều hoà với chuyển vị nền $x = 5cm \times \sin(2\pi f_{TLD} \cdot t)$.



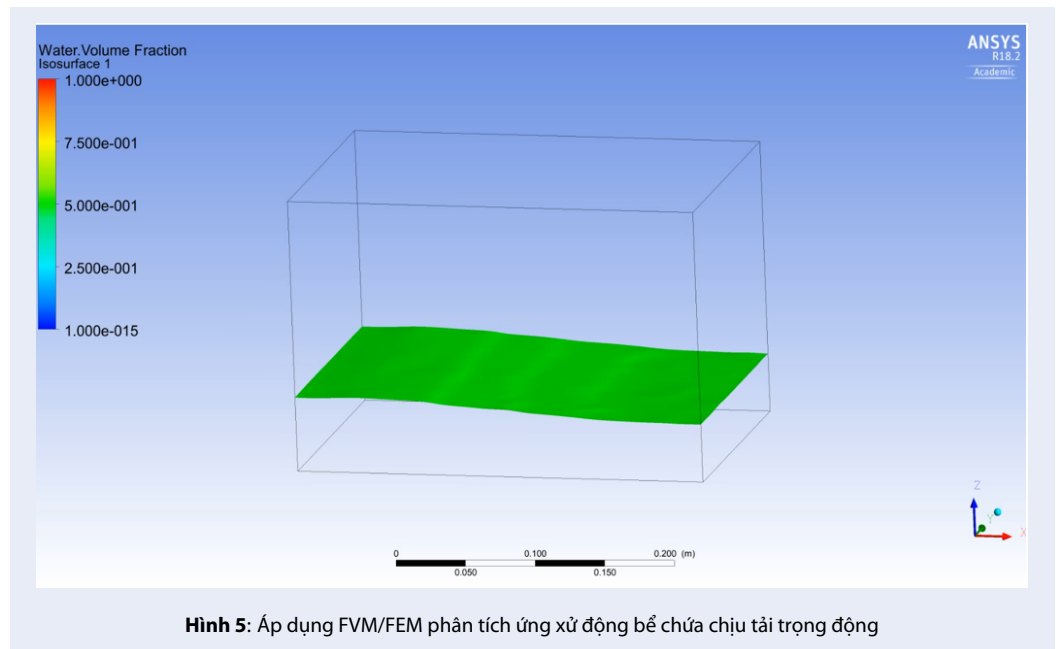
Hình 7: Thí nghiệm bể chất lỏng kích thước $0.2 \times 0.3m$ chịu tải điều hoà

Tần số dao động riêng

Tần số dao động riêng của bể chứa chất lỏng tính bằng công thức giải tích dựa trên giả thiết thành bể tuyệt đối cứng theo Housner²:

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{2a} \tanh\left(\frac{\pi h}{2a}\right)} \quad (6)$$

Khi ấy tần số dao động riêng của bể ở Hình 6 theo là $f_{tank} = 1.118\text{ Hz}$. Kết quả tính toán hoàn toàn trùng khớp với thí nghiệm và các thí nghiệm sẽ trình bày ở phần tiếp theo.



Bảng 1: Kích thước bể và chất lỏng bên trong bể

Đơn vị: mm	Miền kết cấu	Miền chất lưu
Dài (Phương X)	308	300
Rộng (Phương Y)	208	200
Cao (Phương Z)	200	50
Độ dày thành bể	4	—

Chiều cao sóng chất lỏng

Theo Housner², biên độ sóng được tính toán theo công thức giải tích

$$\eta(x=L/2) = \omega^2 \frac{X_0}{g} \sin \omega t \times \left\{ x - \frac{4L}{\pi^2} \frac{\omega^2}{\omega_n^2 - \omega^2} \right\} \quad (7)$$

Kết quả ở Hình 7, trong đó chiều cao sóng lớn nhất $\eta=12.2$ cm tại thời điểm với T là chu kỳ dao động tự nhiên của sóng chất lỏng bên trong bể chứa.

Hình 8 so sánh ảnh chụp nhanh chuyển động sóng chất lỏng thu được từ mô phỏng số và thí nghiệm tương ứng trong thời gian bể chịu tải trọng động. Có thể thấy, chuyển động của sóng trong thí nghiệm thực tế được tiên lượng chính xác bằng mô hình số cả về chiều cao sóng lẫn chu kỳ mỗi dao động.

Từ phần 3 này có thể kết luận phương pháp kết hợp FVM/FEM để mô phỏng bể chất lỏng chịu tải trọng động là chuẩn xác. Trong phần 4, phương pháp này

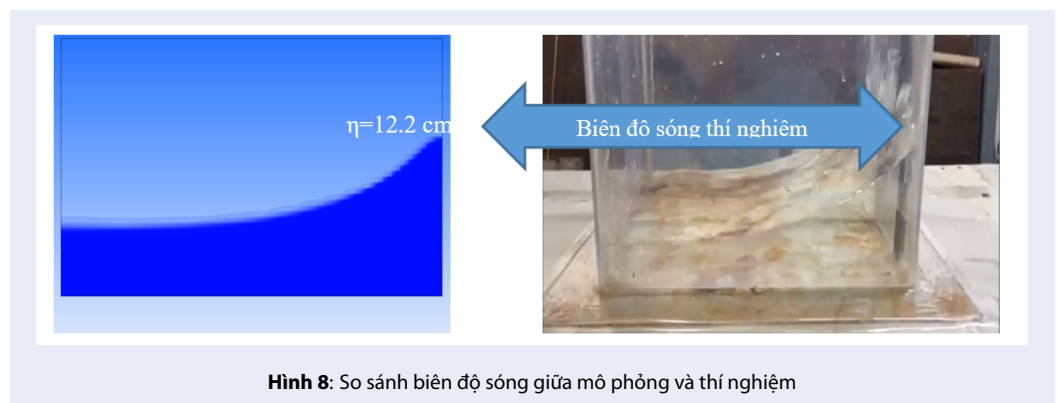
tiếp tục được sử dụng để phân tích các nghiên cứu đã thực hiện trước đây nhằm so sánh kết quả và chỉ ra tầm quan trọng của tương tác rắn lỏng hai chiều.

THẢO LUẬN VỀ ẢNH HƯỞNG CỦA THÀNH BỂ MỀM ĐẾN ĐẶC TRƯNG ĐỘNG LỰC HỌC CỦA BỂ

Để khảo sát sự ảnh hưởng của tương tác FSI hai chiều đến đặc trưng động lực học của bể thành mềm, bài báo phân tích một bài toán đã thực hiện bởi nhiều phương pháp khác nhau của các nghiên cứu đi trước^{27,29} bằng phương pháp FVM/FEM. Bể bê tông kích thước như Hình 10 với đặc trưng: bê tông dung trọng $\gamma = 2400 \text{ kg/m}^3$, mô đun đàn hồi $E_c=2.1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, hệ số poisson $\nu = 0.17$ và tỷ số cản $\xi=3\%$. Yêu cầu tính áp lực thủy động p_w lên thành bể khi bể chịu động đất El Centro 1940, biết rằng động đất gây ra gia tốc theo phương X.



Hình 6: Thiết lập thí nghiệm với (a) cảm biến chuyển vị, (b) cảm biến gia tốc và (c) hộp biến tần



Hình 8: So sánh biên độ sóng giữa mô phỏng và thí nghiệm

Tần số dao động riêng

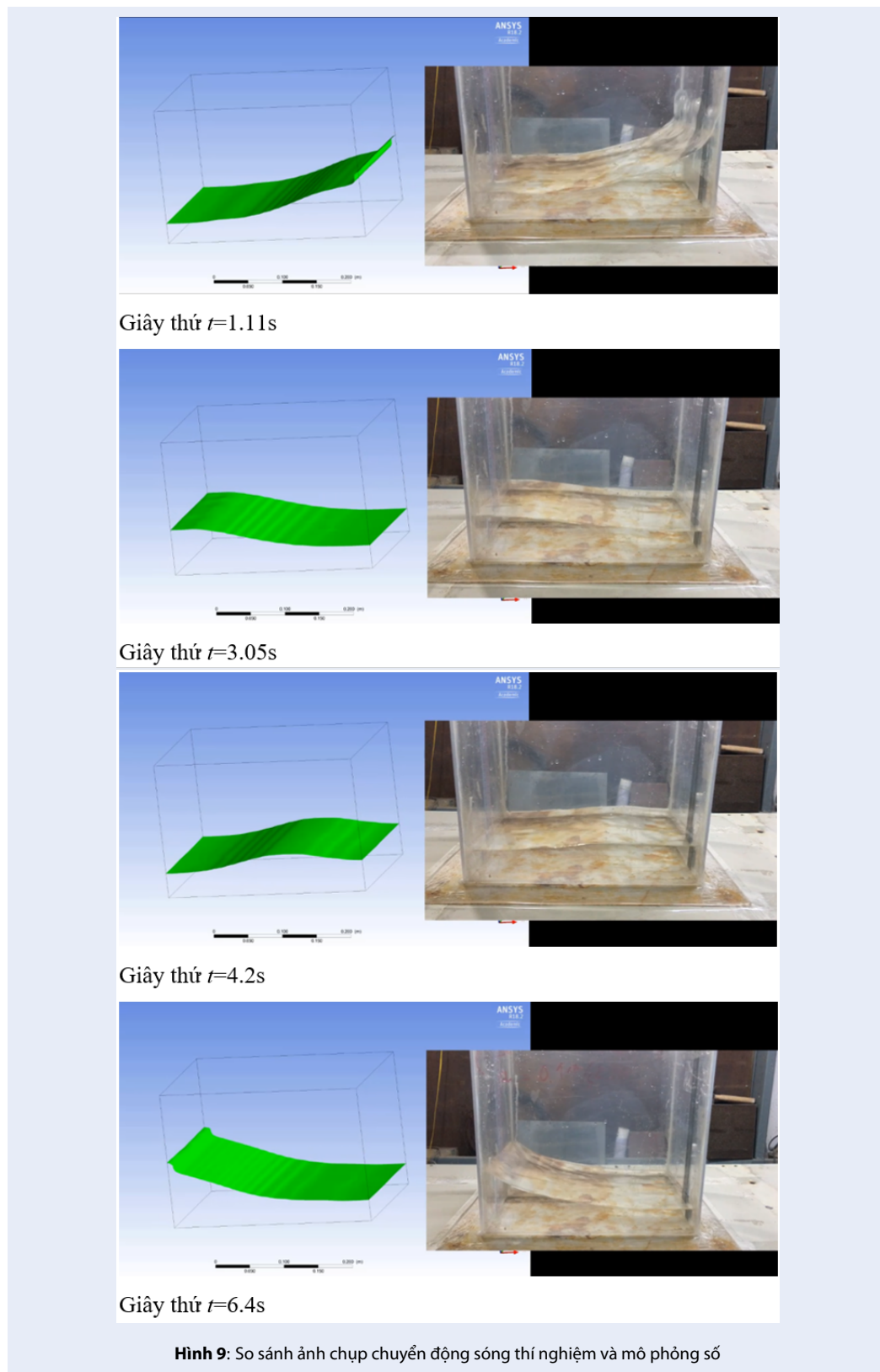
Tần số dao động riêng của bể thành cứng được tính toán theo $f_{tank} = 0.199$ Hz. Tuy nhiên khi thay đổi độ dày thành bể từ mềm đến cứng thì chính do điều kiện biên tương tác ảnh hưởng đến tần số dao động riêng của bể. Đây cũng là thông số đặc trưng động lực học quan trọng nhất của bể chất lỏng, đặc biệt đối với các bể chứa chất lỏng được sử dụng làm thiết bị giảm chấn²³. Để thấy được ảnh hưởng FSI hai chiều đối với thành bể mềm thì tần số f_{tank} được tính toán cho các bể chứa có độ dày thành bể t_w thay đổi từ mỏng 0.3 m đến dày 1.0 m trong trường hợp có và không có xét FSI. Sự khác nhau của tần số chất lỏng được thể hiện qua đồ thị ở Hình 11.

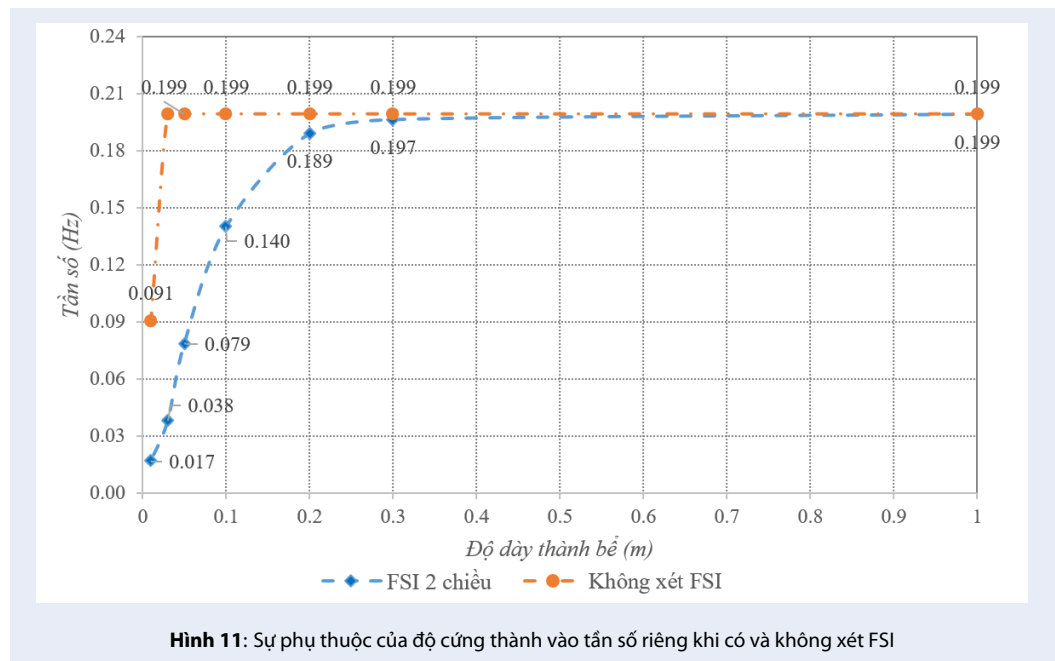
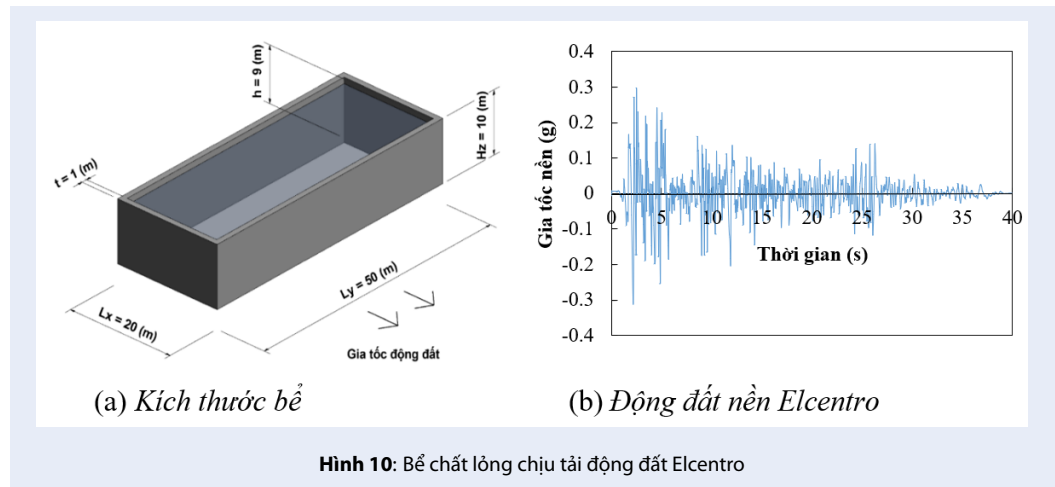
Từ đồ thị trên cho thấy, f_{tank} không chỉ phụ thuộc vào độ cứng của thành bể mà còn phụ thuộc vào việc điều kiện biên tương tác FSI. Mà chính vì sự phức tạp của

phương trình điều kiện biên này mà các nghiên cứu trước đây đã bỏ qua bằng cách xem thành bể là tuyệt đối cứng để đơn giản hóa việc tính toán^{30,31}. Điều này dẫn đến sự thiếu chính xác khi thiết kế bể lần thiết kế thiết bị giảm chấn chất lỏng, và điều này cần được xem xét hiệu chỉnh đặc biệt trong các tiêu chuẩn thiết kế³⁰.

Áp lực động của sóng chất lỏng lên thành bể

Phần này trình bày ảnh hưởng của độ cao mực nước đến áp lực thủy động p_w của bể ở Hình 9 chịu động đất Elcentro. Kết quả bài toán được thể hiện qua Hình 11 và Hình 12. Từ đồ thị ở Hình 11 cho thấy khi xét đến FSI hai chiều thì p_w tác dụng lên thành bể theo FVM/FEM (38.19 kPa) sẽ lớn hơn khi không xét FSI hoặc xem thành bể tuyệt đối cứng (19.2 kPa). Đây cũng là lý do vì sao mặc dù bể chứa được thiết kế để

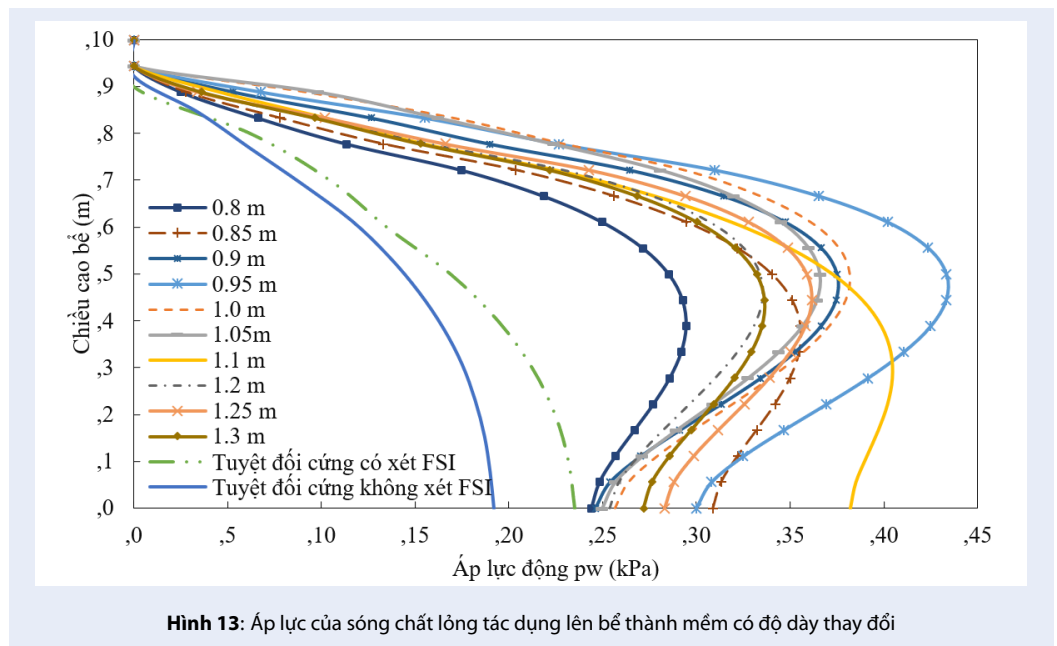
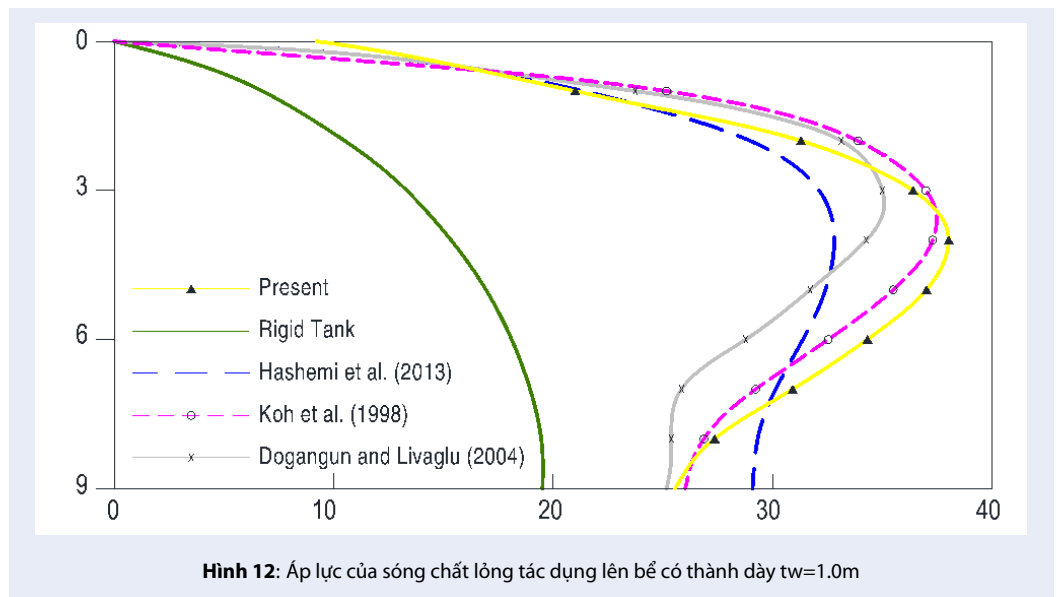




chống cấp động đất cao nhưng thực tế chỉ chịu động đất cấp thấp thì bể đã bị phá hủy.

Khi độ dày thành bể tăng lên, áp suất thủy động p_w cực đại tăng. Tuy nhiên đó là trong trường hợp thành bể còn nằm trong giới hạn đủ bền với $t_w \geq 0.8m$ còn khi bể có thành quá cứng thì dù có xét FSI hay không thì p_w sẽ giảm về giá trị của bể có thành tuyệt đối cứng. Ngoài ra, từ Hình 12 và Hình 13, chứng tỏ tồn tại một “ngưỡng” độ dày nhất định để phân biệt thành bể cứng hay mềm. Hình 12 cho thấy khi t_w nhỏ hơn “ngưỡng” độ dày này, hay nằm trong miền bể mềm, thì p_w giảm nếu độ dày bể giảm. Hình 13 ngược lại, khi vượt qua “ngưỡng” độ dày này, hay nằm trong miền bể cứng, p_w giảm nếu độ dày bể tăng.

Các kết quả ở phần này cho thấy rằng khi thiết kế bể chứa chất lỏng thành mỏng, không thể bỏ qua tính tương tác rần lỏng của chất lỏng và thành bể. Điều này làm cho các bể chứa chất lỏng được an toàn dưới tác dụng của tải trọng động, khi ấy độ lớn của áp lực thủy động bị bỏ qua dẫn đến các sự sụp đổ bể chứa trong thực tế³². Ngoài ra nếu xem xét bể chứa chất lỏng đóng vai trò như thiết bị kháng chấn TLD, thì sự tương tác FSI cho thành bể mềm còn làm thay đổi tần số tự nhiên của bể, điều này dẫn đến thiết bị mất khả năng làm việc.



KẾT LUẬN

Nghiên cứu cho thấy FVM/FEM được đề xuất là hợp lý vì kết quả mô phỏng được kiểm chứng với thí nghiệm và các nghiên cứu đi trước. Phương pháp này tính toán dao động của chất lỏng trong bể thành mềm lần biến dạng thành bể có xét đến FSI 2 chiều. Phương trình điều kiện biên của chất lỏng-thành bể tại mặt tương tác được giải quyết. Đây chính là ưu điểm của FVM/FEM so với một số nghiên cứu đi trước, thường bỏ qua độ cứng thành bể và tương tác FSI khi thiết kế.

Kết quả mô phỏng được các thí nghiệm kiểm chứng độ chính xác của phương pháp như ở Hình 8. Sau đó bài báo kiểm tra đối chiếu với các nghiên cứu đã thực hiện trước đây. Kết quả rút ra là tần số dao động sóng trong bể thành mềm nhỏ hơn trong bể thành cứng như thể hiện ở Hình 11, áp lực động p_w của sóng chất lỏng tác dụng lên bể thành cứng nhỏ hơn lên bể thành mềm ở Hình 12 và Hình 13. Đặc biệt cần quan tâm khi thiết kế các bể chất lỏng đóng vai trò như thiết bị kháng chấn. Vì thiết bị hoạt động dựa trên tần số là chính.

Khi có xét đến sự tương tác giữa thành bể và chất lỏng thì áp lực động tác dụng lên bể tuyệt đối cứng có khác với bể tuyệt đối cứng nhưng không xét tương tác. Điều này cũng khẳng định tầm quan trọng của FSI. Và FSI còn đặc biệt cần xem xét hơn đối với các bể thành mềm. Khi độ dày bể thành mềm thay đổi thì áp lực động lên thành bể thay đổi và có một độ dày gây nguy hiểm nhất cho bể chứa như Hình 13 là độ dày $t_w=0.95$ m. Đây là điểm quan trọng khi thiết kế bể chứa.

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

ACI American Concrete Institute: Viện Bê Tông Hoa Kỳ

ALE Arbitrary Lagrangian Euler

BEM Boundary Element Method: Phương pháp phần tử biên

EC Euro Code: Tiêu chuẩn thiết kế Châu Âu

IS Indian Standard: Tiêu chuẩn thiết kế Ấn Độ

DOF Degree of Freedom: Bậc tự do

FSI Fluid-Structure Interaction: Tương tác hai miền kết cấu-chất lỏng

FEM Finite Element Method: Phương pháp phần tử hữu hạn

FVM Finite Volume Method: Phương pháp thể tích hữu hạn

FVM/FEM Finite Volume Method/ Finite Element Method

MTLD Multi Tuned Liquid Damper: Thiết bị giảm chấn chất lỏng đa tần

MTMD Multi Tuned Mass Damper: Thiết bị giảm chấn khối lượng đa tần

MDOF Multi Degree of Freedom: hệ nhiều bậc tự do

TLD Tuned Liquid Damper: Thiết bị giảm chấn chất lỏng

TLCD Tuned Liquid Column Damper: Thiết bị giảm chấn cột chất lỏng

TMD Tuned Mass Damper: Thiết bị giảm chấn khối lượng

RTHS Real Time Hybrid Simulation

SDOF Single Degree of Freedom: hệ một bậc tự do

SPH Smoothed-Particle Hydrodynamics

SRSS Square Root of the Sum of the Squares

STLD Single Tuned Liquid Damper

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này thuộc đề tài cấp Bộ số: B2021-SPK-09, do Bộ Giáo dục và Đào tạo tài trợ, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh chủ trì.

XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

Nhóm tác giả tuyên bố rằng chúng tôi không có lợi ích tài chính hoặc mối quan hệ cá nhân cạnh tranh nào có thể ảnh hưởng đến công việc được báo cáo trong bài viết này.

ĐÓNG GÓP CỦA CÁC TÁC GIẢ

Tác giả Tường là tác giả chính, tác giả Huỳnh đề xuất phương pháp nghiên cứu, tác giả Hải kiểm tra kết quả và chỉnh sửa bản nháp, tác giả Đoàn thực hiện thí nghiệm và tác giả Khôi hỗ trợ biên soạn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Housner GW. Dynamic pressures on accelerated fluid containers. Bull Seismol Soc Am. 1957;47(1):15-35; Available from: <https://doi.org/10.1785/BSSA0470010015>.
2. Housner GW. The dynamic behavior of water tanks. Bull Seismol Soc Am. 1963;53(2):381-7; Available from: <https://doi.org/10.1785/BSSA0530020381>.
3. Veletsos AS, Tang Y, Tang HT. Dynamic response of flexibly supported liquid storage tanks. J Struct Eng. 1992;118(1):264-83; Available from: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1992\)118:1\(264\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:1(264)).
4. Veletsos AS, Younan AH. Dynamics of solid-containing tanks. II: Flexible tanks. J Struct Eng. 1998;124(1):62-70; Available from: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1998\)124:1\(62\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:1(62)).
5. Chimakurthi SK, Reuss S, Tooley M, Scampoli S. ANSYS Workbench System Coupling: a state-of-the-art computational framework for analyzing multiphysics problems. Eng Comput. 2018;34(2):385-411; Available from: <https://doi.org/10.1007/s00366-017-0548-4>.
6. Hou G, Wang J, Layton A. Numerical methods for fluid-structure interaction - a review. Commun Comp Phys. 2012;12(2):337-77; Available from: <https://doi.org/10.4208/cicp.291210.290411s>.
7. Sotiropoulos F, Yang X. Immersed boundary methods for simulating fluid-structure interaction. Prog Aerosp Sci. 2014/02/01/2014;65:1-21; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2013.09.003>.
8. Rebouillat S, Liksonov D. Fluid-structure interaction in partially filled liquid containers: A comparative review of numerical approaches. Comput Fluids. 2010/05/01/2010;39(5):739-46; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2009.12.010>.
9. Jaiswal O, Rai DC, Jain SK. 'Review of code provisions on seismic analysis of liquid storage tanks/ IITK-GSDMA Project on Building Codes, IITK-GSDMA-EQ04-V1. Vol. 0; 2004.
10. Kildashti K, Mirzadeh N, Samali B. Seismic vulnerability assessment of a case study anchored liquid storage tank by considering fixed and flexible base restraints. Thin Walled Struct. 2018/02/01/2018;123:382-94; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.11.041>.
11. Mehretehan AM, Maleki S. 3D buckling assessment of cylindrical steel silos of uniform thickness under seismic action. Thin Walled Struct. 2018/10/01/2018;131:654-67; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.07.040>.
12. Tuong BPD, Huỳnh PD, Bui T-T, Sarhosis V. Numerical analysis of the dynamic responses of multistory structures equipped with tuned liquid dampers considering fluid-structure interactions. TOBCTJ. 2019;13(1):289-300; Available from: <https://doi.org/10.2174/1874836801913010289>.
13. Tuong BPD, Huỳnh PD. Numerical study on vibration control of structures using Multi tuned liquid dampers with high mass ratio. In: 5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD). Vol. 2020; 2020. p. 1-4; Available from: <https://doi.org/10.1109/GTSD50082.2020.9303167>.
14. Ghaemmaghami A. Dyn Time-Hist Resp Concr Rectangular Liq Storage Tanks. 2010;72;

15. Ding H, Chen Y-N, Wang J-T, Altay O. Numerical analysis of passive toroidal tuned liquid column dampers for the vibration control of monopile wind turbines using FVM and FEM. *Ocean Eng.* 2022/03/01/2022;247:110637; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110637>.
16. Ashasi-Sorkhabi A, Malekghasemi H, Ghaemmaghami A, Merican O. Experimental investigations of tuned liquid damper-structure interactions in resonance considering multiple parameters. *J Sound Vib.* 2017/02/03/2017;388:141-53; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.10.036>.
17. Moukalled F, Mangani L, Darwish M. The finite volume method in computational fluid dynamics. An advanced introduction with OpenFoam® and Matlab®. Nueva York: Springer. 2016; Available from: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6>.
18. Saghi R, Hirdaris S, Saghi H. The influence of flexible fluid structure interactions on sway induced tank sloshing dynamics. *Eng Anal Boundary Elem.* 2021/10/01/2021;131:206-17; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2021.06.023>.
19. Zhao D, Hu Z, Chen G, Lim S, Wang S. Nonlinear sloshing in rectangular tanks under forced excitation. *Int J Nav Archit Ocean Eng.* 2018/09/01/2018;10(5):545-65; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2017.10.005>.
20. Kim J, Park JK, Park J. Fluid-structure interaction analysis of 3-D rectangular tanks by a variationally coupled BEM-FEM and comparison with test results. *Earthquake Eng Struct Dyn.* 1998;27(2):109-24, 02/01; Available from: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199802\)27:2<109::AID-EQE714>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199802)27:2<109::AID-EQE714>3.0.CO;2-M).
21. Truong-Thi P, Nguyen-Xuan H, Wahab MA. A coupled SPH-FEM for fluid-structures interaction problem with free-surface and revetment slope thin-walled structures. Singapore; 2019. p. 187-201; Available from: https://doi.org/10.1007/978-981-13-2405-5_16.
22. Truong-Thi P, Dang-Bao L, Wahab MA, Duong-Ngoc H, Hoang-Duc T, Nguyen-Xuan H. Analysis of fluid-structures interaction problem of revetment slope thin-walled structure using Abaqus. Singapore; 2018. p. 917-25; Available from: https://doi.org/10.1007/978-981-10-7149-2_64.
23. Abdollahzadeh Jamalabadi MY. Frequency analysis and control of sloshing coupled by elastic walls and foundation with smoothed particle hydrodynamics method. *J Sound Vib.* 2020/06/23/2020;476:115310; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115310>.
24. Ng KC, Alexiadis A, Chen H, Sheu TWH. A coupled Smoothed Particle Hydrodynamics-Volume Compensated Particle Method (SPH-VCMP) for Fluid Structure Interaction (FSI) modelling. *Ocean Eng.* 2020/12/15/2020;218:107923; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107923>.
25. Farmani S, Ghaeini-Hessaroeeyeh M, Hamzehei-Javaran S. Developing new numerical modeling for sloshing behavior in two-dimensional tanks based on nonlinear finite-element method. *J Eng Mech.* 2019;145(12):04019107; Available from: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001686](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001686).
26. Serván-Camas B, Cercós-Pita JL, Colom-Cobb J, García-Espinosa J, Souto-Iglesias A. Time domain simulation of coupled sloshing-seakeeping problems by SPH-FEM coupling. *Ocean Eng.* 2016/09/01/2016;123:383-96; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.07.003>.
27. Hashemi S, Saadatpour MM, Kianoush MR. Dynamic analysis of flexible rectangular fluid containers subjected to horizontal ground motion. *Earthquake Eng Struct Dyn.* 2013;42(11):1637-56; Available from: <https://doi.org/10.1002/eqe.2291>.
28. R. ANSYS. '14.0, Help System,'coupled field analysis guide. ANSYS ed: Inc, 2011;.
29. Hashemi S, Saadatpour MM, Kianoush MR. Dynamic behavior of flexible rectangular fluid containers. *Thin Walled Struct.* 2013/05/01/2013;66:23-38; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.02.001>.
30. Kang T-W, Yang H-I, Jeon J-S. Earthquake-induced sloshing effects on the hydrodynamic pressure response of rigid cylindrical liquid storage tanks using CFD simulation. *Eng Struct.* 2019/10/15/2019;197:109376; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109376>.
31. Soliman IM, Tait MJ, El Damatty AA. Development and validation of finite element structure-tuned liquid damper system models. *J Dyn Syst Meas Control.* 2015;137(11); Available from: <https://doi.org/10.1115/1.4030866>.
32. Djermane M, Zaoui D, Labbaci B, Hammadi F. Dynamic buckling of steel tanks under seismic excitation: numerical evaluation of code provisions. *Eng Struct.* 2014/07/01/2014;70:181-96; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.03.037>.

The influence of fluid-structure interactions 2-ways on dynamic characteristics of flexible tank

Bui Pham Duc Tuong^{1,*}, Nguyen Van Doan¹, Nguyen Dang Khoi¹, Phan Duc Huynh¹, Luong Van Hai²

ABSTRACT

This paper investigates the influence of two-way fluid-structure interactions (FSI) on the dynamic characteristics of flexible storage liquid tanks. A coupled finite volume method FVM and finite element method FEM (FVM/FEM) was developed to simulate a flexible water tank subjected to seismic loading. FVM is used to simulate the fluid domain and FEM is used to capture the structural domain. The two-dimensional interaction equation is solved at the contact surface between the elastic tank wall and the fluid by tuning the relaxation parameter and convergence conditions. The model investigates the influence of considering two-way FSI on the dynamic characteristics of a tank flexible to a rigid tank wall. The results show that the frequency of flexible tank walls differs from that of rigid walls, especially the hydrodynamic pressure of liquid motion acting on the tank. A "threshold value" is revealed to distinguish flexible or rigid tanks. If the tank stiffness exceeds this threshold, then the thicker the tank is, the lower the hydrodynamic pressure. However, if the tank stiffness is less than this threshold, the thinner the tank is, the lower the hydrodynamic pressure. Further experiments on a fluid container under harmonic excitation are carried out using a shaking table to verify the dynamic behavior in comparison to numerical results. Good agreement is observed between numerical, analytical, published, and experimental data.

Key words: fluid-structure interaction, flexible liquid storage tank, shaking table testing, sloshing waves, computational fluid dynamics

¹Faculty of Civil Engineering, HCMC University of Technology and Education, HCMC, Vietnam.

²Faculty of Civil Engineering, Bach Khoa University, HCMC, Vietnam.

Correspondence

Bui Pham Duc Tuong, Faculty of Civil Engineering, HCMC University of Technology and Education, HCMC, Vietnam.

Email: tuongbpd@hcmute.edu.vn

History

- Received: 13-2-2023
- Accepted: 7-8-2023
- Published Online: 30-9-2023

DOI :

<https://doi.org/10.32508/stdjet.v6i3.1083>



Copyright

© VNUHCM Press. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



Cite this article : Tuong B P D, Doan N V, Khoi N D, Huynh P D, Hai L V. **The influence of fluid-structure interactions 2-ways on dynamic characteristics of flexible tank.** *Sci. Tech. Dev. J. – Engineering and Technology* 2023; 6(3):1955-1966.