■Ngày nhận bài: 08/3/2024 ■Ngày sửa bài: 12/4/2024 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/5/2024

Nghiên cứu kháng dao động cho bồn chứa chất lỏng lớn chịu ảnh hưởng của động đất

Study on sloshing resistance for large liquid storage tank subjected to seismic excitation

> TRẦN VĂN TÙNG*, NGUYỄN VĂN NINH
Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam; *Email: tungtv@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Với sự phát triển bùng nổ của nền kinh tế Việt Nam, nhu cầu về năng lượng như dầu mỏ đang tăng lên đáng kể và bể chứa thẳng đứng là phương tiện lưu trữ năng lượng quan trọng nhất và nhu cầu về chúng cũng ngày càng tăng. Là kho chứa vật liệu dễ cháy nổ, khi xảy ra hư hỏng không chỉ trực tiếp gây ra những thảm họa nghiêm trọng như hỏa hoạn mà còn gây ra những thảm họa khác như ô nhiễm môi trường. Vì vậy, việc tiến hành nghiên cứu động đất trên bể chứa chất lỏng có giá trị thực tiễn rất lớn. Khi xảy ra động đất mạnh, chất lỏng bị va đập vào bể chứa chất lỏng sẽ ảnh hưởng xấu đến kết cấu bể. Để giải quyết những vấn đề như vậy, một thiết bị vách ngăn hình khuyên có thể được lắp đặt trong bể chứa chất lỏng để kiểm soát phản ứng trượt chất lỏng.

Để nghiên cứu ảnh hưởng của vị trí và kích thước tấm vách ngăn trong bể chứa chất lỏng đến phản ứng va đập của chất lỏng, nghiên cứu này dựa trên phần mềm phần tử hữu hạn tổng quát lớn ADINA. Giả sử chất lỏng là chất lỏng nhớt và không thể nén được, vách ngăn có hình dạng như một tấm tròn mỏng và vuông góc với thành bể, đồng thời thiết lập hệ thống tương tác nền-bể-chất lỏng. Đầu tiên, phân tích tĩnh và phương thức của hệ thống bể chứa chất lỏng không có tấm vách ngăn được thực hiện và sau đó kết quả được so sánh với kết quả của các chỉ tiêu liên quan. Ngoài ra, việc phân tích tham số của phản ứng va đập của chất lỏng trong bể có vách ngăn dưới tác dụng kích thích địa chấn ngang cũng được thực hiện một cách kỹ lưỡng.

Từ khóa: Tấm vách ngăn; bể chứa chất lỏng; kháng dao động; anh hưởng động đất.

ABSTRACT

With the booming development of Viet Nam's economy, the demand for energy such as petroleum is growing dramatically, and the vertical storage tanks are the most important energy storage facilities, and their demand is also growing. As a facility for storing flammable and explosive materials, once damage occurs, it not only causes directly serious disasters such as fires, but also causes other disasters such as environmental pollutions. Therefore, it is of great practical value to conduct seismic research on liquid storage tanks. Under strong earthquakes, liquid sloshing in the liquid storage tank will adversely affect the tank structure. In order to solve such problems, an annular baffle device can be installed in the liquid storage tank to control the liquid sloshing response.

In order to investigate the influence of the baffle plate position and size in the liquid storage tank on the liquid sloshing response, this study is based on the large general finite element software ADINA. Assuming that the liquid is a viscous and incompressible fluid, the baffle is shaped as a thin circular plate and perpendicular to the tank wall, and establish a foundation-tank-liquid interaction system. Firstly, the static and modal analysis of the liquid storage tank system without baffle plate is carried out and then the results are compared with the results of relevant criterions. Moreover, the parametric analysis of the liquid sloshing response in the baffled tank under horizontal seismic excitation is carried out thoroughly.

Keywords: Baffle plate; liquid storage tank; sloshing response; seismic excitation.

1. TỔNG QUAN

1.1 Bể chứa chất lỏng

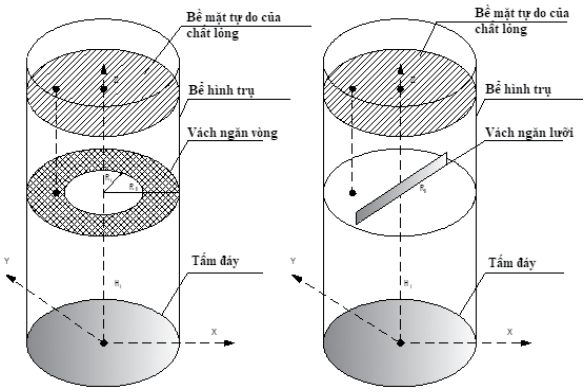
Bể chứa chất lỏng là bể chứa chất lỏng (dầu thô, xăng, khí dầu mỏ hóa lỏng, nước, axit và cồn công nghiệp…). Chúng thường được sử dụng trong các ngành công nghiệp năng lượng và chế biến với hình dáng ngoài và kích cỡ khác nhau. Tuy nhiên, bể hình trụ đỡ bởi nền đất phổ biến hơn bất kỳ dạng nào khác vì tính đơn giản trong thiết kế và kết cấu cũng như hiệu quả chống lại tải trọng thủy tĩnh và thủy động lực. Bể hình trụ có thể được làm bằng bê tông dự ứng lực hoặc thép. Chúng có thể được xây dựng ở các kích cỡ khác nhau để đáp ứng các yêu cầu về năng lực. Hơn nữa, chúng có thể được bố trí riêng biệt hoặc có thể được bố trí trong một nhóm bể gọi là "bãi đặt bể chứa" hoặc, cách khác, như một phần của các nhà máy công nghiệp lớn bao gồm hàng trăm bể.

Hình 1. Bể mở phía đỉnh bằng thép

Tùy thuộc vào tỷ lệ chiều cao và đường kính, bể được chia thành bể cao và bể rộng. Nếu chiều cao của bể lớn hơn đường kính của nó thì bể được dán nhãn là cao, ngược lại, bể sẽ được dán nhãn là rộng.

1.2 Thiết bị chống trượt

Khi kích thước của bể chứa chất lỏng tăng lên, lực và mô men thủy động lực cũng trở nên cực kỳ lớn, đặc biệt khi nó tiến đến trạng thái cộng hưởng. Trong nỗ lực ngăn chặn sự phá hủy cấu trúc hoặc ứng xử động lực học bất lợi, chúng ta cần tìm ra các phương pháp để triệt tiêu hoặc giảm bớt các lực động trượt. Ngày nay, hệ thống giảm chấn trượt được sử dụng đặc biệt với hai loại chính là hệ thống chủ động và hệ thống thụ động. Hệ thống hoạt động bao gồm các thiết bị được tích hợp với bộ đánh giá xử lý thời gian thực để cải thiện dịch vụ và độ an toàn. Các hệ thống này sẽ phát huy tác dụng khi ngoại lực tác động lên hệ thống cách ly nền của kết cấu theo đúng hướng vào đúng thời điểm nhằm giảm bớt những tác động không mong muốn. Tuy nhiên, hệ thống điều khiển thụ động là các thiết bị thông thường để chống lại hoặc hấp thụ năng lượng sinh ra trong trận động đất. Trong các hệ thống điều khiển thụ động, tải bên ngoài là không cần thiết và nó không tiêu thụ bất kỳ nguồn điện nào. Thay vào đó, nó dựa vào đặc tính giảm chấn của vật liệu được sử dụng trong thiết kế của nó.



Hình 2. Bể hình trụ tròn với vách ngăn vòng và lưỡi

1.3 Mục tiêu của nghiên cứu

Các mục tiêu chính của bài báo này có thể được tóm tắt như sau:

(1) Thực hiện nghiên cứu toàn diện về trạng thái động của bể hình trụ và sau đó thiết lập mối quan hệ giữa chiều rộng hoặc vị trí của vách ngăn và chiều cao sóng đập. Dựa vào kết quả thu được chúng ta có thể lựa chọn chiều rộng vách ngăn cũng như vị trí vách ngăn phù hợp trong hệ thống bể. Một mô hình lý thuyết để ước tính tỷ lệ giảm chấn của chế độ đối lưu khi có vách ngăn sẽ được giới thiệu.

(2) Phát hiện ảnh hưởng của vách ngăn đến việc thay đổi tần số va đập của chất lỏng nhằm đề xuất phương pháp hợp lý để tránh hiện tượng cộng hưởng.

(3) Hướng dẫn thiết kế kháng chấn hệ thống bồn chứa chất lỏng. Kết quả cũng có thể được sử dụng để so sánh với các quy chuẩn hiện hành nhằm cải thiện và đóng góp cho các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành.

(4) Hơn nữa, kết quả cũng chỉ ra rằng cần phải kiểm tra độ tin cậy của các bể chứa hiện có, đặc biệt là những bể được xây dựng trước những năm 70, với những phát minh hiện tại để đưa ra các giải pháp tăng cường cho những bể chứa đó.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

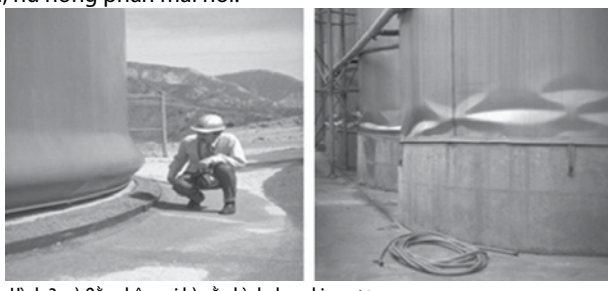
2.1 Dao động trượt của bể chứa chất lỏng có vách ngăn dưới tác dụng của tải trọng động đất

Hiệu suất địa chấn của bể chứa chất lỏng rất khác so với các kết cấu thông thường. Khám phá trạng thái trượt là một nhiệm vụ đầy thách thức và mối quan tâm này là trọng tâm chính của nhiều nhà nghiên cứu kỹ thuật trong nhiều thập kỷ qua. Để giảm thiểu tác động của hiện tượng trượt nước, phương pháp điều khiển thụ động được áp dụng: tạo các kết cấu phụ bổ sung gọi là vách ngăn vào hệ thống bể.

Vách ngăn là thiết bị hữu ích trong việc giảm lực va đập khi di chuyển container. Một số nghiên cứu đã đề cập đến mối lo ngại này, đáng chú ý nhất là ứng dụng của chúng trong các thùng chứa nhiên liệu của các phương tiện không gian. Trong lĩnh vực xây dựng, để ngăn ngừa hư hỏng do va đập trong bể chứa chất lỏng, nhiều cấu hình vách ngăn khác nhau được sử dụng. Tác động của các vách ngăn đến hiện tượng trượt trong bể chủ yếu theo hai cách: Cách thứ nhất: các vách ngăn có thể thay đổi tần số tự nhiên của chất lỏng. Cách thứ hai: vách ngăn có thể thay đổi hệ số giảm chấn của chế độ trượt.

2.2 Các dạng sự cố của bể chứa

Thu thập hư hỏng bể chứa chất lỏng và tìm ra các tiêu chuẩn giới hạn là những giai đoạn quan trọng trong bất kỳ nghiên cứu độ tin cậy nào. Trên cơ sở số liệu thống kê trước đây, chúng tôi đã suy luận rằng các hư hỏng do động đất gây ra ở các bể chứa chất lỏng hình trụ bằng thép là: thành bể bị oằn hình kim cương, oằn chân voi, hư hỏng phần mái nổi.



Hình 3. a) Oằn chân voi b) oằn hình dạng kim cương

Hình 4. Hư hỏng phần mái nổi

2.3 Tổng quan về nghiên cứu hiện tượng trượt chất lỏng

Các cuộc khảo sát về thiết bị trượt đã được khảo sát từ đầu những năm 60. Có nhiều nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm được thực hiện về tác động của vách ngăn đối với hiện tượng va đập trong thùng chứa nhiên liệu của các phương tiện không gian.

Trong hầu hết các nghiên cứu trước đây, nhiều thông số như ảnh hưởng của hình dạng vách ngăn, chiều rộng, độ cứng và vị trí đến khả năng giảm chấn và tần số của các chế độ chuyển động của chất lỏng đã được xem xét. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu này chỉ dừng lại ở quy mô bể nhỏ và rất ít nghiên cứu xem xét ảnh hưởng của nền đất đàn hồi đến phản ứng trượt. Từ việc xem xét tài liệu, cũng có thể kết luận rằng hầu hết tất cả các nghiên cứu được xem xét đều cố gắng đánh giá tác động giảm chấn khi sử dụng các phương pháp thực nghiệm và số. Tất nhiên, các nghiên cứu thử nghiệm là cần thiết để đánh giá hành vi trượt chất lỏng thực tế (vì các hiệu ứng tỷ lệ nên có một số vấn đề trong việc mở rộng kết quả của chúng sang vấn đề thực tế ở quy mô đầy đủ). Mặt khác, khi sử dụng các phương pháp tính toán thường được sử dụng cho các nghiên cứu chính xác. Tuy nhiên, việc nâng cấp mô hình phân tích với độ chính xác chấp nhận được để đánh giá độ giảm chấn của vách ngăn có thể mang lại những hình thức hữu ích cho việc thiết kế các đặc tính và cách bố trí cấu hình vách ngăn.

2.4 Phân tích tĩnh

Phân tích kết cấu tĩnh xác định các chuyển vị, ứng suất, biến dạng và lực trong kết cấu hoặc các bộ phận gây ra bởi tải trọng không tạo ra quán tính và hiệu ứng giảm chấn đáng kể. Giả sử các điều kiện tải trọng và phản ứng ổn định: tải trọng và phản ứng của kết cấu được giả định là thay đổi chậm theo thời gian. Tải trọng kết cấu tĩnh có thể được thực hiện bằng các phần mềm ADINA, ANSYS, SAMCEF hoặc ABAQUS. Các loại tải trọng có thể được áp dụng trong phân tích tĩnh bao gồm các lực và áp suất tác dụng từ bên ngoài, lực quán tính ở trạng thái ổn định, chuyển vị áp đặt, nhiệt độ. Phân tích cấu trúc tĩnh có thể là tuyến tính hoặc phi tuyến. Tất cả các loại phi tuyến đều có thể có biến dạng lớn, độ dẻo, độ cứng do ứng suất, các phần tử tiếp xúc, siêu đàn hồi, v.v.

2.5 Phân tích động học

Phân tích kết cấu động xác định các chuyển vị, ứng suất, biến dạng và lực trong kết cấu hoặc các bộ phận gây ra bởi tải trọng gây ra quán tính và hiệu ứng giảm chấn đáng kể. Phân tích cấu trúc động bao gồm phân tích tuyến tính và phi tuyến.

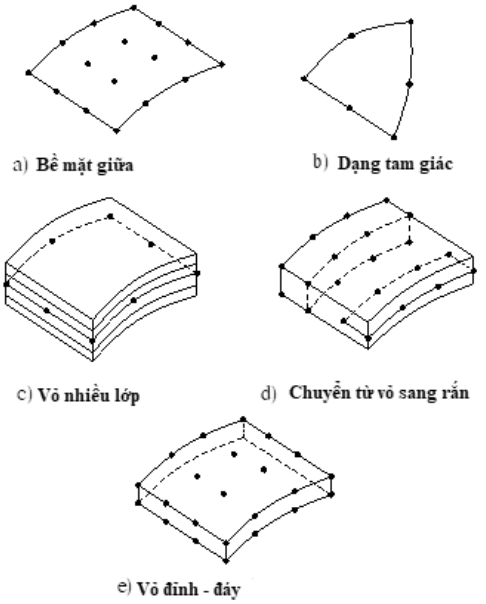
Phân tích động tuyến tính: tải được áp dụng theo thời gian hoặc tần số và các hiệu ứng quán tính và thời gian có liên quan. Vật liệu có tính đàn hồi tuyến tính, các điều kiện biên không thay đổi và tải trọng không ảnh hưởng đến độ cứng.

Phân tích động phi tuyến: tải được áp dụng theo thời gian và các hiệu ứng quán tính và thời gian là không liên quan. Vật liệu là phi tuyến, các điều kiện biên thay đổi và độ cứng do va đập khi tải.

3. MÔ HÌNH PHẦN TỬ HỮU HẠN CỦA BỂ CHỨA CHẤT LỎNG HÌNH TRỤ

3.1 Xây dựng mô hình phần tử hữu hạn 3D của hệ thống bể chứa chất lỏng

Do chiều dày thành bể nhỏ hơn nhiều so với hai chiều còn lại nên trong phương pháp mô hình phần tử hữu hạn kết cấu này sẽ được mô hình hóa bằng các phần tử kết cấu vỏ. Phần tử vỏ là phần tử đẳng tham số từ 4 đến 32 nút có thể được sử dụng để mô hình hóa các cấu trúc vỏ chung dày và mỏng.



Hình 5. Các ví dụ của phần tử tấm

3.2 Mô hình chất lỏng trong bể

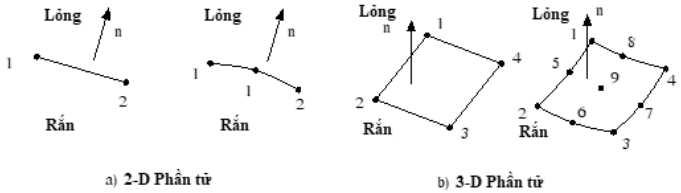
Trong mô hình tương tác chất lỏng - cấu trúc giữa thành bể và chất lỏng, chất lỏng trong bể được mô hình hóa bằng các phần tử chất lỏng dựa trên thế năng. Các phần tử chất lỏng dựa trên thế năng kết hợp các giả định sau:

(1) Môi trường không nhớt, không chuyển động, không truyền nhiệt

(2) Môi trường không nén được hoặc gần như không nén được

(3) Sự dịch chuyển tương đối nhỏ của ranh giới chất lỏng

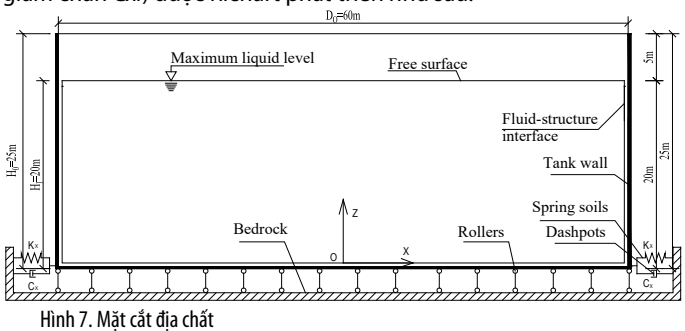
(4) Dòng chất lỏng thực tế có vận tốc dưới tốc độ âm thanh (công thức cận âm).



Hình 6. Các phần tử trung gian chất lỏng - kết cấu bể

3.3 Mô hình nền đàn hồi

Việc phân tích các hệ thống kết cấu đất phức tạp bao gồm nhiều bậc tự do có thể được đơn giản hóa rất nhiều bằng cách mô hình hóa đất như một hệ thống tham số gộp có các đặc tính không phụ thuộc vào tần số. Trong phân tích này, đất được mô hình hóa bằng lò xo và vết lõm. Một tập hợp lò xo và táp lô tương ứng với một bậc tự do (Hình 7), các thông số (độ cứng lò xo đất K*xi* và hệ số giảm chấn C*xi*) được Richart phát triển như sau:



Hình 7. Mặt cắt địa chất

$$K_{xi} = \frac{32(1-\upsilon_f)G_f R_o}{7-8\upsilon_f} \quad (1)$$

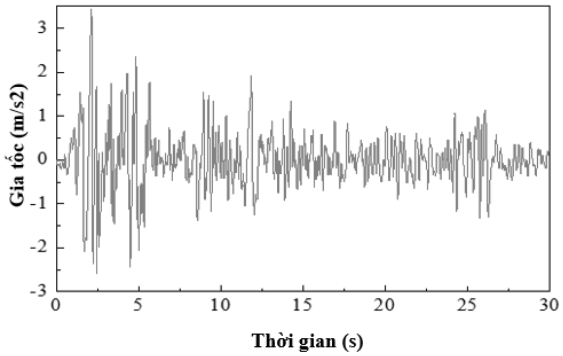
$$C_{xi} = 0.576 K_x R_o \sqrt{\frac{\rho_f}{G_f}} \quad (2)$$

Trong đó ρ_f , υ_f and G_f mật độ khối lượng, hệ số Poisson, và mô đun cắt của đất.

3.4 Tải trọng và các điều kiện biên

Bể chứa chất lỏng được giả định chỉ chịu tải trọng trọng lực và ảnh hưởng động đất. Tải trọng tỷ lệ khối lượng: Có thể áp dụng tải trọng tỷ lệ khối lượng.

Ảnh hưởng động đất: Hiện nay trên thế giới có hàng nghìn hồ sơ động đất mạnh, dựa trên các nghiên cứu trước đây và do thời gian nghiên cứu có hạn nên trong nghiên cứu này sóng địa chấn El Centro được chọn với Gia tốc mặt đất cực đại (PGA) = 0,35g (g = 9,81m/s2 gia tốc trọng trường) trong vòng 30s đầu tiên như Hình 8.



Hình 8. El centro ghi lại trong 30s đầu tiên (PGA = 0,35g)

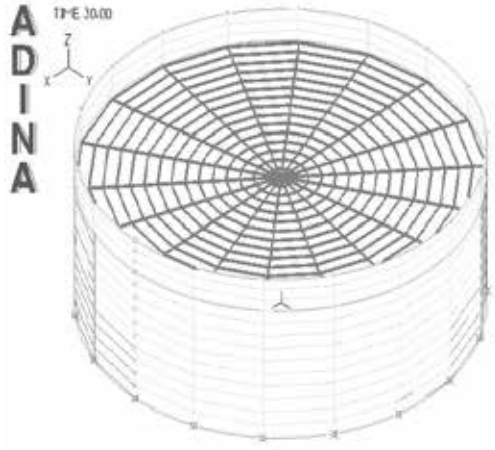
Điều kiện biên:

Bề mặt chuyển tiếp tự do: Điều kiện biên này được đặt trên bề mặt tự do của chất lỏng; áp suất và vận tốc ban đầu của chất lỏng bằng 0.

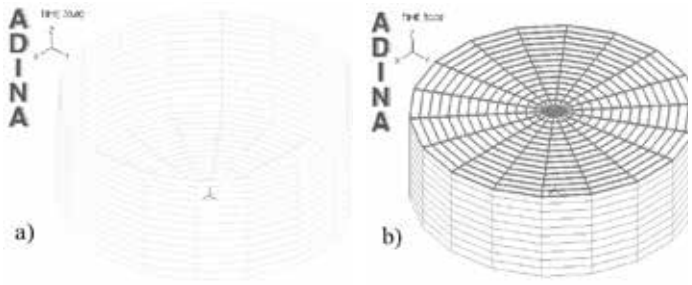
Bề mặt kết cấu chất lỏng: Điều kiện biên này được đặt giữa phần tử chất lỏng dựa trên thế năng và phần tử vỏ kết cấu liền kề (thành bể, tấm đáy và tấm vách ngăn).

3.4 Mô hình phần tử hữu hạn bể chứa chất lỏng

Thành bể được mô hình hóa bằng các điểm hình học 1 đến 4, đường 1 đến 3, vật liệu 1 và nhóm phần tử 1 (loại vỏ). Chất lỏng được mô hình hóa bằng các điểm hình học từ 5 đến 8, dòng 4 đến 7, bề mặt S1, vật liệu 2 và nhóm phần tử 2 (loại chất lỏng dựa trên thế năng). Sự tương tác giữa lớp đất nền và tấm đáy bể được tạo thành bởi các lò xo đất và các tấm chắn có độ cứng và hệ số tương ứng.



Hình 9. Mô hình phần tử hữu hạn (PTHH) của bể chứa chất lỏng



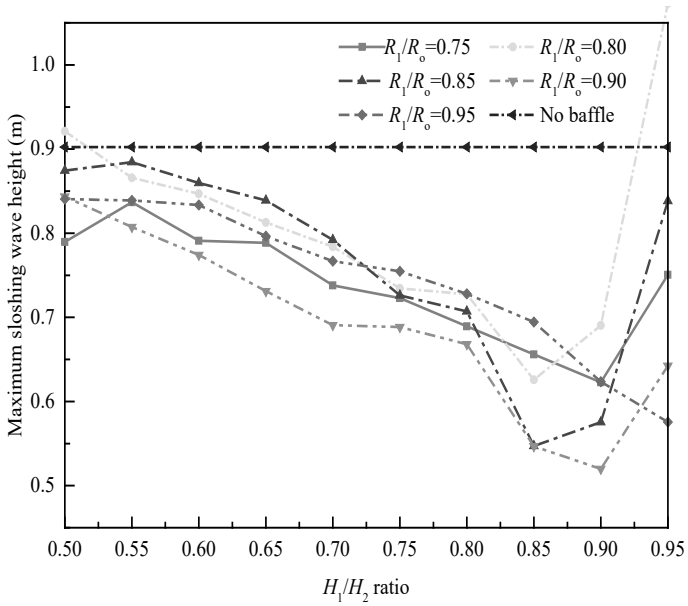
Hình 10. a) Mô hình PTHH của kết cấu bể b) Mô hình PTHH của chất lỏng

4. KẾT QUẢ

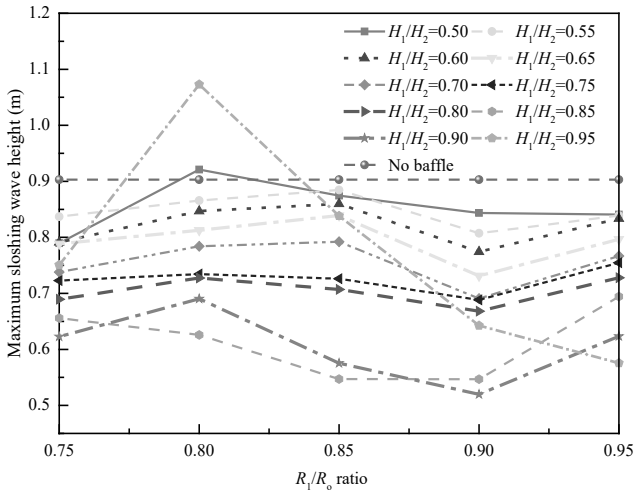
Dựa theo kết quả phân tích theo phần mềm ADINA (FSI) thì tác giả dựa theo các phương pháp: Phân tích tĩnh và phân tích động học để tiến hành tổng hợp chiều cao sóng tối đa với các trường hợp khác nhau dựa theo tỉ số H1/H2 và R1/Ro.

	R_1/R_o / H_1/H_2	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
	0.95	0.7507	1.0730	0.8383	0.6425	0.5756	
	0.90	0.6228	0.6903	0.5754	0.5198	0.6235	
Chiều cao	0.85	0.6559	0.6258	0.5471	0.5467	0.6944	
sóng dao	0.80	0.6894	0.7275	0.7070	0.6681	0.7279	
động tối	0.75	0.7229	0.7345	0.7261	0.6884	0.7547	0.9023
đa f_{max}(m)	0.70	0.7380	0.7840	0.7921	0.6907	0.7668	
	0.65	0.7885	0.8127	0.8390	0.7311	0.7965	
	0.60	0.7910	0.8468	0.8597	0.7742	0.8335	
	0.55	0.8369	0.8658	0.8845	0.8074	0.8390	
	0.50	0.7896	0.9211	0.8744	0.8435	0.8406	

Bảng 1. 1 Chiều cao sóng dao động tối đa so với tỷ lệ H1/H2



Hình 11. Chiều cao sóng dao động tối đa so với tỷ lệ H1/H2



Hình 12. Chiều cao sóng dao động tối đa so với tỷ lệ R1/Ro

5. KẾT LUẬN

Phân tích tĩnh tương đương, phân tích tần số và phân tích lịch sử thời gian dao động của bể không có vách ngăn dưới tải trọng tĩnh và tải trọng địa chấn được phân tích. Phân tích lịch sử thời gian động của bể có vách ngăn trong các trường hợp khác nhau được thực hiện để nghiên cứu ảnh hưởng của các vị trí và kích thước vách ngăn khác nhau đến chiều cao sóng tác động của chất lỏng.

(1) Bằng cách thêm tấm vách ngăn, cường độ chiều cao sóng va đập tối đa sẽ giảm do sự phân tách chất lỏng xung quanh tấm vách ngăn, dẫn đến tiêu tán năng lượng và giảm sự biến đổi lực. Kết quả cho thấy, vị trí của một vòng vách ngăn nằm ngang gần bề mặt chất lỏng có thể có tác dụng giảm chấn hiệu quả hơn. Ngược lại, độ giảm chấn bị giảm nhanh chóng khi di chuyển tấm vách ngăn đến gần đáy bể. Tuy nhiên, khi đặt vách ngăn trên tỷ lệ H1/H2 bằng 0,90 thì chiều cao sóng đập sẽ tăng nhanh thay vì giảm đi. Đặc biệt, khi kết hợp tỷ lệ H1/H2 bằng 0,95 với tỷ lệ R1/Ro bằng 0,8 có thể khuếch đại phản ứng trượt nhanh chóng. Chiều cao sóng đập tối đa thu được trong trường hợp này cao hơn chiều cao sóng đập của bể không bị vón cục. Sự khuếch đại này có thể là do sự tương tác giữa biến dạng vách ngăn lớn và thành bể linh hoạt. Vị trí vách ngăn phù hợp là tỷ lệ H1/H2 bằng 0,9 với vị trí này chiều cao sóng đập tối đa giảm đáng kể lên tới xấp xỉ 40%. Những kết quả này tương thích với kết luận trước đây của các nhà nghiên cứu khác.

(2) Kết quả cho thấy, việc tăng chiều rộng của tấm vách ngăn không làm tăng khả năng giảm chấn nhiều nhưng cũng làm giảm ở một mức độ nào đó. Nguyên nhân của việc khuếch đại chiều cao bị trượt là do sự biến dạng của vách ngăn mảnh và thành bể linh hoạt. Đặc điểm nổi bật nhất của Hình 12 là sự khuếch đại chiều cao sóng lắc khi tỷ số R1/Ro giảm từ 0,9 xuống 0,8 tương ứng với chiều rộng vách ngăn tăng từ 3m lên 6m. Chiều rộng vách ngăn phù hợp là tỷ lệ R1/Ro và bằng 0,9 (fmax=0,5198m), trong trường hợp này chiều cao sóng đập tối đa giảm tới 40% so với chiều cao của bể không có vách ngăn. Tỷ lệ R1/Ro giảm từ 0,95 xuống 0,9, chiều cao sóng đập sẽ giảm đối với tất cả các vị trí vách ngăn nhất định.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. TCVN2737-2023: Tải trọng và tác động - Tiêu chuẩn thiết kế

[2]. TCVN5575-2012: Kết cấu thép - Tiêu chuẩn thiết kế.

[3]. Abbas M, Mansour Z. Damping enhancement of seismic isolated cylindrical liquid storage tanks using baffles [J]. Journal of Engineering Structures, 2007, 29: 3227–3240.

[4]. Naghdali H, Mojtaba K, Hamid T. Shake table study of annular baffles in steel storage tanks as sloshing dependent variable dampers [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 32: 299-310.

[5]. Abbas M, Mansour Z. Sloshing damping in cylindrical liquid storage tanks with baffles [J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 311: 372–385.

[6]. Mahmood H, Mohammad A, Amirhossein S. Reduction of seismic sloshing in floating roof liquid storage tanks by using a Suspended Annular Baffle (SAB) [J]. Journal of Fluids and Structures, 2017, 71: 40–55.

[7]. Wang J D, Zhou D, Liu W Q. Sloshing of liquid in rigid cylindrical container with a rigid annular baffle[C]. Shock and Vibration, 2012, 19: 1205-1222.

[8]. Zuhal O, Yasin F, Mhamed S. Seismic response of baffled liquid containment tanks [C]. The 9th European LS-DYNA Conference 2013.

[9]. Biswala K C, Bhattacharyyab S K, Sinhaa P K. Dynamic response analysis of a liquid-filled cylindrical tank with annular baffle [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 274: 13–37.

[10]. Hakan A, Erdem U, Hafzullah A. An experimental investigation of the effects of the ring baffles on liquid sloshing in a rigid cylindrical tank [J]. Journal of Ocean Engineering, 2013, 59: 190-197.

[11] Mi A X, Zheng J, Lin P Z, Yuan X L. Experimental study on vertical baffles of different configurations in suppressing sloshing pressure [J]. Journal of Ocean Engineering, 2017, 136: 178–189.

[12]. Wanga J D, Lo S H, Zhou D. Liquid sloshing in rigid cylindrical container with multiple rigid annular baffles [J]. Journal of Fluid sand Structures, 2012, 34: 138–156.

[13]. Xue M A, Lin P Z. Numerical study of ring baffle effects on reducing violent liquid sloshing [J]. Journal of Computers and Fluids, 2011, 52: 116–129.

[14]. Morteza S, Milad A. Effects of baffles geometry on sloshing dynamics of a viscous liquid tank [C]. Scientific Research and Essays, 2012, 47: 4092 -4099.

[15]. Liu D M, Peng Z L. Three-dimensional liquid sloshing in a tank with baffles [J]. Journal of Ocean Engineering, 2009, 36; 202–212.

[16]. Medhat A H, Wajdi A. Parametric study of seismic soil-tank interaction: Horizontal excitation [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118: 437-444.

[17]. Shi S C, Jun Y S. Simple Models of Foundation-Soil Interactions [J]. IACSIT International Journal of Engineering and Technology, 5: 654-662.

[18]. Moghaddam H, Sangi S. Elephant's Foot Buckling of Cylindrical Steel Storage Tanks Subjected to Earthquake Excitation [C]. The sixth National Congress on Civil Engineering, 2011, 12: 465-471.

[19]. Muthu P V, Amar P. Analysis of sloshing impact on overhead liquid storage structures [J]. International Journal of Research in Engineering & Technology, 2014, 8:127-142.

[20]. Carluccio A D, Fabbrocino G, Manfredi G. FEM seismic analysis of steel tanks for oil storage in industrial facilities [C]. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.