

Nghiên cứu ứng dụng hệ giảm chấn chất lỏng TLD trong kết cấu nhà cao tầng

On application of TLD fluid damping system in high-rise building structures

> **NGUYỄN TUẤN PHONG, VŨ NGỌC QUANG, PHẠM THANH BÌNH, MAI VIỆT CHINH**

Học viện Kỹ thuật quân sự

Email: nguyentuanphong04071998@gmail.com

TÓM TẮT:

Bài báo tập trung nghiên cứu ứng dụng bể chứa nước trên mái trong các tòa nhà cao tầng làm giảm tác dụng do tải trọng động đất, hay còn gọi là bộ giảm chấn bằng chất lỏng (TLD). Sử dụng phần mềm Abaqus để mô phỏng, phân tích động lực học hệ kết cấu cho tòa nhà 21 tầng có bể nước theo mô hình 3D. Thông qua việc thay đổi chiều cao bể nước, khối lượng nước trong bể sẽ nghiên cứu ảnh hưởng của tần số dao động riêng, chuyển vị đỉnh, giá trị lực cắt. Kết quả đạt được cho thấy bể nước đóng vai trò rất quan trọng giúp giảm tác động của của tải trọng động đất tác động lên công trình.

Từ khóa: Hệ giảm chấn chất lỏng (TLD); kết cấu nhà cao tầng; tải trọng động đất.

ABSTRACT

This article focuses on researching the application of rooftop water tanks in high-rise buildings to reduce the effects of earthquake loads, also known as liquid dampers (TLD). Using Abaqus software to simulate and analyze structural system dynamics for a 21-storey building with a water tank according to a 3D model. By changing the height of the water tank and the volume of water in the tank, the effects of natural oscillation frequency, peak displacement, and shear force value will be studied. The achieved results show that water tanks play a very important role in reducing the impact of earthquake loads on structures.

Keywords: Tuned liquid damper (TLD); high-rise buildings; earthquake.

1. GIỚI THIỆU

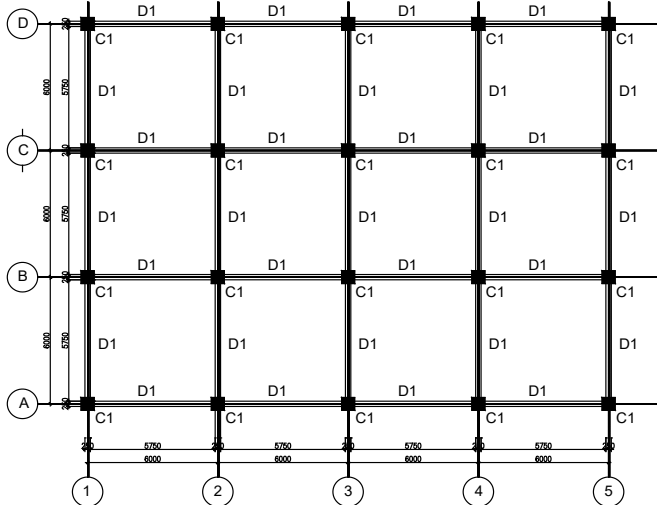
TLD là một bộ giảm chấn cơ học thụ động hoạt động theo nguyên lý dựa vào sự va đập của chất lỏng để tiêu tán năng lượng rung động[1]. TLD cung cấp khả năng kiểm soát tải trọng

động đất bằng cách di chuyển theo hướng ngược lại với chuyển động của kết cấu. Ưu điểm của TLD là chi phí thấp, dễ lắp đặt, bảo trì và có thể áp dụng cho hầu hết các loại kết cấu công trình công trình[2, 3]. Một số tác giả khuyến nghị rằng tỉ lệ khối lượng của TLD so với công trình có thể lấy từ 1% đến 4%, nhưng một số ít các nghiên cứu khác đề xuất giá trị lên đến 5%[4-6]. TLD thường có hình dạng chữ nhật hoặc hình trụ, hoặc hình nón[7, 8]. Liên quan đến hệ giảm chấn chất lỏng TLD, đã có nhiều nghiên cứu được thực hiện. Fujino và cộng sự đã thực hiện các nghiên cứu về liên quan đến kích thước của TLD. Các tác giả kết luận rằng, bất kể hình dạng đáy của bể như thế nào, tỷ lệ tối đa chiều cao của bể (độ cao mà chất lỏng không được vượt quá) với kích thước dài ở đáy bể phải lớn hơn 15%[9]. Fujii và các cộng sự[9-11] đã nghiên cứu việc sử dụng các hệ TLD để giảm dao động do tải trọng ngang của hai tòa tháp cao tầng Nagasaki Airport Tower (cao 42m) và Yokohama Marine Tower (cao 101m). Kết quả chỉ ra rằng chuyển vị ngang lớn nhất của của công trình giảm 50% so với khi không lắp đặt các hệ giảm chấn TLD. Bằng phương pháp nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm, Wakahara và các đồng nghiệp[12] đã đề xuất thiết kế tối ưu hệ TLD ứng dụng cho một khách sạn cao tầng ở Yokohama. Kết quả cho thấy việc sử dụng TLD trên đỉnh tòa nhà có thể giảm đáng kể chuyển vị do tải trọng ngang. Chang và Gu[13] đánh giá các hiệu ứng của hệ TLD hình dạng chữ nhật được lắp đặt trên đỉnh tòa nhà cao tầng dưới tác động của kích động xoáy (vortex-excited vibration). Kết quả cho thấy TLD hình chữ nhật cho thấy hiệu quả cao trong giảm dao động dưới kích động xoáy, đặc biệt với các tần số nằm trong dải 0.9 và 1.0. Tamura và nhóm tác giả[14] đã nghiên cứu mối quan hệ giữa tỷ số cản và TLD của kết cấu có chiều cao lớn, với trường hợp điển hình là tháp Tokyo. Kết quả cho thấy tỷ số cản tăng từ 1% lên trên 7% thông qua việc áp dụng TLD. Bằng phương pháp giải tích, Xin và Chen[15] đã nghiên cứu hệ TLD với các loại đáy dốc khác nhau được sử dụng trong tòa nhà khung ba tầng. Các tác giả kết luận rằng đáy TLD dạng chữ W cho thấy hiệu quả cao nhất trong giảm độ lệch tầng và gia tốc sàn của tòa nhà so với các hệ TLD đáy chữ V và dạng chữ nhật. Bằng phương pháp mô phỏng, Koh và đồng nghiệp [16] đã nghiên cứu ảnh hưởng của hệ tổ hợp giảm chấn chất lỏng TLD cho các tần số dao động khác nhau của kết cấu nhiều bậc tự do. Kết quả cho thấy hiệu quả giảm chấn phụ thuộc vào tần số dao động riêng, phổ động đất và vị trí lắp đặt hệ giảm chấn. Ngoài ra còn nhiều nghiên cứu khác về hệ giảm chấn TLD[17-21].

Dựa vào tổng quan, có thể thấy số lượng nghiên cứu về ứng xử của kết cấu nhà cao tầng sử dụng TLD dưới tải trọng động

đất còn rất khiêm tốn. Ngoài ra, chưa có nghiên cứu nào xem xét đầy đủ một kết cấu nhà cao tầng có bể nước dựa vào phân tích động. Trong nghiên cứu hiện tại, mô hình 3D kết cấu nhà 21 tầng bê tông cốt thép có bể nước trên mái sẽ được phân tích động đầy đủ nhằm đánh giá ảnh hưởng của nó đến kết cấu nhà cao tầng dưới tải trọng động đất.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH MÔ PHỎNG SỐ



Hình 1. Mặt bằng kết cấu tầng điển hình

Đặt bài toán: công trình nhà 21 tầng được lựa chọn để xây dựng mô hình số trong nghiên cứu hiện tại, được minh họa trong Hình 1. Chiều cao công trình 69,3m, mỗi tầng có chiều cao 3,3m, mặt bằng kích thước 24mx18m. Hệ kết cấu khung chịu lực, kích thước dầm và cột lần lượt là 250 x 600 mm và 700 x 700 mm, sàn có chiều dày 15cm.

Theo [22] số dạng dao động cần thiết để xét khi phân tích động lực học của công trình được xác định sơ bộ theo công thức:

$$k = 3\sqrt{n}$$

Trong đó: k là số dạng dao động cần xét; n: số tầng của công trình.

Sử dụng phần mềm ETABS để xác định tần số dao động riêng của công trình. Khối lượng tham gia dao động của công trình và số dạng dao động để phân tích cho bài toán được xác định theo TCVN 9386:2012 [23] và được phần mềm Etabs tự động tính toán. Kết quả về tần số dao động riêng của 9 dạng dao động đầu tiên được thể hiện trên Bảng 1.

Bảng 1. Các tần số dao động của công trình

Trường hợp	Mode	Chu kỳ	Tần số
		s	Hz
Modal	1	2,766	0,361
Modal	2	2,669	0,375
Modal	3	2,257	0,443
Modal	4	0,897	1,115
Modal	5	0,869	1,151
Modal	6	0,74	1,352
Modal	7	0,508	1,97
Modal	8	0,496	2,016
Modal	9	0,429	2,329

Kết quả phân tích dao động từ Etabs là cơ sở để tính toán, thiết kế bể chất lỏng. Theo tác giả Sun (1992)[4], để hệ giảm chấn TLD đạt hiệu quả cao:

$$f_{TLD} \approx f_{ct}$$

Trong đó:

f_{ct} : là tần số dao động riêng của công trình;

f_{TLD} : là tần số dao động của chất lỏng trong bể chứa, với bể chứa hình chữ nhật, xác định theo công thức:

$$f_{TLD} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{L} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right)}$$

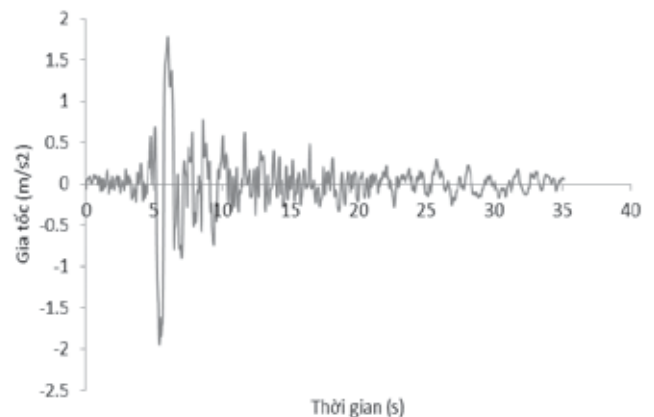
Với: L là chiều dài bể chứa theo phương dao động; h là chiều cao mực chất lỏng trong bể.

Sử dụng phần mềm ABAQUS để mô phỏng, phân tích ứng xử của kết cấu nhà 21 tầng có bể nước chịu tác dụng của tải trọng động đất. Lựa chọn mô hình phá hủy dẻo của bê tông kết hợp giữa lý thuyết dẻo và lý thuyết cơ học phá hủy (CDP) là một trong những mô hình phù hợp để phân tích tính chất phi tuyến tính của vật liệu bê tông. Cơ chế phá hoại của bê tông khi hình thành vết nứt do kéo và nén được mô phỏng thông qua mô hình CDP. Trong mô hình CDP có khả năng phân tích việc suy giảm độ cứng của vật liệu do hư hỏng dưới tác dụng của tải trọng. Theo kết quả nghiên cứu [24, 25] thì mô hình CDP có ưu điểm để mô phỏng ứng xử động của vật liệu bê tông. Trong ABAQUS, mô hình CDP được thực hiện bằng các thông số bao gồm tỷ số cường độ nén hai trục với cường độ nén một trục σ_{bo}/σ_{co} , hình dạng bề mặt phá hoại kc, góc giãn f, độ lệch tâm ϵ , thông số độ nhớt và định luật cấu thành của vật liệu bê tông [26]. Bảng 2 thể hiện giá trị các tham số của mô hình vật liệu CDP cho bê tông. Loại bê tông được chọn trong nghiên cứu này có là B35, cường độ chịu nén 45Mpa.

Bảng 2. Các tham số mô hình vật liệu CDP cho bê tông

σ_{bo}/σ_{co}	1,07
k_c	2/3
ϕ	36(°)
ϵ	0.1
viscosity	0,005

Trong Abaqus, loại phần tử C3D8R và T3D2 được chọn để mô phỏng bê tông và cốt thép. Phần tử C3D8R được định nghĩa là phần tử liên tục có khả năng tích hợp và mô tả vết nứt bê tông dưới ứng suất kéo và nén. T3D2 được sử dụng để mô phỏng các phần tử thanh hai nút dùng để mô phỏng cốt thép chỉ có ứng suất kéo nén dọc trục. Liên kết giữa thanh cốt thép và bê tông là dạng liên kết nhúng Embedded. Kết cấu khung được giả thiết là liên kết tại chân cột và chỉ cho phép di chuyển theo phương của tải trọng động đất.



Hình 2. Gia tốc nền trận động đất Vrancea, Romania

Phương pháp phân tích động đất được sử dụng là phương pháp tích phân trực tiếp theo chuyển động của nền đất. Phương pháp này được áp dụng với hệ kết cấu đàn hồi và hệ không đàn

hồi. Phương pháp tính toán này cho phép xem xét đầy đủ trạng thái ứng suất và chuyển vị của các hệ kết cấu chịu lực dưới tác động tải trọng động đất. Trong nghiên cứu này, sử dụng gia tốc nền của trận động đất Vrancea, Romania năm 1977 với cường độ lớn nhất đạt 7,5 độ Richter. Tải trọng động đất được gán trực tiếp vào các chân cột tầng 1. Các phần tử được chia lưới với kích thước 15cm. Riêng phần tử nước được giảm kích thước mắt lưới tới 8cm. Bước thời gian phân tích là 0,001s.

Nước được mô hình hóa bằng phần tử CPE4R (Four-node plane strain element). Trong mô phỏng chất lỏng (fluid), nước có thể được coi là một vật liệu không nén được. Phương pháp hiệu quả để thiết lập mô phỏng chất lỏng trong Abaqus/Explicit là sử dụng mô hình của Newton kết hợp với phương trình trạng thái (Newtonian viscous shear model) [27]. Nước được mô phỏng với tốc độ sóng 45 m/s và mật độ $983,2 \text{ kg/m}^3$. Tốc độ sóng này tương ứng với mô đun khối là 2,07 MPa. Độ nhớt của nước được chọn là $13\text{E}-4 \text{ Pa}\cdot\text{sec}$ [28].

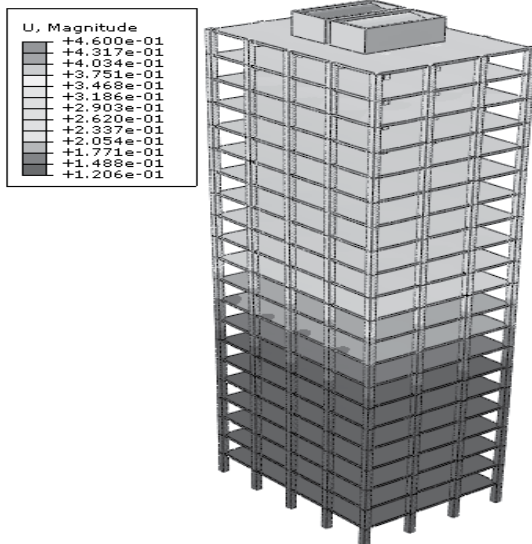
Với nghiên cứu của các tác giả SaqibMehboob và M. Fiaz Tahir (2013) [29] thực hiện phân tích với ba mô hình tòa nhà khác nhau (tòa nhà 2 tầng, tòa nhà 5 tầng, tòa nhà 7 tầng) theo phương pháp PTHH trên phần mềm ANSYS /CivilFEM. Bể chứa chất lỏng được nghiên cứu với chất lỏng là nước, và vị trí đặt bể chứa ở tầng cao nhất của tòa nhà. Tải trọng sử dụng trong nghiên cứu là số liệu gia tốc nền theo thời gian của trận động đất El Centro (năm 1940 tại Mỹ). Các tác giả đề xuất rằng, TLD được cấu trúc với khối lượng lớn hơn 1% tổng khối lượng của công trình. Do đó, 02 bể nước được chọn có kích thước thông thủy là $4,5 \times 9 \text{ m}$, chiều cao bể nước được phân tích theo các trường hợp (TH) minh họa trên Bảng 3:

Bảng 3. Thay đổi khối lượng hệ TLD theo chiều cao chất

Trường hợp (TH)	Chiều cao bể nước (m)	Khối lượng/Tỉ lệ khối lượng công trình
TH1	2,25	2,2%
TH2	1,3	1,2%
TH3	0,7	0,68%
TH4	Không có TLD	-

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

a. Mô hình hóa kết cấu trong phần mềm Abaqus

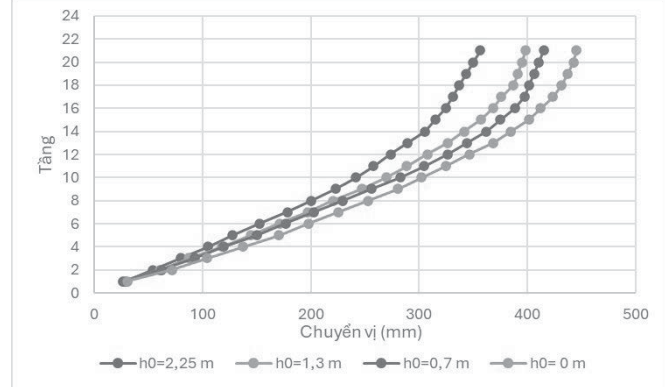


Hình 3. Minh họa dao động của kết cấu dưới tải trọng của động đất

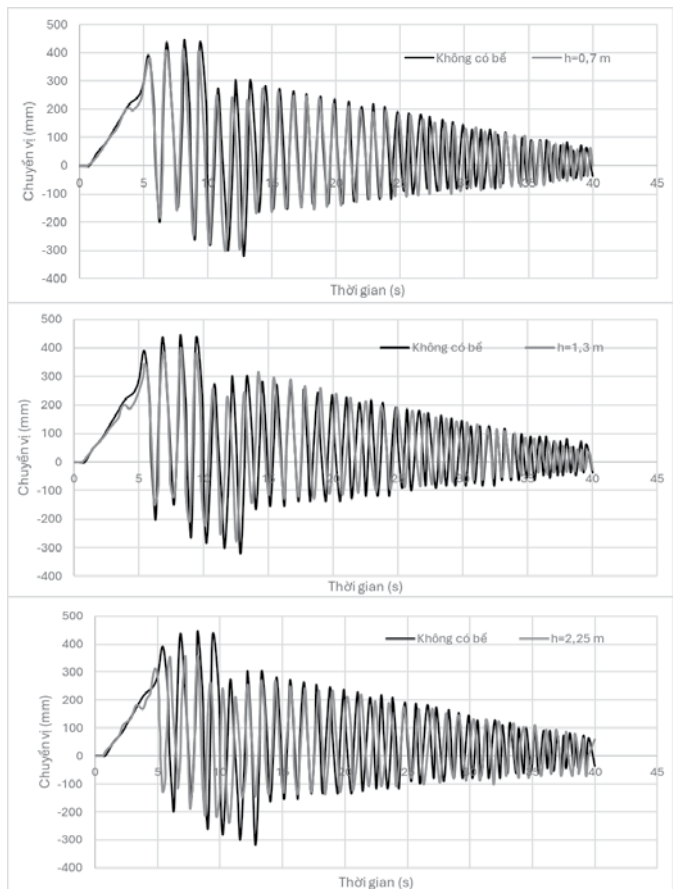
b. Kết quả mô phỏng chuyển vị

Bảng 4. Kết quả chuyển vị lớn nhất tại tầng điển hình

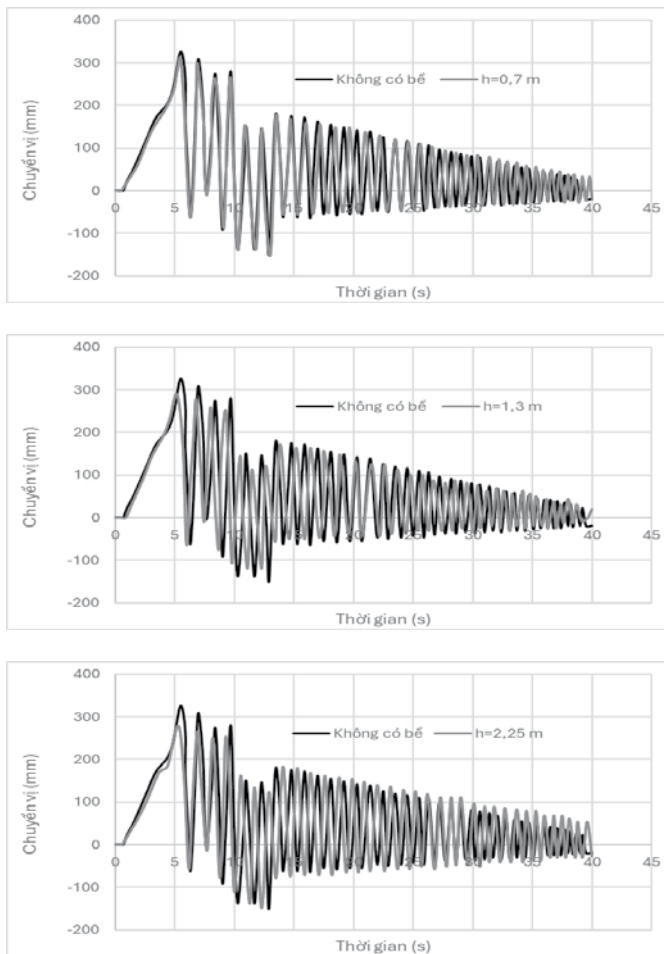
Trường hợp	Không có TLD (mm)	Có TLD (mm)		
		H = 0,7 m	H = 1,3 m	H = 2,25 m
Tầng 21	446	415	399	356
Tầng 11	326	309	290	279
Chênh lệch so với không có TLD	Tầng 21	-	7%	10,5 %
	Tầng 11	-	5,2 %	11,1 %



Hình 4. Ảnh hưởng chiều cao mực nước đến tác dụng giảm chuyển vị của tòa nhà với sự thay đổi chiều cao nước từ $h=0,7\text{m}; 2,25\text{m}$



a) Tầng 21



b) Tầng 11

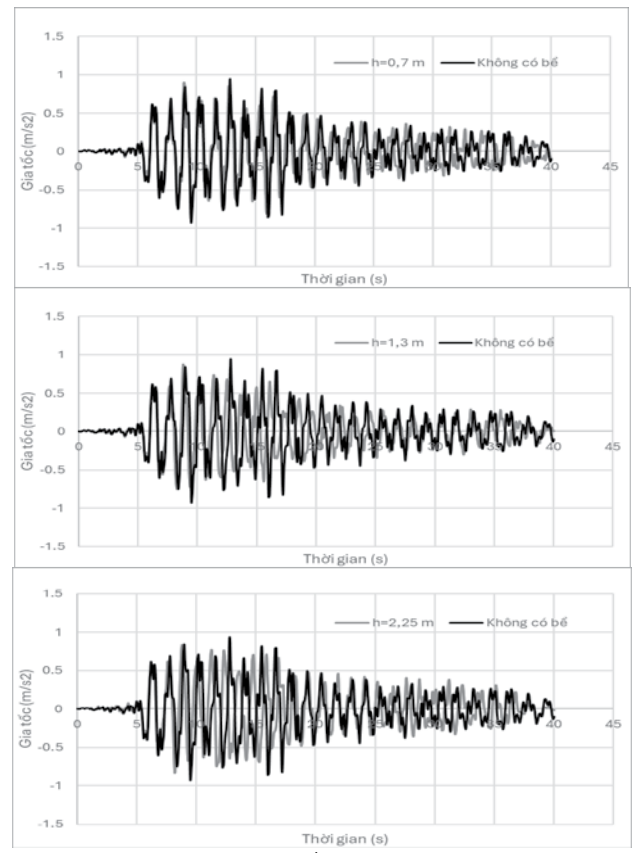
Hình 5. Đồ thị chuyển vị tầng điển hình của công trình

Qua đồ thị hình 4, hình 5 và kết quả chuyển vị ở Bảng 4 ta thấy được chuyển vị của công trình có xu hướng giảm khi tính đến tác dụng của bể nước, khi thay đổi chiều cao của bể nước từ 0,7m đến 2,25m thì chuyển vị thay đổi từ 446mm giảm xuống 356mm, tương ứng với mức độ giảm chuyển vị lớn nhất là 20,2% tại tầng 21. Điều tương tự cũng xảy ra tại tầng 11, khi thay đổi chiều cao của bể nước từ 0,7m đến 2,25m thì chuyển vị thay đổi từ 326mm giảm xuống 279mm, tương ứng với mức độ giảm chuyển vị lớn nhất là 14,4%.

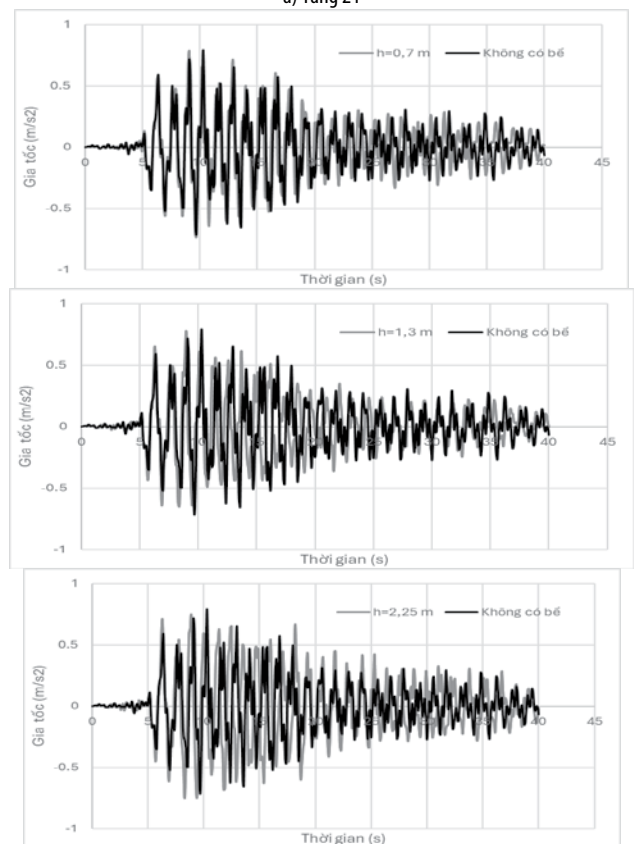
c. Kết quả mô phỏng gia tốc

Bảng 5. Gia tốc tại tầng điển hình

Trường hợp		Không có TLD (m/s ²)	Có TLD (mm)		
			H = 0,7 m	H = 1,3 m	H = 2,25 m
Tầng 21		0,943	0,890	0,862	0,827
Tầng 11		0,789	0,771	0,759	0,746
Chênh lệch so với không có TLD	Tầng 21	-	5,6 %	8,6%	12,3%
	Tầng 11	-	2,28 %	3,8 %	5,44%



a) Tầng 21



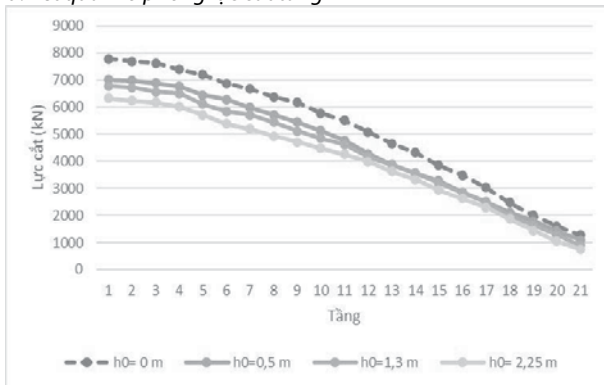
b) Tầng 11

Hình 6. Đồ thị gia tốc tầng điển hình của nhà cao tầng

Hình 6 thể hiện đồ thị gia tốc tại tầng 21 và tầng 11 khi thay đổi chiều cao nước. Bảng 5 thể hiện giá trị gia tốc của tầng 21 và tầng 11 khi thay đổi chiều cao mực nước.

Qua đồ thị hình 6 và kết quả gia tốc ở Bảng 5 ta thấy được gia tốc tại tầng 21 và tầng 11 của công trình có xu hướng giảm khi tính đến tác dụng của bể nước, khi thay đổi chiều cao của bể nước từ 0,7m đến 2,25m thì giá trị gia tốc thay đổi từ 0,943m/s² giảm xuống 0,827m/s², tương ứng với mức độ giảm gia tốc lớn nhất là 12,3% tại tầng 21. Điều tương tự cũng xảy ra tại tầng 11, khi thay đổi chiều cao của bể nước từ 0,7m đến 2,25m thì giá trị gia tốc thay đổi từ 0,789m/s² giảm xuống 0,746m/s², tương ứng với mức độ giảm gia tốc lớn nhất là 5,44%

d. Kết quả mô phỏng lực cắt tầng



Hình 7. Đồ thị lực cắt lớn nhất tại các tầng khi thay đổi chiều cao mực nước
Bảng 6. Kết quả lực cắt tầng lớn nhất

Trường hợp	Không có TLD (kN)	Có TLD (kN)		
		H = 0,7 m	H = 1,3 m	H = 2,25 m
Giá trị lực cắt tầng lớn nhất	7788,9	7020,9	6783,3	6330
Chênh lệch so với không có TLD	-	9,9%	12,9%	18,7%

Hình 7 thể hiện đồ thị lực cắt của các tầng khi thay đổi chiều cao nước. Bảng 6 thể hiện giá trị lực cắt của tầng 21 khi thay đổi chiều cao mực nước.

Qua đồ thị hình 6 và kết quả lực cắt tầng ở Bảng 7 ta thấy được lực cắt tầng của công trình có xu hướng giảm khi tính đến tác dụng của bể nước, khi thay đổi chiều cao của bể nước từ 0,7m đến 2,25m thì lực cắt tầng thay đổi từ 7788,9 kN giảm xuống 6330kN, tương ứng với mức độ giảm lớn nhất là 18,7%.

4. KẾT LUẬN

Bài báo tập trung nghiên cứu ứng xử xử cữ bể nước mái trong nhà cao tầng; đã sử dụng các phần mềm Etabs và Abaqus phân tích mô phỏng số cho kết cấu nhà cao tầng có bể nước để nghiên cứu ảnh hưởng tác dụng giảm dao động của bể nước cho nhà cao tầng. Qua kết quả nghiên cứu từ việc tính toán cho nhà 21 tầng có bể nước mái ta thấy rằng bể nước trong nhà cao tầng có tác dụng làm giảm tác động của động đất thông qua các đại lượng: Chuyển vị, gia tốc và lực cắt tầng tại tầng 21 khi thay đổi chiều cao mực nước từ 0,7m đến 2,25m. Cụ thể:

Chuyển vị thay đổi từ 446mm giảm xuống 356mm, tương ứng với mức độ giảm chuyển vị lớn nhất là 20,2%. Gia tốc thay đổi từ 0,943m/s² giảm xuống 0,827m/s², tương ứng với mức độ giảm gia tốc lớn nhất là 12,3%. Lực cắt tầng thay đổi từ 7788,9 kN giảm xuống 6330kN, tương ứng với mức độ giảm lớn nhất là 18,7%.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Konar, T., A.J.J.o.V. Ghosh, and Control, A review on various configurations of the passive tuned liquid damper. 2023. **29**(9-10): p. 1945-1980.
- [2]. Ocak, A., et al., Optimization of tuned liquid damper including different liquids for lateral displacement control of single and multi-story structures. 2022. **12**(3): p. 377.
- [3]. Zhang, Z.J.E.S., Understanding and exploiting the nonlinear behavior of tuned liquid dampers (TLDs) for structural vibration control by means of a nonlinear reduced-order model (ROM). 2022. **251**: p. 113524.
- [4]. Sun, L., et al., Modelling of tuned liquid damper (TLD). 1992. **43**(1-3): p. 1883-1894.
- [5]. Yu, J.K., et al., A non-linear numerical model of the tuned liquid damper. 1999. **28**(6): p. 671-686.
- [6]. Rana, R. and T.T.J.E.s. Soong, Parametric study and simplified design of tuned mass dampers. 1998. **20**(3): p. 193-204.
- [7]. Casciati, F., et al., Simulating a conical tuned liquid damper. 2003. **11**(5-6): p. 353-370.
- [8]. Chang, C., M.J.J.o.W.E. Gu, and I. Aerodynamics, Suppression of vortex-excited vibration of tall buildings using tuned liquid dampers. 1999. **83**(1-3): p. 225-237.
- [9]. Fujino, Y., et al., Tuned liquid damper (TLD) for suppressing horizontal motion of structures. 1992. **118**(10): p. 2017-2030.
- [10]. Wakahara, T. and Y.J.W.E. FUJINO, JAWE, A simple estimation of across-wind response of tall buildings with tuned liquid damper. 1998. **1998**(76): p. 37-54.
- [11]. Fujii, K., et al., Wind-induced vibration of tower and practical applications of tuned sloshing damper. 1990. **33**(1-2): p. 263-272.
- [12]. Wakahara, T., et al., Suppression of wind-induced vibration of a tall building using tuned liquid damper. 1992. **43**(1-3): p. 1895-1906.
- [13]. Every, M., R. King, and D.J.O.E. Weaver, Vortex-excited vibrations of cylinders and cables and their suppression. 1982. **9**(2): p. 135-157.
- [14]. Tamura, Y., et al., Effectiveness of tuned liquid dampers under wind excitation. 1995. **17**(9): p. 609-621.
- [15]. Xin, Y., et al., Seismic response control with density-variable tuned liquid dampers. 2009. **8**(4): p. 537-546.
- [16]. Gaul, L., J.J.S. Becker, and Vibration, Reduction of structural vibrations by passive and semiactively controlled friction dampers. 2014. **2014**.
- [17]. You, K.P., et al., Increasing damping ratios in a tuned liquid damper using damping bars. 2007. **353**: p. 2652-2655.
- [18]. Tait, M., N. Isyumov, and A.J.J.o.S.E. El Damatty, Effectiveness of a 2D TLD and its numerical modeling. 2007. **133**(2): p. 251-263.
- [19]. Tait, M.J.E.S., Modelling and preliminary design of a structure-TLD system. 2008. **30**(10): p. 2644-2655.
- [20]. Samanta, A., P.J.T.I.J.P.A.C. Banerji, and S. Engineering, Structural vibration control using modified tuned liquid dampers. 2010. **3**(1): p. 14-27.
- [21]. Kim, Y.-M., et al., The vibration performance experiment of tuned liquid damper and tuned liquid column damper. 2006. **20**: p. 795-805.
- [22]. Tâm, V.B., Nhà cao tầng bê tông-cốt thép. 2012.
- [23]. dụng, V.K.h.C.n.X.d.-B.X., Tiêu chuẩn quốc gia về thiết kế công trình chịu động đất. 2012.
- [24]. Lee, J. and G.L.J.J.o.e.m. Fenves, Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. 1998. **124**(8): p. 892-900.
- [25]. Armero, F., S.J.I.J.o.S. Oller, and Structures, A general framework for continuum damage models. I. Infinitesimal plastic damage models in stress space. 2000. **37**(48-50): p. 7409-7436.
- [26]. Mai, V.-C. and S.M.J.J.o.t.C.S.E.I.o.K. Han, Numerical Simulation of 72m-Long Ultra High Performance Concrete Pre-Stressed Box Girder. 2022. **35**(2): p. 73-82.
- [27]. George, H.F. and F.J.E.o.t. Qureshi, Newton's law of viscosity, Newtonian and non-Newtonian fluids. 2013: p. 2416-2420.
- [28]. Update, P., SIMULIA. 2011.
- [29]. Mehboob, S., et al., Investigation of water tank as TLD for vibration control of frame structures under seismic excitation. 2013. **10**(7s): p. 1182-1189.