



# Nghiên cứu ảnh hưởng của độ cứng gối liên kết giữa bể chứa chất lỏng với kết cấu nhà cao tầng khi chịu động đất

■ **ThS. NCS. TRINH THỊ HOA**

*Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải*

■ **PGS. TS. NGUYỄN THỊ TUYẾT TRINH**

*Trường Đại học Giao thông vận tải*

**TÓM TẮT:** Hiện nay có nhiều giải pháp thiết kế kháng chấn cho nhà cao tầng, trong đó giải pháp giảm chấn chất lỏng (Tuned Liquid Damper - TLD) là một trong số các giải pháp được sử dụng nhiều nhất nhờ tính hiệu quả và chi phí hợp lý. Tuy nhiên, sự phức tạp trong việc tối ưu hóa các thông số thiết kế của hệ giảm chấn chất lỏng, như tối ưu hóa kích thước hình học, chiều cao mực nước, gối liên kết giữa bể chứa chất lỏng và kết cấu tòa nhà, khiến công tác tiêu chuẩn hóa các quy tắc thiết kế hệ giảm chấn chất lỏng TLD gặp nhiều khó khăn. Bài báo trình bày các kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của độ cứng gối liên kết giữa bể chứa chất lỏng và kết cấu tòa nhà khi chịu tải trọng động đất. Tải trọng động đất sử dụng trong nghiên cứu là tải trọng ghi lại trong trận động đất El Centro năm 1940 tại bang California của Mỹ. Hiệu quả giảm chấn của bể chứa chất lỏng được đánh giá qua độ cứng của gối liên kết được tạo ra sao cho sự triệt giảm giá trị chuyển vị tại đỉnh kết cấu tòa nhà và triệt giảm lực cắt tại chân của kết cấu tòa nhà là lớn nhất.

**TỪ KHÓA:** Hệ giảm chấn chất lỏng, động lực học kết cấu, động đất, độ cứng, gối liên kết.

**ABSTRACT:** Currently, there are many seismic design solutions for high-rise buildings, in which Tuned Liquid Damper (TLD) is one of the most used solutions thanks to its high efficiency and reasonable cost. However, the complexity in optimizing design parameters related to the fluid damping system such as optimizing geometric dimensions, water level height, connection bearing stiffness between liquid storage tanks and high-rise structures makes it difficult to standardize the design rules of TLD fluid damping systems. This paper presents the results of research on the influence of the connection bearing stiffness between liquid storage tanks and high-rise structures under the effect of earthquake loads. The earthquake load used in this research was recorded in the El Centro earthquake 1940 in California, USA. The damping effect of the liquid storage tank is evaluated by the stiffness of the connection bearing which is

made so that the reduction of displacement value at the top of the building structure and the reduction of the shear force at the base of the building structure is biggest.

**KEYWORDS:** Tuned liquid damper, structural dynamics, earthquake, stiffness, bonded pillow.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong thiết kế nhà cao tầng, tải trọng động đất là một vấn đề quan trọng do những thiệt hại mà nó gây ra cho kết cấu tòa nhà. Trong trường hợp động đất mạnh, nhà cao tầng có thể có các hiện tượng chuyển vị như chuyển vị tương đối của kết cấu tòa nhà so với nền móng hoặc chuyển vị lệch giữa các tầng. Trên thực tế, tần số dao động riêng đầu tiên của kết cấu tòa nhà thường nhỏ (khoảng 0,1 - 0,3 Hz được BR Ellis, 1980 [1] thống kê trên 163 tòa nhà cao tầng) và gần với tần số dao động của các trận động đất có cường độ lớn. Do đó, phản ứng của nó thường rất quan trọng vì sự cộng hưởng có thể xảy ra. Để thỏa mãn cả trạng thái giới hạn về cường độ (ULS) và trạng thái giới hạn về biến dạng (SLS) là một thách thức đối với các kỹ sư thiết kế kết cấu tòa nhà chống động đất. Thứ nhất, nhà cao tầng có thể cao tới cả nghìn mét (như Tòa tháp Jeddah ở Ả Rập Xê Út cao 1.008 m), do đó, ngay cả khi kết cấu có biến dạng nhỏ thì chuyển vị tương đối so với tầng hầm có thể rất lớn. Thứ hai, nhà cao tầng thường có công năng làm văn phòng nên không hoàn toàn sử dụng tường chịu lực, khi đó không thể áp dụng nguyên tắc sử dụng tường chống tải trọng ngang được.

Hệ giảm chấn chất lỏng được coi là một giải pháp hữu hiệu để giảm chấn cho kết cấu nhà cao tầng khi chịu động đất. Khi nghiên cứu ảnh hưởng của bể chứa chất lỏng đến kết cấu nhà cao tầng chịu tác động của tải trọng động đất, ngoài, các tham số được quan tâm như thông số kích thước bể chứa, chiều cao mực nước trong bể, vị trí đặt bể..., thì ảnh hưởng của độ cứng gối liên kết giữa bể chứa và kết cấu tòa nhà cũng là vấn đề cần được quan tâm đến [2]. Gối liên kết có thể được cấu tạo là gối sắt, gối cao su hay gối bê tông... Ứng với mỗi loại, gối được chế tạo với một thông số độ cứng và độ cản nhất định. Vấn đề được quan tâm ở đây là ảnh hưởng của độ cứng gối liên kết đến hiệu quả giảm

chấn của bể chứa cho kết cấu dưới tác dụng của tải trọng động đất.

Bài báo nghiên cứu hiệu quả giảm chấn qua việc thay đổi độ cứng gối liên kết giữa bể chứa chất lỏng và kết cấu tòa nhà. Sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn trên phần mềm ANSYS, phân tích hiệu quả triệt giảm chuyển vị đỉnh lớn nhất và hiệu quả triệt giảm lực cắt đáy lớn nhất của kết cấu tòa nhà tại các trường hợp gối liên kết có độ cứng khác nhau. Căn cứ vào kết quả phân tích, đề xuất độ cứng gối liên kết tối ưu. Trong mô phỏng số, gối liên kết giữa bể chứa và kết cấu được mô phỏng thông qua tham số độ cứng  $K_b$  và độ cản  $C_b$  như trên Hình 1.1.

Trong đó:

$f_{m,n}$  - Tần số dao động của sóng nước trong bể chứa (Hz);

$a, b$  - Kích thước bể chứa (m);

$h$  - Chiều cao mực nước trong bể (m);

$m, n$  - Thứ tự dạng dao động của sóng chất lỏng theo phương  $x, y$  ( $m, n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ).

Theo cơ sở lý thiết tính toán của bể chứa chất lỏng thì từ các thông số kích thước và chiều cao mực nước trong bể, áp dụng công thức (1) sẽ xác định được các giá trị tần số dao động của sóng chất lỏng trong bể và ngược lại.

Để thuận tiện cho việc nghiên cứu việc ảnh hưởng của độ cứng của gối liên kết đến hiệu quả giảm chấn của bể đến kết cấu tòa nhà khi chịu tải trọng động đất, tác giả đề xuất xác định giá trị độ cứng của gối liên kết thông qua tần số dao động của bể chứa (ứng với khi coi bể chứa như một khối lượng tĩnh). Công thức xác định độ cứng của gối liên kết thông qua giá trị tần số dao động của sóng nước trong bể chứa:

$$K_b = (M_b + M_n) * (2\pi f_{slosh-1})^2 \quad (2)$$

## 2.2. Gối liên kết giữa bể chứa chất lỏng với kết cấu tòa nhà

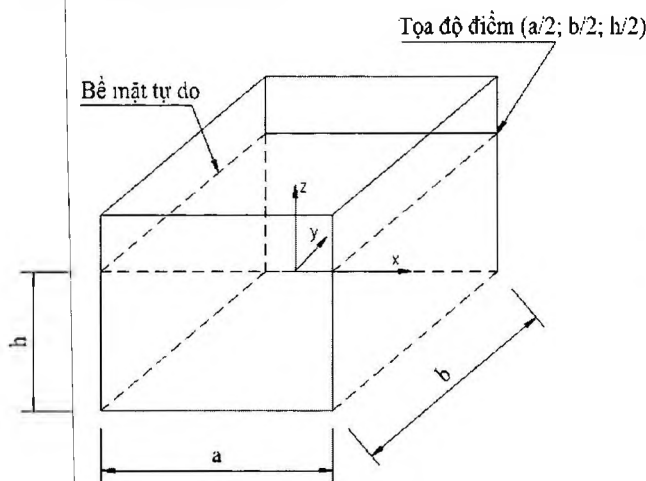
Giả định kết cấu tòa nhà và bể chứa chất lỏng là hai hệ thống tách rời như hệ thống thứ cấp (hay hệ thống chính - primary system) và hệ thống sơ cấp (secondary system), liên kết với nhau thông qua gối đỡ. Nếu tần số của hệ thứ cấp bằng tần số của hệ sơ cấp thì hệ thứ cấp sẽ hoạt động giống như một van điều tiết động. Tuy nhiên, tổng năng lượng dao động không từ riêng của bản thân hệ thứ cấp mà nó bị ảnh hưởng cộng hưởng rất nhiều từ hệ sơ cấp (kết cấu tòa nhà). Các tiêu chuẩn thiết kế chống động đất cho công trình dân dụng của Ủy ban Năng lượng nguyên tử (ASN 2006; CEA 2008 hoặc ETC - C2012) [4,5] đã đưa ra một số quy tắc về tỷ lệ khối lượng, tỷ lệ tần số dao động cơ bản giữa hệ thống thứ cấp và sơ cấp, trong đó nêu rõ các trường hợp liên kết giữa hai hệ thống thứ cấp và sơ cấp cần được tính đến. Quy tắc được minh họa như trên Hình 2.2 [2].

Hình 1.1: Mô phỏng gối liên kết giữa bể chứa chất lỏng và kết cấu tòa nhà

## 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

### 2.1. Đặc trưng dao động riêng của bể chứa chất lỏng

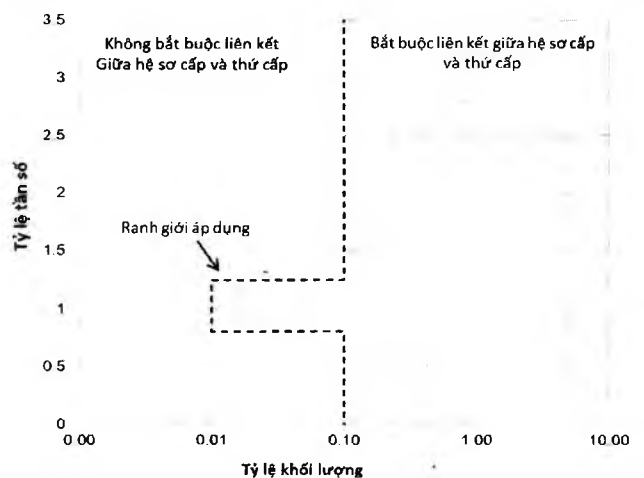
Năm 1966, nhà nghiên cứu của NASA, H. Norman Abramson [3] đã công bố công thức xác định tần số dao động của sóng chất lỏng, hình dạng đặc trưng của nước mặt tự do trong bể cũng như chuyển vị trong trường hợp nước mặt tự do trong bể chuyển động. Trong phạm vi nghiên cứu của bài báo, tác giả giới thiệu cơ sở lý thuyết cho bể chứa chất lỏng dạng chữ nhật có kích thước hai cạnh bể  $(a \times b)$ m, chiều cao mực nước trong bể  $(h)$ m như được mô tả trên Hình 2.1.



Hình 2.1: Hệ trục tọa độ Oxyz và kích thước hình học của bể chứa chất lỏng dạng chữ nhật [3]

Tần số dao động của sóng nước trong bể hình chữ nhật [3]:

$$f_{m,n} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{g\pi \sqrt{\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)} \tanh\left(\pi h \sqrt{\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)}\right)} \quad (1)$$



Hình 2.2: Quy tắc chung phân tích giữa hệ thống thứ cấp và sơ cấp [2]

#### 2.2.1. Một số giả thiết cho quy tắc [2]

- Khi tỷ lệ khối lượng giữa hệ thứ cấp và hệ sơ cấp nhỏ hơn 1%, có thể bỏ qua liên kết giữa hệ sơ cấp và hệ thứ cấp;
- Khi tỷ lệ khối lượng giữa hệ thứ cấp và hệ sơ cấp thuộc



khoảng từ 1% đến 10% và tỷ lệ tần số của dạng dao động đầu tiên giữa hệ thứ cấp và hệ sơ cấp từ 0,8 đến 1,25, nên xét đến liên kết giữa hệ sơ cấp và hệ thứ cấp;

- Khi tỷ lệ khối lượng giữa hệ thứ cấp và hệ sơ cấp lớn hơn 10%, bắt buộc phải xét đến liên kết giữa hệ sơ cấp và hệ thứ cấp;

2.2.2. Các dạng tương tác và mô hình phân tích tương tác giữa bể chứa chất lỏng và kết cấu tòa nhà

\* Các dạng tương tác giữa bể chứa và kết cấu tòa nhà [2]:

- Tương tác động học: Tương ứng với sự thay đổi động học của hệ sơ cấp do sự có mặt của hệ thứ cấp, có tính đến độ cứng của hệ thứ cấp nhưng coi khối lượng của nó bằng 0.

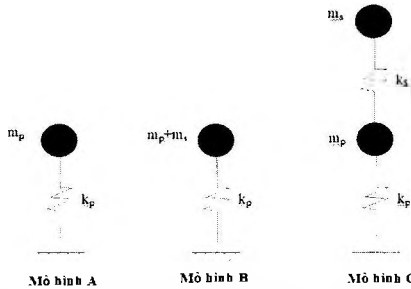
- Tương tác quán tính: Tương ứng với tác dụng của lực quán tính lên hệ sơ cấp, gắn với chuyển động có tính đến khối lượng của hệ thứ cấp.

\* Các mô hình phân tích tương tác giữa hệ sơ cấp và thứ cấp [2] (Hình 2.3).

- Mô hình A: Hệ lò xo 1 bậc tự do (1 DOF - Degrees of Freedom) cho trường hợp bỏ qua tương tác quán tính và động học.

- Mô hình B: Hệ lò xo 1 bậc tự do (1 DOF) cho trường hợp chỉ xét đến tương tác quán tính.

- Mô hình C: Hệ lò xo 2 bậc tự do (2 DOF) cho trường hợp xét cả tương tác quán tính và động học.

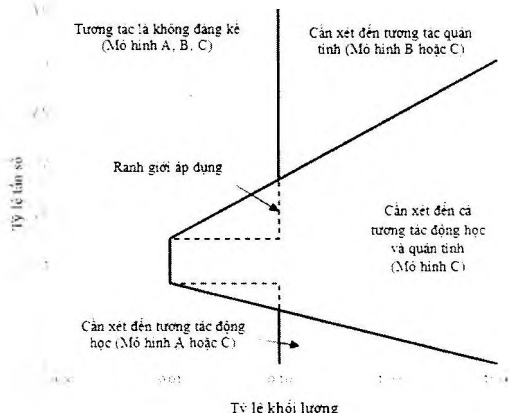


$m_p$  - Khối lượng hệ sơ cấp;  $m_s$  - Khối lượng hệ thứ cấp;  
 $k_p$  - Độ cứng lò xo liên kết giữa hệ sơ cấp với nền;  
 $k_s$  - Độ cứng lò xo liên kết giữa hệ sơ cấp và thứ cấp

Hình 2.3: Các mô hình phân tích tương tác giữa hệ sơ cấp và thứ cấp [2]

2.2.3. Tiêu chí phân tích hệ thống ghép sơ cấp và thứ cấp (coupled system) [2]

Tiêu chí phân tích hệ thống ghép được minh họa trên Hình 2.4.



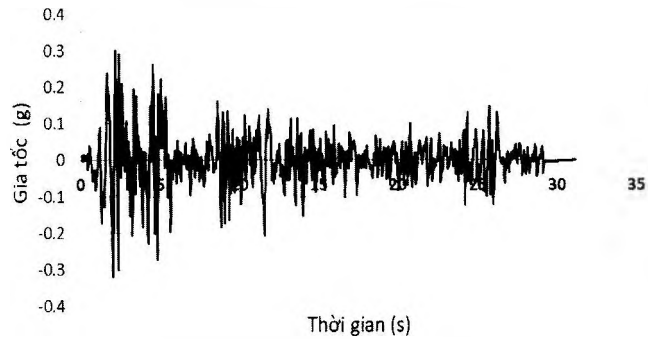
Hình 2.4: Tiêu chí phân tích tương tác giữa hệ thống ghép sơ cấp và thứ cấp [2]

3. PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG CỦA ĐỘ CỨNG GỐI LIÊN KẾT GIỮA BỂ CHỨA CHẤT LỎNG VÀ KẾT CẤU NHÀ CAO TẦNG KHI CHỊU TẢI TRỌNG ĐỘNG ĐẤT

3.1. Tải trọng động đất

Sử dụng gia tốc nền ghi được từ trận động đất El Centro (Mỹ) năm 1940 [6] (Hình 3.1). Giá trị lớn nhất của gia tốc nền khoảng 0,3 g (với  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ). Tín hiệu này đại diện cho sự tương tác giữa đất nền và kết cấu. Sử dụng phân tích Fourier và các kỹ thuật lọc tần số của sóng dao động, các nhà khoa học đã đưa ra nhận định là dải tần số chính của sóng động đất El Centro nằm ở khoảng 0,1 - 0,3 (Hz), khoảng giá trị này gắn với dải tần số của các tòa nhà cao tầng. Tín hiệu kéo dài 30 giây, giá trị cường độ mạnh nhất xảy ra sau khoảng 3 giây.

Trận động đất El Centro ngày 18 tháng 5 năm 1940 thành phần gia tốc theo hướng Bắc - Nam



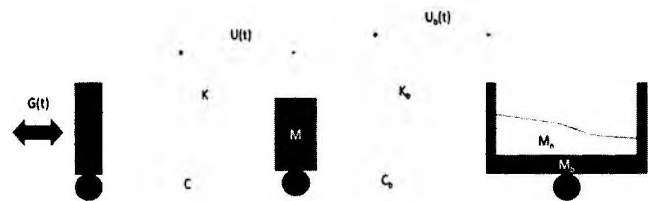
Hình 3.1: Đồ thị gia tốc nền ghi được từ trận động đất El Centro (Mỹ) năm 1940 [6]

3.2. Mô hình hóa kết cấu

Mô hình đơn giản hóa được trình bày như Hình 3.2, là hệ 2 bậc tự do (2DOF) bao gồm:

- Kết cấu tòa nhà được mô hình hóa dưới dạng khối lượng (M), liên kết với nền đất bằng một lò xo có độ cứng (K) và cản nhớt (C);

- Bể chứa chất lỏng được mô hình thực bởi các phần tử tấm vỏ (SHELL181) và các phần tử chất lỏng (FLUID30) trong phần mềm ANSYS. Bể chứa chất lỏng được liên kết với kết cấu tòa nhà bằng một lò xo có độ cứng ( $K_b$ ) và cản nhớt ( $C_b$ ).



Hình 3.2: Mô hình đơn giản hóa mô phỏng trong phần mềm ANSYS

3.3. Phân tích theo lịch sử thời gian

Phân tích ảnh hưởng của độ cứng gối liên kết giữa bể chứa chất lỏng và kết cấu khi chịu tải trọng động đất theo lịch sử thời gian được thực hiện trong ANSYS, kết hợp cùng với họ Phương pháp Tích hợp thời gian Newmark là theo phương pháp AAM (Average Acceleration Method - Phương pháp gia tốc trung bình) ứng với các hệ số  $\gamma = \frac{1}{2}; \beta = \frac{1}{4}$ .

3.3.1. Tham số phân tích

Bảng 3.1. Các tham số để phân tích mối liên kết giữa bể chứa và kết cấu

Tham số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
Chiều rộng bể chứa	b	m	15
Chiều cao mực nước trong bể	h	m	1,5
Chiều cao bể	$h_b$	m	3,0
Chiều dày bê tông thành bể	$\delta_{thanh}$	m	0,5
Chiều dày bê tông đáy bể	$\delta_{day}$	m	1,0
Cản nhớt của gối liên kết giữa bể và kết cấu	$C_h$	%	$2m\omega\xi_i = 2m_{hematik} \omega_{bc} * 5\%$
Cản nhớt giữa của gối liên kết giữa kết cấu và nền	C	%	$2m\omega\xi_i = 2m_{ctr} \omega_{ctr} * 5\%$
Tỷ lệ khối lượng	$M_b + M_n / M_{ctr}$	%	10
Độ cứng lò xo gối liên kết giữa kết cấu với nền	$K_{ctr}$	N/m	7,03E+06
Tần số quy chuẩn	$\bar{f}$	$\square$	1
Độ cứng gối liên kết lò xo giữa bể chứa và kết cấu	$K_b$	N/m	7,03E+05

3.3.2. Giá trị độ cứng của gối liên kết

Coi các đặc trưng hình học và cơ học của kết cấu và bể chứa chất lỏng có giá trị không đổi, thay đổi độ cứng của gối liên kết. Với mỗi giá trị độ cứng liên kết, tính tần số bể chứa chất lỏng. Kết quả ứng với 7 giá trị độ cứng liên kết được trình bày trong Bảng 3.2.

Bảng 3.2. Giá trị tham số độ cứng  $K_b$  ứng với các trường hợp nghiên cứu

Trường hợp nghiên cứu	Độ cứng của liên kết lò xo giữa bể và kết cấu - $K_{bi}$ (N/m)	Tỷ lệ độ cứng các trường hợp $K_{bi} / K_{b3}$	Tần số bể chứa chất lỏng (Hz)
TH 1	1,76E+05	0,25	0,063
TH 2	3,52E+05	0,5	0,089
<b>TH 3</b>	<b>7,03E+05</b>	<b>1</b>	<b>0,126</b>
TH 4	1,41E+06	2	0,178
TH 5	7,03E+06	10	0,398
TH 6	7,03E+07	100	1,260
TH 7	7,03E+08	1000	3,984

Trong đó:

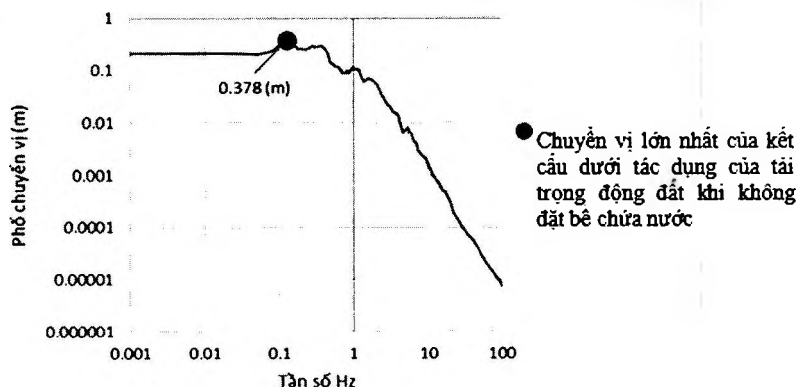
$K_{bi}$  - Độ cứng gối liên kết lò xo giữa bể chứa và kết cấu ứng với trường hợp khảo sát thứ i (i = 1,2,3,4,5,6);

Đối với mỗi trường hợp, chuyển vị và nội lực theo lịch sử thời gian  $D_j(t)$  và  $F_j(t)$  tại khối lượng M được lưu lại. Giá trị lớn nhất nhận được  $D_{TL D_j} = \max |D_j(t)|$ ,  $F_{TL D_j} = \max |F_j(t)|$ , đại diện cho phản ứng của kết cấu dưới tác dụng của tải trọng động đất.

3.4. Nhận xét kết quả phân tích

3.4.1. Chuyển vị của kết cấu tòa nhà khi không đặt bể chứa chất lỏng

Phản ứng của kết cấu khi không đặt bể chứa có thể dễ dàng thu được bằng cách sử dụng phổ phản ứng sàn của chuyển động đầu vào địa chấn (Hình 3.3). Chuyển vị lớn nhất của kết cấu tòa nhà không đặt bể chứa chất lỏng ( $D_{NO}$ ) thu được là 0,378 m. Kết quả này sẽ được sử dụng để so sánh và đánh giá hiệu quả giảm chấn của bể nước trong phần tiếp theo.



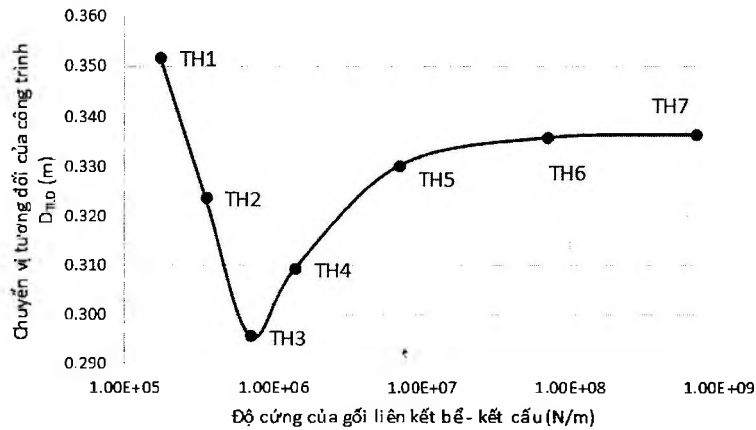
Hình 3.3: Chuyển vị lớn nhất của kết cấu khi không đặt bể chứa chất lỏng



3.4.2. Phân tích ảnh hưởng của độ cứng gối liên kết giữa kết cấu tòa nhà và bể chứa

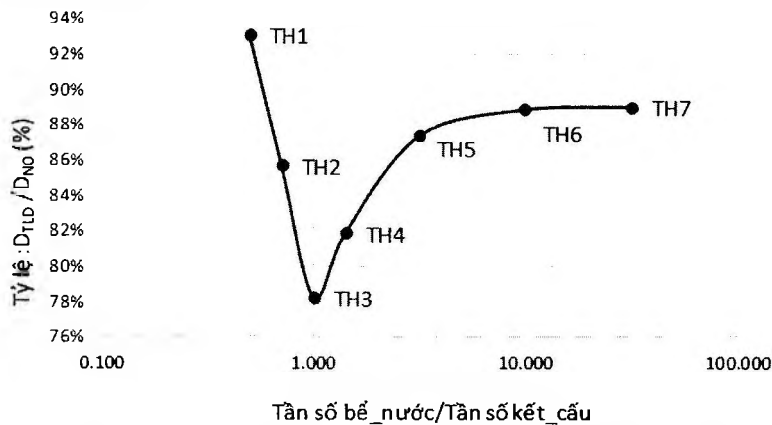
3.4.2.1. Đối với chuyển vị

Chuyển vị tương đối của kết cấu tòa nhà khi đặt bể chứa chất lỏng theo độ cứng của gối liên kết thu được ở Hình 3.4.



Hình 3.4: Chuyển vị tương đối của kết cấu tòa nhà theo độ cứng  $K_b$

Phân tích hiệu quả của bể chứa chất lỏng theo chuyển vị khi đặt bể  $D_{TLD}$  so với khi không đặt bể  $D_{NO}$  ( $D_{TLD}/D_{NO}$  (%)) thông qua tần số quy chuẩn như trên Hình 3.5.



Hình 3.5: Tỷ lệ chuyển vị tương đối của kết cấu theo tần số quy chuẩn

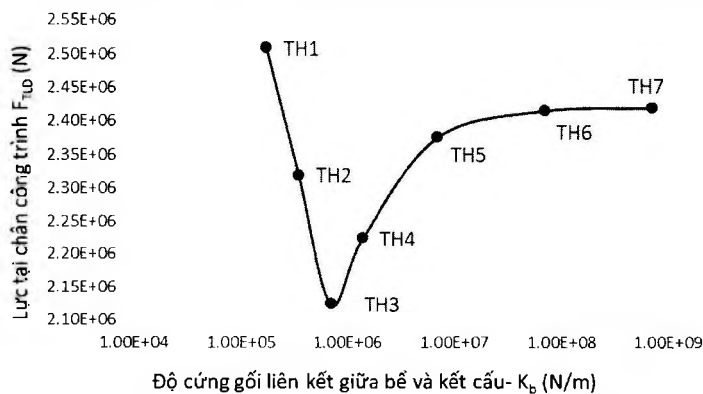
Dựa trên biểu đồ ở Hình 3.4 và Hình 3.5, đưa ra một số nhận xét sau:

- Hiệu quả của chuyển vị phụ thuộc vào gối liên kết giữa bể chứa và kết cấu tòa nhà. Tuy nhiên, sự phụ thuộc này không tuyến tính;

- Hiệu quả giảm chấn của bể chứa chất lỏng đạt được cao nhất khi độ cứng của gối liên kết bằng  $7,03E+05$ , ứng với trường hợp TH3, giá trị chuyển vị lớn nhất của kết cấu tòa nhà khi đặt bể giảm còn 78% so với chuyển vị khi không đặt bể.

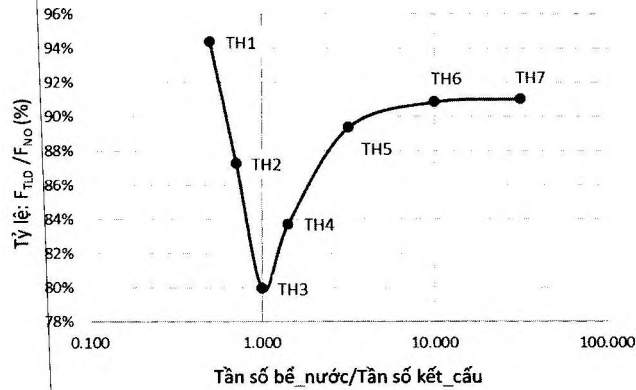
3.4.2.2. Đối với lực cắt tại chân kết cấu tòa nhà

Lực cắt lớn nhất truyền từ kết cấu xuống móng phụ thuộc vào độ cứng của gối liên kết như trên Hình 3.6.



Hình 3.6: Lực cắt lớn nhất tại chân kết cấu tòa nhà

Phân tích hiệu quả giảm chấn của bể chứa chất lỏng đối với kết cấu khi xét theo tỷ lệ lực lớn nhất tại chân kết cấu khi có bể và khi không có bể  $F_{TLD}/F_{NO}$  (%), biểu thị thông qua tần số quy chuẩn trình bày như trên Hình 3.7.



Hình 3.7: Tỷ lệ lực lớn nhất tại chân kết cấu tòa nhà theo tỷ lệ của tần số

Dựa trên biểu đồ Hình 3.6 và Hình 3.7, có một số nhận xét sau:

- Hiệu quả của lực phụ thuộc vào gối liên kết giữa bể với kết cấu. Tuy nhiên, sự phụ thuộc này cũng không tuyến tính;
- Hiệu quả giảm chấn của bể chứa chất lỏng đạt được cao nhất khi độ cứng của gối liên kết bằng  $7,03E+05$ , ứng với trường hợp TH3, giá trị lực lớn nhất của kết cấu tòa nhà khi đặt bể giảm còn 80% so với chuyển vị khi không đặt bể.

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày các kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của độ cứng gối liên kết giữa bể chứa chất lỏng và kết cấu tòa nhà khi chịu tải trọng động đất. Dựa trên mô hình phân tích để xuất, kết hợp sử dụng phần mềm ANSYS với phương pháp phân tích theo lịch sử thời gian dưới tải trọng động đất El Centro, thực hiện các trường hợp nghiên cứu với các giá trị cứng của gối liên kết khác nhau. Nghiên cứu cho thấy, hiệu quả giảm chấn của bể chứa chất lỏng đạt được cao nhất khi độ cứng của gối liên kết bằng  $7,03E+05$ , giá trị chuyển vị lớn nhất của kết cấu tòa nhà khi đặt bể giảm còn 78% so với chuyển vị khi không đặt bể và giá trị lực lớn nhất của kết cấu tòa nhà khi đặt bể giảm còn 80% so với chuyển vị khi không đặt bể. Kết quả phân tích ban đầu cho thấy, khi độ cứng của gối liên kết ( $K_p$ ) ứng với trường hợp tần số của bể chứa chất lỏng bằng với tần số của kết cấu tòa nhà ở dạng dao động đầu tiên, thì tác dụng giảm chấn của bể chứa chất lỏng cho kết cấu tòa nhà sẽ đạt hiệu quả nhất. Kết quả nghiên cứu này có thể cho phép các kỹ sư có thêm lựa chọn phương án thiết kế nhằm tối ưu hóa hiệu quả của phương pháp giảm chấn bằng bể chứa chất lỏng.

#### Tài liệu tham khảo

- [1]. K22158-Supplemental-Case-Study.pdf., <https://www.routledge.com/downloads/K22158/K22158-Supplemental-Case-Study.pdf>, accessed: 26/11/2021.
- [2]. Pierre-Vivien FOUQUIAU1, Frédéric BARBIER2,

Charisis CHATZIGOGOS3 N°000043 New Dynamic Decoupling Criteria for Secondary Systems.

[3]. H.N. Abramson (1966), *Representation of Fuel Sloshing in Cylindrical Tanks by an Equivalent Mechanical Model*, ARS Journal, 31(12), 1697-1705.

[4]. Commissariat à l’Energie Atomique CEA (2008), *Guide de conception Génie Civil des INB du CEA*, AGS SNGEN RDN GUI SIIT 0605 A.

[5]. AFCEN, French Society for Design, Construction and In Service Inspection Rules for Nuclear Island Components (2012), *EPR technical code for civil works*, ETC-C.

[6]. <http://www.vibrationdata.com/elcentro.dat> for El Centro Data.

**Ngày nhận bài: 10/12/2021**

**Ngày chấp nhận đăng: 08/01/2022**

**Người phản biện: PGS. TS. Phạm Hoàng Kiên  
TS. Lê Nguyễn Khương**