

# Phân tích động lực học mô hình khung thép có xét đế gắn thiết bị hệ cản khối lượng qua thí nghiệm bàn rung

## Dynamic analysis of three story steel frame with impact mass damper

> TS PHẠM ĐÌNH HẢI, PHAN QUỐC TUẤN

GV Bộ môn Công trình Thép-gỗ, Khoa XDDD&CN, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

Email: haipd@huce.edu.vn, tuandhxd1986@gmail.com

### TÓM TẮT

Trung tâm nghiên cứu động đất California, Mỹ (PEER-Pacific Earthquake Engineering Research, California, USA) kết hợp với Trường Đại học Trentro, Italy tổ chức cuộc thi dự đoán kết quả thí nghiệm bằng bàn rung của một khung thép 3 tầng dưới tải trọng động đất. Ở thí nghiệm này, một hệ cản khối lượng tác động bằng chì mới gắn tại tầng mái của một khung kết cấu thép 3 tầng và được thí nghiệm dưới tải trọng động đất bằng thiết bị bàn rung. Bài báo trình bày nghiên cứu sử dụng phần mềm phân tích kết cấu SAP2000 để so sánh sự phản ứng của hệ khung có gắn hệ cản và không có hệ cản khối lượng. Các thông số về chuyển vị, gia tốc, lực cắt đáy được xác định và sau đó gửi kết quả để so sánh với kết quả thí nghiệm. Kết quả cho thấy hệ cản khối lượng có ảnh hưởng đến chuyển vị, gia tốc và phản ứng của kết cấu.

**Từ khóa:** Khung thép; thí nghiệm; hệ cản; chuyển vị; gia tốc.

### ABSTRACT

PEER is organizing a blind prediction contest for predicting the experimental results obtained from a Shaking Table test campaign carried out at the PEER Center, Berkeley, California, in collaboration with the University of Trento, Italy. The experimental tests, performed on a steel Moment Resisting Frame, pursued the aim of physically demonstrating the effectiveness of a novel device for seismic action mitigation, called Impact Mass Damper (IMD). The basic operating principle of the device is to induce counteracting impulsive forces on the structure. This research presents an entry based on the dynamic analysis by using the computer program SAP2000 to identify the seismic responses: displacement, acceleration, base shear and impact force under different ground motions. The comparison between two models shows the effect impact mass damper on structure behavior.

**Key works:** Steel frame; damper; experimental; displacement; acceleration.

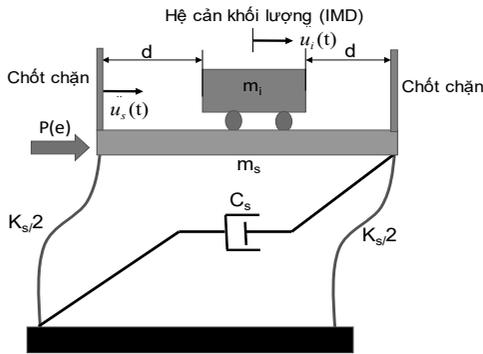
### 1. GIỚI THIỆU

Các loại tải trọng động như: động đất, gió, hoặc tải trọng nổ có thể ảnh hưởng đến tuổi thọ kết cấu công trình xây dựng vì các tải trọng này liên quan đến dao động của kết cấu công trình [1-2]. Để hạn chế dao động thì một số thiết bị giảm dao động đã được nghiên cứu trong một số nghiên cứu trước đây [3-5]. Quả cầu thay đổi khối lượng [6-7], hay hệ cản khối lượng tác động [8-11] là những thiết bị hay được áp dụng hiện nay vì chi phí thấp, hiệu quả, tính cơ động và lắp dựng nhanh và có hiệu quả trong việc giảm dao động và tần số của các công trình do tải trọng động đất hay tải trọng gió đặc biệt là kết cấu cao tầng. Một bộ giảm chấn tác động (IMD) mới được nghiên cứu dựa trên thí nghiệm bằng bàn rung tại trung tâm động đất California, Mỹ nhằm xét ảnh hưởng của bộ giảm chấn tác động đến ứng xử khung thép. Ở nghiên cứu này, một khung thép được thực hiện bằng phần mềm SAP2000 [12] để mô hình khung thép 3 tầng có xét đến hệ cản khối lượng tác động. Mục

tiêu của nghiên cứu: 1) xét ảnh hưởng của hệ cản khối lượng tác động đến phản ứng của công trình, 2) nghiên cứu mô hình liên kết dầm-cột khác nhau của khung, 3) so sánh đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến làm việc của thiết bị giảm chấn của kết cấu. Kết quả nghiên so sánh về chuyển vị, gia tốc, của 2 mô hình có bộ giảm chấn và không có giảm chấn.

### 2. HỆ CẢN KHỐI LƯỢNG TÁC ĐỘNG MỘT BẬC TỰ DO

Hệ cản khối lượng tác động (IMD) là thiết bị cấu tạo gồm một vật khối lượng với trọng lượng là  $m_i$ , được gắn với hệ kết cấu chính qua lò xo và thiết bị cản. Vật khối lượng này được chặn bởi hai nút chặn ở hai bên như Hình 1. Khoảng cách giữa hệ cản khối lượng tác động,  $m_i$ , và hai nút chặn là,  $d$ , cho phép hệ cản khối lượng tác động có thể va chạm sang hai bên trái và phải của 2 nút chặn dưới tác động của tải trọng động.



**Hình 1.** Hệ cân khối lượng tác động một bậc tự do  
Bỏ qua lực ma sát, khi ấy phương trình vi phân chuyển động của hệ cân khối lượng tác động được thể hiện như sau:

$$m_s \ddot{u}_s(t) + c_s \dot{u}_s(t) + k_s u_s(t) = P_e(t) \quad (1)$$

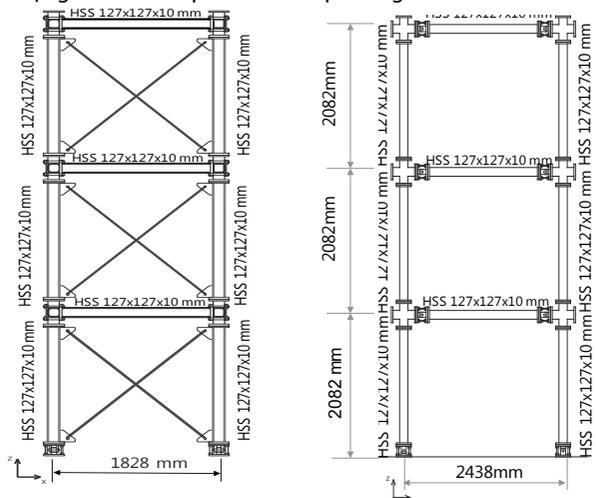
$$m_i \ddot{u}_i(t) = 0 \quad (2)$$

trong đó:  $u_s(t)$ ,  $m_s$ ,  $k_s$  và  $c_s$  là chuyển vị, khối lượng, độ cứng và hệ số cản của kết cấu chính;  $P_e(t)$  là ngoài lực tác dụng lên kết cấu chính;  $m_i$  và  $u_i(t)$  là khối lượng và chuyển vị của hệ cân khối lượng tác động. Có thể thấy rằng khi hệ cân khối lượng,  $m_i$ , va chạm vào nút chặn hai bên, vận tốc  $v$  chạm của phương trình (1) và (2) xác định theo định luật bảo toàn và động học như sau:

### 3. KẾT QUẢ SỐ

#### 3.1 Hệ kết cấu

Một khung thép 3 tầng được lựa chọn từ mô hình cuộc thi phân tích dự đoán kết quả thí nghiệm bằng bàn rung tại trung tâm Động đất California, Mỹ dùng để phân tích cho nghiên cứu này. Các tầng có chiều cao của mỗi tầng 2082 (mm), tổng chiều cao của khung thép 3 tầng là 6248 mm. Dầm cột đều sử dụng cùng 1 loại tiết diện là chữ nhật HSS 127x127x10 (mm). Dầm liên kết với cột bằng liên kết moment theo phương trục X như Hình 2(a), còn liên kết theo phương Y sử dụng liên kết khớp như Hình 2(b). Chân cột sử dụng liên kết khớp theo cả hai phương X và Y.

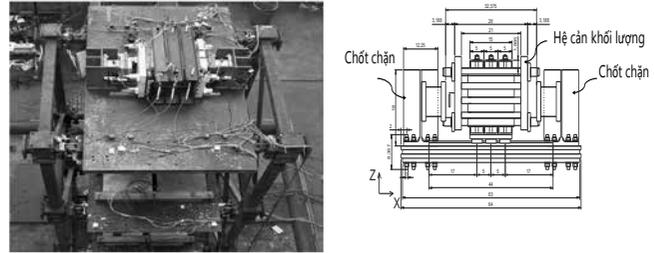


(a) Kích thước theo phương trục X (b) Kích thước theo phương trục Y

**Hình 2.** Mô hình khung thép 3 tầng theo 2 phương X,Y

#### 3.2 Hệ cân khối lượng tác động (IMD)

Để xét đến sự ảnh hưởng của thiết bị giảm chấn khi chịu tải trọng động đất, thì một thiết bị là hệ cân khối lượng tác động mới (IMD) bao gồm các lớp chì được ghép vào nhau và đặt trên tầng mái của hệ khung để xét đến sự ảnh hưởng đến ứng xử động lực học của hệ khung. Hệ cân khối lượng tác động có thể trượt trượt lên ray theo phương trục Y. Hai tấm thép hình chữ C được cố định xuống tầng sàn thép bằng bu lông để làm chốt chặn (Stopper) 2 bên của hệ cân khối lượng. Hình 3 thể hiện mặt bằng của hệ cân khối lượng tác động.



**Hình 3.** Hệ cân khối lượng tác động (IMD)

Bảng 1 thể hiện khối lượng khung của dầm, cột, thanh giằng, khối lượng tấm thép và thiết bị giảm chấn của các tầng 1, 2 và 3.

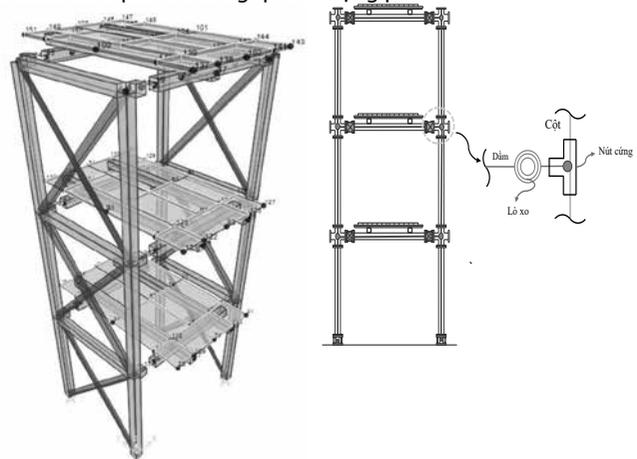
**Bảng 1.** Thông số hệ khung và hệ cân khối lượng tác động

Khối lượng hệ kết cấu chính m (kg)	Khối lượng hệ cân khối lượng tác động, m <sub>d</sub> , (kg)	Tỷ số m <sub>d</sub> /m	Tỷ số cản (%)
11495	1127	0.09	1

#### 3.3 Mô hình hệ khung bằng phần mềm Sap2000

##### a. Mô hình

Nghiên cứu này sử dụng phần mềm Sap2000 của hãng CSI [12] để mô hình và phân tích phản ứng cho khung không có và có hệ cân khối lượng dưới tác dụng của các trận động đất. Dầm và cột được khai báo bằng phần tử thanh, tấm sàn thép được mô hình bằng phần tử dạng tấm coi như tuyệt đối cứng. Liên kết dầm-cột sử dụng liên kết khớp được mô hình bằng độ cứng xoay trong phần mềm Sap2000 thông qua sử dụng phần tử link.



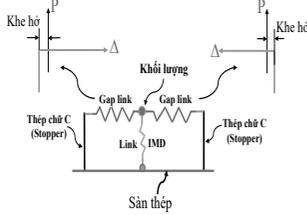
(a) Khung thép 3 tầng (b) Liên kết trong Sap2000

**Hình 4.** Mô hình khung thép 3 tầng (Sap2000)

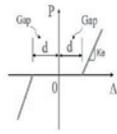
##### b. Mô hình hệ cân khối lượng tác động (IMD)

Hệ cân khối lượng tác động (IMD) được mô hình như Hình 5(a). Hệ cân khối lượng được mô hình bằng sử dụng link trong Sap2000 dùng để so sánh với hệ khung không có hệ cân khối lượng tác động. Khe hở giữa hệ cân khối lượng và hai chốt chặn được mô hình bằng sử dụng gap link trong Sap2000 như Hình 5(b). Hai chốt chặn coi như ngàm và cứng nên được mô hình bằng linear link với

giả thiết là độ cứng rất lớn.



(b) Mô hình thiết bị cân khối lượng



(a) Link Gap



**Hình 5.** Mô hình thiết bị cân khối lượng (IMD) trong thí nghiệm Sap 2000.

Vật liệu cho các tiết diện dầm, cột và tấm sàn là thép A36 với mô đun đàn hồi  $E=29000$  ksi, cường độ chảy  $f_y=0.268$  N/mm<sup>2</sup>, cường độ tới hạn  $f_u=0.4$  N/mm<sup>2</sup>

#### 4. KẾT QUẢ

##### 4.1 Chu kỳ dao động

Chu kỳ dao động của kết cấu chưa gắn hệ cân khối lượng ở dạng dao động thứ 1,2 và 3 là 0.67, 0.16 và 0.08 giây, chu kỳ này rất gần với với chu kỳ của 3 dao động đầu tiên từ mô hình thí nghiệm là 0.68, 0.18 và 0.1 giây. Hình 6 thể hiện 3 dạng dao động đầu tiên của khung chưa gắn hệ cân khối lượng.



(a) Khung thép (b) Dao động thứ 1 (c) Dao động thứ 2 (d) Dao động thứ 3

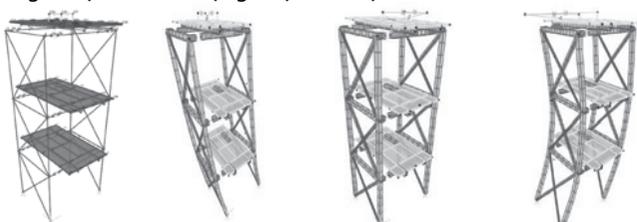
**Hình 6.** Dao động của khung thép 3 tầng không có hệ cân khối lượng

Bảng 3 so sánh các giá trị về chu kỳ, tần số của khung thép 3 tầng cho mô hình thí nghiệm và mô hình bằng phần mềm Sap2000. Có thể nhận thấy mô hình bằng hệ khung bằng phần mềm Sap2000 khá tin cậy.

Bảng 3. Chu kỳ, tần số của khung thép không có thiết bị cân khối lượng

Dao động	Chu kỳ, T, (giây)		Tần số, f (Hz)	
	Thí nghiệm	Mô hình Sap2000	Thí nghiệm	Mô hình Sap2000
Dao động thứ 1	0.68	0.67	1.48	1.47
Dao động thứ 2	0.18	0.16	5.64	6.15
Dao động thứ 3	0.1	0.08	10.47	11.31

Một mô hình khung thép tương tự có gắn hệ cân khối lượng cũng được phân tích bằng phần mềm Sap2000 để so sánh dưới tác dụng tải trọng động lực học. Ba dao động đầu tiên của khung thép có gắn hệ cân khối lượng được thể hiện ở Hình 6.



(a) Khung thép gắn hệ cân (b) Dao động thứ 1 (c) Dao động thứ 2 (d) Dao động thứ 3

**Hình 6.** Dao động của khung thép 3 tầng có hệ cân khối lượng (SAP2000)

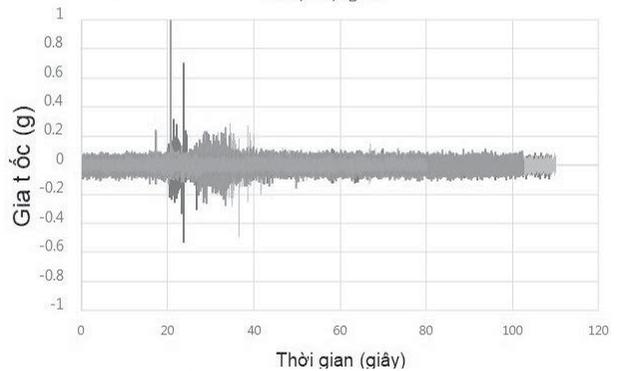
Có thể thấy hệ cân khối lượng tác động có ảnh hưởng đến chu kỳ và tần số dao động của khung thép. Chu kỳ dao động và tần số của khung có gắn thiết bị cân nhỏ hơn so với mô hình không gắn thiết bị giảm chấn. Bảng 4 so sánh các giá trị về chu kỳ, tần số của khung thép 3 tầng khung thép có gắn hệ cân và không có hệ cân khối lượng.

**Bảng 4.** So sánh kết quả khung thép không có hệ cân và có hệ cân khối lượng

Dao động	Chu kỳ, T, (giây)		Tần số, f, (Hz)	
	Không có hệ cân khối lượng	Có hệ cân khối lượng	Không có hệ cân khối lượng	Có hệ cân khối lượng
Dao động thứ 1	0.67	1.25 (giây)	1.47	0.79
Dao động thứ 2	0.16	0.4 (giây)	6.15	2.49
Dao động thứ 3	0.08	0.30 (giây)	11.31	3.36

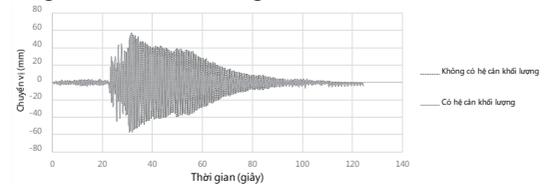
##### 4.2 Phản ứng dưới trận động đất

Hơn 10 trận động đất với cường độ khác nhau để khảo sát của hệ khung thép 3 tầng không có hệ cân khối lượng và có gắn hệ cân khối lượng như Hình 7.

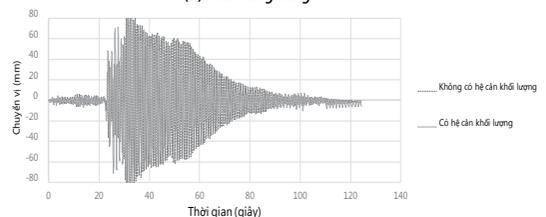


**Hình 7.** 10 trận động đất

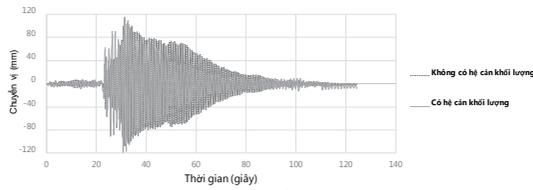
Hình 8 so sánh chuyển vị và gia tốc tại tầng 1,2, và 3 của không có và có hệ cân khối lượng dưới tác dụng của trận động đất AG1. Chuyển vị tại tầng 3 lớn nhất là 118 mm và 108 mm cho khung có gắn hệ cân và khung không có hệ cân khối lượng tác động, trong khi đó chuyển vị tại tầng 1 và 2 của khung không có hệ cân khối lượng tác động và khung có gắn hệ cân khối lượng nhỏ hơn tầng 3. Tương tự gia tốc tại tầng 3 của khung có hệ cân khối lượng nhỏ hơn khung không có hệ cân khối lượng tác động, trong khi đó gia tốc tại tầng 1 và 2 nhỏ hơn tầng 3.



(a) Phản ứng tầng 1

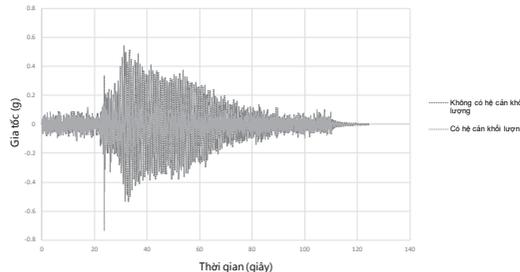


(b) Phản ứng tầng 2

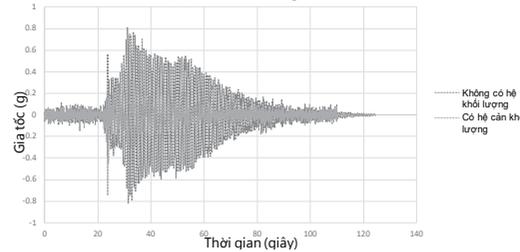


(c) Phản ứng tầng 3

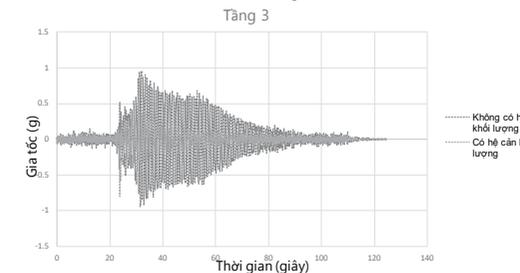
Hình 8. Phản ứng chuyển vị dưới trận động đất AG1



(a) Tầng 1



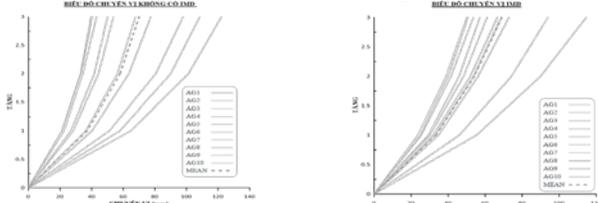
(b) Tầng 2



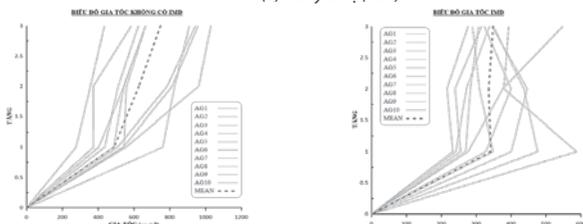
(c) Tầng 3

Hình 9. Phản ứng gia tốc dưới trận động đất AG1

Hình 10 thể hiện so sánh kết quả chuyển vị, gia tốc của khung có và không có hệ cản dưới 10 trận động đất khác nhau.



(a) Chuyển vị (mm)



(b) Gia tốc (g)

Hình 10. Phản ứng kết cấu công trình dưới 10 trận động đất

## 5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu phân tích mô hình và động lực học của khung kết cấu thép có xét đến thiết bị cản khối lượng tác động bằng phần mềm Sap2000. Khung có sử dụng liên kết dạng liên kết khớp và liên kết moment theo 2 phương khác nhau. 10 trận động đất với cường độ khác nhau được dùng để phân tích đánh giá. Phần mềm Sap2000 được dùng để phân tích và đánh giá ở nghiên cứu này. Một số kết luận được đưa ra như sau:

1. Hệ cản khối lượng tác động (IMD) có ảnh hưởng đến chu kỳ, tần số và chuyển vị hệ khung.

2. Với việc sử dụng hệ cản khối lượng tác động thì làm giảm đáng kể phản ứng của kết cấu dưới tác dụng của tải trọng động.

3. Phần mềm kết cấu Sap2000 có thể mô hình hoá hệ cản khối lượng có cấu tạo phức tạp.

### Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Xây dựng Hà Nội đã tài trợ cho nghiên cứu này trong khuôn khổ Đề tài mã số: 27-2023/KHXD.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. TCXDVN 375:2006, Thiết kế công trình chịu động đất, Nhà Xuất bản Xây dựng, Hà Nội.

[2]. TCVN 9386:2012, Thiết kế công trình chịu động đất, Nhà Xuất bản Xây dựng, Hà Nội.

[3]. Housner, G., Bergman, L. A., Caughey, T. K., Chassiakos, A. G., Claus, R. O., Masri, S. F., ... & Yao, J. T. (1997). Structural control: past, present, and future. Journal of engineering mechanics, 123(9), 897-971.

[4]. Spencer Jr, B. F., & Nagarajaiah, S. (2003). State of the art of structural control. Journal of structural engineering, 129(7), 845-856.

[5]. Saeed, T. E., Nikolakopoulos, G., Jonasson, J. E., & Hedlund, H. (2015). A state-of-the-art review of structural control systems. Journal of Vibration and Control, 21(5), 919-937.

[6]. Sun, J. Q., Jolly, M. A., & Norris, M. T. (1995). Passive, adaptive and active tuned vibration absorbers-a survey.

[7]. Kaynia, A. M., Veneziano, D., & Biggs, J. M. (1981). Seismic effectiveness of tuned mass dampers. Journal of the Structural Division, 107(8), 1465-1484.

[8]. Masri, S. F. (1969). Analytical and experimental studies of multiple-unit impact dampers. The Journal of the Acoustical Society of America, 45(5), 1111-1117.

[9]. Gharib, M., & Karkoub, M. (2017, November). A comparative study of mass based vibration dampers. In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Vol. 58370, p. V04AT05A045). American Society of Mechanical Engineers

[10]. Sun, J. Q., Jolly, M. A., & Norris, M. T. (1995). Passive, adaptive and active tuned vibration absorbers-a survey.

[11]. Masri, S. F. (1969). Analytical and experimental studies of multiple-unit impact dampers. The Journal of the Acoustical Society of America, 45(5), 1111-1117.

[12]. SAP2000, C. S. I. (2005). Structural analysis program. Berkeley, California.

[13] Pacific Earthquake Eng. Research Center (PEER) (2023) blind prediction contest

[14]. Rastegaran, M., Ebrahimi, M., Beheshti-Aval, S. B., Karimzade, M., Farsangi, E. N., & Nobahar, E. (2023, February). A novel clevis-based beam-column model to investigate the hysteretic characteristics of steel moment connections: Experimental and numerical simulations. In Structures (Vol. 48, pp. 576-601). Elsevier.