

Hiệu quả giảm chấn của con lắc trong kết cấu khung phẳng

The reduction of vibration of simple pendulum in a plane frame structures

> PHAN TRUNG THÀNH¹, TS PHẠM ĐÌNH TRUNG²

¹Học viên Cao học - Trường Đại học Mở TP Hồ Chí Minh
Email: trungthanhxsd@gmail.com

²Trường Đại học Xây dựng Miền Trung.

Email: phamdinhtung@muce.edu.vn; Tel: 0915185207

TÓM TẮT

Bài báo phân tích hiệu quả giảm chấn của con lắc đơn trong kết cấu khung chịu tác động của gia tốc nền động đất. Kết cấu khung được mô hình bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Tải trọng tác dụng lên khung là các băng gia tốc nền động đất theo thời gian. Con lắc đơn cũng được mô hình với các thông số vật lý cần thiết và được gắn trên tầng trên đỉnh của kết cấu. Toàn bộ hệ thống bao gồm kết cấu có gắn con lắc đơn được phân tích động lực học trên toàn miền thời gian. Kết quả phân tích ứng xử của hệ gồm có chuyển vị và lực cắt ở các tầng của kết cấu cho thấy hiệu quả giảm chấn của con lắc đơn.

Từ khóa: Giảm chấn, con lắc đơn, kết cấu khung, Phương pháp phần tử hữu hạn.

ABSTRACT

The reduced vibration of frame structures included a single pendulum affected by earthquake ground acceleration is presented in this paper. The structure based on a structural model of a multi-storey building in plane frame is built by the finite element method. External loads acting on the structures are ground acceleration of earthquakes. The single pendulum is also modeled with the required physical parameters and is mounted on the top floor of the structure. The system including a structure and a single pendulum subjected the ground acceleration is dynamically analyzed based on the principle of dynamic equilibrium and step by step solution in the time domain. The numerical results of the behavior of the structural system, including displacement and base shear force of the structure, show the reduced effectiveness of the single pendulum.

Key words: Reduction of Vibration, Plane Frame Structure, Single Pendulum, Finite Element Method.

1. GIỚI THIỆU

Nước ta nằm trong khu vực chịu ít ảnh hưởng của động đất mạnh tuy vậy vẫn đã từng xảy ra nhiều trận động đất có cường độ lớn nhỏ khác nhau, trong đó có 2 trận động đất cấp VIII, 11 trận cấp VII và 60 trận cấp VI (thang cường độ MSK-64). Mặt khác, Việt Nam lại nằm trong khu vực hoạt động mạnh của bão nhiệt đới, dù không có sức hủy diệt như động đất, nhưng gió bão là một trong những tác nhân gây ra nguy hiểm cho công trình xây dựng, có thể gây ra sụp đổ nếu không được thiết kế hợp lý, đặc biệt đối với công trình nhiều tầng. Trong những năm gần đây, nhu cầu xây dựng các tòa nhà cao tầng ở các thành phố lớn ngày càng nhiều. Những công trình như vậy có thể nhạy hơn với kích động bên ngoài như gió và động đất do dao động chậm hơn. Đối với công trình nhiều tầng, một trong những thách thức là kiểm soát sự dao động của kết cấu khi có ngoại lực động để đảm bảo sự an toàn cho kết cấu chịu lực. Phương pháp thông thường để làm giảm phản ứng động này là sử dụng thiết bị làm giảm dao động. Con lắc đơn là một trong những giải pháp dùng để giảm chấn cho kết cấu.

Khi cả hệ chịu tác động của tải trọng động hoặc động đất, hệ con lắc cũng dao động và sinh ra lực tương tác với kết cấu chính... thường lực này khác pha so với tải trọng ngoài nên trên kết cấu chính nhìn chung là an toàn hơn. Dưới góc độ năng lượng, khi hệ con lắc dao động, chúng hấp thụ năng lượng cơ học do ngoại lực tác động, vì thế, năng lượng tác động vào kết cấu chính giảm đi. Khi tần số dao động tự nhiên của con lắc được điều chỉnh đến gần tần số riêng của kết cấu thì hiện tượng gần cộng hưởng chiếm ưu thế do đó lực tương tác này càng lớn, và khi này hệ con lắc làm tiêu tán năng lượng nhiều hơn. Vì vậy, vấn đề này đã được nhiều sự nghiên cứu trong suốt các thập niên đã qua, cụ thể hai xu thế chính của vấn đề nghiên cứu này là tối ưu các thông số hoặc đề xuất các giải pháp điều khiển để nâng tầm hiệu quả của con lắc. Việc ứng dụng hệ này vào trong các dạng kết cấu chịu tải trọng động, nhất là các kết cấu công trình chịu động đất thì được quan tâm và có khá nhiều các công bố trong suốt giai đoạn vừa qua của các nghiên cứu trong nước, ở đây chỉ trích dẫn một số công trình trước đây như Hồ Thị Như Hiền (2014), Phạm Đình Trung (2014).

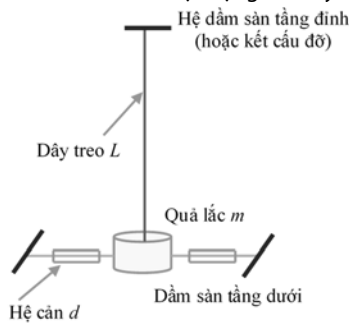
Tương tự, ở nước ngoài cũng thu hút rất nhiều tác giả quan tâm đến hướng nghiên cứu này. Hệ con lắc đã có khá sớm và đã có áp dụng thực tiễn; tuy vậy vẫn còn tồn tại nhiều hướng phát triển tiếp theo và thu hút cho đến thời điểm rất gần đây năm 2019 và 2020 vẫn còn nhiều công bố liên quan trên các tạp chí uy tín. Các nghiên cứu này được trích dẫn sơ lược theo trình tự như sau: Colherinhas (2019), Gerges (2003), Hassani (2016), Kecik (2020), Roffel (2011), Wang và cộng sự (2018, 2020). Các nghiên cứu này cũng phân tích một số thuận lợi của con lắc như cấu tạo đơn giản, dễ dàng thiết kế sơ đồ treo và đỡ cho phương chuyển động.

Tiếp theo xu hướng nghiên cứu về giảm chấn cho kết cấu này, bài báo này phân tích sự giảm chấn của thiết bị giảm chấn là con lắc

đơn giản trong kết cấu khung phẳng chịu tải trọng động đất. Sự rời rạc hóa của kết cấu dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn với phần mềm chuyên dụng SAP2000. Thông số nghiên cứu là khối lượng và hệ cản của con lắc đơn ảnh hưởng đến ứng xử động lực học của hệ. Ngoài ra những thông số khác liên quan đến kết cấu và tần số trội của gia tốc nền động đất cũng được khảo sát.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Phần này trình bày cơ sở lý thuyết của bài báo gồm có con lắc đơn, hệ khung và gia tốc nền. Trước hết cách thức mô tả con lắc đơn trong kết cấu. Con lắc đơn gồm có các thông số vật lý như khối lượng con lắc, hệ cản nhớt, chiều dài dây treo. Chi tiết gồm có các phần và cách lắp đặt như trên hình 1. Chi tiết như các đại lượng sau đây.



Hình 1. Mô hình của con lắc đơn gắn với hệ kết cấu

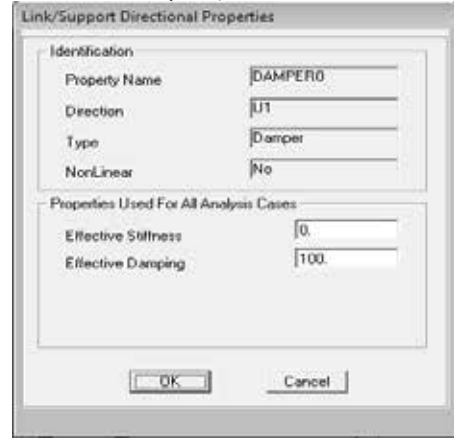
Trong con lắc đơn, quả lắc được nối với kết cấu thông qua hệ thống dây treo, với giả thiết là bỏ qua trọng lượng bản thân dây treo và khối lượng quả lắc được thu gọn về một điểm, như Hình 1. Giả thiết rằng hệ thống treo này có độ cứng dọc trục là rất lớn để thỏa mãn giả thiết là chuyển vị dọc theo phương vuông góc với chuyển vị của quả lắc là bé (có dẫn đàn hồi dây xem nhỏ và bỏ qua), có thể bỏ qua trong phân tích ứng xử của hệ kết cấu dưới tác động của tải trọng động đất. Do đó, hệ thống dây treo này được mô hình bằng phần tử thanh một chiều chỉ chịu kéo "line spring" trong phần mềm SAP2000. Bài báo mô tả đặc điểm phần tử thanh là tương đồng với ứng xử của hệ dây treo, chỉ làm việc chịu kéo theo phương dọc trục, như Hình 2 trong phần mềm SAP2000.



Hình 2. Các đặc tính phần tử "line spring"

Đối với thiết bị cản nhớt liên kết quả lắc vào hệ kết cấu thì được mô tả bằng phần tử "link", đặc điểm của phần tử này là có thể hoàn

toàn bỏ qua độ cứng của phần tử và chỉ xét đến thuộc tính cản nhớt, lực cản tỷ lệ với vận tốc chuyển động, ứng xử dọc trục của phần tử. Do đó, phần tử "link" hoàn toàn tương đồng với đặc tính ứng xử của thiết bị cản. Vì vậy, việc sử dụng một phần tử đặc biệt "link" trong SAP2000 để khai báo thiết bị cản liên kết giữa quả lắc với hệ kết cấu là hoàn toàn khả thi và chấp nhận, như trên Hình 3.



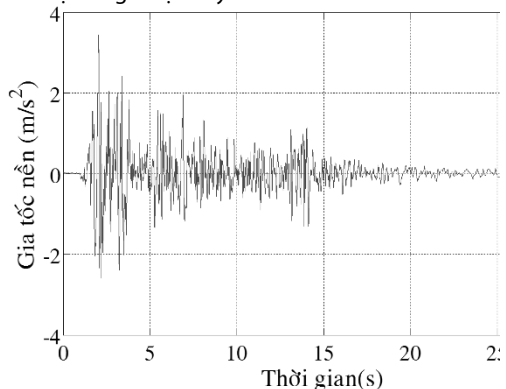
Hình 3. Thông số thuộc tính phần tử "link"

Như vậy, có thể đánh giá rằng từ mô hình con lắc đơn với các thông số vật lý cho trước, bằng cách dùng phần mềm phân tích kết cấu chuyên dụng SAP2000 có thể mô tả được bản chất làm việc của con lắc khi được gắn trong kết cấu bằng những phần tử tương ứng. Mô hình như diễn tả cũng là sự khác biệt của luận văn so với những nghiên cứu đã công bố tại Việt nam và có phát triển rất rõ ràng về mô hình phân tích.

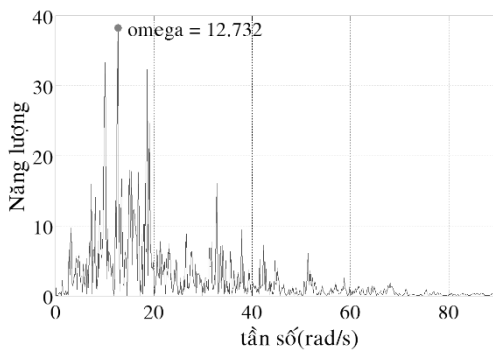
Mục tiêu của bài báo là đánh giá sự giảm chấn dựa vào kết quả ứng xử động lực học của kết cấu chịu gia tốc nền động đất, phương trình chuyển động của hệ chịu gia tốc nền được thiết lập dựa vào nguyên lý cân bằng động như sau

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = P(t) = -M\ddot{u}_g(t)$$

Trong phương trình chuyển động này, các ma trận khối lượng, cản và ma trận độ cứng được xác định bởi phương pháp phần tử hữu hạn, lợi dụng thế mạnh của phần mềm SAP2000; các véc tơ chuyển vị, vận tốc và gia tốc của hệ được xem như là các ẩn số của bài toán, vế phải của phương trình này chính là lực động đất tác dụng lên kết cấu. Trong bài toán này, gia tốc nền $\ddot{u}_g(t)$ là đại lượng biến thiên theo thời gian, thí dụ như trên đồ thị hình 4. Để tìm hiểu đặc trưng tần số trội của gia tốc nền này, bài báo dùng phân tích Fourier phổ năng lượng để xác định, kết quả tần số trội của trận động đất này được cho trên hình 5. Từ kết quả của chuyển vị, các thành phần khác mô tả ứng xử động lực học của hệ cũng được suy ra.



Hình 4. Đồ thị của gia tốc của Elcentro 1940

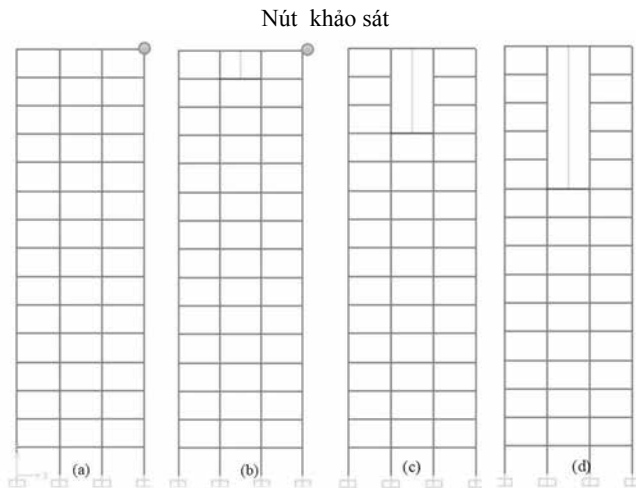


Hình 5. Năng lượng với tần số trội của động đất Elcentro

3. KẾT QUẢ SỐ

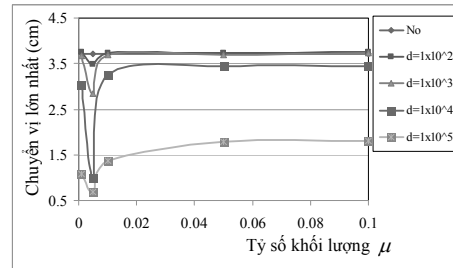
Để làm căn cứ khảo sát sự ảnh hưởng của các thông số đặc trưng động lực học của con lắc lên ứng xử động của hệ kết cấu, kết cấu là khung phẳng 15 tầng 3 nhịp đều, ba thông số đặc trưng của mô hình con lắc đơn được định nghĩa như sau. Tỷ số khối lượng μ là tỷ số giữa khối lượng quả lắc m với khối lượng của hệ kết cấu M , thể hiện $\mu = \frac{m}{M}$ (%), hệ số cản d (Ns/m) và chiều dài dây treo của con lắc

L , có một số trường hợp khảo sát, chiều dài lấy bằng bội số của chiều cao tầng. Chiều dài này sẽ ảnh hưởng đến chu kỳ dao động của con lắc và do vậy cũng ảnh hưởng đến tỷ số tần số của con lắc và tần số của hệ. Tất cả đều có ảnh hưởng đến ứng xử động lực học của cả hệ. Bài báo khảo sát thông số chiều dài con lắc dựa trên 4 sơ đồ: TH1 (a), hệ không gắn con lắc; TH2 (b), hệ có gắn con lắc đơn với chiều dài dây treo bằng chiều cao 1 tầng nhà, TH3 (c) hệ có con lắc đơn với chiều dài dây treo bằng chiều cao 3 tòa nhà và cuối cùng là TH4 (d), con lắc có chiều dài bằng 5 lần chiều cao tầng như trên Hình 6. Nút khảo sát chuyển vị là ở tầng đỉnh bên phải như trên Hình 6.

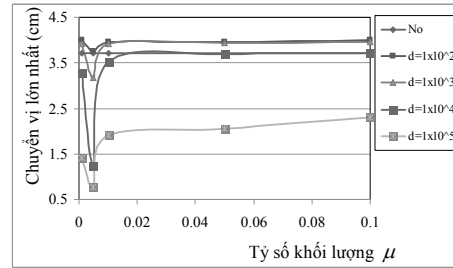


Hình 6. Năng lượng với tần số trội của động đất Elcentro

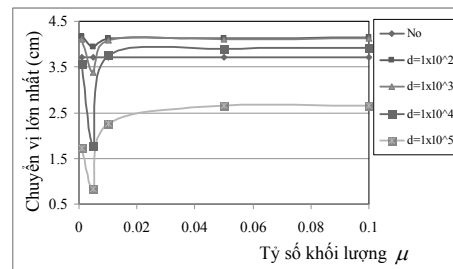
Trong phần này sự ảnh hưởng của tỷ số khối lượng μ lên ứng xử động của hệ được khảo sát dưới tác động của băng gia tốc nền Elcentro, kết quả chuyển vị động lớn nhất ở tầng đỉnh (nút phải trên cùng) được xem xét ứng với các trường hợp tỷ số μ khác nhau ứng với các trường hợp vị trí treo con lắc ở các cao độ tầng khác nhau, thể hiện trên các hình 7, 8, 9. Đồng thời, sự ảnh hưởng của giá trị cản d của thiết bị cản lên ứng xử động của hệ kết cấu cũng được xem xét, kết quả chuyển vị động lớn nhất của hệ kết cấu cũng được trình bày trên các hình 10, 11, 12.



Hình 7. Ảnh hưởng của μ với trường hợp TH2

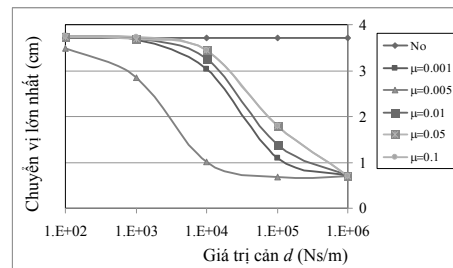


Hình 8. Ảnh hưởng của μ với trường hợp TH3

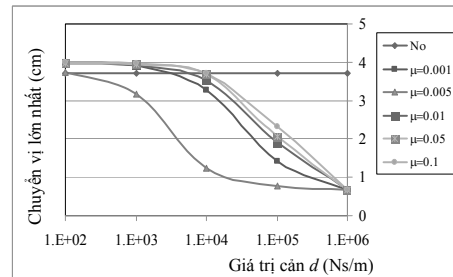


Hình 9. Ảnh hưởng của μ với trường hợp TH4

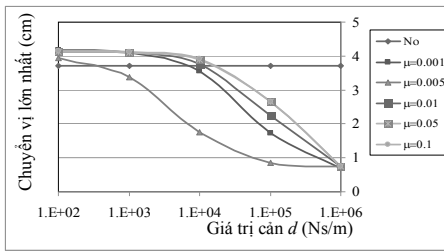
Có thể nhận thấy rằng khi điều chỉnh tỷ số khối lượng, nói cách khác là điều chỉnh thông số khối lượng dao động của quả lắc thì sự ảnh hưởng của con lắc lên ứng xử động của hệ là khác nhau. Trong kết quả phân tích này cho thấy ứng với tỷ số khối lượng $\mu = 0.005$ cho hiệu quả giảm thiểu ứng xử động trong hệ là tốt nhất so với các trường hợp còn lại, thể hiện trên các Hình 7 đến Hình 9.



Hình 10. Ảnh hưởng của cản d trường hợp TH2



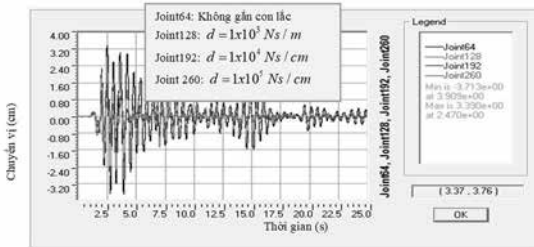
Hình 11. Ảnh hưởng của cản d trường hợp TH3



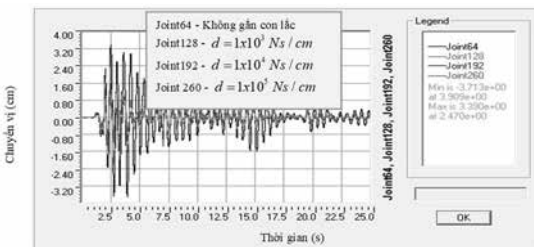
Hình 12. Ảnh hưởng của cản d trường hợp TH4

Bên cạnh đó, kết quả phân tích trên Hình 10 đến Hình 12 cũng cho thấy rằng giá trị cản của mô hình con lắc đơn là ảnh hưởng lên hiệu quả giảm chấn của con lắc đơn là đáng kể dưới tác động của động đất, sự gia tăng giá trị cản hầu như làm gia tăng tính hiệu quả của mô hình con lắc đơn, đặc biệt là ứng với trường hợp tỷ số khối lượng $\mu = 0.005$ và quả lắc gắn ở liền kề tầng đỉnh. Mặc dù vậy, nhưng cũng có vài trường hợp cho thấy thì sự gia tăng này không thật sự mang lại hiệu quả trong việc giảm thiểu ứng xử động của hệ ứng với các trường hợp quả lắc gắn cách tầng đỉnh 3 (TH3) tầng và 5 tầng (TH4), thể hiện trên Hình 10 đến Hình 12.

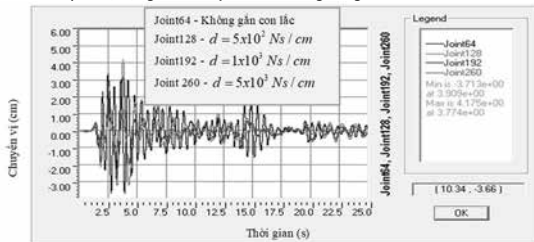
Thông qua kết quả phân tích bên trên cho thấy mô hình con lắc đơn là phát huy được hiệu quả trong việc giảm thiểu ứng xử động trong hệ kết cấu dưới tác động của động đất, đặc biệt trong phân tích này cho thấy ứng với tỷ số khối lượng $\mu = 0.005$ và quả lắc treo ở liền kề tầng đỉnh thì hiệu quả của mô hình con lắc là rõ rệt nhất. Điều này có thể được lý giải thông qua tỷ số tần số điều chỉnh, khi chiều dài treo của quả lắc giảm thì tỷ số điều chỉnh sẽ tăng và tiến dần tới tỷ số $\beta = 1$, hay nói cách khác là tần số dao động riêng của con lắc tiến gần đến tần số dao động riêng của hệ kết cấu nên hiệu quả sẽ là rõ ràng nhất.



Hình 13. Chuyển vị động của nút phải trên cùng tầng đỉnh với TH2



Hình 14. Chuyển vị động của nút phải trên cùng tầng đỉnh với TH3



Hình 15. Chuyển vị động của nút phải trên cùng tầng đỉnh với TH4

Đồng thời, kết quả phân tích cũng cho thấy với sự gia tăng của tỷ số cản, chính là sự gia tăng của giá trị cản d làm gia tăng tính hiệu quả của mô hình con lắc. Nhưng sự gia tăng này thật sự là không đáng kể ứng với miền giá trị cản d nhỏ, còn trong vùng giá trị lớn thì hiệu quả của con lắc đơn là rõ rệt hơn. Nhưng tính hiệu quả cũng chỉ đạt ở một ngưỡng nhất định với sự gia tăng của thông số này. Vì vậy, để thấy rõ hơn sự ảnh hưởng của cần thiết bị lên tính hiệu quả của con lắc thì ứng xử động theo thời gian của hệ kết cấu khi quả lắc được gắn ở liền kề tầng đỉnh được khảo sát và thể hiện trên chi tiết như sau. Kết quả chuyển vị động theo thời gian của hệ kết cấu dưới tác động của trận động đất ElCentro được thể hiện trên Hình 13 đến Hình 15. Từ các hình này, có thể thấy rõ ứng xử động lực học của kết cấu được giảm đi đáng kể giữa có và không có gắn thêm con lắc. Giá trị giảm này tùy vào cả 3 thông số, khối lượng con lắc, hệ số cản và chiều dài con lắc. Tất cả các thông số này đều được khảo sát rõ sự ảnh hưởng.

4. KẾT LUẬN

Bài báo này đã trình bày cách phân tích giảm chấn của kết cấu khung phẳng chịu động đất bằng cách gắn thêm con lắc đơn lên hệ. Kết quả phân tích số cho thấy mô hình con lắc đơn là phát huy tính hiệu quả ứng với gia tốc nền động đất, trong đó tính hiệu quả của mô hình con lắc đơn là tùy vào thông số của nó tương đối so với kết cấu. Cụ thể hơn, có thể tìm được tỷ số khối lượng để đạt hiệu quả giảm chấn tốt nhất và các thông số khác cho từng trường hợp kết cấu cụ thể hay gia tốc nền cụ thể cũng được tìm hiểu rõ.

Qua kết quả số sơ bộ đó, có thể đánh giá rằng đây cũng là một giải pháp giảm chấn khá tốt, hiệu quả giảm chấn có thể lên đến vài chục phần trăm, hoàn toàn phù hợp với yêu cầu cấu tạo và có thể triển khai nghiên cứu sâu hơn để ứng dụng. Những thông số cần được khảo sát nhiều hơn cũng được đề nghị là: qui mô của kết cấu, đặc tính của gia tốc nền động đất và số lượng – vị trí con lắc gắn cũng ảnh hưởng đến kết quả.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Hồ Thị Như Hiền, *Đánh giá hiệu quả giảm chấn của nhiều hệ cản khối lượng (multi-tuned mass dampers) trong kết cấu chịu động đất*, Luận văn Thạc sỹ, Trường Đại học Bách Khoa Thành phố Hồ Chí Minh, 2014.
- Phạm Đình Trung, Nguyễn Trọng Phước, *Phân tích hiệu quả giảm chấn trong kết cấu lắp đặt đồng thời nhiều hệ cản khối lượng chịu động đất*, Hội nghị Cơ học kỹ thuật toàn quốc, kỷ niệm 35 năm thành lập Viện Cơ, Hà Nội, 2014.
- Colherinhas G.B., Morais M.V.G., Shzu M.A.M., Avila S.M., *Optimal Pendulum Tuned Mass Damper Design Applied to High Towers Using Genetic Algorithms: Two-DOF Modeling*, International Journal of Structural Stability and Dynamics, Vol. 19, No. 10, 1950125 (2019).
- Gerges R.R., Vickery B.J., *Parametric Experimental Study of Wire Rope Spring Tuned Mass Dampers*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 91(12), pp.1363-1385, 2003.
- Hassani S., Aminafshar M., *Optimization of pendulum tuned mass damper in tall building under horizontal earthquake excitation*, Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège, Vol. 85, p. 514 – 531, 2016.
- Keck K. and Mitura A., *Energy recovery from a pendulum mass damper with two independent harvesting source*, International Journal of Mechanical Sciences, 174, 2020.
- Roffel A., Lourenco R., Narasimhan S., Yarusevych S., *Adaptive Compensation for Detuning in Pendulum Tuned Mass Dampers*, J. Struct. Eng. Technical Papers., 137(2), 242 – 251, 2011.
- Richard L., *Design, Construction and Testing of an Adaptive Pendulum Tuned Mass Damper*, Master Thesis, Ontario, Canada, 2011
- Wang L., Nagarajaiah S., Shi W. and Zhou Y., *Study on adaptive-passive eddy current pendulum tuned mass damper for wind induced vibration control*, <https://doi.org/10.1002/tal.1793>, 2020.
- Wang L., Shi W., Zhou Y., *Study on self-adjustable variable pendulum tuned mass damper*, Struct Design Tall Spec Build. e1561, 1-13, 2018.