

Hiệu quả giảm chấn của hệ cản khối lượng trong kết cấu khung cao tầng

The efficiency of reductional responses of tuned mass damper in multi storey building structures

> **KS VÕ HOÀNG PHI^{1,*}, TS PHẠM ĐÌNH TRUNG²**

¹HVCH, Trường Đại học Mở TP.HCM, *Email: phi_dian@yahoo.com

²Trường Đại học Xây dựng Miền Trung, Email: phamdinhtung@muce.edu.vn

TÓM TẮT

Mục tiêu của bài báo này là nghiên cứu hiệu quả giảm chấn của thiết bị tiêu tán năng lượng dao động hoạt động dựa trên mô hình hệ cản khối lượng (Tuned Mass Damper - TMD) được gắn vào kết cấu nhà nhiều tầng chịu tác dụng của tải trọng điều hòa với tần số khác nhau. Mô hình kết cấu công trình được lựa chọn là khung 35 tầng chịu tải trọng ngang điều hòa được rời rạc hóa bởi phần mềm phân tích động lực học kết cấu SAP2000. Mô hình ứng xử cơ học của hệ TMD gồm có khối lượng, cản và lò xo đàn hồi với các thông số thay đổi được gắn vào kết cấu này. Kết quả số cho thấy hiệu quả giảm chấn với mô hình ứng xử của hệ TMD thông qua phản ứng động của hệ phụ thuộc vào các thông số: tần số riêng của kết cấu, khối lượng của hệ cản và đặc biệt là tần số của ngoại lực điều hòa.

Từ khóa: Giảm chấn; hệ cản khối lượng; kết cấu nhà nhiều tầng; tải điều hòa.

ABSTRACT

The objective of this paper is to study the reduction of dynamic responses of the oscillating energy dissipation device based on the Tuned Mass Damper (TMD) attached to the multistorey building structure under the harmonic loads with different frequencies. The structural model is a 35-storey frame subjected to harmonic horizontal loads which is discretized by SAP2000 structural dynamics analysis software. The mechanical behavior model of the TMD system including mass, damper and elastic spring with variable parameters and frame structure are studied. The numerical results show that the effect of the TMD to the dynamic response of the system depends on the parameters: natural frequency of the structure, mass of the TMD system and especially the frequency of the external loadings.

Keywords: The reductional response; tuned Mass Damper - TMD; multi storey building structures; harmonic loadings.

1. GIỚI THIỆU

Bài toán thiết kế kết cấu nhà nhiều tầng chịu tải trọng ngang luôn là đề tài thu hút sự quan tâm của các nhà khoa học và các kỹ sư kết cấu. Khi chiều cao nhà hay số tầng tăng lên, yêu cầu phải phân tích ứng xử động lực học của hệ là cần thiết vì bài toán phân tích tĩnh chưa đủ để mô tả hết được ứng xử của nó. Do đó các nhà khoa học phải nghiên cứu sâu hơn về bản chất của kết cấu và tìm ra các giải pháp kết cấu phù hợp chịu được tác động này trong công trình nhà nhiều tầng để kết cấu tương thích tốt và bảo đảm an toàn hơn khi có nguyên nhân động. Mục tiêu là giảm bớt phần nào thiệt hại do tác dụng động gây ra. Vì vậy vấn đề này thu hút sự quan tâm của rất nhiều nhà nghiên cứu, các kỹ sư thiết kế và cả các cơ quan quản lý nhà nước về xây dựng của nhiều quốc gia trên thế giới nói chung và kể cả Việt Nam [1,2,3,4,5,6].

Ở Việt Nam, ngày càng nhiều nhà cao tầng với số tầng 30-40 đã và sẽ được xây dựng trong giai đoạn rất gần đây và tương lai. Việc nghiên cứu và tìm ứng xử của kết cấu đã và đang thu hút nhiều sự chú ý của nhiều nhà nghiên cứu. Nhiều nghiên cứu được thực hiện nhằm đánh giá về các yếu tố ảnh hưởng đến ứng xử của kết cấu dạng này chịu tải trọng gió, động đất. Như đã biết, dao động gây ra bởi lực động, gió có thể gây hư hại, tăng chi phí bảo trì và làm giảm tuổi thọ kết cấu. Những phát triển về kỹ thuật thiết kế, đặc tính vật liệu, kỹ thuật xây dựng trong thời gian gần đây cho phép xây dựng những kết cấu nhẹ hơn, dài hơn và mảnh hơn. Mục đích là giảm chuyển vị và tăng tuổi thọ cho kết cấu nhằm đảm bảo sự làm việc bình thường và mang lại sự an toàn cho con người sử dụng.

Vị trí địa lý nước ta thuộc khu vực Đông Nam Á, cũng nằm trong vùng thường xuyên có gió bão và động đất, dù ảnh hưởng của động đất gây ra chưa lớn nhưng sự xuất hiện của các trận động đất ngày càng nhiều. Từ năm 2005 đến nay, Việt Nam xảy ra một số trận động đất với cường độ tương đối lớn từ 2 đến hơn 4 độ Richter, các trận động đất thường xảy ra tại các tỉnh phía bắc hoặc bị ảnh hưởng di chấn từ các quốc gia láng giềng như Trung Quốc, Lào... Các tỉnh như Hà Nội, Điện Biên, Sơn La... các trận động đất này có cường độ trung bình và nhỏ nên gây thiệt hại không nhiều về người và của. Tuy nhiên, theo thống kê của các nhà nghiên cứu thuộc Viện Vật lý địa cầu thì Việt Nam ta có nguy cơ tiềm ẩn động đất, cường độ có thể đủ lớn để gây ra thiệt hại. Vì vậy, các nhà địa chấn Việt Nam đã lập vùng có khả năng xảy ra động đất trên các vùng địa lý của Việt Nam và nghiên cứu về ảnh hưởng do các trận động đất này gây ra. Với gió bão, sự tác động thật sự là đáng kể và quan trọng với kết cấu nhà nhiều tầng. Việc

ngiên cứu và tìm hiểu ứng xử động của hệ kết cấu dưới tác động của ngoại lực thiên nhiên là vấn đề được quan tâm cấp thiết, có ý nghĩa cả về lý thuyết và thực tiễn [7,8,12]. Bài báo nghiên cứu cho kết cấu nhà nhiều tầng chịu tác động của các loại tải trọng dạng tải trọng động điều hòa làm cơ sở để mô tả tải trọng gió, động đất...

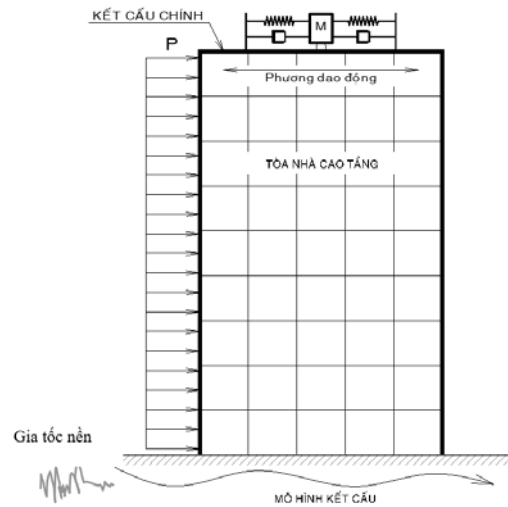
Khá nhiều nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm được thực hiện đối với bài toán tải trọng điều hòa và đã có nhiều kết quả nhất định đưa vào ứng dụng trong thiết kế [7,8,9]. Tuy vậy, việc đưa ra giải pháp làm giảm chuyển vị động và tất nhiên giảm nội lực của kết cấu dưới tác dụng của tải trọng điều hòa là đề tài thu hút được sự quan tâm của nhiều nghiên cứu từ trước, và thậm chí cho đến nay. Ý tưởng dùng hệ cản khối lượng gắn thêm vào kết cấu cũng đã được một vài nghiên cứu quan tâm nhưng vẫn chưa đánh giá hoàn toàn đầy đủ và toàn diện các yếu tố ảnh hưởng đến phản ứng của kết cấu đặc biệt là đối với kết cấu nhà nhiều tầng [10, 11]. Nên bài báo này chọn hướng nghiên cứu là xây dựng mô hình và giải quyết bài toán tương tác tải trọng điều hòa-kết cấu nhiều tầng có gắn hệ cản khối lượng. Trong đó xem xét tất cả các thành phần quán tính của hệ cản và kết cấu theo phương ngang.

Tại sao lựa chọn hệ cản. Theo phương pháp thiết kế truyền thống cho kết cấu công trình nhà nhiều tầng khi chịu tác động của tải trọng là tăng độ cứng cho kết cấu bằng cách tăng tiết diện, thay đổi chủng loại vật liệu, tăng cường độ bê tông, cốt thép... Tuy nhiên, giải pháp này chưa thật sự mang lại hiệu quả cao do làm gia tăng trọng lượng kết cấu do đó làm tăng lực quán tính do dao động và tăng giá thành của công trình. Do đó, để khắc phục phần nào những hạn chế của phương pháp thiết kế trên thì các nhà khoa học, các kỹ sư đã nghiên cứu và đề xuất giải pháp khác là gắn các thiết bị bên ngoài vào kết cấu gọi là hệ cản để chúng hấp thụ một phần năng lượng tác động vào kết cấu, để tiêu tán bớt nguồn năng lượng, gây ra lực lệch pha và từ đó làm cho kết cấu chính nhận ít năng lượng hơn, cho kết cấu an toàn hơn. Hiện nay, người ta đã nghiên cứu, thử nghiệm rất nhiều loại thiết bị gắn thêm vào để giảm chấn cho kết cấu. Sau khi nghiên cứu người ta đưa các thiết bị này vào ứng dụng trong kết cấu thực tế để giảm dao động. Các nghiên cứu đã được ứng dụng vào thực tế điển hình như: Hệ cô lập móng (Base Isolation), Hệ cản chất lỏng nhớt (Viscous Fluid Dampers, Particle Damper), Hệ cản khối lượng (Tuned Mass Damper), Hệ cản ma sát (FD - Friction Dampers), Hệ cản dẻo bằng kim loại (MD - Metallic Dampers)... nhưng mỗi một loại thiết bị đều cho thấy tính hiệu quả, cũng như những ưu, nhược điểm giảm chấn nhất định. Vì vậy, đây vẫn đang là đề tài cần được nghiên cứu thêm và thu hút nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học trong và ngoài nước để tìm tòi và phát triển các thiết bị giảm chấn hiệu quả hơn dưới tác dụng của tải trọng động.

Tiếp nối sự quan tâm này, bài báo này nghiên cứu một dạng thiết bị tiêu tán năng lượng dựa trên mô hình hoạt động của hệ cản TMD để phân tích khả năng giảm chấn của hệ cản TMD này khi được gắn vào công trình thực chịu tác động của tải trọng điều hòa dựa trên cơ sở phân tích động lực học của phần mềm SAP2000.

Hệ cản TMD là thiết bị có cấu tạo gồm một vật có khối lượng được gắn với kết cấu chính thông qua lò xo và thiết bị cản được thể hiện trên Hình 1. Mục đích của hệ TMD được gắn vào kết cấu chính là để giảm ứng xử động của kết cấu dưới tác dụng của tải trọng động cho kết cấu nhà cao tầng. Hệ này có tần số được điều chỉnh (Tuned) đến một tần số riêng của kết cấu để khi tần số này được kích động thì hệ cản sẽ cộng hưởng lệch pha với chuyển động của kết cấu và sẽ tiêu tán năng lượng do lực quán tính của hệ cản tác dụng vào kết cấu. Bài báo cũng khảo sát đáp ứng của kết cấu có gắn nhiều hệ cản khối lượng M-TMD chịu tải trọng động phân tích sự giảm chấn của hệ cản khối lượng lên kết cấu nhà

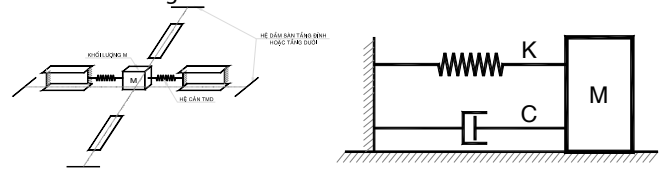
nhiều tầng chịu tải trọng điều hòa bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Kết quả cho thấy rằng hệ cản khối lượng có tác dụng giảm chấn đáng kể với phổ tần số của tải điều hòa.



Hình 1. Mô hình Hệ cản khối lượng TMD gắn lên kết cấu nhà nhiều tầng

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Phần này trình bày cơ sở lý thuyết gồm có các thông số như khối lượng hệ cản TMD (M), độ cứng hệ cản TMD (K), hệ số cản của hệ cản TMD (C). Cách lắp đặt các phần tử lại với nhau và liên kết với kết cấu như trong Hình 2.



Hình 2. Mô hình cấu tạo của hệ cản khối lượng gắn với hệ kết cấu và qui đổi mô hình của hệ kết cấu

Hệ cản TMD là một thiết bị gồm có một khối lượng là M được gắn vào kết cấu chính qua một lò xo có độ cứng K và hệ số cản C như trên Hình 2. Các công trình xây dựng trong thực tế thường được mô hình bởi các khối lượng các sàn tầng và hệ cản khối lượng thường được lắp đặt trên tầng mái hoặc rải rác trên các tầng của tòa nhà. Khi hoạt động, kết cấu chính dao động dưới tác dụng của ngoại lực (tải trọng điều hòa), theo dạng dao động chính tầng trên có chuyển vị lớn, hệ TMD cũng dao động và thường sinh ra lực tương tác (vai trò như là ngoại lực) lệch pha với ngoại lực giúp hệ kết cấu giảm chuyển vị. Để hiệu quả của hệ TMD được phát huy đáng kể thì tần số của hệ cản khối lượng thường được chọn là xấp xỉ tần số riêng của dạng dao động. Mô hình hệ kết cấu có gắn hệ cản TMD chịu tác động của gia tốc nền được tổng quát bằng phương trình vi phân chuyển động và được thể hiện như sau:

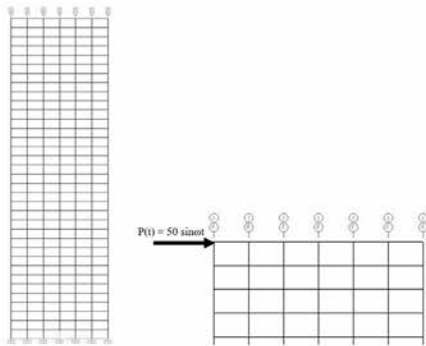
$$\ddot{M}u + C\dot{u} + Ku = Fg$$

Trong đó: **M** là ma trận khối lượng của hệ kết cấu, **C** là ma trận lực cản, **K** là ma trận độ cứng, các vector $\ddot{u}$, $\dot{u}$ và u phụ thuộc thời gian, đó là các vector chuyển vị, vận tốc, gia tốc của kết cấu và **Fg** là vector lực tác động do ngoại lực gây ra. Đây là lý thuyết tổng quát, thực tế khi kết cấu phức tạp về số lượng phần tử thì việc thiết lập phương trình chuyển động này thường rất công phu và khó khăn. Tuy nhiên, công cụ SAP2000 được dùng để giải bài toán này và đây là phần mềm thương mại có độ tin cậy nhất định với kết cấu thực.

3. KẾT QUẢ SỐ

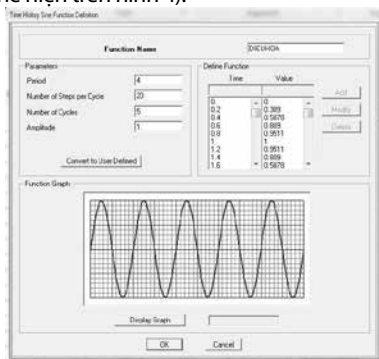
3.1 Kết cấu và tải trọng

Hệ kết cấu được lựa chọn với các thông số đặc trưng như sau: số tầng của kết cấu là 35 tầng, kết cấu cột và dầm cầu tạo bằng vật liệu bê tông cốt thép với tiết diện 400x450 (mm), chiều cao tầng 4 (m), 6 nhịp khung, khoảng cách khung là 6 (m), tỷ số cản $\xi = 5\%$, có tần số riêng nhỏ nhất của hệ $f = 0,2541$ (Hz), được vẽ như trên Hình 3. Nội dung bài báo này khảo sát đối với trường hợp tải trọng điều hòa tác dụng tại vị trí tầng đỉnh của kết cấu cũng như trên Hình 3.



Hình 3. Kết cấu khung phẳng 35 tầng không có gắn hệ cản khối lượng và lực động điều hòa tác dụng

Khi điều chỉnh các thông số của hệ cản TMD thì các đặc tính đặc trưng động học của cũng thay đổi và từ đó đặc trưng ứng xử động của cả hệ kết cấu cũng sẽ bị ảnh hưởng. Vì vậy, hiệu quả của hệ cản TMD lên ứng xử động của hệ kết cấu cũng khác nhau, do đó cần phải được phân tích và khảo sát một cách chi tiết. Sự ảnh hưởng trong mô hình của hệ cản TMD với các yếu tố cản của môi trường được giả thiết là không đáng kể so với sự ảnh hưởng của hệ cản khối lượng TMD với kết cấu, đồng thời tần số của tải trọng điều hòa thay đổi trong phạm vi lân cận xấp xỉ tần số của kết cấu. Bên cạnh đó, vị trí đặt hệ cản TMD cũng được xem xét ở nhiều tầng với các vị trí cao độ khác nhau (thể hiện trong Hình 5) để thấy rõ thêm sự ảnh hưởng của hệ cản TMD với thông số tần số dao động riêng thông qua tần số ngoại lực lên ứng xử động của hệ (thể hiện trên hình 4).



Hình 4. Tải trọng điều hòa $P - P_o \sin(\omega.t)$ khai báo trong SAP2000

Khảo sát với tải trọng điều hòa: $P = P_o \sin(\omega.t)$ với $P_o = 50$ kN và chu kỳ $T = 3,9347$ (s) $\rightarrow f_1 = 0,2541$ (Hz)

3.2 Thông số khối lượng của hệ cản

Khảo sát mô hình hệ cản TMD với sự ảnh hưởng của các thông số đặc trưng động học lên ứng xử động của hệ kết cấu, mô hình hệ cản TMD với các thông số đặc trưng được định nghĩa như sau:

- μ là tỷ số khối lượng là tỷ số giữa khối lượng TMD (M) với khối lượng của hệ kết cấu (M_{total}): $\mu = \frac{M}{M_{total}}$

- γ tỷ số tần số điều chỉnh là tỷ số giữa tần số tự nhiên có cản của TMD (f_d) với tần số dao động riêng của hệ kết cấu (f_1): $\gamma = \frac{f_d}{f_1}$

Khối lượng TMD (Mass) – M

(Tấn)

Trọng lượng TMD (Weight) $W = M \cdot g$ (kN)

Độ cứng TMD (Effective Stiffness) $K = \omega_d^2 M$ (kN/m)

Hệ số cản của TMD (Effective Damping) $C = 2M\omega_d\xi_d$ (kN.s/m)

Trong đó: - T_d : chu kỳ dao động TMD (s)

- f_d : Tần số riêng TMD, $f_d = 1 / T$ (1/s)

- ω_d : Tần số góc của TMD $\omega_d = 2\pi f_d$ (rad/s)

- ξ_d : Tỷ số cản TMD, $\xi_d = 5\%$

Trong thực tế, khi sử dụng hệ cản khối lượng (TMD) đối với hệ kết cấu thì khối lượng TMD thường được gắn ở cao độ các sàn tầng để thuận tiện cho việc kết nối với thiết bị cản nên tần số riêng của hệ cản khối lượng (TMD) là tương đối nhỏ. Vì vậy, tỷ số tần số γ rất khó điều chỉnh trong điều kiện mô hình hệ cản TMD với kết cấu thực tế trong công trình. Vì vậy, trong bài báo này sự ảnh hưởng của thông số này lên ứng xử của hệ kết cấu không được khảo sát nhiều.

3.3 Số lượng TMD

Vị trí đặt TMD cũng được xem xét ở nhiều tầng với các vị trí cao độ khác nhau (Hình 5) để thấy rõ sự ảnh hưởng của Hệ cản khối lượng (TMD) với thông số tần số dao động riêng thông qua vị trí đặt TMD lên ứng xử động của hệ.

TH: Không gắn hệ cản khối lượng TMD

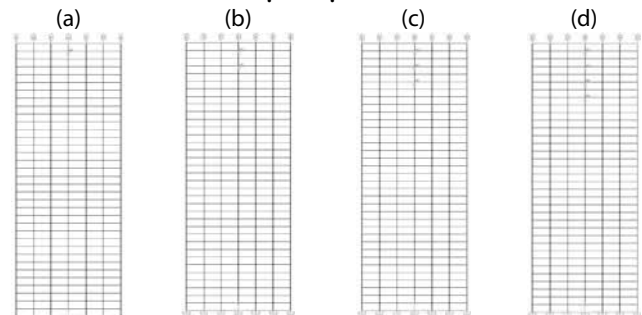
(a) TH1: Gắn hệ cản khối lượng TMD tầng 34: $H=136$ m

(b) TH2: Gắn hệ cản khối lượng TMD tầng 34, 32: $H=136, 128$ m

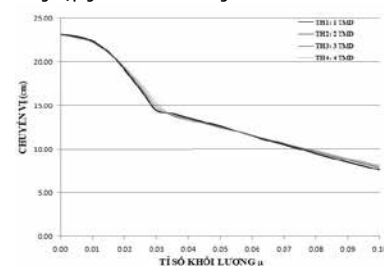
(c) TH3: Gắn hệ cản khối lượng TMD tầng 34, 32, 30: $H=136, 128, 120$ m

(d) TH4: Gắn hệ cản khối lượng TMD tầng 34, 32, 30, 28: $H=136, 128, 120, 112$ m

Vị trí đặt TMD



Hình 5: Các trường hợp gắn TMD ở các tầng



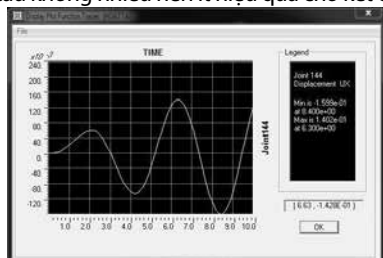
Hình 6. Ảnh hưởng của tỷ số μ tới chuyển vị

3.4 Khảo sát để xác định tỉ số khối lượng

Tỷ số khối lượng μ ảnh hưởng lên chuyển vị và nội lực động của hệ được khảo sát bởi tác dụng của tải trọng điều hòa, tại tầng mái 35 (nút giữa trên cùng - Joint 144) có kết quả chuyển vị động lớn nhất, các trường hợp tỷ số μ khác nhau được xem xét tới ứng với các vị trí đặt hệ cản TMD ở các tầng có cao độ khác nhau (thể hiện trên Hình 5). Hệ kết cấu với kết quả chuyển vị động lớn nhất cũng được trình bày trên Hình 6.

Từ đó ta có thể thấy rằng khi tỷ số khối lượng μ được điều chỉnh, hay điều chỉnh thông số khối lượng của Hệ cản khối lượng (TMD) thì TMD ảnh hưởng lên ứng xử động của hệ là khác nhau. Theo kết quả khảo sát trên Hình 6 cho thấy rằng ứng với tỷ số khối lượng $\mu = 0,03 \div$

0,04 cho hiệu quả giảm thiểu giảm thiểu chuyển vị với ứng xử động trong hệ là rõ rệt nhất. Nếu tiếp tục tăng tỉ số μ thì chuyển vị có giảm nhưng không đáng kể. Mặt khác khi μ tăng quá nhiều ảnh hưởng đến chuyển vị kết cấu không nhiều nên ít hiệu quả cho kết cấu.

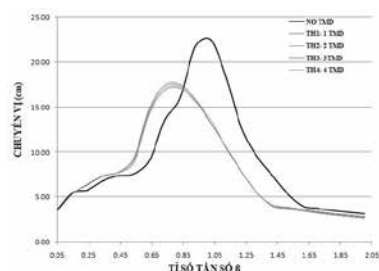


Hình 7. Biểu đồ chuyển vị tại tầng 35 ứng với $\mu = 0,035$, $T = 3,935$ (s)

Căn cứ vào biểu đồ trên Hình 6 ta cũng thấy rõ hiệu quả của TMD khi đặt trên các tầng khác nhau cũng thay đổi khác nhau. Nhìn chung khi TMD đặt trên tầng 34 (ứng với TH1) mang lại hiệu quả hơn so với đặt trên nhiều vị trí. Căn cứ vào kết quả trên ta thấy trường hợp $\mu = 0,035$ mang lại hiệu quả tốt nhất so với các trường hợp còn lại.

3.5 Khảo sát để xác định tỉ số tần số ứng với khối lượng TMD

Phần này khảo sát sự thay đổi tần số tải trọng điều hòa, đặc trưng bởi tỷ số tần số β là tỷ số giữa tần số ngoại lực với tần số dao động riêng của hệ kết cấu, khi tỷ số này xoay quanh đơn vị thì gần cộng hưởng. Kết quả chuyển vị lớn nhất của 04 trường hợp gắn TMD khi giá trị tần số ngoại lực thay đổi được vẽ trên hình 8. Hình này được vẽ từ rất nhiều trường hợp và chỉ thể hiện giá trị chuyển vị lớn nhất.

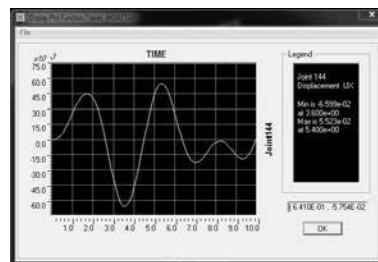


Hình 8. Ảnh hưởng của tỷ số β tới chuyển vị ứng với $\mu = 0,035$

Hình 8 cho thấy rõ sự ảnh hưởng của tỷ số tần số β lên chuyển vị thay đổi rất lớn đối với trường hợp có TMD và không TMD. Chuyển vị này chỉ có hiệu quả khi $\beta = 0,90 \div 1,45$. Tỷ số tần số chỉ có hiệu quả trong 1 dãy tần số nhất định, ngoài dãy tần số trên TMD không có hiệu quả đối với chuyển vị thậm chí có 1 số trường hợp còn gây ra phản tác dụng. Từ kết quả trên cho thấy rằng khi điều chỉnh tỷ số tần số, hay nói cách khác là điều chỉnh tần số dao động của Hệ cản khối lượng (TMD) thì ứng xử động của hệ với sự ảnh hưởng của TMD là khác nhau. Với tỷ số khối lượng $\beta = 0,90 \div 1,45$, Kết quả phân tích thấy hiệu quả giảm thiểu ứng xử động trong hệ là rõ rệt nhất. Nếu giảm tỉ số β ngoài phạm vi trên thì chuyển vị tăng lên chứ không giảm, trường hợp tăng tỉ số β ngoài phạm vi trên thì chuyển vị có giảm nhưng không đáng kể. Mặt khác khi β tăng quá nhiều làm cho kết cấu tại vị trí đặt TMD cũng tăng theo nên không hiệu quả cho kết cấu.

Nhìn vào biểu đồ Hình 8 ta cũng thấy rõ hiệu quả của TMD khi đặt trên các tầng khác nhau cũng thay đổi khác nhau. Nhìn chung khi TMD đặt trên tầng 34, 32, 30, 28 có mang lại hiệu quả hơn so với đặt trên tầng 34 nhưng không đáng kể.

Căn cứ vào kết quả trên ta thấy trường hợp $\beta = 0,90 \div 1,45$ là tốt nhất so với các trường hợp còn lại. Hình 9 thể hiện chuyển vị ngang theo thời gian của đỉnh kết cấu với một trường hợp tải trọng và khối lượng của hệ cản TMD.



Hình 9. Biểu đồ chuyển vị tại đỉnh ứng với $\beta = 1,318$, $\mu = 0,035$

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã phân tích hiệu quả giảm chấn của hệ cản TMD trong kết cấu khung nhiều tầng chịu tải trọng ngang điều hòa có tần số khác nhau, một số nhận định như sau.

- Kết quả phân tích cho thấy rằng khi tăng khối lượng của hệ TMD làm gia tăng tính hiệu quả của hệ nhưng khi khối lượng này quá lớn, TMD có khối lượng lớn, thì sự hiệu quả không còn tăng theo khối lượng nữa. Vì vậy sự gia tăng của thông số này mang lại tính hiệu quả ở một ngưỡng nhất định.

- Khi khảo sát đối với thông số β đặc trưng cho tần số ngoại lực và tần số riêng cho thấy tỉ số β cũng chỉ có hiệu quả ứng với một vùng nhất định gần vùng cộng hưởng và khu vực có tần số ngoại lực lớn; khi tần số ngoại lực nhỏ thì hiệu quả không đáng kể.

- Với kết quả số này, trường hợp TMD được gắn ở tầng mái cho thấy sự hiệu quả rõ ràng hơn thông qua chuyển vị động theo thời gian của hệ kết cấu giảm tương đối; tuy vậy nếu phân bố thành nhiều hệ TMD ở các tầng thì cũng mang lại kết quả tốt dưới góc nhìn lý thuyết và đây cũng là hướng phát triển tương lai cho các kết cấu rất cao tầng; kết quả này cũng xác nhận lại một số tòa nhà cao tầng trên thế giới hiện nay thường dùng một hệ TMD gắn ở tầng mái hoặc tầng ở cao độ rất cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Bùi Lê Lệ Hằng, *Phân tích hiệu quả giảm chấn của hệ cô lập móng cao su lõi chì kết hợp với hệ cản khối lượng trong kết cấu chịu động đất*, Luận văn Thạc sĩ, Trường Đại học Tôn Đức Thắng TP.HCM, 2014.
2. 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 sĩ, Trường Đại học Bách khoa TP.HCM, 2014.
3. Phạm Hữu Nghĩa, *Nghiên cứu giải pháp điều khiển bị động kết cấu với hệ cản thay đổi khối lượng MTMD*, Luận văn Thạc sĩ, Trường Đại học Bách khoa TP.HCM, 2007.
4. Nguyễn Trọng Phước, Huỳnh Tuấn Dũng, *Phân tích ảnh hưởng của hệ cản khối lượng và lưu biến điện trong khung phẳng chịu động đất*, Hội nghị Khoa học toàn quốc Cơ học Vật rắn biến dạng lần thứ XI, 2013.
5. Nguyễn Trọng Phước, Phạm Đình Trung, *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 toàn quốc lần thứ IX, 2014.
6. Nguyễn Trọng Phước, Phạm Đình Trung, Lương Văn Hải, *Phân tích hiệu quả giảm chấn của hệ lưu biến từ kết hợp với hệ cản khối lượng trong kết cấu chịu động đất*, Tạp chí Xây dựng (Bộ Xây dựng), 267&268, 49-51, 2014.
7. Abé M., Igusa T., *Tuned mass dampers for structures with closely spaced natural frequencies*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24, 247-261, 1995.
8. Chi C.L., Ging L.L., Wang F.U., *Protection of seismic structures using semi-active friction TMD*, John Wiley & Sons, Ltd, 39 (6), pp. 635-659, 2010.
9. 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).
10. Conner J. J., *Introduction to Structural Motion Control*, Pearson Edu. Inc, 2003.
11. Gerjes 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.
12. Gerjes R.R., Vickery B.J., *Optimum Design of Pendulum-Type Tuned Mass Dampers*, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 14(4), pp.353-368, 2005.