

개폐식 대공간 구조물의 지진 응답 제어 성능 향상을 위한 TMD의 최적 질량에 관한 연구

A Study on Optimum Mass of TMD for Improving Seismic Response Control Performance of Retractable-Roof Spatial Structure

김 동 형*
Kim, Dong-Hyung

김 현 수**
Kim, Hyun-Su

강 주 원***
Kang, Joo-Won

Abstract

In this study, the retractable-roof spatial structure was chosen as the analytical model and a tuned mass damper (TMD) was installed in the analytical model in order to control the seismic response. The analysis model is mainly consisted of runway trusses (RT) and transverse trusses (TT), and the displacement response was analyzed by installing TMD on those trusses. The mass of the single TMD which is installed in the analytical model was set to 1% of the total structure mass and the total TMD mass ratio was set to be 8% or 6%. In addition, the mass of a single TMD was varied depending on the number of installations. As a result of analyzing the optimal number of installations of TMD, the displacement response was reduced in all cases compared to the case without TMD. Above all, the case with 8 TMDs was the most effective in reducing the displacement response. However, in this case, as the load on the upper structure of the retractable-roof spatial structure increases, the total mass ratio of TMD was maintained and the number of TMDs was increased to reduce the mass ratio of one TMD.

Keywords : Tuned Mass Damper, Mass ratio, Retractable-roof spatial structure, Displacement response

1. 서론

올림픽, 월드컵 등 각종 국제 스포츠 대회와 대규모 전시회 및 공연 등 다양한 문화 행사들이 개최되면서 경기장과 개최 장소에 대한 수요가 점점 증가하고 있다. 그에 따라 해당 조건에 적절하게 부합하는 대공간 구조물의 필요성이 대두되고 있다¹⁾.

대공간 구조물은 많은 인원을 한 번에 수용할 수 있으며, 재난 상황 발생 시 피난처의 역할을 수행할 수 있다. 그러나 많은 인원을 수용할 수 있는 만큼 적절한 내진 설계가 이루어지지 않는다면 구조물 지붕 시설 및 장비 등의 붕괴로 인해 역으로 대규모 인명 피해를 초래할 수 있다²⁾. 국내에서는 2016년

발생한 경주 지진과 2017년 발생한 포항 지진으로 인해 상당한 피해가 발생한 바 있다. 우리나라도 더 이상 지진의 안전지대가 아님이 확인된 만큼 대공간 구조물의 동적 응답을 줄이는 것은 구조 설계 과정에서 매우 중요하다고 할 수 있다³⁾⁴⁾.

일반적으로 널리 사용되고 있는 라멘 구조물에 비하여 대공간 구조물은 규모와 형상에 따라서 매우 다른 구조적 특성을 가진다. 기본적으로 아치 구조의 집합이라고 할 수 있는 대공간 구조물은 자체의 곡률을 이용하여 외력을 면내력으로 저항하도록 하는 형태 저항형 구조물로서 비교적 작은 단면으로 내부 기둥 없이 넓은 공간을 계획할 수 있다는 장점이 있다⁵⁾.

폐쇄된 지붕 형태의 기존 대공간 구조물은 제한적인 조건에서 사용되고 한정된 활동성을 제공하였다. 하지만 오늘날의 개폐식 대공간 구조물은 기후 조건에 구애 받지 않으면서 구조물 내 다양한 활동을 구현할 수 있다. 다목적 놀이 공간을 제공하고, 스포츠 경기장으로 사용될 경우 잔디 생육을 위한

* 학생회원, 영남대학교 일반대학원 건축학과, 석사과정
Dept. of Architecture, Yeungnam University

** 정회원, 선문대학교 건축사회환경학부 부교수, 공학박사
Div. of Architecture & Civil Engrg., Sunmoon Univ.

*** 교신저자, 정회원, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Yeungnam University
Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625
E-mail: kangj@ynu.ac.kr

자연적인 조건이 형성될 수 있도록 해준다. 또한 지붕을 열고 단음으로써 자연적인 채광과 환기를 자유롭게 조절할 수 있기 때문에 친환경적인 측면에서 큰 효과를 누릴 수 있다⁶⁾.

대공간 구조물의 지진 하중에 대한 응답을 줄이기 위한 방법으로 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 대표적인 진동 제어의 방법으로 동조 질량 감쇠기 (Tuned Mass Damper; TMD)가 있다. TMD는 기계적인 진동 제어 방법으로써 구조물의 특성만으로 진동 제어 효과를 예측하고 제어할 수 있다는 특징이 있다⁷⁾. 진동 에너지를 구조물의 고유 진동 주기에 동조하여 기계적 감쇠비를 증가시키는 TMD는 구조물의 고유 진동 주기에 맞추어 적절하게 조율되었을 때 우수한 동적 응답 제어 성능을 나타내어 가장 많이 사용되고 있는 진동 제어 장치 중 하나이다⁸⁾.

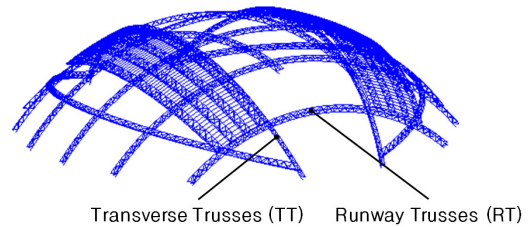
TMD를 구조물에 설치할 경우 TMD의 설치 개수를 증가시킨다고 해서 지진 응답 저감에 반드시 효과적인 것은 아니며, 설치 위치와 TMD의 질량에 따라서 변위 응답의 차이가 있다. 선행 연구⁹⁾에서는 개폐식 대공간 구조물의 해석 모델에 TMD를 설치할 때 TMD 1개의 질량비를 전체 구조물 질량의 1%로 설정하였으며, 8개의 TMD를 설치하는 것이 가장 효과적이었다. 또한 해당 개수에 대한 전체 TMD 질량비를 재검토한 결과, 8% 또는 6%로 설정할 때 변위 응답 저감이 가장 크게 나타났다. 이 경우 해석 모델의 지진 응답 제어에는 가장 효과적이었으나 TMD 1개의 질량이 매우 커지게 되어 상부 구조물에 TMD의 질량이 미치는 영향이 커지게 될 것으로 판단되었다.

따라서 본 연구에서는 해석 모델에 설치되는 TMD의 개당 질량을 줄이기 위하여 총 TMD의 질량비는 전체 구조물 질량의 8% 또는 6%로 유지하고 TMD 1개의 질량비와 설치 개수에 변화를 주어 지진 하중에 대한 변위 응답을 분석하였다.

2. 해석 모델의 개요

본 연구에서는 상용 프로그램인 Midas Gen을 사용하여 해석 모델을 설계하였으며, <Fig. 1>과 같이

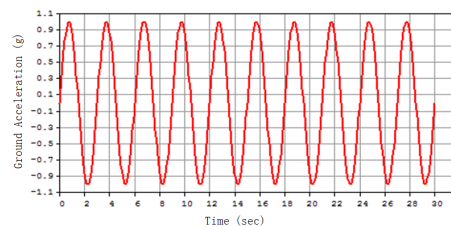
3차원 개폐식 대공간 구조물로 모델링하였다. 해석 모델의 제원은 <Table 1>과 같다.



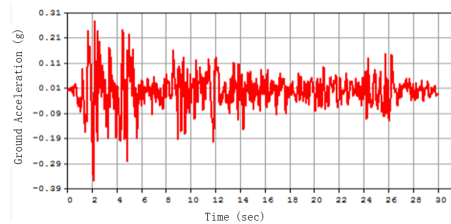
<Fig. 1> Analytical model

<Table 1> Specification of analysis model

Height	95m	
Structural plane	400m (Transverse) X 400m (Longitudinal)	
Total mass of structure	389ton	
Material of structure	SM490	
Period of main mode	1 st mode	3.00 sec
	2 nd mode	2.28 sec
	3 rd mode	1.72 sec



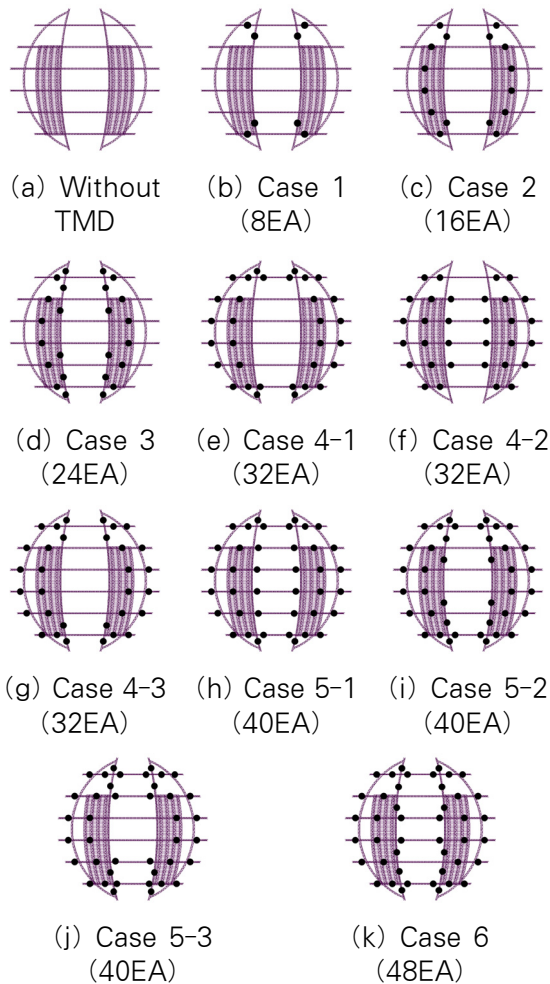
(a) Resonance harmonic loads ($f = 0.33Hz$)



(b) Earthquake wave (El Centro, 1940)
<Fig. 2> Seismic wave

대공간 구조물은 크게 2가지 종류의 트러스로 구성되어 있으며, TMD는 선행 연구¹⁰⁾와 동일하게 횡방향의 Runway Trusses (RT)와 종방향의 Transverse Trusses (TT)의 1/4 지점에 설치하였다. 이와 더불어 본 연구에서는 TMD의 설치 개수를 증가시켰기

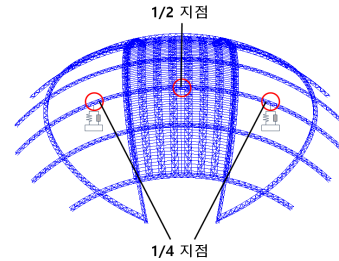
때문에 트러스의 1/8 지점과 3/8 지점에도 TMD를 설치하여 변위 응답을 분석하였다. 지진 하중은 <Fig. 2>와 같이 지진 하중에 대한 구조물의 응답을 극대화하기 위해 구조물의 진동수와 동일한 0.33Hz로 설정하였으며, 일반적으로 사용되는 역사 지진과 중 하나인 El Centro (1940, 180Deg) 지진 하중을 사용하였다. 공진 조화 하중과 El Centro 지진 하중의 가진 방향은 모두 X방향으로 설정하였다.



<Fig. 3> Installation number of TMD

TMD의 설치 위치와 개수는 <Fig. 3>과 같다. TMD의 설치 개수는 선행 연구에서 변위 응답 저감 효과가 가장 큰 8개를 설치한 경우인 Case 1을 기준으로 8개씩 증가시켰으며, 최대 48개까지 설치한 경우인 Case 6까지 고려하였다. TMD를 32개 설치한 경우인 Case 4와 40개를 설치한 경우인 Case 5는 배치에 따라 각각 3가지의 Case로 다시 분류하였다.

<Fig. 4>는 해석 모델의 변위 응답 분석 위치를 나타낸 것이다. 지붕의 개폐 여부와 상관없이 트러스의 좌우측 1/4 지점의 수직 및 수평 방향 변위 응답과 1/2 지점의 수평 방향 변위 응답을 비교하였다. 1/2 지점의 수직 방향 응답은 거의 발생하지 않았기 때문에 고려하지 않았다.



<Fig. 4> Analysis position of displacement response

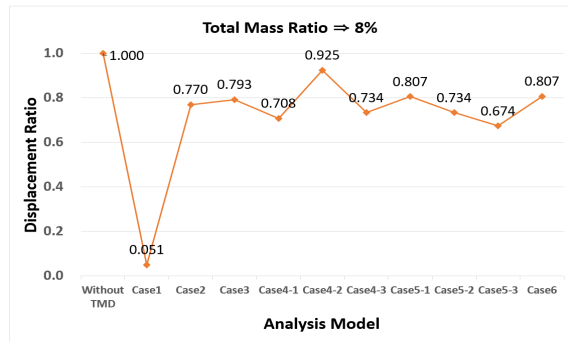
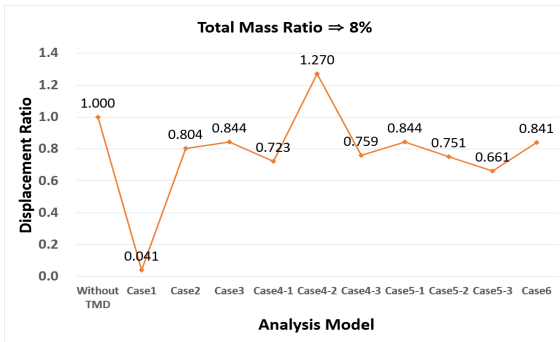
3. 변위 응답 분석

<Table 2> Mass ratio variation according to the number of TMD installation

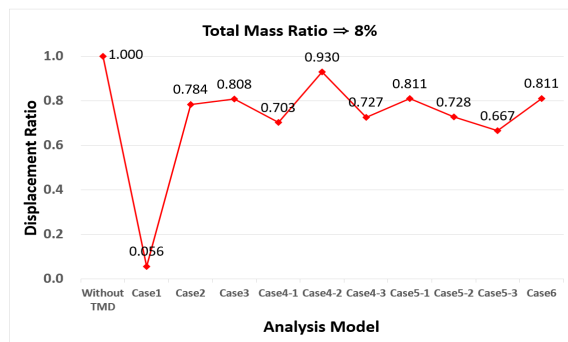
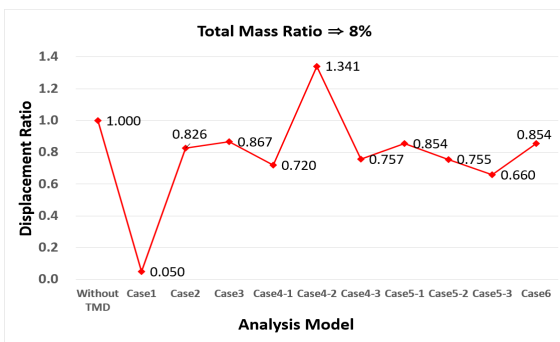
TMD installation number (EA)	Total TMD mass (ton)	Total TMD mass ratio (%)	1EA mass of TMD (ton)	TMD mass ratio (%)
8	31	8	3.9	1.0
16			1.95	0.5
24			1.30	0.33
32			0.97	0.25
40			0.78	0.2
48			0.65	0.17
8	24	6	2.97	0.75
16			1.51	0.38
24			0.98	0.25
32			0.75	0.19
40			0.59	0.15
48			0.51	0.13

TMD 설치 개수에 따른 질량비의 변화를 <Table 2>에 나타내었다. 전체 TMD의 질량이 31ton일 때 전체 TMD 질량비는 8%, 전체 TMD 질량이 24ton일 때 전체 TMD 질량비는 6%가 되도록 설정하였다. 그 후 TMD 개수 변화에 따라 질량과 질량비를 감소시키면서 지진 하중에 대한 변위 응답의 변화를 검토하였다.

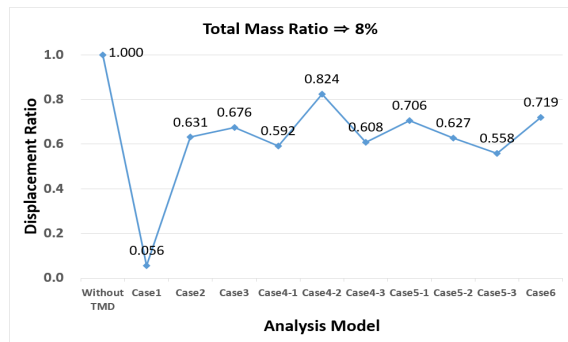
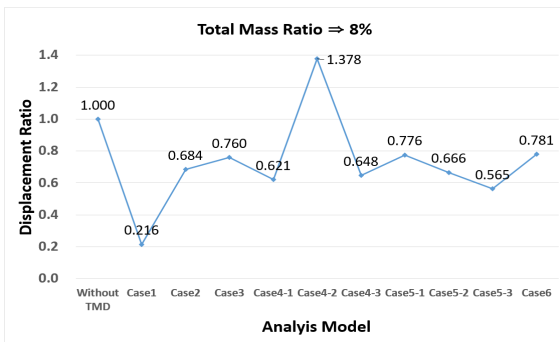
<Fig. 5~10>은 TMD의 질량비가 8%일 때 TMD의 설치 개수에 따른 최대 변위 응답을 나타낸 것이



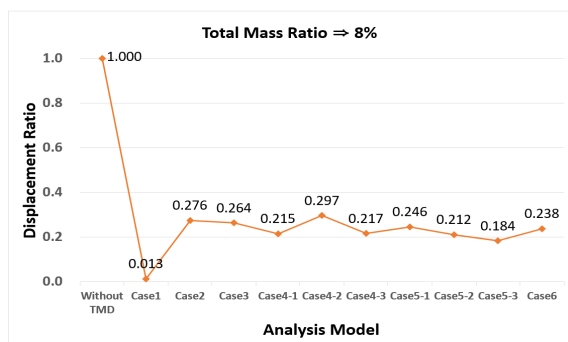
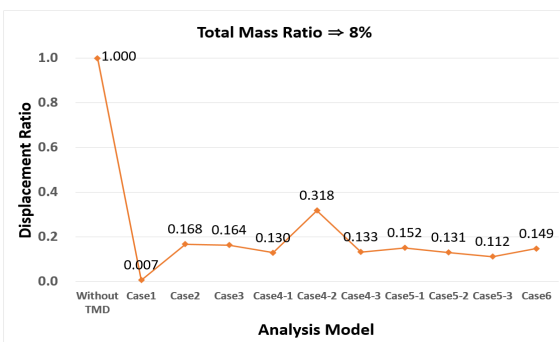
(a) Open roof (b) Closed roof
 <Fig. 5> Maximum horizontal displacement of sinusoidal loads (1/4 point)



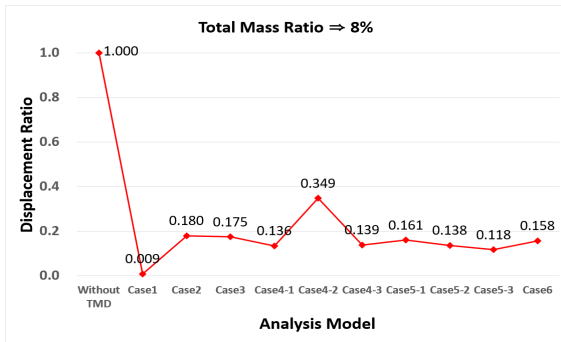
(a) Open roof (b) Closed roof
 <Fig. 6> Maximum vertical displacement of sinusoidal loads (1/4 point)



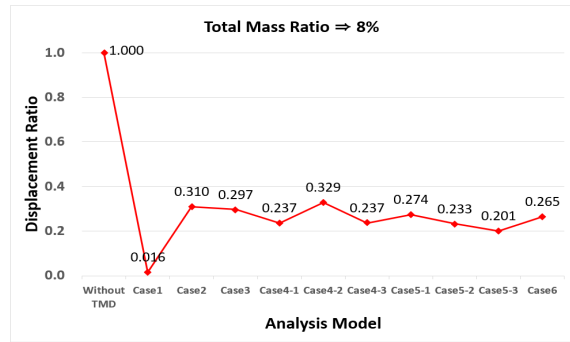
(a) Open roof (b) Closed roof
 <Fig. 7> Maximum vertical displacement of sinusoidal loads (1/2 point)



(a) Open roof (b) Closed roof
 <Fig. 8> Maximum horizontal displacement of earthquake wave (El Centro) (1/4 point)

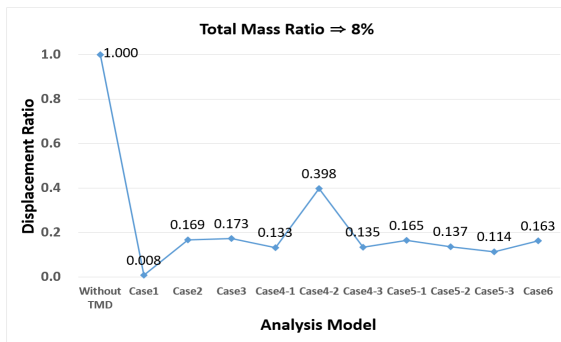


(a) Open roof

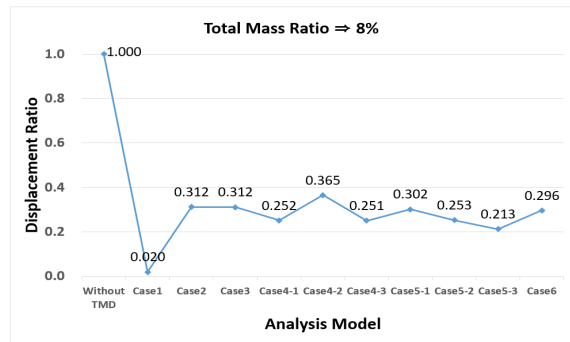


(b) Closed roof

〈Fig. 9〉 Maximum vertical displacement of earthquake wave (El Centro) (1/4 point)



(a) Open roof



(b) Closed roof

〈Fig. 10〉 Maximum horizontal displacement of earthquake wave (El Centro) (1/2 point)

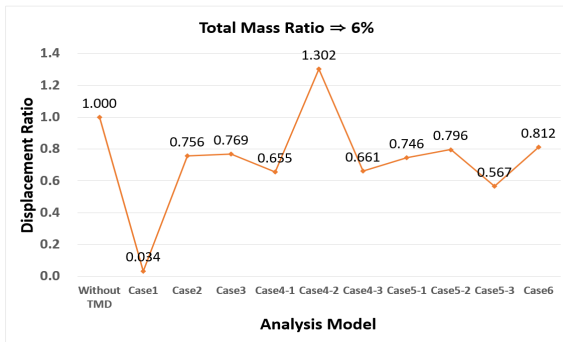
다. TMD의 설치 개수를 8개부터 48개까지 변화시키면서 변위 응답을 비교한 결과, 공진 조화 하중과 El Centro 지진 하중 모두 전반적으로 TMD를 설치하지 않았을 때보다 TMD를 설치했을 때 변위 응답이 저감되었다. Case1의 경우 최대 99%로 변위 응답 저감 효과가 가장 뛰어났다. 이후 TMD 설치 개수를 증가시킬수록 해석 모델의 변위 응답이 점점 더 감소할 것으로 예상되었으나 오히려 Case 1보다 상대적으로 크게 나타났으며, 변위 응답 저감률은 약 10~30%였다. Case간 변위 응답 차이는 10~20%로 비교적 크지 않았다. 이는 TMD에 의한 질량 제어 효과보다 가해지는 지반 가속도에 의한 지진 하중 증가 효과가 더 크게 작용하였기 때문이라고 판단된다.

Case 4-1~3의 경우 TMD의 설치 개수는 동일하지만 설치 위치에 따라 변위 응답이 저감되는 정도가 달랐다. 특히 공진 조화 하중에서 지붕이 열린 상태에서는 Case 4-2의 경우 TMD를 설치하지 않았을 때보다 변위 응답이 오히려 증가하였다. 이는

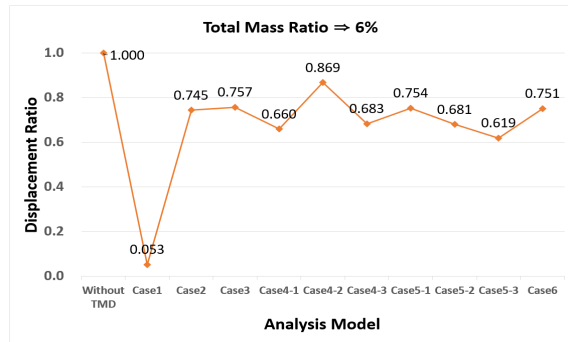
Case 4-2가 다른 해석 모델에 비해 TMD가 비교적 중앙부에 많이 설치되어있기 때문인 것으로 보인다. 이러한 질량 집중 현상을 피하기 위해서는 TMD를 바깥쪽으로 설치하는 것이 변위 응답 저감에 더 유리할 것으로 보인다.

〈Fig. 11~16〉은 TMD의 전체 질량비가 6%일 때 최대 변위 응답을 나타낸 것이다. TMD의 전체 질량비가 6%일 때는 질량비가 8%일 때와 마찬가지로 Case 1의 변위 응답이 99% 가까이 저감되었다. 또한 전반적으로 TMD의 전체 질량비가 8%일 때보다 6%일 때 변위 응답이 더 크게 저감되었다.

TMD 변위 응답의 변화를 분석한 결과, 주어진 조건을 고려하였을 때 TMD를 8개 설치하는 것이 최대 응답 제어 효과가 나타나므로 최상의 결과인 것으로 보인다. 해석 모델의 변위 응답을 최대한 저감시키는 것이 매우 중요한 사항이지만 TMD 1개의 질량을 감소시켜 구조물에 미치는 하중의 영향을 최소화시키는 것 또한 중요하다. 그러므로 전체 TMD 질량비가 동일한 조건 아래에서는 설치 개수

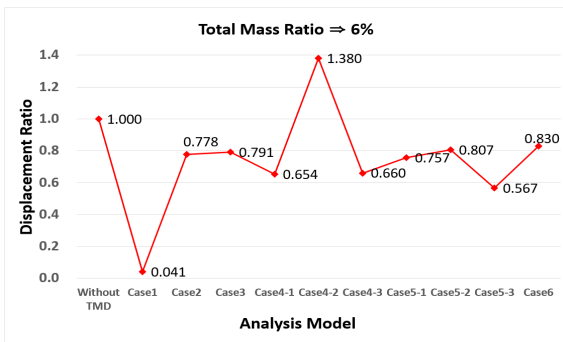


(a) Open roof

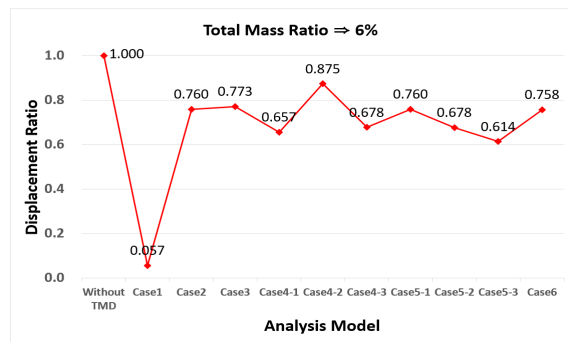


(b) Closed roof

<Fig. 11> Maximum horizontal displacement of sinusoidal loads (1/4 point)

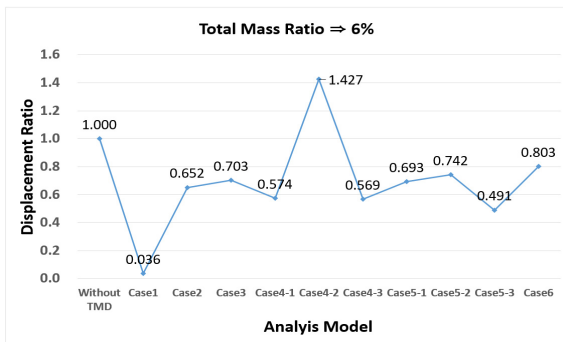


(a) Open roof

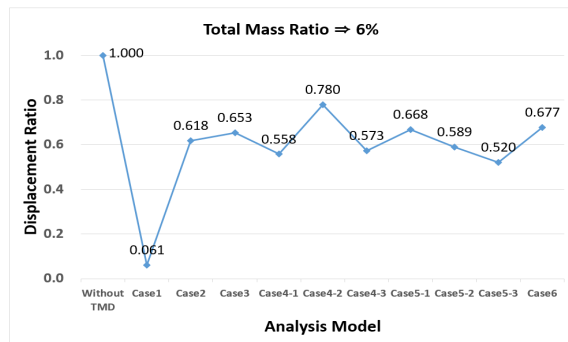


(b) Closed roof

<Fig. 12> Maximum vertical displacement of sinusoidal loads (1/4 point)

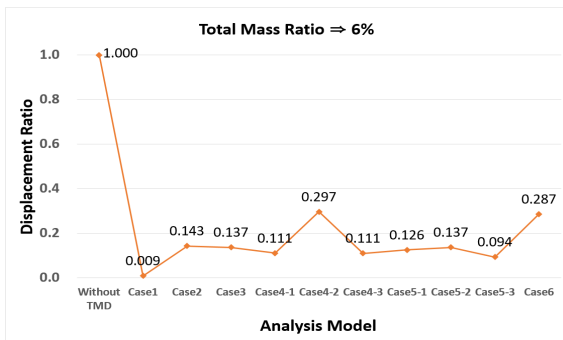


(a) Open roof

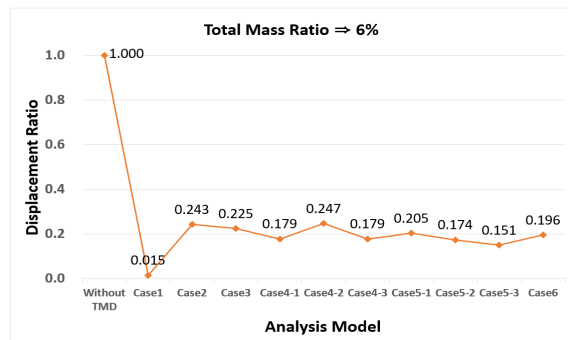


(b) Closed roof

<Fig. 13> Maximum vertical displacement of sinusoidal loads (1/2 point)

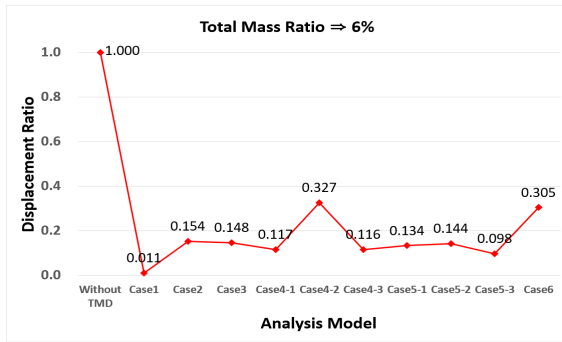


(a) Open roof

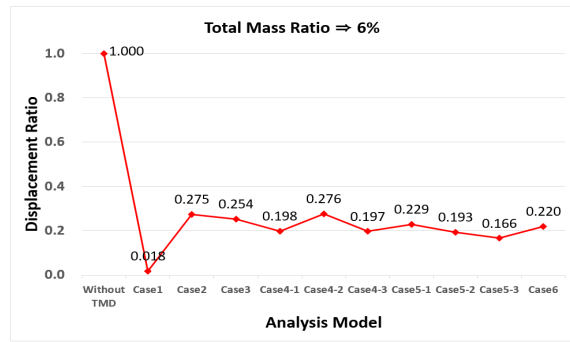


(b) Closed roof

<Fig. 14> Maximum horizontal displacement of earthquake wave (El Centro) (1/4 point)

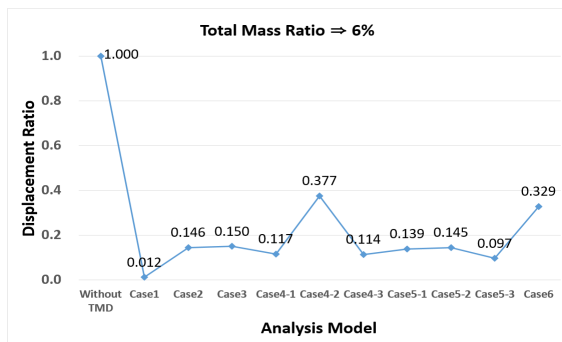


(a) Open roof

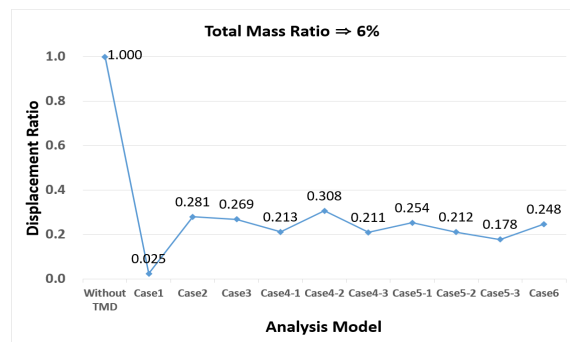


(b) Closed roof

〈Fig. 15〉 Maximum vertical displacement of earthquake wave (El Centro) (1/4 point)



(a) Open roof



(b) Closed roof

〈Fig. 16〉 Maximum horizontal displacement of earthquake wave (El Centro) (1/2 point)

를 증가시켜 TMD 1개의 질량비를 감소시키는 것이 효율적이며, 동시에 해석 모델의 상부 구조물의 부담을 줄일 수 있을 것이라고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 개폐식 대공간 구조물에 TMD를 설치함에 따라 TMD 전체 질량비를 8% 또는 6%로 유지시키면서 TMD의 설치 개수만을 증가시켰을 때 해석 모델의 최대 변위 응답의 변화를 분석하였다. TMD의 설치 개수에 따른 질량비의 변화를 검토한 결과, 지붕의 개폐 유무와 지진 하중의 종류, TMD 전체 질량비에 상관없이 해석 모델에 TMD를 8개를 설치하였을 때 변위 응답 저감 효과가 가장 크게 나타났다. TMD의 설치 개수와 설치 위치를 동일하게 하였을 때는 TMD 전체 질량비가 8%일 때보다 6%일 때 변위 응답 저감 효과가 큰 것으로 나타났다.

또한 수치상으로 개폐식 대공간 구조물의 해석 모델에 TMD를 8개 설치하는 것이 지진 응답 제어

에 가장 효과적이지만 TMD 1개의 질량이 약 3.9ton가 되어 해석 모델의 상부 구조물에 TMD를 설치할 경우 구조적으로 상당한 영향을 미칠 것으로 판단된다. TMD 1개 질량의 경우 TMD의 전체 질량비를 6%로 설정하고 40개를 설치하였을 때 약 0.59ton까지 TMD의 질량을 감소시킬 수 있어 구조물에 가해지는 부담을 줄일 수 있을 것이라 판단된다.

향후에는 TMD 1개의 질량을 줄일 수 있는 방안을 검토하여 실무에 적용할 수 있는 최적 TMD 질량을 찾기 위한 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원(19AUDP-B100343-05)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Kang, J. W., Kim, G. C., Kim H. S., & Seok, G. Y., "The present and Future of Retractable Roof Structures", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.14, No.3, pp.24~31, 2014
2. Kawaguchi, K., & Suzuki, Y. (2005). Damage investigations of public hall in Nagaoka city after Niigata-Chuetu earthquake 2004 in Japan. Proceedings of the International Symposium of Shell and Spatial Structures, The Netherlands, pp.421~428
3. Kawaguchi, K., "A Report on Large Roof Structures Damaged by the Great Hanshin-Awaji Earthquake", International Journal of Space Structures, Vol.12, No.3-4, pp.134~147, 1997
4. Kawaguchi, K., Yosuke, N., Yoshiro, O., & Shunji, O. (2013). Non-Structural Components and Life-Safety in Large Rooms of Spatial Structures. Proceedings of IASS Annual Symposia, Poland, pp.23~27, 2013
5. Cho, Y. W., Lee, S. J., & Han, S. E., "Optimum Design of the Spatial Structures using TABU Algorithm", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.22, No.1, pp.53~60, 2006
6. Pellegrino, S., Kassabian, P. E., & You, Z., "Retractable roof structures", Structures & Buildings, Vol.134, No.1, pp.45~56, 1999
7. Kang, J. W., Kim, G. C., & Kim, H. S., "Seismic Response Control of Arch Structures using Semi-active TMD", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.9, No.5, pp.103~110, 2010
8. Kim, H. S., & Kang, J. W., "Design Method Development of Smart TMD for Retractable-Roof Spatial Structure", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.17, No.3, pp.107~115, 2017
9. Lee, Y. R., Kim, H. S., & Kang, J. W., "Investigation Into Optimal Installation Position of TMD for Efficient Seismic Response Reduction of Retractable-Roof Spatial Structure", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.18, No.2, pp.43~50, 2018
10. Lee, Y. R., Ro, H. S., Kim, H. S., & Kang, J. W., "Seismic Response Control Performance Evaluation of Retractable-Roof Spatial Structure With Variation of TMD Mass", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.19, No.1, pp.75~82, 2019

- Received : August 22, 2019
- Revised : September 09, 2019
- Accepted : September 09, 2019