

아치구조물의 지진응답 저감을 위한 TMD의 적용

Application of TMD to Reduce Seismic Response of Arch Structure

김기철* · 강주원** · 김현수***
Kim, Gee-Cheol · Kang, Joo-Won · Kim, Hyun-Su

요약

TMD(Tuned Mass Damper)는 대표적인 제진장치로서 주로 고층건물, 교량 및 스타디움의 객석 등의 진동제어에 이용되고 있다. 그러나 대공간구조물과 같이 면의 방향의 강성이 매우 작은 구조물에 대한 TMD 적용에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. 본 연구에서는 아치구조물의 진동에 대한 TMD의 제어 성능을 TMD의 설치위치 및 거동방향에 따라서 비교분석하였다. 아치구조물은 수평지진동에 대해서는 역대칭모드인 1차 모드가 지배적이며, 연직지진동에 대해서는 대칭모드인 2차 모드가 지배적인 진동응답을 보이고 있다. 따라서 아치구조물의 효율적인 진동응답제어를 위해서는 진동모드가 탁월한 위치에 TMD를 설치하는 것이 합리적이다. 그리고 수평지진동 및 수직지진동에 대하여 TMD가 수평방향으로 거동하도록 하는 것보다 연직방향으로 움직이도록 설치하는 것이 아치구조물의 진동제어에 있어서 매우 효과적인 것으로 나타났다.

keywords : TMD, 대공간구조물, 제어성능, 진동응답제어

1. 서론

공간구조물은 장경간의 구조물로 풍하중과 지진하중과 같은 동적하중에 의한 거동이 일반적인 라멘 구조물과는 다른 거동을 보이고 있다. 따라서 공간구조물에 대한 진동 제어장치의 적용에 있어서 일반구조물과는 다른 방법으로 적용해야 할 것이다. 본 연구에서는 구조물의 진동제어 있어서 가장 많이 적용되고 있는 TMD(동조질량감쇠기)를 공간구조물의 진동제어에 적용하고자 한다. TMD는 질량·스프링·댐퍼로 구성된 제진장치로 이 장치의 고유주기를 제어하고자 하는 구조물의 진동주기에 맞추어 조정하면 추가 흔들리게 되어 추와 건물 간의 댐퍼에 의해 에너지가 흡수되며 대상으로 하는 구조물 자체의 진동을 저감할 수 있다. 본 연구는 대공간구조물 중에서 자중이 비교적 커서 지진응답이 크게 나타나는 스페이스 프레임 형태의 아치 구조물을 대상으로 하여 수동형 TMD 설치위치 및 거동방향에 따른 제어성능을 분석하고자 한다.

2. 구조물의 진동 제어장치

구조물의 진동제어에 적용되는 제진 장치는 수동형, 능동형 및 준능동형으로 구분할 수 있다. 수동형 제어

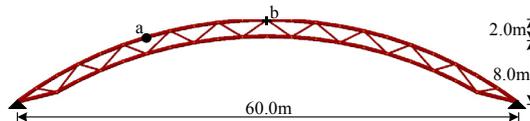
* 정희원 · 서일대학 건축과 교수 beat67@seoil.ac.kr
** 정희원 · 영남대학교 건축공학과 교수 kangj@ynu.ac.kr
*** 정희원 · 신문대학교 건축공학과 교수 hskim72@sunmoon.ac.kr

장치는 지진 및 바람과 같은 동적하중에 대하여 공진이 발생하지 않도록 하거나 가해지는 동적하중의 방향과 반대 방향으로 감쇠력(제어력)이 작용하도록 감쇠장치를 설치하는 방법이다. 능동형 제어장치는 외부에서 가해지는 동적하중에 의하여 야기되는 구조물의 진동을 감지하여 구조물의 진동에 대응하는 제어력을 액추에이터와 같은 장치를 사용하여 인위적으로 가하여 구조물의 진동을 저감시키는 방법이다. 준능동형 제어장치는 수동형과 준능동형의 중간적인 장치로 구조물에 인위적으로 제어력을 가하지는 않으나 구조물의 강성이나 감쇠 등을 동적하중의 특성에 부응하여 순간적으로 변화시켜 구조물을 제어하는 방법이다. 각각의 제어장치에 따라서 제어력, 반응속도, 경제적 비용 등 장·단점이 있을 수 있으며 본 논문에서는 구조물의 진동 제어에 가장 많이 적용하고 있는 수동 TMD를 아치 구조물의 진동제어에 적용하고자 한다.

3. 아치구조물의 진동제어를 위한 TMD의 적용

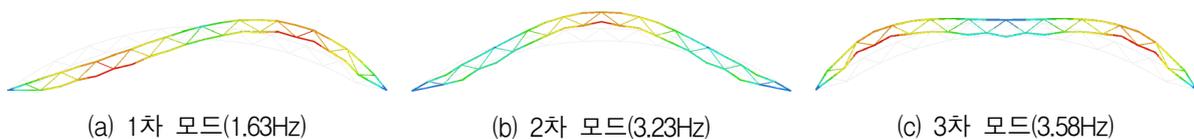
3.1 예제 구조물의 동적특성

아치 구조물은 대공간구조물의 기본적인 동적 및 정적 특성을 가지고 있으며 동시에 부분원통형상 및 돔형상의 대공간구조물에 대한 진동특성을 내재하고 있다. 따라서 본 연구에서는 <그림 1>과 같이 아치 구조물을 예제 구조물로 선정하였다. 예제 구조물의 경간은 60m, 높이는 8m이며 트러스 아치의 춤은 2m이다. 트러스 아치의 상현재와 하현재는 $\varnothing 216.3 \times 4.5$, 사재는 $\varnothing 101.6 \times 3.2$ 크기의 강관으로 구성되어 있다.



<그림 1> 트러스 아치 예제구조물

아치 구조물의 진동모드 양상은 <그림 2> (a)와 같이 역대칭 모드 그리고 <그림 2> (b), (c)와 같이 대칭모드로 나타난다. 대칭 모드는 주로 연직방향 지진하중에 반응하여 구조물이 상하로 진동하는 지진응답에 기여하고, 역대칭 모드는 주로 수평방향 지진하중에 대하여 응답이 크게 발생할 것으로 예상된다. 아치 구조물은 일반 라멘구조와 다르게 수평지진에 의하여 수평응답을 물론 연직응답도 나타나고 있다. 이러한 아치구조의 지진응답은 아치 구조물의 개각과 겹보기 세장비에 의하여 크게 결정된다. 또한 저차모드의 진동주기가 지진하중의 가속도스펙트럼에서 탁월한 주기영역에 존재하는 것을 알 수 있다.



<그림 2> 예제 구조물의 모드형상 및 고유주기

3.2 예제 구조물의 TMD 적용

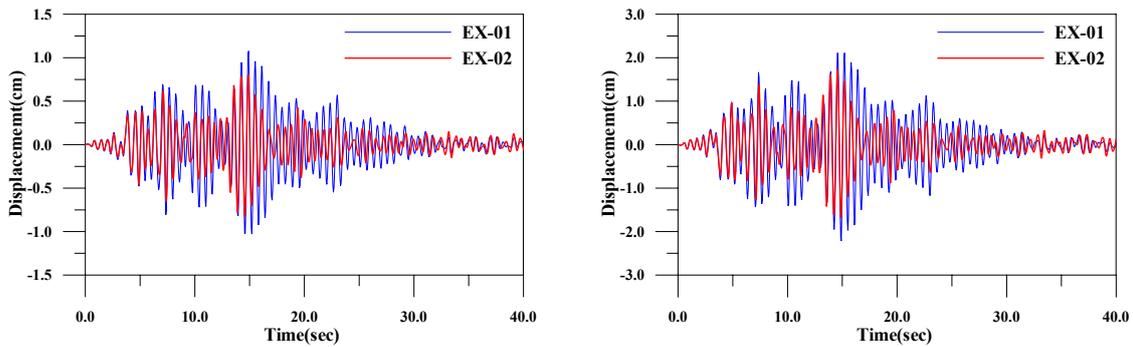
예제 구조물에 Taft_NS(1952) 지진하중을 수평방향으로 가하여 시간이력해석을 수행하였다. Taft 지진하중은 주기가 1초 이내인 영역에서 큰 에너지를 가지고 있으므로 저차 모드의 주기가 1초 이내인 예제 구조물에 큰 영향을 미칠 수 있을 것으로 사료된다. 예제 구조물의 총질량이 40.6 kgf/g이므로 TMD의 질량은 구조물 총질량의 1%인 0.406 kgf/g로 하였다. 그리고 질량비에 따른 진동수비를 0.987로 하여 TMD의 진동수를 1.613 Hz

로 설계하였다. 예제 구조물의 저차 모드형상을 분석하여 수평 및 연직변위가 가장 많이 발생하는 트러스 경간의 1/2지점, 경간의 좌우 1/4지점에 그림 5와 TMD를 설치하여 TMD 설치위치에 따른 진동응답을 비교 분석하고자 한다. 그리고 1차 모드를 비롯한 저차모의 경우에 모드 형상이 수평 및 수직 양방향 모두 나타나고 수평방향 지진하중에 대하여 수평방향 뿐만 아니라 수직방향 응답이 매우 크게 발생하므로 TMD의 거동을 수직 및 수평방향으로 하여 그에 따른 진동제어 성능을 분석하고자 한다.

4. TMD 설치위치 및 거동방향에 따른 지진동 제어성능

4.1 TMD 설치 위치에 따른 지진동 제어성능 분석

지진하중에 의한 아치 구조물의 지진응답을 저감하기 위하여 수동형 TMD를 예제 구조물의 진동모드를 분석하여 설치한다. EX-01은 예제 구조물의 경간 중앙에 TMD를 한 개 설치한 것이며 EX-02는 예제 구조물의 경간 좌우 1/4지점에 TMD를 두 개 설치한 것으로 TMD의 총 질량은 동일하게 하였다. 즉 EX-02 TMD 질량은 EX-01 TMD 질량의 1/2로 하였다.



(a) 점'a'의 수평방향 응답

(b) 점'a'의 수직방향 응답

<그림 3> TMD 설치 위치에 따른 예제 구조물의 지진응답

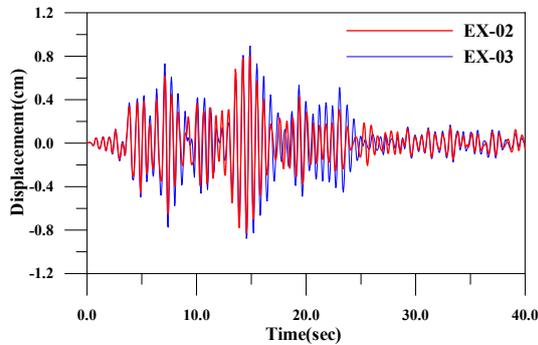
<그림 3>는 TMD 설치 위치에 따른 예제 구조물의 지진응답으로 경간의 좌우 1/4지점에 TMD를 설치하는 것이 경간의 중앙에 TMD를 설치하는 것보다 지진동 제어에 있어서 보다 효과적인 것을 볼 수 있다. 이는 고유치해석을 통한 모드분석에서 알 수 있듯이 1차 모드 형상에서 모드벡터가 가장 큰 지점인 점 'a'에 TMD를 설치하는 것이 효과적이며, 모드벡터가 영(zero)인 점 'b'에 TMD를 설치하는 것은 제어효과가 거의 없는 것을 알 수 있다.

4.2 TMD의 거동 방향에 따른 지진동 제어성능 분석

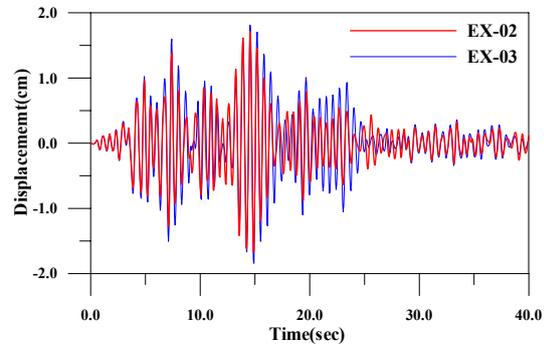
예제 구조물과 같은 공간구조물의 경우에 수평방향 지진하중에 대하여 수평방향 뿐만 아니라 수직방향 응답이 매우 크게 발생하므로 TMD의 거동방향에 따라서 예제 구조물의 진동제어 성능이 다르게 나타날 것으로 판단된다. EX-02와 EX-03은 예제 구조물의 경간 1/4지점과 3/4지점에 TMD를 설치한 것으로 EX-02는 TMD 거동이 수직방향으로 EX-03은 TMD 거동이 수평방향으로 각각 움직이도록 한 것이다.

<그림 4>는 TMD 거동 방향에 따른 예제 구조물의 지진응답을 나타낸 것이다. 지진하중이 수평방향으로 적용한 경우일지라도 TMD의 거동을 수평방향으로 움직이도록 한 것보다 수직방향으로 움직이도록 것이 지

진동 제어에 있어서 보다 효과적인 것을 볼 수 있다. 이는 수직방향의 응답이 전체적인 예제 구조물의 응답에 지배적이기 때문이며 또한 진동모드의 모드벡터가 수직방향이 지배적이기 때문이다.



(a) 점 'a' 수평방향 응답-Taft 지진



(b) 점 'a' 수직방향 응답-Taft 지진

<그림 4> TMD 거동 방향에 따른 예제 구조물의 지진응답-Taft 지진하중

5. 결론

공간구조물은 동적특성으로 인하여 수평방향 지진하중에 의하여 수평방향의 지진응답은 물론 연직방향의 지진응답이 매우 크게 나타나고 있다. 본 연구에서는 TMD 설계에 대한 기본적인 설계변수인 TMD의 설치 위치 및 TMD의 거동방향에 따른 아치 구조물의 제어성능을 알아보았다.

- 아치 구조물 경간의 1/4지점에 TMD를 설치하는 것이 진동제어에 있어서 효과적이며 진동모드 분석을 통하여 최적의 설치위치를 선정할 수 있다.
- 지진하중의 작용방향에 관계없이 TMD의 거동을 수직방향으로 움직이도록 것이 수평방향으로 움직이게 한 것 보다 제어성능에 있어서 효과적이다.

실제 공간구조물에서 TMD 설치의 한계가 있으며 상현재와 하현재 사이 또는 사재에 설치해야 할 것이다. 사재에 설치할 경우에 TMD 거동이 사선방향으로 움직이기 때문에 TMD의 사선방향 거동에 대한 연구가 필요하다. 그리고 돔과 같은 공간구조물의 경우에 질량이 작은 TMD를 고르게 분포시켜 보다 용이하게 응답 제어효과를 줄 수 있을 것으로 사료되며 이에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#06 건설핵심 B03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김기철, 김광일, 강주원 (2008), “면진 트러스-아치 구조물의 지진거동분석”, 한국공간구조학회 논문집, 제8권, 2호, pp.73-84.
- Arjang Sadeghi (2004), Horizontal Earthquake Loading and Linear/Nonlinear Seismic Behavior of Double Layer Barrel Vaults, *International Journal of Space Structure*, Vol.19, No.1, pp.21-37.
- Ikuo Tatemich and Mamoru Kawaguchi (2000), A New Approach to Seismic Isolation: Possible Application in Space Structures, *International Journal of Space Structure*, Vol.15, No.2, pp.145-154.