

아치구조물 적용 인장저항 면진장치의 수치해석적 거동 분석

Behavior Analysis of Base Isolation With Anti-Uplift Device for Arch Structure by Numerical Analysis

김 기 철*

Kim, Gee-Cheol

장 명 호**

Jang Myung Ho

Abstract

If an excessive displacement occurs in the base isolation system, the structure will be damaged due to overturning of the upper structure. In this study, we analyze the behavior of base isolation by applying earthquake to base isolation with anti-uplift device. In the case of structures that generate horizontal reaction forces such as arch structures, horizontal reaction forces must be considered in the design of the base isolation and structural members. And anti-uplift device for preventing the excessive displacement of the base isolation system is needed.

Keywords : Base isolation system, Overturning, Anti-uplift device, Earthquake

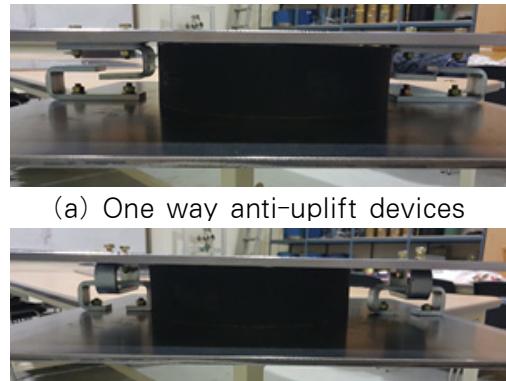
1. 서론

면진장치를 갖는 구조물에 예기치 못한 과도한 지진 하중이 작용할 경우 면진장치의 변위가 설계변위 이상으로 매우 크게 발생할 수 있다. 동시에 연직하중과 횡하중에 의한 전도모멘트가 커져 면진장치에 인장력 또는 압축력의 부가축력이 발생할 가능성이 있다. 일반적인 면진장치는 전도에 의해 발생하는 들림(Uplift) 현상에 저항할 수 없어 면진장치의 들림이 방지되지 않으면 면진장치의 기능을 상실하게 된다. 따라서 면진장치의 변위 제한 및 들림 방지를 위한 부가적인 장치를 면진장치에 설치할 필요가 있다^{1),2)}.

그리고 아치구조물과 같은 대공간 구조물은 기하학적 특성으로 인하여 수직반력은 물론 수평반력이 크게 발생하므로 아치구조물에 면진장치를 적용할 경우에 수평방향 반력을 고려하여야 한다.

본 연구에서는 아치구조물의 높이(H)-경간(L)비에 따라서 다르게 나타나는 수평 방향 반력을 분석하고, 인장

저항 장치를 장착한 면진장치의 지진에 의한 거동을 분석하고자 한다.



〈Fig. 1〉 Base Isolation with anti-uplift devices

〈Fig. 1 (a)〉는 인장저항 장치가 면진장치의 변위 제한 및 들림 방지를 일방향으로 저항하며 〈Fig. 1 (b)〉는 인장저항 장치가 이방향으로 저항한다. 〈Fig. 1〉과 같은 인장저항 면진장치에 강한 지진하중이 작용하여 횡방향 변위가 과도하게 발생하면 인장저항 장치에 장력이 작용함으로써 면진장치와 구조물의 오버터닝을 방지한다. 면진장치의 들림에 효과적으로 저항하기 위하여 인장저항 장치를 일방향 L형태와 이방향 C형태로 제작하였다.

* 주 · 교신저자, 정회원, 서일대학교 건축공학과 교수
Dept. of Architecture Eng., Seoil University
Tel: 02-490-7582 Fax: 02-490-7427
E-mail: beat67@seoil.ac.kr

** 정회원, 대림대학교 건축과 교수
Dept. of Architecture, Daelim University

2. 아치구조물의 정적/동적 특성

높이(H)-경간(L)비에 따른 아치구조물 해석모델은 Fig. 2와 같다. 예제 아치구조물의 상현재, 하현재는 $\phi 355.6 \times 6.30$ 이고 사재는 $\phi 216.3 \times 4.5$ 의 강관을 사용했다. 구조물의 경간은 60m이며, 상현재와 하현재 사이의 춤은 2m로 높이-경간비와 관계없이 일정하게 했다. 예제구조물의 높이-경간비는 1/4, 1/6 및 1/8, 예제구조물의 높이는 각각 15m, 10m, 7.5m로 설정하였다³⁾. 예제 아치구조물에 작용한 고정하중과 활하중의 합은 같다.

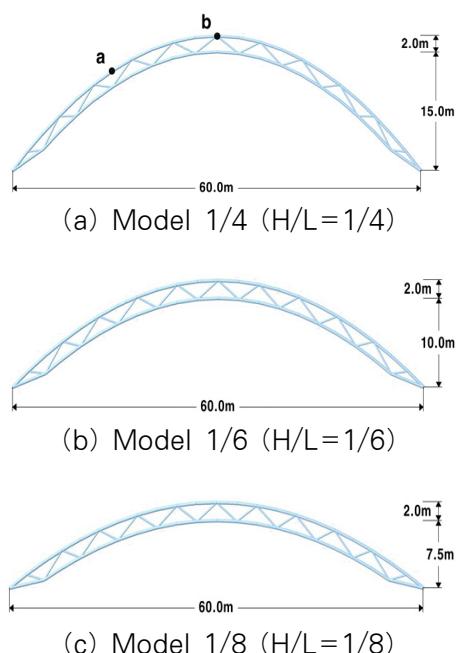


Fig. 2) Rise-Span ratio of arch structure

Table 1은 높이-경간비에 따른 예제 아치구조물의 지점 수직반력 및 지점 수평반력을 나타낸 것이다. 예제 아치구조물의 기하학적 특성으로 인하여 높이-경간비가 낮을수록 수평 방향 지점반력이 크게 나타나고 있으며, 수직방향 지점반력은 높이-경간비에 관계없이 유사한 것을 볼 수 있다. 따라서 아치구조물과 같은 대공간 구조물은 지점의 기초설계에 있어서 높이-경간비에 따라서 다르게 나타나는 수평반력을 반드시 분석하여 이를 설계에 반영해야 할 것이다.

Table 1) Reaction force of arch structures

Model	Model 1/4	Model 1/6	Model 1/8
Dead load (kN)	Horizontal reaction	72.8	104.0
	Vertical reaction	83.4	80.5
Live load (kN)	Horizontal reaction	54.3	80.2
	Vertical reaction	53.8	53.6

아치구조물은 보-기둥 구조물과 다른 동적특성을 갖고 있다. Fig. 3은 예제 아치구조물의 1차 진동모드와 고유진동주기를 나타낸 것으로 역대칭모드로 나타나고 있으며, 높이-경간비가 클수록 고유진동주기가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 1차모드 수평 방향의 질량참여율이 높이-경간비가 클수록 크게 나타나기 때문이다.

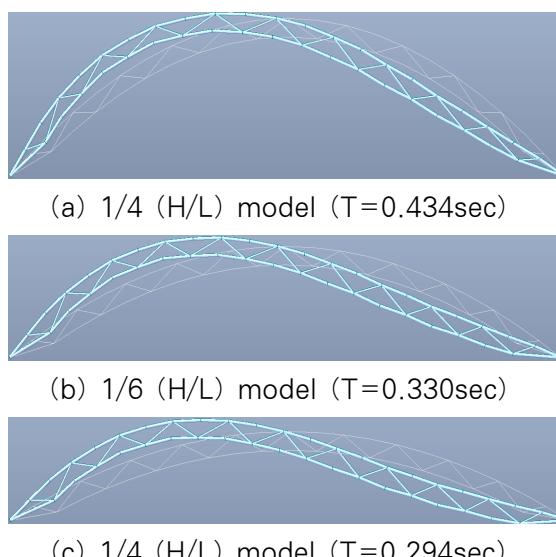


Fig. 3) 1st vibration mode

3. 면진 아치구조물의 자진응답

3.1 면진장치 및 자진하중

면진장치의 진동주기는 면진장치의 유효강성과 상부 구조물의 무게에 의해서 결정된다. 예제 아치구조물에

설치된 면진장치의 물성치와 지진하중은 〈Table 2〉 및 〈Table 3〉과 같다.

〈Table 2〉 Structure properties of base isolation³⁾

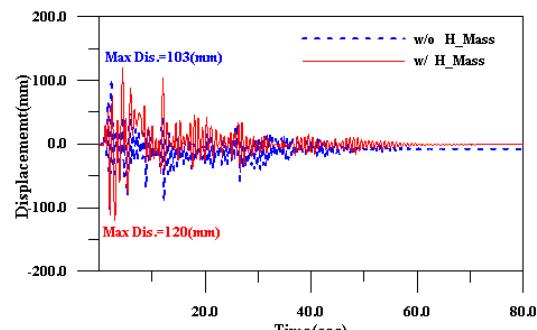
Initial horizontal stiffness (Ku) (kN/m)	2,039	Yield horizontal stiffness (Kd) (kN/m)	117
Yield load (Fy) (kN)	35	Vertical stiffness (kN/m)	81,758
Effective horizontal stiffness (Keff) (kN/m)	451	Effective damping (kN·sec/m)	0.848

〈Table 3〉 Earthquakes

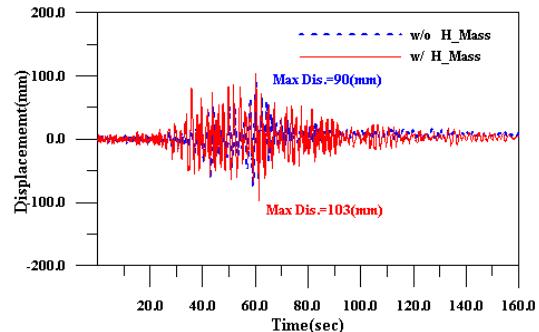
Earthquake name	Earthquake site
El Centro	1940, El Centro Site, 180 Deg
Mexico	1985, Mexico City, Station 1, 180 Deg
Taft	1952, Taft Lincoln School, 69 Deg (0.155g)
Hyougoken	1995, Hyougoken_South, N12W
San Fernando	1971, San Fernando 8244 Orion Blvd, 90 Deg

3.2 수평반력에 따른 면진장치의 변위응답

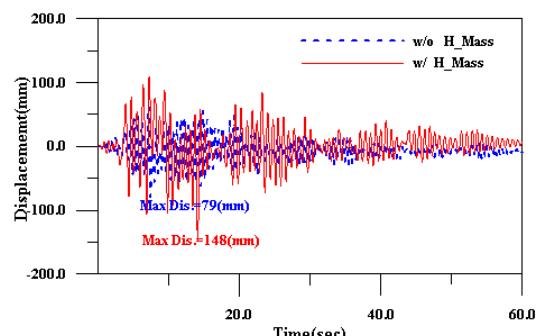
아치구조물의 수평반력은 면진장치에 수평하중으로 작용하여 면진장치의 수평변위가 크게 나타나게 된다. 본 절에서는 높이-경간비가 1/4인 예제 아치구조물의 수평 방향 지점반력을 수평 방향 질량으로 고려하여 지진하중에 의한 면진장치의 변위응답을 분석하고자 한다.



(a) Displacement by El-Centro



(b) Displacement by Mexico



(c) Displacement by Taft

〈Fig. 4〉 Displacement of base isolation

수평 방향 지점반력을 면진장치에 정직하중으로 기할 경우 변위가 281.74mm로 나타나고 있다.

〈Fig. 4〉에서 보는 바와 같이 지점의 수평 방향 반력을 수평 방향 질량으로 고려한 경우 지진하중에 의한 면진장치(상판 변위) 변위응답이 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. Taft 지진하중의 경우 수평 방향 지점반력의 유무에 따라서 최대 변위응답이 약 2배 더 크게 나타나고 있다. 따라서 면진장치 설계에 있어서 수평 방향 지점반력을 하중 또는 질량으로 고려하여 면진장치의 설계변위(제한변위)를 설정하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

3.3 면진장치 아치구조물의 지진응답

면진장치를 갖는 아치구조물에 지진하중을 수평 방향으로 가하여 발생하는 변위응답을 분석하고자 한다. 〈Fig. 5〉는 지반에 대한 절점 'a'의 X방향 상대변위를 나타냈으며, 〈Fig. 6〉은 면진장치에 대한 절점 'a'의 X방향 상대변위를 나타낸 것이다.

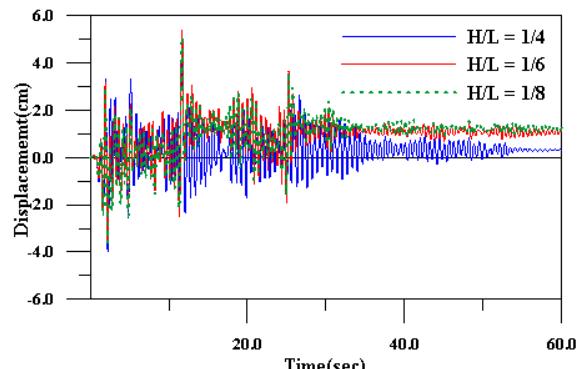
지반에 대한 절점 'a'의 X방향 상대변위를 나타낸 Fig. 5를 살펴보면 높이-경간비가 작을수록 수평 방향 지점반력이 크므로 아치구조물의 잔류변위가 크게 나타나고 있다. Hyougoken 지진에 의한 잔류변위는 높이-경간비와 관계없이 차이가 거의 없는 것을 볼 수 있다. 이는 Hyougoken 지진하중이 커서 아치구조물의 변위가 크게 나타나므로 상대적으로 잔류변위가 작게 보이는 것이다.

일반적으로 높이-경간비가 작을수록 잔류변위가 크게 나타나지만 높이-경간비 1/6과 1/8의 잔류변위 차이가 거의 없는 것을 볼 수 있다. 따라서 높이-경간비가 일정 이하가 되면 아치구조물의 잔류변위가 수렴하여 나타나고 있다. 이는 높이-경간비가 일정 이하가 되면 수평 방향 지점반력이 수렴하기 때문이다. 이러한 잔류변형을 방지하기 위한 한 가지 방법으로 면진장치의 설치 방향을 구조물의 지점 방향에 직각으로 설치한다.

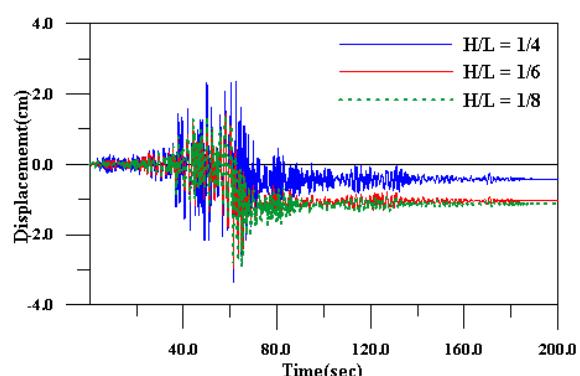
예제 아치구조물의 상현재 및 하현재와 같은 구조부재를 설계하기 위해서는 지반에 대한 상대변위를 이용한 지진응답분석으로는 어려울 것으로 판단된다. 따라서 본 절에서는 면진장치(상판)와 아치구조물을 연결해주는 절점과 아치구조물 절점 'a'의 상대변위를 분석하고자 한다.

면진장치(상판)에 대한 절점 'a'의 X방향 상대변위를 나타낸 Fig. 6을 살펴보면, 높이-경간비가 클수록 상대변위가 크게 나타나고 있다. 높이-경간비 1/4인 경우 면진장치에 대한 아치구조물의 상대변위가 가장 크게 나타나고 있으며, 높이-경간비 1/6과 1/8의 상대변위는 차이가 거의 없는 것을 볼 수 있다.

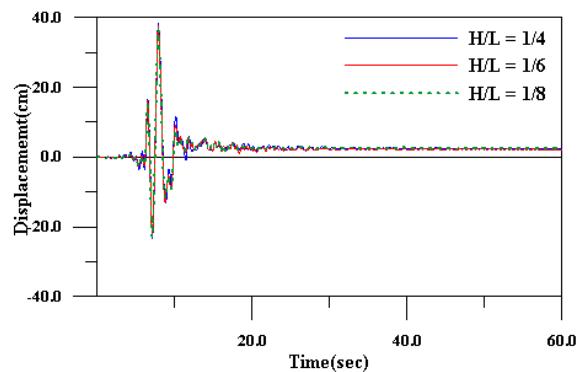
면진장치를 설계하기 위해서는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 높이-경간에 따른 지반에 대한 아치구조물의 상대변위를 검토하는 것이 바람직하다. 그러나 아치구조물 구조부재에 구조적 영향을 끼치는 것은 면진장치와 아치구조물의 상대변위이다. 따라서 아치구조물의 구조부재 설계 시 Fig. 6에서 보는 바와 같이 면진장치에 대한 아치구조물의 상대변위의 분석을 통하여 구조부재를 설계하는 것이 타당할 것으로 판단된다.



(a) Displacement by El-Centro



(b) Displacement by Mexico



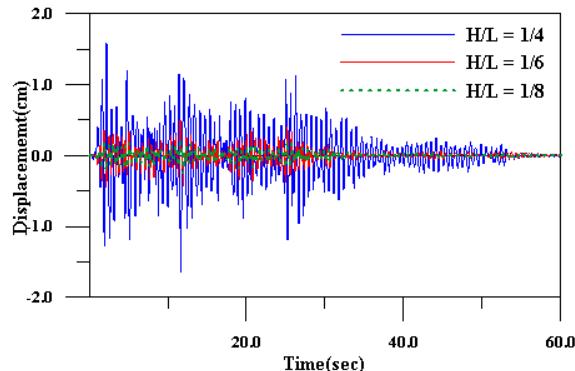
(c) Displacement by Hyougoken

Fig. 5 Relative displacement of point 'a' to ground

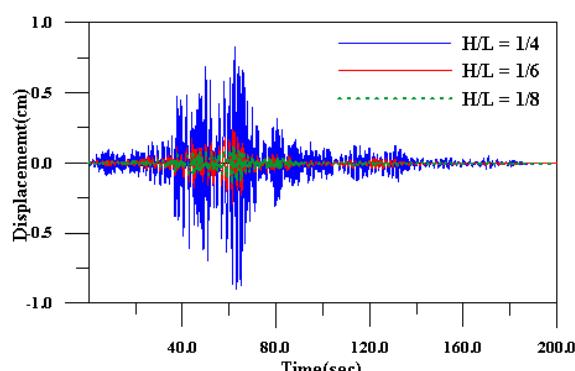
4. 인장저항 면진장치

4.1 인장저항 면진장치의 지진응답

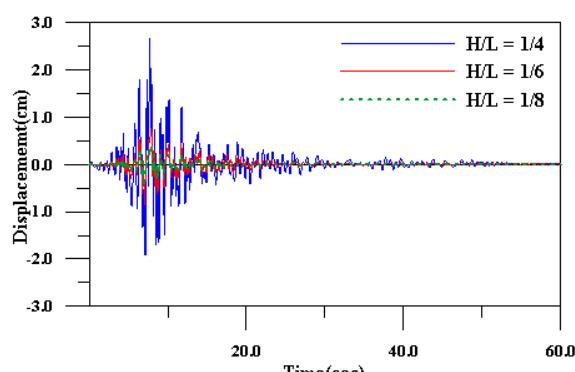
본 연구에 사용한 면진장치는 납-고무 면진장치 (Lead Rubber Bearing, LRB)로 Fig. 1과 같으며 면진장치의 특성은 Table 2와 같다.



(a) Displacement by El-Centro



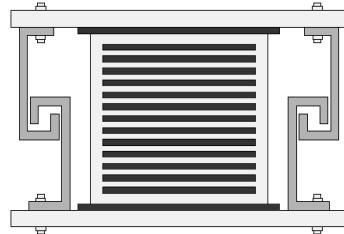
(b) Displacement by Mexico



(c) Displacement by Hyogoken

〈Fig. 6〉 Relative displacement of point 'a' to base isolation

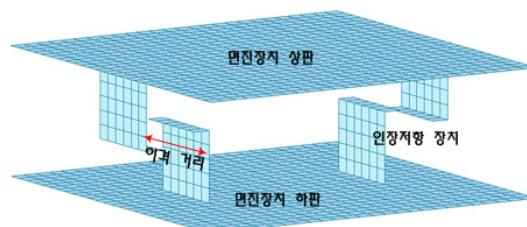
인장저항 면진장치에 강한 수평하중이 작용하여 횡방향 변위가 과도하게 발생하면 인장저항 장치에 장력이 작용함으로서 면진장치와 구조물의 오버터닝을 방지한다. 〈Fig. 7〉과 같이 면진장치의 변위제한에 효과적으로 저항하기 위하여 L타입의 인장저항 장치를 면진장치에 장착하였다⁴⁾.



〈Fig. 7〉 Base isolation with anti-uplift devices

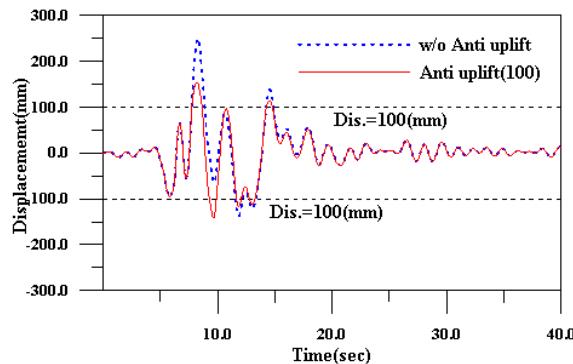
인장저항 면진장치는 면진장치에 장착된 인장저항 장치의 위치(상/하 인장저항 장치의 간격)에 따라서 거동이 다르게 나타난다. 상/하로 연결된 인장저항 장치의 간격은 면진장치의 설계변위 이상으로 해야 하며, 인장저항 장치 간격이 면진장치 설계변위보다 작을 경우 면진장치가 적절하게 저항하지 않게 된다. 동일한 면진장치에 인장저항 장치의 이격거리가 다를 경우 면진장치의 거동이 상이하므로 이에 대한 분석이 필요하다.

〈Fig. 8〉은 인장저항 장치를 갖는 면진장치의 수치해석 모델이며 〈Fig. 7〉을 수치해석 모델로 표현한 것이다. 면진장치 상판과 하판에 장착된 인장저항 장치에 의하여 면진장치의 설계변위 이상의 거동에 저항하게 된다.

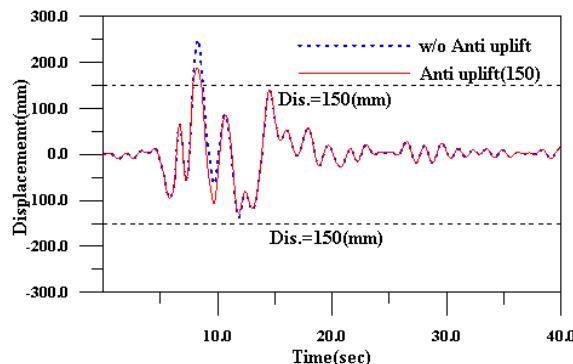


〈Fig. 8〉 Analysis model of base isolation with anti-uplift devices

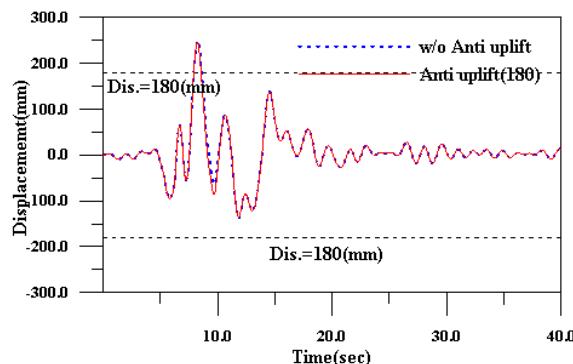
〈Fig. 9〉, 〈Fig. 10〉 그리고 〈Fig. 11〉은 인장저항 면진장치의 인장저항 장치 설치 위치(상/하 인장저항 장치 이격거리)에 따른 면진장치(상판)의 지진응답을 나타낸 것이다. Anti uplift(100)은 〈Fig. 8〉에서 상/하 인장저항 장치의 이격거리가 100mm임을 의미하며, Anti uplift(150)과 Anti uplift(180)은 각각 상/하 인장저항 장치의 이격거리가 150mm와 180mm임을 의미한다.



(a) Anti uplift device gap of 100mm



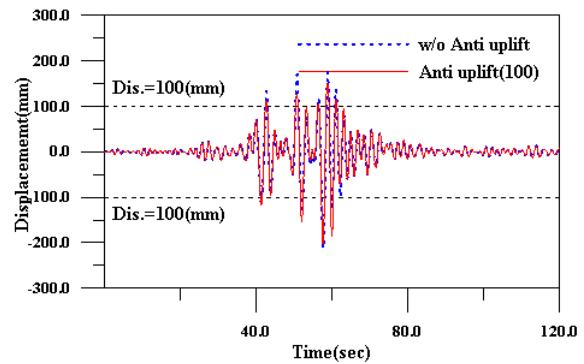
(b) Anti uplift device gap of 150mm



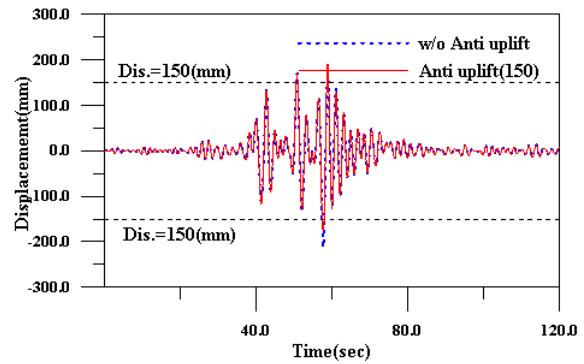
(c) Anti uplift device gap of 180mm

〈Fig. 9〉 Displacement of base isolation
by Hyougo-ken earthquake

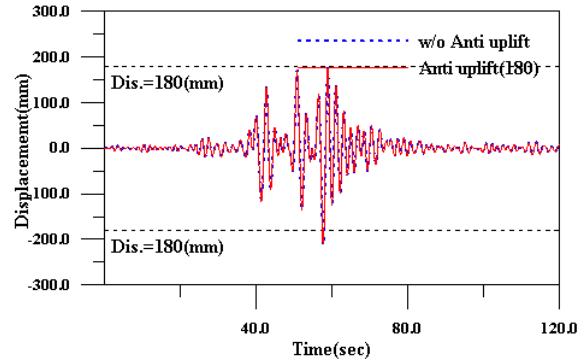
〈Fig. 9〉에서는 인장저항 장치의 이격거리가 작을수록 면진장치의 변위응답이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 면진장치(상판)의 지진에 의한 움직임이 인장저항 장치에 의해서 제한되기 때문이다. 그러나 Anti uplift(180)의 경우 인장저항 장치가 없는 면진장치의 변위와 같은 것을 볼 수 있다. 이는 인장저항장치의 이격거리가 인장저항 장치가 없는 면진장치의 변위응답을 초과하기 때문이다.



(a) Anti uplift device gap of 100mm



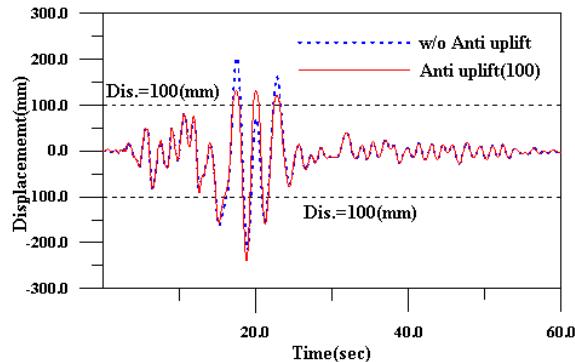
(b) Anti uplift device gap of 150mm



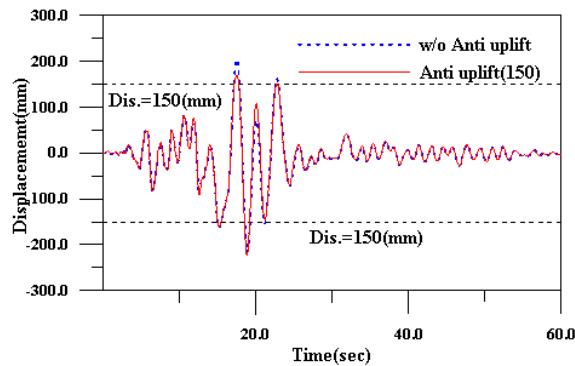
(c) Anti uplift device gap of 180mm

〈Fig. 10〉 Displacement of base isolation
by Mexico earthquake

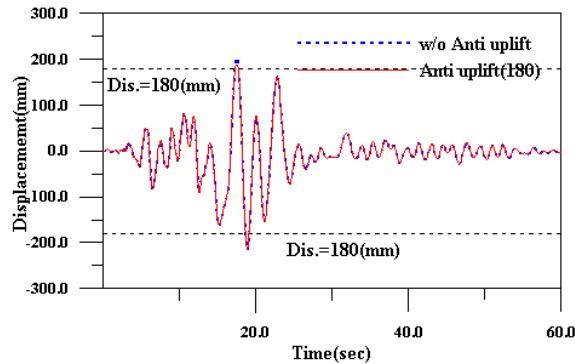
Anti uplift(100)에서 면진장치(상판)의 최대 변위응답을 100mm로 제한하고 있지만 면진장치(상판)의 변위응답이 100mm를 초과하여 나타나고 있다. 이는 지진하중에 의하여 면진장치(상판)이 거동하면서 인장저항 장치에 변형을 야기하기 때문이다. 인장저항 장치를 충분히 강한 부재로 설계를 하여 변형이 생기지 않는다면 면진장치(상판)이 변위의 제어가 가능할 것으로 판단된다.



(a) Anti uplift device gap of 100mm



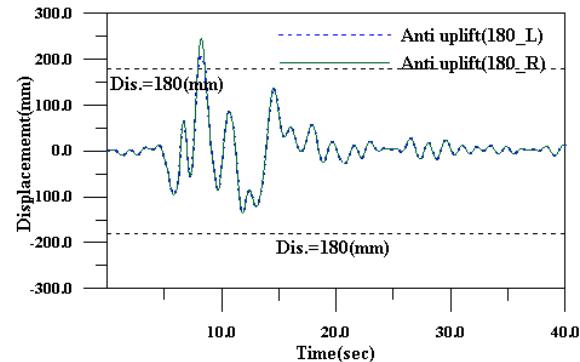
(b) Anti uplift device gap of 150mm



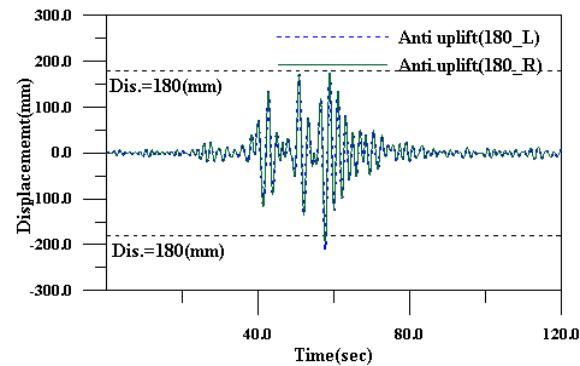
(c) Anti uplift device gap of 180mm

〈Fig. 11〉 Displacement of base isolation by San Fernando earthquake

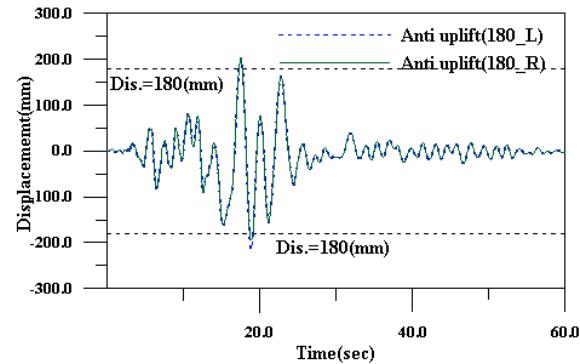
〈Fig. 12〉는 면진장치에 장착된 좌/우 인장저항 장치의 변위응답을 나타낸 것이다. 좌/우 인장저항 장치의 최대 변위응답이 매우 미소한 차이를 보이고 있으나 좌/우 인장저항 장치의 거동은 대체적으로 매우 유사한 것을 볼 수 있다.



(a) Left-right anti uplift devices by Hyougoken



(b) Left-right anti uplift devices by Mexico

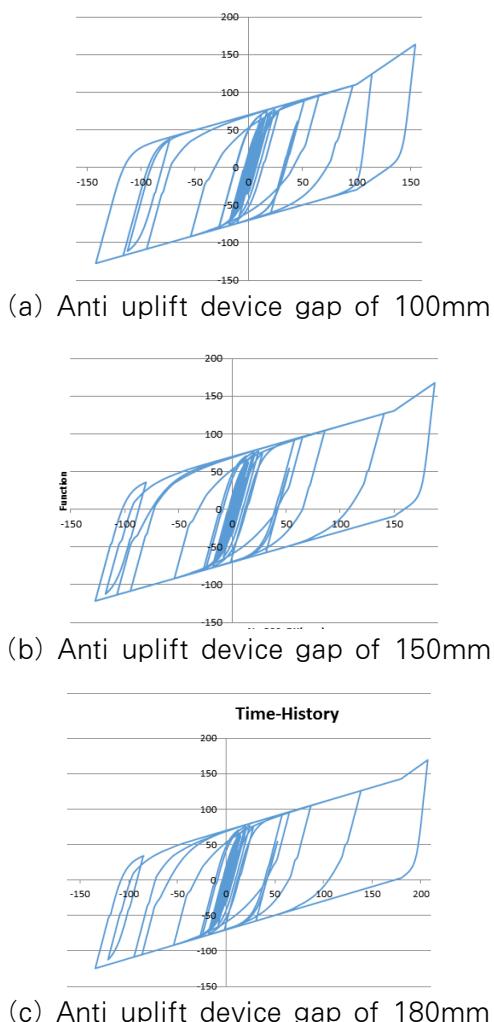


(c) Left-right anti uplift devices by San Fernando

〈Fig. 12〉 Displacement of left-right anti uplift devices

4.2 인장저항 면진장치의 이력거동

〈Fig. 13〉은 인장저항 장치가 장착된 면진장치의 이력곡선으로 면진장치 변위한계 부근에서 이력곡선이 꺾이는 것을 볼 수 있다. 이는 면진장치의 변위가 제한되면서 하중이 증가하기 때문이다.



〈Fig. 13〉 Hysteretic curve of base isolation by Hyougo-ken earthquake

5. 결론

아치구조물과 같이 수평방향 지점반력이 발생하는 구조물의 경우 면진장치 설계 및 구조부재 설계 시 수평방향 지점반력을 반드시 고려해야 한다. 지진하중에 의한 면진장치 변위가 과도하게 발생할 경우 면진장치의 변위제한을 위해서 부가적인 장치가 필요하다. 본 연구에서는 지진하중에 의한 인장저항 면진장치의 거동을 분석하였다. 인장저항 면진장치는 지진하중에 의한 대공간 구조물의 변위를 제어하는데 매우 적합한 시스템이다. 면진장치에 장착되는 인장저항 장치의 이격거리는 면진장치의 제한 변위에 맞게 설정해야 한다. 추후 대공간 구조물의 수평반력에 의한 면진장치의 잔류변형 억제 방법 등에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원(20AUDP-B100343-06)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Kim, G. C., Kim, K. I., & Kang, J. W., "The Seismic Behavior of the Truss-Arch Structure with Seismic Isolation", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.8, No.2, pp.73~84, 2008
2. Kim, D. K., "Evaluation of Structural Response of Base Isolated Frame Considering Uplift Effect of Isolators", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.10, No.2, pp.69~76, 2010
3. Kim, S. G., Kim, Y. S., Kim, G. C., & Kang, J. W., "The Seismic Response according to Rise-Span Ratio of the Arch Structure With Seismic Isolation", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.18, No.1, pp.55~65, 2018, doi: 10.9712/KASS.2018.18.1.55
4. Kim, S. G., Kang, J. W., & Kim, G. C. (2017). Behavior Analysis of Isolation with Anti-uplift Device for Horizontal Load. Proceedings of the KASS 2017 Spring Conference, Republic of Korea, Vol.13, No.1, pp.105~106

- Received : August 19, 2020
- Revised : August 27, 2020
- Accepted : August 27, 2020