

아치 구조물의 지진응답 제어를 위한 드림방지 면진장치의 적용

Application of Seismic Base Isolation With Anti-Uplift Device for Arch Structure

김 기 철*
Kim, Gee-Cheol

이 준 호**
Lee, Joon-Ho

Abstract

When an unexpected excessive seismic load is applied to the base isolation of arch structure, the seismic displacement of the base isolation may be very large beyond the limit displacement of base isolation. These excessive displacement of the base isolation causes a large displacement in the upper structure and large displacement of upper structure causes structural damage. Therefore, in order to limit the seismic displacement response of the base isolation, it is necessary to install an additional device such as an anti-uplift device to the base isolation. In this study, the installation direction of the base isolation and the control performance of the base isolation installed anti-uplift device were investigated. The installation direction of the base isolation of the arch structure is determined by considering the horizontal and vertical reaction forces of the arch structure. In addition, the separation distance of the anti-uplift device is determined in consideration of the design displacement of the base isolation and the displacement of the arch structure.

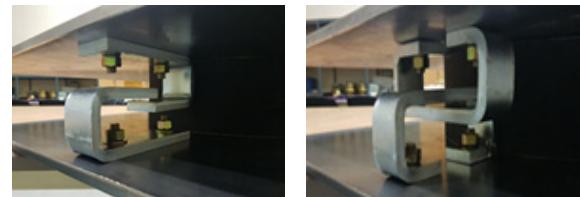
Keywords : Arch structure, Base isolation, Seismic displacement, Anti-uplift device, Control performance

1. 서론

아치 구조물은 기둥-보 구조물과 다른 기하학적 특성으로 인하여 수직방향에 비해 수평방향 지점반력이 매우 크게 발생한다. 따라서 아치 구조물에 면진장치를 설치할 때 수직방향 반력과 함께 수평방향 반력을 반드시 고려해야 한다.

면진장치에 과도한 지진하중이 작용하면 면진장치의 변위가 제한된 변위 이상으로 매우 크게 발생할 수 있다. 면진장치의 과도한 변위는 면진장치의 전도(Over turning)를 유발시킬 수 있다. 면진장치에 과도한 변위와 전도가 발생할 경우 기능을 상실하게 되므로 면진장치의 변위 제한 및 드림 방지(Anti-uplift)를 위한 부가적인 저항장치를 면진장치에 설치할 필요가 있다¹⁻³⁾.

본 연구에서는 면진장치 설치 방향에 따른 지진응답 제어성능과 드림방지 장치를 갖는 면진장치의 지진응답



(a) One way device (b) Two way device
(Fig. 1) Anti-uplift devices of base isolation

제어성을 알아보자 한다.

(Fig. 1)과 같은 드림방지 장치는 일방향 또는 이방향으로 거동하게 되며 면진장치 좌우에 설치한다. 드림방지 장치는 면진장치의 과도한 변위 발생을 제한하며, 전도 및 드림을 방지할 수 있다.

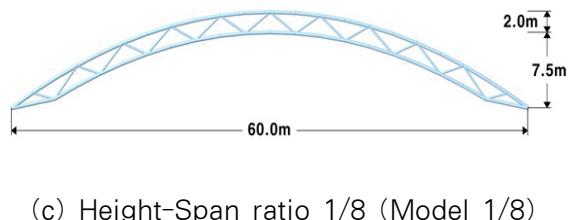
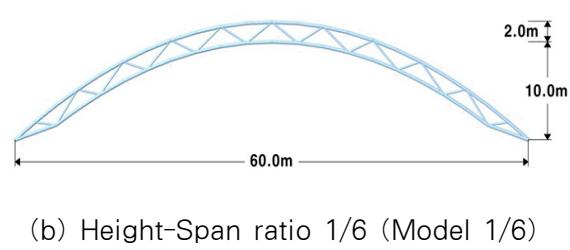
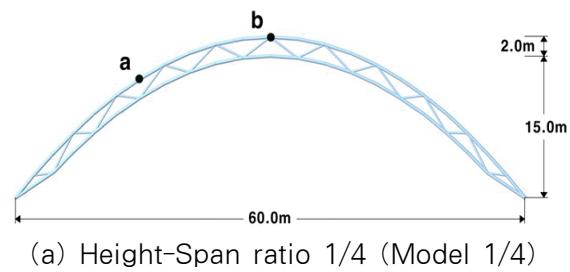
2. 아치 구조물의 지진응답 특성

2.1 예제 아치 구조물의 동적특성

예제 구조물은 일반적인 형태의 아치 구조물로 상현재, 하현재는 $\phi 355.6 \times 6.3$, 사재는 $\phi 216.3 \times 4.5$ 의 강관을 사용하였다. 예제 구조물의 경간은 60m이며, 상현재와 하현재 사이의 춤은 2m로 높이(H)-경간(S)비와 관계없이 일정하게 하였다. (Fig. 2)는 높이-경간비에 따

* 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, 서일대학교 건축공학과 조교수
Dept. of Architecture Eng., Seoil University

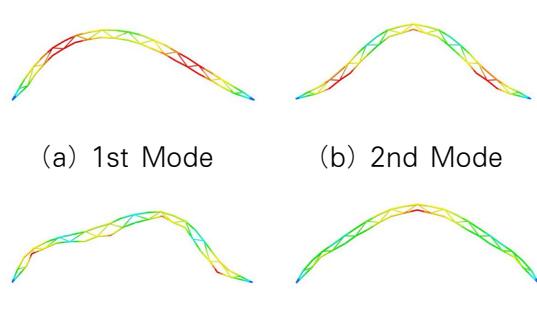


〈Fig. 2〉 Example models of arch structure

른 예제 구조물을 나타낸 것이다. 예제 구조물의 높이-경간비는 1/4, 1/6, 1/8, 예제 구조물의 높이는 각각 15m, 10m, 7.5m로 설정하였다^{4),5)}.

〈Fig. 3〉은 높이-경간비가 1/4인 예제 아치 구조물의 주요 저차모드의 진동모드를 나타낸 것이다. 예제 구조물의 진동모드 양상은 역대칭모드(1차, 3차)와 대칭모드(2차, 4차)가 나타나는 일반적인 아치 구조물의 동적특성을 보이고 있다. 높이-경간비가 1/6 및 1/8인 경우 높이-경간비가 1/4인 경우와 다르게 3차 및 4차 진동모드의 순서가 반대로 나타난다. 이는 높이-경간비에 따라서 수평방향과 수직방향의 질량참여율이 다르게 나타나기 때문이다.

주요 저차모드의 역대칭 모드형상으로 인하여 아치 구조물 경간의 1/4 지점에서 수평방향 및 수직방향 지진응답이 크게 발생한다.



〈Fig. 3〉 Vibration mode of rise-span ratio 1/4 model

〈Table 1〉 Period of mode shapes (Unit : sec)

Mode	Model 1/4	Model 1/6	Model 1/8
1 st	0.4337	0.3301	0.2941
2 nd	0.1987	0.1582	0.1709
3 rd	0.1265	0.1382	0.1432
4 th	0.1084	0.1025	0.0941

〈Table 1〉은 3가지 예제 구조물의 진동모드별 주기를 나타낸 것이다. 높이-경간비가 클수록 고유진동주기가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 높이-경간비가 클수록 1차모드 수평방향의 질량참여율이 크게 나타나기 때문이다. 또한 지진하중 가속도스펙트럼에서 가속도 응답이 크게 나타나는 단주기 영역(0.09~0.4sec)에 주요 저차모드의 주기가 분포하고 있는 것을 볼 수 있다.

2.2 높이-경간비에 따른 지점반력

아치 구조물은 기하학적 특성으로 인하여 높이-경간비에 따라서 지점의 수평반력과 수직반력이 다르게 나타나고 있다⁶⁾. 정적하중에 의한 지점반력은 수직방향보다 수평방향이 더 크게 나타나고 있다.

〈Table 2〉는 높이-경간비에 따른 예제 아치 구조물의 지점 수직반력 및 지점 수평반력을 나타낸 것이다. Seismic load는 El Centro Site, 270 Deg(1940)의 지진에 대한 지점반력을 나타낸 것이다.

아치 구조물의 높이-경간비가 낮을수록 수평방향 지점반력이 크게 나타나고 있으며, 수직방향 지점반력은

〈Table 2〉 Reaction force of arch structures

	Model	Model 1/4	Model 1/6	Model 1/8
Dead load (kN)	Horizontal reaction	72.8	104.0	132.8
	Vertical reaction	83.4	80.5	79.4
Live load (kN)	Horizontal reaction	54.3	80.2	103.7
	Vertical reaction	53.8	53.6	53.8
Seismic load (kN)	Horizontal reaction	28.6	33.9	42.2
	Vertical reaction	11.6	11.9	11.5

높이-경간비에 관계없이 유사한 것을 볼 수 있다. 따라서 아치 구조물과 같은 대공간 구조물은 높이-경간비에 따른 반력을 분석하여 기초설계 및 면진장치 설치 등에 반영해야 할 것이다⁶⁾.

2.3 예제 아치 구조물의 지진응답

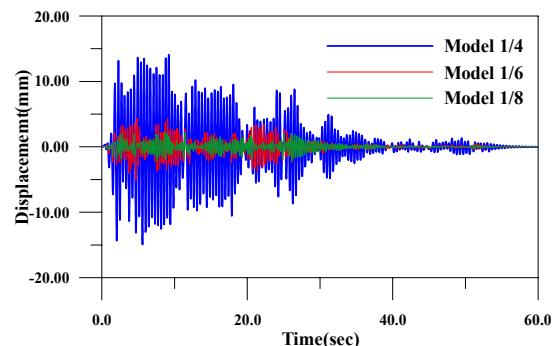
예제 구조물은 높이-경간비에 따라서 지진하중에 의한 응답이 다르게 나타나므로 지진응답이 가장 크게 나타나는 경간의 1/4 지점(Point 'a')에서의 변위응답을 비교 분석하고자 한다. 예제 구조물에 적용한 지진하중은 〈Table 3〉과 같다.

〈Fig. 4〉는 El Centro 지진하중에 의한 예제 구조물의 수평방향과 수직방향 변위응답 그래프를 비교한 것이다. 〈Fig. 4〉를 보면 높이-경간비가 클수록 변위응답이 크게 나타나고 있다. 또한 높이-경간비가 1/4, 1/6, 1/8인 예제 구조물 모두 수평방향 변위보다 수직방향 변위가 더 크게 나온 것을 볼 수 있다. 높이-경간비가 1/4 모델은 수평방향 변위와 수직방향 변위가 유사한 것을 볼 수 있으며, 높이-경간비가 1/8인 모델의 경우 수직방향 변위응답에 대한 수평방향의 변위응답의 비가 가장 크게 나타나고 있다^{4),5)}.

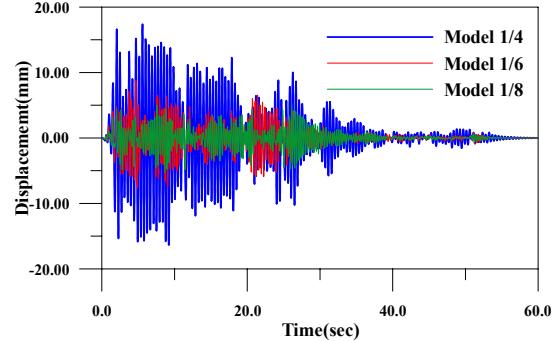
〈Fig. 5〉는 Hyougoken 지진하중에 의한 예제 구조물의 변위응답 그래프를 비교한 것이다. 〈Fig. 4〉와 마찬가지로 높이-경간비에 따른 수평방향 변위응답의 차이가 수직방향보다 더 큰 것을 볼 수 있다.

〈Table 3〉 Contents 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



(a) Horizontal direction displacements



(b) Vertical direction displacements

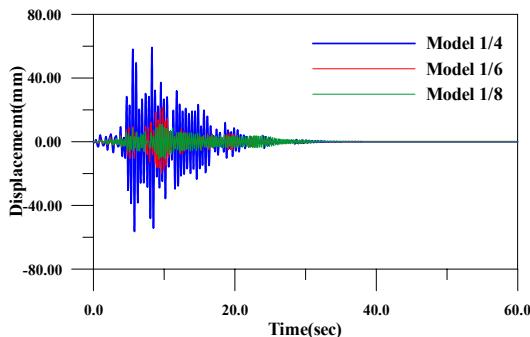
〈Fig. 4〉 Displacement by El-Centro

지진하중에 의한 이러한 변위응답 양상은 아치 구조물의 기하학적 특성이 반영되어 나타나는 것이다. 따라서 아치 구조물에 면진장치를 설치할 경우 아치 구조물의 높이-경간비를 고려해야 한다.

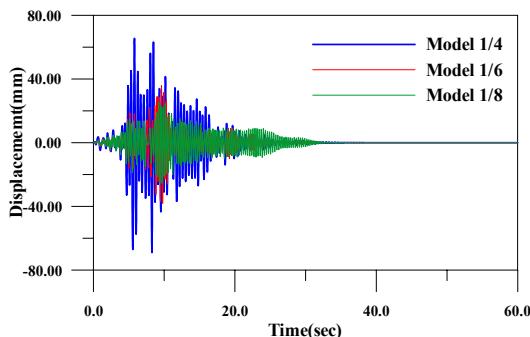
3. 아치 구조물의 면진장치 적용

3.1 면진장치 적용 방향에 따른 지진응답

아치 구조물과 같이 지붕구조물로 사용되고 있는



(a) Horizontal direction displacements



(b) Vertical direction displacements

〈Fig. 5〉 Displacement by Hyougoken

대공간 구조물은 지진하중에 의한 동적응답 중 변위응답 분석이 가장 중요하다. 지붕구조물에 과도한 변위가 발생할 경우 구조부재의 부재력 증가 또는 손상을 유발할 수 있다. 따라서 본 절에서는 면진장치 설치 방향에 따른 변위응답을 분석하고자 한다.

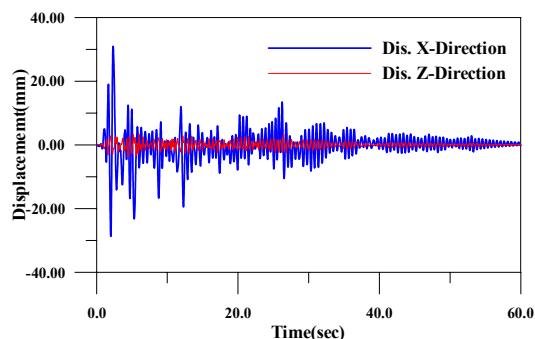
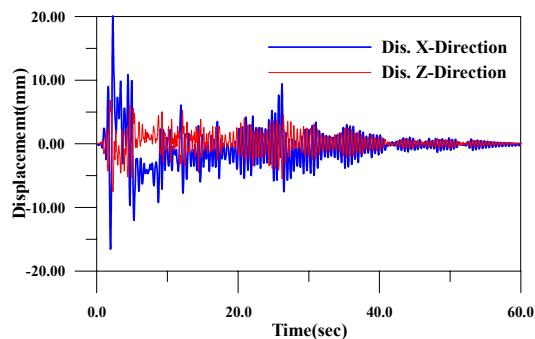
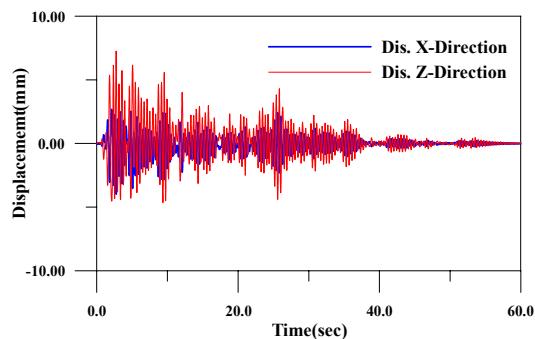
앞서 설명한 바와 같이 아치 구조물의 높이-경간비에 따라서 지점 반력이 다르게 나타나므로 지점의 수평반력과 수직반력을 모두 고려하여 면진장치를 설치하는 것이 적절하다. 예제 아치 구조물의 지점반력을 고려하여 면진장치 설치 방향을 90° , 60° , 30° 로 하였다. 면진장치의 설치 방향 90° 는 기존의 면진장치 설치와 같이 수직방향으로 설치한 것이다.

예제 아치 구조물 〈Fig. 2 (a)〉에 적용한 면진장치는 납-고무 면진장치(Lead Rubber Bearing, LRB)이다. 면진장치의 특성은 〈Table 3〉와 같으며, 지진하중은 〈Table 4〉와 같다.

본 절에서는 〈Fig. 2 (a)〉의 높이-경간비가 1/4인 예제 구조물(Model 1/4)에 수평방향으로 El-Centro, Taft, Hyougoken 지진하중을 가하였다. 면진장치 설치 방향에 따른 지진응답을 비교분석하기 위하여 아치 구

〈Table 4〉 Earthquakes

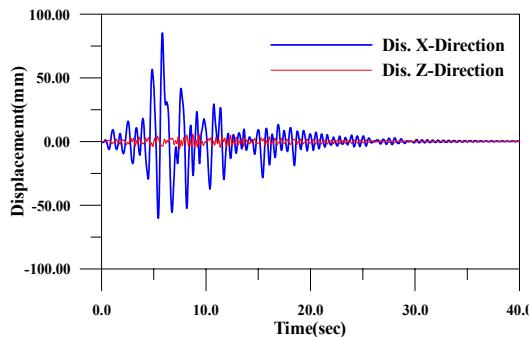
Name	Site
El Centro	1940, El Centro Site, 180 Deg
Taft	1952, Taft Lincoln School, 69 Deg (0.155g)
Hyougoken	1995, Hyougoken_South, N12

(a) Base isolation installation = 90° (b) Base isolation installation = 60° (c) Base isolation installation = 30°

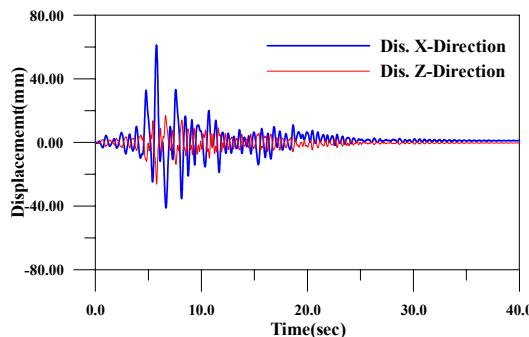
〈Fig. 6〉 Displacement by El-Centro earthquake

조물의 변위응답이 가장 크게 나타나는 경간의 1/4 (Point 'a')에서 변위응답을 그래프로 나타냈다.

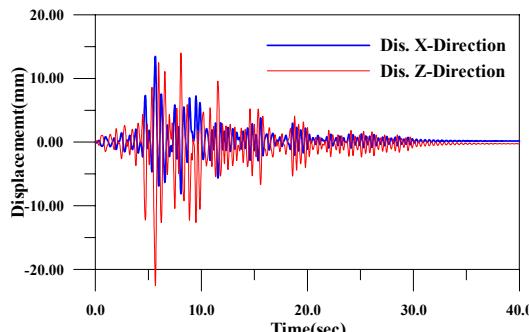
〈Fig. 6〉에서 보는 바와 같이 면진장치의 설치 방향 (90° , 60° , 30°)에 따라서 변위응답이 다르게 나타



(a) Base isolation installation=90°



(b) Base isolation installation=60°

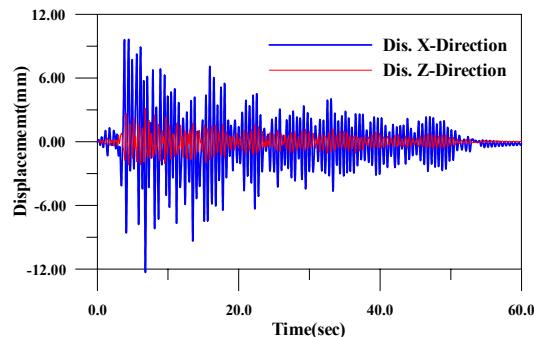


(c) Base isolation installation=30°

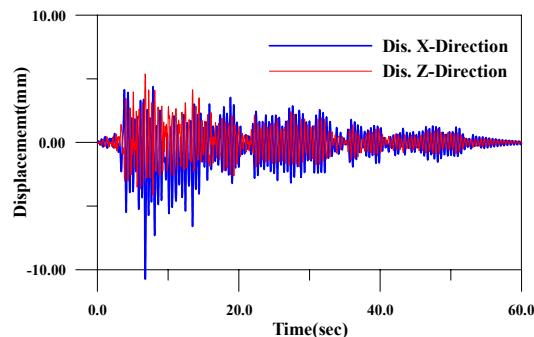
〈Fig. 7〉 Displacement by Hyogoken earthquake

난다. 기존의 일반적인 면진장치 설치 방법(설치 방향 90°)에서는 수직방향에 대한 지진응답이 비교적 잘 제어되지만 수평방향에 대한 지진응답은 제어가 되지 않는 것을 볼 수 있다. 면진장치 설치가 60°인 경우에는 90° 일 때의 변위응답과 비교하여 수평방향응답이 다소 감소하였으나 수직방향 변위응답이 약간 증가한 것을 볼 수 있다. 면진장치 설치가 30°인 경우에는 수평방향 변위응답이 크게 감소하였다.

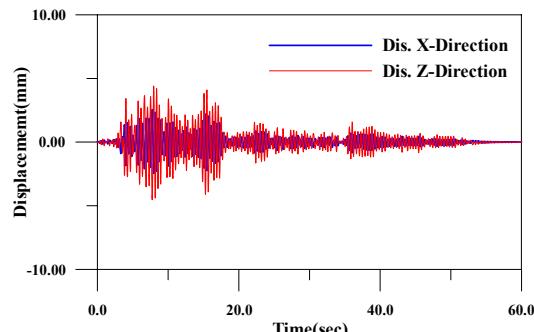
〈Fig. 7〉과 〈Fig. 8〉은 Hyogoken 지진하중, Taft 지진하중에 의한 수평방향 및 수직방향 변위응답을 비교한 것이다. 〈Fig. 6〉과 마찬가지로 면진장치 설치 방향이 30°인 경우 지진응답 제어가 우수한 것을 볼 수



(a) Base isolation installation=90°



(b) Base isolation installation=60°



(c) Base isolation installation=30°

〈Fig. 8〉 Displacement by Taft earthquake

있다.

따라서 아치 구조물의 면진장치는 제어하고자 하는 지진응답의 방향(수직/수평)에 따라서 설치하는 것이 적절할 것이다. 또는 아치 구조물의 수평반력과 수직반력의 합력 방향으로 면진장치를 설치하면 지진응답에 대한 우수한 제어성능이 나타날 것이다.

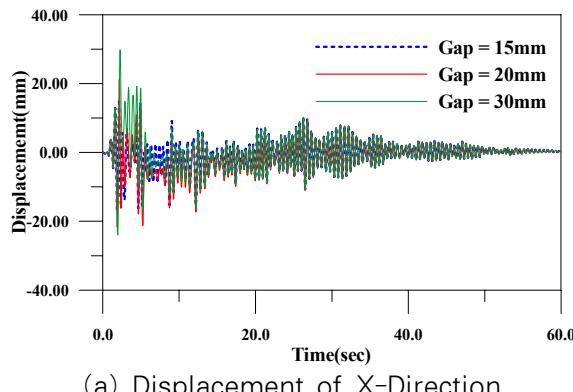
3.2 들림방지 면진장치 적용 지진응답

아치 구조물과 같은 대공간 구조물의 지진응답을 저감하기 위해서 면진장치를 설치하나 대공간 구조물에 과도한 변위가 발생할 경우 구조부재 손상 또는 부착물의 털락 등이 유발될 수 있다. 따라서 본 절에서는 들림

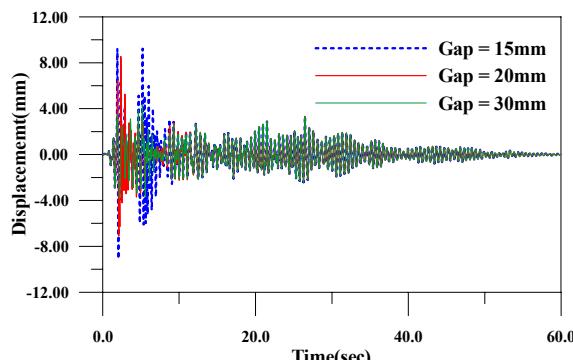
방지 면진장치가 설치(설치방향 90°)된 예제 구조물의 변위응답을 분석하여 들림방지 장치의 지진응답 제어성을 알아보자 한다.

〈Fig. 9~11〉에서 Gap은 〈Fig. 1〉의 상/하 들림방지 장치의 수평방향 이격거리로 Gap(이격거리)이 클수록 면진장치의 설계변위가 큰 것을 의미한다.

〈Fig. 9 (a)〉에서 보는 바와 같이 예제 구조물 점 'a' (경간의 1/4 지점)의 최대 변위응답(수평방향)은 들림방지 면진장치의 이격거리를 초과하지 않는다. 이는 지진 하중에 의하여 예제 구조물의 변위응답이 면진장치의 설계변위를 넘지 않게 제어되고 있다는 것을 보여준다. 그러나 수직방향 변위응답은 〈Fig. 9 (b)〉와 같이 들림방지 장치의 이격거리와 관계없이 변위응답이 유사하게 나타나고 있다. 들림방지 장치의 수직방향에 대한 지진 응답 제어는 면진장치 전도방지 또는 들림에 역할을 하고 있다.



(a) Displacement of X-Direction

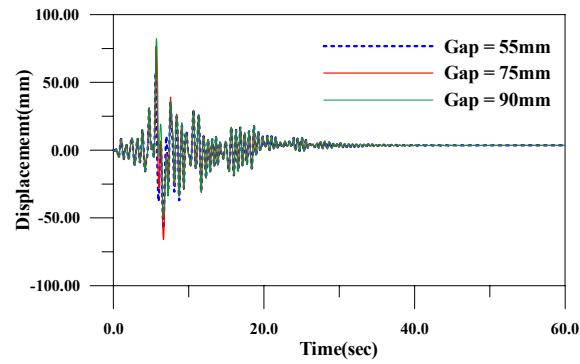


(b) Displacement of Z-Direction

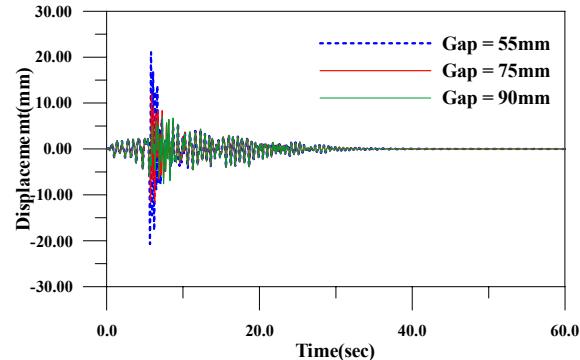
〈Fig. 9〉 Point 'a' Dis. by El-Centro earthquake

〈Fig. 10〉과 〈Fig. 11〉은 Hyougoken 지진하중과 Taft 지진하중에 의한 예제 아치 구조물 점 'a'의 변위응답이다. 〈Fig. 9〉와 마찬가지로 점 'a'의 변위응답이 들림방지 장치의 이력거리(면진장치 설계변위)를 초과하지 않고 있다. 따라서 들림방지 장치의 이격거리는 면진장치의 설계변위에 따라 결정되어야 한다.

〈Table 5〉는 들림방지 장치의 이력거리에 따른 예제 구조물 최대변위와 면진장치 상판의 최대변위를 나타낸 것이다. 들림방지 장치의 이력거리가 예제 구조물의 최대변위보다 작은 경우에는 예제 구조물의 최대변위가 이격거리를 초과하여 나타나고 있다. 예를 들어 El Centro 지진하중이 적용된 경우 예제 구조물의 최대 변위는 30.92mm이지만 이격거리를 15mm 또는 20mm로 할 경우 아치 구조물의 최대 변위가 이격거리를 다소 초과하는 것을 볼 수 있다. 면진장치 상판의 최대 변위는 들림방지 장치 이격거리를 초과하지 않고 있다.

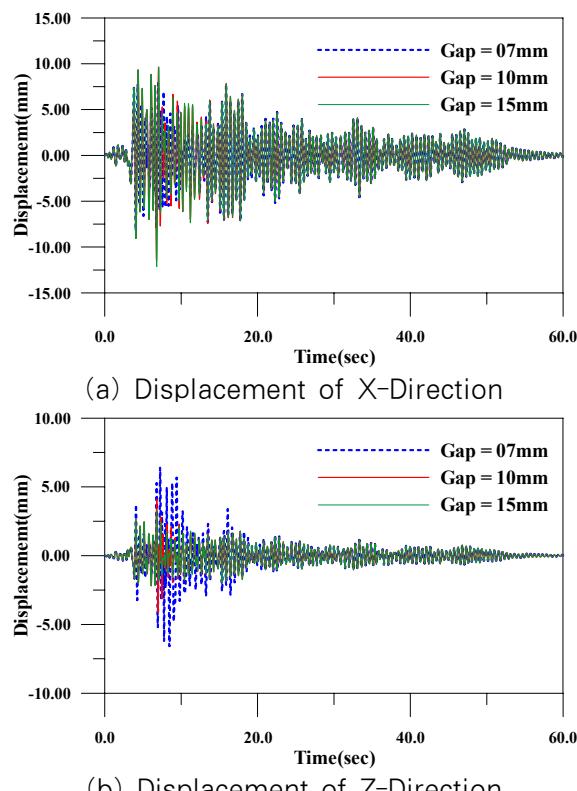


(a) Displacement of X-Direction



(b) Displacement of Z-Direction

〈Fig. 10〉 Point 'a' Dis. by Hyougoken earthquake



〈Fig. 11〉 Point 'a' Dis. by Taft earthquake

〈Table 5〉 Displacement by earthquake (unit : mm)

Earthquake name	Model	Point 'A' of arch	Top plate of base isolation	Ratio (%)
El-Centro	Gap_15	16.55	15.0	110.3
	Gap_20	21.66	19.98	108.4
	Gap_30	29.81	28.48	104.7
Hyougoken	Gap_55	57.4	53.42	107.5
	Gap_75	76.5	74.26	103.0
	Gap_90	82.3	81.23	101.3
Taft	Gap_07	8.22	7.04	116.8
	Gap_10	11.47	9.76	117.5
	Gap_15	12.14	10.69	113.6

4. 결론

아치 구조물과 같은 대공간 구조물은 기하학적 특성으로 인하여 수직방향 반력에 비해 수평방향 지점반력이 매우 크게 발생한다. 본 연구에서 면진장치 설치 방

향에 따른 아치 구조물의 지진응답을 분석한 결과, 수직방향으로 설치한 면진장치보다 수평방향 지점반력과 수직방향 지점반력의 합력 방향으로 면진장치를 설치할 때 지진응답 제어가 우수한 것으로 나타났다. 따라서 대공간 구조물의 면진장치 설치에 있어서 면진장치 설치 방향을 고려해야 한다.

또한 아치 구조물과 같은 대공간 구조물에 예상치 못한 지진하중이 가해지면 면진장치의 설계변위 이상의 과도한 변위가 발생하게 되므로 면진장치에 들림방지 장치와 같은 부가적인 제어장치가 필요하다. 본 연구에서 들림방지 장치를 갖는 면진장치를 아치 구조물에 적용하여 지진응답을 분석한 결과, 들림방지 장치에 의하여 아치 구조물의 지진응답이 제한되는 것을 볼 수 있었다. 들림방지 장치의 이격거리는 면진장치 설계변위와 구조물의 최대 변위를 고려하여 결정한다.

들림방지 장치를 갖는 면진장치의 갑작스러운 거동은 면진장치 상부구조물에 충격 형태의 응답을 야기할 수 있다. 따라서 추후 연구에서는 들림방지 장치의 충격진동 영향을 고려한 면진장치 거동에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2020년도 서일대학교 학술연구비에 의해 연구되었음.

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, Retrieved from file://C:/Users/user/Downloads/The_Seismic_Behavior_of_the_Truss-Arch_Structure_with_Seismic_Isolation.pdf
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,

Retrieved from
file:///C:/Users/user/Downloads/Evaluation_of_Structural_Response_of_Base_Isolated_Frame_Considering_Uplift_Effect_of_Isolators.pdf

3. 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
4. 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
5. Kim, S. G., Kim, G. C., & Kang, J. W. (2017). Seismic Response Analysis of Arch Structure According to Rise-Span Ratio. Proceedings of the AIK 2017 Autumn Conference, Republic of Korea, Vol.37, No.2, pp.657~660
6. Kim, G. C., & Jang, M. H., "Behavior Analysis of Base Isolation With Anti-Uplift Device for Arch Structure by Numerical Analysis", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.20, No.3, pp.99~106, 2020, doi: 10.9712/KASS.2020.20.3.99

- Received : November 21, 2020
- Revised : November 25, 2020
- Accepted : November 25, 2020