

면진장치 특성 변화에 따른 중간층 면진시스템의 지진응답 평가

Seismic Response Evaluation of Mid-Story Isolation System According to the Change of Characteristics of the Seismic Isolation Device

김 현 수*
Kim, Hyun-Su

김 수 근**
Kim, Su-Geun

강 주 원***
Kang, Joo-Won

Abstract

As the number of high-rise buildings increases, a mid-story isolation system has been proposed for high-rise buildings. Due to structural problems, an appropriate isolation layer displacement is required for an isolation system. In this study, the mid-story isolation system was designed and the seismic response of the structure was investigated by varying the yield strength and the horizontal stiffness of the seismic isolation system. To do this, a model with an isolation layer at the bottom of 15th floor of a 20-story building was used as an example structure. Kobe(1995) and Nihonkai-Chubu(1983) earthquake are used as earthquake excitations. The yield strength and the horizontal stiffness of the seismic isolation system were varied to determine the seismic displacement and the story drift ratio of the structure. Based on the analytical results, as the yield strength and horizontal stiffness increase, the displacement of the isolation layer decreases. The story drift ratio decreases and then increases. The displacement of the isolation layer and the story drift ratio are inversely proportional. Increasing the displacement of the isolation layer to reduce the story drift ratio can cause the structure to become unstable. Therefore, an engineer should choose the appropriate yield strength and horizontal stiffness in consideration of the safety and efficiency of the structure when a mid-story isolation system for a high-rise building is designed.

Keywords : Characteristics of seismic isolation system, Seismic response reduction, Mid-story isolation, Tall building

1. 서론

최근 한국에 규모 5.5 이상의 강진이 발생되어 한
국도 더 이상 지진에 안전하지 않다는 인식이 확산
됨에 따라 내진설계에 대한 관심과 필요성의 목소
리 또한 증가하고 있다. 지진에 대한 피해를 차단하
기 위한 효과적인 방법은 지진의 에너지가 건물로
전달되지 않도록 지반에서 건물을 격리시키는 면진
시스템이다. 면진시스템은 지반의 진동이 구조물로
전달되는 것을 차단하여 건물에 발생하는 피해를
줄이는 방법으로 격리 장치를 구조물에 삽입하여

전체의 구조물의 주기를 증가시켜 구조물에 전달되
는 지진하중을 감소시킴으로써 지진의 피해를 줄이
는 것이다.

일반적으로 면진시스템은 주로 중저층 건물의 기
초면진으로 많이 사용되어 왔는데 이는 주기가 짧은
중저층 건물에서 큰 효과를 볼 수 있기 때문이다. 하
지만 고층 건물에 기초면진을 적용하면 면진장치의
변위가 늘어나 면진장치의 부담이 커지게 되고 전도
모멘트가 커져 구조물이 불안정해질 수 있다. 따라서
고층 건물의 중간층을 분리시켜 면진시키는 중간층
면진시스템이 제안되고 있다. 이와 관련하여 중간층
면진시스템에 대한 연구가 많이 수행되고 있다.

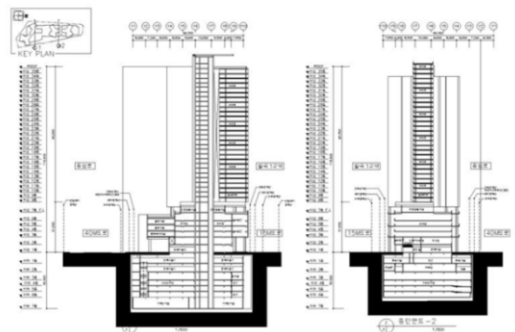
중간층 면진시스템이 적용된 국내 사례로 <Fig. 1>
의 동일하이빌 뉴시티를 들 수 있다. 지상 7층 이하
의 상업 시설과 8층 이상의 주거 시설로 이루어진
주상복합건물로 면진시스템을 적용하여 지진에 대
한 안전성을 향상시키고 초기에 계획하였던 경사기

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

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

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

등과 벨트월을 삭제함으로써 경제성을 확보하였다¹⁾. 일본에서는 Kobe 지진 이후로 면진구조물이 많이 증가하면서 중간층 면진시스템이 많이 적용되었는데 그 사례로 Taisei Corporation의 연수원을 들 수 있다. 이 건물은 16층으로 8층에 면진시스템이 적용되었다. 면진시스템에 의해 구조물로 전달되는 지진 에너지가 감소함으로써 구조물 보강에 필요한 비용을 절감하여 경제적 효과를 높였다²⁾.



〈Fig. 1〉 DONG-IL High-Vill New City³⁾

중간층 면진시스템과 관련된 연구로는 Tsuneki et al.(2008)⁴⁾은 기초면진과 중간층 면진시스템의 특징 및 각 시스템을 적용한 구조물의 응답을 비교분석하였으며 그와 함께 중간층 면진시스템을 적용한 사례를 몇 가지 소개하였다. Hur et al.(2017)⁵⁾은 3개층을 수직 증축한 공동주택에 대하여 면진층 주기 설정에 따른 구조물의 응답 변화를 알아보고 이때의 면진층 주기는 기본 건물의 2배 이상으로 설정할 것을 제안하였다.

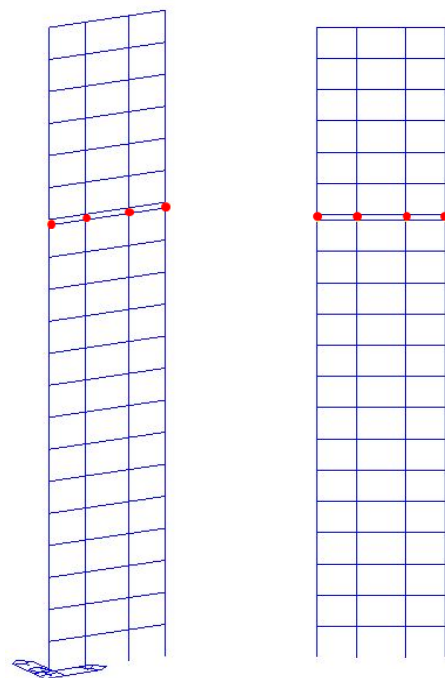
면진시스템은 일반적으로 수평 방향에 대한 유연성과 수직 방향에 대한 적절한 강성을 가져야하며 또한 지진에너지에 대한 에너지 소산 능력도 가져야한다. 설계할 때의 핵심은 층간 변위를 최소화시키는 것에 있는데 면진층에 변위를 집중시켜 구조

물의 층간 변위를 감소시킬 수 있다. 그러나 층간 변위를 최소화하기 위해 면진층 변위를 매우 크게 증가시킨다면 면진층의 격리 장치가 파괴될 가능성이 있고 구조물의 불안정성으로 들림 현상이 일어날 수도 있다. 따라서 층간 변위를 감소시키며 동시에 구조물의 안정성도 확보할 수 있는 적절한 방안이 필요하다. 중간층 면진시스템에 관한 연구는 주로 수직 증축이나 주상복합건물에 시스템을 적용하고 그에 따른 효과를 분석한 연구가 많이 이루어졌으나 면진장치의 특성에 따른 응답을 분석한 연구는 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 면진시스템의 항복강도와 수평강성을 변화시켜 중간층 면진시스템을 사용한 고층 건물의 지진응답을 분석하고자 한다.

2. 해석 모델

2.1 해석 모델 개요

본 연구에서는 지진하중에 대한 중간층 면진시스템의 면진장치 설계를 위한 최적값을 분석하기 위해 <Fig. 2>와 같은 20층의 라멘구조물을 해석 모델을 설계하였다.

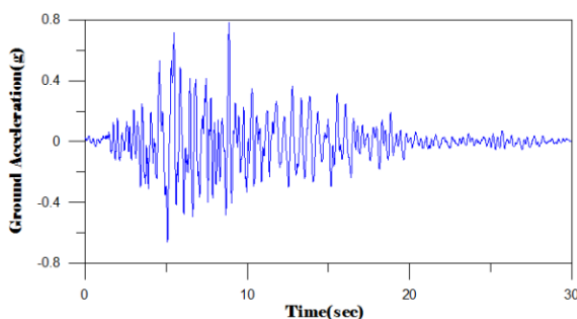


〈Fig. 2〉 Analytical model

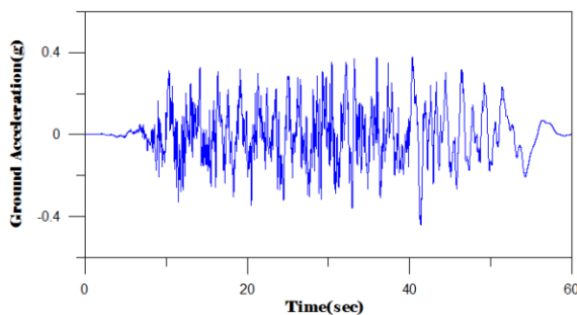
선행 연구⁶⁾에서 층간변형률과 가속도 응답을 동시에 제어하기 위해서는 고층 건물의 상층부에 면진시스템을 설치하는 것이 효율적이라 판단하였다. 특히 최상층으로부터 0.25h(구조물의 높이) 정도를 면진하는 것이 효율적일 것이라 사료되어 20층의 15층 하부에 중간층 면진시스템을 적용하여 구조물 상부 6개층을 면진시켰다. 면진층에는 상부 구조물에 위치한 모든 기둥 하부에 면진장치를 설치하여 총 4개의 LRB(Lead Rubber Bearing)를 설치하였다. 층질량은 $1.0 \times 10^6 \text{kg}$ 로 두었다. 해석 모델의 일반사항은 <Table 1>에 나타내었다.

<Table 1> Specification of analytical model

Variable		R20-LB15
Height		4m × 20story = 80m
Principal plane		XZ plane
Material		SM490
Section	Column	H 500×420×55/90
	Beam	H 400×200×18/24
	Device	LRB(Lead Rubber Bearing)
Isolation system	Number of installations	4
	Vertical stiffness	2,793,000kN/m
Slenderness ratio		1:5



(a) Kobe earthquake



(b) Nihonkai-Chubu earthquake

<Fig. 3> Input seismic load

해석에 사용한 지진하중은 역사지진의 Kobe 지진(1995, EW)과 Nihonkai-Chubu 지진(1983)을 사용하였다. 지진하중은 해석 모델의 X축 방향으로 입력하였다. 입력 지진하중에 대한 가속도 응답스펙트럼을 <Fig. 3>에 나타내었다.

2.2 해석 모델링 및 분석 방법

본 연구는 상용프로그램인 Midas Gen. Ver. 860을 사용하여 해석을 수행하였다. Kobe 지진과 Nihonkai-Chubu 지진을 입력하고 각각의 경우에 대해서 해석을 진행하였다. 모델에 설치한 면진장치의 항복강도와 수평강성을 변화시키면서 면진층 변위와 구조물의 층간 변위비를 구하여 서로 어떤 관계를 이루는지 살펴보았다. 또한 면진장치의 항복강도와 수평강성에 따른 면진장치의 이력거동을 검토하였다.

모델에 설치한 면진장치는 <Fig. 4>와 같은 LRB를 사용하였다. LRB는 적층고무받침에 에너지 소산기능을 높이기 위해 납을 삽입한 것으로 지진 시 고무는 면진구조물의 고유주기를 장주기화시켜 상부 구조로 전달되는 지진에너지를 감소시키고 납은 에너지소산기능으로 면진층 변위와 구조물로 전달되는 지진에너지를 감소시켜 별도의 댐퍼가 필요 없다는 장점을 가진다.



<Fig. 4> LRB(Lead Rubber Bearing)⁷⁾

면진장치의 특성은 면진구조물의 목표설계주기 (T_D)와 감쇠계수(B)에 따라 결정된다. 이를 이용하여 목표설계변위(D)는 식 (1)과 같이 결정된다⁸⁾.

$$D = \frac{g \cdot S_{D1} \times T_D}{4\pi^2 B} \quad (1)$$

여기서,

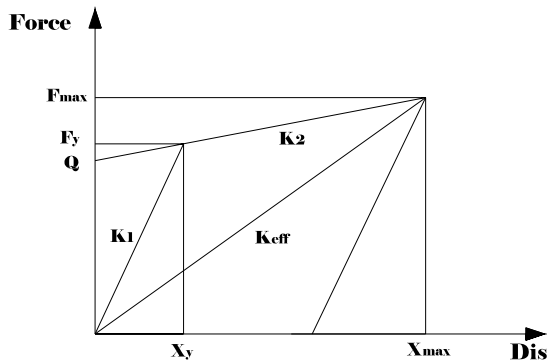
$$g = \text{중력가속도 } (m/s^2)$$

$$S_{D1} = \text{지진계수}$$

$$T_D = \text{면진시스템의 목표설계주기 (초)}$$

$$B = \text{감쇠계수}$$

LRB는 비선형 이력거동을 하며 주로 이선형으로 모델링 할 수 있다. LRB의 유효강성(K_{eff})은 <Fig. 5>의 항복강성(K_2), 납항복강도(Q), 설계변위(x_{max})로 식 (2)를 통해 구할 수 있으며, 유효감쇠(β_{eff})는 식 (3)으로부터 구할 수 있다. 여기서 Area는 이력 곡선의 면적이다⁹⁾.



<Fig. 5> Bilinear hysteretic behavior

$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{x_{max}} \quad (2)$$

$$\beta_{eff} = \frac{Area}{2\pi K_{eff}(x_{max})^2} \quad (3)$$

본 논문에서 LRB의 수직강성은 2,793,000kN/m로 두고 장치의 항복강도(Q)와 수평강성(K_1) 변화에 따른 최대 면진층 변위와 최대층간 변위비의 변화를 검토하기 위해 Kobe 지진의 경우 항복강도는 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1,000kN로 변화시키고 수평강성은 500~5,000kN/m 범위로 하여 해석을 수행하였다. Nihonkai-Chubu 지진의 경우 정확한 해석을 위하여 항복강도는 Kobe 지진과 동일하게 두고 수평강성은 1,500~6,000kN/m의 범위로 해석을 진행하였다.

3. 해석 결과

3.1 Kobe 지진에 대한 동적응답

면진장치의 항복강도(Q)와 수평강성(K_1)을 변화시켜 얻은 Kobe 지진에 대한 최대 면진층 변위를 <Table 2>에 나타내었다. 항복강도와 수평강성이 커질수록 면진층 변위는 감소하는 경향을 보인다. 항복강도 10kN, 수평강성 500kN/m일 때 면진층 변위가 45.1cm로 가장 크게 나타났고 수평강성 5,000kN/m, 항복강도 100kN 또는 200kN인 경우에 3.3cm로 가장 작은 면진층 변위가 나타났다.

<Table 2> Maximum displacement of Isolation layer (Unit : cm)

Q (kN)	10	20	50	100	200	500	1000
K_1 (kN/m)							
500	45.1	38.2	23.3	21.6	20.9	21.1	21.1
1000	21.3	17.2	14.5	14.9	15.5	15.8	15.8
1500	13.6	13.7	13.0	11.8	11.5	11.5	11.5
2000	11.5	11.4	10.5	9.2	8.8	8.8	8.8
2500	9.5	9.3	8.6	7.4	7.0	7.1	7.1
3000	7.8	7.6	7.0	6.1	5.8	5.7	5.7
3500	6.7	6.5	6.0	5.2	4.8	4.8	4.8
4000	5.7	5.5	5.0	4.4	4.1	4.2	4.2
4500	4.8	4.7	4.3	3.8	3.7	3.7	3.7
5000	4.2	4.1	3.8	3.3	3.3	3.4	3.4

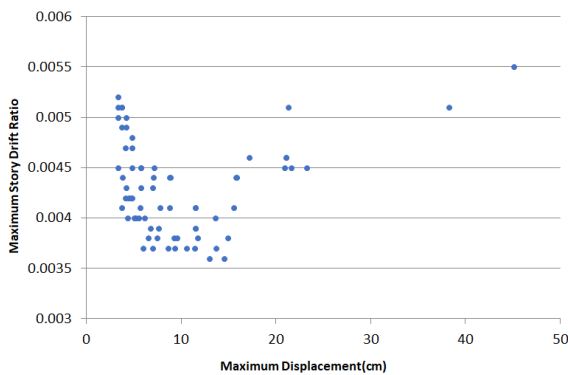
<Table 3>에는 면진장치의 항복강도(Q)와 수평강성(K_1)을 변화시켜 얻은 Kobe 지진에 대한 최대 층간 변위비를 나타내었다. 층간 변위비는 항복강도가 커질수록 감소했다가 증가하는 모습을 보이며 수평강성이 증가할 경우에도 감소했다가 증가한다. 면진장치를 설치하지 않은 경우의 층간 변위비는 0.0054이다. 항복강도의 경우 50kN까지는 층간 변위비가 감소하였다가 그 이후로 증가하는 것을 알 수 있다. 수평강성의 경우 1,500~2,500kN/m 부근까지 증가할수록 층간 변위비가 감소하다가 이후로 증가하는 것을 볼 수 있다. 항복강도 10kN, 수평강성 500kN/m일 때 층간 변위비가 0.0055로 가장 큰 값을 가지며 이때는 면진시스템을 적용하여도 효과

가 없는 것으로 판단된다. 항복강도 50kN, 수평강성 1,000kN/m 또는 1,500kN/m일 때 0.0036의 가장 작은 층간 변위비를 가져 이때 층간 변위비 제어에 가장 효과적인 것으로 판단된다.

<Table 3> Maximum story drift ratio (Unit : $\times 10^{-2}$)

K_1 (kN/m)	Q (kN)						
	10	20	50	100	200	500	1000
500	0.55	0.51	0.45	0.45	0.45	0.46	0.46
1000	0.51	0.46	0.36	0.38	0.41	0.44	0.44
1500	0.40	0.37	0.36	0.38	0.39	0.41	0.41
2000	0.39	0.37	0.37	0.38	0.41	0.44	0.44
2500	0.38	0.37	0.37	0.38	0.43	0.44	0.45
3000	0.41	0.39	0.37	0.40	0.43	0.45	0.45
3500	0.39	0.38	0.37	0.40	0.45	0.47	0.48
4000	0.41	0.40	0.40	0.42	0.47	0.49	0.50
4500	0.42	0.42	0.40	0.44	0.49	0.51	0.51
5000	0.43	0.42	0.41	0.45	0.50	0.51	0.52

면진층 변위와 층간 변위비를 비교해보면 면진층 변위가 증가하여도 층간 변위비가 항상 감소하는 것은 아닌 것을 알 수 있다. 중간층 면진의 원리는 하부 건물을 따라서 전달되는 지반가속도를 면진층에서 격리시켜서 상부 구조물의 응답을 줄이고 상부 구조물의 동조질량감쇠기 효과로 인하여 하부 구조물의 응답도 저감시키는 것이다. 면진층 변위가 증가하여 격리 효과를 키우면 전체 구조물의 응답이 줄어드는 경향이 있지만 과도하거나 특정한 변위에서는 오히려 응답이 증가할 수도 있으므로 신중히 검토하는 것이 필요하다.



<Fig. 6> Isolation layer displacement-story drift ratio graph at Kobe earthquake

면진층 변위와 층간 변위비의 관계그래프를 <Fig. 6>

에 나타내었다. 면진층 변위와 층간 변위비는 대체적으로 서로 반비례 관계를 이루고 있는 것을 알 수 있다. 면진층 변위 0~15cm 범위에서 그 관계가 잘 나타나고 있다. 면진층의 변위가 커질수록 층간 변위비 제어에 효과적인 것으로 판단된다.

3.2 Nihonkai-Chubu 지진에 대한 동적응답

<Table 4>는 Nihonkai-Chubu 지진에 대해 면진 장치의 항복강도와 수평강성을 변화시켜 얻은 최대 면진층 변위를 나타낸 것이다. Kobe 지진의 경우와 같이 항복강도와 수평강성이 증가할수록 면진층 변위가 감소하는 것을 알 수 있다. 항복강도 10kN, 수평강성 1,500kN/m일 때 면진층 변위가 39.4cm로 가장 큰 값으로 나타났다. 항복강도 1,000kN, 수평강성 6,000kN/m인 경우 가장 작은 값인 4cm의 면진층 변위가 나타났다.

<Table 4> Maximum displacement of Isolation layer (Unit : cm)

K_1 (kN/m)	Q (kN)						
	10	20	50	100	200	500	1000
1500	39.4	38.1	34.1	29.2	22.7	19.3	18.8
2000	25.8	25.0	23.1	20.4	16.3	14.1	13.7
2500	18.6	18.1	17.0	15.3	12.2	10.7	10.5
3000	13.8	13.5	12.7	11.5	9.4	8.4	8.3
3500	11.5	11.2	10.5	9.5	7.9	7.1	7.0
4000	9.4	9.1	8.6	7.9	6.8	6.2	6.1
4500	7.8	7.6	7.2	6.7	5.9	5.5	5.4
5000	6.7	6.5	6.2	5.9	5.3	4.9	4.9
5500	5.8	5.7	5.5	5.2	4.7	4.5	4.4
6000	5.1	5.0	4.9	4.7	4.3	4.1	4.0

<Table 5>는 면진장치의 항복강도와 수평강성을 변화시키고 얻은 Nihonkai-Chubu 지진에 대한 구조물의 층간 변위비를 나타낸 것이다. Kobe 지진의 경우와 마찬가지로 항복강도와 수평강성이 증가함에 따라 층간 변위비는 감소했다가 증가하는 것을 알 수 있다. 각각의 수평강성에 대해서 항복강도가 증가할 경우 항복강도 50kN, 100kN일 때에 가장 작은 층간 변위비를 가지는 것을 알 수 있다. 반면 각 항복강도에 대한 층간 변위비는 항복강도가 작

은 경우 수평강성이 클 때 최소응답을 가지는 것을 볼 수 있고 항복강도가 커질수록 상대적으로 작은 수평강성에서 최소응답을 가지는 것을 알 수 있다. 면진장치를 설치하지 않은 경우 층간 변위비는 0.0093이다. Nihonkai-Chubu 지진의 경우 면진장치를 설치하여도 층간 변위비 제어에는 크게 효과적이지 않으나 항복강도 50kN, 수평강성 1,500kN/m 일 때 층간 변위비가 0.0090으로 가장 큰 응답 저감을 보인다. 따라서 이때 가장 효과적인 것으로 판단된다. 반면 항복강도 10kN, 수평강성 1,500kN/m 인 경우 0.0103으로 가장 큰 층간 변위비가 나타났다.

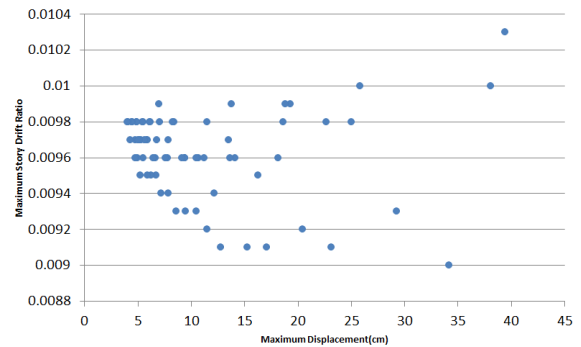
<Table 5> Maximum story drift ratio (Unit : $\times 10^{-2}$)

K_1 (kN/m)	Q (kN)						
	10	20	50	100	200	500	1000
1500	1.03	1.00	0.90	0.93	0.98	0.99	0.99
2000	1.00	0.98	0.91	0.92	0.95	0.96	0.96
2500	0.98	0.96	0.91	0.91	0.94	0.96	0.96
3000	0.99	0.97	0.91	0.92	0.96	0.98	0.98
3500	0.98	0.96	0.93	0.93	0.97	0.98	0.99
4000	0.96	0.96	0.93	0.94	0.97	0.98	0.98
4500	0.96	0.96	0.94	0.95	0.97	0.98	0.98
5000	0.96	0.96	0.95	0.95	0.97	0.98	0.98
5500	0.97	0.97	0.96	0.95	0.97	0.98	0.98
6000	0.97	0.97	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98

Nihonkai-Chubu 지진의 경우에도 Kobe 지진과 마찬가지로 면진층 변위가 클수록 층간 변위비가 항상 감소하지는 않는다. 면진층 변위가 너무 클 때에는 면진장치의 부담이 커지면서 구조물이 불안정해져 층간 변위가 증가하는 것으로 판단된다. 반면 면진층 변위가 너무 작아지면 내진구조물과 비슷하게 일체거동을 하여 층간 변위가 증가하는 것으로 사료된다.

<Fig. 7>에 면진층 변위와 구조물의 층간 변위비의 관계 그래프를 나타내었다. 면진층 변위와 층간 변위비는 대체로 반비례하는 양상을 보인다. 그러한 관계는 면진층 변위 0~25cm 범위에서 잘 나타난다. 즉 면진층의 변위가 커질수록 층간 변위비가 감소한다. 이러한 반비례 관계는 항복강도 50kN일 때에

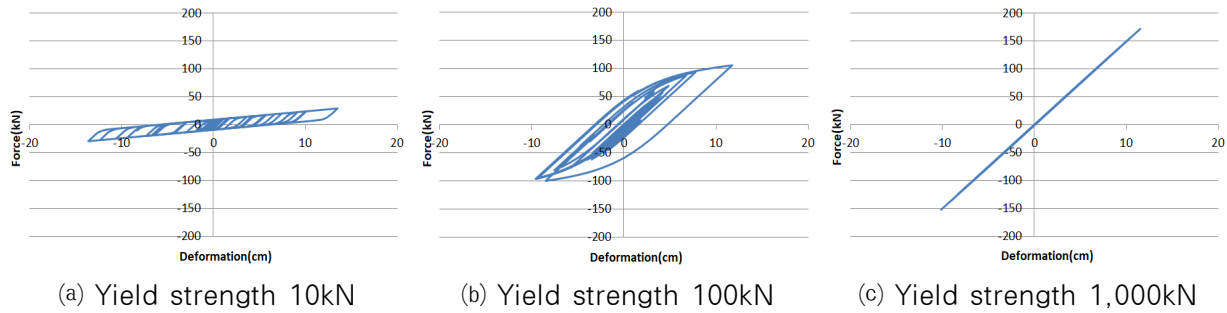
잘 나타난다. 그러나 면진층 변위가 매우 커지게 되면 구조물이 불안정해질 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 항복강도와 수평강성을 증가시켜 면진층 변위를 감소시킨다면 층간 변위비가 증가하여 구조적인 피해가 발생할 가능성이 있다. 따라서 적당한 면진층 변형을 발생시켜 층간 변위비를 제어하는 것이 필요하다. 이를 위해 적절한 항복강도와 수평변위를 선택할 필요가 있을 것으로 판단된다.



<Fig. 7> Isolation layer displacement-story drift ratio graph at Nihonkai-Chubu earthquake

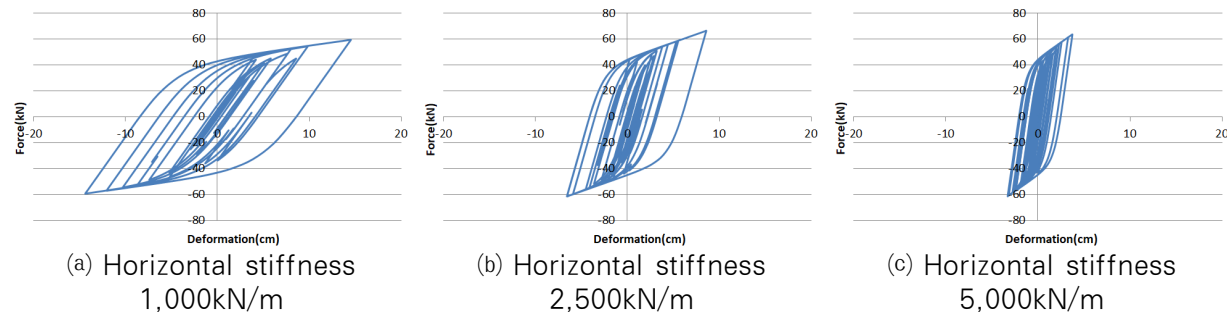
3.3 면진장치의 이력거동

<Fig. 8>은 Kobe 지진에서의 수평강성이 1,500kN/m 이고 항복강도가 10kN, 100kN, 1,000kN인 경우의 면진장치 이력거동을 나타낸 것이고, <Fig. 9>는 Kobe 지진에서 항복강도가 50kN이고 수평강성이 1,000kN/m, 2,500kN/m, 5,000kN/m일 때의 면진장치 이력거동을 나타낸 것이다. Nihonkai-Chubu 지진의 경우 Kobe 지진에서의 면진장치 이력거동과 같은 양상을 보였다. <Fig. 8>과 같이 Kobe 지진, Nihonkai-Chubu 지진에서 모두 수평강성이 일정할 때 항복강도가 증가할수록 층 전단력은 증가하며, 에너지 소산량이 감소하면서 탄성거동을 하게 되는 것을 알 수 있다. <Fig. 9>와 같이 항복강도가 일정할 때에는 수평강성이 증가할수록 그래프의 기울기가 증가하는 것을 알 수 있다. 수평강성이 증가하면 면진층의 변형이 감소하게 되어 에너지 소산량도 감소하여 상부 구조물과 하부 구조물이 일체 거동을 하게 된다. 이력그래프와 함께 층간 변위비를 비교해보면 에너지 소산면적이 클수록 면진장치의 효과가 잘 나타나는 것을 알 수 있다.



(a) Yield strength 10kN (b) Yield strength 100kN (c) Yield strength 1,000kN

<Fig. 8> Hysteretic behavior of horizontal stiffness at 1,500kN/m for Kobe earthquake



(a) Horizontal stiffness 1,000kN/m (b) Horizontal stiffness 2,500kN/m (c) Horizontal stiffness 5,000kN/m

<Fig. 9> Hysteretic behavior of yield strength at 50kN for Kobe earthquake

층 전단력은 증가하고, 에너지 소산량이 감소하면서 탄성거동을 하게 되는 것을 알 수 있다. <Fig. 9>와 같이 항복강도가 일정할 때에는 수평강성이 증가할수록 그래프의 기울기가 증가하는 것을 알 수 있다. 수평강성이 증가하면 면진층의 변형이 감소하게 되어 에너지 소산량도 감소하여 상부 구조물과 하부 구조물이 일체거동을 하게 된다. 이력그래프와 함께 층간 변위비를 비교해보면 에너지 소산면적이 클수록 면진장치의 효과가 잘 나타나는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 고층 건물에 적용된 중간층 면진시스템을 설계하고 그에 대한 구조물의 응답을 분석하기 위해 15층 하부에 중간층 면진시스템을 적용한 20층 건물을 모델링하고 면진장치의 항복강도와 수평강성을 변화시키며 상용프로그램으로 해석을 수행하였다. 지진하중은 Kobe 지진, Nihonkai-Chubu 지진을 입력하였다. 각 지진에 대해 면진층 변위와 구조물의 층간 변위비를 구하고 그 관계를 분석하였다. 그에 대한 결론은 다음과 같다.

1) 해석 결과 면진장치의 항복강도와 수평강성이 증가할수록 면진층 변위는 감소하는 것을 알 수 있

었다. 반면 층간 변위비는 항복강도와 수평강성이 증가함에 따라 감소하였다가 증가하는 양상을 보였다. 면진층 변위와 층간 변위비는 서로 반비례 관계를 이루는 것을 알 수 있었다. 즉 면진층에서 변형이 많이 일어날수록 층간 변위비는 감소한다. 그러나 면진층 변위가 너무 커지면 면진장치에 부담이 크게 작용하게 되어 파괴의 위험성이 증가하게 되고, 구조물이 불안정해질 수 있다. 이를 해결하기 위해 항복강도와 수평강성을 증가시켜 면진층 변위를 크게 감소시키면 층간 변위비는 증가하여 구조적인 피해가 발생할 수 있다. 따라서 면진층 변위를 조절하고 층간 변위비를 제어할 수 있는 적절한 항복강도와 수평강성을 선택할 필요가 있다.

2) 면진장치 이력거동의 경우 수평강성이 일정하고 항복강도가 증가할 때에 층 전단력은 증가하고 에너지 소산량이 감소하면서 항복강도가 매우 커지게 되면 탄성거동을 하게 되는 것을 알 수 있었다. 반면 항복강도가 일정하고 수평강성이 증가하게 되면 이력그래프의 기울기가 커지면서 면진층 변위가 감소하는 것을 알 수 있었다. 수평강성이 증가할수록 그래프의 면적이 줄어드는 것을 확인할 수 있는데 이에 따른 에너지 소산량이 감소하는 것으로 판단된다. 에너지 소산량이 감소할수록 구조물은 상하

부 구조물이 일체거동을 하게 되고 층간 변위비가 증가할 것으로 사료된다. 따라서 에너지 소산면적이 클수록 면진효과가 잘 나타나기 때문에 면적을 증가시킬 수 있는 적절한 값을 선택하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

3) 면진층 변위와 층간 변위비의 관계를 알아보고 면진장치의 이력거동을 살펴본 결과, 중간층 면진시스템을 설계할 때에 엔지니어는 시스템의 안전성과 효과가 잘 나타날 수 있도록 면진장치의 항복강도와 수평강성을 적절한 값으로 선택할 필요가 있을 것으로 보인다.

4) 본 연구에서는 강진에 속하는 Kobe 지진과 Nihonkai-Chubu 지진을 사용하여 구조물의 응답을 분석하였다. 최근 국내에서 발생하는 지진들의 규모는 주로 중약진으로 발생하기 때문에 면진장치 특성 변화에 따른 구조물의 응답이 안정적일 것으로 예상되나 보다 더 정확한 결과를 도출하기 위해서는 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

추후 다양한 모델을 대상으로 한 연구와 지진하중 이외의 동적하중을 가한 중간층 면진시스템의 성능 해석 및 면진장치 성능과 경제성을 고려한 면진장치 설계에 관한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2017R1A2B4006226).

References

1. Lee, J. Y., Ju, Y. K., Kim, D. K., & Kim, S. D., "Application of Base Isolation System on the Middle Story of High-Rise Building", Proceeding of Autumn Annual Conference of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.28, No.1, pp.9~12, 2008
2. Kawamura, S., Sugisaki, R., Ogura, K., Maezawa, S., Tanaka, S., & Yajima, A., "Seismic isolation retrofit in Japan", 12WCEE

- 2000, pp.25~33, 2000
3. Hur, M. W., Ann, T. S., Son, J. W., & Kim, C. S., "Construction of Isolation Device for DONG-IL High-Vill New City", Review of Architecture and Building Science, Vol.54, No.5, pp.81~86, 2010
4. Tsuneki, Y., Torii, S., Murakami, K., & Sueoka, T., "Middle-Story Isolated Structural System of High-Rise Building", Proceeding of The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008
5. Hur, M. W., Lee, Y. H., Kim, J. H., Park, C. Y., & Lee, S. H., "Seismic Isolation Effects by the Isolation Period of the Vertically Story-added Remodeling Building", Proceeding of Spring Annual Conference of the Korea Concrete Institute, Vol.29, No.1, pp.705~706, 2017
6. Kim, K. Y., Lee, Y. R., Kim, H. S., & Kang, J. W., "Seismic Response Evaluation of High-Rise Buildings Considering Installation Story of the Mid-Story Isolation System", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.17, No.4, pp.85~92, 2017
7. Korea Professional Construction Newspaper, "Lead Body (LRB) 7.5 Can not resist earthquake", 2017.06
8. Cho, S. G., Yun, S. M., Kim, D. K., & Hong, K. J., "Analyses of Vertical Seismic Responses of Seismically Isolated Nuclear Power Plant Structures Supported by Lead Rubber Bearings", Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol.19, No.3, pp.133~143, 2015
9. Kim, G. C., Kim, S. G., & Kang, J. W., "Application of Mid-story Isolation System for Seismic Response Reducing of Dome Structure", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.16, No.4, pp.37~44, 2016

- Received : December 26, 2017
- Revised : January 09, 2018
- Accepted : January 09, 2018