

주상 복합 구조물에 적용된 중간층 면진 시스템의 성능 검토

Control Performance Evaluation of Mid-Story Isolation System for Residence-Commerce Complex Building

박 광 섭*
Park, Kwang-Seob

김 윤 태**
Kim, Yun-Tae

김 현 수***
Kim, Hyun-Su

Abstract

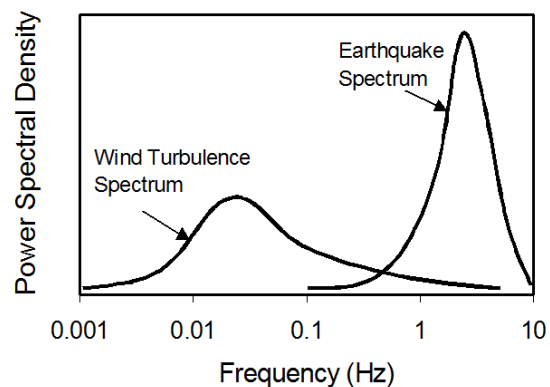
A seismic isolation system is one of the most effective control devices used for mitigating the structural responses due to earthquake loads. This system is generally used as a type of base isolation system for low- and mid-rise building structures. If the base isolation technique is applied to high-rise buildings, a lot of problems may be induced such as the movement of isolation bearings during severe wind loads, the stability problem of bearings under large compression forces. Therefore, a mid-story isolation system was proposed for seismic protection of high-rise buildings. Residence-commerce complex buildings in Korea have vertical irregularity because shear wall type and frame type structures are vertically connected. This problem can be also solved by the mid-story isolation system. An effective analytical method using super elements and substructures was proposed in this study. This method was used to investigate control performance of mid-story isolation system for residence-commerce complex buildings subjected to seismic loads. Based on numerical analyses, it was shown that the mid-story isolation system can effectively reduce seismic responses of residence-commerce complex tall buildings.

Keywords : Residence-commerce complex building, Mid-story isolation system, Seismic response reduction, Efficient analysis method, Vibration control

1. 서론

경주 및 포항 지진으로 인하여 국내도 더 이상 지진의 안전지대가 아니라는 인식이 강해지고 있다. 이에 따라 지진 하중으로부터 구조물을 안전하고 효과적으로 보호하기 위한 연구의 필요성이 더욱 높아지고 있다. 현재 빌딩 구조물에 대한 내진 성능을 보강하기 위한 다양한 방법들이 제안되어 건물에 적용되고 있다. 그 중 면진 장치가 가장 효과적인 지진 응답 제어 시스템 중 하나로 알려져 있다^{1),2)}. 일반적으로 지진 하중의 에너지는 <Fig. 1>에 나타

낸 바와 같이 풍하중에 비하여 진동 대역이 높은 영역에 집중되어 있으므로 고층 건물보다 중저층 건물에 더 큰 피해가 발생할 위험이 있다.



(Fig. 1) Dynamic characteristics of wind and earthquake loads

중저층 건물의 피해를 줄이기 위해서는 지진 하중에 의하여 유발되는 건물의 가속도를 감소시키는

* 정회원, (주)보루 이사
Boru E&C
** 정회원, (주)보루 대표이사, 공학박사
Boru E&C
*** 교신저자, 정회원, 선문대학교 건축사회환경공학부 부교수,
공학박사
Div. of Architecture, Architectural & Civil Engineering,
Sunmoon University
Tel: 041-530-2315 Fax: 041-530-2839
E-mail: hskim72@sunmoon.ac.kr

것이 중요한데 면진 시스템은 지반과 구조물 사이를 격리시키는 역할을 한다. 면진 장치가 설치된 중저층 구조물은 지반에 고정된 구조물에 비하여 고유 진동수가 낮아지게 되므로 <Fig. 1>에 나타낸 지진 하중의 에너지가 모여 있는 높은 진동수 대역을 피할 수 있다. 이렇게 중저층 건물을 대상으로 개발된 면진 시스템이 고층 건물에 적용될 때에는 여러 가지 문제가 발생할 수 있다. 일반적으로 고층 구조물의 고유 진동수가 중저층 건물에 비하여 낮기 때문에 면진 장치를 기초와 지반 사이에 설치할 경우 면진 장치에서 발생하는 수평 변위가 매우 커지게 된다. 또한 고층 건물 자체의 높은 자중 때문에 발생하는 큰 축력과 함께 지진 하중에 의한 전도 모멘트가 증가하여 기초 면진 시스템에서 인장력이 유발될 수 있다. 면진 시스템이 고층 건물에 기초 면진의 형태로 적용될 때 발생하는 이러한 문제 때문에 최근에는 고층 건물을 부분적으로 분리하여 면진 기술을 적용하는 중간층 면진 시스템이 적용되고 있다³⁻⁵⁾. <Fig. 2>에 나타낸 일본 도쿄 소재 15층 규모 Iidabashi First 빌딩은 10층에 면진 시스템이 설치되어 있다.



<Fig. 2> Iidabashi First Building in Tokyo

중간층 면진 시스템이 고층 건물에 적용될 때에는 구조물의 층수 및 형태와 함께 동적 특성을 분석하여 최적의 위치에 설치된다. 중간층 면진 시스템의 동역학적 개념은 동조 질량 감쇠기의 확장된 개념으로 설명될 수 있다⁶⁾. 다만 기존의 일반적인 동조 질량 감쇠기에 비하여 격리되는 상부 구조물의

질량이 매우 크다는 점이 다르다.

우리나라는 높은 땅값 및 인구 밀도와 사회·경제적인 이유에 의하여 고층 주상 복합 건물이 많이 건설되고 있다. 일반적으로 상가 용도의 저층부는 골조 구조 시스템이 사용되고, 주거 용도의 상층부는 전단벽식 구조 시스템이 사용된다. 이와 같이 전단벽식 상부 구조물과 골조 하부 구조물이 결합된 일반적인 주상 복합 건물을 <Fig. 3>에 나타내었다.



(a) Nonhyun I-Park (b) Incheon Prime World
<Fig. 3> Residence-commerce complex

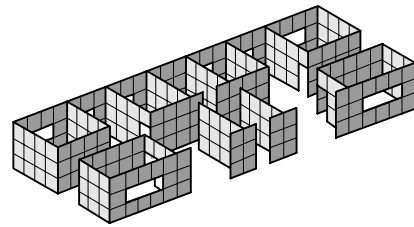
그림에서 볼 수 있듯이 전혀 다른 구조적 특성을 가진 두 건물이 경제적 필요에 의하여 수직적으로 연결된 경우 구조적인 측면에서는 단점이 더 많이 부각되는 수직 비정형 구조물로 평가된다⁷⁾. 따라서 고층의 주상 복합 빌딩 구조물에 중간층 면진 시스템이 적용된다면 하부의 상가 골조부와 상부의 주거용 내력벽 구조 시스템이 만나는 위치에 설치하여 상이한 두 구조 시스템을 격리시킴으로써 수직 비정형성을 저감시키는 것이 바람직할 것이다. 수직 비정형 건물에 중간층 면진 시스템이 적용될 때 발생하는 구조물의 다양한 동적 특성을 정밀하게 분석하고 중간층 면진 시스템과 수직 비정형 구조물의 상호 작용을 고려한 최적 설계를 수행하기 위해서는 효율적인 해석 기술의 개발과 성능 분석이 필요하다.

이러한 배경을 바탕으로 본 연구에서는 주상 복합 상부의 내력벽 구조물과 하부의 골조 구조물의 동적 특성을 정확하게 표현할 수 있는 단순화 된 응

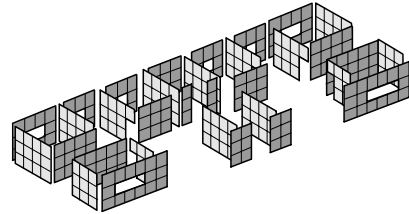
축 모델을 이용한 효율적인 해석 기술을 사용하였다. 이때 수퍼 요소와 부분구조법을 이용하여 구조물을 모형화 하였다. 이러한 해석 기술을 이용하여 주상 복합 건물에 적용된 중간층 면진 시스템의 지진 응답 저감 성능을 검토하였다.

2 상부 벽식 구조물의 효율적인 해석

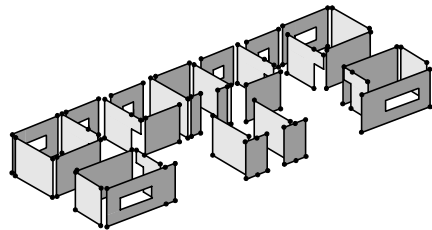
국내에서 주거 용도로 건설되는 내력 벽식 아파트는 층마다 동일한 입면과 평면이 반복되는 특징을 가지고 있다. 이러한 특징을 이용하여 반복적으로 사용되는 동일한 형태의 벽체를 수퍼 요소로 생성하고 이를 조합한 세대를 부분 구조로 구성하면 전체 벽식 아파트 구조물을 매우 효과적으로 모형화할 수 있다⁸⁾. 이와 같은 모형화는 전체 벽식 구조물을 유한 요소로 세분한 모델에 비하여 매우 효율적인 해석을 수행할 수 있다. 부분구조법을 사용하여 벽식 주거용 구조물의 벽체를 모형화하는 방법을 <Fig. 4>에 나타내었다. 그림과 같이 우선 상부 벽식 구조물 한 층의 벽체를 판 요소⁹⁾를 사용하여 세분 모델로 모형화한다. 이렇게 작성된 세분 모델을 <Fig. 4 (b)>와 같이 수퍼 요소를 생성하기 위한 단위 블록으로 분리한다. 일반적으로 벽식 구조물은 대칭의 형태로 설계되기 때문에 분리된 블록은 동일한 형태가 여러 군데 발생하게 된다. 구조 형태가 동일한 전단벽은 하나의 수퍼 요소를 생성한 후 반복적으로 사용할 수 있다. 각각의 벽체, 상하부 벽체 및 슬래브와 연결하기 위한 절점을 제외하고 나머지 절점의 자유도를 행렬 응축 기법¹⁰⁾에 의해 소거하면 <Fig. 4 (c)>에 나타낸 바와 같이 여러 개의 수퍼 요소를 얻을 수 있다. 이렇게 생성된 수퍼 요소를 조합하면 <Fig. 4 (d)>와 같이 한 층의 벽체를 구성하는 부분 구조를 만들 수 있다. 수퍼 요소와 부분 구조를 사용하여 슬래브를 모형화하는 과정을 <Fig. 5>에 나타내었다. <Fig. 5 (c)>에서는 서로 대칭인 수퍼 요소 하나를 생성한 후 다른 하나는 자유도 위치 변환으로 쉽게 얻을 수 있다.



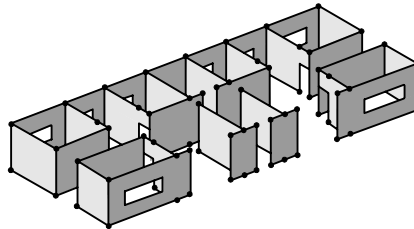
(a) Refined mesh of shear wall



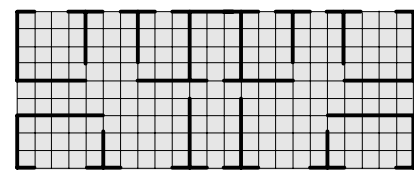
(b) Blocks for shear walls



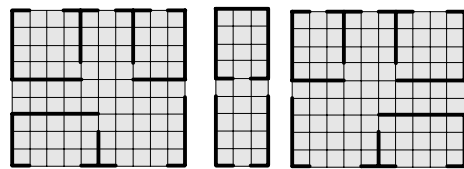
(c) Generation of super elements



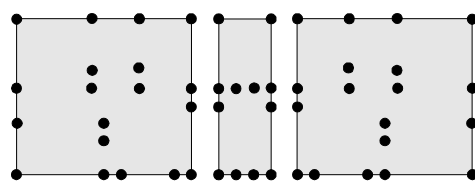
(d) Generation of substructure
<Fig. 4> Substructure for shear walls



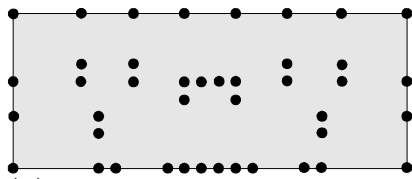
(a) Refined mesh of slab



(b) Division of floor slab



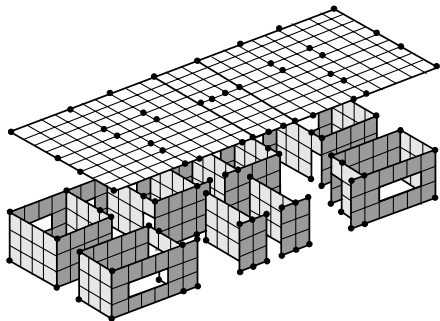
(c) Generation of super elements



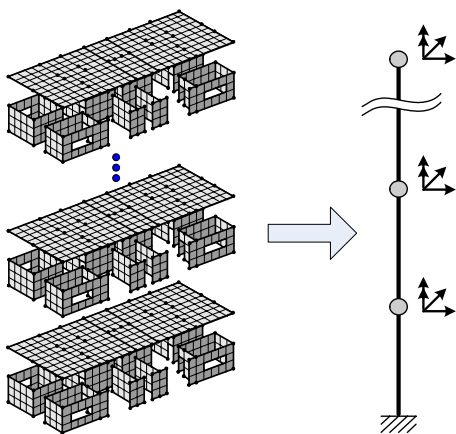
(d) Generation of substructure
 <Fig. 5> Substructure for floor slab

이러한 방법으로 생성한 전단벽 및 슬래브를 위한 부분 구조를 <Fig. 6>과 같이 조합하면 기준층을 위한 부분 구조를 생성할 수 있다.

앞서 생성한 전단벽 부분 구조와 슬래브 부분 구조간의 공유 절점을 최소화하여 기준층을 모형화하고, 모형화된 기준층을 상부 구조물의 전체 층 수 만큼 쌓아올린다. 층수가 변함에 따라 달라지는 전단벽 두께에 대한 비율을 고려하여 강성 행렬을 변경하면 어렵지 않게 해당 층의 강성 행렬을 구할 수 있다. 상부 벽식 구조물의 전체 층을 쌓아올린 후에는 <Fig. 7>과 같이 층당 3개의 자유도를 갖는 응축된 막대 모델을 생성한다.



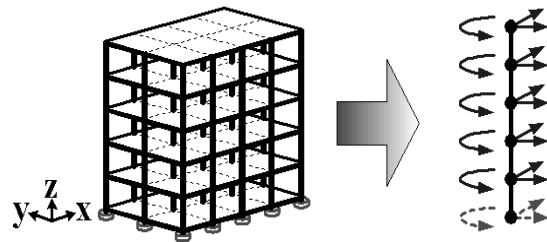
<Fig. 6> Substructure for typical story



<Fig. 7> Generation of lumped stick model

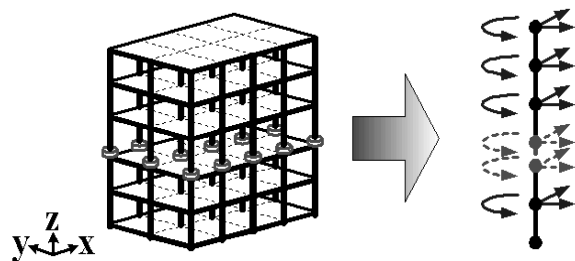
3. 하부 골조 및 중간 면진층 모델

본 연구에서는 주상 복합 건물의 하부 구조물인 골조 부분을 모형화하기 위해서 일반적인 보 요소를 사용하여 기둥과 보 부재를 모형화한다. 그 후 슬래브 효과를 강막 가정을 통해서 고려하고 각 절점의 수직 방향 이동 자유도와 수평 방향의 두 회전 자유도는 행렬 응축 기법을 이용해서 소거한다. 이러한 과정을 거치면 <Fig. 8>에 나타난 바와 같이 각 층에서 평면의 이동과 회전을 고려하는 3개의 자유도만으로 표현되는 응축된 막대 모델로 변환될 수 있다.



<Fig. 8> Condensed stick model for frame

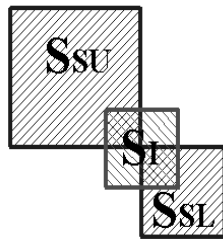
본 연구에서 대상으로 삼고 있는 주상 복합 구조물의 수직 비정형성을 저감시키고 지진 응답을 효과적으로 줄이기 위하여 상부 벽식 구조물과 하부 공조 구조물의 사이에 면진층을 삽입한다. 이러한 중간층 면진 구조물의 경우에는 면진 장치 설치 부분에 수평 이동 및 회전에 대한 자유도만 고려하고 나머지 수직 및 수평 방향 두 자유도를 생략해도 구조물의 전체 거동을 표현하는데 무리가 없다.



<Fig. 9> Stick model for mid-story isolation

앞서 구한 상부 벽식 구조물을 나타내는 막대 모델과 하부 골조 구조물을 나타내는 막대 모델은 층당 동일한 3개의 자유도를 가지고 있으므로 직접

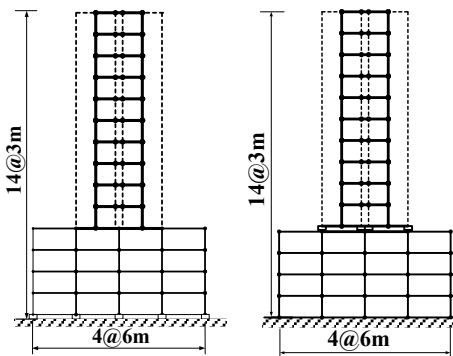
연결할 수 있지만 본 연구에서는 중간층 면진 시스템의 강성 및 감쇠가 고려되어 연결한다. 각각 구성된 상부 구조물의 강성 행렬 SSU와 하부 구조물의 강성 행렬 SSL에 대하여 <Fig. 10>과 같이 면진 장치의 자유도에 해당하는 부분에 면진 장치의 강성 행렬 SI를 조합하여 전체 구조물의 강성 행렬을 구성한다. 최종적으로 구성된 해석 모델은 각 층에서 평면의 이동과 회전을 고려하는 3개의 자유도로만 구성되어 매우 효율적이다.



<Fig. 10> Generation of stiffness matrix

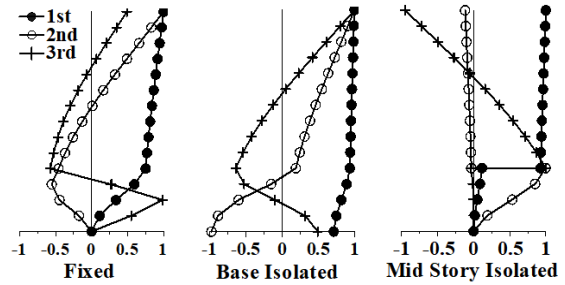
4. 주상 복합 건물에 대한 중간층 면진 시스템의 효율성 검토

본 연구에서는 간단한 2차원 주상 복합 구조물에 대한 중간층 면진 시스템의 효율성을 검증한 후 더 큰 규모의 3차원 주상 복합 구조물에 대한 평가를 수행하였다. 첫 번째 해석 모델은 <Fig. 11>에 나타난 바와 같이 전체 14층 건물로서 4층의 하부 골조 구조물과 10층의 상부 벽식 구조물로 구성되어 있으며 그 사이에 면진층이 삽입되었다.



(a) Normal model (b) Mid-story isolation model
<Fig. 11> 14-story example model

El Centro (1940, NS) 지진 하중을 사용하여 시간 이력 해석을 수행하였다. 고유치 해석을 수행하여



<Fig. 12> Mode shapes of each model

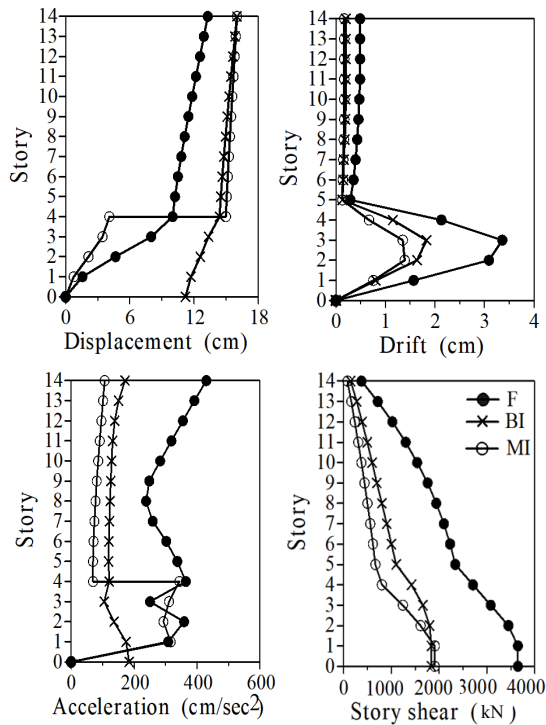
<Table 1> Natural periods (Unit: sec)

Mode	Fixed	Base isolated	Mid-story isolated
1	1.40(83.13%)	2.86(98.76%)	3.19(51.30%)
2	0.44(5.57%)	0.70(1.18%)	0.79(37.84%)
3	0.24(6.86%)	0.39(0.05%)	0.37(0.00%)

얻은 모드 형상과 질량 참여율 및 고유 진동 주기를 <Fig. 12>와 <Table 1>에 나타내었다.

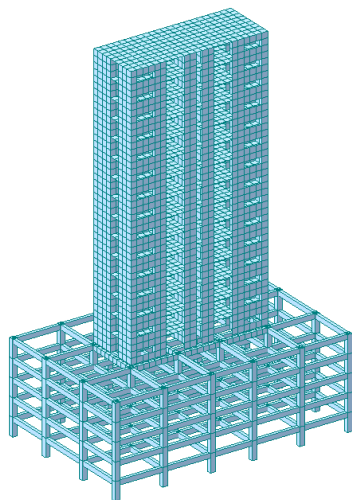
수치 해석을 수행한 후 층별 변위, 가속도, 층 전단력 및 층간 변위를 <Fig. 13>에 나타내었다. 그림에서 중간층 면진 시스템이 적용된 구조물의 최대 층간 변위를 살펴보면 구조물의 하부와 상부 모두 최대 층간 변위가 면진 시스템이 적용되지 않은 밀면 고정 구조물에 비하여 크게 줄어든 것을 확인할 수 있다. 면진 장치의 전단 변형율은 기초 면진 시스템을 적용한 경우와 중간층 면진 시스템을 적용한 경우가 각각 31%와 30%로 나타났다. 절대 가속도의 경우 하부 구조물에서는 큰 감소가 없었으나 상부 구조물에서는 기초 면진 시스템을 적용한 경우 이상의 수준으로 응답이 감소하였다. 예제 구조물의 층 전단력 또한 면진 장치를 사용하지 않은 경우에 비하여 큰 폭으로 감소하였고 밀면 전단력은 지반 고정 구조물에 비하여 52%로 줄어들었다.

일반적으로 주상 복합 건물에서는 대부분의 횡 변위가 하부 골조 구조물에서 발생한다. 기초 면진 또는 중간 면진 시스템을 적용하면 기존의 하부 횡 변위를 감소시켜 골조의 소성힌지 발생을 방지할 수 있으며, 전달되는 지진력이 감소되므로 경제적인 구조물의 설계가 가능하다.



〈Fig. 13〉 Analysis results of 14-story building

앞 절에서 제안된 해석 기법을 적용하여 3차원 주상 복합 구조물에 대한 중간층 면진 시스템의 지진 응답 저항 성능을 분석하였다. 예제 구조물의 3차원 투시도를 〈Fig. 14〉에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 예제 구조물은 총 20층 건물로서 5층의 하부 골조 구조물과 15층의 상부 벽식 구조물로 구성되어 있다.



〈Fig. 14〉 20-story 3D example structure

중간층 면진 시스템은 5층과 6층 사이 구조 시스템이 변하는 부분에 설치된다. 중간층 면진 시스템을 구성하기 위해 사용한 LRB의 특성치를 〈Table 2〉에 나타내었으며 총 30개를 면진층에 설치하였다. 본 예제에 대해서는 Northridge 지진 하중(1994)을 2방향으로 가하여 시간 이력 해석을 수행하였다. 지진 하중에 의한 구조물의 피해를 예측하기 위해서는 층간 변위비를 평가하는 것이 중요하므로 20층 주상 복합 구조물에 대하여 중간층 면진 시스템을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우의 층간 변위비를 〈Table 3〉에 비교하였다. 일반적으로 지진 하중에 의한 허용 층간 변위비는 0.015를 사용하므로 이를 기준으로 평가하였다.

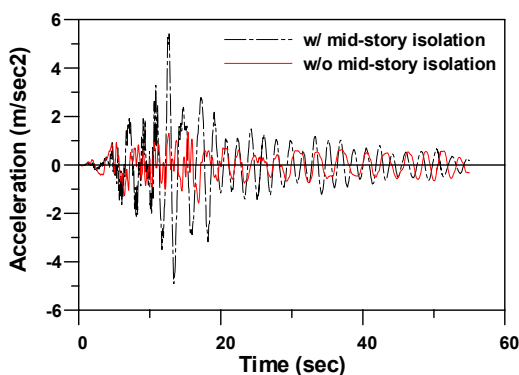
〈Table 2〉 LRB properties

Product height (mm)	380.8
Vertical stiffness (kN/m)	2,793,000
Horizontal stiffness (kN/m)	1,653
Yield strength (MPa)	15
Allowable deformation (mm)	300

〈Table 3〉 Peak story drifts

Story	w/o MI	w MI
20F	0.0014	0.0001
19F	0.0015	0.0001
18F	0.0015	0.0001
17F	0.0015	0.0001
16F	0.0015	0.0001
15F	0.0015	0.0001
14F	0.0015	0.0001
13F	0.0015	0.0001
12F	0.0014	0.0001
11F	0.0013	0.0001
10F	0.0013	0.0001
9F	0.0012	0.0001
8F	0.0011	0.0001
7F	0.0010	0.0001
6F	0.0009	0.0001
5F	0.0215	0.0146
4F	0.0139	0.0101
3F	0.0108	0.0085
2F	0.0134	0.0076
1F	0.0126	0.0063

표에 나타낸 바와 같이 중간층 면진 시스템을 사용하지 않은 경우 상부 벽식 구조물과 만나는 5층에서 허용 층간 변위비를 크게 뛰어 넘는 0.0215의 층간 변위비를 나타내므로 구조물의 안전성에 문제가 생길 것으로 판단할 수 있다. 5층 외에도 하부 골조 구조물의 모든 층에서 층간 변위비가 0.01을 넘는 결과를 나타내고 있다. 상부 구조물은 전단 벽식 구조물로서 층간 변위가 매우 작은 0.0009에서 0.0015의 값이 나타난다. 중간층 면진 시스템을 적용한 경우에는 전 층에 걸쳐서 허용 층간 변위비 이하로 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 가장 큰 층간 변위비가 나타나는 5층의 값을 비교해보면 중간층 면진 시스템을 사용함으로써 약 32%의 응답을 저감시킬 수 있었다. 중간층 면진 시스템을 주상 복합 구조물에 적용하면 그 외의 모든 층에서 층간 변위비를 줄일 수 있었고 1층의 경우 약 50%까지 대폭 줄일 수 있었다. 지진 하중이 구조물에 작용할 경우 구조물의 안정성과 사용성을 평가할 수 있는 가속도 응답을 검토하기 위하여 <Fig. 15>에 비교 대상 모델의 최상층 가속도 응답 시간 이력을 장변 방향에 대하여 비교하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 중간층 면진 시스템을 적용하면 상부 벽식 구조물의 전반적인 가속도 응답을 대폭 줄일 수 있었다. 최대 가속도 응답은 중간층 면진 시스템을 적용하지 않은 경우와 적용한 경우에 각각 5.41m/s^2 과 1.58m/s^2 으로 나타났다. 즉 주상 복합 구조물에 중간층 면진 시스템을 적용하여 상부 벽식 구조물의 최대 가속도를 70% 이상 줄일 수 있었다.



<Fig. 15> Roof acceleration time history

5. 결론

본 연구에서는 상부 벽식 구조물과 하부 골조 구조물로 구성된 수직 비정형 주상 복합 구조물의 지진 응답을 저감시키기 위하여 중간층 면진 시스템을 적용하였으며 지진 응답 제어 성능을 검토하였다. 이때 중간층 면진 시스템은 전혀 다른 두 구조 시스템인 벽식 구조물과 골조 구조물의 접합부에 설치하였다. 면진층이 삽입된 주상 복합 구조물의 지진 응답을 검토하기 위해서는 비교적 복잡한 고유치 해석 및 시간 이력 해석이 필요하므로 전단 벽식 구조물과 골조 구조물의 동적 거동을 효과적으로 표현할 수 있는 해석 모델을 적용하였다. 이때 기준층이 반복되는 특성을 이용하여 수퍼 요소 및 부분구조법을 사용하였다. 역사 지진 하중을 예제 구조물에 가하고 개발된 해석 기법을 적용하여 주상복합 구조물에 적용된 중간층 면진 시스템의 지진 응답 제어 성능을 검토하였다. 수치 해석 결과, 중간층 면진 시스템은 벽식 구조물과 골조 구조물을 분리시켜 수직 비정형성을 완화함으로써 연결된 구조물에 비하여 지진 응답을 효과적으로 저감시킬 수 있었다. 중간층 면진 시스템을 통해서 지진 하중에 의한 구조물의 피해에 직접적인 영향을 미치는 층간 변위비와 층 전단력 뿐만 아니라 사용성과 안정성에 영향을 미치는 가속도 응답도 매우 효과적으로 저감시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 검토한 예제 구조물 및 면진 장치만으로는 일반화된 평가를 내리기가 어렵기 때문에 추후 다양한 예제 구조물 및 중간층 면진 시스템에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 (주)보루의 지원으로 2018년에 수행된 “중간층 면진시스템 설계기술 개발”과제의 연구 성과 물임을 밝히며 이에 감사드립니다.

References

1. Naeim, F., & Kelly, J. M., "Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice", Wuley, pp.1~304, 1999.
 2. Kelly, J. M. (1999). The current state of base isolation in the Unite States. Proceedings of the Second World Conference on Structural Control, Japan, pp.1043~1052
 3. Kang, J. W., Kim, T. H., & Kim, H. S., "Performance Evaluation of Vibration Control of a Smart Top-Story Isolation System", Journal of Korean Association for Spacial Structures, Vol.10, No.3, pp.49~56, 2010
 4. 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
 5. Sueoka, T., Torii, S., & Tsuneki, Y. (2004). The Application of Response Control Design using Middle-Story Isolation System to High-Rise Building. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada
 6. Tsuneki, Y., Torii, S., Murakami, K., & Sueoka, T. (2008). Middle-Story Isolated Structural System of High-Rise Building. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, China
 7. Zuo, Y. (2015). Study on Design of High-Rise Commercial Residential Complex. Proceedings of the 2015 International conference on Applied Science and Engineering Innovation, China
 8. Kim, H. S., Lee, D. G., & Kim, C. K., "Efficient three-dimensional seismic analysis of a high-rise building structure with shear walls", Engineering Structures, Vol.27, No.6, pp.963~976, 2005
 9. Weaver, W., Lee, D. G., & Derbalian, G., "Finite element for shear walls in multistory frames", Journal of the Structural Division ASCE, Vol.107, pp.1365~1369, 1981
 10. Weaver, W., & Johnson, P. R., "Structural Dynamics by Finite Elements", 1st ed., Prentice Hall, pp.1~591, 1987.
- Received : July 03, 2019
 - Accepted : July 15, 2019