

지진시 저층건물 면진구조의 동적 거동해석

문병영* · 강경주* · 강범수** · 김계수***

Dynamic Analysis of Base-Isolated Low-level Structures Under Earthquake Excitation

Byung-Young Moon, Gyung-Ju Kang, Beom-Soo Kang and Kye-Soo Kim

Key Words: Seismic Isolation(면진), Rubber Bearing(고무베어링), Vibration of Building(건물진동), Elastomeric Bearing Test(면진베어링 강성시험), Earthquake Response(지진응답)

Abstract

This paper presents an analytical evaluation of the effect of motion on seismic responses of base isolated low-level building and experimental studies to evaluate isolation performances of a rubber bearing. Dynamic responses induced by earthquake were evaluated by response analyses, taking the rubber bearing of the base isolation devices into account. In the experiment, vibration tests were carried out using a model for rubber bearings as isolation devices against earthquake in order to investigate the isolation performances of the rubber bearings. Several kinds of rubber bearing for base isolated low-level building against earthquake are examined. As a result, it is shown that the effect of the motion on the response of the building and the base response is well controlled from a seismic design standpoint.

1. 서론

1990년대 이후 고베지진, 터키지진, 대만지진 등 전세계적으로 강지진의 발생빈도가 증가하고 있으며 이에 따라 세계적으로 지진에 대한 건물의 내진 설계에 대한 관심이 높아지고 있다^(1~3). 국내에서도 건교부에서 1998년부터 교량, 철도 등의 중요 시설물에 내진 설계기준을 구체적으로 발표하는 등 내진 설계의 필요성에 증가하고 있다. 또한 1999년 발생한 터키, 그리스, 대만 등의 지진에서 2~3층의 일반건물에 대한 피해가 막대하였으며, 90%이상의 사상자가 이와 같은 일반주택에서 발생하였음을 볼 때 중요 시설물 이외에 일반 건물에 대한 내진 설계도 필요하다.

면진구조는 면진베어링과 상부구조로 이루어져 있다. 면진구조는 일본의 阪伸·淡路대지진에서

면진설계된 교량에 대부분 손상이 가지 않음을 통해 그 우수성이 입증되었고, 이에 대한 연구가 교량용과 건물용에 대하여 활발히 수행되고 있다.

면진구조물에 대한 연구로는 Kawashima가 교량의 내진을 연구하였고⁽⁴⁾ 海野 壽 등은 2000gal까지의 대지진시 면진구조물의 동적거동을 연구하였다⁽⁵⁾. 小倉柱治 등은 고층건물의 상부구조에 면진층을 넣어서 건물의 동적거동을 해석하였다⁽⁶⁾. 일본에서는 이같은 연구가 있으나 우리나라에는 연구가 많지 않았다. 또한, 한반도의 지진은 지역에 따라 다르나 최대지반 가속도가 $0.20g$ ⁽⁷⁾로서 우리나라 실정에 맞는 면진구조의 동적거동에 대한 해석의 필요성이 있다.

본 연구는 실험에 의해 구해진 베어링의 전단 탄성계수를 이용하여 3층 건물에 대하여 지진동에 대한 응답해석을 수행하였다. 적용된 지진파는 1940년 미국에서 발생한 El Centro NS 지진파의 실측 데이터이며, 해석을 통하여 지진동시 비면진 구조물과 면진 구조물의 응답을 비교 분석하여 면진성능에 대해 평가하고 그 거동에 대해

* 부산대학교 항공우주공학과 대학원

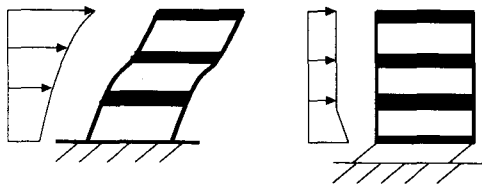
** 부산대학교 항공우주공학과

*** 동일고무벨트(주)

여 살펴보았다.

2. 해석모델

면진 구조는 상부건물과 면진층으로 구성되어 있다. Figure 1은 지진시 면진구조와 비면진 구조의 동적 특성을 나타내고 있다. 비면진 구조의 경우는 지진 에너지가 건물에 전달되어 많은 변형을 동반하게 되지만, 면진구조의 경우에는 지진 에너지를 면진층이 흡수하여 상부건물에는 비교적 적은 상대변위를 보인다. 지진시 면진구조는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 면진층에 변형이 집중되고, 상부구조는 강체에 가까운 거동을 하는 구조이다. 따라서 상부건물은 Fig. 2와 같이 집중질량과 탄성영역을 가지는 구조로 모델링 할 수 있다. Fig. 2의 M_i 는 각층의 질량, K_i 는 각층의 탄성강성을 나타낸다. 여기서, i 는 각 층을 나타낸다. 일반주택과 같은 저층건물에 대해서 해석하기 위해 건물 층수를 3층으로 정하였고, 집중질량과 집중강성을 주었으며 주택용건물 사이드로 $10m \times 13.5m$ 를 선정하였다. 그리고, 면진층은 Fig. 3에서와 같이 면진베어링을 배치하게 된다. 베어링 배치는 지반과 상부구조물 사이에 충분한 유동층 형성을 위해 Fig. 3과 같이 12개를 배치를 하였다.



(a) 비면진구조물 (b) 면진구조물

Fig. 1 Deformation characteristics of building

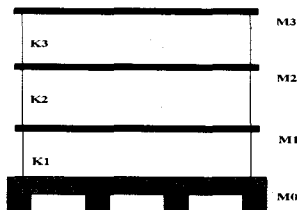


Fig. 2 Model of isolator

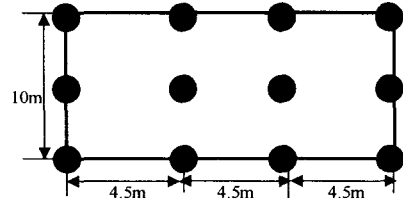


Fig. 3 Arrangement of rubber bearings

3. 해석방법

3.1 실험 및 결과

면진 베어링의 수평강성을 구하기 위해서 실험을 수행하였다. 실험장치 및 실험장면은 Fig. 4와 같고, 이 실험의 도식적 표현은 Fig. 5에 보였다. 실험은 실제 베어링의 1/4 축소모델에 대하여 수행하였으며 정현파(sine)파 형태의 수평변위를 가하였다. 실험은 가진주파수, 가진변위에 따라 Table1에서 나타난 바와 같이 14가지의 경우에 대하여 수행되었으나, 실험 결과 중 응답해석에 적용하기 위하여 지배적인 특성을 보이는 결과를 선택하였다. 적용된 결과는 수직하중 21632.6kgf 때 상온(23. C)에서 주파수 0.01Hz, 최대 전단변형률 1.5(59mm)를 가지는 사인파형태의 수평 변위를 3사이클 가했을 때의 결과이다.

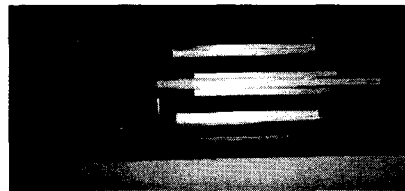


Fig. 4 Experimental tool

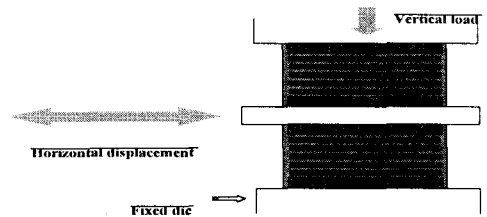


Fig. 5 Schematic expression of experiment

Table 1 Experimental conditon

Shear strain (γ) \ Frequency	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
0.01Hz	○	○	○	○	○	○
0.50Hz	○	○	○	○	○	○
0.17Hz				○		
0.33Hz				○		

Table 2 Experimental result

	1st cycle	2nd cycle	3rd cycle	Average value
Shear strain (γ)	1.53	1.53	1.53	-
Shear modulus (G) (kgf/cm ²)	9.62	8.91	8.62	9.05

Table2는 응답해석에 적용된 베어링 실험 결과를 나타낸다. 실험 결과로 전단탄성계수값 9.05kgf/cm²를 구하였다. 본 논문에서는 평균 전단탄성계수를 9kgf/cm²로 가정하여 응답해석에 적용하였다. 또한 수평 강성은 1652.4kgf/mm 로 결정되어진다.

3.2 면진구조의 운동방정식

면진구조는 면진베어링으로 이루어져 있는 면진층과 상부건물로 이루어져 있다. 면진베어링은 고무와 철판의 적층으로 이루어져 있다. 건물의 상부 구조물은 콘크리트와 철골로 이루어져 있다. 지진시에 탄성의 범위를 넘어서는 하중을 받을 때 콘크리트와 철골 순으로 항복변형을 일으키게 된다. 따라서 상부건물에 대한 비선형 모델로서는 bilinear로 표현할 수 있다. 본 논문에서는 상부구조에 대해서 bilinear로 모델링하여 보다 정확한 지진 응답해석을 수행하고자 한다.

Figure 7과 같이 전단형탄소성 모델의 지진응답시의 i 층과 $i-1$ 층간의 전단력을 $Q_i = k_i(x_i - x_{i-1}) + y_i Q_i$ 로 하고, 감쇠계수를 C_i 로 둔다.

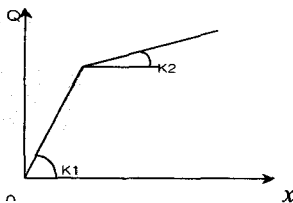


Fig. 6 Bilinear restoring force

여기서, k_i 및 $y_i Q_i$ 는 복원력 특성에 대응해서 각 시각에서 변화하는 수치로서, y 축에 층전단력이고, x 축에 층간 변형을 취한 경우의 구배와 y 축절편에 대응한다. 응답해석에 대한 1단계의 사이에는, 층 전단력과 층간 변형의 관계가 이 직선상에 있는 것으로 한다. 또, 감쇠상수 C_i 는 상수로 한다. 이때, i 층의 진동 조합식은 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned}
 & m_i \ddot{x}_i + c_i (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) + c_{i+1} (\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1}) \\
 & + k_i(x_i - x_{i-1}) + k_{i+1}(x_i - x_{i+1}) + y_i Q_i - y_{i+1} Q_{i+1} \\
 & = -m_i \ddot{y}_0 \quad (i=1 \sim n)
 \end{aligned} \tag{1}$$

(1)식을 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$M(\ddot{x}) + C(\dot{x}) + k(x) + H y Q = -M E(\ddot{y}_0) \tag{2}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 \{x\} &= \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad yQ = \begin{pmatrix} yQ_1 \\ \vdots \\ yQ_i \\ \vdots \\ yQ_n \end{pmatrix} \quad H = \begin{pmatrix} 1 & -1 & & & \\ & & 1 & -1 & \\ & & & & \ddots \\ & & & & & 1 & -1 \\ & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & 1 \end{pmatrix} \\
 E &= \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad M = \begin{pmatrix} m_0 + m_1 & & & & \\ & m_1 & & & \\ & & m_i & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & m_n \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

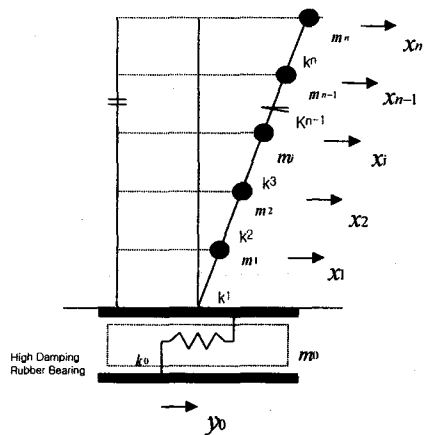


Fig. 7 Electro-plastic model

약하는 유용한 수단이다. 본 논문에서는 가속도 비교방법과 전단력 비교방법을 비교하였다. Figure 8은 면진구조물과 비면진 구조물의 각 층별 가속도를 나타낸 것이다. 주기가 짧고 진폭이 크게 나타나는 것이 비면진 구조물의 가속도 응답이고, 주기가 길고 규칙적으로 나타나는 것이 면진 구조물의 가속도 응답이다. 면진 구조물의 가속도는 1층부터 상부층은 거의 비슷한 주기와 진폭을 보이고 있다. 상대적 움직임이 거의 없다는 것을 알 수 있으며, 비면진 구조물에서는 위층으로 갈수록 점점 큰 가속도를 보인다. 짧은 주기를 가진 큰 진폭의 진동이 계속되므로 건물의 손상이 예상된다.

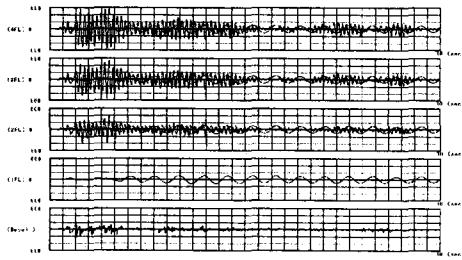


Fig. 8 The comparison of acceleration response

Figure 9는 면진구조와 비면진 구조의 각 층별 전단력을 비교한 것이다. 주기가 짧고 전단력이 크게 나타나는 것은 비면진 구조이고, 주기가 길고 전단력이 작게 나타나는 것은 면진 구조물의 전단력이다. 비면진 구조물의 전단력은 아래층에서 전단력이 크게 나타나고 있고 위층으로 갈수록 줄어든다. 건물 아래부분에 강한 전단력이 가해지므로 지진시 저층에서 파괴가 일어날 가능성이 높다는 것을 알 수 있다. 특히 면진구조물은 7초 이내의 강한 전단력을 막아 줌으로써 저층의 파괴를 막는 역할을 하는 것을 예상 할 수 있다.



Fig. 9 The comparison of shear force

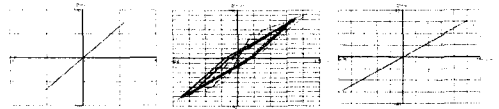
Table 5는 건물의 복원력 특성치이다.

Figure. 10의 (a),(b)는 각각 bilinear로 해석했을 때, 복원력 특성을 나타낸 것이다.

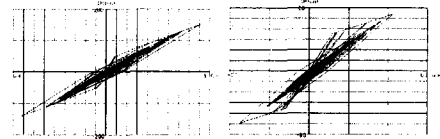
Table 5 Restoring force of building

Restoring force	Posion (Store)	Qy1 (ton)	k2/k1	Qy2 (ton)	k3/k1
linear	2~3	35	0.2	0	0
	1~2	50	0.2	0	0

비면진 일 때는 2층과 3층에서 비선형복원력 특성을 나타낸다. 면진에서는 2층에서 비선형 복원력 특성을 나타낸다. 이를 통해서 비선형 해석을 통한보다 정확한 면진구조의 동적특성의 해석을 수행할 수 있다.



(a) isolated



(b) unisolated building

Fig. 10 Nonlinear response

4.4 최대변위 및 전단 편향비교

건물의 동적거동을 최대변위와 전단편향을 통해 파악하였다. Table 6는 지반의 움직임에 대한 각 층의 상대변위를 나타낸 것이다. 지반이 8.595(cm) 움직였고 면진층이 11.019(cm)의 전단변형을 함으로써 지진에너지를 흡수하여 건물에 전달되는 것을 막고 있다. 1층으로부터 4층까지의 상대변위는 면진 건물에서 0.387(cm)이고 비면진 건물에서는 0.744(cm)이므로, 면진층에 의해 상부건물의 상대변위를 52%로 줄일 수 있었다. 따라서 면진층의 효과를 확인 할 수 있었다.

Table 6 The comparison of relative displacement

층	면진 건물(cm)	비면진 건물(cm)
4	11.406	1.568
3	11.363	1.378
2	11.233	0.824
1	11.019	8.595
0	8.595	

Figure 11은 면진건물과 비면진 건물의 최대 전단편향비교이다. 면진건물은 면진층에서 10.526(cm)의 변위를 보이고 있다. 상부구조는 0.3(cm) 이내의 작은 변위를 보이고 있다. 반면에 비면진 건물은 1층과 2층사이의 변형이 0.81(cm)로서 면진건물의 같은 위치에서의 변형 0.2(cm)에 비해서 4배의 변형이 있다. 따라서 면진의 효과를 알 수 있다.

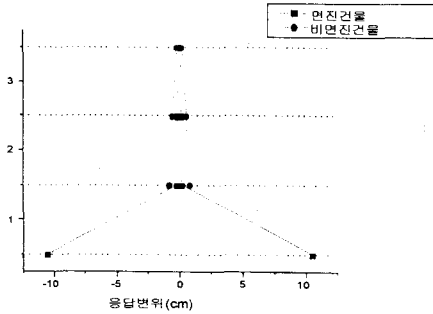


Fig. 11 The comparison of maximum shear deflection

5. 결론

비선형으로 모델링된 면진구조물의 상부구조와 면진구조로 나누어서 각각에 대한 동적 응답을 구하여 면진의 효과를 실험과 시뮬레이션으로 검증하였다. 면진건물의 동적 거동을 해석하기 위해 고무의 전단탄성계수를 실험에 의해 구했고 저층 건물에 대한 지진의 동적 거동의 해석에 실험치를 이용하여 면진의 기능이 잘 발휘되고 있음을 확인했다. 해석에는 실제 지진 데이터를 이용하였으며 한반도의 최대지반가속도에 맞게 해석하였다. 면진층에 의해서 면진구조물은 장주기로 운동함으로 인해서 건물의 안정성을 확보할 수 있었으며, 면진 효과를 확인할 수 있었다.

후기

본 연구는 Brain Korea 21 Program의 지원으로 행해졌으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Kelly, J. M., 1999, "The Theory of Seismic

Isolation and its Implementation in the United States", 국제내진학술세미나

- (2) Kelly, J. M., 1996, "Earthquake-Resistant Design with Rubber", 2nd Edition, Springer-Verlag, London
- (3) Walters, M.I., et al, 1995, "Use of Seismic Isolation in new and retrofit construction", Proceedings Joint ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference, Seismic Shock and Vibration Isolation, Honolulu, Hawaii, PVP-Vol. 309, pp.221~228
- (4) Kawashima, K., 1999, "Seismic Design and Isolation of Bridges in Japan", 국제내진학술세미나, pp. 1~16
- (5) 海野 聡의 3명, 1998, "대지진시의 면진구조의 동적거동", 제10회 일본지진공학 심포지엄, pp. 2681~2686
- (6) 小倉 柱治의 5명, 1998, "Seismic Rehabilitation of Training Center Mid-story Isolation System", 제10회 일본지진공학 심포지엄, pp.3341~3346
- (7) 유철수, 1997, "한반도의 지진 특성과 내진 설비", 국제내진학술세미나, pp. 9
- (8) 강범수, 전정배, 김홍주, 김계수, 정경수, 1999, "Evaluation on Seismic Isolation Rubber Bearing Systems", ERC/NSDM 부산대학교, 동일고무벨드(주)