

지진시 저층건물 면진구조의 비선형 동적 거동

문병영[†] · 강경주^{**} · 강범수^{***} · 김계수^{****}
(2001년 2월 8일 접수, 2001년 8월 23일 심사완료)

Dynamic Stability Analysis of Base-Isolated Low-level Nonlinear Structure 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), Nonlinear Response(비선형 응답), Earthquake(지진)

Abstract

This paper presents an analysis of nonlinear response of the seismically isolated structure against earthquake excitation to evaluate isolation performances of a rubber bearing. In the analysis of the vibration of building, the building is modeled by lumped mass system where the restoring force is considered as linear, bilinear and trilinear. Fundamental equations of motion are derived for the base isolated structure, and hysteretic and nonlinear-elastic characteristics are considered for a numerical calculation. The excitation levels are magnified for the recorded strong earthquake motions in order to examine dynamic stability of the structure. Seismic responses of the building are compared for the each restoring force type. As a result, it is shown that the effect of the motion by the nonlinear response of the building is comparatively not so large from a seismic design standpoint. The responses of the isolated structures reduced sufficiently and controled the motion of the building well in a practical range. By increasing the acceleration of the earthquake, the yielding of the force was occurred in the concrete and steel frame, which shows the necessity of the exact nonlinear dynamic analysis.

1. 서론

지진은 자연적으로 발생하는 큰 재앙이며 대비해 두지 않을 경우 경제적 사회적 큰 피해를 입게 된다. 이에 따라 세계적으로 지진에 대한 관심이 높아지고 있고^(1~3) 국내에서도 건교부에서 1998년부터 교량, 철도 등의 중요 시설물에 내진 설계기준을 구체적으로 발표하는 등 지진에 대한 방재 대책을 수립하고 예상되는 피해를 최소화 하려는 노력을 보이고 있다.

1990년대 이후 고베지진, 터키지진, 대만지진 등 전 세계적으로 강지진의 발생빈도가 증가하고 있고, 1999년 발생한 터키, 그리스, 대만 등의 지진에서 2~3층의 일반건물에 대한 피해가 막대하였으며, 90% 이상의 사상자가 이와 같은 일반주택에서 발생하였다. 또한 지진의 진동을 상부구조물로부터 분리 시키는 면진장치는 효과적인 역할을 하고 있음이 일본의 阪神·淡路 대지진에서 면진설계된 교량에 대부분 손상이 가지 않음을 통해 그 우수성이 입증되었고, 이에 대한 연속적인 연구가 일본에서 교량용과 건물용에 대하여 활발히 수행되고 있다. 면진베어링이 큰 변형을 받을 때의 비선형 거동이 연구되었고⁽⁴⁾ 고층건물의 중간층에 면진장치가 설비될 때의 동적거동이 연구되었다.⁽⁵⁾ 국내에서의 연구로는 면진 구조물에 대한 해석으로는 교량에 대해서 기초분리 장

† 책임자, 회원, 부산대학교 항공우주공학과
E-mail : moon_byung_young@hotmail.com
TEL : (051)510-3442 FAX : (051)513-3760

** 부산대학교 대학원 항공우주공학과

*** 부산대학교 항공우주공학과

**** 동일고무벨트(주)

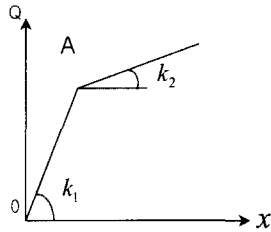


Fig. 1 Bilinear restoring force

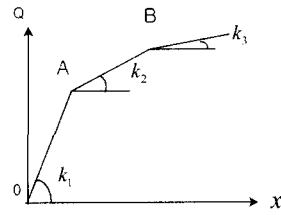


Fig. 2 Trilinear restoring force

치를 bilinear로 모델링하여 해석이 수행되었고⁽⁶⁾ 지진에 대한 고감쇠 면진베어링의 비선형 진동해석이 수행되기도 하였다.⁽⁷⁾ 또한 수정히스테리틱 bilinear면진베어링 모델을 사용한 지진응답감소에 대한 연구가 수행되기도 하였다.⁽⁸⁾ 그러나, 상기의 연구들은 면진자체의 연구로서 상부구조물을 비선형으로 모델링하여 해석한 예는 없는 실정이다. 실제로 대지진과 같은 힘을 받을 때의 저층 건물의 상부구조의 거동을 파악하는 것은 중요하며, 이를 반영하여 면진을 설계할 필요가 있다.

이에 본 논문에서는 저층구조물인 일반주택의 면진구조와 상부구조의 비선형 해석을 통해 면진장치를 보다 정확하게 설계하고 개선된 면진 제품을 생산하는데 기여하고자 한다.

2. 해석방법

2.1 면진구조의 특성

면진구조는 면진베어링으로 이루어져 있는 면진층과 상부건물로 이루어져 있다. 면진베어링은 고무와 철판의 적층으로 구성되어 있으며, 건물의 상부 구조물은 콘크리트와 철골로 이루어져 있다. 지진시에 탄성의 범위를 넘어서는 하중을 받을 때 콘크리트와 철골 순으로 항복변형을 일으키게 된다. 때문에 선형모델로써는 정확한 상부구조의 거동따라서 상부건물에 대한 비선형 모델로서는 주로 재료의 항복 정도에 따라서 bilinear, trilinear로 표현할 수 있다. 1질점계의 경우 Fig. 1은 bilinear 복원력 특성을 나타내 주고, $k_2/k_1 = 1/10 \sim 1/20$ 을 고려할 수 있다. Fig. 2는 trilinear 복원력 특성을 나타내 주고 있다. 이론적으로는 A지점에서 콘크리트의 붕괴와 B지점에서 철조혹은 철골의 항복하중을 부여한다. 소성 스프링 계수비는 $k_2/k_1 = 1/5 \sim 1/2$, $k_3/k_1 = 1/100 \sim 1/20$

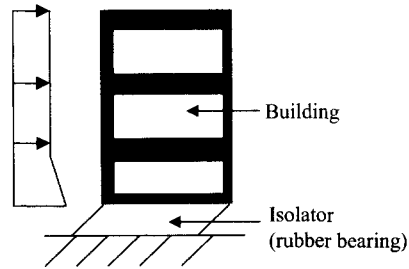


Fig. 3 Deformation characteristics of building

범위를 고려할 수 있다. 본 논문에서는 상부구조에 대해서 trilinear와 bilinear로 모델링하였을 때 면진구조에서 보다 정확한 지진 응답해석을 수행하고자 한다.

2.2 면진베어링의 설계

면진베어링은 Fig. 3과 같이 건물의 하중을 지탱하면서 지진시에는 건물과 지면을 분리시키며, 지진시에는 변형에 대해서 견뎌주어야 한다. 이런 목적을 달성하기 위해서 다음과 같은 과정을 거쳐서 설계한다.⁽⁹⁾

건물 진중량 W 는 각 면진구조가 부담하는 중량 (N_{si})의 합으로 나타낸다.

$$W = \sum_i N_{si} \tag{1}$$

면진구조만의 고유주기 T_f , 설계 지진의 세기에 등가인 에너지 속도 V_E , 지진 입력에 대한 면진층의 전단력 계수 α_1 , 면진층의 최대 층간 변형 δ_{max} 를 결정한다. 고무베어링의 형상과 관련하여, 일차 형상계수 S_1 , 이차 형상계수 S_2 를 결정할 때 다음과 같은 식이 사용된다.

$$S_1 = D/4t, S_2 = D/nt \quad (2)$$

여기서, D 는 고무층의 지름, t 는 한 고무층의 두께, n 은 고무층의 총개수이다. 이것을 바탕으로, 고무의 최소지름 D_{\min} 을 결정한다.

$$D_{\min} = \delta_{\max} \cdot S_2/\gamma \quad (3)$$

여기서, $\gamma = \delta_{\max}/nt$ 는 전단변형각이다. 면압의 평균치 σ_{av} , 한계면압 σ_{cr} 는 다음과 같다.

$$\sigma_{av} = \left(\frac{T_f}{2\pi}\right)^2 \cdot \frac{gG \cdot S_2}{D_{\min}} \quad (4)$$

$$\sigma_{cr} = \xi GS_1 S_2, \quad \xi = \pi \sqrt{\frac{k}{8(1+2kS_1^2 G/E_b)}} \quad (5)$$

$$k = 1.2338 - 0.11307G + 0.0059701G^2 - 0.00010451G^3$$

k 는 고무경도에 따른 수정계수이고, E_b 는 체적탄성율로서 $20,000 \text{ kg/cm}^2$ 을 사용하였다. 전체의 수평강성 K_H 는 각 베어링의 수평강성 K_{Hi} 의 합으로 나타낸다.

$$K_H = \sum_i K_{Hi}, \quad K_{Hi} = K_{Hw} \left[1 - \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{cr}}\right)^2\right] \quad (6)$$

여기서, $K_{Hw} = \frac{\pi}{4} GS_2 D_i$, $\sigma_i = \frac{4N_{si}}{\pi D_i^2}$

고무베어링으로 구성된 면진건물의 고유주기 T_0 는 다음과 같다.

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_H g}} \quad (7)$$

2.3 면진구조의 운동방정식

상부구조의 비선형을 고려한 복원력에 대한 면진건물의 운동방정식은 Fig. 4와 같이 면진구조와 상부구조물을 포함하여 모델링할 수 있다. 전단형탄소성 모델의 지진응답시의 i 층과 $i-1$ 층간의 전단력을 $Q_i = K_i(x_i - x_{i-1}) + yQ_i$ 로 하고, 감쇠계수를 C_i 로 둔다. 여기서, K_i 및 yQ_i 는 복원력 특성에 해당하고 각 시간에서 변화하는 값이

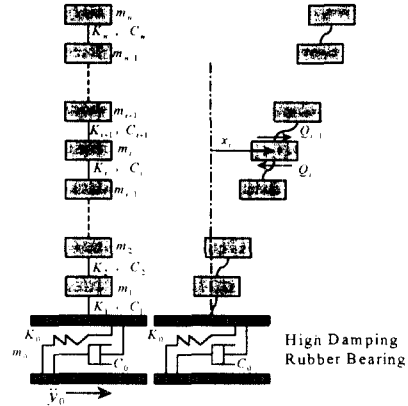


Fig. 4 Elasto-Plastic Model

다. 이들은 y 축에 층전단력을, x 축에 층간 변형을 취한 경우의 구배와 y 축절편에 해당한다. 응답해석에 있어서 한 시간간격 사이에는, 층 전단력과 층간 변형의 관계가 이 직선상에 있는 것으로 한다. 또, C_i 는 변하지 않는 감쇠상수로 한다. 이 때, i 층의 진동 평형식은 다음 식으로 표현된다.

$$m_i \ddot{x}_i + C_i(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) + C_{i+1}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1}) + K_i(x_i - x_{i-1}) + K_{i+1}(x_i - x_{i+1}) + yQ_i - yQ_{i+1} = -m_i \ddot{y}_0 \quad (i=1 \sim n) \quad (8)$$

식 (8)을 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$M(\ddot{x}) + C(\dot{x}) + K(x) + H(yQ) = -ME(\ddot{y}_0) \quad (9)$$

여기서

$$\{x\} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, \quad \{yQ\} = \begin{pmatrix} yQ_1 \\ \vdots \\ yQ_i \\ \vdots \\ yQ_n \end{pmatrix}$$

$$H = \begin{pmatrix} 1 & -1 & & & \\ & \cdot & \cdot & & \\ & & 1 & -1 & \\ & & & \cdot & \cdot \\ & & & & 1 \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$M = \begin{pmatrix} m_0 + m_1 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & m_i & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & m_n & \\ & & & & & \ddots \\ & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & m_n \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} C_0 + C_1 + C_2 & -C_2 & & & & & & \\ -C_2 & C_2 + C_3 & & & & & & \\ & & \ddots & & & & & \\ & & & C_{n-1} + C_n & -C_n & & & \\ & & & -C_n & C_n & & & \end{pmatrix}$$

$$K = \begin{pmatrix} K_0 + K_1 + K_2 & -K_2 & & & & & & \\ -K_2 & K_2 + K_3 & & & & & & \\ & & \ddots & & & & & \\ & & & K_{n-1} + K_n & -K_n & & & \\ & & & -K_n & K_n & & & \end{pmatrix}$$

2.4 지진응답의 수치해석
 면진 건물 지진응답 수치해석을 위하여 운동방정식에 대한 수치해석방법을 간단히 설명하면 다음과 같다. 변위 \$u\$, 속도 \$v\$, 가속도 \$a\$를 독립된 변량으로서 취급하고, Taylor급수로 전개하여 시간 \$m\tau\$에 전개하면 다음과 같다.

$$u_{m+1} = u_m + \tau v_m + \frac{\tau^2}{2} a_m + \frac{\tau^3}{6} \left(\frac{da}{dt}\right)_{t=t'}$$

$$= u_m + \tau v_m + \frac{\tau^2}{2} a(t'),$$

$$v_{m+1} = v_m + \tau a_m + \frac{\tau^2}{2} \left(\frac{da}{dt}\right)_{t=t'}$$

$$= v_m + \tau a(t')$$

여기서 \$t'\$와 \$t''\$는 구간 \$(t_m, t_{m+1})\$사이의 한 시점이고, 구간양끝의 값 \$a_m, a_{m+1}\$의 결합으로 다음과 같이 표현된다.

$$a(t') = (1 - 2\beta)a_m + 2\beta a_{m+1},$$

$$a(t'') = (1 - \mu)a_m + \mu a_{m+1}$$

이 방법은 Newmark- \$\beta\$법이다. \$\beta = 1/6\$인 경우는, 가속도가 구간사이에서 직선적으로 변화하는 것으로 한 선형가속도법과 일치한다. \$\mu\$의 값은 1/2을 이용하였다. 이 방법을 응용하여 변위 벡터 및 그 속도와 가속도를 다음 식과 같이 둔다.

$$\{x\} = D, \{\dot{x}\} = V/\tau, \{\ddot{x}\} = A/\tau^2$$

식 (10), (11)의 관계를 이용하면

$$D_{m+1} = D_m + V_m + \frac{1}{2} [(1 - 2\beta)A_m + 2\beta A_{m+1}]$$

$$V_{m+1} = V_m + \frac{1}{2} (A_m + A_{m+1})$$

식 (9)로부터 다음 식의 관계가 있다.

$$M A_{m+1} / \tau^2 + C V_{m+1} / \tau + K_{m+1} D_{m+1} + H_y Q_{m+1} = -ME \cdot \ddot{y}_{0_{m+1}}$$

식 (13), (14)을 (15)에 대입하면 다음 식을 얻게 된다.

$$\left(M/\tau^2 + \frac{1}{2} C/\tau + \beta K_{m+1} \right) A_{m+1} + \left[\frac{1}{2} C/\tau + \frac{(1-2\beta)}{2} K_{m+1} \right] A_m + (C/\tau + K_{m+1}) V_m + K_{m+1} D_m + H_y Q_{m+1} = -ME \cdot \ddot{y}_{0_{m+1}}$$

본 논문에서는, 계산의 간략화를 위해서 구간 \$(t_m, t_{m+1})\$간의 복원력 특성은 변화하지 않는 것으로 해서, 식 (16)으로부터 \$(m + 1)\$스텝의 가속도를 계산하고, 식 (14), (15)로부터 속도 및 변위를 계산하고 있다. 계산된 \$(m + 1)\$스텝의 변위에 대해서 복원력 특성을 구하지만, 그 결과를 식 (16)에 대입해서 수렴계산을 반복하지 않고, 그 다음 스텝에 반영한다. 따라서, 계산정도를 높이기 위해서, 한 스텝간의 시간간격을 좁게하면 된다.

3. 비선형 동적해석 및 고찰

지진시 면진건물의 상부구조물을 보다 정확하게 해석하기 위해 기존의 선형복원력 특성인 linear해석과 비선형 복원력 특성인 bilinear형과 trilinear형 복원력 특성의 응답을 구하여 비교하였다.

3.1 해석입력데이터

입력지진파로는 Fig. 5와 같이 1940, El-Centro(NS)파를 사용하였다. El-Centro(NS)파의 최대지면가속도는 439gal 이며, 탄성과 bilinear, trilinear복원

력 특성을 고려한 응답을 구하여 비교하는데 이 수치를 사용하였고, trilinear복원력 특성에서 최대 지반가속도 크기 차이에 따른 동적 특성을 비교하기 위해서 439gal일 때와 879gal일 때를 비교하였다. El-Centro(NS)파는 건물에 대해 수평방향으로 전달되는 것으로하고 30초까지 해석하였다. 지배주파수는 3.7~4.5Hz이다.

Table 1은 건물의 복원력 특성치이다. Q_{y1} , Q_{y2} 는 linear, bilinear, trilinear의 특성을 비교할 수 있도록 El-Centro(NS)지진파에 대해 항복이 일어나는 값을 선택하였다. k_2/k_1 , k_3/k_1 값은 2.1절에서 언급한 대로 일반적으로 사용되는 값을 선정하였다. Q_{y1} , Q_{y2} 값은 bilinear, trilinear의 항복지점이다.

Table 2는 면진층과 상부구조의 설계변수이다. 건물의 설계에 따라서 12개의 면진 베어링을 배치하고, 설계하중은 각 모서리 부분에서 받는 값에

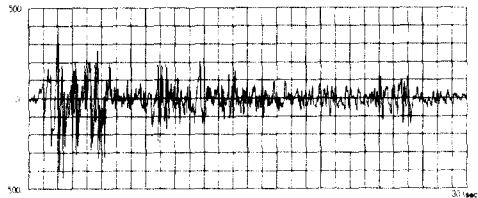


Fig. 5 El-Centro(NS) earthquake acceleration

Table 1 Restoring force of building

Characteristic of restoring force	Position (Floor)	Q_{y1} (ton)	k_2/k_1	Q_{y2} (ton)	k_3/k_1
linear	2~3	0	0	0	0
	1~2	0	0	0	0
bilinear	2~3	210	0.1	0	0
	1~2	300	0.1	0	0
trilinear	2~3	210	0.2	350	0.01
	1~2	300	0.2	500	0.01

Table 2 Design parameters of isolated building

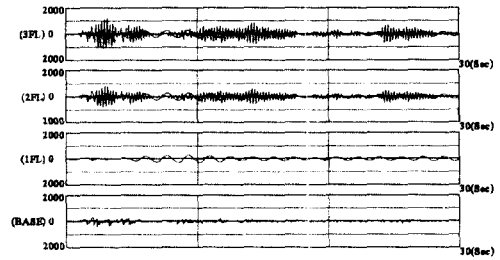
Isolator	Total Thickness of Rubber t_r	Shear Modulus G (kg/cm^2)	Design Weight		Design Period T_f	
	Each corner 4 EA		Other 8 EA			
	129 (mm)	9	83 (tonf)	166 (tonf)	2.5 (sec)	
Mass(ton)			Stiffness(ton/cm)			
M0	M1	M2	M3	K1	K2	K3
660	400	400	200	610	610	610

비해 다른 곳은 2배가 되게 된다. 건물구조는 연속체이나 본 논문에서는 이산계로 모델링 하였고, 질량은 운동에너지를 이용하여 등가치를 사용하였다.

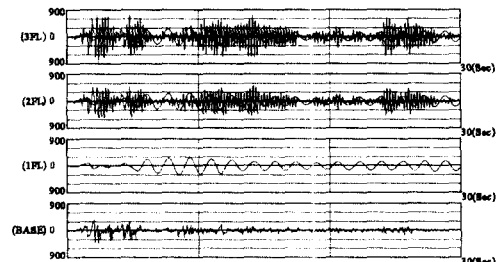
3.2 선형과 비선형 응답해석비교

전체 건물의 운동방정식의 해석은 직접적분법인 Newmark- β 법을 이용하여 응답을 구하였다. Figure 6 (a),(b),(c)는 복원력 특성에 따른 절대 가속도 응답을 나타내고 있다.

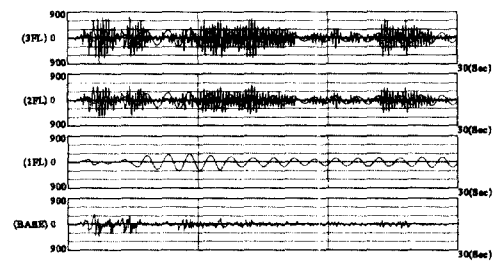
주기가 길고 규칙적으로 나타나는 것은 면진시의 응답이고 주기가 짧은 것은 비면진시의 응답이다. 면진응답은 세가지의 경우 모두 주기와 진폭에서 같은 응답을 나타내고 있다. 비면진응답은



(a) Linear



(b) Bilinear



(c) Trilinear

Fig. 6 Absolute response according to restoring forces

선형에 대해서 상부로 갈수록 진폭이 커지지만, 비선형에서는 상부건물의 층별 응답의 차이가 선형에 비해 비교적 적다. 건물이 면진에 의해 병진운동을 함으로서 면진장치가 건물의 진동감소에 기여함을 알 수 있다. Figure 7 (a),(b),(c)는 각각 비면진linear, bilinear, trilinear복원력 특성을 해석한 것이다. Fig. 7(a)는 비면진 탄성복원력 특성을 각층(2F, 3F)별로 해석한 것이다. 면진 건물의 세가지 복원력 특성해석 즉, linear, bilinear, trilinear에 대해서는 선형해석 결과를 얻게 되었다. 비면진 bilinear에 대해서는 Fig. 7(b)와 같이 2층에서는 항복이 발생하였고 3층에서는 항복이 발생하지 않았다. Table 1의 건물의 복원력 특성치와 비교해보면, 2층에서는 건물에 작용하는 전단력이 300ton이상이므로 항복이 발생했다. 3층에서는 210ton 이하로 작용할 때 항복이 발생하지 않는 것으로 되어 있고 이에 따라 항복이 발생하지 않았다.

Fig. 7(c)는 비면진 trilinear에 대한 해석이다. 2층에서는 항복이 발생하였고 3층에서는 항복이 발생하지 않았다. Table 1의 복원력 특성치와 비교

해보면 2층에서 300ton이상의 전단력 작용으로 항복이 발생하여 비선형성을 보여주고 있다. 그러나 동일한 해석대상에 대해서도 비면진탄성해석의 경우 항복이 일어나지 않은 것으로 해석한다. 따라서 비면진에 대해서 trilinear로 해석하는 것이 보다 정확한 해석이 된다고 할 수 있다. 비면진 일때는 항복이 발생하지만 면진에 대해서는 항복이 발생하지 않았다. 이것은 면진구조가 건물의 진동을 감소시켰기 때문에 발생하는 것으로 면진의 성능을 보여주는 것이다. Figure 8은 절대가속도를 면진과 비면진에 대해 비교한 것이다. bilinear와 trilinear 그래프는 겹치고 있다. 이것은 지진의 가속도가 건물의 항복을 충분히 일으키기에는 적은 값이기 때문으로 추정된다. 면진과 비면진 모두 가속도는 상부로 갈수록 커지는 것을 알 수 있다. 선형으로 해석할 경우 더욱 상부가 많이 흔들리는 것으로 나타난다. 비선형으로 해석하면 선형에 비해서는 35% 줄어든다. 면진해석은 비면진에 비해서 절대 가속도가 43~53% 줄어드는 것을 알 수 있다.

3.3 최대 가속도 897gal에 대한 응답비교

Fig. 7에서 면진 구조에 대해서는 복원력 특성은 선형으로 해석되었고, 비면진 bilinear, trilinear에 대해서는 2층에서 비선형, 3층에서는 선형으로 해석되었다. 본연구에서는 면진구조를 설치한 저층 건물의 비선형 동적응답을 고찰하는 것이 목적이므로 비선형 특성이 나타날 수 있는 지진의 특성을 고려할 필요가 있다. 이에 대해 더 큰 지진 가속도에 대해서 면진 성능을 보기 위해 지진가속도를 두 배가 되게 하였고, 층별로 뚜렷

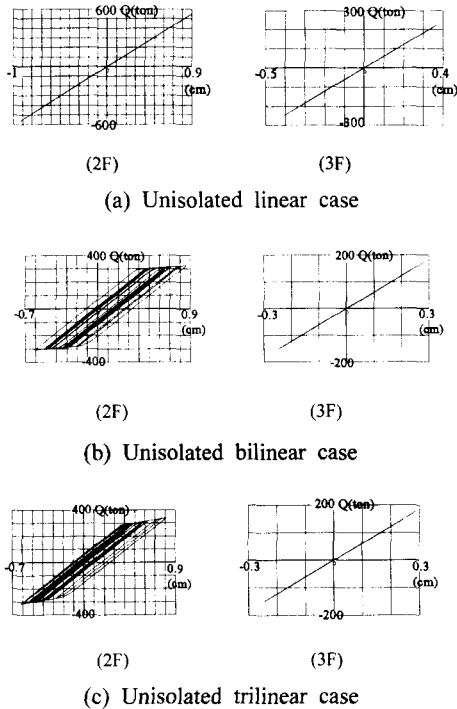


Fig. 7 Response of Nonlinear restoring forces

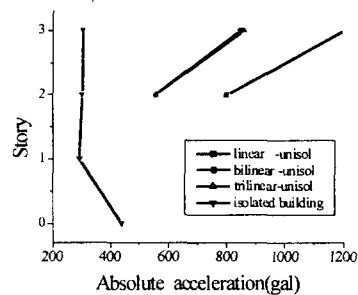


Fig. 8 Comparison of absolute acceleration

4. 결론

본 연구에서는 지진시에 가장 큰 피해가 예상되는 저층의 일반 건물에 대해서 지진하중이 작용할 때, 세가지 종류의 복원력 특성, linear, bilinear, trilinear 면진건물과 비면진 건물의 응답을 서로 비교하여 면진성능을 검토하였다. 이상의 연구에서 다음과 같은 결론을 내렸다.

- (1) 지진 하중이 작용할 때 면진 구조의 상부건물은 구조물에 피해를 주는 가속도와 층간변위를 감소시키므로 지진에 의한 피해를 줄이게 된다.
- (2) 저층일수록 높은 전단력으로 인해 비선형 복원력 특성은 항복 범위를 넘어서는 경우 저층에서 현저하게 나타난다.
- (3) 면진건물은 비면진에 비해서 비선형 복원력 특성이 현저하게 줄어들어는 것을 통해 면진 성능을 알 수 있다.
- (4) 면진 건물에 대한 탄소성 응답해석은 항복 범위를 넘을 경우 탄성해석과 오차가 많이 나기 때문에 비선형해석으로 보다 정확한 해석을 수행할 수 있다.

후 기

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," International Seminar on Seismic Design and Devices, pp. 1~27.
- (2) Kelly, J. M., 1996, *Earthquake-Resistant Design with Rubber*, 2nd Edition, Springer-Verlag, London, pp. 1~18.
- (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.3.9, pp. 221~228.

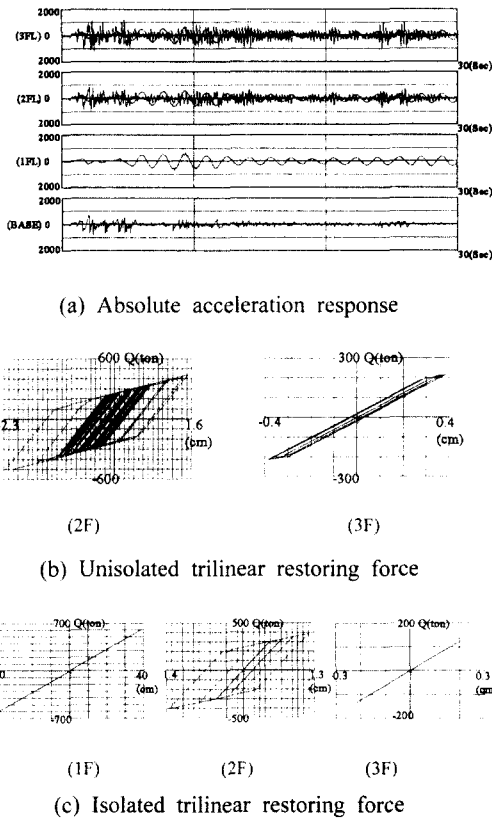


Fig. 9 Responses for maximum acceleration of 897gal

한 결과를 비교할 수 있는 trilinear의 경우에 대해서 복원력 특성을 해석하였다. Fig. 9(a)에 절대가속도를, Fig. 9(b)에 비면진 복원력 특성을, Fig. 9(c)에는 면진에 대한 복원력특성을 각층별로 나타내었다. Fig. 9(a)에서 주기가 일정하게 나타나 있는 파가 면진 구조의 응답을 나타내고 있고 비면진에 비해서 응답의 주기를 일정하게 유지시켜 줌으로써 강한 지진 가속도에 대해서도 건물을 안전하게 운동하도록 유지시켜준다. Fig. 9(b),(c)에서 비면진구조에 대해서는 2층, 3층 모두 비선형 복원력 특성을 나타내지만 면진구조은 2층에서 면진구조에 비해 비교적 선형에 가깝고, 3층에 대해서는 선형을 나타냄으로써 면진의 성능을 보여주고 있다. 이는 건물의 진동이 2층에서 크게 나타나, 진동모드의 영향이 크므로 나타나는 비선형 현상으로 생각할 수 있다.

- (4) Masaki, K., Kazuyo, N., Masaki, S., Yasuo, T., 1990, "A Study on Response during Large Deformation in a Seismic Isolation System of Nuclear Island Buildings," *JSME Int. J.*, Series III, Vol.33, No.3, pp. 404~411.
- (5) 小倉柱治, 1998, "研修施設の中間階免震レトロフィット," 第10回日本地震工学シンポジウム, pp. 3341~3346.
- (6) 이상수, 1997, "지진에 대비한 기초분리 교량의 설계법에 관한 연구(I)," 한국강구조학회 논문집, 제8권, 제4호, pp. 625~635.
- (7) Koo, G. H., Ohtori, Y., 1998, "Loading Rate Effects of High Damping Seismic Isolation Rubber Bearing on Earthquake Responses," *KSME Int. J.*, Vol. 12, No. 1, pp. 58~66.
- (8) 구경희, 이재한, 김종범, 이형연, 유봉, 1996, "수정히스테리틱 Bi-Linear 면진베어링 모델을 사용한 지진응답감소," 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제1호, pp. 127~134.
- (9) Kelly, J. M., 1999, *Design of Seismic Isolated Structures*, John Wiley and Sons, Inc., pp. 191~202.