

LR형 지반분리계의 내진효과

Aseismic Effectiveness of LR type Base Isolated System

정연경* 예광일* 김재웅**
Jung, Yeon-Kyoung Yae, Kwang-II Kim, Jae-Ung

ABSTRACT

Many methods have been proposed for achieving optimum performance of structures subjected to earthquake excitation. The conventional approach requires that structures passively resist earthquakes through a combination of strength, deformability, and energy absorption. Base isolation is a technique for mitigating the effects of earthquakes on structures through the introduction of flexibility and energy absorption capability.

In this paper, a parametric study of effectiveness of isolation systems with various main structures' properties is carried out through the response spectrum analysis. It is shown that, most base isolators with its longer period and higher damping can significantly reduce the base shear force transmitted to the structures.

1. 서론

지진이나 풍하중과 같은 동적 하중에 의한 구조물의 과도한 진동은 구조물의 물적피해 뿐만 아니라 인명피해의 안전성 문제를 야기시킬 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 부재의 강성 증대방법은 과도한 건설 경비의 지출과 함께, 추가적인 자중의 증가 그리고 고층, 대형화된 근래의 구조물들에 대한 진동감소 효과의 한계를 갖고 있다.

이에 따라 구조물의 진동에 의한 물적, 인적피해를 효과적으로 줄이기 위한 많은 방법들이 제안, 연구되고 있다. 그 중의 하나인 지반분리계(Base Isolated System)는 지진의 영향이 구조물에 전달되는 위치에서 구조물과 지반을 효율적으로 분리하여, 구조물에 전달되는 지진의 영향을 감소시키려는 방법으로서 이에 대한 연구들이 수행되고 있다¹⁻²⁾.

Su³⁾는 지진하중에 대한 지반분리계의 성격을 고찰한 결과 구조물에 전달되는 지반가속도가 상당히 줄어드는 사실을 확인하였으며, 풍하중에 대한 지반분리계의 효과도 Chen⁴⁾등에 의하여 검토되었다. Makris⁵⁾는 실제 지진에 대한 지반분리계의 실측기록을 사용하여 지반분리계에 대한 수치해석방법의 정확성을 확인하였고, 수동 지반분리계의 한계를 극복하기 위하여 Gina⁶⁾는 능동진동흡수기와의 합성을 제안하고 그 효과를 비교, 검토하였다.

* 동아대학교 건축공학과 석사과정

** 동아대학교 건축공학과 교수, 공학박사

본 연구에서는 제한된 입력지진과 지반분리계에 대한 내진해석의 범위를 벗어나, 좀 더 광범위한 조건들에 대한 내진효과를 검토하고자 한다.

지반분리계로는 효과성과 실용성이 큰 것으로 알려진 LR(Laminated Rubber Bearing) type을 대상으로 하며, 지진하중에 대하여 지반분리계가 선형으로 거동한다는 가정과 응답스펙트럼해석에 따라 구조물의 동적 거동을 파악하고, 거동에 영향을 주는 변수들의 변화에 따른 내진효과를 고찰하고자 한다.

2. 운동방정식

지반분리계의 해석을 위한 구조물의 모델은 그림 1과 같이 상부의 주구조물과 하부의 기초구조물(Base) 그리고 기초구조물과 지반(Ground) 사이에 설치된 지반분리장치로 구성된 것으로 가정한다.

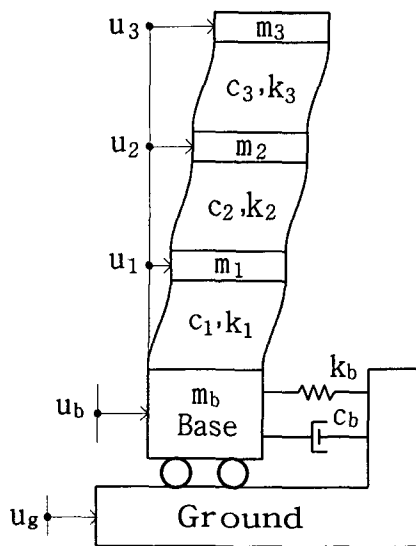


그림 1. 지반분리계가 설치된 구조물의 모델

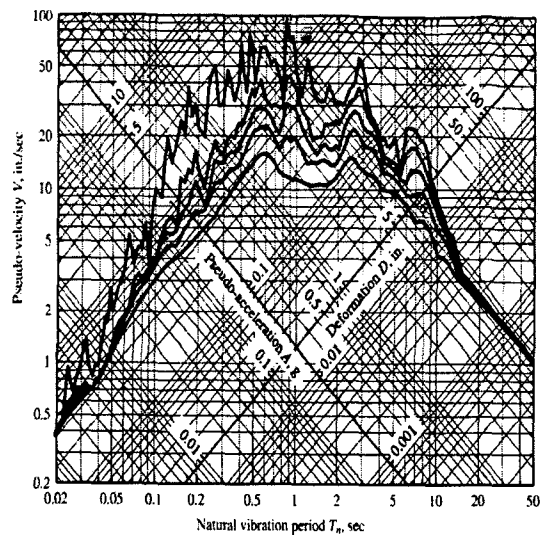


그림 2. 합성 응답스펙트럼(EI-Centro, 감쇠율 0, 2, 5, 10, 20%)

1) 주구조물

그림 1과 같은 3층의 전단건물 모델에 대한 운동방정식을 확장하여, n층의 주구조물에 대한 운동방정식을 구하면 식(1)과 같다.

$$\bar{m} \ddot{v} + \bar{c} \dot{v} + \bar{k} v + \bar{e} \ddot{u}_b = -\bar{e} \ddot{u}_g \quad \dots\dots\dots(1)$$

위에서 진한 글자체의 기호는 행렬 또는 벡터를 의미하며, 변수 상부의 \cdot 와 $\ddot{}$ 는 각각 1, 2차 도함수를 나타낸다. \bar{m} , \bar{c} , \bar{k} 들은 전단건물에 대한 통상적인 질량, 감쇠, 강성행렬을 나타내고, u_b 는 지반(Ground)에 대한 기초구조물의 상대변위를, u_g 는 지반의 절대변위를 의미하며, 기타 기호들은 다음과 같다.

$$\bar{e} = \begin{pmatrix} m_1 \\ \vdots \\ m_i \\ \vdots \\ m_n \end{pmatrix} \quad v = \begin{pmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ u_n \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(2)$$

위에서 m_i 는 i 번째 자유도의 질량, u_i 는 기초구조물(Base)에 대한 i 번째 자유도의 상대변위를 나타낸다.

2) 기초구조물

기초구조물에 대한 운동방정식을 구하면 다음과 같다.

$$m_t \ddot{u}_b + c_b \dot{u}_b + k_b u_b + \sum_{i=1}^n m_i \ddot{u}_i = -m_t \ddot{u}_g \quad \dots\dots\dots(3)$$

위에서

$$m_t = m_b + \sum_{i=1}^n m_i \quad \dots\dots\dots(4)$$

이다. m_b , k_b , c_b 들은 각각 기초구조물의 질량 그리고 지반에 대한 스프링, 감쇠효과를 나타낸다.

3) 전체구조물

식(1)과 (3)을 합하면 전체구조물에 대한 운동방정식이 구해질 수 있다.

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u = -e \ddot{u}_g \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$m = \begin{pmatrix} m_t & | & m_1 & m_2 & \cdots & m_n \\ \hline m_1 & | & & & & \\ m_2 & | & & \bar{m} & & \\ \vdots & | & & & & \\ m_n & | & & & & \end{pmatrix} \quad c = \begin{pmatrix} c_b & | & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \hline 0 & | & & & & \\ \vdots & | & & \bar{c} & & \\ \vdots & | & & & & \\ 0 & | & & & & \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{k} = \left(\begin{array}{c|ccc} k_b & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \hline 0 & & & & \\ \vdots & & & & \\ \vdots & & & \bar{k} & \\ 0 & & & & \end{array} \right) \quad \mathbf{e} = \begin{pmatrix} m_t \\ \vdots \\ \bar{e} \end{pmatrix} \quad \mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_b \\ \vdots \\ \mathbf{v} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(6)$$

3. 응답스펙트럼 해석

전체구조물에 대한 운동방정식(5)의 해를 $r(\leq n)$ 개 모드의 모드진폭(\mathbf{y})과 모드벡터(Φ)들의 선형결합으로 가정할 때, 해 \mathbf{u} 는 다음과 같이 표현되고

$$\mathbf{u} = \Phi \mathbf{y} \quad \dots\dots\dots(7)$$

위에서

$$\Phi = \left(\begin{array}{cccc} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_1 & & \phi_j & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \right) \quad \phi_j = \begin{pmatrix} \phi_{1j} \\ \vdots \\ \phi_{ij} \\ \vdots \\ \phi_{nj} \end{pmatrix} \quad \mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_j \\ \vdots \\ y_r \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(8)$$

이다. \mathbf{m} , \mathbf{k} 가 대칭행렬(질량, 강성직교성 성립)이고 \mathbf{c} 가 classical damping(감쇠직교성 성립)인 경우, 모드중첩법에 따라 j 차 모드($j=1, 2, \dots, r$)에 대한 진폭방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\ddot{y}_j + 2\omega_j \xi_j \dot{y}_j + \omega_j^2 y_j = -\frac{L_j}{M_j} \ddot{u}_g \quad \dots\dots\dots(9)$$

위에서

$$L_j = \phi_j^T \mathbf{e}, \quad M_j = \phi_j^T \mathbf{m} \phi_j \quad \dots\dots\dots(10)$$

이고, ω_j 와 ξ_j 는 j 차 모드에서의 진동수와 감쇠율을 나타낸다. 각 모드의 진동수(또는 진동주기)와 감쇠율에 대한 응답스펙트럼으로부터 최대응답들, 즉 최대변위, 최대동가수 평력, 최대밀면전단력, 최대전도모멘트들은 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\overline{u_j} = \phi_j \overline{y_j} = \phi_j \frac{L_j}{M_j} S_{d,j} \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$\overline{f_j} = \overline{k u_j} = \overline{m \phi_j} \frac{L_j}{M_j} S_{aj} \dots\dots\dots(12)$$

$$\overline{V_j} = \hat{1} \overline{f_j} = \hat{1} \overline{m \phi_j} \frac{L_j}{M_j} S_{aj} \dots\dots\dots(13)$$

$$\overline{M_j} = \hat{h} \overline{f_j} = \hat{h} \overline{m \phi_j} \frac{L_j}{M_j} S_{aj} \dots\dots\dots(14)$$

위에서 $S_{aj}(=S_{aj}/\omega_j^2)$ 와 S_{aj} 는 각각 j차 모드에서의 변위 응답스펙트럼(displacement response spectrum)과 모의-가속도 응답스펙트럼(pseudo-acceleration response spectrum)을 나타낸다. 기타 기호들은 다음과 같고, 식(15)의 h_i 는 지반으로부터 i층 까지의 높이를 나타낸다.

$$\hat{1} = (1, 1, \dots, 1), \quad \hat{h} = (h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_n) \dots\dots\dots(15)$$

임의의 응답 R 의 전체 최대응답 \overline{R} 은 SRSS(square-root-of-sum-of-squares)방법에 따라 다음과 같이 각 모드에 의한 응답을 중첩하여 구하기로 한다.

$$\overline{R} = (\overline{R_1}^2 + \overline{R_2}^2 + \dots + \overline{R_r}^2)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(16)$$

4. 내진효과 검토

4-1. 내진효과 산정

본 연구에서 지반분리계의 내진효과 성격을 고찰하기 위한 지진스펙트럼의 특성과 주 구조물, 기초구조물의 조건과 범위 그리고 해석과정은 다음과 같이 하기로 한다.

(1) 지진응답스펙트럼;

해석에 쓰일 스펙트럼으로는 그림 2와 같은 응답스펙트럼(EI Centro earthquake, NS component, 1940; 감쇠율 0~20%, 진동주기 0.02~50초)을 사용하기로 한다.

(2) 주구조물의 조건;

모든 층에서의 질량 m_i , 스프링계수 k_i , 각 층의 층고는 동일하고, 감쇠는 classical damping으로서 다음과 같은 Rayleigh damping으로 가정한다.

$$\overline{c} = a_0 \overline{m} + a_1 \overline{k} \dots\dots\dots(17)$$

주구조물의 1차 진동주기 T_1 (단주기 0.3초, 장주기 2.0초)이 주어지면, \overline{m} , \overline{k} 가 구해질 수 있으므로(질량의 크기는 임의로 가정될 수 있음) 나머지 모드들에 대한 진동주기 또는 모드벡터들을 구할 수 있다. 감쇠의 경우도 주구조물의 임의의 2개 모드의 감쇠율($\zeta_1 = \zeta_2 = 0.01$ 또는 0.1)이 주어지면 비례상수 a_0 와 a_1 이 구해지고, 따라서 \overline{c} 그리고 나머지 모드들에 대한 감쇠율도 구할 수 있다.

(3) 기초구조물의 조건;

기초구조물의 진동주기 ($T_b=0.1, 1.0, 3.0$ 초), 감쇠율 ($\zeta_b=0.01, 0.1, 0.3$)과 m_b, c_b, k_b 의 관계는 다음과 같이 정의되며, 질량 m_b 는 총질량 m_i 와 동일한 것으로 가정한다.

$$T_b = \frac{2\pi}{\omega_b}, \quad \zeta_b = \frac{c_b}{2m_t\omega_b}, \quad \omega_b = \sqrt{\frac{k_b}{m_t}} \quad \dots\dots\dots(18)$$

(4) 전체구조물의 조건;

주구조물과 기초구조물의 조건이 주어지면, m, c, k 가 구해지고, 따라서 전체구조물의 모든 모드에 대한 진동수 ω_j (또는 진동주기 T_j^*) 그리고 모드벡터 Φ 가 구해질 수 있다. 전체구조물의 감쇠도 classical damping으로 가정할 때, 전체 구조물의 j차모드의 감쇠율 ξ_j 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\xi_j = \frac{C_j}{2\omega_j M_j} \quad \dots\dots\dots(19)$$

위에서 C_j 는 행렬 $\Phi^T c \Phi$ 의 대각선 원소중 j번째 원소를 나타내고, M_j 는 식(10)과 같다.

4-2. 내진효과 특성

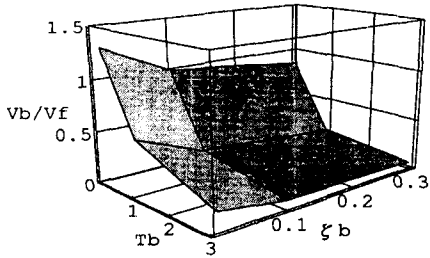
지반분리계의 내진효과는 비조절응답에 대한 조절응답의 비율(R_b/R_f)로써 검토하기로 하며, 대표적인 경우들에 대한 해석결과는 표 1 그리고 그림 3과 같다.

표에서 V, U, M 은 각각 밀면 전단력, 최상층의 상대변위, 밀면 전도모멘트를 나타내며, 아래첨자 f 는 fixed base(지반분리계가 없는 비조절의 경우), b 는 isolated base(지반분리계가 있는 조절의 경우)를 나타낸다. 또한 T_1, ζ_1 은 주구조물의 1차모드에서의 진동주기와 감쇠율을, T_b, ζ_b 는 기초구조물의 진동주기와 감쇠율을, T_1^* 는 전체구조물의 1차 진동주기를 나타내며, 지반분리계의 내진효과 특성을 살펴 보면 다음과 같다.

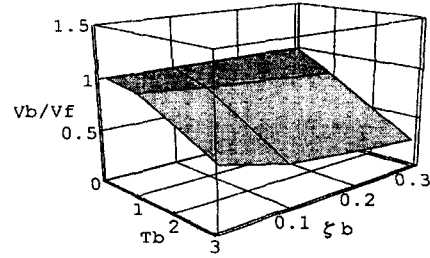
1. 지반분리계를 사용할 경우 전반적으로 지진응답(밀면전단력, 상대변위, 밀면전도모멘트)들은 감소하나, 주구조물과 기초구조물의 진동주기가 모두 짧은 경우 응답이 오히려 증가할 수 있는 것으로 나타난다.
2. 일반적으로 기초구조물의 진동주기와 감쇠율이 증가할수록 지진응답들은 감소한다.
3. 그러나 기초구조물의 진동주기가 어느 정도 이상일 때는, 기초 구조물의 감쇠가 증가하더라도 이에 따른 지진응답의 감소는 완만하게 나타난다.
4. 진동주기가 짧고 감쇠율이 작은 주구조물의 경우에는 지반분리계의 내진효과가 크게 나타나나, 주구조물의 진동주기가 길고 감쇠율이 큰 경우에는 내진효과가 완만하다.
5. 기초구조물의 진동주기가 주구조물의 1차 진동주기보다 큰 경우, 전체구조물의 1차 진동주기는 기초구조물의 진동주기에 근접하게 된다.
6. 이상과 같은 지반분리계의 내진효과(지진응답 감소효과)는 주로 지반분리계에 의한 구조물 진동주기의 증가에 따른 가속도 응답스펙트럼의 감소에 의한 것으로 판단된다.

표 1. 주구조물, 기초구조물의 조건과 전체구조물 응답

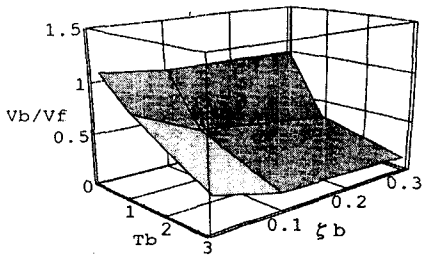
주구조물		기초구조물		전체구조물 응답			주구조물		기초구조물		전체구조물 응답				
T_1	ζ_1	T_b	ζ_b	T_1^*	$\frac{V_b}{V_f}$	$\frac{U_b}{U_f}$	$\frac{M_b}{M_f}$	T_1	ζ_1	T_b	ζ_b	T_1^*	$\frac{V_b}{V_f}$	$\frac{U_b}{U_f}$	$\frac{M_b}{M_f}$
0.3	0.01	0.1	0.01	0.31	1.30	1.28	1.28	2.0	0.01	0.1	0.01	2.00	1.00	1.00	1.00
			0.1		0.99	0.98	0.98				1.00		1.00	1.00	
			0.3		0.85	0.84	0.84				1.00		1.00	1.00	
		1.0	0.01	1.03	0.54	0.47	0.47			1.0	0.01	2.19	0.95	0.97	0.97
			0.1		0.28	0.24	0.24				0.89		0.92	0.92	
			0.3		0.17	0.14	0.14				0.80		0.83	0.83	
		3.0	0.01	3.01	0.19	0.16	0.16			3.0	0.01	3.50	0.57	0.59	0.59
			0.1		0.09	0.08	0.08				0.41		0.41	0.41	
			0.3		0.06	0.05	0.05				0.27		0.27	0.27	
	0.1	0.1	0.01	0.31	1.09	1.07	1.07		0.1	0.1	0.01	2.00	0.97	0.96	0.96
			0.1		1.02	1.01	1.01				0.97		0.96	0.96	
			0.3		0.99	0.98	0.98				0.97		0.96	0.96	
		1.0	0.01	1.03	0.79	0.69	0.69			1.0	0.01	2.19	1.04	1.06	1.06
			0.1		0.50	0.43	0.43				1.00		1.01	1.01	
			0.3		0.34	0.30	0.30				0.95		0.97	0.97	
		3.0	0.01	3.01	0.33	0.28	0.28			3.0	0.01	3.50	0.77	0.82	0.82
			0.1		0.17	0.15	0.15				0.66		0.67	0.67	
			0.3		0.13	0.11	0.11				0.47		0.46	0.46	



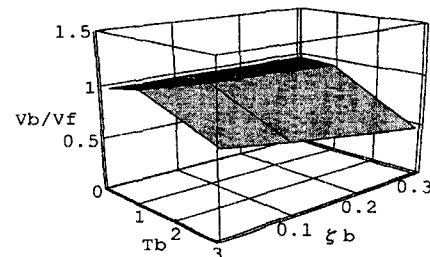
(a) $T_1 = 0.3, \zeta_1 = 0.01$



(b) $T_1 = 2.0, \zeta_1 = 0.01$



(c) $T_1 = 0.3, \zeta_1 = 0.1$



(d) $T_1 = 2.0, \zeta_1 = 0.1$

그림 3. 지반분리계의 내진효과 (V_b/V_f)

5. 결 론

지진에 의한 구조물의 과도한 진동은 큰 물적, 인적피해를 가져올 수 있기 때문에, 구조물에 전달되는 지진의 영향을 감소시키는 방법의 하나인 지반분리계(Base Isolated System)에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

본 연구에서는 제한된 범위의 내진해석을 벗어나, 주구조물과 기초구조물의 다양한 조건에 대한 응답스펙트럼해석을 통하여 지반분리계의 내진효과를 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 기초구조물의 진동주기가 증가할수록 내진효과가 커지며, 장주기보다는 단주기 구조물에서 더 큰 효과가 나타난다.
- 2) 기초구조물의 감쇠율이 증가할수록 내진효과는 커지지만, 주구조물의 감쇠율이 큰 경우에는 내진효과가 완만하다.
- 3) 주구조물과 기초구조물 모두의 진동주기가 짧고 감쇠율이 작을 경우 지진응답은 오히려 증가할 수 있다.
- 4) 주구조물의 기본진동주기보다 기초구조물의 진동주기가 큰 경우, 전체구조물의 기본진동주기는 기초구조물의 진동주기에 근접하게 된다.
- 5) 지반분리계의 내진효과는 구조물 진동주기의 증가에 의한 가속도 응답스펙트럼의 감소의 결과인 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 이경진, 이종렬, 최인길, 연길환, 정수영, 윤석천, "LRB 免震構造를 이용한 건축물의 내진해석" 대한건축학회 학술발표회 논문집, 1993.10.
2. 이동근, 이정석, "Base Isolation System이 있는 건물의 지진하중에 대한 동적해석" 한국전산구조공학회 논문집, 제3권 제1호, 1990.3.
3. Lin Su, Goodarz Ahmadi, and Iradj G. Tadjbakhsh, "Comparative study of base isolation systems", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 115, No. 9, Sept., 1989, pp. 1976-1992.
4. Yu Chen and Goodarz Ahmadi, "Wind effects on base-isolated structures", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 118, No. 8, August, 1992, pp. 1708-1727
5. Nicos Makris, and Himanshu S. Deoskar, "Prediction of observed response of base-isolated structure", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 122, No. 5, May, 1996, pp. 485-493
6. Gina J. Lee-Glauser, Goodarz Ahmadi, and Lucas G. Horta, "Integrated passive/active vibration absorber for multistory buildings", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 4, April, 1997, pp. 499-504