

면진건물의 포락해석을 위한 설계용 도표 산정

Construction of Design Table for Envelope Curve Analysis of Base Isolated Buildings

이 현 호* 천 영 수**
Lee, Hyun-Ho Chun, Young-Soo

Abstract

The aim of this study is to evaluate the design table for envelope curve analysis of base isolated buildings, which represent the period of base isolated buildings and the lateral displacement of base isolation devices. For the construction of design table, V_E spectrum, which represents the energy, is developed instead of acceleration of seismic hazard. Based on the seismic coefficient of UBC 97, boundary period T_G and maximum velocity response V_0 are proposed considering Korea seismic hazard. Using T_G and V_0 , finally, V_E spectrum is developed for the four types of soil conditions. Base on the V_E spectrum, design table for envelope curve analysis is also developed for soil types.

요 지

본 연구의 목적은 면진건물의 설계를 수행하는데 있어, 면진건물의 주기, 수평 변위량 등과 같은 면진장치의 성능을 결정하기 위한 중요 요소들을 손쉽게 산정할 수 있는 포락해석용 도표를 산정하는데 있다. 이를 위하여 가속도로 표현되는 설계지진의 위험도 대신, 에너지와 관계된 V_E 스펙트럼을 아울러 산정한다. UBC 97의 지진응답계수를 적용한 경계주기 T_G 및 최대속도 응답 V_0 를 지반조건별로 제안하였으며, 이를 근간으로 한 스펙트럼 작성법을 제안하였다. 제안된 V_E 스펙트럼을 근거로 지반조건별 포락해석용 도표를 작성하였다.

Keywords : Base Isolated Building, Envelope Curve Analysis, V_E Spectrum, Earthquake, Soil Type, Seismic Response Coefficient

핵심 용어 : 면진건물, 포락해석, V_E 스펙트럼, 지진, 지반조건, 지진응답계수

* 정회원, 동양대학교 건축학부 교수, 공학박사
** 정회원, 대한주택공사 책임연구원, 공학박사

E-mail : hhlee@phenix.dyu.ac.kr 054-630-1165

• 본 논문에 대한 토의를 2006년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2006년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

지진위험도가 낮다고 예상하던 일본 니카다현에 2004년 10월 23일 발생한 규모 6.8의 지진은 내진 설계 또는 보강이 잘 되지 않은 건물에 수 많은 피해를 유발하였다. 또한 2004년 12월 26일 발생한 인도네시아-슈마트라 지진은 발생 규모 9.0에 달하는 대규모의 지진이며, 이론 인해 수십만명의 인명피해 및 헤아릴 수 없는 재산피해를 발생시켰다. 이에 우리 정부는 2005년 1월 4일자 공보를 통하여 내진규준을 강화하고, 면진장치를 도입하는 등의 적극적인 지진재해 방지 대책을 발표하였다.

최근 장수명 건물에 대한 사회적인 요구가 증가하고 있는데, 건물의 장수명화를 위해서는 사용 연한 동안 고정하중과 적재하중 뿐 아니라 바람, 폭풍, 지진 등과 같은 자연현상에 대해서도 견딜 수 있도록 건축물이 적절히 설계되어야 한다. 그 중 지진은 주변국들의 피해사례에서도 알 수 있듯이 적절히 대처하지 못하였을 경우 많은 인명 피해와 재산상의 피해를 가져올 수 있다는 점에서 이를 특별히 고려한 구조계획 즉, 내진 설계를 통하여 관리되고 있다. 이러한 내진기술 중 면진기술은 건물과 지반사이에 전단변형 장치를 설치하여 지반과 건물을 분리(base isolation)시키는 방법이다.

일본의 경우 1994년 이전에 약 80여개의 건물에 불과하던 면진건물이, 1995년 고베지진 이후 그 효용성이 입증되어, 2002년에 이르러서는 약 1,100여개의 건물이 면진화될 만큼 장기적인 안목에서의 경제성과 내구성에 대하여 기존 내진설계가 갖는 한계에 대한 대안으로서 그 실효성을 인정받고 있다. 하지만 우리나라 경우, 재해시 문제가 되는 정보, 통신, 의료 사회공공 시설물의 피해로 인한 혼란 방지라는 차원에서 면진구조의 도입이 종종 거론되고는 있으나 아직까지 일반 건축물에 적용하기 위한 구체적인 설계기술이 정착되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 면진건물의 설계를 수행하는데 있어, 면진건물의 주기, 수평 변위량 등과 같은 면진장치의 성능을 결정하기 위한 중요 요소들을 손쉽게 산정할 수 있는 포락해석용 도표를 산정하고자 한다. 본 연구

에 있어 포락해석용 도표는 4가지 조건의 지반조건별로 산정되며, 포락해석용 도표 산정을 위해 필요한 에너지 등가 속도(V_E) 스펙트럼도 아울러 산정된다.

2. 에너지 등가 속도(V_E) 스펙트럼 및 해석절차

최근에는 미국을 중심으로 구조물의 성능에 근거한 내진설계(performance based seismic design) 규준이 개발되었으며, 우리나라에서도 이를 근거한 내진설계규준이 2005년도에 개정될 예정이다. 이러한 내진설계규준은 지진 가속도를 하중효과로 취급하므로, 구조물의 비탄성 변형능력을 고려하고자 반응수정계수를 사용하여 설계 지진하중을 낮출 수 있게 설정되어 있다. 하지만 반응수정계수는 구조시스템별 획일된 하나의 값을 적용시키는 등 타당성이 결여되고, 복합구조 시스템인 경우의 반응수정계수 적용에 대하여 많은 논란이 되고 있다.⁽¹⁾ 그러나 지진을 하중과 변형의 곱이라 할 수 있는 에너지로 평가한 경우, 그 입력에너지는 건물의 총질량과 1차 고유주기에 지배되며 구조물의 강도, 구조물 내부의 강도분포 및 강성분포에는 거의 영향을 받지 않는 매우 안정된 양임이 보고⁽⁶⁾되고 있다. 국내의 경우, 2000년 문태섭 등(Moon et. al)이 “지진 입력 에너지에 의한 에너지 등가 속도 스펙트럼의 제안”이라는 연구에서 설계용 에너지 등가 속도(V_E) 스펙트럼을 제안하였다. 이 연구에서는 4종의 지반조건 및 격진, 열진, 강진, 중진, 약진의 5종의 지진 세기(intensity)를 변수로 V_E 스펙트럼을 제안하였다. 본 절에서는 문태섭 등의 선행 연구를 참고로 하여, 최근 개정되고 있는 미국 및 우리나라의 설계규준을 근거로 한 새로운 V_E 스펙트럼을 아래와 같은 절차로 개발 및 제안하고자 한다.

일반적으로 뉴턴의 제2법칙에 근거한 단자유도계(single degree of system)에서의 운동방정식은 식 (1)과 정리할 수 있다.

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + F(y) = F_e \quad (1)$$

여기서 M : 질점의 질량

$C \dot{y}$: 질점의 감쇠력
 $F(y)$: 복원력(= ky)
 F_e : 지진력
 (= $-M \ddot{y}_o$, \ddot{y}_o : 지진가속도)

위 식의 양변에 $dy = \dot{y}dt$ 를 곱하여 지진계속시간(t_o)에 대하여 적분하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & M \int_0^{t_o} \ddot{y} \dot{y} dt + C \int_0^{t_o} \dot{y}^2 dt + \int_0^{t_o} F(y) \dot{y} dt \\
 & = \int_0^{t_o} F_e \dot{y} dt \quad (2)
 \end{aligned}$$

상기식의 우변은 지진력(F_e)×변위로 지진에 의한 총입력에너지가 된다. 또한 지진에 의해 구조물에 입력되는 총에너지 E 는 다음의 식에 의해서도 구해질 수 있다.

$$E = \frac{1}{2} M V_E^2 \quad (3)$$

여기서 V_E 는 속도의 차원을 갖는 양으로 에너지 등가 속도이며 다음식과 같이 정리 될 수 있다.

$$V_E = \sqrt{\frac{2E}{M}} \quad (4)$$

산정된 V_E 는 에너지와 관련된 속도이므로 변위를 미분한 속도(VD) 또는 가속도를 적분한 속도보다는 크을 1986년 秋山宏 교수가 발표하였다.⁽⁶⁾ 즉 감쇠비 h (damping ration)가 증가할수록 $(1 + 3h + 1.2\sqrt{h})$ 의 형태로 V_E 가 VD보다 커지는 것이다. 이상과 같이 V_E 는 지진에 의한 총에너지 입력으로 표현되는 식이므로 여러 가지 지진들의 V_E 를 분석함으로써 지진에 의해 구조물에 입력되는 총에너지양에 대한 평가가 가능할 것이라 판단된다.



Fig. 1 V_E 스펙트럼 산정 절차

본 연구에서 산정되는 V_E 스펙트럼은 각각의 지진 가속도에 의한 총 입력에너지 양 E 를 Newmark의 선형 가속도법(linear acceleration method)을 사용하여 고유주기별 응답을 구한 것이다. 또한 지진에 의해 다자유도계에 입력되는 에너지는 단자유도계의 탄성진동계에 입력되는 에너지로 치환될 수 있음이 이미 검증⁽⁶⁾되었기 때문에 본 연구에서는 단자유도 탄성진동계에 대해서 해석하였다. V_E 스펙트럼을 구하기 위한 해석 절차는 Fig. 1과 같다.

3. VE 스펙트럼 산정

3.1 지반 조건

최근까지 우리가 사용하고 있던 지진하중은 2000년 대한건축학회에서 제정한 것으로 KS 2000으로 통칭하기도 한다. 이 규준은 5개의 지반조건을 사용하는 미국의 UBC 97과는 달리 4개의 지반조건을 사용하고 있으며, 각 지반조건별 계수를 Table 1에 내진규준의 모태가 된 ATC 3-06,⁽⁷⁾ KS 2000,⁽²⁾ UBC 97⁽⁸⁾로 정리하여 나타내었다. 본 연구에선 KS 2000을 적용해 4종류의 지반조건을 사용하였다.

Table 1 지반조건의 분류 및 비교

Seismic Code		ATC 3-06	KS 2000 UBC 91	UBC 97
Soil Type	Hard Rock			$S_A / 0.8$
	Rock	$S_1 / 1.0$	$S_1 / 1.0$	$S_B / 1.0$
	Stiff Soil	$S_2 / 1.2$	$S_2 / 1.2$	$S_C / 1.2$
	Soft Soil	$S_3 / 1.5$	$S_3 / 1.5$	$S_D / 1.47$
	Very Soft Soil		$S_4 / 2.0$	$S_E / 2.0$

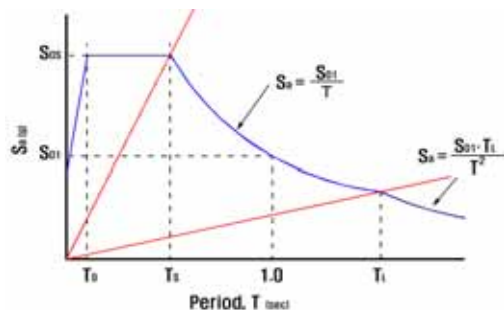


Fig. 2 T_G 및 V_0 를 산정하기 위한 응답스펙트럼(NEHRP 2003)

3.2 V_E 스펙트럼

V_E 스펙트럼을 작성하기 위해서는 속도 응답이 시작되는 경계주기 T_G 및 속도 응답의 최대 응답 V_0 를 결정하여야 한다. 그러나 기존 연구⁽³⁾에 의하면 연약 지반으로 갈수록 응답특성이 불명확하여, 지진기록의 응답특성을 이용한 정량적인 T_G 및 V_0 의 산출은 어려운 것으로 판단된다. 이상의 결과로부터, V_E 스펙트럼을 산정하기 위한 경계주기 T_G 및 최대속대응 V_0 를 산정하기 위한 절차를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2는 NEHRP 2003⁽⁹⁾에 의한 것으로, 주기 T_S 이전은 가속도응답이 지배하는 구간이고, T_S 및 T_L 사이는 속도응답이 지배하는 구간이며, T_L 이후는 변위응답이 지배하는 구간이다. 여기서 T_S 는 T_G 와 같은 의미이며, $2.5C_a$ 는 SDS로, C_v 는 SD1과 같은 의미이다. 본 연구에서는 C_a , C_v 의 지진응답계수를 사용한다.

그러나 기존 우리 기준에는 지진응답계수가 없으므로, UBC 97의 지진구역 1 (0.075g) 및 지진구역 2 (0.15g)의 C_a , C_v 계수를 직선보간하여 0.11g의 지진위험도에 대한 C_a , C_v 를 산정하였다. 산정된 지진응답계수를 Table 2에 나타내었다. 따라서 다음식 (5)

Table 2 0.11g에 대한 지진응답계수

지반조건	C_a	C_v
S_1	0.110	0.110
S_2	0.130	0.190
S_3	0.170	0.250
S_4	0.240	0.370

및 (6)을 이용하여 지반 조건별 T_G 및 V_0 를 산정할 수 있다.^{(5),(6),(9)}

$$T_G = \frac{C_v}{2.5C_a} \quad (5)$$

$$V_0 = V_E = \frac{a_{\max}}{\omega} (1 + 3h + 1.2\sqrt{h}) \quad (6)$$

여기서 a_{\max} : 최대 가속도응답 = $2.5C_a$ $\omega = 2\pi/T$

T : 고유주기

h : 감쇠비(damping ratio)

Table 3에 본 연구에서 산정한 T_G 및 V_0 를 문태섭 등(2000)의 기존 연구결과와 같이 나타내었으며, 본 연구결과에 의한 V_E 스펙트럼을 지반조건별로 분리하여 Fig. 3에 나타내었다. 이에 의하면 본 연구결과에 의한 V_E 스펙트럼이 기존 연구결과에 의한 V_E 스펙트럼과는 T_G 및 V_0 가 상이한 것으로 나타났으며, 이는 경계주기 산정방법 차이에 기인한 것으로 판단된다. 즉, V_0 에 있어 본연구와 문태섭 등에 의한 연구결과가 다른 것은, 본 연구에선 평균응답 특성을, 문태섭 등의 연구에선 지진기록의 최대응답 특성을 적용함에 기인한 것이다.

Table 3 산정된 T_G 및 V_0

지반 조건	T_G		V_0	
	본 연구	문태섭 등	본 연구	문태섭 등
S_1	0.400	0.561	29	60
S_2	0.585	0.655	50	70
S_3	0.588	0.748	65	80
S_4	0.617	0.935	97	100

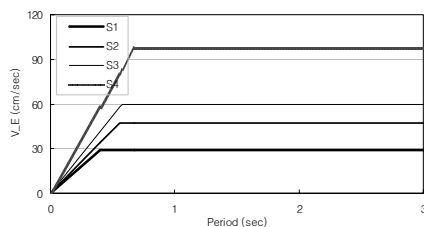


Fig. 3 산정된 V_E 스펙트럼

즉 본 연구의 경우, NEHRP 2003의 응답스펙트럼 산정절차를 이용한 V_E 스펙트럼 산정절차를 제안하였다. 이는 유효지반가속도(EPA)에 의한 평균응답을 고려하는 것이다. 이에 반하여 문태섭 등의 연구의 경우, 각 지진기록 응답중 최대치를 V_E 스펙트럼으로 선정해, 안전을 확보한 것이다. 따라서 본 연구결과와 문태섭 등의 연구결과가 차이를 나타내는 것이다.

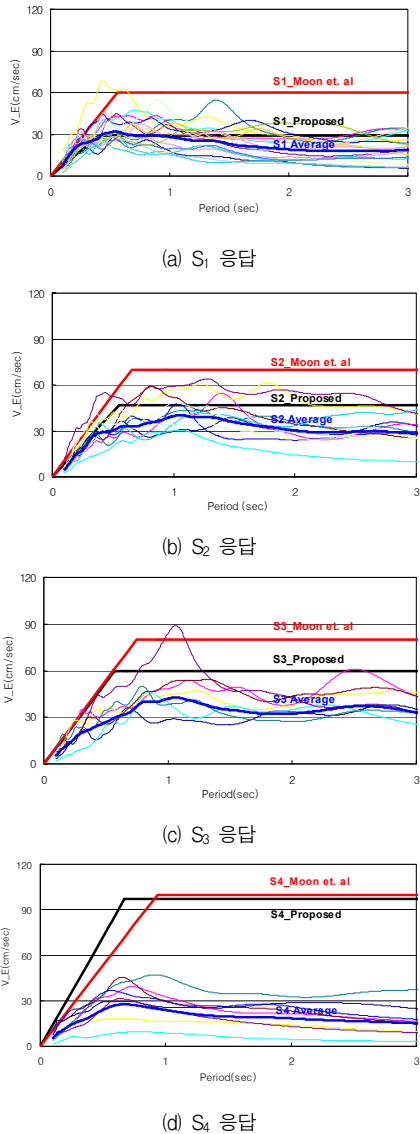


Fig. 4 지진응답과 V_E 스펙트럼 비교

Fig. 4에 본 연구 및 문태섭 등에 의한 V_E 스펙트럼과 기존연구⁽⁹⁾에 의거 선정된 지진기록의 평균응답을 지반조건별로 정리하였다. 여기서 지진기록은 KS 2000⁽²⁾에 의거 기준의 응답스펙트럼과 지진기록의 응답이 유사한 것을 사용하였다. 각 기록은 0.11g로 크기가 조정된 것이며, S₁ 지반은 21개, S₂ 지반은 13개, S₃ 지반은 9개 그리고 S₄ 지반은 8개의 지진기록을 사용하였다. 이에 의하면 본 연구에 의한 V_E 스펙트럼(proposed)이 지진기록의 평균응답과 유사한 것으로 나타났다. 그러나 S₄지반의 경우, 지진기록 장소의 불명확성, 지진기록 자체의 민감한 응답특성으로 인하여 제안된 V_E 스펙트럼과는 많은 차이가 발생하여, S₄지반에 기록된 지진기록을 사용할 때는 신중한 검토가 필요한 것으로 판단된다.

즉 지진기록을 선정하기 위해 사용한 KS 2000 기준은 지반조건에 따른 최대 응답이 일정한 반면, 본 연구에 사용된 NEHRP 2003 지침은 연약지반으로 갈수록 최대응답이 증가되는 형태이다. 따라서 Fig. 4의 S₄ 응답과 같이 지진기록의 응답이 기준의 스펙트럼과 유사하기는 매우 어려우며, 이는 현행 또는 개정될 내진기준이 근본적으로 검토 및 보완하여야 될 문제점이다.

4. 면진건물의 동적응답예측을 위한 포락 해석법

4.1 포락해석법

면진건물의 지진응답예측은 직접지진응답해석 또는 포락해석법에 의해 평가될 수 있다. 지진응답해석은 지진기록 등을 직접 사용한 시간-이력 해석을 수행하는 것으로 많은 수행시간 및 지진기록의 기록된 지반조건 등의 꼼꼼한 검토가 필요하다. 포락해석법은 대상으로 하는 면진건물 상부구조의 강성이 면진층의 강성에 비해서 매우 커진다는 특성을 이용한 등가단자유도계 해석모델로 지진응답을 구하는 방법이다.

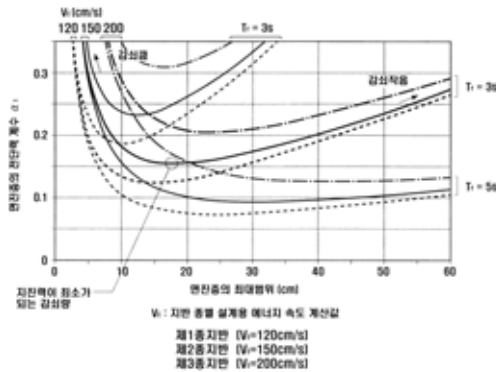


Fig. 5 일본의 포락해석용 도표

포락해석법은 구조물에 입력되는 에너지와 구조물이 소산하는 에너지가 일치(평형)함에 기인한 해석수법으로, 직접해석보다 시간을 단축시킬 수 있는 장점이 있다. 따라서 지진 등의 입력 총에너지 속도환산값 V_E , 면진주기 T_f , 감쇠기의 항복전단력계수 α_s 가 결정되면, 면진층의 최대변위 δ_{max} 와 면진층의 전단력 계수 α_1 의 응답계산치가 계산되는 도해적인 해석수법인 것이다. Fig. 5에 일본에서 사용되는 지반조건별 포락해석법에 의한 도표 예⁽⁴⁾를 나타내었다

4.2 포락해석용 도표의 작성

포락해석을 위한 각종 계수는 에너지 원리에 근거한 다음 식(7)⁽⁹⁾으로 산정된다.

$$W_e(t) + W_p(t) = E(t) \quad (7)$$

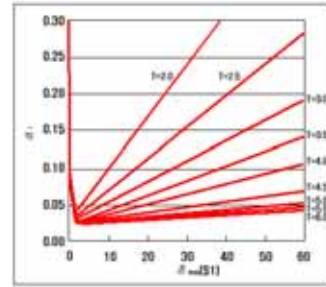
여기서

W_e : 면진부재(isolator)의 탄성변형 에너지 W_p :

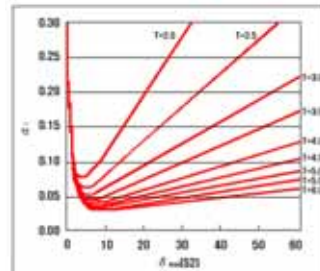
감쇠기(damper)의 흡수에너지

E : 지진입력 에너지

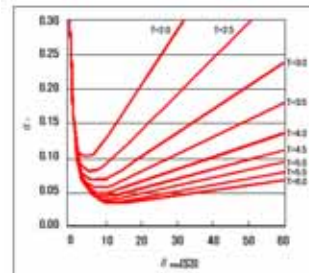
또한 W_e 는 면진부재의 수평강성, 면진층의 최대변형으로, W_p 는 감쇠기의 항복전단력, 감쇠기의 누적소성 변형량으로 산정한다.



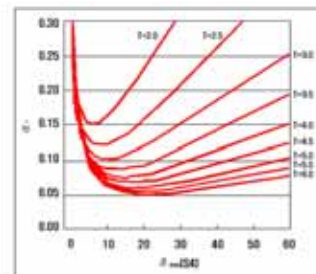
(a) S₁ 지반



(b) S₂ 지반



(c) S₃ 지반



(d) S₄ 지반

Fig. 6 개발된 지반조건별 포락해석용 도표

그러나 이러한 방법들에 의한 포락선 작성은 매우 어렵기 때문에, 일본건축학회(AIJ)의 면진구조설계지침(2001)⁽⁶⁾의 아이소레이터(적층고무 등)가 선형거동을, 감쇠기가 완전탄소성 복원력 특성을 보이는 경우의 계변수(감쇠기의 항복전단력 계수, 면진부재의 최대전단력 계수 등)로 산정하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

식 (8)에 AIJ의 지침에 의거 감쇠기의 항복전단력 계수, 면진부재의 최대전단력 계수를 이용하여 포락해석용 도표의 면진층 전단력계수 α_1 을 구하는 방법을 정리하였다.

$$\alpha_1 = \alpha_f + \alpha_s = \left(-\frac{7}{8}a + \sqrt{a^2 + 1}\right) \cdot \alpha_0 \quad (8)$$

여기서

$$a = 8\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_0}\right), \quad \alpha_0 = \frac{2\pi \cdot V_E}{T_f \cdot g}$$

$$\alpha_f = \frac{f \cdot Q_{\max}}{M_g} : \text{면진부재의 최대전단력계수}$$

$$\alpha_s = \frac{s \cdot Q_y}{M_g} : \text{감쇠기의 항복전단력계수}$$

$$T_f = \text{면진구조물의 고유주기}$$

g : 중력가속도

따라서 아래의 조건에 의한 포락해석용 도표를 Fig. 6과 같이 개발하였으며, 이 도표는 면진구조의 응답해석에 적절하게 이용될 수 있으리라 판단된다.

- 지반조건별 V_0 : S₁, S₂, S₃, S₄
- T_f = 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 (sec)

Fig. 7에 일반적인 면진구조물 설계절차와 본 연구에서 개발된 V_E 스펙트럼을 이용한 면진설계 절차를 나타내었다. 이로부터 개발된 V_E 스펙트럼의 효율성을 확인할 수 있었다.

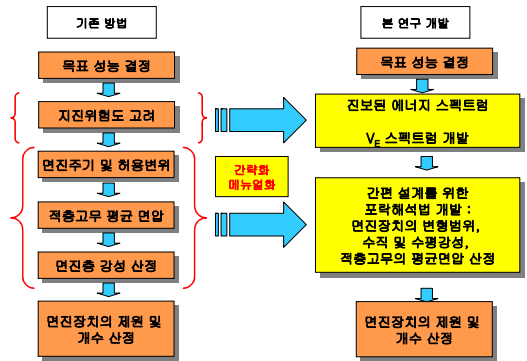


Fig. 7 면진구조물 설계절차

5. 결론

본 연구에서는 면진건물 설계를 수행하기 위한 에너지 등가 속도(V_E) 스펙트럼 및 포락해석용 도표를 제안하였으며, 주요한 연구결과는 다음과 같다.

- 1) UBC 97의 지진응답계수를 적용한 경계주기 T_g 및 최대속도 응답 V_0 를 지반조건별로 Table 3과 같이 제안하였다.
- 2) 지진 등의 입력 총에너지 속도환산값 V_E , 면진주기 T_f , 감쇠기의 항복전단력계수 α_s 가 결정되면, 면진층의 최대변위 δ_{\max} 와 면진층의 전단력 계수 α_1 의 응답계산치가 계산되는 도해적인 해석수법인 포락해석법 도표를 지반조건별로 산정하였다. 이 상과 같이 제안된 설계용 도표는 면진장치 등을 이용한 신축건물 또는 기존건물의 내진안정성 확보에 적용될 수 있으리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03-산학원A07-01)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 문태섭, 오상훈, 이선옥, “지진 입력 에너지에 의한 에너지

-
- 지 등가 속도 스펙트럼의 제안”, 대한건축학회논문집 구조계, 16권 4호, 2000.4, pp.3-9.
2. 대한건축학회, “건축물 하중기준 및 해설, 2000.
 3. 이현호, “지반조건 및 이력특성을 고려한 비탄성 요구스펙트럼 산정”, 대한건축학회논문집 구조계, 19권 7호, 2003. 7, pp.3-10.
 4. 日本免震構造協會, “免震構造入門”, Ohmsha, 1995.
 5. 日本建築學會, “免震構造設計指針”, 日本建築學會, 2001.
 6. 秋山宏, “Earthquake-Resistant Limit-state Design for Building”, Tokyo University, 1986.
 7. Applied Technology Council, “Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings,” ATC, Report No. ATC 3-06, 2nd Printing, April 1984.
 8. International Conference of Building Officials, “Uniform Building Code,” International Conference of Building Officials, Vol. 2, April 1997.
 9. Building Seismic Safety Council, “NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures,” Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management, Report No. FEMA 450, Washington D. C., 2003.
- (접수일자 : 2005년 4월 21일)