

특정지반에 적용할 설계응답스펙트럼에 대한 고찰

A Study on the Applicatin of Design Response Spectrum to a Specific Soil Profile

박형기*
Park, Hyung-Ghee

조양희*
Joe, Yang-Hee

이정수**
Lee, Jung-Soo

ABSTRACT

This paper is for a reasonable selection of design response spectra for the seismic design of specific types of soil-structure interaction systems, e.g., underground structures within flexible soil profiles or structures on the shallow soil layers on the stiff bed rock. The existing backup data used for determining the design response spectra of the Code have been investigated and evaluated. For this purpose, various types of free field analyses have been performed using one-dimensional wave propagation theory considering the nonlinear properties of the soil profile. As a result, a reasonable approach of determining input response spectra for specific soil profiles has been proposed to be compatible to the design response spectra of the Code.

1. 서론

1995년 1월에 발생한 고베지진 후 정부는 자연재해대책법⁽¹⁾을 전면 개정하여 지진재해가 사회적으로나 경제적으로 큰 영향을 미칠 수 있는 17개의 각종시설에 대해서 내진설계기준을 제정하여 시행하도록 하였다. 이에 관련하여 건교부에서는 소관 시설에 대한 내진설계기준을 보완하거나 신규로 제정하기 위한 연구 계획을 수립하고 한국지진공학회에 연구수행을 위탁하게 되었으며, 그 결과로 내진설계기준연구(II)⁽²⁾가 발표되었다. 연구 내용중에 지진하중 결정에 기본이 되는 설계지반운동이 제시되어 자연재해대책법의 대상시설에 대한 내진설계기준 작성에 반영되고 있다^{(3),(4)}.

구조물의 설계시 작용시킬 지진하중의 결정에 가속도계수, 설계응답스펙트럼, 강진 지속 시간 등이 매우 중요한 요소이다. 내진설계기준연구(II)에는 규정된 평균 지반특성을 기준으로 지반종류 S_A 또는 S_B 로 분류되는 지반에서 기초저면과 기반암사이에 3.048m이상의 토층

* 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수, 정회원

** 인천대학교 토목환경시스템공학과 석사과정

을 가지는 경우와 깊은 기초를 가지는 구조물이나 지하구조물의 내진설계시에 적용시켜야 할 설계응답스펙트럼에 대한 정의가 불명확하다.

따라서 이 연구에서는 설계응답스펙트럼의 형상 결정에 관한 연구 결과를 고찰하고, 1차원 파전달이론에 기초한 지반응답해석을 수행하고 그 결과를 분석 고찰하여 타당성있는 설계응답스펙트럼의 결정 방안을 제안하고자 한다.

2. 내진설계기준연구(II)의 설계응답스펙트럼

2.1 지반종류의 분류와 절차

두께 30.0m미만의 토층을 가진 부지에서는 전체 토층이 지표면 지반운동에 중요한 영향을 미치며, 30.0m를 초과하는 단단한 토층으로 이루어진 지반의 경우에는 상부 30.0m~50.0m의 토층에 지반운동의 특성이 좌우되는 경향을 보인다⁽⁵⁾. 이 경우에 있어서 암반과 토층지반의 전단파속도가 지배적인 역할을 한다. 이에 근거하여 내진설계기준연구(II)에서는 상부 30.48m에 대한 평균 지반특성으로 지반을 $S_A \sim S_F$ 의 6가지로 분류하도록 표 1과 같이 규정하고 있다.

표 1 지반의 분류

지반종류	지반종류의 호칭	지표면 아래 30.48m 토층에 대한 평균값		
		전단파속도 V_s , (m/s)	표준관입시험, $\bar{N} (\bar{N}_{CH})$ (blow/foot)	비배수전단강도 \bar{s}_u , (kPa)
S_A	경암지반	1500 초과	-	-
S_B	보통암지반	760에서 1500		
S_C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360에서 760	> 50	> 100
S_D	단단한 토사지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
S_E	연약한 토사지반	180미만	< 15	< 50
S_F	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

지반종류의 분류 절차는 그림 1에 보인 바와 같이 이루어질 수 있다^{(6),(7)}. 표 1에 기술된 기준에 따라 지반종류를 분류할 때 예외적으로 기반암과 확대기초 또는 매트기초 사이에 3.048m이상의 토층이 존재한다면 그 부지가 평균 지반특성에 따른 기준에 의하여 지반종류 S_A 와 S_B 로 분류되더라도 암반등급인 지반종류 S_A 와 S_B 로 분류될 수 없도록 내진설계기준연구(II)에서 규정하고 있다.

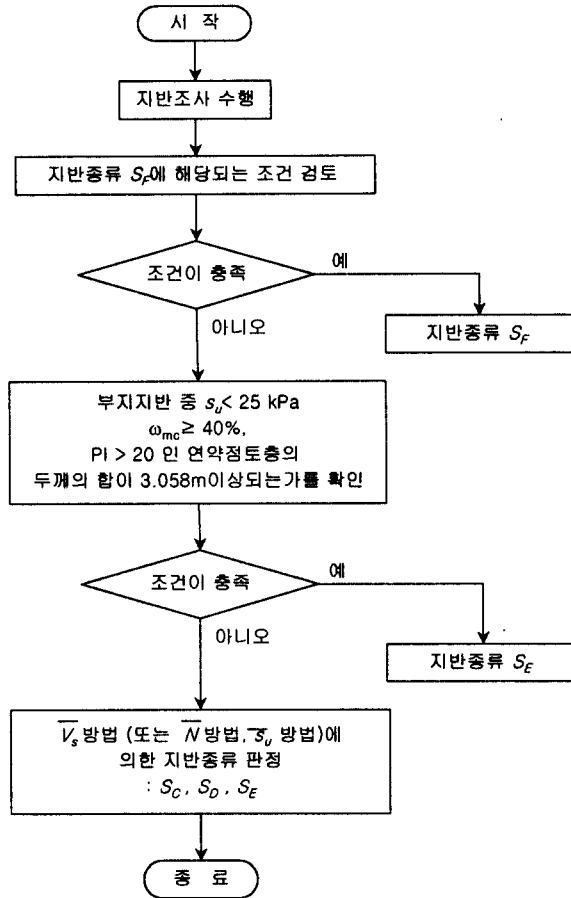


그림 1 지반종류의 분류 절차

2.2 응답스펙트럼의 형상에 미치는 토층의 영향

지반운동이 암반층으로부터 상부 토층으로 전파될 때 암반층의 지반운동은 증폭 또는 저하된다. 이러한 현상은 암반과 단단한 상부 토층 사이에 연약한 토사층이 존재하는 비균질 부지에서 보다 복잡하게 나타난다. 다음과 같은 부지의 특성이 지표면 지반운동의 특성, 특히 증폭 또는 저하 정도와 지배적인 진동수에 영향을 미친다.

- 토층의 두께
- 암반층과 토층의 전단파 속도
- 토층/암반층의 임피던스비 (여기서, 임피던스비는 단위체적중량과 전단파속도의 곱에 대한 비를 나타냄)
- 토층의 특성(전단계수, 감쇠비 등)

지진시 지표면상 지반운동의 특성을 그림 2와 같이 지반종류에 따라 두 인자(C_a , C_v)로 표시한 응답스펙트럼으로 나타낼 수 있다⁽⁸⁾. 내진설계기준연구(II)에서도 이 응답스펙트럼의 표현 방법을 따랐으며, 단주기 범위의 계수 C_a 와 중간주기 범위의 계수 C_v 는 UBC⁽⁶⁾를 참조하여 결정

되었다. 지반종류 S_B (보통암지반)을 기준으로 각 지반종류마다 이 계수들의 비, F_3 와 F_1 을 구하여 1989년 Loma Prieta지진시 실측된 자료를 이용하여 다양한 지질학적 지반 구성별로 평균증폭계수를 구하고 회귀분석으로 얻은 결과⁽⁸⁾와 비교하면 그림 3과 그림 4에 보인바와 같다.

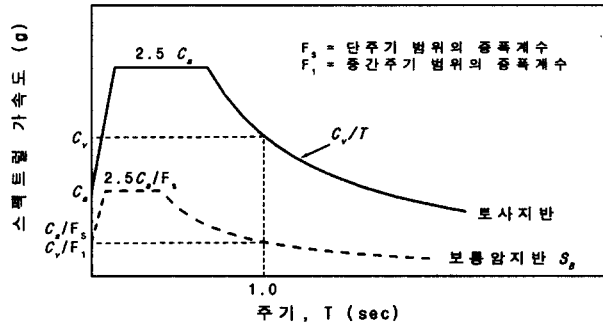


그림 2 부지지반의 특성을 반영한 응답스펙트럼 작성법

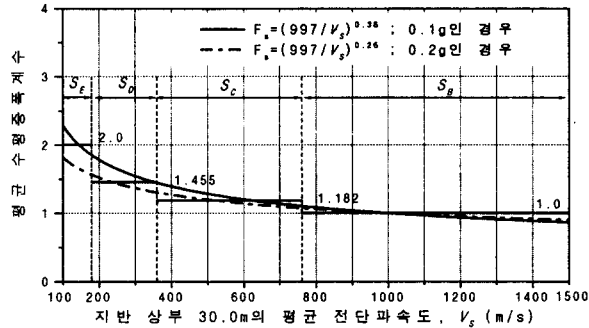


그림 3 내진설계기준연구(II)의 지진구역 I에서 각 지반종류별 S_B 지반에 대한 C_a 의 비, F_3

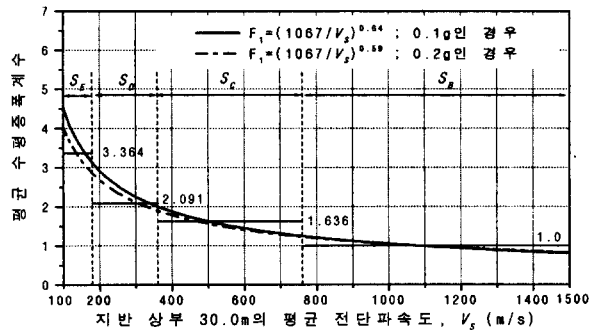


그림 4 내진설계기준연구(II)의 지진구역 I에서 각 지반종류별 S_B 지반에 대한 C_v 의 비, F_1

내진설계기준연구(II)에 의하면 지중구조물의 내진설계를 위한 입력운동으로서 기반암(지반

종류 S_A 또는 S_B)에서의 지진가속도계수와 설계응답스펙트럼으로 정의 할 수도 있고, 또한 지표면에서의 지진가속도계수와 설계응답스펙트럼을 사용할 수도 있음을 알 수 있다.

3. 기반암과 기초저면 사이에 얇은 토층이 있는 지반

내진설계기준연구(II)에는 상부 30.48m에 대한 평균 지반특성으로 판단할 때 지반종류 S_A 또는 S_B 일 경우라도 기반암과 확대기초 또는 매트기초 사이에 3.048m이상의 토층이 존재하게 되는 구조물의 내진설계를 위한 설계응답스펙트럼으로서 지반종류 S_A 또는 S_B 에 해당하는 설계응답스펙트럼을 사용할 수 없도록 규정되어있다. 이와 관련하여 이 연구에서는 지반운동이 암반층에서 상부 토층으로 전파하는 것으로 가정하여 convolution process에 의해 지반응답해석을 수행하고 그 결과를 검토하여 이 경우에 적용할 수 있는 설계응답스펙트럼의 작성 방안을 제안하고자 한다.

Convolution process에 의한 접근방법의 적용은 먼저 지반종류 S_B (또는 S_A)의 설계응답스펙트럼을 만족시키는 인공지진가속도시간이력을 SIMQKE⁽¹⁰⁾로 작성하고, 이를 그림 5에 보인 바와 같이 암반노두(B점, 지반종류 S_B (또는 S_A))에 입력시킨다. 암반노두 B점의 지반운동의 주요 진동수 분포와 지속시간은 C점의 그것들과 거의 동일하다. 이 때 지반 매질의 비선형 거동 특성을 고려한 1차원 파전달이론에 의한 지반응답해석을 수행하여 지표면상의 A점에서 가속도시간이력을 구하고 이로부터 응답스펙트럼을 계산한다. 그림 6은 부지지반이 지반종류 S_B (보통암지반)위에 토층 두께 5m(모델 $S_B - S_{C2} - 5$), 10m(모델 $S_B - S_{C2} - 10$), 20m(모델 $S_B - S_{C2} - 20$)의 전단파속도 $V_S = 400\text{m/s}$ 인 매우 조밀한 토사지반(지반종류 S_C)으로 구성된 부지지반에 대한 convolution process로 지반응답해석한 결과이다. 이 해석에서는 SHAKE를 수정한 M-SHAKE⁽⁹⁾를 이용하여 그림 7과 같은 토사지반의 역학적 성질의 비선형성을 고려하고 그림 8과 같은 S_B 지반에 상응하는 가속도시간이력을 적용하였다.

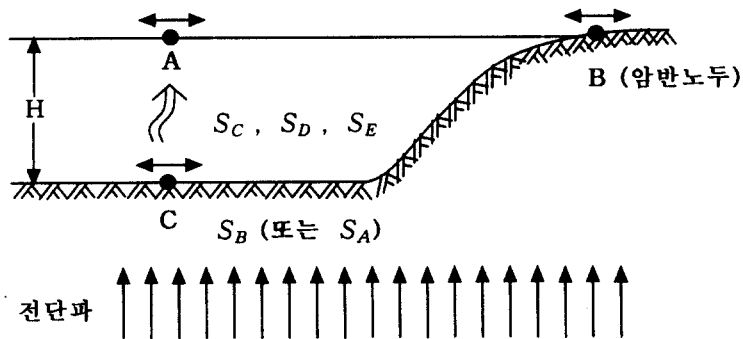


그림 5 수직으로 진행하는 전단파를 받는 탄성체상의 토층지반

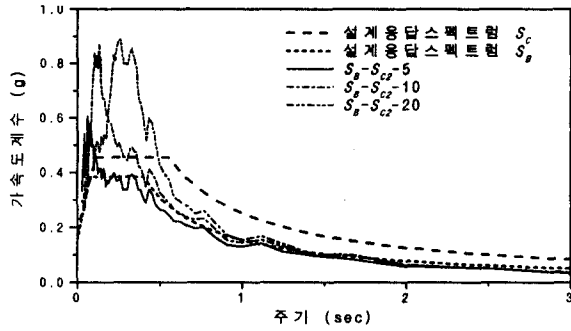


그림 6 설계응답스펙트럼과 지반응답해석 결과

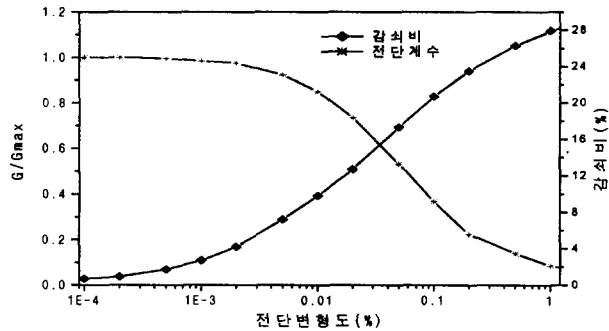
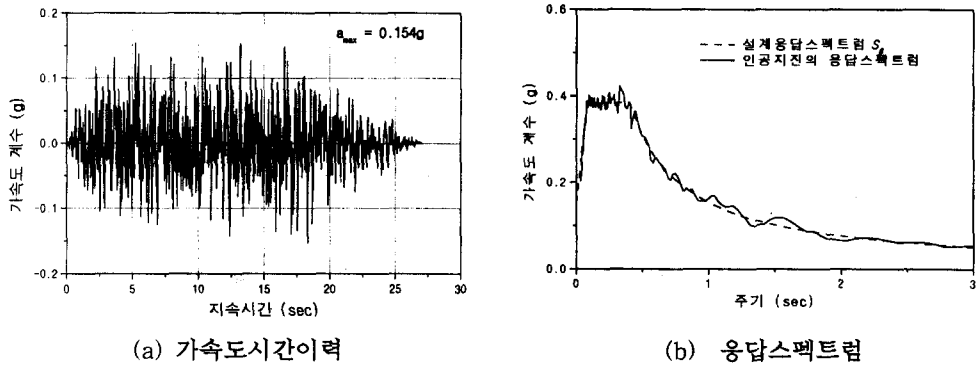


그림 7 토사지반의 전단변형도- 전단계수 및 감쇠비 관계



(a) 가속도시간이력

(b) 응답스펙트럼

그림 8 지반종류 \$S_B\$에 상응하는 가속도시간이력과 응답스펙트럼

그림 6을 고찰하면, 지표면상의 응답스펙트럼을 수정없이 사용하면 내진설계기준연구(II)에서 규정한 표준설계응답스펙트럼의 증폭계수 결정 배경과는 일관성이 결여된 결과가 된다. 따라서 계산된 응답스펙트럼의 증폭계수는 S_c 지반의 증폭계수보다 크지 않게 결정하는 것이 합리적이라 판단된다. 예로서 이를 근거로 모델 $S_B - S_{c2} - 10$ 의 지반 구성에 대해 지표면상의 응답스펙트럼을 작성하면 그림 9와 같이 된다.

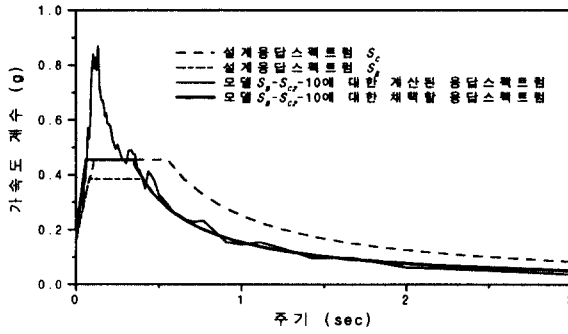


그림 9 지표면상의 계산된 응답스펙트럼과 채택할 응답스펙트럼

4. 지하구조물이 설치되는 지반

지하구조물의 내진설계에서는 지반운동의 공간적 변화, 즉 수직, 수평방향으로의 지반운동의 변화를 고려하여 지진하중의 크기가 결정되어야 한다. 수직방향으로의 지반운동 변화를 해석하는 방법으로는 지표면상에서 정의된 설계응답스펙트럼으로부터 deconvolution process에 의하여 지반운동을 결정하는 방법과 기반암에서 정의된 설계응답스펙트럼을 이용하는 convolution process에 의한 방법이 있다. 이론적으로는 두 가지 방법에 의하여 계산된 결과는 같아야 한다 그러나 실제에 있어서는 응답스펙트럼의 증폭계수를 결정할 때 실측된 자료로부터 구한 그림 3과 그림 4에서 보인 바와 같은 평균 증폭계수의 회귀곡선으로부터 지반종류별로 하나의 대표값으로 나타낸 결과와 응답스펙트럼으로부터 인공가속도시간이력을 작성할때에 발생하는 차이로 두 방법에 의한 결과는 다소 차이를 보일 것으로 기대된다.

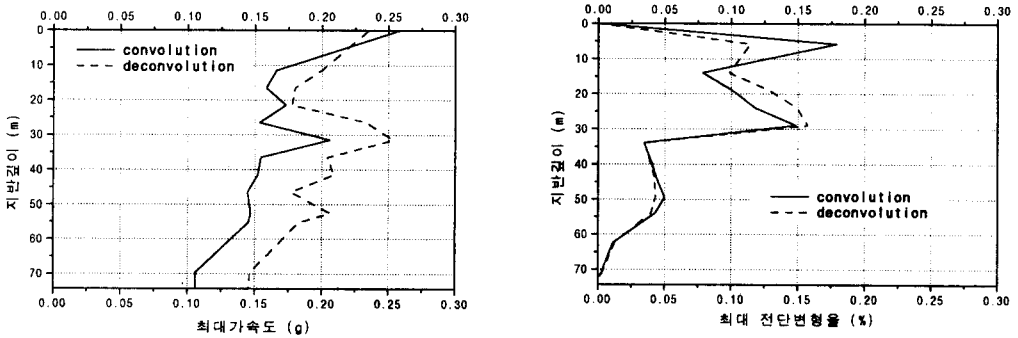
그림 10과 같은 부지지반에 대하여 1차원 파진달이론으로 deconvolution process와 convolution process에 의해 지반응답해석을 수행하였다. Deconvolution process에서는, 상부 30.48m에 대한 평균전단파속도로 지반종류를 분류하면 S_D 에 해당되므로 이에 상응하는 설계응답스펙트럼을 목표로 인공가속도시간이력을 작성하여 지표면에 입력시켜 지반 매질의 비선형성을 고려한 지반응답

G.L. 0.0m					
G.L. -11.4m	매립층	$V_s=130\text{m/s}$	$\gamma=1.9\text{ t/m}^3$	$G_{\max}=3276.53\text{ t/m}^2$	$\nu=0.48$
G.L. -31.4m	실트질모래 1	$V_s=200\text{m/s}$	$\gamma=1.92\text{ t/m}^3$	$G_{\max}=7836.73\text{ t/m}^2$	$\nu=0.49$
G.L. -52.5m	실트질모래 2	$V_s=310\text{m/s}$	$\gamma=2.03\text{ t/m}^3$	$G_{\max}=19906.43\text{ t/m}^2$	$\nu=0.48$
G.L. -55.2m	자갈층	$V_s=330\text{m/s}$	$\gamma=2.03\text{ t/m}^3$	$G_{\max}=22557.86\text{ t/m}^2$	$\nu=0.48$
G.L. -69.6m	풍화암	$V_s=600\text{m/s}$	$\gamma=2.20\text{ t/m}^3$	$G_{\max}=80816.33\text{ t/m}^2$	$\nu=0.45$
G.L. -74.3m	연암	$V_s=1500\text{m/s}$	$\gamma=2.60\text{ t/m}^3$	$G_{\max}=596938.78\text{ t/m}^2$	$\nu=0.463$
	경암	$V_s=1500\text{m/s}$	$\gamma=2.63\text{ t/m}^3$	$G_{\max}=603826.53\text{ t/m}^2$	

그림 10 사례 해석의 대상 부지지반

해석을 수행한다. Convolution process에서는 지반종류 S_A 에 해당하는 설계응답스펙트럼을 목표로 가속도시간이력을 작성하여 경암층(기반암)의 상부에 입력시킨다.

지반응답해석 결과로서 지반깊이에 따른 최대가속도와 최대전단변형도를 그림 11과 같이 얻을 수 있었으며, 기반암을 취급한 경암층의 상부에서의 계산된 응답스펙트럼은 그림 12와 같다. 해석결과를 고찰하면 각 process로 계산된 지하구조물 설계에 작용시킬 지진하중의 대소는 지하구조물의 설치위치에 따라 달라하므로 타당성있는 설계 수행의 판단은 다른 관점에서 이루어져야 할 것이다. 즉 증폭계수를 사용하여 지표면에서 정의한 설계응답스펙트럼은 기반암의 설계응답스펙트럼보다 불확실성이 더 많이 포함된 것이므로 기반암을 기준으로 convolution process에 의한 해석결과를 지하구조물의 내진설계에 반영하는 것이 보다 타당할 것으로 판단된다.



(a) 최대가속도

(b) 최대전단변형률

그림 11 지반깊이에 따른 최대가속도 및 최대전단변형률

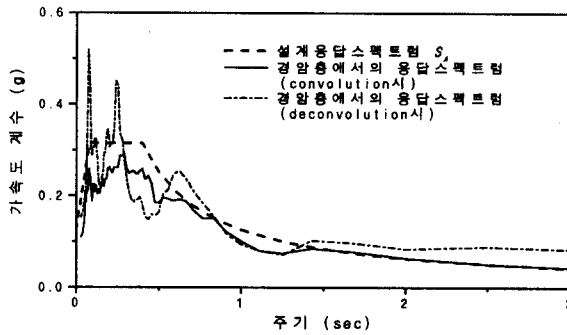


그림 12 경암층(기반암)에서의 응답스펙트럼

5. 결론

내진설계기준연구 (II)에서 제시된 규정의 기술적 배경과 일관성을 유지하며 타당성있게 내진설계기준연구(II)에서 명시되지 않은 특정지반에 적용할 설계응답스펙트럼의 선택이 이루어질 수 있는 방안을 제시하기 위하여 먼저 설계응답스펙트럼 작성에 관련된 연구자료를 조사 분석하

고, 1차원 파전달이론에 의한 지반응답해석을 통한 분석 고찰하였다. 그 결과로서 다음과 같이 제안하고자 한다.

(1) 기반암과 기초저면 사이에 얇은 토층이 있는 지반의 설계응답스펙트럼은 기반암(지반종류 S_B 또는 S_A)에 부합되는 인공가속도시간이력을 사용한 convolution process로 지표면상의 응답스펙트럼을 구하되 상부토층에 해당되는 증폭계수보다 크게 택할 필요는 없다.

(2) 지하구조물이 설치되는 지반의 경우에 사용할 설계응답스펙트럼은 기반암에 부합되는 인공가속도시간이력으로 지반깊이에 따른 변위를 구하여 지하구조물의 내진설계에 필요한 지진하중을 구하는 것이 바람직하다.

6. 참고문헌

1. 자연재해대책법(법률 제 4993호) 제 34조(1995), "내진설계기준의 설정".
2. 건설교통부(1997), "내진설계기준연구(Ⅱ), 제 1권 내진설계성능기준", 한국지진공학회.
3. 한국가스안전공사(1998), "도시가스 배관의 내진설계 연구".
4. 환경부(1999), "상수도시설 내진설계기준 마련을 위한 연구".
5. SEAOC(1999), "Recommended Lateral Force Requirements and Commentary".
6. International Conference of Building Officials(1997), "Uniform Building Code".
7. BSSC of the National Institute of Building Sciences(1997), "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1 : Provisions(FEMA 302)".
8. BSSC of the National Institute of Building Sciences(1997), "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 2 : Commentary(FEMA 303)".
9. 박형기(1995), "충상지반내 수직이동 수평지진파의 해석", 인천대학교, 공업개발연구소 연구논문집, 제 10집 제 1권.
10. SIMQKE(1976), User's Manual and Documentation, Department of Civil Engineering, M.I.T.