

## 구조물-지반 상호작용 영향을 고려한 새로운 지반계수 평가방법에 대한 제안

### Proposed New Evaluation Method of the Site Coefficients Considering the Effects of the Structure-Soil Interaction

김 용 석\*

Kim, Yong-Seok

#### ABSTRACT

Site coefficients in IBC and KBC codes have some limits to predict the rational seismic responses of a structure, because they consider only the effect of the soil amplification without the effects of the structure-soil interaction. In this study, upper and lower limits of site coefficients are estimated through the pseudo 3-D elastic seismic response analyses of structures built on linear or nonlinear soil layers considering the structure-soil interaction effects. Soil characteristics of site classes of A, B, and C were assumed to be linear, and those of site classes of D and E were done to be nonlinear and the Ramberg-Osgood model was used to evaluate shear modulus and damping ratio of a soil layer depending on the shear wave velocity of a soil layer. Seismic analyses were performed with 12 weak or moderate earthquake records, scaled the peak acceleration to 0.1g or 0.2g and deconvoluted as earthquake records at the bedrock 30m beneath the outcrop. With the study results of the elastic seismic response analyses of structures, new standard response spectrum and upper and lower limits of the site coefficients of  $F_a$  and  $F_v$  at the short period range and the period of 1 second are suggested including the structure-soil interaction effects.

#### 1. 서론

구조물의 내진설계에서 지반조건과 구조물-지반 상호작용 영향을 고려한 구조물의 지진해석은 구조물의 설계응답가속도를 합리적으로 예측하기 위해서는 필수적인 것이다. IBC<sup>(1)</sup>와 KBC2005<sup>(2)</sup>에서 제시한 지반분류체계는 실무적인 측면에서 지진해석을 위한 지반분류가 세분화되어 있지 못하고, 지반분류를 위한 지반특성 판정에서도 실무자의 주관적 판단에 따라 큰 차이가 발생할 수 있게 되어있다. 한편, IBC와 KBC 기준에서 지반을 상부 100ft(30.48m) 지반의 지반특성값 평균에 따라 분류하는데, 이 규정은 물헝기초의 경우에는 부적합하고,<sup>(3)</sup> 지반분류를 위한 전단파속도 체계도 SI 단위체계에 부적합하여 표1에 나타난 새로 제안한 지반분류체계를 사용하였다.

\* Member-Mokpo National University, Professor (대표저자 : [yskim@mokpo.ac.kr](mailto:yskim@mokpo.ac.kr))

또, IBC에서 지반종류 별로 하나의 대표적인 지반계수는 제시하고 있지만, 각 지반을 대표하는 지반특성값은 제시하지 않고 지반종류 별로 지반특성값 범위를 계단식으로 규정하여 지반계수의 선형보간이 어렵게 되어 있다. 그런데, 지반특성값에 따른 지반계수의 선형보간이 허용되지 않고, 상부 30m 지반층의 하부에 단단한 지반이 존재하는 경우에는 지반특성치 평균값이 커져 지반분류 경계값을 약간 만 넘겨도 지반종류가 달라지고 지반계수가 크게 달라져 상당한 과소설계가 되는 문제점이 발생한다. IBC 기준의 또 다른 문제점으로는 그림1에 나타난 지진응답스펙트럼을 작성할 때 필요한 지반계수  $F_a$ 와  $F_v$ 는 동일한 지반에 대해서 구해져야 하는데, 지반 B를 제외한 모든 지반에서  $F_a$ 와  $F_v$ 를 규정한 전단파속도가 상당히 달라서 IBC 지진응답스펙트럼의 신뢰성이 크게 떨어진다.<sup>(4)</sup> 그런데, 표9에 나타난 것처럼 B, C, D, E 지반에서 전단파속도를 한 단계씩 더 세분화하고 각 전단파속도에서 지반계수  $F_a$ 와  $F_v$ 를 산정하면 입력지진수준 뿐만 아니라 지반특성값에 따른 직선보간도 가능하다.

이 연구에서는 새로운 지반분류체계에 따라 선형과 비선형 지반 위에 놓인 구조물의 탄성지진응답해석을 각 지반을 대표하는 전단파속도에 대해 수행하여 탄성응답스펙트럼을 구하고, 그림1에 나타난 것과 같은 표준응답스펙트럼으로 최적화하기 위한 새로운 방안을 검토하고 지반계수  $F_a$ 와  $F_v$ 를 산출하여 구조물-지반 상호작용영향을 고려한 지반계수의 상·하 한계값을 평가하였다.

표1. 수정 제안된 지반분류

지반종류	지반종류의 호칭	알게 묻힌기초 밑 30m에 대한 평균 지반특성		
		전단파속도 (m/sec)	SPT N-값 (타격횟수/30cm)	비배수전단강도 (kPa)
A	경암 지반	> 1600	-	-
B	보통암 지반	800 - 1600		
C	매우 조밀한 토사 지반 또는 연암 지반	400 - 800	> 50	> 100
D	단단한 토사 지반	200 - 400	10 - 50	50 - 100
E	연약한 토사 지반	< 200	< 10	< 50

## 2. 구조물-지반 지진응답해석 모델링

주파수영역에서 선형 및 비선형 지반이 구조물의 수평방향 지진응답에 미치는 영향을 검토하기 위하여 구조물-지반 체계 지진응답해석을 한 번에 수행할 수 있는 P3DASS 의사 3-D 유한요소 프로그램을 이용하여 지진해석을 수행하였다.<sup>(6)</sup>

기초지반은 그림1에 나타난 것처럼 단단한 암반 위에 놓여 있는 것으로 가정하여 유한요소해석을 위해 기초지반을 먼저 각 층 별로 나눈 후에 등가원형기초 아래 원통형 중심영역(Core Region)과 중심영역을 제외한 외부영역(Far Field)으로 나누고, 다시 중심영역 지반은 원주 주변과 수직 변위를 고려하기 위해 환상유한요소로 세분화하였으며 외부영역은 이론 해로 구한 Consistent Transmitting Boundary 요소를 선형 해석의 경우에는 기초가장자리에 비선형 해석의 경우에는 기초가장자리에서 대략 기초반경의 6배 거리에 있는 것으로 모델링하였다.

지반은 암반이나 단단한 지반 위에 30m 두께로 놓여 있으며, 균질하고, 탄성이나 비탄성이며, 점

성이 있는 등방성 특성을 갖은 것으로 가정하였다. 또, 초기 지반특성은 구조물-지반체계에 대한 지진해석 전에 구조물-지반 상호작용 영향이 미치지 않는 자유장 영역에 대한 비선형 지진해석을 통해서 사전 평가된 특성이 일정하게 유지되는 것으로 가정하였다. 이 연구의 지진해석에 고려한 지반의 전단파속도는 표9에 나타난 것처럼 지반 종류에 따라 100m/sec와 4800m/sec사이에서 고려하였으며, 지반의 단위중량은 16.7kN/m<sup>3</sup>에서 26.5kN/m<sup>3</sup>까지 지반 종류에 따라 변하는 것으로 가정하였다.

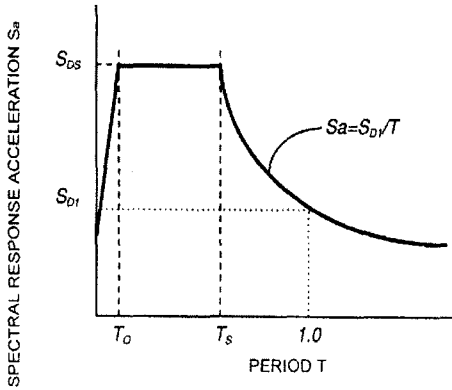


그림 1. IBC 응답스펙트럼

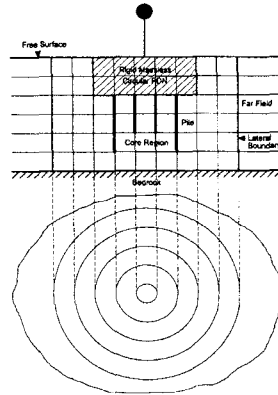


그림 2. 의사 3-D F.E.M. 모델

지반의 포아슨비와 초기 감쇠계수는 0.3과 0.05로 가정하였다. 한편, 지반의 비선형 구성방정식으로 Ramberg-Osgood 모델을 사용하였는데, 지반의 전단변형에 따라 전단탄성계수와 감쇠계수를 식(1)과 식(2)로 나타낼 수 있으며, 항복전단변형  $\gamma_y$ 는  $5 \times 10^{-5}$ 으로 가정하고 토질에 따라 정해지는 실험계수  $\alpha$ 는 전단파속도 400, 200, 100 m/sec에 따라 각각 0.025, 0.1, 0.25로 가정하였다.

$$G = \frac{2 \cdot G_0}{1 + \sqrt{1 + 4\alpha \frac{\gamma}{\gamma_y}}} \quad (1)$$

$$D = \frac{2}{3\pi} \frac{\sqrt{1 + 4\alpha \frac{\gamma}{\gamma_y}} - 1}{\sqrt{1 + 4\alpha \frac{\gamma}{\gamma_y}} + 1} \quad (2)$$

여기서 G와 G<sub>0</sub>는 실제 및 초기 전단탄성계수이고,  $\gamma$ 는 전단변형, D는 감쇠계수이다.

기초는 일반적으로 고려되는 1.2m 정도의 묻힘(E)이 된 반경(R) 15m 정도의 중간 크기의 강체운 통기초로 가정하고, 기초의 단위중량은 2.4t/m<sup>3</sup>인 것으로 가정하였다.

지진해석에 사용한 지진기록은 표2에 나타난 것처럼 서울인공지진과 울진계측지진 기록을 포함한 중·약진 지진기록을 대표하는 2개의 인공 지진기록과 10개의 실측 지진기록 등 총 12개의 지진기록을 선정하여 명목 상 최대지진가속도를 0.1g와 0.2g로 조정하여 사용하였다. 그러나 이 지진기록들은 지표면에 나타난 지반종류 B에 해당하는 노출암반에서 기록된 것들이어서 구조물-지반체계의 정확한 지진해석을 위해서 지반 B (Cs=1000m/sec)에 대한 Deconvolution 과정을 통해서 연약지반 밑 암반에서의 지진기록을 생성해서 사용하였다. 구조물-지반체계에 대한 지진해석은 0에서 2초 사이의 고

유주기를 갖는 구조물에 대해 0.1초 고유주기 간격으로 주파수 영역 0-20 Hz에서 수행하였다.

표2. 중·약진 지진기록

No.	EQ. Name		Component	Max. Response (m-sec)			Natural Period (sec)	Duration (sec)	Epicentral Distance (km)	Site Class	
				Acc.	Vel.	Displ.					
1	Simulated EQ.	St. Louis, USA	-	1.044	0.126	0.039	0.13	80.00	-	Bedrock	
2		Seoul, Korea		1.072	0.047	0.002	0.27	20.00	-		
3	San Fernando Lake Hughes	1971	E-W	1.885	0.056	0.009	0.15	36.89	24		
4			N-S	1.497	0.084	0.019	0.19				
5	N. Palm Springs	1986	ARM270	1.015	0.052	0.062	0.17	11.05	46		
6			ARM360	1.267	0.034	0.005	0.15				
7	Northridge San Marino SMA360	1994	E-W	1.139	0.074	0.008	0.21	40.00	35		
8			N-S	1.467	0.073	0.011	0.16				
9	Parker Field	1966	C12320	0.620	0.068	0.035	0.16	44.11	15		SB
10	Loma Prieta	1989	PJH315	0.697	0.091	0.034	0.40	40.00	78		
11	ChiChi, Taiwan	1999	TCU046	1.300	0.398	0.374	0.18	85.00	14		
12	Ulgin, Korea	2004	WSC N-S	0.07	0.023	-	0.15	120.00	140		Bedrock

### 3. 선형지반을 고려한 탄성응답스펙트럼의 지반계수

선형지반 위에 세워진 구조물의 탄성응답스펙트럼에 대한 지진응답해석을 0.1g 지반가속도 수준에 대해서 수행하였고, 그림3에는 지반의 전단파속도가 4800, 800, 400, 200, 100 m/sec인 경우에 12개 탄성지진응답의 평균값에 표준편차를 더한 스펙트럼을 나타냈다. 지진해석 결과에 의하면 응답스펙트럼이 지반의 고유주기영역에서 구조물-지반 상호작용 영향으로 상당히 크게 증폭되었으며, 연약지반 일수록 최대응답은 줄어들지만 넓은 폭에서 지진응답이 증폭되었다.

그림4~8에서는 탄성응답스펙트럼을 KBC 표준응답스펙트럼(Design Spectrum 1) 및 이 연구에서 제안한 표준응답스펙트럼(Design Spectrum 2)과 비교하고, 그에 따라 표준설계스펙트럼가속도 SDS와 주기1초의 설계스펙트럼가속도 SD1을 표3에 나타난 것처럼 산정하였다. KBC 표준응답스펙트럼(R.S.1)에서 SDS는 고유주기 0.1초에서 0.5초사이 응답스펙트럼가속도 값을 평균하여 구하고, SD1은 0.4초에서 2초사이 응답스펙트럼가속도 값을 평균하여 구하였으며, 이 연구에서 제안한 표준응답스펙트럼(R.S.2)에서는 SDS는 고유주기 0.1초에서 지반의 고유주기(Tp)에 0.2초를 더한 주기까지의 응답스펙트럼가속도 값을 평균하여 구하고, SD1은 주기 Ts (Tp+0.1)초에서 응답스펙트럼가속도 값이 SDS와 같도록 식 (3)을 이용하여 SDS에 (Tp+0.1)을 곱하여 구하였다.

$$S_a = S_{D1}/T \quad (3)$$

해석결과에 의하면 지반이 연암지반(전단파속도가 800m/sec이상)보다 단단할 경우에는 IBC와 이 연구에서 제안한 방법들로 구한 스펙트럼가속도 SDS와 SD1은 모두 거의 일치하게 나타났으나, 지반이 연약한 지반(전단파속도가 400m/sec이하)의 경우에는 구조물-지반 상호작용 영향으로 이 연구에서 제안한 표준응답스펙트럼(R.S.2)이 IBC 표준응답스펙트럼(R.S.1)보다 SDS의 경우에는 20%정도, SD1의 경우에는 30-40%정도 크게 증폭되는 것으로 나타났다. 따라서 연약지반(D나 E 지반)의 경우에는 구조물-지반 상호작용 영향도 내진설계에서 고려되어야 할 것으로 판단되었다.

표3에는 앞에서 구한 탄성설계스펙트럼 가속도로부터 B지반의 지반계수 Fa와 Fv를 1로 하여 B지반을 기준으로 표준화한 선형지반계수 Fa와 Fv가 나타나 있다.

표3. 선형지반 설계스펙트럼 가속도 Sds와 SD1 (단위 : g)

지반 가속도 수준 (g)	응답 가속도	Response Spectrum (R.S.)	지반종류 (Cs : m/sec)							비 고
			Rigid 4800	A 2400	B 1000	C 800	D 400	E		
								200	100	
0.10	Sds	R.S. 1	0.194	0.203	0.275	0.404	0.697	0.455	0.296	0.1 ≤ t ≤ 0.5
		R.S. 2	0.194	0.203	0.275	0.491	0.697	0.554	0.344	0.1 ≤ t ≤ Tp+0.2
	SD1	R.S. 1	0.107	0.108	0.111	0.113	0.155	0.276	0.299	0.4 ≤ t ≤ 2.0
		R.S. 2	0.107	0.108	0.111	0.123	0.279	0.360	0.413	SD1 = Sds*(Tp+0.1)

표4. 표준화한 선형 지반계수 Fa와 Fv

지반 가속도 수준 (g)	지반 계수	Response Spectrum (R.S.)	지반종류 (Cs : m/sec)							비 고
			Rigid 4800	A 2400	B 1000	C 800	D 400	E		
								200	100	
0.10	Fa	R.S. 1	0.7	0.74	1.0	1.5	2.5	1.7	1.1	To = 0.2 Ts
		R.S. 2	0.7	0.74	1.0	1.8	2.5	2.0	1.3	
	Fv	R.S. 1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.4	2.5	2.7	Ts = Sds/SD1
		R.S. 2	1.0	1.0	1.0	1.1	2.5	3.2	3.7	Ts = Tp+0.1

#### 4. 비선형지반을 고려한 탄성응답스펙트럼의 지반계수

비선형 지반 위에 세워진 구조물의 탄성응답스펙트럼에 대한 지진해석을 지반가속도 수준 0.1g와 0.2g에 대해서 수행하였고, 그림9와 10에는 지반가속도 수준이 0.1g일때 전단파속도가 200m/sec와 100m/sec인 D와 E 비선형 지반에 대한 탄성응답스펙트럼이 나타나 있고, 그림11과 12에는 지반가속도 수준이 0.2g인 경우의 탄성응답스펙트럼이 나타나 있다. 여기에서도 선형지반의 경우처럼 KBC 표준응답스펙트럼(Design Spectrum 1)과 이 연구에서 제안한 표준응답스펙트럼(Design Spectrum 2)을 구하여 비교하였으며, 표5에 나타난 비선형 지반을 고려한 단주기와 주기 1초의 설계스펙트럼 가속도 Sds와 SD1을 산정하였다.

해석결과에 의하면 표5에 나타난 것처럼 지반에 전단파속도가 400m/sec이상인 경우에는 거의 선형응답스펙트럼 양상을 나타냈고, 가속도 수준이 0.1g일때 전단파속도가 200~400m/sec인 D지반의 경우에 단주기 설계스펙트럼 가속도 Sds는 비선형성에 의한 지반감쇠의 증가로 30%정도 감소하였는데, 주기 1초의 설계스펙트럼 가속도 SD1은 10%정도 증가하였지만 큰 변화가 없어 장주기 영역에서는 비선형성 영향이 크지 않는 것으로 판단되었고, 전단파속도가 100m/sec인 E 지반의 경우 지반의 비선형 영향으로 단주기와 주기 1초의 설계스펙트럼 가속도가 거의 비슷하고 응답스펙트럼이 지반가속도의 50%수준으로 감소하는 Base Isolation현상이 발생하였다. 지반가속도 수준이 0.2g인 경우에도 0.1g인 경우와 유사한 지진응답가속도의 감소, Base Isolation현상 등 지반의 비선형성이 나타났는데 지반의 비선형 특성은 지진가속도 수준의 증가로 더 크게 나타났다. 그런데, 이러한 지반의 비선형성은 지반의 비선형 모델에 따라서도 크게 영향을 받기 때문에 지반에 대한 적절한 비선형 모델이 제시되어야 설계응답스펙트럼 가속도의 기준화가 가능할 것으로 판단되었다. 표6에는 앞에서 구한 탄성설계스펙트럼 가속도로부터 탄성 B지반을 기준으로 표

준화한 비선형 지반계수  $F_a$ 와  $F_v$ 를 산정하여 나타냈다.

선형과 비선형 지반에 놓인 구조물에 대한 지진해석 결과로부터 산정한 단주기 및 주기 1초의 지반계수  $F_a$ 와  $F_v$ 를 IBC에서 사용한 계측식을 수정한 식(4)로 계산한 것과 표7에서 비교하였다. 식(4)는 Borchardt가 지반의 전단파속도 1050m/sec를 기준으로 제안하여 IBC에서 사용한 식을 지반의 전단파속도를 1000m/sec로 변경하고 최적화하여 저자가 수정 제안한 식이다.<sup>(7)</sup>

$$F_a = (1000/C_s)^\alpha$$

$$F_v = (1000/C_s)^\beta \quad (4)$$

표5. 비선형지반 설계스펙트럼 가속도  $S_{DS}$ 와  $S_{D1}$  (단위 : g)

지반 가속도 수준 (g)	응답 가속도	Response Spectrum (R.S.)	지반종류 ( $C_s$ : m/sec)						비 고
			Rigid	A	B	C	D	E	
			4800	2400	1000	800	400	200	
0.10	$S_{DS}$	R.S. 1	N/A : Linear Site						0.1 ≤ t ≤ 0.5
		R.S. 2							0.1 ≤ t ≤ $T_p+0.2$
	$S_{D1}$	R.S. 1							0.4 ≤ t ≤ 2.0
		R.S. 2							$S_{D1} = S_{DS} \cdot (T_p+0.1)$
0.20	$S_{DS}$	R.S. 1							0.1 ≤ t ≤ 0.5
		R.S. 2							0.1 ≤ t ≤ $T_p+0.2$
	$S_{D1}$	R.S. 1							0.4 ≤ t ≤ 2.0
		R.S. 2							$S_{D1} = S_{DS} \cdot (T_p+0.1)$

표6. 표준화한 비선형 지반계수  $F_a$ 와  $F_v$

지반 가속도 수준 (g)	지반 계수	Response Spectrum (R.S.)	지반종류 ( $C_s$ : m/sec)						비 고
			Rigid	A	B	C	D	E	
			4800	2400	1000	800	400	200	
0.10	$F_a$	R.S. 1	N/A : Linear Site						$T_o = 0.2 T_s$
		R.S. 2							$T_s = S_{DS}/S_{D1}$
	$F_v$	R.S. 1							$T_s = T_p+0.1$
		R.S. 2							
0.20	$F_a$	R.S. 1							$T_o = 0.2 T_s$
		R.S. 2							
	$F_v$	R.S. 1							$T_s = S_{DS}/S_{D1}$
		R.S. 2							$T_s = T_p+0.1$

IBC 회귀식은 지진기록을 기초로 하여 실험적 연구와 지반의 응답수치해석을 통해서 얻어진 식으로 지진에 의한 지반의 비선형성이 반영되었다고 평가할 수 있는데, IBC 수정식에 의하면 지반의 전단파속도가 600m/sec보다 큰 단단한 지반의 경우에는 입력지진 가속도 수준이 0.1g와 0.2g일때 지반계수가 거의 같아 지반이 거의 선형의 특성을 보이는 것으로 나타났다.

연구결과는 지반이 선형인 경우와 지진가속도 수준이 0.1g와 0.2g일때 지반이 비선형인 경우에 대해서 산정한 지반계수를 나타내고 있다. IBC 수정식에 의한 값과 연구결과를 비교해보면, 전단파속도가 1000m/sec보다 빠른 단단한 선형지반의 경우에는 구조물-지반 상호작용 영향이 두드러지게 나타나지 않지만, 지반이 연약한 경우에는 구조물-지반 상호작용 영향이 상당히 심각하게 나타난 것을 알 수 있고, 지반의 비선형성을 고려할 경우에는 그 영향이 더 크게 나타났는데,

지진가속도 수준에 따라 지반계수의 한계값들을 나타내는 것을 알 수 있다. 그런데, 지반의 전단파속도가 100m/sec 정도로 낮은 지반의 경우 IBC 수정식으로는 지반계수가 최대를 나타내고 있지만, 지반의 비선형성을 고려한 이론적 해석결과에서는 상당히 작은 최소값을 나타내고 있어 심각한 차이를 보이는데, 전단파속도가 매우 작은 지반의 경우에는 실험에 의한 지반의 비선형 특성 모델을 마련해서 지반 F에 준하는 지반에 대한 특별한 해석이 필요한 것으로 판단되었다.

표8에는 표7에 나타난 선형 및 비선형 지반에 대한 구조물-지반 상호작용을 고려한 지진해석 결과를 지반종류별로 설계스펙트럼 가속도계수 Fa와 Fv의 상·하 한계값을 정리하였는데, Fa와 Fv의 상·하 한계값이 지반의 비선형 때문에 입력지진 가속도 수준에 따라 커지는 것을 알 수 있다. 이 표에 나타난 지반계수들은 입력지진 가속도와 지반의 전달파속도에 따라 선형보간이 가능하다.

표7. 수정식과 연구결과에 의한 지반계수 Fa 및 Fv의 비교

지반종류			A	B			C		D		E		비 고	
전단파속도 (m/sec)			2200	1600	1000	800	600	400	300	200	100			
Fa	IBC 수정식	계 측 식	0.1g	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.3	$Fa=(1000/Cs)^{0.36}$	
			0.2g	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.8	$Fa=(1000/Cs)^{0.26}$	
	연구결과	Linear								2.5	2.3	2.0	1.3	
			Nonlinear	0.1g	Linear경우와 같음					2.8	2.1	1.4	0.2	하한계값
		0.2g							3.2	2.1	1.0	0.2	상한계값	
		Fv	IBC 수정식	계 측 식	0.1g	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.8	2.2	3.0	4.6
0.2g	0.6				0.8	1.0	1.2	1.4	1.8	2.1	2.7	4.1	$Fv=(1000/Cs)^{0.62}$	
연구결과	Linear									2.5	2.9	3.2	3.7	
			Nonlinear	0.1g	Linear경우와 같음					2.8	3.2	3.6	0.5	하한계값
	0.2g								3.6	3.2	2.7	0.3	상한계값	

표8. 설계스펙트럼 가속도계수 Fa와 Fv의 한계값

지반종류			A	B			C		D		E		비 고
전단파속도 (m/sec)			2200	1600	1000	800	600	400	300	200	100		
Fa	입력지진 수준계수	0.10	0.8	0.9	1.0	1.8	2.2	2.8	2.1	1.4	0.2	하한계값	
		0.20	0.8	0.9	1.0	1.8	2.2	3.2	2.1	1.0	0.2	상한계값	
Fv	입력지진 수준계수	0.10	0.6	0.8	1.0	1.2	1.8	2.8	3.2	3.6	0.5	하한계값	
		0.20	0.6	0.8	1.0	1.2	1.8	3.6	3.2	2.7	0.3	상한계값	

## 5. 결론

이 논문에서는 내진설계를 위한 지반계수의 상·하 한계값 평가를 위해 선형과 비선형 지반 위에 세워진 구조물에 대한 구조물-지반 상호작용을 고려한 지진응답해석을 12개의 지진기록을 0.1g와 0.2g 가속도 수준으로 조정하여 수행하였다.

연구결과에 의하면 전단파속도가 1000m/sec 이상인 단단한 선형지반의 경우에는 지반의 비선형성이나 구조물-지반 상호작용 영향이 미미하지만, 전단파속도가 200~1000m/sec인 경우에는 지반의 비선형성과 구조물-지반 상호작용영향이 상당히 중요한 것으로 나타났으며, 전단파속도가 200m/sec 이하인 경우에는 비선형 지반을 고려한 특별한 지진해석이 필요한 것으로 판단되었다.

구조물-지반 상호작용 영향을 고려한 설계응답스펙트럼은 그림1에 나타난 것과 같은 기존 모델을 수정하여 작성할 수 있는데, 단주기 설계스펙트럼 가속도를 0.1초에서 지반고유주기

(Tp)+0.2초까지의 평균가속도로 하고, 단주기 가속도영역을 Tp+0.1초 까지 연장하였다. 주기 1초의 가속도는 Ts(Tp+0.1초)에서의 가속도를 기준으로 주기에 반비례하게 수정하였다.

또, 비선형 지반을 고려한 지진응답해석에서 지반의 비선형성을 합리적으로 고려하기 위해서는 정확한 비선형 지반특성모델이 필요하기 때문에 지반의 비선형성을 고려한 지반계수의 기준화는 지반에 대한 실험적 자료를 통한 비선형 지반모델 개발이 필요한 것으로 판단되었다.

### 참고문헌

1. International Building Code Council (IBC), 2003 International Building Code, pp.301~343.
2. 대한건축학회, 건축구조설계기준 (KBC2005), 2005, pp.89~119.
3. 김용석, "구조물-지반 상호작용과 지진해석", 한국지진공학회, 구미서관, 2005, p.105.
4. Dobry, R. et al., "New Site Coefficients and Site Classification System Used in Recent Building Seismic Code Provisions", Earthquake Spectra, V.16, No.1, Feb. 2000, pp.41~67.
5. Kim, Yong-Seok, Dynamic Response of Structures on Pile Foundations, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 1987, p.272.
6. Kim, Yong-Seok and Roesset, Jose M., "Effect of Nonlinear Soil Behavior on the Inelastic Seismic Response of a Structure", The International Journal of Geomechanics, V.4, No.2, June 2004, pp.104~114.
7. Borcherdt, R.D., "Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification)", Earthquake Spectra, Vol.10, 1994, pp.617~653.

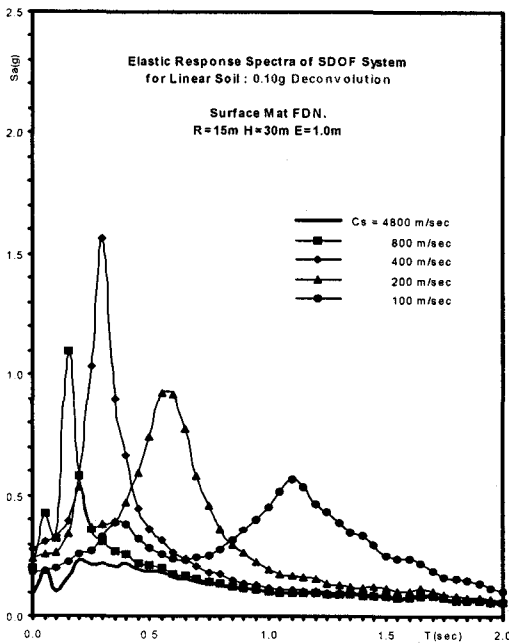


그림3. 탄성 Mean+S.D. 응답스펙트럼(선형지반)

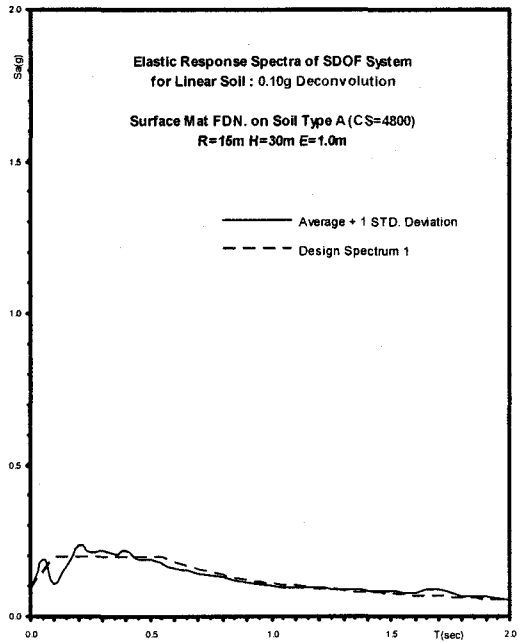


그림4. 탄성 Mean+S.D. 응답스펙트럼(A 지반)



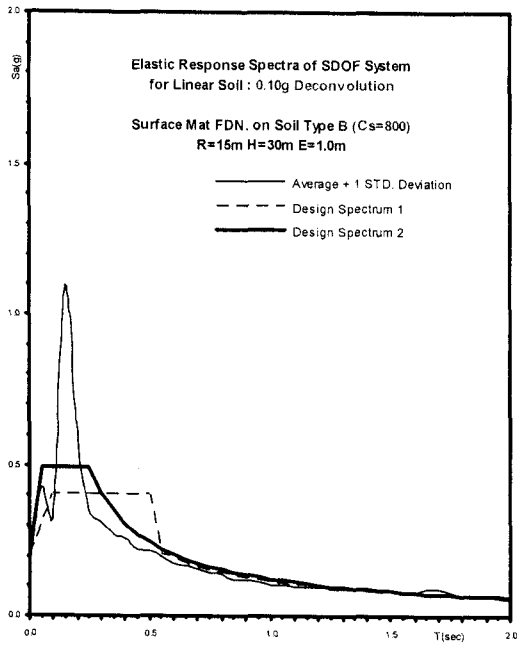


그림5. 탄성 Mean+ S.D. 응답스펙트럼(B지반)

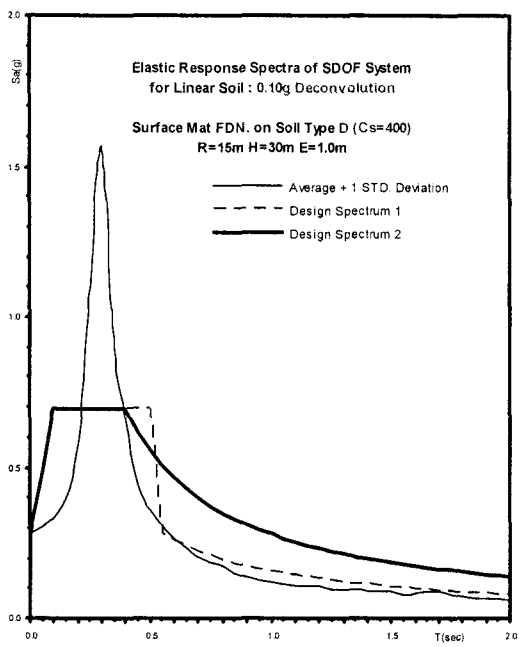


그림6. 탄성 Mean+ S.D. 응답스펙트럼(C 지반)

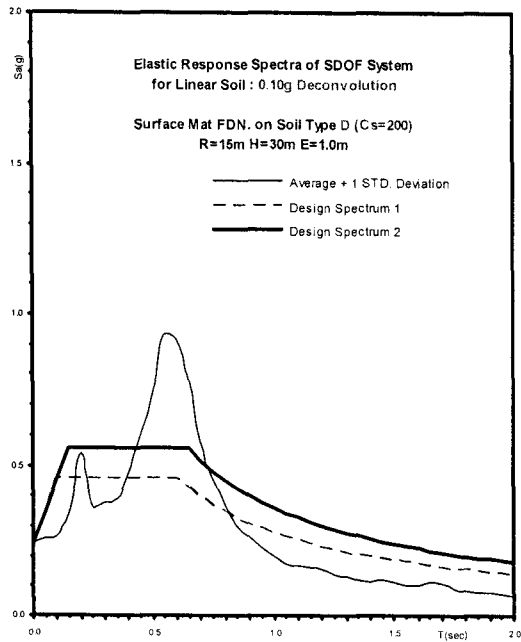


그림7. 탄성 Mean+ S.D. 응답스펙트럼(D 지반)

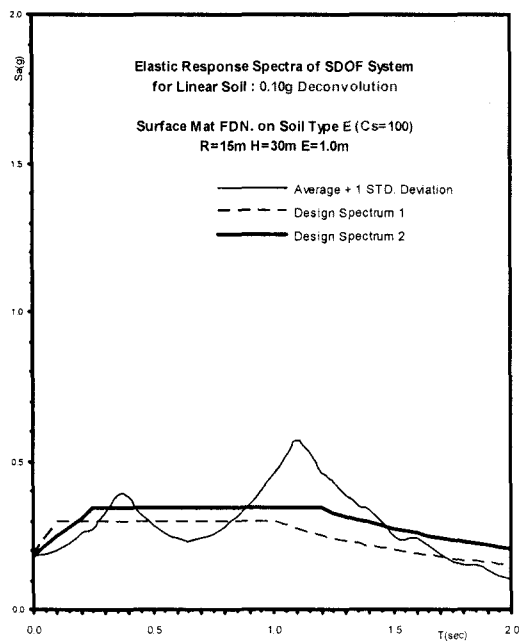


그림8. 탄성 Mean+ S.D. 응답스펙트럼(E 지반)

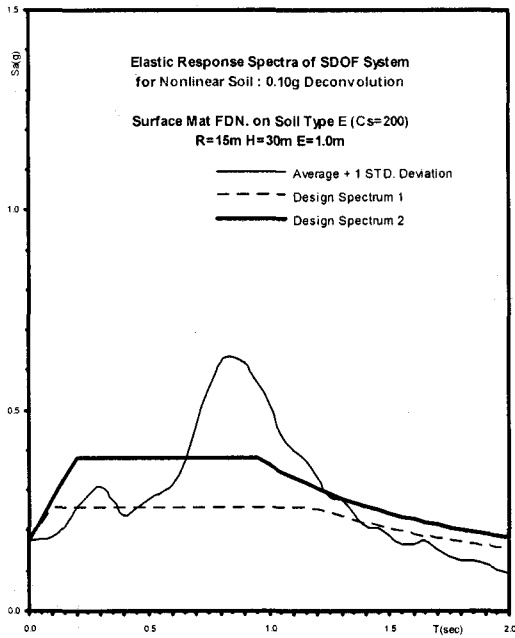


그림9. 탄성 Mean+ S.D 응답 Spec. 0.1g(비선형 E)

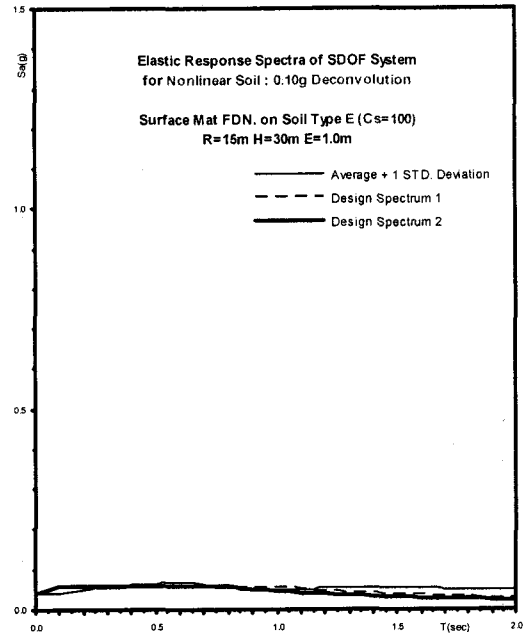


그림10. 탄성 Mean+ S.D 응답 Spec. 0.1g(비선형 E)

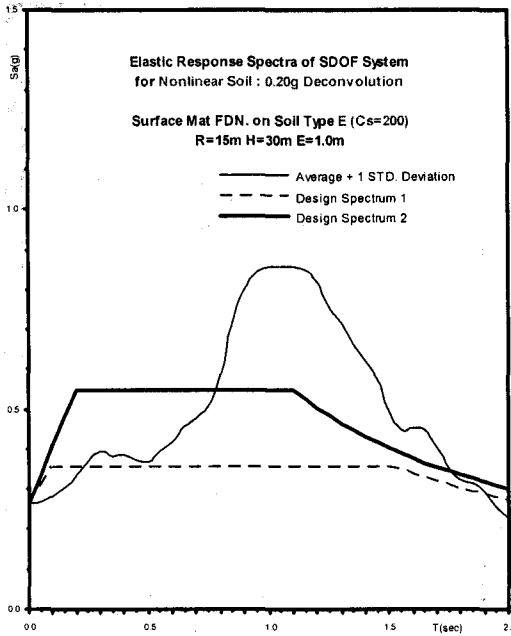


그림11. 탄성 Mean+ S.D 응답 Spec. 0.2g(비선형 E)

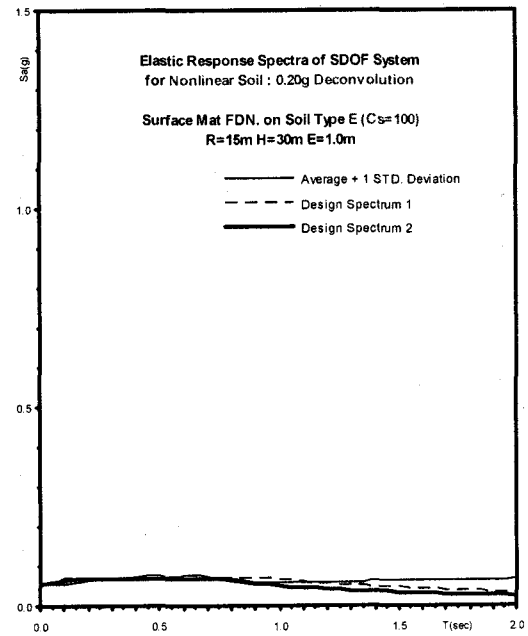


그림12. 탄성 Mean+ S.D 응답 Spec. 0.2g(비선형 E)