

지반계수의 한계값 평가를 위한 구조물-지반체계에 대한 지진응답해석

Seismic Response Analyses of the Structure-Soil System for the Evaluation of the Limits of the Site Coefficients

김용석¹⁾

Kim, Yong-Seok

국문 요약 >> IBC와 KBC 기준의 지반계수는 지반증폭 만이 고려되고 구조물-지반 상호작용 영향이 고려되지 않은 지반계수로 합리적인 구조물의 지진거동을 예측하는데 어떤 한계가 있다. 이 연구에서는 선형과 비선형 지반 위에 세워진 구조물의 탄성지진응답해석을 의사 3-D 해석으로 수행하여 구조물-지반 상호작용 영향이 고려된 지반계수의 상·하 한계값을 평가하였다. 지반의 특성은 지반 A, B, C의 경우에는 선형으로 가정하였고, 지반 D와 E의 경우에는 비선형으로 가정하여 Ramberg-Osgood 모델을 사용하여 전단파속도를 기준으로 전단탄성계수와 감쇠비 계산식을 규정하였다. 지진해석은 중·약진 지진기록 12개를 선정하여 최대 지진가속도를 0.1g와 0.2g로 조정하고, 구조물-지반 체계에 대한 의사 3-D 해석 시에는 30m 지반 하부 암반에서의 지진기록으로 변환하여 사용하였다. 구조물의 탄성 지진응답해석을 통해서 얻은 결과로부터 구조물-지반 상호작용 영향을 고려한 새로운 표준응답스펙트럼과 단주기 영역 및 주기 1초에서의 지반계수 F_a 와 F_v 의 상·하 한계값을 제시하였으며, KBC 기준을 위한 새로운 지반계수도 제안하였다.

주요어 지반계수, 구조물-지반 상호작용, 비선형 지반, 의사 3-D 해석, 중·약진, 상·하 한계값

ABSTRACT >> Site coefficients in IBC and KBC codes have some limits to predict the rational seismic responses of a structure, because they take into account only the effect of the soil amplification without the effects of the structure-soil interaction. In this study, upper and lower limits of the site coefficients are estimated through the pseudo 3-D elastic seismic response analyses of structures built on the linear or nonlinear soil layers taking into account the effects of the structure-soil interaction. 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 the 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 located at 30m deep under 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 effects of the structure-soil interaction, and new site coefficients for the KBC code are also suggested.

Key words site coefficient, structure-soil interaction, nonlinear site, pseudo 3-D, moderate and weak earthquakes, upper and lower limits

1. 서론

건축 구조물의 내진설계에서 지반조건과 구조물-지반 상호작용 영향을 고려한 구조물의 지진해석은 구조물의 설계

응답가속도를 합리적으로 예측하기 위해서는 필수적인 것이다. IBC(International Building Code)⁽¹⁾와 KBC(Korean Building Code)⁽²⁾에서 제시한 지반분류체계는 실무적인 측면에서 지진해석을 위한 지반분류가 세분화되어 있지 못하고, 지반분류를 위한 지반특성 판정에서도 실무자의 주관적 판단에 따라 큰 차이가 발생할 수 있게 되어 있다. 한편, IBC와 KBC 기준에서 지반을 상부 100ft(30.48m) 지반의 특성값 평균에 따라 분류하도록 규정하고 있는데, 지표면에

¹⁾ 정회원·목포대학교 건축공학과 교수
(대표저자: yskim@mokpo.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2007년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 3. 24 / 심사종료일 : 2006. 10. 30)

놓인 얇은기초의 경우에는 이 규정이 적합하지만 문헌기초의 경우에는 부적합하고⁽³⁾, 지반분류를 위한 전단파속도 체계도 SI 단위체계에는 부적합하여 표 1에 나타난 것과 같은 새로 제안한 지반분류체계를 사용하였다.

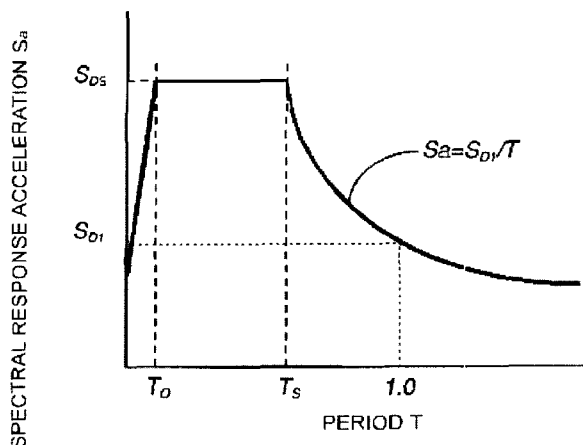
또, IBC에서 입력지진수준에 따른 지반계수의 선형보간은 허용되고 있으나, 지반특성값 차이에 따른 지반계수의 선형보간은 허용되지 않아 지진해석에 대한 합리성이 결여되어 있다. IBC에서 지반종류 별로 하나의 대표적인 지반계수는 제시하고 있지만, 각 지반을 대표하는 지반특성값은 제시하지 않고 지반종류 별로 지반특성값 범위를 계단식으로 규정하여 지반계수의 선형보간이 어렵게 되어 있다. 그런데, 지반특성값에 따른 지반계수의 선형보간이 허용되지 않고, 상부 30m 지반층의 하부에 지반특성값 차이가 큰 단단한 지반이 존재하는 경우에는 지반특성치 평균값이 커져 지반분류 경계값을 약간 만 넘겨도 지반종류가 달라지고 지반계수가 크게 달라져 상당한 과소설계가 되는 문제점이 발생한다. IBC 기준의 또 다른 문제점으로는 그림 1에 나타난

지진응답스펙트럼을 작성할 때 필요한 지반계수 F_a 와 F_v 는 동일한 지반에 대해서 구해져야 하기 때문에 F_a 와 F_v 를 규정한 지반 특성값이 같아야 하는데, IBC 기준에 제시된 지반계수에 따른 지반의 전단파속도를 역산해 보면 지반 B를 제외한 모든 지반에서 F_a 와 F_v 를 규정한 전단파속도가 상당히 달라서 IBC 지진응답스펙트럼의 신뢰성이 크게 떨어진다.⁽⁴⁾ 그런데, 표 1에 나타난 것처럼 B, C, D, E 지반에서 전단파속도를 한 단계 씩 더 세분화하고 각 전단파속도에서 지반계수 F_a 와 F_v 를 산정하면 입력지진수준 뿐만 아니라 지반특성값에 따른 직선보간도 가능하다.

이 연구에서는 새로 제안한 지반분류체계에 따라 선형과 비선형 지반 위에 놓인 구조물에 대한 탄성지진응답해석을 각 지반을 대표하는 전단파속도에 대해 수행하여 탄성응답스펙트럼을 구하고, 그림 1에 나타난 것과 같은 표준응답스펙트럼으로 최적화하기 위한 새로운 방안을 검토하였다. 또, 제안한 방법에 따라 지반계수 F_a 와 F_v 를 산출하고 표준화하여 구조물-지반 상호작용을 고려한 지반계수의 상·하 한계

〈표 1〉 제안한 지반분류

지반종류	지반종류의 호칭	알게 문헌기초 밑 30m에 대한 평균 지반특성		
		전단파속도 (m/sec)	표준관입시험 N값 (타격횟수/30cm)	비배수전단강도 (kPa)
A	경암지반	2200	-	-
B	보통암지반	1600	-	-
		1000	-	-
C	연암지반 또는 매우 조밀한 토사지반	800	-	-
		600	-	-
D	단단한 토사지반	400	50	100
		300	30	75
E	연약한 토사지반	200	10	50
		100	0	0



2400 Years Max. Ground Motion for Site B
 Mapped Spectral Acceleration (5% Damping, Site B)
 : S_s, S_1
 Max. Considered EQ. Spectral Response Acceleration
 : $SMS = Fa.Ss$
 : $SM1 = Fv.S1$
 Design Spectral Response Acceleration
 : $S_{D5} = 2/3 SMS = 2/3 Fa.Ss$
 : $S_{D1} = 2/3 SM1 = 2/3 Fv.S1$

〈그림 1〉 IBC 응답스펙트럼⁽¹⁾

값을 평가하였으며, KBC를 위한 지반계수도 새로이 제안하였다.

2. 구조물-지반 지진응답해석 모델링

선형 및 비선형 지반이 구조물의 수평방향 지진응답에 미치는 영향을 검토하기 위하여 개발한 P3DASS 유한요소 프로그램을 이용하여 지진해석을 수행하였다. 이 프로그램은 처음에 파일의 유무를 고려하여 지반 위에 놓인 무질량 강체온통기초의 선형 및 비선형 수평 및 회전 강성을 계산하기 위해 주파수영역에서 의사 3-D 유한요소법으로 개발되었는데⁽⁵⁾, 후에 자유장 다층지반을 1차원 다자유도계로 모델링하여 비선형 지진해석을 수행하여 지진 때문에 발생하는 지반의 비선형 영향을 고려하고, 비선형해석을 위한 어떤 장점을 이용하여 반복적인 비선형 문제를 풀기 위한 노력을 절약하기 위해서 구조물-지반체계 지진응답해석을 한번에 수행할 수 있도록 수정하였다.⁽⁶⁾

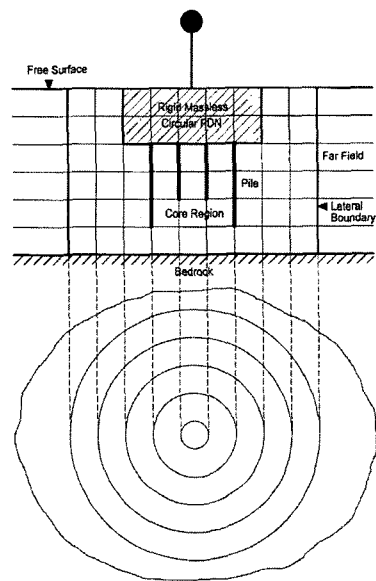
기초지반은 그림 2에 나타난 것처럼 단단한 암반 위에 놓여 있는 것으로 가정하여 유한요소해석을 위해 기초지반을 먼저 각 층 별로 나누는 후에 등가원형기초 아래 원통형 중심영역(Core Region)과 중심영역을 제외한 외부영역(Far Field)으로 나누고, 다시 중심영역 지반은 원주 주변과 수직변위를 고려하기 위해 환상유한요소로 세분화하였으며, 외부영역은 수평방향으로 토질이 균질한 무한한 외부영역을 대체하기 위해 정확한 이론해에 의해 개발된 Consistent Transmitting Boundary 요소로 대체하였다. Consistent Transmitting Boundary 는 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, 점성이 있는 등방성 특성을 갖은 것으로 가정하였다. 또, 초기 지반특성은 구조물-지반체에 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 표 3에 나타난 것처럼 지반 종류에 따라 100m/sec와 4800m/sec사이에서 고려하였으며, 지반의 단위중량은 16.7kN/m³에서 26.5kN/m³까지 지반 종류에 따라 변하는 것으로 가정하였고, 지반의 포아슨비와 초기 감쇠계수는 0.3과 0.05로 가정하였다. 한편, 지반의 비선형 구성방정식으로는 Ramberg-Osgood 모델을 사용하였는데,⁽⁷⁾ 지반의 전단변형에 따라 전단탄성계수와 감쇠계수를 식 (1)과 식 (2)로 나타낼 수 있

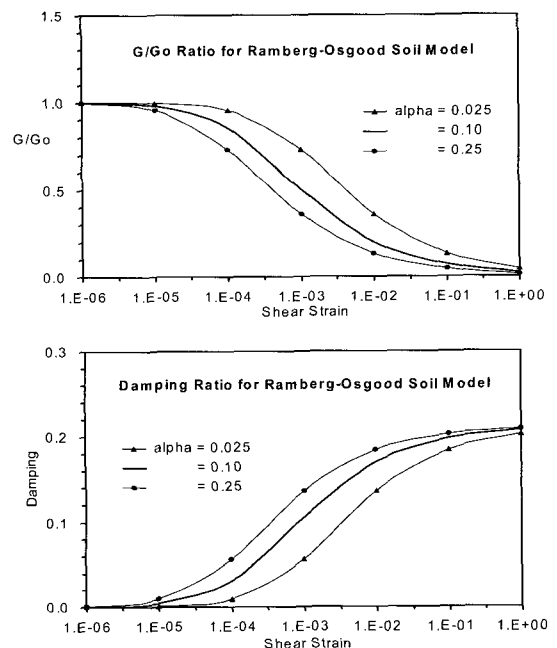
으며, 항복전단변형 γ_y 는 5×10^{-5} 으로 가정하고 토질에 따라 정해지는 실험계수 α 는 전단파속도 400, 200, 100m/sec에 따라 각각 0.025, 0.1, 0.25로 가정하였다.(그림 3)

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

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



〈그림 2〉 의사 3-D F.E.M. 모델



〈그림 3〉 Ramberg-Osgood 모델

〈표 2〉 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		Bedrock
12	Ulgin, Korea	2004	WSC N-S	0.07	0.023	-	0.15	120.00	140		

여기서 G와 G₀는 실제 및 초기 전단탄성계수이고, γ는 전단변형, D는 감쇠계수이다.

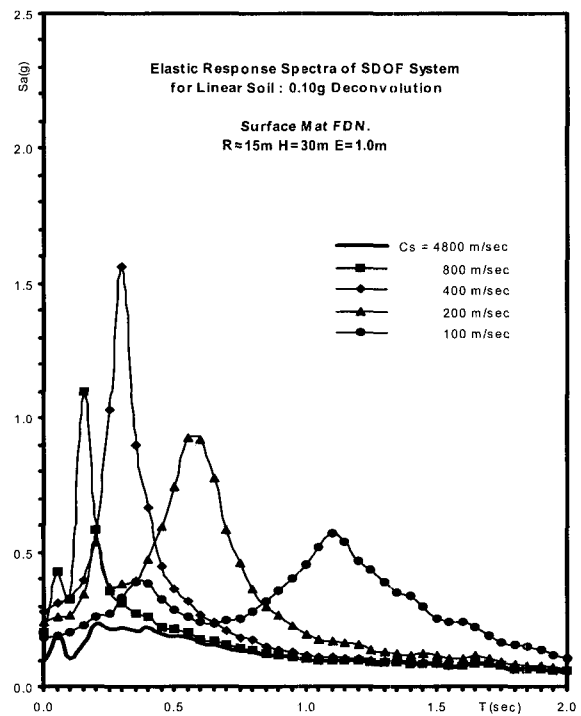
기초는 일반적으로 고려되는 1.2m 정도의 묻힘(E)이 된 반경(R) 15m 정도의 중간 크기의 강체온통기초로 가정하고, 기초의 단위중량은 2.4t/m³인 것으로 가정하였다.

지진해석에 사용한 지진기록은 표 2에 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 노출암반(Outcrop)에서 기록된 것들이어서 구조물-지반체계의 정확한 지진해석을 위해서 지반 B(V_s=1000m/sec)에 대한 Deconvolution 과정을 통해서 연약지반 밑 암반에서의 지진기록을 생성해서 사용하였다.

구조물-지반체계에 대한 지진해석은 0에서 2초 사이의 고유주기를 갖는 구조물에 대해 0.1초 고유주기 간격으로 주파수 영역 0-20 Hz에서 수행하였다.

3. 선형지반을 고려한 탄성응답스펙트럼의 지반계수

선형지반 위에 세워진 구조물의 구조물-지반 상호작용을 고려한 탄성응답스펙트럼에 대한 지진응답해석을 0.1g 지반가속도 수준의 12개 지진기록으로 수행하였고, 그림 4에는 지반의 전단파속도가 4800, 800, 400, 200, 100m/sec인 경우에 12개 탄성지진응답의 평균값에 표준편차를 더한 스펙트럼을 나타냈다. 지진해석 결과에 의하면 응답스펙트럼이 지반의 고유주기영역에서 구조물-지반 상호작용 영향

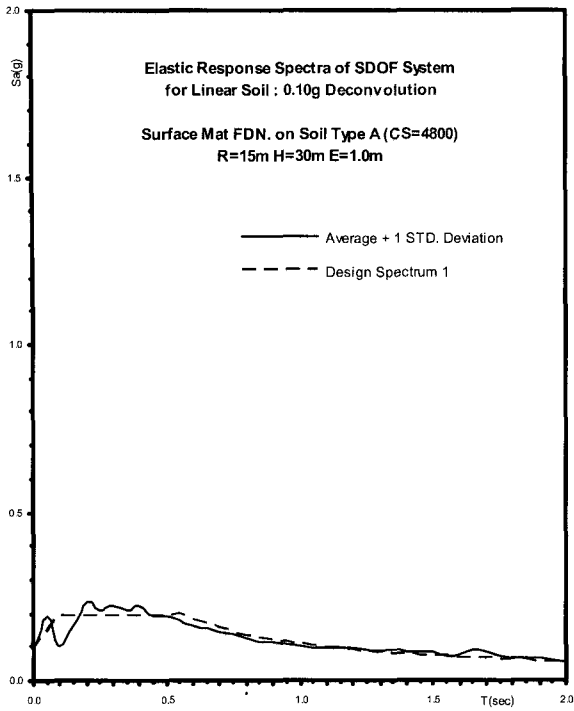


〈그림 4〉 탄성 Mean+S.D. 응답스펙트럼(선형지반)

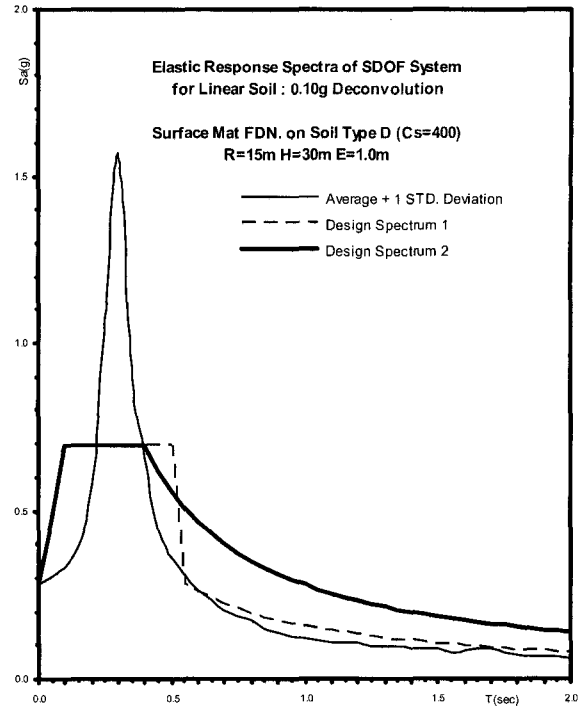
로 상당히 크게 증폭되는 것을 알 수 있으며, 연약지반 일수록 최대응답은 줄어들지만 넓은 폭에서 지진응답이 증폭되는 것으로 나타났다.

그림 5~9에서는 탄성응답스펙트럼을 KBC 표준응답스펙트럼(Design Spectrum 1) 및 이 연구에서 제안한 표준응답스펙트럼(Design Spectrum 2)과 비교하고, 그에 따라 표준설계스펙트럼가속도 S_{DS}와 주기1초의 설계스펙트럼가속도 S_{D1}을 표 3에 나타난 것처럼 산정하였다.

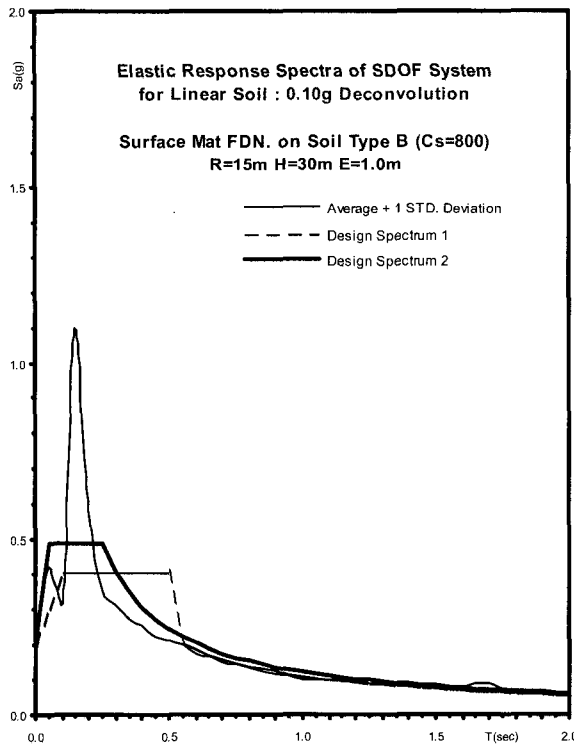
KBC 표준응답스펙트럼(R.S.1)에서 S_{DS}는 고유주기 0.1



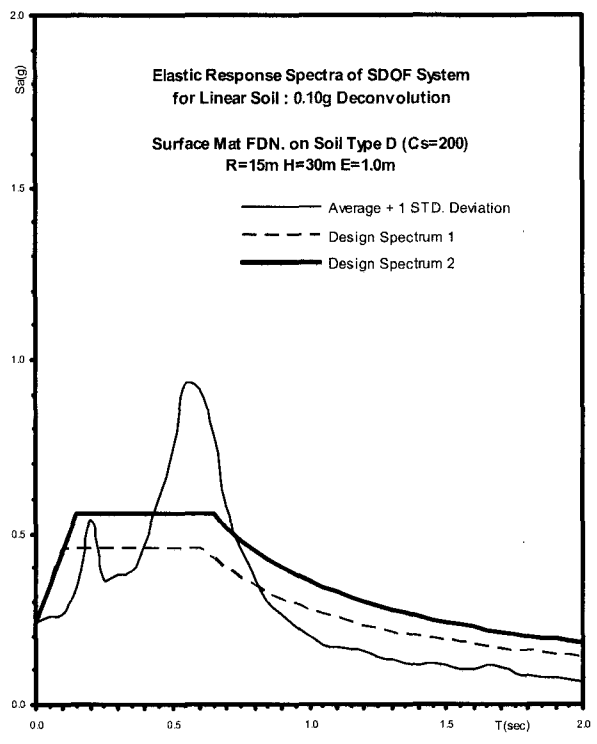
〈그림 5〉 탄성 Mean+S.D. 응답스펙트럼(A 지반)



〈그림 7〉 탄성 Mean+S.D. 응답스펙트럼(C 지반)



〈그림 6〉 탄성 Mean+S.D. 응답스펙트럼(B 지반)



〈그림 8〉 탄성 Mean+S.D. 응답스펙트럼(D 지반)

초에서 0.5초사이 응답스펙트럼가속도 값을 평균하여 구하고, S_{D1} 은 0.4초에서 2초사이 응답스펙트럼가속도 값을 평균하여 구하였으며, 이 연구에서 제안한 표준응답스펙트럼(R.S.2)에서는 S_{DS} 는 고유주기 0.1초에서 지반의 고유주기(T_p)에 0.2초를 더한 주기까지의 응답스펙트럼가속도 값을

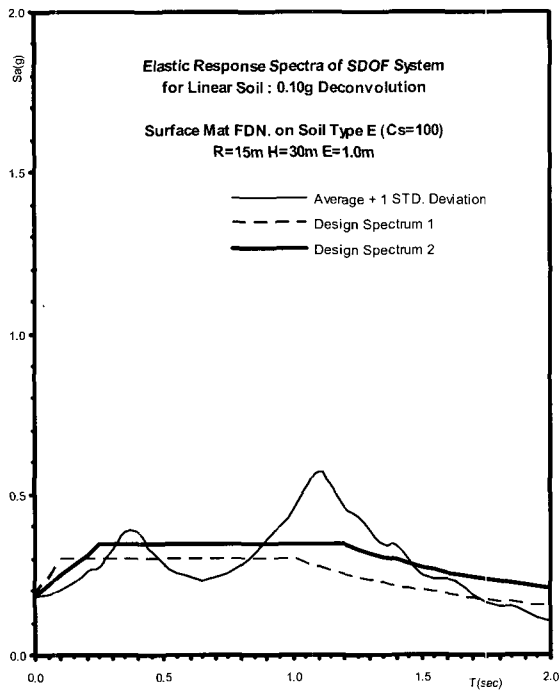
평균하여 구하고, S_{D1} 은 주기 $T_s(T_p+0.1)$ 초에서 응답스펙트럼가속도 값이 S_{DS} 와 같도록 식 (3)을 이용하여 S_{DS} 에 ($T_p+0.1$)을 곱하여 구하였다.

$$S_a = S_{D1}/T \tag{3}$$

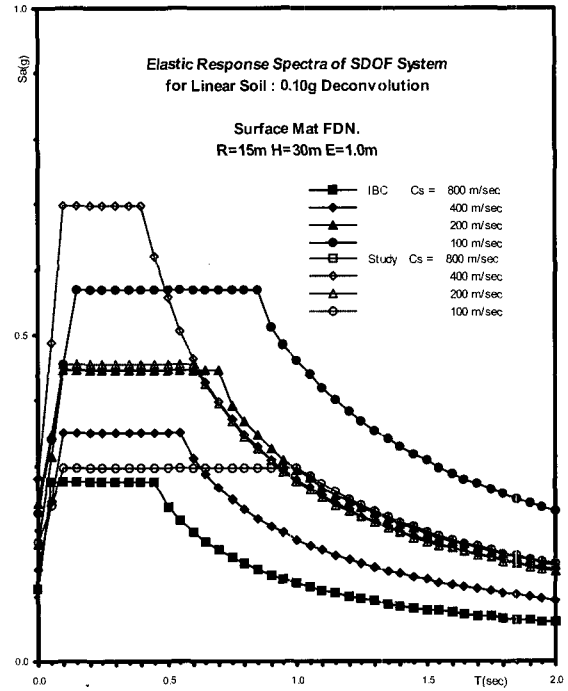
〈표 3〉 선형지반 설계스펙트럼 가속도 S_{DS} 와 S_{D1}

(단위 : g)

지반 가속도 수준(β)	응답 가속도	Response Spectrum (R.S.)	지반종류(V_s : m/sec)							비 고
			Rigid 4800	A 2400	B 1000	C 800	D 400	E		
								200	100	
0.1C	S_{DS}	R.S. 1	0.194	0.203	0.275	0.404	0.697	0.455	0.296	$0.1 \leq t \leq 0.5$
		R.S. 2	0.194	0.203	0.275	0.491	0.697	0.554	0.344	$0.1 \leq t \leq T_p+0.2$
	S_{D1}	R.S. 1	0.107	0.108	0.111	0.113	0.155	0.276	0.299	$0.4 \leq t \leq 2.0$
		R.S. 2	0.107	0.108	0.111	0.123	0.279	0.360	0.413	$S_{D1} = S_{DS}*(T_p+0.1)$



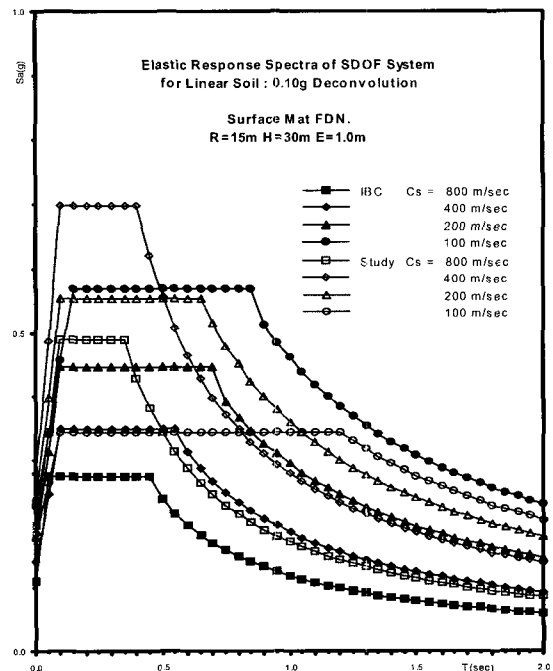
〈그림 9〉 탄성 Mean+S.D. 응답스펙트럼(E 지반)



〈그림 10〉 탄성Mean+S.D. vs IBC 응답스펙트럼 1

해석결과에 의하면 지반이 연암지반(전단파속도가 800m/sec 이상)보다 단단할 경우에는 IBC와 이 연구에서 구한 스펙트럼가속도 S_{DS} 와 S_{D1} 은 모두 거의 일치하게 나타났으나, 지반이 연약한 지반(전단파속도가 400m/sec 이하)의 경우에는 구조물-지반 상호작용 영향으로 이 연구에서 제안한 표준응답스펙트럼(R.S.2)이 IBC 표준응답스펙트럼(R.S.1)보다 S_{DS} 의 경우에는 20%정도, S_{D1} 의 경우에는 30-40%정도 크게 증폭되는 것으로 나타났다. 따라서 연약지반(D나 E지반)의 경우에는 구조물-지반 상호작용 영향도 내진설계에서 고려되어야 할 것으로 판단되었다.

또 그림 10과 11에서는 전단파속도가 800, 400, 200, 100 m/sec인 지반에 대한 IBC 탄성응답스펙트럼을 이 연구에서 구한 응답스펙트럼1(R.S.1) 및 응답스펙트럼2(R.S.2)와 비교하였는데, 구조물-지반 상호작용 영향을 고려한 탄성응답스펙트럼(R.S.2)이 IBC 설계응답스펙트럼보다 안전한 내진 설계 관점에서 더 합리적인 것으로 판단되었다.



〈그림 11〉 탄성Mean+S.D. IBC 응답스펙트럼 2

표 4에는 앞에서 구한 탄성설계스펙트럼 가속도로부터 B 지반의 지반계수 F_a 와 F_v 를 1로 하여 B지반을 기준으로 표준화한 선형지반계수 F_a 와 F_v 가 나타나 있다.

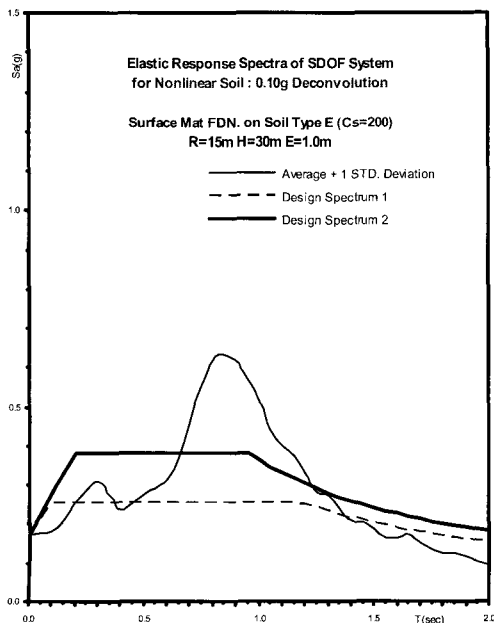
4. 비선형지반을 고려한 탄성응답스펙트럼의 지반계수

비선형 지반 위에 세워진 구조물의 구조물-지반 상호작용을 고려한 탄성응답스펙트럼에 대한 지진해석을 지반가속도 수준 0.1g와 0.2g에 대해서 12개 지진기록으로 수행하였고, 그림 12와 13에는 지반가속도 수준이 0.1g일때 전단파속도가 200m/sec와 100m/sec인 비선형 E 지반에 대한 탄성응답스펙트럼이 나타나 있고, 그림 14와 15에는 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, 표 5에 나타난 비선형 지반을 고려한 단주기와 주기 1초의 설계스펙트럼 가속도 S_{DS} 와 S_{D1} 을 산정하였다.

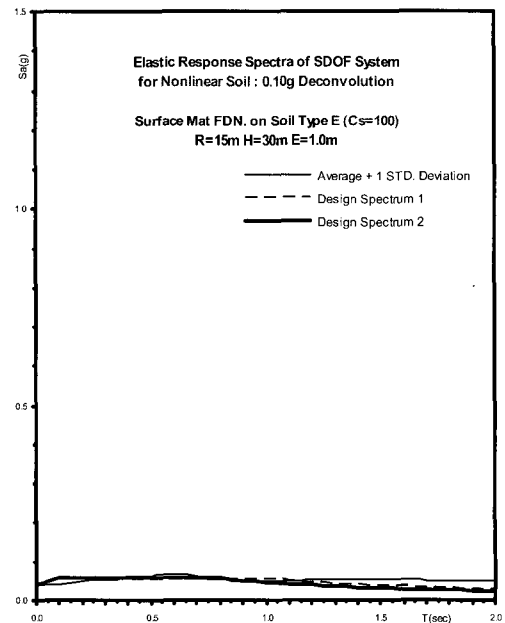
해석결과에 의하면 표 5에 나타난 것처럼 지반에 전단파속도가 400m/sec이상인 경우에는 거의 선형응답스펙트럼 양상을 나타냈고, 가속도 수준이 0.1g일때 전단파속도가 200~400m/sec인 D지반의 경우에 단주기 설계스펙트럼 가속도 S_{DS} 는 비선형성에 의한 지반감쇠의 증가로 30%정도 감소하였는데, 주기 1초의 설계스펙트럼 가속도 S_{D1} 은 10% 정도 증가하였지만 큰 변화가 없어 장주기 영역에서는 비선형성 영향이 크지 않는 것으로 판단되었고, 전단파속도가 100m/sec인 E지반의 경우 지반의 비선형 영향으로 단주기와 주기 1초의 설계스펙트럼 가속도가 거의 비슷하고 응답스펙트럼이 지반가속도의 50%수준으로 감소하는 Base Isolation현상이 발생하였다.⁽⁸⁾ 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 기준

〈표 4〉 표준화한 선형 지반계수 F_a 와 F_v

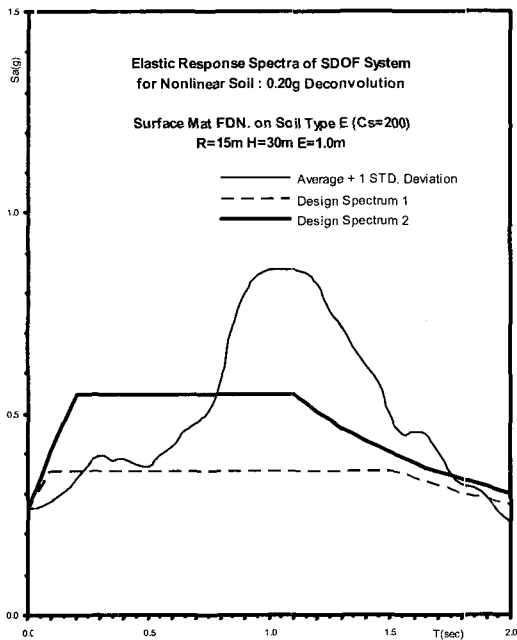
지반 가속도 수준(g)	지반 계수	Response Spectrum (R.S.)	지반종류(V_s : m/sec)							비 고
			Rigid 4800	A 2400	B 1000	C 800	D 400	E		
								200	100	
0.10	F_a	R.S. 1	0.7	0.74	1.0	1.5	2.5	1.7	1.1	$T_o = 0.2 T_s$
		R.S. 2	0.7	0.74	1.0	1.8	2.5	2.0	1.3	
	F_v	R.S. 1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.4	2.5	2.7	$T_s = S_{DS}/S_{D1}$
		R.S. 2	1.0	1.0	1.0	1.1	2.5	3.2	3.7	



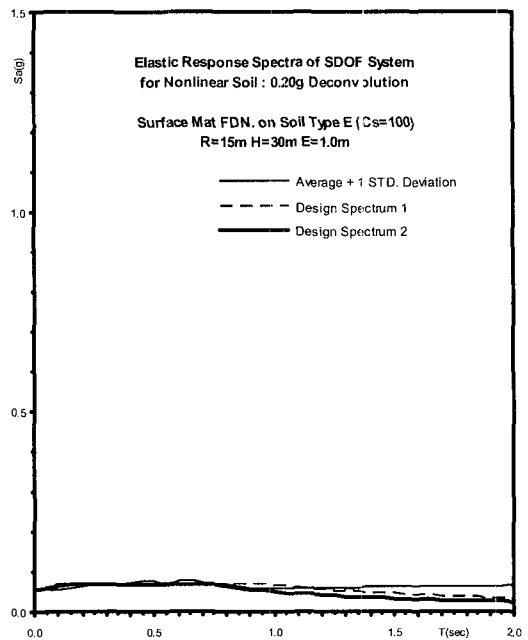
〈그림 12〉 탄성Mean+S.D응답Spec. 0.1g(비선형 E)



〈그림 13〉 탄성Mean+S.D응답Spec. 0.1g(비선형 E)



〈그림 14〉 탄성Mean+S.D응답Spec. 0.2g(비선형 E)



〈그림 15〉 탄성Mean+S.D응답Spec. 0.2g(비선형 E)

〈표 5〉 비선형지반 설계스펙트럼 가속도 S_{DS} 와 S_{D1}

(단위 : g)

지반 가속도 수준(g)	응답 가속도	Response Spectrum (R.S.)	지반종류(V_s : m/sec)						비고				
			Rigid 4800	A 2400	B 1000	C 800	D 400	E					
								200		100			
0.10	S_{DS}	R.S. 1	N/A : Linear Site							0.782	0.254	0.055	$0.1 \leq t \leq 0.5$
		R.S. 2								0.782	0.384	0.058	$0.1 \leq t \leq T_p+0.2$
	S_{D1}	R.S. 1								0.171	0.304	0.046	$0.4 \leq t \leq 2.0$
		R.S. 2								0.313	0.403	0.052	$S_{D1} = S_{DS}*(T_p+0.1)$
0.20	S_{DS}	R.S. 1								1.802	0.355	0.068	$0.1 \leq t \leq 0.5$
		R.S. 2								1.802	0.549	0.070	$0.1 \leq t \leq T_p+0.2$
	S_{D1}	R.S. 1								0.394	0.533	0.065	$0.4 \leq t \leq 2.0$
		R.S. 2								0.811	0.604	0.050	$S_{D1} = S_{DS}*(T_p+0.1)$

〈표 6〉 표준화한 비선형 지반계수 F_a 와 F_v

지반 가속도 수준(g)	지반 계수	Response Spectrum (R.S.)	지반종류(V_s : m/sec)						비고				
			Rigid 4800	A 2400	B 1000	C 800	D 400	E					
								200		100			
0.10	F_a	R.S. 1	N/A : Linear Site							2.84	0.92	0.20	$T_o = 0.2 T_s$
		R.S. 2								2.84	1.40	0.21	
	F_v	R.S. 1								1.54	2.74	0.41	$T_s = S_{DS}/S_{D1}$
		R.S. 2								2.82	3.63	0.47	$T_s = T_p+0.1$
0.20	F_a	R.S. 1								3.28	0.65	0.13	$T_o = 0.2 T_s$
		R.S. 2								3.28	1.00	0.13	
	F_v	R.S. 1								1.77	2.40	0.29	$T_s = S_{DS}/S_{D1}$
		R.S. 2								3.65	2.72	0.23	$T_s = T_p+0.1$

화가 가능할 것으로 판단되었다. 표 6에는 앞에서 구한 탄성 설계스펙트럼 가속도로부터 탄성 B지반을 기준으로 표준화한 비선형 지반계수 F_a 와 F_v 를 산정하여 나타냈다.

선형과 비선형 지반에 놓인 구조물에 대한 구조물-지반 상호작용 영향을 고려한 지진해석 결과로부터 산정한 단위

기 및 주기 1초의 지반계수 F_a 와 F_v 를 IBC에서 사용한 계측식을 수정하여 제안한 식 (4)로 계산한 것과 표 7에서 비교하였다. 식 (4)는 Borchardt가 지반의 전단파속도 1050m/sec를 기준으로 제안하여 IBC에서 사용한 식을 지반의 전단파속도를 1000m/sec로 변경하고 최적화하여 저자가 수정

제안한 식이다.⁽⁹⁾

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

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

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

연구결과는 지반이 선형인 경우와 지진가속도 수준이 0.1g와 0.2g일때 비선형 지반인 경우에 대해서 산정한 지반계수를 나타내고 있다. IBC 수정식에 의한 값과 연구결과를 비교해보면, 전달파속도가 1000m/sec보다 빠른 단단한 선형지반의 경우에는 구조물-지반 상호작용 영향이 두드러지게 나타나지 않지만, 지반이 연약한 경우에는 구조물-지반 상호작용 영향이 상당히 심하게 나타나는 것을 알 수 있고, 지반의 비선형성까지 고려할 경우에는 그 영향이 더 크게 나타났는데, 지진가속도 수준에 따라 지반계수의 한계값들이 나타나는 것을 알 수 있다. 그런데, 지반의 전달파속도가

100m/sec정도로 낮은 지반의 경우 IBC 수정식으로는 지반계수가 최대를 나타내고 있지만, 지반의 비선형성을 고려한 이론적 해석결과에서는 상당히 작은 최소값을 나타내고 있어 심한 차이를 보이는데, 전달파속도가 매우 작은 지반의 경우에는 실험에 의한 지반의 비선형 특성모델을 마련해서 지반 F에 준하는 지반에 대한 특별한 해석이 필요한 것으로 판단되었다.

표 8에는 표 7에 나타난 선형 및 비선형 지반에 대한 구조물-지반 상호작용을 고려한 지진해석 결과를 기초로 하여 지반종류별로 설계스펙트럼 가속도계수 F_a 와 F_v 의 상·하한계값을 정리하여 제시하였는데, F_a 와 F_v 의 상·하한계값이 지반의 비선형 때문에 입력지진 가속도 수준에 따라 커지는 것을 알 수 있다. 이 표에 나타난 지반계수들은 입력지진 가속도와 지반의 전달파속도에 따라 선형보간이 가능하다.

5. KBC기준을 고려한 지반계수

표 8에 나타난 설계스펙트럼 가속도계수 F_a 와 F_v 의 한계값으로부터 KBC 기준을 위한 지반계수를 지진지역 1과 2에 해당하는 KBC 입력지진 가속도 계수 0.09와 0.15에 대해 직선보간법으로 표 9에 나타난 것처럼 산정하였다.

〈표 7〉 수정식과 연구결과에 의한 지반계수 F_a 및 F_v 의 비교

지반종류			A	B		C		D		E		비 고	
전달파속도(m/sec)			2200	1600	1000	800	600	400	300	200	100		
F_a	IBC 수정식	계측식	0.1g	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.3	$F_a=(1000/V_s)^{0.36}$
			0.2g	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.8	$F_a=(1000/V_s)^{0.26}$
	연구결과	Linear		0.8	0.9	1.0	1.8	2.2	2.5	2.3	2.0	1.3	
		Nonlinear	0.1g	Linear경우와 같음					2.8	(2.1)	1.4	0.2	하한계값
0.2g	Linear경우와 같음					3.2	(2.1)	1.0	0.2	상한계값			
F_v	IBC 수정식	계측식	0.1g	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.8	2.2	3.0	4.6	$F_v=(1000/V_s)^{0.66}$
			0.2g	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.8	2.1	2.7	4.1	$F_v=(1000/V_s)^{0.62}$
	연구결과	Linear		1.0	1.0	1.0	1.1	1.8	2.5	2.9	3.2	3.7	
		Nonlinear	0.1g	Linear경우와 같음					2.8	(3.2)	3.6	0.5	하한계값
0.2g	Linear경우와 같음					3.6	(3.2)	2.7	0.3	상한계값			

* ()안 값은 직선보간한 값임.

〈표 8〉 설계스펙트럼 가속도계수 F_a 와 F_v 의 한계값

지반종류			A	B		C		D		E		비 고
전달파속도(m/sec)			2200	1600	1000	800	600	400	300	200	100	
F_a	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
F_v	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

〈표 9〉 KBC를 위한 지반계수 F_a 와 F_v

지반종류			A	B		C		D		E	비고
전단파속도(m/sec)			2200	1600	1000	800	600	400	300	200	
F_v	입력지진 수준계수	0.09	0.8	0.9	1.0	1.8	2.2	2.8	2.2	1.5	
		0.15	0.8	0.9	1.0	1.8	2.2	3.1	2.2	1.2	
F_a	입력지진 수준계수	0.09	1.0	1.0	1.0	1.2	1.8	2.7	3.2	3.7	
		0.15	1.0	1.0	1.0	1.2	1.8	3.2	3.2	3.2	

〈표 10〉 KBC를 위해 제안한 설계스펙트럼 가속도계수

(a) KBC2005 설계스펙트럼 가속도계수

지반 종류	단주기 가속도계수		주기1초 가속도계수	
	지진지역		지진지역	
	1	2	1	2
SA	2.0	1.8	0.8	0.7
SB	2.5	2.5	1.0	1.0
SC	3.0	3.0	1.6	1.6
SD	3.6	4.0	2.3	2.3
SE	5.0	6.0	3.4	3.4

(b) 제안한 설계스펙트럼 가속도계수

지반 종류	지반특성		단주기 가속도계수		주기1초 가속도계수	
	전단파 속도(m/sec)	SPT N-값	지진지역		지진지역	
			1	2	1	2
A	2200	-	2.0	2.0	1.0	1.0
B	1600	-	2.2	2.2	1.0	1.0
	1000	-	2.5	2.5	1.0	1.0
C	800	-	4.5	4.5	1.2	1.2
	600	-	5.5	5.5	1.8	1.8
D	400	50	7.8	7.0	3.2	2.7
	300	30	5.5	5.5	3.2	3.2
E	200	10	3.0	3.8	3.2	3.7

표 10에는 KBC2005의 가속도계수와 수정 제안한 설계스펙트럼 가속도계수를 비교하였는데, 구조물-지반 상호작용의 영향이 연약지반의 경우에는 상당히 큰 것으로 나타났다.

구조물-지반 상호작용 영향을 고려한 수정 제안한 설계스펙트럼은 그림 1에 나타난 것과 같은 방법으로 작성할 수 있는데, T_b 는 지반의 고유주기 T_p 에 0.1초를 더해서 ($T_p+0.1$)로 결정한다.

6. 결 언

이 논문에서는 내진설계를 위한 지반계수의 상·하 한계 값 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/sec이상인 단단한 선형지반의 경우에는 지반의 비선형성이나 구조물-지반 상호작용영향이 미미하지만, 전단파속도가 200~1000m/sec인 경우에는 지반의 비선형성과 구조물-지반 상호작용영향이 상당히 중요하고, 전단파속도가 200m/sec이하인 경우에는 비선형 지반을 고려한 특별한 지진해석이 필요한 것으로 입증되었다. 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.

구조물-지반 상호작용 영향을 고려한 설계응답스펙트럼 표준모델은 기존 모델을 수정하여, 단주기 설계스펙트럼 가속도를 0.1초에서 지반고유주기+0.2초까지의 평균가속도로 하고, 단주기 가속도영역을 지반고유주기+0.1초 까지 연장하였다. 주기 1초의 가속도는 지반고유주기+0.1초에서의 가속도를 기준으로 주기에 반비례하게 수정하였다.

또, 구조물-지반 상호작용을 고려한 지반계수에 대한 연구결과를 종합해서 KBC 기준의 개정을 위한 설계스펙트럼 가속도계수를 표 10에 제안하였다.

한편, 이 후에도 선형과 비선형 지반의 지반계수에 대한 구조물-지반 상호작용을 고려한 수치해석적 연구와 깊게 묻힌 기초 위에 세워진 구조물의 설계스펙트럼 가속도계수에 대한 연구가 국내 실정에 보다 적합한 지진기록을 확보하여 지속적인 KBC 기준의 수정을 위해서 필요한 것으로 판단되었다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.(KRF-2004-041-D00752)

참고 문헌

1. International Building Code Council (IBC), *2003 International Building Code (IBC2003)*, 2002, pp. 301-343.
2. 대한건축학회, 건축구조설계기준 (KBC2005), 2005, pp. 89-119.
3. 김용석, 구조물-지반 상호작용과 지진해석, 한국지진공학회, 구미서관, 2005, pp. 105.
4. Dobry, R. et al., "New Site Coefficients and Site Classification System Used in Recent Building Seismic Code Provisions," *Earthquake Spectra*, Vol. 16, No. 1, Feb. 2000, pp. 41-67.
5. Kim, Y.S., "Dynamic Response of Structures on Pile Foundations," Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 1987, pp. 272.
6. Kim, Y.S. and Roesset, J.M., "Effect of Nonlinear Soil Behavior on the Inelastic Seismic Response of a Structure," *The International Journal of Geomechanics*, Vol. 4, No. 2, June 2004, pp. 104-114.
7. Roesset, J.M., *A Review of Soil-Structure Interaction*, Lawrence Livermore Laboratory, 1980, pp. 125.
8. Choi, Yoojoong and Stewart, Jonathan P., "Nonlinear Site Amplification as Function of 30m Shear Wave Velocity," *Earthquake Spectra*, Vol. 21, 2005, pp. 1-30.
9. Borchardt, R.D., "Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification)," *Earthquake Spectra*, Vol. 10, 1994, pp. 617-653.