

# 건축물의 지진해석을 위한 연약지반에 묻힌 기초로 인한 지반증폭계수에 대한 저감계수

## Reduction Factor of the Site Coefficient due to the Foundation Embedment in the Soft Soil Layer for the Seismic Analysis of a Building

김용석<sup>1)</sup>  
Kim, Yong-Seok<sup>1)</sup>

**국문 요약** >> 이 논문에서는 연약지반에 세워진 건축물의 지진해석을 위해서 기존의 지반증폭계수에 대한 기초묻힘으로 인한 저감계수를 산정하는 연구를 비선형 의사 3D 지진해석이 가능한 P3DASS 유한요소 프로그램으로 수행하였다. 지반은 30m 두께로 균질하고 탄성과 점성이 있는 등방성 연약한 지반으로 압반 위에 놓인 것으로 가정하였고, 기초는 반경이 10-70m인 등가원형 강제기초로 기초묻힘은 0, 10, 20, 30m인 경우를 고려하였다. 지진해석은 노두에서 실측한 7개 지진기록의 유효지진가속도를 0.1g로 조정후 연약지반 밑 암반에서 지진기록을 생성하여 수행하였다. 연구에 의하면 매우 연약한 지반에 소형기초가 깊게 묻힌 경우 외에는 지반증폭계수가 점진적으로 감소하고 기초크기에 따른 편차도 크지 않은 것으로 평가되어 기초반경 별로 구한 저감계수에 대한 평균에 표준편차를 더한 저감계수를 기초묻힘에 따른 표준저감계수로 산정하였다. 지반증폭계수에 대한 표준저감계수를 실용화와 KBC 등의 기준을 위해 지반의 평균전단파속도와 지반종류에 따라 제안하였다.

**주요어** 연약지반, 지반증폭계수, 기초묻힘, 저감계수, P3DASS 유한요소 프로그램

**ABSTRACT** >> In this study, the reduction factor of the code-defined site coefficient due to the embedment of a foundation was estimated for the seismic analysis of a building built on a soft soil site. This was done by utilizing the in-house finite element software P3DASS, which has the capability of pseudo 3D seismic analysis with nonlinear soil layers. A 30m thick soft soil site laid on the rock was assumed to be homogeneous, elastic, viscous and isotropic, and equivalent circular rigid foundations with radii of 10-70m were considered to be embedded at 0, 10, 20 and 30m in the soil layer. Seismic analyses were performed with 7 bedrock earthquake records deconvoluted from the outcrop records of which the effective ground acceleration was scaled to 0.1g. The study results showed that the site coefficients are gradually reduced except in the case of a small foundation embedded deeply in the weak soil layer, and it was estimated that the deviation of the site coefficients due to the foundation size was not significant. The standard reduction factor due to the foundation embedment were calculated adding the standard deviation to the average of 5 reduction factors calculated for 5 different foundation radii. Standard reduction factors for the site amplification factor were proposed for the practical amplification and the codes of KBC, etc., in accordance with the average shear wave velocity of the site, and the site class.

**Key words** Soft soil, Site coefficient, Foundation embedment, Reduction factor, Finite element software of P3DASS

### 1. 서론

건축구조물의 내진설계를 위해서 지반조건과 구조물-지

반 상호작용 영향을 고려한 구조물의 지진해석은 구조물의 설계응답가속도를 합리적으로 예측하기 위해서 필수적이라 할 수 있다. IBC (International Building Code)<sup>(1)</sup>와 KBC (Korean Building Code)<sup>(2)</sup>에 제시된 지반증폭계수(site coefficient)는 실무적인 측면에서 지진해석을 위해 지표면에 세워진 건축물에는 적합하지만 묻힌기초 위에 세워진 건축물에는 부적합하여 기준에 제시된 지반증폭계수로 내진설계를 수행할 경우에는 매우 보수적인 설계결과로 인해 상당한 경제적 부담을 유발하는 경우가 있다.

<sup>1)</sup> 정회원·국립목포대학교, 정교수  
(교신저자 : yskim@mokpo.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2010년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 3. 4 / 수정일 1차 : 2010. 4. 17, 2차 : 2010. 4. 27 / 게재확정일 : 2010. 4. 27)

지진해석에서 문헌기초의 장점을 반영하기 위해서는 기준에 제시된 지반증폭계수를 사용하는 것 대신에 기초지반에 대한 지반평가를 통해서 내진설계를 수행해야 하는데, 전문지식이 부족한 실무에 종사하는 엔지니어들이 기초지반에 대한 지반평가를 수행하는 것은 상당히 번거롭고 난해한 업무이다. 기초지반에 대한 지반평가는 기초가 문헌 지반에 대한 3차원 유한요소 지진해석을 수행해야 하기 때문에 범용 전문프로그램이 필요하지만 아직 이러한 범용 프로그램이 실용화되지 못하고 있다.<sup>(3)</sup> 이러한 실무적인 애로를 해소하고 문헌기초 지반에 대한 지반증폭계수를 보다 합리적이고 논리적인 방법으로 기준에 반영하기 위해서는 기초지반체계에 대한 지진응답해석을 수행하여 문헌기초 지반에 대한 지반증폭계수를 지표면기초 지반의 지반증폭계수에 문헌기초 지반체계의 특성에 따른 저감계수(Reduction Factor)를 곱해서 구할 수 있도록 체계화하는 것이 필요하다.

기초지반에 의한 구조물의 지진응답 증폭에 관한 최근까지 국내외 연구는 그 수가 많지 않은데, 주로 2차원적 지반 특성을 고려한 지표면 기초 위에 세워진 구조물의 지진응답 증폭에 관한 연구<sup>(4),(5)</sup>가 대부분이고, 3차원 지반특성을 고려한 문헌기초 위에 세워진 건축물의 지진응답 증폭에 관한 연구가 Kim<sup>(6),(7)</sup>에 의해 수행되었으나 문헌기초의 특성 변화가 구조물의 지반증폭계수의 저감에 미치는 영향에 관한 체계적인 연구는 찾기 어려웠다.

이 연구에서는 In-house 프로그램인 P3DASS(Pseudo 3D Dynamic Analysis of Structure-Soil System)로 30m 깊이의 연약지반에 문헌 기초 위에 세워진 단자유도 건축물의 지진응답해석을 등가기초의 크기(반경)가 다른 5가지 경우와 기초의 문헌 깊이가 다른 4가지 경우를 고려하여 수행하였다. 문헌기초 건물의 지반증폭계수를 단주기 영역과 장주기 영역에서 구하여 지표면기초 건물의 지반증폭계수로 나누어서 문헌기초에 의한 단주기 영역에서 지진응답 저감계수( $E_a$ )와 장주기 영역에서 지진응답 저감계수( $E_v$ )를 산정한 후 평균전단파속도와 지반종류 별로 설계용 지반증폭계수에 대한 문헌기초 지반의 저감계수를 제안하였다.

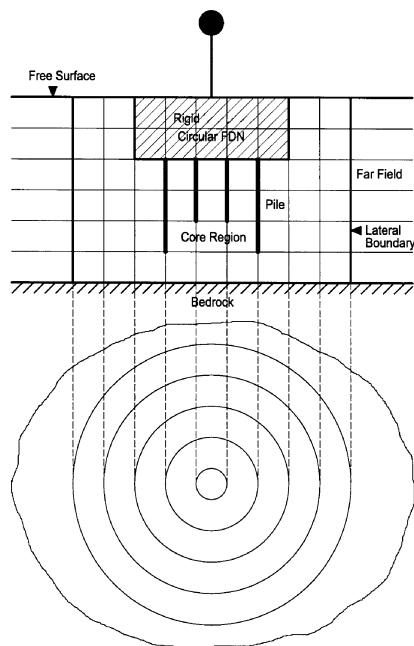
## 2. 구조물-지반 지진응답해석 모델링

문헌기초-지반에 대한 지반평가를 위한 지진해석은 선형 및 비선형 지반에 세워진 구조물의 수평방향 지진응답해석을 위해서 개발된 P3DASS 유한요소 프로그램으로 수행하였다. 이 프로그램은 주파수영역에서 파일의 유무를 고려하여 선형이나 비선형 다층지반 위에 세워진 1자유도계 체계에 대한 지진

응답해석을 한 번에 일괄적으로 의사 3D 유한요소법으로 수행할 수 있다.<sup>(7)</sup> 비선형 해석은 지반의 비선형 특성모델을 이용하여 반복적인 선형해석을 수행하는 할선강성법으로 수행할 수 있다.

기초지반은 그림 1에 나타난 것처럼 상대적으로 단단한 지반 위에 놓여 있는 것으로 가정하고 유한요소해석을 위해 먼저 상부 연약한 기초지반을 여러 층으로 나눈 후에 등가원형기초(사각형 기초의 경우 종횡비가 4:1 정도 까지 치환가능)<sup>(8)</sup>, 아래 원통형 중심영역(Core Region)과 중심영역을 제외한 외부영역(Far Field)으로 구분한다. 다시 중심영역 기초와 지반은 원주 주변 수평과 수직 변위를 고려하기 위해 환상유한요소로 세분화하고, 외부영역은 수평방향으로 토질이 균질한 무한한 외부영역을 대체하기 위해 정확한 이론식으로 개발한 Consistent Transmitting Boundary 요소로 대체한다. Consistent Transmitting Boundary는 선형 해석의 경우에는 기초가장자리, 비선형 해석의 경우에는 기초가장자리에서 대략 기초반경의 6-10배 거리에 있는 것으로 가정하여 모델링한다.<sup>(7),(8)</sup>

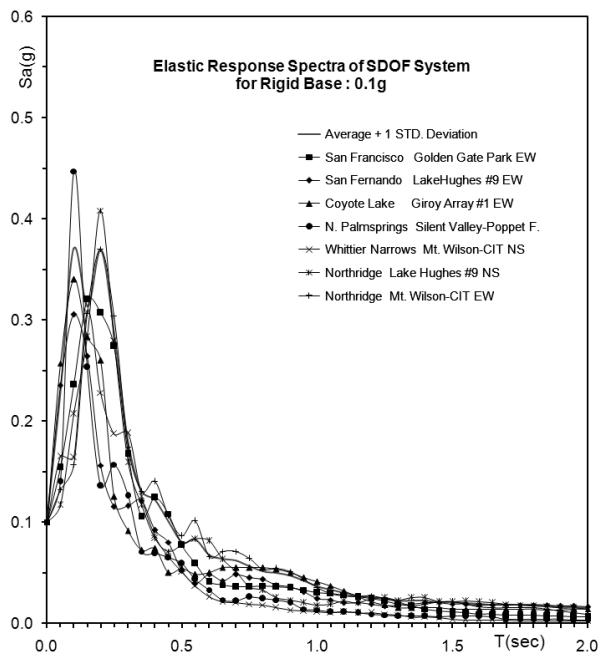
이 연구에서 고려한 기초지반은 30m 두께로 수평방향으로 균질하고 탄성과 점성이 있는 등방성 연약한 지반으로 단단한 암반 위에 놓인 것으로 가정하였다. 지진해석에서 고려한 지반의 전단파속도는 지반종류를 분류하고 연구에서 필요한 보간을 고려하여 100, 180, 360, 760, 1500m/s 가지 경우를 가정하였으며, 지반의 단위중량은 16, 16, 18, 20, 26 kN/m<sup>3</sup>로 전단파속도에 따라 변하는 것으로 가정하였고, 지반의 포아슨비



〈그림 1〉 의사 3D 유한요소 모델

〈표 1〉 중·약진 지진기록

No.	EQ. Name		Component		Max. Acc. (m/s <sup>2</sup> )	Natural Period (sec)	Magnitude	Duration (sec)	Epicentral Distance (km)	Site Class
1	San Francisco	1957	Golden Gate Park	GGP100	1.098	0.15	5.3	39.72	11.1	S <sub>B</sub>
2	San Fernando	1971	Lake Hughes #9	L09291	1.314	0.10	6.6	34.89	23.1	
3	Coyote Lake	1979	Giroy Valley #1	G01230-2	1.010	0.10	5.7	36.83	12.6	
4	N. Palm Springs	1986	Silent Valley -Poppet F.	SIL000-2	1.363	0.10	6.0	24.00	27.7	
5	Whittier Narrows	1987	Mt. Wilson-CIT	B-MTW000	1.549	0.15	5.3	22.00	18.7	
6	Northridge	1994	Lake Hughes #9	L09000	1.618	0.20	6.7	40.00	44.8	
7			Mt. Wilson-CIT	MTW090	1.314	0.20				



〈그림 2〉 7개 지진기록의 응답스펙트럼

와 초기 감쇠계수는 0.3과 0.05로 가정하였다. 또, 기초는 물힘(E)이 있는 원통형 강체온통기초로 가정하고, 기초의 단위중량은 온통기초일 경우는 23.5kN/m<sup>3</sup>로 기초가 3.3m이상인 경우에는 지하층을 고려하여 3.56kN/m<sup>3</sup>으로 가정하였다.

한편, 단자유도계의 설계응답스펙트럼은 감쇠계수를 0.05로 가정하여 작성하였다.

지진해석을 위한 지진기록은 미국 Berkeley 소재 Pacific Earthquake Engineering Research Center(PEER)<sup>(9)</sup>에서 제공하고 있는 전 세계 지진으로부터 기록된 1557개 지진 기록 중에서 United States Geology Survey(USGS)에서 전단파속도가 750m/s이상인 지반이나 Geomatrix 지반조건 분류상 지반조건이 A(Rock)로 평가된 지반에서 실측한 표 1에 나타난 총 7개의 지진기록을 선정하여 유효지진가속도를 0.1g로 조정하여 사용하였는데 지진기록의 응답스펙트럼은

그림 2에 나타나 있다. 그러나 이 지진기록들은 지표면에 나타난 지반종류 S<sub>B</sub>에 해당하는 노출암반(Outcrop)에서 기록된 것들이어서 구조물-지반체계의 정확한 지진해석을 위해서 S<sub>B</sub>지반(V<sub>s</sub>=1000m/s)에 대한 역산(Deconvolution)법으로 연약지반 밑 암반에서의 지진기록을 생성해서 사용하였다.

구조물-기초지반 체계에 대한 지진해석은 0에서 2초 사이의 고유주기를 갖는 구조물에 대해 0.1초 고유주기 간격으로 주파수 영역 0-30Hz에서 수행하였다.

### 3. 선형지반을 고려한 탄성응답스펙트럼의 지반증폭계수

선형 지반 위에 세워진 건축물의 구조물-지반 상호작용을 고려한 탄성응답스펙트럼에 대한 지진응답해석을 0.1g 지반가속도 수준의 7개 지진기록으로 수행하고, 지반의 전단파속도가 100, 180, 360, 760, 1500m/s인 경우에 대해 평균+표준편차 탄성응답스펙트럼을 구하여 단주기 영역에서 지반증폭계수 F<sub>a</sub>는 응답스펙트럼을 0.1초에서 0.5초까지 평균하여 구하고, 장주기 영역(1초 주기)에서 지반증폭계수 F<sub>v</sub>는 응답스펙트럼을 0.4초에서 2.0초까지 평균하여 구하였다.

탄성응답스펙트럼은 등가원형기초의 반경이 10, 20, 30, 50, 70m인 경우를 고려하였고, 기초의 물힘은 0, 10, 20, 30m인 경우를 고려하였다. 기초반경(R)과 기초물힘(E)을 지반깊이(H) 30m로 정규화하면 R/H는 1/3, 2/3, 1, 5/3, 7/3이 되고 E/H는 0, 1/3, 2/3, 1이 된다.

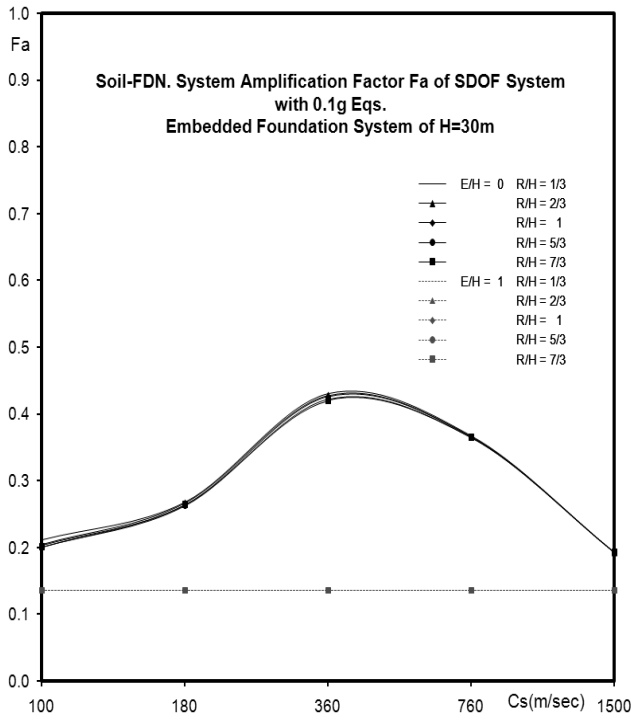
표 2와 표 3에는 기초물힘, 기초반경과 전단파속도에 따른 지반증폭계수 F<sub>a</sub>와 F<sub>v</sub> 값이 나타나 있고, 그림 3에는 이 값들을 그림으로 나타냈다. 그림에서는 기초물힘비(E/H) 별로 기초반경비(R/H)와 전단파속도에 따른 F<sub>a</sub>와 F<sub>v</sub>의 변화를 보여주고 있는데, E/H가 0인 지표면기초의 경우와 E/H가 1인 강성기초인 경우에는 기초크기에 따른 영향이 거의

〈표 2〉 기초반경에 따른 문힌기초의 장주기영역 지반증폭계수  $F_a$ 

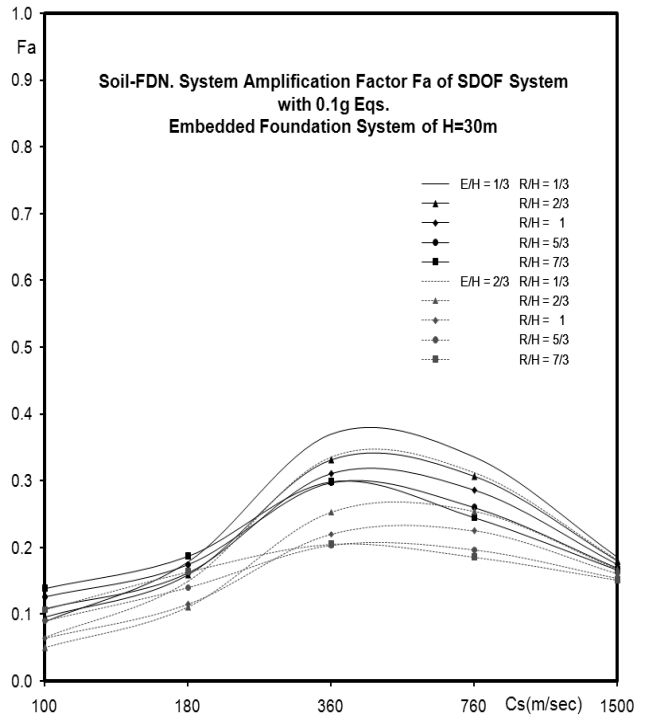
H(m)	E(m)	E/H	R(m)	R/H	전단파속도(m/s)				
					100	180	360	760	1500
30	0	0	10	1/3	0.211	0.268	0.431	0.367	0.192
			20	2/3	0.204	0.266	0.427	0.366	0.192
			30	1	0.203	0.265	0.426	0.366	0.192
			50	5/3	0.201	0.263	0.422	0.365	0.192
			70	7/3	0.200	0.263	0.420	0.364	0.192
	10	1/3	10	1/3	0.089	0.178	0.369	0.335	0.185
			20	2/3	0.096	0.159	0.331	0.306	0.179
			30	1	0.109	0.162	0.310	0.285	0.175
			50	5/3	0.127	0.175	0.297	0.259	0.169
			70	7/3	0.138	0.186	0.298	0.244	0.166
	20	2/3	10	1/3	0.065	0.149	0.336	0.312	0.181
			20	2/3	0.050	0.111	0.253	0.254	0.168
			30	1	0.064	0.115	0.220	0.225	0.160
			50	5/3	0.091	0.140	0.204	0.197	0.154
			70	7/3	0.107	0.163	0.204	0.185	0.151
	30	1	10	1/3	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136
			20	2/3	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136
			30	1	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136
			50	5/3	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136
			70	7/3	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136

〈표 3〉 기초반경에 따른 문힌기초의 단주기영역 지반증폭계수  $F_v$ 

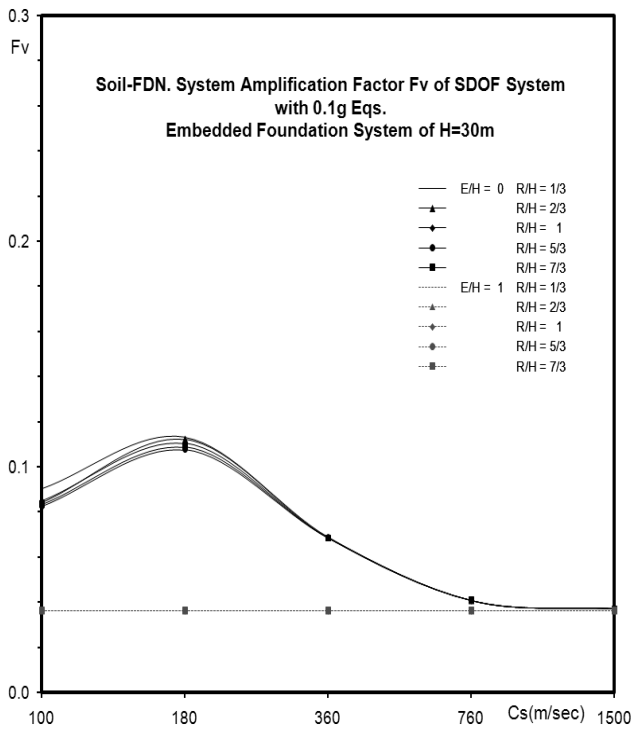
H(m)	E(m)	E/H	R(m)	R/H	전단파속도(m/s)				
					100	180	360	760	1500
30	0	0	10	1/3	0.090	0.113	0.069	0.041	0.037
			20	2/3	0.084	0.112	0.069	0.041	0.037
			30	1	0.085	0.110	0.069	0.041	0.037
			50	5/3	0.037	0.041	0.068	0.108	0.083
			70	7/3	0.037	0.041	0.069	0.109	0.083
	10	1/3	10	1/3	0.074	0.100	0.064	0.040	0.037
			20	2/3	0.065	0.090	0.060	0.040	0.037
			30	1	0.062	0.084	0.057	0.039	0.037
			50	5/3	0.037	0.039	0.054	0.077	0.059
			70	7/3	0.037	0.039	0.052	0.075	0.061
	20	2/3	10	1/3	0.066	0.092	0.061	0.040	0.037
			20	2/3	0.050	0.071	0.053	0.039	0.037
			30	1	0.046	0.062	0.049	0.038	0.037
			50	5/3	0.036	0.038	0.045	0.055	0.046
			70	7/3	0.036	0.038	0.044	0.053	0.049
	30	1	10	1/3	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036
			20	2/3	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036
			30	1	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036
			50	5/3	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036
			70	7/3	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036



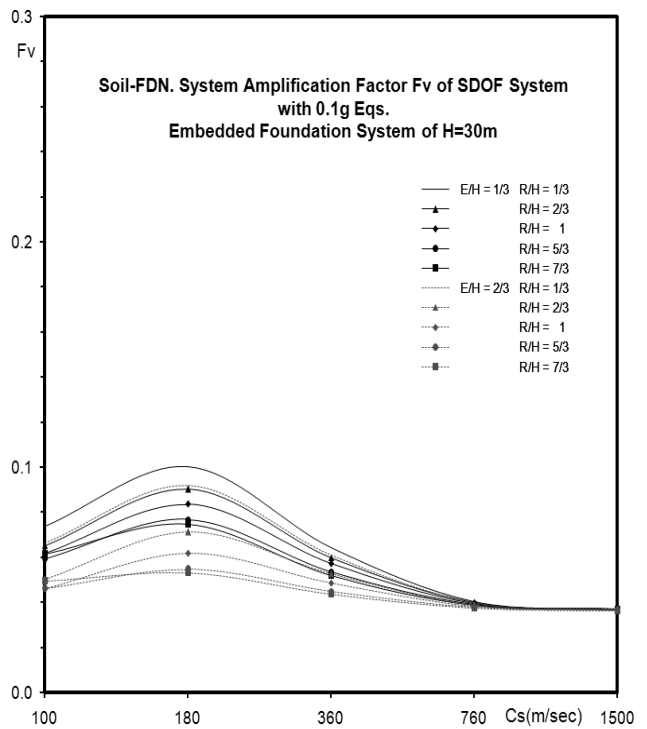
(a)  $F_a$  :  $E/H=0$  및 1인 경우



(b)  $F_a$  :  $E/H=1/3$  및 2/3인 경우



(c)  $F_v$  :  $E/H=0$  및 1인 경우



(d)  $F_v$  :  $E/H=1/3$  및 2/3인 경우

〈그림 3〉 기초물침에 따른 단주기 및 장주기 영역 지반증폭계수  $F_a$ ,  $F_v$

없는 것으로 평가되었고,  $E/H$ 가 1/3과 2/3인 문헌기초의 경우에는 기초반경이 50m이상( $R/H$ 가 5/3, 7/3)인 대형 기초의 경우에는 기초크기의 영향이 미미하지만 기초반경이 50m 이하( $R/H$ 가 1/3, 2/3, 1)인 중소형 기초의 경우에는 그 영향이 상당한 것으로 평가되었다. 따라서 기초의 물침이 얇은

( $E/H$ 가 1/3) 소형과 중형 문헌기초의 경우에는 지반증폭계수가 각각 25%, 12%정도 증가하였지만, 기초물침이 깊은 ( $E/H$ 가 2/3) 경우에는 지반증폭계수가 각각 65%, 25%정도 증가하여 기초물침이 깊을 수록 중형보다 소형기초의 지반증폭계수가 크게 영향을 받는 것으로 평가되었다.

〈표 4〉 전단파속도에 따른 물린기초지반의 장주기영역 지반증폭계수  $F_a$ 

H(m)	R(m)	R/H	E(m)	E/H	Site Class / 전단파속도(m/s)				
					S <sub>E</sub>	S <sub>D</sub>	S <sub>C</sub>	S <sub>B</sub>	S <sub>A</sub>
					100-180	180-360	360-760	760-1500	≥1500
30	10	1/3	0	0	0.211	0.268	0.431	0.367	0.192
			50	1/3	0.089	0.178	0.369	0.335	0.185
			70	2/3	0.066	0.149	0.336	0.312	0.181
			30	1	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136
	20	2/3	0	0	0.204	0.266	0.427	0.366	0.192
			10	1/3	0.096	0.159	0.331	0.306	0.179
			20	2/3	0.050	0.111	0.253	0.254	0.168
			30	1	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136
	30	3/3	0	0	0.203	0.265	0.426	0.366	0.192
			10	1/3	0.109	0.162	0.310	0.285	0.175
			20	2/3	0.064	0.115	0.220	0.225	0.160
			30	1	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136
	50	5/3	0	0	0.201	0.263	0.422	0.365	0.192
			10	1/3	0.127	0.175	0.297	0.259	0.169
			20	2/3	0.091	0.140	0.204	0.197	0.154
			30	1	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136
	70	7/3	0	0	0.200	0.263	0.420	0.364	0.192
			10	1/3	0.138	0.186	0.298	0.244	0.166
			20	2/3	0.107	0.163	0.204	0.185	0.151
			30	1	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136

〈표 5〉 전단파속도에 따른 물린기초지반의 단주기영역 지반증폭계수  $F_v$ 

H(m)	R(m)	R/H	E(m)	E/H	Site Class / 전단파속도(m/s)				
					S <sub>E</sub>	S <sub>D</sub>	S <sub>C</sub>	S <sub>B</sub>	S <sub>A</sub>
					100-180	180-360	360-760	760-1500	≥1500
30	10	1/3	0	0	0.090	0.113	0.069	0.041	0.037
			50	1/3	0.074	0.100	0.064	0.040	0.037
			70	2/3	0.066	0.092	0.061	0.040	0.037
			30	1	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036
	20	2/3	0	0	0.084	0.112	0.069	0.041	0.037
			10	1/3	0.065	0.090	0.060	0.040	0.037
			20	2/3	0.050	0.071	0.053	0.039	0.037
			30	1	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036
	30	3/3	0	0	0.085	0.110	0.069	0.041	0.037
			10	1/3	0.062	0.084	0.057	0.039	0.037
			20	2/3	0.046	0.062	0.049	0.038	0.037
			30	1	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036
	50	5/3	0	0	0.037	0.041	0.068	0.108	0.083
			10	1/3	0.037	0.039	0.054	0.077	0.059
			20	2/3	0.036	0.038	0.045	0.055	0.046
			30	1	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036
	70	7/3	0	0	0.037	0.041	0.069	0.109	0.083
			10	1/3	0.037	0.039	0.052	0.075	0.061
			20	2/3	0.036	0.038	0.044	0.053	0.049
			30	1	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036

한편, 표 4와 표 5에는 기초반경, 기초물림과 전단파속도에 따른 지반증폭계수  $F_a$ 와  $F_v$  값이 나타나 있고, 표 6와 표 7에서는 이 값들을 물림이 없는( $E/H$ 가 0) 지표면 기초의 지

반증폭계수로 정규화한 값들을 나타내었다. 이와 같이 정규화한  $E_a$ 와  $E_v$  값은 지반증폭계수  $F_a$ 와  $F_v$ 에 대한 기초물림에 따른 저감계수의 의미가 있다. 그림 4에는 전단파속도 별

〈표 6〉 지표면기초에 대한 묻힌기초의 지반계수비 (지반증폭계수  $F_a$ 에 대한 저감계수  $E_a$ )

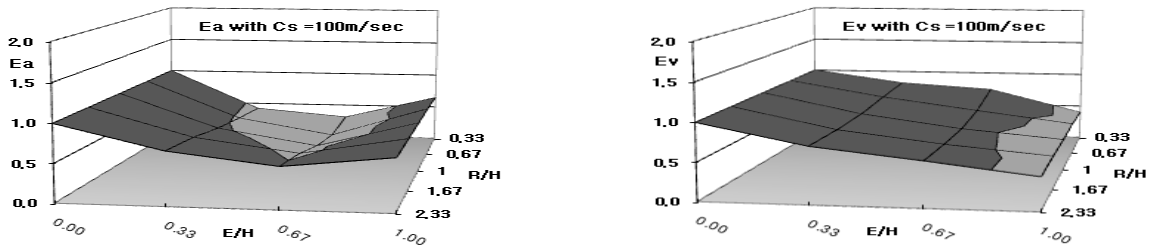
H(m)	R(m)	R/H	E(m)	E/H	Site Class / 전단파속도(m/s)				
					S <sub>E</sub>	S <sub>D</sub>	S <sub>C</sub>	S <sub>B</sub>	S <sub>A</sub>
					100-180	180-360	360-760	760-1500	≥1500
30	10	1/3	0	0	1	1	1	1	1
			50	1/3	0.419	0.665	0.858	0.913	0.964
			70	2/3	0.309	0.556	0.780	0.850	0.939
			30	1	0.645	0.508	0.316	0.371	0.708
	20	2/3	0	0	1	1	1	1	1
			10	1/3	0.470	0.596	0.774	0.836	0.932
			20	2/3	0.245	0.417	0.593	0.694	0.872
			30	1	0.668	0.512	0.319	0.372	0.708
	30	3/3	0	0	1	1	1	1	1
			10	1/3	0.534	0.611	0.728	0.779	0.909
			20	2/3	0.317	0.434	0.517	0.614	0.834
			30	1	0.67	0.514	0.319	0.372	0.708
	50	5/3	0	0	1	1	1	1	1
			10	1/3	0.631	0.665	0.704	0.710	0.881
			20	2/3	0.452	0.535	0.482	0.540	0.800
			30	1	0.678	0.519	0.323	0.373	0.709
	70	7/3	0	0	1	1	1	1	1
			10	1/3	0.691	0.708	0.71	0.669	0.865
			20	2/3	0.537	0.619	0.486	0.508	0.785
			30	1	0.681	0.517	0.324	0.373	0.710

〈표 7〉 지표면기초에 대한 묻힌기초의 지반계수비 (지반증폭계수  $F_v$ 에 대한 저감계수  $E_v$ )

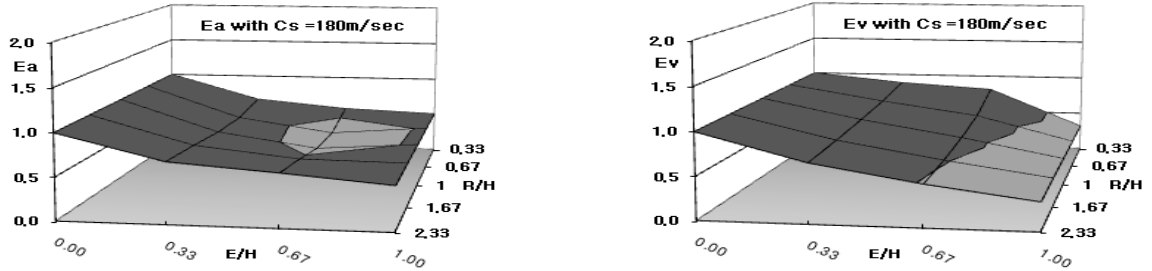
H(m)	R(m)	R/H	E(m)	E/H	Site Class / 전단파속도(m/s)				
					S <sub>E</sub>	S <sub>D</sub>	S <sub>C</sub>	S <sub>B</sub>	S <sub>A</sub>
					100-180	180-360	360-760	760-1500	≥1500
30	10	1/3	0	0	1	1	1	1	1
			50	1/3	0.816	0.884	0.933	0.990	0.999
			70	2/3	0.736	0.811	0.886	0.980	0.997
			30	1	0.399	0.318	0.524	0.887	0.973
	20	2/3	0	0	1	1	1	1	1
			10	1/3	0.776	0.804	0.874	0.978	0.997
			20	2/3	0.598	0.634	0.769	0.953	0.992
			30	1	0.429	0.321	0.526	0.887	0.973
	30	3/3	0	0	1	1	1	1	1
			10	1/3	0.724	0.756	0.835	0.970	0.995
			20	2/3	0.543	0.558	0.709	0.941	0.986
			30	1	0.423	0.326	0.526	0.887	0.973
	50	5/3	0	0	1	1	1	1	1
			10	1/3	0.718	0.714	0.786	0.958	0.989
			20	2/3	0.558	0.509	0.659	0.931	0.981
			30	1	0.436	0.335	0.527	0.887	0.970
	70	7/3	0	0	1	1	1	1	1
			10	1/3	0.736	0.686	0.759	0.953	0.987
			20	2/3	0.591	0.488	0.635	0.924	0.978
			30	1	0.433	0.331	0.526	0.887	0.970

로 기초반경비(R/H)와 기초물함비(E/H)에 따른 저감계수  $E_a$ 와  $E_v$ 의 변화가 3차원 그림으로 나타나 있는데, R/H가

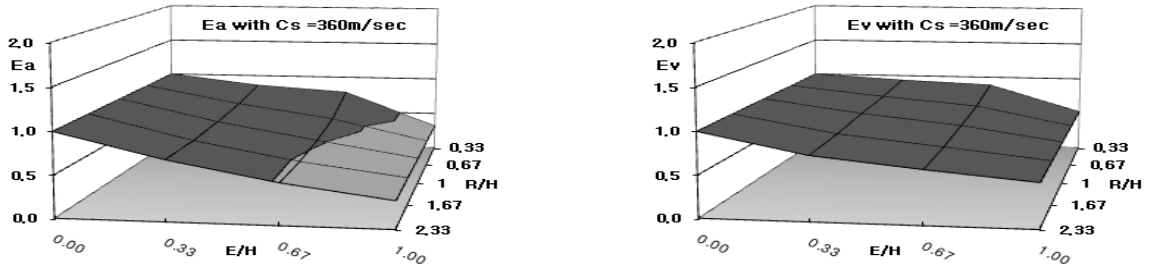
1/3인 소형기초의 경우에는 지반증폭계수의 감소가 다른 경우보다 작은 경우가 있지만 전반적으로 중대형 기초의 경우



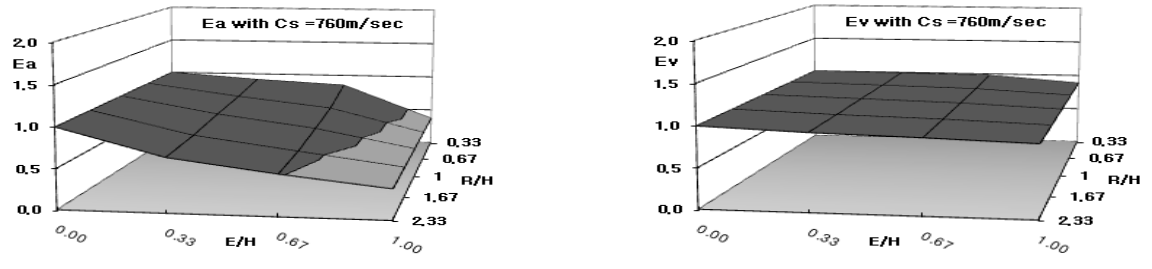
(a)  $C_s = 100\text{m/s}$



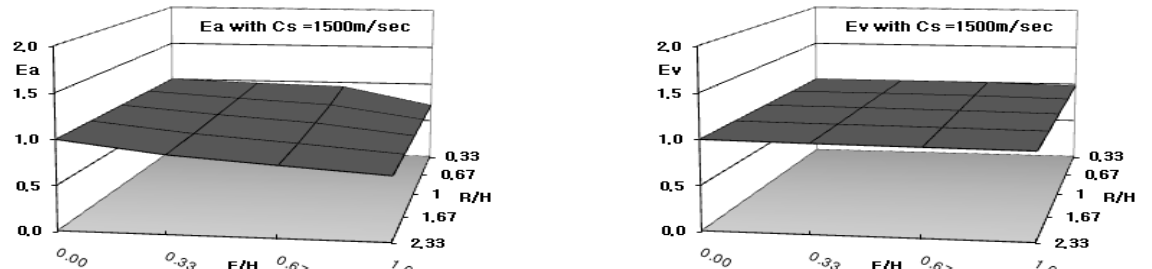
(b)  $C_s = 180\text{m/s}$



(c)  $C_s = 360\text{m/s}$



(d)  $C_s = 760\text{m/s}$



(e)  $C_s = 1500\text{m/s}$

〈그림 4〉 전단파속도, 기초반경 및 기초물함에 따른 지반증폭계수에 대한 저감계수  $E_a$ ,  $E_v$

기초크기의 영향은 미미하고 전단파속도가 100m/s인 경우 외에는 기초의 문힘이 깊을 수록 지반증폭계수가 점진적으

로 감소하는 것으로 평가되었다.

표 8에는 지반의 평균전단파속도 별로 저감계수  $E_a$ 와  $E_v$



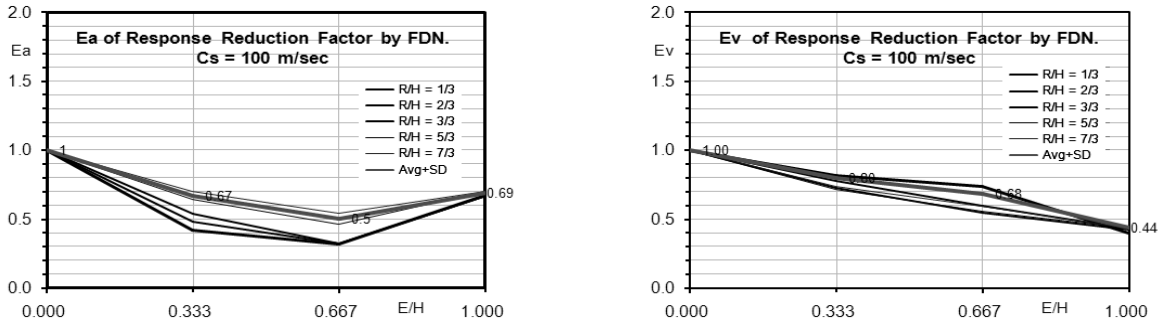
〈표 8〉 평균전단파속도 별 기초반경비와 기초물함비에 따른 저감계수  $E_a$ ,  $E_v$

전단파속도 (m/s)	R/H	$E_a$				$E_v$			
		E/H				E/H			
		0	1/3	2/3	1	0	1/3	2/3	1
100	1/3	1	0.42	0.32	0.67	1	0.82	0.74	0.40
	2/3	1	0.48	0.32	0.67	1	0.78	0.60	0.43
	1	1	0.54	0.32	0.67	1	0.72	0.54	0.42
	5/3	1	0.64	0.46	0.70	1	0.72	0.56	0.44
	7/3	1	0.70	0.54	0.70	1	0.74	0.59	0.43
	Avg+SD	1	0.67	0.5	0.69	1	0.8	0.68	0.44
180	1/3	1	0.67	0.56	0.51	1	0.88	0.81	0.32
	2/3	1	0.60	0.42	0.52	1	0.8	0.63	0.32
	1	1	0.62	0.44	0.52	1	0.76	0.56	0.33
	5/3	1	0.67	0.54	0.52	1	0.71	0.51	0.34
	7/3	1	0.71	0.62	0.52	1	0.69	0.49	0.33
	Avg+SD	1	0.70	0.60	0.52	1	0.85	0.73	0.33
360	1/3	1	0.86	0.78	0.32	1	0.93	0.89	0.52
	2/3	1	0.78	0.6	0.32	1	0.87	0.77	0.53
	1	1	0.73	0.52	0.32	1	0.84	0.71	0.53
	5/3	1	0.71	0.49	0.33	1	0.79	0.66	0.53
	7/3	1	0.71	0.49	0.33	1	0.76	0.64	0.53
	Avg+SD	1	0.82	0.70	0.33	1	0.91	0.83	0.53
760	1/3	1	0.92	0.85	0.38	1	0.99	0.98	0.89
	2/3	1	0.84	0.70	0.38	1	0.98	0.95	0.89
	1	1	0.78	0.62	0.38	1	0.97	0.94	0.89
	5/3	1	0.71	0.54	0.38	1	0.96	0.93	0.89
	7/3	1	0.67	0.51	0.38	1	0.95	0.92	0.89
	Avg+SD	1	0.88	0.78	0.38	1	0.99	0.97	0.89
1500	1/3	1	0.97	0.94	0.71	1	1	1	0.97
	2/3	1	0.94	0.88	0.71	1	1	0.99	0.97
	1	1	0.91	0.84	0.71	1	1	0.99	0.97
	5/3	1	0.89	0.80	0.71	1	0.99	0.98	0.97
	7/3	1	0.87	0.79	0.71	1	0.99	0.98	0.97
	Avg+SD	1	0.95	0.91	0.71	1	1	1	0.97

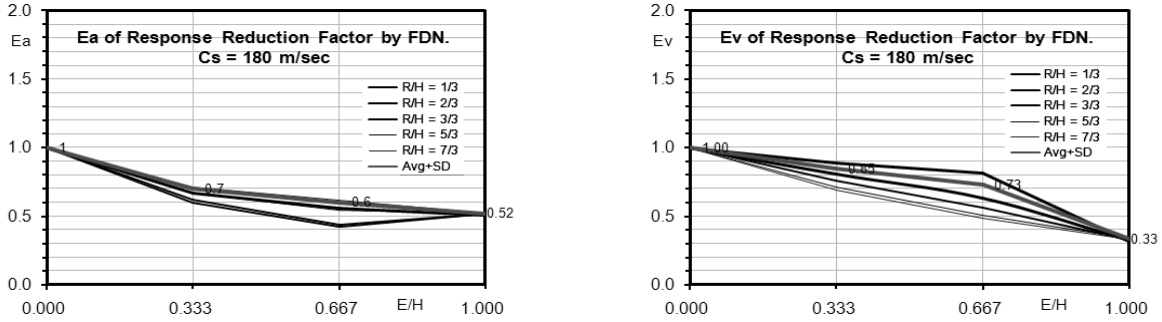
값을 기초반경비(R/H)와 기초물함비(E/H)에 따라 나타내고, 기초반경비가 다른 5가지 경우(R/H가 1/3, 2/3, 1, 5/3, 7/3)에 대한 평균값에 표준편차를 더한 표준저감계수를 추가해서 나타냈다. 또 그림 5에는 표 8에 나타난 저감계수를 그림으로 표현하였다.

단주기 영역에서 저감계수  $E_a$ 는 전단파속도가 작아지고 기초의 물함이 커질수록 감소하는 것으로 나타났는데, 전단파속도가 100m/s로 연약한 지반에 묻힌 강체기초가 암반 위에 놓인 경우(E/H=1)에는 지반이 연약해 기초의 거동이 증가하는 것으로 판단되었다. 또, 장주기 영역에서 저감계수  $E_v$ 도 전단파속도가 작아지고 기초의 물함이 커질수록 감소하는 것으로 나타났다.

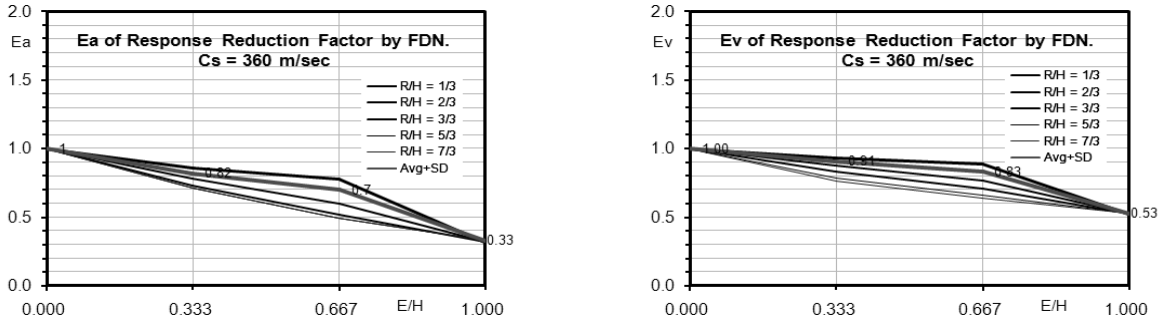
한편, 저감계수  $E_a$ 와  $E_v$ 는 전단파속도와 기초물함에 따라 최대 75%정도의 편차를 보이는 경우도 있지만 소형기초(기초반경 10m정도)가 매우 연약한 지반에 깊게 묻힘 경우를 제외하고는 전반적으로 심한 편차를 보이지 않는 것으로 평가되었고, 84%의 신뢰도를 나타내는 평균에 표준편차를 더한  $E_a$ 와  $E_v$  값은 보수적인 측면에서 기초크기에 무관하게 기초물함에 의한 저감계수를 대표할 수 있는 것으로 판단되었다. 표 9에는 평균전단파속도 별로 수치해석에서 구한 평균+표준편차 저감계수  $E_a$ 와  $E_v$  값을 정리하여 나타냈고, 수치해석에서 구한 평균+표준편차 저감계수를 실용화하기 위해 보수적으로 그림 6에 나타난 것처럼 단순하게 직선화하여 묻힌기초의 전단파속도에 따른 저감계수로 제안하였다.



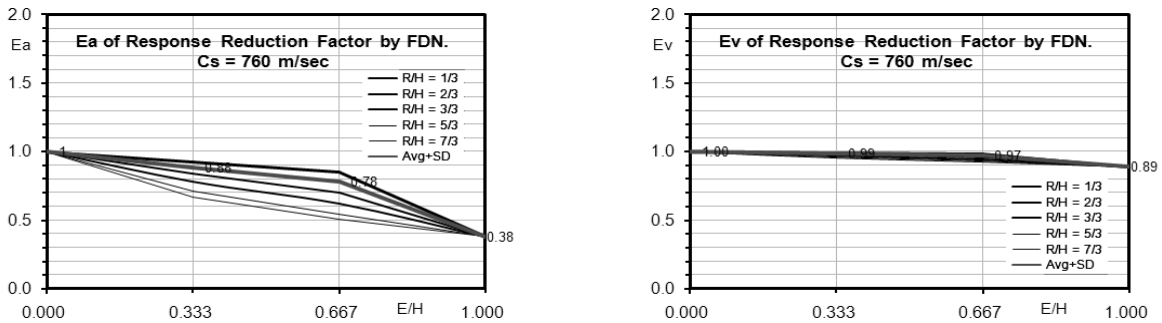
(a)  $C_s = 100\text{m/s}$



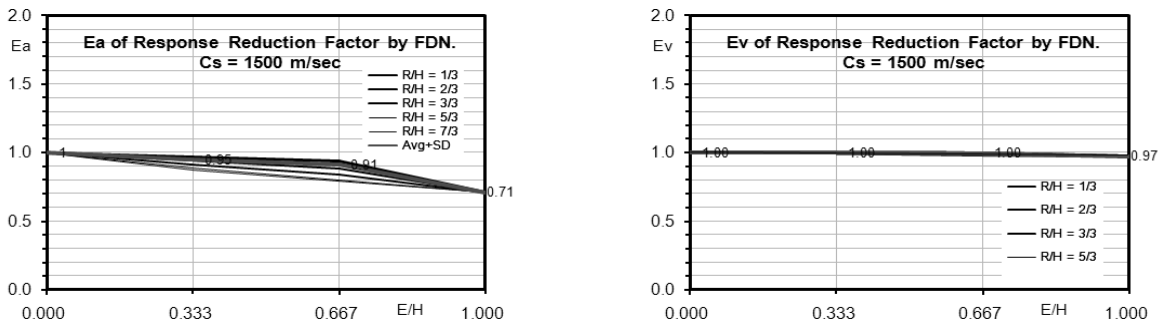
(b)  $C_s = 180\text{m/s}$



(c)  $C_s = 360\text{m/s}$



(d)  $C_s = 760\text{m/s}$

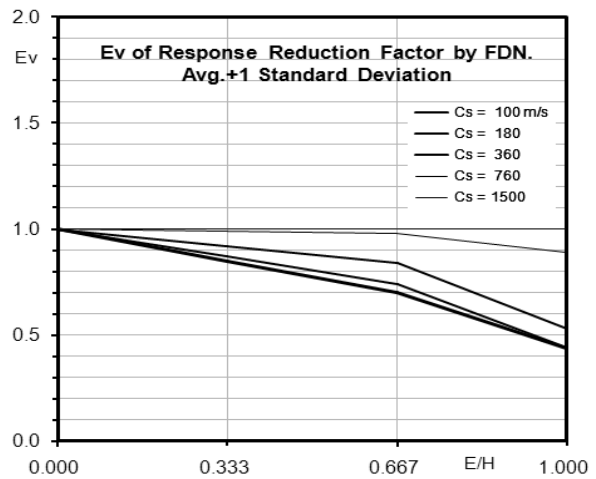
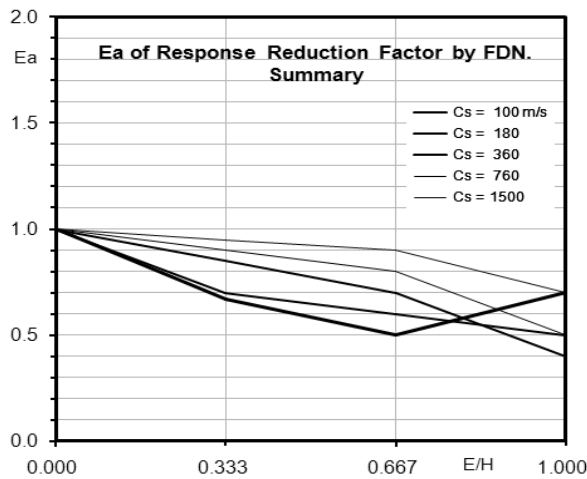


(e)  $C_s = 1500\text{m/s}$

〈그림 5〉 전단파속도 별 저감계수의 기초반경과 기초물함에 따른 변화 및 평균+표준편차

〈표 9〉 평균전단파속도별 기초물함에 따른 수치해석 및 제안한 저감계수  $E_a$ ,  $E_v$

	전단파속도 (m/s)	$E_a$				$E_v$			
		$E/H$				$E/H$			
		0	1/3	2/3	1	0	1/3	2/3	1
수치해석 저감계수	100	1	0.67	0.50	0.69	1	0.80	0.68	0.44
	180	1	0.70	0.60	0.52	1	0.85	0.74	0.33
	360	1	0.82	0.70	0.33	1	0.91	0.83	0.53
	760	1	0.88	0.78	0.38	1	0.99	0.97	0.89
	1500	1	0.95	0.91	0.71	1	1	1	0.97
제안한 저감계수	100	1	0.67	0.5	0.7	1	0.85	0.70	0.44
	180	1	0.70	0.6	0.5	1	0.87	0.74	0.44
	360	1	0.85	0.7	0.4	1	0.92	0.84	0.53
	760	1	0.90	0.8	0.5	1	0.99	0.98	0.89
	1500	1	0.95	0.9	0.7	1	1	1	1



〈그림 6〉 평균전단파속도별 기초물함에 따른 저감계수  $E_a$ ,  $E_v$

표 9와 그림 6에 나타나지 않은 중간 기초물함비( $E/H$ )에 대한 저감계수는 직선보간으로 구하여 사용할 수 있다.

#### 4. KBC를 위한 지반증폭계수에 대한 물하기초의 저감계수

표 9와 그림 6에 나타난 지반증폭계수에 대한 물하기초의 저감계수는 주어진 전단파속도(100, 180, 360, 760, 1500m/s)에 따라 구한 저감계수이기 때문에 지반종류 별 ( $S_A$ ,  $S_B$ ,  $S_C$ ,  $S_D$ ,  $S_E$ )로 정해진 지반증폭계수에 적용하기 위해서는 지반종류 별 지반증폭계수를 대표하는 전단파속도를 구한 후에 표 9에서 직선보간하여 저감계수를 구해야 한다.<sup>(10),(11)</sup> 이렇게 직선보간하여 구한 저감계수  $E_a$ ,  $E_v$ 를 기준에 제시된 지반증폭계수  $F_a$ ,  $F_v$ 에 곱해서 단주기와 주기1초의 설계스펙트럼가속도  $S_{DS}$ ,  $S_{DI}$ 을 다음 식 (1)처럼 구하면 물하기초에 의한 지반증폭계수의 저감효과를 고려할 수

있다. 다음 식 (1)에서  $S$ 는 KBC의 지역계수이다.

$$S_{DS} = E_a \times F_a \times \left(\frac{2}{3}S\right) \tag{1}$$

$$S_{DI} = E_v \times F_v \times \left(\frac{2}{3}S\right)$$

KBC와 IBC 기준의 설계응답스펙트럼 작성 시에 사용하는 지반증폭계수  $F_a$ 와  $F_v$ 에 따라 역산한 지반종류 별 전단파속도가 표 10에 나타나 있는데, 동일한 지반에 대해  $F_a$ 와  $F_v$ 를 규정한 지반 특성값은 같아야 하지만 지반  $S_B$ 를 제외한 모든 지반에서  $F_a$ 와  $F_v$ 를 규정한 전단파속도가 상당히 다르게 나타나 있다.<sup>(12)</sup> 이렇게 역산한 지반종류 별 전단파속도로 KBC2009에 따라 유효지반가속도 0.1g경우에 대해 지반종류 별 지반증폭계수에 대한 저감계수를 전단파속도 별로 수치해석으로 구한 저감계수로부터 직선보간하여 구한 지반종류 별 저감계수를 기초반경비( $R/H$ )와 기초물함비

〈표 10〉 KBC2009 지반증폭계수에 대한 지반의 대표전단파속도

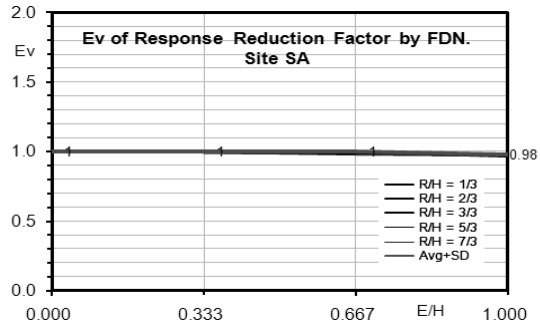
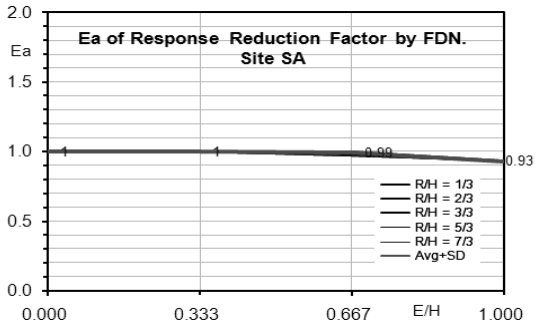
지진 가속도 수준 0.1g	지반종류	S <sub>A</sub>	S <sub>B</sub>	S <sub>C</sub>	S <sub>D</sub>	S <sub>E</sub>
	지반증폭계수 $F_a$	0.8	1.0	1.2	1.6	2.5
	대표전단파속도(m/s)	1986	1050	624	274	77
	지반증폭계수 $F_v$	0.8	1.0	1.7	2.4	3.5
	대표전단파속도(m/s)	1480	1050	464	273	153

〈표 11〉 지반종류 별 보간한 기초반경에 따른 저감계수  $E_a, E_v$

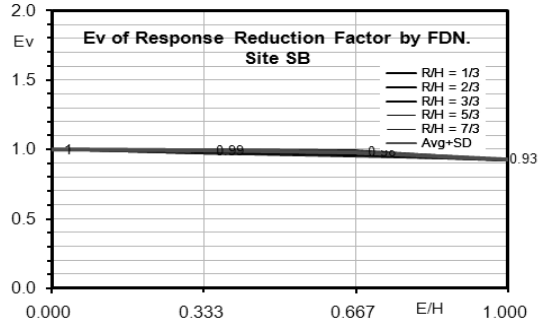
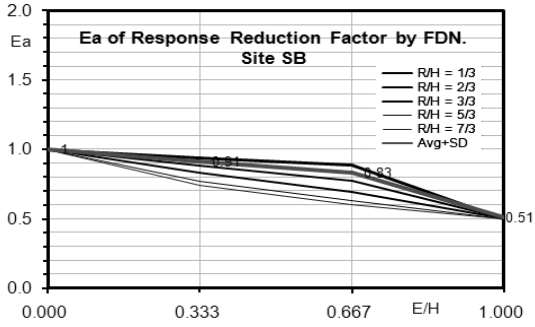
전단파 속도 (m/s)	R/H	E/H							
		$E_a$				$E_v$			
		0	1/3	2/3	1	0	1/3	2/3	1
S <sub>A</sub>	1/3	1	1	1	0.93	1	1	1	0.97
	2/3	1	1	0.99	0.93	1	1	0.99	0.97
	1	1	1	0.98	0.93	1	0.99	0.99	0.97
	5/3	1	1	0.97	0.93	1	0.99	0.98	0.97
	7/3	1	1	0.97	0.93	1	0.99	0.98	0.97
	Avg+SD	1	1	0.99	0.93	1	1	1	0.98
S <sub>B</sub>	1/3	1	0.94	0.89	0.50	1	0.99	0.99	0.92
	2/3	1	0.88	0.77	0.50	1	0.99	0.97	0.92
	1	1	0.83	0.69	0.50	1	0.98	0.96	0.92
	5/3	1	0.77	0.63	0.50	1	0.97	0.95	0.92
	7/3	1	0.74	0.60	0.50	1	0.97	0.95	0.92
	Avg+SD	1	0.91	0.83	0.51	1	0.99	0.98	0.93
S <sub>C</sub>	1/3	1	0.90	0.83	0.36	1	0.95	0.91	0.62
	2/3	1	0.82	0.66	0.36	1	0.9	0.82	0.62
	1	1	0.77	0.59	0.36	1	0.87	0.77	0.62
	5/3	1	0.71	0.52	0.36	1	0.83	0.73	0.62
	7/3	1	0.69	0.50	0.36	1	0.81	0.71	0.62
	Avg+SD	1	0.86	0.75	0.36	1	0.93	0.87	0.63
S <sub>D</sub>	1/3	1	0.77	0.68	0.41	1	0.92	0.86	0.45
	2/3	1	0.69	0.51	0.42	1	0.85	0.72	0.46
	1	1	0.68	0.48	0.42	1	0.81	0.66	0.46
	5/3	1	0.69	0.51	0.42	1	0.76	0.61	0.46
	7/3	1	0.71	0.55	0.42	1	0.73	0.59	0.46
	Avg+SD	1	0.75	0.62	0.42	1	0.89	0.8	0.47
S <sub>E</sub>	1/3	1	0.35	0.24	0.69	1	0.86	0.79	0.35
	2/3	1	0.44	0.20	0.72	1	0.8	0.62	0.36
	1	1	0.52	0.29	0.72	1	0.75	0.55	0.36
	5/3	1	0.63	0.43	0.73	1	0.72	0.53	0.37
	7/3	1	0.69	0.52	0.73	1	0.7	0.52	0.37
	Avg+SD	1	0.66	0.47	0.73	1	0.83	0.72	0.37

(E/H)에 따라 표 11에 나타났다. 또, 기초반경비가 다른 5 가지 경우에 대한 평균값에 표준편차를 더한 표준저감계수를 추가해서 표 11에 나타났다. 한편, 그림 7에는 표 11에 나타난 저감계수를 그림으로 표현하였다. 기초크기와 기초 문힘에 따른 지반종류 별 저감계수도 전단파속도 별 저감계수와 동일한 경향을 나타냈다.

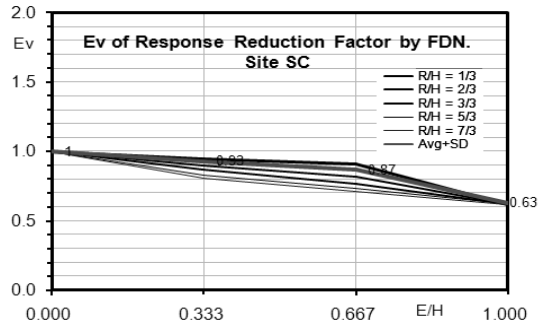
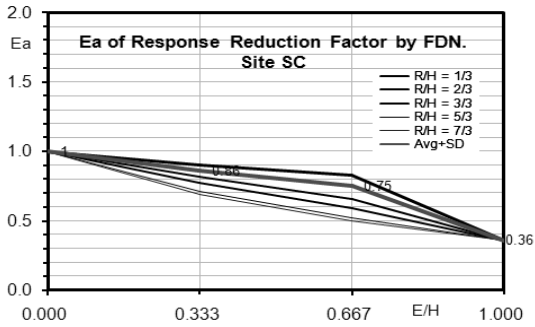
표 12에는 지반종류 별로 수치해석에서 구한 저감계수로 부터 보간하여 구한 기초크기에 따른 저감계수의 평균+표준편차 저감계수를 정리하여 나타냈고, 표 13에는 보간한 평균+표준편차 저감계수를 실용화하기 위해 보수적으로 그림 8에 나타난 것처럼 단순하게 직선화하여 실무 설계를 위한 지반종류 별 문힘기초의 저감계수를 제안하였다. 표 13



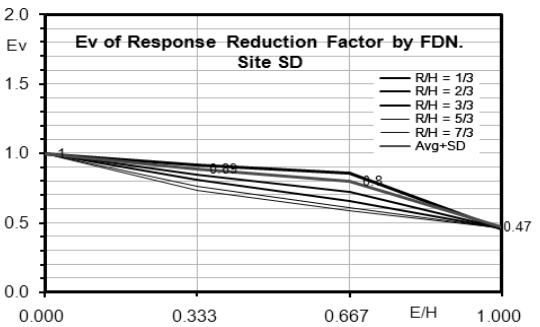
(a) Site S<sub>A</sub>



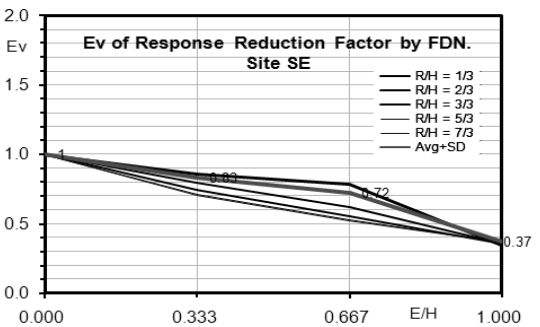
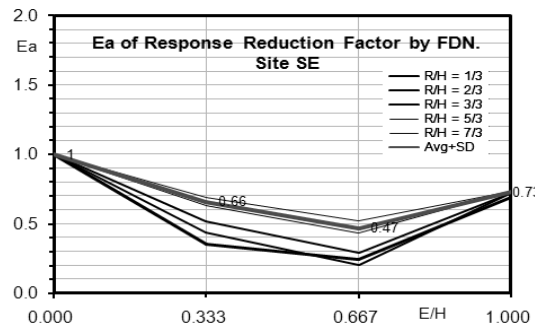
(b) Site S<sub>B</sub>



(c) Site S<sub>C</sub>



(d) Site S<sub>D</sub>



(e) Site S<sub>E</sub>

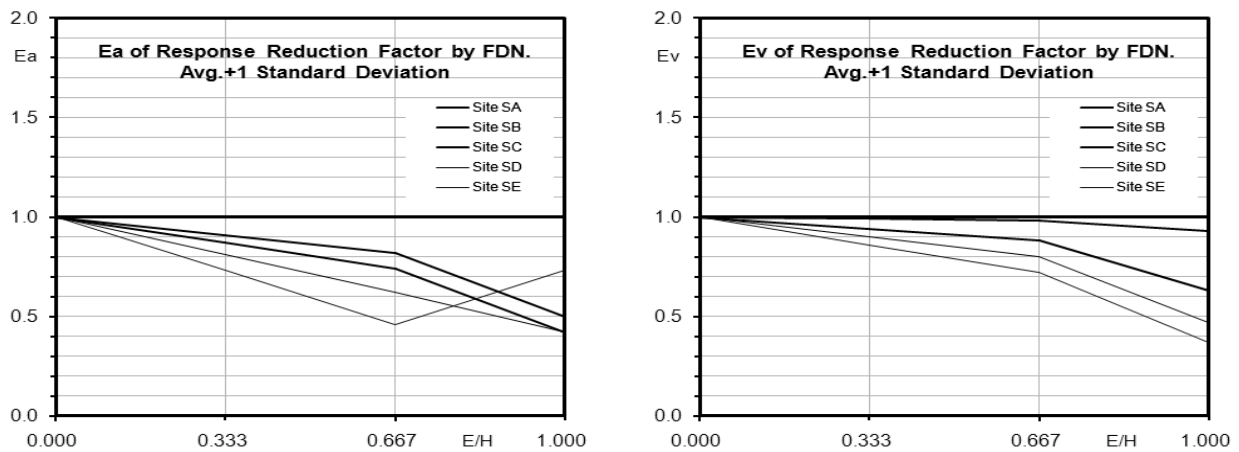
〈그림 7〉 지반종류 별 저감계수의 기초변경과 기초물침에 따른 변화 및 평균+편차

〈표 12〉 지반종류 별 기초물함에 따라 보간한 저감계수  $E_a$ ,  $E_v$

	지반 종류	$E_a$				$E_v$			
		$E/H$				$E/H$			
		0	1/3	2/3	1	0	1/3	2/3	1
보간한 저감계수	S <sub>A</sub>	1	1	0.99	0.93	1	1	1	0.98
	S <sub>B</sub>	1	0.91	0.83	0.51	1	0.99	0.98	0.93
	S <sub>C</sub>	1	0.86	0.75	0.36	1	0.93	0.87	0.63
	S <sub>D</sub>	1	0.75	0.62	0.42	1	0.89	0.80	0.47
	S <sub>E</sub>	1	0.66	0.47	0.73	1	0.83	0.72	0.37

〈표 13〉 지반종류 별 기초물함에 따라 제안한 저감계수  $E_a$ ,  $E_v$

지반 종류	$E_a$				$E_v$			
	기초물함비 $E/H$				기초물함비 $E/H$			
	0	1/3	2/3	1	0	1/3	2/3	1
S <sub>A</sub>	1	1	1	1	1	1	1	1
S <sub>B</sub>	1	0.91	0.82	0.50	1	0.99	0.98	0.93
S <sub>C</sub>	1	0.87	0.74	0.42	1	0.94	0.88	0.63
S <sub>D</sub>	1	0.81	0.62	0.42	1	0.90	0.80	0.47
S <sub>E</sub>	1	0.73	0.46	0.73	1	0.86	0.72	0.37



〈그림 8〉 지반종류 별 기초물함비에 따른 저감계수  $E_a$ ,  $E_v$

과 그림 8에 나타나지 않은 중간기초물함비( $E/H$ )에 대한 저감계수는 직선보간해서 사용할 수 있다.

### 5. 결 언

이 논문에서는 연약지반에 세워진 건축물의 지진해석을 위해서 기준(KBC, IBC)에 주어진 지표면기초에 적합한 지반증폭계수에 대한 문헌기초로 인한 저감계수를 제안하는 연구를 수행하였다.

문헌기초-지반에 대한 지반평가 지진해석은 선형 및 비선형 지반에 세워진 구조물의 수평방향 지진응답해석을 위해서 개발한 P3DASS 유한요소 프로그램으로 수행하였는데, 이 연구

에서 고려한 기초지반은 30m 두께로 수평방향으로 균질하고 탄성과 점성이 있는 등방성 연약한 지반으로 단단한 암반 위에 놓인 것으로 가정하였다. 지반은 전단파속도 별로는 전단파속도가 100, 180, 360, 760, 1500m/s인 5가지 지반을, 지반종류 별로는 S<sub>A</sub>, S<sub>B</sub>, S<sub>C</sub>, S<sub>D</sub>, S<sub>E</sub> 지반을 고려하였다. 기초는 원통형 문헌 강제운동기초로 가정하고, 등가원형기초의 반경은 10, 20, 30, 50, 70m인 경우를, 기초의 물함은 0, 10, 20, 30m 인 경우를 고려하였다.

지진해석을 위한 지진기록은 미국 PEER에서 제공하고 있는 지진기록 중에서 지반조건이 암반으로 평가된 지반에서 실측한 총 7개의 지진기록을 선정하여 유효지진가속도를 0.1g로 조정된 후 S<sub>B</sub>지반에 대한 역산(Deconvolution)법으로

연약지반 밑 암반에서의 지진기록을 생성하여 사용하였고, 구조물-기초지반 체계에 대한 지진해석은 주파수 영역 0-30Hz에서 주파수영역 해석법으로 수행하였다.

연구결과에 의하면 지반이 매우 연약(전단파속도가 100m/s 이하)한 경우를 제외하고는 기초의 묻힘이 깊을수록 지반증폭계수가 점진적으로 감소하는 것으로 평가되었고, 소형기초(기초반경 10m정도)가 매우 연약한 지반에 깊게 묻힘 경우를 제외하고는 기초크기는 기초지반의 증폭계수에 큰 영향이 없는 것으로 평가되어, 기초반경 별로 구한 저감계수에 대한 평균+표준편차 저감계수를 기초크기에 무관한 기초묻힘에 따른 표준저감계수로 산정하였다.

수치해석에서 구한 표준저감계수를 실용화하기 위해 지반의 평균전단파속도에 따른 지반증폭계수에 대한 표준저감계수로 제안하였고, 표준저감계수를 KBC 등 기준에 반영할 수 있도록 지반종류에 따른 지반증폭계수에 대한 표준저감계수로도 제안하였다.

이 연구에서 제안한 표준저감계수는 기본적으로 선형 지반을 고려하였기 때문에 지반가속도 수준에 관계없이 모든 지반가속도 수준에 적용이 가능하고, 보다 실제적인 저감계수를 사용하고자할 경우에는 표준저감계수 대신에 평균전단파속도에 따라 구한 저감계수를 지반의 평균전단파속도나 지반의 종류, 기초반경, 기초묻힘을 고려하여 직선보간하여 사용할 수 있다.

## 감사의 글

이 논문은 2008학년도 목포대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

## 참고 문헌

1. International Building Code Council (IBC), International Building Code (IBC 2009), 340-366, 2009.
2. 대한건축학회, 건축구조설계기준 (KBC 2009), 기문당, 1039, 2009.
3. 김용석, 구조물-지반 상호작용과 지진해석, 한국지진공학회, 구미서관, 105, 2005.
4. 윤종구, 김동수, 방은석, "국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 개선에 대한 연구(III)," 한국지진공학회 논문집, 제10권, 제2호, 63-71, 2006.
5. Zhang, Y., Conte, J.P., Yang, Z., Elgamal, A., Bielak, J., Acero, G., "Two-Dimensional Nonlinear Earthquake Response Analysis of a Bridge-Foundation-Ground System," *Earthquake Spectra*, Vol.24, No.2, 343-386, 2008.
6. Kim, Yong-Seok, Dynamic Response of Structures on Pile Foundations, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 1987.
7. Kim, Yong-Seok 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, 104-114, June, 2004.
8. Roesset, J. M., A Review of Soil-Structure Interaction, Lawrence Livermore Laboratory, 125, 1980.
9. PEER Strong Earthquake Data Base, <http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html/>
10. Dobry, R. et al., "New Site Coefficients and Site Classification System Used in Recent Building Seismic Code Provisions," *Earthquake Spectra*, Vol. 16, No. 1, 41-67, Feb., 2000.
11. Borcherdt, R. D., "Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification)," *Earthquake Spectra*, Vol. 10, No. 4, 617-653, 1994.
12. 김용석, "KBC 내진설계기준을 위한 지반분류와 지반계수에 대한 연구," 한국지진공학회 논문집, 제11권, 제1호, 59-65, 2007.