

내진설계기준의 지반분류체계 및 설계응답스펙트럼 개선을 위한 연구 - (II) 제안

Site Classification and Design Response Spectra for Seismic Code Provisions - (II) Proposal

조형익¹⁾ · Manandhar Satish¹⁾ · 김동수^{1)*}

Cho, Hyung Ik¹⁾ · Manandhar Satish¹⁾ · Kim, Dong Soo^{1)*}

¹⁾KAIST 건설 및 환경공학과

¹⁾Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST

/ A B S T R A C T /

In the companion paper (I – Database and Site Response Analyses), site-specific response analyses were performed at more than 300 domestic sites. In this study, a new site classification system and design response spectra are proposed using results of the site-specific response analyses. Depth to bedrock (H) and average shear wave velocity of soil above the bedrock ($V_{S,Soil}$) were adopted as parameters to classify the sites into sub-categories because these two factors mostly affect site amplification, especially for shallow bedrock region. The 20 m of depth to bedrock was selected as the initial parameter for site classification based on the trend of site coefficients obtained from the site-specific response analyses. The sites having less than 20 m of depth to bedrock ($H1$ sites) are sub-divided into two site classes using 260 m/s of $V_{S,Soil}$ while the sites having greater than 20 m of depth to bedrock ($H2$ sites) are sub-divided into two site classes at $V_{S,Soil}$ equal to 180 m/s. The integration interval of 0.4 ~ 1.5 sec period range was adopted to calculate the long-period site coefficients (F_V) for reflecting the amplification characteristics of Korean geological condition. In addition, the frequency distribution of depth to bedrock reported for Korean sites was also considered in calculating the site coefficients for $H2$ sites to incorporate sites having greater than 30 m of depth to bedrock. The relationships between the site coefficients and rock shaking intensity were proposed and then subsequently compared with the site coefficients of similar site classes suggested in other codes.

Key words: Seismic code, Site classification, Design response spectra, Site response analysis

1. 서론

우리나라 최초의 내진설계기준은 1988년 ‘건축물의 구조기준 등에 관한 규칙’[1]에 내진설계에 대한 사항이 포함되며 시작되었다. 당시로는 최신의 내진설계기준이었던 미국의 ATC3-06 (1978)에 바탕을 둔 것으로 이후 2005년 건축구조설계기준(Korean Building Code, KBC)[2]이 고시되기까지 큰 틀의 변동 없이 적용되었다[3]. KBC 2005는 IBC (International Building Code 2000)[4]의 내진설계개념을 대폭 수용하였다. 재현주기 500년 지진의 유효지반가속도로 표현되던 설계지진은 IBC 2000 이후 최대고려지진(Maximum Considered Earthquake, MCE)인 재현주기

2,400년 지진의 유효지반가속도에 대한 2/3 값이 설계지진으로 정의되었다. KBC 2005는 IBC 2000의 설계지진 정의를 받아들이고 있는데 재현주기 2,400년 지진의 유효지반가속도는 내진설계기준연구(II)[5]의 설계지진 재현주기 500년 지진 유효지반가속도의 2배에 해당하고 이것의 2/3에 해당되는 설계지반가속도는 재현주기 500년 지진 유효지반가속도의 1.33배가 된다. 즉, KBC 2005에서 기준이 되는 설계지반가속도(중요도계수 1.0인 구조물)는 내진설계기준연구(II)의 기준 설계지진인 재현주기 500년 지진에 비해 1.33배 증가하게 된다. 내진 특등급 구조물에 해당하는 중요도 계수 1.5를 적용하면 내진설계기준연구(II)의 재현주기 2,400년 지진의 유효지반가속도와 값이 같아진다[6]. KBC 2009에서는 행정구역에 따른 지역계수로 재현주기 2,400년 지진위험도로 정의된 MCE 지진의 유효지반가속도를 활용하도록 수정하였으나, 설계지진하중 자체에 큰 변화는 없도록 하였다.

도로교설계기준[7, 8]은 단일모드 스펙트럼 해석 시 구조물의 진동주기

*Corresponding author: Kim, Dong Soo

E-mail: dskim@kaist.ac.kr

(Received February 26, 2016; Revised April 12, 2016; Accepted April 22, 2016)

Table 1. Site classification system and site coefficients in current seismic code [9]

Site class	Description	$V_{S,30}$ (m/s)	Seismic region I				Seismic region II			
			F_a	F_v	C_a	C_v	F_a	F_v	C_a	C_v
S_A	Hard Rock	$V_{S,30} > 1500$	0.82	0.82	0.09	0.09	0.71	0.71	0.05	0.05
S_B	Rock	$760 \leq V_{S,30} < 1500$	1.00	1.00	0.11	0.11	1.00	1.00	0.07	0.07
S_C	Very dense soil and soft rock	$360 \leq V_{S,30} < 760$	1.18	1.63	0.13	0.18	1.14	1.57	0.08	0.11
S_D	Stiff soil	$180 \leq V_{S,30} < 360$	1.45	2.09	0.16	0.23	1.57	2.29	0.11	0.16
S_E	Soft soil	$V_{S,30} < 180$	2.00	3.36	0.22	0.37	2.42	3.29	0.17	0.23
S_F	Requires site-specific evaluation									

2/3승에 반비례($1/T^{2/3}$)해서 스펙트럴 가속도(Spectral Acceleration)를 감소시킨다. 구조물 주기에 반비례($1/T$)해 감소하는 내진설계기준연구(II)에 비해 이는 장주기 구조물에 대해 보수적인 하중을 산정토록 한다. 설계응답스펙트럼 작성 시에는 지반종류 별로 하나의 지반계수(S)를 활용하고 최대 스펙트럴 가속도를 설계지반운동의 최대 2.5배를 넘지 못하도록 제한하여, 지반종류에 관계없이 최대 스펙트럴 가속도가 같도록 하였다. 단주기, 장주기 두 증폭계수로 지반종류에 따라 최대 스펙트럴 가속도를 달리 정의하는 내진설계기준연구(II)와 KBC 기준과는 다르다고 할 수 있다.

1997년 건설교통부에서 제정한 내진설계기준연구(II)는 내진설계기준 공통적용사항을 명시한 내진설계 상위개념에 해당하는 기준이다. 그러나 내진설계기준연구(II)는 제정 당시 법제화되지 않아 앞서 언급한 KBC 기준, 도로교설계기준과 같이 시설물에 따라 그 기준을 개정하거나 신규 제정할 시 설계지진하중 등을 독자적으로 적용하게 되었다. 시설물에 따라 설계지진하중 표현방법이 다른 여러 사회적 부작용을 야기한다. 설계 실무자에게 혼란을 줄 수 있고 모든 조건이 동일하다 할지라도 시설물에 따라 산정되는 설계지진하중의 정량적 수준이 불일치하는 모순이 발생할 수 있다. 근본적으로는 공통된 설계지진하중 산정법이 기반 되었을 때 기대되는 내진설계기법 발전이 저해되는 문제가 있다.

2013년 신설된 지진·화산재해대책법(제14조 제4항)에서는 내진설계기준 등에 활용하기 위하여 국가 내진성능목표와 내진설계기준 별로 공통적으로 적용되는 설계지반운동 등의 고시를 법제화하였고, 동법 시행령(제10조의2)을 통해 내진설계기준 공통적용사항으로 지반분류체계와 설계응답스펙트럼으로 표현되는 설계지반운동의 특성표현을 명시하였다. 지진·화산재해대책법과 시행령 제정으로 1997년 이후 약 20년 동안 이어져온 국내 내진설계기준과 지반증폭 특성 불일치로 인한 문제(동반논문 I)와 시설물 별 내진설계기준의 공통적용사항이 다르므로 인해 발생하는 문제 등을 내진설계기준 공통적용사항 고시를 통해 국가 내진설계기준 체계화, 실무 효율성 증대, 설계기술 고도화 등의 효과를 기대할 수 있게 되었다.

동반논문 I - 데이터베이스 및 지반응답해석)에서는 국내 지반의 증폭 특성을 면밀히 반영하는 지반분류체계 및 설계응답스펙트럼 제안을 위해 국내 지반을 대표할 수 있는 대규모 지반조사자료와 다양한 입력지진파를 확보하여 지반응답해석을 수행하였고, 결과를 현행 기준과 비교분석하여 기준의 문제점을 지적하였다. 본 논문에서는 동반논문(I)에서 수행된 지반응답해석의 결과를 활용하여 국내 지반의 지진 시 증폭특성에 적합한 지반분류체계 및 이에 대응하는 설계응답스펙트럼을 제안하고자 하였다.

2. 기준 및 선행연구 분석

2.1 내진설계기준연구(II)

내진설계기준연구(II)[5]에서 정의하고 있는 지반분류체계는 상부 30 m 지반의 평균 지반특성을 활용하는데 활용되는 지반정수로는 전단파속도(Shear Wave Velocity, V_s), 표준관입시험 관입저항치(SPT-N치), 비배수 전단강도(Undrained Shear Strength, S_u)가 있다. 상부 30 m 지반의 평균 전단파속도인 $V_{S,30}$ 의 계산은 지반의 전단파속도 주상도와 식(1)을 이용할 수 있고, 이를 바탕으로 Table 1과 같이 부지고유의 지반응답해석이 요구되는 S_F 지반을 제외한 5개의 지반분류로 지반을 분류할 수 있다.

$$V_{s,30} = 30 / \left(\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}} \right) \tag{1}$$

여기서, d_i 와 V_{si} 는 각각 지표면 하부 30 m까지의 i 번째 토층의 두께(m)와 전단파속도(m/s)이다.

구조물에 작용하는 정량화된 지진하중을 의미하는 스펙트럴 가속도를 구조물의 주기에 따라 나타난 설계응답스펙트럼(Design Response Spectrum, DRS)은 단주기 지진계수(C_a) 및 장주기 지진계수(C_v)를 토대로 작성된다. C_a , C_v 는 지역계수(Z)와 단주기 증폭계수(F_a), 장주기 증폭계수(F_v)의 곱으로 각각 결정되는데, 지역계수는 재현주기 500년 지진의 설계지반운동 수준을 행정구역(지진구역 I, 지진구역 II)에 따라 제시한 값이다. 국내 지진구역 I ($Z=0.11$ g)과 지진구역 II ($Z=0.07$ g)에 대한 각 지반종류 별 지진계수와 증폭계수를 Table 1에 나타내었다. 재현주기가 다른 지진에 대해서는 각 재현주기에 해당하는 위험도계수(I)를 곱하여 C_a , C_v 를 산정한다. 2013년 소방방재청[10]에서는 새로운 국가지진위험지도와 함께 위험도계수를 공표하였는데 재현주기 별 위험도계수는 내진설계기준(II)에 제시된 계수와 동일하나 Table 2와 같이 4,800년에 대한 위험도계수가 추가되었다. Table 1에 제시된 지반분류 별 하나의 C_a , C_v 는 지진 재현주기 증가 시 위험도계수를 통해 지반운동수준의 선형적 증가를 고려하나, 지반운동수준 증가에 동반되는 지반의 비선형 증폭특성은 반영하지 않는다. 지반분류와 재현주기에 따른 C_a , C_v 가 결정되면 Fig. 1과 같이 설계응답스펙트럼을 작성할 수 있다.

Table 2. Importance factor (*I*) [10]

Return period	50	100	200	500	1,000	2,400	4,800
<i>I</i>	0.4	0.57	0.73	1.0	1.4	2.0	2.6

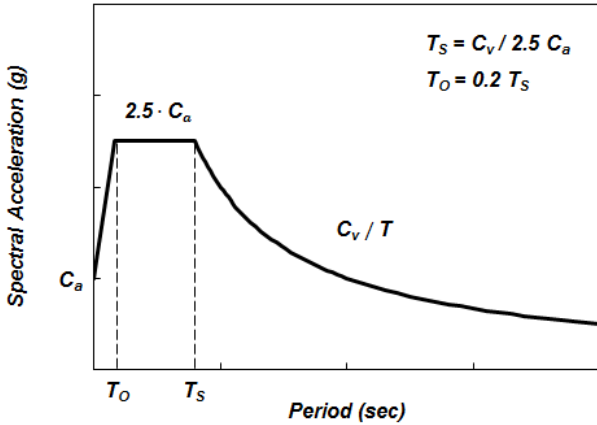


Fig. 1. Standard design response spectra in Korea [5]

2.2 선행연구 분석

미국 NEHRP 1994[11]에서는 Mexico 지진(1985)과 Loma Prieta 지진(1989) 계측 기록, 관련한 지반응답해석 등의 연구결과를 통해 연약지반을 지반분류에 새로이 추가하였고, $V_{s,30}$ 을 활용한 지반분류방법을 처음으로 도입하였다. NEHRP 1997[12]에서는 장주기 증폭계수와 함께 단주기 증폭계수를 활용한 설계응답스펙트럼 작성법이 처음으로 소개되었다. 이후 성능기반설계법 도입에 따른 설계지반운동에 대한 개념 변화, 장주기 영역 재 정의를 위한 통제주기(Long-period Transition Period, T_L) 추가 등 [13, 14] 일부 변화에 더불어 현재 세계적으로 통용되는 건축물의 내진설계 기준(IBC 2012[15])을 작성하기에 이르렀다. 이러한 역사의 미국 내진설계 기준은 강진 지역인 서부해안지역을 중심으로 발달해왔다. 서부해안지역은 기반암이 지표면 수백m 하부에 존재하는, 다시 말해 전단파속도로 대변되는 지반의 강성이 점차적으로 증가해 기반암에 이르는 지역이다. 동반 논문(I)에서 논한 바와 같이 30 m 이내에 공학적 기반암(Engineering Bedrock)이 존재하고, 그로 인해 토사층과 암반 간의 강성 차가 매우 큰 지역에서 $V_{s,30}$ 을 활용하여 지반을 분류하는 IBC 기준은 적합하지 않다.

미국 동부지역 역시 서부해안지역과 달리 기반암이 얇은 깊이에 존재하여 IBC 기준이 적합하지 않다. 이를 개선하고자 다양한 연구가 수행되었다. 그 중 동부지역에 위치한 대표적인 도시, 뉴욕시의 내진설계기준 개선과 관련된 연구의 결과로 해당 지역의 지반조건을 고려한 지반분류법이 제안되었다[16]. 제안된 지반분류법에서는 지반을 기반암 깊이 100 ft (30.48 m) 미만 또는 이상의 두 그룹으로 구분하였고, 기반암이 100 ft 이상으로 깊은 지반에 대해서는 IBC 기준을 따르도록 했다. 중점이 되는 100 ft 이하 얇은 깊이에 기반암이 분포하는 지반에 대해서는 암반을 포함하지 않고 토층만의 평균 전단파속도(Average Shear Wave Velocity of Soil above Bedrock, $V_{s,soil}$)를 활용하여 지반을 분류하였고, 그에 따른 증폭계수를 제시하였다.

유럽연합의 설계기준인 Eurocode 8[17]은 지반분류법으로 $V_{s,30}$ 을 활

용하고 있는데 이는 IBC 기준과 동일하다. Eurocode 8의 지반분류에서 주목할 만한 사항은 얇은 기반암 특성을 별도로 고려한 E 지반이다. E 지반은 기반암 상부에 토층의 두께가 5 ~ 20 m이며, $V_{s,soil}$ 이 360 m/s 미만인 지반으로 정의되는데, 기반암 깊이 20 m 이하의 지반을 별도로 고려하고 $V_{s,30}$ 이 아닌 $V_{s,soil}$ 을 활용하는 것이 특징이다. 설계응답스펙트럼은 IBC 기준 및 국내 내진설계기준연구(II)이 F_a, F_V 두 종류의 증폭계수를 이용하여 작성하는데 비해 Eurocode 8은 하나의 지반계수(soil factor, S)를 활용한다. 단주기 대역에서 최대증폭구간(A Region of Constant Spectral Acceleration)을 제어하는 통제주기(T_B, T_C)의 경우 내진설계기준(II)와 같이 단주기, 장주기 증폭계수(혹은 지진계수)에 의해 결정되는 것이 아니라, 지반종류에 따른 값 자체를 제시하고 있다. 또한 IBC의 T_L 과 같이 통제주기, T_D 를 도입하여 장주기 구조물의 설계지진하중 합리화를 꾀하고 있다.

중국의 건축물 내진설계기준[18]에서는 지반을 전단파속도만 사용하여 분류하는데 이 경우 $V_{s,30}$ 이 아닌 상부 20 m 지반의 평균 전단파속도인 $V_{s,20}$ 을 활용하고 있다. $V_{s,20}$ 을 활용한 지반분류 시에도 IBC, Eurocode 8, 내진설계기준연구(II)에서 매우 단단한 지반부터 연약한 지반까지 지반 구분을 위해 제시하고 있는 180, 360, 760 m/s (Eurocode 8은 800 m/s)가 아닌 140, 250, 500 m/s를 분류 기준으로 제시하고 있다.

앞 절과 동반논문(I)에서 논의한 것과 같이 국내 내진설계기준은 미국에서 개발된 내진설계기준을 준용하여 작성되어 왔다. 그러나 IBC 기준으로 대변되는 미국의 내진설계기준은 자국 내에서도 지역에 따른 적용성 문제가 대두되어 왔고, 이를 개선하고자 하는 노력들이 이어지고 있다. 유럽연합과 중국 등 미국을 제외한 주요 국가의 내진설계기준은 IBC 기준과 유사한 부분이 있으나, 자국의 지반 증폭특성에 적합하도록 지반분류방법을 개선하고 그에 따른 설계응답스펙트럼을 내진설계기준에 반영하였다. 우리나라도 한반도 지반의 증폭특성에 적합한 지반분류방법과 설계응답스펙트럼을 표준화할 필요가 있다.

2.3 지반증폭 영향요소

내진설계 시 지반분류에 따라 설계지진하중을 달리 고려하는 것은 지반 증폭의 영향을 고려하기 위함이다. Fig. 2와 같이 지진원에서 전파되어 기반암에 이른 지진파(Bedrock Motion)는 기반암 상부 지반에서 증폭(Site Amplification)되어 지표면에 증폭된 하중(Free-field Motion)으로 작용한다. 지반증폭은 주파수영역 해석에서 전달함수(Transfer Function)를 통해 고려할 수 있는데 전달함수는 Fig. 2에서와 같이 기반암까지의 깊이(Depth to Bedrock, H)와 기반암 상부 지반의 평균 전단파속도($V_{s,soil}$)의 함수로 간략화하여 표현할 수 있다[17]. $V_{s,soil}$ 은 아래 식(2)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$V_{s,soil} = \left(\sum_{i=1}^n D_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n \frac{D_i}{V_{si}} \right) \tag{2}$$

여기서, D_i 와 V_{si} 는 각각 기반암 깊이까지의 i 번째 토층의 두께(m)와 전단파속도(m/s)이다.

국내와 같이 기반암 분포 깊이가 30 m 이내로 얇은 지역은 지반조사가

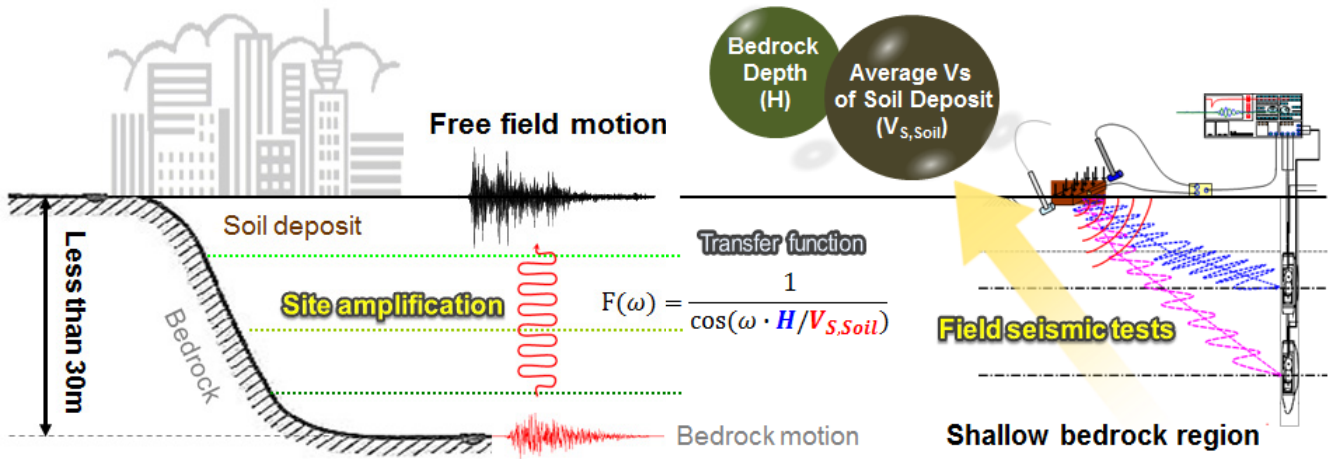


Fig. 2. Factors affecting site amplification and its determination by field seismic tests

기반암까지 수행될 수 있고, 현장 탄성파시험을 활용한 기반암 상부 지반의 전단파속도 획득이 가능하다. Fig. 2에 나타난 것과 같이 지반증폭에 가장 큰 영향을 미치는 두 요소인 기반암 깊이와 $V_{s,Soil}$ 획득이 가능한 국내 지반은 $V_{s,30}$ 이 아닌 기반암 깊이, $V_{s,Soil}$ 를 활용한 지반분류방법이 강력한 대안이 될 수 있다. 선행연구 분석에서 논의한 바와 같이 국내와 같이 기반암이 얇게 분포하는 지반특성을 갖는 국가들은 이미 30 m 이내의 얇은 기반암 깊이와 $V_{s,Soil}$ 을 지반분류의 기준으로 제시하고 기준에 반영하고 있다. 본 논문에서는 국내 지반의 증폭특성에 적합한 지반분류방법으로 기반암 깊이 (H), 토층 평균 전단파속도($V_{s,Soil}$)를 활용한 방안을 제안하고자 하였다.

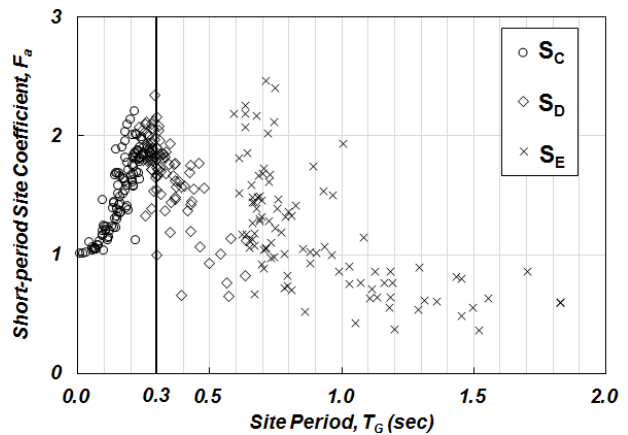
3. 증폭계수를 활용한 지반분류체계 제안

동반논문(I)에서 수행된 지반응답해석 결과를 활용하여 본 장에서는 국내 지반의 증폭특성에 적합한 지반분류체계 및 설계응답스펙트럼을 제안하고자 한다. 동반논문(I)에서는 국내 300개 지반에 대해 8개의 입력지진파, 4개의 지진세기를 활용한 해석을 수행하였다. 해석에 적용된 0.110 g, 0.154 g, 0.220 g, 0.286 g 4개의 지진세기에 따라 300개 각 지반의 평균 단주기 증폭계수(Short-period Site Coefficient, F_a), 장주기 증폭계수(Long-period Site Coefficient, F_v)를 아래 식(3)을 활용하여 획득하였다 (F_a 의 경우 $a = 0.1, b = 0.5, F_v$ 의 경우 $a = 0.4, b = 2.0$). 지진세기에 따른 300개 각 지반의 평균 F_a, F_v 는 하나의 지반에 입력된 8개 지진파에 대해 도출된 각 8개 F_a, F_v 의 평균을 의미한다. 도출된 평균 F_a, F_v 의 경향과 전체 지반의 분포특성 등에 근거하여 국내 지반특성에 적합한 지반분류체계를 제안하고자 하였다.

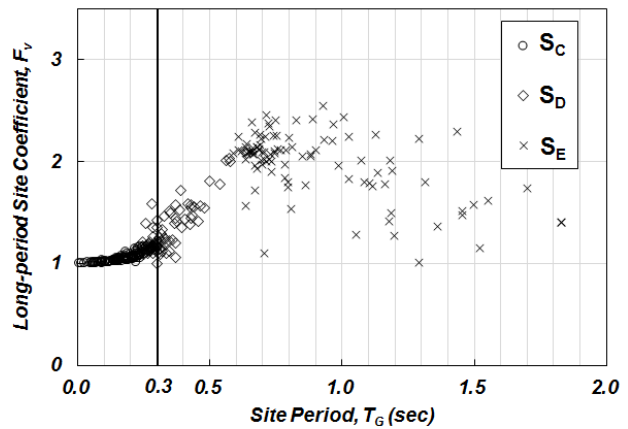
$$F_{a,v}(RRS) = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{b-a} \int_a^b \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rock}(T)} dT \quad (3)$$

3.1 기반암 기준 깊이(H)

재현주기 1,000년 지진의 설계지반운동에 해당하는 0.154 g에 대해 S_C ,



(a) Short-period site coefficient, F_a



(b) Long-period site coefficient, F_v

Fig. 3. Site coefficients with respect to corresponding site periods (0.154 g)

S_D, S_E 지반 각 100개의 평균 F_a, F_v 를 지반고유주기에 따라 Fig. 3에 도시하였다. F_a 는 지반고유주기 0.3초까지 증가하는 경향을 보이다 이후 주기 영역에서 감소하는 경향을 나타낸다. F_v 는 깊이 일정하거나 혹은 완만한 증가세를 보이다 0.3초 주기 이후 급격한 증가 경향을 나타내고 있다. F_a, F_v 모두 0.3초 주기를 전후하여 경향이 뚜렷이 변화함을 확인할 수 있다. 지반

고유주기 0.3초가 국내 지반의 증폭특성 변화를 대변하는 하나의 요소임을 판단할 수 있다. Fig. 4에는 해석에 사용된 전체 300개 지반의 지반고유주기와 기반암 깊이를 S_C , S_D , S_E 지반분류에 따라 나타내었다. 몇몇 예외적인

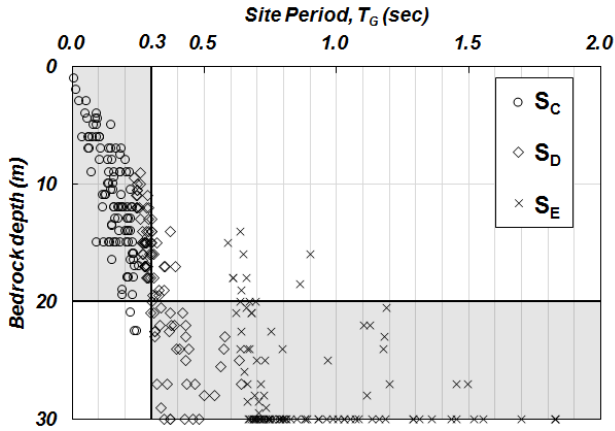
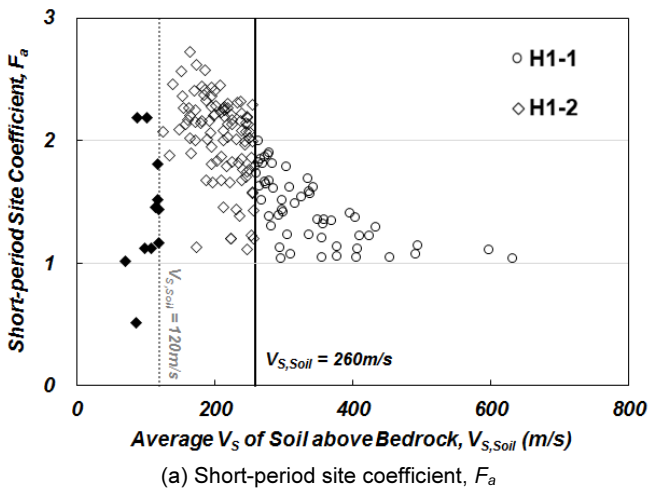


Fig. 4. Site period with respect to depth to bedrock

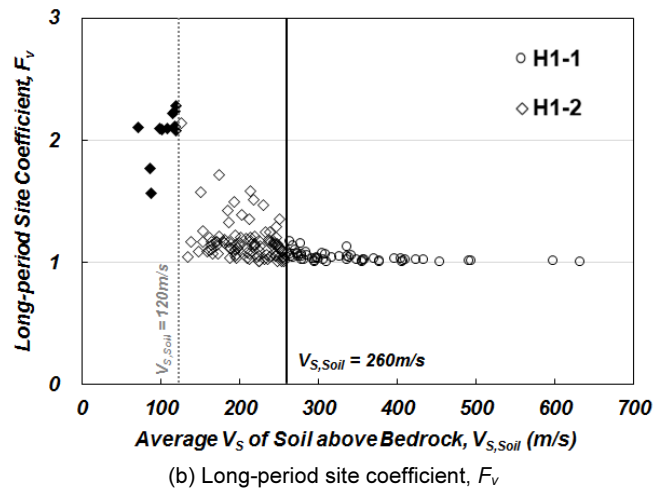
지반을 제외하면 그림에서 음영으로 표시한 것과 같이, 지반고유주기 0.3초 이하인 지반은 기반암 깊이 20 m 이하에 속하고 0.3초 이상인 지반은 기반암 깊이 20 m 이상으로 분류됨을 확인할 수 있다. 그림과 같이 지반고유주기 0.3초와 기반암 깊이 20 m는 해석대상이 된 국내 300개 지반을 그 증폭 경향에 따라 구분하는 중요 기준이 된다. 이에 따라 기반암 깊이 20 m를 서로 다른 증폭특성의 두 지반을 합리적으로 구분하는 기반암 기준 깊이로 판단하였고, 기반암 깊이 20 m를 지반분류의 1차 기준으로 결정하였다. 기반암 깊이 20 m에 기초하여 전체 지반을 두 지반으로 분류하고, 기반암이 깊이 20 m 이하에 존재하는 지반을 H1 지반, 20 m를 초과하여 존재하는 지반을 H2 지반으로 명명하였다.

3.2 토층 평균 전단파속도($V_{S,Soil}$) 기준

Fig. 5와 Fig. 6에 기반암 깊이 20 m를 기준으로 분류된 H1, H2 지반의 평균 F_a , F_v 를 지반의 $V_{S,Soil}$ 에 따라 나타내었다. 각 그림에서 H1 지반은 260 m/s, H2 지반은 180 m/s를 각 지반의 2차 분류에 적용되는 $V_{S,Soil}$ 로 결정하였다. 2차 분류의 기준이 되는 $V_{S,Soil}$ 는 H1, H2 지반의 평균 $V_{S,Soil}$ 를 활

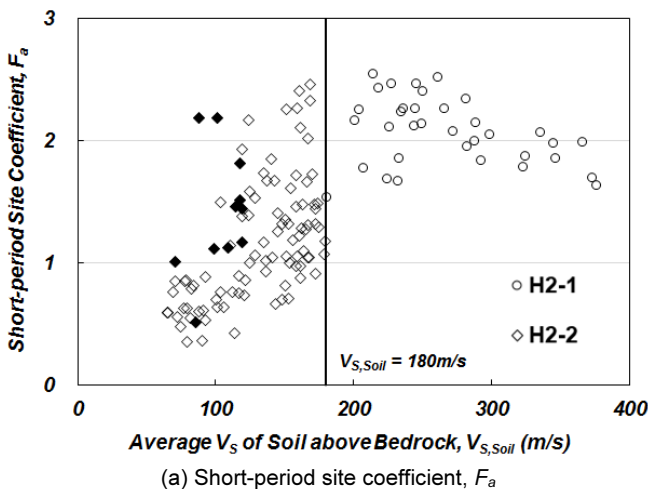


(a) Short-period site coefficient, F_a

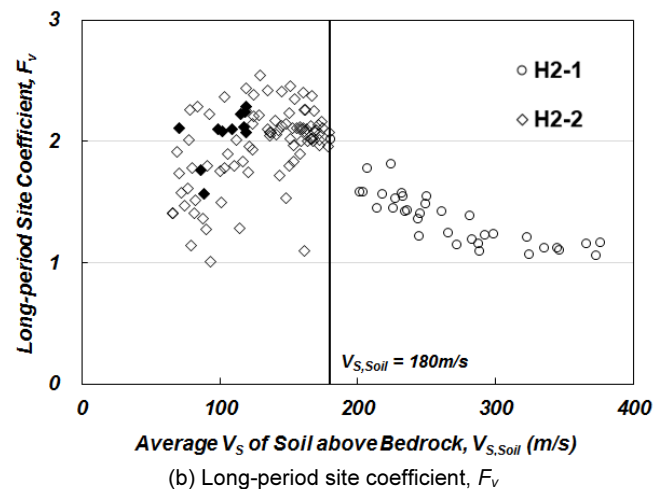


(b) Long-period site coefficient, F_v

Fig. 5. Site coefficients with $V_{S,Soil}$ (H1 sites, 0.154 g)



(a) Short-period site coefficient, F_a



(b) Long-period site coefficient, F_v

Fig. 6. Site coefficients with $V_{S,Soil}$ (H2 sites, 0.154 g)

Table 3. New seismic site classification system

Site class	Site description	Parameters for classification	
		Depth to bedrock(<i>H</i>)	<i>V_{S,Soil}</i>
<i>R</i>	Rock*		≥ 760 m/s**
<i>H1-1</i>	Shallow deposits of dense soils	≤ 20 m	≥ 260 m/s
<i>H1-2</i>	Shallow deposits of medium-dense to loose-medium soil***		< 260 m/s
<i>H2-1</i>	Deep deposits of medium-dense to loose-medium soil	> 20 m	≥ 180 m/s
<i>H2-2</i>	Deep deposits of loose soil consisting mainly of moderately stiff to very soft clay layers		< 180 m/s
<i>SP</i>	Special soil requiring site-specific evaluation		

* Rock or other rock-like geological formation, including less than 5 m of weaker material at the surface

** The *V_S* of upper part of bedrock

*** Soil sites with *V_{S,Soil}* ≤ 120 m/s are classified as *H2-2* regardless of depth to bedrock

용하였다. *H1* 지반은 256 m/s가 평균 *V_{S,Soil}*으로 260 m/s를 전후하여 증폭 경향을 구분하였다. *H2* 지반의 경우 평균 *V_{S,Soil}*는 164 m/s이나 모집단에 100 m/s이하의 *V_{S,Soil}*를 갖는 다수의 지반이 포함되어 있고, IBC, Eurocode 8 등 국내 외 대부분의 기준이 연약지반을 분류하는 기준으로 180 m/s를 활용하고 있으므로 180 m/s를 *H2* 지반의 2차 분류 기준으로 삼고자 하였다. 기반암 깊이 20 m 이하의 *H1* 지반에서 *V_{S,Soil}* 260 m/s 이상인 지반을 *H1-1*, 미만인 지반을 *H1-2*로 명명하였고, 유사하게 기반암 깊이 20 m를 초과하는 *H2* 지반에서 *V_{S,Soil}* 180 m/s 이상인 지반을 *H2-1*, 미만인 지반을 *H2-2* 지반으로 명명하였다.

Fig. 4에서 기반암의 깊이가 20 m 이하인 *H1* 지반 중 지반고유주기가 예외적으로 큰 지반이 존재한다. 기반암 깊이가 20 m 이하임에도 지반고유주기가 0.5초 이상인 지반인데 매우 작은 *V_{S,Soil}*이 그 원인이 될 수 있다. 이들 지반의 증폭경향 파악을 위해 Fig. 5에 음영을 달리하여 증폭계수를 나타내었다. 해당 지반들은 20 m 이하의 기반암 깊이로 인해 *H1* 지반으로 분류되나 그 증폭특성은 기존 *H1* 지반의 증폭경향과 확연히 대별된다. 기존 *H1* 지반과 이들 지반은 *V_{S,Soil}* 120 m/s를 기준으로 증폭경향을 구분할 수 있다. Fig. 5에 음영으로 표시한 120 m/s 이하의 매우 연약한 *H1* 지반을 Fig. 6에 포함하여 도시하였고, 그림과 같이 그 증폭경향은 *H2-2* 지반의 증폭경향과 매우 유사함을 확인할 수 있다. 따라서 120 m/s 이하의 *V_{S,Soil}*를 갖는 연약한 지반은 기반암 깊이에 관계없이 *H2-2* 지반으로 분류되는 것이 타당할 것으로 판단하여 예외조항을 두기로 하였다. 본 절에서는 *V_{S,Soil}*를 활용하여 지반을 2차로 분류하고자 하였고, 최종적으로 전체 지반을 Table 3과 같이 4개의 지반으로 분류하였다.

3.3 지반분류의 비교

새롭게 제안된 지반분류체계에 따르면 지반이 4가지 지반으로 분류된다. 동반논문(1)의 지반응답해석에 사용한 *S_C*, *S_D*, *S_E* 지반 각 100개, 총 300개 지반을 새로운 지반분류체계에 분류하였고, 그 분포 특성을 Fig. 7에 나타내었다. 기반암 깊이가 20 m 이하의 상대적으로 단단한 지반인 *H1-1* 지반은 *S_C* 지반이 대부분을 차지하였다. 마찬가지로 기반암 깊이가 20 m 이하로 얇으나 상대적으로 연약한 지반인 *H1-2* 지반에는 *S_C* 지반과 *S_D* 지반이 다수 분포하였다. 기반암 깊이가 20 m를 초과하여 깊은 *H2* 지반에는 상대적으로 단단한 *H2-1* 지반에 *S_D* 지반이, 연약한 *H2-2* 지반에는 *S_E* 지반이

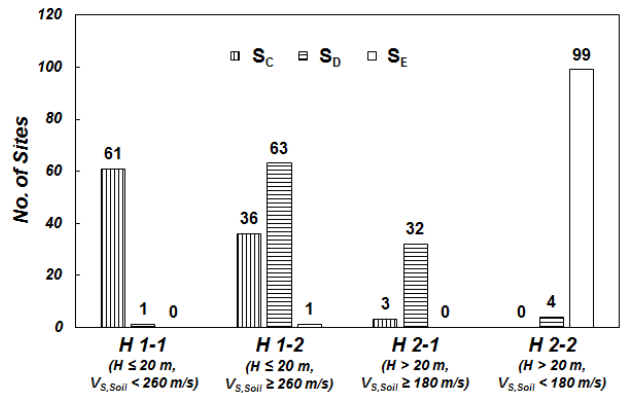


Fig. 7. Site distribution

대부분 분포하였다. 그림과 같이 기존 3가지 지반종류로 분류되는 국내 지반은 새롭게 제안된 4가지 지반분류에 따라 분류되었고, 각 지반분류에 적절한 수의 지반이 분포하는 것을 확인할 수 있다.

4. 지반분류에 따른 증폭계수 제안

4.1 장주기 증폭계수(*F_v*) 적분구간 최적화

Borcherdt[20]에 의해 제안된 식 (3)을 활용한 *F_v* 산정법은 NEHRP 1994[11] 이후 기준에 적용되고 있다[21]. Borcherdt[20]는 *RRS* (Ratio of Response Spectra)의 평균을 구하기 위해 식(3)의 적분구간 *a*와 *b*를 달리한 *F_v* 산정을 시도하였는데, 다양한 적분구간을 적용하여 도출된 *F_v*가 유사하여 주기 0.4초~2.0초의 적분구간을 *F_v* 산정의 적분구간으로 통일하였다. 그러나 국내 지반은 동반논문(1)에서 밝힌 바와 같이 그 단주기적 증폭 특성으로 인해 *RRS*가 2.0초 주기 이내에서 증폭이 거의 발생하지 않는 구간, 즉 *RRS*가 1로 수렴하는 주기 대역이 등장하게 된다. 때문에 2.0초까지 적용하는 적분구간은 국내 지반의 증폭특성에 비해 과소한 *F_v*를 산정하게 하고, 이는 설계응답스펙트럼 작성 시 장주기 대역에서 지반응답해석의 평균을 포괄하지 못하는 결과를 도출하게 된다고 논한 바 있다. 본 절에서는 국내 지반의 증폭특성을 가장 합리적으로 반영할 수 있는 *F_v* 적분구간 도출하고, 이를 활용하여 *F_v*를 산정하고자 하였다.

동반논문(I)에서 수행된 지반응답해석 결과를 앞서 제안한 지반분류체계를 통해 분류하고, 각 지반종류 별 평균 RRS를 결정하여 Fig. 8에 도시하였다. F_v 산정에 활용되는 RRS는 F_a 산정 시와는 달리 표준편차(σ)가 고려되므로 그림의 RRS는 $RRS+1\sigma$ 이다. 그림에서 H2-2 지반을 제외한 나머지 지반은 주기 2.0초 이전에 RRS가 1.0으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이는 국내 지반의 얇은 기반암 특성으로 인하여 주기 2.0초 이하에서 대부분의 증폭이 발생하는 것으로 설명할 수 있다. 4가지 지반종류의 RRS 경향에 근거하여 F_v 적분구간을 0.4~1.0초, 0.4~1.5초, 0.4~2.0초의 세 구간으로 분류하여 F_v 를 도출하였다. 세 가지 적분구간에 따라 획득한 F_v 를 활용하여 설계응답스펙트럼(Design Response Spectra, DRS)을 작성하고, 이를 지반응답해석의 결과로 도출된 자유장 평균 응답스펙트럼(Free-field Response Spectra)과 비교하였다(Fig. 9).

Fig. 9에 H1-1 지반과 H2-2 지반의 결과는 포함시키지 않았는데, 해당 지반의 주기 1.0~2.0초 사이의 RRS 감소경향(Fig. 8에서 기울기) 차이가 미미하여 적분 구간에 따른 F_v 가 매우 유사하였고, 그로 인해 DRS에 미치는 영향이 작아 포함시키지 않았다. 반면 H1-2 지반과 H2-1 지반은 세 적분구간에 따른 F_v 변화가 큰데 그 영향은 Fig. 9를 통해 확인할 수 있다. 그림에서 기존 적분구간인 0.4~2.0초를 적용하였을 때 가장 작은 스펙트럴 가속도를 산정하는데 지반응답해석 결과로 도출된 자유장 평균 응답스펙트

럼을 포괄하지 못하고 있어 과소설계의 개연성이 있다. 0.4~1.0초의 적분구간을 적용하였을 때는 가장 보수적인 스펙트럴 가속도를 결정하는데 반대로 해석결과를 포괄하고 있으나 중 장주기 대역에서 지나치게 큰 스펙트럴 가속도를 산정하고 있어 수요가 증가하고 있는 초고층 초장대 구조물의 과다설계를 유발할 수 있다. 0.4~1.5초의 적분구간을 활용하여 도출된 F_v 를 적용한 DRS는 이러한 문제점을 해소할 수 있는 최적의 적분구간이라 판단되어 본 연구에서는 해당 적분구간을 F_v 도출에 적용하였다. 기존 선행연구[22]에서도 동일한 F_v 적분구간을 국내 지반에 대해 추천한 바 있다.

4.2 기반암 깊이(H)에 대한 검토

국내 지반의 기반암 출현 깊이는 정규분포로 표현 시 평균 $\pm 1\sigma$ (표준편차) 수준에서 14.1~33.1 m 깊이로 보고된 바 있다[23]. 그러나 동반논문(I)의 지반응답해석에 활용된 300개 지반은 기반암 깊이가 최대 30 m까지로 제한되었다. 분포 비율은 매우 낮으나 30 m 이상 깊은 깊이에 기반암이 위치하고 있는 지반이 국내에도 존재하므로 이에 대한 고려가 필수적이다. 앞서 제안된 지반분류체계의 1차 분류 기준인 기반암 깊이 20 m 이하에 해당되는 H1 지반(H1-1 지반, H1-2 지반)은 문제가 없으나, 기반암 깊이 20 m를 초과하는 H2 지반(H2-1 지반, H2-2 지반)의 지반응답해석에 활용된 지반은 기반암 깊이가 20~30 m로 국한되었기 때문에 추가 검토가 필요하다. 본 절에서는 30 m 이상 깊이에 기반암이 존재하는 국내 지반에 대한 추가적인 지반응답해석을 통해 H2 지반이 기반암 깊이 20 m를 초과하는 전체 지반을 포괄하도록 하였다.

동반논문(I)에 서술한 지반조사자료 획득 방법을 활용하여 기반암 깊이 30 m 이상 지반에 대한 전단파속도 추상도를 추가 확보하였다. Table 4에 나타낸 바와 같이 전국을 경기권, 충청 전라권, 경상도권으로 구분하고, 각 지역에서 H2-1 지반 10개, H2-2 지반 10개씩 20개 지반을 확보하였고, 최종적으로 H2-1 지반 30개, H2-2 지반 30개, 총 60개의 전단파속도 추상도를 획득하였다. 추가 60개 지반에 대해 동반논문(I)에서 수행한 것과 같이 지반응답해석을 수행하였다. 해석을 통해 기반암 깊이 30 m 이상인 H2-1, H2-2 지반의 자유장 평균 응답스펙트럼을 도출하고, 앞서 동반논문(I)에서 H2-1, H2-2 지반(H > 20 m, 최대 30 m로 제한)에 대해 도출된 DRS와 비교하였다(Fig. 10). Fig. 10에서 H2-2 지반은 기존 20~30 m의 기반암 깊이 이를 가지는 지반에 대해 도출된 DRS가 해석결과를 전 주기영역에서 적절히 포괄하고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 H2-1 지반은 해석결과가 DRS와 달리 단주기 영역에서 증폭이 미소하며 0.6~1.4초 주기까지 DRS를 초과하는 결과를 도출하였다. Fig. 10을 통한 비교를 통해 H2-2 지반은 앞서 기반암 깊이 20~30 m를 가지는 지반에 대해 도출된 DRS가 30 m 이상 깊은 기반암을 가지는 국내 지반에도 효용성을 가지는 것을 확인할 수 있으나, H2-1 지반에 대해서는 별도의 보정이 필요한 것으로 판단하였다.

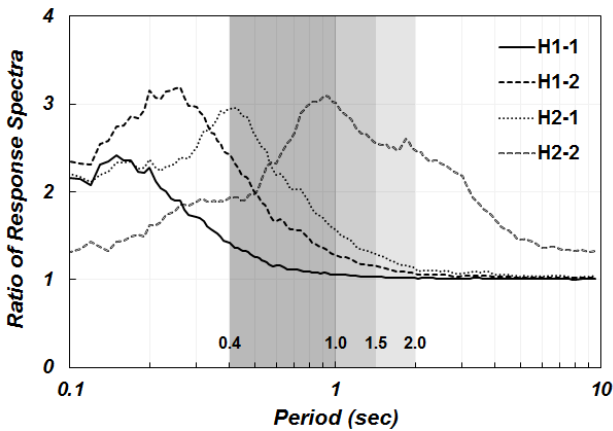


Fig. 8. Average+1σ RRS curves for new site classes (0.154 g)

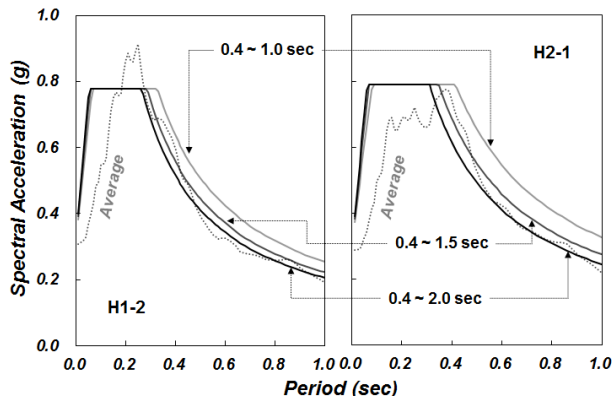


Fig. 9. Comparison of modified design response spectra and average spectral acceleration (0.154 g)

Table 4. New sites having depth to bedrock greater than 30 m

Region (province)	Gyeonggi		Chungcheong, Jeolla		Gyeongsang	
	H2-1	H2-2	H2-1	H2-2	H2-1	H2-2
site class	H2-1	H2-2	H2-1	H2-2	H2-1	H2-2
No. of sites	10	10	10	10	10	10
Sum.	20		20		20	

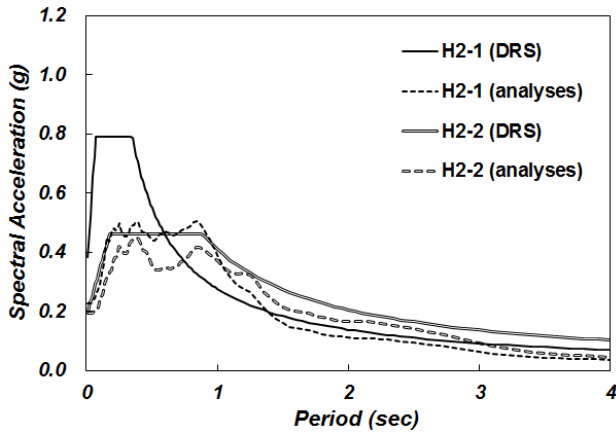


Fig. 10. Comparison of design response spectra (*H2* site class) and average spectral acceleration for the sites having depth to bedrock greater than 30 m (0.154 *g*)

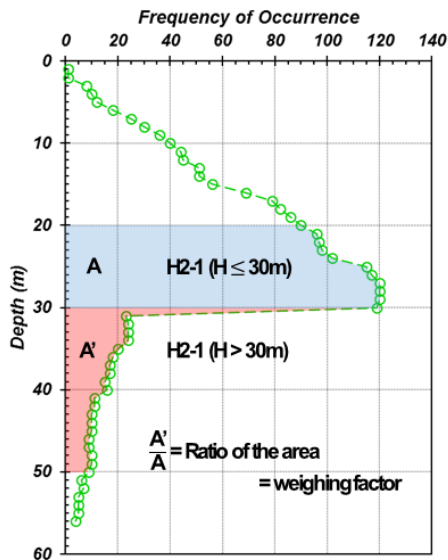


Fig. 11. Determination of weighing factor for considering the sites with bedrock depth greater than 30 m based on the frequency distribution of bedrock depth

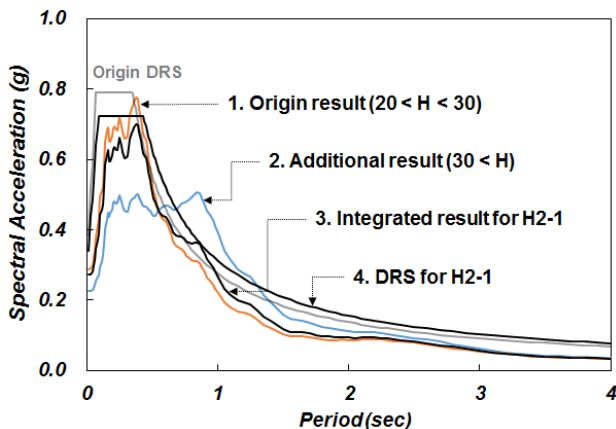


Fig. 12. Construction of integrated DRS for *H2-1* site

H2-1 지반에서 30 m 이상 깊이에 기반암을 가지는 지반에 대한 영향을 고려하기 위해 기존 20 ~ 30 m 깊이에 기반암을 가지는 지반에 대해 도출된 자유장 평균 응답스펙트럼과 30 m 이상 깊이에 기반암 깊이를 가지는 지반에 대해 도출된 자유장 평균 응답스펙트럼을 가중평균(A Weighted Average)을 통해 통합하고자 하였다. 가중치 결정에는 선창국 등[23]에 의해 보고된 바 있는 국내 지반의 깊이에 따른 기반암 출현 빈도를 활용하였다 (Fig. 11). 그림에서 깊이 20 m에서 30 m 사이의 면적과 30 m에서 50 m 사이의 면적 비를 두 응답스펙트럼의 가중평균의 가중치로 삼았다. Fig. 11에서 결정된 가중치를 활용하여 Fig. 12와 같이 *H2-1* 지반의 통합DRS를 작성하였다. 새롭게 작성된 *H2-1* 지반의 DRS는 기존 DRS보다 단주기 영역의 증폭이 감소하고 중-장주기 영역의 증폭이 증대하는 것을 확인할 수 있다.

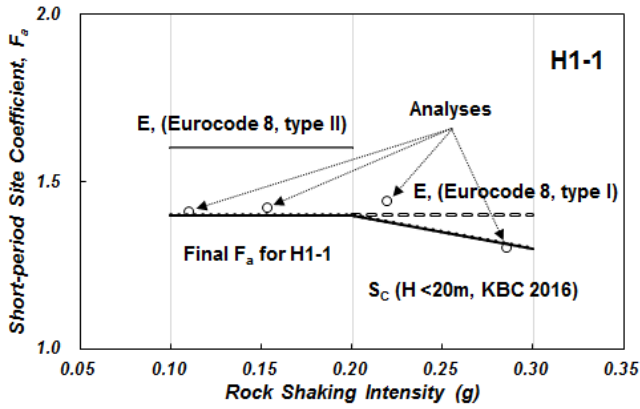
4.3 지반운동수준에 따른 증폭계수 결정

앞서 본 장에서는 국내 지반에 적합한 F_v , 적분구간의 결정, *H2* 지반의 깊은 기반암 지반에 대한 적용성 등을 논의하였다. 본 절에서는 이를 바탕으로 제안된 4가지 지반의 최종 F_a , F_v 를 결정하고자 하였다. 서론에서 언급한 것과 같이 현행 내진설계기준연구(II)[5]에서는 지반종류에 따라 제시된 단일 지진계수(C_a , C_v)와 위험도계수(I)를 통해 재현주기 증가에 따른 지반운동수준의 선형적 증가는 고려하나, 지반운동수준 증가에 따른 지반의 비선형 증폭특성은 고려하지 않는다. 본 연구에서는 제안된 4가지 지반의 지반응답해석결과를 통해 도출된 F_a , F_v 를 국내 외 기준에 제시된 유사한 지반의 증폭계수와 비교하고, 지진세기(Rock Shaking Intensity), 즉 지반운동수준에 따른 F_a , F_v 를 제시하여 비선형 증폭특성을 고려하고자 하였다.

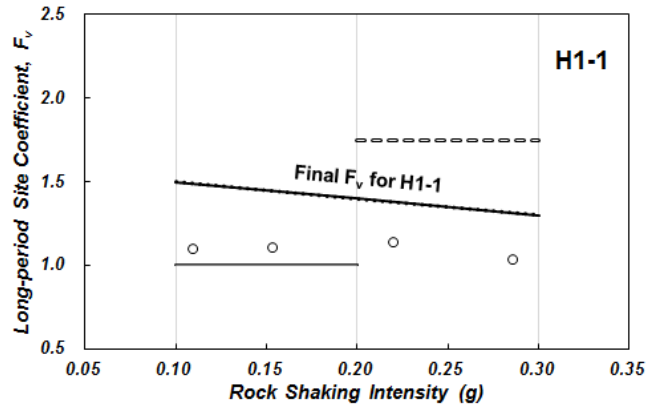
제안된 4가지 지반의 지반응답해석 결과로 도출된 증폭계수와 국내 외 관련 내진설계기준에서 *H1-1*, *H1-2*, *H2-1*, *H2-2* 지반과 유사한 지반에 대해 제시된 증폭계수를 비교하고자 Table 5와 같이 나타내었다. 비교를 위한 설계기준으로 Eurocode 8[17]과 2016 건축구조기준(안)(Korean Building Code, KBC)[24]을 결정하였는데, 두 설계기준 모두 얕은 깊이에 기반암이 존재하는 지반종류를 포함하고 있기 때문이다. KBC 2016은 현재 국토교통부 행정예고를 통해 전면개정을 예고하고 있는 건축분야의 최신 기준이다. 개정(안)에서는 S_c , S_d 지반 중 기반암 깊이 20 m 이하인 지반에 대해 별도의 F_a , F_v 사용을 명시하였는데, 이는 설계응답스펙트럼의 단주기 영역 증가와 장주기 영역 감소를 야기한다. 기반암 깊이 20 m 이하 지반에 대해 제안된 *H1* 지반은 Eurocode 8의 *E* 지반(20 m 이하 기반암을

Table 5. Proposed site classes with equivalent site classes from other codes

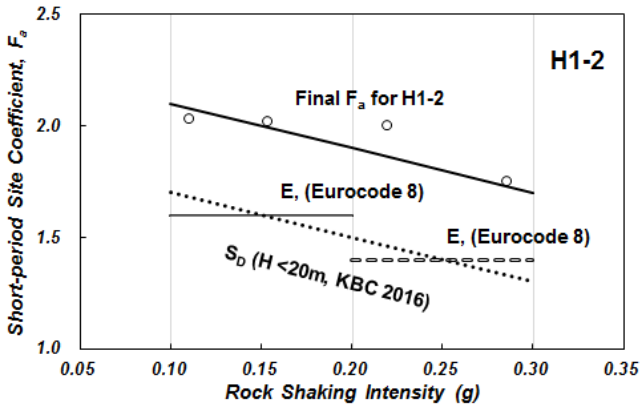
Site class	Code	Equivalent site class
<i>H1-1</i>	Eurocode 8 [17]	<i>E</i> (5 m < <i>H</i> < 20 m)
	KBC 2016 [24]	S_c (<i>H</i> < 20 m)
<i>H1-2</i>	Eurocode 8	<i>E</i> (5 m < <i>H</i> < 20 m)
	KBC 2016	S_d (<i>H</i> < 20 m)
<i>H2-1</i>	Eurocode 8	<i>C</i>
	KBC 2016	S_d (<i>H</i> > 20 m)
<i>H2-2</i>	Eurocode 8	<i>D</i>
	KBC 2016	S_E



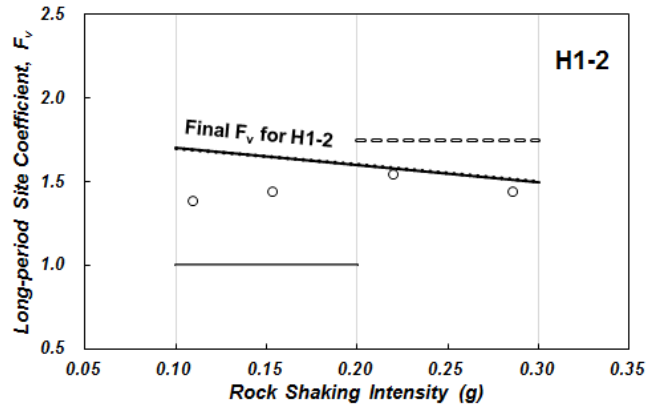
(a) F_a for H1-1 site class



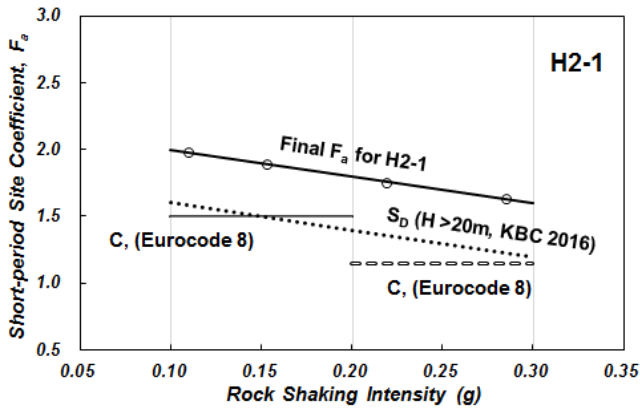
(b) F_v for H1-1 site class



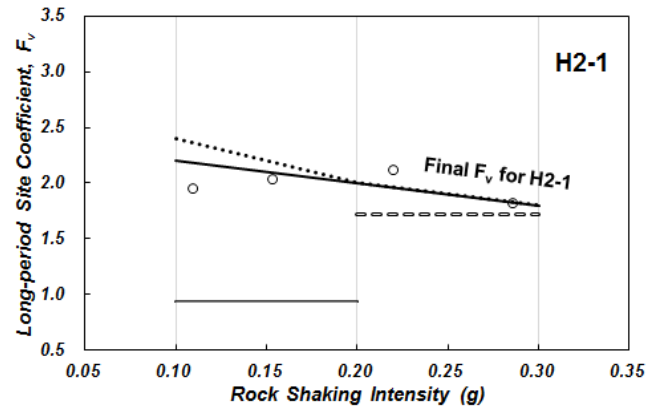
(c) F_a for H1-2 site class



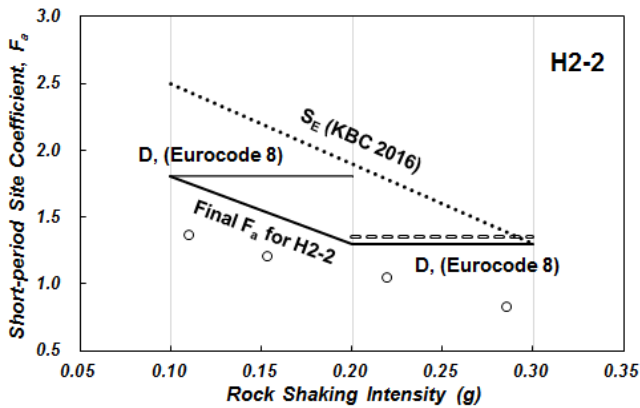
(d) F_v for H1-2 site class



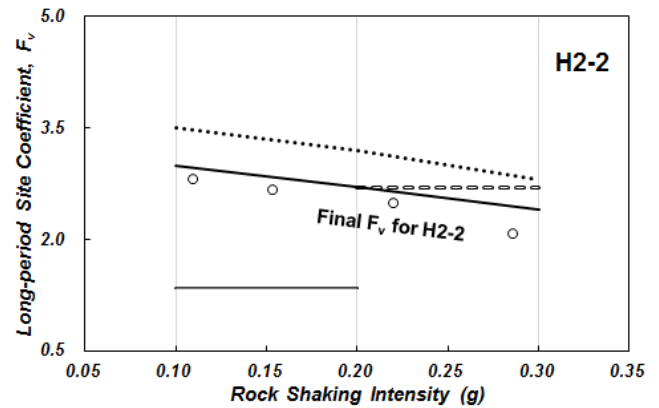
(e) F_a for H2-1 site class



(f) F_v for H2-1 site class



(g) F_a for H2-2 site class



(h) F_v for H2-2 site class

Fig. 13. Determination of site coefficients with respect to rock shaking intensity

고려하는 지반)과 KBC 2016의 S_C, S_D 지반 중기반암 깊이 20 m 이하에 해당하는 지반을 비교하였다. H2 지반에 대해서는 C 지반과 S_D 지반, D 지반과 S_E 지반을 각각 비교하였는데, Eurocode 8의 C, D 지반은 S_D, S_E 지반과 같은 명명법이 다를 뿐 동일한 지반종류이다.

지반운동수준에 따른 증폭계수를 Fig. 13에 도시하였다. 각 그림에는 지반응답해석 결과로 도출된 증폭계수와 Eurocode 8, KBC 2016에서 제시하고 있는 증폭계수를 비교하였다. 선행연구 분석에서 언급한 바와 같이 Eurocode 8은 DRS 작성을 위해 지반종류 별 단일 증폭계수(S)를 활용한다. 때문에 Fig. 13에서 Eurocode 8의 F_a, F_v 를 표현하기 위해 내진설계기준연구(II)에 제시된 DRS 작성법을 활용하여 DRS를 작성하여 Eurocode 8의 DRS와 동일한 수준의 단주기, 장주기 증폭을 도출하는 F_a, F_v 를 산정하고, 이를 Eurocode 8에 대응하는 증폭계수로 결정하였다. 또한 Eurocode 8은 규모 5.5를 기준으로 DRS를 구분 제시함(Type I: 규모 5.5 이상, Type II: 규모 5.5 이하)으로 지반의 비선형 증폭특성을 반영하고 있는데, 규모 5.5에 대응하는 지진세기는 0.2 g [25]이므로 각 그림과 같이 0.2 g를 기준으로 구분된 증폭계수가 제시되어 있다. KBC 2016은 내진설계기준(II)과 달리 지진세기에 따른 증폭계수를 활용하도록 하고 있어 그림과 같이 일부 구간을 제외하면 기울기를 가진다.

Fig. 13(a), (b)는 H1-1 지반에 대한 증폭계수 비교를 도시하고 있다. 그림에서 해석결과로 도출된 F_a 는 S_C 지반($H < 20$)의 F_a 와 전반적으로 유사하고(실선과 중첩), 지진세기 0.2 g 이상에서 E 지반의 F_a 와도 유사하다. F_v 의 경우 S_C 지반($H < 20$)의 F_v 에 비해 해석의 F_v 가 작는데 E 지반(Type II)보다는 큰 수준이다. 해석결과와 국내 외 유사지반의 증폭계수를 고려하여 H1-1 지반의 최종 F_a, F_v 는 실선과 같이 결정하였다. 다른 세 개의 지반도 이와 같이 증폭계수를 결정하였는데 H1-2 지반과 H2-1 지반의 F_a 는 단주기 증폭이 크게 고려된 해석결과를 반영하여 F_a 를 결정하였다. 더불어 연약 지반인 H2-2 지반의 F_a 는 0.3 g 수준에서 D 지반과 S_E 지반의 F_a 를 따르도록 해 해석결과와 같은 급격한 F_v 의 감소를 방지하고자 하였다.

4.4 설계응답스펙트럼 작성

Fig. 13을 통해 결정된 4개 지반의 최종 F_a, F_v 를 Table 6에 나타내었다. 표에서 지진세기(Rock Shaking Intensity)를 유효지반가속도(Effective Peak Acceleration), S 로 재 명명하였고, 국가지진위험지도를 통해 결정하거나 아래 식 (4)와 같이 행정구역에 따른 지역계수(Z)와 재현주기 별 위험도계수(I)를 활용하여 결정하도록 하였다.

$$S = Z \times I \tag{4}$$

Table 6과 같이 유효지반가속도(S)에 따른 F_a, F_v 를 결정하고, Fig. 14에 제시한 DRS 작성법을 통해 지반종류에 따른 DRS를 작성할 수 있다. 내진설계기준연구(II)에 제시된 지진계수(C_a, C_v) 개념은 불필요하다.

Fig. 14에는 기존 통제주기 T_0, T_S 에 더해 속도일정구간(A Region of Constant Spectral Velocity)과 변위일정구간(A Region of Constant Spectral Displacement)을 구분하는 통제주기인 T_L (Long-period Transition Period)을 추가 도입하였다. IBC 2012[15]에 반영된 미국의 설계하중기준인 ASCE 7-10[14]에서 T_L 은 지진원 이론(Seismic Source)에 기초한 지진 규모(M)와의 관계, 천발지진 계측기록과 대규모 섭입대 지진(Subduction Zone Earthquake) 모델을 통해 모사된 응답스펙트럼을 활용하여 결정되었고, 지역에 따라 4 ~ 16초를 고려하고 있다[26]. Eurocode 8은 규모 5.5 이상인 Type I 설계응답스펙트럼에서 $T_D (=T_L)$ 를 2.0초로 제안한 바 있다. 국내에도 초고층, 초장대 구조물 등 장주기 구조물에 대한 수요 증대와 함께 내진설계시 지진하중 합리화를 위해 T_L 도입 필요성이 제기되고 있다. 이에 본 연구에서는 지반분류 별 DRS 작성에 T_L 을 적용하기로 하고 Eurocode 8, ASCE 7-10에 제시된 2 ~ 4초의 T_L 을 고려하고자 하였다. 한편, 국내와 지진환경이 유사한 판내부(intra-plate) 지역에서 계측된 국내 외 지진기록을 분석한 국내 한 연구에서 국내 지반은 $1/T^2$ 으로 감소하는 변위에 민감한 구간은 3초에서 시작됨을 보고한 바 있다[27]. 이와 같은 연구 결과는 Eurocode 8의 2초 보다 보수적인 3초의 T_L 을 산정하므로 T_L 처너 도입에 따른 영향을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다. 3.0초의 T_L 을 DRS 작성에 적용해 보았고 이를 Fig. 15에 나타내었다. 그림에서 4가지 지

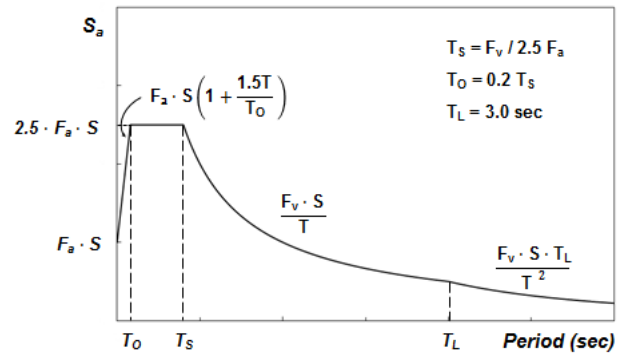


Fig. 14. Constructing design response spectrum

Table 6. Site coefficients* for new site classes

Site class	Short-period site coefficient, F_a			Long-period site coefficient, F_v		
	$S^{**} \leq 0.1$	$S = 0.2$	$S = 0.3$	$S \leq 0.1$	$S = 0.2$	$S = 0.3$
R	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
H1-1	1.4	1.4	1.3	1.5	1.4	1.3
H1-2	2.1	1.9	1.7	1.7	1.6	1.5
H2-1	2.0	1.8	1.6	2.2	2.0	1.8
H2-2	1.8	1.3	1.3	3.0	2.7	2.4

* Use straight-line interpolation for intermediate values of S ** Effective peak acceleration (rock shaking intensity)

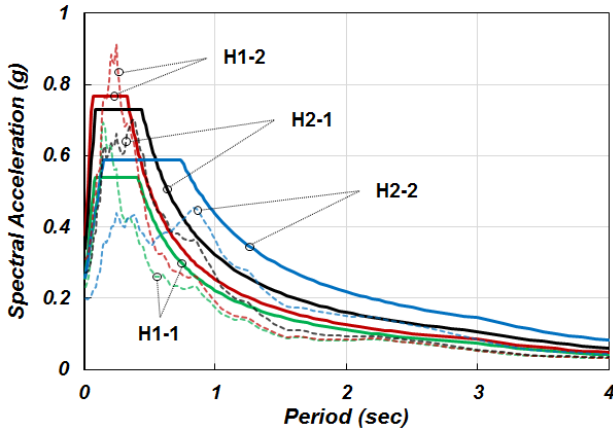


Fig. 15. Comparison of final DRS and average response spectra (S=0.154 g)

반의 최종 DRS와 지반응답해석을 통해 도출된 자유장 평균 응답스펙트럼을 함께 비교 도시하였다. DRS 작성에 활용된 최종 F_a , F_v 는 앞 절에서 논의한 바와 같이 지반응답해석 결과와 국내·외 설계기준에 제시된 증폭계수를 고려하여 보수적으로 결정되었기 때문에 DRS가 해석결과를 충분히 포괄하는 것을 확인할 수 있다. 또한 3.0초의 통제주기 T_L 도입에도 제시된 증폭계수를 활용하여 작성된 DRS는 장주기 영역에서 해석결과를 충분히 포괄하고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 동반논문(I)에서 수행된 대규모 국내 지반에 대한 지반응답해석의 결과를 활용하여 국내 지반의 증폭특성에 적합한 지반분류체계 및 이에 대응하는 설계응답스펙트럼을 제안하였다. 새로운 기준 제안 과정에서 논의된 내용을 아래와 같이 정리하였다.

- 1) 기반암 깊이(H), 토층 평균 전단파속도($V_{s,Soil}$)를 활용한 지반분류 지반증폭에 가장 큰 영향을 미치는 두 요소인 기반암 깊이와 $V_{s,Soil}$ 은 국내와 같이 기반암의 분포 깊이가 30 m 이내인 지역에서는 지반조사를 통해 획득 가능하다. 본 연구에서는 지반응답해석을 통해 도출된 국내 300개 지반의 증폭계수 경향을 활용하여 기반암 깊이 20 m를 지반분류의 1차 기준으로 삼아 20 m 이하에 기반암이 존재하는 지반을 H1 지반, 20 m 이상 깊이에 기반암이 존재하는 지반을 H2 지반으로 분류하였다. 또한 H1 지반 중 $V_{s,Soil}$ 이 260 m/s 이상인 지반을 H1-1, 미만인 지반을 H1-2 지반으로 분류하였고, H2 지반은 $V_{s,Soil}$ 이 180 m/s 이상인 지반을 H2-1, 미만인 지반을 H2-2 지반으로 분류하여 지반을 총 4개의 지반으로 분류하는 지반분류체계를 제안하였다.
- 2) 단주기, 장주기 증폭계수(F_a , F_v) 결정
기반암 깊이(H), 토층 평균 전단파속도($V_{s,Soil}$)에 의해 분류된 4가지 지반종류의 증폭계수 결정을 위해 다음과 같은 사항을 고려하였다. 국내 지반의 증폭특성에 적합한 F_v 적분구간(RRS)을 0.4 ~ 1.5초로 결정하여 적용하였다. 기반암 깊이 20 m 이상 지반인 H2 지반의 증폭계수 결정을 위해 기반암이 30 m 이상 깊이에 존재하는 국내 지반의 분포비율

을 고려하였다. 또한 제안된 4개 지반과 유사한 국내·외 내진설계기준의 지반에 대해 제시된 증폭계수를 고려하여 지반운동수준에 따른 증폭계수를 제시하였다.

3) 설계응답스펙트럼 작성

설계에서 고려하고자 하는 지진 재현주기와 그에 따른 위험도계수를 활용하여 유효지반가속도(S)를 결정하고, 유효지반가속도에 따른 F_a , F_v 를 선택하도록 하여 지반운동수준에 따른 비선형 특성을 기준에 반영하였다. 더불어 장주기 구조물의 지진하중산정 합리화를 위해 통제주기 T_L 을 추가 도입하였다. 최종 제안된 F_a , F_v 와 3.0초의 T_L 을 활용하여 작성한 설계응답스펙트럼은 지반응답해석을 통해 도출된 자유장 평균 응답스펙트럼을 적절히 포괄하였다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 자연재해저감기술개발사업단의 지원을 받아 수행되었으며(MPSS-NH-2013-71), 이에 깊은 감사를 드립니다.

/ REFERENCES /

1. Regulatory Guide on Building Code, Ministry of Construction and Transport, c1988.
2. Korean Building Code, Architectural Institute of Korea, c2005.
3. A Study on Improvement in Seismic Design of Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs' Jurisdiction Facilities, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, c2012, 532p.
4. International building code, International Code Council, c2000.
5. A Study on Site-Specific Seismic Design Response Spectrum, Ministry of Construction and Transportation, c1997.
6. Seismic Design of Geotechnical Structures, Korean Geotechnical Society, Seoul:Goomibook; c2006, 650p.
7. Korean Highway Bridge Design Code, Korea Road and Transportation Association, Seoul, c2010.
8. Korean Highway Bridge Design Code (Limit State Design), Korea Road and Transportation Association, Seoul, c2012.
9. Lee SH, Sun CG, Ha JG, Kim DS, Verification of 2-Parameters Site Classification System and Site Coefficients (I) - Comparisons with Well-known Seismic Code and Site Response Characteristics, J Korean Geotech Soc, 2012; 28(3):25-34.
10. National Seismic hazard Maps, Public Announcement of National Emergency Management Agency, NO, 2013-179, c2013.
11. Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings, Washington, DC, Building Seismic Safety Council, c1994.
12. Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1-Provisions, Washington, DC, Building Seismic Safety Council, c1997.
13. Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures (FEMA P-750), Washington, DC, Building Seismic Safety

- Council, c2009.
14. Minimum Design Loads for Building and Other Structures, ASCE / SEI 7-10, c2010
 15. International Building Code, International Code Council, 2012.
 16. Gajer RB, Dobry R, Silva W, Thomann T, Kishore K, Patel J, Jain S, 2008 New York City DOT Seismic Design Guidelines for Bridges Considering Local Site Conditions, Sixth National Seismic Conference on Bridges and Highways, c2008.
 17. Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1,1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, 2005.
 18. Code for Seismic Design of Buildings, GB 50011-2010, China Building Industry Press, c2010.
 19. Kramer SL, Geotechnical Earthquake Engineering, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, c1996.
 20. Borcherdt RD, Estimates of Site-dependent Response Spectra for Design (Methodology and Justification), Earthq Spectra, 1994; 10(4):617-654.
 21. Dobry R, Martin G, Development of Site-Dependent Ratio of Elastic Response Spectra (RRS), Proceeding of the Workshop on Earthquake Site Response and Seismic Code Provisions, c1999.
 22. Yoon JK, Kim DS, Bang ES, Development of Site Classification and Modification of Design Response Spectra considering Geotechnical Site Characteristics in Korea (III) - Modification of Design Response Spectra, EESK J. Earthq Eng, 2006; 10(2):63-71.
 23. Sun CG, Han JT, Cho WJ, Representative Shear Wave Velocity of Geotechnical Layers by Synthesizing In-situ Seismic Test Data in Korea, J Eng Geology, 2012; 22(3):293-307.
 24. Korean Building Code Revision (draft), Pre-Announcement of Administration, Announcement of Ministry of Land, Infrastructure and Transport, NO. 2016-4, c2016.
 25. Pitilakis K, Gazepis C, Anastasiadis A, Design Response Spectra and Soil Classification for Seismic Code Provisions, Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering, c2004.
 26. Crouse CB, Leyendecker EV, Somerville PG, Power M, Silva WJ, Development of Seismic Ground-motion Criteria for the ASCE 7 Standard, In Proceedings of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering, 2006:18-22.
 27. Lee YJ, Kim JH, Lee JH, Kim JK, A Study on the Development of Inelastic Response Spectrum based on the Intra-plate Earthquake Records, Proceedings of the EESK spring conference, 2c016.