[기술보고]

국내 암반지층의 전단파속도에 근거한 지진공학적 기반암 결정

선 창 국^{1*}

¹한국지질자원연구원 국토지질연구본부 지진연구센터

[Technical Report]

Earthquake Engineering Bedrock Based on the Shear Wave Velocities of Rock Strata in Korea

Chang-Guk Sun^{1*}

¹Earthquake Research Center, Geological Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea

Received 14 May 2014; received in revised form 3 June 2014; accepted 16 June 2014

대부분의 내진설계 기준에서 설계지진지반운동은 기반암에서의 기준 스펙트럼과 지반동적 조건 정량화를 위한 부지증폭계수에 의해 정의된다. 특히, 지진공학적 기반암은 지진파가 증폭 없이 감쇠전파되는 기초적 지반구성층이다. 지진공학 관점에서 기반암을 파악하기 위하여, 원위치 탄성파시험으로 획득한 전단파속도(V_S) 자료를 시추조사 시 구분되는 암반층에 대해 살펴보았다. 국내 연암에서 대부분의 V_S 자료는 강지진 관측소 설치 시 고려되는 공학적 기반암의 최저 V_S 값인 750 m/s에 비해 크게 나타났으나, 풍화암에서는 전체의 60 % 정도가 작게 나타났다. 따라서 국내 풍화암 하부의 연암 및 그 이상 경도의 암반층을 지진공학적 기반암으로 고려해야 한다.

주요어 : 공학적기반암, 전단파속도, 지진지반운동, 부지증폭, 내진설계

In most current seismic design codes, design earthquake ground motions are defined by a reference spectrum, based on bedrock and site amplification factors that quantify the geotechnical dynamic conditions. Earthquake engineering bedrock is the fundamental geotechnical formation where the seismic waves are attenuated without amplification. To better define bedrock in an earthquake engineering context, shear wave velocity (V_S) data obtained from in-situ seismic tests were examined for several rock strata in Korea; these data were categorized by borehole drilling investigations. The V_S values for most soft rock data in Korea are > 750 m/s, which is the threshold V_S value for identifying engineering bedrock from a strong motion station. Conversely, V_S values are < 750 m/s for 60% of V_S data in weathered rock in Korea. Thus, the soft (or harder) rock strata below the weathered rock layer in Korea can be regarded as earthquake engineering bedrock.

Key words : engineering bedrock, shear wave velocity, earthquake ground motion, site amplification, seismic design

*Corresponding author: pungsun@kigam.re.kr

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

시공간 불확실성의 대표적 재해 유인인 지진은 주로 지각을 구성하는 단단한 암반에서의 단층운동으로 발생하게 되고, 이 위치를 지진원이라고 한다. 지진원에서 강력한 에너지 발산에 따라 생성된 지진파는 공간으로 전파되는데(Kinoshita, 2007), 일반적으로 진원으로부터 거리가 멀어질수록 그 크기가 작아지는 감쇠(attenuation) 현상이 발생한다(Chandler et al., 2005). 암반을 통과하면서 감쇠된 지진파는 암반 상부에 존재하고 실제 구조물이 위치하는 토사 지층들을 통과하면서는 그들의 동적특성에 따라 일정 진동수 범위에서 크기가 커지는 증폭(amplification)이 발생할 수 있다(Sun et al., 2005). 이와 같은 지진운동의 증폭 정도를 대부분의 현행 내진 설계 기준들에서는 부지증폭계수(site coefficients)로 정량화하고 지반 및 지질 조건에 따라 구분하여 제시하고 있다. 즉, 증폭이 되지 않는 암반 조건의 부지를 기준으로 하고 여기에 상대적으로 취약한 토사 지반들을 단계별로 구분한 증폭계수들을 고려하여 일반적인 토사 부지에서의 설계지반운동을 결정한다(Dobry et al., 2000).

최근에는 중요 시설물들에 대해 내진설계기준에 따른 지반운동 결정 대신 대상 원위치에서 지반 동적특성 획득 목적의 탄성과 시험을 포함한 다양한 현장 지반조사를 수행하고(Anbazhagan and Sitharam, 2009), 이를 토대로 부지고유 지진응답해석을 실시하여 지표면 또는 지중의 지반운동을 평가하는 사례들이 급격하게 증가하고 있다(KGS, 2010). 뿐만 아니라 현장 탄성과 시험이 병행되지 않음에 따라 방치되어 온 기존 시추조사 자료와 같은 과거 지반관련 자료를 이용하여 부지응답해석을 진행하기 위한 실무측면의 시도들도 보편화되고 있다(Sun et al., 2007; KGS, 2010). 그러나 이러한 과정 중에 자료나 지식 부족에 따른 여러 오류들이 발생할 수 있는데, 무엇보다도 지반지층 구성, 지층별 지반동적

특성, 지진파 진동수 등과 같은 여러 입력 자료나 조건의 부정확성으로 인해 그릇된 평가 결과들이 도출될 수 있다(Sun et al., 2007). 그 중에서도 기반암의 적절한 선정은 지표면이나 지중의 지반운동에 정량적 영향을 미치는 매우 중요한 요소들 중의 하나이다. 여기에서는 국내 시추조사에서 보편적으로 구분하여 보고하는 주요 암반층들을 대상으로 지반의 대표 동적특성인 전단파속도(shear wave velocity, V_s) 분포를 조사하고, 이를 토대로 적합한 공학적 기반암을 선정하고자 하였다.

다층구성 지반에서의 지진파 전파

지진 발생에 따라 지표면 부근에서 인류가 경험하며 다양하고 심각한 피해를 유발하는 지반운동은 지하 진원으로부터 발생한 지진파가 지표면까지 전파되어 나타나는 진동이다(Sun, 2004; Mohamed et al., 2013). 지하 단단한 암반 내에 위치한 지진원으로부터 상대적으로 연약하고 구조물이 밀집한 지표면까지의 지진파 전파 현상에 대해 Fig. 1에서 개요적으로 파악해 볼 수 있다. 대부분의 인류활동 부지들은 지표면 아래 지하에 여러 강성 및 공학적 특성을 보이는 다양한 지반지층들로 구성되어 있으며(Sun et al., 2012), 주로 토사재료로 구성된 지층들 내에서 지진파는 다양한 진동수 범위에 걸쳐 입사, 반사, 굴절 등의 현상으로 복잡한 변화를 일으키게 된다(Kramer, 1996; Sun 2004). 반면, 토사에 비해 상대적으로 균질한 암반을 따라서 전파되는 지진파는 큰 변화 보다는 전파거리 증가에 따른 진폭 감쇠 변화가 주요 현상이 된다.

내진설계를 위한 현행 국내외 주요 지진재해도(seismic hazard map)는 암반노두 조건(A)으로 가정되어 있으며, 대개 토사층이 상재된 기반암 상부 조건(풍화암이 기반암인 경우 C이나 연암이 기반암인 경우 B)이 자유장인 암반노두 조건(A)에 비해 지진파 진폭이 작게

Fig. 1. Schematic illustration of wave propagation through rock and soil strata.

나타난다. 물론, 대부분의 피해는 지표면 부근 주거 및 산업 시설 밀집 지역(D)에서 발생하게 되는데, 암반노두나 기반암에 비해 상대적으로 크게 증폭된 지반운동이 그 지배적 원인이 된다. 지표면 지진지반운동은 부지 응답 해석을 통해 정량적으로 평가되어 오고 있으며, 암반노두나 기반암 내의 지반운동을 입력지진으로 하여 해석이 수행된다(KGS, 2010).

암반 대 지표면의 증폭 정도는, 몇몇 정량화 방법이 있기는 하지만, 입력지진 조건에 대한 상대적 크기 비율로 간단히 파악해 볼 수 있다. 이런 과정에서 증폭 정도에 크게 영향을 미치는 가장 중요한 기하학적 조건 중의 하나가 바로 기반암의 위치(심도)이며, 상대적으로 연약한 토사구성의 지반지층과 그 아래 기반암 간의 강성(stiffness) 차이 또한 큰 영향을 미칠 수 있다(Kramer, 1996; Sun et al., 2012). 지진 시 지반운동의 부지증폭 정도는 여러 공학적 지표들로 정량화되어 오고 있으며, 대표적으로 대상 위치에서의 기하학적 조건과 동적 물성을 모두 고려할 수 있는 부지주기(site period, T_G)가 있다(Rodriguez-Marek et al., 2001; Sun, 2004; Kim and Yoon, 2006; Sun, 2010). 일반적으로 부지주기가 증가할수록 증폭 정도는 증가하게 된다(Sun, 2010). 부지주기는 각 부지의 기반암 상부 지층들의 두께와 전단파속도(V_{Si})를 토대로 식 (1)과 같이 결정할 수 있다(Sun et al., 2005). 여기서, D_i 와 V_{Si} 는 각각 기반암 상부에 분포하는 i 번째 지층의 두께와 전단파속도를 의미한다.

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{V_{Si}} \quad (1)$$

부지주기는 기반암 심도($H = \sum D_i$)가 깊어질수록 커지게 되고, 이로 인해 주로 부지주기 부근 지반운동 성분들이 크게 증폭될 수 있다(Sun et al., 2005; Papadimitriou et al., 2008). 따라서 적합한 기반암의 선정은 기반암부터 토사지층을 거쳐서 지표면까지의 전체적인 지반운동의 평가 및 이를 통한 합리적 지진대책 수립에 가장 우선 고려될 사항이다. 특히, 지진공학적 관점의 기반암 심도를 풍화암 상부(C)로 선정할 지 아니면 연암상부(B)를 선정할 지에 따라 지진 시 증폭관련 부지고유 지진응답 및 그에 따른 지표면 지반운동은 매우 크게 달라질 수 있다(Sun et al., 2007). 그러므로 국내 지반조사에서 가장 먼저 접하게 되는 두 암반 조건에 대한 지진공학적 기반암으로서의 적합성이 전문가 관점의 정량 지표라고 할 수 있는 대표 지반동적특성인 전

단파속도를 토대로 분석되어야 한다.

시추공 탄성파시험을 통한 전단파속도 획득

전단파속도(V_S)는 압축파속도(compressional wave velocity, V_P)와 함께 현장에서 다양한 지구물리탐사 기법들을 적용하여 측정할 수 있는 체적파속도이며(Sun and Mok, 2006), 이 두 속도를 토대로 포아송비(Poisson's ratio)를 결정할 수 있다. 또한, 전단파속도로는 대상 지반재료의 밀도를 함께 고려하여 전단탄성계수를 산정할 수 있다. 일반적으로 지진 시 지반을 매질로 하여 전파되는 여러 지진파 성분 중 초기에 도달하는 압축파보다는 암반이나 토사와 같은 고체 매질을 통해 전파하는 전단파나 이어지는 표면파에 의한 지반 및 구조물의 피해가 주류를 이룬다. 지반공학이나 지진공학 관점에서는 현장 탄성파시험 기법은 무엇보다도 우선적으로 지반 매질의 전단파속도를 결정하기 위해 활용되고 있다(Sun et al., 2006b). 특히, 국내를 포함한 국외 주요 내진설계 기준들에서 30 m(또는 100 ft)까지의 평균 전단파속도를 지반운동 결정을 위한 부지조건 분류의 변수로 이용하고 있다(Dobry et al., 2000; Sun, 2004).

전단파속도를 획득할 수 있는 현장 원위치 시험은 비파괴 시험, 시추공 탄성파 시험, 그리고 관입 탄성파 시험으로 구분된다(Kim et al., 2005). 넓은 의미에서는 관입 방법의 경우 시추공 방법에 포함시킬 수 있다. 경제성 측면을 논외로 하게 되면, 이러한 시험 기법들 중에서 가장 객관적 신뢰도가 높으며 다양하고 직관적인 정보를 제공할 수 있는 것이 바로 시추공 탄성파 시험이다(Sun et al., 2005). 이와 같은 이유로 본 연구에서도 시추공 탄성파 시험만을 대상으로 고려하였으며, 여러 시추공 방법들 중에서도 상대적으로 오랫동안 지반 지진공학 분야에서 수행되어 온 크로스홀(crosshole) 및 다운홀(downhole) 탄성파 시험을 선정하였다. 여기서는 본 연구진이 직접 시험을 수행하고 분석하여 결과에 대한 전문적 신뢰도가 확보된 자료들을 대상으로 하였다. 주로 금세기 초반에 역사 및 계기 지진 피해지역들에서 부지특성 평가를 위해 수행한 시추공 탄성파 시험의 결과들(Sun, 2010)이며, 연암이상의 단단한 암반까지 시험이 성공적으로 완료된 자료들을 취합 분석하였다.

이 연구의 대상 크로스홀 시험과 다운홀 시험이 수행된 8 개 지역의 지리적 분포는 Fig. 2에서 확인할 수 있으며, 비교적 다양한 지리적 위치임을 알 수 있다. 각 지역별로 최대 12개소(Gyeongju)부터 최소 1개소

Fig. 2. Locations of the study areas where in-situ borehole seismic tests were performed.

(Hadong, Haemi, Sacheon)까지의 시험 부지 개수가 분포하는데 이 수량은 Fig. 2에서 각 지역 표시 원의 크기로 파악해 볼 수 있다. 또한, Table 1에 총 28개소 대상 부지들의 현장 시험 종류와 시추조사로부터 파악한 공학적 개념의 풍화암, 연암 및 보통암(경암 포함)까지의 심도를 전단파속도에 따라 결정한 공학적 기반암 심도와 함께 정리하였다. 대상 위치들의 시추조사 암반 심도 분포에 근거해 볼 때, 홍성 지역에서 최대 35 m 정도의 풍화암이 두껍게 발달해 있음을 알 수 있다. 비록, 연구대상 자료 수의 한계로 인해 모암의 종류에 따른 전단파속도의 정량적 분석을 수행하지는 못했지만, Table 1에 각 부지의 모암 종류도 제시하였다. 전단파속도는 미소변형을 조건의 지반 강성을 의미하며 이 특성은 공간적인 변화를 보이게 되는데, 여러 다양한 환경 조건에 의해 크게 영향을 받는다(Sun et al., 2013). 그 영향 요소 중의 한 가지는 모암의 종류이므로(Sun et al., 2006a), 향후 다양한 암반 조건에 대한 신뢰성 높은 국내 전단파속도 자료의 추가 확보 및 분석을 통해 지

질학적 암반 종류와 전단파속도 간의 정량적 규명이 요구된다.

모든 대상 시험 부지에서는 우선 시추조사를 풍화암 종료(하부)심도 또는 연암 시작(상부)심도부터 최소 약 5 m 정도까지 확인하고자 수행하였으며, 일부 부지들에서는 수 m 정도의 비교적 얇은 토사 두께 분포에 따라 더 깊은 암반심도까지 시추조사를 수행하기도 하였다. 시추 종료후 현장 탄성과 시험을 위한 PVC 케이싱을 설치하고 시추공과 시험용 케이싱 주변을 모래시멘트로 충전하여 시험 환경을 조성하였다. 일부 부지에서는 크로스홀 시험과 다운홀 시험이 병행되기도 하였다. 풍화암을 포함한 연암, 보통암(경암 포함)의 암반층에서의 탄성과 자료 획득 간격은 대부분 1 m로 설정하고 진행하였으며, 획득한 탄성과 신호를 시험 기법별로 분석하여 시험 심도별 전단파속도를 결정하였다(Kim et al., 2005; Sun and Mok, 2006). 이 연구를 위한 암반층의 구분은 시추조사 과정의 지층 분류에 따라 이루어졌으며, 암반층에서의 전체 자료 수는 126개이다. 이 중 풍화암은 66개, 그리고 연암 및 그 이상 경도 암반(이 연구에서는 보통암 및 경암)은 60개이다.

전단파속도 분포 토대의 공학적 기반암 선정

지반을 구성하는 다양한 지층들은 그 발달 또는 형성 과정이 다르다. 인위적으로 지표면 부근에 조성하는 매립토가 있고, 이와는 달리 자연 조건에서의 침식, 이송, 충적 등의 작용에 의해 형성된 퇴적토가 있다. 특히, 발달 환경에 따라 여러 종류 재료들로 구분되는 다양한 지층들이 퇴적토를 구성할 수 있으며, 재료들에 따라 공학적 특성들이 매우 상이할 수 있다. 퇴적토의 발달 과정을 외부 재료의 유입 현상이라고 한다면, 자연상태 지반에서 퇴적토 하부에 존재할 수 있는 풍화토, 풍화암, 연암 등은 신선한 원위치 모암이 물리적 및 화학적 요인에 의해 변화되어 형성된 것이다(Sun et al., 2005; 2006a). 이러한 이유로 본 연구 대상인 풍화암과 연암의 경계는 갑작스러운 지층의 단절변화 형태로 나타나지 않고 대부분 점진적인 풍화 및 파쇄 정도의 변화 형태로 보이게 되며, 실무적인 시추조사에서는 굴진 성능 및 표준관입시험의 극한적 적용성을 토대로 애매할 수 있는 두 암반층의 경계선을 우선 구분한다. 풍화암이 종료된 것으로 판단되면 실무 시추과정에서는 암반용 코어버렐(core barrel)을 이용하여 굴진한다. 이 과정에서 원만하

Table 1. Site investigation information and depth to rock strata for the study sites. The first two characters in the site name indicate the name of the local area; i.e., .GJ, HS, IS, PC, TY, HD, HM, and SC stand for Gyeongju, Hongseong, Imsil, Pyeongchang, Tongyeong, Hadong, Haemi, and Sacheon, respectively. CH and DH represent the crosshole seismic test and downhole seismic test, respectively.

Site name	Seismic test method	Depths to rock strata (m)				Drilling depth (m)	Parent rock
		Engineering bedrock	Weathered rock	Soft rock	Moderate rock		
GJ01	CH & DH	8.0	-	7.4	-	11.0	Sandstone
GJ02	CH & DH	11.0	10.5	17.5	-	21.0	Granite
GJ03	DH	28.0	26.5	28.5	-	31.0	Sandstone
GJ04	DH	19.0	10.0	18.5	-	22.0	Diorite
GJ05	DH	45.0	42.5	49.0	-	52.0	Granite
GJ06	DH	31.0	22.0	32.0	-	35.5	Granite
GJ07	DH	16.0	5.2	15.0	-	19.0	Granite
GJ08	CH & DH	38.0	31.0	37.0	-	41.0	Granite
GJ09	CH & DH	5.0	1.0	2.5	5.0	13.0	Granite
GJ10	DH	32.0	-	26.2	-	31.0	Sandstone
GJ11	DH	35.0	-	34.5	-	39.0	Sandstone
GJ12	DH	30.0	-	29.0	31.0	35.0	Granite
HS01	CH & DH	11.0	3.0	10.3	-	14.5	Granite
HS02	CH & DH	45.0	10.0	44.5	-	48.5	Granite
HS03	CH & DH	47.0	9.5	46.5	-	51.0	Granite
HS04	DH	32.0	8.5	31.0	-	35.5	Granite
HS05	DH	40.0	23.0	46.0	-	50.0	Granite
HS06	DH	30.0	10.0	28.0	-	33.0	Granite
IS01	CH & DH	5.0	-	-	5.0	10.0	Tuff
IS02	DH	7.0	-	2.7	6.0	14.0	Tuff
IS03	DH	4.0	-	2.1	4.8	10.0	Tuff
PC01	CH & DH	4.0	-	-	4.1	13.0	Limestone
PC02	CH & DH	2.0	-	-1.6	3.5	10.0	Limestone
TY01	CH	8.0	6.0	7.5	18.5	30.0	Andesite
TY02	CH	8.5	5.8	8.1	24.0	35.0	Andesite
HD01	CH	12.0	9.5	16.2	-	19.5	Granite
HM01	CH & DH	16.0	6.7	15.8	-	20.0	Granite
SC01	CH & DH	8.7	-	6.4	-	10.0	Shale

게 암석 코어들이 채취되면 계속 코어버렐로 굴진하게 되며, 그렇지 않으면 다시 풍화암 굴진과 동일하게 진행한다.

그 동안 국내 시추조사 보고서에서 풍화암과 연암으로 구분하여 제시되어 온 수 많은 부지 정보들은 지진공학 관점의 기반암으로서의 재고 없이 단순히 설계자 또는 사용자의 편의에 따라 선택적으로 활용되어 왔다(KGS, 2010). 뿐만 아니라, 그 동안 일부 설계활용 부지응답 해석이나 광역 지진대책 수립 과정에서도 일정

한 기준 없이 사용자가 풍화암 또는 연암을 자체적으로 선택해 왔다. 지진공학적 기반암의 기준은 일반적으로 대표 지반동적특성으로 여겨지는 전단파속도로 제시되며(Sun et al., 2005), 각 지역이나 국가에 따라 다소 차이가 존재할 수 있으나, 미국 ANSS(advanced national seismic system) 지진 관측소 설치를 위한 지반조사의 공학적 암반 조건에 따르면 전단파속도 750 m/s 초과 조건으로 제시하고 있다(USGS, 2002). 이 조건은 현행 내진설계 기준의 보통암(Rock) 부지 분류 B(또는 S_B)의

Fig. 3. Probability distribution of the shear wave velocity in rock strata: (a) weathered rock, and (b) soft rock.

전단파속도 760 m/s 초과 조건과 유사한 것이다(Sun, 2004; 2010). 비록 지진공학적인 기반암의 최소 정량적 기준($V_s > 760$ m/s)이 일반적인 풍화암과 연암의 구분 기준들과 물리적 의미에서 일치하지 않을 수는 있지만, 공학적 활용성과 보수성을 고려하여 공학적 기반암의 필요 조건을 파악해 보고자 대부분 1 m 단위로 획득된 현장 전단파속도 자료를 정리하였다. 총 66개인 풍화암 전단파속도 자료와 총 60개의 연암(일부 보통암 및 경암 포함) 자료를 토대로 그들의 정규 확률밀도 분포를 도출하여 Fig. 3에 제시하였다. Fig. 3에서는 표준편차(standard deviation, σ) 범위를 고려한 정규분포의 차별적 도식과 함께 전단파속도의 50 m/s 단위별 자료빈도를 원자료 참고 목적으로 중첩 제시하였다.

자료의 확률적 대칭분포를 나타내는 정규분포에서 풍화암과 연암의 전단파속도 평균은 각각 665 m/s와 1775 m/s였으며, 표준편차(σ)는 각각 194 m/s와 881 m/s였다. 두 암반의 평균 전단파속도는 ANSS 공학적 기반암의 최소 전단파속도 기준인 750 m/s에 비해 풍화암은

Fig. 4. Comparison between the V_s probability distributions of soft rock and weathered rock.

작게 그리고 연암은 크게 나타났다. 750 m/s 기준을 Fig. 3에 파선으로 삽입하여 확인해 보니 평균을 중심으로 풍화암은 $+1\sigma$ 그리고 연암은 -2σ 범위 내에 기반암 전단파속도 기준 값이 분포하였다. 또한, Fig. 4에 도시한 두 대상 국내 암반층의 2σ 범위 정규분포에서 쉽게 파악할 수 있는 바와 같이, 정규분포의 첨두인 전단파속도 평균만에 근거해 보면 풍화암은 공학적 기반암 조건을 만족하지 못하고 연암은 공학적 기반암 조건을 만족한다. 다만, 풍화암은 전단파속도 자료 전체의 약 40%에 해당하는 상당수 자료가 750 m/s 보다 크게 나타났고, 이로 인해 상당영역이 최소 기준 값보다 큰 범위에 분포하고 있다.

현재 자료 수준에서의 풍화암 전단파속도 분포 현황에 근거해 볼 때, 향후 보다 많은 조건과 수량의 신뢰성 높은 풍화암 전단파속도 자료의 확보 분석을 통해 평균적 의미에서 국내 풍화암이 지진공학적인 기반암으로 고려될 수 있을 지를 더 심도있게 고찰해 봐야 할 것이다. 그렇다 할지라도, 기반암에 대해 750 m/s라는 최소 전단파속도 기준과 암반 지층의 평균 값만으로 비교하여 의미를 부여하는 것은 공학적 측면의 근거로는 부적합할 것으로 판단된다. 즉, 평균을 충분히 포괄하는 범위가 기반암 최소 기준을 만족하는 암반 지층이 공학적 기반암의 의미로 합리적이라고 할 수 있다. 연암의 경우 소수의 자료를 제외하고는 대부분 공학적 기반암 조건을 만족하는 750 m/s 이상의 전단파속도를 보였다. 연암 자료는 전체의 약 30%가 시추조사를 통해 보통암 또는 경암으로 구분된 자료이긴 하였으나, 겨우 10% 정도만이 750 m/s 미만의 전단파속도를 보이므로 전반적으로 지진공학적인 기반암으로 고려해 볼 수 있다. 적용 자료의 최소한의 전문가적 신뢰성을 확보코자 본 연구진이 직

접 수행한 현장 시추공 탄성파시험 결과 자료만을 선별 도입하였다. 이런 이유로 분석을 위한 수량적 한계가 존재하고 그에 따라 다양한 관점의 지질공학적 분석이 어렵기는 하지만, 현재까지의 자료 분포에 근거해 볼 때 지극히 보수적인 관점에서는 연암 이상 경도의 암반이 지진공학적 기반암으로 적합할 것으로 판단된다. 그렇다 할지라도, 향후 다양한 조건에 대한 신뢰성 높은 현장 탄성과 시험 수행 및 자료 확보를 통해 여러 수준의 암반 종류를 포함한 조건들에 대한 체계적 정량화가 있어야 할 것으로 보인다.

국내 현장 시추조사에서 풍화암의 경우 대개 표준관입시험이 수행되고 그에 따라 조사보고서에는 N 값이 제시되며, 대부분 50 cm 두께 관입 시 타격수의 형식으로 표현하게 된다. 반면, 연암 및 그 이상 경도의 암반에서는 현실적으로 표준관입시험을 수행할 수 없으므로 코어버렐로 채취한 암반 시료의 상태를 실측하여 TCR(total core recovery) 및 RQD(rock quality designation)를 공학적 상태변수로 제시한다. 본 고찰에서는 이러한 시추조사로부터의 정량적 정보와 전단파속도를 비교하여 지질 및 지반공학 현장변수에 따른 두 암반층의 강성 변화를 직관적으로 파악해 보고자 하였다. Fig. 5에는 풍화암에서의 표준관입시험 N 값과 전단파속도간의 자료를 이산화 분포로 제시하였다. 여기서 N 값은 현장고유 비선형 관계의 도출 적용이 바람직하지만(Sun et al., 2013), 절대비교 기준이 전단파속도이므로 효율성을 고려하여 30 cm 관입 조건으로 단순 선형환산하여 적용하였다.

풍화암에 관한 Fig. 5로부터 N 값 증가에 따라 대체적으로 전단파속도가 증가하는 경향을 파악해 볼 수는 있으나, 자료 수의 부족과 산포도로 인해 상관성이 높은 관계를 도출하기는 어려웠다. 그러나 과반수 이상의 자료들이 공학적 기반암 최소 조건인 750 m/s 미만의 전단파속도를 보이고 있고, 그 하한 분포 범위 또한 상한 분포에 비해 기준 값과 큰 차이를 나타내고 있다. 따라서 전단파속도 분포가 획득되지 않은 채 시추조사만 수행된 지층 정보에서 풍화암 상부를 지진공학적 기반암 상부로 선정하고 대상 부지의 지진응답을 평가하게 되면 상당한 오류가 포함될 수 있을 것으로 보인다. 그렇다 할지라도, 신뢰성 높게 전단파속도 주상도가 결정되고 이로부터 전단파속도 750 m/s를 연속적으로 상회하는 심도가 풍화암 내에 존재하게 되면, 이 위치를 공학적 기반암 선으로 고려할 수 있다.

연암에 대해서는 풍화암의 N 값과는 다른 공학적 상

Fig. 5. Shear wave velocity versus N value in weathered rock.

Fig. 6. Shear wave velocity versus TCR and RQD in soft rock.

태변수인 TCR 및 RQD와 전단파속도간의 자료 분포를 Fig. 6에 도시하였다. 비록 일부 보통암이나 경암의 자료가 포함되었다 할지라도 연암에서의 전단파속도는 TCR과 RQD의 증가에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 보이며, TCR의 경우 최대 값인 100%에서 거의 상한부터 하한에 걸쳐 폭 넓은 범위의 전단파속도로 분포한다. RQD는 비록 넓은 전단파속도 범위이기는 하나 완전한 기울기로 전단파속도와 선형 비례하는 양상을 나타낸다. 연암 역시 더 다양한 조건과 다수의 신뢰성 높은 전단파속도 자료 확보에 따른 추가 고찰을 통해 보다 정량적인 상관관계의 도출이 가능할 수 있을 것이다. 무엇보다도 Fig. 6에서 가장 직관적으로 확인할 수 있는 사항은 거의 대부분의 전단파속도가 지진공학적 기반암 기준인 750 m/s를 상회하고 있다는 것인데, TCR과는 달리 RQD에서는 20% 이상인 경우는 모두 공학적 기반암 조건을 만족하고 있다. 이러한 연암의 전단파속도

분포에 근거해 볼 때, 전단파속도가 획득되지 못한 시추 조사 부지에 대한 지진응답을 예측하고자 해석을 수행할 경우 연암 상부를 기반암 선으로 고려할 수 있을 것으로 판단된다. 특히, RQD가 20 % 이상인 암반에 대해서는 기반암으로서의 공학적 신뢰도가 상당히 높을 것으로 보인다.

요약 및 결론

기존 또는 제한적 상황의 지반자료를 활용한 합리적 지진지반운동 평가 및 체계적 내진설계의 일환으로, 일반적인 시추조사로부터 확인되는 풍화암과 연암에 대해 지진공학적 기반암으로서의 소요 특성을 고찰하고자, 신뢰성 높게 수행되고 분석된 시추공 탄성파시험의 전단파속도 자료를 취합 분석하였다. 대상 암반층들의 전단파속도 자료에 대해 확률밀도 분포를 도출하여 공학적 기반암의 최소 전단파속도 기준인 750 m/s와 비교한 결과, 연암층 전단파속도 분포에서는 기반암 기준이 평균보다 상당히 작은 -1σ 와 -2σ 사이에 분포하였으나 풍화암층에서는 평균과 $+1\sigma$ 사이에 분포하였다. 대부분의 연암 전단파속도 자료는 750 m/s에 비해 큰 분포를 보여 공학적 기반암의 조건을 만족하지만, 풍화암은 40 % 정도만이 조건을 만족하였다. 전단파속도 획득 결과 없이 시추조사 자료만 존재하는 경우에 대해 부지증폭관련 지진응답을 평가하고자 한다면, 공학적 관점의 보수성을 감안해 볼 때, 풍화암 보다는 연암을 지진공학적 기반암으로 선정해야 할 것으로 판단된다. 전단파속도와 두 대상 암반의 지질지반공학 현장획득 변수들인 풍화암의 N 값 그리고 연암의 TCR 및 RQD를 비교하였으며, 대체적으로 변수들이 증가함에 따라 전단파속도 역시 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 특히, RQD가 20 % 이상인 암반의 전단파속도는 모두 750 m/s를 상회하는 분포를 보였다. 본 연구는 신뢰성이 담보된 전단파속도 자료 확보라는 이유로 국내 다양한 조건 및 충분한 수량의 자료가 처리 분석되지는 못했으며, 향후 보다 확대된 자료의 수집 및 추가 고찰을 통해 개선된 결과와 그에 따른 토의가 진행될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 ‘한반도 동부지역 잠재적 위험 지진원 평가’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Anbazhagan, P. and Sitharam, T. G., 2009, Spatial variability of the depth of weathered and engineering bedrock using multichannel analysis of surface wave method, *Pure and Applied Geophysics*, 166, 3, 409-428.
- Chandler, A. M., Lam, N. T., Tsang, H. H., and Sheikh, M. N., 2005, Estimation of near-surface attenuation in bedrock for analysis of intraplate seismic hazard, *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 7, 3, 159-173.
- Dobry, R., Borcherdt, R. D., Crouse, C. B., Idriss, I. M., Joyner, W. B., Martin, G. R., Power, M. S., Rinne, E. E., and Seed, R. B., 2000, New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions, *Earthquake Spectra*, 16, 1, 41-67.
- KGS, 2010, Understanding of seismic ground response analysis through round robin test, *Geotechnical Special Publication No. 3*, Korean Geotechnical Society (in Korean).
- Kim, D. S. and Yoon, J. K., 2006, Development of new site classification system for the regions of shallow bedrock in Korea, *Journal of Earthquake Engineering*, 10, 3, 331-358.
- Kim, H. J., Sun, C. G., Cho, S. M., and Heo, Y., 2005, Determination of shear wave velocity profiles from the SCPT, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 25, 3C, 201-214 (in Korean with English abstract).
- Kinoshita, S., 2007, Propagation characteristics of bedrock waves traveling from Pre-tertiary basement to engineering bedrock, *Earth Planets Space*, 59, 11, 1173-1179.
- Kramer, S. L., 1996, *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, New Jersey.
- Mohamed, A. M. E., Abu El Ata, A. S. A., Abdel Azim, F., and Taha, M. A., 2013, Site-specific shear wave velocity investigation for geotechnical engineering applications using seismic refraction and 2D multichannel analysis of surface waves, *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 2, 1, 88-101.
- Papadimitriou, A. G., Antoniou, A. A., Bouckovalas, G. D., and Marinos, P. G., 2008, Methodology for automated GIS-aided seismic microzonation studies, *Computers and Geotechnics*, 35, 4, 505-523.
- Rodriguez-Marek, A., Bray, J. D., and Abrahamson, N. A., 2001, An empirical geotechnical seismic site response procedure, *Earthquake Spectra*, 17, 1, 65-87.
- Sun, C. G., 2004, *Geotechnical information system and site amplification characteristics for earthquake ground motions at inland of the Korean peninsula*, Ph.D. Dissertation, Seoul Nation University.
- Sun, C. G., 2010, Suggestion of additional criteria for site categorization in Korea by quantifying regional specific characteristics on seismic response, *Jigu-Mulliwa-Mulli-Tamsa*, 13, 3, 203-218 (in Korean with English abstract).
- Sun, C. G., Cho, C. S., Son, M., and Shin, J. S., 2013, Correlations between shear wave velocity and in-situ penetration test results for Korean soil deposits, *Pure and*

- Applied Geophysics, 170, 3, 271-281.
- Sun, C. G., Han, J. T., and Cho, W., 2012, Representative shear wave velocity of geotechnical layers by synthesizing in-situ seismic test data in Korea, The Journal of Engineering Geology, 22, 3, 293-307 (in Korean with English abstract).
- Sun, C. G., Han, J. T., Choi, J. I., Kim, K. S., and Kim, M. M., 2007, Investigation into the input earthquake motions and properties for round robin test on ground response analysis, Proceedings of the Korean Geotechnical Society Autumn National Conference 2007, 266-292 (in Korean with English abstract).
- Sun, C. G., Kim, B. H., and Chung, C. K., 2006a, Investigation on weathering degree and shear wave velocity of decomposed granite layer in Hongsung, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 26, 6C, 431-443 (in Korean with English abstract).
- Sun, C. G., Kim, D. S., and Chung, C. K., 2005, Geologic site conditions and site coefficients for estimating earthquake ground motions in the inland areas of Korea, Engineering Geology, 81, 4, 446-469.
- Sun, C. G., Kim, H. J., Jung, J. H., and Jung, G., 2006b, Synthetic application of seismic piezo-cone penetration test for evaluating shear wave velocity in Korean soil deposits, Mulli-Tamsa, 9, 3, 207-224 (in Korean with English abstract).
- Sun, C. G. and Mok, Y. J., 2006, Development and application of a source for crosshole seismic method to determine body wave velocity with depth at multi-layered sites, Mulli-Tamsa, 9, 3, 193-206. (in Korean with English abstract).
- USGS, 2002, Technical guidelines for the implementation of the advanced national seismic system - version 1.0, Prepared by ANSS Technical Integration Committee, Open-File Report 02-92, US Department of the Interior, US Geological Survey.

선창국

한국지질자원연구원 국토지질연구본부 지진연구센터

지진재해연구실

Tel: 042) 868-3176

E-mail: pungsun@kigam.re.kr