

역사 지진 피해 발생 읍성 지역의 부지 응답 특성 평가

Estimation of Site Response Characteristics at Town Fortress Areas Damaged by Historical Earthquakes

선창국* 방은석** 정충기*** 김동수****
Sun, Chang-Guk Bang, Eun-Seok Chung, Choong-Ki Kim, Dong-Soo

ABSTRACT

To estimate the local site effects at two town fortress areas where stone parapets were collapsed during historical earthquakes, site characteristics were evaluated using borehole drillings and seismic tests and equivalent-linear site response analyses were conducted based on the shear wave velocity (V_s) profiles determined from site investigations. The study sites are categorized as site classes C and B according to the mean V_s to 30 m ranging from 500 to 850 m/s, and their site periods are distributed in short period range of 0.06 to 0.16 sec. For site class C in the study areas, the short-period (0.1-0.5 sec) and mid-period (0.4-2.0 sec) site coefficients, F_a and F_b specified in the Korean seismic design guide, underestimate the ground motion in short-period band and overestimate the ground motion in mid-period band, respectively, due to the characteristics showing high amplification in short period range, which can result in the collapse of stone parapets having the short natural period.

1. 서론

지진 재해에 대한 국가적 종합 대응 체계 확립 목적으로 최근 국내 주요 기관들에서는 지속적으로 지진 관측 시설을 확충하고 지진 자료 분석 기법을 개발 및 개선해 오고 있으며, 현재는 신속한 지진 경보 발령 및 재해 예측이 가능하고 관측 자료를 이용한 연구들도 활발하게 진행되고 있다. 그러나 1905년 시작된 국내 지진 관측 이후 내륙의 홍성에서 비교적 큰 지진(규모 5.0)이 발생한 1978년 까지만 해도 계기 지진 기록의 활용은 매우 미미한 상태였고, 그 이후 지진 재해에 대한 관심이 높아지고 관측 시설들이 확충됨에 따라 국내에서도 계기 지진 자료를 이용한 다양한 연구가 수행되고 있다(한국지질자원연구원, 2004). 그렇다 할지라도 아직까지는 내진 설계와 같은

* 정회원 · 한국지질자원연구원 지진연구센터, 선임연구원

** 정회원 · 한국과학기술원 건설및환경공학과, 박사과정

*** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

**** 정회원 · 한국과학기술원 건설및환경공학과, 교수

지진공학 측면의 실무적 활용을 위한 계기 지진 자료의 확보는 부족한 상황이며, 실제 국내 설계 지반 운동의 기본 정보인 성능 및 지역별 발생 가능 지진 세기는 주로 역사 지진 기록을 토대로 결정되어 있다(Sun 등, 2005).

역사 지진 기록에 의존하는 지진 세기 평가 과정 중에는 여러 면의 불확실성이 내재되어 있으며, 그 중에서도 역사 문헌상 지진 피해 부지의 지리적 그리고 구조물의 형식적 모호성은 가장 지배적인 불확실성으로 고려될 수 있다. 특히, 과거 역사 문헌의 지리적 모호성으로 인해 역사 지진 피해 구조물 부지에서의 지반 특성에 따른 부지 효과는 거의 확인이나 평가되지 못 해 왔다. 즉, 과거 역사 기록상에 존재했던 지표면 부근 구조물에 작용하는 지진 세기의 정확한 평가를 위해서는 피해 구조물의 구체적 위치와 손상 정도에 대해 명확한 파악이 이루어 져야 할 뿐만 아니라 해당 위치에서의 부지 효과로 인한 지진 증폭 특성 평가가 반드시 선행되어야 한다. 본 연구에서는 국내 역사 문헌상의 구조물 지진 피해 사례를 조사하고(과학기술부, 2000), 수많은 사례 중 그 손상 정도와 지리적 위치가 비교적 명료한 해미와 사천의 두 읍성 지역을 대상으로 지진 증폭과 관련된 부지 효과의 정량화를 수행하였다. 대상 지역에서는 현장 지반 조사를 수행하여 지반 특성을 파악하고, 이를 기본 정보로 이용하여 지진 응답 해석을 수행함으로써 부지 고유의 지진 응답 특성을 평가하였다.

2. 대상 읍성 지역의 기본 정보 및 지반 특성

본 연구의 대상인 해미와 사천 읍성에서는 각각 1518년(선조 14년)과 1700년(숙종 26년)에 지진으로 인한 성첩 붕괴가 발생하였으며(과학기술부, 2000), 이와 같은 정량적인 역사 지진 피해 사례를 근거로 부지 응답 특성 평가를 위한 두 지역의 기본 정보를 수집하였다. 해미 읍성은 1407년(태종 7년)에 해미현을 설치한 이래로 1491년(성종 22년)에 축성된 성벽과 그 상부의 성첩이 거의 온전한 형태로 현재까지 보존된 곳으로서 당시의 전형적인 읍성 형태를 확인할 수 있다. 반면, 사천읍성은 1445년(세종 27년)에 축성되었으나 현재는 북쪽 산지의 일부 성벽을 제외하고는 거의 훼손된 상태이며, 문헌(泗川郡, 1899; 사천문화원, 1989)을 고찰하여 사천읍성의 성벽 영역을 추정하였다.

두 대상 읍성 지역의 지질 특성을 대표하는 기반암은 다소 상이하게 파악되었는데, 해미 읍성은 거의 전역이 중생대 쥐라기의 대보 화강암류로 구성된 반면 사천 읍성은 중생대 백악기의 경상계 퇴적암류로 구성되어 있다. 해미 읍성과 사천 읍성은 두 지역 모두 북쪽에 산지를 끼고 능선을 따라 남쪽 평지까지 포함하는 전형적인 평사성의 형태를 보이고 있다. 해미 읍성은 성벽 밖의 북서쪽과 북동쪽에 비교적 높은 산지가 존재하고 읍성 영역은 북동쪽 산지의 지류에서부터 시작하여 남쪽의 작은 하천 이전의 평지까지 분포하며(그림 1), 성벽의 총 길이는 1,800m 정도이다. 따라서 읍성 남서쪽의 반정도 영역에서는 평야지의 지형적 특성을 보이고 북동쪽의 반정도 영역에서는 구릉 및 산지의 지형적 특성을 보인다(그림 1). 또한, 사천읍성은 인근에 높은 산지나 하천은 존재치 않지만 북동쪽의 산지와 남동 및 남서쪽의 평지를 그 영역으로 하며, 성벽의 총 길이는 1,400m 정도로 기록되어 있다(泗川郡, 1899). 추정되는 읍성 영역 내부에서는 해미읍성과 유사하게 남서쪽의 반정도 영역에서는 평야지의 지형적 특성을 보이고 북동쪽의 반정도 영역에서는 구릉 및 산지의 지형적 특성을 보인다. 이러한 지형적 특성을 토대로 볼 때, 해미 및 사천읍성은 하천이나 유

수에 의한 퇴적층의 발달은 미약하고 평지에서도 비교적 얇은 심도에 기반암이 분포할 가능성이 있다.

일반적으로 읍성 지역은 문화 유적지로서 개발이 제한됨에 따라 기초적인 지형 및 지질 자료를 제외하고는 지반 특성 파악을 위해 활용 가능한 지반 조사 자료가 거의 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지반 구성 및 동적 특성의 종합적 평가를 목적으로 현존하는 해미 읍

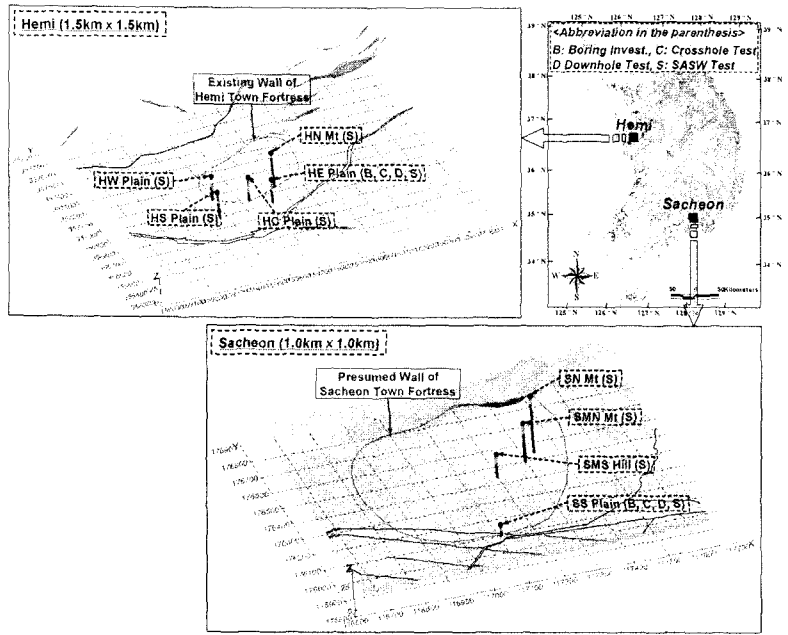


그림 1. 읍성 지역의 지형 특성 및 지반 조사 내력

성과 추정된 사천 읍성 영역에 대한 시추 조사 및 깊이에 따른 전단파 속도(V_s) 분포 결정을 위한 현장 탄성과 시험을 수행 하였다. 해미와 사천 읍성의 지리적 위치 및 지역별로 수행된 지반 조사 내용은 그림 1과 같다. 지반 조사는 대상 지역의 지형 특성을 고려하여 선정하였으며, 해미 읍성의 경우 산지 1개소와 평지 4개소에서 그리고 사천 읍성의 경우 산지 2개소, 구릉 1개소 및 평지 1개소에서 지반 조사를 수행하였다. 각 지역별로 1개소의 종합 조사 부지(해미의 HE Plain 부지와 사천의 SS Plain 부지)에서는 시추 조사와 크로스홀(crosshole), 다운홀(downhole) 및 SASW 시험이 모두 수행되었으며, 그 외 부지에서는 SASW 시험만이 실시되었다.

시추 조사와 현장 탄성과 시험 결과를 종합적으로 분석하여 읍성 지역의 지층 구성을 파악하였으며, 매립토(Fill), 퇴적토(Alluvial Soil), 풍화 잔류토(Weathered Residual Soil), 풍화암(Weathered Rock) 그리고 연암(Soft Rock)을 포함한 기반암(Bed Rock)의 총 5 종류로 구분하였다(선창국 등, 2005). 현장 지반 조사로부터 파악된 두 지역의 깊이에 따른 지층 구성은 그림 2와 같다. 지층 구성의 파악을 위하여 시추 부지에서는 조사 결과를 직접 활용하였으며, SASW 시험만 수행한 부지에서는 시추 부지에서의 V_s 에 따른 지층 분포와 지형 특성을 종합 분석하여 지층 구성을 파악하였다(Sun 등, 2005). 또한, 그림 2에는 각 부지의 깊이에 따른 V_s 분포도 삽입 도시 하였는데, 다양한 현장 탄성과 시험이 수행된 HE Plain 부지와 SS Plain 부지의 경우 대표 V_s 주상을 도출하여 제시하였다(Sun 등, 2005). 공학적 기반암인 연암(선창국 등, 2005)의 심도는 상대적으로 넓은 면적의 평지를 포함하고 풍화 지층 상부에 다소의 퇴적토가 발달한 해미 읍성이 대부분의 영역이 산지와 구릉지로 구성된 사천 읍성에 비해 깊게 분포하고 있다. 두 대상 지역에서 파악된 지층 구성으로 볼 때, 해미 읍성에서는 평지를 중심으로 기반암 위의 풍화암 및 토사에서 지진 증폭 가능성이 높을 것으로 보이는 반면, 사천 읍성에서는 그에 비해 상대적으로 증폭 가능성이 낮을 것으로 추정된다.

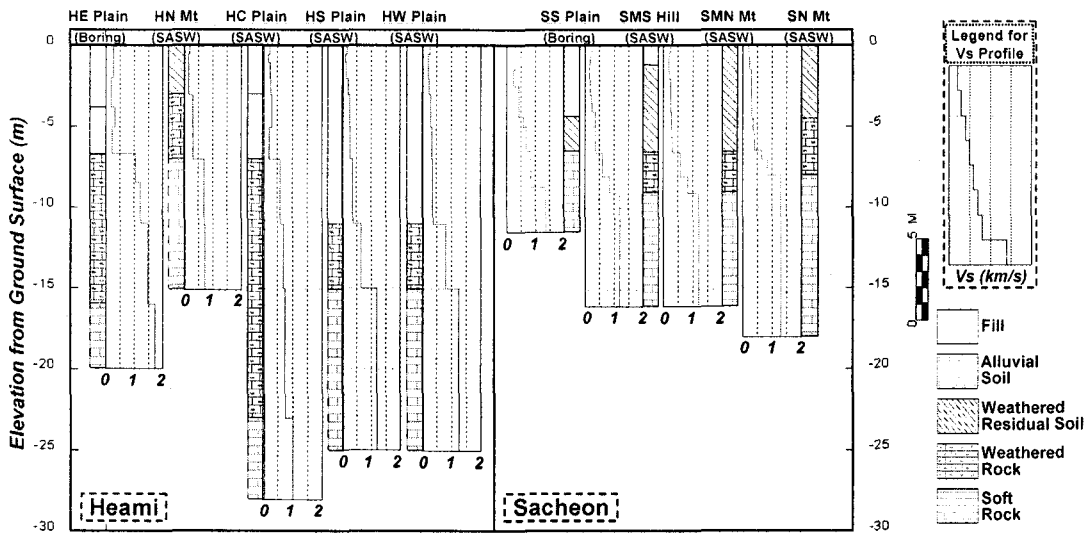


그림 2 지반 조사 부지별 지층 및 전단파 속도 분포

3. 읍성 지역 부지에 대한 지진 응답 해석

본 연구에서는 역사 지진 피해가 발생했던 읍성 지역의 부지 효과를 정량적으로 평가하고자, 1차원 부지 응답 해석 기법의 SHAKE91(Idriss와 Sun, 1992)을 이용하여 두 읍성 지역 내 9개소의 부지를 대상으로 1 종류의 인공(Artificial) 지진과 국내에서 보편적으로 적용되고 있는 3 종류의 계측 지진들(EI Centro, Hachinohe 및 Ofunato 지진)의 입력 지진을 토대로 해석을 수행하였다. 해석은 지반 조사 결과로부터 파악된 깊이에 따른 지층 구성과 V_s 분포를 입력

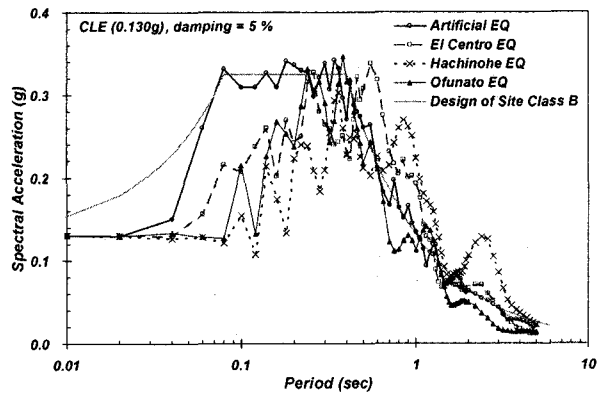


그림 3. 암반 노두 입력 지진의 가속도 응답 스펙트럼

정보로 활용하여 I등급 붕괴 방지 수준(CLE)과 기능 수행 수준(OLE)에 대해서 실시하였으며, 지진과의 최대 가속도는 각각 1000년과 100년 재현 주기의 국내 지진 재해도를 근거로 해미 읍성의 경우 0.130g와 0.047g 그리고 사천 읍성의 경우 0.120g와 0.044g로 조정하여 입력하였다. 그림 3은 해미 읍성 입력 지진들의 CLE(0.130g)에 대한 암반 노두 가속도 응답 스펙트럼으로서 현행 내진 설계 기준(Sun 등, 2005)의 지반 분류 B에 해당되는 보통암 지반의 설계 응답 스펙트럼과 함께 도시하였다. 깊이별 V_s 분포와 더불어 등가선형 부지 응답 해석시 요구되는 전단변형률에 따른 지반의 정규화 전단탄성계수(normalized shear modulus, G/G_0) 및 감쇠비(damping ratio, D)의 비선형 곡선은 기존 문헌 자료와 국내 내륙 지반에 대해 공진주 시험으로부터 얻은 기존 시험 결과를 활용하였으며(선창국 등, 2005), 해석 부지의 합리적 지진 응답 특성 평가를 위하여 지층별로 특성화된 G/G_0 및 감쇠비 곡선을 입력하였다.

두 지역의 대상 부지에 대한 1차원 등가 선형 지진 응답 해석을 수행한 결과, 부지별로 지층 구성 및 V_s 분포와 같은 지반 특성에 따라 암반 노두에 대한 지표면 자유장 가속도의 비로 파악할 수 있는 증폭 정도가 다르게 나타났다. 다양한 지진파 입력을 통한 해석으로 부터 결정된 지표면 최대 가속도(peak ground acceleration)는 해미 읍성과 사천 읍성 지역에서 CLE의 경우 각각 0.156g~0.328g와 0.125g~0.263g이었고 OLE의 경우 각각 0.052g~0.114g와 0.046g~0.104g이었다. 이러한 결과는 암반 노두의 최대가속도를 기준으로 최대 2.5배 및 최소 1.1배의 증폭 정도를 나타낸 것이다. 각 부지에서 내진 성능 수준별 4 종류의 지진파 해석 결과들을 평균한 지표면 최대 가속도는 표 1에 제시한 바와 같다. 또한, 표 1에는 부지별 지반 특성으로서 기반암 심도(bedrock depth, H), 부지 고유 주기(site period, T_G) 그리고 현행 국내 내진 설계 지반 분류 기준인 지하 30m까지의 평균 전단파 속도(V_{s30}) 및 그에 따른 지반 분류도 함께 제시하였다(Sun 등, 2005). T_G 는 각 부지의 기반암 상부 지층의 두께 및 V_s 를 토대로 식 (1)과 같이 결정할 수 있다. 또한, V_{s30} 은 부지 효과를 정량화한 단주기(short-period; 0.1~0.5초) 및 중장주기(mid-period; 0.4~2.0초) 지반 증폭 계수, F_a 및 F_v 의 경험적 분류 기준으로서 식 (2)를 이용해 산정할 수 있다. 특히, T_G 는 대상 부지의 지진시 대표적 공진 주기에 해당되므로 그에 상응하는 부지 고유의 지진 응답특성을 예측할 수 있다.

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

여기서, D_i 와 V_{Si} 는 각각 기반암 심도(H)까지의 i 번째 지층의 두께($H = \sum D_i$)와 평균 V_s

$$V_{s30} = 30 / \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{Si}} \quad (2)$$

여기서, d_i 와 V_{Si} 는 각각 지하 30m까지 분포하는 i 번째 지층의 두께($30m = \sum d_i$)와 평균 V_s

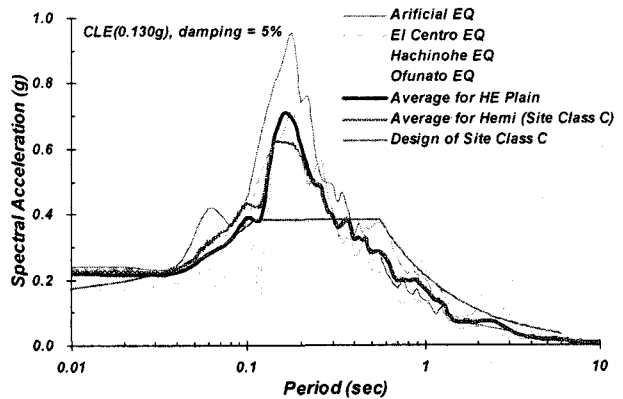
표 1. 부지별 지반 특성 및 평균 지표면 최대 가속도

Site Name		Investigation Method	Bedrock Depth, H (m)	Site Period, T_G (sec)	V_{s30} (m/s)	Site Class	Average of Peak Ground Acceleration (g)	
							CLE	OLE
Hemi	HE Plain	B, C, D, S	16.0	0.140	673	C	0.220	0.085
	HN Mt	S	15.0	0.121	567	C	0.247	0.086
	HC Plain	S	23.0	0.161	532	C	0.196	0.067
	HS Plain	S	15.0	0.159	497	C	0.266	0.096
	HW Plain	S	15.0	0.134	594	C	0.218	0.075
Sacheon	SS Plain	B, C, D, S	8.7	0.064	854	B	0.174	0.063
	SMS Hill	S	9.1	0.096	606	C	0.193	0.072
	SMN Mt	S	9.1	0.096	624	C	0.177	0.066
	SN Mt	S	8.0	0.080	763	B	0.160	0.060

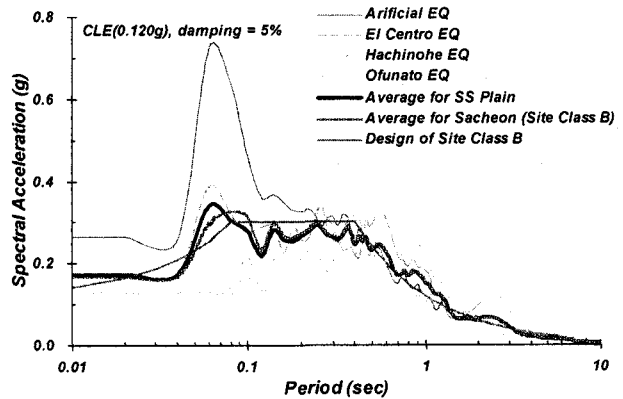
읍성은 역사적으로 지역 방어를 위해 축성되어 왔으므로 주로 산지나 구릉지를 끼고 위치해 있다. 따라서 일반적인 내륙 평야 지역에 비해 읍성 지역의 기반암은 대체로 얇게 분포해 있고, 그로 인해 T_G 는 작고 V_{s30} 은 클 수 있다. 본 연구 대상 읍성 부지의 경우도 T_G 는 약 0.06~0.16

초 그리고 V_{s30} 은 약 500~850 m/s로서 Sun 등(2005)이 조사했던 국내 내륙의 $T_G(0.1\sim0.4\text{초})$ 및 $V_{s30}(250\sim650\text{ m/s})$ 분포 범위와 비교해 볼 때 각각 하한 및 상한 부근의 값으로 결정되었다. 이러한 V_{s30} 의 분포 범위에 따라 기존 내륙 부지들이 대부분 C 또는 D 지반으로 분류된 것(Sun 등, 2005; 선창국 등, 2005)과는 달리, 읍성 부지는 B 또는 C 지반으로 분류되었다.

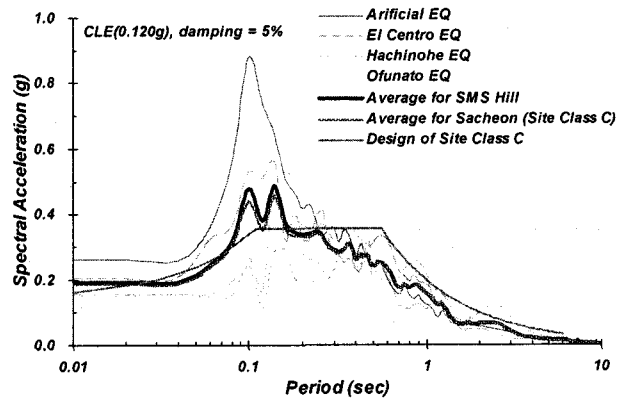
부지의 주기별 지진 응답 특성을 파악하기 위해 본 연구에서는 입력 지진파에 따른 지표면 가속도 응답 스펙트럼을 확인하였으며, 지진파의 주요 주파수 성분에 따라 동일 부지의 경우도 다소 다른 스펙트럼 형상을 보였다. 그림 4는 시추 조사와 공내 탄성과 시험이 수행되었고 각각 C와 B로 지반 분류된 해미의 HE Plain 및 사천의 SS Plain 부지 그리고 사천에서 지반 C로 분류된 SMS Hill 부지에 대한 CLE의 지표면 가속도 응답 스펙트럼을 도시한 것이다. 비교 목적으로 부지별 해당 지반 분류의 표준 설계 응답 스펙트럼을 함께 도시하였으며, 부지별 그리고 지역별 해당 지반 분류의 평균 스펙트럼도 제시하였다. 지진파별 응답을 그림 4에서 살펴보면, 다른 지진에 비해 인공 지진의 가속도 응답이 대상 부지의 고유 주기 부근에서 설계 스펙트럼보다 크게 증폭되고 있는 일관된 경향을 보이고 있으며, 이는 그림 3에서 확인할 수 있는 바와 같이 인공 지진의 경우 다른 입력 지진파와는 달리 읍성 부지의 고유 주기에 상응하는 고주파수(0.06~0.16초의 주기) 성분이 풍부하기 때문이다. 전체적으로는 지반 분류 C가 증폭이 거의 발생하지 않은 지반 분류 B에 비해 스펙트럴 가속도가 크게 나타났다. 또한, 지반 분류 C의 경우 지반 특성에 따라 지진 응답이 다르게 평가되었는데, 사천 읍성 부지에 비해 대체로 T_G 가 크고 V_{s30} 이 작은 해미 읍성 부지(표 1 참조)의 스펙트럴 가속도가 보다 주기가 긴 영역에서 크게 증폭되었다. 이와 같은 CLE에서의 지진 응답 특성



(a) 해미 HE Plain 부지(지반 분류 C)의 응답 스펙트럼



(b) 사천 SS Plain 부지(지반 분류 B)의 응답 스펙트럼



(c) 사천 SMS Hill 부지(지반 분류 C)의 응답 스펙트럼

그림 4. 읍성 부지의 지표면 가속도 응답 스펙트럼

그림 4. 읍성 부지의 지표면 가속도 응답 스펙트럼

의 경향은 OLE에서도 거의 일치하였다. 전체적인 응답 스펙트럼 비교 결과로 볼 때, 부지별 상대적인 응답 특성은 지반 조사로부터 평가된 지반 특성을 통해서도 개략적으로 예측 가능하였다.

4. 읍성 지역에 대한 부지 응답 특성의 정량적 분석

대상 부지들에 대한 지진 응답 해석으로부터 결정된 응답 스펙트럼과 설계 스펙트럼의 차이는 상대적으로 T_G 가 크고 V_{S30} 이 작은 해미 읍성 부지들(지반 분류 C)에서 컸으며, 이러한 차이는 현행 내진 설계 기준과 해미 읍성 지역과의 국부적 부지 효과 차이로부터 기인한 것이다. 부지 효과는 단주기 및 중장주기 지반 증폭 계수인 F_a 및 F_v 로 정량화되어 활용되고 있으며(Sun 등, 2005), 각각 지반 운동의 구조물 주기(T)별 지표면의 응답 스펙트럼(RS_{soil})대 암반 노두의 응답 스펙트럼(RS_{rock}) 비를 이용하는 식 (3) 및 식 (4)로부터 결정하게 된다.

$$F_a = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{0.4} \int_{0.1}^{0.5} \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rock}(T)} dT \quad (3)$$

$$F_v = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{1.6} \int_{0.4}^{2.0} \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rock}(T)} dT \quad (4)$$

여기서, R_{soil} 과 R_{rock} 은 각각 진원부터 지표면과 기반암 노두까지의 거리

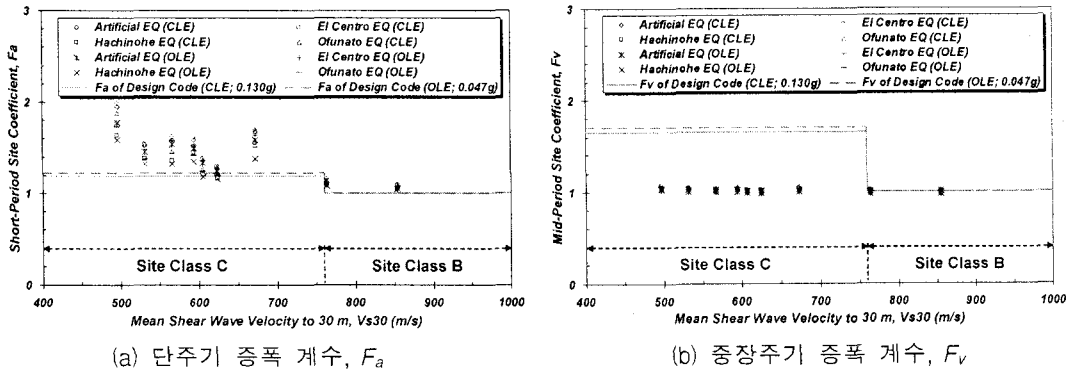


그림 5. 역사 지진 피해 읍성 지역의 V_{S30} 에 따른 지반 증폭 계수

읍성 대상 부지들의 F_a 와 F_v 를 산정하여 부지 효과를 정량적으로 평가하고, 현행 내진 설계 지반 분류 기준으로서의 지반 특성인 V_{S30} 에 따른 크기 분포 관계를 그림 5에 도시한 바와 같이 살펴보았다. 그림 5에는 현행 내진 설계 기준의 CLE(0.130g) 및 OLE(0.047g)에서의 지반 분류 B와 C의 지반 증폭 계수들도 비교 제시하였다. F_a 의 경우 Borchardt(1994)에 의해 이미 알려진 바와 같이 V_{S30} 의 증가에 따른 증폭 계수의 감소 경향을 확인할 수 있었으나, F_v 의 경우 그러한 감소 경향은 거의 나타나지 않았다. 또한, 지반 C로 분류된 읍성 부지의 경우 기존 국내 내륙 부지에서와 같이 F_a 는 현행 설계 기준에 비해 크게 그리고 F_v 는 작게 결정되었다(Sun 등, 2005; 선창국 등, 2005). 이러한 증폭계수의 차이는 지반 분류 C(그림 4(a) 및 4(c))의 응답 스펙트럼 비교 결과와도 대응되며, 국내 읍성 지역과 현행 내진 설계 기준의 근간인 미국 서부 지역의 부지 고유 지

진 응답 특성의 차이로 인한 것이다(Sun 등, 2005). 더불어 읍성 지역 부지의 단주기 증폭 지배 특성은 지진시 고유 진동수가 작은 성첩 구조물(맹승원, 2001)의 공진을 발생시킬 수도 있을 것으로 보이나, 읍성 지역에 대한 보다 정확한 역사 지진 세기 평가를 위해서는 본 연구에서 정량화한 부지 효과를 토대로 지반-성벽-성첩 시스템에 대한 종합적 분석이 필요할 것으로 판단된다.

5. 요약 및 결론

정량적인 역사 지진 피해 사례인 성첩 붕괴 기록이 존재하는 해미와 사천의 두 읍성 지역을 대상으로 부지 효과를 정량화하고자, 다양한 지반 조사를 수행하여 깊이에 따른 지층 구성 및 V_s 분포와 같은 지반 특성을 평가하고 등가선형 부지 응답 해석을 실시하였다. 조사된 지반 특성을 토대로 결정된 대상 부지들의 V_{s30} 는 500~850 m/s의 분포를 나타냈고, 그에 따라 대상 부지들은 지반 분류 C와 B로 구분되었다. 또한, 부지 고유 지진 응답에 관련된 T_G 는 0.06~0.16초의 단주기 분포를 보였으며, 이로 인해 지반 분류 C로 구분된 대상 부지의 경우 F_a 는 현행 내진 설계 기준 보다 크게 그리고 F_b 는 작게 결정되었다. 읍성 지역의 성첩 붕괴 사례들에 근거한 역사 지진 세기의 정량적 평가를 위해서는 부지의 단주기 증폭 특성과 성첩의 작은 고유 주기 특성의 상응에 따른 지진시 공진 가능성도 고려될 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구를 위한 한국 원자력안전기술원과 한국 지진공학연구센터의 연구 지원 및 협조에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 한국지질자원연구원, "지진 통합관측망 운영 및 신속경보 시스템 개발 연구 (부산-경남 지역)", 2004.
2. Sun, C. G., Kim, D. S. and Chung, C. K., "Geologic site conditions and site coefficients for estimating earthquake ground motions in the inland areas of Korea", Engineering Geology, Vol.81, No.4, 2005, pp.446-469.
3. 과학기술부, "지진세기의 정량적 평가 및 단층운동 해석 연구", 2000.
4. 泗川郡, "泗川邑誌", 1899.
5. 사천문화원, "泗川·昆陽邑誌", 1989.
6. 선창국, 양대성, 정충기, "서울 평야 지역에 대한 부지 고유의 지진 증폭 특성 평가", 한국지진 공학회 논문집, 제9권, 제4호, 2005, pp.29-42.
7. Idriss, I. M. and Sun, J. I., "User's Manual for SHAKE91: A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits, University of California, Davis, 1992.
8. Borcherdt, R. D., "Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification)", Earthquake Spectra, Vol.10, 1994, pp.617-653.
9. 맹승원, "성첩 모델의 진동대 실험과 역사 지진의 세기 평가", 석사학위논문, 서울대학교, 2001.