

경주 지역의 지반공학적 지진 민감도 분석

Analysis of Geotechnical Seismic Sensitivity in Gyeongju

방 은 석* ¹	Bang, Eun-Seok	선 창 국* ²	Sun, Chang-Guk
김 동 수* ³	Kim, Dong-Soo	정 충 기* ⁴	Chung, Choong-Ki
조 성 호* ⁵	Joh, Sung-Ho		

Abstract

The earthquake hazard has been evaluated for 10km by 10km area around Gyeongju, which is located near Yangsan fault and has abundant historical earthquake records. The ground motion potentials were determined based on equivalent linear analysis by using the data obtained from in situ and laboratory tests and the El Centro earthquake record scaled to CLE and OLE levels of the region. The in situ tests include 9 boring investigations, 2 crossholes, 7 downholes, 13 SASW tests, and in the laboratory, X-ray diffraction and weathering state analyses and resonant column tests were performed. The peak ground accelerations range between 0.158g and 0.286g on CLE level and between 0.067g and 0.116g on OLE levels, respectively, showing the good potential of amplification in the deep alluvial layer which is common in Gyeongju area. The response spectrum based on the Korea Design Guide sometimes underestimated the motion, particularly near the natural period of the site, and the importance of site-specific analysis and the need for the improved site categorization method were introduced.

요 지

역사적 지진 발생 기록이 풍부하고 양산 단층 영향권 내에 있어 지진 발생 가능성이 높은 경주 지역을 대상으로 지진 민감도 분석을 수행하였다. 지형적 특성을 고려한 지반조사와 현장 및 실내 시험을 통하여 대상 지역 지반의 지층 구성과 각 지층의 동적 특성을 분석 평가하고, 이를 토대로 한 지반 응답 해석을 수행하였다. 9개의 시험공을 시추하여 2개소의 크로스홀 시험과 7개소의 다운홀 시험을 실시하였고, 시추부지 포함 13개소에서 SASW 시험도 수행하였다. X선 회절 및 풍화도 분석과 공진주 시험 등의 실내시험도 병행하였다. 이러한 시험 결과를 바탕으로 El Centro 지진에 의한 지표면 최대 가속도를 등가 선형 부지응답해석을 통해 평가한 결과 붕괴방지 수준에서 0.158g~0.286g, 기능수행 수준에서 0.067g~0.116g의 분포를 보였고 퇴적층에 의하여 형성된 경주 시가지 분지 지형에서 증폭정도가 심하다는 것을 알 수 있었다. 해석 결과로 볼 때, 현행 건교부 기준 설계응답스펙트럼은 경우에 따라 지반 운동을 과소평가하고 지반 고유의 공진 현상을 고려하지 못하였다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 개선된 지반 분류방법을 소개하였고 부지고유의 지반응답평가의 중요성에 대해 제시하였다.

Keywords : Seismic sensitivity, Seismic test, Shear wave velocity, Ground response analysis, Seismic guideline, Site categorization

*1 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 석사과정
*2 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정
*3 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수
*4 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수
*5 정회원, 중앙대학교 토목환경공학과 조교수

1. 서론

인간이 직접적으로 체험하고, 재산과 인명의 피해를 유발시키는 지표면에서의 지진동은 진앙에서 지진이 발생한 후 전파되면서 감쇠 또는 증폭되어 나타난 결과이며, 그 전달매체인 지반의 특성에 크게 영향을 받게 된다. 즉 지진이 발생하였을 때 진앙으로부터 동일한 거리에 있는 지역이라도 구성 지반 특성에 따라 지표면에서의 지진하중 크기는 매우 다르게 나타난다. 특히 지진하중은 단단한 매질인 기반암에서 보다 그 상부의 연약한 매질인 토사층에서 크게 증폭되어 나타나게 된다. 이러한 지진 피해 규모에 대한 지반 특성 영향의 중요성을 인식하게 되면서 최근 효율적이면서 차별적 지진 대책 수립을 위하여 지반 특성에 따른 지역별 지진 민감도 분석과 이를 GIS등을 이용하여 정보화하는 연구가 추진되고 있다(Kiremidjian, 1997).

한편 이러한 지진시 지반의 영향에 대한 연구는 지진 기록이 일천한 우리나라에서 지진운동의 세기를 정량적으로 평가하는데 활용할 수 있다. 역사 기록의 피해 상황에 근거하여 지표면의 지진동을 평가하고, 발생 지역의 지반 특성을 조사 분석한 후 그 영향을 여과함으로써 기반암에서의 지반운동 세기를 정량적으로 평가할 수 있다. 이렇게 평가된 지반운동의 세기는 내진공학적 측면에서 우리나라 설계 지반운동 세기를 정하는데 중요한 참고자료로 활용될 수 있다.

본 연구에서는 지반공학적 관점에서의 지역별 지진민감도 평가의 일환으로, 역사적 지진 발생 기록이 풍부하고, 양산 단층 영향권 내에 있어 지진 발생 가능성이 높은 경주 지역을 대상으로 연구를 수행하였다. 지형적 특성을 감안한 지반조사와 현장 및 실내시험을 통하여 대상 지역 지반의 지층 구성과 각 지층의 동적 특성을 분석 평가하고, 이를 토대로 한 지반응답해석을 수행하여 경주 지역의 지반공학적 지진민감도를 분석하였다.

2. 지질 및 지형 특성

연구대상 지역인 경주가 속하는 경상분지는 중생대 쥐라기 후기의 대보 조산운동 이후부터 백악기에 걸쳐 형성된 육성 퇴적분지로서 퇴적암과 광범위한 화산 활동에 의한 화산암류 및 이를 관입한 화강암류로 구성되어 있다. 본 연구의 대상 지역인 경주는 화강암류가 주 구성 암층을 이루며, 부분적으로 퇴적암류와 화산암류가 분포한다. 퇴적암류는 사암과 셰일로 이루어져 있으며, 퇴적암이 화강암

의 관입에 의한 접촉 열변성작용을 받은 혼펠스도 존재한다. 화산암류는 하위의 안산암질 암류와 상위의 유문암질 암류로 구분되고, 이들 화산암류 사이에는 응회암질의 역암, 사암, 셰일이 협재한다. 화강암류는 화강섬록암, 흑운모 화강암, 각섬석화강암 등으로 구분되며, 이들 암석의 구성 광물은 석영, 사장석, 흑운모, 각섬석 등으로 변질작용이 활발하게 이루어졌다. 일반적으로 암층 노두의 양상은 풍화가 많이 진행되어 있는 상태이다. 또한, 경주 인근의 포항, 구룡포, 감포 및 울산지역에서는 제3기의 해성 및 육성 퇴적암류와 화산암류가 경주 일대의 지층들과 부정합 및 단층으로 접촉한다. 이로 인해 과거 지진 활동이 활발했으며, 추후 지진 활동의 가능성이 매우 높을 것으로 예측된다.

경주 지역은 평야와 낮은 구릉 지역에 형성된 시가지와 인근 전답 지역을 주변 산들이 둘러싸고 있는 분지로 이루어져 있으며, 산을 끼고 흘러나온 여러 지천이 중심부의 현산강과 합류하여 흐른다(그림 1). 현재 분지 내의 여러 하천들은 인간의 거주를 위한 치수대책으로 인하여 좁은 유역으로 한정되어 있지만, 역사 기록(이강래, 1998)에 의하면 건국 초기부터 분지를 횡단하는 북천의 잦은 범람으로 인해 민가가 침수되거나 떠내려 가는 피해가 빈번할 정도로 홍수시에는 경주 분지 대부분이 하천의 대상 유역이었다고 한다. 따라서 전체 경주 지역의 지형 및 지반은 하천에 의한 영향을 크게 받아 두꺼운 충적층이 기반암 상부에 존재할 가능성이 있다.

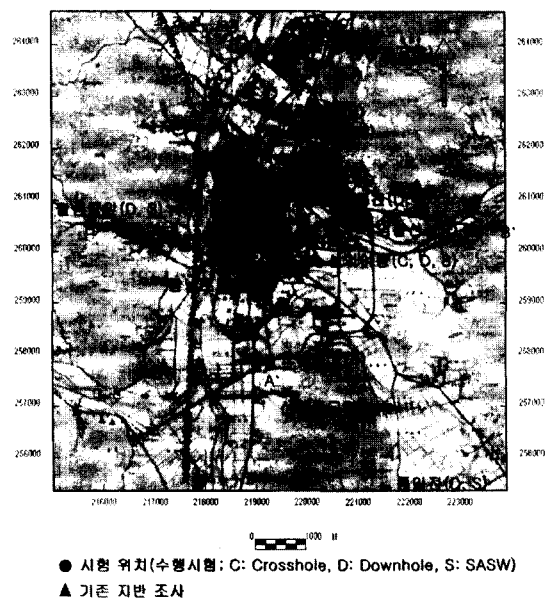


그림 1. 대상 지역의 지반 조사 위치 및 수행 시험 내력

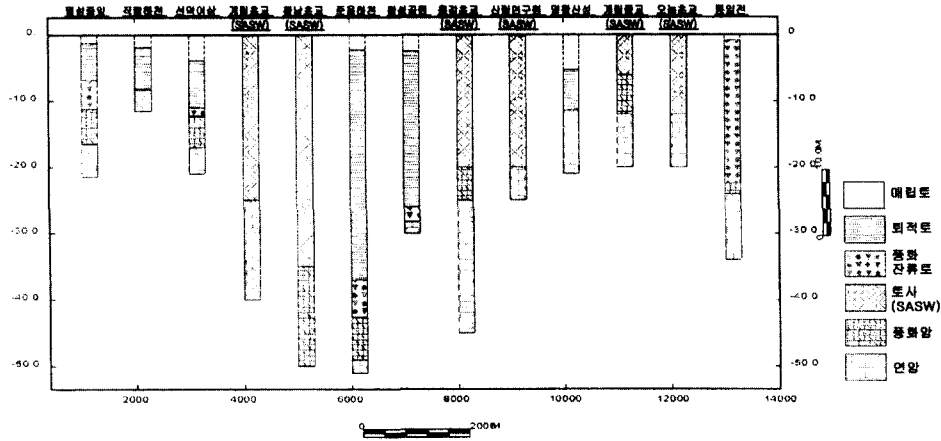


그림 2. 지반조사 위치별 지층 구성

3. 지반 조사 및 시험

경주 지역의 지반공학적 지진 민감도 분석을 위하여 현장과 실내에서 다양한 조사 및 시험을 수행하였다. 분석 대상 지역은 경주 역사 유적지와 현시가지를 포함하는 시계 내의 10×10km 부지로 선정하였다. 대상 지역의 지반 특성을 평가하기 위하여 현장에서는 시추 조사 및 탄성과 시험을 통하여 지반 조사를 수행하였다. 지반 조사는 대상 지역의 지형 변화를 고려하여 하천 2개소, 구릉 4개소, 그리고 평야 7개소의 총 13개소에서 수행되었다. 총 7개소에서 9공의 시추 조사를 실시하였고, 탄성과 시험은 7개소의 다운홀시험, 2개소의 크로스홀시험 그리고 13개소의 SASW 시험으로 구성된다. 한편, 대상 부지 내에서 기 수행된 135공의 지반 조사 자료를 수집하여 지반 특성 파악에 활용하였다. 대상 지역에서 수집된 기존 지반 조사 자료와 본 연구에서 수행한 지반 조사의 위치 및 위치별로 수행된 탄성과 시험 내용은 그림 1과 같다.

실내에서는 현장에서 채취한 시료를 이용하여 광물 구성 성분 파악을 위한 X-선 회절 분석과 광물학적 방법을 이용한 풍화도 판단 시험을 실시하였다. 이와 더불어 흙의 기본 물성치 시험과 강도 정수 결정을 위한 직접단시험을 수행하였으며, 대상 지반의 동적 특성 평가를 위하여 공진주 시험을 병행하였다.

4. 지층 구성 및 지반 특성

시추 조사와 현장 탄성과 시험 결과를 종합적으로 분석한 결과 나타난 경주 지역의 지층 구성은 그림 2와 같다. 시추 부지에서의 지층 구분은 풍화잔류토와 풍화암의 경우

표준관입 시험의 N치 50/15를 기준으로 결정하였으며, 풍화암과 연암의 경우 굴진성 및 육안 판별로 결정하였다. 또한, SASW 시험 부지에서는 시추 부지의 지층과 전단파속도의 관계 분석을 통한 기준을 설정하여 지층을 구분하였다. 지진민감도 평가에 중요한 요소인 토사층의 심도는 외곽 산지를 제외한 경주 시가지를 중심으로 한 분지 내의 지역에서 10m~40m이며, 풍화대에 의한 잔적층 보다는 자갈 및 모래의 퇴적층 위주로 구성되어 있다. 이는 지형적 특성에서 설명한 바와 같이 경주 분지 내의 여러 하천에 의한 영향으로 분석된다. 따라서 우리나라 국토 대부분의 표토층을 구성하는 풍화잔류토 지역과 다르게 퇴적에 의한 토사층이 깊게 분포하므로, 신라의 문화 유적지가 포함된 경주시 지역은 지진파의 증폭 가능성이 높은 지진 취약지구로 분류될 수 있다.

경주 분지의 지질 반층(Basin)의 분포를 조사하기 위하여 그림 1에 표시된 분지내 남북(AA') 및 동서(BB') 단면상의 지층 구성과 함께 풍화암 및 연암 경계선을 그림 3과 그림 4에 도시하였다. 매우 제한된 지반조사 결과만을 활용하였기 때문에 정확한 결과를 제시하기는 어렵지만 동서 단면의 경우 지형적 특성과 일치하는 지질 반층의 개략적 형상을 얻을 수 있었다. 그러나 남북 단면의 경우 현재의 결과만으로 지질 반층의 형상을 예측하기에는 암반의 경계선이 너무 불규칙하게 나타나 있다.

광물학적 성분 파악을 위한 X-선 회절 분석 결과에 의하면 경주 지역의 지반은 모암인 화강암의 주구성 광물인 Quartz, Feldspar의 일종인 Orthoclase, 그리고 Mica의 일종인 Biotite가 주류를 이루며, 위치에 따라 Chlorite, Kaolinite, Montmorillonite와 같은 점토 광물도 확인되었다. 이와 더불어 토질 상태의 광물 구성을 현미경을 이용,

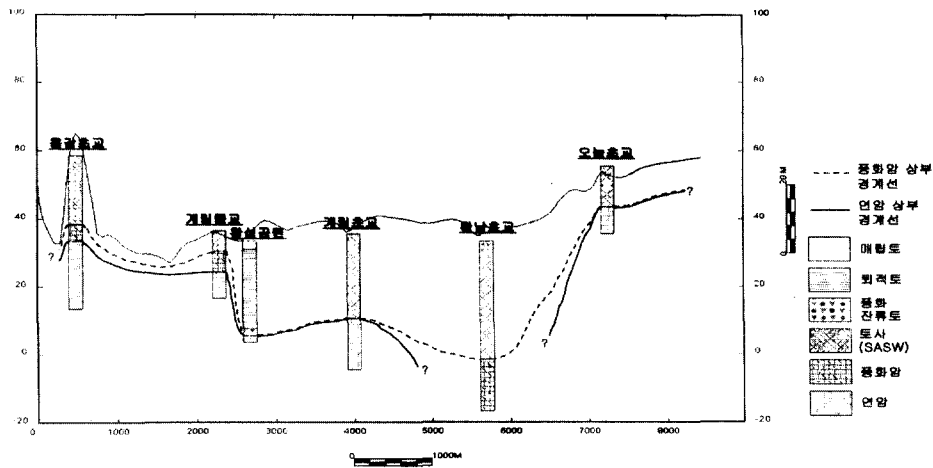


그림 3. 남북(AA') 단면의 지층 구성 및 지표고

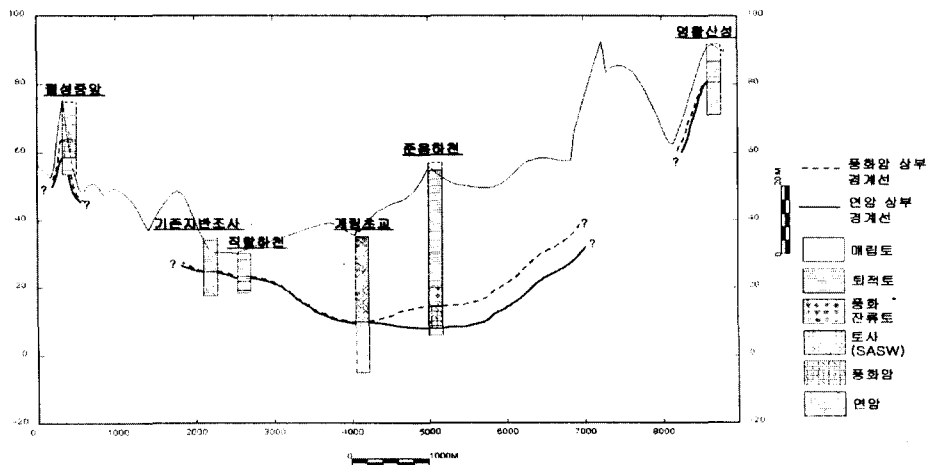


그림 4. 동서(BB') 단면 지층 구성 및 지표고

육안 측정하여 풍화도 지수 X_d 를 결정하였다(Lumb, 1962). 결정된 풍화도 지수는 풍화대 상부의 풍화잔류토에서는 0.6, 하부의 풍화암에서는 0.4 정도의 값을 보였다.

시추조사에서 얻은 흙에 대한 기본 물성시험과 직접전단시험을 수행하여 지반의 대표적인 특성을 얻었다. 퇴적토는 주로 GP, GM, SP, SW, SM과 같이 자갈이나 모래가 우세한 흙으로 분류되었고 마찰각은 $30 \sim 45^\circ$, 점착력은 $0.0 \sim 0.4 \text{ kg/cm}^2$ 의 범위를 나타냈다. 풍화잔류토는 주로 SW나 SM으로 분류되었고 마찰각은 $34 \sim 50^\circ$, 점착력은 $0.0 \sim 0.3 \text{ kg/cm}^2$ 의 범위를 나타냈다.

그림 5와 그림 6은 채취한 시료를 현장 조건(밀도, 함수비)에 따라 재성형하여 공진주 시험을 실시한 결과로서 대표적인 퇴적토와 풍화잔류토의 전단변형률에 따른 정규화 전단탄성계수(G/G_{max}) 및 감쇠비(D)곡선이다. 시험 결과는 지층별로 조사 위치와 구속압에 관계없이 대체로 유

사한 경향을 보였으며, 이 결과를 종합하여 경주 지역의 지반응답해석을 위한 퇴적토와 풍화잔류토 지층의 정규화 전단탄성계수 및 감쇠비의 대표 곡선을 결정하였다(그림 5, 그림 6). 공진주 시험의 특성상 전단변형률 0.1% 이상에서는 지반 동적 물성의 획득이 불가능하여, 전단변형률에 따른 정규화 전단탄성계수의 대표 곡선 제안시 Ramberg-Osgood 모델을 이용하여 전단변형률 1%까지의 Best Fit 곡선을 결정하였다.

경주 지역에서 수행한 탄성과 시험을 이용한 지반의 전단파 속도 분포는 시험 방법에 따라 다소 다를 수 있다. 일반적으로 시험 방법별로 볼 때, 크로스홀, 다운홀, SASW 시험의 순서로 신뢰성이 높은 것으로 알려져 있으며, 3종류의 시험이 모두 수행된 곳에서는 크로스홀시험의 결과를 기준으로 전단파속도를 결정하였으며, 다운홀시험이 수행된 부지에서는 다운홀시험의 결과를 바탕으로 전단

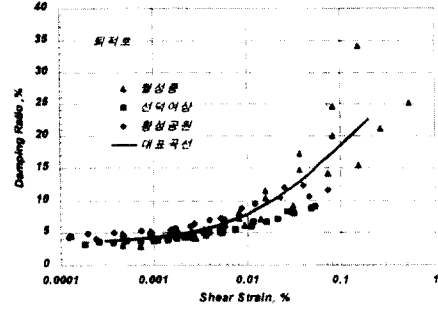
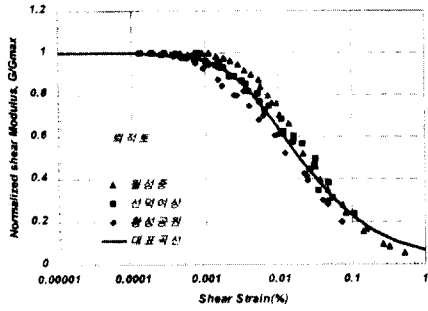


그림 5. 퇴적토의 공진주 시험 결과 및 대표 곡선

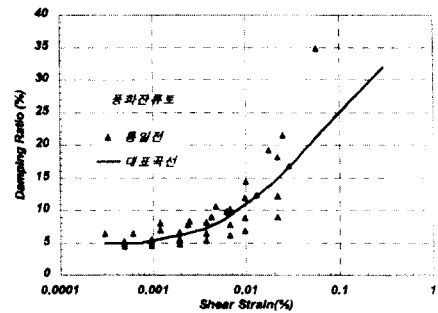
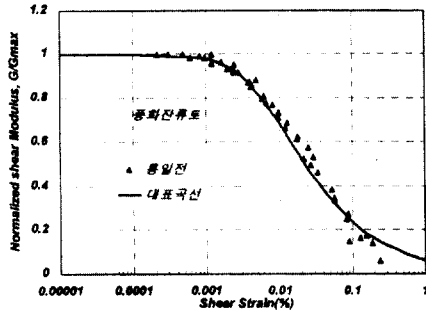


그림 6. 풍화잔류토의 공진주 시험 결과 및 대표 곡선

파속도를 결정하였다. 그러나 경주지역 지반의 경우 파쇄 대가 많고 자갈질 퇴적층으로 인한 전파에너지 감쇠로 인하여 깊은 심도에서는 크로스홀 및 다운홀시험의 수행이 불가능하였기 때문에 깊은 심도에서와 SASW시험만 실시된 부지에서는 SASW시험의 결과를 이용하여 전단파속도를 결정하였다. 이와 같은 방법으로 결정한 대표적인 전단파속도(V_s) 분포는 그림 7과 같다. 지반의 국지적인 토질 및 지질 조건과 지표면 및 지하 지형이 지반 운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 건설교통부 내진설계 기준연구(II)(1997)에서는 지반을 지진 민감도에 따라 6종으로 분류하였다. 건설교통부 기준의 분류 기준에 따라 현장 탄성과 시험으로 결정한 상부 30.48m의 평균 전단파속도(\bar{V}_s)를 이용하여 경주지역의 지반을 분류한 결과, 대부분이 Sc(매우 조밀한 토사 또는 연암지반; $360\text{m/s} < \bar{V}_s \leq 760\text{m/s}$)와 S_D(단단한 토사지반; $180\text{m/s} < \bar{V}_s \leq 360\text{m/s}$)지반으로 나타났다.

5. 지진 민감도 분석

5.1 지반 응답 해석

본 연구에는 1차원 지반응답특성 평가 기법 중 등가선

형 해석기법을 적용하는 프로그램인 SHAKE91을 사용하였다. 경주지역의 지진에 대한 민감도 분석을 위해서는 대상 지역의 설계 지반운동으로부터 기반암 가속도가 결정되어야 한다. 일반적으로 설계 지반운동의 크기는 역사지진 기록을 근거로 한 지진위험도 분석을 기초로 하여 결정된다. 건설교통부 내진설계 기준연구에서는 행정구역의 구분에 따른 결정 방법과 보다 정확한 설계 지반운동 결정을 위하여 지진 재해도에 의한 방법을 제안하고 있다. 본 연구에서는 지진 재해도로부터 경주지역 보통암 지반의 설계 지반운동 수준을 산정하였고, 그 값은 1등급 구조물 붕괴방지수준의 경우 0.14g, 기능수행수준의 경우 0.05g에 해당한다.

1차원 부지응답특성 평가에 필요한 해석 부지의 층상 구조 및 입력지반자료는 지반조사 결과를 종합적으로 검토하여 결정하였고, 기반암 깊이의 결정은 보통암(지반 분류 S_B)의 전단파 속도(760m/sec 이상)를 가지는 층을 기반암으로 결정하였다. 각 부지의 기반암 심도는 표 1과 같으며, 시추조사 결과로 볼 때 일부 풍화암이나 연암지반이 기반암에 해당되었다.

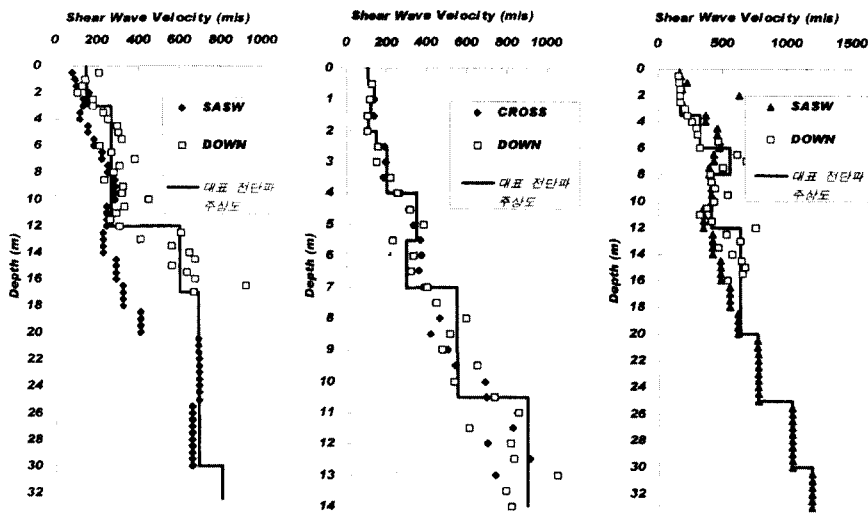
해석 대상부지의 최대 전단탄성계수는 현장 탄성과 시험으로 결정한 전단파 속도로부터 결정하였고 풍화잔류토와 퇴적토층의 전단변형률 크기에 따른 정규화 전단탄성계

수 및 감쇠비 곡선은 공진주 시험의 결과를 이용하였다. 그러나 시료가 확보되지 못한 매립토의 정규화 전단탄성계수 및 감쇠비 곡선은 일반적인 국내 산토의 대표곡선을 사용하였고 실험이 불가능한 암반의 대표곡선은 SHAKE91에서 제안하고 있는 곡선을 이용하였다(Idriss, 1992).

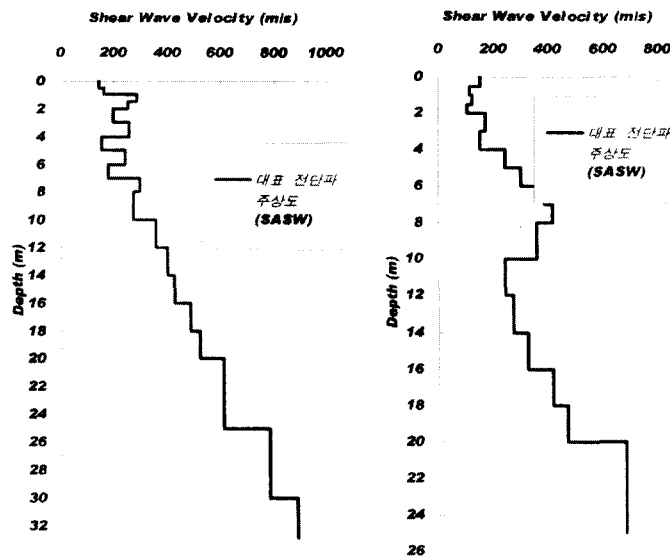
경주지역은 해안지역이 아니고 내륙지역이므로 입력 지진으로 실제로 내륙에서 발생한 El Centro 지진의 가속도 시간 이력(그림 8)을 사용하였다. 여기서 시간영역 최대 가속도 수준(PGA: Peak Ground Acceleration)은 지진 재해도를 참고하여 경주지역의 1등급 구조물 붕괴방지수준(0.14g) 및 기능수행수준(0.05g)에 적합하도록 설계 지반운동 수준을 조절하여 사용하였다.

5.2 해석 결과

경주 지역의 다양한 부지에 대한 지반응답해석을 수행하여 표 1과 같이 1등급 구조물 설계시 기반암 가속도 및 지표면 최대가속도를 결정하였다. 붕괴방지수준의 경우 보통암 지반의 설계지반 가속도 0.14g에 비해 각 부지의 지표면 최대가속도는 0.158g~0.286g의 분포를 보이고, 기능수행수준의 경우 보통암 지반의 0.05g에 비해 0.067g~0.116g의 분포를 보인다. 이는 지반의 종류에 따라 최대 2.3배의 증폭 가능성이 있음을 나타낸다. 그리고 그림 9를 보면 알 수 있듯이 퇴적층에 의하여 형성된 경주시가지 분지 지형에서 증폭정도가 심하다는 것을 알 수 있다.



(a) S_c지반(통일전, 선덕여상, 황성공원)



(b) S_d지반(용강초교, 산림연구원)

그림 7. 경주지역의 대표적 S_c 및 S_d 지반의 탄성과 시험을 통한 전단파 주상도 결정

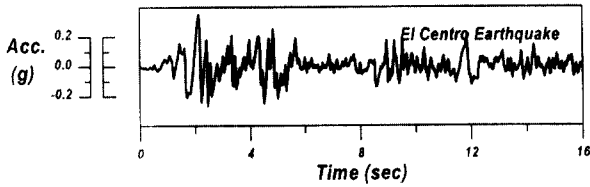


그림 8. El Centro 지진의 시간영역 가속도 이력곡선

그림 10과 그림 11은 통일전 부지의 1등급 구조물 붕괴 방지수준에 대한 해석 결과이다. 그림 10의 깊이별 해석 결과를 살펴보면 지표면 근처에서 지반 증폭현상이 크게 발생함을 알 수 있고, 등가 전단변형률 역시 지표면 근처의 지반 가속도 증폭이 크게 발생한 심도에서 커짐을 알 수 있다. 그림 11에서는 기반암과 지표면 자유장운동의 응답 스펙트럼을 도시하였으며, 기반암 가속도에 비하여 지표면 가속도가 크게 증폭된 것을 확인할 수 있다.

건설교통부 내진설계 기준을 따라 지반을 분류할 경우, 부지의 기반암 깊이를 고려하지 않고 깊이 30.48m까지의 평균 전단파속도만을 기준으로 S_A 지반부터 S_E 지반까지 분류한다. 통일전 부지의 경우 평균 전단파속도가 372m/s로 S_C지반으로 분류되나 S_C지반의 전단파속도 영역이 360m/s~760m/s임을 감안하면 거의 하한치에 가깝다. 그림 11은 S_C지반으로 분류된 통일전 부지의 붕괴방지수준



그림 9. 지표면 가속도(붕괴방지수준, 타원내: 지반 증폭정도가 심한 곳)

에 대한 해석결과와 S_C 및 S_D 지반의 표준응답스펙트럼과 비교한 것이다. 이 경우 부지응답해석에 대한 해석 결과는 S_C 보다는 S_D 지반의 표준응답스펙트럼과 비슷함을 알 수 있다. 이러한 결과는 통일전 부지의 평균 전단파속도가 S_C 지반의 하한선 부근에 해당되어 S_D 지반에 가깝기 때문인 것으로 분석된다. 표 1에 의하면 깊이 30.48m까지의 평균 전단파속도에 의한 지반 분류에서 S_C지반과 S_D지반의 경계에 해당하는 경우가 많이 발견되며, 대부분의 우리나라

표 1. 경주지역 1등급 구조물의 1차원 부지응답특성 평가 결과

(El Centro형 지진: 붕괴방지수준 기반암노두 가속도 0.14g, 기능수행수준 기반암노두 가속도 0.05g)

부지	기반암 깊이, H(m)	상부 30.48m 평균 Vs (m/sec)	지반 분류	공진주파수			기반암 가속도(g)		지표면 가속도(g)	
				f=Vs*/4H	SHAKE		붕괴방지	기능수행	붕괴방지	기능수행
					붕괴방지	기능수행				
직할하천	8	661.1	S _C	8.8	10.3	11.3	0.136	0.049	0.244	0.088
선덕여상	11	428.7	S _C	5.4	6.3	7.3	0.130	0.047	0.286	0.116
월성중고	18	381.4	S _C	3.7	5	5.8	0.125	0.045	0.165	0.075
통일전	31	372.0	S _C	3	3.5	4.1	0.116	0.042	0.218	0.090
준용하천	45	365.7	S _C	2	2.5	3	0.102	0.037	0.229	0.092
황성공원	28	455.6	S _C	3.7	4.9	5.4	0.124	0.045	0.276	0.102
명활산성	16	357.1	S _D	3.8	3	4	0.125	0.045	0.183	0.087
산림연구원	25	346.7	S _D	3	2.5	3.4	0.120	0.043	0.180	0.086
오능초등학교	14	559.5	S _C	6.7	7	7.9	0.131	0.047	0.224	0.074
용강초등학교	30	358.5	S _D	3	2.6	3.5	0.120	0.042	0.223	0.091
황남초등학교	50	412.0	S _C	3.4	1.9	2.3	0.086	0.032	0.169	0.058
계림초등학교	25	420.4	S _C	3.8	3.3	4.2	0.110	0.043	0.158	0.067
계림중학교	14	640.6	S _C	7.3	9.6	10.2	0.131	0.047	0.226	0.081

Vs*: 기반암 깊이까지의 평균 Vs

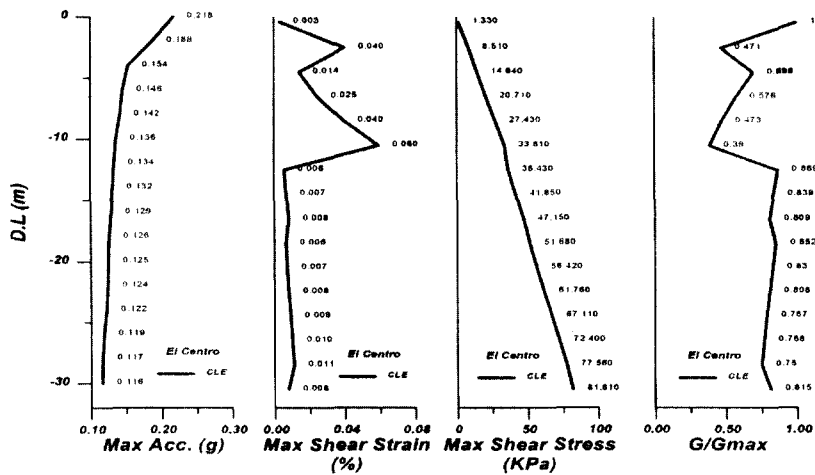


그림 10. 깊이별 최대가속도, 전단변형률, 전단응력과 전단탄성계수비 (통일전, El Centro형 지진, 0.14g)

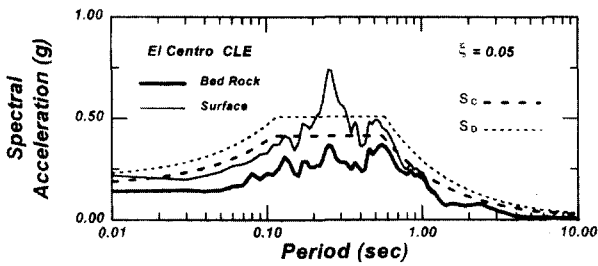


그림 11. 기반암과 지표면 자유장 응답스펙트럼 (통일전, El Centro형지진, 0.14g)

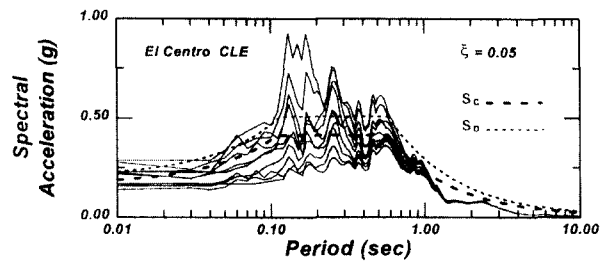


그림 13. Sc 지반의 지표면 자유장 응답스펙트럼 (El Centro형 지진, 0.14g)

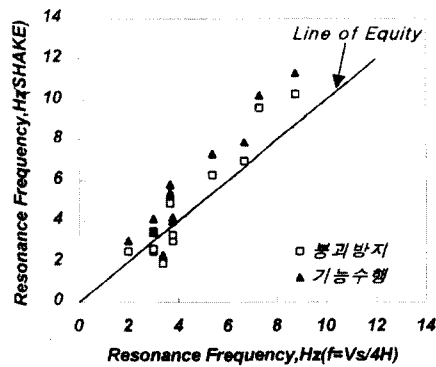


그림 12. 간편식($f=V_s/4H$)과 SHAKE 결과에서의 공진주파수의 비교

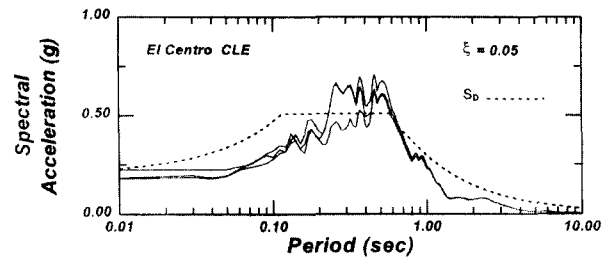


그림 14. Sd 지반의 지표면 자유장 응답스펙트럼 (El Centro형 지진, 0.14g)

지반은 평균 전단파 속도가 300m/s에서 600m/s 정도임을 감안할 때 건교부 기준에 의한 지반 분류보다는 평균 전단파 속도가 300m/s에서 600m/s 구간에서는 지반 분류를 더 세밀하게 하거나 평균 전단파속도를 직접 사용하여 증폭에 따른 지진계수를 획득하고 표준응답스펙트럼을 산출하는 방안이 지반 분류 경계에서의 모호함을 제거해 주리라 판단된다. Borchardt는 다양한 지반에 대하여 1989년도 Loma Prieta 지진에 의한 지반과 암반에서의 푸리에 스펙

트라(fourier spectra)의 비를 이용하여 장주기 및 단주기 증폭계수를 지반의 평균 전단파 속도에 대한 관계식으로 책정해 놓고 95% 신뢰도 구간에 한하여 지반분류를 한 바 있다(Dobry 등, 1999). 이런 방안을 뒷받침하기 위해서는 정확한 지반의 전단파 속도 추상도를 산출하기 위한 탄성파 시험의 확립이 필요하고 같은 평균 전단파속도를 가지는 지반일지라도 지반의 특성과 지진의 종류에 따라 응답스펙트럼의 특성이 달리 나타나는 경우에 대한 연구도 동반되어야 할 것이다. 그림 11에 의하면 주기 0.2~0.3초 부근에서 계산된 응답스펙트럼이 건교부 표준응답스펙트럼의 값보다 크게 증폭된 것을 알 수 있다. 이는 부지의 층

상구조, 동적 물성치, 입력지진파에 따른 공진 형상으로 건교부 기준 표준응답스펙트럼은 이 현상을 적절히 반영하지 못함을 알 수 있다. 따라서 중요구조물의 설계를 위해서는 부지고유의 지반응답 평가가 필요하며, 최소한 기반암까지의 깊이와 평균 전단파속도를 바탕으로 공진 영역의 산정이 요구된다.

그림 12는 간편식($f=Vs/4H$)을 통해 얻은 부지의 공진주파수와 붕괴방지 및 기능수행수준에 대해서 SHAKE 해석 결과로부터 얻은 공진주파수를 비교한 것이다. 그림 12를 보면 SHAKE 해석의 지반 전달함수에서 획득한 공진주파수가 간편식에서 얻은 공진주파수에 비해 공진주파수가 큰 부지에서는 다소 큰 값을 보이나, 공진주파수가 작은 부지에서는 거의 일치하고 전반적으로 경향이 1:1선에 근접한 것을 볼 수 있다. 그러므로 기반암까지의 깊이와 평균 전단파 속도를 바탕으로 산정한 공진 영역의 도출만으로도 그 부지의 공진영역을 어느 정도 파악할 수 있다. 전반적으로 붕괴방지 수준보다 기능수행 수준의 지진강도에서의 지반의 공진주파수가 더 큰 것을 볼 수 있는데, 일반적으로 어떤 시스템의 공진주파수는 그 시스템의 강성의 제곱근에 비례한다고 볼 때 지반이 비선형 거동을 하기 때문에 규모가 큰 지진에 대해서는 큰 변형구간에서 더 작은 전단 강성을 가지게 되고 그에 따라 공진주파수는 작아지게 된다.

그림 13은 본 연구에서 수행한 13개의 부지 중 S_c 지반에 해당하는 10개 지반의 지표면 자유장 응답스펙트럼과 S_c 및 S_D 지반의 표준응답스펙트럼을 함께 도시한 것이다. 해석 결과 대부분 S_c 지반의 표준응답스펙트럼보다 크게 산정되었고, 4개의 부지에서는 S_D 지반보다도 공진주파수 대역에서 증폭이 크게 일어남을 알 수 있다. 그림 14는 S_D 지반에 해당하는 3개 부지의 지표면 자유장 응답스펙트럼을 도시한 것이다. 3개 부지 모두 표준응답스펙트럼보다 특정주파수 대역에서 증폭이 크게 일어남을 알 수 있고, 공진주파수 대역이 장주기 대역으로 이동함을 알 수 있다.

6. 결론

지진피해 기록이 빈번하고 지진 발생 가능성이 큰 경주 지역의 지반에 대한 지진 민감도 분석을 위하여 다양한 부지를 대상으로 현장 지반 조사 및 실내 시험을 이용한 지반 특성 평가와 이를 통한 지반 응답 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 경주 지역의 지층은 시가지를 중심으로 대부분의 지역에서 하천의 범람에 의해 형성된 퇴적층이 상당히 깊은

- 심도까지 발달해 있으며, 현장 탄성파 시험으로 결정된 전단파속도를 이용한 지반 분류는 S_c 및 S_D 로 나타났다.
- (2) 현행 건교부 기준을 따라 1등급 구조물에 대한 지반응답 해석을 수행한 결과, 붕괴방지수준과 기능수행수준에서 지표면 최대가속도가 각각 0.158g~0.286g 및 0.067g~0.116g 범위에 분포하였다. 제한된 자료에 의한 분석이지만 퇴적층에 의하여 형성된 경주 시가지 분지 지형에서 증폭정도가 심하였다.
- (3) 부지고유의 지진응답해석 결과와 건교부 지반 분류에 의한 응답스펙트럼은 차이를 보였다. 지반 분류시 상부 30.48m의 평균 전단파속도를 이용할 경우 S_c 지반과 S_D 지반의 경계부근에 해당하는 경우가 많았으며, 공진주파수 부근에서 건교부 응답스펙트럼이 과소 평가 되었다. 따라서 평균 전단파속도를 스펙트럼 작성을 위한 계수 산정시 직접 적용하는 기법과 기반암 깊이를 고려한 지반의 고유주기 평가기법이 포함될 필요성이 있다.

감사의 글

본 연구는 '99 원자력 연구 개발 중장기 계획 사업의 지원에 의한 "지진세기의 정량적 평가 및 단층운동 해석 연구" 과제에 수행된 것임을 밝히며, 연구에 협조해 주신 경주시청과 (주)도화지질에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 건설교통부(1997), "내진설계기준연구(II)".
2. 김동수, 이진진, 윤종구(1999), "부지 고유의 지반 거동 평가", 한국지진공학회 논문집, Vol. 3, No. 4, pp. 1-10.
3. 이강래(1998), "삼국사기 I, 김부식", 한길사.
4. Dobry, R., Ramos, R. and Power, M. S.(1999), "Site Factors and Site Categories in Seismic Codes" Technical Report MCEER-99-0010.
5. Idriss, I. M. and Sun, J. I.(1992), "User's Manual for SHAKE91", Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, Davis.
6. Kiremidjian, A. S.(1997), "Spatial Analysis in Geotechnical Earthquake Engineering", Spatial Analysis in Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Geotechnical Special Publication No. 67, pp. 1-14.
7. Lumb, P.(1962), "The Properties of Decomposed Granite", Geotechnique, Vol. 12, No. 3, pp.226-243.
8. Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.(1972), "SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response of Horizontally Layered Soils", Report no. EERC/72-12, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley.
9. Tateiwa, I.(1928), "Geological Atlas of Chosen, No. 10", Geological Survey of Chosen.

(접수일자 2000. 9. 15)