

경주 지역의 지반공학적 지진 민감도 분석 Analysis of Geotechnical Seismic Sensitivity in Kyeongju

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

ABSTRACT

The earthquake hazard has been evaluated for 10km by 10km area around Kyeongju, 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 of the region. The in situ tests include 9 boring investigations, 2 crosshole, 7 downhole, 13 SASW tests, and in the laboratory, X-ray diffraction analyses and resonant column tests were performed. The peak ground accelerations range between 0.140g and 0.286g on CLE and between 0.051g and 0.116g on OLE, respectively, showing the good potential of amplification in the deep alluvial layer which is common in Kyeongju area. The response spectrum based on the Korea design guide was sometimes underestimate the motion, particularly near the natural period of the site, and the importance of site-specific analysis and need for the improved site categorization method were introduced.

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 지진하중의 크기는 크게 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.

한편 이러한 지진에 대한 지반의 영향에 대한 연구는 지진 기록이 일천한 우리나라에서 지진운동의 세기를 정량적으로 평가하는데 활용할 수 있다. 역사 기록의 피해 상황에 근거하여 지표면 지진동을 평가하고, 발생 지역의 지반특성을 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.

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정
** 한국과학기술원 토목공학과 석사과정
*** 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수, 정회원
**** 한국과학기술원 토목공학과 부교수, 정회원
***** 중앙대학교 토목공학과 조교수, 정회원 - 130 -

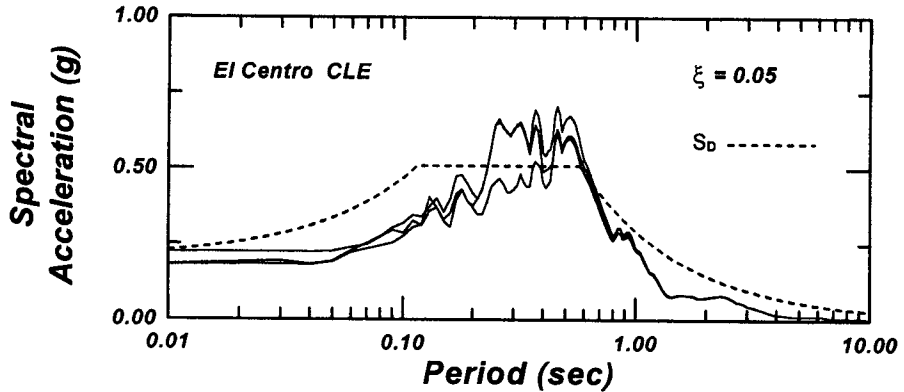


그림 12. S_D 지반의 지표면 자유장 응답스펙트럼 (El Centro형 지진, 0.14g)

6. 결론

지진피해 기록이 빈번하고 지진 발생 가능성이 큰 경주지역의 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 탄성과 시험으로 결정된 전단파 속도를 이용한 지반 분류는 S_C 및 S_D로 나타났다.
- (2) 현행 건교부기준을 따라 1등급 구조물에 대한 지반응답해석을 수행한 결과, 붕괴방지수준과 기능수행수준에서 지표면 최대가속도가 각각 0.140g~0.286g 및 0.051g~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 응답스펙트럼과의 차이를 보였다. 지반 분류시 상부30.48m의 평균 전단파속도를 이용할 경우 S_C지반과 S_D지반의 경계부근에 해당하는 경우가 많았으며 공진 주파수부근에서 건교부 응답 스펙트럼이 과소 평가 되었다. 따라서 평균 전단파속도를 스펙트럼 작성을 위한 계수 산정시 직접 적용하는 기법과 기반암 깊이를 고려한 지반의 고유주기 평가기법이 포함될 필요성이 있었다.

감사의 글

본 연구는 '99 원자력 연구 개발 중장기 계획 사업의 지원에 의한 "지진세기의 정량적 평가 및 단층운동 해석 연구"과제로 수행된 것임을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김동수, 이진선, 윤종구(1999), "부지 고유의 지반 거동평가", 한국지진공학회 논문집, Vol. 3, No. 4, pp. 1-10.
2. 건설교통부(1997), "내진설계기준연구(II)".
3. Idriss, I. M and Sun, J. I.(1992), "User's Manual for SHAKE91", Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, Davis.
4. 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
5. Tateiwa, I.(1928), "Geological Atlas of Chosen, No. 10", Geological Survey of Chosen

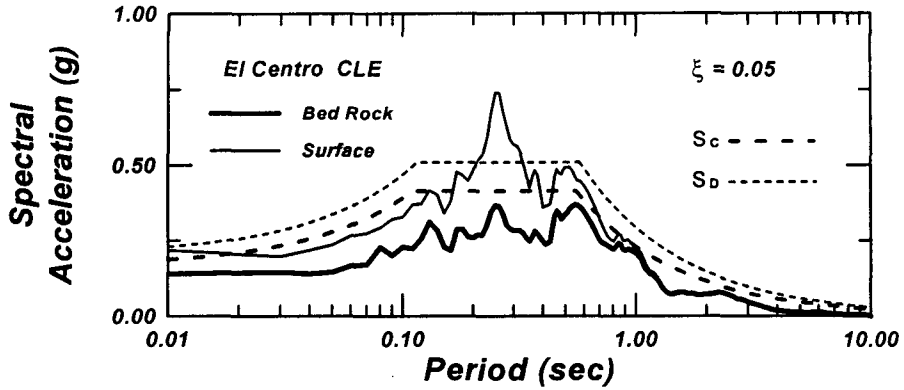


그림 10. 기반암과 지표면 자유장 응답스펙트럼 (통일전, El Centro형 지진, 0.14g)

그림 11은 본 연구에서 수행한 13개의 부지 중 S_c 지반에 해당하는 10개 지반의 지표면 자유장 응답스펙트럼과 S_c , 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 12는 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.

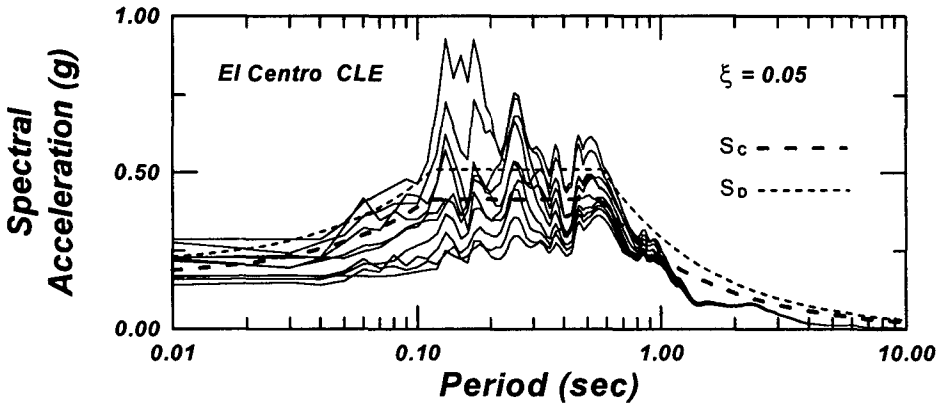


그림 11. S_c 지반의 지표면 자유장 응답스펙트럼 (El Centro형 지진, 0.14g)

그림 9와 그림 10은 통일전 부지의 1등급 구조물 붕괴방지수준에 대한 해석 결과이다. 그림 9의 깊이별 해석 결과를 살펴보면 지표면 근처에서 지반 증폭현상이 크게 발생함을 알 수 있고, 등가 전단변형을 역시 지표면 근처의 지반 가속도 증폭이 크게 발생한 심도에서 커짐을 알 수 있다. 그림 10에서는 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 깊이가 30.48m까지의 평균 전단파속도만을 기준으로 지반을 S_A 지반부터 S_E 지반까지 분류한다. 통일전 부지의 경우 평균 전단파속도가 372m/s로 S_C지반으로 분류되나 S_C지반의 전단파속도 영역이 360m/s~750m/s임을 감안하면 거의 하한치에 가깝다. 그림 10은 S_C지반으로 분류된 통일전 부지의 붕괴방지수준에 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 전단파 속도가 S_C 지반의 하한선 부근에 해당되어 S_D 지반에 가깝기 때문인 것으로 분석된다. 표 1에 의하면 깊이가 30.48m까지의 평균 전단파속도에 의한 지반 분류에서 S_C지반과 S_D지반의 경계에 해당하는 경우가 많이 발견되며, 이 경우에는 건교부 기준에 의한 지반 분류보다는 평균 전단파속도를 직접 사용하여 세밀한 지반 분류를 수행하는 방안이 바람직하다고 판단된다.

또한, 그림 10에 의하면 주기 0.2~0.3초 부근에서 계산된 응답스펙트럼이 건교부 표준응답스펙트럼의 값보다 크게 증폭된 것을 알 수 있다. 이는 부지의 층상구조, 동적 물성치, 입력지진파에 따른 공진 현상으로 건교부 스펙트럼은 이 현상을 적절히 반영하지 못함을 알 수 있다. 따라서 중요구조물의 설계를 위해서는 부지고유의 지반 응답평가가 필요하며, 최소한 기반암까지의 깊이와 평균 전단파 속도를 바탕으로 공진 영역의 산정이 중요하다.

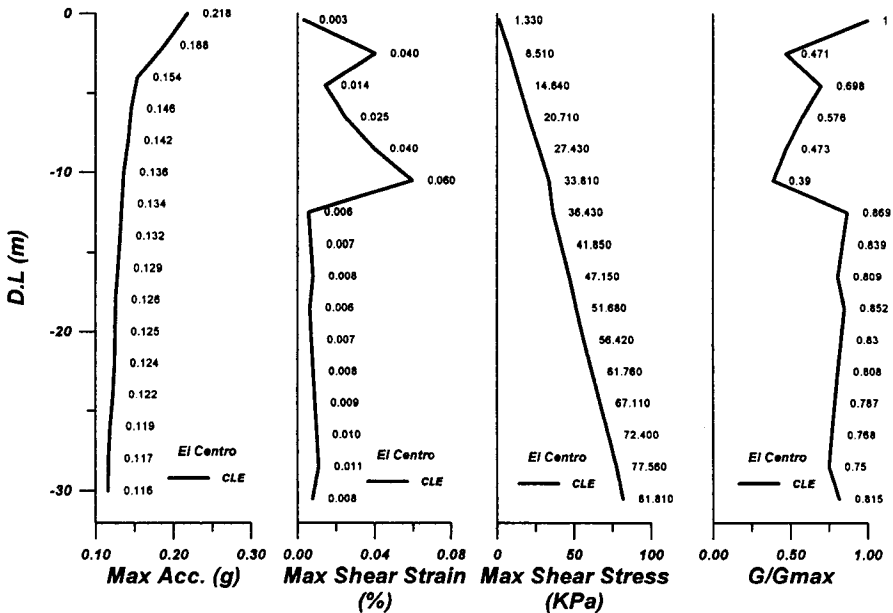


그림 9. 깊이별 최대가속도, 전단변형률, 전단응력과 전단탄성계수비 (통일전, El Centro형 지진, 0.14g)

비 곡선은 일반적인 국내 산토(Mountain Soil)의 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 붕괴방지 수준(0.14g) 및 기능수행수준(0.05g)에 적합하도록 설계 지반운동 수준을 조절하여 사용하였다.

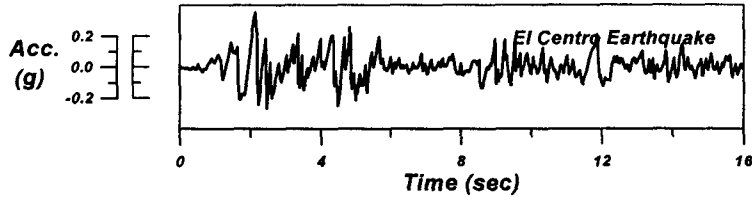


그림 8. El Centro 지진의 시간영역 가속도 이력곡선

표 1. 경주지역 1등급 구조물의 1차원 부지응답특성평가 결과

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

부지	기반암 깊이(m)	상부 30.48m 평균 Vs (m/sec)	지반 분류	기반암 가속도(g)		지표면 가속도(g)	
				붕괴방지	기능수행	붕괴방지	기능수행
직할하천	8	661.1	Sc	0.127	0.046	0.140	0.051
선덕여상	11	428.7	Sc	0.130	0.047	0.286	0.116
월성중고	18	381.4	Sc	0.125	0.045	0.165	0.075
통일전	31	372.0	Sc	0.116	0.042	0.218	0.090
준용하천	45	365.7	Sc	0.102	0.037	0.229	0.092
황성공원	28	455.6	Sc	0.124	0.045	0.276	0.102
명활산성	16	357.1	S _D	0.125	0.045	0.183	0.087
산림연구원	25	346.7	S _D	0.120	0.043	0.180	0.086
오능초등학교	14	559.5	Sc	0.131	0.047	0.224	0.074
용강초등학교	30	358.5	S _D	0.120	0.042	0.223	0.091
황남초등학교	50	412.0	Sc	0.086	0.032	0.169	0.058
계림초등학교	25	420.4	Sc	0.110	0.043	0.158	0.067
계림중학교	14	640.6	Sc	0.131	0.047	0.226	0.081

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 지반 설계지반 가속도 0.14g에 비해 각 부지의 지표면 최대가속도는 0.140g~0.286g의 분포를 보이고, 기능수행수준의 경우 보통암 지반의 0.05g에 비해 0.051g~0.116g의 분포를 보인다. 이는 지반의 종류에 따라 최대 2.3배의 증폭 가능성이 있음을 나타낸다.

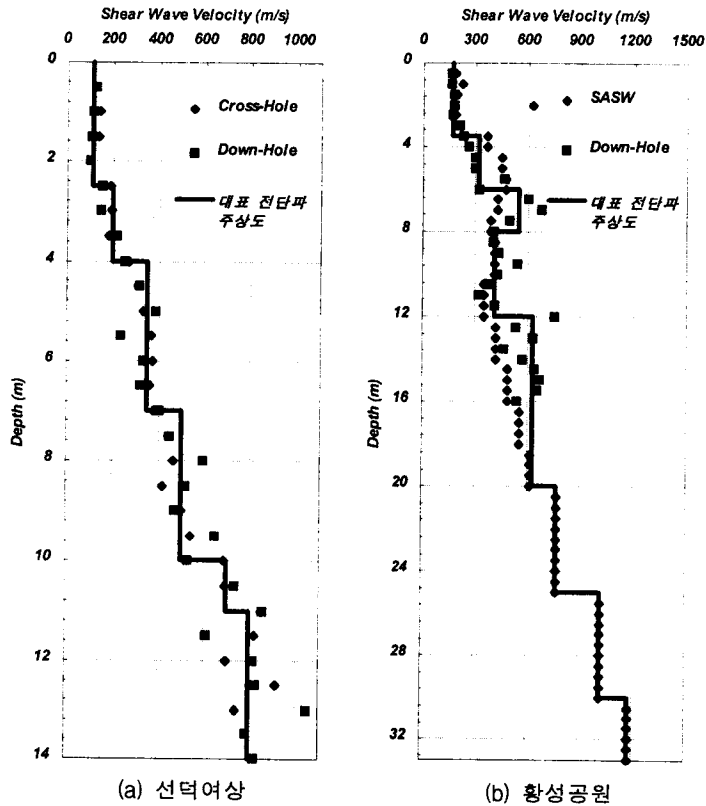


그림 7. 탄성과 시험을 통한 전단파 주상도 결정

5. 지진 민감도 분석

5.1 지반 응답 해석

본 연구에는 1차원 지반응답특성 평가기법 중 등가선형 해석기법을 적용하는 프로그램인 SHAKE91을 사용하였다. 경주지역의 지진에 대한 민감도 분석을 위해서는 대상 지역의 설계 지반 운동으로부터 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 붕괴방지구준(CLE; Critical Level Earthquake)의 경우 0.14g, 기능수행수준(OLE; Operational Level Earthquake)의 경우 0.05g에 해당한다.

1차원 부지응답특성 평가에 필요한 해석 부지의 층상구조 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 결정된 전단파 속도로부터 결정하였고 잔류토, 풍화토, 퇴적토층의 전단변형을 크기에 따른 정규화 전단탄성계수 및 감쇠비 곡선은 공진주 시험의 결과를 이용하였다. 그러나 시료가 확보되지 못한 매립토의 정규화 전단탄성계수 및 감쇠

비 곡선은 일반적인 국내 산토(Mountain Soil)의 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 붕괴방지 수준(0.14g) 및 기능수행수준(0.05g)에 적합하도록 설계 지반운동 수준을 조절하여 사용하였다.

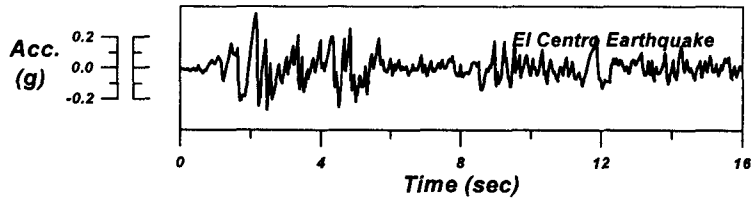


그림 8. El Centro 지진의 시간영역 가속도 이력곡선

표 1. 경주지역 1등급 구조물의 1차원 부지응답특성평가 결과

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

부지	기반암 깊이(m)	상부 30.48m 평균 Vs (m/sec)	지반 분류	기반암 가속도(g)		지표면 가속도(g)	
				붕괴방지	기능수행	붕괴방지	기능수행
직할하천	8	661.1	Sc	0.127	0.046	0.140	0.051
선덕여상	11	428.7	Sc	0.130	0.047	0.286	0.116
월성중고	18	381.4	Sc	0.125	0.045	0.165	0.075
통일전	31	372.0	Sc	0.116	0.042	0.218	0.090
준용하천	45	365.7	Sc	0.102	0.037	0.229	0.092
황성공원	28	455.6	Sc	0.124	0.045	0.276	0.102
명활산성	16	357.1	So	0.125	0.045	0.183	0.087
산림연구원	25	346.7	Sb	0.120	0.043	0.180	0.086
오능초등학교	14	559.5	Sc	0.131	0.047	0.224	0.074
용강초등학교	30	358.5	Sb	0.120	0.042	0.223	0.091
황남초등학교	50	412.0	Sc	0.086	0.032	0.169	0.058
계림초등학교	25	420.4	Sc	0.110	0.043	0.158	0.067
계림중학교	14	640.6	Sc	0.131	0.047	0.226	0.081

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 지반 설계지반 가속도 0.14g에 비해 각 부지의 지표면 최대가속도는 0.140g~0.286g의 분포를 보이고, 기능수행수준의 경우 보통암 지반의 0.05g에 비해 0.051g~0.116g의 분포를 보인다. 이는 지반의 종류에 따라 최대 2.3배의 증폭 가능성이 있음을 나타낸다.

그림 9와 그림 10은 통일전 부지의 1등급 구조물 붕괴방지수준에 대한 해석 결과이다. 그림 9의 깊이별 해석 결과를 살펴보면 지표면 근처에서 지반 증폭현상이 크게 발생함을 알 수 있고, 등가 전단변형을 역시 지표면 근처의 지반 가속도 증폭이 크게 발생한 심도에서 커짐을 알 수 있다. 그림 10에서는 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 지반을 S_A 지반부터 S_E 지반까지 분류한다. 통일전 부지의 경우 평균 전단파속도가 372m/s로 S_C지반으로 분류되나 S_C지반의 전단파속도 영역이 360m/s~750m/s임을 감안하면 거의 하한치에 가깝다. 그림 10은 S_C지반으로 분류된 통일전 부지의 붕괴방지수준에 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 전단파 속도가 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, 이 경우에는 건교부 기준에 의한 지반 분류보다는 평균 전단파속도를 직접 사용하여 세밀한 지반 분류를 수행하는 방안이 바람직하다고 판단된다.

또한, 그림 10에 의하면 주기 0.2~0.3초 부근에서 계산된 응답스펙트럼이 건교부 표준응답스펙트럼의 값보다 크게 증폭된 것을 알 수 있다. 이는 부지의 층상구조, 동적 물성치, 입력지진파에 따른 공진 형상으로 건교부 스펙트럼은 이 현상을 적절히 반영하지 못함을 알 수 있다. 따라서 중요구조물의 설계를 위해서는 부지고유의 지반 응답평가가 필요하며, 최소한 기반암까지의 깊이와 평균 전단파 속도를 바탕으로 공진 영역의 산정이 중요하다.

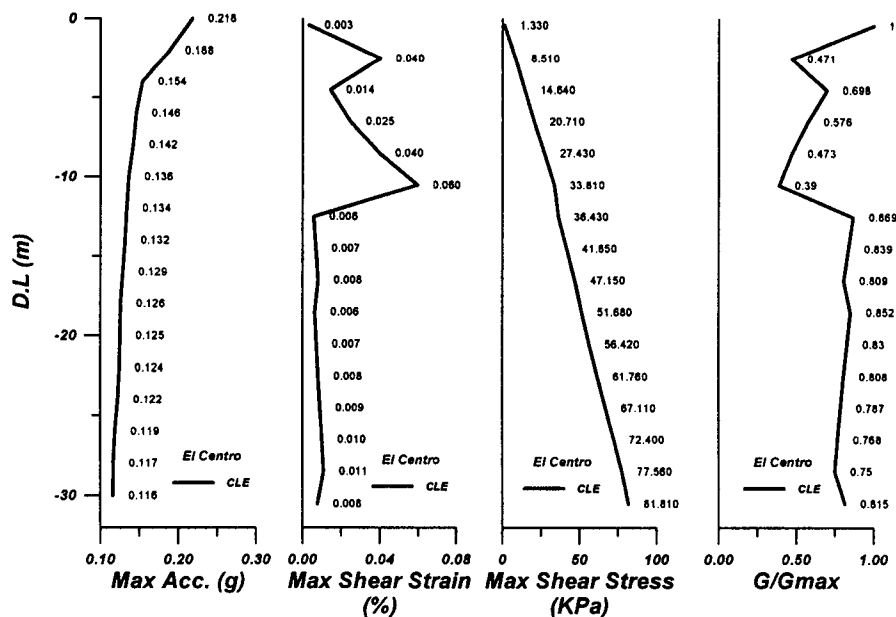


그림 9. 깊이별 최대가속도, 전단변형률, 전단응력과 전단탄성계수비 (통일전, Ei Centro형 지진, 0.14g)

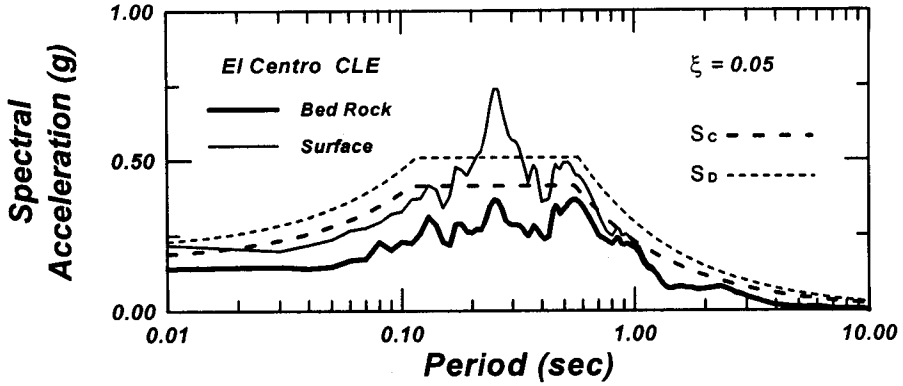


그림 10. 기반암과 지표면 자유장 응답스펙트럼 (통일전, El Centro형 지진, 0.14g)

그림 11은 본 연구에서 수행한 13개의 부지 중 S_c 지반에 해당하는 10개 지반의 지표면 자유장 응답스펙트럼과 S_c , 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 12는 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.

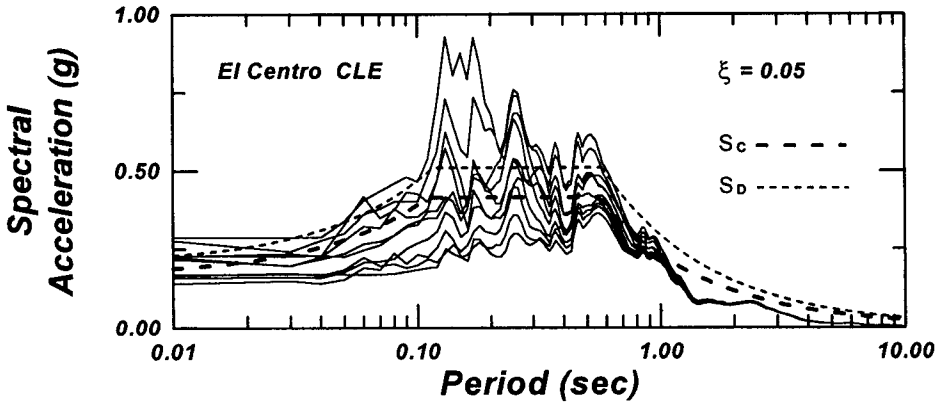


그림 11. S_c 지반의 지표면 자유장 응답스펙트럼 (El Centro형 지진, 0.14g)

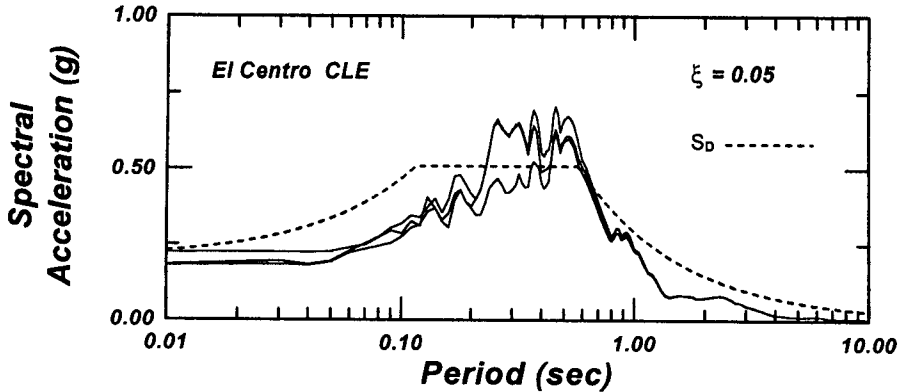


그림 12. S_D 지반의 지표면 자유장 응답스펙트럼 (El Centro형 지진, 0.14g)

6. 결론

지진피해 기록이 빈번하고 지진 발생 가능성이 큰 경주지역의 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 탄성과 시험으로 결정된 전단파 속도를 이용한 지반 분류는 S_c 및 S_D 로 나타났다.
- (2) 현행 건교부기준을 따라 1등급 구조물에 대한 지반응답해석을 수행한 결과, 붕괴방지수준과 기능수행수준에서 지표면 최대가속도가 각각 0.140g~0.286g 및 0.051g~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 응답스펙트럼과의 차이를 보였다. 지반 분류시 상부30.48m의 평균 전단파속도를 이용할 경우 S_c 지반과 S_D 지반의 경계부근에 해당하는 경우가 많았으며 공진 주파수부근에서 건교부 응답 스펙트럼이 과소 평가 되었다. 따라서 평균 전단파속도를 스펙트럼 작성을 위한 계수 산정시 직접 적용하는 기법과 기반암 깊이를 고려한 지반의 고유주기 평가기법이 포함될 필요성이 있었다.

감사의 글

본 연구는 '99 원자력 연구 개발 중장기 계획 사업의 지원에 의한 "지진세기의 정량적 평가 및 단층운동 해석 연구"과제로 수행된 것임을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김동수, 이진선, 윤종구(1999), "부지 고유의 지반 거동평가", 한국지진공학회 논문집, Vol. 3, No. 4, pp. 1-10.
2. 건설교통부(1997), "내진설계기준연구(II)".
3. Idriss, I. M and Sun, J. I.(1992), "User's Manual for SHAKE91", Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, Davis.
4. 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
5. Tateiwa, I.(1928), "Geological Atlas of Chosen, No. 10", Geological Survey of Chosen