

부지 고유의 지반 거동평가 예제 연구

Case Study of Site Specific Ground Response Evaluation

김동수*
Kim, Dong-Soo

이진선**
Lee, Jin-Sun

ABSTRACT

Free- field ground motion during earthquake is significantly affected by the local site conditions and the behavior of structure is influenced by ground motion, it is essential to perform the reliable site characterization and to determine the site specific earthquake response.

In this study, case study of site specific ground response evaluation was performed at Incheon area. Step by step procedures for site characterization and one-dimensional site response analysis were introduced and the importance of site specific analysis was verified

1. 서론

지진은 여러 종류의 자연재해 중에서 인명과 재산에 가공할 피해를 가져올 수 있는 재해이다. 1995년 1월 일본 고베시 인근 효고현 남부 지진으로 인하여 5000여명의 사상자와 7조원이상의 재산 피해를 가져왔다. 역사기록에 의하면 우리 나라도 인명과 재산피해를 초래한 강진이 여러 차례 있었으며 최근에는 지진활동이 증가하여, 지진에 대한 안전지대가 아니라는 인식이 증대되고 있다.

지진에 의해 발생된 지진파는 지반을 통하여 전파되며, 지진시 구조물의 거동은 기초지반의 특성에 많은 영향을 받으므로, 지진 관련 지반 공학적 문제들에 대한 이해와 연구는 매우 중요하다. 최근의 지진피해 상황을 살펴보면, 연약 점토 퇴적층 위에 형성된 Mexico City의 경우 지반증폭현상에 의하여 엄청난 피해를 입었으며, Armenia지진의 경우 진원으로부터 멀리 떨어진 깊은 퇴적층 위에 세워진 도시의 경우 진원 근처에 위치한 도시보다 많은 피해를 입었다. 또한 Loma Prieta지진 및 고베지진의 경우 매립층 위에 세워진 구조물들이 많은 피해를 입는 등 지진시 지반 및 구조물의 거동을 정확히 예측하기 위해서는 신뢰성 있는 부지의 증폭현상 평가가 매우 중요하다 (National Center for Earthquake Engineering Research, 1994).

* 한국과학기술원 토목공학과 부교수, 정회원

** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

본 논문에서는 위와 같이 지진 거동해석에 있어서 중요한 과정 중 하나인 지반 증폭현상 평가를 위한 부지 특성 평가기법(Site Characterization)과 1차원 지반 증폭 해석기법을 이용한 국내 지반의 지진 증폭 현상 평가 예제를 담고 있다.

2. 부지응답특성 평가 개요

2.1 부지 응답 특성 평가

암반 내 단층으로부터 발생한 지진파는 암반 및 지반을 통해 전파가 이루어진다. 이러한 전파가 이루어지는 과정에서 지층을 통과한 지진파의 크기와 주파수 대역이 변하여 지표면에 도달하게 된다. 따라서, 부지 응답특성 평가는 지반의 종류 및 지층구조에 따른 지진파의 전파특성을 고려한 설계응답 스펙트럼의 작성, 액상화(Liquefaction) 평가를 위한 지진 거동시 지반의 변형율-전단응력의 예측, 그리고 지반 구조물의 안정성 확보를 위한 지진에 의한 동적 하중의 산정을 위해 수행되어진다. 이를 위한 해석 방법으로 지난 수십 여 년간 부지 응답 특성 평가를 위해 여러 가지 해석방법이 개발되었다(Kramer, 1996).

2.2 1차원 부지응답 특성 평가

현재 사용중인 여러 지반 증폭현상 해석기법 중 가장 널리 사용되어지는 방법은 1차원 지반 증폭현상 평가 기법이다. 이 기법은 지반을 구성하고 있는 모든 지층의 경계가 반무한-수평이고 지반의 응답이 주로 기반암으로부터 연직 방향으로 전파되는 SH파에 의해 이루어진다고 가정하고 해석하는 방법이다. 지진 발생시 지진 거동이 계측가능한 위치는 노두(Rock Outcrop)에서의 계측치와 지표면에서의 계측치이다. 노두에서의 계측치를 이용하여 기반암에서의 지진 거동을 예측한 후 이를 이용하여 1차원 지반 증폭현상 평가를 통하여 지표면에서의 지진거동을 예측하고 이를 노두 인근 지역에서 계측되어진 지표면 실제 계측치와 비교하는 방법으로 1차원 지반 증폭현상 해석방법의 타당성이 검증되어져 왔다.

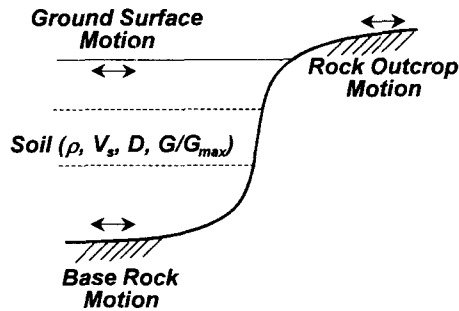


그림 1. 1차원 지반 증폭 현상 평가 개요도

1차원 지반 증폭현상해석 기법은 다음과 같은 방법으로 해석이 이루어진다. 지반이 Kelvin-Voigt 모델의 전단과 점성감쇠 특성을 가지는 재료라면 파동방정식은 식 (1)과 같다.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (1)$$

여기서, ρ 는 지반의 밀도이며, G 는 지반의 전단탄성계수, η 는 지반의 손실계수이다.

식(1)의 일반해는 식(2)와 같으며 식(2)를 이용하면 지반을 구성하는 지층간의 전달함수 식(3)을 얻을 수 있다.

$$u(z, t) = Ae^{i(\omega t + k^* z)} + Be^{i(\omega t - k^* z)} \quad (2)$$

여기서, k^* 는 실수항과 허수항을 가지는 복소파동수이며, ω 는 각속도이다.

$$|F(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 kH + \sinh^2 \xi kH}} \approx \frac{1}{\sqrt{\cos^2(\omega H/v_s) + [\xi(\omega H/v_s)]^2}} \quad (3)$$

여기서, ξ 는 지반의 감쇠비이다.

식(3)으로부터 지반의 공진 주파수는 식(4)와 같이 지반의 전단파 속도 v_s 와 지층의 두께 H 에 의해 결정되며 따라서, 지반의 증폭정도는 공진 주파수에 영향을 주는 v_s 와 H 및 감쇠비에 영향을 받게 된다.

$$\omega_n = \frac{v_s}{H} \left(\frac{\pi}{2} + n\pi \right) \quad (4)$$

그러므로 일차원 지반 증폭 현상 평가를 위해 필요한 지반 조사 사항으로는 지층의 두께, 변형율에 따른 전단파 속도 주상도와 감쇠비 주상도가 필요하게 되며 이에 대한 자세한 내용은 2.3절에 설명되어져 있다.

2.3 지반 증폭현상을 평가하기 위한 부지 조사방법

저변형율 및 중간변형율 사이($10^{-4} \sim 1\%$)에서 지반은 비선형 거동을 보이는 것으로 알려져 있다(그림 2). 이러한 비선형성을 고려하기 위해 일차원 지반 증폭 해석 기법에서는 등가 선형 해석 기법을 사용한다.

등가 정적 해석기법은 그림 2에서와 같이 초기 가정치 $G^{(1)}$, $\xi^{(1)}$ 를 선정 후 등가 정적 해석에 의한 등가 변형율 $v_{eff}^{(1)}$ 을 계산하며, 이렇게 계산되어진 등가 변형율이 초기 가정치 $G^{(1)}$, $\xi^{(1)}$ 와 일치하는 변형율에 비하여 크기 때문에 두 번째 가정치 $G^{(2)}$, $\xi^{(2)}$ 를 선정하여 산정된 등가 변형율과 가정된 전단탄성계수와 감쇠비가 허용치 이내에 들어올 때 까지 반복 계산을 수행하게 된다(Kramer, 1996).

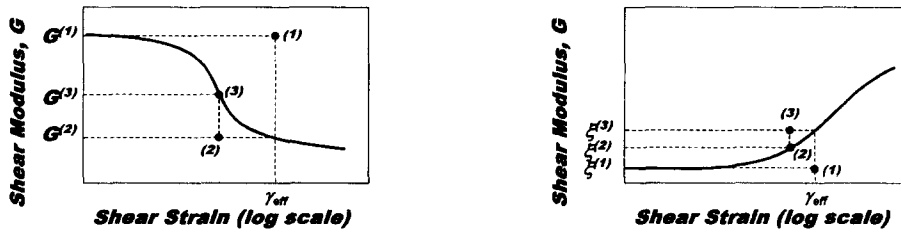


그림 2. 등가 선형 해석을 위한 반복(Iteration) 계산법

부지특성 평가를 위해 필요한 비선형 지반 물성치를 획득하는 방법은 다음과 같이 크게 4가지 방법이 있다(한국 지반공학회, 1997).

- 1) 현장 및 실내시험 결과를 이용하는 방법
 - a) 현장 : 전단파속도 주상도 획득 (SASW, 크로스홀, 다운홀시험)
 - b) 실내 : 공진주/비틀전단 시험기를 이용한 G/G_{max} 곡선 획득
 - c) $G_{field} = (G/G_{max})_{y, lab} \times (G_{max})_{field}$
 - d) 현장 감쇠비 획득이 불가능 하므로 실내 시험결과를 사용
- 2) 현장시험 결과를 이용하는 방법
 - a) 1) 항의 a)단계를 수행하며 기존문헌의 G/G_{max} 곡선을 사용한다(Kim, 1991, Vucetic and Dobry, 1991)
 - b) $G_{field} = (G/G_{max})_{y, literature} \times (G_{max})_{field}$
 - c) 지반의 분류에 의한 문헌 발표 결과를 사용
- 3) 실내시험 결과를 이용하는 방법
 - a) 지반조사 자료 및 기존 자료를 바탕으로 대상지반의 특성에 따른 Aging효과 고려
 - b) 공진주/비틀전단 시험기를 이용한 G/G_{max} 곡선 획득
 - c) $(G_{max})_{field} = (G/G_{max})_{lab, t_1} \times \Delta G, \Delta G = I_G \times \log_{10}(t_1/t_2)$
여기서, t_1 =실내시험 구속시간, t_2 =지질시간, $I_G=1$ 차압밀 종료후 전단탄성계수 증가비
 - d) $G_{field} = (G/G_{max})_{y, lab} \times (G_{max})_{field}$
 - e) 현장 감쇠비 획득이 불가능 하므로 실내 시험결과를 사용
- 4) 경험에 의한방법
 - a) 지반조사자료를 바탕으로 각층의 지반자료획득(함수비, 단위중량, 간극비, 체분석 등)
 - b) 지반 자료를 바탕으로 공학적 지반 분류(사질토, 점성토, 사력지반 등)
 - c) G_{max} 값을 얻기위해 Hardin의 식 사용(Hardin, 1966)
 - d) 2)항의 a), b), c) 단계를 수행

상기 방법으로 획득되어진 변형율에 따른 현장 G/G_{max} 곡선과 감쇠비 곡선이 1차원 지반 증폭 해석 프로그램의 입력치로 사용되며, 현장 및 실내시험 결과를 이용하는 방법이 가장 정확한 해석 방법이다.

3. 국내지반의 지반 거동 평가 예제

3.1 개요

본 논문에서는 국내 인천 ○○지역을 대상 부지로 선정하여 2절에서 설명된 지반 증폭현상 평가방법으로 지반 증폭 현상을 평가해 보았다. 본 논문에 수록된 평가는 예비평가로서 현장시험으로 지반 분류를 위해 에너지 비 측정이 이루어진 표준관입시험(SPT)을 수행하였고 전단파 속도 주상도 획득을 위해 SASW시험을 수행하였다. 실내 시험으로는 인근 현장 교란 시료를 재성형하여 공진주/비틀전단 시험을 수행하여 변형율에 따른 G/G_{max} 곡선을 획득하였다. 현장 및 실내 시험을 수행하여 얻어진 지반 조사자료는 최종적으로 현재 가장 널리 사용되고 있는 1차원 지반 증폭 해석 프로그램인 SHAKE91의 입력변수로 사용되었다.

3.2 현장 및 실내시험 결과

표준관입시험(SPT)을 수행하여 대상 부지의 주상도를 그림 3과 같이 획득하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 본 대상부지는 상부 8m정도 깊이로 매립토층이 존재하였고 그 밑으로 점토질 실트층과 점토층이 28m깊이로 있으며, 그 밑으로 사질토 층과 풍화암 마지막으로 기반암이 놓여 있다. 표준관입 시험은 50m깊이 까지 수행되었으며 풍화암의 깊이는 SASW결과를 바탕으로 추정되었다. 지하수위는 지표면 하 3m 이다. 전단파 속도 주상도는 상부 4m깊이까지는 교란영향으로 전단파속도는 약 100m/sec정도이며 하부 단단한 점토층에서 약 300m/sec, 사질토 층에서 400m/sec, 풍화암층은 약 600m/sec이다. 기반암의 전단파속도는 1200m/sec로 가정하였다.

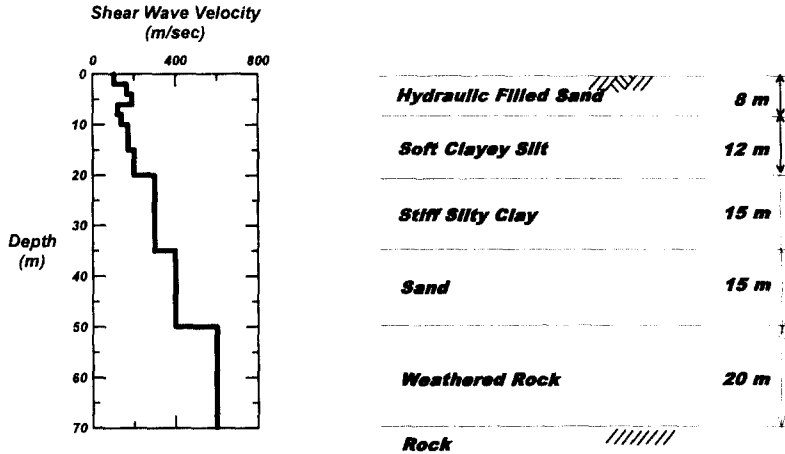


그림 3. 현장 시험으로부터 획득된 지반의 전단파 속도 주상도 및 지층 분류 주상도

교란 시료를 재성형하여 실내에서 공진주/비틀전단 시험을 수행하여 얻어진 대상 지반의 종류에 따른 변형율-정규화 전단탄성계수, 변형율-감쇠비 곡선은 그림 4와 같다.

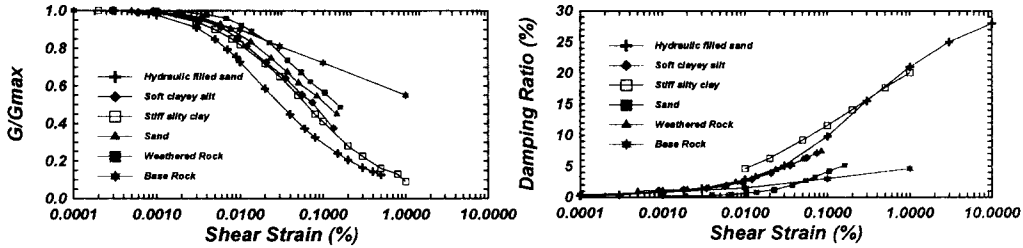


그림 4. 실내 시험으로부터 획득된 지반의 변형률에 따른 정규화 전단탄성계수, 감쇠비 곡선

3.3 입력 지진 파형

지반 증폭현상 평가에 있어서 사용되어지는 기반암 입력지진종류는 증폭현상에 큰 영향요소로서 작용하는데, 그 이유는 입력 지진의 주파수대역 에너지 분포와 지반의 공진주파수 대역의 상관성과 입력지진의 최대가속도(Peak Acceleration)에 따른 지반의 비선형성에 기인하게 된다.

본 논문에서는 대상 지반의 증폭현상 평가를 위해 입력지진으로 일본에서 지반 액상화 평가시 사용되는 장(Hachinobe)·단주기(Ofunato) 지진과 Elcentro 지진을 입력지진으로 선택하였다(그림 5). 입력 지진의 크기는 국내 건교부 내진설계기준에 따라 인천지역 1등급 구조물 기능수행 수준인 최대가속도 0.06g로 조정하여 사용하였다.

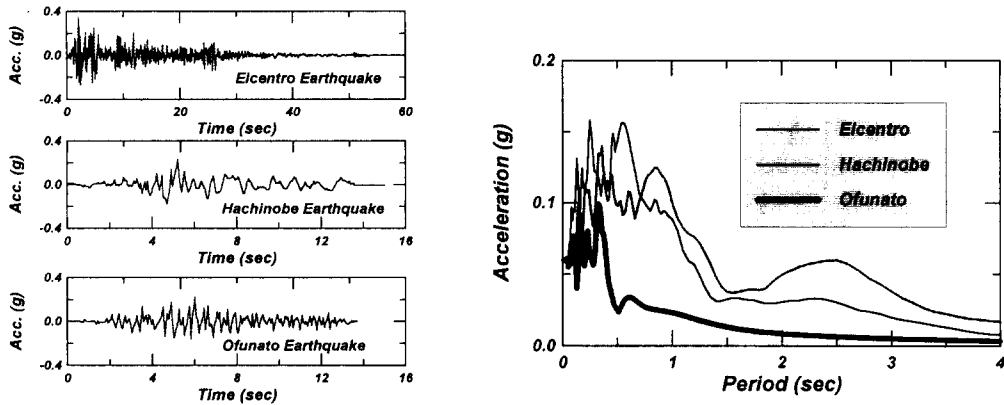


그림 5. 입력 지진 파형과 주파수 대역

3.4 해석 결과

앞절에서 설명한 입력지진 종류와 크기로 일차원 지반 증폭 해석 프로그램인 Shake91을 사용한 대상지반의 지반 증폭 결과는 그림 6과 같다. 그림 6 으로부터 기암반에서의 지진크기에 비하여 지표면에서의 크기가 크게 증폭이 됨을 볼 수 있으며, 지진의 주파수 대역 에너지 분포에 따라 그 증폭정도가 확연히 차이가 남을 알 수 있다.

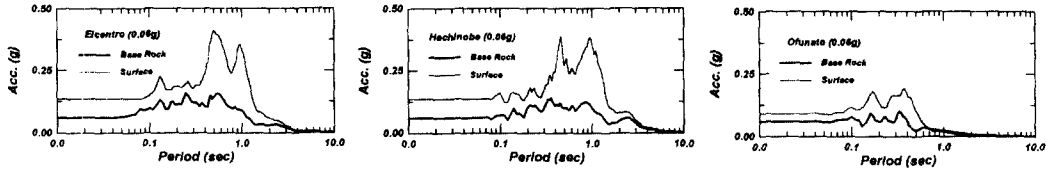


그림 6. 지진 파형에 따른 지반 증폭 현상 평가

1997년 제정된 국내 건교부 내진 설계 기준은 지반 종류에 따른 지반 증폭효과를 고려하여 설계 응답 스펙트럼을 제시하고 있다(표 1).

표 1. 건교부 내진설계 기준 (건설교통부, 1997)

분류	지반 종류	전단파 속도(m/sec)
Sa	경암지반	1500초과
Sb	보통암 지반	760~1500
Sc	매우 조밀한 토사, 연암	360~760
Sd	단단한 토사지반	180~360
Se	연약한 토사 지반	180미만
Sf	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반	

본 대상부지는 건교부 내진 설계 기준에 따르면 지반 종류 Sd 또는 Se에 속하며 이에 따른 인천지역 1등급 구조물 기능수행 수준인 최대가속도 0.06g로 작성된 설계응답 스펙트럼과 본 연구로부터 얻어진 설계응답스펙트럼을 그림 7에 함께 도시하였다.

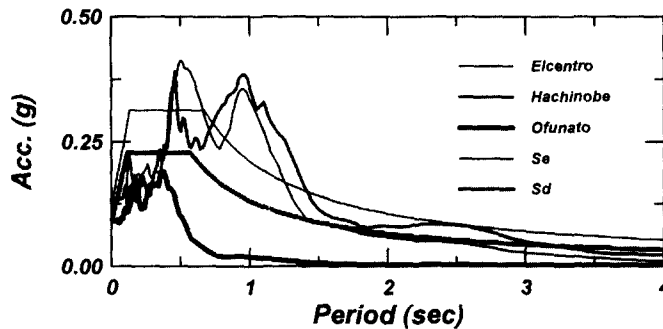


그림 7. 건교부 내진 설계기준과의 비교

그림 7로부터 건교부 내진 설계 기준의 지반 종류 Sd 및 Se는 비교적 장주기·지진에 대해서 본 대상 부지의 지반 증폭 현상을 포함하지 못하는 수준으로 작성되어 있음을 알 수 있으며, 특히 장주기 지진 에너지에 대해서는 설계기준이 크게 못 미치는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 지반 증폭현상에 대한 평가 방법과 국내 부지에 대한 평가 예제를 통하여 지반 증폭현상을 평가하였다. 이에 따른 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 연약한 지반으로 이루어진 깊은 퇴적층의 구조를 가지는 지반의 경우 지진 에너지에 큰 증폭현상을 보이며, 이에 따른 평가가 중요함을 알 수 있었다.
2. 부지 특성을 고려한 종합적인 지반 증폭현상 평가 방법을 기술하였다.
3. 지진 파형에 따른 지진 에너지 분포가 지반 증폭현상에 중요 영향 요소임을 알 수 있었다.
3. 국내 내진 설계기준으로 작성되어진 설계응답 스펙트럼이 모든 경우를 만족하지 못함을 알 수 있었으며, 중요구조물 및 지반 증폭현상이 크게 예상되는 부지의 경우, 부지 고유의 지반 증폭현상 평가가 이루어져야함을 알 수 있었다.

5. 감사의 글

본 연구는 STEPI (ED-01-04) "지진 재해 대응기술 개발사업"의 지원에 의한 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

6. 참고 문헌

1. 건설교통부, (1997), "내진설계기준연구(II)", pp. 29-41.
2. 한국 지반공학회, (1997), "진동 및 내진설계", pp. 80-91.
3. Steven L. Kramer(1996), "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice-Hall
4. I.M. Idriss, (1995), "Assessment of Site Response Analysis Procedures", NIST GCR 95-667
5. National Center for Earthquake Engineering Research, (1994), "Research Accomplishment (1986-1994)", State University of New York at Buffalo, pp. 121-128.
6. Kim, D. S. (1991), "Deformation Characteristics of Soils at Small to Intermediate Strains form Cyclic Test", Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin
7. Vucetic, M. and Dobry, R. (1991), "Effects of Soil Plasticity on Cyclic Response", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 1, Jan
8. Hardin, B. O. and Black, W. L. (1966), "Sand Stiffness Under Various Triaxial Stresses", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 92, No. SM2, pp. 27-42.