

부지 고유의 지반 거동평가

Evaluation of Site Specific Ground Response

김 동 수* 이 진 선** 윤 중 구***
Kim, Dong Soo Lee, Jin Sun Yoon, Jong Ku

국문요약

지진 시 지반의 자유장 운동은 국지적 지반조건에 의하여 크게 영향을 받으며 내진설계에 앞서 지반조건을 고려한 부지응답특성 평가를 수행하여야 한다. 본 논문은 부지고유의 지반거동 평가를 위하여 필요한 절차를 국내 내진기준과 외국의 기술현황 조사를 바탕으로 제안하였다. 부지응답특성 평가의 개요를 설명하고 1차원 등가선형 해석에 필요한 지반자료 획득을 위한 지반조사계획, 지반조사기법, 저변형을 및 고변형을 영역에서의 지반의 변형거동특성, 현장 및 실내시험결과를 이용한 부지특성평가방법들을 제안하였다. 또한 제안된 절차를 따라 수행된 인천 지역의 부지응답특성평가 예를 포함하였다.

주요어 : 변형특성, 지진, 부지응답특성평가, 내진설계기준, 지반조사

ABSTRACT

Free-field ground motion during earthquake is significantly affected by the local site conditions and it is essential for the seismic design to perform the site specific ground response analysis. In this paper, the procedures of site specific ground response analysis were suggested based on the Korean seismic guideline and the review of state of the art technologies. The concept of ground response analysis was introduced, and the techniques of obtaining soil data for one dimensional equivalent linear analysis which include site investigation planning, field and laboratory testing techniques, deformational characteristics of soils at small to large strains, and site characterization techniques combining field and laboratory test results, were suggested. Finally, the case study was performed at Incheon area following the suggested procedure.

Key words : deformation characteristics, earthquake, ground response analysis, seismic guideline, site characterization

1. 서 론

지진은 여러 종류의 자연재해 중에서 인명과 재산에 가공할 피해를 가져올 수 있는 재해이다. 1995년 1월 일본 고베시 인근 효고현 남부 지진으로 인하여 5000여명의 사상자와 7조원 이상의 재산피해를 가져왔다. 역사기록에 의하면 우리 나라도 인명과 재산피해를 초래한 강진이 여러 차례 있었으며 최근에는 지진 활동이 증가하여, 지진에 대한 안전지대가 아

니라는 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, 연약한 점토질 퇴적층 위에 형성된 Mexico city의 경우 지반증폭현상에 의하여 엄청난 피해를 입었으며(Dobry and Vucetic⁽³⁾), 1988년 발생한 Armenia지진의 경우 진원으로부터 멀리 떨어진 깊은 퇴적층 위에 세워진 도시의 경우 진원 근처에 위치한 도시보다 많은 피해를 입었다.(Yegian et. al⁽⁴⁾) 또한 Loma Prieta지진 및 고베지진의 경우 매립지 위에 세워진 구조

* 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 부교수

** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

*** 한국과학기술원 토목공학과 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2000년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

물들이 많은 피해를 입는 등 지진시 지반 및 구조물의 거동을 정확히 예측하기 위해서는 신뢰성 있는 부지의 증폭현상의 평가가 매우 중요하다.(NCEER⁽⁸⁾)

국내에서 내진설계에 관한 기준이 정립되기 시작한 것은 1980년대 후반부터이며, 최근들어 건설교통부에서 내진설계 성능기준(상위 개념 기준)을 제정하여 사용되고 있다.(건설교통부⁽¹⁾) 건교부 내진설계 기준에 따르면, 설계지반운동을 시설물의 중요도에 따라 내진 특, I, II등급으로 구분하였으며, 지진 발생시 구조물의 내진성능 수준에 따라 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 구분하였다. 또한, 지역별 지진발생 확률에 근거하여 설계지반운동 수준을 결정하여 지진 재해도로 제시하였으며, 지반 종류(전단파 속도에 따라 $S_A \sim S_F$ 로 분류)에 따른 설계 응답스펙트럼을 작성할수 있도록 하였다.(표 1) 부지고유의 특성평가가 요구되는 지반의 경우 (S_F) 앞서 예를 든 지진 피해와 유사하게 지진시 큰 증폭현상이 예상되므로 이에 적합한 설계 응답스펙트럼을 작성하여 구조물의 설계에 적용하는 것이 필요하다. 또한, 지반종류 S_D, S_E 지반으로 분류되어 설계지반운동의 결정이 가능한 지반이라도 지진에 대한 경제적이고 신뢰성있는 지반운동 평가를 위하여는 부지고유의 지반운동 평가가 매우 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 현재 실무에서 가장 널리 사용되는 1차원 등가선형 부지응답특성 평가방법의 개요를 설명하고, 문헌연구를 바탕으로 이를 위한 현장 및 실내 지반조사기법과 사용한 부지특성평가방법을 기술하였다. 이들

평가 방법을 적용하여 국내 건설부지에 대한 사례연구를 수행하고 국내내진설계 기준과의 비교 분석을 수행하였다.

2. 부지응답특성 평가 개요

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, 지진시 지반의 변형을 및 전단응력의 예측, 지반 구조물의 안정성 확보를 위한 지진에 의한 동적 하중의 산정을 위해 수행되어진다.

현재 사용중인 지반 증폭현상 해석기법 중 가장 널리 사용되어지는 방법은 1차원 지반 증폭현상 평가 기법이다. 이 기법은 지반을 구성하고 있는 모든 지층의 경계가 반무한수평이고 지반의 응답이 주로 기반암으로부터 연직 방향으로 전파되는 SH파에 의해 이루어진다고 가정하고 해석하는 방법이다. 경사각을 가지고 기반암에 도달한 지진파는 지반의 강성도가 일반적으로 하층부에서 상층부로 갈수록 작아짐에 따라 Snell의 법칙에 의하여 상향 전파가 이루어지면서 점점 연직 방향의 전파 경로를 갖게 된다.(그림 1) 따라서, 1차원 지반 증폭 평가 기법으로 대부분의 경우의 지반 증폭 현상의 예측이 가능하다.

지진 운동에 대한 정의는 그림 2와 같이 운동이 일어나는 매질 종류에 따라 지표면 자유장 운동(free surface motion, C), 기반암 운동

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	

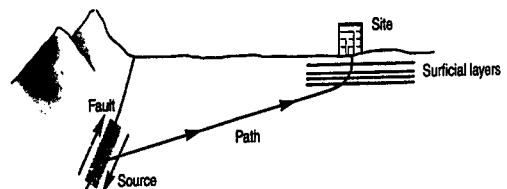


그림 1 지반내 지진파의 굴절현상(Kramer⁽⁸⁾)

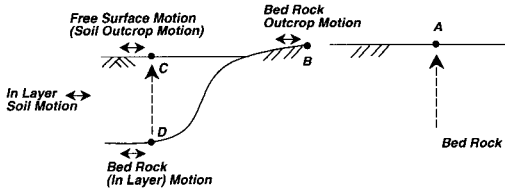


그림 2 지반운동의 정의 및 통제점 결정

(bedrock motion, D)으로 크게 나눌 수 있으며, 경계 조건에 따라 지진파의 전반사가 일어나는 자유장의 경우(상부 전파층이 존재하지 않는 경우) 노두운동(outcrop motion, C, B)으로 표현하여 1차원 지반 증폭 평가시 같은 기반암 운동이라도 층내운동(in layer motion, D)과 노두운동(outcrop motion, B)으로 명시하여 사용된다.

건교부 기준에서 설계지반운동수준은 "보통암 지반(전단파 속도 760~1500m/sec)"의 "지표면 자유장"에서 발생 할 수 있는 최대 가속도값(peak ground acceleration)으로 정의하며, 만약 내진설계를 하는 지역이 지진재해도상의 지반조건인 "보통암 지반"이 아닐 경우 그 지역의 지반특성에 따른 지진 응답평가를 실시하여 설계 지반 가속도를 재산정하여야 한다.

예를 들어 설계 대상지역의 설계지반운동수준은 그림 2와 같이 보통암지반의 지표면 자유장인 A점으로 지진재해도상에 정의되어 있으나, 지진응답해석을 하고자 하는 부지의 조건이 CD단면과 같이 지표면 자유장이 보통암이 아닌경우 지반 조건이 다르므로 지진재해도상에서 정의된 설계지반운동수준(A점의 지반운동 수준)을 C점에 적용하지 못하게 된다. 따라서 암반에서의 지진운동의 감쇠를 무시한다면, 지진재해도상에서 정의된 설계지반운동수준인 암반 노두운동(A, B)이 해석대상지역의 기반암(D)점에 도달한다고 보고 DC점간의 지진운동의 해석을 하여야 하는데 이를 "지진 응답해석"이라 한다. 이때, 유의하여야 할 점은 B점과 D점의 경계조건 차이에 따라 같은 지진운동이 B, D점에 도달한다 하여도 그 크기가 다르며, 일반적인 지진응답 해석 프로그램

에서는 이를 각각 노두운동(outcrop motion)과 지반내 운동(in layer motion)으로 정의하여 입력치를 산정할 수 있도록 하였다.

일반적으로 지반은 미소변형율에서 부터 비선형거동을 하므로 이를 고려한 해석이 필요하며, 크게 선형해석기법, 등가선형해석기법과 비선형해석기법으로 구분할 수 있다. 선형해석기법은 지반의 변형율에 따른 전단탄성계수 및 감쇠비의 변화를 고려하지 않고 초기 공학적 물성치를 사용하여 해석을 수행하는 기법이며, 비선형 해석기법은 지진시 지반이 겪게 되는 전단 변형율의 변화를 단계적으로 고려하는 방법이며, 등가선형해석기법은 지반의 비선형성을 고려하는 선형해석기법으로써 지진시 겪게되는 지반변형율의 변화과정을 등가변형율로 대표하여 이에 상응하는 지반의 전단탄성계수와 감쇠비를 사용하여 해석하는 방법이다.(Kramer⁽⁷⁾)

지진 발생시 지진 거동이 예측가능한 위치는 일반적으로 암반 노두(rock outcrop)에서의 계측치와 지표면(free surface)에서의 계측치이다. 따라서, 1차원 지반 증폭현상 평가 방법의 타당성은 암반 노두에서의 계측치를 이용하여 기반암에서의 지진 거동을 예측한 후 이를 이용하여 1차원 지반 증폭현상 평가를 통하여 지표면에서의 지진거동을 예측하고 이를 암반 노두 인근 지역에서 계측되어진 지표면 실제 계측치와 비교하는 방법으로 검증되어져 왔다. (Idriss⁽⁶⁾)

3. 부지특성평가를 위한 지반조사

3.1 지반조사계획

3.1.1 시추깊이

정적하중에 대한 전통적인 구조물의 설계시에는 지지층의 위치를 확인하는 것이 중요하였으나, 내진설계에서는 지진시 지반운동을 결정하기 위한 기준면의 위치를 확인하는 것이 중요하다. 1997년 작성된 건교부 내진설계 기준

연구(건설교통부⁽¹⁾)에 의하면 설계지반운동의 기준면은 전단파속도를 기준으로 760~1500m/sec 범위의 보통암 지반이며, 표준관입시험의 N값으로부터의 결정은 어렵다고 기술되어 있다. 따라서, 지진응답특성 평가를 위하여는 풍화암 지역을 통과하여 보통암 지반까지 시추 및 지반조사가 수행되어야 한다. 그러나, 모든 시추를 기반암 깊이까지 수행할 필요는 없으며 상세지반조사 초기에 설계지반운동 결정을 위한 대표적 시추위치를 선정하고, 선정된 시추공에서는 기반암 깊이까지 표준관입시험, 탄성파시험, 실내시험을 위한 비교란 시료채취 등을 수행하여야 한다.

3.1.2 조사항목 및 빈도

지진응답특성 결정을 위하여는 지반의 층상구조, 기반암까지의 깊이, 각 층의 밀도, 전단파속도, 전단탄성계수와 감쇠비의 비선형 특성, 지하수위, 지반응력상태의 평가가 필요하다. 표준관입시험은 1m간격으로 수행하며 샘플러에 채취된 시료를 이용하여 입도분포를 결정한다. P파 및 S파 검층은 표준관입 시험이 수행된 시추공에서 1~2m간격으로 수행한다. 지반의 변형특성 및 단위중량 평가를 위하여는 각 층에서 1개 이상의 시료채취를 하여 실내시험을 수행한다.(PHRI⁽¹⁰⁾)

3.2 지반조사기법

지반공학에서 사용되는 대표적인 관입시험은 표준관입시험과 콘관입시험이 있다. 표준관입시험은 다양한 종류의 지반에 적용가능하나, 암반이나 자갈층에서는 사용할 수 없다. 표준관입시험을 통하여 관입저항값(N값), 입도분포 및 지반분류 등 물리적 시험을 위한 교란 시료 채취등을 수행한다. 내진설계를 위하여 N값과 동적지반계수와의 경험적인 상관관계를 자주 사용한다. 이때 사용되는 N값이 상재하중과 에너지비에 대한 보정이 필요한지 주의할 필요가 있다. 연약 점성토 지반에서 N값과

동적 지반계수와의 상관성을 이용한 경우 신뢰성이 떨어지므로 비교란 시료 채취를 통한 실내시험을 이용하는 것이 바람직하다.

최근, 선단저항, 주변마찰, 간극수압의 연속적 측정이 가능한 피에조콘 장비의 활용이 빈번하며, 이들 측정값을 바탕으로 내진설계를 위한 지반분류, 지반계수 추정이 가능하다. 콘시험장비에 진동감지기를 설치하여 다운홀시험이 가능한 동적콘실험(seismic cone)을 활용할 수 있다.

지진시 지반거동평가를 위하여 각 층의 전단탄성계수, 감쇠비, 단위중량의 결정이 중요하다. 지반은 변형률 크기에 따라 탄성계수가 감소하는 비선형 거동을 보인다. 선형한계 변형률 이하의 저변형률 영역($\gamma < 10^{-4}\%$)에서 지반의 선형거동을 측정하기 위하여 현장 탄성파 기법이 사용되나, 비선형 거동 및 감쇠비 측정이 불가능하므로 변형을 변화에 따른 탄성계수의 비선형성과 감쇠비 측정을 위해서는 실내시험이 필요하다.

저변형률 영역에서 지반의 전단파속도 주상도를 작성하기 위해서는 시추공내에서 수행되는 탄성파시험(크로스홀, 다운홀시험)과 표면파시험을 사용한다. 특, 1등급 구조물의 경우에는 시추공내에서 수행되는 탄성파시험을 반드시 수행하여야 한다. 탄성파시험이 수행된 지반조사 이후에 구조물이나 성토체의 시공에 의해 지반의 유효상재하중의 변화가 예상되는 경우는 유효상재하중의 변화를 고려하여 전단파속도의 크기를 수정하여 사용한다.

변형률 크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비의 변화를 얻기 위하여 공진주시험, 진동삼축 압축시험, 비틀전단시험을 사용한다. 이들 시험은 현장에서 채취된 비교란 시료를 이용하여 수행하는 것이 원칙이나 비교란 시료 채취가 어려운 경우에는 현장 밀도를 고려하여 재성형된 시료를 사용할 수도 있다. 시험시 변형률 크기가 크지 않은 경우($\gamma < 10^{-1}\%$), 시료에 가해지는 교란 정도가 미미하므로, 1개의 시료를 이용하여 여러 개의 구속압 단계의 시험을

실시하는 단계적 시험(staged-testing)이 가능하다.(Kim⁽⁶⁾)

내진 특, 1등급 구조물의 설계시에는 지반의 비선형 거동을 실내시험법을 사용하여 측정하여야 한다. 이를 위하여 각 층에서 비교란 시료를 채취하고, 변형률 크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비를 측정한다. 이때 변형률 범위는 10⁻⁴%~1% 영역을 추천한다. 이때 시료가 채취된 깊이에서의 구속압 효과를 고려하기 위하여, 최소 3가지 구속압단계(현장지반 평균주응력의 1/2, 현장지반의 평균주응력, 현장지반 평균주응력의 2배)에서 시험을 실시하고 시공후에 구속압 정도를 고려하여 사용한다.

3.3 지반의 변형특성

3.3.1 저변형률 변형특성

저변형률($\gamma < \gamma_t^c$) 하에서의 전단탄성계수(G_{max})와 감쇠비(D_{min})는 구속압, 간극비, 응력이력, 포화도, 입도분포 및 배열, 하중속도, 시간효과 등 많은 요소에 영향을 받는다. 실내시험에서 현장의 조건을 완벽하게 재현하여 변형특성을 결정하는 것이 매우 어려우므로, 최대 전단탄성계수는 현장 탄성파시험에서 얻은 전단파속도 주상도로부터 식 (1)을 이용하는 것을 원칙으로 한다. 감쇠비의 경우는 현장시험으로부터의 측정이 불가능하여, 실내시험으로 얻는다.

$$G_{max} = \frac{\gamma_t}{g} V_s^2 \quad (1)$$

여기서, V_s = 전단파속도 (m/sec)

γ_t = 지반의 전체단위중량 (Ton/m³)

g = 중력가속도 (9.8m/sec²)

저변형률 변형특성을 예측하기 위하여 Hardin은 간극비, 구속압, 과압밀비의 함수로 최대전단탄성계수를 예측하는 식을 제안하였다.(Hardin⁽⁴⁾) 일본 항만기술연구소에서는 최대전단탄성계수를 점성토 지반에서 1축 압축강도와 상관관

계로, 사질토 지반에서 N값과의 상관관계로 예측하는 식을 제안하였다.(PHRI⁽¹⁰⁾) 지반의 감쇠비도 저변형률 영역에서 변형률 크기에 관계없이 일정한 최소값(D_{min})을 갖는다. 지진시 지반거동을 예측하는데 감쇠비가 상당히 중요한 영향을 미치나, 신뢰성 있는 예측의 어려움으로 인하여 전단탄성계수와 비교할 때 지금까지는 상대적으로 적은 연구가 수행되어 왔다. 주요시설의 설계시에는 비교란 시료를 채취하여 지반의 감쇠비를 측정하여야 된다. Vucetic과 Dobry⁽¹³⁾의 문헌 연구결과에 의하면 저변형률 감쇠비(D_{min})는 0.5%~5.5% 범위에 분포하는 것으로 보고되었으며, PHRI⁽¹⁰⁾의 보고서에도 1%~5% 범위를 제안하고 있다.

3.3.2 고변형률 변형특성

선형한계변형률 이상의 고변형률에서 지반은 변형률이 증가함에 따라 전단탄성계수는 감소하고 감쇠비는 증가하는 비선형 거동을 보인다. 지반의 비선형 응력-변형 관계를 모델하기 위하여 Ramberg-Osgood 모델, 수정 hyperbolic 모델, bilinear 모델 등이 사용된다. 지진시의 지반거동을 경제적으로 예측하기 위하여, 등가 선형 해석이 주로 사용되고 있으며, 이때 실내시험으로부터 측정된 전단탄성계수변형률($G-\gamma$) 관계 및 감쇠비-변형률($D-\gamma$) 관계가 이용된다. 탄성계수(G)를 최대 전단탄성계수(G_{max})로 정규화하여 나타낸 것을 정규화탄성계수 감소곡선(normalized modulus reduction curve)이라고 칭한다. 정규화 탄성계수 감소곡선은 주어진 지반에 대하여 매우 좁은 범위에서 결정되고, 시료의 교란과 불교란에 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있어, 현장시험과 실내시험을 복합적으로 고려할 때 매우 중요한 요소로 작용한다.

소규모 프로젝트에서 지반의 비선형 거동의 측정이 불가능할 경우에는 경험적 상관관계를 적용할 수 있다. 그러나, 이들 상관관계는 데이터의 분산을 감수하여 외국지반의 시험 자료를 바탕으로 만들어진 성과이므로 국내지반

에 적용시 주의를 요한다.

Vucetic과 Dobry⁽¹³⁾는 점성토 지반에서 수행된 시험결과의 문헌 연구를 바탕으로, 선형한계 변형률은 소성지수(PI)의 증가에 따라서 증가함을 밝히고, 소성지수에 따른 정규화 탄성계수 감소곡선과 감쇠비 곡선을 제시하였다. 이들의 상관관계는 PI가 15이상인 점성토 지반에서 타당한 결과를 보인다고 판단되며, 비소성(NP) 지반이나 소성지수가 15이하인 지반의 경우 구속압의 영향을 고려할 필요가 있다.

일본 항만기술연구소(PHRI)⁽¹⁰⁾ 보고서에서는 NP 혹은 PI가 10이하인 지반에서 구속압의 효과를 고려한 정규화 전단탄성계수 감소곡선을 제안하였다. 뒷채움 쇄석이나 자갈층의 전단탄성계수 감소곡선은 Rollins등이 제안한 곡선을 사용할 수 있으며(Rollins et al.⁽¹¹⁾), 국내 준설패립토에 대한 전단탄성계수 감소곡선은 김동수와 추연욱⁽²⁾이 제시하였다.

3.4 부지특성 평가 방법

건설되는 구조물의 중요도, 시험장비의 가용성, 지반조사 비용 등을 고려하여 지반조사기법의 조합이 결정되므로, 현장여건에 따라 각 시험에서 결정된 지반물성치를 효과적으로 결합하여 대상지반의 부지특성을 평가하여야 한다.

3.4.1 현장 및 실내시험 결과 이용

- ① 현장시험을 통하여 대상지반의 깊이별 전단파속도(V_s)주상도를 결정한다. 이때, 크로스홀시험, 다운홀시험 등이 사용될 수 있다.
- ② 대상지반을 층으로 나누고 각층의 질량밀도를 추정하여 현장시험에서 결정된 전단파속도로부터 저변형률 최대탄성계수(G_{max})를 결정한다.
- ③ 각층의 중앙에서 비교란시료를 채취한다. 이때 시료에 교란이 발생되지 않도록 시료 채취 및 운반시 주의하여야 한다. 비교란시료의 채취가 매우 어려운 경우에는 교란시료로 채취한다.

- ④ 실내 변형특성 평가시험을 수행하여 변형률 크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비를 얻는다. 이때, 공진주시험, 진동삼축시험, 비틀전단시험을 사용할 수 있으며 변형률 범위는 10^{-4} ~1%를 추천한다.

- ⑤ 실내시험 결과로부터 현장 구속압 상태를 고려하여 각 층에 대표적인 변형률 크기에 따른 정규화전단탄성계수(G/G_{max})관계를 도출한다.

- ⑥ 현장에서 구한 최대전단탄성계수(G_{max})와 실내시험에서 구한 비선형관계(G/G_{max} -log)를 결합하여 각 층에서의 현장 비선형 전단탄성계수를 식 (2)와 같이 결정한다.

$$G_{field} = (G/G_{max})_{\gamma, lab} \times (G_{max})_{field} \quad (2)$$

- ⑦ 현장시험으로부터 감쇠비 측정이 불가능하므로, 실내시험에서 얻은 변형률 크기에 따른 감쇠비($D - \gamma \log$) 관계를 사용한다.

3.4.2 현장시험 결과 이용

시험장비의 가용성 및 지반조사 비용의 제한 등으로 인하여 현장시험만이 가능할 경우, 부지특성을 평가하기 위한 단계별 방법을 정리하면 다음과 같다.

- ① 3.4.1절의 ①, ②단계를 수행한다.
- ② 각 층의 정규화 전단탄성계수 감소곡선(G/G_{max} -log)을 구하기 위하여 대상지반의 층상구조와 종류를 분류하여 3.3.2절에 기술한 내용을 포함한 상관관계를 적용할 수 있다.
- ③ 현장에서 구한 최대전단탄성계수와 문헌에서 구한 지반의 비선형 관계를 결합하여 각 층에서의 비선형 전단탄성계수를 식 (3)을 적용하여 결정한다.

$$G_{field} = (G/G_{max})_{\gamma, literature} \times (G_{max})_{field} \quad (3)$$

- ④ 변형률 크기에 따른 감쇠비($D - \log \gamma$) 관계를 결정하기 위하여 3.3.2절에 기술된 내용을 포함한 상관관계를 사용한다.

3.4.3 경험에 의한 방법

시험장비의 가용성 및 지반조사 비용의 제한 등으로 인하여 현장 탄성파시험 및 실내 변형 특성시험을 수행할 수 없는 경우에는 경험적 방법에 의해 지반의 비선형 거동을 평가한다.

- ① 지반조사 자료를 바탕으로 지반의 층상구조를 확인하고 각 층에서 지반자료(N_{60} , 단위중량, 지하수위, 간극비, 액 소성한계, 입도분포, 비중 등)를 얻는다.
- ② 지반자료와의 경험적 상관관계를 이용하여 각 층의 최대전단탄성계수(G_{max})를 결정한다. 3.3.1 절의 내용을 포함한 상관식을 적용할 수 있다.
- ③ 3.4.2절의 ②, ③, ④ 단계를 수행한다.

4. 국내지반의 거동평가 예제

4.1 개요

본 논문에서는 국내 인천 지역을 대상 부지로 선정하여 3.4절에서 설명된 부지특성 평가방법 중 현장 및 실내시험 결과를 이용하는 방법으로 부지고유의 지반거동을 평가해 보았다. 현장시험으로 지반 분류를 위해 에너지비 측정이 이루어진 표준관입시험(SPT)을 수행하였고 전단파 속도 주상도 획득을 위해 표면파시험(SASW)과 다운홀시험을 수행하였다. 실내 시험으로는 인근 현장 교란 시료를 재성형하여 공진주/비틀전단 시험을 수행하여 대상지반 각층의 변형율에 따른 G/G_{max} 곡선과 감쇠비 곡선을 획득하였다. 현장 및 실내 시험을 수행하여 얻어진 지반 조사자료는 최종적으로 1차원 지반 증폭 해석 프로그램인 SHAKE91⁽¹²⁾의 입력변수로 사용되었다.

4.2 현장 및 실내시험 결과

표준관입시험(SPT)을 수행하여 대상 부지의 주상도를 그림 3과 같이 획득하였다. 본 대상 부지는 상부 8m정도 깊이로 매립토층이 존재하였고 그 밑으로 점토질 실트층과 점토층이 28m깊이로 있으며, 그 밑으로 사질토 층과 풍

화암, 마지막으로 기반암이 놓여 있다. 표준관입시험은 50m깊이 까지 수행되었으며 풍화암의 깊이는 SASW결과를 바탕으로 추정하였으나, 그 정확한 깊이는 판단하기는 어렵다. 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.

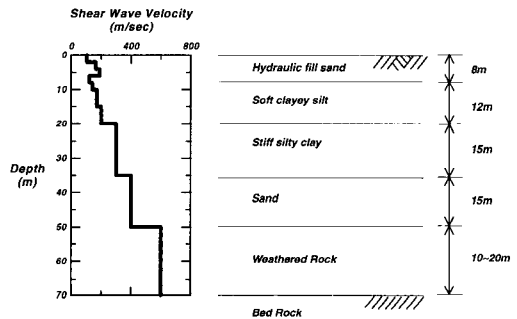


그림 3 현장 시험으로부터 획득된 지반의 전단파 속도 주상도 및 지층 분류 주상도

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

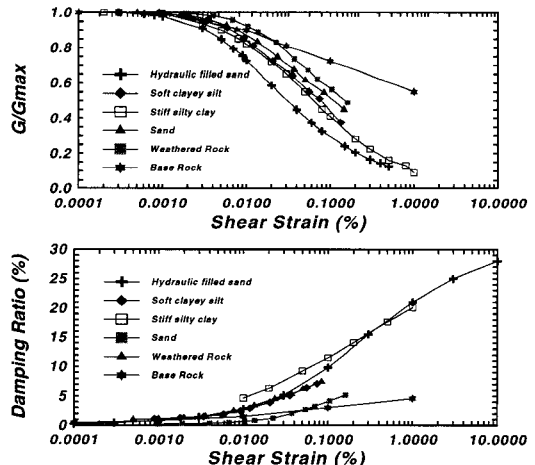


그림 4 실내 시험으로부터 획득된 지반의 변형율에 따른 정규화 전단탄성계수, 감쇠비 곡선

4.3 입력 지진 파형 및 지진 강도

지반 증폭현상 평가에 있어서 사용되어지는 입력지진의 종류는 증폭현상에 큰 영향요소로서 작용하는데, 그 이유는 입력 지진의 주파수 대역 에너지 분포와 지반의 공진주파수 대역의 상관성, 입력지진의 최대가속도(peak acceleration)에 따른 지반의 비선형 거동에 기인하게 된다.

1997년 작성된 건교부 내진설계 기준(건설교통부⁽¹⁾)에 따르면, 설계지반운동 수준을 재현주기와 지역에 따라 등고선 형태의 지진재해도로 제시하였다. 지진 재해도는 재현주기에 따라 제시되어 있으며, 설계지반운동 수준의 선택은 설계하고자 하는 구조물의 중요도와 내진성능에 대하여 재현주기를 결정한다.

본 논문에서는 대상 지반의 증폭현상 평가를 위해 입력지진으로 일본에서 항만 설계시 사용되는 장주기(Hachinohe) 및 단주기(Ofunato) 지진과 El Centro 지진을 입력지진으로 선택하였다.(그림 5) 입력 지진의 크기는 인천지역 I 등급 구조물 기능수행 수준인 최대가속도 0.06g로 조정하여 사용하였으며, 조정된 설계가속도 0.06g는 보통암 지반의 경우 이므로 평가 대상

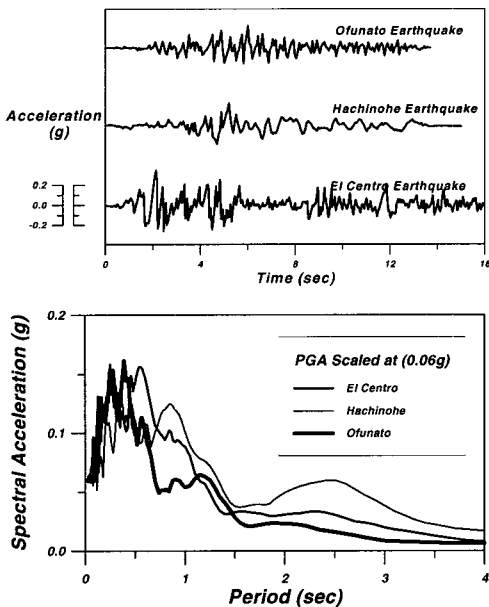


그림 5 입력 지진 파형과 주파수 대역

부지의 입력시 기반암 최대가속도 0.06g의 지진이 노두운동(outcrop motion)으로 작용하도록 적용하였다.

4.4 해석 결과

앞절에서 설명한 입력지진 종류와 크기로 일차원 지반 증폭 해석 프로그램인 SHAKE91을 사용한 대상지반의 지반 증폭 결과는 그림 6과 같다. 그림 6으로부터 암반 노두에서의 지진크기에 비하여 지표면에서의 크기가 크게 증폭이 됨을 볼 수 있으며, 지진의 주파수 대역 에너지 분포에 따라 그 증폭정도가 확연히 차이가 남을 알 수 있다.

지반의 깊이가 깊은 부지의 경우 기반암의 깊이를 추정하는데 있어서 큰 어려움이 있는데, 이는 기반암 상부층(풍화암)의 두께 결정에 중요한 요소로 작용한다. 이번 예제 해석에서는 수행가능한 지반조사로써 표면파기법을 사용하였으나, 시험방법의 제한으로 인하여 정확한

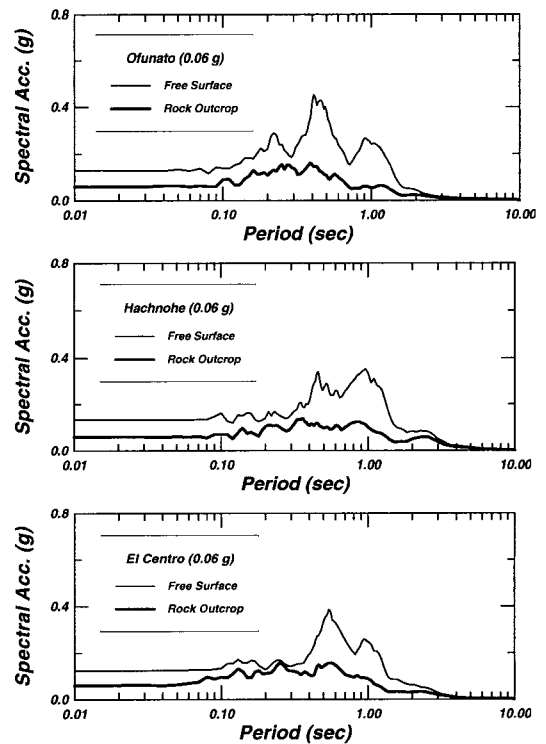


그림 6 지진 파형에 따른 지반 증폭 현상 평가

풍화암의 깊이와 전단파 속도를 추정하지 못하였다. 따라서, 풍화암의 깊이를 5m-30m로 변화시키며 해석한 결과 지표면 자유장에서의 최대 가속도는 약 20%정도의 변화를 가져왔으며, 풍화암의 두께가 커질수록 그 크기는 감소하였다. 또한, 풍화암의 전단파속도 영향은 크기가 커짐에 따라 지표면의 최대가속도는 15% 정도 증가함을 볼 수 있었다. 따라서, 지층의 두께가 깊은 부지의 경우 기반암의 깊이를 정확히 추정하는 것이 부지증폭 현상 평가에 영향을 미침을 알 수 있다.

건교부 내진설계 기준에서 지반종류 S_D 또는 S_E 지반의 응답스펙트럼과 1차원 부지응답특성 평가 결과를 비교하여 그림 7에 도시하였다. 그림 7로부터 본 부지의 경우 장주기 지진에너지의 경우 건교부 내진설계 기준에 비하여 큰 지반증폭을 나타냄을 알 수 있으며, 이러한 부지의 경우 S_E 지반으로 분류하여 부지고유의 증폭 현상을 평가할 필요가 있음을 알 수 있다.

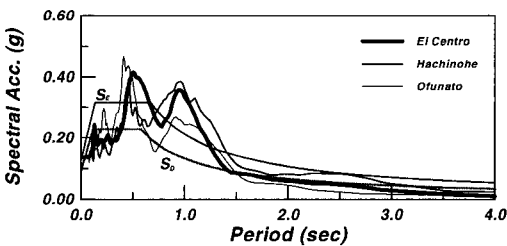


그림 7 건교부 내진 설계기준과의 비교

5. 요약

본 논문에서는 지반 증폭현상에 대한 평가 개요, 부지특성평가를 위한 지반조사 기법, 국내 부지에 대한 평가 예제 수행을 통하여 현재 실무에서 가장 널리 사용되는 1차원 등가선형 부지응답특성 평가방법을 이용한 부지고유의 지반거동 평가기법을 기술 하였다. 본 논문의 내용을 요약하면 다음과 같다.

부지고유의 지반응답특성평가 개요를 건교부 기준의 설계지반운동 결정 방법에 맞추어 기술하였으며, 부지특성 평가를 위한 지반조사

기법, 저변형을 및 고변형을 하에서의 지반의 변형특성과 관련된 내용을 요약하였다. 또한, 부지특성 평가시 구조물의 중요도, 시험장비의 가용성 및 지반조사 비용을 고려하여 시행자가 결정할 수 있도록 국내 내진 기준과 외국의 기술현황 조사를 바탕으로 현장 및 실내시험 이용, 현장시험이용, 경험적 방법 등 3가지의 기법을 제안하였다.

마지막으로 제안된 방법을 이용하여 국내 지반에 대한 부지고유의 지반응답특성 평가를 수행하여, 연약지반에서의 지반증폭의 가능성, 입력지진의 영향, 기반암 까지의 깊이 및 풍화암 전단파 속도의 영향을 분석하였다. 본 논문에서 해석을 수행한 대상부지의 경우 국내 내진 설계기준과의 비교를 통해 부지 고유의 지반증폭현상 평가가 필요함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터 과제(97KS-1031-02-03-3)와 KISTEP(ED-01-04) "지진 재해 대응기술 개발사업"의 연구비 지원에 의한 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 건설교통부, 내진설계기준연구(II), 1997, pp. 29-41.
2. 김동수, 추연옥, "국내 준설매립토 지반의 동적변형특성", 한국 지진공학회 춘계학술 발표회, 1999.
3. Dobry, R. and Vucetic, M., "Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits," *Proceedings, International Symposium on Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106, No. GT6, 1987, pp. 720-724.*
4. Hardin, B. O., "The nature of stress strain behavior of soils," *Proceedings, Geotech. Eng.*

- Div. Specialty Conferece on Earthquake Eng. and Soil Dynamics*, ASCE, Pasadena, Vol. 1, June, 1978, pp. 390.
5. Idriss, I. M., "Assessment of site response analysis procedureds," GCR 95-667, NIST, 1995.
 6. Kim, D. S., "Deformation Characteristics of Soils at Small to Intermediate Strains form Cyclic Test," Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 1991.
 7. Kramer, S. L., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1996.
 8. National Center for Earthquake Engineering Research, "Research Accomplishment (1986-1994)," State University of New York at Buffalo, 1994, pp. 121-128.
 10. Port and Harbour Research Institute Editor (PHRI), *Handbook Liquefaction Remediation of Reclaimed Land*, PHRI, 1997.
 11. Rollins, K. M., Evans, M. D., Diehl, N. B., and Daily III, W. D., "Shear modulus and damping relationships for gravels," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 5, May, 1998.
 12. Schnabel, P. B., Lysmer, J., and Seed, H. B., "SHAKE : a computer program for earthquake response analysis of horizontal layered sites," Report EERC 7212, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, 1972.
 13. Vucetic, M. and Dobry, R., "Effects of soil plasticity on cyclic response," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 1, Jan, 1991.
 14. Yegian, M. K., Ghahraman, V. G., and Gazetas, G., "1988 Armenia earthquake. I: seismological geotechnical, and structural overview," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 1, Jan, 1994, pp. 119.