

지반 응답 해석 Round Robin Test의 입력 지반 물성에 따른 지반 응답 특성 영향 고찰

Effect of Input Soil Properties for Round Robin Test on Ground Response Analysis

김동수¹⁾, Dong-Soo Kim, 이세현²⁾, Sei-Hyun Lee, 추연욱³⁾, Yun-Wook Choo, 박성식⁴⁾, Sung-Sik Park,
김동준⁵⁾, Dong-Joon Kim

- 1) 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST
- 2) 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST
- 3) 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사후 연수 연구원, Post-Doctoral Researcher, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST
- 4) 원광대학교 토목환경·도시공학부 전임강사, Full Time Lecturer, Division of Civil, Environmental & Urban Engineering, Wonkwang University
- 5) 현대건설 기술연구소 선임연구원, Senior Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : Free field ground motion during earthquake is significantly affected by the local soil conditions and it is essential for the seismic design to perform the site specific ground response analysis. So, Round Robin Test (RRT) on ground response analysis was performed for three sites in Korea. A total of 12 teams presented the results of ground response analysis with used input soil properties based on own judgement. In this paper, the results of one dimensional equivalent linear analysis presented by 11 teams were compared to evaluate the effect of input soil properties on ground response analysis. Additionally, 4 influence factors on ground response analysis, that is shear wave velocity of soil layer, nonlinear dynamic deformational characteristics, bedrock depth and bedrock velocity were studied for assumed simple soil conditions.

Keywords : Round Robin Test, local site condition, ground response analysis, input soil property, equivalent linear analysis, influence factor study

1. 서론

지진은 인명과 재산에 가공할 피해를 가져올 수 있는 자연재해 중 하나이다. 최근 들어 국내외적으로 지진의 발생 빈도가 증가하고 큰 규모의 지진이 발생하고 있으며 지진에 의한 심각한 피해사례들이 보고되고 있다. 역사기록에 의하면 우리나라도 인명과 재산 피해를 초래한 강진이 몇 차례 있었지만 일반적으로 지진에 대한 안전지대로 인식되어 왔다. 그러나 최근에 발생한 울진해역 지진(2004, 규모 5.2), 후쿠오카 지진(2005, 규모 7.0), 오대산 지진(2006, 규모 4.9) 등은 큰 규모의 지진은 아니지만 직접 또는 간접적으로 우리나라에 영향을 미치면서 대형 토목구조물 뿐 아니라, 내진설계 적용 대상 구조물의 범위가 확대되는 등 내진설계의 중요성이 강조되고 있다.

구조물의 내진설계를 수행하기 위해서는 기본적으로 구조물에 가해지는 지진하중을 결정해야 하며 이는 부지 고유의 지반응답해석(Site Specific Response Analysis)을 통해 획득한 지표면 가속도와 설계

응답스펙트럼으로부터 결정하게 된다. 그러므로 신뢰성 있는 지반응답해석을 수행하기 위해서는 기반암 상부의 국지적 지반 조건을 정확히 평가하는 것은 매우 중요하다.

지진에 의해 발생된 지반운동은 국지적 지반조건에 의해 좌우되고 지진시 구조물의 거동은 구조물 하부 기초지반에 많은 영향을 받으므로, 지진 관련 지반 공학적 문제들에 대한 이해와 연구는 매우 중요하다. 실제 연약한 점토질 퇴적층 위에 형성된 Mexico City의 경우 지반증폭현상에 의하여 엄청난 피해를 입었으며(Dobry & Vucetic, 1987), 멕시코시티 지진 이후 지반조건에 따른 지반 응답 특성에 대한 연구가 활발하게 진행되었다. 또한 1988년 발생한 Armenia 지진의 경우, 진원으로부터 멀리 떨어진 깊은 퇴적층 위에 세워진 도시가 진원 근처에 위치한 도시보다 많은 피해를 입었다(Yegian 등, 1994). 따라서 국지적 지반조건에 따라 지진에 의한 지반증폭현상을 평가하여 설계지진력 산정시 고려하는 것은 매우 중요하다. 또한 전단파속도 주상도, 변형률에 따른 정규화 전단탄성계수, 감쇠비 등 지반의 동적 물성치의 지반 응답 특성에 대한 영향 정도를 평가하는 것 역시 지반공학적 내진설계 차원에서 가치 있는 일이 될 것이다.

한국지반공학회 지반진동위원회에서는 3개의 해석대상지반에 대한 층상구조, 깊이별 SPT-N치, CPT- q_c 값과 같은 지반의 기본 정보를 이용하여 부지 고유의 지반응답해석을 수행하는 Round Robin Test(RRT)를 실시하였고, 이를 통해, 해석기법, 입력 지반 물성, 입력지진과 등의 차이에서 발생할 수 있는 지반 응답 특성의 분산정도를 검토함으로써 내진설계의 신뢰성을 증진하는데 도움이 되고자 하였다. 본 논문에서는 기관별로 SPT-N치와 CPT- q_c 값을 이용하여 제시한 지반 전단파속도 주상도와 문헌에서 획득한 비선형 변형특성 등 입력 지반 물성치에 따른 지반 응답 특성의 영향 정도를 집중적으로 분석하였다. 해석기법의 경우에는 총 12개의 기관 중 11개 기관에서 제출한 등가선형 해석(SHAKE91, Pro SHAKE, EERA, DEEPSOIL 등) 결과를 중심으로 분석을 수행하였다.

2. 지반응답해석을 위한 입력 지반 물성치

지반응답해석을 위한 입력 지반 물성치에는 지반의 층상구조, 층별 밀도, 전단파속도 주상도, 변형률에 따른 정규화 전단탄성계수 및 감쇠비, 그리고 액상화 관련 계수 등이 있으며 다양한 현장 및 실내 시험을 통해 이러한 입력 변수들을 획득하고 있다. 본 절에서는 주어진 해석대상지반의 층상구조와 SPT-N치, CPT- q_c 값을 이용하여 기관별로 제시한 전단파속도 주상도, 비선형 동적 변형특성, 층별 밀도에 대해 검토하고자 한다.

2.1 전단파속도 주상도

본 RRT에 참여한 12개 기관에서는 3개의 해석대상지반에 대해 주어진 SPT-N치와 CPT- q_c 값을 문헌에서 획득한 여러 경험식에 적용하여 전단파속도 주상도를 제시하였다. (단, 해석대상지반 3에 대해서는 SPT-N치만 주어짐) 각 해석대상지반에 대한 12개의 전단파속도 주상도와 함께 이로부터 획득한 상한, 하한, 평균 전단파속도 주상도를 그림 1에 나타내었다. 단 해석대상지반 1에는 이상값(Outlier)라 할 수 있는 결과가 1개 존재하여 이를 제외하고 하한 및 평균 전단파속도 주상도를 결정하였다.

또한 각 해석대상지반에 대해 기관별 상부 토층 30m의 평균 전단파속도($V_{s,30}$)의 평균, 최대, 최소값과 건설교통부 상위개념 기준인 내진설계기준연구(II)의 방법으로 지반을 분류하였을 때의 결과를 표 1에 나타내었다. 3개의 지반 모두 $V_{s,30}$ 의 평균값으로부터 S_D 지반으로 분류되고, 해석대상지반 1의 경우, 이상값(Outlier)의 영향으로 $V_{s,30}$ 의 최소값이 상당히 작은 것을 확인할 수 있다.

2.2 비선형 동적 변형특성

정규화 전단탄성계수 감소곡선($G/G_{max}-\log\gamma$), 감쇠비 곡선($D-\log\gamma$)과 같은 비선형 동적 변형특성은 시료의 교란, 하중주파수 등에 상관없이 일정하게 나타나며, 시료의 종류(자갈, 모래, 점토 등)에 따라

일정한 범위에서 결정되는 것으로 알려져 있다(Seed 등, 1984). 따라서 본 논문에서는 3개의 해석대상 지반에 나타나 있는 지반의 종류를 고려하여 6개의 지반(1.자갈섞인 모래, 2.점토질 실트, 3.실트질 모래, 4.점토, 5.모래, 6.풍화암)으로 분류하였다. 각각의 지반에 대해 12개 기관에서 제시한 비선형 동적 변형특성과 각 지반에 대한 상한, 하한을 함께 도시하여 그림 2에 나타내었다. 풍화암의 경우에는, 대부분의 기관이 Schnabel(1973)에 의해 제안된 곡선을 사용하였기에 그 곡선을 강조하여 나타내었다. 자갈섞인 모래, 실트질 모래, 모래와 같은 모래 계열의 지반에 대해서는 많은 기관에서 Seed & Idriss(1970, 1984)의 모래에 대한 곡선을 사용하였고, 점토질 실트, 점토와 같은 점토 계열의 지반에 대해서는 Vucetic & Dobry(1991)과 Seed & Sun(1984)에 의해 제안된 곡선을 대부분 사용하였다.

2.3 단위중량

깊이별 단위중량을 결정하기 위해 지반 종류 또는 SPT-N치를 바탕으로 국내의 참고자료를 이용한 기관이 있었지만, 대부분 기관에서는 경험에 의해 지반 종류별로 단위중량을 가정하여 해석을 수행한 것으로 판단된다. 각 기관에서 제시한 단위중량을 살펴보면, 같은 종류의 지반이라 하여도 깊이별로 단위중량이 다르겠지만 자갈섞인 모래의 경우, $1.8\sim 2.0t/m^3$, 점토질 실트의 경우, $1.6\sim 1.9t/m^3$, 실트질 모래와 모래의 경우, $1.8\sim 2.0t/m^3$, 점토의 경우, $1.7\sim 1.9t/m^3$, 풍화암의 경우, $1.95\sim 2.2t/m^3$ 범위로 분포하였다.

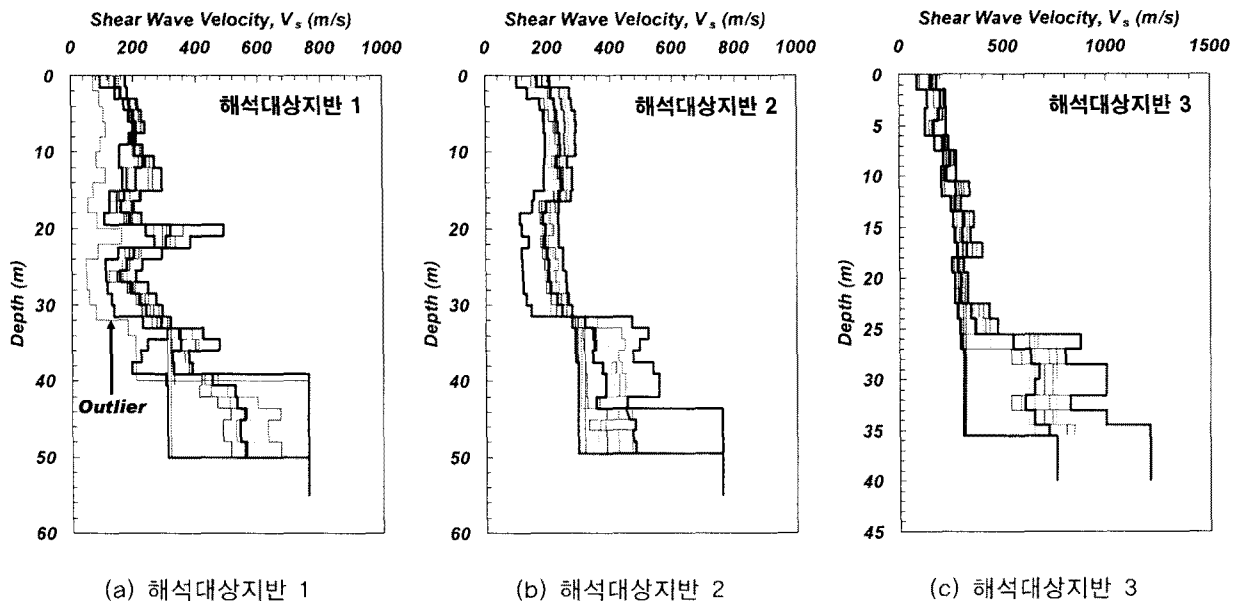
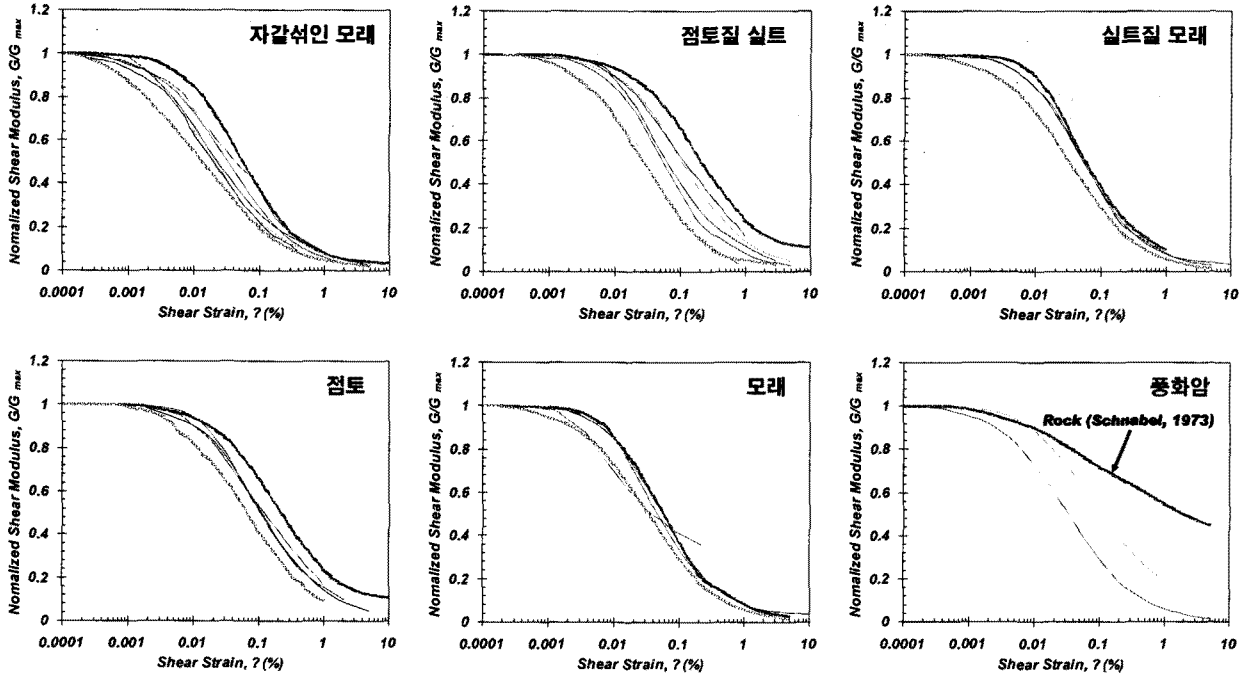


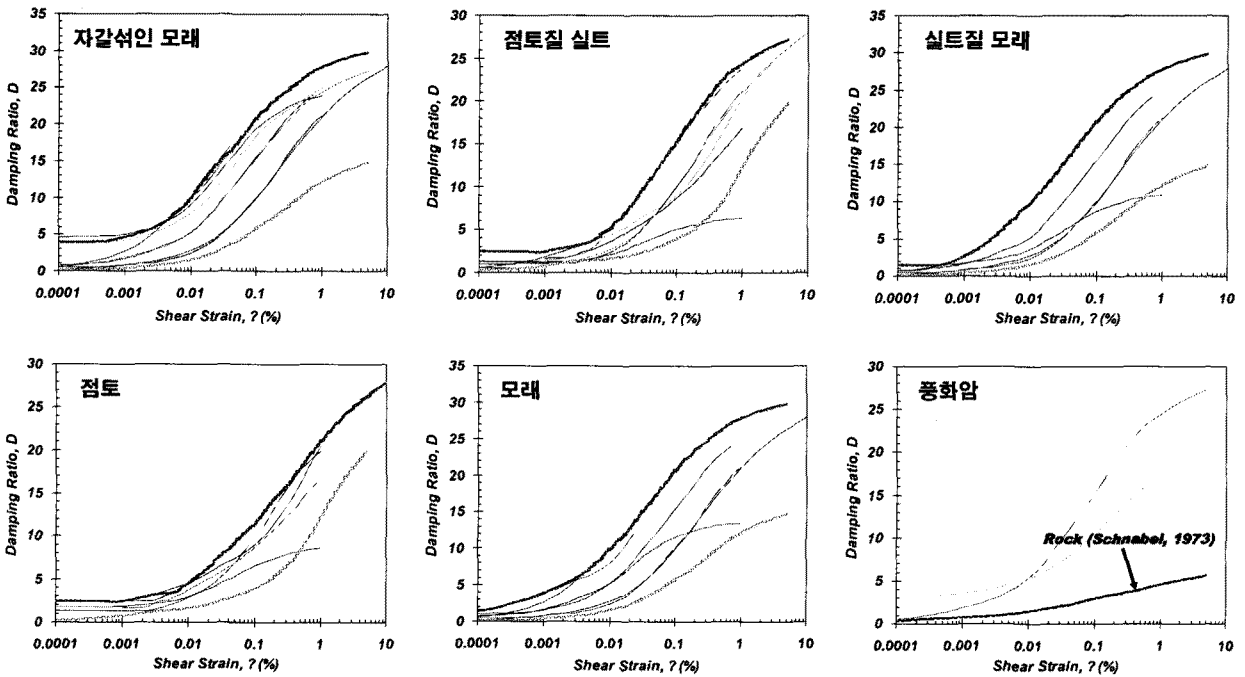
그림 1. 12개 기관에서 제시한 해석대상지반의 전단파 속도 주상도

표 1. 해석대상지반의 상부 토층 30m 평균 전단파 속도

해석대상지반	상부 토층 30m 평균 전단파속도, $V_{s,30}$ (m/s)				지반분류	지반분류에 따른 기관수
	최소	최대	평균	지반분류		
1	74.9	201.1	181.0	S_D	S_D 지반 : 9개, S_E 지반 : 3개	
2	149.8	245.2	204.6	S_D	S_D 지반 : 10개, S_E 지반 : 2개	
3	194.3	295.2	258.9	S_D	S_D 지반 : 12개	



(a) 지반 종류별 정규화 전단탄성계수 감소곡선 (G/G_{max} -logy)



(b) 지반 종류별 감쇠비 곡선 (D-logy)

그림 2. 12개 기관에서 제시한 비선형 동적 변형특성

3. 기관별 제출 결과를 통한 지반응답특성 고찰

일반적으로 등가선형해석을 수행할 경우, 지반의 깊이별 최대가속도 및 가속도 시간이력, 전단변형률, 전단응력 그리고 구조물의 주기에 따른 응답스펙트럼 등을 얻게 된다. 지반의 깊이별 최대가속도는 주로 토류구조물의 내진설계 및 액상화 평가에 이용되고, 가속도 시간이력은 구조물의 동해석시 이용하게 된다. 또한 깊이별 전단변형률은 지진시 지중구조물 측벽에 작용하는 토압산정을 위한 지중 변위 산정

에 주로 이용되고, 구조물 주기에 따른 응답스펙트럼은 지진시 구조물에 작용하는 최대 지진하중을 산정하는데 이용하게 된다.

본 장에서는 등가선형해석을 수행한 11개 기관의 제출 결과를 바탕으로 각 해석대상지반의 깊이별 최대 지반가속도, 전단변형률 그리고 지표면 응답스펙트럼의 분산정도를 분석하였다. 입력 기반암 가속도는 내진설계기준연구(II)의 재현주기 1000년 지진에 해당하는 0.154g로써, 내진성능 목표로는 지진구역 1의 1등급 붕괴방지 수준에 해당하는 기반암 가속도이다. 또한 입력 지진파로는 서로 다른 주파수 특성을 가진 Hachinohe 지진(장주기), Ofunato 지진(단주기), 인공지진파를 이용하였다.

3.1 깊이별 최대 지반가속도 (Peak Ground Acceleration)

11개 기관에서 각 해석대상지반에 대해 산정한 입력 지반 물성치를 이용하여 획득한 깊이별 최대 지반가속도를 그림 3에 나타내었다. 본 그림 3에서는 Ofunato 지진에 대한 결과만을 나타내었으며, 나머지 지진파에 대한 결과는 생략하였다.

각 해석대상지반에 대해 11개 기관에서 획득한 결과들 사이의 큰 분산정도를 그림 3으로부터 확인할 수 있다. 해석대상지반 1의 경우, 지표면 자유장 최대 가속도가 0.061g~0.237g, 해석대상지반 2의 경우, 0.125g~0.299g, 해석대상지반 3의 경우, 0.191g~0.418g의 범위에서 다양한 값을 갖는다. 특히 해석대상지반 1의 경우, 전단파속도 주상도 Outlier의 영향으로 Hachinohe 지진에 대해 지표면 최대 가속도가 0.044g까지 감폭되는 결과를 포함하고 있다. 이와 같은 기관별 결과들 사이의 큰 분산은 층별 전단파속도, 감쇠비, 밀도 등 다양한 입력 지반 물성치들이 전달 함수(Transfer Function)에 사용되어 복합적으로 지반증폭효과에 영향을 주고 있기 때문이며, 각각의 입력 지반 물성치들이 각각 어느 정도의 영향을 미치고 있는지 판단하기는 힘들다.

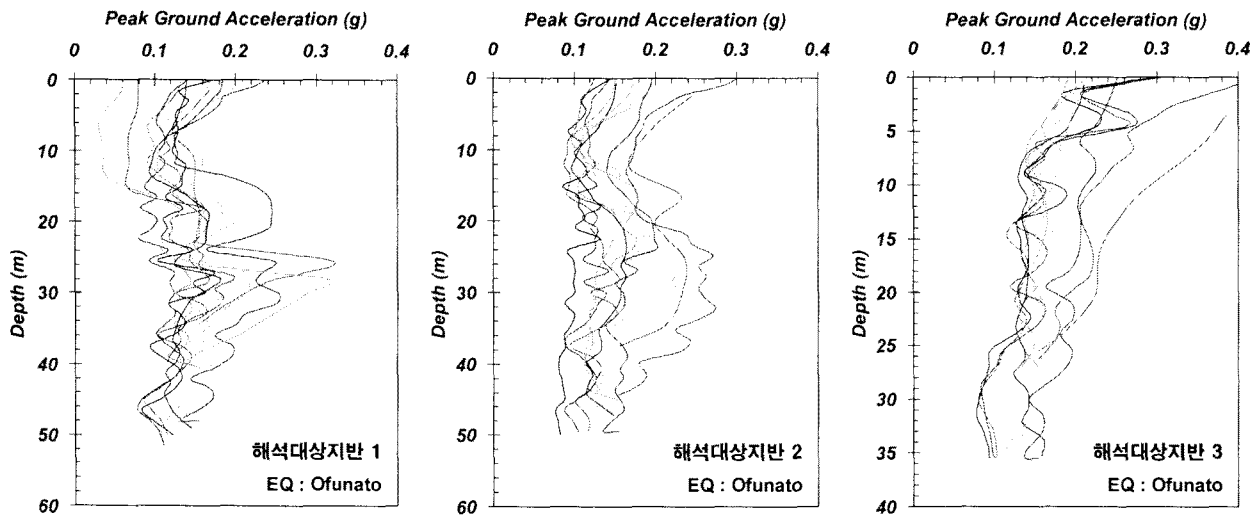


그림 3. 각 해석대상지반의 깊이별 최대 지반가속도 (Ofunato 지진)

3.2 깊이별 최대 전단변형률 (Maximum Shear Strain)

11개 기관에서 각 해석대상지반에 대해 획득한 인공지진에 대한 깊이별 최대 전단변형률을 그림 4에 나타내었다. 3.1의 깊이별 최대 지반가속도와 마찬가지로 3개 해석대상지반 모두에서 비교적 큰 분산정도를 보이고 있다. 해석대상부지 1과 2의 경우, 전단파속도가 작은 점토질 실트 및 점토층이 위치한 20m 근처에서 전단변형률이 크게 유발되는 것을 알 수 있다. 또한 해석대상부지 3의 경우에는 사질토층이 대부분이고, 깊이별 전단파속도 값이 비교적 크기 때문에 몇몇 결과를 제외하고는 모든 깊이에서 0.1%이하의 변형률이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 여전히 각 입력 지반 물성치들이 어떤 식으로 깊이별 전단변형률 분포에 영향을 주고 있는지 판단하기는 쉽지 않다.

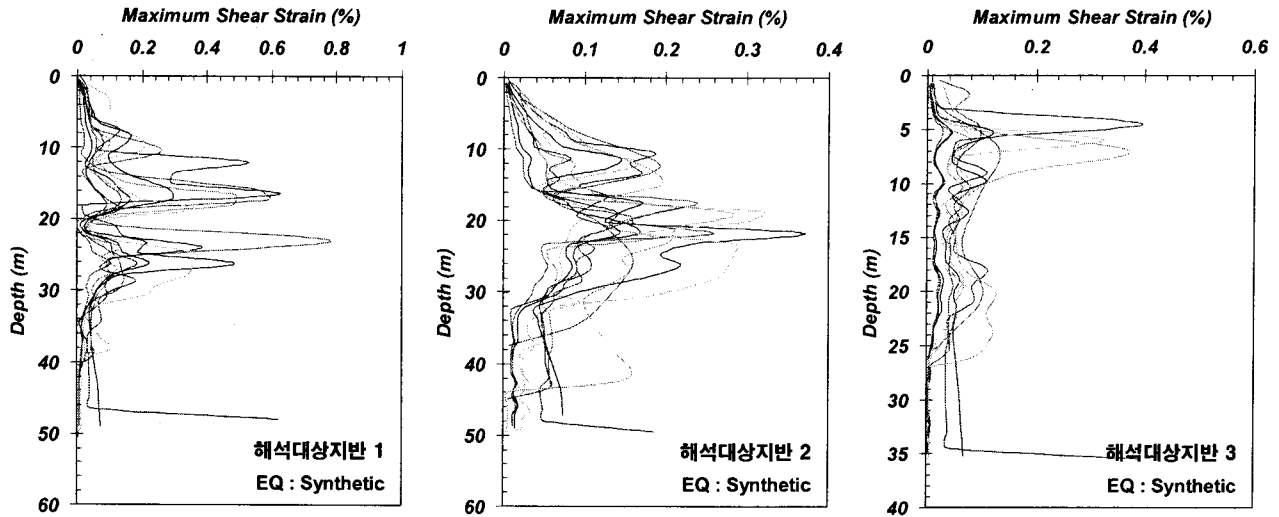


그림 4. 각 해석대상지반의 깊이별 최대 전단변형률 (인공 지진)

3.3 지표면 응답스펙트럼 (Response Spectrum)

11개 기관에서 각 해석대상지반에 대해 획득한 Hachinohe 지진에 대한 지표면 자유장에서의 응답스펙트럼을 그림 5에 나타내었다. 지진의 주파수 대역 에너지 분포 및 해석지반의 고유주기 분포에 따라 그 증폭정도가 확연히 차이가 남을 알 수 있다.

기반암 상부 토층지반의 고유주기(T_G)는 토층 지반의 층별 전단파속도(V_{si}) 및 토층의 두께(d_i)를 이용하여 식 (1)로부터 계산할 수 있다.

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

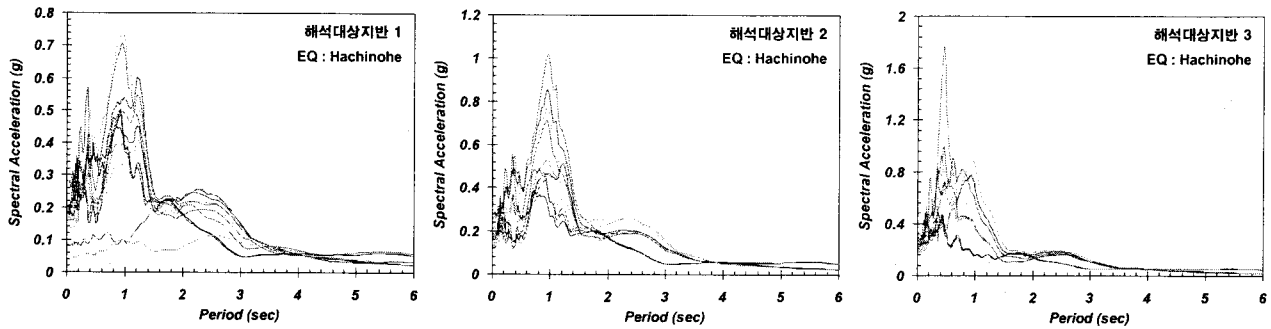


그림 5. 각 해석대상지반의 지표면 응답스펙트럼 (Hachinohe 지진)

해석대상지반 1, 2의 경우, 기관에서 제시한 전단파속도 주장도 중 그림 1(a)에 나타난 전단파속도 주장도 Outlier의 결과를 제외하면 지반의 고유주기는 약 0.7초~1.0초 사이에 분포하고 평균 0.82초 정도로 유사한 값을 갖는다. 해석대상지반 3은 지반의 고유주기가 0.43초~0.6초 사이에 분포하고, 평균 0.5초로 1, 2지반에 비해 비교적 단주기적 특성을 지닌 지반이다.

해석대상지반 1에서 2개 기관의 결과는 2초 근처 장주기 영역에서 최대 증폭이 발생하고 있지만 이를 제외한 나머지 결과들은 해석대상지반 1의 지반 고유주기인 0.8초 근처에서 최대 증폭이 발생함을 확인할 수 있다. 해석대상지반 2, 3도 마찬가지로 각각 주기 0.8초와 0.5초 근처에서 최대 증폭이 발생하고 있음을 알 수 있다. 따라서 국지적 지반조건에 따라 지진에 의한 지반증폭현상은 상이하게 달라지

고, 전단파속도를 비롯한 입력 지반 물성치를 신뢰성 있게 평가하는 것은 매우 중요하다.

4. 영향요소 연구

본 논문은 여러 입력 지반 물성치가 지반응답해석 결과에 어떤 영향을 주는지 고찰해보는 것을 목적으로 하고 있다. 그러나 3장에서 설명하였듯이, 각 참여기관에서 제출한 지반응답해석 결과는 각자의 방법으로 산정한 전단파속도 주상도, 비선형 동적곡선 및 밀도 등이 복합적으로 해석 결과에 영향을 주게 되어 각 변수의 영향 정도를 판단하기 쉽지 않았다. 따라서 해석대상지반을 비교적 단순하게 구성하여 영향요소 연구를 수행하였다. 해석에 고려할 영향요소는 1. 기반암 상부 토사 지반의 전단파 속도, 2. 비선형 동적 곡선, 3. 기반암 깊이, 4. 기반암 속도를 선정하였고, 층별 단위중량에 대한 영향요소 연구는 생략하였다.

각 영향요소에 대한 지반응답특성 영향 평가를 위한 해석조건을 표 2에 간단히 정리하였다. 여기서, 영향요소 연구에 필요한 지반의 비선형 동적곡선은 그림 2에 나타낸 12개 기관에서 제시한 모든 지반의 동적 곡선 중 풍화암 곡선을 제외한 5개 지반의 모든 곡선을 대표할 수 있는 하나의 대표곡선을 선정하였고, 이를 토사지반 전단파속도, 기반암 깊이 및 속도에 대한 영향요소 연구에 적용하였다. 또한 비선형 동적곡선에 대한 영향요소 연구를 위해서는 정규화 전단탄성계수 감소곡선($G/G_{max}-\log\gamma$), 감쇠비 곡선($D-\log\gamma$)에 대해 수집된 자료를 바탕으로 각각 상한(Upper Bound)곡선과 하한(Lower Bound)곡선을 결정하여 그림 6에 나타내었다. 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 상한 곡선은 선형한계 전단변형률 값이 큰 점토질 지반을 대표하는 점토의 상한이 선택되었고, 하한은 선형한계 전단변형률 값이 작은 모래질 지반을 대표하는 자갈섞인 모래의 하한이 선택되었다. 감쇠비 곡선의 경우, 상한 곡선은 자갈섞인 모래의 상한이, 하한은 점토질 실트의 하한이 선택되었다. 각 물성의 대표곡선은 상한 곡선과 하한 곡선을 적절히 고려하여 결정되었다. 그리고 기반암과 풍화암(영향요소 3, 4)에 대해서는 그림 2에 나타낸 풍화암 곡선을 일괄적으로 적용하여 해석을 수행하였다.

4.1 토사 지반 전단파속도에 대한 영향 평가

기반암 상부 단일층 토사지반의 전단파속도를 100~800m/s까지 25m/s 간격으로 변화시켜 획득한 29개의 전단파속도 주상도에 대한 지반응답해석 결과를 그림 7에 나타내었다.

지반이 겪는 최대 전단변형률은 전단파속도가 증가함에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 지표면에 가까운 층일수록 역시 최대 전단변형률은 감소하지만, 이는 기반암 상부 토사지반이 동일한 지반 물성치를 갖기 때문에 일어나는 현상으로 판단되며, 일반적으로 다양한 지층구성과 지반 물성치로 구성된 지반에 대해서는 그림 4에서 보는 바와 같이 복잡한 결과를 얻을 것이다.

또한 지표면 및 기반암 응답스펙트럼으로부터 단주기 증폭계수(F_a), 장주기 증폭계수(F_v)를 결정하여 지반의 전단파속도에 대한 영향 정도를 검토해 보았다. 단주기 및 장주기 증폭계수는 NEHRP-1994, 1997 등에 정의되어 있는 식 (2), (3)을 이용하여 계산하였다.

$$F_a(RRS) = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{0.4} \int_{0.1}^{0.5} \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rock}(T)} dT \quad (2)$$

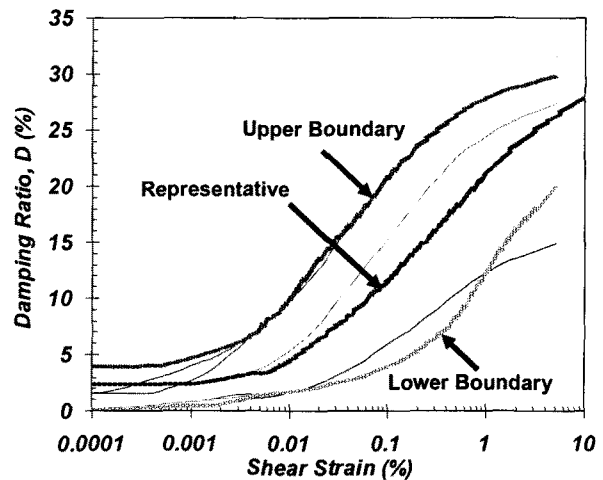
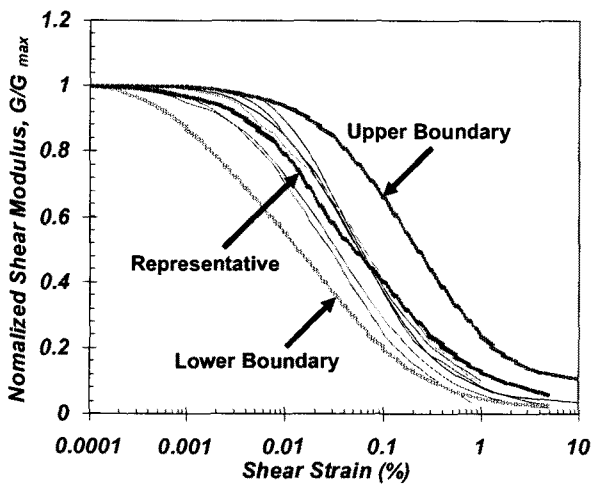
$$F_v(RRS) = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{1.6} \int_{0.4}^{2.0} \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rock}(T)} dT \quad (3)$$

여기서, R_{rock} 과 R_{soil} 은 각각 진원(fault)에서 암반노두와 지표면까지의 거리(hypocentral distance)를 의미하고, 본 연구에서는 R_{soil}/R_{rock} 의 경우 1.0으로 가정하여 계산을 수행하였다. RS_{soil} 과 RS_{rock} 은 각각 구조물의 주기 T에서 지표면 및 암반노두의 스펙트럼 가속도를 의미한다. 즉, RS_{soil}/RS_{rock} 은 주어진 주

기 T에서 기반암과 지표면의 스펙트럴 가속도비로서 RRS(Ratio of Response Spectra)로 나타낸다. 따라서 단주기 증폭계수 F_a 는 주기 0.1초에서 0.5초 사이의 RRS 평균값을 의미하고, 장주기 증폭계수 F_v 는 주기 0.4초에서 2.0초 사이의 RRS 평균값을 의미한다.

표 2. 영향요소 연구를 위한 해석 조건

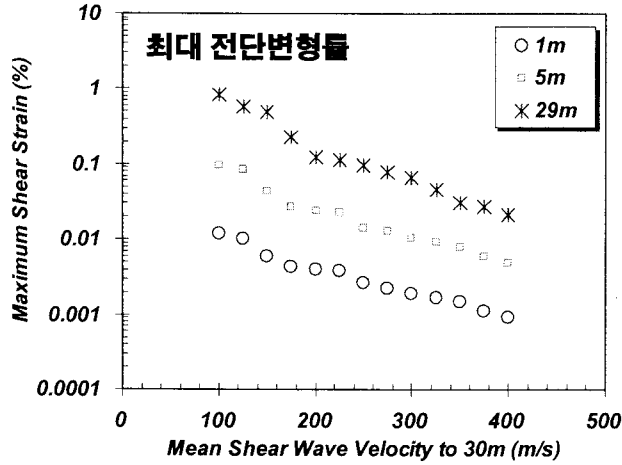
영향 요소	토사 지반 전단파속도 ($V_{s,soil}$)	비선형 동적곡선 (G/G_{max} , D -logy)	기반암 깊이 (BD)	기반암 속도 ($V_{s,rock}$)
1. 토사지반 전단파속도	100~800m/s까지 25m/s 간격으로 변화	대표곡선	30m	1000m/s
2. 비선형 동적곡선	100, 200, 300, 400m/s (300m/s에 대해서만 결과 도시)	G/G_{max} , D 각각에 대해 상한, 하한, 대표곡선	30m	1000m/s
3. 기반암 깊이	토사(0~20m) : 200m/s 풍화암(20m~BD) : 700m/s	대표곡선	20m ~ 60m까지 5m 간격으로 변화	1000m/s
4. 기반암 속도	토사(0~20m) : 200m/s 풍화암(20m~BD) : 700m/s	대표곡선	30m, 60m	760, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000m/s
공통 사항	<ul style="list-style-type: none"> - 단위중량 : 토사지반 1.8 t/m³, 풍화암 2.2 t/m³, 기반암 2.6 t/m³ - 풍화암과 기반암의 비선형 동적곡선은 그림 2의 풍화암 곡선 사용 - 입력 기반암 가속도 : 0.154g (재현주기 1000년 지진) - 입력지진파 : Hachinohe 지진 			



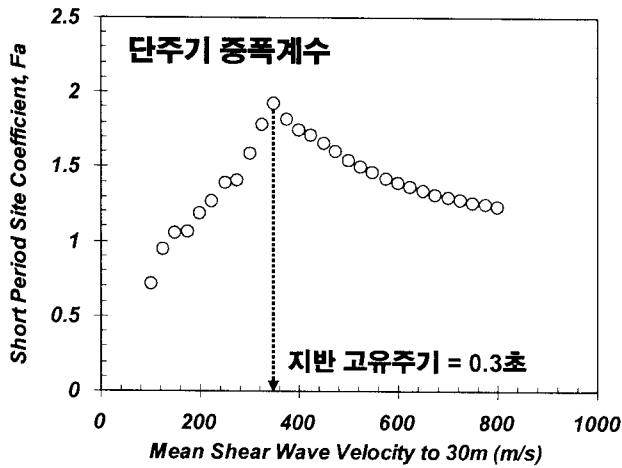
(a) 정규화 전단탄성계수(G/G_{max}) 감속곡선

(a) 감쇠비(D) 곡선

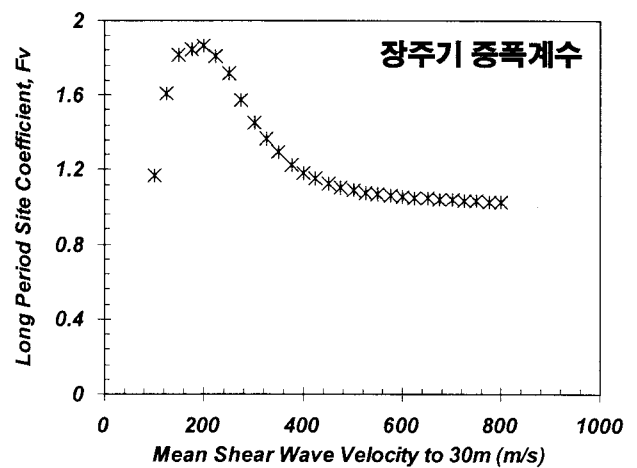
그림 6. 영향요소 연구를 위한 비선형 동적곡선



(a) 최대 전단변형률



(b) 단주기 증폭계수, F_a



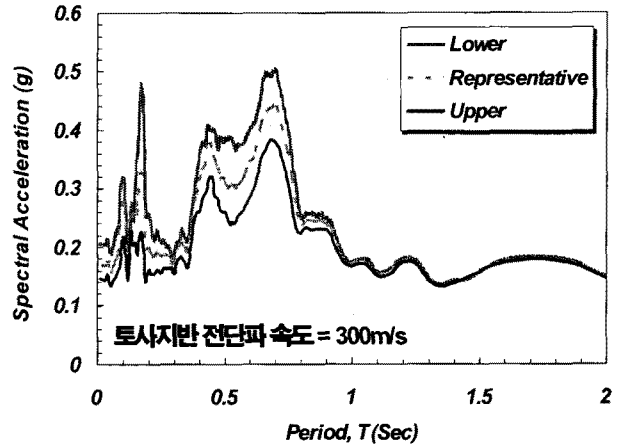
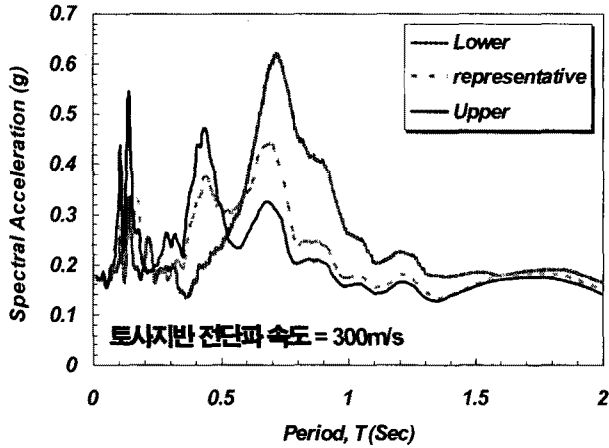
(c) 장주기 증폭계수, F_v

그림 7. 토사지반 전단파속도 변화에 따른 지반응답특성 평가

그림 7(b)에서 보는 바와 같이 F_a 는 지반의 전단파속도에 따라 증가하다가 지반 고유주기가 약 0.3초에 해당하는 350m/s를 경계로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 식 (2)에 나타난 바와 같이 F_a 를 획득하기 위한 적분구간이 0.1초에서 0.5초이므로 중간값인 주기 0.3초에서 지반과 구조물의 공진효과에 의해 최대 증폭을 일으키는 지반이 최대 F_a 값을 갖는 것으로 판단된다. 반면, F_v 는 지반의 전단파속도가 200m/s 이하인 연약지반을 제외하고는 지반의 전단파속도가 증가함에 따라 감소하면서 점차적으로 1.0에 수렴하는 것을 확인할 수 있었다.

4.2 토사 지반 비선형 동적 곡선에 대한 영향 평가

단일층으로 구성된 기반암 상부 토사지반의 정규화 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 곡선을 그림 6에 나타난 바와 같이 상한/대표/하한 곡선으로 변화시켜가며 각 전단파속도 주상도에 대해 지반응답해석을 수행하였다. 지반의 전단파속도는 100, 200, 300, 400m/s에 대해 해석을 수행하였으며, 300m/s에 대한 지표면 응답스펙트럼을 그림 8에 나타내었다. 감쇠비 곡선의 경우, 해석을 수행한 모든 전단파속도 주상도에 대해 상한 곡선(upper)을 사용하였을 때, 전체 주기 영역에서 스펙트럴 가속도의 증폭 정도가 가장 작았고, 하한 곡선(lower)을 사용하였을 때, 가장 크게 증폭됨을 확인할 수 있었다. 그러나 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 경우, 해석에 수행된 전단파속도의 크기, 구조물의 주기에 따라 증폭정도의 경향성이 다양하였다.



(a) 정규화 전단탄성계수(G/G_{max}) 감소곡선 변화

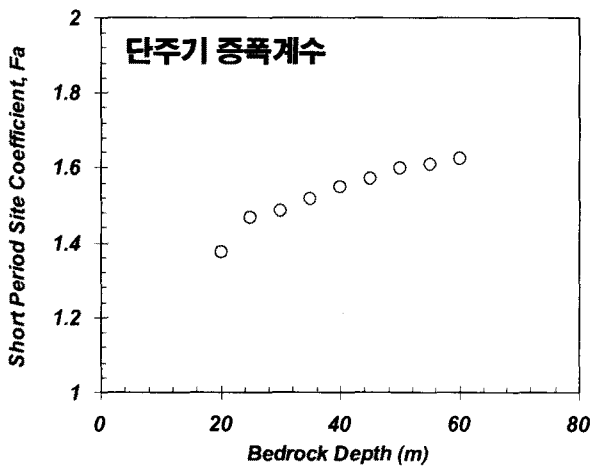
(b) 감쇠비(D) 곡선 변화

그림 8. 비선형 동적 곡선 변화에 따른 지표면 응답스펙트럼 ($V_{s,30}=300\text{m/s}$)

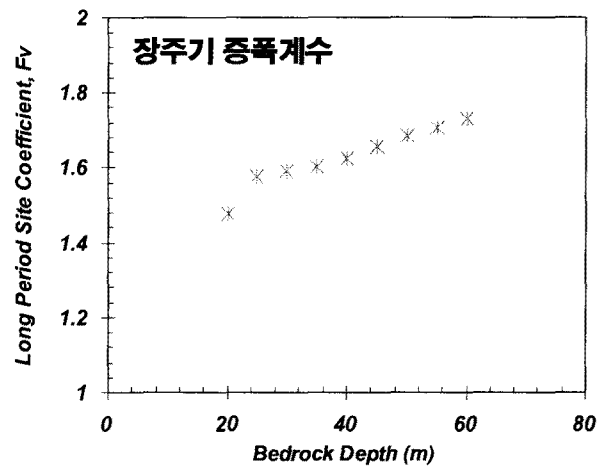
4.3 기반암 깊이에 대한 영향 평가

시추공 시험, 표면파 시험 등 지반조사 기법들이 지반의 깊이가 깊은 부지의 기반암 깊이를 신뢰성 있게 추정하는데 있어서 어려움이 존재한다. 또한 기반암의 위치에 따라 지반의 고유주기가 달라지므로 지반응답해석을 수행하는데 있어서 기반암 상부층(풍화암)의 두께를 정확히 결정하는 것은 중요하다. 본 Round Robin Test에서 주어진 시추 주상도를 바탕으로 기반암 깊이를 결정하는데 있어, 풍화암이 시작하는 깊이, 연암이 시작하는 깊이, 시추가 종료된 깊이 등 기관에 따라 다양하게 기반암 깊이를 결정하여 해석을 수행하였다. 따라서 본 절에서는 표 2에 나타난 바와 같이 지표면 하부 20m부터 60m까지 5m 간격으로 풍화암 두께를 변화시켜가며 기반암 깊이에 따른 지반응답특성의 영향 평가를 수행하였다.

그 결과, 그림 9에 나타난 바와 같이 단주기 및 장주기 증폭계수는 큰 폭은 아니지만, 기반암 깊이에 따라 증가하였으며, 지표면 자유장에서의 최대 가속도는 기반암 깊이에 따라 일정한 경향성을 나타내지는 않았지만, 최대 약 30% 정도의 변화를 가져왔다. 최대 전단변형률은 토사지반과 풍화암의 경계(지표면 하부 19m)에서 가장 크게 발생하였으며, 이 경계층에서 기반암 깊이가 증가함에 따라 최대 약 25% 정도 최대 전단변형률 양이 증가함을 확인하였다.



(a) 단주기 증폭계수, F_a



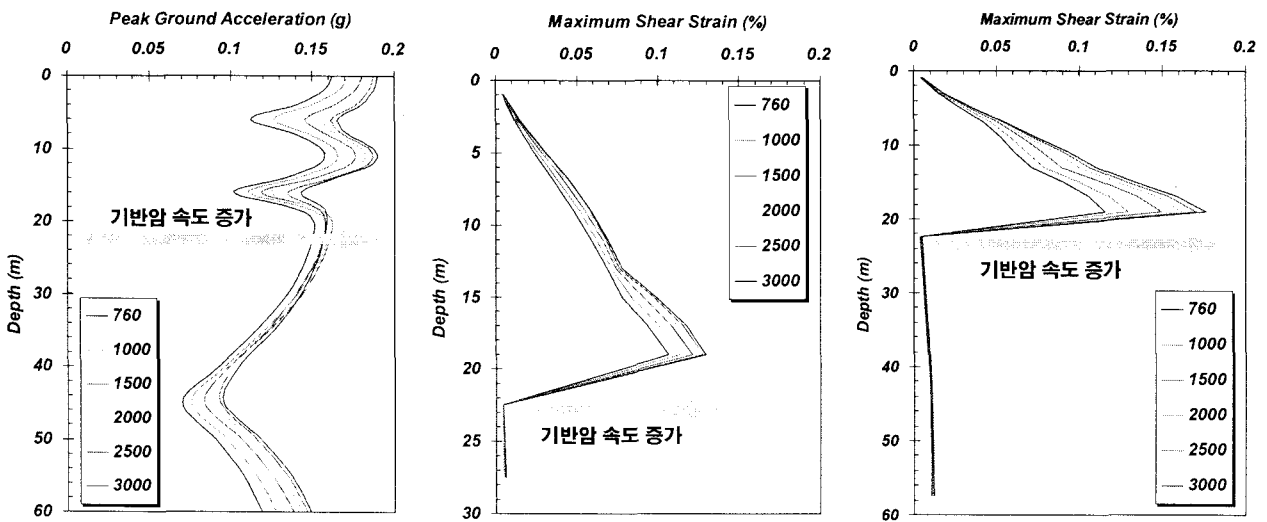
(b) 장주기 증폭계수, F_v

그림 9. 기반암 깊이 변화에 따른 지반응답특성 평가

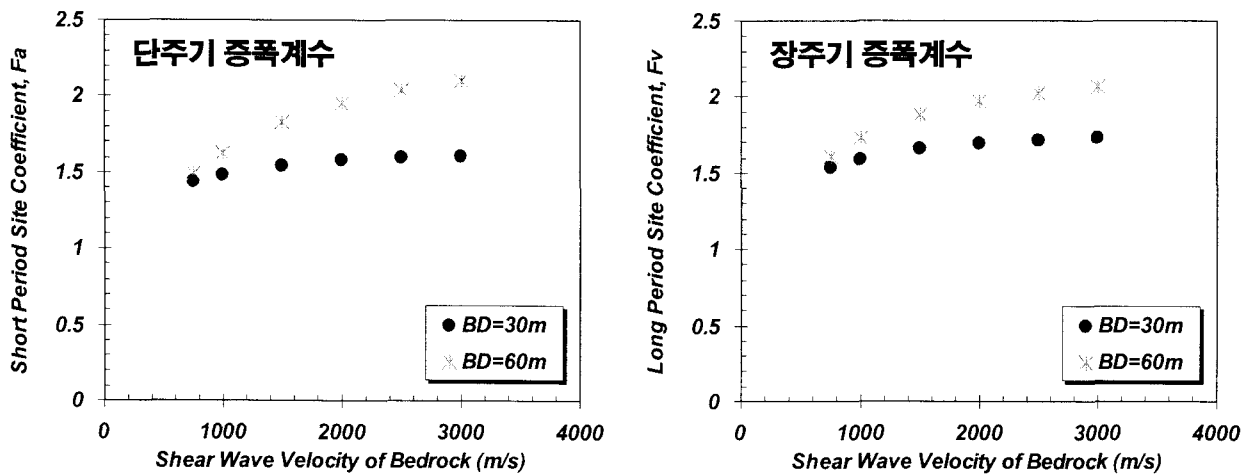
4.4 기반암 속도에 대한 영향 평가

기반암의 속도 역시 지반응답해석에 필요한 중요한 입력 물성치이다. 일반적으로 반무한 탄성(Elastic half-space) 암반 위에 지반이 존재하는 경우 강체 암반(Rigid half-space) 위에 지반이 존재하는 경우에 비하여 지표면 자유장에서의 지반운동 크기는 작게 나타난다. 즉, 기반암과 그 상부에 위치하는 지반과의 강성도 차이가 커짐에 따라 지반증폭현상이 크게 발생하게 된다. 따라서 표 2에 나타낸 바와 같이 기반암 깊이 30m, 60m에 대해 기반암 속도를 변화시켜가며 지반응답특성의 영향 평가를 수행하였다.

그림 10(a)에 보는 바와 같이 기반암 속도가 증가함에 따라 기반암 상부 모든 깊이에서의 최대 가속도가 증가하는 것을 확인하였다. 최대 전단변형률의 경우, 기반암 깊이 30m, 60m 모두 토사지반과 풍화암 경계에서 가장 크게 유발되었고, 기반암 속도가 증가함에 따라 그 크기가 증가하였다(그림 10b, 10c). 단주기 및 장주기 증폭계수 또한 기반암과 지반 사이의 강성도 차이에 의한 증폭현상에 의해 기반암 속도가 증가함에 따라 증가하였고, 앞 절에서 설명한 기반암 깊이에 따른 영향에 의해 기반암 깊이가 60m일 때의 증폭계수가 30m일 때의 값보다 큰 것을 확인하였다(그림 10d, 10e)



(a) 지반 최대 가속도 (BD=60m) (b) 최대 전단변형률 (BD=30m) (c) 최대 전단변형률 (BD=60m)



(d) 단주기 증폭계수, F_a (e) 장주기 증폭계수, F_v

그림 10. 기반암 속도 변화에 따른 지반응답특성 평가

5. 결론

본 논문에서는 RRT에서 주어진 시추 주상도, SPT-N, CPT- q_c 를 바탕으로 총 12개 기관에서 각 해석대상지반에 대해 제시한 지반응답해석 결과를 비교하였고, 그 결과, 최대 지반가속도, 최대 전단변형률, 지표면 응답스펙트럼 모두에서 분산정도가 큰 것으로 나타났다. 또한 전단파속도 주상도, 비선형 동적곡선, 층별 밀도 등 다양한 입력 지반 물성치들이 복합적으로 지반증폭효과에 영향을 주고 있어 각 입력물성치들의 영향 정도를 판단하기 쉽지 않았다. 따라서 해석대상지반을 단순하게 구성하여 기반암 상부 토사 지반의 전단파 속도, 비선형 동적 곡선, 기반암 깊이, 기반암 속도에 대한 영향요소 연구를 수행하였다. 영향요소 연구로부터 지반응답특성에 대한 입력 지반 물성치의 영향 정도를 명확하게 확인할 수 있었다. 또한 내진설계시 가능한 신뢰성 있게 지반 물성치를 획득하여 지반응답해석에 이용하여야 한다고 판단된다.

감사의 글

본 지반응답해석 Round Robin Test에 참여하여 결과 자료를 제공해 주신 동림컨설팅, 동아대학교, 동의대학교, 부산대학교, 삼보기술단, 서경대학교, 서울대학교, 연세대학교, 원광대학교, 한국과학기술원, 한국유지관리, 한국지질자원연구원, 한양대학교 그리고 현대건설의 참여자들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부 (1997), 내진설계기준연구(II).
2. Dobry, R. and Vucetic, M. (1987), "Dynamic Properties and Seismic Response of Soft Clay Deposits", Proceedings of International Symposium on Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106, No. GT6, pp. 720-724.
3. FEMA (1997), NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Provision.
4. Seed, H. B., Robert, T. W., Idriss, I. H. and Tokimatsu, K. (1984), "Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils", Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, UCB/EERC-84/14.
5. Yegian, M. K., Ghahraman, V. G. and Gazetas, G. (1994), "1988 Armenia Earthquake. I : Seismological Geotechnical and Structural Overview", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 1, pp. 1-20.