

## 지반 구조물의 내진설계를 위한 지반응답해석 기법의 비교연구 Comparative Study on Ground Response Analyses for Seismic Design of Geotechnical Structures

황재익<sup>1)</sup>, Jaelk Hwang, 한진태<sup>2)</sup>, JinTae Han, 조종석<sup>3)</sup>, JongSeok Cho, 김명모<sup>4)</sup>, MyoungMo Kim

1) 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사후 연구원, Post-Doc., School of Civil Urban & Geosystem Engineering Department, Seoul National University

2) 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정, Graduate Student, School of Civil Urban & Geosystem Engineering Department, Seoul National University

3) 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil Urban & Geosystem Engineering Department, Seoul National University

4) 서울대학교 지구환경시스템공학부 정교수, Professor, School of Civil Urban & Geosystem Engineering Department, Seoul National University

**개요(SYNOPSIS) :** Ground response analysis is one of the most important and most commonly encountered problems in geotechnical earthquake engineering. It is a prerequisite step for liquefaction assessment of saturated soil or the pseudo-static and dynamic analysis of geotechnical structures. A number of techniques have been developed for ground response analysis. In this study, ground response analyses were performed using the computer programs that are currently being used domestically. From these analyses, the analysis techniques applied to the programs were compared and analyzed. The results of ground response analyses were compared as follows: 1) 1-dimensional analysis vs. 2-dimensional analysis; 2) equivalent linear analysis vs. nonlinear analysis.

**Key words :** Ground Response Analysis, Equivalent Linear Analysis, Nonlinear Analysis, Total Stress Analysis, Effective Stress Analysis

### 1. 서 론

지반응답해석은 특정한 지진에 의한 기반암위에 존재하는 토층의 운동을 평가하는 것으로 옹벽과 사면과 같은 지반구조물의 내진설계를 위한 설계가속도를 산정하거나, 포화된 지반의 액상화 발생 가능성을 평가할 때 이용된다. 지반응답해석은 주로 수치해석방법을 이용하여 수행되는데, 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 수치해석 프로그램은 SHAKE91(Idriss 등, 1992)로 1차원, 전응력, 그리고 등가선형 해석을 수행한다. 항만관련 지반 구조물의 경우 지반과 구조물의 기하학적 형상 때문에 1차원으로 모형화 하는데 무리가 있으며, 지반 내에 항상 지하수나 해수가 존재하기 때문에 전응력 해석방법을 적용하는 것 또한 한계가 있으며 흙의 비선형 거동을 고려하기 위하여 선형 또는 등가선형해석을 이용하는 것 역시 신뢰성이 떨어진다. 하지만 해석대상의 차원, 흙의 비선형성, 그리고 과잉간극수압 발생 등을 고려할 수 있는 엄밀한 해석기법을 지반응답해석에 적용한다면 결과의 신뢰성은 높아질 수 있으나, 이에 따르는 복잡한 매개변수에 대해 적절한 값을 결정하기 위해서는 반복삼축시험과 같은 추가적인 실내시험

을 수행하여야 한다. 따라서 보다 엄밀한 해석을 수행하기 위해서는 보다 많은 노력이 필요하다.

본 연구에서는 현재 국내에서 널리 사용되고 있는 수치해석 프로그램들을 이용하여 지반응답해석을 수행하여 지반구조물의 내진설계를 위해 수행되는 지반응답해석에 적용된 다양한 해석방법을 비교·연구하였다.

## 2. 지반응답해석(Ground response analysis)

### 2.1 개요

지반응답해석은 기반암 운동에 대한 기반암위에 존재하는 토층의 응답을 결정하는 것으로서 구조물의 내진설계 시 가장 먼저 선행되어야 한다. 지반응답해석은 설계응답스펙트럼을 작성하기 위한 지표면 운동을 평가할 때, 액상화 발생 가능성을 평가하기 위한 깊이별 토층에서의 동적응력, 동적변형률, 또는 최대가속도를 산정할 때, 사면, 제방과 같은 흙구조물이나 옹벽과 같은 토류구조물의 내진설계를 위한 등가지진하중을 결정할 때, 그리고 구조물의 동적변형해석을 위한 흙의 동적 물성값과 입력기반암 운동을 결정하기 위해 수행된다. 지반응답해석 방법은 모형화 차원 수에 따라 1차원, 2차원, 그리고 3차원 해석으로, 흙의 비선형성의 고려방법에 따라 선형, 등가선형, 그리고 비선형해석으로, 과잉간극수압의 고려 여부에 따라 전응력, 유효응력해석으로, 그리고 해석영역에 따라 주파수 영역, 시간 영역해석으로 분류된다.

### 2.2 지반응답해석에 이용되는 컴퓨터 프로그램의 개요

현재 국내에서 지반응답해석에 이용되고 있는 수치해석 프로그램들이 표 1에 정리되어 있다. 표 1에서 보듯이 각 수치해석 프로그램들은 모형화 차원, 흙의 응력-변형률 관계, 과잉간극수압의 고려여부 그리고 해석영역에 따라 다양한 해석방법들을 가지고 있다. 예를 들어 SHAKE91은 세계적으로 가장 많이 사용되는 있는 지반응답해석 프로그램으로 1차원 모형화, 등가선형해석, 전응력해석, 그리고 주파수 영역 해석방법을 채택하고 있다. 본 연구에서는 표 1에 정리 되어있는 SHAKE91, NERA(Bardet 등, 2001), SUMDES(Li 등, 1992), FLUSH(Lysmer 등, 1975), FLIP(Iai 등, 2001), 그리고 FLAC(Itasca Consulting Group, 1995)을 이용하여 지반응답해석을 수행하였다.

표 1. 지반응답해석을 위한 수치해석 프로그램

지반응답해석 프로그램	해석방법			
	모형화 차원	흙의 응력-변형률 관계	과잉간극수압 고려 여부	해석영역
SHAKE91	1	등가선형	전응력	주파수영역
NERA	1	비선형	전응력	시간영역
SUMDES	1	비선형	유효응력	시간영역
FLUSH	2	등가선형	전응력	주파수영역
FLIP	2	비선형	유효응력	시간영역
FLAC	2	비선형	전응력	시간영역

### 2.3 해석 조건

지반응답해석을 수행하기 위해서는 해석대상의 지반정보와 입력지진파 시간이력이 필요하다. 지반응답해석 프로그램들은 공통적으로 각 층의 단위중량( $\gamma$ ), 최대전단탄성계수( $G_{max}$ ) 또는 전단파속도( $V_s$ ), 그리고 포아송비가 필요하며, 추가적으로 등가선형해석(SHAKE91, FLUSH)의 경우 전단변형률

에 따른 정규화 전단탄성계수( $G/G_{max}$ ) 곡선, 그리고 감쇠비 곡선이 필요하며, 비선형해석(NERA, FLIP, FLAC)에서는 비선형 응력-변형률관계를 규정하는 매개변수가 필요하다. 또한 유효응력해석(FLIP, SUMDES)에서는 과잉간극수압 발생 모델을 위한 추가적인 입력변수가 필요하다.

### 2.3.1 해석단면

지반응답해석 기법의 비교 연구를 위해 그림 1과 같이 두개의 모래층으로 이루어진 단순한 수평지반을 해석단면으로 가정하였다. 해석단면은 2차원 단면이지만 해석단면의 폭을 토층두께의 3배로 넓게 하여 1차원 모형화가 가능하도록 하였다.

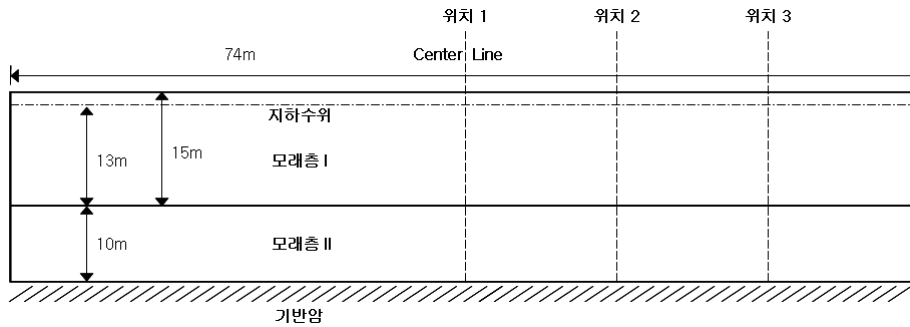


그림 1. 해석단면

### 2.3.2 입력물성값

해석에 이용된 토층의 기본 물성값들은 표 2에 정리되어 있다. 최대전단탄성계수( $G_{max}$ )는 일본 항만기술연구소(1997)에서 제시한 식(1)을 이용하여 가정한 N값으로부터 추정하였다. 등가선형해석에서 필요한 전단변형률에 따른 정규화된 전단탄성계수와 감쇠비 변화 곡선은 Seed와 Idriss(1970)가 모래와 암에 대해 제안한 곡선을 사용하였다.

$$G_{max} = 14400 N^{0.68} \quad (kPa) \quad (1)$$

표 2. 해석에 이용된 물성값

토층	단위중량, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )		점착력, c (kPa)	내부마찰각, $\phi$ (°)	N값	최대전단탄성계수, $G_{max}$ (kPa)	전단파속도, $V_s$ (m/sec)
	습윤	포화					
모래층 I	18	20	0	32	15	88987.8	222.3
모래층 II	-	21	0	36	30	142570.9	267.0
기반암	전단파속도 : 1500 m/sec, 단위중량 : 26 kN/m <sup>3</sup>						

### 2.3.3 입력지진파

설계 입력지진파는 지반구조물을 시공하고자 하는 지역에서의 실제 지진기록이나 응답스펙트럼을 이용하여 결정하는 것이 바람직하나 이러한 자료가 없는 경우에는 장주기특성을 갖는 지진파와 단주기 특성을 갖는 지진파, 그리고 해당 부지의 지역적인 특성을 반영하는 인공 지진파를 작성하여 내진설계에 반영하는 것이 필요하다. 본 연구에서 지반응답해석을 위해 Hachinohe 지진파, Ofunato 지진파, 그리고 인공 지진파를 사용하였다. Hachinohe 지진파와 Ofunato 지진파는 일본에서 항만구조물의 내진설계에

가장 많이 이용되는 실제 지진기록으로 각각 장주기파와 단주기파를 대표하며, 인공 지진파는 설계응답 스펙트럼에 부합되도록 생성되었다. 그림 2는 최대가속도 크기가 0.11g로 크기 조정된 입력지진파의 가속도 시간이력과 응답스펙트럼을 보여준다.

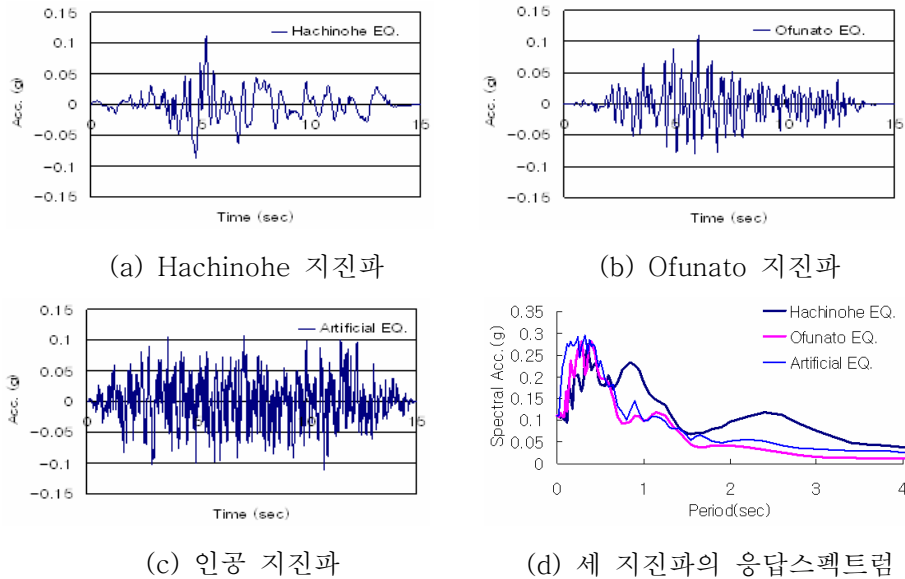


그림 2. 입력지진파의 가속도 시간이력 및 응답스펙트럼

### 3. 해석결과

그림 1의 해석단면에 대해 표 1에서 제시한 다양한 수치해석 프로그램들을 이용하여 지반응답해석을 수행하였다. 1차원해석 vs. 2차원해석, 등가선형해석 vs. 비선형해석의 결과를 깊이별 최대가속도 분포를 비교하여 정리하였다.

#### 3.1 1차원해석 vs. 2차원해석

모형화 차원 수에 따른 지반응답해석 결과의 비교를 위해 1차원해석은 SHAKE91, NERA, 그리고 SUMDES를 이용하여 수행하였으며, 2차원 해석은 FLUSH, FLAC, 그리고 FLIP을 이용하여 수행하였다. 해석에 사용된 수치해석 프로그램의 해석방법은 표 1에 정리되어 있다.

##### 3.1.1 SHAKE91 vs. FLUSH

그림 3에서 SHAKE91과 FLUSH의 결과를 비교하였다. SHAKE91과 FLUSH는 모형화 차원 수만 각각 1차원과 2차원으로 다를 뿐 나머지 해석방법은 동일하다. 이 프로그램들은 지반의 비선형성을 고려하기 위하여 등가선형해석을 사용하며 전응력해석을 수행한다.

단주기 지진인 Ofunato 지진과 인공 지진의 경우, SHAKE91과 FLUSH의 결과가 비교적 잘 일치한 반면, 장주기 지진인 Hachinohe 지진의 경우, FLUSH의 결과가 SHAKE91의 결과보다 더 크게 나타난다. 이러한 원인은 FLUSH의 경우 2차원 모형화를 하기 때문에 1차원 수평방향 자유도 이외의 자유도와 관련된 진동 모우드가 존재하며, 이러한 1차원해석에서는 존재하지 않는 진동 모우드가 Hachinohe 지진의 장주기 성분과 결합하여 큰 응답을 보였기 때문으로 판단된다.

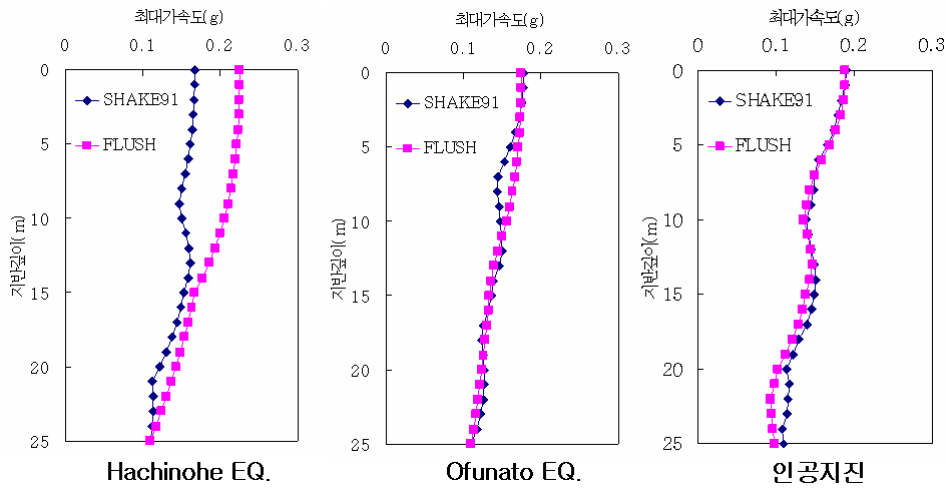


그림 3. 깊이에 따른 최대가속도의 변화 (SHAKE91 vs. FLUSH)

### 3.1.2 NERA vs. FLAC

그림 4는 NERA와 FLAC의 결과를 보여준다. NERA와 FLAC은 비선형 응력-변형률 관계를 사용하며 전응력해석을 수행하지만 모형화 차원은 각각 1차원과 2차원이다. FLAC의 경우 전단변형률 수준에 따른 전단탄성계수의 변화를 고려하기 위하여 최대전단탄성계수,  $G_{max}$ 을 사용한 경우와  $G_{max}$ 의 75%, 50% 그리고 25%를 사용한 경우에 대해 해석을 수행하였다.

단주기 지진인 Ofunato 지진과 인공 지진의 경우, FLAC의 최대가속도 결과는 입력전단탄성계수가 작아질수록 감소하는 경향을 보인 반면, Hachinohe 지진의 경우, 입력 전단탄성계수가 최대전단탄성계수  $G_{max}$ 의 25%일 때 가장 큰 응답을 보였다. 이러한 원인은 지반의 탄성계수가 작아지면서 해석대상的高유주기가 증가하기 때문에 Hachinohe 지진의 장주기 성분의 영향으로 큰 응답을 보였기 때문으로 판단된다. Ofunato 지진과 인공 지진의 경우, 입력전단탄성계수가 최대전단탄성계수  $G_{max}$ 의 25%인 경우 NERA의 결과와 비슷한 반면, Hachinohe 지진인 경우, 최대전단탄성계수  $G_{max}$ 의 50%인 경우가 NERA의 결과와 가장 비슷하였다. 따라서 FLAC을 이용하여 지반응답해석을 수행할 때는 적절한 전단탄성계수를 사용하는 것이 중요함을 알 수 있다.

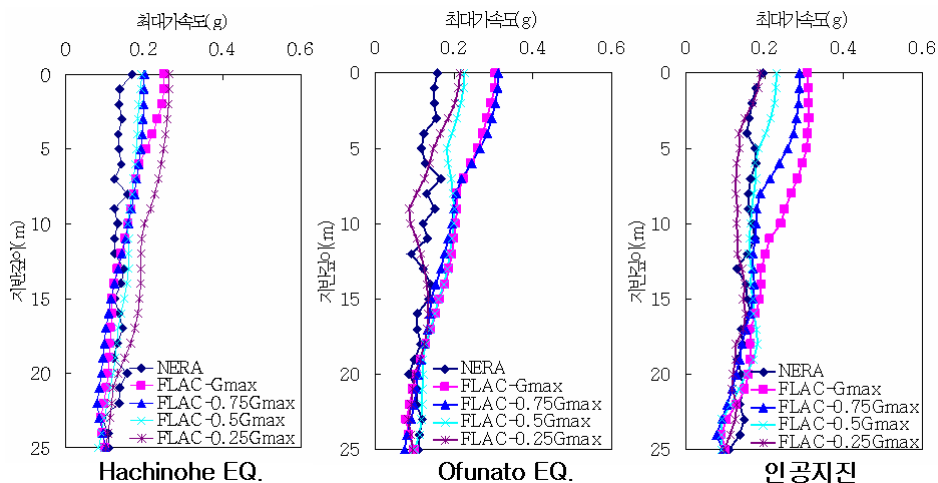


그림 4. 깊이에 따른 최대가속도의 변화 (NERA vs. FLAC)

### 3.1.3 SUMDES vs. FLIP

그림 5는 SUMDES와 FLIP의 결과를 보여준다. SUMDES와 FLIP은 비선형 응력-변형률 관계를 사용하며 과잉간극수압발생을 고려하는 유효응력해석을 수행하지만 모형화 차원 수는 각각 1차원과 2차원이다.

SUMDES의 경우, 최대가속도의 크기는 조밀한 모래층 II에서는 점점 증가하다가 상대적으로 느슨한 모래층 I에서는 과잉간극수압의 발생으로 인해 크게 감소한다. FLIP의 경우, 최대가속도의 크기는 SUMDES의 결과에 비해 변화가 작으며 지표면으로 갈수록 증가하는 경향을 보인다. 유효응력해석은 과잉간극수압 발생모형을 정의하는 매개변수에 따라 그 결과가 민감하게 변하기 때문에 정확한 결과를 얻기 위해서는 반복삼축시험과 공진주실험과 같은 실내실험을 통한 정확한 매개변수 산정이 선행되어야 한다.

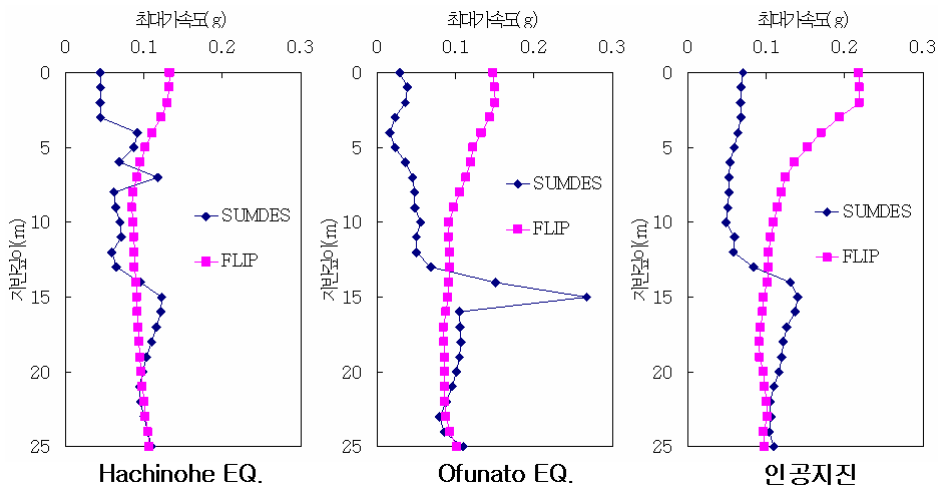


그림 5. 깊이에 따른 최대가속도의 변화 (SUMDES vs. FLIP)

### 3.2 등가선형해석 vs. 비선형해석

지반응답해석 프로그램은 등가선형해석이나 비선형 응력-변형률 관계를 이용하여 지반의 비선형성을 고려한다. 이러한 등가선형해석과 비선형 모델의 차이점을 알아보기 위해 1차원, 전응력해석 프로그램인 SHAKE91과 NERA를 이용하여 그림 1의 해석단면에 대해 지반응답해석을 수행하였다. 사용된 입력지진파는 크기가 0.06g, 0.11g, 그리고 0.15g인 인공 지진파를 사용하였다.

#### 3.2.1 SHAKE91 vs. NERA

그림 6, 7은 SHAKE91과 NERA의 결과를 보여준다. SHAKE91과 NERA는 1차원, 전응력해석을 수행하며 지반의 비선형성은 각각 등가선형해석과 비선형모델을 사용하여 고려한다.

입력지진의 크기가 0.06g인 경우, 등가선형해석인 SHAKE91과 비선형해석인 NERA의 결과가 거의 일치하지만 입력지진의 크기가 증가할수록 비선형해석에 비해 등가선형해석의 응답이 더 작게 나타나는 경향을 보인다. 특히 입력지진의 크기가 0.15g인 경우, 비선형성이 가장 클 것으로 예상되는 모래층 I과 II의 경계에서는 등가선형해석 결과가 비선형해석 결과보다 최대가속도의 경우 약 37%, 최대전단변형률의 경우 약 30% 작게 나타난다. 입력지진의 크기가 작거나 지반의 강성이 큰 경우와 같은 낮은 수준의 변형률이 발생할 경우에는 등가선형해석과 비선형해석은 거의 같은 결과를 나타내지만, 입력지진의 크기가 크거나 강성차가 큰 두 개 토층의 경계에서와 같은 높은 수준의 변형률이 발생할 경우에는 등가선형해석과 비선형해석의 결과에 차이가 남을 알 수 있다.

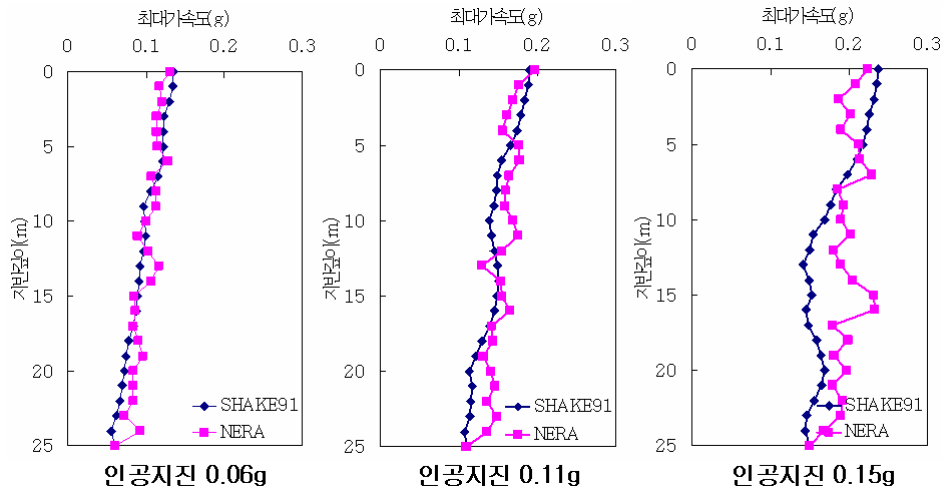


그림 6. 깊이에 따른 최대가속도의 변화 (SHAKE91 vs. NERA)

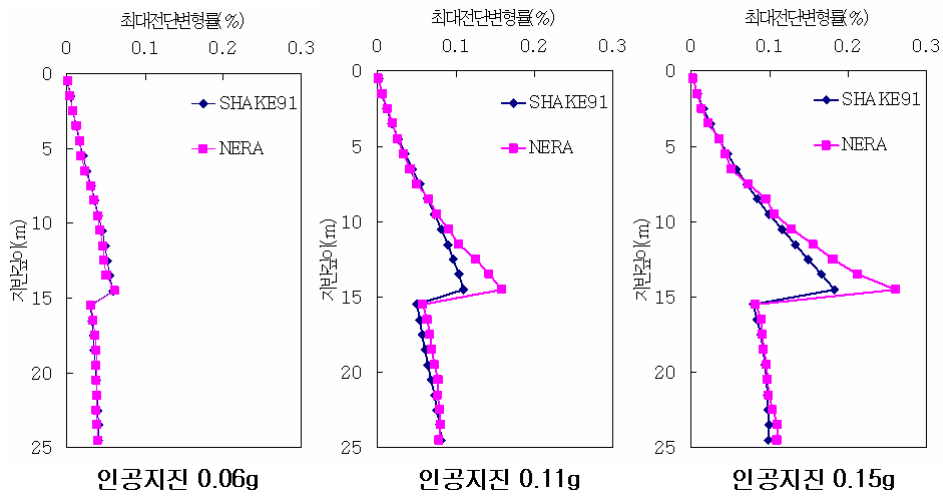


그림 7. 깊이에 따른 최대전단변형률의 변화 (SHAKE91 vs. NERA)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 지반구조물의 내진설계를 위해 수행되는 지반응답해석의 다양한 해석기법을 비교 연구하기 위해 현재 국내에서 널리 사용되고 있는 수치해석 프로그램들을 이용하여 지반응답해석을 수행하였다. 1차원해석과 2차원해석, 등가선형해석과 비선형해석의 결과를 서로 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

##### 1차원해석 vs. 2차원해석

1) 등가선형, 전응력해석 프로그램인 SHAKE91과 FLUSH를 이용하여 각각 1차원해석과 2차원해석을 수행하였다. 단주기 지진인 Ofunato 지진과 인공 지진의 경우, SHAKE91과 FLUSH의 결과가 비교적 잘 일치하지만, 장주기 지진인 Hachinohe 지진의 경우, FLUSH의 결과가 SHAKE91보다 더 크게 나타났다. 이러한 원인은 FLUSH의 경우 2차원 모형을 하기 때문에 1차원 수평방향 자유도 이외의 자유도와 관련된 진동 모우드가 존재하며, 이러한 1차원해석에서는 존재하지 않는 진동 모우드가 Hachinohe 지진의 장주기 성분과 결합하여 큰 응답을 보였기 때문으로 판단된다.

2) 비선형, 전응력해석 프로그램인 NERA와 FLAC을 이용하여 각각 1차원해석과 2차원해석을 수행하였다. 단주기 지진인 Ofunato 지진과 인공 지진의 경우, FLAC의 최대가속도 결과는 입력전단탄성계수가 작아질수록 감소하는 경향을 보인 반면, Hachinohe 지진의 경우, 입력 전단탄성계수가 최대전단탄성계수  $G_{max}$ 의 25%일 때 가장 큰 응답을 보였다. 이러한 원인은 지반의 탄성계수가 작아지면서 해석대상의 고유주기가 증가하기 때문에 Hachinohe 지진의 장주기 성분의 영향으로 큰 응답을 보였기 때문으로 판단된다. Ofunato 지진과 인공 지진의 경우, 입력전단탄성계수가 최대전단탄성계수  $G_{max}$ 의 25%인 경우 NERA의 결과와 비슷한 반면, Hachinohe 지진인 경우, 최대전단탄성계수  $G_{max}$ 의 50%인 경우가 NERA의 결과와 가장 비슷하였다. 따라서 FLAC을 이용하여 지반응답해석을 수행할 때는 적절한 전단탄성계수를 사용하는 것이 중요하다.

3) 비선형, 유효응력해석 프로그램인 SUMDES와 FLIP을 이용하여 얻은 1차원해석과 2차원해석 결과를 서로 비교한 결과, 유효응력해석은 과잉간극수압 발생 모델과 이를 정의하는 매개변수에 따라 그 결과가 민감하게 변하기 때문에 정확한 결과를 얻기 위해서는 실내실험을 통한 정확한 매개변수 산정이 선행되어야 한다.

### 등가선형해석 vs. 비선형해석

1차원, 전응력해석 프로그램인 SHAKE91과 NERA를 이용하여 각각 등가선형해석과 비선형해석을 수행하였다. 그 결과, 입력지진의 크기가 작거나 지반의 강성이 큰 경우와 같은 낮은 수준의 변형률이 발생할 경우에는 등가선형해석과 비선형해석은 거의 같은 결과를 나타내지만, 입력지진의 크기가 크거나 강성차가 큰 두 개 토층의 경계에서와 같은 높은 수준의 변형률이 발생할 경우에는 등가선형해석과 비선형해석의 결과에 차이가 발생하였다.

## 참고문헌

1. Bardet, J. P. and Tobita, T.(2001), *NERA: A computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered soil deposits*, University of Southern California.
2. Iai, S., FLIP Research Group and Ozutumi, O.(2001), *Special Geomechanics Workshop FLIP: Finite element analysis Liquefaction Program Seminar Materials*, U.C. Berkeley Geoenvironmenting.
3. Idriss, I. M. and Sun, J. I.(1992), *User's Manual for SHAKE91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits*, University of California, Davis.
4. Itasca Consulting Group(1995), *FLAC: Fast Lagrangian Analysis of Continua Version 3.3*, Itasca Consulting Group, Inc..
5. Li, X. S., Wang, Z. L. and Shen, C. K.(1992), *SUMDES: A Nonlinear Procedure for Response Analysis of Horizontally-layered Sites Subjected to Multi-directional Earthquake Loading*, Department of Civil Engineering, University of California, Davis.
6. Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C. F. and Seed, H. B.(1975), *FLUSH: A computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems*, Report No. EERC-75-30.
7. Port and Harbour Research Institute(1997), *Handbook Liquefaction Remediation of Reclaimed land*, A.A.Balkema, Rotterdam, Brookfield.
8. Seed, H. B. and Idriss, I. M.(1970), "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response analysis", Report No. UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.