

## 지반응답해석기법의 차이에 의한 지반응답 분산도 평가 Influence of Analysis Models on Variation of Ground Response during Earthquake

김성렬<sup>1)</sup>, Sung-Ryul Kim, 최재순<sup>2)</sup>, Jae-Soon Choi, 김수일<sup>3)</sup>, Soo-Il Kim, 박대영<sup>4)</sup>, Dae-Young Park, 박성용<sup>5)</sup>, Seong-Yong Park, 김기풍<sup>6)</sup>, Ki-Poong Kim

- 1) 동아대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Dong-A Univ.
- 2) 서경대학교 토목공학과 전임강사, Instructor, Dept. of Civil Engineering, Seokyeong Univ.
- 3) 연세대학교 사회환경시스템 공학부 교수, Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ.
- 4) 동아대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dong-A Univ.
- 5) 연세대학교 사회환경시스템 공학부 박사수료, Ph.D.Candidate, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ.
- 6) 연세대학교 사회환경시스템 공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ.

**SYNOPSIS** : The Round-Robin Test (RRT) for ground response analysis was performed by Division of Geotechnical Earthquake Engineering of Korean Geotechnical Society. This research analyzed the influence of analysis methods on variation of ground response by using the results of this RRT. The analysis methods include equivalent linear analysis, non-linear analysis and effective stress analysis. A total of 5 teams among 12 teams applied two kinds of analysis methods. This research compared the results of these 5 teams and analyzed the variation of the results according to analysis methods. The compared results were shear stress-shear strain relation, transfer function, time history and the response spectrum of ground surface acceleration, peak ground acceleration, peak shear strain and maximum excess pore pressure ratio.

**Keywords** : ground response analysis, analysis model, non-linear model, equivalent linear model, effective stress model

### 1. 서론

국내 지반구조물 내진설계연구가 본격적으로 시작된 1997년 이후 약 10여년이 경과하였다. 지금의 국내 내진설계 기술수준을 살펴보면 각종 수치해석 프로그램들을 이용하여 지반응답해석을 활발히 수행하고 있고, 지반동적물성값에 대한 이해도가 높으며, 비선형해석 뿐 아니라 각종 과잉간극수압 모델을 개발하여 유효응력해석까지 수행하는 등 높은 수준이 되었다. 그러나, 내진설계 실무에서는 제한된 지반조사 정보, 해석모델에 대한 이해부족 등으로 해석결과의 신뢰성을 확보하지 못하고 있다. 그러므로, 본 RRT 분석을 통하여 해석결과의 분산도를 평가하고 향후 개선방향을 제시할 필요가 있다.

본 RRT는 표준관입시험의  $N$ 값 및 지층구성 그리고 콘관입시험의  $q_t$ 값 등 제한된 정보가 주어진 상태에서 수행되었다. 총 12곳이 참여하였는데 사용된 해석기법의 종류를 살펴보면 등가선형해석 11곳, 전응력 비선형해석 4곳, 유효응력해석 2곳 등이다. 해석입력정보가 제한되었기 때문에 동적물성값, 해석방법,

기반압깊이 결정 등 해석에 필요한 입력정보를 각 기관마다 자율적으로 결정하였다. 그러므로, 각 기관의 입력물성값 차이가 지반응답에 미치는 영향이 클 것으로 판단되었다. 본 논문의 목적은 해석기법의 종류가 지반응답에 미치는 영향을 분석하는 것이므로 동일한 기관에서 2종류 이상의 해석기법을 적용한 경우의 결과를 분석하였다.

표 1은 이번 RRT 참여기관에서 수행한 해석기법을 정리한 것이다. J를 제외한 나머지 기관에서 등가선형해석을 수행하였고, 4곳에서 전응력 비선형해석, 2곳에서 유효응력해석을 수행하였다. 총 5개 기관(C, D, F, J, K 기관)이 2종류 이상의 지반응답해석을 수행하였는데 이 중 C, D, K기관의 3곳은 등가선형해석과 전응력비선형 해석을 수행하였고, K기관은 등가선형해석과 유효응력해석, J기관은 전응력비선형해석과 유효응력해석을 수행하였다.

표 1. RRT 참여기관의 해석기법 정리

해석기법	참여기관	사용프로그램 및 해석모델
등가선형해석 기법	11개 기관 (J 제외한 나머지 기관)	· SHAKE91 (A, B, G, H) · Pro-Shake(C, I, K, L) · EERA (D) · DEEPSOIL (F) · SHAKE2000 (E)
전응력 비선형해석 기법	4개 기관 (C, D, F, J)	· YUSAYUSA-2 (C) - 비선형모델: Hyperbolic 모델 · NERA (D) - 비선형모델: Mechanical 모델 · DEEPSOIL (F) - 비선형모델: Modified hyperbolic 모델 · FLAC 5.0 (J) - 비선형모델: M-C model with hysteric damping
유효응력해석 기법	2개 기관 (J, K)	· FLAC 5.0 (J) - 과잉간극수압모델: UBC sand 모델 · YUSAYUSA (K) - 비선형모델: Hyperbolic 모델 - 과잉간극수압모델: Stress-path 모델

우선 위 5개 기관에서 적용한 해석기법의 개요를 살펴보고, 해석기법이 지반응답에 미치는 영향을 비교 분석하였다. 분석된 결과는 전단응력-전단변형률 곡선, 전달함수, 지표면 가속도 시간이력 및 응답스펙트럼, 최대 지반가속도 및 최대 전단변형률 그리고 최대 과잉간극수압비 등이다.

## 2. 해석기법 개요

본 절에 기술된 해석기법에 대한 일부 내용은 한국지반공학회(2006)에서 출간된 지반공학시리즈8 ‘지반 구조물의 내진설계’ 중 ‘3.2 지반응답해석(박두희, 2006)’을 참고하여 기술하였다.

지반응답해석 방법은 표 2와 같이 구분할 수 있다. 이중 해석영역은 주파수 영역해석과 시간 영역해석으로 구분된다. 주파수 영역해석법은 푸리에 변환을 이용하여 지진과 시간이력 등을 주파수 영역으로 전환한 후 주파수 영역에서 정의되는 전달함수를 이용하여 지진응답을 산정하는 방법이다. 이 방법은 푸리에 변환을 위해 선형 탄성모델만이 이용되므로, 지반의 비선형 거동을 간접적으로 모사하기 위해 등가선형해석법이 필요하다. 시간 영역해석법은 지반 비선형 모델을 이용할 수 있으며 시간 영역에서의 수치적 분법을 이용하여 지반의 응답을 순차적으로 계산한다. 시간 영역해석법은 시간경과에 따른 지반강성과 과

잉간극수압 변화 등을 고려하는 것이 가능한데 과잉간극수압 발생 고려여부에 따라 전응력해석과 유효응력해석으로 구분한다.

표 3은 1차원 지반응답해석에 이용되는 해석 프로그램들을 나열하였다. 이 중 주파수 영역에서 등가선형해석법을 이용하는 프로그램들이 가장 널리 이용되고 있다. 시간영역 비선형해석 프로그램은 비선형모델 및 감쇠모델의 종류에 따라 구분된다. 유효응력해석 프로그램은 응력-변형률 구성모델과 과잉간극수압 모델의 종류에 따라 구분된다.

표 2. 지반응답해석의 구분

구분	분류
해석차원	1, 2, 3 차원
해석영역	주파수 영역, 시간 영역
응력 - 변형률 관계	선형, 등가선형, 비선형
과잉간극수압 고려 여부	전응력, 유효응력

표 3. 1차원 지반응답해석의 구분 및 관련 프로그램

해석영역	지반응력-변형률 관계	과잉간극수압 고려 여부	프로그램
주파수 영역	등가선형	전응력	SHAKE91, ProShake, DEEPSOIL, EERA, YUSAYUSA
시간 영역	비선형	전응력	DEEPSOIL, NERA, SPECTRA, YUSAYUSA
시간 영역	비선형	유효응력	SUMDES, DESRA, DMOD_2, TESS, YUSAYUSA

## 2.1 등가선형해석 기법

등가선형해석 기법은 선형탄성해석에서 그림 1에 나타난 절차를 이용하여 지반의 비선형성을 간접적으로 고려하는 방법으로 해석절차는 다음과 같다.

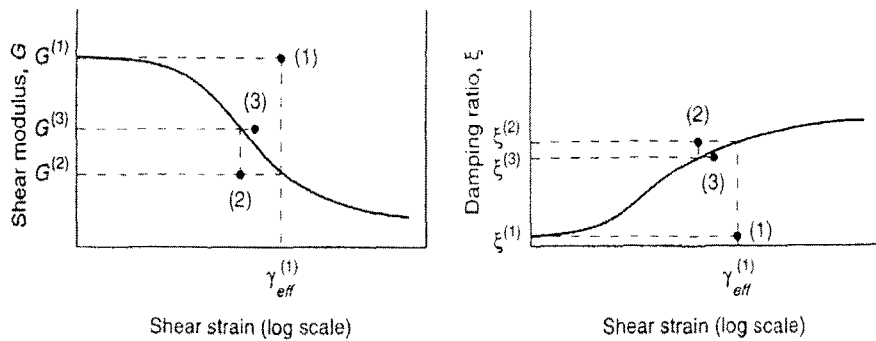


그림 1. 등가선형해석을 위한 반복계산 수행 과정(Kramer, 1996)

- ① 각 해석지층에서 전단탄성계수와 감쇠비의 초기 가정값  $G^{(1)}$ 와  $\xi^{(1)}$ 를 결정한다. 일반적으로 초기 가정값은 전단탄성감소계수와 감쇠비 곡선에서 최소변형률에 해당하는 값을 사용한다.
- ② 초기 가정값  $G^{(1)}$ 와  $\xi^{(1)}$ 을 이용하여 선형탄성 지반응답해석을 수행하고 각 층에서 전단변형률 시간이력을 산정한다.
- ③ 변형률 시간이력 중 최대 변형률  $\gamma_{max}$  값을 구한 후 다음 식을 이용하여 유효전단변형률  $\gamma_{eff}^{(1)}$  값을 계산한다.

$\gamma_{eff} = R_\gamma \gamma_{max}$  여기서,  $R_\gamma = (M-1)/10$  또는 0.65 적용, M은 지진규모

- ④ 그림 1에서  $\gamma_{eff}^{(1)}$ 에 대응하는  $G^{(2)}$ 와  $\xi^{(2)}$ 값을 이용하여 다시 지반응답해석을 수행하고 각 지층의 전단변형률 시간이력을 산정한다.
- ⑤ 이런 방법으로 i번째 해석에 이용된  $G^{(i)}$  및  $\xi^{(i)}$ 값과 해석시 얻어진  $\gamma_{eff}$ 에 대응하는 새로운  $G^{(i+1)}$  및  $\xi^{(i+1)}$ 값의 오차가 허용오차 이내가 될 때까지 ②-④번 과정을 반복한다.

등가선형해석의 입력변수는 4가지(흙 단위중량, 최대전단탄성계수, 전단탄성계수 곡선, 감쇠비 곡선)로 입력변수의 수는 적지만 지층구분, 기반암깊이, Outcrop 옵션 등 세부 입력값의 결정이 해석결과에 큰 영향을 미치므로 주의가 필요하다.

## 2.2 전응력 비선형해석 기법

등가선형해석 기법은 오랜 기간에 걸쳐 해석결과의 유효성이 검증되었으며 비교적 만족할만한 결과를 보여준다. 그러나, 지반의 비선형거동이 우세하거나 공진현상에 의한 큰 응답발생 등의 경우에 실제 지반 거동과 차이날 수가 있다. 이러한 경우에는 정확한 지반응답을 얻기 위하여 비선형해석 기법을 이용하는 것이 바람직하다.

### 2.2.1 비선형 구성모델

비선형 구성모델은 전단응력-전단변형률의 비선형 관계를 묘사하는데 이용된다. 지반의 비선형 거동은 그림 2와 같이 뼈대곡선(backbone curve)과 unloading 및 reloading 곡선으로 구성된다. 이 중 unloading 및 reloading 곡선은 아래 기술된 Masing(Masing, 1926)과 Extended Masing Rule(Pyke, 1979; Vucetic, 1990)을 이용하여 정의된다.

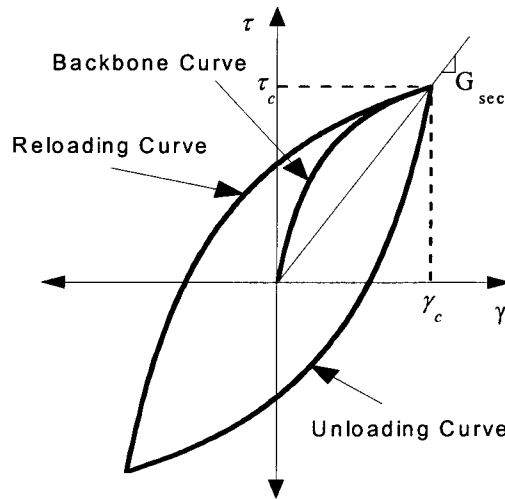


그림 2. Masing과 Extended Masing Rule을 따르는 비선형 모델의 거동

- ① 초기재하 시 응력-변형률은 뼈대곡선을 따른다.
- ② unloading 그리고 reloading 곡선은 뼈대곡선을 사용하여 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\tau - \tau_{rev}}{2} = F_{bb} \left( \frac{\gamma - \gamma_{rev}}{2} \right)$$

여기서,  $\tau_{rev}$ =응력 역전점,  $\gamma_{rev}$  = 변형률 역전점,  $F_{bb}$ =뼈대곡선 함수

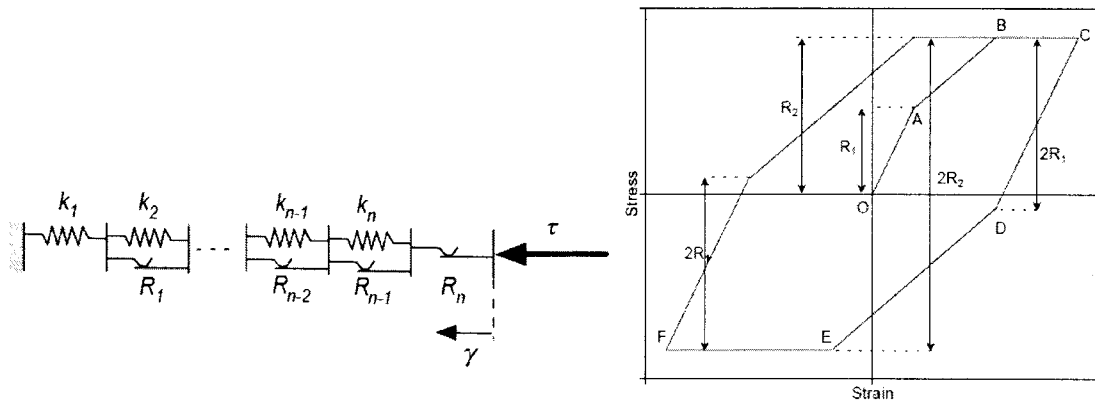
- ③ 만약 unloading 또는 reloading 곡선의 변형률이 과거에 발생한 최대변형률을 초과하면 추가적인 변형에서는 뼈대곡선을 따라가게 된다.
- ④ unloading 또는 reloading 곡선이 이전 사이클에서의 unloading 또는 reloading 곡선을 만나면 응력-

변형률 곡선은 이전 사이클 곡선을 따라간다.

백대곡선을 정의하는 비선형 구성모델에는 1) Mechanical, 2) Hyperbolic, 3) Modified hyperbolic, 4) 소성모델 등이 있다. 이 비선형 모델들이 전단탄성계수 감소곡선을 잘 모사할 수 있도록 관련변수들을 결정하는 것이 중요하다.

### 1) Mechanical 모델

Mechanical 모델은 Iwan(1967)과 Mroz(1967)가 그림 3(a)와 같이 스프링 강성과 슬라이더로 구성된 n개의 요소를 이용하여 비선형 응력-변형률 곡선을 모사하기 위해 제안하였다. 슬라이더 R의 저항력은 순차적으로 점차 증가한다 ( $R_1 < R_2 < R_3, \dots$ ). 전단응력이 저항력  $R_1$ 보다 작은 경우 강성은  $k_1$ 이 되며, 응력이  $R_1$ 보다 커지게 되면  $R_1$ 슬라이더는 움직이고  $k_2$ 의 강성이 발휘된다. 이런 방식으로 그림 3(b)의 비선형 이력관계를 모사한다.



(a) Mechanical 모델

(b) 응력-변형률 이력곡선

그림 3. NERA 프로그램에 적용된 Mechanical 모델

### 2) Hyperbolic 모델

Hyperbolic 모델은 Kondner와 Zelasko(1963)에 의하여 개발되었으며 지반의 응력-변형률은 다음 식으로 정의된다.

$$\tau = \frac{G_{mo}\gamma}{1 + \left(\frac{G_{mo}}{\tau_{mo}}\gamma\right)} = \frac{G_{mo}\gamma}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)} \quad (1)$$

여기서,  $\tau$ =전단응력,  $\gamma$ =전단변형률,  $G_{mo}$ =전단탄성계수,  $\tau_{mo}$ =전단강도,  $\gamma_r$ =기준전단변형률,  $\gamma_r = \tau_{mo}/G_{mo}$

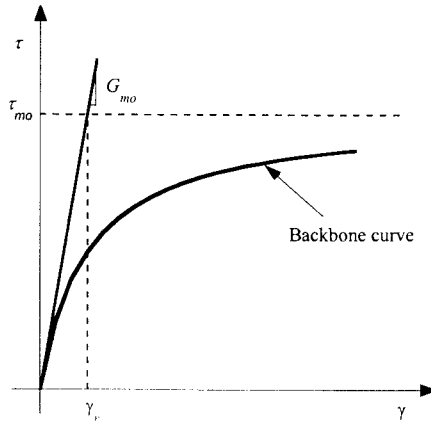


그림 4. Hyperbolic 모델의 응력-변형률 관계

### 3) Modified hyperbolic 모델

Modified hyperbolic 모델(Matasovic, 1993)은 기존의 Hyperbolic 모델에서 식 (2)와 같이 변수  $\beta$  와  $s$ 의 추가적인 변수들을 도입하여 정밀하게 지반의 동적 거동을 나타낼 수 있다. Hashash와 Park(2001)은 이 모델에 구속압력의 영향을 고려할 수 있도록 Extended modified hyperbolic 모델을 제시하고 이를 DEEPSOIL 프로그램에 적용하였다.

$$\tau = \frac{G_{mo}\gamma}{1 + \beta \left( \frac{G_{mo}}{\tau_{mo}} \gamma \right)^s} = \frac{G_{mo}\gamma}{1 + \beta \left( \frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^s} \quad (2)$$

### 4) 소성(Plasticity) 모델

소성모델은 지반 탄성거동의 한계를 정의하는 항복면(yield surface)을 토대로 hardening, softening, 이방성 등 지반의 복잡한 거동을 모사하기 위해서 개발되었다. 소성모델은 지반의 탄성거동과 소성거동을 구분하여 지반의 거동을 더욱 사실적으로 모사할 수 있고 현재까지 많은 모델들이 개발되고 있다. 그러나, 실무에서의 사용은 증가되지 않고 있는데, 그 이유는 지반거동을 정밀하게 모사하려면 많은 수의 입력변수가 필요하며 모델에 적합한 변수값의 결정과 구성모델에 대한 명확한 이해 등이 어렵기 때문이다.

#### 2.2.2 감쇠비

지반의 감쇠는 점성 감쇠와 이력감쇠로 구성된다. 이력감쇠는 지반의 비선형 응력-변형률 이력곡선의 내부 면적에 해당하는 값으로 선형한계변형률보다 큰 변형률에서 비선형 거동에 의해 발생한다. 변형률이 선형한계변형률을 넘어 점차 증가하면 응력-변형률 이력곡선의 크기가 점차 커지게 되고 감쇠비도 증가한다. 변형률이 선형한계변형률보다 작으면 이력감쇠는 이론적으로 0이 되지만, 실험에 따르면 미소변형률에서도 감쇠비가 존재하는 것으로 나타났다. 이 미소변형률에서 존재하는 감쇠를 점성감쇠로 정의한다. 앞서 기술한 모든 비선형 모델은 기본적으로 이력감쇠를 내재적으로 포함하고 있으므로 별도의 감쇠비를 고려하지 않아도 된다. 다만, 점성감쇠를 고려하지 않을 경우 미소변형률에서 감쇠비가 0이 되어 잘못된 응답값이 얻어질 수 있으므로 일부 프로그램에서는 점성감쇠를 적용하고 있다.

그림 5는 NERA 프로그램에서 계산된 이력감쇠와 등가선형해석의 감쇠비 곡선을 비교하여 보여준다. NERA 프로그램은 지반 비선형 모델로서 Mechanical 모델을 사용한다. 계산된 감쇠비를 보면 미소변형률에서 감쇠비는 0이며 전단변형률이 선형한계변형률을 넘어서면 이력감쇠에 의해 감쇠비가 증가한다. 일부 변형률범위에서 감쇠비가 일시적으로 감소하지만 1% 미만의 변형률 수준에서 비교적 만족할만한 결과를 주고 있다.

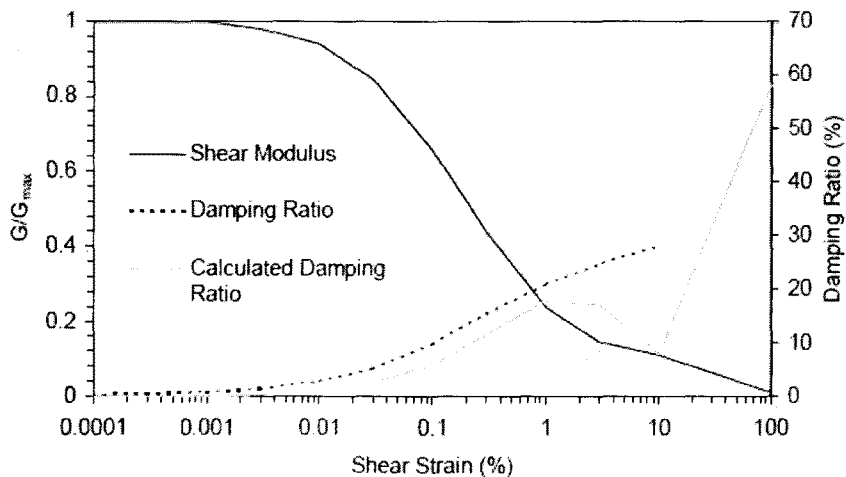


그림 5. NERA 프로그램에서 계산된 이력감쇠비

### 2.3 유효응력해석 기법

유효응력해석 기법은 과잉간극수압 모델을 이용하여 지반진동에 의해 발생하는 과잉간극수압을 모사한다. 지반의 강성과 강도는 과잉간극수압이 발생하면 크게 변화되며 이는 지반응답에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 과잉간극수압이 발생하면 구속응력이 감소하고 이로 인하여 지반의 강성이 낮아진다. 따라서 전응력 해석에 비하여 지반의 고유 주기가 길어지며 저주파수요소가 크게 증폭된다. 또한, 유효응력해석을 통하여 액상화 발생 여부도 평가할 수 있게 된다.

현재 많은 수치해석 프로그램에서 여러가지 종류의 과잉간극수압 모델을 적용하고 있다. 이 중 DESRA(Lee 등, 1978) 프로그램은 구성모델로 Hyperbolic 모형을 사용하고 과잉간극수압은 전단변형률, 유효응력, 그리고 축적된 체적 변형률에 의하여 정의된다. Vucetic과 Dobry(1988)는 과잉간극수압을 반복회수와 전단변형률의 함수로 단순화시킨 모형을 제안하였으며, 이 모델은 DMOD\_2 프로그램(Matasic, 1993)에 적용되었다. SUMDES(Li 등, 1992)는 위의 모형과는 달리 소성모형을 사용하는 유효응력해석 프로그램으로서 지반진동과 간극수압발생 및 확산의 연계해석이 가능하다. 최근에는 과잉간극수압 모델로 교란상태개념 모델(Park 등, 2000), UBC sand 모델(박성식 등, 2005), Stress path 모델(Ishihara 등, 1980), 소산에너지 모델(Jai 등, 1992) 등 많은 과잉간극수압 모델들이 개발되어 각종 수치해석 프로그램에 적용되고 있다.

유효응력해석은 전응력해석에 비하여 진동시 발생하는 과잉간극수압을 모사할 수 있는 장점을 가지고 있지만 과잉간극수압모델에서 추가 입력변수가 필요하고 해석모델에 적절한 입력변수값을 결정하는 것이 어려우므로 실무에서 적용하기 어려운 단점이 있다.

### 2.4 등가선형해석과 비선형해석 기법의 비교

등가선형해석과 비선형해석기법의 거동차이는 그림 6의 응력-변형률 관계를 참조하면 쉽게 설명된다. 등가선형해석은 유효전단변형률  $\gamma_{eff}$ 에 해당하는 할선탄성계수를 이용한다. 그러므로, 등가선형해석은 변형률이 유효전단변형률보다 작으면 탄성계수를 과소평가하며 변형률이 유효전단변형률보다 커지면 탄성계수를 과대평가하게 된다. 일반적으로 등가선형해석이 비선형해석에 비하여 응답의 최대값이 크게 예측되는데 그 이유는 등가선형해석이 최대변형률 수준에서 응력을 과대평가하기 때문이다.

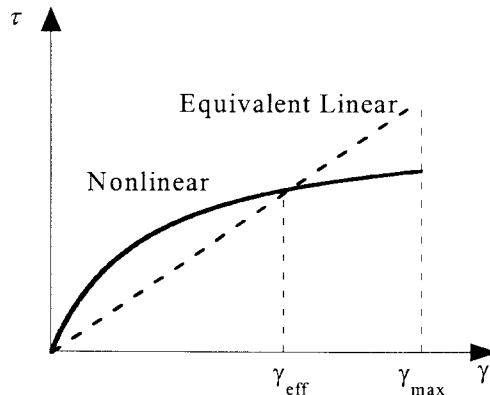


그림 6. 등가선형해석과 비선형해석의 응력-변형률 관계비교

Kramer(1996)는 등가선형해석과 비선형해석 기법의 특징을 다음과 같이 제시하였다.

- ① 등가선형해석의 경우 입력지진파의 진동수와 토층의 고유진동수가 일치하는 경우 실제와 다른 과도한 증폭현상이 발생할 수 있다.
- ② 등가선형해석의 전단변형률 시간이력에서 충격파와 같이 순간적으로 발생하는 최대변형률이 전체 진동

시간에서의 평균적인 변형률 값보다 매우 큰 경우 유효전단변형률이 커지므로 전단탄성계수값은 과소 평가되고 감쇠비는 과대평가될 수 있다. 만일, 최대전단변형률이 평균적인 변형률 값보다 매우 작다면 반대의 결과를 주게 된다.

- ③ 비선형해석은 시간에 따른 과잉간극수압의 변화, 지반강도 및 강성변화 등 여러 가지 영향을 고려할 수 있지만, 등가선형해석은 이를 고려할 수 없다.
- ④ 비선형해석과 등가선형해석의 결과차이는 지반의 비선형거동 정도에 영향을 받는다. 지반강성이 크거나 지진파의 에너지가 작으면 지반의 비선형성이 작으므로 두가지 해석방법 모두 합리적인 결과를 줄 것이다. 그러나, 변형률이 커져서 비선형거동이 지배적인 경우에는 비선형해석을 수행하는 것이 바람직하다.

등가선형해석과 비선형해석기법 모두 1차원 지반응답해석에서 만족할만한 결과를 주고 있으므로, 어느 해석기법이 보다 정확한 결과를 준다고 단정지을수 없다. 지반응답해석 결과의 정확성은 지층조건, 지반물성값, 입력지진파 등 해석입력값의 합리적 결정, 그리고 해석모델에 대한 이해도에 좌우된다고 판단된다.

## 2.5 Round Robin Test 참여기관의 해석조건

표 4는 본 RRT 연구에 참여한 기관들이 이용한 각 해석기법의 입력물성값을 정리하였다.

표 4. RRT 참여기관의 사용프로그램 및 주요 입력물성값 정리

해석기법	프로그램	입력물성
등가선형해석 기법	· SHAKE 91 · Pro-Shake · EERA · DEEPSOIL · SHAKE2000	· 등가선형모델 - 단위중량, 지층두께 - $G/G_{max}-\gamma$ 곡선 - $D-\gamma$ 곡선
전응력 비선형해석 기법	· NERA	· 비선형모델: Mechanical 모델 - $G/G_{max}-\gamma$ 곡선 ( $D-\gamma$ 곡선은 사용않음)
	· DEEPSOIL	· 비선형모델: Modified hyperbolic 모델 - $G_{max}$ , 기준전단변형률, $\beta$ , $s$
	· YUSAYUSA-2	· 비선형모델: Hyperbolic 모델 - $G_{max}$ , 전단강도
	· FLAC 5.0	· 비선형모델: M-C model with hysteric damping - 전단변형률에 따른 전단탄성계수와 감쇠비 변화
유효응력해석 기법	· FLAC 5.0	· 과잉간극수압모델: UBC sand 모델 - 탄성변수 2개(전단탄성계수, 체적탄성계수) - 소성변수 4개(파괴마찰각, constant volume의 마찰각, 소성전단계수, 파괴비)
	· YUSAYUSA	· 비선형모델: Hyperbolic 모델 - $G_{max}$ , 전단강도 · 과잉간극수압모델: Stress-path model - 간극수압 증가 및 감소 계수, 액상화 발생각, $k$ value, 체적압축지수, 투수계수, 흩내부마찰각 등

등가선형해석의 모든 프로그램은 해석기법과 입력물성값의 종류가 동일하다. 그러므로 같은 입력물성값이 이용된다면 해석결과는 동일하다. 전응력 비선형해석기법은 응력-변형률의 비선형 모델의 종류에 따라 구분된다. 일반적으로 이러한 비선형 모델은 등가선형해석에서 이용하는 전단탄성계수 감소곡선을 동일하



게 모사하게 된다. Mechanical 모델은 등가선형해석과 동일한 전단탄성계수 감소곡선을 이용한다. Hyperbolic 모델과 Modified hyperbolic 모델은 전단탄성계수 곡선을 모사하기 위해 전단강도 또는 기준 전단변형률 등의 값을 적절히 결정하여야 하며 등가선형해석에 이용되는 곡선과의 적합성 여부를 확인할 필요가 있다. 만일, 비선형모델이 전단탄성계수 곡선을 합리적으로 모사한다면 비선형해석과 등가선형해석의 결과는 비슷해진다. 비선형모델의 감소비는 일반적으로 응력-변형률의 비선형성에 내재된 이력감쇠로서 모사한다.

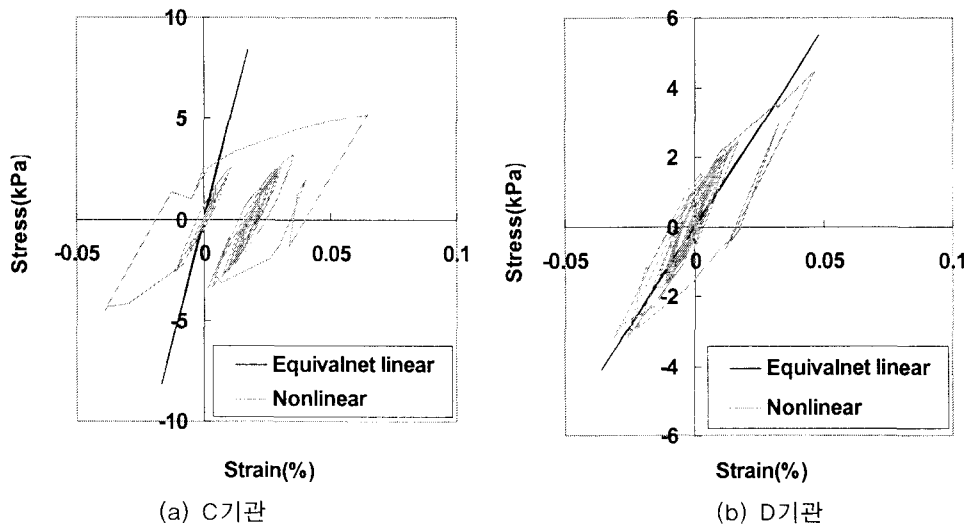
유효응력해석 모델의 경우 지반의 과잉간극수압 발생거동을 모사하기 위해 많은 수의 입력변수가 필요하다. 그러나, 본 RRT해석에서는 과잉간극수압 발생과 관련된 정보가 전혀 주어지지 않았다. 그러므로 특정 해석모델이 보다 정확한 결과를 준다고 단정지을수 없으며 단지 해석정보가 제한된 실무상황에서 발생할 수 있는 지반응답해석의 분산도를 평가하고 향후 개선사항을 제시하는데 의미가 있다.

### 3. 해석기법의 종류에 따른 지반응답 비교

#### 1) 전단응력-전단변형률 곡선 비교

그림 7은 각 기관에서 적용한 지표면 전단응력-전단변형률 곡선을 비교하여 보여준다. 등가선형해석과 비선형해석을 수행한 C, D, F기관의 결과를 보면 D와 F기관은 두 해석기법의 곡선기울기가 비슷한데 반하여 C기관은 큰 차이가 발생하였다. 이것은 C기관에서 적용한 Hyperbolic 모델에서 전단강도값을 등가선형해석의 전단탄성계수 감소곡선과 관계없이 N값을 이용하여 독립적으로 결정함으로써 전단강도가 과소하게 평가되었기 때문으로 판단된다. 그러므로, 비선형모델이 전단탄성계수 곡선을 잘 모사할 수 있도록 입력물성값을 적절히 결정하는 작업이 선행되어야 한다. J와 K기관의 유효응력해석 결과를 보면 전응력해석에 비하여 지반강도와 강성이 감소한 것을 확인할 수 있으며 K기관의 경우 지표면 근처에서 과잉간극수압이 크게 발생하였기 때문에 강도와 강성이 크게 감소하였다. 기관별로 이력곡선 내의 면적으로 정의되는 이력감쇠값, 변형률수준, 전단탄성계수값이 다르게 나타난 이유는 입력물성값, 곡선이 얻어진 깊이, 그리고 지표면 깊이산정기준 등의 차이 때문으로 판단된다.

그림 8은 등가선형해석과 비선형해석의 지진파 3개에 대한 응력-변형률 곡선을 비교한 것이다. 그림 8(a)의 등가선형해석 결과를 보면 변형률이 증가함에 따라 유효전단변형률이 증가하므로 응력-변형률 곡선의 기울기로 정의되는 전단탄성계수값이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그림 8(b)의 비선형 거동은 동일한 뼈대곡선을 이용하여 산정되므로 그 형태가 동일한 것을 알 수 있다.



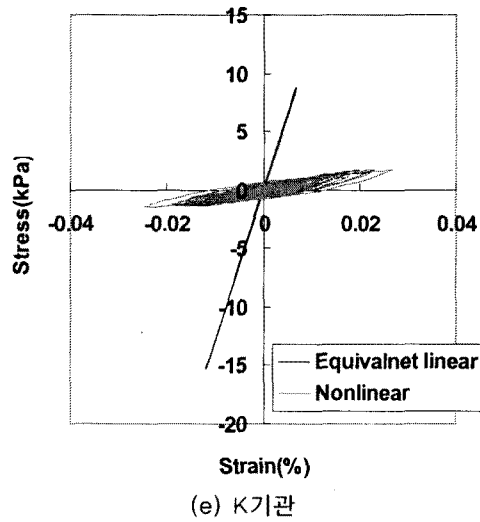
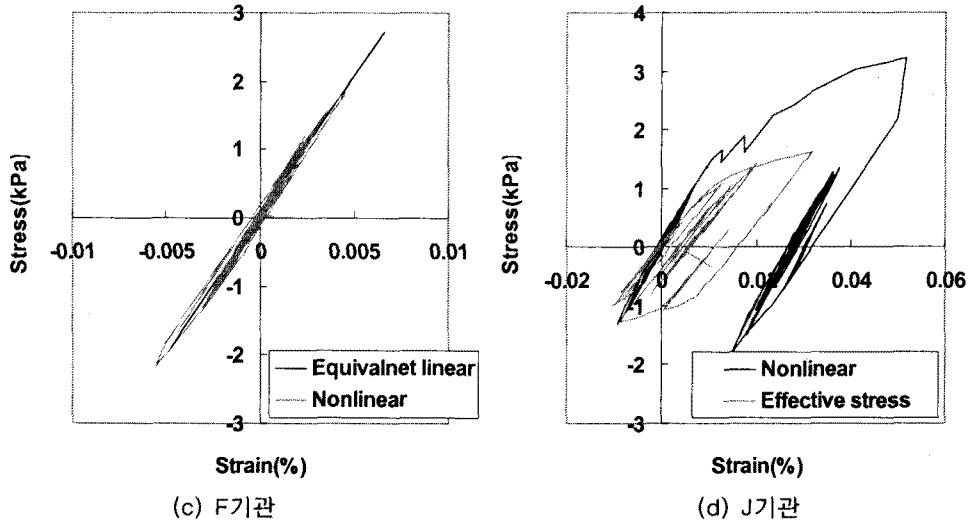


그림 7. 각 기관의 전단응력-전단 변형률 곡선 비교 (주상도 1, Hachinohe 지진파, 지표면 근처깊이)

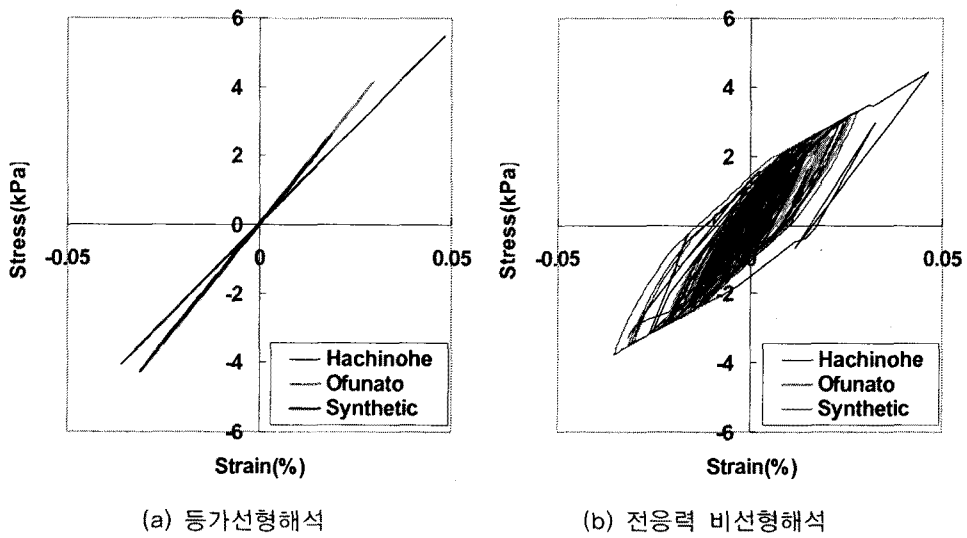


그림 8. 지진파에 따른 지표면 전단응력-전단변형률 곡선비교 (D기관, 주상도1)

## 2) 전달함수(Transfer function) 비교

그림 9와 그림 10은 각각 D와 F기관의 등가선형해석과 비선형해석의 전달함수를 비교한 것이다. 전달함수는 주파수 영역에서 기반암 가속도에 대한 지표면 가속도 응답의 비율로 정의된다. 응답에 큰 영향을 주는 첫 번째 공진진동수와 3~5Hz 미만의 저주파수 영역에서는 두 전달함수가 서로 비슷하였다. 그러나, 약 3~5Hz 이상의 고주파수 영역의 경우 비선형해석의 증폭비가 주파수에 영향을 받지 않으며 등가선형해석에 비해 큰 것으로 나타났다.

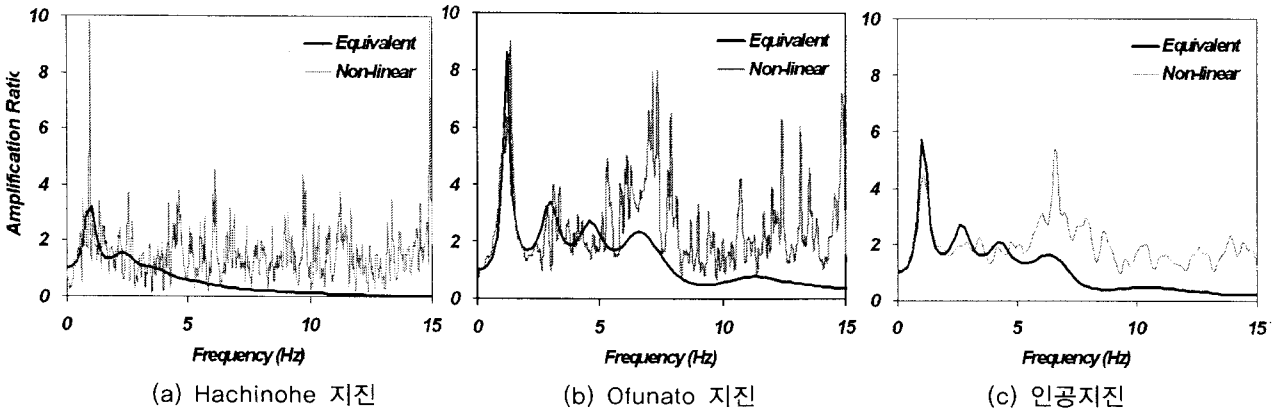


그림 9. 해석기법에 따른 전달함수의 비교 (주상도 1, D기관)

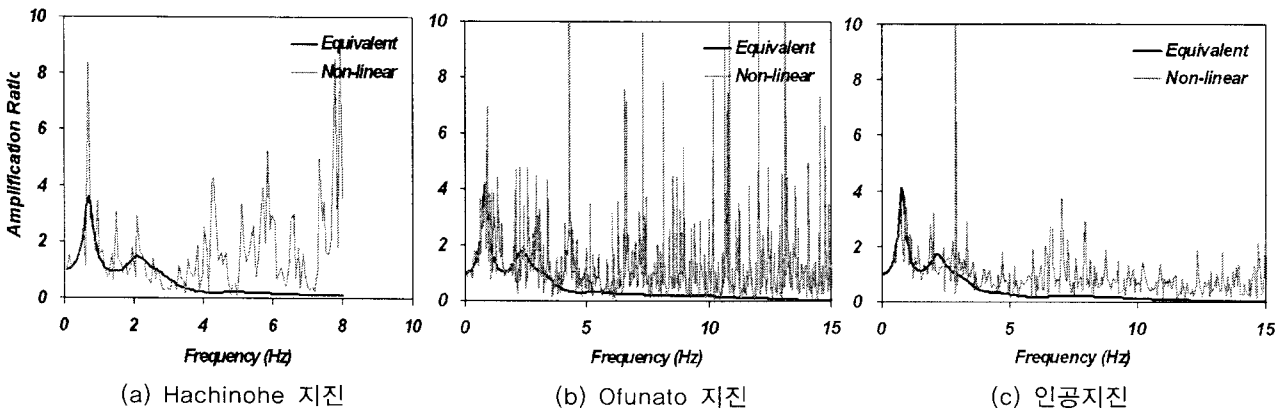


그림 10. 해석기법에 따른 전달함수의 비교 (주상도 1, F기관)

## 3) 최대지반가속도(PGA)와 최대전단변형을 비교

그림 11은 지진파, 해석기법, 그리고 주상도에 따른 지표면 PGA값과 각 PGA값을 등가선형해석의 PGA값으로 나눈 비율을 보여준다. 지표면 PGA값의 변화범위는 0.04~0.41g로 나타났다. 전체적으로 비선형 해석 또는 유효응력해석의 결과가 등가선형해석 결과에 비하여 지표면 PGA값이 감소하는 결과를 보여준다.

표 4는 동일한 기관에서 수행한 두 해석기법간의 지표면 PGA 오차를 정리하여 보여준다. 등가선형해석의 지표면 PGA에 대한 다른 해석기법의 오차는 -0.06g~0.20g의 범위로 나타났다. 그리고, 등가선형해석에 대한 비선형해석의 지표면 PGA 비율을 살펴보면 C기관의 경우 0.74, D기관의 경우 0.85, F기관의 경우 0.84로서 비선형해석의 지표면 PGA가 등가선형해석에 비하여 15%~26% 감소하는 것으로 나타났다. 비선형해석과 유효응력해석을 수행한 J기관의 경우 과잉간극수압의 영향으로 유효응력해석이 비선형해석에 비하여 35%정도 감소한 값을 보여준다. K기관의 경우 유효응력해석의 PGA값이 등가선형해석에 비하여 오히려 증가하였는데, 이것은 그림 11에서 알 수 있듯이 PGA값이 다른 기관에 비하여 매우 작게 산정되어 그 오차가 크게 평가되었기 때문으로 판단된다.

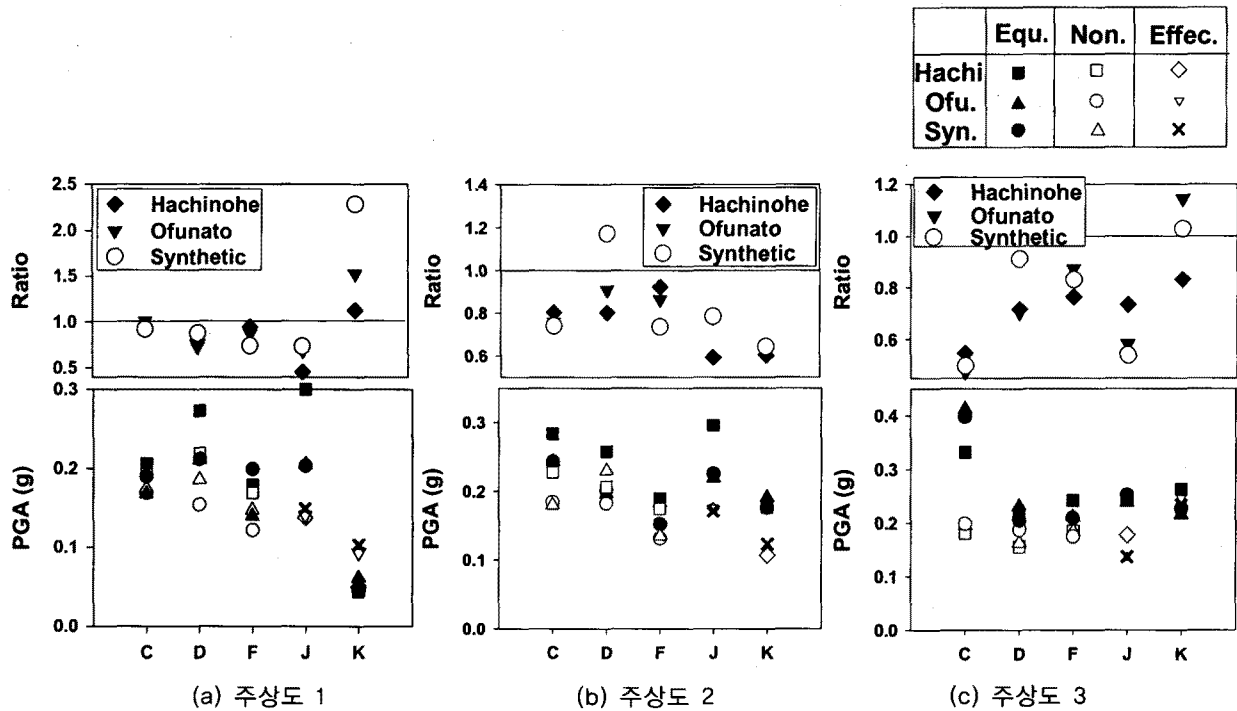


그림 11. 해석기법에 따른 지표면 최대가속도의 비교  
(Ratio=(비선형해석결과)/(등가선형해석결과), J기관의 경우 비선형해석에 대한 비율)

표 4. 해석기법의 종류에 따른 PGA와 최대전단변형률 응답비교

구분	지표면 PGA (g)		상부20m 평균PGA (g)		상부20m 평균최대전단변형률(%)	
	오차범위 <sup>1)</sup>	비율 <sup>3)</sup>	오차범위	비율	오차범위	비율
C (등가선형, 비선형)	0.00~0.20 Avg <sup>2)</sup> =0.09 Dev <sup>3)</sup> =0.08	0.74	-0.01~0.15 Avg=0.06 Dev=0.06	0.81	-0.11~0.04 Avg=-0.01 Dev=0.04	1.22
D (등가선형, 비선형)	-0.03~0.07 Avg=0.04 Dev=0.03	0.85	-0.02~0.10 Avg=0.03 Dev=0.04	0.83	-0.04~0.09 Avg=0.01 Dev=0.05	1.01
F (등가선형, 비선형)	0.01~0.06 Avg=0.03 Dev=0.02	0.84	-0.02~0.04 Avg=0.01 Dev=0.02	0.93	-0.06~0.00 Avg=-0.01 Dev=0.02	1.17
J (비선형, 유효응력)	0.05~0.16 Avg=0.09 Dev=0.04	0.65	0.04~0.27 Avg=0.17 Dev=0.07	0.61	-0.02~0.03 <sup>5)</sup>	1.69 <sup>5)</sup>
K (등가선형, 유효응력)	-0.06~0.07 Avg=0.01 Dev=0.05	1.09	-0.10~0.07 Avg=0.00 Dev=0.06	0.97	-0.09~1.10 Avg=0.22 Dev=0.42	0.76

<sup>1)</sup> 등가선형해석에 대한 다른 해석기법의 해석결과 오차 (J기관의 경우 비선형해석에 대한 오차)

<sup>2)</sup> 지진파와 주상도의 종류에 따른 해석결과 오차의 평균

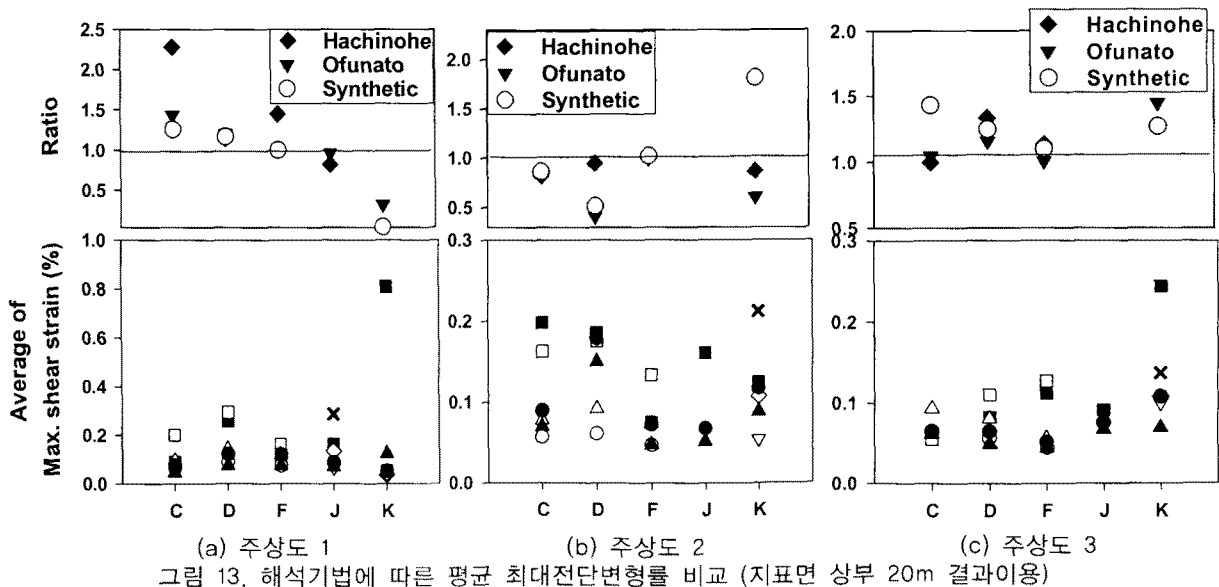
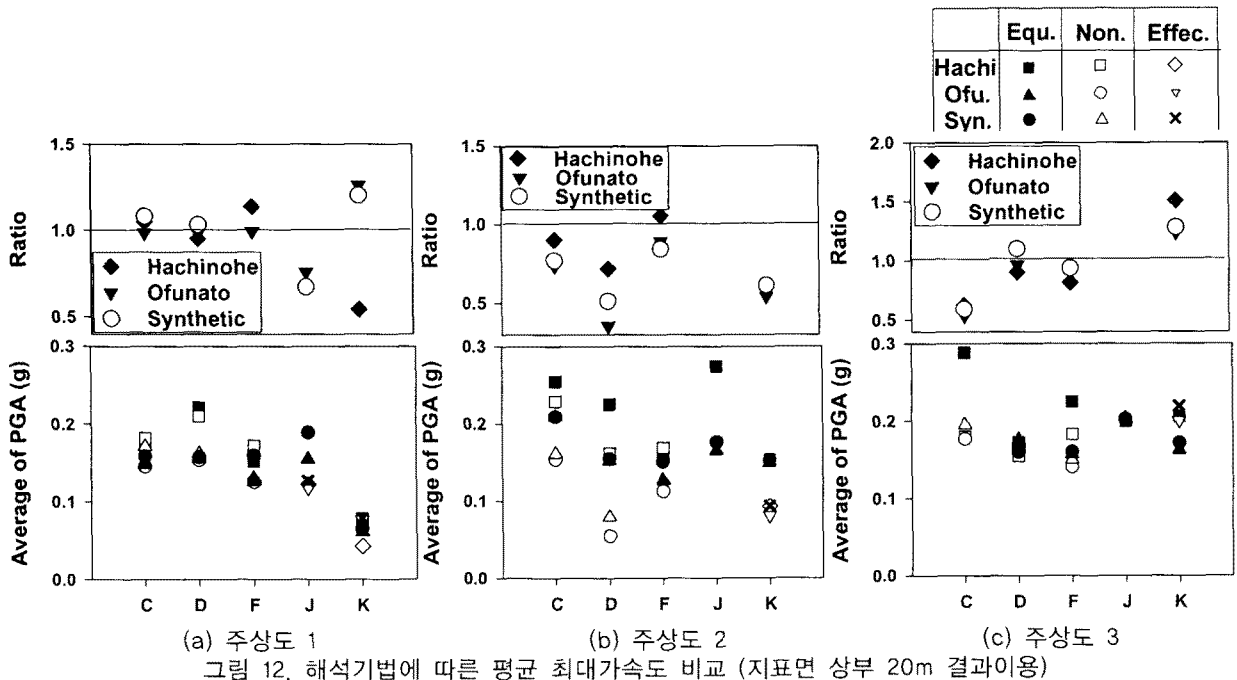
<sup>3)</sup> 지진파와 주상도의 종류에 따른 해석결과 오차의 표준편차

<sup>4)</sup> 각 해석결과를 등가선형해석의 해석결과로 나눈 비율 (J기관의 경우 비선형해석에 대한 비율)

<sup>5)</sup> 주상도 1에 대한 결과만 제시됨

그림 12와 그림 13은 각각 지표면 상부 20m 깊이에 대한 PGA와 최대전단변형률의 평균값을 비교한 것으로서 지반구조물 내진설계에서 중요하게 다루는 액상화 평가에 대해 지반응답이 미치는 영향을 살펴보고자 분석하였다. 국내 액상화 평가시 깊이별 PGA값을 이용하여 지진 전단응력을 산정하기 때문에 평균 PGA값을 살펴보는 것이 의미가 있다. 지표면 상부 20m를 기준으로 정한 것은 액상화 평가시 지표면 상부 20m 깊이 이내에서만 액상화 발생 위험이 있는 것으로 판단하고 있기 때문이다. 상부 20m 깊이의 평균 PGA값의 해석기법에 따른 오차는  $-0.10g \sim 0.27g$ 이며, 평균 최대전단변형률의 오차는  $-0.11\% \sim 1.10\%$ 로 나타났다.

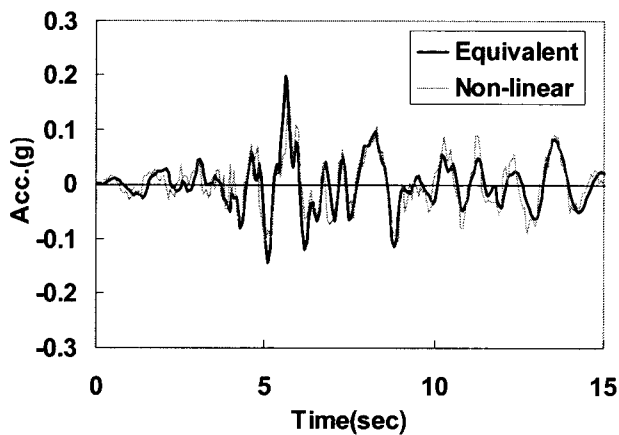
표 4에서 상부 20m 평균 PGA값의 비율을 보면 C기관 0.81, D기관 0.83, F기관 0.93으로 등가선형 해석이 비선형해석에 비하여 7%~19% 정도 감소하였다. 비선형해석을 적용할 경우 깊이별 가속도값이 등가선형해석에 비하여 작아지므로 액상화 평가시 비선형해석을 수행하는 것이 보다 합리적이고 경제적인 결과를 줄 것으로 판단된다. J기관의 경우 유효응력해석이 전응력해석에 비하여 평균 PGA가 약 40% 감소하였다. 상부 20m 평균 최대전단변형률의 비율을 보면 전반적으로 비선형해석이 등가선형해석에 비하여 1.01~1.22배 크게 나타났다. J기관의 경우 과잉간극수압의 영향으로 유효응력해석의 전단변형률이 전응력해석에 비하여 1.69배 증가하였다.



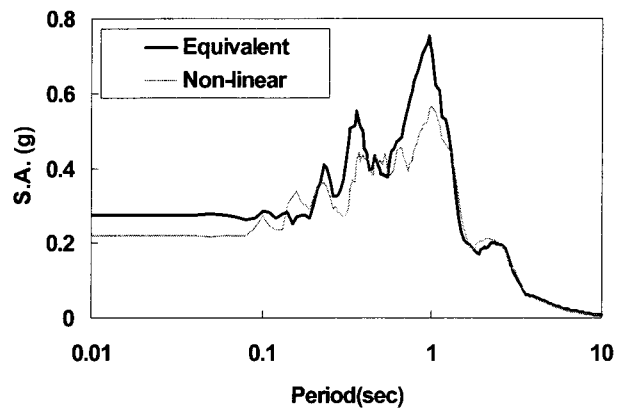
#### 4) 지표면 응답스펙트럼 비교

그림 14와 그림 15는 각각 장주기 Hachinohe 지진파와 단주기 Ofunato 지진파에 대한 등가선형해석과 비선형해석의 지표면 가속도 시간이력과 응답스펙트럼을 보여준다. 두 해석기법의 응답스펙트럼 곡선을 주기에 따라 살펴보면, 장주기 영역에서의 응답은 서로 비슷하고, 최대응답은 비선형해석이 등가선형해석에 비하여 감소하였다. 단주기 영역에서는 비선형해석의 응답이 등가선형해석보다 크게 나타났는데, 그 이유는 그림 9와 그림 10에서 제시하였듯이 단주기 영역에서 비선형해석의 증폭계수가 등가선형해석에 비하여 크기 때문이다. 시간이력을 살펴보면 최대 가속도 진폭에서는 등가선형해석의 가속도가 비선형해석보다 크지만 가속도 진폭이 작은 경우에는 비선형해석의 가속도가 더 큰 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 다른 해석결과에서도 동일하게 관찰되었다.

그림 16은 비선형해석과 유효응력해석의 결과이다. 유효응력해석은 과잉간극수압 발생으로 인하여 지반강성이 감소하므로 전체 주기 영역에서 그 응답이 감소하였다.

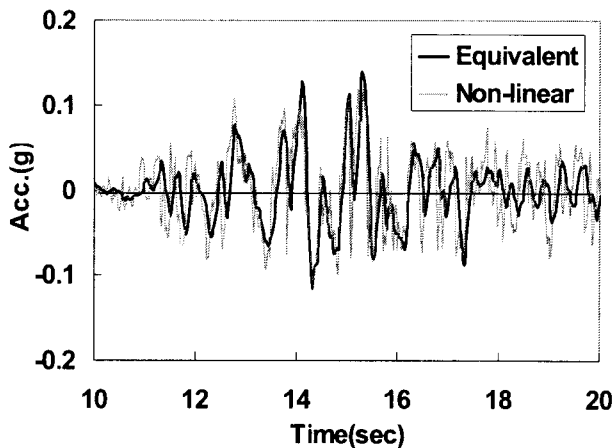


(a) 가속도 시간이력

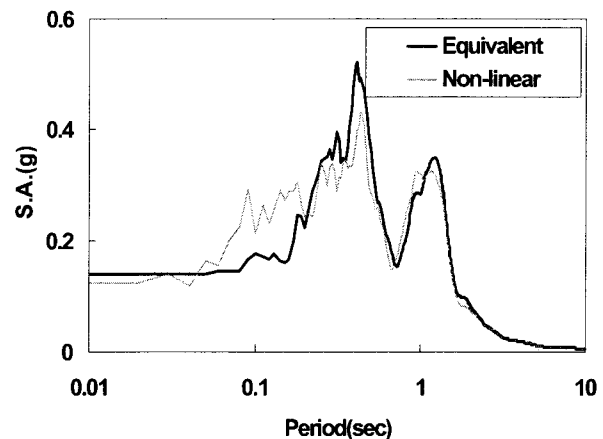


(b) 응답스펙트럼

그림 14. 지표면 가속도 시간이력과 응답스펙트럼 (D기관, 주상도 1, Hachinohe지진)

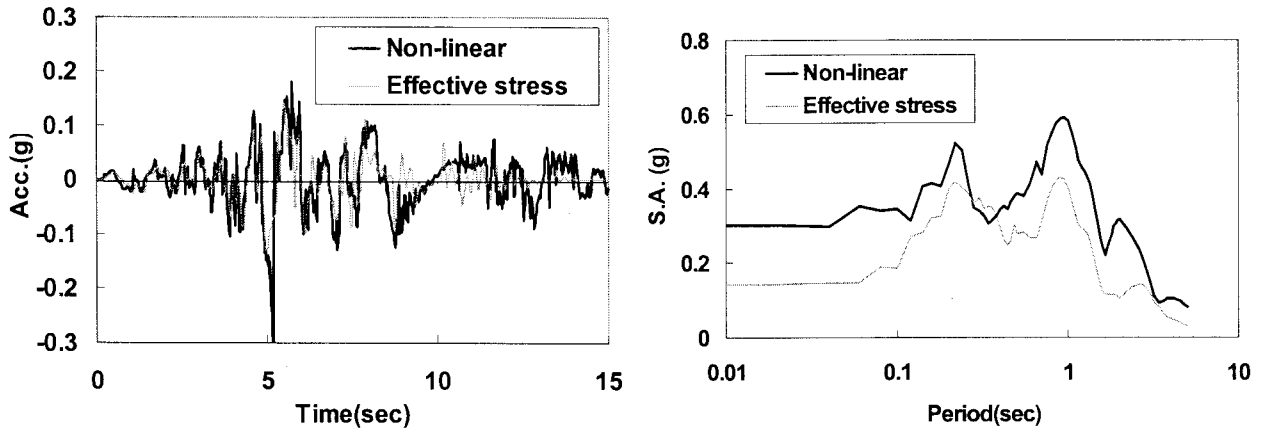


(a) 가속도 시간이력



(b) 응답스펙트럼

그림 15. 지표면 가속도 시간이력과 응답스펙트럼 (F기관, 주상도 1, Ofunato지진)

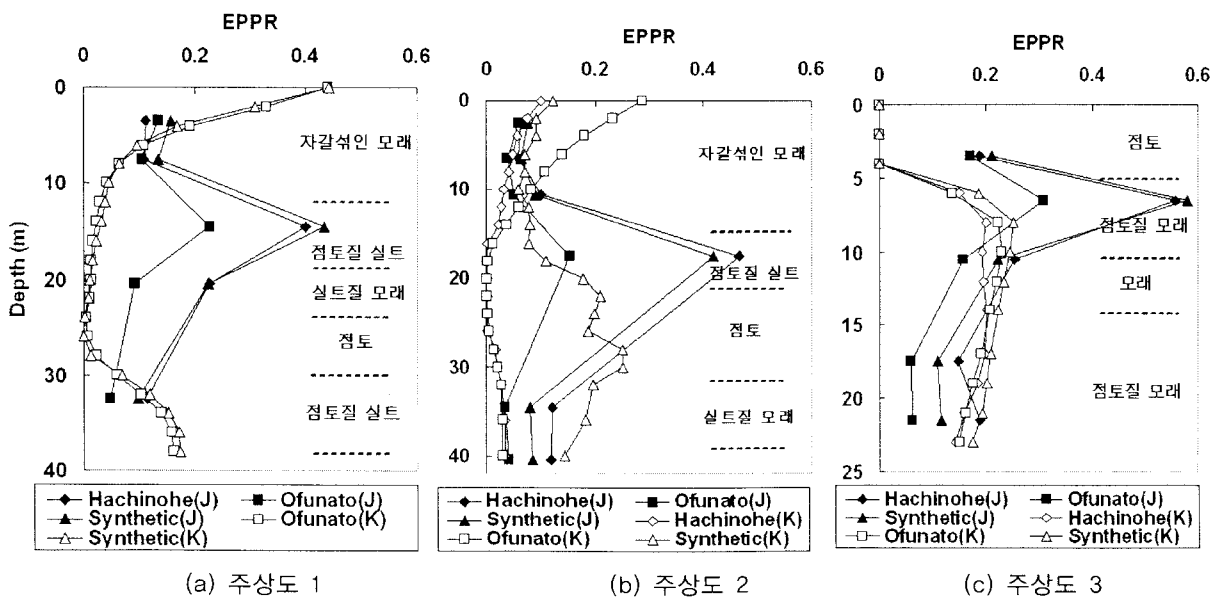


(a) 가속도 시간이력 (b) 응답스펙트럼  
 그림 16. 지표면 가속도 시간이력과 응답스펙트럼 (J기관, 주상도 1, Hachinohe지진)

### 5) 과잉간극수압 응답

그림 17은 유효응력해석을 수행한 J와 K기관의 깊이별 최대 과잉간극수압비(EPPR) 결과이다. 본 RRT에서는 지반의 투수성 및 과잉간극수압 발생 특성에 대한 정보가 주어지지 않았기 때문에 과잉간극수압 산정결과는 단지 해석기관에 따른 오차를 비교하는데만 의의가 있다.

각 기관의 결과를 보면 과잉간극수압의 최대값 발생 깊이 및 분포 양상은 지진과 특성에 영향을 받지 않았다. J와 K기관의 최대 과잉간극수압비는 주상도 1의 경우 0.44와 0.43, 주상도 2의 경우 0.47과 0.29, 주상도 3의 경우 0.58과 0.25로 나타나 최대 2배 이상 차이가 발생하였다. 기관별 최대 과잉간극수압 발생깊이 및 분포양상도 서로 다른 것으로 나타났다. 최대 과잉간극수압은 K기관의 경우 지표면에서 발생하였고, J기관은 지반내 점토질 실트에서 발생하였다. 이러한 결과는 각 모델의 입력변수가 합리적으로 산정될 수 없는 상황에서는 정밀한 해석을 수행하더라도 해석결과의 신뢰성이 크게 떨어진다는 사실을 보여준다. 그러므로, 유효응력해석은 과잉간극수압 발생특성을 상세히 조사하고 과잉간극수압 모델과 해석 프로그램에 대한 충분한 지식을 가진 기술자가 수행을 하여야만 신뢰성있는 결과를 줄 수 있다고 판단된다.



(a) 주상도 1 (b) 주상도 2 (c) 주상도 3  
 그림 17. 3개 주상도의 최대과잉간극수압비(EPPR) 비교

## 4. 요약 및 결론

본 논문에서는 RRT 수행결과 중 해석기법에 따른 지반응답의 분산도를 분석하였다. 동일한 기관에서 2종류 이상의 지반응답해석을 수행한 5개 기관에 대하여 전단응력-전단변형률 곡선, 전달함수, 지표면 가속도 시간이력 및 응답스펙트럼, 최대 지반가속도 및 최대 전단변형률 그리고 최대 과잉간극수압비 등의 결과를 비교하고 그 분산도를 평가하였다. 본 RRT는 표준관입시험의 N값과 지층구분, 콘관입시험의  $q_c$  등 제한된 정보만이 주어진 상황에서 수행되었기 때문에 해석결과의 신뢰성은 판단할 수 없으며 단지 해석기법의 차이가 지반응답의 분산도에 미치는 영향만을 평가하였다. 특히, 유효응력해석의 경우 지반 간극수압 발생에 대한 정보가 전혀 주어지지 않았기 때문에 해석정보가 제한된 실무상황에서 발생할 수 있는 분산정도를 알아보는 데 의의가 있다.

- 1) 등가선형해석은 유효전단변형률에서 결정된 탄성계수를 이용하여 선형탄성해석을 수행하므로 비선형 해석에 비하여 최대응력을 과대평가하고 최대변형률을 과소평가하였다.
- 2) 등가선형해석과 비선형해석의 전달함수는 응답에 큰 영향을 주는 첫 번째 공진주파수와 3~5Hz 미만의 저주파 영역에서 서로 비슷하였다. 그러나, 3~5Hz 이상의 고주파 영역에서는 비선형해석의 증폭비가 등가선형해석에 비하여 큰 것으로 나타났다.
- 3) 해석기법에 따른 지표면 PGA값을 비교한 결과 등가선형해석의 지표면 PGA값이 비선형해석에 비해 15~26% 정도 감소하였다. 유효응력해석은 전응력해석에 비하여 약 35%정도 감소하였다.
- 4) 지반응답해석이 액상화평가에 미치는 영향을 살펴보기 위해 액상화 평가대상인 지표면 상부 20 m 깊이의 지층에 대하여 평균 PGA값과 평균 최대전단변형률값을 비교하였다. 평균 PGA값의 경우 비선형해석이 등가선형해석에 비하여 약 7~19% 감소하였으며, 평균 최대전단변형률은 1.01~1.22배 증가하였다. 유효응력해석은 전응력해석에 비하여 평균 PGA값이 약 40%감소하였고 평균 최대전단변형률은 약 1.69배 증가하였다. 국내 액상화 평가기준에서는 깊이별 PGA값을 이용하여 지진 전단응력을 산정하기 때문에 비선형해석을 수행할 경우 깊이별 가속도값이 등가선형해석에 비하여 작아 지므로 보다 합리적이고 경제적인 설계가 될 수 있다.
- 5) 등가선형해석과 비선형해석의 지표면 응답스펙트럼을 비교하면 장주기 영역에서는 서로 비슷하며, 응답스펙트럼의 최대값은 등가선형해석이 비선형해석에 비해 크며, 단주기 영역에서는 비선형해석의 응답이 큰 것으로 나타났다. 유효응력해석의 경우 과잉간극수압발생에 의해 전체 주파수 영역에서 응답이 감소하는 것으로 나타났다.
- 6) 유효응력해석에 의한 최대과잉간극수압비는 기관별로 최대 2배 이상 차이가 발생하였으며, 최대 과잉간극수압의 발생깊이 및 분포양상도 서로 다른 것으로 나타났다. 이러한 결과는 각 모델의 입력변수를 합리적으로 산정할 수 없는 상황에서는 정밀한 해석을 수행하더라도 해석결과의 신뢰성이 크게 떨어진다는 사실을 보여준다.

## 감사의 글

금번 Round Robin Test 수행을 위해 수고하신 지반진동위원회와 참여기관의 관련자분들께 깊이 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 박두희(2006), 지반구조물의 내진설계 중 3.2 지반응답해석, 지반공학시리즈 8, 구미서관.
2. 박성식, 김영수, Byrne, P.M., 김대만 (2005), "액상화해석을 위한 간단한 구성모델", 한국 지반공학회 논문집, 제21권 8호 pp.27-35.
3. Hashash, Y. M. A., and Park, D. (2001), "Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation



- in the Mississippi embayment", *Engineering Geology*, 62(1-3), 185-206.
4. Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.(1992), "Strain space plasticity model for cyclic mobility", *Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundations Engineering*, 32(2), 1-15.
  5. Iwan, W.D.(1967), "On a class of models for the yielding behavior of continuous and composite systems", *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol.34, pp.612-617.
  6. Ishihara, K. and Towhata, I.(1980), "One-dimensional soil response analysis during earthquakes based on effective stress analysis", *Journal of the faculty of engineering*, The Univeristy of Tokyo(B), Vol.XXXV, No.4, 655-700.
  7. Konder, R. L., and Zelasko, J. S. (1963), "Hyperbolic stress-strain formulation of sands", *Second pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Sao Paulo, Brazil, 289-324.
  8. Kramer, S.L.(1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall
  9. Lee, M.K.W., and Finn, W.D.L. (1978), "Dynamic effective stress response analysis of soil deposits with energy transmitting boundary including assessment of liquefaction potential", The University of British Columbia, *Faculty of Applied Science*.
  10. Li, X.S., Z.L. Wang and C.K. Shen (1992), "SUMDES: A nonlinear procedure for response analysis of horizontally-layered sites subjected to multi-directional earthquake loading", Dept. of Civil Engin. Univ. of Calif., Davis.
  11. Masing, G. (1926), "Eignesspannungen und Verfestigung beim Messing", *Second International Congress on Applied Mechanics*, Zurich, Switzerland, 332-335.
  12. Matasovic, N. (1993), "Seismic response of composite horizontally-layered soil deposits", Ph.D. Thesis, University of California, Los Angeles.
  13. Morz, Z.(1967), "On the description of anisotropic workhardening", *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 15, pp.163-175.
  14. Park, I.J. and Desai, C.S. (2000), "Cyclic behavior and liquefaction of sand using disturbed state concept", *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, 126(9), pp. 834-846.
  15. Pyke, R.M. (1992), "TESS: A computer program for nonlinear ground response analyses", TAGA Engin. Systems & Software, Lafayette, California.
  16. Vucetic, M. (1990), "Normalized behavior of clay under irregular cyclic loading", *Canadian Geotechnical Journal*, 27, 29-46.
  17. Vucetic, M. and Dobry, R.C. (1988), "Cyclic triaxial strain controlled testing of liquefiable sands", *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, ASTM STP 977, ASTM, Philadelphia, pp.475-485.