

주파수 의존성을 고려한 등가선형해석기법의 검증

Verification of Frequency-Dependent Equivalent Linear Method

정 창 균¹ Jeong, Chang-Gyun

곽 동 엽¹ Kwak, Dong-Yeop

박 두 희² Park, Du-Hee

Abstract

One-dimensional site response analysis is widely used to simulate the seismic site effects. The equivalent linear analysis, which is the most widely used type of site response analysis, is essentially a linear method. The method applies constant shear modulus and damping throughout the frequency range of the input motion, ignoring the dependence of the soil response on the loading frequency. A new type of equivalent linear analysis method that can simulate the frequency dependence of the soil behavior via frequency-strain curve was developed. Various forms of frequency-strain curves were proposed, and all curves were asserted to increase the accuracy of the solution. However, its validity has not been extensively proven and the effect of the shape of the frequency-strain curve is not known. This paper used two previously proposed frequency-strain curves and three additional curves developed in this study to evaluate the accuracy of the frequency-dependent equivalent linear method and the influence of the shape of the frequency-strain curves. In the evaluation, six recordings from three case histories were used. The results of the case study indicated that the shape of the frequency-strain curve has a dominant influence on the calculated response, and that the frequency dependent analysis can enhance the accuracy of the solution. However, a curve that results in the best match for all case histories did not exist and the optimum curve varied for each case. Since the optimum frequency-strain curve can not be defined, it is recommended that a suite of curves be used in the analysis.

요 지

1차원 지반응답해석은 지반에 의한 지진동의 증폭현상을 모사하는 데 널리 사용되고 있다. 가장 널리 사용되고 있는 등가선형 지반응답해석기법은 유효변형률에 상응하는 전단탄성계수와 감쇠비를 전 주파수 영역에 일률적으로 적용하며, 진동주파수에 대한 지반 응답의 영향을 고려하지 않는다. 지반의 비선형거동을 주파수영역에서 보다 정확하게 모사하기 위하여 진동주파수와 지반거동의 상관관계를 주파수-변형률 곡선으로써 모의하는 등가선형해석기법이 개발되었으며, 이 방법은 기존의 등가선형해석기법에 비하여 정확성을 향상시킨다고 알려져 있다. 이제까지 다양한 형상의 주파수-변형률 곡선이 제안되었으며, 이들은 한결같이 해석의 정확성을 증가시킨다고 주장된 바 있다. 본 연구에서는 기존의 연구에서 제안되었던 두 개의 주파수-변형률 관계 완화곡선과 본 연구에서 새롭게 제안된 세 개의 곡선을 이용하여 주파수 의존성을 고려한 등가선형해석기법의 정확성을 검증하였다. 검증에는 세 개의 부지에서 기록된 6개의 지진파가 사용되었다. 해석결과, 완화곡선은 지반응답에 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 주파수 의존성을 고려한 해석은 정확성을 향상시킬수 있는 것으로 나타났다. 하지만, 모든 사례에서 가장 정확하게 응답을 예측하는 완화곡선은 없는 것으로 나타났으며, 해석사례별로 최적의 완화곡선이 다른 것으로 나타났다. 따라서, FDEL

1 한양대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.)

2 정회원, 한양대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ., dpark@hanyang.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

해석 수행 시, 다양한 완화곡선을 사용해야 할 것으로 판단되며 등가선형해석과 병행해서 수행되어야 한다고 판단된다.

Keywords : Equivalent linear, Frequency-dependent, Frequency domain, Frequency-strain curve, Site response analysis

1. 서론

1차원 지반응답해석은 지진에 대한 지반의 동적 응답을 예측하기 위하여 널리 수행된다. 1차원 지반응답 해석기법 중 주파수영역에서 수행되는 등가선형해석은 사용하기 편리하며 해석 소요시간이 짧아 가장 빈번하게 사용되고 있다(Idriss, 1990). 등가선형해석은 지반의 비선형 거동을 전단탄성계수와 감쇠비 곡선을 활용하여 간접적으로 모사한다. 등가선형해석은 해석시 유효 전단변형률을 반복적 기법을 이용하여 계산한 후, 이에 상응하는 전단탄성계수와 감쇠비를 선정하며 이를 선형적으로 해석에 적용하는 기법으로서 지반 내 발생하는 변형률이 크지 않을 경우에는 비교적 정확한 것으로 알려졌다(Kramer, 1996). 하지만, 변형률의 폭이 클 경우 신뢰성이 감소하는 것으로 알려져 있다. 반면, 시간영역에서 수행되는 비선형해석은 등가선형해석에 비하여 정확성은 높지만, 해석소요시간이 상대적으로 크며 많은 수의 입력변수를 정의해야 하므로 실무에서 거의 사용되고 있지 않다.

수치적으로 매우 효율적인 주파수 영역의 틀은 유지하되, 해석의 정확성을 향상시키는 새로운 등가선형 해석기법들을 개발하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다(Sugito 등, 1994; Kausel과 Assimaki, 2002; Yoshida 등, 2002). 이들의 공통점은 변형률과 진동 주파수와의 상관관계를 완화곡선으로 모사한다는 점이며, 이와 같은 이유로 이들은 “주파수 의존성을 고려한 등가선형해석기법(FDEL, Frequency-dependent equivalent linear method)”이라 불리운다. FDEL은 기존의 등가선형해석에 비하여 정확성을 크게 향상시키는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 세 가지 계측사례를 통하여 FDEL의 정확성을 검증하고자 하였다. 검증에는 Kausel과 Assimaki (2002)와 Yoshida 등(2002)의 완화곡선과 본 연구에서 제안된 새로운 곡선들이 사용되었다.

2. 변형률의 주파수 의존도

그림 1은 전단변형률이 각각 크고(A) 작은(B) 경우에

대한 전단응력-변형률 이력곡선을 비교하고 있다. 매 시간단계에서의 변형률 변화량이 일정하다고 가정하였을 경우, 이력곡선 A는 closed loop을 완성하는 데 비교적 긴 시간이 걸리는 반면, 곡선 B는 상대적으로 빠르게 loop이 완성될 것이다. 즉, 전단변형률이 크면 진동주기가 긴 반면, 전단변형률이 작을 경우에는 진동주기가 낮게 된다. 이는 전단변형률의 크기와 진동주기/주파수는 독립된 변수가 아니며 상호간에 밀접한 관계가 있음을 시사한다.

그림 2는 변형률의 주파수에 대한 의존도를 설명하기 위하여 두 개의 계측된 변형률 시간이력으로부터 계산된 푸리에 스펙트럼을 도시하고 있다. 변형률과 주파수의 정량적인 관계는 완벽하게 일치하지는 않지만, 이들의 경향은 유사한 것을 볼 수 있다. 즉, 큰 전단변형률은 저주파수에서는 발생하는 반면, 고주파수에서는 매우

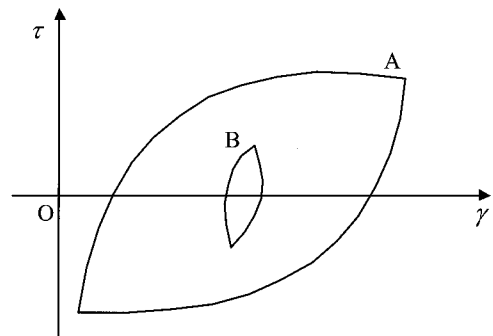


그림 1. 주파수에 따른 응력-변형률 곡선의 차이(Yoshida 등, 2002)

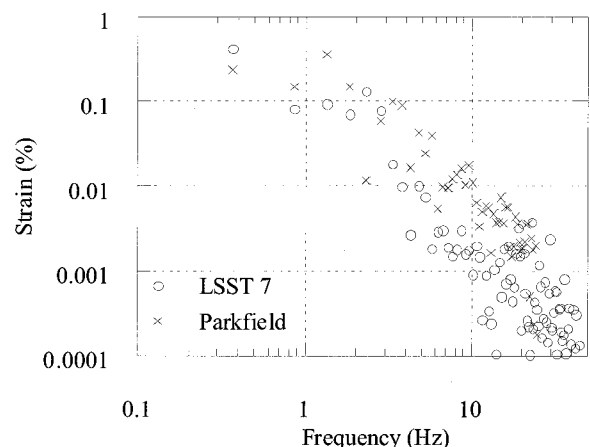


그림 2. 주파수에 따른 변형률의 변화

작은 전단변형률만이 발생 가능하며 10Hz 이상에는 푸리에 진폭이 최대진폭에 비하여 10배 이상 감소하는 것을 확인할 수 있다.

3. 주파수 의존성을 고려한 등가선형해석(FDEL)

FDEL은 전 절에서 설명된 진동주파수와 변형률의 관계를 모의하는 해석기법이다. 이제까지 제안된 모든 FDEL의 기본 골격은 모두 동일하며, 주파수와 변형률의 관계를 정의하는 방법에서만 차이를 보이고 있다(Sugito 등, 1994; Kausel과 Assimaki, 2002; Yoshida 등, 2002). Sugito 등(1994)은 정확성에 문제가 있음이 이미 밝혀졌으므로 본 논문에서는 다루지 않겠다. Kausel과 Assimaki (2002)와 Yoshida 등(2002)이 제안한 방법은 모두 그림 2와 같은 변형률 푸리에 스펙트럼을 활용하되, 푸리에 스펙트럼을 직접 해석에 사용하는 것이 아니라 이를 완화한 곡선을 사용한다.

Yoshida 등(2002)은 변형률 스펙트럼 완화곡선을 식 (1)과 같이 정의하였다(이하 YKSM):

$$\begin{cases} \gamma_{eff} = \gamma_{max} & f_p > f \\ \gamma_{eff} = \gamma_{max} \left\{ 1 - \left(\frac{\log f - \log f_p}{\log f_e - \log f_p} \right)^m \right\} & f_p \leq f \leq f_e \\ \gamma_{eff} = 0 & f < f_e \end{cases} \quad (1)$$

여기서, f_p 는 변형률 푸리에 스펙트럼의 진폭이 최대일 때의 주파수, f_e 는 지반의 비선형거동을 고려할 필요가 없는 최소주파수이며, m 은 적합상수이다. Yoshida 등(2002)은 f_e 와 m 으로 각각 15Hz와 2를 제안하였다.

Kausel과 Assimaki(2002)는 변형률 스펙트럼 완화곡선을 식 (2)와 같이 제안하였다(이하 KA).

$$\begin{cases} \gamma_{eff} = \gamma_{max} & f \leq f_0 \\ \gamma_{eff} = \gamma_{max} \times \frac{\exp\left(-\alpha \frac{\omega}{2\pi f_0}\right)}{\left(\frac{\omega}{2\pi f}\right)^\beta} & f > f_0 \end{cases} \quad (2)$$

여기서, 평균주파수 f_0 와 평균변형률스펙트럼 γ_0 는 다음과 같이 정의된다.

$$f_0 = \frac{\int_0^\infty \omega r(\omega) d\omega}{2\pi \int_0^\infty r(\omega) d\omega} \quad (3)$$

$$r_0 = \frac{1}{\omega_0} \int_0^{\omega_0} r(\omega) d\omega \quad (4)$$

여기서 α 와 β 는 곡선근사변수이다. 완화곡선은 f_0 까지는 일정하며, 이후엔 식 (2)과 같이 감소하게 된다. YKSM과 KA의 완화곡선은 각각 그림 3(b), (c)에 도시하였다. 그림 3은 두 개의 완화곡선이 확연하게 상이한 형상을 가지고 있음을 보여주고 있다. 본 연구에서는 완화곡선이 지반응답해석에 미치는 영향을 평가하고자 추가적인 세 개의 완화곡선을 사용하였으며 이들은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \gamma_{eff} = \gamma_{max} & f_p > f \\ \gamma_{eff} = 4.51\gamma_{max} \times \left\{ \frac{f}{f_p} \times \frac{\exp\left(-0.12 \frac{f}{f_p}\right)}{\left(\frac{f}{f_p} + 1\right)^2} \right\} & f_p \leq f \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \gamma_{eff} = \gamma_{max} & f_0 > f \\ \gamma_{eff} = \gamma_{max} \left\{ \frac{\exp(-af)}{(f+1)^b} \right\} / \left\{ \frac{\exp(-af_0)}{(f_0+1)^b} \right\} & f_0 \leq f \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \gamma_{eff} = 0.65\gamma_{max} & f_0 > f \\ \gamma_{eff} = 0.65\gamma_{max} \left\{ \exp(af+b) \right\} / \left\{ \exp(af_0+b) \right\} & f_0 \leq f \end{cases} \quad (7)$$

식 (6)~(7)의 a 와 b 는 최소자승법을 이용하여 결정되는 상수이다. 본 논문에서는 식 (5)~(7)을 순서대로 Trial #1, Trial #2, Trial #3 곡선으로 명하도록 하였다. Trial #1 - 3의 완화곡선은 각각 그림 3(d), (e), (f)와 같다. Trial #1은 YKSM 방법과 동일하게 변형률이 최대인 지점을 기준으로 하는 f_p 를 적용하였으나, 완화곡선의 감소비율을 YKSM에 비하여 작게 설정하였으며 Trial #2는 KA 방법과 동일하게 평균주파수인 f_0 를 기준으로 하되, KA 방법의 단점인 매끄럽지 못한 연결부분을 최대한 완화시켰다. 마지막으로, Trial #3은 KA 방법과 동일한 f_0 를 기준으로 완화곡선을 적용하되, 등가선형과

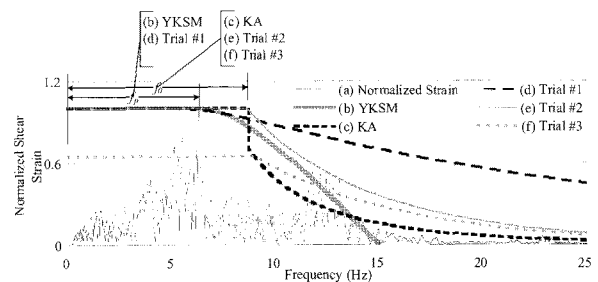


그림 3. 주파수에 대한 변형률의 의존도를 정의한 완화곡선

동일하게 γ_{max} 가 아닌 $0.65\gamma_{max}$ 를 사용하였으며, 고주파 수 영역에 해당하는 부분에 식 (7)과 같은 완화곡선을 적용하도록 하였다.

4. FDEL의 검증을 위한 사례비교

FDEL의 검증을 위하여 YKSM과 KA, 그리고 Trial #1~3과 같은 총 5개의 완화곡선을 이용하여 세 가지 사례에서 예측된 6개의 지진기록과 계산된 응답을 비교하였다. 모든 해석은 등가선형과 비선형해석이 가능한 1차원 지반응답해석 프로그램인 GeoSHAKE(Lee 등, 2008)에 FDEL 해석기능을 추가적으로 장착하여 수행하였다.

4.1 Case 1: Turkey Flat, 캘리포니아, 미국

미국 캘리포니아 주에 위치한 Turkey Flat은 지진에 의한 지반증폭효과를 연구하기 위하여 설치된 테스트 부지이다. 이 지역은 San Andreas 단층의 Parkfield 영역에서 단 5km 떨어져 있는 얕은 심도의 분지이다. 일명 “Turkely Flat Test”라고 불린 프로젝트에서는 지반응답 해석의 정확성을 검증하기 위하여 Blind Test가 수행되었다. Blind Test에서는 물리탐사를 통하여 조사된 전단파속도 주상도, 현장시료를 채취하여 수행된 실내실험 결과(Real, 1988), 그리고 예측된 기반암과 암반노두에서의 지진기록이 제공되었으며 이를 기반으로 지표면의 응답을 예측하도록 하였다(Kwok 등, 2008). 그림 4는 Turkey Flat의 전단파속도 주상도와 실내실험을 통하여 얻어진 전단탄성계수와 감쇠비 곡선을 도시하고 있다. 본 연구에서는 2004년 발생한 규모 6.0의 Parkfield 지진시 기반암(깊이 25m)에서 측정된 지진파를 입력파(그림 5)로 사용하여 지반응답해석을 수행하였다.

해석 결과는 그림 6~그림 10에 도시하였다. 그림 6은 예측 및 계산된 지표면에서의 5% 감쇠된 가속도 응답스펙트럼을 비교하고 있다. E-W 기록은 모든 완화곡선들을 사용한 FDEL이 비교적 결과를 정확하게 예측한 반면, N-S 기록은 전반적으로 과대 예측하는 것을 볼 수 있다. E-W 기록의 경우, YKSM은 PGA(Peak Ground Acceleration)를 정확하게 예측하였으며 등가선형해석과 KA는 이를 다소 작게 예측하였다. 또한, 본 논문에서 제안된 Trial #1~2의 곡선은 모두 PGA를 정확하게 예측하는 반면, Trial #3은 과소 예측하는 것을 확인할 수 있다. N-S 기록은 등가선형해석은 비교적 정확하게 지

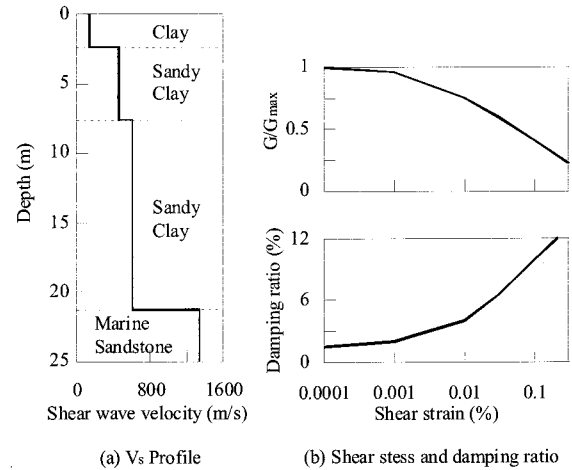


그림 4. Case 1 대상지반의 전단파속도 주상도와 해석에 사용된 동적 곡선

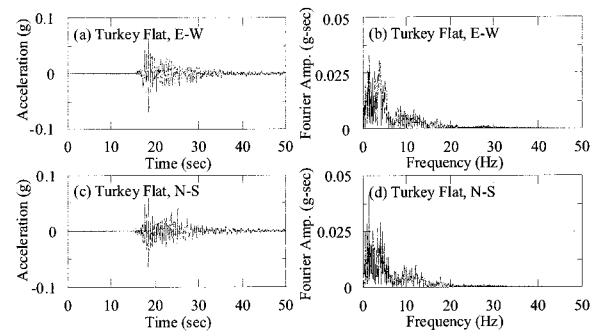


그림 5. Case 1에 사용된 입력지진파 시간이력곡선과 푸리에스펙트럼

반응답을 예측한 반면, YKSM과 KA는 모두 응답을 크게 과대 예측하는 것을 볼 수 있다. Trial #1은 계산된 응답이 예측기록과 유사하며, Trial #2~3은 응답을 과대예측하고 있다.

그림 7은 예측기록과 해석방법별로 계산된 전달함수들을 비교하고 있다. 그림 7은 해석결과에 큰 영향을 미치는 주파수 대역인 0~15Hz 만을 보여주고 있으며, 이 대역에는 1차와 2차 모드만이 포함되어 있다. 1차 모드 전달함수는 E-W와 N-S 기록 모두 YKSM과 Trial #1이 유사하며, KA와 Trial #2~3이 유사한 것으로 나타났다. 그림 3에서 YKSM과 Trial #1은 동일하게 f_b 를 사용하는 반면, KA와 Trial #2~3은 f_0 를 사용한다고 설명한 바 있다. 이는 저주파수-고전단변형률에서의 응답에 지배 받는 1차 모드 응답은 완화곡선에서 최대전단변형률을 적용하는 구간에 의하여 결정된다는 것을 확인할 수 있다.

YKSM(또는 Trial #1)이 KA(또는 Trial #2~3)에 비하여 전달함수의 크기(증폭)가 작은 이유는 YKSM과 KA 방법으로 계산된 4개의 깊이에서의 변형률 완화곡

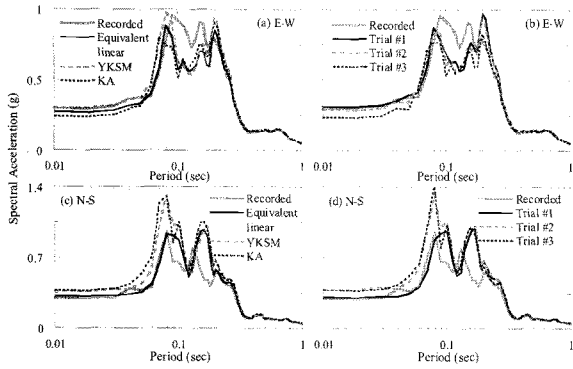


그림 6. Case 1에서 계산된 5% 감쇠된 지표면 가속도 응답스펙트럼의 비교

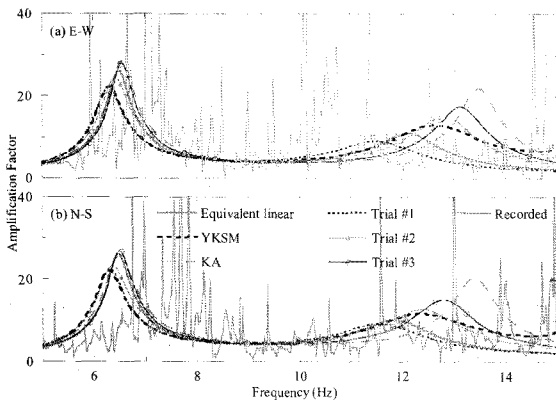


그림 7. Case 1의 계속 전달함수와 계산된 전달함수 비교

선(그림 8)으로써 설명된다. 지표면에서는 f_0 와 f_p 가 유사한 반면, 심도가 증가할수록 이들의 차이가 증가하며 f_0 가 f_p 에 비하여 현저하게 작아지는 것을 볼 수 있다. 이는 평균주파수인 f_0 가 최대주파수인 f_p 에 비하여 월등히 크게 계산되었기 때문이다. 따라서, YKSM은 KA에 비하여 더욱 연성 거동을 보이게 되었으며 응답이 낮게 계산되었다.

1차 모드 응답은 최대변형률이 적용되는 쪽에 지배 받는 반면, 고주파수의 응답은 완화곡선의 감소정도에 따라서 결정되는 것으로 나타났다.

그림 9는 표면층에서 적용된 전단변형률 완화곡선들을 비교하고 있다. f_0 이후 가장 급격하게 완화곡선이 감소하는 KA는 그림 7과 같이 2차 모드 응답이 가장 크게 계산된 것을 볼 수 있다. 고주파수에서 완만한 곡선을 보이는 Trial #1과 등가선형해석의 2차 모드 전달함수가 가장 낮은 것으로 나타났다.

전달함수의 크기와 지반의 응답은 반드시 비례하지 않는다. 등가선형해석과 Trial #3은 f_p 까지는 동일하게 $0.65\gamma_{max}$ 를 적용하나, Trial #3은 f_p 이상의 주파수에서 식 (7)의 완화곡선을 사용한다. Trial #3은 standard 등가

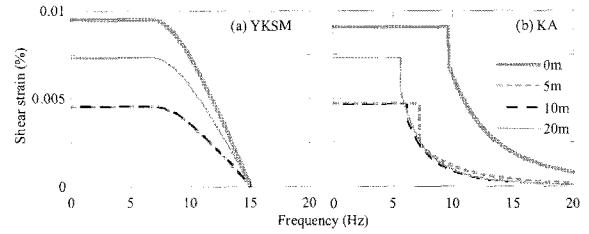


그림 8. 토층의 깊이 변화에 따른 완화곡선의 변화(Case 1, E-W 요소)

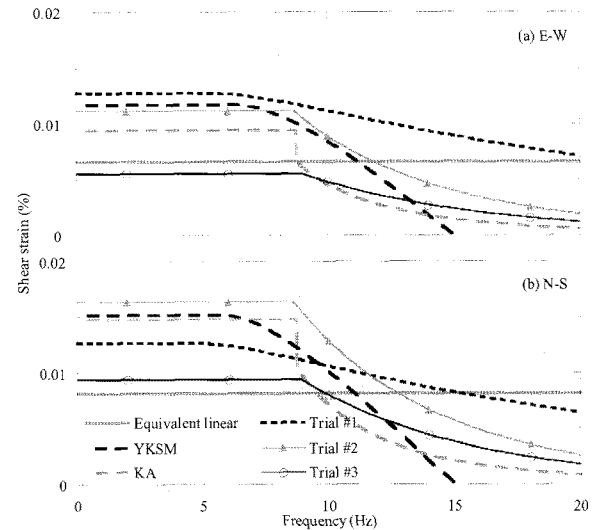


그림 9. 해석방법별 최상층 레이어의 완화곡선(Case 1)

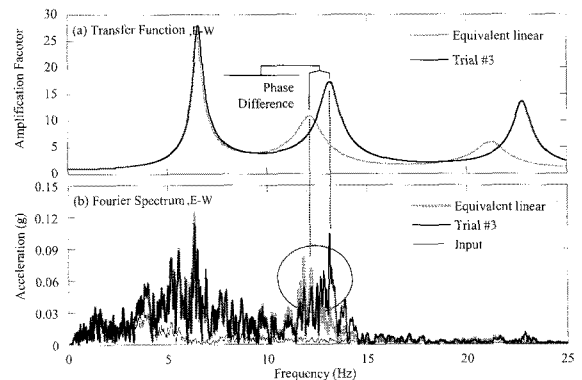


그림 10. Standard 등가선형해석과 Trial #3곡선을 사용한 해석에서 계산된 전달함수와 가속도 푸리에 스펙트럼의 비교(Case 1, E-W 요소)

선형해석에 비하여 고주파수에서 지반거동을 단단하게 예측하므로 그림 10a와 같이 2차 모드의 전달함수가 등가선형해석에 비하여 크게 계산되었으며 또한 고주파수로 미세한 phase shift가 발생한 것을 볼 수 있다. Trial #3은 12Hz 부분에서 등가선형해석에 비하여 작게 예측하였으므로 그림 10b와 같이 이 부분에서 계산된 푸리에 스펙트럼이 등가선형에 비하여 작게 예측되었다. 물론, Trial #3의 2차 모드인 13Hz 부근에서는 등

가선형해석에 비하여 크게 응답을 예측하였지만, 결과적으로 12Hz 부분의 주파수 요소가 지반응답에 더욱 큰 영향을 끼쳐서 해당 주파수 대역 등가선형해석의 응답이 Trial #3에 비하여 오히려 크게 계산된 것으로 판단된다(그림 6 E-W 참조). 이는 계산되는 지반의 응답은 단순히 전달함수의 최대증폭값뿐만 아니라, phase shift에도 미세하게 반응한다는 것을 알 수 있다.

Case 1은 사용된 완화곡선의 특성은 FDEL의 결과에 현저한 영향을 미치는 것을 보여주고 있다. 또한, 동일한 사례에서도 지진동의 방향에 따라서도 완화곡선의 형상에 따라서 지반응답해석의 결과가 크게 달라지는 것을 볼 수 있으며, 이는 FDEL의 정확성이 지진파의 주파수 특성에 큰 영향을 받으며 해석사례마다 최적의 곡선이 달라지는 것을 의미한다. Case 1에서는 평균적으로는 Trial #1이 기록된 응답과 가장 유사한 것으로 나타난 반면 등가선형해석기법은 최적의 기법은 아니지만 FDEL에 비하여 안정적으로 응답을 예측하는 것으로 나타났다.

4.2 Case 2: Treasure Island, 캘리포니아, 미국

두 번째 사례에서는 1989년 미국 캘리포니아 주에서 발생한 규모 6.9의 Loma Prieta 지진 시 Treasure Island에서 계측된 기록을 사용하였다. 심도 88m의 연약지반인 Treasure Island의 전단파속도 주상도와 동적곡선은 그림 11과 같다. 지반응답해석은 Treasure Island와 인접한 Yerba Buena Island 암반노두에서 기록된 지진파(그림 12)를 입력파로 사용하여 수행되었다.

그림 13은 계산된 지표면 가속도 응답스펙트럼을 비교하고 있다. E-W 요소는 YKSM이 가장 낮게 예측하는 것으로 나타났으며 등가선형해석도 계측기록에 비하여 응답을 작게 예측하였다. 반면, KA는 실 지진기록과 가장 유사한 응답을 예측하였으며 Trial #1 - 3도 등가선형해석에 비하여 현저하게 향상된 예측을 하는 것을 볼 수 있다. N-S 요소는 모든 결과가 지진기록에 비하여 낮게 예측된 것을 볼 수 있다. 이는 기반암에서의 지진 기록이 아니라, 인접한 암반노두의 기록을 사용함에 따른 부정확성 때문인 것으로 판단된다. 계산된 응답의 일반적인 경향은 E-W와 유사하다. 즉, YKSM과 등가선형해석이 응답을 과소 예측하는 반면, 이외의 FDEL 해석은 응답의 정확성을 다소 향상시키는 것을 볼 수 있다. 이의 이유는 그림 14의 전달함수로서 쉽게 설명될 수

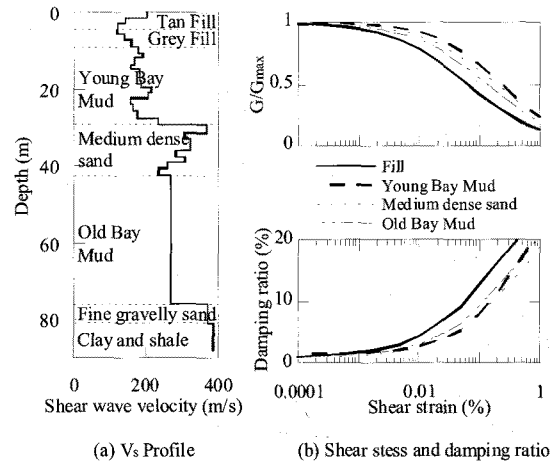


그림 11. Case 2의 전단파속도 주상도와 동적곡선(Hashash와 Park, 2002)

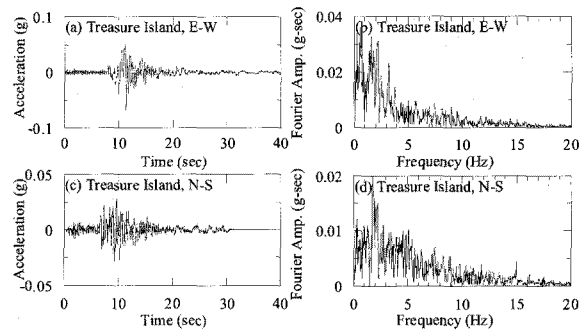


그림 12. Case 2에 사용된 입력지진파 시간이력곡선과 푸리에 스펙트럼

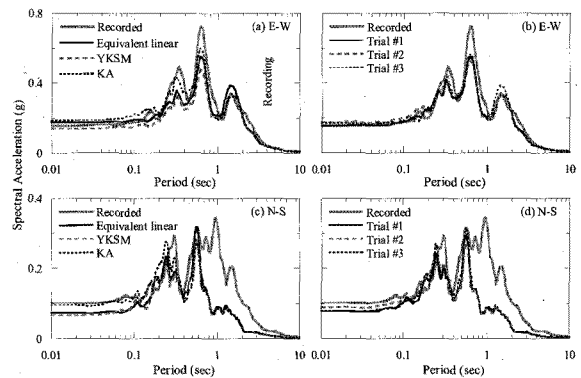


그림 13. Case 2에서 계산된 5% 감쇠된 지표면 가속도 응답스펙트럼의 비교

있다. 저심도인 Case 1에서는 토층의 고유주파수 낮아 2차 모드 이상은 해석에 큰 영향을 미치지 않는 반면, 심도가 상대적으로 큰 Case 2의 경우 10 Hz 내에 무려 5개의 모우드가 포함되어 있다. 고차 모드에서 응답을 단단하게 모델링하는 FDEL이 전체적으로 응답을 크게 예측하였으며 결과적으로 지진기록과 더욱 유사하게 응답을 예측하였다.

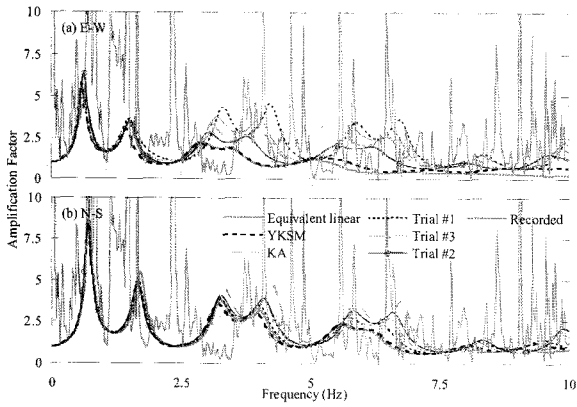


그림 14. Case 2의 계측 전달함수와 계산된 전달함수 비교

4.3 Case 3: Lotung, 대만

1980년대 초반부터 EPRI 주관으로 시작된 LSST (Lotung Large-Scale Seismic Test) 프로젝트는 지반증폭현상과 지반-구조물 상호작용을 연구하기 위하여 대만 Lotung 지역에 대규모의 downhole array를 설치하였으며 정밀한 지반조사가 이루어졌다. 사례연구를 위하여 선정된

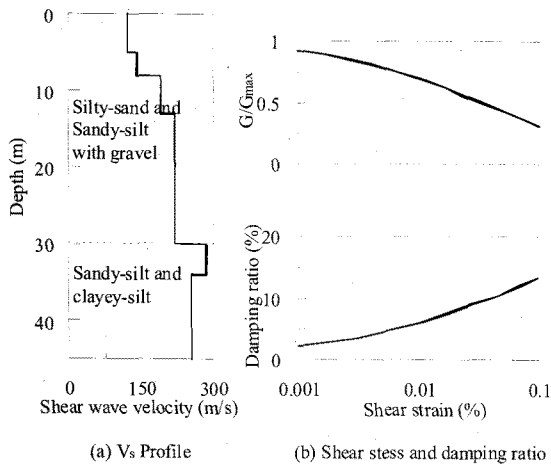


그림 15. Case 3에 사용된 대상지반의 전단파속도 주상도와 동적곡선(Elgamal 등, 1995)

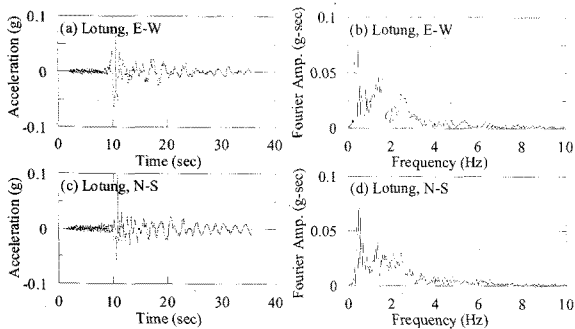


그림 16. Case 3에 사용된 입력지진파 시간이력곡선과 푸리에 스펙트럼

지반은 47m 깊이의 실트층으로 구성된 연약지반으로, 해석에 사용된 전단파 속도와 주상도와 동적곡선은 그림 15와 같다. 본 연구에서는 LSST 7 지진(규모 6.2) 중 47m 깊이에서 기록된 지진파를 입력파(그림 16)로 사용하였으며, 지표면에서 측정된 지진기록과 해석 결과를 비교하였다.

그림 17과 그림 18은 각각 해석방법에 따른 지표면에서의 가속도 응답스펙트럼과 전달함수를 비교하고 있다. E-W 요소는 YKSM이 계측기록과 가장 유사하며 등가선형해석도 기록과 근접한 것으로 나타났다. 반면, Trial #1~3은 모두 응답을 크게 과대예측하는 것을 볼 수 있다. N-S 요소도 E-W와 마찬가지로 YKSM으로 예측된 응답이 계측기록과 가장 유사한 것을 볼 수 있다. 완화곡선 중 KA는 E-W와 N-S 경우 모두 매우 비현실적으로 응답을 과대예측할 수 있는 것으로 나타났다. 그림 18의 전달함수는 E-W의 경우 모든 해석이 1차 모우드의 응답을 비교적 정확하게 예측하는 것을 볼 수 있다. 1차 모우드 이상의 주파수 특성은 고주파수 요소를 크게 예측하는 KA와 Trial #3의 경우 계측된 증폭비율

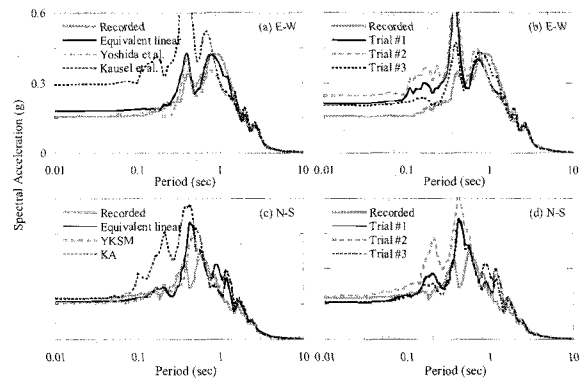


그림 17. Case 3에서 계산된 5% 감쇠된 지표면 가속도 응답스펙트럼의 비교

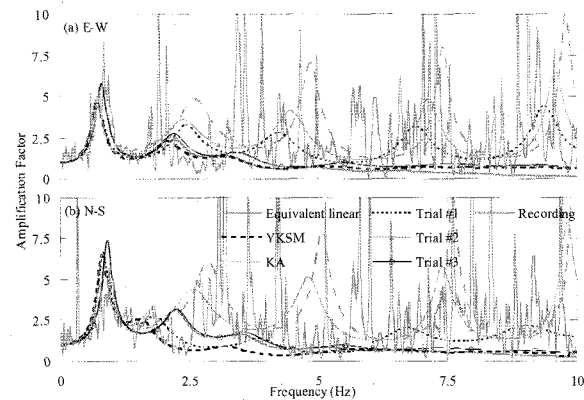


그림 18. Case 3의 계측 전달함수와 계산된 전달함수 비교

과 상당히 유사한 것으로 나타났다. 하지만, 실 지진기록은 isolated peak를 보이는 반면, 연속된 함수로서 고주파수 증폭함수를 나타내는 FDEL은 실 지진기록에 비하여 고주파수 증폭을 과대예측하여 응답을 크게 계산할 수 있음을 보여준다. 이와 같은 결과는 Case 2와는 상반된 결과이다(Case 2에서는 고주파수 요소를 크게 예측하여 실 지진기록과 일치성이 향상되었다고 기술한 바 있다). Case 3의 경우에는 2~4차 모우드의 증폭계수가 7.5 이상으로 오히려 1차 모우드를 상회하여 해석결과에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 주파수-변형률 완화곡선으로써 변형률의 주파수 의존성을 고려하는 등가선형해석기법(FDEL)의 정확성을 검증하였다. FDEL 해석에는 기존 연구에서 제안된 두 개의 곡선과 본 연구에서 새롭게 제안된 세 개의 곡선이 사용되었다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

1. FDEL은 언제나 해석의 정확성을 향상시킬 수 있지만, 지반진동을 가장 정확하게 예측하는 완화곡선은 사례 별로 모두 다른 것으로 나타났다. 즉, 모든 사례에서 일괄적으로 가장 정확한 예측을 보장하는 최적의 곡선은 존재하지 않는 것으로 판단된다.
2. 기존에 제안된 두 개의 주파수-변형률 곡선은 예측된 응답의 정확성을 향상시키는 경우도 있었지만, 반대로 등가선형해석에 비하여 오히려 정확성이 감소하는 사례도 있었다. 이들 곡선은 제한된 사례에 맞도록 최적화된 경험적 곡선이며, FDEL은 정확성을 “언제나” 향상한다는 결론은 오류가 있는 것으로 판단된다.
3. Kausel과 Assimaki(2002)가 제안한 곡선은 심각하게 응답을 과대예측할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 일정 주파수 이상에서 매우 낮은 변형률을 적용하기 때문인 것으로 판단되며 해석 시 사용되지 말아야 할 것으로 판단된다. 가장 적절한 곡선은 Yoshida 등(2002) 과 본 연구에서 제안된 Trial #1 곡선인 것으로 나타났다.
4. FDEL은 등가선형해석보다 향상된 예측을 할 수 있

는 반면, 최적의 곡선이 사례별로 달라진다는 단점을 가지고 있으므로 등가선형해석과 병행해서 수행되어야 하며, 최적의 곡선을 알 수 없으므로 Yoshida 등(2002), Trial #1을 포함한 2개 이상의 곡선을 적용해야 할 것으로 판단된다.

5. FDEL을 성공적으로 적용하기 위해서는 최적화된 완화곡선에 대한 지속적인 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단 기초과학분야 신진교수지원(D00579)으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Elgamel, A.W., Zeghal, M., Tang, H.T., and Stepp, J.C. (1995), "Lotung Downhole Array. I: Evaluation of Site Dynamic Properties", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.121, No.4, pp. 350-362.
2. Hashash, Y.M.A., and Park, D. (2002), "Viscous damping formulation and high frequency motion propagation in non-linear site response analysis", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.22, No.7, pp.611-624.
3. Idriss, I.M. (1990), "Response of soft soil sites during earthquakes", *Proceedings of the Symposium to Honor H.B. Seed*, Berkeley, CA: BiTech Publishers, Vol.2, pp.273-289.
4. Kausel, E., and Assimaki, D. (2002), "Seismic simulation of inelastic soils via frequency-dependent moduli and damping", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.128, No.1, pp.34-47.
5. Kramer, S.L. (1996), *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., p.653.
6. Kwok, A.O.L., Stewart, J.P., and Hashash, Y. (2008), "Nonlinear Ground-Response Analysis of Turkey Flat Shallow Stiff-Soil Site to Strong Ground Motion", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.98, No.1, pp.331.
7. Lee, H.S., Yun, S.U., Park, D., and Kim, I.T. (2008), "Estimation of nonlinear site effects of soil profiles in Korea", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.3, pp.13-23.
8. Real, C.R. (1988), *Turkey Flat, USA Site Effects Test Area - Report 2: Site Characterization*, TR 88-2.
9. Sugito, M., Goda, H., and Masuda, T. (1994), "Frequency dependent equi-linearized technique for seismic response analysis of multi-layered ground", *Doboku Gakkai Rombun-Hokokushu /Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.493, No.3-2, pp.49-58.
10. Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I., and Miura, K. (2002), "Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.22, No.3, pp.205-222.

(접수일자 2008. 10. 23, 심사완료일 2008. 11. 28)