

하중의 주파수에 지배받는 흙의 동적거동을 고려하는 등가선형해석방법 개발 Development of equivalent linear algorithm procedure that accounts for the loading frequency dependent soil behavior

박두희¹⁾, Duhee Park, 이현우²⁾, Hyun-Woo Lee, 이승찬²⁾, Seung-Chan Lee, 김재연²⁾, Jae-Yeon Kim, 천병식³⁾, Byung-Sik Chun

- 1) 한양대학교 공과대학 토목공학과 전임강사, Full-time Lecturer, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ. (dpark@hanyang.ac.kr)
- 2) 한양대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.
- 3) 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

SYNOPSIS : Site response analysis is widely used in estimating local seismic site effects. The soil behavior in the analysis is assumed to be independent of the rate of the seismic loading. Laboratory results, however, indicate that cohesive soil behavior is greatly influenced by the rate of loading. A new equivalent linear analysis method is developed that accounts for the rate-dependence of soil behavior and used to perform a series of one dimensional site response analyses. Results indicate that while rate-dependent shear modulus has limited influence on computed site response, rate-dependent soil damping greatly filters out high frequency components of the ground motion and thus results in lower response.

Key words : Frequency-dependent, Equivalent linear, Shear modulus, Damping, Site response.

1. 서 론

지반증폭현상은 지반구조물의 내진설계시 요구되는 설계응답스펙트럼, 액상화 피해 예측을 위한 동적 응력 및 변형률, 지반구조물에 작용하는 지진하중 또는 변위 등을 결정하기 위하여 반드시 규명되어야 한다(Idriss와 Seed, 1968; Roesset, 1977; Idriss, 1990; Park, 2004). 1차원 지반응답해석은 지반증폭현상을 예측하기 위하여 널리 사용되고 있으며 해석시 지반의 거동은 하중재하속도의 영향을 받지 않는다고 가정되어왔다. 사질토의 경우 하중재하속도가 흙의 거동에 미치는 영향이 미소하지만, 점성토의 경우 전단탄성계수와 감쇠비 모두 하중재하속도의 영향을 크게 받는다는 사실이 실내실험을 통하여 입증되어졌다. 본 연구에서는 하중재하속도가 흙의 동적거동에 미치는 영향을 고려하는 새로운 등가선형 해석기법을 개발하였으며 일련의 지반응답해석을 통하여 하중재하속도에 지배받는 지반거동이 지반증폭 현상에 미치는 영향을 규명하였다.

2. 하중주파수가 흙의 동적거동에 미치는 영향

흙의 동적거동은 일반적으로 전단탄성계수곡선(Shear modulus reduction curve)과 감쇠비곡선(Damping ratio curve)으로 표현된다(그림 1). 전단탄성계수와 감쇠비 곡선은 구속압력(EPRI, 1993; Laird와

Stokoe, 1993), 소성지수(Vucetic와 Dobry, 1991), 그리고 하중재하속도(Kramer, 1996; Isenhower와 Stokoe, 1981)등의 영향을 받는다. 구속압력과 소성지수가 흙의 동적거동에 미치는 영향은 잘 알려져 있으며 정량화 되어있지만 하중재하속도의 영향은 체계적으로 정량화 되어있지 않다.

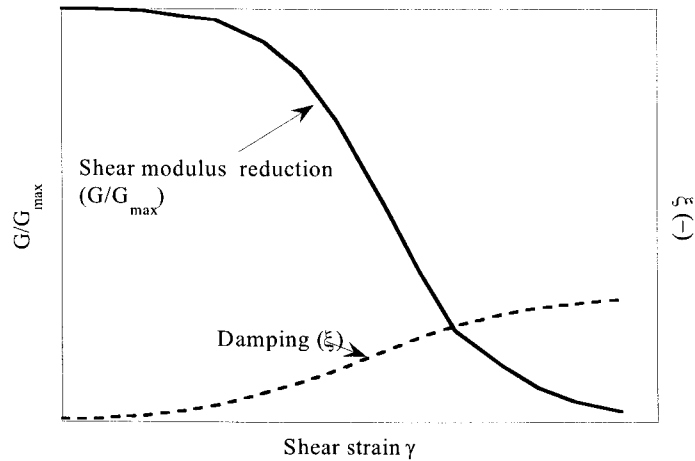


그림 1. 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비곡선

점성토의 경우 하중재하속도가 감소할수록 크리프현상과 응력완화로 인하여 강성과 강도 모두 감소하며 하중재하속도의 영향은 소성지수가 높을수록 커진다(Matesic와 Vucetic, 2003). Isenhower와 Stokoe(1981)는 공명주실험(RC)과 전단비틀림장치실험(TS)을 사용하여 하중재하속도가 지반강성에 미치는 영향을 규명하였다(그림 2). 전단탄성계수는 평균 전단변형속도가 증가함에 따라 커지며 전단변형속도를 로그 스케일로 나타냈을 경우 선형관계를 갖는다는 것을 볼 수 있다. 또한 전단탄성계수와 평균 전단변형속도의 관계는 전단변형률의 크기의 영향을 받는다.

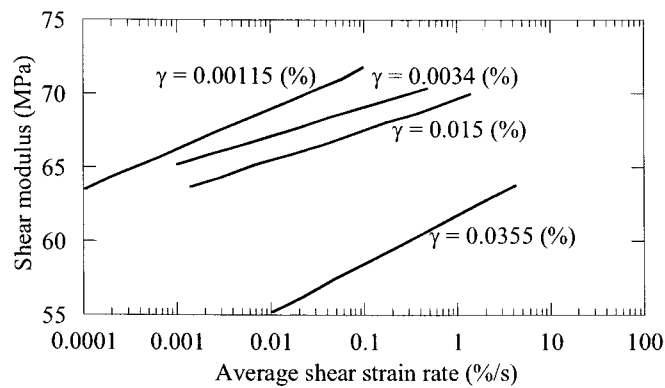


그림 2. 전단변형속도에 따른 전단탄성계수의 변화

Kim과 Stokoe(1991)는 RC와 TS실험을 통하여 하중재하속도가 비교란 점토의 전단탄성계수 및 감쇠비에 미치는 영향을 규명하였으며, 하중재하속도는 다음의 식을 이용하여 하중주파수로 치환되었다.

$$\dot{\gamma} = 4f\gamma \quad (1)$$

여기서 $\dot{\gamma}$ = 평균전단변형속도, f = 하중주파수, γ = 전단변형률이다.

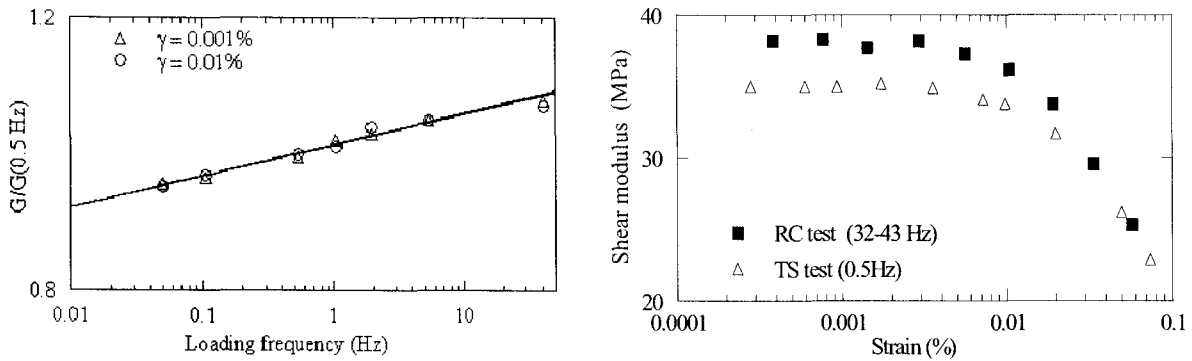


그림 3. 하중주파수가 전단탄성계수에 미치는 영향: a) 정규화된 하중주파수와 전단탄성계수 관계식, b) RC와 TS실험을 통하여 얻어진 전단탄성계수 감소곡선

그림 3는 하중주파수에 따라서 변화하는 전단탄성계수를 보여준다. 전단탄성계수를 하중주파수가 0.5Hz인 경우의 전단탄성계수로 정규화 시켰을 경우 전단변형률=0.001%와 전단변형률=0.01%경우 모두 하나의 선형관계식으로 표현되므로 정규화하지 않을 경우에 비하여 유용한 관계식이 된다(그림 3a). Kim과 Stokoe(1991)는 추가적으로 다양한 전단변형률에서 하중주파수가 전단탄성계수에 미치는 영향을 규명하였다. 그림 3b는 각각 하중주파수가 32-43Hz인 RC실험결과와 하중주파수가 0.5Hz인 TS실험결과를 비교하고 있다. 전단변형률이 0.01%이하였을 경우 하중주파수의 영향은 크지만 그 이상에서는 이의 영향이 미비함을 볼 수 있다. 특히 전단변형률이 0.1%이상일 때 하중주파수의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

하중주파수는 흙의 전단탄성계수와 마찬가지로 감쇠비에도 큰 영향을 미치는 것으로 판명되었다. Kim과 Stokoe(1991)의 실험 결과, 흙의 감쇠비는 하중주파수가 증가할수록 커지는 것으로 나타났다(그림 4). 이 때 감쇠비는 정규화된 전단탄성계수 관계식과 같이 0.5Hz에서의 감쇠비로 정규화 되었다. 하중주파수의 의존정도는 전단변형률의 크기에 좌우되며, 변형률이 작을수록 의존정도가 커지는 것을 볼 수 있다. Rix와 Meng(2005)은 하중주파수의 영향을 평가하는데 무공명(Non Resonance)실험기를 사용하였다. 사용된 시료는 재성형된 카올리나이트(Kaolinite)였다. NR 실험의 주요 장점은 기기 자체에서 유발되는 감쇠를 제거할 수 있다는 것이다. Rix와 Meng(2005)과 Kim과 Stokoe(1991)의 실험결과를 비교하였을 때 감쇠비의 하중주파수에 대한 의존도가 확연히 다르다는 것을 볼 수 있다. NR 실험으로 구한 감쇠비의 모양이 포물선인 것은 저주파수에서 발생하는 기기 감쇠비를 제거하였기 때문인 것으로 추정된다. 고주파수에의 감쇠비의 차이는 다른 특성의 시료가 사용되었기 때문에 정확한 비교는 할 수 없다.

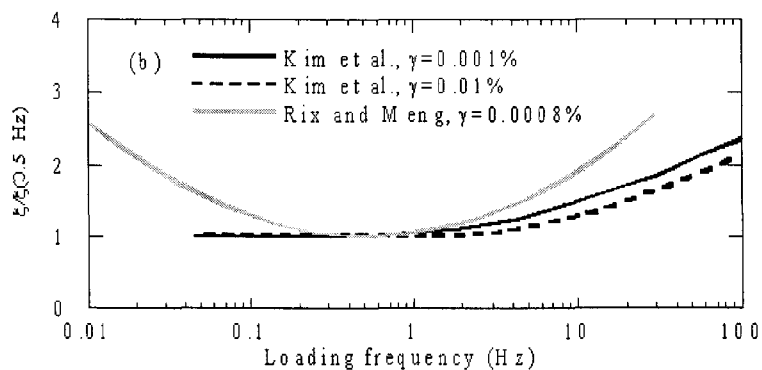


그림 4. 하중주파수에 따른 감쇠비의 변화

3. 등가선형해석기법

수직으로 전파되는 무한매질의 1차원 지반운동방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (2)$$

여기서 ρ =밀도, u =변위, z =지표면 아래의 깊이, G =전단탄성계수, η =점성이다.

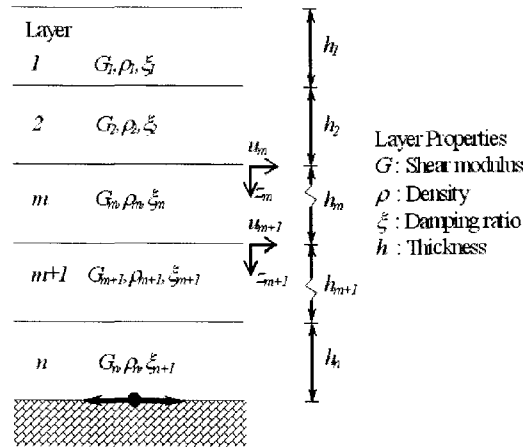


그림 5. 등가선형해석에서 사용되는 단순화한 복수층 지반

중복반사이론에 입각하여 그림 5에 나타난 것처럼 반무한 탄성체의 기반 위에 복수층 지반이 놓여진 경우에 대해 식 (2)의 해를 구할 수 있다(Schnabel 등, 1972). 각 층은 동일 층 내에서 등방, 균질하며 물리적 특성과 역학적 특성은 같다고 가정한다. 이 모델의 진동은 연직 방향으로 투과 및 반사하여 전달되는 전단파에 의해 발생하며 변위는 수평 방향으로만 발생한다.

위의 파동방정식을 풀면 각 층의 상단과 하단에서의 변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} u(Z_m=0, t) &= u_m = (A_m + B_m) e^{i\omega t} \\ u(Z_m=h_m, t) &= u_{m+1} = (A_m e^{ik_m^* h_m} + B_m e^{-ik_m^* h_m}) e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 u =변위, A_m 과 B_m = 위쪽과 아래쪽 방향으로 전파되는 파의 진폭, h_m = 두께, 그리고 k_m^* 는 다음과 같이 정의된다.

$$k_m^* = \frac{\omega}{(\sqrt{G_m/\rho_m})_m (1 + i\xi_m)} \quad (4)$$

위의 식에 경계조건과 적합성(Compatibility)을 만족시키게 하면 다음과 같은 지층간의 상호식을 구할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} A_{m+1} &= \frac{1}{2} A_m (1 + \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 - \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \\ B_{m+1} &= \frac{1}{2} A_m (1 - \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 + \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\alpha_m^* = \frac{\rho_m(\sqrt{G_m/\rho_m})_m(1+i\zeta_m)}{\rho_{m+1}(\sqrt{G_m/\rho_m})_{m+1}(1+i\zeta_{m+1})}$ 이다.

위의 식을 사용하여 지층 간에 다음과 같은 전달함수(transfer function)를 유도할 수 있다.

$$F_{ij}(\omega) = \frac{|u_i|}{|u_j|} = \frac{A_i(\omega) + B_i(\omega)}{A_j(\omega) + B_j(\omega)} \quad (6)$$

전달함수는 한 층에서의 변위를 안다면 모든 층에서의 변위를 쉽게 계산할 수 있는 유용한 식이며 지반증폭효과는 전달함수를 통하여 정의된다. 식(6)은 변위에 대한 전달함수지만 속도 및 가속도의 전달함수도 이와 동일하다. 식(6)을 정의하는데 필요한 전단탄성계수와 감쇠비는 각각 하중주파수의 영향을 받지 않는다는 가정한다.

4. 하중주파수의 영향을 고려하는 등가선형해석기법

새로운 등가선형해석법은 비선형, 등가선형해석이 모두 가능한 1차원 지반응답해석 프로그램 DEEPSOIL에 적용되었다. DEEPSOIL은 SHAKE(Schnabel 등, 1972)와 유사하나 층과 재료 개수의 제한이 없으며 다양한 형태의 복소수 전단탄성계수의 사용이 가능하다(Park, 2004).

기존의 등가선형해석법은 각각의 주파수에서 계산된 대표전단변형률에서의 하중주파수에 독립된 전단탄성계수와 감쇠비를 산정하여 전달함수를 결정한다. 하중주파수에 따라서 변화하는 전단탄성계수와 감쇠비를 모사하기 위하여 식(6)을 정의하는데 필요한 k_m^* 과 α_{m+1}^* 를 다음과 같이 변화시킨다.

$$k_m^* = \frac{\omega}{[\sqrt{G_m(\omega)/\rho_m}]_m[1+i\zeta_m(\omega)]} \quad (7)$$

$$\alpha_{m+1}^* = \frac{\rho_m[\sqrt{G_m(\omega)/\rho_m}][1+i\zeta_m(\omega)]}{\rho_{m+1}[\sqrt{G_{m+1}(\omega)/\rho_{m+1}}][1+i\zeta_{m+1}(\omega)]} \quad (8)$$

식(7)과 (8)의 $G_m(\omega)$ 과 $\zeta_m(\omega)$ 은 전단탄성계수와 감쇠비의 하중주파수에 대한 의존성을 정규화 시킨 관계식(그림 3과 4)으로 정의한다. 전단탄성계수의 경우는 전단변형률이 0.01%까지는 정규화 곡선을 사용하며 전단변형률이 0.1%이상일 경우는 그림 4b에 의거하여 1이라고 가정한다.

5. 하중주파수에 영향을 받는 흙의 동적거동이 지반응답해석에 끼치는 영향

하중주파수에 의한 효과를 규명하고자 새로 개발된 등가선형해석기법을 사용하여 일련의 지반응답해석이 수행되었다. 해석에는 두께는 50m이며 전단탄성계수는 200m/sec인 토층이 사용되었으며 지반의 동적거동은 Vucetic과 Dobry(1991)가 제안한 소성지수 30인 점성토를 대표하는 전단탄성계수와 감쇠비 곡선으로 모사되었다(그림 6).

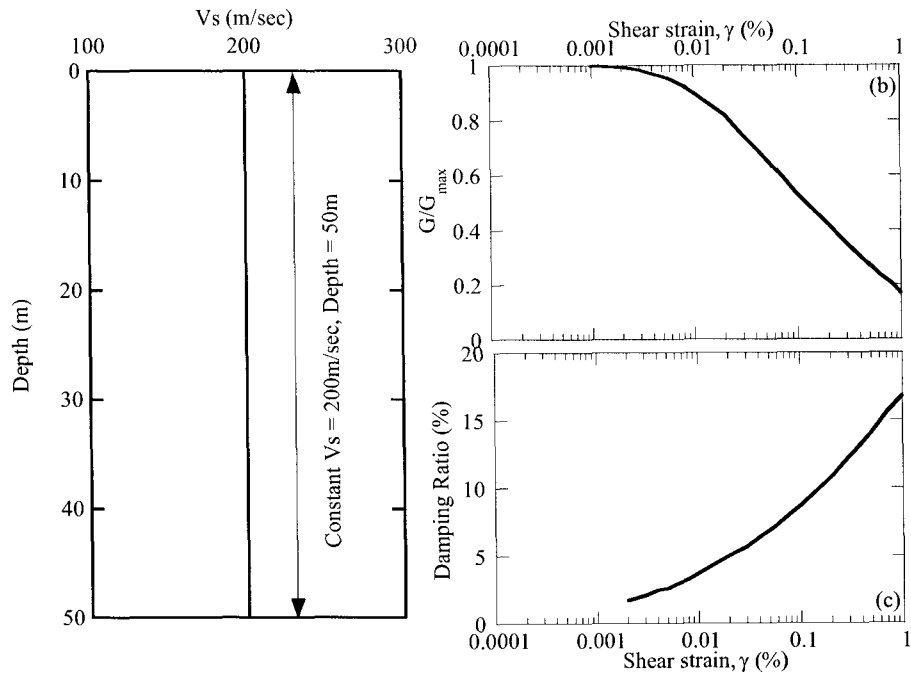


그림 6. 해석에 사용된 지반의 전단파 주상도, 정규화된 전단탄성계수 및 감쇠비 곡선

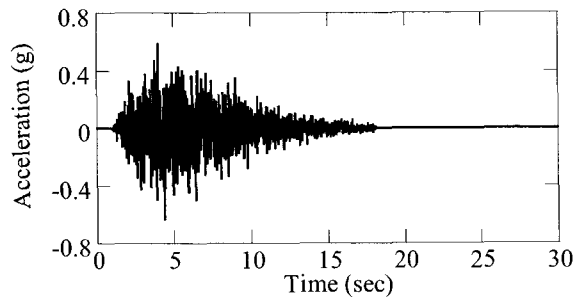


그림 7. 입력파로 사용된 인공 지진파

해석에 사용된 입력 지진파는 SMSIM(Boore, 2000)으로 생성한 인공 지진파이다. SMSIM은 미국의 확률론적 지진재해도 생성에 사용되었던 프로그램이다(Frankel, 1996). 하중주파수가 전단탄성계수와 감쇠비에 미치는 영향은 그림 3과 4의 관계식으로 정의되었다. 전단탄성계수 관계식은 하나인 반면 감쇠비 관계식은 그림 4와 같이 두 개이다. 본 논문에서 Rix와 Meng(2005)의 관계식이 사용되었다. 해석 결과는 지반의 거동이 하중주파수에 독립적이라고 가정한 경우 FI(Frequency Independent)로 표기하였고, 독립적이지 않다고 가정된 경우 FD(Frequency Dependent)로 표기하였다.

그림 8은 5% 감쇠된 지표면 응답스펙트럼과 전달함수를 비교하고 있다. 해석은 세 가지의 경우에 대하여 수행되었다. 첫 번째 경우는 전단탄성계수와 감쇠비가 모두 FI, 두 번째는 전단탄성계수와 감쇠비 모두 FD, 세 번째는 전단탄성계수는 FI, 그리고 감쇠비는 FD인 경우이다.

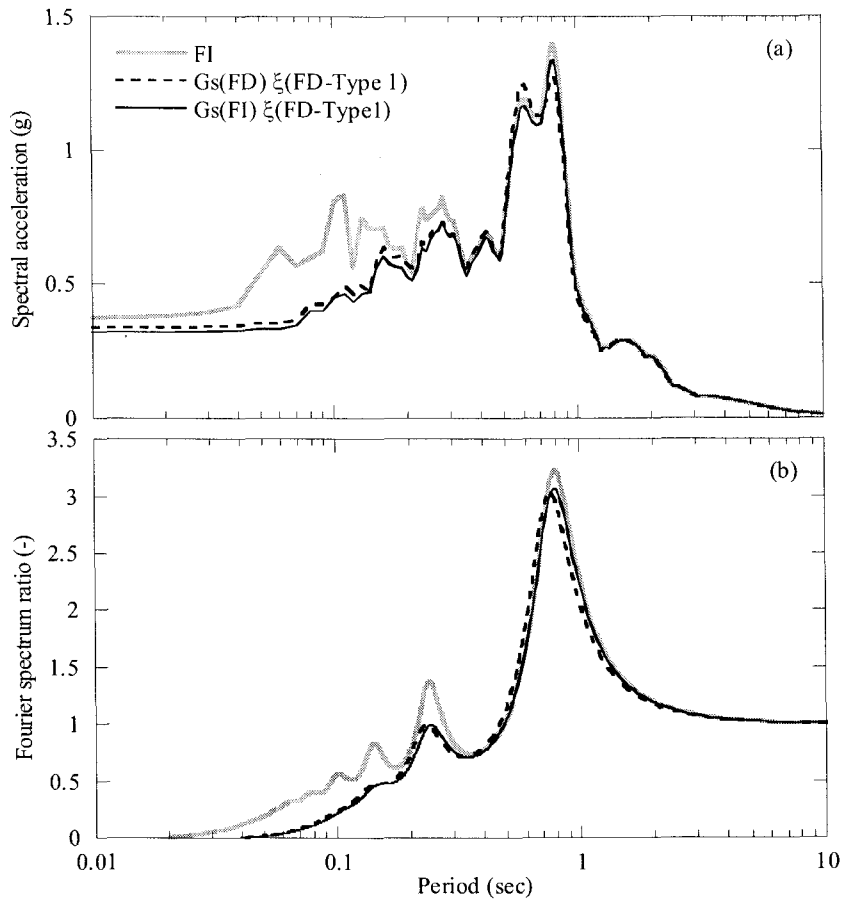


그림 8. 지표응답스펙트럼 (토층 두께=50m, Vs=200m/sec)

5% 감쇠된 지표 응답스펙트럼을 비교하였을 경우 FI의 경우가 FD에 비하여 응답 큰 것을 볼 수 있다. 특히 FD 전단탄성계수와 감쇠비를 사용한 경우 고주파 요소가 현저하게 제거되었으며 이로 인하여 저주기 응답이 낮아졌음을 볼 수 있다. 이는 전달함수의 비교를 통하여도 확인할 수 있다. FD의 경우 저주기 증폭정도가 FI에 비하여 현저히 낮음을 볼 수 있다. 하중주파수에 의하여 변화하는 전단탄성계수의 영향을 규명하기 위하여 감쇠비가 FD일 경우 전단탄성계수를 FI로 모사하였다. 두 해석 결과는 매우 유사하며 이는 하중주파수의 영향을 받는 전단탄성계수는 응답에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

6. 요약

본 연구에서는 하중주파수에 따라서 변화하는 전단탄성계수와 감쇠비를 고려하는 지반응답해석방법을 개발하였다. 개발된 방법은 기존의 등가선형해석기법의 전달함수를 수정하여 전단탄성계수와 감쇠비에 하중주파수가 미치는 영향을 고려할 수 있도록 수정되었으며 하중주파수의 영향은 정규화된 관계식들을 통하여 평가하게 된다. 일련의 지반응답해석을 수행한 결과 전단탄성계수의 하중주파수에 대한 의존성은 해석결과에 큰 영향을 미치지 않는 반면 감쇠비의 의존성은 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, 하중의 주파수가 높을수록 감쇠비도 동시에 증가하여 고주파수 요소를 필터링하여 저주기 응답스펙트럼이 낮아지는 것으로 판명되었다.

감사의 글

이 논문은 2005년 한양대학교 교내연구비 지원(HY-2005-N)으로 연구되었으며 이에 깊이 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Boore D. M.(2000), "SMSIM Fortran programs for simulating ground motions from earthquakes", Version 2.0. A revision of OFR 96-80-A. OF 00-509, USGS.
2. EPRI(1993), "Guidelines for determining design basis ground motions". EPRI TR-102293, Electric Power Research Institute, .
3. Frankel A. M., Perkins, D. Barnhard, T. Leyendecker, E. Safak, E. Hanson, S. Dickman, N., and Hopper, M.(1996), "National seismic hazard maps: Documentation June 1996", OFR 960532, USGS.
4. Idriss I. M., and Seed H. B.(1968), "Seismic response of horizontal soil layers", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division* Vol.94, No.4, pp.1003-1031.
5. Idriss I. M.(1990), "Response of Soft Soil Sites During Earthquakes", *Proc. of the Symposium to Honor H.B. Seed*, Berkeley, CA, pp.273-289.
6. Isenhowe,r W. M., and Stokoe K. H.(1981), "Strain-rate dependent shear modulus of San Francisco Bay Mud", *Proc. International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, University of Missouri-Rolla, pp.597-602.
7. Kim, D. S., Stokoe, K. H., and Hudson, W. R.(1991), "Deformational characteristics of soils at small to intermediate strains from cyclic tests", Research Report 1177-3, University of Texas at Austin.
8. Kramer, S. L.(1996), *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
9. Laird, J. P., and Stokoe, K. H.(1993), "Dynamic properties of remolded and undisturbed soil samples test at high confining pressure", GR93-6, Electric Power Research Institute.
10. Matesic, L., and Vucetic, M.(2003), "Strain-rate effects on soil secant shear modulus at small cyclic strains", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.129, No.6, pp.536-549.
11. Park D.(2004), "Estimation of non-linear seismic site effects for deep deposits of the Mississippi Embayment", Mid America Earthquake Center CD Release 04-06, 2004.
12. Roesset, J. M.(1977), "Soil amplification of earthquakes", *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, John Wiley.
13. Rix, G. J., and Meng, J. W.(2005), "A non-resonance method for measuring dynamic soil properties", *Geotechnical Testing Journal* Vol.28, No.1, pp.1-8.
14. Schnabel, P. B., Lysmer, J. L., and Seed H. B.(1972), "SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites", EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center.
15. Vucetic, M., and Dobry, R.(1991), "Effect of soil plasticity on cyclic response", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.117, No.1, pp.87-107.