

하중주파수의 영향을 고려한 등가선형해석 기법

Effect of frequency dependent soil behavior on equivalent-linear analysis

김재연* · 이현우** · 박두희***

Kim, Jae Yoen · Lee, Hyun Woo · Park, Duhee

개 요

본 연구의 목적은 현재 지반지진공학에서 가장 큰 문제점 중 하나로 대두한 동하중의 주파수에 비례하는 흙의 거동이 지반진동에 미치는 영향을 규명 하는데 있다. 이를 위해 주파수의 영향을 고려하여 지반거동을 모사할 수 있는 지반진동해석 프로그램을 제시하고자 한다. 이 프로그램은 주파수에 비례하는 흙의 전단탄성계수 및 감쇠비를 모두 고려할 수 있는 새로운 해석기법이 될 것이다. 이를 이용하여 주파수에 비례하는 흙의 거동이 지반진동에 미치는 영향을 심도 있게 연구하고자 한다.

Key word : 하중주파수, 지반진동해석

1. 서론

부지 증폭현상을 규명하기 위해서는 지반진동해석(site response analysis)을 수행하여야 하며 해석시 가장 중요한 것은 지반의 비선형거동이다. 현재까지는 지반의 비선형 거동은 하중이 가해지는 속도(rate of loading)에, 즉 하중의 주파수(frequency of loading)에, 비례하지 않는다고 가정을 해왔다. 하지만 최근 수행되고 있는 여러 실험들은 지반 하중주파수의 영향을 크게 받는다는 것을 보여주고 있다. 따라서 주파수의 영향을 받는 지반의 거동을 고려한 지반진동해석을 수행하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다. 하지만, 아직까지 이 중요한 영향을 고려할 수 있는 지반진동 해석방법이 개발되어 있지 않다. 본 연구는 주파수에 비례하는 흙의 비선형 거동을 모델링 할 수 있는 지반진동 해석프로그램을 제안하고자 한다.

2. 하중주파수의 영향을 고려한 지반동적모형

2.1 전단탄성계수모형

지반의 전단탄성계수곡선은 미소변형률에서의 점선탄성계수 즉 G_{max} 로 지반의 할선탄성계수를 정규화 하여 결정한다. 일반적으로 G_{max} 는 geophysical test를 통하여 구해진 V_s 를 사용하여 구해지지만, 전단탄성계수 감소곡선은 실내실험을 통해 결정하게 된다. 이때 구해진 V_s 와 전단탄성계수 감소곡선에 사용된 실험들 간에 적용된 하중 주파수에 대한 주파수의 영향은 3단계로 결정할 수 있다. 1단계 RF(reference frequency)에 대한 $G_{max, Ref. freq.}$ 를 구하는 것에서 시작할 수 있다. V_s 를 구할 때 사용되어진 주파수를 $f(V_s)$ 라 할 때, 이때의 최대 전단탄성계수를 $G_{max, f(V_s)}$ 라 할 때 $G_{max, Ref. freq.}$ 는 그림 1의 Step 1에 표현된 식과 같다.

그림 1a는 Kim(1991)의 결과를 사용하여 0.5Hz에서 G 값으로 정규화한 전단탄성계수 모형이다. 이들 값은 지반의 모든 변형률을 고려하지 못하고, 0.001~0.01%의 변형률에서의 하중주파수의 영향을 받는 전단탄성계수 값들을 나타내고 있다.

* 정희원 · 한국대학교 토목공학과 · 석사과정 · Email: finnyboy@hanyang.ac.kr

** 정희원 · 한국대학교 토목공학과 · 석사과정

*** 정희원 · 한국대학교 토목공학과 · 전임강사 · Email: dpark@hanyang.ac.kr

2단계는 RF에 대한 하중주파수의 영향을 고려한 전단탄성계수 감소곡선을 구하는 것이다. RF에서 얻어진 $G_{Ref.freq.}$ 와 $G_{max.Ref.freq.}$ 를 이용하여, 그림 1a의 모형을 이용하여, 주어진 하중주파수(f)에서의 전단탄성계수(G_f)와 $G_{Ref.freq.}$ 를 통해 그림 1의 Step 2를 통해 구할 수 있다. RF에서 얻어진 $G_{max.Ref.freq.}$ 에 대해 정규화된 하중주파수(f)에서의 전단탄성계수 감소곡선은 그림 1c와 같이 나타내어진다. 마지막 3단계는 2단계에서 구해진 곡선에 1단계에서 얻은 $G_{max.Ref.freq.}$ 를 사용하여 G_f 를 구하는 것이다.

위의 과정을 살펴보게 되면 RF의 영향을 무시할 수 있다는 것을 알 수 있다. 실제 지반의 전단탄성계수에 영향을 끼치는 것은 $f(V_s)$ 와 입력지진파의 하중주파수가 된다.

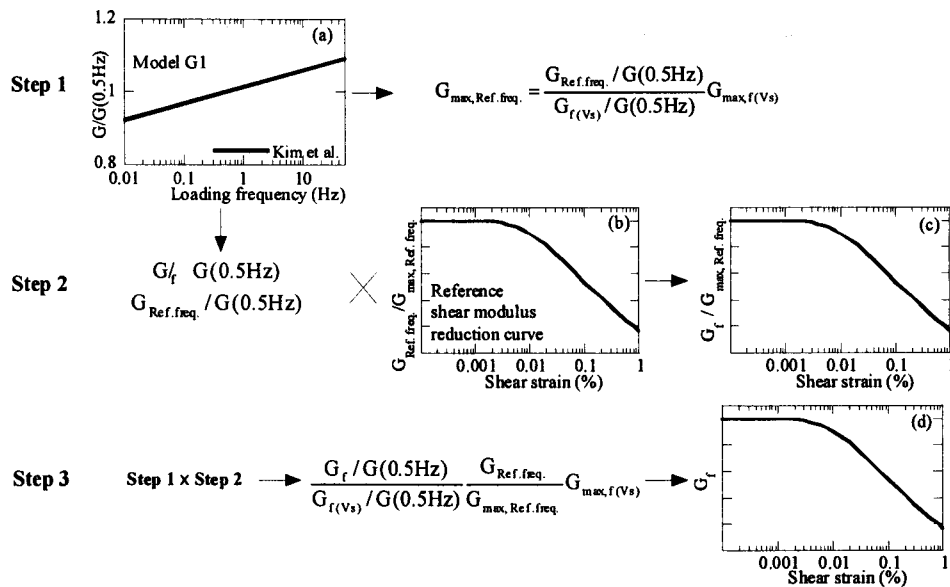


그림 1. 하중주파수의 영향은 받는 전단탄성계수감소곡선 모형

2.2 감쇠비 모형

감쇠비곡선은 지반의 선형영역의 미소변형률에서의 G_{min} (small damping ratio)와 비선형영역의 hysteretic 감쇠로 구성된다. Rix와 Meng(2005) 그리고 Darendeli(2001)은 미소변형률에서의 G_{min} 에 대한 하중주파수의 영향을 연구하였다. Kim(1991)은 두가지 변형률 범위에서의 감쇠비에 대한 주파수의 영향만을 고려하였다. 하지만 실제 hysteretic 감쇠에 대한 주파수의 영향을 고려하기 위해서는 다양한 범위에서 정규화된 곡선들이 필요하다. 본 연구에서는 제한된 자료들로 인하여, G_{min} 에서의 주파수의 영향을 고려하였다.

3가지 형식의 정규화된 감쇠된 모형을 사용하였다. 모형 D1은 Rix와 Meng(2005)의 자료를 기초로 하였고, 모형 D2는 Kim(2001) 그리고 모형 D3은 Darendeli(2001)의 자료를 기초로 하였다. 이들을 통해 주파수의 영향을 받는 감쇠비 모형은 그림 2에 나타냈다.

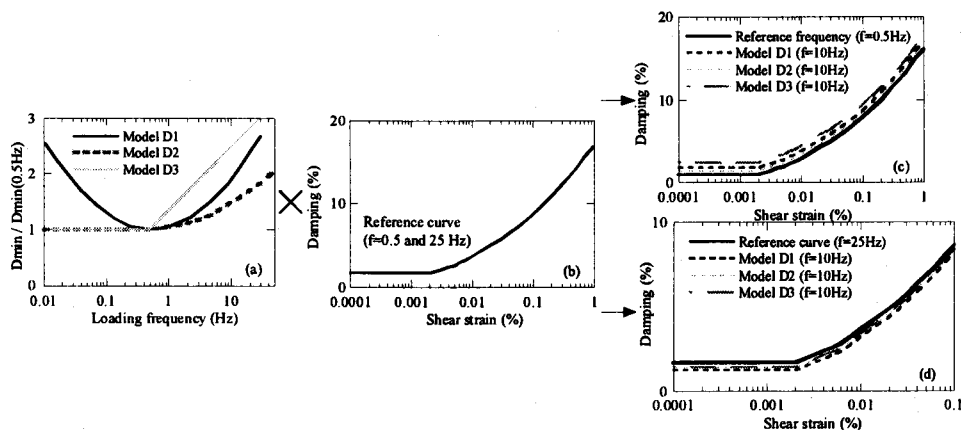


그림 2. 제안된 주파수의 영향을 고려한 미소변형률에서의 감쇠비모형

3. 하중주파수에 지배받는 동적거동을 고려하는 지방응답해석기법

본 연구의 지반진동해석모형을 설명하기 위해서 기존의 등가선형해석모형을 먼저 소개한 후 새로 개발될 모델을 설명하고자 한다. 등가선형해석기법은 연직방향으로 전파되는 전단파의 1차원 파동방정식을 반무한 반탄성체의 기반 위에 복수증지반이 놓인 경우에 대해 적용하여 해를 구한다(Schnabel, 1972). 각 층은 동일 층 내에서 등방·균질하고 물리적 특성과 역학적 특성은 같다고 가정한다. 이때 진동은 모델지반을 연직방향으로 투과 및 반사하여 전달하는 전단파에 의해 발생하고 아래와 같은 변위는 수평 방향으로만 발생한다. 이 파동방정식을 풀면 각 층의 상단과 하단에서의 변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 u =변위, A_m 과 B_m =전파의 상향파와 하향파 성분, h_m =층의 두께, $k_m^* = \frac{\omega}{(\sqrt{G_m / \rho_m})_m (1 + i\xi_m)}$ 이다. 위의 식에 경계조건과 compatibility조건을 만족시키게 하면 다음과 같은 지층간의 상호식을 구할 수 있게 된다.

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

여기서 $\alpha_{m+1}^* = \frac{\rho_m \sqrt{G_m / \rho_m} (1 + i\xi_m)}{\rho_{m+1} \sqrt{G_m / \rho_m} (1 + i\xi_{m+1})}$ 이다. 위의 식을 사용하여 지층간에 다음과 같은 전달계수를 유도할 수 있다.

$$F_{ij}(\omega) = \frac{|u_i|}{|u_j|} = \frac{A_i(\omega) + B_i(\omega)}{A_j(\omega) + B_j(\omega)} \quad (3)$$

전달계수는 한 층에서의 변위를 안다면 모든 층에서의 변위를 쉽게 계산할 수 있는 유용한 식이다. 이 식이 주파수영역 지반진동해석기법의 기본식이다.

본 연구에서는 기존의 등가선형해석기법을 기반으로 하여 주파수에 지배받는 지반거동이 모사 가능한 새로운 해석기법을 제안하고자 한다. 전술한바와 같이 주파수영역에서 두 지층에 대한 경계조건은 식(2)과 같이 나타낼 수 있다. 등가선형해석은 입력지진파를 푸리에변환을 통해, 지반의 전달함수를 사용하여 지표면에서의 지진파를 구하게 된다. 지표면에서의 변위를 2라 정의하였을 때, 전달함수는 다음과 표현된다.

$$F_{ij}(\omega) = \frac{|u_{surface}|}{|u_{input motion}|} = \frac{2}{A_n(\omega) + B_n(\omega)} \quad (4)$$

여기서 $u_{surface}$ =지표면에서의 변위, $u_{input motion}$ =입력지진파의 변위이다. 전달함수는 각 층의 전단탄성계수와 감쇠비값의 영향을 크게 받게 된다. 식(1)을 발전시켜 주파수의 영향을 고려한 새로운 전달함수를 제안하고자 한다. 이를 이용하면 동적 하중의 주파수에 비례하는 흙의 거동을 직접 고려할 수 있게 된다. 이를 위해서는 식(1)에서 정의된 k_m^* 과 식(2)에서 정의된 α_m^* 을 각각 주파수에 비례할 수 있도록 다음과 같이 정의한다.

$$\alpha_m^*(\omega) = \frac{\rho_m \left[\sqrt{G_m(\omega) / \rho_m} \right]_m [1 + i\xi_m(\omega)]}{\rho_{m+1} \left[\sqrt{G_{m+1}(\omega) / \rho_m} \right]_{m+1} [1 + i\xi_{m+1}(\omega)]} \quad (5)$$

$$k_m^*(\omega) = \frac{\omega}{\left[\sqrt{G_m(\omega) / \rho_m} \right]_m [1 + i\xi_m(\omega)]} \quad (6)$$

식(5)과 (6)에서와 같이 전단탄성계수와 감쇠비를 각각 주파수에 연계시킴으로써 전달함수에 하중주파수의 영향을 고려할 수 있게 된다.

그림 3은 부산지역의 깊이 32m 토층에 대하여 제안된 모형을 사용하여 등가선형해석을 수행한 결과이다. 해석된 결과는 입력지진파의 주파수와 전단변형률에 대한 하중주파수가 지반의 거동에 어떠한 영향을 미치는지 알려주고 있다. 규모가 큰 지진파에 대해서는 그 영향을 그리 크지는 않았다. 이는 미소변형률에서의 감쇠비보다 지반의 hysteretic 감쇠가 더 크게 작용하기 때문이다. 더불어 전단변형률이 커질수록 주어진 하중주파수에 대한 전단탄성계수 값이 작아지는데, 이는 제안된 모형이 기존의 등가선형해석기법의 알고리즘을 기초로 하여, 선택된 전단탄성계수와 감쇠비값이 유효전단변형률에 의해 구해지기 때문이다. 그러므로 입력 지진파의 높은 주파수에서 응답에 대한 하중주파수의 영향이 작게 되고, 낮은 주파수에서는 그 영향이 크게 예측된다. Hector지진파의 경우 Ofunato지진파보다 작은 규모를 가지고 있기 때문에 미소변형률에서의 감쇠의 영향이 크게 나타나고 있다.

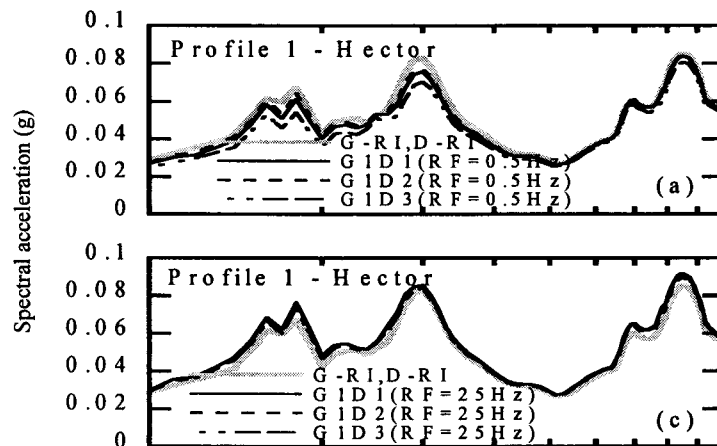


그림 3. 부산지역 깊이 32m지반의 감쇠비의 하중주파수 의존성을 고려한 응답스펙트럼

4. 결론

실내실험을 통한 하중주파수에 대한 점성토의 거동을 바탕으로 주파수의 영향을 고려한 흙의 동적거동곡선모형들을 제안하였고, 이를 바탕으로 한 등가선형해석기법을 발전시켜 주파수의 영향이 고려된 새로운 전달함수를 제안하였다. 이 프로그램은 주파수에 비례하는 흙의 전단탄성계수 및 감쇠비를 모두 고려할 수 있는 새로운 해석기법이 될 것이다.

참고문헌

1. Darendeli, M. B. (2001). "Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves," University of Texas at Austin, Austin.
3. Isenhower, W. M., and Stokoe, K. H. "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, 597-602.
4. 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, Austin.
5. Meng, J. (2006). "Earthquake ground motion simulation with frequency-dependent soil properties." Soil Dynamics and Earthquake Engineering, doi:10.1016/j.soildyn.2006.07.002.
6. 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, Urbana.
7. Park, D., and Hashash, Y. M. A. (2004). "Soil damping formulation in nonlinear time domain site response analysis." Journal of Earthquake Engineering, 8(2), 249-274.
8. Rix, G. J., and Meng, J. W. (2005). "A non-resonance method for measuring dynamic soil properties." Geotechnical Testing Journal, 28(1), 1-8.