

등가선형화에 의한 1차원 지진응답해석의 민감도분석

A Parametric Study on the Earthquake Response Analysis based on the Equivalent Linear Theory

권 오 순^{*1} Kwon, O-Soon
박 우 선^{*2} Park, Woo-Sun

Abstract

The earthquake response analysis based on the equivalent linear theory is commonly used in solving liquefaction problem for its simplicity. But it is possible to make a severe error because most input parameters are obtained from empirical methods. Sensitivity analyses on the equivalent linear analysis are carried out using one dimensional liquefaction analysis program, KLiq, developed in this study. Six important factors were deeply discussed, i.e., the effect of the shear modulus and damping ratio, the effect of strain variations, determination method of the effective strain, the effect of the maximum shear modulus, the curve shape of the strain-dependent shear modulus and damping ratio, and the effect of the input earthquakes.

요지

등가선형화이론을 이용한 지진응답해석은 사용의 간편함 때문에 많이 사용되고 있지만, 대부분의 입력 정수들이 경험식에 의해 얻어지고 있어 해석결과에 심각한 오류를 발생시킬 여지가 있다. 입력 정수를 실험의 결과로부터 얻을 수 없다면 합리적인 방법을 통하여 입력 정수를 결정하여야 하며, 또한 입력 정수들이 해석결과에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 고찰이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 입력정수가 해석 결과에 미치는 영향에 대해 민감도 분석을 실시하였다. 해석은 등가선형화 이론에 기초하여 개발한 액상화 해석프로그램(KLiq)을 이용하였다. 검토된 사항은 전단탄성계수와 감쇠비의 영향, 변형률의 영향, 반복계산에서 유효변형률 결정방법, 최대전단탄성계수의 영향, 변형률 의존곡선(지반의 종류)의 영향, 입력 지진파의 영향 등이다.

Keywords : Equivalent linear, Earthquake response, Transfer function, Effective strain

1. 서론

지반의 액상화예측을 위해 사용하고 있는 지진응답해석은 대부분 등가선형화이론을 기초로 하고 있다. 등가선형화이론은 지반의 비선형 거동을 변형률에 의존하는 선형화된 전단탄성계수와 감쇠비를 이용하여 해석하는 방법이며, 현재까지 많은 연구실적을 바탕으로 지반의 동적인 문제의 해결에 1차원뿐만 아니라 2차원 문제에까지 적

용되고 있다.

등가선형화이론이 자주 사용되고 있는 가장 큰 이유는 입력 정수가 간단하고 그 수 또한 적기 때문이다. 그러나, 입력 정수의 수가 적어지면 입력 정수의 결정에도 신중을 기해야 하는 어려움이 있다. 정확하지 않은 입력 정수로 인하여 전혀 다른 해석 결과를 얻을 수 있기 때문이다. 지반의 염밀한 지진응답해석을 위해서는 기본적인 물성시험과 함께 지반의 동적인 특성을 도출하기 위한 실험을 수

*1 정희원, 한국해양연구소 연안항만공학연구본부 선임연구원

*2 한국해양연구소 연안항만공학연구본부 책임연구원

행하여야 한다. 즉, 최대전단탄성계수를 얻기 위한 현장 탄성파시험과 미소변형률과 중간변형률 범위에서 전단 탄성계수와 감쇠비의 변형률 의존 특성을 구하기 위한 불교란시료에 대한 공진주시험과 반복삼축시험 또는 반복 단순전단시험을 실시하여야 한다. 그러나, 현실적으로 대부분 충분한 시험을 수행하지 못하고 일부 혹은 모든 입력 자료를 경험적인 경로를 통해 결정하고 있다.

경제적인 측면이나 여러 가지 여건상 최소한의 시험을 실시하여 지진응답해석을 실시한다면, 입력 정수의 중요성과 해석 결과에 미치는 영향에 대한 고찰은 필수적이다. 따라서, 이 논문에서는 등가선형화 이론을 이용하여 지반의 1차원 지진응답해석을 수행할 경우에 있어서 입력 정수들이 해석 결과에 미치는 영향에 대한 고찰해 보았다. 해석은 등가선형화에 의한 범용1차원 액상화평가 프로그램(KLiq)을 제작하여 사용하였다.

2. 이론적 배경

2.1 등가선형화이론

동적 하중을 받는 흙은 그림 1과 같이 변형률에 따라 전단탄성계수 값이 변화하는 특성을 가진다. 이러한 지반의 비선형적인 거동을 변형률에 따라 변화되는 선형 거동으로 쉽게 모사하는 방법이 등가선형화이론이다. 지반의 비선형 거동을 비선형이 아닌 선형으로 가정한다면 곡선을 특징짓는 가장 중요한 변수는 뼈대곡선(skeleton curve)의 기울기와 이력곡선(hysteresis loop)의 폭이다. 기울기는 지반의 강성을 대표하는 값으로 전단탄성계수 G_{eq} 로 정의되며 이력곡선의 폭을 대표하는 값은 감쇠비 D 이다. 이와 같은 전단탄성계수와 감쇠비가 변형률에 따라 변화하는

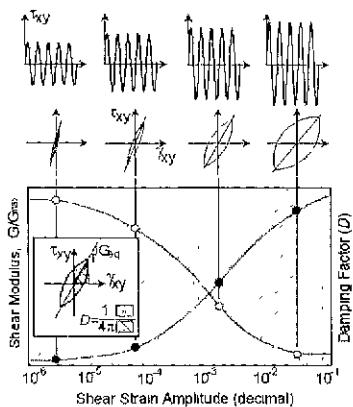


그림 1. 변형률 의존곡선

특성을 고려하는 등가선형이론에 기초한 해석과정은 다음과 같다.

- (1) 초기 전단탄성계수 G_0 과 감쇠비 D_0 를 이용하여 지진 응답해석을 실시한다.
- (2) 변형률 의존곡선에 의거하여 해석 결과에서 얻어진 평균적인 변형률 값에 해당하는 새로운 전단탄성계수 G 와 감쇠비 D 를 가정한다.
- (3) 가정한 전단탄성계수와 감쇠비가 해석 결과에서 얻어진 전단탄성계수와 감쇠비 사이의 오차가 허용오차 이내로 수렴할 때까지 반복 계산을 실시한다.

등가선형모델은 실제 지반의 거동을 단순화시킨 것으로 복잡한 비선형 거동에 대한 근사적인 해석에 제시할 수 있으며 영구변형이나 파괴가 발생하는 문제에 대해서는 직접적으로 적용할 수 없다는 단점이 있다.

2.2 중복반사파이론(Fujitsu, 1998; Schnabel et al., 1972)

중복반사이론에 의한 계산모델은 그림 2에 나타낸 것처럼 반무한 탄성체의 기반 위에 해석 지반이 놓여진 경우에 대해 적용한다. 각 층은 동일 층 내에서 동방·균질하고 물리적 특성과 역학적 특성은 같다고 가정한다. 이 모델의 진동은 모델 지반을 연직 방향으로 투파 및 반사하여 전달하는 전단파에 의해 발생하고 아래와 같은 변위는 수평 방향으로만 발생한다. 따라서, 모든 층에서 다음과 같은 파동방정식을 만족하여야 한다.

$$\rho_m \frac{\partial^2 u_m}{\partial t^2} = G_m \frac{\partial^2 u_m}{\partial x^2} + \eta_m \frac{\partial^3 u_m}{\partial x^2 \partial t} \quad (1)$$

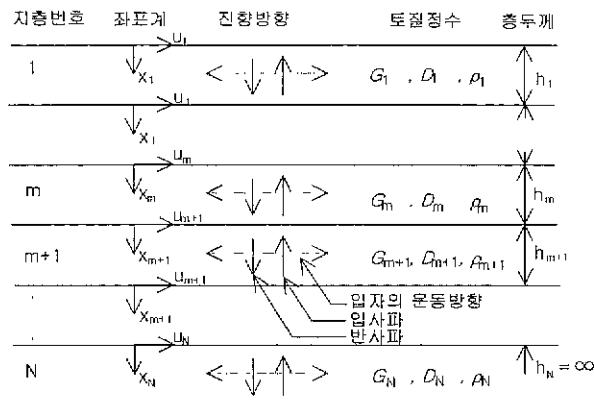


그림 2. 계산모델

여기서,

$u_m = u_m(x, t)$: m번쨰 층의 위치 x

시간 t에서 수평변위

ρ_m : m층의 밀도

G_m : m층의 전단탄성계수

η_m : m층의 점성계수

수평변위가 진동수 ω 의 조화진동이라고 보면 다음 식과 같은 일반해로 생각할 수 있다.

$$u_m(x, t) = U_m(x) \cdot e^{i\omega t} \quad (2)$$

이를 이용하면 식(1)은 다음과 같이 정리되며,

$$(G_m + i\omega\eta_m) \frac{\partial^2 U_m}{\partial x^2} = \rho_m\omega^2 U_m \quad (3)$$

이 식의 일반 해는 다음과 같이 표현된다.

$$U_m = E_m e^{ik_m x} + F_m e^{-ik_m x} \quad (4)$$

여기서,

$$k_m = \sqrt{\frac{\rho_m \omega^2}{G_m + i\omega\eta_m}} = \sqrt{\frac{\rho_m \omega^2}{G_m^*}}$$

, G_m^* : 복소전단탄성계수

감쇠비 D_m 은 점성계수 η_m 과 다음 식(5)와 같이 관련되며, G_m^* 은 식(6)과 같이 표현된다.

$$\omega_m \eta_m = 2G_m D_m \quad (5)$$

$$G_m^* = G_m + i\omega\eta_m = G_m(1 + 2iD_m) \quad (6)$$

식(2)와 식(4)로부터 조화진동의 해는 다음 식(7)로 구한다.

$$u_m(x, t) = E_m e^{i(k_m x + \omega t)} + F_m e^{-i(k_m x - \omega t)} \quad (7)$$

식(7)의 우변 제1항은 입사파 성분이며 제2항은 반사파 성분이다. 각 층의 경계에서 변위 및 전단응력을 같기 때문에 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$E_{m+1} + F_{m+1} = E_m e^{ik_m h_m} + F_m e^{-ik_m h_m} \quad (10)$$

$$E_{m+1} - F_{m+1} = \frac{k_m G_m^*}{k_{m+1} G_{m+1}^*} (E_m e^{ik_m h_m} - F_m e^{-ik_m h_m}) \quad (11)$$

식(10)과 식(11)에서 E_{m+1} 및 F_{m+1} 은 다음 식으로 구한다.

$$E_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 + \alpha_m) e^{ik_m h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 - \alpha_m) e^{-ik_m h_m} \quad (12)$$

$$F_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 - \alpha_m) e^{ik_m h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 + \alpha_m) e^{-ik_m h_m} \quad (13)$$

여기서, α_m : 복소임피던스,

$$\alpha_m = \frac{k_m G_m^*}{k_{m+1} G_{m+1}^*} = \left[\frac{\rho_m G_m^*}{\rho_{m+1} G_{m+1}^*} \right]^{\frac{1}{2}}$$

지표면에서는 전단응력이 작용하지 않기 때문에 $E_1 = F_1$ 이 되며, 이것은 지표면에서는 진행파와 반사파의 진폭이 일반적으로 같은 것을 의미한다. 지표면에서부터 차례로 계산하면 m층의 E_m, F_m 은 다음과 같이 E_1 로 나타낼 수 있다.

$$E_m = e_m(\omega) E_1, \quad F_m = f_m(\omega) E_1 \quad (14)$$

$e_m(\omega), f_m(\omega)$ 은 $E_1 = F_1 = 1$ 일 때의 진폭이다. 여기서, n층의 하단과 m층의 상단 변위의 전달계수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$A_{nm}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} = \frac{(E_m + F_m)e^{i\omega t}}{(E_n + F_n)e^{i\omega t}} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_n} = \frac{e_m(\omega) + f_m(\omega)}{e_n(\omega) + f_n(\omega)} \quad (15)$$

전달계수 $A_{nm}(\omega)$ 는 주파수 영역으로 취급되며 해석 대상지반의 지반구성이 고려되어 주파수마다 계산할 수 있다. 이와 같이 응답변위가 얻어지면 응답가속도 및 전단변형률은 다음과 같이 계산된다.

$$\ddot{u}_m(x, t) = \frac{\partial^2 u_m}{\partial t^2} = -\omega^2 (E_m e^{ik_m x} + F_m e^{-ik_m x}) e^{i\omega t} \quad (16)$$

$$\gamma_m(x, t) = \frac{\partial u_m}{\partial x} = ik_m(E_m e^{ik_m x} - F_m e^{-ik_m x})e^{i\omega_m t} \quad (17)$$

m층에서 지진파가 입력된다면, 입력지진등의 가속도 시계열을 주파수영역으로 변환하고 전달계수를 이용하여 n층에서의 가속도를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\ddot{u}_n = \sum_{s=0}^{n/2} A_{m,n}(\omega_s) C_s e^{i\omega_s t} \quad (18)$$

여기서,

C_s : 복소 Fourier계수(복소 진폭)

3. 입력지진파

3.1 개요

지반가속도 시계열은 실제 관측된 시계열을 수정하여 사용하거나 인공적으로 지진파를 합성하는 방법이 사용된다. 항만 및 어항시설의 내진설계표준서(해양수산부, 1999)에서는 지반조건을 고려하여 만들어진 인공지진파와 2개 이상의 실제 지진파에 대한 검토를 실시하도록 규

정하고 있다.

3.2 인공 지진

실제로 발생된 지진은 진앙이 서로 다르고 지진의 전파 경로에 따라 그 특성이 바뀌기도 하기 때문에 실제 지진기록만을 이용한 해석결과를 설계에 반영하는 것에는 무리가 따른다. 또한 실제 지진기록은 크기를 조정하여 목표로 하는 최대 값을 만족시킨다 하더라도 설계 응답스펙트럼을 만족시키지 못한다. 그러므로 설계 응답스펙트럼에 부합하는 인공지진을 산정하고 이를 이용하여 해석을 수행하며 그 결과를 설계에 반영하는 것이 필요하다. 다음 그림 3과 그림 4는 제안된 표준 설계스펙트럼을 만족하는 인공지진을 제작 프로그램을 사용하여 합성한 예이다. 여기에서 지진구역은 우리 나라를 2개 지역으로 구분한 항만 및 어항시설의 내진설계표준서를 참조하였으며, 연약한 토사지반에 해당하는 S_E 조건을 사용하였다.

3.3 실제 지진

인공지진을 형성하는 방법 중에서 실제의 지진기록을

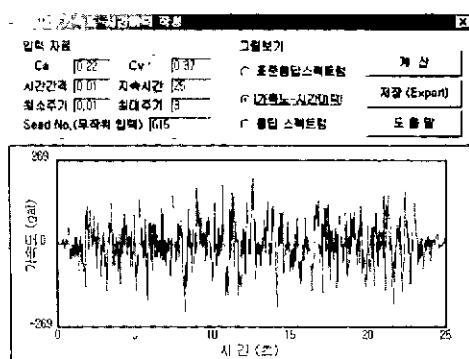


그림 3. 지진구역 I, 연약한 토사지반(S_E)

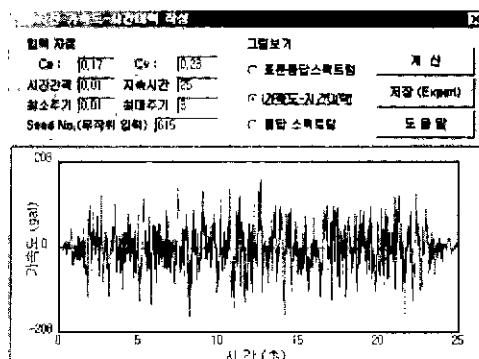
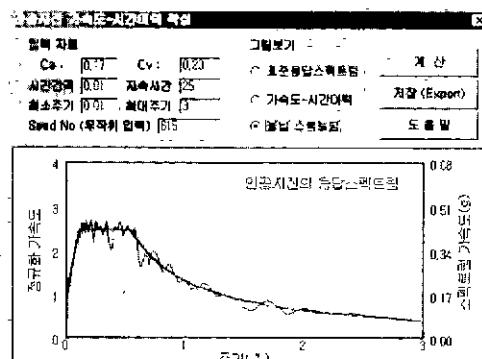
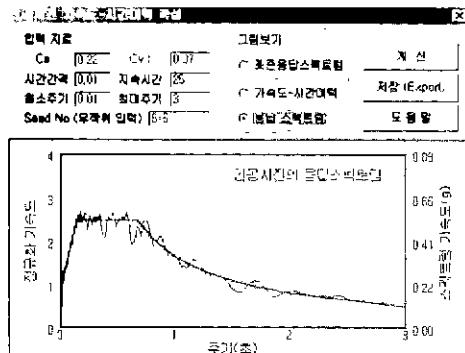


그림 4. 지진구역 II, 연약한 토사지반(S_E)



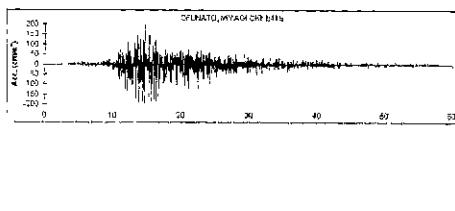


그림 5. Miyagi-oki Earthquake(Ofunato)

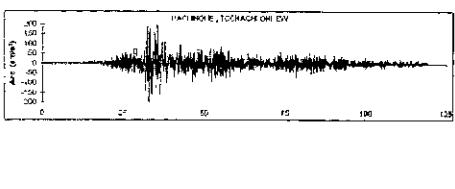
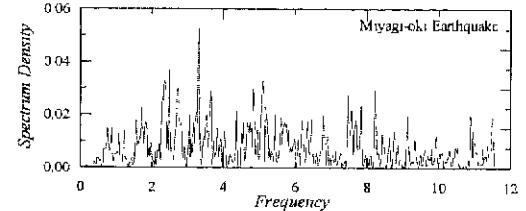


그림 6. Tokachi-oki Earthquake(Hachinohe)

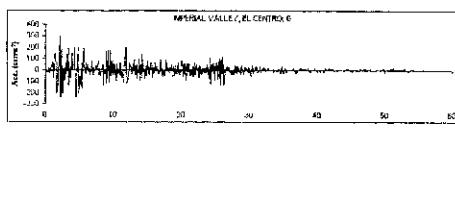
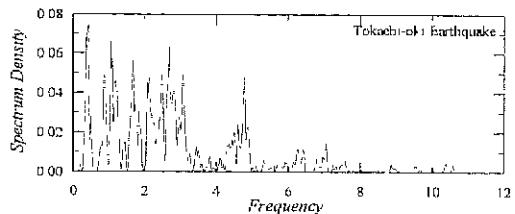


그림 7. Imperial Valley Earthquake(El Centro)

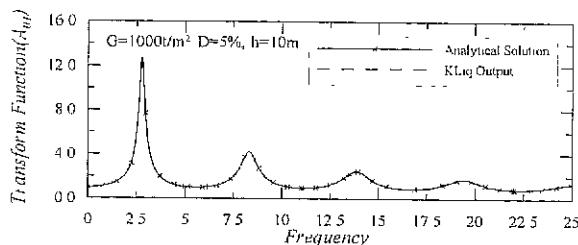
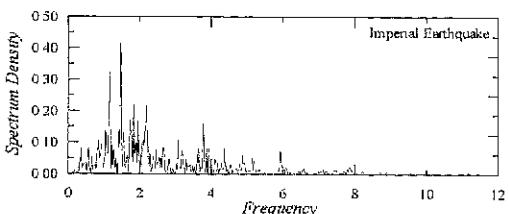


그림 8. 제작프로그램의 검증결과

수정하는 방법이 가장 쉽게 접근할 수 있는 방법이다. 이는 가속도 시계열이나 속도 시계열에서 목표로 하는 진동의 최대 값으로 임의의 비례계수를 적용하여 지진동의 크기를 조정하는 방법이다. 이러한 방법으로 지진동의 크기를 조절하여 가속도 시계열을 결정하는 데에는 세심한 주의를 기울여야 한다. 대상으로 하는 지진기록은 최대 가속도 또는 최대 속도 뿐만 아니라 진도, 진양거리 그리고 지역적인 특성도 목표로 하는 지역과 맞아야 한다. 또한 지진기록은 주파수 특성과 지속시간도 지역적인 특성을 반영할 수 있어야 한다. 다음 그림 5~그림 7은 태평양지진공학연구센터(PEERC)에서 제공한 대표적인 지진을 나타낸 것으로 지진 가속도 시계열과 지진파의 주파수 특성을 대표하는 파워스펙트럼을 나타낸 것이다.

4. 민감도분석 결과

4.1 중복반사파이론의 민감도분석

4.1.1 제작프로그램 검증

제작프로그램을 검증하기 위하여 단일 토층에 대한 해석해와 프로그램을 이용한 해석결과를 비교하였다. 토층 조건은 토층 두께 10m, 전단탄성계수(G) 1000t/m², 감쇠비(D) 5% 및 포화된 토층의 유효단위중량을 0.8t/m³으로 적용하였다. 단일 토층에 대한 전달함수를 식(12), 식(13) 및 식(15)을 이용하여 다음과 같이 주파수에 대한 함수로 도출하였으며, 이 결과와 제작프로그램에서 얻어진 전달함수를 다음 그림 8에서 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 제작프로그램은 해석해와 일치하는 결과를 보였다.

$$\begin{aligned} A_{2,1}(\omega) &= \frac{u_2}{u_1} = \frac{(E_2 + F_2)e^{i\omega t}}{(E_1 + F_1)e^{i\omega t}} \\ &= \frac{2}{e^{ik_1 h_1} + e^{-ik_1 h_1}} = \frac{1}{\cos(k_1 h_1)} \\ &= \frac{1}{\cos\left(\sqrt{\frac{\rho_1 \omega^2}{G_1(1+2iD_1)}} h_1\right)} \end{aligned}$$

4.1.2 전단탄성계수와 감쇠비의 영향

전단탄성계수의 영향을 알아보기 위하여 10m 두께의 포화된 균질한 모래층(단위중량 $1.8t/m^3$)을 5요소로 분할하여 전단탄성계수와 감쇠비를 변화시키면서 해석을 수행하였다. 전단탄성계수는 $100\sim10000t/m^2$, 감쇠비는 $1.0\sim30.0\%$ 범위에서 사용하였다. 입력지진은 그림 7에서 제시한 Imperial Valley Earthquake의 가속도 시계열을 $1/10$ 로 수정하여 사용하였다.

그림 9는 감쇠비를 10%로 고정하고 전단탄성계수를 변화시키면서 해석을 수행하여 얻어진 응답가속도를 입력 지진파의 최대가속도로 정규화시켜 깊이에 따라 나타낸 그림이며, 그림 10은 전단탄성계수를 $1000t/m^2$ 으로 고정하고 감쇠비를 변화시키며 해석을 수행한 결과이다.

그림 11은 전단탄성계수를 대수 축으로 두고 지표면의 정규화 가속도 응답을 도시한 것이며 그림 12는 감쇠비를

대수 축으로 두고 지표면의 정규화 가속도 응답을 도시한 것이다. 그림 11에서 해석결과 최대 지반 가속도 응답은 전단탄성계수가 $1000\sim10000t/m^2$ 의 범위에서 최대 값에 도달한 후 다시 감소하는 경향을 보이며, 그림 12에서는 감쇠비가 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있다.

그림 9와 그림 10과 같이 지진파가 지반을 진행하며 나타나는 증폭 또는 감쇠 현상의 원인을 명확히 살펴보기 위해 식(15)에서 정의한 전달계수(A_{nm})를 전단탄성계수별로 구분하여 그림 13에 도시하였다. 주파수변화에 따른 전달계수의 변화를 살펴보면 특정 주파수조건에서 상당히 증폭되는 현상을 볼 수 있다. 이는 공진현상에 의한 것으로 지표면 가속도에 직접적으로 관련된다는 점에서 대단히 중요하다. 전반적인 거동을 살펴보면, 전단탄성계수가 증가함에 따라 지반 강성이 증가함에 따라 공진조건 대가 점차 고주파수 영역으로 이동함을 알 수 있으며, 첫 번째 공진 조건대에서 증폭율이 6.44로 두 번째 2.08, 세 번

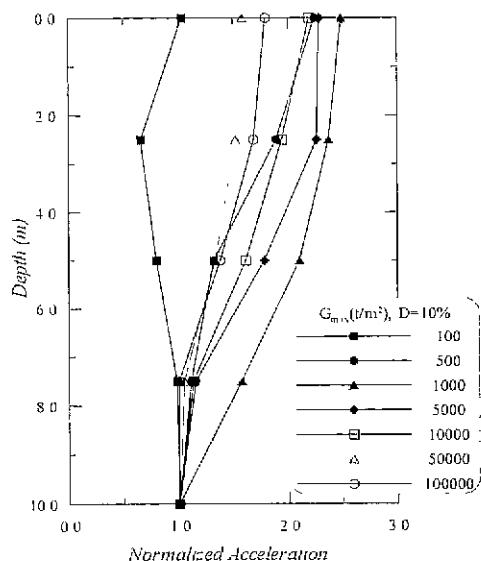


그림 9. 전단탄성계수와 깊이에 따른 최대응답가속도

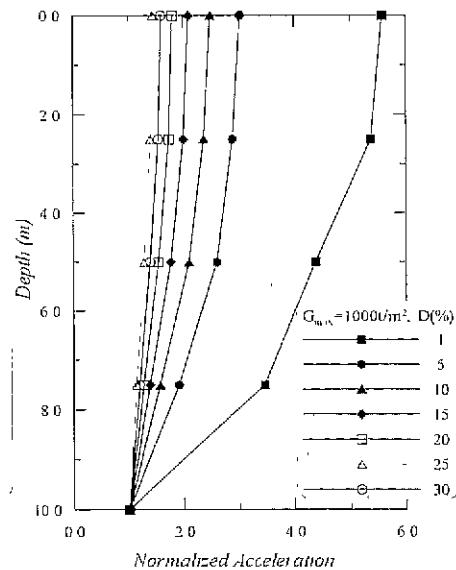


그림 10. 감쇠비와 깊이에 따른 최대 응답가속도

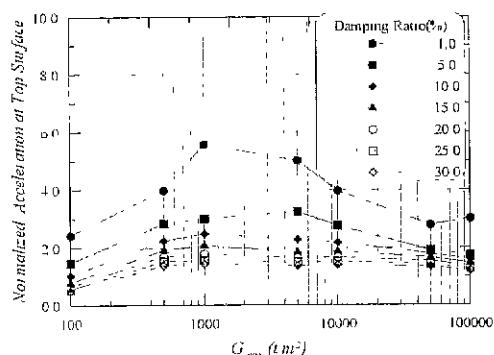


그림 11. 전단탄성계수와 지표 최대응답가속도의 관계

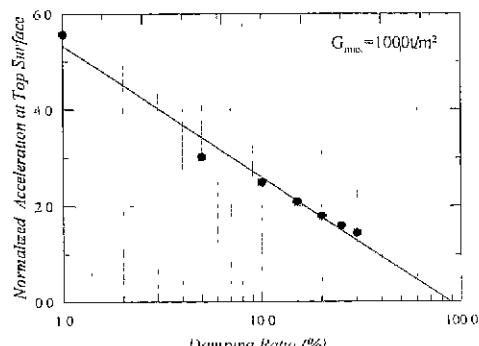


그림 12. 감쇠비와 지표 최대응답가속도의 관계

표 1. 피크 주파수와 파장

구분	주파수	파장(L)	지반의 두께(h)과 파장의 상관관계
1	1.855	40.0	$h = 1/4 L$
2	5.542	13.3	$h = 3/4 L$
3	9.229	8.0	$h = 5/4 L$

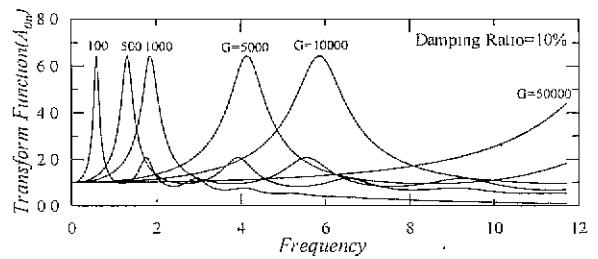
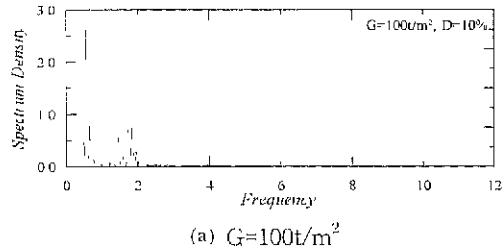
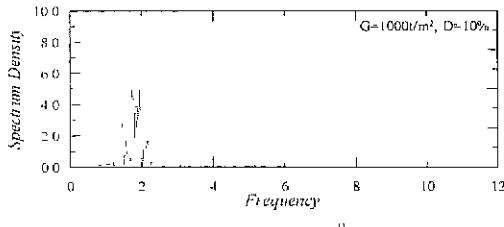


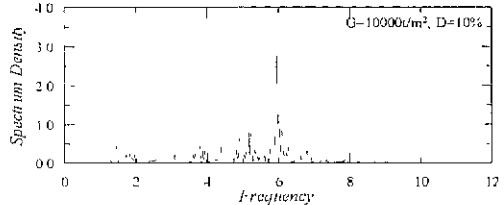
그림 13. 전단탄성계수의 변화에 따른 지표면 가속도의 전달함수(A_{nm})



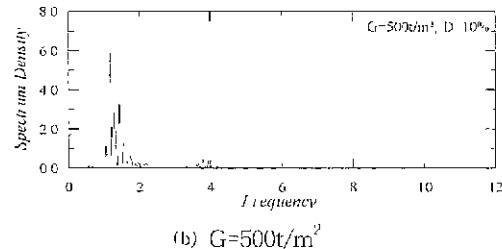
(a) $G=100t/m^2$



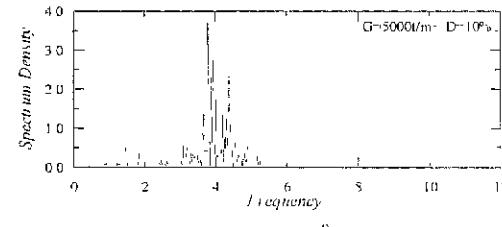
(c) $G=1000t/m^2$



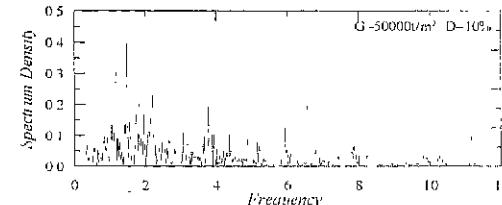
(e) $G=10000t/m^2$



(b) $G=500t/m^2$



(d) $G=5000t/m^2$



(f) $G=50000t/m^2$

그림 14. 전단탄성계수의 변화에 따른 지표면 가속도의 파워스펙트럼

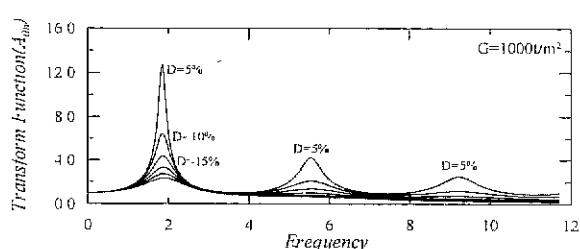


그림 15. 전단탄성계수의 변화에 따른 지표면 전달계수(A_{nm})

제 1.17보다 현저히 큼을 알 수 있다. 이는 입력지진파 성분이 첫 번째 고유 진동 조건대에 몰려 있게 되면 크게 증폭될 수 있다는 것을 의미하는 것으로 액상화 평가에 있어서 대단히 중요한 의미를 지닌다.

그림 14는 지표면 가속도 파워스펙트럼을 지반의 전단탄성계수별로 나타낸 것이다. 그림 13에서 나타낸 전달계수의 피크점이 나타나는 주파수 부근에 가속도가 집중된 것을 알 수 있다. 또한 입력지진파의 주파수특성을 나타낸 그림 7을 그림 13의 전달계수와 비교해 보면, 입력 지진파의 가속도가 모여있는 주파수(1.6~2.0) 근처에서 전달계수의 첫 번째 피크가 나타나는 $G=1000t/m^2$ 에서 가장 큰 응답가속도가 발생하는 것을 알 수 있다. 즉, 입력지진파의 주파수 특성과 전달계수의 첫 번째 피크가 나타나는 주파수가 일치하면 지진파는 크게 증폭된다는 사실을 알 수 있다.

그림 15는 감쇠비를 변화시킬 때 나타나는 전달계수를 도시한 것이다. 전단탄성계수가 증가할수록 첫 번째 피크

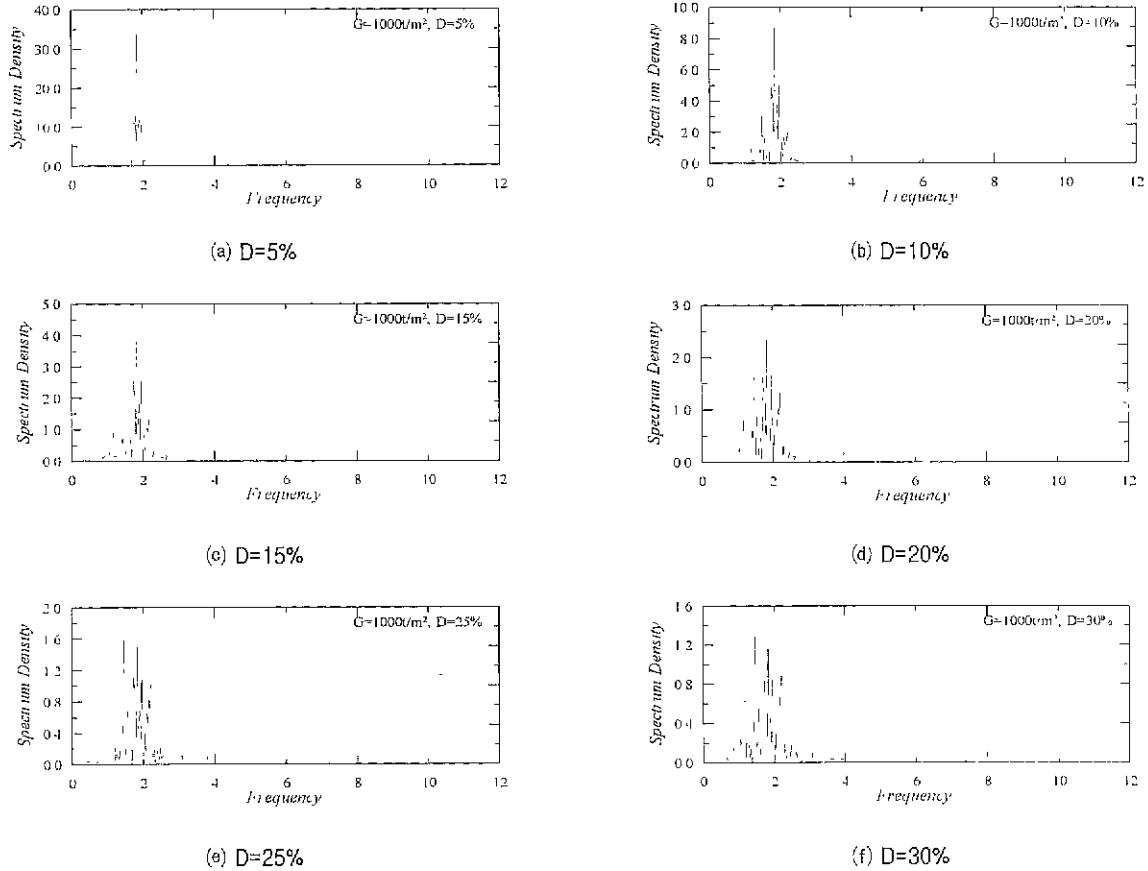


그림 16. 감쇠비의 변화에 따른 지표면 가속도의 파워스펙트럼

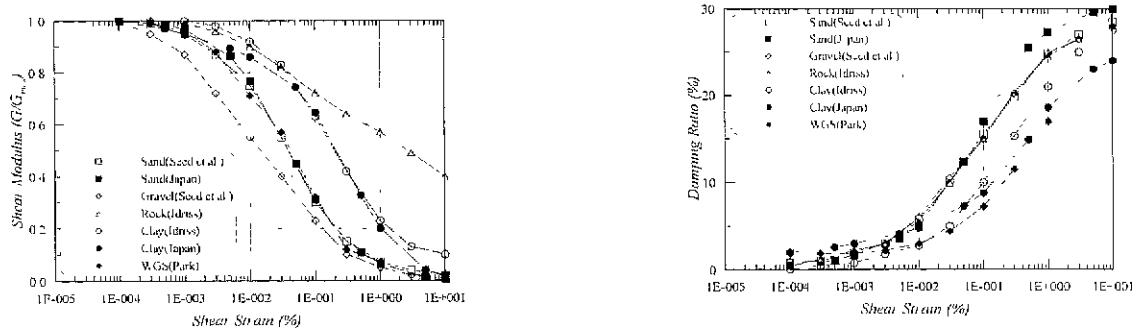


그림 17. 전단탄성계수 및 감쇠비 변형률 의존곡선

가 이동하는 것과는 달리, 감쇠비가 증가하면 피크가 나타나는 주파수는 거의 변화하지 않으며 피크의 크기가 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 전달계수의 특성이 그림 12와 같이 감쇠비가 증가할수록 최대 응답 가속도가 감소하는 원인이 된다. 지표면의 응답스펙트럼을 감쇠비별로 나타낸 그림 16에서도 응답가속도 피크가 주로 분포하는 주파수는 거의 같지만, 그 크기가 감쇠비가 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있다.

전달계수의 피크가 나타나는 주파수를 이용하여 다음

식에서 파장을 계산할 수 있다.

$$k_m = \frac{2\pi}{L} = \sqrt{\frac{\rho_m \omega^2}{G_m^*}} \quad (\text{여기서, } L : \text{파장}) \quad (19)$$

주파수별로 계산된 파장을 정리하여 다음 표 1에 정리하였다. 피크가 나타나는 주파수에서 계산된 파장은 캔틸래버 형태 부재에서 공진이 발생하는 파장과 동일하게 나타났다. 이 결과에서도 지진파가 진행하면서 지반의 공진

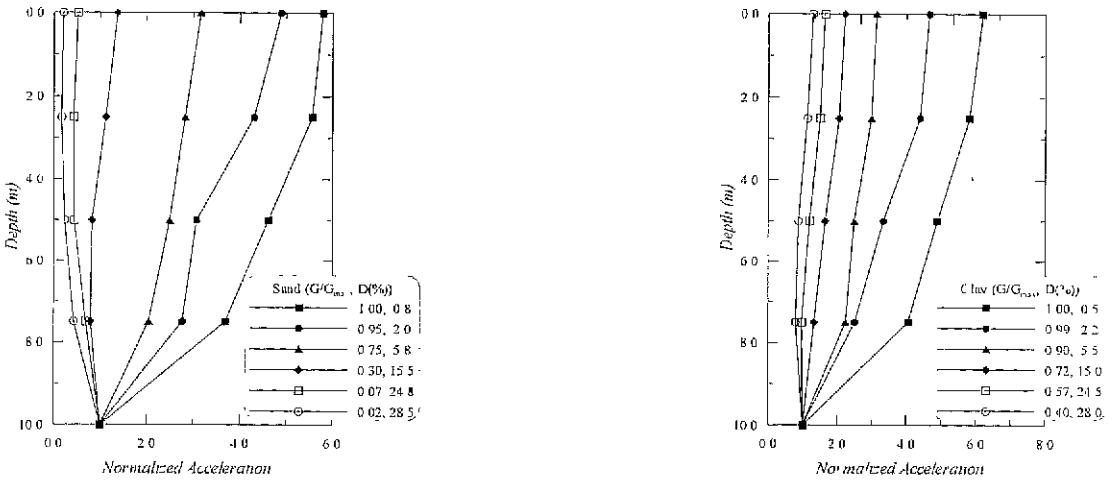


그림 18 변형률과 깊이에 따른 최대 가속도

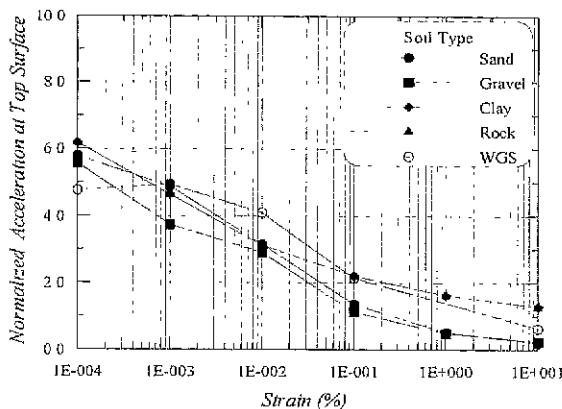


그림 19. 전단탄성계수 및 감쇠비의 변형률을 연관관계와 자표 최대응답가속도의 관계

주파수와 일치하면 증폭되는 현상을 잘 설명할 수 있다.

4.1.3 변형률 의존특성을 고려한 분석

그림 1에서 제시한 바와 같이 지반의 전단탄성계수와 감쇠비는 전단변형률에 의존하여 서로 상관관계를 가지며 변화한다. 따라서, 독립적인 변수로 두고 분석하는 방법과 함께 변형률에 의존하여 연관된 전단탄성계수와 감쇠비 값에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 해석에 사용한 변형률의 준곡선은 그림 17에서 제시한 바와 같이 여러 연구자들(박웅종, 1998; 日本港灣協會, 1999; Seed et al., 1970; Seed et al., 1984; Idriss, 1990)에 의해 제안된 대표적인 결과를 사용하였다.

사질토와 점성토의 변형률 의존곡선을 사용하여 해석을 수행한 결과에서 얻어진 지반의 가속도 응답을 깊이에 따라 도시한 그림 18에서 변형률이 증가할수록 가속도는

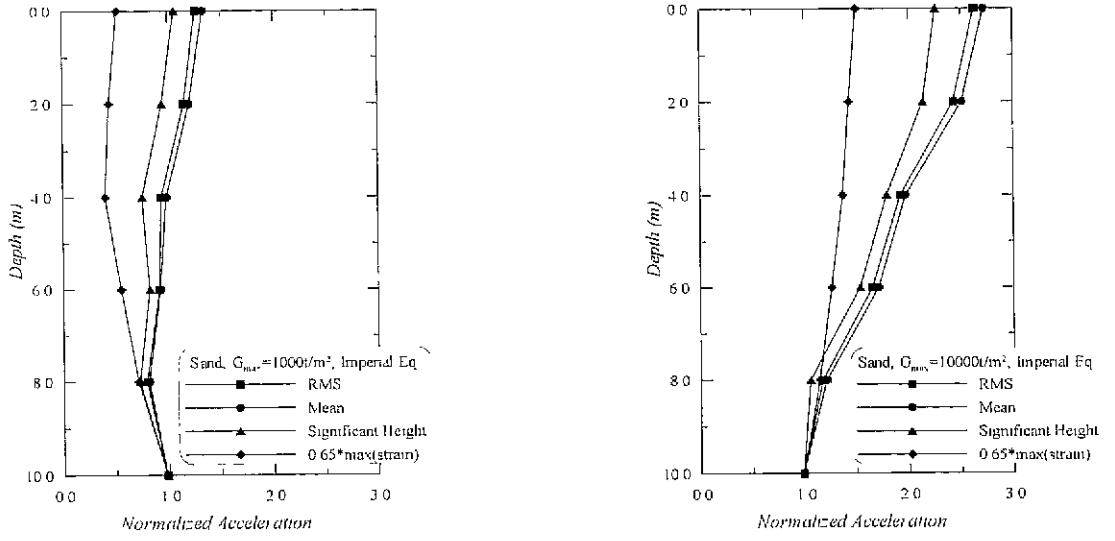
감소하는 경향을 보이고 있다. 변형률을 대수축으로 두고 지표면 최대 가속도를 비교한 그림 19에서도 같은 결과를 보이고 있다.

4.2 등가선형화이론의 민감도분석

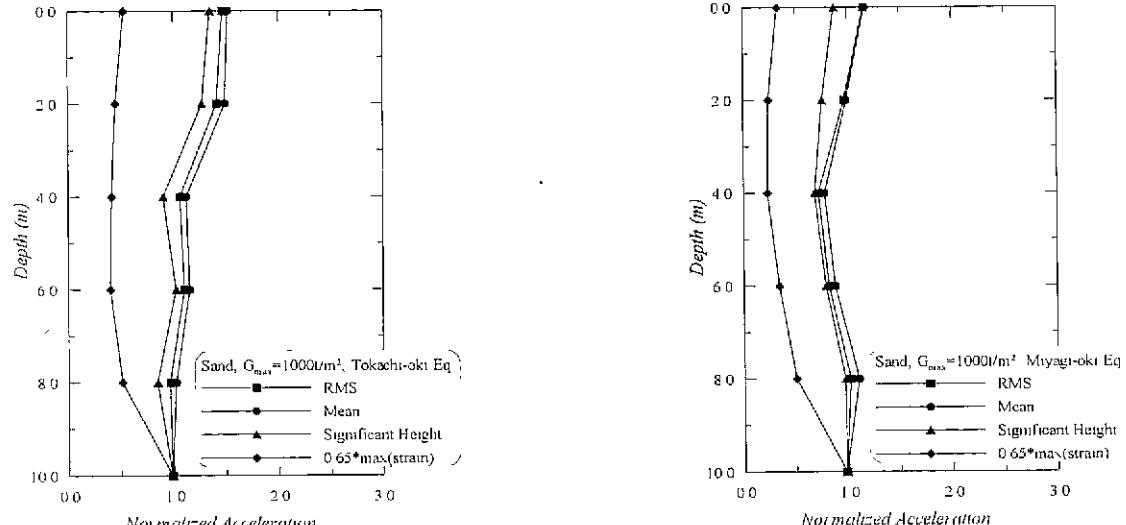
4.2.1 반복계산에서 유효변형률 결정방법

앞에서 설명한 바와 같이 등가선형화이론을 적용하는 과정에서 반복적으로 새로운 전단탄성계수와 감쇠비를 결정하기 위해 이전의 입력정수로부터 평균적인 변형률을 결정하여야 한다. 해석 결과에서 등간격으로 얻어진 변형률 시계열의 대표 값을 결정하는 방법은 경험적으로 몇 가지가 사용되고 있으며, 이러한 변형률 대표 값의 결정방법은 수렴시간과 해석 결과에도 영향을 미치게 된다. 이번 논문에서는 최대전단변형률의 0.65%를 취하는 방법과 1 방향 진폭(single amplitude)의 RMS(root mean square), 평균(mean) 그리고 유의파고(significant height)로 결정하는 방법에 대한 해석을 수행하여 그 결과를 비교하였다. 해석에 사용된 지반조건과 입력지진은 앞 절과 동일하다. 다음 표 2에서 사용한 유효변형률의 결정방법을 요약 정리하였다.

그림 20은 지반조건과 지진파의 종류를 달리하여 유효변형률 결정방법에 따른 해석 결과를 나타낸 것이다. 최대변형률의 0.65배의 값을 유효변형률로 결정하는 방법은 다른 방법들에 비해 1/2정도의 응답가속도를 나타냈으며, 유의파고로 결정하는 방법보다는 RMS나 평균(mean)을 취하는 방법이 거의 유사한 결과를 보이고 있다. 수렴 시간은 최대변형률의 0.65배의 값을 유효변형률로 결정하



(a) 전단탄성계수에 따른 비교



(b) 지진파의 종류에 따른 비교

그림 20. 유효변형률 결정방법에 따른 응답가속도 분포

는 방법이 다른 방법에 비해 2배 정도가 소요되었다. 이번

표 2. 유효변형률의 결정방법

구 분	계산식
Root mean square	$\gamma = 1.414\sqrt{m_0}$
Mean	$\gamma = 1.254\sqrt{m_0}$
Significant strain*	$\gamma = 2.00\sqrt{m_0}$
0.65 × max(strain)	$\gamma = 0.65 \times \gamma_{\max} $

여기서, m_0 는 스펙트럼밀도합수($\sum_{i=0}^{10} |C_i|^2$)의 면적

* 변형률 진폭 상위 1/3의 평균

연구에서는 상대적으로 큰 응답가속도를 보이기 때문에 안전측이며 수렴 속도도 빠른 1방향 진폭(single amplitude)의 평균을 유효변형률로 결정하는 방법을 사용하였다.

4.2.2 최대전단탄성계수의 영향

동가선형화이론을 적용한 경우, 전단탄성계수와 감쇠비의 변형률의 존곡선에 의거하여 반복계산이 이루어진다. 주어진 전단탄성계수의 변형률의 존곡선은 G/G_{\max} 의 분포를 나타낸 것으로 최대전단탄성계수를 입력정수로 사용하게 된다. 최대전단탄성계수는 미소변형률에서 최

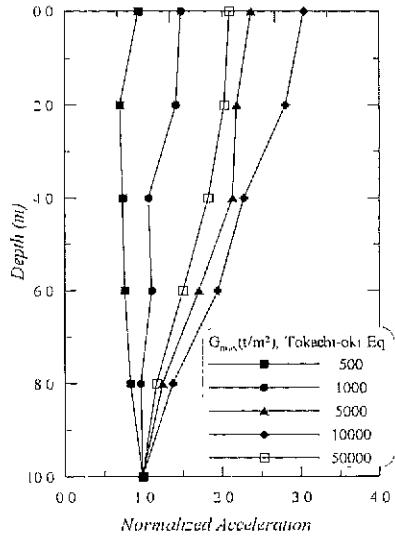


그림 21. 최대전단탄성계수와 깊이에 따른 정규화된 최대 응답가속도

대 값을 나타내므로 현장에서 실시한 탄성파시험의 결과를 이용하는 것이 바람직하지만, 대부분 실내 공진주시험이나 여러 가지 경험식에 의거하여 결정되고 있다. 여기에서는 앞에서 제시한 모래의 변형률 의존곡선을 이용하여 변형률에 따른 G/G_{max} 와 감쇠비를 적용하고 최대전단탄성계수를 변화시키며 해석을 수행하여 그 민감도를 분석하였다.

그림 21은 깊이에 따라 최대 응답가속도를 나타낸 것이며, 그림 22는 대수축으로 표시한 최대전단탄성계수와 지표 최대 응답가속도의 관계를 나타낸 것이다. 지표 최대 응답가속도는 반복계산을 수행하지 않은 중복반사파 해

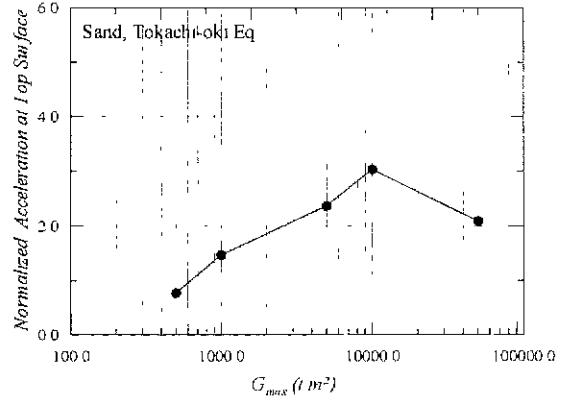


그림 22. 최대전단탄성계수와 지표 최대응답가속도의 관계

석 결과와 유사하게 $G_{max}=10000\text{t}/\text{m}^2$ 에서 지표 최대 응답가속도를 보이고 다시 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나, 최대 값이 나타나는 전단탄성계수가 반복계산을 하지 않은 경우보다 커진 것은 입력한 최대전단탄성계수(G_{max})가 반복계산 과정에서 유효변형률에 따라 작게 적용되기 때문이다.

4.2.3 변형률 의존곡선(지반의 종류)의 영향

그림 23은 그림 17에서 제시한 전단탄성계수와 감쇠비의 변형률 의존곡선을 이용하여 등가선형화 지진응답해석을 실시한 결과를 깊이에 따라 나타낸 것이다. 지반조건과 입력지진파는 앞 절과 동일하며, 최대전단탄성계수는 $5000\text{t}/\text{m}^2$ 을 사용하였다. 점성토의 변형률 의존곡선을 사용한 경우가 지표면에서 가장 큰 응답가속도를 유발하

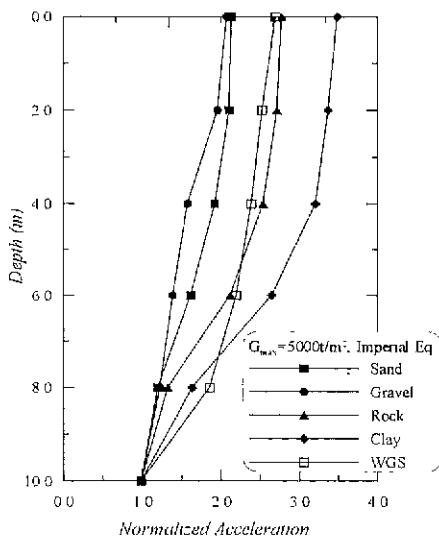


그림 23. 변형률 의존곡선에 따른 지반의 최대 응답가속도

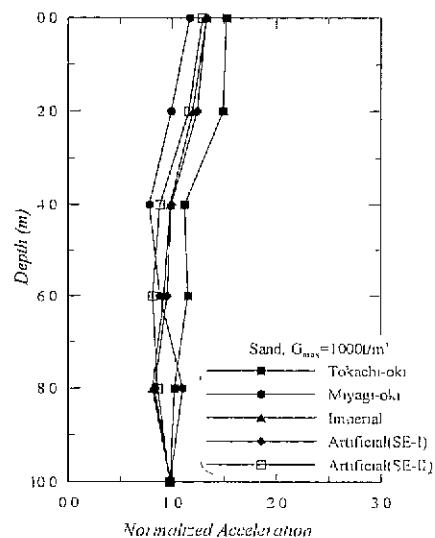


그림 24. 지진의 종류에 따른 지반의 최대 응답가속도

는 것으로 나타났으며, 모래의 변형률 의존곡선을 사용하여 해석한 경우가 가장 작은 지표 응답가속도를 보이고 있다. 자갈의 경우는 모래의 경우와 유사하며, 암은 점성토와 유사한 결과를 보이고 있다. 화강암 풍화토(WGS)는 중간 정도의 응답가속도를 보이고 있다.

4.2.4 입력 지진파의 영향

동일한 지반조건과 변형률 의존곡선을 사용하더라도 입력지진의 종류에 따라 그 결과가 달라진다. ‘항만 및 어항시설의 내진설계표준서’에서 제시한 지반 조건을 고려하여 만들어진 인공지진(그림 3, 그림4)과 실제 지진(그림 5~그림7)에 대한 검토를 실시하였다. 비교를 위하여 인공지진과 실제 지진 모두 최대가속도를 0.1g로 수정하여 사용하였다. 해석 결과를 나타낸 그림 24에서 Tokachi-oki 지진을 적용한 경우에 가장 큰 응답가속도를 얻을 수 있었으며, Miyagi-oki 지진을 적용한 경우에 가장 작은 응답가속도가 발생하는 것으로 나타났다. 그림 5~그림 7에서 제시한 지진파의 주파수특성과 그림 13에서 제시한 전달계수를 비교하면, 전단탄성계수가 $1000l/m^2$ 에서 첫 번째 피크가 나타나는 주파수와 Tokachi-oki 지진의 주파수 특성이 일치하여 공진으로 인해 증폭되는 특성이 나타나며 Miyagi-oki 지진은 주파수 특성이 다른 지진파에 비해 전달계수의 피크가 나타나는 주파수에 가속도가 집중되지 않는 것을 알 수 있다.

5. 결론

균일한 단일 토층을 대상으로 중복반사파 이론과 등가 선형화 방법을 적용하여 1차원 지진응답해석의 민감도분석을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 중복반사파 이론을 적용한 경우, 일반적인 액상화를 검토하는 지반의 전단탄성계수와 감쇠비의 범위에서 전단탄성계수는 증가할수록 감쇠비는 감소할수록 지표에서의 최대 응답가속도는 증가하는 것으로 나타났다. 전단탄성계수와 감쇠비가 서로 독립적인 변수가 아니므로 연관성을 고려할 경우, 변형률 수준이 증가 할수록 전단탄성계수는 감소하고 감쇠비는 증가하며 지표의 최대 응답가속도는 감소하는 것으로 나타나 감쇠비가 전단탄성계수보다 더 중요한 영향인자임을 알 수 있다.

- (2) 등가선형화 이론을 적용할 경우, 반복 계산 과정에서 사용하는 유효변형률은 1방향 진폭의 평균(mean)으로 계산하는 것이 다른 방법에 비하여 수렴시간이 짧고 안전측의 결과를 얻을 수 있다.
- (3) 기존 연구에서 많이 사용되고 변형률 의존곡선을 사용할 경우, 점성토(Idriss, 1990; Japan, 1999)의 변형률 의존곡선을 사용한 경우가 지표면에서 가장 큰 응답가속도를 유발하는 것으로 나타났으며, 모래의 변형률 의존곡선(Seed et al., 1970; Japan, 1999)을 사용하여 해석한 경우가 가장 작은 지표 응답가속도를 보인다. 풍화토(박용종, 1998)의 변형률 의존곡선을 사용한 경우에는 모래와 점성토의 중간정도의 응답가속도를 보였다. 그러나, 이 결과는 흙의 종류에 따른 거동 특성이기보다는 변형률 의존곡선과 관련된 문제이기 때문에 다양한 흙에 대한 실험 결과를 통해 합리적인 많은 변형률 의존곡선을 도출하는 과정이 선행된 후 추가적인 상관관계 분석이 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 지반의 동적 물성치에 의해 결정되는 전달계수의 주파수 특성과 입력지진파의 주파수 특성이 지반의 응답가속도를 결정한다. 결론적으로 전달계수의 첫 번째 피크가 나타나는 주파수에서 입력 지진파의 가속도가 집중되면 공진이 발생하여 지반의 응답가속도는 급격히 증가한다.

감사의 글

이 연구는 해양수산부의 ‘지진에 대비한 항만구조물보강 및 신형안벽개발II’ 연구용역의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 1 박용종(1998), 풍화토가 화강암 풍화토의 동적물성치에 미치는 영향, 석사학위논문. 서울대학교, pp 32~50
- 2 해양수산부(1999), 항만 및 어항시설의 내진설계표준서, pp 21~30
- 3 해양수산부(1999), 지진대비 항만구조물 보강기법 및 신형안벽개발(II), pp 109~152
- 4 日本港灣協會(1999), 港灣の施設の技術上の基準・同解説
- 5 Fujitsu(1998). LIQUEUR manual. FCENA/V series, pp 11~14
- 6 Gasparini, D. A and Vanmarcke, E. H.(1976), Simulated Earthquake Motions Compatible With Prescribed Response Spectra, Department of Civil Engineering, Research Report R76-4, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, pp 1~59
7. Idriss, I. M.(1990), "Response of Soft Soil Sites during Earthquakes", Proceedings, Memorial Symposium to honor Professor Harry Bolton Seed, Berkeley, California, Vol. II, May

8. Lysmer, J., Uda, T., Seed, H. B. and Hwang, R.(1974), LUSH-A Computer Program for Complex Response Analysis of Soil-Structure Systems, Earthquake Engineering Research Center, Report No UCB/EERC-74/4, University of California, Berkeley, pp 1~35
- 9 Schnabel, P. B., Lysmer, J , and Seed, H. B.(1972), SHAKE - A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Earthquake Engineering Rosearch Center, Report No. UCB/EERC-72/12. University of California, Berkeley, pp B1 ~B18
10. Seed, H. B and Idriss, I. M.(1970), Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses, Earthquake Engineering Research Center, Report No UCB/EERC-70/10. University of California, Berkeley, pp 8 ~37
11. Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M. and Tokimatsu, K.(1984), Moduli and Damping Factors for Dynamic Anlayses of Cohesionless Soils. Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-84/14. University of California, Berkeley, pp 10 ~35
12. Sun, J. I , Golesorkhi, R. and Seed, H. B.(1988), Dynamic Moduli and Damping Ratios for Cohesive Soils. Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-88/15 University of California, Berkeley, pp 4 ~36

(접수일자 2000. 1. 24)