

● ● ●

新 유사정적 사면안정해석 기법 개발

박두희¹⁾, 안재광²⁾, 윤세웅²⁾

¹⁾ 한양대학교 전임강사

²⁾ 한양대학교 대학원생

1. 서론

국내에서는 지진동에 의한 사면피해가 제한적인 반면 국외에서는 많은 사례가 발생하였다. 국내의 경우, 1783년 이태리에서 발생한 지진 이후 사면피해에 대한 과학적인 기록이 시작되었으며 1930년대 항공사진이 개발되면서부터 사면피해가 더욱 정밀하게 기록되었다. 이 중 매우 중요한 사례는 1957 캘리포니아(Daly City, 규모 = 5.3)에서 발생한 지진에 의하여 유발된 23개의 사면붕괴이며 이는 총 10 km²에 걸쳐서 발생하였다. 1964년 알래스카 지진(규모 = 9.2)에서는 269,000 km²에 이르는 대규모의 사면붕괴가 발생하였다. 페루에서 발생한 규모 7.9의 지진은 역사상 가장 파괴적인 사면붕괴를 유발하였다. 이로 인하여 발생한 대규모 낙석으로 인하여 18,000 이상의 사망자가 발생하였으며 30,000 km²에 걸쳐서 수천개의 사면붕괴로 이어졌다. 이외에도 수많은 지진동에 의한 사면피해가 발생하였으며 이를 모두 나열하는 것은 불가능하다.

지진동에 대한 사면의 안정성을 평가하는 가장 정확한 방법은 기하학적 증폭형상과 시간별로 변이하는 안전율을 모사할 수 있는 2차원 또는 3차원 동적해석이다. 하지만 2 - 3차원 동적해석은 수행하기가 어려우며 긴 연산 시간이 소요되므로 널리 수행되지 않고 있다. 이와 같은 이유로, 지진에 의한 관성력을 등가정적하중으로 치환하는 유사정적해석이 가장 널리 사용되고 있다. 유사정적해석은 수행이 간편하다는 장점을 가지고 있지만 다양한 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 기존 유사정적 해석기법의 문제점을 보완하되, 사면의 동적거동을 보다 정확하게 모사하는 수정된 1차원 지반응답해석기법을 장착하여, 동적해석의 정확성과 유사정적해석의 편리성을 동시에 만족하는 新

기술기사

유사정적 해석법을 개발하였으며 이의 정확성을 평가하였다.

2. 유사정적 해석기법

지진이 발생하면 사면에 큰 관성력이 유발되며 토체 내 응력이 증가하게 된다. 관성력을 유발시키는 지진력을 등가정적하중으로 치환하여 Body Force로 사면 토체에 작용하여 해석하는 방법을 유사정적해석법이라 하며 이때의 등가정적하중은 다음과 같이 계산된다(Terzaghi, 1950).

$$F_h = \frac{a_h}{g} W = k_h \frac{a_{max}}{g} W \quad (1)$$

여기서 a_h =수평가속도, a_{max} =최대지반가속도, k_h =수평 지진계수이다. 수직성분을 고려할 경우에는 식 (1)의 h 항을 v 로 변경하면 된다. 식 (1)은 유사정적해석의 정확성은 a_h (또는 k_h)에 따라서 결정됨을 보여준다. 국내의 경우에는 a_{max} 는 일반적으로 내진설계기준(II)에서 제시된 재현주기 1000년(내진성능 1등급) 또는 재현주기 500년(내진성능 2등급) 지진에 상응하는 최대지반가속도(a_{max})가 사용된다. 일반적으로는 S_b 지반이라 가정되며 이와 같은 경우 a_{max} 내진성능 1과 2등급 각각 0.154g와 0.11g이다. 지반의 증폭현상을 모사할 경우, 지반분류별 증폭계수를 적용해야 한다. k_h 는 일반적으로 0.5 ~ 1.0이 적용되고 있다. 이와 같은 방법으로 수행되는 유사정적해석기법에는 다음과 같은 문제점이 있다.

1. a_{max} 의 예측은 수평지반이라고 가정해서 예측하였으며 이는 사면에 적용하는 것은 무리가 있다. 이를 정확하게 예측하기 위해서는 2차원-3차원 동적해석을 수

- 행해야 하나 이는 전술한 바와 같이 사용하기 어렵다.
- 2. 지표면에서 계산되는 최대지반가속도를 사용하기에 깊이에 따른 가속도의 변화가 고려되지 않는다. 깊이에 따른 가속도의 변화를 모사하기 위해서는 1번 항목과 마찬가지로 동적해석을 수행해야 한다.
- 3. 사면 내 깊이에 따른 최대지반가속도의 변화, 그리고 순간적으로 동적하중이 작용하는 점 등을 고려하여 국내외에서 k_h 는 1.0 보다 작은 값이 일반적으로 사용되고 있다. 하지만, k_h 은 경험적으로 산정된 값이며 국가별 설계기준에서 k_h 은 일정하지 않다. 국내에서는 명확한 기준 없이 관례적으로 0.5~ 1.0이 적용되고 있다.

3. 新 유사정적 해석기법 개발

전절에서 기존의 유사정적 해석기법의 문제점을 지적하였다. 본 연구에서는 기존의 해석기법의 문제점을 해결하며 유사정적해석의 정확성을 향상시키기 위하여 동적해석과 유사정적을 혼합시킨 Hybrid 유사정적 해석기법을 개발하였다. 新 유사정적 해석기법의 구성요소인 동적해석 모듈과 유사정적 모듈은 다음과 같다.

3.1 동적해석 모듈

사면의 동적응답 특성을 정확하게 예측하기 위해서는 2차원 이상의 동적해석을 수행해야 하나, 이는 해석의 어려움과 과도한 소요연산시간 등의 이유로 실무에서 수행되는 경우는 거의 없다. 본 연구에서는 동적응답을 보다 간편하게 예측하기 위하여 수정된 1차원 지반응답해석기법을 개발하였으며 이를 新 해석기법에 모듈로서 적용하였다.

일반적인 1차원 지반응답해석은 모든 지층의 경계

수평하며 지반의 응답은 기반암으로부터 수직방향으로 전파되는 수평전단파(SH, horizontal shear wave)에 지배받는다라는 가정을 기본으로 한다. 실제 지진파 전파는 3차원이지만 여러 사례 있어서 지표면 자유장 운동을 비교적 잘 예측하였다(Idriss, 1968).

1차원 지반응답해석은 해석영역에 따라 주파수 영역 그리고 시간영역으로 구분되어진다. 주파수 영역 해석은 입력물성치가 적으며 계산이 빠르다는 장점을 가지고 있지만 지반 거동은 선형 탄성이라고 가정되어진다. 반면, 지진 시 지반의 비선형 거동에 의하여 지반응답은 크게 영향을 받으며 해석 시 이를 사실적으로 모사하는 것은 매우 중요하다. 주파수 영역에서 지반의 비선형 거동을 고려하기 위하여 제안된 방법이 등가선형해석기법이며 시간영역에서는 비선형해석을 통하여 모사하게 된다. 실무에서 비선형해석이 사용되는 경우는 극히 드물며 일반적으로 등가선형해석이 적용되고 있다.

1차원 등가선형해석은 연직방향으로 전파되는 SH파에 대하여 다음과 같은 1차원 파동방정식의 해를 주파수 영역에서 계산하게 된다(Kramer, 1996, Schnabel et al., 1972).

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

여기서 ρ =비중, G =전단탄성계수, u =변위, z =지표면에서부터의 깊이, t =시간이다. 위의 파동방정식은 중복반사 이론에 입각하여 반무한 반탄성체의 기반 위에 복수층지반이 놓여진 경우에 대해 적용하여 해를 구한다(Schnabel, 1972). 각 층은 동일 층 내에서 등방·균질하고 물리적 특성과 역학적 특성은 같다고 가정한다. 이 모델의 진동은 모델 지반을 연직 방향으로 투과 및 반사하여 전달되는 전단파에 의해 발생하고 아래와 같은 변위는 수평 방

향으로만 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 =전파의 상향파와 하향파 성분, h_m =층의 두께

$$k_m^* = \frac{\omega}{(\sqrt{G_m/\rho_m})(1+i\xi_m)} \text{이다.}$$

위의 식에 boundary condition과 compatibility condition을 만족시키게 하면 다음과 같은 지층간의 상호식을 구할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} A_{m+1} &= \frac{1}{2} A_m (1+\alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1-\alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \\ B_{m+1} &= \frac{1}{2} A_m (1-\alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1+\alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{여기서 } \alpha_{m+1}^* = \frac{\rho_m \sqrt{G_m/\rho_m} (1+i\xi_m)}{\rho_{m+1} \sqrt{G_m/\rho_m} (1+i\xi_{m+1})} \text{이다.}$$

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

$$F_{ij}(\omega) = \frac{|u_i|}{|u_j|} = \frac{A_i(\omega) + B_i(\omega)}{A_j(\omega) + B_j(\omega)} \quad (7)$$

전달계수는 한 층에서의 변위를 안다면 모든 층에서의 변위를 쉽게 계산할 수 있는 유용한 식이며 주파수영역 지반진동해석기법의 기본식이다. 주파수영역해석방법은 매우 계산 시간이 빠르고 간편하다는 장점을 가지고 있지만 선형인 재료모델에만 적용될 수 있다는 단점을

기술기사

동시에 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 제안된 해석방법이 등가선형해석방법이며 이는 상당히 정확한 것으로 알려졌다(Kramer, 1996).

사면의 응답은 수평토층과는 상이하며 이의 기하학적 형상에 의한 증폭을 예측하는 것은 매우 중요하다. 과거 일본 마쓰자키에서 기록된 지진들은 지표면의 기하학적 형상으로 인한 증폭현상을 입증한 바 있다(Jibson, 1987). 지표면의 기하학적 형상으로 인한 증폭효과는 지진파와 지표면에서의 상호작용, 지진파의 주파수 특성, 입사각 등 다양한 요소들의 영향을 받으므로, 이를 모델링 및 정량화하는 것은 매우 어렵다.

본 연구에서는 1차원 지반응답해석 틀 안에서 사면의

기하학적 형상으로 인한 증폭현상을 간접적으로 모사하는 수정된 해석기법을 개발하였다. 일반적인 1차원 해석과 수정된 해석기법의 차이점은 심도별 무게의 변화를 모사할 수 있다는 점이다. 사면의 상부층은 Fig. 1과 같이 하부층에 비하여 층의 무게가 작으며, 층의 무게는 심도가 깊어질수록 증가하게 된다. 이와 같이 수직방향으로 변이하는 무게를 모델링하기 위하여 본 연구에서는 층의 밀도(ρ)를 그림 1과 같이 ρ_1 에서 $\rho_{adjusted}$ 로 보정하였으며 이는 파동방정식(식 (2))을 풀기 위한 식 (3) - (4)에 ρ 를 대체하게 된다. 수정된 지반응답해석은 매우 간단하게 기하학적 형상의 증폭정도를 간접적으로 모사할 수 있게 된다.

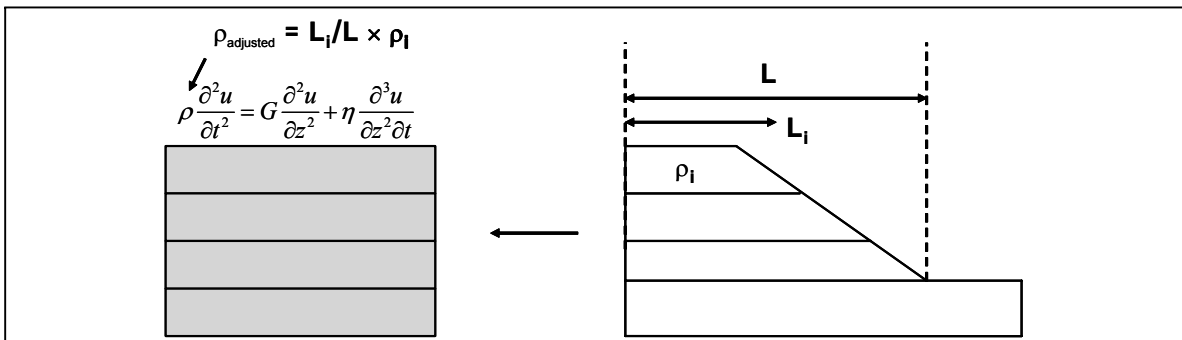


Fig. 1. Schematic representation of mass adjustment in the modified 1D site response analysis method

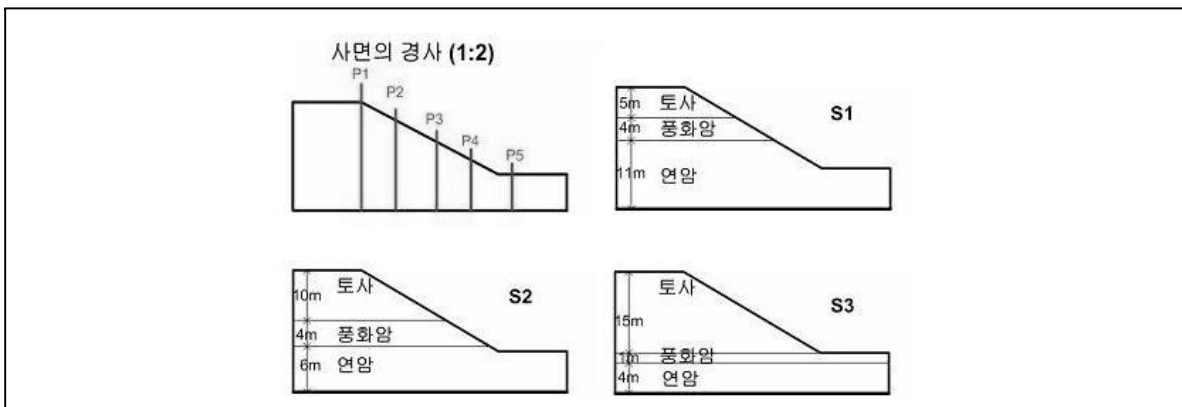


Fig. 2. Slope profiles used for seismic stability analyses

수정된 1차원 지반응답해석의 정확성을 검증하기 위하여 해석결과를 2차원 동적해석과 비교하였다. 1차원 지반응답해석과의 2차원의 동적해석에 사용된 사면은 Fig. 2와 같다. 사면의 종류는 총 세 가지이며 각각에 대하여 사면의 경사도는 1:2를 적용하였다. 지반에 사용된 물성치는 Table 1과 같다.

입력 지진파는 Yerba Buena 지진파를 재현주기 1000년 지진에 상응하도록 스케일링 하였다(Fig. 3). 지반의 전단탄성계수감소 곡선과 감쇠비 곡선은 Table 2와 같이 선정하였다.

수정된 1차원 응답해석이 사면의 심도에 따른 무게변화를 예측할 수 있다고 하나, 해석 1회로 사면표면에서의

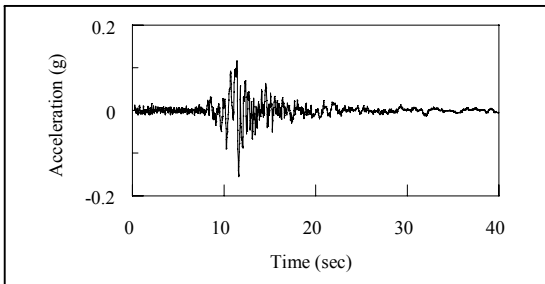


Fig. 3. Yerba Buena Time history used in dynamic analysis

Table 1. Geo-material properties used in the analyses

Geo-material classification	Vs (m/s ²)	γ (tf/m ³)	ϕ (°)	c (tf/m ³)
Sand	300.0	2.0	40	3
Weathered rock	400.0	2.2	30	10
Weak rock	1000.0	2.5	30	15

Table 2. Dynamic curves used

Geo-material classification	Shear modulus reduction curve	Damping curve
Sand	Seed & Idriss (1970) Mean	Seed & Idriss (1970) Mean
Weathered rock	Seed & Idriss (1970) Upper	Seed & Idriss (1970) Lower
Weak rock	Schnabel & Idriss (1972) Rock	Schnabel & Idriss (1972) Rock

응답을 구할 수 없다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 5개 지점(P1 - P5)에서 1차원 응답을 수행되었다. 1차원 해석 소요시간이 일반적으로 1분 미만인 것을 감안하면, 5회의 해석을 수행하여 수 시간이 소요되는 2차원 동적 해석과는 비교가 되지 않을 만큼 효율적이다. Fig. 4는 5회의 1차원 해석으로 계산된 사면표면에서의 최대지반 가속도와 Quake/W를 사용하여 수행된 2차원 요소 동적 해석으로 계산된 결과를 비교하였다. 1차원 지반응답해석은 Mass Adjustment를 하지 않은 Standard 그리고 Mass Adjust한 Modified Version 모두 GeoSHAKE를 사용하였다.

해석결과는 Fig. 4와 같다. 기존의 Standard 1차원 지반응답해석은 무게가 최소인 최상층의 응답을 정확하게 예측하지 못하는 것으로 나타난 반면, Modified 해석은 놀라울 정도로 2차원 동적해석과 유사한 응답을 예측하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 사용된 세 개의 사면에서 공통적으로 나타났으며 Modified 해석기법은 효과적이며 효율적으로 2차원 동적응답을, 즉 기학적 증폭, 충분히 정확하게 모의할 수 있음을 보여주고 있다.

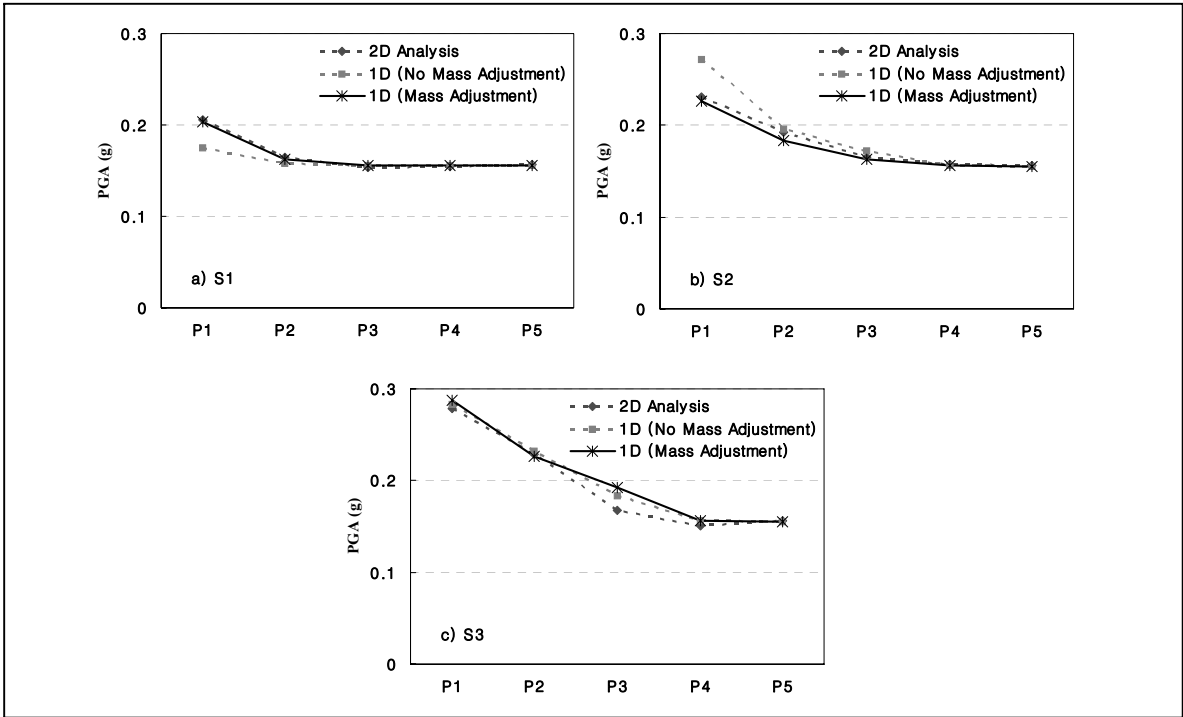


Fig. 4. Comparison of calculated peak ground acceleration along the slope surface using 1D and 2D analyses

3.2 유사정적 해석 모듈

유사정적해석은 일반적인 한계평형해석에 식 (1)과 같은 등가정적 Body Force를 적용하여 안전율을 계산한다. 한계평형해석은 파괴토체를 여러 개의 수직방향으로 분리된 요소에 작용하는 힘의 평형을 고려하여 안전율을 계산하며 토체에 일정한 k_h 을 적용하는 경우에는 매우 효율적이지만, 전절에서 설명된 깊이별로 변화하는 최대 지반가속도의 변화를 반영할 수 없다. 이를 반영하기 위해서는 토체의 요소를 수평방향으로 분리해야 하며, 각각의 요소에 깊이별로 변이하는 Body Force를 적용해야 한다. 본 연구에서는 토체의 요소를 수평방향으로 분리하여 유사정적해석을 수행하는 기법을 개발하였다.

4. 新 유사정적 해석기법 검증

본 연구에서는 개발된 신 유사정적 해석기법의 적절성을 평가하기 위하여 기존의 방법과 계산된 안전율을 비교하였다. 기존의 유사정적해석법은 VisualFEA(2003)를 사용하였으며 이에 포함된 점응력법을 사용하였다. k_h 로는 0.5와 1.0을 모두 사용하였으며 a_{max} 로는 Standard 1차원 해석으로 계산된 사면 최상층의 값을 적용하였다. Fig. 5는 기존 유사정적해석과 新 유사정적 해석법을 비교하고 있다. 비교 결과, 깊이별 지반가속도의 변화를 모사할 수 있는 新 유사정적 해석법은 $k_h = 0.5$ 와 1.0 중간 정도의 안전율을 예측하는 것을 볼 수 있다. 이는, 기존의 해석기법은 지진동에 대한 사면의 안전율을 과대 또는 과소예측할 수 있음을 볼 수 있다.

본 예제는 실제 실무에서와 같이 내진설계기준(II)에 의거하지 않고 지반응답을 수행하여 a_{max} 를 예측하였다. 즉, 기존의 해석으로 명한 기법도 관례적으로 수행되는 방법에 비하여는 정확성이 향상된 방법이다. 관례적으로 지반응답해석을 수행하지 않을 경우, Fig. 5 보다도 차이가 더욱 커질 것으로 판단된다.

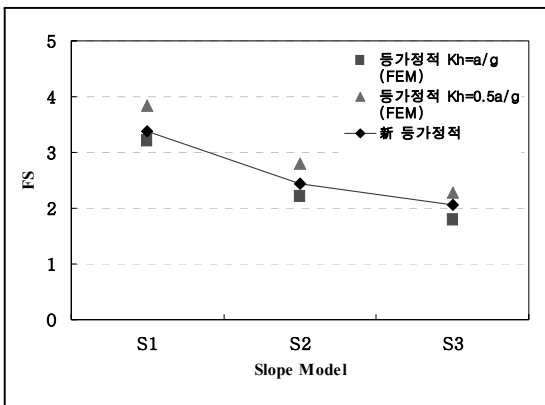


Fig. 5. Comparison of calculated factor of safety

3. 결론

본 연구에서는 지진동에 대한 사면의 안정성을 평가하는 새로운 해석기법을 개발하였다. 해석기법은 동적해석과 유사정적의 두 개의 모듈로 구성되어있다. 동적해석모듈은 1차원 지반응답해석을 기반으로 하되, 깊이별 무게의 변화를 모사할 수 있도록 수정되었다. 수정된 1차원 응답해석의 정확성을 검증하기 위하여 해석결과를 2차원 동적해석과 비교하였다. 수정된 1차원 해석을 5개의 위치별로 수행하여 사면표면에서 최대지반가속도를 계산하였으며 이를 2차원 동적해석과 비교한 결과, 수정된 해석을 2차원 해석을 놀라울 정도로 정확하게 예측하는 것을 볼 수 있다. 반면, 기존의 응답해석은 특히 최상층의 응답을 정확하게 예측하지 못하는 것으로 나타났다. 동적해석모듈의 장점은 정확하게 동적응답을 예측하며, 깊이별 변이하는 최대진반가속도의 예측이 가능하다는 점이다. 동적해석모듈에서 계산된 깊이별 가속도를 파괴토체에 적용하기 위하여 가속도로 인한 Body Force를 분리된 수평요소에 작용하도록 하였으며 이로써 안전율을 계산하였다. 동적해석과 유사해석을 융합한 Hybrid 해석기법은 기존의 해석기법과 비교하였을 경우, 수평지진계수를 사용할 필요가 없으며 동적응답을 정확하게 모사하며 해석에 반영하는 진보된 방법이다.

[참고문헌]

1. 건설교통부(1997), “내진설계기준연구(II)”,
2. Hashash, Y.M.A., and Park, D.(2001), Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment. Engineering Geology, Vol.62, No.1-3, 185-206.
3. Idriss, I.M., and Seed, H.B.(1968). Seismic response of horizontal soil layers, Soil mechanics and foundations, 1003-1029.
4. Jibson, R.(1987). Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis. Transportation Research Record Washington, 9-17.
5. Kramer, S.L.(1996). Geotechnical earthquake engineering, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.
6. 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, Berkeley, CA.
7. Seed and Idriss (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. University of California, Berkeley Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC 70-10, 37
8. Terzaghi, K.(1950). Mechanism of Landslides. The Geological Society of America, Berkeley November, 83-123.
9. VisualFEA(2003). User's Manual, SYTecEnC.



(주) 세원지오텍
SEWONGEOTECH CO., LTD

서울시 강남구 도곡동 424 청암빌딩 4층
TEL : 02 - 574 - 3285
FAX : 02 - 574 - 3289
E-mail : sewon3285@empal.com

- | | |
|------------------|-----------------|
| ▶지반조사 및 물리탐사 | ▶연약지반 개량 및 보강설계 |
| ▶흙막이 및 터널보강 설계 | ▶사면안정 검토 및 보강설계 |
| ▶기타 토질 및 기초분야 설계 | ▶재하시험 및 계측관리 |