

1차원 지반응답해석을 통한 사면의 증폭특성 규명

Estimation of amplification of slope via 1-D site response analysis

윤세웅¹⁾, Se-Ung Yun, 박두희²⁾, Duhee Park

¹⁾ 한양대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

²⁾ 한양대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

SYNOPSIS : The seismic slope stability is most often evaluated by the pseudo-static limit analysis, in which the earthquake loading is simplified as static inertial loads acting in horizontal and/or vertical directions. The transient loading is represented by constant acceleration via the pseudostatic coefficients. The result of a pseudostatic analysis is governed by the selection of the value of the pseudostatic coefficient. However, selection of the value is very difficult and often done in an ad hoc manner without a sound physical reasoning. In addition, the maximum acceleration is commonly estimated from the design guideline, which cannot accurately estimate the dynamic response of a slope. There is a need to perform a 2D dynamic analysis to properly define the dynamic response characteristics. This paper develops the modified one-dimensional seismic site response analysis. The modified site response analysis adjusts the density of the layers to simulate the change in mass and weight of the layers of the slope with depth. Multiple analyses are performed at various locations within the slope to estimate the change in seismic response of the slope. The calculated peak acceleration profiles with depth from the developed procedure are compared to those by the two-dimensional analyses. Comparisons show that the two methods result in remarkable match.

Keywords : Seismic slope stability, Pseudostatic analysis, Pseudostatic coefficients, Seismic site response analysis, Peak acceleration profile

1. 서론

1957년에 발생한 캘리포니아(Daly City, 규모 = 5.3) 지진으로 인하여 총 10 km²에 걸쳐 23개의 사면 붕괴가 유발되었으며 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 18,000명 이상의 사망자가 발생하였으며 30,000 km²에 걸쳐서 수천개의 사면붕괴로 이어졌다(Keefer, 2002).

일반적으로 지진동에 대한 사면의 안정성 평가는 지진계수를 이용하여 지진에 의한 관성력을 등가정적하중으로 치환하는 유사정적 해석법을 사용한다. 하지만 유사정적 해석결과에 가장 큰 영향을 미치는 지진계수는 합리적인 물리적 근거 없이 산정된다. 또한 해석에 사용되는 최대가속도는 경험식이나 1차원 지반응답해석으로 구하기 때문에 사면의 기하학적 형상에 의한 증폭특성을 모사한다고 볼 수 없다. 지진동에 대한 사면의 증폭특성을 정확하게 예측하기 위해서는 2-3차원 동적해석을 수행해야 하지만 해석상의 어려움과 긴 연산시간이 소요되기 때문에 널리 수행되지 않고 있다.

본 연구에서는 1차원 지반응답해석 틀 안에서 사면의 기하학적 형상으로 인한 증폭특성을 간접적으로 모사하기 위하여 사면의 깊이별 무게를 조절한 1차원 지반응답해석을 수행하였으며, 이를 2차원 동적해

석과 비교하여 정확성을 평가하였다.

2. 유사정적 해석

지진동에 의한 지반운동은 가속도 성분으로 인하여 지반에 큰 관성력을 유발시키며 사면 내 응력 변화가 발생한다. 사면의 평형상태를 유지하기 위한 전단응력이 전단강도를 초과할 경우 사면은 불안정해지며 붕괴가 발생할 수 있다. 사면의 안정성을 평가하는 가장 정확한 방법은 동적해석법이나 해석의 어려움, 긴 소요연산시간 등의 이유로 널리 수행되지 않으며 대부분 유사정적 해석이 수행된다. 유사정적 해석방법은 지진력을 동적하중이 아닌 등가정적하중으로 치환하여 Body Force로 사면의 토체에 작용하는 해석방법이다. 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 =수평지진계수이다. 식 (1)은 유사정적해석의 정확성은 a_{\max} (또는 k_h)에 따라서 결정됨을 보여준다. 국내의 경우 a_{\max} 는 일반적으로 내진설계기준(II)에서 제시된 재현주기 1000년(내진성능 1등급) 또는 재현주기 500년(내진성능 2등급) 지진에 상응하는 최대지반가속도가 사용된다. 일반적으로는 S_B 지반이라 가정되며 이와 같은 경우 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.

하지만 a_{\max} 를 수평지반이라고 가정해서 예측하였기 때문에 사면에 적용하는 것은 무리가 있으며, 또한 지표면에서 계산되는 최대지반가속도를 사용하기에 깊이에 따른 가속도의 변화가 고려되지 않는다. 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 는 경험적으로 산정된 값이며 국가별 설계기준에서 k_h 는 일정하지 않다.

3. 1차원 지반응답해석

사면의 기하학적 형상으로 인한 동적응답 특성을 정확하게 예측하기 위해서는 2차원 이상의 동적해석을 수행해야 하나, 이는 해석의 어려움과 과도한 소요연산시간 등의 이유로 실무에서 수행되는 경우는 거의 없다. 본 연구에서는 1차원 지반응답해석기법을 이용하여 보다 간편하게 사면의 동적응답 특성을 예측하였다.

일반적인 1차원 지반응답해석은 모든 지층의 경계가 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; Seed, 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 비선형 해석이 사용되는 경우는 극히 드물며 일반적으로 등가선형해석이 적용되고 있다.

1차원 등가선형해석은 연직방향으로 전파되는 SH파에 대하여 다음과 같은 1차원 파동방정식의 해를 주파수영역에서 계산하게 된다(Kramer, 1996, Schnabel; Lysmer; Seed, 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 중복반사이론에 입각하여 반무한 반탄성체의 기반 위에 복수층지반이 놓여진 경우에 대해 적용하여 해를 구한다(Schnabel; Lysmer; Seed, 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 변위는 수평 방향으로만 발생한다.

주파수영역해석방법은 매우 계산 시간이 빠르고 간편하다는 장점을 가지고 있지만 선형인 재료모델에만 적용될 수 있다는 단점을 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 마쭈자키에서 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.

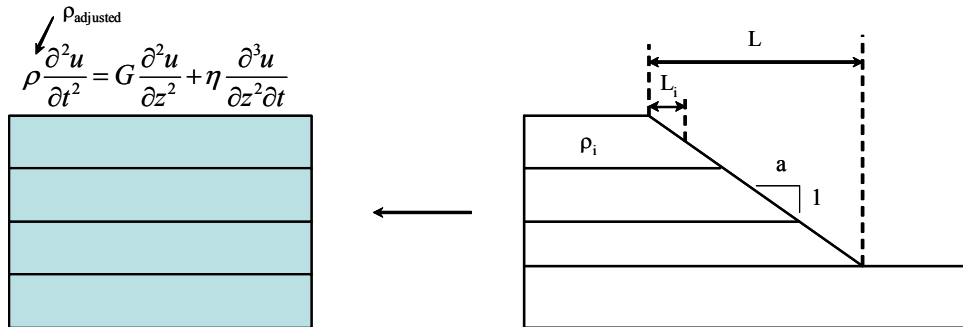


그림 1. 1차원 지반응답 해석에 적용된 밀도 보정법

본 연구에서는 1차원 지반응답해석 틀 안에서 사면의 기하학적 형상으로 인한 증폭현상을 간접적으로 모사하는 해석기법을 적용하였다. 일반적인 1차원 해석과 본 연구에서 적용한 해석기법의 차이점은 심도별 무게의 변화를 모사할 수 있다는 점이다. 사면의 상부층은 그림 1과 같이 하부층에 비하여 층의 무게가 작으며, 층의 무게는 심도가 깊어질수록 증가하게 된다. 이와 같이 수직방향으로 변이하는 무게를 모델링하기 위하여 본 연구에서는 사면을 구성하는 각각의 층의 밀도(ρ_i)를 그림 1과 같이 전체 사면 폭에 대한 각 층의 폭의 비를 이용하여 $\rho_{adjusted}$ 를 식 (3)과 같이 계산한다.

$$\rho_{adjusted} = \frac{L_i + aL/6}{L + aL/3} \times \rho_i \quad (3)$$

여기서 L =사면폭, L_i =사면정점에서부터 i 번째 층 끝단까지의 수평거리, ρ_i = i 번째 층의 밀도이다. 식 (3)은 사면의 경사가 완만할수록 사면폭을 크게 산정하였다. 이는 사면의 경사가 완만할수록 1차원 지반응답해석의 조건과 유사해지기 때문이다.

수정된 1차원 지반응답해석의 정확성을 검증하기 위하여 해석결과를 2차원 동적해석과 비교하였다. 1차원 지반응답해석과의 2차원의 동적해석에 사용된 사면은 그림 2와 같다. 사면의 종류는 총 세 가지이며 각각에 대하여 사면의 경사도는 1:1와 1:2를 적용하였다. 지반에 사용된 물성치는 표 1과 같다. 입력 지진파는 Ofunato 지진파를 재현주기 1000년 지진에 상응하도록 스케일링 하였다(그림 3). 지반의 전단탄성계수감소 곡선과 감쇠비 곡선은 표 2와 같이 선정하였다.

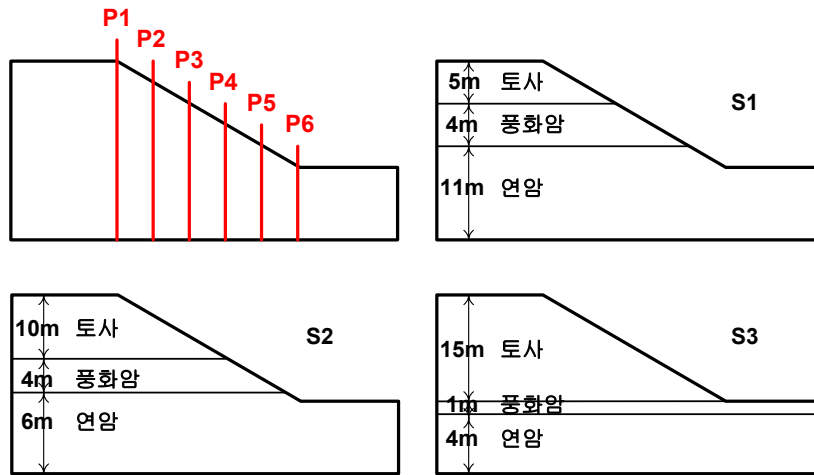


그림 2. 토층에 따른 검토단면

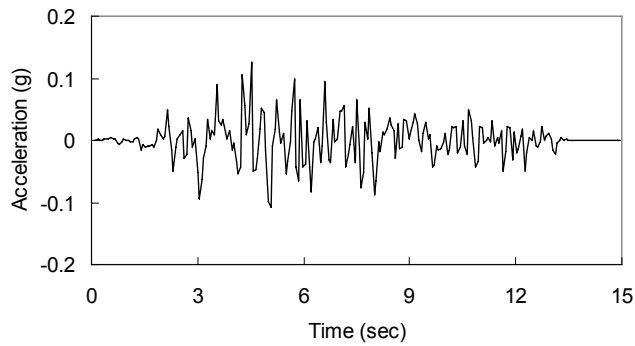


그림 3. 동적해석에 사용된 입력지진파

표 1. 지반의 물성치

구분	Vs (m/s)	γ (tf/m ³)
토사	300.0	2.0
풍화암	400.0	2.2
연암	1000.0	2.5

표 2. 지반의 동적 곡선

구분	전단탄성계수 감소곡선	감쇠비 곡선
토사	Seed 등(1970) Mean 곡선	Seed 등(1970) Mean 곡선
풍화암	Seed 등(1970) Upper 곡선	Seed 등(1970) Lower 곡선
연암	Schnabel 등(1972) Rock 곡선	Schnabel 등(1972) Rock 곡선

본 연구에서는 그림 2와 같이 6개 지점(P1 - P6)에서 1차원 응답을 수행되었다. 1차원 해석 소요시간이 일반적으로 1분 미만인 것을 감안하면, 6회의 해석을 수행하여 수 시간이 소용되는 2차원 동적해석과는 비교가 되지 않을 만큼 효율적이다. 그림 4는 6회의 1차원 해석으로 계산된 사면표면에서의 최대 지반가속도와 Quake/W(2004)를 사용하여 수행된 2차원 요소 동적해석으로 계산된 결과를 비교하였다.

해석결과는 그림 4와 같다. 기존의 1차원 지반응답해석은 무게가 최소인 최상층의 응답을 정확하게 예측하지 못하는 것으로 나타난 반면, 수정된 해석은 2차원 동적해석과 유사한 응답을 예측하는 것으로 나타났다. 수정된 해석법과 2차원 동적해석간의 차이는 사면의 경사와 토층의 깊이가 증가함에 따라서

커지는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 사용된 모든 사면에서 공통적으로 나타났으며 수정된 해석 기법은 효과적이며 효율적으로 2차원 동적응답을 충분히 정확하게 모의할 수 있음을 보여주고 있다.

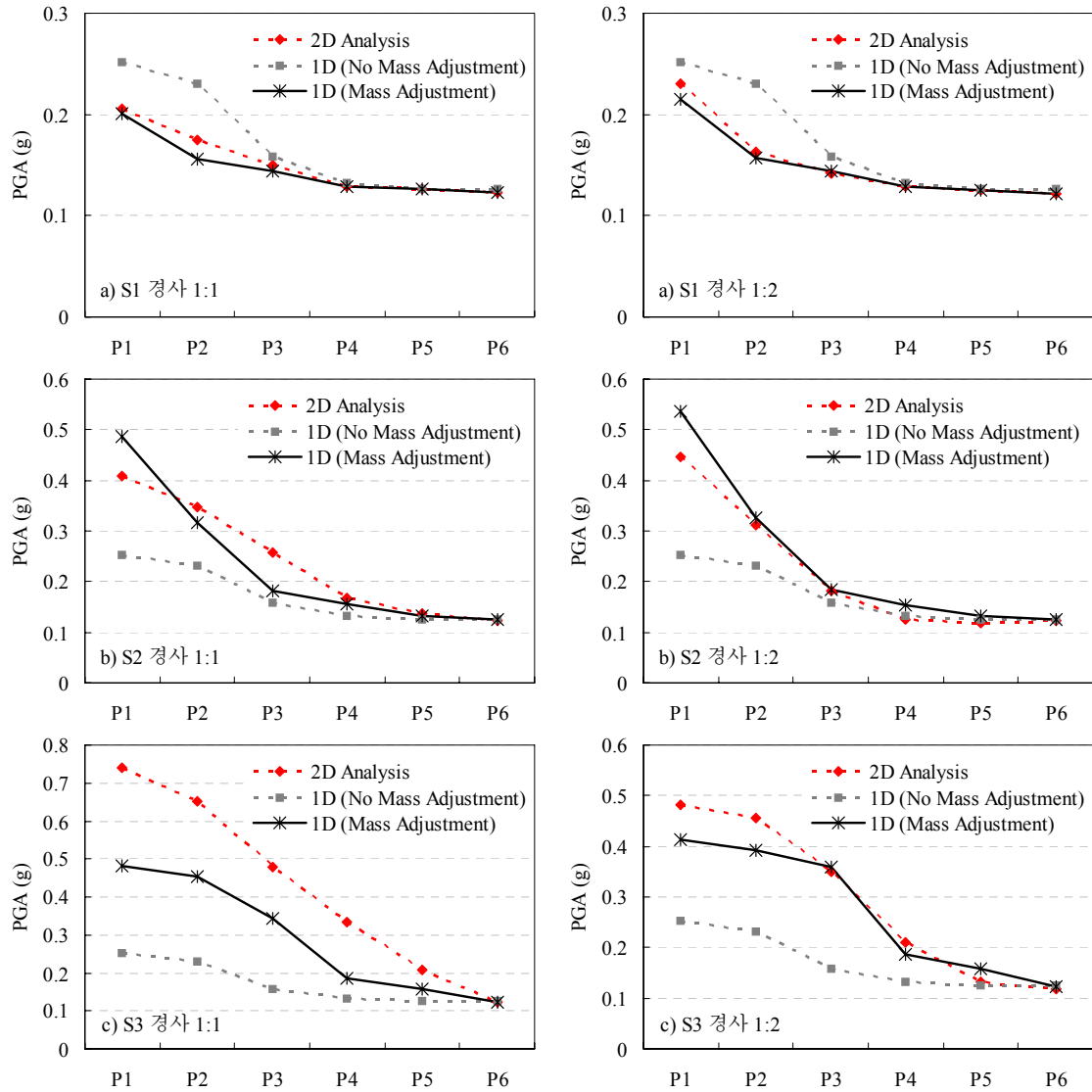


그림 4. 2차원 유한요소법과 1차원 지반응답해석으로 계산된 최대지반가속도 비교

4. 결론

본 연구에서는 1차원 지반응답해석을 통하여 사면의 증폭특성을 규명하였다. 해석기법은 기존의 1차원 지반응답해석을 기반으로 하되, 사면의 깊이별 무게의 변화를 모사할 수 있도록 수정되었다. 수정된 해석기법과 2차원 동적해석의 응답결과를 비교하여 정확성을 검증하였다. 토층과 경사에 따른 6개의 사면에 대하여 수정된 1차원 해석을 6개의 위치별로 수행하여 사면표면에서 최대지반가속도를 계산하였다. 이를 2차원 동적해석과 비교한 결과, 기존의 1차원 응답해석과 비교하여 수정된 해석은 2차원 동적 해석을 상당히 정확하게 예측하는 것을 볼 수 있다. 반면, 기존의 1차원 응답해석은 특히 사면 최상층의 응답을 정확하게 예측하지 못하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 건설교통부(1997), **내진설계기준연구(II)** pp. 29-41.
2. Idriss, I.M., and Seed, H.B.(1968), "Seismic response of horizontal soil layers", *Journal of the Soil mechanics and foundations*, Vol. 94, No. SM4, pp. 1003-1029.
3. Jibson, R.W.(1987), "Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis", *Transportation Research Record Washington*, No. 1411, pp. 9-17.
4. Keefer, D.M.(2002), "Investigating Landslides Caused By Earthquakes-A Historical Review", *Geophysics*, Vol. 23, pp. 473-510.
5. Kramer, S.L.(1996), *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J. pp. xviii-653.
6. QUAKE/W(2004), *User's Manual*, GEO-SLOPE International Ltd.
7. 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.
8. Seed, H.B. and Idriss, I.M.(1970), "Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses", *Earthquake Engineering Research Center*, University of California Berkeley. Report No. EERC 70-10, pp. 41.
9. Terzaghi, K.(1950), "Mechanism of Landslides", *The Geological Society of America*, Berkeley November, pp. 83-123..