산사면의 지진동 증폭 특성

Amplification characteristics of Mountain Slopes

박두희* · 김태균** · 안재광*** · 박인준****

Park, Duhee · Kim, Tae-Gyun · Ahn, Jae-Kwang · Park, Inn-Joon

Abstract

Seismic stability of slopes is most often assessed through pseudo-static analysis or Newmark displacement method. In both types of analyses, it is necessary to define the maximum acceleration of the slope. It is current practice to determine the acceleration using the seismic site coefficients. However, the site coefficients are not compatible with slopes, since they were developed for horizontally layered soil profiles. In this study, a series of pseudo-static and dynamic analyses are performed on various mountain slopes, from which the amplification factors are derived. A new method for calculating the amplification factors is proposed in this study. In a slope, the ground acceleration varies in both the vertical and horizontal directions. In the proposed procedure, the calculated accelerations at each node inside the slope failure mass are summed. The amplification factor is defined as the ratio of the average acceleration of the soil mass to the rock outcrop peak acceleration. The factors calculated using the proposed method is shown to be close to 1 for mountain slopes modeled in this study. The factors are approximately 14-50% lower than coefficients developed for horizontal soil deposits. The derived factors are lower because even though the amplification at the slope crest is high, as well as on the surface of the slope, the amplification is low near the bottom of the soil layer. In summary, it is demonstrated that the use of the site coefficients derived for horizontally layered soil profile will lead to significant conservative estimate of the slope stability.

Key words : Slope stability, Amplification factor, Seismic stability, Mountain slope

요 지

지진 시 산사면의 안전성은 일반적으로 유사정적해석법이나 Newmark 변위법으로 평가된다. 두가지 방법에서 모두 사면에서의 최대가속도를 정의해야 하며 이는 설계기준에 제시된 지진계수를 이용하여 산정한다. 하지만 지진계수는 수평지반 지표면에서의 최대응답을 나타내므로 사면에는 원칙적으로 적용 가능하지 않다. 본 연구에서는 산사면에서의 증폭계수를 도출하기 위하여 다양한 두께와 전단파속도의 산사면에 대한 일련의 2차원 유사정적해석과 동적해석을 수행하였다. 산사면의 증폭계수는 수평지반과는 다르게 지표면에서의 응답을 적용하는 것이 아니라 시간이력에 따라 사면 파괴토체 내부에서 발생하는 모든 가속도 합 최대값과 암반노두에서의 최대지반가속도의 비율로서 계산하는 방법을 새롭게 적용하였다. 이와 같이 계산된 증폭계수는 평균값이 1에 가까우며 사면토체의 평균가속도는 크게 증폭되지 않는 것으로 나타났다. 경사가 30°인 산사면의 증폭계수는 수평지반의 계수에 비해서 14-50% 작은 것으로 나타났다. 이는 사면의 정상부 및 지표면 부근에서는 크게 증폭이 되지만 하부 경계면에서는 증폭이 작아서 평균을 계산하였을 경우 작아지기 때문이다. 결론적으로, 수평지반에 대해서 제시된 증폭계수를 산사면에 적용할 경우, 증폭을 크게 과대예측할 수 있으므로 본 연구에서 제시된 증폭계수를 사용하는 것이 보다 합리적인 것으로 판단된다.

핵심용어 : 사면안정성, 증폭계수, 지진안전성, 산사면

1. 서 론

사면의 지진에 대한 안정성을 평가하기 위해서는 유사정적

해석 또는 Newmark 변위법이 널리 사용된다(MLTM, 2009). 두 가지 방법 모두 사면에서 발생하는 최대지반가속도를 예측해야 적용 가능하며 내진설계기준에는 수평지반에서

*정회원, 교신저자. 한양대학교 건설환경공학과 부교수(Tel: +82-2-2220-0322, Fax: +82-2-2220-1945, E-mail: dpark@hanyang.ac.kr)

Corresponding Author. Member. Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

**한양대학교 건설환경공학과 대학원생

Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

***한양대학교 건설환경공학과 박사과정

Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

****한서대학교 토목공학과 교수

Professor, Department of Civil Engineering, Hanseo University

의 증폭특성을 나타내는 지진계수를 사용하여 최대지반가속도를 계산하도록 제시하고 있다. 하지만 이와 같은 방법은 경사진 구조의 증폭계수로 사용하기에는 적절하지 않으며 특히 암반 위에 얇게 피복된 산사면에는 적용될 수 없다. 또한, 사면의 기하학적 형상으로 인하여 추가적인 증폭이 발생하여 사면 정상부에서의 응답은 하단면에서보다 1.25~1.50배 큰 것으로 알려졌으나(Ashford and Sitar, 2002; Gazetas and Dakoulas, 1992; Jibson, 1987; Pedersen et al., 1994; Rathje and Bray, 2001) 이와 같은 경사면의 사실적인 증폭특성을 기존의 설계기준으로는 예측할 수 없다. 그렇다고 기존의 연구결과를 적용하는 것도 합리적이지 않다. 이들은 대부분 제방, 흙댐, 매립지와 같은 완만한 경사면에서 수행된 결과이거나 국부적인 증폭특성을 분석하였기 때문이다.

본 연구에서는 다양한 산사면에 대한 일련의 2차원 동적해석을 수행하여 예상 사면 파괴토체에서의 응답을 계산하였으며 증폭계수를 도출하였다. 증폭계수는 기존방법의 모순과 단점을 근본적으로 극복하는 합리적이고 사실적인 방법이며 이는 본문에서 자세하게 설명하였다. 도출된 증폭계수는 기존에 제시된 계수와 비교하여 적절성을 평가하였다.

2. 지진에 대한 사면의 안정성 평가 방법

건설공사 비탈면 설계기준(MLTM, 2009)은 비탈면의 지진시 안정성은 간편 해석법 또는 상세 해석법으로 평가할 것을 제시하고 있다. 여기서 간편 해석법은 유사정적해석과 Newmark 변위법을 의미하며 상세 해석법은 동적해석법을 나타낸다. 유사정적해석법은 동적 지진하중을 등가 정적하중으로 치환하여 사면의 파괴토체에 적용하는 방법으로 이를 통하여 사면의 지진에 대한 안전율을 계산한다. 등가 정적하중은 지진계수에 토체의 무게를 곱하여 계산하며 이때 지진계수는 일반적으로 내진설계기준(MOCT, 1997)에서 수평지반에 대하여 제시된 지진계수의 50%를 적용한다(MLTM, 2009). 유사정적해석은 계산과정이 간단하며 소수의 지반 물성치만을 필요로 하므로 수행하기 쉬운 장점을 가지고 있으므로 실무에서 가장 널리 사용된다. 하지만 시간 및 공간적으로 변이하는 지진하중을 고려할 수 없으며 이를 지진계수로 단순화해야 하는 단점이 있다. 유사정적해석법으로 소요되는 안전율을 확보하지 못하는 경우, 추가적으로 Newmark의 변위법을 수행하여 사면의 안정성을 평가할 수 있다. Newmark의 변위법은 Newmark 활동블록이론(1965)을 기초로 하는 모든 경험 및 해석해를 포괄적으로 의미하며 대표적인 방법으로는 Franklin and Chang (1977), Makdisi and Seed (1978), Jibson (2007) 등에 의한 방법이 있다. Newmark의 변위법은 사면의 안전율이 1이 되는 항복가속도를 초과하는 지속시간 동안에 발생하는 영구변위를 계산하며 이를 적용하기 위해서는 유사정적해석으로부터 항복가속도를 계산해야 하며 사면에서 발생하는 최대가속도를 예측해야 한다. Newmark의 변위법 적용 시에도 유사정적해석과 동일하게 내진설계기준에 제시된 지진계수를 적용하여 최대가속도를 계산해야 한다. 즉, 유사정적해석법 그리고 Newmark의 변위법 모두를 적용하기

위해서는 사면의 최대가속도를 계산해야 하며 내진설계기준에는 수평지반에 대해서 제시된 지진계수로써 이를 계산할 것을 권장하고 있다. 하지만 내진설계기준에 제시된 지진계수를 산사면에 적용하기에는 다음과 같은 문제가 있다:

- 국내 내진설계기준의 지반분류는 미국 기준과 동일하게 심도 30 m까지의 평균 V_s 또는 N 치를 기반으로 한다. 이와 같은 지반분류법은 얇은 심도 특성을 보이는 국내 지반에 적절하지 않으며 특히 산사면에는 적합하지 않다.

- 사면에서의 증폭특성은 수평지반과는 상이하므로 수평지반을 대상으로 제시된 지진계수를 사면에 적용하는 것은 적절하지 않다. 또한, 지진 시 사면에서 발생하는 가속도는 깊이 그리고 수평방향으로 모두 공간적으로 변이하므로 지표면의 최대값을 나타내는 지진계수를 적용하는 것은 매우 보수적이다.

- 기존에 제방, 댐, 그리고 매립지와 같이 경사가 완만하며 경계면은 수평방향에 가까운 흙으로 구성된 사면에 대한 증폭 특성은 분석된 사례가 있으나 기반암-토층 경계면이 경사진 산사면에 대해서는 정밀한 해석이 수행된 사례가 극히 제한적이어서 이에 대한 정보가 없다.

3. 수치해석

대상 산사면을 결정하기 위하여 총 33개 국내 산사면 자료를 수집하여 분석하였다. 수집된 자료를 분석한 결과, 대부분 경사진 기반암에 토사층이 피복한 형태를 보이고 있으며, 토사층의 두께는 1.0 m에서 16.0 m까지 다양한 것으로 나타났다. 사면의 경사는 최대 20~30° 사이에 분포하였다. 본 연구에서는 사면 경사는 30°로 고정하였고 토사층의 두께는 조사된 범위를 고려하여 2.5, 5.0, 10.0, 15.0 총 4가지를 적용하였다. 토사층의 전단파 속도는 내진설계기준연구(II)(MOCT, 1997)에 제시된 범위를 포함하기 위하여 150, 200, 250, 300, 350m/s로 5가지를 적용하였다.

Fig. 1에는 해석에 적용된 단면을 도시하였다. 해석 영역은 폭 200 m × 최대높이 70 m를 적용하였다. 해석 영역의 폭은 다양한 해석을 수행하여 토사층에 영향을 주지 않는 최소 영역을 시행착오를 통하여 결정하였다. 파괴면 및 항복가속도의 산정은 유사정적해석을 수행하였으며 상용프로그램인 Slope/W(GEO-SLOPE International Ltd., 2004)를 사용하였다. 사면의 동적 거동은 유한차분법으로 운동방정식을 시간영역에서 푸는 FLAC^{2D}(Itasca Consulting Group, 2008)를 사용하여 모사하였다. 구성모델으로는 Mohr-Coulomb 모델과 Sig3 모델을 조합하여 적용하였다. Mohr-Coulomb 모델은 국

Fig. 1. Modeling of mountain slopes

내외에서 지진해석에서 가장 널리 사용되는 구성모델이기는 하나 미세변형률에서의 비선형성을 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 이를 모사하기 위해서 FLAC^{2D}에 탑재되어 있는 Sig3 모델을 Mohr-Coulomb 모델과 융합하여 적용하였다. Sig3 모델은 다음과 같이 정의된다

$$M_s = \frac{a}{1 + \exp(-(L - x_0)/b)} \quad (1)$$

여기서, M_s 은접선전단탄성계수, $L = \log(\gamma)$, x_0 , a , b 는 curve fitting 변수이다. Mohr-Coulomb의 강도정수로는 $c' = 0$, $\phi = 30^\circ$, $\psi = 0^\circ$ 를 적용하였다. Sig3모델의 변수는 Darendeli(2001) 비선형 동적 곡선을 맞추도록 산정되었다. 본 연구에서는 총 4가지 토층 두께를 적용하였으며 각 토층 중앙 구속압에서 Darendeli 곡선 맞춤형 변수를 산정하였으며 이는 Table 1에 정리하였다. Fig. 2에는 깊이 7.5 m(=토층 두께:15 m)에서의 Darendeli 곡선과 Sig3 모델로 계산된 동적곡선을 비교하고 있다. Sig3 모델은 전단탄성계수와 감쇠비 곡선 모두 Darendeli가 제시한 곡선과 유사한 것을 확인할 수 있다.

시간영역에서 수행되는 동적 해석에서 지반의 저변형률 감쇠는 다음과 같은 Rayleigh 공식으로 모델링한다.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

여기서 $[C]$ = 감쇠행렬, $[M]$ = 질량행렬, $[K]$ = 강성행렬이며 α 와 β 는 식 (3) 및 식 (4)와 같이 계산되는 변수이다.

$$\alpha = 4\pi\zeta \frac{f_m f_n}{f_m + f_n} \quad (3)$$

Table 1. Sig3 parameter

Depth, D (m)	a	b	x_0
2.5	1	-0.65	-1.79
5.0	1	-0.65	-1.692
10.0	1	-0.65	-1.582
15.0	1	-0.65	-1.53

Fig. 2. Dynamic curves used in the analyses

$$\beta = \frac{\zeta}{\pi f_m + f_n} \quad (4)$$

여기서 ζ 는 감쇠비, f_m 과 f_n 은 Rayleigh 공식의 주파수 의존성을 결정하는 주파수이다. 실제 지반의 감쇠는 진동 주파수의 영향을 받지 않으나 Rayleigh 공식은 진동 주파수의 영향을 받게 된다. 따라서 Rayleigh 공식 적용 시, 진동 주파수의 영향을 최소화하는 f_m 과 f_n 조합을 결정해야 한다. f_m 과 f_n 이 지반진동해석에 주는 영향에 대해서는 많은 연구가 수행된 바 있다. Kwok et al. (2007)은 시간영역 지반응답해석 프로그램에 대한 비교연구에서 f_m 과 f_n 으로 토층의 1차와 5차 mode를 사용할 것을 권장하였다. 토층에 대한 해석만을 수행하는 경우에는 전체 토층의 고유주기를 계산하여 f_m 과 f_n 을 계산하면 된다. 하지만 본 연구와 같이 토층과 암반층이 혼재되어 있는 경우에는 토층에 대해서는 위와 같이 f_m 과 f_n 을 적용하면 되지만 암반층에 대해서는 이를 적용할 수 없다. 암반층에서는 지진파가 크게 증폭되지 않으며 주파수 특성이 크게 바뀌지 않으므로 f_m 은 암반층에서의 1차 모드 주파수를 적용하고 f_n 은 지진파의 탁월주파수를 적용해야 한다.

요소의 크기(Δt)는 지진파 전파를 정확하게 모사할 수 있도록 Kuhlemeyer and Lysmer (1973)가 제안한 최대 크기보다 작게 적용하였다

$$\Delta t \leq \frac{\lambda}{10} \quad (5)$$

여기서, λ 는 최대파장이다. 하부 경계조건으로는 Lysmer and Kuhlemeyer(1973)가 제안한 점성댐퍼를 적용하여 사면 표면에서 반사된 하향 지진파를 흡수하도록 하였다. 측면 경계조건으로 자유장 경계를 적용하여 마찬가지로 반사파가 내부로 다시 재입사하는 것을 방지하였다. 입력지진파의 최대지반가속도는 내진설계기준연구(II)(MOCT, 1997)에 제시된 재현주

Fig. 3. Input motion used in the analyses

Fig. 4. Comparison of input motion (a) original recorded data (b) baseline corrected data

기 1000년 지진의 PGA인 0.154 g로 스케일링된 Ofunato와 Friuli 지진파(Italy, 1976, 규모 6.4), 인공지진파를 사용하였다(Fig. 3). 사용된 지진파는 모두 Baseline correction을 수행한 후 적용하였다(Fig. 4).

4. 해석결과

본 연구에서는 사면의 증폭특성을 정량화하며 지진계수로 표현하기 위하여 사면 해석 영역과 동일한 높이의 암반 Column에 대한 동적해석을 수행하였으며 암반 노두에서의 최대 가속도를 계산하였다. Fig. 5는 토층두께 15 m, 전단파 속도 150 m/s인 사면에 입력 지진파 Ofunato 지진파를 적용한

해석결과이며 사면에서 최대가속도가 발생한 시간단계 ($t = 5.36s$)에서의 수평방향 가속도 분포도 스텝샷이다. 사면에서의 최대지반가속도는 전술한 바와 같이 수평지반과는 다르게 단지 깊이에 따라서 변이하는 것이 아니라 수평방향으로도 변이하며 사면의 정상부에서 특히 크게 증폭된다. 하지만 이는 정상부근에서 국부적으로 발생하며 이외의 위치에서는 정상부에 비하여 상대적으로 작은 가속도가 발생한다. 전체적으로 사면의 지표면에서의 응답이 하부 경계면에 비해서 큰 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 사면에 작용하는 가속도는 위치별로 큰 차이를 보이고 있으며 Fig. 5에는 표현이 되지 않았지만 시간단계별로도 변화폭이 매우 크다

본 연구에서 사면의 증폭계수를 구하는 목적은 궁극적으로

Fig. 5. Snapshot of contour of horizontal acceleration at $t = 5.36s$

(a) Depth = 15 m

(b) Depth = 5m

(c) Depth = 15m

(d) Depth = 5m

Fig. 6. Comparison of failure surface calculated by (a), (b) limit equilibrium and (c),(d) dynamic analysis

지진 시 사면의 안전율을 구하거나 영구변위를 계산하는 것이다. 안전율과 영구변위는 모두 사면 파괴토체에 대해서 계산된다. 따라서 증폭계수를 수평지반에서와 같이 지표면과 하부경계면에서의 응답의 비율 또는 사면 전체에서 대해서 계산하는 것은 의미가 없으며 파괴토체에 대해서 구해야 안전율과 영구변위 계산 시 적용할 수 있다. 그리고 사면 파괴면 외부에 작용하는 가속도는 사면의 붕괴에 영향을 미치지 않으므로 앞선 방법은 적절하지 않다.

파괴토체에 작용하는 가속도를 계산하기 위해서는 먼저 파괴토체를 결정해야 한다. 본 연구에서는 한계평형해석과 유한차분해석법을 적용한 동적해석의 결과를 비교하여 파괴면을 산정하였다. 동적해석에서는 최대전단변형률이 발생하는 위치를 연결해서 파괴면을 산정하였다. Fig. 6은 Fig. 5와 동일한 지반 조건을 적용한 해석 결과이며 Fig. 6a와 b는 각각 한계평형해석과 동적해석으로 계산된 파괴면을 나타낸다. 하지만 동적해석에서는 사면에 충분한 변형을 유발하기 위하여 입력지진파의 최대가속도를 한계평형해석에서 계산된 항복가속도($PGA = 0.194 \text{ g}$)와 일치하도록 스케일링 하였다. 동적해석으로 계산된 파괴면은 토층 두께가 얇을수록 토층 전체가 파괴되는 무한사면의 파괴 형태를 보였으며, 두꺼울수록 원호파괴의 형태를 나타냈다. 이는 한계평형해석으로 계산된 원호파괴 형태와 완벽하게 일치하지는 않지만 비교적 유사한 것으로 나타났다. 아래의 해석에서는 한계평형해석과 동적해석에서 계산되는 파괴면은 일치한다고 가정하였으며 한계평형해석에서 계산된 파괴면 내부 노두에서의 평균가속도를 사면파괴토체의 가속도로 산정하였다. 모든 노두에서의 가속도 시간이력을 추출해서 계산하는 과정은 시간소모적이므로 FLAC의 내장함수(fish 함수)를

코딩하여 데이터를 처리하였다. 계산된 사면토체에서의 최대가속도와 암반노두에서의 최대가속도의 비율로써 증폭계수를 산정하였다.

계산된 증폭계수는 Fig. 7a와 b에 각각 토층 두께와 전단파속도의 함수로 나타났다. 증폭계수의 범위는 0.75-1.45이며 두께 별 평균은 0.93-1.07, 전단파속도 별 평균은 0.96-1.01 인 것으로 나타났다. 두께가 증가할수록 평균적으로 증폭계수

Fig. 7. Amplification factor as functions of (a) soil depth and (b) shear wave velocity

Fig. 8. Amplification factor as function of V_s/D for (a) $D < 10$ m (site class H_1) (b) $D = 10 \sim 20$ m (site class H_2)

가 증가하며 결과의 분산정도도 동시에 커지는 것을 확인할 수 있다. 특히 두께가 5m까지는 증폭계수는 최대 1.1로 증폭이 크지 않거나 오히려 감폭되는 것으로 나타났다. 전단파속도는 뚜렷한 경향성을 보이지 않으며 크기에 관계없이 평균이 일정한 것으로 나타났다.

Fig. 8에는 증폭계수와 V_s/D (전단파속도와 토층 두께의 비율)을 비교하였다. 토층 두께가 결과에 큰 영향을 미치는 것을 고려해서 10미만과 10이상일 경우 두가지로 분류해서 증폭계수를 각각 Fig. 8a와 b에 정리하였다. 두께의 영향은 수평지반에서도 중요한 것으로 연구되었으며 Kim et al. (2008)은 지진계수를 두께와 평균 전단파속도의 함수로 표현하였다. Table 3은 Kim et al. (2008)의 지진계수를 나타낸

Table 4. Calculated amplification factor

	Site	This study	Ratio (%)
H_1 -1	1.37	0.97	71%
H_1 -2	1.08	0.93	86%
H_2 -1	1.97	1.01	51%
H_2 -2	1.43	1.05	73%

다. Kim et al. (2008)은 두께 10 m 미만과 10 m 이상 / 20 m 미만의 지반을 각각 H_1 과 H_2 로 표현하였으며 평균 전단파속도에 따라서 이들을 세분화하였다. 지진계수는 두께와 평균 전단파속도에 모두 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 반면 Fig. 8a와 b 모두 V_s/D 의 비율에 따라서 뚜렷한 경향성을 보이지는 않는 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서는 파괴토체에서의 평균값을 계산하므로 지표면에서의 큰 증폭이 결과에 큰 영향을 미치지 않기 때문인 것으로 판단된다. 이는 본 연구에서 계산된 결과와 Kim et al. (2008)의 계수를 비교하였다. Kim et al. (2008)의 분류기준인 H_1 -1과 H_1 -2는 증폭계수가 각각 1.37과 1.08인 반면 본 연구에서 계산된 증폭계수는 각각 0.97과 0.93으로 약 14-30% 작은 것으로 나타났다. H_1 -1과 H_1 -2는 Kim et al. (2008)에 비하여 27-50% 작은 것으로 나타났다. 즉, 수평지반의 증폭계수를 적용할 경우, 사면토체에 작용하는 지진하중을 크게 과대예측하게 된다. 단, 본 연구에서는 사면경사와 전단강도의 영향을 고려하지는 않았으므로 추후 이를 추가적으로 고려하는 해석을 수행하여 산사면에서의 증폭계수를 보정해야 할 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 다양한 토층 두께와 전단파속도의 산사면에 대한 한계평형해석과 동적해석을 수행하여기하학적 증폭특성을 분석하였으며 나아가 증폭계수를 도출하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

Table 2. Material properties used in finite difference analyses

	Density ρ (kN/m ³)	Cohesion c' (kPa)	Friction angle ϕ (°)	Poisson ration ν	Shear wave velocity V_s (m/s)
Soil	20.0	1.0	35.0	0.30	150.0 ~ 350.0
Rock	25.0	1.50e+04	55.0	0.25	2000.0

Table 3. Short-period site coefficients, F_a (Kim et al., 2008)

Site Class	H (m)	$V_{s, \text{Soil}}$ (m/s)	F_a		
			0.11g	0.154g	0.220g
H_1 -1	$H < 10$	$V_{s, \text{Soil}} < 300$	1.34	1.37	1.41
H_1 -2		$V_{s, \text{Soil}} \geq 300$	1.08	1.08	1.09
H_2 -1	$10 \leq H < 20$	$V_{s, \text{Soil}} < 300$	1.94	1.97	2.02
H_2 -2		$V_{s, \text{Soil}} \geq 300$	1.04	1.43	1.47
H_3 -1	$H \geq 20$	$V_{s, \text{Soil}} < 200$	1.42	1.26	1.1
H_3 -2		$200 \leq V_{s, \text{Soil}} < 360$	2.11	2.04	1.96
H_3 -3		$V_{s, \text{Soil}} \geq 360$	1.67	1.69	1.69

- 1) 산사면에서 발생하는 가속도는 위치에 따라서 크게 변이하는 것으로 나타났다. 지진 시 산사면에서의 응답은 사면의 정상부에서 가장 크나 이는 국부적으로 발생하는 것으로 나타났다. 이외의 위치에는 사면의 지표면에서 응답이 가장 크게 계산된 반면 사면의 하부경계면에서는 증폭이 크지 않은 것으로 나타났다.
- 2) 기존에는 수평지반의 지표면에서의 응답을 나타내는 증폭계수를 산사면에 적용해 왔다. 하지만 이는 산사면에서의 공간적으로 변이하는 증폭특성을 반영하지 못한다. 본 연구에서 제시된 사면 파괴토체의 평균값을 적용하는 방법은 기존 방법에 비하여 합리적이며 정확한 기법인 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구에서 제안된 방법으로 경사도가 30° 인 산사면에서의 증폭계수를 산정한 결과, 계산된 계수는 수평지반의 계수에 비하여 최소 14% 최대 50% 작은 것으로 나타났다. 산사면의 증폭계수는 두께가 10 m 미만인 경우에 1에 가까워 증폭효과를 고려할 필요가 없으며 기존의 계수를 적용할 경우, 증폭을 과대예측하며 보수적인 예측을 하는 것으로 나타났다. 두께가 10 m 이상일 경우에는 증폭비가 1.2-1.5까지 커질 수 있으나 평균을 적용할 경우에는 1.03으로 10 m 이하인 경우와 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 10 m 이상일 경우에는 기본적으로는 증폭계수 1을 적용하되 중요한 부지로 판단될 경우 사면 고유의 증폭해석을 수행해서 증폭계수를 산정하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업인 ‘지진시 사면붕괴 등 지반피해 예측기술 개발 [NEMA-지진-2012-2]’ 과 한국학술진흥재단 기본연구지원사업의 ‘사면 및 제방 지진해석 및 내진설계 알고리즘 개발(2011-0012486)’의 과제 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- Ashford, S.A., and Sitar, N. (2002) Simplified method for evaluating seismic stability of steep slopes, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 128, No. 2, pp.119-128.
- Darendeli, M.B. (2001) Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves, PhD dissertation, Univ. of Texas at Austin, Austin, T.
- Franklin, A.G., and Chang, F.K. (1977) Earthquake resistance of earth and rock-fill dams: Permanent displacements of earth embankments by Newark sliding block analysis, Report 5. *U.S. Army Engineer Water way Experiment Station*, Vicksburg, Miss., pp S-71-17.
- Gazetas, G., and Dakoulas, P. (1992) Seismic analysis and design of rockfill dams: state-of-the-art, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp.27-61.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2004) *SLOPE/W for slope stability v.2004*
- Itasca Consulting Group (2008) *FLAC (Fast Lagrangian Analyses of Continua) v.6.0.*
- Jibson, R.W. (1987) Summary of research on the effects of topographic amplification of earthquake shaking on slope stability, Virginia, U.S. Geological Survey.
- Jibson, R.W. (2007) Regression models for estimating coseismic landslide displacement, *Engineering Geology*, Vol. 91, No. 2, pp.209-218.
- Kim, D.S., Lee, S.H., and Yoon, J.K. (2008) Development of site classification system and modification of site coefficients in Korea based on mean shear wave velocity of soil and depth to bedrock, *KSCE Journal*, Vol. 28, No. 1C, pp.63-74.
- Kuhlemeyer, R.L., and Lysmer, J. (1973) Finite element method accuracy for wave propagation problems, *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, Vol. 99, No. Tech Rpt.
- Kwok, A.O.L., Stewart, J.P., Hashash, Y.M.A., Matasovic, N., Pyke, R., Wang, Z., and Yang, Z. (2007) Use of exact solutions of wave propagation problems to guide implementation of nonlinear seismic ground response analysis procedures, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 11, pp.1385-1398.
- Makdisi, F.I., and Seed, H.B. (1978) Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 104, No. GT7, pp.849-867.
- MLTM (2009) Design criteria of Slope, Ministry of Land, Transportation and Maritime (in Korean).
- MOCT (1997) Korean Seismic Design Standard, Ministry of Construction and Transportation (in Korean).
- Newmark, N.M. (1965) Effect of earthquakes on dams and embankments, *Geotechnique*, Vol. 15, No. 2, pp.139-160.
- Pedersen, H., Sánchez-Sesma, F., and Campillo, M. (1994) Three-dimensional scattering by two-dimensional topographies, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 4, pp.1169-1183.
- Rathje, E.M., and Bray, J.D. (2001) One- and two-dimensional seismic analysis of solid-waste landfills, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 38, No. 4, pp.850-862.

© Received March 7, 2013

© Revised April 1, 2013

© Accepted April 8, 2013