

지진 시 산사면의 영구변위 추정식 개발

Development of Permanent Displacement Model for Seismic Mountain Slope

이 중 후¹ Lee, Jong-Hoo

박 두 희² Park, Duhee

안 재 광³ Ahn, Jae-Kwang

박 인 준⁴ Park, Inn-Joon

Abstract

Empirical seismic displacement equations based on the Newmark sliding block method are widely used to develop seismic landslide hazard map. Most proposed equations have been developed for embankments and landfills, and do not consider the dynamic response of sliding block. Therefore, they cannot be applied to Korean mountain slopes composed of thin, uniform soil-layer underlain by an inclined bedrock parallel to the slope. In this paper, a series of two-dimensional dynamic nonlinear finite difference analyses were performed to estimate the permanent seismic slope displacement. The seismic displacement of mountain slopes was calculated using the Newmark method and the equivalent acceleration time history. The calculated seismic displacements of the mountain slopes were compared to a widely used empirical displacement model. We show that the displacement prediction is significantly enhanced if the slope is modeled as a flexible sliding mass and the amplification characteristics are accounted for. Regression equation, which uses PGA, PGV, Arias intensity of the ground motion and the fundamental period of soil layer, is shown to provide a reliable estimate of the sliding displacement. Furthermore, the empirical equation is shown to reliably predict the hazard category.

요 지

지진에 대한 사면 재해도 작성 시 일반적으로 Newmark 활동블록 이론에 기초한 변위 추정식이 사용된다. 하지만 기존에 제안된 추정식들은 활동면에서의 동적 응답을 고려하지 않고 제방, 흙댐, 매립지 등 비교적 완만한 경사의 지반구조물을 대상으로 제안되었으며 산사면과 같이 경사진 기반암에 토사층이 피복된 경우에는 적합하지 않다. 본 연구에서는 산사면의 지형적 특성을 모사한 2차원 비선형 동적해석을 수행하여 이의 동적 응답 특성을 분석하였다. 지진 시 산사면의 영구변위는 활동면에서 계산된 등가가속도를 Newmark 활동블록 방법에 적용하여 계산하였다. 이와 같이 계산된 영구변위는 본 연구에서 제안된 간편 변위 추정식과 비교하여 정확도를 평가하였다. 검토 결과, 산사면의 기하학적 증폭은 입력 지진의 세기와 주기, 토층의 고유주기에 영향을 크게 받으므로 이를 고려하지 않는 기존의 경험식은 영구변위를 정확하게 예측하지 못하는 것으로 나타났다. 변위 예측식의 정확도는 최대지반가속도, 최대지반 속도, Arias 진도, 평균주기와 토층의 고유주기가 고려될 경우 현격하게 향상되는 것으로 분석되었으며 이를 기반으로

1 비회원, 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang Univ.)

2 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang Univ., Tel: +82-2-2220-0322 Fax: +82-2-2220-1945, dpark@hanyang.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang Univ.)

4 정회원, 한서대학교 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanseo Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 10월 31일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

하여 새로운 변위추정식이 제시되었다. 나아가 본 연구에 제안된 변위추정식은 산사태 재해 위험도 예측에 적용되어 정확성이 검증되었다.

Keywords : Seismic slope stability, Newmark sliding block, 2D dynamic nonlinear analysis, Amplification factor, Flexible sliding block model

1. 서론

지진 시 사면의 안정성 평가에는 일반적으로 한계평형법을 기반으로 한 유사정적해석법이 사용된다. 유사정적해석법은 일시적인(Transient) 지진하중을 한 방향으로 작용하는 정적하중으로 치환하여 사면의 안전율을 평가하는 방법으로써 사용이 간편하다는 장점이 있다. 하지만 진동 지속 시간 내에 사면에 작용하는 하중은 지속적으로 변화하며 또한 짧은 시간동안에 작용하며 이를 불변의 정적 관성력으로 적용하여 안전율을 산정하는 것은 불확실성이 큰 것으로 알려졌다(Kramer, 1996). 또한 과거에 안전율이 1이상으로 안전하다고 평가되었지만 실제 지진 시 붕괴된 다수의 댐 및 제방 사례가 보고되었다. 유사정적해석법의 이러한 한계점을 극복하고자 Newmark(1965)는 활동변위법을 제안하였으며 이 방법은 현재 사면의 동적 안정성 평가 시 가장 널리 사용되고 있다.

Newmark(1965)가 최초로 제안한 경험적 추정식은 항복가속도비(k_y/PGA)와 최대지반속도(PGV)의 함수로 댐과 제방에서의 변위를 예측하였다. 하지만 이때 사용된 입력지진파는 4개뿐이며 PGA와 PGV를 각각 0.5g와 76.2cm/sec로 비현실적으로 크게 스케일링하였다. 이를 보완하고자 Franklin and Chang(1977)은 27개 지진 event의 179가지 기록과 10개의 인공지진파를 사용하여 지진 규모에 따른 표준화된 설계 차트를 제시하였고, Ambraseys and Menu(1988)는 11개 지진 event의 50가지 기록으로 계산된 변위를 회귀분석을 수행하여 변위 추정식을 제안하였다. 하지만 최대지반가속도만으로 변위를 정확하게 예측하는 것은 한계가 있는 것으로 나타났으며 Jibson(1993, 2007)은 기존에 제시된 변위 추정식에 Arias 진도, 규모(M) 등을 추가로 고려한 추정식을 제안하였다. 하지만 위의 추정식들은 모두 활동블록을 강체로 가정하였기 때문에 활동 토체의 동적 응답 특성을 고려하지 못하는 한계점을 내포하고 있다.

사면내의 동적거동을 고려하고자 Chopra(1966)는 예

상 활동면에 작용하는 응력을 합하여 관성력을 구한 이후 토체의 질량을 나눠서 등가가속도(HEA , Horizontal Equivalent Acceleration)를 산정하는 개념을 제안하였다. Makdisi and Seed(1978)는 등가가속도 산정방법을 이용하여 예상되는 제방의 파괴 높이에 따른 등가가속도비(HEA_{max}/PGA)와 항복가속도비로 변위를 예측하는 설계차트를 제안하였으며 이는 아직도 HAZUS^{MR4A}(FEM, 2003)에 적용되고 있다. Bray and Travararou(2007)는 제방 및 매립지의 응답특성을 고려한 1차원 비선형 응답해석을 수행하여 확률론적 변위 모델을 제시하였다. 이를 기반으로 Bray and Travararou(2009)는 확률론적 변위 평가방법을 제안하였다. 하지만 1차원 응답해석으로는 기하학적 형상에 따른 증폭특성을 모사할 수 없다. 또한, Makdisi and Seed(1978), Bray and Travararou(2009)의 경험적 추정식은 제방 및 매립지를 기반으로 제안되었기 때문에 지진시 산사면의 위험도 평가에는 적절하지 않다. 따라서 지진시 산사태 재해도 작성을 위해서는 산사면의 응답 특성을 고려한 변위 추정식이 필요하다. 이에 본 논문에서는 국내 산사면의 대표단면을 선정하고 2차원 동적 연속체 유한차분 해석을 수행하여 변위를 계산하였으며 Newmark 활동블록 변위추정식을 제안하였다.

2. Newmark 변위

지진 시 산사면의 활동면에 정적 상태 그리고 관성력으로 유발된 전단력이 저항력을 초과할 경우에 평형상태를 유지하지 못하고 영구적인 변위가 발생하게 된다. Newmark(1965)의 활동블록방법은 사면의 예상 활동면에서의 지반운동은 기반면 위의 강체(Rigid block)의 움직임과 유사하다고 가정한 영구변위 계산법을 제안하였다. 활동블록방법의 변위 산정 절차는 Fig. 1에 도시하였다. 강체의 움직임은 항복가속도를 초과할 경우 발생하며 변위는 초과된 가속도 펄스를 2번 적분하여 산정된다. 이때 항복가속도는 사면의 저항력과 동일한 전

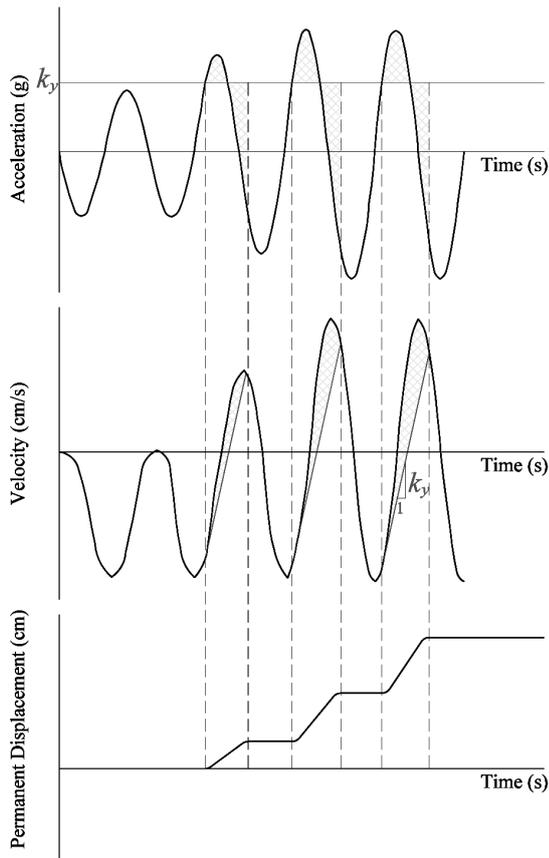


Fig. 1. Schematic illustration of slope permanent displacement

단력이 작용할 때의 가속도이다. 활동블록방법을 통해 파생된 연구자들의 경험적 변위 추정식은 Table 1에 정리하였다. 전술하였듯이 대부분의 추정식은 활동면의 응답을 고려하지 않거나 제방, 흙댐, 매립지 등의 지반 구조물에서 수행된 결과이다. 추정식별로 사용된 변수도 상이한 것을 확인할 수 있다.

3. 수치해석

3.1 대표 단면선정

해석에 사용된 산사면의 형상은 Fig. 2와 같으며 기반암은 국내 산사면의 특징을 반영하여 지표면과 평행하게 모사하였다. 산사면의 높이는 50m를 적용하였다. 토층 두께의 경우 4m 이하인 경우 강체로 가정할 수 있기에 4, 6, 8m로 적용하였으며 조사된 국내 산지 특성을 고려하여 사면 경사각은 15°~30°를 적용하였다. 이에 따른 해석 Case는 Table 2에 정리하였으며 적용된 지반의 물성은 Table 3에 정리하였다. 토층의 내부마찰각과 전단파속도는 국내 산사면을 대상으로 표준관입시험을 수행하여 얻은 $(N_1)_{60}$ 을 기준으로 산정하였다. 이때 내부

Table 1. Summary of sliding block models

| Authors | Functional form | Designated applications | Analysis |
|-----------------------------|---|----------------------------|----------------------|
| Ambraseys and Menu (1988) | $\log D = 0.90 + \log \left[\left(1 - \frac{k_y}{PGA} \right)^{2.53} \left(\frac{k_y}{PGA} \right)^{-1.09} \right]$ | Ground and Slopes | Record base |
| Jibson (1993) | $\log D = 1.460 \log I_a - 6.642a_c + 1.546$ | Mountain slopes | Record base |
| Jibson (2007) | Eq. A : $\log D = 0.215 + \log \left[\left(1 - \frac{k_y}{PGA} \right)^{2.341} \left(\frac{k_y}{PGA} \right)^{-1.438} \right] \pm 0.510$ Eq. B : $\log D = 0.561 \log I_a - 3.833 \log (k_y / PGA) - 1.474 \pm 0.616$ | Mountain slopes | Record base |
| Makdisi and Seed (1978) | $\frac{D}{PGA \cdot T_D} = f \left(\frac{k_y}{PGA} \right) [chart - based method]$ | Earth dams and embankments | FEM base - Decoupled |
| Rathje and Antonakos (2011) | $\ln(D) = -1.56 - 4.58 \left(\frac{k_y}{HEA_{max}} \right) - 20.84 \left(\frac{k_y}{HEA_{max}} \right)^2 + 44.75 \left(\frac{k_y}{HEA_{max}} \right)^3 - 30.50 \left(\frac{k_y}{HEA_{max}} \right)^4 - 0.64 \ln(HEA_{max}) + 1.55 \ln(HEV_{max}) + f_2(T_s)$ with $f_2(T_s) = \begin{cases} 1.42 \cdot T_s, T_s \leq 0.5s \\ 0.71, T_s > 0.5s \end{cases}$ | Slopes | 1D Coupled |
| Bray and Travasarou (2007) | $\ln(D(cm)) = -0.22 - 2.83 \ln(k_y) - 0.333 (\ln(k_y))^2 + 0.566 \ln(k_y) \ln(PGA) + 3.04 \ln(PGA) - 0.244 (\ln(PGA))^2 + 0.278(M-7)$ | Earth and waste slopes | 1D Coupled |

Table 2. Summary of the cases performed in this study

| Case | Slope angle β (°) | Depth D (m) | Friction angle ϕ (°) | Shear velocity V_s (m/s) |
|------|-------------------------|---------------|---------------------------|----------------------------|
| 1 | 15 | 4 | 25 | 100 |
| 2 | | | 30 | 150 |
| 3 | | | 35 | 200 |
| 4 | | 8 | 25 | 100 |
| 5 | | | 30 | 150 |
| 6 | | | 35 | 200 |
| 7 | 20 | 4 | 25 | 100 |
| 8 | | | 30 | 150 |
| 9 | | | 35 | 200 |
| 10 | | 8 | 25 | 100 |
| 11 | | | 30 | 150 |
| 12 | | | 35 | 200 |
| 13 | 25 | 4 | 25 | 100 |
| 14 | | | 30 | 150 |
| 15 | | | 35 | 200 |
| 16 | | 8 | 25 | 100 |
| 17 | | | 30 | 150 |
| 18 | | | 35 | 200 |
| 19 | 30 | 4 | 25 | 100 |
| 20 | | | 30 | 150 |
| 21 | | | 35 | 200 |
| 22 | | 6 | 25 | 100 |
| 23 | | | 30 | 150 |
| 24 | | | 35 | 200 |

Table 3. Soil and rock properties used in the study

| | Unit weight γ (kN/m ³) | Cohesion c' (kPa) | Friction angle ϕ (°) | Poisson ratio ν | Shear velocity V_s (m/s) |
|---------|---|---------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|
| Soil | 20 | 5.0 | 25~35 | 0.3 | 100~200 |
| Bedrock | 25 | 1.5e4 | 55 | 0.25 | 2000 |

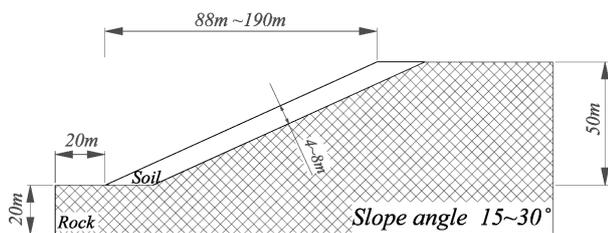


Fig. 2. Model of mountain slope

마찰각과 전단파속도는 각각 Peck et al.(1974)과 Dikmen (2009)이 제안한 식을 사용하였으며 적용된 값은 각각 25, 30, 35°와 100, 150, 200m/s이다.

3.2 모델링

본 연구에서는 유한차분법으로 운동방정식을 시간영역

에서 수치적분하는 FLAC^{2D} v7.0(Itasca Consulting Group, 2011)을 사용하였다. 지반은 2개의 중첩된 삼각형이 구성된 사각형 요소로 모델링하였다. 측면 경계조건으로 자유장 경계를 적용하여 경계면에서 반사파가 내부로 재입사하는 것을 방지하였으며, 하부 경계조건으로 Kuhlemeyer and Lysmer(1973)가 제안한 점성댐퍼를 사용하여 하향 지진파를 흡수하도록 하였다.

해석시 적용된 최대 요소크기는 1m로 이는 지진파 전파를 정확하게 모사하기 위한 최대 크기(Lysmer and Kuhlemeyer, 1969)보다 작은 값이다. 지반의 토층은 비선형성을 모사하기 위해 FLAC에 탑재된 비선형 모델 중 가장 적용성이 우수한 Sig3 모델(Sigmoidal model)을 사용하였다.

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

여기서, M_s 는 접선전단탄성계수, $L = \log(\gamma)$, x_0 , a , b 는 curve fitting 변수이다. 위 모델은 전단변형률의 증감에 따른 접선탄성계수 변화를 예측하는 경험적인 모델로써 전단탄성계수 및 감쇠비 곡선의 호환성이 우수하기에 사용되었다. Sig3 모델의 입력 변수는 Darendeli(2001) 비선형 동적 곡선에 상응하도록 산정되었다. Sig3의 a , b 는 각각 1.0과 -0.65가 적용되었고 x_0 는 토층의 두께에 따라 다르게 적용하였다. 토층 두께가 4, 6, 8m인 경우에 대해 x_0 는 각각 -1.71, -1.65, -1.59이다. Mohr-Coulomb 모델은 Sig3 모델과 함께 적용하여 큰 전단 변형률에 대한 소성파괴를 모사하였다. 이때 $c = 5\text{kPa}$, 소성거동은 Non-associated flow rule을 적용하였으며 $\psi = 0^\circ$ 을 사용하였다.

지반의 저변형률 감쇠는 Rayleigh 감쇠 공식을 통해 모사되었으며 다음과 같다:

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

여기서, $[C]$ 는 감쇠행렬, $[M]$ 은 질량행렬, $[K]$ 는 강성행렬이며 α 와 β 는 식에 대한 변수이다. α 는 $\frac{4\pi\zeta(f_m f_n)}{(f_m + f_n)}$, β 는 $\frac{\zeta}{\pi} \frac{1}{f_m + f_n}$ 과 같은 식으로 계산되며 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 (Park et al., 2010). 따라서 진동 주파수의 영향을 최소화하는 α 와 β 를 선정하기 위해 f_m 과 f_n 를 결정해야 한다. 토층에 대해 f_m 과 f_n 은 토층의 1차와 5차 mode를 사용하였으며(Kwok et al., 2007), 암반층에 대해 지진파의 주파수 특성이 크게 바뀌지 않으므로 f_m 은 기반암의 1차 mode, f_n 은 지진파의 탁월주파수를 적용하였다.

3.3 입력지진파

본 연구에서는 주파수 특성이 다른 2가지 입력지진파가 사용되었으며(Fig. 3) 이는 Table 4에 정리하였다. Fig. 3b에는 입력지진파의 5% 감쇠비가 적용된 가속도 응답스펙트럼과 설계응답스펙트럼(MLTM, 2009)을 지진파의 최대지반가속도로 정규화하여 도시하였다. 입력지진

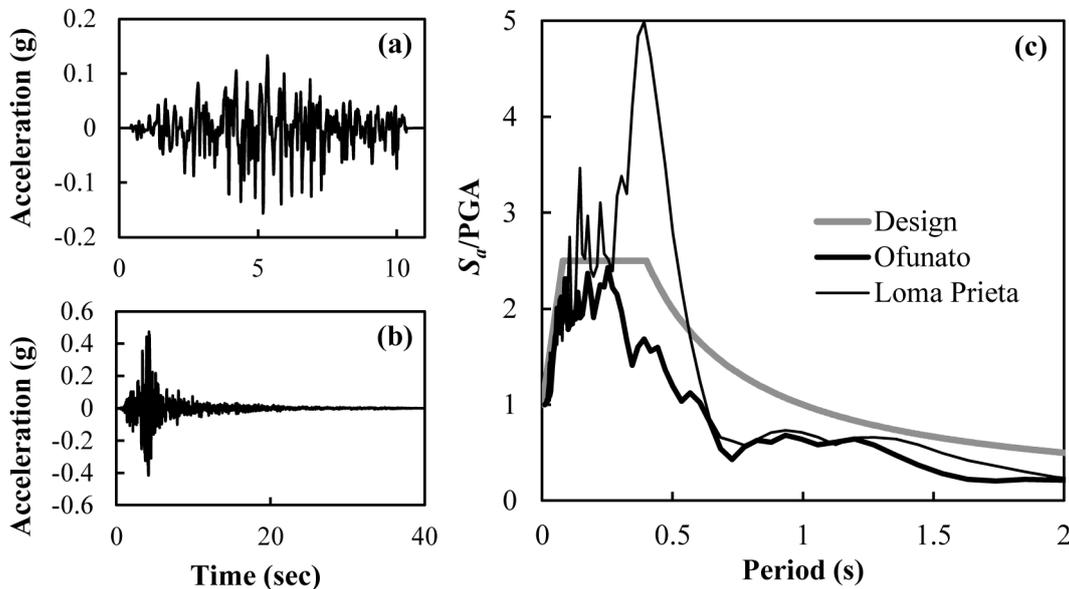


Fig. 3. Input motion: (a) Record motion of Ofunato, (b) Record motion of Loma Prieta, (c) 5% damped response spectra of input motions and design response spectrum of Korea (MLTM, 2009) normalized to the peak acceleration

Table 4. Input motions used in the dynamic analyses

| Earthquake | PGA (g) | Predominant Period (T_p) | Mean Period (T_m) |
|-------------|---------|------------------------------|-----------------------|
| Ofunato | 0.15 | 0.29 | 0.42 |
| Loma Prieta | 0.47 | 0.39 | 0.37 |

파는 지진구역 I 재현주기 1000년 지진의 최대지반가속도인 0.154g와 0.3, 0.5, 0.7, 1.0g로 스케일링을 하여 적용하였다. 모든 지진파는 Baseline correction한 후 해석에 적용되었다.

3.4 변위 산정

지진 시 산사면에 발생하는 가속도는 기하학적 영향 (Topographic effect)과 지층간의 영향(Stratigraphic effect)을 받게 되며 진동은 공간적으로 그리고 시간상으로 변이한다. 또한, 산사면 위치에 따라서 도달 시간의 차이로 인하여 추가적인 가속도 변이가 발생한다. 따라서 산사면의 예상 활동면을 따라 움직이는 파괴토체를 하나

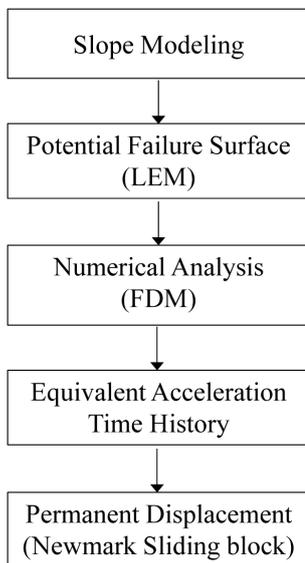


Fig. 4. Flow chart for the calculation of permanent displacement

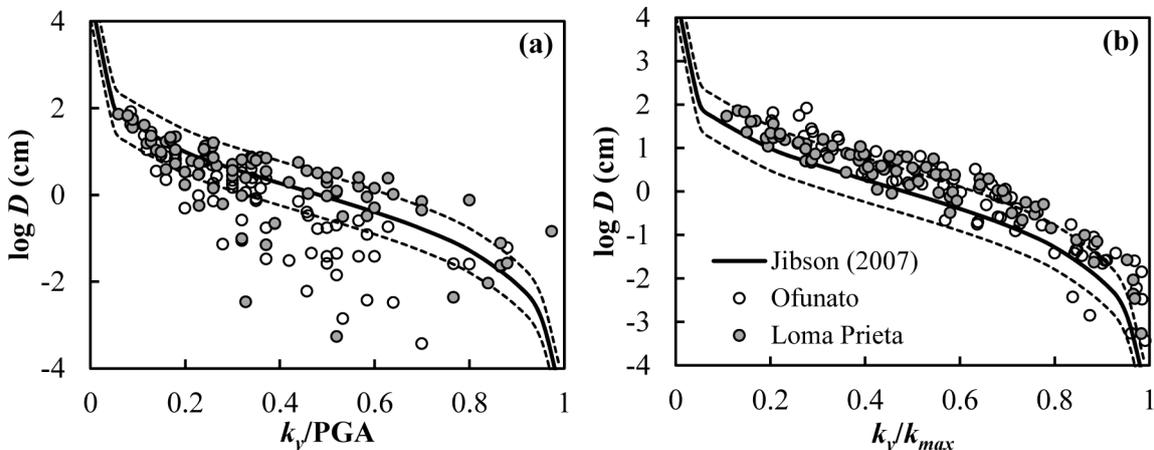


Fig. 5. Comparison of calculated displacement and Jibson (2007)'s Model A: (a) Ratio of k_y to PGA (Peak ground acceleration), (b) Ratio of k_y to k_{max} (Equivalent acceleration)

의 강체로 가정하는 것은 적절하지 않다. 영구변위는 Fig. 4에 도시된 절차로 계산되었다. 한계평형해석을 통해 예상활동면을 산정하고 2차원 동적해석을 수행하여 시간단계별 사면에서의 응력을 계산하였다. 등가가속도는 Chopra(1966)가 제안한 대로 예상 활동면에 작용하는 전단응력을 각 절편별로 합한 후 토체의 질량을 나누어서 계산하였다. 사면의 영구변위는 계산된 등가가속도 시간이력을 Newmark 활동블록법에 적용하여 계산하였다.

4. 산사면의 변위 예측

4.1 경험적 사면 변위추정식 정확성 평가

Fig. 5는 Newmark 활동방법을 적용하여 계산된 영구변위를 도시하였다. Fig. 5a는 입력 지진 가속도-시간이력을 적용하였으며 Fig. 5b는 활동면에서 계산된 등가가속도-시간이력을 사용하였다. 입력지진파의 PGA를 사용하여 Jibson(2007)의 경험식 A(Table 1)로 예측된 영구변위는 계산된 변위를 과대예측 하는 것으로 나타났다. 반면 PGA 대신 등가가속도를 사용할 경우, Jibson(2007)의 추정식으로도 계산된 변위를 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다. 위 사례를 통하여 토층의 두께가 크지 않은 산사면일 경우에도 활동블록의 증폭 특성을 고려하지 않고 강체로 가정하여 입력지진파의 PGA를 적용하는 것은 적절하지 않다는 것이 나타났다. 따라서 합리적으로 영구변위를 예측하기 위해서는 산사면의 증폭 계수를 반드시 고려해주어야 한다.

4.2 산사면의 간편 변위 추정식 제안

본 연구에서는 산사면의 동적 증폭 특성이 고려된 새로운 2가지 변위추정식을 제안하였다. 첫 번째 제안식 Model A는 Jibson(2007)'s 경험식 A(Table 1)의 추정식과 유사하며 변위의 예측 정확도를 향상시키기 위하여 지수와 상수를 수정하였다. 주요매개변수인 항복가속도 비로 변위를 예측하며 아래와 같이 정의되었다.

$$\log(D) = 0.246 + \log \left[\left(1 - \frac{k_y}{k_{max}} \right)^{1.9} \left(\frac{k_y}{k_{max}} \right)^{-1.955} \right] \quad (3)$$

여기서, D 는 변위(cm), k_{max} 는 등가지진가속도, k_y 는 항복가속도이다. 등가지진가속도는 활동면에서의 응력을 통해 산정하거나 입력 최대지반가속도와 증폭계수의 곱으로 계산할 수 있다. Park et al.(2014)에서 산사면과 같이 토층 두께가 크지 않은 사면은 이를 강체로 가정할 수 없으며 증폭 특성을 고려해야한다고 보고되었다. 본 연구에서는 Park et al.(2014)에서 계산된 증폭계수를 토대로 토층의 고유주기와 지진파의 평균 주기의 비에 대한 함수로 증폭계수 차트를 도출하였으며 이는 Fig. 6에 도시하였다. 산사면의 증폭계수는 T_s/T_m 이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. PGA가 0.154g이며 T_s/T_m 이 0.5보다 작은 경우에만 증폭계수가 1보다 크며 PGA 및 T_s/T_m 이 그 이상인 경우 감소하는 것으로 계산되었다. 식 (3)과 Jibson(2007)의 경험식 A(Table 1)의 차이점은 입력지진파의 최대가속도(PGA)를 사용하는 것이 아니라 토층의 등가지진가속도를 적용한다는 점이다.

두 번째 제안식은 추가적인 변수를 적용하여 예측 결

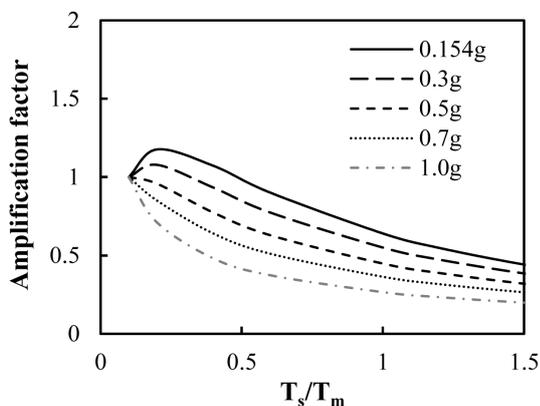


Fig. 6 Amplification factors

과의 정확도를 향상시키고자 하였다. 이때 추가로 사용된 변수는 입력지진파의 주파수 특성과 강도를 대변하는 최대지반속도(PGV), 입력지진파의 전체적 특징을 고려할 수 있는 Arias 진도 그리고 토층의 고유주기(T_s)이다. 이를 Model B라 명하였으며 식은 아래와 같다.

$$\log(D) = \log \left[\left(1 - \frac{k_y}{k_{max}} \right)^{1.949} \left(\frac{k_y}{k_{max}} \right)^{-1.633} \right] + 0.0004 \cdot \left(\frac{PGV^2}{k_{max}} \right) + 1.32 \cdot k_y + 0.04 \cdot I_a + 0.06 \ln(T_s) \quad (4)$$

여기서 I_a 는 Arias 진도(cm/s), PGV 는 최대지반속도(cm/s), T_s 는 토층의 고유주기(s)이다.

4.3 산사면의 위험도 등급에 대한 예측 정확도 평가

영구변위를 통한 사면의 평가는 안전을 평가방법과 달리 안정성의 기준을 정의하기 쉽지 않으며 공학자의 판단에 의해 따른 허용 변위 기준이 제안되고 있다. Jibson and Keefer(1993)는 5~10cm를 사면이 붕괴되지 않기 위한 허용범위로 제안하였다. 캘리포니아의 지진재해도 평가 지침서에서는 15~100cm의 변위발생 시 지반 강도 감소 및 균열을 초래한다고 제시하였다(Parrish, 2008). Blake et al.(2002)는 미국의 캘리포니아 지역의 건설공사 시 인근 지역의 건물의 중요도에 따른 허용 변위 기준을 제시하였다. 이때 빌딩과 주택의 경우 5cm, 비교적 덜 중요한 건물이나 연성토체에 대해서는 15cm를 허용범위로 정했다. 하지만 여전히 제시된 허용변위 기준은 공학적 판단과 경험을 기반으로 한다는 한계점을 내포하고 있다.

Jibson et al.(2000)은 변위 추정식에 의해 예측한 변위와 산사태가 실제로 발생한 지역을 비교하여 변위의 크기에 대한 지진시 산사태 위험도에 대한 확률을 제안하였다. 이는 미국 알래스카 앵커리지 지역에 대해 지진시 산사태 위험등급에 기준으로 사용되었다(Jibson and Michael, 2009). Jibson and Michael(2009)이 제시한 등급은 다음과 같다. Low(<2%, 0~1cm), Moderate(2~15%, 1~5cm), High(15~32%, 5~15cm), Very high(>32%, >15cm). 본 연구에서 제안한 변위 추정식을 Jibson and Michael(2009)이 제시한 위험도 등급을 기준으로 예측

의 정확도를 평가하였다.

Fig. 7은 4가지 위험도 등급을 나타내는 사각형 범위와 변위 추정식으로 계산된 변위를 도시하였다. 추정변위가 해당 위험도 등급의 영역 안에 위치한다면 정확히 예측한 것이고, 영역의 범주에 벗어나면 과대 혹은 과소예측을 함을 의미한다. Model B는 Model A와 Jibson (2007)의 경험식 A보다 위험도 등급 영역 안에 많이 위치함을 보이고 있다. 이는 영구변위 추정시 Arias 진도, 최대지반속도(PGV), 토층 고유주기(T_s)의 정보가 추가

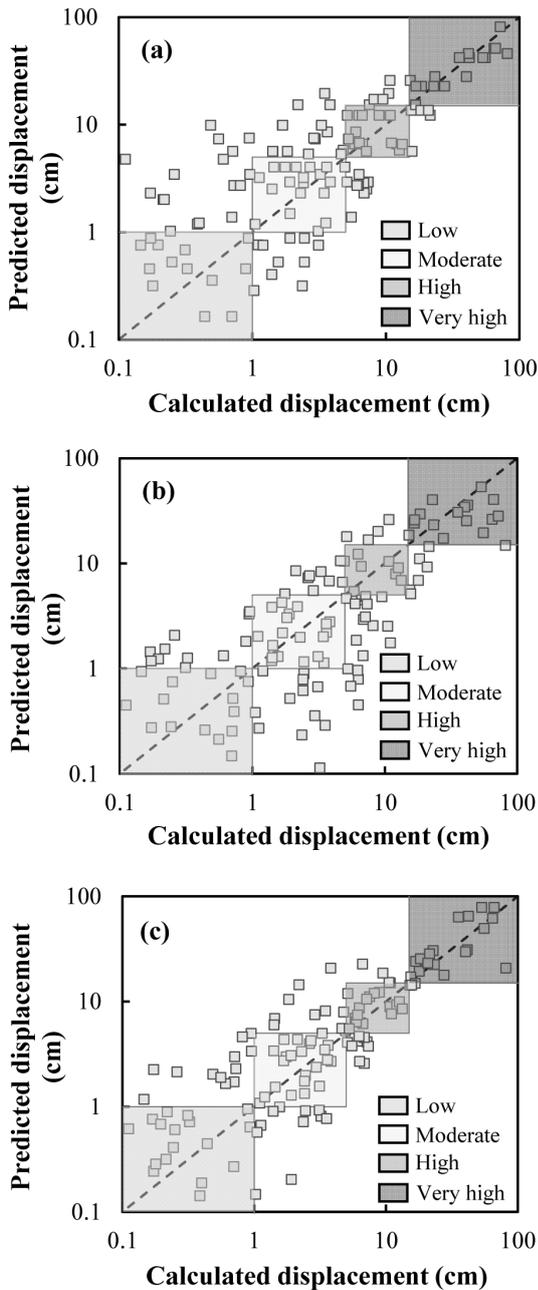


Fig. 7. Calculated and predicted displacements shown with bins representing four hazard categories: (a) Jibson(2007) Eq.A, (b) Model A, (c) Model B

될 경우 예측 정확도가 향상됨을 의미한다.

Fig. 8은 변위 추정식을 통해 계산된 결과의 정확성을 막대그래프로 도시하였다. Model A의 경우 Low 등급에서 정확성이 다른 추정식보다 우수한 것으로 나타났지만 High 등급에서의 정확도는 가장 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 입력 지진파의 주기 및 강도, 토층의 고유주기가 반영된 Model B의 경우 Jibson(2007)의 경험식 A와 Model A보다 예측 정확도가 향상됨을 확인할 수 있다. 따라서 지진 및 사면의 다양한 특성을 고려할 경우 영구변위 예측의 정확도를 높일 수 있는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 산사면에 대한 2차원 비선형 동적해석을 수행하여 산사면의 동적응답을 계산하였다. 산사면의 예상 활동면에서의 등가가속도를 통해 증폭 특성 및 영구변위를 분석하였다. 이때 영구변위는 산정된 등가가속도를 Newmark 활동블록 방법에 적용하여 계산하였다. 나아가 계산된 영구변위를 통해 본 연구에서 제안한 추정 변위식 정확성을 평가하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 산사면에서의 기하학적 증폭특성은 입력지진파의 크기와 평균 주기, 토층의 고유주기에 영향을 받는 것으로 나타났다. 하지만 제시된 증폭특성은 지진파 및 사면의 특징에 따라서 증폭특성은 차이를 보일 수 있다. 따라서 정밀한 사면의 증폭계수를 도출하려면 입력 지진파와 사면에 따른 추가적인 변수 분석이 필요할 것으로 판단된다.
- (2) 입력 지진의 특성만을 고려하는 기존의 변위 추정식은 지진시 사면의 변위를 과대 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 활동면에서의 증/감폭 특성이 고려되지 않기 때문이다. 따라서 지진시 산사면의 변위 예측에서는 산사면의 증폭특성을 고려해야 하는 것으로 분석되었다.
- (3) 변위추정시 입력 지진파의 주기 및 강도, 토층의 고유주기가 반영된 Model B는 항복가속도비만 고려한 Model A보다 정확도가 높은 것으로 나타났다. 이는 산사면의 변위 예측시 지진의 특성 중 최대가속도만 고려되는 추정식은 불확실성이 큰 것을 의미한다. 따라서 신뢰성있는 변위 예측을 위해서는

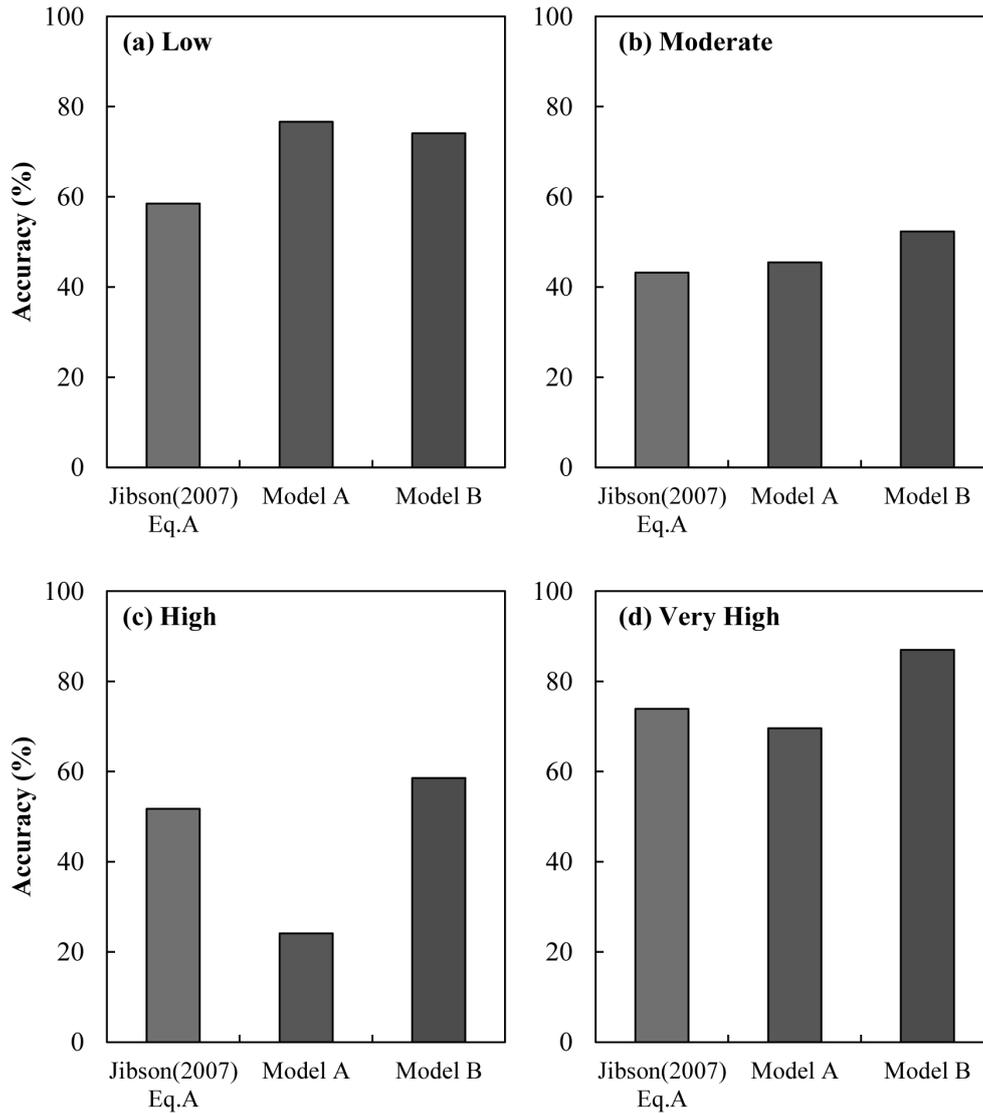


Fig. 8. Accuracy of correctly predicting the hazard category

추가적인 변수의 반영이 요구되며 Arias 진도, 최대 지반속도(PGI), 토층 고유주기(T_s)를 적용할 경우 추정식의 정확도가 향상되는 것으로 분석되었다.

- (3) 본 연구에서 제안된 변위 추정식은 활동면의 중/갑 폭 특성을 고려하는 방법으로 Jibson(2007)식보다 정확성이 우수한 것으로 나타났다. 따라서 지진시 산사태 재해도 작성시 본 모델을 사용할 경우 비교적 신뢰성있는 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단 된다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해 저감기술개발사업인 ‘지진시 사면붕괴 등 지반피해 예측기술 개발 [NEMA-

지진-2012-2]’의 과제 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Agency, F.E.M. (2003), “HAZUS-MH MR4 Technical Manual”: FEMA Washington, DC.
2. Ambraseys, N. and Menu, J. (1988), “Earthquake Induced Ground Displacements”, *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol.16, No.7, pp.985-1006.
3. Blake, T., Hollingworth, R., and Stewart, J. (2002), *Recommended procedures for implementation of DMG special publication 117 guidelines for analyzing and mitigating landslide hazards in California*, Southern California Earthquake Center, University of Southern California.
4. Bray, J.D. and Travararou, T. (2007), “Simplified Procedure for Estimating Earthquake-induced Deviatoric Slope Displacements”,

- Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol.133, No.4, pp.381-392.
5. Bray, J.D. and Trasarou, T. (2009), "Pseudostatic Coefficient for Use in Simplified Seismic Slope Stability Evaluation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.135, No.9, pp.1336-1340.
 6. Chopra, A.K. (1966), *Earthquake effects on dams*, University of California, Berkeley.
 7. Darendeli, M.B. (2001), *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves*, University of Texas at Austin.
 8. Dikmen, Ü. (2009), "Statistical Correlations of Shear Wave Velocity and Penetration Resistance for Soils", *Journal of Geophysics and Engineering*, Vol.6, No.1, pp.61.
 9. Franklin, A.G. and Chang, F.K. (1977), "Earthquake Resistance of Earth and Rock-fill Dams. Report 5: Permanent Displacements of Earth Embankments by Newark Sliding Block Analysis", *Unknown*, Vol.1.
 10. Itasca Consulting Group, I. (2011), *Fast Lagrange Analysis of Continua, Version 7.0*.
 11. Jibson, R.W. (1993), "Predicting Earthquake-induced Landslide Displacements Using Newmark's Sliding Block Analysis", *Transportation Research Record*, pp.9-9.
 12. Jibson, R.W. (2007), "Regression Models for Estimating Coseismic Landslide Displacement", *Engineering Geology*, Vol.91, No.2, pp. 209-218.
 13. Jibson, R.W., Harp, E.L., and Michael, J.A. (2000), "A Method for Producing Digital Probabilistic Seismic Landslide Hazard Maps", *Engineering Geology*, Vol.58, No.3, pp.271-289.
 14. Jibson, R.W. and Keefer, D.K. (1993), "Analysis of the Seismic Origin of Landslides: Examples from the New Madrid Seismic Zone", *Geological Society of America Bulletin*, Vol.105, No.4, pp.521-536.
 15. Jibson, R.W. and Michael, J.A. (2009), *Map Showing Seismic Landslide Hazards in Anchorage, Alaska*, US Department of the Interior, US Geological Survey.
 16. Kramer, S.L. (1996), *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.
 17. 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.
 18. Kwok, A.O.L., Asce, M., 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, pp.1385.
 19. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. (1969), "Finite Element Model for Infinite Media", *Journal of Engineering Mechanics Division. ASCE*, Vol.95, pp.859-877.
 20. Makdissi, 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.
 21. MLTM (2009), "Design criteria of Slope".
 22. Newmark, N.M. (1965), "Effect of Earthquakes on Dams and Embankments", *Geotechnique*, Vol.15, No.2, pp.139-160.
 23. Park, D., Lee, J. H., Ahn, J. K., Han, J. T., Lee, J., and Park, I. J. (2014), "Development of Prediction Method Considering Geometrical Amplification Characteristics of Slope I : Analysis About Amplification Characteristics of Mountain Slopes in Seoul", *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol.14, No.5, pp.1-8.
 24. Park, D., Shin, J. H., and Yun, S.U. (2010), "Seismic Analysis of Tunnel in Transverse Direction Part II: Evaluation of Seismic Tunnel Response via Dynamic Analysis", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.26, pp.71-85.
 25. Parrish, J.G. (2008), *Guidelines for Evaluating and Mitigating Seismic Hazards*.
 26. Peck, R. B., Hanson, W. E., and Thornburn, T.H. (1974), *Foundation Engineering*, Wiley, New York.
 27. Rathje, E.M. and Antonakos, G. (2011), "A Unified Model for Predicting Earthquake-induced Sliding Displacements of Rigid and Flexible Slopes", *Engineering Geology*, Vol.122, No.1, pp.51-60.

Received : March 11th, 2015

Revised : April 10th, 2015

Accepted : April 13th, 2015