

지진시 비탈면의 영구변위 발생에 따른 응답특성 분석

Analysis of Response Characteristics According to Permanent Displacement in Seismic Slope

안재광¹ Ahn, Jae-Kwang 박상기² Park, Sangki
김우석³ Kim, Wooseok 손수원⁴ Son, Su-Won

Abstract

The slope collapse can be classified into internal and external factors. Internal factors are engineering factors inherent in the formation of slopes such as soil depth, slope angle, shear strength of soil, and external factors are external loading such as earthquakes. The external factor for earthquake can be expressed by various values such as peak ground acceleration (PGA), peak ground velocity (PGV), Arias coefficient (I), natural period (T_p), and spectral acceleration ($S_{aT=1.0}$). Specially, PGA is the most typical value that defines the magnitude of the ground motion of an earthquake. However, it is not enough to consider the displacement in the slope which depends on the duration of the earthquake even if the vibration has the same peak ground acceleration. In this study, numerical analysis of two-dimensional plane strain conditions was performed on engineered block, and slope responses due to seismic motion of scaling PGA to 0.2 g various event scenarios was analyzed. As a result, the response of slope is different depending on the presence or absence of sliding block; it is shown that slope response depend on the seismic wave triggering sliding block than the input motion factors.

요지

비탈면 붕괴는 크게 내적요인과 외적요인으로 분류할 수 있다. 내적요인은 토층 깊이, 사면경사, 흙의 전단강도 등의 기존에 비탈면의 형성과 함께 내재 되어있는 공학적 요인이며, 외적요인은 지진과 같은 하중이다. 이때 최대가속도(PGA), 최대속도(PGV), Arias계수(I), 고유주기(T_p), 스펙트럼 가속도($S_{aT=1.0}$) 등은 지진의 외적요인으로 대변되는 값이다. 특히, 최대지반가속도(peak ground acceleration, PGA)는 지진의 지반 운동 크기를 정의하는 가장 대표적인 값이지만 동일한 최대 지반가속도 값을 가지는 진동이라도 지진의 지속시간에 따라 달라지는 사면에서의 변위를 충분히 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 인공사면을 대상으로 2차원 평면변형률 조건의 수치해석을 수행하였으며, 다양한 지진 시나리오의 PGA 를 0.2g로 스케일링하여 적용했을 때 비탈면에서 발생하는 응답특성을 분석하였다. 분석 결과, 비탈면의 상층부와 하층부의 응답은 활동면 발생 여부에 따라 차이를 보이며, 입력 지진파의 외적요인 보다는 소성변형을 유발시킨 진동 특성의 영향을 받는 것으로 나타났다.

Keywords : Numerical analysis, Plastic model, Seismic analysis, Sliding block, Slope

1 정희원, 기상청 지진화산연구과 기상연구사 (Member, Research Officer, Earthquake and Volcano Research Division, KMA)

2 비희원, 한국건설기술연구원 복합재난연구단 수석연구원 (Senior Research, Multi-Disaster Countermeasures Organization, KICT)

3 정희원, 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Infrastructure Safety Research, KICT)

4 정희원, 부산대학교 지진방재연구센터 전임연구원 (Member, Associate Researcher, Seismic Simulation Test Center, Pusan National Univ., Tel: +82-51-510-3296, Fax: +82-51-513-9596, firesome@pusan.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Table 1. Material properties (Park et al., 2018)

| Material | Vs (m/s) | Cohesion (kPa) | Friction angle (°) | Density (kN/m ³) |
|----------------|----------|----------------|--------------------|------------------------------|
| Soil | 150 | 5.88 | 34.5 | 15.88 |
| Weathered rock | 560 | 19.0 | 33.7 | 20.0 |
| Bed rock | 1,000 | 100.0 | 50 | 23.0 |

유한차분해석 프로그램인 Flac v.7(Itasca, 2011)을 사용하기에 Darendeli(2001) 모델을 바로 적용할 수 없다. 따라서 프로그램에 내장된 S자형 곡선인 시그모이드 함수 (sigmoidal curve)를 Darendeli(2001) 곡선과 유사하게 매칭 하였다. 적용된 시그모이드 함수(Itasca, 2011)는 아래와 같다:

$$G_m = \frac{a}{1 + \exp(-(\log(\gamma) - x_0)/b)}$$

여기서 G_m 은 전단탄성계수, γ 는 전단변형, x_0 , a , b 는 S자형 곡선을 위한 피팅변수이다. 본 연구에서 사용된 x_0 , a , b 는 각각 -1.75, -0.58, 1이다. 소성변형을 모사하기 위해 시그모이드 함수와 Mohr-Coulomb 모델을 결합하였고, 이때 소성 거동은 $\psi = 0$ 을 적용하여 non-associate flow rule을 따르게 하였다. 본 논문에서는 앞서 언급된 시그모이드 함수의 비소성모델은 sig-associate flow rule model(SA모델)로, MC모델이 결합된 소성모델은 non-associate flow rule model(NA모델)이라 칭하였다.

3. 지진 시나리오 결정

지진에 대한 증폭특성 및 안정성 평가는 사용되는 지

진파에 영향을 받기 때문에 국내 지진환경에 상응하는 입력지진파 선정이 중요하다. 과거부터 국내에서 설계 시 사용된 Hachinohe와 Ofunato 지진파의 경우 지진원과 전파 경로에 대한 고려 없이 사용되고 있다. Hachinohe 지진파는 실제 Tokachi-oki 지진(1968.5.16.)의 관측자료이며, 이 지진의 정보는 모멘트 규모(M_w) 8.3, 심도 26km, 복합 혹은 대각선이동단층으로 보고되었다(USGS, 2009). Ofunato 지진파는 Miyagi 지진(1978.6.12.)의 관측자료이며, 심도 44km, 복합 단층의 움직임을 보인 해저지진이다(Seno et al., 1980). 두 지진은 해저지진으로 최근 국내에서 피해를 유발한 9.12지진(약칭: 경주지진, 2016.9.12., $M_L=5.8$), 포항지진(2017.11.15., $M_L=5.4$)과는 차이가 있다. 따라서 국내 지진환경에 부합하는 지진 시나리오를 선정하기 위해서 규모(M), 진원으로부터의 이격거리(R), 지진원의 특성 등의 고려가 필요하겠다.

본 연구에서는 국내에서 최근 발생한 9.12(경주)와 포항지진과 유사한 규모의 지진을 수집하였으며, 수집된 기록의 규모 범위는 5~7이다. 이격거리(R) 20km 미만의 지진파 10개, $R \geq 20$ km 인 관측기록 2개를 지진 시나리오로 선정하였다(Table 2). 이때 지진원의 단층정보를 고려하지 않았기에 본 연구에서는 정단층과 역단층, 복합단층을 모두 적용하였다. 수집된 지진파는 기반암 기준의 기록이며 PGA_{rock} 을 0.2g로 스케일링한

Table 2. Input motions

| No. | EQ name | Year | Station name | M | Fault | R_{rup} (km) | Vs30 (m/sec) |
|-----|------------------------|------|-----------------|------|-----------------|----------------|--------------|
| 1 | Loma prieta | 1989 | Gilroy array 1 | 6.93 | Reverse oblique | 9.64 | 1428 |
| 2 | Hollister | 1974 | Gilroy array 1 | 5.14 | Strike slip | 10.5 | 1428 |
| 3 | Northridge | 1994 | Wonderland ave. | 6.69 | Reverse oblique | 20.29 | 1222 |
| 4 | Kobe (Japan) | 1995 | Kobe uni | 6.9 | Strike slip | 0.92 | 1043 |
| 5 | Coyote lake | 1979 | Gilroy Array 1 | 5.74 | Strike slip | 10.7 | 1428 |
| 6 | Loma prieta | 1989 | Los gatos | 6.93 | Reverse oblique | 5.02 | 1070 |
| 7 | Tottori (Japan) | 2000 | SMNH 10 | 6.61 | Strike slip | 15.59 | 967 |
| 8 | San fernanda | 1971 | Pasadenaold | 6.61 | Reverse | 21.5 | 969 |
| 9 | Tottori (Japan) | 2000 | OKYH07 | 6.61 | Strike slip | 15.23 | 940 |
| 10 | 9.12 (Gyeongju, Korea) | 2016 | MKL | 5.8 | - | 13 | - |
| 11 | Pohang (Korea) | 2017 | PHA2 | 5.3 | - | 9 | - |
| 12 | Whittier narrows | 1987 | Pasadena | 5.99 | Reverse oblique | 6.78 | 969 |

Table 3. External factor of Input motions at Scaled PGA=0.2g

| No. | PGV (m/s) | PGD (m) | I (m/s) | $S_{aT=0.1}$ (g) | $S_{aT=1.0}$ (g) | T_p (sec) |
|-----|-----------|---------|---------|------------------|------------------|-------------|
| 1 | 0.162 | 0.039 | 0.247 | 0.537 | 0.053 | 0.197 |
| 2 | 0.057 | 0.003 | 0.094 | 0.731 | 0.012 | 0.094 |
| 3 | 0.184 | 0.028 | 0.324 | 0.381 | 0.219 | 0.145 |
| 4 | 0.200 | 0.100 | 0.337 | 0.280 | 0.260 | 0.416 |
| 5 | 0.185 | 0.050 | 0.232 | 0.493 | 0.157 | 0.088 |
| 6 | 0.465 | 0.147 | 0.415 | 0.218 | 0.536 | 0.994 |
| 7 | 0.187 | 0.130 | 0.362 | 0.355 | 0.091 | 0.210 |
| 8 | 0.125 | 0.013 | 0.324 | 0.400 | 0.148 | 0.269 |
| 9 | 0.196 | 0.246 | 0.700 | 0.429 | 0.099 | 0.073 |
| 10 | 0.048 | 0.004 | 0.100 | 0.329 | 0.018 | 0.029 |
| 11 | 0.092 | 0.023 | 0.109 | 0.502 | 0.153 | 0.057 |
| 12 | 0.079 | 0.008 | 0.218 | 0.474 | 0.061 | 0.345 |

후 적용하였다. Table 3은 입력된 지진파의 대푯값을 정리하였다.

4. 수치해석 모델링

동적 수치해석을 수행하기 위해서는 전달되는 진동이 필터되지 않도록 격자 설정이 필요하기에 Kuhlemeyer and Lysmer(1973)가 제안한 요소 크기보다 작게 모델링하였다. 적용된 요소 길이는 0.5m로 최대 25Hz 까지 필터 되지 않도록 하였다. 동적해석 수행전 정적해석 단계를 우선적으로 수행해야 하기에 하부 및 측면 경계는 구속(fix)조건을 설정하고, $Ko=1$ 조건으로 응력상태를 모사하였다. 정적해석에 적용된 구속조건은 동적해석 단계에서는 점성댐퍼 및 자유장 경계 조건으로 변경한다. 하부 경계조건은 반사파를 생성되지 않도록 Lysmer

and Kuhlemeyer(1969)가 제안한 점성댐퍼를 설정하였다. 점성댐퍼는 무한한 경계를 효과적으로 모사할 수 있기에 동해석의 하부경계로 적용할 수 있다(Park et al., 2010). 측면 경계조건의 경우 자유장 효과를 모사하기 위해 동적 응답을 강제로 적용하는 자유장 경계(free field)를 적용하였다. 대상구간의 자연사면은 무한사면처럼 연장되나 검토하고자 하는 영역만을 모델링하였다. 이때 동적해석시 자유장 경계조건을 적용할 경우 처음과 끝 부분의 격자($i=1$ and i_{max})는 직각 사각형으로 구성해야 하므로, 비탈면의 상하단은 가상의 수평선을 연장하였다.

실제 지반 감쇠는 진동 주파수의 영향을 받지 않으나 동적해석에서 미소변형률은 Rayleigh 감쇠로 설정하므로 진동 주파수의 영향을 최소화하는 f_m 과 f_n 을 선택해야 한다(Park et al., 2010). 토층의 f_m 과 f_n 은 Kwok et al.

LEGEND

Dynamic Apply Conditions

O = Both DOFs Quieted

* = Free Field Boundary

Net Applied Forces

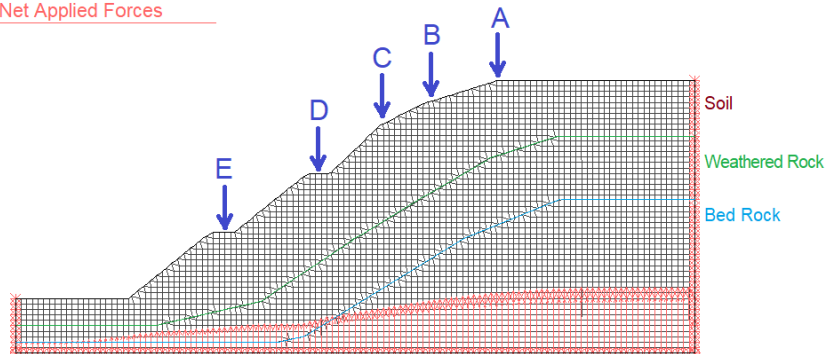


Fig. 2. Modeling and Section

(2007)이 제시한 토층의 1차와 5차 mode를 사용하였고, 암반은 f_m 과 f_n 을 각각 1차 모드 주파수와 지진파의 탁월 주파수를 적용하였다(Park et al., 2013).

모델링된 격자망과 경계조건, 분석 집중구간은 Fig. 2에 도시하였다. 이때 선정된 분석 집중구간(A, B, C, D, E)은 인공사면의 소단과 자연사면의 경사가 바뀌는 지점으로 기하학적 형상에 따라 진동이 중첩되어 다른 곳보다 크게 증폭될 것이다.

5. 증폭특성 분석

본 장에서는 비탈면의 토층을 SA와 NA모델로 모델링하고, 적용된 모델에 따른 응답특성을 비교하였다.

5.1 지반 모델에 따른 응답특성 분석

앞서 선택된 12개 지진파를 적용한 결과로 지반의 구성모델에 따른 위치별 최대가속도(PGA)를 Fig. 3에 도시하였으며, 이때 1:1선을 통해 두 모델의 응답 차이를 비교하였다. 두 모델의 응답은 대부분 큰 차이를 보이지 않았으나, A-C 구간의 일부 사례에서 SA모델의 응답이 NA모델보다 크게 계산되는 것으로 나타났다. 이에 대한 응답차이를 분석하기 위해 Loma Prieta 지진(No. 1 이벤트)에 대하여 증폭이 가장 크게 발생한 사면 정상(Top)에서의 계산된 수평 방향의 변위와 가속도 시간이력을 Fig. 4에 도시하였다. 이때 변위는 기반면($j=1$)을 기준으로 한 상대변위이고, 추가로 지반을 탄성모델의 해석 결과도 함께 비교하였다. 탄성모델과 SA모델의 경우 상대변위가 커졌지만 다시 0에 수렴하는 반면 non-associated flow rule을 따르는 NA모델의 경우 급격한

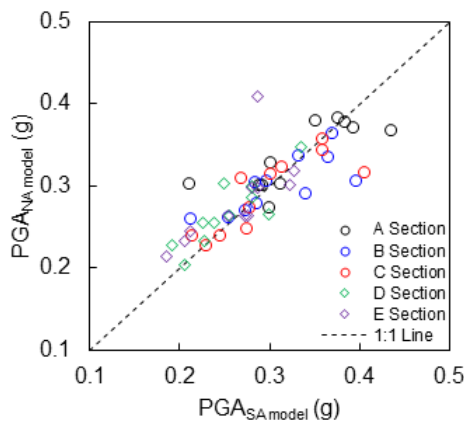


Fig. 3. Comparison of PGA with SA model and NA model

상대변위가 발생한 이후 0으로 돌아가지 않는다. 영구 변위는 4초 전후로 급격히 증가하는 것으로 계산되었으며, 이 구간에서의 가속도 응답특성은 앞선 모델들과 차이를 보였다. 이는 비탈면의 내적 저항력보다 큰 관성력의 작용으로 파괴면의 전단변형률의 급격히 증가하면서 생긴 응답이다.

A 구간에서 4초 전후로 급격한 변화를 보이는 이유를 정확히 분석하고자 깊이별 전단응력-변형률 곡선을 Fig. 5에 도시하였으며, 이는 0~5초까지의 거동이다. 탄성모델과 SA모델의 전단응력과 전단변형률의 관계는 입력된 곡선에 따라 변화하는 반면, NA모델은 4.07초부터 4.23초 까지 급격한 소성변형이 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 5의 결론을 바탕으로 Fig. 4의 가속도 시간이력을 재분석 할 경우, 하부 토층에서 항복응력 이상으로 응력전달이 되지 않기 때문에 상대변위 발생시 NA모델의 지표면 가속도는 탄성모델이나 SA모델보다 작다. 또한 지표 하부 1m 지점에서는 항복응력 도달 전에 소성변형이 발생하는데, 이는 하부에서 발생한 대변형으로 비탈면의 쓸림이 발생하였기 때문이다. 추가로 NA모델의 소성변형이 발생한 이후 비탈면의 경사 반대 방향으로 작용한 관성력에서 다른 모델보다 더 큰 PGA 응답을 보였다. 이는 비탈면의 대변형이 이후 변화된 응력상태에 따른 결과로 파악된다.

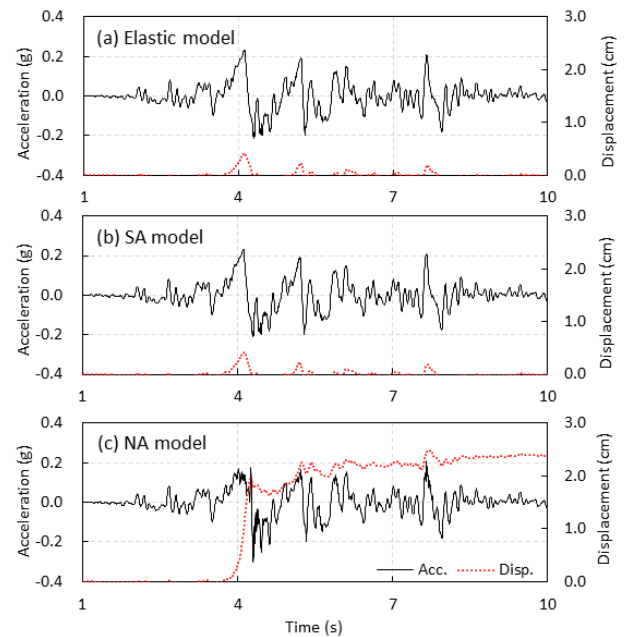


Fig. 4. Response of Loma Prieta earthquake (No.1 event) at Section A (=slope top)

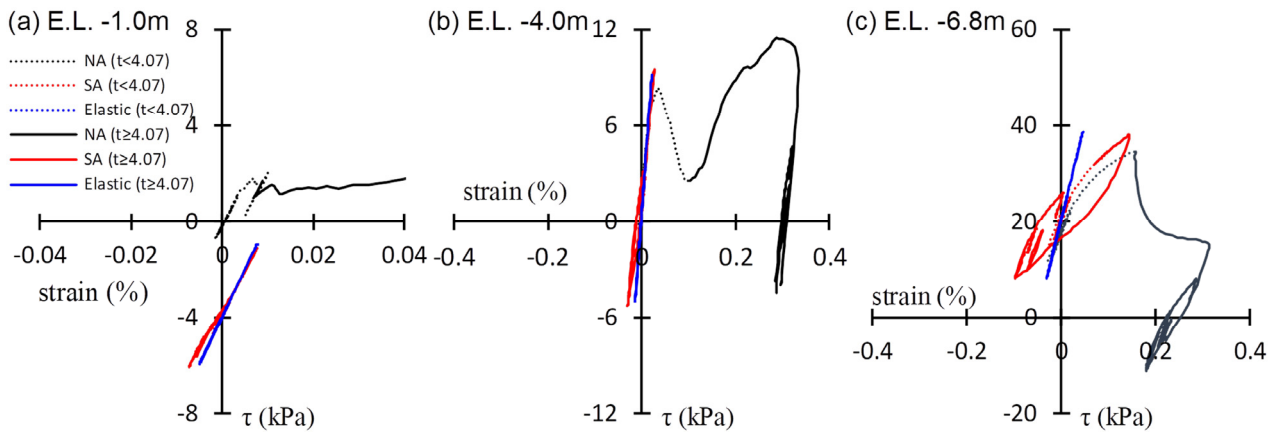


Fig. 5. Stress-strain curve for 5 seconds in Section A

5.2 위치별 응답특성 분석

비탈면의 움직임을 확인하기 위하여 4개의 지진파에 대한 수평방향 상대변위 등고선(contour)과 PGA 주상도를 Fig. 6에 도시하였다. 육안으로 파악할 경우 0.05cm 이상의 상대변위가 발생할 때 원호파괴와 유사한 움직임이 확인되었다. Fig. 6d는 전체적으로 상대변위가 1cm 미만으로 계산되었으며, 자연사면 부분(=상부 영역)에 원호파괴형태의 움직임이 확인되었다. 이때 SA모델과 NA모델의 토층 깊이별 PGA가 유사한 것으로 나타났다. Fig. 6a, b and c 사례에서는 깊이별 수평방향 PGA에

차이가 나타났으며 토사 전체영역에서 쓸러 내림(sliding)이 확인되었다. Fig. 6b and c의 경우 E, D구간보다 A-C 구간에서 더 큰 PGA와 상대변위가 발생하였다.

앞서 계산된 상대변위와 모델에 따른 가속도차이를 기반으로 활동면 분석결과를 Table 4에 정리하였다. 이때 수평방향의 상대변위가 0.05cm 이상일 경우를 활동면으로 가정하였다. 표에 정리된 Total, Upper zone, Upper zone II는 각각 전체(토사전체), 상부(자연사면), 상부 II(첫번째 소단~자연사면)영역의 파괴를 의미한다. Fig. 6b와 같이 전체적으로 상대변위가 0.05cm 이상 나타났지만 다른 구간보다 상부에 더 큰 변위가 발생함을 보였

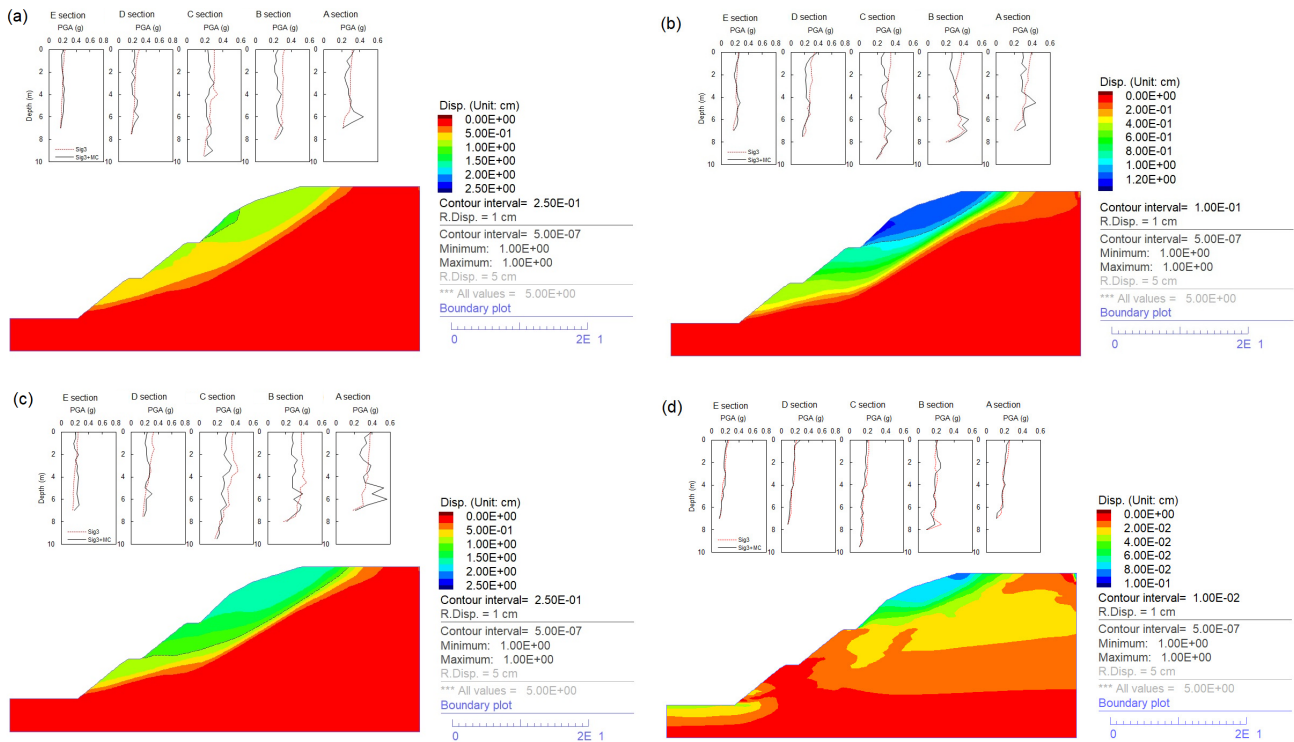


Fig. 6. Horizontal relative displacement and PGA column for seismic motions : (a) No.1, (b) No.5, (c) No.7 (d) No. 10

Table 4. Calculated permanent displacement at surface and failure type

| No. | Failure type | PGD (cm) | | | | |
|-----|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | E section | D section | C section | B section | A section |
| 1 | Total | 0.71 | 0.75 | 1.01 | 0.90 | 0.91 |
| 2 | Upper zone | 0.15 | 0.20 | 0.30 | 0.30 | 0.30 |
| 3 | Upper zone | 0.17 | 0.23 | 0.32 | 0.32 | 0.32 |
| 4 | Upper zone | 0.15 | 0.14 | 0.25 | 0.25 | 0.24 |
| 5 | Total & Upper zone | 0.46 | 0.79 | 1.17 | 1.13 | 1.14 |
| 6 | Total | 2.41 | 2.45 | 2.40 | 2.43 | 2.32 |
| 7 | Total & Upper zoneII | 0.96 | 1.24 | 1.65 | 1.57 | 1.59 |
| 8 | Total & Upper zone | 0.89 | 0.92 | 1.27 | 1.24 | 1.23 |
| 9 | Total & Upper zoneII | 1.09 | 3.94 | > 5.00 | > 5.00 | > 5.00 |
| 10 | Upper zone | 0.05 | 0.05 | 0.11 | 0.13 | 0.14 |
| 11 | Upper zone | 0.09 | 0.09 | 0.13 | 0.12 | 0.11 |
| 12 | Total | 0.35 | 0.40 | 0.50 | 0.49 | 0.51 |

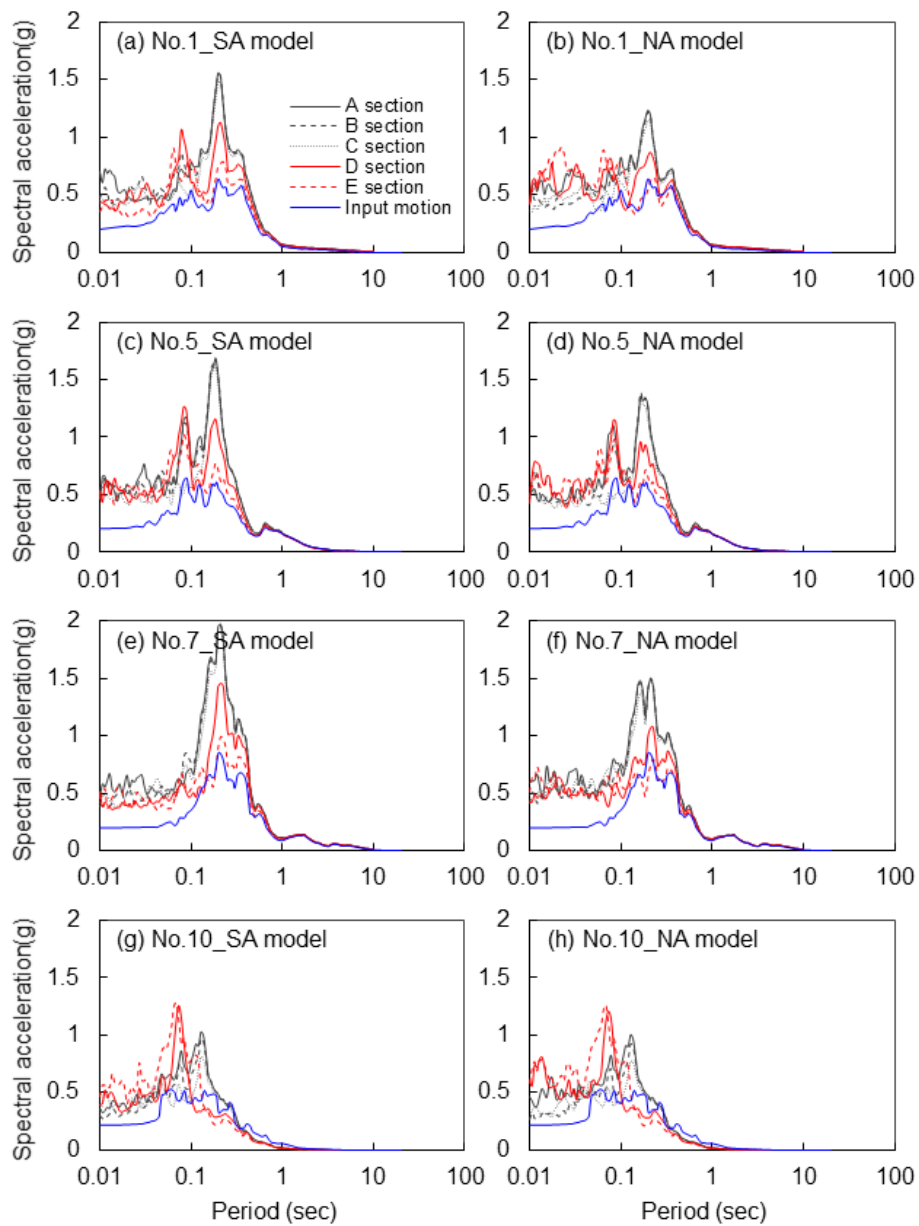


Fig. 7. Response spectrum at surface

기에 Total & Upper Zone이라 정의하였다. 이와 같은 개념으로 Fig. 6의 a, c, d의 움직임을 각각 ‘Total’, ‘Total & Upper Zone II’, ‘Upper Zone’이라 정리하였다. Table 4에 정리된 결과를 도식화하지 않았지만, PGV, PGD, I , S_w , T_p , 모두 크기에 따른 활동면의 구분이 쉽지 않은 것으로 나타났다. 따라서 지진에 대한 활동면의 영역 설정은 쉽지 않기에 전체영역뿐만 아니라 추가로 상부영역까지 고려하는 것이 적절하다.

SA모델과 NA모델의 구역별 응답스펙트럼을 Fig. 7에 도시하였다. 0.5sec이하의 주기에서는 증폭이 이루어진 것을 확인할 수 있으며, 입력지진파의 우세 주기에 따라 위치별 응답에는 차이가 있는 것으로 나타났다. No.5와 No.10은 0.1sec 이하의 단주기가 우세한 지진파로 1소단과 2소단(section D와 E)에서 크게 증폭하는 것으로 나타났다. 사면 Top에서의 증폭은 0.1~0.5sec 주기 영역

에서 크게 계산되었다. 또한, No.10을 제외하고 Top 부분에서는 두 모델간의 스펙트럴 가속도의 차이가 분명하게 나타났다. 앞서 뚜렷한 파괴를 보인 No.1, 5, 7의 0.1~0.5sec 주기 영역에서 NA모델의 응답은 SA모델보다 스펙트럴 가속도가 작게 계산되었고, 0.1sec 이하 영역에서는 더 크게 계산되었다. 이는 항복 파괴이후 발생하는 비탈면의 쓸려 내림 효과인 것으로 파악되며, 이 영향으로 특히 하단부의 응답특성은 단주기 성분이 더 크게 증가하였다.

5.3 모델 차이를 이용한 가속도 분석

PGA주상도와 상대변위를 산출하여도 비탈면의 예상 활동면을 결정이 여전히 쉽지 않지만 모델별 가속시간이력 그래프(Fig. 4)를 통해 상대변위가 증가할 때의 가

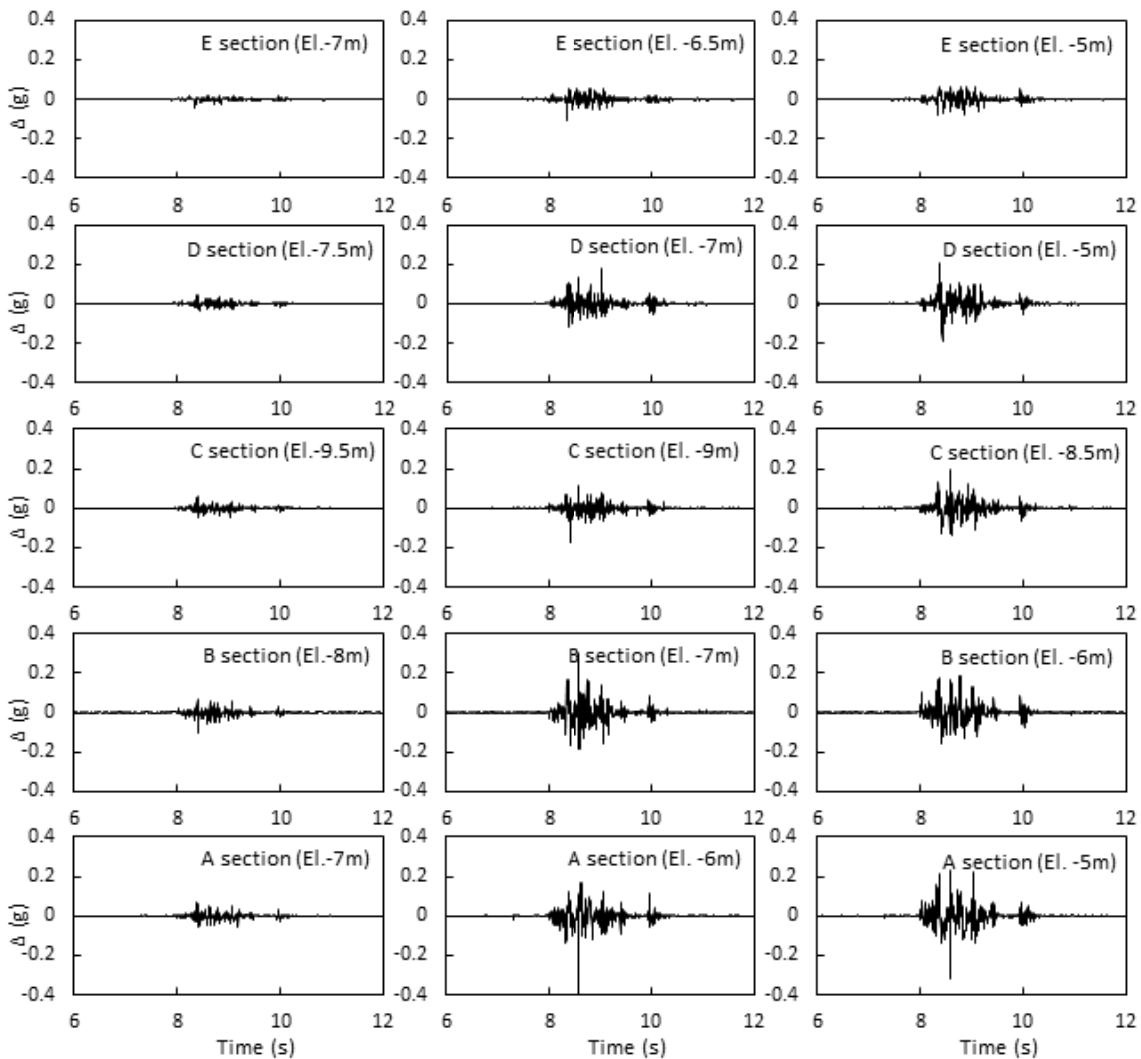


Fig. 8. Acceleration difference between NA and SA for No.7 event

속도의 차이가 발생함을 확인하였다. 비탈면의 파괴면을 정확히 산정하려면 전단응력-변형률 곡선을 이용할 수 있지만 전체 시간영역에서 이를 제대로 파악하기 쉽지 않기에 모델간의 가속도 차이를 이용하였다. 이와 같은 방법은 소성변형 발생시 전달되는 가속도 차이가 발생하는 점을 이용하기에 비탈면의 쓸러 내림의 움직이는 구간을 추정하기 용이할 것으로 사료된다. 두 모델간의 가속도 차이를 분석시 사용된 식은 아래와 같다:

$$\Delta = a_{SA} - a_{NA}$$

여기서 Δ 는 가속도 차로 단위는 g이고, a_{SA} 와 a_{NA} 는 각각 SA모델에서 계산된 가속도와 NA모델에서 계산된 가속도이다. $\Delta > 0$ 이면, 소성변형이 발생한 것이다. No. 7과 No. 10 이벤트일 때 기반면과 기반면 상부의 토층에서의 차이를 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 도시하였다. 기반

면 위의 지층에서 두 이벤트 모두 소성변형이 나타났음을 확인하였고, 위치별 크기에 차이를 보였다. No.10 이벤트의 경우 1cm 미만의 상대변위가 발생하였기에 소성변형이 없을 것이라 보였지만 A-C구간에 뚜렷한 차이를 보였다. 이는 Fig. 6d와 비교하면 0.05cm 상대변위 형상의 결과와 비슷하다. 또한 Fig. 8과 Fig. 9를 통해 쓸러 내림을 주도했던 영구변위 발생 주요 시간대를 파악할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 입력지진파에 따른 비탈면의 응답과 활동면 분석을 위해 2차원 평면변형률 조건의 동적 수치해석을 수행하였다. 이를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

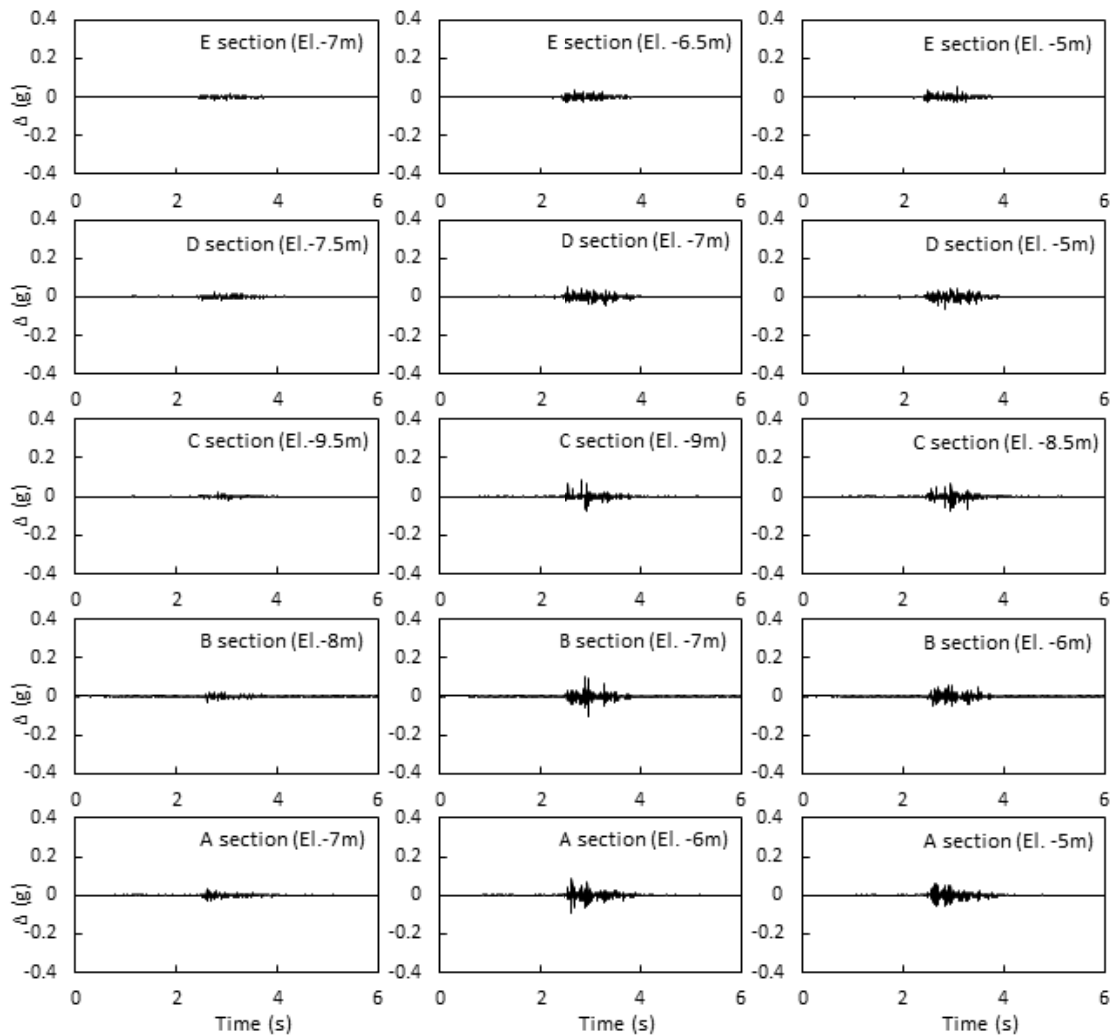


Fig. 9. Acceleration difference between NA and SA for No.10 event

- (1) 비탈면 지반에 탄성 혹은(SA) 비선형 모델을 적용할 경우 지진시 전달되는 동적 응력에 비례하여 지반의 변형이 발생하지만, 소성변형이 발생하지 않기에 영구변위를 모사할 수 없다. 따라서, 지진시 비탈면의 응답 분석시 파괴에 의한 움직임을 고려해야 하기에 NA모델을 적용한 해석이 요구된다.
- (2) 지진시 지반을 소성(NA) 모델로 적용할 경우, 소성 변형으로 인해 상부로 전파되는 진동은 비소성모델과 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 비탈면에 전달된 응력이 항복점에 도달한 경우 항복응력보다 더 큰 응력은 상부로 전달되지 않기 때문이다. 결국, 소성변형에 따른 응답특성은 지반의 대변형 발생 여부에 따라 달라진다.
- (3) 본 연구에서 수행된 비탈면의 경우 이벤트에 따라 위치별 상대변위 움직임이 크게 달라지는 것으로 나타났다. 따라서, 입력지진을 기준으로 한 응답특성을 정의하기보다는 영구변위를 발생시키는 진동에 대한 특성값 도출이 필요할 것으로 보인다.
- (4) 지진시 비탈면의 활동면은 기반면 지진파의 대푯값을 기반으로 설정하기 쉽지 않기에 부분영역과 전체영역을 구분하여 설정하는 것을 권장하는 바이다. 따라서, HEA의 계산시 지진특성별로 달라지는 활동면에 대한 고려가 반드시 필요하겠다.
- (5) 영구변위가 발생할 때의 응답은 SA모델의 최대 가속도보다 크진 않으나 고주파수 진동이 생성되는 것으로 나타났다. 또한 모델간의 가속도 차이를 통해 예상되는 활동면의 위치 및 영구변위의 상관성을 유추할 수 있을 것으로 파악되었다. 따라서, SA와 NA모델 비교를 통한 지진시 비탈면 응답에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 지진·지진해일·화산감시 및 예측기술 개발 과제(과제번호 1365002988)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. Ambraseys, N. and Menu, J. (1988), "Earthquake Induced Ground Displacements", *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol.16, No.7, pp.985-1006.
2. Bray, J.D. and Travararou, 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.
3. Darendeli, M.B. (2001), *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves*, Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin.
4. Federal Emergency Management Agency (2003), *HAZUS-MH MR4 Technical Manual: FEMA*, Washington, DC.
5. Huang, Y., Zhao, L., Xiong, M., Liu, C., and Lu, P. (2018), "Critical slip surface and landslide volume of a soil slope under random earthquake ground motions", *Environmental earth sciences*, Vol.77, No.23, pp.787.
6. Itasca (2011), *FLAC:Fast Lagrange Analysis of Continua, Version 7.0*, Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc.
7. Jibson, R.W. (2007), "Regression Models for Estimating Coseismic Landslide Displacement", *Engineering Geology*, Vol.91, No.2, pp. 209-218.
8. Keefer, D.K. (1984). "Landslides caused by earthquakes", *Geological Society of America Bulletin*, Vol.95, No.4, pp.406-421.
9. 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, pp.1385.
10. Kuhlemeyer, R. L. and Lysmer, J. (1973), "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems", *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, Vol.99, Tech Rpt.
11. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOILT) (2016), *Design Criteria of Slope* (in Korean).
12. Lee, J.H., Ahn, J.K., and Park, D. (2015), "Prediction of seismic displacement of dry mountain slopes composed of a soft thin uniform layer", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.79, pp.5-16.
13. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. (1969), "Finite Element Model for Infinite Media", *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol.95, pp.859-877.
14. 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.
15. Park, D., Kim, T. G., Ahn, J.K., and Park, I.J. (2013), "Amplification characteristics of Mountain Slopes", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.13, No.2, pp.117-123.
16. Park, D.H., 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 the Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.6, pp.71-85.
17. Park, S., Kim, W., Lee, J., and Baek, Y. (2018), "Case Study on Slope Stability Changes Caused by Earthquakes—Focusing on Gyeongju 5.8 ML EQ", *Sustainability*, Vol.10, No.10, pp.3441.
18. Rathje, E.M. and Bray, J.D. (2001), "One- and two-dimensional seismic analysis of solid-waste landfills", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.384, pp.850-862.
19. Seno, T., Shimazaki, K., Somerville, P., Sudo, K., and Eguchi, T. (1980), "Rupture process of the Miyagi-Oki, Japan, earthquake of June 12, 1978", *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol.23, No.1, pp.39-61.
20. Strenk, P.M. (2010), *Evaluation of analytical procedures for esti-*

mating seismically induced permanent deformations in slopes, Ph.D. Dissertation, Drexel University, Philadelphia.

21. USGS (2009), *PAGER-CAT Earthquake Catalog, Version 2008_06.1*, United States Geological Survey, 2009.09.04
22. Varnes DJ. (1978), "Slope movement types and processes", *In Landslides Analysis and Control*, Schuster RL, Krizek RJ (eds).

National Academy of Sciences, Transportation Research Board:
Washington DC; 11-33.

Received : December 2nd, 2019

Revised : December 12th, 2019

Accepted : December 13th, 2019