Korean Journal Of Agricultural Science

pISSN : 2466-2402
eISSN : 2466-2410

REVIEW

Review of earthquake-induced landslide modeling and scenario-based application

Giha Lee[1,†], Hyunuk An[2,†], Minho Yeon[1], Jun Pyo Seo[3], Chang Woo Lee[3,*]

[1]Department of Advanced Science and Technology Convergence, Kyungpook National University, Sangju 37224, Korea

[2]Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

[3]Division of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

[†]These authors equally contributed to this study as first author.

[*]Corresponding author: leecwfr@korea.kr

Abstract

Earthquakes can induce a large number of landslides and cause very serious property damage and human casualties. There are two issues in study on earthquake-induced landslides: (1) slope stability analysis under seismic loading and (2) debris flow run-out analysis. This study aims to review technical studies related to the development and application of earthquake-induced landslide models (seismic slope stability analysis). Moreover, a pilot application of a physics-based slope stability model to Mt. Umyeon, in Seoul, with several earthquake scenarios was conducted to test regional scale seismic landslide mapping. The earthquake-induced landslide simulation model can be categorized into 1) Pseudo-static model, 2) Newmark's dynamic displacement model and 3) stress-strain model. The Pseudo-static model is preferred for producing seismic landslide hazard maps because it is impossible to verify the dynamic model-based simulation results due to lack of earthquake-induced landslide inventory in Korea. Earthquake scenario-based simulation results show that given dry conditions, unstable slopes begin to occur in parts of upper areas due to the 50-year earthquake magnitude; most of the study area becomes unstable when the earthquake frequency is 200 years. On the other hand, when the soil is in a wet state due to heavy rainfall, many areas are unstable even if no earthquake occurs, and when rainfall and 50-year earthquakes occur simultaneously, most areas appear unstable, as in simulation results based on 100-year earthquakes in dry condition.

Keywords: earthquake-induced landslide, Mt. Umyeon, physics-based model, slope stability

Check for updates

OPEN ACCESS

Citation: Lee G, An H, Yeon M, Seo JP, Lee CW. 2020. Review of earthquake-induced landslide modeling and scenario-based application. Korean Journal of Agricultural Science 47:963-978. https://doi.org/10.7744/kjoas.20200080

Received: Augutst 25, 2020

Revised: November 05, 2020

Accepted: November 10, 2020

Copyright: © 2020 Korean Journal of Agrcultural Science

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http: //creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Introduction

한국과학기술한림원(KAST, 2008)에 의하면 지금까지 밝혀진 역사 기록상의 국내 유감지진은 약 1,800회 이상이며, 이러한 지진 중에서도 인명 및 재산 피해가 발생한 MMI (modified mercalli intensity)진도 7 이상의 피해 지진은 과거 2,000년 동안 약 40회 이상 있었던 것으로 보고되었다. 또한, MMI 진도 5 이상 지진이 약 400회 이상 기록되었으며, 그중 인명 및 재산피해를 야기한 지진은 약 45회 이상으로 평균적으로 50년 빈도로 지진으로 인한 피해가 발생한 것으로 보고되고 있다.

우리나라에서의 지진발생횟수는 지진관측망의 증가와 현대화로 1998년 이후 증가추세를 보이고 있으며, 최근에는 경상북도 포항, 경주 지역을 중심으로 2016년 252회, 2017년 223회로 예년 평균에 비해 발생횟수가 급격히 증가한 것으로 보고되는 등 지진으로 인한 다양한 형태의 재해가 발생할 수 있을 것으로 예측되고 있다. 기상청 지진연보에 따르면, 2018년에 한반도에서 발생한 규모 2.0 이상의 지진은 총 115회로 디지털 관측기간(1999 - 2017년)의 연평균(67.6회)보다 약 1.7배 많았고, 유감 지진은 33회(포항 여진 20회 포함)로 연평균 10.6회보다 약 3배가 많았던 것으로 나타났다.

특히 최근 지진은 산지 내 대규모 균열 등으로 인한 구조물 피해와 함께 액상화, 산사태 및 토석류 등과 같은 다양한 산지토사재해를 유발하는 것으로 보고되고 있으며, 국내에서도 최근 빈번한 큰 규모의 지진으로 인해 그 어느 때 보다 지진재해에 대한 관심이 증폭되고 있는 상황이다. 실제로 2017년 포항지진 발생 당시 진원지 인근에 설치되었던 땅밀림 무인원격 감시시스템에서 사면변위를 감지한 것을 계기로 지진으로 인한 산지토사재해의 발생 가능성도 제기되고 있다.

전술한 바와 같이 지진으로 인한 재해의 예측과 위험저감 등을 목적으로 지진을 외부요인으로 하는 산지토사재해에 대한 지속적인 관심과 연구가 요구되고 있으나 국내에서 지진으로 인한 산사태, 땅밀림 등의 산지토사재해가 공식적으로 보고된 적이 없는 관계로 대부분의 연구가 지진으로 인한 구조물의 안전성 평가 등과 같은 내진설계에 초점이 맞춰져 있다. 특히, 자연사면에서의 산사태 또는 토석류와 관련된 연구는 강우를 외부요인으로 하는 산사태와 관련된 연구들이 주로 수행되었으며, 지진(seismic loading)에 의한 (1) 사면안정해석(slope stability analysis), (2) 물질이동(landslide run-out) 등과 같은 지진산사태(earthquake-induced landslide) 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 지진산사태(earthquake-induced landslide) 모형 개발 및 적용과 관련된 국내·외 주요 연구의 기술적 내용을 분석하고, 물리기반 모형(physics-based model)의 시범적용을 통해 국내 지진산사태 위험지도 작성에 필요한 지진산사태 모형 개발 및 활용을 위한 가이드라인을 제시하고자 한다.

Review of earthquake-induced landslide modeling

지진산사태 이론

광역(large-scale)의 지진산사태 위험분석을 위해 일반적으로 사용되는 모형은 정적해석모형(pseudo-static model)과 동적해석모형(Newmark displacement model)이 있다.

이 중 정적해석모형은 지진의 영향과 관련된 사면안전성을 분석하는데 전통적으로 사용되어 왔다(Seed, 1967; An et al., 2016a). 그러나 정적해석모형의 경우 복잡한 지진의 물리적 거동특성을 객관적인 기준이 없이 단순하고 경험적으로 산정된 지진계수(seismic coefficient)를 이용하여 분석하는 단점이 있다.

따라서 이후 여러 연구자들은 이러한 정적해석모형의 단점을 보완하기 위해 Newmark (1965)에 의해 제안된 기법인 동적해석모형을 이용하여 지진산사태 위험분석을 수행하였다(Wilson and Keefer, 1983; Wieczorek et al., 1985;

Jibson and Keefer, 1993; Jibson, 2000; Refice and Capolongo, 2002). 동적해석모형은 최초 Newmark (1965)에 의해 개발된 이후, Wilson and Keefer (1983), Wieczorek et al. (1985), Jibson and Keefer (1993) 등 많은 연구자들에 의해 국외 대규모 지진과 관련된 산사태 분석 모형으로서 사용되어 왔으며, 일반적으로 정적해석모형과 연계하여 안전율을 계산하고, 이를 통해 산정된 임계가속도와 지진이 발생했을 때 이를 지진계를 이용하여 기록한 정보 등의 관측자료를 이용해 사면의 변위 예측 평가를 할 수 있는 장점이 있다.

국내·외 지진산사태 연구에서 지금까지 활용되고 있는 사면안정해석과 관련된 이론을 정리하면 다음과 같다.

지진산사태 사면안정해석모형

정적해석모형

정적해석모형은 Terzaghi (1950)가 사면의 지진 안정성을 평가할 수 있도록 Fig. 1과 같이 제안한 간단한 방법으로 해석적(analytical) 또는 수치적(numerical) 기법을 이용하여 적용이 가능하다. 정적해석에서는 사면의 안정성 평가 시 수평가속도(a_h) 만을 고려하는 것이 일반적이며(Anderson and Kavazanjian, 1995), 수직가속도(a_v)의 영향은 종종 생략되고 있다(Kramer, 1996). 정적해석모형 적용 시 고려해야할 사항은 (1) 규모(magnitude), (2) 방향(direction), (3) 작용점(acting point)이나, 일반적으로 지진규모를 나타내는 지진계수(seismic coefficient, $k_h$or k_v)를 반영하여 특정임계값(threshold)을 기준으로 사면안전률(safety factor, factor of safety [FOS] or factor of safety [FS])에 따른 사면의 안정성 및 불안정성을 평가한다.

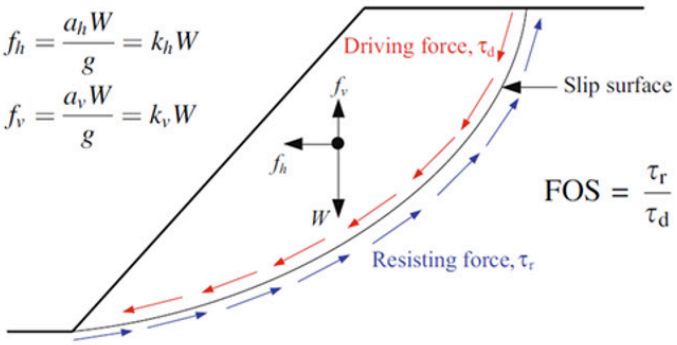

Fig. 1. Pseudo-static slope stability modeling concept (Zhang, 2012). FOS, factor of safety.

Clough and Chopra (1966)와 Ling and Leshchinsky (1998)은 수평지진력 이외에도 수직지진력 역시 사면안정성 분석에 중요한 영향을 미칠 수 있다고 하였고, Zhang (2012) 역시 FOS의 한계값이 지진의 수직적 요소를 고려해야하는 상황이 있을 수 있다고 주장하였다.

정적해석모형은 FOS와 임계지진계수(critical seismic coefficient, k_c)를 간단하고 직접적으로 산정하는데 매우 유용하지만, 일정한 단방향 유사정적가속(pseudo-static acceleration)을 가정하기 때문에 지진의 일시적인 동적(dynamic) 효과를 모의할 수 없는 단점이 있다. 또한 사면안정은 영구변위(permanent displacement)와 밀접한 관계를 가지고 있지만 정적해석의 결과는 영구변위에 대한 정보를 제공하지 않으므로 지진 후 사면의 거동을 해석하기 어려운 문제가 있다. 따라서 정적해석모형은 지진산사태 잠재적 위험지역 선정 등과 같은 지진산사태 예비평가(preliminary assessment or screening)에 적절하며, 지진산사태에 따른 사면변위 해석을 위해서는 동적해석이 가능한 모형이 필요하다(Stewart et al., 2003; Jibson, 2011; Wasowski et al., 2011; Lee et al., 2014).

동적해석모형

변위기반(displacement-based) 동적활동블록(dynamic sliding block) 해석기법인 Newmark 모형은 자연사면, 또는 댐 및 제방과 같은 특수 목적을 위해 만들어진 인공사면(man-made slope)에서 영구변위가 성능을 평가하는데 유용하게 활용될 수 있으므로 지진 시 사면안정성을 평가하기 위한 또 다른 대안이 될 수 있다. 이 기법은 1965년의 Rankine Lecture에서 Newmark (1965)이 처음으로 지진으로 인한 제방의 잠재적 변위를 평가하는 절차를 소개한 후, 지반공학의 지진분야에서 지금까지도 널리 사용되고 있다.

Newmark 모형은 강체블록(rigid sliding block) 거동을 기초로 하는 변형해석 기법으로 Fig. 2a와 같이 활동면 상부의 토층(soil mass)를 강체블록으로 가정하고, 지진에 의해 토층이 받게 되는 가속도가 임계가속도(critical acceleration)를 초과하는 경우, 활동면을 따라 토층이 하부로 이동하는 것으로 간주한다. 이 때, Newmark 모형은 Fig. 2b와 같이 지진에 의해 획득된 지반가속도 기록 및 임계가속도를 이용하여 변위를 계산하며, 이때 상향 거동은 무시하게 되고, 모든 변위는 한 방향 거동으로만 가정한다. Newmark 모형을 이용하여 변위를 예측하기 위해서는 임계가속도(critical acceleration, a_c)가 우선적으로 결정되어야 하는데 이 값은 정적해석모형의 한계평형해석을 통해 계산된 FOS와 지형정보(사면경사, α)를 이용하여 산정된다.

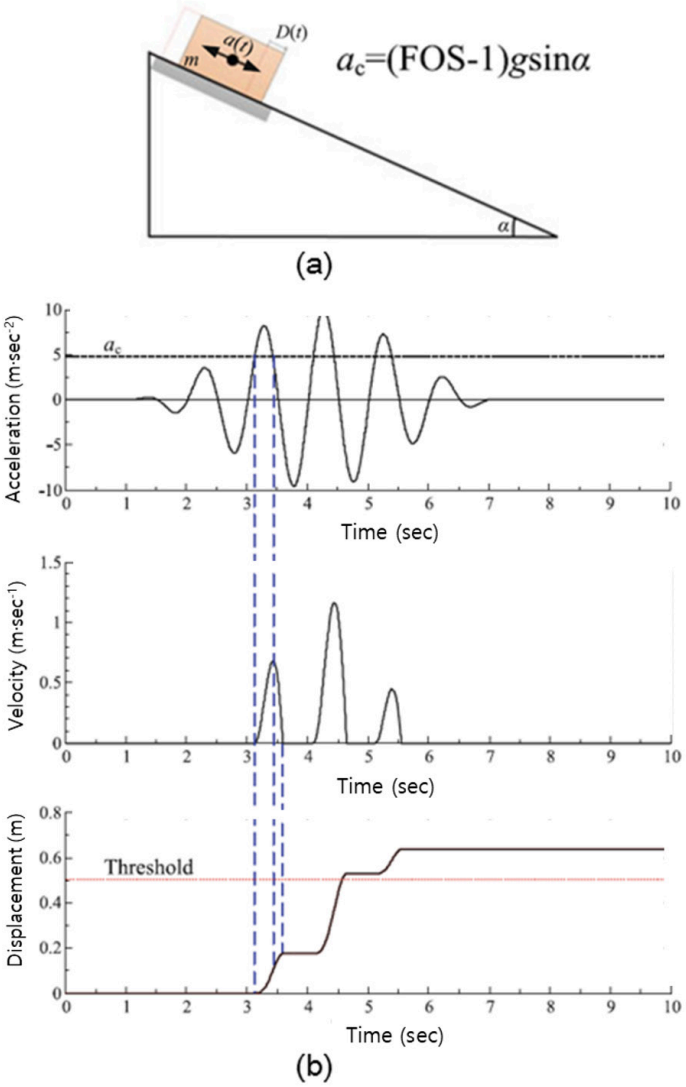

Fig. 2. Newmark displacement modeling concept. (a) Sliding block, (b) displacement estimation process. FOS, factor of safety.

Newmark 변위 계산에는 Arias 강도(a_c)가 활용되기도 하는데, Harp and Wilson (1995)에 따르면 Arias 강도는 지진계 등을 통해 얻어진 정확한 지진 기록을 토대로 획득되며 여러 연구를 통해 지진으로 발생된 산사태와 상관성이 있음이 밝혀졌다. 특히, Arias 강도는 일반적으로 사면변위를 발생시키는 힘을 산정하기 위해 사용되는 주요 인자인 최대지반가속도와 마찬가지로 지진산사태 해석에 유용하게 활용될 수 있는 것으로 알려져 있다.

Newmark 모형은 활동블럭을 강체로 가정하기 때문에 블록 내에서 지진파의 감쇠효과를 고려할 수 없고 임계가속도가 일정한 한계를 가지고 있다. 그러나 실제 지진 시 산사태 발생사례 검증을 통해 사면의 변위를 비교적 잘 예측할 수 있는 것으로 알려져 있다. 해당 모형이 개발된 이후, 수많은 응용기법들이 개발되어 왔으며, 1) 흙댐 및 제방의 지진 변형 분석(Kramer and Smith, 1997; Rathje and Bray, 1999), 2) 산사태와 관련된 변위(Jibson, 1993; Harp and Jibson, 1995; Del Gaudio et al., 2003), 3) 토목섬유를 이용한 매립지의 지진 변형(Bray and Rathje, 1998; Yegian et al., 1998), 4) 콘크리트 중력 댐의 활동해석(Leger and Katsouli, 1989; Danay and Adeghe, 1993) 분야에서 활용되고 있다.

특히, Richards and Elms (1979)가 중력식 옹벽에 적용한 연구는 세계적으로 공통적인 내진설계 가이드라인으로 활용되고 있으며, Hsieh and Lee (2011)는 Newmark 모형을 이용하여 지진산사태의 발생가능 지역을 추정하고 어떤 종류의 진동 조건 하에서 산사태가 발생하는지를 추정한 바 있다. 그리고 Varnes (1984), Rodriguez et al. (1999)은 많은 사면 안정성 분석이 지역규모 분석에 적용할 수 없으므로 구역화(rationalization)를 목적으로 사면의 취약성과 불안정성을 유발할 수 있는 파괴 메커니즘을 간단한 형태로 정량화 할 필요가 있다고 주장하였다.

최근에는 지리정보시스템(geographic information system, GIS) 도구의 발달로 동적활동블록 방법에 의한 다양한 지역규모 분석이 제안되었다. 특히, Jibson (2000), Jibson and Jibson (2003)은 지진산사태 정적해석기법과 결합한 Newmark 모형은 지진산사태의 잠재위험성을 평가하는 데 활용할 수 있음을 강조하였으며, 후속연구(Jibson, 2007)에서 전세계 대규모 지진기록(30개의 전세계 지진에서 2270건의 강한 진동 기록)을 기반으로 임계가속도비, 지진규모, Arias 강도 등의 변수를 활용하여 지진산사태로 인한 사면변위를 추정하는 회귀방정식을 도출한 바 있다. 이와 유사하게 Hsieh and Lee (2011)는 전세계 대규모 지진 시 진동기록(1999년 Chi-Chi 지진, 1999년 Kocaeli 지진, 1999년 Duzce 지진, 1995년 Kobe 지진, 1994년 Northridge 지진 및 1989년 Loma Prieta 지진)의 정보로부터 임계가속도, Arias 강도 및 Newmark 모형의 변위 간의 관계를 더욱 세분화했으며, 기존의 경험식(Jibson, 1993)을 수정하여 매우 높은 정확도의 사면변위 결과를 추정한 바 있다.

국내에서도 Lee et al. (2014)이 Jibson (2000)의 방법론을 참고하여 사면의 기하학적 특성을 고려하여 도출된 지진증폭계수를 활용하여 지진 시 서울지역의 동적안전률 및 동적변위에 대한 산사태 재해도를 작성한 사례가 있다.

응력-변형률 모형

최근 수십 년 동안 컴퓨터 기술의 급격한 발전에 따라 지진산사태 동적해석을 위한 수치모의기법이 개발·활용되고 있다. 이러한 해석기법은 일반적으로 유한요소법(finite element method, FEM)(Clough, 1960), 유한차분법(finite difference method, FDM) (Mitchell and Griffiths, 1980), 경계요소법(boundary element method, BEM) (Brebbia and Wrobel, 1980)과 같은 연속적인 방법과 강체블록탄성법(rigid block spring method, RBSM) (Yoshiki et al., 1960; Kawai, 1977, 1978), 이산요소법(discrete element method, DEM) (Cundall, 1971), 불연속변형해석(discontinuous deformation analysis, DDA) (Shi and Goodman, 1985, 1989)과 같은 불연속적인 방법으로 분류된다.

Clough (1960)는 Courant (1943)가 처음 개발한 수학적 기법을 기반으로 FEM을 개발하였으며, 해당 기법은 사면에 적용되어 지반의 정적 및 동적 변형을 모의하는데 유용한 도구를 제공하고 있으며, 여러 응용사례가 개발되고 발표되었다.

Kramer (1996)는 사면안정해석의 수치모의와 관련된 연구들을 종합하였으며, Seed (1973)는 1971년 San Fernando 지진(M 6.6)에서 San Fernando 상하부댐의 붕괴를 흙에 대한 전단 시험을 기반으로 FEM을 사용하여 각 노드의 변형 잠재력을 추정한 바 있다. 그리고 Lee (1974)와 Serff (1976)는 변형률 포텐셜법을 사용하여 흙의 강성 감소와 영구사면변위를 모의한 바 있다.

최근에는 비선형-비탄성 지반모형이 개발되어 2, 3차원 모형으로 구현되고 있다(Prevost, 1981; Griffiths and Prevost, 1988; Elgamal et al., 1990; Taiebat et al., 2011). 또한 Zheng et al. (2009), Latha and Garaga (2010) 및 Zhang et al. (2012)는 FDM을 사용하여 지진 시 사면의 안정성을 연구한 바 있다.

Ning and Zhao (2013)은 절리가 발달한 암사면과 같은 다수의 개별 블록으로 구성된 사면체의 분석을 위해 불연속적인 방법이 보다 적용성이 크다고 제시하였다. 이러한 불연속적인 방법은 지진 하중 하에서 각 블록에 영향을 미칠 개별 블록 사이의 상호 작용을 편리하게 고려할 수 있다.

응력-변형률 모형은 정적해석모형 및 동적해석모형에 비해 보다 물리적인 지진산사태 해석기법이지만, 모형 구성 및 구동을 위해 보다 고품질 자료가 요구되며, 흙의 응력-변형률 거동을 예측하기 위한 정교한 수치기법을 필요로 한다. 이러한 이유로, 응력-변형률 방법은 일반적으로 사력댐이나 일부 사면과 같은 제한적인 연구에 적용되고 있다. 따라서 이 방법은 현장특성을 반영하여 해석결과가 매우 지역적인(site-specific) 특징을 갖게 되며, 유역단위, 전국단위에 대한 지진산사태 위험도 분석 등의 문제에 적용되는데 한계가 있다.

시사점

국내외 연구동향에서 살펴보았듯이 지진산사태 분석 및 예측을 위한 사면안정해석 모형은 1) 정적해석모형, 2) 동적해석모형, 3) 응력-변형률 모형으로 구분될 수 있으며, Jibson (2011)은 각 모형별 장·단점에 따라 각기 다른 적용상황에 맞추어 적절하게 적용될 수 있다고 강조한 바 있다.

즉, 지진산사태 모의를 위한 모형개발에 있어 고려해야할 사항은 (1) 적용목적, (2) 해석을 위한 시·공간적 범위, (3) 가용 자료의 양과 질, (4) 계산자원(computing resources) 및 속도(calculation speed) 등으로 정의할 수 있다. 즉, 아무리 모형이 물리적일지라도 모형의 매개변수 등을 보정할 수 있는 실측 자료의 양과 질이 부족할 경우, 모형결과의 불확실성(uncertainty)이 증대되어 정확도(accuracy)가 낮아질 수 있다.

따라서, 유역규모이상의 지진산사태 위험지도를 작성하기 위해서는 정적해석모형 또는 동적해석모형 수준의 접근법이 가장 타당하나, 국내의 경우 대규모 지진에 따른 측정된 산사태 인벤토리가 축적되지 않아 Newmark 모형 기반의 동적해석모형보다는 정적해석모형기반의 지진산사태 위험지도 작성이 용이한 것으로 판단된다.

Scenario-based landslide modeling – case study

개요

본 연구에서는 An et al. (2016b)이 개발한 물리기반의 사면안정해석모형 TiVaSS (time variant slope stability)에 지진력을 고려할 수 있도록 알고리즘을 개선한 후, 서울 우면산을 대상으로 가상의 지진시나리오를 적용하여 물리기반 정적해석모형의 적용성을 검토하도록 한다.

TiVaSS 모형은 시불변성(time-invariant) 특성을 가지고 있는 지형, 지질, 토지피복 매개변수와 설계지반운동 수준을 고려한 지진계수를 반영할 수 있을 뿐만 아니라 강우에 의한 토양의 시변성(time-variant) 토양수분변화를 모의할 수 있다. 즉, 강우와 지진에 의한 산사태를 동시에 모의할 수 있음을 의미하며, 국내에서도 이와 유사한 연구가 Kim et al. (2018)에 의해 수행된 바 있다.

모형이론

Fig. 3과 같이 일반적으로 무한사면안정해석은 토양 내에서의 흐름은 지표와 평행하게 흐르며, 사면에서의 파괴는 전단력과 수직응력과의 관계 때문에 발생한다고 가정하며, 수평지진가속도(a)를 고려하면 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

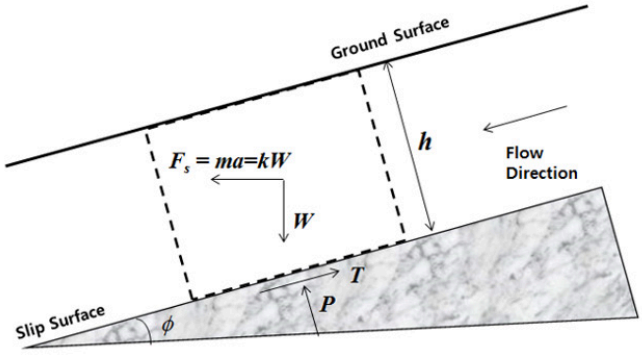

Fig. 3. Infinite slope stability method considering horizontal seismic force.

$$\tau = \frac{T}{b/cos\phi} = \frac{W}{b}\cos\phi(\sin\phi + k\cos\phi) \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{P}{b/cos\phi} = \frac{W}{b}\cos\phi(\cos\phi + k\cos\phi) \quad (2)$$

여기서 $W = \gamma_s Db$는 토층무게(kg·m^{-1}), τ는 전단력(kg·m^{-1}), P는 수직력(kg·m^{-1}), D는 토양깊이(m), b는 사면폭(m), ϕ는 사면각(°), γ_s은 흙의 단위중량(kg·m^{-3}), k는 수평지진계수이다.

무한사면의 전단강도는 Mohr-Coulomb 이론으로 일반적으로 식(3)과 같이 표현 된다.

$$S = c + \sigma' \tan\phi \quad (3)$$

여기서 c는 점착력(kg·m^{-2}), σ'는 유효응력($\sigma' = \sigma - u$) (kg·m^{-2}), u는 공극수압(kg·m^{-2}), ϕ은 내부마찰각(°)이다.

그리고 사면의 안전율 FS는 식(4)와 같이 정의된다.

$$FS = \frac{S}{\tau} \quad (4)$$

식(4)에 식(1)-(3)을 대입하면 식(5)와 같다.

$$FS = \frac{c + (\gamma_s D\cos\phi\,(\cos\phi - k\cos\phi - u)\tan\psi}{\gamma_s D D\cos\phi\,(\sin\phi + k\cos\phi)} \quad (5)$$

여기서 공극수압 $\mu = \gamma_w\psi$이면, 식(5)은 아래와 같이 표현된다.

$$FS = \frac{c + (\gamma_s D\cos\phi\,(\cos\phi - k\sin\phi - \gamma_w\psi)\tan\phi}{\gamma_s D D\cos\phi\,(\sin\phi + k\cos\phi)} \quad (6)$$

여기서 γ_w은 물의 단위중량(kg·m^{-3}), ψ는 지하수압(m)이다.

식(6)은 일반적으로 포화토에만 유효하고, 만약 토양이 건조되었다면 부압이 과도한 흡입력을 일으키므로, 불포화토에서의 유효응력은 아래와 같이 일반화할 수 있다.

$$\sigma' = \sigma - u_a + \sigma^s \tag{7}$$

여기서 u_a는 공기압이고 σ^s는 흡입응력이고 식(8)과 같다.

$$\sigma^s = -(u_a - u_\omega) S_e \tag{8}$$

여기서 u_ω는 수압, S_e는 유효포화도이며 식(9)와 같이 정의된다.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tag{9}$$

여기서, θ는 체적함수비($m^3 \cdot m^{-3}$), θ_s는 포화함수비($m^3 \cdot m^{-3}$), θ_r는 잔류함수비($m^3 \cdot m^{-3}$)이다. 만약, $u_a = 0$이고, $u_\omega = \gamma_\omega \psi$라고 가정하면 유효응력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma' = \sigma - \psi S_e \gamma_\omega \tag{10}$$

식(10)을 식(3)에 대입하여 정리하면 불포화토의 특성 및 지진력을 고려할 수 있는 식(11)과 같은 사면 안전률 공식을 유도할 수 있다.

$$FS = \frac{c + (\gamma_s \cos\phi (\cos\phi - k \sin\phi - \gamma_w \psi S_e) \tan\phi}{\gamma_s \mathrm{D}\, D \cos\phi (\sin\phi + k \cos\phi)} \tag{11}$$

따라서 토양의 특성 및 시간에 따른 토양 포화도의 변화, 그리고 해당지역에 대한 지진계수 추정이 가능하다면 식(11)을 이용하여 지진산사태 위험도 해석이 가능하다.

모형 적용

대상유역 및 수문기상 조건

2011년 7월 26일과 27일 서울시 집중호우로 인해 우면산 지역의 지반이 연약해지고, 배수로 및 사방(*砂防*)시설물의 부족 등으로 인해 우면산 인근지역 4개소(래미안APT, 신동아APT, 전원마을, 형촌마을)에서 20여명의 사상자(13명 사망)가 발생하였다.

Fig. 4와 같이 우면산 산사태 발생 당시 서울 지역에는 연강수량(약 1,400 mm)의 40%이상에 해당하는 폭우(587.5 mm)가 3일(2011.7.26 - 28)동안 내렸으며, 시간당 강수량도 50 mm이상을 기록하였다.

모형의 지진계수 설정

우면산 지역의 지진으로 인한 산사태 분석을 위해서는 식(11)에서의 수평지진계수(k)의 결정이 필요하며, 본 연구에서는 MOLIT (2018)에서 제시한 내진설계기준을 토대로 지진계수를 다음과 같은 절차로 결정하였다.

일반적으로 국내 특정구역에서의 지진계수를 산정하기 위해서는 해당지역에서의 유효수평지반가속도(effective peak ground acceleration, EPA)를 산정하고, 이를 이용하여 재현기간별 설계지반운동 수준을 결정한다. 또한, EPA를 PGA (peak ground acceleration)로 환산하여 지진의 진도 및 규모로 변환이 가능하다.

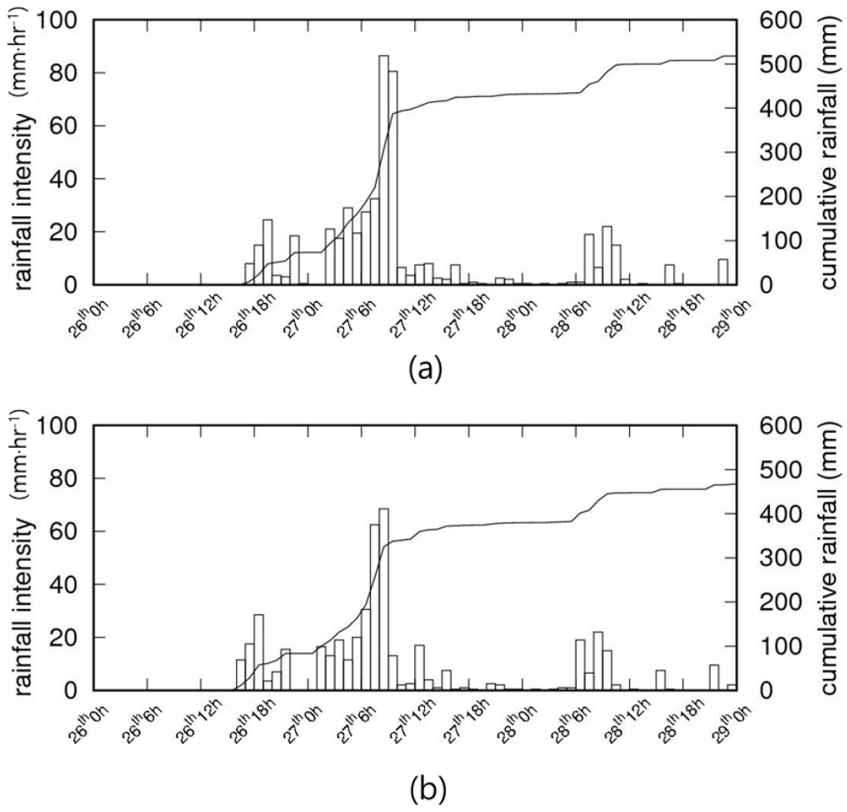

Fig. 4. Rainfall intensity and cumulative rainfall of the landslide event. (a) Namhyeon station, (b) Seocho station.

여기서, EPA는 지진구역계수와 위험도계수의 곱으로 표현된다. 예를 들면, 내진설계기준에 의해 우면산은 서울지역이므로 내진설계기준에 의해 지진구역 Ⅰ에 해당하고, 500년 빈도의 위험도계수는 1이므로 EPA (= 0.11 × 1)는 0.11 g으로 식(11)의 수평지진계수로 활용된다.

설계지반운동은 구조물이 건설되기 전에 부지 정지작업이 완료된 지면에서 지반운동으로 정의되며, 국가지진위험도의 값은 EPA값이다.

전술한 바와 같이 지진구역계수와 위험도계수를 곱하여 특정지역의 유효수평지반가속도가 결정되면, 이를 수평지진계수로 활용할 수 있다. 또한, 유효수평지반가속도를 알 경우, 식(12)와 같이 지반의 종류에 따라 최대지반가속도를 산정할 수 있으며 식(13)-(14)를 이용하여 지진의 진도 및 규모로 환산이 가능하다.

$$PGA = \beta \times EPA \tag{12}$$

여기서 β는 지반의 종류에 따라 결정된다.

$$MMI = 3 \times \log(PGA) + 1.5 \tag{13}$$

여기서 MMI는 수정 메르칼리 진도, PGA의 단위는 gal (1 g = 980 gal)이다.

$$Mg = 1 + \mathrm{MMI} \times \frac{2}{3} \tag{14}$$

여기서 Mg는 지진규모(magnitude)이다.

예를 들어, 설계지반운동수준을 보수적으로 $\beta \approx 2.5$할 경우, PGA는 0.275 g이며, 진도는 8.8, 지진의 규모는 6.9로 추정할 수 있다.

이와 같은 직접적인 방법이외에도 국가지진위험지도 등과 같은 지진규모, 진도 또는 지반가속도와 관련된 공간분포 정보를 이용하여 수평지진계수의 공간적 추정이 가능하며, 이를 활용하여 지진산사태 사면안정해석 역시 가능하다.

모형 모의결과

TiVaSS 모형을 적용하기 위한 지형자료는 1 : 5,000의 수치지도로 부터 작성된 고해상도 DEM (10 m × 10 m)를 사용하였으며, 토양 및 지질과 관련된 매개변수들은 실측 및 실험을 통한 Table 1의 값을 사용하였다. 특히, 공극수압 변화에 따른 함수비의 변화를 나타내는 토양수분특성곡선(soil water characteristic curve)의 경우 Fig. 5와 같이 van Genuchten 모형을 사용하였다.

Table 1. Time variant slope stability (TiVaSS) model parameters (An et al., 2016b).

K_s (m·s^{-1})	γ_s (kg·m^{-3})	φ (°)	c (kg·m^{-2})	θ_s (m^3·m^{-3})	θ_r (m^3·m^{-3})
1.3E - 05	1,874	29.63	1,037	0.5	0.18

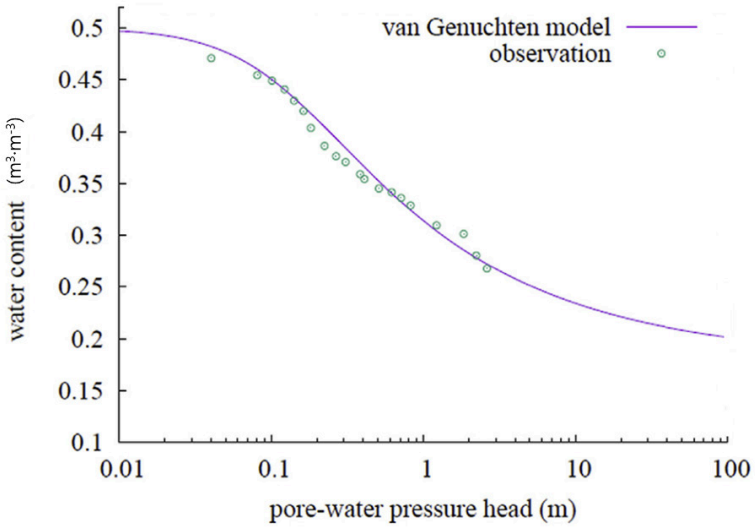

Fig. 5. Soil-water characteristic curve for the study area (An et al., 2016b).

물리기반의 TiVaSS 모형을 이용한 지진산사태에 따른 사면안정성해석을 위해 가상 지진시나리오를 토양의 건조조건과 강우가 지속된 습윤조건으로 구분하여 적용하였다. Fig. 4의 강우시작전 7월 26일 12 am을 건조조건으로 하였으며, 7월 27일 10 am을 습윤조건으로 하여 50년, 100년, 200년 빈도의 지진이 발생하였을 때 산사태 위험지역을 도시하고 비교·분석하였다. 다만, 7월 26일 이전에 내린 강수로 인한 선행토양함수는 대상지역의 초기함수비에 반영된 것으로 간주하였다.

해당 재현주기별 지진규모는 식(12)-(14)를 이용하여 6.07 (50년빈도), 6.37 (100년빈도), 6.59 (200년빈도)로 산정되었으며, 우면산 지역의 지진시나리오별 산사태 위험도는 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다.

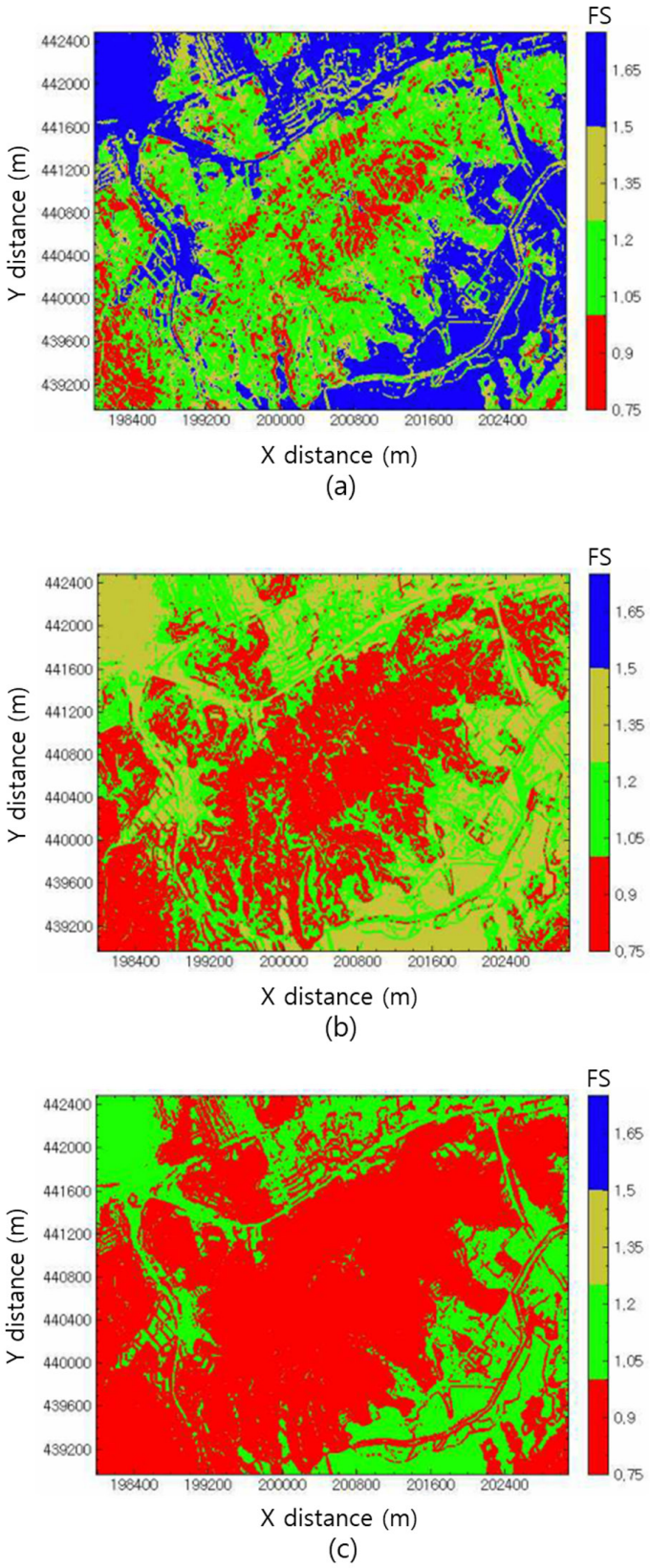

Fig. 6. Scenario based earthquake-induced landslide-prone areas (dry condition). (a) 50 years-magnitude: 6.07, (b) 100 years-magnitude: 6.37, (c) 200 years-magnitude: 6.59. FS, factor of safety.

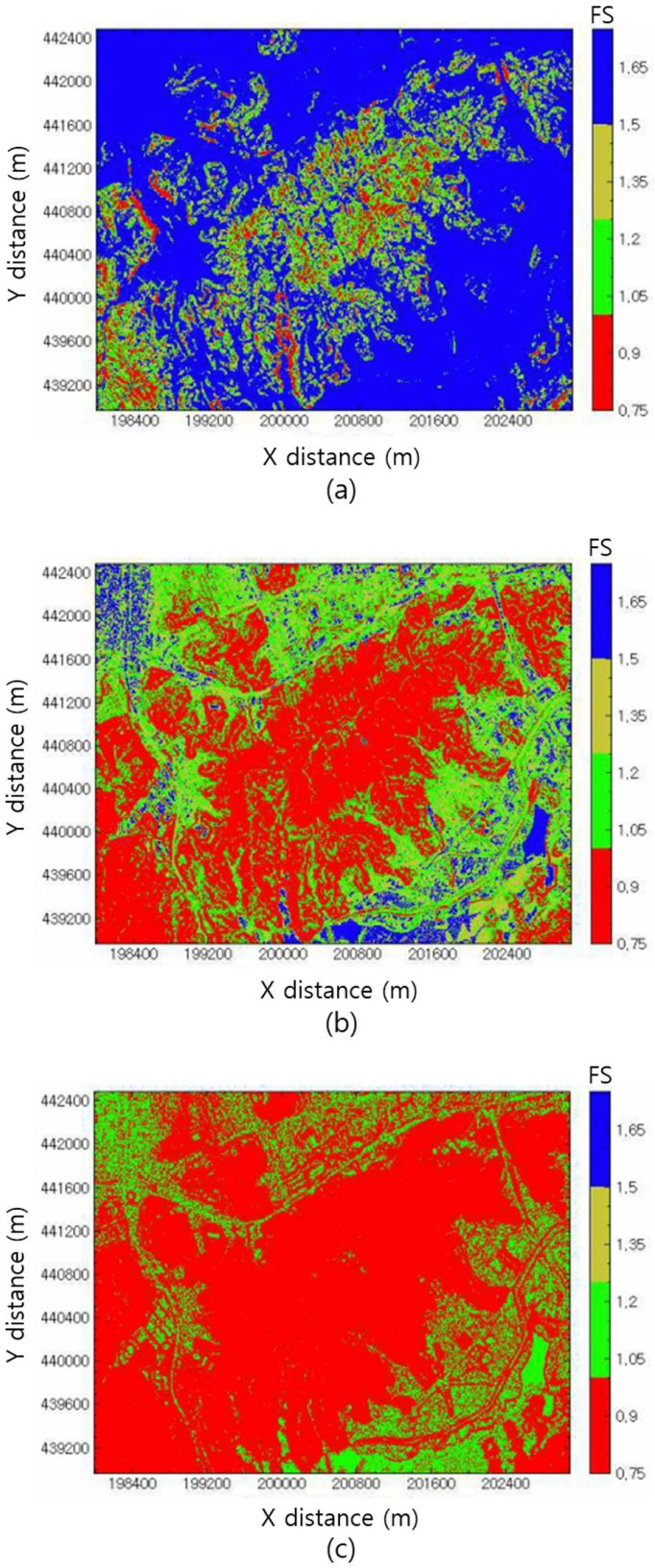

Fig. 7. Scenario based earthquake-induced landslide-prone areas (wet condition). (a) No earthquake, (b) 50 years-magnitude: 6.07, (c) 100 years-magnitude: 6.37. FS, factor of safety.

토양이 건조상태인 경우, 50년빈도의 지진발생 시 우면산 상부지역 일부에서 FS < 1에 해당하는 불안정한 사면이 발생하기 시작해서, 100년빈도일 경우, 우면산 대부분의 지역이 불안정해졌으며, 200년빈도의 지진에서는 완경사 사면을 포함한 거의 대부분의 지역이 불안정 지역으로 나타났다.

계속적인 집중호우로 인해 토양이 습윤상태가 된 경우, 지진을 고려하지 않았음에도 많은 지역이 불안정하게 나타났으며, 50년빈도의 지진이 동시에 발생했을 경우, 건조상태의 토양에서의 100년빈도와 유사할 정도로 많은 지역이 불안정하게 나타났다. 특히, 건조상태일 경우는 200년빈도의 지진에 의해 산지하부 완경사를 포함한 모든 지역이 위험하게 나타났으나 습윤상태인 경우는 100년빈도에도 대부분의 지역이 불안정하게 모의되었다.

Conclusion

국내·외 연구동향을 분석한 결과, 지진산사태 분석 및 예측을 위한 사면안정해석 모형은 (1) 정적해석모형, (2) 동적해석모형 그리고 (3) 응력-변형률모형으로 구분될 수 있다. 실제로 유역규모이상의 지진산사태 위험지도를 작성하기 위해서는 정적해석모형 또는 동적해석모형 수준의 모의기법이 요구되나 국내의 경우 실제 지진발생 시 사면재해와 관련된 현장조사 자료의 부재로 인해 지진시 사면의 동적변위 모의결과에 대한 검증이 불가하므로 내진설계기준 또는 국가지진위험도의 활용이 가능한 정적해석모형 기반의 지진산사태 위험도 평가 용이한 것으로 분석되었다.

지진산사태 모의를 위해 기개발된 물리기반의 사면안정해석모형에 지진력을 고려할 수 있도록 알고리즘을 개선하였으며, 2011년 서울 우면산을 대상으로 강우와 지진을 고려한 가상의 지진 시나리오를 적용하여 물리기반 정적해석모형의 적용성을 검토하였다.

그 결과, 대상 산지사면의 토양이 건조상태인 경우, 50년빈도의 지진발생 시 상부지역 일부에서 불안정한 사면이 발생하기 시작해서, 100년빈도일 경우, 산지 대부분의 지역이 불안정해졌으며, 200년빈도의 지진에서는 대상지역의 대부분이 불안정 지역으로 모의되었다. 또한, 강우로 인해 토양이 습윤상태인 경우, 지진을 고려하지 않더라도 많은 지역이 불안정하게 나타났으며, 강우와 50년빈도의 지진이 동시에 발생했을 경우, 건조상태의 토양에서의 100년빈도의 지진과 유사할 정도로 많은 지역이 불안정하게 나타났다.

이상의 연구결과로부터 지진으로 인한 수평지진계수를 고려한 정적해석모형의 경우, 일반 자연사면에서의 지진으로 인한 산사태 발생 메카니즘의 최소한의 물리적 특성을 반영하면서 유역규모 이상의 분석 또는 예측 등과 같은 전국단위 위험지도 작성이 가능할 것으로 판단된다.

Acknowledgements

본 연구는 환경부 “표토보전관리기술개발사업; 2019002830001”으로 지원받은 과제임.

Authors Information

Giha Lee, Department of Advanced Science and Technology Convergence, Kyunpook National University, Professor

Hyunuk An, Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University, Professor

Minho Yeon, Department of Advanced Science and Technology Convergence, Kyunpook National University, Master student

Jun Pyo Seo, Division of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science, Doctor of Philosophy

Chang Woo Lee, Division of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science, Doctor of Philosophy

References

An HU, Kim MS, Lee GH, Viet TT. 2016a. Survey of spatial and temporal landslide prediction methods and techniques. Korean Journal of Agricultural Science 43:507-521.

An HU, Viet TT, Lee GH, Kim YS, Kim MS, Noh SJ, Noh JK. 2016b. Development of time-variant landslide-prediction software considering three-dimensional subsurface unsaturated flow. Environmental Modelling & Software 85:172-183.

Anderson DG, Kavazanjian Jr. E. 1995. Performance of landfills under seismic loading. In Proc., 3rd Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. Vol. 3. pp. 277-306. University of Missouri, Rolla, MO, USA.

Bray JD, Rathje EM. 1998. Earthquake-induced displacements of solid-waste landfills. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 124:242-253.

Brebbia CA, Wrobel L. 1980. The boundary element method. Computer methods in fluids. A 81-28303 11-34. pp. 26-48. Pentech Press Ltd., London, UK.

Clough RW, Chopra AK. 1966. Earthquake stress analysis in earth dams. Journal of the Engineering Mechanics Division 92:197-212.

Clough RW. 1960. The finite element method in plane stress analysis. In 2nd Conference on Electronic Computation, Pittsburgh, PA, USA.

Courant R. 1943. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. Bulletin American Mathematics Society 49:1-23.

Cundall P. 1971. A computer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock system. In Symposium of International Society of Rock Mechanics 2:11-18.

Danay A, Adeghe L. 1993. Seismic-induced slip of concrete gravity dams. Journal of Structural Engineering 119:108-129.

Del Gaudio V, Pierri P, Wasowski J. 2003. An approach to time-probabilistic evaluation of seismically induced landslide hazard. Bulletin of the Seismological Society of America 93:557-569.

Elgamal AWM, Scott RF, Succarieh MF, Yan L. 1990. La Villita dam response during five earthquakes including permanent deformation. Journal of Geotechnical Engineering 116:1443-1462.

Griffiths D, Prevost JH. 1988. Two-and three-dimensional dynamic finite element analyses of the Long Valley Dam. Geotechnique 38:367-388.

Harp EL, Jibson RW. 1995. Inventory of landslides triggered by the 1994 Northridge. California earthquake. US Geological Survey, Colorado, USA.

Harp EL, Wilson RC. 1995. Shaking intensity thresholds for rock falls and slides: evidence from 1987 Whittier Narrows and Superstition Hills earthquake strong-motion records. Bulletin of the Seismological Society of America 85:1739-1757.

Hsieh SY, Lee CT. 2011. Empirical estimation of the Newmark displacement from the arias intensity and critical acceleration. Engineering Geology 122:34-42.

Jibson RW. 1993. Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis. Transportation Research Record 1411:9-17.

Jibson RW. 2000. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. Engineering Geology 58:271-289.

Jibson RW. 2007. Regression models for estimating coseismic landslide displacement. Engineering Geology 91:209-218.

Jibson RW. 2011. Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes—a retrospective. Engineering Geology 122:43-50.

Jibson RW, Jibson MW. 2003. Java programs for using Newmark's method and simplified decoupled analysis to model slope performance during earthquakes. US Department of the Interior. US Geological Survey, Colorado, USA.

Jibson RW, Keefer DK. 1993. Analysis of the seismic origin of landslides: Examples from the New Madrid seismic zone. Geological Society of America Bulletin 105:521-536.

KAST (The Korean Academy of Science and Technology). 2008. Earthquake disaster mitigation and management in Korea: Current status and suggestions for future improvement. [in Korean]

Kawai T. 1977. A new discrete analysis of nonlinear solid mechanics problems involving stability, plasticity and crack. In the Symposium on Applications of Computer Methods in Engineering, Los Angeles, USA.

Kawai T. 1978. New discrete models and their application to seismic response analysis of structures. Nuclear Engineering and Design 48:207-229.

Kim HS, Moon SW, Seo YS. 2018. Development of slope stability program considering rainfall and earthquake. Proceedings of the Korean Society of Engineering Geology Fall Conference 2018:27-28. [in Korean]

Kramer SL, Smith MW. 1997. Modified Newmark model for seismic displacements of compliant slopes. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 123:635-644.

Kramer SL. 1996. Geotechnical earthquake engineering. Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Series, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.

Latha GM, Garaga A. 2010. Seismic stability analysis of a Himalayan rock slope. Rock Mechanics and Rock Engineering 43:831-843.

Lee JY, Han JT, Baek Y, Park DH, Lee JH, Park IJ. 2014. Development of prediction mothod considering geometrical amplification characteristics of slope II: Construction of Landslide Hazard Map during Earthquake in Seoul. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation 14:85-92. [in Korean]

Lee KL. 1974. Seismic permanent deformation in earth dams. University of California, Los Angeles, CA, USA.

Leger P, Katsouli M. 1989. Seismic stability of concrete gravity dams. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 18:889-902.

Ling HI, Leshchinsky D. 1998. Effects of vertical acceleration on seismic design of geosynthetic-reinforced soil structures. Geotechnique 48:347-373.

Mitchell AR, Griffiths DF. 1980. The finite difference method in partial differential equations. Wiley-Interscience, Chichester and Sussex, England and New York, UK and USA.

MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure, and Transport). 2018. General seismic design. In KDS 17 10 00. [in Korean]

Newmark NM. 1965. Effects of earthquakes on dams and embankments. Geotechnuque 15:139-160.

Ning Y, Zhao Z. 2013. A detailed investigation of block dynamic sliding by the discontinuous deformation analysis. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 37:2373-2393.

Prevost JH. 1981. DYNA-FLOW: A nonlinear transient finite element analysis program. Princeton University, Department of Civil Engineering, School of Engineering and Applied Science, New Jersey, USA.

Rathje EM, Bray JD. 1999. An examination of simplified earthquake-induced displacement procedures for earth structures. Canadian Geotechnical Journal 36:72-87.

Refice A, Capolongo D. 2002. Probabilistic modeling of uncertainties in earthquake-induced landslide hazard assessment. Computers & Geosciences 28:735-749.

Richards R, Elms DG. 1979. Seismic behavior of gravity retaining walls. Journal of the Geotechnical Engineering Division 105:449-464.

Rodriguez CE, Bommer J, Chandler RJ. 1999. Earthquake-induced landslides 1980-1997. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 18:325-346.

Seed HB. 1967. Slope stability during earthquakes. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division 93:299-323.

Seed HB. 1973. Analysis of the slides in the San Fernando dams during the earthquake of Feb. 9. (1971). Report to State of California Department of Water Resources, Los Angeles References 37 Department of Water and Power. National Science Foundation: College of Engineering, University of California, San Francisco, USA.

Serff N. 1976. Earthquake induced deformations of earth dams. College of Engineering, University of California, San Francisco, USA.

Shi GH, Goodman RE. 1985. Two dimensional discontinuous deformation analysis. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 9:541-556.

Shi GH, Goodman RE. 1989. Generalization of two-dimensional discontinuous deformation analysis for forward modelling. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 13:359-380.

Stewart JP, Blake TF, Hollingsworth RA. 2003. A screen analysis procedure for seismic slope stability. Earthquake Spectra 19:697-712.

Taiebat M, Kaynia AM, Dafalias YF. 2011. Application of an anisotropic constitutive model for structured clay to seismic slope stability. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 137:492-504.

Terzaghi K. 1950. Mechanism of landslides. Application of geology to engineering practice. pp. 83-123. Geological Society of America, New York, USA.

Varnes DJ. 1984. Landslide hazard zonation: A review of principles and practice. International Association of Engineering Geology. Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slop, Paris, France.

Wasowski J, Keefer DK, Lee CT. 2011. Toward the next generation of research on earthquake-induced landslides: Current issues and future challenges. Engineering Geology 122:1-8.

Wieczorek GF, Wilson RC, Harp EL. 1985. Map showing slope stability during earthquakes in San Mateo County, California (No. 1257-E). US Geological Survey, Colorado, USA.

Wilson RC, Keefer DK. 1983. Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyote Lake, California, earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America 73:863-877.

Yegian M, Harb J, Kadakal U. 1998. Dynamic response analysis procedure for landfills with geosynthetic liners. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 124:1027-1033.

Yoshiki M, Fujita Y, Kawai T. 1960. Influence of residual stresses on the buckling of plates. Journal of Zosen Kiokai 107:187-194. [in Japanese]

Zhang Y, Chen G, Zheng L, Wu J, Zhuang X. 2012. Effects of vertical seismic force on the initiation of the Da-guangbao landslide induced by the Wenchuan earthquake. pp. 530-539. In The 8th Annual Conference of International Institute for Infrastructure, Renewal and Reconstruction, Kumamoto, Japan.

Zhang Y. 2012. Earthquake-Induced Landslides. pp. 11-39. Springer, Beijing, China.

Zheng YR, Ye HL, Huang RQ. 2009. Analysis and discussion of failure mechanism and fracture surface of slope under earthquake. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 28:1714-1723.