

비탈면 안정해석과 유지관리의 통합해석기법

Integral Method of Stability Analysis and Maintenance of Slope

박민철¹⁾ · 유병옥[†] · 백용²⁾ · 황영철³⁾

Mincheol Park · Byeongok Yoo · Yong Baek · Youngcheol Hwang

Received: January 7th, 2016; Revised: January 25th, 2016; Accepted: February 22nd, 2016

ABSTRACT : Even if the various data analyzing methods were suggested to examine the measured slope behaviors, it is difficult to find methods or procedures for connecting the analyzed results of slope stability and measured slope data. This research suggests the analyzing methods combing the stability analysis and measured data based on progressive failure of slope. Slope failure analysis by time degradation were calculated by strength parameters composed of strength reduction coefficients, also which were compared to the measured data according to the variations of safety factor and displacement of slopes. The accumulated displacement curve were shown as 3rd degree polynomials by suggested procedures, which was the same as before researches. The reverse displacement velocity curves were shown as linear function for prediction of brittle slope failures, also they were shown as 3rd degree polynomials for ductile slope failures, which were the same as the suggested equation by Fukuzono (1985) and they were very similar behaviors to the in-situ failure cases.

Keywords : Slope, Slope maintenance, Slope stability analysis, Progressive failure

요지 : 비탈면 안정해석 기법과 유지관리를 위한 계측자료 해석기법은 다양하게 제시되어 있지만 두 기법을 연계할 수 있는 방안은 제시되지 않았다. 본 연구에서는 진행성 파괴에 대한 비탈면 안정해석과 계측기반의 유지관리를 통합할 수 있는 해석기법을 제안하였다. 시간 열화에 의한 비탈면의 붕괴과정은 강도감소계수를 적용한 지반강도정수를 이용하여 정량화하고, 비탈면 붕괴 시까지의 안전율과 파괴범위를 산정하였다. 변위는 누적 변위 곡선과 변위 속도 곡선, 변위 역속도 곡선으로 정량화하여 유지관리 기법과 연계하였다. 제안된 절차로 해석을 수행한 결과, 누적 변위 곡선을 이용한 비탈면의 파괴모델은 기존 연구와 동일하게 3차 다항모델로 산정되었다. 붕괴 시점 예측에 적용되는 변위 역속도의 취성재료에서는 1차 직선식, 연성재료에서는 3차 다항식으로 감소되어 Fukuzono(1985)의 제안식과 일치하였으며 붕괴사례와도 유사한 거동을 나타내었다.

주요어 : 비탈면, 비탈면 유지관리, 비탈면 안정해석, 진행성 파괴

1. 서론

외부환경 변화로 인한 지반의 시간 열화 현상은 비탈면의 진행성 파괴를 유발시키며 전통적인 한계평형해석으로는 적절한 안정해석에 한계가 있다(Conte et al., 2010). 비탈면의 진행성 파괴는 전단 영역의 발생과 진행과정을 해석할 수 있는 유한요소해석을 이용하여야 한다(Lo & Lee, 1973; Chen et al., 1992; Sterpi, 1999). 유한요소해석을 통해 진행성 파괴 거동을 평가할 수 있지만 비탈면 안정해석에 적용하기 위해서는 안전율을 산정하는 것이 필요하다. Zienkiewicz et al. (1975)은 유한요소해석을 통해 안전율을 산정하기 위해 강도감소법을 제안하였으며 이후 많은 학자들에 의해 연구가 수행되었다(Chowdhury, 1981; Griffiths, 1980; Griffiths & Lane, 1999).

비탈면 유지관리를 위해 적용되는 계측은 표면의 이동, 지층의 이동, 기상과 지하수위의 변화 등을 측정하며, 설계 시 예측한 거동이 적절했는지를 확인하여 구체적인 설계를 하고, 기 설계된 내용을 보완하거나 향후 유지관리를 고려하여 계획하도록 설계기준에 제시되었다(Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, 2011). 하지만 비탈면의 공학적 특성과 계측자료 기반의 해석기법이 명확하지 않아 이를 개선하고자 유지관리 기법에 대한 연구들이 수행되었다(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 2006; Yoo, 2006; Korea Expressway Corporation, 2009). 주로 통계적 공정관리기법을 활용하여 이상 거동의 발생 유무를 판단하고 계측자료의 이상 영역의 거동은 누적 변위량으로 파괴모델을 선정하였다.

또한, 변위 속도를 이용하여 비탈면 붕괴 시점을 예측하기 위

1) Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

† Expressway and Transportation Research Institute, Korea Expressway Corporation (Corresponding Author : bouou@ex.co.kr)

2) Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

3) Department of Civil Engineering, Sangji University

한 연구가 많이 진행되었다(Fukuzono, 1985; Hayashi et al., 1988; Fukuzono, 1990; Voight, 1988; Martin, 1993; Saito, 1996; Rose & Kungr, 2007). 이들은 크리프 거동에 의한 비탈면의 붕괴 시점을 예측하고자 계측자료의 역속도 곡선(inverse-velocity)을 이용하였으며, 현장 붕괴사례와 실험을 통해 이를 검증하였다. 하지만 토사 비탈면의 경우 파괴면을 가정할 뿐 아니라 거동 양상이 매우 다양하므로 계측자료의 역속도 곡선만을 이용하여 비탈면 붕괴 시점을 예측하기는 매우 어렵다.

따라서 본 연구의 목적은 유한요소해석을 이용한 비탈면의 진행성 거동해석과 계측기반의 유지관리를 통합할 수 있는 해석기법을 제안하는 것이다. 시간 열화로 인해 유발되는 진행성 파괴 거동을 유한요소해석으로 해석하고 변위 결과를 정량화하여 유지관리 기법과의 연계절차를 제시하였다.

본 연구에서는 먼저 진행성 파괴 거동은 강도감소계수로 정량화하였으며 각각의 강도감소 단계에서 비선형 정적해석을 수행하였다. 이후 응력해석법으로 안전율을 산정하고 해석된 변위 결과를 누적 변위 곡선, 변위 속도 곡선, 변위 역속도 곡선으로 정량화하였다. 둘째로 해석결과를 토대로 변위 계측자료의 분석기법인 통계적 공정관리 기법에 적용하여 관리한계를 설정하고 변위 역속도 곡선을 이용한 붕괴 예측기법과의 연계절차를 제시하였다. 마지막으로 해석기법의 검증을 위해 진행성 파괴에 대한 거동을 Fukuzono(1985)가 제안한 역속도 방정식과 비교·검증하였다.

2. 이론적 배경

2.1 유한요소해석

한계평형해석은 결정론적 기법으로 가정된 파괴면에 작용하는 전단응력과 전단 강도를 비교하여 안전율을 제시한다. 하지만 한계평형해석은 해석결과로 최소안전율만을 제시하므로 시간 열화 현상에 의해 지속적인 변위와 함께 발생하는 진행성 파괴에 대해서는 적절한 안전율을 제시하지 못한다.

유한요소해석은 유지관리를 위한 계측시스템에 대하여 적절한 해석결과를 줄 수 있으며, 비탈면의 진행성 파괴 거동을 분석할 수 있는 방법이다(Duncan, 1996). 또한, 비탈면의 진행성 파괴는 유한요소해석을 통해 연구되어 왔으며, Zienkiewicz et al.(1975)은 강도감소계수(SRF, Strength Reduction Factor)를 적용한 강도감소법을 제시하였고, 한계평형해석과 같이 안전율을 결과로 산정하게 된다. 이후 Griffiths(1980)는 광범위한 지반조건과 기하형상에 따라 강도감소법을 적용하여 Bishop & Morgenstern(1960)의 차트와 비교·분석을 통해 해석기법을 검증하였다.

응력해석법은 간편법인 한계평형해석과 고등해석인 유

한요소해석의 장점을 조합한 해석법이다. 먼저, 유한요소법을 수행하여 비탈면의 응력상태를 해석하고 한계평형법의 가상활동면들에 대한 안전율을 산정하게 된다. 그리고 한계평형해석의 가상활동면 중에 최소안전율과 임계단면을 산정하는 방식이다. 유한요소해석을 수행할 때 지반재료의 구성 모델은 한계평형해석의 파괴규준과 동일한 Mohr-Coulomb의 항복규준을 사용하게 된다.

응력해석법에 의한 안전율(FOS, Factor Of Safety)은 Eq. (1)과 같다.

$$FOS = \frac{\int_s \tau_f dT}{\int_s \tau_m dT} \quad (1)$$

여기서, FOS는 안전율, τ_m 은 유발되는 전단응력이며 τ_f 는 Mohr-Coulomb 파괴규준에 따른 전단 강도이다.

2.2 통계적 공정관리 기법

국내에서 대표적으로 적용되는 비탈면 계측자료 기반의 유지관리 기법은 통계적 공정관리 기법으로 제조업 분야에서 제품의 불량률을 줄이기 위해 적용하는 통계적 공정관리(SPC, Statistical Process Control)를 활용한 것이다. 통계적 공정관리의 모집단은 비탈면의 변위 계측자료이며, 평균과 표준편차가 관리도의 관리한계 내에 존재하면 비탈면은 통계적으로 안정상태에 있다고 할 수 있다. 비탈면의 이상영역을 관리도를 이용하여 쉽게 이상 영역의 발생 여부를 판단할 수 있는 장점이 있다.

이 방법은 계측자료의 평균을 이용하는 \bar{X} 관리도와 표준편차 혹은 범위를 이용하는 R관리도를 동시에 사용한다.

\bar{X} 관리도의 관리한계와 중심선은 Eq. (2)를 이용하여 구한다.

$$\begin{aligned} UCL &= \bar{x} + A_2 \bar{R} \\ CL &= \bar{x} \\ LCL &= \bar{x} - A_2 \bar{R} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, 상수 A_2 는 표본크기 n의 함수이다. \bar{x} 는 평균 μ 의 예측치이며, \bar{R} 는 표준편차 σ 의 예측치이다.

R 관리도의 관리한계와 중심선은 Eq. (3)을 이용하여 구한다.

$$\begin{aligned} UCL &= D_4 \bar{R} \\ CL &= \bar{R} \\ LCL &= D_3 \bar{R} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 상수 D_3 와 D_4 는 표본크기 n의 함수이다.

2.3 붕괴 시점 예측

비탈면의 붕괴 시점을 예측하기 위한 기법으로 암반의 크립 거동에 따라 시간과 변위와의 상관관계를 이용한 다양한 모델들이 제시되었다(Saito, 1961, Voight, 1988). 이러한 모델들을 비탈면에서 일반화된 기법으로 적용하기 어려워 Fukuzono(1985)는 시간 경과에 따라 지반 변위가 변화하는 특성을 역속도와 시간과의 관계로 표현하는 역속도 곡선을 제안하였다. 이 역속도 모델은 인공 산사태를 재현한 실험실 실험을 수행하여 가속도의 변화를 계측한 자료를 이용하여 유추되었다. 붕괴 시점은 변위 속도가 증가하면서 역속도 관계가 0이 되어가는 추세선을 형성하게 되므로 Fukuzono는 붕괴 시점을 Eq. (4)와 같이 제안하였다.

$$\frac{1}{V} = [A(\alpha - 1)]^{\frac{1}{\alpha-1}} \cdot (t_f - t)^{\frac{1}{\alpha-1}} \quad (4)$$

여기서, t 는 시간이며, t_f 는 파괴시간, V 는 변위 속도, A 와 α 는 곡선맞춤을 위한 상수이다. α 가 2보다 클 때는 볼록형(convex) 패턴이며, α 가 2 이하일 때는 오목형(concave) 패턴을 보이게 된다.

시간과 역속도 관계를 이용하면 비탈면 붕괴 시의 역속도 관계가 0이 되는 장점으로 인해 국외에서 많이 적용되고 있다(Petley et al., 2002; Wartmann & Malasacage, 2013). Petley et al.(2002)은 비탈면 붕괴 사례들에 대한 추세선의 패턴을 분석하였지만 이러한 패턴들은 계측변위자료를 비탈면 붕괴 후에 분석한 것이므로 비탈면의 붕괴 시점을 실시간으로 예측하기는 매우 어렵다. 따라서 비탈면의 유지관리 단계에서 계측자료를 토대로 붕괴 시점을 예측하기 위해서는 역속도 곡선의 패턴에 대한 설계단계의 해석이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 진행성 파괴에 대한 해석 절차를 제시하고, 계측자료 기반의 유지관리기법과 연계가 가능하도록 해석절차를 수립하였다.

3. 진행성 파괴에 따른 비탈면 안정해석

3.1 해석절차

유한요소법을 이용한 비탈면의 진행성 파괴해석 및 계측자료의 통합해석 단계는 총 10단계로 구성되며, 해석결과를 유지관리 기법에 적용하여 연계한다. 본 연구에서 제안된 비탈면 안정해석의 절차에 대한 상세한 설명은 아래와 같다.

(1) Step 1 : 먼저 진행성 파괴에 대한 검토를 위해서는 비탈면의 지층분포에 따라 지반조사 자료를 토대로

지질 공학적 관점과 토질역학적 관점을 충분히 고려하여 비탈면의 기하형상과 요소망을 생성한다.

- (2) Step 2 : 지반 물성치를 산정한다. 유한요소해석에 적용된 모델은 Mohr-coulomb 모델을 사용한다.
- (3) Step 3 : 전단 강도 정수는 강도감소계수에 따라 감소시키게 되며 파괴 시의 점착력은 Eq. (5)와 같고 내부마찰각은 Eq. (6)과 같다. 강도감소계수를 이용할 경우, 초기 강도감소계수와 증분값을 결정하여야 하며 일반적인 강도감소법에서는 각각 1.0과 0.05로 적용한다. 최종적인 강도감소계수는 비선형 정적해석에서 수렴되지 않는 단계일 때의 계수 값이다.

$$c'_f = c' / SRF \quad (5)$$

$$\phi'_f = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi'}{SRF} \right) \quad (6)$$

여기서, c' 은 점착력, c'_f 는 파괴 시 점착력, ϕ' 은 내부마찰각, ϕ'_f 은 파괴 시 내부마찰각이다. SRF 는 강도감소계수이다.

- (4) Step 4 : 유한요소해석에서는 비탈면의 초기지중응력을 산정하는 것이 중요하며, 지반조사자료를 토대로 k_0 조건에서 산정하게 된다.
- (5) Step 5 : 초기 지중응력산정을 토대로 응력해석법을 통해 안전율을 산정하게 된다. 이때 감소된 강도 정수에 따라 반복해석을 통해 안전율의 감소를 파악하며 파괴면은 한계평형해석과 동일하게 적용하게 된다.
- (6) Step 6 : 진행성 파괴에 대한 거동을 해석하기 위해 비선형 정적해석을 수행하게 되며, 각 강도감소계수의 단계에 따라 수렴되지 않을 때(파괴가 발생할 때)까지 반복해석을 수행하여야 한다.
- (7) Step 7 : 강도감소에 따른 반복해석을 통해 비탈면의 진행성 파괴에 대한 변위를 파악한다.
- (8) Step 8 : Step 7 과정을 통해 비탈면의 최대변위 발생 지점의 누적 변위 곡선을 산정한 후 비탈면 계측계획과 연계하여야 한다. 즉 해석결과를 이용한 변위속도 곡선으로 비탈면의 파괴모델을 만들며, 비탈면 유지관리단계에서 계측된 변위 자료의 누적 변위 곡선과 상호비교하게 된다.
- (9) Step 9 : 변위 속도 곡선은 비탈면의 유지관리 단계에서의 관리기준으로 활용될 수 있으며 비탈면 안정해석 단계에서 이를 이용하여 관리기준을 설정할 수 있다.
- (10) Step 10 : 마지막으로 변위 역속도 곡선을 산정하게 된다. 변위 역속도가 0이 되는 지점이 붕괴가 발생하는 시점이므로 다양한 붕괴예측 기법과의 연계가 가능하다.

3.2 해석결과

본 절에서는 지반특성이 연성거동 및 취성거동인 경우를 분리하여 제안된 해석절차에 따라 비탈면 안정해석을 수행하였다.

3.2.1 Case 1

비탈면의 진행성 거동해석을 위해 해석 비탈면은 유한비탈면으로 높이는 10.0m이고, 표준경사도인 1:1.2로 하여 기하형상과 요소망을 생성하였다(Fig. 1).

유한요소해석에 적용된 모델은 Mohr-coulomb 모델을 사용하며, 유한요소해석을 위해 내부마찰각, 점착력, 팽창각, 탄성계수, 포아송비 및 단위중량이 필요하나 항복과정에서 발생하는 체적변화를 나타내는 팽창각은 안전율을 산정하는 비탈면 안정해석에서는 중요성이 떨어진다(Griffiths & Lane, 1999). 본 연구에서는 팽창각을 0으로 적용하며 항복과정에서의 체적변화가 일정하도록 하였다. 적용된 지반 물성치는 Table 1의 Case 1과 같이 점착력 10kPa, 내부마찰각 30°이다.

Fig. 2(a)는 강도감소계수를 적용하여 점착력과 내부마찰각의 감소 정도를 나타낸 것이다. 점착력은 초기 10kPa에서 최종 4.8kPa까지 감소되었으며 내부마찰각은 14.5°일 때 유한요소해석에서 수렴되지 않아 비탈면 붕괴가 발생된 것으로 나타났다.

계수화된 강도 정수에 따른 각 단계별로 비선형 정적해석을 수행한 결과는 Fig. 3과 같다. 먼저 응력해석법으로 안전율을 산정하고 비탈면 상부의 변위로 누적 변위 곡선과

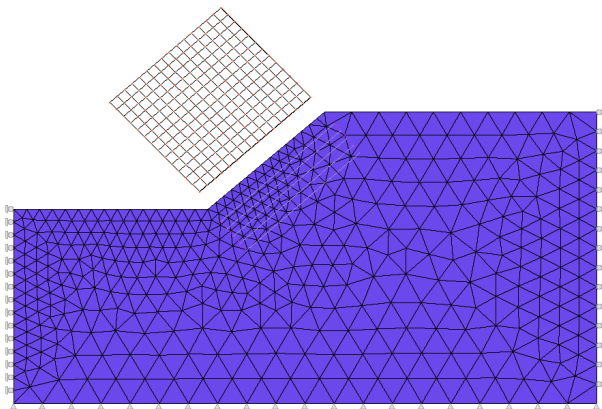


Fig. 1. Mesh and boundary conditions

Table 1. Physical parameters of soil in numerical analysis

	Case 1	Case 2
ϕ' (Degree)	30	40
c (kPa)	10	0
ψ (Degree)	0	0

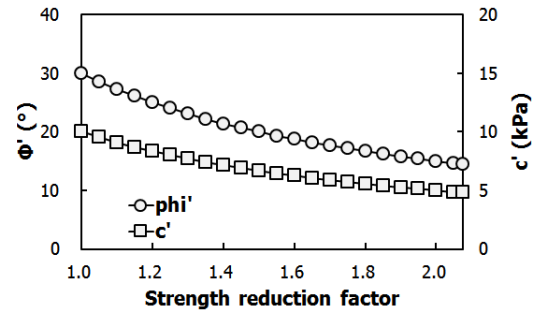
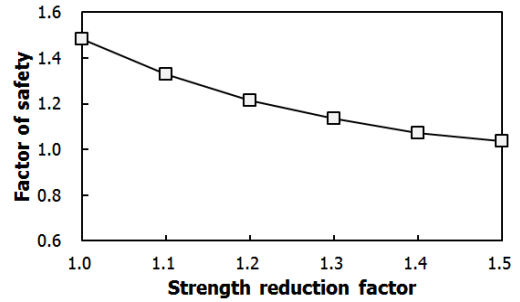
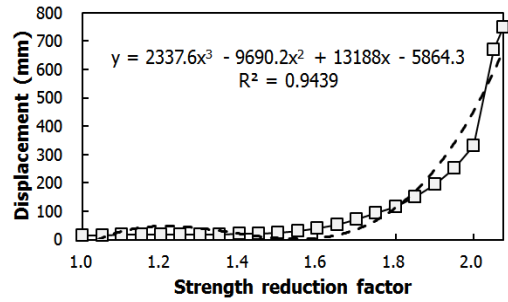


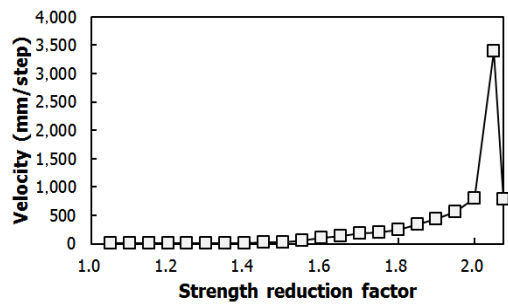
Fig. 2. Parameter variation of case 1 according to strength reduction factor



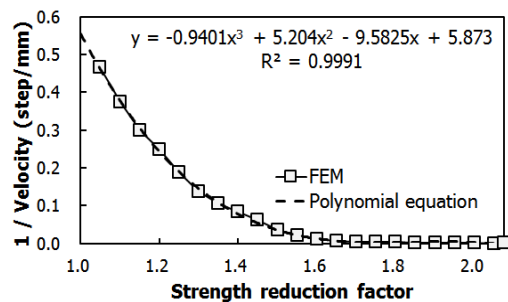
(a) Factor of safety



(b) Displacement curve



(c) Displacement-velocity curve



(d) Displacement-inverse velocity curve

Fig. 3. Analysis results of case 1

변위 속도 곡선, 변위 역속도 곡선을 작도하였다. Fig. 3(a)는 응력해석법에 의한 안전율 감소를 나타낸 것이다. Fig. 3(b)~(d)는 강도가 감소된 각 단계(Step)에서의 변위를 산정한 결과이다. Fig. 3(b)의 누적 변위 곡선에서는 강도감소계수 1.6 단계 이후부터 변위가 발생되어 강도감소계수 2.0 이후에 급격한 변위가 발생하는 것으로 나타났다. 비탈면의 파괴모델은 $y = 2,337.6x^3 - 9,690.2x^2 + 13,188x + 5,864.3$ 의 3차 방정식으로 산정되었다. 계측자료 기반의 파괴모델과 비교하면 Han & Chang(2005)에 의해 제시된 느릅재 현장과 동일한 3차 다항모델로 산정되었다. Fig. 3(c)는 누적 변위의 변위 속도 곡선을 나타낸 것이다. 강도감소계수 2.0에서 급격한 변위 속도를 나타냄을 알 수 있다. Fig. 3(d)는 변위 역속도 곡선을 나타낸 것이다. 변위 역속도 곡선은 $y = -0.9x^3 + 5.2x^2 - 9.6x + 5.9$ 의 3차 다항식으로 변위 역속도가 급속히 감소되었다.

3.2.2 Case 2

Case 2의 해석조건은 점착력이 없는 취성재료로 지반을 가정하였다. 진행성 파괴에 의한 붕괴 거동의 차이를 판단하기 위해, Case 1과 동일한 비탈면 기하형상에 지반의 강도정수만을 달리하여 해석하였다. 지반 물성치는 Table 1의 Case 2와 같이 점착력 0kPa, 내부마찰각 40°이며, Fig. 4와 같이 강도감소계수를 적용하였다. 내부마찰각의 변화가 21.5°로 변할 때 유한요소해석에서 수렴되지 않아 비탈면 붕괴가 발생된 것으로 나타났다.

각 단계별로 비선형 정적해석 수행결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5(a)에서 응력해석법에 의한 안전율 감소를 나타낸 것으로 Case 1(Fig. 3(a))과 비교하면 Case 2 비탈면의 경우, 점착력이 없어 강도감소계수가 1.2일 때 안전율이 감소된 후 큰 변화가 발생되지 않는 것으로 나타났다. Fig. 5(b)의 누적 변위 곡선에서는 Case 1(Fig. 3(b))과 달리 초기 단계부터 변위가 지속적으로 발생되었으며 강도감소계수 1.6단계 이후부터 변위가 크게 증가되는 것으로 나타났다. 비탈면의

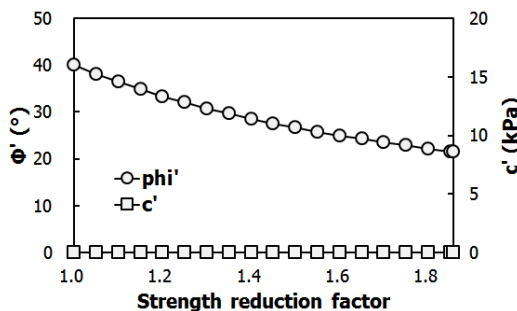
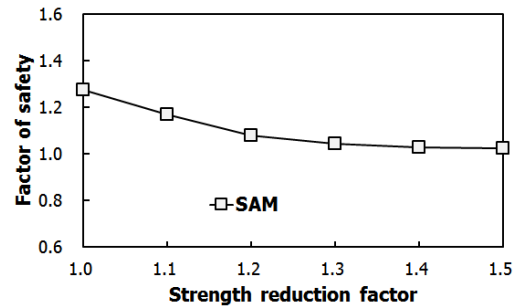
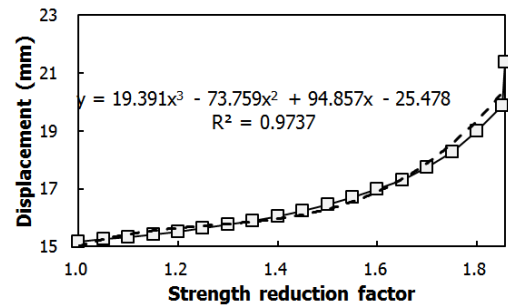


Fig. 4. Parameter variation of case 2 according to strength reduction factor

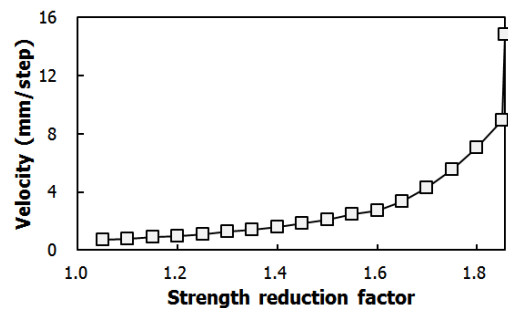
파괴모델은 Case 1의 거동과 거의 동일하였으며 Han & Chang (2005)에 의한 느릅재 현장과 유사한 3차 다항모델이 도출되었다. 방정식은 $y = 19.4x^3 - 73.8x^2 + 94.9x - 25.5$ 의 3형태로 나타났다. Fig. 5(c)는 누적 변위의 변위 속도 곡선을 나타낸 것으로 강도감소계수 1.6과 1.9에서 변곡점을 보였다. Fig. 5(d)는 변위 역속도 곡선을 나타낸 것으로 Case 1과 달리 $y = -1.6x + 2.9$ 의 1차 직선식으로 감소되었다.



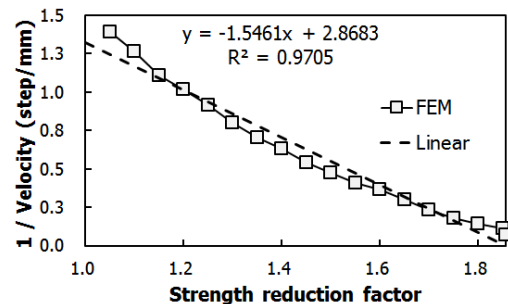
(a) Factor of safety



(b) Displacement curve



(c) Displacement-velocity curve



(d) Displacement-inverse velocity curve

Fig. 5. Analysis results of case 2

4. 비탈면의 통합 유지관리 기법

4.1 해석과정의 연계

Yoo(2006)는 비탈면의 유지관리를 위한 계측자료 기반

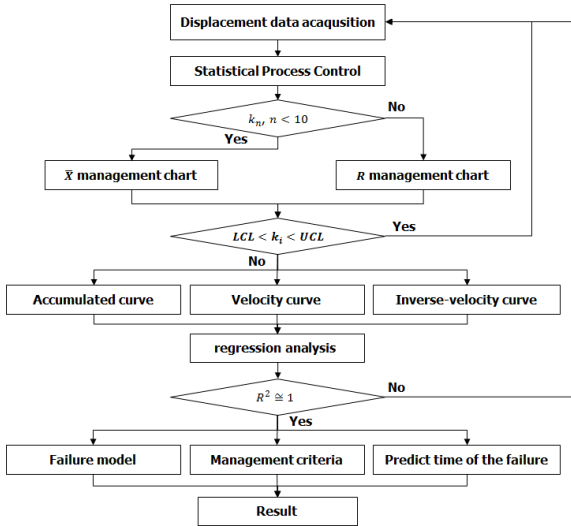


Fig. 6. Analysis procedure of progressive failures in slope

의 통계적 의사결정 알고리즘을 제시하였다. 통계적 공정관리 기법을 적용하여 관리한계를 벗어나면 1차 점검을 수행하고 회귀분석을 통해 비탈면 거동이 한계값을 나타내는 점근선에 근접하면 2차 점검을 수행하도록 하였다.

Fig. 6은 본 연구결과로 제시된 계측자료 해석절차를 나타낸 것이다. 본 연구에서 제안된 해석과정은 통계적 공정관리 기법의 관리기준, 누적 변위 곡선의 파괴모델, 변위 속도 곡선의 관리단계 및 붕괴 시점을 예측하기 위한 변위 역속도 곡선에 대한 파괴예측 기법을 연계 수행하도록 되어있다.

4.2 통합해석과정

4.2.1 이상 영역 판단

통계적 공정관리기법은 비탈면에서 발생하는 이상 영역을 판단하는 기법으로 모집단인 변위 계측자료를 이용하는 관리도의 관리한계를 벗어나면 비탈면의 이상 거동이 유발된 것으로 판단한다. 그러나 유한요소해석을 통한 비탈면의 진행성 거동해석으로 산정된 변위를 이용하여 통계적 공정관리 기법을 적용하면 지표와 지중의 변위 값을 모두 계산할 수 있으므로 지표 변위계 또는 지중경사계 등에서 구한

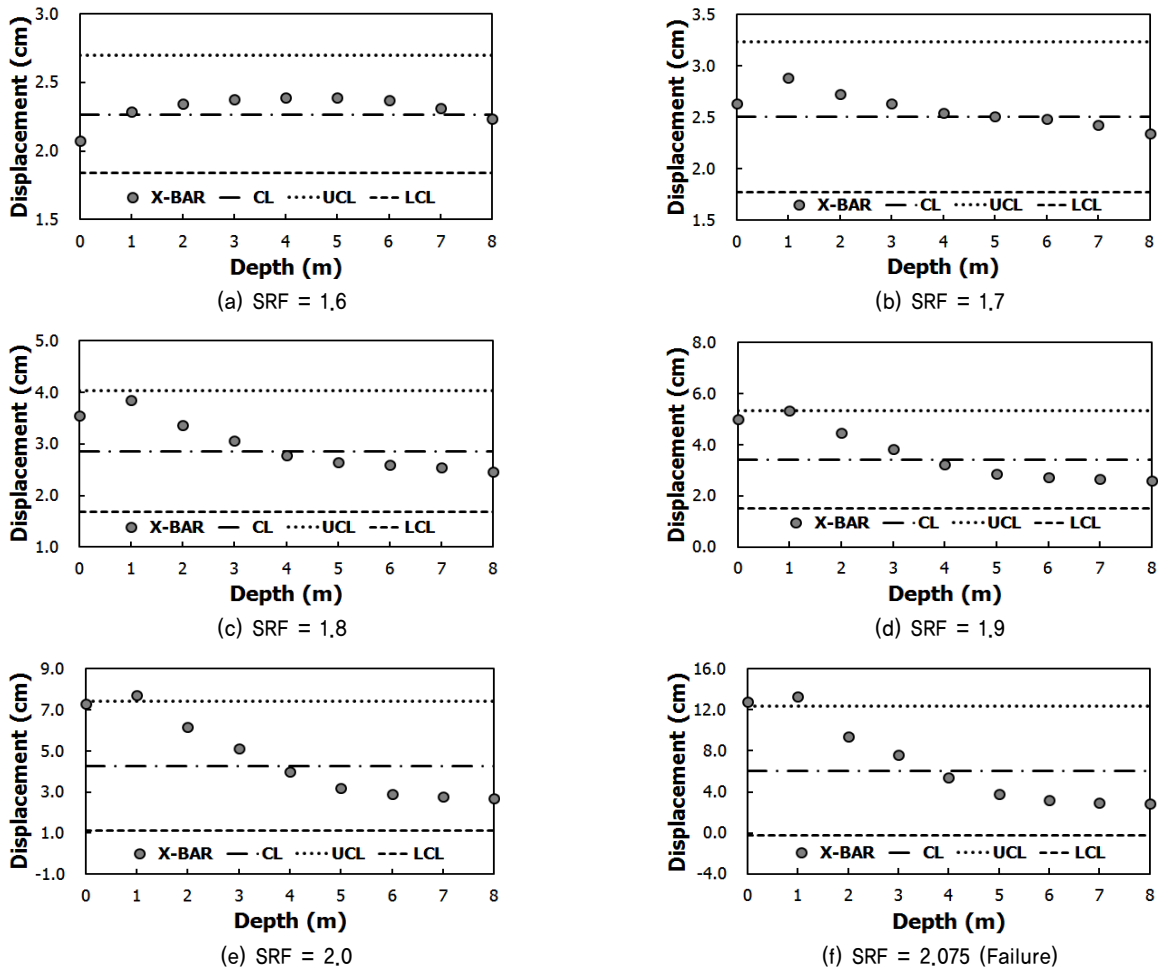


Fig. 7. \bar{X} management chart according to depths

다양한 계측 자료와 비교·분석할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서 제안된 해석절차에 따라 심도별 누적 변위 곡선을 이용한 통계적 공정관리 기법을 적용하여 관리한계를 선정할 수 있다. 심도별 누적 변위 곡선에서 각 강도감소계수 단계별로 통계적 공정관리기법을 적용하여 \bar{X} 관리도를 작성하면 Fig. 7과 같다. Fig. 7(a)는 강도감소계수가 1.6일 때이며 심도별로 관리한계 안에 존재하는 것을 알 수 있다. Fig. 7(d)와 같이 강도감소계수가 1.9일 때 관리한계를 초과

하는 것을 볼 수 있다. 그러므로 변위 자료를 통계적 공정관리 기법에 적용하여 현장 계측자료 기반의 관리기준에 대한 한계값을 설정할 수 있다.

4.2.2 비탈면의 파괴모델

Fig. 8은 비탈면 상부의 지표면에서부터 지중 7.0m 지점까지의 누적 변위 곡선을 나타낸 것이다. 지표면에서 가장 큰 변위가 발생되며 파괴면 아래에서는 변위가 거의 발생되지

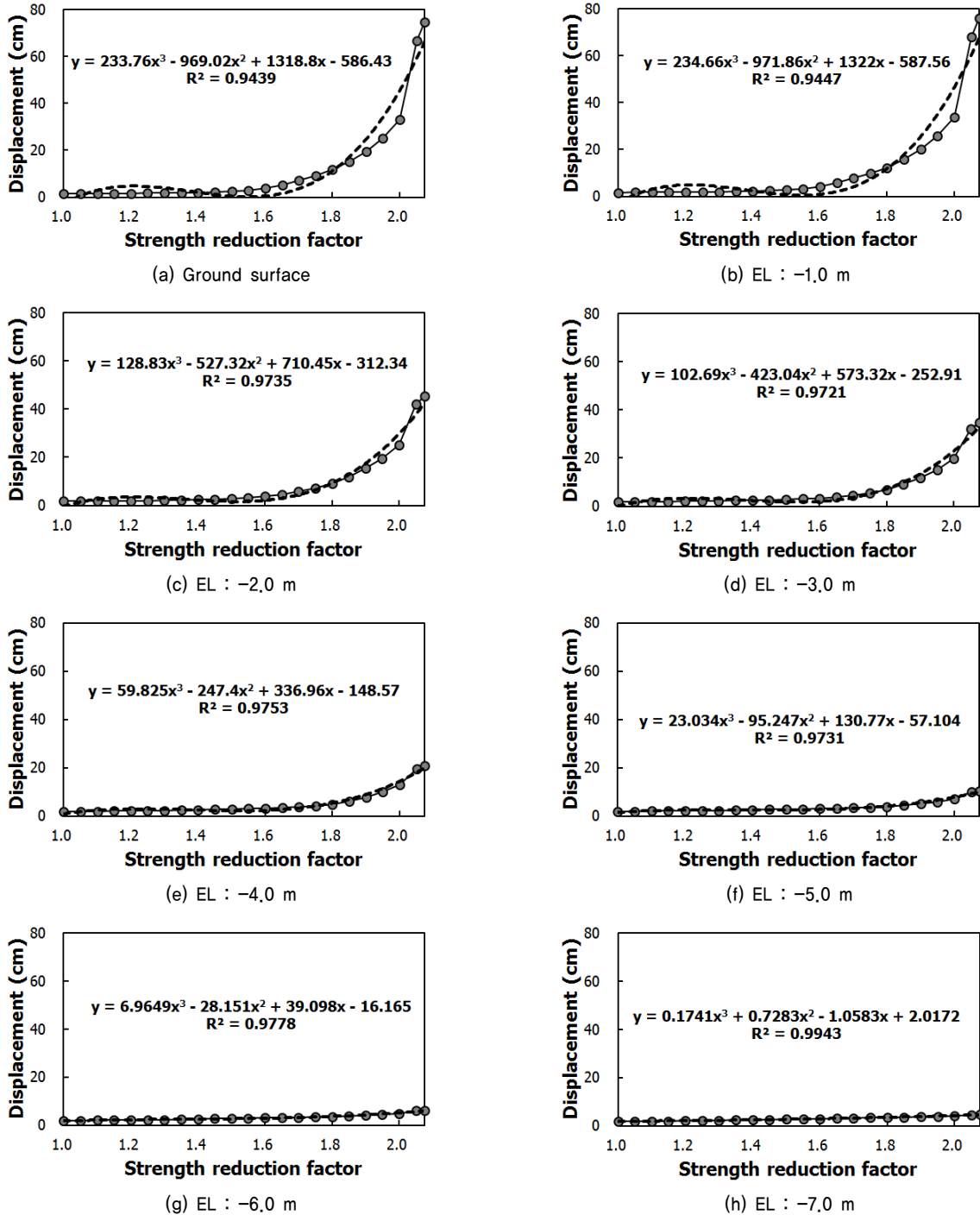


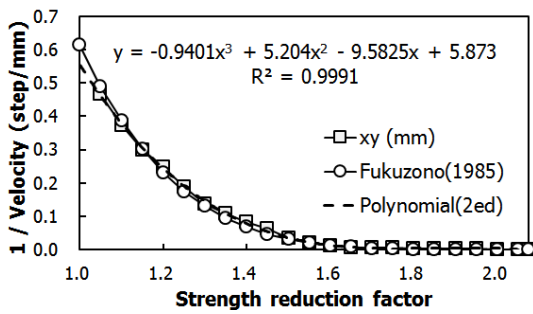
Fig. 8. Accumulated displacement curve according to depths

않음을 알 수 있다. Fig. 8(f)와 같이 지중 5.0m 지점에서는 변위가 거의 발생되지 않았으며 이는 파괴면 아래에 존재하기 때문이다. 이러한 심도별 누적 변위 곡선은 현장 비탈면의 지중 변위를 측정하기 위해 적용하는 지중경사계의 계측 자료에 대한 심도별 기준으로 적용할 수 있다.

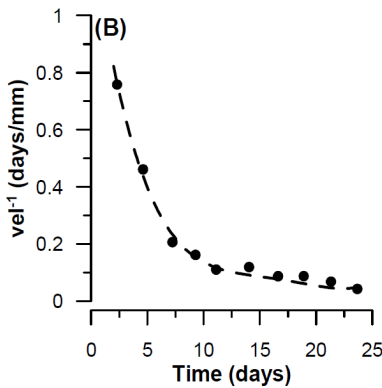
4.2.3 파괴 시점 예측

Fukuzono(1985)는 진행성 거동으로 인한 비탈면 붕괴 시점을 변위 역속도 곡선에서 예측하고자 하였다. 변위 역속도 곡선의 결과는 Fig. 9~10과 같다. 지반의 강도 정수가 점착력 10kPa 및 내부마찰각이 30°인 Case 1의 경우, 변위 역속도는 3차 다항식으로 급속히 감소되었으며 Fukuzono의 제안식에서 $A=4.0$, $\alpha=1.21$ 로 산정되어 오목한 패턴을 나타내었다(Fig. 9(a)). Petley et al.(2002)에 의해 보고된 일본의 Kunini 비탈면 붕괴사례와 유사한 연성 거동의 패턴을 나타내었다(Fig. 9(b)).

지반의 강도 정수가 점착력 0kPa 및 내부마찰각이 40°인 Case 2의 경우, 변위 역속도 곡선은 1차 직선식으로 감소되었으며, $A=2.05$, $\alpha=1.79$ 로 산정되어 선형 패턴을 나타내었다(Fig. 10(a)). Petley(2004)에 의해 보고된 영국의 Selborne 절토 비탈면 붕괴사례와 유사한 패턴을 나타내었다(Fig. 10(b)).



(a) Displacement-inverse velocity curve



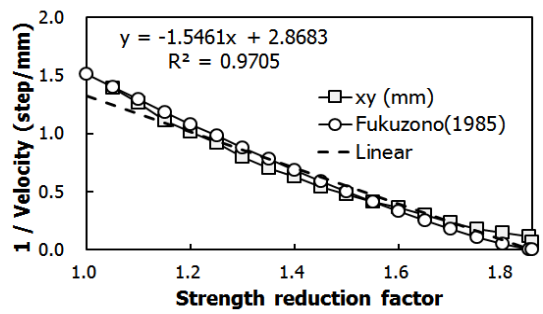
(b) Failure case of Kunini slope movement

Fig. 9. Results of ductile slope (Case 1)

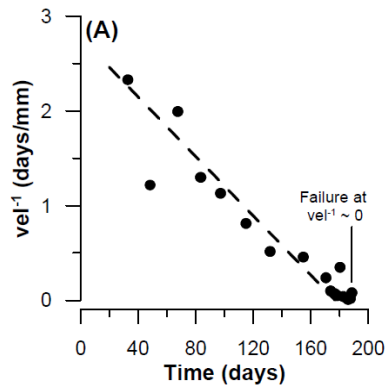
5. 결론

본 연구의 목적은 유한요소법에 의한 진행성 비탈면 안정해석과 현장계측기반의 유지관리를 통합할 수 있는 해석 절차를 제안하기 위한 것으로 제안된 해석절차에 따라 연성 및 취성지반의 비탈면을 통합 분석하였다. 비탈면 안정해석 결과를 계측기반의 유지관리 기법에 적용한 결과를 요약 정리하면 아래와 같다.

- (1) 제안된 통합해석기법을 적용한 결과, 진행성 파괴과정을 정량화할 수 있었으며 해석결과로 누적 변위 곡선, 변위 속도 곡선 및 변위 역속도 곡선을 산정할 수 있었다.
- (2) Case 1의 해석결과, 초기 지반 강도가 점착력 10kPa, 내부마찰각 30°에서 파괴 시에는 점착력은 4.8kPa, 내부마찰각은 14.5°로 나타났다. 누적 변위 곡선의 파괴모델은 3차 방정식인 $y = 2,337.6x^3 - 9,690.2x^2 + 13,188x + 5,864.3$ 으로 산정되었다.
- (3) Case 1의 변위 역속도 곡선은 3차 다항식으로 $y = -0.9x^3 + 5.2x^2 - 9.6x + 5.9$ 나타났다. Fukuzono 제안식에서 $A = 4.0$, $\alpha = 1.21$ 로 오목한 패턴으로 나타났고, 일본의 Kunini 비탈면 붕괴사례와 유사한 연성 거동의 패턴을 보였다.
- (4) Case 2의 해석결과, 초기 지반 강도가 점착력 0kPa, 내부



(a) Displacement-inverse velocity curve



(b) Failure case of Selborne cut-slope experiment

Fig. 10. Results of brittle slope (Case 2)

마찰각 40°에서 내부마찰각이 21.5°일 때 파괴가 발생된 것으로 나타났다. 누적 변위 곡선의 파괴모델은 $y = 19.4x^3 - 73.8x^2 + 94.9x - 25.5$ 의 3차 방정식으로 산정되었다.

- (5) Case 2의 변위 역속도 곡선은 Case 1과 달리 $y = -1.6x + 2.9$ 의 1차 직선 형태를 보였으며, $A = 2.05$ 및 $\alpha = 1.79$ 로 계산되었다. 또한, 영국의 Selborne 절토비탈면붕괴 사례와 유사한 패턴을 나타내었다.

본 연구에서 제안된 통합해석절차는 유한요소해석을 이용한 진행성 파괴 거동을 정량화하여, 계측기반 유지관리에 적용할 수 있는 장점이 있다. 따라서 이러한 과정에 대한 추가적인 연구를 통해 제안된 해석기법의 정확성과 신뢰성을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(15SCIP-B065985-03)에 의해 수행되었습니다.

References

- Bishop, A. W. and Morgenstern, N. R. (1960), Stability coefficients for earth slope, *Géotechnique*, Vol. 10, pp. 129~150.
- Chen, Z., Morgenstern, N. R. and Chan, D. H. (1992), Progressive failure of the carsington dam: a numerical study, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 29, No. 6, pp. 971~988.
- Chowdhury, R. N. (1981), Discussion on stability analysis of embankment and slopes, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 107, pp. 691~693.
- Conte, E., Silvestri, F. and Troncone, A. (2010), Stability analysis of slopes in soils with strain-softening behavior, *Computers and Geotechnics*, Vol. 37, pp. 710~722.
- Duncan, J. M. (1996), State of the art: Limit equilibrium and finite-element analysis of slopes, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 104, No. 2, pp. 691~693.
- Fukuzono, T. (1985), A new method for predicting the failure time of slope, *Proceedings of 4th International Conference and Field Trip on Landslides*, Tokyo, pp. 145~150.
- Fukuzono, T. (1990), Recent studies on time prediction of slope failure, *Landslide News*, Vol. 4, pp. 9~12.
- Griffiths, D. V. (1980), Finite element analyses of walls, footings and slopes, Ph.D thesis, University of Manchester, United Kingdom. pp. 18~89.
- Griffiths, D. V. and Lane, P. A. (1999), Slope stability analysis by finite elements, *Géotechnique*, Vol. 49, No. 3, pp. 387~403.
- Han, H. S. and Chang, K. T. (2005), Predicting the failure of slope by mathematical model, *Journal of the Korea Geotechnical Society*, Vol. 21, No. 2, pp. 145~150.
- Hayashi, S., Park, B. W., Komamura, F. and Yamamori, T. (1988), On the forecast of time to failure of slope (II) - approximate forecast in the early period of the tertiary creep, *Journal of Japanese Landslide Society*, Vol. 25, pp. 11~16.
- Korea Expressway Corporation (2009), Slope maintenance monitoring system, pp. 1~10.
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (2006), Development of tunnel portal slope stabilization technique and real-time monitoring system considering deterioration characteristics, pp. 1~406.
- Lo, K. Y. and Lee, C. F. (1973), Stress analysis and slope stability in strain-softening materials, *Géotechnique*, Vol. 23, No. 1, pp. 1~11.
- Martin, D. C. (1993), Time dependent deformation of rock slopes, Ph.D thesis, University of London. pp. 22~138.
- Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (2011), Construction of slope design criteria, Guideline, pp. 119~133. (in Korean)
- Petley, D. N., Bulmer, M. H. and Murphy, W. (2002), Patterns of movement in rotational and translational landslides, *Geology*, Vol. 30, pp. 719~722.
- Petley, D. N. (2004), The evolution of slope failures: mechanisms of rupture propagation, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 4, pp. 147~152.
- Rose, N. D. and Kung, O. (2007), Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 44, pp. 308~320.
- Saito, M. (1961), Failure of soil due to creep, *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, pp. 315~318.
- Saito, M. (1996), Forecasting time of slope failure by tertiary creep, *Proc. of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, pp. 677~683.
- Sterpi, D. (1999), An analysis of geotechnical problems involving strain softening effects, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 23, No. 13, pp. 1427~1454.
- Voight, B. A. (1988), Method for prediction of volcanic eruption, *Nature*, Vol. 332, pp. 125~130.
- Wartmann, J. and Malasavage, N. E. (2013), Predicting time-to-failure in slopes from precursory displacements: a centrifuge experiment, *Geo-Congress 2013: Stability and Performance of Slopes and Embankments III*, ASCE, pp. 741~749.
- Yoo, B. S. (2006), A study of failure analysis methods based on real-time monitoring data for landslide warning system, Ph.D thesis, Kumoh National Institute of Technology pp. 60~144 (in Korean).
- Zienkiewicz, O. C., Humpheson, C. and Lewis, R. W. (1975), Associated and non-associated viscoplasticity and plasticity in soil mechanics, *Géotechnique*, Vol. 25, pp. 671~689.