

토사비탈면 붕괴에 대한 계측관리기준 제안: 변위를 기준으로

Suggestion of Measurement Management Criteria for Soil Slope Failure Based on Displacement

최선규* · 석재욱** · 정향선***

Choi, Sun-Gyu*, Suk, Jae-Wook**, and Jeong, Hyang-Seon***

Abstract

This paper describes the Measurement Management Criteria (MMC) of a soil slope failure based on displacement using literature reviews, small-scale experiments, large-scale experiments, and field data. Two types of measurement management criteria were developed, i.e., short-term criteria for slopes under construction or requiring urgent measurements, and long-term criteria for slopes under continuous management. First, the measurement criteria for the short term were determined based on small- and-large scale experiments, and were determined to be “1 mm/min for the watch level,” “4 mm/min for the caution level,” and “21 mm/min for the alert level.” Next, the criteria for the long term were determined through a literature review and field data, and were “2 mm/day for the watch level,” “8 mm/day for the caution level,” and “56 mm/day for the alert level”.

Key words : Measurement Management Criteria (MMC), Soil Slope, Displacement, Short Term Period Criteria, Long Term Period Criteria

요 지

본 연구는 토사비탈면 붕괴에 대한 변위기반의 계측관리기준을 선행연구, 소형 및 대형실증실험 그리고 현장데이터 분석을 통해 개발하였다. 계측관리기준은 시공 중 또는 신속하게 관리가 요구되는 단기기준의 계측관리기준과 지속적인 관리가 요구되는 장기기준의 계측관리기준으로 구분하여 개발하였다. 첫번째, 단기기준의 계측관리기준은 소형 및 대형실증실험을 통해 ‘주의단계 1 mm/min’, ‘경계단계 4 mm/min’과 ‘심각단계 21 mm/min’으로 산정되었다. 두 번째, 장기기준의 계측관리기준은 선행연구와 현장데이터 분석을 통해 ‘주의단계 2 mm/day’, ‘경계단계 8 mm/day’와 ‘심각단계 56 mm/day’로 산정되었다.

핵심용어 : 계측관리기준, 토사비탈면, 변위, 단기기준, 장기기준

1. 서 론

급격한 기후변화 및 산업화로 인하여 자연재해의 빈도 및 피해의 정도가 증가하고 있다. 특히 산사태는 자연재해 중 높은 비율을 차지하고 있으며 시민의 인명 및 재산 등에 직접적인 피해가 발생하는 특징이 있다(Lee et al., 2019). 따라서 전 세계적으로 많은 연구자들에 의해 산사태와 관련된 연구가 수행 되고 있으며(Gokceoglu and Sezer, 2009), 특히 한국은 여름철 집중호우와 높은 산지 비율로 산사태에

특히 취약한 특징을 지니고 있어 관련 연구가 또한 활발히 진행 중에 있다(Choi et al., 2019). 국내에서의 산사태와 관련된 연구로는 산사태 원인 및 특징과 관련된 연구(Song and Hong, 2007; Choi et al., 2011), 산사태·토석류의 피해 및 위험 평가에 관한 연구(Kang and Kim, 2015; Kim et al., 2019), 산사태 예방 및 복구대책에 관한 연구(Lee et al., 2018; Jang et al., 2020) 등이 있다.

산사태는 인명·재산에 직접적인 영향을 미치므로 이를 사전에 대비하기 위한 산사태 예·경보 시스템 및 이를 관리

*정희원, 국립재난안전연구원 방재연구실 선임연구원(Tel: +82-52-928-8462, Fax:+82-52-928-8199, E-mail: sungyuchoi@korea.kr)

Member, Senior Researcher, Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Research Institute

**국립재난안전연구원 방재연구실 시설연구사(E-mail: stonely@korea.kr)

Research Officer, Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Research Institute

***교신저자, 정희원, 국립재난안전연구원 방재연구실 선임연구원(Tel: +82-52-928-8464, Fax:+82-52-928-8199, E-mail: jhs99@korea.kr)

Corresponding Author, Member, Senior Researcher, Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Research Institute

하기 위한 대피 기준 등에 대한 연구 또한 진행 중이며(Ryu et al., 2013; Park et al., 2018) 관련 연구는 스마트시티와 결부되어 중요성이 증대되고 있다(Choi et al., 2019). 산림청은 1983년부터 강우량 기준의 예·경보 시스템을 하였으며, 2013년 도양함수지수를 이용한(강우 및 지질 조건 기준) 전국 단위의 예·경보 체계를 구축 및 운영 중에 있다(Lee et al., 2015). 행정안전부는 「급경사지 재해예방에 관한 법률(약칭: 급경사지법)」을 제정 및 관리하고 있다. 급경사지법에 의해 특별 관리가 필요하다고 판단되는 지역의 경우 상시계측관리를 수행하여야 하므로, 급경사지 관리 실무편람을 통해 강우에 따른 급경사지 붕괴에 대한 예·경보 및 주민대피 권고기준을 마련하였다(MOIS, 2016).

앞에서 살펴 본 바와 같이 국내의 예·경보 시스템은 기본적으로 강우 혹은 강우와 지질조건을 기반으로 관리·운영되고 있다. 이는 산지의 특정 지점이 아닌 지역 혹은 일정 범위에 대한 관리 시스템으로 특정 산지에 대한 붕괴거동의 파악이 곤란하다. 또한 비탈면 거동이 아닌 강우량을 기반으로 붕괴를 예측하는 간접적인 붕괴 판단 방법으로 신뢰성에 문제가 발생한다.

이를 보완하기 위해 최근 산지 혹은 비탈면의 거동에 대해 직접 확인이 가능한 다양한 계측기기를 활용한 연구가 수행되고 있다. 일반적으로 산지의 붕괴거동과 관련되어 사용되어지는 계측기 항목으로는 강우량계, 변위계, 지표·지중 경사계, 체적함수비계, 모관흡수력계, 간극수압계 등이 있다.

상기 계측 항목 중 변위측정을 통한 붕괴거동 파악 및 예·경보 시스템은 가장 직접적이고 직관적으로 위험 정도를 평가할 수 있어 국내·외에 널리 연구되고 있는 계측 방법이다.

국외의 경우, 미국의 지질조사국은 산사태 연구 및 예방을 목적으로 실시간 모니터링을 실시하고 있으며 변위계를 포함한 산사태 예·경보 시스템을 운영 중에 있다(Reid et al., 1999). 유럽은 13개국의 공동 연구를 통해 산사태 전반에 관한 연구를 수행하였으며, 변위를 포함한 계측기별 경보 조건 및 대응 방안 등의 기준을 설정하였다(Bazin, 2012). 중국의 지질조사서는 산사태가 빈번히 발생하는 산지를 대상으로 변위거동을 4단계로 분류한 후 예·경보 시스템을 개발하였다(Yueping et al., 2010). 일본은 고속도로조사회(TCJGS, 1996), 사면안정 소위원회(JHO, 1998) 등에서 변위를 기준으로 주민대피 관리기준을 설정하여 제안하였다.

국내의 경우, 국토해양부에서 2002년부터 절토사면유지관리시스템을 구축하여 파괴에 이르는 변위속도(2.6 mm/hr)를 제안하였다(MOLIT, 2004). Yoo (2006)는 현장 사면 데이터를 활용하여 사면 붕괴에 대한 누적변위 및 변위속도를 제안하였다. 행정안전부는 계측기 종류 별 급경사지 붕괴에 대한 주민대피 관리기준 설정에 대하여 연구하였으며, 특히

급경사지 붕괴가 발생하였거나 발생이 예상되는 현장 데이터를 바탕으로 변위기반의 주민대피 관리기준을 개발하였으며(MOIS, 2015), 연구 결과를 바탕으로 2016년 급경사지 관리 실무편람을 편찬하여 급경사지 관리에 대한 가이드라인을 편찬하였다(MOIS, 2016).

상기 국내·외 연구처럼 변위 기반의 관리기준 연구는 대부분 현장데이터 분석 결과를 통해 산사태 혹은 급경사지 붕괴 예·경보 기준 및 주민대피 관리기준을 제안하였다. 하지만 실제 붕괴거동이 기록된 변위 계측 데이터는 한정적으로, 한정된 데이터를 통한 기준 설정은 신뢰성에 문제가 발생한다. 또한 비탈면 거동 및 붕괴는 지질에 따라 달라지지만 이에 대한 연구는 부족한 실정이다. 특히 급경사지의 경우 계측이 필요한 급경사지는 토사비탈면 가장 높은 비율을 차지하고 있다(NDMI, 2019).

따라서 본 연구에서는 계측이 가장 필요한 토사비탈면을 대상으로 국내·외 참고문헌, 소형 및 대형 붕괴모의실험, 현장측정 데이터를 분석하여 토사비탈면에 적용 가능한 변위기반의 계측관리기준(Measurement Management Criteria, MMC)을 개발 및 제안하였다.

2. 관리기준 설정 및 연구수행 방법

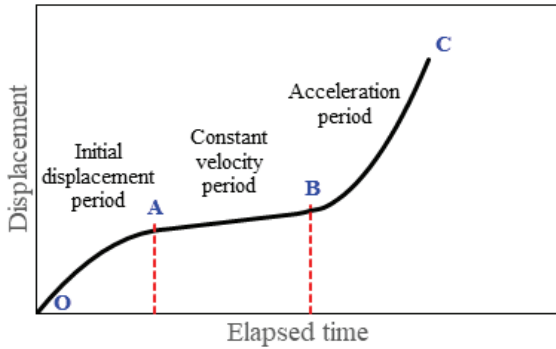
2.1 관리기준 설정 방법

비탈면의 붕괴는 지질·지형학적 요인, 물리적 요인 및 인간 활동에 의한 요인 등에 영향을 받으며 강우는 비탈면 붕괴에 직접적인 영향을 받는다. 이로 인해 비탈면 붕괴 형태는 다양하지만 크게 다항형 모델, 성장형 모델 및 급속형 모델로 분류가 가능하다.

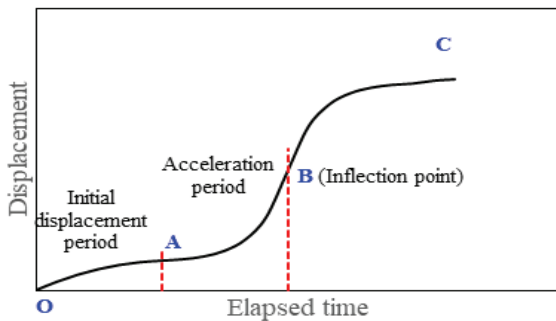
첫 번째, 다항형 모델(Polynomial model)은 일반적인 비탈면 붕괴 모델로 붕괴거동은 초기 변위가 발생구간, 변위가 일정하게 증가하는 구간, 파괴 직전 변위가 급속하게 증가하는 구간으로 나누어진다. 이러한 거동은 점착력이 낮은 지반, 구속압이 높은 지반, 암반 등에서 주로 나타나는 형태이다. 두 번째, 성장형 모델(Growth model)은 초기 변위 발생 구간, 변위가 가속되는 구간, 변위가 감속되는 구간으로 나누어지며 이와 같은 붕괴 형태는 점착력이 높은 지반에 주로 나타난다. 마지막으로 급속형 모델(Abrupt model)은 초기변위가 발생하는 구간, 변위가 일정하게 증가하는 구간과 변위가 급속히 증가하는 구간으로 나누어지며 이는 짧은 시간에 변위가 급격히 발생하는 암반비탈면에 주로 발생한다.

이러한 비탈면 붕괴 특징을 기반으로 비탈면 붕괴에 따른 단계별 구분이 가능하며, 이를 통해 계측관리기준 설정이 가능하게 된다. Fig. 1은 앞에서 언급한 비탈면 붕괴 모델을 나타낸 그림이며, Table 1은 Fig. 1을 기반으로 설정한 단계별 구분과 구분 지점을 정리한 표이다. 예를 들어 다항형 모델의 경우 비탈면 붕괴 거동을 초기 변위 구간, 등속 구간 및 가속 구간으로 구분이 가능하며 이를 계측관리기준으로

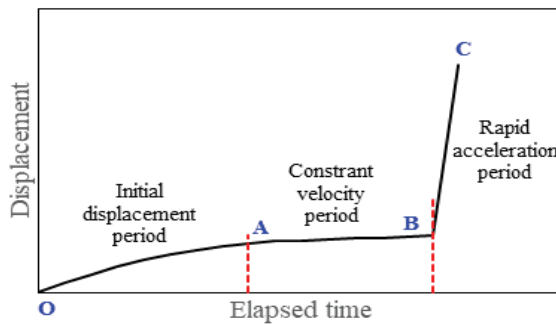
설정할 경우 변위가 발생하는 시점으로부터 등속변위 시점까지(OA)를 ‘초기 변위 발생 구간’, 변위가 일정하게 증가하는(AB) ‘등속 구간’과 변위가 가속되는(BC) ‘가속 구간’으로 나누어진다. 각 구간을 단계별 관리기준 주의(Watch)-경계(Caution)-심각(Alert)의 3단계의 기준 구분되어지며 주의는 ‘등속의 시점(A)’, 경계는 ‘등속의 종점(가속의 시점, B)’, 심각은 ‘가속의 종점(C)’으로 설정이 가능하다.



(a) Polynomial model



(b) Growth model



(c) Abrupt model

Fig. 1. Failure Model of Slope

Table 1. Determination of MMC

Type	Watch	Caution	Alert
Polynomial	A	B	C
Growth			
Abrupt			

구체적인 분석 방법은 다음과 같다. 시간에 따른 변위 데이터를 관리기준의 속도변위 단위를 기준으로 미분하며 ‘변위속도’를 계산하고, 변위속도를 미분하여 ‘변위가속도’를 계산한다.

하지만 일반적으로 심각 단계를 설정하는 가속의 종점의 경우 계측 값은 변위가 측정 가능한 최대 변위와 이에 따른 최대가속 값을 산정하게 된다. 하지만 계측관리기준은 붕괴로 인한 피해 이전의 위험을 제공하는 방법으로 심각 단계를 가속의 종점으로 설정하기 어려운 실정이다. 이를 보완하기 위하여 Xu et al. (2011)은 실제 붕괴 현장의 데이터를 이용하여 비탈면 붕괴가 발생하는 변위속도를 분석하였다. 현장 데이터 분석 결과 비탈면 붕괴 시 변위속도를 경사각으로 환산할 경우 88° 이상으로 확인 하여 이를 근거로 심각 단계를 85° 이상으로 결정하였다.

본 연구에서는 비탈면 붕괴에 대한 계측관리기준으로 두 기법 모두를 적용하여 주의와 경계의 기준은 다항형의 모델을 따르며 심각단계는 변위속도를 85°로 설정하여 계측관리기준 개발을 수행하였다.

2.2 연구수행 방법

본 연구는 토사비탈면 붕괴에 대한 계측관리기준 개발을 위해 국내·외 참고문헌, 실내실험(소형 및 대형) 및 현장 데이터를 분석하였다.

연구수행은 시공 중인 비탈면의 안정성을 검토하거나 짧은 시간의 폭우 등으로 인한 단기적인 관점에서 적용이 가능한 계측관리기준과 급경사지 중 위험지구로 지정된 비탈면, 땅밀림 등의 지속적인 계측관리를 위한 계측관리기준을 구분하여 개발하였다.

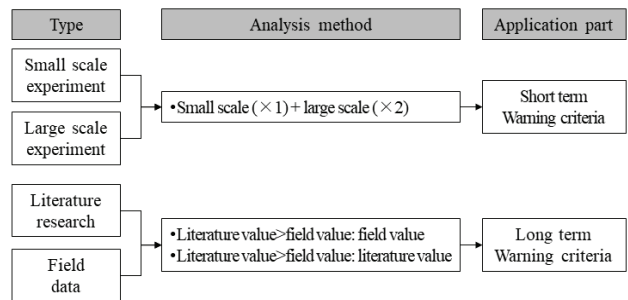


Fig. 2. Analysis Method for MMC

먼저 단기적인 관점에서 관리가 필요한 계측관리기준은 국립재난안전연구원에서 보유 중인 소형·대형 비탈면 붕괴 시뮬레이터의 이용하여 비탈면 붕괴실험을 실시하였으며 붕괴 과정의 거동을 확인을 위해 지표변위계를 설치하여 지표거동을 분석하였다. 변위계측데이터로부터 각각의 단계별 관리기준값을 도출하였으며, 최종적으로 단기관점에서 적용 가능한 계측관리기준을 개발하였다. 이때 scale effect가

고려된 대형실험에 가중치($\times 2$)를 부여한 후 최종 계측관리기준을 개발하였다. 다음으로 장기적인 관점에서의 계측관리기준은 국내·외 참고문헌과 국내에서 발생한 붕괴가 발생하였거나 붕괴 발생이 예측되는 현장데이터를 분석 한 후 계측관리기준을 개발하였으며 Fig. 2는 두 계측관리기준 개발을 위한 순서도를 나타내고 있다.

3. 장비 및 실험 조건

3.1 비탈면 붕괴 시뮬레이터

단기기준의 계측관리기준 개발을 위해 연구원에서 보유 중인 동양최대크기의 대형 비탈면 붕괴 시뮬레이터와 이를 1/10 규모로 제작한 소형 비탈면 시뮬레이터를 이용하여 토사비탈면 붕괴 실험을 실시하였다.

대형 비탈면 붕괴 시뮬레이터는 모형토조, 강우재현장치 및 이를 통제하는 관제실로 구성되어 있다(Fig. 3). 모형토조는 폭 4 m, 길이 21 m, 높이 2.5 m이며, 3단으로 분리되어 있어 각 토조별 각도 조절이 가능하며, 특히 3번 토조는 최대 40°까지 경사조절이 가능한 특징이 있다. 강우재현장치는 너비 4 m, 길이 21 m로 토조 전체에 강우 재현이 가능하며 강우강도는 약 10~160 mm/hr까지 조절이 가능하다(Jeong et al., 2019). 관제실은 토조 및 강우장치를 컨트롤 할 수 있으며 붕괴 영상 및 계측 데이터를 실시간으로 확인 및 저장 할 수 있다. Fig. 3은 연구에 사용한 대형 비탈면 붕괴 시뮬레이터를 나타내고 있다.

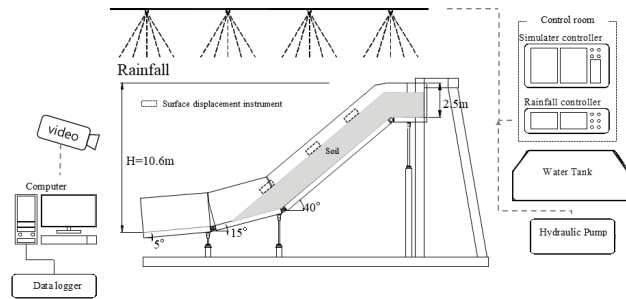


Fig. 3. Description of Real Scale Slope Simulator

대형 비탈면 붕괴실험을 통한 계측관리기준에 관한 연구는 예산 및 연구기간의 한계로 다양한 조건에서의 반복적인 실험이 곤란하다. 이를 보완하기 위하여 대형 붕괴 시뮬레이터를 1/10로 축소한 소형 붕괴 시뮬레이터를 활용하였다. 소형 시뮬레이터는 대형 크기의 1/10이며, 장비의 수준 및 실험방법 등은 동일하게 적용하였다.

3.2 실험 조건

대형 붕괴 실험은 2회 실시하였다. 실험에 사용한 토사는 화강암 풍화토로 모래 73.8%, 세립분 22%, 균등계수(Cu)는 6.0, 곡률계수(Cg)는 0.84, 공학적으로는 SP로 분류되며 입

도분포곡선은 Fig. 4와 같다. 대형 붕괴 시뮬레이터 경사를 40°(1차) 및 35°(2차)로 고정 한 후 중장비를 이용하여 10%의 함수비를 가진 토사를 시뮬레이터에 쌓아 비탈면을 형성하였다. 이 때 건조단위중량은 상·중·하단 건조단위중량은 1.6 t/m³이며 토사량은 약 220 t(1차) 및 234 t(2차)으로 계산되었다. 비탈면 조성 후 3개의 와이어 지표변위계(8.6, 6.2, 3.3 m)를 설치한 후 50 mm/hr의 강우를 지속적으로 분사하여 비탈면의 붕괴를 유도하였으며 계측기를 통한 변위자료를 획득하였다.

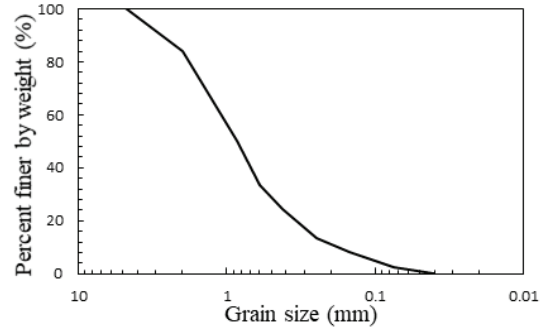


Fig. 4. Grain Size Distribution Curve

소형붕괴실험은 다양한 조건에 대한 결과를 도출하기 위하여 동일한 토사에 강우강도(30, 50, 100 mm/hr), 비탈면 경사(35, 40, 50°) 및 건조단위중량(1.3~1.5 t/m³)을 달리하여 총 18회를 실시하여 계측기를 통한 변위자료를 획득하였다.

4. 단기기준의 계측관리기준 개발

4.1 실내실험을 통한 계측관리기준 분석

단기기준의 계측관리기준을 개발하기 위하여 소형붕괴 모의실험을 18회, 대형붕괴모의실험을 2회 실시하였다.

소형실험결과를 분석하기 위하여 시간에 따른 변위거동을 측정하였으며 실험조건에 따른 붕괴형태를 분석하였다. 분석결과 비탈면 붕괴 형태는 강우강도가 낮을수록, 건조단위중량이 높을수록, 비탈면경사가 높을수록 다항형의 붕괴형태로 측정되었으며, 강우강도가 높아질수록, 건조단위중량이 낮을수록, 비탈면 경사가 낮을수록 급속형의 붕괴형태로 측정되었다. 특히 붕괴형태는 강우강도에 가장 큰 영향을 받는 것으로 확인되었다(NDMI, 2019).

계측관리기준 도출을 위하여 시간-변위 그래프를 분석하였다. 변위거동은 위에서 언급한 바와 같이 강우강도, 건조단위중량, 경사 등에 따라 달라지지만 일반적으로 다항형의 기준을 적용하여 분석이 가능 할 것으로 판단되었다. 따라서 먼저 변위 그래프를 이용하여 변위속도, 변위가속도, 변위속도에 대응하는 경사각을 계산하였다.

다음으로 2장에서 설명한 바와 같이 관리기준을 3단계로 설정하여 등속구간의 시작점을 ‘주의’, 가속의 시점을 ‘경

계', 최대 가속지점을 '심각'으로 설정하였으며 최대가속지점이 최대변위지점일 경우 85°를 초과하는 변위속도를 '심각'의 지점으로 설정하였다. 이를 통해 기준에 해당하는 지점에 주의(노란색 동그라미), 경계(분홍색 세모), 심각(붉은색 네모)을 Fig. 5와 같이 표시하였으며 Table 2는 분석에 의해 산정된 단계별 관리기준 및 평균을 계산한 결과를 나타내고 있다. 소형실험을 통한 결과값은 개별 값의 최소값을 설정하거나 평균값을 설정할 수 있지만 본 연구에서는 급경사지 관리 실무편람의 방법에 따라 평균값을 이용하는 방법을 선택하였다. 소형실험을 통한 단기기준의 계측관리기준은 주의 '1 mm/min', 경계 '5 mm/min', 심각 '31 mm/min'으로 계산되었다.

Table 2. MMC Results From Small Test

No.	MMC (mm/min)		
	Watching	Warning	Alert
1	2	8	17
2	2	7	50
3	1	2	13
4	2	6	88
5	1	6	13
6	1	5	27
7	1	5	79
8	1	2	36
9	1	3	33
10	1	4	22
11	1	6	42
12	1	6	18
13	1	10	28
14	1	8	17
15	1	3	14
16	1	7	12
17	1	3	16
18	1	3	25
Result	1	5	31

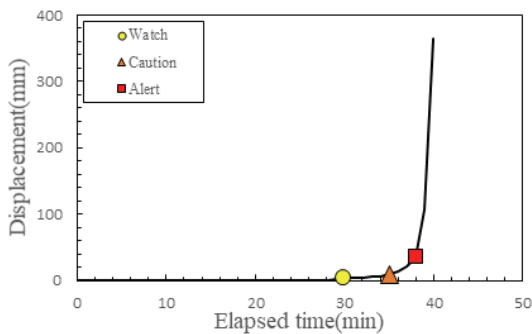
다음으로 대형 붕괴모의실험을 3장과 같이 실시하였으며 강우에 의한 변위거동을 분석하였다. 실험결과 상단 혹은 중단의 경우 시간에 따라 점진적으로 변위가 증가하는 계단식 혹은 다항형의 붕괴형태를 보였으며 하단의 경우 일정시점에서 변위가 급속히 증가하는 급속형의 붕괴 형태를 나타내는 것으로 나타났다. 이는 하단 비탈면의 경우 강우의 지속적인 침투로 하단에서의 포화도 강도가 저하되어 최종 붕괴 이전에 급격한 변위가 발생한 것으로 판단된다(NDMI, 2019). 또한 경사각이 높은 경우 실험시작 후 붕괴가 발생하는 시간이 짧은 것으로 나타났다.

계측관리기준 도출을 위하여 대형붕괴모의실험으로부터 변위거동을 측정하였으며, 소형실험분석과 같이 변위거동을 속도, 가속도, 경사각을 계산하였다.

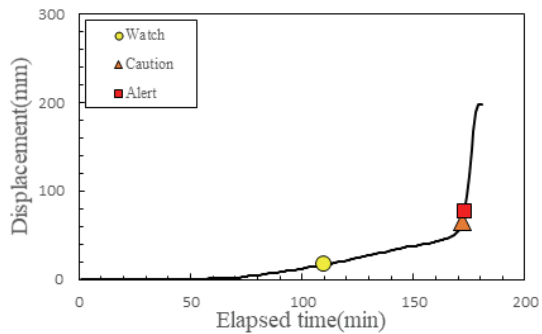
대형 붕괴실험을 통한 분석 방법은 소형과 동일하지만 대형실험의 경우 실험시간이 약 18~21시간으로(소형실험은 2시간 이내) 실험 도중 세굴 및 부분붕괴 등의 현상이 발생한다. 따라서 대형실험에서의 계측자료는 실험 전체의 그래프를 분석하는 것이 아니라 붕괴에 직접적으로 영향을 받은 데이터(최종 다항형 그래프 혹은 전체 그래프)만을 이용하여 계측관리기준을 분석하였다. 최종적으로 총 4개의 데이터를 분석에 활용하였으며 Fig. 6은 4개의 데이터 중 일부 데이터를 이용하여 단계별 관리기준 지점을 표시한 그림이다. Fig. 6의 분석을 통해 단계별 관리기준 값을 계산하였으며 이는 Table 3에 표시하였다. 대형실험을 통한 단기기준의 계측관리기준은 주의 '1 mm/min', 경계 '3 mm/min', 심각 '17 mm/min'으로 계산되었다.

Table 3. MMC Results From Small Test

No.	MMC (mm/min)		
	Watching	Warning	Alert
1	1	4	24
2	1	5	15
3	1	3	17
4	1	3	12
Result	1	3	17

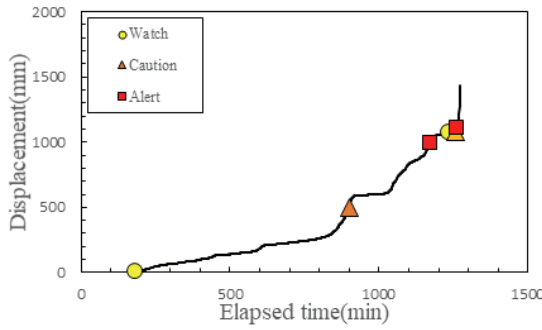


(a) Graded points from 3th test

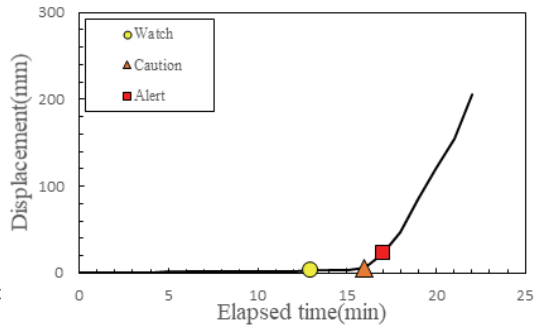


(b) Graded points from 15th test

Fig. 5. Graded Points from Small Scale Tests



(a) Graded points from 2th data



(b) Graded points from 4th data

Fig. 6. Graded Points from Large Scale Tests

Table 4. Determined MMC for Short Term

Type	MMC (mm/min)		
	Watch	Caution	Alert
Samll	1	5	31
Large (×2)	1	3	17
Result	1	4	21

실내실험을 통한 단기기준의 계측관리기준 개발을 위해 소형실험과 대형실험의 결과를 분석하였다. 소형실험을 통한 기준은 대형실험을 통한 기준보다 높은값으로 확인되었다 (Watching 제외). 이는 소형실험은 다양한 조건(강우강도, 흙의 건조단위중량, 경사각)에 의해 단계별 기준값에 차이가 크게 발생하여 평균값이 높게 나타난 것으로 판단된다. 또한 붕괴시간의 차이로 인한 영향으로 판단된다. 소형실험은 약 2시간 내외로 비교적 단기간에 실험이 진행되며 대형실험은 16시간 이상 소요된다. 이러한 크기의 차이로 인해 소형실험은 비교적 붕괴가 빠르게 발생하고 급격한 변위 또한 빠르게 발생하기 때문인 것으로 판단된다. Jeong et al. (2011)은 소형모형토조시험과 대대형모형토조시험을 통해 크기에 따른 시간-그래프를 분석하였으며 소형실험의 경우 대대형실험보다 동일한 시간동안 높은 변위가 발생함을 확인 하였다.

소형실험은 scale effect를 고려하지 못하는 한계점으로 소형실험과 대형실험을 직접적으로 비교하기에는 문제점이

발생한다. 이를 보완하기 위하여 대형실험의 결과에 가중치 (×2)를 부여하여 최종적으로 토사비탈면에 적용가능한 단기기준의 계측관리기준을 개발하였다. 실내실험을 통한 단기기준의 계측관리기준은 최종적으로 주의 ‘1’, 경계 ‘4’, 심각 ‘21 mm/min’으로 결정하였다(Table 4).

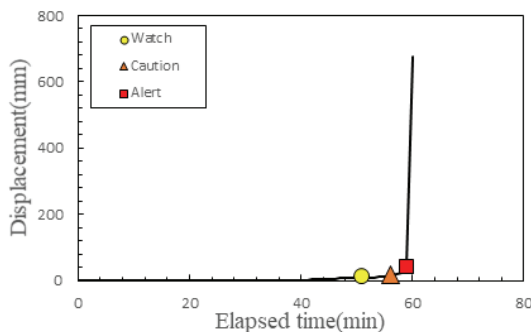
4.2 단기기준의 계측관리기준 검증

본 연구를 통해 제시된 단기기준의 계측관리기준을 검증 하였으며, 검증은 국립재난안전연구원에서 2020년도에 수행한 소형 및 대형실험결과와 비교를 통해 수행하였다.

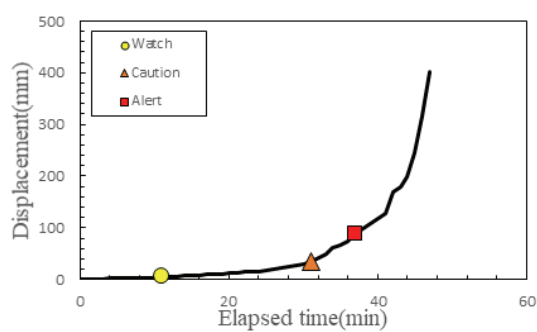
2020년도의 실험조건은 2019년도의 실험조건과 대부분 유사하지만 세립분의 양이 약 10% 많으며, 하부에 불투수층을 재현한 조건이 차이점이다. 앞장과 동일한 방법으로 분석을 실시하였으며 Fig 7은 소형 및 대형실험을 통한 관리기준의 지점을 나타내고 있으며 Table 5는 소형 및 대형실험을 통한 계측관리기준을 나타내고 있다.

Table 5. MMC from 2020 Year

Type	MMC (mm/min)		
	Watch	Caution	Alert
Samll	1	4	229
Large (×2)	1	4	29
Result	1	4	96



(a) Graded points from 3th test (small test)



(a) Graded points from 5th data (large test)

Fig. 7. Graded Points from 2020 Year

2020년 실험을 분석한 결과 계측관리기준은 주의 '1', 경계 '4', 심각 '96 mm/min'으로 계산되었다. 이는 본 연구에서 제시한 계측관리기준보다 주의는 동일하며, 경계는 1 mm/min 높게 분석되었으며 특히 심각은 약 5.6배로 높게 계산된 것을 확인하였다. 이는 불투수층 및 기타 실험조건의 영향으로 붕괴시작지점부터 변위가 급속도로 증가한 것으로 판단된다. 계측관리기준은 붕괴를 예측하여 산사태 및 급경사지 붕괴의 위험을 전달하는 기준으로 보수적으로 개발되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서 제시한 계측관리기준은 검증을 위해 사용할 결과보다 보수적으로 설계되어 두 실험조건 모두 적용 가능한 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구에서 제시한 계측관리기준은 합리적인 것으로 판단된다.

5. 장기기준의 계측관리기준 개발

5.1 선행연구 분석을 통한 계측관리기준 검토

국내·외 비탈면 붕괴와 관련된 계측관리기준은 대부분 변위속도를 기반으로 연구가 수행되고 있다. 국내에서는 Yoo (2006), MOLIT (2004), Cheon et al. (2013), MOIS (2015) 등에서 관련 연구가 수행하였으며, 국외에서는 일본 고속도로 조사회(TCJGS, 1996)와 일본 사면안정소위원회(JHO, 1998), Yueping et al. (2010), Brawner (1994), Bazin (2012) 등에서 연구를 수행하였다.

상기 선행연구 중 직접적으로 비교·분석이 가능한 동일한 단위의 기준이 제시된 관리기준을 분석하였으며, 최종적으로 국내에서는 Yoo (2006), Cheon et al. (2013), MOIS (2015)와 국외에서는 일본 고속도로조사회(TCJGS, 1996)와 일본 사면안정소위원회(JHO, 1998), Yueping et al. (2010)를 활용하였다. 선행연구 분석 시 관리기준은 mm/day만의 연구 결과만 활용하였으며 총 관심(Attention)-주의-경계-심각의 4단계로 기준을 분석하였다.

Table 6. MMC from Literature Study

Type	MMC (mm/day)			
	Attention	Watch	Caution	Alert
Yoo (2006)	13.8	18.6	54.4	94.2
Cheon et al. (2013)	-	-	5	50
MOIS (2015)	1	6	26	63
TCJGS (1996)	-	1	10	100
JHO (1998)	-	-	10	100
Yueping et al. (2010)	-	6.5	10	100
Result	7.4	8.0	19.2	84.5

Table 6은 선행연구를 통한 국내·외 계측관리기준을 나타내고 있다. 지역별 지질 및 강우조건 등에 따라 지표거동은

달라지므로 관심-주의-경계의 경우 지표거동에 따른 관리기준은 다르게 나타났지만, 심각한 경우 대부분 약 100 mm/day의 기준을 제시한 것으로 나타났다

선행연구를 통한 단계별 계측관리기준은 관심 '7 mm/day', 주의 '8 mm/day', 경계 '19 mm/day', 심각 '85 mm/day'로 분석되었으며, 해당 결과는 추후 현장데이터 분석을 통한 관리기준과 비교를 통해 최종적으로 장기기준의 계측관리기준으로 도출에 활용될 예정이다.

5.2 현장데이터 분석을 통한 계측관리기준 검토

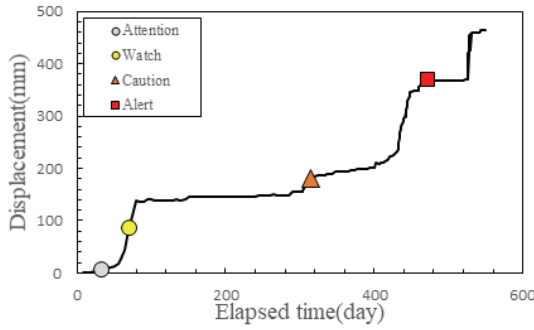
행정안전부는 연구과제 수행을 통해 급경사지 붕괴에 대한 계측관리기준을 개발하였다. 관리기준 개발을 위해 급경사지 계측현장 중 붕괴가 발생하였거나 붕괴가 예측되어지는 10개소의 현장데이터를 분석하였으며, 관리기준은 다항형 모델을 기반으로 변위속도(mm/day)를 이용하여 4단계(관심-주의-경계-심각)의 기준으로 분석을 실시하였다.

상기 계측관리기준을 토사비탈면을 대상의 계측관리기준을 활용하기 위해 개선사항을 확인하였으며 개선사항은 다음과 같다.

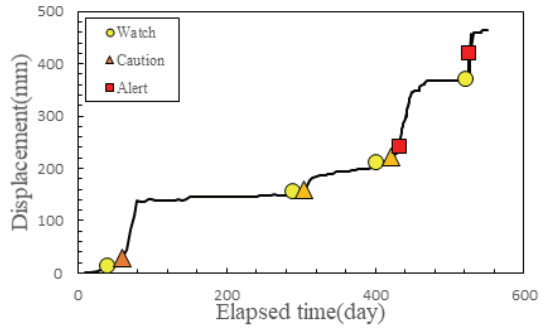
첫째, 현재의 권고기준은 10개소의 현장 데이터를 이용하여 산정한 결과로, 보다 많은 데이터를 활용한다면 신뢰성을 보다 높일 수 있을 것으로 판단된다. 두 번째, 현재의 기준은 암반 및 토사비탈면 전체에 대한 분석 결과로 본 연구에서 제시하고자 하는 토사비탈면에 대한 주민대피 관리기준으로는 부적합하다. 세 번째, 현재의 주민대피 권고기준은 누적변위(mm)와 변위속도(mm/day)를 동시에 제안하고 있어 기준 적용에 대한 세부 지침이 필요하며 누적변위는 지반·지질 조건 등에 따라 달라지므로 이에 대한 고려가 필요하다. 네 번째, 급경사지 관리 실무편람에서의 관심-주의-경계-심각 단계는 표 5.1의 기준으로 산정해야 하지만 본 연구를 통한 해당 데이터 분석 시 일부 도출값은 기준에 부적합한 것으로 확인되어 데이터 분석 시 단계별 값은 기준에 부합되는 값으로 재 산정할 필요가 있다. 다섯 번째, 실무편람에서 제시하는 '관심' 단계의 기준 산정은 '초기 변위 구간'으로 제시되어 있지만 초기 변위구간에 대한 정의가 명확하지 않아 관심 구간 설정시 객관적인 판단이 곤란하다. 마지막으로, 기존의 기준은 한 데이터에 대하여 하나의 단계별 기준을 적용하여 산정하였지만 한 데이터에 대하여 복수의 단계별 기준을 적용하여 현실적인 기준 적용이 필요할 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 현장데이터를 기반으로 토사비탈면에 적용하기 위한 일부 데이터를 활용하여 단계별 계측관리기준을 분석하였다.

Fig. 8(a)는 급경사지 관리 실무편람의 관리기준으로 사용한 계측데이터의 분석 결과이며, Fig. 8(b)는 동일 데이터를 본 연구에서 확인한 개선사항을 바탕으로 분석한 결과를 나타내고 있다.



(a) Graded points from Gangneung (MOIS, 2016)



(b) Graded points from Gangneung (this study)

Fig. 8. Graded Points from Field Data

급경사지 관리 실무편람에서 적용한 10개의 데이터 중 8개의 데이터를 활용하여 다중 기준을 적용한 후 단계별 계측관리기준을 계산하였다. Table 7은 본 연구에서의 개선 사항에 따라 산정한 계측관리기준이다.

Table 7. MMC from Field Data

Area	MMC (mm/day)		
	Watch	Caution	Alert
Gangneung	2	5	63
Danyang	1	20	62
Hongcheon	2	4	35
Yangpyeong	1	6	-
Chungju	2	-	-
Muju	2	5	-
Yeongdeok	2	6	84
Pohang	1	12	39
Result	2	8	56

현장데이터 분석 결과 단계별 계측관리기준은 주의 '2 mm/day', 경계 '8 mm/day', 심각 '56 mm/day'로 결정되었으며, 해당 관리기준은 최종적으로 선행연구결과와 비교 후 최종적으로 본 연구에서 제시하는 장기기준의 계측관리기준으로 결정하였다. 계측관리기준 결정 방법은 Fig. 2에 기술되어 있으며 본 데이터 분석 결과 모든 단계에서 현장데이터 분석으로 획득한 기준이 선행연구 분석을 통한 기준보다 보수적으로 산정되어, 최종적으로 현장데이터 분석 결과를 최종 계측관리기준으로 결정하였다.

따라서 최종적으로 토사비탈면에 적용이 가능한 장기기준의 계측관리기준은 주의 '2 mm/day', 경계 '8 mm/day', 심각 '56 mm/day'로 결정하였다.

6. 결론

본 연구에서는 급경사지 중 계측이 가장 필요한 토사비탈

면에 적용 가능한 변위기반의 계측관리기준을 국내·외 참고문헌, 소형 및 대형 붕괴모의실험, 현장측정 데이터를 분석을 통하여 제시하였다.

- (1) 시공 중인 비탈면의 안정성 및 짧은 시간의 발생하는 폭우 등에 적용 가능한 단기관점에서의 계측관리기준을 개발하였다. 분석은 소형 및 대형 붕괴모의실험을 통해 데이터 별 관리기준을 산정하였으며, 실험의 신뢰성을 높이기 위해 대형실험 결과에 가중치를 부여하는 방식을 적용하였다. 최종적으로 본 연구를 통하여 단기기준의 계측관리기준은 주의단계 '1 mm/min', 경계단계 '4 mm/min', 심각단계 '21 mm/min'으로 제시하였다.
- (2) 지속적인 관리가 필요한 토사비탈면 및 땅밀림 등에 적용하기 위한 장기기준의 계측관리기준도 개발하였다. 분석은 국내·외 선행연구 결과와 붕괴가 발생하거나 붕괴가 예상되는 현장 데이터 분석을 통해 단계별 관리기준을 산정하였다. 최종적으로 본 연구를 통하여 장기기준의 계측관리기준은 주의단계 '2 mm/day', 경계단계 '8 mm/day', 심각단계 '56 mm/day'로 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 국립재난안전연구원의 지원("실증 실험 기반 토사재해 취약성 평가기술 개발", NDMI-주요-2021-07-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Bazin, S. (2012). Guidelines for landslide monitoring and early warning systems in Europe - Design and required technology, Safeland, Deliverable D4.8. EGU General Assembly 2012, Vienna, Austria, p. 1347.

- Brawner, C.O. (1994). *Rockfall Hazard Mitigation Methods Participant Workbook*. NHI Course No. 13219, Publication No. FHWA SA-93-085, Washington, DC, USA: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration,
- Cheon, D.J., Park, Y.J., Lee, S.H., Kim, J.S., and Jung, D.Y. (2013). The development of landslide predictive system using measurement information based on u-IT. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 14, No. 10, pp. 5115-5122. doi:10.5762/KAIS.2013.14.10.5115
- Choi, J.H., Kim, H.T., Oh, J.Y., and Kim, Y.S. (2011). Analysis of the controlling factors of an urban-type landslide at Hwangryeong Mountain based on tree growth patterns and geomorphology. *The Korean Society of Engineering Geology*, Vol. 21, No. 4, pp. 281-293. doi:10.9720/kseg.2011.21.4.281
- Choi, S.G., Jeong, H., Song, H.S., Kwon, T.K., Kim, Y., and Lee, J.M. (2019). Study of Korea early warning system for slope failure. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 5, pp. 73-81. doi:10.9798/KOSHAM.2019.19.5.73
- Gokceoglu, C., and Sezer, E. (2009). A statistical assessment on international landslide literature (1945-2008), *Landslides*, Vol. 6, No. 4, pp. 345-357. doi:10.1007/s10346-009-0166-3
- Jang, S.J., Lee, Y.T., Lee, K.Y., Kim, K.N., Lee, J.H., and Chun, K.W. (2020). A study of disaster prevention and characteristics of landslides triggered by the 2019 typhoon mitag in samcheok. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 20, No. 2, pp. 221-227. doi:10.9798/KOSHAM.2020.20.2.221
- Japan Highways Organization (JHO). (1998). *Design guideline*, pp. 1-37.
- Jeong, H.S., Kang, H.S., Suk, J.W., and Kim, H.J. (2019). Rainfall distribution characteristics of artificial rainfall system for steep-slope collapse model experiment. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 20, No. 12, pp. 828-835.
- Jeong, J., Ji, Y., Kim, Y., and Lee, S. (2011). A study on the scale effect of landslide model test. *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 12, No. 8, pp. 5-12.
- Kang, H.S., and Kim, Y.T. (2015). Study on physical vulnerability curves of buildings by numerical simulation of debris flow. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 5, pp. 155-167. doi:10.9798/KOSHAM.2015.15.5.155
- Kim, M.I., Kwak, J., Jun, B.H., and Kim, N. (2019). Analysis of landslide risk distribution pattern under extreme precipitation. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 3, pp. 105-112. doi:10.9798/KOSHAM.2019.19.3.105
- Lee, C., Kim, D., Woo, C., Kim, Y.S., Seo, J., and Kwon, H. (2015). Construction and operation of the national landslide forecast system using soil water index in Republic of Korea. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 6, pp. 213-221. doi:10.9798/KOSHAM.2015.15.6.213
- Lee, C.H., Eo, G., Lee, S.H., Oh, K.R., and Sim, O.B. (2018). Development of multilayer defense system recovery techniques for flood and landslide: For residential and industrial complex in Chuncheon city. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 6, pp. 123-131. doi:10.9798/KOSHAM.2018.18.6.123
- Lee, J.S., Kang, H.S., Suk, J.W., and Kim, Y.T. (2019). Development of hazards Level-based rainfall Threshold for prediction of rainfall-induced landslide occurrence in Korea. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 5, pp. 225-236. doi:10.9798/KOSHAM.2019.19.5.225
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2004). *Development and operation of road cut slope management system in 2004*.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2015). *The R&D research on construction of monitoring management system for evacuating inhabitant in steep slope site and development of monitoring specification*.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2016). *Guideline of steep-slope management*.
- National Disaster Management Research Institute (NDMI). (2019). *Development of steep slope disaster Mitigation technology based on empirical experiments*.
- Park, J.Y., Lee, S.R., Lee, D.H., Kim, Y.T., Oh, S., and Park, H.J. (2018). Development of continuous rainfall-based citywide landslide early warning model. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 1, pp. 99-111. doi:10.9798/KOSHAM.2018.18.1.99
- Reid, M.E., LaHusen, R.G., and Ellis, W.L. (1999). *Real time monitoring of activate landslides*. Reston, VA, USA: US Geological Survey. doi:10.3133/fs09199
- Ryu, J.H., Park, J.Y., and Lim, I.H. (2013). A study on landslide warning guidelines based on regional rainfall. *Journal of The Korea Society of Societal*

Security, Vol. 6, No. 1, pp. 55-63.

Song, Y.S., and Hong, W.P. (2007). A case study on the analysis of cause and characteristics of a landslide at the sedimentary rock area. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 17, No. 1, pp. 101-113.

Task Committee of Japanese Geotechnical Society (TCJGS) (1996). *Manual for zonation on rain-induced slope failure*. Tokyo, Japan: Japanese Geotechnical Society.

Xu, Q., Yuan, Y., Zeng, Y., and Hack, R. (2011). Some new pre-warning criteria for creep slope failure. *Science China Technological Sciences*, Vol. 54, No. 1, pp. 210-220. doi:10.1007/s11431-011-4640-5

Yoo, B.S. (2006). *A study of failure analysis methods based*

on real-time monitoring data for landslide warning system. Ph.D. dissertation, Kumoh National Institute of Technology.

Yueping, Y., Wang, H., Gao, Y., and Li, X. (2010). Real-time monitoring and early warning of landslides at relocated Wushan town, the three gorge reservoir, China. *Journal of Southeast Asian Applied Geology*, Vol. 2, No. 3, pp. 170-184.

Received	November 9, 2020
Revised	November 10, 2020
Accepted	November 16, 2020