

토사비탈면 붕괴에 대한 계측관리기준 제안: 지표 경사를 중심으로

최선규¹, 정민수¹, 석재욱², 정향선¹, 송효성^{1*}

¹국립재난안전연구원 방재기준평가센터, ²국립재난안전연구원 재난원인조사실

Suggestion of Measurement Management Criteria for Soil Slope Failure - Based on Surface Inclination

Sun-Gyu Choi¹, Min-Su Jung¹, Jae-Wook Suk², Hyang-Seon Jeong¹, Hyo-Sung Song^{1*}

¹Disaster Prevention Assessment Center, National Disaster Management Research Institute

²Disaster Scientific Investigation Division, National Disaster Management Research Institute

요약 본 논문은 지표 경사계를 설치한 비탈면 붕괴실험을 통해 지표 경사 기반의 비탈면 거동 분석 및 지표 경사 기반의 계측관리기준 개발연구를 수행하였다. 지표 경사 기반 계측관리기준 개발을 위해 실규모 급경사지 붕괴 시뮬레이터를 활용하여 비탈면 붕괴를 유도하였으며, 붕괴과정 동안의 지표 거동을 영상촬영, 지표 변위계 그리고 지표 경사계를 이용하여 측정 및 분석하였다. 분석 결과 지표 변위 거동과 지표 경사 거동 모두 다항형의 거동을 보이는 것으로 확인되었으며, 이는 두 계측기 모두 직접적인 지표의 변화를 측정하는 방법이기 때문으로 판단된다. 따라서, 지표 경사의 계측관리기준은 다항형 모델을 기반으로 설정하였으며, 계측관리기준의 단위는 '지표 경사속도'로 설정하였다. 단계별 관리기준은 '관심단계-계측시점', '주의단계-등속의 시점', '경계단계-등속의 종점', '심각단계-과속의 종점'인 4단계로 설정하였다. 데이터 분석을 통한 최종 산정한 계측기준은 '관심단계-계측시점', '주의단계-0.04°/min', '경계단계-0.22°/min', '심각단계-1.74°/min'로 제안하였다. 본 연구에서 제안한 단계별 계측관리기준은 추가적인 실증실험을 통한 데이터 분석 및 지표 변위 기반의 계측관리기준과의 계측 경보 발령 비교를 통해 신뢰성을 검증하였다.

Abstract This research studied slope behavior and the development of measurement management criteria(MMC) for soil slope failure based on surface inclination by conducting a slope failure experiment with surface inclination measurement. In particular, a real scale steep-slope failure simulator was used in the slope failure experiment, and the displacement behaviors were measured and analyzed using a digital camera, displacement measurement, and inclination measurement to develop the MMC. Specifically, the displacement and inclination behaviors followed a polynomial model because two methods could measure the surface behavior of a slope. In addition, the graded MMC determined the 'surface inclination velocity' with the same method used for the MMC from surface displacement. Additionally, four types of MMC were determined for 'Watch-Starting point when value is detected', 'Caution-Starting point of constant velocity', 'Warning-End point of constant velocity', and 'Alert-End point of acceleration'. Based on the results of the research, four graded MMC results were obtained for 'Watch-Starting point when value is detected', 'Caution-0.04°/min', 'Warning-0.22°/min', and 'Alert-1.74°/min'. Also, each determined MMC exhibited reliability from the other slope failure experiment with different soils and a comparison with the corresponding MMC from surface displacement.

Keywords : Measurement Management Criteria(MMC), Soil Slope, Displacement, Surface Inclination, Surface Displacement, Steep-Slope Failure Simulator

본 논문은 행정안전부 국립재난안전연구원의 지원("실증실험 기반 토사재해 취약성 평가기술 개발(II)", NDMI-주요-2022-07-02)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Hyo-Sung Song(NDMI)

email: song32@korea.kr

Received April 28, 2022

Accepted July 7, 2022

Revised June 24, 2022

Published July 31, 2022

1. 서론

최근 급속한 기후변화 및 산업화로 인한 지진, 침수, 산사태 등의 다양한 자연재해가 발생하고 있다. 자연재해 중 산사태는 가장 빈번히 발생하는 자연재해 중 하나로, 그 피해는 산지에서뿐만 아니라 인근의 주민에게 인명·재산상의 피해를 유발시키는 특징이 있다. 특히, 인명 피해가 발생한 15년 동안의 (2007년~2021년) 산사태 및 급경사지 붕괴 자료를 분석한 결과 107건의 건물 파손, 사망자 75명, 부상 23명 등의 피해가 발생한 것으로 확인되었다[1].

이를 해결하고자 산사태 및 급경사지 붕괴 등과 관련된 다양한 연구가 수행되고 있으며, 구체적으로 산사태 원인·메커니즘에 관한 연구, 산사태 방지 및 피해의 최소화 등에 관한 연구, 산사태 피해의 사전 예방을 위한 예·경보 시스템 등의 연구가 활발히 수행되고 있다[2-5].

산사태 관련 연구 중 산사태 예측, 예·경보 시스템 및 예측관리기준에 관한 연구는 국내·외 연구자들에게 주목 받고 있는 주제이다. 산사태 예·경보 시스템(혹은 예측관리기준) 연구를 위해서는 예·경보를 위한 단계별 기준이 필요하며, 기준설정을 위한 다양한 예측 기반의 기준이 연구되고 있다[6]. 예측 기반의 관리기준을 위해 활용되는 예측기로는 일반적으로 강우량계를 비롯하여 지표 변위계, 모관흡수력계, 간극수압계, 지중 경사계 등이 있다.

강우량계 기반의 관리기준은 국내·외에 가장 널리 사용되고 있는 관리기준으로 I(Intensity)-D(Duration) 기반의 관리기준에 관한 주제가 가장 활발히 연구되고 있다[7]. 이는 산사태 붕괴 현장에서의 산사태 붕괴 시 강우강도와 강우기간과의 상관관계 분석을 통한 관리기준 설정 방법이다. 해당 강우 기반의 기준은 일반적으로 특정 산지에 대한 관리기준이 아닌 지역을 기반으로 활용된다. 산림청에서는 강우 정보와 지형정보를 활용하여 지역 전체에 대한 관리기준을 설정 및 운영 중에 있다[8].

지표 변위계[9,10], 체적함수비계[11,12], 모관흡수력계[13,14], 지중 경사계[15] 등의 예측장비 기반의 관리기준도 최근 다양한 연구가 이루어지고 있다. 이러한 예측관리기준은 강우 기반 기준과 같이 일정 지역을 기반으로 활용될 뿐만 아니라 특정산지에 설치하여 산지의 거동을 직접적으로 측정함으로써 측정된 산지에 대한 적용이 가능하다.

상기 예측장비 중 지표 변위계를 활용한 산사태 붕괴 예측 및 관리기준 개발은 신뢰성이 높은 방법으로 알려

져 있다[16]. 왜냐하면 지표변위계는 지표의 거동을 직접적으로 측정하는 방법으로 산사태를 데이터와 함께 직관적인 판단이 가능하며, 지형 및 지질 특성에 크게 영향을 받지 않는 방법이기 때문이다. 또한, 많은 연구로 인해 실제 붕괴 시 계측데이터 혹은 실험데이터가 가장 많이 축적된 방법이기도 하다.

지표 변위 기반의 예측관리기준은 산사태 및 급경사지 붕괴를 관리하기 위한 기준으로 널리 활용되고 있는 방법이지만 제약사항 및 신뢰성 확보 등의 추가적인 연구가 필요하다.

지표 경사계를 활용한 산사태 거동 분석 및 관리기준 개발연구도 최근 연구되고 있다. 왜냐하면 지표 경사계를 활용한 산사태 및 급경사지 붕괴 연구는 지표 거동을 직접 측정하여 직관적인 분석이 가능할 뿐만 아니라 동일한 지표면 측정방법인 지표 변위계를 활용한 연구 결과와 비교 가능하기 때문이다.

구체적으로 [17]은 경사계 및 체적함수비계를 설치한 실규모 급경사지 붕괴실험을 하였으며, 측정된 경사 데이터 분석을 통해 계측 위치별 급경사지 붕괴 거동 분석 및 예측을 통한 예·경보 시스템에 대한 적용 가능성을 확인하였다.

[18]은 실내 및 현장 비탈면 붕괴실험을 통해 경사계를 활용한 예측관리기준을 연구하였다. 연구 결과 동일 지점에서의 지표 경사와 지표 변위 거동의 유사함과 상관관계를 확인하였으며, 경사속도($^{\circ}/hr$)를 기준으로 설정한 2단계 관리기준을 제안하였다. [19]는 경사계를 설치한 실내 및 현장의 비탈면 붕괴실험을 하였으며, 비탈면 붕괴 이전 경사계를 통한 가속 구간을 통한 붕괴 예측 및 경사속도와 붕괴시간과의 상관관계를 통해 비탈면 붕괴식을 제안하였다. [20]은 실내실험을 통해 변위와 경사의 상관관계 분석을 실시하였으며, 분석을 통해 붕괴영역을 고려한 경사변형($^{\circ}/rad$)과 변위의 선형관계를 확인하였다.

경사계 측정을 통한 산사태 예측관리기준 개발에 관한 연구는 국외에서 최근 연구되고 있으며 국내에는 전무한 실정이다. 다만 행정안전부 급경사지 관리 실무편람에서는 지중 경사계를 활용한 누적변위경사도($^{\circ}$)와 일변위 경사도($^{\circ}/day$) 기반의 예측관리기준이 적용하고 있다. 해당 관리기준은 일본 사면안전소위원회, 일본 지반 경사계 산사태 판정기준, 국내 흙막이 가시설 관리기준 등을 참고하여 개발한 기준으로 해당 기준에 대한 개선이 필요하다[15].

또한 급경사지 관리 실무편람에 따르면 예측기기에 따

른 주민대피 관리기준은 직접지표(변위계, 경사계, 하중계)로 분류되는 계측기 중 2개 이상에서 이상 징후가 측정될 경우 경보가 발령되도록 관리하고 있다. 따라서, 기존의 지중 경사계 및 하중계 기반의 관리기준이 아닌 실험 및 검증이 가능한 새로운 관리기준이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 지표 거동 측정이 가능하며 가장 널리 사용되고 있는 지표 변위 결과와의 비교를 통한 검증이 가능한 지표 경사 기반의 비탈면 붕괴에 대한 계측관리기준 개발연구를 수행하였다. 구체적으로 연구원에서 보유 중인 실규모 급경사지 붕괴 시뮬레이터를 활용하여 비탈면 붕괴를 유도하였으며 붕괴과정의 지표 경사 데이터를 활용하여 지표경사 기반의 계측관리기준을 개발하였다. 마지막으로 추가적인 수행한 실규모 급경사지 붕괴실험 결과 및 동일 지점에서의 지표 변위 기반 계측관리기준과의 비교를 통한 검증을 실시하였다.

2. 실험조건 및 방법

2.1 토사 특성

실험에 사용된 토사는 화강풍화토를 이용하였으며 화강풍화토는 노두의 발달이 미약하고 풍화 깊이가 얇아 소규모 산사태 발생이 우세한 우리나라에 빈번히 발생하는 토질로 알려져 있다[5]. 실험에 사용한 화강풍화토의 비중(G_s)은 2.6, 유효입경(D_{10})은 0.16mm, 균등계수(C_u) 9.38, 곡률계수(C_g) 0.84, 통일분류법으로는 SC-SM로 분류되고 세립분 함량은 약 20%, 액성한계(LL, Liquid Limit)는 약 22.6%, 소성한계(PL, Plastic Limit)는 약 19%로 나타나 소성지수(PI, Plastic Index)는 3.6로 확인되었다.

2.2 비탈면 붕괴 시뮬레이터 장비

국립재난안전연구원은 실규모 급경사지 붕괴 시뮬레이터를 보유하고 있다. 실규모 급경사지 붕괴 시뮬레이터는 동양 최대규모로 Fig. 1과 같이 강우를 재현하기 위한 인공강우재현장치, 비탈면 구축을 위한 모형토조 그리고 비탈면 영상 분석과 계측결과 확인을 위한 관제실로 이루어져 있다. 인공강우재현장치의 크기는 4m×21m로 비탈면 전체에 동일한 강우 재현이 가능하며 시간당 10~160mm까지의 강우강도 조절이 가능하다. 또한 좌우 분사 방식과 직하 분사방식으로 실험조건에 따라 분사 방법 선택이 가능하다. 모형 토조는 1번 토조, 2번

토조, 3번 토조로 나누어져 있으며 토조별로 각도 조절이 가능한 가변형 구조로 되어 있다. 1번 모형토조는 0~5°, 2번 모형토조는 0~15°, 3번 모형토조는 15~40°로 실험 조건에 맞게 각도를 설정할 수 있다. 토층은 2.5m 높이까지 축조가 가능하며, 토사는 최대 250t 가량 축조가 가능하다. 마지막으로 관제실은 강우강도 및 방식 조절이 가능하며, 비탈면 각도 변경, 계측 데이터 수신, 영상정보 취득이 가능하도록 구축되어 있다[16,17].

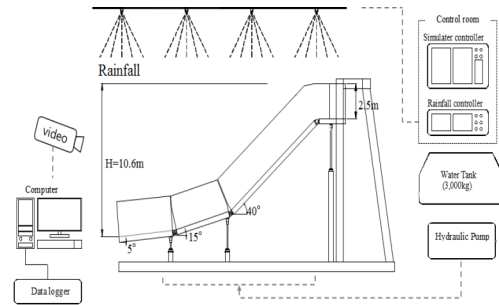


Fig. 1. Shape of real-scale steep-slope failure simulator

2.3 실험조건

실규모 비탈면 붕괴 시뮬레이터를 이용한 비탈면 붕괴 유도를 위해 2.1에서의 토사로 비탈면을 구축하였다. 비탈면의 바닥 경사는 1번 모형토조 5°, 2번 모형토조 15°, 3번 모형토조 35°로 이루어져 있으며 비탈면 표면 경사는 35°로 구성되어 있다. 비탈면 규모는 직선 높이 10.6m, 길이 15.2m, 토층 심도는 2.5m, 폭 4m로 비탈면의 무게는 약 220t 정도이다. 비탈면 구축 시 흙은 건조밀도 약 15.2kN/m³, 함수비 10%의 조건으로 축조하였다.

강우에 의하여 비탈면이 붕괴되는 과정을 측정하기 위해 지표 경사계가 비탈면 끝단을 기준으로 상부(7.5m)·중부(6.3m)·하부(5.1m)에 위치에 각 1EA(총 3EA)를 설치하였으며, 지표 변위계는 지표 경사계와 동일한 높이에 설치되어 있으며, 중앙으로부터 약 1m 떨어진 지점에 각 1EA(총 6EA)개씩 각각 설치되어 있다. 붕괴과정의 변화를 시각적으로 분석하기 위해 비탈면 정면 상부에 영상장치를 설치하였다.

마지막으로 인공강우 재현장치를 이용하여 강우를 분사하였으며 강우강도는 50mm/hr로 설정하였다. 인공강우 재현장치에서 분사하는 강우의 균등계수는 87.2%로 이는 국내·외 강우장치의 균등계수 신뢰성을 만족하

는 것으로 확인되었다[21].

실험을 위한 비탈면 규모 및 계측기 종류 및 설치 방법은 Fig. 2에 나타내고 있으며 해당 실험을 2회 수행하였다.

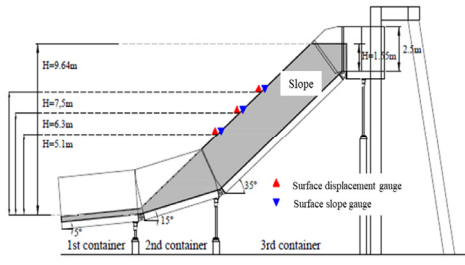


Fig. 2. Schematic diagram of slope and location of measurement

2.4 계측기기

실험에 사용한 지표 변위계와 지표 경사계는 다음과 같다. 먼저, 지표 변위계는 변위계 센서와 이를 포함하는 박스, 변위계를 고정시키기 위한 고정대로 구성되어 있다. 변위계 센서는 지표 변위 측정을 위해 널리 사용되는 와이어센서(전기저항식)를 이용하였으며, 실증실험 규모를 고려하여 측정범위는 2,000mm까지 측정이 가능한 장비를 사용하였다. 측정기기와 데이터를 저장하는 로그는 전선으로 연결되어 있다. 지표 경사계는 무선으로 데이터 전송이 가능한 일체형 경사 측정 센서와 주변기기(지시대+배터리)로 구성되어 있으며, 측정 센서는 360°로 계측이 가능하며, 게이트웨이를 통해 송·수신이 이루어진다.

3. 지표 거동 분석 결과

상기 조건으로 구축된 비탈면에 강우를 지속적으로 분사하여 비탈면 붕괴를 유도하였으며 붕괴시간 동안의 영상정보, 지표 경사 및 지표 변위의 계측정보를 획득하였다.

영상정보 및 계측기(지표 경사, 지표 변위) 분석 결과는 다음과 같다. 먼저 영상장치 분석 결과이다. 1차 실험을 통한 붕괴 거동은 약 20분 후 중앙부에서 세굴이 발생하였으며, 시간이 흐름에 따라 세굴의 크기와 개수도 증가하였다. 큰 세굴 발생 후 약 1,000분 정도 후에 붕괴가 발생하였으며 붕괴 시 토침은 약 1m가 발생하는 거동을 보였다. 2차 실험을 통한 붕괴 거동은 강우시작 약 25분 이후 세굴이 발생하였으며 1차 실험 결과와 유사한

진행을 보였지만 천천히 붕괴가 진행되어 약 1,300분 이후 붕괴가 발생하였다. 붕괴과정 중의 형태를 분석한 결과 하부에서의 강우 증가로 인한 세굴·붕괴가 발생한 후 점차 상부로 전이되어 붕괴가 발생하였으며, 이는 기존 연구[22]를 통해 분류되는 얇은 파괴 형태의 후퇴성 붕괴(Retrogressive collapse)가 발생한 것으로 확인되었다[23]. 실험을 통한 비탈면의 붕괴 최종 형상은 Fig. 3과 같다.

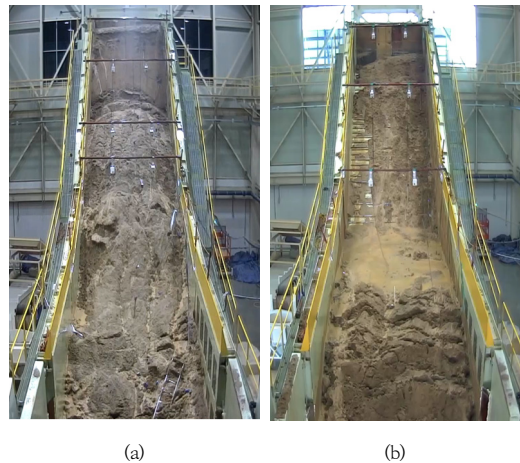


Fig. 3. Slope shape after slope failure (a) First test, (b) Second test

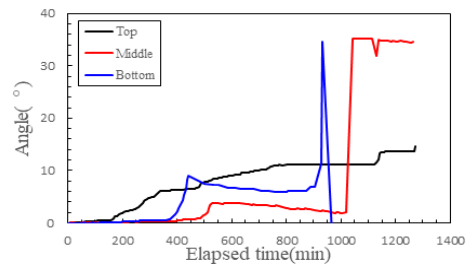


Fig. 4. slope inclination results with time for First test

다음은 지표 경사 분석 결과이다. 경사계가 설치된 급경사지 붕괴실험을 통해 시간에 따른 위치별 변화를 측정하였으며 결과는 Fig. 4와 같다. 먼저 상부 계측기의 경우 약 180분 이후부터 점진적으로 경사각이 증가하였으며 하부의 경우 약 400분 이후 급격하게 증가하는 것을 확인하였다. 이는 영상정보를 통해 시각적으로 확인한 경우와 같이 강우로 인한 하부에서의 급속한 붕괴로 발생한 경사각의 변화로 판단된다. 중부 계측기의 경우 약 550분 이후 지표면 거동이 측정되었다. 따라서 영상

에서의 붕괴 거동과 경사계 측정을 통한 지표 변위 거동은 유사함을 확인하였다.

마지막으로 지표 변위 분석 결과이다. Fig. 5는 급경사지 붕괴실험을 통한 시간에 따른 위치별 지표 변위 결과를 나타내고 있다. 계측정보를 통한 급경사지 붕괴 거동은 비탈면 상부의 경우 약 200분 이후 점진적인 변화, 하부의 경우 약 500분경 이후 급속한 변화, 중부의 경우 약 750분경 1차 붕괴로 확인되었으며 약 1,200분 이후 최종 붕괴로 계측되었다.

영상정보, 경사 및 변위 데이터 분석 결과 모두 하부에서의 급격한 거동, 상부에서의 점진적인 거동을 확인하였다. 이는 3종류 모두 지표면의 변화를 관측 및 측정하는 방법이기 때문에 판단된다.

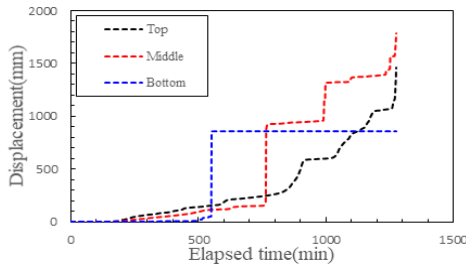


Fig. 5. Surface displacement result with time for first test

Fig. 6은 동일한 위치(상부)에서 계측된 변위와 경사 결과를 나타내고 있다. 먼저, 경사계 설치 위치는 중부 이상의 상부에 설치하는 것이 점진적인 지표 거동을 측정할 수 있을 것으로 판단되어 중부 이상 혹은 상부(선단에서 2/3지점)에 설치하는 것이 적당한 것으로 판단된다. 이는 최종 붕괴 측정이 가능하고 하부의 세굴 및 급격한 붕괴에 영향이 적은 위치이기 때문이다[24]. 다음으로 두 계측 결과 모두 시간에 따라 계측값이 점진적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이를 통해 두 계측 결과는 유사한 경향을 보이는 것으로 판단된다[19,20].

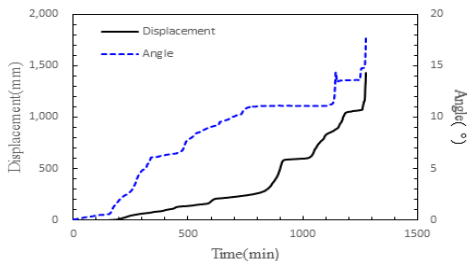


Fig. 6. Comparison of surface displacement and inclination in same location

4. 지표 경사 기반 계측관리기준 결정

4.1 계측관리기준 설정

지표 거동의 관점에서 비탈면 붕괴 형태는 먼저, 크게 점착력이 낮거나, 구속압이 높은 토사나, 암반 등에 적용 가능한 다항형 모델(Polynomial model), 점착력이 높은 토사에 적용 가능한 성장형 모델(Growth model), 마지막으로 암반비탈면에 적용 가능한 급속형 모델(Abrupt model)로 분류가 가능하다[16].

해당 붕괴 형태 중 다항형 모델은 일반적인 비탈면의 거동 형태로 Fig. 7과 같이 초기 거동 발생, 등속, 가속의 3단계로 나눌 수 있다[25]. 다항형 모델은 변위 기반의 계측관리기준으로 국내·외에서 가장 널리 활용되고 있으며 기준으로는 누적 변위와 변위 속도를 기반으로 기준이 있으며, 대부분 변위 속도를 기반으로 관리기준을 설정하고 있다.

본 연구에서의 지표 경사 기반 계측관리기준은 일반적인 비탈면 붕괴 거동 형태를 나타내고 있는 다항형 모델을 적용하였다. 이는 3장에서 지표 거동 분석 결과 지표 경사와 지표 거동의 유사성을 확인하였을 뿐만 아니라, 최근 연구자들은 지표경사와 지표 변위 데이터를 통해 두 데이터간의 높은 상관관계를 확인하였다 [18-20]. 관리기준 설정을 위한 단위는 '경사속도'로 설정하였으며 이는 지표 변위 기반의 관리기준인 변위 속도와 같이 경사 데이터를 시간에 따른 경사각으로 적용 가능할 뿐만 아니라 최근 경사 기반의 기준으로 활용되고 있으며[18], 정부의 공식적인 경사계 기반의 관리기준의 단위로 활용되고 있기 때문이다[26].

따라서 지표 경사 기반의 계측관리기준은 행정안전부 계측관리기준을 준용하여 4단계(관심-주의-경계-심각) 설정하였으며, '관심(Watch)'은 경사각 발생 시점(O), '주의(Caution)'는 등속의 시점(A), '경계(Warning)'는 등속의 종점(B), '심각(Alert)'은 가속의 종점(C)으로 설정하였다. 특히 가속의 종점의 경우 실제 비탈면 붕괴 이전에 심각 단계를 발령하기 위해 심각 단계발령 시점을 85°의 기울기로 제한하였다[15]. Fig. 7과 Table 1은 지표 경사 기반의 계측관리기준의 단계별 지점을 나타내고 있다.

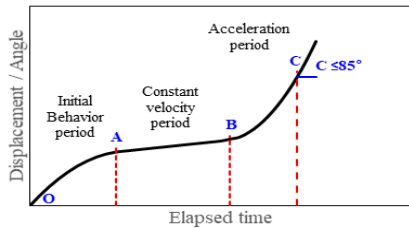


Fig. 7. slope failure model by polynomial behavior

Table 1. Determination of measurement management criteria

Level	Watch	Caution	Warning	Alert
Location	O	A	B	C

4.2 지표 경사 기반의 계측관리기준 결과

상기 기준을 기반으로 실증실험 데이터를 분석하였다. 총 6개의 데이터를 분석하였으며 분석 그래프는 Fig. 8과 같다. 그림 Fig. 8(a)는 1차 실증실험에서의 상부 계측 결과이며, Fig. 8(b)는 2차 실증실험에서의 하부 계측 결과이다. Fig. 8은 Fig. 6 및 Table 1의 관리기준에 따라 계측값 발생 시점을 관심, 경사각이 지속적으로 발생하는 시점과 종점을 주의와 경계, 마지막으로 최대 경사

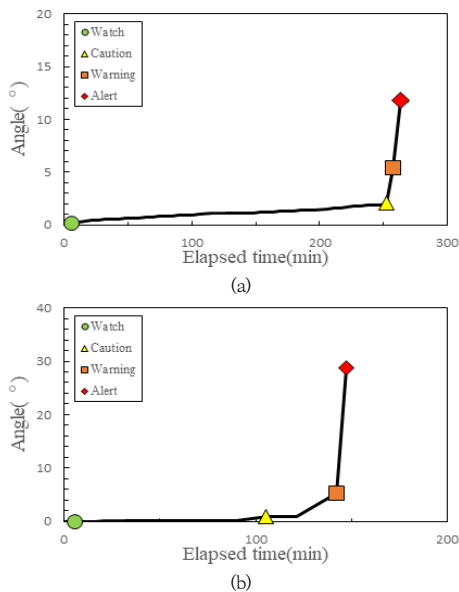


Fig. 8. Graded points from results
(a) First test, (b) Second test

각을 심각으로 계산하였다. 그래프 분석을 통한 단계별 경사각을 산정하였으며 이를 Table 2에 기술하였다. 최종적인 계측관리기준은 단계별 계측관리기준의 평균값으로 산정하였다. 평균값을 통한 기준설정 방법은 행정안전부 계측관리기준 산정 방법으로 활용되고 있는 방법이다[15,16]. 왜냐하면 단계별 기준의 최솟값을 적용할 경우 계측관리기준은 매우 낮은 값으로 산정되어, 최솟값 적용에 따른 과도한 경보 문제가 발생할 것으로 판단되기 때문이다.

Table 2와 같이 본 연구를 통한 경사각 기반의 계측관리기준은 '관심'단계는 '계측값 발생시점', '주의'단계는 '0.04°/min', '경계'단계는 '0.22°/min', '심각'단계는 '1.74°/min'로 제안하였다.

Table 2. Management criteria on each grade

No.	Criteria(°/min)			
	Watch	Caution	Warning	Alert
1	Starting point when value is detected	0.03	0.05	1.94
2		0.04	0.15	0.80
3		0.04	0.63	1.22
4		0.05	0.12	0.43
5		0.04	0.18	1.57
6		0.05	0.21	4.44
Result		0.04	0.22	1.74

4.3 계측관리기준 신뢰성 검토

본 연구에서 제안하는 계측관리기준은 실증실험 계측 데이터 분석을 통한 결과로 적은 데이터 분석으로 도출한 결과의 신뢰성의 문제가 발생한다.

따라서 본 연구에서 제안하는 계측관리기준에 대한 검증은 위해 추가적인 실험 규모 비탈면 붕괴실험 결과와의 비교 및 지표 변위 기반의 계측관리기준과의 단계별 기준 비교를 통한 신뢰성을 검증하였다.

먼저 추가적인 실험 규모 비탈면 붕괴실험 결과와의 비교이다. 본 연구에서는 2장의 실험과 토질 조건을 달리하여 추가적인 비탈면 붕괴실험을 하였으며, 실험조건은 다음과 같도록 설정하였다. 실험에 사용한 토질은 화강 풍화토로 비중은 2.59, 액성한계는 29.7%, 소성한계는 21.5%, 소성지수는 6.8%로 통일분류법으로 SC-SM으로 분류되며, 세립분은 약 38.0%로 확인되었다. 비탈면 조건은 토심 2.0m, 비탈면 경사는 35°, 습윤단위중량 약 15.6kN/m³로 축조하였다. 계측기는 지표 변위계(3EA)와 지표 경사계(3EA)를 설치하였으며 50mm/hr로 강우를 분사하여 비탈면 붕괴를 유도하였다. 실험은 총 2회

실시하였으며 계측데이터를 시간에 따른 경사각 분석 후 본 계측관리기준 방법에 따라 단계별 관리기준을 산정하였다. 단계별 산정 시점은 Table 1과 같으며 시점별 계측 결과의 평균값을 통하여 계측관리기준을 계산하였다. 분석 그래프는 Fig. 9와 같으며, 이를 Table 3으로 개별 데이터 및 평균을 산정하였다. 신뢰성 검토를 위한 계측관리기준 값은 관심단계 계측값 발생시점, 주의단계 0.04°/min, 경계단계 0.18°/min, 심각단계 2.22°/min로 산정되었다.

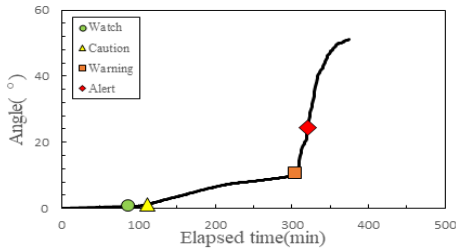


Fig. 9. Graded point for verification test

Table 3. Management criteria on each grade for validation

No.	Criteria(°/min)			
	Watch	Caution	Warning	Alert
1		0.03	0.20	3.52
2		0.03	0.16	2.78
3	Starting point when value is detected	0.05	0.18	2.15
4		0.01	0.13	1.22
5		0.08	0.24	1.40
Result		0.04	0.18	2.22

해당 결과는 본 연구에서 제안하는 주의 0.04°/min, 경계 0.22°/min, 심각 1.74°/min와 비교 할 경우 주의 단계는 동일하며, 경계단계는 다소 낮고, 심각 단계는 다소 높게 산정된 것으로 확인되었다. 이는 토질 조건이 다른 경우에도 본 연구에서 제안하는 기준이 적용 가능한 것을 보여준다.

다음으로 경사 기반과 변위 기반의 계측관리기준의 정보 발령 시점에 대한 비교이다.

경보 발령 비교는 Fig. 6에서의 동일한 지점에 위치한 변위계와 경사계의 데이터 비교를 통해 실시하였다.

Fig. 10은 본 연구에서의 실증실험을 통한 동일높이에서의 지표 변위와 지표 경사 기반의 단계별 계측관리기준을 나타내고 있다. 시간에 따른 변위는 검정색이며 주의 단계는 노란색, 경계 단계는 분홍색, 심각 단계는 붉은색, 테두리는 가는 검정색으로 처리하였다. 또한 시

간에 따른 경사는 파란 점선이며 주의 단계는 노란색, 경계 단계는 분홍색, 심각 단계는 붉은색, 테두리는 굵은 파란색으로 처리하였다. 지표 변위 기반의 관리기준은 주의단계 약 170분과 1,238분, 경계단계 약 901분과 1,257분, 심각단계 1,172분과 1,260분으로 계산되었다. 또한, 지표 경사 기반의 관리기준은 주의단계 약 168분과 1,226분, 경계단계는 1,137분과 1,253분, 심각단계는 1,142분과 1,274분으로 계산되었다. 두 계측관리단계 주의 단계는 약 170분, 경계단계는 1,255분, 심각단계는 약 1,258분 정도로 유사한 경향을 보였다. 두 계측기준 비교를 통해 지표 변위 및 지표 경사 모두 유사한 시간에 동일한 관리기준이 적용되는 것을 확인하였다.

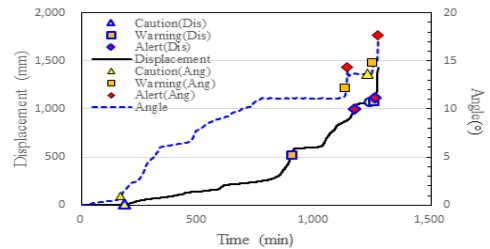


Fig. 10. Comparison of surface warning level for displacement and inclination

5. 결론

본 연구에서는 실규모 급경사지 붕괴 시뮬레이터를 활용하여 지표 경사계를 설치한 급경사지 붕괴 실증실험을 실시하였으며, 지표 경사 기반의 붕괴 거동 분석 및 이를 통한 계측관리기준을 개발 및 검증을 실시하였다. 구체적인 결론은 다음과 같다.

- (1) 지표 경사계 분석을 통한 비탈면 붕괴 분석 결과 비탈면 붕괴 이전의 계측기 위치별 거동을 확인하였다. 이를 통해 경사계 설치의 비탈면 중부 및 상부에 설치하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.
- (2) 지표 경사 기반의 계측관리기준은 다항형을 기반으로 관심-주의-경계-심각의 4단계로 설정하여 분석을 실시하였다. 분석 결과 단계별 계측관리기준은 '관심'단계 '계측값 발생 시점', '주의'단계는 '0.04°/min', '경계'단계는 '0.22°/min', '심각'단계는 '1.74°/min'로 제안하였다. 본 관리기준의 신뢰성은 추가적인 실증실험 데이터 및 동일 위치에서의 지표 변위 기반의 계측관리기준과의 정보 발령 시점 비교를 통해 검증을 실시하였다.

References

- [1] J. W. Suk, H. S. Jeong, H. S. Song, S. G. Choi, M. S. Jung, "A study on the factors causing sediment disaster and the characteristics of building damage through the analysis of collapse cases", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 23, No. 5, pp. 1-10, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.5.1>
- [2] K. S. Kim, Y. S. Song, B. G. Chae, Y. C. Cho, C. O. Lee, "Geometric characteristics of landslides on Natural terrain according to the geological condition", *The journal of engineering geology*, Vol. 17, No. 1, pp. 75-87, 2007.
- [3] S. K. Choi, J. M. Lee, Y. T. Kim, T. H. Kwon, "Characteristics of trapped debris by silt-type barriers: field-scale test results", *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 5, pp. 261-269, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2017.17.5.261>
- [4] H. Jun, S. Kim, "A study on application of very short-range-forecast rainfall for the early warning of mud-debris flows", *Journal of Wetlands Research*, Vol. 19, No. 3, pp. 366-374, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.17663/JWR.2017.19.3.366>
- [5] I. H. Son, Y. T. Oh, S. G. Lee, "A study on experimental prediction of landslide in Korea granite weathered soil using scale-dwon model test", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 20, No. 6, pp. 439-447, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.6.439>
- [6] S. G. Choi, H. Jeong, H. S. Song, T. K. Kwon, Y. Kim and J. M. Lee, "Study of korea early warning system for slope failure", *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*, Vol. 19, No. 5, pp. 73-81, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.5.73>
- [7] J. S. Lee, H. S. Kang, J. W. Suk, Y. T. Kim, "Development of hazard Level-based rainfall Threshold for prediction of rainfall-induced landslide occurrence in Korea", *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*, Vol. 19, No. 5, pp. 225-236, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.5.225>
- [8] C. Lee, D. Kim, C. Woo, Y. S. Kim, J. Seo, H. Kwon, "Construction and operation of the national landslide forecast system using soil water index in Republic of Korea", *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*, Vol 15, No. 6, pp. 213-221, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2015.15.6.213>
- [9] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), Development and operation of road cut slope management system in 2004, 2004.
- [10] B. S. Yoo, "A study of failure analysis methods based on real-time monitoring data for landslide warning system", Ph. D. dissertation, Kumoh National Institute of Technology, 2006.
- [11] M. I. Kim, B. G. Chae, Y. C. Cho, Y. S. Seo, "Study on rainfall infiltration characteristics for weather soils: Analysis of soil volumetric water content and its application", *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 18, No. 1, pp. 83-92, 2008.
- [12] J. W. Suk, H. S. Song, H. S. Kang, H. J. Kim, "A study on applicability of volumetric water content to predict shallow failure", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 20, No. 12, pp. 737-746, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.12.737>
- [13] J. Eichenberger, A. Ferrari, L. Laloui, "Early warning thresholds for partially saturated slopes in volcanic ashes", *Computers and Geotechnics*, Vol. 49, pp. 79-89, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.11.002>
- [14] H. S. Song, B. G. Chae, Y. S. Song, J. H. Choi, W. G. Seo, I. Woo, Study on landslide flume tests using stability analysis of the unsaturated infinite slope, *The journal of engineering geology*, Vol. 29, No. 4, pp. 541-552, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.9720/kseg.2019.4.541>
- [15] Ministry of the Interior and Safety (MOIS), The R&D research on construction of monitoring management system for evacuating inhabitant in steep slope site and development of monitoring specification, 2015.
- [16] S. G. Choi, J. W. Suk, H. S. Jeong, "Suggestion of measurement management criteria for soil slope failure based on displacement", *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*, Vol. 21, No. 1, pp. 251-260, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2021.21.1.251>
- [17] K. Lee, J. Suk, H. Kang, H. Kim, "Failure mechanisms of a rainfall-induced landslide using a full-scale flume test", *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*, Vol. 19, No. 7, pp. 383-392, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.7.383>
- [18] T. Uchimura, I. Towhata, L. Nishie, S. Yamaguchi, I. Seko, J. Qiao, "Precaution and early warning of surface failure of slopes using tilt sensors, *Soils and Foundations*, Vol. 55, No. 5, pp. 1086-1099.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.09.010>
- [19] J. Xie, T. Uchimura, G. Wang, Q. Shen, "A new prediction method for the occurrence of landslides based on the time history of tilting of the slope surface", *Landslides*, Vol. 17, pp. 201-312, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01283-8>
- [20] J. Xie, T. Uchimura, C. Huang, Z. Maqsood, J. Tian, "Experimental study on the relationship between the velocity of surface movements and tilting rate in pre-failure stage of rainfall-induced landslides", *Sensors*, Vol. 21, No. 18, pp. 5988, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.3390/s21185988>
- [21] H. S. Jeong, H. S. Kang, J. W. Suk, H. J. Kim, "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, 2019.

DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.12.828>

- [22] D. M. Cruden, D. J. Varnes, "Landslide types and processes", Special Report No. 247, Transportation Research Board, National Academy of Science, PP. 36-75, 1996.
- [23] National Disaster Management Research Institute (NDMI), Development of steep slope disaster mitigation technology based on empirical experiments(II), 2019.
- [24] S. Qiao, C. Feng, P. Yu, J. Tan, T. Uchimura, L. Wang, J. Tang, Q. Shen, J. Xie, "Investigation on surface tilting in the failure process of shallow landslides", Sensors, Vol. 20, PP. 2662, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.3390/s20092662>
- [25] L. I. U. Peng, H. U. A. N. G. Zheng-jun, L. I. Yong, S. O. N. G. San-hong, Y. U. Guo, X. I. E. Mo-wen, "Landslide emergency monitoring and early warning based on situation awareness sensing", In *MATEC web of Conferences*, Vol. 175, No. 6, pp. 04030, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817504030>
- [26] Ministry of the Interior and Safety (MOIS), "Guideline of steep-slope management", 2016.

최 선 규(Sun-Gyu Choi)

[정회원]



- 2008년 6월 : 경북대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2014년 2월 : 경북대학교 건설환경에너지공학부 (공학박사)
- 2019년 4월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 책임연구원

<관심분야>
지반공학

정 민 수(Min-Su Jung)

[정회원]



- 2008년 3월 : Kobe대학 자연과학연구과 (공학박사)
- 2008년 4월 ~ 2011년 1월 : Kobe대학 시민공학과 학술추진연구원
- 2011년 3월 ~ 2012년 2월 : 한국건설기술연구원 박사후 연구원
- 2012년 3월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 시설연구관

<관심분야>
지반공학

석 재 욱(Jae-Wook Suk)

[정회원]



- 2008년 2월 : 부경대학교 환경해양대학 탐사공학과 (공학석사)
- 2013년 2월 : 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 (공학박사)
- 2013년 4월 ~ 2015년 10월 : 한국시설안전공단 선임연구원
- 2015년 11월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 시설연구사

<관심분야>
지반공학, 지질공학

정 향 선(Hyang-Seon Jeong)

[정회원]



- 2016년 2월 : 부산대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 책임연구원

<관심분야>
지반공학

송 효 성(Hyo-Sung Song)

[정회원]



- 2017년 8월 : 군산대학교 해양과학대학 해양건설공학과 (공학석사)
- 2019년 4월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 선임연구원

<관심분야>
지반공학, 지질공학