

현장모형실험 기반 표층거동분석을 통한 사면붕괴 예측

Slope Failure Prediction through the Analysis of Surface Ground Deformation on Field Model Experiment

박성용¹, 민연식², 강민서³, 정희돈³, 사미 플림반⁴, 김용성^{5*}

Sung-Yong Park¹, Yeon-Sik Min², Min-seo Kang³, Hee-Don Jung³,

Ghazali-Flimban Sami⁴, Yong-Seong Kim^{5*}

¹Member, Researcher, National Disaster Management Research Institute, 406-33, Jongga-Ro, Jung-gu, Ulsan, 44538, Republic of Korea

²Korea Land & Housing Corporation, 337, Gongji-ro, ChunCheon, Gangwon-do, 24365, Republic of Korea

³Ph.D Candidate, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University, 1, Kangwondaehak-gil, Chuncheon, Gangwon-do, 24341, Republic of Korea

⁴Ph.D Candidate, Department of Biological Environment, Kangwon National University, 1, Kangwondaehak-gil, Chuncheon, Gangwon-do, 24341, Republic of Korea

⁵Member, Professor, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University, 1, Kangwondaehak-gil, Chuncheon, Gangwon-do, 24341, Republic of Korea

ABSTRACT

Recently, one of the natural disasters, landslide is causing huge damage to people and properties. In order to minimize the damage caused by continuous landslide, a scientific management system is needed for technologies related to measurement and monitoring system. This study aims to establish a management system for landslide damage by prediction of slope failure. Ground behavior was predicted by surface ground deformation in case of slope failure, and the change in ground displacement was observed as slope surface. As a result, during the slope failure, the ground deformation has the collapse section, the after collapse precursor section, the acceleration section and the burst acceleration section. In all cases, increase in displacement with time was observed as a slope failure, and it is very important event of measurement and maintenance of risky slope. In the future, it can be used as basic data of slope management standard through continuous research. And it can contribute to reduction of landslide damage and activation of measurement industry.

요 지

최근 발생하고 있는 자연재해 중 산사태와 관련된 재해는 막대한 인명과 재산피해를 발생시키고 있다. 지속적으로 발생하고 있는 산사태로 인한 피해를 최소화하기 위해서는 계측, 모니터링 시스템 등 관련 기술에 대한 과학적 관리체계가 필요하다. 본 연구는 사면붕괴 예측을 통한 산사태 피해저감을 위한 관리체계 확립을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 산사태 발생시 지반거동을 예측하기 위한 표층지반변형률 붕을 제작하고, 사면 붕괴전조로서 변형률 증가를 관측하였다. 그 결과, 사면 붕괴 시 지반의 변형은 붕괴 전조 구간, 변형 가속 구간, 변형 급가속 구간을 거친 후 붕괴에 이르는 것으로 나타나, 붕괴 전조 예측과 상관관계가 있는 것으로 판단된다. 모든 조건에서 사면붕괴 전조로서 시간에 따른 변위량의 증가가 공통적으로 관측되었으며, 이는 붕괴위험 사면의 계측 및 유지관리 관점에서 대단히 중요한 현상으로 판단된다. 산사태 발생에 따른 지반변위는 향후 지속적 연구를 통해 사면붕괴예측 및 계측관리기준의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료되며, 산사태 피해저감 및 계측산업 활성화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Landslide, Slope failure, Ground displacement, Surface ground deformation, Slope failure prediction

Received 9 Aug. 2017, Revised 5 Sep. 2017, Accepted 5 Sep. 2017

*Corresponding author

Tel: +82-33-250-6463; Fax: +82-33-251-6463

E-mail address: yskim2@kangwon.ac.kr (Y.-S. Kim)

1. 서론

최근 발생하고 있는 자연재해중 산사태와 관련된 재해는 막대한 인명과 재산피해를 발생시키고 있다. 특히 2011년 우면산 산사태, 춘천 천전리 산사태 등은 우리사회에 큰 상처를 남긴 대형 산사태이며, 점차 심해지는 극한강우 현상에 기인한 산사태가 전국적으로 발생함으로써 이러한 피해의 규모는 증가하고 있는 실정이다. 2012년 태풍 ‘산바’에 의한 산사태 피해는 약 970억원, 국지성 집중호우에 의한 산사태 피해는 약 540억원으로 확인되었다(Korea Forest Service, 2013).

최근 10년간 산사태로 인한 국내 연평균 사망자는 30명 정도이며, 이는 전체 자연재해로 인한 사망자의 30%에 이르는 큰 피해에 해당한다. 단일유형의 재해가 전체 피해의 30%에 이르는 피해를 발생시키는 것은 상당히 심각한 재해의 유형이라 할 수 있으며, 집중강우에 따른 산사태 발생빈도 증가에 따라 그 피해규모가 급격히 늘어나고 있는 추세이다(Chae et al., 2015).

이러한 산사태 피해를 최소화하기 위해서는 산사태 위험지역이나 위험사면을 정확히 파악하고 이에 대한 적절한 대책을 수립하여 붕괴를 사전에 예방해야 한다. 국민안전처(현 행정안전부)에서는 2008년부터 급경사지에 관한 조사를 수행하여 전국 13,000여개소 중 붕괴위험지구로 선정된 436개소에 대한 예방사업을 추진해 오고 있다(Ministry of Public Safety and Security, 2015).

또한, 강우에 의해 산사태가 주로 발생하는 우리나라의 경우 정확한 산사태 예·경보를 위해서는 실시간 모니터링을 통한 사전감지가 효율적이며, 학계 및 연구기관에서는 과학적 관리체계 구축의 일환으로 산사태 발생을 미리 예측하기 위한 자동화계측, 모니터링 시스템 등 산사태 관련 계측기술이 지속적으로 연구되고 있다. 산사태 취약 또는 발생가능 지점에 대한 확률론적, 결정론적 평가방법이 제안되고, 전국단위의 산사태 재해예측지도가 구축되어 있으며, 이러한 연구는 지질과 지형 등을 고려한 산사태 발생지역 예측관점에서 산사태 피해저감에 많은 기여를 하고 있다. 그러나, 산사태의 발생특성상 산사태 발생지역 예측이 아닌 산사태 발생시점을 예측하는 것이 실질적 피해저감을 위한 합리적 해결책이 될 것으로 판단된다(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2015).

유럽에서는 산사태 재해예방을 목적으로 공동협력 프로젝트를 통하여 산사태 감지 및 모니터링 시스템을 구축

하기 위한 노력을 지속적으로 하고 있다. 일본의 경우 낙반재해를 사전에 감지하여 피해를 예방하기 위해 건설성토목연구소에서 암반사면 감시시스템을 개발, 암반사면의 계측을 지속적으로 수행하고 있으며, 미국에서는 산악지대에 있는 도로에 낙석위험 경보를 발령할 수 있는 계측시스템을 설치하여 운용하고 있고, 홍콩의 경우 사면붕괴 발생 전 경고를 위해 주로 강우와 지하수위 변화에 대한 국지적인 계측을 수행하고 있다(Min, 2016).

우리나라에서는 산사태 예상지역을 대상으로 산사태 모니터링 시스템을 구축하고, 발생순간의 강우와 지질요소별 특성값의 변화를 실제 관측하고 있으나, 지반거동분석을 통해 산사태 붕괴 전조를 예측하는 연구는 아직까지 미미한 실정이다. 산사태로부터 인명피해와 경제적 손실을 최소화하기 위해서는 산사태 발생시점을 조기에 예측하는 연구가 반드시 필요하다 할 수 있으며(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2014), 산사태 예·경보의 효율성을 극대화하기 위해서는 보급형 모니터링 센서를 이용한 넓은 지역을 대상으로, 측정의 신속성 및 정확성을 제고할 필요가 있다.

따라서, 본 연구는 산사태 발생 예측 기술개발을 통한 실질적 산사태 피해저감을 위한 연구로서, 산사태 발생시 지반거동을 예측하기 위한 표층지반변형률 붕을 제작하고, 사면 붕괴전조로서 변형률 증가를 관측함으로써 사면 붕괴예측 및 계측관리기준의 기초자료로 활용하고자 하였으며, 이는 붕괴위험 사면의 계측 및 유지관리 관점에서 대단히 중요한 의의가 있다고 하겠다.

2. 표층지반변형률 붕의 제작

2.1 표층지반변형률 붕의 원리

Kim(2015)에 의하면 활동면의 접선에 평행한 변위는 활동면의 근처에서 변화가 커지며, 활동면으로부터 떨어진 위치에서는 변화가 감소하며, 활동면으로부터 떨어진 얇은 사면부분에서도 전단변형이 미소하게 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서는 ‘표층지반변형률 붕’을 제작하고 사면에 관입 설치하여 붕의 휨변형에 따라 전단변형율의 증가를 포착할 수 있는 실험을 수행하였다.

본 연구에서 사용한 표층지반변형률 붕은 사면붕괴시 사면의 천층(표면)부에서 증가하는 변형을 손쉽게 계측하

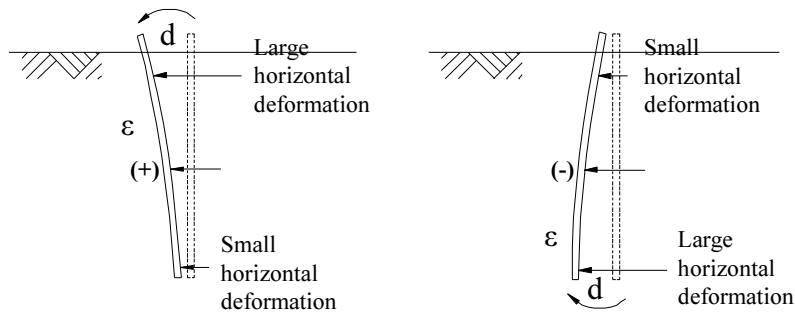
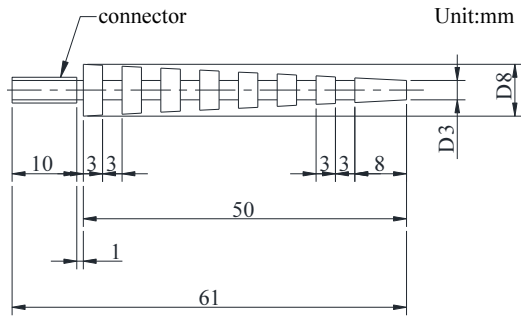


Fig. 1. Sign convention of horizontal displacement sensor (Lee et al., 2014)



(a) The schematic diagram of penetrator



(b) The photograph of penetrator

Fig. 2. The schematic diagram and photo of penetrator

기 위한 장치이다. Fig. 1에 사면 거동 발생시 표층지반변형을 붕의 거동 및 부호를 나타내었다. 즉, 계측결과와 절대값 및 부호에 근거하여 사면붕괴시 지반거동의 정성적 파악이 가능할 것으로 판단된다. 지반거동 발생시 상단 또는 하단부의 변위가 상대적으로 미소하다면 표층지반변형을 붕에는 휨변형이 발생하게 된다. 이에 따른 변위(d)와 변형율(ϵ)의 관계를 실험을 통해 구하는 경우, 변형율의 응답에 의해 사면표층의 상대적 변위를 구할 수 있게 된다 (Lee et al., 2014).

2.2 표층지반변형률 붕의 제작

2.2.1 사용재료

표층지반변형률 붕을 제작하기 위한 주재료로는 휨변형에 대한 탄성이 우수하며, 제작을 위한 가공성이 우수한 듀랄루민(AL 2011)을 선정하였으며, 지반거동에 따른 표층 지반변형을 계측하기 위한 장치로는 스트레인게이지(UFLA-1-350-11-005LE)를 선정하였다. 이 외에도 보조재료로 M-coat A접착제, 스트레인 게이지 접합용(연장선), 데이터 전송용 Cable, W-1코팅제, 그리고 외부피복재로 내후성을 갖는 열수축 튜브 등을 사용하였다.

2.2.2 표층지반변형률 붕의 제작

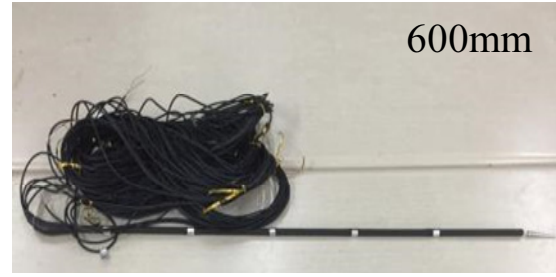
본 연구에서 사용한 표층지반변형률 붕을 단순화된 구조를 전제로 하였으며, 전장 800mm, 600mm의 길이로 구성되어 있으며, 외경 8mm, 내경 7mm의 붕 형태를 가지고 있다. 계측기를 사면에 용이하게 삽입할 수 있도록 선단에는 접속부를 포함하여 61mm 길이의 탈착식 관입부가 장착되어 있다(Fig. 2 참조).

계측부의 양단의 경우 하단에는 관입부 결합을 20mm, 상단에는 지반노출부를 30mm를 반영하여 제작하였으며, 이를 제외한 계측부에는 2매의 스트레인 게이지를 부착하였다. 이때 관입부 결합부로부터 스트레인 게이지의 거리는 계측기 길이와 상관없이 334mm로 모두 동일하게 부착하였으며, 이를 2액티브 게이지법으로 결선하여 휨변형에 대한 반응을 출력시키는 것으로 하였다.

계측부 외측은 계측기를 사면에 삽입 시 스트레인게이지 손상을 방지하기 위하여 스트레인게이지 부착 후 코팅제로 마감하였고 내후성을 갖는 열수축 튜브를 피복하여 표층지반변형률 붕의 파손 및 모형지반으로의 삽입을 용이하게 해주었으며, 마지막으로 계측부와 관입부를 연결함으로써 표층지반변형률 붕을 제작하였다(Fig. 3 참조). 또한, 사면붕괴모사를 위한 모형실험 진행에 따라 표층지



(a) 800 mm



(b) 600 mm

Fig. 3. The photograph of surface ground strain pole



Fig. 4. Calibration test

반변형률 봉으로부터 획득되는 데이터를 데이터로거를 통해 *.CSV 파일로 변환하여 저장하기 위해 데이터 전송용 Cable을 연결하였다. 데이터로거에 연결하여 할 수 있도록 데이터 전송용 Cable을 이용하여 선을 연장하였으며, 보호용 테이프로 감싸주어 마감하였다.

2.2.3 표층지반변형률 봉의 검정

Fig. 4는 본 연구에서 사용한 표층지반변형률 봉의 검정을 위한 검정시험전경을, Fig. 5는 검정결과를 나타낸 것이다. 한쪽을 고정단으로 하고, 자유단에 하중을 가하여 변위를 측정하는 방식의 캔틸레버보 조건을 부가한 검정 방법을 나타내며, 재하에 의해 휨변형량을 고려할 수 있다. 시편의 하단부를 고정장치에 고정하고 변위는 다이얼 게이지를 사용하여 측정하였으며, Data logger를 통해 부가된 변위에 따른 변형율을 측정하였다.

변형률(ϵ)은 계측부의 유효길이에 대한 수평변위량(d)의 비율(%)로 정의할 수 있으며, 이 값(+ 및 -)는 휨변형방향에 대응한다. 표면으로부터 얇은 부분(활동면으로부터 위쪽의 부분)이 ‘아래로 볼록’과 같이 변위 분포하는 경우에는 표층지반변형률 봉도 이에 따르듯 휘며, 그 변형량을 마이너스로 정의하였다. 따라서 활동면보다도 아래쪽에

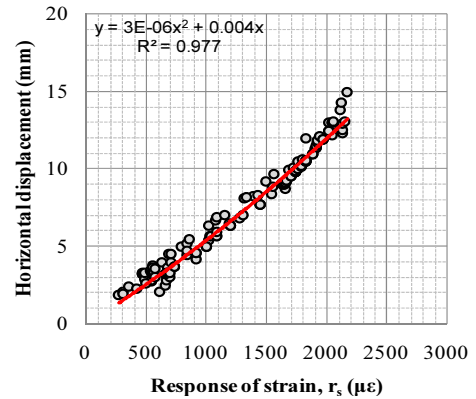


Fig. 5. Calibration test results

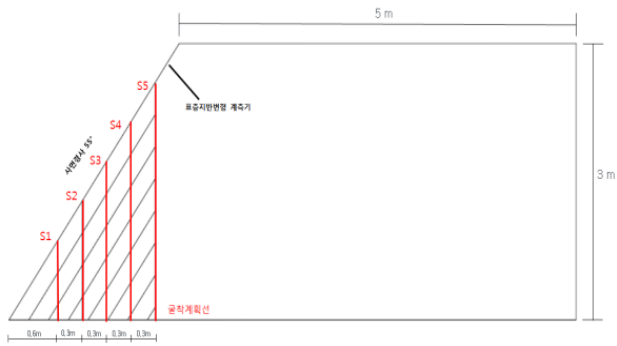
보이는 ‘위로 볼록’의 분포에서는 표층지반변형률 봉의 역방향으로 휨변형을 일으키며 이 경우에는 플러스가 된다 (Fig. 1 참조).

본 검정 결과, 하중의 부가에 따른 변형율의 오차는 극히 미소하게 나타났으며, 표층지반변형률 봉의 본체를 이루는 듀랄루민 봉은 탄성한계 내에서 거동한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 상기에서 구해진 검정데이터를 통합하여 일반화된 보정식을 제안하였으며(Fig. 5 참조), 이를 활용함으로써 모형사면 붕괴시험에 의한 사면의 표층변형량을 효과적으로 측정할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 표층지반변형 계측을 위한 현장모형실험 수행

3.1 현장모형사면 제체의 설계 및 조성

제작된 표층지반변형률 봉을 사용하여 사면 붕괴시 사면의 표층변형률을 분석하기 위한 모형실험을 계획하였다. 사면 높이는 현장여건을 고려하여 3.0m, 4.0m, 5.0m의 3가지 Case로 현장모형사면을 설계하였으며, 사면각도는 국민안전처의 급경사지 평가기준을 참조하여 55°로 선정하였다. 이외에 현장모형사면 천단부 길이는 최대 높이

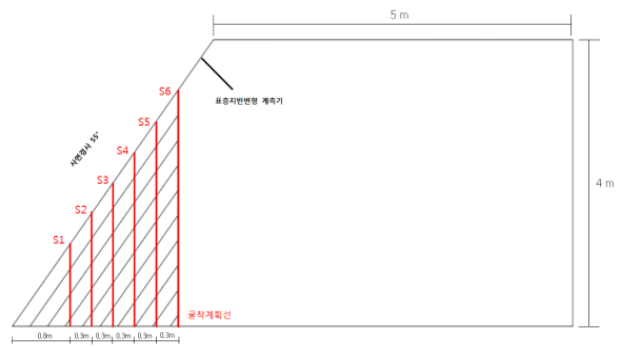


(a) The schematic diagram of Slope models



(b) Construction of slope models

Fig. 6. Slope model (Case 1)

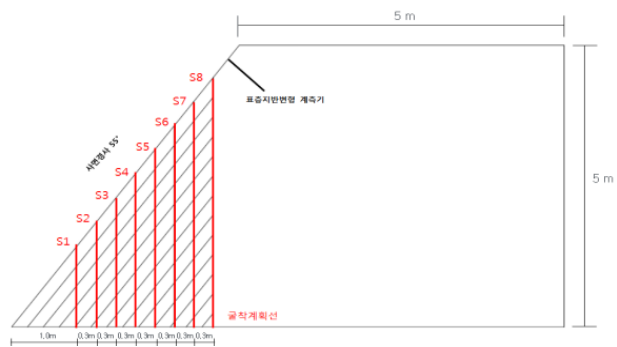


(a) The schematic diagram of Slope models

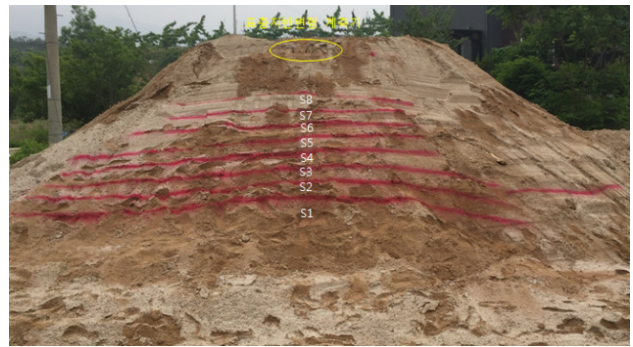


(b) Construction of slope models

Fig. 7. Slope model (Case 2)



(a) The schematic diagram of Slope models



(b) Construction of slope models

Fig. 8. Slope model (Case 3)

5.0m인 점을 고려하여 사면붕괴 지점에 대한 여유거리를 주기 위해 5.0m로 모두 동일한 조건으로 설계하였다.

Case 1은 사면높이 3.0m, 사면거리 총 2.1m, 총 5구간의 굴착구간으로(Fig. 6 (a) 참조), Case 2는 사면높이 4.0m, 사면거리 총 2.8m, 총 6구간의 굴착구간으로(Fig. 7 (a) 참조), Case 3은 사면높이 5.0m, 사면거리 총 3.5m, 총 8구간의 굴착구간으로(Fig. 8 (a) 참조) 설계하였다. 이때 S₁의 굴착구간은 설계사면거리에 대한 30%의 비율로 선정하였으며, S₂ 이후의 굴착구간에 대해서는 0.3m의 동일한 간격

을 적용하였다. 각 Case 모두 S₁ 굴착구간을 제외한 굴착구간은 모두 동일한 조건을 적용하였으며, 굴착에 따른 사면의 거동과 사면붕괴 발생 시 표층지반변형 분석을 위해 굴착구간별 대기시간을 부여하였다.

3.2 모형사면 조성

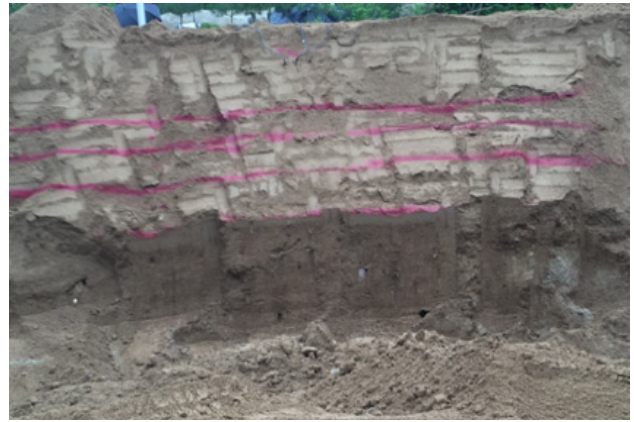
현장모형실험에 사용된 화강풍화토는 우리나라 전역에 가장 많이 분포하며 편마암 등이 여러 원인에 의해 풍화되

Table 1. Physical characteristics of the soil

Density ρ_d (g/cm ³)	Sand (0.075~2 mm) (%)	Silt (0.005~0.075 mm) (%)	Clay (less than 0.005 mm) (%)	D ₅₀ (mm)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	W _{opt} (%)
1.793	56.5	9.5	0.85	0.85	1.928	13.3



(a) Excavate soil

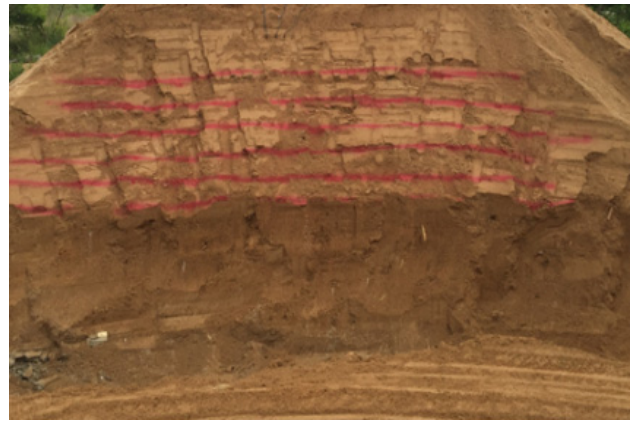


(b) Standby status

Fig. 9. Slope failure through excavation (Case 1)



(a) Excavate soil



(b) Standby status

Fig. 10. Slope failure through excavation (Case 2)

어 잔류된 흙으로 건설현장에서 성토재료나 양질의 기초 지반으로 많이 사용되고 있다. 풍화의 진행 정도에 따라서 흙 입자내의 간극이 잘 발달되어 있어 하중을 받으면 큰 변형이 발생하게 된다. 본 연구에서는 사용한 모형조성용 토사의 물리적 특성은 Table 1에 나타난 바와 같다.

모형지반은 자중이 작용하고, 퇴적되어 다짐된 상태를 백호를 이용하여 재현하였으며, 모형사면 조성이 완료된 후 작성한 도면을 바탕으로 굴착구간을 사면에 표시하였다(Fig. 6 (b), Fig. 7 (b), Fig. 8 (b) 참조).

3.3 굴착을 통한 사면붕괴 재현

본 연구에서는 3.0m, 4.0m, 5.0m의 높이에 사면각도 55°,

천단부 길이 5.0m의 조건으로 현장실험을 수행하였다. 사면의 붕괴를 모사하기 위해 사면천단부로부터 단계적으로 절토면이 수직이 되도록 굴착하여 사면을 불안정화 시키는 방법을 적용하였다. 현장사면의 거동과 붕괴시점에 대한 분석을 위해 표층지반변형률 붕을 사면에 삽입하여 S₁, S₂, S₃, S₄ 등 굴착구간별로 대기시간을 주어 표층지반변형률 계측 값을 획득하였다. 굴착진행에 따른 현장사면 상태는 Fig. 9~Fig. 11, 굴착 후 붕괴사면은 Fig. 12에 나타내었다.

4. 굴착진행에 따른 지반거동 분석

본 연구에서는 조성된 모형사면의 S₁ 구간을 수직으로



(a) The schematic diagram of Slope models



(b) Construction of slope models

Fig. 11. Slope failure through excavation (Case 3)



(a) slope failure (Case 1)



(b) slope failure (Case 2)



(c) slope failure (Case 3)

Fig. 12. Slope failure

굴착하고, 이후 대기시간을 주어 표층지반변형률 붕괴의 반응을 살펴보았다. 대기시간이 지나고 S_2 를 수직으로 추가 굴착하여 대기시간을 유지하였다. S_1 과 동일한 방법으로 표층지반변형률 붕괴의 반응을 살펴 본 뒤 다음 굴착을 수행 하였으며, 사면이 붕괴될 때 까지 지속적으로 계측하였다.

Fig. 13~Fig. 15는 사면 높이 3.0m(Case 1), 4.0m(Case 2),

5.0m(Case 3)에 대하여, 사면 붕괴 시까지의 시간에 따른 변위 분포를 나타내고 있다. 가로축은 실험개시부터 사면 붕괴 발생 시까지의 경과시간을, 세로축은 변위를 도시하였다.

4.1 Case 1(사면높이 3.0m)

Case 1(사면높이 3.0m)의 경우, 실험개시로부터 약 5분까지는 사면의 거동에 변화가 없었으나(O-A구간), 굴착진행에 따라 5분 경과시점에 사면거동의 전조현상을 확인할 수 있으며, 이후 18분까지 사면거동이 미세하게 증가되는 것(A-B)을 확인하였다. 그 후 약 18분부터 25분까지 비교적 일정한 증가구간(B-C)과 사면붕괴가 발생하기 전 변형이 가속적으로 증가한 급가속 구간(C-D)을 거쳐, 실험개시 약 27.5분 후에 사면붕괴가 최종적으로 발생하였다(Fig. 13 참조). 이는 Case 2와 거의 유사한 경향으로 판단된다.

설치한 표층변형률 봉을 통해 획득한 데이터 분석을 통해 사면거동에 따른 변위 값을 분석해보면, 800mm 표층지반변형률 봉은 0.01mm에서 전조현상 발생을 시작으로 0.30mm까지 정상증가를, 1.75mm까지 가속증가를, 3.75mm까지 급가속 증가구간을 확인할 수 있으며, 이후 사면붕괴가 발생한 것으로 확인되었다. 600mm 표층지반변형률 봉은 0.01mm에서 전조현상 발생을 시작으로 0.30mm까지 정상증가를, 1.06mm까지 가속증가를, 1.60mm까지 급가속 증가구간을 확인할 수 있으며, 이후 사면붕괴가 발생한 것으로 확인되었다.

4.2 Case 2(사면높이 4.0m)

Case 2(사면높이 4.0m)의 경우, 실험개시로부터 약 5분까지는 사면의 거동에 변화가 없었으나(O-A구간), 굴착진행에 따라 5분 경과시점에 사면거동의 전조현상을 확인할 수 있으며, 이후 18분까지 사면거동이 미세하게 증가되는 것(A-B)을 확인하였다. 그 후 약 18분부터 25분까지 비교적

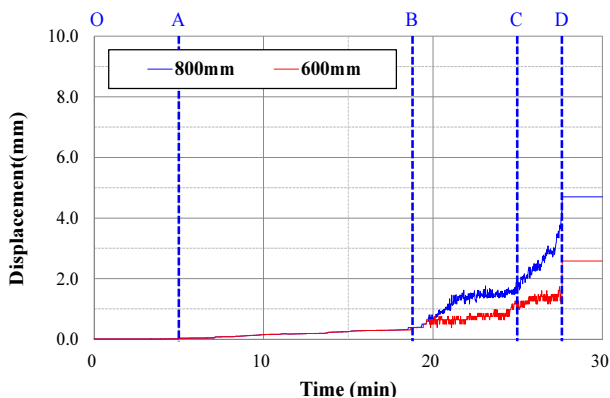


Fig. 13. Displacement vs. time (Case 1)

적 일정한 증가구간(B-C)과 사면붕괴가 발생하기 전 변형이 가속적으로 증가한 급가속 구간(C-D)을 거쳐, 실험개시 약 27.5분 후에 사면붕괴가 최종적으로 발생하였다(Fig. 14 참조).

설치한 표층변형률 봉을 통해 획득한 데이터 분석을 통해 사면거동에 따른 변위 값을 분석해보면, 800mm 표층지반변형률 봉은 0.01mm에서 전조현상 발생을 시작으로 0.30mm까지 정상증가를, 2.08mm까지 가속증가를, 3.77mm까지 급가속 증가구간을 확인할 수 있으며, 이후 사면붕괴가 발생한 것으로 확인되었다. 600mm 표층지반변형률 봉은 0.01mm에서 전조현상 발생을 시작으로 0.30mm까지 정상증가를, 1.06mm까지 가속증가를, 1.60mm까지 급가속 증가구간을 확인할 수 있으며, 이후 사면붕괴가 발생한 것으로 확인되었다.

4.3 Case 3(사면높이 5.0m)

Case 3(사면높이 5.0m)의 경우, 실험개시로부터 약 7분까지는 사면의 거동에 변화가 없었으나(O-A구간), 굴착진행에 따라 7분 경과시점에 사면거동의 전조현상을 확인할 수 있으며, 17분까지 사면거동이 미세하게 증가되는 것(A-B)을 확인하였다. 그 후 25분까지 일정한 증가구간(B-C)과 사면붕괴가 발생하기 약 전 변형이 가속적으로 증가한 급가속 구간(C-D)을 거쳐, 실험개시 약 27.5분 후에 사면붕괴가 최종적으로 발생하였다(Fig. 15 참조).

설치한 표층변형률 봉을 통해 획득한 데이터 분석을 통해 사면거동에 따른 변위 값을 분석해보면, 800mm 표층지반변형률 봉은 0.02mm에서 전조현상 발생을 시작으로 0.29mm까지 정상증가를, 2.02mm까지 가속증가를, 4.02mm까지 급가속 증가구간을 확인할 수 있으며, 이후 사면붕괴

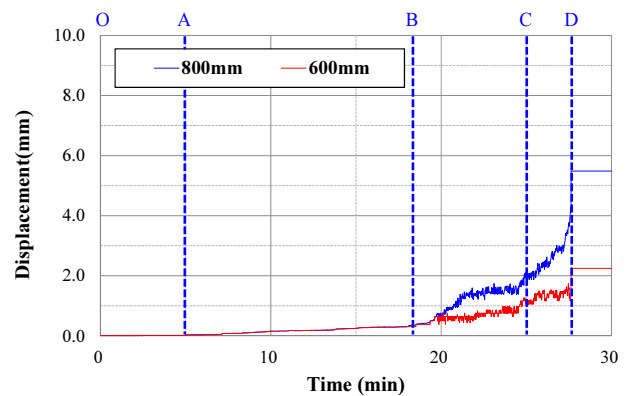


Fig. 14. Displacement vs. time (Case 2)

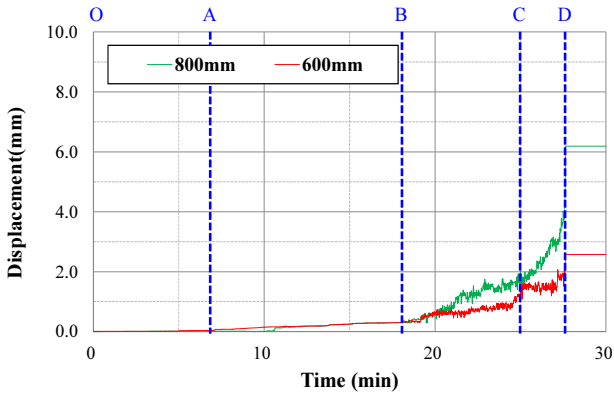


Fig. 15. Displacement vs. time (Case 3)

가 발생한 것으로 확인되었다. 600mm 표층지반변형률 봉은 0.04mm에서 전조현상 발생을 시작으로 0.29mm까지 정상증가를, 1.39mm까지 가속증가를, 2.60mm까지 급가속 증가구간을 확인할 수 있으며, 이후 사면붕괴가 발생한 것으로 확인되었다.

사면의 높이가 증가됨에 따라 전조현상구간 및 붕괴구간은 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며, 사면 붕괴시 지반변형은 붕괴전조구간(정상 증가), 변형 가속구간(가속적 증가), 변형 급가속 구간(급가속적 증가)을 거친 후 붕괴에 이르는 것으로 확인되었다.

모든 Case에서 800mm 표층지반변형률 봉이 측정된 변위값이 600mm 표층지반변형률 봉에서 측정된 변위값보다 다소 크게 나타나고 있는데, 이는 Fig. 1에서 제시한 표층지반변형률 봉의 변위와 변형률과의 관계에서 그 이유를 확인할 수 있으며, 계측깊이가 깊을수록 변위값이 커지는 실험결과에 따라 계측기 설치위치가 사면붕괴 전조 예측과 상관관계가 있는 것으로 판단된다.

사면 활동면 상부측의 변형은 활동면과 가까울수록 표층부보다 더 먼저 가속 구간을 나타내며 그 값도 더 큰 것으로 알려져 있다(Tamate et al., 2013). 본 연구에서도 표층지반변형률 봉에 부착한 센서가 사면 활동면과 가까울수록 더 큰 변위 값을 나타내는 것으로 확인되었으며, 이는 Min(2016)의 연구결과와도 유사한 거동특성을 나타내는 것으로 판단된다. 사면활동면의 접선에 평행한 변위는 활동면의 근처에서 변화가 커지며, 활동면으로부터 떨어진 위치에서는 증가현상이 다소 낮게 나타나고 있다. 따라서 사면붕괴시 지반 변형 계측을 위해 계측기를 설치할 경우 예상활동면과 더 가까운 심도에 설치한다면 사면 붕괴 전조 현상을 더 빠르고 정확하게 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 산사태 발생시 지반거동을 예측하기 위한 표층지반변형률 봉을 제작하고, 사면 붕괴전조로서 변형률 증가를 관측함으로써 사면붕괴예측 및 계측관리기준의 기초자료로 활용하고자 하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 사면 활동면 상부측의 변형은 활동면과 가까울수록 표층부 보다 더 먼저 가속 구간을 나타내며, 그 값도 더 큰 것으로 나타나 사면 변형 계측을 위해 계측기를 설치할 경우 예측되는 사면 활동면과 더 가까운 지중에 설치한다면 사면 붕괴 전조현상을 더 빠르고 정확하게 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 사면 붕괴 시 지반의 변형은 붕괴 전조 구간(정상 증가), 변형 가속 구간(가속적 증가), 변형 급가속 구간(급가속적 증가)을 거친 후 붕괴에 이르는 것으로 나타나, 붕괴 전조 예측과 상관관계가 있는 것으로 판단된다.
- (3) 사면붕괴 전조로서 지반변위의 증가가 공통적으로 관측되었으며, 붕괴 시 가속도적 증가 및 급가속적 증가가 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 활용하여 사면 붕괴를 사전예측함으로써 인명피해 저감에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

향후 지속적인 연구진행을 통해 사면붕괴 전조현상 분석의 명확한 확립이 필요하며, 그 결과는 사면 계측관리기준의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This research was supported by Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (IPET) through Advanced Production Technology Development Program, funded by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (Grant number 116114-03).

References

1. Chae, B. G., Song, Y. S., Choi, J. H. and Kim, K. S. (2015),

- The Current Methods of Landslide Monitoring Using Observation Sensors for Geologic Property, *Journal of Sensor Science and Technology*, Vol.24, No.5, pp.291-298 (in Korean).
2. Kim, Y. S. (2015), *Development of slope failure forecasting and warning system*, Research Institute Report (in Korean).
 3. Korea Forest Service (2013), *A Study on integrated management for hazards of landslide* (in Korean).
 4. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (2014), *Development of an integrated early detection system of landslides based on a real-time monitoring*, Research Institute Report (in Korean).
 5. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (2015), *Technology Development of Landslide Rapid Detection based on a Real-time Monitoring*, Research Institute Report (in Korean).
 6. Lee, C. W., Park, S. Y and Kim, Y. S. (2014), Development of Horizontal Displacement Sensor for Rainfall-simulated Centrifugal Model Test, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.15, No.12, pp.71-77 (in Korean).
 7. Ministry of Public Safety and Security (2015), *The R&D research on Construction of Monitoring Management System for Evacuating Inhabitant in Steep Slope Site Development of Monitoring Specification* (in Korean).
 8. Min, Y. S. (2016), *A Study on slope failure prediction through the measurement of surface ground deformation*, Ph.D. dissertation, Kangwon National University, Korea (in Korean).
 9. Tamate, S., Hori, T., Mikuni, C., Itoh, K., Kikkawa, N. and Suemasa, N. (2013), A Large Scale Model Test on Detection of Potential Risk of Slope Failure by Monitoring of Shear Strain in Shallow Section, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol.69, No.3, pp.326-336.