The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169
Vol. 33, No. 4, December, 2023, pp. 555-571
https://doi.org/10.9720/kseg.2023.4.555

RESEARCH ARTICLE

소형 및 실규모 급경사지 실험을 통한 계측관리기준 개발을 위한 실험적 연구: 모관흡수력을 기준으로

송효성[1] · 이영학[1] · 이승재[2] · 김재정[3*]

[1]국립재난안전연구원 방재기준평가센터 지반재난연구팀 선임연구원
[2]국립재난안전연구원 방재기준평가센터 지반재난연구팀 연구원
[3]국립재난안전연구원 방재기준평가센터 지반재난연구팀 시설연구사

Experimental Study on Establishing Measurement Management Criteria for Soil Slope Failure by Using Reduction-Scale and Full-Scale Slope Experiments: Based on Matric Suction

Hyo-Sung Song[1] · Young-Hak Lee[1] · Seung-Jae Lee[2] · Jae-Jung Kim[3*]

[1]Senior Researcher, Geotechnical Disaster Research Team, Disaster Prevention Assessment Center, National Disaster Management Research Institute
[2]Researcher, Geotechnical Disaster Research Team, Disaster Prevention Assessment Center, National Disaster Management Research Institute
[3]Research Officer, Geotechnical Disaster Research Team, Disaster Prevention Assessment Center, National Disaster Management Research Institute

Abstract

Due to South Korea's concentrated summer rainfall, constituting 70% of the annual total, landslides frequently occur during the rainy season, necessitating accurate prediction methods to mitigate associated damage. In this study, a reduced-scale and full-scale slope was configured using weathered granite soil to find the possibility of establishing measurement management criterias through landslide reproduction. The experiment focused on matric suction, analyzing changes in ground properties and failure patterns caused by rainfall infiltration. Subsequently, an unsaturated infinite slope stability analysis was conducted. By calculating the failure time when the safety factor falls below 1 for each experiment, landslide prediction was demonstrated to be possible, approximately 17 minutes prior for the reduction-scale experiment and 6.5 hours for the full-scale experiment. These findings provide useful data for establishing Korean soil slope measurement management criteria that consider the characteristics of weathered granite soil.

Keywords: reduction-scale experiment, full-scale experiment, weathered granite soil, measurement management criteria, matric suction

초 록

우리나라는 연평균 강수량의 70%에 달하는 여름철 강우로 인해 산사태가 자주 발생하고 있으며, 이로 인한 피해 완화를 위해서는 정확한 예측기법이 필요하다. 본 연구에서는 화강암 풍화토를 이용하여 소형 및 실규모 실험을 통한 계측관리기준 수립 가능성을 모색하였다. 실험은 모관흡수력을 중점으로 강우

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Jae-Jung Kim
E-mail: kjj0914@korea.kr

Received: 16 October, 2023
Revised: 7 December, 2023
Accepted: 9 December, 2023

Ⓒ 2023 The Korean Society of Engineering Geology

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.

침투로 인한 지반 특성 변화와 사면붕괴 패턴을 분석하였으며, 이 결과를 기초로 불포화 무한사면 안정성 해석을 수행하였다. 안전율이 1 미만으로 떨어지는 조건에서 붕괴도달 시간을 산정한 결과, 소형 실험의 경우 약 17분 전, 실규모 실험의 경우 약 6.5시간 전으로 산사태 예측이 가능한 경향을 나타냈다. 이러한 연구 결과는 화강암 풍화토의 특성을 고려한 계측관리기준을 확립하는데 유용한 자료로 활용될 수 있다.

주요어: 소형 급경사지 실험, 실규모 급경사지 실험, 화강암 풍화토, 계측관리기준, 모관흡수력

서 론

최근 지구온난화와 이로 인한 기상변동으로 인해 연평균 강수량의 약 2/3 이상이 하절기에 발생하고 있다. 국내에서 발생하는 대부분의 급경사지 붕괴, 토석류 등의 토사재해는 이 기간에 주로 집중되어 재산 손실 및 인명피해를 지속적으로 발생시키고 있다. 토사재해로부터 발생하는 피해 예방 또는 최소화하기 위해서는 급경사지 붕괴 특성을 파악할 필요가 있으며, 이를 토대로 급경사지 붕괴 예측을 통한 계측관리기준 수립이 중요하다.

일반적으로 급경사지 붕괴는 강우에 의해 지하수위가 상승함에 따라 지반 내 간극수압이 증가하여 발생하는 것으로 알려져 있다. 하지만, 자연사면의 경우 지하수위 상승에 의한 영향보다는 강우가 침투함에 따라 습윤전선 하강에 의한 영향으로 주로 얕은 붕괴가 발생되고 있다(Kim et al., 2004; Song et al., 2012). 사면 불안정성 조건에 대한 형성과정은 강우가 지속됨에 따라 표층지반이 포화되기 시작하고 습윤전선이 일정 깊이에 도달하여 지반의 전단강도를 좌우하는 모관흡수력(matric suction)이 감소하게 된다(Ng and Shi, 1998; Lu and Godt, 2008). 이 때문에 많은 연구자들이 불포화 지반 내 강우가 침투함에 따른 심도별 유효응력의 변화를 고려하기 위해 많은 연구를 진행하였으며(Terzaghi, 1943; Bishop, 1959; Lu and Likos, 2006), 모관흡수력과 체적함수비의 관계인 흙-함수특성곡선(Soil-Water Characteristics Curve, SWCC)을 토대로 산정된 흡입응력(suction stress)을 이용하여 불포화 지반 내 응력상태를 표현함으로써 토사 비탈면의 붕괴 발생 특성을 규명하기 위해 노력하고 있다(Kim et al., 2004; Godt et al., 2006; Song et al., 2016, 2019).

토사 비탈면의 붕괴 발생 특성을 파악하는 방법으로는 붕괴가 발생할 가능성이 큰 자연사면을 대상으로 계측센서를 설치를 한 후 자연적 또는 인공적으로 붕괴를 발생시키는 방법과 모형실험 장치를 통해 다양한 조건별 붕괴 특성을 파악하는 방법 등으로 구분할 수 있다. 자연사면을 대상으로 하는 방법은 여러 가지 복합적인 요인으로 인해 해석하기 어려울 뿐만 아니라 소요되는 시간과 비용만큼 유용한 정보를 얻기 어렵다. 따라서 일부 연구자들은 붕괴에 영향을 미치는 인자를 인위적으로 조절할 수 있는 모형실험이 실시된 바 있다(Iverson, 2000; Song et al., 2006; Chae et al., 2007; Fang et al., 2012). 모형실험은 자연사면의 규모를 재현하는데 있어서 치수효과(Scale effect)로 인한 침식이나 유동성이 커지는 문제점을 내포하고 있으나(Moriwaki et al., 2004), 붕괴에 영향을 미치는 복수의 인자들을 대상으로 한 가지씩 변화시키면서 반복 실험을 수행할 수 있다는 점은 비탈면의 붕괴특이점이나 붕괴에 미치는 요소를 면밀히 파악할 수 있다는 측면에서 장점이 되기도 한다.

한편, 현재까지 국내에서는 토사 비탈면의 붕괴 발생의 유발인자인 강우와 지질 요소의 특성값을 활용하여 비탈면의 붕괴 시점을 추정할 수 있는 연구는 미흡한 실정이다. 이를 달성하기 위해서는 실험 데이터 수집을 기반으로 비탈면의 붕괴 특성 파악에 따른 계측값의 활용과 비탈면의 안정성 평가가 유용한 방법이 될 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 강우침투에 따른 토사 비탈면의 붕괴 특성을 규명하고 계측관리기준 수립을 위한기초 자료를 구축하기 위해 소형 급경사지 실험 장치(길이 2.1 m, 높이 0.5 m, 폭 0.4 m) 및 실규모 급경사지 실험 장치(길이 21 m, 높이 2.5 m, 폭 4 m), 그리고 인공강우를 활용하여 강우 침투에 따른 토사 비탈면의 붕괴를 재현하고, 실험별 붕괴 특성과 비교·분석하였다. 모형사면 내에 설치한 체적함수비 및 모관흡수력 센서를 통해 강우가 침투함에 따른 지반재료의 특성을 시간별로 기록하였으며, 붕괴 양상을 분석하기 위해 실험 전체 과정을 촬영장비로 모니터링 하였다. 최종적으로는 각 실험 장

치별 실험 결과를 토대로 불포화 무한사면 안정해석법을 활용하여 안정해석을 수행하였다. 이 결과를 기초로 모관흡수력에 의한 비탈면 붕괴예측 시점을 추정하여 계측관리기준 수립에 관한 근거 마련을 목적으로 하고 있다.

소형 및 실규모 급경사지 실험장치

본 연구에서는 토사 비탈면의 표층붕괴를 재현하기 위해 소형 및 실규모 급경사지 실험장치를 활용하였으며(NDMI, 2019), 강우 침투에 따른 지반특성 변화 및 비탈면 붕괴특성을 살펴보고자 하였다. 먼저 소형 급경사지 실험장치는 크게 모형토조, 강우재현장치 그리고 계측장치로 구성되어 있다(Fig. 1). 모형토조는 길이 2.1 m, 높이 0.5 m 그리고 폭 0.4 m로 사면의 경사는 0~40°로 조절할 수 있다. 강우재현장치는 살수장치와 강우 조절부로 구성되어 있다. 살수장치는 1단 5열의 4 m 높이에 설치된 노즐로 노즐의 위치를 이동시킬 수 있으며 강우 조절부의 펌프압을 조절함에 따라 10 mm/hr부터 140 mm/hr까지 재현할 수 있다. 계측장치는 강우가 침투함에 따른 지반특성 변화를 관찰하기 위해 모관흡수력 센서 및 체적함수비 센서를 사용하였고, 지표면의 움직임을 측정하기 위해 지표변위계를 사용하였다. 모든 계측 센서는 데이터 로거를 통해 계측값들을 불러들일 수 있으며 본 연구에서는 1초당 1개의 데이터를 수집하였다. 강우 침투에 따른 지반특성 변화를

Fig. 1. Panoramic view of the landslide model test device (reduction-scale).

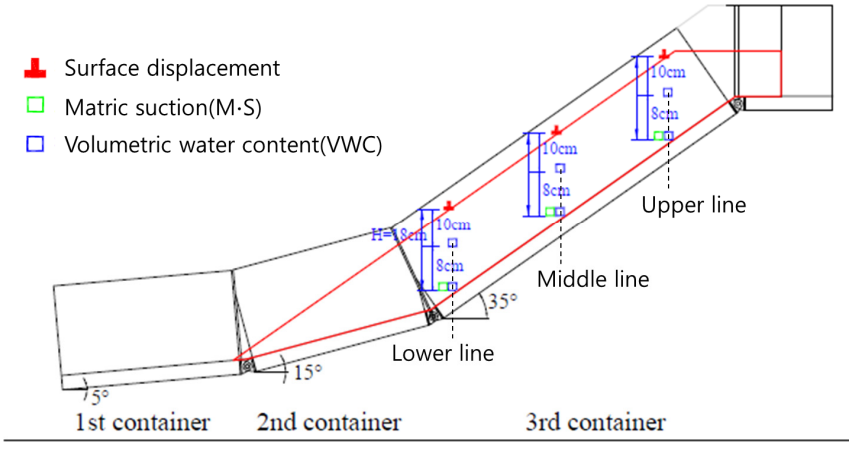


Fig. 2. Schematic diagram of the landslide model test device (reduction-scale).

관찰하기 위해 설치된 체적함수비 센서는 지표면으로부터 수직으로 0.10 m 및 0.18 m 심도에 설치하였으며, 모관흡수력 센서는 모형사면의 최하단부인 0.18 m 심도에 설치하였다. 지표변위계는 모식도에서와 같이 지표면에 설치하였다(Fig. 2).

실규모 급경사지 실험장치도 마찬가지로 모형토조, 강우재현장치 그리고 계측장치로 구성되어 있다(Fig. 3). 모형토조는 총 길이 21 m, 높이 2.5 m 그리고 폭 4 m이며, 토조는 3개로 분리되어 각 토조별로 각도조절이 가능한 가변형 구조이다. 하단부 토조는 0~5°, 중단부 토조는 0~15° 그리고 상단부 토조는 15~40°로 경사조절이 가능하다. 강우재현장치는 소형 급경사지 실험장치와 마찬가지로 살수장치, 강우 조절부로 구성되어 있다. 살수장치는 16 m 높이에 회전 분사 노즐 20개와 수직 분사 노즐 9개 총 29개의 노즐이 있으며, 4 m × 21 m의 범위에 강우를 분사할 수 있다. 강우 조절부는 강우 노즐의 회전속도 및 회전지체시간, 펌프압력 그리고 노즐 형태 등의 조건에 따라 10 mm/hr부터 160 mm/hr의 강우강도 조절이 가능하다. 계측장치는 소형 급경사지 실험장치와 마찬가지로 강우가 침투함에 따른 지반특성 변화를 측정하기 위한 모관흡수력과 체적함수비 센서를 사용하였고, 지표의 움직임을 측정하기 위해 지표변위계를 사용하였다. 이 또한 마찬가지로 1초당 1개의 데이터를 수집하여 데이터 분석을 수행하였다. 그리고 실규모 급경사지 실험에서는 모관흡수력 및 체적함수비센서는 지표면으로부터 0.5~1.5 m에 설치하였고 지표변위계는 모식도에서와 같이 지표면에 설치하였다(Fig. 4). 소형 및 실규모 급경사지 실험장치의 제원을 간략히 정리하면 Table 1과 같다.

Fig. 3. Panoramic view of the landslide model test device (full-scale).

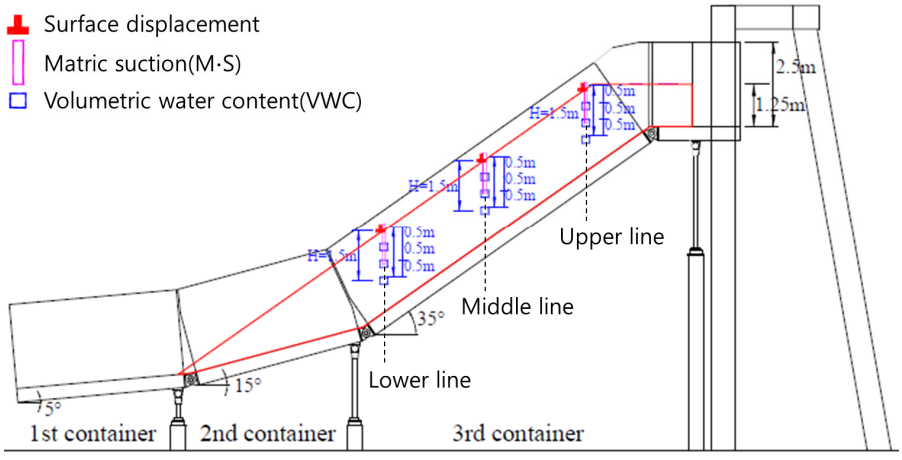


Fig. 4. Schematic diagram of the landslide model test device (full-scale).

Table 1. Landslide model test device specifications

		Reduction-scale	Full-scale
Landslide model test device	Length (m)	2.1	21
	Height (m)	0.5	2.5
	Width (m)	0.4	4
	Rainfall intensity (mm/hr)	10~140	10~160
	Slope angle (°)	0~40	0~40
Nozzle	Nozzle shape	Vertical spray nozzle	Rotating spray nozzle, Vertical spray nozzle
	Nozzle height	4 m	16 m

실험조건 및 실험방법

본 연구에서는 국내에서 산사태 발생빈도가 가장 높은 화강암 풍화토를 이용하여 모형사면을 조성하였다. 실내토질시험을 통해 도출된 공학적·물리적 특성은 Table 2와 같으며, 입도분포곡선은 Fig. 5와 같다. 인공강우는 현장 재현을 위해 2019년 태풍 '미탁'으로 인해 울진군에서 많은 사면붕괴사고를 유발한 강우량을 기초로 설정되었다. 이 때 10시간 동안 누적 강우량은 약 550 mm로 기록되었으며, 이를 근거로 본 연구에서는 설계강우량을 시간당 50 mm로 설정하였다(NDMI, 2019). 설계강우량에 대한 유효성 검증을 실시한 결과, 분사형태는 고르게 나타났고, 계측량은 50 mm/hr에 근접하여 유효한 것으로 판단된다(NDMI, 2019). 또한, 울진군에서 현장사면 붕괴당시 대부분 35° 이상의 급경사지에서 발생되었으므로 이를 근거로 모형사면의 경사조건은 35°의 경사로 적용하였다. 이후 모형토조 내에 각 실험의 단위중량에 맞게 모형사면을 조성하였고(Table 3), 이와 동시에 계측센서를 모형토조의 지표 및 지중에 설치를 하였다. 이후 강우를 분사함과 동시에 데이터로거를 통해 데이터를 저장하였고, 영상촬영장치를 통해 붕괴과정을 저장하였다. 한편, 자연 사면은 증발 및 모세관 현상 등에 의해 일정량의 수분을 포함하고 있으므로, 습윤과정(wetting path)을 통해 산출된 불포화 함수특성의 적용이 자연사면에서의 침투거동 예측에 근사한 결과를 재현할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 사면구성에 활용한 시료의 물리·역학적 특성을 반영(USCS: SP-SW)하여 습윤과정에 의해 도출된 불포화 함수특성을 적용하였다(Fig. 6, Table 4).

Table 2. Physical property of weathered granite soil

Property	Symbol	Value
Specific gravity (-)	G_s	2.60
Natural water content (%)	w	18.95
Dry unit weight (g/cm^3)	γ_d	1.67
Effective particle size (mm)	D_{10}	0.42
Uniformity coefficient (-)	C_u	3.41
Coefficient of curvature (-)	C_g	0.79
USCS (-)	-	SP
Coefficient of permeability (cm/sec)	K_s	7.6×10^{-2}
Liquid limit (%)	LL	22.56
Plastic limit (%)	PL	18.92
Cohesion (kPa)	c	11.84
Friction angle (°)	ϕ	27.02

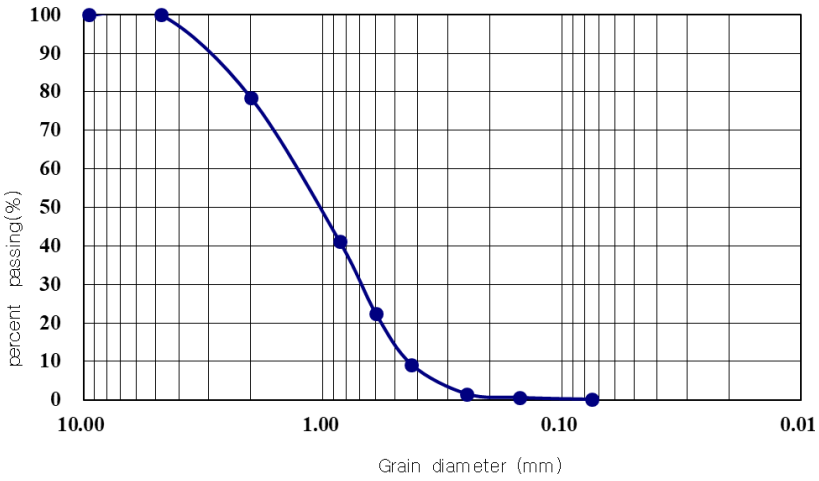
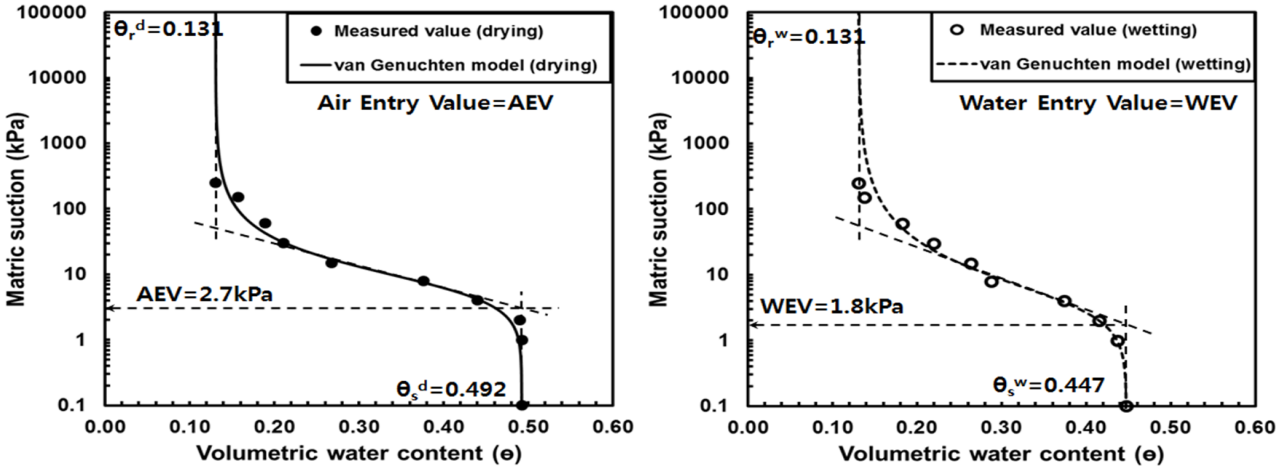


Fig. 5. Grain size distribution curve of the soil used in model tests.

Table 3. Experimental conditions of the model slopes for the landslide model tests

		Unit weight (g/cm^3)	Rainfall intensity (mm/hr)	Slope angle (°)	Initial water content (%)
Reduction-scale experiments	Case 1	1.45	50	35	8.50
	Case 2	1.47	50	35	7.20
	Case 3	1.48	50	35	10.60
	Case 4	1.60	50	35	13.10
	Case 5	1.54	50	35	10.90
	Case 6	1.62	50	35	10.50
	Case 7	1.61	70	35	12.20
	Case 8	1.68	70	35	11.50
Full-scale experiments	Case 1	1.51	50	40	10.00
	Case 2	1.60	50	35	10.00



(a) Drying path (b) Wetting path

Fig. 6. SWCC of the soil used in model tests (Song and Song, 2023).

Table 4. Fitting parameter of SWCC for the weathered granite soil (Song and Song, 2023)

Soil	Path	α(kPa^{-1})	n	m
Granite soil	Drying	0.145	1.990	0.497
	Wetting	0.245	1.712	0.416

실험결과 및 분석

토사비탈면 붕괴 발생 특성

소형 급경사지 실험

실험이 진행되면서 Fig. 2와 같이 심도별로 설치된 체적함수비 센서를 통해 실험조건별 강우가 침투하는 것을 확인하였고, 붕괴가 발생한 후 촬영된 실험 영상을 토대로 토사비탈면의 붕괴 발생 특성을 분석하였다. 소형 급경사지 실험은 총 8회 실시되었으며, 실험에서 나타난 대표적인 붕괴유형은 후퇴성 붕괴(retrogressive failure)와 전진형 붕괴(progressive failure)의 두 가지 유형으로 나타났다. 소형 실험 8회 중, 후퇴성 붕괴는 2회(25%), 전진형 붕괴는 6회(75%)로 전진성 붕괴가 가장 높은 비율을 차지하고 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 이번 실험에서 나타난 대표적인 후퇴성 붕괴 양상으로 사면

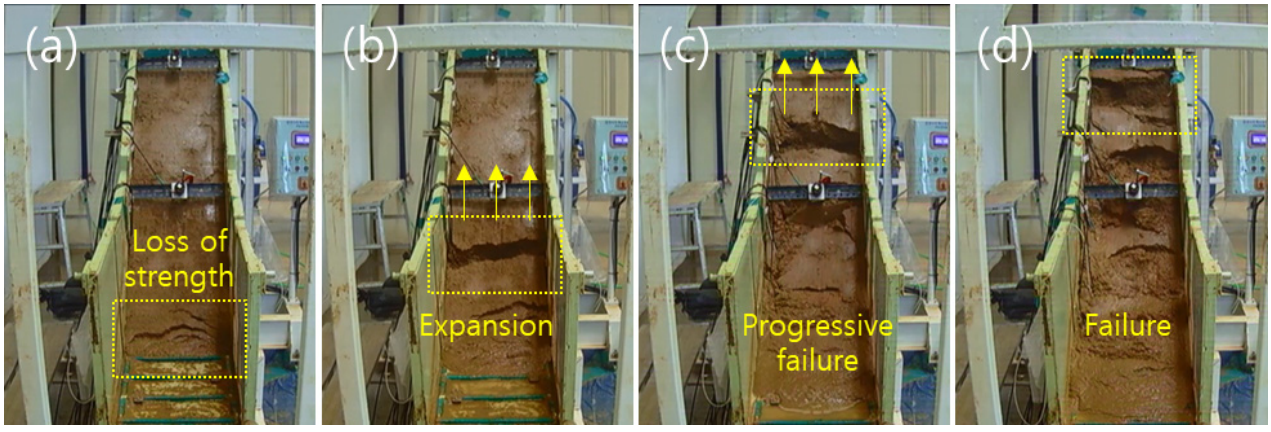


Fig. 7. Landslide failure characteristic (retrogressive failure).

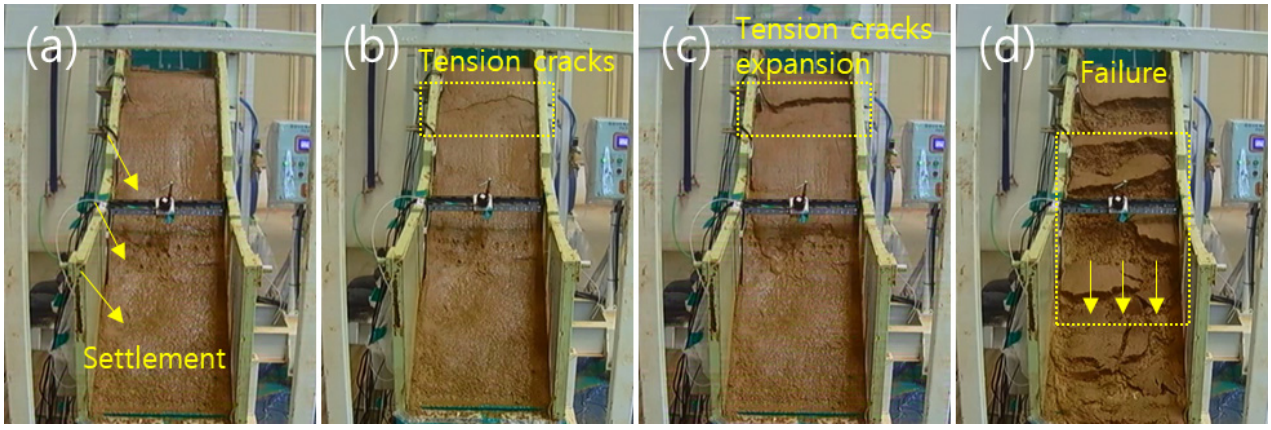


Fig. 8. Landslide failure characteristic (progressive failure).

의 하단부에서 발생한 붕괴로 인해 지지력을 상실한 상부토층이 차례대로 붕괴가 발생하는 형태를 보여주며, Fig. 8은 사면의 상부에서 인장균열이 발생한 후 넓은 면적의 지반이 동시에 붕괴되는 전진형 붕괴의 양상으로 나타났다. 소형실험에서는 무한사면에서 대표적인 얕은 붕괴(shallow failure) 형태로 나타나지 않았는데, 이는 사면내 지하수위로 인한 포화대 형성과 수압의 급격한 변동성 차이로 추정된다. 무한사면에서는 사면토층 내 지하수위의 영향으로 강우 침투에 의해서도 토층 내 급격한 수압변동은 크지 않을 수 있으며, 강우에 의한 침식 및 세굴 등 사면 표층을 중심으로 한 얕은 붕괴가 자주 발생된다. 반면, 본 실험에서 나타난 전진형 및 후퇴성 붕괴는 지하수위 형성 없이 강우에 의해서만 토층 바닥면까지 포화를 시킨 조건으로 토층 내 수압은 급격한 변동을 경험하게 되며, 이로 인해 사면 토층 내 급격한 강도저하로 토층내 붕괴가 발생된 것으로 분석되었다.

전진형 및 후퇴성 붕괴에 대한 모니터링 결과를 고찰하면, 전진형 붕괴는 강우에 의해 사면 바닥에 도달된 침투수가 토체 내 급격한 강도저하를 유발하여 사면 중앙을 중심으로 한 침하를 발생시켰고, 이로 인해 사면 상단부 경사가 끝나는 종단부에서 인장균열이 형성되었다. 시간경과에 따른 사면 토층 내 침투수압 증가는 인장균열 확장과 함께 사면 상부 토체 무게의 불균형을 야기하여 하부 사면측으로 붕괴가 전개된 것으로 판단된다.

후퇴성 붕괴는 다음의 두 가지 상황으로 추정된다. 첫 번째는 강우에 의해 사면표층에서 흘러들어온 지표수의 집중으로 사면 하부에 붕괴면을 형성시키고 시간경과에 따라 점차적으로 사면 상단부로 확장된 것으로 보이며, 두 번째는 상부사면의 배면이 수평지대로 바닥면에 도달된 침투수가 취약대층을 통과하여 사면 하단부에 물길을 형성시킨 파이핑 붕괴이다.

전진형 붕괴와 후퇴성 붕괴가 발생한 주요 원인을 고찰하면, 금번 모형실험조건은 비탈면 경사 및 사용토질이 동일하며, 유일한 차이는 강우강도(50 mm/h, 70 mm/h) 및 토질의 단위중량(1.45~1.68)이다. 그러나, 강우강도나 단위중량 변화는 전진성 및 후퇴성 붕괴유형과 무관한 결과로 나타났다. 단, 모형축조 과정에서 토조와 사면경계부 다짐차이로 인한 누수취약부위 형성 가능성 또는 사면토체 내 불균일로 인한 저밀도층 형성 가능성이 있으며, 이러한 현상들은 토층 내부 물길 형성으로 인한 파이핑 붕괴와 같이 후퇴성 붕괴과정에서 나타날 수 있는 현상으로 추정된다.

한편, 모형사면 내 설치된 계측센서를 토대로 강우침투 양상을 살펴보면 0.10 m의 깊이(바닥부)에서 침투 도달 시간은 평균 24분이며, 0.18 m의 깊이(중단부)에서 침투 도달 시간은 평균 36분으로 나타났다. 여기서, 붕괴시점은 사면 표층부에서 침식 세굴과 함께 토체가 강도를 잃고 부분적으로 떨어져 나가기 시작하는 현상에 대해 사면활동에 따른 붕괴시점으로 결정하였다. 모든 실험 케이스(8개)에 대한 붕괴 발생시간 범위(48~90분)는 평균 약 61분으로 나타났으며, 가장 늦은 시간인 90분을 제외한 범위(48~72분)로 계산해도 평균 약 57분으로 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

결과적으로, 자연사면을 형성하고 있는 지반 환경은 암반 돌출부, 지형경사, 토질 분포 등 다양한 조건이 존재하므로, 상기의 결과들은 지반지형 및 지질조건에 따라 사면에서 충분히 발생할 수 있는 붕괴형태를 이해하는데 도움이 되는 중요한 시사점을 제공한다고 사료된다.

실규모 급경사지 실험

실규모 급경사지 실험은 총 2회 실시하였으며, Fig. 4와 같이 모형사면 내 설치된 체적함수비 센서를 통해 강우가 침투하는 것을 확인하였고 붕괴가 발생한 후 촬영된 실험 영상을 토대로 붕괴 발생 특성을 분석하였다. 실규모 급경사지 실험의 경우 실험 시작 약 20분 후 모형 사면의 곳곳에서 세굴이 발생했다(Fig. 9b, Fig. 10b). 시간 경과에 따라 세굴은 점차 상부와 하부로 확장되었고 세굴 개수도 점차 증가하는 것으로 나타났으며, 세굴로 인해 소규모 형태의 부분적 붕괴도 발생하였다. 또한 인공강우를 분사함에 따라 모형토조의 측벽에 강우가 집중되어 모형사면의 측벽 부근에서 활발한 침식이 발생되었고, 이는 시간이 지남에 따라 사면 중앙지점으로 점차 확장되었다.

여기서, 붕괴시점은 소형실험과 동일하게 사면 표층부에서 침식 세굴과 함께 토체가 강도를 잃고 부분적으로 떨어져 나가기 시작하는 현상에 대해 사면활동에 따른 붕괴시점으로 결정하였다. 최종 붕괴발생 전까지 세굴면의 확장과 측벽 침식, 소규모 붕괴사면, 사면 상부에 인장균열면이 대표적으로 관찰되었으며, 최종적 붕괴는 토층 내 약 1 m 깊이(중부사면)로부터 표층붕괴가 발생하였다(Fig. 9d, Fig. 10d). 1차 및 2차 실험의 경우 최종 붕괴에 이르기까지 붕괴과정은 유사하며, 붕괴도달 시간은 각각 11시간 16분(1차)와 10시간 17분(2차)로 유사하였다.

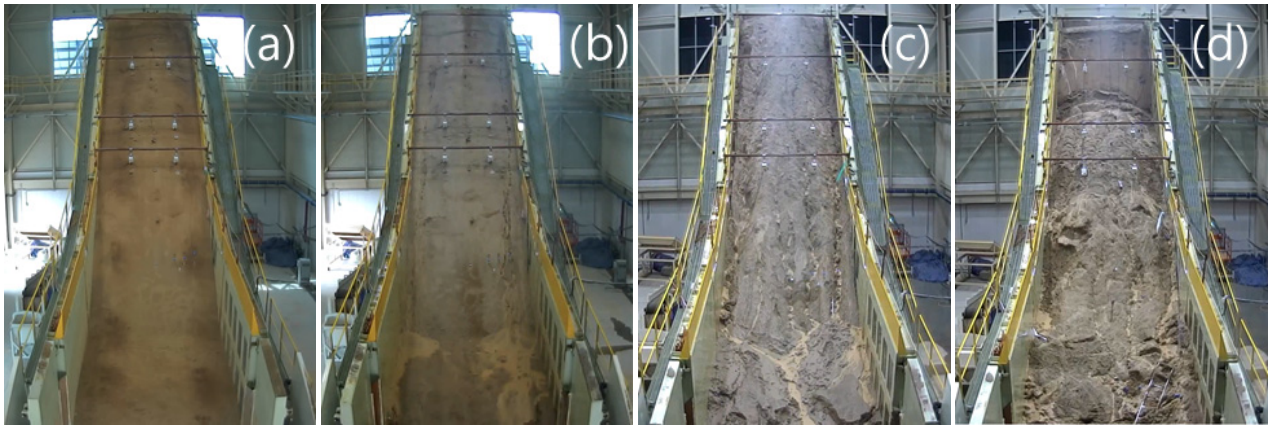


Fig. 9. Landslide failure characteristic (1st experiment).

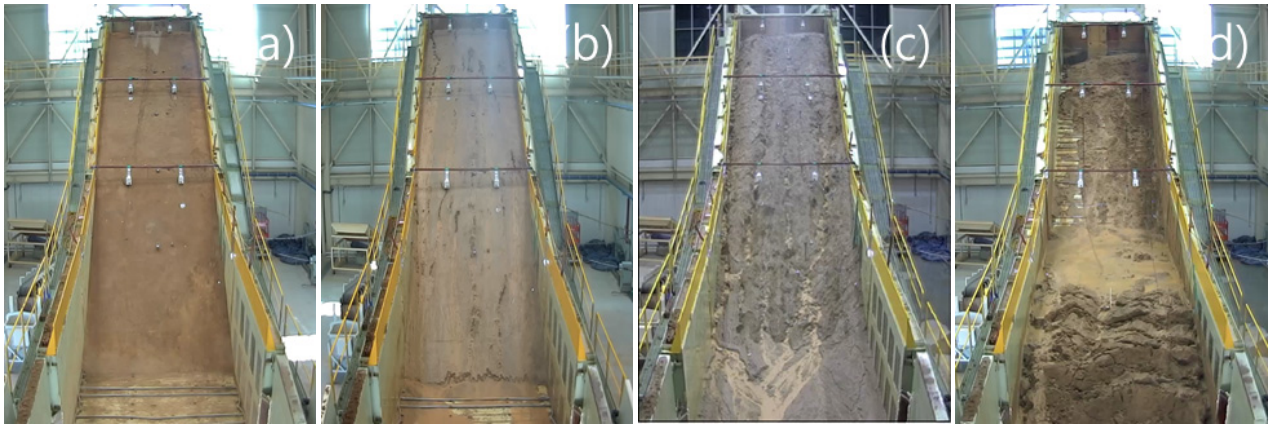


Fig. 10. Landslide failure characteristic (2nd experiment).

소형실험에서는 전진성 및 후퇴성 붕괴가 발생한데 반면, 실규모 사면에서는 표층에서 침식세굴로 인해 발생된 표층붕괴로 나타났다. 이와 같은 차이가 발생된 원인은 규모 측면에서 실규모 사면이 소형사면보다 10배 큰 규모로 축조되어 토체 높이와 자중이 필연적으로 증가할 수밖에 없으며, 이로 인해 동일한 강우강도(50 mm/hr) 조건이 작용되었다고 해도 사면 토체 바닥면까지 침투수의 도달시간은 길어질 수밖에 없다. 이 과정에서 실규모 사면은 지표면 침식 및 세굴이 심화되고, 사면토체 바닥면까지 침투수가 도달하기 전 표층 붕괴된 것으로 추정된다. 모형사면 내 설치된 깊이별 계측센서(VWC)를 토대로 강우에 의한 침투 도달 시간을 산정한 결과(Fig. 11)은 다음과 같다.

0.5 m의 깊이(상부사면: Upper slope)에 침투도달 시간(Infiltration time)은 평균 약 56분으로 사면의 하단부(VWC bottom), 중단부(VWC center), 상단부(VWC top)에서 각각 약 63분, 약 44분, 약 61분으로 나타났다. 상부사면은 배면지

대가 수평으로 형성되어 있어 전체적으로 강우에 의한 침투수가 토층내로 빠르게 도달하는 것으로 나타났으며 침투과정에서 토층내로 진행된 침투가 경사를 따라 사면 중단부(VWC center)에 가장 빠르게 도달된 것으로 추정된다.

1.0 m의 깊이(중부사면: Middle slope)에 침투도달 시간은 평균 약 125분으로 사면의 하단부(VWC bottom), 중단부(VWC center), 상단부(VWC top)에서 각각 약 95분, 약 151분, 약 130분으로 나타났다. 중부사면의 경우 지표면 가까이에 위치한 상단부가 중단부보다 침투수가 빨리 도달된 것으로 나타났는데, 이는 실험과정에서 침식과 세굴이 중단부에 주로 집중된 현상을 설명할 수 있는 결과로 판단된다.

1.5 m 깊이(하부사면: Lower slope)에 침투도달 시간은 평균 약 256분으로 사면의 하단부(VWC bottom), 중단부(VWC center), 상단부(VWC top)에서 각각 약 166분, 약 273분, 약 330분으로 나타났다. 하부사면에서는 침투 도달 시간에 대해 일정부분의 경향성을 나타냈다. 하단부는 사면의 침투수가 집수되는 지점에 위치하고 있어 침투수 도달 반응이 가장 빠르게 나타난 것은 자연스러운 현상으로 판단된다. 상단부의 경우 침투수 도달 반응이 가장 늦었는데, 이는 사면중앙에서 침식 세굴의 심화로 인해 하부측으로 침투경로가 형성된 것으로 추정된다. 또한, 강우분사가 사면 표층부 침투에 미치는 영향이 크지 않음을 추측할 수 있는 결과로 나타났다.

전체적으로 체적함수비 센서 결과에 대한 각 사면위치에 따른 침투도달 시간을 고찰하면, 실규모에서 관찰된 침식 및 세굴 결과와 이로 인한 토층 내 물길 형성으로 인한 파이핑 파괴가 하부사면에 발생했다는 결과와 어느정도 일치성을 가지므로 개연성이 있으며, 강우량은 사면에 침투하기보다 주로 사면 표층으로 유출되었다는 결과가 설득력을 가질 것으로 판단된다.

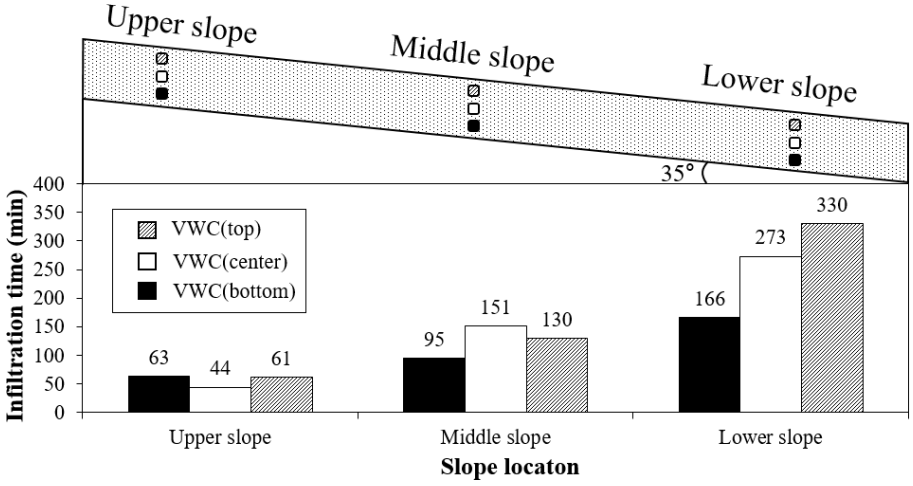


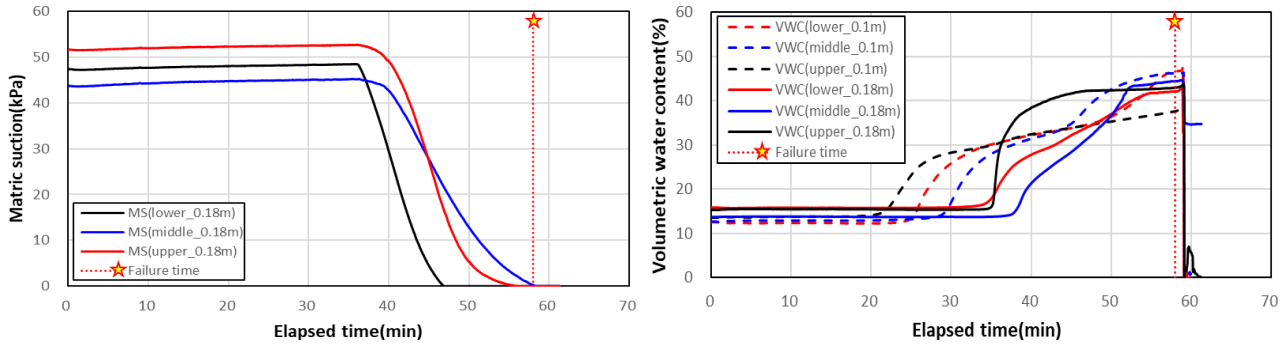
Fig. 11. Infiltration time by VWC location.

지반재료 변화 특성

소형 급경사지 실험

본 연구에서는 강우가 침투함에 따른 지반재료의 변화 특성을 파악하기 위해 체적함수비 센서와 모관흡수력 센서를 설치하였고 지표면에는 지표변위계 센서를 설치하였다. Fig. 12는 소형 급경사지 실험에서 나타나는 대표적인 지반재료의 변화 특성으로 사면의 하단부는 검정색, 중단부는 파란색, 상단부는 빨간색으로 표시하였고, 심도에 따라0.10 m 깊이(하부사면)의 경우 파선 그리고 0.18 m 깊이(중부사면)의 경우 실선으로 나타내었다. 먼저 체적함수비의 경우 습윤전선이 하강함에 따라 실험이 시작된 후 0.10 m에서는 평균 24분에 반응하였고, 0.18 m에서는 평균 36분에 반응하였다. 또한 체적

함수비는 평균 41.19%에서 수렴을 하였으며 0.18 m의 깊이에서 포화영역에 도달한 후 후 평균 약 61분 후에 붕괴가 발생하는 것을 알 수 있었다. 모관흡수력의 경우 체적함수비와 마찬가지로 포화영역에 도달함에 따라 급격하게 약 0 kPa로 수렴하였다. 또한 모관흡수력은 체적함수비에 비해 별다른 전조현상 없이 급격하게 수렴하는 것도 확인할 수 있었다. 또한 붕괴가 발생하면서 체적함수비의 경우는 급격하게 높아지는 경우와 낮아지는 경우를 확인할 수 있었지만, 모관흡수력의 경우 붕괴가 발생한 후에도 계속 수렴된 값이 나타나는 것을 확인하였다.

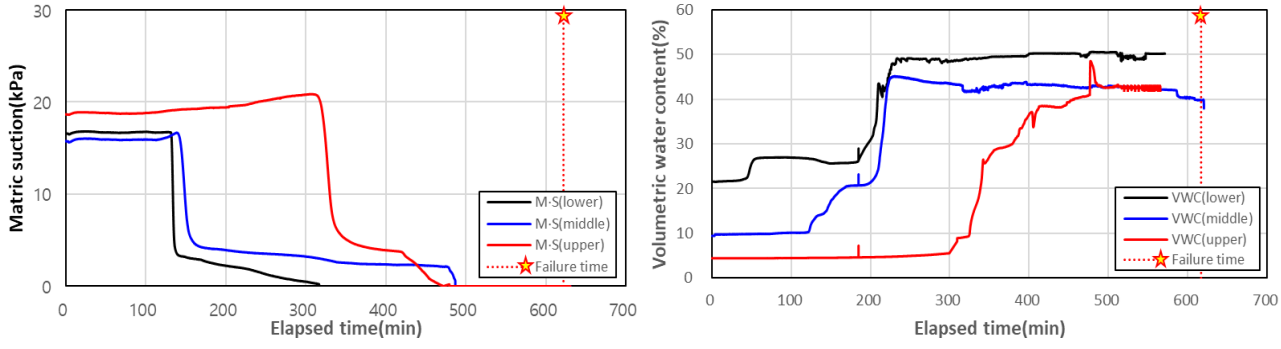


(a) Matric suction (reduction-scale) (b) Volumetric water content (reduction-scale)

Fig. 12. Changes in representative matric suction and volumetirc water content (reduction-scale).

실규모 급경사지 실험

실규모 급경사지 실험에도 마찬가지로 심도에 따라 체적함수비 센서와 모관흡수력 센서를 설치하였고, 지표면에는 지표변위계 센서를 설치한 후 강우가 침투함에 따른 지반재료의 변화 특성을 파악하였다. Fig. 13은 실규모 급경사지 실험에서 나타나는 대표적인 지반재료의 변화 특성으로 위치에 따라 사면의 하단부는 검정색, 중단부는 파란색 그리고 상단부는 빨간색으로 나타내었다. 체적함수비의 경우 소형실험과 마찬가지로 습윤전선이 하강함에 따라 실험이 시작된 후 0.5 m 깊이(상부사면)에서는 평균 약 56분에 반응하였고, 1.0 m 깊이(중부사면)에서는 평균 약 125분에 반응하였으며 1.5 m깊이(하부사면)에서는 평균 약 256분에 반응하였다. 하지만 지표면과 가장 근접한 0.5 m 깊이(상부사면)의 경우 완전한 포화가 발생되기 전 계측센서가 이탈하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 실규모 급경사지 실험에서의 체적함수비는 평균 41.72%에서 수렴을 하였으며 1.5 m 깊이(하부사면)에서 포화영역에 도달한 후 1차 실험은 11시간 16분, 2차 실험은 10시간 17분 후에 붕괴가 발생하였다. 모관흡수력도 소형 급경사지 실험과 마찬가지로 전조현상 없이 급격하게 0 kPa에 가깝게



(a) Matric suction (full-scale) (b) Volumetric water content (full-scale)

Fig. 13. Changes in representative matric suction and volumetric water content (full-scale).

수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 같은 심도에 설치된 체적함수비와 모관흡수력 센서를 비교했을 때 모관흡수력 센서가 먼저 반응을 하는 것을 알 수 있었지만 체적함수비의 경우 점진적으로 증가하다가 수렴하는 것을 알 수 있었다.

흡입응력을 고려한 불포화 무한사면의 안정해석

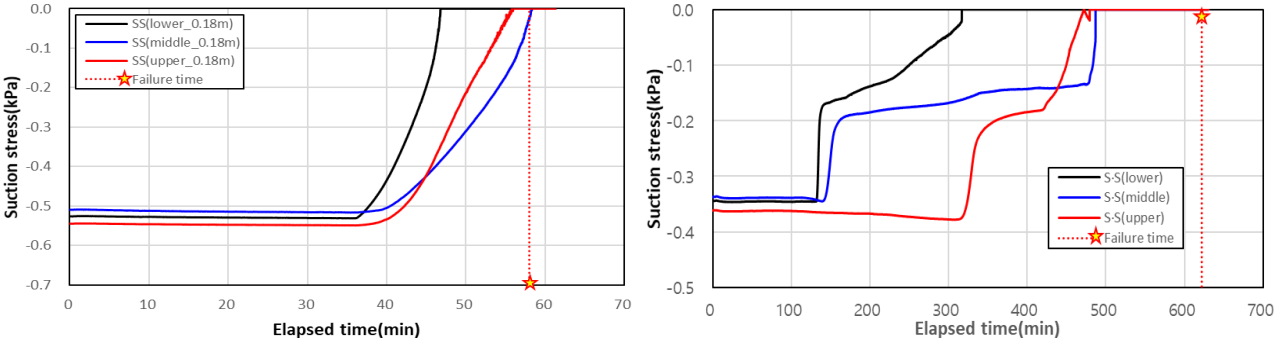
흡입응력

모관흡수력은 흙 입자 사이의 물과 공기의 접촉면에 작용하기 때문에 불포화토의 응력상태를 표현하기 위한 변수로 작용할 수 없다(Lu and Griffiths, 2004). 따라서 본 연구에서는 실험이 진행되는 동안 계측된 모관흡수력과 불포화계수를 토대로 불포화토 내부에서 일어나는 다양한 현상을 고려하기 위하여 흡입응력을 식 (1)과 같이 산정하였다(Lu and Likos, 2006).

$$\sigma^s = \frac{(u_a - u_w)}{(1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n)^m} \tag{1}$$

여기서, σ^s는 흡입응력, $(u_a - u_w)$는 모관흡수력, α는 공기유입값과 관계된 곡선맞춤계수, n은 함수특성곡선의 변곡점 기울기와 관계된 곡선맞춤계수 그리고 m은 잔류함수비에 관계된 계수이다.

Fig. 14는 소형 및 대형실험을 통해 계측된 모관흡수력과 불포화 계수를 이용하여 산정한 실험별 대표적인 흡입응력의 변화를 나타낸 그래프이다. 강우침투에 따른 흡입응력의 반응은 모관흡수력의 반응과 매우 유사하게 나타났으며, 소형실험의 경우 -0.54~0 kPa의 값을 나타냈고, 대형실험의 경우 -0.39~0 kPa의 값을 나타냈다. 또한 흡입응력도 모관흡수력의 변화와 마찬가지로 포화가 시작되면서 급격하게 0으로 수렴하는 경향을 확인할 수 있었다.



(a) Suction stress (reduction-scale) (b) Suction stress (full-scale)

Fig. 14. Changes in representative suction stress.

불포화 무한사면의 안정성 평가

비탈면 붕괴는 습윤전선이 임계 깊이에 도달하여 붕괴를 발생시키며, 우리나라에서 발생되는 비탈면 붕괴는 발생 깊이가 2 m 이내의 천층파괴가 주로 발생한다(Cho and Lee, 2001; Kim and Song, 2015). 이러한 현상은 습윤전선이 하강함에 따른 흙의 전단강도에 기여하는 모관흡수력이 감소하여 사면의 파괴를 유발하기 때문이며, 이와 같이 사면의 길이에 따른 깊이 비가 큰 평면 파괴의 경우 모관흡수력의 영향을 고려한 무한사면 안정해석을 통해 사면의 안정성을 파악하는 것이 바람직하다.

일반적인 사면안전율은 식 (2)와 같다.

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c' + \sigma' \tan\phi'}{\gamma z \sin\beta \cos\beta} \tag{2}$$

여기서, FS는 사면안전율, c'는 점착력, σ'는 유효응력, ϕ'는 내부마찰각, γ는 단위중량, z는 토층 두께, 그리고 β는 비탈면 경사이다.

Lu and Likos(2006)는 Terzaghi 및 Bishop의 유효응력 공식을 확장하여 불포화토 유효응력 상태를 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s = (\sigma - u_a) + (u_a - u_w) S_e \tag{3}$$

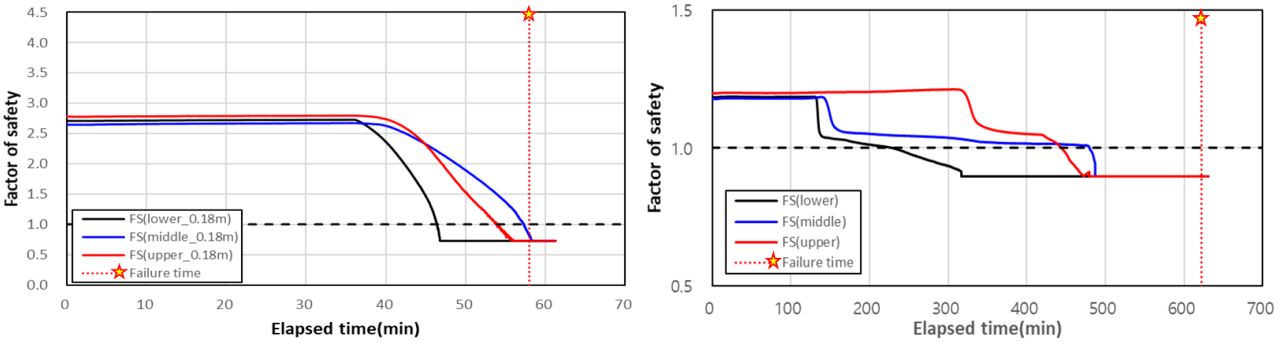
여기서, σ는 전응력, u_a는 공극압, σ^s는 흡입응력, $(u_a - u_w)$는 모관흡수력, S_e는 유효포화도를 나타낸다.

흡입응력을 고려한 유효응력 식을 안전율 식 (2)에 대입하면 식 (4)와 같이 표현되며, Lu and Godt(2008)는 얕은 심도의 무한사면 파괴를 해석하기 위해 불포화토의 개념을 적용한 안전율 산정 방법을 식 (4)와 같이 제안하였다.

$$FS = \frac{c' + [\gamma z \cos^2\beta - \sigma^s] \tan\phi}{\gamma z \sin\beta \cos\beta} \tag{4}$$

위의 식을 재정렬하면 식 (5)와 같이 3개의 항으로 구분된다. 첫 번째 항은 흙의 내부마찰각, 두 번째 항은 점착력, 세 번째 항은 흡입응력으로 구분된다. 따라서 사면경사는 35°, 단위중량은 소형실험의 경우 1.44~1.55 g/cm^3, 대형실험의 경우 1.54~1.60 g/cm^3 가상 활동면 깊이는 소형실험의 경우 지표면으로부터 0.18 m 깊이로 설정하였고, 대형실험의 경우 1.0 m 깊이로 설정하였다. 그리고 나머지 인자는 직접전단시험으로부터 구한 내부마찰각과 점착력 값을 이용하여 사면안전율을 산정하였다. Fig. 15는 각 실험별 산정된 흡입응력을 이용하여 계산된 불포화 무한사면 안전율의 변화를 나타낸 그래프이다.

$$FS = \frac{\tan\phi'}{\tan\beta} + \frac{2c'}{\gamma z \sin 2\beta} + \frac{\sigma^s}{\gamma z}(\tan\beta + \cot\beta)\tan\phi' \tag{5}$$



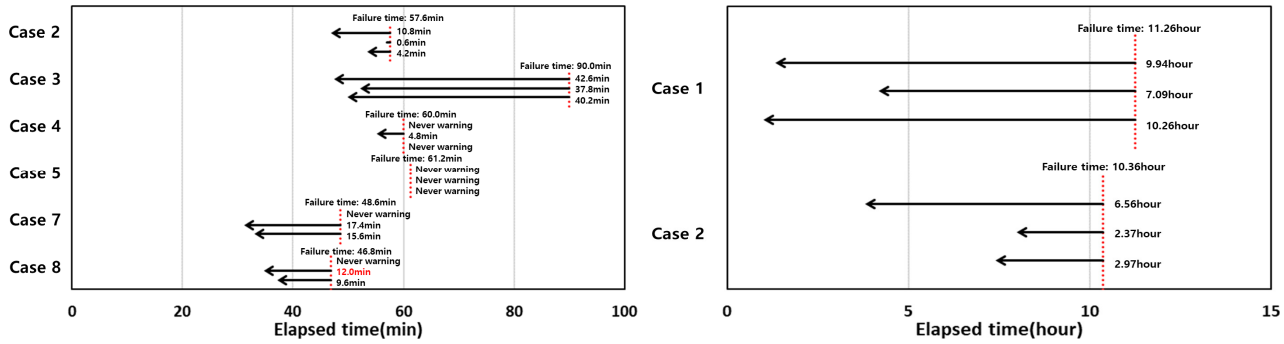
(a) Factor of Safety (reduction-scale) (b) Factor of Safety (full-scale)

Fig. 15. Changes in representative factor of safety.

불포화 무한사면 안전율은 모관흡수력, 흡입응력과 마찬가지로 습윤전선이 하강함에 따른 현상을 반영하고 있음을 알 수 있다. 그리고 초기 일정하게 유지 되다가 강우가 침투함에 따라 급격하게 감소하면서 사면붕괴에 이르는 것으로 나타났으며, 각 실험별 최소 사면안전율은 소형실험과 실규모 실험의 경우 FS = 0.896으로 나타났다. Table 5와 Fig. 16은 불포화 무한사면의 안전율이 1 이하로 떨어지는 시점과 실제 붕괴시간의 차이를 나타낸 것이다. 붕괴 후 탐지하였을 때를 제외하고, 소형실험의 경우 실제 붕괴가 발생하기 전 평균 17분 전에 붕괴를 탐지할 수 있었고, 대형실험의 경우 평균 6.5시간 전 붕괴를 탐지할 수 있었다. 그리고 붕괴를 탐지할 수 있는 모관흡수력은 소형실험의 경우 평균 0.82 kPa, 대형실험의 경우 평균 1.84 kPa으로 나타났다.

Table 5. Landslide detection time through experiments

		Failure time (experiments) (hour)	Failure time (FOS < 1) (hour)	Detection time (hour)	Critical matric suction (kPa)
Reduction-scale experiments	Case 1		-	Data error	
	Case 2	0.96	0.78	0.18	0.80
			0.95	0.01	0.84
			0.89	0.07	0.81
	Case 3	1.50	0.79	0.71	0.84
			0.87	0.63	0.83
			0.83	0.67	0.84
	Case 4	1.00	-	-	-
			0.92	0.08	0.83
			-	-	-
	Case 5	1.02	-	-	-
			-	-	-
			-	-	-
	Case 6		-	Data error	
	Case 7	0.81	-	-	-
			0.52	0.29	0.83
			0.55	0.26	0.76
	Case 8	0.78	-	-	-
			0.58	0.20	0.83
			0.62	0.16	0.83
Full-scale experiments	Case 1	11.26	1.32	9.94	1.84
			4.17	7.09	1.84
			1.00	10.26	1.84
	Case 2	10.36	3.80	6.56	1.84
			7.99	2.37	1.84
			7.39	2.97	1.84



(a) Detection time (reduction-scale) (b) Detection time (full-scale)

Fig. 16. Detection time using matric suction.

결 론

본 연구에서는 습윤전선이 하강함에 따른 불포화 무한사면의 안전율과 실제 붕괴 특성을 분석하여 급경사지 붕괴를 탐지할 수 있는 계측관리기준 수립 근거를 마련하기 위해 소형 및 실규모 급경사지 실험을 수행하였다. 이를 위해 국내에서 산사태가 가장 빈번하게 발생하는 화강암 풍화토를 사용하여 모형실험을 수행하였다. 또한 강우가 침투함에 따른 지반 특성 변화를 파악하고 불포화토의 특성을 분석하기 위해 체적함수비계와 모관흡수력계를 설치한 후 토사비탈면 붕괴를 재현하였다. 그리고 실험 결과를 바탕으로 흡입응력 기반 무한사면 안정해석을 수행하였으며, 각 실험별 계측관리기준을 제시하였다. 구체적인 결론은 다음과 같다.

(1) 소형실험에 의한 실험 결과는 전진형 및 후퇴성 붕괴유형으로 나타났다. 이 중에서 전진형 붕괴 형태는 75%로 가장 많았는데, 이는 사면 바닥에 도달된 침투수가 토체 내 급격한 수압상승을 초래하여 강도저하 유발에 따른 붕괴로 분석되었다. 후퇴성 붕괴는 강우로 인해 사면 하단에 붕괴면이 형성되어 상단부로 확장해 가는 형태로, 사면토층 내 물길 형성으로 인한 파이핑 붕괴가 원인이 된 것으로 추정된다.

실규모 실험에서는 소규모 실험과 달리 표층붕괴가 발생할 가능성이 높은 것으로 나타났다. 그 이유는 실규모 급경사지에서 토체 높이와 자중 증가에 따라 사면토체 바닥면까지 침투수의 도달시간이 길어지는 것이 원인으로 분석되었다. 또한, 사면 경사에 따라 강우가 사면내로 침투되지 못하고 침식 및 세굴이 사면 중단부에서 발현됨에 따라 사면 하부로 물길 형성으로 인한 파이핑 파괴의 발생 가능성도 염두에 둘 필요가 있는 것으로 나타났다.

결과적으로, 소형 및 실규모 실험은 강우침투에 의한 특정실험 조건을 가지므로 사면토층 내 포화대가 형성된 사면붕괴유형과는 차이가 있다. 그러나, 자연사면을 형성하고 있는 지반 환경은 암반 돌출부, 지형경사, 토질 분포 등 다양한 조건이 존재하므로, 본 연구에서 발견된 결과들은 지반지형 및 지질조건에 따라 사면에서 충분히 발생할 수 있는 붕괴형태를 이해하는데 중요한 시사점을 제공한다.

(2) 체적함수비 센서에 의한 침투도달 시간을 추적한 결과, 실규모 실험의 사면중앙에서 관찰된 침식 및 세굴현상이 하부사면에 토층 내 물길 형성으로 인한 파이핑 파괴로 이어졌다는 추정과 일치하는 결과를 나타내었다. 따라서, 실험관찰과 계측에 의한 결과는 현상 문제를 규명할 수 있는 근거로서 유효한 것으로 판단된다. 또한, 강우량은 사면토층을 포화에 미치는 영향이 미미한 것으로 나타났으며, 대부분 사면경사로 인해 주로 지표유출이 되고 있음을 알 수 있었다. 그 원인은 사면 최상부의 배면이 수평으로 형성된 지대에 위치하므로 침투로 인한 포화대가 형성되었고, 이 부위에서 시작된 침투가 사면토층 바닥면 포화에 영향을 미친 것으로 판단된다.

(3) 실험 결과를 토대로 불포화 무한사면 안정해석을 한 결과 소형실험의 경우 약 17분 전 붕괴를 탐지할 수 있었고, 대형실험의 경우 약 6.5시간 전 붕괴를 탐지할 수 있었다. 이때 소형실험의 경우 붕괴를 탐지할 수 있는 모관흡수력은 0.82 kPa이며, 대형실험의 경우는 1.84 kPa로 나타났다.

(4) 모관흡수력의 경우 체적함수비와 다르게 별다른 전조현상 없이 급격하게 반응하였다. 그리고 붕괴가 발생한 후에도 수렴된 값을 지속해서 보였는데, 이는 향후 급경사지 붕괴위험지구에 계측기를 설치할 때 계측기 설치 깊이에 따라 붕괴의 유·무를 판단할 수 있으므로 설치 깊이는 매우 중요할 것으로 판단된다.

본 연구는 한정된 지형, 지반 및 강우 조건에 특정하여 수행된 실험으로 향후 다양한 조건에서의 실험을 수행할 예정이며, 실험과 실제 자연사면 및 급경사지 붕괴위험지구에 계측기 추가 설치를 통한 데이터 확보에 집중할 예정이다. 이로부터 주의·경계·심각 시점을 예측할 수 있는 기술개발을 통해 한국형 계측관리기준 수립에 대한 공학적 근거를 마련할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 행정안전부 국립재난안전연구원의 지원(“실증실험 기반 토사재해 취약성 평가기술 개발(Ⅲ)”, NDMI-주요-2023-07-02)에 의해 수행되었습니다.

References

Bishop, A.W., 1959, The principle of effective stress, Technisk Ukeblad, 106(99), 859-863.

Chae, B.G., Lee, S.H., Song, Y.S., Cho, Y.C., Seo, Y.S., 2007, Characterization on the relationships among rainfall intensity, slope angle and pore water pressure by a flume test: In case of gneissic weathered soil, The Journal of Engineering Geology, 17(1), 57-64 (in Korean with English abstract).

Cho, S.E., Lee, S.R., 2001, A comparative study of surficial stability analyses in unsaturated slopes, Journal of the Korean Geotechnical Society, 17(4), 135-143 (in Korean with English abstract).

Fang, H., Cui, P., Pei, L.Z., Zhou, X.J., 2012, Model testing on rainfall-induced landslide of loose soil in Wenchuan earthquake region, Natural Hazards and Earth System Sciences, 12(3), 527-533.

Godt, J.W., Baum, R.L., Chleborad, A.F., 2006, Rainfall characteristics for shallow landsliding in Seattle, Washington, USA, Earth Surface Processes and Landforms, 31(1), 97-110.

Iverson, R.M., 2000, Landslide triggering by rain infiltration, Water Resources Research, 36(7), 1897-1910.

Kim, J.H., Jeong, S.S., Park, S.W., Sharma, J., 2004, Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils, Engineering Geology, 75(3-4), 251-262.

Kim, K.S., Song, Y.S., 2015, Geometrical and geotechnical characteristics of landslides in Korea under various geological conditions, Journal of Mountain Science, 12(5), 1267-1280.

Lu, N., Godt, J., 2008, Infinite slope stability under steady unsaturated seepage conditions, Water Resources Research, 44(11), 1-13.

Lu, N., Griffiths, D.V., 2004, Profiles of steady-state suction stress in unsaturated soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(10), 1063-1076.

Lu, N., Likos, W.J., 2006, Suction stress characteristic curve for unsaturated soil, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132(2), 131-142.

Moriwaki, H., Inokuchi, T., Hattanji, T., Sassa, K., Ochiai, H., Wang, G., 2004, Failure processes in a full-scale landslide

experiment using a rainfall simulator, Landslides, 1, 277-288.

NDMI (National Disaster Management Research Institute), 2019, Development of steep slope disaster mitigation technology based on empirical experiments (II), 212p (in Korean with English abstract).

Ng, C.W.W., Shi, Q., 1998, A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage, Computers and Geotechnics, 21(1), 1-28.

Song, H.S., Chae, B.G., Song, Y.S., Choi, J.H., Seo, W.G., Woo, I., 2019, Study on landslide flume tests using stability analysis of the unsaturated infinite slope, The Journal of Engineering Geology, 29(4), 541-552 (in Korean with English abstract).

Song, Y.S., Chae, B.G., Kim, W.Y., Seo, Y.S., 2006, Model test to predict the runout distance of landslide according to hourly rainfall, Proceedings of the Korean Geotechnical Society Spring Conference, Seoul, 12-19 (in Korean with English abstract).

Song, Y.S., Chae, B.G., Lee, J., 2016, A method for evaluating the stability of an unsaturated slope in natural terrain during rainfall, Engineering Geology, 210, 84-92.

Song, Y.S., Hong, W.P., Woo, K.S., 2012, Behavior and analysis of stabilizing piles installed in a cut slope during heavy rainfall, Engineering Geology, 129-130, 56-67.

Song, Y.S., Song, H.S., 2023, Experimental study to estimate the criteria for shallow landslides under various geological conditions in South Korea, Environmental Earth Sciences, 82(23), 582.

Terzaghi, K., 1943, Theoretical soil mechanics, John Wiley and Sons, 503p.