

인공강우에 의한 모형토조사면의 붕괴메카니즘 결정 (I)

Determination of Failure Mechanism of Slope Calibration Chamber Tests Using Rainfall Simulation (I)

정 지 수¹ Jeong, Ji-Su

정 춘 교² Jung, Chun-Gyo

이 중 인³ Lee, Jong-In

이 승 호⁴ Lee, Seong-Ho

Abstract

This study analyzes the determination of slope failure model due to changes in ground condition followed by heavy rainfall. With a simulated rainfall system, the movement of a slope from the rainfall penetrating the unsaturated soil is investigated with respect to various conditions of pore-water pressure, earth pressure, and moisture content, considering rainfall duration and permeability. As a result of the experiment, under the persistent precipitation of 50mm/h, pore-water pressure of weathered granite soil started increasing from the upper position of the slope, and then the pressure increased in middle and bottom portion of it in timely manner. In case of the pore-water pressure of the standard soil, the pressure increased from the middle and bottom portion, and the cause of the different order is suspected to be the difference in permeability between the standard soil and the weathered granite soil. As an outcome, though the result may vary by each foundation, there exists a danger of slope failure not only when the cumulative rainfall is more than 120 mm but also when the saturation level amounts to 60~75%.

요 지

본 연구에서는 강우 시 지반정수 변화에 따른 사면붕괴 모델결정에 관한 기초연구로서 강우재현장치를 활용한 모형실험을 실시하여 불포화 상태의 사면에 침투하는 강우에 대하여 지속강우특성과 투수특성을 고려하여 간극수압, 토압, 함수비의 변화에 따른 사면 거동에 대해 분석하였다. 연구결과 강우(50mm/h)가 지속적으로 발생됨에 따라 화강 풍화토의 간극수압은 상부에서 먼저 상승하기 시작하며, 이어서 중간부와 하부에서 간극수압이 상승하기 시작하였다. 표준사의 간극수압은 역으로 하부에서 상부로 간극수압이 상승하는 것을 확인할 수 있었으며 이 같은 원인은 표준사와 화강풍화토의 투수계수의 차이로 판단된다. 실험결과 지반조건 별로 다른 차이가 있으나 약 60~75% 정도 포화될 경우와 누적강우량 120mm이상 지속 시 사면붕괴의 발생 위험성이 있는 것을 알 수 있었다.

Keywords : Pore-water pressure, Rainfall durations, Rainfall intensity, Soil slope

1. 서 론

최근 들어 세계적으로 자연재해가 빈번히 발생하고

있으며, 이로 인한 피해는 산업의 발달과 인구의 증가 등, 직간접적인 요인에 따라 더욱 더 증가추세에 있다. 특히 우리나라는 지리적인 영향으로 연강수량 중 대부

1 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 외래교수 (Member, Adjunct Prof., Dept. of Civil Engrg., Sangji Univ., js0615@paran.com, 교신저자)

2 국토해양부 주한미군 기지이전 사업단 (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs)

3 국토해양부 공공기관 지방이전 추진단 (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs)

4 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Sangji Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 8월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

분이 여름철(6월~9월)에 장마, 계절성 집중강우 또는 태풍과 동반되어 집중됨으로 인해 강우에 의한 피해는 가장 큰 자연재해중의 하나이다. 우기시 기상이변에 의한 계절성 집중강우로 인한 인적 물적 피해가 다수 발생하고 있으며 이런 계절성 강우는 국지적으로 단 시간에 많은 양을 발생시키고 있다.

이와 같이 강우가 산사태의 가장 중요한 요인이나 아직 강우강도, 강우지속시간 등에 따른 산사태 발생과의 상관관계에 대해서는 확실히 규명되어 있지 않았다.

본 논문에서는 강우에 따른 산사태 발생 시 강우강도, 강우지속시간, 비탈면 경사, 지반조건에 따른 파괴 원인을 분석하여 산사태를 예측하기 위한 산사태 붕괴특성을 알아보고자 인공강우장치를 이용한 모형토조의 유관상의 붕괴 형태와 간극수압, 토압, 함수비, 변위 등의 측정결과에 대한 비교연구를 통해 지반특성에 따른 산사태 붕괴 메커니즘을 분석하는 것이다.

2. 실내모형실험

실내모형실험을 수행하기 위하여 실내모형토조 실험장치를 구성하고 모형사면 실험에 대한 기준 정립 및 산사태 발생현상을 파악하기 위하여 표준사를 사용하였고, 국내의 산사태 발생빈도가 높은 화강풍화토를 이용하여 사면붕괴시 간극수압, 함수비, 토압 등을 비교 분석하여 사면붕괴 모델을 결정한다.

2.1 토질조건

본 실험에 사용된 흙의 재료는 표준사와 화강풍화토로 실험을 실시하였다.

표준사는 강릉에서 제작된 주문진 규사를 사용하였으며, 화강풍화토는 2008년 사면붕괴가 발생되었던 원주시 우회도로 공사현장에서 채취한 흙을 사용하였다.

체분석 시험과 비중시험, 지반의 강도정수는 직접전

표 1. 대상시료 물리적 특성

체분석	표준사	화강풍화토
10% Pass Particle Size (D_{10} , mm)	0.41	0.08
30% Pass Particle Size (D_{30} , mm)	0.51	0.4
60% Pass Particle Size (D_{60} , mm)	0.54	1
Uniformity Coefficient (C_u)	1.24	13.3
Coefficient of Curvature (C_g)	0.97	2.1
Specific Gravity (G_s)	2.62	2.61

표 2. 지반의 강도정수

구분	단위중량(Kn/m^3)	점착력(kpa)	내부마찰각($^\circ$)
표준사	13.9	0	30
풍화토	16.9	19.61	20

표 3. 투수계수

구분	투수계수 (cm/sec)
표준사	2.15×10^{-2} cm/sec
풍화토	8.58×10^{-4} cm/sec

단시험을 통하여 도출하였다. 실험결과는 표 1과 같다.

2.2 실내모형실험 장치 및 계측기

2.2.1 실내모형 실험장치

본 연구에서 제작한 산사태 모형토조실험장치는 크게 모형토조, 인공강우장치 등으로 구성되어 있다. 모형토조는 내부에 흙을 채우는 부분으로 총길이 7m, 높이 4m, 폭 1m로 제작하였으며 조립식으로 제작하여 원하는 길이 및 높이로 추가 조립할 수 있다. 토조의 경사는 $10^\circ \sim 40^\circ$ 로 조절할 수 있도록 하였다. 또한 모형토조 측면에 투명강화아크릴판으로 구성하여 사면의 거동을 육안상으로 확인 할 수 있게 하였다.

인공강우장치는 살수장치부, 강우량 조절장치부, 그리고 물탱크부로 구성되어 있으며, 살수장치부는 1단 11열의 노즐로 구성되어 있다. 강우량 조절장치부는 펌프장치로 압력밸브장치를 설치하여 강우강도를 $50 \sim 370 \text{mm/hr}$ 의 범위에서 조절할 수 있도록 하여 집중강우시 영향을 충분히 고려할 수 있도록 하였고, 20ton 용량의 물탱크로 물공급을 하여 강우지속시간에 대한 영향을 고려하여 제작하였다.

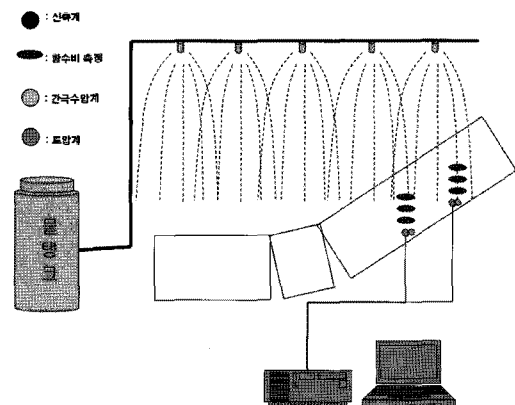


그림 1. 인공강우재현장치를 이용한 모형토조

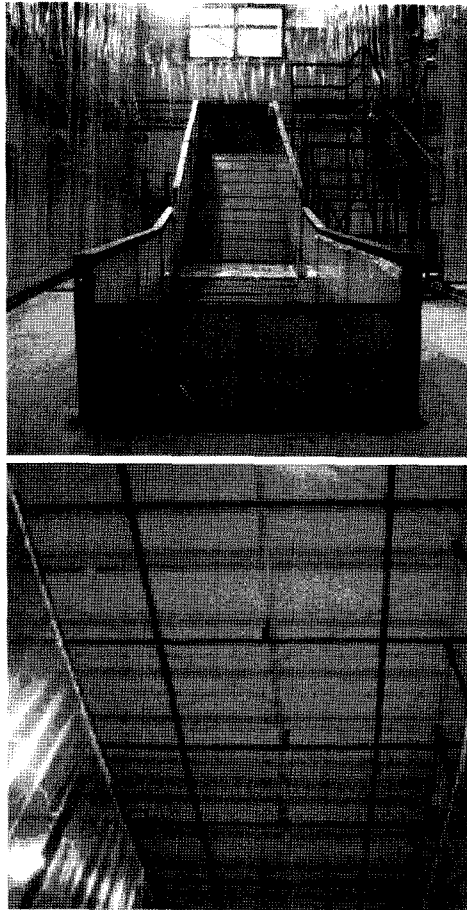


그림 2. 모형토조 실험장치(상:모형토조 정면사진, 하:강우재현장치)

2.2.2 강우강도

조사에 따르면 강우는 누적강우량 150mm 이상의 강우가 지속되거나, 강우가 하루 이상 지속되고 시간당 평균 강우량이 35mm 이상일 경우에도 산사태가 발생하는 것으로 보고되고 있다.(Ikeya1989). 우리나라의 지역적 강우특성을 살펴보면, 중부지역은 기압골 형성에 의한 집중호우의 누적강우량에 영향을 받아 산사태가 많이

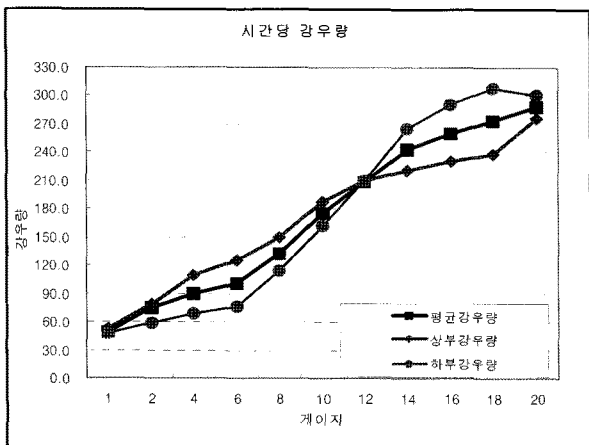


그림 3. 인공강우재현장치의 시간에 따른 강우량

표 4. 강우량

계이지	하부측정 (5min)	상부측정 (5min)	평균강우량 (5min)	시간당 평균 강우량
1	4.4	4	4.2	50
2	8.7	4.9	6.8	81
4	9.1	5.7	7.4	89
6	10.4	6.3	8.3	100
8	12.5	9.5	11	132
10	15.6	13.5	14.5	176
12	17.5	17.5	17.5	209
14	18.4	22.1	20.25	243
16	19.2	24.2	21.7	260
18	19.8	25.7	22.8	273
20(Max)	23	25	24	288

발생되는 것으로 나타났다. 인공강우재현장치 누적강우량의 적용을 고려하여 50mm/hr 강우강도를 지속적으로 유지하였다.

2.2.3 계측장치

사용된 계측장치는 강우시 모형토조 기반내 간극수압을 측정하기 위한 간극수압계와 강우강도에 따른 산사태 붕괴 현상의 파악을 위한 토압계, 함수비센서 그리고 측정된 계측값을 컴퓨터에 기록하기 위한 데이터 로거이다. 간극수압계와 토압계는 모두 스트레인 게이지 Full Bridge 방식이다. 함수비센서는 Pulse 신호로 주파수 변화에 따른 함수량을 측정하도록 되어있다. 간극수압계는 모형토조 기저부를 따라 상단, 중단, 하단에 3개소에 설치하여 1초당 50개의 자료를 측정하여 정밀한 측정을 수행하였다. 함수비 센서는 상단에 3개 바닥면으로부터 5cm, 20cm, 35cm의 높이에 설치하였고, 하단에 2개 바닥면으로부터 5cm, 30cm의 높이로 설치하였다. 또한 산사태 발생 시 표면의 거동을 가시적으로 확인할 수 있게 표적계를 설치하였다.

모형토조 측면은 강화 아크릴판으로 제작하고 컬러 마킹한 옅은 관을 통해 삽입하여 사면의 거동을 가시적으로 확인할 수 있도록 하였고, 또한 우량계를 통해 강우강도를 계측하였으며 이 같은 실험 구성장치 외에 비디오카메라 2대와 디지털 카메라를 이용하여 실험 시작부터 붕괴 발생 후 종료까지 모형사면의 거동을 촬영하였다.

가. 함수비측정장치 : 사면의 각층별 강우 침투속도 확인

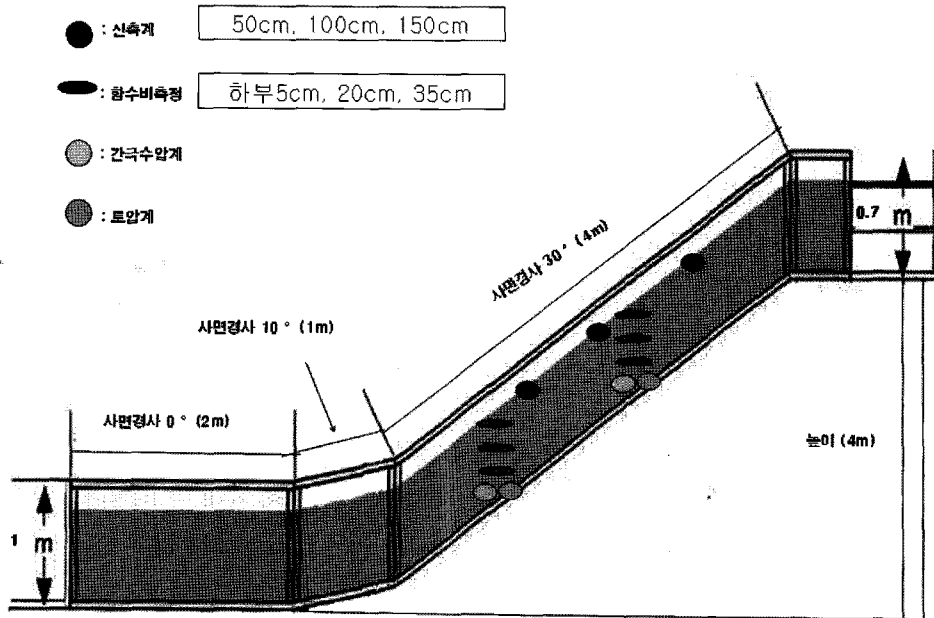


그림 4. 계측기 설치 모식도

- 나. 간극수압계 : 간극수에 의한 사면 붕괴의 연관성 확인
- 다. 토압계 : 강우 침투에 의한 토압 변화량 확인
- 라. 우량계 : 우량계를 통해 강우강도 계측
- 마. 데이터 로거 : 계측데이터 계측값의 자료 수집
- 바. 컬러마킹 흙 : 산사태 발생 시 사면의 단면 거동을 가시적으로 확인
- 사. 고속카메라 : 모형비탈면의 붕괴 발생시 전체적인 붕괴형상 및 붕괴 단계 분석

2.3 실험방법

2.3.1 실험방법

본 모형실험에서는 강우에 따른 산사태 발생시 강우강도, 강우지속시간, 비탈면 경사, 지반조건에 따른 파괴 원인을 분석하고 산사태를 예측하기 위한 기초 자료를 구하기 위하여 산사태 모형실험을 실시하였다. 본 실험은 산사태 메커니즘 규명에 그 바탕을 두고 사면지반의 경사를 30°, 토고를 400mm로 자연적인 사면과 유사성을 갖기 위해 단위중량을 고려하여 단계별 다짐을 실시하여 조성하였으며, 강우강도를 50mm/hr의 일정량의 강우량으로 모형실험을 진행하였다.

- 가. 산사태의 붕괴 시점을 예측하기 위하여 강우재현장치 및 모형토조, 계측기 준비
- 나. 제작한 강우재현장치와 모형토조 장치로 테스트 실험을 하여 문제점 발견 시 보완

표 5. 실험 단계별 연구내용

연구단계	연구 내용	비 고
모형장치 구안	모형 산사태 실험장치 구안 및 방법 결정	
계측기 calibration	함수량계, 간극수압계, 토압계 교정	
강우재현장치 테스트	시간별 강우강도 확인	
계측기 설치	붕괴양상 및 붕괴시점을 파악하기 위한 계측기 설치(토압계, 간극수압계, 함수량계)	
흙 쌓기 및 다짐	자연적인 사면과 유사성을 갖기 위해 단위중량을 고려하여 다짐 실시	
계측기 설치	사면의 파괴시점을 예측하기 위한 신축계 설치 강우강도를 확인하기 위한 함수량계 설치	
강우강도 재현	집중호우시 강우강도 묘사	
데이터 분석	계측데이터 값을 통한 사면의 붕괴양상 분석	

- 다. 각 요인별(강우강도, 강우지속시간, 비탈면 경사, 지반조건) 산사태의 붕괴 특성 분석
- 라. 실험 결과를 분석하여 조건별 파괴 원인을 분석하여 산사태붕괴 시점 예측

3. 실험 결과

3.1 표준사 실험 결과

강우강도 50mm/hr로 실험을 시작한 결과 실험시작

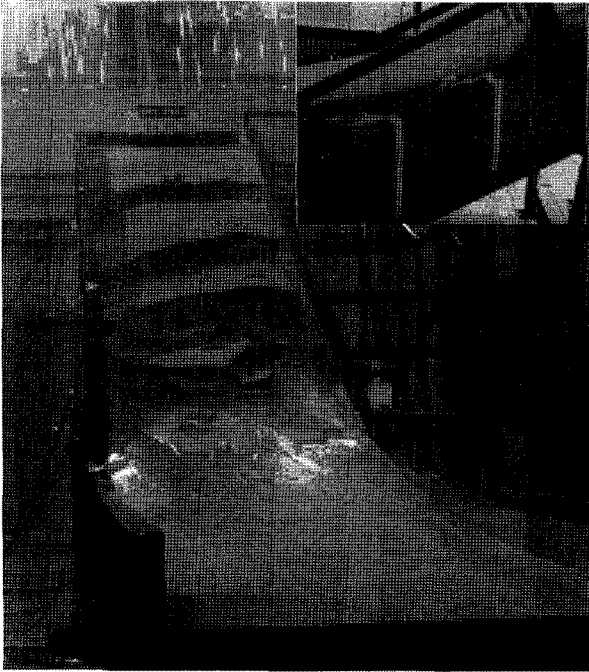


그림 5. 모형토조 사면붕괴 형상(표준사)

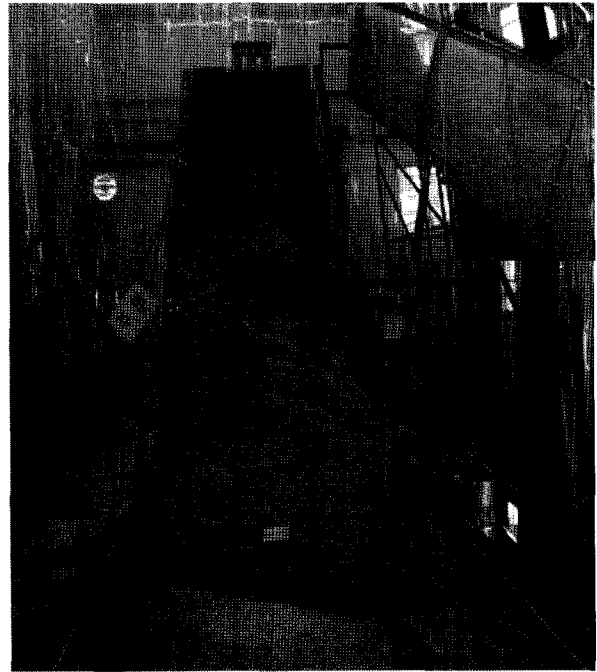


그림 6. 모형토조 사면붕괴 형상(화강풍화토)

약 110분부터 (그림 5)와 같이 시간에 따라 붕괴가 발생했으며, 130분까지 붕괴형상을 나타냈다. 붕괴형태는 상단 부 균열에 이어 사면의 1/3정도 되는 부분에서 파괴가 발생하고 이어서 표층유실로 인해 점차적으로 파괴되는 형태를 나타내었다.

간극수압은 하부에서 먼저 상승 후 상부로 전이되는 양상을 보였으며, 하부에서 간극수압이 470Pa에 수렴하였고 지하수위는 상부에서는 약 1cm, 중부에서는 약 2cm, 하부에서는 약 5cm의 지하수위가 형성되었다. 함수비 분석결과 40cm의 토괴 중 30cm위치에서는 함수비 45~50%로 수렴하였고, 바닥 5cm위치에서는 75~80%의 함수비를 나타내었다.

3.2 화강풍화토 실험 결과

강우강도 50mm/hr로 실험 결과 누적강우량 120mm에서 (그림 6)과 같이 슬라이딩으로 인한 사면붕괴가 발생하였다.

간극수압은 상부에서 먼저 상승하기 시작하며, 이어서 중간부와 하부에서 간극수압이 상승하기 시작하였으며 하부에서 간극수압이 2200Pa로 수렴 후 파괴되었다. 지하수위는 상부에서는 약 8cm, 중부에서는 약 10cm, 하부에서는 약 22cm의 지하수위가 형성되는 것을 확인할 수 있었으며, 함수비는 토고 전체에서 함수비

65~75%로 수렴 후 사면붕괴가 발생되는 것을 알 수 있었다.

3.3 계측기별 실험 결과

3.3.1 토압

강우에 따른 토압의 변화량은 (그림 7, 8)과 같다. 실험 전 토고의 입력에 의해 표준사는 약 5900Pa에서 실험시작 후 강우의 영향으로 인해 점차적으로 토압이 증가되다 6500Pa에서 수렴하고 일정시간 경과 후 에는 토압이 감소하는 양상이 나타났다.

토압의 감소현상은 누적강우량 90mm까지 증가하는 양상을 보이다 누적강우량 100mm부터 감소되는 양상을 계측모니터링을 통해 확인할 수 있었으며 이는 지표수의 유출로 인해 점착력이 없고 입자가 작고 균등한 표준사가 지표수와 함께 흘러내린 것으로 판단된다.

화강풍화토는 누적강우량 50mm까지 토압 8200Pa로 점차적으로 증가하는 양상을 보였으며, 누적강우량 50mm부터 70mm까지는 일시적으로 토압이 감소되는 현상을 보이다 누적강우량 120mm까지 증가 후 붕괴가 발생하였다. 누적강우량 50mm까지 지표포화로 인해 토압이 점차 증가되다가 일시적인 감소현상을 나타낸 것은 화강풍화토의 투수계수가 작기 때문에 일정심도까지 포화가 진행 후 일부 강우가 표면유출로 인하여 일시

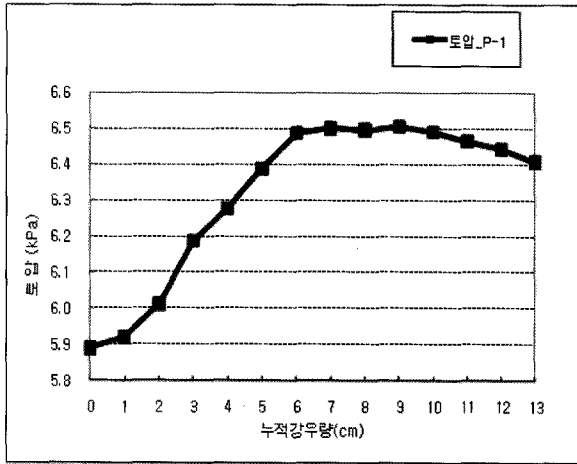


그림 7. 표준사(토압)

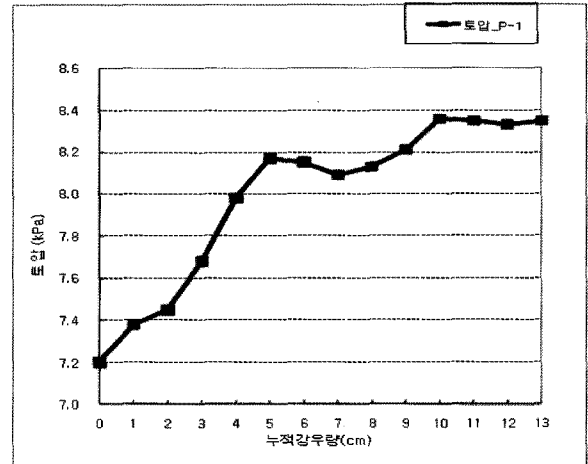


그림 8. 화강풍화토(토압)

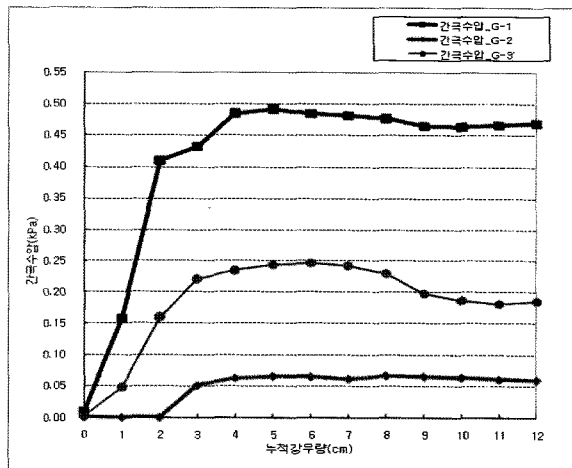


그림 9. 표준사 (간극수압)

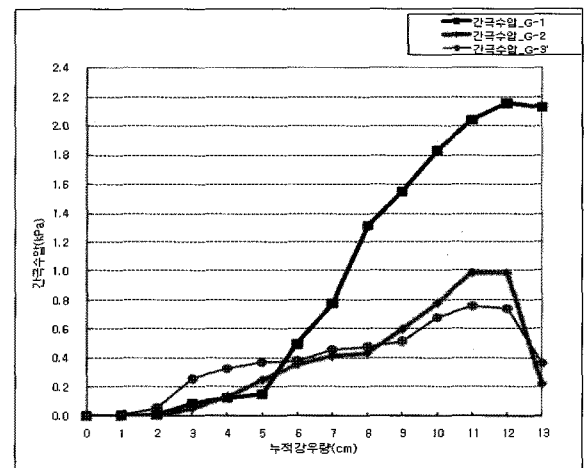


그림 10. 화강풍화토 (간극수압)

적인 토압의 감소현상이 발생된 것으로 판단된다.

3.3.2 간극수압

표준사의 간극수압은 하부(G-1)에서 먼저 상승 후 상부(G-3)로 전이되는 양상을 보였으며, 하부에서 간극수압이 470Pa에 수렴하였고 지하수위는 상부에서는 약 2cm, 중부에서는 약 1cm, 하부에서는 약 5cm의 지하수위가 형성되었다.

표준사의 토압이 누적강우량 60mm까지 증가 후 수렴된 것과 간극수압의 누적강우량 60mm까지 증가되는 양상확인 결과 투수계수가 높은 표준사의 경우 누적강우량 60mm까지 간극수압은 점차적으로 증가하다가 누적강우량 100mm일 때부터 표층유실에 의한 붕괴가 발생되는 것을 확인 할 수 있었다.

화강풍화토의 간극수압은 상부(G-3)에서 먼저 상승

하기 시작하였으며, 이어서 중간부(G-2)와 하부(G-1)에서 간극수압이 상승하기 시작하였고 하부(G-1)에서 간극수압이 2200Pa로 수렴 후 붕괴가 발생하였다. 지하수위는 상부(G-3)에서는 약 8cm, 중부(G-2)에서는 약 10cm, 하부(G-1)에서는 약 22cm의 지하수위가 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

화강풍화토 하부(G-1)에서의 간극수압은 누적강우량 50mm부터 120mm까지 급격한 증가양상을 보이다 붕괴되었으며, 이는 지하수의 흐름으로 인하여 하부(G-1)에 높은 지하수위가 형성 후 흙의 포화로 인하여 누적강우량 120mm일때 붕괴된 것으로 판단된다.

50mm/h의 강우강도와 30°의 경사, 본 연구대상 시료와 유사한 물성치인 지반일 경우 누적강우량 120mm이상 지속 시 사면붕괴의 발생 위험성이 있는 것으로 판단된다.

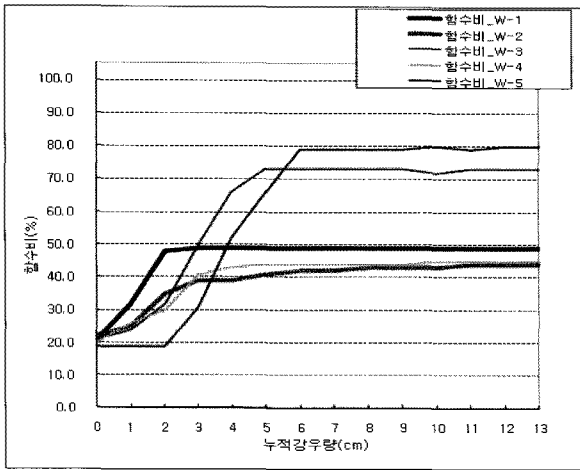


그림 11. 표준사(함수비)

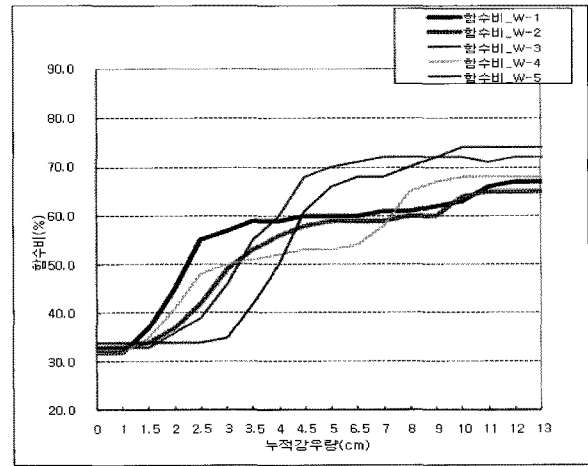


그림 12. 화강풍화토 (함수비)

3.3.3 함수비

강우에 따른 함수비 측정결과는 (그림 11, 12)와 같다. 표준사 함수비 분석 결과 40cm의 토피고 중 30cm위치(W-1, 2, 4)에서는 함수비 45~50%로 수렴하였고, 바닥 5cm 위치(W-3, 5)에서는 75~80%의 함수비를 나타내었다.

지표면에서 가까운 (W-1, 2, 4)에서 먼저 함수량이 증가되었으며, 바닥 5cm위치에 있는 (W-3, 5)중 상부 위치에 있는 (W-3)의 계측기에서 약 24분 먼저 증가되는 현상과 지속 강우 시 상부에서 포화 후 하부로 전이 되는 양상을 계측 모니터링을 통하여 확인할 수 있었다.

표준사의 경우 누적강우량 60mm까지 함수비가 증가 되는 양상을 나타냈으며 누적강우량 60mm부터 120mm까지는 함수비의 변화가 미세한 것을 확인할 수 있었다. 이는 50mm/h의 강우강도와 30° 경사의 표준사일 경우 누적강우량 60mm이상 지속 시 사면붕괴의 발생 위험성이 있는 것으로 판단된다.

화강풍화토 함수비는 토고 전체에서 함수비 65~75%로 수렴 후 사면붕괴가 발생하는 것을 알 수 있었다.

투수계수가 높은 표준사의 경우 일정강우량이 지속된 후에는 함수비의 변화 양상이 나타나지 않았지만 화강풍화토의 경우 사면붕괴 전까지 함수비의 변화를 확인할 수 있었다.

실험결과 화강풍화토는 지반이 60~75% 포화될 경우와 누적강우량 120mm이상 지속될 때 사면붕괴의 발생 위험성이 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 강우 시 지반정수 변화에 따른 사면붕괴

모델결정에 관한 기초연구로서 강우재현장치를 활용한 모형실험을 실시하여 불포화 상태의 사면에 침투하는 강우에 대하여 지속강우특성과 투수특성을 고려하여 간극수압, 토압, 함수비의 변화에 따른 사면 거동에 대해 분석하였다.

- (1) 실험 결과 강우(50mm/h)가 지속적으로 발생됨에 따라 화강풍화토의 간극수압은 상부에서 먼저 상승하기 시작하며, 이어서 중간부와 하부에서 간극수압이 상승하기 시작하였다. 표준사의 간극수압은 역으로 하부에서 상부로 간극수압이 상승하는 것을 확인할 수 있었으며 이 같은 원인은 표준사(투수계수 $2.15 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$)와 화강풍화토(투수계수 $8.58 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$)의 투수계수의 차이로 판단된다.
- (2) 간극수압은 사면의 최심부에서 먼저 포화되어 바닥부에 지하수위 형성 후 수위가 상승되는 현상을 확인할 수 있었으며, 표준사의 경우 하부에서 간극수압이 470Pa에 수렴하였고 지하수위는 상부에서는 약 2cm, 중부에서는 약 1cm, 하부에서는 약 5cm의 지하수위가 형성되었다. 화강풍화토는 하부에서 간극수압이 2200Pa로 수렴 후 파괴 되었으며, 지하수위는 상부에서는 약 8cm, 중부에서는 약 10cm, 하부에서는 약 22cm의 지하수위가 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 지하수위가 낮은 표준사는 표층유실에 의한 붕괴현상이 발생하는 반면 지하수위가 높게 형성된 화강풍화토는 슬라이딩으로 인한 사면붕괴가 발생하였다.
- (3) 함수비 분석 결과 표준사는 40cm의 토피고 중 30cm 위치에서는 함수비 45~50%로 수렴하였고, 바닥

5cm위치에서는 75~80%의 함수비를 나타내었다. 화강풍화토는 토고 전체에서 함수비 65~75%로 수렴 후 사면붕괴가 발생하는 것을 알 수 있었다. 실험결과 화강풍화토는 지반이 60~75% 포화될 경우와 누적강우량 120mm이상 지속될 때 사면붕괴의 발생 위험성이 있는 것으로 판단된다.

- (4) 사면 내 침투된 강우에 대하여 투수계수와 간극수압의 상관관계 분석 결과 지반조건별로 다른 차이가 있으나 약 60~75% 정도 포화될 경우와 누적강우량 120mm이상 지속될 때 사면붕괴의 발생 위험성이 있는 것을 알 수 있었다. 향후 사면경사, 표면수 유출 지반특성 등의 조건에 대한 추가적인 연구가 이루어 진다면 사면붕괴 모델결정을 위한 자료로서의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신 연구 개발사업인 낙석 및 산사태 방지를 위한 차세대 신기술 개발의 연구비지원(05지역혁신 B02-01)에 의해 수행되었으며 국토해양부 및 낙석 및 산사태 방재연구단 관계자 여러분께 감사드립니다.

그리고, 연구에 참여한 KG 엔지니어링의 황석민 사원에게도 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김홍택, 유한규, 강인규, 이혁진 (2001), “실내모형실험을 통한 강우시 사면내 간극수압의 변화 탐구”, 한국지반공학회'01 봄학술발표회논문집, pp.199-206.
2. 이승호, 황영철 (2004), “집중호우시 군사시설물이 설치된 사면의 안정성 평가에 관한 연구”, 한국지반환경공학회논문집 제5권 제4호, pp.47-56.
3. 김재홍, 박성환, 정상삼, 유지형 (2002), “강우시 습윤에 의한 불포화 풍화토의 사면 안정 해석 연구”, 한국지반공학회논문집, 제18권, 제2호, pp.123-136.
4. 황석민 (2010), “지반정수 변화에 따른 사면붕괴 모델 결정에 관한 연구, 상지대학교 토목공학과 석사 졸업논문.
5. 이승, 김종수, 이규환, 이장덕 (1997), “공내재하시험을 이용한 화강풍화토의 전단계수 산정”, 한국지반공학회지, 제13권, 제6호, pp.95-105.
6. 이성진, 이혜지, 이승래 (2005), “화강풍화토에 대한 함수특성곡선 - 추정방법에 대한 연구”, 한국지반공학회논문집, 제21권, 제1호, pp.15-27.
7. 이인모, 조우성, 김영욱, 성상규 (2003), “풍화토 사면에서 강우로 인한 간극수압 변화에 대한 실험연구”, 한국지반공학회논문집, 제19권, 제1호, pp.41-49.
8. 조성은, 이승래 (2000), “강우특성을 고려한 사면의 표면파괴에 대한 안정성 평가”, 한국지반공학회논문집, 제16권, 제5호, pp.107-116.
9. Braja M. Das (1998) Principles of Geotechnical Engineering Fourth Edition, Thomson Learning, pp.175-277.
10. Pradel, D. and Raad, G. (1993), “Effect of Permeability on Surficial Stability of Homogeneous Slopes”, Journal of Geotechnical Engineering ASCE, Vol.119, No.2, pp.315-332.
11. Fredlund, D. G. and Xing, A. (1995), “Equations for the soil-water characteristic curve”, Canadian Geotechnical Journal, Vol.31, pp.521-532.

(접수일자 2010. 6. 18, 심사완료일 2011. 1. 5)