

산사태 모형실험에서의 Scale Effect에 관한 연구

A Study on The Scale Effect of Landslide Model Tests

정 지 수¹⁾ · 지 영 환²⁾ · 김 유 태³⁾ · 이 승 호[†]

Jeong, Jisu · Ji, Younghwan · Kim, Yootae · Lee, Seungho

ABSTRACT : This study was performed to analyze the degree of rainfalls, the duration time of rainfalls, the inclination of slopes and other damage causes depending on the ground condition, when the landslide occurs by the rainfall. Based on that, a big and a small model soil box were compared to examine the features of landslides, which is ultimately for forecasting landslides. An artificial rainfall device was installed in the model box, and the large model box has a real-size slope in it. Also, various measures were fulfilled such as collapse forms, a pore pressure, an earth pressure and moisture contents in order to analyze the effect of the model box size on the landslide mechanism and to test the usability of a small model box as a material for landslide experiments.

Keywords : Calibration Chamber Test, Landslide, Collapse Mechanism

요 지 : 본 연구는 강우로 인한 산사태 발생 시 강우강도, 강우지속시간, 비탈면 경사, 지반조건등에 따른 파괴 원인을 분석하여 산사태를 사전에 예측하기 위해 산사태 붕괴특성을 알아보고자 인공강우장치를 이용한 실제사면 크기에 근접한 대대형모형토조와 소형모형토조로 실험을 실시하였다. 육안상의 붕괴 형태 및 간극수압, 토압, 함수비, 지중변위 등의 계측결과에 대한 비교연구를 통해 모형토조연구에 있어 크기에 따른 산사태 메커니즘 분석과 소형모형토조 실험에 대한 산사태 모형실험으로서의 검증 실험을 수행하였다.

주요어 : 실내모형실험, 산사태, 붕괴 메커니즘

1. 서 론

강우가 산사태의 가장 중요한 요인이나 아직 강우강도, 강우지속시간 등에 따른 산사태 발생과의 상관관계에 대해서는 확실히 규명되어 있지 않다. 산사태 실내모형실험은 인공적으로 구성된 사면규모에 제약이 있으므로 치수효과 등의 문제를 내포하고 있어, 자연사면과 동일한 조건을 형성하는데 한계가 있다(Moriwaki 등, 2004).

국내에서 산사태와 관련한 대표적 실험적 연구를 살펴보면 사공명 등(2007)은 강우에 기인한 사면활동 분석을 통하여 사면붕괴 활동타입을 구분하였으며, 채병곤 등(2006)은 모형실험장치를 이용한 산사태 발생 및 사태물질 거동특성 실험을 실시하였다. 실내모형실험과 관련한 기존연구에 있어 Okura 등(2002)은 실제 크기에 유사한 산사태 모형시험장치를 이용하여 집중강우 동안 발생하는 산사태의 유동화 과정에 대한 실험을 실시하였다.

본 연구에서는 강우에 따른 산사태 발생 시 강우강도, 강우지속시간, 비탈면 경사, 지반조건에 따른 파괴 원인을 분석하여 산사태를 예측하기 위한 산사태 붕괴특성을 알아보

고자 인공강우장치를 이용한 실제사면 크기에 근접한 대대형모형토조와 소형모형토조의 육안상의 붕괴 형태 및 간극수압, 토압, 함수비, 지중변위 등의 계측결과에 대한 비교연구를 통해 모형토조연구에 있어 크기에 따른 산사태 메커니즘 분석과 소형모형토조 실험에 대한 산사태 실험으로서의 검증 실험을 수행하였다.

- (1) 산사태 관련 연구동향 조사
- (2) 인공강우장치를 이용한 실내모형토조 실험 개요
- (3) 소형모형토조 및 대대형모형토조 실험
- (4) 실험결과 및 분석
- (5) 비교분석을 통한 결론 도출

2. 강우에 따른 사면내 지하수 거동에 관한 이론적 고찰

2.1 강우 침투에 따른 지하수 흐름 특성

산악지역의 지하수의 흐름은 포화대를 통한 흐름과 불포

1) 정희원, 상지대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

2) 정희원, 상지대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

3) 비희원, 국토해양부 익산지방국토관리청 도로관리국장

† 정희원, 상지대학교 공과대학 건설시스템공학과 교수(E-mail : shsh123@hanmail.net)

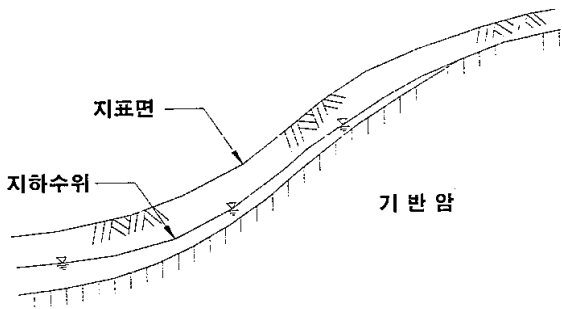


그림 1. 비탈면의 전형적인 지하수 흐름

화대를 통한 흐름으로 구분할 수 있다. 우기 시 강우는 지표면을 통해 침투되어 불포화 층으로 유입되거나 지표면을 따라 직접 유출된다. 불포화 층에 유입된 강우는 시간이 흐름에 따라 포화 층으로 유입되어 포화대를 증가시키고 수두경사에 의해 표고가 낮은 곳으로 이동한다(이인모 등, 2003) (그림 1).

현재 포화대를 통한 지하수 흐름은 많은 연구를 통해 실제 지하수의 거동과 유사한 결과를 보이고 있으나, 불포화대를 통한 지하수 흐름은 불포화 층에 존재하는 불확실한 요소들에 의해 아직까지 지하수 거동을 명확히 파악하지 못한 관계로 불포화대의 실험식을 사용할 때에는 주의가 요구된다. 따라서 불포화대를 통한 지하수 흐름을 모델화할 때에는 강우 발생으로 인하여 생기는 수문과정 중 중요한 영향을 미치는 요소들만을 사용하여 지하수의 거동을 파악하는 것이 바람직하다.

3. 모형토조실험

3.1 소형모형토조

본 연구에서 제작한 산사태 모형토조 실험장치는 크게 모형토조, 인공강우장치 등으로 구성되어 있다. 모형토조는 내부에 시료를 채우는 부분으로 총길이 5.2m, 높이 2.3m, 폭 1m의 조립식으로 제작하여 원하는 길이 및 높이 조절이 가능하도록 하였다. 토조의 경사 또한 10°, 20°, 30°, 40°로 조절할 수 있도록 하였으며, 모형토조 측면은 투명강화아크릴판으로 구성하여 사면의 거동을 육안상으로 확인할 수 있게 하였다(그림 2, 그림 3).

인공강우장치는 살수장치부, 강우량 조절장치부, 물탱크부로 구성되어 있다. 5.1m×2.1m 크기로 구성된 살수장치부는 1단 5열의 노즐로 구성되어 있으며, 살수장치부는 조립식으로 상하조절이 가능하여 강우재현 시 높이 조절이 가능하도록 하였다. 강우량 조절장치부는 펌프장치로 압력밸브 장치를 설치하여 강우강도를 130~370mm/hr의 범위에서

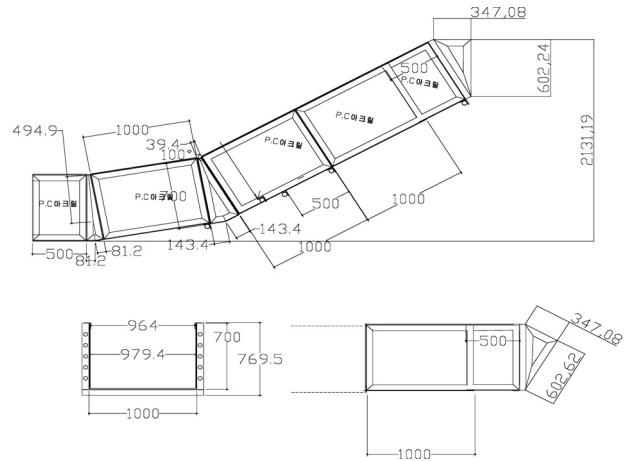


그림 2. 산사태 모형토조 설계



그림 3. 산사태 모형토조 실험장치

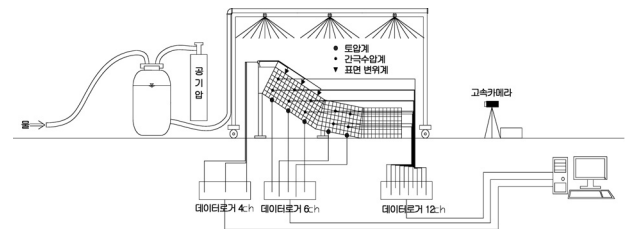


그림 4. 인공강우 장치를 이용한 실내 모형토조 모식도

조절할 수 있도록 하여 집중강우 시 영향을 충분히 고려할 수 있도록 하였고, 강우지속시간에 대한 영향을 고려할 수 있도록 10⁴kg 용량의 물탱크로 제작하였다(그림 4).

3.1.1 강우강도

강우는 24시간 내에 200mm 이상의 강우가 지속되거나, 강우가 하루 이상 지속되고 시간당 평균 강우량이 10mm 이상일 경우에 산사태가 발생할 위험이 크다(Ikeya, 1989). 우리나라의 지역적 강우특성을 살펴보면, 중부지역은 기압골 형성에 의한 집중호우의 누적강우량에 영향을 받아 산사태가 많이 발생하는 것으로 나타났다(이승호 등, 2004). 본 실험에서는 누적강우량의 적용을 고려하여 100mm/hr의 강우강도를 지속적으로 유지하여 실시하였다(표 1, 그림 5).

표 1. 펌프압에 따른 강우량 측정 결과

펌프	수직 (5분 측정)	중간 (5분 측정)	시간당 평균 강우량	시간당 수직 강우량	시간당 중간 강우량
P00.2	10.5	12.4	137	126	149
P00.3	11.5	14.3	155	138	172
P00.4	13.1	16	175	157	192
P00.5	14.4	15.2	178	173	182
P01.0	20.5	23.5	264	246	282
P01.5	24.1	20.8	269	289	250

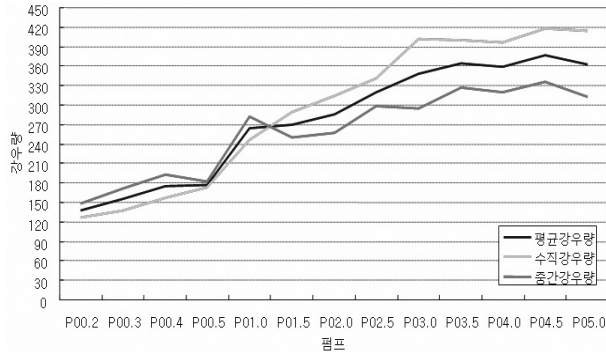


그림 5. 펌프압에 따른 강우량 측정

3.1.2 사용시료

실험에 사용된 대상시료는 주문진 표준사를 사용하였다. 체분석 시험과 비중시험, 단위중량시험을 통한 주문진 표준사의 물성시험 결과는 표 2와 같다. 표 2에 나타난 바와 같이 주문진 표준사의 비중은 2.61이며, 균등계수와 곡률계수는 각각 1.8 및 1.04로 나타났다. 또한, 그림 6은 체분석을 실시한 주문진 표준사의 입도분포곡선을 나타낸 것으로서 입도

표 2. 주문진 표준사의 물리적 특성

체 분석	D_{10}	0.3
	D_{30}	0.41
	D_{60}	0.54
	C_u	1.8
	C_c	1.04
비중(Gs)	2.61	

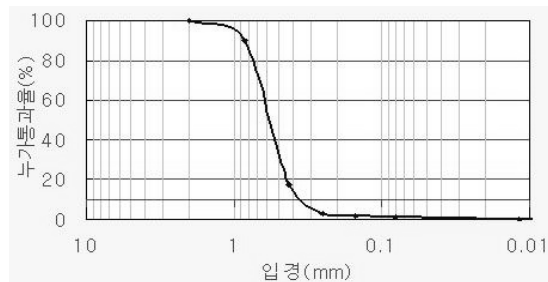


그림 6. 주문진 표준사의 입도분포 곡선

분포가 매우 균등함을 알 수 있다. 실험에서는 최적의 다짐 효과를 주기 위해 표준사의 평균함수비를 10%로 하여 실험하였다.

3.1.3 계측장치

사용된 계측장치는 강우 시 모형토조 기반내 간극수압을 측정하기 위한 간극수압계와 강우강도에 따른 산사태 붕괴 현상의 파악을 위한 토압계, 그리고 측정된 계측값을 컴퓨터에 기록하기 위한 데이터 로거이다. 간극수압계는 모형토조 기저부를 따라 상단, 중간, 하단 3개소에 설치하여 1초당 50개의 자료를 측정함으로써 정밀한 측정이 가능하도록 하였다. 함수비 센서는 상단과 중간 3개씩 바닥면으로부터 15, 30cm의 높이에 설치하였다. 또한, 붕괴 시 표면거동의 가시적 확인을 위하여 표적계를 설치하였다(그림 7).

3.2 대대형모형토조

일본 방재과학기술연구소의 대형 강우실험 설비를 활용하여 대규모 모형사면을 제작하고 실험을 실시하였다(그림 9). 모형의 형상은 그림 8과 같이 총 사면 길이는 23m, 폭 3m, 깊이 1.6m, 흙 층 깊이 1.2m, 높이 7.8m의 복합 사면형 철제 모형이다. 모형사면 끝 가장자리는 슬릿형 옹벽 모양의 축조물(침투수는 특수망을 통해 자연 배수)로 사면 흩층을 억제하고 있다. 수로 끝 가장자리 이외에는 배수를 하지 않는 조건이다. 또 한쪽 벽은 강화 유리를 사용해서 흩층 내

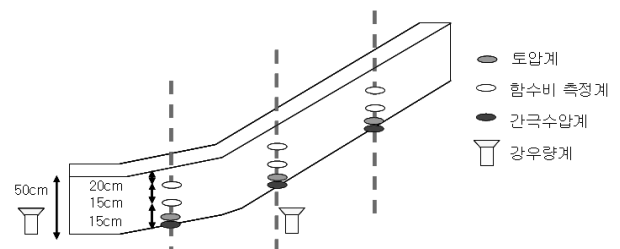


그림 7. 계측기 설치 위치 모식도

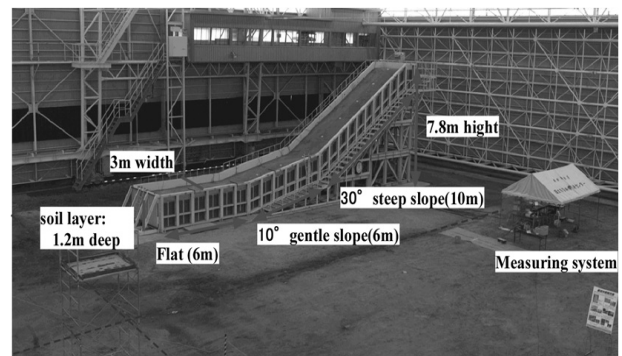


그림 8. 대대형모형토조 모식도



그림 9. 대대형 인공강우 재현장치

부의 변형 상황이 외부에서 육안으로 확인이 가능하도록 되어 있다. 흙의 초기 함수비는 8% 정도의 자연 건조 상태의 시료를 사용하여 인력에 의해 20cm의 층마다 단단히 고정하여 완성하였다. 사면제작 후의 사면 모형의 건조 밀도는 평균 13.426 KN/m³, 간극의 비율은 0.964이다.

3.2.1 계측기 설치

사면의 변동을 계측하기 위해 지표면 변위계(D1~D9), 토양수분계(PW1~PW15), 간극수압계(G0~11)를 그림 10에 표시된 위치에 설치하였다. 지표면 변위계 D1~D5는 사면위에 추를 고정하고 신축계를 사용해 계측하였다. D6~D9에는 사면표층에 타겟을 설치하였다. 함수비 계측은 표면에서 15cm, 55cm, 85cm의 위치에 설치하고, ADR식을 사용해 체적(부피) 함수율을 계측하고, 사면 흙 고유의 밀도를 사용해 포화도를 산출하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 붕괴형태

대대형모형토조와 소형모형토조의 붕괴형태는 강우강도

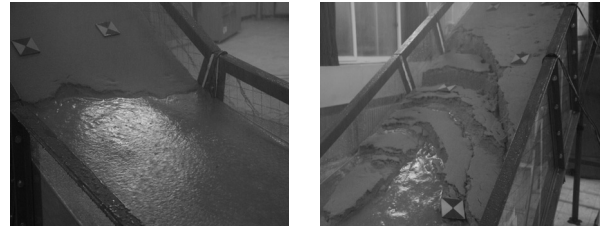


그림 11. 소형모형토조 붕괴 모습

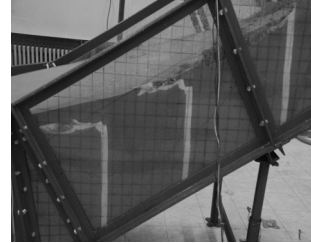
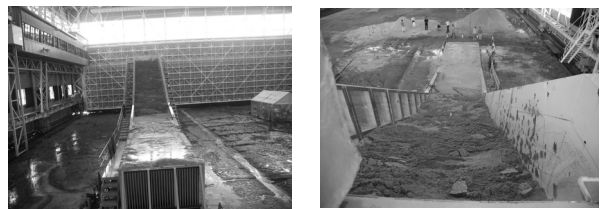


그림 12. 대대형모형토조 붕괴 모습



100mm/hr로 실험을 실시한 결과 실험시작 약 33분부터 그림 11, 12와 같이 시간에 따라 붕괴가 발생했으며, 소형모형토조는 실험시작 후 90분까지 붕괴형상을 나타내었다. 붕괴형태는 상단부 균열에 이어, 하부로부터 사면의 1/3 정도 되는 부분에서 붕괴가 발생하고, 이어서 점차적으로 붕괴되는 형태를 나타내었다. 대대형모형토조는 상부붕괴를 시작으로 140분에 완전한 붕괴가 발생하였다.

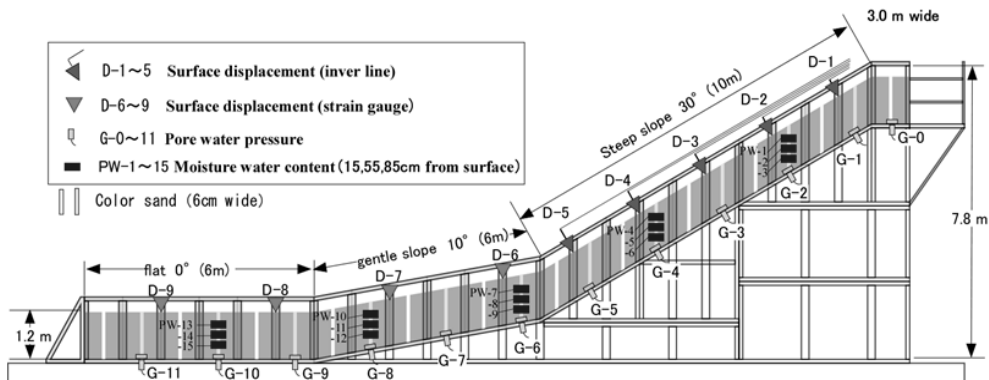


그림 10. 대대형모형토조 계측기 설치 위치도

4.2 소형모형토조 계측결과

4.2.1 토압

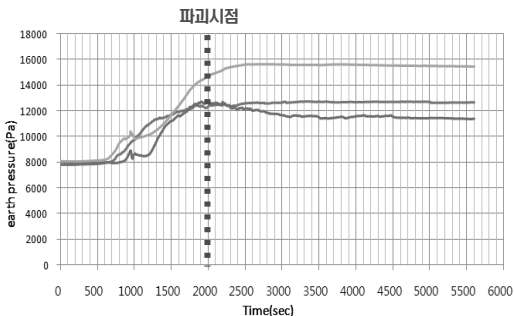
강우강도에 따른 토압의 변화량은 그림 13과 같다. 실험 전 토고에 의한 토압 8,000 Pa에서 실험시작 후 강우의 영향으로 인해 점차적으로 토압이 증가하다 상부토압은 약 13,000 Pa, 중간토압은 약 11,000 Pa, 하부토압은 15,000 Pa에서 수렴하였다(그림 13(a)).

파괴시점을 지나 상부 붕괴로 인한 토압이 하부로 전이되어 하부의 토압이 높게 나타나는 것으로 판단되며, 중간부분의 붕괴의 영향으로 토압이 감소함을 확인할 수 있었다.

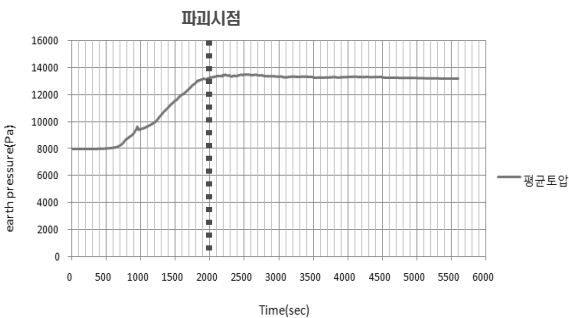
강우강도에 따른 평균토압은 그림 13(b)와 같다. 실험시작 전 토압의 영향으로 8,000 Pa의 평균토압이 작용하다가 강우의 영향을 받아 점차적으로 토압이 증가하였다. 평균토압 13,000 Pa에서 수렴하는 것을 알 수 있다.

4.2.2 간극수압

그림 14는 소형모형토조 상부, 중간, 하부의 간극수압 그래프와 평균 간극수압 그래프를 나타낸다. 상부의 간극수압은 배수로 인해 간극수압이 감소함을 확인할 수 있었다. 하부의 간극수압은 배수로 인해 간극수압이 6,000 Pa 까지 증가함을 알 수 있었다. 1,000 sec 지점에서 간극수압은 가속도적으로 증가하며 약 6,000 Pa까지 증가하다가 일정하게 유지됨을 알 수 있었다.

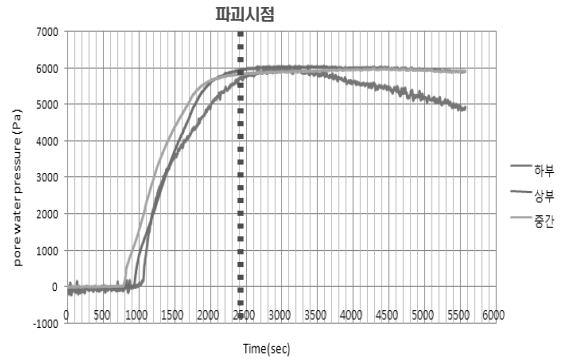


(a) 토압 그래프

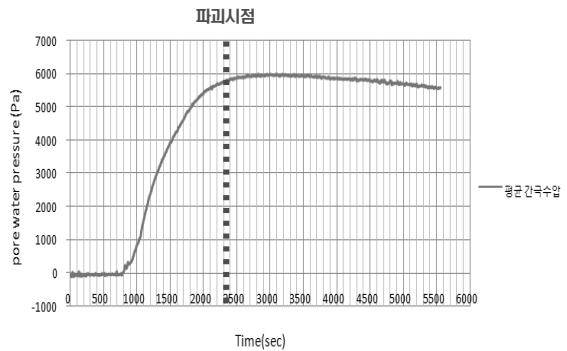


(b) 평균 토압 그래프

그림 13. 토압 그래프 및 평균 토압 그래프



(a) 간극수압 그래프



(b) 평균 간극수압 그래프

그림 14. 간극수압 그래프 및 평균 간극수압 그래프

4.2.3 함수비 측정결과

그림 15와 같이 모형토조 바닥면으로부터 15cm에 함수비 측정기 No.1, No.2, No.3을 설치하였고, 바닥면으로부터 30cm 위치에 함수비 측정기 No.4, No.5, No.6을 설치하였다.

강우강도에 따른 함수비 측정결과는 그림 16(a)와 같다. 강우침투와 더불어 포화도가 상승하지만 완전한(100%) 포화는 되지 않고 일정함수비에서 수렴함을 알 수 있다. 그림 16(b)에서의 평균 함수비를 보면 일정하게 함수비가 증가하다 붕괴가 일어난 후 평균 65%의 포화도를 유지함을 알 수 있었다.

4.2.4 지표변위 측정결과

지표변위는 그림 17과 같이 실험시작 후 파괴시점까지

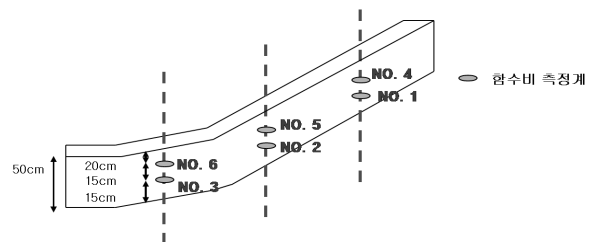
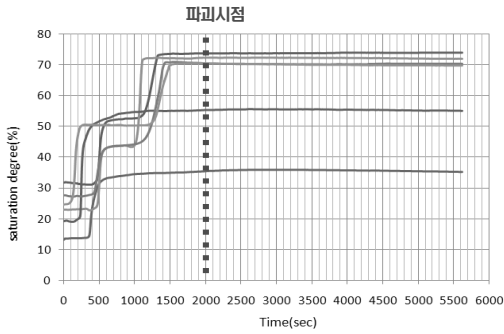
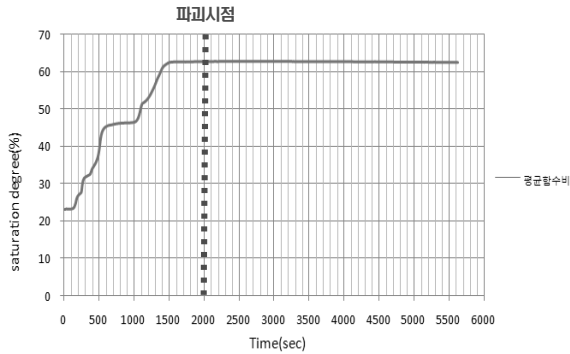


그림 15. 함수비 측정기 설치 모식도(No.1~6)



(a) 함수비 그래프



(b) 평균 함수비 그래프

그림 16. 함수비 그래프 및 평균 함수비 그래프

10mm 이동하였으며 중간부분은 6mm 이동하였다. 하부는 파괴시점까지 큰 이동이 없었으며, 이는 상부와 중간 지점에서 파괴가 일어나고 진행되었음을 나타낸 것이다.

4.3 대대형모형토조 계측결과

4.3.1 토압

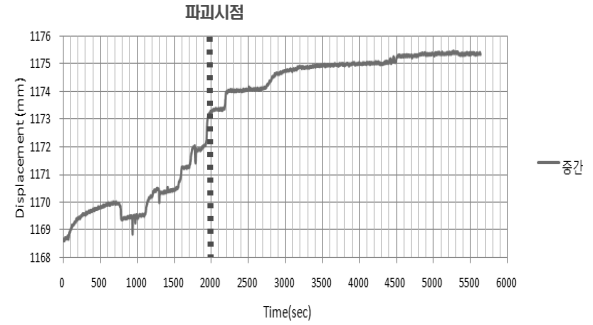
그림 18(a)는 상단 토압 그래프를 나타내고 (b)는 하단 토압 그래프를 나타낸다. 토압은 강우가 지속됨에 따라 크게 변화가 없다가 붕괴 직전에 상단부분의 붕괴로 인해 토압이 급격히 아래로 전이되는 현상을 확인할 수 있었다.

4.3.2 함수비

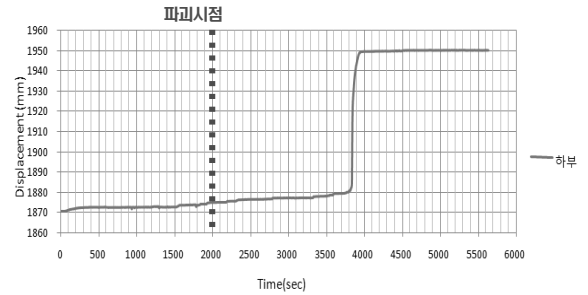
그림 19에서 사면 하부에 설치되어 있는 토양수분계(PW-4,5,6)의 변화를 보면, 초기에는 약 40% 이었던 포화도가 강우 침투에 따라 포화도가 상승과 함께 위에서부터 순서대로 포화도가 70~80%까지 상승해 그 후 일정하게 유지하고 있다. 그 후 지하수위가 발생하여 PW-6까지 상승하고, 포화도가 100% 정도까지 이르는 것으로 나타났다. 그 후 붕괴 직전까지 되어 PW-5도 포화도가 100%까지 상승하였다. 이상에서 알 수 있는 것처럼 강우 침투와 더불어 포화도가 상승하지만, 완전한 포화(100%)는 되지 않고 일단 70~80% 정도를 유지한다. 그 후 지하수위가 높아지고 나서 처음으로



(a) 상단부분

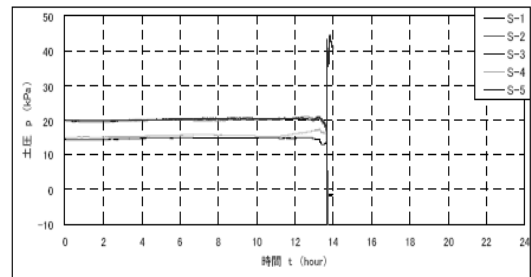


(b) 중간부분

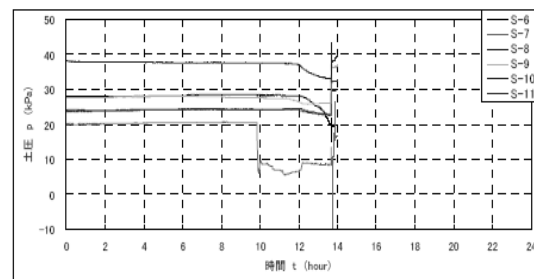


(c) 하단부분

그림 17. 지표변위 측정결과



(a) 상단 토압 그래프(S-1~S-5)



(b) 하단 토압 그래프(S-6~S-11)

그림 18. 대대형모형토조 토압 그래프

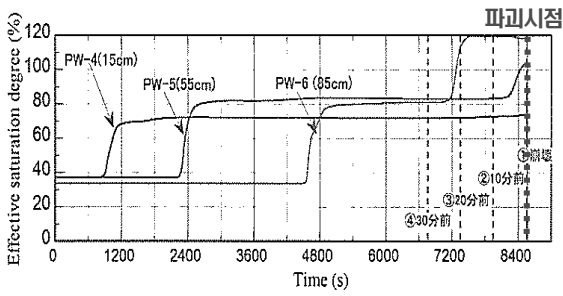


그림 19. 대대형모형토조 함수비 그래프

완전한 포화(100%) 움직임을 나타냈다.

4.3.3 지하수위

그림 20은 경사 30° 사면에 의한 지하수위(G1~G5)의 결과를 나타냈다. 그 움직임을 살펴보면, 6,450 sec까지는 수위에 전혀 변화가 없다는 것을 알 수 있다. 그 후 6,450 sec에서 7,000 sec의 사이에 강우 침투가 지반 위에 도달하고 수위가 상승하기 시작해 G1~G5 전체 점에서 같은 상승 경향을 보이면서 수위가 단시간에 상승하였다.

4.3.4 지중변위

그림 21을 통해 사면에 의한 변위의 상황을 보면, 4,200 sec부근에서 D1~4에 걸쳐 동시에 사면하부의 이동을 보이고, 6,000 sec부근까지 0.2cm 정도 움직인 후 변위가 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 그 후 지하수의 상승에 대응하여 변위에 증가가 진행되고 동시에 경과와 더불어 변위는 가속도적으로 증가하여 붕괴에 도달하였다.

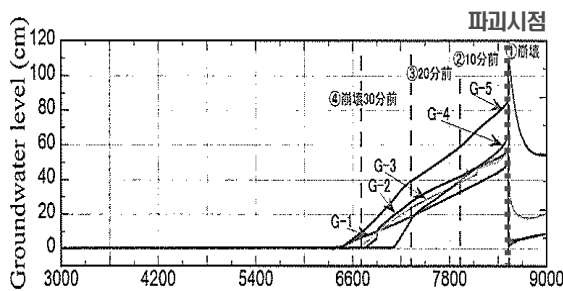


그림 20. 지하수 그래프

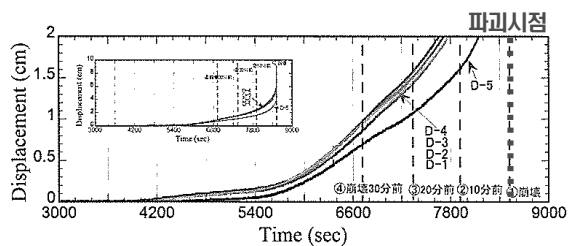


그림 21. 지중변위 길이 그래프

5. 소형모형토조와 대대형모형토조 비교분석 결과

5.1 토압 비교 결과

그림 22는 소형모형토조와 대대형모형토조 토압 비교를 나타내며, 계측된 토압의 평균값으로 비교해 본 결과 강우가 지속됨에 따라 토압이 점차적으로 증가함을 확인할 수 있었다. 소형모형토조의 실험 시작 시 토고에 의한 8,000 Pa에서 점차적으로 토압이 증가하다가 일정하게 평균 12,000 Pa에서 일정하게 유지되고 대대형모형토조 또한 17,000 Pa에서 평균 18,000 Pa에서 일정하게 유지됨을 확인하였다.

5.2 함수비 비교 결과

그림 23은 소형모형토조와 대대형모형토조의 평균함수비를 나타낸 것으로 비교 결과 소형모형토조와 대대형모형토조는 강우침투와 더불어 포화도가 상승하지만 완전한 포화(100%)는 되지 않고 각각 65%, 70%로 유지하였다.

5.3 간극수압 비교 결과

그림 24는 소형모형토조 간극수압과 대대형모형토조 지하

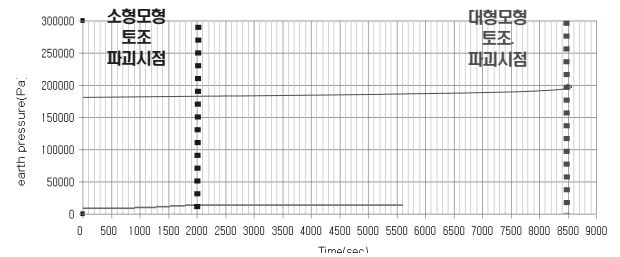


그림 22. 토압 비교 그래프

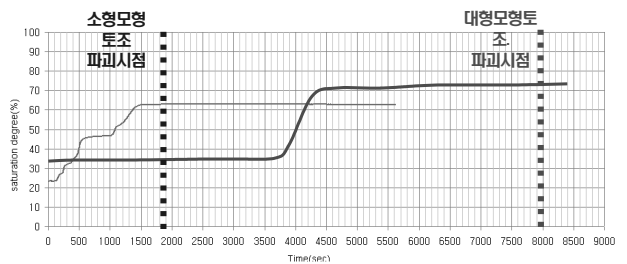


그림 23. 함수비 비교 그래프

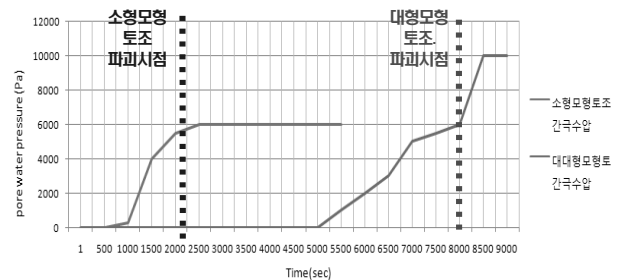


그림 24. 소형모형토조 간극수압과 대대형모형토조 지하수위 비교 그래프

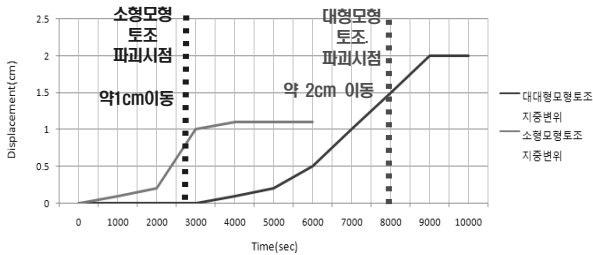


그림 25. 지중변위 비교 그래프

수위 비교를 나타내며, 강우가 지속됨으로 인해 일정시간 변화가 없다가 파괴가 발생하기 직전까지 단시간 급격한 증가를 보인다. 소형모형토조는 파괴시점 2,000 sec에서 약 6,000 Pa로 수렴하며, 대대형모형토조는 붕괴시점 8,500 sec에서 약 10,000 Pa로 수렴함을 확인하였다.

5.4 지중변위 비교 결과

그림 25는 지중변위 비교 그래프로 소형모형토조와 대대형모형토조는 모두 지하수의 상승에 대응해서 지중변위의 증가가 진행되었고, 동시에 경과와 함께 변위는 가속도적으로 증가하여 붕괴에 도달하였다. 소형모형토조는 파괴가 되기 전까지 전 변위 약 10mm를 나타내었고 대대형모형토조는 파괴가 되기 전까지 전구간 20mm의 붕괴 전 움직임을 보였다.

6. 결 론

소형모형토조와 대대형모형토조 비교를 통한 산사태 메커니즘 특성에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 소형모형토조는 대대형모형토조의 약 1/3 크기로서, 강우강도 100mm/hr와 흙 시료가 같은 조건에서 붕괴시간을 비교하여 보면 소형모형토조는 33분에 붕괴되었고 대대형모형토조는 140분에 붕괴가 발생하였다. 대대형모형토조와 소형모형토조 모두 붕괴 전에 상부 균열 후 붕괴에 도달하는 형태를 보였다.
- (2) 소형모형토조와 대대형모형토조는 강우침투와 더불어 포화도가 상승하지만, 완전한 포화(100%)는 되지 않고 증가하다 붕괴에 도달한 후에도 각각 65%, 70%로 유지하는 것으로 나타났다.
- (3) 강우강도에 따른 토압의 변화량은 소형모형토조 당초 토고에 의한 8,000 Pa에서 점차적으로 토압이 증가하다가 일정하게 평균 12,000 Pa에서 일정하게 유지되고, 대대형모형토조 또한 17,000 Pa에서 평균 18,000 Pa에서 일정하게 유지됨을 확인하였다. 강우 침투에 따라 토압이 점차적으로 증가되며 급격한 변화는 사면 붕괴 당시에 관찰되었다.

- (4) 소형모형토조 간극수압은 실험시작 후 파괴시점 2,000 sec에서 약 6,000 Pa로 수렴하며, 대대형모형토조는 붕괴시점 8,500 sec에서 약 10,000 Pa로 수렴함을 확인하였다. 대대형모형토조 지하수위 비교결과 강우가 지속됨으로 인해 일정시간 변화가 없으나 파괴가 발생하기 직전까지 급격한 증가를 보이는 것으로 나타났다. 이는 지하수의 급격한 증가가 사면 붕괴에 중요한 인자인 것으로 판단된다.
- (5) 소형모형토조와 대대형모형토조는 모두 지하수의 상승에 대응하여 지중변위의 증가가 진행되었고, 동시에 경과와 더불어 변위는 가속도적으로 증가하여 붕괴에 도달하였다. 소형모형토조는 파괴가 되기 전까지 전변위 약 10mm의 이동을 나타내었고, 대대형모형토조는 파괴가 되기 전까지 전구간 20mm의 붕괴 전 움직임을 보였다.
- (6) 강우강도, 강우지속시간, 비탈면 경사, 지반조건 등의 다양한 인자를 적용한 추가적인 모형실험을 실시한다면 산사태 붕괴예측을 위한 자료로서의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. 사공명, 오춘배, 이성진, 유준희, 천병식(2007), 경제조건에 따른 토사면의 활동 특성, 2007 한국지반공학회 사면안정 학술 발표대회, 한국지반공학회, pp. 173~179.
 2. 이승호, 황영철(2004), 집중호우시 군사시설물이 설치된 사면의 안정성 평가에 관한 연구, 한국지반환경공학회 논문집, Vol. 5, No. 4, pp. 5~97.
 3. 이인모, 김영욱, 조우성, 성상규(2003), 풍화토 사면에서 강우로 인한 간극수압 변화에 대한 실험연구, 한국지반공학회 논문집, Vol. 19, No. 1, pp. 41~49.
 4. 채병근, 서용석, 송영석, 조용찬, 김원영(2006), 인공강우장치를 이용한 산사태 발생 및 사태물질 확산특성 모형실험, 2006년 학술발표회논문집, 대한지질공학회, pp. 69~78.
 5. Ikeya, H.(1989), Debris Flow and its Countermeasures in Japan, Bull. of the IAEG, Vol. 40, No. 1, pp. 15~33.
 6. Moriwaki, H., Inokuchi, T, Hattani, T., Sassa, K., Ochiai, H., Wang, G.(2004), Failure Processes in a Full-scale Landslide Experiment using a Rainfall Simulator, Landslides, Springer-Verlag, Vol. 1, No. 4, pp. 277~288.
 7. Okura, Y. H. Kitahara, H. Ochiai, T. Sammori, T. Kawanami (2002), Landslide Fluidization Process by Flume Experiment, Engineering Geology, Vol. 66, No. 1, pp. 65~78.
- (접수일: 2010. 9. 14 심사일: 2011. 3. 17 심사완료일: 2011. 7. 5)