

강우시 토사사면내의 간극수압변화에 관한 실험적 고찰

A Experimental Study on the Variation of the Pore-water Pressure in the Soil Slope during the Rainfall

정의중¹⁾ · 김홍택²⁾ · 장현익³⁾ · 김경석⁴⁾ · 강인규[†]

Jeung, Eujung · Kim, Hongtaek · Jang, Hyunik · Kim, Kyungsuk · Kang, Inkyu

ABSTRACT : In this research, model tests have been performed for researching the seepage characteristics in the finite soil slope during the rainfall using a manufactured rainfall simulator. On the basis of the results, it has been analyzed how to change the seepage characteristics due to the duration time of rainfall. We are found that the pore-water pressure was gradually increased as increasing the duration time of rainfall. Specially, at the beginning of rainfall, the pore-water pressure in the middle surface of slope was measured larger than any point. As increasing the duration time of rainfall, the pore-water pressure at the inner part of slope was increased greatly at the collapse due to infiltrating the pore-water within the slope. In the research, it was not easy to get various test results because measuring instruments are high sensitivity and difficult to handle. For the future, the model test results are needed for the various slope angle.

Keywords : Soil slope, Pore-water pressure, Model test

요 지 : 본 연구는 강우시 토사사면의 침투거동 특성을 규명하기 위한 기초연구로서 강우재현장치를 활용하여 실내모형실험을 실시하여 유한사면내의 간극수압의 변화를 측정하였으며, 이를 바탕으로 강우지속시간에 따른 강우시 유한사면내의 침투거동 특성을 분석하였다. 분석결과 강우가 지속적으로 발생됨에 따라 사면내의 간극수압은 점차 증가하는 것을 알 수 있으며, 강우초기에는 사면 중앙부 표면에서 간극수압이 크고 강우가 점차 지속됨에 따라 사면내로 강우가 침투하여 사면붕괴 직전에는 사면내부의 간극수압이 크게 증가되는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 실시한 실내실험은 계측기의 민감도가 높고 조작이 용이하지 못하여 많은 실험결과를 얻지 못하였으며, 향후 다양한 사면경사에서의 유한사면에 대한 강우시 침투거동 특성에 대해 실험적 연구가 필요하다고 생각된다.

주요어 : 토사사면, 간극수압, 모형실험

1. 서 론

1970년대부터 시작된 산업화의 영향으로 우리나라는 눈부신 경제성장과 급격한 인구증가가 발생하였으며, 이로 인해 도로, 철도 등의 사회간접시설의 확대가 지속적으로 요구되고 있는 실정이다. 우리나라는 국토의 70% 이상이 산지로 이루어져 있어 도로, 철도 등의 사회 간접시설 건설시 산지 절취로 인한 비탈면이 필연적으로 발생하며, 지반관련 공학자들은 이러한 비탈면의 안정성 및 경제성 확보를 위해 끊임없는 노력을 해오고 있다. 하지만 이러한 노력에도 불구하고 비탈면의 붕괴는 해마다 발생되고 있으며, 이로 인한 인명피해와 경제적 손실은 무시할 수 없는 실정이다. 우리나라에서 발생하는 비탈면 붕괴는 전체

의 75%가 강우가 집중되는 7월~9월 사이에 발생하는 것으로 보고되고 있는 것으로 보아 비탈면의 안정성을 저해하는 요소 중 중요한 것 중에 하나가 강우의 영향인 것으로 생각된다. 또한, 근래 들어 이상기온 등의 영향으로 인해 기록적인 강수량의 발생 빈도가 빈번히 발생되고 있는 추세이므로 강우시 비탈면 안정성 확보의 중요성은 점차 강조되고 있는 실정이다. 그러나 아직까지 이러한 강우시의 사면내 거동 특성에 대하여 수치모델링에 의한 평가방법은 어느 정도 제안되었지만, 실제 사면에서 이러한 수치모델에 의한 결과가 발생하는지에 대한 검증은 수행 사례가 많지 않다. 따라서 본 연구는 다양한 강우시험을 수행할 수 있는 강우모형시험장치를 이용하여 강우시 사면내에 발생하는 간극수압의 변화와 이로 인한 파괴양상을 분

1) 정회원, 홍익대학교 토목공학과 석사과정

2) 정회원, 홍익대학교 토목공학과 교수

3) 비회원, 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원

4) 비회원, 한국도로공사 도로교통연구원 연구원

† 정회원, (주)브니엘컨설턴트 대표이사(E-mail : kang-ik@vniel.co.kr)

석하고자 하였으며, 향후 사면안정 검토시 강우에 의한 요인을 분석하는데 도움을 주고자 한다. 본 연구는 국내·외에서 연구 발표된 강우시 사면의 거동특성 평가와 관련된 모형실험 사례를 조사하고, 모형토조 내에서 실제 강우시 사면의 거동을 재현할 수 있도록 토조, 진동다짐대 및 강우 재현장치 등을 자체 설계하여 제작하였다(김홍택 등, 2006).

강우시 비탈면 안정성 평가를 위해 수행된 국내 연구는 김상규 등(1991)이 모형비탈면과 강우재현장치를 이용한 시험을 통해 습윤전선의 진행과정과 지표유출의 영향 및 강우지속시간에 따른 간극수압 변화를 분석하고 이들이 비탈면의 안정성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였으며, 조성은 등(2000a, 2000b)은 시간 의존적 침투-응력 해석기법을 강우에 의한 토사 비탈면의 안정해석을 수행하여 강우시 비탈면 안정성 평가기법을 개발하여 제안하였다. 또한, 재현기간에 따른 강우강도와 지속시간을 고려하여 강우시 비탈면의 표면파괴 가능성 평가에 대한 연구를 수행하였다. 김홍택 등(2001)은 모형시험을 통해 강우시 비탈면의 간극수압 변화에 대한 연구를 수행하였으며, 강우시 비탈면 안정성 평가에 간극수압비를 도입하여 강우강도에 따른 간극수압비 범위를 제시하였다. 김재홍(2006)은 강우로 인한 비탈면의 포화깊이가 비탈면의 안정성에 미치는 영향을 분석하고, 포화깊이 추정식과 침투류 해석결과를 비교하여 추정식의 적용성을 파악하였으며, 불포화 특성을 고려한 비탈면 안정해석을 통해 안정성 검토시 지반의 불포화 특성을 고려해야 함을 지적하였다. 류지협(2003)은 강우시 침투로 인한 불포화 비탈면의 파괴메카니즘을 규명하기 위하여 계측을 통해 강우시 비탈면의 모관흡수력과 지하수위의 변화를 관찰하였으며, 수치해석을 수행하여 계측결과와 비교하였다.

국외 연구로는 榎明潔(Enoki Meiketsu, 1999)가 강우로 인해 발생된 비탈면의 붕괴규모를 고려하여 토조를 제작한 후 인공강우를 통해 강우시 비탈면내의 침투거동에 대한 실험을 실시하고, 이를 이용하여 강우시 비탈면 붕괴의 이론모형을 제시하였으며, Wang과 Sassa(2001)는 강우시 비탈면에 발생하는 토석류가 비탈면에 유발된 과잉간극수압에 의한 액상화가 원인이라는 점에 착안하여 인공강우를 이용한 모형시험으로 간극비와 입도분포에 따른 간극수압형성 및 토석류 발생유형에 대한 연구를 수행하였다.

2. 모형토조실험

2.1 계측기

2.1.1 함수량계

본 연구에서 사용한 함수량계는 물과 흙의 큰 유전율 차를

이용하여 토체내의 함수량을 실시간으로 측정하는 TDR(Time-Domain Reflectometer) 방식의 계측장치로 전기적 불연속성을 지닌 물체로부터 전자기파(electromagnetic wave)의 이동 시간(travel time)을 측정하여 이를 실측한 함수비와의 상관관계로부터 토체내의 함수비를 간접적으로 측정하는 계측장치이다. 그림 1은 본 연구에서 사용한 TDR방식의 함수량계로 Campbell사의 CS616을 사용하였으며, 이 계측장치는 미국의 시험도로 연구 등에 많이 사용되고 있는 계측장치이다. CS616은 크게 회로기판(circuit board)과 여기에 연결되어 있는 두 개의 스테인레스강 재질의 로드(rod)로 구성되어 있다. 로드의 길이는 300mm, 지름은 3.2mm, 로드간 간격은 32mm이고 회로기판은 가로 63mm, 세로 85mm, 높이 18mm인 케이스 내에 회로가 연결되어 있다. 토조의 방수를 위해 그림 1과 같이 방수 처리된 접속구에 함수량계를 설치하여 사용하였다.

2.2.2 간극수압계

간극수압계(tensiometer)는 흙 속의 부(-) 간극수압(negative pore-water pressure)을 측정하는 장치로 그림 2와 같이 높은 공기 함입값을 갖는 가느다란 튜브로 연결된 다공질 세라믹 컵으로 구성되어 있다. 흙 속으로 삽입한 간극수압계 관내에 있는 물을 흙이 빨아들임으로써 다공질 세라믹 컵 내에서 평형을 이루어 부의 간극수압을 측정한다. 일반적으로 간극 공기압은 대기압 상태로 간주되기 때문에 측정값은 수치적으로 모관흡수력(matric suction)이 된다. 만약 간극 공기압이 대기압보다 크면 간극수압계 측정값에 주변의 간극

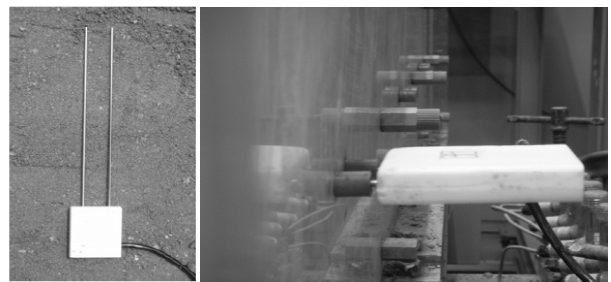


그림 1. 함수량계 및 설치전경

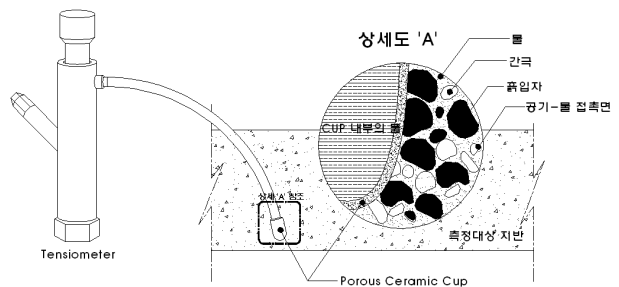


그림 2. 간극수압계 측정원리

공기압을 더해야 한다. 결국 측정된 모관흡수력은 세라믹 컵의 공기함입값(air-entry-value)을 초과하지 못한다.

본 연구에서 사용한 간극수압계는 Soil Moisture사의 Small-tip Tensiometer(2100F)로 계측값이 자동으로 기록되며 일반 간극수압계와는 달리 그림 3과 같이 세라믹이 실린 더 끝이 아닌 작은 튜브의 끝단에 장착되어 있는 small-tip 형태로 현장계측보다는 실내실험에 보다 용이하게 사용할 수 있도록 한 계측장치이다. 간극수압계는 내부에서 물의 공동현상이 일어날 수 있기 때문에 측정할 수 있는 모관흡수력 범위는 최대 100kPa로 비교적 낮다. 또한 튜브는 부식되지 않고 열전도율이 낮은 플라스틱으로 만들어졌으며 물 저장용기에서 튜브와 세라믹으로 물이 공급되는 체계로 되어 있다.

간극수압계의 설치 이전에 계측기와 세라믹의 포화가 먼저 이루어져야 하고 진공펌프를 이용하여 계측기 내의 공기를 제거하여야 한다. 자료수집기(data-logger)에 연결하여 간극수압의 변화를 계측한 결과, 실시간으로 계측이 가능하고 간극수압계 설치로 인해 토조에서 물이 새지 않도록 함수량계와 동일하게 방수 처리된 접속구에 설치하였다.

2.2 실험방법 및 모형지반의 특성

본 연구에서는 강우시 유한사면의 침투거동을 살펴보기 위해 다음과 같은 순서로 실험이 진행되었다.

(1) 토조에 모형지반 조성 및 계측기 설치

불투수층을 설치하기 위하여 시료 바닥에 비닐을 설치한 후 테이프를 테이핑을 하여 시료와 물의 유출을 최대한 억제하였다. 시료는 토조에 설치하기 전 건조조에서 24시간 건조시켰으며, 24시간 노건조 시료에 물을 적당량 섞어

함수비 10%정도에 맞추고 토조에 넣어 다짐을 실시하였다. 모형지반은 총 5층으로 나누어 토조에 평행하게 단계별로 포설하여 조성하였으며, 다짐도를 조절하기 위해 시료의 무게를 잰 후 진동다짐대와 다짐판의 크기가 200mm×200mm인 램머로 다짐을 실시하였다. 다짐도는 95% 이상을 목표로 하였으며, 함수량계와 간극수압계 및 토압계는 모형지반의 조성 중에 미리 정해진 각각의 위치에 설치하여 모형지반과의 밀착성을 좋게 하였다.

(2) 사면경사면 조성 및 초기값 설정

소정의 경사에 이르도록 제작된 스티로폼을 이용하여 사면경사면을 조성한 후, 강우를 주지 않고 실온에서 24시간 이상 장시간 방치한 상태에서 각각의 계측값이 더 이상 변화되지 않는 상태에서 초기값을 설정하였다.

(3) 강우재현

유량계를 조정하여 소정의 강우강도로 원하는 지속시간 동안 인공강우재현장치를 이용하여 강우를 재현하였다. 인공강우는 선행강우강도 20mm/hr.을 시작으로 하여 24시간 단위로 강우강도를 2배씩 증가시키면서 실험을 실시하였으며, 계측기는 최대한 사면의 경사면 부근 가까이 설치하였다. 사면의 계측기 설치위치는 그림 4와 같다. 각 계측기간의 간격은 200mm 이다.

(4) 실험종료

사면이 파괴가 일어날 때 까지 소정의 강우를 재현시키면서 사면내의 거동을 계측하였다.

본 연구의 실험에 사용한 시료는 강원도 인제군 두촌면에서 채취한 화강풍화토를 사용하였으며 이는 2005년 6월

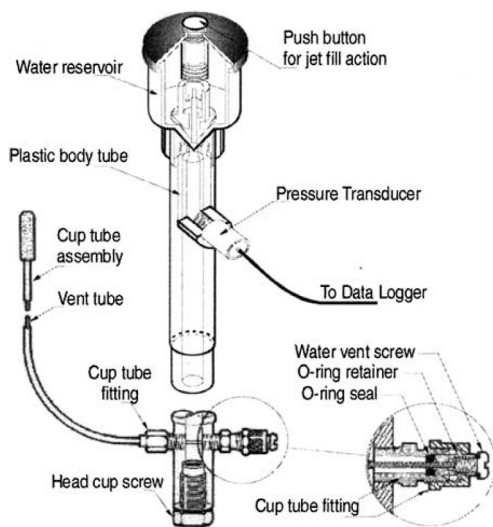
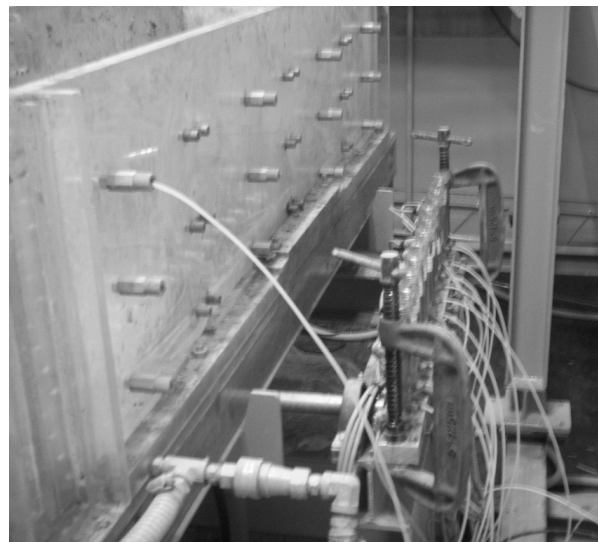


그림 3. 간극수압계(tensiometer)와 설치전경



집중호우로 인해 사면붕괴가 발생한 현장 지반이다. 흙의 물리적 특성을 파악하기 위해 입도분석, 비중시험, 다짐시험 등을 실시하였으며, 통일분류상으로는 SW이나 점토성분의 함유로 인해 투수성이 적은 상태여서 변수위 투수시험을 실시하여 포화투수계수를 구하였다. 대상시료의 물성을 정리하면 표 1과 같다.

3. 실험결과

3.1 시간에 따른 함수비 변화

초기 24시간 강우시에는 무한사면의 경우(이상경(2006), 최경엽(2007))와 마찬가지로 깊이에 따라 체적함수비의 상승속도가 다른 것을 알 수 있다. 체적함수비가 어느 정도 정상침투상태에 도달한 후에는 강우강도가 바뀌는 시점에서만 약간의 상승이 일어나고 변화가 없음을 알 수 있었다. 이는 체적함수비가 정상침투상태에 도달하여 강우강도가 증가하여도 체적함수비가 증가하지 않은 것으로 판단된다. 또한 모형사면 내에 설치된 함수량계로부터 측정된 체적함수비의 상승시점을 살펴보면, 지표면 쪽에 설치된 함수량계에서 측정한 체적함수비의 상승시점이 빠른 것을 알 수 있었다. 이는 강우초기에 사면의 표면부터 포화가 진행되기 때문으로 판단된다.

3.2 시간에 따른 모관흡수력 변화

시간에 따른 모관흡수력은 부(-)에서 양(+)으로 상승한 이후 즉 지반이 포화된 이후에는 양의 간극수압을 나타내었다. 지반이 포화된 이후 시간에 따른 간극수압의 변화를 살펴보기 위해 양의 간극수압을 나타내는 구간을 회귀 분석하여 시간에 따른 토조의 간극수압을 도시하면 그림 6과 같다. 그림 6에서 알 수 있듯이 강우가 지속적으로 발생됨에 따라 사면내의 간극수압은 점차 증가하는 것을 알 수 있으며, 강우초기에는 사면 중앙부 표면에서 간극수압이 크고 강우가 점차 지속됨에 따라 사면내로 강우가 침투하여 사면붕괴 직전에는 사면내부의 간극수압이 크게 증가되는 것을 알 수 있다. 또한 사면붕괴가 발생한 후 사면 전경은 그림 7과 같다.

4. 수치해석

4.1 수치해석 개요

본 연구에서는 강우강도와 지속시간 변화에 따른 불포화 유한사면내의 간극수압의 변화를 관찰하고자 수치해석을 실시하였다. 해석에 사용된 지반 물성치는 모형실험에 사용된 시료의 물성치를 적용하였으며, 불포화 특성인 모

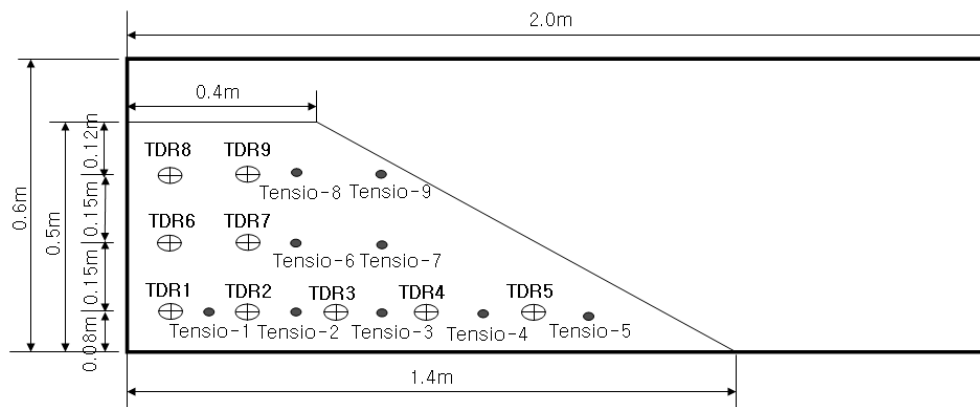
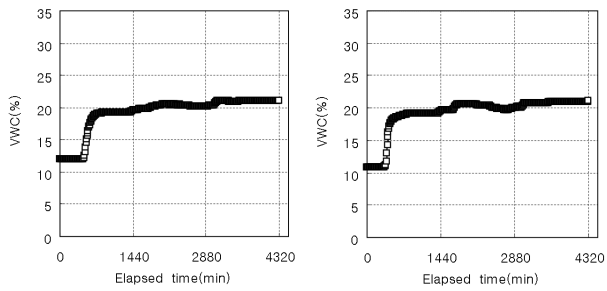


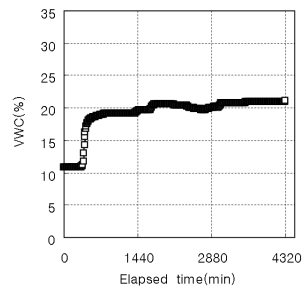
그림 4. 계측기 위치

표 1. 대상 시료의 물성시험 결과

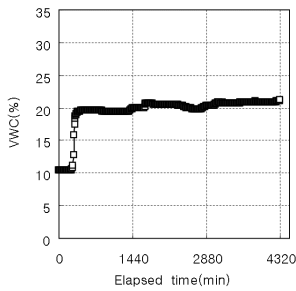
비중	2.68	No. 200체 통과율(%)	7.00
최대 건조단위 중량(tf/m ³)	1.9	10% 통과입경(mm)	0.20
최적 함수비(%)	11.8	30% 통과입경(mm)	0.90
액성한계, 소성한계	N.P	60% 통과입경(mm)	2.00
투수계수(m/sec)	1.69×10^{-7}	Clay(%)	2.19
균등계수(C_u)	10	Silt(%)	2.74
곡률계수(C_c)	2.03	Sand(%)	87.76
USCS Texture	SW	USDA Texture	Sand



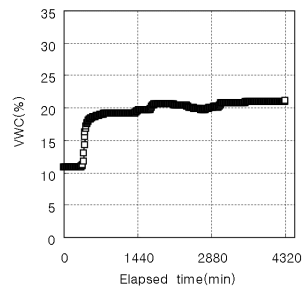
(a) TDR-1



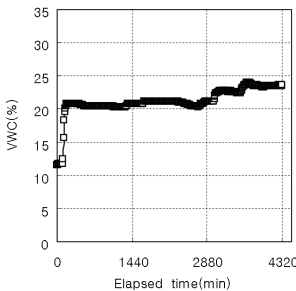
(b) TDR-2



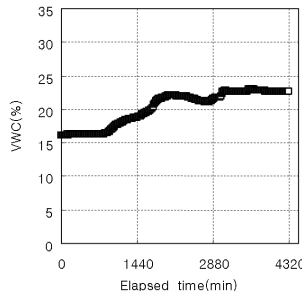
(c) TDR-3



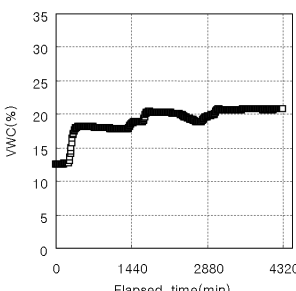
(d) TDR-4



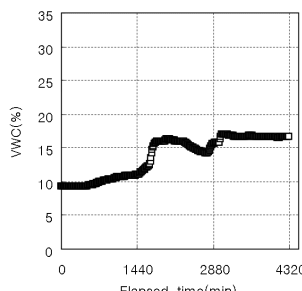
(e) TDR-5



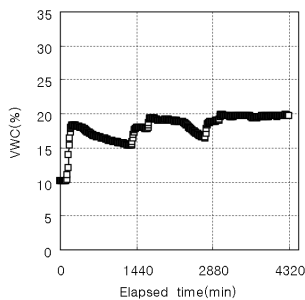
(f) TDR-6



(g) TDR-7

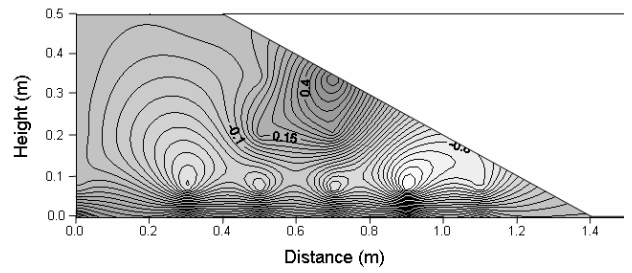


(h) TDR-8

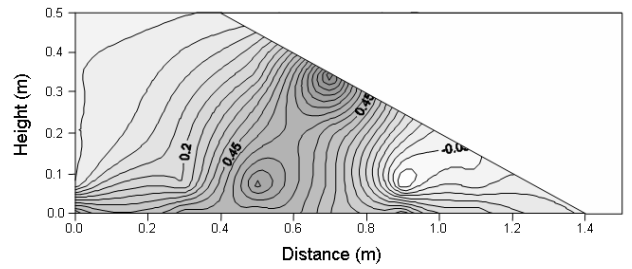


(i) TDR-9

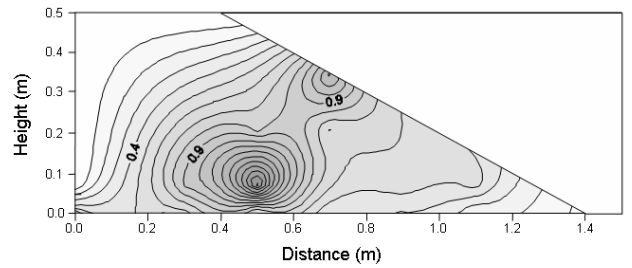
그림 5. 시간에 따른 함수비 변화



(a) 1440분 경과시점



(b) 2880분 경과시점



(c) 4320분 경과시점

그림 6. 시간에 따른 토조의 간극수압 분포도(단위: kPa)

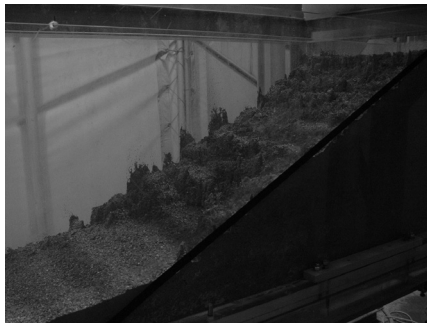
관흡수력의 변화에 따른 체적함수비의 변화값은 그림 8의 흡수분 함수특성 실험(SWCC) 결과를 이용하였으며, 모관 흡수력의 변화에 따른 투수계수의 값은 그림 9의 값을 이용하였다. 수치해석은 불포화 침투해석이 가능한 SEEP/W 프로그램을 이용하였다. 해석대상 불포화사면은 모형실험과 같은 규격으로 요소망을 구성하였으며, 강우의 재현은 경계함수(boundary function)를 이용하여 모사하였다.

4.2 경계조건

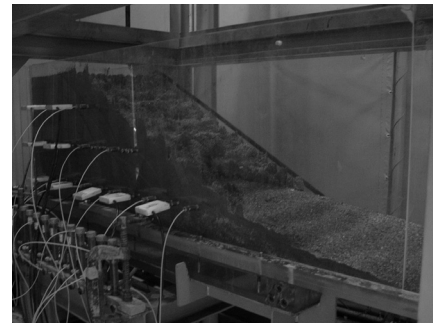
사면의 표면은 초기에 불포화 상태로 존재하는 경우가 많으므로 투수계수가 매우 작은 상태이며 따라서 초기에는 침투할 수 있는 물의 양이 매우 작은 상태이다. 그러나 강우가 지속될수록 지반의 포화도가 증가하게 되고 투수계수가 커지며 침투하는 물의 양도 많아지게 된다. 이러한 강우의 침투특성을 모델하기 위해 사면 표면의 경계조건으로는 다음의 방법을 적용할 수 있다. 먼저 강우강도가 지반으로 침투할 수 있는 물의 양보다 많은 경우에는 강우



(a) 정면



(b) 우측 측면



(c) 좌측 측면

그림 7. 사면 붕괴후 전경사진

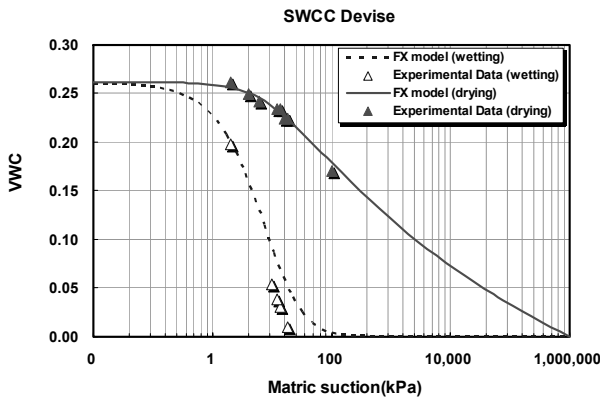


그림 8. SWCC 시험결과를 이용한 함수특성곡선

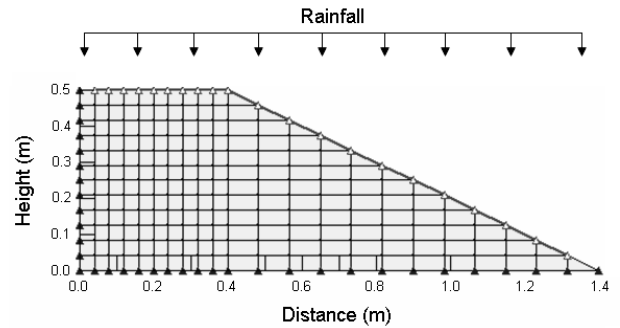


그림 10. 해석에 사용된 격자요소망과 경계요소망

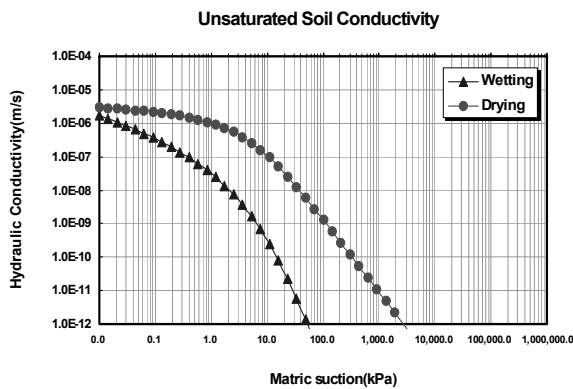
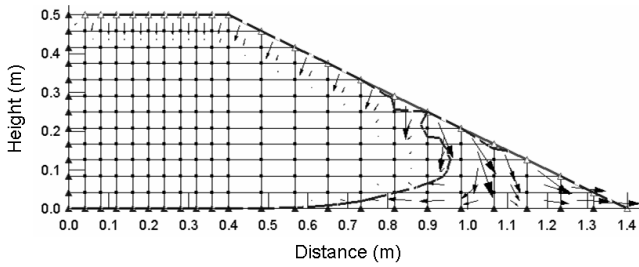
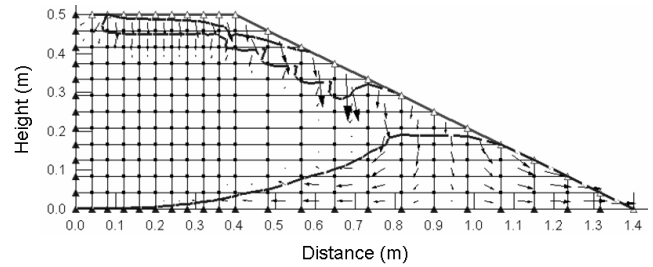


그림 9. 모관흡수력의 변화에 따른 투수계수

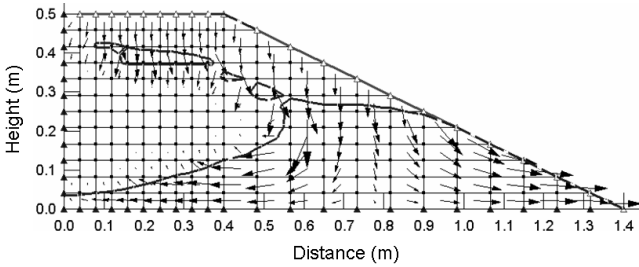
의 일부만 침투하고 나머지는 지표를 통하여 유출된다. 즉, 강우강도가 아무리 크더라도 지반내로 침투되는 수량은 일정한 한계가 있다는 것이다. 일반적으로 강우강도가 증가할수록 침윤전선의 진행속도는 빨라지나 한계 강우강도보다 큰 강우에서는 강우의 강도에 관계없이 침투양상이 일정하게 된다. 김상규 등(1991)에 의하면 지반내로 침투되는 한계강우강도는 그 지반의 포화 투수계수의 4~5배이나, 대체로 강우강도가 포화투수계수와 차수(order)가 같아지는 경우 한계강우강도로 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 포화 투수계수와 차수가 같아지는 강우강도를 한계 강우강도로 정하여 모델링 하였으며 모형시험의 경우 사



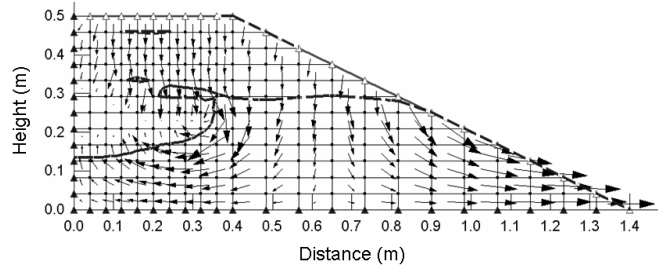
(a) 4시간 경과시점



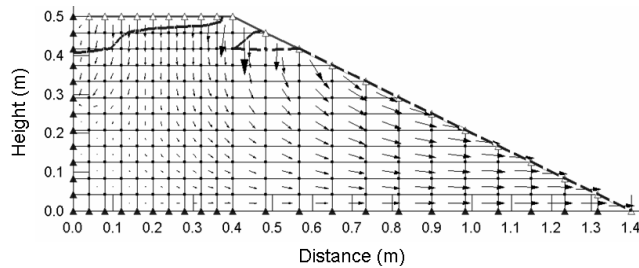
(b) 8시간 경과시점



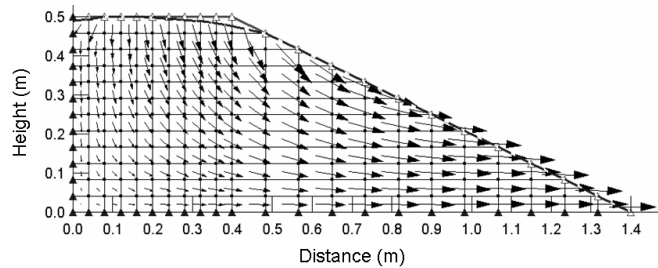
(c) 12시간 경과시점



(d) 16시간 경과시점



(e) 20시간 경과시점



(f) 24시간 경과시점

그림 11. 시간에 따른 침투류 해석결과

면의 좌측면과 바닥면은 불투수층으로 하여 실험을 하였으므로 수치해석에서도 사면의 좌측면과 바닥면은 불투수 경계를 주었다. 강우의 재현은 사면 경계부에 유량이 일정하게 유입되는 것으로 하였으며 해석은 시간에 따른 간극수압의 변화를 살펴보고자 transient 해석을 수행하였다.

4.3 수치해석 결과

실험과 동일한 강우조건에서 시간에 따른 침투류 해석 결과를 정리하여 도시하면 그림 11과 같다. 그림 11에서 알 수 있듯이 사면저부와 사면 표면에서부터 포화가 시작되어 사면 중심으로 포화가 진행되는 것을 알 수 있으며 이는 실험결과와도 유사한 경향임을 알 수 있다. 또한 강우강도(20mm/hr)로 24시간 동안 강우가 지속된 시점에서 지하수위가 지표까지 형성되었으며, 실험결과에서도 24시간 강우가 지속된 이후부터 계측기의 측정값이 일정값에 수렴되는 양상을 나타내었다.

5. 결론 및 제언

본 연구는 강우시 토사사면의 침투거동 특성을 구명하기 위한 기초연구로서 강우재현장치를 활용하여 실내모형 실험을 실시하여 유한사면내의 간극수압의 변화를 측정하여 분석하였으며, 이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 실내모형시험의 결과를 보면 강우가 지속적으로 발생됨에 따라 사면내의 간극수압은 점차 증가하는 것을 알 수 있었으며, 강우초기에는 사면 중앙부 표면에서 간극수압이 크고 강우가 점차 지속됨에 따라 사면내로 강우가 침투하여 사면붕괴 직전에는 사면내부의 간극수압이 크게 증가되는 것을 알 수 있었다.
- (2) 시료의 체적함수비(volume water content)는 일정한 강우강도(20mm/hr)로 24시간 동안 강우가 지속될 경우 일정한 값에 수렴하는 것을 알 수 있었다. 즉 시료가 일정한 체적함수비(volume water content)에 도달한 이후에는 강우강도가 증가하고 지속시간이 늘어나더라도

체적함수비에는 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다.

- (3) 모형사면 내에 설치된 함수량계로부터 측정된 체적함수비의 상승시점을 살펴보면, 지표면 쪽에 설치된 함수량계에서 측정한 체적함수비의 상승시점이 빠른 것을 알 수 있었으며, 이는 강우초기에 간극수압의 최대값이 사면의 표토 부근에 발생하는 점과 관계가 있을 것으로 생각된다.
- (4) 실험과 동일한 강우조건에서 시간에 따른 침투류 해석 결과, 사면 저부와 사면 표면에서부터 포화가 시작되어 사면 중심으로 포화가 진행되는 것을 알 수 있으며 이는 실험결과와도 유사한 경향임을 알 수 있다. 또한 강우강도(20mm/hr)로 24시간 동안 강우가 지속된 시점에서 지하수위가 지표까지 형성되었으며, 실험결과에서도 24시간 강우가 지속된 이후부터 계측기의 측정값이 일정값에 수렴되는 양상을 나타내었다.
- (5) 본 연구에서 실시한 실내실험은 계측기의 민감도가 높고 조작성이 용이하지 못하여 많은 실험결과를 얻지 못하였으며, 향후 다양한 사면경사에서의 유한사면에 대한 강우시 침투거동 특성에 대해 실험적 연구가 필요하다고 생각된다.

참 고 문 헌

1. 김상규, 김영목(1991), 강우로 인한 사면 불안정, *대한토질공학회지*, 제7권, 제1호, pp. 53-64.
2. 김재홍 (2002), *강우시 불포화 풍화토의 습윤에 의한 무한사면 안정해석*, 연세대학교 대학원, 석사학위논문, 90 pp.
3. 김홍택, 백승철, 강인규, 이혁진, 유찬호 (2006), *모형시험을 통한 강우시 사면거동특성평가 연구*, 한국도로공사 연구보고서, 139 pp.
4. 김홍택, 유한규, 강인규, 이혁진 (2001), 실내모형실험을 통한 강우시 사면내 간극수압의 변화 탐구, *2001 봄 학술발표회 논문집*, 한국지반공학회, pp. 199-206.
5. 류지협 (2003), 모관흡수력을 고려한 사면의 안정성 평가, *대한토목학회논문집*, 제23권, 제4호, pp. 195-201.
6. 이상경 (2006), *불포화 무한사면의 침투거동에 관한 연구*, 홍익대학교 대학원, 박사학위논문, 160 pp.
7. 조성은, 이승래 (2000a), 강우특성을 고려한 사면의 표면파괴에 대한 안정성 평가, *한국지반공학회논문집*, 제16권, 제5호, pp. 107-116.
8. 조성은, 이승래 (2000b), 강우침투에 따른 불포화 토사사면의 안정해석, *한국지반공학회논문집*, 제16권, 제1호, pp. 51-63.
9. 최경엽 (2007), *실내모형실험을 통한 불포화 무한사면의 거동 특성에 관한 연구*, 홍익대학교 대학원, 석사학위 논문, 128 pp.
10. 榎明潔 (1999), 降雨時の斜面表層崩壊, *土と基礎*, Vol. 47, No. 5, pp. 17-20.
11. Wang, G. and Sassa, K. (2001), Factors affecting rainfall-induced flowslides in laboratory flume tests, *Geotechnique*, Vol. 51, No. 7, pp. 587-599.

(접수일: 2007. 11. 22 심사일: 2007. 11. 22 심사완료일: 2007. 12. 20)