

## 풍화화강토 사면에서 강우로 인한 모관흡수력 변화에 대한 실험 연구 In-situ Monitoring of Matric Suctions in a Weathered Granite Soil Slope

이인모<sup>1)</sup>, In-Mo Lee, 조우성<sup>2)</sup>, Woo-Sung Cho, 김영욱<sup>3)</sup>, Young-Uk Kim, 성상규<sup>4)</sup>, Sang-Gyu Sung

- 1) 고려대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.
- 2) 고려대학교 토목공학과 석사, Mater of Science, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.
- 3) 명지대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Myoungji Univ.
- 4) 고려대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

**SYNOPSIS** : Rainfall-induced landslides in a weathered granite soil slope have mostly relative shallow slip surfaces above the groundwater table. The pore-water pressure of soil above the groundwater table is usually negative. This negative pore-water pressure(or matric suction) has been found to make a large contribution to the slope stability. Therefore, the variation of in-situ matric suction profiles with time in a soil slope should be understood. In this study, a field measurement program was carried out from June to August, 2001 to monitor in-situ matric suctions and volumetric water contents in a weathered granite soil slope. The influence of climatic conditions on the variation of in-situ matric suctions could be found to decrease rapidly with depth. It could be found that decrement of matric suction induced by precipitation is affected not only by the amount and duration of rainfalls but also by the initial matric suction just prior to rainstorms. The soil-water characteristic from the field monitoring tends toward the wetting path of SWCC obtained from the laboratory test.

**Key words** : matric suction, weathered granite soil slope, field monitoring, rainfalls, SWCC

### 1. 서론

풍화토 사면의 안정문제는 여러 가지 요인에 의해서 야기된다. 계절적 강우가 심한 우리나라와 같은 지역에서는 여름철 집중호우가 풍화토 사면파괴의 주원인인 것으로 알려져 있다. 이와 같은 강우로 인한 풍화토 사면의 파괴는 주로 지하수위 위쪽의 비교적 얇은 부분에서 일어나게 된다. 풍화토 사면에서 지하수위 위쪽의 간극수압은 보통 대기압과 비교해서 음의 값을 갖는 것으로 나타난다. 이와 같은 모관흡수력( $u_a - u_w$ )은 사면의 안정성 확보에 큰 역할을 하는 것으로 밝혀졌다. 투수성이 좋은 풍화토 사면에서의 강우로 인한 얇은 파괴는 지하수위의 상승으로 인한 간극수압의 증가에 기인하는 것으로 보기 어렵다. 강우의 침투로 인해 지하수위 위쪽의 비포화대에서의 모관흡수력이 소멸하여 전단강도가 감소하기 때문인 것으로 알려져 있다. 따라서, 강우로 인한 풍화토 사면의 안정성을 보다 합리적으로 평가하기 위해서는 불포화토 역학을 고려한 모관흡수력의 영향을 반영해야 한다. 이는 강우 및 기후조건의 변화에 따른 지반내 비포화대에서의 모관흡수력의 변화양상에 대한 현장계측의 필요성을 제기한다.

이 연구의 목적은 현장계측을 통해 기후조건의 변화에 따른 불포화 화강풍화토 사면내의 모관흡수력의 변화양상을 모니터링하여 여름철 집중호우와 사면내의 모관흡수력 분포간의 상관관계를 찾아보는 것

이다. 현장계측시에 모관흡수력과 더불어 체적함수비도 함께 모니터링하여 우기시 현장의 실제 흡-수분 특성도 파악하였다. 이와 같은 현장 모니터링은 실제지반의 불포화상태 거동을 이해하고 사면의 안정성을 보다 실제적이고 합리적으로 평가하는데 도움을 줄 것이다.

## 2. 현장 시료의 물리적 특성

현장 교란시료에 대한 체분석 시험결과 200번체 통과량은 2.2%로 통일분류법상 SP로 분류되었다. 기타 기본적인 물성치 실험에 대한 결과는 표 1에 정리하였다. 현장 불교란 시료에 대한 흡-수분 특성곡선은 그림 1과 같이 얻었다.

표 1. 현장 교란시료의 물성치

기본적인 물성	값
비중	2.68
최대 건조단위중량 ( $\text{kN/m}^3$ )	16.6
최적 함수비 (%)	11.3
200번체 통과량 (%)	2.2
균등계수 $C_u$	3.43
곡률계수 $C_c$	1.14
통일분류법	SP

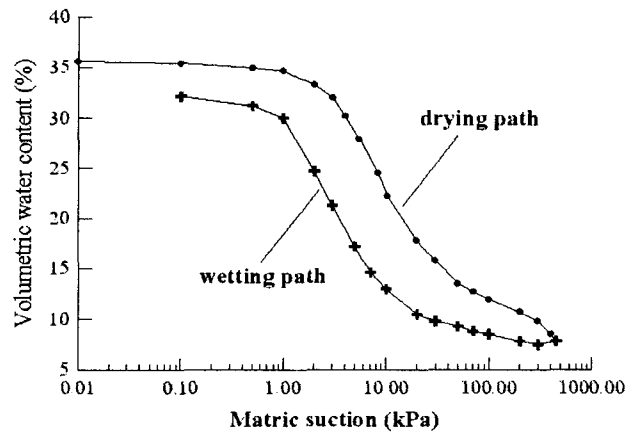


그림 1. 흡-수분 특성곡선

## 3. 현장계측

기후조건의 변화에 따른 불포화 풍화토 사면의 거동특성을 알아보기 위해서 강우량, 모관흡수력 및 체적함수비에 대한 현장 모니터링을 수행하였다. 이러한 현장계측은 강우로 인한 사면파괴가 빈번히 발생하는 집중호우 기간인 2001년 6월에서 8월까지 이루어졌다.

### 3.1 현장조건

실험장소는 고려대학교 의과대학 부근의 잔디로 뒤덮인 사면에 잡았다. 핸드오거 보링을 실시한 결과 평균적으로 사면표면부근 2m 심도까지는 화강풍화토로 이루어져 있으며, 그 아래로는 풍화암이 존재하고 있었다. 우기가 시작되기 전 6월 중순경의 비포화상태의 두께는 약 1.8m정도였다. 이번 현장계측을 위해서 대략 폭 8m에 길이 12m 정도의 영역을 선정하였다. 실험장소로 선정된 영역은 사면의 정상부가 도로와 맞닿아 있어서 사면 정상부에서의 유량 출입은 불가능했으며 대략 30° 정도의 일정한 경사를 갖고 있었다. 사면표면의 비교적 균일한 증발산의 영향이외에 나무뿌리 등으로 인한 불균일한 증발산의 영향을 최소화하기 위해서 사진 1에서 보듯이 나무식생과 떨어진 지점을 실험영역으로 선정하였다.

### 3.2 계측장비의 배치

계측장비의 위치 및 배치를 그림 2에 나타내었다. 사면내의 모관흡수력의 변화를 모니터링하기 위해서 jet-fill tensiometer를 사용하였고 자동계측을 위해 pressure transducer를 장착하였다. 3개를 하나의 그룹으로 사면의 상부쪽(U)과 하부쪽(D)에 2그룹을 설치하여 총 6개의 장력계를 설치하였다. 각 그룹내의 3개의 장력계는 0.5m 간격으로 매설하였으며, 각각 0.4m, 0.8m, 1.2m의 심도로 묻었다. 또한, 사면내의 체적함수비 변화를 모니터링하기 위해서 Campbell사의 CS615 함수비센서를 사용하였다. 사면 상부쪽 U 지점에 0.4m심도와 1.2m 심도에 각각 1개씩 총 2개를 매설하였다. 그리고, 실험 영역의 하단부에

강우계를 설치하여 현장의 강우자료를 자동계측 하였다.

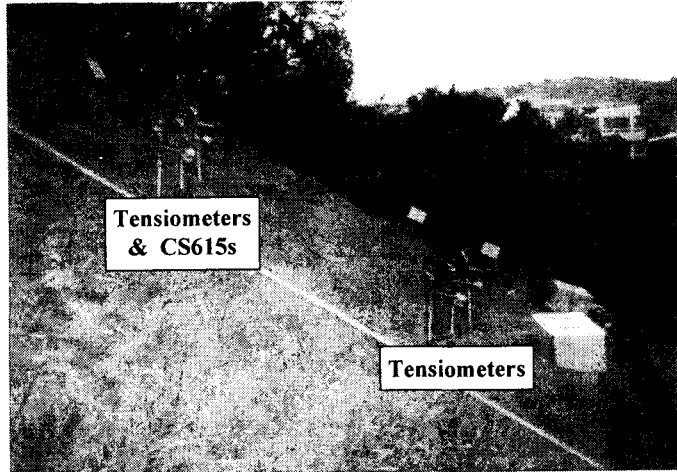


사진 1. 계측장비가 설치된 현장 사면

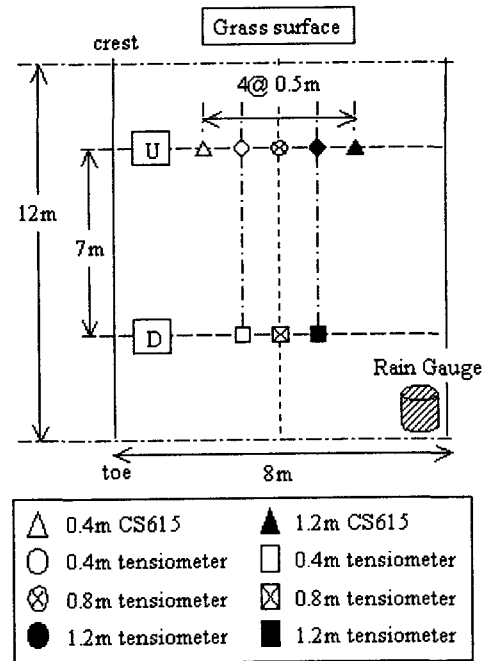


그림 2. 계측장비 배치도

### 3.3 계측장비 및 데이터 수집 시스템

#### 장력계 (jet-fill tensiometer)

Soilmoisture사의 jet-fill tensiometer(장력계)를 사용하여 모관흡수력을 계측하였다. 장력계는 지반 내의 음의 간극수압을 측정하게 된다. 흙과 측정계 사이에 일단 평형이 이루어지면, 장력계 안의 물은 흙의 간극이 갖는 음의 수압과 동일한 값을 나타낸다. 일반적인 자연사면은 표면이 대기와 접하고 있으므로 간극 공기압이 영(zero)이라고 볼 수 있기 때문에 장력계로 측정된 음의 간극수압의 부호를 바꾸고 위치수두에 대한 보정을 하면 바로 모관흡수력을 얻을 수 있다.

장력계는 미리 천공해 놓은 구멍에 삽입하고 주변의 흙과 잘 접촉되도록 흙을 다져 넣어야 한다. 또한 지표면으로부터 유입되는 강우가 장력계 외벽을 타고 직접적으로 세라믹 컵에 도달하지 못하도록 장력계 둘레의 지표면을 씰링(sealing)해야 한다. 사진 2는 이렇게 세팅해 놓은 장력계의 모습이다.

#### 체적함수비 센서 (CS615)

사면내의 체적함수비는 Campbell사의 CS615를 이용하여 계측하였다. CS615는 전자기파에 대한 유전상수의 변화를 이용하여 체적함수비를 간접적으로 알려준다. 두개의 봉은 wave guide로서 작동하고 주변의 물질(흙)은 함수비에 따라 유전상수가 변화하게 된다. CS615는 그 결과물로 직사각형 파를 제시하고, calibration curve를 이용하여 파의 주기를 체적함수비로 변환할 수 있다. 이와 같이 특정 흙에 대한 calibration을 이용하면 정확도는  $\pm 2\%$ 에 달한다.

#### 강우기록장치 (TE525MM)

강우량은 국부적으로도 차이를 나타낼 수 있기 때문에 자동 강우기록장치를 이용하여 현장에서의 강우량을 실측하였다. Campbell사의TE525MM은 0.1mm강우량 단위로 측정이 가능하다. TE525MM은 수

수통 내의 bucket(0.1mm tip)이 한번씩 기울어질 때마다 스위치가 카운트 된다.

### 데이터 수집 시스템

모관흡수력 값을 자동계측하기 위해서 총 6개의 pressure transducer를 jet-fill tensiometer에 모두 장착하였다. 6개의 pressure transducer, 2개의 CS615 및 1개의 TE525MM을 데이터로거인 CR10X에 연결하였다. 계측된 데이터는 일정시간 간격을 두고 데이터로거의 기억장치에 기록된다. RS232 인터페이스를 이용한 통신으로, 로거에 수집된 데이터를 휴대용 컴퓨터로 직접 옮겼다. 로거의 메모리용량을 고려하여 4일에 한번 꼴로 데이터를 내려 받았다. 이러한 데이터 수집 시스템은 사진 3에 나타나 있다.

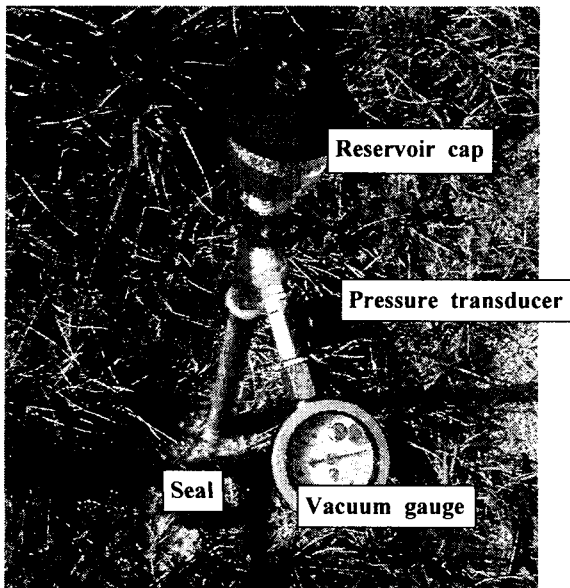


사진 2. 현장 사면에 설치된 장력계

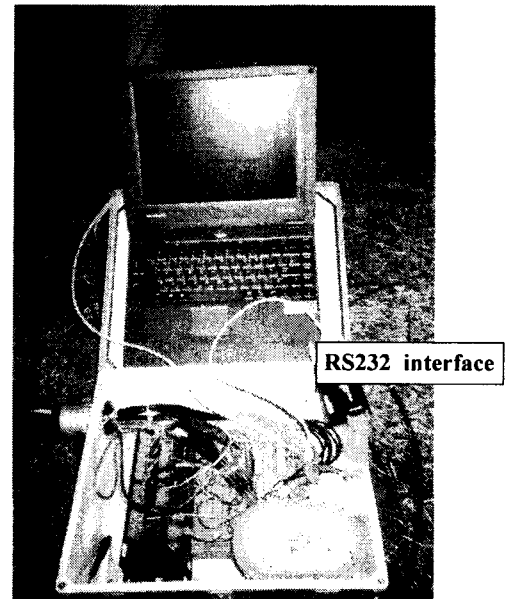


사진 3. 데이터 수집 시스템

### 3.4 현장계측 결과

6월15일부터 8월23일까지의 강우에 따른 현장 모관흡수력의 일별 변화양상을 그림 3에 나타내었다. 그림에 나타낸 모관흡수력 값은 매일 자정(24:00시)의 값을 사용한 것이다. 또한, 위 기간 중 강우량이 많았던 두 기간(7월14일~7월15일, 7월29~8월1일)에 대해서는 시간별 변화양상을 추가로 나타내었다.

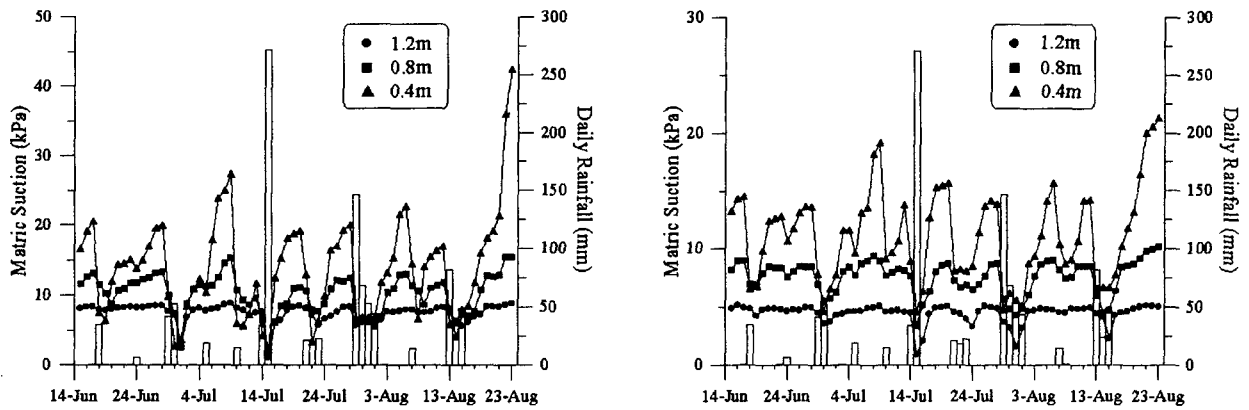
#### 3.4.1 모관흡수력의 일별 변화양상(6월15일~8월23일)

모관흡수력의 일별 변화양상은 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 (a)와 (b)에서 공통적으로 나타나는 현상은 모관흡수력의 큰 변화폭은 통상 지표면 부근(0.4m깊이)에서 발생하였고 그 변화의 크기는 깊이에 따라 감소하는 경향을 보였다. 6월18일의 강우나 8월7일의 강우와 같이 일강우량이 비교적 적은 경우에는 지표면에서 깊어질수록 모관흡수력의 변화에 시간적인 지체현상도 발견할 수 있었다. 그러나, 강우량이 많은 경우에는 깊이에 따라 지체되는 시간이 매우 짧아지므로 일별 변화값을 나타내는 그림 3에서는 이러한 지체현상을 찾아내기 어려웠다. 이처럼 큰 강우에 대한 지체현상은 시간별 변화양상을 나타내는 그림 4와 그림 5에서 확인할 수 있다.

강우에 따른 모관흡수력의 변화는 강우 직전의 모관흡수력 분포에도 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 7월10일의 경우에는 강우량이 13mm정도로 적은 양이었으나 그 강우로 인한 0.4m 깊이에서의 모관흡수력의 감소폭은 다른 큰 강우들에 의한 감소폭 보다도 컸다. 그리고, 7월 15일의 강우와 7월29일의

강우에 대해 모관흡수력 감소폭을 비교해 보아도 알 수 있다. 강우량은 15일의 경우에 더 많았지만 그 강우 직전의 비로 인해 지반이 이미 습윤해져 있는 상태였으므로 더 작은 량의 강우를 기록한 29일의 경우보다 모관흡수력의 감소 폭이 상대적으로 적었음을 확인할 수 있다. 강우직전의 모관흡수력이 더 높아져 있는 경우에는 강우로 인한 침투가 더 원활히 이루어지므로 흡수력의 감소폭이 더 클 것이다. 그러나, 모관흡수력이 큰 경우에는 상대적으로 지반의 투수계수가 감소하게 되므로, 깊은 깊이까지는 큰 영향을 미치지 못하는 것을 확인 할 수 있었다.

반대로 강우직전에 모관흡수력이 낮게 걸려 있으면 강우 침투로 인한 흡수력의 감소폭은 상대적으로 작지만, 투수계수가 높아져 있으므로 깊은 곳까지 영향력을 행사할 수 있을 것이다. 이는 7월14일~7월15일, 7월29일~8월1일, 8월13일~8월15일에서 확인할 수 있었다.



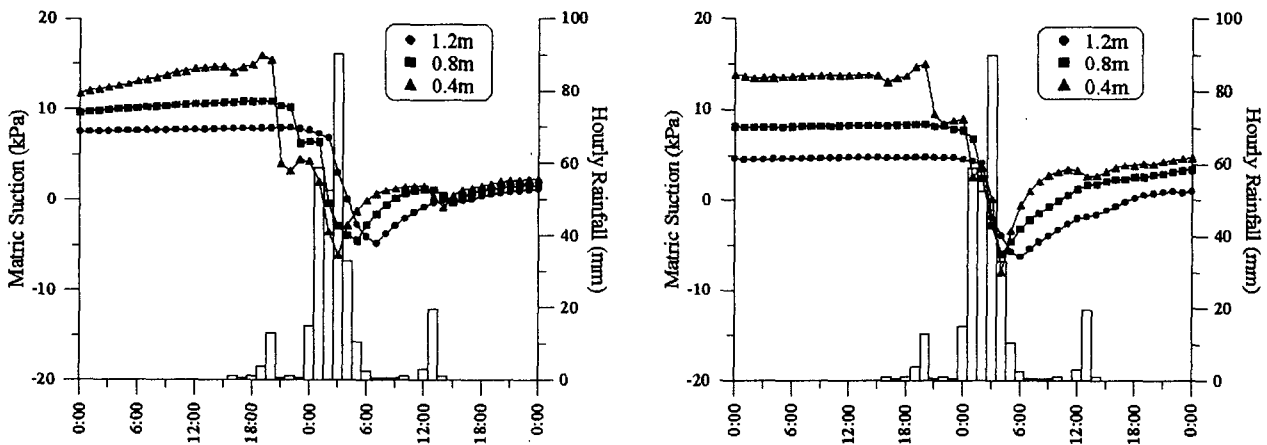
(a) 사면 상부쪽

(b) 사면 하부쪽

그림 3. 모관흡수력의 일별 변화양상(6월15일~8월23일)

### 3.4.2 모관흡수력의 시간별 변화양상 (7월14~7월15일, 7월29일~8월1일)

그림 3에서는 명확히 드러나지 않았던 깊이별 시간지체 현상이 그림 4와 그림 5에서는 잘 나타난다. 그림 5에서 보면, 7월29일의 강우지속시간이 짧은 경우에는 감소했던 모관흡수력이 빨리 회복되는데 반해서 7월 30일의 지속적인 강우의 경우에는 감소한 모관흡수력의 회복이 느린 것을 볼 수 있다. 따라서, 강우강도 뿐만 아니라 강우지속시간 또한 사면의 안정성에 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다.



(a) 사면 상부쪽

(b) 사면 하부쪽

그림 4. 모관흡수력의 시간별 변화양상(7월14일~7월15일)

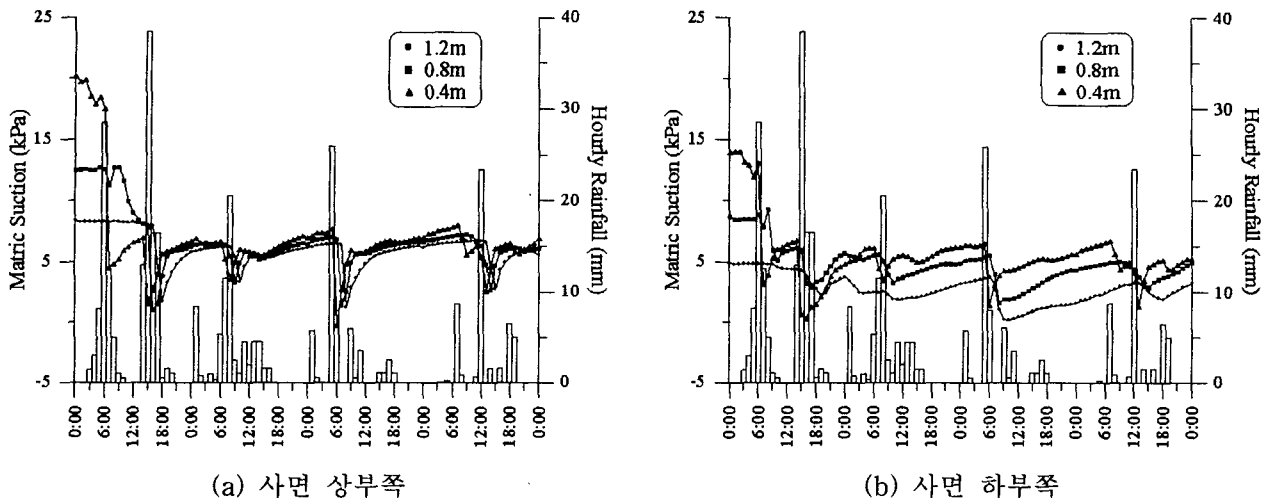


그림 5. 모관흡수력의 시간별 변화양상(7월29일~8월1일)

### 3.4.3 현장 흡-수분 특성

현장사면의 상부쪽 U지점에서 1.2m깊이와 0.4m깊이에서 모니터링 된 모관흡수력 값들과 체적함수비 값들을 이용하여 현장에서의 흡-수분 특성을 얻을 수 있었다. 최근의 연구에 의하면 흡-수분 특성 또한 흡 종류에 따른 고유한 성질이 아닌 것으로 나타나고 있다. 현장의 흡이 받고 있는 응력상태에 따라 같은 흡이라 하더라도 흡-수분 특성이 달라질 수 있다는 것이다. Charles W.W.Ng (2000) 등의 연구에 의하면, 보다 낮은 응력상태에 있는 흙일수록 모관흡수력 변화에 대해 체적함수비의 변화가 심한 것으로 나타났다. 다시 말하면, 낮은 응력상태에 있는 흙의 흡-수분 특성곡선이 더 가파르게 나타난다.

그림 6과 그림 7은 각각 0.4m깊이와 1.2m깊이에서 현장 계측된 데이터들을 실내실험으로 구한 흡-수분 특성곡선 위에 찍어본 것이다. 0.4m 깊이의 흙은 넓은 영역에 걸쳐서 분포하고 있으며 평균적으로 더 가파른 변화를 보이고 있고, 1.2m깊이의 흙은 제한된 영역에 분포하고 있으며 더 완만한 변화를 보인다. 이같이 두 깊이에서 흡수력과 함수비의 분포영역이 다른 것은 비교적 얇은 깊이인 0.4m의 경우에는 표면의 증발이나 강우의 침투 등에 직접적으로 영향을 받고 있으므로 모관흡수력이나 체적함수비의 변화 폭이 크기 때문이고, 상대적으로 깊은 1.2m 깊이의 경우는 표면의 증발이나 표면으로부터의 강우의 유입이 제한되므로 흡수력이나 함수비의 변화가 크지 않기 때문인 것으로 생각된다. 그리고, 평균 기울기가 다른 것은 비록 두 깊이에서의 응력상태의 차이가 크지는 않지만, 앞에서 언급한 Charles W.W.Ng (2000)의 연구의 경향이 반영된 것이라 볼 수 있다. 따라서, 더 낮은 응력상태에 있는 0.4m 깊이의 경우에 기울기가 더 가파르게 나타난 것으로 판단된다.

그림 8에서는 두 깊이(예:0.4m, 1.2m)에서의 계측값 들을 함께 나타내어 현장 지반의 전반적인 흡-수분 특성을 보고자 하였다. 그림 8에 나타난 현장의 흡-수분 특성이 실내실험으로 얻은 흡-수분 특성 곡선의 습윤경로(wetting path) 쪽에 가까이 머무는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 6월 15일부터 8월 23일 까지의 현장 계측기간이 우기에 걸쳐 있으므로 대상 지반의 거동에서 습윤과정이 주가 될 것이라는 추정을 확인 시켜 주는 결과이다. 따라서, 우기동안의 불포화토 사면에 대한 투수해석을 수행할 때 흡-수분 특성곡선의 습윤경로를 사용하는 것이 보다 합리적일 것으로 사료된다.

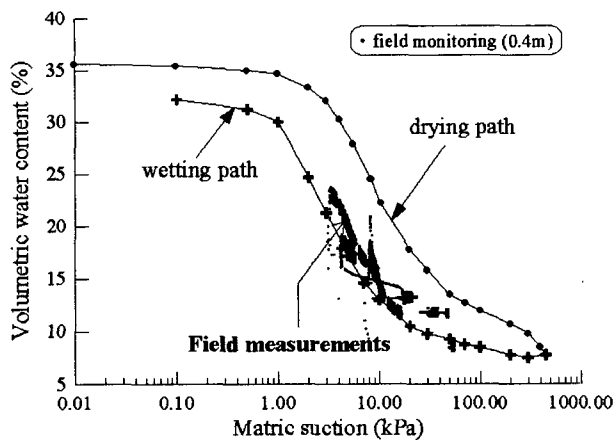


그림 6. 0.4m 깊이에서의 현장 흡-수분 특성

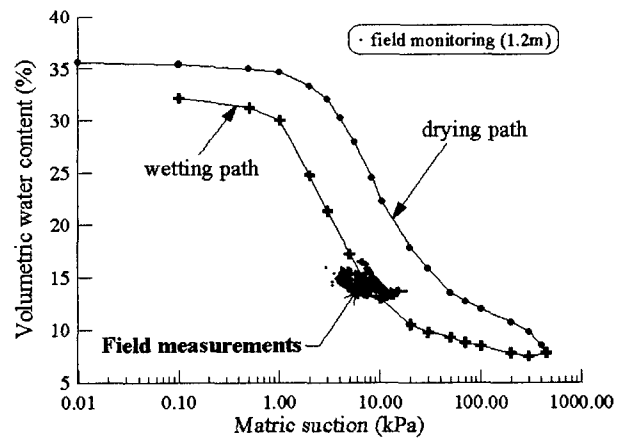


그림 7. 1.2m 깊이에서의 현장 흡-수분 특성

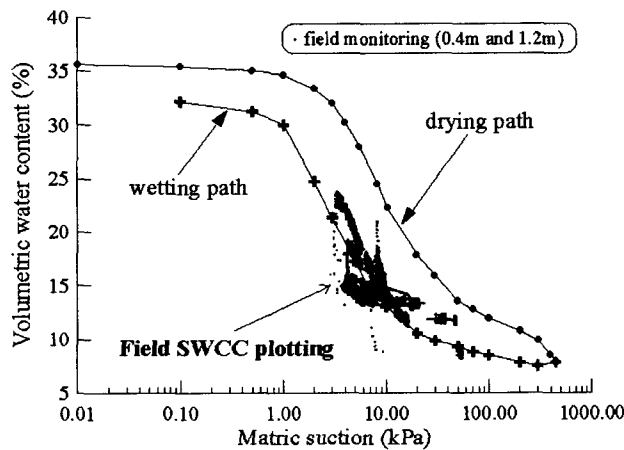


그림 8. 대상 지반의 현장 흡-수분 특성

#### 4. 결론

이와 같은 불포화 토사사면에서의 모관흡수력 및 체적함수비에 대한 현장모니터링을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 기후조건에 따라 지반내의 모관흡수력은 변화하였으며, 그 변화의 폭은 깊이에 따라 감소하는 경향을 보여주었다. 즉, 지반내 모관흡수력은 지표면에서 가까운 곳에서 기후조건에 큰 영향을 받았다.
- 2) 강우의 지반내 침투로 인한 모관흡수력의 감소는 깊이에 따라 시간적인 지체현상을 보여 주었다. 따라서, 강우로 인한 사면의 안정성 저하는 강우가 멈춘 뒤에도 계속 될 가능성이 있다.
- 3) 강우 침투로 인한 모관흡수력의 감소 폭은 강우 직전의 지반 내 모관흡수력의 분포에도 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 강우 직전의 지반 내 모관흡수력이 큰 경우에는, 작은 강우라 하더라도 모관흡수력을 크게 감소시킬 수 있었다.
- 4) 강우강도 뿐만 아니라 강우지속시간 또한 사면의 안정성에 크게 영향을 미치는 요소인 것으로 나타났다. 큰 강우라 하더라도 지속시간이 짧은 경우에는 감소되었던 모관흡수력의 회복이 빨리 이루어졌다.
- 5) 우기의 현장 흡-수분 특성은 실내실험에서 얻은 흡-수분 특성곡선의 습윤경로(wetting path)를 따르는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. 김상규, 김영목(1991), “강우로 인한 사면 불안정”, 한국토질공학회지, 제 7권, 제 1호, pp.53~64.
2. 조성은, 이승래(2000), “강우특성을 고려한 사면의 표면파괴에 대한 안정성 평가”, 한국지반공학회지, 제 16권, 제 5호, pp.107~116.
3. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H.(1993), *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons Inc., New York.
4. Fredlund, D.G. and Xing, A.(1994), “Equations for the soil-water characteristic curve”, Canadian Geotechnical Journal, 4th International Symposium on Landslides, Vol. 31, pp.521~532.
5. Fredlund, D.G., Xing, A. and Huang, S.(1994), “Predicting the permeability functions for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve”, Canadian Geotechnical Journal, 4th International Symposium on Landslides, Vol. 31, pp.533~546.
6. Lim, T.T., Rahardjo, H., Chang, M.F. and Fredlund, D.G.(1996), “Effect of rainfall on matric suctions in a residual soil slope”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 33, pp.618~628.
7. Ng, C.W.W. and Pang, Y.W.(2000), “Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 126, No. 2, pp.157~166.