

## 불포화된 화강풍화토에 대한 공학적 특성분석을 위한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Engineering Characteristics Analysis of Unsaturated Weathered Granite Soil

김준석\*

Joon-Seok Kim\*

Professor, Department of civil and environmental engineering, Chungwoon University, Incheon, Republic of Korea

\*Corresponding author: Joon-Seok Kim, jskim@chungwoon.ac.kr

## ABSTRACT

**Purpose:** The presence of the matric suction in unsaturated soil increases the stability of the slope, but the reduction of the matric suction due to precipitation can cause sudden slope failure, resulting in a major disaster. In this paper, engineering characteristics in unsaturated state were analyzed for granite weathering soil, which is the representative mountain soil of Korea. **Method:** Experiments and analysis were conducted on granulated weathering soil as unsaturated shear strength relationships for moisture characteristic curves, unsaturated injection curves, and matric suction under unsaturated conditions. **Result:** It was analyzed that a rapid change in the matric suction for volumetric water content occurs compared to the case where the particle size distribution is poor and the particle size distribution is good. A good case for the particle size distribution indicates a relatively small permeability coefficient at the same matric suction capacity compared to a poor case. The greater the matric suction, the greater the shear strength. **Conclusion:** For Korea's representative soil, granulated weathering soil, the functional characteristic curves, unsaturated permeability coefficients, unsaturated shear strength, etc., which are engineering characteristics in unsaturated state, were tested to secure each correlation.

**Keywords:** Unsaturated Soil, Matric Suction, Moisture Characteristic Curves, Unsaturated Shear Strength, Unsaturated Permeability Coefficients

## 요약

**연구목적:** 불포화토에서 발생하는 모관흡수력의 존재는 사면의 안정성을 증가시키지만, 강우침투로 인한 모관흡수력의 감소는 갑작스런 사면 파괴를 유발하여 큰 재난을 발생시킬 수 있다. 본 논문에서는 우리나라의 대표적인 산흙인 화강풍화토에 대하여 불포화상태에서의 공학적 특성을 분석하였다. **연구방법:** 화강풍화토에 대하여 입도상태가 양호한 경우와 입도상태가 불량한 경우로 나누어 불포화상태에서 함수특성곡선, 불포화투수곡선, 모관흡수력에 대한 불포화 전단강도 관계 등으로서 실험과 분석을 수행하였다. **연구결과:** 입도분포가 불량한 경우가 입도분포가 균등한 경우에 비하여 체적함수비에 대한 모관흡수력의 변화가 급격히 발생하는 것으로 분석되었다. 입도가 균등한 경우가 입도가 불량한 경우에 비하여 동일한 모관흡수력에서 투수계수가 비교적 작은 값을 나타내었다. 모관흡수력이 크게 작용할수록 전단강도가 증가하는 경향을 보였다. **결론:** 우리나라의 대표적인 산흙인 화강풍화토에 대하여 입도상태가 양호한 경우와 입도상태가 불량한 경우로 나누어 불포화상태에서의 공학적 특성인 함수특성곡선, 불포화투수계수, 불포화 전단강도 등에 대하여 실험을 실시하여 각각의 상관관계를 확보하였다.

**핵심용어:** 불포화토, 모관흡수력, 함수특성곡선, 불포화 전단강도, 불포화투수계수

Received | 27 August, 2020

Revised | 18 September, 2020

Accepted | 21 September, 2020

OPEN ACCESS



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 noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

## 서론

우리나라는 하절기의 집중호우에 의하여 빈번한 사면 파괴가 발생하며 지반공학적 문제에 있어 강우에 의한 사면 안정성 평가는 중요한 요소로 인식되어왔다. 일반적으로 흙으로 구성된 사면의 경우 강우침투에 따른 토사 내부의 수분변화와 간극수압의 변화로 인하여 사면은 불안정해지게 된다. 이러한 현상은 흙의 전단강도에 변화를 유발하여 사면붕괴의 결과로 나타날 수 있다(Lumb, 1962). 또한, 강우의 침투해석을 통한 화강풍화토의 비탈면 안정 연구 등 많은 연구가 추진되어 왔다(Kim et al., 2018). 강우 발생시 지표면에 도달한 강우는 사면경사를 따라 유출되거나 증발되는 양을 제외하고 지반으로 침투가 일어난다. 지반 내부로 침투되는 침투속도는 지반 특성에 따라 다르게 결정되며 투수계수가 큰 지반의 경우 침투가 깊은 위치까지 발생하여 지반의 전반적인 영역에서 모관흡수력을 감소시키면서 깊은 사면파괴의 유형을 유발하게 된다. 투수계수가 작거나 깊지 않은 곳에 암반 등의 불투수층이 존재할 경우 침투된 강우는 지표 가까운 곳에 누적되어 영(zero)이나 양(positive)의 값을 갖는 간극수압을 발생시키면서 표면파괴 유형의 사면 붕괴를 일으키기 쉬운 조건이 된다. 강우의 양이 많을수록 사면붕괴의 재해가 늘어나는 것으로 제시되고 있다(Lam et al., 1987). ITS시스템과 같이 정보통신에 의한 시스템 구축에 있어서 도로 사면의 안정성은 매우 중요하다(Yoon, 2016). 국내 대부분의 사면 지반은 지하수위 상부에 존재하며 강우, 증발 및 모세관 현상 등에 의하여 약간의 수분을 함유하고 있는 불포화 상태로 유지된다. 불포화 상태에서는 대기압에 대하여 간극수압이 음의 값이 되며 이는 사면 안정성에 큰 영향을 끼친다. 모관흡수력의 존재는 사면의 안정성을 증가시키지만, 강우침투 등으로 인한 모관흡수력의 감소는 갑작스러운 사면 파괴를 유발할 수 있다. 따라서 불포화 사면지반에서의 강우에 의한 침투 현상과 이를 고려한 사면의 안정성 해석에 관한 연구 및 이를 고려한 사면 안정성 검토가 필요하다. 모세관 현상 및 강우에 의한 지표면 침투로 인하여 지하수위 상부에는 수분이 존재하게 되며, 간극을 모두 포화시키지 못하는 불포화토 상태가 된다. 불포화토는 일반적으로 포화토의 거동과는 다른 거동특성을 보이며 지반의 전단강도에 영향을 미치게 된다. 공기압과 수압의 차이에 의한 모관흡수력은 흙 입자간을 서로 당기는 힘으로 작용하여 지반의 강도를 증진시키는 역할을 한다. 즉, 함수비가 커지면 모관흡수력이 작아지고 함수비가 작아지면 모관흡수력이 커지게 되어 결국 사면의 안정성에 크게 영향을 미치게 된다(Fredlund, 1995). 우리나라 토사사면의 붕괴는 집중호우에 의한 빈번한 사면 파괴 형태로 발생하고 있으며 국내 토사사면은 대부분 풍화토 지반으로 형성되어 있는 특징이 있다. 대부분의 지형이 가파른 특성을 보이며 강우의 계절적 편중으로 인한 지속적인 침식으로 산지에서는 풍화토의 깊이가 비교적 얇은 특징을 보인다. 따라서 대부분 얇은 깊이에서 사면 붕괴가 발생하는 특징을 보인다(Kim, 2006). 강우 발생 시에는 지중 침투수에 의한 간극수압의 상승, 표면 유수에 의한 침식, 흙의 포화로 인한 활동토층의 단위중량 증가 및 전단강도 감소 등에 의하여 사면을 붕괴시키려는 활동력은 증가되고 사면 붕괴에 저항하려는 저항력은 감소되어 사면의 안정성이 극도로 저하되게 된다. 그러므로 우리나라에서는 여름철에 집중호우에 의한 사면 붕괴가 자주 보고 되고 큰 피해가 발생하고 있다. 이와 같은 상황에서 우리나라의 사면붕괴는 국내 강우특성과 국내 토사사면의 지반조건 및 거동 특성과 밀접한 관련을 맺고 있는 것으로 분석되지만 불포화토에 대한 실험수행의 어려움으로 인하여 우리나라의 고유한 흙에 대한 많은 실험적 분석이 부족한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 우리나라의 대표적인 산흙인 화강풍화토에 대하여 입도상태가 양호한 경우(시료A)와 입도상태가 불량한 경우(시료B)로 나누어 불포화상태에서의 공학적 특성에 대하여 분석하였다. 분석내용은 불포화 상태에서 함수특성곡선, 불포화투수곡선, 모관흡수력에 대한 불포화 전단강도 관계 등으로서 실험과 분석을 수행하였다.

## 실험의 범위와 시료의 종류

### 함수특성곡선(soil-water characteristic curve)

모관흡수력이 지반의 거동특성에 가장 중요한 역할을 하는 설계변수로서 불포화 대수층에서의 지하수 흐름, 강우에 따른 사면 내 침투특성, 사력댐의 안정성, 가스 등을 포함한 불포화 지반의 압밀특성 등을 해석하기 위한 필수적인 불포화지반 특성이다. 함수특성곡선은 지반의 고유특성으로서 불포화 지반의 거동 특성을 결정하는 매우 중요한 기본물성으로서 흙 속에 존재하는 물의 양과 모관흡수력의 관계로 정의하며 흙의 구조(간극의 크기, 형태 및 분포)에 영향을 받는 것으로 연구되고 있다(Hillel, 1982). 실제 자연현상에서 모관흡수력의 변화는 강우나 증발 등 자연환경조건에 따른 지반의 함수비 변화로 인하여 나타나며, 강우가 발생할 경우 강우가 지반으로 침투되면서 함수비가 증가하게 되어 모관흡수력이 점차 감소하는 경향을 보인다. 오랜 건조로 인해 수분이 증발할 경우 함수비가 감소하면서 높은 모관흡수력을 유발하게되며 모관흡수력을 유발시키기 위해 일반적으로 축변환기법(axis-translation technique)을 이용한다.

함수특성곡선을 현장에서 구하는 것은 비교적 어렵기 때문에 본 논문에서는 건조 및 습윤 과정에서 셀에 가해진 압력에 따른 체적함수비의 변화를 측정하여 건조-습윤과정을 반복하면서 이력곡선(hysteresis-loop)을 얻을 수 있는 장점이 있는 체적압력판 추출기법(volumetric pressure plate extractor)을 Fig. 1과 같이 적용하여 함수특성곡선을 도출하였다(Fredlund et al., 1994). 본 연구의 모관흡수력 범위는 0.1 ~ 190kPa 로서 모관흡수력 변화에 따른 체적함수비 측정을 습윤-건조과정 반복 실험하며 수행하였다.

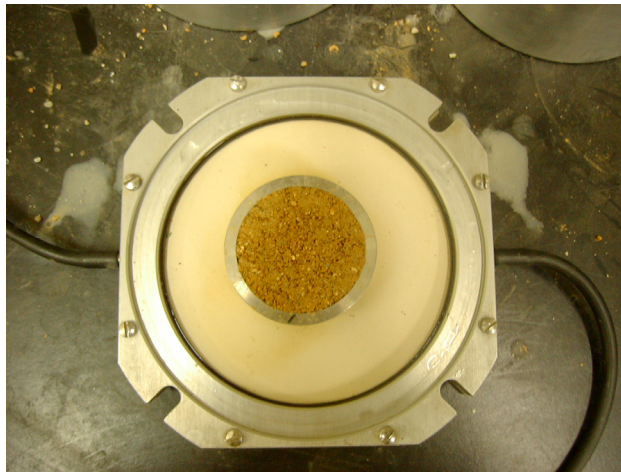


Fig. 1. Experimental apparatus and experimental appearance

### 불포화투수계수(unsaturated permeability coefficient)

일반적으로 흙 속의 모든 간극은 상호 연결되어 있기 때문에 자연토의 가장 조밀한 상태에서도 물의 흐름이 가능하다. 불포화토에서 간극유체는 액체와 기체 2 가지 상태(phase)를 이루고 있으므로 물과 공기로 이루어진 간극유체의 흐름을 해석하기 위해서는 흐름율(flow rate)과 작용포텐셜(driving potential)의 상관관계를 알아야 하며 이러한 상관관계를 나타내는 계수인 투수계수(coefficient of permeability)를 알아내야한다. 일반적으로 물의 흐름문제에서 작용 포텐셜을 '수두

(hydraulic head)라고 표현하며, 물의 흐름을 유발시키는 원인은 수두의 변화(gradient)이므로 일반적인 지반공학 문제에서 완전 포화된 지반의 경우 유체의 흐름은 물의 흐름만으로 한정되며 이러한 물의 흐름은 Darcy의 법칙을 따르는 것으로 알려져 있다. 그러나, 불포화토 흐름 문제의 경우 물, 공기 그리고 흙 입자의 3상 구조여서 물과 공기의 흐름을 동시에 고려하여야 하며 물의 흐름은 연속된 물로 이루어진 흐름 통로(flow channel)를 통해서만 발생한다. 불포화토에서도 Darcy의 법칙이 적용 가능하며 이 경우 투수계수가 상수가 아니며 모관흡수력 혹은 포화도 등의 함수로 표현된다. 물의 투수계수(water permeability,  $k_w$ )는 흙의 종류, 흙 입자들의 구성요소, 흙 입자의 구조(fabric) 그리고 포화도에 의존하며, 불포화토의 경우에는 간극비와 포화도( $S_r$ ) 또는 함수비( $w$ )가 추가로 연관된 복합적인 함수로 정의될 수 있다(Fredlund et al., 1997). 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 전응력, 간극공기압과 간극수압을 각각 독립적으로 조절하고 측정할 수 있는 삼축압축시험기를 사용하였으며, 공기함입치(air entry value)가 각각 1 bar 와 5 bar 인 세라믹 디스크를 이용하여 400 kPa 범위 내에서 불포화 투수계수 실험 수행하였다.



Fig. 2. Experimental apparatus for unsaturated permeability coefficient

### 불포화 전단강도(unsaturated shear strength)

포화토의 경우에는 외적인 하중에 대응하여 평형상태에서 간극수압이 주로 영(zero) 이상의 값을 가지므로 유효응력에 불리한 영향을 미친다(Gan et al., 1988). 불포화토는 평형상태에서 간극수압이 음(negative)값으로 작용하여 유효응력을 증가시키는 역할을 한다. 부의 간극수압은 모관흡수력에 의해 유발되며 대기압이 일정할 때 모관흡수력은 함수비와 연관이 있고 또한 지반의 입도분포특성 및 다짐정도에도 영향을 받는다. 모관흡수력의 변화는 유효응력의 변화로 이어져 지반의 전단강도를 변화시키므로 모관흡수력의 변화가 불포화지반의 강도특성에 큰 영향을 나타내게 된다(Lee et al., 2003). 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 모관흡수력 50kPa, 100kPa, 200kPa 에 대하여 실험을 수행하였다.



Fig. 3. Experimental apparatus for unsaturated shear strength

### 시료의 종류

본 연구에서 실험에 사용된 시료는 우리나라를 대표할 수 있는 화강풍화토로서 입도분포가 서로 다른 두 개의 시료를 대상으로 하였으며, 시료A는 여러 크기의 입자가 잘 섞여 있는 입도가 양호한 풍화토이고, 시료B는 같은 크기의 입자가 많은 비중을 차지하여 여러 크기의 입자가 골고루 섞이지 않은 입도가 불량한 풍화토이다. 각각의 시료에 대한 물리적 특징은 Table 1에 정리하였으며 입도분포는 Figs. 4, 5와 같다.

Table 1. Engineering characteristics of the sample

|     | 균등계수(Cu) | 곡률계수(Cg) | 비중   | 비고   |
|-----|----------|----------|------|------|
| 시료A | 47.7     | 3.1      | 2.67 | 입도양호 |
| 시료B | 1.07     | 0.55     | 2.66 | 입도불량 |

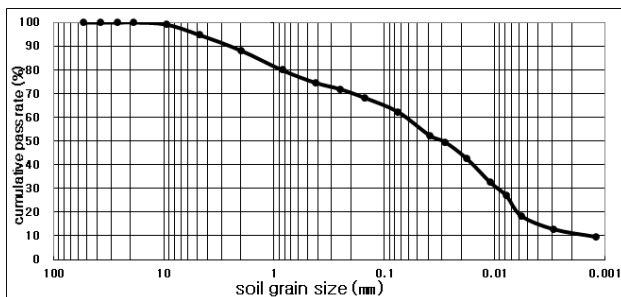


Fig. 4. Particle diameter curve of sample A

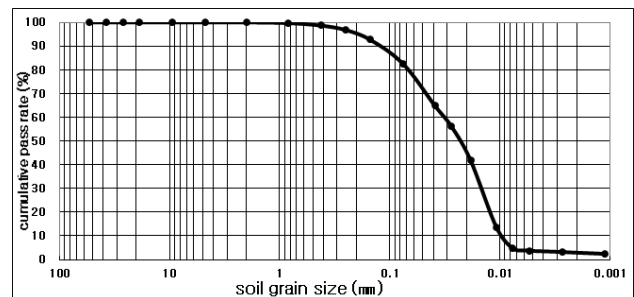


Fig. 5. Particle diameter curve of sample B

## 실험결과 분석

### 함수특성곡선 실험결과분석

체적압력판 추출기(Volumetric Pressure Plate Extractor)를 이용한 습윤-건조과정 반복실험을 통하여 0.1 ~ 190kPa 범위의 모관흡수력 변화에 따른 체적함수비를 측정하여 Figs. 6, 7과 Tables 2, 3에 정리하였다. Figs. 6, 7과 같이 체적함수비가 감소하면 모관흡수력은 증가하며 반대로 체적함수비의 증가에 따라 모관흡수력은 급격히 감소하는 것으로 분석된다.

시료A의 경우에는 체적함수비와 모관흡수력의 관계가 시료B에 비하여 비교적 완만한 변화를 보인다. 즉, 시료B는 시료의 입자분포가 균등하지 않은 시료로서 입자분포가 균등한 시료A에 비하여 체적함수비에 대한 모관흡수력의 변화가 급격히 발생하는 것으로 분석되었다.

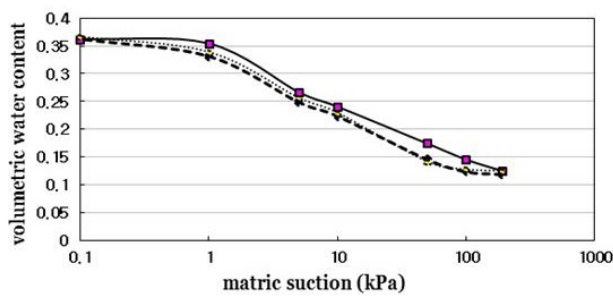


Fig. 6. Soil-water characteristic curve for sample A

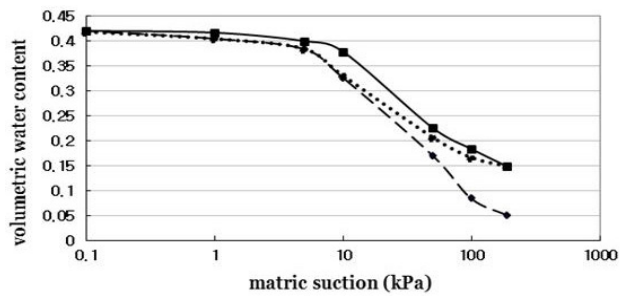


Fig. 7. Soil-water characteristic curve for sample B

Table 2. soil-water characteristic date for sample A

| 압력(kPa) | 체적함수비01  | 체적함수비02  | 체적함수비03  | 평균값      |
|---------|----------|----------|----------|----------|
| 190     | 0.118989 | 0.125664 | 0.125661 | 0.123436 |
| 100     | 0.123843 | 0.145866 | 0.128782 | 0.132830 |
| 50      | 0.145866 | 0.174531 | 0.142144 | 0.154180 |
| 10      | 0.223666 | 0.240625 | 0.230148 | 0.231480 |
| 5       | 0.248735 | 0.266782 | 0.256938 | 0.257485 |
| 1       | 0.331111 | 0.353927 | 0.339122 | 0.341387 |
| 0.1     | 0.361861 | 0.361872 | 0.366347 | 0.363360 |

Table 3. soil-water characteristic date for sample B

| 압력(kPa) | 체적함수비01  | 체적함수비02  | 체적함수비03  | 평균값      |
|---------|----------|----------|----------|----------|
| 190     | 0.050049 | 0.148126 | 0.148104 | 0.115426 |
| 100     | 0.083815 | 0.183204 | 0.165807 | 0.144275 |
| 50      | 0.170003 | 0.225378 | 0.206483 | 0.200621 |
| 10      | 0.325446 | 0.377674 | 0.329941 | 0.344354 |
| 5       | 0.382277 | 0.398395 | 0.383104 | 0.387925 |
| 1       | 0.403101 | 0.415065 | 0.403079 | 0.407082 |
| 0.1     | 0.418613 | 0.418596 | 0.416994 | 0.418068 |

### 불포화 투수곡선 실험결과분석

불포화토의 투수계수를 측정하기 위한 실험적 방법은 시간이 오래 걸리고, 실험수행이 용이하지 않은 문제점이 있다. 본 연구에서는 전응력, 간극공기압과 간극수압을 각각 독립적으로 조절하고 측정할 수 있는 삼축압축시험기를 이용하여 400 kPa 범위 내에서 불포화 투수계수 실험을 수행하였으며 실험결과는 Figs. 8, 9와 Table 4에 정리하였다. 실험 결과에서 입도 차이가 극명한 두 시료의 불포화투수곡선은 비교적 유사한 것으로 분석되었으며, 입도가 균등한 시료A가 입도가 불량한 시료B에 비하여 동일한 모관흡수력인 경우에 대하여 투수계수가 비교적 작은 값을 나타내었다.

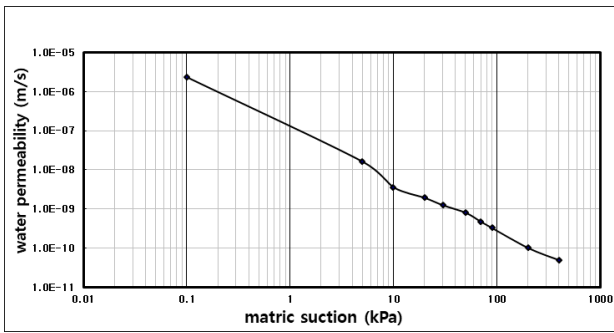


Fig. 8. Unsaturated permeability coefficient for sample A

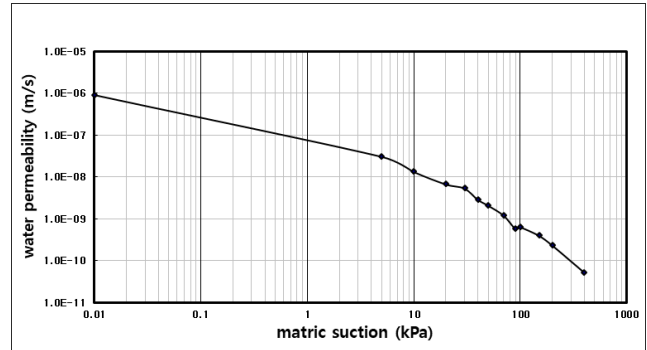


Fig. 9. Unsaturated permeability coefficient for sample B

Table 4. Soil-water characteristic date for sample B

| 모관흡수력(kPa) | 투수계수(m/s) |          |
|------------|-----------|----------|
|            | 시료A       | 시료B      |
| 0.01       | 2.38E-06  | 9.13E-07 |
| 5          | 1.65E-08  | 3.08E-08 |
| 10         | 3.62E-09  | 1.34E-08 |
| 20         | 1.94E-09  | 6.77E-09 |
| 30         | 1.26E-10  | 5.39E-09 |
| 50         | 8.04E-10  | 2.11E-09 |
| 70         | 4.76E-10  | 1.22E-09 |
| 90         | 3.27E-10  | 5.93E-10 |
| 200        | 1.01E-10  | 2.38E-10 |
| 400        | 4.92E-11  | 5.36E-11 |

### 불포화 전단강도 실험결과분석

불포화 상태에서 주어진 모관흡수력 조건에서 삼축압축시험을 실시하여 전단강도를 도출하여 Figs. 10, 11과 Table 5에 정리하였다. 실험결과 모관흡수력이 크게 작용할수록 전단강도가 증가하는 경향을 보이며 시료의 입도가 균등한 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여 약 5 ~ 9%의 강도증가가 있는 것으로 분석되었다.

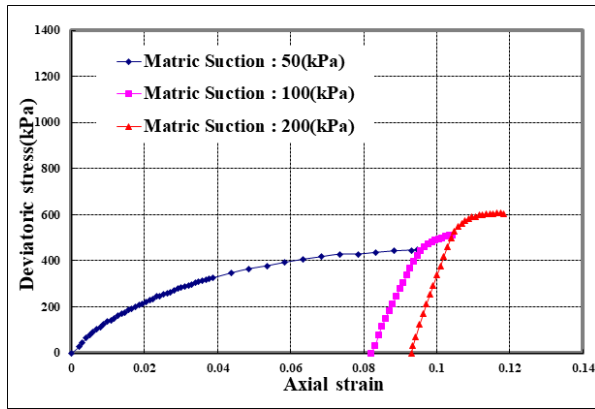


Fig. 10. Deviatoric stress for matric suction (sample A)

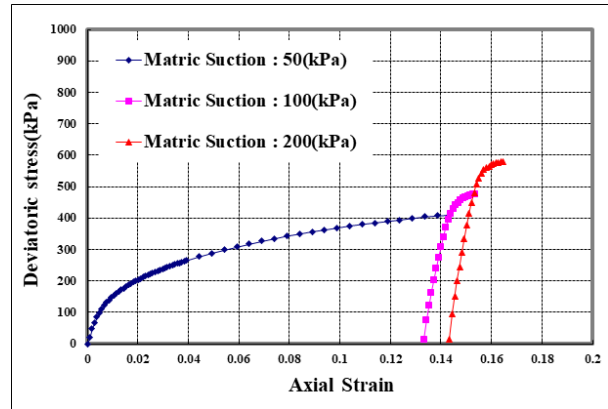


Fig. 11. Deviatoric stress for matric suction (sample B)

Table 5. Deviatoric stress for matric suction

| 모관흡수력(kPa) | 전단강도(축차응력)(kPa) |        |
|------------|-----------------|--------|
|            | 시료A             | 시료B    |
| 50         | 446.14          | 409.22 |
| 100        | 511.33          | 478.23 |
| 200        | 605.04          | 578.56 |

## 결론

불포화토에서 발생하는 모관흡수력의 존재는 사면의 안정성을 증가시키지만, 강우침투 등으로 인한 모관흡수력의 감소는 급작스런 사면 파괴를 유발하여 큰 재난을 발생시킬 수 있다. 본 논문에서는 우리나라의 대표적인 산흙인 화강풍화토에 대하여 입도상태가 양호한 경우와 입도상태가 불량한 경우로 나누어 불포화상태에서의 공학적 특성인 함수특성곡선, 불포화투수계수, 불포화 전단강도 등에 대하여 실험을 실시하여 각각의 상관관계를 확보하였으며 각각의 특성에 대한 연구 결과를 아래와 같이 정리하였다.

- 1) 함수특성곡선분석에서는 체적함수비가 감소하면 모관흡수력은 증가하며 반대로 체적함수비의 증가에 따라 모관흡수력은 급격히 감소하는 것으로 분석되었다. 입도분포가 양호한 경우에는 체적함수비와 모관흡수력의 관계가 입도분포가 불량한 경우에 비하여 비교적 완만한 변화를 보였다.
- 2) 불포화투수곡선의 분석결과 입도차이가 극명한 두 시료의 불포화투수곡선은 비교적 유사한 것으로 분석되었으며, 입도가 균등한 경우가 입도가 불량한 경우에 비하여 동일한 모관흡수력에서 투수계수가 비교적 작은 값을 나타내었다.
- 3) 불포화 전단강도 실험결과 모관흡수력이 크게 작용할수록 전단강도가 증가하는 경향을 보이며 시료의 입도가 균등한 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여 약5~9%의 강도증가가 있는 것으로 분석되었다.
- 4) 불포화된 화강풍화토에서 입도분포가 불량한 경우가 입도분포가 균등한 경우에 비하여 체적함수비에 대한 모관흡수력의 변화가 급격히 발생하여 전단강도가 급격히 감소할 수 있는 것으로 분석되었다.



## Acknowledgement

본 연구는 2020년도 청운대학교 학술연구조성비의 지원에 의해 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

## References

- [1] Fredlund, D.G., Xing, A. (1994). "Equation for the soil-water characteristic curve." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, pp. 521-532.
- [2] Fredlund, D.G. (1995). "The stability of slopes with negative pore-water pressure." *Proceedings, Ian Boyd Donald Symposium on Modern Developments in Geomechanics, Monash University, Melbourne, Australia, June 7.* pp. 99-116.
- [3] Fredlund, M.D., Wilson, G.W., Fredlund, D.G. (1997). "Prediction of the soil water characteristic curve from the grain size distribution curve and volume-mass properties." *Proceedings of the 3rd Symposium on Unsaturated Soil, Rio de Janeiro, Brazil, April 2022,* pp. 13-23.
- [4] Gan, J.K.M., Fredlund, D.G., Rahardjo, H. (1988). "Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 25, pp. 500-510.
- [5] Hillel (1982). *Introduction to Soil Physics.* Academic Press. New York, USA.
- [6] Kim, K.S. (2006). "The properties of soil by geological conditions in the soil slope in landslide areas." *Journal of Geotechnical engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 359-371.
- [7] Kim, G.H., Hwang, E.P., Lee, K.I. (2018). "Evaluation of stability of slope with granite weathered soil considering rainfall events." *Journal of the Korea Society of Disaster Information*, Vol. 14, No. 4, p. 422.
- [8] Lam, L., Fredlund, D.G., Barbour, S.L. (1987). "Transient seepage model for saturated-unsaturated soil systems." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 24, pp. 565-580.
- [9] Lee, S.J., Lee, S.R., Kim, Y.S. (2003). "An approach to estimate unsaturated shear strength using artificial neural network and hyperbolic formula." *Journal of Computers and Geotechnics*, Vol. 30, pp. 489-503.
- [10] Lumb, P. (1962). Effect of rainstorms on slope stability. *Proceedings of Symposium on Hong Kong Soils, Hong Kong*, pp. 73-87.
- [11] Yoon, B.J. (2016). "ITS System architecture based upon object-oriented methodology." *Journal of Korea Society of Disaster Information*. Vol. 12, No. 1, pp. 105-115.