

## 비배수전단시 불포화 다짐화강토의 간극압과 체적변형특성

### Characteristics of Pore Pressure and Volume Change During Undrained Loading of Unsaturated Compacted Granite Soil

김 찬 기\*<sup>1</sup> Kim, Chan-Kee

김 태 형\*<sup>2</sup> Kim, Tae-Hyung

이 중 천\*<sup>3</sup> Lee, Jong-Cheon

#### Abstract

A series of triaxial compression tests were performed on samples of compacted granite soil in a modified triaxial cell that allowed separate control of pore air pressure ( $U_a$ ) and pore water pressure ( $U_w$ ) in order to examine the characteristics of pore pressure, volume change and stress-strain behavior during undrained loading conditions. Triaxial samples of unsaturated and saturated compacted granite soil, 50mm in diameter and 100mm in height, were prepared by compaction in a mould. These samples were tested at 3 different suction values (0.5, 1.0, 2.0 kgf/cm<sup>2</sup>) for unsaturated compacted granite soil and at 3 different confining stresses (1.0, 2.0, 4.0 kgf/cm<sup>2</sup>). Results showed that only effective cohesion increased with little variation of friction angle, according to matric suction.

#### 요 지

본 연구는 풍화 화강토의 일정 간극비에서 초기함수비의 변화에 따른 거동 특성을 통상의 삼축압축시험기를 이용한 비배수시험을 실시하여 비배수전단시 불포화 풍화 화강토의 간극압, 체적변형 및 응력-변형률 거동특성을 밝히고자 한다. 연구에 사용된 시료는 조립질의 풍화 화강토이고 직경 50mm 높이 100mm로 복층다짐하여 삼축 시험용 공시체를 제작하였다. 준비된 공시체를 구속압력과 흡인력( $u_a-u_w$ )을 각각 달리한 비배수 3축압축시험을 실시하였다. 그 결과 초기 함수비의 변화에 따라 내부마찰각( $\phi'$ )의 변화는 다소 있지만 흡인력의 변화에 따른 내부마찰각의 변화는 거의 없고 유효점착력만이 증가하는 경향을 보이고 있다.

**Keywords :** Granite soil, Matric suction, Soil-water characteristic curve, Triaxial compression test

#### 1. 서 론

자연지반이나 성토지반의 대부분은 부분포화상태이거나 불포화상태로 존재한다. 불포화토는 모세관현상, 삼투압 등에 의해 물을 흡수하려는 힘을 유발하고 이러한 힘 때문에 포화토와 다른 거동을 한다. 불포화토가 물을 흡수하려는 힘을 전흡인력이라하며 전흡인력은 간극

공기압과 간극수압의 차인 흡인력(matric suction)과 삼투압(osmotic suction)으로 구분되어 진다. 여기서 삼투압은 특수한 지역과 특수한 흙에서만 발생되고 흡인력에 비해 작은 값을 갖으며, 흡인력은 물과 공기의 접촉면에서 물분자간의 인력에 의해 발생하는 접촉압이다. 이 접촉압 때문에 유효응력이론을 적용할 수 없다. 따라서 새로운 응력성분을 도입하여 불포화토의 응력상태

\*1 정회원, 대전대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Dajin Univ., cckim@daejin.ac.kr)

\*2 Lehigh대학교 박사후연구원 (Post-Doctoral Researcher, Lehigh Univ.)

\*3 정회원, 익산대학 토목공학과 강사 (Member, Parttime Instructor, Iksan National Collage)

를 설명하고 있으며, 대부분 불포화토의 응력상태는 순평균응력( $\sigma_m - u_a$ )항과 흡인력( $u_a - u_w$ )항으로 분리하여 각각의 독립된 변수로 취급하는 것이 적당하며 각 변수는 흡인력에 따라 다르다. 이와 같은 불포화토에 대한 연구는 유효응력 개념을 적용한 유효응력식이 Bishop(1959)에 의해 처음 발표된 이래 많은 연구가 진행되고있다.

본 연구는 비배수전단 시 불포화 풍화 화강토의 간극압, 체적변형 및 응력-변형을 거동특성을 밝히고자 매우 조립인 경기도 포천지역의 풍화 화강토를 선정하여 포화토를 달리한 시험을 수행하기 위해 다짐시험이 선행되었으며 시험 결과를 이용하여 삼축 시험용 공시체를 제작하였다. 그리고 구속압력을 각각 달리하고 각각의 구속압력에 대한 흡인력( $u_a - u_w$ )을 0.5, 1.0, 2.0kgf/cm<sup>2</sup>로 달리하여 불포화 비배수 3축압축시험을 실시하여 불포화토에서 흡인력이 어떤 영향을 미치는가를 밝히고자 하였으며 흡인력이 없는 시험결과를 이용할 때 강도정수의 변화특성을 밝히고 실용상에 어떤 문제점이 있으며, 비배수 전단시 흡인력에 따라 불포화 화강토의 응력-변형을 거동, 간극압 및 체적변화특성을 밝히고자 하였다.

## 2. 불포화토의 역학적 특성

불포화토에 대한 연구는 유효응력 개념을 적용한 유효응력식이 Bishop(1959)에 의해 처음 발표되었다. 그 후 Bishop과 Donald(1961)는 흡인력을 측정하여 불포화 점성토의 전단강도에 대한 연구 결과를 발표한 바 있으며, Jenning과 Burland(1962)는 응력변수를 순평균응력과 흡인력의 항으로 분리할 것을 제안하였으며 Fredlund(1978)는 분리된 응력변수를 사용하여 오늘날 주로 이용되는 불포화토의 전단강도식을 발표하였다. 특히 불포화토에 대한 연구는 Fredlund와 Morgenstern(1976, 1977)에 의해 많은 연구가 수행되었고, Rahardjo 등(1990, 1995)은 불포화토의 배수 및 비배수 재하시 발생하는 체적변형 및 간극수압거동에 대한 연구를 발표한 바 있으며 Miller와 Nelson(1993)은 불포화토의 전단강도특성과 흡인력과 응력상태에 대한 연구결과를 발표한 바있다. 국내에서는 송창섭(1994)이 충적 실트질 모래를 사용하여 불포화토의 거동 예측을 위한 구성식의 개발에 관한 연구 결과를 발표한 바가 있다. 이와 같이 불포화토에 대한 유효응력 개념은 광범위하게 발전되었다. 그 중 Fredlund 등(1978)은 불포화토의 전단강도를 식 (1)과 같이 정의하였다.

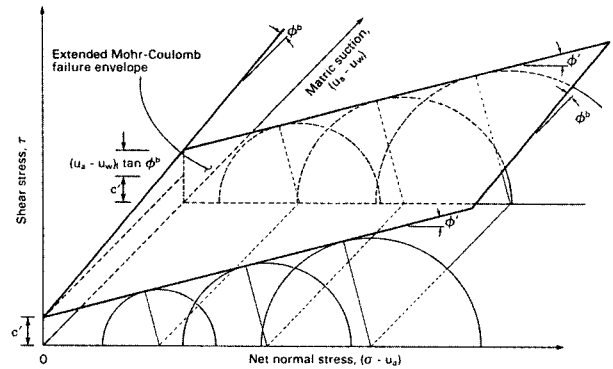


그림 1. 불포화토에 대한 확장된 Mohr-Coulomb 파괴 포락선(Fredlund (1978))

$$\tau = c + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (1)$$

여기서  $c$ 는 유효점착력,  $\sigma - u_a$ 는 순연직응력,  $\phi$ 는 내부마찰각,  $u_a - u_w$ 는 흡인력,  $\phi^b$ 는 흡인력에 의한 유효점착력의 증가를 나타내는 각이다.

불포화토의 전단강도는 순연직응력이나 흡인력의 증가에 따라 증가하게 되며 이러한 관계를 ( $\sigma$ ,  $\tau$ ,  $s$ )공간에 나타내면 그림 1과 같다. 그림에 나타난 바와 같이 흡인력이 증가할 때 공간 상에서 하나의 파괴면을 형성하고 있음을 알 수 있다. 그림에서 흡인력의 증가로 인한 점착력은 식 (2)와 같다.

$$c = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2)$$

## 3. 시 험

### 3.1 시료준비

본 연구에 사용된 풍화 잔적토는 경기도 포천 지역에서 채취한 시료를 실내에서 자연건조 시킨 후 #4번 체를 통과한 시료로서 물리적 특성은 표 1과 같으며 입도분포곡선은 그림 2와 같다. 이와 같이 준비된 시료에 대한 비배수전단시 응력-변형을 거동특성을 검토하기 위해 초기함수비를 최적함수비인 11.6%와 건조측(Dry Side)인 6.5% 그리고 습윤측(Wet Side)인 18.5%를 갖도록 각각 준비하여 다짐시험에서 얻은 최대건조밀도의 92%인 1.7(g/cm<sup>3</sup>)의 건조밀도가 되도록 삼축시험용 공시체를 이용하여 시료를 제작하였다. 다짐은 필요한 시료의 총중량으로부터 각 층의 양을 결정한 다음 각층의 Un (percentage of under compaction)값과 다짐높이를 결정하여 다지는 방법(Ladd, 1978)을 이용하여 높이 100mm,

표 1. 풍화 화강토의 기본 물성치

Sample	Compaction		Atterberg limit(%)		#200(%)	G <sub>s</sub>	Li(%)	USCS
	$\gamma_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	O.M.C (%)	Liquid limit	Plastic limit				
Pocheon	1.85	11.6	NP		17.15	2.67	2.80	SM

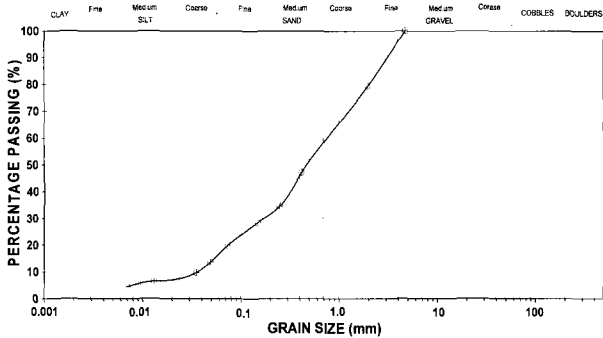


그림 2. 풍화 화강토의 입도분포곡선

직경 50mm로 공시체를 제작하였다.

### 3.2 흡인력의 측정방법

흙의 흡인력을 측정하는 방법으로는 룯드 선단에 센서 (fine porous ceramic sensing tip)를 부착하여 현장에서 이용할 수 있도록 한 Tensiometers법이 있으며, 불포화 시료의 간극수압은 부압을 갖게되어 높은 흡인력하에서는 간극수압의 측정이 불가능하다. 이런 경우 흡인력을 측정하기 위해 고압공기투과판(high air entry ceramic disk)이나 멤브레인을 이용하여야 하는 단점이 있다. 이러한 점을 보완하기 위해 Hilf(1956)에 의해 개발된 축변환기법을 도입한 그림 3과 같은 압력판 장치(Pressure plate apparatus)를 이용하는 방법이 있다. 이 외에도 Filter Paper법, Thermocouple Psychrometers법, Thermal Matric Potential Sensors법 등이 있다.

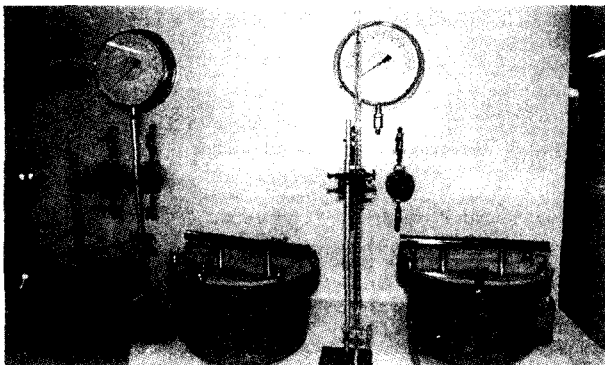


그림 3. 압력판 장치

본 연구에 사용된 흡인력 측정기는 압력판 장치 (Pressure plate apparatus, model No. 1600. Soil Moisture Co., Santa Barbara, CA. USA)이며 시험방법은 ASTM D 2325에 준하여 시험을 수행하였다. 여기에 사용된 고압공기투과판은 Soil Moisture 사의 1bar, 5bar를 각각 사용하였다. 그리고 흡인력 측정시험에 이용되는 고압공기투과멤브레인과 다공 세라믹판(porous ceramic stone)은 물과 공기를 분리하여 일정압력 이하에서 물은 통과시키고 공기는 통과치 못하게 하는 역할을 하고 있다.

### 3.3 비배수삼축압축 시험

불포화 비배수삼축압축시험은 통상의 삼축압축시험기를 흡인력을 조정할 수 있도록 개조한 불포화 삼축압축시험기(Colorado State Univ.)를 이용하였고 다공판은 5bar의 고압공기투과판을 사용하였다. 그리고 공시체 제작 방법 및 조건은 포화토의 경우와 같다. 일정 흡인력을 가한 상태에서 압밀을 실시한 후 전단시험을 행한다. 이때 공시체의 초기 함수비와 흡인력이 다를 경우 물은 고압공기투과판을 통하여 평형상태가 되도록 이동하므로 평형상태에 도달한 후에 전단한다.

그림 4는 일정 흡인력 하에서 시간에 따른 함수비의 변화를 나타낸 곡선이다. 그림에 나타난바와 같이 15시간 경과 후 평형상태에 도달하고 있음을 알 수 있다. 이를 근거로 비배수 삼축압축시험에서 전단은 흡인력을 가한 후 약48시간 후에 시작하였다.

이와 같이 준비된 불포화 상태의 공시체를 구속압력을 1, 2, 4kgf/cm<sup>2</sup>으로 각각 달리하고 각각의 구속압력에 대한 흡인력을 0.5, 1.0, 2.0kgf/cm<sup>2</sup>로 각각 달리하여 비배수 삼축압축시험을 실시하였으며 전단 시 압축변형률 속도는 0.1%/min으로 하였다.

## 4. 시험결과 및 고찰

### 4.1 함수비 특성

그림 4는 압력판에 흡인력을 가하였을 때 공시체의 함

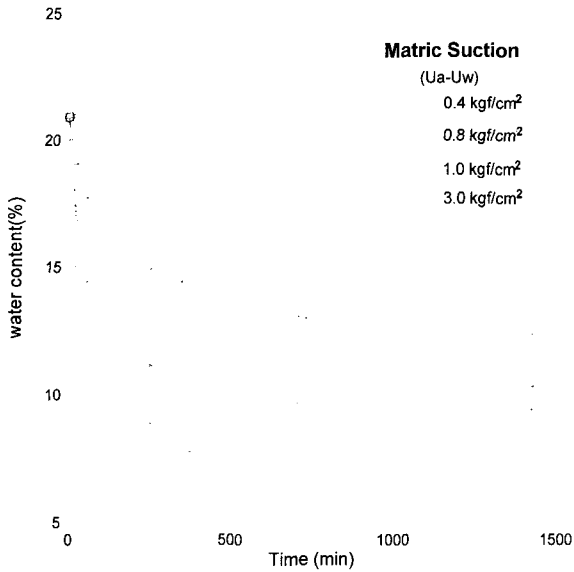


그림 4. 풍화 화강토의 시간에 따른 함수비 변화

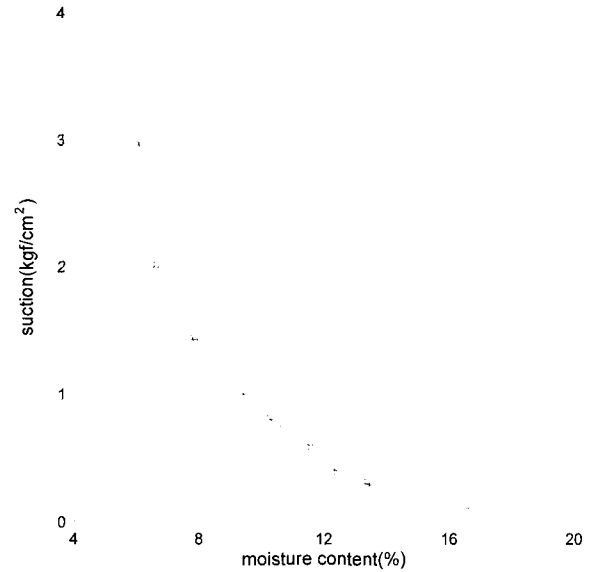


그림 5. 풍화 화강토의 함수비 특성곡선

수비가 평형상태에 도달하는데 소요되는 시간을 나타낸 그림이다. 그림에서 흡인력이  $0.4\text{kgf/cm}^2$ 인 경우에 따른 함수비의 변화는 흡인력이  $0.8, 1.0, 3.0\text{kgf/cm}^2$ 인 경우에 비해 초기 기율기가 완만하며 평형상태에 도달하는 시간이 흡인력이 큰 경우에 비해 다소 많은 시간이 소요되고 있다. 그리고 흡인력이 클수록 초기기율기가 급하며 단시간에 평형상태에 도달하고 있음을 알 수 있다. 또한 함수비가 평형상태에 도달하는 시간은 그림에 나타난바와 같이 15시간 정도 이상이면 일정 함수비에 도달하는 것으로 나타나고 있다.

그림 5는 본 시료에 대한 함수비에 따른 흡인력의 변화 결과를 나타낸 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 흡인력이  $3\text{kgf/cm}^2$ 정도 이상이면 흡인력이 증가해도 함수비의 변화가 거의 없음을 볼 수 있으며 함수비 17%정도이면 흡인력이  $0.1\text{kgf/cm}^2$ 정도임을 알 수 있다. 이 시험 결과로부터 비배수삼축시험시 일정 흡인력이 작용할 때 시료에 유지되는 함수비를 알 수 있다.

#### 4.2 응력-변형률 특성

불포화 풍화 화강토의 비배수 전단시 응력 및 체적변형에 대한 거동특성을 밝히기 위해 비배수삼축압축시험을 수행하였으며 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림에서 ●는 불포화 상태에서 흡인력이 0인 상태의 시험결과를 나타낸 것이고 흡인력에 따라  $0.5\text{kgf/cm}^2$ 인 경우는 ○표,  $1.0\text{kgf/cm}^2$ 인 경우는 □표,  $2.0\text{kgf/cm}^2$ 인 경우는 △로 각각 나타내었다. 그림에 나타난바와 같이 초

기함수비가 증가함에 따라 축차응력은 다소 감소하는 경향을 보이고 있으며 최대 건조측이 습윤측보다 초기 접선기율기가 크며 작은 축변형률에서 최대 축차응력을 나타내는 경향이 있다. 흡인력의 변화가 축차응력에 미치는 영향은 초기함수비가 작은 건조측인 경우보다 초기함수비가 많은 습윤측의 경우가 다소 크게 영향을 받고 있다. 이는 물과 공기의 접촉면에서 물분자간의 인력에 의해 발생하는 접촉압으로 생각된다. 또한 체적변형율은 초기함수비의 영향은 비교적 작게 나타나고 있으며 구속압력이 작은 경우는 전단 중에 체적이 팽창하고 있으며 구속압력이 큰 경우는 축변형율이 10% 내외에서 다이러턴시현상이 나타난다. 그리고 같은 구속압력에서는 흡인력이 큰 경우가 이러한 현상이 더욱 두드러지게 발생하고 있다.

그림 7은 불포화 풍화 화강토의 비배수 전단시 전단강도 특성을 밝히기 위해 비배수삼축압축시험 결과를 순연직응력, 흡인력 및 전단강도 공간에 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 흡인력이 증가할 때 공간상에서 하나의 파괴면을 형성하고 있다. 이 파괴면은 일정 흡인력에서 Mohr-Coulomb의 파괴 포락선이다. 초기 함수비의 변화에 따라 내부마찰각( $\phi'$ )의 변화는 다소 있지만 흡인력의 변화에 따른 내부마찰각의 변화는 거의 없고 유효점착력만이 증가하는 경향을 보이고 있다. 흡인력의 증가로 인한 유효점착력의 증가는 초기함수비가 건조측인 경우  $\phi^b = 3^\circ$ 이고, 최적함수비인 경우  $\phi^b = 8^\circ$ 이며, 습윤측인 경우  $\phi^b = 9^\circ$ 를 각각 나타내고 있다.

그림 8은 흡인력에 대한 점착력의 관계로 나타낸 그

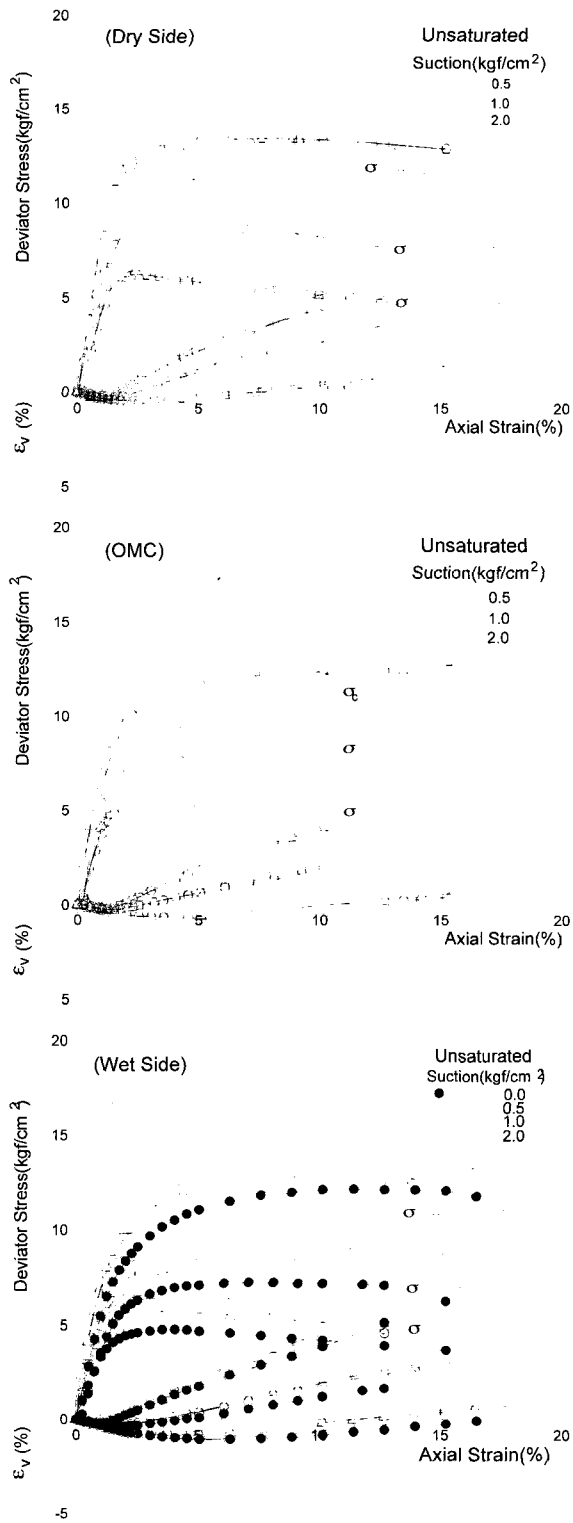


그림 6. 풍화 화강토의 응력-변형률 관계

림이다. 그림에서 직선은 초기함수비를 달리한 세 경우의 점착력의 변화를 직선식으로 회귀분석한 경우로서 식 (2)와 같이 표현한 것이고 점선은 다항식으로 회귀분석한 결과를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 건조측의  $c'$ 는 직선식으로 회귀분석한 경우 0.98로서

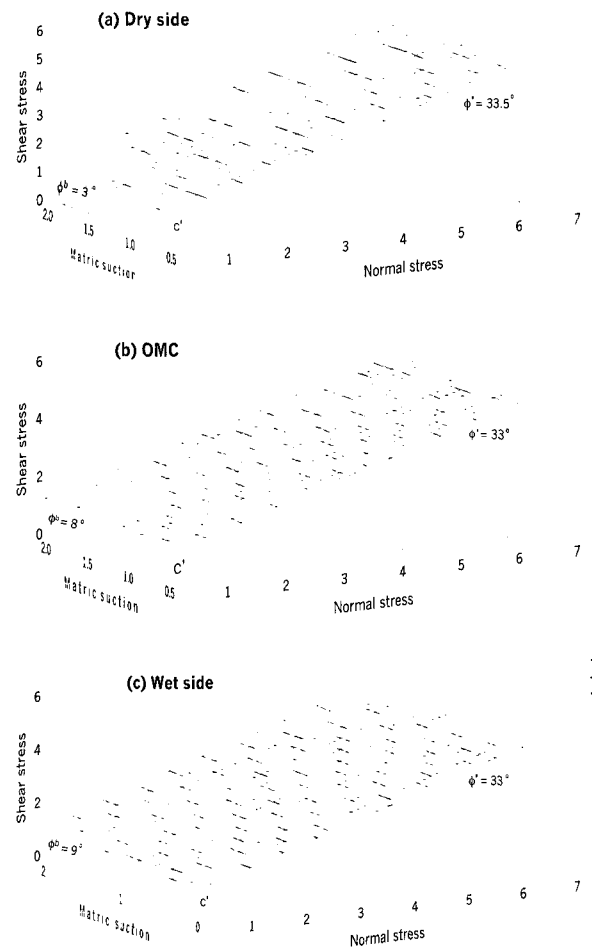


그림 7. 풍화 화강토의 확장된 Mohr-Coulomb 파괴포락선

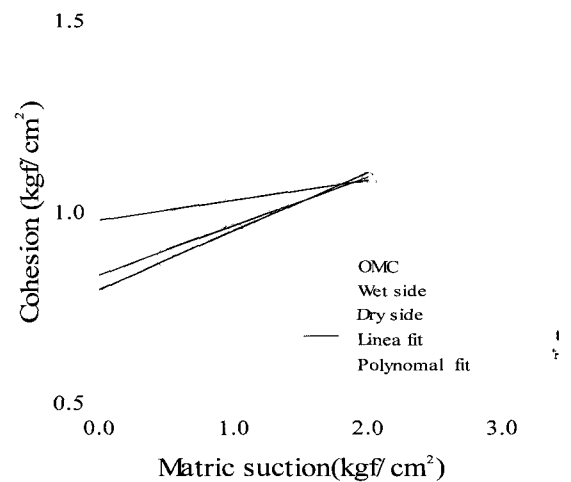


그림 8. 풍화 화강토의 흡인력에 따른 점착력의 변화

다항식으로 회귀분석한 경우의 0.96보다 다소 크게 나타나고 있다. 그러나 초기함수비가 다소 증가한 OMC와 습윤측에서의  $c'$ 값은 회귀분석식에 따라 차이가 매우 작게 나타나고 있다. 그러므로 흡인력의 증가로 인한 유효

점착력의 증가를 나타내는 기울기인  $\phi^b$ 를 결정할 때 직선식으로 회귀분석하여도 실용상 큰 문제는 없을 것으로 생각한다.

### 4.3 간극공기압 특성

비배수 전단 시 불토화토의 체적은 변화하며 시료내의 간극은 공기와 물로 차 있으므로 간극공기압과 간극수압의 변화는 역학적으로 매우 관심이 있다. 그림 9는 축변형율에 대한 간극공기압의 변화를 초기함수비, 구속압력, 흡인력을 각각 달리한 결과를 나타낸 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 구속압력이 낮은  $1\text{kgf/cm}^2$ 인 경우의 간극공기압은 변형율 초기부분만 정의 값을 갖

고 그 이후는 부의 값을 갖는다. 그리고 흡인력이 클수록 이러한 현상은 더욱 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 구속압력이 비교적 큰  $4\text{kgf/cm}^2$ 인 경우의 간극공기압은 전체적으로 정의 값을 갖으며 흡인력이 클수록 다소 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그리고 초기함수비가 작은 경우보다 함수비가 큰 습윤측에서 간극공기압의 변화가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

### 4.4 간극수압 특성

그림 10은 축변형율에 대한 간극수압의 변화를 초기함수비, 구속압력, 흡인력을 각각 달리시험한 결과를 나타낸 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 구속압력이 낮

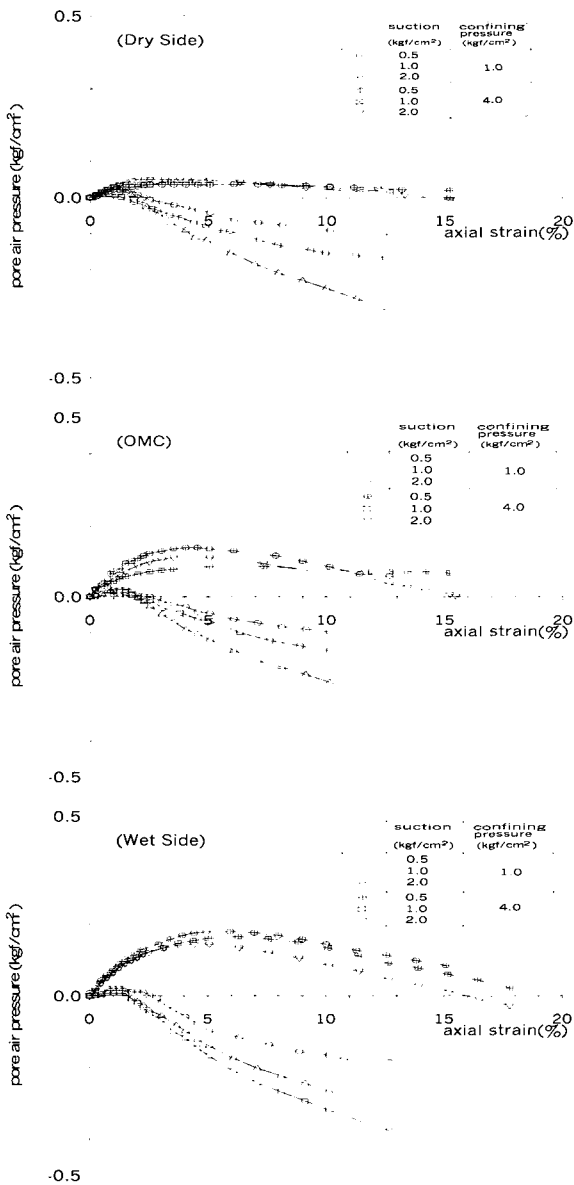


그림 9. 풍화 화강토의 간극공기압 곡선

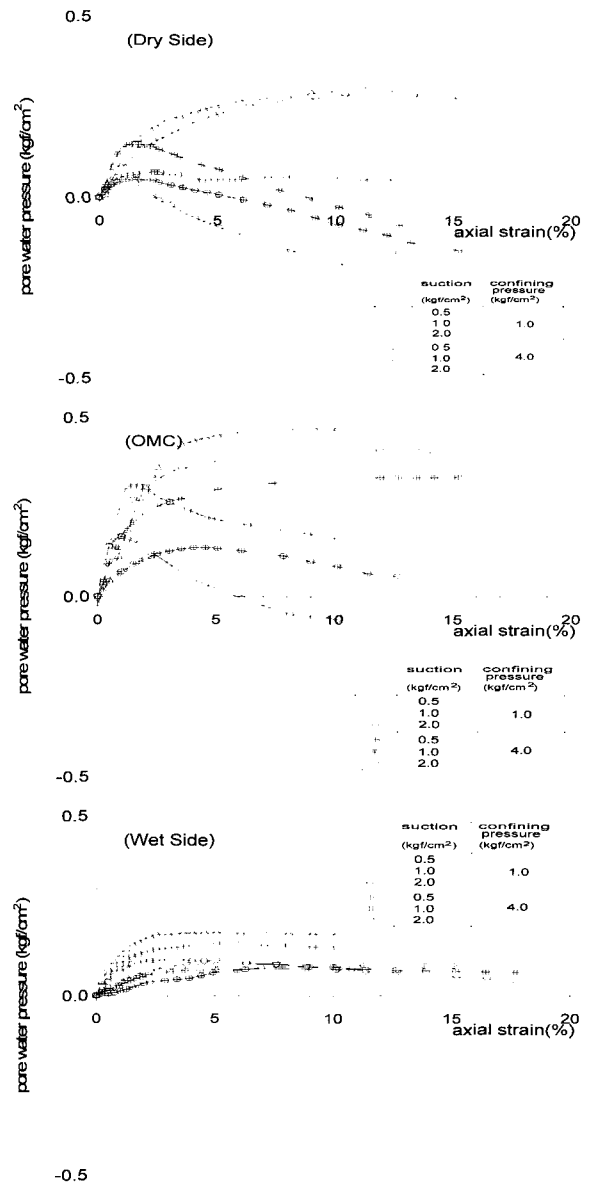


그림 10. 풍화 화강토의 간극수압 곡선

은  $1\text{kgf/cm}^2$ 인 경우의 간극수압이 구속압력이 비교적 큰  $4\text{kgf/cm}^2$ 인 경우 보다 작게 나타나는 경향이 있다. 그리고 같은 구속압력에서는 흡인력이 클수록 간극수압이 크게 나타나고 있다. 즉 흡인력이  $0.5\text{kgf/cm}^2$ 인 경우는 일정 축변형률이 경과한 후 부의 간극수압을 나타낸다. 이와 같이 불포화토는 전단 시 체적변화가 일어나고 간극수압과 간극공기압이 발생하며 강도는 포화토 보다 크게 나타나는 경향이 있다.

## 5. 결론

본 연구는 불포화 풍화 화강토의 일정 간극비에서 초기함수비의 변화에 따른 거동 특성과 비배수 전단 시 풍화 화강토의 간극수압, 체적변형 및 응력-변형률 거동 특성을 밝히고자 매우 조립인 경기도 포천지역의 풍화 화강토를 구속압력과 흡인력을 각각 달리한 비배수 3축 압축시험을 실시하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 시료의 함수비특성은 흡인력이  $3\text{kgf/cm}^2$ 정도 이상이면 흡인력이 증가해도 함수비의 변화가 없으며 한계모관상승고는 흡인력이  $0.1\text{kgf/cm}^2$ 이하이다.
- (2) 불포화토의 비배수 전단 시 체적변화는 초기함수비의 변화와 흡인력의 변화에 따른 영향보다 구속압력의 영향을 더 크게 받고 있음을 알 수 있다.
- (3) 흡인력의 변화가 축차응력에 미치는 영향은 건조축인 경우보다 습윤축의 경우가 다소 크고, 체적변형률은 모든 경우 전단 중에 체적이 팽창하며, 구속압력이 작고 흡인력이 큰 경우에 더욱더 크게 발생하고 있다.
- (4) 초기 함수비와 흡인력의 변화에 따른 내부마찰각의 변화는 미소하지만 유효 점착력은 증가하는 경향을 보이고 있다. 그리고 흡인력의 증가로 인한 유효 점착력의 증가를 나타내는  $\phi^b$ 는 선형식으로 회귀분석하여도 실용상 큰 문제는 없을 것으로 생각한다.

## 참고 문헌

1. 송창섭(1994), “불포화토의 거동예측을 위한 구성식 개발”, 서울대학교, 박사학위논문.
2. Bishop, A. W.(1959), “The Principle of Effective Stress”, *Technisk Ukeblad*, 106(99), pp.859-863.
3. Bishop, A. W., and Donald, I. B.(1961), “The Experimental of Partly Saturated Soil in the Triaxial Apparatus”, *Proceeding of the 5th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1, pp.13-21.
4. Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R.(1976), “Constitutive Relations for Volume Change in Usaturated Soils”, *Canadian J. Geotechnical*, Vol.13, pp.261-276.
5. Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R.(1977), “Stress State Variables for Usaturated Soils”, *Pro. ASCE*, 103 GT5, pp.447-466.
6. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, D. A.(1978), “The shear strength of Usaturated Soils”, *Canadian J. Geotechnical*, Vol.15, No.2, pp.261-276.
7. Hilf, J. W.(1956), “An Investigation of Pore Water Pressure in Compacted Cohesive Soils”, US Bureau of Reclamation, Tech. Mem. 654, Denver, US Bureau of Reclamation.
8. Jennings, J. E. and Burland J. B.(1962), “Limitation to the use of effective stress in partly saturated soils”, *Geotechnique*, 12(2), pp.125-144.
9. Ladd, R. S.(1978), “Preparing Test Specimens Using Undercompaction”, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.1, No.1, pp.16-23.
10. Miller, D. J. and J. D. Nelson(1993), “Osmotic Suction as a Valid Stress State Variable in Unsaturated Soil Mechanics”, *Unsaturated Soils, Geotechnical Special Publication*, No.30, pp.64-76.
11. Nelson, J. D. and E. E. Drumright(1995), “The Shear Strength of Unsaturated Tailings Sand”, *Unsaturated Soils*, Vol.1, pp.45-50.
12. Rahardjo, H.(1990), “The Study Undrained and Drained Behaviour of Unsaturated Soil”, Ph. D. dissertation, univ. of Saskatchewan, Canada.
13. Rahardjo, H. and D.G. Fredlund(1995), “Pore Pressure and Volume Change Behaviour During Undrained and Drained Loadings of an Unsaturated Soil”, *Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils*, pp.165-170.
14. Toru Onoedra, Masanobu Oda and Kazumi Minami(1976), “Shear Strength of Undisturbed Sample of Decomposed Granite Soil”, *Soil and Foundations*, Vol.16, No.1, pp.17-26.

(접수일자 2002. 4. 25, 심사완료일 2003. 6. 20)