산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제29권 A호, 2009.
Journal of Industrial Technology, Kangwon Natl. Univ., Korea, No. 29 A, 2009.

다짐 화강풍화토의 균등계수 변화에 따른 함수특성곡선에 관한 연구

A Study on the Soil Water Characteristic Curve with Change of Coefficient of Uniform in Compacted Granitic Soils

유 건 선* 김 덕 경** 유 남 재***
Yoo, Kun-Sun Kim, Doc-Kyoung Yoo, Nam-Jae

Abstract

In this study, to determine characteristics of compaction and the soil water characteristic curve(SWCC) in decomposed granitic soils, compaction tests and SWCC tests were carried out for samples having various contents of coefficient of uniform(c_u), By compacting their samples with standard Proctor density test, the effects of binder contents on maximum dry density and optimum moisture content were investigated and compared. Samples compacted with the maximum dry density and the optimum moisture content were tested by means of the SWCC, to determine their SWCC parameters, such as Brooks & Corey(λ, ψ_b), Van Genuchten (α, n, m), Fredlund & Xing(a, n, m).

키워드 : *함수특성곡선, 균등계수, 바인더, 다짐, 불포화토*
Keywords : *SWCC, c_u, binder, compaction, unsaturated soils*

1. 서론

화강풍화토는 화강암질 암석의 결정성 심성암이 풍화되어 그 장소에 잔류되어 있는 풍화잔류토이므로 풍화의 정도에 따라 암석에 가까운 것으로부터 실트, 점토와 같은 세립분을 함유한 것까지 넓은 범위의 것이 포함된다. 이러한 화강풍화토는 국내의 공사현장에서 흔히 성토재료나 기초지반으로 이용되고 있으나, 그 공학적 특성은 완전히 밝혀지지 않은 상태이다.

흙의 다짐시 binder(결합재)의 역할을 하는 #40체 통과분 시료의 함유율(이하 binder 함량이라 칭함)과 균등계수가 다짐 및 함수특성곡선에 어떠한 영향을 미치는지에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

그러므로 본 시험 연구는 성토재료로서 이용되는 다짐 화강풍화토에 대하여 binder 함량 즉, 균등계수가 함수특성곡선에 어떻게 기여하는가를 밝히고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 함수특성곡선 시험기(Tempe Cell)를 제작 다짐 화강풍화토에 대한 함수특성곡선을 구하였다. 이를 위하여 binder 함량(가적통과율 30%, 35%, 40%, 50%, 60%)을 달리한 5종류의 시료에 대하여 함수특성곡선 시험을 수행하였다.

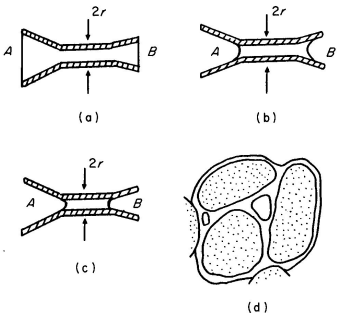
* 한라대학교 토목공학과 교수
** 강원대학교 대학원 토목공학과 석사과정
*** 강원대학교 토목공학과 교수, 교신저자

2. 불포화토의 이론적 배경

2.1 개요

습윤흙에서 표면장력 현상은 간극수에 부압을 초

래한다고 알려져 왔다(Briggs, 1897). 이 압력은 soil pull, capillary potential, capillary pressure, suction pressure, pressure deficiency, capillary tension 등으로 불려왔다. 흙-물은 입자들을 둘러싸고 있는 연속적인 필름 형태와 입자들 사이의 접촉점 부근에 메니스커스 형태로 존재한다고 간주된다(그림 2.1). 이 메니스커스는, 주어진 온도 및 함수비와 주어진 흙의 메워진 상태에 대하여 특정한 모관압력 u_c에 상응하는, 특정 곡률을 갖는다. 간극의 나머지 공간은 공기에 의해 점유된다. Hilf(1956)에 의하면, 흙-물의 모관압력을 결정하는 이 메니스커스의 곡률은 공기압력의 변화에 영향을 받지 않는다.



(a) 메니스커스가 편평 (b) 메니스커스가 곡선
(c) 최대곡률의 메니스커스 (d) 불포화토
그림 2.1 흙의 모관압력

간극유체의 누출을 허용하지 않고 압축되어 온 흙내부의 간극의 공기 압력은 공기의 압축성의 Boyle 법칙과 물로의 공기용해의 Henry 법칙을 조합함으로써 (2.1)식과 같이 계산될 수 있다. 즉, 흙 조직을 둘러싸고 있는 물의 압력인, 종 간극수압은 간극공기 압력과 모관압력의 합, $u = u_a + u_c$가 될 것이다.

$$u_a = \frac{P_a \triangle e}{e_{a1} + h e_w} \tag{2.1}$$

여기서, P_a : 대기압
$\triangle e$: 비배수 압축 동안의 간극비 변화
e_{a1} : 압축후 공기간극비
e_w : 물간극비
h : 물로의 공기 용해 계수(부피기준)

불포화토는 3상 이상의 구조를 가지며, 간극수압이 간극공기압에 대해 상대적으로 음의 값을 갖는다. 상대적으로 건조한 환경에 있는 지표부근의 흙은 부간극수압과 잠재적으로 불포화상태에 놓이게 된다.

흙을 파내어 교란시키고 재다짐하는 과정 또한 불포화토의 결과를 초래한다.

자연적으로 생성된 지표부근의 흙은 상대적으로 함수비가 낮다. 변화하는 환경하에 놓인 고소성 점토는 팽창토라고 알려져 왔다. 흙의 수축 또한 똑같이 심각한 상황을 낳는다. 느슨한 실트질흙은 젖게 되어 재하환경에 놓이게 되면 자주 붕괴된다. 상기 두 경우의 간극수압은 초기에 음(-)이었으며, 간극수압의 증가로 부피변화가 발생한 경우이다.

풍화잔류토는 근 들어 특별한 관심을 모으고 있다. 다시 한번 말하지만, 특이한 거동에 관련된 주요소는 부(-)간극수압이다. 이러한 흙에 대한 설계에 대하여 제한적으로 포화토 토질역학을 사용하기 위한 많은 시도가 있었다.

2.2 불포화토의 상(phase)

불포화토는 흔히 3상(相, phase), 즉 1) 토립자, 2) 물, 그리고 3) 공기를 갖는 것으로 정의된다. 그러나 공기-물 인터페이스 또는 수축성 표피(contractile skin)(Fredlund and Morgenstern, 1977)라는 4번째 상의 존재를 인정하는 이 보다 올바른 정의라고 생각한다. 아주 적은 양의 공기의 존재로 흙은 불포화된다. 폐색된 기포처럼 발생하기 쉬운 소량의 공기는 간극수를 압축성으로 만든다. 일반적으로, 공기상(air phase)을 흙 전체에 걸쳐 연속적이게 만드는 것은 다량의 공기이다. 동시에 그 원리와 개념이 포화토 토질역학과 다른 결과로 인하여 간극공기와 간극수의 압력은 상당한 차이가 나기 시작한다.

불포화토는 여러 상들의 혼합체이며, 그 혼합체의 응력상태가 어떻게 정의되는가에 영향을 미치기 때문에, 그 흙을 구성하는 상의 총 개수를 정립하는 것이 중요하다. 첫째로, 하나의 상이 의미하는 바를 정의하는 것은 중요하다. 상(phase)의 정의를 근거로, 불포화토는 흔히 3상으로 알려진 것보다는 실제로 4개의 상으로 구성된다. 토립자, 공기, 물 상에 추가하여 수축성 표피(contractile skin)로 언급되는 공기-물 인터페이스라는 제4의 상이 존재한다고 가정한다.

공기 상(air phase)이 연속적일 때, 수축성 표피는 토립자와 상호작용하며 그 흙의 역학적 거동에 영향을 미친다. 연속적인 공기 상을 갖는 불포화토의 요소를 그림 2.2에 나타내었다. 공기 상이 폐색된 기포로 구성될 때, 물은 상당한 압축성을 보인다.

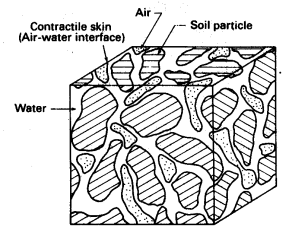


그림 2.2 연속적인 공기통로를 갖는 불포화토 구조

각 상의 부피와 무게를 도식적으로 표현하면 그림 2.3와 같다. 그림 2.3(a)는 불포화토의 4상을 보여주며, 수축성 표피의 두께는 단지 몇 개의 분자층에 불과한 수준이다. 그러므로 수축성 표피의 물리적 구분은 불포화토의 부피-무게 관계를 정립할 때 불필요하며, 수축성 표피는 물 상의 한 부분으로서 고려된다. 따라서 부피-무게 관계를 언급할 때 그림 2.3(b)와 같이 단순화된 3상의 체계를 사용할 수 있다.

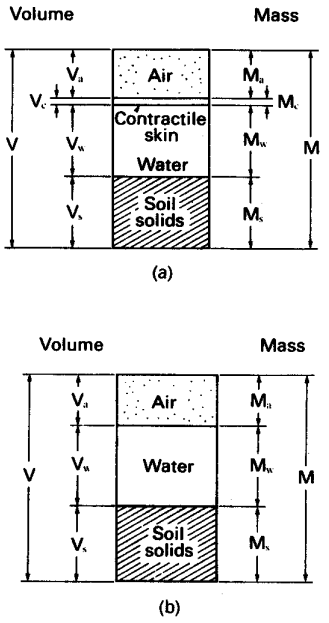


그림 2.3 불포화토의 4상 및 단순화된 3상

2.3 축전이 기법(Axis Translation Technique)

-1기압(절대기압)에 근접한 부(-)간극수압을 갖는 불포화토를 시험할 때 어려움이 발생한다. 부압을 측정하는 계기 내의 물은 압력이 절대기압($-1.0kg/cm^2$)에 가까워질 때 Cavitation을 일으키기 시작한다. Cavitation이 발생함에 따라, 측정기구는 물에서 나온 공기로 채워지며, 이때 측정기구의 물은 흙속으로 밀려 들어가게 된다. 따라서 절대기압에 가깝거나 그보다 낮은 부간극수압을 갖는 불포화토의 간극수압을 일반적인 측정기구로 측정하는 데에는 한계가 있다.

한 축전이 기법을 사용하면 부(-)간극수압을 측정할 수 있다. 측정은 불포화 비교란시료 또는 다짐시료를 대상으로 수행된다. 이 기법은 Hilf(1956)가 처음으로 제안하였으며, 그는 그림 2.4에 나타낸 장비를 사용하여 다음과 같이 부(-)간극수압을 측정하였다.

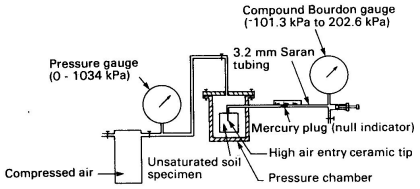


그림 2.4 Hilf의 축전이 기법을 사용한 부간극수압 측정기

불포화시료를 밀폐된 압력셀에 넣고, 간극수압 측정 탐침을 시료 내부에 삽입한다. 이때 탐침 끝에는 포화된 세라믹필터(High Air Entry Ceramic Filter, HAECF)가 설치되어 있으며, 탐침은 무공수(deaired water)로 채워진 튜브(중간에 수은 null indicator 포함)를 통하여 null-type 압력측정기구에 연결되어있다. 탐침이 시료에 삽입되자마자 튜브 속의 물은 인장력을 받게 되어 Bourdon 게이지는 부(-)압을 나타내기 시작한다. 이때 측정시스템 내부의 물이 받는 추가 인장력은 압력셀의 압력을 증가시킴으로써 알 수 있다. 종적으로, 증가된 공기압력에 의해 null indicator의 수은이 더 이상 압력셀 쪽으로 이동하지 않을 때 비로소 형조건이 얻어진다. 이때 압력셀의 공기압력과 측정된 부간극수압($-1.0kg/cm^2$ 이하)의 차이를 이 흙의 표면흡인력(matric suction, $u_a - u_w$)으로 간주한다.

압력셀의 공기압력이 대기압과 같을 때,(즉, $u_a = 0$) 표면 흡인력값은 수치적으로 부(-)간극수압으로 나타난다. 이와 같이 축전이 기법은 단순히 축의 기준점을 대기압에서 종 공기압력으로 이동시킴으로써(축전이), 실제 시료의 간극수압이 절대기압보다 낮을 경우 측정기구 내부의 물의 압력이 절대기압 아래로 내려가 Cavitation 현상이 생기는 것을 방지한다.

따라서 부(-)간극수압을 측정할 수 있을 때까지 공기압력을 증가시키는 방법을 축전이 기법이라 한다.

3. 연구 방법

3.1 시료의 기본물성

본 연구의 시험에 사용한 시료는 원주 봉화산

APT신축현장에서 채취한 화강풍화토로서 그 물리적 성질은 표 3.1과 같으며, 통일분류법에 의하면 SP로 분류된다.

표 3.1 화강풍화토의 물성

비중	2.70
#40체 통과량	24.0
#200체 통과량	3.2
균등계수, Cu	1.50/0.29 = 5.17
액성한계	38.5
소성한계	32.0
소성지수	6.5
통일분류법	SP
AASHTO분류법	A-2-4

3.2 시료조성

다양한 균등계수를 갖는 시료를 조성하기 위하여, #40체 보다 작은 입경의 세립분과 #40체 보다 큰 입경의 조립분을 각각 만들고 이들을 혼합하여 5종류의 시료를 조성하였다. 세립분은 그림 3.1과 같은 체진동기를 사용하여 노건조시료를 1분동안 진동시켜 통과한 시료를 사용하였으며, 조립분은 노건조시료 중 #40체에 잔류한 시료와 #40체에 잔류한 시료를 물로 세척하여 세립분을 제거한 깨끗한 시료 등 두 종류를 사용하였다.

노건조시료와 세척시료에 대해서 체 분석한 결과는 그림 3.2와 같다. 이 그림에서 보는 바와 같이 노건조시료에 비해 세척시료에는 상당한 양의 세립분이 나타나는데, 이것은 노건조시료의 조립토에 세립분이 붙어있음을 의미한다. 따라서, 노건조시료와와 세척시료의 입도분포 차이를 고려하여 시료를 다음과 같은 방법으로 조성하였다. 원시료의 #40체 통과율이 건식시 약 17% 습식시 약 24%이므로, 조립토를 세척한 시료를 사용하여 표 3.2와 같은 방법으로 5가지 시료를 조성하였다.

그림 3.1 체 진동기

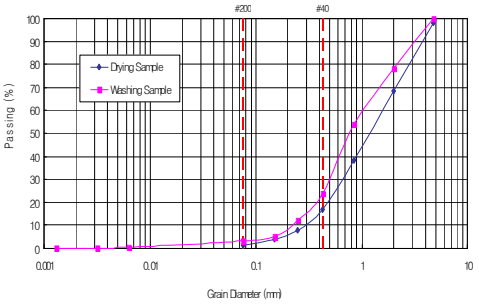


그림 3.2 체분석 결과

표 3.2 조성 시료의 입도분포(2500g)

체번호	입경	조성 시료량(g)				
(#)	(㎜)	P2	P3	P4	P5	P6
10	2.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	1.180	1000	0.0	0.0	0.0	0.0
18	1.000	0.0	1000	0.0	0.0	0.0
20	0.850	0.0	0.0	1000	0.0	0.0
30	0.600	0.0	0.0	0.0	1000	0.0
40	0.425	750	625	500	250	1000
100	0.150	500	625	750	1000	1250
200	0.075	167.5	167.5	167.5	167.5	167.5
pan	-	82.5	82.5	82.5	82.5	82.5
d60	mm	1.18	1.00	0.85	0.60	0.43
d10	mm	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Cu	d60/d10	7.87	6.67	5.67	4.00	2.83

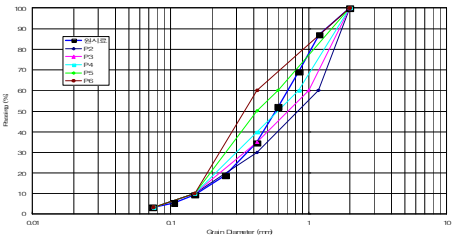


그림 3.3 조성 시료의 입도분포 곡선

표 3.2의 방법으로 시료를 조성한 결과, 5종류 조성시료의 실제 입도분포는 기존 조성과 비슷하게 표 3.3 및 그림 3.4과 같이 나타났으며, 균등계수는 3.6~7.1로서 입도분포가 양호한 것으로 나타났다.

표 3.3 조성 시료의 실제 입도분포(500g)

체번호 (#)	입경 (㎜)	조성 시료량(g)				
		P2	P3	P4	P5	P6
10	2.000	0.60	1.10	0.40	0.40	
16	1.180	202.4	0.00	0.00	0.00	
18	1.000	0.00	205.8	0.00	0.00	
20	0.850	0.00	0.00	202.6	0.00	
30	0.600	0.00	0.00	0.00	192.2	
40	0.425	130.2	110.9	95.3	59.2	확인
100	0.150	119.4	122.1	148.7	196.6	불가
200	0.075	22.4	45.4	34.8	35.6	
pan	-	19.5	14.5	17.8	14.7	
d60	mm	1.20	1.02	0.87	0.58	
d10	mm	0.17	0.15	0.16	0.16	
Cu	d60/d10	7.06	6.80	5.44	3.63	

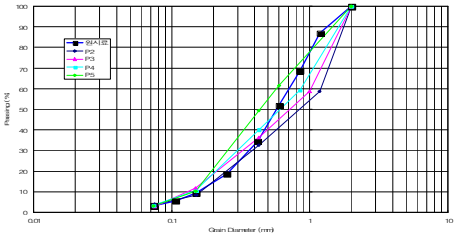


그림 3.4 조성 시료의 실제 입도분포 곡선

3.3 다짐 시험방법 및 결과

본 연구의 함수특성곡선에 사용할 시료의 조건을 정하기 위하여 상기 3.2절에서 언급한 방법으로 조성한 교란시료에 대하여 다짐시험을 실시하였다.

다짐시험은 표 3.4에 요약한 표준다짐시험방법으로 실시하였으며, 혼합시료의 함수비를 맞추기 위하여 분무기와 시료 스푼을 이용하여 수작업으로 시료를 교반하였다. 또한 다짐 시 시료에 가해지는 다짐에너지의 일관성을 유지하기 위하여, 그림 3.5에 나타낸 자동다짐시험기를 이용하였다.

표 3.4 다짐방법의 종류(KS F2312)

다짐 방법	램머 무게 (kgf)	몰드 안지름 (㎝)	다짐 층수	층당 다짐 횟수	허용 대 입경
표 준	2.5	10	3	25	19

자동다짐시험기의 낙하고는 회전원판 사이에 삽입되는 원호모양의 마찰 고무바의 접촉 길이를 30cm로 조정함으로서 정하였고, 추를 교환하여 램머 무게를 조절하였다. 또한 램머 낙하 시 다짐몰드가 고정되어있는 바닥판을 회전시킴으로써 다짐의 균일성을 확보하였다.

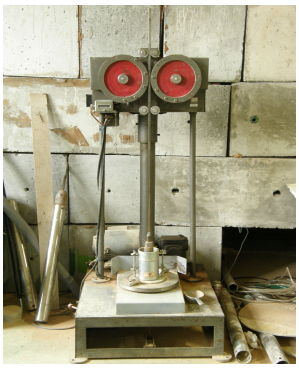


그림 3.5 자동다짐시험기 전경

3.3.1 원시료의 다짐

그림 3.6에서 보는 바와 같이 표준다짐결과, 적함수비는 15.1%, 대건조단위중량은 1.765t/㎥로, 공기 함유율은 다짐시 20% 초반인 것으로 나타났다.

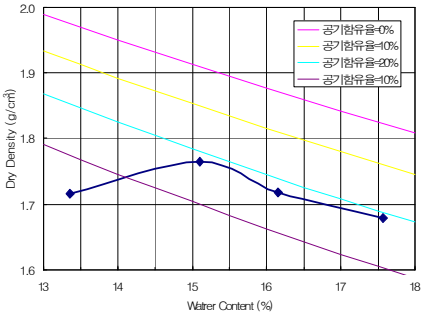


그림 3.6 원시료의 다짐곡선

3.3.2 균등계수별 조성시료의 다짐

원시료에 균등계수를 조정하여 조성한 시료(P2~P6)에 대하여 균등계수에 따른 대건조단위중량과 적함수비의 변화를 그림 3.7와 그림 3.8에 각각 나타내었다. 대건조단위중량은 균등계수가 증가함에 따라 일정하게 증가하리라는 우리의 예측과는 달리, 시료의 균등계수가 좋지 않다고 판단되는 Cu<6 인 상태에서 꾸준히 증가하는 듯 하였으나, 시료의 균등계수가 좋다고 판단되는 Cu>6 에서 조금씩 증가하는 경향을 보였다. 한 적함수비는 균등계수가 증가함에 따라 뚜렷한 경향을 보이는 것은 아니지만, 대체적으로 균등계수가 증가함에 따라 적함수비가 감소하는 경향을 볼 수 있었다.

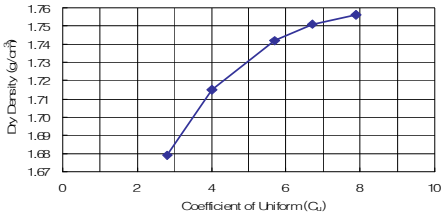


그림 3.7 균등계수에 따른 최대건조단위중량의 변화

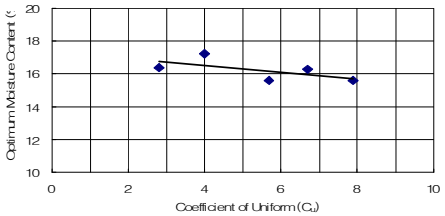


그림 3.8 균등계수에 따른 최적함수비의 변화

원시료에 균등계수를 조정하여 바인더 함량을 변화시킨 조성 시료(P2~P6)에 대하여 대건조단위중량과 적함수비의 변화를 그림 3.9와 그림 3.10에 각각 나타내었다. 대건조단위중량은 바인더 함량이 증가함에 따라 비선형적으로 감소하는 경향을 보였으며, 적함수비는 바인더함량이 증가함에 따라 적함수비가 다소 증가하는 경향을 볼 수 있었다.

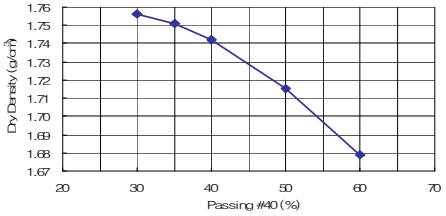


그림 3.9 바인더 함유량에 따른 최대건조단위중량의 변화

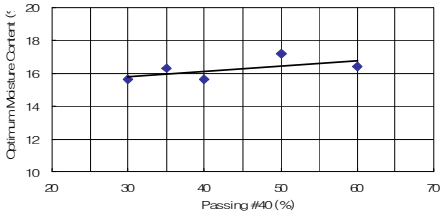


그림 3.10 바인더 함유량에 따른 최적함수비의 변화

3.4 함수특성곡선 시험방법 및 결과

3.4.1 시료준비과정

P6 조합으로 시료를 조성한다면(#10통과량=100%, #40통과량=60%, #100통과량=10%, #200통과량=3.3%) 시료의 함수비를 16.35%로 맞추고, 24시간(ASTM D-698)동안 항습수조(데시케이터를 개조하여 제습제 대신 물을 사용)에 비닐 랩으로 감싸 방치하여 시료전체가 균질한 함수비가 되도록 하였다. 사용하기 리하게 150g 씩 각각 나누어 비닐 랩에 씌어서 항습수조에 보관하였다.

3.4.2 시료조성과정

Tempe Cell 내부에 함수비 16.35% 흙을 넣고 γd=1.682g/cm^{3}가 되도록 그림 3.11과 같이 정적 다짐하여 Φ=60mm, h=20mm 크기의 시료가 되도록 하기 위하여 투입될 흙의 무게를 산정하였다.

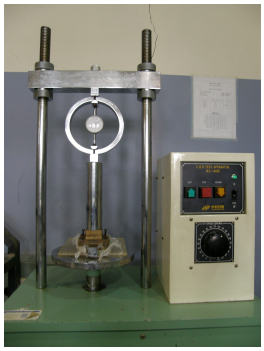


그림 3.11 CBR 시험기를 이용한 정다짐

실제 함수비(ω)= 16.35%
건조단위중량(γd)= 1.682g/cm3
습윤단위중량(γt)= 1.682×(1+0.1635)= 1.957g/cm3

부피(V)= $\frac{\pi \times 6^2}{4} \times 2$= 56.549cm3

흙의 무게(W)= 1.957×56.549= 110.67g

따라서 상기와 같이 다짐될 시료의 무게가 결정되면, 해당 무게만큼의 시료를 Tempe Cell에 넣고 3tonf 용량의 CBR시험기를 사용하여 흙을 정적 다짐함으로서 다음과 같이 시료를 조성하였다.

Tempe Cell의 높이(60mm)와 다짐금속봉의 높이(100mm)를 버니어 캘리퍼스로 측정하고, 시료높이를 20mm로 만들기 위해 CBR시험기로 압축을 가하였다.

예를 들어 Tempe Cell에 110.67g의 시료를 넣었을때, Tempe Cell 밖으로 돌출된 다짐금속봉의 높이가 89mm라면 11mm가 Tempe Cell내부에 들어가 있는 부분이므로 이때 시료높이는 60 - 11 = 49mm이다. 따라서 시료높이가 20mm가 되기 위해서는 다짐금속봉이 49 - 20 = 29mm가 더 들어가

야 한다. 따라서 CBR 시험기의 다이얼 게이지 하나의 눈금이 0.01mm 이므로 29바퀴가 돌아가도록 압축을 가한다. 여러개의 시료를 일관성 있게 조성하기 위해 CBR시험기의 속도를 조정하였는데, 초 CBR시험기의 속도계기판에서 "120속도"로 빠르게 압축을 가하다 마지막 2mm(두바퀴)를 남기고 "40속도"로 천천히 압축을 가하였다. 한 압축하중을 정지한 후 1분 만에 다이얼 게이지 값을 읽고 하중을 제거 하였으며, 5분후 흙의 팽창으로 인해 상부 재하판이 솟아오른양을 버니어 캘리퍼스로 측정하고 실제 다짐된 시료의 부피를 구하여 건조단위 중량을 다시 구하였다.

P5 ~ P2 시료에 대해서도 같은 간극비를 갖게 하기위해 함수비와 대 건조단위중량을 P6시료와 동일하게 위과정을 반복하여 정다짐하였다.

3.4.3 Tempe Cell을 이용한 함수특성곡선 시험 방법 및 결과

Tempe Cell을 포함한 불포화토와 관련된 모든 시험에서 필터의 포화는 필수적이며, 이를 위해 필터위에 deaired water를 충분히 붓고(약500cc), 공압을 200kPa 이상 가하여 필터를 통하여 물이 빠져나오도록 한다. 소 3회 반복. 이때 물이 빠져나오는 양을 측정하여 필터의 투수계수를 측정한다. 이 투수계수를 제작당시의 투수계수(5 bar 필터의 경우, 1.2×10^{-7}cm/s, Table 4.6, Fredlund and Rahardjo Book, P83)와 비교하여 필터의 파손여부를 확인한다.

완벽히 포화된 세라믹 필터를 포함한 Tempe Cell에 3.4.2절과 같이 정다짐한 시료를 포화시킨후 표 3.5와 같이 Matric Suction 단계를 변화시켜 체적함수비를 구한다.

그림 3.13과 같이 함수특성곡선 시험을 실시한다.

표 3.5 함수특성곡선 시험 Matric Suction과정

Matric Suction (kpa)	VolumetricWater Content (%)
1	47.0
2	46.5
4	45.3
8	38.6
16	34.3
32	31.9
64	29.4
128	26.7
256	23.7

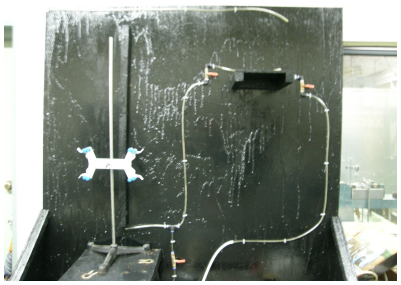


그림 3.12 함수특성곡선 시험전경

실측값으로 부터 Brooks & Corey 와 Van Genuchten, Fredlund & Xing의 세가지 model을 이용하여 각각의 그래프를 그림 3.14 ~ 그림 3.16에 나타내었고, 표 3.6에서는 각각의 계수를 비교분석하였다. 대체적으로 측정값과 유사하게 식과 계수등을 구할수 있었으며, 그중 Fredlund & Xing model이 실험값과 가장 유사하다고 볼 수 있다.

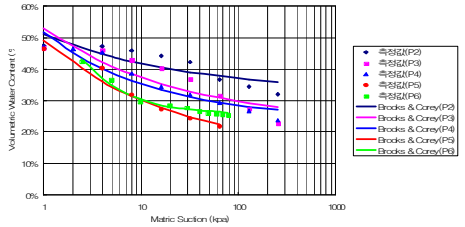


그림 3.13 Brooks & Corey model

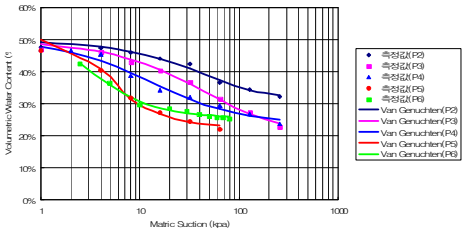


그림 3.14 Van Genuchten model

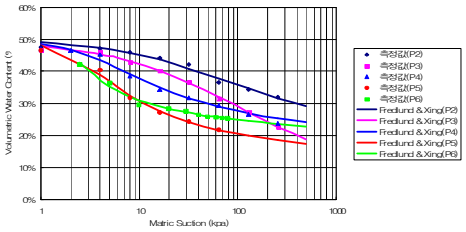


그림 3.15 Fredlund & Xing model

표 3.6 Model별 계수비교

구분	Brooks & Corey		Van Genuchten		Fredlund & Xing	
P2	λ	0.291	α	0.000	a	16.260
			n	0.800	n	0.810
	Ψ_b	1.250	m	77.385	m	0.500
P3	λ	0.316	α	0.000	a	48.480
			n	0.700	n	0.650
	Ψ_b	1.370	m	48.024	m	1.400
P4	λ	0.385	α	0.060	a	2.840
			n	0.900	n	1.400
	Ψ_b	1.181	m	1.197	m	0.400
P5	λ	0.319	α	0.372	a	2.240
			n	11.900	n	1.800
	Ψ_b	0.913	m	0.083	m	0.500
P6	λ	0.920	α	0.369	a	1.720
			n	1.900	n	3.400
	Ψ_b	1.735	m	0.591	m	0.300

4. 결론

원주 화강풍화토에 대해 다짐시험 수행 및 함수특성곡선을 구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 다짐거동은 균등계수가 클수록 대건조밀도가 비선형적으로 증가하며, 적함수비가 다소 감소한다.

2) 다짐거동은 #40체 통과율 즉, 바인더 함량이 커질수록(30% ~ 60%구간 내) 대건조밀도는 비선형적으로 감소하며, 적함수비는 다소 증가한다.

3) 함수특성곡선을 Brooks & Corey 와 Van Genuchten, Fredlund & Xing의 각 세가지 model로 비교분석한 결과 아래와 같은 계수값을 얻을 수 있었으며, 이 계수들은 함수특성곡선을 수식화하는데 중요하게 사용될 수 있다. 또한 Fredlund & Xing model이 실험값과 가장 유사하다고 볼 수 있다.

구분	Brooks & Corey		Van Genuchten		Fredlund & Xing	
P2	λ	0.291	α	0.000	a	16.260
			n	0.800	n	0.810
	Ψ_b	1.250	m	77.385	m	0.500
P3	λ	0.316	α	0.000	a	48.480
			n	0.700	n	0.650
	Ψ_b	1.370	m	48.024	m	1.400
P4	λ	0.385	α	0.060	a	2.840
			n	0.900	n	1.400
	Ψ_b	1.181	m	1.197	m	0.400
P5	λ	0.319	α	0.372	a	2.240
			n	11.900	n	1.800
	Ψ_b	0.913	m	0.083	m	0.500
P6	λ	0.920	α	0.369	a	1.720
			n	1.900	n	3.400
	Ψ_b	1.735	m	0.591	m	0.300

이와 같이 정다짐하여 구한 함수특성곡선을 토대로 불포화 전단시험을 수행하여 불포화 전단강도 정수(c', ϕ', ϕ_b)를 구하는 과정은 차후 과제로 남긴다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호#'08지역기술혁신 B01-01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Barden, L. and Sides, G. R. Engineering behavior and structure of compacted clay, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 96, No. SM4, pp. 1171, 1970.

[2] Bishop, A. W. *The principle of effective stress*, Teknisk Ukeblad, 39, pp. 859-863, 1959.

[3] Bishop, A. W., Alpan, I., Blight, G. E., and Donald, I. B. Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils, Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Boulder, Colorado, pp. 503-532, 1960.

[4] Drumright, E. E. *The contribution of matric suction to the shear strength of*

unsaturated soils, PhD Thesis, Colorado State University, Fort Collins, 1989.

[5] Escario, V. and Saez. J. *The shear strength of partly saturated soils*. Geotechnique 36, No. 3, pp. 453-456, 1986.

[6] Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, R. A. *The strength of unsaturated soils*. Can. Geotech. J. 15, No. 3, pp. 313-321, 1978.

[7] Gan, J. K., Fredlund, D. G. & Rahardjo, H. *Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test*, Can. Geotech. J. 25, No. 3, pp. 500-510, 1988.

[8] Gilbert, O. H. *The influence of negative pore water pressures on the strength of compacted clays*, SM Thesis, MIT, 1959.

[9] Hilf, J. W. *An Investigation of Pore-Water Pressure in Compacted Cohesive Soils*, Technical Memorandum 654, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 1956.

[10] Hogentogler, C. A. Essentials of soil compaction, Proceedings of the Highway Research Board, *National Research Council, Washington, D.C.*, pp. 309-316, 1936.

[11] Karube, D. *New concept of effective stress in unsaturated soil and rock*. Special Technical Publication 977, p. 539-552,. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1988.

[12] Khalili, N. and Khabbaz, M. H. *A unique relationship for χ for the determination of the shear strength od unsaturated soils*, Geotechnique, No. 5, pp. 681-687, 1998.

[13] Lambe, T. W. *Structure of compacted clay*, Transactions ASCE, 125, pp. 682-705, 1960.

[14] Langfelder, L. J., Chen, C. F., and Justice, J. A. Air permeability of compacted cohesive soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 94, No. SM4, pp. 999, 1968.

[15] Lee, K. L., and Haley, S. C. Strength of compacted clay at high pressure, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 94, No. SM6, pp. 1303, 1968.

[16] Olson, R. E. Effective stress theory of soil compaction, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 89, No. SM2, pp. 27-45, 1963.

[17] Proctor, R. R. The design and construction of rolled earth dams, *Engineering News Record III*, August 31, September 7, 21, and 28, 1933.

[18] Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. and Clifton, A. W. *Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction*. Can. Geotech. J. 31, pp. 379-392, 1996.

[19] Ning Lu, William J. Likos, *Unsaturated Soil Mechanics*, pp. 494-529, 2004.