

강우시 점토함유량에 따른 화강풍화토의 불포화 침투 특성

Effect of Rainfall-Induced Infiltration on Unsaturated Weathered Soils with Varying Clay Contents

유 남 동¹ Yu, Nam-Dong

정 상 섭² Jeong, Sang-Seom

김 재 홍³ Kim, Jae-Hong

박 성 완⁴ Park, Seong-Wan

Abstract

In this study, experiments on the SWCC were performed in order to find out the characteristics of unsaturated soil and to analyze the stability of unsaturated weathered slopes with rainfall-induced wetting. Several soil types classified by mixture portion of clay (CH) in the weathered soil (SW) were used in experimental tests. To achieve the SWCC, the filter paper method was used on SW with varying clay contents. A tensiometer test was used for measuring wetting front suction of the soils in a laboratory with varying relative densities. Based on the experimental results, it is shown that the wetting front suction increases as clay content of mixture soil increases : in particular, the wetting front suction increases sharply as the clay contents increase. It is also found that wetting front suction affects the initial wetting band depth and stability of the slope.

요 지

본 연구에서는 불포화 지반의 특성을 파악하고, 강우시 불포화 사면의 포화깊이에 따른 안정성을 파악하기 위해 국내 지반의 전형적인 화강풍화토(SW)에 점토(CH) 함유량 0~30%을 변화시켜 가며 함수특성곡선 산정 실험을 수행하였다. 또한 강우로 인해 증가되는 포화깊이에 영향을 미치는 투수계수 및 suction을 구하기 위해 다짐도에 따른 강도정수 변화를 측정하였다. 침투로 인해 발생하는 지반내의 suction 변화를 점토함유량에 따라 모형 시험과 수치해석을 사용하여 분석하였다. 특히 불포화 지반에서 포화지반으로 바뀌는 과정에 잔류하는 wetting front suction은 점토 함유량과 지반의 다짐도에 따라 민감하게 변화하였다. 강우시 침투수의 거동을 파악하기 위해 상용프로그램인 SEEP/W를 통해 침투해석을 수행하였고, 침투해석 결과를 연동시켜 포화깊이에 따른 사면의 안정성을 SLOPE/W 프로그램을 이용하여 포화깊이 및 점토함유량에 따라 비교·분석하였다. 해석결과를 통해 wetting front suction은 초기 포화깊이에 영향을 미치며 안전율이 변하는 것을 알 수 있다.

Keywords : Clay contents, Filter paper, SWCC, Tensiometer, Unsaturated, Wetting band depth, Wetting front suction

1. 서 론

불포화지반의 중요한 요소는 흙의 흡수력(suction)이

다. suction의 개념은 1900년대 초부터 연구가 시작되었으며(Buckingham, 1907; Edlefsen & Anderson, 1943; Childs & Collis-George, 1948; Bolt & Miller, 1958), 1965

1 정회원, (주)도화종합기술공사, 지반공학부 (Member, Dohwa Consulting Engineers, Co., LTD., Geotechnical Dept.)

2 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., soj9081@yonsei.ac.kr)

3 정회원, 박사과정, 토목공학과, University of Colorado at Boulder (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., University of Colorado at Boulder)

4 정회원, 단국대학교 공과대학 토목공학과 전임강사 (Member, Full-Time Lecturer, Dept. of Civil Engrg., Dankook Univ.)

년 Aitchison이 “Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils”의 보고서에서 흙의 흡수력(suction)을 정량적인 개념과 열역학적인 구성요소로 규명하면서 지반공학에 도입하였다. Fredlund & Rahardjo(1993)에 의해 이론과 실험적인 불포화 지반의 역학적 개념이 정립되었으며, 최근까지 불포화 특성을 연구하기 위해 Fredlund 교수는 실험장비와 응용프로그램 개발을 하고 있다. 또한 Murray D. Fredlund(1997)와 함께 함수특성곡선(SWCC)을 변화시키는 중요한 요소인 흙의 입도분포, 건조밀도, 간극비 그리고 흙의 비중에 상응하는 6000여 가지 흙을 분류시켜 함수특성곡선을 찾는 프로그램을 개발하였다.

Leong & Rahardjo(2002)는 SWCC를 산정하는데 수행되는 filter paper 방법에 영향을 주는 요소에 대하여 연구하였다.

국내에서는 김상규 등(1999, 2000)이 불포화 풍화토의 침투 및 강도특성에 관한 연구를 수행하였으며, 조성은 등(2000, 2001)은 국내 토사사면의 불포화 거동특성을 규명하고자 수치해석기법과 침투에 대한 수정간략법을 제안하였다. 또, 김재홍(2000,2002)은 강우시 불포화 사면의 안정성분석과 강우시 불포화 무한사면의 습윤에 따른 안정해석을 수행하였으며, 류지협 등(2003)은 모관흡수력을 고려한 사면의 안정성을 평가 분석하였다.

본 연구에서는 국내에 널리 산재해 있는 화강풍화토(SW)에 점토(CH)를 첨가하여 성형한 혼합토를 대상으로 불포화지반의 특성을 잘 반영해 주는 함수특성곡선과 wetting front suction 산정하고 강우로 인한 침투해석을 수행하여 기존의 포화해석 및 불포화해석을 통해 사면의 안정성을 검토하고자 한다.

2. 불포화 지반의 특성

일반적으로, 포화지반의 구조는 흙입자와 물의 2상으로 이루어져 있는 반면에 부분포화된 지반은 흙 입자와 물, 공기, 물-공기 사이의 모세관 현상을 발생시키는 수축피(contractile skin) 4상으로 이루어져 있다. 따라서 불포화 지반과 관련된 흐름, 변형 및 강도특성을 적절히 고려하기 위해서는 이들 거동특성에 대한 간극수와 간극공기 사이의 압력차이로 나타나는 모관흡수력의 영향을 반드시 고려할 필요가 있다. 또한 불포화 정도에 따른 모관흡수력의 발생정도를 나타내는 함수특성곡선은 불포화토의 거동을 해석하는데 매우 중요한 요소이며 토질별 함수특성곡선의 결정은 반드시 필요한 단계라 할 수 있다.

흙 속의 수분의 양은 중량함수비, 체적함수비 그리고 포화도로 표현할 수 있으나, 침투해석을 위해서는, 불포화 지반의 구성요소인 흙 입자, 물, 공기의 세 가지 구성성분으로 고려되어야 한다. 이러한 특징 때문에 포화지반 해석에서 사용되는 함수비(W_w/W_s)보다는 간극공기를 고려하는 체적함수비(V_w/V) 개념으로 설명된다. 그러므로, 불포화 지반의 함수특성곡선은 체적함수비와 흡수력과의 관계로 곡선을 나타낸다. 많은 함수특성곡선이 제안되어져 왔으며 거의 모든 함수특성곡선은 다음 식 (1)과 같은 일반식에서 유도된다(Leong & Rahardjo, 1997).

$$a_1 \theta^{b_1} + a_2 \exp(a_3 \theta^{b_1}) = a_4 S^{b_2} + a_5 \exp(a_6 S^{b_2}) + a_7 \quad (1)$$

여기서, $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, b_1, b_2$ 는 상수, S 는 모관흡수력, θ 는 표준화된 체적함수비를 나타낸다. θ 는 $(\theta_w - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ 으로 표현되며, 여기서 $\theta_w, \theta_r, \theta_s$ 는 체적함수비, 잔류체적함수비, 포화체적함수비이다. 기존의 여러 연구자들은 식 (1)과 같은 함수특성곡선 방정식의 일반식으로 여러 지역의 지반 특성에 맞는 함수특성곡선 유형에 따라 방정식을 간편화시켜 제안하였다. a 와 b 에 관련된 상수들을 가정하여 여러 연구자들이 각각의 대상 시료에 맞게 제안한 간편식들을 제안하였으며, 다음 식 (2)와 식 (3)은 van Genuchten과 Fredlund & Xing(1994)이 제안한 방정식들이다

$$\theta = \left[\frac{1}{1 + (a \cdot s)^n} \right]^m \quad (2)$$

$$\theta = \left[\frac{1}{\ln \left\{ e + \left(\frac{s}{a} \right)^n \right\}} \right]^m \quad (3)$$

미지수인 a, n, m 값들은 불포화 지반의 주요 특성을 알 수 있는 중요한 매개변수이다. 각각의 매개변수들은 곡선의 공기함입값(air entry value), 경사, 잔류함수비를 조절하는 계수가 된다. 여기서, $a=1/a$ 이다.

3. 불포화토 실험 및 수치해석

3.1 실험 시료

본 연구에서는 통일분류법에 의해 SW로 분류된 화강 풍화토에 CH로 분류된 점토를 사용하여 점토분의 함유량을 5%, 10%, 20%, 30%로 늘려가면서 성형된 시료를

실험재료로 사용하였다. 실험 재료는 연세대학교내 굴착현장에서 채취한 풍화토와 김해지역의 지반개량 공사현장에서 채취한 점토를 사용하였다. 다음 표 1과 그림 1은 실험 시료인 풍화토와 점토의 기본물성실험 및 입도분포곡선, 표 2는 점토의 중량비에 따라 성형된 시료에 대한 기본물성 실험결과이다.

표 1. 풍화토와 점토의 기본물성실험 결과

분류		풍화토	점토
통과중량백분율			
10% 입경(mm)	D ₁₀	0.2	0.00001
30% 입경(mm)	D ₃₀	0.62	0.0006
60% 입경(mm)	D ₆₀	1.6	0.008
균등계수	C _u	8	800
곡률계수	C _c	1.2	4.5
비중	G _s	2.645	2.720
No. 200체 통과량 (%)		4.56	98.8
액성한계 (%)	LL		72.3
소성한계 (%)	PL	NP	27.4
소성지수 (%)	PI		44.9
통일분류(USCS)		SW	CH

표 2. 성형시료의 기본물성실험 결과

실험	SW	SW+CH 5%	SW+CH 10%	SW+CH 20%	SW+CH 30%	CH
비중	2.65	2.65	2.66	2.67	2.68	2.72
γ_{dmax} (kN/m ³)	18.74	18.35	18.00	17.81	17.61	-
γ_{dmin} (kN/m ³)	11.44	11.24	11.16	10.09	10.00	-
LL (%)	-	28.32	32.30	34.32	36.55	72.3
PL (%)	-	20.29	21.05	21.95	22.12	27.4
PI (%)	-	8.03	11.25	12.37	14.43	44.9

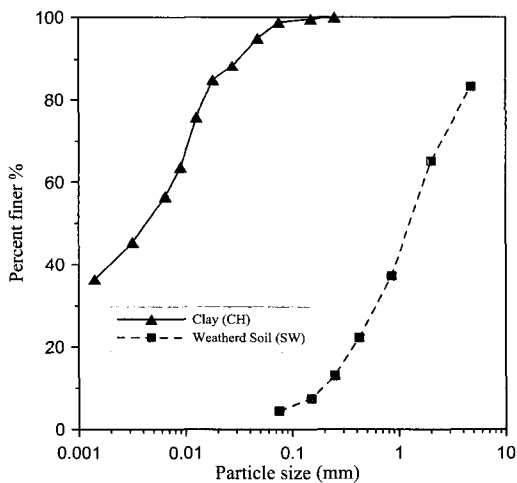


그림 1. 풍화토와 점토의 입도분포 곡선

3.2 실험결과 및 비교 분석

3.2.1 함수특성곡선

본 연구에서는 Filter Paper 방법에 의해 화강풍화토와 점토가 섞인 혼합토의 체적함수비에 따른 흡수력을 산정하였으며 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 풍화토의 경우 S자 형태가 나타나지 않았고, 점토분이 증가함에 따라 공기함입치가 커지는 것을 볼 수 있다.

Filter paper 법을 통해 산정한 함수특성곡선을 van Genuchten 과 Fredlund & Xing에 의해 제한한 함수특성곡선 방정식들에 의해 함수특성곡선을 추정하였다. 그림 3은 SW+CH30%의 경우 Filter paper 방법으로 구한 data를 2개의 함수특성곡선으로 나타낸 것이다.

곡선 방정식으로 변수 a, n, m 값이 점토 함유량의 양

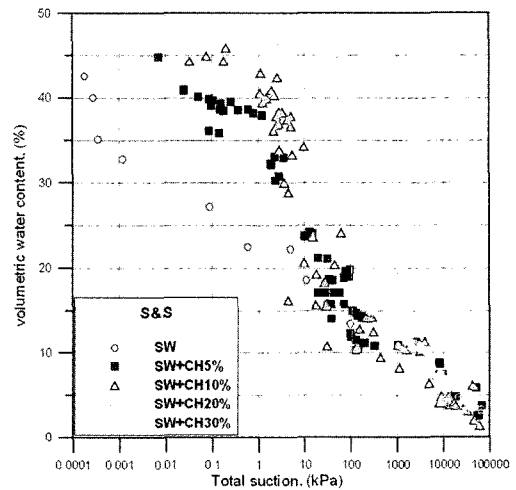


그림 2. 함수특성곡선

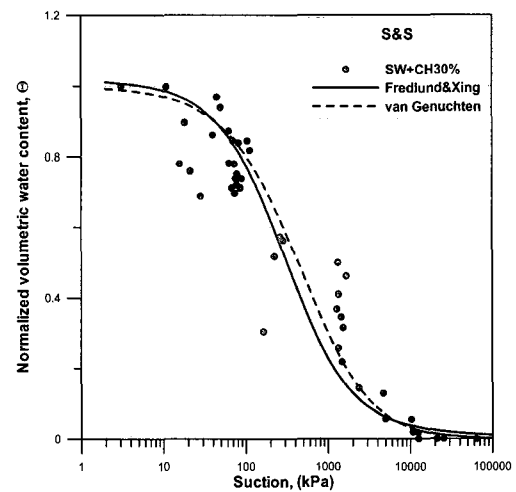


그림 3. 점토(CH) 30% 함유된 풍화토의 함수특성곡선

표 3. 방정식 모형에 따른 상수 비교

구분	Fredlund & Xing			van Genuchten		
	a	n	m	a	n	m
SW	8	0.4	2.6	40	0.35	1.65
SW+CH 5%	14	0.6	2.6	45.5	0.50	1.50
SW+CH 10%	23	0.8	2.6	57.1	0.65	1.45
SW+CH 20%	160	0.8	2.6	357.1	0.70	1.40
SW+CH 30%	320	1.0	2.6	714.3	0.90	1.40

에 따라 변하는 특성을 알 수 있다. 표 3에서 살펴보면, 공기함입치(air entry value)의 suction 값은 점토질 흙이 많이 함유되면서 a의 수치가 커지는 것을 알 수 있으며, 함수특성곡선의 경사 또한 점토질 흙의 성분이 많아지면서 경사가 급해지고 거의 수치도 증가하는 경향이 있다. 마지막으로 잔류 suction의 분포는 모든 혼합토에 대해서 비슷하므로 m의 수치 또한 거의 변화가 없다.

3.2.2 침투에 의한 지반 내의 suction

Wetting front suction은 지반이 포화되기 바로 직전에 측정되는 흙의 잔류 suction을 의미한다. 실험을 통해 구할 수 있는 이 값은 침투해석의 입력값으로 사용되어 진다.

본 연구에서는 Jet-fill tensiometer를 사용하여 Wetting front suction을 산정하였다. Pradel & Raad(1993)는 wetting front suction의 값을 대략 사질토의 경우 8kPa로, 점토질의 흙에 대해서는 14kPa로 규명하였으나, 실험을 통해 고찰해본 결과 이 값은 토질별로 변화할 뿐만 아니라 지반이 형성된 밀도에 따라 다른 값을 나타내는 것으로 판단되었다. Wetting front suction 실험에서는 지름 15cm, 높이 17.5cm의 CBR 몰드에 실험 시료를 성형하고 성형된 지반이 완전포화 될때까지 지속적인 강우조

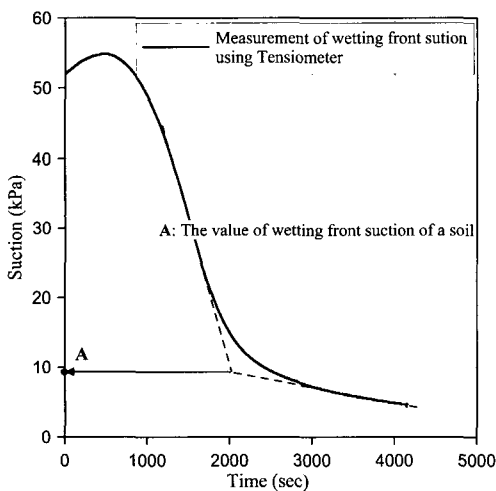


그림 4. wetting front suction 값의 결정

건을 모사한 후, 풍화토에 섞인 점토의 함유량에 따라 각각 건조단위중량을 달리하면서 suction을 측정하였다. Tensiometer의 다이알게이지의 눈 읽음 오차를 줄이기 위해서 transducer와 converter를 장착하였으며, 1초에 1회 데이터를 기록할 수 있는 datalogger(TDS 302)을 이용하여 측정의 정확도를 높였다.

그림 4는 tensiometer를 이용하여 전형적인 wetting front suction 값을 결정하는 실험결과이다.

각각의 성형시료에 대하여 다짐도에 따른 wetting front suction 변화의 영향을 고려하기 위하여 건조단위중량을 14.7, 15.2, 15.7, 16.2, 16.7, 17.7kN/m³으로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 또한, 같은 점토 함유량에서 성형시료의 단위중량이 증가할수록 잔류되는 부분의 wetting front suction 값이 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 각 결과로 나타난 wetting front suction 값을 점토 함유량에 따라 그림 5에 나타내었다.

그림 5에서 순수한 풍화토의 경우, 건조단위중량이 15.7kN/m³ 이하일 때에는 wetting front suction이 발생하지 않는 것으로 나타났으며, 15.7kN/m³ 이상의 건조단위중량에서는 일정하게 4kPa의 값을 보였다. 그러나 풍화토에 점토가 함유됨에 따라 건조단위중량 15.7kN/m³ 이하에서도 wetting front suction이 발생하는 것을 관찰할 수가 있으며, 점토분의 함유량이 많아질수록 wetting front suction은 건조단위중량에 비례해 급격히 증가하고 있는 것을 관찰할 수 있다. 함유량에 따른 각각의 성형시료에 대해서 건조단위중량에 대한 wetting front suction 값은 직선화되어 변화되고 있는 모습을 보이고 있다.

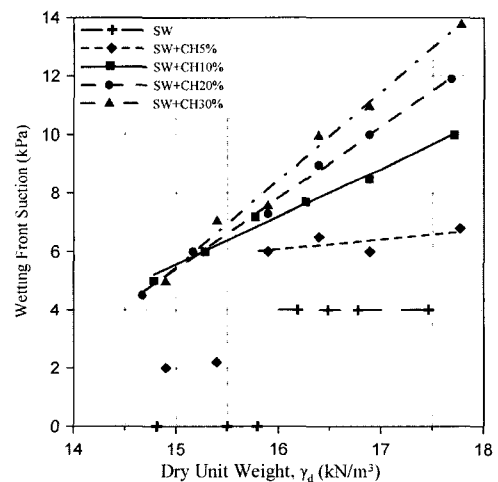


그림 5. 건조중량에 따른 wetting front suction

3.3 수치해석 및 결과 분석

본 연구에서는 강우시 무한사면에 침투되어 발생하는 사면의 포화깊이를 파악하기 위해 2차원 불포화침투 해석이 가능한 상용프로그램인 SEEP/W를 사용하였으며 프로그램 해석을 통해 침투 해석된 사면을 SLOPE/W 프로그램으로 연동해 사면안정해석을 수행하였다. 해석지반은 풍화토(SW)에 섞인 점토(CH)의 함유량에 따라 SW, SW+CH5%, SW+CH10%, SW+CH20%, SW+CH30%의 혼합토로 이루어진 무한사면(그림 6)으로 가정하였다.

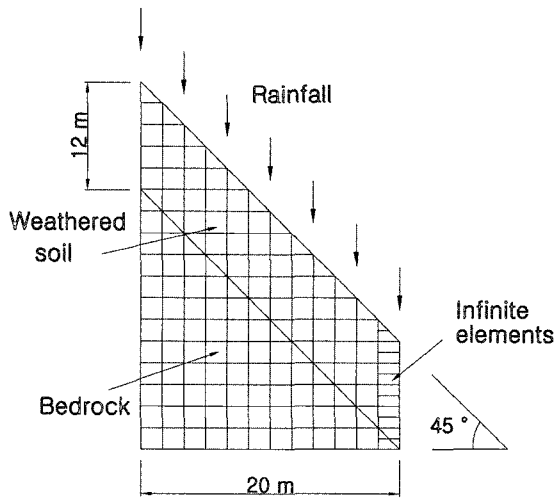


그림 6. 수치해석상의 무한사면 mesh(SEEP/W)

3.3.1 지반의 물성치

점토의 함유량에 따른 각 지반의 물성치는 실험을 통해 산정하였다. 해석지반의 시료에 대한 비중과 최대건조단위중량(γ_{dmax}) 및 최소건조단위중량(γ_{dmin})의 값은 표 2에서 제시한 바와 같으며, 각 시료의 최대건조단위중량과 최소건조단위중량을 이용하여 해석지반을 상대밀도 100, 90, 80%에 해당하는 시료를 성형하여 포화투수계수 및 삼축실험을 통한 포화강도정수 c , ϕ 값을 산정하였다. 그 결과는 표 4와 같다.

3.3.2 프로그램의 경계조건

강우시 무한사면의 침투에 의해 발생하는 포화깊이를 해석하기 위한 경계조건으로는 강우지속시간을 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 24, 48, 72, 96, 120시간의 12단계로 적용하였다. 지반물성은 포화투수계수와 함수특성곡선 및 강우지속시간별 강우를 입력하여 강우시간별 강우에 의한 포화깊이를 산정하였다.

3.3.3 침투해석 결과

수치해석의 결과에서 그림 7과 그림 8에 도시한 바와 같이 점토가 다량 함유된 풍화토일수록 일정한 깊이까지 포화되는데 강우지속시간이 길어지고 있으며, 상대밀도가 낮아질수록 일정 포화깊이에 이르는 강우지속시간이 짧아지고 있다. 이는 점토분이 함유된 지반일수

표 4. 해석지반의 물성치

D _r		종류	SW	SW+CH 5%	SW+CH 10%	SW+CH 20%	SW+CH 30%
		100%	γ_d (kN/m ³)	18.74	18.35	18.001	17.805
k (cm/s)	5.91×10^{-6}		1.31×10^{-7}	8.55×10^{-8}	4.85×10^{-8}	3.74×10^{-8}	
c (kPa)	1.38		6.37	10.82	22.28	31.44	
ϕ (°)	34.0		31.3	30.7	29.6	28.1	
w.f.s (cm)	40.8		70.1	107.1	124.8	135.5	
90%	γ_d (kN/m ³)	17.61	17.26	16.74	16.58	16.42	
	k (cm/s)	1.19×10^{-5}	7.36×10^{-6}	4.06×10^{-6}	1.66×10^{-6}	8.71×10^{-7}	
	c (kPa)	1.19	5.83	9.46	19.34	28.32	
	ϕ (°)	33.8	30.8	29.8	26.8	25.3	
	w.f.s (cm)	40.8	66.3	85.8	94.3	99.2	
80%	γ_d (kN/m ³)	16.62	16.28	16.02	15.44	15.28	
	k (cm/s)	4.21×10^{-5}	2.85×10^{-5}	1.02×10^{-5}	7.65×10^{-6}	5.24×10^{-6}	
	c (kPa)	0.94	5.34	8.71	16.61	25.33	
	ϕ (°)	33.6	30.4	29.3	24.3	22.7	
	w.f.s (cm)	40.8	62.9	67.3	67.7	67.5	

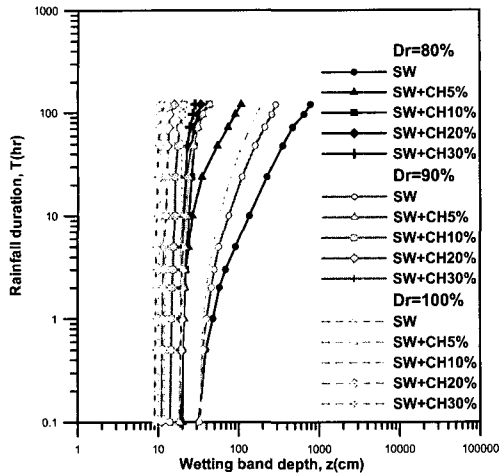


그림 7. 강우지속시간별 포화깊이

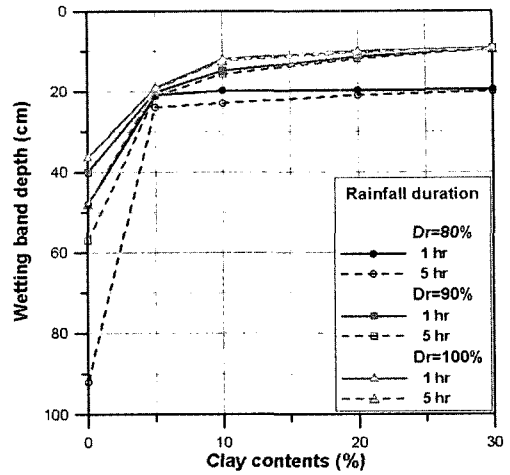


그림 8. 점토함유량에 따른 강우지속시간별 포화깊이

록 투수계수가 작고, wetting front suction이 커짐에 따라 침투능력이 감소하고 있다. 또한 점토함유량에 따라 wetting front suction 값의 차이가 거의 없는 상대밀도 80%의 경우에는 초기 강우시 점토함유량에 따라 포화 깊이의 차이가 적은 반면, 상대밀도 90%와 100%로 증가됨에 따라 점토함유량에 비례해 증가하는 wetting front suction에 의해 초기 강우시 포화깊이의 차이에 크게 영향을 미친다.

3.3.4 포화깊이에 따른 안정성 평가

표 5에는 다음 식 (4)(Vanapalli & Fredlund(1996))에 의해 포화도와 포화강도정수를 이용하여 불포화지반의 강도정수를 간접적으로 산정하였다.

$$\tan \phi^b = \tan \phi' \left(\frac{S - S_r}{100 - S_r} \right) \quad (4)$$

SEEP/W 해석을 통해 얻은 포화깊이와 계산을 통해 구한 불포화 지반의 강도정수를 이용해 상용프로그램인 SLOPE/W의 결과 값들을 비교 검토하였다. 다음 그림 9는 상대밀도 80%와 90%로 이루어진 SW의 지반으

로 이루어진 무한사면에 대해 실험을 통해 산정된 지반 물성을 적용하여 기존 포화해석방법 및 불포화 해석방법을 통해 포화깊이에 따라 사면의 안전율을 해석한 것이다. 기존 포화해석의 경우 포화깊이에 따라 포화깊이에 해당하는 깊이만큼은 포화토의 강도정수를, 나머지 부분은 습윤상태의 강도정수를 입력하여 강우지속시간

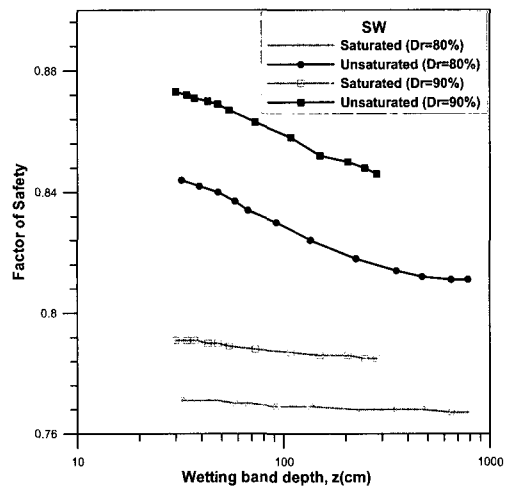


그림 9. 두 가지 해석의 안전율비교

표 5. 불포화 화강풍화토의 강도정수

지반 종류	Dr = 80%		Dr = 90%		Dr = 100%	
	ϕ^b	ϕ^b/ϕ'	ϕ^b	ϕ^b/ϕ'	ϕ^b	ϕ^b/ϕ'
SW	10.25	0.31	10.36	0.31	10.44	0.31
SW+CH 5%	9.80	0.32	9.96	0.32	10.14	0.32
SW+CH 10%	7.47	0.26	7.63	0.26	7.91	0.26
SW+CH 20%	5.16	0.21	5.78	0.22	6.49	0.22
SW+CH 30%	4.65	0.20	5.26	0.21	5.92	0.21

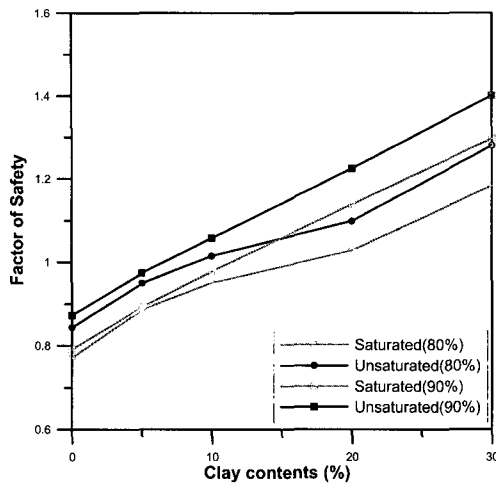


그림 10. 점토 함유량에 따른 안전율 비교

에 해당하는 포화깊이에 따른 지반의 안전율을 평가하였다. 반면, 불포화 해석에서는 SEEP/W를 통해 얻어진 지반의 침투조건을 그대로 연동시켜 불포화 안정해석을 수행하였다.

포화깊이를 반영한 기존포화해석방법과 불포화해석방법을 이용하여 해석한 결과 전반적으로 불포화 지반의 해석이 더 안전한 것으로 나타났다. 이는 기존포화방법을 통한 해석시 포화깊이를 반영한다 하더라도 불포화 해석의 경우 흙의 흡수력을 고려해 불포화지반 전단강도정수(ϕ^b)가 첨가되었을 뿐만 아니라 matric suction으로 인한 강도증가와 침투시 발생하는 wetting front suction의 영향으로 인해 기존의 포화안정해석과 안전율 차이를 보이는 것으로 볼 수 있다. 그림 10은 점토(CH) 함유량에 따른 안전율 검토결과를 나타낸 것이다.

점토분이 함유될수록 사면의 안전율은 높아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 점토가 많이 포함된 지반일수록 투수계수는 작아지고, wetting front suction 값이 커짐으로써 침투율이 적어 포화 깊이에 영향을 미치고 있기 때문이다. 상대밀도 80%의 경우 기존해석방법을 통한 안전율에 비해 불포화해석을 통한 안전율증가는 6.7~9.5% 증가한 반면, 상대밀도 90%의 경우에는 7.6~10.4% 증가했다. 또한 기존해석방법에서 상대밀도 80%에 대한 90% 지반의 안전율증가는 0.7~10.8%인데, 이에 반해 불포화 침투해석일 때 사면의 안전율은 2.5~11.5% 증가하는 것으로 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 풍화토에 점토분이 함유됨에 따라 변

화되는 불포화 상태의 지반특성을 파악하고자, 국내의 화강 풍화토와 점토질 흙을 중량비에 따라 5, 10, 20, 30%로 혼합한 성형시료를 대상으로 filter paper 실험을 수행하여 불포화 지반의 고유특성인 함수특성곡선을 산정하고 wetting front suction을 건조단위중량에 따라 측정하였다. 또한 본 실험대상과 동일한 물성으로 이루어진 무한사면에 대하여 강우로 인한 포화깊이를 SEEP/W를 이용하여 예측하고, 포화강도정수와 불포화 강도정수를 이용하여 포화 지반과 불포화 지반의 포화 깊이에 따른 안정성(SLOPE/W)을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 점토함유량이 증가할수록 wetting front suction의 값은 증가하고, 투수계수가 감소함에 따라 포화깊이가 줄어들었으며, 이에따라 안전율도 점차 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) 건조단위중량 15.67kN/m^3 이하의 풍화토(SW)로 다져진 사면에 대해서는 wetting front suction 값이 나타나지 않았으나, 건조단위중량 15.67kN/m^3 이상으로 다져진 풍화토에서는 일정한 값을 나타내었다. 반면, 풍화토(SW)에 점토(CH)가 함유된 경우에는 15.67kN/m^3 이하의 건조단위중량으로 성형된 시료에 대해서도 wetting front suction 값이 나타났다. Wetting front suction은 건조단위 중량이 증가함에 따라 직선형태로 점차 증가하였으며, 점토 함유량에 따라 직선의 기울기가 점점 커지는 경향을 보였다.
- (3) 불포화지반의 포화깊이 추정을 통한 포화깊이에 따른 안전율과 포화깊이를 변화시키면서 수행한 기존 해석방법을 통해 얻은 안전율을 검토한 결과, 점토(CH)가 점차 증가함에 따라 지반의 안전율은 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 기존의 포화해석방법에 비해 불포화해석에 의한 안전율이 약 6~10%정도 증가하였다. 상대밀도 80%의 경우와 상대밀도 90% 지반의 안전율 증가를 비교한 결과 실제지반에서 지반물성과 구속조건에 따라 변화하는 Wetting front suction의 수치가 안전율에 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

1. 김상규, 류지협, 김동현 (1999), "불포화 풍화토의 침투 특성", 대한토목학회논문집 제19권, pp.995-1002.

2. 김상규, 류지협 (2000), “불포화 풍화토의 강도특성”, *대한토목학회논문집*, 제20권, pp.109-118.
3. 김재홍, 정상섭 (2000), “강우시 불포화 사면의 안정성분석”, *한국지반공학학회*, 제16권, pp.611-614.
4. 김재홍 (2002), “강우시 습윤에 의한 불포화 풍화토의 사면 안정 해석 연구”, 석사논문, 토목공학과 연세대학교.
5. 류지협 (2003), “모관흡수력을 고려한 사면의 안정성 평가” *대한토목학회논문집* 제23권, pp.195-201.
6. 조성은, 이승래 (2000), “강우특성을 고려한 사면의 표면파괴에 대한 안정성 평가”, *한국지반공학학회논문집*, 제16권, 제5호, pp. 107-116.
7. 조성은, 이승래 (2001), “불포화 토사사면의 얽은파괴 해석에 대한 비교 연구”, *한국지반공학학회논문집*, 제17권, 제4호, pp.135-143.
8. Bolt, G.H. and R.D. Miller. (1958) “Calculation of total and component potentials of water in soil”, *Trans. Am. Geophys. Union* 39 917-928.
9. Buckingham, E. (1907), “Studies on the movement of soil moisture”, *U.S. Dept. of Agr. Bur. Soils Bull.* 38.
10. Childs, E. C. et Collis-George, N. (1948), “Interaction of water and porous materials”, *Soil Geometry and soil-water equilibria*. Discussions paraday Soc. N3, pp.78-85.
11. Daniel Pradel and Glen Raad (1993), “Effect of Permeability on Surficial Stability of Homogeneous Slopes”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.119, No.2, pp.315-332.
12. Edlefsen. N.E. and A.B.C Anderson (1943), “Thermodynamics of soil moisture”, *Hilgardia*. 15.
13. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993), “*Soil Mechanics for Unsaturated Soils*”, John Wiley and Sons, Inc.
14. Fredlund, D. G. and Anqing Xing (1994), “Equations for the soil-water characteristic curve”, *Can. Geotech. J.*, Vol.31, pp. 521-532.
15. Fredlund, M. D., Fredlund D. G., and Wilson G.W. (1997) “Estimation Of Unsaturated Soil Properties Using A Knowledge-Based System”, *ASCE Fourth Congress on Computing in Civil Engineering Philadelphia, Pennsylvania* June, pp.16-18.
16. Krahn, J. & Fredlund, D. G. (1972), “On total, matric and osmotic suction”, *J. Soil Science*, 114, No.5, 339-349.
17. Leong, E. C., He, L., and Rahardjo, H. (1997), “Review of Soil-Water Characteristic Curve Equations”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.123, No.12, pp. 1106-1117.
18. Leong, E. C., He, L., and Rahardjo, H. (2002), “Factors Affecting the Filter Paper Method for Total and Matric Suction Measurements”, *Journal of Geotechnical Testing*, Vol.25, No.3 pp.321-332.
19. Pradel, D, Raad, G. (1993), “Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes”, *J. Geotech. Eng. Div., Am. Soc. Civ. Engrs.* 119(2), pp.315-332
20. Vanapalli and Fredlund (1996), “Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction”, *Canadian Geotechnical Journal*, 33: 379-392.

(접수일자 2004. 8. 17, 심사완료일 2004. 10. 5)