

지속적인 강우에 의한 토사사면의 포화시간 예측

Prediction of Saturation Time for the Soil Slopes due to Rainfalls

박성원¹⁾ · 한태곤[†] · 김홍택²⁾ · 백승철³⁾

Park, Sungwon · Han, Taekon · Kim, Hongtaek · Baek, Seungcheol

ABSTRACT : Many studies for slope stability studies have indicated that the infiltration of rainwater into a slope decrease the slope stability. In order to minimize damage caused by slope failure, most design codes suggest that the slope stability be analyzed by saturated condition during rainy season. However it would be excessively conservative condition that every soil slope is saturated in rainy season irrespective of rainfall intensity, soil type and slope geometry. In addition, because most soil slopes are in an unsaturated state, it is necessary to consider the unsaturated characteristics of slope. This paper suggests a prediction method of saturation time for the weathered granite soil slopes due to rainfalls. The finite element analysis of transient water flow through unsaturated slope was used to investigate effects of soil-water characteristics, permeability at saturation, slope geometry, and rainfall intensity. From the result of these analyses, the prediction charts considering soil-water characteristics, permeability at saturation, and slope height were proposed in this study. It is possible to the time required to be saturated slope after rainfall.

Keywords : Soil-water characteristics, Weathered granite soils, Unsaturated soil, Slope stability

요 지 : 강우시 우수의 침투로 사면의 안정성은 감소되며, 사면활동에 의한 피해를 최소화하기위해 강우시 토사사면에 대한 사면 안정해석시 지표까지 완전히 포화되는 조건으로 설계하도록 설계기준을 강화하고 있다. 그러나 이와 같은 설계방식은 강우강도, 강우지속시간, 지반특성, 사면의 기하학적 특성 등과 관계없이 동일하게 지표까지 완전 포화조건으로 설계함으로써 지나치게 과다하게 설계되는 경향이 있는 등 문제점이 지적되고 있다. 또한 대부분의 토사사면은 불포화상태에 있으며, 불포화특성을 고려한 사면 안정해석이 수행되어야 할 것이다. 본 논문은 강우시 토사 사면이 완전 포화되기까지 소요되는 강우지속시간을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 이를 위해 본 논문에서는 불포화토의 흡수분 특성과 포화시 투수계수, 사면의 기하학적 조건, 강우강도 등을 고려하여 불포화토 사면에 대한 유한요소해석을 실시하여 강우시 토사사면이 완전 포화되기 까지 소요되는 강우지속시간을 예측하였으며, 이들 해석결과로부터 간편하게 사용할 수 있는 예측도표를 제시하였다.

주요어 : 흡수분 특성, 화강풍화토, 불포화토, 사면안정

1. 서 론

우리나라에서 발생하는 비탈면 붕괴는 전체의 75%가 강우가 집중되는 7월~9월 사이에 발생하는 것으로 보아 비탈면의 안정성을 저해하는 요소 중 중요한 것이 강우의 영향이다. 또한, 근래 들어 이상기온 등의 영향으로 인해 기록적인 강수량의 발생이 빈번해지고 있는 추세이므로 강우시 비탈면 안정성 확보의 중요성은 점차 강조되고 있는 실정이다. 건설교통부를 비롯한 각 관계기관에서는 위와 같은 중요성을 인식하고, 비탈면 붕괴로 인한 피해를 최소화하기 위하여 강우시 비탈면 설계기준을 강화하였다. 그러나 강화된 비탈면 설계기준은 강우시 지표면 포화조건으로 설정하도록 제안하고 있어 이러한 기준을 적용할 경우 비탈면의 강우시 안정성 확보를 위해서는 표준경사로

설계한 거의 모든 절취 비탈면은 보강공법의 적용이 필요하게 되고, 이로 인해 비탈면 공사비의 급격한 증가를 초래하게 되어 이에 대한 개선이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 우리나라 표토의 대부분을 차지하고 있는 화강풍화토를 대상으로 합리적인 비탈면 안정성 평가방법을 제안하기 위한 기초연구의 일환으로 비탈면의 높이와 경사, 지반의 흡수분 특성 및 함수특성을 변화시키며 SEEP/W를 이용한 비정상류 침투류 해석을 수행하였으며, 해석결과를 바탕으로 강우시 비탈면과 지반의 조건 변화에 따른 침투 거동특성의 변화를 관찰하였다. 해석결과를 바탕으로 이용하여 강우개시 후 비탈면 포화에 소요되는 시간 예측이 가능한 그래프를 제안하였다. 또한, 예측 그래프의 적용성 확인을 위하여 임의의 비탈면에 대한 수치해석결과와 예측그래프를 이용한 결과를 비교, 평가하였다.

1) 비회원, (주)유신코퍼레이션 부장

† 정회원, (주)한진중공업 토목설계팀 부장(E-mail : hsg@hanjinsc.com)

2) 정회원, 홍익대학교 토목공학과 교수

3) 정회원, 안동대학교 토목공학과 교수

2. 흡-수분 특성곡선

2.1 흡-수분 특성곡선 모델

불포화도에 대한 연구를 통하여 흡-수분 특성곡선(soil-water characteristic curve, SWCC)에 대한 모델은 많은 연구자들에 의해 제시된 바 있으며, Leong과 Rahardjo(1997)은 Fredlund와 Xing 모델(1994)의 단점을 보완하여 식 (1)과 같이 새로운 흡-수분 특성곡선 모델을 제시하였다.

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

여기서, θ : 체적함수비 θ_s : 포화시 체적함수비
 e : 자연수 Ψ : 흡인력
 a, n, m : 흡-수분 특성곡선의 형태를 결정하는 계수

계수 a 는 변곡점에서의 흡인력에 해당하는 계수이며, 계수 n 은 곡선 직선부의 기울기에, 그리고 계수 m 은 높은 흡인력단계에서 그래프 형상에 관계를 갖는 계수이다. Fredlund와 Xing(1994) 모델의 장점으로는 먼저 넓은 범위에서 실험 자료를 표현할 수 있는 유연성을 가졌으며, 모델에 포함된 계수들이 각각의 의미를 가지면서, 3개의 계수를 가진 기존의 모델인 van Genuchten(1980)의 모델에 비해 적합한 계수를 찾기 위해 수렴하는 효율이 높은 것으로 평가되고 있다(Leong & Rahardjo, 1997). 이러한 평가를 근거로 본 연구에서 수행한 화강풍화토 비탈면의 강우를 고려한 침투류 해석에서는 Fredlund와 Xing(1994)의 모델을 이용하였다.

2.2 화강풍화토의 흡-수분 특성

우리가 살고 있는 한반도의 기반은 중생대의 화강암류가 대부분을 차지하고 있으며, 이러한 기반암은 풍화작용에 의해 퇴적토와 잔류토의 형태로 지표에 분포하고 있다. 본 연구의 대상이 되는 화강풍화토는 통일분류상 실트질 모래(SM)로 분류되며, 모암이 화강암, 화강편마암 및 화강암질 편마암으로 우리나라의 전역에 걸쳐 광범위하게 분포한다. 이성진 등(2005)은 서창, 연기, 옥천, 조치원 등의 화강풍화토를 대상으로 불포화 특성시험을 수행하여 화강풍화토의 함수특성을 Fredlund와 Xing(1994)의 계수를 이용하여 제시하였으며, 본 연구에서는 표 1과 같이 제시된 결과 중 일부를 이용하여 화강풍화토에 대한 침투류 해석을 수행하였다.

3. 비탈면 포화에 대한 영향인자 분석

3.1 강우강도의 영향

강우강도가 비탈면 포화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 강우강도를 표 2와 같이 변화시키며 침투류 해석을 수행한 결과 강우강도와 포화투수계수의 비 I/k_{sat} 가 0.3 이상인 경우 비탈면은 거의 포화($I/k_{sat} = 0.3, 0.5$ 인 경우) 혹은 완전 포화($I/k_{sat} = 0.9, 1.0$ 인 경우)상태에 도달되었으나, I/k_{sat} 가 0.3 미만인 경우는 포화상태에 도달되지 못하였다.

3.2 흡-수분 특성과 함수특성의 영향

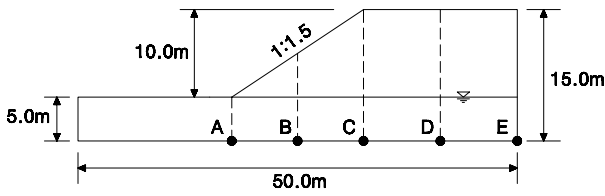
Fredlund와 Xing(1994)이 제안한 흡-수분 특성곡선은 포

표 1. 화강풍화토의 함수특성(이성진 등, 2005)

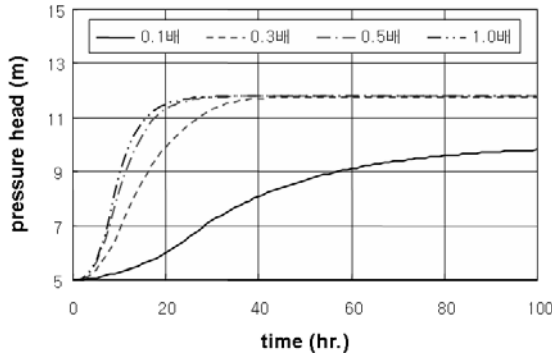
구 분	θ_s	s	a	n	m	R ²
No. 1	0.286	0.379	42.08	0.743	1.404	0.998
No. 2	0.375	0.447	46.00	1.058	1.297	0.999
No. 3	0.444	0.451	109.97	0.854	1.710	0.999
No. 4	0.444	0.367	73.08	0.672	1.920	0.999
No. 5	0.400	0.400	50.91	0.943	1.308	0.998
No. 6	0.400	0.448	46.18	1.105	0.933	0.998
No. 7	0.370	0.421	23.03	1.215	1.110	0.998
No. 8	0.320	0.265	17.80	0.513	1.694	0.996

표 2. 침투류 해석에 적용한 강우강도

구 분	해석 1	해석 2	해석 3	해석 4	해석 5
I(mm/hr)	36	108	180	324	360
K _{sat} (m/s)	1×10 ⁻⁴	1×10 ⁻⁴	1×10 ⁻⁴	1×10 ⁻⁴	1×10 ⁻⁴
I/K _{sat}	0.1	0.3	0.5	0.9	1.0



(a) 해석에 이용된 비탈면의 기하학적 조건



(b) 침투류 해석결과

그림 1. 강우강도에 대한 영향 분석

화시 체적함수비 θ_s 와 계수 a , n , m 에 의해 정의되므로 이들의 변화와 포화투수계수의 변화가 비탈면 포화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 침투류해석을 수행한 결과 포화투수계수와 θ_s , a , n 이 증가할수록 m 이 감소할수록 비탈면 포화시간은 감소하였으며, 비탈면 포화시간에 대한 회귀분석결과 계수 n 의 상관성이 가장 높은 것으로 나타났다.

3.3 비탈면 높이와 경사의 영향

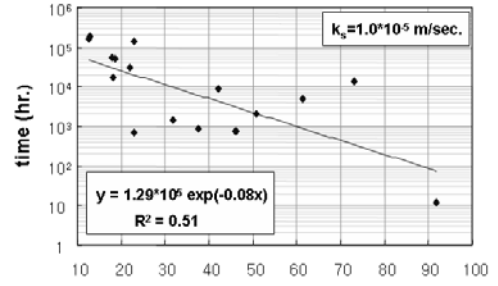
비탈면의 높이와 경사가 비탈면 포화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 비탈면의 높이를 5~15m로, 비탈면의 경사를 1:1.0~1:2.0으로 변화시키며 침투류 해석을 수행한 결과, 비탈면의 높이가 증가할수록 포화시간은 비례적으로 증가하였으며, 비탈면의 경사변화에 따라 포화시간에 차이를 나타내었다.

4. 비탈면 포화시간 예측

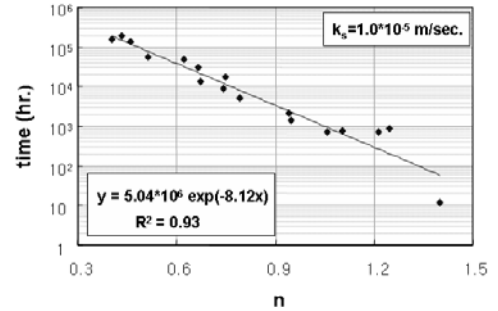
4.1 영향인자 사이의 관계식 도출

영향인자 분석결과를 바탕으로 비탈면 경사 1:1.5 조건에서 포화시간과 상관성이 높은 계수 n , 비탈면 높이, 포화투수계수를 중심으로 회귀분석을 실시하여 식 (2)~(4)와 같은 관계식을 도출하였다.

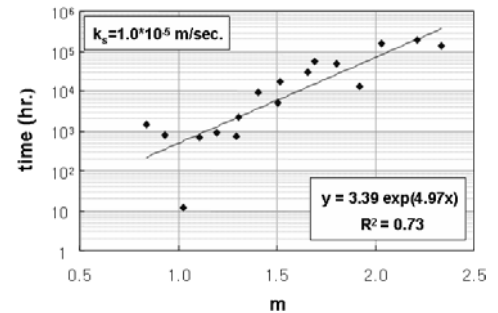
$$\text{time} = a \cdot n^b \quad (2)$$



(a) 계수 a의 변화

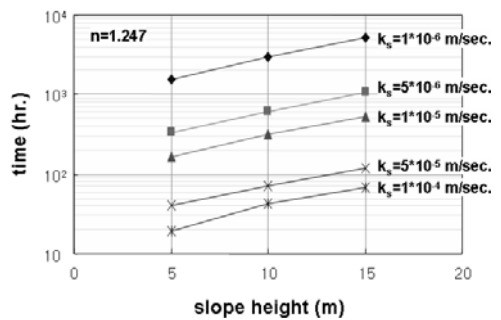


(b) 계수 n의 변화

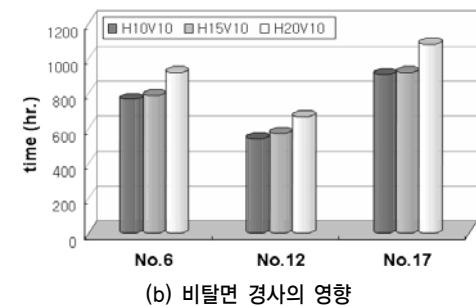


(c) 계수 m의 변화

그림 2. 흡-수분 특성의 영향 분석



(a) 비탈면 높이의 영향



(b) 비탈면 경사의 영향

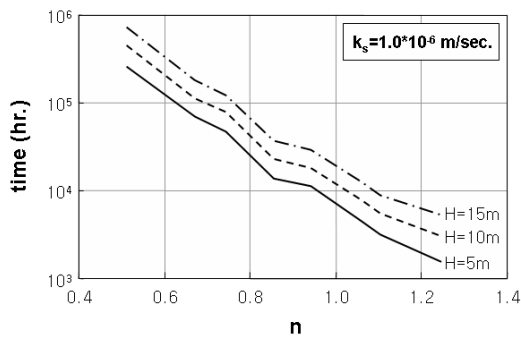
그림 3. 비탈면의 경사와 높이의 영향 분석

여기서, time : 강우시 비탈면이 포화되는데 소요되는 시간
n : 흡수분 특성곡선 상의 계수
a, b : 계수

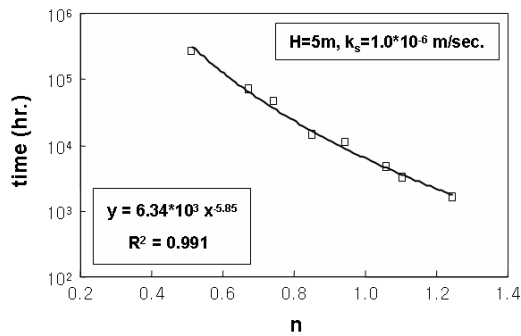
식 (2)의 계수 a, b는 포화투수계수와 비탈면의 높이에 따라 변화되는 계수이며, 포화투수계수 및 비탈면의 높이를 변화시켜 침투류 해석에 의한 강우시 비탈면의 포화시간을 평가하여 이를 식 (2)와 같이 회귀분석한 결과를 정리하면 표 3과 같다.

표 3의 회귀분석결과를 토대로 포화투수계수 및 비탈면의 높이를 변화에 따른 계수 a와 b에 대한 관계식을 회귀분석을 통해 결정하면 식 (3) 및 (4)와 같다.

$$a = A \cdot k_{sat}^B \quad (3)$$



(a) 침투류 해석결과



(b) 해석결과의 회귀분석

그림 4. 침투류 해석결과 및 회귀분석결과

표 3. 침투류 해석에 의한 회귀분석결과

사면높이 H(m)	포화투수계수 ks(m/sec.)	식 (2) 계수 a	식 (2) 계수 b
5	1*10 ⁻⁶	6.34*10 ³	-5.85
5	5*10 ⁻⁶	1.28*10 ³	-5.82
5	1*10 ⁻⁵	6.49*10 ²	-5.78
5	5*10 ⁻⁵	1.40*10 ²	-5.62
10	1*10 ⁻⁶	1.11*10 ⁴	-5.76
10	1*10 ⁻⁵	1.13*10 ³	-5.70
15	1*10 ⁻⁶	1.78*10 ⁴	-5.73
15	1*10 ⁻⁵	1.80*10 ³	-5.71

$$b = C \cdot k_{sat} - D \quad (4)$$

여기서, $A = 0.0024 H^{0.845}$ $B = 0.9866 H^{-0.00691}$
 $C = 7300 H^{-0.351}$ $D = 6 H^{-0.0175}$
 k_{sat} : 포화시 투수계수(m/s) H : 사면높이(m)

4.2 관계식의 오차율 확인

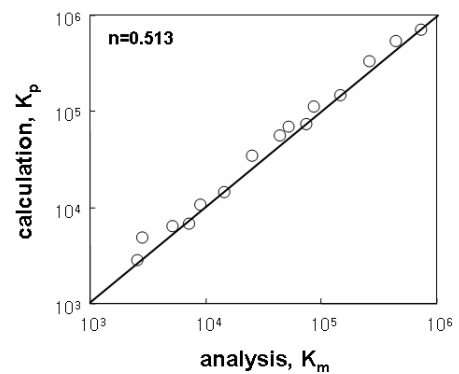
도출된 관계식의 적용성 확인을 위해 관계식으로 예측된 포화시간과 수치해석을 통한 포화시간 사이의 추론오차율(Average Interface Error Rate, AIER) 확인한 결과 평균 오차율 14%인 것으로 나타났다.

$$AIER(\%) = \frac{1}{N} \sum \frac{|K_m - K_p|}{K_m} \times 100(\%) \quad (5)$$

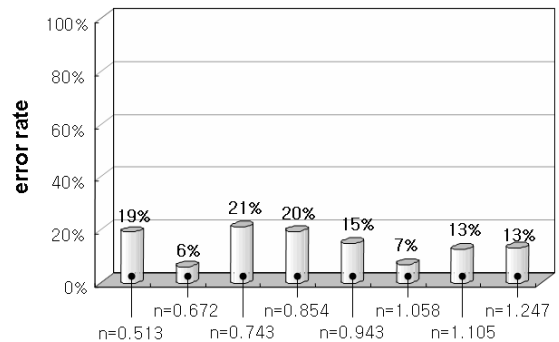
여기서, N : 추론자료의 수 K_m : 수치해석에서 구한 값
 K_p : 관계식에서 구한 값

4.3 포화시간 예측 그래프 작성

영향인자와 비탈면 포화에 소요되는 시간 사이의 관계식으로 별도의 침투류 해석 없이 비탈면의 기하학적 조건과, 지반의 흡수분 특성, 그리고 포화투수계수를 이용하여 비탈면 포화에 소요되는 시간을 예측할 수 있는 그래프를



(a) n = 0.513의 오차



(b) 계수별 추론 오차율

그림 5. 수치해석과 관계식 결과 비교

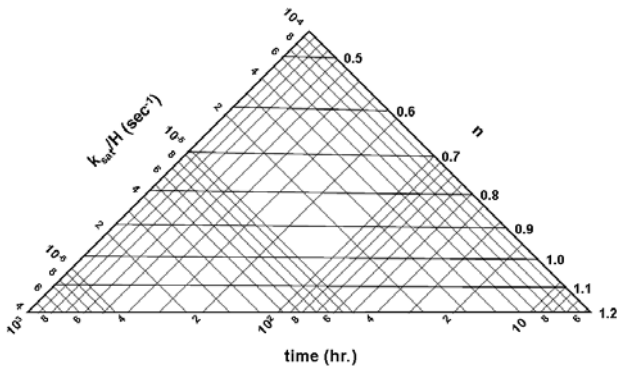
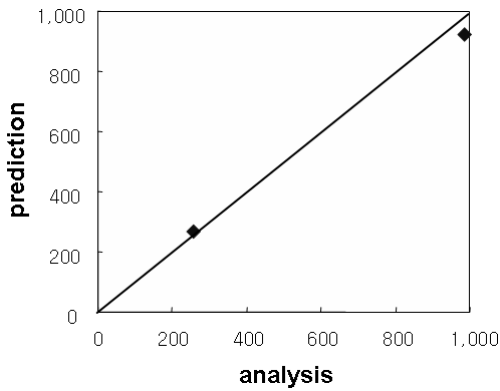


그림 6. 비탈면 포화시간 예측을 위한 그래프

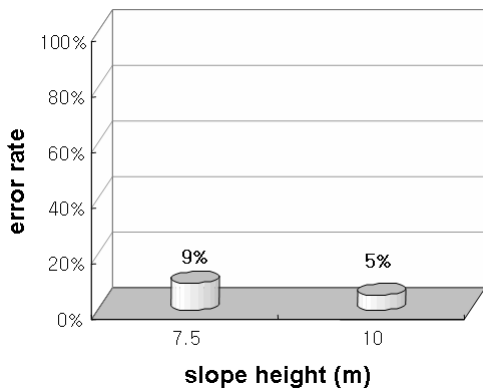
작성하였다. 본 그래프의 강우조건은 강우가 지반의 포화 투수계수 이상의 강도로 작용하는 조건에서 도출된 그래프이며, 그래프의 간편화를 위하여 지반의 포화투수계수와 비탈면의 높이의 비를 표시하였다.

4.4 예측그래프의 적용성 확인

본 연구에서 제시한 포화시간 예측 그래프의 적용성 확인을 위해 임의의 비탈면에 대한 침투류 해석을 수행하고 해석결과와 그래프에서 제시하는 결과를 비교한 결과 비탈면 높이 7.5m인 경우는 9%의 추론오차가 발생하였으며,



(a) 예측결과와 해석결과 비교



(b) 예측결과의 추론오차

그림 7. 예측그래프의 적용성 확인 결과

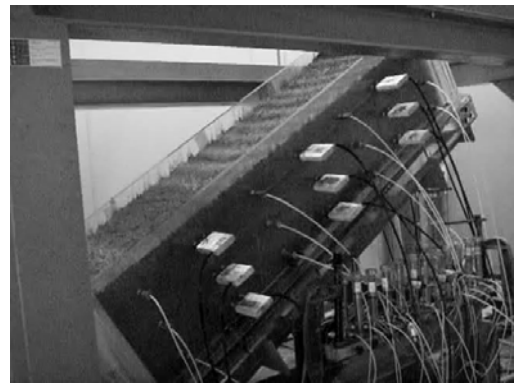
높이 10m인 경우는 5%의 추론오차가 발생하는 것으로 나타나 평균 7%의 추론 오차율이 발생하는 것으로 나타났다.

5. 실내모형실험 및 SWCC시험에 의한 예측도표의 검증

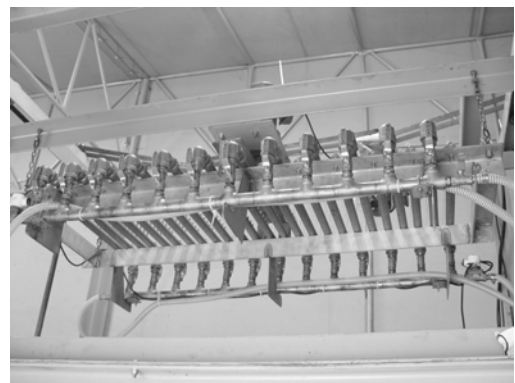
5.1 실내모형실험

실내모형실험장치(한태근, 2006)는 그림 9와 같이 모형 토조(infiltration box), 강우재현장치(폭 360mm, 길이 1300mm, 273개(세로13개, 가로21개) 강우핀), 진동다짐대, 경사를 45°까지 조절 할 수 있도록 한 경사조절장치, 계측장비(Tensiometer(간극수압 측정), TDR(체적함수비 측정))로 구성되어 있고, 길이 1400mm 높이 300mm 폭 400mm의 모형토조는 두께 15mm의 아크릴재질로 만들어져 토조내부를 관찰 할 수 있도록 되어있다. 토조내 사면은 300mm 깊이의 화강풍화토 단일층으로 만들었다. 인공강우 발현 기능은 유량계에서 강우강도를 고정하면, 해당 유량만큼 물이 수조를 통해 강우재현장치로 이동, 인공강우를 재현하게 된다. 모형토조 및 강우재현장치에 대한 전경사진은 그림 8과 같다.

실험에 사용한 시료는 강원도 홍천군 두촌면에서 채취



(a) 모형토조



(b) 강우재현장치

그림 8. 실험전경

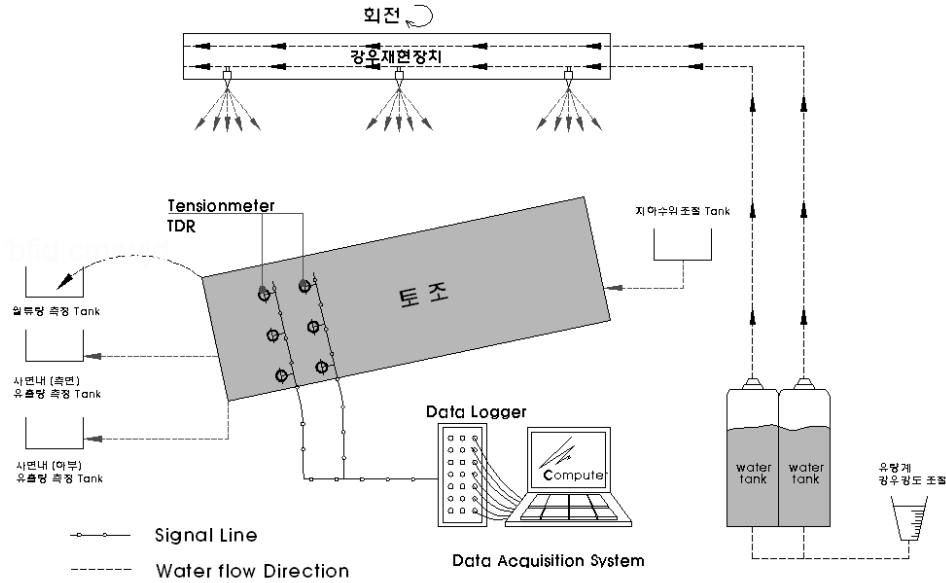


그림 9. 실험장치 개요도(한태근, 2006)

표 4. 대상 시료의 물성시험 결과

비중(G_s)	2.68	No. 200체 통과율(%)	7.00
최대 건조단위 중량($\gamma_{d,max}$)	1.98	10% 통과입경(D_{10} , mm)	0.20
최적 함수비(OMC, %)	11.8	30% 통과입경(D_{30} , mm)	0.90
액성한계, 소성한계(%)	N.P	60% 통과입경(D_{60} , mm)	2.00
투수계수(cm/sec)	9.8×10^{-4}	Clay(%)	2.19
균등계수(C_u)	10	Silt(%)	2.74
곡률계수(C_c)	2.03	Sand(%)	87.76
USCS	SW	USDA	Sand

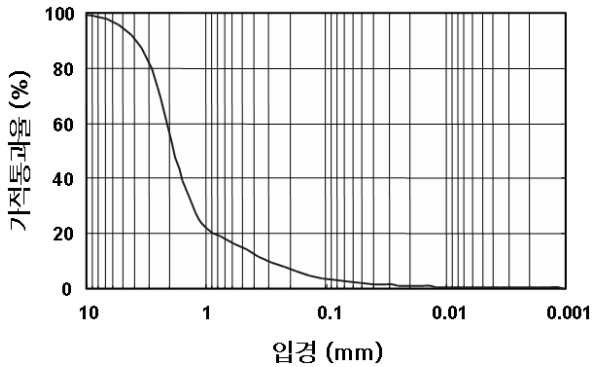
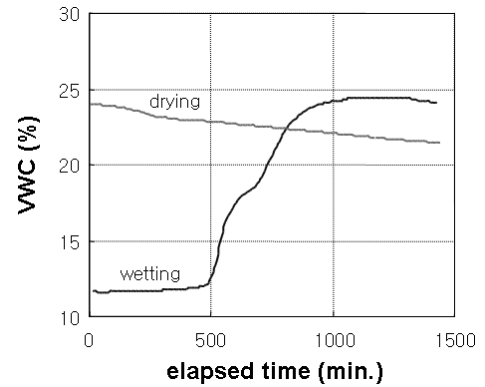


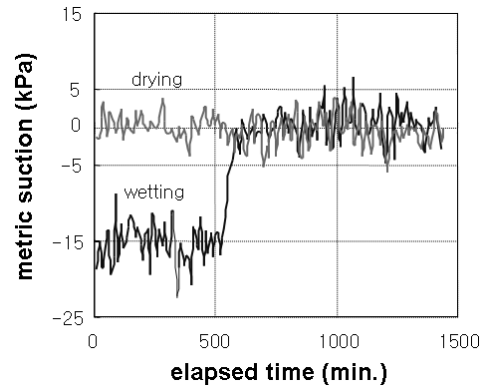
그림 10. 대상토의 입도분포곡선

한 화강풍화토로 2005년 집중호우로 인해 토석류 붕괴가 발생한 대단히 취약한 지반이다. 흙의 물리적 특성파악을 위해 입도분석, 비중시험, 다짐시험과 포화투수계수를 구하기 위해 변수위 투수시험을 실시하였다. 대상 시료의 물성을 정리하면 표 4와 같다.

모형사면에서 더 이상 모관흡수력, 체적함수비, 유출량 등 예측치의 변화가 없는 상태를 정상상태(steady-state)라 정의하고, 그림 11은 체적함수비와 모관흡수력이 시간의



(a) 체적함수비



(b) 모관흡수력

그림 11. 시간경과에 따른 정상상태 도달

경과에 따라 정상상태에 도달하는 과정을 보여준다. 강우 강도 10mm/hr, 30mm/hr 작용시켜 수행한 습윤과정 실험에서 강우작용 후 13~17시간이 경과하면 정상 상태에 도달하였고, 건조과정 실험에서는 강우종료 후 24시간 이상 경과하면 정상 상태에 도달하였다.

5.2 SWCC시험

SWCC(Soil-Water Characteristic Curve) 장치를 이용하여 압력을 조절하면서 변화되는 체적함수비를 측정하였다. 사용한 SWCC cell은 Fredlund가 고안한 함수특성곡선을 얻는 장비로 미국 GCTS사 제품(SWC-150)이다. 실험은 직경75mm의 몰드에 다져놓은 시료를 24시간 수침 시킨후 공기압을 주어 간극수를 밀어내는 원리로 함수비와 흡수력을 조절한다. 체적함수비는 흡의 흡수력으로 인하여 물이 흡수 될 때 유입량을 측정함으로써, 흡수력은 유입된 양의 물만큼 유출시키는데 필요한 가압로드에 가해진 힘을 구하여 알 수 있다. 건조상태 재현은 가압을 단계별로 증가시키면서 상승하는 volume tube 수위를 읽어, 습윤상태 재현은 압력을 제하 하면서 하강하는 volume tube 수위를 읽어 측정한다. 함수특성곡선을 구하기 위하여 Fredlund와 Xing(1994), van Genuchten(1980), Brooks와 Corey(1964) 3가지 제안식을 활용, Soil-Vision 프로그램으로 함수특성곡선을 작성하여 실험결과와 같이 나타내었다.

함수특성곡선식을 사용하여 산출한 Fitting 계수는 표 5와 같다.

시험결과값과 각 제안한 함수특성곡선간의 경향을 보면 비교적 수식이 단순한 Brooks와 Corey식에서는 건조상태에서의 잔류함수비와 모관흡수력이 다른 제안식들과 큰 차이를 보이고 있어 상대적으로 van Genuchten, Fredlund와 Xing의 제안식의 정도가 더 높은 것으로 생각된다.

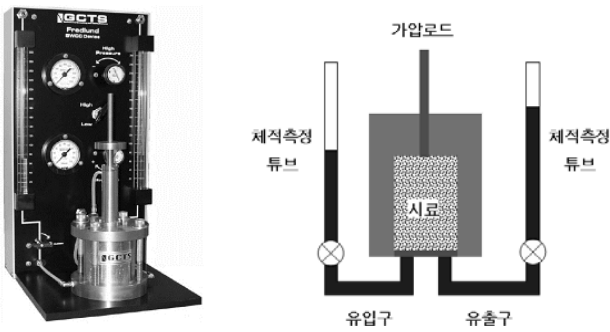


그림 12. SWCC 시험장치

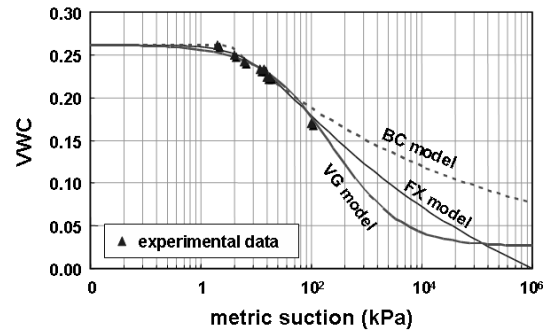
표 5. Fitting 계수

구분	방법	Fredlund와 Xing		van Genuchten		Brooks와 Corey	
		a	n	a	n	λ	ψ
건조	a	8.89		0.004		3.18	
	n	1.12		0.68		0.09	
	m	0.29		1.04		-	-
습윤	a	17.8		0.01		0.86	
	n	0.74		0.93		0.44	
	m	5.29		8.00		-	-

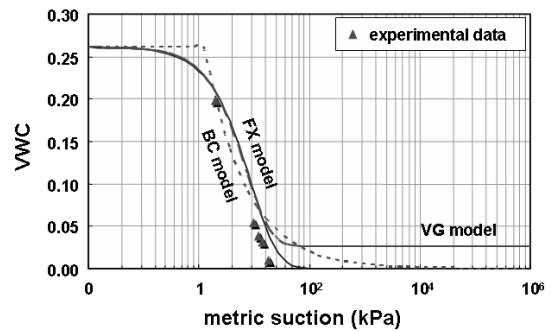
5.3 포화시간 예측 검증

수치해석적인 방법을 이용한 사면 포화시간 예측도표(박성원, 2005)로부터, 실내모형실험에 사용한 불포화토 토질 특성 및 모형토조의 제원을 바탕으로 $k_{sat}/H=(9.81 \times 10^{-4})/30=3.27 \times 10^{-5}(\text{sec}^{-1})$ 이고, $n=1.12$ (건조측)이므로 사면 포화시간은 그림 14와 같이 예측할 수 있다.

예측도표에 의한 사면 포화시간 예측결과, 포화시간은 21시간으로 추정되었으며, 건조과정 실험의 경우시 정상상태 도달시간은 경우종료 후 24시간으로 측정되어져, 결과 값이 서로 유사한 경향을 나타내고 있음을 확인하였다.



(a) 건조상태



(b) 습윤상태

그림 13. Fitting 제안식과 실험data 비교

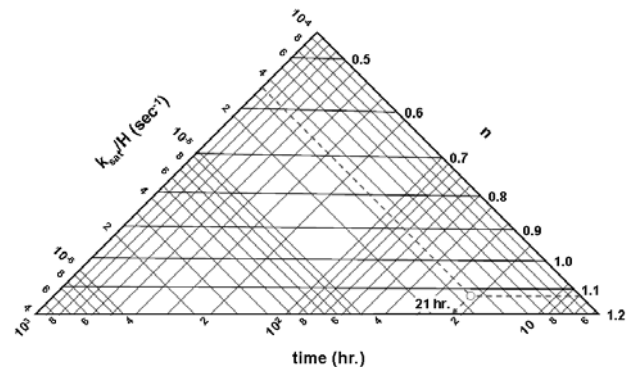


그림 14. 사면 포화시간 예측을 위한 도표(박성원, 2005)

6. 결론 및 제언

본 연구는 화강풍화토 비탈면을 대상으로 강우 개시 후 비탈면이 포화에 도달되는 시간을 예측하기 위하여 유한 요소법을 이용한 비정상류 침투류 해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 비탈면 포화는 강우강도와 지반의 포화투수계수의 비 I/k_{sat} 가 0.3 이상인 경우 발생하는 것으로 나타났으며, 포화투수계수와 Fredlund와 Xing(1994)의 흡수분 특성 중 θ_s , a , n 이 증가할수록, m 이 감소할수록 비탈면 포화에 소요되는 시간은 대체적으로 감소하였다.
- (2) 침투류 해석결과에 대한 회귀분석을 통해 비탈면의 높이, 포화투수계수, 그리고 Fredlund와 Xing의 흡수분 특성곡선 계수 n 사이의 관계를 이용하여 비탈면 포화 시간 예측 그래프를 작성하였으며, 예측 그래프의 적용성 확인 결과 추론 오차는 평균 7%인 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. 박성원(2005), 강우를 고려한 화강풍화토 사면의 설계방법에 관한 연구, 박사학위논문, 홍익대학교.
2. 이성진, 이해지, 이승래(2005), 화강풍화토에 대한 함수특성곡선 - 추정방법에 대한 연구, 한국지반공학회논문집, 제21권, 제1호, pp. 15~27.
3. 한태곤(2006), 실내모형실험 및 매개변수 분석에 의한 강우시 토사사면의 간편 설계기법 제안, 박사학위논문, 홍익대학교.
4. Brooks, R. H. and Corey, A. T.(1964), *Hydraulic Properties of Porous Media*, Hydrology Paper 3, Colorado State Univ., Fort Collins, Colo.
5. Fredlund, D. G. and Xing, A.(1994), Equations for the soil-water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No. 4, pp. 521~532.
6. Leong, E. C. and Rahardjo, H.(1997), Review of Soil-Water Characteristic Curve Equations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 12, pp. 1106~1117.
7. van Genuchten, M.(1980), A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Science Society of America Journal*, No. 44, pp. 892~898.

(접수일: 2007. 5. 18 심사일: 2007. 5. 18 심사완료일: 2007. 7. 9)