

지속강우특성에 따른 불포화 풍화토사면의 안정성분석

Stability Analysis of Unsaturated Weathered Soil Slopes Considering Rainfall Duration

정상섭* · 최재영** · 이재훈***

Jeong, Sang-Seom · Choi, Jae-Young · Lee, Jae-Hwan

Abstract

In this study, the influence of wetting band depth by continuous rainfall and the magnitude of wetting front suction on the stability of slopes in weathered soils were investigated by using finite element programs SEEP/W and SLOPE/W. Three different intensities of rainfall (10mm/hr, 30mm/hr, 50mm/hr) were chosen, and the total duration of rainfall was 96 hours. Three infinite slopes with the inclination of 1:1.5 and 1:1.8, 1:2.0 were considered and the typical properties and the shear strength parameters of the weathered soil were applied. It is shown that rainfall duration plays an important role in slope stability. Based on the analytical results, it is found that as the rainfall duration increases, the wetting band depth also increases. Also, the increasing rate of the wetting band depth was decreased as the soil density was increased. These results come from the decrease of the coefficient of permeability and the increase of the soil suction. Finally, it is also shown that the safety factors of slopes by unsaturated analysis are mostly larger than those by saturated analysis. Therefore, commonly used saturated analysis may substantially underestimate the degree of safety factor in realistic situations.

Keywords : stability analysis, unsaturated soil, rainfall duration, soil suction, safety factor

요 지

본 연구에서는 국내 풍화토 사면에서의 일반적 적용 경사 기준인 1:1.5, 1:1.8, 1:2.0 경사에 대하여 함수특성과 투수특성을 고려한 강우 시 사면의 침투거동특성을 SEEP/W 로 평가하였고, 그 결과를 활용하여 SLOPE/W 로 간극수압의 변화에 따른 무한사면 거동을 분석하였다. 또한 기존 이론인 Fredlund and Xing을 이용하여 함수특성곡선을 결정하고 강우강도에 대하여 지속시간이 달라지는 경우 화강풍화토 사면의 지반조건을 변화시켜 포화깊이, 안전율 변화를 수치해석적으로 접근하여 검토하였다. 본 연구결과 강우의 지속시간이 증가함에 따라 포화심도가 증가하는 것을 볼 수 있었고, 사면의 기울기가 완만해짐에 따라 포화심도가 증가하는 것으로 나타났으며, 지속강우특성을 고려한 해석을 통해 안전율의 경향을 확인할 수 있었다. 실제의 사면 거동을 좀 더 정확히 모사하기 위해서는 지속강우특성을 고려한 불포화토 해석을 통해 간극수압 분포를 산정한 후 사면안정해석을 실시하는 것이 필요하다고 판단된다.

핵심용어 : 안정해석, 불포화토, 지속강우특성, 안전율, 침투해석, 포화심도, 함수특성곡선

1. 서 론

최근 전 세계적으로 이상기후 현상에 의한 집중강우의 발생빈도가 증가되고 있으며, 국토면적의 약 70%가 산지인 우리나라의 경우도 이러한 이상기후 현상에 의해 강우가 집중되는 6~9월에 사면붕괴 등의 자연재해 발생이 점차 증가하면서, 사면 안정 및 보강 대책에 대한 관심이 고조되고 있는 실정이다. 또한, 국내자연사면의 대부분은 화강풍화토, 편마암토 등으로 지속적인 강우에 의한 지반포화와 전단강도 저하로 인한 사면 파괴보다는 불포화사면의 강우침투로 인해 임계의 포화깊이에 도달하여 얇은 파괴가 발생하게 된다(조성은 등, 2000; 김재홍, 2002). 즉, 포화깊이의 변화에 의

해 사면의 파괴가 일어나게 되는데, 사면의 전단강도를 증가시키는 지표면에서의 음의 간극수압(suction)의 감소로 인한 강도 저하가 얇은 사면파괴의 주요 원인인 것으로 알려져 있다(Ng and Shi, 1998).

국내 사면의 거동을 현장상태에 보다 가깝게 이해하기 위해서는 무엇보다도 국내 지반 특성에 맞는 불포화거동과 강우특성에 대한 연구가 필요하다. 지반의 불포화거동을 파악하기 위해서는 함수특성곡선, 침투수의 이동속도, 포화깊이, 강우 전 지반의 함수조건, 지하수위 위치 등이 중요하다. 예를 들어 함수특성곡선을 얻게 되면, 이를 통해 불포화 지반의 전단강도를 예측할 수 있고(Fredlund and Rahardjo, 1993; Vanapalli et al., 1996; Kim et al., 2004), 포화투수

*정회원 · 교신저자 · 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수 (E-mail : soj9081@yonsei.ac.kr)

**정회원 · 동부엔지니어링(주) 지반공학부 부장

***연세대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

계수와 함수특성곡선을 이용하여 불포화 지반의 투수계수도 예측할 수 있다(Marshall, 1958; Mualem, 1976; 이규현, 2007). 이러한 이유로, 보다 합리적인 실제 지반거동에 대한 연구를 위해서는 불포화도에 대한 기본적인 이해와 무한사면의 안정성에 대해 연구하는 것이 필요하다.

기존의 강우 시 사면 안정성 분석은 지하수위를 기준으로, 저면부는 포화상태로 지하수위 위는 완전 불포화로 가정된 후 주로 한계평형법을 이용하여 해석한다. 그러나 이러한 연구에서는 국내 토사사면 파괴의 주된 원인이 되는 영향인자들을 적절히 고려할 수 없을 뿐 아니라 침투로 인한 불포화 사면 지반 거동의 변화를 보다 합리적으로 고려하기가 어렵다. 따라서, 최근에는 불포화도의 특성을 잘 나타내는 함수특성곡선 실험을 통해 사면안정성을 평가한 연구들이 수행되고 있다(유남동, 2003; 이성진 등, 2005; 이규현, 2007). 하지만, 사면 파괴에 대한 보다 적절한 대책이 이루어지기 위해서는 불포화 사면 지반의 거동 특성과 지속강우특성을 고려함으로써 이에 따른 주어진 사면의 강우특성 및 시간에 의존적인 사면 붕괴에 대한 보안대책을 마련할 수 있는 체계적인 방법이 필요하다.

본 연구에서는 실제의 사면거동 특성 반영에 적합하도록 일반적인 국내 풍화토 사면(사면 경사 1:1.5, 1:1.8, 1:2.0)에서의 지속강우특성과 투수특성을 고려하여 강우 시 사면의 침투거동특성을 평가하고 그 결과를 활용하여 강우 시 사면의 침투거동을 좌우하는 간극수압의 변화에 따른 무한사면 거동에 대해 연구하였다. 또한 국내의 화강풍화토를 대상으로 기존 이론인 Fredlund and Xing와 van Genuchten의 방법을 통해 함수특성곡선을 결정하고, 재현기간에 대한 강우강도-지속시간을 달리하는 강우특성에 따라 포화강도정수, 흡수력에 따른 불포화강도정수를 이용해 간극수압의 변화에 따른 불포화사면 거동을 분석하였다.

2. 함수특성곡선 이론

함수특성곡선(soil-water characteristic curve)은 불포화 지반의 고유 특성이며, 지반의 강도와 거동 특성을 결정하는 매우 중요한 기본물성이라 할 수 있다. 일반적으로 함수특성곡선은 흙이 갖고 있는 물의 양과 모관흡수력, 즉 matric

suction과의 관계로 정의된다. 흙 속의 수분의 양은 증량함수비, 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 모관흡수력과의 관계로 곡선을 나타낸다.

전형적인 함수특성곡선의 모양은 그림 1과 같이 표현된다. 초기상태인 포화된 지반의 간극은 모관흡수력이 증가하여도 지반특성의 고유수치인 공기함입값(air-entry-value)을 초과할 때까지는 흙 속의 간극은 밖으로 물이 유출되지 않는다. 여기에 나타나는 공기함입값은 포화된 지반에 처음으로 공기가 간극으로 유입되기 시작하는 압력이다.

흙 속의 간극으로 공기가 계속 유입되면서 물이 유출되어 지반의 모관흡수력은 증가한다. 함수특성곡선에서 가장 중요한 요소이며, 지반의 고유한 특징인 곡선의 경사가 정해진다. 곡선의 경사는 공기함입값(air-entry-value)과 잔류함수비(residual water content)를 결정짓는 중요한 요소가 된다. 흙 속으로 공기의 흡입이 계속되면 모관흡수력이 지속적으로 증가한다. 그러나, 어느 정도의 모관흡수력이 증가하여도 더 이상의 물이 추출되지 않는 함수비가 존재하게 된다. 이때의 함수비를 잔류함수비(residual water content)라 한다.

Mualem(1976)은 함수특성곡선으로부터 불포화투수계수를 유도해 내려는 연구를 수행하였고, Vanapalli et al.(1996)은 함수특성곡선과 포화전단강도 정수들 사이의 관계식을 제안하였다. 또한, 함수특성곡선은 모관흡수력(matric suction) 변화에 따른 지반의 체적함수비 변화를 결정한다. 모관흡수력 변화에 따른 물리적 변화의 계수는 함수특성곡선의 경사에 의해 좌우된다. 기존의 함수특성곡선 방정식은 일반식으로 여러 지역의 지반 특성에 맞는 함수특성곡선 유형으로 제안되었다.

전형적인 모래질 흙, 실트질 흙 그리고 점토질 흙에 대한 함수특성곡선 유형은 그림 2와 같다. 즉, 함수특성곡선으로부터 규정되어진 몇 가지의 변수들이 다양한 곡선들에게도 규정된다(포화체적함수비 θ_s , 잔류체적함수비 θ_r , 공기함입값 또는 기포압 ψ 그리고 잔류공기량 θ_a). 많은 함수특성곡선이 제안되어져 왔으며 거의 모든 함수특성곡선은 다음 식 (1)과

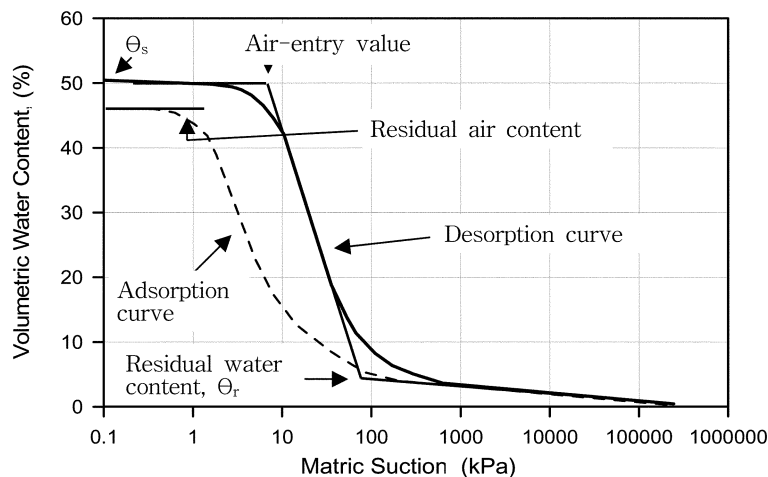


그림 1. 실트질 흙의 전형적인 함수특성곡선

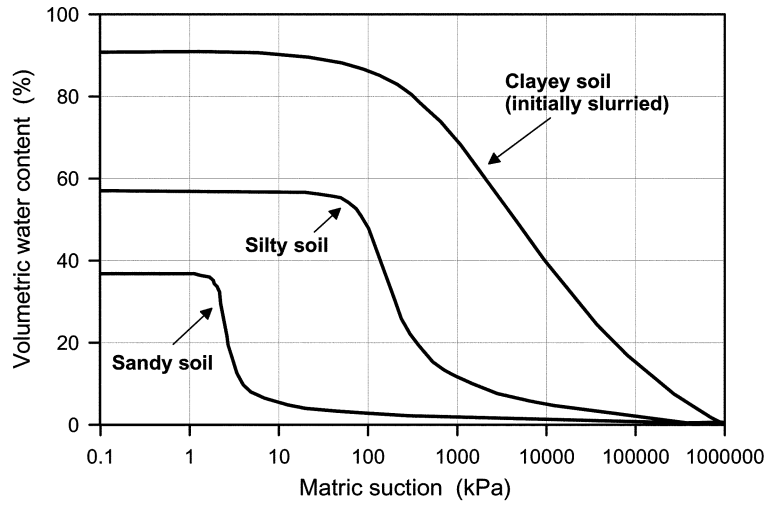


그림 2. 전형적인 모래질, 실트질 그리고 점토질 흙에 대한 함수특성곡선(Fredlund and Xing, 1994)

같은 일반식에서 유도된다.

$$a_1\Theta^{b_1} + a_2\exp(a_3\Theta^{b_1}) = a_4S^{b_2} + a_5\exp(a_6S^{b_2}) + a_7 \quad (1)$$

여기서, $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, b_1$, 그리고 $b_2 =$ 상수
 $S =$ 모관흡수력
 $\Theta =$ 표준화된 체적함수비

즉, Θ (normalized volumetric water content)는 $(\theta_w - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ 으로 표현되며, 여기서 θ_w 는 체적함수비이다. 식 (1)과 같은 함수특성곡선 방정식의 일반식으로 많은 사람들이 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 표 1로 정리하였다.

표 1. 여러 지반에 대한 함수특성곡선 방정식의 제안식들

제안한 사람	제안식	비고
Gardner(1958)	$\Theta = \frac{1}{1+aS^n}$	$a_1=a_7, a_2=a_5=0, a_4/a_1=a, b_1=1, b_2=n, a=n=$ 상수
Brooks and Corey(1964)	$\Theta = \left(\frac{S_b}{S}\right)^\lambda$	$a_2=a_5=a_7=0, b_1=1, b_2=-\lambda, a_4/a_1=S_b^\lambda$
McKee and Bumb(1984)	$\Theta = A\exp(a_6S-B)$	$a_2=a_4=a_7=0, b_1=b_2=1, a_5/a_1=A\exp(-B), A=B=$ 상수
McKee and Bumb(1987)	$\Theta = \frac{1}{1+A\exp(a_6S-B)}$	$a_2=a_4=0, a_1=a_7, b_1=-1, b_2=1, a_5/a_1=A\exp(-B), A=B=$ 상수
van Genuchten(1980)	$\Theta = \left[\frac{1}{1+(aS)^n}\right]^m$	$a_2=a_5=0, a_1=a_7, a_4/a_1=\alpha^n, b_1=n, a=n=m=$ 상수
Fredlund and Xing(1994)	$\Theta = \left\{ \frac{1}{\ln[e+(S/a)^n]} \right\}^m$	$a_7/a_2=e, a_4/a_2=(1/a)^{b_2}, b_2=n, b_1=-1/m, a=n=m=$ 상수

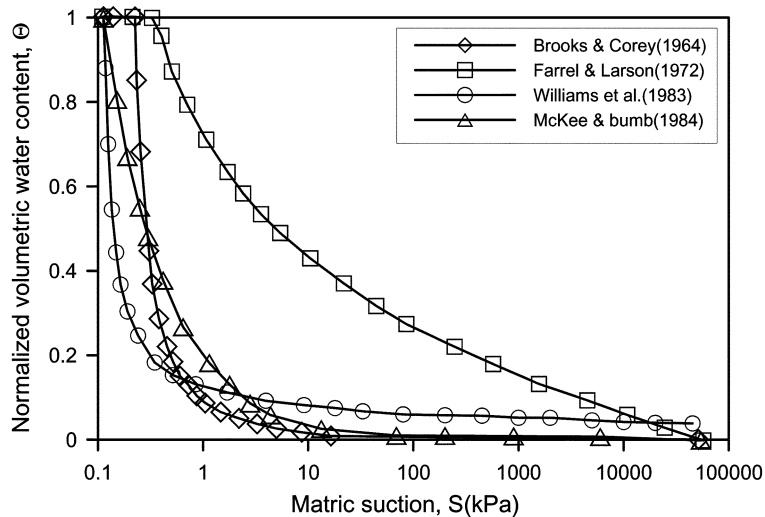


그림 3. 함수특성곡선 방정식의 예전 형태

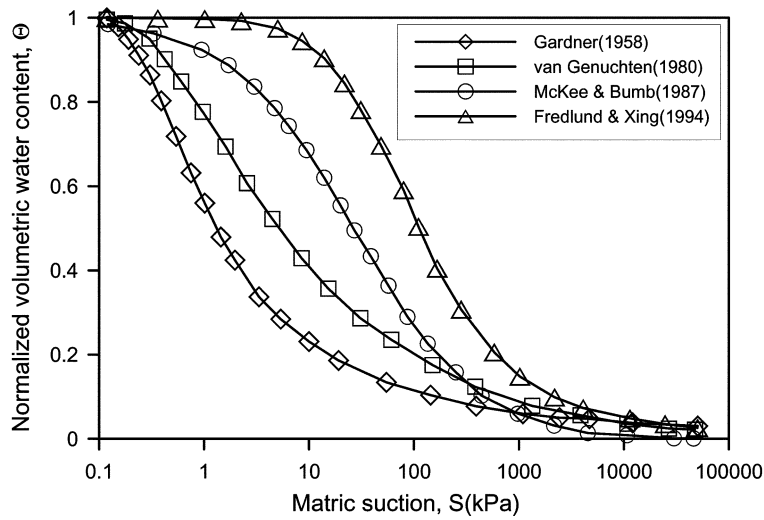


그림 4. 함수특성곡선 방정식의 S자 형태

오래전부터 함수특성곡선의 방정식들 대부분은 함수특성곡선의 실험값들이 이루는 형태를 바탕으로 경험적으로 표현되었다. 그 후, 계속적인 실험으로 근래에는 일반적인 함수특성곡선의 형태는 S자 모양을 이루고 있다.

초창기에 제안되었던 식들 중 Gardner(1958), Brooks and Corey(1964), McKee and Bumb(1984)들이 제안한 식들은 그림 3과 같이 S자 형태의 곡선을 이루지 못하고, 근래에 발표된 McKee and Bumb(1987), van Genuchten(1980), Fredlund and Xing(1994) 등이 제안한 식들은 그림 4 처럼 S자 형태의 함수특성곡선 방정식을 보여주고 있다. 더욱이 Fredlund and Xing(1994)은 흙의 입도분포곡선을 고려하여 함수특성곡선 방정식의 이론적인 기초를 세웠다.

여러 제안식들 가운데, 다양한 흙에 대한 함수특성곡선의 유형을 방정식으로 표현하는데 있어서 van Genuchten과 Fredlund and Xing의 제안식이 여러 흙들에게 이용되며 방정식의 검증으로 이용되고 있다.

3. 강우특성에 따른 포화깊이 산정

강우특성은 비탈면 안정성에 많은 영향을 미친다. 특히 건조사면의 강우에 대한 불포화도 흐름 특성상 강우에 의한

포화 심도의 증가는 비탈면 안정성의 결정적 영향을 미친다. 본 연구에서는 강우강도에 대한 지속시간의 변화에 따른 비탈면 안정성 변화 양상을 분석하였다.

3.1 수치해석 개요

불포화 풍화토사면의 안정성 분석의 해석 단면은 그림 5와 같이 높이 14m, 폭 100m 사면의 1:1.5(33°) 기울기로 모델링하였으며, 사면의 기울기 및 지반조건, 투수계수, 강우강도 등의 매개변수들을 변화시켜가며 해석을 수행하였다.

표 2에서와 같이 불포화 풍화토사면의 안정성 분석에 대한 해석을 위해 매개변수를 설정하였다.

불포화 풍화토사면의 포화깊이 산정 및 안정성 분석에서는 표 2와 같이 지속시간을 총 12단계로 나누어 수행하였다. 이는 지속시간에 따른 포화깊이 및 안전율의 거동이 변화하는 양상을 비교적 상세하게 관찰하기 위하여 충분히 검토시간을 세분화한 것이다.

사면의 기울기는 표준기울기를 기준으로 1:1.5(33°), 1:1.8(29°), 1:2.0(26°)에 대하여 해석을 실시하였다. 현재 국내 설계기준에 따르면 풍화토 깎기 사면의 표준기울기는 H=0~5m 까지는 1:1.2로, 그 이후로는 1:1.5를 적용토록 한다. 이때 기준안전율을 만족하지 못하면 공사부지 여건을 고려하여

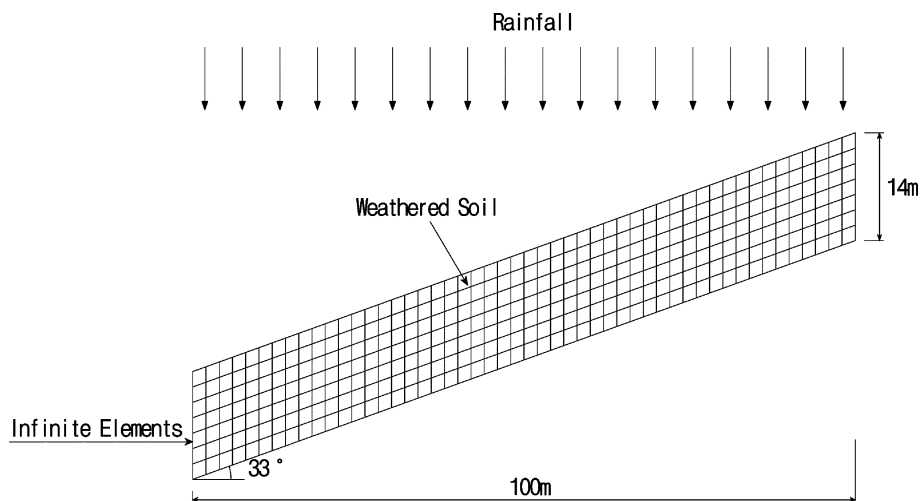


그림 5. 해석 단면

표 2. 해석 조건

변화인자	변화값	비고
지속시간	3, 6, 12, 24, 36, 48, 60, 72, 78, 84, 90, 96hr	12단계
사면의 기울기	1:1.5	3case
	1:1.8	
	1:2.0	
지반조건	느슨한 지반	2case
	조밀한 지반	
투수계수	10^{-5} m/sec	4case
	10^{-6} m/sec	
	10^{-7} m/sec	
	10^{-8} m/sec	
강우강도	10mm/hr (2.77×10^{-6} m/sec)	3case
	30mm/hr (8.33×10^{-6} m/sec)	
	50mm/hr (1.39×10^{-5} m/sec)	

표 3. 지반 물성치

구분	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kN/m ²)	내부 마찰각 (Φ, Φ^b)		투수계수 (m/sec)
			포화	불포화	
느슨한 지반	17.64	9.8	27°	6.6°	10^{-5}
					10^{-6}
조밀한 지반	18.62	14.7	33°	9.1°	10^{-7}
					10^{-8}

1:1.8 내지 1:2.0의 사면기울기로 완화하여 적용한다. 따라서 이러한 국내 설계현황을 고려하여 본 연구의 사면 기울기는 풍화토 사면의 일반적 기울기 기준인 1:1.5와 완화경사인 1:1.8 및 1:2.0의 3가지를 선정하였다.

지반의 강도정수는 표 3에서와 같이 기존 문헌에서 제시하고 있는 국내 화강풍화토의 일반적인 강도정수 값 중 느슨 및 조밀한 2가지 조건을 선정하여 적용하였으며, 지반의 투수계수는 10^{-5} m/sec, 10^{-6} m/sec, 10^{-7} m/sec, 10^{-8} m/sec를 적용하여 국내 풍화토지반의 느슨~조밀한 상태의 투수계수를 모사하였다.

3.2 강우강도 선정

강우의 재현빈도는 강우강도 및 지속시간에 영향을 미치는 인자이며 재현빈도가 높을수록 강우강도가 높다. 동일한 재현빈도 내에서는 강우강도가 높을수록 지속시간이 짧다. 따라서 합리적인 강우강도 및 지속시간의 선정은 중요한 요소이며, 본 연구에서는 일상에서 자주 발생하는 강우(10mm/hr) 및 산사태를 유발할 가능성이 큰 집중호우(30mm/hr, 50mm/hr)에 해당하는 강우강도를 적용하였다.

3.3 강우강도-지속시간에 따른 포화깊이 산정

본 연구에서는 Geo-Slope사의 SEEP/W를 이용하여 불포화토 해석을 실시하였다. 불포화토 흐름의 특성상 시간에 따른 부정류해석이며 함수특성곡선은 함수특성곡선 방정식을 이용하여 산정하였다.

강우 시 포화깊이를 해석하기 위한 경계조건으로 강우지속

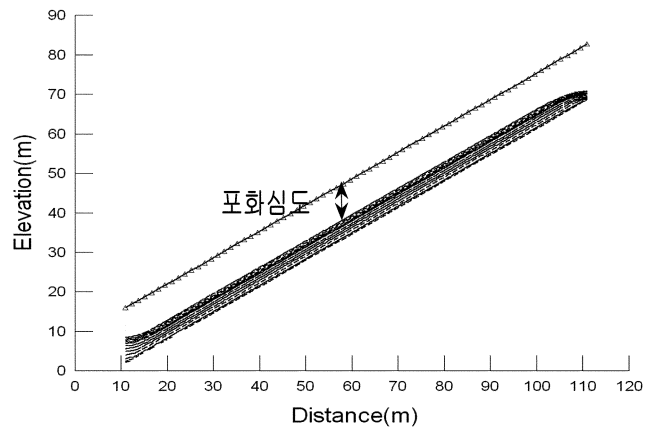


그림 6. SEEP/W 해석결과

시간은 3, 6, 12, 24, 36, 48, 60, 72, 78, 84, 90, 96시간으로 12단계의 같은 조건이며, 강우강도는 10mm/hr, 30mm/hr, 50mm/hr의 경우와 모든 경계조건 및 사면의 기울기는 1:1.5로 동일하게 적용하였다. 또한 지반 투수계수는 10^{-5} m/sec, 10^{-6} m/sec, 10^{-7} m/sec, 10^{-8} m/sec로 각각 적용하였다. 포화깊이 산정에 관련된 해석 시에는 전술한 바와 같이 투수계수, 강우강도, 사면의 기울기에 의한 영향이 고려되며 지반의 강도정수는 변수로 작용하지 않는다.

그림 6은 SEEP/W 프로그램에서의 대표적인 해석결과로서 조밀한 지반조건에서의 투수계수 10^{-7} m/sec, 강우강도 50mm/hr 적용시의 지속시간에 따른 포화심도이다.

그림 7은 SEEP/W 결과로서 불포화토에서 강우강도가 지속됨에 따라 포화심도의 변화를 나타내고 있다. 즉, 강우의 지속시간이 증가함에 따라 포화심도가 증가하는 것을 알 수 있다.

지반의 투수계수가 10^{-8} m/sec인 경우에는 불포화시의 투수계수가 너무 작아 하향으로의 침투가 발생되지 않아 지속시간에 따른 포화심도 증가 양상이 나타나지 않았으며, 지반의 투수계수가 10^{-7} m/sec인 경우에는 그림 6에서의 SEEP/W 해석결과와 같이 강우강도 50mm/hr에서의 포화심도 변화가 비교적 미세하게 나타났으며, 10mm/hr 및 30mm/hr에서도 동일한 양상으로 나타났다.

지반의 투수계수가 10^{-6} m/sec인 경우에는 초기포화심도 증가가 현저히 작은 것으로 나타났다. 강우강도가 10mm/hr 정도로 작은 경우 및 강우강도 30mm/hr, 50mm/hr에서도 동일한 양상으로 나타나며, 지속시간이 24시간이 될 때까지는 점진적으로 증가하는 것을 알 수 있으나 그 후에는 급격히 증가하여 해석영역 전체가 포화심도에 이르는 것을 알 수 있다.

지반의 투수계수가 10^{-5} m/sec인 경우에는 불포화시의 투수계수가 매우 커서 3시간 지속 시부터 이미 큰 포화심도를 나타내고 있으나 강우지속시간 초기 이후에는 미약하게 강우강도에 따라 포화심도가 변화되고 있다. 또한, 투수계수가 10^{-5} m/sec인 경우의 10mm/hr 및 30mm/hr에서 포화심도가 초기이후에는 10^{-6} m/sec 보다 투수계수가 크어도 불구하고 낮은 심도의 경향을 보인다. 이는 비탈면에서 투수계수가 클수록 포화깊이의 증가가 예측되는 일반적인 경향과 일치하지 않는 것으로서 투수계수가 클 경우에는 빠르게 포화상태에 이르게 되나 일정심도 이후에는 투수특성보다 강우강도

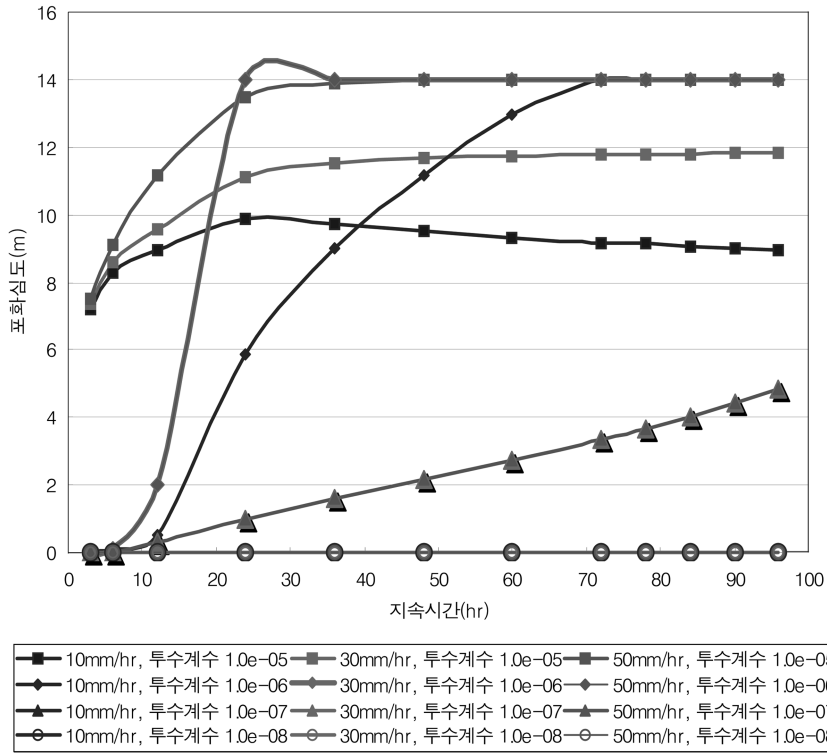


그림 7. 강우지속시간에 따른 포화심도 변화

및 지속시간에 보다 많은 영향을 받게 되어 포화심도 증가 속도가 초기보다 급격히 감소됨을 알 수 있었다.

이와 같이 포화심도는 강우강도 및 지반조건에 따라 그 진전상태가 매우 달라질 수 있다. 즉 포화심도는 단지 강우 강도나 지반의 투수계수조건에 의하여 지배되는 것이 아니라 지속강우조건 즉 강우강도와 이에 따른 지속시간에 영향을 받으며, 동시에 지반의 투수계수의 크고 작음에 따라 영향을 미치는 것으로 나타났다. 강우강도와 지속시간이 비교적 크고 길더라도 지반의 투수계수가 상당히 작은 경우는 강우에 대한 영향이 크지 않으나 지반의 투수계수가 비교적 큰 경우는 강우에 대한 영향에 더 민감하여 일정지속시간 이후 포화심도가 급격히 증가하여 비탈면이 위험상태에 이를 수 있음을 알 수 있었다.

4. 수치해석을 통한 불포화 사면의 안정성 분석

본 연구에서 수행한 수치해석 결과를 이용하여 지속시간과 포화심도에 따른 사면의 안전율을 검토하였다.

사면의 안전율은 기존 문헌에서 제시하고 있는 지반의 강도정수를 적용하였으며, 간극수압 분포 및 이에 따른 비탈면 안정해석 적용은 상용프로그램인 SEEP/W의 연동해석으로 SLOPE/W를 이용하여 산정하였다.

4.1 지속시간에 따른 사면의 안전율 검토

지속시간에 따른 사면의 안전율을 검토하기 위하여 지반의 상대밀도 조건을 조밀한 지반으로 하여 $c=14.7\text{kN/m}^2$, $\phi=33^\circ$ 를 적용하였고, 사면 기울기로는 풍화토사면에서 대표적인 1:1.5(33°)의 기울기로 동일하게 적용하였다. 투수계수 및 강우강도는 기존 절과 동일하게 적용하였으며(표 2 참조), 지속시간은 앞서 수행한 바와 같이 3, 6, 12, 24, 36, 48,

60, 72, 78, 84, 90, 96시간을 적용하여 12단계 지속시간 변화에 따른 사면의 안전율 변화를 해석함으로써 지속강우 조건이 불포화토 사면에 미치는 영향을 검토하였다.

지속시간 및 포화심도에 따른 사면의 안전율 검토에서는 조밀한 지반의 물성치를 이용하여 해석을 실시하였다. 사면의 기울기는 1:1.5로 적용하였으며, 지속시간에 따른 포화심도와 이에 해당하는 안전율의 변화는 그림 8과 같이 나타나고 있다. 해석결과는 지속시간이 증가함에 따라 포화심도는 증가하고 사면의 안전율은 감소하는 경향을 나타낸다. 투수계수가 10^{-8}m/sec 인 경우에는 지속시간에 따라 포화심도변화가 거의 없어 안전율은 일정한 양상으로 나타났고, 투수계수 10^{-7}m/sec 인 경우 또한 포화심도 변화가 미미하여 안전율의 변화는 거의 없었다. 투수계수가 10^{-6}m/sec 의 경우 투수계수가 비교적 크므로 강우에 따라 하향으로의 침투가 원활하게 이루어져 지속시간에 따른 포화심도 증가가 앞의 2가지 경우보다 현저하게 나타났으며, 투수계수가 10^{-5}m/sec 인 경우에도 투수계수 10^{-6}m/sec 경우의 안전율 감소와 동일한 경향을 나타내고 있다. 즉, 사면의 안전율은 강우조건이나 강도정수 뿐만 아니라 사면의 투수계수 또한 큰 영향을 미치게 됨을 확인할 수 있었다.

4.2 사면의 기울기에 따른 안전율 검토

본 연구에서는 강우지속시간이 증가함에 따라 포화심도가 변화하는 과정 중에서 사면 기울기에 따른 안전율을 검토하여 기울기에 따른 안전율의 변화를 일반적인 결과와 비교할 수 있었으며, 기울기에 따른 안전율은 일반적인 결과와 동일한 경향으로 나타나는 것을 알 수 있었다.

지속시간에 따른 사면의 안전율을 검토하기 위하여 지반의 상대밀도 조건을 조밀한 지반으로 적용하였으며, 강우강도는 50mm/hr로 적용하였다. 투수계수 및 지속시간은 앞서 수행

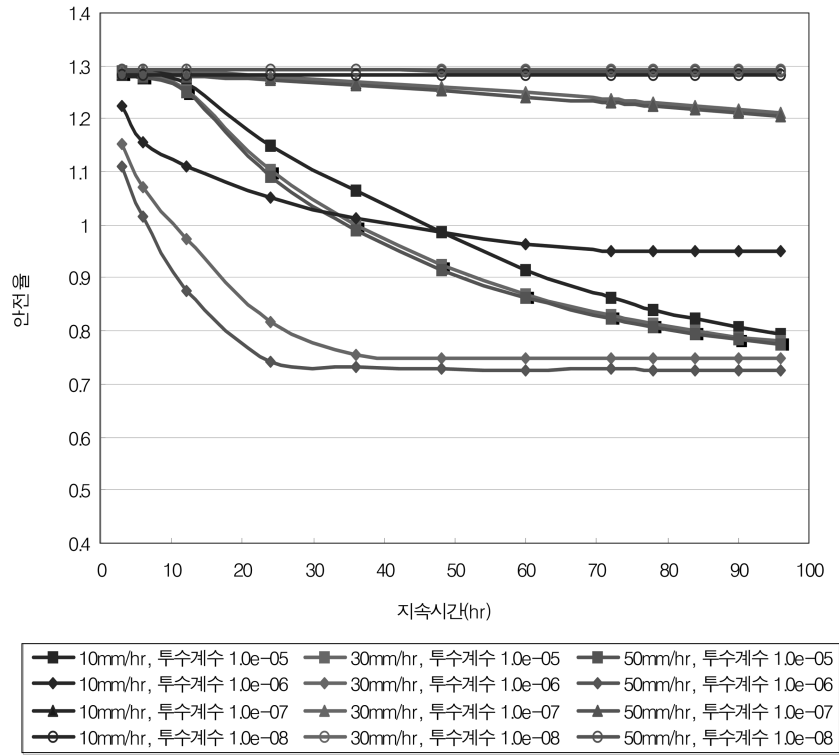


그림 8. 강우지속시간에 따른 사면의 안전율

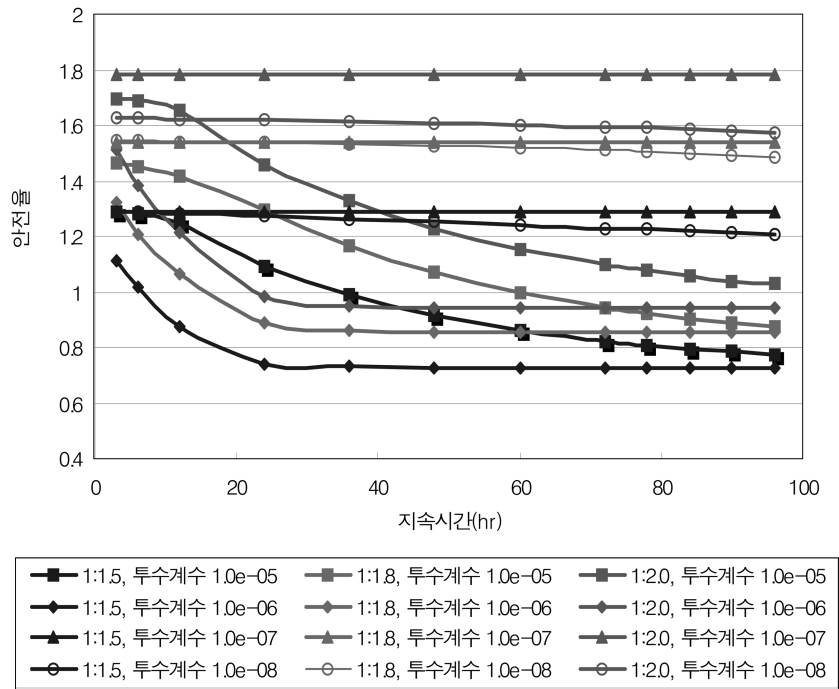


그림 9. 사면기울기에 따른 사면의 안전율

한 바와 동일하게 적용하였고(표 2 참조), 지속시간 변화에 따른 사면의 안전율 변화를 해석함으로써 지속강우조건을 반영하였다. 사면의 기울기는 풍화토 사면의 일반적 기울기 기준인 1:1.5(33°)와 완화경사인 1:1.8(29°), 1:2.0(26°)에 대하여 해석을 실시하였다. 그림 9에서 안전율 변화를 전체적으로 나타내었다.

사면에서의 기울기가 1:1.5에서 안전율은 기울기 1:1.8과 1:2.0에서의 안전율보다 명확하게 작게 나타나는 것을 알 수 있으며, 변화하는 경향은 동일하게 나타나고 있다. 투수계수가 10^{-7} m/sec 및 10^{-8} m/sec인 경우에는 전술한 바와 같이

작은 투수계수로 인한 침투감소로 지반의 포화가 거의 일어나지 않으므로 지속시간에 따른 안전율의 변화가 미미하다. 또한 사면기울기가 1:1.5에서 1:1.8, 1:2.0으로 완만해질수록 안전율의 변화가 좀 더 크게 나타나며 지속시간의 증가에 따른 안전율의 변화 양상은 사면의 기울기에 따라 비교적 동일하게 나타남을 알 수 있었다.

4.3 지반 조건에 따른 사면의 안전율 검토

본 연구에서는 지반 조건에 따른 사면의 안전율에 대하여 검토하였다. 지반의 종류는 느슨한 지반과 조밀한 지반으로

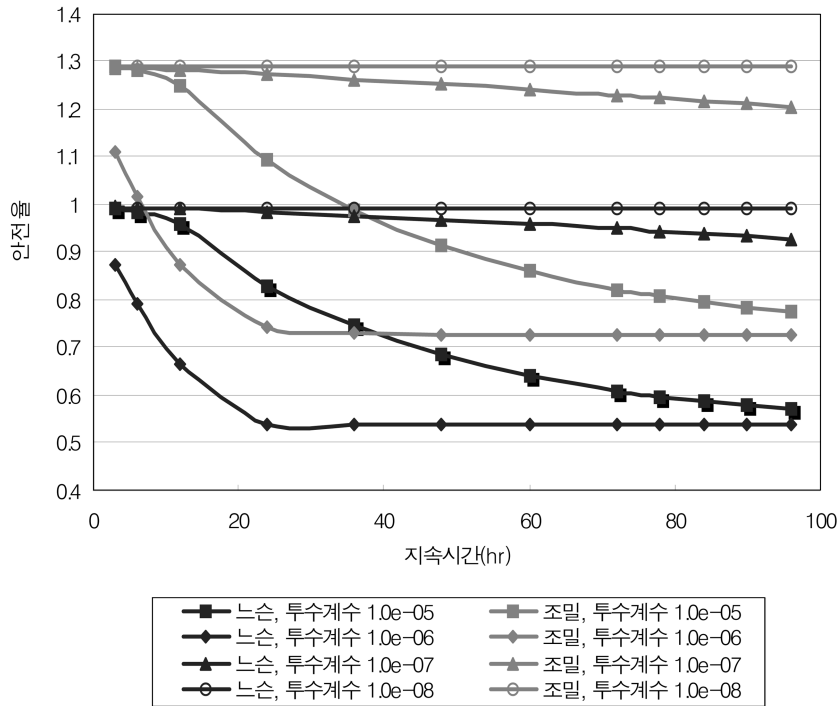


그림 10. 지반 조건에 따른 사면의 안전율

분류하였으며 기존 문헌을 참고로 국내 화강풍화토의 대표적인 값들을 이용하여 적용하였다. 사면의 기울기는 풍화토 사면의 일반적 적용기준인 1:1.5로 동일하게 적용하였으며, 강우강도는 50mm/hr로 적용하였다. 투수계수는 앞서 수행한 바와 같이 4가지 조건으로 변화시켜 적용하였고, 12단계 지속시간 변화에 따른 사면의 안전율 변화를 해석함으로써 지속강우조건을 반영하였다(표 2 참조).

그림 10은 지반 조건에 따른 사면의 안전율의 결과를 나타내고 있다. 지속시간이 증가함에 따라 안전율은 동시에 감소되지만 일반적으로 알 수 있듯이 안전율의 절대적인 수치는 지반 조건이 조밀한 지반에서 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 투수계수 10^{-5} m/sec, 10^{-6} m/sec인 경우 동일한 변화양상을 나타내었으나, 느슨한 지반의 경우보다 조밀한 지반에서의 안전율 감소폭이 더 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 지반조건에서의 포화 및 불포화시 강도정수 변화에 기인하는 것으로서 사면의 안정은 강도정수 뿐만 아니라 사면의 투수계수와 밀접한 관계에 있다. 침투된 강우의 거동은 투수계수에 큰 영향을 받아 지반 내 간극수압 분포를 형성하기 때문에 사면은 지반조건 및 투수계수와 강우의 지속에 따라 안전율이 변화할 수 있으므로 설계 및 시공 시 주의를 기울여야 할 사항임을 알 수 있었다. 투수계수 10^{-7} m/sec의 경우 안전율 변화폭이 미미하며, 투수계수 10^{-8} m/sec인 경우에는 낮은 투수계수로 인해 지반조건에 관계없이 안전율 변화가 나타나지 않았다.

4.4 포화 사면의 안전율 비교

사면에서의 안전율은 강우지속시간이 길어짐에 따라 지표 침투에 따른 포화로 인해 안전율이 급감하게 된다. 따라서 본 연구에서 실시한 불포화토 침투해석과 포화 사면의 안전율과의 비교를 위하여 통상 설계에서 적용하고 있는 우기시의 해석을 1:1.5(33°) 사면기울기로 실시하였다.

포화 안정해석결과 느슨한 지반에서의 최소안전율은 $F_s=0.333$, 조밀한 지반에서의 안전율은 $F_s=0.486$ 으로서 지표 포화시는 침투해석을 통한 지반 포화시 보다도 안전율이 작게 산정되는 것으로 나타났다. 실제의 사면거동은 강우강도와 지속시간 및 사면의 강도정수 뿐만 아니라 투수계수와도 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다. 근본적으로 사면 안전율의 핵심은 지반의 전단강도와 활동력과의 대소인데 지반의 전단강도는 오직 유효응력에 의하여 좌우되는 값이다. 이러한 유효응력에 변화를 주는 것은 강우에 의한 사면내의 간극수압 분포이므로 유입유량(강우)이 시간에 따라 불포화토의 투수계수 및 함수량 관계에 따라 변화하는 부정류 침투속성을 가지며 주어진 경계조건하에서 시간에 따라 그 분포를 달리한다.

5. 결 론

본 연구에서는 불포화 상태의 무한사면에 침투하는 강우에 대하여 지속강우특성과 투수특성을 고려하여 사면의 침투거동특성을 상용프로그램인 SEEP/W로서 평가하고 그 결과를 활용하여 강우 시 사면의 침투거동을 좌우하는 간극수압의 변화에 따른 무한사면 거동에 대해 분석하였다. 이에 국내의 화강풍화토를 대상으로 기존 이론인 Fredlund and Xing와 van Genuchten의 방법을 통해 함수특성곡선을 결정하고, 재현기간에 대한 강우강도-지속시간을 달리하는 강우특성에 따라 포화강도정수, 흡수력에 따른 불포화강도정수를 이용해 SLOPE/W로 간극수압의 변화에 따른 불포화사면 거동을 분석하였다. 본 연구결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 강우지속시간에 따른 사면포화심도는 투수계수 10^{-6} m/sec인 경우 강우강도 10mm/hr, 30mm/hr 및 50mm/hr로 지속시간이 24시간이 될 때까지 점진적으로 증가하며, 그 후에는 급격히 증가하여 해석영역 전체가 포화심도에 이

르는 것을 알 수 있었다. 이와 같이 풍화토사면에서의 일반적인 투수조건 시 강우지속시간이 24시간 이후에는 포화심도가 급격히 증가하여 사면 안전율이 저하됨을 알 수 있었다.

2. 사면기울기가 1:1.5에서의 사면안전율은 기울기 1:1.8과 1:2.0에서의 안전율보다 명확하게 작게 나타났으며, 사면기울기가 1:1.5에서 1:1.8, 1:2.0으로 완만해질수록 안전율 변화가 좀 더 크게 나타났다. 이와 같이 사면기울기가 완만해짐에 따라 지속강우에 의한 침투가 증가하여 포화심도 증가 또한 커졌음을 알 수 있었다.
3. 지반조건에 따른 사면안전율은 투수계수가 10^{-7} m/sec의 경우 변화폭이 미미하며, 10^{-8} m/sec인 경우에는 낮은 투수계수로 인하여 지반조건에 관계없이 변화가 나타나지 않았다. 투수계수 10^{-5} m/sec, 10^{-6} m/sec인 경우 동일한 변화양상을 나타내었으나, 느슨한 지반보다 조밀한 지반에서의 안전율 감소폭이 더 크게 나타났다. 이와 같이 사면 내 침투된 강우의 거동은 투수계수에 큰 영향을 받아 지반 내 간극수압 분포를 형성하기 때문에 지반조건 및 투수계수, 강우의 지속에 따라 안전율이 급격히 변화할 수 있음을 알 수 있었다.
4. 실제의 사면거동은 지속강우 및 강도정수 뿐만 아니라 투수계수와도 밀접한 관계가 있다. 따라서 현행 설계 및 사면안정검토에 있어 일반적으로 적용되는 포화해석은 지속강우특성이 반영되지 않은 상태이므로 불포화 해석시보다 실제의 사면거동을 정확히 파악할 수 없는 것임을 알 수 있었다.

참고문헌

김재홍(2002) 강우시 불포화 풍화토의 습윤에 의한 무한사면 안정해석, 석사학위논문, 연세대학교.
 유남동(2003) 점토함유량에 따른 화강풍화토의 불포화 특성, 석사학위논문, 연세대학교.
 이규현(2007) 불포화 사면안정에 미치는 세립분의 영향분석, 석사학위논문, 연세대학교.
 이성진, 이혜지, 이승래(2005) 화강풍화토에 대한 함수특성곡선 -

추정방법에 대한 연구, 한국지반공학회는논문집, 한국지반공학회, 제21권, 제1호, pp. 15-27.
 조성은, 이승래(2000) 강우특성을 고려한 사면의 표면과괴에 대한 안정성 평가, 한국지반공학회는논문집, 한국지반공학회, 제16권, 제5호, pp. 107-116.
 Brooks, R. H. and Corey, A. T. (1964) Hydraulic properties of porous media, *Colorado State University Hydrology Paper*, Vol. 3, pp. 27.
 Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993) *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley and Sons, Inc.
 Fredlund, D. G. and Anqing Xing (1994) Equations for the soil-water characteristic curve. *Can. Geotech. J.*, Vol. 31, pp. 521-532.
 Gardner, W. R. (1958) Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, Vol. 85, pp. 228-232.
 Kim, J., Jeong, S., Park, S., and Sharma, J. (2004) Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils. *Engineering Geology*, Vol. 75, No. 3-4, pp. 251-262.
 Marshall, T. J. (1958) A relation between permeability and size distribution of pores. *Journal of Soil Science*, Vol. 9, pp. 1-8.
 McKee, C.R. and Bumb, A.C. (1984) The importance of unsaturated flow parameters in designing a monitoring system for hazardous wastes and environmental emergencies. *Proceedings, Hazardous Materials Control research Institutes National Conference*, Houston, TX, pp. 50-58.
 McKee, C.R. and Bumb, A.C. (1987) Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of water and gas. *In SPE Formation Evaluation*, pp. 599-608.
 Mualem, Y. (1976) A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, Vol. 12, pp. 513-522.
 Ng, C. W. W. and Shi, Q. (1998) A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage. *Computers and Geotechnics*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-28.
 Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., and Clifton, A. W. (1996) Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Can. Geotech. J.*, Vol. 33, pp. 379-392.
 van Genuchten, M. Th. (1980) A closed form equation for predicting hydraulic conductivity in unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 44, pp. 892-898.
 (접수일: 2008.10.1/심사일: 2008.11.3/심사완료일: 2008.11.3)