선행강우를 고려한 인제지역 불포화 화강풍화토 사면의 안정성 특성

Slope Stability Characteristic of Unsaturated Weathered Granite Soil in Inje considering Antecedent Rainfall

이지성* · 송영갑** · 김윤태***

Lee, Ji Sung · Song, Young-Karb · Kim, Yun Tae

Abstract

Unsaturated geotechnical properties and other factors(rainfall characteristic, geomorphology, etc) have to be considered in order to evaluate the stability of real slope. Even though antecedent rainfall is also an important factor on the slope stability, it is rarely considered in analysis of slope stability. In this paper slope stability analysis for unsaturated weathered granite soil in Inje was conducted considering antecedent rainfall. Effect of antecedent rainfall was considered in analysis by using initial matric suction, which was induced from field measurement. Unsaturated geotechnical properties(soil-water characteristic curve, unsaturated conductivity, unsaturated shear strength) of weathered granite soil in Inje were also investigated. Effects of antecedent rainfall on variation of factor of safety(FS) of slope, failure time and cumulative rainfall were evaluated. For a slope with high initial matric suction, FS slowly decreased and failure time delayed than a slope with low initial matric suction. Numerical analysis also indicated that a slope with wetting SWCC more rapidly approached to failure than a slope with drying SWCC.

Key words : Unsaturated geotechnical properties, Antecedent rainfall, Initial matric suction, Failure time, Cumulative rainfall

요 지

실제 사면 안정성을 평가하기 위해서는 불포화 지반정수를 반영함과 동시에 여러 인자(강우 특성, 지형학적 특성 등)를 고려해야 한다. 또한 사면안정성에 큰 영향을 미치는 선행강우를 고려해야 함에도 불구하고 사면안정해석 시 거의 반영이 되지 않고 있는 실정이다. 따라서 선행강우를 고려한 사면안정해석을 위해 기존의 현장계측치에 근거하여 초기 모관흡수력의 변화를 바탕으로 선행강우를 고려하였다. 선행강우를 고려한 실제 사면의 안정성을 분석하기 위해 급경사지 봉곡다발지역인 인제지역의 불포화 지반정수(함수특성곡선, 불포화투수곡선, 불포화 강도특성)를 산정하였다. 강우강도 특성과 인제지역 불포화 지반특성을 반영하여 선행강우가 불포화 사면의 안전을 변화에 미치는 영향을 분석하였을 뿐만 아니라, 선행강우(초기 모관흡수력)에 따른 파괴시점 및 파괴시점까지의 누적강우량을 비교·분석 하였다. 초기 모관흡수력이 높을수록 안전율이 급격히 감소하는 시점과 파괴시점이 늦어진다. 사면안정해석 시 습윤 함수특성곡선을 사용할 때가 건조 함수특성곡선을 사용했을 때보다 더 빠른 시점에 파괴가 유발된다.

핵심용어 : 불포화 지반정수, 선행강우, 초기 모관흡수력, 파괴시점, 누적강우량

1. 서 론

지난 30년 동안 기상관측소에서 관측된 강우자료를 살펴보면, 여름철 평균 강수량은 1976~1985년대에 661 mm, 1986~1996년대에는 710 mm, 1996~2005년대에는 814 mm로서 크게 증가했음을 알 수 있다. 특히 1996년 이후에는 매년 여름철 강수량이 800 mm를 초과하였다. 강수량 자체가 증가함에 따라 사면재해는 과거에 비해 더욱 심각해지고 있는 실정이다. 기상청의 자료에 의하면 기후변화 등의 영향으로 인해

국지적인 집중호우가 발생할 가능성이 증가되고 있다. 그림 1은 1999년부터 2011년까지 우리나라에서 우기(6월~9월) 및 건기(10월~5월)시 사면붕괴 이력을 나타낸다. 우리나라의 사면재해(사면붕괴, 산사태, 도로유실, 도로 및 계곡매몰 등)는 강우가 지반에 침투됨에 따라 유발된 붕괴로서 6월~9월 사이의 집중호우 기간에 주로 발생한다는 것을 알 수 있다.

강우 침투로 인하여 사면내 표층에서 습윤대(water front)가 형성되면 모관흡수력이 감소함에 따라 취약한 면에서 얇은 파괴(shallow failure)가 발생하게 된다. 산악지형이 많은 국

*정회원 · 국립부경대학교 해양공학과 석사과정(E-mail: js3497@naver.com)

**국립방재연구원 선임연구원

***정회원 · 국립부경대학교 해양공학과 교수(교신저자)

그림 1. 건기 및 우기시 사면붕괴 이력

내의 경우 강우 시 사면의 붕괴가 빈번하게 발생함에 따라 사면의 안정성을 정확히 평가하기 위해서 강우에 의한 지반의 수리학적 거동과 강우 침투에 의한 영향을 파악해야 한다 (이승래 등, 2009).

따라서 불포화 사면의 안정해석 시 대상사면의 지질 및 지반공학적 특성, 지형학적 특성 및 강우 특성 등 많은 변수들을 고려해야 한다. 특히 강우 특성 및 선행강우는 사면의 안정성에 영향을 많이 준다. 그림 2는 서울 및 강원도 지역에서 사면붕괴가 발생하기 전·후의 일 강우량을 각각 나타내고 있다. 사면붕괴가 발생하기 며칠 전부터 선행강우가 있었으며, 붕괴발생 시점에 집중강우가 내렸음을 알 수 있다. 기존의 불포화 사면의 연구에서는 불포화 이론에 입각하여 시간에 따른 사면의 안전을 거동을 분석하였다(조성은, 2000; 김재홍 등, 2002; Rahardjo 등, 2007; 오세봉 등, 2008; 박성완 등, 2009; 정상섭 등, 2009; 이승래 등, 2009). 그러나 국외 문헌에 의하면 사면의 안정해석 및 강우 한계선 설정 시 선행강우의 중요성을 언급(Saito 등, 2010; Dahal 등, 2008)하고 있으나, 사면의 안정해석 시 선행강우를 고려한 해석은 현재까지 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 선행강우가 사면의 안정성에 미치는 영향을 고려하기 위해 강우 시 모관흡수력의 변화에 대한 현장 계측치(이인모 등, 2003; 이승래 등, 2006)를 바탕으로 불포화 사면의 초기 모관흡수력을 산정하였다. 또한 급경사지 붕괴 다발지역인 강원도 인

제군에서 비교란 시료를 채취하여 불포화 지반정수 특성을 산정하였다. 강우강도 특성과 인제지역 불포화 지반특성(건조 및 습윤 함수특성곡선, 불포화 전단강도, 투수곡선)을 반영하여 선행강우가 불포화 사면의 안전을 변화에 미치는 영향을 분석하였을 뿐만 아니라, 선행강우(초기 모관흡수력)에 따른 파괴시점 및 파괴시점까지의 누적강우량을 비교·분석 하였다. GEO-SLOPE 2004의 SEEP/W와 SLOPE/W를 활용하여 불포화 사면의 선행강우를 고려한 침투해석 및 안정해석을 수행하였다.

2. 인제지역 화강풍화토의 불포화 지반특성

2.1 함수특성곡선(SWCC)

함수특성곡선(soil-water characteristic curve, SWCC)은 지반의 불포화 특성을 결정하는 고유한 지반 물성특성으로서 그림 3과 같이 함수비와 모관흡수력의 관계를 나타내며, 일반적으로 S형태를 가진다. 전형적인 함수특성곡선의 모양은 건조과정(drying curve)과 습윤과정(wetting curve)이 서로 다른 경로를 가진다. 포화된 간극은 모관흡수력의 증가에도 불구하고 공기함입치(air-entry value)를 초과할 때까지는 흙의 간극에서 물이 유출되지 않는다. 이러한 공기함입치는 간극으로 공기가 유입되기 시작하는 압력으로 정의된다. 그리고 모관흡수력의 증가에도 불구하고 더 이상 물이 추출되지 않는 함수비를 잔류함수비라 한다. 이 함수비에서 잔류한 소량의 물은 열에 의해서만 제거될 수 있다. 함수특성곡선은 흙 속의 물의 양과 모관흡수력과의 관계로 정의되며, 물의 양은 중량 함수비, 체적함수비 또는 포화도로 나타낼 수 있다.

본 연구에 사용된 비교란 화강풍화토는 강원도 인제지역 시험현장에서 비교란 시료채취기를 통해 채취되었다. 채취된 비교란 화강풍화토에 대한 함수특성곡선은 SWC-150 Fredlund SWCC Device를 이용하여 습윤 및 건조과정의 함수특성곡선을 산정하였다. 건조 및 습윤 과정에서 셀에 가해진 압력에 따른 체적함수비의 변화를 측정하여 함수특성곡선을 구할 수 있으며 이러한 건조-습윤과정을 반복하면서 이력곡선

(a) 서울 A지역

(b) 강원도 B지역

그림 2. 붕괴발생 전·후의 강우 이력

그림 3. 전형적인 함수특성곡선의 모습(Fredlund & Xing, 1994)

그림 4. 인제지역의 함수특성곡선

(hysteresis loop)을 얻을 수 있는 장점이 있다. 특히 본 연구에서 목표로 하고 있는 강우로 인한 지반침투해석 시 선행 강우를 고려한 안정해석을 수행하기 위해서 습윤과정 함수특성곡선을 얻는 것이 필요하다.

많은 연구자들에 의해 실내 실험결과로부터 최적의 함수특성곡선을 결정하기 위해 다양한 함수특성곡선 방정식이 제안되어 왔다(Gardner, 1958; Brooks & Corey, 1964; van Genuchten, 1980; Fredlund & Xing, 1994). 강원도 인제지역에서 채취한 시료는 우리나라의 전형적인 화강풍화토로서, 국내의 많은 문헌자료에 의하면 Fredlund & Xing의 함수특성곡선이 이 지역의 화강풍화토에 가장 최적의 곡선을 주는 것으로 알려져 있다(김윤기, 2003; 이승래 등 2009; 전경한 2012). 그림 4는 강원도 인제지역의 함수특성곡선으로서 건조 과정과 습윤과정의 실험결과를 식 (1)의 Fredlund & Xing (1994)의 방법으로 나타내었다.

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

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln \left[1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right]}{\ln \left[1 + \frac{1000000}{\psi_r} \right]} \quad (1b)$$

그림 5. 인제지역의 불포화 투수곡선

여기서 a , n , m = 맞춤변수이고, ψ_r = 잔류함수비에 대응하는 모관흡수력을 나타낸다.

2.2 불포화 투수곡선

불포화 투수곡선은 다양한 크기의 모관흡수력에 대해 투수 시험을 실시해서 직접 얻는 것이 가장 합리적이지만, 실험에 소요되는 시간과 비용의 문제로 인해 일반적으로 함수특성곡선으로부터 추정한다(Fredlund, 1994). 국내 화강풍화토에 대해 불포화 투수곡선 실험을 수행한 결과 대체로 Kunze 투수곡선과 FX-M(Fredlund & Xing - Mualem) 투수곡선에 의해서 비교적 잘 표현되는 것을 알 수 있다(김윤기, 2003). 본 연구에서 사용된 투수곡선식은 식 (2)와 같은 Fredlund 등(1994)이 제안한 식을 이용하여 인제지역의 불포화 투수곡선을 산정하였다. 그림 5는 모관흡수력의 변화에 따른 인제지역의 건조 및 습윤과정의 불포화 투수곡선을 나타낸다. 포화투수계수(k_s)는 1.87E-05 m/s로서 실내투수시험으로부터 산정되었다. 모관흡수력이 감소함에 따라, 즉 강우가 지반에 침투하여 함수비가 증가함에 따라, 투수계수 값은 증가한다.

$$k_r(\psi) = \frac{\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(\psi_{aev})}^b \frac{\theta(e^y) - w\theta}{e^y} \theta'(e^y) dy} \quad (2)$$

여기서, $b = \ln(1,000,000)$, aev = 공기함입치(air-entry value)를 나타낸다.

2.3 불포화 전단강도

불포화 강도정수는 강원도 인제지역의 비교란 시료를 채취하여 불포화 삼축실험을 통해 산정되었다. 표 1은 실내시험을 통해 얻은 지반특성 및 불포화 지반정수를 나타낸다. 인제지역 화강풍화토는 통일분류법으로 SW 또는 SP이며 단위중량은 약 16.44 kN/m³이다. 점착력과 내부마찰각은 각각 8 kPa 및 30°이다. 수치해석 시 ϕ' 값은 비선형성을 고려하여 화강풍화토 지반에 대한 기존 연구결과(이승래 등, 2009)에 근거하여 15°를 사용하였다.

표 1. 강원 인제지역의 지반조건

USCS	γ (kN/m ³)	c(kPa)	Φ (°)	Φ^b (°)	SWCC Fitting parameter					Saturated hydraulic permeability(m/s)
					Condition	a	n	m	Initial V.W.C	
SW or SP	16.44	8.0	30.0	15.0	Drying	3.4	1.6	0.7	0.4219	1.87E-05m/s
					Wetting	8.9	1.1	1.0	0.3241	

3. 사면안정해석 및 분석

화강풍화토 사면에서 모관흡수력과 강우를 현장계측한 자료(이인모 등, 2003; 이승래 등, 2006)에 의하면 지반내 모관흡수력은 강우 침투에 의해서 감소하며, 강우가 없는 기간에는 증가하는 경향을 가진다. 지반내에서 계측된 모관흡수력(그림 6)의 크기는 깊이에 따라 다르나 약 20 kPa-90 kPa 범위로 변화한다. 모관흡수력의 변화량은 강우량 및 강우지속시간 뿐만 아니라 지반침투 특성, 강우직전의 모관흡수력의 분포 등에도 의존한다. 본 연구에서는 선행강우가 지반에 침투

됨에 따라 모관흡수력이 감소된 영향을 지반의 초기 모관흡수력(20, 40, 60, 80 kPa)으로 해석에 반영하였다. 표 2는 초기 모관흡수력을 고려한 사면안정해석을 수행하기 위한 4가지 해석조건을 나타낸다. 선행강우를 고려한 안정해석을 수행하기 위하여 선행강우의 영향을 지반의 초기 모관흡수력으로 고려하였다. 불포화 지반정수인 건조 및 습윤 함수특성곡선, 불포화 투수곡선, 전단강도 정수, 초기 모관흡수력을 반영하고 지속강우 특성을 고려하여 침투해석을 수행하였을 뿐만 아니라 사면안정해석을 통해 시간경과에 따른 안전율의 변화를 분석하였다.

그림 6. 강우에 따른 모관흡수력의 현장계측 결과(이승래 등, 2006)

표 2. 해석 조건

Case	SWCC type	Slope angle (°)	Initial matric suction (kPa)	Rainfall intensity, i (mm/hr)	Permeability, k_s (m/s)	Number of numerical analysis
Inje-1	Drying	45.0	20	15mm/hr 지속강우	1.87E-05	8
			40			
	Wetting		60			
			80			
Inje-2	Wetting	33.7	20	15mm/hr 지속강우	1.87E-05	8
			40			
		45.0	60			
			80			
Inje-3	Wetting	45.0	20	$k_s/i=1(15, 30, 60)$ $k_s/i=10(15, 30, 60)$		24
			40			
			60			
			80			
Inje-4	Wetting	45.0	20	15mm/hr 지속강우	3.74E-05	12
			40		1.87E-05	
			40		9.40E-06	
			60			
			60			
			80			

3.1 건조 및 습윤 함수특성곡선의 영향

그림 7은 건조 및 습윤구간의 함수특성곡선에 대한 안전율 변화 양상을 나타낸다. 일반적으로 사면 안전율이 강우 초기에는 서서히 감소하다가 어떤 시점 이후에는 급격히 감소하는 경향이 있다. 초기 모관흡수력이 높을수록(즉, 80 kPa일 때) 안전율이 급격히 감소하는 시점이 늦어지고, 파괴시점이

그림 7. 건조 및 습윤 함수특성곡선에 따른 안전율 변화 양상

(a) 파괴시점

(b) 파괴시점까지의 누적강우량

그림 8. 습윤 및 건조 함수특성곡선에 따른 파괴시점 및 누적

늦춰진다는 것을 알 수 있다. 그러나 선행강우로 인해 초기 모관흡수력이 낮을 때(즉, 20 kPa일 때) 안전율의 감소가 빨라짐을 알 수 있다.

그림 8은 건조 및 습윤 함수특성곡선에 따른 파괴시점 및 파괴시점까지의 누적강우량을 나타낸다. 그림 8을 통해 습윤 함수특성곡선을 사용할 때가 건조 함수특성곡선을 사용했을 때보다 약 3~6시간 더 빠른 시점에 파괴가 유발되며, 약 45~90 mm 정도 파괴시점까지의 누적강우량이 작다는 것을 알 수 있다. 이는 불포화 투수곡선이 함수특성곡선으로부터 추정되기 때문에 건조와 습윤의 불포화 투수곡선을 비교해보면 그림 5와 같이 함수특성곡선의 n 값에 의해 모관흡수력이 약 10 kPa 이상일 때 습윤구간의 투수계수가 더 크기 때문이다. 이러한 경향은 Rahimi 등(2010)이 수리학적 특성(함수 특성곡선, 포화투수계수, 불포화 투수곡선)을 고려한 연구에서 공기함입치보다 초기 모관흡수력이 클 때, n 값이 작을수록 안전율의 변화가 더 크게 나타난다는 결과와 일치한다. 이와 같은 결과로부터 건조과정 함수특성곡선을 사용하여 강우침투에 의한 사면 안정성을 분석하면 파괴시점과 누적강우량을 과대평가할 우려가 있음을 알 수 있다.

3.2 사면 경사의 영향

선행강우와 사면 경사에 따른 안전율을 비교·분석하기 위해 사면의 경사가 $33.7^\circ(1:1.5)$ 와 $45.0^\circ(1:1)$ 인 2 경우에 대한 해석을 수행하였다. 이 때 선행강우의 영향을 고려하기 위해 다른 해석과 마찬가지로 초기 모관흡수력을 중요 변수로 두고 안전율의 변화를 분석하였다. 그림 9는 사면경사와 모관흡수력에 따른 안전율의 변화를 나타낸다. 사면의 경사가 클수록 초기 안전율 값은 더 작으며, 사면의 경사가 클수록 안전율의 감소도 급격히 일어나는 것을 확인할 수 있다. 그리고 동일한 사면의 경사를 갖더라도 선행강우의 크기(초기 모관흡수력의 차이)에 따라서 안전율의 변화 및 파괴시점이 달라지는 것을 알 수 있다. 사면의 경사가 클수록, 또한 초기 모관흡수력이 작을수록 파괴시점은 빠르고, 파괴 시의 누적강우량은 작다는 것을 알 수 있다.

그림 9. 사면의 경사에 따른 안전율 변화 양상

(a) 초기 모관흡수력에 따른 파괴시점

(b) 파괴시점까지의 누적강우량

그림 10. $k_s/i=1$ 일 때 파괴시점 및 누적강우량(Case=Inje-3)

(a) 초기 모관흡수력에 따른 파괴시점

(b) 파괴시점까지의 누적강우량

그림 11. $k_s/i=10$ 일 때 파괴시점 및 누적강우량(Case=Inje-3)

3.3 k_s/i 비의 영향

그림 10과 11은 모관흡수력과 포화투수계수와 강우강도의 비(k_s/i)에 따른 파괴시점 및 누적강우량을 각각 보여주고 있다. 이승래 등(2009)의 연구에 의하면 포화투수계수와 강우강도의 비(k_s/i)에 따라 사면의 안전율은 동일한 비의 값을 갖더라도 불규칙(증가 및 감소)한 양상을 보이며 k_s/i 값이 큰 경우 사면은 강우 초기부터 강우 종료시점까지 불안정한 상태가 된다고 제시하였다. 그림 10과 11을 통해 동일한 k_s/i 값을 가질 때 i 의 값이 커질수록 파괴시점이 더 빠르며, 누적강우량도 커지는 경향을 보이고 있다. 그림 10과 11을 비교해보면 $k_s/i=1$ 일 경우가 $k_s/i=10$ 일 경우보다 파괴시점과 누적강우량은 초기 모관흡수력에 크게 의존함을 알 수 있다.

3.4 투수계수 영향

일반적으로 투수계수는 사면내 강우 침투에 큰 영향을 미친다. 그림 12는 초기 모관흡수력이 80 kPa 일 때 포화투수계수에 따른 안전율의 변화를 나타낸다. 동일한 강우일 때 투수계수가 클수록 안전율이 상대적으로 급격히 감소한다는 것을 볼 수 있다. 이는 동일한 강우 시 투수계수가 클수록

그림 12. 투수계수에 따른 안전율 변화 양상

강우 침투에 의해서 사면지반 내에서 형성되는 포화대가 더 빨리 깊게 나타나기 때문이다.

그림 13은 모관흡수력과 포화투수계에 따른 파괴시점과 누적강우량을 나타낸다. 그림 13에서 알 수 있듯이 투수계수

(a) 초기 모관흡수력에 따른 파괴시점

(b) 파괴시점까지의 누적강우량

그림 13. 투수계수에 따른 파괴시점 및 누적강우량(Case=Inje-4)

가 큰 사면일수록 파괴시점은 빠르고, 파괴 시의 누적강우량은 작다. 파괴시점과 파괴 시의 누적강우량은 동일한 경향을 나타냈으며, 이는 동일한 지속강우 특성을 반영하였기에 유사한 경향을 보인다. 이를 통해 투수계수가 큰 지반일수록 안전을 변화가 빠르고 파괴시점 또한 빠른 것을 확인하였다.

이와 같이 선행강우를 고려함과 동시에 사면의 안정에 영향을 미치는 여러 인자를 고려하여 사면안정성을 평가해 본 결과, 강우가 지반에 침투함에 따라 사면의 안전율은 강우 초기에는 서서히 감소하다가 어떤 시점 이후에는 급격히 감소하는 경향이 있다. 초기 모관흡수력이 클수록 사면의 파괴가 지연되는 것으로 보아, 모관흡수력은(즉 선행강우는) 사면의 안정성에 큰 영향을 줄을 알 수 있다. 또한 초기 모관흡수력의 차이 또한 불포화투수곡선 상에서 투수계수와 관련되기 때문에 강우 침투 시 포화대의 발달과 큰 관련이 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 급경사지 붕괴 다발지역인 강원 인제지역의 현장의 비교란 시료를 이용하여 불포화 공학적 특성(함수특성곡선, 불포화투수곡선)을 산정하고, 선행강우를 고려한 사면의 안정해석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 기존의 현장 계측데이터를 참고하여 초기 모관흡수력의 변화를 바탕으로 선행강우를 고려하였다. 초기 모관흡수력이 높을수록 안전율이 급격히 감소하는 시점이 늦어지고, 파괴시점이 늦어진다는 것을 확인하였다.
- 2) 사면안정해석 시 습윤 함수특성곡선을 사용할 때가 건조 함수특성곡선을 사용했을 때보다 더 빠른 시점에 파괴가 유발된다. 이는 불포화 투수곡선이 함수특성곡선으로부터 추정되기 때문에 큰 모관흡수력의 범위에서는 습윤구간의 투수계수가 더 크기 때문이다.
- 3) 동일한 k_s/α 값을 가질 때 α 의 값이 커질수록 파괴시점이 빨라지며 파괴시점까지의 누적강우량도 커진다.
- 4) 동일한 강우일 때 포화투수계수가 클수록 안전율이 급격히 작아진다. 이는 투수계수가 클수록 강우 침투에 의한

사면지반에서 형성되는 포화대가 더 빨리 깊게 나타나기 때문이다.

- 5) 추후, 선행강우를 고려한 불포화 급경사면에 대한 안정 해석의 신뢰성을 확보하기 위해서는 실질적인 침투모니터링시스템의 구축을 통한 검증이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단-공공복지안전사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0031526).

참고문헌

- 김윤기 (2003) 투수시험결과 해석에 의한 불포화 풍화토의 투수성에 관한 연구, 공학석사 학위논문, KAIST.
- 김재홍, 박성완, 정상섭, 유지형 (2002) 강우시 습윤에 의한 불포화토 풍화토의 사면 안정 해석 연구, 한국지반공학회 논문집, 제18권, 제2호, pp. 123-136.
- 박성완, 신길호 (2009) 습윤경로 함수특성곡선을 고려한 불포화 편마풍화토 사면의 안정해석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제29권, 제5C호, pp. 191-198.
- 이승래, 김윤기, 최정찬, 오진규 (2006) 강우 침투에 따른 도로성토사면의 불포화 특성 변화 예측, 대한토목학회 정기술발표 논문집, 대한토목학회, pp. 1160-1163.
- 이승래, 오태규, 김윤기, 김희철 (2009) 강우 침투시 강우강도와 포화투수계수가 안전율에 미치는 영향, 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, 제25권, 제1호, pp. 65-76.
- 이인모, 조우성, 김영욱, 성상규 (2003) 풍화토 사면에서 강우로 인한 간극수압 변화에 대한 실험연구, 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, 제19권, pp. 41-49.
- 오세봉, 문중호, 김태경, 김윤기 (2008) 불포화 지반특성 영향에 대한 강우시 사면붕괴의 사례연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제28권, 제3C호, pp. 167-179.
- 전경한 (2012) 국내화강풍화토의 불포화정수에 대한 확률론적 해석, 공학석사 학위논문, KAIST.
- 정상섭, 최재영, 이재환 (2009) 지속강우특성에 따른 불포화 풍화토사면의 안정성분석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제29권, 제1호, pp. 1-9.

조성은, 이승래 (2000) 강우 침투에 따른 불포화 토사사면의 안정해석, **지반공학회 논문집**, 제16권, 제1호, pp. 51-64.

Arezoo Rahimi, Harianto Rahardjo, Eng-Choon Leong (2010) Effect of hydraulic properties of soil on rainfall-induced slope failure, *Engineering Geology* 114, pp. 135-143.

Brooks, R.H. and Corey, A.T (1964) Hydraulic properties of porous media. Colorado State University, Ft. Collins, Colo. Hydrology paper No.3, (March)

Fredlund, D.G., and Xing, A. (1994) Equation for The Soil-Water Characteristic Curve, *Canadian Geotechnical Journal*, 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, No. 4, pp. 228-232.

Hitoshi Saito, Daichi Nakayama, Hiroshi Matsuyama, 2010, Relationship between the initiation of a shallow landslide and rain-

fall intensity-duration, *Geomorphology* 119, 167-175.

Rahardjo, H., Ong, T.H., Rezaur, R.B., Leong, E.C. (2007) Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 12, 1532-1543.

Ranjan Kumar Dahal, Shuichi Hasegawa (2008) Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya, *Geomorphology* 100, 429-443.

van Genuchten, M. (1980) A closed-form equation of predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society American Journal*, Vol. 44, pp. 892-898.

◎ 논문접수일 : 2012년 04월 29일
 ◎ 심사의뢰일 : 2012년 05월 04일
 ◎ 심사완료일 : 2012년 06월 19일