

# 열차의 속도 하중을 고려한 강우시 성토사면의 안정성 변화

## Variation of Slope Stability under rainfall considering Train Speed

김정기\* 김현기\*\* 박영곤\*\*\* 신민호\*\*\*\* 김수삼\*\*\*\*\*  
Kim, Hyun-Ki Kim, Jung-Ki Park, Young-Kon Shin, Min-Ho Kim, Soo-Sam

### ABSTRACT

Infiltration of rainfall causes railway embankment to be unstable and may result in failure. Basic relationship between the stability of railway embankment and rainfall introducing the partial saturation concept of ground are defined to analyze the stability of embankment by rainfall. A pressure plate test is also performed to obtain soil-water characteristic curve of unsaturated soils. Based on this curve, the variables in the shear strength function and permeability function are also defined. These functions are used for the numerical model for evaluation of railway embankments under rainfall. As comparing the model and case studies, the variation of shear strength, the degree of saturation and pore-water pressure for railway embankment during rainfall can be predicted and the safety factor of railway embankment can be expressed as the function of rainfall amount, namely rainfall index. Therefore, the research on safety factor on railway embankment considering train speed and rainfall infiltration with the variation of rainfall intensity and rainfall duration was carried out in this paper

### 1. 서론(Introduction)

우리나라 거의 모든 철도연변의 성토·절토사면 붕괴는 태풍과 장마 등의 호우에 의해 발생하기 때문에 최근 강우에 의한 사면의 안정성을 적절하게 평가하는 것이 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 일반적인 사면안정해석은 유효전단강도파라미터( $c'$ ,  $\phi'$ )를 이용한 포화토 사면으로 지하수위 상부에 존재하는 부의 간극수압(이하 모관흡수력)으로 인한 전단강도분포는 일반적으로 고려하지 않고 있다. 이는 모관흡수력 측정도 난해하지만 활동파괴가 주로 지하수위 하부에서 발생하는 경우 부의 간극수압에 관한 함을 무시하여도 이론적으로 무리가 없기 때문이다. 그러나, 지하수위가 매우 깊거나 얇은 파괴면이 발생하는 경우에 있어서는 모관흡수력을 무시해서는 안되며, 강우시 사면 안정해석을 함에 있어 불포화 토질역학을 근거로 한 사면안정해석을 시행할 필요가 있다.

우수침투에 의한 사면 붕괴 요인은 포화토의 상승에 의한 자중의 증가, 포화에 따른 모관흡수력의 소실에 의한 겉보기 점착력의 소실, 간극수압의 저하에 의한 흙의 강도저하에 기인한다. 따라서, 본 연구에서는 불포화토질역학 이론을 도입하여 실내실험을 통해 흙이 갖는 체적함수비와 모관흡수력의 관계를 나타내는 흙의 토질함수특성곡선을 구하였으며, 포화투수실험과 전단강도실험 결과와 불포화토 투수함수와 전단강도함수를 이용하여 모관흡수력의 변화에 따른 불포화투수계수와 전단강도의 변화에 대하여 예측하였다. 본 예측결과로부터 불포화토 사면안정해석에 필요한 파라미터를 구하였다. 이러한 파라미터를 이용하여 강우강도, 강우지속시간과 열차속도하중의 변화가 철도성토사면의 안정성 변화에 어느 정도의 영향을 주는가를 파악하고, 강우시 철도성토사면의 안정해석에 있어 보다 현실적이고 합리적인 해석방법을 제공하고자 한다.

\*정회원 한국철도기술연구원 연구원  
\*\*정회원 한국철도기술연구원 주임연구원  
\*\*\*정회원 한국철도기술연구원 선임연구원  
\*\*\*\*정회원 한국철도기술연구원 수석연구원  
\*\*\*\*\*정회원 한양대학교 공과대학 토목환경공학과 교수

## 2. 이론적 배경

### 2.1 토질함수특성곡선(Soil water characteristic curve)

흙의 토질함수특성곡선은 흙이 갖는 체적함수비와 모관흡수력(matric suction,  $\psi$ )과의 관계를 함수특성(Soil-water characteristic)으로 정의된다(Childs, 1940). 토질함수특성곡선은 불포화토질역학에서 매우 중요한 구성상관관계에 해당한다. 포화시( $\psi=0$ ) 체적함수비( $\theta = V_w/V$ )는 간극률과 같으며( $\theta_s = n$ ), 체적함수비 대신 포화도  $S$ 와 중력함수비  $w$ 를 사용하여 토질함수특성곡선을 나타낼 수도 있다.

토질함수특성곡선은 잔류함수비, 이력현상, 공기유입값(air-entry value) 등의 몇 가지 중요한 특성을 가지고 있다. 잔류함수비( $\theta_r$ )는 흡수력의 증가에도 불구하고 더 이상의 물이 추출되지 않는 함수비를 말한다. 즉, 잔류함수비는 흙으로부터 추가적인 물을 제거하기 위해 요구되는 큰 흡수력 변화에서의 함수비이다. 이력현상은 흙이 흡윤과정(absorption curve)과 건조과정(desorption curve)을 거치는 동안 같은 함수량에 대한 흡수력값이 다르게 나타나는 것을 말한다. 즉, 건조과정에서는 물이 배수되는데 더 작은 간극의 영향을 받으며 흡윤과정에서 물의 흡수는 큰 간극의 영향을 받는다. 본 연구에서는 건조과정(desorption curve)의 측정데이터를 사용하였다. 포화된 간극은 흡수력의 증가에도 불구하고 어느 일정한 한계 값이 초과될 때까지는 아무런 간극수의 유출도 발생하지 않는다. 이러한 임계흡수력을 흙이 가지는 공기유입값(air-entry value,  $a$ )이라고 간극으로 공기가 유입되기 시작하는 압력으로 정의된다.

본 연구에서는 넓은 흡수력 범위( $0 \sim 10^6$  kPa)에 대한 토질함수특성곡선을 나타내는 Fredlund and Xing(1994)이 제안한 경험식을 사용하여 실내 실험으로부터 측정된 데이터와 비교하였다.

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

여기서,  $\theta_w$  : 체적함수비(volumetric water content)

$\theta_s$  : 포화 체적함수비(saturated volumetric water content)

$e$  : 자연대수로서 2.71828

$a$  : 흙의 공기유입값(air entry value)

$n$  : 토질함수특성곡선에서 변곡점의 경사를 지배하는 파라미터

$m$  : 잔류함수비와 관련된 파라미터

$\psi$  : 모관흡수력

$C(\psi)$ 는 다음과 정의되는 보정함수이다.

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \frac{\psi}{C_r})}{\ln(1 + 1000000/C_r)} \quad (2)$$

여기서,  $C_r = (u_a - u_w)$ 은 잔류함수비  $\theta_r$ 에 해당하는 모관흡수력과 관련된 상수이다.

### 2.2 불포화 전단강도 함수

불포화토를 위한 전단강도 함수를 직접적으로나 간접적으로 예측하기 위해 포화 전단강도 파라미터인 점착력 및 내부마찰각과 병용하여 함수특성곡선을 사용하고 있다(Vanapalli et al., 1996 ; Fredlund et al., 1996 ; Oberg and Sallfors, 1997 ; Khallili and Khabbaz, 1998 ; Bao et al., 1998). 따라서, 본 연구에서는 실내직접전단실험에 의한 포화 전단강도 파라미터( $c'$ ,  $\phi'$ )와 Fredlund et

al(1995)이 제안한 전단강도 예측식을 이용하여 모관흡수력에 따른 불포화전단강도의 변화를 예측하였다.

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + \tan \phi' \int_0^{\psi} \left[ \frac{S - S_r}{1 - S_r} \right] d(u_a - u_w) \quad (3)$$

여기서,  $S = \frac{\theta_w}{\theta_s}$  : 포화도(degree of saturation)

$(\sigma - \sigma_a)$  : 순수연직응력

$(\sigma_a - \sigma_w)$  : 모관흡수력

$S_r$  : 잔류포화도

### 2.3 불포화도 투수함수

불포화도의 투수계수의 측정은 일반적으로 토질함수특성을 측정하고 포화투수계수를 사용하여 반경험적, 통계적으로 산정하는 방법이 주로 사용되고 있다(Mualem, 1976). 본 연구에서는 포화투수계수  $k_s$ 와 토질함수특성곡선을 이용하여 불포화 투수함수를 예측하는 통계적인 모델을 사용하였으며, Fredlund et al(1994)에 의해 제안된 식을 이용하였다. 함수특성곡선으로부터 투수함수를 결정하는데 있어 가장 주시해야 할 점은 투수함수의 정확성이 포화 투수계수에 매우 큰 영향을 받는다는 사실이다. 모관흡수력( $\psi$ )에 따른 상대투수계수  $k_r(\psi)$ 는 다음과 같다.

$$k_r(\psi) = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^{-y_i}) - \theta(\psi)}{e^{-y_i}} \theta'(e^{-y_i})}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^{-y_i}) - \theta_s}{e^{-y_i}} \theta'(e^{-y_i})} \quad (4)$$

여기서,

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

$$C(\psi) = \frac{-1}{(C_r + \psi) \ln \left( 1 + \frac{1000000}{C_r} \right)}$$

$$a = \ln(\psi_{aev}), \quad b = \ln(1000000)$$

$e$  : 자연대수로서 2.71828

$k_r(\psi)$  : 불포화투수계수(unsaturated hydraulic conductivity)

$k_s(\psi)$  : 포화투수계수(saturated hydraulic conductivity)

$\theta$  : 체적함수비(volumetric water content)

$y_i$  : 적분더미변수(a dummy variable of integration representing suction)

## 3. 실내실험 및 예측 결과

### 3.1 대상시료

국내 토질에 대한 함수특성곡선의 작도를 위해 가평지역 철도성토사면에서 채취한 화강풍화토와 주문진 표준사를 사용하여 실험을 실시하였다. 화강풍화토는 No. 10체 통과시료를 사용하였으며, 토질함수특성곡선의 실험에 사용된 시료는  $0.95 \times \gamma_{dmax}$ 가 되도록 시료를 성형하였다.

### 3.2 기본물성시험

KS규정에 준하여 비중시험, 투수시험, 다짐시험 등의 기본물성실험을 실시하여 <도표 1>에 보

였으며, 토질함수특성의 측정은 재하 공기압 0~15bar, 압력셀(Pressure Plate)내 압력조절이 1/100 kPa까지 가능한 실험기를 제작하여 대상 시료에 대한 토질함수특성을 측정하였다. <그림 1>은 화강풍화토와 주문진 표준사의 토질함수특성곡선에 대한 실험 데이터와 예측 데이터를 나타내고 있다. 그림에서 나타나듯이 Fredlund and Xing(1994)이 제시한 식(1)을 이용한 예측결과가 실험데이터와 잘 일치하고 있다.

도표 1. 대상시료의 물리적 특성

	$\gamma_{dmax}$ ( $t/m^3$ )	$w_{opt}$ (%)	$k_s$ ( $cm/sec$ )	$G_s$	$S(\%)$	$w_{sat}$
주문진 표준사	1.63	-	$8.10 \times 10^{-2}$	2.63	100	23.2
화강 풍화토	1.82	11%	$4.41 \times 10^{-4}$	2.64	100	20.1

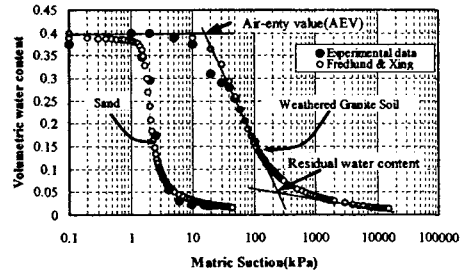


그림 1. 토질함수특성곡선

### 3.3 전단강도함수 및 투수함수 예측결과

직접전단실험을 실시하여 전단강도 파라미터( $c'$ ,  $\phi'$ )를 구하고 Fredlund et al.(1995)가 제시한 식(3)를 이용하여  $\phi^b$ 를 구하였으며, 식(4)를 이용하여 모관흡수력에 대한 불포화 투수계수의 변화를 구하였다.  $\phi^b$ 와 불포화 투수계수는 수치해석에 이용되는 입력파라미터이다. <그림 2>은 모관흡수력에 대한 불포화 전단강도 변화를, <그림 3>은 불포화 투수계수의 변화를 보여주고 있다.

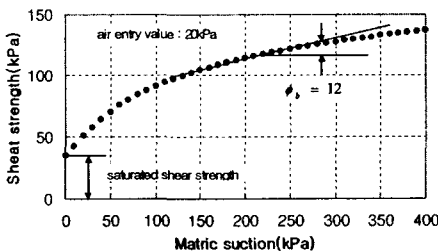


그림 2. 모관흡수력에 따른 전단강도의 변화(화강풍화토)

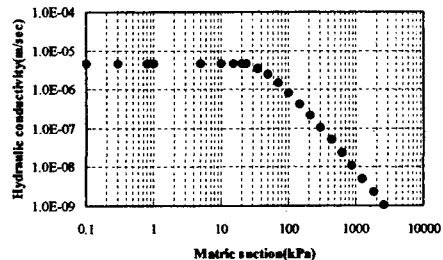
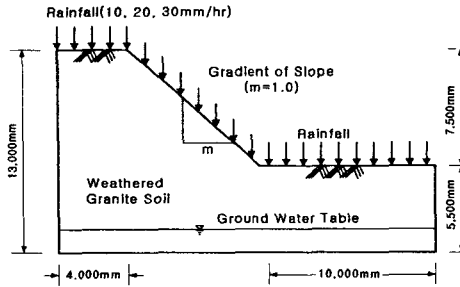


그림 3. 모관흡수력에 따른 투수계수의 변화

## 4. 해석단면 및 경계조건

### 4.1 해석단면

강우침투(rainfall infiltration)에 의한 철도성토사면의 안정성을 검토하기 위해 대표 단면을 설정하여 수치해석을 실시하였다. 해석의 용이성을 위해 지반은 화강풍화토로 균질하게 구성되었고 지반의 투수계수는 수평방향 및 연직방향이 동일한 것으로 가정하였으며, 지하수위는 불투수층으로부터 1.5m 상부에 존재한다. 강우침투 및 사면안정성분석에 사용된 해석단면을 <그림 4>에 보였다.



<그림 4> 강우침투 및 사면안정성 해석에 사용된 해석 단면

## 4.2 경계조건

### (1) 강우침투조건

사면 표면으로 침투하는 강우는 다음과 같은 두 가지 경계조건으로 주어질 수 있다.

#### ① 사면상부 흐름유출(Flooded slope surface)

이때의 조건은 강우강도가 지반으로 침투할 수 있는 물의 양보다 월등하게 크다는 것을 정의한다. 따라서 강우의 일부분은 침투할 것이고, 나머지는 사면표면을 따라 유출될 것이다. 이 경우 경계조건은 모관흡수력을 0으로 둔다.

$$u_a - u_w = 0 \quad (5)$$

#### ② 조정된 침투(Controlled infiltration)

이때의 조건은 강우강도가 지반으로 침투할 수 있는 물의 양보다 작거나 같은 경우를 정의한다. 이 경우 물의 유입은 강우강도에 의해 통제되며, 경계조건은 유입수량  $q_{in}$ 와 강우강도  $I_R$ 가 동일하다.

$$q_{in} = I_R \quad (6)$$

침투해석을 위해 상기의 경계조건에 의한 강우강도 입력치를 정의하였다. 최대 사면유입량 ( $q_{in \max}$ )은 김 등(1991)에 의하면 포화투수계수의 약 4~5배 정도로 정의되며, 조 등(2000)에 의하면 강우강도와 투수계수의 차수(order)가 같아질 때로 정의한다. 수치해석에 사용된 강우강도 경계조건을 <도표 4>에 보였다.

### (2) 하중경계조건

성토사면의 안정해석을 위한 열차하중은 국내 1·2급 선로조건을 적용하고, 표준적인 하중에 근거하여 속도충격률  $i$ 에 의한 변동분을 고려함에 의해 동적하중(dynamic pressure)을 계산하였다. 해석의 용이성을 위해 윤중(wheel load)을 레일면에 직하하지 않고, 노반압력(subgrade pressure)으로 변환하여 재하하는 것으로 하였다.

$$\text{열차이동속도에 따른 동적하중: } P_{dy} = P_{st} \times i \quad (7)$$

$$\text{속도충격률(impact ratio): } i = 1.0 + 0.513 \left( \frac{V}{100} \right) \text{ for korea(AREA Spec.)} \quad (8)$$

열차제원 : LS22(축중 22tf, 윤중 11tf)

여기서,  $P_{dy}$  : 동적하중,  $P_{st}$  : 열차정지하중,  $i$  : 속도충격률,  $V$  : 열차속도(km/hr)

수치해석용 침묵에 의한 하중분담율(차륜직하 침묵 :  $0.4 P_{dv}$ )은 평균압력분포 계산에서 도상두께 15cm 까지는 하중분산이 없으며, 도상두께 15cm 이하 깊이에 대해서는 45°로 하중이 분산된다는 가정(RTRI, 1994)하에 사면안정해석시 열차속도에 따른 하중경계조건을 다음의 <도표 5>와 같이 적용하였다.

도표 4. 강우강도의 경계조건

Rainfall intensity $I_R$ (mm/hr)	Rainfall intensity $I_R$ (m/s)	$q_{in}$ for unit area (m/s)	Rainfall duration (hour)	Rainfall pattern
0	0	0	0	-
10	$2.78 \times 10^{-6}$	$2.78 \times 10^{-6}$	1, 2, 5, 10	일정
20	$5.56 \times 10^{-6}$	$5.56 \times 10^{-6}$	"	"
30	$8.33 \times 10^{-6}$	$8.33 \times 10^{-6}$	"	"

도표 5. 열차동적하중의 경계조건

열차속도 (km/h)	동적하중 ( $P_{dv}$ )		노반압력 (kPa)
	축중 (tf)	윤중 (tf)	
30	25.39	12.69	100.3
50	27.64	13.82	109.3
80	31.03	15.51	122.6
100	33.29	16.64	131.6

### 4.3 수치해석 결과 및 분석

사면내부로 침투하는 강우침투해석을 위하여 상용프로그램을 사용하였으며, 해석대상사면에 지하수위를 주고, 정상상태에서 1차 해석하여 불포화침투해석의 초기조건을 구현하였으며, 2차 해석에 있어 비정상상태로 화강풍화토의 토질함수특성과 투수함수 등을 적용하여 강우상황을 재현하여 해석하였다. 다음의 <그림 6>은 10mm/hr 강우강도에 대한 성토높이에 따른 지속시간별 체적함수비 변화의 한 예를 보여주고 있다. 본 그림에서 강우지속시간이 증가함에 따라 성토사면 상부로부터 점진적으로 포화영역(습윤전선)이 하강하여 지반상부가 포화됨을 알 수 있다.

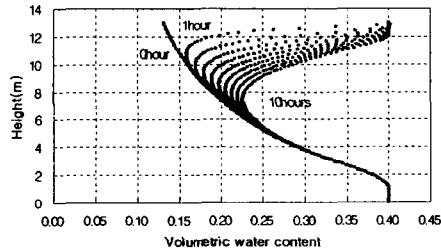


그림 6. 체적함수비의 변화(10mm/hr)

강우침투에 의한 철도성토사면의 안정성해석을 위해 불포화전단강도함수인  $\phi^b$ 의 고려로 불포화 전단강도 함수의 구현이 가능한 상용프로그램을 사용하였다. 본 프로그램은 다양한 사면안정이론으로 토사/암반사면의 안전율을 계산하는 한계평형해석 프로그램으로 사면의 형상, 지층구조, 외부하중이 복잡한 경우에도 해석이 가능하다.

<그림 8>은 열차속도 100km/hr인 경우 강우강도, 강우지속시간과 누적강우량의 변화에 따른 성토사면의 안전율 변화를 수치해석하여 나타낸 결과이다. 열차속도가 0이고 지표면으로의 우수침투가 없는 초기상태에서의 안전율은 1.67이었다. 그러나 <그림 6>에서 알 수 있듯이 강우강도, 강우지속시간이 증가함에 따라 사면의 안전율이 감소하며 강우강도 30mm/hr인 경우는 10mm/hr, 20mm/hr보다도 초기에 사면안전율이 현저히 저감함을 알 수 있다. 따라서, 강우강도가 강우지속시간보다 철도성토사면안전율 변화에 많은 영향을 준다는 것을 판단할 수 있다. 모든 해석결과는 일정 속도에 대해 강우강도, 강우지속시간, 누적강우량이 증가함에 따라 안전율이 감소되는 것을 보여주고 있다.

또한 열차속도 증가는 충격률의 증가를 동반하며, 결과적으로 성토사면에 재하되는 하중의 증가를 발생시키기 때문에 성토사면의 안전율(FS)을 열차속도의 함수로 보면, 열차속도의 증가에 따라 안전율이 저하하고 있으며, 강우강도·강우지속시간의 증가에 따라서도 안전율이 감소하고 있다(그림 7, 8, 9). 수치해석결과에 의하면 강우강도 및 강우지속시간의 증가가 열차속도 증가에 비해 성토사면의 안전율에 보다 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있었다

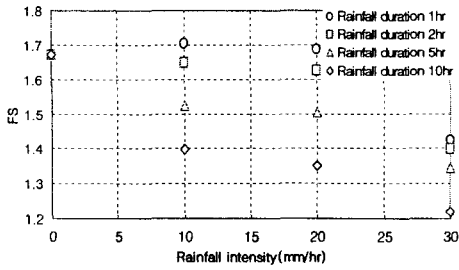


그림 6. 강우강도와 강우지속시간에 따른 안전율 변화(열차속도 100km/hr)

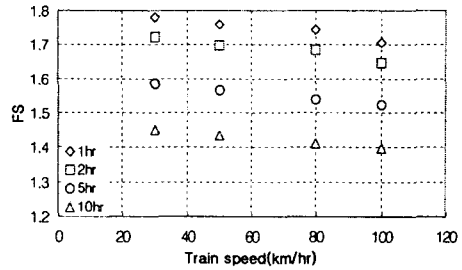


그림 7. 열차속도에 따른 안전율 변화 (강우강도 10mm/hr)

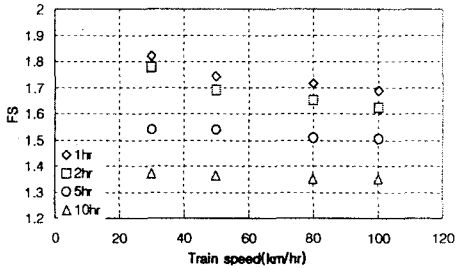


그림 8. 열차속도에 따른 안전율 변화 (강우강도 20mm/hr)

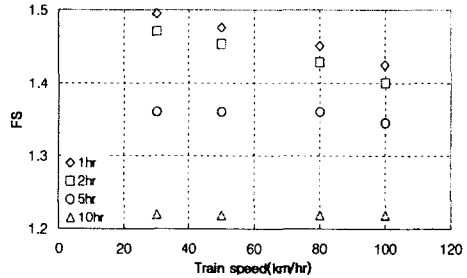


그림 9. 열차속도에 따른 안전율 변화 (강우강도 30mm/hr)

### 5. 결론(Conclusion)

본 연구에서는 불포화토이론을 도입하여 강우시 철도성토사면의 안정해석을 실시한 결과 강우강도와 지속시간에 따라 안전율이 감소할 뿐만 아니라 열차의 속도에 따라서도 사면의 안전율이 감소함을 알 수 있었다. 따라서, 철도성토사면의 안전율 변화를 불포화토 이론을 근거로 하여 강우강도와 지속시간의 함수로 예측함과 동시에 열차하중을 속도의 함수로 적용하여 강우시 열차의 속도를 규제함으로써 공학적 기반을 갖는 열차운전규제를 설정할 수 있을 것이라 사료된다.

### Acknowledgement

본 연구는 건설교통기술혁신 5개년사업의 일환으로 건설교통부의 연구지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

### Reference

1. 김상규, 김영목(1991) 강우로 인한 사면 불안정. 대한토질공학회지, 제7권 1호, pp.53-64
2. 조성은, 이승래(2000) 강우침투에 따른 불포화 토사사면의 안정해석. 한국지반공학회논문집, 16권, 제1호, pp.51-64.
4. Childs, E. C. (1940) The use of soil moisture characteristics in soil studies. Journal of Soil Science, Vol. 50, pp. 239-252.
5. Fredlund, D. G. and A. Xing(1994) Equations for the Soil-Water Characteristics Curve. Can. Geotech. J., Vol. 31, pp. 521-532.
6. Fredlund, D. G., A. Xing, and S. Huang(1994) Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils using the Soil-Water Characteristics Curve. Can. Geotech. J., Vol. 31, pp. 533-546.
7. D. G. Fredlund, S. K. Vanapalli, A. Xing & D. E. Pufahl, (1995) Predicting the Shear Strength function for Unsaturated soils the Soil-water Characteristic Curve. In: Unsaturated soils.