

## 강우를 고려한 불포화 토사사면의 안정해석 연구

### A Study of Stability Analysis on Unsaturated Soil Slopes Considering Rainfall

김 기 웅<sup>1</sup> Kim, Khi-Woong  
김 범 주<sup>2</sup> Kim, Bum-Joo  
박 정 준<sup>3\*</sup> Park, Jeong-Jun

#### ABSTRACT

Shallow slope failures in residual soil during periods of prolonged infiltration are common in Korea. This study examines an infinite slope analysis to estimate the influence of infiltration on surficial stability of slopes by the limit equilibrium method. Approximate method which is based on the Green-Ampt model have been considered to evaluate the likelihood of shallow slope failure which is induced by a particular rainfall event that accounts for the rainfall intensity and duration for various return periods. Pradel & Raad method which is devised to predict the depth of wetting front to decomposed granite soil slopes having measured soil-water characteristic curves. To compare the results with those obtained from the Pradel & Raad method, a series of numerical analysis using SEEP/W were carried out. It was found that the stability analysis of unsaturated soils calculated by using the soil-water characteristic curve of decomposed granite soils was found to be a proper analysis for shallow slope failures due to rainfall.

#### 요 지

우리나라에서는 강우로 인한 얇은 사면파괴 형태를 흔하게 볼 수 있다. 즉, 강우시 발생하는 사면의 얇은 파괴는 지표로 침투하는 강우에 의한 포화깊이 증가에 의해 발생한다. 본 연구에서는 침투가 사면 표면이 안정에 미치는 영향을 평가하기 위해 한계평형법을 이용하는 무한사면 해석방법을 적용하였다. 재현기간에 따른 강우강도와 지속기간이 고려되는 임의의 강우에 의해 유발되는 얇은 사면파괴의 가능성을 평가하기 위해서 일차원 침투모델인 Green-Ampt 모델에 바탕을 둔 침투능에 따른 침투깊이를 산정한 Pradel & Raad 방법을 이용하였다. 즉, 이론해에 의한 결과와 비교하기 위하여 동일한 조건으로 SEEP/W를 통한 수치해석을 수행하였다. 결과, 화강풍화토의 함수특성곡선을 이용하여 불포화사면의 강도정수를 추정하여 계산된 불포화지반의 해석이 기존 포화사면의 해석에 비하여 보다 정확한 결과임을 알 수 있었다.

**Keywords :** Surficial slope stability, Pradel & Raad model, Cumulative infiltration, Numerical analysis, Unsaturated soil slope

#### 1. 서 론

국내에서 발생하는 사면 파괴는 우기에 집중적으로 발생하는 경향이 있으며, 이로 인한 인명 및 재산 피해는 점차 증가하고 있다. 강우에 의한 사면 파괴는 주로 토사 비탈면에 대해서 발생하는데 이는 강우 침투로 인해 사면 내

부의 간극수압의 감소에 기인된 전단강도의 감소가 주요한 원인이라 할 수 있다.

강우로 인한 사면 불안정을 고려하기 위하여 국내 여러 기관의 사면 설계기준에서는 우기 조건에 대하여 지하수위가 지표면까지, 혹은 지표면 아래 얇은 깊이까지 위치한다는 가정하에 사면 해석 조건을 제시하고 있다(건설교통

1 비회원, 시립인천전문대학 토목공학과 교수 (Non-Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Incheon City College)  
2 비회원, 동국대학교 토목환경시스템공학과 조교수 (Non-Member, Assistant Professor, Dept. of Civil & Environ. System Engrg., Dongguk University)  
3\* 정회원, 인천대학교 토목환경공학과 연구교수 (Member, Research Professor, Dept. of Civil & Environ. Engrg., University of Incheon, E-mail: frostjun@incheon.ac.kr)

부, 2000, 2003; 한국도로공사, 2002; 한국토지공사, 2006). 그러나, 이러한 사면해석 조건은 이미 기존의 많은 연구자들에 의하여 강우에 의한 지하수위 상승효과를 실제 현상과 비교해 매우 과다하게 고려함으로써 결과적으로 과다 설계 및 보강을 유도할 수 있다고 지적되어 왔다(김기웅과 김범주, 2007; 조성은과 이승래, 2000). 그럼에도 불구하고 기존의 설계기준이 계속해서 유지되고 이유는 지하수위가 지표면에 위치하는 가정에 따라 설계된 사면의 경우에도 우기시 빈번히 사면 붕괴가 발생하고 있고, 설계자의 입장에서도 기존의 방법이 적용하기에 매우 간단하기 때문이라 할 수 있다.

현행 사면 설계기준에서 우기시 안정해석 조건에 대한 불합리한 부분은 강우가 사면 안정에 미치는 영향을 단순히 지하수위의 위치를 조정함으로써 반영하는데 있다. 따라서, 해석 방법이 상대적으로 간단하면서도 강우가 사면 안정에 미치는 영향이 실제 사면의 거동과 관련하여 보다 현실적으로 반영된 사면 해석을 수행하고, 이를 설계에 적용함으로써 기존 해석 조건 적용에 따른 경제적 손실을 궁극적으로 줄일 수 있을 것이다.

따라서, 본 연구에서는 침투가 사면 표면이 안정에 미치는 영향을 평가하기 위해 한계평형법을 이용하는 무한사면 해석법을 연구하였다. 재현기간에 따른 강우강도와 지속기간이 고려되는 임의의 강우에 의해 유발되는 얇은 사면파괴의 가능성을 평가하기 위해서 일차원 침투모델인 Green-Ampt 모델에 바탕을 둔 침투능에 따른 침투깊이를 산정하는 Pradel & Raad의 방법을 이용하였다. 즉, 이론해에 의한 결과와 비교하기 위하여 동일한 조건으로 SEEP/W를 통한 수치해석을 수행하였다.

## 2. 해석 이론

### 2.1 지배방정식

불포화 흐름에 있어서 투수계수가 일정한 값이 아니고, 포화도 또는 체적함수비에 따라 변화함을 나타내어 Dracy 이론은 불포화도에 물이 흐를 때에도 적용할 수 있다. 비정상 흐름에 있어서 투수매체의 임의의 위치에 있는 요소에 물이 들어와서 나가는 유량차는 체적함수비의 변화와 동일하다. 즉, 외부에서 들어오는 유량이 있을 때 요소내의 유량의 변화율의 합계는 체적함수비의 시간에 관한 변화율과 동일하다고 말할 수 있다. 2차원의 흐름에 대해서

는 이를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(Lam and Fredlund, 1984).

$$\frac{\partial}{\partial h} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q = \frac{\partial (V_w/V)}{\partial t} \quad (1)$$

여기서,  $k_x$ 와  $k_y$ 는  $x$  및  $y$  방향의 투수계수,  $h$ 는 전수두,  $q$ 는 외부에서 들어오는 단위체적유량,  $V_w$ 는 요소내 물의 체적,  $V$ 는 요소의 전체적,  $V_w/V$ 는 체적함수비,  $t$ 는 시간이다.

체적함수비는 응력상태와 투수매체의 특성에 따라 변화한다. 불포화도에 대한 응력상태는 두가지 응력상태변수 ( $\sigma - u_a$ )와 ( $u_a - u_w$ )로 완벽하게 표시할 수 있다(Fredlund and Morgenstern, 1977). 여기서,  $\sigma$ 는 전응력,  $u_a$ 는 간극공기압,  $u_w$ 는 간극수압을 의미한다. 만일 비정상흐름이 발생하는 동안 전응력이 일정하고 간극공기압은 대기압에서 일정하다고 가정하면, 체적함수비의 변화는 두 번째의 응력상태변수 ( $u_a - u_w$ )에만 의존한다. 또한, 가정에 의하여  $u_a$ 는 일정하므로 체적함수비의 변화는 간극수압만의 함수가 된다. 체적함수비와 간극수압과의 관계는 투수계수의 특성에 의존하며, 그 관계는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{V_w}{V} = m_2^w (u_a - u_w) \quad (2)$$

여기서,  $m_2^w$ 는 체적함수비와 간극수압 관계곡선의 경사가 되며, 간극수압이 정(+)의 값이면 흙의 체적변화계수  $m_v$ 와 같아진다. 이 계수는 투수매체의 저수능(storage capacity)을 나타낸다. 한편, 전수두는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h = \frac{u_w}{\rho_w g} + z \quad (3)$$

여기서,  $h$ 는 전수두,  $g$ 는 중력가속도,  $\rho_w$ 는 물의 밀도,  $z$ 는 기준점으로부터의 높이이다. 식 (2)를 미분하면 불포화도에 대한 비정상흐름의 지배방정식이 도출된다.

$$\frac{\partial (V_w/V)}{\partial t} = m_2^w \frac{\partial (u_a - u_w)}{\partial t} \quad (4)$$

식 (3)을 정리하여 식 (4)와 (2)에 대입하면 식 (5)를 도출할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial h} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q = \rho_w g m_2^w \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

표 1은 불포화도에 대하여 제안된 경험적 투수계수 함수식을 나타낸 것이다.

## 2.2 불포화 토사사면의 한계평형해석 이론

강우의 시작 초기에 사면에 포화대가 존재하지 않는다고 가정하면, 불투수층인 기반암 위의 토층에 강우의 시작으로 인하여 침윤전선(wetting front)이 발생할 것이며, 강우가 지속되면 비포화대를 통하여 사면의 기반암까지 침투할 수 있다. 이 때, 실제 사면파괴는 대부분 지표로부터 지하 수m 내외의 얇은 부분에서 발생하며 지표면과 나란하게 발생하는 것이 보통이다. 이와 같이 사면의 길이/깊이의 비가 큰 평면 파괴의 경우 안정성은 모관흡수력의 영향을 고려한 반무한사면 해석을 통해 이용할 수 있다(조성은과 이승래, 2000).

### 2.2.1 Green-Ampt 이론

주어진 조건 하에서 지반 내 임의면을 통해서 침투할 수 있는 최대율을 침투능이라 하며 침투가 진행함에 따라 그 값은 시간에 따라 변해서 최소값에 접근할 때까지 감소한다. 이때 침투능 곡선 아래 면적을 흙의 누적 침투능(cumulative infiltration capacity,  $F$ )이라 하며 임의의 시간 동안 주어진 흙이 흡수할 수 있는 단위 면적당 최대

부피를 의미한다. 일반적으로 누적 침투능과  $f = dF/dt$ 로 정의되는 침투능에 대하여 식 (6)과 (7)이 성립한다.

$$\lim_{t \rightarrow 0} F(t) = 0 \quad \text{그리고} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = \infty \quad (6)$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \infty \quad \text{그리고} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = K_1 \quad (7)$$

여기서,  $K_1$ 은 지표에서의 경계조건에 대응하는 투수계수이며 지표면이 포화상태에 도달하면 투수계수는  $K_s$ 가 된다.

지표를 통해 침투할 수 있는 물의 양은 흙의 함수특성, 흙의 불균질성, 포화도 등에 연관되어 있으며 균질한 흙을 통한 일차원 연직 침투에 대한 많은 해석적, 경험적인 식들이 제안되었다(Green and Ampt, 1911; Mein and Larson, 1973).

Green & Ampt는 해석적인 방법에 의해 침투능을 구하기 위해 1차원 연직흐름에 기초를 둔 간략해를 제안하였다. 이 모델은 일차원 연직흐름, 침윤전선에서의 일정한 모관흡수력, 그리고 침윤전선 위 부분에서의 함수량 결과와 투수계수가 일정하다는 가정을 바탕으로 하고 있다. Green-Ampt 모델은 침윤전선 위는 완전히 포화되어 있고, 그 하부는 초기상태의 포화도를 유지한다는 가정하에 침투능을 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = K \frac{(z_w + \Psi_f)}{z_w} = \frac{d(z_w \Delta \theta_i)}{dt} \quad (8)$$

표 1. 경험적 투수계수 함수 (신동훈 등, 2007)

형식	투수함수식	
$k = f(\theta_w)$	$k_w = a\theta_w^b$	Gardner(1985)
	$k_w = k_s \left(\frac{\theta_w}{\theta_s}\right)^{2b+3}$ and $b = \frac{\Delta \log \psi}{\Delta \log \theta_w}$	campbell(1974) Ahuja(1973,1974) Gillham et al(1976) Zachmann et al(1981) hillel(1982)
	$k_w = k_s \exp[b(\theta_w - \theta_s)]$	Davidson et al(1969) Dane and Klute(1977)
$k = f(\psi)$	$k_w = a + b\psi$	Richards(1931)
	$k_w = a\psi^{-b}$	Wind(1955) Weeks and Richards(1967)
	$k_w = \frac{k_s}{1 + a\left(\frac{\psi}{\rho_w g}\right)^b}$	Gardner(1958) Arbhabhirama and Kridakorn(1968)
	$k_w = a \exp(b\psi)$	cristensen(1943)
	$k_w = \begin{cases} k_s & \text{for } \psi \leq \psi_b \\ k_s \exp[b(\psi - \psi_b)] & \text{for } \psi > \psi_b \end{cases}$	Rijtema(1965) Phillip(1986)

여기서,  $f$ 는 침투능,  $z_w$ 는 침윤전선의 깊이,  $\psi_f$ 는 침윤전선에서의 모관흡수력,  $\Delta\theta_i$ 는 함수량 결손이다.  $K$ 는 침윤전선 위 부분에서의 투수계수로 침투시 지중에 존재하는 공기의 영향이 크지 않으면 포화투수계수는  $K_s$ 와 같다. 침투능은 시간  $t$ 가 증가할수록 감소하여  $K$ 값에 점차로 수렴하게 된다. 이때 누적 침투능은 식 (9)으로 구할 수 있다.

$$F = z_w \Delta\theta_i = Kt + \Delta\theta_i \psi_f \ln \left[ 1 + \frac{F}{\Delta\theta_i \psi_f} \right] \quad (9)$$

시간  $t$ 에서의 침투능은 누적침투량으로 부터 식 (10)로 구할 수 있다.

$$f = K \left[ \frac{\psi_f \Delta\theta_i}{F} + 1 \right] \quad (10)$$

따라서, 깊이  $z_w$ 까지 지반을 포화시키기 위해 필요한 시간은 식 (11)과 같다(Pradel and Raad, 1993).

$$T_w = \frac{\Delta\theta_i}{K} \left[ z_w - \psi_f \ln \left( \frac{\psi_f + z_w}{\psi_f} \right) \right] \quad (11)$$

그림 1에 나타낸 바와 같이 Darcy의 법칙에 기초한 Green-Ampt 모델은 간단하면서도 연직 침투과정의 기본적인 특성을 잘 나타내며 모델 변수들은 측정 가능한 흙의 물리적 특성들로 구성된다. 이 모델은 불포화 흐름을 고려한 보다 엄밀한 방법과 비교해도 매우 합리적인 예측결과를 주는 것으로 알려져 있다(조성은과 이승래, 2001).

### 2.2.2 Pradel and Radd 이론

Pradel & Radd(1993)는 사면의 안정성 검토를 위하여

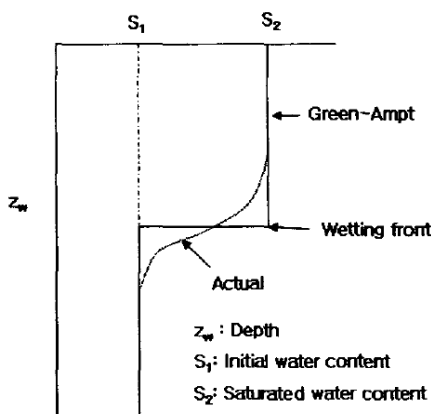


그림 1. Green-Ampt 모델

강우강도, 지속시간, 재현기간을 고려할 수 있는 방법을 Green-Ampt 침투이론을 이용하여 제안하였다(그림 2). 이 방법은 안전율이 1이 되는 임계깊이  $Z_w$ 까지 포화를 얻기 위하여 다음 두 가지 조건을 만족하도록 하였다. 첫째, 강우는 지반의 침투능을 초과해야 하며 두번째, 깊이  $Z_w$ 까지 포화되도록 충분히 오래 지속해야 한다. 즉, 강우강도의 지속시간이  $Z_w$ 까지 포화되도록  $T \geq T_w$  이어야 하고 강우강도가  $i \geq f$  이어야 한다. 이 때 지반을 깊이  $Z_w$ 까지 포화시키기 위해 필요한 시간은 식 (12)와 같다.

$$T_w = \frac{\theta_s - \theta_i}{k_s} \left[ Z_w - \psi_w \ln \left( \frac{\psi_w + Z_w}{\psi_w} \right) \right] \quad (12)$$

이 때,  $\theta_s$  = 최종 체적함수비,  $\theta_i$  = 초기 체적함수비,  $K_s$  = 포화투수계수,  $\psi_w$  = 침윤전선에서의 모관흡수력을 나타낸다. 또한, 물이 지반으로 들어가는 침투율은 식 (13)과 같다.

$$v_i = k_s \frac{Z_w + \psi_w}{Z_w} \quad (13)$$

따라서, 침윤전선이 깊이  $Z_w$ 까지 진행하여 포화되기 위해서는 강우강도의 지속시간이  $T \geq T_w$  이고 강우강도가  $i \geq f$  이어야 하므로 다음 조건을 만족해야 한다.

$$T_{\min} = T_w \quad , \quad I_{\min} = v_i \quad (14)$$

$$I_{\min} = \frac{\theta_s - \theta_i}{T_{\min}} \left[ Z_w - \psi_w \ln \left( \frac{\psi_w + Z_w}{\psi_w} \right) \right] \left( \frac{Z_w + S}{Z_w} \right) \quad (15)$$

그림 3은 강우기간에 따른 강우강도를 나타낸 것으로 최대강우강도 포락선과 강우강도 지속시간을 이용하여 위의 조건인  $T \geq T_w$  ,  $i \geq f$ 를 만족하는 포화조건을 찾는

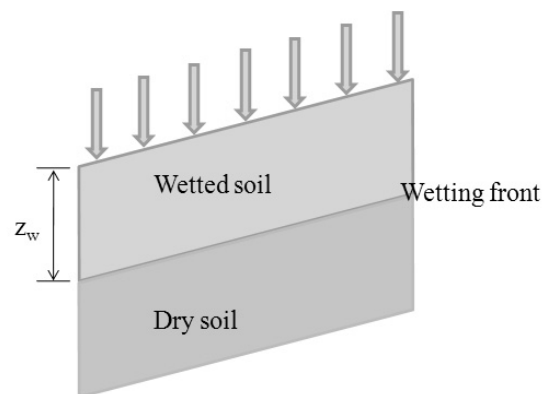


그림 2. 임계깊이

방법을 보여주고 있다. ( $T_{min}$ ,  $I_{min}$ )를 좌표로 하는 점 P는 포화가 발생하기 위해서 최대 강우강도 포락선 위에 위치하게 될 것이다. 이는 침투해석시 투수계수와 강우강도 지속시간과의 관계를 산정하는 근거가 될 수 있다. 이 때, 점 P는 비가 오지 않아도  $Z_w$ 까지 포화가 발생할 것이다. 이 P점이 식 (15)와 만나는 점이 초기 강우강도( $I_{lim}$ )이고 한계투수계수( $K_{lim}$ )를 결정 할 수 있다. 이에 따라 식 (13), (14)와 같은 관계식이 성립하게 되고  $K_{lim}$  보다 큰 흙에서는 포화가 발생하지 않게 된다.

### 3. 강우조건에 따른 침투해석

#### 3.1. 해석 조건

침투해석에 적용된 해석단면은 그림 4와 같다. 해석 대상 사면의 높이는 15m이고, 사면 경사는 국내 지방 기준에서 제시하고 있는 토사 비탈면에 대한 표준경사인 1:1.5를 적용하였다. 침투해석에 사용된 경계조건은 해석영역 양 측면 및 하부에 무한경계 조건을 설정하였고, 강우 적용은 사면 천단부와 사면부의 유입을 모두 고려하였다.

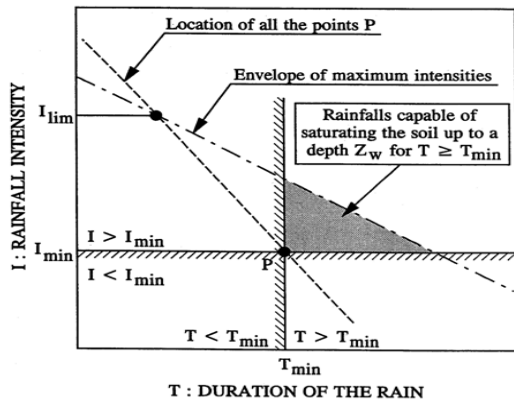


그림 3. 강우기간에 따른 강우 강도(Pradel & Radd, 1991)

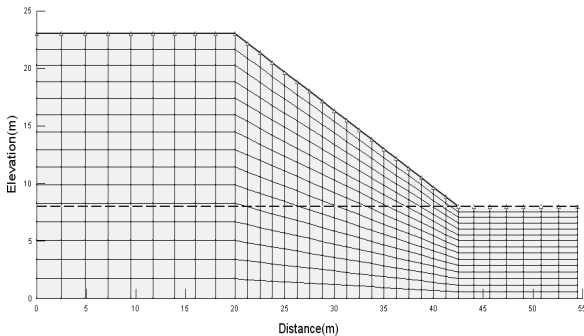


그림 4. 높이 15m, 경사 1:1.5 사면 해석단면

초기 지하수위는 사면 하단부를 기준으로 8m에 위치하는 것으로 가정하였다. 강우를 반영한 침투해석시 초기 지하수위의 설정은 매우 중요하다. 선행 강우의 효과가 사면 내 침투특성에 많은 영향을 미치기 때문이다. 또한, 사면 지층은 단일 토사층(풍화토)으로 구성되어 있는 것으로 가정하였다.

강우에 의한 불포화 지반의 지하수위 변화 및 간극수압 변화를 파악하기 위해서는 불포화 지반의 함수특성이 고려되어야 한다. 즉, 여러 문헌(신방웅 등, 2003)에서 풍화토에 대하여 제시된 수리 특성치로부터 표 2와 같이 침투해석에 필요한 입력 값을 결정하였다. 풍화토의 특성상 문헌들에 제시된 값들의 변화 범위가 큰 편이었으므로, 입력 값은 문헌 제시 값들의 평균적인 값으로 하였다. 그리고, 풍화토의 함수특성곡선식으로는 Fredlund & Xing(1994)의 함수특성곡선식을 이용하여 함수곡선을 추정하였다. 침투 해석시 초기모관흡수력은 실제 지반의 강도에 영향을 줄 수 있는 범위를 고려하여 -10 kPa로 하였다. 그림 5는 해석에 사용된 시료의 함수특성곡선을 나타내고 있다.

본 해석에서는 2000년 건설교통부에서 발행한 한국화물주상도에 강원도지역의 100년 빈도의 24시간 지속강우를 기준으로 하여 지반의 수리특성을 고려하기 위하여 표 3과 같은 강우 조건을 설정하고, Fredlund & Xing(1994)의 함수특성곡선식을 이용하여 추정된 함수곡선을 적용하여 그림 6과 같이 투수계수곡선을 결정하였으며, 각 단계에서의 사면 내 지하수위와 간극수압의 분포를 조사하였다.

표 2. 풍화토의 함수특성

구분	함수특성곡선 보정계수			포화시 수리특성	
	a	n	m	포화 체적함수비	포화 투수계수
풍화토	150	1.05	3.9	43%	$5 \times 10^{-7}$ m/s

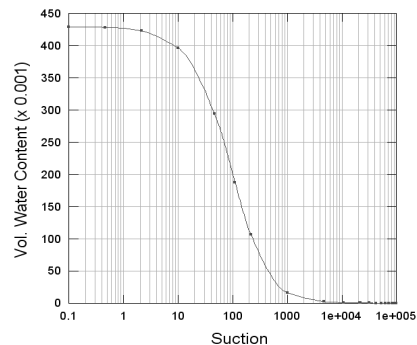
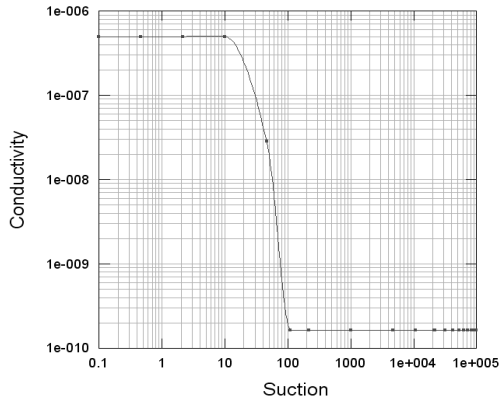


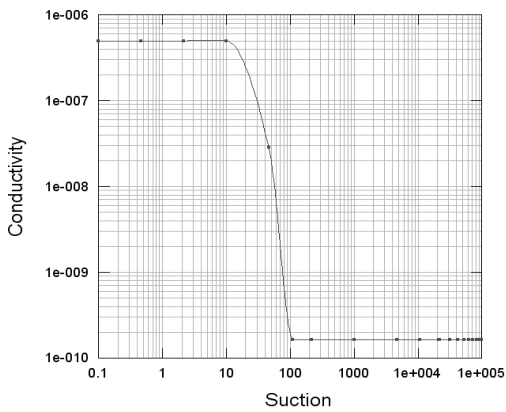
그림 5. 해석에 사용된 흙시료의 함수특성곡선

표 3. 해석에 적용된 강우 조건

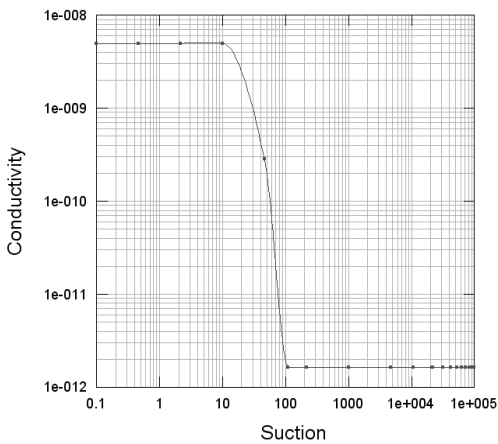
투수계수 조건	강우강도	강우 지속기간	해석단계
Case 1 ( $K=5 \times e^{-5}$ cm/s)	16.7 mm/h (400 mm/day)	24시간	3h, 12h, 24h, 36h, 72h, 10day, 30days, 60days, 90days
Case 2 ( $K=5 \times e^{-6}$ cm/s)	16.7 mm/h (400 mm/day)	24시간	3h, 12h, 24h, 36h, 72h, 10day, 30days, 60days, 90days
Case 3 ( $K=5 \times e^{-7}$ cm/s)	16.7 mm/h (400 mm/day)	24시간	3h, 12h, 24h, 36h, 72h, 10day, 30days, 60days, 90days



(a) Case 1 ( $K=5 \times e^{-5}$  cm/s)



(b) Case 2 ( $K=5 \times e^{-6}$  cm/s)



(c) Case 3 ( $K=5 \times e^{-7}$  cm/s)

그림 6. 투수계수 곡선

표 4는 침투해석에 가정된 풍화토 지반의 입력 물성값이다. 이 때, 모관흡수력에 의한 전단강도 증가율을 나타내는 모관흡수력의 유효마찰각  $\phi_b$ 의 영향을 조사하기 위하여  $\phi_b/\phi'$ 를 0~1 사이로 변화시켜 해석을 수행하였다.

### 3.2. 해석결과

그림 4의 사면 경사 1:1.5 해석단면에 대하여 표 3의 강우 조건을 적용하여 침투해석을 수행한 결과는 그림 8에 나타난 바와 같다.

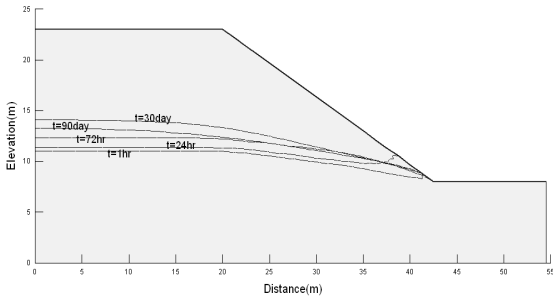
그림 7에 나타난 바와 같이 투수계수 조건이  $K=5 \times e^{-5}$  cm/s인 Case 1에 대하여 사면 내 지하수위는 해석단면의 좌측 경계면상을 기준으로 초기 지하수위 위치로부터 1시간 후 3m, 24시간 후 3.4m, 72시간 후 4.3m, 그리고 30일 후 최대 5.9m 상승 후 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 그림 7(a)는 강우 침투로 인한 사면 내 강우의 흐름벡터와 압력수두 분포에 대한 결과를 나타낸 것으로서, 강우가 지속되는 동안(24시간) 실제 사면 내로 침투하는 양은 Case 중 가장 크며, 강우가 멈춘 후 30일 이상이 경과해야 점차 정상상태 흐름에 가까워지는 것을 알 수 있다.

투수계수 조건이  $K=5 \times e^{-6}$  cm/s인 Case 2에 대하여 사면 내 지하수위는 Case 1과 마찬가지로 해석단면 좌측 경계를 기준으로 초기 지하수위 위치로부터 계속 상승하여 90일 후 3m 까지 상승 하는 결과를 나타내었다. 즉, 그림 7(b)에 나타난 바와 같이 강우가 지속되는 동안(24시간) 실제 사면 내로 침투하는 양은 크지 않으며, 강우가 멈춘 후 90일 이상이 경과해야 점차 정상상태 흐름에 가까워지는 것을 알 수 있다.

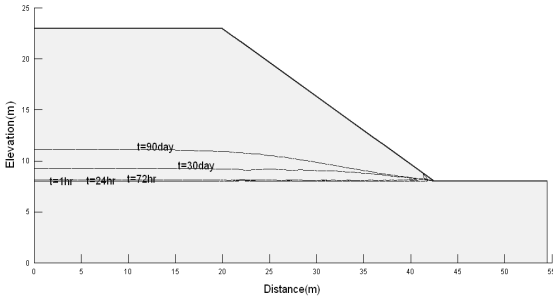
그림 7(c)는 Case 3의 경우로서 투수계수 조건이  $K=5 \times e^{-7}$  cm/s에 대하여 사면 내 지하수위는 해석단면 좌측 경계를 기준

표 4. 침투해석시 입력물성치

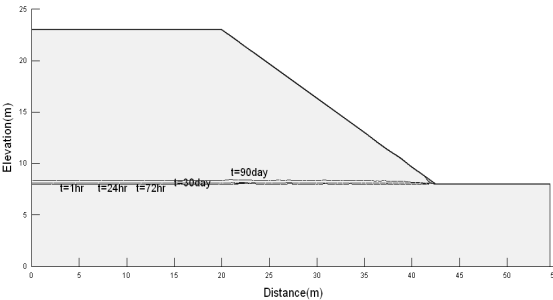
구 분	단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	점착력 (kg/cm <sup>2</sup> )	내부마찰각 $\phi'(^{\circ})$	모관흡수력 유효마찰각 $\phi_b(^{\circ})$
풍화토	1.8	0.1	30	0~30



(a) Case 1 ( $K=5 \times 10^{-5}$  cm/s) 적용한 경우



(b) Case 2 ( $K=5 \times 10^{-6}$  cm/s) 적용한 경우



(c) Case 3 ( $K=5 \times 10^{-7}$  cm/s) 적용한 경우

그림 7. 시간 경과에 따른 침투해석 결과

으로 초기 지하수위 위치로부터 90일 후 최대 0.3m 정도로 거의 상승하지 않는 경향을 나타내었다. 강우 침투로 인한 사면내 강우의 흐름벡터와 압력수두 분포에 대한 도시 결과, 강우가 지속되는 동안(24시간) 실제 사면 내로 침투하는 양은 Case 중 가장 작으며 강우가 멈춘 후 90일

이상이 경과하여도 정상상태 흐름에 가까워 지지 않는 것을 알 수 있다.

## 4. 이론해와 수치해석 비교 분석

### 4.1. 해석조건

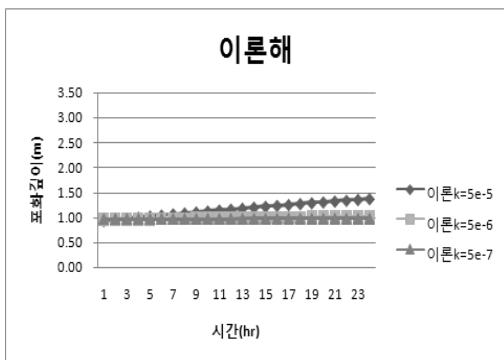
해석방법은 2.2.3 절에서 제시한 식 (15)의 Pradel & Ladd 방법을 사용하여 강우로 인한 사면 내 포화 깊이를 산정한 후, 식 (16)을 적용하여 사면의 길이/깊이의 비가 큰 평면파괴에 대하여 모관흡수력의 영향을 고려한 한계 평형해석을 수행하였다. 또한, SEEP/W를 사용하여 포화 깊이를 산정하여 한계평형해석을 수행한 후 이론해인 Pradel & Ladd 방법의 결과와 비교하였다.

$$F_s = \frac{c' + (\gamma z_w \cos^2 \beta - u_w) \tan \phi'}{\gamma z_w \sin \beta \cos \beta} \quad (16)$$

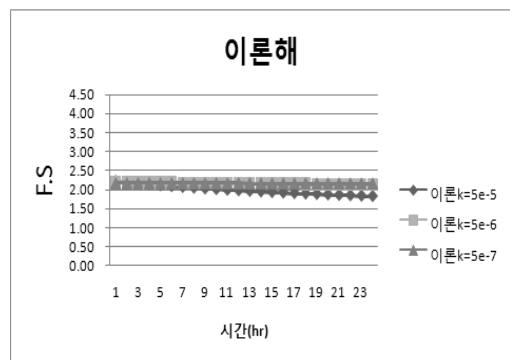
### 4.2. 해석결과

일반적인 토사 비탈면에서 강우가 침투하면, 우선 사면 상부의 얇은 깊이에서 부분 포화가 발생하기 시작하고, 이로 인해 결국 사면에 표면 파괴가 유발될 수 있다. 이러한 표면 파괴에 대한 강우의 영향을 조사하기 위하여 사면 경사 1:1.5의 무한사면에 대하여 표 3의 강우 조건과 초기 지하수위, 표 4의 지반 물성치를 적용하고 Pradel & Radd 방법을 사용하여 강우에 따른 사면의 포화 깊이와 안전율을 산정하였다. 또한, 그 결과를 SEEP/W를 이용하여 산정한 포화깊이 및 안전율과 비교하였다.

그림 8(a)와 같이 Pradel & Radd 방법을 이용하여 해석을 실시한 결과 투수계수가  $K=5 \times 10^{-5}$  cm/s인 경우가 투수계수가  $K=5 \times 10^{-6}$  cm/s,  $K=5 \times 10^{-7}$  cm/s인 경우 보다 포화깊이가

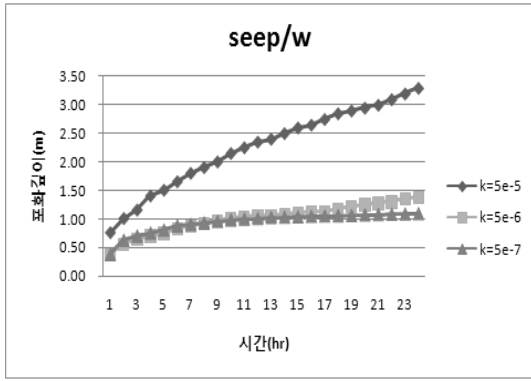


(a) 포화깊이

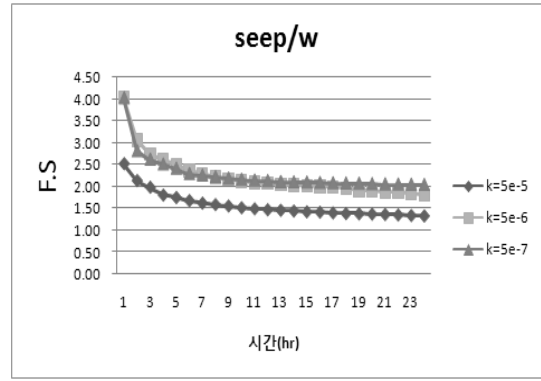


(b) 안전율

그림 8. Pradel & Radd 방법을 이용한 해석 결과



(a) 포화깊이



(b) 안전율

그림 9. SEEP/W를 이용한 해석 결과

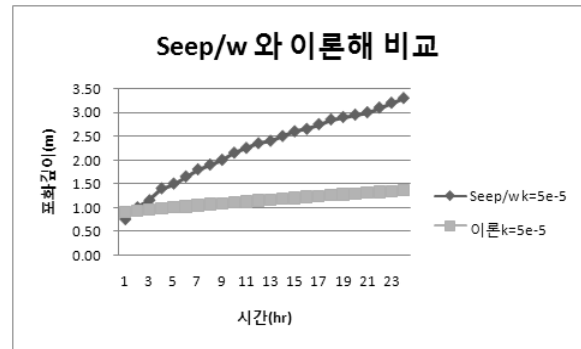
큰 것으로 나타났고, 크기의 증가율이 매우 일정함을 알 수 있다. 또한, 강우 지속 1시간 이내에 포화 깊이가 크게 증가하는 것으로 나타났고, 이는 SEEP/W 해석 결과와 많은 차이가 있는 것으로 나타났다. 그림 8(b)에 나타낸 바와 같이 안전율은 투수계수가  $K=5 \times 10^{-5}$  cm/s 일 때 가장 작음을 알 수 있고, 역시 일정하게 감소함을 나타내었다.

그림 9(a)는 SEEP/W 해석을 실시한 결과로, 투수계수가  $K=5 \times 10^{-5}$  cm/s 인 경우 투수계수가  $K=5 \times 10^{-6}$  cm/s,  $K=5 \times 10^{-7}$  cm/s 인 경우 보다 포화 깊이가 큰 것으로 나타났다. 이는 강우 강도가 16.67 mm/hr 일 때 투수계수가  $K=5 \times 10^{-5}$  cm/s 인 지반에 보다 많은 침투가 발생하며, 투수계수가 감소함에 따라 포화 깊이 또한 점차 감소함을 나타낸다. 즉, 그림 9(b)에서와 같이 안전율도 투수계수가  $K=5 \times 10^{-5}$  cm/s 때가 가장 작음을 알 수 있다.

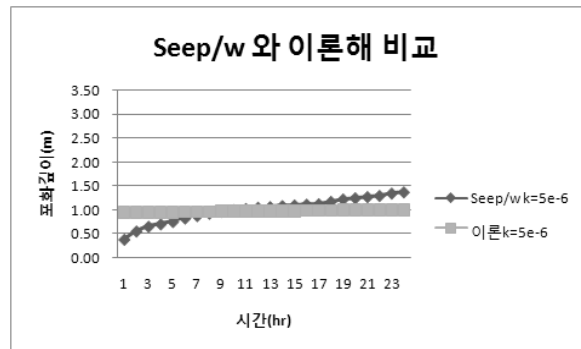
그림 10과 그림 11에 나타낸 바와 같이 투수계수 조건에 따른 포화 깊이와 안전율을 이론적인 Pradel & Radd 방법과 수치해인 SEEP/W 해석에 대해서 비교한 결과, 두 방법의 결과에 많은 차이가 존재하는 것으로 나타났다. 이는 SEEP/W 해석과 달리 Green-Ampt의 1차원 침투이론을 기초로한 Pradel & Radd 방법에서는 포화 깊이가 산정시 침투가 중력 방향으로만 발생하는 것을 가정하는데 기인한 것으로 판단된다. 한편, 두 방법의 결과 차이는 투수계수가 감소할수록 작아지는 것으로 나타났고, 강우의 지속 시간이 증가할수록 점차 일정한 값으로 수렴해 가는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

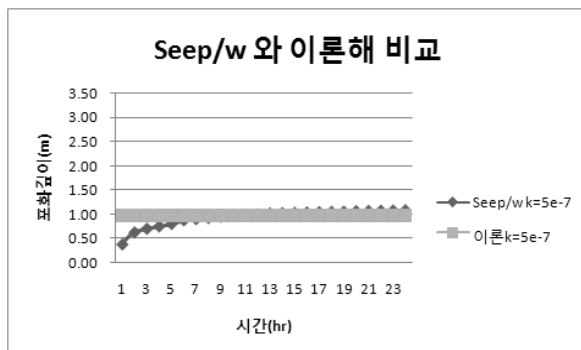
본 연구에서는 토사 비탈면의 안정 해석시 강우의 영향에 대하여 조사하였다. 이를 위해 사면경사 1:1.5, 높이 15



(a)  $K=5 \times 10^{-5}$  cm/s



(b)  $K=5 \times 10^{-6}$  cm/s

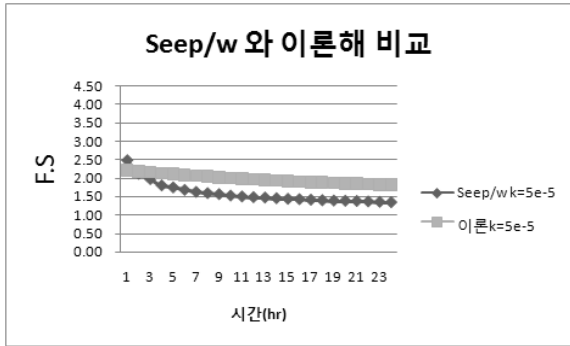


(c)  $K=5 \times 10^{-7}$  cm/s

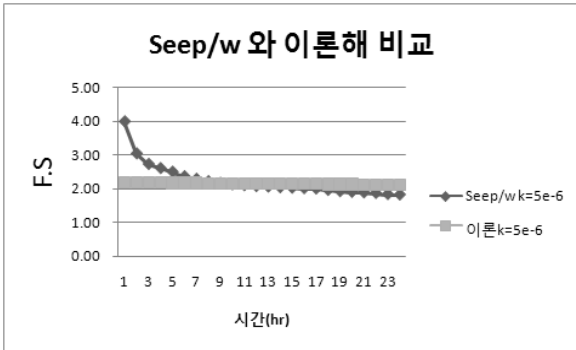
그림 10. 각 투수계수에 따른 포화깊이 비교

m의 풍화토 사면에 대하여 강원도의 지역의 100년 빈도

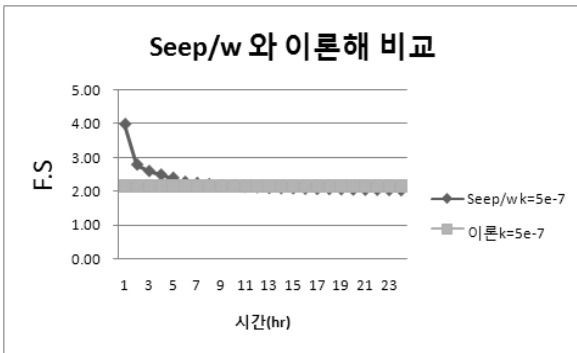




(a)  $k=5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$



(b)  $k=5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$



(c)  $k=5 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$

그림 11. 각 투수계수에 따른 안전율 비교

평균 강우 조건을 적용하였고, 침투가 사면 표면이 안정에 미치는 영향을 평가하기 위해 한계평형법을 이용하는 무한사면 해석 방법을 적용하였다. 임의의 강우에 의해 유발되는 얇은 사면파괴의 가능성을 평가하기 위해서 이론적인 침투능에 따른 침투깊이를 산정하는 Pradel & Raad의 방법에 의한 결과와 비교하기 위하여 동일한 조건으로 SEEP/W를 통한 수치해석을 수행하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

모든 사면안정해석들에 대해서 강우 조건의 변화에 비해 지반의 투수계수가 변화가 사면 안정성에 미치는 영향이 상대적으로 큼을 확인하였다. 지반의 투수계수가 감소할수록 동일 강우 조건에 대한 강우의 침투량은 감소하였

고, 결과적으로 사면 내 높은 모관흡수력의 분포로 사면 안정성이 증가하였다.

또한, Pradel & Radd 방법을 사용하여 사면의 표면파괴에 대한 해석을 수행한 결과, 투수계수가 증가함에 따라 포화깊이가 일정한 비율에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 이론적인 Pradel & Radd 방법과의 비교를 위하여 동일 조건에 대해 SEEP/W를 통한 수치해석을 수행한 결과, 동일 강우 조건에서 포화깊이와 사면의 안전율은 두 방법간 비교적 차이가 큰 것으로 나타났다. 이는 SEEP/W 해석과 달리 Green-Ampt의 1차원 침투이론을 기초로한 Pradel & Radd 방법에서는 포화깊이 산정시 침투가 중력 방향으로만 발생하는 것으로 가정하는데 기인한 것으로 판단된다. 두 해석의 차이는 투수계수가 감소할수록 작아지는 것으로 나타났고, 강우의 지속시간이 증가할수록 점차 일정한 값으로 수렴해 가는 것으로 나타났다.

침투해석결과 강우로 인해 지하수위가 최대 상승하는 시점은 강우가 중단된 후 비교적 오랜 시간이 경과한 후인 것으로 나타났으나, 실제 강우로 인해 발생하는 사면의 파괴는 지하수위가 최대 위치까지 상승하기 이전에 사면 내 얇은 깊이에서 평면 형태로 발생하는 경우가 많으므로 사면 표면파괴 해석을 통해 강우시 침윤전선의 이동에 따른 사면 안정성 변화에 대한 검토를 반드시 수행해야 할 것이다.

## 참고문헌

1. 건설교통부 (2000), *도로설계편람*, 제4편 토공 및 배수, pp.406-10.
2. 건설교통부 (2003), *국도건설공사 설계실무요령*, 11. 공종별 설계요령 2. 비탈면 안정공, pp.89.
3. 김기웅, 김범주 (2007), *비탈면 안정 해석시 강우의 영향에 관한 연구*, 한국지반공학회, pp.105.
4. 신동훈, 임은상, 조성은 (2007), “CFGD댐 차수벽 균열시 침투거동해석을 위한 기초연구”, *Korean Geo-Environmental Conference 2007*.
5. 신방용, 이봉직, 이종규, 강종범 (2003), “불포화 화강풍화토의 함수특성”, *한국지반공학회 논문집*, 제4권 제1호, pp. 49-58.
6. 조성은, 이승래 (2000), “강우침투에 따른 불포화 토사사면의 안정해석”, *한국지반공학회*, 제6권, 1호, pp.51-64.
7. 조성은, 이승래 (2001), “불포화 토사사면의 얇은파괴 해석에 대한 비교 연구”, *한국지반공학회논문집*, 제 17권, 4호, pp.135-143.
8. 한국도로공사 (2002), *도로설계요령*, 제2권 토공 및 배수, pp.123-124.

9. 한국토지공사 (2006), *단지조성공사 설계 및 적산 기준*, 제 1편 설계기준 제3장 토공사.
10. Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R. (1977), "Stress state variables of unsaturated soils", *J. of Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, Vol.113, No. 5, pp.447-464.
11. Fredlund, D. G. and Anqing Xing (1994), "Equations for the soil water characteristic curve", *Can. Geotech. J.*, Vol.31, pp.521-532.
12. Green, W. H. and Ampt, G. A. (1911), "Studies of soil physics I. The flow of air and water through soils", *J. Agr. Sci.*, 4, pp.1-24.
13. Lam, L. and Fredlund, D. G. (1984), "Saturated Unsaturated Transient Seepage Model for Geotechnical Engineering", *Proc., 5th Finite Elements in Water Resources Conf.*, Vermont, pp.18-22.
14. Mein, R. G. and Larson, C. L. (1973), "Modeling infiltration during a steady rain", *Water Resources Research*, Vol.9, No. 2, pp.384-395.
15. Pradel, D. and Raad, G. (1993), "Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes", *J. Geotech. Engrg.* ASCE, Vol.119, No.2, pp.315-332.

(논문접수일 2008. 9. 18, 심사완료일 2008. 11. 21)