

강우특성을 고려한 사면의 표면파괴에 대한 안정성 평가

Surficial Stability Evaluation of Homogeneous Slopes Considering Rainfall Characteristics

조 성 은*¹ Cho, Sung-Eun

이 승 래*² Lee, Seung-Rae

Abstract

Shallow slope failures in residual soil during periods of prolonged infiltration are common in Korea. This study examines the surficial stability of slopes by conventional limit equilibrium method. Two approximate methods which are 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 and Mein & Larson method which provides a solution for the case of ponding have been applied to weathered granite soil slopes having measured soil-water characteristic curves. According to the results, Pradel & Raad method is found to be more conservative than Mein & Larson method since Pradel & Raad method uses the infiltration capacity in calculating the cumulative infiltration, instead of the applied rainfall intensity.

요 지

강우에 의한 얇은 사면파괴는 우리나라에서 흔히 볼 수 있는 사면파괴의 형태이다. 본 연구에서는 재현기간에 따른 강우 강도와 지속시간을 고려한 한계평형법에 의하여 이러한 얇은 사면파괴의 가능성을 평가하기 위한 방법에 대하여 논의하였다. 이를 위해 일차원 침투모델인 Green-Ampt 모델에 바탕을 둔 두 방법을 고려하였다. 즉 침투능에 따른 침투깊이를 산정하는 Pradel과 Raad의 방법과 일정한(uniform) 강우강도가 작용할 경우 폰딩(ponding)에 대한 해를 주는 Mein과 Larson의 방법을 고려하여 함수특성이 알려진 화강풍화토사면에 적용하였다. 연구결과에 의하면 Pradel과 Raad 방법은 실제 적용된 강우강도가 아닌 침투능을 바탕으로 침투깊이를 산정하므로 Mein과 Larson 방법에 비해 보수적인 사면안정 해석결과를 예측한다.

Keywords : Surficial slope stability, Green-Ampt Model, Prolonged infiltration, Soil-water characteristics curve

1. 서론

뉴질랜드, 일본, 캐나다, 한국, 홍콩 등과 같이 많은 산악 지역을 가지는 나라들은 가파른 산지 사면에서의 산사태 발생으로 인하여 상당한 재산 손실과 인명 피해를 입고 있다. 이러한 사면파괴는 풍화 잔류토층이 장기간의 강우나

집중강우에 노출될 경우 주로 발생하며 대부분 파괴면의 깊이는 얇고 사면의 표면과 평행을 이루므로 간단한 평면 무한사면 해석법을 이용하여 안정해석을 수행할 수 있다.

일반적으로 강우로 인한 사면파괴는 지하수위 상승으로 인하여 사면지반내의 간극수압이 증가하여 파괴가 발생하는 것으로 알려져 있으나 비교적 가파른 자연사면에

*1 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

*2 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

서는 지하수위 상승에 의한 영향을 거의 받지 않으며, 강우의 침투로 침윤전선이 임계깊이에 도달하여 얇은 사면파괴가 발생하게 된다. 즉, 사면의 안정성을 유지하고 있던 지표면에서의 음의 간극수압의 소멸로 인한 강도의 감소가 얇은 사면파괴의 주요 원인인 것으로 알려져 있다 (Fredlund 등, 1995; Ng 등, 1998).

강우의 침투가 사면의 안정에 미치는 영향에 관한 많은 연구가 수행되어 왔지만 어느 정도의 강우가 지반으로 침투하고 이 때 사면의 안정성에 미치는 영향은 어느 정도인지 정량화 하는 것은 쉽지 않다. 최근 널리 사용되고 있는 수치모델의 경우 실제 현장의 복잡한 조건을 고려할 수 있고 침투가 사면의 안정성에 미치는 영향을 설명할 수 있다 (Alonso 등, 1995; Ng 등, 1998; 조성은 등, 2000). 그러나, 실제 침투량을 정량화하는 것은 쉽지 않은 것으로 알려져 있다 (Gasmo 등, 2000).

한편 수리학 분야에서는 강우의 유출, 침투량 등의 산정을 위해 연직 일차원 흐름이론이 실제 현상을 간략화 함으로써 유도되었으며, 이에 대한 많은 연구와 적용을 통하여 그 타당성이 비교적 잘 정립되어 있다. 따라서 본 연구에서는 한계평형법을 사용하여 얇은 파괴에 대한 안정성을 해석하고자 할 때, 확률강우강도 자료를 근거로 사면파괴를 일으키는 깊이까지 강우가 침투할 가능성을 평가하기 위한 방법에 대하여 논의하였다. 이를 위해 일차원 침투모델인 Green-Ampt 모델에 바탕을 둔 두 방법을 고려하였다. 즉 최대침투능에 따른 침투깊이를 산정하는 Pradel과 Raad의 방법과 일정한(uniform) 강우강도가 작용할 경우 폰딩(ponding)에 대한 해를 주는 Mein과 Larson의 방법을 고려하여 함수특성이 알려진 화강풍화토 사면에 적용하고 그 결과에 대하여 비교 검토하였다.

2. 한계평형법에 의한 사면의 안정해석

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

경사가 α 인 반무한 사면에서 가상의 파괴면이 사면과 평행하다고 가정하면 깊이 z_w 에서의 안전율은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F_s = \frac{c_e + (\sigma_n - u_a) \tan \phi'}{W \sin \alpha \cos \alpha} \quad (1)$$

여기서, $W(= \gamma z_w)$ 는 단위 폭을 가진 절편의 무게, $(\sigma_n - u_a)$ 는 전단면에서의 순수적응력, c_e 는 불포화 지반의 유효점착력으로 Fredlund 등(1978)에 의해 제안된 전단강도식을 사용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_e = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2)$$

여기서, u_a 는 간극공기압, u_w 는 간극수압이며 ϕ^b 는 모관흡수력의 증가에 의한 전단강도의 증가를 고려하기 위한 상수이다. 일반적으로 이 값은 모관흡수력이 증가함에 따라 감소하나 작은 범위의 모관흡수력 변화에 대해서는 상수로 가정할 수 있다. 그리고 작은 값의 모관흡수력의 경우 ϕ^b 와 ϕ' 의 차이가 크지 않으므로 $\phi^b = \phi'$ 로 가정하면 식(1)은 다음과 같이 쓸 수 있다 (Fourie, 1996).

$$F_s = \frac{c' + (\gamma z_w - u_w) \cos^2 \alpha \tan \phi'}{\gamma z_w \sin \alpha \cos \alpha} \quad (3)$$

여기서, γ 는 총단위중량이며 z_w 는 전단면까지의 연직 깊이를 나타낸다.

3. 일차원 침투 이론

침투는 지표를 통해 물이 흙 속으로 들어가는 물리적인 과정을 말하며 침투량은 불포화 지반의 함수량 조건, 간극수압, 투수계수 등에 따른 물의 재분포에 의해 결정된다. 이때 Darcy의 법칙과 연속방정식으로부터 일차원 연직흐름에 대한 지배방정식은 다음과 같이 얻을 수 있다 (Richards, 1931).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

여기서, θ 는 체적함수량, h 는 물의 압력수두, K 는 투

수계수이다.

다음과 같이 깊이에 따라 일정한 초기조건을 가정하면 경계조건에 따라 식(4)의 해가 결정된다.

초기조건:

$$\theta(z, 0) = \theta_o, \quad t = 0 \quad \text{for } z \geq 0 \quad (5)$$

Dirichlet 경계조건:

$$\begin{aligned} \theta(0, t) &= \theta_1, \quad z = 0 \quad \text{for } t \geq 0 \\ h(0, t) &= h_1, \quad z = 0 \quad \text{for } t \geq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, h_1 은 지표에서의 압력수두, θ_1 은 이에 해당하는 체적함수량이다.

이 경우 누적침투량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K(t) = K_o t + \int_0^{z_w} [\theta(z, t) - \theta_o] dz \quad (7)$$

여기서, z_w 는 침윤전선(wetting front)의 깊이, K_o 는 초기 함수량(θ_o)에서의 투수계수를 나타낸다.

Neumann 경계조건:

$$\left[K - K \frac{\partial h}{\partial z} \right]_{z=0} = i_1(t) \quad (8)$$

이 경우 폰딩(ponding)이 발생하지 않으면 누적침투량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K(t) = \int_0^t i_1(\bar{t}) d\bar{t} \quad (9)$$

여기서, $i_1(t)$ 는 시간에 따른 강우강도이다.

3.1 Green-Ampt의 해

주어진 조건하에서 지반 내 임의면을 통해서 침투할 수 있는 최대을 침투능(infiltration capacity)이라 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 누적침투능(cumulative infiltration capacity)과 $f = dF/dt$ 로 정의되는 침투능(infiltration capacity)에 대하여 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\lim_{t \rightarrow 0} F(t) = 0 \quad \text{그리고} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = \infty \quad (10.1)$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \infty \quad \text{그리고} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = K_1 \quad (10.2)$$

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(Green과 Ampt, 1911; Horton, 1940; Philip, 1957; Mein과 Larson, 1973).

Green과 Ampt는 해석적인 방법에 의해 침투능을 구하기 위해 1차원 연직 흐름에 기초를 둔 간략해를 제안하였다. 이 모델은 일차원 연직흐름, 침윤전선에서의 일정한 모관흡수력, 그리고 침윤전선 위 부분에서의 함수량 결손(moist deficit)과 투수계수가 일정하다는 가정을 바탕으로 하고 있다.

Green-Ampt 모델은 침윤전선 위는 완전히 포화되어 있고 그 아래는 초기상태의 포화도를 유지한다는 가정 아래 침투능을 다음과 같이 나타낸다.

$$f = K \frac{(z_w + \Psi_f)}{z_w} = \frac{d(z_w \Delta\theta)}{dt} \quad (11)$$

여기서, f 는 침투능, z_w 는 침윤전선의 깊이, Ψ_f 는 침윤전선에서의 모관흡수력, $\Delta\theta$ 는 함수량 결손(moist deficit)이다. 그리고 K 는 침윤전선 위 부분에서의 투수계수로 침투시 지중에 존재하는 공기의 영향이 크지 않으면 포화투수계수 K_s 와 같다.

침투능은 시간 t 가 증가할수록 감소하여 K 값에 점차로 수렴하게 된다. 이때 누적 침투능은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F = z_w \Delta\theta_i = Kt + \Delta\theta_i \Psi_f \ln \left[1 + \frac{F}{\Delta\theta_i \Psi_f} \right] \quad (12)$$

그리고 시간 t 에서의 침투능은 누적침투량으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f = K \left[\frac{\Psi_f \Delta\theta_t}{F} + 1 \right] \quad (13)$$

따라서 식(12)로부터 깊이 z_w 까지 지반을 포화시키기 위해 필요한 시간은 다음과 같음을 알 수 있다(Pradel 등, 1993).

$$T_w = \frac{\Delta\theta_t}{K} \left[z_w - \Psi_f \ln \left(\frac{\Psi_f + z_w}{\Psi_f} \right) \right] \quad (14)$$

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 예측 결과를 주는 것으로 알려져 있다 (Wallace, 1975).

3.2 Mein과 Larson의 해

Mein과 Larson(1973)은 균일한 강우강도에 의한 폰딩(ponding) 발생과 그 이후의 침투에 대한 해를 구하는 방법을 제안하였다. 즉, 침투의 초기에는 강우가 지반으로 모두 침투할 수 있지만 침투능이 강우강도와 같아지게 되면 지표면에서의 수압이 0이 되면서 폰딩(ponding)이 발생한다. 이때 일정한 강우강도를 가정하면 Green-Ampt 모델로부터 누적침투량은 다음과 같으며 이에 대응하는 침윤전선의 깊이는 강우강도의 함수이다.

$$F_b = \frac{K \Delta\theta_t \Psi_f}{(i - K)} \quad (15)$$

또한 이에 대응하는 시간은 다음과 같다.

$$t_b = \frac{F_b}{i} \quad (16)$$

그리고 폰딩(ponding) 발생 후 침투능의 감소는 누적침투량에 따라 식(13)과 같이 주어진다(Dunin, 1976).

3.3 변수의 결정

Green-Ampt 모델은 적절한 변수값을 사용하면 실측치에 가까운 계산 결과를 얻을 수 있어 널리 사용되어져 왔다. 초기 조건으로 현장에서 계측 가능한 초기 함수량 결손 $\Delta\theta_t$ 를 지정함으로써 선행강우의 영향을 고려할 수 있으며 투수계수는 직접 측정하거나 경험적으로 결정할 수 있다. 그리고 침윤전선에서의 모관흡수력 Ψ_f 의 결정을 위해 이론적 및 실험적 연구에 바탕을 둔 많은 방법들이 제안되었으며 그 중 Mein 등(1974)은 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\Psi_f = \int_0^{\Psi_f} K_r(\Psi) d\Psi \quad (17.1)$$

여기서, Ψ_f 는 초기 모관흡수력이며 K_r 은 상대투수계수 함수(relative permeability function)이다.

또한 Ravi 등(1983)은 Brooks와 Corey(1964)의 함수특성 곡선의 변수를 사용하는 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\Psi_f = \frac{2 + 3\lambda}{1 + 3\lambda} \left(\frac{\Psi_b}{2} \right) \quad (17.2)$$

여기서, λ 는 간극크기분포 지수, Ψ_b 는 공기함입값이다.

한편 변수 $\Delta\theta_t$, K , 그리고 Ψ_f 값은 침투시험을 통해 식(12)로부터 간단하게 구할 수 있으나 이 경우에는 다른 초기조건과 강우조건에서는 사용할 수 없는 단점이 있다 (Espinoza, 1999).

4. 강우특성을 고려한 사면안정 평가법(Pradel과 Raad의 방법)

Pradel과 Raad는 사면의 안정성 검토를 위하여 강우의 강도, 지속시간, 재현기간을 고려할 수 있는 방법을 제안하였으며 안전율이 1이 되는 임계깊이 z_w 까지 포화를 얻기 위하여 다음과 같은 두 가지 조건을 만족하는 것을 기본으로 한다. 즉, 강우는 지반의 침투능을 초과해야 하며 깊이 z_w 까지 포화되도록 충분히 오래 지속되어야 한다. 이때 Green과 Ampt 모델로부터 지반을 깊이 z_w 까지 포화시키기 위해 필요한 시간은 식(14)와 같고 물이 지반으로 들

어가는 침투율은 식(11)과 같음을 알 수 있다. 따라서 침윤 전선이 깊이 z_w 까지 진행하여 포화를 보장하기 위해서는 강우강도의 지속시간이 $T \geq T_w$ 이고 강우강도가 $i \geq f$ 이어야 한다. 즉, 다음과 같은 조건을 만족해야 한다(Pradel 등, 1993).

$$T_{\min} = T_w \quad (18.1)$$

$$i_{\min} = f = \frac{\Delta\theta_s}{T_{\min}} \left[z_w - \Psi_f \ln \left(\frac{\Psi_f + z_w}{\Psi_f} \right) \right] \left(\frac{z_w + \Psi_f}{z_w} \right) \quad (18.2)$$

이 방법의 적용에 대해서는 Fourie 등(1996, 1999)에 의 해 논의된 바 있다.

5. 강우침투에 대한 풍화토 시면의 안정해석

일차원 침투이론을 바탕으로 강우특성에 따른 사면의 얕은 파괴에 대한 안정성 검토를 수행하였다. 이를 위해 문헌에서 얻은 풍화토의 세립함유량에 따른 함수특성 자료(류지협, 1997)를 바탕으로 한계평형법과 Green-Ampt 모델을 사용하였다. 이 흙은 통일분류법에 의해 SM-SC로 분류된다.

5.1 함수특성

불포화토의 함수특성과 투수특성을 나타내기 위해 많은 경험적, 반경험적인 모델들이 제안되었으며 함수특성

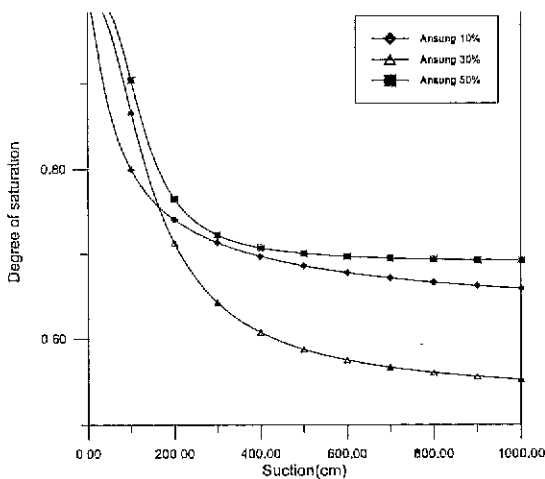


그림 1. 모관흡수력에 따른 포화도

표 1. van Genuchten의 계수

시료		a	m	n
안성 풍화토	세립 10%	0.032	0.356	1.553
	세립 30%	0.009	0.581	2.387
	세립 50%	0.009	0.692	3.247

에 대한 대표적인 van Genuchten(1980)의 모델은 다음과 같다.

$$S_e = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \left(\frac{S - S_r}{1 - S_r} \right) = \left(\frac{1}{1 + (a(u_a - u_w))^n} \right)^m \quad (19)$$

불포화토의 투수계수는 함수량에 따라 변하며 그 변화는 포화투수계수에 대한 불포화투수계수의 비인 상대투수계수 K_r 에 의해 나타내어진다. van Genuchten(1980) 모델에 의하면 이를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$K_r(S_e) = S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (20)$$

여기서, $m = 1 - 1/n$, ($n > 1$)이며 S_e 는 유효포화도(effective degree of saturation), S_r 은 잔류포화도, θ_r 은 잔류 체적함수량(residual volumetric moisture content), θ_s 는 포화체적함수량(saturated volumetric moisture content), 그리고 a , n 및 m 은 상수이다.

문헌상(류지협, 1997)의 실험결과에 의하면 모델변수는 표 1과 같으며 모관흡수력의 변화에 따른 포화도와 상

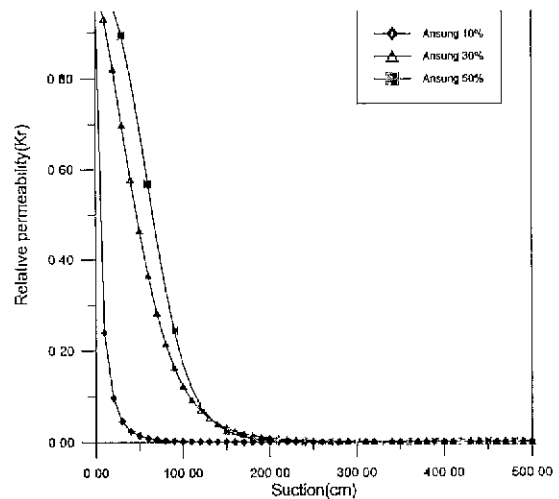


그림 2. 모관흡수력에 따른 비투수계수

대투수계수의 변화는 각각 그림 1 및 그림 2와 같다.

5.2 한계평형법에 의한 해석

먼저 No. 200체의 통과율이 30%인 경우에 대하여 안정해석을 실시하였다. 이때 $c' = 2.943 \text{ kPa}$, $\gamma = 18.65 \text{ kN/m}^3$, $\phi = 30^\circ$, $\phi^b = 30^\circ$ 를 사용하였다. 그리고 사면의 초기 모관흡수력의 크기를 200cm(약 20 kPa)로 가정하면 식(17.1)에 의해 침윤전선에서의 모관흡수력 ϕ_f 는 54.97cm로 계산되어진다.

주어진 지반의 물성에 대하여 사면의 경사각을 변화시키면서 식(3)의 반무한 사면해석에 의해 침윤전선의 침투깊이에 따라 안전율을 구하면 그림 3과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 안전율은 침투 깊이에 따라 감소하며 경사각 40° 와 50° 에서는 침윤전선이 일정 깊이가 이상 침투하면 사면은 안정을 유지할 수 없음을 알 수 있다. 이때 경사가 급할수록 파괴에 요구되는 침투깊이가 얕음을 알 수 있다. 또한 일정 깊이가 이하에서는 침윤전선의 진행에 대한 안전율의 감소가 크지 않게 됨을 알 수 있다.

강우에 의한 평면파괴의 경우 일반적으로 그 파괴면의 깊이가 얕은 것이 전세계적으로 나타나는 특징이다. 남캘리포니아 지역 code는 사면의 안정성을 1.22m 이상의 깊이에서 식(3)에 의해 검토할 것을 요구하고 있다(Minimum, 1978). 우리 나라의 경우에도 자연사면의 활동양상에 대한 기존의 연구에 의하면 일반적으로 활동면의 깊이는 2m 이하이고 대부분이 1m 이하에서 발생하는 것으로 알려져 있다(최경, 1986; 박용원 등, 1993). 따라서 그림 4는 모관흡수력의 크기가 사면의 안정성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 깊이 1.5m에서의 모관흡수력의 크기 변화에 따

른 안전율의 변화를 한계평형법에 의해 계산한 결과이다. 그림에서 경사각 40° 와 50° 에서는 일정 크기의 모관흡수력이 존재하지 않으면 사면은 안정을 유지할 수 없음을 알 수 있다. 즉, 모관흡수력의 존재로 인하여 안정을 유지하던 사면이 침투에 의해 불안정하게 될 수 있음을 의미한다. 이러한 모관흡수력이 사면의 안정에 미치는 영향은 여러 연구자에 의해 언급되어져 왔다.

5.3 지반의 침투능

그림 5는 No. 200체의 통과율이 30%인 흙에 대하여 $K_s = 0.87 \text{ cm/hr}$, $\phi_f = 54.97 \text{ cm}$, $\Delta\theta_s = 0.28$ 일 경우 강우의 지속시간에 따른 지반의 침투능을 Green-Ampt 모델에 기초한 Mein과 Larson의 방법에 의해 계산한 것이다. 일반적으로 침투의 양상은 지표면에 가해지는 강우강도와 지반의 함수량 분포에 의해서 결정된다. 즉, 지표면에 침투능을 증가하는 유량이 가해지는 경우의 침투(flooding infiltration)는 지반의 함수량 분포에만 의존하지만 그렇지 않은 경우의 침투양상은 지반의 초기 함수분포와 더불어 작용하는 강우강도에도 영향을 받는다.

그림 5는 일정한 강우강도가 가해질 때 포화투수계수가 K_s 인 균질한 흙에 대한 전형적인 침투상황을 나타내고 있다. 강우강도가 최소 침투능(K_s)보다 작으면(즉, $i < K_s \leq f$), 강우지속시간에 관계없이 표면유출 없이 모든 강우가 지반으로 침투할 수 있다. 만약 강우강도가 최소 침투능보다 크지만 흙의 침투능보다 작으면(즉, $K_s < i \leq f$) 유출은 발생하지 않는다. 그러나 폰딩(ponding)이 발생하면 표면유출이 발생하기 시작하고 침투능은 최소 침투능에 이를 때까지 감소하게 된다(Mein과 Larson, 1973;

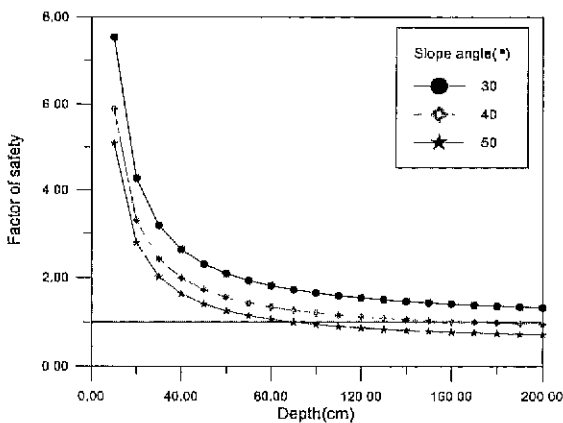


그림 3. 침윤전선의 침투깊이에 따른 안전율의 변화

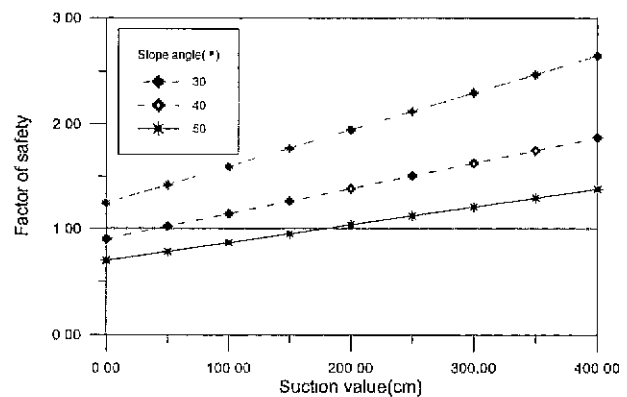


그림 4. 모관흡수력의 크기 변화에 따른 안전율의 변화

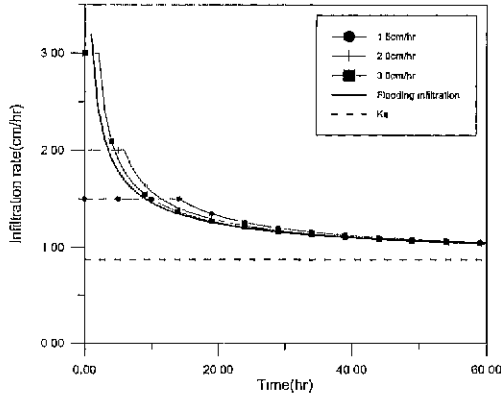


그림 5. 강우강도에 따른 침투 양상

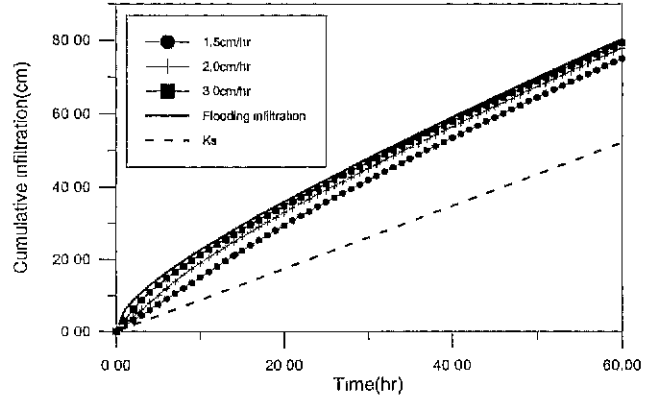


그림 6. 강우강도에 따른 누적침투량

Rubin, 1966). 이때 표면유출량은 누적 강우량과 누적 침투량의 차이로 계산되어지며 초기 ponding이 발생할 때의 침윤전선의 깊이는 최소침투능에 대한 강우강도의 비로 정의되는 상대 강우강도(relative intensity)에 의해 결정된다.

그림 6은 그림 5의 침투능을 시간에 대하여 적분하여 얻은 강우강도에 따른 누적침투량을 나타낸다. 일정한(uniform) 강우강도가 작용한 경우 폰딩(ponding)이 발생하기 전에는 침투능이 강우강도보다 크므로 강우가 모두 침투하여 누적침투량이 직선을 이루나 폰딩(ponding) 발생 후에는 침투능이 점차 감소하므로 곡선의 기울기가 감소하게 된다. 그리고 flooding infiltration의 경우 누적 침투량은 지반으로 침투할 수 있는 최대량인 누적침투능이 된다.

5.4 Pradel & Raad 방법과 Mein & Larson 방법의 적용

강우강도-지속시간의 관계분석은 도시지역의 우수거, 고속도로의 암거 등의 설계시의 기본자료이며 이들 관계는 여러 가지 식으로 표현된다. 이중 빈도개념이 도입된 강우강도와 지속시간의 관계를 강우강도-지속시간-생기빈도곡선(Intensity-Duration-Frequency: IDF curve)이라 한다. 이원환(1993)에 의해 작성된 서울지방의 IDF곡선을 식으로 나타내면 표 2와 같다. 여기서 t 는 지속시간(min)이며 강우강도는 mm/hr로 나타난다.

그림 7은 Mein과 Larson의 방법(식(15) 및 식(16))에 의

표 2. 서울의 재현기간별 강우강도 공식

	재현기간(년)				
	2	5	10	30	50
서울	$\frac{300}{\sqrt{t+0.22}}$	$\frac{420}{\sqrt{t+0.19}}$	$\frac{497}{\sqrt{t+0.15}}$	$\frac{610}{\sqrt{t+0.09}}$	$\frac{660}{\sqrt{t+0.05}}$

해 일정한 강우강도가 지표면에 작용할 경우 폰딩(ponding)이 발생하는 시간을 서울지방의 IDF 곡선과 함께 도시한 것이다. 이 그림은 곡선 B의 상부에 존재하는 강우조건에 의해서만 그림 8의 대응하는 깊이까지 포화될 수 있음을 의미한다. 그림 8은 Mein과 Larson의 방법에 의해 그림 7의 강우강도와 폰딩(ponding)이 발생하는 시간에 대응하는 침윤전선의 진행깊이를 나타낸 것이다. 이때 식(1)이나 식(3)에 의해 그림 8의 강우조건에 대응하는 침투깊이에 대해 그림 3과 같이 사면의 안전율을 구할 수 있으며 그림 3, 그림 7 및 그림 8로부터 예비설계에 필요한 정보를 얻을 수 있다.

침윤전선이 지표 아래 1m까지 발달하기 위한 강우조건을 Pradel과 Raad의 방법과 Mein과 Larson의 방법에 의해서 계산한 결과 또한 그림 7과 그림 8에 나타내었다.

(1) Pradel과 Raad 방법

식(18.1)과 식(18.2)에 의해 $T_{min} = 13.85 \text{ hr}$, $i_{min} = 1.35 \text{ cm/hr}$ 로 계산되고 그림 7의 점C로 나타나며 통계학적으로 재현주기 5년 이상의 강우에서 1m까지 포화될 수 있음을 의미한다.

(2) Mein과 Larson 방법

식(13)과 식(16)에 의하면 $T_{min} = 20.78 \text{ hr}$, $i_{min} = 1.35 \text{ cm/hr}$ 로 계산되고 그림 7의 곡선 B를 따라 움직이는 점A로 나타나며 통계학적 재현주기 10년 이상의 강우에서 1m까지 포화될 수 있음을 의미한다.

위의 결과에서 방법1에 의하면 1m까지 포화되는 점C는 방법2의 기준에 따르면 1m까지 포화되지 않는다. 이와 같이 두 방법에 차이가 발생하는 것은 방법1이 누적침투량 F를 계산할 때 실제 발생하는 일정(uniform)한 강우강

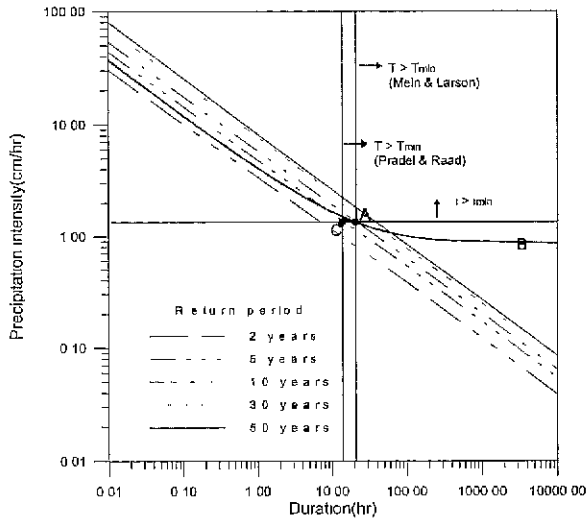


그림 7. 지반을 포화시키기 위한 강우강도-지속시간의 관계

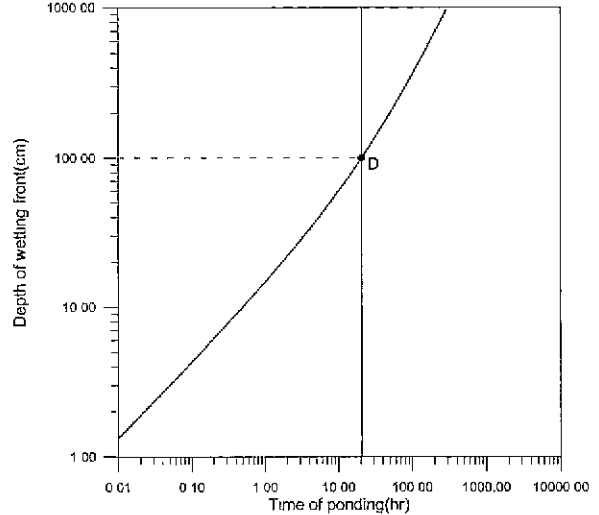


그림 8. Ponding 발생시간에 대응하는 침윤전선의 깊이

도에 의해 계산(즉, $F = i * t$)하지 않고 시간에 따라 변화하는 침투능을 바탕으로 식(12)를 이용하여 계산하기 때문이다. 즉, 방법1은 식(6)의 경계조건에 대한 해를 바탕으로 하며 방법2는 식(8)의 경계조건에 대한 해를 바탕으로 한다. 이런 경우 방법1이 방법2보다 작은 T_{min} 을 계산하므로 보다 보수적인 결과를 준다. 즉 Pradel과 Raad의 방법은 누적침투량이 강우강도의 크기에 영향을 받지 않으므로 따라서 식(14)의 사면파괴를 유발하는 임계깊이 z_w 까지 포화하기 위한 시간도 강우강도의 크기에 독립적이다. 이것은 강우강도가 지반의 침투거동에 영향을 미치지 않음을 의미한다.

5.5 세립질 함유량에 따른 침투거동의 차이

그림 9는 세립질 흙의 함유량에 따른 침투거동의 차이를 살펴보기 위하여 강우강도의 크기를 변화시키면서 폰딩(ponding) 발생시기와 침윤전선의 깊이를 흙의 No. 200체 통과율에 따라 도시한 것이다. 이때 투수계수의 크기는 0.87 cm/hr 로 일정하다고 가정하였다.

사용된 물성치는 표 3과 같다. 그림 1과 그림 2로부터도 알 수 있듯이 세립함량이 많을수록 함수특성곡선이 완만하고 보다 많은 수분을 함유할 수 있다. 이러한 특성은 표 3의 변수를 통해 그림 9와 그림 10에 반영되었으며 세립함

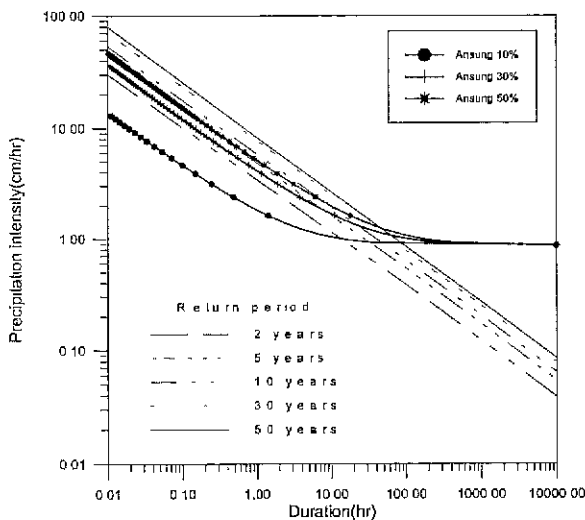


그림 9. 세립질의 함량에 따른 지반을 포화시키기 위한 강우강도-지속시간의 관계

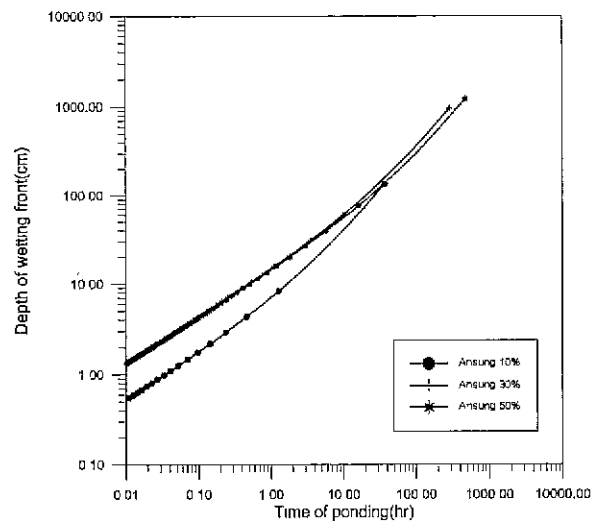


그림 10. 세립질의 함량에 따른 ponding 발생시간에 대응하는 침윤전선의 깊이

표 3. 세립함량에 따른 Green-Ampt 모델 변수의 변화

세립함량	10 %	30 %	50 %
물성			
ϕ_f [식(17.1)]	7.67 cm	54.97 cm	69.67 cm
$\Delta\theta_i$	0.26	0.28	0.36

유량이 작을수록 같은 크기의 강우강도에 대하여 폰딩(ponding)이 빠른 시간에 발생하고 이에 대응하는 침윤전선의 깊이도 얕음을 알 수 있다. 특히 세립함유량이 10%인 경우 폰딩(ponding)이 발생하기 위해 요구되는 침윤전선의 최소침투깊이가 대략 1m 이내임을 볼 수 있으며 이는 지표 얕은 부분이 상대적으로 작은 강우강도에도 짧은 시간에 쉽게 포화되어 표면파괴의 가능성이 더 많음을 의미한다.

5.6 임계투수계수(Threshold permeability)

Pradel과 Raad(1993)에 의하면 깊이 z_w 까지 포화시킬 수 있는 최대 투수계수의 값은 다음과 같다.

$$K_{lim} = i_{min} \left(\frac{z_w}{z_w + \Psi_f} \right) = \frac{\Delta\theta_i}{T_{min}} \left[z_w - \Psi_f \ln \left(\frac{\Psi_f + z_w}{\Psi_f} \right) \right] \quad (21)$$

그림 11은 IDF곡선과 세립함량 30%인 경우, 깊이 100 cm까지 포화되기 위해 요구되는 최소요건을 의미하

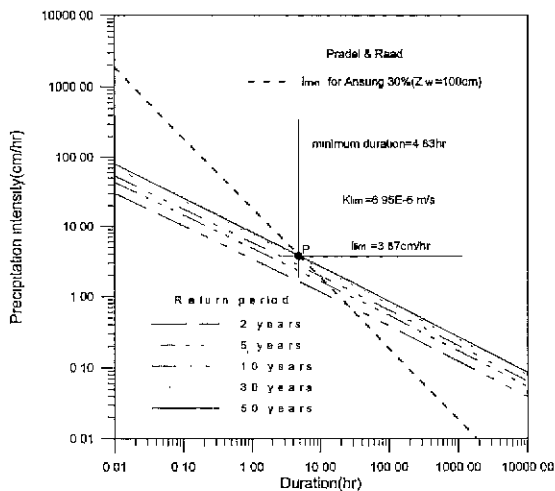


그림 11 Pradel과 Raad 방법에 의한 임계투수계수

는 식(18.2)를 나타낸 것이다. 이때 최대 강우강도를 갖는 50년 주기의 선과 만나는 점 P는 100cm까지 포화하기 위한 최소 지속시간이 4.38시간임을 나타낸다. 이에 대응하는 강우강도는 3.87cm/hr이며 이로부터 $K_{lim} = 6.95 \times 10^{-6}$ m/s로 계산된다.

Mein과 Larson 방법에 의한 최대투수계수는 식(15), (16)으로부터 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$K_{lim} = \frac{t_p i_{min}^2}{\Delta\theta_i \Psi_f + t_p i_{min}} = \frac{z_w^2 \Delta\theta_i}{t_p (\Psi_f + z_w)} \quad (22)$$

그림 12는 Mein과 Larson의 방법에 기초하여 깊이 100 cm까지 포화되기 위해 요구되는 최소요건을 나타내었으며 Pradel과 Raad의 방법에 비해 긴 지속시간이 요구됨을 알 수 있다. 최대 강우강도를 갖는 50년 주기의 선과 만나는 점 P로부터 $K_{lim} = 4.64 \times 10^{-6}$ m/s로 계산되며 Pradel과 Raad의 방법에 비해 작음을 알 수 있다. 즉, 전자가 후자에 비하여 100cm의 깊이까지 포화될 가능성이 있는 지반의 범위가 더 넓음을 의미한다. 이러한 결과는 앞서 언급된 바와 같이 Pradel과 Raad의 방법이 실제 침투량이 아닌 최대 침투능을 바탕으로 이론을 전개하기 때문이다.

그림 13은 재현기간에 따라 깊이 100 cm까지 포화하기 위한 최대투수계수의 변화를 나타낸 것으로 재현기간이 커질수록 Pradel과 Raad의 방법이 Mein과 Larson의 방법보다 더 큰 범위의 투수계수에서 포화될 수 있음을 나타낸다. 따라서 재현기간이 커질수록 Pradel과 Raad 방법은 안정성 평가에 있어 보다 보수적인 결과를 주게 된다.

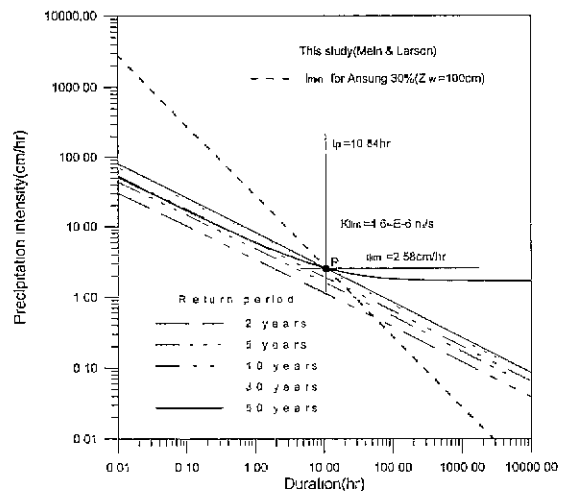


그림 12. Mein과 Larson 방법에 의한 임계투수계수

참고문헌

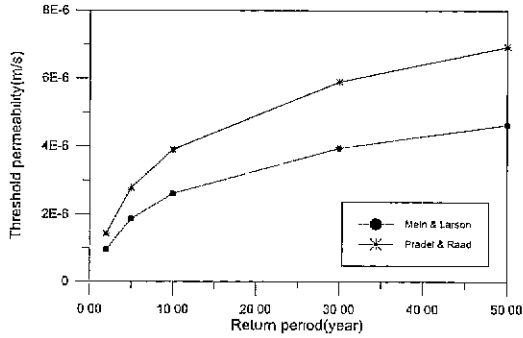


그림 13. 재현기간에 따른 임계투수계수 ($z_w = 100 \text{ cm}$)

6. 결론

본 연구에서는 재현기간에 따른 강우강도-지속시간을 고려한 얇은 사면파괴에 대한 가능성을 평가하기 위한 한계평형방법에 대하여 논의하였다. 이를 위해 일차원 침투 모델인 Green-Ampt 모델에 바탕을 둔 두 방법을 고려하였다. 즉, 침투능에 따른 침투깊이를 산정하는 Pradel과 Raad의 방법과 일정한(uniform) 강우강도가 작용할 경우 폰딩(ponding)에 대한 해를 주는 Mein과 Larson의 방법을 고려하여 풍화토 사면에 적용하였다.

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 한계평형법을 이용한 안정해석에 의하면 강우의 침투에 의해 침윤전선이 일정깊이 이상 진행하면 불안정하게 되어 파괴가 발생할 수 있다.
- (2) Pradel과 Raad 방법은 누적침투량 F 를 계산할 때 실제 발생하는 일정(uniform)한 강우강도에 의해 계산하지 않고 시간에 따라 변화하는 침투능을 바탕으로 계산하므로 Mein과 Larson의 방법에 비해 과도하게 보수적인 결과를 준다.
- (3) 풍화토의 세립함유량이 작을수록 같은 크기의 강우강도에 대하여 폰딩(ponding)이 빠른 시간에 발생하고 이에 대응하는 침윤전선의 깊이도 알 수 있다. 이는 지표 얇은 부분이 상대적으로 작은 강우강도에도 짧은 시간에 쉽게 포화되어 표면파괴의 가능성이 더 많음을 의미한다.
- (4) 깊이 z_w 까지 포화시킬 수 있는 최대 투수계수의 값은 Pradel과 Raad의 방법이 더 큰 값을 주며 이는 더 큰 범위의 투수계수에서 포화될 수 있음을 의미한다. 따라서 안정성 평가에 있어 강우강도를 고려하는 Mein과 Larson 방법보다 보수적인 결과를 주게 된다.

1. 류지협(1997), "불포화 화강풍화토의 투수 및 강도 특성", 공학박사 학위논문, 동국대학교
2. 박용원, 김감래, 여운관(1993), "1991년 용인-안성 지역 산사태 연구", 한국지반공학회지, 제9권, 제4호, pp.103~116.
3. 이원환(1993), 수문학, 문운당, pp. 48~50.
4. 조성은, 이승래(2000), "강우침투에 따른 불포화토사사면의 안정해석", 한국지반공학회지, 제16권, 제1호, pp 51~64.
5. 최경(1986), 한국의 산사태 발생요인과 예지에 관한 연구. 농학박사 학위논문, 강원대학교
6. Alonso, E., Gens, A and Lloret, A (1995), "Effect of rain infiltration on the stability of slopes", Proceedings of the First Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, pp.241~249.
7. Brooks, R. H and Corey, A. T.(1964), Hydraulic properties of porous media. Hydrology paper No.3, Civil Eng. Department, Colorado State University, Fort Collins.
8. Dunin, F. X.(1976), Infiltration: Its simulation for field conditions. In: Edited by Rodda, J. C. Facets of hydrology. John Wiley & Sons Ltd., pp 199~227
9. Espinoza R. D(1999). Infiltration In: Delleur J. W., editor, The handbook of groundwater engineering, CRC Press LLC.
10. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R and Widger, A.(1978), "Shear strength of unsaturated soils", Can. Geotech. J. Vol.15, pp.313~321
11. Fourie, A. B.(1996), "Predicting rainfall-induced slope instability", Proceedings of the Institutions of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, Vol. 119, No 4, pp.211~218.
12. Fourie, A. B., Rowe, D. and Blight, G. E.(1999), "The effect of infiltration on the stability of the slopes of a dry ash dump". Geotechnique, Vol 49, No.1, pp 1~13
13. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H.(1995), Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons Inc.
14. Gasmol, J. M., Rahardjo, H. and Leong, E. C (2000), "Infiltration effects on stability of a residual soil slope", Computer and Geotechnics, Vol.26, No.2, pp 145~165
15. Mein R. G. and Larson C. L.(1973). "Modeling infiltration during a steady rain", Water Resources Research. Vol.9, No.2, pp.384~395
16. Mein, R. G and Farrel, D. A.(1974), "Determination of wetting front suction in the Green-Ampt equation", Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Vol 38, pp.872~876.
17. Minimum standards for slope stability analysis(1978), Building and Safety Division County of Los Angeles, Calif.
18. Ng, C. W. W. and Shi, Q.(1998), "A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage". Computer and Geotechnics, Vol 22, No 1, pp.1~28
19. 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
20. Rawls, W. J., Brakensiek, D. L. and Sani, B.(1983), "Agricultural management effects on soil water processes. Part I: Soil water retention and Green and Ampt infiltration parameters", Trans ASAE, Vol 266, pp.1747~1752.
21. Richards, L. A.(1931), "Capillary conduction of liquids through porous media". Physics, Vol 1, pp 318~333
22. Rubin, J.(1966). "Theory of rainfall uptake by soils initially drier than their field capacity and its applications", Water Resources Research, Vol.2, pp 739~794.
23. Wallace, K.(1975), "The analysis of surface infiltration into earth structures", 4th Southeast Asian Conf. on Soil Engrg., Kuala Lumpur.

(접수일자 2000. 6. 12)