

2층 지반의 표면파괴에 대한 안정성 평가를 위한 침투거동 해석

Infiltration Analysis for Surficial Stability Evaluation of Two-layered Slopes

조 성 은¹ Cho, Sung-Eun

Abstract

Shallow slope failures in residual soil during periods of prolonged infiltration are common over the world. Therefore, this study examines an approximate method to estimate the influence of infiltration on surficial stability of slopes by one-dimensional infiltration model. Modified GAML model based on the Green-Ampt model was extended to predict the infiltration behavior of two-layered slope. Then, the model has 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 in two-layered soil profile. The results obtained from the approximate method were compared with those obtained from numerical analyses. According to the results, with the use of properly estimated input parameters, the proposed method was found to give good results that agree reasonably well to those of the more rigorous finite element analyses.

요 지

강우에 의한 표면파괴는 세계적으로 흔히 볼 수 있는 사면파괴의 형태이다. 본 연구에서는 침투가 사면 표면의 안정에 미치는 영향을 평가하기 위해 일차원 침투모델을 이용한 무한사면 해석법을 연구하였다. 2층으로 구성된 지반에서 임의의 강우에 의해 유발되는 얇은 사면파괴의 가능성을 평가하기 위해서 Green-Ampt 모델에 바탕을 둔 수정 GAML(Green-Ampt-Mein-Larson) 모델을 확장하여 재현기간에 따른 강우강도와 지속시간이 고려되는 침투거동을 예측하였다. 예측된 침투거동과 비교하기 위하여 일련의 수치해석이 수행되었다. 그 결과에 의하면 적절하게 선택된 입력값을 사용하면 제안된 간략법이 더욱 엄밀한 해석법인 유한요소해석과 근사한 합리적인 결과를 줄 수 있다.

Keywords : Green-Ampt model, Soil water characteristic curve, Surficial stability, Two-layered slopes

1. 서 론

강우에 의한 사면파괴는 전세계적으로 흔히 볼 수 있는 사면파괴의 한 형태이다. 이러한 사면파괴는 풍화 잔류토층이 강우에 노출될 경우 주로 발생하며 대부분 파괴면의 깊이는 얇고 사면의 표면과 평행을 이루므로 평면 무한사면 해석법을 이용한 안정해석이 많이 수행되어 왔다.

이러한 사면의 안정성을 평가하기 위해서는 강우에

의한 지반의 수리학적 거동을 파악해야 하며 이를 위해 수치해석, 간략해를 이용하는 방법 등 많은 방법들이 사용되어져 왔다. 이중 간략해를 이용한 방법은 실제현상을 간략화하여 유도된 연직 일차원 침투모델을 이용하여 지반의 침투량 및 침투율 등을 해석하는 것으로 많은 연구와 현장 적용을 통하여 여러 분야에서 그 실효성이 잘 정립되어 있다. 지반공학 분야에서도 이미 이러한 간략해를 이용하여 강우에 대한 사면의 안정성 평가를 수행한 바 있다(조성은과 이승래, 2000,

¹ 정회원, 수자원연구원 댐안전연구소 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Dam Safety Research Center, Korea Institute of Water and Environment, drsecho@hanmail.net)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다. 단, 건전한 토의 문화 정착을 위하여 학회에서 내용을 조정할 수 있음을 알려드립니다.

2001; Pradel과 Raad, 1993; Fourie, 1996; Fourie 등, 1999). 간략법은 침윤전선의 깊이를 평가하는데 문제를 간단하게 하기 위한 가정사항들이 적용되고 불포화 지반의 전단강도를 평가하는데 어려움이 있음에도 불구하고 강우에 의한 사면의 거동을 파악하고 안정성을 평가하는데 유효하게 사용될 수 있다. 그러나 기존의 평가방법은 균질한 지반의 경우에만 국한되어 표면조건에 의한 침투 거동 및 이에 따른 안정성 평가가 어려운 점이 있었다.

본 연구에서는 기존에 개발된 표면파괴에 대한 안정성 평가기법을 확장하여 2층으로 이루어진 사면의 안정성 평가기법을 제안하였다. 이를 위하여 한계평형법을 사용하여 표면파괴에 대한 안정성을 평가하고자 할 때 확률강우강도 자료를 근거로 사면파괴의 가능성이 있는 깊이까지 강우가 침투할 가능성을 평가하기 위한 방법에 대하여 논의하였다. 이때 지반의 침투거동을 평가하기 위해 일차원 침투모델인 Green-Ampt 모델에 바탕을 둔 2층 지반의 침투거동 예측이 가능한 수정 GAML 모델을 이용하였으며 강우강도가 하부층의 포화투수계수보다 크고 상부층의 포화투수계수보다 작은 경우에도 적용할 수 있도록 이론을 확장하였다.

2. 강우의 침투에 대한 사면의 안정성 평가

2.1 강우에 의한 사면파괴

강우에 의한 사면파괴에 대한 많은 연구가 수행되었으며, 강우에 의해 지하수위가 상승하여 간극수압이 상승하고 이로 인하여 전단저항이 감소하여 파괴에 도달하는 것으로 알려져 있다. 그러나 불포화 상태의 지반에서는 강우에 의한 침윤전선의 진행에 의하여 사면의 안정성을 유지하고 있던 모관흡수력의 소멸로 인한 전단강도의 감소도 주요한 원인인 것으로 알려져 있다(Fredlund와 Rahardjo, 1995).

지반의 점착력 c' 이 0인 경우, 사면의 경사각이 내부 마찰각보다 크면($\alpha \geq \phi'$) 불포화 상태에서 안정하던 사면이 강우의 침투에 따라 침윤전선이 임계깊이에 도달하면 불안정해질 수가 있다. 즉, $\alpha \geq \phi'$ 인 경우 사면의 불안정이 임시지하수위의 형성이나 지하수위 상승으로 인한 양의 간극수압의 발생과 이로 인한 유효응력의 감소로 발생하는 것으로 판단하는 것은 부적절하다. 그러나 $\alpha < \phi'$ 인 경우 침투에 의해 전체 토층이 완전 포화상태에 도달하여 모관흡수력에 의한 겉보기점착력을 완

전히 상실하여도 한계상태에 도달하지는 않는다. 하지만 이러한 경우에도 임시지하수위의 생성이나 지하수위의 상승으로 인하여 유효응력이 감소하는 경우에는 전단강도가 감소하므로 한계상태에 도달할 수 있다.

점착력이 존재하는($c' \neq 0$) 불포화 사면에서 $\alpha \geq \phi'$ 인 경우, 침투에 의해 전체 토층이 완전 포화상태에 도달하여 모관흡수력에 의한 겉보기 점착력이 완전히 소멸하여도 안정한 상태를 유지할 수 있다. 하지만 이러한 경우라 할지라도 지하수위가 상승하여 유효응력이 감소하게 되면 전단저항이 감소하므로 한계상태에 도달하게 된다(Sudhakar, 1996).

2.2 한계평형법에 의한 사면의 안정해석

강우의 초기에 사면에 포화대가 존재하지 않는다고 가정하면, 강우로 인하여 지반에 침윤전선(wetting front)이 발생할 것이며 강우가 지속되면 강우는 불포화대를 통하여 불투수층에 도달할 때까지 침투하게 된다. 이 때 실제 사면파괴는 대부분 지표로부터 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 검토할 수 있다.

경사가 α 인 반무한 사면에서 가상의 파괴면이 사면과 평행하다고 가정하면 깊이 z_w 에서의 안전율은 다음과 같이 계산할 수 있다(Cho와 Lee, 2002).

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

여기서, W 는 단위 폭을 가진 절편의 무게, $(\sigma_n - u_a)$ 는 전단면에서의 순수직응력, 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.

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

여기서 γ_t 는 총단위중량이며 z_w 는 전단면(침윤전선)까지의 연직깊이이다.

지반이 그림 1과 같이 두께 L_1 인 상부층과 반무한인 하부층의 2층으로 이루어진 경우 식 (2)는 다음과 같이 적용될 수 있다.

$$F_s = \frac{c' + [\gamma_1 L_1 + \gamma_2 (z_w - L_1) \cos^2 \alpha - u_w] \tan \phi'}{\gamma_1 L_1 + \gamma_2 (z_w - L_1) \sin \alpha \cos \alpha} \quad (3)$$

여기서, γ_1, γ_2 는 각각 상, 하부층의 총단위중량이다.

식 (1)에서 불포화 상태의 경우 간극수압은 음의 값을 가지며, 침투에 의해 지반이 완전히 포화되면 사면에 평행한 방향의 흐름성분이 생기고 간극수압과 간극공기압은 같게 된다(즉, $u_a = u_w$). 따라서 모관흡수력은 0이 되고 순수직응력은 유효응력과 같아지게 된다. 침투에 의해 정수압 상태에 도달하면 간극수압은 다음과 같다.

$$u_w = \gamma_w z_w \cos^2 \alpha \quad (4)$$

이때 γ_w 는 물의 단위중량이며 z_w 는 자유수면으로부터의 깊이가 된다.

3. 간략해에 의한 침투해석

강우에 대한 사면의 안정성 평가를 위해서는 시간에 따른 강우의 침투깊이를 합리적으로 예측할 수 있어야 한다. 지반에서의 물의 이동에 대한 수치해는 복잡하고 비선형의 형태를 취하므로 반복적으로 내재적인 식을 풀어야 하며, 세밀한 공간적, 시간적 이산화를 적용해야 하므로 많은 계산량을 필요로 하는 단점을 가지고 있다.

Green과 Ampt(1911)는 Darcy의 법칙에 근거한 일차원 침투식을 제안하였으며, 여러 가정사항을 포함한 간략식임에도 불구하고 이론적 근거와 측정 가능한 변수들로 비교적 정확한 해를 얻을 수 있어 널리 사용되어 왔다. Mein과 Larson(1973)은 Green-Ampt 식을 바탕으로

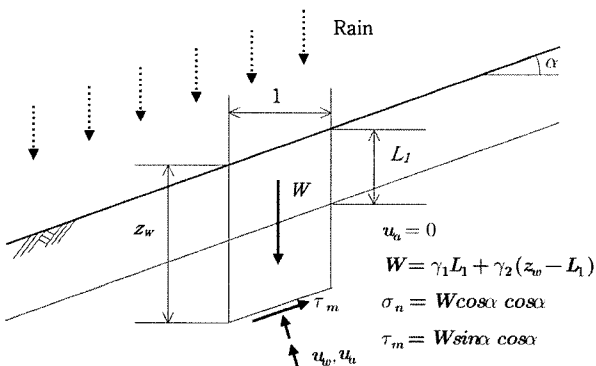


그림 1. 불포화 지반의 무한사면 해석

로 지표면에 폰딩(ponding)이 발생하기 전·후의 침투량을 구할 수 있는 2단계 모델을 제안하였다.

일차원 침투이론을 바탕으로 강우로 인한 지반 내 침투깊이를 예측하는 방법으로는 Lumb(1962, 1975)에 의해 제안된 습윤대 방법(wetting band method)과 Pradel과 Raad(1993)에 의해 제안된 방법, 그리고 수정 간략법(Cho와 Lee, 2002; 조성은과 이승래, 2000) 등이 있다.

Pradel과 Raad는 Green-Ampt 모델을 이용하여 확률 강우자료를 바탕으로 강우의 강도, 지속시간, 재현기간을 고려할 수 있는 사면의 안정성 평가기법을 제안하였다. 이 방법은 사면에서 파괴가 발생할 수 있는 임계깊이 z_w 까지 포화되기 위해서 두 가지 조건이 만족될 것을 요구한다. 즉, 강우강도(i)는 지반의 침투능(f)을 초과해야 하고 깊이 z_w 까지 포화되도록 충분히 오래 지속되어야 한다. 조성은과 이승래(2000)는 Pradel과 Raad의 방법의 경계조건을 개선하여 일정한 강우강도가 지표면에 경계조건으로 작용할 때 임의의 깊이까지 포화될 가능성을 평가하였다. 그러나 이들 방법은 균질한 지반에서의 침투만을 고려할 수 있는 한계가 있다.

4. 간략해를 이용한 2층 지반의 침투해석

Green-Ampt모델은 기본적으로 균질한 지반을 대상으로 하지만 2층으로 이루어진 지반의 경우 침투거동이 균질한 지반의 거동과는 다르기 때문에 후에 다층지반에 적용 가능한 식으로 확장되었다(Ahmed 등 1980; Moore 1981; Moore와 Eigel 1981; Flerchinger 등 1988). Moore(1981)는 GAML 모델을 개선하여 2층으로 이루어진 지반의 표면효과를 고려할 수 있는 모델을 제안하였다. Moore와 Eigel(1981)에 의하면 수정 GAML모델은 2층 지반에 대하여 Richard의 방정식을 잘 근사화하고 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 Moore에 의해 제안된 모델을 강우강도가 하부층의 포화투수계수보다는 크고 상부층의 포화투수계수보다는 작은 경우로 확장하고 이를 이용하여 2층으로 이루어진 사면의 일차원 침투거동 해석에 적용하였다.

4.1 수정 GAML 모델

그림 2는 Moore에 의해 제안된 수정 GAML모델의 개념도를 나타낸다. 상부층의 두께는 L_1 , 초기함수비 결손

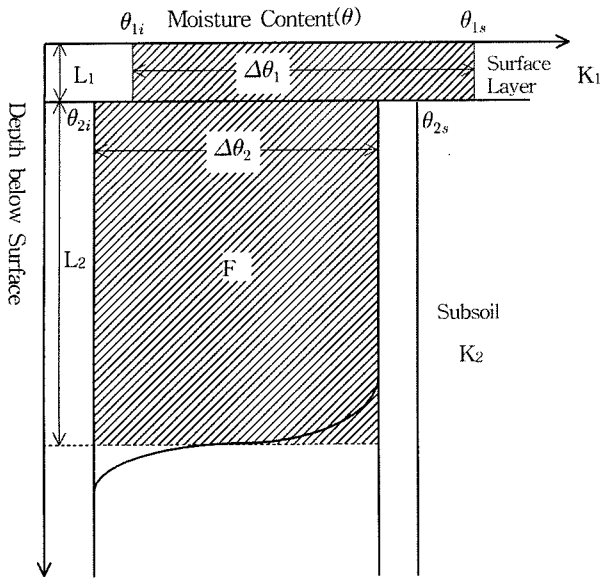


그림 2. 수정 GAML 모델의 개념도

$\Delta\theta_1$, 투수계수 K_1 이며 하부층은 초기함수비 결손 $\Delta\theta_2$, 투수계수 K_2 인 균질한 반무한의 지반으로 구성된다.

지반의 포화투수계수보다 큰 일정한 강우강도 i 에 대하여 폰딩이 발생하기 전까지는 강우가 지반으로 모두 침투할 수 있으므로 침투능은 강우강도와 같고($f = i$), 강우강도가 침투능을 초과하게 되면 지표면에서의 수압이 0이 되면서 폰딩이 발생한다. 폰딩이 발생할 때의 누적침투량 F_p , 발생시간 t_p , 침윤전선의 깊이 z_p 는 다음과 같다.

$$F_p = \frac{\Delta\theta_1 \psi_{f1}}{i/K_1 - 1}, t_p = F_p/i, z_p = F_p/\Delta\theta_1 \text{ for } z_p < L_1 \quad (5-1)$$

$$F_p = \frac{H - E(i/K_2)}{(i/K_2) - 1} + F_1, t_p = F_p/i, z_p = \frac{F_p - L_1(\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2)}{\Delta\theta_2} \text{ for } z_p > L_1 \quad (5-2)$$

여기서, $E = L_1 \Delta\theta_2 (K_2/K_1)$, $H = \Delta\theta_2 (L_1 + \psi_{f2})$, $F_1 = L_1 \Delta\theta_1$ 이고, ψ_{f1} , ψ_{f2} 는 상부 및 하부 층의 침윤전선에서의 모관수두, z_p 는 폰딩이 발생할 때의 침윤전선의 깊이이다.

폰딩이 발생한 이후($t > t_p$)의 침투능은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = K_1 \left(1 + \frac{\Delta\theta_1 \psi_{f1}}{F} \right) \text{ for } z \leq L_1 \quad (6-1)$$

$$f = K_2 \left(\frac{H + F - F_1}{E + F - F_1} \right) \text{ for } z > L_1 \quad (6-2)$$

여기서, z 는 침윤전선의 깊이이다.

이때 대응하는 누적 침투량은 다음과 같다.

$$F = F_p + K_1(t - t_p) + \psi_{f1} \Delta\theta_1 \ln \left(\frac{F + \psi_{f1} \Delta\theta_1}{F_p + \psi_{f1} \Delta\theta_1} \right) \text{ for } z \leq L_1 \quad (7-1)$$

$$F = F_p + K_2(t - t_p) - (E - H) \ln \left(\frac{F + H - F_1}{F_p + H - F_1} \right) \text{ for } z > L_1 \quad (7-2)$$

식 (7-1), (7-2)는 반복적인 방법이나 Li 등(1976)의 방법을 사용하여 풀 수 있다(부록 참조).

4.2 모델 변수

초기 조건으로 현장에서 계측 가능한 초기 함수량 결손 $\Delta\theta_i$ 를 지정함으로써 선행강우의 영향을 고려할 수 있으며 투수계수는 직접 측정하거나 경험적으로 결정할 수 있다.

침윤전선에서의 모관흡수력 ψ_f 의 결정을 위해 이론적 및 실험적 연구에 바탕을 둔 많은 방법들이 제안되었으며 그 중 Mein과 Farrel(1974)은 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\psi_f = \int_0^{\psi_i} K_r(\psi) d\psi \quad (8)$$

여기서, ψ_i 는 초기 모관수두이며 K_r 은 상대투수계수 함수(relative permeability function)이다.

수정 GAML 모델의 입력변수로는 K_1 , K_2 , $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$, ψ_{f1} , ψ_{f2} 가 평가되어야 한다. 상부층의 변수는 쉽게 구할 수 있지만 K_2 , $\Delta\theta_2$, ψ_{f2} 의 평가는 지층의 형상에 따라 달라진다. 즉, 조립질 지반이 세립질 지반의 상부에 있는 경우와 그 반대인 경우에 따라 평가 방법이 달라진다.

조립질 지반이 세립질 지반의 상부에 있는 경우에는 하부의 세립지반이 침투를 조절하며 두층 모두 포화 상태에 도달하게 된다. 따라서 이 경우에 K_2 는 하부층의 포화투수계수이고 $\Delta\theta_2$ 는 포화상태로부터의 함수량결손이다. 그리고 ψ_{f2} 는 식 (8)에 의해 결정된다.

그러나 세립질 지반이 조립질 지반의 상부에 있는 경우에는 상부층의 투수계수가 작아 침투를 방해하므로 하부층이 포화상태에 도달할 수 없다. 따라서 하부층은 불포화 상태로 존재하게 되므로 하부층의 함수비와 투수계수를 평가하는 절차가 필요하게 된다. Moore(1981)는 세립질 지반이 조립질 지반의 상부에 존재하는 2층 지반에서의 정상상태 침투를 고려하여 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$\frac{K_2}{(\psi(\theta_w) + L_1)} = \frac{K_1}{L_1} \quad (9)$$

여기서, $\psi(\theta_w)$ 는 상부층 바로 아래에서의 모관수두이다. L_1 과 K_1 을 알고 있으므로 함수특성곡선과 투수계수함수로부터 나머지 값을 시행착오법에 의해 구할 수 있다.

4.3 수정 GAML 모델의 확장 ($K_2 < i < K_1$ 인 경우)

강우강도란 비가 내리는 상태의 강도로 단위시간동안의 강수량을 말한다. 투수계수는 Darcy의 법칙에서 유출속도와 동수경사의 관계를 나타내는 기울기로 단위는 유출속도와 같다. 따라서 흙으로 유입되는 정도를 나타내는 강우강도와 유출되는 정도를 나타내는 투수계수의 비교를 통하여 지반의 침투 거동을 유추할 수 있다.

Moore의 수정 GAML모델은 강우강도가 포화투수계수 K_1 과 K_2 보다 큰 경우에 적용되나 조립질 지층이 세립질 지층의 상부에 존재하는 층상지반에서는, 강우강도가 하부층의 포화투수계수보다는 크고 상부층의 포화투수계수보다는 작은 경우에도 지표면에서 폰딩이 발생할 수 있으므로 이에 대하여 고려해야 한다.

그림 3은 $K_2 < i < K_1$ 인 경우의 일차원 침투결과를 상용 프로그램인 SEEP/W를 사용하여 구한 것이다. 이때 그림 4 및 표 1과 같은 전형적인 모래와 실트의 함수특성곡선과 상대투수계수곡선을 사용하였으며 강우강도는 0.9cm/hr를 표면에 가하였다. 그림에서 알 수 있듯이

$K_2 < i < K_1$ 인 경우 포화가 경계층에서부터 발생하여 상부지층을 포화시키며 상향으로 진행하게 된다. 즉, 침윤선이 경계면에서 상부지층으로 반사되는 듯한 현상이 발생하게 되고 결국에는 상부지층이 완전포화 상태에 도달하여 표면에서 폰딩이 발생하게 된다.

이 경우 침투를 모델링하기 위해서는 다음과 같이 침투과정을 개념적으로 몇 단계로 구분하여 고려하는 것이 편리하다.

1) 강우가 상·하부 지층의 경계에 도달하는 시간 t_1 까지($t < t_1$)

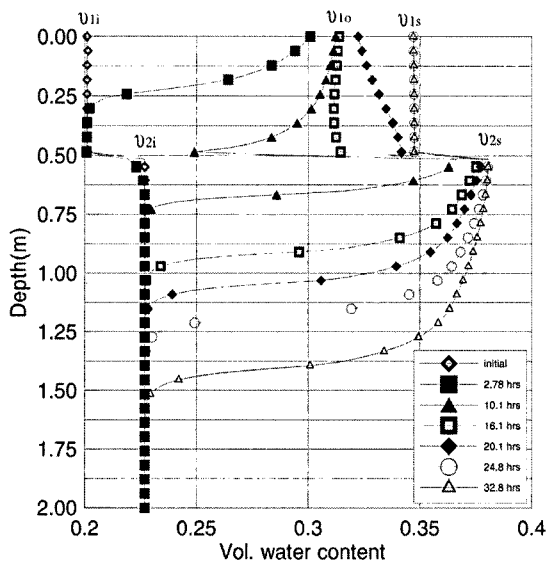
강우강도가 지반의 침투능보다 작으므로 모든 강우가 지반으로 침투하게 되고 경계면에 강우가 도달하게 되는 시간은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f = i, F = it \quad (10)$$

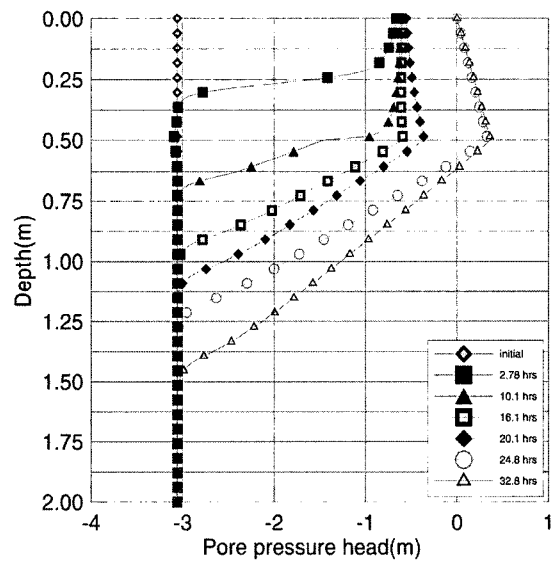
$$t_1 = \frac{\Delta\theta'_1 L_1}{i} \quad (11)$$

여기서, $\Delta\theta'_1 = \theta_{1o} - \theta_{1i}$ 이다.

이때는 표면에 폰딩이 발생하지 않아 지표면에서의 함수비가 포화상태의 체적함수비 θ_{1s} 와 다르게 되므로 지표에서의 체적함수비 θ_{1o} 를 결정해야 한다. 강우가 표면에 가해지면 침윤전선이 형성되고 초기 불포화상태의 투수계수가 강우강도보다 작기 때문에 물을 흘려보내기 위해 Darcy의 법칙에 따라 침윤전선 부근의 동수경사가 큰 값을 갖게 된다. 그러나 침윤전선이 진행함에



(a) 깊이에 따른 함수비 분포



(b) 깊이에 따른 간극수압 분포

그림 3. $K_2 < i < K_1$ 인 경우의 침투거동

따라 침윤전선 위부분의 동수경사는 1로 수렴하고 지반의 투수계수는 강우강도와 같아지게 된다. 따라서 지반의 투수계수함수로부터 강우강도와 같은 크기의 투수계수에 대응하는 모관흡수력을 구할 수 있고 이 모관흡수력에 대응하는 함수비 θ_{10} 를 함수특성곡선으로부터 얻을 수 있다.

2) 경계면에 도달한 후 지중 폰딩(subsurface ponding)이 발생하는 시간 t_2 까지($t_1 < t < t_2$)

강우가 경계면에 도달한 후 하부층에 도달하면 처음에는 침투능이 강우강도보다 크기 때문에 강우가 모두 침투하지만, 하부층의 투수계수보다 강우강도가 크기 때문에 일정 시간이 지나면 침투능이 감소하여 경계면이 완전포화 상태에 도달하는 폰딩이 발생하게 된다. 이때 폰딩이 발생하는 시간은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f = i, F = it \quad (12)$$

$$z_w = L_1 + \frac{F - L_1 \Delta\theta'_1}{\Delta\theta_2} \quad (13)$$

$$t_2 = \frac{K_2 \Delta\theta_2 \psi_{2f}}{i(i - K_2)} + t_1 \quad (14)$$

3) 지중 폰딩 발생 후 포화대의 상향 확대에 의한 지표면에서의 폰딩 발생시간 t_3 까지($t_2 < t < t_3$)

경계면에서의 폰딩이 발생한 후에는 강우가 모두 하부

층으로 침투하지 못하고 남는 양이 발생하여 쌓이게 되므로 지표면을 향해 상부지층으로 포화대가 확산하게 된다. 이때 포화대가 지표면에 도달하게 되면 지표면의 간극수압이 0이 되면서 지표면 폰딩(surface ponding)이 발생하게 된다. t_2 부터 t_3 까지의 시간 동안 하부지층으로 침투하지 못하고 남는 물의 양 R 은 식 (17)과 같이 계산되고 상부지층이 추가적으로 흡수할 수 있는 물의 양 S 는 식 (18)과 같다. R 과 S 가 같아지면 지표면 폰딩이 발생하게 되므로 t_3 는 식 (19)로 계산된다.

$$f = i, F = it \quad (15)$$

$$z_w = L_1 + \frac{F - L_1 \Delta\theta_1}{\Delta\theta_2} \quad (16)$$

$$R = \int_{t_2}^{t_3} (i - f) dt = i(t_3 - t_2) - \Delta F \quad (17)$$

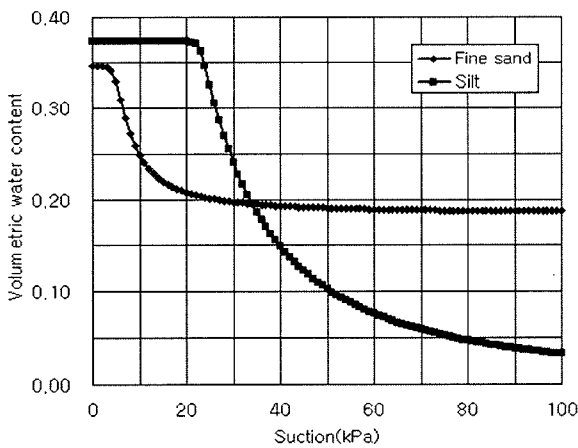
$$S = \Delta\theta''_1 L_1 \quad (18)$$

$$t_3 = \frac{\Delta\theta''_1 L_1 + \Delta F + it_2}{i} \quad (19)$$

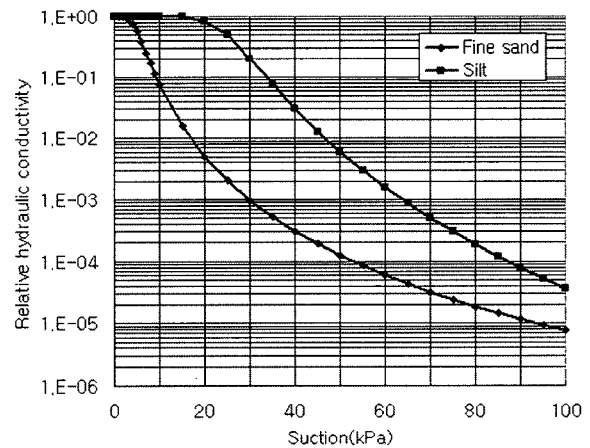
여기서, $\Delta\theta''_1 = \theta_{1s} - \theta_{10}$

4) 지표면에서의 폰딩 발생시간 t_3 이후($t_3 < t$)

지표면 폰딩이 발생한 후에는 2층의 침투상태가 지속되므로 식 (6-2), (7-2)를 적용할 수 있다.



(a) 함수특성곡선



(b) 상대투수계수 함수

그림 4. 적용된 지반의 수리학적 특성

표 1. 해석에 이용된 입력변수들

흙의 종류	투수계수 함수		$\Delta\theta_i$	함수특성곡선					K_s (cm/hr)
	α'	β		θ_r	θ_s	a	n	m	
Fine sand	11.31	4.03	0.15	0.185	0.346	1.841	6.442	0.229	1.548
Silt	9.88e-4	7.38	0.14	0.0	0.373	0.426	40.057	0.041	0.09

5. 제안된 방법의 적용

일차원 침투모델을 이용하여 지반에서의 침투거동을 예측하기 위한 입력 상수값들을 추정하기 위하여 그림 4와 같은 전형적인 모래와 실트의 함수특성곡선과 상대투수계수곡선을 사용하였다. 함수량 결손 $\Delta\theta_i$ 를 구하기 위하여 식 (20)과 같은 van Genuchten(1980)의 함수특성곡선식을 사용하였고 식 (8)로부터 침윤전선에서의 모관수두를 추정하기 위해 식 (21)과 같은 Gardner(1958)의 상대투수계수곡선을 이용하였다.

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{1}{1 + \left(\alpha \left(\frac{u_a - u_w}{\gamma_w} \right) \right)^n} \right)^m \quad (20)$$

여기서, θ_r 은 잔류체적함수량, θ_s 는 포화체적함수량, 그리고 α , n 및 m 은 상수이다.

$$K_r = \left[1 + \alpha' \left(\frac{u_a - u_w}{\gamma_w} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (21)$$

여기서 α' 와 β 는 상수이다.

초기 모관흡수력은 깊이에 따라 30kPa로 일정하다고 가정하였으며 상부지층의 깊이 $L_1=50\text{cm}$ 로 가정하였다.

5.1 조립질 지반이 세립질 지반의 상부에 있는 경우

초기 모관흡수력이 30kPa이므로 식 (8)로부터 $\psi_{f1}=60.64\text{cm}$, $\psi_{f2}=251.78\text{cm}$ 로 평가되었다.

층상 지반의 경우 층의 구성순서에 따라 침투 거동에 많은 영향을 미친다. 즉, 세립질 지반이 조립질 지반의 상부에 있는 경우가 조립질 지반이 세립질 지반의 상부에 있는 경우보다 침투율 및 침투량이 훨씬 적다.

그림 5는 강우강도가 상부지층의 포화투수계수보다 큰 경우의 강우강도에 따른 침투양상을 나타낸 것으로 강우초기에는 모든 강우가 지반으로 침투하지만 폰딩이 발생한 후에 침투능이 감소하게 되고 침윤전선이 상부와 하부지층의 경계면에 도달한 이후에는 하부지반의 포화투수계수 값까지 감소하게 된다. 그림에서 알 수 있듯이 수정 GAML 모델과 수치해석의 결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 본 연구에서 유도된 방법을 적용하여 $K_2 < i < K_1$ 인 경우의 시간에 따른 침투율의 변화를 나타낸 것으로 이 경우에도 수치해석의 결과가 비교적 잘

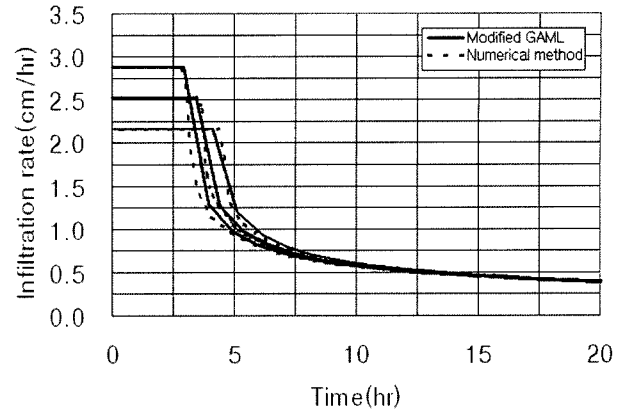


그림 5. 강우강도에 따른 침투 양상($K_1 < i$)

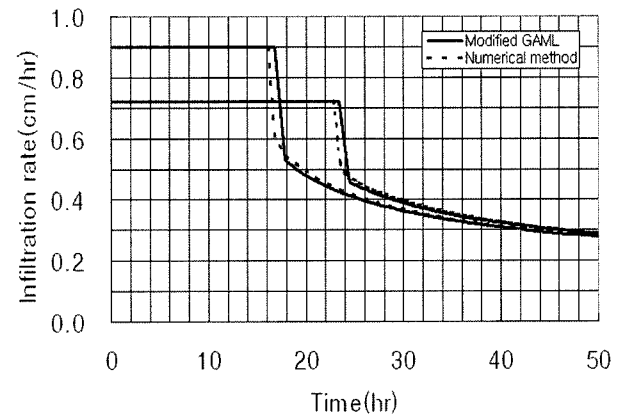


그림 6. 강우강도에 따른 침투 양상($K_2 < i < K_1$)

일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 7은 수정 GAML 모델을 이용하여 일정한 강우강도가 지표면에 작용할 경우 폰딩이 발생하는 시간을 IDF(Intensity-Duration-Frequency) 곡선과 함께 도시한 것이다. 이 그림은 구해진 곡선의 상부에 존재하는 강우 조건에 의해서만 그림 8의 대응하는 깊이까지 포화될 수 있음을 의미한다. 예를 들면 그림 8의 점 B에 해당하는 점은 상부지층과 하부지층의 경계인 깊이 50cm 지점을 나타내며 이 깊이까지 지반이 포화되기 위해서는 그림 7의 A점의 강우강도보다 크고 A점의 지속시간보다 길어야 한다.

이때 식 (1)이나 식 (3)에 의해 대응하는 침투깊이에 대해 사면의 안전율을 구할 수 있다. 이때 그림 3(b)와 같이 하부층의 투수계수가 상부층에 비해 훨씬 작은 경우에는 상부층에 양의 간극수압이 발생하므로 이에 대한 안전율을 계산해서 경계면에서의 파괴가능성도 검토해야 한다.

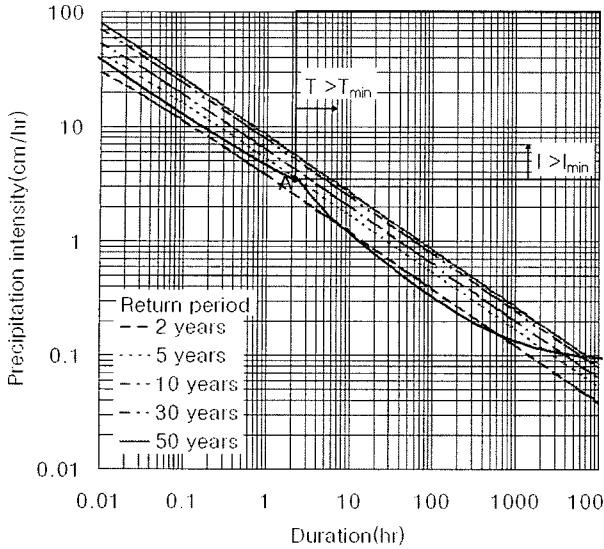


그림 7. 지반을 포화시키기 위한 강우강도-지속시간의 관계

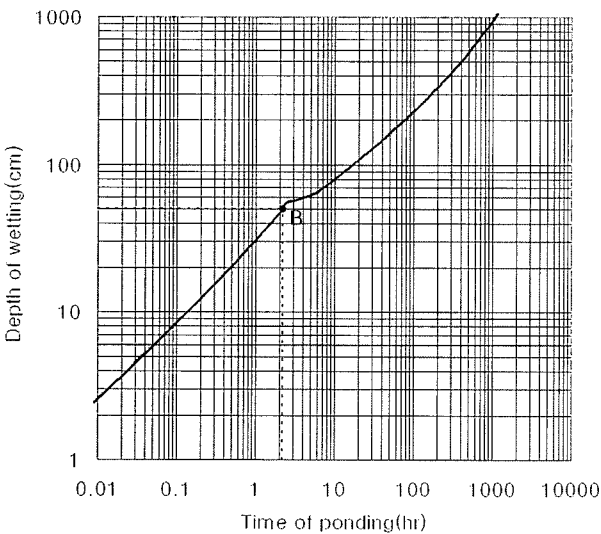


그림 8. Ponding 발생시간에 대응하는 침윤전선의 깊이

5.2 세립질 지반이 조립질 지반의 상부에 있는 경우

세립질 지반이 조립질 지반의 상부에 있는 경우 투수 계수가 작은 세립질 지반에 의해 강우의 침투가 방해받을므로 조립질 지반은 불포화 상태를 유지하게 되며 폰딩깊이는 상부 세립질 지반에서만 발생하게 된다. 따라서 폰딩 발생 가능성이 있는 강우강도의 조건은 균질한 하나의 지층의 경우와 같다. 이때 하부지층에서의 물성값은 식 (9)를 만족하도록 함수특성 곡선과 투수계수 함수로부터 몇 번의 시행착오를 통해 $\Delta\theta_2=0.08$, $\psi_{f2}=76.96\text{cm}$, $K_2=0.22\text{cm/hr}$ 로 결정되었다.

이 값을 이용하여 수정 GAML모형을 적용하면 그림 9와 같이 시간에 따른 침투율을 구할 수 있다. 상부층에서

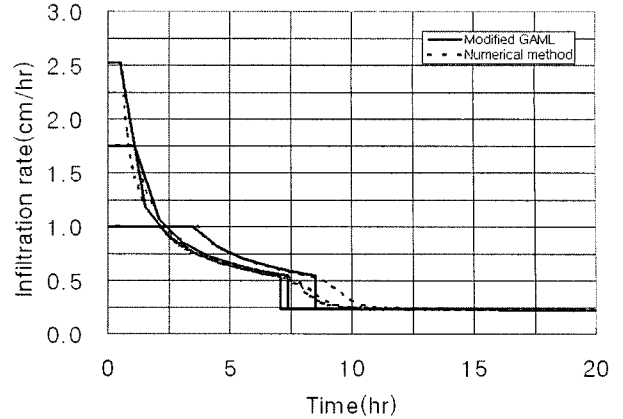


그림 9. 강우강도에 따른 침투 양상

는 강우에 의해 폰딩이 발생하고 이 후 침투율이 감소하는 모습을 보이지만 침윤전선이 지층의 경계면에 도달한 이후로는 일정한 침투율을 나타내고 있다. 이러한 경향은 수치해석결과와도 잘 일치하고 있다. 다만 수정 GAML 모델은 피스톤 형상의 함수분포를 가정하기 때문에 층의 경계면에서 불연속면이 발생하게 된다.

이 경우에도 침윤전선의 진행에 따른 안전율은 구할 수 있지만 상부지층이 침투를 방해하여 하부지층이 불포화 상태를 유지하므로 사면안정에 있어 크게 유리하다.

6. 결론

본 연구에서는 침투가 사면 표면의 안정에 미치는 영향을 평가하기 위해 일차원 침투모형을 이용한 무한사면 해석법에 대하여 논의하였다. 2층으로 구성된 지반에서 재현기간에 따른 강우강도와 지속시간이 고려되는 임의의 강우에 의해 유발되는 얇은 사면파괴의 가능성을 평가하기 위해서 Green-Ampt 모델에 바탕을 둔 수정 GAML 모델을 확장하여 침투거동을 예측하였다. 예측된 침투거동과 비교하기 위하여 일련의 수치해석이 수행되었다.

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 강우강도가 하부층의 포화투수계수보다는 크고 상부층의 포화투수계수보다는 작은 경우에는 포화가 경계층에서부터 발생하여 상부지층을 포화시키며 상향으로 진행하게 된다. 즉, 침윤선이 경계면에서 상부지층으로 반사되는 듯한 현상이 발생하게 되고 결국에는 상부지층이 완전포화 상태에 도달하여 표면에서 폰딩이 발생하게 된다. 이 경우에 대하여 본 연구에서 유도한 방법은 수치해석과 비교하여 근사

한 결과를 주었다.

- (2) 세립질 지반이 조립질 지반의 상부에 있는 경우 투수계수가 작은 세립질 지반에 의해 강우의 침투가 방해를 받으므로 조립질 지반은 불포화 상태를 유지하게 되며 폰딩깊이는 상부 세립질 지반에서만 발생하게 된다. 따라서 폰딩 발생 가능성이 있는 강우강도의 조건은 균질한 하나의 지층의 경우와 같다.
- (3) 연구 결과에 의하면 간략법들은 문제의 단순화를 위한 여러 가정의 도입으로 인하여 사용에 제한성이 존재하지만 적절하게 선택된 입력값을 사용하면 제안된 간략법이 엄밀한 해석법인 유효요소해석과 근사한 합리적인 결과를 주므로 예비설계와 간편해석을 위한 보다 편리하고 빠른 지침을 제공할 수 있다.

부 록

수정 GAML모델은 Green-Ampt 모델과 마찬가지로 내재적인(implicit) 비선형의 식으로, 해를 구하기 위해서는 반복적인 방법을 사용해야 한다. Li 등(1976)은 주어진 시간단계에서 해를 구할 수 있는 방법을 제안했으며 수정 GAML 모델에 이를 적용하면 다음과 같다.

$$F(t) - F(t - \Delta t) = \Delta F = K_2 \Delta t - (E - H) \ln \left(1 + \frac{\Delta F}{F + H - F_1} \right) \quad (i)$$

여기서 F 는 시간단계 시작에서의 기지의 누적침투량이고 ΔF 는 미지의 값이다.

고차항을 생략한 Taylor 급수 전개를 이용하여 ΔF 의 1단계 추정치는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta F_0 = \frac{1}{2} [K_2 \Delta t - 2(F + E - F_1) + \sqrt{\{2(F + E - F_1) - K_2 \Delta t\}^2 + 8K_2 \Delta t (F + H - F_1)}] \quad (ii)$$

보다 정확한 값을 구하는 문제는 식 (iii)의 함수 $f(\Delta F) = 0$ 인 ΔF 를 구하는 문제로 귀결된다.

$$f(\Delta F) = \Delta F - K_2 \Delta t + (E - H) \ln \left(1 + \frac{\Delta F}{F + H - F_1} \right) \quad (iii)$$

$f(\Delta F)$ 의 2차 Taylor 급수 전개로부터 2단계 추정치 ΔF_1 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta F_1 = \Delta F_0 - \frac{f'(\Delta F_0)}{f''(\Delta F_0)} + \sqrt{\left(\frac{f'(\Delta F_0)}{f''(\Delta F_0)} \right)^2 - 2 \frac{f'(\Delta F_0)}{f''(\Delta F_0)}} \quad (iv)$$

$$\text{이때 } f'(\Delta F_0) = \frac{F + E - F_1 + \Delta F_0}{F + H - F_1 + \Delta F_0},$$

$$f''(\Delta F_0) = \frac{H - E}{(F + H - F_1 + \Delta F_0)^2}$$

Li 등(1976)에 의하면 1차 추정치의 최대오차는 8% 정도이고, 2차 추정치의 오차는 0.003% 이하인 것으로 알려져 있다.

참 고 문 헌

1. 조성은, 이승래 (2000), “강우특성을 고려한 표면파괴에 대한 안정성 평가”, *한국지반공학회지*, 제16권, 제5호, pp.107-116.
2. 조성은, 이승래 (2001), “불포화 토사사면의 얇은파괴 해석에 대한 비교 연구”, *한국지반공학회지*, 제17권, 제4호, pp.135-143.
3. Ahmed, Y., Hachum, A., and Jose, F. (1980), “Rain Infiltration into Layered Soils: Prediction”, *Journal of Irrigation and Drainage Division*, ASCE, Vol.106, No.4, pp.311-319.
4. Cho, S. E. and Lee, S. R. (2002), “Evaluation of Surficial Stability fro Homogeneous Slopes Considering Rainfall Characteristics”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.128, pp.756-763.
5. Flerchinger, G. N., F. J. Watts, and G. L. Bloomsburg. (1988), “Explicit Solution to Green-Ampt Equation for Nonuniform Soils”, *Journal of Irrigation and Drainage Division*, ASCE, Vol.114, No.3, pp.561-565.
6. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1995), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley and Sons.
7. 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.
8. 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.
9. Gardner, W. R. (1958), “Some Steady State Solutions of the Unsaturated Moisture Flow Equation with Application to Evaporation from a Water Table”, *Soil Science*, 85, pp.228-232.
10. Green, W. H. and Ampt, G. A. (1911), “Studies of Soil Physics-I. The Flow of Air and Water through Soils”, *Journal of Agricultural Science*, 4, pp.1-24.
11. Li, R., Stevens, M. A., and Simons, D. B. (1976), “Solutions to Green-Ampt Infiltration Equation”, *Journal of Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers*, ASCE, 102(No. IR2), pp.239-248.
12. Lumb, P. (1962), “Effect of Rain Storms on Slope Stability”, *Proceedings of the Symposium on Hong Kong Soils*, Hong Kong, pp.73-87.
13. Lumb, P. (1975), “Slope Failures in Hong Kong”, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 8, pp.31-65.
14. Mein R. G. and Larson C. L. (1973), “Modeling Infiltration during a Steady Rain”, *Water Resources Research*, 9(2), pp. 384-394.
15. Mein, R.G. and Farrel, D.A. (1974), “Determination of Wetting Front Suction in the Green-Ampt Equation”, *Soil Science Society of America Proc.* 38, pp.872-876.
16. Moore, I. D. (1981), “Infiltration Equations Modified for Surface Effects”, *Journal of Irrigation and Drainage Division*, ASCE, 107(No. IR1), pp.71-86.

17. Moore, I. D. and Eigel, J. D. (1981), "Infiltration into Two-Layered Soil Profiles", *TRANSACTIONS of the ASAE*, 24(6), pp.1496-1503.
18. Pradel, D. and Raad, G. (1993), "Effect of Permeability on Surficial Stability of Homogeneous Slopes", *Journal of Geotechnical Engineering.*, Vol.119, No.2, pp.315-332.
19. Sudhakar, M. R. (1996), "Role of Apparent Cohesion in the Stability of Dominican Allophane Soil Slopes", *Engineering Geology*, 43, pp.265-279.
20. van Genuchten, M. T. (1980). "A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898.

(접수일자 2005. 4. 15, 심사완료일 2005. 10. 21)