

불포화 토사사면의 얇은파괴 해석에 대한 비교 연구

A Comparative Study of Surficial Stability Analyses in Unsaturated Soil Slopes

조 성 은*1 Cho, Sung-Eun

이 승 래** Lee, Seung-Rae

Abstract

Shallow slope failures in residual soil during periods of prolonged infiltration are common over the world. This study examines an infinite slope analysis to estimate the influence of infiltration on surficial stability of slopes by the limit equilibrium method. 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. To compare the results with those obtained from the approximate method, a series of numerical analyses were carried out. According to the results, with the use of properly estimated input parameters, the modified approximate method was found to give results that agree reasonably well with those of the more rigorous finite element analyses.

요 지

강우에 의한 잔류토에서의 얇은 사면파괴는 세계적으로 흔히 볼 수 있는 사면파괴의 형태이다. 본 연구에서는 침투가 사면 표면의 안정에 미치는 영향을 평가하기 위해 한계평형법을 이용하는 무한사면 해석법을 연구하였다. 재현기간에 따른 강우강도와 지속기간이 고려되는 임의의 강우에 의해 유발되는 얇은 사면파괴의 가능성을 평가하기 위해서 Green-Ampt 모델에 바탕을 둔 간략법들이 적용되었다. 간략법들에 의한 결과들과 비교하기 위하여 일련의 수치해석이 수행되었다. 그 결과에 의하면 적절하게 선택된 입력값을 사용하면 수정간략법이 더욱 엄밀한 해석법인 유한요소 해석과 근사한 합리적인 결과를 줄 수 있다.

Keywords : Green-Ampt model, Infiltration, Soil-water characteristics curve, Surficial slope stability, Unsaturated soil slope

1. 서 론

국내의 경우 상당수의 사면파괴가 잔류토층이나 균열이 많은 지반층이 장기간의 강우나 집중강우에 노출될 경우 발생하며 주로 잔류토층의 경우에는 파괴면의 깊이가 얇고 사면의 표면과 평행을 이루므로 간단한 평면 무한사면 해석법을 이용하여 안정해석을 수행할 수 있다. 일반적으로 이러한 강우로 인한 사면파괴는 지하수위 상승으로 인하여 사면지반내의 간극수압이

증가하여 파괴가 유발되는 것으로 알려져 있으나, 기존의 연구에 의하면 강우로 인한 지하수위의 상승은 크지 않으며, 반면 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).

지반의 강우에 대한 사면의 안정성 평가를 수행하기

*1 정회원, 한국과학기술원 박사후 연수과정

**2 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

위해서는 실제 사면현장에서 지하수의 상황을 꾸준히 관찰하는 것이 가장 바람직하지만, 이러한 자료를 얻기 어려운 경우에는 이론적인 방법에 의해 지하수의 상황을 예측해야 한다. 이때 유한요소법을 이용하면 대상 지반의 함수특성곡선과 투수계수함수로부터 불포화 지반의 흐름을 비교적 합리적으로 해석할 수 있다.

한편 불포화 지반의 흐름은 일차원 침투이론을 이용하여 간략하게 해석할 수도 있다. 즉, 최소 침투능에 따른 침투깊이를 산정하는 Lumb의 습윤대법(wetting band method), 최대침투능에 따른 침투깊이를 산정하는 Pradel과 Raad의 방법, 또는 일정한 강우강도가 작용할 경우 폰딩(ponding)이 유발되는 경우를 고려한 수정 간략법(조 & 이, 2000)을 이용할 수 있다.

본 연구에서는 강우에 의해 발생하는 얇은파괴에 대한 안정성 평가를 위해 사용되어 온 이들 방법들에 대하여 그 특성을 비교 연구하였고 함수특성이 알려진 지반에 대하여 적용함으로써 그 차이점과 특성을 논의하였다. 그리고 각 방법들의 적용성을 검토하기 위하여 유한요소법을 이용한 수치해석법과 안정성 평가 결과를 비교하였다.

2. 한계평형법에 의한 사면의 얇은파괴에 대한 안정해석

강우의 시작 초기에 사면이 불포화상태라고 가정하면, 강우의 시작으로 인하여 지중에 침윤전선(wetting front)이 발생할 것이며 강우가 지속되면 비는 비포화대를 통하여 사면의 기반암까지 침투하게 된다. 이 때 실제 사면파괴는 비교적 균질한 지반의 경우 대부분 지표로부터 지하 수m 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.

즉 경사가 α 인 반무한 사면에서 가상의 파괴면이 사면과 평행하다고 가정하면 깊이 z_w 에서의 안전율은 그림 1과 같이 식(1)로 계산할 수 있다.

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

여기서, c' 는 점착력, γ_t 는 총단위중량, $(\sigma_n - u_a)$ 는 파괴단면에서의 순수직응력, u_a 는 간극공기압, u_w 는

간극수압이다. 그리고 식(1)은 식(2)와 같은 Fredlund 등(1978)에 의해 제안된 개량된 Mohr-Coulomb 전단강도 식을 이용한다.

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

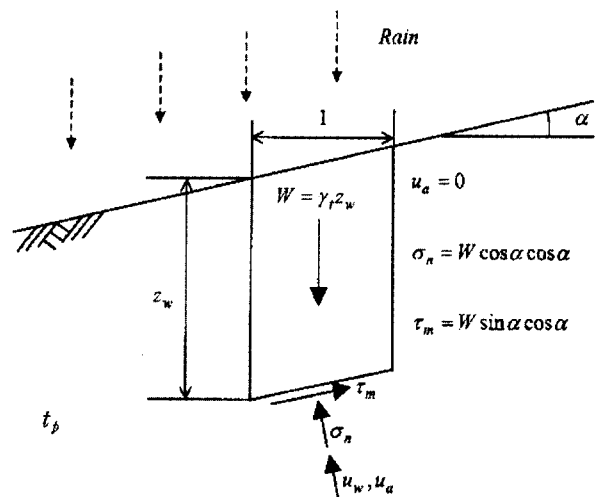
여기서, $(u_a - u_w)$ 는 모관흡수력, ϕ' 는 마찰각, ϕ^b 는 모관흡수력의 증가에 의한 전단강도의 증가를 고려하기 위한 상수이다.

일반적으로 ϕ^b 값은 모관흡수력이 증가함에 따라 감소하나 작은 범위의 모관흡수력 변화에 대해서는 상수로 가정할 수 있다(Fredlund 등, 1987). 그리고 작은 값의 모관흡수력의 경우 ϕ^b 와 ϕ' 의 차이가 크지 않으므로 $\phi^b = \phi'$ 로 가정하면 식(1)은 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

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

3. 일차원 침투이론을 이용한 사면안정 해석법

강우에 의한 사면의 안정 평가시 한계평형법을 이용하여 안전율을 구하기 위해서는 강우에 의한 침투깊이를 합리적으로 예측할 수 있어야 한다. 이를 위해 일차원 침투이론을 바탕으로 강우로 인한 지반 내 침투깊이를 예측하는 방법으로는 Lumb(1962, 1975)에 의해 제안된 습윤대 방법(wetting band method)과 Pradel과 Raad



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

그림 1. 불포화토의 무한사면 해석

(1993)에 의해 제안된 방법, 그리고 수정 간략법(조 & 이, 2000) 등이 있다.

3.1 습윤대 방법(wetting band method)

평평한 지표면에서 포화투수계수 값보다 큰 강우가 작용하면 막 포화된 지반의 침투율은 포화투수계수의 값과 같다고 볼 수 있다. 이때 포화된 지반과 아래 부분의 불포화된 부분사이에 명확한 침윤전선을 가정하면 침윤전선의 침투깊이는 다음과 같이 나타낼 수 있다 (Lumb, 1975).

$$z_w = \frac{K_s t}{n(S_f - S_o)} = \frac{K_s t}{\Delta\theta_i} \quad (4)$$

여기서 n 은 간극비, S_o , S_f 는 각각 초기 상태와 최종 상태의 포화도이며 $\Delta\theta_i$ 는 함수량 결손 그리고 K_s 는 포화투수계수이다. 이 방법은 매우 단순하므로 지하수면이나 불투수층 위에 산정된 침투깊이 z_w 를 중첩하여 침투에 의한 영향을 고려하는 방법으로 1970~1980년대에 많이 사용되었다.

3.2 Pradel과 Raad의 방법

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 다음과 같은 두 가지 조건이 만족될 것을 요구한다. 즉, 강우강도(i)는 지반의 침투능(f)을 초과해야 하고 깊이 z_w 까지 포화되도록 충분히 오래 지속(지속시간 = T)되어야 하므로 다음과 같은 최소조건을 만족해야 한다.

$$T_{\min} = \frac{\Delta\theta_i}{K_s} \left[z_w - \psi_f \ln \left(\frac{\psi_f + z_w}{\psi_f} \right) \right] \quad (5a)$$

$$i_{\min} = f = \frac{\Delta\theta_i}{T_{\min}} \left[z_w - \psi_f \ln \left(\frac{\psi_f + z_w}{\psi_f} \right) \right] \left(\frac{z_w + \psi_f}{z_w} \right) \quad (5b)$$

여기서 ψ_f 는 침윤전선에서의 모관흡수력이다.

3.3 수정된 간략법

깊이에 따라 일정한 초기조건을 가정한 균일사면에

서 일정한 강우강도에 의한 침투를 모델하기 위해서 그림 2에 요약된 바와 같이 Green-Ampt 모델에 바탕을 둔 2단계 모델(Mein과 Larson, 1973)을 이용할 수 있다. 이 모델은 초기에 강우강도가 흙의 침투능(infiltration capacity) 보다 작은 경우에 적합하다. 조 & 이(2000)는 이 모델을 바탕으로 Pradel과 Raad에 의해 제안된 간편법의 강우 경계조건의 부적절함을 수정하여 일정한 강우강도가 지표면에 경계조건으로 작용할 때 임의의 깊이까지 완전포화될 가능성을 평가하여 얇은 파괴에 대한 안정성을 평가할 수 있는 방법을 제안하였다.

침투의 초기에는 강우가 지반으로 모두 침투할 수 있지만 침투능이 강우강도와 같아지게 되면 지표면에서의 수압이 0이 되면서 폰딩(ponding)이 발생한다. 이때 시간에 대해 일정한 강우강도를 가정하면 Green-Ampt 모델로부터 폰딩(ponding) 발생시간은 다음과 같이 산정된다.

$$t_p = \frac{F_p}{i} = \frac{K_s \Delta\theta_i \psi_f}{i(i - K_s)} \quad (6)$$

여기서 F_p 는 폰딩이 일어날 때까지의 누적침투량이다.

또한 이에 대응하는 침윤전선의 깊이는 다음과 같이 강우강도의 함수로 표현된다.

$$z_w = \frac{K_s \psi_f}{(i - K_s)} \quad (7)$$

그리고 폰딩(ponding) 발생 후 침투능의 감소는 누적 침투량(F)에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = K_s \left[1 + \frac{\psi_f \Delta\theta_i}{F} \right] \quad (8)$$

한편 침윤전선에서의 모관흡수력 ψ_f 의 값은 다음과 같이 계산할 수 있다(Mein등, 1974).

$$\psi_f = \int_0^{\psi_i} K_r(\psi) d\psi \quad (9)$$

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

임의의 깊이까지 완전포화되기 위한 강우조건은 식(6)과 식(7)로부터 구할 수 있으며 이때의 안전율은 식(1) 혹은 식(3)으로 계산할 수 있다.

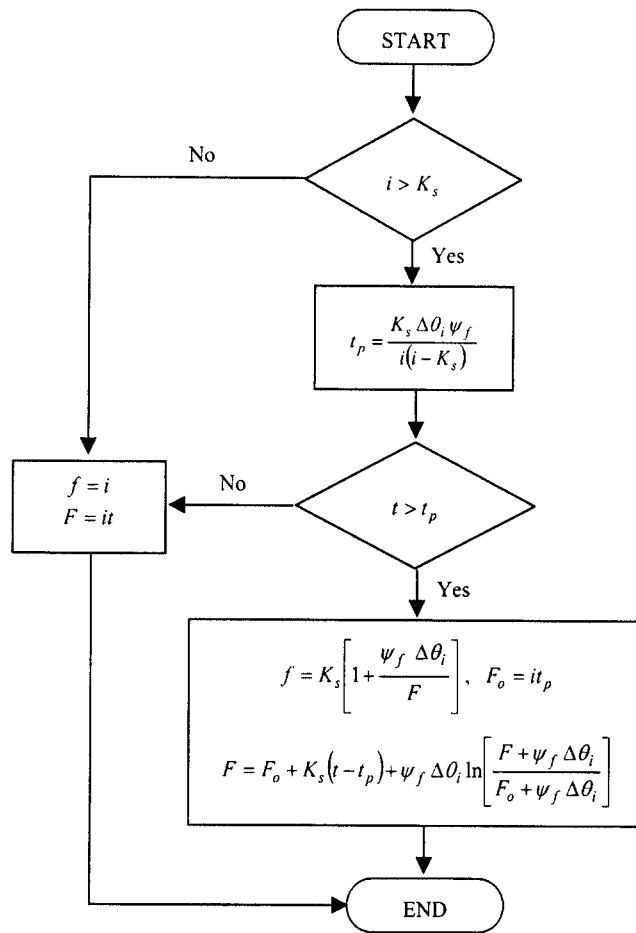


그림 2. Mein과 Larson 모델

3.4 침투율에 따른 비교

앞서 설명된 세가지 방법은 모두 1차원 연직 흐름에 기초를 둔 간략해로 그림 3과 같이 명확한 침윤전선이 존재하는 피스톤 모양의 함수량분포를 가정하고 있다. 그리고 이 방법들은 침윤전선에서의 일정한 모관흡수력 ψ_f , 그리고 침윤전선 위 부분에서의 함수량 결손 $\Delta\theta_i$ (moist deficit, 습윤상태가 되기 전과 후의 체적함수량 차이로 표현)와 투수계수 K_s 가 일정하다는 가정으로부터 유도되는 Green-Ampt 모델을 바탕으로 하고 있지만 침투량을 계산하기 위하여 각각 다른 침투율을 가정하여 사용하고 있다. 또한 침투모델에 이용된 변수들의 값은 직접 측정하거나 경험적으로 구할 수 있으며 이에 대한 자세한 내용은 조 & 이(2000)에 의해 기술되었다.

한편 주어진 조건하에서 지반 내 임의면을 통해서 침투할 수 있는 최대율을 침투능(infiltration capacity)이라 하며 침투가 진행함에 따라 그 값은 시간에 따라 변하고

결국 최소값(개략적으로 포화투수계수값과 동일)에 접근할 때까지 감소한다(Espinoza, 1999). 그러나 Pradel과 Raad의 방법은 그림 4와 같이 강우강도에 의한 최대 침투능을 이용하여 침투깊이를 계산하며 Lumb의 습윤대

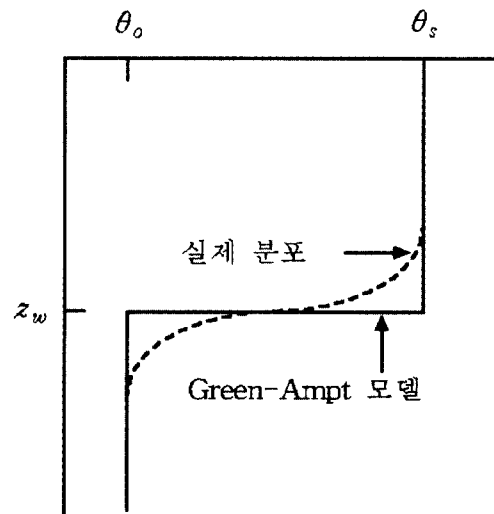


그림 3. 깊이에 따른 함수비 분포

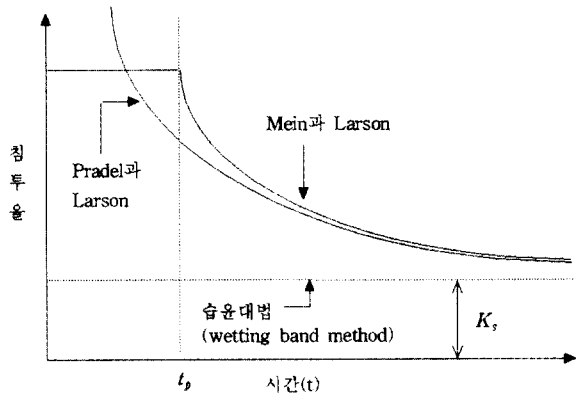
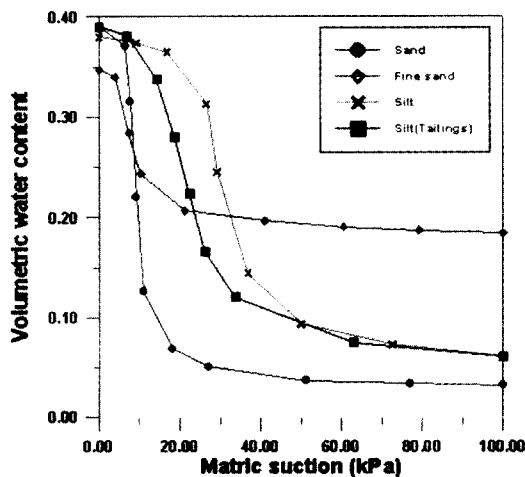


그림 4. 일차원 침투모델의 시간에 따른 침투율

방법은 포화투수계수값을 침투율로 가정하여 침투깊이를 계산한다. 반면 실제 지반의 경우에는 불포화 상태의 침투능이 초기조건과 강우강도에 따라 다르며, 특히 폰딩이 일어날 가능성이 있으며 K_s 값보다는 항상 크고, 침투능이 한계값인 K_s 값으로 수렴하기까지는 상당한 시간이 소요된다. 따라서 Lumb의 습윤대방법은 장기간의 강우로 인해 이미 지반이 거의 포화된 상태에서 포화투수계수 값보다 큰 강우가 작용하는 경우에는 적용이 가능하나 실제 강우의 강도를 고려하지는 못한다. 그리고 Pradel과 Raad의 방법은 폰딩이 일어나는 경우를 고려하지 못한다. 이에 반해 Mein과 Larson의 모델을 이용하는 수정된 간략법은 실제 강우강도 및 포화상태에 따라 침투율이 결정될 수 있다.

4. 유한요소법을 이용한 해석과의 결과 비교

일차원 침투 해를 이용하는 습윤대 방법, Pradel과



(a) 함수 특성 곡선

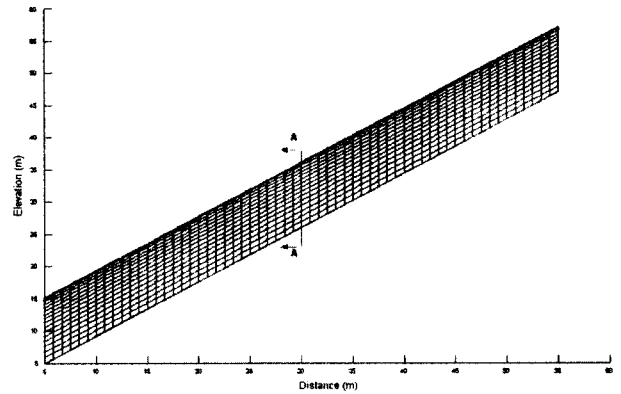


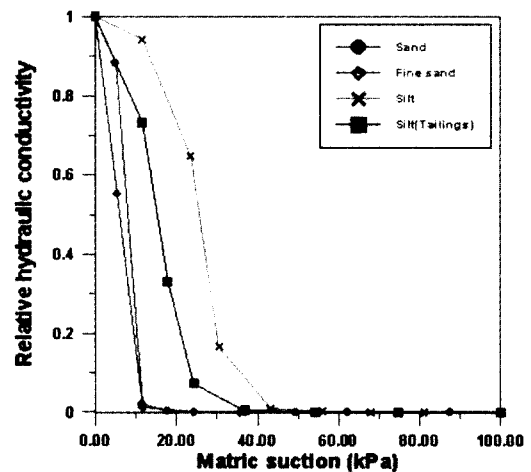
그림 6. 해석 대상 사면

Raad 방법, 그리고 수정된 간략법의 적용성을 알아보기 위하여 2차원 유한요소해석 방법을 이용하는 경우와 그 결과를 비교하였다. 침투해석을 위해서는 2차원 불포화 흐름해석이 가능한 상용 프로그램인 SEEP/W를 사용하였고 사면안정 해석을 위해서는 불포화 상태를 고려할 수 있는 한계평형해석 상용 프로그램인 SLOPE/W(Geo-Slope International, 1994)를 사용하였다.

여러 지반조건에 대한 침투해석을 위해 문헌에 이미 발표되어 SEEP/W 프로그램에 내장된 그림 5(a)와 그림 5(b)의 함수특성곡선과 상대투수계수곡선을 사용하였다. 그리고 해석대상은 그림 6과 같이 깊이가 10m인 균질한(homogeneous) 사면으로 경사각이 30°와 40°인 경우로 가정하였다. 해석을 위한 초기상태의 모관흡수력은 사면내에서 30 kPa로 일정하다고 가정하였다.

4.1 간략법들의 적용

일차원 침투모델을 이용하여 주어진 네종류의 지반



(b) 상대투수계수 함수

그림 5. 해석지반의 수리학적 특성

표 1. 간략법에 이용된 입력변수들

흙의 종류	투수계수 함수		$\Delta\theta_i$	Ψ_f (cm)	K_s
	α'	β			
Sand	14.7055	7.0456	0.35	70.6	$5.4 \times 10^{-5} m/s$
Fine sand	29.5709	5.7925	0.15	58.5	$4.3 \times 10^{-6} m/s$
Silt	0.00478	5.7307	0.14	247.7	$2.5 \times 10^{-7} m/s$
Silt(Tailings)	0.1638	4.3486	0.25	161	$5.8 \times 10^{-8} m/s$

에서의 침투거동을 예측하기 위한 입력상수값들을 추정하기 위하여 주어진 함수특성곡선과 상대투수계수곡선을 사용하였다. 그 결과들은 표 1에 주어졌다. 함수량 결손 $\Delta\theta_i$ 는 그림 5(a)로부터 구하였으며 식(9)로부터 침윤전선에서의 모관흡수력을 추정하기 위해 식(10)과 같은 Gardner(1958)의 식을 이용하여 투수계수함수식을 곡선맞춤(curve fitting)법으로 구하였다.

$$K_r = \left[1 + \alpha' \left(\frac{u_a - u_w}{\gamma_w} \right)^{\beta} \right]^{-1} \quad (10)$$

여기서 γ_w 는 물의 단위중량이며 α' 와 β 는 상수이다. 강우강도에 따른 초기 폰딩(ponding) 발생 시간과 대응하는 침윤전선의 깊이를 서울지방의 확률강우강도(이원환, 1993)와 함께 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 그림 7의 결과에 의하면 모래로 이루어진 사면의 표면에 폰딩(ponding)이 발생하기 위한 최소요건을 나타내는 곡선이 최대강우강도를 나타내는 곡선(재현기간 50년)의 위에 위치하므로 모래의 경우에는 재현기간 50년 이하의 강우에 의해 포화되지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 모래가 강우강도에 비해 상대적으로 큰 배수

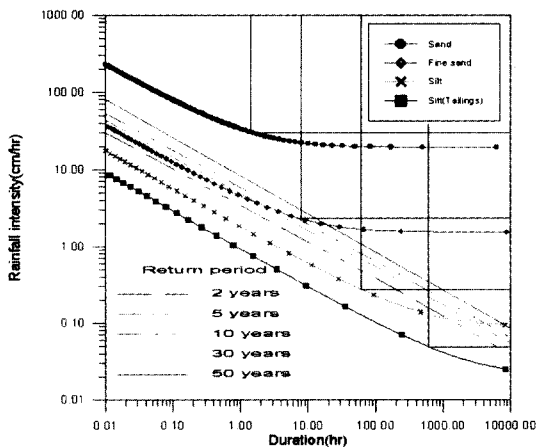


그림 7. z_w 까지 포화되기 위한 최소요건들

표 2. 유한요소 해석을 위한 경계조건과 무한사면 해석으로 계산된 안전율 ($z_w=120cm$)

흙의 종류	t_p (hours)	i_{min} (cm/hr)	안전율	
			$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 40^\circ$
Fine sand	7.8	2.3	1.62	1.19
Silt	60.9	0.275	2.26	1.83
Silt(Tailings)	613.6	0.0489	1.86	1.48

능력을 가지고 있기 때문이다. 반면, 투수계수가 작은 실트질 흙일수록 특정깊이 z_w 까지 포화시킬 수 있는 강우강도의 범위가 확대됨을 알 수 있다.

깊이 1.2m까지 지반이 포화되는 경우의 안전율은 침윤전선에서의 모관흡수력을 고려하여 식(3)으로부터 구할 수 있으며 그 결과를 표 2에 나타내었다. 이때 안전율을 구하기 위하여 모래질 흙의 경우 단위중량 $\gamma_t = 19 kN/m^3$, 점착력 $c' = 0$, 마찰각 $\phi' = \phi^b = 35^\circ$, 실트질 흙의 경우 단위중량 $\gamma_t = 19 kN/m^3$, 점착력 $c' = 31 kPa$, 마찰각 $\phi' = \phi^b = 25^\circ$ 를 가정하였다.

4.2 수치해석의 적용

일차원 침투이론을 이용한 결과와 비교하기 위하여 4.1절과 동일한 조건아래 일련의 수치해석을 수행하였다. 사용된 요소망은 그림 6과 같으며 불포화 흐름을 해석하기 위해 그림 5(a)의 함수특성곡선과 그림 5(b)의 투수계수자료를 이용하였다. 해석영역의 양쪽 측면과 바닥은 수직인 흐름이 발생하지 않는 불투수 경계조건을 지정하였고 사면의 표면에는 강우를 모사하기 위해

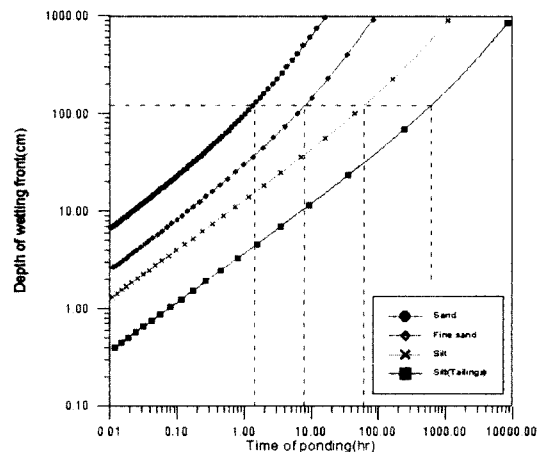


그림 8. 폰딩시간에 대응하는 침윤전선의 깊이

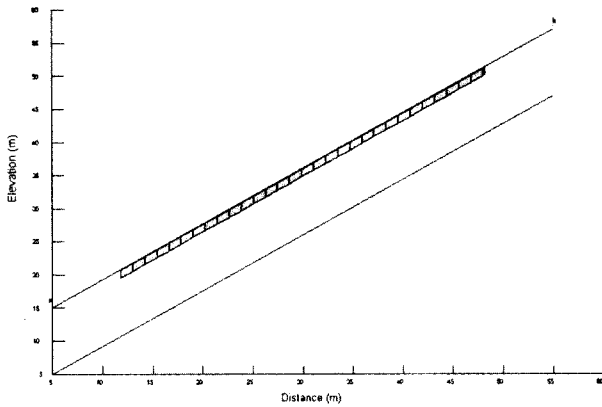


그림 9. SLOPE/W를 이용한 무한사면 해석

일정한 단위유량을 경계조건으로 가하였다. 이때 지표에서의 유출을 모델링하기 위해 해석과정에서 표면에서의 간극수압이 0보다 크지않도록 경계조건을 지정하였다. 해석에 사용한 강우조건은 그림 7에 표시된 바와 같이 깊이 1.2m까지 지반을 포화시키기 위한 최소조건을 적용하였으며 표 2에 나타내었다.

강우의 침투로 인한 침윤전선의 진행을 정량화하기 위해 그림 9와 같이 지표로부터 1.2m의 깊이에서 사면에 평행한 평면과 피면에 대한 안전율을 시간에 따라 한계평형법을 이용하여 구하였다. 이때 강우가 시작된 후 특정시간에서의 간극수압의 분포는 SEEP/W를 이용한 유한요소해석에 의해 구하고 그 결과를 사면안정해석 프로그램인 SLOPE/W의 입력으로 사용하였다. 평면과 피면을 이용한 무한사면 해석모델을 검증하기 위하여 초기 모관흡수력 조건에서 그 결과를 식(3)에 의한 안전율과 비교하였으며, 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

해석은 세종류의 흙에 대하여 각각 경사각이 30°와 40°인 경우에 대하여 수행하였다. 모래의 경우는 앞서 4.1절에서 언급된 바와 같이 폰딩(ponding)이 발생하지 않으므로 해석에서 제외시켰다.

4.3 결과의 비교

SLOPE/W를 이용한 사면안정해석에 의해 구해진 안전율을 그림 10에 간략법에 의해 얻어진 결과와 함께 나타내었다. 이들 결과로부터, 실트질 흙의 경우 사면경사가 40°일 때 다소 정확도가 떨어지는 결과가 얻어졌지만 수정된 간략법이 여러 가정을 도입하여 문제를 단순화 했음에도 불구하고 침윤전선의 진행을 예측하는데 있어 비교적 좋은 결과를 주는 것을 알 수 있다.

그림 10의 결과에 의하면 2차원 유한요소법을 이용한 해석에서는 완만한 사면보다 경사가 급한 사면에서 침윤전선의 진행이 빠른 것을 알 수 있으나 간략법은 일차원 침투이론에 근거하므로 사면의 경사를 고려할 수 없다. 그러나, 실제 사면에서의 경우를 생각해보면 급경사면에서는 침투를 위해 강우가 표면에 작용하는 시간이 표면유출에 의하여 영향을 받을 수 있다는 사실도 함께 고려되어야 한다. 게다가, 일반적으로 침윤전선 위에서의 투수계수는 흙속에 갇힌 공기의 영향으로 포화투수계수값보다 작으며 대략 포화투수계수의 약 0.5배의 값을 사용하는 것이 적절하다고 알려져 있으므로(Bouwer, 1966), 실제 현장에서의 관측결과와 수정된 간략법에 의한 예측결과보다 침윤전선이 느리게 진행할 것으로 생각된다. 이러한 이유들로 사면경사에 의한 영향이 실제현장에서의 적용에서는 최소화될 수 있을 것으로 생각되며 본 연구에서 사용된 간략해가 여전히 유효하리라 여겨진다.

한편, 그림 10에서 알 수 있듯이 Pradel과 Raad의 방법은 침윤전선이 1.2m까지 진행하는데 다른 방법들에 비해 훨씬 적은 시간을 예측하므로 다른 방법들에 비해 지나치게 보수적인 결과를 주는 것으로 판단된다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 최대침투능으로부터 침투량을 산정하기 때문이다.

습윤대 방법은 강우강도의 영향을 고려하지 못하고 포화투수계수 K_s 와 함수량결손 $\Delta\theta$ 에 따라 깊이 120cm 까지 소요되는 시간이 결정되며 표 1의 값으로부터 식 4에 의해 예측된 시간은 fine sand가 11.6시간, silt가 186.7시간, silt(tailings)가 1436.8시간으로 Pradel과 Raad의 방법과 수정된 간략법에 비해 훨씬 큰 값을 예측하고 있다. 이러한 결과는 앞서 설명한대로 습윤대 방법이 포화된 지반의 침투능(K_s)을 이용하여 침투량을 예측하기 때문이다.

본 연구에서 수행된 해석들은 균일한 사면에 대해서만 제한적으로 수행되었지만 자연사면의 경우 실제 지층의 분포는 일반적으로 균일하지 않고 여러 특성이 다른 층으로 구성되어 있다. 일반적으로 이러한 층의 존재는 침투를 지연시키는 것으로 알려져 있다(Williams 등, 1998). 즉, 점토층은 작은 투수계수로 인하여 침투를 지연시키며, 모래층은 큰 간극으로 인한 큰 공기함입치(air entry value) 때문에 침투의 지연시키게 된다. 그러므로 균일한 지반을 대상으로 고안된 침투모델의 경우 특별

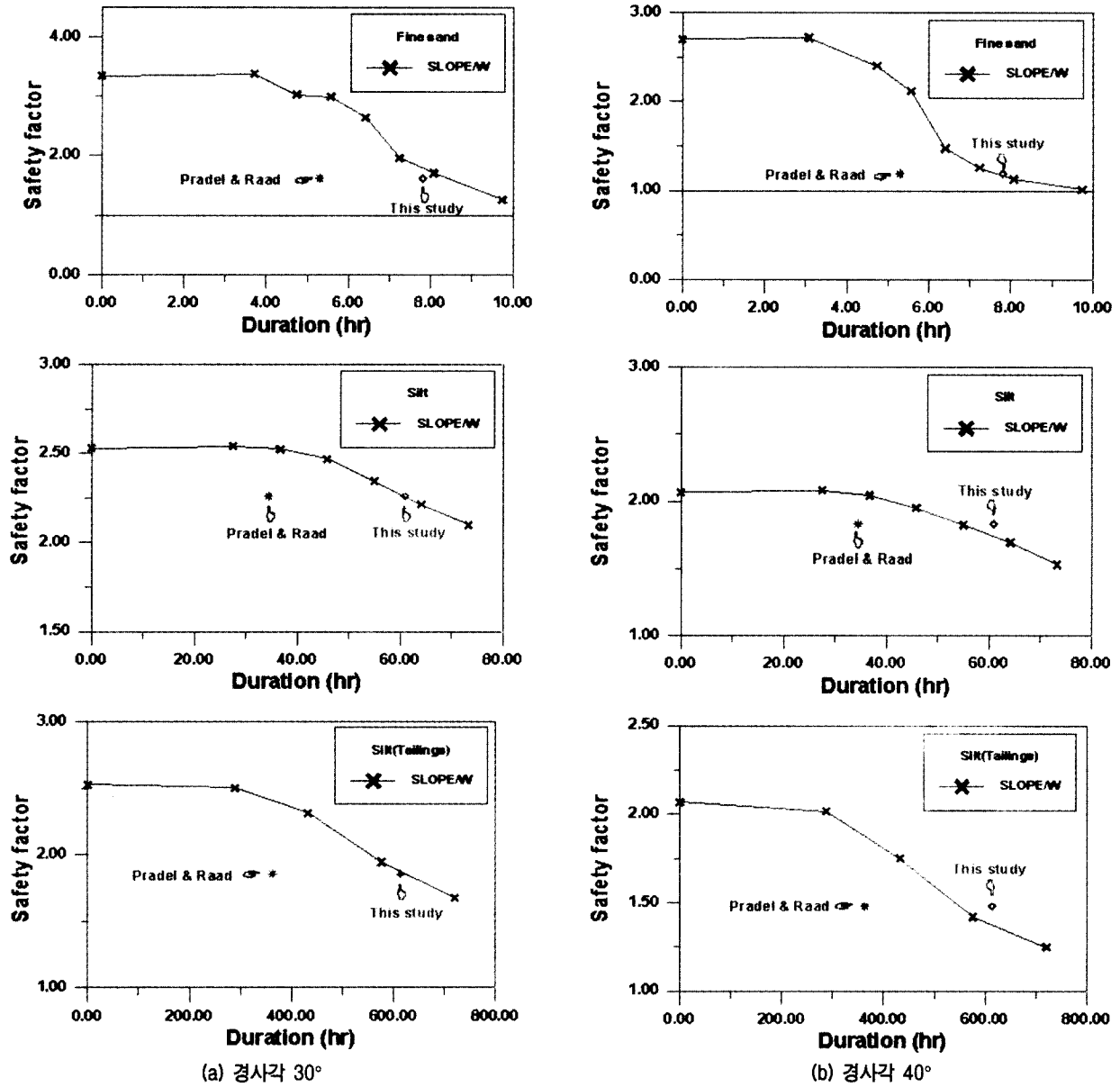


그림 10. 수치해석과 간략법의 결과 비교

한 경우를 제외하고는 대체로 실제 현장에서의 관측값보다 보수적인 침투량(과다한 침투량)을 예측하게 된다.

5. 결론

강우의 침투로 인한 사면의 표면파괴는 침윤전선의 사면 안으로의 진행에 기인한다. 이러한 현상은 침윤전선이 진행함에 따라 전단강도에 기여하는 모관흡수력이 사면의 파괴를 유발할 만큼 감소하기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 사면의 표면안정에 대한 침투의 영향을 평가하기 위해서 사용되는 일차원 침투이론을 바탕으로 하는 간략법들에 대하여 그 특성을 비교 연구하

고 수치해석을 이용하는 방법과 그 해석 결과들을 비교하였다.

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Pradel과 Raad 방법은 누적침투량을 계산할 때 실제 발생하는 일정(uniform)한 강우강도에 의해 계산하지 않고 단순히 시간에 따라 변화하는 침투능만을 바탕으로 계산하므로 수정된 간략법에 비해 과도하게 보수적인 결과(과다한 침투량)로 인한 안전율의 과소평가를 준다. 이에 비해 습윤대 방법은 강우강도의 영향을 고려하지 못하고 침윤전선의 진행이 포화투수계수와 습윤미흡량에 따라 결정된다. 따라서

습윤대 방법은 완전 포화된 지반의 침투능을 이용하여 침투량을 예측하기 때문에 다른 방법들에 비해 훨씬 느린 침윤전선의 진행을 예측한다.

- (2) Mein과 Larson의 모델을 이용하는 수정된 간략법의 적용성을 수치해석 결과와의 비교를 통하여 검토하였다. 이로부터 다른 간편법들에 비해 수정간략법이 합리적인 경계조건의 적용으로 인하여 엄밀한 해석법인 유한요소해석 결과에 보다 근사한 안정성 평가 결과를 얻을 수 있었다. 이 방법은 특히 피스톤 모양의 침윤전선에 대한 가정이 보다 유효한 모래질 흙에서 적용성이 우수함을 알 수 있다.
- (3) 간략법들은 문제의 단순화를 위한 여러 가정의 도입으로 인하여 사용에 여러 제한성이 존재하지만, 그럼에도 불구하고 수리학적 특성을 바탕으로 선택된 입력변수를 사용하고 각 방법의 특성을 고려하여 적절한 상황에 적용하면 비용과 노력이 많이 드는 복잡한 해석을 수행하지 않고도 임의의 깊이에 대하여 여러 강우조건들에 따른 사면의 파괴 가능성 평가를 가능하게 하므로 예비설계와 간편해석을 위한 보다 편리하고 빠른 지침을 제공할 수 있다.

참 고 문 헌

- 이원환(1993), 수문학, 문운당, pp.48-50.
- 조성은, 이승래(2000), "강우특성을 고려한 표면파괴에 대한 안정성 평가", 한국지반공학회지, 제16권, 제5호, pp.107-116.
- Bouwer, H. (1966). "Rapid field measurement of air entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis", *Water Resour. Res.*, 2(4), 729-738.
- Espinoza, R. D. (1999). *Infiltration. The handbook of groundwater engineering*, CRC Press LLC.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., and Widger, R. A. (1978). "The shear strength of unsaturated soils", *Canadian Geotechnical Journal*, 15, 313-321.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., and Gan, J. K. M. (1987). "Nonlinearity of strength envelope for unsaturated soils", *Proceedings of 6th International Conference on Expansive soils*, New Delhi, 49-54.
- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H.(1995), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons Inc.
- 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, 228-232.
- 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, 1-24.
- Lumb, P.(1962), "Effect of rain storms on slope stability", *Proceedings of the Symposium on Hong Kong Soils*, Hong Kong, 73-87.
- Lumb, P.(1975), "Slope failures in Hong Kong", *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 8, 31-65.
- Mein R. G., and Larson C. L. (1973). "Modeling infiltration during a steady rain", *Water Resources Research*, 9(2), 384-394.
- Mein, R.G., and Farrel, D.A. (1974). "Determination of wetting front suction in the Green-Ampt equation", *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38, 872-876.
- Ng, C. W. W., and Shi, Q. (1998). "Numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage", *Computer and Geotechnics*, 22(1), 1-28.
- Pradel, D., and Raad, G. (1993). "Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes", *J. Geotech. Engrg. ASCE* 119(2), 315-332.
- SEEP/W (Version 4.23) for finite element seepage analysis and SLOPE/W for slope stability analysis. (1999). *Geo-slope International*, Canada.
- Williams, J. R., Ouyang, Y., Chen, J.-S., and Ravi, V. (1998). *Estimation of infiltration rate in the vadose zone: compilation of simple mathematical models. Volume II*, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. EPA, Cincinnati, Ohio 45268, EPA/600/R-97/128b.

(접수일자 2001. 1. 15)