

불포화 무한사면 안전율의 수정방정식에 대한 연구

A Study on Analytical Solution of Unsaturated Infinite Slope Stability

채 유 미¹ Chae, Yu-Mi 김 재 홍² Kim, Jae-Hong
정 영 훈³ Jeong, Young-Hun 김 태 현⁴ Kim, Tae-Heon

Abstract

In conventional analytical solutions for rainfall-induced soil slope stability, the Green-Ampt (1911) equation for estimating the saturation depth and the Skempton & DeLory (1957) equation for calculating the infinite slope shallow failure were compared with the numerical analysis to confirm the error. In the simple evaluation of the reason of soil slope instability due to rainfall using the conventional equations, there are many errors and, overestimation or underestimation of the calculation results. In this study, the equation consisting of the results obtained from infiltration analysis on unsaturated soil slope is proposed by applying the average range of the strength parameters of the granite weathered soils, and its reliability is verified by comparing with the numerical analysis results. The developed equation can be used easily in various fields for the estimation of slope safety factor by checking the rainfall duration and saturation depth.

요 지

기준에 사용하고 있는 포화깊이를 추정하는 Green-Ampt (1911) 방정식과 무한사면 얽은파괴를 계산하는 Skempton & DeLory(1957) 방정식을 수치해석과 비교하여 오류를 확인하였다. 실제 비탈면에서 강우로 인한 사면 불안정성의 근본적인 원인을 방정식으로 간단하게 평가하기에는 계산 결과에 대한 오류와 과대 또는 과소평가가 되고 있는 부분들을 많이 포함하고 있다. 본 연구에서는 국내 화강풍화토 강도정수의 평균범위를 적용하여 불포화 침투해석을 고려한 방정식을 제안하고 수치해석 결과와 비교하여 신뢰성을 검증하였다. 비탈면의 붕괴에 위협을 주는 강우지속시간과 포화깊이를 확인하면서 사면 안전율 방정식을 여러 분야에서 쉽게 사용할 수 있도록 제안하였다.

Keywords : Infinite soil slope, Analytical equation, Unsaturated seepage analysis, Factor of safety

1. 서 론

우리나라 강우의 특성은 강우량은 늘어남에도 강우 일수는 줄어들며 집중호우가 내리고 있다. 또 대부분 사

면파괴는 이 기간에 일어나고 있으며, 국내 81개 관측소 기준으로 2011년에는 자연비탈면붕괴 18개소(22.2%), 토석류 41개소(50.6%), 인공사면 붕괴 22개소(27.2%)로 발표되었다(Lee et al., 2014). 2011년 변경하기 전 비탈

1 정희원, 동신대학교 토목공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Dongshin Univ.)

2 정희원, 동신대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Dongshin Univ., Tel. +82-61-330-3139, woghd@dsu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 정희원, ㈜우빈기술공사, 기사 (Member, Engineer, Wonbin Engrg. Co., LTD.)

4 정희원, ㈜건설품질시험원, 과장 (Member, Researcher, Construction Quality Testing Center Co., LTD.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

면 설계기준은 지하수위를 사면 지표면까지 상승시켜서 사면의 안전율을 산정하며 아직까지는 대부분 설계기준에 사용되어지고 있다. 그러나 지하수위를 포화지반으로 가정하고 난 후 사면안정해석을 하는 것은 비현실적이고 과도한 공사를 유발시킬 수 있다. 비탈면 안정성 평가에서는 지하수위의 상승에 대한 영향은 대부분 받지 않는다. 비탈면은 강우침투로 인해 포화깊이에 도달하면 얇은 사면파괴나 표층파괴가 빈번하게 발생한다. 지표면부분까지 포화라고 가정하는 비현실적인 보수적 설계 기준이라도 여전하게 강우에 따라 사면의 붕괴는 자주 발생하기 때문에 침투로 인한 사면안정성 해석을 통한 효과적인 설계가 이루어질 수 있도록 기준은 변경 되었다. 강우의 침투를 고려하는 사면안정해석을 하는 경우에 현장 지반조사 결과, 지형조건과 배수조건, 설계계획빈도에 따라 해당하는 지역의 강우강도 그리고 강우지속시간 등을 고려한 사면안정해석을 실시하고, 그 해석한 결과를 적용한 설계정수와 해석방법을 정확하게 명시하고 안전율 1.3을 적용한다(MLTAMA, 2011). 국내에서 무한사면 안전율을 계산하기 위해 일반적으로 사용하는 방정식은 Skempton and DeLory(1957) 제안식을 사용한다. 추가적으로 강우강도와 지속시간에 따른 Green-Ampt(1911) 제안식을 사용하면 강우로 인한 포화층이 두께를 계산할 수 있다. 이러한 이론적인 방정식들의 안전율 계산과 강우로 인한 포화두께 예측들은 실제 비탈면에서 발생하고 있는 현상과 많은 오차가 발생하고 있다. Skempton and DeLory(1957) 제안식 Eq. (1)은 강우에 의한 포화깊이를 가정해야 하며, Green-Ampt(1911) 방정식 Eq. (2)은 제안식은 강우지속시간이 길어질수록 포화깊이가 과소평가되고 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 불포화 침투해석과 한계평형해석으로 비탈면 안정성에 영향을 끼치는 요소들을 적용하여 수치해석 결과와 비교분석 후, 불포화 침투해석에 영향을 주는 요소들을 방정식에 포함을 시켜 신뢰성 있는 방정식을 제안하고자 한다.

2. Skempton & DeLory(1957) 제안식

Skempton and DeLory(1957) Eq. (1)은 무한사면에서 포화두께까지의 사면파괴 안전율을 계산하며, c' 는 점착력, r_t 는 습윤 밀도, r_w 는 물의 밀도, z_w 는 사면표층의 포화두께, α 는 사면이 이루고 있는 경사각, ϕ 는 내부마찰각이다. 또한 수치해석 프로그램과 Skempton and DeLory

(1957) 제안식을 사용해서 안전율을 구한 결과 Fig. 1처럼 안전율은 포화깊이에 크게 영향을 받으면서, 시간이 지남에 따라 초반부에는 안전율의 차이가 상당하지만 포화깊이가 깊어질수록 안전율이 급감하는 것을 볼 수 있었다. Green-Ampt(1911) 방정식 Eq. (2)은 강우지속시간에 따른 비탈면의 포화두께를 계산하는 식이며, μ 는 초기체적함수비에서 완전 포화될 수 있는 체적함수비의 차이이며, $\theta_s - \theta_i$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 θ_s 는 포화체적함수비, θ_i 는 초기체적함수비이다. S는 모관흡수력, T_w 는 강우지속시간, k_w 는 포화 투수계수이다. Green-Ampt(1911) 방정식은 Fig. 2처럼 포화투수계수를 사용하면서 모관흡수력의 크기가 수식에 계속 영향을 주기

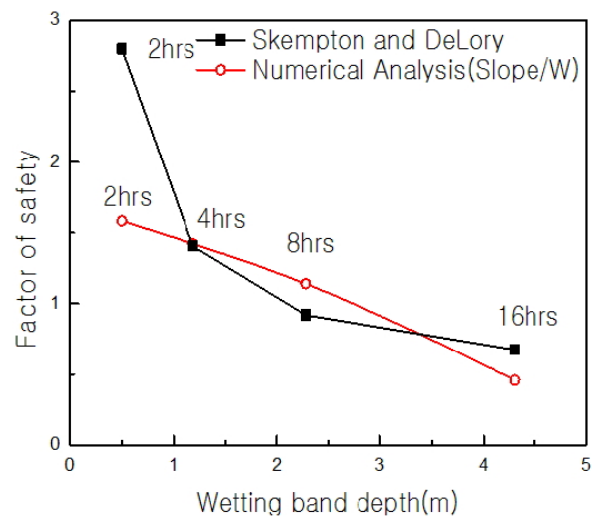


Fig. 1. Comparison of analytical solution and numerical analysis for factor of safety (Kim et al., 2013)

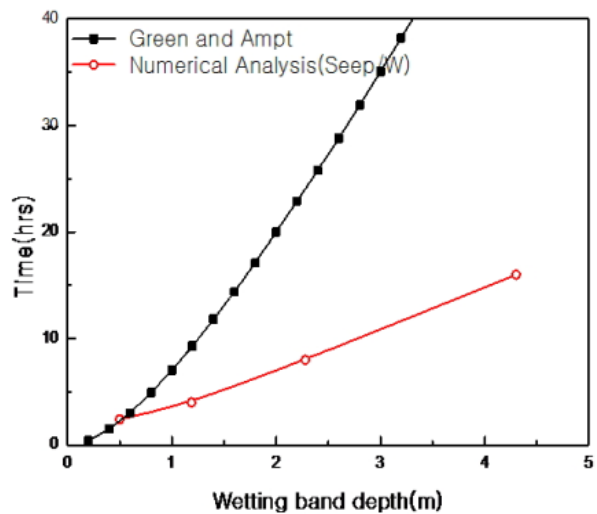


Fig. 2. Comparison of analytical solution and numerical analysis for wetting band depth (Kim et al., 2013)

때문에 수치해석과 비교해보면 강우지속시간이 길어질 수록 포화깊이 차이가 커지는 것을 볼 수 있다. 문헌에서 포화깊이가 커지더라도 제안식이나 수치해석의 안전율은 비슷하게 유지되고 있어, 강우지속시간에 따른 포화깊이와 안전율의 연관성을 설명하기 어려운 부분이 발생한다(Kim et al., 2013).

$$F_s = \frac{c' + (\gamma_t - \gamma_w) z_w \cos^2 \alpha \tan \phi'}{\gamma_t z_w \sin \alpha \cos \alpha} \quad (1)$$

$$T_w = \frac{\mu}{k_w} \left[z_w - S \cdot \ln \left(\frac{S + z_w}{S} \right) \right] \quad (2)$$

3. 지반특성과 경계조건

수치해석에 사용한 무한사면은 경사가 30° 대상인 지반이며, 두께는 18.03m로 가정하였다. 또한 점착력(c) 5~15kPa, 내부마찰각(ϕ) 25~33°, 단위중량(γ_t) 15~19 kN/m³, 모관흡수력(S) 0.6~1m, 평균적인 화강풍화토 강도정수를 사용하였으며, 강우강도는 $1.5 \times 10^{-5} m/sec$, 강우지속시간 6시간까지 적용하였다. 수치해석 시 필요한 입도분포곡선과 함수특성곡선의 계수들은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Soil properties for numerical analysis

Estimate hydraulic conductivity function		
Saturated permeability (m/s)		2.5×10^{-6}
Fredlund and Xing	α (kPa)	57.63
	n	1.22
	m	0.18
Saturated Vol. Water content (m^3/m^3)		0.435
Residual Vol. Water content (m^3/m^3)		0.083

3.1 사면 안전율 계산

Skempton and DeLory(1957) 제안식과 Green-Ampt(1911) 방정식을 통하여 안전율을 찾아보았다. 일반적인 화강풍화토에서 모관흡수력은 대략 0.8m 정도로 측정되지만, 세립분에 따라 1m까지 상승하거나 0.6m로 낮아질 수도 있기 때문에, 1m, 0.8m, 0.6m 로 나누어서 Green-Ampt(1911) 방정식을 이용하여 강우지속 6시간까지의 포화깊이를 계산하였다. 평균적인 화강풍화토의 입도분포곡선과 함수특성곡선의 계수들을 적용하였다. 그 결과 모관흡수력에 따른 강우시간별 포화깊이를 Table 2에 나타내었다. Green-Ampt(1911) 방정식에서 구한 포화깊이를 사용하여 Skempton and DeLory(1957) 제안식에 적용하여 모관흡수력에 따른 안전율은 Table 3과 같다.

3.2 침투해석(SEEP/W)과 한계평형해석(SLOPE/W)

사면안정해석 프로그램으로서 GeoStudio(2016)을 사

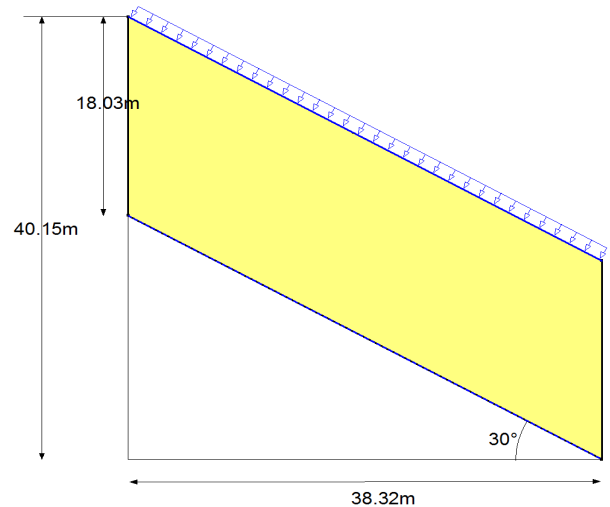


Fig. 3. Geometry of Infinite slope for limit equilibrium analysis

Table 2. Variation of wetting band depth by matric suction (S) in Green-Ampt (1911)'s equation

S = 1m		S = 0.8m		S = 0.6m	
Rainfall duration (hr)	Wetting band depth (m)	Rainfall duration (hr)	Wetting band depth (m)	Rainfall duration (hr)	Wetting band depth (m)
1hr	0.3505	1hr	0.3172	1hr	0.2795
2hr	0.5163	2hr	0.4693	2hr	0.4161
3hr	0.652	3hr	0.5947	3hr	0.5297
4hr	0.7723	4hr	0.7062	4hr	0.6314
5hr	0.8828	5hr	0.8091	5hr	0.7257
6hr	0.9863	6hr	0.9057	6hr	0.8147

Table 3. Variation of safety factor by matric suction (S) in Skempton and DeLory (1957)'s equation

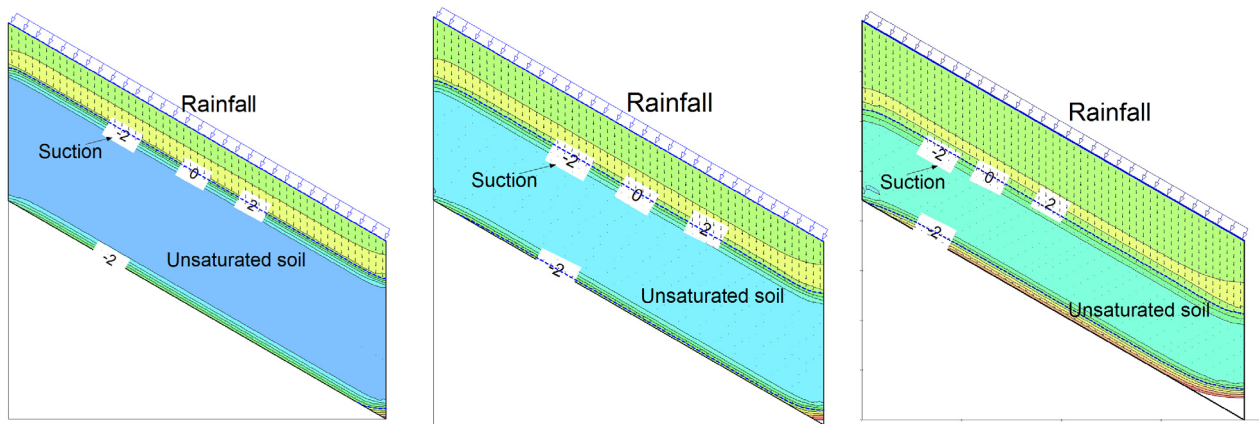
S = 1m		S = 0.8m		S = 0.6m	
Rainfall duration (hr)	F·S	Rainfall duration (hr)	F·S	Rainfall duration (hr)	F·S
1hr	2.224	1hr	2.414	1hr	2.683
2hr	1.643	2hr	1.766	2hr	1.939
3hr	1.387	3hr	1.481	3hr	1.612
4hr	1.236	4hr	1.313	4hr	1.419
5hr	1.113	5hr	1.198	5hr	1.288
6hr	1.058	6hr	1.115	6hr	1.193

용하였고 침투해석을 위하여 seep/w를 이용하여 수치해석의 포화깊이를 찾아보았다. 강우가 지속되면서 사면의 표층부터 점차적으로 포화가 진행되어 포화층과 불포화층으로 나누어 사면안정해석을 실시하였다. 강우에 의한 불포화 침투해석으로 얻은 지반 내 모관흡수력은 -2kPa까지는 완전포화상태로 가정하여 포화깊이를 측정하였고, 강우지속 1시간단위로 침투과정을 Fig. 4처럼 나타내었고 강우지속 1시간단위별 포화깊이는 Table 4에 정리하였다.

구한 포화깊이를 한계평형해석 slope/w를 이용하여

주어진 사면에 지반의 물성치를 넣은 후에, 사면에 대한 경계조건을 설정을 하고 강우지속시간별 안전율을 Fig. 5처럼 찾았으며, 각 시간별 안전율을 Table 5에 나타내었다.

방정식으로 구해낸 안전율과 수치해석으로 구한 안전율을 비교한 Fig. 6에 나타 내었다. 모관흡수력이 감소할수록 수치해석의 안전율이 점점 낮아지는 것을 볼 수 있고, 방정식의 안전율보다 수치해석의 안전율이 급격히 차이가 나는 것을 볼 수 있었다. 또한 방정식의 안전율이 수치해석 안전율보다 점점 과대평가 되고 있음



(a) At S = 1m after 6 hrs

(b) At S = 0.8m after 6 hrs

(c) At S = 0.6m after 6 hrs

Fig. 4. Variation of wetting band depth by rainfall duration (Seep/W)

Table 4. Variation of wetting band depth by rainfall duration

S=1m		S=0.8m		S=0.6m	
Rainfall duration (hr)	Wetting band depth (m)	Rainfall duration (hr)	Wetting band depth (m)	Rainfall duration (hr)	Wetting band depth (m)
1hr	0.17	1hr	0.24	1hr	0.4
2hr	0.67	2hr	0.91	2hr	1.44
3hr	1.37	3hr	1.87	3hr	2.88
4hr	2.17	4hr	2.99	4hr	4.39
5hr	3.01	5hr	4.1	5hr	5.94
6hr	3.83	6hr	5.23	6hr	7.52

Table 5. Factor of safety by rainfall duration and wetting band depth

S=1m			S=0.8m			S=0.6m		
Rainfall duration (hr)	Wetting band depth (m)	F·S	Rainfall duration (hr)	Wetting band depth (m)	F·S	Rainfall duration (hr)	Wetting band depth (m)	F·S
1hr	0.17	5.316	1hr	0.24	3.701	1hr	0.4	2.694
2hr	0.67	1.824	2hr	0.91	1.49	2hr	1.44	0.96
3hr	1.37	0.997	3hr	1.87	0.831	3hr	2.88	0.644
4hr	2.17	0.743	4hr	2.99	0.646	4hr	4.39	0.53
5hr	3.01	0.635	5hr	4.1	0.567	5hr	5.94	0.494
6hr	3.83	0.544	6hr	5.23	0.529	6hr	7.52	0.49

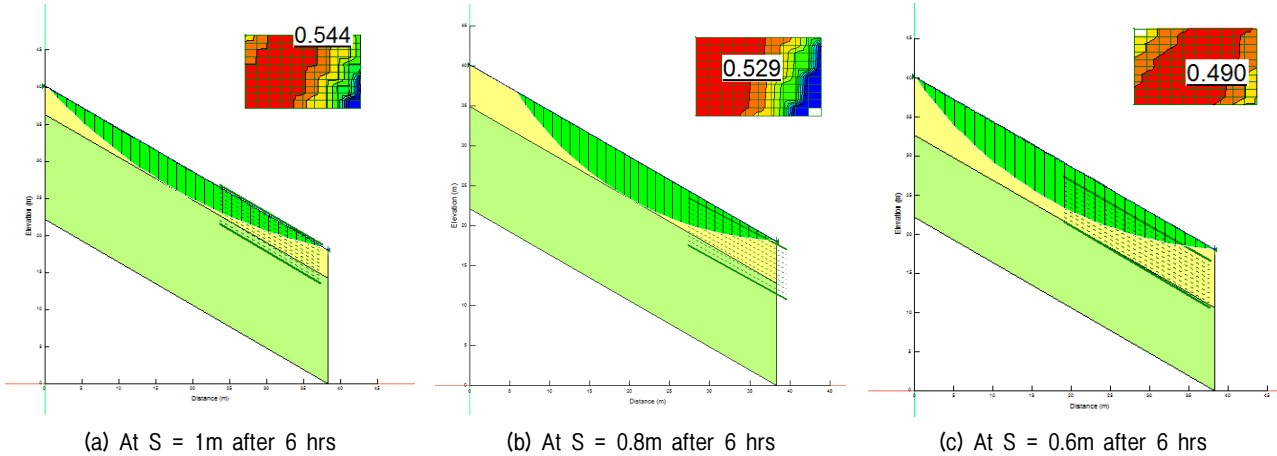


Fig. 5. Variation of safety factor by wetting band depth in slope stability analysis (Slope/W)

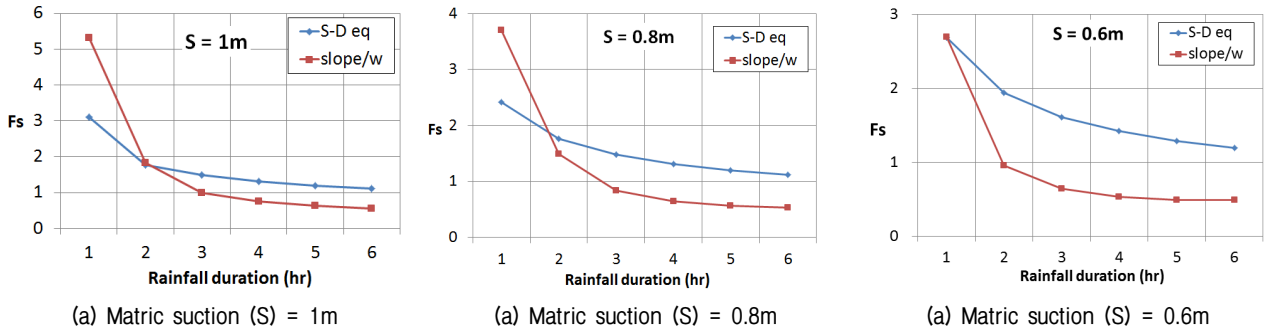


Fig. 6. Comparison of analytical solution (Skempton and DeLory, 1957) and numerical analysis

을 알 수 있다. 그러므로 비탈면 안정성에 영향을 끼치는 요소들을 분석해보며 수치해석에 비슷한 결과 값을 얻을 수 있도록 방정식을 수정하여 적용하였다.

4. 포화깊이와 사면안전율 수정식 산정

4.1 수정포화깊이 산정

Green-Ampt(1911) 방정식에서 보여주는 포화깊이의 오차는 수치해석 결과에 맞추어 적절한 수정을 하였다.

우선적으로 Skempton and DeLory(1957) 방정식에서 안전율 1.3에 강우지속시간이 결정되면 Green-Ampt(1911) 방정식에 결정된 강우지속시간을 적용하여 상응하는 포화깊이를 결정할 수 있다. 앞 절에서 제시한 Table 2와 Table 4를 보면 모관흡수력(S)값이 감소할수록 이론식 결과 값은 수치해석 값보다 포화깊이 예측이 과대평가되고 있다. 이러한 오차를 줄이고자 방정식에 여러 계수를 적용하여 Fig. 7과 같이 다양한 점선들로 제안식들을 볼 수 있다. 강우지속시간이 증가하면서 방정식과 수치해석의 오차가 줄어들고 비탈면 설계기준인 1.3에 방정

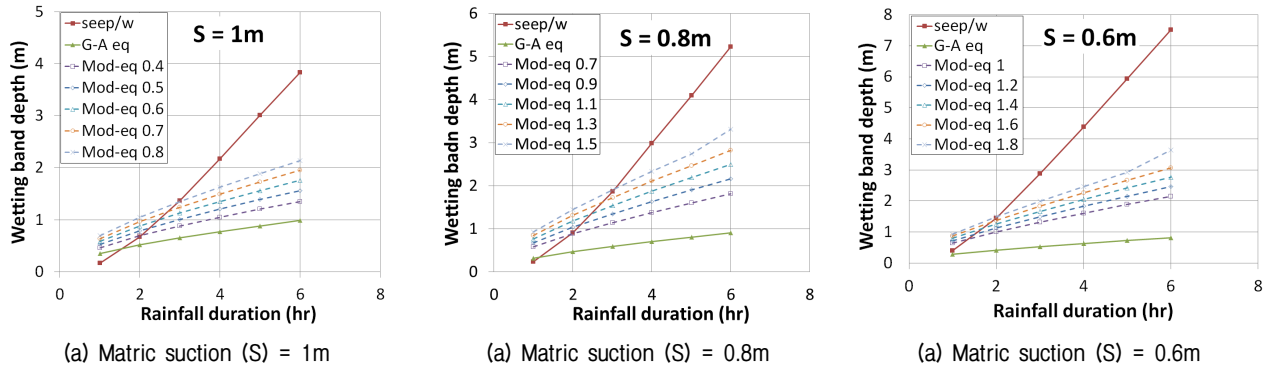


Fig. 7. Comparison of analytical solution with various parameters and numerical analysis for wetting band depth (z_w)

식과 불포화 침투해석과 한계평형해석의 결과를 동일하게 계수를 결정하여 안정성 평가에 기준을 정하고자 하였다(MATLAB, 2011).

Fig. 7에서 붉은 실선은 수치해석으로 얻은 포화깊이를 보여주며, 초록색 실선은 기존 방정식으로부터 얻은 포화깊이를 계산한 값이다. 계수를 적용하여 수정한 방정식들은 점선으로 나타나고 있으며 모관흡수력의 지반조건에 따라 계수 값들은 0.4~1.8까지 다양하게 적용하여 오차를 줄이고자 시도하였다.

모관흡수력(S)이 0.6m 인 지반조건에서 수정방정식과 수치해석의 포화깊이 비교하는 Fig. 7은 제일 크게 포화깊이의 차이를 보이고 있지만, 모관흡수력이 0.8과 1m로 증가할수록 수치해석과 방정식으로 얻은 강우로 인한 포화깊이의 차이가 점점 감소하고 있음을 확인할 수 있었다. Table 5 에서 비탈면 설계에서 안정성에 대한 기준이 되는 안전율이 1.3이 되는 구간을 보면 모관흡수력(S) 1m, 0.8m인 경우에는 2~3시간 사이에 있으며, 0.6m인 경우에는 1~2시간 사이에 위치해 있기 때문에 계수값을 결정할 수 있었다. 그러므로 Green-Ampt (1911) 방정식을 강우지속시간에 맞는 포화깊이를 찾기

위해서 계수를 추가해 수정식 Eq. (3)을 제안하였다. 수정식을 5가지 방법으로 나누어 비교해 본 결과 모관흡수력 S=1m일 때는 y_{m1} 이 약 0.6, S=0.8m 일 경우는 y_{m1} 이 약 1.0이며, S=0.6m 일 경우에는 약 1.5 이었다. 여기서, y_{m1} 과 모관흡수력(S)의 관계식은 $y_{m1} = -1.7 \ln S + 0.6$ 으로 경향성을 유추할 수 있었다.

$$T_w = \frac{-y_{m1}(\log \mu)}{k_w} \left[z_w - S \cdot \ln \left(\frac{S+z_w}{S} \right) \right] \quad (3)$$

4.2 사면안전율의 수정식 산정

Green-Ampt(1911) Eq. (3)을 통한 수정포화깊이(z_w)를 Skempton and DeLory(1957) 방정식에 적용하여 안전율을 구하게 되면 Fig. 8처럼 나타낼 수 있다. Fig. 8을 보면 포화깊이에 따라서 안전율에 영향을 크게 받고, 모관흡수력이 낮아짐에 따라 지반의 강도가 작아지기 때문에 안전율이 점점 낮아지고 있다. 강우초기에는 Skempton and DeLory(1957) 방정식의 안전율이 수치해석 값보다 과대평가 되고 있지만, 파란색 실선은 수치해석으로 얻

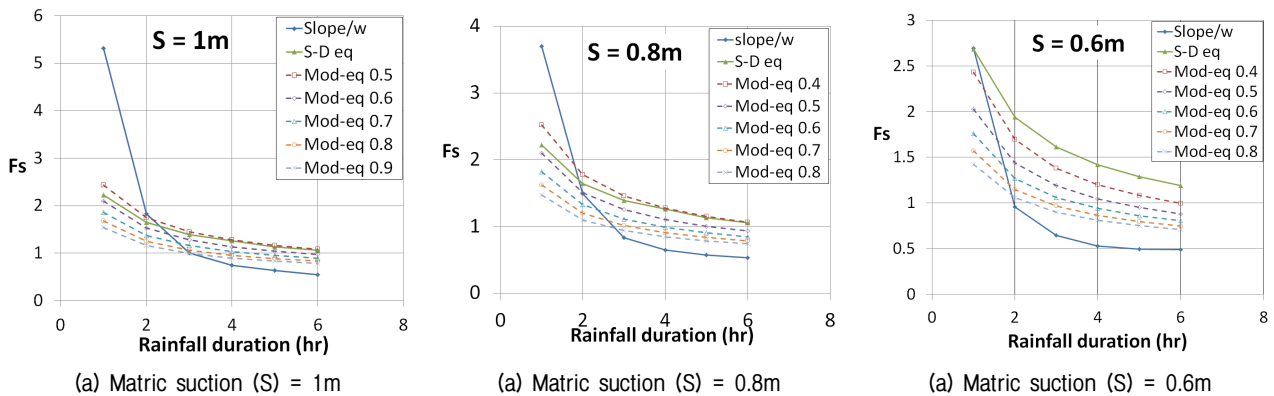


Fig. 8. Comparison of analytical solution with various parameters and numerical analysis for factor of safety

은 포화깊이를 한계평형해석으로 얻은 안전율을 의미하며, 초록색 실선은 Skempton and DeLory(1957) 방정식으로 얻은 안전율을 나타낸다. 강우가 지속되더라도 Skempton and DeLory(1957) 제안식은 안전율 '1' 이하로 떨어지지 않는다. 이것은 파괴가 되지 않는다는 것을 의미하여 비탈면 지반조건에서는 오류를 포함하고 있음을 알 수 있다. 따라서 방정식에 계수들을 적용함으로써 강우가 지속되어 적절한 시기에 파괴가 되는 시점을 알 수 있어야 한다. 따라서 안전율 제안식에 y_{m2} 계수를 추가하여 수정안전율 계산식 Eq. (4)를 제안하였다. 안정성에 중요한 설계기준을 설정하기 위해서 우기 시에 안전율 1.3이 되는 구간은 모관흡수력 $S(=1m, 0.8m, 0.6m)$ 일 때 약 $y_{m2} = 0.6$ 임을 확인할 수 있었다.

$$F_s = \frac{c' + y_{m2}(\gamma_t - \gamma_w) z_w \cos^2 \alpha \tan \phi'}{y_{m2}(\gamma_t z_w \sin \alpha \cos \alpha)} \quad (4)$$

5. 결론

기존 문헌에서 얻은 이론적인 방정식으로 계산한 강우 시 포화깊이와 무한사면의 안전율의 오류를 확인하고자 불포화 침투해석과 한계평형해석으로 얻은 안전율을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 강우 시 지표면으로부터의 포화깊이를 예측하는 Green-Ampt(1911) 방정식은 불포화 침투해석을 기준으로 강우지속시간이 진행됨에 따라 과소평가 됨을 확인하였고, 그 포화깊이를 이용하여 무한사면 안전율을 예측하는 Skempton and DeLory(1957) 방정식은 침투해석으로 얻은 포화깊이를 적용한 한계평형해석 결과 기준으로 다소 과대평가 되고 있었다.

(2) 강우지속시간이 계속 증가하여도 기존 이론적인 방정식으로 얻은 포화깊이는 1m 이상으로 증가하지 않고 있었으며, 안전율 역시 '1' 이하로 떨어지지 않아 현장에서 발생하는 상황과 맞지 않는 결과 값을 제시하고 있었다.

(3) Green-Ampt(1911) 방정식에 y_{m1} 계수값을 적용하여 불포화 침투해석으로 얻은 결과값과 비교하여 적절한 강우 시 비탈면 포화깊이를 산정할 수 있도록 수정하였으며, Skempton and DeLory(1957) 방정식에 y_{m2} 계수값을 적용하여 비탈면 설계기준 1.3을 맞추어 수치해석으로 얻은 결과 값과 기준을 동일 시해 평가 기준으로 쉽게 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌 (References)

1. Kim, Y., Kim, J., Lee, J., and Kim, S. (2013), "A Study on Soil Slope Stability Design Considering Seepage Analysis", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.1, pp.135-147.
2. GeoStudio (2016), version 8.0.10, *Manual for SLOPE/W and SEEP/W modeling*, GEO-SLOPE International, Ltd., Calgary, Alberta, Canada.
3. Green, W. H. and Ampt, G. A. (1911), "Studies on Soil Physics : 1. Flow of Air and Water through Soils", *Journal of Agricultural Science*, Vol.4, pp.1-24.
4. Lee, J., Kim, J., and Hwang, Y. (2014), "Slope Stability by Variation of Rainfall Characteristic for Long Period", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.6, pp.51-59.
5. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA, 2011), "Design Standard for Slope Stability in Construction", *Construction Slope Design Standard* (in Korean), South Korea.
6. Skempton, A. W. and DeLory, F. A. (1957), "Stability of Natural Slopes in London Clay", *Proc. 4th Int. Conf. on Soil Mech. and Found Engrg.*, Vol.2, pp.378-381.

Received : January 9th, 2018

Revised : February 28th, 2018

Accepted : March 7th, 2018