

강우침투에 따른 사면의 안정성 평가

Slope Stability Analysis by Rainfall Infiltration

한 희 수[†] · 조 재 호¹⁾ · 양 남 용²⁾ · 신 백 철³⁾

Han, Heui-Soo · Cho, Jae-Ho · Yang, Nam-Yong · Shin, Baek-Chul

ABSTRACT : The unsaturated layers by rainfall infiltration are not properly reflected in construction codes to do slope design. The objective of this paper is to analyze the slope behavior according to the saturation layer increase resulted from the rainfall infiltration, to do that the laboratory slope model apparatus was adopted. From the model apparatus, the variation of water content and strength parameters of the model slope were analyzed. The safety factors of model slope was decreased, if saturation layer was increased from 3.0m to 4.5m, which means ground water level 3m selected from construction codes makes higher safety level. Also, if the ground water level is located in soil surface, the lower safety level will show up. Therefore, to make the proper slope design, the experiments and analysis of variation of saturation layer is needed.

Keywords : Slope stability, Rainfall infiltration, Shear strength, Ground water level, Laboratory slope model test

요 지 : 현행 사면 안정 해석 시 지하수위 결정방법은 강우에 의한 침투과정에 의한 불포화구간을 제대로 반영하고 있지 못하고 있다. 본 연구에서는 강우에 의한 지표면 상부침투에 의한 포화대 증가에 따른 사면의 안전율 변화를 실내모형실험을 통해 검증하고자 하였다. 강우침투로 인한 흙의 전단강도 저하를 정확히 파악하기 위해 실내 사면모형실험을 통해 함수비 변화를 측정하고, 이에 따른 강도정수의 변화를 파악하였다. 포화깊이 3.0m에서 4.5m로 변할 때 안전율이 가장 크게 변화되는 것을 알 수 있었으며, 이는 설계기준에서 제시한 지하수위 (-)3.0m은 다소 과소 설계된다는 것을 판단할 수 있다. 또한, 지표면 포화로 해석할 경우는 과다 설계되므로 사면의 설계 시 강우 침투에 관한 실험 및 해석이 필요함을 알 수 있다.

주요어 : 사면안정, 강우침투, 전단강도, 지하수위, 실내 사면모형실험

1. 서 론

최근 들어 터널이나 교량 교각 등 주요구조물에 비해 집중강우나 호우에 의해 많은 사면 붕괴가 일어났다. 이는 강우침투특성이나 지하수위 변동에 의한 영향은 무시하고 지하수위만을 가정한 우기 시 지반강도정수를 이용하여 산정된 안전율만을 만족하도록 설계하고 있는 상황에서 빈번히 발생하고 있다.

이에 따라 근래에 사면안정해석에 불포화토에 대한 관심이 높아져 연구가 많이 진행되어 있으며, 류지협(1997)은 불포화 화강풍화토의 투수 및 강도 특성을 연구하였고, 백승철(1999)은 침투에 따른 절토사면의 안정성 검토를 하였다. 이승래 등(2009)은 실내시험을 통한 모관흡수력과 함수 특성곡선과의 관계를 이용한 사면안정성 평가 연구들이 수행되었다. 사공명 등(2009)은 실제 무한사면과 유사한 조건으로 모형 토조를 만들어 강우재현기구를 통한 인공강우를 이용하여 강우 시 불포화 무한사면에 침투거동에 관한 연구

를 수행하였으며, 토조내 대상토의 체적함수비의 변화와 간극수압의 변화, 그리고 불포화토의 다양한 특성을 조사하고, 사면내 간극수압에 영향을 미치는 인자들인 강우강도, 강우지속시간, 경사각등을 변화시켜 간극수압의 변화를 확인하였다. 이정식 등(2010)은 사면의 전단강도와 강우강도와의 상관관계를 해석하였고, 한희수 등(2010)은 불포화투수계수를 이용한 지반의 연속 침투능을 산정하여 불포화 거동을 해석하였다.

2. 강우침투 모형실험

2.1 강우 시 지하수위 적용기준

강우 시 사면안정성에 가장 큰 영향을 주는 요인으로는 강우로 인한 지하수위 증가를 들 수 있다. 강우 시 초기 간극수압은 지표면 부근이 포화되지 않아 음(-)의 간극수압을 보이거나 강우가 지속되면 습윤대(wetting band)가 점차 확대

† 정희원, 금오공과대학교 토목공학과 교수(E-mail : hanhs@kumoh.ac.kr)

1) 비희원, 금오공과대학교 대학원 토목공학과 박사과정

2) 정희원, 금오공과대학교 대학원 토목공학과 박사과정

3) 비희원, 금오공과대학교 대학원 토목공학과 박사과정

표 1. 국내 각 기관별 지하수위 적용기준

구 분	기 관	조 건	적 용 기 준	
			건 기	우 기
도로설계 실무편람 (토질 및 기초편)	도로 공사 (1996)	암반	· 인장균열면이나 활동면을 따라 수압이 작용되지 않음	· 인장균열면이나 활동면을 따라 작용되는 수압을 $H_w = 0.5H$ 로 가정하여 적용
		토층/ 풍화암	· 지하수위 미고려	· 지하수위는 G.L(-) 3.0m
도로설계 편람 (토공 및 배수편)	건교부 (2000)	암반	· 인장균열면이나 활동면을 따라 수압이 작용되지 않음	· 인장균열면이나 활동면을 따라 작용되는 수압을 $H_w = 0.5H$ 로 가정하여 적용
		토층/ 풍화암	· 지하수위 미고려	· 지하수위 고려
토지공사 설계기법 연구보고서	토지 공사 (1991)	-	· 건기시 시추공의 수위적용	· 지하수위는 G.L(-)3.0m 적용하고, 경우에 의한 표면파괴 해석
국도건설 공사설계 실무요령	건교부 (2004)	암반	· 인장균열면이나 활동면을 따라 수압이 작용되지 않음	· 인장균열면이나 활동면을 따라 작용되는 수압을 $H_w = 0.5H$ 로 가정하여 적용
		토층/ 풍화암	· 지하수위 미고려	· 지하수위는 지표면에 위치
도로설계 요 령 (토공 및 배수)	도로 공사 (2002)	암반	· 인장균열면이나 활동면을 따라 수압이 작용되지 않음	· 인장균열면이나 활동면을 따라 작용되는 수압을 $H_w = 0.5H$ 로 가정하여 적용
		토층/ 풍화암	· 지하수위 미고려	· 지하수위는 지표면에 위치
건설공사 비탈면 표준시방서	건교부 (2006)	암반	· 인장균열면이나 활동면을 따라 수압이 작용되지 않음	· 인장균열면이나 활동면을 따라 작용되는 수압을 $H_w=0.5H$ 로 가정하여 적용 · 인장균열이 없는 것으로 가정하는 경우에는 지표면의 2m 하부에 지하수위를 위치시키고 지하수위는 삼각형 형태로 분포하는 것으로 가정
		토층/ 풍화암	· 건기시 시추공의 수위적용	· 지하수위는 지표면에 위치

되어 지표면 부근이 양(+의) 간극수압으로 변화한다. 또한 침투된 강우가 지하수위 위치에 도달될 때까지 강우가 지속된다면 지하수위 상승이 발생한다. 지하수위가 낮은 사면에서는 집중호우가 발생하더라도 지하수위 증가에는 큰 영향이 없으므로 침투강우에 의해 발생하는 습윤대에 대한 안정성을 평가하면 된다. 다시 말해 강우에 의한 침투로 사면의 안정성이 저하되는 원인은 포화도 증가에 따른 간극수압의 증가로 인한 지반의 강도 저하, 포화도 증가로 인한 흙의 자중 증가, 침투력에 의한 활동력의 증가, 지표 유출수로 인한 침식으로 분류할 수 있다.

현행 사면 안정 해석 시 지하수위 결정방법은 건기 시에는 시추공에서 측정된 지하수위를 적용하고, 우기 시에는 과다 안전측인 지표면 상단까지, 또는 지표면 아래 임의 깊이(G.L -3m)까지 포화되는 것으로 가정하여 적용하고 있다(표 1). 최근 건설교통부(2006)에 제정된 건설공사 비탈면 설계기준에서는 실트 및 사질토 지반에서의 비탈면 표면파괴는 주로 집중강우에 의해 발생되며 파괴면의 깊이도 대체로 2m 내외인 경우가 많다. 이것은 집중 강우 시 강우가 흙으로 빨리 침투하여 간극수압을 상승시키기 때문이다.

본 연구에서는 실트질 사질토 지반에서의 강우 침투로 인

한 함수비 변화를 파악하고 이에 따른 단위중량 및 강도정수의 변화를 파악하여 사면의 안전을 변화를 파악하고 설계 기준에서 제시된 지하수위 기준을 종합 검토하고자 하였다.

2.2 강우침투 모형실험

2.2.1 실내모형실험 대상토의 기본 물성 및 다짐

본 논문의 실험에 사용한 시료는 충북 영동군에서 채취한 화강풍화토를 사용하였으며, 얇은 파괴가 발생하였던 취약한 지반의 흙이다. 이 흙을 10번체(2mm)에 치고 주문진

표 2. 혼합시료의 특성

	입 도 분 포					W/P
	D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	c_c	c_u	
시료1	0.77	1.30	2.50	3.247	0.878	P
시료2	0.87	1.40	2.60	2.989	0.866	P
	분 류					Definition
	Gravel	Sand		Silt	Clay	
Coarse		Fine				
시료1	-	S	-	-	-	SP
시료2	-	S	-	-	-	SP

표 3. 다짐방법

No.	램머 무게 (N)	몰드 직경 (cm)	다짐 층수	층당 다짐 횟수
A	25	10	3	25
B	25	15	3	55
C	45	10	5	25
D	45	15	5	55
E	45	15	5	92

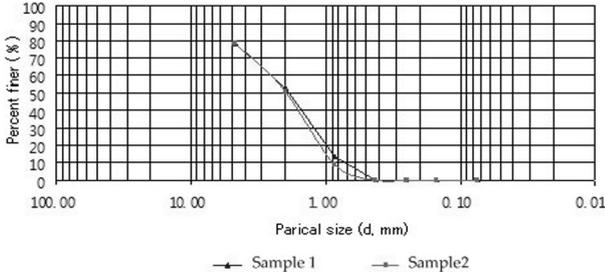


그림 1. 입도분포

표준사와 1:1비율로 교반하여 실트질 모래(2mm~0.3mm)를 만든 후 모형을 제작하였다. 혼합시료의 특성은 표 2에, 입도분포는 그림 1에 나타나있다.

흙의 다짐시험(KS F2312)의 다짐방법에는 표 3과 같이 5가지의 다짐방법이 있다. 이 중 C, D 및 E 다짐방법이 현장과 유사한 지반강도를 나타낼 것으로 사료되며, 다짐방법을 단순화하기 위하여 C 방법을 선택하였다.

2.2.2 실내모형실험 장치

본 연구의 실험장치는 침투상자와 강우재현장치, 경사조절장치 등으로 구성하였다. 침투상자의 경우 투명한 아크릴 재질로 제작하여 내부를 관찰할 수 있도록 제작하였고, 하부에 배수가 가능하도록 유입구와 유출구를 두었으며 유량계를 통해 강우강도를 고정할 수 있게 하고 강우재현장치를 통해 인공강우를 재현하게 하였다. 또한 특정 위치에 강우가 집중되어 표토에 세굴이 발생하고 유로가 생성되지 않도록 분사형 노즐을 사용하고 개별 조절이 가능하도록 하였고 경사조절장치와 상하진동에 의한 다짐이 가능하도록 이동식 진동다짐대를 설치하였다. 그림 2는 실험에 사용된 강우재현장치를 보여주며, 장치 ①은 강우를 재현하기 위한 노즐, 장치 ②는 control box, 장치 ③은 유량조절계, 장치 ④는 모형토조이다.

본 연구의 강우재현장치에 의한 실험순서는 다음과 같다. 초기 지반의 함수비 조건을 만들기 위해 그림 3 (a)와 같이 모형토조하부에 자갈을 깔고 실트질 모래의 유실을 막기 위해 부직포를 그 위에 깔았다. 그 후 자갈층 상부에 그림 3 (b)에 보인 바와 같이 흙을 채워가며 수정다짐 C방법으로

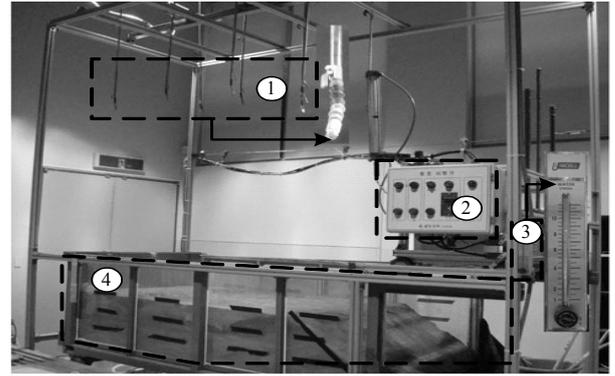


그림 2. 강우재현장치



(a) 자갈 및 부직포설치



(b) 지하수 흐름 및 방치



(c) 강우재현



(d) 조건별 및 깊이별 함수비측정 및 시료채취

그림 3. 실내모형실험 순서

총 45cm의 토조층을 만들었다. 그 후 자갈층에 물을 흘려 지하수위 조건을 만들고 모관상승에 의해 토조층을 불포화 상태로 만들었다. 토조를 불포화상태로 만든 후 TDR 센서를 이용하여 초기함수비를 측정하였으며, 그 후 그림 3(c)에 보인 바와 같이 60mm/hr의 강우를 토조층에 재현하였다. 그림 3(d)와 같이 강우 직후와 20분 침투, 40분 침투 시 각 조건별 및 깊이별 함수비 측정 및 비배수 직접전단시험을 위한 시료를 채취하였다.

2.2.3 강우시간과 시료채취

이 실험에서는 선행강우를 무시하는 대신에 초기함수비를 조절한 후, 강우강도 60mm/hr에서 40분 강우 후 20분,

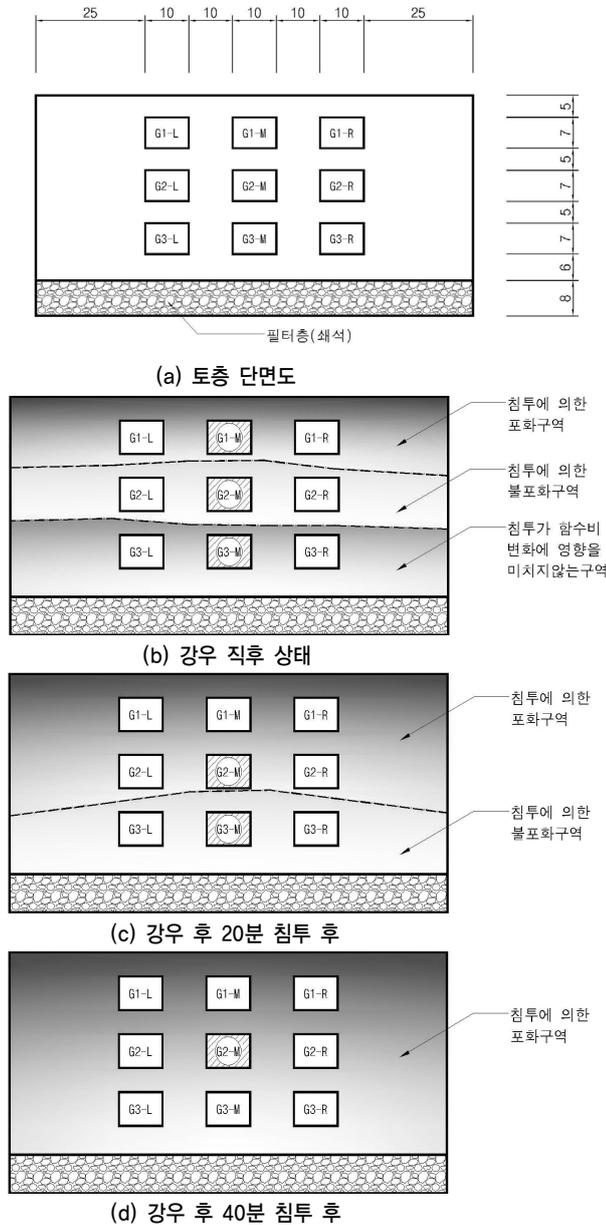


그림 4. 실내모형실험의 각 조건별 및 지점별 함수상태

표 4. 위치별 측정 함수비

시간	위치	위치별 측정 함수비(%)			
		L	M	R	평균
강우 전	G1	21.00	21.40	23.00	21.80
	G2	23.30	23.40	23.15	23.28
	G3	25.80	26.70	25.91	26.14
강우 직후	G1	39.10	38.80	39.40	39.10
	G2	26.20	26.30	26.05	26.18
	G3	25.80	26.70	25.91	26.14
20분 침투	G1	39.86	39.68	39.71	39.75
	G2	39.13	38.76	38.94	38.94
	G3	30.51	31.41	30.62	30.85
40분 침투	G1	39.25	38.34	38.91	38.83
	G2	39.67	39.79	39.45	39.64
	G3	39.95	39.88	39.69	39.84

40분 침투 후 깊이별 함수비를 측정하였다. 또한 강우 후 토조벽면을 타고 물기둥이 발생하므로, 모형토조의 양쪽 부분은 배제하고 중앙의 시료만 사용하여 비배수 전단강도 실험을 실시하였다. 그림 4는 실내모형실험의 각 조건별 및 지점별 함수상태를 보여준다.

표 4는 각 단계별 함수비 측정 결과이다. 이 결과 중 양측면(L,R)의 함수비는 벽면을 통한 강우 흐름의 영향을 고려해 안전율 산정에서 배제하고, 가운데(M) 부분의 깊이별 함수비를 사용하였다.

실내 실험을 통하여 함수비를 측정한 후 전체단위중량과 포화도를 계산하였다(표 5 참조). 건조단위중량 γ_d 는 실험을 통하여 알고 있으므로 습윤단위중량 γ_t 와 γ_d 의 상관관계를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_t = (1 + w) \times \gamma_d \quad (1)$$

표 5. 함수비 변화에 따른 포화도와 단위중량 변화

시간	깊이	구분	함수비 (%)	포화도 (%)	단위중량 $\gamma_t (kN/m^3)$
강우 전	G1-M		21.40	51.55	20.6
	G2-M		23.40	56.37	21.5
	G3-M		26.70	64.32	23.6
강우 후	G1-M		38.80	93.47	21.5
	G2-M		26.30	63.36	21.5
	G3-M		26.70	64.32	23.7
20분 침투	G1-M		39.68	95.59	23.7
	G2-M		38.76	93.38	23.6
	G3-M		31.41	75.67	22.3
40분 침투	G1-M		38.34	92.36	23.5
	G2-M		39.79	95.86	23.8
	G3-M		39.88	96.07	23.8

그리고 흙의 비중과 함수비, 포화도 및 간극비 사이의 관계를 이용하여 식 (2)와 같이 포화도를 계산하였다.

$$s = \frac{G_s w}{e} \quad (2)$$

2.3 비배수 직접전단시험

침투실험 중에 채취한 시료는 간극수압과 간극공기압을 측정하거나 완전히 제거할 수 없기 때문에 비배수 직접전단 시험으로 하중 재하 시 간극수가 급격히 배수되는 것을 방지하기 위해 불침투성 세포막을 사용하였다. 수직응력 100kPa, 200kPa, 400kPa으로 증가시켜가며 일정 변위에 따른 파괴면에 작용되는 전단응력을 측정하였다. 여기서 c 값과 ϕ 값은 강우 침투에 의한 함수비 변화에 따라 달라지므로 강도정수 값들을 상수 대신 함수비에 따른 변수 값으로 처리하였다.

시료의 각 하중조건별 변위에 따른 직접전단시험의 결과는 표 6 및 그림 5와 같다. 이를 살펴보면 점착력은 함수비가 증가함에 따라 증가하고, 내부마찰각은 함수비 증가에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 이를 근거로 강우에 의한 함수비 변화에 따른 점착력 및 내부마찰각의 변화를 고려하여 사면의 안전율 변화를 파악하였다.

함수비 변화에 따른 점착력, 내부마찰각 및 전단강도 변화는 식 (3)~(5)와 그림 5에 보인바와 같으며, 함수비에 따라 변화된 값을 사면안정 해석 시 사용하였다.

$$c = c' + \Delta c \quad (3)$$

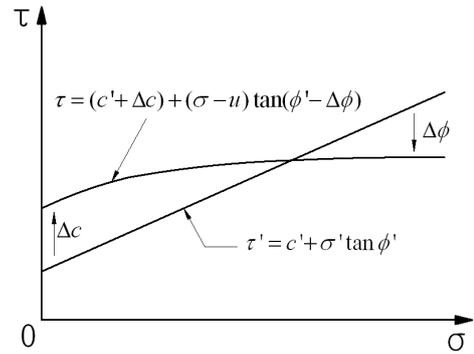
$$\phi = \phi' - \Delta \phi \quad (4)$$

$$\tau = (c' + \Delta c) + (\sigma - u) \tan(\phi' - \Delta \phi) \quad (5)$$

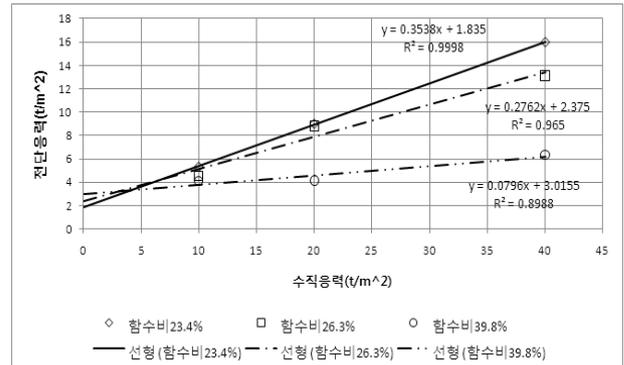
여기서 c' 와 ϕ' 은 강우 침투에 의해 함수비가 변하기 전의 불포화상태의 점착력과 내부마찰각이고, Δc 와 $\Delta \phi$ 는 강우 침투에 의한 함수비 변화에 따른 점착력과 내부마찰각의 변화량이다.

표 6. 함수비 변화에 따른 점착력과 내부마찰각의 변화

시간	구분	함수비 (%)	점착력 c (kPa)	내부마찰각 ($^\circ$)
강우 전	G2-M	23.40	18.4	19.48
강우 후	G2-M	26.30	23.8	15.44
20분 침투	G2-M	38.76	81.0	8.05
40분 침투	G2-M	39.79	30.2	4.58



(a) Mohr-Coulomb의 파괴포락선



(b) 함수비 변화에 따른 Mohr-Coulomb의 파괴포락선

그림 5. 함수비 변화에 따른 점착력과 내부마찰각 변화

3. 강우침투에 따른 사면안정해석

3.1 사면안정해석을 위한 입력 값

사면안정해석은 TALREN97 프로그램을 이용하여 수행하였으며, 대상사면에 대하여 강우시 침투에 의한 포화깊이 변화를 고려하여 안정성을 평가해보고, 설계기준에서 제시한 우기 시 및 지하수위 기준을 적용하여 안정성을 평가해보았다.

사면안정해석 시 흙의 단위중량 및 강도정수는 표 7과 같이 자연상태(불포화상태), 강우 침투로 인한 포화상태와 불포화상태로 나누어서 각각의 단위중량과 점착력, 내부마찰각을 입력하였다.

강우 침투에 따른 습윤대 변화를 산정하기 위해, Lumb(1975)

표 7. 함수비 변화에 따른 단위 중량 및 강도정수

토층상태	함수비 (%)	단위중량 (γ_t , kN/m ³)	점착력 (c , kPa)	내부마찰각 ($^\circ$)	
자연 상태	불포화	23.4	21.0	18.4	19.48
	포화	39.8	23.6	30.2	4.58
강우 침투	불포화	26.3	21.5	23.8	15.44
	포화	39.8	23.6	30.2	4.58

이 습윤대 변화를 식 (6)과 같이 제안하였고, Geotechnical Engineering Office(1984)는 토층의 투수계수와 포화도에 따른 습윤대의 두께를 그림 6과 같이 도해적으로 나타내었다. 제안 식에서는 동수경사가 1인 경우인 연직흐름을 전제로 하였고, 강우 전 지반의 상태가 건조상태 또는 선행강우로 인해 함수비가 상태를 나타낸 포화도의 변화정도, 즉 $S_f - S_0$ 를 중요한 요소로 표시하였다.

$$h = \frac{Kt}{n(S_f - S_0)} \quad (6)$$

여기서 h 는 습윤대의 두께이고 K 는 토층의 투수계수이며 n 은 간극률, S_f 는 초기 포화도, S_0 는 최종 포화도, t 는 강우 지속시간이다.

표 8은 식 (6)을 이용하여 강우 침투 시 포화도의 변화를 산정하기 위해 사용된 입력값들을 보여준다. 여기서, 간극률과 포화도, 강우 지속시간은 실험을 통해 얻어진 값들이다.

표 8. 강우 침투에 의한 포화대 계산을 위한 입력값

입력상수	값	비 고
투수계수 $K(cm/sec)$	1×10^{-2}	실트질 사질토
간극률 $n(\%)$	52.4	실험값
초기 포화도 $S_f(\%)$	56.0	실험값
최종 포화도 $S_0(\%)$	93.0	실험값
강우 지속시간 t	0min 20min(1,200sec) 40min(2,400sec)	모의 강우 침투시간
침투깊이 h	1.5m 단위 증가	식 (6)

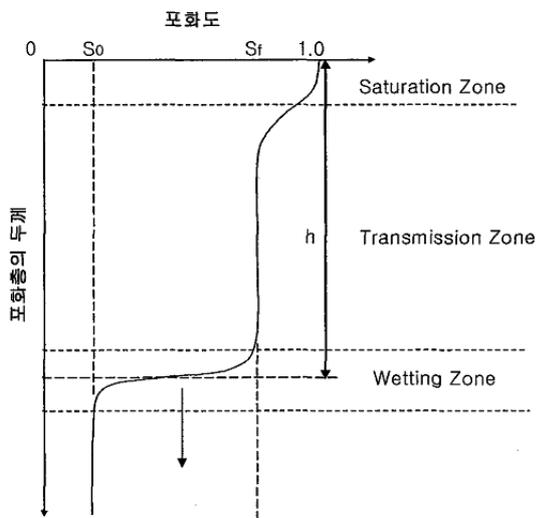


그림 6. 강우 시 습윤대의 형성 (Geotechnical Engineering Office, 1984)

3.2 사면안정해석 결과

강우침투에 의한 포화깊이 변화에 따른 안전율 해석을 위하여, 사면의 포화대 깊이는 4.5m로 하였고, 포화대 침투 구간을 1.5m 구간으로 나누어 계산하였다. 사면의 경사는 30°(1:1.7), 35°(1:1.4) 및 40°(1:1.2)으로 하여 사면의 경사에 따른 안전율 변화를 분석하였다.

그림 7은 사면 경사가 30°일때 포화깊이 변화에 따른 사면안정해석 결과를 나타낸 것이다. 이는 4.5m 지반 전체가 강우 전 건기 시의 불포화 상태일 때를 나타낸다. 표 7과 8에 따라 지반의 단위중량 γ_t 은 $21.0kN/m^3$ 이고 점착력 c 는 $18.4kPa$, 내부마찰각 ϕ 은 19.48° 로 하였다. 사면 안정해석 결과 안전율이 1.56으로 건기 시 설계기준에서 제시한 안전율 1.5보다 높게 나타났다.

그림 8은 경사 30°, 1.5m 포화 시 사면안정해석 결과를 나타낸 것이다. 강우로 인해 지표면으로부터 1.5m까지 포화되어 기존의 불포화 상태에서의 단위중량 γ_t 는 $2.1t/m^3$ 이고 점착력 c 는 $1.84t/m^2$, 내부마찰각 ϕ 은 19.48° 에서 단위중량 γ_t 은 $2.36t/m^3$ 이고 점착력 c 는 $3.0t/m^2$, 내부마찰각 ϕ 은 4.58° 로 변화하였다. 또한 지표면으로부터 1.5m~3.0m지점까지는 포화되지는 않았지만 강우 침투로 인해 함수비가 변화되어 단위중량 γ_t 은 $2.15t/m^3$ 이고 점착력 c 는 $2.38t/m^2$, 내부마찰각 ϕ 은 15.44° 로 변화하였다. 지표면 3.0m 이하는 아직 강우 침투의 영향을 받지 않아 기존의 불포화 상태의 강도 정수와 동일하다. 사면안정해석 결과는 안전율이 1.61로 기존 불포화 상태의 1.56보다 높게 나타났다. 그 이유는 포화로 인한 강도정수의 변화에서 토층의 두께가 1.5m에 불과하므로 포화구간이 상대적으로 작아 흙의 유효응력 및 내부마찰각 감소량에 의한 전단강도 감소보다 점착력 증가에 의한 전단강도 증가량이 크기 때문이다.

Soil no	1	2	3	4
γ	2.15	2.36	2.5	2.1
τ_{s1}	1	1	1	1
c	2.38	3	10	1.84
τ_c	1	1	1	1
ϕ	15.44	4.58	40	19.48
τ_{ϕ}	1	1	1	1

Units : Tons meters and degrees
Calculation method : Bishop

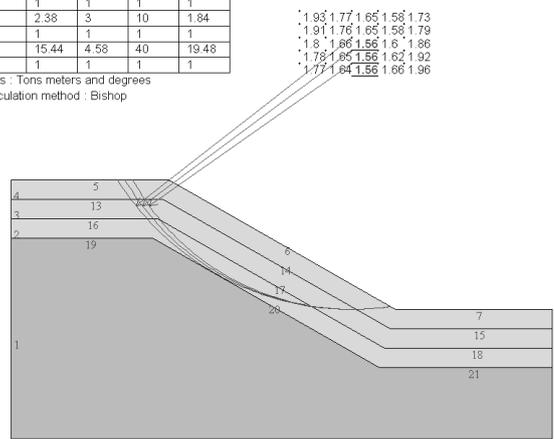


그림 7. 경사 30° 건기 시

Soil no	1	2	3	4
γ	2.15	2.36	2.5	2.1
Γ_{s1}	1	1	1	1
c	2.38	3	10	1.84
Γ_c	1	1	1	1
ϕ	15.44	4.58	40	19.48
Γ_ϕ	1	1	1	1

Units : Tons meters and degrees
Calculation method : Bishop

1.96 1.79 1.65 1.61 1.82
1.95 1.79 1.69 1.63 1.89
1.93 1.79 1.7 1.65 1.96
1.83 1.7 1.61 1.7 1.94
1.82 1.7 1.62 1.73 2.01

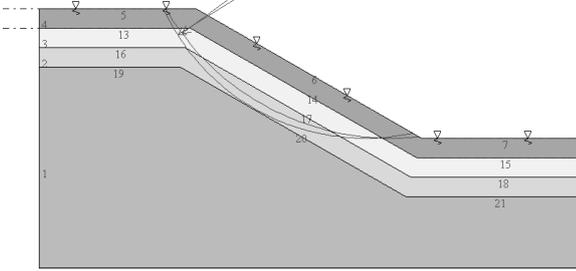


그림 8. 경사 30° 1.5m 포화 시

그림 9는 경사 30° 3.0m 포화 시 사면안정해석 결과를 나타낸 것이다. 강우로 인해 지표면으로부터 3.0m까지 포화되어 기존의 불포화 상태에서의 단위중량 γ_t 은 $21.0kN/m^3$ 이고 점착력 c 는 $18.4kPa$, 내부마찰각 ϕ 은 19.48° 에서 단위중량 γ_t 은 $23.6kN/m^3$ 이고 점착력 c 는 $30.0kPa$, 내부마찰각 ϕ 은 4.58° 로 변화하였다. 또한 지표면으로부터 3.0m~4.5m 지점까지는 포화되지는 않았지만 강우 침투로 인해 함수비가 변화되어 단위중량 γ_t 은 $21.5kN/m^3$ 이고 점착력 c 는 $23.8kPa$, 내부마찰각 ϕ 은 15.44° 로 변화하였다. 사면안정해석 결과는 안전율이 1.49로 1.5m 포화 시의 안전율 1.61보다 작은 것을 알 수 있다. 이는 1.5m 포화 시가 초기 건기 시 보다 안전율이 높았던 것과 같은 이유로 해석할 수 있다. 포화된 토층의 두께가 3.0m로 비교적 두꺼워지므로 내부마찰각의 영향이 커져 포화로 인한 점착력 증가보단 내부마찰각의 감소가 안전율에 지배적으로 작용되기 때문이다.

Soil no	1	2	3	4
γ	2.15	2.36	2.5	2.1
Γ_{s1}	1	1	1	1
c	2.38	3	10	1.84
Γ_c	1	1	1	1
ϕ	15.44	4.58	40	19.48
Γ_ϕ	1	1	1	1

Units : Tons meters and degrees
Calculation method : Bishop

1.66 1.57 1.49 1.51 1.81
1.68 1.57 1.49 1.54 1.85
1.67 1.56 1.5 1.57 1.9
1.65 1.57 1.51 1.58 1.97
1.66 1.58 1.54 1.65 2.02

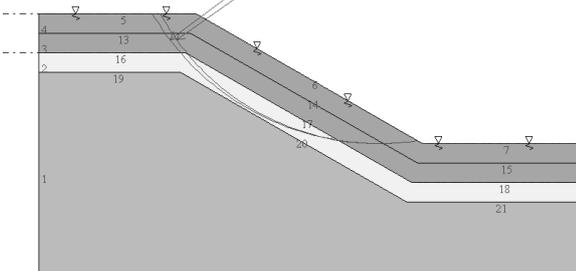


그림 9. 경사 30° 3.0m 포화 시

Soil no	1	2	3	4
γ	2.15	2.36	2.5	2.1
Γ_{s1}	1	1	1	1
c	2.38	3	10	1.84
Γ_c	1	1	1	1
ϕ	15.44	4.58	40	19.48
Γ_ϕ	1	1	1	1

Units : Tons meters and degrees
Calculation method : Bishop

1.81 1.56 1.41 1.3 1.23
1.79 1.56 1.41 1.31 1.25
1.78 1.56 1.42 1.33 1.28
1.51 1.34 1.22 1.15 1.28
1.5 1.34 1.23 1.16 1.3

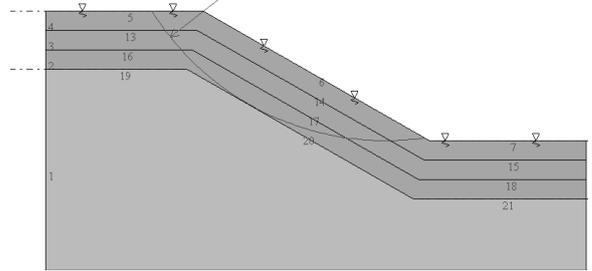


그림 10. 경사 30° 4.5m 포화 시

그림 10은 경사 30° 4.5m 포화 시 사면안정해석 결과를 나타낸 것이다. 지표면으로부터 4.5m까지 포화되어 기존의 불포화 상태에서의 단위중량 γ_t 은 $21.0kN/m^3$ 이고 점착력 c 는 $18.4kPa$, 내부마찰각 ϕ 은 19.48° 에서 단위중량 γ_t 은 $23.6kN/m^3$ 이고 점착력 c 는 $30.0kPa$, 내부마찰각 ϕ 은 4.58° 로 변화하였다. 사면안정해석 결과는 안전율이 1.15로 3.0m 포화 시의 안전율 1.49보다 작은 것을 알 수 있다. 특히 3.0m에서 4.5m로 포화층의 두께가 변할 때 안전율의 감소폭이 큰 것을 알 수 있다. 이는 포화층의 두께가 두꺼워지므로 인해 내부마찰각의 영향이 커져 포화로 인한 점착력 증가보단 내부마찰각의 감소가 안전율에 지배적으로 작용되기 때문이다.

그림 11는 사면 경사 30°에서 도로공사의 도로설계요령(2002), 건교부의(국도건설공사설계실무요령(2004)등의 설계기준과 같이 지표면까지 지하수위상수면을 고려했을 경우

Soil no	1	2	3	4
γ	2.15	2.36	2.5	2.1
Γ_{s1}	1	1	1	1
c	2.38	3	10	1.84
Γ_c	1	1	1	1
ϕ	15.44	4.58	40	19.48
Γ_ϕ	1	1	1	1

Units : Tons meters and degrees
Calculation method : Bishop

1.53 1.41 1.34 1.32 1.6
1.33 1.22 1.16 1.25 1.44
1.34 1.24 1.19 1.3 1.51
1.35 1.27 1.23 1.35 1.57
1.38 1.31 1.29 1.41 1.64

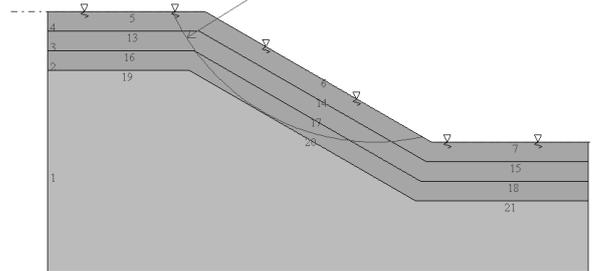


그림 11. 경사 30° 지표면 지하수위 시 (설계기준)

포화 시 사면안정해석 결과를 나타낸 것이다. 지표면까지 포화되어 기존의 불포화 상태에서의 단위중량 γ_t 은 $21.0kN/m^3$ 이고 점착력 c 는 $18.4kPa$, 내부마찰각 ϕ 은 19.48° 에서 단위중량 γ_t 은 $23.6kN/m^3$ 이고 점착력 c 는 $30.0kPa$, 내부마찰각 ϕ 은 4.58° 로 변화했다. 사면안정해석 결과는 안전율이 1.16로 4.5m 포화 시의 안전율 1.15와 거의 비슷하게 나타났다. 이는 설계기준이 강우로 인한 지표면 포화대 하강은 전혀 고려하지 못하므로 과다 설계될 수 있음을 의미한다.

그림 12은 경사 30° 에서 도로공사의 도로설계요령(1996), 토지공사의 Koland 설계기법 연구보고서 등의 설계기준에서 제시한 지표면 (-)3.0m 사면안정해석 결과를 나타낸 것이다. 지표면에서 3.0m까지 기존의 불포화 상태에서의 단위중량 γ_t 은 $21.0kN/m^3$ 이고 점착력 c 는 $18.4kPa$, 내부마찰각 ϕ 은 19.48° 이다. 지하수위 아래는 모두 포화된 상태이므로 지표면 3.0m 지점 아래로는 포화상태이므로 단위중량 γ_t 은 $23.6kN/m^3$ 이고 점착력 c 는 $30.0kPa$, 내부마찰각 ϕ 은 4.58° 이다. 사면안정해석 결과는 안전율이 1.26로 안전율 1.16에 비해 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 지표면 포화 시보다 과소 설계됨을 의미한다. 또한 본 연구에서 강우 침투로 인해 포화대가 3.0m~4.5m로 변할 때 안전율이 급격히 변한다는 것을 감안하면 지표면 (-)3.0m로 설계에 적용하는 것은 대단히 과소설계 됨을 알 수 있다.

경사 35° 포화깊이 변화에 따른 사면안정해석 결과를 보면, 4.5m 지반 전체가 강우 전 건기 시의 불포화 상태일 때 사면 안정해석 결과 안전율이 1.36으로 건기 시 설계기준에서 제시한 안전율 1.5보다 낮게 나타났다. 경사 35° 1.5m 포화 시 사면안정해석 결과는 안전율이 1.41로 기존 불포화상태의 1.36보다 높게 나타났다. 경사 35° 3.0m 포화 시 사면안정해석 결과는 안전율이 1.36로 1.5m 포화 시의 안전율 1.41 보다 작은 것을 알 수 있다. 경사 35° 4.5m 포화 시 사

면안정해석 결과는 안전율이 1.13로 3.0m 포화 시의 안전율 1.36보다 작은 것을 알 수 있다. 이 경우 역시 3.0m에서 4.5m로 포화층의 두께가 변할 때 안전율의 감소폭이 큰 것을 알 수 있다. 이는 포화층의 두께가 두꺼워지므로 인해 내부마찰각의 영향이 커져 포화로 인한 점착력 증가보단 내부마찰각의 감소가 안전율에 지배적으로 작용되기 때문이다.

경사 35° 에서 도로공사의 도로설계요령(2002), 건교부의 국토건설공사설계실무요령(2004)등의 설계기준에서 제시한 지하수위가 지표면까지 상승한 경우, 사면안정해석 결과는 안전율이 1.13로 4.5m 포화 시의 안전율 1.13와 같게 나타났다. 경사 35° 에서 도로공사의 도로설계요령(1996년), 토지공사의 Koland 설계기법 연구보고서 등의 설계기준에서 제시한 지표면 (-)3.0m 사면안정해석 결과는 안전율이 1.19로 안전율 1.13에 비해 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 지표면 포화 시보다 과소 설계됨을 의미한다. 또한 본 연구에서 강우 침투로 인해 포화대가 3.0m~4.5m로 변할 때 안전율이 급격히 변한다는 것을 감안하면 지표면 (-)3.0m로 설계에 적용하는 것은 대단히 과소설계 됨을 알 수 있다.

경사 40° 의 포화깊이 변화에 따른 사면안정해석 결과를 살펴보면 4.5m 지반 전체가 강우 전 건기 시의 불포화 상태일 때 사면 안정해석 결과 안전율이 1.18으로 건기 시 설계기준에서 제시한 안전율 1.5보다 낮게 나타났다.

경사 40° 일 때 1.5m 포화 시 사면안정해석 결과는 안전율이 1.23로 기존 불포화 상태의 1.18보다 높게 나타났다. 경사 40° 일 때 3.0m 포화 시 사면안정해석 결과는 안전율이 1.16로 1.5m 포화 시의 안전율 1.23보다 작은 것을 알 수 있다. 경사 40° 일 때 4.5m 포화 시 사면안정해석 결과는 안전율이 0.99로 3.0m 포화 시의 안전율 1.16보다 작은 것을 알 수 있다. 또한 사면의 경사가 40° 일 경우는 안전율이 0.99로 파괴됨을 의미하므로 경사가 급해질수록 포화깊이 변화에 더 민감한 것을 알 수 있다. 경사 40° 일 때 도로공사의 도로설계요령(2002), 건교부의 국토건설공사설계실무요령(2004), 건교부의 건설공사 비탈면 설계기준(2006)의 설계기준에서 제시한 지하수위가 지표면까지 상승한 경우, 사면안정해석 결과는 안전율이 0.99로 4.5m 포화 시의 안전율 0.99와 같게 나타났다. 경사 40° 에서 도로공사의 도로설계요령(1996), 토지공사의 Koland 설계기법 연구보고서 등의 설계기준에서 제시한 지표면 (-)3.0m 사면안정해석 결과는 안전율이 1.02로 안전율 0.99에 비해 높게 나타남을 알 수 있다.

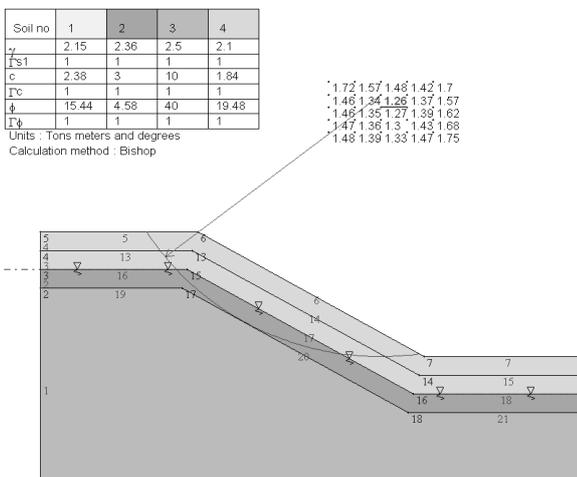


그림 12. 경사 30° 지하수위 (-)3.0m(설계기준)

3.3 사면의 안전율 변화

TALREN97을 이용하여 사면안정해석을 실시한 결과 강

우침투에 의한 포화깊이 변화에 따른 안전율은 표 9와 그림 13와 같이 나타났다. 이를 살펴보면 지표면 1.5m 지점까지 포화되었을 경우에는 포화된 지표의 두께가 깊지 않으며 함수비 증가로 인한 내부마찰각 저하보다 점착력의 증가로 인하여 안전율이 증가함을 확인할 수 있었다. 또한 지표면 3.0m 지점까지 포화되었을 경우에는 안전율이 감소하지만 건기 시보다 크게 감소하지 않음을 확인할 수 있다. 지표면 4.5m 지점까지 포화되었을 경우에는 안전율이 크게 감소함을 알 수 있었다.

도로공사의 도로설계요령(2002), 건교부의 국토건설공사 설계실무요령(2004), 건교부의 건설공사 비탈면 설계기준(2006) 등의 설계기준과 같이 지표면까지 지하수위 상승면

표 9. 강우침투에 의한 포화깊이 변화에 따른 안전율

사면 경사	강우 시 침투에 의한 포화깊이 변화에 따른 안전율			
	0.0m	1.5m	3.0m	4.5m
30° (1:1.7)	1.56 안정	1.61 안정	1.49 안정	1.15 불안정
35° (1:1.4)	1.36 안정	1.41 안정	1.36 안정	1.14 불안정
40° (1:1.2)	1.18 불안정	1.23 불안정	1.16 불안정	0.99 불안정
사면 경사	설계기준 적용시 안전율			
	지표면포화 ^{1), 2), 3)}		G.L(-)3.0m ^{4), 5)}	
30° (1:1.7)	1.16 불안정		1.26 안정	
35° (1:1.4)	1.13 불안정		1.19 불안정	
40° (1:1.2)	0.99 불안정		1.02 불안정	

1) 도로공사의 도로설계요령(2002), 2) 건교부의 국토건설공사설계실무요령(2004), 3) 건교부의 건설공사 비탈면 설계기준, 4) 도로공사의 도로설계요령(1996), 5) 토지공사 설계기법 연구보고서(1991)

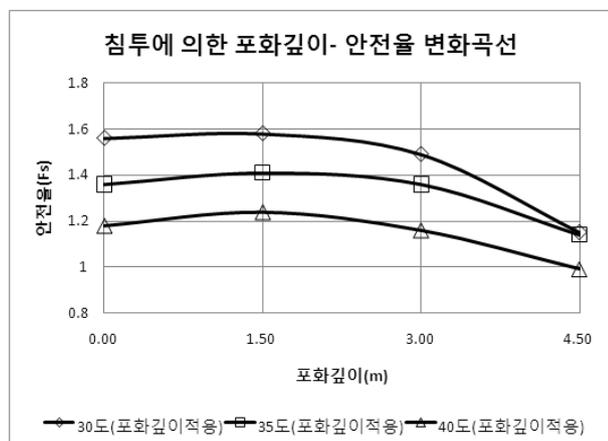


그림 13. 강우침투에 의한 포화깊이 변화에 따른 안전율

을 고려했을 경우, 설계기준이 강우로 인한 지표면 포화대 하강은 고려하지 못하므로 과다 설계될 수 있었다. 또한 도로공사의 도로설계요령(1996), 토지공사의 Koland 설계기법 연구보고서 등의 설계기준에서 제시한 지표면 (-)3.0m 사면안정해석 결과, 포화대가 3.0m 이상 크게 증가하는 경우 안전율이 급격히 변한다는 것을 감안하면 지표면 (-)3.0m로 설계에 적용하는 것은 대단히 과소설계 됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 강우침투로 인한 흙의 전단강도 저하를 정확히 파악하기 위해 실내 모형사면실험을 통해 함수비 변화를 측정하고, 이에 따른 강도정수의 변화를 파악하였다. 측정된 값들을 토대로 사면안정해석을 실시하고 설계기준과 각종 문헌에서 제시한 지하수위 기준과 비교하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 지반 모형에 강우강도(60mm/hr)를 적용하여 침투에 따른 지반의 함수비 변화를 파악한 결과 강우 초기 시 지반 모형의 30cm까지는 강우에 의한 함수비 변화(23.30%에서 26.20%)를 보였고 15cm까지는 이미 강우 초기 시에 함수비가 39%(포화도 90%)를 넘어 포화됨을 알 수 있었다.
- (2) 강우 후 20분 침투 시에는 모형 전체(45cm)가 강우로 인한 침투의 영향으로 함수비가 변화되고 30cm까지 포화됨을 알 수 있었으며, 강우 후 40분 침투 시에는 모형 전체(45cm)가 강우로 인한 침투의 영향으로 지반 전체가 포화됨을 알 수 있었다.
- (3) 함수비에 따른 강도정수의 변화를 파악하기 위해 실험 중 채취한 시료로 비배수 직접전단시험을 수행하여 점착력과 내부마찰각의 변화를 파악하였다. 초기 함수비 23.40%에서 함수비 39.79%로 포화되었을 때 비배수 직접전단시험을 통해 산정된 점착력은 1.84t/m²서 3.02t/m²으로 증가하였고 내부마찰각은 19.48°에서 4.58°로 감소하였다.
- (4) 강우 침투로 인한 지반의 포화깊이가 1.5m일 때 함수비 증가로 인한 내부마찰각의 감소보다 점착력의 증가로 인하여 전단강도가 오히려 증가되어 안전율이 미소하게 증가함을 확인할 수 있었다.
- (5) 강우 침투로 인한 지반의 포화깊이가 3.0m일 때 함수비 증가로 인한 내부마찰각의 지점까지 포화되었을 경우에는 안전율이 감소하지만 건기 시보다 크게 감소하지 않

음을 확인할 수 있었으며, 마지막으로 지표면 4.5m지점까지 포화되었을 경우에는 안전율이 크게 감소함을 알 수 있었다.

- (6) 강우 침투로 인한 지반의 포화깊이 3.0m에서 4.5m로 변할 때 안전율이 가장 크게 변화되는 것을 알 수 있었으며, 각 기관에서 제시한 것과 같이 지하수위를 지표면으로 가정할 경우, 강우로 인한 지표면 포화대 하강은 고려하지 못하므로 과다 설계될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국립금오공과대학교의 학술연구 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 대해 감사드립니다.

참고 문헌

1. 건설교통부(2000), 도로설계 편람 (토공 및 배수편), pp. 449~451.
2. 건설교통부(2004), 국도건설 공사설계 실무요령, pp. 241~244.
3. 건설교통부(2006), 건설공사 비탈면 설계기준, 한국시설안전기술공단, 구미서관, pp. 101~138.

4. 류지협(1997), 불포화 화강풍화토의 투수 및 강도 특성, 박사학위 논문, 동국대학교, pp. 22~39.
5. 백승철(1999), 절토사면 안정성 검토 사례 - 안동지역, 1999년도 학술발표대회 논문집, 대한지질공학회, pp. 33~41.
6. 사공명, 유재호, 이성진(2009), 강우로 인한 조립토 사면에서의 토층 두께 변화에 따른 사면의 활동 분석 : 실내모형실험, 한국지반공학회 논문집, Vol. 25, No. 4, pp. 91~103.
7. 이승래, 오태규, 김윤기, 김희철(2009), 강우침투 시 강우강도와 포화투수계수가 안전율에 미치는 영향, 한국지반공학회 논문집, Vol. 25, No. 1, pp. 65~76.
8. 이정식, 한희수, 장진욱, 양남용(2010), 사면의 전단강도와 강우강도와의 상관관계, 한국지반환경공학회 논문집, Vol. 11, No. 2, pp. 13~21.
9. 한국도로공사(1996), 도로설계 실무편람 (토질 및 기초편), pp. 473~438.
10. 한국도로공사(2002), 도로설계 요령 (토공 및 배수), pp. 204.
11. 한국토지공사(1991), Koland 설계기법 연구보고서, 지원(조) 1911-9414, pp. 14.
12. 한희수, 이정식, 장진욱, 양남용(2010), 불포화투수계수를 이용한 지반의 연속침투능 산정, 대한지질공학회 논문집, Vol. 20, No. 2, pp. 137~146.
13. Lumb, P. (1975), Slope Failures in Hong Kong, *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*, Geological Society of London, Vol. 8, No. 1, pp. 31~65.
14. Geotechnical Engineering Office(1984), *Geotechnical Manual for Slopes*, Geotechnical Engineering Office, Hong Kong, pp. 53~70.

(접수일: 2011. 5. 4 심사일: 2011. 5. 30 심사완료일: 2011. 8. 22)