

강우지속시간에 따른 풍화토사면의 개량토 심도 평가

Evaluation of the Depth of Improved Soil on Weathered Soil Slopes by Rainfall Duration

유진주¹, 이종우², 이강일^{3*}

Jin-Ju Yu¹, Jong-Woo Lee², Kang-Il Lee^{3*}

¹Member, Graduate Student (Master Course), Department of Civil Engineering, Daejin University, 1007 Hoguk-ro, Pocheon-si, Gyeonggi-do 11159, Republic of Korea

²Member, Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Daejin University, 1007 Hoguk-ro, Pocheon-si, Gyeonggi-do 11159, Republic of Korea

³Member, Professor, Department of Construction and Environmental Engineering, Daejin University, 1007 Hoguk-ro, Pocheon-si, Gyeonggi-do 11159, Republic of Korea

ABSTRACT

Recently, irregular torrential rainfall have frequently occurred due to abnormal climate, and landslide damage is increasing. In Korea, more than 70% of the total land is mountainous areas, appropriate measures are needed to prevent landslides by heavy rainfall. When improved soil is applied to the surface of the slope, it is possible to suppress an increase in groundwater level due to rainfall penetration and secure stability of the slope. In this study, the appropriate depth of improved soil that can confirm the increase in groundwater level and secure stability by applying improved soil to the weathered soil slope was studied. A total of three cases were analyzed for the slope of the cross-section: standard slope for weathered soil (1:1.5, 1:1.8, and 1:2.0). For rainfall conditions, referring to the regional frequency probability rainfall provided by the Water resource Management Information System, the increase in groundwater level by stage was confirmed by assuming a 500-year frequency precipitation maximum duration of 48 hours. As a result of the study, in the case of natural slopes, the slope was completely saturated before 48 hours the rainfall duration, and there was a possibility of collapse. the improvement depth in the slope of 1:1.5 was appropriate for more than 1m from the surface regardless of the rainfall duration, and in the the slope of 1:1.8 was appropriate of 1m for more than 36 hours. in the slope of 1:2.0, it was appropriate for that safety when improved soil of 0.5m for rainfall duration 48 hours or more.

요 지

최근 기상이변으로 불규칙성의 집중호우가 자주 발생하여 산사태 피해가 늘어나고 있다. 우리나라의 경우 전체 토지의 70% 이상이 산지로 이루어져 있는 만큼, 집중강우 시 산사태를 예방할 수 있는 적절한 방안이 필요한 실정이다. 사면 표층부에 개량토를 적용할 경우 강우 침투로 인한 지하수위 상승을 억제하고 사면의 안정성을 확보할 수 있다. 본 연구에서는 풍화토 사면에 개량토를 적용하여 지하수위 상승량을 확인하고 안정성을 확보할 수 있는 개량토 적절한 심도를 연구하였다. 해석 단면의 경사는 풍화토지반에 대한 표준경사 대하여 총 3가지의 경우를 확인하였다(1:1.5, 1:1.8, 1:2.0). 강우 조건은 국가 수자원 관리 종합정보시스템에서 제공한 지역 빈도 확률강우량을 참고하여 500년 빈도 강수량 최대지속시간 48시간으로 가정하여 단계별 지하수위 상승량을 확인하였다. 연구결과, 자연사면의 경우 강우지속시간 48시간 이전에는 비탈면이 완전 포화되어 붕괴의 가능성이 있었다. 반면, 1:1.5 경사의 사면에서는 강우지속시간과 무관하게 지표면으로부터 1m 이상의 심도가 적절하며, 1:1.8 사면에서는 36시간 이상 지속 시에 1m의 심도가 적절한 것으로 평가되었다. 또한, 1:2.0 사면의 경우 48시간 이상 지속시에 0.5m 이상의 개량토를 적용하여야 안전성이 확보되는 것으로 나타났다.

Keywords : Slope stability, Improved soil, Penetration analysis, Rainfall duration

Received 4 May 2022, Revised 17 Jun. 2022, Accepted 20 Jun. 2022

*Corresponding author

Tel: +82-31-539-2024; Fax: +82-31-539-2020

E-mail address: kilee@daejin.ac.kr (K. I. Lee)

1. 서론

사면이 파괴되는 경우 활동면의 깊이에 따라 유한사면과 무한사면으로 분류되는데, 규모가 크고 기울기가 완만한 자연사면의 경우 무한사면 파괴가 발생하는 것이 일반적이다. 산사태가 발생할 경우 사면의 활동속도가 빨라지며 토석류와 낙괴가 병합적으로 발생하게 되어 근처 구조물과 인명피해를 야기한다. 사면의 파괴 요인으로는 지형의 변화와 상재하중의 변화, 강우 및 풍화작용에 의한 지반의 강도저하 등이 있으나(Terzaghi, 1950), 대부분의 산사태는 강우 시에 집중적으로 발생한다는 연구 결과가 있다(Song, 2003). 즉 자연사면에서 사면파괴의 가장 큰 요인은 강우로 인한 지반의 강도 저하로 지표면부터 포화되는 구간에 대하여 지반의 전단 강도가 감소하므로 사면의 취약한 지점을 중심으로 얇은 파괴가 발생한다(Cho and Lee, 2000; Kim et al., 2002). 강우 시 사면의 안정성을 해석하기 위해서는 설계 시 선행 강우량의 크기와 시간당 강우강도가 지배적인 요소인 만큼(Lumb, 1975; Brand et al., 1984) 침투해석을 단계적으로 실시하여 지하수위의 상승량을 정확히 반영되어야 한다. 이를 고려하지 않고 지하수위와 지표면을 일치하여 완전 포화상태로 해석하는 경우는 가장 위험한 상황에서의 안정성 평가이지만 사면 붕괴의 원인을 정확히 파악할 수 없고, 과설계를 유발할 가능성이 있다. 침투해석을 단계적으로 해석하기 위해서는 지반의 불포화도 거동을 파악하고 있어야 하고, 이는 흙의 모관흡수력을 알고 있어야 그 특성을 이해할 수 있다(Fredlund et al., 1994; Ryu, 2003). 함수특성곡선은 일반적으로 모관흡수력과 체적함수비의 관계로 정의되어 이를 수학적으로 구현하기 위한 연구들이 진행되어왔다(Brooks and Corey, 1964; Fredlund et al., 1994; van Genuchten, 1980). 또한 국내지반의 불포화특성을 이해하고자 함수특성곡선 실험을 통한 사면 안정성 평가 연구들이 꾸준히 진행되고 있다(Kim et al., 1999; Lee et al., 2002; Lee and Lee, 2005; Lee and Lee, 2009)

최근 기상이변으로 불규칙한 집중호우가 자주 발생하면서 산사태로 인한 피해가 증가함에 따라 현장에서는 사면의 표층부를 지반안정재로 개량함으로써 사면의 붕괴를 방지하고 있다. 지반안정재는 흙과 간극 사이의 물과 화학반응에 의한 고화 작용으로 강도를 개선하여 안정성을 향상하게 시키는 재료를 의미한다. 플라이애시는 화력발전소에서 석탄을 연소하고 발생하는 부산물로 발생하는 장소에 따라 구분된다. 산업폐기물인 플라이애시는 매년 증

가하는 추세로 시멘트, 비료와 혼합하여 재활용되는 정도가 약 75%이며 나머지는 매립되는 실정이다(Cho, 2020). 이를 재활용하여 지반안정재로 활용하면 환경친화적이며 플라이애시의 다공성이 수분 및 유기질을 흡수하여 수화반응으로 경질의 수화물을 생성하고 지반의 강도를 증진시켜 강우로 인한 세굴 및 표층부의 표면유실을 방지할 수 있다(Bhang, 2016; Fourie et al., 1999; Lee et al., 2021).

따라서, 본 연구에서는 풍화도 사면을 플라이애시 지반안정재로 개량하였을 때 강우 조건에 따른 적절한 심도를 연구하고자 한다. 강우 자료는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS, 2019)에서 제공하는 2017년까지의 분석한 지역빈도 확률강우량을 참고하여 국내기준 최대 강우량을 보인 의정부 관측소의 500년 빈도 강우량을 적용하여(1081.6 mm) 12, 36, 48시간 지속시의 지하수위의 변화량을 확인하였다. 해석 단면의 경사는 풍화토지반에 대한 표준경사와 급경사인 경우에 대하여 사면의 높이를 60m로 고정하고 총 3가지의 단면을 설정하였다(1:1.5, 1:1.8, 1:2.0). 또한, 해석단면에 대하여 SEEP/W를 활용하여 강우 지속시간에 대한 지하수위 변화를 평가하고, SLOPE/W를 활용하여 침투해석결과로 얻은 지하수위에 대한 사면의 안정성을 평가하였다. 그리고 여러 풍화토사면 현장에서 참고자료로 활용할 수 있는 개량토의 심도를 평가하였다.

2. 지반안정재 개량토의 특성

2.1 플라이애시 지반안정재

본 연구에서 사면의 표층부 개량을 위한 재료인 지반안정재를 사용하였으며 지반안정재의 주성분은 플라이애시이다. 플라이애시는 석탄을 연소하고 발생하게 되는 부산물로 산업폐기물로 지정되어있으나, 콘크리트와 혼합하여 사용하게 되면 장기적 강도증진에 효과가 있어 재활용되고 있다. 지반안정재로 사용되는 플라이애시는 제지슬러지를 제거한 제지회 플라이애시로 세립질 토사와 혼합하여 사용하였을 때 간극의 물과 화학반응이 작용하여 공학적인 성질을 개선하는데 효과가 있다. 또한, 일반적인 생석회 지반안정재를 사용하였을 때 발생하는 함수비 저하, 고온에 의한 안전사고, 고화 반응의 장기화, 2차 혼합으로 인한 긴 시공 시간 등의 문제점들을 개선할 수 있다(Lee et al., 2002).

Table 1. Strength test value of improved soil by site (Lee et al., 2021)

Soil type	Compression test		Shear test	Compaction test	City Name
	q (kPa)	c=q/2 (kPa)	c (kPa)	optimum water content (%)	
SP (10%)	781	390,5 (234,3*)	-	12,2	Saemangeum
Remark	(*) means the value when 60% of the test value is applied				

Table 2. Result of improved soil permeability test (Lee et al., 2021)

Division	Permeability coefficient (cm/sec, $\times 10^{-5}$)					Average
	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	
Ground stabilizer 10%	2,13	1,33	1,24	1,68	1,91	1,66

2.2 개량토의 강도 특성

지반안정재로 시공된 사면의 표층부는 강도특성에 좌우되므로 지반 정수의 선정이 매우 중요하다. Lee et al.(2021)은 새만금지역의 원지반 토사 중 No.19체를 통한 시료와 플라이에시를 혼합한 개량토에 대한 강도특성을 파악하였다. 개량토 강도특성 실내시험은 Table 1에 나타내었다.

토사 비탈면 개량 후 식생이 가능한 강도는 1.0MPa 이하이며, 사면보강이 가능한 개량토의 목표 강도는 0.5MPa 이상을 만족해야한다. 새만금지역의 개량토에 대한 배합 시험 5개의 공시체($\phi 5 \times 10 \text{cm}$)를 대상으로 실시하였다. 지반안정재 비율을 10%로 배합하여 실시한 결과 28일 강도 평균값이 781kPa로 식생과 사면보강이 가능한 압축강도를 만족하였다. 지반안정재 10% 혼합한 개량토의 다짐 시험 결과 최적함수비는 12.7%로 나타났다. 실내시험을 시행한 결과 원지반보다 11~21배 증가함을 확인할 수 있었다. 점착력은 Terzaghi and Peck(1967)이 제안한 식을 이용하여 나타내었다. 하지만 개량토를 현장에서 적용하게 되면 현장에서 불균질성과 강우특성 오랜 표면의 노출로 인한 안전율과 수침시의 감소율을 고려하여야 한다. 이러한 이유로 개량토의 점착력 390.5kPa에 60%를 저감하여 234.3kPa로 점착력이 산정되었다.

2.3 개량토의 투수특성

개량토의 투수특성을 시험하기 위해 Lee et al.(2021)은 Table 2에 나타난 바와같이 지반개량지 배합10%를 최종 배합비로 하여 개량토 공시체($\phi 10 \times 20 \text{cm}$) 5개를 대상으로 변수위 투수시험을 실시하였다. 투수시험 결과는 Table 3과 같으며 평균 투수계수는 $1.66 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 로 나타났다.

Table 3. Numerical analysis cases

Division	Factors	The number
Rainfall intensity (mm/hr)	36,1	1
Rainfall duration (hr)	0, 12, 36, 48	4
Slope gradient	1:1,5, 1:1,8, 1:2,0	3
Improved soil thickness (m)	0, 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5	6
Soil conditions	Weathered soil	1

이에, Lee et al.(2021)은 해석 시의 안전율을 고려하여 개량토의 투수계수를 $1.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 로 제안하였다.

3. 침투해석

3.1 개요

강우지속시간에 따라 지하수위가 상승하게 되면 사면의 안정성은 저하된다. 이를 예방하기 위해 한계평형해석을 이용한 사면의 안정성을 검토하여야 하며, 이에 앞서 침투해석을 이용한 사면의 지하수위를 선정하여야 한다. 이에, 본 연구에서는 침투해석을 시행하기 위해 범용프로그램인 GEO STUDIO사의 SEEP/W 2012를 활용하였다. 그리고, 각 해석조건에 대한 강우강도의 단계적 지하수위 상승을 확인하고, 이에 대해 분석을 하였다.

3.2 침투해석 조건

3.2.1 침투해석 조건

사면 안정성을 평가하기에 앞서 해석결과에 영향을 미치는 각 변수에 대하여 해석 케이스를 Table 2와 같이 72개로 결정하였다. 여기서, 강우 조건은 국가 수자원 관리

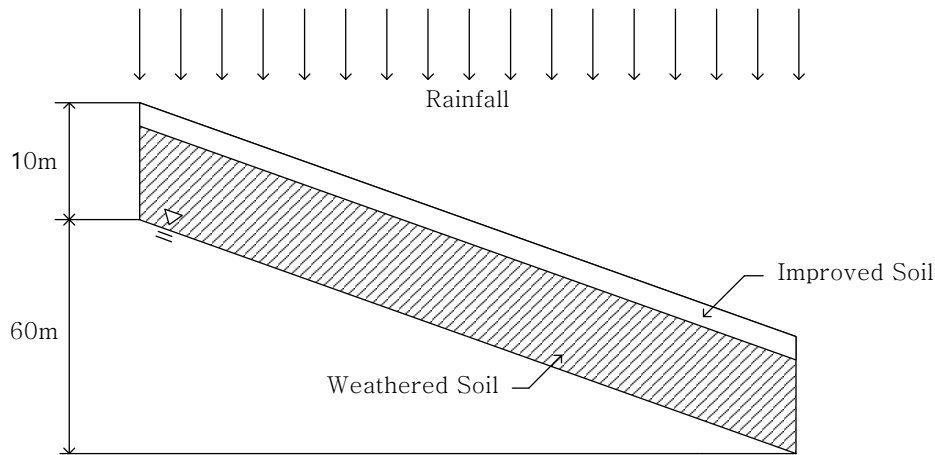


Fig. 1. Geometry for Analysis

Table 4. Penetration analysis Soil Condition

Division	Permeability (cm/sec)	Volumetric water content (%)	USCS
Weathered soil	5.0×10^{-4}	43.46	Silty Sand(SM)

종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 지연빈도 확률강우량을 참고하였으며, 특정한 지역을 대상으로 해석이 진행되는 것이 아니기에 집중호우 시를 가정하여 국내기준 최대 강우량을 보인 의정부 관측소 500년 빈도 72시간에 대하여 1081.4mm 강우강도를 적용하였다. 이를 바탕으로 지속시간 최대 48시간으로 나타내면 36.1mm/hr로 선정하였으며, 총 12시간, 36시간 48시간 지속 시의 3단계로 나누어 비교하였다. 지속시간에 따른 침투 결과가 선형적으로 나타나 24시간 지속 시의 침투 해석 및 사면안정해석 결과는 생략하였다. 사면의 경사는 국토교통부(Ministry of Land, 2016)의 건설공사 사면 설계기준을 참고하여 1:1.5, 1:1.8, 1:2.0의 경사를 적용하였다. 개량토의 심도는 실제 현장의 시공 적용성을 고려하여 개량토를 적용하지 않은 자연사면(개량토 0m)과 개량토를 0.5m씩 늘려 2.5m 개량 시까지 총 6가지의 경우의 사면 안정성을 비교하였다.

3.2.2 해석 단면

해석 단면은 Fig. 1과 같이 풍화토의 두께를 10m, 사면의 높이를 60m로 고정하였다. 사면의 경사는 1:1.5(33.69°), 1:1.8(29.05°), 1:2.0(26.56°)의 경우로 구분하였다. 사면 파괴부의 지반 조건은 풍화토로 적용하였으며 지반의 개량은 표층부부터 하였다. 강우 조건은 사면 상부에 균등하게 분포하도록 적용하였고, 초기 지하수위는 풍화토의 밑면과 일치시킴으로써 강우 지속시간별로 지하수위의 상승량을 측정할 수 있도록 하였다.

3.2.3 침투해석 대상 지반의 불포화 특성

불포화 거동을 해석하기 위해서는 함수특성곡선과 불포화 투수계수곡선을 결정하여야 한다. 풍화토와 개량토에 대한 함수특성곡선과 불포화 투수계수곡선은 SEEP/W 프로그램에서 제공하는 함수특성 데이터를 활용하였으며, 이때 필요한 입력값은 토질의 입경과 포화시의 체적함수비이다. 여기서, 토질종류는 국내의 풍화토가 분해되는 과정에서 대부분이 실트질 모래로 분해됨을 감안하여 실트질 모래(SM)로 적용하였다. 또한 포화시의 체적함수비는 Kim et al.(2002)의 연구에서 제시한 값을 적용하였다. 이에, 침투해석시 풍화토 및 개량토에 대한 불포화 특성은 Table 4와 같다.

3.3 침투해석 결과 및 분석

상기 조건을 반영하여 침투해석을 실시하였으며 사면의 경사 조건에 따라 지하수위가 상승량을 포화된 깊이로 나타낸 결과는 Table 5, 6, 7 및 Fig. 2와 같다. 포화된 깊이의 경우 사면 경사에 따른 영향이 거의 없고 비슷한 경향이 나타났다. 최대 48시간 동안 강우가 지속되었을 때 자연사면은 강우지속시간 48시간에서 완전포화가 이루어졌다. 개량토 0.5m 적용하였을 때의 포화된 깊이를 비교해보면 1:1.5 경사에서는 9.82m에서 0.88m로, 1:1.8 경사에서는 9.84m에서 1.05m로, 1:2.0 기울기에서는 9.86m에서 1.26m까지로 감소하였다. 이러한 결과를 미루어 봤을 때

Table 5. Saturation depth at slope 1:1.5

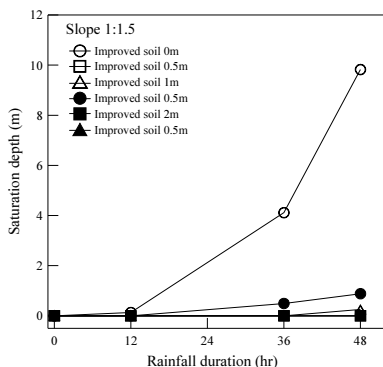
Division	Improved soil thickness					
	0m	0.5m	1m	1.5m	2m	2.5m
0	0	0	0	0	0	0
12	0.13	0	0	0	0	0
36	4.11	0.49	0	0	0	0
48	9.82	0.88	0.25	0	0	0

Table 6. Saturation depth at slope 1:1.8

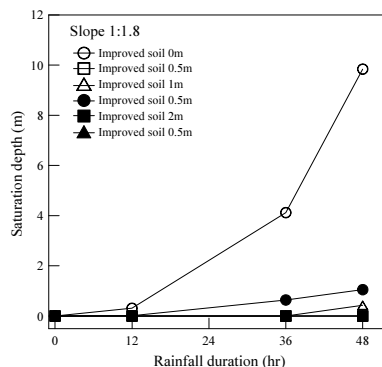
Duration (hr)	Improved soil thickness					
	0m	0.5m	1m	1.5m	2m	2.5m
0	0	0	0	0	0	0
12	0.31	0.01	0	0	0	0
36	4.12	0.64	0	0	0	0
48	9.84	1.05	0.43	0	0	0

Table 7. Saturation depth at slope 1:2.0

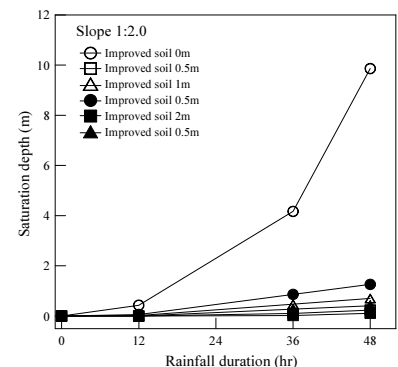
Duration (hr)	Improved soil thickness					
	0m	0.5m	1m	1.5m	2m	2.5m
0	0	0	0	0	0	0
12	0.43	0.06	0.02	0	0	0
36	4.17	0.86	0.47	0.27	0.1	0.02
48	9.86	1.26	0.7	0.41	0.24	0.11



(a) In slope 1:1.5



(b) In slope 1:1.8



(c) In slope 1:2.0

Fig. 2. Saturated depth by rainfall duration

개량토 적용시 강우로 인한 지하수위 상승속도가 감소하는 것으로 판단된다.

4. 사면의 안정성 평가

4.1 개요

사면 안정해석의 목적은 사면의 파괴를 예측하고 예방하는 것에 있다. 본 연구에서는 사면 안정해석에 일반적으로

사용하는 한계평형해석(Limit Equilibrium Method, LEM) 프로그램인 SLOPE/W를 활용하였으며 침투해석 결과를 연계하여 지하수위를 산정한 후 사면 안정성을 검토하였다. 이때 한계평형해석 방법은 Bishop의 간편법(Bishop and Bjerrum, 1955)을 적용하였다. 사면 안정성 해석을 위한 지반 정수로는 단위중량, 점착력, 내부마찰각이 있으며 내부마찰각의 경우 불포화토에서 모관흡수력에 의한 겉보기 마찰각이 고려되어야 한다. 따라서, 이를 고려한 사면 안정성 해석시의 지반의 강도정수는 Table 8과 같다. 여기

Table 8. Numerical analysis Soil Condition

Division	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	ϕ^b (°)
weathered soil	19	15	30	8.1
Improved soil	19	200	30	—

Table 9. Stability results at slope 1:1.5

Duration (hr)	Improved soil thickness					
	0m	0.5m	1m	1.5m	2m	2.5m
0	1.18	1.263	1.348	1.436	1.526	1.619
12	1.179	1.263	1.348	1.436	1.526	1.619
36	1.082	1.258	1.348	1.436	1.526	1.619
48	0.944	1.251	1.339	1.436	1.526	1.619

Table 10. Stability results at slope 1:1.8

Duration (hr)	Improved soil thickness					
	0m	0.5m	1m	1.5m	2m	2.5m
0	1.378	1.474	1.573	1.674	1.779	1.887
12	1.378	1.474	1.573	1.674	1.779	1.887
36	1.274	1.473	1.573	1.674	1.779	1.887
48	1.125	1.463	1.572	1.674	1.779	1.887

Table 11. Stability results at slope 1:2.0

Duration (hr)	Improved soil thickness					
	0m	0.5m	1m	1.5m	2m	2.5m
0	1.5	1.595	1.694	1.794	1.898	2.005
12	1.495	1.596	1.694	1.795	1.899	2.006
36	1.37	1.582	1.69	1.793	1.898	2.006
48	1.213	1.571	1.685	1.791	1.897	2.005

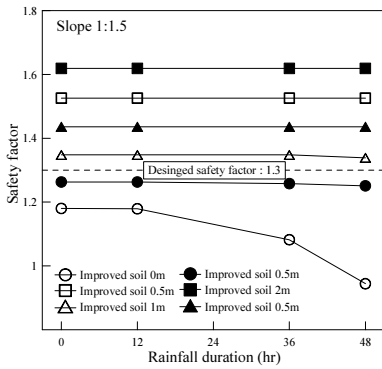
서, 개량토의 점착력은 Lee et al.(2021)의 문헌을 참고하였으며 단위중량과 내부마찰각은 풍화토와 동일하게 적용하였다.

4.2 사면의 안정성 평가 결과

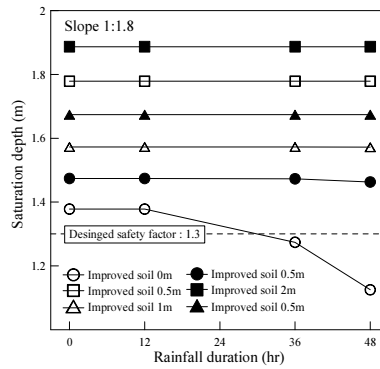
사면 파괴활동면이 활동저항력보다 작을 경우에는 파괴가 일어나지 않지만, 설계 시 사면의 불확실성과 기하학 조건을 고려하여 허용 안전율을 설계에 반영해야 한다. 국내에서 적용하는 깎기 사면의 안전율은 건기에 1.5, 우기에 1.2~1.3을 적용한다(Ministry of Land, 2016). 본 연구에서는 침투해석을 실시하여 지하수위를 적용하였으므로, 우기 시의 안전율 1.3을 기준으로 적용하였다.

Table 8에서 제시한 지반의 정수를 적용하여 사면 안정성 해석한 결과는 Table 9, 10, 11과 같이 나타내었다. 이

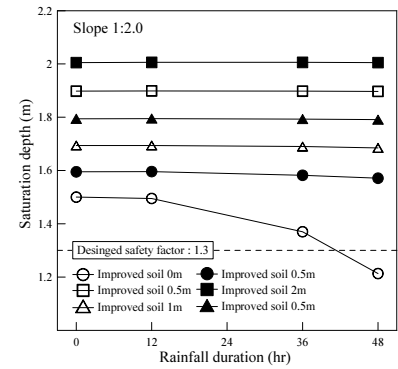
러한 결과를 그래프로 나타낼 경우 Fig. 3과 같다. 자연사면 1:1.5 경사에서 강우 지속시간 48시간이 지났을 때 안전율이 0.944로 파괴의 위험이 있는 것으로 나타났다. 동일한 사면에 개량토 0.5m 적용할 경우의 최대 안전율은 1.251로 사면 안정성 기준을 만족하지 않았으며 1m 적용할 경우의 최대 안전율은 1.339로 사면 안정성 기준을 만족하였다. 또한, 1:1.8 사면의 경우 자연사면에서는 안전율이 1.125로 사면의 붕괴 위험이 있는 것으로 나타났다. 같은 사면에서 개량토 0.5m 적용 시 안전율이 1.463으로 증가하여 사면 안정성 기준을 만족하였다. 1:2.0 사면은 자연사면 조건에서 36시간까지는 안전율이 1.37로 사면 안정성 기준을 만족하였으나, 48시간이 지났을 때는 1.213으로 감소하였다. 같은 조건의 사면에 개량토 0.5m 적용 시 1.571까지 안전율이 증가하였다.



(a) In slope 1:1.5

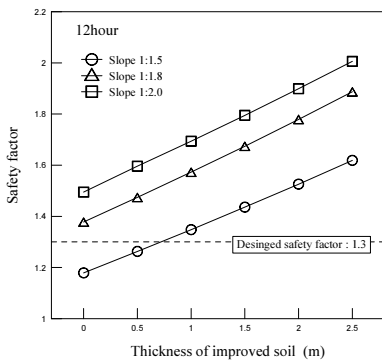


(b) In slope 1:1.8

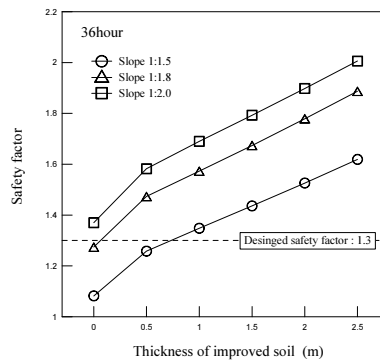


(c) In slope 1:2.0

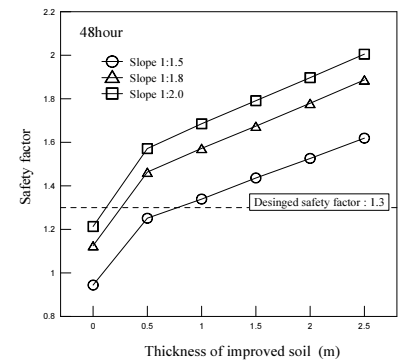
Fig. 3. Safety factor by rainfall duration



(a) For 12hours



(b) For 36hours



(c) For 48hours

Fig. 4. Safety factor by the thickness of improved soil

5. 개량토 심도 제안

경제적으로 개량토를 적용하기 위해서 다음과 같이 개량토 심도를 제안하였다. 36.1mm/hr의 강우 조건으로 12시간, 36시간, 48시간 지속하였을 경우의 침투해석 결과를 연계하여 사면 안전율을 종합 분석하여 개량토 심도에 따라 Fig. 4와 같이 도시하였다. 이에 안정적인 심도를 제안하기 위한 안전율은 우기시 설계기준 안전율 1.3을 적용하였다.

Fig. 5에 따르면 1:1.5 경사의 사면에서는 강우지속시간과 무관하게 지표면으로부터 1m 이상 적용하는 것이 적절하며, 1:1.8 사면에서는 36시간 이상 지속 시에 개량토를 1m 적용 시 적절한 것으로 평가되었다. 또한, 1:2.0 사면의 경우 48시간 이상 지속 시 0.5m 이상의 개량토를 적용하였을 때 안전성이 확보되는 것으로 나타났다.

6. 결론

본 연구는 강우시 사면의 붕괴로 인한 산사태 및 토석류 등의 재해를 방지하기 위하여 지반안정재 개량토를 적용

하는 방안을 고려하였다. 연구에서 적용한 개량토는 지반 안정재10%를 혼합하여 실시한 결과 28일 강도 평균값이 781kPa이며, 사면안정해석 시 적용한 점착력의 값은 200kPa를 적용하였다. 이때 투수계수는 $1.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 이다. 침투해석 및 사면 안정해석을 수행하여 강우지속시간과 사면의 조건에 따른 개량토의 안정적인 심도에 대하여 연구하였다.

1. 최대 48시간 동안 강우가 지속되었을 때 자연사면은 강우지속시간 48시간에서 완전포화가 이루어졌다. 개량토를 0.5m 적용하는 경우의 포화된 깊이를 비교해보면 1:1.5 경사의 경우는 9.82m에서 0.88m로, 1:1.8 경사의 경우는 9.84m에서 1.05m로, 1:2.0 경사의 경우는 9.86m에서 1.26m로 감소하였다. 이러한 결과를 미루어 봤을 때 개량토 적용시 강우로 인한 지하수위 상승속도가 감소하는 것으로 판단된다.
2. 자연사면(개량토 미적용시)의 경우 강우지속시간이 48시간 지날 경우 경사와 무관하게 모든 사면에서 안정성 기준을 만족하지 못하였다. 1:1.5 사면의 경우 48시간의

강우가 지속되는 동안 모두 사면 안정성 기준을 만족하지 못하였으며, 1:1.8 사면의 경우 강우지속시간 36시간 이후에 사면안전율기준을 만족하지 못하였다. 1:2.0 사면의 경우 강우지속시간 48시간 이후에 사면안전율기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

3. 강우지속시간에 따른 개량토의 적절한 심도는 다음과 같다. 1:1.5 사면에서 12시간이상 지속되었을 때 지표면으로부터 1m 이상 개량하는 것이 적절하며, 1:1.8 사면에서는 36시간 이상 지속 시 0.5m의 개량토가 적절한 것으로 판단된다. 또한, 1:2.0 사면의 경우 48시간 이상 지속하였을 때 0.5m 이상 개량토를 적용하여야 사면 안정성이 확보되는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 보수적인 조건을 반영하여 개량토 깊이를 제안하였으므로 현장에서 적용할 시에는 각 현장의 상황을 고려하여 개량토 깊이를 적용하는 것이 적절하다. 따라서, 유사한 사면에 대하여 본 연구에서 제안한 심도보다 적은 심도를 적용 시 사면 안정성을 면밀하게 검토할 필요성이 있다.

References

1. Bhang, I. H. (2016), "A Study on the Behavior Characteristic of Composite Reinforced Earth with Improved Soil Surface and Geogrid-reinforced Backfill", Ph.D. Thesis, Graduate School of Jeonbuk National University.
2. Bishop, A. W. and Bjerrum L. (1955), "The use of slip circle in the stability analysis of earth slopes", *Geotechnique*, Vol.5, No.1, pp.7-17.
3. Brand, E. W., Premchitt, H. B. and Phillipson, H. B. (1984), "Relationship between Rainfall and Landslides in HongKong", *Proc. Of 4th Inter. SYMPOS. Landslides*, Toronto, pp.377-384.
4. Brooks, R. H. and Corey, A. T. (1964), "Hydraulic properties of porous media", *Colorado State University Hydrology Paper*, Vol.3, pp.27.
5. Cho, S. E. and Lee, S. R. (2000), "Slope Stability Analysis of Unsaturated Soil Slopes Due to Rainfall Infiltration", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.16, No.1, pp.51-64.
6. Cho, H. K. (2020), "Verification and Status of Lightweight Aggregate based Coal Ash", *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol.15, No.1, pp.33-38.
7. 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.1-3.
8. Fredlund, D. G., Xing, A. and Huang, S. (1994), "Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils using the Soil-Water Characteristic Curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, pp.533-546.
9. Kim, J. H., Park, S. W., Jeong, S. S. and Yoo, J. H. (2002), "A Study of Stability Analysis on Unsaturated Weathered Slopes Based on Rainfall-induced Wetting", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.18, No.2, pp.123-136.
10. Kim, S. K., Ryu, J. H. and Kim, D. H. (1999), "Infiltration Characteristics of Unsaturated Decomposed Soils", *Journal of Civil Engineering*, Vol.19, No.III-5, pp.995-1002.
11. Lee, K. I., Park, S. B. and Choi, M. J. (2021), "Evaluation of Field Applicability of Slope of Improved Soil for Ground Stabilizer", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.20, No.2, pp.35-44.
12. Lee, S. J. and Lee, S. R. (2005), "Soil Water Characteristic Curve for Weathered Granite Soils - A Prediction Method", *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.21, No.2, pp.17-26.
13. Lee, Y. S., Lee, H. J. and Kim, Y. S. (2002), "Soil Water Characteristic Curve for Weathered Granite Soils - A Prediction Method", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.3, No.2, pp.22-23.
14. Lee, H. K. and Lee, I. (2009), "A Study for Unsaturated Character of Weathered Granite Soil in Korea", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.10, No.3, pp.13-20.
15. Lumb, P. (1975), "Slope Failures in Hong Kong", *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol.8, pp.31-65.
16. Ministry of Land (2016), "Construction of Slope Design Criteria Guideline".
17. Ryu, C. H. (2003), "Estimation of Slope Stability during the Change of Matric Suction", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol.2003, No.23, pp.195-201.
18. Song, Y. S. (2003), "The design methods of the slopes reinforced by earth retention system", Ph.D. Thesis, Graduate School of Daejin University.
19. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967), "Soil Mechanics in Engineering Practice 2nd Edition", New York, John Wiley.
20. Terzaghi, K. (1950), "Mechanisms of Landslides," *Geotechnical Society of America*, Berkeley, pp.83-125.
21. Van Genuchten, M. T. (1980), "A closed form equation for predicting hydraulic conductivity in unsaturated soils", *Soil Sci. Soc.Am. J.*, Vol.44, pp.892-898.
22. Water Resources Management Information System (2019), "Probability rainfall (regional frequency analysis)".