

강우특성을 고려한 불포화 풍화잔류토 사면의 안정성 해석

Stability Analysis of a Slope in Unsaturated Weathered Residual Soil Considering the Rainfall Characteristics

이강일* · 장용채** · 김태훈*** · 정연인****

Lee, Kang-Il · Chang, Yong-Chai · Kim, Tae-Hoon · Chung, Youn-In

Abstract

It has been reported that the failure of a slope in weathered soils or rocks induced by intensive rainfall occurs mainly within 2.0m below the ground surface, and that the effect of rainfall on the rise of the ground water level is not significant if the ground water level inside the slope is not so high before rainfall. Most slopes in Korea, however, have been examined to rather fail at the deeper part since they are usually designed on the basis of assumption that the ground water level rises up to the surface when raining. In this study, the rise of ground water level and slope stability were examined in order to verify the appropriateness of the current ground water level condition that has a significant effect on slope stability using the average daily rainfall in Seoul for the last 30 years. The result showed that the ground water level appears to rise up to 6.0~41.0% of the slope height respectively, and therefore the currently applied condition of ground water level may be somewhat overestimated.

Keywords : Unsaturated soil, Characteristics of rainfall, Ground water level, Stability of slopes

요 지

풍화토나 풍화암 지반의 경우 집중호우에 의한 사면붕괴는 주로 지표면부근 2.0m 이내에서 발생되며, 강우발생 전에 사면 내 지하수위가 높지 않다면 강우가 지하수위 상승에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 보고되고 있다. 그러나 국내 사면설계에 적용되고 있는 우기시 지하수위 조건은 강우에 의해 지하수위가 지표면까지 상승하는 것으로 보고 있어, 사면의 활동 파괴면이 지표부근 보다는 사면 심부에서 발생하는 것으로 검토되고 있다. 본 연구는 사면 안정에 주된 영향을 미치는 지하수위 조건의 적정성 여부를 검토하기 위하여 서울지역 30년 평균일강우량을 적용하여 실제 우기시 지하수위 상승 및 사면안정성을 검토하였다. 그 결과 지하수위 상승량은 사면 높이의 6.0~41.0%로 나타나 현재 통용되고 있는 우기시 지하수위 적용 기준이 과대평가되고 있음을 알 수 있었다.

주요어 : 불포화토, 강우특성, 지하수위, 사면안정

* 비회원, 대전대학교 건설시스템공학과 부교수

** 정회원, 목포해양대학교 해양시스템공학부 부교수

*** 비회원, (주)대우건설 기술연구원 선임연구원

**** 정회원, 계명대학교 공과대학 토목공학과 부교수

1. 서론

우리나라는 전국토의 70%가 산지로 이루어져 있으며, 산지의 최상부 표토층은 일반적으로 풍화가 발달된 화강암이나 화강편마암의 풍화잔류물이고, 우기시를 제외하고는 대부분 불포화 상태로 존재한다. 또한 풍화 잔류토는 간극이 매우 커서 건조와 습윤 상태에서의 강도 및 흐름특성이 현격하게 변화하는 특징을 가지고 있으며, 대체적으로 No.200 체($0.75\mu\text{m}$ 이하) 통과율이 0~60%의 세립자를 함유한 입도분포가 양호한 조립토로 구성되어 있다(이강일 외, 1999).

이러한 풍화잔류토로 구성된 산지는 지역개발 및 사회 간접시설 공사가 활발하게 진행됨에 따라 인위적으로 그 모양이 변화하게 되고, 이로 인해 발생된 사면은 여러 가지 요인에 의해 안정성 여부가 달라진다. 강우에 의한 사면붕괴는 국내 지형특성과 부합하여 많은 인명 및 재산피해를 발생시키고 있다. 1963년부터 1996년까지 20명 이상이 사망한 대규모 사면붕괴가 15건 발생하였으며, 최근에는 집중호우를 동반한 루나(2002년), 매미(2003년)와 같은 태풍에 의해 전국적으로 196개소의 사면붕괴(장현식 외, 2004)가 발생되었다. 이러한 사면붕괴 사례를 볼 때 사면붕괴는 주로 강우가 내리는 동안 발생하고, 그 원인은 강우가 지표면으로 침투하여 사면안정성에 영향을 주었기 때문으로 평가하고 있다.

현재 강우시 사면붕괴에 대한 국내외 연구에 따르면 집중호우에 의한 사면붕괴는 주로 지표면부근 2.0m 이내에서 발생되며, 강우 발생 전 사면내 지하수위가 높지 않다면 강우가 지하수위 상승에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 보고하고 있다(김재홍, 2002). 그러나 국내 사면설계에 적용되고 있는 우기시 지하수위조건은 강우에 의해 지하수위가 지표면까지 상승하는 것으로 보고 있어, 사면의 활동과피면이 지표부근보다는 사면 심부에서 발생하는 것으로 검토되고 있다. 또한 이를 바탕으로 보강범위를 결정하다 보니 사면보강(soil nailing이나 earth anchor)의 범위가 사면심부 파괴활동면 외부에 위치하도록 보강대책을 수립하여야 하는 불합리하고 비경제적인 과 보강이 이루어지고 있다.

따라서 본 연구는 현재 국내에서 실시되고 있는 사면설계 방법과 사면안정성에 가장 중요한 인자인 지하수위 조건을 어떻게 다루고 있는지를 파악하고, 또한 국내 여러 기관에서 제시하고 있는 사면구배 및 지하수위 설계기준을 조사하여 강우시 지하수위조건에 대한 적정성을 평가하였다. 적정성 평가는 한국도로공사의 사면설계조건을 준하여 검토사면을 선정하고 현재의 해석방법과 강우시 불포화토 특성(함수특성곡선, 투수계수)을 고려하였을 경우에 대한 사면안정성(Leong외, 1997)을 비교하고, 해석상의 문제점을 분석하여 보다 합리적이고 경제적인 사면해석방법을 제시하고자 한다.

2. 강우시 사면 안정해석

2.1 함수특성곡선

불포화토 사면의 경우에는 모관흡수력이 지반의 거동특성에 매우 중요한 역할을 하는 설계변수이다. 따라서 불포화토와 관련된 흐름특성, 변형특성 및 강도특성을 적절히 고려하기 위해서는 이들 거동특성에 대한 모관흡수력의 영향을 반드시 고려하여야 한다(Fredlund외, 1994, Kunze외, 1968, Vanapalli외, 1998). 함수특성곡선(soil water characteristic curve)은 사면의 불포화정도에 따른 모관흡수력의 발생정도를 대변하며, 불포화토에서 지하수 흐름, 강우로 인한 사면안정 등을 포함한 압밀특성 등을 규명하기 위해 반드시 고려해야 하는 지반 특성치이다.

그림 1은 함수특성곡선을 나타낸 것으로 포화함수비(θ_s)는 흙의 최대체적함수비를 나타내며, 일반적으로 포화함수비에는 용해되거나 갇힌 공기가 포함되어 있어 흙의 간극률과 일치하지는 않고 5~10%정도 낮은 것으로 알려져 있다. 또한 낮은 모관흡수(0~1기압)에서는 모세관현상과 간극의 크기에 따라 포화함수비가 달라지므로 흙의 구조에 영향이 크나 높은 모관흡수력에서는 흡착에 의한 영향이 크므로 흙의 비표면적과 이중확산층의 영향이 크다. 따라서 본 연구도 강우에 따른 불포화토 사면의 함수특성의 변화를 고려하여 보다 정밀하게 사면의 안정성을 평가하였다.

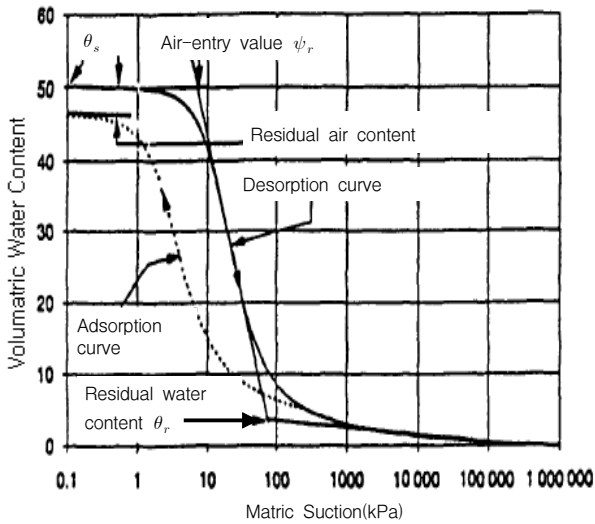


그림 1. 함수특성곡선

2.2 국내 사면 지하수위 적용기준

국내 건설부분 최 상위 기관인 건설교통부에서는 토사 또는 풍화암층의 경우 건기시에는 지하수위를 고려하지 않고, 우기시에는 지표면까지 지하수위가 포화된 것으로 보고 사면의 안정성 평가를

실시하며, 건설교통부 산하 한국도로공사와 한국토지공사는 과거에 우기시 지하수위를 지표면 3.0m 아래에 위치하도록 권고하였다. 그러나 최근 한국도로공사와 한국토지공사에서도 건설교통부의 기준을 따라 우기시 지하수위가 지표면에 위치하는 것으로 개정하여 현재 적용하고 있는 추세이다. 표 1은 상기와 같은 각 기관별 지하수위 적용기준을 나타낸 것이다.

2.3 서울지역의 강우특성

현재 세계 도처에서 발생하고 있는 많은 산사태는 급속한 도시개발화의 영향에 따라 이례적인 자연의 폭풍우와 관련하여 지질학적, 지형학적 및 기후변화에 따른 것이다. 강우시 사면은 지표면부터 포화되면서 내부로 침투와 침류가 발생하여 간극수압이 상승하고, 전단강도가 감소한다. 사면이 포화되기 위해서는 지반의 침투율 이상의 충분한 강우강도와 강우 지속시간이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 그림 2와 같이 1971년부터 2000년까지 서울지역에 발생된 30년 평균 일강우량(기상청자료)을 적용하여 지하수위 변화를 수치 해석으로 관찰하였다.

표 1. 국내 각 기관별 지하수위 적용기준

구 분	기관	조건	적 용 기 준	
			건기시	우기시
도로설계 실무편람 (토질 및 기초편)	도로 공사 (1996)	암반	인장균열면이나 활동면을 따라 수압이 작용되지 않음	인장균열면이나 활동면을 따라 작용되는 수압을 $H_w(\text{지하수위})=0.5H(\text{사면고})$ 층으로 가정하여 적용
		토층/풍화암	지하수위 미 고려	지하수위는 G.L(-) 3.0m
도로설계 편 램 (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 미 고려	지하수위 고려
Koland 설계기법 연구보고서	토지 공사	-	건기시 시추공의 수위적용	지하수위는 G.L(-) 3.0m 적용하고, 강우에 의한 표면파괴해석
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 미 고려	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 미 고려	지하수위는 지표면에 위치

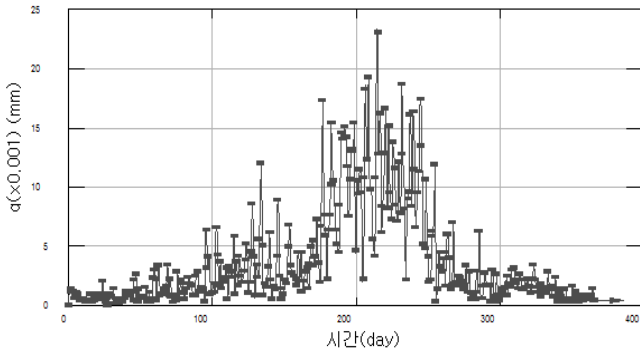


그림 2. 서울지역 30년간 강우변화도

3. 사면안정 해석조건 및 결과 고찰

3.1 해석단면

본 연구에서는 강우에 의한 지하수위 변화를 고려할 수 있도록 침투해석을 실시하고, 국내 지하수위 적용기준과 비교하여 사면 안정성을 검토하였다. 침투해석에 사용된 경계조건은 전체적인 지하수의 흐름을 고려하여 해석영역 양 측면 및 하부에 무한경계 조건을 설정하고 강우적용은 사면부 유입은 흘러내리는 양이 많으므로 무시하고, 사면

천단부 유입만 고려하였다. 또한 초기지하수위는 사면 하단부에 위치하는 것으로 가정하였다.

검토단면은 표 2와 같이 가장 전형적인 4가지 경우에 대하여 사면설계 및 시공경험이 가장 풍부한 한국도로공사의 토사층 절토사면을 적용하였다. 표준기울기는 1:1.5, 소단은 5.0m마다 1.0m를 적용하였으며 사면높이는 10.0m~25.0m까지 각 5.0m 별로 변화시킨 단면을 선택하고 그에 따른 각 단면별 사면 안정성과 지하수위 변화를 평가하였다. 지하수위 조건은 한국도로공사의 조건을 적용할 경우는 건기시 원지반, 우기시 지표면 지하수위 조건을 선택하였고, 강우에 의한 침투해석 조건을 적용할 경우는 서울지역 30년 평균강우량을 적용하여 각 단면별 침투해석을 실시하여 그에 따른 지하수위 상승고를 적용하였다.

본 연구에서 일평균 강우량을 적용한 것은 국내 강우의 계절적 편중과 장기적인 지하수위 변화를 고려한 것으로 30년간 일 평균강우량을 365개의 데이터로 반복적으로 적용하고, 강우가 지하수위에 도달하기까지의 침투와 지체현상을 고려하여 보다 현실적인 지하수위 변동요건을 반영하기 위한 것이다.

표 2. 침투해석 및 사면안정 해석 단면

사면 높이	해석단면 및 강우발생 초기 지하수위 상태	사면 높이	해석단면 및 강우발생 초기 지하수위 상태
10m		20m	
15m		25m	

3.2 지반정수

한계평형해석에 의한 사면안정 검토는 토사(풍화토, 풍화암)에 대하여 실시하는 것이 일반적이므로 본 연구에서는 대상지반을 풍화토지반으로 가정하여 사면 안정검토를 실시하였다. 본 연구에 적용된 지반정수는 국내 설계사례를 조사하여 표 3과 같은 값을 해석에 적용하였다.

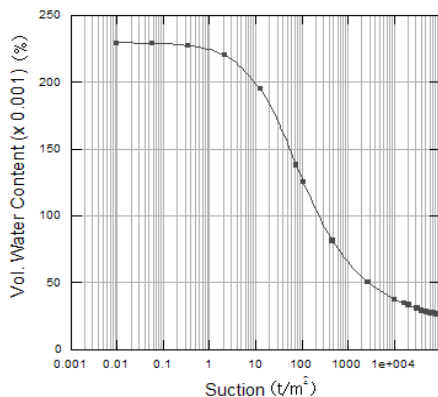
표 3. 풍화토 지반의 강도정수

구 분	단위중량(t/m^3)	점착력(t/m^2)	내부마찰각($^\circ$)
풍 화 토	1.9	1.5	30

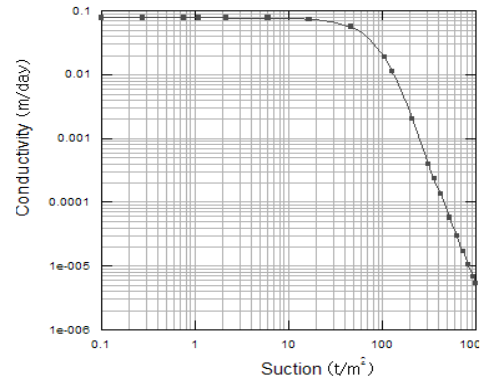
강우에 의한 불포화지반의 지하수위 변화 및 간극수압변화를 파악하기 위해서는 불포화지반의 함수특성곡선 및 투수계수곡선이 규명되어야 한다. 본 연구에 사용된 대상지반은 충남 서창지역 풍화토(SM)지반에서 시험된 풍화토의 보유함수비 측정(volumetric pressure plate extractor)결과를 반영하여 Fredlund와 Xing 함수특성곡선식을 이용하여 함수곡선을 추정하고, 이를 이용하여 불포화토의 투수계수곡선을 결정하였다. 표 4는 서창지역 풍화토의 현장시험에 의한 함수특성곡선 보정계수와 수리특성치이며 그림 3은 SEEP/W 프로그램에 서창지역 풍화토(SM)의 수리특성치를 입력하여 얻어진 함수특성곡선 및 투수계수곡선을 나타낸 것이다.

표 4. 서창지역 풍화토(SM)의 수리특성치(김윤기, 2002)

구 분	함수특성곡선 보정계수			포화시 수리특성	
	α	n	m	함수비 (%)	투수계수 (cm/sec)
서창지역	33.506	0.831	1.155	22.95	9.13×10^{-5}



(a) 함수특성곡선



(b) 투수계수곡선

그림 3. 충남 서창지역 풍화토(SM)의 함수특성곡선 및 투수계수곡선(김윤기, 2002)

3.3 침투해석에 의한 지하수위 변화 예측

서울지역 30년 평균 일강우 적용시 사면높이에 따른 지하수위 변화와 간극수압 분포를 예측하였다. 해석에 사용된 유한요소프로그램은 캐나다의 Geo-Slope International사에서 개발된 SEEP/W를 사용하였다.

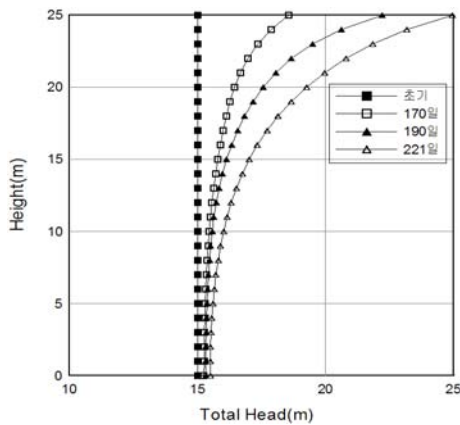
사면의 높이가 10.0m인 경우를 수치해석 한 결과는 누적강우 발생 248일이 경과한 후 최대 지하수위 상승이 발생하였으며, 이 때의 지하수위 상승고는 초기 지하수위보다 약 4.1m정도 상승한 것으로 나타났다. 또한, 지표면부근의 압력수두 변화를 측정한 결과(그림 4), 강우의 지속시간이 증가할수록 지표면의 압력수두가 점진적으로 증가하여 누적강우 발생 221일이 경과한 후에는 부(-)의 압력수두($-10.0t/m^2$)를 갖고 있던 지표면의 압력수두가 침투강우에 의해 $0.0t/m^2$ 까지 증가하여 포화상태가 되었다. 그러나 이는 침투강우에 의한 습윤대(wetting zone)로서 사면 하부에 위치한 지하수위와는 다른 의미의 이중수위(punched water level)임을 알 수 있다.

사면의 높이가 15.0m인 경우는 누적강우 발생 257일이 경과한 후 최대 지하수위 상승이 발생하였으며 이 때의 지하수위 상승고는 초기 지하수위보다 약 2.7m정도 상승한 것으로 나타났다. 또한, 지표면부근의 압력수두 변화를 측정한 결과(그림 5), 강우의 지속시간이 증가할수록 지표면의 압력수두가 점진적으로 증가하여 누적강우 발생 220일이 경과한 후에는 부(-)의 압력수두($-15.0t/m^2$)를 갖고 있던 지표면의 압력수두가 침투강우에 의해

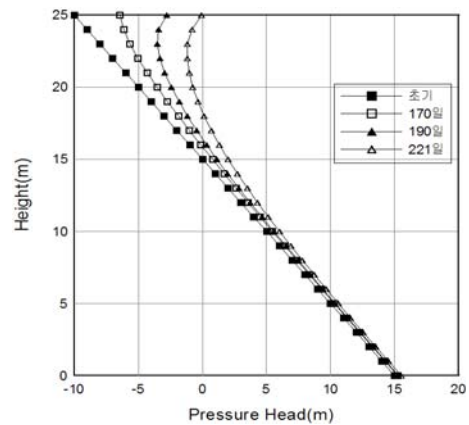
-4.3t/m²까지 증가하였으나 포화상태를 보이지는 않았다.

사면의 높이가 20.0m인 경우는 누적강우 발생 275일이 경과한 후 최대 지하수위 상승이 발생하였으며 이 때의 지하수위 상승고는 초기 지하수위보다 약 1.8m정도 상승한 것으로 나타났다. 또한, 지표면부근의 압력수두 변화를 측정된 결과(그림 6), 강우의 지속시간이 증가할수록 지표면의 압력수두가 점진적으로 증가하여 누적강우 발생 215일이 경과한 후에는 부(-)의 압력수두(-20.0t/m²)를 갖고 있던 지표면의 압력수두가 침투강우에 의해 -6.2t/m²까지 증가하였으나 포화상태를 보이지는 않았다.

사면의 높이가 25.0m인 경우는 누적강우 발생 291일이 경과한 후 최대 지하수위 상승이 발생하였으며 이 때의 지하수위 상승고는 초기 지하수위보다 약 1.5m정도 상승한 것으로 나타났다. 또한, 지표면부근의 압력수두 변화를 측정된 결과(그림 7), 강우의 지속시간이 증가할수록 지표면의 압력수두가 점진적으로 증가하여 누적강우 발생 215일이 경과한 후에는 부(-)의 압력수두(-25.0t/m²)를 갖고 있던 지표면의 압력수두가 침투강우에 의해 -10.1t/m²까지 증가하였으나 포화상태를 보이지는 않았다. 그러나 사면높이가 15m, 20m, 25m에서와 같이 부(-)의 압력수두가 감소한다는 것은 습윤대가 형성 되었다는 것을 의미하는 것으로 지표면부근의 사면 안정성에 영향을 미칠 수 있다.

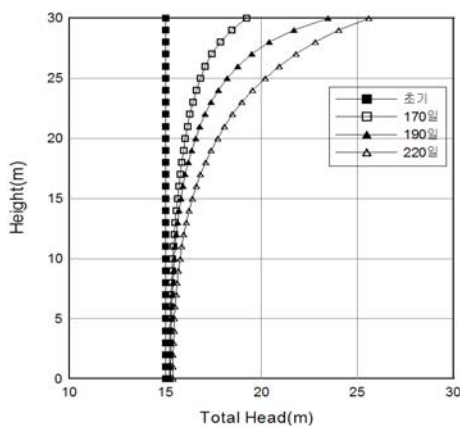


(a) 시간별 전수두 변화도

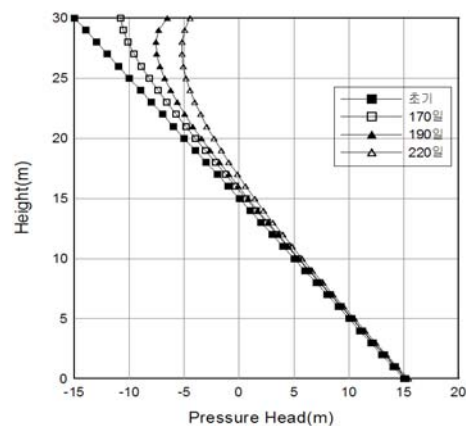


(b) 시간별 압력수두 변화도

그림 4. 시간별 수두 변화도(사면높이 10.0m 적용시)

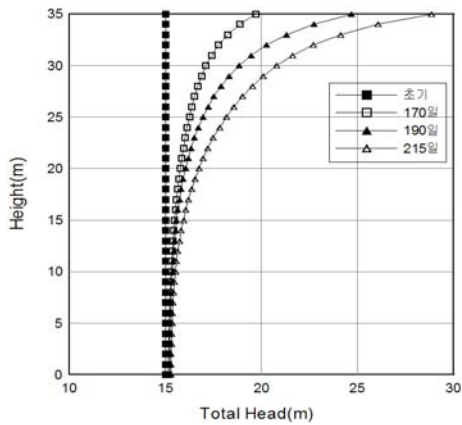


(a) 시간별 전수두 변화도

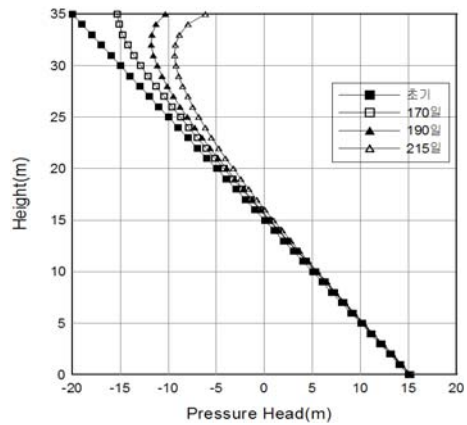


(b) 시간별 압력수두 변화도

그림 5. 시간별 수두 변화도(사면높이 15.0m 적용시)

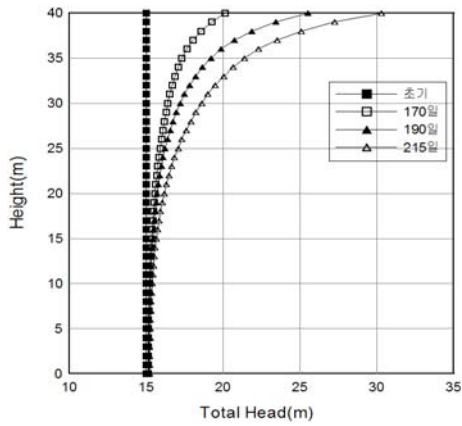


(a) 시간별 전수두 변화도

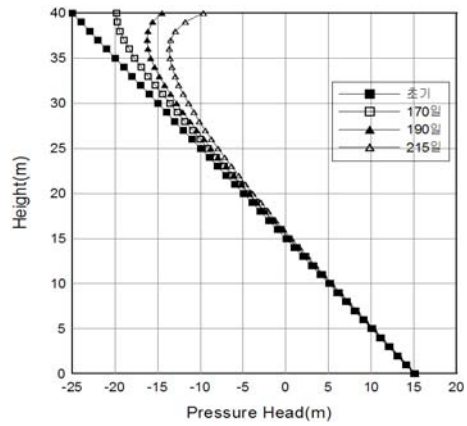


(b) 시간별 압력수두 변화도

그림 6. 시간별 수두 변화도(사면높이 20.0m 적용시)



(a) 시간별 전수두 변화도



(b) 시간별 압력수두 변화도

그림 7. 시간별 수두 변화도(사면 높이 25.0m 적용시)

3.4 침투해석 결과 분석

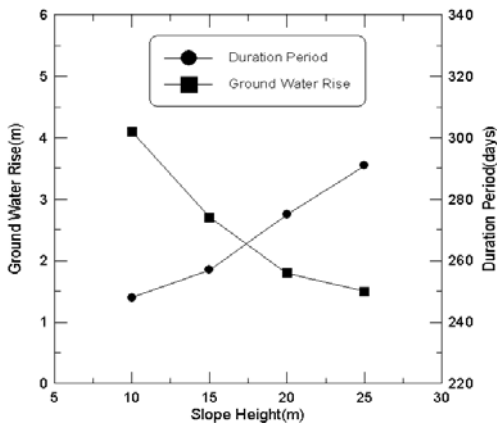
사면 높이에 따른 지하수위 침투해석 결과를 요약하면 그림 8과 같다. 사면 높이에 따른 지하수위(그림 8(a))는 원지반 지하수위까지 침투거리가 길수록 지체수위가 낮게 형성되었으며, 지표면부근에 원지반 지하수위가 위치하는 경우 지표면까지 지하수위가 상승할 수 있는 것으로 평가되었다. 또한 최대 지하수위 상승에 소요되는 시간 역시 강우의 침투거리에 길수록 늦게 형성되었다.

지표면의 최대압력수두(그림 8(b))는 최대 지하수위가 형성되기 이전에 발생하며, 사면 높이가 높을수록 압력수두 증가량도 크게 발생하였다. 이는

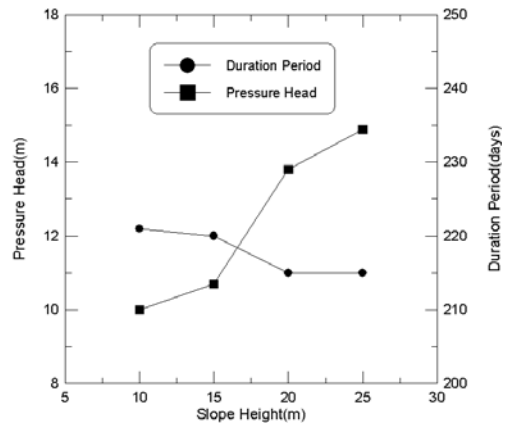
강우가 침투되기 이전 원지반이 갖고 있는 부(-)압의 크기에 의한 영향으로 사료된다.

3.5 사면의 안정성 검토

사면 안정해석은 국내에서 일반적으로 조성되는 사면의 화강 풍화토의 지반정수와 한국도로공사의 사면 표준기울기를 토대로 검토하였으며, 지하수위 조건은 크게 건기와 우기로 나눌 수 있으나, 본 연구에서는 우기시 조건만을 검토하였다(지하수위 및 파괴유형에 따른 사면의 안정성 검토에 대한 대표 단면(사면 높이 25m)의 결과는 그림 9와 같음).



(a) 지하수위변화



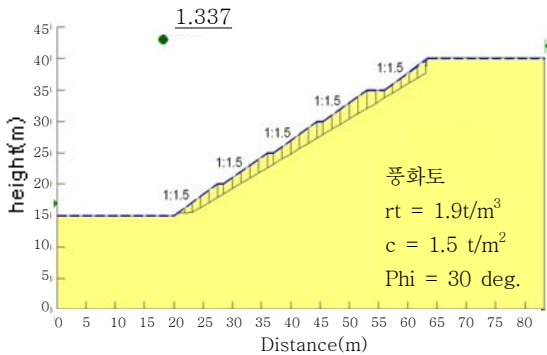
(b) 압력수두변화

그림 8. 사면 높이에 따른 침투해석 결과

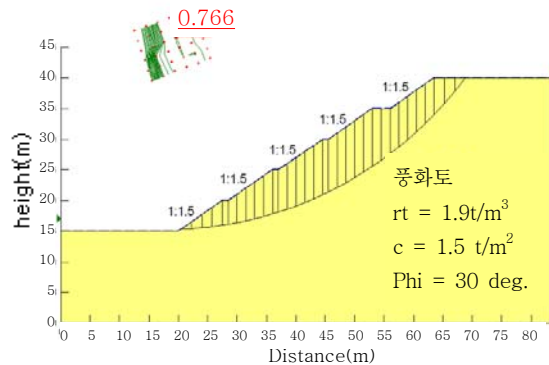
우기시 지하수위는 한국도로공사 지하수위 적용 기준과 서울 지역 30년 평균 일강우량에 의한 침투해석결과로 나누어 적용하였으며, 사면 안정성을 평가하기 위한 사면 높이는 10.0m~25.0m까지 5.0m간격으로 안정해석을 실시하였으며 해석시 최

소안전율은 1.3을 기준으로 하였다.

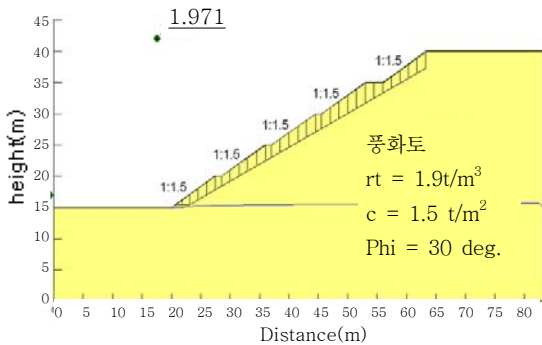
수치해석으로 사면안정성을 검토한 결과는 표 5와 같으며 표에서와 같이 사면높이(10, 15, 20, 25m)와 관계없이 우기시 지하수위가 지표면에 위치하고 저부를 통과하는 사면파괴는 최소안전율기준(1.3)을 만족하지 못하였으나 지표로부터 약 2.0m



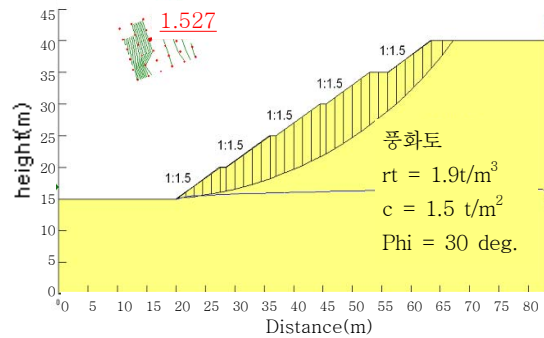
(a) 지표면 포화조건 적용(표면파괴)



(b) 지표면 포화조건 적용(저부파괴)



(c) 강우에 의한 침투해석 결과적용(표면파괴)



(d) 강우에 의한 침투해석 결과적용(저부파괴)

그림 9. 지하수위 및 파괴조건에 따른 안정성 검토(사면 높이가 25.0m인 경우의 예)

표 5. 우기시 사면 안정해석 결과

구 분	지하 수위	파괴유형		사면 높이에 따른 안전율			
				10.0m	15.0m	20.0m	25.0m
한 국 도로공사 조건적용	지표면	표면 파괴	안전율	1.68	1.52	1.42	1.34
			평 가	안정	안정	안정	안정
		저부 파괴	안전율	1.10	0.91	0.80	0.77
			평 가	불안정	불안정	불안정	불안정
강우시 침투해석 조건적용	해 석 결 과	표면 파괴	안전율	2.53	2.28	2.11	1.97
			평 가	안정	안정	안정	안정
		저부 파괴	안전율	1.78	1.65	1.56	1.53
			평 가	안정	안정	안정	안정

를 통과하는 표면파괴는 모두 안정한 것으로 평가되었다. 또한, 침투해석에 의한 압력수두의 변화를 고려한 경우도 사면 높이와 관계없이 표면파괴와 저부파괴 모두 안정한 것으로 평가 되었다.

상기와 같은 결과는 절토사면 전체를 풍화토지반으로 단순화시키고 지반상수도 동일한 값을 적용했을 경우에 대한 결과이기 때문에 현장조건과는 상당히 다른 결과가 나타날 수는 있다. 그러나 상기의 조건 및 결과만을 바탕으로 평가를 해 보면 풍화토지반의 경우는 지하수위 조건 및 파괴유형에 따라 사면의 안전율이 상당히 다르게 평가되었다. 만약 설계시 지하수위를 지표면에 파괴유형은 저부파괴로 가정하여 해석한다면 대부분의 사면이 불안정하게 평가되어 비경제적인 보강대책이 수립되어야 한다. 따라서 설계시 지역별로 집중호우시 지금까지의 파괴유형 및 지하수위와의 관계를 종합적으로 평가하여 사면안정과 밀접한 연관성을 갖고 있는 설계변수를 좀더 유연하게 선택하여야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 풍화토나 풍화암 지반에서 사면안정에 주된 영향을 미치는 지하수위의 적정성 여부를 평가하기 위하여 불포화토 특성을 고려할 수 있는 SEEP/W 유한요소프로그램을 이용하여 침투해석을 실시하고 이 결과를 이용하여 모델링사면의 안정성해석을 실시하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 침투해석결과 사면 높이에 따른 지하수위는 원지반 지하수위까지 침투거리가 길수록 지체수위가 낮게 형성되며 지표면 부근에 원지반 지하수위가 위치할 경우 침투거리가 짧아 지표면까지 지하수위가 상승할 수 있다.
- (2) 침투해석 결과 우기시 지하수위 상승량은 사면높이의 6.0~41.0%범위에 있으며, 압력수두 증가는 지표면부근 2.0m~3.0m에서만 크게 나타나고 그 아래는 증가량이 미미하게 평가되었다.
- (3) 우기시 지하수위 조건에 따른 사면안정해석 결과 지하수위가 지표면에 위치하고 저부파괴조건을 적용할 경우 모두 불안정하게 평가 되었지만 침투해석 결과에서 얻어진 지하수위조건을 적용할 경우 모두 안정된 결과를 나타내었다.
- (4) 강우에 의한 지하수위 조건은 사면높이와 현 지하수위 및 대상토질의 투수계수 등에 따라 달라질 수 있으므로 특정한 수위를 강제 규정하는 것보다 불포화 특성을 고려한 침투해석 결과에 따른 지하수위변화를 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

상기의 결과는 일반적인 풍화토(SM)지반에 대하여 제한된 조건(지형, 투수계수, 강우 등)에서의 결과임으로 향후 다양한 조건을 고려한 해석을 실시할 필요가 있다.

감사의 글

된 연구의 일부임을 밝히며, 동 기관에 감사의 뜻을 표하는 바이다.

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 2005년 건설핵심기술개발 자유공모과제 사업에 의하여 실시

(접수일자 : 2005년 11월 14일)

참고문헌

1. 김윤기(2002), 투수시험결과 해석에 의한 불포화 풍화토의 투수특성에 관한 연구. 한국과학기술원, 석사학위논문.
2. 김재홍(2002), 강우시 불포화 포화토의 습윤에 의한 무한사면 안정해석. 연세대학교, 석사학위논문.
3. 이강일 외(1999), 풍화화강암과 풍화토의 공학적 성질과 응용. 창우출판, pp. 325~354.
4. 장현식 외(2004), 집중강우시 발생하는 절토사면 붕괴의 특성 연구. 한국지반공학회, '2004 봄학술발표회 논문집, pp. 635~642.
5. Fredlund, D. G. and Xing, A.(1994), Equation for The Soil-Water Characteristic Curve. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp. 521~532.
6. 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.
7. Kunze, R. J., Uehara, G. and Graham, K.(1968), Factors Important in The Calculation of Hydraulic Conductivity. Soil Science America Proceeding, Vol. 32, pp. 760~765.
8. Leong, E. C. and Rahardjo, H.(1997), Permeability Function for Unsaturated Soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No. 12, pp. 1118~1126.
9. Vanapalli, S. K., Sillers, W. S. and Fredlund, M. D.(1998), The Meaning and Relevance of Residual State to Unsaturated Soils. 51st Canadian Geotechnical Conference, Edmonton, Alberta, October 4~7.