

강우특성을 고려한 불포화토 사면의 안정성 해석

Stability Analysis of Slope in Unsaturated Soil Based on the Characteristics of Rainfall

이관영¹⁾, Gwan-Young Lee, 이강일²⁾, Kang-Il Lee, 김찬기³⁾, Chan-Kee Kim, 장용채⁴⁾, Yong-Chai Chang

¹⁾ 서울고속도로주식회사 공사부장 General Manager, Seoulbeltway Corporation

²⁾ 대진대학교 건설시스템공학과 부교수 Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Daejin University

³⁾ 대진대학교 건설시스템공학과 부교수 Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Daejin University

⁴⁾ 목포해양대학교 해양시스템공학부 부교수 Associate Professor, Division of Ocean System Engineering
Mokpo National Maritime University

SYNOPSIS : The present study proposed to examine the appropriateness of the ground water level condition that had a significant effect on the stability of the slopes and, for this purpose, analyzed the rise of ground water level during the rainy season by applying the average daily rainfall of Seoul for the last 30 years. The result showed that the rise of ground water level was 6.0~41.0% of the slope height, which suggests that the currently applied condition of ground water level is somewhat overestimated. In addition, the result of interpreting the stability of slopes during the rainy season, slopes were unstable in all conditions when the ground water level was at the ground surface and base failure occurred. This suggests the importance of ground water level condition in stability analysis.

Keywords : stability analysis, ground water level condition, stability of slopes, rise of ground water level

1. 서 론

우리나라는 전국토의 70%가 산지로 이루어져 있으며, 산지의 최상부 표토층은 일반적으로 풍화가 발달된 화강암이나 화강편마암의 풍화잔류물이고, 우기시를 제외하고는 대부분 불포화 상태로 존재한다. 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 달라지며, 각 요인들은 서로 연관성이 있어 어느 한 요인에 의해 사면 붕괴가 발생한다고는 볼 수는 없으나 크게 내적 요인과 외적요인으로 구분할 수 있다. 내적요인으로는 토질, 지형 등을 들 수 있고, 외적요인은 강우, 지하수, 지진, 침상 등의 자연적인 요인과 절토, 성토, 굴토, 벌목 등의 인위적인 요인으로 구분된다. 강우시 사면붕괴에 대한 국내외 연구에 따르면 집중호우에 의한 사면붕괴는 주로 지표면부근 2.0m 이내에서 발생되며, 강우 발생전 사면내 지하수위가 높지 않다면 강우가 지하수위 상승에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 보고하고 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. 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 연구에서는 우기시 지하수위 변화와

침투수에 의한 지표부근 토층의 간극수압의 분포를 파악하여 사면의 안정성을 평가하고, 사면해석단계를 좀더 세분화하여 우기시 합리적이고 경제적인 사면설계방법을 제시하고자 한다.

2. 강우시 사면의 거동특성

사면붕괴에 대한 안정성 평가는 주로 유효응력 개념의 무한사면 해석법이 이용된다. 지하수위가 낮은 사면에서는 집중호우가 발생하더라도 지하수위 증가에는 커다란 영향이 없으므로 침투강우에 의해 발생되는 습윤대(wetting band)에 대한 안정성만 평가하면 된다. 일반적으로 강우에 의한 습윤대는 강우강도, 강우지속시간, 토층의 투수계수에 따라 두께가 달라지나 사면고에 비해 작고, 하부의 지하수위와 연계되지 않으므로 사면안정 해석시 무한사면 해석을 실시하는 것이 바람직하다.

사면안정 해석시 강우로 인한 간극수압의 영향은 간극수압비를 이용하여 간단하게 고려할 수 있다. 일반적으로 간극수압비(γ_u)는 0~0.5의 범위 값을 가지며, 평균적으로 0.25를 사용한다고 제안한 바가 있다. 모관흡수력은 외부환경에 따라서 변하며 흙의 평형상태에도 영향을 미친다. 염분함량의 변화로 인한 삼투압 흡수력의 변화 또한 흙의 역학적 거동에 영향을 미치지만 일반적인 지반 공학적 문제에서는 모관흡수력이 전 흡수력 변화를 좌우하며, 삼투압 흡수력은 무시할 정도로 미미하다. 그러나 화학적 오염 등에 의해 염분량이 변화하는 경우에는 삼투압 흡수력의 영향도 고려되어야 한다.

흙에서 간극은 물이 지하수면 위로 상승하게 하는 모세관 같은 역할을 하며, 이러한 모세관 현상은 모관흡수력의 크기와 간극크기에 따라 달라지고, 모관흡수력이 큰 경우 물의 자중이 흙 구조에 압축력을 가하여 전단강도를 증가시킨다.

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, Vanapalli외, 1998).

함수특성곡선(soil water characteristic curve)은 사면의 불포화도에 따른 모관흡수력의 발생정도를 대변하며, 불포화토에서 지하수 흐름, 강우로 인한 사면안정 등을 포함한 압밀특성 등을 규명하기 위해 반드시 고려해야 하는 지반 특성치이다. 그림 1은 흙의 종류에 따른 함수특성곡선의 유형을 나타낸 것으로 그림에서 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. 따라서, 본 연구에서도 강우에 따른 불포화토 사면의 함수특성의 변화를 고려하여 보다 정밀하게 사면의 안정성을 평가하였다.

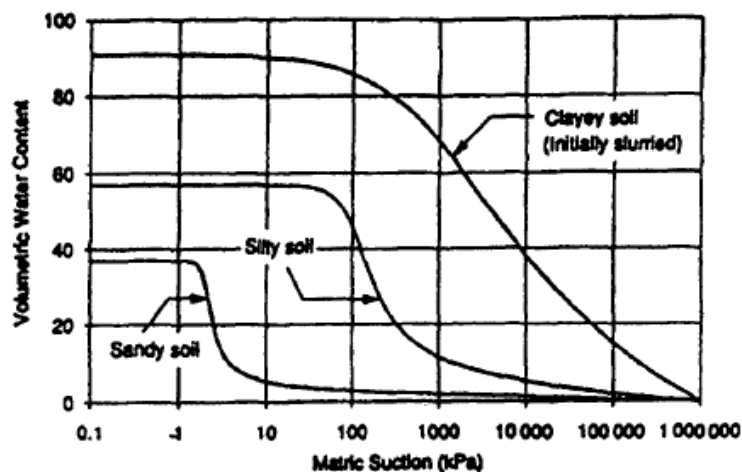


그림 1. 흙의 종류에 따른 함수특성곡선의 유형

3. 강우시 비탈면 안정해석

3.1 검토개요

사면 안정해석에 있어 지하수위는 사면 안정에 중요한 영향을 미치며, 안정해석시 건기와 우기로 나누어 지하수위 변화를 고려하고 있는 실정이다. 또한 안정해석방법에 있어 실제 우기시 산사태의 주요 파괴형태인 표층부에 의한 무한사면 표면파괴 보다는 사면 심부를 통과하는 유한사면에 의한 저부파괴 형태를 실시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 강우에 의한 지하수위 변화를 고려할 수 있도록 침투해석을 실시하고, 국내 지하수위 적용기준과 비교하여 사면 안정성을 검토하였다.

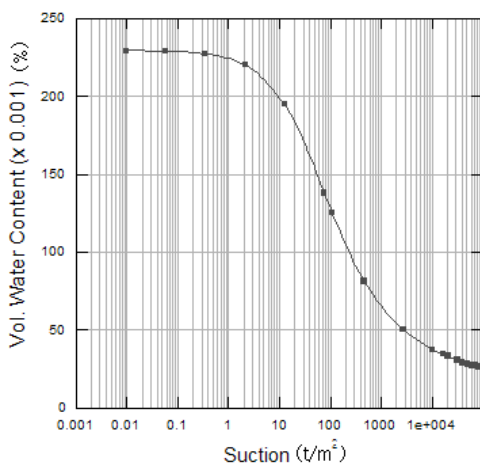
3.2 해석단면 및 지반정수

검토단면은 사면 설계 및 시공경험이 가장 풍부한 한국도로공사의 토사 표준기울기 1:1.5와 5.0m마다 1.0m의 소단을 적용하였다. 사면의 높이에 따른 사면 안정성의 변화를 파악하기 위해 검토높이를 10.0m~25.0m까지 변화시켜, 각 5.0m마다 사면 안정성과 지하수위 변화를 평가하였다. 지하수위 조건은 한국도로공사의 적용기준인 건기시 원지반 지하수위, 우기시 지표면 포화조건을 적용하였으며, 강우에 의한 침투발생시 수위변화를 고려하기 위해 서울지역 30년 평균강우량을 적용하여 수치해석을 실시하고, 우기시 지하수위 상승을 고려하였다.

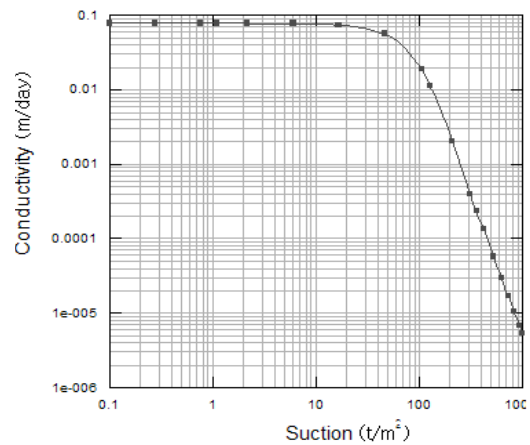
본 연구에 적용된 지반정수는 표 1과 같이 국내 설계사례를 바탕으로 풍화토의 지반정수를 사용하였다. 그림 2는 Fredlund와 Xing의 제안식에 의해 충남 서창지역의 불포화 풍화토(SM)의 함수특성곡선 및 투수계수곡선을 나타낸 것으로 풍화토의 보유함수비 측정(volumetric pressure plate extractor) 결과를 반영하여 함수곡선을 추정하고, 이를 이용하여 불포화토의 투수계수곡선을 결정하였다. 본 연구에서는 표 2와 같이 이 지역의 수리특성치의 결과 예를 본 해석에 적용하였다.

표 1. 풍화토지반의 지반강도정수

구 분	단위중량 (tonf/m ³)	점착강도 (tonf/m ²)	내부마찰각 (°)
풍 화 토	1.9	1.5	30



(a) 함수특성곡선



(b) 투수계수곡선

그림 2. 충남 서창지역 풍화토(SM)의 함수특성곡선 및 투수계수곡선

표 2. 서창지역 풍화토(SM)의 수리 특성치(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}

3.3 해석결과

해석에 사용된 유한요소 프로그램은 캐나다의 Geo-Slope International사에서 개발된 SEEP/W를 사용하였다. 침투해석에 의한 지하수위의 예측은 서울지역 30년 평균 일 강우 적용시 사면 높이에 따른 지하수위 변화와 간극수압 분포를 예측하였으며 대표적인 침투해석의 예로 15.0m일 때의 지하수위의 변화와 압력수두의 변화를 그림 3에 나타내었다.

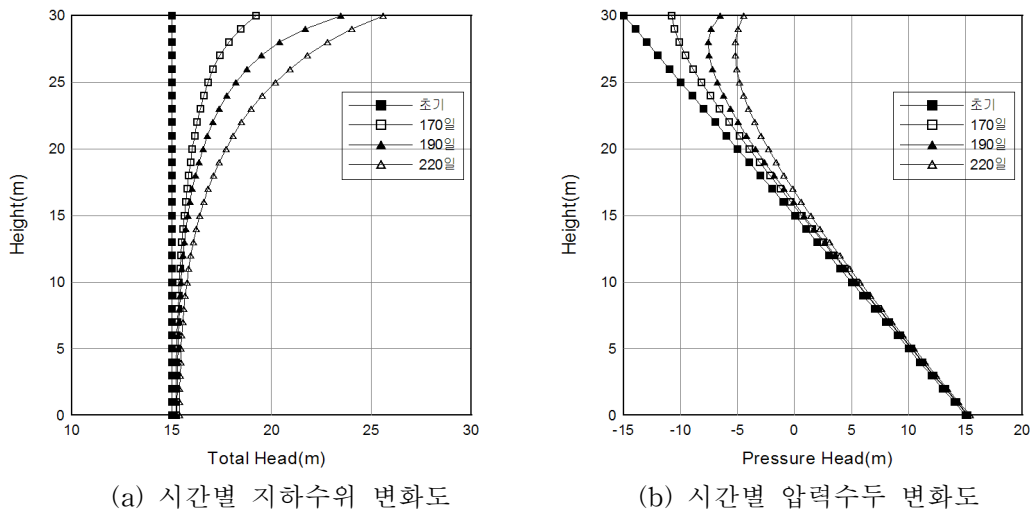


그림 3. 시간별 수두 변화도(사면 높이 15.0m 적용시)

표 3. 침투해석 결과요약

구 분		비탈면 높이				
		10.0m	15.0m	20.0m	25.0m	
지하수위	최소	경과일	1일	1일	1일	1일
		수위	15.0m	15.0m	15.0m	15.0m
	최대	경과일	248일	257일	275일	291일
		수위	19.1m	17.7m	16.8m	16.5m
	수위증가량		4.1m	2.7m	1.8m	1.5m
지표면 압력수두	최소	경과일	1일	1일	1일	1일
		압력수두	-10.0m	-15.0m	-20.0m	-25.0m
	최대	경과일	221일	220일	215일	215일
		압력수두	0m	-4.3m	-6.2m	-10.1m
	압력수두증가량		10.0m	10.7m	13.8m	14.9m

또한 사면 높이에 따른 침투해석 결과를 요약하면 표 3과 같으며 이 결과를 그림 4에 나타내었다. 사면 높이에 따른 지하수위(그림 4(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 침투거리가 길수록 늦게 형성되었다. 지표면의 최대압력수두(그림 4(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.

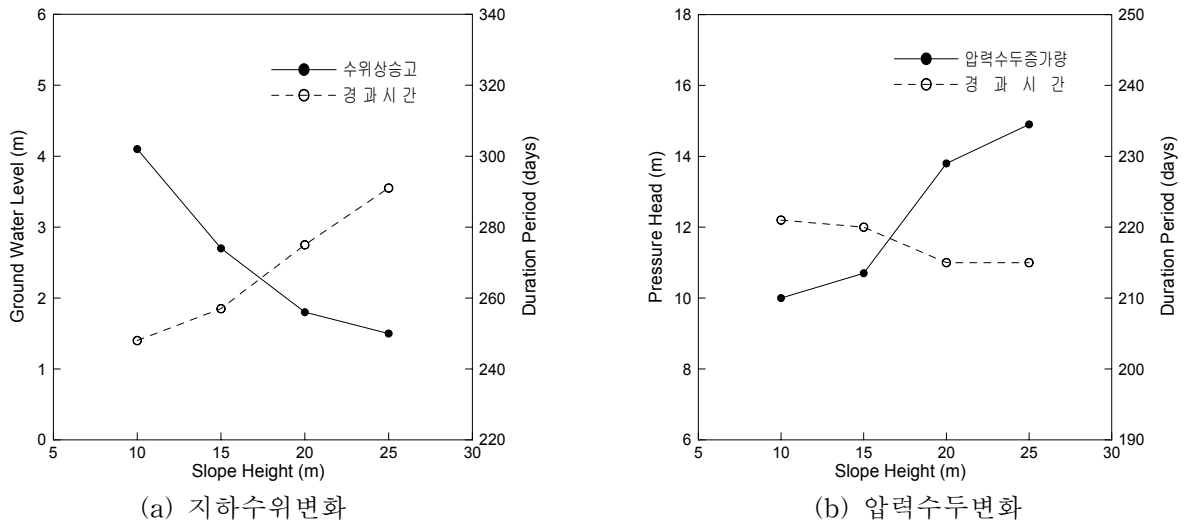


그림 4. 사면 높이에 따른 침투해석 결과

표 4.1은 우기시에 대한 사면의 안정해석 결과를 한국도로공사에서 권고하고 있는 사면 기울기, 지반 강도정수 등을 적용한 표준단면 조건으로 사면 안정해석은 실시한 결과이다. 본 해석 결과에 의하면 지하수위가 지표면에 위치한 경우, 저부파괴에 대하여 모두 불안정한 결과를 나타내었다. 표준 사면이 불안정한 상태를 보인다는 것은 국내 각 기관에서 권고하고 있는 지하수위 조건이 과다하거나 사면 안정해석에 문제가 있음을 단편적으로 보여주는 것이다. 따라서 우기시 사면안정 해석방법은 기존의 사면설계방법을 좀더 세분화할 필요가 있으며 그 방법으로 그림 5와 같은 해석방법을 제안한다.

표 4. 우기시 사면 안정해석 결과

구 분	지하수위	파괴유형	사면 높이에 따른 안전율				
			10.0m	15.0m	20.0m	25.0m	
한국도로공사 조건적용	지표면	표면파괴	안전율	1.68	1.52	1.42	1.34
			평가	안정	안정	안정	안정
		저부파괴	안전율	1.10	0.91	0.80	0.77
			평가	불안정	불안정	불안정	불안정
강우시 침투해석 조건적용	해석 결과	표면파괴	안전율	2.53	2.28	2.11	1.97
			평가	안정	안정	안정	안정
		저부파괴	안전율	1.78	1.65	1.56	1.53
			평가	안정	안정	안정	안정

주) 절토사면의 우기시 최소안전율 기준은 1.3을 적용함.

