국내 절토 비탈면 설계기준 적용시 사면경사와 강우조건의 영향 연구

A Study on the effect of slope inclination and rainfall in current cut soil slope design criteria

나유성[1], Yousung La, 김범주[2], Bumjoo kim

[1] 동국대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dongguk University
[2] 동국대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Dongguk University

SYNOPSIS : In this study, the effects of slope inclination and rainfall on weathered soil slope stability were investigated for current cut soil slope design criteria. A series of slope stability analysis was performed on the slopes with the same height (5m), but different inclinations (1:0.8, 1:1, 1:1.2, 1:1.5, 1:2). Seepage analysis was also conducted to examine the rainfall effects directly and compare the combined seepage and slope stability analysis results with the slope stability analysis results for rainy season from the current cut soil slope design criteria. Typical properties for weathered soils were used in both the slope and seepage analysis. The analysis results showed that, for the slopes much steeper than the standard slopes, the factor of safety criteria were satisfied. Therefore, it appears that the slope designs by current cut soil slope design criteria lead to conservative results.

Keywords : slope inclination, rainfall, slope stability, seepage analysis, weathered soils

1. 서 론

현재 국내의 사면 설계는 통상적으로 강우시에는 지하수위를 사면의 만수위 조건으로 가정한 안정해석을 통해 이루어지고 있다. 그러나 이러한 조건에서도 강우시에는 사면 붕괴가 발생하고 있고, 설계결과에 따른 과다보강으로 인한 시공비 낭비가 불가피한 현실이다. 강우로 인한 사면 불안정을 고려하기 위하여 국내 여러 기관의 사면 설계기준에서는 우기 조건에 대하여 지하수위가 지표면까지, 혹은 지표면 아래 얕은 깊이까지 위치한다는 가정에 기초한 사면 해석 조건을 제시하고 있다(건설교통부, 2000, 2003; 한국도로공사, 2002; 한국토지공사, 2006). 그러나, 이러한 방법은 이미 기존의 많은 연구자들에 의하여 강우에 의한 지하수위 상승 효과를 실제 현상과 비교해 매우 과다하게 고려함으로서 결과적으로 과다 설계 및 보강을 유도할 수 있다고 지적되어 왔다(김기웅과 김범주, 2007; 이강일 외, 2006; 이수형 외, 2005; 조성은 외, 2000). 그럼에도 불구하고 기존의 설계기준이 계속해서 유지되고 이유는 지하수위가 지표면에 위치하는 가정에 따라 설계된 사면의 경우에도 우기시 빈번히 사면 붕괴가 발생하고 있고, 또한 설계자의 입장에서도 기존의 방법이 적용하기에 매우 간단하기 때문이라 할 수 있다.

따라서, 본 연구는 강우가 사면에 미치는 영향을 파악하고 국내 절토비탈면 설계기준을 적용한 해석방법과 불포화토 특성을 고려한 경우의 사면안전성 평가와 비교하여 현행설계기준의 표준 사면경사 기준에 대한 적정성을 검토하고자 한다.

2. 국내 절토사면 설계 기준

2.1 국내 각 기관별 깍기 비탈면 표준경사

깎기 비탈면과 관련된 표준경사는 건설교통부 도로설계기준(2001) 및 건설교통부 산하 한국도로공사(2002), 한국토지공사(2006), 대한주택공사(2006), 고속철도 등에서 표 1과 같이 각 기관별 자체 시방기준을 보유하고 있다. 깍기 비탈면의 표준경사는 지반조건을 굴착방법에 따라 토사, 리핑암 및 발파암 등으로 구분하고 있으며 깍기 비탈면의 높이에 따라 토사의 경우 1:1.2~1:1.5, 리핑암의 경우 1:1.0~1:1.5, 그리고 발파암의 경우는 1:0.5~1:1.0으로 시공하도록 규정하고 있다.

표 1. 국내 기관별 흙깍기 비탈면 표준경사 기준

<table>
<tr><th colspan="2">지반조건</th><th>사면높이</th><th>건설교통부</th><th>한국
도로공사</th><th>한국
토지공사</th><th>대한
주택공사</th><th>고속
철도공단</th></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">토사
(사질토,점성토)</td><td>0~5m</td><td>1:1.2</td><td>1:1.2</td><td>1:1.2</td><td>1:1.2</td><td>1:1.5</td></tr>
<tr><td>5m이상</td><td>1:1.5</td><td>1:1.5</td><td>1:1.5</td><td>1:1.5</td><td>1:1.5</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">리핑암
(풍화암)</td><td>0~5m</td><td rowspan="2">1:0.7</td><td rowspan="2">1:1.0</td><td rowspan="2">1:1.0</td><td>1:1.0</td><td rowspan="2">1:1.0</td></tr>
<tr><td>5m이상</td><td>1:1.2</td></tr>
<tr><td rowspan="4">발파암</td><td rowspan="2">연암</td><td>0~5m</td><td rowspan="4">1:0.5</td><td rowspan="4">1:0.5</td><td rowspan="4">1:0.5</td><td>1:0.8</td><td rowspan="2">1:0.7</td></tr>
<tr><td>5m이상</td><td>1:1.0</td></tr>
<tr><td rowspan="2">경암</td><td>0~5m</td><td>1:0.5</td><td rowspan="2">1:0.5</td></tr>
<tr><td>5m이상</td><td>1:0.8</td></tr>
</table>

2.2 국내 각 기관별 지하수위 적용기준

지하수위 적용기준은 표 2와 같이 일반적으로 비탈면의 설계는 건기시와 우기시로 구분되어 있으며, 건기시의 안정성 검토기준은 대부분 지하수위를 고려하지 않거나 수압이 작용하지 않는 것으로 가정하여 검토하도록 하고 있다. 또한 우기시는 암반의 경우 인장균열면을 따라 수압이 작용하고 토사의 경우는 지하수위를 고려하되 지하수위가 G.L(-) 3.0 m 혹은 지표면에 위치하는 것으로 가정하여 검토하도록 규정되어 있다.

표 2. 국내 각 기관별 지하수위 적용기준

<table>
<tr><th rowspan="2">구분</th><th rowspan="2">기관</th><th rowspan="2">조건</th><th colspan="2">적용기준</th></tr>
<tr><th>건기시</th><th>우기시</th></tr>
<tr><td rowspan="2">도로설계
실무편람
(토질 및
기초편)</td><td rowspan="2">도로공사
(1996)</td><td>암반</td><td>인장균열면이나 활동면을 따라 수압이 작용되지 않음</td><td>인장균열면이나 활동면을 따라 적용되는 수압을 H_w(지하수위) =0.5H (사면고)층으로 가정하여 적용</td></tr>
<tr><td>토층/풍화암</td><td>지하수위 미고려</td><td>지하수위는 G.L(-) 3.0m</td></tr>
<tr><td rowspan="2">도로설계
편람
(토공 및
배수편)</td><td rowspan="2">건교부
(2000)</td><td>암반</td><td>인장균열면이나 활동면을 따라 수압이 작용되지 않음</td><td>인장균열면이나 활동면을 따라 적용되는 수압을 H_w=0.5H로 가정하여 적용</td></tr>
<tr><td>토층/풍화암</td><td>지하수위 미고려</td><td>지하수위 고려</td></tr>
</table>

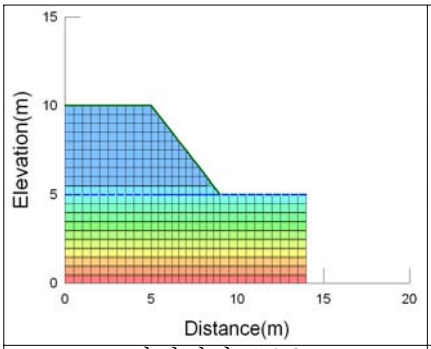
국도건설 공사설계 실무요령	건교부 (2004)	암반	인장균열면이나 활동면을 따라 수압이 작용되지 않음	인장균열면이나 활동면을 따라 적용되는 수압을 H_w=0.5H로 가정하여 적용
		토층/풍화암	지하수위 미고려	지하수위는 지표면에 위치
도로설계 요령 (토공 및 배수)	도로공사 (2002)	암반	인장균열면이나 활동면을 따라 수압이 작용되지 않음	인장균열면이나 활동면을 따라 적용되는 수압을 H_w=0.5H로 가정하여 적용
		토층/풍화암	지하수위 미고려	지하수위는 지표면에 위치
Koland 설계기법 연구보고서	토지공사	-	건기시 시추공의 수위적용	지하수위는 G.L(-) 3.0m 적용하고, 강우에 의한 표면파괴 해석

3. 사면안정해석

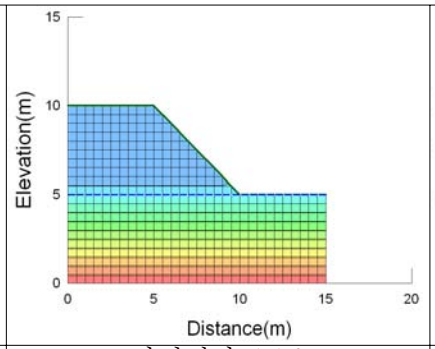
3.1 해석단면 및 강우조건

본 연구에서는 표 3과 같이 사면높이가 5m인 풍화토 사면을 해석 대상으로 하여, 사면경사를 다섯 종류, (1:0.4, 1:0.8, 1:1, 1:1.5, 1:2까지) 사면안전율을 조사하였다. 강우조건은 2000년 건설교통부에서 발행한 그림 1과 같이 한국확률주상도에 강원도지역의 100년 빈도의 24시간 지속강우를 기준으로 하여 16.7mm/h(400mm/day) 24시간 지속강우를 사용하였다.

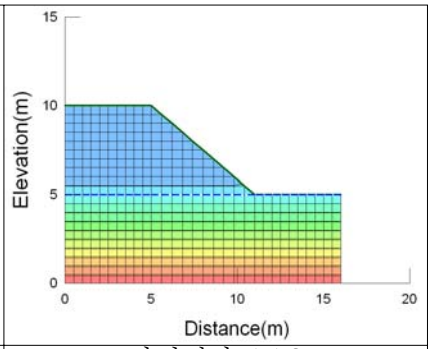
표 3. 해석단면



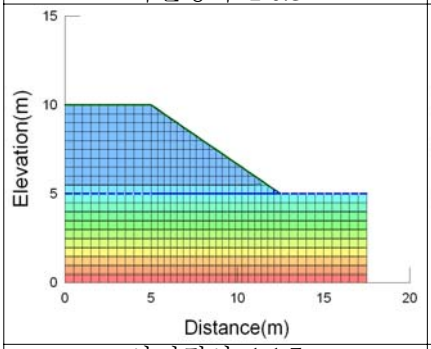
사면경사 1:0.8



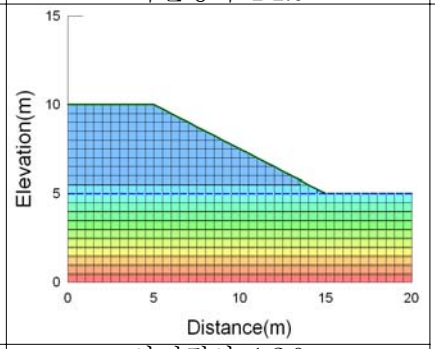
사면경사 1:1.0



사면경사 1:1.2



사면경사 1:1.5



사면경사 1:2.0

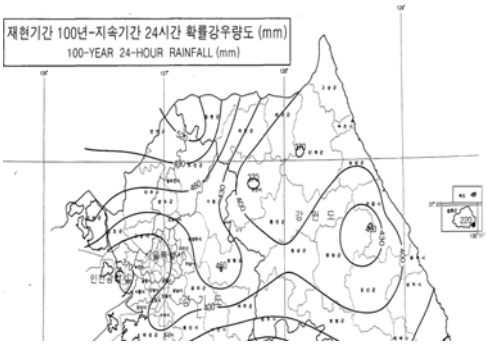


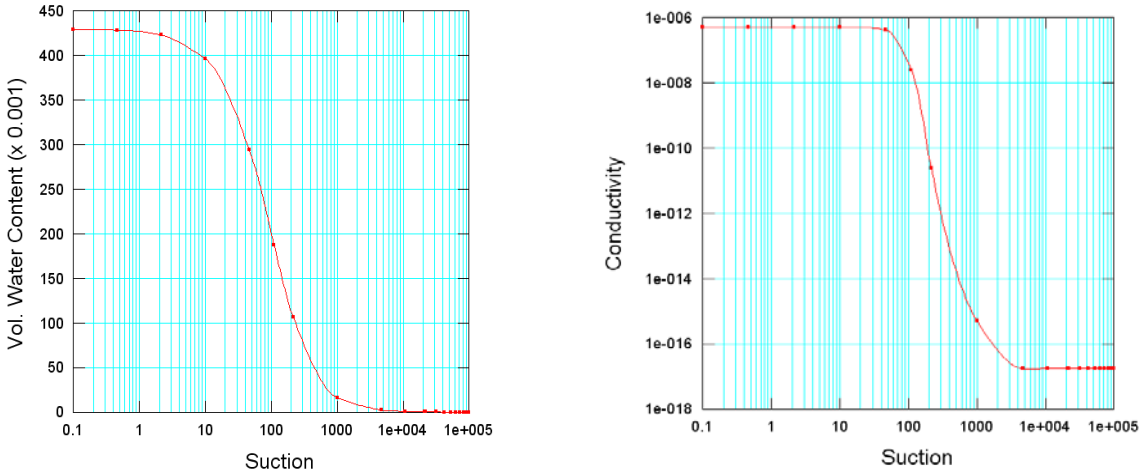
그림 1. 한국확률주상도

3.2 지반정수

강우에 의한 불포화 지반의 지하수위 변화 및 간극수압 변화를 파악하기 위해서는 불포화 지반의 함수특성이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 여러 문헌(이수형 등, 2005; 김재홍 등, 2002; 이강일 등, 2006)에서 풍화토에 대하여 제시된 수리특성치들로부터 표 4와 같이 침투해석에 필요한 입력값을 결정하였다. 풍화토의 특성상 문헌들에 제시된 값들의 변화 범위가 큰 편이었으므로, 입력값은 문헌 제시값들의 평균적인 값으로 하였다. 그리고, 풍화토의 함수특성곡선식으로는 Fredlund & Xing의 함수특성곡선식을 이용하여 함수곡선을 추정하였으며 이를 이용하여 불포화토의 투수계수곡선을 결정하였다. 침투해석시 초기모관흡수력은 실제 지반의 강도에 영향을 줄 수 있는 범위를 고려하여 -10 kPa로 하였다. 그림 2는 SEEP/W프로그램에서 얻어진 함수특성곡선 및 투수계수 곡선이다

표 4. 풍화토의 함수특성

구분	함수특성곡선 보정계수			포화시 수리특성	
	a	n	m	포화 체적함수비	포화 투수계수
풍화토	150	1.05	3.9	43%	5×10-7 m/sec



(a) 함수특성곡선 (b) 투수계수곡선

그림 2. 풍화토의 함수특성곡선 및 투수계수곡선

사면안정해석을 위한 입력 물성값으로는 침투해석에서와 마찬가지로 풍화토에 대하여 일반적인 값을 적용하고자 하였다. 따라서, 여러 문헌들(김상규, 1995; 이수형 등, 2005; 김재홍 등, 2002; 이강일 등, 2006)에서 풍화토에 대한 물성값으로 제시된 값들의 평균적인 값들을 해석에 적용하였다. 또한 다른 종류의 흙과 비교를 위하여 한국도로공사의 도로설계요령(1992) 에서 제시하고 있는 자연지반의 토질종류별 설계정수 중 3종류의 흙을 사용하였다. 표 5는 사면안정해석시 가정한 토층에 대한 입력 물성치이다.

표 5. 사면안정해석 입력물성치

구 분	단위중량(t/m^3)	점착력(t/cm^2)	내부마찰각(°)
풍화토	1.8	1.5	30
점토 및 실트(굳은 것)	1.7	2.0	20
점성토(굳은 것)	1.8	2.5	25
사질토(밀실한 것)	1.9	1.5	30

3.3 침투해석 결과

본 연구에서는 Geo-Slope사의 SEEP/W를 이용하여 침투해석을 실시하였다. 그 결과 시간당 16.7mm의 강우가 24시간 동안 지속된 경우, 사면 내 지하수위는 그림 3과 같이 해석단면 좌측 경계를 기준으로 초기 지하수위 위치로부터 24시간 후 0.4m, 72시간 후 최대 1.25m상승 후 30일 후 0.5m, 90일 후 0.4m로 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 강우 조건이 지하수위 변화(상승)에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

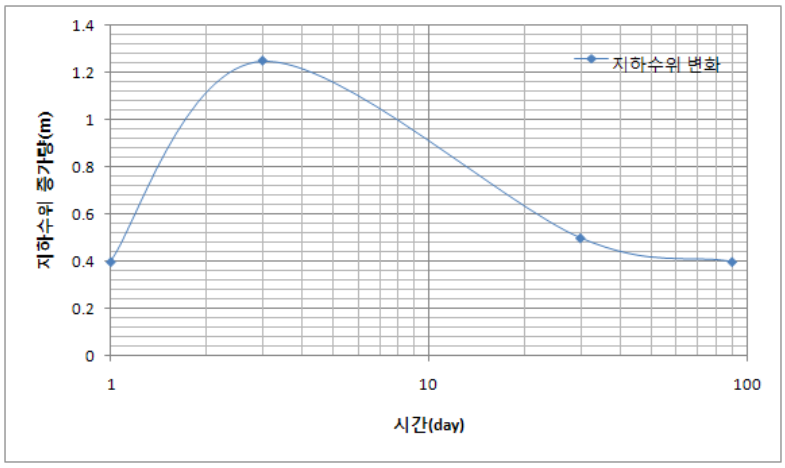


그림 3. 지하수위 변화

3.4 사면의 안정성 분석

사면 안정해석시 지하수위 조건은 건기시와 우기시로 나눌 수 있으나, 본 연구에서는 우기시 조건만을 검토 하였고 현행 설계기준 상의 우기시 만수위조건을 적용하고 Geo-Slope사의 SLOPE/W를 이용하여, 사면경사를 다섯 종류, (1:0.8, 1:1, 1:1.2, 1:1.5, 1:2까지) 사면안전율을 조사하였다. 또한 다른 종류의 흙과 비교를 위하여 한국도로공사의 도로설계요령(1992) 에서 제시하고 있는 자연지반의 토질종류별 설계

정수 중 3종류의 흙을 사용하였다. 그 결과 그림 4와 같이 풍화토와 사질토의 경우 기준 안전율을 1:0.8~1:1.0 사이의 사면경사에서 만족하며 1:1.0 이상의 사면경사에서는 기준 안전율을 만족하는 것을 볼 수 있다. 그리고 점토 및 실트와 점성토는 모든 사면에서 기준 안전율을 만족하는 것으로 나타났다.

SEEP/W를 사용한 침투해석과 연계하여 사면안정해석을 수행한 결과 그림 5와 같이 모든 사면에서 현행설계기준과 큰 차이로 기준 안전율을 만족 하였다. 따라서 현행설계 기준에서 표준경사를 0~5m 사면에서 1:1.2로 정한 것과 비교 할 때 많은 차이가 있는 것으로 판단된다.

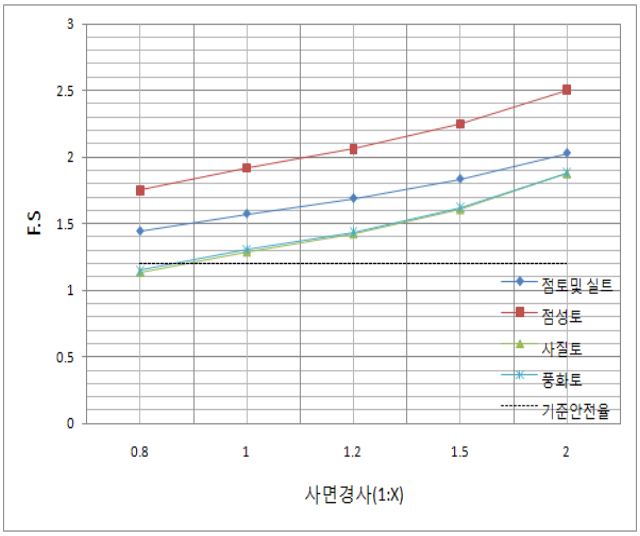


그림 4. 4종류 흙의 사면안정 해석 결과

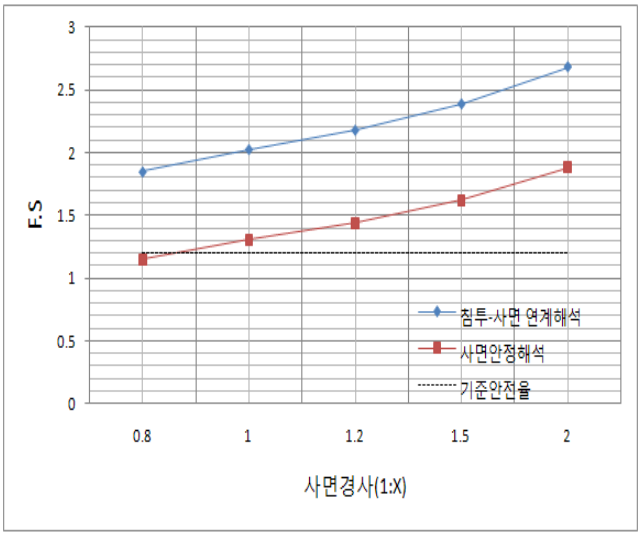


그림 5. 풍화토와 침투-사면 연계해석 결과 비교

4. 결론

본 연구는 현행설계기준의 표준 사면경사 기준에 대한 적정성을 검토하고자 SEEP/W를 이용하여 침투해석을 실시하였고 SLOPE/W를 이용하여 사면 안정 해석을 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 높이 5m의 전형적인 풍화토 사면을 해석단면으로 선정하여 시간당 16.7mm의 강우가 24시간 동안 지속된 강우 조건을 적용하고 침투해석을 수행하였다. 침투해석 결과 강우강도가 크고 지속시간이 긴 강우 조건하에서도 강우의 침투에 따른 지하수위 상승의 효과는 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

2. 우기시 만수위조건을 적용한 현행 설계 기준을 통하여 사면경사를 다섯 종류, (1:0.8, 1:1, 1:1.2, 1:1.5, 1:2까지) 사용하여 해석한 결과 풍화토는 1:0.8~1:1.0 사이의 사면경사에서 기준안전율을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 침투해석과 연계하여 사면안정해석을 수행한 결과와 이를 비교해 보았을 때 매우 큰 차이로 기준안전율을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 현행설계 기준에서 표준경사를 0~5m 사면에서 1:1.2로 정한 것과 비교 할 때 많은 차이가 있는 것을 알 수 있었다.

3. 사면의 경사와 강우의 영향 등을 고려하여 사면의 안정성을 검토한 결과, 전반적으로 현행 설계기준은 매우 과다한 설계를 유발 할 수 있는 조건인 것으로 나타났고 보다 합리적인 절토사면 기준이 필요할 것으로 판단된다. 그러나 본 연구 결과는 제한된 조건에서의 결과임으로 향우 다양한 조건을 추가하여 해석을 실시할 필요가 있다.

참고문헌

건설교통부(2000), “도로설계편람″, 제4편 토공 및 배수, pp406-410.

건설교통부(2001), “도로설계기준, 5장 토공″, pp.95-98.

건설교통부(2003), “국도건설공사 설계실무요령″, 11. 공종별설계요령 2. 비탈면 안정공 pp.89.

김기웅, 김범주(2007), 비탈면 안정 해석시 강우의 영향에 관한 연구, 한국지반공학회, 105p.

김상규(1995), “산사태 및 사면재해에 관한 연구”, 한국과학재단보고서.

김상규, 김영묵(1991), “강우로 인한 사면 불안정”, 대한토질공학회지, 제7권 제1호, pp.53-64.

김재홍, 박성완, 정상섭, 유지형(2002), “강우시 습윤에 의한 불포화 풍화토의 사면 안정 해석 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제18권 제2호, pp.123-136.

대한주택공사(2006), “주택건설전문시방서″, 41010 비탈면보호, pp.103.

이강일, 장용채, 김태훈, 정연인(2006), “강우특성을 고려한 불포화 풍화잔류로 사면의 안정석 해석”, 한국지반환경공학회 논문집, 제7권 제2호, pp.5-14.

이수형, 황선근, 사공명, 김현기(2005), “철도연변 절취 토사사면에 대한 강우에 의한 침투를 고려한 사면안정해석법의 적용성 평가”, 한국지반공학회 논문집, 제21권 제6호, pp.137-146.

조성은, 이승래(2000), “강우침투에 따른 불포화 토사사면의 안정해석″, 한국지반공학회, 제6권 제1호 pp.51-64.

한국도로공사(2002), “도로설계요령″, 제2권 토공 및 배수, pp.123-124.

한국토지공사(2006), “단지조성공사 설계 및 적산 기준″, 제1편 설계기준 제3장 토공사.

Fredlund, D. G. and Rahardjo, H.(1995), “Soil Mechanics for Unsaturated Soils″, John Wiley & Sons Inc.