

성토재료의 필터링 조건이 사면 안정에 미치는 기초연구 A Fundamental Study on Slope Stability Due to Filtering Condition of Embankment Material During Rain

김상환¹⁾, Sang-Hwan Kim, 김학문²⁾, Hak-Moon Kim, 신중호³⁾, Jong-Ho Shin, 고동필⁴⁾, Dong-Pil Ko

1) 호서대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hoseo University

2) 단국대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering,
Dankook University

3) 건국대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Konkuk University

4) 호서대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hoseo University

개요(SYNOPSIS) : Recently, localized heavy rain due to "EL-LIO" was a kind of reason by risk of slope stability. In this paper, the behaviour of slope when localized heavy rain was studied. In order to perform this study experimental programs were performed. Experimental programs was checked filtering conditions for slope stability due to localized heavy rain. And then, investigated slope stability and fracture mechanism each other types. In the experimental study, performed changing filtering condition by embankment, through five fixing factors such as rainfall intensity, slope shape, geological condition, compaction energy and water content. According to the results of this study, behaviour of facture slope has made a shallow and narrow waterway. This waterway expanded base stone. In order to, suggested a system for slope stability examination.

Key words : localized heavy rain, filtering condition, slope stability, experimental programs

1. 서론

최근 온난화 현상으로 인하여 발생하는 국지성 호우는 사면의 안정에 불안정성을 초래하는 요인으로 사면의 활동과 그로 인한 피해는 주기적으로 발생하고, 또한 증가하는 추세이다. 특히 호우시 동반하는 강풍과 경이적인 강우량으로 인한 인명 및 재산의 피해는 국내·외적으로 심각한 추세이며 강우로 인한 사면의 거동에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.

현재 강우에 의한 사면의 침식 및 유실에 대한 사면의 표면보호공법은 식생공사(Sodding), 콘크리트나, 모르타르 뿔어붙이기 공사, 콘크리트 블록공사가 병행되어 시공·설계되어 지고 있다. 이중 식생공사가 사면을 보호하는 최선책으로 받아들여지지만 강우에 의한 침식작용으로 식생이 유실되는 어려움이 있다. 따라서, 본 논문은 성토층의 층간 필터링 조건과 함께 셀프 필터링 조건을 검토하여 강우에 의한 사면의 침식 및 유실에 대한 안정성을 연구하고자 2006년도 호우 시에 큰 피해가 발생한 강원도 평창군의 OO면 일대의 설계중인 도로사면을 모델링하고 성토층의 필터링 조건과 셀프필터링 조건을 검토하였다. 이를 통하여 각 타입의 사면안정성 및 파괴 메카니즘을 규명하고 강우시 사면의 거동특성을 분석하고자 실내모형시험을 수행하였다. 실내모형시험은 강우강도, 사면의 형상 및 원지반의 지층, 다짐에너지, 초기함수비를 고정변수로 취했으며, 강우강도는 평창지방의 최대강우량을 모사하였고, 성토사면의 필터링 조건형태를 변화시키는 조건으로 시험을 수행하였다. 실험 Case는 3가지로 Case-1의 경우는 3

개의 성토층이 필터링 조건을 만족하도록 성토한 경우이고, Case-2는 Case-1과 반대로 시공한 경우, 마지막으로 Case-3의 경우는 단일 성토층이 필터링 조건을 만족하도록 성토하고 모형시험을 수행하였다.

본 논문은 필터링 조건을 통하여 사면의 안정성 및 파괴 메카니즘을 실내모형시험을 통하여 관측되는 내용을 중심으로 수행하였다.

2. 성토재의 Filtering 검토이론

성토재의 특성을 분석하여 현재 각 성토층의 경계부에서의 필터링 조건검토와 더불어 각각의 성토층 자체에서의 필터링 조건까지 검토하여, 각 성토 층별 입도분포를 결정하고, 내부 침식 가능성을 차단하여 유수에 의한 성토재료의 유실/변형 가능성을 최소화한다.

2.1 Filtering 이론

Terzaghi & Peck(1948)는 필터재료의 선정에 있어서 다음과 같은 기준을 제시하였다.

$$\frac{D_{15(F)}}{D_{85(B)}} < 4, \quad \frac{D_{15(F)}}{D_{15(B)}} > 4 \quad (1)$$

여기서 $D_{15(F)}$, $D_{15(B)}$: 필터재료와 기본 재료의 통과율 15%에 해당되는 입경
 $D_{85(B)}$: 기준재료로서 통과율 85%에 해당되는 입경

첫 번째 기준은 필터를 통해서 기준재료(즉, 보호받아야 할 흙)의 흙입자가 필터를 통과하여 빠져나가지 못하도록 하기 위한 것이다.(Piping 방지조건)

두 번째 기준은 필터는 침투압이나 수압이 발생하지 않도록 투수성이 좋아야 한다는 것이다.(배수 조건) 이 두 가지의 조건은 다음 그림 1과 같다.

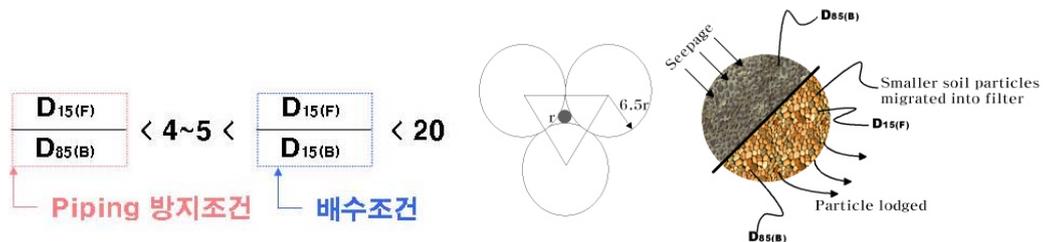


그림 1. 필터재의 조건

즉, 흙 입자가 빠져나오지 못할 정도로 적은 공극을 갖고 있어야 하며, 동시에 침투수가 필터를 통과할 때 어려움이 없도록 충분한 투수성을 유지해야 한다는 것이다. 이러한 조건이 만족되지 못할 경우 흙 입자의 유실로 인한 침식으로 사면이 파괴되거나 높은 침투압 및 수압이 발생하여 사면의 안정성에 큰 영향을 줄 수 있다.

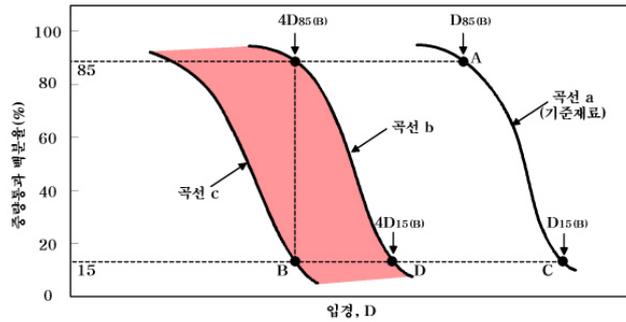


그림 2. 필터의 선택기준

위에 기술된 필터 선정기준을 적용시키는 것은 그림 2를 이용하여 설명할 수 있다. 곡선 a는 기준재료의 입도곡선이다. 첫 번째는 기준으로부터 $D_{15(F)} < 4D_{85(B)}$. A 점의 x좌표는 $D_{85(B)}$, 따라서 $4D_{85(B)}$ 의 크기는 계산된다. B점의 x좌표는 $4D_{85(B)}$ 이므로 그림에 나타낼 수 있다. 이와 같은 방법으로 두 번째 기준으로부터 $D_{15(F)} > 4D_{15(B)}$. C점과 D점의 x좌표는 각각 $D_{15(B)}$ 와 $4D_{15(B)}$ 이다. 곡선 b와 c는 B점과 D점의 경계 내에서 기하학적으로 곡선 a와 유사하게 그린다. 곡선 b와 곡선 c 경계 내에 해당되는 입도분포를 갖는 흙은 좋은 필터 재료라고 할 수 있다.

2.2 Self Filtering 이론

지층의 경계부 사이의 필터조건이 만족한다 하더라도, 성토재 자체의 입도분포가 매우 광범위한 영역에 걸쳐 있거나 입도분포의 절손(gap grading)이 있는 경우에는 침투수에 대해서 성토재자체가 내부적인 필터링 조건을 만족하지 못할 수 있다.

비록 필터와 성토재료 사이의 필터조건이 만족한다 하더라도 성토재료를 구성하고 있는 재료들 간의 필터링 조건이 만족되지 못하면 가는 입자들이 큰 입자들의 공극 사이로 이동되어 성토재료 내부에서 흐름의 집중이 발생되게 되고, 극단적으로는 함몰이나 붕괴를 가져올 수도 있다.

이러한 Self filtering의 가능성을 확인하는 방법은 Lowe에 의해 제안되었으며, 그 기준은 다음과 같다. (Terzaghi & Peck, 1996)

- 1) 대상 재료의 입도분포곡선을 임의의 입경에서 두 부분으로 구분한다.
- 2) 구분점을 경계로 입경이 큰 쪽과 작은 쪽에 대해 각각의 입도분포 곡선을 작성한다.
- 3) 입경이 큰 쪽의 D_{15} 와 입경이 작은 쪽의 D_{85} 의 비율을 계산하여 D_{15}/D_{85} 가 4~5보다 작으면 Self filtering에 대해 안전하다.

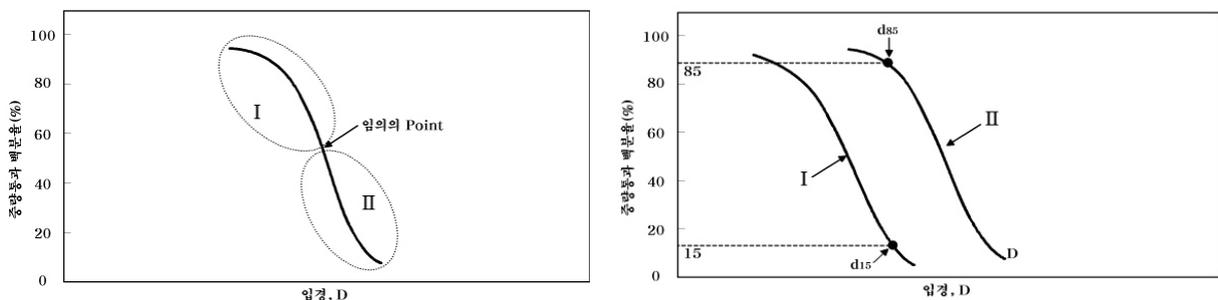


그림 3. Self Filtering 조건

즉, 그림 3처럼 $\frac{d_{15}}{d_{85}} < 4 \sim 5$ 이면 self filtering 조건을 만족하여 유수에 의해 각 성토층 내부에서 발생

될 수 있는 내부 침식의 가능성을 차단하고, 성토재료의 유실/변형 가능성을 최소화 할 수 있다.

3. 실내모형시험을 통한 사면안정성평가

3.1 개요

필터링 조건에 의한 강우시 사면의 안정성을 검토하기 위하여 강원도 평창군의 00면 일대의 설계중인 도로사면을 대상으로 실내모형시험을 실시하였다. 강우강도는 평창군 지방의 최대강우량을 고정변수로 하고, Terzaghi & Peck의 필터링 조건을 이용하여 필터링 설계를 실시한 성토층 사면의 안정성 시험(Case-1)과 그에 대한 대조군 시험으로 성토층 입경이 반대로 설계된 성토층 사면의 안정성 시험(Case-2), 3개의 필터링 설계지층을 혼합한 시험(Case-3)을 통하여 강우에 의해 유실되는 토사량을 분석하여 필터링 효과를 확인하고 이를 통하여 필터링 조건에 따른 인공조성 사면의 안정성 여부를 판단하여 경제적이고 안전한 사면을 설계하는데 목적이 있다.



그림 4. 실내모형시험 사면전경

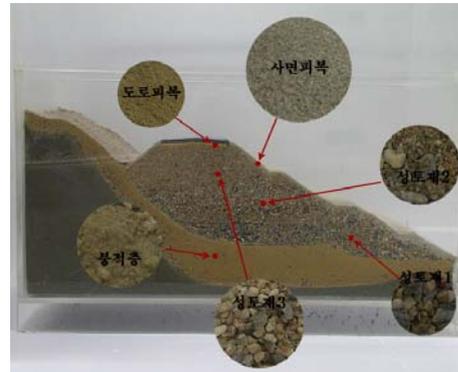


그림 5. 사면구성 재료(Case-2의 경우)

3.2 실내모형시험

3.2.1 성토재료의 체분석 실험

3.2.1.1 성토재료의 시료분석

사면구성 재료는 그림 5와 같다. Case-1, 2, 3의 경우 모두 동일한 재료를 사용하여 시험을 실시하였으며 각각의 Case별 시료의 구성은 표 1과 같고 단면도는 그림 6과 같다.

표 1. Case별 성토재의 구성

	Case-1	Case-2	Case-3
지층 순서	성토재 1	성토재 3	성토재 1+2+3 혼합 단일층 시공
	성토재 2	성토재 2	
	성토재 3	성토재 1	
	붕적층	붕적층	붕적층

그림 5는 Case-2의 경우로 필터링 조건을 반대로 시공한 것이고, 표 1에서 보듯이 원지반 붕적층을 기준으로 성토순서에 의하여 Case를 구성하였다.



Case-1

Case-2

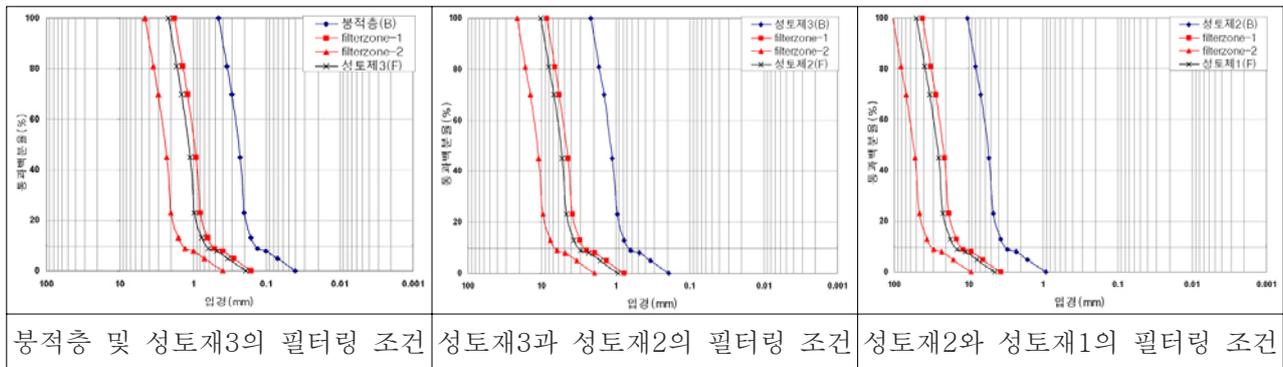
Case-3

그림 6. Case별 지층단면도

3.2.1.2 Filtering 검토 실험결과

각각의 성토재료의 입경가적곡선 및 각각의 층간 필터링 조건은 다음 표 2와 같다.

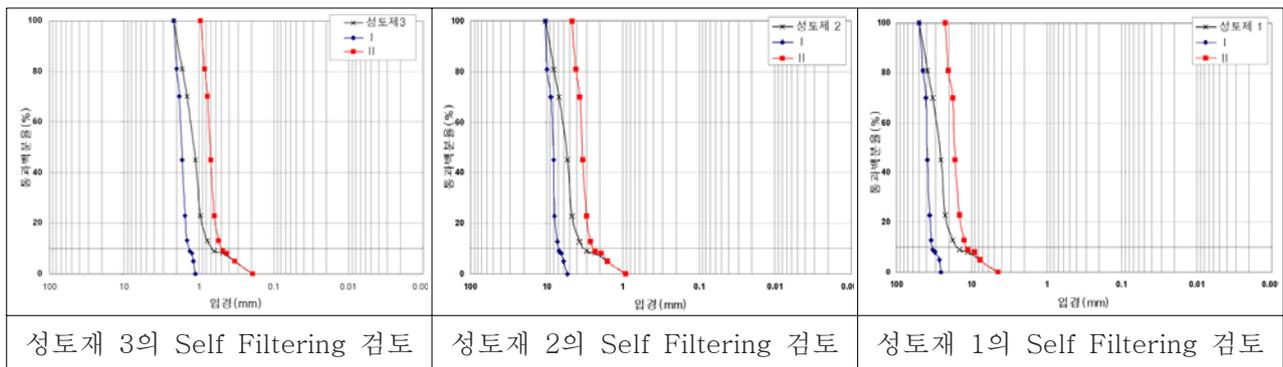
표 2. 각 층간 필터링 조건



즉, Case-1의 경우는 위와 같이 필터링 설계를 실시하여 사면 구성시 층간 필터조건을 만족하였다.

3.2.1.3 Self Filtering 검토 실험결과

표 3. 성토재 별 Self Filtering 검토



즉, 성토재 1, 2, 3의 경우 $\frac{d_{15}}{d_{85}} < 4 \sim 5$ 의 조건을 모두 만족하는 3.125, 1.666, 2의 결과로 각각의 지층은 Self Filtering 조건을 만족한다.

3.2.2 강우강도

본 대상구간은 강원도 평창군 OO면 일대로 지난 7월 200mm 내외의 기록적 폭우가 내려, 불과 4시간 동안 약 4천억 원의 피해가 발생하였다. 또한 △△면이 64mm의 강우량을 기록할 때 OO면은 209mm의 비가 내려 3배 이상의 차이를 보이는 지역 간 예측할 수 없는 강우량의 편차를 보이는 지역으로 사면 안전에 대한 검토가 절실히 요구되는 지역이다.

따라서 본 논문에서는 강원도 평창부근의 연평균 최대 강우강도인 250mm/hr을 모사하여 사면의 안정성을 검토하고, 발생하는 유실 토사량을 측정하여 분석한다.

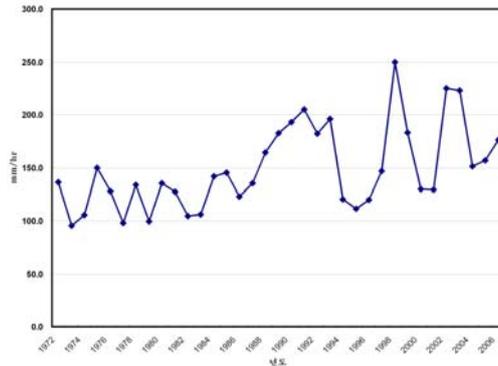


그림 7. 대상구간의 연평균 강우강도

3.2.2.1 강우강도 모사장치

강우의 재현장치는 노즐을 통하여 fog형태로 분사되며 노즐 조절을 통하여 분사각과 분사량을 조절할 수 있다. 강우 측정시에 유의해야 할 점은 토조내 균등한 강우가 적용되어야 한다는 점과 물방울이 너무 커서 표면에 심각한 침식이 발생하지 않아야 한다는 점이다. 그림 8과 같이 시험에 사용된 분사노즐은 이 두 가지 유의점을 모두 조절할 수 있다.

3.2.2.2 장비의 구성 및 강우강도 시험전경

사용장비의 구성은 강우 장치를 모사하는 펌프와 노즐, 사면체를 모사하는 750×300×300 크기의 토조와 지반체로 구성되어 있으며 강우에 따른 유출수의 양을 측정하기 위하여 토조 하단부에 집수 공간을 두었다. 또한 가정한 강우강도를 측정하기 위하여 3단으로 이루어진 각 사면의 중앙부에 강우 측정용 비커를 두어 강우강도를 측정하였다. 장비의 구성과 강우강도의 측정 전경은 그림 8과 같다.



그림 8. 장비의 구성 및 강우강도 측정

3.2.3 시험순서

- 과정1: 필터링 조건의 기반재료를 배합설계 한다.
- 과정2: 원지반의 지층을 각각 조성한다.
- 과정3: 성토 사면을 조성한다.
- 과정4: 토사피복과 도로하부의 피복층을 조성한다.
- 과정5: 펌프장비에 노즐을 연결하고 연결호수의 Air를 제거 후 장치를 연결한다.
- 과정6: 유출되는 유량 및 유실 토사량을 측정한다.

3.2.4 유출유량 및 유실 토사량 분석

유출유량 및 유실 토사량을 측정하여 상기에서 제시한 Case별 필터링 조건에 따른 차이를 정량적으로 비교 분석한다. 토사량을 측정하기 위해서는 여과기와 유리섬유 여과지가 필요하다. 여과기는 상부 여과관과 여과재 지지대, 하부 여과관, 고무마개, 금속제 집게, 흡인병, 펌프장치로 구성된다.

유출된 토사량을 측정하기 위한 실험순서는 다음과 같다.

- 과정1: 건조한 여과지(유리섬유)의 무게를 측정 후 여과지에 유출수를 분다.
- 과정2: 여과지를 105℃에서 2시간 건조 후 여과지를 황산데시게이터를 통해 30분간 방냉 시킨다.
- 과정3: 여과지의 무게를 측정한다.

3.2.5 실내모형시험 결과

각 Case별 시험결과 Case-1의 경우 지속적인 강우에도 불구하고 매우 안정된 경향을 보였으며, 사면의 측면에서 관찰하였을 때 각 성토재 경계 간에 유입수의 흐름이 매우 양호하게 흐름을 볼 수 있었다. 또한 조성된 사면위에 놓아진 도로 배후에 내린 강우 역시 고임 없이 잘 배수가 되었다.

Case-2의 경우 시험 시작 5분 후부터 급격히 사면의 하부가 유실되는 경향을 나타내었고, 지속된 강우로 인하여 사면전체가 파괴되는 양상으로 예상을 상회하는 결과가 도출 되었다.

Case-3의 경우 Case-1과 큰 차이는 없었으나 사면 하부 배수구 쪽의 일부 토피만 유실 되었다. 유실 토사량 시험결과는 표 4와 같으며, Case별 시험 후 사면의 형상은 그림 9와 같다.

표 4. Case별 유실 토사량 시험 결과

Case-1	Case-2	Case-3
86mg/l	1965mg/l	232mg/l



그림 9. Case별 시험 후 사면 형상

4. 결론 및 제언

본 연구는 강원도 평창군 OO면 일대의 설계중인 도로사면을 토대로 필터링 조건에 따른 강우시 사면의 안정성을 위한 실내모형시험을 수행하였다. 이를 통하여 다음의 결론을 도출하였다.

Filtering & Self Filtering을 적용하여 각층을 성토재 3, 2, 1 순으로 조성한 Case-1과 Case-1을 반대로 성토한(성토재 1, 2, 3) Case-2, 3가지 성토층을 혼합하여 단일층으로 구성한 Case-3를 동일한 강우강도로 시험한 결과 토사의 유실량은 Case-2의 경우가 가장 크게 측정되었다. 강우로 인한 지반의 지표수의 침투가 입경이 미세한 지표층을 빠르게 투과하지 못하고 사면을 따라 강하되면서 소유력을 발생시켜 유실 토사량이 가장 크게 측정된 것으로 판단되며 3개의 필터재료로 성토된 Case-1과 단일필터재료로 성토된 Case-3의 경우는 Case-3가 Case-1보다 더 많은 유실을 보인 것으로 측정되었다.

강우 후 사면의 파괴메커니즘 분석을 통하여 Case-1의 경우는 토사피복층의 유실도 크게 보이지 않는 안정한 사면의 상태를 보였고, 단일 필터층의 Case-3의 경우 사면 하부의 배수구 쪽의 사면피복이 유실되는 모습이 관찰되었다. 이는 하부에서 초기변형이 시작되었고, 사면내 침투수의 사면방향의 흐름을 통한 거동이라 판단된다. 하지만 Case-2의 경우는 강우 초기시 사면이 습윤 상태가 되고 얇고 폭이 좁은 수로가 형성되어 그 수로들이 점차적으로 확대되며 침식이 발생하는 천층 활동과 파괴 타입의 활동 메커니즘을 보이다가 지속적인 강우로 인하여 초기에 형성된 골짜기로 강우가 집수되고 집수된 부분의 전석층까지 활동을 확대하는 우곡부 활동과 파괴 타입으로 발전하였다.

이를 통하여 필터층을 다중의 층으로 설계하여 층간필터링과 필터층의 자체필터링까지 고려된 시공을 하면 강우시 유수에 의한 성토재료의 유실/변형 가능성을 최소화함으로써 경제적이고 안전한 사면을 설계하는데 기여할 수 있을 것으로 판단되고, 향후 사면안전 진단 시에 사면성토재료의 Sampling을 통한 필터링 분석을 통한 사면의 안정성 진단에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 감사의 글

본 연구는 소방방재청의 2007년 자연재해저감기술사업인 “사면의 안정성 평가 기술개발” 연구비 지원에 의해 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

6. 참고문헌

1. 사공명, 김민수, 김수남, 이인용(2006), “강우로 인한 철도 연변사면의 활동분석 : 실내모형시험”, 한국지반공학회논문집, Vol.22 No.5
2. 사공명, 임경재(2005), “강우를 고려한 사면내 요부에서의 안정성 해석”, 한국지반공학회논문집, Vol.21 No.9
3. 김영목, 박향근, 최문희(2004), “호우시 도로성토사면의 사면불안정 분석”, 한국지반환경공학회논문집, Vol.5 No.3
4. 남인호(2003), “강우강도에 의한 붕적토 성토사면의 안정성”, 공학석사 학위논문, 충남대학교
5. 김홍택, 박시삼, 이선주(2001), “무한사면에서의 강우시 간극수압의 변화에 관한 연구”, 대한토목학회 2001학술발표회논문집[창립50주년], pp.2902~2906.
6. Terzaghi & Peck(1996), "Soil Mechanics in Engineering Practice", John Wiley and Sons, New York, pp.81~82.