

강우침투에 따른 이암 절취사면의 안정성 분석

전병주 (주,성지지반기술)
이수곤, 강병호 (서울시립대학교)
김영목 (한밭대학교)

1. 서 론

우리나라에서 발생하고 있는 사면붕괴는 주로 우기시 강우와 밀접한 관계가 있다. 그러나 사면붕괴는 강우강도의 크기나 강우지속기간 등의 외적 요인에 관련된 것 뿐 만 아니라 공사 등에 의한 자연지반의 인위적 수정에 기인하는 사면의 조건 등과의 관계가 깊다. 또한, 사면을 구성하고 있는 지반의 공학적 관점과 더불어 수리수문학적, 지형학적 및 지질학적 관점에서의 다각적인 관심이 요구되고 있다.

연구대상사면은 지질학적으로 현생시대에 가장 근접하게 형성된 암반인 경주-포항 일원에 분포하는 이암(Mudstone)으로 셰일(Shale), 실트스톤(Siltstone)과 같이 점토를 주성분으로 하는 퇴적암의 일종이다. 이암은 강도가 약하고 팽창성 성분인 Illite, Bentonite, Montmorillonite 등 점토성 광물을 함유하여 습윤시 지반강도가 급격히 저하됨은 기존의 여러 연구에서 밝힌 바 있다. 그러나, 금번 연구에서는 이암 사면 지반의 특성과악과 사면 형상에 따른 강우 침투시 침투영역 및 포화도에 따른 안정성을 분석하여 우기시 사면이 불안정하게 되는 일련의 과정을 분석하여 사면 안정성 증대 방안을 제안하고자 한다.

이암 사면내 강우 침투 영역의 차이 즉, 표면 피복 공법적용 여부에 따른 사면 내부의 침투거동 차이에 대한 연구를 위해 사면 상단부의 평탄면에 강우침투를 고려한 경우와 사면 상단부의 평탄면과 경사부의 강우침투를 억제한 경우로 나누어 침윤선의 변화를 비교·분석하였으며, 동일한 경우에 대하여 불포화흐름을 고려한 경우의 절취 사면의 안정성에 끼치는 영향을 분석하였다.

2. 연구 사면 분석

2.1 사면 형상

절취비탈사면을 구성하고 있는 기반암은 신생대 제 3기층인 이암질 옹회암, 이암이 수평층상으로 분포한다. 표층은 붕적층이 3~6m, 풍화토 및 풍화암이 15m 층후를 가지며 그 하부에 이암의 파쇄대가 심부(지표하 27m)까지 발달하고 있다. 지표조사에 결과 암층의 경계면과 저지대인 계곡은 지질구조대(단층 및 파쇄대)가 발달함이 확인되었다. 지하수위는 암층 내부의 파쇄대의 영향을 받으며 풍화대층과 암반층의 경계부에 위치하고 표고 64.8~70.2m에 분포한다.(그림. 1 참조)

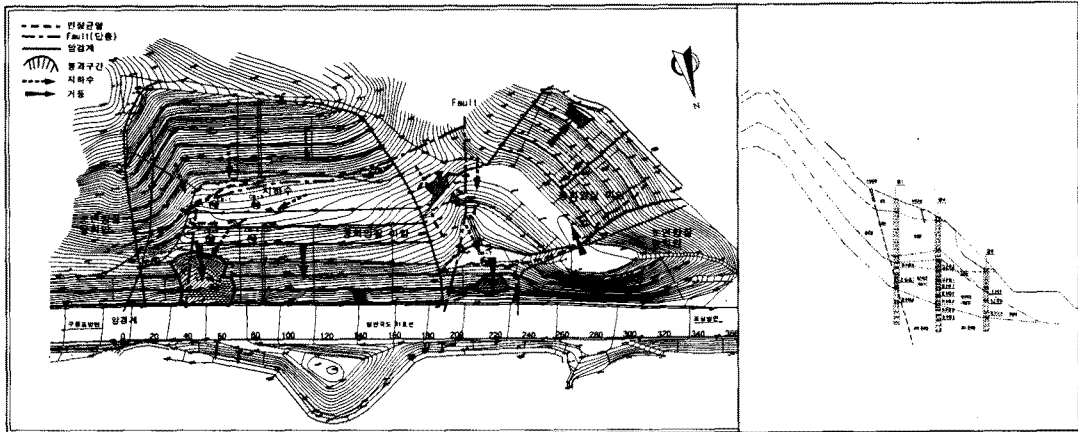


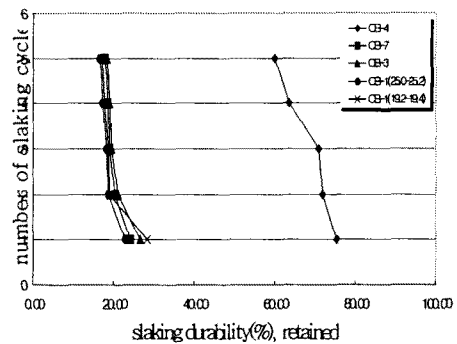
그림. 1. 지질 구조대와 지하수의 흐름 및 단면도

2.2 지반 분석

연구 비탈면 지반 이암의 Slake 내구성을 파악하기 위한 시추조사 코아를 이용하여 Slaking 시험을 실시하였다. 4개 시추공 중 붕괴 활동면이 위치하는 파쇄대 구간의 이암시료와 신선한 이암 시료를 이용하여 slake 내구성시험을 시행하였다. 각 시료의 건습반복횟수를 5회까지 실시한 결과 표 1.과 같이 파쇄대의 내구성지수(Id2)는 18.79~21.14% 로서 매우 낮으며 신선한 암반의 내구성지수(Id2)는 73.34%로서 중간정도이다. 이암은 신선한 암반에 비하여 파쇄대구간은 강우 침투시 건습이 반복되면서 내구성 지수가 급격히 저하되면서 토양화 상태로 천이됨을 알 수 있다.

표 1. Slaking Cycle과 내구성지수(Id)

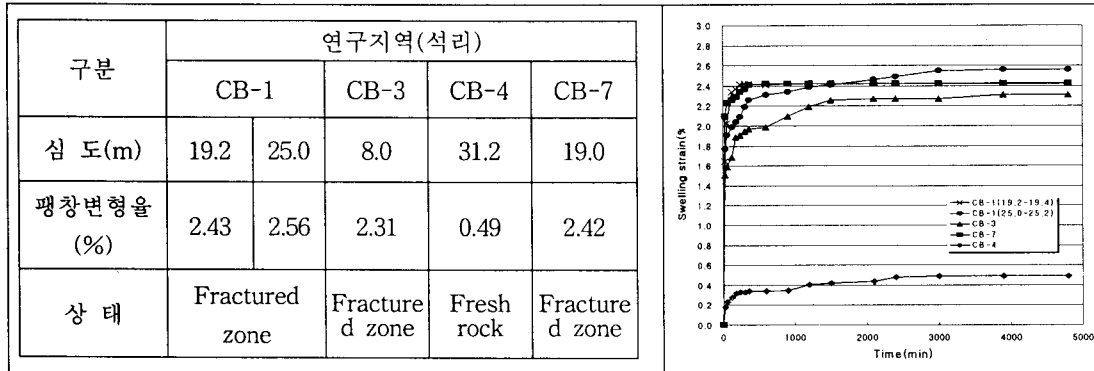
구분	연구지역(석리)				
	CB-1	CB-3	CB-4	CB-7	
심도(m)	19.2	25.0	8.0	31.2	19.0
I _{a1} (%)	28.26	22.96	26.62	76.96	24.24
I _{a2} (%)	19.08	18.79	21.14	73.34	20.28
I _{a3} (%)	18.80	18.17	19.45	72.25	19.10
I _{a4} (%)	17.77	17.29	19.04	63.47	18.60
I _{a5} (%)	17.10	16.71	18.36	61.23	17.86
상태	Fractured zone	Fractured zone	Fresh rock	Fractured zone	



이암의 팽창은 점토의 구성물질인 점토광물의 성분(Kaolinite, Montmorillonite, Illite, Chlorite)과 분자구조와 흡착수의 상호작용을 통하여 발생하는 과정으로 입자 또는 결정간의 팽창과 결정구조내의 팽창작용으로 기인하는 것으로 알려져 있다. 심도를 달리한 3개 시추공

이암시료에 대한 팽창특성은 모든 시료가 초기10시간 이내에 급속한 증가를 보이다가 이후에 둔화되었다가 약60시간 정도 경과하면 최대치를 기록한다.

표 2. Swelling 시험 결과



3. 강우침투에 따른 안전성 분석

3.1 사면조건 및 모델

이암지반 절취 사면에 강우로 인한 불포화지층의 포화상태와 지하수위의 상승으로 간극수압이 증가되어 사면의 안정성에 미치는 영향을 연구하였다. 그림. 2는 침투거동 및 안정해석을 위한 모델로서 지반은 표층, 붕적층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층으로 이루어져 있으며, 절취사면 후면 자연산지에 65~73°의 고각의 단층대와 풍화암층내 20°미만 저각의 층리가 발달하고 있다.

그림. 2의 붕괴는 도로개설시 1차붕괴 후 상부 거동토체를 제거하여 하층을 경감시키고 역지막쪽으로 보강을 한 상태이나 시간이 경과되면서 지하수면에 발달하는 저각의 파쇄대(활동면)가 Slaking, Swelling 현상으로 토사화가 진행 중 집중강우로 붕괴가 발생하였다.

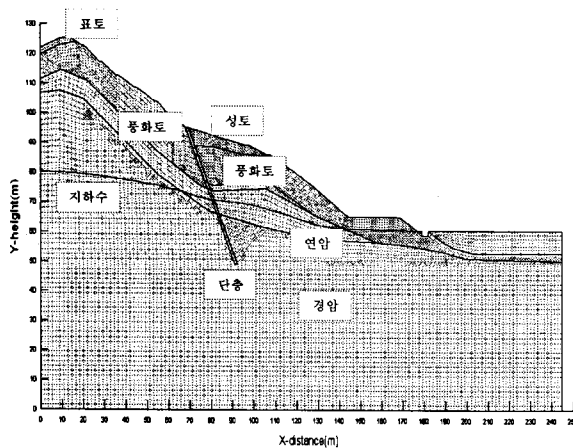


그림. 2. 사면 모델링 형상

표 1. 토질정수 산정결과표

구분	단위중량 ($\gamma_t, t/m^3$)	점착력 ($c, t/m^2$)	내부마찰각(Φ)	투수계수 (cm/sec)
표토층	1.8	1.0	25	2.0×10^{-3}
성토층	1.8	1.5	25	2.0×10^{-3}
풍화토	1.9	1.2	25	8.5×10^{-4}
풍화암	2.1	2.0	28	3.0×10^{-4}
연암층	2.3	5.0	30	2.7×10^{-6}
경암층	2.5	10	35	6.8×10^{-7}

3.2 강우조건

포항지역의 강우량을 1961년부터 2006년까지의 자료를 분석한 결과 연간 강우량이 1994년은 600mm, 2003년은 2,100mm 로서 연도별 편차가 심하나 46년간의 연평균 강우량은 1,148mm이다. 포항지역의 46년간의 기상청의 강우자료를 평균한 월평균 강우량은 우기철인 6월~9월 사이에 강우량의 60~70%의 강우가 집중되고 있다.

본 연구에서 사용된 강우자료는 2000년 9월 붕괴가 발생하기 전 15일 이상의 기상자료이다. 강우침투는 근본적으로 강우시작으로부터 사면내로 침투가 시작되는 것으로 하였으며, 이 때 지반의 초기 조건으로 대략 최적함수비의 함수조건으로 가정하였다.

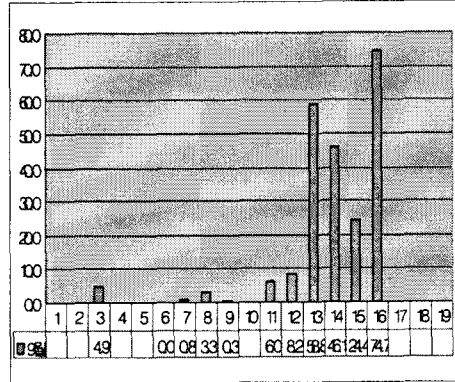


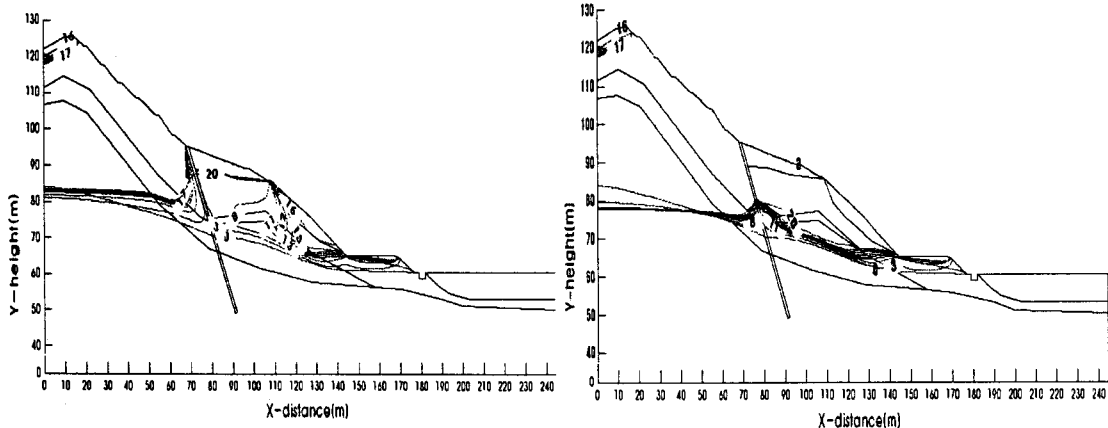
그림. 3. 붕괴전 후 강우량
(2000년 9월 17일 붕괴)

3.3 강우침투 해석

검토사면은 도로건설시 1차 붕괴 후 안정화 공법으로 거동 토체를 제거하는 절취공법으로 1차 안정성을 증대시키고, 역지말뚝을 시공하여 안정화를 기하였다. 이때 지형조건을 고려하여 절취 사면 중간부에 약 30m폭의 평탄지가 형성되었으며 배수를 원활하기 위하여 격자상의 맹암거를 시공한 후 평탄부를 제외한 원지반 절취사면은 강우의 침투를 억제하기 위해 녹생토가 시공된 사면이다. 수년간 안정성을 유지하고 있던 연구사면은 2000년 9월 4일간 연속 집중 호우시 평탄지 하부 사면 붕괴와 평탄지의 단층면을 따라 인장균열이 발생하였다. 강우침투는 절취사면의 법면처리 방법에 따라 강우의 침투 유형이 달라지므로 중간 평탄지의 배수공 설치여부와 강우침투 방지를 위한 녹화여부 조건을 가정하여 침투해석을 하였다.

3.3.1 중간 평탄지 비녹화시

절취 사면중 중간 평탄부인 성토층을 제외한 원지반을 녹생토로 시공하여 강우침투 및 암반의 풍화를 지연시키고자 시공된 상태로 강우침투시의 침투해석과 안정성을 검토하였다. 강우량에 의한 침윤전선의 변화는 12일까지 선행강우 23.5mm는 하부의 지하수위의 변화가 미비하였으나 13일자의 58.8mm 강우시 단층대와 비녹화 구간인 성토층으로 강우가 침투하여 지하수위가 증가하였다. 또한 연속적인 강우로 14일 46.1mm, 15일 24.4mm, 16일 74.7mm의 연속호우로 성토층 하부까지 포화되었으며 하부사면은 녹화의 영향으로 완전히 포화되지 않고 불포화대가 잔존하였다. 또한 단층대 상부의 절취구간은 강우침투가 미비하여 지하수위가 5m 상승하였으나 단층대 우측 성토층 하부는 17.5m의 지하수위 상승이 발생하였다.



(평탄지 비녹화시) (절취면 전구간 녹화시)

그림. 4. 사면내 침투조건 변화에 의한 강우침윤전선의 변화

3.3.2 절취면(평탄지 및 법면) 전구간 녹화

절취 사면중 중간 평탄부인 성토층 및 원지반을 녹생토로 법면녹화하여 강우 침투를 지연시켰을 경우를 가정하여 침투해석 및 안정성 변화를 분석하였다. 그 결과 표면 녹화시 강우는 지표면을 따라 흐르는 량에 비하여 지하로 침투되는 량이 미비하므로 침윤선의 변화는 최대치가 6m 상승하는 것으로 분석되었다.

3.3.3 침투조건에 따른 안전율 변화

동일 강우 조건에서의 침투형상에 따라 침윤선의 변화는 많은 차이가 발생하고 그에 따른 안전율도 상이하게 나타난다. 그림. 5에서와 같이 절취사면의 원지반은 우수침투 및 풍화 억제목적으로 표면녹화를 시공하였고 지형적인 여건상 중앙부에 위치하는 평탄부의 성토층은 배수층을 시공하였으나 붕괴가 발생하였다. 현장여건에 의한 배수층 시공을 시공한 경우, 배수층을 시공하지 않은 상태와 그리고 전구간에 법면녹화를 시공한 경우에 대한 강우침투와 안전율 변화를 검토하였다.

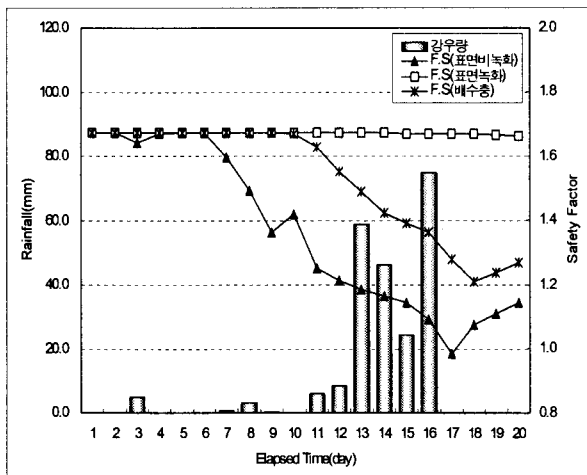


그림. 5. 사면내 침투조건과 일별 안전율 변화

결과 전구간 법면녹화시는 안전율은 거의 감소하지 않으며 배수층 시공시 안전율은 1.2를 상회하나 배수층의 장기적인 기능발휘가 의문시된다. 배수층을 시공하지 않고 성토층에 침투를 용인할시는 연속적인 강우시 급격히 안전율이 저하되어 6일간 누적강우 218.2mm가 될 때 안전율이 1.0이하로서 불안정하게 됨을 알 수 있다.

4. 결론

이암지반 절취 사면이 강우로 인한 불포화지층의 포화상태와 지하수위의 상승으로 간극수압이 증가될 때 사면의 안정성에 미치는 영향을 연구하기 위해 실제 건설공사중 붕괴이력이 있으며, 건설 3년 후 집중 강우현상으로 붕괴가 발생한 사면을 연구 대상 모델로 선정하였다. 선정된 사면은 지반상태를 파악하기 위한 정밀조사, 실내시험 자료를 적용하여 지반조건과 지반정수를 파악하였으며 붕괴시의 실제 강우강도를 적용하여 강우침투에 의한 사면의 불안정성을 수치해석적으로 파악하였다. 사면의 표면처리에 따른 침투능의 변화 또는 침투영역에 따라 강우의 포화영역과 한계평형이론을 이용한 안정성 변화를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 이암의 Slaking 내구성지수 시험결과 신선한 기반암의 내구성지수(I_d)는 73.34(%), 붕괴 활동면 및 단층파쇄대 구간의 내구성지수는 18.79 ~ 21.14 (%)로서 나타났다.

2) 이암의 Swelling 특성을 파악하기 위한 시험결과 신선한 기반암은 팽창 변형율이 0.49%, 파쇄대구간은 2.42~2.56%의 팽창 변형율을 갖는 것으로 나타났다.

3) 동일 강우조건하에서 절취 사면의 침투영역과 침투능을 달리하여 침투시 거동 및 안정성을 분석한 결과 절취법면의 녹화< 배수층 시공< 법면의 비녹화 순으로 강우침투가 용이하고 안전율이 감소함을 확인하였다.

4) 절취 사면의 호우시 침투거동 분석결과 안정성 유지를 위해서는 사면내 대규모의 평탄지를 조성함은 장기적으로 안정성을 위한 방법으로 적용될 수 있으며 사면내 발달하는 파쇄대 및 인장균열은 그라우팅 등 보강하여야 할 것으로 판단된다. 사면의 안정성 확보를 위해서는 근원적으로 표면부에 법면녹화 또는 차수층을 설치하여 강우의 침투를 방지함이 사면의 안정성을 유지하는데 효과적임을 알 수 있었다.

사 사

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(사면붕괴 예측 및 대응기술 개발) 연구비의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김영목, 1990, 강우시 무한사면의 침투거동, 동국대학교 공학박사 학위논문.
2. 김영목, 이성수, 서승중, 2003, 강우침투를 고려한 절토사면의 안정해석, 대한토목학회 정기학술대회, pp. 3363~3366.
3. 김영목, 전병주, 최성운, 2006, 절토사면 압성토에 설치된 배수층의 효과, 한국지반공학회사면안정위원회 학술발표회, pp153~161.
4. 이수곤, 신현우, 이경수, 최호순, 2006, 이암 암반사면의 안정성 검토 방법에 대한 연구,

- 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.235~238.
5. 조성은, 이승래, 2000, 강우침투에 따른 불포화 토사사면의 안정해석, 한국지반공학회지 제16권, 제1호, pp.51~64.
 6. 케이에스엠기술(주), 2001, 00지역 대절토사면 안전진단보고서.
 7. 포항국도유지관리사업소, 2005, 00지역 4차선 확·포장공사 00지역 비탈면보강 설계보고서.
 8. Brooks, R.H., and Corey, A., 1964, Hydraulic Properties of Porous Media, Hydrol. Papers, Colorado State University, Fort Collins, Colorado
 9. Iramy, S., 1954 On the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soil, (Trans. Am. Geophys. Un., Vol. 35, pp.463~468.
 10. Lam, L., and Fredlund, D. G., 1984, Saturated- Unsaturated Transient Seepage Model for Geotechnical Engineering, Proc. 5th Finite Element in Water Resour. Confer5., Vermont, pp.18~22.
 11. Slope/W, 1996, User ' s Guide for Finite Element Seepage Analysis, Geo- Slope Int. Ltd., Canada.