

이암 절취사면의 붕괴이력을 고려한 강우침투에 따른 안정성 분석

The Effect of Rainfall on the Stability of Mudstone Slope in Consideration of Collapse Record

전 병 추¹ Jeon, Byeong-Chu

이 수 곤² Lee, Su-Gon

김 영 목³ Kim, Young-Muk

정 성 래⁴ Chung, Sung-Rae

Abstract

At the mudstone slope located on the roadside of the Seokri area in Donghae-myeon, Pohang, Gyeongsangbuk-do, this study was performed to analyze the effects of rainfall on the stability of slope through seepage analysis according to the precipitation type of the mudstone slope, referring to the actual case of slope failure. For this, precise geological survey, geophysical exploration and drilling survey for the slope where the failure occurred were performed and followed by analysis of detailed soil layer. For the section where failure surface located, the durability reduction of rocks was measured through slaking/swelling tests and the permeability was measured through in-situ permeability tests for each soil layer. In addition, the change of strength parameter and process of instability were analyzed by back analysis, using Talren 97 and Slope/W programs, in the slope. By applying different precipitation conditions to the geographical conditions of the slope that had actual failure records, the slope stability was analyzed by seepage analysis according to duration of rainfall and rise of groundwater level resulting from the flow of rainfall caused by development of geological structures and the slope surface condition.

요 지

경상북도 포항시 동해면 석리지역의 국도변에 위치한 이암으로 구성된 사면에서 실제로 발생한 사면붕괴 사례를 중심으로 이암사면의 강우유형에 따른 침투해석을 시행하여 강우가 사면에 미치는 안정성 분석에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 붕괴가 발생한 사면을 대상으로 정밀지표조사, 지구물리탐사 및 시추조사를 수행한 후 상세 지층상태를 분석하고, 붕괴 활동면이 위치하는 구간에 대하여 slaking/swelling 시험을 통해 내구성이 저하되는 것을 파악하고, 현장투수시험을 통해 토층별 투수성을 파악하였다. 또한 한계평형해석 프로그램인 Talren 97을 이용하여 역해석에 의한 강도정수의 변화분석 및 Slope/W 프로그램을 이용하여 호우시 침투거동과 강우량에 따른 사면내 수압의 변화에 의한 불안정하게 되는 과정을 분석하였다. 실제 붕괴이력을 갖는 사면을 대상으로 지형적인 조건과 서로 상이한 강우조건을 적용하여 사면의 지질구조대 발달 및 사면표면의 상태에 따른 강우침투로 인한 지하수의 상승과 강우지속시간에 따른 침투해석을 통해 사면의 안정성을 분석하였다.

Keywords : Fault zone, Pore water pressure, Rainfall intensity, Seepage analysis, Slaking/swelling, Surface vegetation

1 정회원, (주) 성지지반기술 상무이사 (Member, Managing Director, Sungji Geotechnical Engineering, Co., Ltd., bjeons@naver.com, 교신저자)

2 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul)

3 정회원, 한밭대학교 토목환경도시공학부 교수 (Member, Prof., Division of Civil, Environmental and Urban Engineering, Hanbat National Univ.)

4 정회원, (주) 성지지반기술 대표이사 (Member, Chief Executive Officer, Sungji Geotechnical Engineering, Co., Ltd.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

우리나라는 산악지형이 70% 이상을 차지하여 도로건설, 택지조성 및 공장건설 등 기간산업을 위한 사회간접자본의 확충이 요구되는 경우 산야의 절취가 불가피하며, 이때 절취사면이 수반되고 건설시 지반조건 또는 지질학적 여건에 따라 붕괴현상이 발생한다. 또한 시공 완료 후 여름 폭우시 강우침투에 의한 사면의 불안정요소가 증가하여 많은 사면붕괴가 발생하여 인명피해와 경제적 손실을 초래한다.

우리나라의 사면붕괴는 주로 우기시에 발생하므로 강우와 밀접한 관계가 있다. 이는 강우강도의 크기나 강우지속시간 등의 외적 요인에 관련된 것뿐만 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.

본 연구는 실제 시공 중에 붕괴가 발생하였고 보강공사를 하였으나 수년 후 추가붕괴가 발생한 실제사면을 대상으로 지반의 특성, 사면 형상에 따른 강우 침투시 침투영역 및 포화도에 따른 안정성을 분석하여, 우기시

사면이 불안정하게 되는 일련의 과정을 분석하여 이암으로 구성된 절취사면에서의 사면 안정성 증대 방안을 제안하고자 한다.

2. 연구사면 분석

2.1 사면 형상

연구대상 사면은 경상북도 포항시 동해면 석리지역의 국도변 사면으로서 규모는 연장 약 340m, 최대높이 약 70m로서 사면 경사는 1:1.2(40°)이고, 연직높이 5m 간격으로 13개의 소단이 설치되어 있다. 특히 절취면 중 중앙부 5소단에 경사 12°, 폭 30m의 평탄한 광장부가 형성된 것이 특징이다. 절취비탈사면을 구성하고 있는 기반암은 신생대 제 3기층인 응회암질 이암으로서 이암이 수평층상으로 분포한다. 표층은 붕적층이 3~6m, 풍화토 및 풍화암이 15m 층 두께를 가지고 있으며, 그 하부에 이암의 파쇄대가 심부(지표하 27m)까지 발달하고 있다. 지표조사 결과 암층의 경계면과 저지대인 계곡은 지질구조대(단층 및 파쇄대)가 발달함이 확인되었다. 지하수위는 암층내부의 파쇄대의 영향을 받으며 풍화대 층과 암반층의 경계부에 위치하고 있다(Fig. 1).

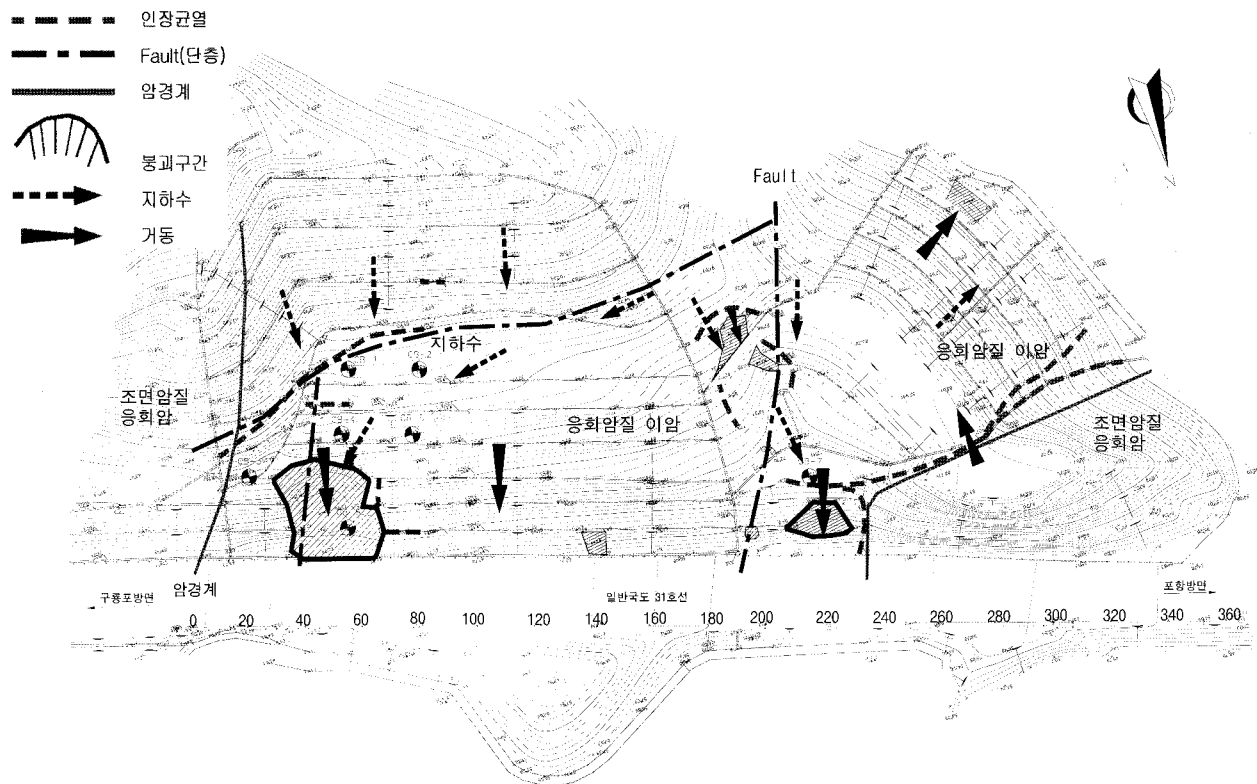


Fig. 1. Status of slope (Geological features, groundwater flow and borehole location)

2.2 붕괴 이력

본 연구비탈면은 31호 국도건설시 자연 산능지 하단부를 신규 절취하였으며, 높이 15m, 비탈면 경사 1:1.0로 시공 6개월 후 1997년 8월 13일 10여 일간 162.5mm의 연속적인 강우로 인해 1차 대규모 산사태가 발생하였다. 붕괴위치는 절취면 하단부 후방 수평으로 약 80m 지점에서 연직단차 약20m의 자연산지의 붕괴로서 붕괴면은 65~70°의 경사를 갖는 단층활면(slikenside)이 발달하고 있다. 붕괴비탈면의 보강대책으로 연직높이 5m(13단), 1:1.5경사로 절취하여 거동토체를 경감하고 역지말뚝(φ406, 강관pile)을 인장균열부 상부 1열, L=20m, 하부에 2열, L=21~32m시공하였다. 2차 붕괴는 2000년 9월에 4일간 204.0mm의 연속적인 강우로 인해 3소단 하부 약30m 구간에서 붕괴활동과 1차붕괴시 인장균열부에서 재인장균열이 발생하여 보강대책으로 역지말뚝 변형구간에 추가보강(φ105, mini 강관pile)을 실시하고 하부 붕괴구간은 압성토 보강공법을 시공하였다. 3차 붕괴는 2005년 9월 6일 태풍 나비와 동반하여 1일 강우량 265mm의 집중호우시 2차 붕괴현상과 동일하게 붕괴가 발생하였다(Fig. 2).

2.3 지반 분석

연구대상지역 사면의 지형과 지질공학적인 특성을 파악하기 위하여 정밀지표조사결과 사면의 구성 지반은 신생대 제3기의 담회색~담녹색의 이암이 주를 이루고, 현재 보강공이 시공된 말뚝하부 구간은 단층 각력이 사면의 횡방향으로 분포하여 붕괴면에 단층 점토와 용수 현상이 관찰되었다.

자연사면의 미절취구간 노두는 괴상의 자주색~회갈색의 조면암질 응회암으로 괴상의 형태로 분포하고 절리는 냉각시 형성된 절리로 단속적이고 불규칙하게 발달하고 있다. 절취 사면내의 붕괴면에 노출된 이암층은 20°이하 저각의 경사를 이루며 층상의 담회색~녹회색의 응회암질 이암이 분포하며, 지하수에 의한 풍화현상으로 암의 원조직은 유지하나 강도가 극히 미약하고 토사화 되어 있다. 이를 종합하여 보면 시점부와 종점부의 고지대는 조면암질 응회암이 분포하고 현사면의 대부분을 차지하고 있는 절취구간은 암질이 연약한 응회암질 이암(해성 쇄설성 퇴적암)이 분포한다. 또한 절취면 후면 계곡부에 관찰되는 단층 파쇄대는 사면 중심부에 종방향인 동-서방향과 횡단하는 남-북방향으로 발달하고 있다. 지반균열 및 거동은 지질구조에 의한 지층의 교란과 구조대내 지하수의 침투가 용이하므로 수차례의 사면의 거동이 발생하였다.

사면의 내부 지반상태를 세밀히 파악하기 위하여 전기비저항탐사와 시추조사를 시행한 결과 상부구간의 붕적(성토)층, 풍화대층, 기반암층으로 분포하고 인장균열이 관찰되는 지점은 하부로 연장되는 구조대가 발달하고 활동면을 따라 이암의 파쇄에 의한 점토화 현상, 지표수 침투와 지하수위 상승으로 인한 swelling, slaking 현상이 진행되어 지반이 상당히 약화된 상태로 분석되었다(Fig. 3).

이암의 slake 내구성을 파악하기 위하여 연구대상 사면내의 총 4개의 시추공 중 붕괴 활동면이 위치하는 파쇄대 구간의 이암시료와 신선한 이암 시료를 이용하여 slaking test를 실시하였다. 각 시료의 건습반복횟수를 5회까지 실시한 결과 Fig. 4와 같이 파쇄대의 내구성지수(Id2)는 18.79~21.14%로서 매우 낮으며 신선한 암반

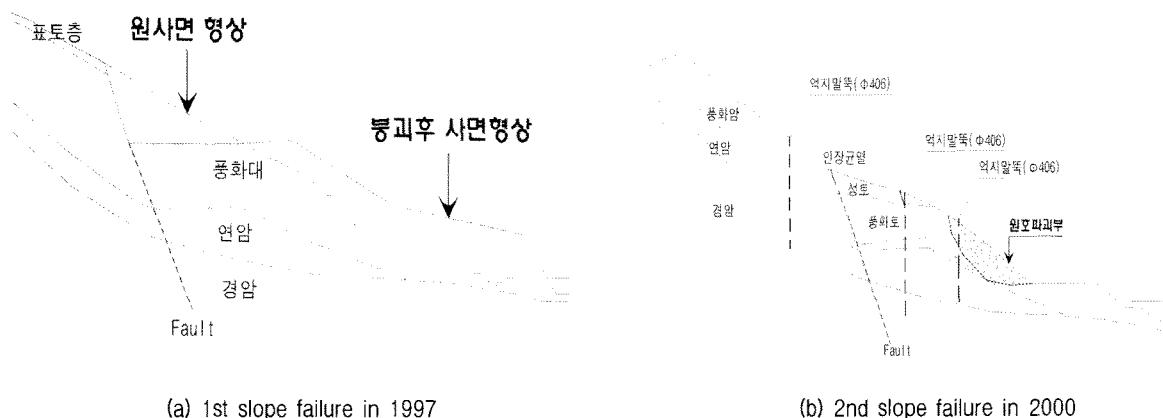


Fig. 2. Model of slope failure

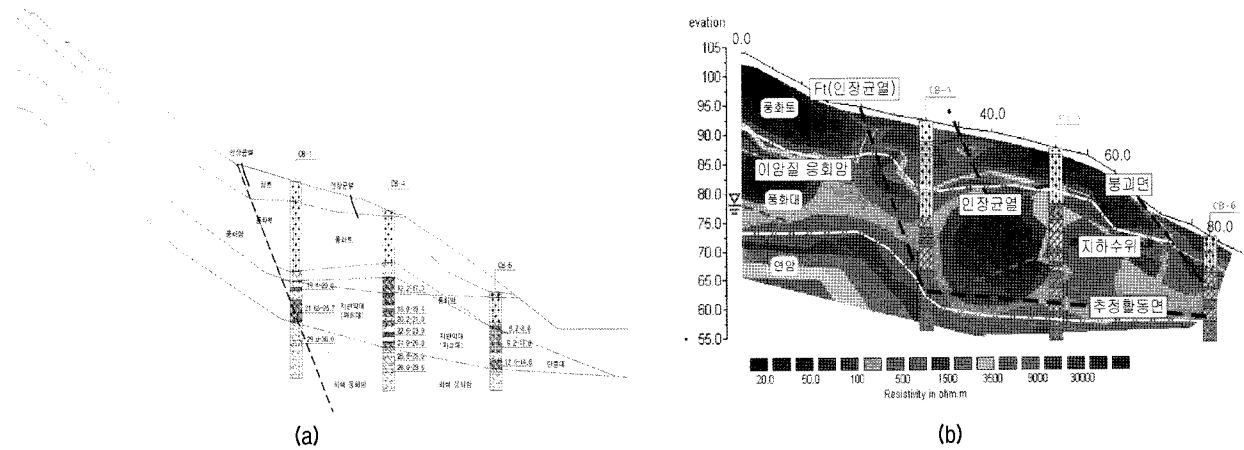
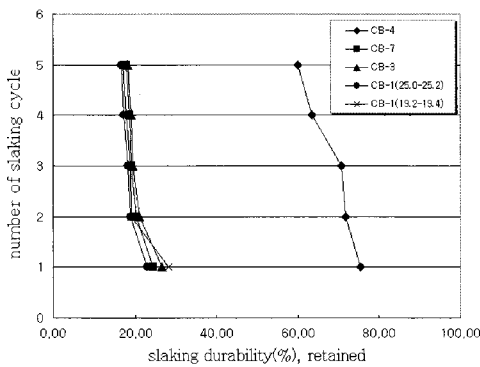
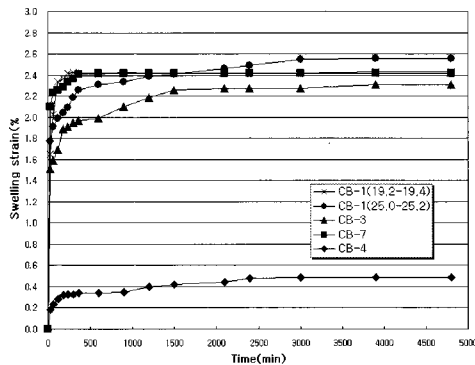


Fig. 3. (a) Master of sectioned diagram, (b) Result of resistivity method



Item	Study area (Pohang Seokri)				
	CB-1	CB-3	CB-4	CB-7	
Depth (m)	19.2	25.0	8.0	31.2	19.0
Id1 (%)	28.26	22.96	26.62	76.96	24.24
Id2 (%)	19.08	18.79	21.14	73.34	20.28
Id3 (%)	18.80	18.17	19.45	72.25	19.10
Id4 (%)	17.77	17.29	19.04	63.47	18.60
Id5 (%)	17.10	16.71	18.36	61.23	17.86
condition	Fault		Fault	MW	Fault

Fig. 4. Slaking cycle and slake durability index (I_d)



Item	Study area (Pohang Seokri)				
	CB-1	CB-3	CB-4	CB-7	
Depth (m)	19.2	25.0	8.0	31.2	19.0
Swelling strain (%)	2.43	2.56	2.31	0.49	2.42
condition	Fault		Fault	MW	Fault

Fig. 5. Results of swelling test

의 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. 정강복 등(2006)은 포항지역에 산출되는 자연상태의 이암에 대한 강도특성 및 열화특성을 파악하기 위하여 slaking에 의한 열화된 이암을 대상으로 직접전단시험을 실시한 결과 44~51%의 강도감소 현상이 발생하는 것으로 나타났다. 심도를 달리한 3개 시추공 이암시료에 대한 팽창

특성은 모든 시료가 초기 10시간 이내에 급속한 증가를 보이다가 이후에 둔화되었다가 약 60시간 정도 경과하면 최대치를 기록한다(Fig. 5). 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. 이암의 화학분석에 의한 구성 성분은 Quartz 62.4%, Illite 18.4%, Albite 9.5%, Chlorite 7.6%, Pyrite 2%로 구

Table 1. Coefficient of permeability for each layer

Item	U.S.C.S	Coefficient of permeability(m/sec)	Mean (m/sec)
Residual soil	GC, GP	7.3×10^{-5} above	2.0×10^{-5}
CW soil	CL, SC, GC	$3.5 \times 10^{-6} \sim 6.2 \times 10^{-7}$	8.5×10^{-6}
HW	Mudstone	$5.0 \times 10^{-6} \sim 2.1 \times 10^{-7}$	3.0×10^{-6}
Fault	Mudstone	$3.0 \times 10^{-5} \sim 8.4 \times 10^{-6}$	5.0×10^{-5}
MW (bedrock)	Mudstone	$2.4 \times 10^{-8} \sim 6.8 \times 10^{-9}$	2.7×10^{-8}

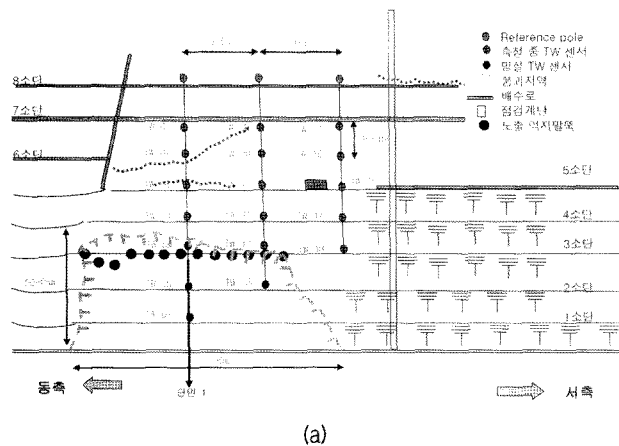
성되어 있다(김광식 등, 2001).

연구대상 사면의 구성 토층별 투수성을 파악하기 위하여 시추조사와 병행하여 투수시험을 실시하였다. 상부로부터 붕적·매립층, 풍화토, 풍화암, 이암파쇄대 및 연암층으로 분포하고 시험방법은 일정구간의 대상심도(0.5~1.0m)를 설정하여 변수위 시험법인 falling head test를 실시하였으며 그 결과는 Table 1과 같다.

2.4 계측에 의한 거동 분석

연구 비탈면에 1차 붕괴(2000년) 이후 보강공사 실시 후 지반변위 상태와 지반거동을 사전에 파악하고 신속히 대처하기 위하여 지표변위계를 횡단선상으로 설치하여 태양열을 광원으로 사용하는 실시간 무선 송출시스템을 적용하여 관리하여왔다(Fig. 6).

3차붕괴(2005년)를 전후한 강우자료와 계측자료를 분석하면 강우량은 9월 4일 7mm, 5일 17mm, 6일 265mm의 집중호우가 발생되었으며, 계측기의 지표면의 변위는 9월 6일 10시 01분에 처음 변위가 감지되기 시작하여 14시 31분까지 점차 증가하는 현상을 보이다가 급격한 붕괴에 의하여 계측기가 망실되었다(포항공도유지관리사업소, 2005)(Fig. 7).



3. 강우침투에 따른 안정성 분석

3.1 사면조건 및 모델설정

대상사면인 이암지반의 사면에 강우시 지표면으로 강우 침투로 인한 불포화지층의 포화상태로의 변화와 지하수위의 상승에 따른 간극수압의 증가가 사면의 안정성에 미치는 영향을 연구하였다.

Fig. 8에서 보면 침투거동 및 안정해석을 위한 모델로서 표층, 붕적층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층으로 지층이 이루어져 있으며, 절취사면 중심부에 65~73°의 고각의 단층대와 기반암은 20°미만 저각의 층리가 발달하고 있다.

도로개설시 1차 붕괴 후 상부 거동토체를 제거하여 하층을 경감시키고 역지막쪽으로 보강을 한 상태로 사면의 안전율을 증대시켰으나 시간이 경과되면서 강우 침투, 지하수위면에 발달하는 저각의 파쇄대(활동면)가 slaking, swelling 현상으로 토사화가 진행되어 집중강우로 인한 붕괴가 발생하였다(Fig. 8).

3.2 역해석에 의한 강도정수

각 지층에 대한 토질정수는 붕괴시기별 현장조사에

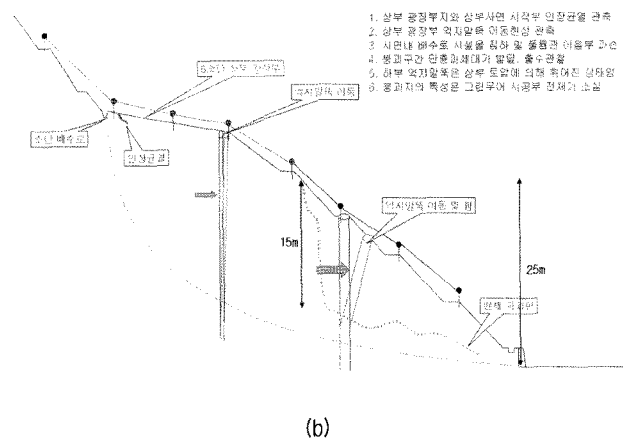


Fig. 6. Set up measurement instrument. (a) Plane figure, (b) Sectioned diagram

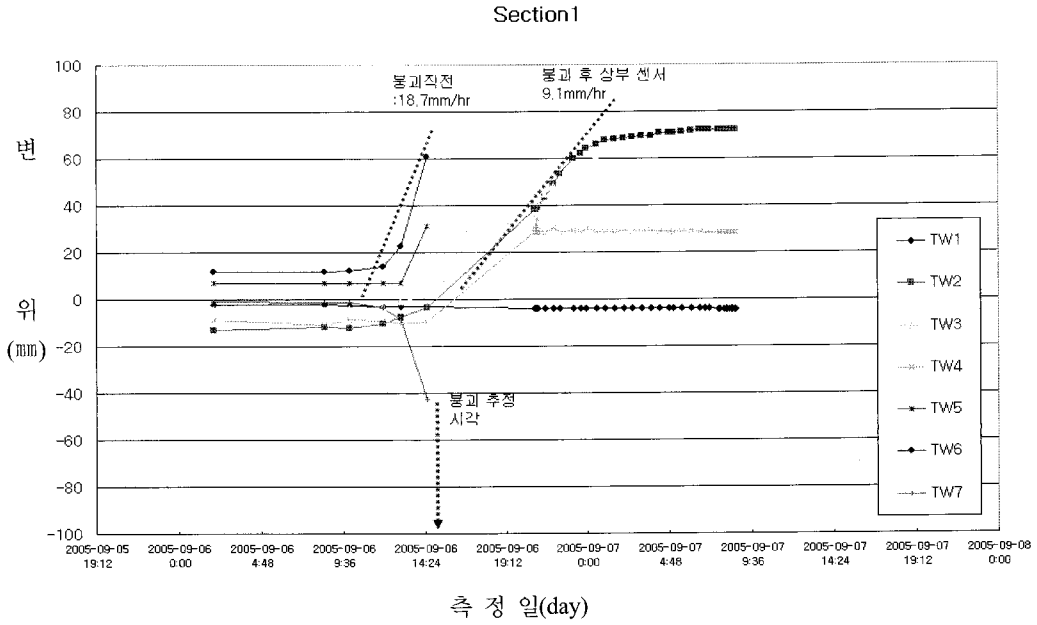
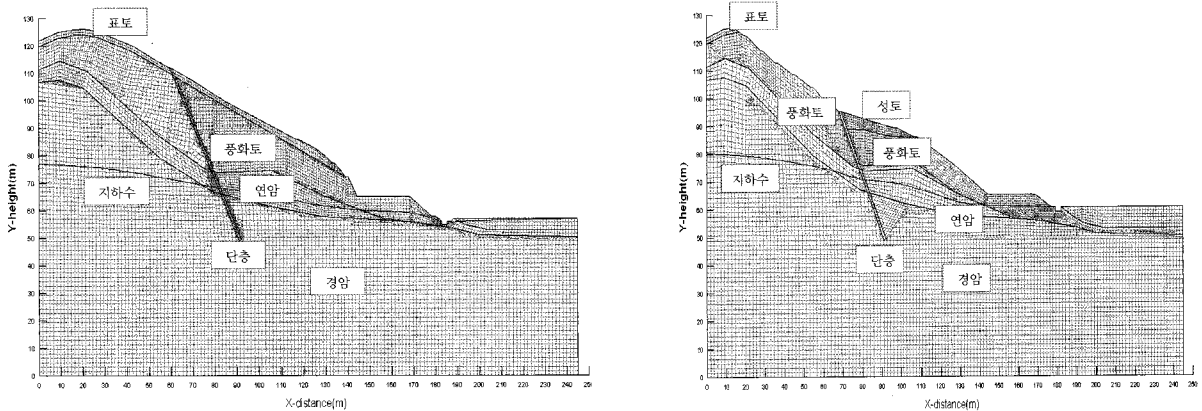


Fig. 7. Strain of measurement sensor for each time slot



(a) 1st slope failure in 1997

(b) 2nd slope failure in 2000, 3rd in 2005

Fig. 8. Model of slope failure

의한 붕괴비탈면의 지층상태를 파악하고 붕괴형상을 재현하였으며, 실내시험자료와 붕괴 당시의 지형, 토질 및 지질조건, 그리고 강우 상황 등을 고려하여 붕괴상황 당시의 조건에 의한 붕괴시 단면을 재현시켰다.

역해석에 의한 강도정수의 추정은 재현된 붕괴 단면으로부터 사면 구성하고 있는 토질 및 지질 조건을 고려하고, 붕괴면의 상태를 고려하여 구성 토질조건에 대한 일반적인 값으로부터 반복적으로 안정해석을 행하여 사면 붕괴상태가 될 수 있는 조건을 찾아내어 이로부터 구하는 것으로서 Table 2와 같이 각 지층의 토질정수를 산정하였다. 본 역해석시 사용된 한계평형해석 프로그램은 사면안정해석시 일반적으로 많이 사용하고 있는 Talren 97이다.

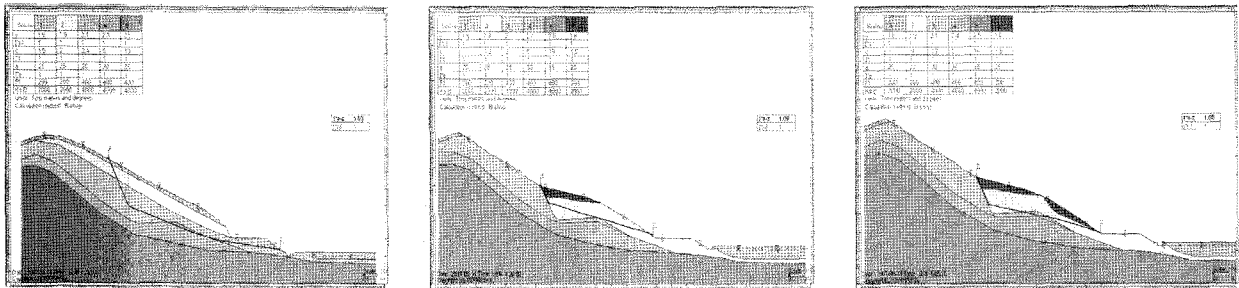
Fig. 9는 역해석에 의해 강도정수를 구할 때 이에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 10은 연구사면의 붕괴시 토질강도정수의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 10에서와 같이 시간이 경과되고 붕괴가 진행될수록 강도정수는 감소한다는 것을 알 수 있다.

실내시험에 의한 강도정수의 변화는 기반암이 잔적토로 변화하면서 내부마찰각은 최대 51%, 점착력은 92% 감소하는 것으로 보고된 바 있으나(조성은과 이승래, 2000), 본 연구에서는 역해석에 의한 강도정수는 풍화토층이 점착력은 55%, 내부마찰각은 12% 감소하였으며 풍화암은 점착력과 내부마찰각 공히 29% 감소되었음을 알 수 있다.

Table 2. Value of cohesion and friction angle

Type	Specific gravity, γ_f (kN/m ³)	Cohesion, c (kN/m ²)	Friction angle, Φ (°)	Coefficient of permeability, k (m/sec)
Residual soil	18	10	25	2.0×10^{-5}
Infilling	18	15	25	2.0×10^{-5}
CW soil	19	12	25	8.5×10^{-6}
HW	21	20	28	3.0×10^{-6}
MW	23	50	30	2.7×10^{-8}
SW	25	100	35	6.8×10^{-9}

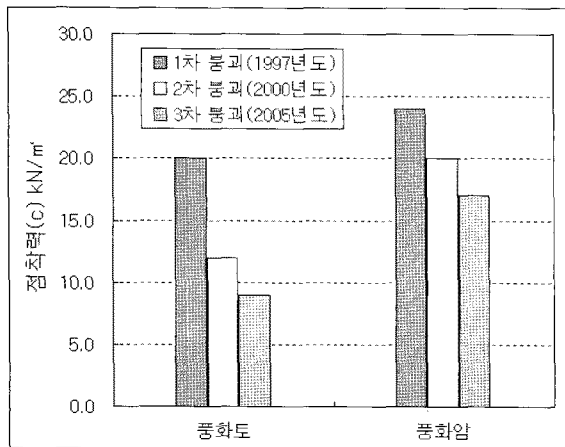


(a) 1st slope failure in 1997

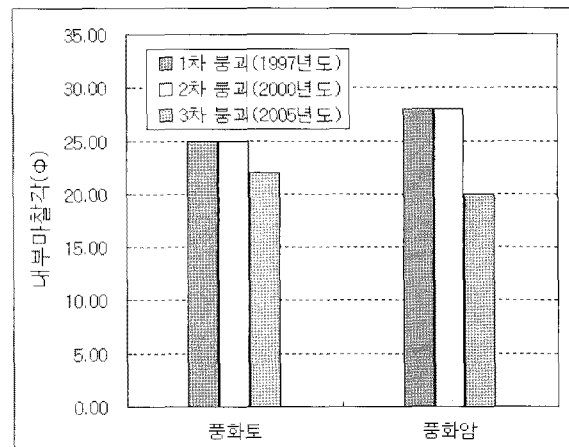
(b) 2nd slope failure in 2000

(c) 3rd slope failure in 2005

Fig. 9. Result of limit equilibrium back analysis at slope failure



(a) Value of cohesion



(b) Value of friction angle

Fig. 10. Variation of cohesion and friction angle by the elapsed time

3.3 강우조건

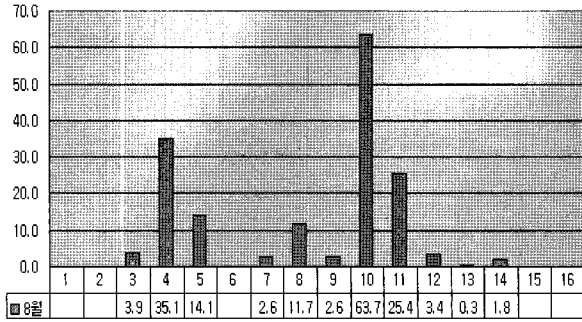
포항지역의 강우량에 대해 1961년부터 2006년까지의 자료를 분석한 결과 연간 강우량이 1994년은 600mm, 2003년은 2,100mm 로서 연도별 편차가 심하나 46년간의 년평균 강우량은 1,148mm이다. 포항지역의 46년간의 기상청의 강우관측 자료를 평균한 월평균 강우량은 우기철인 6월~9월 사이에 강우량의 60~70%의 강우가 집중되고 있다.

본 연구에서 사용된 강우자료는 1997년 8월, 2000년

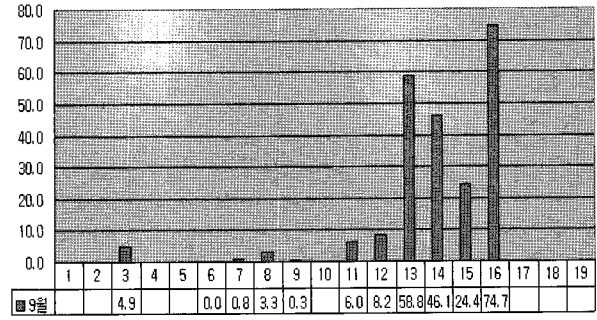
9월, 그리고 2005년 9월 붕괴가 발생하기 전 15일 이상의 기상자료이다(Fig. 11). 강우침투는 근본적으로 강우 시작으로부터 사면내로 침투가 시작되는 것으로 하였으며, 이 때 지반의 초기 조건으로 대략 최적함수비의 함수조건으로 가정하였다.

3.4 강우침투 해석

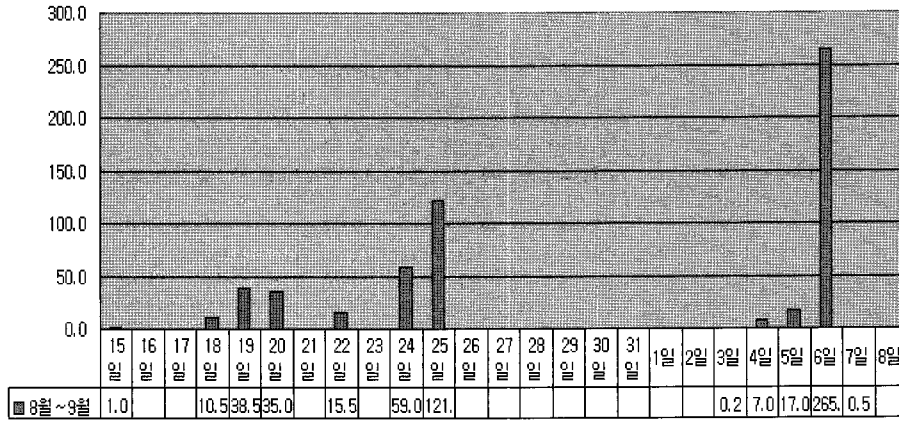
강우로 인한 사면내 강우 침투거동에 대하여 Brooks 와 Corey(1964) 등 여러 학자들에 의하여 불포화흐름에



(a) Normal rainfall in Aug 1997



(b) Heavy rainfall for 4 days in Sep 2000



(c) Heavy rainfall for 1 day in Aug. to Sep. 2005

Fig. 11. Annual rainfall (Korea Meteorological Administration)

대하여 이론이 정리되었으며, 균일한 강도의 강우가 계속되는 경우 지표면에 발생하는 물고임 현상(ponding)과 물고임 현상 발생후 침투이론은 Mein과 Larson (1973)에 의하여 침윤전선의 깊이를 구할 수 있는 식이 제안된 바 있다. 또한 Pradel과 Raad(1993)에 의하여 사면의 안정성을 평가하면서 침투효과에 대하여 연구가 이루어 졌으며, 국내의 경우 김영복(1990, 2006) 등 여러 학자에 의하여 강우에 대한 침투거동을 재현하는 실험모델의 제시와 더불어 이에 대한 수치해석적 연구를 행한 바 있다.

본 연구는 강우에 의하여 수차례 붕괴가 발생한 사면을 대상으로 강우량과 침투거동의 연관성 및 안정해석을 시행하였다. 연구사면은 도로건설시 붕괴현상이 발생하여 안정화 대책으로 거동 토체 상부를 일정 제거하는 절취공법과 억지말뚝을 시공하여 지반거동을 억제토록 시공되어 있다. 이때 사면 절취시 지형조건을 고려하여 절취 사면 중간부(H=25~30m)에 약 30m폭의 평탄지가 형성되었으며, 배수 목적으로 격자상의 맹암거가 설치되어있으며 평탄부를 제외한 원지반 절취사면은 강우의 침투를 억지하기 위해 녹생토가 시공된 사면이다.

수년간 안정성을 유지하고 있던 연구사면은 2000년 9월 4일간 연속 집중 호우시 평탄지 하부 사면 붕괴와 평탄지의 단층면을 따라 인장균열이 발생하였다(Fig. 9). 또한 2005년 태풍 나비와 동반한 1일 집중호우에 3차 붕괴가 발생하였다. 강우침투는 절취사면의 범면처리 방법에 따라 강우의 침투 유형이 달라지므로 중간 평탄지의 배수공 설치여부와 강우침투 방지를 위한 녹화여부 조건을 가정하여 침투해석을 하였다.

3.4.1 지질구조대 발달시 강우침투

하부 절취에 의한 압성토 제거 및 상부의 자연사면에 분포하는 단층대로 강우가 침투하면서 간극수압이 증대되어 평면형 붕괴가 발생되었다. 일별 강우량에 따른 강우침투로 부정류해석에 의한 침투해석의 결과는 선행 강우량과 강우강도에 따른 모관흡수력의 변화는 Fig. 12와 같으며, 강우에 의한 안전율의 변화는 Fig. 13과 같다.

침투해석에 의하면 자연비탈면에 위치하는 단층대를 기준으로 상부의 능선부는 강우가 수직으로 침투후 지형여건에 따른 하향경사의 지층경계면을 따라 하류하여 일정깊이만 포화되며 그 하부는 불포화 영역을 이루

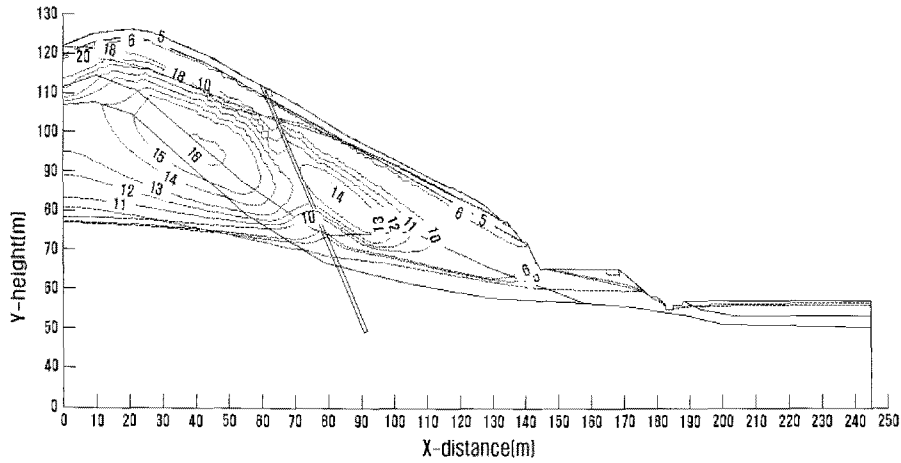


Fig. 12. Change of wetting front at 1st slope failure

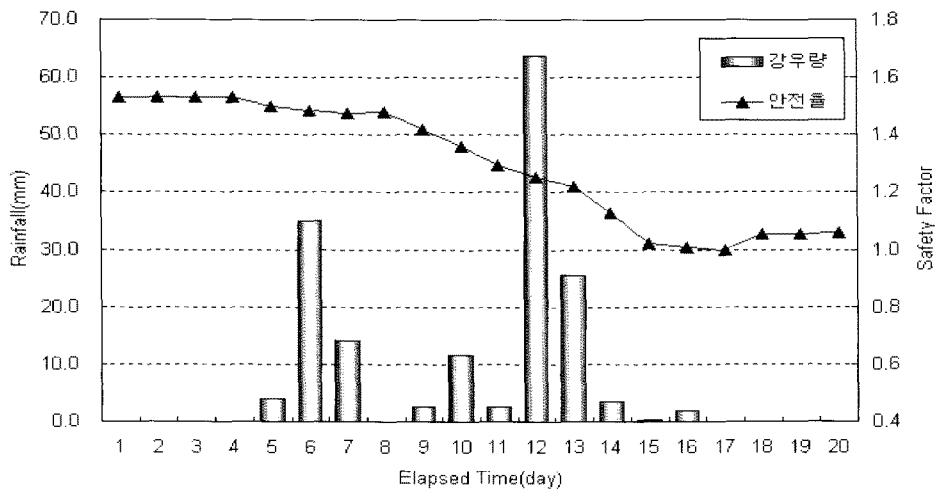


Fig. 13. Change of Factor of safety by rainfall in 1997

고 있다. 단층대 상부 유역의 침투수들이 단층대로 유입하여 하부로 침투됨으로 단층대 하부구간은 급격히 포화영역이 확장되고 지하수위의 상승으로 간극수압이 지반내 불연속면에 크게 증가되어 사면 안정성이 저하됨을 알 수 있다.

3.4.2 사면 표면 비녹화시 강우침투

절취 사면중 중간 평탄부인 성토층을 제외한 원지반은 녹생토로 시공되어 있는 현 사면은 붕괴가 발생한 조건임을 감안하여 비녹화 상태로 간주하여 강우침투시의 침투해석과 안정성을 검토하였다. 실제 사면 붕괴가 발생하기 전에는 녹생토로 녹화되어 있는 반면, 사면이 붕괴된 상태에서는 녹화층도 파손되어 용이하게 강우가 침투할 수 있는 조건이 되므로 이를 고려한 것이다.

Fig. 14(a)의 사면 붕괴가 발생한 조건인 비녹화 조건에서는 강우에 의한 침윤전선의 변화는 12일까지 선행

강우 23.5mm는 하부의 지하수위의 변화가 미미하였으나 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 포화되었다. 한편, Fig. 14(b)는 녹화가 되어 있는 경우로서 강우침투의 억제 효과로 지하수위의 변동은 미미한 것으로 나타나고 있다. 또한, 단층대 상부의 절취구간은 강우침투로 인해 일부 지하수위가 5m 상승하였으나 비녹화의 경우에는 단층대 우측 성토층 하부는 17.5m의 지하수위 상승이 발생하였다. 한편, 김영목 등(2006)에 의하면 토사 사면의 표층하부에 배수층을 시공하였을 때 배수층 하부에 강우침투가 억제 효과가 보고된바 있으며, 급변 법면 녹화시 강우 침투해석 결과 하부로 강우침투가 억제되는 것으로 분석되었다. Fig. 15는 이에 대한 분석 결과를 도시한 것이다.

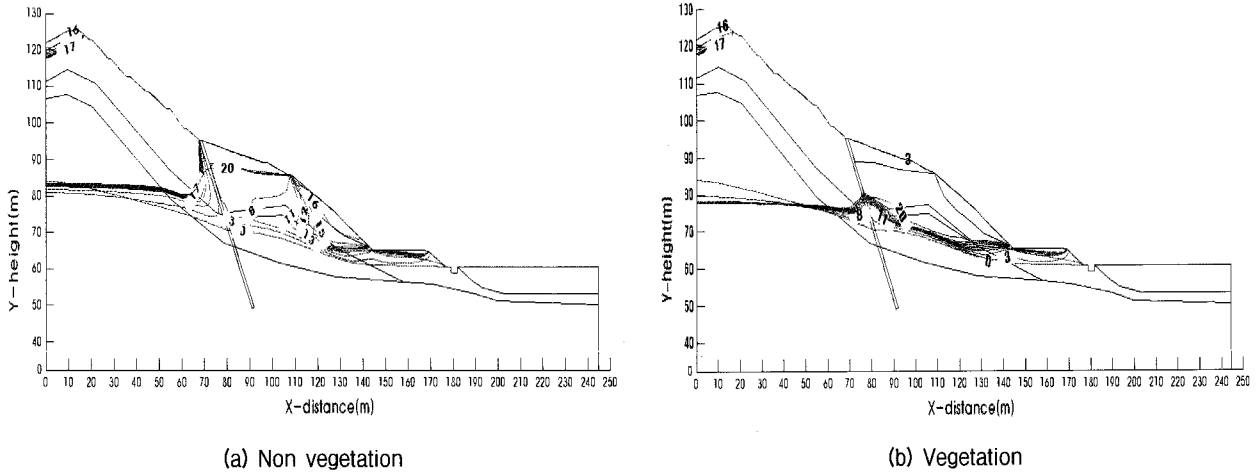


Fig. 14. Variation of wetting front by change of vegetation in slope

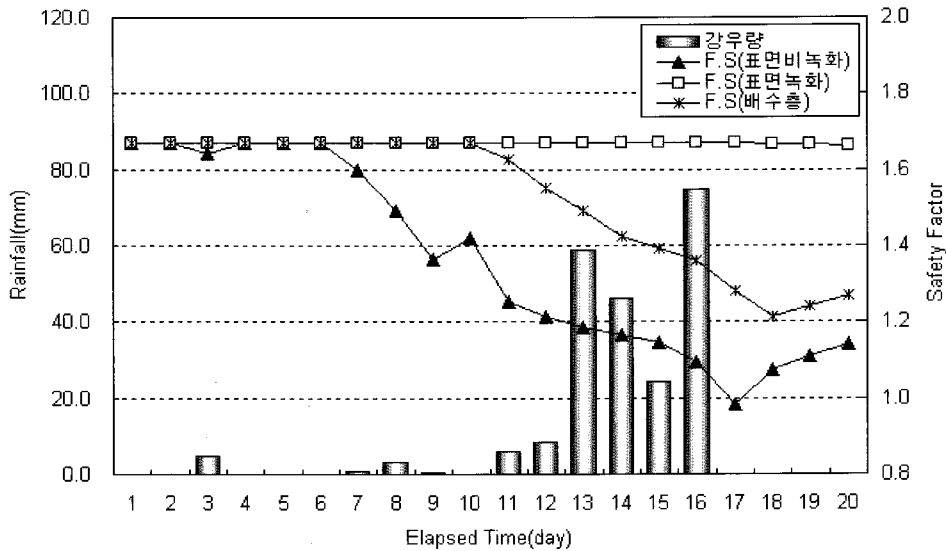


Fig. 15. Variation of safety factor by change of vegetation in 2000

3.4.3 1일 집중강우시 침투해석

3차 붕괴는 1, 2차 붕괴시와 달리 태풍을 동반한 1일 집중 호우가 256mm로서 2차 붕괴와 동일한 하부사면의 성토부 재붕괴와 평탄부 인장균열이 발생하였다. 붕괴 전 15~18일 4일간 선행강우량이 196mm이었으며, 이때 성토층 하부 풍화대 구간 층 두께 21m 중 지상부 하부 심도 8m와 사면 경사지 중심부 기준 하부 5m의 원호상으로 불포화 구간이고 그 외는 포화대가 형성되는 것으로 분석되었다.

건기시에도 사면 하단부에 지하수위가 형성되어 유출 현상이 지속되었으나 사면내 포화대구간의 축소 또는 간극수압이 소산현상이 발생되지 않은 상태로 지속되었다. 그러므로 1일 집중호우 결과 성토층 하부 원지반이 포화상태로 간극수압의 증가현상으로 가장 취약부인 단

층대와 하부 사면의 성토층은 붕괴현상이 발생하였다.

실제 강우량 분석결과 강우강도는 최소 10mm/hr, 최대 40mm/hr로 당일 강우량 256mm의 집중 호우가 발생되었으며, 14시 30분에 사면붕괴가 발생되었다. 붕괴 발생 전까지의 강우량은 약 150mm이었으며, 이 조건에서 침투해석 결과 Fig. 16~18과 같이 전사면의 포화 현상을 확인할 수 있다. 이때의 강우침투에 의한 한계평형해석 해석결과 안전율 1.022로 나타났으며, 이후의 약 100mm의 강우량은 지하 침투보다는 대부분이 표면으로 유출되어 사면 밖으로 배출된 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구사면은 이암지반 절취 사면으로 3차례에 걸쳐

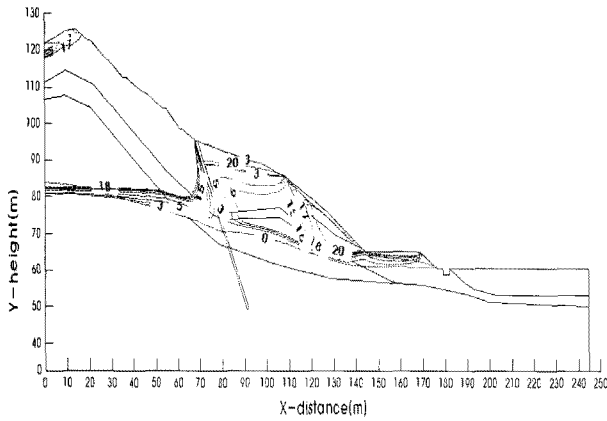


Fig. 16. Change of wetting front at 3rd slope failure

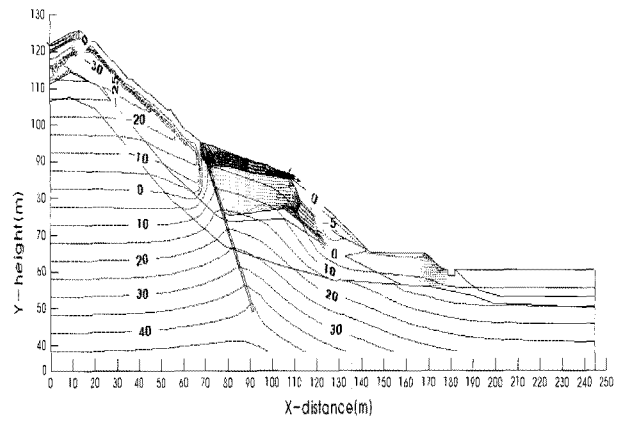


Fig. 17. Distribution chart of pressure head at 3rd slope failure

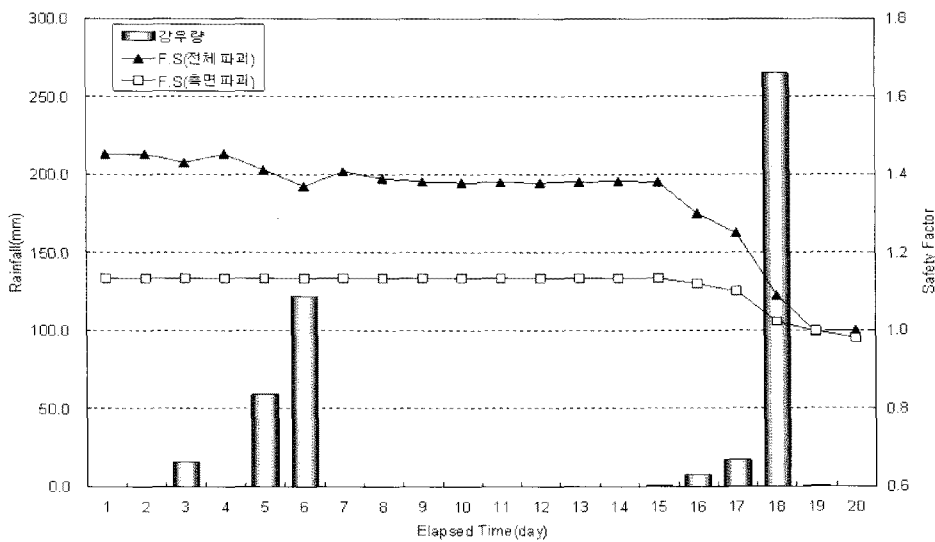


Fig. 18. Daily change of factor of safety at 3rd slope failure

서 대규모의 붕괴가 발생한 이력이 있는 사면으로서 지반상태를 파악하기 위한 정밀조사, 실내시험 자료를 분석하고 지반조건과 역해석에 의한 지반정수를 파악하였으며, 붕괴시의 실제 강우강도를 적용하여 강우침투에 의한 사면의 불안정성을 해석적으로 파악하였다. 3차레 사면 붕괴 조건을 고려하여 강우 침투 변화와 침투영역에 대해 분석을 하였으며, 또한 한계평형이론을 이용한 안정성 변화를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구사면 이암의 slaking 내구성지수 시험결과 신선한 기반암의 내구성지수(I_d)는 73.34(%), 붕괴 활동면 및 단층파쇄대 구간은 18.79~21.14(%)로 나타났으며, swelling 시험결과 신선한 기반암의 팽창 변형률은 0.49%, 파쇄대구간은 2.42~2.56%의 팽창 변형률을 갖는 것으로 나타났다.

- (2) 연구대상 사면의 시간경과에 따른 지반정수의 변화를 붕괴 사면의 역해석 결과를 토대로 분석한 결과 3차레 붕괴 과정 동안 풍화토층은 점착력 55(%), 내부마찰각 12(%), 그리고 풍화암층은 점착력 29(%), 내부마찰각 29(%), 정도 감소된 것으로 분석되었다.
- (3) 사면내에서의 지질구조대 발달시 2일 누적강우량 약 89mm 침투시 붕괴가 발생하였으며, 절취 사면 상부에 평탄지가 형성되고 차수시설이 없는 경우 1일 최대강우량 150mm, 4일 누적강우량 200mm를 초과하면 붕괴가 발생할 수 있음을 확인하였다.
- (4) 절취 사면의 강우시 침투거동 분석결과 안정성 유지를 위해서는 사면내 또는 상부에 대규모의 평탄지 조성은 장기적 안정성에 위해요소로 작용할 수 있으며, 사면의 안정성 확보를 위해서는 근원적으로 표면에 법면녹화 또는 차수층을 설치하여 강우 침투를 억제하는 것이 효과적임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구의 일부는 소방방재청 자연재해저감기술개발 사업(사면 붕괴 예측 및 대응 기술 개발) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김광식, 김교원, 정자혜 (2001), “포항분지 제3기 이암의 크리프 특성”, *대한지질공학회 2001년 학술발표논문집*, pp.3-13.
2. 김영목 (1990), “강우시 무한사면의 침투거동”, *공학박사학위논문*, 동국대학교, pp.64-136.
3. 김영목, 전병추, 최성운 (2006), “절토사면 압성토에 설치된 배수층의 효과”, *한국지반공학회 사면안정위원회 학술발표회*, pp.153-161.
4. 조성은, 이승래 (2000), “강우침투에 따른 불포화 토사사면의 안정해석”, *한국지반공학회지*, 제16권, 제1호, pp.51-64.
5. 정강복, 노기만, 유경한, 이영희 (2006), “포항지역 이암의 풍화에 따른 강도열화특성”, *대한토목학회 정기학술대회*, pp.1124-1127.
6. 구룡포-포항간 4차선 확·포장공사 석리지역 비탈면보강 설계보고서 (2005), 포항국도유지관리사업소, pp.50-55.
7. Brooks, R. H., and Corey, A. (1964), “Hydraulic Properties of Porous Media”, *Hydrol. Papers*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
8. Mein, R. G., and Larson, C. L. (1973), “Modelling Infiltration during a Steady Rain”, *Water Resour. Res.*, Vol.10, No.4, pp.795-800.
9. Pradel, D., and Raad, G. (1993), “Effect of Permeability on Surficial Stability of Homogeneous Slopes”, *Geotech Eng.*, ASCE, Vol.119, No.2, pp.315-332.
10. Slope/W (1996), “User’s Guide for Finite Element Seepage Analysis”, Geo-Slope Int. Ltd., Canada.
11. Talren 97 (1997), “User’s Guide”, Terrsol Geotechnical Consultants.

(접수일자 2008. 11. 4, 심사완료일 2009. 2. 17)