

집중호우시 사면 붕괴의 특성 및 토층 심도와 지하수변동에 따른 사면 안정성 해석

백 용* · 권오일 · 김승현 · 구호본
한국건설기술연구원 지반연구부

Characteristics of Slope Failure Due to Local Downpour and Slope Stability Analysis with Changing Soil Depth and Groundwater Level

Yong Baek* · O-Il Kwon · Seong-Hyun Kim · Ho-Bon Koo
Korea Institute of Construction Technology, Dept. Geo-technical Eng.

국내에서는 매년 집중호우에 의하여 사면 붕괴 및 산사태가 발생하고 있다. 특히, 최근의 집중강우는 국지성 및 계절 라성 강우가 대부분이다. 본 연구에서는 집중호우에 의하여 붕괴된 현장의 특성을 분석하고, 토층의 심도와 지하수면의 변화에 따른 사면의 안정성을 해석한다. 본 연구에 사용된 자료는 집중호우시 붕괴된 절토사면 조사 자료와 일반 국도 변 1,372개의 현장 조사자료이다. 토층의 붕괴 심도와 지하수 변동이 사면의 안정성에 미치는 영향에 대해서는 FLAC-SLOPE(ITASCA사)을 이용하여 분석을 실시하였다. 연구결과에 의하면 국내 사면붕괴의 주요 형태는 표층유실 및 표층붕괴 등 천부 파괴가 주를 이루고 있으며, 지하수면과 토층 심도 변화에 따라 사면의 안정성이 변화하는 것으로 나타났다.

주요어: 집중호우, 절토사면, 수치해석, 표층붕괴, 기하학적 분석

The failure of cut slope and landslide sometimes come from a local downpour within a short duration in Korea. Especially, most of recent downpour converged upon a limited region and seemed the characteristics of guerilla. Characteristics of slopes failed due to local downpour are analyzed. Failure mode is also analyzed with respect to the depth of soil layers and the change of groundwater level. To know the influence factors of the slope stability during local downpour, the authors conducted field survey for failed slopes and tried to make a comparative study of 1,372 cut slope data distributed in the national road. FLAC-SLOPE(ITASCA Co.) is used to analyze slope stability with changing depth of soil layers and groundwater level. The result shows that the failed types of domestic slopes during local downpour are mainly shallow collapse and landslide. The change of soil depth and groundwater level have influenced on the stability of slopes.

Key words: downpour, cut-slope, numerical analysis, shallow collapse, geometrical analysis

* Corresponding author : baek44@kict.re.kr

서 론

국내에서는 매년 반복되는 자연재해로 인하여 많은 인명 및 재산피해가 발생하고 있다. 자연재해 중 태풍은 강한 바람과 집중호우를 동반하여 기습하기 때문에 피해 또한 적지 않으며, 특히 2002년도 태풍루사에 의한 피해는 과히 기록적이라 할 수 있다(건설교통부, 2002). 본 연구에서는 태풍루사시 집중호우에 의하여 붕괴된 사면의 붕괴 현황 및 규모, 기하학적 특성에 대하여 분석 검토를 실시하였다.

사면 붕괴의 원인에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로는 강우와 지반상태가 있다(Hoek and Bray, 1981). 최근에는 지하수의 영향에 따른 사면안정해석에 관한 연구가 많이 이루어지고 있는 실정이다. 강우와 관련된 사면 관련 연구 동향을 살펴보면 다음과 같다. 홍원표 등(1996)에 의하면 강우 시 침윤선의 하강과 지하수의 상

승효과가 사면안정에 미치는 영향을 연구한 결과, 침윤선 하강 속도가 지하수위 상승속도보다 빠를 경우 사면 불안정화가 심화 되는 결과를 도출하였다. 조성은과 이승래(2000)는 강우침투에 대한 영향을 유한요소해석에 의하여 안정성 검토를 수행하였다. 임희대(2001) 등에 의하면 강우와 관련된 토사사면의 안정성 평가 기법에 대하여 연구를 시도하였다. 이인모 등(2003)에 의하면 사면 붕괴를 강우의 영향으로 간주하고 간극수압의 변화에 따른 사면의 안정성에 대한 평가를 실시하였다. Dai and Lee(2001)는 강우와 계측결과를 비교하면서 사면의 안정을 해석하는 연구를 수행한 바 있다.

본 연구는 집중호우에 의하여 붕괴된 사면 자료와 한국건설기술연구원(KICT)에서 수행한 국도변 절토사면 조사 자료를 비교분석하여 집중호우에 의한 사면 붕괴 특성을 규명하였다. 또한 국내 사면 붕괴의 특성을 토대로 하여 토층 및 지하수가 사면 안정에 미치는 영향에 대하여 수치해석을 통하여 분석하였다.



Fig. 1. Collapsed slope in Myeongho Pungho, Bonghwa



Fig. 2. Collapsed slope in Songack nurupze, Jaecheon



Fig. 3. Collapsed slope in Socheon Buncheon, Bonghwa



Fig. 4. Collapsed slope in Bulgyo Jangyang, Bosung

붕괴 사면의 특성 분석

집중호우에 의해 붕괴된 사면을 대상으로 정밀 조사를 실시하여 붕괴 유형 및 특성을 분석하였다. 붕괴 현장은 전라남도 순천일대와 충청남도 충주 일대를 조사하였다. Fig. 1에서 4는 사면 붕괴가 발생한 현장 사진

예이다. 본 연구에 활용된 조사 사면의 현장명과 현황은 Table 1에 나타내었다.

Table 1을 통하여 결과를 정리하면 다음과 같다. 조사 사면의 연장은 27m에서 220m의 길이를 보이며, 평균 연장은 91m이다. 사면 높이는 8m에서 74m의 범위를 보이며, 평균 높이는 25m이다. 사면 경사각은 40°에

Table 1. List of collapsed cut slopes analyzed in this study

	Name of site	Length (m)	Height (m)	Angle (o)	Rock type	Degree of weathering
1	Danyang Gakok Gadae 1	220	74	58	Phyllite	Moderately Weathered
2	Danyang Gakok Gadae 2	120	30	58	Meta sediment	Completely Weathered
3	Danyang Dansung Janghae 20	27	18	57	Limestone	Highly Weathered
4	Danyang Dansung Gasan	40	11	68	Granitic gneiss	Completely Weathered
5	Jaecheon Bongyang Okjeon	30	17	40	Biotitic gneiss	Completely Weathered
6	Danyang Dansung yeojungbang 15	137	21	63	Dolomite	Highly Weathered
7	Jaecheon Songack Mudonurupjae 1	66	22	53	Biotitic granite	Highly Weathered
8	Jaecheon Songack Mudonurupjae 2	145	31	53	Biotitic granite	Highly Weathered
9	Jaecheon Ducksan Sinhyeon	47	16	46	Dolomite	Highly Weathered
10	Kyeosan Munkang Yangkok 8	40	17	53	Limestone	Highly Weathered
11	Kyeosan Munkang Yangkok 7	90	20	48	Limestone	Completely Weathered
12	Danyang Dansung Duhang 1	119	20	60	Quartzite	Completely Weathered
13	Danyang Dansung Duhang 1	72	23	57	Granite	Moderately Weathered
14	Jaecheon Susan Sungam	120	8	62	Limestone	Highly Weathered
15	Bonghwa Socheon Buncheon 16	70	17	45	Gneiss	Completely Weathered
16	Bonghwa Myeongho Pungho	32	50	40	Sediment	Completely Weathered
17	Bonghwa Socheon Kanghae	100	12	50	Gneiss	Completely Weathered
18	Bosung Bulgyo Jangyang	100	50	54	Granite	Highly Weathered
19	Goheong Bongrae Singum	50	20	55	Tuff	Highly Weathered
20	Goheong Pungyang Pungnam	200	20	60	Tuff	Highly Weathered
Range		27~220	8~74	40~68		
Aver.		91	25	54		

서 68°이며 평균 54°이다. 암반 사면의 경우, 풍화등급은 심한풍화에서 완전풍화가 우세하게 나타나고 있다.

붕괴사면의 특성을 검토하기 위하여 한국건설기술연구원 사면조사팀에서 수행한 국도 절토사면 조사자료(이하 기 조사자료; 한국건설기술연구원, 2002)와 비교하였다. 기존 국도 절토사면 조사현장은 총 1,372개소로 상대적으로 위험도가 높은 현장들이다. 우선, 사면의 기하학적인 양상을 살펴보기 위하여 기 조사자료와 붕괴된 사면의 형상을 비교하였다. Table 2는 기 조사 현장

과 붕괴사면의 연장 분포를 비교한 것이다. 분석결과에서 나타나듯이 붕괴사면의 연장은 기 조사 자료와 유사하게 연장에 대한 분포 범위가 50 ~ 150m 내에 가장 많이 분포하는 것으로 분석되었다.

Table 3은 붕괴 사면의 높이에 대한 분포를 나타낸 것이다. 분석 결과에 의하면 10 ~ 30m의 높이가 가장 많이 분포하며, 50m 이상의 대절토 사면도 분포하고 있음을 알 수 있다.

Table 2. Distribution of slope lengths for the pre-investigated and the collapsed cut slopes

Length(m)	Pre-investigated cut slopes		Collapsed cut slopes	
	No. of sites	Percentage(%)	No. of sites	Percentage(%)
0~50	122	9	6	30
50~100	537	39	5	25
100~150	367	26	7	35
150~200	166	12	-	-
200~250	105	8	2	10
250~300	23	2	-	-
300~350	24	2	-	-
350~400	14	1	-	-
400~	14	1	-	-
Total	1,372	100	20	100
Average	119m		91m	

Table 3. Distribution of slope heights for the pre-investigated and the collapsed cut slopes

Height(m)	Pre-investigated cut slope		Collapsed cut slope	
	No. of sites	Percentage(%)	No. of sites	Percentage(%)
0~10	139	10	1	5
10~20	553	41	7	35
20~30	412	30	7	35
30~40	149	11	2	10
40~50	72	5		
50~	47	3	3	15
Total	1,372	100	20	100
Average	22m		25m	

Table 4. Distribution of slope angles for the pre-investigated and the collapsed cut slopes

Slope ratio	Pre-investigated cut slope	Collapsed cut slope	Remark
~1:0.3	241	-	73° ~
1:0.3~1:0.5	449	2	63~73°
1:0.5~1:0.7	349	8	55~63°
1:0.7~1:1.0	262	8	45~55°
1:1.0~1:1.2	55	2	40~45°
1:1.2~	16	-	~40°
Total	1,372	20	
Average	62°	54°	

Table 5. Weathering grade distribution of pre-investigated and collapsed cut slopes

Grade	Pre-investigated cut slope	Percentage (%)	Collapsed cut slope	Percentage (%)
Fresh	52	4	-	-
Slightly weathered	350	26	-	-
Moderately weathered	565	41	3	15
Highly weathered	319	23	9	45
Completely weathered	86	6	8	40
Total	1,372	100	20	100

집중호우에 의해서 발생한 사면붕괴와 경사와의 관계를 분석하였다. Table 4는 기 조사현장 사면의 경사각 분포와 붕괴사면의 경사각 분포를 나타낸 것이다. 기 조사현장 자료분석 결과 1 : 0.3 ~ 1 : 0.5 경사의 사면이 많은 반면 붕괴 사면은 1 : 0.5 ~ 1 : 1.0 사이에서 최대분포를 나타낸다. 이러한 분석 결과를 미루어 볼 때 사면 경사도만으로 안정성과 연관을 짓기는 어려울 것으로 사료된다. 이는 단순히 급한 사면 경사가 붕괴의 주요 요인이라 단정할 수 없음을 지시한다. 즉, 단순한 사면 경사의 완화만으로는 집중호우에 의해 발생하는 표층붕

괴를 방지할 수 없음을 의미한다.

암반사면 및 혼합사면의 경우, 풍화정도가 사면의 안정성에 큰 영향을 미치므로 풍화등급에 따른 분석을 시도하였다. Table 5는 기 조사대상 사면과 붕괴사면과의 풍화등급에 대한 비교도표이다. 붕괴사면의 풍화등급이 17개 사면에서 심한풍화~완전풍화에 해당되고 있음을 알 수 있다. 이는 암반사면 및 혼합사면에서 풍화등급이 사면의 안정성에 영향을 미치는 중요한 요인임을 알 수 있다.

붕괴 사면에 대한 기하학적 분석

집중호우에 의하여 붕괴된 도로사면을 대상으로 기하학적 분석을 수행하였다. 붕괴 형태의 기하학적인 양상을 분석하기 위하여 7개의 평가 항목을 선정하여 측정하였다. 측정항목은 사면 높이(H), 붕괴 폭(W), 사면 연장(L), 사면 경사(θ), 붕괴 심도(Df), 붕괴 길이(Lf), 붕괴부 수직거리(ΔH) 등이다. Fig. 5는 붕괴부의 기하학적 분석을 위해 수집된 항목의 모식도이다. Fig. 5의 a)는 정면도이며 b)는 횡단면도를 나타낸 것이다.

사면 연장에 대한 붕괴 폭 비(W/L)

Fig. 6은 붕괴사면의 연장에 대한 붕괴구간 폭을 비율로 나타내었다. 대부분의 현장은 W/L이 0~20%에 집중되어 나타나며 이러한 결과는 사면 내 붕괴가 전체사면에서 발생하기 보다는 취약부에 해당하는 부분적인 구간에서 발생하는 경우가 많음을 의미한다. 따라서 위험사면의 안전율을 높이는 방안으로 일반적으로 시공되고 있는 전 구간에 걸친 보강보다는 보다 정밀한 조사를 통하여 위험구간을 집중적으로 보강하는 것이 효율적이라 생각된다.

붕괴 길이에 대한 붕괴 심도 비(Df/Lf)

붕괴된 부분의 단면 길이 및 붕괴심도는 붕괴의 규모를 판단하는 중요한 요소이다. Fig. 7을 보면 Df/Lf가 0~30%에 가장 우세하게 분포한다. Df/Lf의 값이 낮을수록 상대적인 붕괴심도가 얕으므로 표층붕괴 및 표층

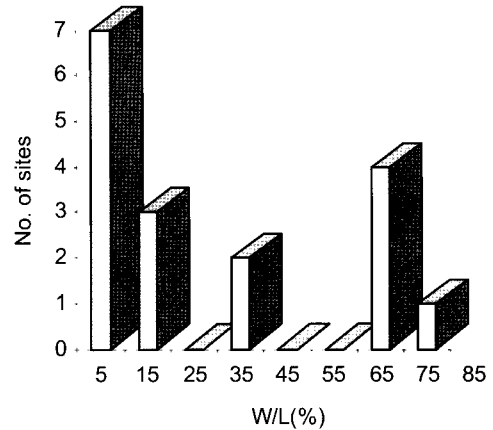


Fig. 6. Distribution of the ratio of collapsed width(W) to slope length(L)

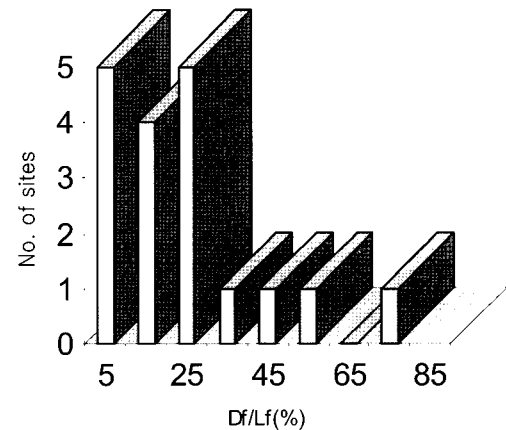


Fig. 7. Distribution of the ratio of collapsed depth(Df) to collapsed length(Lf)

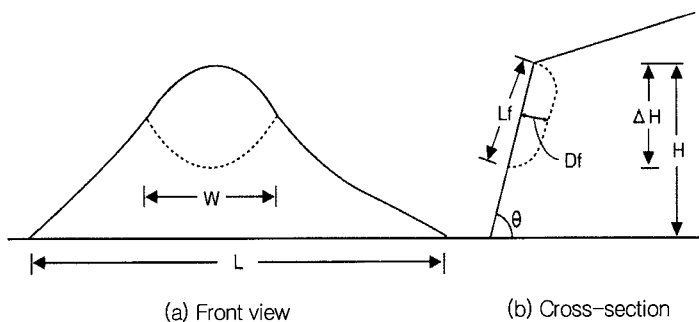


Fig. 5. Geometric factors to analyze a collapsed cut slope

유실이 우세하다고 할 수 있다. 집중호우에 의하여 발생하는 붕괴 형태로는 얇은 심도의 표층붕괴가 많이 발생함을 알 수 있다.

붕괴 사면 높이에 대한 붕괴부 수직거리 비 ($\Delta H/H$)

사면 단면에서 측정된 붕괴부의 수직거리를 사면 높이와 비교해 보았다(Fig. 8). 붕괴 사면의 경우, 붕괴부의 수직거리는 전체 사면 높이의 약 40~60 %에 해당됨을 알 수 있다. 즉, 집중호우에 의한 붕괴는 사면 전체에서 발생하기 보다는 국부적인 붕괴형태임을 알 수 있다.

토층심도 및 지하수위를 고려한 안정성 해석

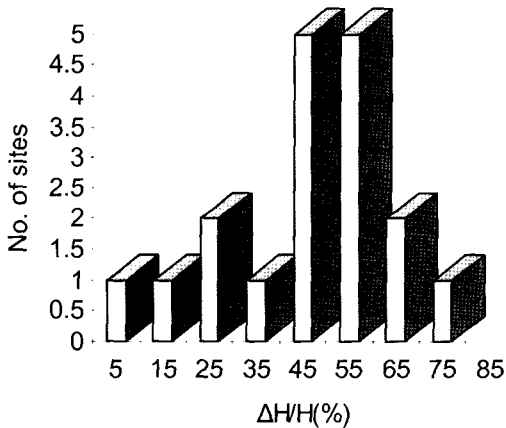


Fig. 8. Distribution of the ratio of collapsed height (ΔH) to slope height(H)

해석모델

지금까지 살펴 본 바와 같이 집중호우에 의하여 붕괴된 절토사면은 대규모의 붕괴보다는 국부적인 표층붕괴가 우세한 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 집중호우의 영향을 지하수위 변동으로, 표층붕괴 특성을 토층심도의 변화로 고려하여 안정성 해석을 수행하였으며, 그 결과로 얻어진 안전율의 변화를 검토하였다. 절토사면의 안정성 해석에 ITASCA사에서 개발된 FLAC-SLOPE (window version v.4.0)이 이용되었다. 해석시 사용한 지층의 지반강도정수는 Table 6과 같으며 해석에 사용된 모델은 Fig. 9와 같다.

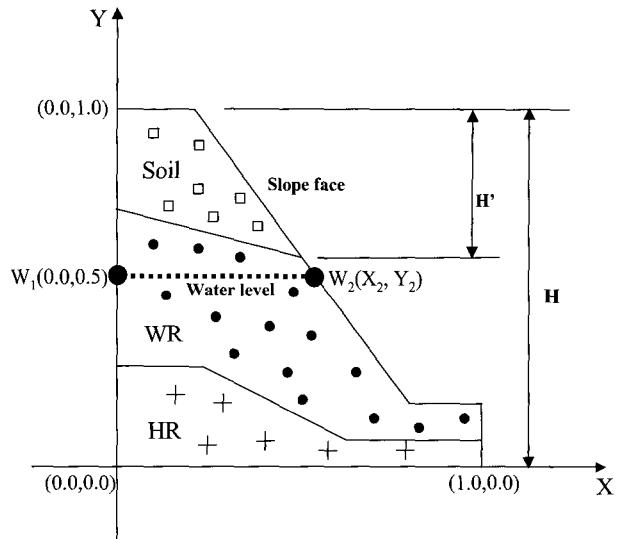


Fig. 9. Typical cross-section of the model

Table 6. Input parameters for numerical analysis in this study

	γ (kg/m^3)	C (t/m^2)	ϕ ($^\circ$)
Soil	1,500	0.1	25
Weathered rock (WR)	1,900	1.0	27
Hard rock (HR)	2,100	3.0	30

토층 심도변화에 따른 안정성 해석

토층의 심도를 변화시켜가면서 건기시와 우기시로 구분하여 안전율의 변화를 살펴보았다. 해석시 우기의 경우, 도로설계편람(건설교통부, 1999)을 근거로 지하수위 $W=1/2H$ 를 사용하였다. 해석결과를 그래프로 나타내면 Fig. 10과 같다. 토층심도가 깊어질수록 안전율이 낮아짐을 보이며 지하수위의 영향을 받는 심도에서는 우기시의 경우가 건기시의 경우에 비하여 영향이 큼을 알 수 있다.

지하수의 영향을 고려한 안정성 해석

지하수의 영향을 고려하기 위하여 토층심도를 3가지의 모델로 설정하였다. 토층의 두께는 $H'=0.4H, 0.6H, 0.8H$ 의 3가지 경우이며, 각 모델에 대하여 지하수위를 단계별로 변화시키며 해석을 수행하였다. 지하수위는 좌측점(W_1)을 기준으로 고정하고 우측점(W_2)을 변화시켰다. 해석모델에서 W_1 의 좌표값은 (0.0, 0.5)이며 지하수위 변화에 따른 W_2 점은 Table 7에 나타내었다. Table 7에 나타난 해석결과에 의하면 지하수위가 높을 수록, 토층심도가 깊어질수록 안전율이 급격하게 낮아

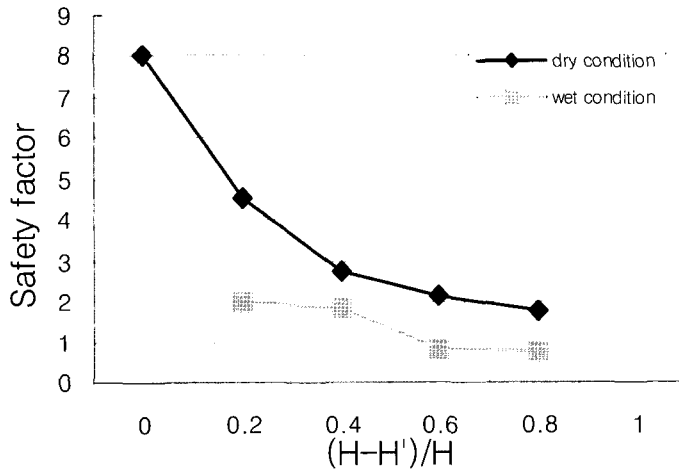


Fig. 10. Safety factors with changing soil depth under dry and wet conditions

Table 7. Safety factors with changing water level

W ₂		F _s		
X-axis	Y-axis	H'=0.4H	H'=0.6H	H'=0.8H
0.55	0.55	0.72	-	-
	0.50	0.93	0.70	0.50
	0.45	2.03	1.00	0.66
	0.40	2.74	1.61	0.78
	0.35	-	2.08	1.22
	0.30	-	2.16	1.64
	0.25	-	-	1.74
	0.20	-	-	1.82

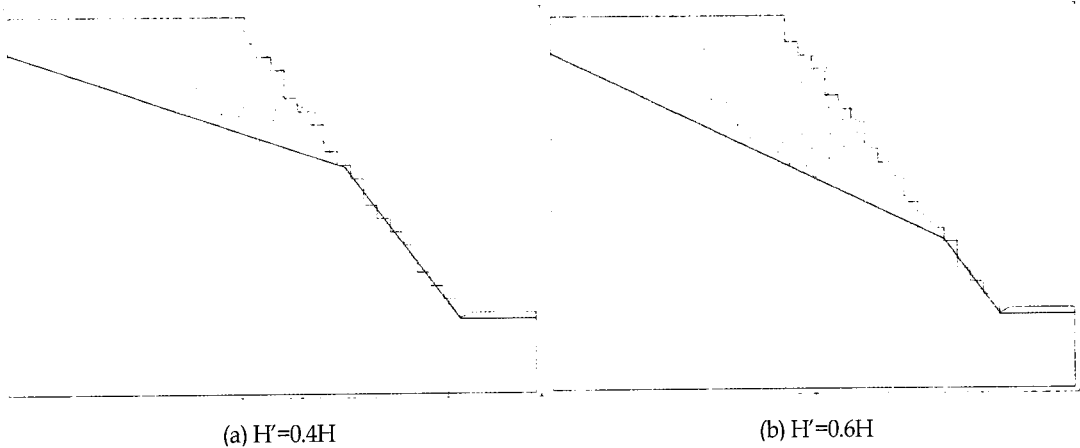


Fig. 11. Results of numerical analysis showing displacement vectors

짐을 알 수 있다. Fig. 11은 $H'=0.4H$ 와 $H'=0.6H$ 해석모델의 변위해석 결과를 나타낸 것이다. 해석결과에서도 토층심도가 깊은 $H'=0.6H$ 모델에서 활동영역이 깊은 것으로 나타났다.

한, 지하수위의 영향을 고려하기 위하여 토층의 두께를 $H'=0.4H, 0.6H, 0.8H$ 의 경우로 해석한 결과, 토층의 두께가 두꺼울수록 지하수의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

결론

본 연구는 집중강우로 인하여 붕괴된 사면의 자료를 활용하여 국내 사면 붕괴의 특성에 대하여 분석하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 국내 사면 붕괴는 집중강우와 매우 밀접한 관계가 있다. 붕괴 사면의 경사는 1:0.5에서 1:1.0 사이로 분석되었으며 기 조사된 사면자료 분석결과와 비교할 때 단순히 사면 경사도로 안정성과 연관을 짓기는 어려운 것으로 나타났다. 이는 사면 안정화 대책으로서 경사의 완화만으로 표층붕괴를 억제하기는 현실적으로 어렵다는 것을 지시한다.
2. 붕괴 사면의 기하학적인 특성을 분석한 결과 붕괴 사면은 국부적 붕괴가 발생한 것으로 나타났으며, 전체적인 사면의 거동보다는 표층붕괴에 의한 것으로 나타났다. 이들 위험사면의 안전율을 높이는 방안으로 일반적으로 시행되고 있는 전구간에 걸친 보강보다는 정밀한 지질 조사를 통하여 위험구간을 선정하고 집중적으로 보강하는 것이 보다 타당할 것으로 사료된다.
3. 붕괴 모델사면을 대상으로 토층의 심도와 지하수위를 변수로 설정하여 안정성을 검토한 결과, 우기시의 안전율이 건기시에 비하여 변화가 큼을 알 수 있다. 또

참고 문헌

건설교통부 도로관리과 홈페이지, 2002, www.moct.go.kr, 태풍루사에 의한 피해현황 보도자료.

건설교통부, 1999, 도로설계편람, 한국건설기술연구원.

이인모, 조우성, 김영욱, 성상규, 2003, 풍화토 사면에서 강우로 인한 간극수압 변화에 대한 실험연구, 한국지반공학회는논문집, 제 19권 1호 pp. 41~49.

임희대, 이승래, 김영목, 2001, 강우시 토사사면의 안정성 평가, 대림기술정보, pp. 4~16.

재해영향평가서, 2001, 사면안정성 평가법 개발, 국립방재연구소, pp. 10.

조우성, 이승래, 2000, 강우침투에 따른 불포화 토사사면의 안정해석, 한국지반공학회는논문집, 제 16권 제 1호, pp. 51~64.

한국건설기술연구원, 2002, 도로절개면 유지관리시스템 개발 및 운용, 건설교통부.

홍원표, 최승호, 한중근, 황인철, 1996, 강우시 사면안정해석법에 관한 연구, 대한토목학회 발표회 논문집, pp. 195~198.

Dai. F. C. and Lee. C. F., 2001, Frequency-volume re-

lation and prediction of rainfall-induced landslides, *Engineering Geology*, 59, pp. 253~266.

Hoek, E. & Bray, J., 1981, "Rock Slope Engineering", Revised Third Edition, Institute of Mining and Metallurgy, London.

투 고 일 2004년 11월 21일

심 사 일 2004년 11월 23일

심사완료일 2005년 3월 9일

권오일

한국건설기술연구원 지반연구부
411-712 경기도 고양시 일산구 대화동 2311

Tel: 031-910-0526

Fax: 031-910-0561

E-mail: kwonoil@kict.re.kr

김승현

한국건설기술연구원 지반연구부
411-712 경기도 고양시 일산구 대화동 2311

Tel: 031-910-0524

Fax: 031-910-0561

E-mail: sshkim@kict.re.kr

백 용

한국건설기술연구원 지반연구부
411-712 경기도 고양시 일산구 대화동 2311

Tel: 031-910-0228

Fax: 031-910-0561

E-mail: baek44@kict.re.kr

구호본

한국건설기술연구원 지반연구부
411-712 경기도 고양시 일산구 대화동 2311

Tel: 031-910-0217

Fax: 031-910-0561

E-mail: hbkoo@kict.re.kr