

태풍 루사 영향에 의한 사면 붕괴 유형 및 특징

Types and Characteristics of Slope Failure induced by the 15th Typhoon, Rusa

배규진¹⁾, Gyu-Jin Bae, 구호본²⁾, Ho-Bon Koo, 백용³⁾, Yong Baek, 최영태⁴⁾, Young-Tae Choi

- 1) 한국건설기술연구원 토목연구부 연구 위원,
Researcher Manager, Civil Engineering Department Korea Institute of Construction Technology
- 2) 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원,
Researcher Fellow, Civil Engineering Department Korea Institute of Construction Technology
- 3) 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원,
Senior Researcher, Civil Engineering Department Korea Institute of Construction Technology
- 4) SK건설 토목사업부 상무이사,
Managing Director, Civil Construction Department, SK Engineering Construction

SYNOPSIS : Many human lives and properties have been damaged by the annually occurring natural disasters. Among them, a typhoon accompanying a gale and a localized torrential downpour induce a first order damages. In this study, states, scales and other characteristics of slope failure induced by the typhoon Rusa, which damaged the whole Korea peninsular on August 30th for 3 days, were analyzed. In addition, permanent measures for slope failure are conducted to prepare natural disasters. Since the key factor on the slope failure is considered to be a rainfall. The characteristics of domestic rainfall and typhoon are investigated, and then failure forms and some characteristics of slope failure are analyzed. By comparing with the data of existing slopes, the hazard of slope failure is examined. There fundamental results could be applied to the future measures of slope failure.

Key words : slope failure, typhoon Rusa, natural disaster, permanent measures.

1. 서론

매년 반복되는 자연재해로 인하여 많은 인명 및 재산피해를 입고 있다. 자연재해 중 태풍은 강한 바람과 집중호우를 동반하여 기습하기에 피해 또한 적지 않다. 본 연구에서는 지난 2002년 8월 30일부터 3일간 전국을 강타한 태풍 루사의 피해에 대하여 사면 붕괴와 관련하여 붕괴 현황 및 규모, 특성에 대하여 분석 검토를 수행하고 향후 사면 붕괴에 대한 항구적인 대책마련 및 자연재해에 대비한 기초 자료로 활용하고자 한다. 연구 방법으로 사면 붕괴의 원인에 가장 큰 영향을 미치는 것이 강우라 할 수 있으므로 국내 강우의 특색 및 태풍의 경로에 대하여 살펴보기로 한다. 또한 국내 기존 붕괴 사면 자료를 검토하여 국내 도로 사면의 붕괴 형태 및 특징에 대한 분석을 실시하였으며, 태풍 루사로 인한 도로 사면 붕괴 사례들과도 비교 분석하였다.

(본 고에 기재된 피해내용에 대한 자료는 태풍직후 수집된 발표 자료를 게재하였으며 실제 피해내용과는 일부 다를 수 있음을 사전에 밝힙니다.)

2. 사면 붕괴 원인

사면 붕괴를 발생시키는 요인은 다양하며 이런 요인들은 서로 상관되어 나타나기 때문에 하나의 요인으로 사면이 붕괴된다고 단언하기는 어렵다. 일반적으로 사면 붕괴는 강우, 지형, 지질, 토질, 임상 등의 자연적 요인과 국토개발에 따른 절개지 생성, 성토사면 형성 등 인위적 요인에 의하여 연관되어 발생된다고 할 수 있다. 본 연구에서는 사면 붕괴 원인에 대하여 여름철 강우기와 관련하여 집중적으로 살펴보기로 한다.

2.1 자연적 요인

사면 붕괴와 가장 밀접한 관련이 있는 요인은 강우이다. 우리나라는 기상학적으로 다우지역에 속하며 사면 붕괴 요인 중 가장 밀접한 관계를 가진다. 국내의 경우, 연평균 강우량이 1,200mm ~ 1,400mm 이나 매년 지역이나 계절에 따라 매우 다른 강우특성을 나타낸다. 특히, 최근에서 지역에 따른 계절라성 강우의 영향으로 지역적으로 폭우가 발생하기도 한다.

그림 1은 1971년~2000년까지 전국 주요 도시 5개(서울, 강릉, 대전, 부산, 광주)를 설정하여 월별 강우량을 나타낸 것이다. 국내의 경우 200mm이상의 강우는 6~9월에 편기되어 내리고 그 중에서도 6월말에서 8월에 집중됨을 알 수 있다. 이는 사면 붕괴발생이 여름철에 집중되어 발생하는 것과 깊은 관련이 있다고 할 수 있다. 월평균 강우량은 최소 21.6mm에서 최대 348mm이며 주요 5개 도시의 7월과 8월의 강수량이 평균 200mm 이상을 보이고 있다. 최근 지역적인 집중호우가 내리는 경우가 많아 사면 붕괴 발생에 따른 피해가 집중됨을 알 수 있다. 국내에 발생하는 집중호우는 열대성 저기압(태풍), 이동성 저기압(강우전선)에 의하여 주로 발생된다. 본 연구의 대상인 15호 태풍 루사는 열대성 저기압의 종류로 태평양 해상에서 발생하여 우리나라로 이동하면서 전남, 충청도 일대, 강원도지역에 영향을 주며 강풍과 더불어 호우를 동반하여 큰 피해를 발생시켰다. 이외에도 국내에 영향을 주는 크고 작은 태풍은 10여개에 달하고 있는 실정이다.

그림 2는 2002년 한반도 주위에 발행한 태풍의 이동경로를 나타낸 것이다. 대부분 태풍은 간접적인 강풍이나 강우의 영향을 가져왔으며 직접적으로 태풍 루사에 의하여 피해가 많이 발생하게 되었다. 본 연구에서는 태풍 루사에 대하여 자세히 살펴보기로 한다.

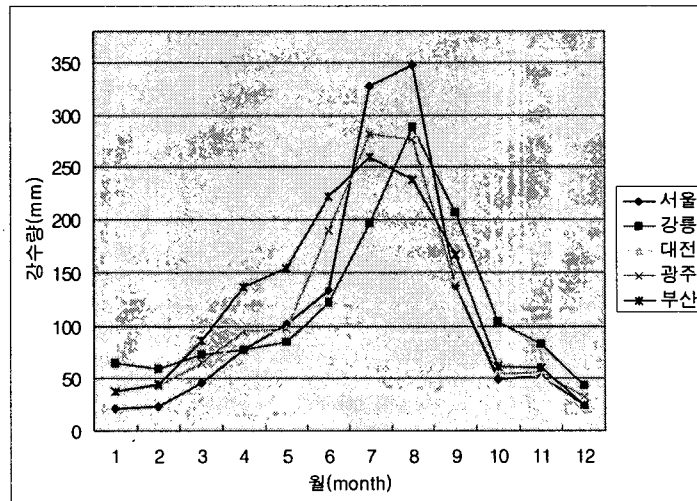


그림 1. 전국 주요 5개 도시 월평균 강우량

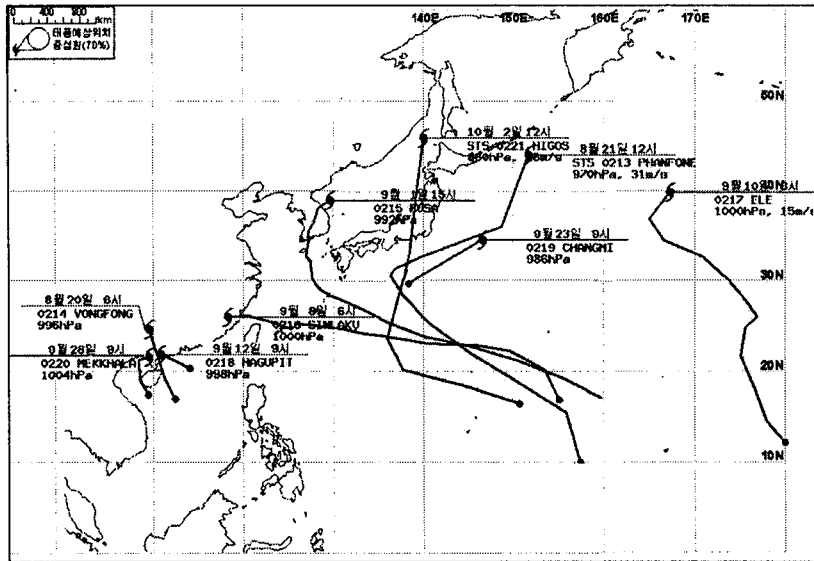


그림 2. 2002년 한반도 주위에 발행한 태풍의 이동경로

지난 2002년 8월 30일부터 전국을 강타한 루사에 대하여 살펴보면 다음과 같다. ‘삼바사슴’을 뜻하는 제 15호 태풍 루사(RUSA)는 2002년 8월 23일 처음 발생하여, 2002년 8월 31일 제주도 서귀포 동쪽 약 58km 부근 해상에 도달하였다. 처음 발생할 당시에는 약한 강도의 소형 태풍이었으나, 우리나라에 도착할 때쯤에 이르러 강한 강도의 대형 태풍으로 성장하였다. 우리나라가 태풍의 영향권에 있던 기간은 8월 30일부터 9월 1일까지 이었다. 태풍의 중심부근에는 초속 36m의 매우 강한 바람이 불고, 해상에서는 6~10m의 매우 높은 파도를 일으켰으며, 많은 비를 동반하였다(기상청, 2002).

태풍 루사의 진행경로는 그림 3과 같다. 태풍 루사는 처음 제주도 서귀포 동쪽을 지나 전라남도 고흥반도, 순천, 전라북도 남원, 무주, 충청북도 보은, 충주, 강원도 평창, 인제 등을 거쳐 동해안으로 빠져나갔다. 태풍이 지나가는 동안 이들 지역뿐만 아니라 한반도 전역에 걸쳐 많은 비를 내렸다.

표 1은 주요 지점의 강수현황을 나타낸 것이다. 표 1에 알 수 있듯이 이번 태풍으로 인해 전국적으로 46mm에서 871mm정도로 지역에 따라 다양하게 많은 비가 내렸다. 이런 집중호우는 다음에 설명할 예·경보 체제와 비교할 경우 천문학적인 강우량에 해당이 된다.

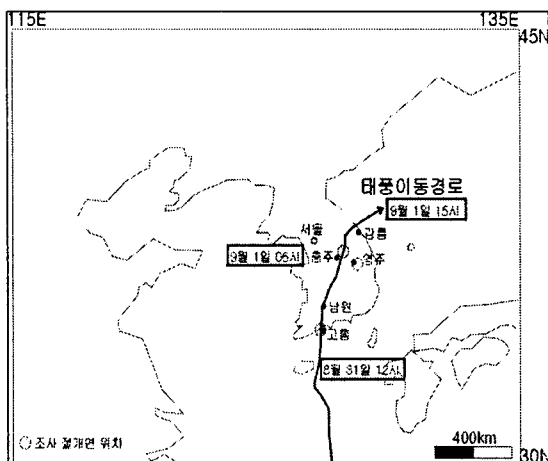


그림 3. 태풍 루사의 이동 경로

표 1. 지역별 강수량 분포 (단위 : mm)

지역	강수량	지역	강수량	지역	강수량	지역	강수량
강릉	871	속초	295	태백	237	상주	193
대관령	713	합천	289	순천	255	광주	139
고흥	404	산청	286	남해	254	대구	135
동해	320	추풍령	280	진주	210	제주	126
제주	591	부산	111	대전	120	서울	46
여라목	575	진주	388	진주	373	구미	344
성필의	331	중산리	286	화개	286	대덕	270
여수	331	김천	286	사천	286	무주	270
백야	331	김천	286	사천	286	무주	270

참고로, 현재 국내에 적용되고 있는 예·경보체제에 대하여 간략히 살펴보면 다음과 같다. 국내의 사면재해에 영향을 미치는 강우는 최대강우량, 일 강우량, 누적 강우량 등을 들 수 있다. 국내외의 기존 연구자료에 의하면 사면재해의 해석결과 재해의 발생시기는 토층의 두께 및 지형에 의하여 최대강우량 및 누적강우량에 영향을 받는 것으로 보고되고 있다(일본토목연구소, 2002).

표 2는 사면 붕괴와 강우와의 관계에 대하여 국내에 제시된 사면 재해 기준을 나타내고 있다. 태풍 루사에 의하여 발생한 강우량은 사면 재해 경보의 기준치를 초과할 만큼 많은 량의 강우이다. 국내의 경우 사면 붕괴와 강우량의 관계에 대하여 정량적인 값을 제시한 경우는 없으나 집중강우와 동반하여 향후 강우량에 따른 지역적인 사면 붕괴 경보체제를 종합적으로 강구하여 피해를 최소화하여야 할 것으로 사료된다. 일본의 경우, 지역적으로 사면 붕괴에 대비하여 지역적으로 일 강우량의 변화에 따라 차량 통행을 금지하고 있는 실정이다.

표 2. 사면 재해 경보 기준

	사면재해주의보	사면재해경보	태풍 루사 (강릉지역)	비고
2일 연속강우량(mm)	100	200	885	
일 강우량(mm)	80	140	871	
최대 시우량(mm)	15	30	78.5	

사면 붕괴를 발생시키는 요인 중 강우이외에도 침식작용에 의하여 지형을 변형시켜 사면의 안정성을 감소하는 경향이 있다. 또한 지반의 상황 즉, 지질과 토질의 상태에 따라서도 다양한 형태로 사면의 붕괴가 발생한다. 국내사면 붕괴의 대부분은 토사층과 암반층의 경계부에서 주로 발생하는 경우가 허다하다. 이는 사면을 구성하는 재질의 이방성, 강도특성의 차이 및 암반 경계부에 지하수의 유입 등으로 경계부가 활동면이 되어 붕괴가 자주 발생하는 것으로 사료된다. 암반의 경우는 암반내의 불연속면을 따라 또한 암반의 풍화정도에 의하여 붕괴를 야기시킨다. 국내의 지형을 살펴보면 오랜 기간동안 지각변동으로 인하여 동쪽은 산악지형을 이루게 되어 지표수의 유로가 짧아 유출수와 유입수와의 집배수능력에 차이에 의하여 사면 붕괴와 관련이 있는 것으로 판단된다. 이외에도, 사면의 안정화에 이중성을 가지는 임상에 대한 영향도 들 수 있다. 임상은 강우시 유출수와 침투수와의 양을 변화시키는 역할을 할 뿐 아니라 토사층의 전단저항을 증가시키는 역할을 한다.

2.2 인위적 요인

철도, 도로의 건설에 따라 사면의 형성 및 성토 등으로 인하여 사면내의 응력 변화를 가져와 사면의 붕괴를 유발시킬 수 있다. 예를 들면, 절취에 의하여 사면 내 응력의 변화 및 전단 저항의 감소를 가져올 뿐만 아니라 성토하중의 증가로 인하여 활동력의 증대효과로 사면의 붕괴를 발생시킬 수 있다. 그 밖에 터널, 댐 등의 구조물 축조에 의하여도 지하수위의 변화 및 지형의 변화에 따라 사면 붕괴가 부차적으로 발생할 가능성이 있다.

3. 태풍 루사에 의한 피해 현황

3.1 인명피해

우리나라에서는 태풍 루사로 인해 도로유실, 침수, 낙석, 산사태 등이 발생하여 많은 인명, 재산 피해가 발생하였다. 이 중 사면 붕괴와 관련된 피해도 기존 장마철이나 태풍에 의한 피해보다 크게 발생하

였는데, 국립방재연구소의 재해영향 평가 보고서(2001)에 의하면 지난 10년간 호우로 인한 사망자 중 사면붕괴로 인한 사망자수는 261명으로 보고하였다.

표 3은 국립방재연구소에서 보고한 지난 10년간 사면붕괴로 인한 사망자 수를 보여주는 것으로 표에서는 호우로 인한 사망자 중 사면재해로 인한 사망자의 수는 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 2000년 이후는 체계적인 유지관리에 의해 사면재해로 인한 사망자의 수는 감소하고 있는 추세이다.

표 3. 최근 10년간 사면붕괴(산사태 포함)로 인한 피해자 현황(국립방재연구소, 2001)

연도	전체 사망자수	사면재해로 인한 사망자수	비율(%)	비고
1991	240	63	26.3	
1992	40	1	2.5	
1993	69	12	17.4	
1994	72	6	8.3	
1995	158	28	17.7	
1996	77	2	2.6	
1997	38	5	13.2	
1998	384	103	26.8	
1999	89	23	25.8	
2000	49	18	36.7	
10년 합계	1,216	261	21.4	
10년 평균	122	26	21.3	

3.2 도로사면 붕괴 피해

이번 태풍 루사에 의해 전국 국도 도로사면에서도 많은 낙석과 산사태가 발생하였다. 특히 태풍이 지나간 경로 주변에서 많은 낙석과 산사태가 발생하였는데, 세부 피해 현황을 살펴보면 기간도로의 수해 발생 건수는 조사당일 현재(2002년 9월 5일) 121건에 해당되며 117건은 긴급복구공사가 완료되었으며 이중 2곳은 복구공사가 진행 중이다(건설교통부 도로관리과, 2002).

4. 붕괴 사면 현황 및 특징 분석

4.1 기본 자료 분석

붕괴된 도로사면 121개소 가운데 응급으로 조치를 수행한 현장이외 추가 붕괴 위험성이 내재되어 있다고 판단되는 현장에 대하여 한국건설기술연구원에서 정밀 조사를 실시하여 붕괴 유형 및 특성을 파악하였다. 붕괴 현장은 태풍 루사의 진행 경로를 고려하여 전라남도 순천일대와 충청남도 충주 일대를 조사하였다.

그림 4에서 9는 사면 붕괴가 발생한 현장 사진의 예이다. 가장 집중호우가 발생한 강릉지방의 자료는 미집계된 관계로 인하여 본 연구에서는 포함하지 않았다. 본 연구에 활용된 조사 사면의 현장명과 현황은 표 4에 나타내었다. 조사대상 사면에 대한 위치는 그림 3에서 검은색 원으로 표시되었다.



그림 4. 피산 문광 양곡 7지구 전경사진

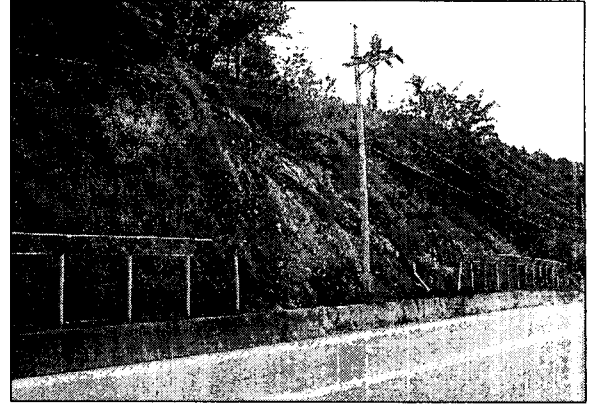


그림 5. 단양 단성 두향 1지구 전경사진



그림 6. 봉화 명호 풍호지구 전경사진

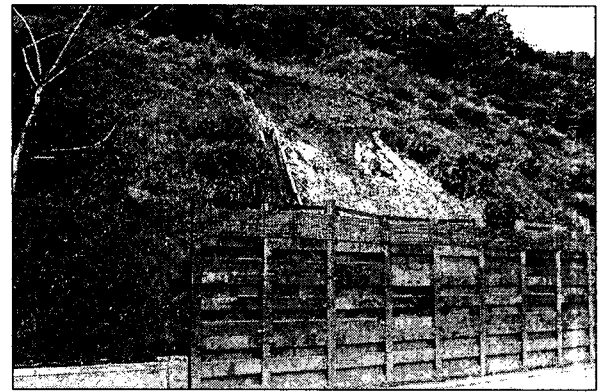


그림 7. 제천 송악 느릅재 전경사진



그림 8. 봉화 소천 분천 전경사진

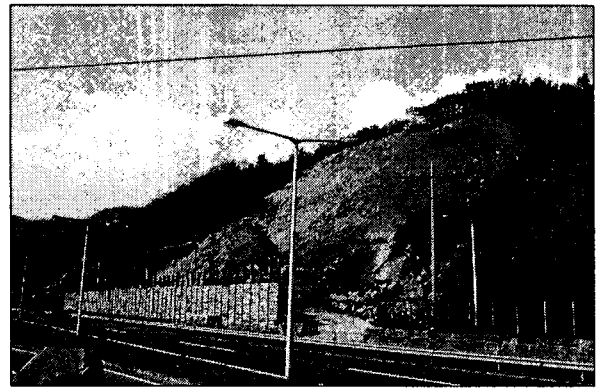


그림 9. 보성 벌교 장양 전경사진

표 4. 붕괴 사면 조사 대상 목록

	현장위치	연장(m)	높이(m)	경사(°)	기반암종	풍화등급	비고
1	단양 가곡 가대 1	220	74	58	천매암	보통풍화	
2	단양 가곡 가대 2	120	30	58	변성퇴적암	완전풍화	
3	단양 단성 장희 20	27	18	57	석회암	심한풍화	
4	단양 단성 가산	40	11	68	화강편마암	완전풍화	
5	제천 봉양 옥전	30	17	40	흑운모편마암	완전풍화	
6	단양 단성 외중방 15	137	21	63	돌로마이트	심한풍화	
7	제천 송악 무도 느릅재 1	66	22	53	흑운모화강암	심한풍화	
8	제천 송악 무도 느릅재 2	145	31	53	흑운모화강암	심한풍화	
9	제천 덕산 신현	47	16	46	돌로마이트	심한풍화	
10	괴산 문광 양곡 8	40	17	53	석회암	심한풍화	
11	괴산 문광 양곡 7	90	20	48	석회암	완전풍화	
12	단양 단성 두항 1	119	20	60	규암	완전풍화	
13	단양 단성 두항 2	72	23	57	화강암	보통풍화	
14	제천 수산 성암	120	8	62	석회암	심한풍화	
15	봉화 소천 분천 16	70	17	45	편마암	완전풍화	
16	봉화 명호 풍호	32	50	40	퇴적암	완전풍화	
17	봉화 소천 광희	100	12	50	편마암	완전풍화	
18	보성 별교 장양	100	50	54	화강암	심한풍화	
19	고흥 봉래 신금	50	20	55	응회암	심한풍화	
20	고흥 풍양 풍남	200	20	60	응회암	심한풍화	
범위		27~220	8~74	40~68			
평균		91	25	54			

표 4의 결과를 살펴보면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다. 조사 사면의 연장은 27m에서 220m의 길이를 보이며 평균 연장은 91m이다. 사면 높이는 8m에서 74m의 범위를 보이나 평균사면 높이는 25m이다. 사면 경사각은 40°에서 68°이며 평균 54°이다. 암반 사면의 경우, 풍화등급은 심한풍화에서 완전풍화가 우세하게 나타나고 있다. 도로사면 붕괴원인은 고경사의 경사각에 의해서 발생했다기 보다는 시간당 강우량 78.5mm, 일 강우량 최대 871mm 이상의 기록적인 강우와 사면 구성암반의 풍화등급이 심한풍화에서 완전풍화등급으로 되어 있어 강우에 매우 취약한 것이 원인이었던 것으로 생각된다.

조사 사면의 풍화등급이 높은 이유는 다음의 이유로 설명될 수 있다. 도로사면이 위치한 지역의 지질 특성은 옥천변성대가 지나가는 곳으로 지질 구조선이 매우 발달한 지역이다. 그래서 옥천변성대 주변의 암석들은 불연속면이 많이 발달해 있고, 이들 암석은 물리, 화학적인 풍화작용에 의해 쉽게 풍화될 수 있다. 조사대상 사면의 풍화등급이 높은 것은 이런 이유에 의해 설명이 가능하다.

4.2 붕괴 사면 현황 분석

금번 붕괴사면의 특징을 알아보기 위해 기존 국도 절개면 조사자료(이하 기 조사자료, 한국건설기술연구원, 2002)와 비교하였다. 본 연구에서 참조한 1372개소의 기 조사현장들은 상대적으로 붕괴 위험성이 높은 도로 절개면부터 연차적으로 현장조사를 수행하기 위해 정한 현장들이다. 조사우선순위 결정시에는 절개면의 안정성을 평가할 수 있는 절개면의 높이, 경사, 절개면의 형상(횡단형상), 용수(지하수) 유

무, 집수 지형, 풍화정도, 절리 방향성, 절개면 보호공, 붕괴 이력, 뜯돌 여부 등의 항목을 선정하여 항목 별로 배점을 부여한 후 이 결과를 조합하여 총점이 높을수록 위험도가 높은 순으로 등급을 평가하여 조사 우선순위를 결정하였고 이를 기반으로 현장조사를 실시하였다.

표 5와 6은 기 조사 현장과 붕괴사면 연장과 높이의 분포를 비교한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 사면 붕괴는 연장에 대하여는 기 조사 자료와 대동소이한 결과를 나타낸다. 또한, 사면 높이에 대한 붕괴 사면의 분포는 20에서 30m의 높이가 가장 많은 분포를 나타내고 있다.

표 5. 조사 대상 사면 연장 분포 현황

사면 연장(m)	기 조사현장		붕괴 사면	
	현장개수	비율(%)	현장개수	비율(%)
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		
400m 이상	14	1		
계	1372	100	20	100
사면 평균 연장	119m		91m	

표 6. 조사대상 사면 높이 분포 현황

사면 높이(m)	기 조사현장		붕괴 사면	
	현장개수	비율(%)	현장개수	비율(%)
10m 이하	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		
50m 이상	47	3	3	15
계	1372	100	20	100
평균높이	22m		25m	

다음으로 사면 구성 재료별 요소에 의하여 현황을 분석하였다. 사면 구성재료 별로 암사면, 토사사면, 혼합사면 3가지의 종류로 구분하여 비교하였다. 표 7은 사면 구성재료별 암사면과 토사사면의 비율을 나타낸 것이다. 전체적으로 보면 기 조사자료 결과 암사면이 88%의 비율을 차지하고 있는 반면에 붕괴된 사면은 암사면이 30%에 지나지 않는 것을 알 수 있다. 기 조사자료의 경우 암사면이 많은 것은 과거 절개면 시공시 과대 발파 등으로 발생된 이완 암반이 그대로 방치된 경우가 많았으므로 조사우선순위를

결정하는데 인자로 작용하는 낙석 및 뜯돌 등에 기인한 결과이다.

기 조사자료에서는 토사와 혼합사면이 12%에 지나치지 않으나 붕괴된 사면은 70%에 달하는 것을 알 수 있다. 이는 집중강우 등 국내 사면 붕괴와 관련하여 대부분의 사면 붕괴는 토사 및 혼합사면이 대부분인 것을 유추할 수 있는 결과이다.

표 7. 조사대상 사면의 구성 재료에 대한 비율

	총사면수	암사면	비율(%)	혼합사면	비율(%)	토사사면	비율(%)
기 조사자료	1372	1201	88	155	11	16	1
붕괴사면	20	6	30	11	55	3	15

구체적으로 살펴보면 표 7에서 알 수 있듯이 전국 국도 절개면 구성 물질은 암사면이 대부분인 반면, 이번 붕괴는 토사 및 혼합 사면에서 주로 발생한 것을 알 수 있다. 특히, 암이나 토사로 구성된 순수사면 보다는 암과 토사가 혼합된 사면에서 붕괴가 많은 것을 알 수 있다. 이는 사면과 관련된 붕괴가 암반의 활동(sliding)보다는 토사의 유출 및 표층붕괴 및 표층유실이 많았다는 것을 알 수 있다.

국내 기준의 경우, 사면 구성재료별 설계기준이 다르므로 이에 대한 분석을 실시하였다. 사면 경사와의 관계를 살펴보기 위하여 경사별로 구분하여 검토하였다. 표 8은 기 조사현장 사면의 경사각분포와 붕괴사면의 경사각 분포를 나타낸 것이다. 대부분의 붕괴 사면은 1 : 0.5에서 1 : 1.0 사이에 분포하는 것을 알 수 있다. 특히 기 조사현장의 자료에서 보듯이 1 : 0.3에서 1 : 0.5 경사의 사면이 많은 반면 붕괴 사면은 적게 나타나는 것을 미루어 볼 때 단순한 사면 경사도로 안정성과 연관을 짓기는 어려울 것으로 본다. 기 조사현장 및 붕괴 사면 경사가 45도 이상인 사면이 전체의 95%를 차지하고 있는 만큼 45도 이상이 되는 사면에 주의를 요할 필요가 있음을 시사하고 있다.

표 8. 조사대상 사면 경사 분포 현황

사면 경사	기 조사현장	붕괴 사면	비고
> 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° >
계	1372	20	
평균	62°	54°	

세부적으로 살펴보면 붕괴된 사면 경사각이 대부분 60° 이하에 분포하고 있음을 알 수 있다. 이는 사면 경사가 붕괴에 절대적인 요소라고 볼 수 없음을 말해준다. 단순한 사면 경사의 완화만으로 표층유실 등의 붕괴는 대책을 마련하기 어렵다는 것을 지시한다.

또한 본 연구에서는 암사면 및 혼합사면의 경우가 풍화정도에 의하여 많은 영향을 미칠 것으로 예상하여 풍화등급에 따른 분석을 시도하였다. 표 9는 기 조사대상 사면과 붕괴사면과의 풍화등급에 대한 비교도표이다. 표 9를 보면 사면을 구성하는 암반의 풍화등급을 알 수 있는데, 기 조사 현장의 경우 대부분 약간풍화에서 심한 풍화 등급에 해당되고 있다. 이는 표 7에서 언급한바와 같이 낙석 및 뜯돌 등

의 원인에 기인한 결과로 판단된다. 붕괴사면의 경우 풍화등급이 대부분 심한풍화에서 완전풍화에 해당되고 있음을 알 수 있다. 이는 사면을 구성하는 구성재료와 풍화등급이 사면의 안정성에 영향을 미치는 중요한 요인임을 알 수 있다. 사면의 시간에 따라서 풍화작용 및 열화작용을 받게 됨으로 인하여 시간의 경과에 따라 안정화 대책을 마련할 필요가 있는 것으로 사료된다.

표 9. 조사대상 사면 풍화 상태 현황

풍화등급	기 조사현장 개수	비율(%)	붕괴 사면 개수	비율(%)	비고
신선	52	4	-	-	
약간풍화	350	26	-	-	
보통풍화	565	41	3	15	
심한풍화	319	23	9	45	
완전풍화	86	6	8	40	
계	1372	100	20	100	

4.3. 붕괴 사면의 특징

4.3.1 개요

본 연구에서는 태풍 루사와 관련 집중호우 발생 결과 붕괴된 도로사면을 대상으로 붕괴 형태에 대한 분석을 수행하였다. 이는 향후 사면 붕괴의 형상에 따른 대책안 마련에 기초 자료로 활용될 뿐만 아니라 사면 설계 기준 설정에도 참고자료로 활용하고자 한다.

4.3.2 붕괴형태에 대한 분석

먼저, 태풍에 동반된 집중호우로 인하여 붕괴가 발생된 총 20개소의 사면에 대하여 현장조사를 실시하였다. 현장 조사시 사면의 기하학적인 형태를 우선적으로 측정하였다. 측정항목으로는 사면의 총연장, 최대높이, 사면 평균경사 등이며, 붕괴 양상에 대한 검토를 실시하고자 다음과 같은 형상으로 규정하였다.

붕괴가 발생한 부분에 대하여 중심으로 조사를 실시하였으며 붕괴가 발생한 부분에 대해 사면 길이 L, 사면 높이 H, 사면 경사 θ , 붕괴부의 폭 W, 붕괴부 심도 Df, 단면 붕괴 길이 Lf, 붕괴부 수직거리 ΔH 로 나타낸다.

4.3.3 사면 연장에 대한 붕괴구간(W/L)

붕괴사면의 연장에 대한 붕괴구간의 길이를 백분율로 나타내었다(그림 10). 대부분의 현장은 W/L이 0~20%에 집중된다. 이러한 결과는 사면 내 위험요소가 전체적인 것이 아니라 부분적인 것임을 지시한다. 따라서 위험사면의 안전율을 높이는 방안으로 전구간에 걸친 보강보다는 보다 세밀한 조사를 통하여 위험구간을 집중적으로 보강하는 것이 보다 효율성이 높을 것으로 사료된다.

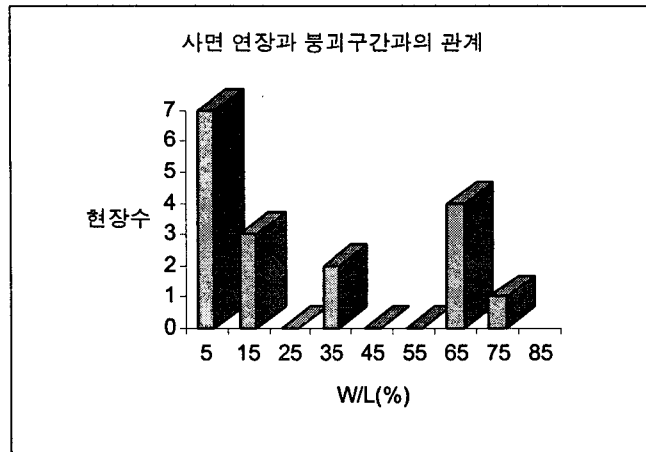


그림 10. 사면 연장과 붕괴 구간과의 관계

4.3.4 붕괴 길이에 대한 붕괴 심도(Df/Lf)

붕괴된 부분의 단면 길이 및 붕괴심도는 붕괴의 규모를 알 수 있는 중요한 요소이다. 따라서 이를 백분율로 표현하였다(그림 11). 그림 11을 보면 Df/Lf가 0~30 %에 가장 우세하게 분포한다. Df/Lf의 값이 낮을수록 상대적인 붕괴심도가 얕으므로 표층붕괴 및 표층유실이 우세하다고 말할 수 있으므로 집중호우 결과 붕괴된 사면의 경우 토층의 두께가 사면 안정성에 중요한 요인임을 간접적으로 얻을 수 있다.

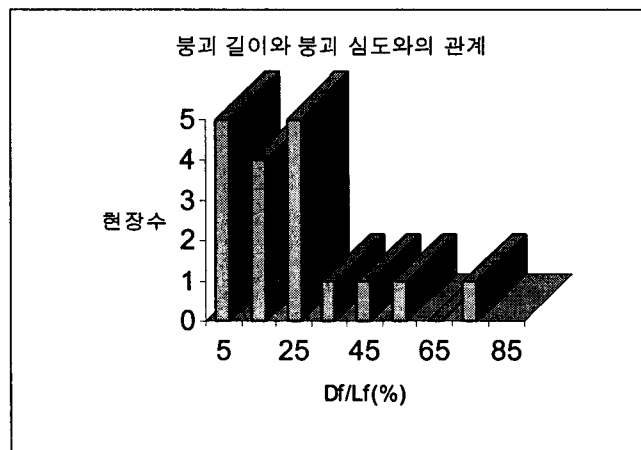


그림 11. 붕괴 길이와 붕괴심도와의 관계

4.3.5 사면 높이에 대한 붕괴 수직거리($\Delta H/H$)

사면 단면에서 측정된 붕괴부의 수직거리를 사면 높이와 비교해 보았다(그림 12). 대부분 붕괴 사면의 경우, 붕괴수직거리는 40~60 %에 해당됨을 알 수 있다. 즉, 집중호우에 의한 붕괴는 사면 자체가 움직이는 대규모의 붕괴보다는 국부적인 붕괴가 우세함을 알 수 있다.

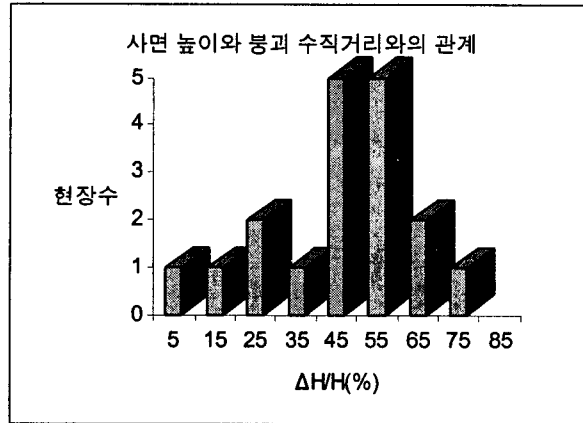


그림 12. 사면 높이와 붕괴 수직거리와의 관계

5. 결론

본 연구는 지난 2002년 8월 30일 국내를 강타한 태풍 루사의 영향으로 붕괴된 사면의 자료를 활용하여 국내 사면 붕괴의 유형 및 특징에 대하여 분석하였다. 본 연구를 수행한 결과, 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 국내 사면 붕괴는 대부분 게릴라성의 강우에 직간접적인 영향을 받는다. 국내의 경우 200mm 이상의 강우는 6~9월에 편기되어 내리고 그 중에서도 6월말에서 8월에 집중됨을 알 수 있다. 이는 사면 붕괴발생이 여름철에 집중되어 발생하는 것과 깊은 관련이 있다고 판단된다.
2. 붕괴 사면의 경우, 암사면이 30%, 혼합사면과 토사사면이 70%에 달하고 있어 사면과 관련된 붕괴가 암반의 활동(sliding)보다는 토사의 유출, 표층붕괴 및 표층유실이 많았다는 것을 알 수 있다. 또한 붕괴 사면의 경사는 1 : 0.5에서 1 : 1.0 사이로 나타나고 있어 단순한 사면 경사도만을 가지고 안정성과 연관을 짓거나 사면 경사의 완화만으로 표층유실 등의 붕괴를 막기는 어려울 것으로 판단된다.
3. 붕괴 사면의 특징을 분석한 결과 붕괴 사면은 사면 내 일부분이 붕괴가 발생한 것으로 나타났으며 전체적인 사면의 거동보다는 표층붕괴가 주된 것으로 나타났다. 이에 대한 대책으로는 위험사면의 안전율을 높이는 방안으로 전구간에 걸친 보강보다는 보다 세밀한 조사를 통하여 위험구간을 집중적으로 보강하는 것이 보다 효율성이 높을 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. 건설교통부 도로관리과 홈페이지(2002), www.moct.go.kr, 태풍 루사에 의한 피해현황 보도자료.
2. 기상청 홈페이지(2002), www.kma.go.kr, 태풍정보.
3. 재해영향평가서(2001), 사면안정성 평가법 개발, 국립방재연구소, p. 10.
4. 한국건설기술연구원(2000), 산사태 발생사례 및 대책방안, 한일건설기술워크샵 논문집, p. 42-68.
5. 한국건설기술연구원(2002), 도로절개면 유지관리시스템 개발 및 운용 IV, 건설교통부.
6. Hoek, E. & Bray, J(1981). "Rock Slope Engineering", Revised Third Edition, Institute of Mining and Metallurgy, London.
7. Bieniawski(1989), "Engineering rock mass classification, John Wiley & Sons, Inc., N.Y.
8. 日本 土木研究所(2002), 光纖維センサを活用した道路斜面 モニタリングに関する 研究, p. 27.
9. 久樂勝行外 4人(1991), 落石 崩壊に関するのり面 斜面の 安定度評價方法, 第 26回 土質工學會 研究發表會.