

태풍에 의한 절개면 붕괴특성 연구 및 경사도 설계기준 검토

Characteristics of Slope Failure induced by Typhoon and an Examination of a Standard Slope Inclination for Design

구호본¹⁾, Ho-Bon Koo, 백용²⁾, Yong Baek, 권오일³⁾, O-Il Kwon

¹⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원,

Researcher Fellow, Civil Engineering Department Korea Institute of Construction Technology

²⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원,

Senior Researcher, Civil Engineering Department Korea Institute of Construction Technology

³⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원

Researcher, Civil Engineering Department Korea Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : Every year in domestic slope failure caused by rainfall is happening frequently. Specially, causable failure accident by localized downpour accompanied when summer rainy season period and produces typhoon gets damage of large scale human life and property. Failure happened at slope of 121 places ranged whole country national highway by No.15 typhoon Rusa that strike whole country during 3 days from August 30, 2002. Slope failure that happen by typhoon are judged for major cause to effect of ground saturation and surface water by localized downpour. In this research, failure characteristic was analyzed to target 20 places attaining site investigation among failure slope. As a result, erosions by surface water was construed for major cause of failure and judged for direct relation in failure slope weathering and topography. Also, result that analyze inclination of failure part, in the case of ripping rock, inclination of failure side is forming incline of the lowest 40°, because surface failure of depth 4m on or so scale happened, it is require that regulating plan gently design standard inclination of weathered rock and soil layer. And it is considered that desirable preparation of design standard about measure that help smooth drainage of surface water and can restrain percolation in ground to reduce failure damage by rainfall.

Key words : typhoon Rusa, ground saturation, failure characteristic, drainage, restrain percolation

1. 서 론

매년 국내에서는 강우에 의한 절개면 붕괴가 빈번히 발생하고 있는 실정이다. 특히 여름철 장마기간이나 태풍 발생 시 수반되는 집중호우에 의해 야기되는 붕괴 사고는 대규모 인명 및 재산상의 피해를 가져다 준다. 2002년 8월 30일부터 3일간 전국을 강타한 제 15호 태풍 루사에 의해서 전국 국도변 도로 유실 및 절개면 붕괴가 121개소에 달하였다. 태풍에 의해 발생한 절개면 붕괴는 집중호우로 인한 지반 포화 및 지표수의 영향이 주요 원인으로 판단된다. 본 연구에서는 붕괴 절개면 중에서 정밀현장조사가 이루어진 20개소를 대상으로 붕괴 특성을 분석하였다. 그 결과 지표수의 영향이 주요 원인으로 분석되었고 절개면의 풍화도와 지형 형상 또한 붕괴에 직접적인 관련이 있는 것으로 판단된다. 또한 붕괴부의 경사도를 분석한 결과 리핑암의 경우, 붕괴면의 경사는 40°를 나타내고 있으며, 심도 4m 내외 규모의 표

층부 붕괴가 주로 발생하였다. 그러므로 풍화암 및 토사 층의 경사각 설계기준을 다소 완만하게 조정하는 방안이 요구된다. 강우에 의한 붕괴 피해를 줄이기 위해서는 지표수의 원활한 배수를 유도하고 지반 내 침투를 억제할 수 있는 공법에 대한 설계기준을 마련하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

2. 도로 절개면 붕괴 발생요인

국내 도로절개면의 붕괴 발생요인은 크게 시공상의 문제점과 자연환경적인 특징으로 구분되어 질 수 있다. 국내에 분포하는 도로절개면은 대부분 짧은 공사기간과 낮은 시공비로 인하여 정밀 기초조사와 체계적인 안정해석을 통한 절개면 시공에 어려움이 있었다. 특히 90년대 이전에 개설된 도로의 경우에는 더욱이 공사가 소홀하게 이루어진 것이 현실이다. 또한 절취부의 경사도를 단순히 토사, 리핑암, 발파암으로 구분하여 1:1.2, 1:0.7, 1:0.5 등으로 일률적 적용하는 미흡한 시방서 설계기준을 따라 시공하는 문제점이 있다. 자연환경적인 특징으로는 사계절이 뚜렷한 국내의 기후 조건으로 인하여 매년 봄철 해빙기 동결 융해 현상으로 인한 붕괴가 빈번히 발생하고 있다. 그리고 연평균 강우량의 2/3 이상이 여름철 장마기간과 태풍기간에 집중하여 발생하는 것도 붕괴 발생의 주요 요인으로 분석된다.

태풍에 의해 발생하는 도로절개면 붕괴의 직접적인 원인은 집중강우이다. 이 중 집중강우강도와 선행강우량(누적강우량)의 영향에 대해서 논란을 불러일으키고 있다. 강우강도는 짧은 시간 내에 발생하는 집중강우에 의해 도로 절개면의 붕괴가 발생한다는 것이고, 선행강우량은 붕괴 발생 전까지의 강우량이 절개면 붕괴에 직접적인 영향으로 작용한다는 것이다. 절개면 관련 기술 선진국인 홍콩의 경우 강우강도를, 반면 토층 심도가 깊은(20m이상) 일본의 경우 선행강우량의 개념을 도입하고 있다.

표 1. 최대 강우강도와 절개면붕괴 발생의 시간차

| 시간차 지역 | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 | +4 | +5 | +6 | +7 | +8 | 시우량 (mm) | 최대 시우량 | 일우량 (mm) | 전일우량 (mm) | 발생 년도 |
|-----------|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|-------------|-----------|-------------|--------------|----------|
| 서울, 구로 | | | | . | | | | | | | | 30.1 | 60.2 | 253.4 | 81.6 | 87 |
| 경기, 김포 | | | . | | | | | | | | | 43 | 41 | 211 | 39 | 87 |
| 거창, 신원 | | . | | | | | | | | | | 32.1 | 34.5 | 215.2 | 15.8 | 87 |
| 거창, 남창 | | | . | | | | | | | | | 32.3 | 32.3 | 60.3 | 150 | 87 |
| 전북, 익산 | | | | | | | | | | . | | 62 | 70 | 212.2 | 0 | 87 |
| 산청, 신안 | | | | . | | | | | | | | 22 | 31 | 172 | - | 87 |
| 산청, 금서 | | | | . | | | | | | | | 49.5 | 49.5 | 238.8 | - | 87 |
| 포천, 군내 | | | | . | | | | | | | | 70 | 70 | 235.5 | 51 | 87 |
| 경기, 성남 | | | | | | | | | | | | 45 | 59 | 327 | 57 | 87 |
| 충남, 부여 | | . | | | | | | | | | | 42 | 77 | 541.9 | 35.2 | 87 |
| 충남, 부여 | | | | | | | | | | | | 72 | 77 | 541.9 | 35.2 | 87 |
| 부산, 사하 | | | . | | | | | | | | | 56 | 56 | 264 | 144 | 89 |
| 전남, 장성 | | | . | | | | | | | | | 68 | 68 | 429.5 | - | 89 |
| 전남, 장성 | | | | . | | | | | | | | 54 | 68 | 338 | - | 89 |
| 경북, 영풍 | | | | | | | | | | | . | 31.5 | 66 | 46 | 154 | 90 |
| 경기, 수원 | | | | | | | | | | . | | 33.9 | 54.1 | 141.1 | 276.3 | 90 |
| 강원, 철원 | | | . | | | | | | | | | 60 | 60 | 358 | 242 | 96 |
| 강원, 강릉 | | | . | | | | | | | | | 78.5 | 78.5 | 871 | 14.0 | 02 |

표 1은 국내 도로절개면 발생현황을 강우와 연계하여 분석한 것으로 “0”는 최대 시우량이 발생한 시점을, 네모속의 “점”은 도로 절개면이 붕괴된 시점을 나타내는 것이다. 즉, “0”에 찍힌 점은 최대 시우량이 발생한 시점에 도로 절개면이 붕괴된 것을 나타내고 “+1”은 최대 시우량이 발생 한 후 1시간 후 붕괴가 발생한 것을 나타낸다. 표 1에서와 같이 18개소 현장 중 11개소(61%)가 최대 시우량이 발생한 시

간 내지 최대 시우량 1시간 후에 도로 절개면이 붕괴된 것을 나타낸다. 반면, 최대 시우량 발생 후 6~8시간 후 발생한 현장은 3개소(17%)에 한정된다. 이는 국내 도로 절개면 붕괴는 최대 시우량과 밀접한 관계가 있는 것을 시사하고 있다.

강릉 지역의 강우량을 살펴보면 2002년 8월 31일 시간당 강우량 78.5 mm, 일 강우량 최대 871 mm를 기록하였다. 이는 일 강우량의 경우 절개면 최대 발생 빈도 강우량의 2~4배에 해당한다. 국내의 경우 강우강도에 보다 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 일 강우량이 150 mm 이상, 또는 최대 시우량 50 mm 이상의 강우가 올 때 붕괴 발생 확률이 높은 것으로 보고 있다(표 1).

3. 붕괴 절개면 현황 및 특성 분석

3.1 일반 현황 분석

붕괴된 도로절개면 가운데 응급으로 조치를 수행한 현장을 제외하고 추가 붕괴 위험성이 내재되어 있다고 판단되는 20개소의 현장에 대하여 정밀 조사를 실시하여 붕괴 유형 및 특성을 파악하였다. 붕괴 현장은 태풍 루사의 진행 경로를 고려하여 전라남도 순천일대와 충청남도 충주 일대를 조사하였다.

표 2의 결과를 살펴보면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다. 조사 절개면의 연장은 27m에서 220m의 길이를 보이며 평균 연장은 91m이다. 절개면 높이는 8m에서 74m의 범위를 보이며 평균 절개면 높이는 25m이다. 절개면 경사각은 40°에서 68°이며 평균 54°이다. 암반 절개면의 경우, 풍화등급은 심한풍화에서 완전풍화가 우세하게 나타나고 있다. 절개면 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 추정된다.

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

표 2. 조사대상 붕괴절개면 일반 현황

| | 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 벌교 장양 | 100 | 50 | 54 | 화강암 | 심한풍화 | |
| 19 | 고흥 봉래 신금 | 50 | 20 | 55 | 응회암 | 심한풍화 | |
| 20 | 고흥 풍양 풍남 | 200 | 20 | 60 | 응회암 | 심한풍화 | |

3.2 붕괴 특성 분석

전국 국도 절개면 구성 물질은 암사면이 대부분인 반면, 이번 붕괴는 토사 및 혼합 사면에서 주로 발생한 것을 알 수 있다. 특히, 암이나 토사로 구성된 순수절개면 보다는 암과 토사가 혼합된 절개면에서 붕괴가 많은 것을 알 수 있다. 이는 사면과 관련된 붕괴가 암반의 활동(sliding)보다는 토사의 유출, 표층붕괴 및 표층유실이 많았다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 일반적인 절개면의 붕괴가 불연속면 또는 파쇄대 등의 연약대 발달에 따른 대규모 구조적인 붕괴인 점과 상반된 결과이다. 강우에 의한 붕괴는 토층 및 풍화암층의 포화로 인하여 지반 내 간극수압 증대 및 전단강도 저감에 따른 붕괴와, 지표수의 원활한 배수가 이루어지지 못한 상황에서 지형적으로 집수형상을 이루는 지점에서 표층침식이 붕괴로 발달하는 것으로 판단된다. 이러한 침투수 및 지표수의 유동에 의한 붕괴양상은 붕괴 토체의 이동 속도가 매우 빠르고 도로에 직접적인 피해를 가하는 것이 특징이다.

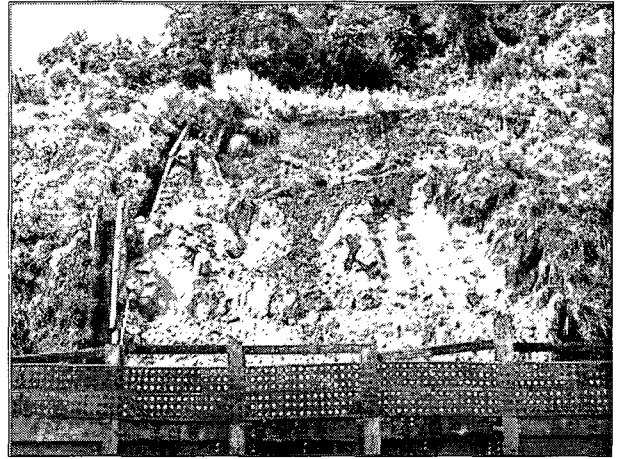
표 3. 조사대상 붕괴절개면 지질 및 지형 특성

| 현장명 | 구성재료 | 풍화도 | 불연속면 | 상부사면경사 | 집수지형 |
|-----------------|------|-------------|------|--------|------|
| 단양 가곡 가대 1 | 암사면 | 약간풍화(SW~MW) | 엽리 | 33 | |
| 단양 가곡 가대 2 | 토사사면 | 심한풍화(HW~CW) | 엽리 | 15 | 유 |
| 단양 단성 장회 20 | 암사면 | 보통풍화(MW~HW) | | 60 | 유 |
| 단양 단성 가산 | 토사사면 | 완전풍화(CW~RS) | | 0 | |
| 제천 봉양 옥진 | 혼합사면 | 심한풍화(HW~CW) | 파쇄대 | 40 | 유 |
| 단양 단성 외중방 15 | 암사면 | 보통풍화(MW~HW) | 엽리 | 18 | |
| 제천 송악 무도 느릅재 1 | 혼합사면 | 보통풍화(MW~HW) | | 18 | 유 |
| 제천 송악 무도 느릅재 2 | 혼합사면 | 보통풍화(MW~HW) | | 20 | 유 |
| 제천 덕산 신현 | 혼합사면 | 심한풍화(HW~CW) | 층리 | 10 | 유 |
| 괴산 문광 양곡 8 | 암사면 | 보통풍화(MW~HW) | 층리 | 28 | |
| 괴산 문광 양곡7 | 토사사면 | 완전풍화(CW~RS) | | 25 | |
| 단양 단성 두항 1 | 혼합사면 | 완전풍화(CW~RS) | 파쇄대 | 20 | 유 |
| 단양 단성 두항 2 | 암사면 | 보통풍화(MW~HW) | 단층 | 24 | 유 |
| 제천 백운 성암 | 암사면 | 보통풍화(MW~HW) | 단층 | 18 | |
| 봉화 소천 분천 16 | 토사사면 | 완전풍화(CW~RS) | | -10 | 유 |
| 봉화 명호 풍호 | 혼합사면 | 완전풍화(CW~RS) | 파쇄대 | 38 | 유 |
| 봉화 소천 광회 | 토사사면 | 완전풍화(CW~RS) | | 10 | |
| 보성 벌교 장양 (금치재) | 혼합사면 | 완전풍화(CW~RS) | | 13 | |
| 고흥 봉래 신금 | 혼합사면 | 심한풍화(HW~CW) | | 14 | |
| 고흥 풍양 풍남 (남당마을) | 혼합사면 | 심한풍화(HW~CW) | 파쇄대 | 43 | 유 |

붕괴 절개면의 지형적인 특성을 살펴보면, 총 20개의 붕괴 절개면 중 10개의 현장이 집수지형을 형성하는 지점에서 붕괴가 발생하였다. 또한 파쇄대가 분포하는 현장은 모두 집수지형을 형성하는 것으로 분석되어 절개면에 발달하는 지질특성이 지형적인 특성으로 나타나고 집중호우 발생 시 지표수가 다량으로 유입되는 원인으로 인하여 붕괴로 발달하는 것으로 판단된다. 붕괴절개면의 상부사면경사를 분석해 보면 집수지형에 의해 붕괴가 발생한 현장의 평균경사는 28.8°, 집수지형을 형성하지 않는 나머지 10개소의 평균 경사는 14.9°를 이루는 것으로 나타난다. 이러한 특성은 상부자연사면의 경사가 어느 정도 급한 경우에 지표수의 유동에 의해 침식작용이 발생하고, 반대로 완경사의 경우에는 지표수의 유동이 원활하지 않아 지반내로 침투하는 양상을 보이는 것으로 판단된다. 따라서 상부자연사면의 경사가 급한 경우에는 수직도수로와 같은 지표수의 배수 공법을 적용하고, 완경사인 경우에는 지표수의 침투를 억제하는 표면보호공 또는 침투수의 배출을 통해 지반내 지하수위의 상승을 억제하는 수평배수공 등의 공법을 적용하는 것이 합당할 것으로 사료된다(표 3).



a) 봉화 명호 풍호 지구



b) 제천 송악 무도 느릅재 1지구

그림 1. 집수지형 지점에서 붕괴가 발생한 현장 예



a) 단양 단성 가산 지구

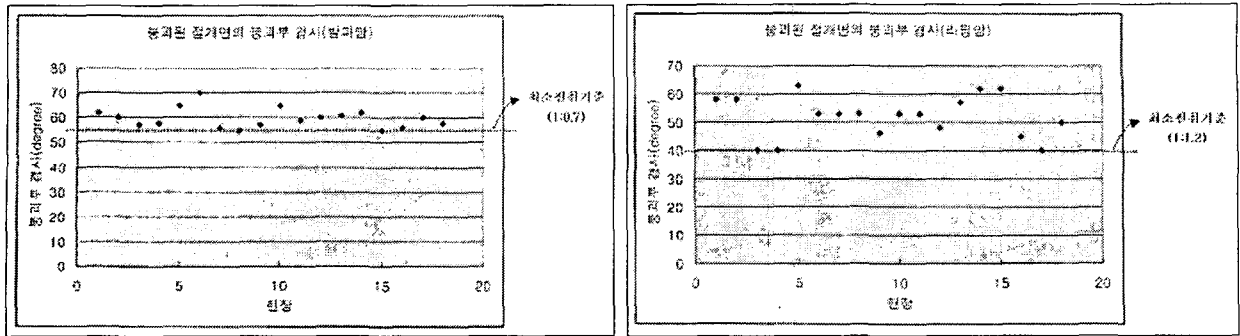


b) 봉화 소천 광회 지구

그림 2. 완경사의 상부사면을 이루는 붕괴 발행 현장 예

4. 경사도 설계기준 검토

태풍 루사에 의해서 발생한 붕괴 절개면과 과거 도로절개면에서 취득한 자료를 이용하여 붕괴부의 경사도를 분석해 보았다. 그 결과 발파암의 경우(18개소)에 1:0.7~1:0.3의 붕괴경사도를 보이고, 리핑암의 경우(18개소)에는 1:0.5~1:1.2의 붕괴경사도를 가지는 것으로 분석되었다. 국내 도로절개면 경사각 결정에 있어서 국가 설계 기준은 암반층 비탈면 표준경사와 관련하여 암반의 풍화상태, 시추조사 시 코아회수율, RQD 및 불연속면의 특성 등을 고려하여 1:0.5~1:1.0으로 제시하고 있다. 설계단계의 기준은 보다 안정성을 확보할 수 있는 기준을 제시하는 것이므로 현 리핑암 적용 국가기준(1:1.0)을 설계단계에서 다양한 현장 여건을 충분히 고려할 수 있도록 적용 기준을 1: 1.2로 낮추어 조정하는 것이 바람직 할 것으로 사료된다. 또한 절개면의 경우 설계단계의 기준과 시공단계의 기준을 구별되는 것이 타당하다. 즉 절개면의 현 설계는 예비설계단계로 간주하고 시공과 함께 지반특성을 충분히 반영할 수 있는 상태(예를 들면 절개면 시공 50% 진척단계)에서 안정성 해석에 의한 실시설계를 하는 것이 바람직하다.



a) 발파암의 경우

b) 리핑암의 경우

그림 3. 조사대상 절개면 붕괴부 경사도 분석

5. 결론

태풍 루사에 의해 발생한 붕괴 절개면의 특징을 살펴보면, 평균 높이가 약 25m 정도이고, 경사도는 40° ~ 68° 의 범위를 갖는다. 또한 평균 붕괴 심도는 4m 내외로 토사의 원호파괴 및 표층붕괴의 양상이 주를 이루고 있다. 붕괴 절개면의 지형적인 특성을 분석한 결과, 절개면을 이루는 암반의 지질특성과 지형특성이 서로 밀접한 관계에 있으며 이러한 특성이 붕괴와 직접적인 연관이 있는 것으로 나타났다. 향후 강우에 의한 붕괴 피해를 줄이기 위해서는 절개면 상단부 집수형상 유무와 상부자연사면에서의 지표수 침투 등을 고려한 대책공법 적용이 요구된다. 따라서 지표수의 원활한 배수를 돕고 지반내 침투를 억제할 수 있는 집수지형 수직도수로 설치, 절개면 상부 산마루측구 설치, 수평배수공, 표면보호공 등의 공법에 대한 설계기준을 마련하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

국내 도로절개면 경사각 결정에 있어서 국가 설계 기준은 암반층 비탈면의 경사도를 1:0.5~1:1.0으로 제시하고 있다. 그러나 본 연구에서 절개면의 붕괴경사도를 분석한 결과 풍화도가 심한 리핑암의 경우 최하 40° (1:1.2)의 경사도를 갖는 것으로 나타났다. 따라서 다양한 현장여건을 충분히 고려할 수 있도록 설계기준을 다소 완만한 구배로 조정하는 방안이 요구된다. 아울러 절개면 공사와 관련하여 현 설계는 예비설계단계로 간주하고 시공과 함께 지반특성을 충분히 반영할 수 있는 단계에서 안정성 해석에 의한 실시설계를 수행하는 제도적인 개선을 제언한다.

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 V, 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. 구호본, 배규진. (1997) 대한토목학회지, 철원, 연천지역 산사태 피해 현황 및 분석, pp. 22 - 268.
9. Turner, A. K. 외 2인, "Landslides Investigation and Mitigation", Transportation Research council Board, Special Rep. 247, 1996, pp. 48 - 54