

## 2009년 집중호우에 의한 인제군 상남리 토석류 현장 분석

### Analyses of Debris Flow by Heavy Rainfall of Sangnamri of Injegun in 2009

최준식<sup>1)</sup>, Joon-Sik Choi, 콕철수<sup>2)</sup>, Cheol-Soo Kwak, 유남재<sup>3)</sup>, Nam-Jae, Yoo

<sup>1)</sup> 강원대학교 토목공학과 석사과정, Master's Course, Dept. of Civil Engineering, Kangwon National Univ.

<sup>2)</sup> 강원대학교 토목공학과 석사과정, Master's Course, Dept. of Civil Engineering, Kangwon National Univ.

<sup>3)</sup> 강원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kangwon National Univ.

**SYNOPSIS** : This study is a research results about flow characteristics of debris flow mobilized from landslides such as initiation, transportation and deposition. As results of slope stability analyses at sites studied, the safety factors in rainy period are decreased drastically in comparisons with those in dry period so that the effect of rainfall on initiation of debris flow is known to be significant. From results of analyzing rainfall data, debris flow occurred as previous rainfall accumulated during 2 weeks was more than 526mm, the maximum rainfall intensity being more than 34mm/hr and the day rainfall being more than 171mm/day. As results of analyzing topology of channel debris flow running, the angle of slope where debris flow initiated was in the range of 36~39°. For area of channel debris flow being transporting the angle of channel was in the range of 11~36°. The angle of channel where debris flow started to be deposited was found to be in the range of 5~10°.

**Keywords** : landslide, heavy rainfall, debris flow, Sangnamri, 2009

## 1. 서론

우리나라는 매년 크고 작은 토석류에 의한 산사태로 인해 인명과 재산상에 상당한 피해를 받고 있다. 대부분의 토석류는 국지성 집중호우가 발생하는 7월~9월에 집중적으로 발생한다. 2002년의 8월의 태풍 루사에 의한 강릉지역에 토석류 발생, 2003년 9월의 태풍 매미의 이동 경로 상에 위치했던 경남 및 강원지역의 토석류 발생, 그리고 2006년의 7월의 태풍 예위니아와 함께 발생한 국지성 집중호우로 인한 인제지역의 대단위 토석류는 최근 국내에서 발생한 토석류의 대표적인 예라 할 수 있다.

일반적으로 토석류 발생의 직접적인 원인은 집중호우, 지진 등의 자연적 원인과 산불, 벌목, 공사로 인한 지반교란 등의 인위적인 원인이 있다. 또한 토석류가 발생한 계곡의 최상부 사면의 지형적인 특성이나 토석류가 이동하는 계곡의 기하학적 형상 및 지질, 식생, 그리고 기후 등 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하여 발생한다. 이러한 토석류에 대응을 위해서는 토석류가 발생하는 위치의 지형 및 지질과 유발요인에 대한 조사와 분석이 필요하다.

국내에서 발생하는 토석류 피해에 효과적으로 대처하기 위해서는 지형, 지질 및 기후상황에서 발생하는 토석류 사례에 대한 조사와 분석을 통한 자료와 경험이 축적되어야 할 것으로 보인다. 이러한 배경에서 이 논문은 2009년 7월 14일 집중호우에 의해 강원도 인제군 상남면 상남리 446지방도에서 발생한 토석류 피해현장에 대한 원인을 분석하였다. 피해원인 분석을 위해 현장조사를 실시하고 현장시험 및 실내실험을 통해 수집된 자료를 바탕으로 토석류 발생에 관해 영향을 미치는 인자를 분석하고 토석류 발생 및 흐름 특성을 분석하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 토석류의 이동

토석류는 경사와 유송물질의 퇴적규모에 따라 크게 초기 발생단계(initiation), 이동 및 침식단계(transportation and erosion), 그리고 퇴적단계(deposition)의 세부분으로 구분할 수 있다. 일반적으로 초기 발생단계는 경사가 25°(47%)이상이며 이동 및 침식단계의 경사는 15°(27%)이상으로 구성되며, 부분적인 퇴적단계는 15°(27%)미만, 전체적인 퇴적단계는 10°(18%)미만에서 분포하는 것으로 알려져 있으며 이를 그림 1에 나타내었다.

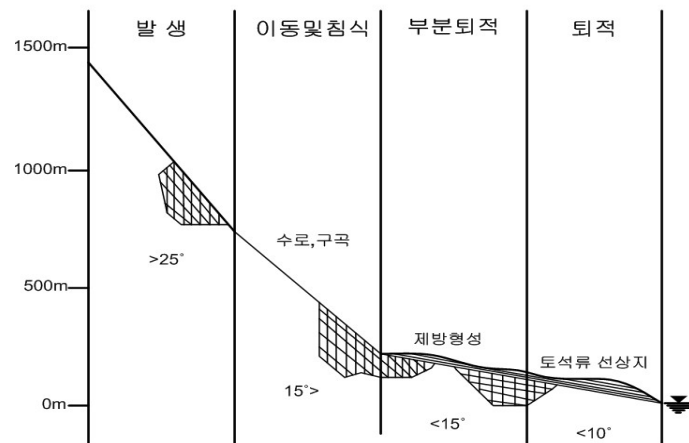


그림 1. 토석류의 단계적 구분(국립방재연구소, 2004)

### 2.2 강우가 토석류 발생에 미치는 영향

강우 침투가 발생하면 사면은 물과 공기의 흐름이 동시에 발생하는 불포화 조건이 형성되며 이때 강우에 의한 모관 흡수력의 감소는 사면 안정성에 절대적인 영향을 미친다. 일반적으로 강우로 인한 사면 파괴의 원인은 강우 침투로 침윤전선이 임계깊이에 도달하여 음의 간극수압이 소멸되고 이로 인한 강도의 감소로 인하여 파괴가 발생한다.

건기시 불포화토는 평형상태에서 간극수압이 음으로 작용하여, 유효응력을 증가시키는 역할을 하고 있어 사면이 안정하지만 우기시 강우가 지반내로 침투함에 따라 함수비가 높아지면, 모관 흡수력에 의해 유발되는 부 간극수압이 작아져 전단강도 또한 작아지므로 이에 따라 파괴가 발생한다.

또한 강우강도가 큰 경우 계곡으로 물이 집중되어 높은 수위와 빠른 유속으로 흙, 자갈, 바위, 나무 등과 함께 흐르는 토석류가 발생한다.

## 3. 토석류 현장조사

### 3.1 현장 정밀조사

그림 2는 상남리 현장 정밀조사 후 사면의 전체모식도를 단계적으로 구분하였다. 토석류가 발생한 계곡은 발생부, 유하부, 퇴적부의 형태로 구분할 수 있다. 토석류는 발생부 사면의 산사태로 시작하여 계곡을 중심으로 하류로 내려오면서 퇴적에 이르게 된다. 초기 발생부 사면의 사면붕괴로 시작된 토석류는 계곡에 유입되면서 계곡의 양안사면과 계곡하상에서 침식을 계속적으로 증대시켜 최종적으로 퇴적부에 엄청난 규모의 퇴적량이 발생하게 된다. 단계별 조사내용은 다음과 같다.

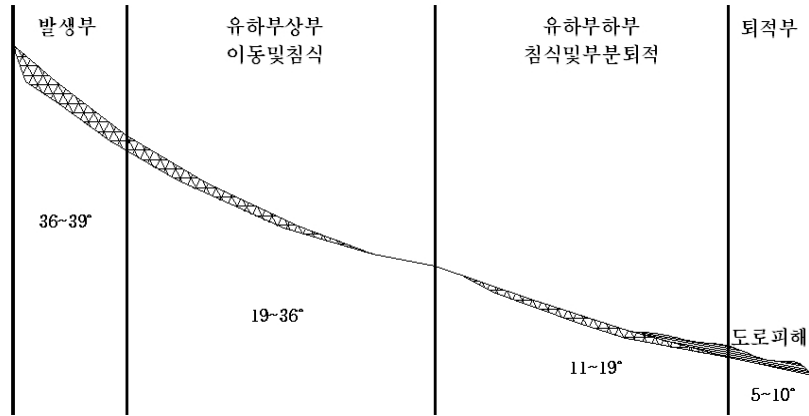


그림 2. 상남리 토석류의 단계적 구분

### 3.1.1 토석류 발생부

토석류가 발생한 형태는 여러 가지 형상으로 나타나지만 계곡형 토석류가 발생한 계곡의 발생부의 형상은 부채꼴 모양의 형상을 나타내고 있다. 그림 3의 발생부 사면은 부채꼴 형상을 나타내고 부분적으로 기반암이 노출 되었다. 발생부의 경사는 36~39°로 Van Dine(1985)에 따른 일반적인 발생부 사면의 경사 25°보다 큰 것으로 나타났다.



그림 3. 인제군 상남리 토석류 발생부

### 3.1.2 토석류 유하부

유하부는 주로 침식이 발생하며 계곡의 급한 구배로 인해 계곡 중앙부의 지속적인 침식이 발생하고 토석류가 진행 될수록 계곡의 깊이와 폭이 점점 커지면서 침식이 계속적으로 이루어지게 된다. 계곡의 깊이가 깊어지면 계곡 사면의 붕괴가 발생하여 얇은 산사태가 일어나 토석류로 유입되어 하부로 연행된다.

그림 4은 유하부(상부)를 나타내는 것으로 침식깊이는 약 0.5~0.7m로 계곡의 좌우사면에 침식된 형상을 판단하여 토석류 발생이전의 유하부 형상을 추정하였다. 상부에서 하부로 내려가면서 토석류에 의해 침식되어 기반암이 노출되어 있다. 유하부 경사는 19~36°로 나타났고, 유하부 상부에서는 주로 이동 및 침식현상이 발생하였다.

그림 5는 유하부(하부)를 나타내는 것으로 주로 침식과 부분퇴적현상이 함께 발생하였다. Van Dine(1985)에 따른 일반적인 유하부 경사는 상부에서 15°보다 크고 하부에서 15°보다 작게 나타났다.





그림 4. 인제군 상남리 토석류 유하부(상부)



그림 5. 인제군 상남리 토석류 유하부(하부)

### 3.1.3 토석류 퇴적부

그림 6는 퇴적부 사진으로서 좁은 계곡을 따라 내려오던 토석류 이동물질이 사면경사가 5~10°로 낮아지면서 속도가 줄어들어 퇴적현상이 발생하였다. 발생부 부터 흘러내려온 토석류가 평탄한 도로를 만나면서 토석류 이동물질에 의해 피해를 일으켰다. 퇴적부의 토석류 피해는 446번 지방도 6km구간에 걸쳐 1200t 가량의 토사와 토석이 퇴적 되었다.



그림 6. 인제군 상남리 토석류 퇴적부



그림 7은 토석류 발생부 사면부터 유하부 및 퇴적부까지 구간별로 현장조사 결과를 바탕으로 상남리 토석류 현장의 침식과 퇴적을 분석하여 전체 구간에서 일어나는 침식량과 퇴적량을 분석할 수 있었다. 발생부에서 침식이 점차 증가하다가 유하부(상부)에서 침식이 주를 이루고 침식과 퇴적이 동시에 일어나기 시작하는 유하부(하부)에서 침식과 퇴적의 차이를 보였다. 또한 도로와 인접한 퇴적부에서 발생부와 유하부로부터 이동한 토석류가 퇴적되었다.

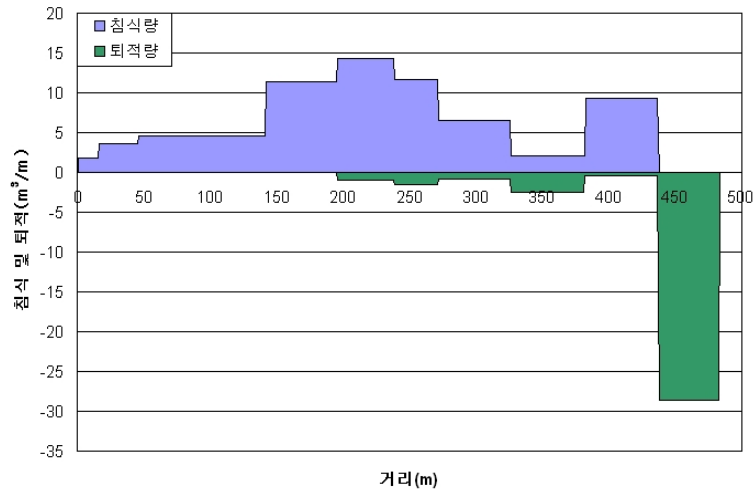


그림 7. 상남리 토석류 구간에 따른 침식/퇴적

## 4. 결과분석

### 4.1 실내시험 결과

토층의 공학적 특성이 토석류 발생요인으로 작용한다. 따라서 피해원인 분석을 위해 토질시료를 채취하여 각종 토질시험을 실시하였다. 현장시험으로 현장단위 중량시험을 수행하였고 실내시험으로 체분석, 비중시험, 직접전단시험을 수행하였다. 그림 8은 발생부 지역에서 시료를 채취하는 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 불교란 시료는 표토를 제거하고 스테인리스로 제작된 원통형 샘플러(stainless ring sampler)를 이용하여 채취하였다.

표 1은 채취한 시료의 실험결과로 현장단위중량은  $1.538t/m^3$ , 비중은 2.45, 함수비는 46.9%, 직접전단시험을 수행하여 점착력은  $0.2tf/m^2$ 와 내부마찰각은  $35.2^\circ$ 이며, 체분석 결과 통일분류상 GW로 확인되었다.

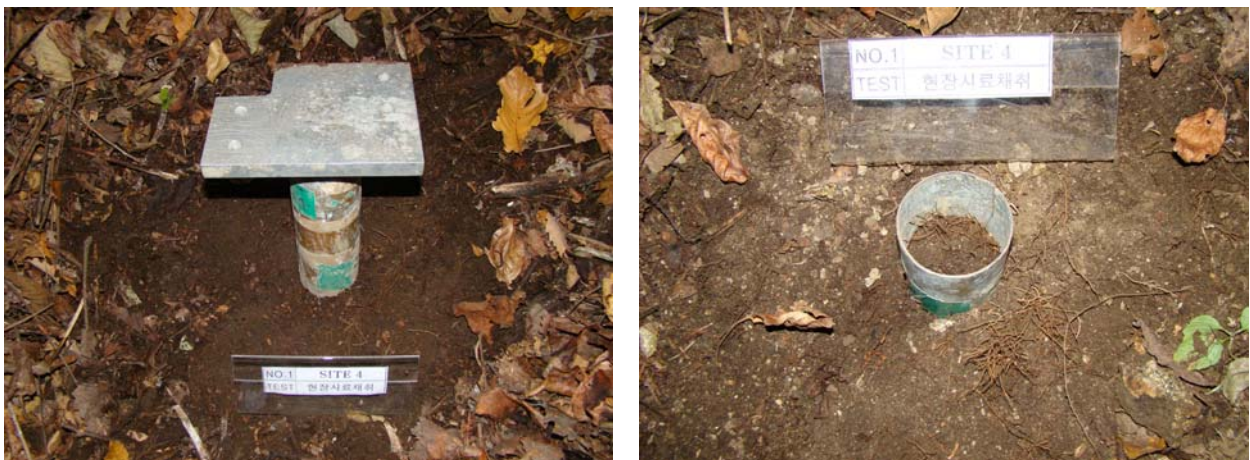


그림 8. 원통형샘플러를 이용한 불교란 시료채취

표 1. 지반정수 산정

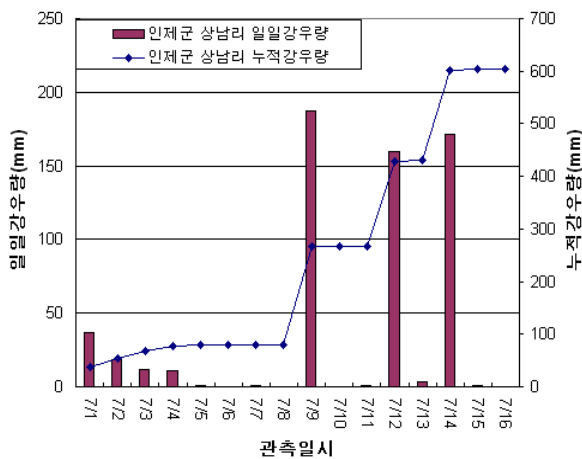
흙의 분류	비중	함수비(%)	현장단위중량(tf/m <sup>3</sup> )	c(tf/m <sup>2</sup> )	Φ(°)
GW	2.45	46.90	1.538	0.2	35.2

#### 4.2 강우량 분석

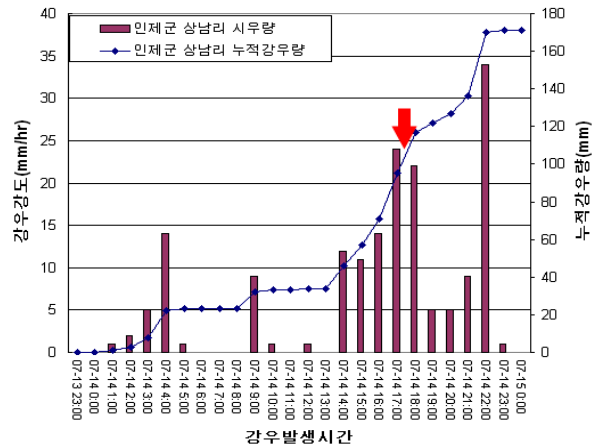
토석류 발생의 가장 큰 요인은 강우량이라 할 수 있다. 그러므로 본 연구 대상지역에 토석류 발생 당시의 강우량을 기상청(AWS)자료를 수집하여 다음과 같이 분석하였다.

그림 9 (a)는 2009년 7월 1일~16일 2주간 인제군 상남리 토석류 발생지역의 일일강우량 및 누적강우량을 나타내는 그래프이다. 토석류 피해는 7월 14일 일일강우량이 171mm/day의 강우가 왔을 때 발생하였다. 토석류 피해 발생전 7월 14일 17시전까지의 누적강우량은 526mm/day로 기록되었다.

그림 9 (b)는 토석류 피해 당일의 시간강우량과 일일강우량을 나타내는 그래프이다. 최대시간강우량은 34mm/hr로 나타났으며 171mm/day의 강우가 토석류 발생 당일 8~9시간 만에 집중적으로 쏟아 졌음을 알 수 있다. 토석류 발생은 화살표로 표시된 곳으로 7월 14일 17시30분~40분으로서 7월 9일부터 내리기 시작한 선행강우에 의한 누적강우량의 증가와 집중호우로 인한 시간강우량의 증가가 토석류 발생의 직접적인 원인인 것으로 판단된다.



(a) 일일강우량 및 누적강우량



(b) 피해당일 시간강우량 및 누적강우량

그림 9. 2009년 인제군 상남리 강우량(인제군 상남면 상남리 AWS)

토석류 발생시 누적강우량, 시간강우량, 일일강우량 모두 표 2의 산사태 경보기준치를 초과 하였다.

표 2. 산사태 예보기준(산림청)

구분	산사태주의보	산사태경보
누적강우량(mm)	100~200미만	200이상(526)
시간강우량(mm/hr)	20~30미만	30이상(34)
일일강우량(mm/day)	80~150미만	150이상(171)

\*( )상남리 강우량

### 4.3 사면안정해석

토석류 피해는 그 피해영역이 광범위하여 토석류가 발생하기 시작하는 발생부 사면에 대한 해석을 실시하였다. 사면안정 해석을 위해 한계평형해석 상용프로그램인 SLOPE/W를 사용하였다.

사면안정에 필요한 지반정수는 표 1의 값을 사용하였다. 해석 단면은 현장상세조사를 통해 얻어진 결과를 사용하였다.

토석류에 발생은 선행강우와 시간당 최대강우강도에서 발생하므로 그림 10과 같이 원호 활동에 대한 안정해석은 건기시와 우기시로 나누어 수행하였다. 토사층에서의 파괴를 해석의 주대상으로 하므로 건기시에는 지하수위를 모두 무시하였으며, 우기시에는 토사층이 모두 포화조건이 되도록 지표면까지 지하수위를 모델링하였다.

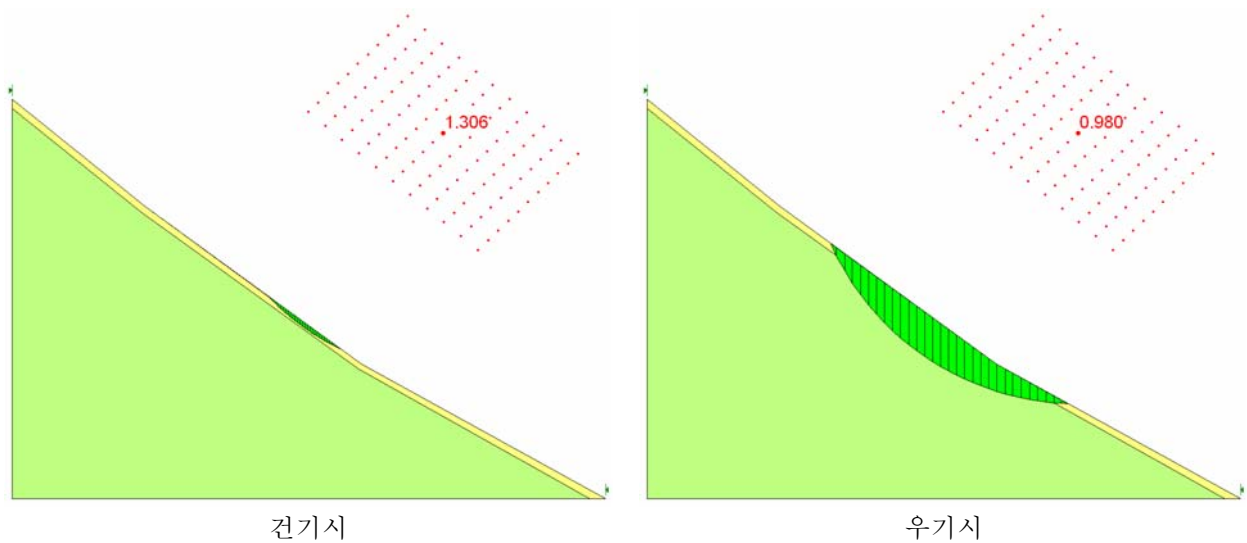


그림 10. 상남리 발생부사면

원호활동에 의한 안정해석결과 표 3.과 같이 분석되었다. 발생부사면은 건기시에는 최소안전율 1.5보다 낮은 1.306의 안전율을 보이고, 우기시에는 최소안전율 1.2~1.3보다 낮은 0.980를 나타낸다. 우기시 강우에 의한 지하수위가 상승하여 토사층에 형성되는 포화조건에서 사면의 안정성이 급격하게 낮아져 발생부 사면에서 파괴가 유발되는 것으로 예상된다.

표 3. 상남리 발생부 및 유하부 토석류 현장의 사면안전율(한국도로공사, 도로설계요령 2001)

구분	강우조건	
	건기	우기
발생부사면	1.306 < 1.5	0.980 < 1.2~1.3

### 5. 결론

- (1) 토석류의 유하 특성으로 토석류가 시작된 발생부의 높은 통일분류상 GW로 나타났다. 발생부의 경사는 36~39°로 파괴형태는 암반층 위에 형성되어있는 얇은 표토층에서 발생하였다. 유하부의 경사는 11~36°로 계곡의 기하학적 특성에 따라 침식과 퇴적의 양상이 변화한다. 퇴적부의 경사는 5~10°로 나타났다.
- (2) 강우특성을 분석 결과 토석류 발생전 누적강우량 526mm/day, 토석류 발생당일 최대시간강우량 34mm/hr, 일일강우량 171mm/day의 상황에서 토석류가 발생하였다. 이는 산림청 산사태 예보 기준치

보다 높은 강우강도에서 토석류가 발생하였다. 즉, 선행강우에 의한 누적강우량과 최대시간강우량이 증가하여 토석류가 발생하였다.

- (3) 현장조사 결과를 바탕으로 사면안정성 해석을 실시한 결과, 건기시에는 허용안전율 1.5보다 낮은 1.306의 안전율을 보였고, 우기시에는 허용안전율 1.2~1.3보다 낮은 0.980의 안전율을 보였다. 상남리 발생부 사면의 안전율은 건기, 우기 모두 허용안전율보다 낮게 나타났다. 특히 우기시 강우로 인해 지하수위가 상승하여 토사층에 형성되는 포화조건에서 사면의 안정성이 급격하게 낮아져 발생부의 사면파괴가 발생하였다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호#08지역기술혁신 B01-01)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 국립방재연구소(2004), 토석류의 발생작용 및 저감대책에 관한 연구
2. 한국도로공사(2001), 도로설계요령
3. Van Dine, D. F., "Debris Flows and Torrents in the Southern Canadian Cordillera", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 22, No. 1, pp. 44-68,1985.