

토석류 재해 조사법의 제안 The Proposal of Debrisflow Investigation

최희림¹⁾, Hui-Rim Choi, 장범수²⁾, Bhum-Soo Chang, 이왕곤³⁾, Wang-Gon Lee, 박상덕⁴⁾, Sang-Duk Park

¹⁾ 한국시설안전공단 연구원, Researcher, Korea Infrastructure Safety Corporation

²⁾ 한국시설안전공단 부장, General Manager, Korea Infrastructure Safety Corporation

³⁾ 한국시설안전공단 과장, Manager, Korea Infrastructure Safety Corporation

⁴⁾ 강릉대학교 토목공학과 교수, Professor, Department of Civil Eng, Kangnung National University

SYNOPSIS : A debris flow is known as that flood and landslide of water cause much physical human damages worldwide to complex natural disaster that happen combining and happy event is happening mainly in urgent mountains area in domestic. Because happen about debris flow that happen from each place every year and is drift, mechanism of accumulation definitely make clear and great many damage is not running out. Must grasp actual conditions of priority debris flow to need debris flow prevention countermeasure and lay countermeasure to take away damage by debris flow. Because collecting actual conditions of debris flow that happen by objective investigation methods and accuracy, proposed about investigation calamity investigation method so that can calculate debris flow damage and prepare in subsequentness damage.

Keywords : debris flow, disaster, prevention, investigation method

1. 서론

토석류는 물의 범람과 산사태가 결합해서 발생하는 복합적 자연재해로 전 세계적으로 많은 물적 인적 피해를 유발하는 것으로 알려져 있으며 국내에서도 경사가 급한 산악지역에서 주로 발생하고 있다. 매년 각지에서 발생하는 토석류에 대해서 그 발생과 흐름 그리고 퇴적에 대한 메커니즘은 여전히 해명되지 않고 있으며 이러한 상태로 수많은 피해가 끊이지 않고 발생하고 있다. 이러한 토석류 피해를 줄이기 위해서는 토석류 방지를 위한 대책의 개발과 함께 토석류 피해를 저감할 수 있는 제도개선이 필요하며, 이를 위해서는 최우선적으로 토석류의 발생실태를 파악하는 것이 중요하다.

우리나라 역시 전국토의 약 64%가 산지로 구성되어 있어 각종개발사업 시행시 건설공사에 의한 인공 비탈면이 많이 발생할 수밖에 있는 지형적인 특징을 갖고 있으며, 전통적으로 배산임수의 지형에 택지가 많이 조성되는 관계로 토석류가 발생할 경우 인명피해로 이어지기 쉬운 구조적인 취약성을 내포하고 있을 뿐만 아니라 경제적 성장에 따라 피해대상의 가치도 증가하고 있다. 우리나라에서도 재해가 발생할 경우 각 관리기관에서 응급복구를 실시하고 전문가에 의해 피해조사를 실시한 후 복구를 실시하고 있으나, 그리고 각 관리 기관별로 조사방법이 다르며, 전문가들의 주관적인 견해로 정량적인 결과를 얻기가 힘든 실정이며, 응급복구를 완료한 후에 조사가 이루어지기 때문에 붕괴 당시 상황을 정확하게 반영하는 조사가 이루어 지지 못하는 경우가 많다. 따라서 토석류의 발생실태 및 피해상황 등에 대한 정량적인 결과를 얻기 위해서는 조사항목을 표준화 할 필요성이 있으며, 이러한 객관화된 방법에 따라 토석류 발생에 따른 재해지역에 대해 신속하고 정확한 조사가 실시되어야 할 것이다. 토석류 재해의 조사는 이학적인 현장조사나 관측조사, 공학적인 피해조사, 인문사회 분야에서의 실태조사나 영향조사, 행정적 입장에서 원인조사나 복구조사 등

각 분야별로 망라된 종합조사가 이루어져야한다. 본 연구에서는 이러한 토석류 재해 조사기법을 제안하고자 한다.

2. 토석류 조사기법

2.1 토석류의 정의

토석류(土石流, debris flow)는 물의 범람과 산사태가 결합해서 발생하는 복합적인 자연재해로 주로 물의 흐름에 의해 발생하는데, 이로 인한 유속의 증가, 토사유실, 대규모 암반의 이동현상 등에 의해 대규모 재해가 발생하게 된다. 토석류는 낙석과 산사태 그리고 급류(急流)의 중간정도로 분류되는 물질의 이동현상을 말하며, 주요 구성성분에 따라 그림 1과 같이 이토류(泥土流, mud flow) 및 사토류(沙土流, granular flow) 그리고 혼합류(混合流, mixed flow)로 나눌 수 있다. 토석류의 종류에 따라 유속과 밀도, 최대순간유출량, 운동에너지 등이 상이하므로 토석류 방호책의 설계시 현장조사를 통해 이에 대한 분류를 실시하는 것이 매우 중요하다. 이토류(mud flow)가 주로 물과 세립질 물질로 구성되어 있는 반면에 사토류(granular flow)는 주로 조립질 물질로 구성되어 있으며 특히 전면부에 분포하는 거력(巨礫) 등은 토석류의 흐름에 중요한 역할을 한다.

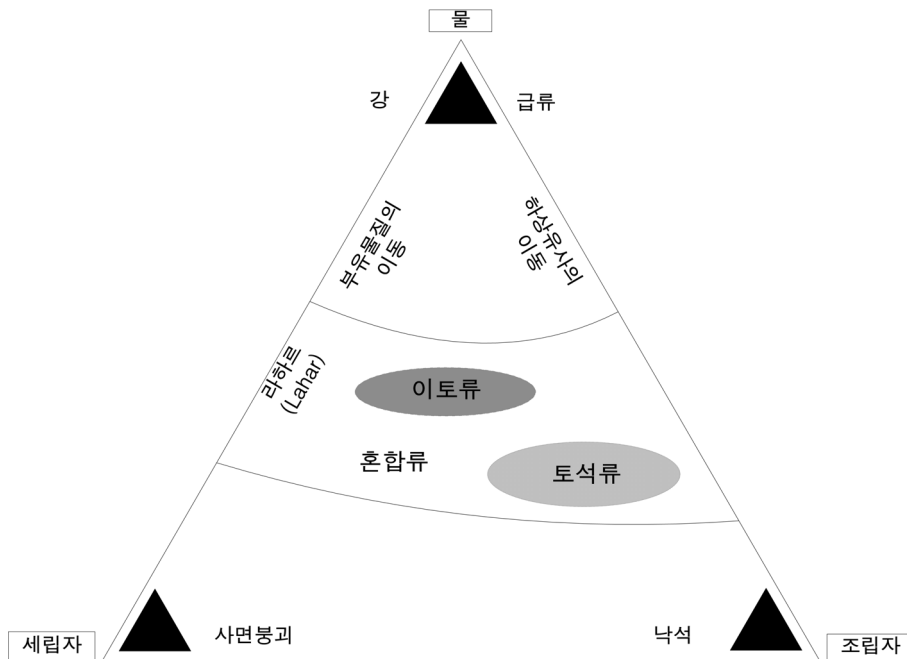


그림 1 토석류의 분포도

토석류의 발생원인은 고결되지 않은 흙과 암편들이 사면이나 계곡을 따라 흘러내리므로 점착력이 없는 동적거동을 한다. 토석류 발생조건을 내적요인과 외적요인으로 나눌 수 있다. 내적요인은 급경사지형, 지질조건, 산림, 비탈면경사 및 굴곡도 등이 있다. 지질조건이 취약한 급경사 지역의 V형 계곡에서 대부분 토석류가 발생한다. 외적요인은 집중강우, 지진, 해빙수 등이 있으며 이 중에서 가장 큰 원인은 집중강우에 의해 발생한다. 토석류는 호우 등으로 인해 높은 간극수압이 형성될 때 발생된다.

2.2 토석류 재해 조사전 준비사항

토석류 재해 조사를 위해서는 사전에 정보 수집과 현지조사에 사용할 지형도, 지질도와 공중사진 등을

입수하는 것이 필요하며, 지형도의 경우는 1:50,000 이나 1:25,000 지형도를 준비한다. 현장조사 시에는 사진기, 줄자, 계산기, 손전등, 간단한 측량장비와 기록장비를 준비하도록 한다.

2.3 유역조사

2.3.1 토석류가 발생한 지역의 위치, 지역명, 하천명 등에 대한 조사

토석류가 발생하였다는 보고는 재해발생상황 등을 통해 이루어지는 경우가 많으며, 보고서 정확한 행정구역 명이나 지형도 등에 등재되어 있는 명칭보다는 토석류재해가 발생한 지역사람들이 통상적으로 사용하고 있는 지역명이나 하천명 등을 사용하는 경우가 많다. 따라서 지형도 및 현지탐문 등을 통해 정확한 행정구역, 위치와 하천명 등을 파악하여 조사시 혹은 차후 대책 수립 및 복구시에도 통일된 위치와 명칭을 사용하도록 하는 것이 필요하다.

2.3.2 유역면적 조사

우선적으로 토석류가 발생한 유역면적을 산정하는 것이 중요하다. 따라서 입수 가능한 가장 최근의 지형도 등을 이용하여 토석류가 발생한 지역의 유역면적을 산정하도록 한다. 우리나라에서는 토석류가 발생한 지역의 유역면적에 대한 정확한 연구가 아직 이루어져 있지 않으나, 외국의 사례에 따르면 일반적으로 토석류가 발생한 유역의 유역면적은 대부분 1.5km²이하이며, 0.3km²이하의 면적에서 가장 심하게 발생하는 것으로 보고되고 있다. 즉 1차 계곡이나 2차 계곡에서 토석류나 토사류가 주로 발생하고 있으므로 유역면적을 산정할 때에는 이를 유념할 필요가 있을 것이다.

2.3.3 계곡의 길이에 대한 조사

유역내에서 토석류 재해를 발생시킨 계곡의 유로길이를 조사한다. 여기서 유로길이란 1/25,000 지형도에서 계곡 지형을 이루는 이른바 1차계곡이 되는 지점에서 토석류가 흘러 퇴적을 개시한 지점까지의 하도길이를 측정하는 것으로 지형도와 현지조사를 통해 결정한다.

2.3.4 토석류가 발생한 지역에 대한 지형조사

토석류가 발생한 지역의 지형에 대한 조사로서 유역의 경사, 유역의 최고표고, 최저표고 등을 조사한다. 이종의 유역의 경사는 토석류가 발생한 부분, 발생한 토석류가 흘러간 부분, 흘러간 토석류가 퇴적한 부분에 대해 재해 전후의 경사를 조사하도록 한다. 그 방법으로는 입수 가능한 가장 최근의 기록(지형도 및 기존 피해 조사 자료 등)과 현지측량 등의 방법이 있다.

2.3.5 토석류가 발생한 지역에 대한 발달한 지질에 대한 조사

토석류 재해가 발생한 지역의 지형과 함께, 해당지역에 발달한 지질 역시 토석류 조사에 있어서 매우 중요한 위치를 차지하는 데에는 해당지역의 지질상태가 토석류 발생의 주요 인자를 차지하고 있기 때문이다. 조사방법으로는 한국지질자원연구원에서 발간한 지질도, 인근에 시공된 시설물 설치과정에서 조사된 지질 조사자료, 농촌진흥청 농업기술연구소 등에서 발간한 토양도 등을 활용하여 현지조사를 통해 자세한 사항을 보완한다. 조사항목으로는 토석류 재해가 발생한 지역에 발달한 기반암의 종류 및 발달상황, 단층 혹은 파쇄대의 발달상황, 기반암의 풍화정도, 화산암설 지대 혹은 화산퇴적물의 여부, 봉적토층 발달여부, 표토층의 발달상황 등을 들 수 있다.

2.4 기존 시설물 및 지정지 관계조사

토석류가 발생한 지역에 설치되어 있는 사방시설, 치산시설 등 모든 시설물에 대한 재해 전 위치·형상 등에 대한 조사가 필요하다. 특히 사방댐의 경우는 계획 저수량과 재해직전 및 직후의 퇴사상황을 파악할 필요가 있다. 이를 위해서는 사방댐의 설계도서 및 가장 최근에 이루어진 준설기록 및 점검기록 등을 확인할 필요가 있다. 지정지 관계조사로는 사방지정지, 급경사지 붕괴위험지역, 자연재해위험지역, 특정관리대상시설 등의 지정여부에 대해 조사를 실시한다.

2.5 재해상황조사

2.5.1 재해의 형태에 대한 조사

재해상황 조사를 위해서는 먼저 토석류 재해의 형태가 토석류에 의한 재해인지, 토사류에 의한 재해인지 여부를 조사해야 하는데 이를 위해서는 최대입경 및 퇴적구조 등을 조사하여 판별할 수 있다. 즉, 토석류 혹은 토사류에 발생한 지역 중 어느 지점에 위치하는 퇴적물의 최대입경이 소류력에 의해 운반되어 온 것인지의 여부를 조사하여 토석류 여부를 판단하게 되는데 일반적으로 강우자료, 토석류발생시각, 해당지역지점 부근의 재해 후 하폭(河幅)과 계곡바닥의 경사를 측정하여 결정한다. 또한, 퇴적구조에 의한 판정은 토석류에 의한 퇴적도가 명확히 존재하고 큰 자갈을 포함한 퇴적물에 층상구조(層狀構造)를 갖는지 여부 등을 통해 판별한다. 따라서 이를 위한 조사가 수반되어야 한다.

2.5.2 토석류재해가 발생한 시각 및 재해를 초래한 강우 상황에 대한 조사

토석류는 한번 발생하는 것으로 그치지 않고 수차례에 걸쳐 발생하는 경우가 많으므로 각각의 토석류 발생시각에 대한 조사가 필요하다. 토석류 재해 저감 및 예고를 위한 계측장비가 설치되어 있을 경우에는 정확한 시각을 알 수 있으나, 대부분의 경우 이러한 상황을 기대하기는 어려우므로 탐문 등에 의해 발생시각을 조사한다. 탐문을 통해 토석류 재해 발생시각을 아는 방법으로는 토석류 발생에 따른 진동이나 바람을 느꼈던지, 천둥과 같은 소리가 났던지, 썩은 냄새가 났거나, 강우가 지속되는데도 불구하고 하천의 수량이 감소하였던지 하는 등의 현상을 확인한 시각을 묻는 방법이 있다.

또한 토석류를 초래한 강우의 상황을 파악하는 방법으로는 기상청 자료 및 해당지역에 설치된 강우계측장비 등에서 얻어진 강우자료로부터 강우지속시간, 강우강도 등을 얻을 수 있으며, 토석류를 발생시킨 강우 이전의 선행강우여부 및 지속시간과 강우량 등을 조사한다.

2.5.3 유량 조사

토석류가 발생한 시점부근의 최고유량, 유량-시간 곡선을 파악하는 방법으로는 수문학적 방법을 이용할 수 있으며, 이외에 실제로 토석류 재해가 발생한 후 재해현장의 흔적으로부터 유량을 추정하는 방법이 있다. 비록 재해의 흔적으로부터 유량을 추정하는 것은 대단히 어려운 일이며 정밀도를 확신할 수는 없으나 주변 암반이나 교각, 사방댐 등에 남은 흔적에서 수위를 상징하고 적당한 조도를 가정함으로써 최고 유량을 추정할 수 있다.

2.6 토석류 발생상황 조사

2.6.1 토사 유출 원인

일반적으로 토석류에 의한 토사유출의 원인으로는

- 1) 붕괴토사가 그대로 토석류로 바뀐 점
- 2) 붕괴토사가 일시적으로 계곡을 막아 천연댐을 만들고 이 천연댐이 파괴돼 토석류가 된 점
- 3) 계곡바닥 퇴적물 이동에 의한 것 등을 들 수 있는데 재해발생전후의 공중사진이나 현지조사 등을 통해 추정할 수 있다.

그러나, 실제 토석류 현장에서는 붕괴와 계곡 바닥의 세굴이 동시에 발생하는 경우도 있고, 위에 말한 3가지 분류에 맞지 않거나 2개 이상의 원인을 갖는 경우도 많이 있으므로 세밀한 조사 및 판단이 필요하다. 즉, 계곡 바닥 퇴적물 이동에 의한 토석류 발생지역은 계곡 바닥의 경사가 15~20°인 것으로 보고되고 있으므로 15°이상인 영역을 조사하는 것이 바람직하다. 그러나 후속류에 의한 계곡 바닥 퇴적물 이동의 경우 계곡 바닥의 경사가 10°인 지역 부근에서도 발생한 사례가 있으므로 주위가 필요하다.

2.6.2 붕괴 상황 조사

토석류 재해가 발생한 지역에 대한 상황을 현지답사에 의해 조사한다. 이때 조사해야 할 항목으로는 다음과 같은 것들이 있다. 즉, 토석류 발생의 원인을 제공한 붕괴가 발생한 곳의 지형(산허리 또는 계곡부 여부 등), 붕괴가 발생하기 전 전후의 경사, 형상 및 토석류의 발생규모(평균폭, 평균길이, 평균깊이, 발생면적, 붕괴토량, 유출토사량, 잔류토사량 등) 등에 대한 조사를 실시해야 한다

표 1 붕괴현장 조사표(안)의 예

연번	조사기관		조사자				조사일시		기상	
	수계명		계곡명			유역면적				
1.	조사위치	시점	경도	중점	경도	지형			경사	
		위도	위도		1)산허리, 2)계곡부			°		
	발생규모								지질	용수유무
	평균폭	평균길이	평균깊이	발생면적	붕괴토량	유출토사량	잔류토사량			
		m	m	m	m ²	m ³	m ³	m ³	m ³ /day	
2.	조사위치	시점	경도	중점	경도	지형			경사	
		위도	위도		1)산허리, 2)계곡부			°		
	발생규모								지질	용수유무
	평균폭	평균길이	평균깊이	발생면적	붕괴토량	유출토사량	잔류토사량			
		m	m	m	m ²	m ³	m ³	m ³	m ³ /day	
3.	조사위치	시점	경도	중점	경도	지형			경사	
		위도	위도		1)산허리, 2)계곡부			°		
	발생규모								지질	용수유무
	평균폭	평균길이	평균깊이	발생면적	붕괴토량	유출토사량	잔류토사량			
		m	m	m	m ²	m ³	m ³	m ³	m ³ /day	

2.6.3 계곡바닥 세굴 상황조사

현지측량에 의해 토석류 발생과 관련된 퇴적물(주로 계곡바닥의 경사가 15°이상인 지역)과 토석류에 의해 흘러내려간 토사량에 관계있는 퇴적물(계곡바닥의 경사가 주로 10°~15°인 지역)의 양을 파악한다. 50~200m 간격으로 경사나 계곡의 폭이 변화되는 지점에서 횡단측량을 실시한다. 재해전의 측량자료가 있는 계곡에서는 같은 측점을 사용해 횡단의 변화를 파악하며, 재해 이전의 자료가 없는 경우에는 상·하류의 단면 및 횡단면상 보전된 비탈면, 그 비탈면의 경사에서 추정한다.

2.7 토석류 퇴적상황 조사

2.7.1 퇴적부의 지형적 특징 조사

퇴적부까지 흘러 내려온 토석류는 점차로 그 흐름을 멈추고 퇴적되기 시작하는데, 그 퇴적범위는 흘러 내려온 토석류의 양, 후속류의 양과 지속시간 등의 요인 이외에도 퇴적이 이루어지는 지역의 지형(선상 지형 혹은 기복이 있는 평야지대 여부 등)도 하나의 요인이 되므로 이에 대한 조사를 실시한다. 또한, 퇴적이 이루어진 지점의 재해전후 하상경사, 하폭변화에 대한 조사와 함께 토석류가 퇴적된 최하단 지점에서 약 50m 하류까지의 평균경사도 조사하는 것이 바람직하다. 또한 토석류에 의한 퇴적이 발생한 부분에 대해 토석류 재해 발생이전의 하천폭에 대해서도 조사 할 필요가 있다.

2.7.2 퇴적부의 조사

토석류의 위험구역 설정의 기초적 자료를 마련하기 위해서도 토석류나 토사류가 어떻게 분산·퇴적하는지를 조사하는 것이 매우 중요하다. 따라서 퇴적부 말단의 상황이나 분산을 저지한 지형조건, 기존시설물의 종류와 규모 등도 조사할 필요가 있다.

- 1) 최대 퇴적폭과 분산각 : 토석류나 토사류가 어떻게 분산·퇴적되는가하는지를 조사하는 것으로 토석류 위험구역 설정의 기초적 자료가 된다. 기존 지형도와 현장조사를 통해 이를 결정하며, 퇴적부 말단의 상황이나 분산을 저지한 지형조건, 시설물의 종류 등도 조사한다.
- 2) 퇴적길이 조사 : 토석류 퇴적물의 흐름방향의 길이를 토석류의 퇴적길이라 부르는데 퇴적길이를 조사하는 것 역시 토석류의 위험구역을 설정하는데 유용한 자료가 된다. 이것 역시 기존 지형도와 현장조사를 통해 이를 결정한다.
- 3) .퇴적깊이(두께), 평균 퇴적깊이(두께) 및 퇴적면적 : 퇴적물의 퇴적깊이(두께)를 조사하는 것도 필요한데, 퇴적부의 최대 퇴적깊이(두께)는 토석류 퇴적물 중 가장 두껍게 퇴적한 토사의 깊이를 말하는 것으로 주위 지형과의 고저를 조사하여 위험구역설정에 유용하게 사용된다. 이렇게 조사한 자료들을 평면도상에 퇴적심도로서 표현하는 것이 바람직하며, 이러한 자료들로부터 흘러든 토사의 퇴적 범위와, 퇴적토사량 등을 구할 수 있다.
- 4) 입도조사 : 토석류 재해지에서 토사의 입도조성을 아는 것은 토석류 대책공법 즉 토석류 대책용 사방댐 등에 있어 설계조건으로서 충격력 추정에 도움이 되고 토석류 유하 상황 추정에도 유용한 자료가 된다. 따라서 토석류의 선단부, 중간부, 말단부 각 지점에서의 입도조성 및 최대입경, 평균입경을 조사할 필요가 있다.
- 5) 유목에 대한 조사 : 토석류 재해시에 큰 피해를 주는 요인 중의 하나로 유목이 있는데 이에 대한 조사로 토석류 재해시 유출해 온 유목의 양과 퇴적 위치 및 피해 등을 조사할 필요가 있다.

2.8 토석류 피해 상황조사

이외에도 차후 보상 및 복구 혹은 주민의 소개(疏開) 등을 위한 자료로 활용하기위해, 토석류에 의한 피해를 정확하게 파악할 필요가 있다. 즉, 최소한 다음과 같은 항목에 대한 피해 상황조사가 필요하다.

- (1) 인적 피해(사망자, 행방불명, 중경상자, 단위 인)
- (2) 건물(전체 파손, 절반파손, 일부 파손, 단위 호)
- (3) 토지 등(유실, 토사 퇴적, 침수, 단위 ha)
- (4) 교통 두절 기간(단위 시간)
- (5) 피해액(일반 피해, 공공 피해, 단위 원)
- (6) 기타

3. 결론

본 연구는 “토석류 재해저감을 위한 시설기준 및 제도개선”을 위한 연구 수행과정 중 이루어진 중간 성과를 정리한 것이다. 즉 재해저감을 위한 시설기준 및 제도개선을 위해서는 무엇보다도 먼저 토석류 발생실태 및 발생현황에 대한 객관적인 조사방법의 수립과 이에 따른 조사가 필요하다는 결론을 얻었으며 이러한 명제하에 토석류 재해 조사를 위한 항목 및 방법에 대해 제안하고자 하였다. 연구수행 중 붕괴현장 조사표(안)를 작성하여 제안하였으며, 차후 추가적인 연구를 통하여 좀 더 자세하고 객관적인 조사방법 및 조사표 등을 제안하고자 한다.

감사의글

본 연구는 건설교통기술평가원의 지역기술혁신사업 연구과제 “토석류 재해저감을 위한 시설기준 및 제도개선”의 지원으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 장범수(2008), 비탈면과 관련한 국내외 제도 및 토석류 피해에 따른 대책 및 연구동향, 한국지반공학회지, pp.21~31
2. 건설교통부(2006), 건설공사 비탈면 설계기준
3. 국립방재 연구소(2001), 재해취약시설 점검기준
4. 국립방재 연구소(2004), 토석류의 발생작용 및 저감대책에 관한 연구
5. 급경사지 재해 예방에 관한 법률(2007)
6. 강원발전 연구소(2005), 산불피해지의 사방복구계획 표준화
7. 김경석, 장현익, 유병옥(2007), 고속도로 토석류 피해저감을 위한 대책 연구
8. 김지태(2007), 대만의 토석류 재해 대응방안, 한국방재학회지, v.7 no.2, pp.81~86
9. 조홍동(2007), 최근 국내 토석류의 발생과 방재대책, 한국지반환경공학회, 제8권 제3호, pp. 6~10
10. 國土交通省(2008), 地すべり防止技術指針
11. 國土技術政策綜合研究所(2007), 土石流・流木對策設計技術指針
12. 防, 山沙汰技術協會(1980), 土石流災害調査法
13. Debris Flow and Disaster Prevention, Tsukuba, Japan, pp.433~438
14. Zollinger, F.(1985), Debris Detention Basins in the European Alps, Proc. Int. Symp. Erosion,