

일본의 토석류(debris) 피해 및 방지 대책 사례



류 기 정
(주)한진중공업 상무
(kcyoo@hanjinsc.com)



윤 일 중
(주)한진중공업 과장

1. 개요

최근 국내에서도 이상기온으로 인한 집중호우로 일부 산악지역은 토석류에 의한 피해로 도로가 끊어지는 사례가 빈번하게 발생하고 있다. 토석류(Debris flow)는 급경사의 산허리 지층 및 하상이 견고하지 않은 지역에서 호우가 발생하면 산사태 및 하상의 침식으로 토석과 물이 함께 세차게 밀려 내려가는 현상이다. 토석류는 호우에 의해 계곡류 주변의 사면이 붕괴하여 그 붕괴 토사가 하상퇴적물(river bed deposit)과 함께 흘러내리면서 불라한 토사가 계곡을 일시적으로 막고 그 뒤에 밀려오는 물에 의해 무너져서 같이 흐른다. 그 유하 속도는 일반적으로 5~20m/s로 극히 빠르고, 순간적으로 하류에 떨어져서 큰 재난을 일으키기도 한다. 일본은 토석류, 산사태, 땅밀림 등의 위험요소가 전국에 22만 개소가 있고 이들 위험요소는 증가하는 추세에 있다. 이는 생활지역이 산간지역까지 확대되고 있는 것과 관련이 있다고 한다. 토석류 및 산사태로부터 안정성을 확보하기 위해 사방사업 실시와 병행하여 강우시 경계피난 혹은 토지이용방책 등을 포함한 '토사재해방지대

책추진법(2001)'이 강하게 추진되고 있다. 이 글에서는 토석류의 일반적 특징과 일본의 토석류 피해사례 및 방지대책에 대해 일부 소개하고자 한다.

2. 토석류의 특징

2.1 토석류 발생원인

토석류는 고결되지 않은 흙과 암편들이 사면이나 계곡을 따라 흘러내리므로 점착력이 없는 동적 거동을 한다. 토석류 발생조건을 내적요인과 외적요인으로 나눌 수 있다. 내적요인은 급경사지형, 지질조건, 산림, 사면경사 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. 간극수압을 유발하는 원인은 크게 3가지로 대별된다.

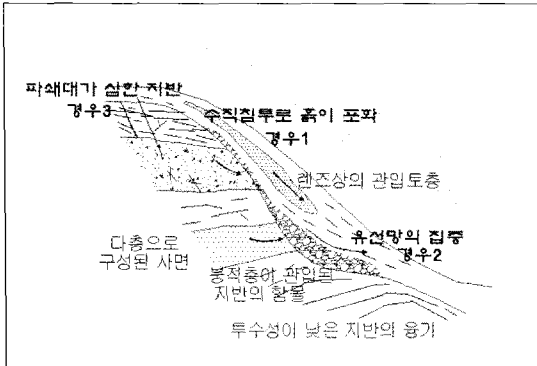


그림 1. 강우로 인한 간극수압의 유발원인(Campbell, 1975)

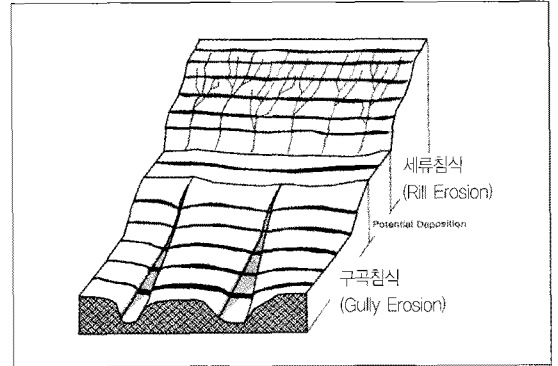


그림 2. 세류침식과 구곡침식

1) 수직침투

강우가 사면의 표층으로 침투하여 표층에 발달한 인장 균열 등으로 침투하여 흙을 포화시켜 간극수압을 증가시킨다.

2) 표토층과 상대적으로 불투성인 기반암

토층의 두께가 얇아 유전망의 집중으로 인한 국부적인 간극수압의 증가가 발생 될 수 있다. 주로 봉적층이 관입된 지반이 함몰되거나 또는 흐름방향을 가로지르는 투수성이 낮은 지반이 용기된 사면의 하부에 발생한다.

3) 지표면과 거의 평행한 지하수위면

파쇄가 심한 기반암의 균열을 통해 물이 침투되는 경우다. 유수는 지표면과 평행하게 이동하게 되며 이것이 토석류 유발의 주원인이 된다.

2.2 토석류의 특징

토석류의 구성물질은 모래, 실트 및 점토 등의 세립물질과 암편들의 혼합체이다. 토석류가 발생시 호우 등에 의해 많은 물을 함유하며 빠른 속도로 사면 아래로 흘러 내려가면서 기반암을 얇게 파복한 주변의 고결되지 않은 흙과 암편을 붕괴시킨다. 우수가 한 곳으로 집중하여 흐르는 경우 침식에 의한 토석류가 발생한다. 침식의 종류는 세류침식(Rill Erosion)과 구곡침식(Gully Erosion)이 있다. 세류침식은 사면정상으로부터 한계거리만큼 떨어진 곳에서 지표

면 흐름이 수로화(channelled)되는 현상을 말한다. 지표흐름이 세류를 형성하여 분산되기 시작하면 주 흐름 이외에도 횡적인 이차수로가 형성되며 이러한 수로들의 합류지점에서는 유량이 커지면서 토립자의 이송능력을 증가시키게 된다. 구곡침식은 비교적 급경사 측면의 수로로 우기에만 물이 흐르는 특성이 있으며 구곡의 주 형성원인은 기후나 토지사용 용도변경에 따른 유출의 과다에 기인한다. 또한 구곡은 안정하천에 비해 수로 폭이 좁고 수심이 깊고 수리적 특성의 편차가 심하여 침식이 빨리 진행되어 주변 지형이 불안정하다.

토석류의 구성물질은 주로 조립질의 유기 및 무기물질로 구성되며, 입자의 크기는 세립질부터 암괴크기의 입자까지 다양하다. 구성물질의 차이는 주로 지역적인 지질학적 구성과 식생의 상태에 따라 좌우되는 것으로 알려져 있다.(Lister et al., 1984)

3. 일본의 토석류 피해 사례

일본은 국토의 70%가 산지이며 산지에 발달한 하천은 유럽, 중국 등의 대륙에 있는 하천에 비해 짧고 급하게 형성되어 있다. 또한, 산지 지층은 강우나 바람에 풍화하기 쉬운 연약한 지반이다. 세계 평균 약 2.5배의 눈이나 비가 내리는 일본은 장마나 태풍 등에 의해 큰비가 내리면 붕괴되기 쉬운 산지 지층조건에 의해 토사재해가 빈번하게 발생한다.



그림 3. 강우에 의한 토석류 피해 사례
(2006. 07. 19 나가노현 오키야시)



그림 4. 지진에 의한 피해 사례
(2004년 10월 니이가타현 중월 지진)

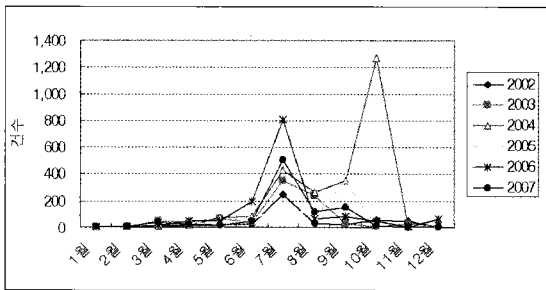


그림 5. 일본의 최근 6년간 월별 토사재해 발생건수

토석류의 대부분은 강우와 지진에 의해 발생한다. 그림 3은 강우에 의한 피해 사례로 강우량은 700mm 이상으로 관측되었다. 그림 4는 지진에 의한 피해 사례로 지진강도 6.8에 의한 피해 사례이다.

일본 국토교통성 사방부 홈페이지 자료에 의하면 매년 500건~2,000건 이상의 토사재해가 발생하였으며 대부분 7월에 발생하였다. 특이한 것은 2004년 10월은 다른 해와 달리 엄청난 재해가 발생하였다. 이는 니이가타현에 지진

규모 6.8의 중월 지진이 발생하였기 때문이다. 최근 6년간 일본의 토사재해 자료는 아래와 같다.

4. 일본의 토석류 사방 대책 사례

4.1 후지천 토석류 방지 시스템

1) 사방대책 배경

후지천의 수원은 Mt. Shichimen 정상부(△3,192m)를 시작해 해발 약 2,000m 이상의 높은 지역이다. 또한, 산의 경사는 급경사를 형성하고 있어 강우 발생시 수원이 급경사로 빠르게 유하하기 때문에 하천의 침식, 운반 작용이 현저하게 크고 유역 중앙부를 종단하고 있는 대단층과 여기서 파생된 소규모 단층군 및 파쇄대가 수없이 분포한다. 이러한 지형 및 지질 조건으로 인해 여러 차례 산사태가 발생하여 많은 소중한 인명이나 가옥을 잃게 되어 이에 대한 사

표 1. 일본 최근 6년간 토사재해 발생건수(일본 국토교통성 사방부 홈페이지 자료)

년	월	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	합계
2002		9	6	21	19	25	28	246	37	26	63	52	7	539
2003		4	10	49	46	65	43	349	237	34	7	32	21	897
2004		2	6	10	19	77	87	430	269	353	1,273	3	8	2,537
2005		9	7	28	47	24	63	173	89	355	8	3	8	814
2006		11	11	21	53	48	198	811	66	86	53	10	73	1,441
2007		5	11	43	22	13	52	507	120	154	20	8	11	966
평균		6.7	8.5	28.7	34.3	42.0	78.5	419.3	136.3	168.0	237.3	18.0	21.3	1,199.0

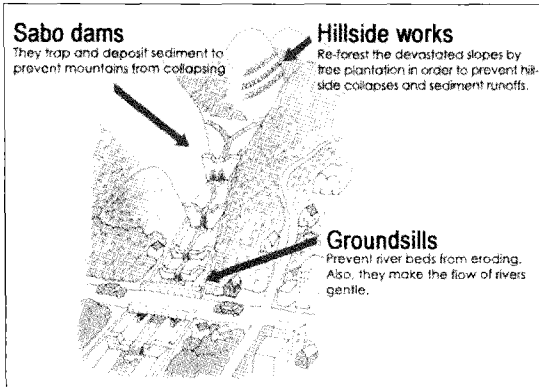


그림 6. 재해 방지 시스템 개요도

방대책을 수립하였다.

2) 토석류 방지 기본 대책

산사태 및 토석류로부터 안전하기 위해 유역 상류에서부터 사방시설 정비작업을 계획하였으며, 토사 재해를 막기 위해서 크게 사방댐 건설, 붕괴된 사면에 나무를 심는 식재 공사, 하상 침식 방지 공사 등의 사방 사업을 시행하여 하천 하류의 민가 및 농경지의 안전을 확보하고 있다.

3) 사방댐 계획

후지천 유역의 사방댐은 하천 관련 기관과 상호 협력을 취하여 상류부터 하구까지의 유역 전체에서의 토사의 유출량, 유역경계 지역 지반의 물리적 특성 등의 전반적인 조사를 실시한 후 적절한 위치에 Open type 사방댐(강제 파이프 틀 댐), 돌 사방댐, 조석 콘크리트 댐 등의 친환경 자재를 이용하여 자연과의 조화를 이루게 하였다. 조석 콘크리트 댐은 공사 주변 자갈 등의 조골재와 콘크리트 옹벽을 조합한 공법이다. 환경과 생태계를 보존할 수 있는 사방댐을 건설하지만 설치 수량을 최소화하였다.

4) 감시 및 관측 계획

일본의 각 지자체는 「토사재해방지법」에 근거하여 급경사지 붕괴나 암반 붕괴, 도로의 이면 붕괴 등의 이른바 토사 재해의 방지를 위해 한층 감시 강화나 토사 재해방지 대책을 세우고 있다. 이는 토사 재해 발생시 인명 손실 등의 중대한 피해를 사전에 방지하기 위한 대책으로서 토석류 등을 감시하는 카메라와 강수량 정보를 안내해 주는 시스템 등을 설치하여 운영하고 있다.



그림 7. 강제 파이프 틀 댐

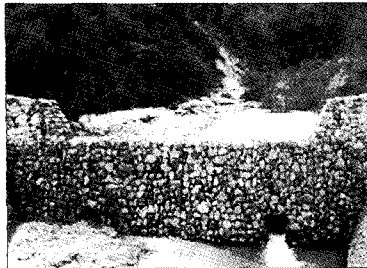


그림 8. 돌 사방 댐

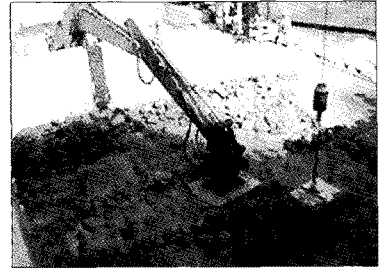


그림 9. 조석 콘크리트 댐

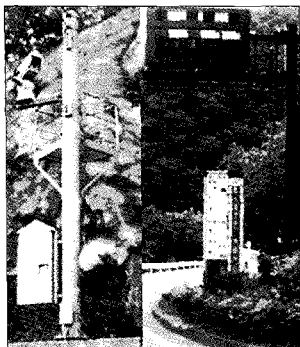


그림 10. CCTV·강수량 정보 표시판



그림 11. 지반 신축계 설치

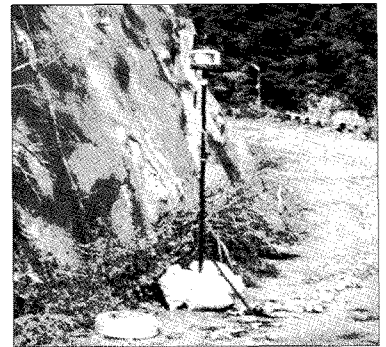


그림 12. 경고등 설치

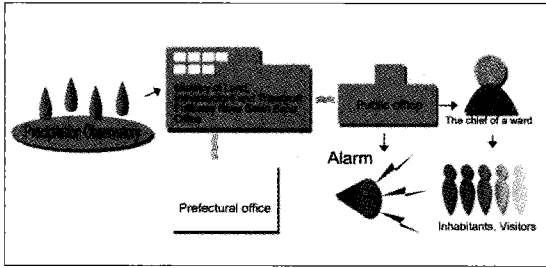


그림 13. 종합 토석류 방지 대책 시스템

5) 하류부 하천 정비 공사

토석류 재해는 하류의 민가, 가축, 농경지 등의 피해 및 인명 손실까지 발생할 수 있으므로 하류 하상을 정비하여 토석류 재해를 최소화 하였다. 상류 사방댐에서 토사와 유목이 걸러지고도 물은 계속 내려오기 때문에 하천에 손상을 줄 우려가 있다. 따라서 바다가 폐이거나 제방이 허물어지는 것을 방지하기 위한 하천 정비 사업을 수립하고 있다.

6) 종합 토석류 방지 대책 시스템

강수량, 산사태 붕괴 조짐 등의 토석류 발생을 예측하고 각 자치체가 신속한 경보 발령으로 빠르게 피난할 수 있도록 「종합 토사 재해 대책」을 추진하고 있다. 일본에서는 집중호우시 텔레비전에서 일기예보 때 산사태 예보를 한다고 한다.

4.2 녹시마카와 토석류 방지 사례

1) 토석류 방지 계획

유역의 하상 경사는 완만하고 꾸불꾸불하다. 하안 침식이나 토사 퇴적이 현저히 많으며 태풍 등의 집중호우시 토사의 유출·공급을 반복해 하류의 민가에 피해를 주고 있어 이를 방지하기 위한 대책이 필요하게 되었다. 대책 방법은 이 지역의 넓은 하상을 이용하고 계곡 배후지에 사방림 조성 등을 실시하여 사방댐 건설을 최소화 하는 방지 대책을 추진하였다. 사업을 추진함에 있어서 지역 주민과 전문 기술자가 협의회를 구성해 지형 및 하천 특성 등을 고려한 친환경적이고 합리적인 방재계획을 하였다.

2) 사방댐 계획

계곡 상류부와 하류부에 토석류를 억제하거나 조절할 수 있는 사방댐을 설치하였고 일부 지역은 조림(造林)을 실시하였다. 사방댐은 하상구배가 큰 계곡에서 급류로 인한 종·횡 침식으로 계곡부에 발생하는 돌, 자갈, 모래, 흙 등과 같은 침식 및 붕괴물질을 억제하기 위해 설치하였다.

4.3 Dorodani 사방댐

1930년 대규모 토석류 붕괴 발생 후 재발을 방지하기 위해 1938년 까지 8년에 걸쳐 산복공사(hillside work)와 더

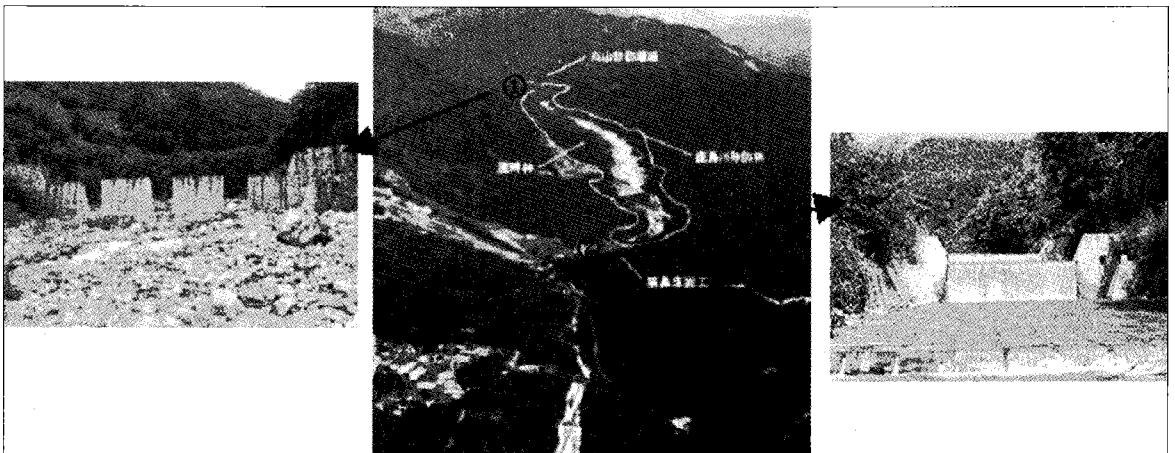
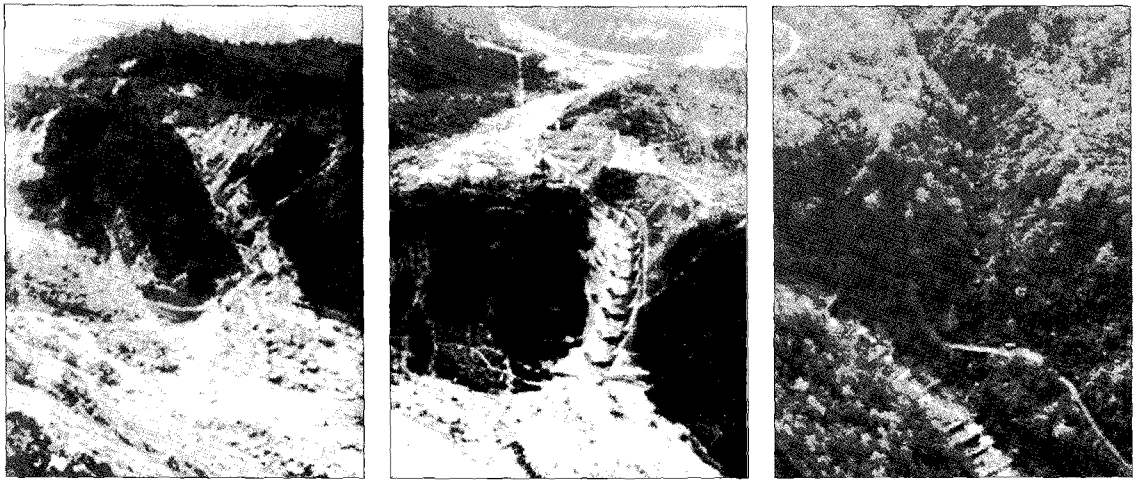


그림 14. 녹시마카와 사방림 정비 사업계획



(a) 1930년 붕괴시

(b) 1938년 계단형 사방댐 시공후

(c) 2006년 현재

그림 15. Dorodani 사방댐 건설로 인한 붕괴된 산지 복원 사례



그림 16. Shiraiwa 사방댐

불어 계단형 사방댐(stepped concrete dams)을 시공한 후 2006년 현재 복원된 과정을 보여주고 있다.

4.4 Shiraiwa 사방댐

산지부 상류에서부터 흐른 퇴적물을 방지하기 위해 1931년~1939년 동안에 걸쳐 완성된 사방댐으로 높이가 63.0m로 일본에서도 대규모이다. 일본 대부분의 산지는 급경사지역으로 토사층이 두껍게 분포하고 비, 바람 등에 쉽게 붕괴되는 지질조건을 가진다. 이 지역은 소규모 체크 댐을 여러 개 설치하여 방류량을 줄임으로써 침식을 방지하고 하류지역의 피해를 방지하였다.

5. 각국의 산사태 관련 법규

5.1 일본

일본은 산사태 방지법, 급경사지 붕괴로 인한 재해방지법, 토사재해 방지대책 추진법 등을 구분하여 제도화하고 있다. 「급경사지 붕괴로 인한 재해방지법」을 '69. 7. 1제정하여 93년과 99년에 개정하였으며, 경사도가 30도 이상인 토지를 급경사지로 정의하여 급경사지 붕괴위험지역의 지정, 붕괴위험 지역 내에서의 강수, 지형 및 지질 등의 조사, 표지의 설치, 행위의 제한 등의 위험지역 관리 등에 관한 규정을 정하고 있다.

5.2 미국 Oregon 주 규정(ORS 195.260)

본 규정은 산사태 등 급경사지 붕괴로 야기되는 인명피해를 저감하기 위한 주 정부, 토지소유주 및 관련기관의 의무사항을 명기하고 있다. 주 정부는 건축허가 전 재난담당부서(주 지질조사국 또는 산림국)의 보고서를 제출받아 급경사지 피해발생이 예상되는 지역에 거주용도의 건물 건축시 제한조치를 한다.

5.3 홍콩

홍콩은 좁은 국토에서 대규모 건축공사를 많이 추진하는 관계로 건축법(Building Ordinance)의 규정으로 사면에 대한 관리를 행하고 있다. 동 규정은 지역 개발이 계획된 곳의 건축 공사시 건축법 및 규정 하에 지반사항에 관련된 제지를 가할 수 있도록 되어 있고, 모든 지반규정사항은 공인된 지반공학자(RGE, Registered Geotechnical Engineer)에 의해 감독하고 있다.

5.4 국내 기준

국내는 「자연재해 대책법」과 2008년 3월에 입법 공고된 「급경사지 재해예방에 관한 법률」등이 최근에 마련되었다. 주요 내용은 다음과 같다.

- 급경사지를 관리하고 있는 지방자치단체, 지방산림청, 정부투자기관 등의 관리주체와 시·군·구 재난안전대책본부장은 급경사지에 대한 안전점검을 연 1회 이상 의무적으로 실시하도록 한다.
- 안전점검 결과 붕괴위험이 있는 급경사지는 재해위험도평가와 주민의견 수렴 절차를 거쳐 붕괴위험지역으로 지정한 다음 계측관리를 통하여 급경사지의 붕괴위험성을 사전에 인지하고 주민대피를 신속히 실시함으로써 인명피해를 사전 예방할 수 있도록 하였다.
- 또한, 근원적인 재해위험요인 해소를 위하여 체계적으로 정비사업을 추진하도록 하고, 지방자치단체에 사업비의 일부를 국고로 지원할 수 있도록 하였다.
- 소방방재청은 현재 관리주체별로 산발적으로 관리되고 있는 급경사지와 각종 토질조사자료 등에 대한 데이터베이스를 구축하여 급경사지 유지관리에 활용토록 하였다.

6. 결론

국내의 토석류 붕괴 사례를 보면 대부분 강원도 일부지역에 편중되어 있다. 이는 상기 일본의 사례와 같이 토석류

발생이 가능한 조건 즉, 집중 호우시 지형 및 지질이 취약하기 때문에 판단된다. 일본의 토석류 피해는 주로 강우와 지진에 의해 발생하였다. 국내에서의 토석류 피해는 주로 강우에 의해 발생하였으나 일본의 경우와 같이 지진 발생 시에도 큰 피해가 발생하므로 지진에 대한 토석류 방지 대책에 대한 연구도 향후 필요할 것으로 판단된다.

일본의 토석류 방지대책은 환경성을 고려하여 사방댐 건설을 최소화 하고 사방림 조성 등으로 자연과의 조화를 강조하고 있다. 또한, 토석류 감시 및 관측시스템이 개발되어 운영되고 있어 토석류 피해를 최소화하고 있다.

토석류 방지 대책은 지역별로 유역, 지형, 지질, 계곡부 길이, 강우량 및 토석류 퇴적상황 등의 상세 조사를 바탕으로 다년간의 수립대책이 요구된다. 또한, 토석류 붕괴가 발생한 지역은 또 다시 재해가 발생할 확률이 높기 때문에 확실한 복원방법과 유지관리가 필요하다. 산사태 및 토석류 방지 대책에 대한 꾸준한 노력과 전문 인력에 의한 체계적인 관리로 우리의 소중한 인명과 재산을 보호해야 할 것이다.

참고 문헌

1. 한국지반공학회(2007) "지반재해와 저감기술"
2. 김진홍, 양승진(1996), "산지하천의 토사유출량 산정과 사방댐의 규모결정", 대한토목학회지
3. "급경사지 재해예방에 관한 법률(2008. 03.21)"
4. 김원영(2001), "토석류 산사태 발생원인과 예측" 방재연구 제 3권 제4호
5. 행정자치부, 국립방재연구소(2004) "토석류 발생작용 및 피해저감에 관한 연구"
6. <http://www.ktr.mlit.go.jp/fujikawa/index.html>
7. <http://www.sabo.or.jp/index.htm>
8. <http://www.mlit.go.jp/river/sabo/sinpoupdf/gaiyou-06.pdf>