



전 근우
강원대학교 교수
kwchun@kangwon.ac.kr

지진에 의한 산지재해와 그 대책

1. 서론

지난해 9월 12일 경상북도 경주시 남남서 방향 8km 지역에서 규모 5.8의 지진이 발생한 이후, 지금까지 569회의 여진으로 약 60여건의 문화재(국가지정 36건, 시도지정 24건)가 피해를 입는 등, 전례가 없는 다양한 피해가 발생하였다. 즉, 이번 경주지진을 계기로 우리나라도 지진으로부터 안전 지대가 아니라는 것이 확인되었고, 특히 지진지역을 중심으로 발생한 지금까지 경험하지 못했던 다양한 피해형태와 함께 앞으로 더 큰 규모의 지진이 발생할 수 있다는 보도로 전 국민의 불안을 가중시켰다.

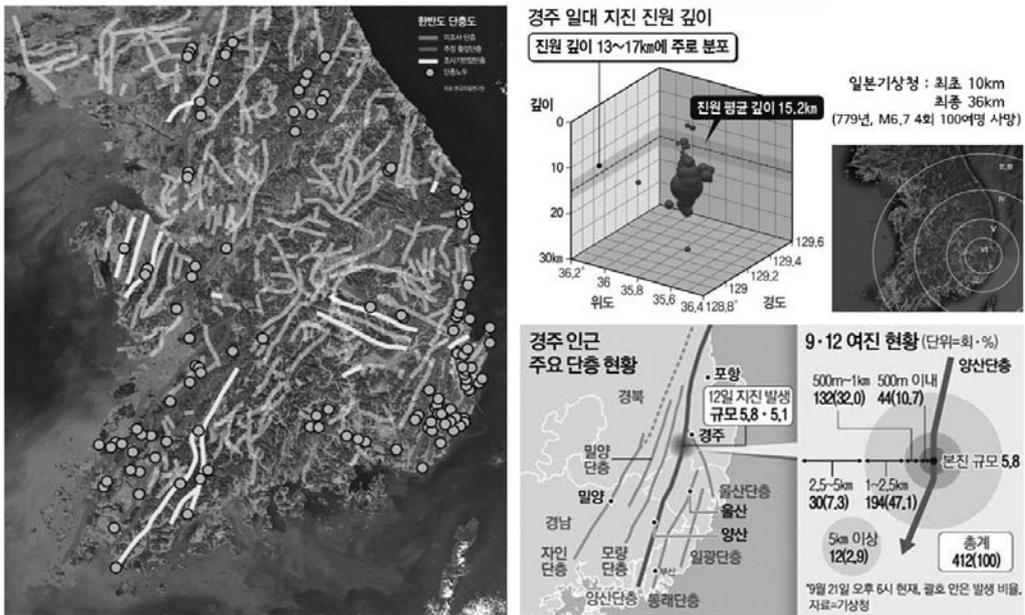


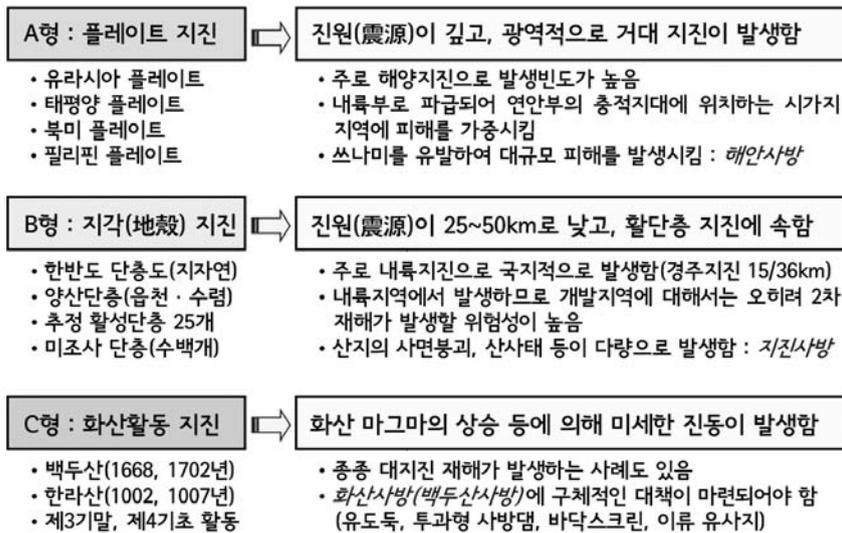
그림 1. 우리나라의 활성단층과 2016년 9월 12일에 발생한 경주지진

특히, 지진발생에 의하여 지반이 연약해 진 구역에 집중호우가 발생하였을 경우, 지중 침투수에 의한 산사태, 사면붕괴, 그리고 이에 따른 토석류 피해가 예상된다. 따라서 우리나라에서도 지진에 의하여 산지에서 발생할 수 있는 각종 산지토사재해의 특성을 미리 파악하고, 그 재해특성별 대책을 마련하는 지진사방(地震砂防)을 적극적으로 검토하여야 할 것이다.

2. 지진과 사방

우리나라에서 발생할 수 있는 지진에 의한 주요 재해로는 플레이트 지진에 의한 피해, 지각 지진에 의한 피해 및 화산활동에 의한 피해로 구분할 수 있으며, 각 형태별로 구체적인 사방대책이 마련되어야 하지만 실상은 그렇지 못하다.

플레이트에 의한 지진은 주로 해양지진으로 쓰나미를 유발하여 대규모 피해를 발생시키는 것으로, 진원이 깊고 광범위하게 거대 지진이 발생하며, 해안사방(海岸砂防)이 이에 해당한다. 또한, 지각활동에 의한 지진은 주로 내륙지진으로 산지의 사면붕괴와 산사태 등이 다량으로 발생하는 것으로, 진원이 25~50km로 낮고 횡단층 지진에 속하며, 지진사방(地震砂防)이 이에 해당한다(Yeats 등, 1997; (社)日本治山治水協會, 1998; 中村 등, 2000). 그리고 화산활동에 의한 지진은 화산 마그마의 상승 등에 의하여 미세한 진동이 발생하는 것으로, 화산사방(火山砂防)이 이에 속하며, 백두산 지역이 이에 해당한다.



지진의 유형분류 및 주요 재해특성

그림 2. 지진의 유형분류 및 사방사업의 대상이 되는 주요 재해특성

3. 지진지역의 산지토사재해 및 사방시설 피해 특성

1) 지진지역의 산지토사재해 특성

지진이 발생하면 산체(山體)에 관성력이 부가되고 지하수와 간극수압이 상승하여 균열·낙석, 사면붕괴, 산사태, 토석류 등이 발생하게 되며, 진도에 따라 다양한 산지토사재해 형태가 나타난다. 즉, 일반적으로 진도 5인 경우에는 소규모 균열이나 액상화가 생길 수 있고, 이로 인하여 낙석이나 소규모 붕괴가 발생할 수 있다. 또한, 진도 6의 경우에는 균열이 생길 수 있어 소규모 붕괴나 산사태가 발생하며, 진도 7인 경우에는 대규모 균열이 생길 수 있어 붕괴가 빈번히 발생하고 대규모 산사태나 산체의 붕괴가 발생한다.

한편, 소규모 균열은 균열과 같은 현상이지만, 여기서는 규모가 작은 균열을 의미한다. 또한, 지하수위가 높은 연약한 사력 지반에서는 액상화가 발생할 수 있고, 액상화가 진행되면 지면으로부터 오수가 분출하거나 지반침하가 발생하여 제방이나 기슭막이의 붕괴, 하수관이나 맨홀의 부상이 나타나기도 하며, 건물의 토대가 기울거나 붕괴되는 등의 피해가 발생할 수 있다. 그리고 대규모 산사태나 산체의 붕괴 등이 발생할 경우, 지형 등에 따라서는 천연담이 형성될 수 있고, 다량의 붕괴토사가 토석류화 할 수도 있다.

지반·사면 등의 상황(氣象廳, 2009)

진도	지반의 상황	사면 등의 상황
5약	소규모 균열이나 액상화가 생길 수 있음	낙석이나 소규모 붕괴가 발생할 수 있음
5강		
6약	균열이 생길 수 있음	소규모 붕괴나 산사태가 발생할 수 있음
6강		
7	대규모 균열이 생길 수 있음	붕괴가 다발하고, 대규모 산사태나 산체의 붕괴가 발생할 수 있음



그림 3. 일본 기상청에서 발표한 진도별 지반·사면 등의 상황

일본에서는 1995년 효고(兵庫)현에서 발생한 남부지진에 의한 산지피해 상황을 파악하기 위하여 지진 직후에 인가 주변 및 산록부를 중점적으로 피해조사를 실시하였다. 그 결과, 피해의 특징으로 ① 척박한 능선부를 중심으로 지진동의 진폭에 동반된 산복붕괴와 낙석이 다량으로 발생하였고, ② 붕괴토사는 안식각으로 유지하면서 입경이 클수록 하부에 퇴적하였으며, ③ 낙석이 땅속에서 분출된 듯이 발생하였다.

그리고 2016년도에 발생한 구마모토(熊本) 지진에 의한 토사재해는 다양한 토사이동 현상이 나타난 것이 특징이었다. 즉, 지금까지의 지진에 의한 토사재해는 대규모 사면붕괴가 특징이었지만, 이번에는 급경사지를 중심으로 한 심층붕괴뿐만 아니라 자연사면 및 인공사면에서 소규모의 붕괴가 다수 발생하는 등, 환경사 사면에서도 사면붕괴나 산사태가 발생하였으며, 붕괴된 토사가 토석류화하여 하류까지 유출되어 피해를 가중시켰다.



그림 4. 2016년 구마모토(熊本) 지진에 의한 다양한 토사재해 발생 상황

2) 지진지역의 사방시설 피해 특성

1995년 일본 효고현에서 발생한 남부지진 피해 후 건설성(현 국토교통성)과 효고현이 중심이 되어 롯코(六甲)산계 및 아와지(淡路) 북부에 분포하는 사방댐 및 골막이 734기와 기슭막이 약 175km의 사방시설을 점검하였다.

피해내역은 다음과 같은 기준에 따라 진행하였다. 즉, ① 파괴는 균열부에서 5cm 이상의 비틀림이 발생하거나 혹은 10cm 이상의 간극이 발생한 경우 및 원형이 유지되지 못하는 변형, 돌쌓기에서는 석재의 대규모 탈락 혹은 돌출된 경우, ② 박리는 콘크리트 및 돌쌓기 표면이 부분적으로 벗겨진 경우, ③ 신규 균열은 균열부에서 5cm 미만의 비틀림이 발생하거나 혹은 10cm 미만의 틈이 발생한 경우, ④ 균열 확대는 지진 발생 이전부터 존재하였던 균열이 확대된 것으로, 크기는 5cm 미만의 비틀림이 발생하였거나 혹은 10cm 미만의 틈이 발생한 경우 등이다.

한편, 사방시설의 피해도 면에서 ① 기능을 상실한 경우는 개축, ② 구조상의 안전도가 저하되면

보강·개축, ③ 외관적 손상이 있을 경우는 보수, 그리고 ④ 외관상 무피해 시에는 대책 불필요 등으로 판정하였다. 그리고 피해조사 시 동일 시설에 복수의 피해가 발생한 경우는 피해정도가 심한 쪽으로 계산한 결과, 사방댐 및 골막이 734기 중 약 1.5%, 기슭막이 175km 중 0.7% 정도만 피해를 입은 것으로 나타났다. 특히 내진설계를 한 댐의 높이가 15m 이상인 경우 제체 바깥쪽에 실시한 사이채우기 콘크리트의 수평줄눈에서 비틀림이 발생한 사방댐이 1기가 조사되었고, 댐의 높이가 15m 이하인 사방댐 역시 파괴 및 박리가 각각 1기로, 건설 연대가 불분명한 메쌓기 및 찰쌓기 사방댐에서 발견되었을 뿐, 전체적으로 사방시설의 손상은 미미한 것으로 나타났다.

표 1. 효고현 남부지진에 의하여 피해가 발생한 사방시설

공종	피해내역				
	파괴	박리	신규 균열	균열 확대	계
사방댐 (H<15m)	1* ¹⁾	1* ²⁾	5	3	10
사방댐 (H≥15m)	-	-	1* ³⁾	-	1
앞댐	0	0	1	0	1
골막이	4	3	1	1	9
기슭막이	16	0	6	4	26
계	21	4	14	8	47

주 : 조사 사방시설 : 사방댐(골막이) 734기, 기슭막이 175km→각각 1.5%, 0.7% 동일 시설에 복수의 피해가 발생한 경우는 피해정도가 심한 쪽으로 계산하였음 (H는 사방댐의 높이를 나타냄)

*1) 건설 연대가 불분명한 메쌓기 사방댐

*2) 건설 연대가 불분명한 찰쌓기 사방댐

*3) 제체 바깥쪽에 실시한 사이채우기 콘크리트의 수평줄눈에서 발행한 비틀림

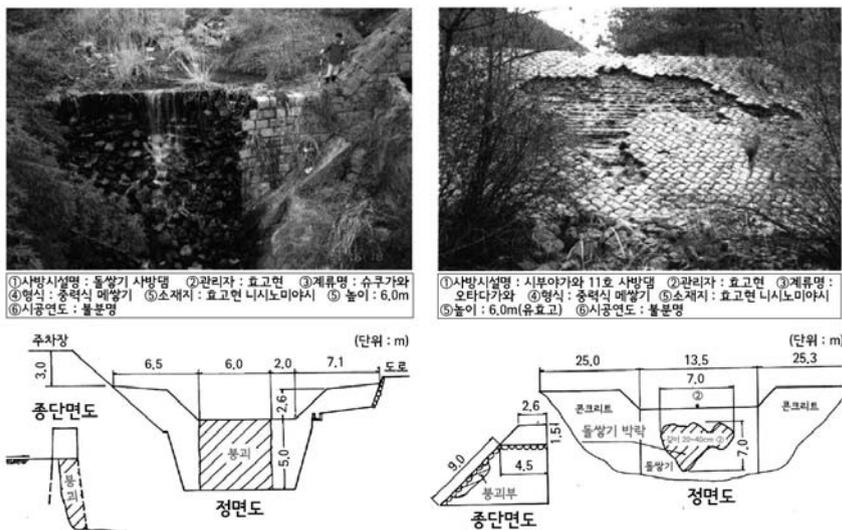


그림 5. 효고현 남부지진 시 피해가 발생한 사방댐 조사표

4. 지진지역의 사방대책

일본의 과거 사례에 의하면, 지진에 의한 토사재해는 전술한 바와 같이 진도 5강부터 발생하지만, 지진의 진원이나 지진의 진도를 사전에 예측하기는 매우 어려운 실정이다. 따라서 지진에 동반되는 토사재해에 대한 대책은 평상시에 이를 예상하여 대응책을 마련하여야 한다.

1) 산지토사재해 위험도 예측

우선 통상적인 산지토사재해 해석방법을 지진지역에 적용할 때의 문제점을 파악한 후, 지진의 사전대책과 사후대책으로 구분하여 실시하여야 한다.

지진의 사전대책은 지진의 규모(진도와 매그니튜드)와 범위(장소)를 상정한 후, 산지토사재해의 발생을 예측(발생형태·규모, 피해 : 사면붕괴·토사유출 위험도 예측, 시설의 내진점검)하여 지진의 사전대책(구조물대책 : 사면붕괴 방지공사·산사태 방지공사·토석류 대책공사·기존 시설의 개축 및 보강, 비구조물대책 : 주민의 방재의식 향상·경계피난체제의 정비·토지이용 규제)을 수립하여야 한다.

지진의 사후대책은 제1단계로 지진이 발생하면 우선 지진의 관측정보(진도와 가속도 분포)를 수집한 후, 긴급조사(대규모 사면이동, 시설피해 개요 파악)를 실시하여 대규모 2차 피해의 발생 여부를 파악하여 긴급조치를 실시한다. 또한, 제2단계에서는 응급조사(사면의 이동 및 시설피해에 대한 전체적인 상황 파악)를 실시한 후, 2차 피해의 위험성 여부를 판단하여 응급대책(복구)을 수립한다. 그

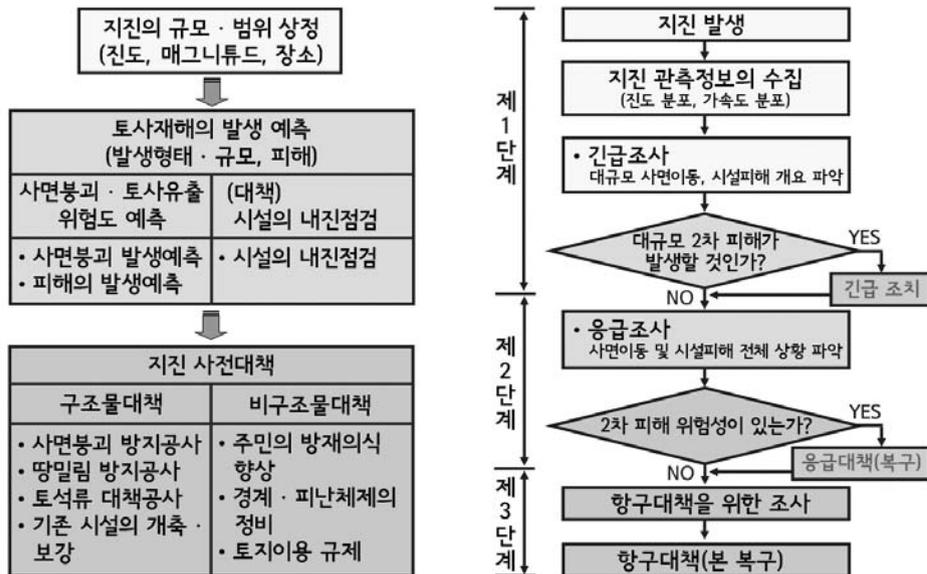


그림 6. 산지토사재해에 관한 지진 사전대책(좌) 및 사후대책(우)의 흐름도

리고 제3단계에서는 항구대책을 위한 조사를 실시한 후, 항구대책인 본 사업을 실시한다.

2) 유역관리를 위한 토사수지도 작성

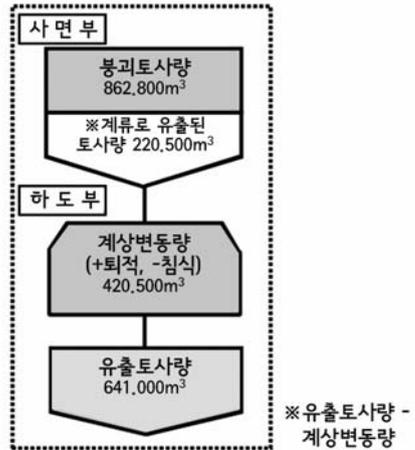
사방계획을 수립할 경우 대상으로 하는 지진지역의 계획기준점 혹은 보조기준점을 통과하는 토사량이 계획허용토사량과 같아지도록 토사처리계획을 책정하여야 한다. 즉, 계획생산토사량, 계획유출토사량 및 계획허용유출토사량을 추정하고, 이를 기초로 유역이나 하도구간별 유입토사량, 유출토사량 및 해당 구간의 퇴적·침식토사량을 계획기준점까지의 유역이나 하도구간에 따라 분할, 세분화하여 토사수지도로 나타내어야 한다.

여기서, 계획생산토사량이란 주로 산지사면이나 계류에 있어서 호우 등에 의하여 발생한 토사가 골짜기나 하도에 유출된 후, 강우나 유수의 작용에 의하여 운반 가능하게 된 상태, 즉 불안정한 토사생산량에 해당하는 계획강우 시에 생산되는 토사량이다. 또한, 계획유출토사량은 계획규모의 강우에 의하여 홍수 시에 있어서 사방댐의 상류에 일시적으로 저류된 후, 해당 홍수 후반 혹은 이후의 중·소규모의 홍수에 의하여 하류로 유하되는 토사량으로, 사방댐에 있어서 해당 홍수 이전에 형성되는 퇴사평면과 계획퇴사물대로 형성된 평면에 둘러싸인 양으로 계산된다. 그리고 계획허용유출토사량은 계획규모의 강우에 동반되는 홍수 시에 계획기준점까지 유하될지라도 계획기준점 하류에서는 재해가 발생하지 않는 토사량의 상한 값으로, 토사처리계획의 기준이 되는 토사량이다. 이는 계획기준점에 있어서 홍수 시의 토사유송능력 혹은 계상변동·수위를 적당한 방법으로 계산하여 홍수·토사범람 등의 재해가 발생하지 않는 유출토사량을 설정한다.

3) 지진사방의 효율적 실시 및 새로운 재해형태별 대응

지진지역의 산지토사재해를 경감시키기 위해서는 산사태, 토석류 및 유목에 대한 사방대책을 중점적·효율적으로 실시하여 사방 정비율을 향상시키고, 비구조물대책의 토대가 되는 토사재해경계구역의 지정을 확대하여야 한다. 또한, 지진에 의하여 예상되는 심층 산사태, 하도폐기 등과 같은 새로운 재해형태에 대한 대응(퇴적토사의 준설, 도류제 설치 등)이 구체적으로 이루어져야 한다. 특히 공중탐사(공중전기탐사, 공중자기탐사 및 공중γ선탐사 등) 결과를 해석하여 산사태위험도를 재검토하고, 이를 바탕으로 보전대상으로부터의 근접 정도, 지형 및 기존 시설의 정비 상황 등에 따라

기간 : 지진 직후~
2006년 10월



지진 직후로부터 2006년 10월까지의 토사수지도(田村 등, 2009)

그림 7. 지진 직후의 토사수지도 사례

긴급성이 높은 것부터 순차적으로 공사를 실시하도록 한다.

- 최근의 빈발하는 토사재해, 기존의 시설정비 상황 등을 고려해 볼 때, 크게 다음과 같은 3대 과제가 제기되고 있음

집중호우 · 지진에 의한 대규모 토사재해의 빈발

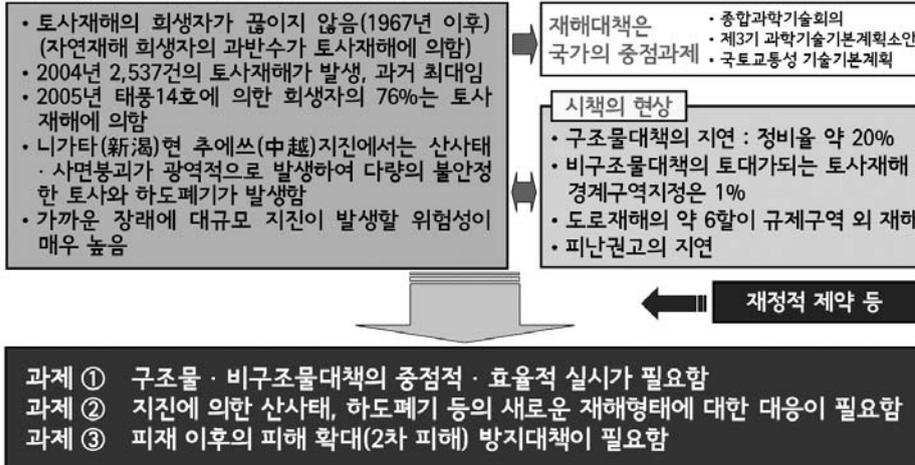


그림 8. 일본에서 제시된 지진지역의 토사재해 경감을 위한 주요 과제

지진지역에서 사방대책을 수립할 경우, 지진 피해를 입은 산지재해개소에 대한 위험도를 평가하여 사방사업의 우선순위를 결정하여야 한다. 즉, A순위는 토석이 직접 인가 등에 유출하여 2차 피해가 발생할 위험성이 높은 곳, B순위는 토석이 유출될 위험성을 높지만, 하류에 사방시설이 정비되는 등, 직접적으로는 인가 등에 영향을 미치지 않는 곳, C순위는 A, B 순위 이외의 장소 등으로 구분하여야 한다. 또한, 2차 재해를 방지하기 위해서는 산지재해조사를 실시하여 산지재해 위험도를 재검토하고, 산지재해위험개소의 주지와 연락망 체제 등의 정비, 정보제공 및 공표 등을 실시하여야 한다. 그리고 지진에 의한 재활동형 산사태 위험도를 예측(산사태 기구의 해명, 산사태 발생조건의 해명, 산사태 위험도 평가방법)하고, 지형, 지질구조 등의 소인과 지진에 의한 산사태 토괴의 강도변화 특성을 고려한 재활동형 산사태의 기구해명과 위험도를 예측하여야 한다.

4) 사방관련 정보 제공 및 피난대책

일본에서는 집중호우에 동반되는 토사재해의 위험구역을 지방자치단체의 사방관계기관에 의하여 「토사재해경계구역」등으로 지정하여 공표하고 있다. 일반적으로 지진에 의하여 발생하는 토사는 집중호우시에 발생하는 토사와 동일한 범위로 유하하기 때문에 토사재해경계구역 및 그 주변에 거주하고 있는 주민은 지진 시에는 토사재해에 대하여 주의하여야 한다. 그러나 토사재해가 반드시 토사재해경계구역 등이나 그 주변에서만 발생하지는 않기 때문에 토사재해의 전조현상에 항상 주의하여

야 한다. 즉, 토석류 등이 발생하면, 이상 징후(예를 들면, 이상한 소리, 냄새, 진동 등)가 나타나기 때문에 지진 시에 「평소와 다르다거나 이상하다」고 느껴지면 안전한 대피장소로 이동하여야 한다.

그리고 긴급지진속보가 공표되거나 진동이 심하게 감지되면 집 안의 안전한 장소(예를 들면, 2층 아니면 산쪽의 반대방향의 공간 등)로 이동하여야 한다. 특히 지진발생 시에는 안전한 대피장소로 이동하는 데 필요한 충분한 시간을 확보할 수 경우가 대부분이기 때문에 평소에 대피장소를 파악해 두어야 한다. 또한, 토사재해가 발생하면 토사에 매몰되어 질식사하는 경우가 발생하기 때문에 수건, 방석 등으로 입이나 코 주변에 공간을 확보하도록 한다.

5) 구체적인 지진사방 기술지침 수립

지진의 유형분류, 산지에서의 지진특성 및 지진에 의한 산지토사재해 등, 지진의 개요와 지진에 의한 산지토사재해의 특성과 산사태에 관여하는 여러 인자, 지진에 의한 산사태 분포의 특징 및 지진에 의한 산사태의 특징 등, 지진에 의한 산지토사재해의 발생기구를 해설하여야 한다. 특히 산지 재해분야에서 지금까지 사방대책의 주요 외력으로 간주하였던 정수압, 퇴사압, 부력 및 양압력, 토석류의 유체력, 사력과 유목의 충돌하중 이외에 지진 시의 관성력과 동수압을 설계하중으로 고려하여야 하므로, 이에 대한 판단 자료를 조속히 마련하여야 한다.

그리고 유역특성조사, 사방계획조사, 토석류대책계획조사, 유목대책계획조사, 기초지반조사 및 유

규슈지방 특히 구마모토현 주민께 드리는 긴급 공지(트위트나 HP을 활용하여 주시)

구마모토현을 비롯한 일련의 지진에 의하여 이전에 볼 수 없었던 지반 진동, 토사재해가 발생하기 쉬운 상태가 되었습니다. 토사재해로부터 생명을 지키기 위하여 강우 발생 시에는 토사재해에 주의하십시오.

[주의하여야 할 3가지 사항]

- 토사재해경계구역은 물론이고, 경사가 완만한 사면이나 계류에서도 적은 강우에 의해서 토사재해가 발생할 위험이 있습니다. 위험한 곳에 가지 않도록 주의하십시오.
- 호우주의보, 호우경보나 토사재해경계정보에 충분히 주의를 기울여 주십시오.
- 사전에 미리 피난대피소 등의 안전한 장소에 피난해 주십시오.

지진 후에는 토사재해에 주의

지진에 따라서는 지반이 연약해지기 때문에 토사경계구역 뿐만이 아니라 경사가 완만한 사면이나 계류에서도 적은 강우에 의하여 토사재해가 발생할 위험이 있습니다.

그림 9. 2016년 4월에 발생한 일본 구마모토지진 시 공표한 공지내용

지관리조사 등과 같은 지진지역에 있어서의 사방조사방법을 확립하여 지진발생 이후의 토사이동 현상과 토사재해에 대한 조사법을 제시하여야 한다. 즉, 진도, 피해정보수집, 협지답사, 항공사진을 이용한 조사, 기존 문헌조사, 사면변동조사, 수리·수문조사, 구조물 피해조사, 지질·토질조사, 실내실험(물리·역학실험)에 대한 주요 조사목적 및 내용, 각 단계별 이용도 등을 구체적으로 제시하여야 한다.

마지막으로 지진지역의 각종 사방시설 등을 정비하여 붕괴, 산사태 및 토석류 등에 의한 토사재해를 방지 또는 경감하기 위한 대책(토사발생원, 토사이동, 이동토사의 정지·퇴적 등) 등의 구조물 대책과 지진지역에 있어서 토사재해의 위험구역의 주지, 경계피난체제 정비, 주택 등의 토지이용규제, 이전촉진 이외에 경계·피난활동을 지원하기 위한 우량정보시스템 정비 등의 비구조물대책을 제시하여야 한다.

5. 결론

우리나라는 지진 경험이 별로 없을 뿐만이 아니라 지진지역은 일반산지에 비하여 산지토사재해의 발생주기가 길기 때문에 우선은 국내·외의 다양한 지진피해 사례 및 관련 자료를 확보하여 큰 틀에서의 대책을 마련하는 추적연구가 이루어져야 한다. 특히 최근 이상기후에 의한 강우패턴의 변화로 국지성 집중호우가 발생하고, 재해의 발생현상도 그와 유사한 형태를 나타내기 때문에 지진지역의 조사지역을 설정할 경우 그 지역에서 발생하는 재해가 주기적이지 않다는 점을 고려하여야 한다. 그리고 지진지역의 하류지역 보전대상물의 피해저감 방안을 마련하기 위해서는 지역성과 경제성을 고려하여 보전대상물 자체, 사방시설물을 구성하는 여러 요소 및 토사재해대책과의 연계방안을 강구하여야 할 것이다.

참고문헌

- 富田陽子·櫻井亘·中庸充. 1996. 六甲山系における地震後の降雨による崩壊地の擴大について. 新砂防, 48(6) : 15-21.
- (社)日本治山治水協會. 1998. 地震による山地災害とその對策. 新和印刷株式會社. 161pp.
- 中村浩之·土屋智·井上公夫·石川芳治. 2000. 地震砂防. 古今書院. 190pp.
- Federal Office for the Environment FOEN. 2016. 13th Congress Interpraevent 2016 -Conference Proceedings. 1013pp.
- Yeats R.S., Sieh K. and Allen C.R. 1997. The geology of earthquake. Oxford University Press. 568pp.