

사면재해의 발생원인과 대책

이영남 (현대건설기술연구소 연구위원)

심해식 (국방부 시설국 건설기술과)

류지협 (한려대학교 토목공학과 전임강사)

1. 머리말

세계 각국은 매년 기상이변으로 인한 자연재해로 많은 인명과 재산피해를 입고 있다. 특히, 우리나라는 대륙성 기후와 해양성 기후의 영향을 같이 받고 있으며 복잡한 산악지형으로 국지적인 기상 영향을 많이 받는 특성이 있다. 우리나라의 사면재해는 대부분 집중호우에 의하여 발생하는데 특히, 올해는 엘니뇨의 영향으로 국지적인 집중호우가 전국에 걸쳐 내려 강우시 자연사면이 갑자기 붕괴되는 산사태와 더불어 국토개발의 영향으로 형성된 절개사면과 축대에서 많은 붕괴사고를 겪은바 있다. 이러한 절개사면과 축대의 붕괴는 자연사면에서 발생하는 산사태에 비하여 인적, 물적 관점에서 훨씬 심각한 피해를 준다.

우리나라의 사면재해에 관한 연구는 1970년대 부터 임학분야에서 수행되어 왔으나 이후 절개지의 붕괴에 의한 인명피해가 증가함에 따라 지반공학분야에서도 많은 관심을 가지게 되었다. 일반적으로 사면재해로 인한 피해를 감소시키기 위해서는 우리나라의 강우, 지형, 지질과 같은 환경적 특성을 바탕으로 원인을 규명하고 사면재해 예상지역에 대한 위험성(risk)을 평가하여 적절한 안전대책을 세우는 연구가 수행되어야 한다. 우리나라에서는 산림청, 건설부, 국방부, 국립방재연구소 등에서 사면재해에 관한 연구를 수행하고 있다.

본 내용은 최근까지 현장조사와 모델실험, 현장계

측을 바탕으로 밝혀진 사면재해의 발생원인과 이를 바탕으로 제안된 예지기술 및 대책공법을 소개한다.

2. 사면재해의 발생 요인

우리나라에서 사면재해로 인한 인명과 재산의 피해는 자연사면보다 대부분 도심지의 절개사면에서 많이 발생한다. 이와 같은 사면재해는 도로, 주거단지 등을 위해 지형이 변경된 후 집중호우에 의하여 발생한다. 사면재해를 유발하는 요인은 매우 다양하며 이러한 요인들은 서로 관련이 있기 때문에 어느 하나의 요인으로 재해를 설명할 수는 없다.

강우는 사면재해의 발생에 가장 중요한 원인으로 알려져 있다. 우리나라는 기상학적으로 다우지역에 속하여 연평균 강우량은 1,200~1,400mm 정도이며, 강우는 매년, 지역마다 또는 계절적으로 다르게 발생하는 특성을 보인다. 최근 우리나라에서는 지역적인 집중호우가 내리는 경우가 많아 사면붕괴가 발생하고 있다. 연구자들은 강우와 사면재해 발생과의 통계적인 연구를 통하여 시우량 30mm이상, 일우량 140mm이상이면 사면재해가 발생할 확률이 매우 높은 것으로 평가한다. 그림 1.은 1987년 발생한 산사태의 분포와 3개월간의 누적강우량을 나타낸다. 여기서 누적강우량이 많을수록 산사태의 규모도 비례하여 커졌음을 알 수 있으며, 어느 한계강우 이상이 내리면 전국 어느 곳에서도 산사태가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

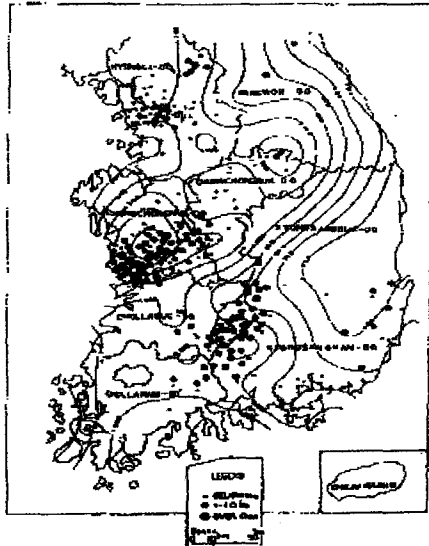


그림 1. 1987년 산사태의 분포와 3개월간의 누적강우량(건기원, 1989)

사면재해는 토사층과 암반층의 불연속면에서 많이 발생하는 특성을 보인다. 우리 나라를 형성하는 지질은 시생대로부터 중생대 시대의 암석으로 구성되어 풍화 깊이가 얇은 특징을 보이며, 자연사면에서 사면파괴는 마치 산껍질을 벗긴 것과 같은 형상을 보인다. 파괴가 발생하면 붕괴된 흩덩어리와 나무는 유출수와 함께 아래로 사면을 침식하면서 흘러 내리며 많은 피해를 입힌다. 즉, 자연사면에서 파괴는 상부의 평행활동(translational slide)으로 시작하여 유출수와 함께 토석류(debris flow)로 발전하는 특성을 보인다(그림 2).

지형은 강우시 유출수와 침투수의 집배수능력에 영향을 주기 때문에 사면재해의 발생에 깊은 관련을 갖고 있다. 즉, 사면재해는 하강사면에서, 그리고 사면의 경사가 30° 이상에서 많이 발생한다. 또한 최근의 국토개발, 즉 주택지나 산업지 조성, 광산개발, 수로의 변경, 도로나 철도건설 등에 의한 지반의 절토나 성토작업은 계속하여 증가하고 있다. 이러한 인간활동은 궁극적으로 자연지형을 변경시키며 사면을 불안정하게 하는 요인으로 작용할 수 있다.

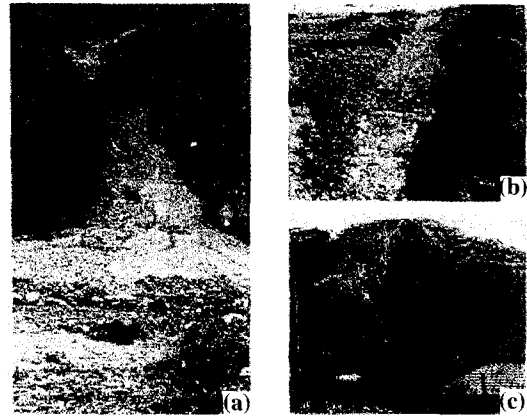


그림 2. 자연사면의 파괴형태(김, 1994)

- (a) 경기도 포천군 일동면 기산리
- (b) 강원도 화천군 화천읍 상2리
- (c) 강원도 화천군 상성면 도농리

3. 사면재해의 발생 기구(mechanism)

사면재해는 사면을 구성하는 흙과 암석의 풍화로 인한 강도감소, 강우시 침투로 인한 토괴중량 및 간극수압 증가, 사면선단부의 침식 등의 원인으로 발생한다. 우리 나라의 사면재해 지역을 현장답사해 보면 강우시 사면의 표토층을 형성하고 있는 얇은 풍화토층으로 침투된 물은 사면 지반을 포화시켜 활동력을 증가시키고 저항력을 감소시켜 파괴를 유발하는 것을 알 수 있다. 특히, 사면의 상단부의 인장균열과 사면내부에 존재하는 흠파이프(macropore)는 집중강우시 사면내 많은 침투를 가능하게 함으로서 큰 간극수압을 발생시켜 사면재해 촉진 요인으로 사료된다. 1991년 7월 집중호우로 사면재해가 발생한 용인군내 사면을 현장답사하여 균열이 사면에서 발견된 창리사면을 해석하였다. 이 지역은 표층이 약 40cm 두께이며 사면 상부 38° 부터 활동이 시작되었다(그림 3.). 해석 결과 균열이 물로 포화되지 않은 경우는 사면의 하단부에만 포화대가 일부 형성되지만 균열이 물로 포화된 경우는 사면 하부의 투수성이 큰 층부터 전 경사면에 걸쳐 높은 간극수압이 형성되어 사면재해 발생 위험이 커짐을 알 수 있었다.

자연사면에서 강우시 침투가 지표면 하부로 진행하

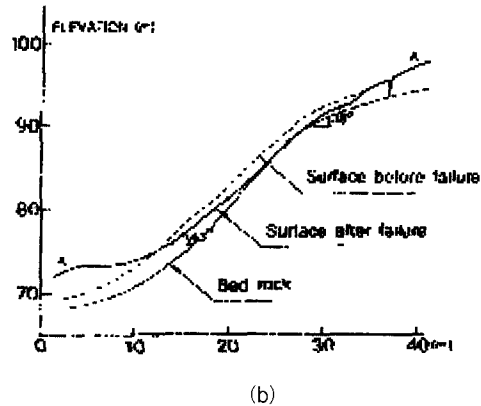
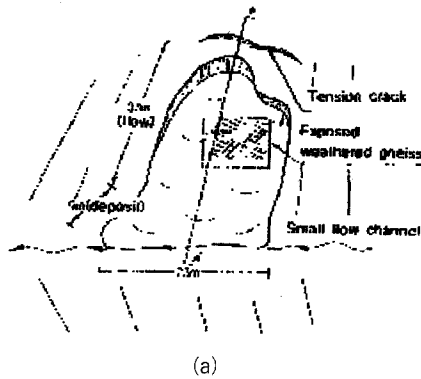


그림 3. 창리 사면 (a) 묘사도, (b) 단면도

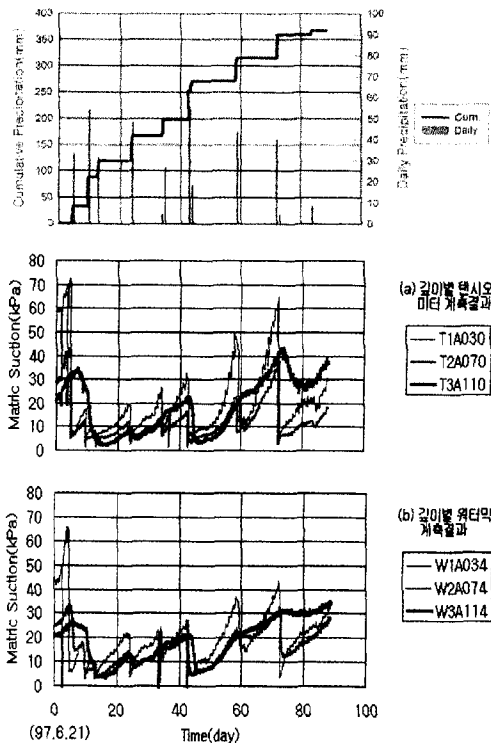


그림 4. 강우계측 결과 및 텐시오미터, 워터막 계측 결과

(a) A위치 깊이별 Suction 분포 (6월 25일 강우)

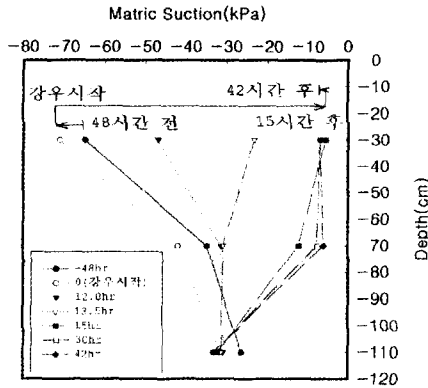
(b) A위치 깊이별 Suction 분포 (7월 15일 강우)

면서 포화도가 증가함에 따라 부간극수압이 감소하는

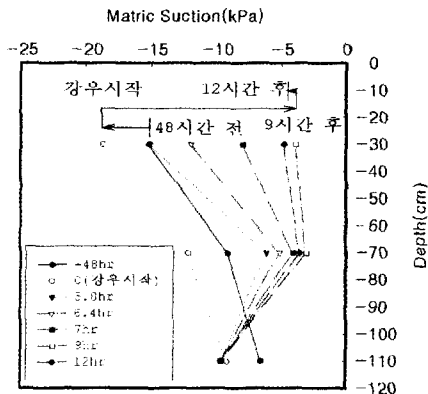
침투거동을 파악하기 위하여 자연사면에 부간극수압계, 정간극수압계등을 설치하여 계측하였는데 그림 4.는 97. 6. 21 부터 약 2달간 계측한 결과이다. 강우가 내리는 동안 부간극수압은 급격히 감소하였으며 강우가 그친 후 다음 강우까지는 증발로 인하여 부간극수압이 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 비교적 적은 강우량인 50mm 정도에서도 70cm 깊이까지 부간극수압이 5kPa까지 변화하지만, 30cm 깊이에서 그 이하로 작아지지 않는 것으로 보아 지표면 부근에서도 침투수로는 지반을 완전히 포화시킬수 없음을 알 수 있다. 그림 5.에서는 침투로 인한 침윤영역이 시간에 따라 변화하는 과정을 볼 수 있다. 침투속도는 초기함수비와 강우 형태에 영향을 받음을 알 수 있다. 현장 계측 결과로 부터 강우에 대한 침투속도가 동일 지역에서도 크게 다른 것은 수풀에 의한 차단효과, 지표면 상태, 흙의 비균질성, 지형 형상의 차이등이 복합적으로 작용하는 것을 확인할 수 있다.

4. 사면재해의 예지 기술

사면재해로 인한 피해를 경감하기 위하여 연구자들은 재해가 예상되는 지역을 선정하는 방법을 제안하였다. 이러한 재해 위험지역은 사면재해를 일으키는 주요인자와 재해 발생과의 관계를 이용한 재해의 예, 경보시 중점적으로 관리된다. 사면재해 가능지역의



(a) A위치 깊이별 Suction 분포(6월 25일 강우)



(b) A위치 깊이별 Suction 분포(7월 15일 강우)

그림 5. 강우시 깊이별 Matric Suction 분포

선정과 평가에는 재해에 영향을 미치는 지형학적, 지질학적, 기상학적, 지반공학적인 요소들이 모두 고려되어 대상지역의 특성에 맞는 적절한 기준이 제시되어야 한다. 재해 예상지역을 선정은 개인의 주관적인 판단에 따라 달라질 수도 있으며, 특히 대상지역이 넓고 대부분 경사가 급하고 접근하기 어려운 전 지역을 방문 선정하는 데에는 많은 제약 조건이 있다. 따라서 대상지역의 지형도를 이용하여 위험지역을 선정하는 지형학적인 방법은 매우 유용하다. 최근에는 데이터베이스 첨단기법인 GIS(지리정보체계)를 이용하여 사면재해에 영향을 미치는 요인을 대상으로 화상, 통계, 문자 및 수치와 같은 네가지 형태의 자료를 이용

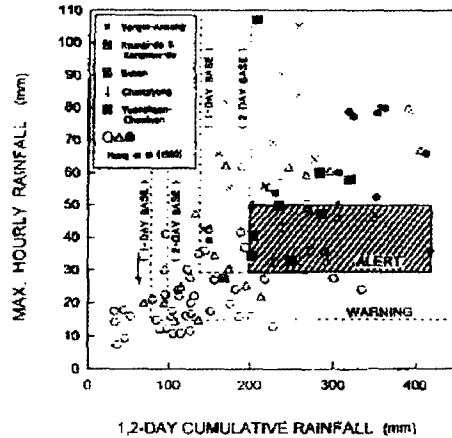


그림 6. 누적강우량, 일강우량, 최대시우량과 사면재해의 발생

하여 재해 위험지역을 미리 예측 관리하는 연구가 수행되고 있다. 이러한 시스템이 완성되면 향후 사면에 대한 획기적인 관리가 이루어질 것이다.

사면재해의 위험지역이 선정되면 그 지역에 대한 현장조사를 통하여 파괴 가능성을 평가한다. 우리나라에서는 산림청, 건설부, 국방부 등에서 사면재해의 안전도 평가표를 작성하여 사용하고 있으며 국립방재연구소에서는 사면의 안전도에 예상피해액을 고려한 재원의 투자우선순위 평가 방법을 연구하고 있다.

한편 우리 나라에서는 강우와 사면재해 발생의 상관성을 규명하여 예, 경보자료로 사용하여 왔다. 이는 사면재해가 지형, 지질, 기상 등 많은 원인들이 복합적으로 작용하여 발생하므로 과거 사면재해 발생의 자료를 해석하여 이 결과에 지형, 지질, 기상 등의 인자들을 포함시킬 수 있기 때문이다. 사면재해에 영향을 미치는 강우는 누적강우량, 일강우량, 최대시우량 등이다. 그림 6.은 홍 등이 과거 10년간의 자료를 해석하여 산사태 발생을 2일 최대누적강우량과 최대시우량으로 제한한 것이다. 여기에 김(1994)은 1990년 경기, 강원 산사태, 1991년의 용인, 안성 산사태등의 자료를 추가하여 표 1.과 같이 강우량에 의하여 사면재해의 발생을 예, 경보할 수 있는 기준값을 제안하였다.

표 1. 사면재해의 예, 경보를 위한 기준

	사면재해 주의보	사면재해 경보
2일 연속강우량(mm)	100	200
일강우량(mm)	80	140
최대시우량(mm)	15	30

5. 사면재해 대책공법

사면재해의 대책공법은 재해의 발생요인을 잘 파악하여 대상지역의 지질학적, 지형학적 및 지반공학적 특성에 따라 가장 효과적인 공법을 선택하여야 한다. 사면 보호공법은 현재 사면안전성은 확보되어 있으나 우수의 침투, 세굴 등에 의하여 사면안전율이 감소되는 것을 방지하기 위한 안전율유지법과 사면안정성이 확보되지 못할 것이 예상되는 사면에 안전율을 증가시켜주는 안전율증가법의 두 가지로 나눌 수 있다. 전자는 사면파괴를 발생시키는 직접요인으로부터 사면을 보호하는 소극적인 대책공법이라 할 수 있으며 후자는 사면파괴의 잠재적 취약성을 개선시키려는 적극적인 대책공법이라 할 수 있다.

사면이 안정한 상태라도 강우의 침식작용과 지표면의 풍화작용 등에 의하여 파괴가 발생할 수 있다. 이러한 자연적인 요인의 영향을 최소화 시키는 공법을 안전율유지법이라 한다. 안전율유지법은 물리역학적 방법과 생물화학적방법으로 구분하며 물리역학적방법으로는 수로공과 블록공이 있고 생물화학적방법으로는 피복공과 표층안정공이 있다.

사면의 안정도 평가표에 의하여 잠재적인 사면재해 지역으로 선정되면 이를 방지하기 위한 대책이 수립되어야 한다. 대책에는 사면의 활동력에 대해 저항력을 증가시키는 방법과 사면의 활동력을 감소시키는 방법이 있다. 저항력을 증가시키는 방법에는 말뚝, 옹벽 등을 사용하는 방법이 있으며 활동력을 감소시키는 방법은 사면상부의 흙을 제거시키는 배토공과 사면의 경사를 완만하게 하는 방법이 있다.

대책공법의 선정은 대상사면의 규모, 구배, 지형조건, 지질조건 및 주변여건 등에 대한 충분한 사전조사 결과를 토대로 이루어져야 한다. 일반적으로 대책공법의 주체는 안전율유지공법으로 하고 안전율증가공

법은 주로 직접 주거지역 및 중요시설 등을 보호하기 위한 경우에 한해 사용한다. 활동면이 활발하게 움직이고 있다고 판정될 경우에는 원칙적으로 안전율증가법을 쓰지 않고 안전율유지법을 선행하여 사면의 활동을 경감한 후 보강한다. 점성토지반으로 사면경사가 1:1.2, 모래나 사질토로 1:1.5 보다 완만한 경우는 식생공만으로 침식이나 표층유실을 어느 정도 방지할 수 있다. 사면의 경사가 급해지면 사면틀공이나 블록공 등의 병용이 요구된다. 용수가 많은 사면에서는 지하배수구나 수평배수공 등의 지하배수시설을 적극적으로 도입하여 사용한다. 절토후 풍화가 빠른 암에서는 풍화가 진행하여도 사면파괴가 일어나지 않을 정도로 사면경사를 확보한후 식생공을 행하거나 표면수를 투수시키지 않는 사면보호공을 적용한다. 또한 상부에 세굴이 가능한 지역은 배수로를 설치하여 준다. 낙석의 위험이 있는 사면에는 식생공과 병용하여 낙석방지망을 씌우거나 낙석방지책을 설치한다. 또한 균열이 많고 용수가 없는 연암의 경우는 슛크리트공이 적합하다.

6. 맺음말

우리 나라는 매년 사면재해로 인하여 많은 피해를 겪고 있는 실정이며, 대부분의 안정 사면도 풍화가 심하게 진행되거나 지진, 태풍, 집중호우등 기상이변과 같은 외적 상황이 악화되면 항상 파괴에 이를 가능성이 있다. 따라서 사면재해로 인한 피해를 경감하기 위하여는 사면재해를 유발하는 요인과 그 발생 기구의 규명과 더불어 사면재해를 예측할 수 있는 적절한 예, 경보체계의 구축이 필요하다. 또한 위험사면에 대하여 적절한 보호공법을 수행하고 지속적으로 사면의 유지관리에 관심을 기울여야 한다. 우리 나라에서 가장 중요한 사면재해 유발 요인은 강우이다. 최근까지의 연구결과에 따르면 강우가 내리면 사면내 침투로 포화도가 증가하며, 침투가 계속되면 큰 간극수압을 발전시켜 결국 사면파괴를 유발한다고 제안하고 있다. 사면재해의 위험지역을 선정하기 위하여 최근에는 GIS를 이용한 연구가 수행되고 있으며 강우를 이용한 사면

재해의 예, 경보 기준과 사면의 안정성 평가표은 간단하면서도 매우 효율적인 것으로 평가받고 있다. 사면이 위험지역으로 선정되면 그 정도에 따라 적절한 보

호공법이 수행되어야 하며 보호공법은 안전율유지법과 안전율증가법으로 구분되어 사용되고 있다. ●

〈참고문헌〉

1. 김상규(1994), "한국에서 발생하는 지반활동," (Preession) Proc. North-East Asian Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows, Seoul, pp.75~99.
2. 김상규, 장연수, 서홍석, 류지협(1993), "사면내 균열의 산사태 활동에 미치는 영향에 관한 연구," 제 2회 한국지반공학회 사면안정위원회 학술발표회집, 한국지반공학회, pp.99~117.
3. 현대건설기술연구소(1997), 산사태의 안전도 평가 및 대책 연구보고서, 현대건설기술연구소 96GEO01, 현대건설기술연구소.
4. 건설기술연구원(1989), 절개면의 안전진단 및 보호공법 연구보고서, 건기원89-GE-111, 한국건설기술연구원.
5. 건설기술연구원(1998), 위험 절개면 및 축대의 조사 및 투자우선순위 결정방법 연구 연구보고서, 건기원98-037, 건설기술연구원.
6. 동국대 산업기술대학원(1997), 산사태, 토질 및 암반사면의 안정해석, 대책공법, 단기강좌, 동국대 산업기술대학원.
7. Brand, E.W.(1984), "Relationship between Rainfall and Landslides in Hong Kong," Proc. 4th Int. Symposium on Landslides, Vol. 1, Toronto, pp.377~384.
8. GCO(1995), Guide to Slope Maintenance, Geotechnical Engineering Office.
9. Jang, Y.S., S.K. Kim, S.M. Shin, and J.H. Ryu(1994), "A Study on the Landslides and Their Shape of Failure in Youngin-Ansung County," Proc. North-East Asian Symposium on Landslides and Debris Flows, Seoul.
10. Kim, S.K., Y.S. Jang, H.S. Seo, and S.G. Han(1994), "Failure Mechanisms of the Landslides in Youngin-Ansung County," Proc. North-East Asian Symposium on Landslides and Debris Flows, Seoul.