

국지성 집중강우 인한 비탈면 붕괴 과거 사례 분석



김낙영
도로교통연구원 수석연구원

1. 서론

우리나라의 지형적인 조건으로 70%이상이 산지로 구성되어 있어 도로 및 철도 등 건설시 비탈면이 불가피하게 존재하게 된다. 최근 이러한 도로와 철도의 고속화는 비탈면의 개소증가와 규모적인 측면에서도 대규모화 되어가고 있습니다.

이러한 비탈면의 절취로 인하여 절취면이 대기중에 노출됨으로써 강우 및 강설의 영향으로 국부적인 비탈면 붕괴 및 대규모 붕괴가 발생하게 된다. 특히 태풍과 같이 강우량이 급증하는 경우에 많은 비탈면 붕괴가 발생하게 되는데 이러한 태풍은 매년 평균 30개 가량 발생하지만, 우리나라에 직간접적으로 영향을 미치는 비를 뿌리는 것은 연평균 3.8개꼴로 발생되고 있습니다. 지난 1976년의 경우 6개의 태풍이 우리나라를 강타하기도 했으나 1989년이나 2001년의 경우 태풍의 영향을 전혀 받지 않기도 하고 지난 2002년 8월 31일 발생한 루사는 그 동안 가장 많은 비를 뿌린 태풍으로 하루 동안 강릉에 871mm에 달하는 집중호우를 뿌렸고 기상관측 이래 가장 큰 피해를 주기도 하는 등 최근 급격한 기후의 변화는 예측하기가 매우 어려운 양상입니다. 이러한 태풍 및 국지성 집중호우를 발생시켜 해마다 일부 고속도로 구간이 폐쇄되는 사례가 반복되고 있습니다. 이러한 비탈면의 붕괴 및 산사태(토석류)로 인한 자연재해는 2000년 이후 증가 추세에 있으며 매년 발생되어 인명피해 및 재산피해를 주고 있는 실정입니다. 그리고 최근의 강우로 인한 피해유형 중 특

징은 발생 원인이 도로 및 철도 주변에 인접한 비탈면의 붕괴에 의한 것 보다 도로에서 일정거리 떨어진 상부 계곡부 자연사면에서 발생한 토석류가 계곡을 따라 흘러 내려와 도로 및 철도의 운행에 막대한 지장을 주고 있다.

이와같이 최근의 기후변화로 인하여 과거에 비하여 시간당 강우량이 커지고 강우발생 범위가 국지성 강우 유형으로 변화되므로 비탈면 안정성에 가장 위대한 요소인 강우로 인한 비탈면의 붕괴가 급증하고 있다. 이러한 국지성 강우로 인한 비탈붕괴 규모가 과거에 비하여 상대적으로 크게 발생하고 있다.

2. 국지성 강우 특성

국지성 호우는 비탈면 붕괴 등의 피해를 발생시키는 직접적인 요인으로서 발생원인은 지형적인 특징과 강우전선 상의 문제 등이 원인이다. 비가 내리는 시간과 관계없이 총강수량이 많은 것을 호우라고 하며, 단시간에 비가 많이 오는 현상을 폭우 또는 집중호우라고 한다. 그러나 국지성호우는 지형적인 특징과 강우전선 상의 문제 등으로 인하여 특정 지역에만 국한되어 집중적으로 비가 내린다는 점에서 차이가 있으며 태풍에 수반하여 일어날 때도 있다. 또한 홍수나 사태 등의 재해를 수반하므로 안전에 막대한 지장을 주고 있고 이러한 국지성 강우는 예보가 어렵다는 한계점을 가지고 있다.

국지성 강우는 뇌운강수로서 돌발적으로 출현하며, 장마철로부터 초가을에 걸쳐서 남쪽으로부터 유입되는 열대기단과 북쪽으로부터 유입되는 한대기단과의 접촉지역에서 발생할 때가 많고, 혀 모양 습윤역을 수반하며, 또 700~800hPa 부근에 하층제트가 있는 것이 특징이다. 구름대 속에는 호우를 형성하는 작은 구름덩이가 있는데 이를 호우세포라고 한다. 비를 뿌리는 대형 비구름대 속에는 여러 개의 호우세포가 형성되어 습한 공기를 빨아들이면서 더욱 강해진다. 호우세포는 수명이 단 2~3시간에 불과하고 크기는 3~5km밖에 안 되어 국지성호우를 일으키는 원인이 되고 있다.

한국에서는 지리산 일대가 국지성호우가 빈발한 곳으로 알려져 있다. 표고 1,000m가 넘는 준령 20여 개와 수많은 산봉이 어우러져 거대한 산악군을 이루어 구름대의 이동을 막기 때문에 국지성호우가 잦을 뿐만 아니라 연간 강수량도 1,300mm가 넘는 대표적인 다우지역이기도 하다.

3. 비탈면 붕괴 원인

3.1 국지성 호우

최근의 기상현황에서 본 바와 같이 일 강우량이 800mm 이상 되는 국지성 집중호우 및 연간 강우량의 30% 이상 되는 강우량이 짧은 기간에 집중되어 사면을 구성하는 지반의 약화와 자중증가, 전단강도 저하 등에 유발하여 붕괴를 유발시키는 직접적인 원인으로 작용한다.

3.2 비탈면내의 배수시설

일반적으로 비탈면내의 배수시설은 주로 산마루측구, 도수로 소단 측구가 시공되어 있는데 집중 호우시 배수시설 용량의 부족으로 그림 3.1과 같이 사면을 따라 월류되어 사면의 유실을 유발시키는 사례가 많다.

배수설계는 도로설계요령에 설계발생빈도의 기준에 의하면, 사면내의 배수시설(측구)은 5년 설계발생빈도, 압거 및 배수관의 경우는 25년(배수구조물 설계법)을 고려하여 설계유량을 결정하도록 되어 있다. 그러나 최근의 강우량은 이러한 설계유량을 훨씬 뛰어 넘는 강우량으로 시공된 도수로 등의 배수시설의 수리단면이 부족되어 발생하는 경우가 있어 배수시설에 대한 단면설계시에 합리적인 측면에서 이러한 강우량을 반영하여야 할 것이다.



그림 3.1 사면내 도수로 및 측구의 용량부족으로 인해 유실이 발생하는 사례

3.3 도로내의 집수시설 막힘

비탈면 사면의 유실이 발생하는 경우, 그림 3.2와 같이 도로 노면측에 설치되어 있는 집수정이 토사의 유입에 의해 막혀 물이 성토사면으로 유입되어 발생되어 토사를 세굴 시키고 유실시키는 사례들이 있다. 이는 집수정의 관리 소홀의 문제 및 집수정의 단면부족으로 인해 발생하는 경우로 나눌 수 있는데, 관리 소홀에 대한 문제는 우기가 시작되기 이전에 집수정을 청소하거나 현재 설치되어 있는 집수정을 유지관리가 원활한 집수정 형태로의 개선하는 방안 등이 필요하다.



그림 3.2 집수정 막힘

3.4 산불의 영향

과거의 사례를 살펴보면 강원도 지역에 발생된 산불에 의해 그림 3.3과 같이 산지의 황폐화로 인해 강우시 토석류 및 나무뿌리 등의 계곡으로 유입되면서 유로가 차단되고 이로 인한 유로의 변경으로 성토사면의 유실 및 그림 3.4와 같이 산불이 발생된 구간에서의 토석류발생으로 인해 도로를 차단하는 사례가 많았다. 이러한 붕괴사례는 계곡부가 형성된 구간에서 토석류가 유입되지 않도록 토석류 억제시설을 하는 방안 및 근원적인 계곡부에 대한 사방공사 등과 같은 방법이 강구될 수 있다.



그림 3.4 산불로 인한 토석류의 발생으로 유로 차단에 의해 유실 발생

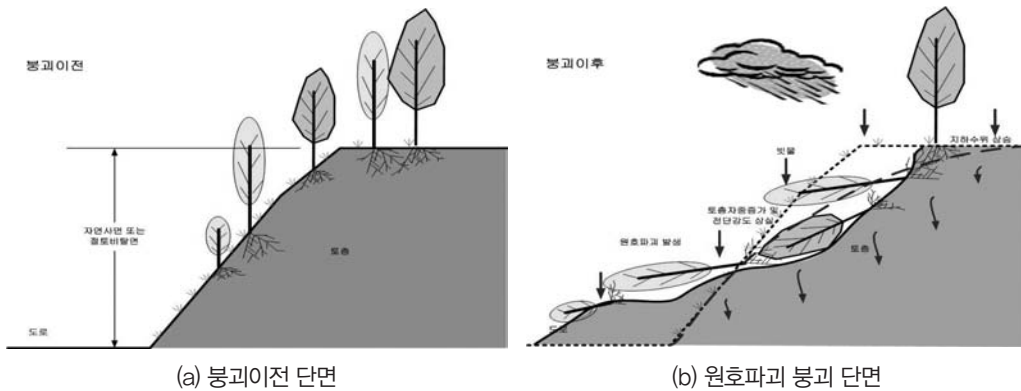


그림 3.4 계곡부의 토석류에 의한 피해 사례

4. 국지성 강우로 인한 비탈면 붕괴 유형

4.1 원호파괴 비탈면 붕괴 유형

원호파괴 비탈면 붕괴 유형은 풍화로 인해 약화된 토층이 강우 및 지표수의 유입으로 인해 수위 상승으로 자중증가 및 전단강도 상실로 인해 원호형의 붕괴발생하는 것으로 다음 그림 4.1과 같다



(a) 붕괴이전 단면

(b) 원호파괴 붕괴 단면

그림 4.1 원호파괴 유형 붕괴개요도



그림 4.2 원호파괴 유형 일반적인 사례

4.2 표층유실 비탈면 붕괴 유형

표층유실 비탈면 붕괴유형은 강우 및 동결융해로 느슨해진 토층과 단단한 층사이를 따라 물이 침투 흐르면서 이 면을 따라 표층이 탈리되는 붕괴유형으로 다음 그림 4.3과 같다.

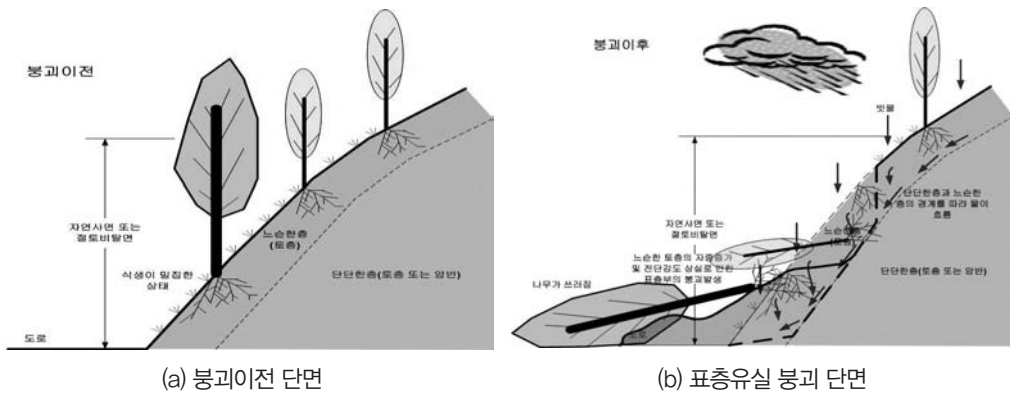


그림 4.3 표층유실 유형의 붕괴개요도

다음 그림 4.4는 표층 토층이 유실되어 도로를 차단시켰던 일반적인 사례이다.



그림 4.4 표층유실 유형의 붕괴사례

4.3 불연속면에 의한 비탈면 붕괴 유형

불연속면에 의한 비탈면 붕괴유형은 다음 그림 4.5와 같이 암반내에 발달하는 절리면 또는 단층면에 의한 붕괴양상이다.

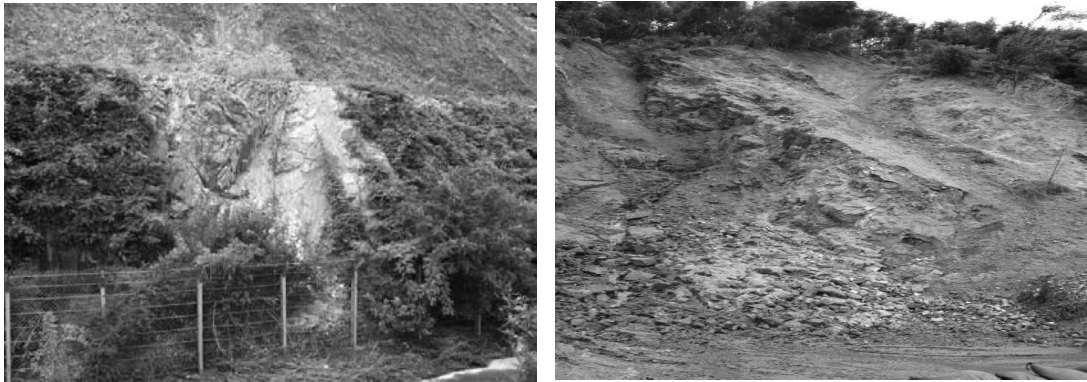


그림 4.5 불연속면에 의한 비탈면 붕괴사례

4.4 절토부 낙석 붕락 유형

지반구성은 암반 및 풍화암으로 구성되어 표면에 암괴가 붙어 있고 붕괴원인은 풍화 및 동결융해 작용에 의해 절리틈새가 벌어지고 이로 식생이 이루어지고 강우시 절리틈새에 수압 등이 작용하여 표면에 붙어 있는 암괴가 붕락하는 유형이다. 붕괴규모는 일반적으로 깊이가 표면에 붙어 있는 암괴가 떨어지는 유형으로 큰 암괴가 떨어지는 경우가 많으나 비교적 규모가 작은 암괴가 떨어지는 경우가 많다. 피해상황은 다음 그림 4.6과 같이 낙석방지망 및 낙석방지울타리 파손, 도로 파손이 되었다.



그림 4.6 낙석에 의한 붕락사례

4.5 성토부 노면수 유입 붕괴

노면수 유입으로 인한 성토비탈면 붕괴는 다음 그림 4.7과 같이 암반위에 성토를 실시한 편절편 성 구간에서 집중강우시 계곡부 및 노면수가 성토비탈면으로 유입되어 암반면 위로 지하수가 흘러 토사가 세굴 및 유실되고 상부 토층이 유실되면서 붕괴가 발생하는 유형이다.

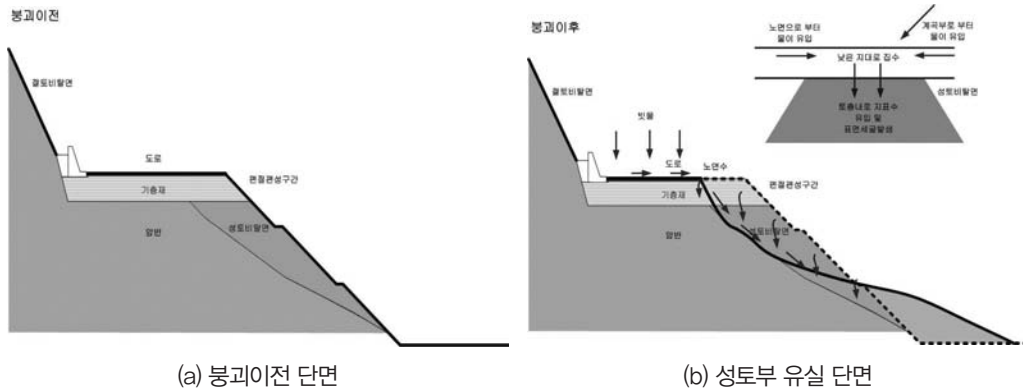


그림 4.7 편성 구간의 성토비탈면 유실 개요도

인접부에 비탈면이 붕괴된 토사나 토석류가 발생되어 유로를 차단시키는 지역과 도로의 구조상 집수가 잘 되는 지역에서 붕괴발생빈도가 높고 암반면 위에 시공된 석축이나 옹벽구조물이 토사층의 유실로 인해 붕괴가 발생된다.

4.6 계곡부 토석류 유형

토석류의 지반구성은 비교적 강한 암반면 위에 얇은 토층이 형성되어 있음. 토층은 주로 큰 암괴가 혼합된 붕적층이 주를 형성하고 있다. 토석류는 전면부에서 큰 규모를 예측하기가 어려운 상태이나 발생 규모에 따라 붕괴가 발생한 연장이 큰 차이를 보인다. 다음 그림 4.8, 그림 4.9는 일반적인 토석류 발생사례로서 계곡을 형성하는 구간의 여러 개소에서 동시에 붕괴가 발생되어 있고 토석류가 발생된 계곡부의 경사는 $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 의 범위가 많으며 계곡부의 나무와 큰 규모의 암괴를 쓸고 내려오는 붕괴유형을 보였다. 하부 지반조건이 강한 암반으로 구성되어 있다.



그림 4.8 일반적인 계곡부에서의 토석류

•토석류에 의한 피해유형 2 - 토석류의 도로유입

- STEP 1 - 상부로 부터의 유송잡물(토사, 암석, 초목류 등)에 의해 도로하부 횡 배수관 기능 마비
- STEP 2 - 대규모 토석류에 의해 토석류의 도로유입
- STEP 3 - 도로파손 및 도로 통행차단

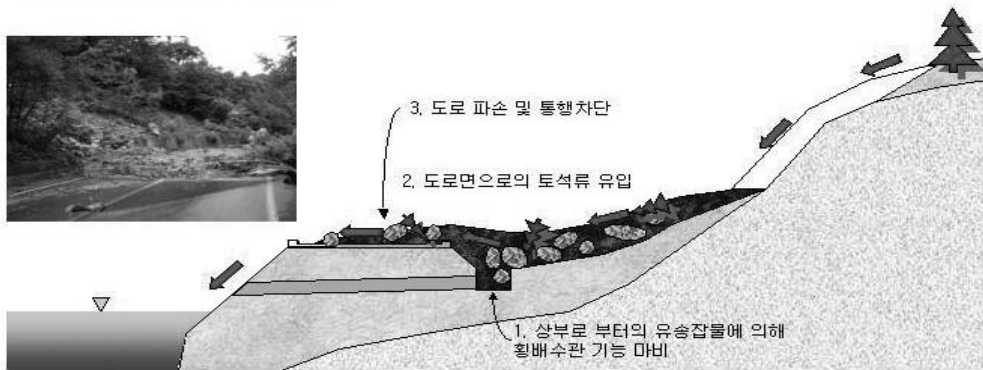


그림 4.9 토석류의 도로유입