

괴의 1차적 원인을 분석함으로써 향우 집중호우 등으로 인한 대규모 절토사면의 붕괴 예측 및 유지관리에 대한 기초 자료 활용에 그 목적이 있다.

2. 사면의 붕괴형태 및 붕괴요인

2.1 사면의 붕괴형태

지반의 운동역학적 특성과 이동하는 물질의 종류에 따라 파괴 유형을 낙반, 전도, 활동, 확장, 유동 등으로 Varnes(1978)가 분류를 하였다.

2.1.1 낙반(fall)

전단력이 작용하지 않은 표면을 따라 흙 또는 암석이 이탈하는 현상을 말한다. 낙반은 매우 빠른 속도로 발생하며 다른 사면붕괴의 형태보다 먼저 발생하는 경우가 많다.

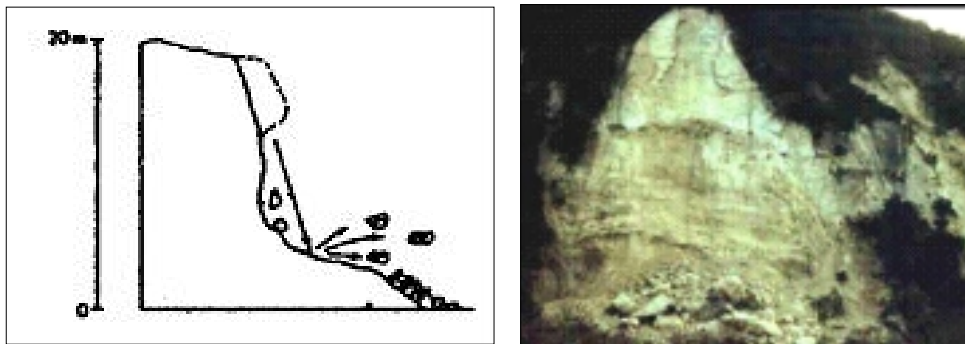


그림 1. 낙반(fall)

2.1.2 전도(topple)

암블록들이 어떤 기준점 혹은 기준축을 중심으로 중력에 의해 회전하면서 붕괴되는 경우를 말한다. 사면상부에 인장균열 등이 존재하여 물이 침투한 경우, 변위를 촉진하는 요인이 될수도 있다. 대부분은 암반에서 많이 발생하지만, 경화된 토사의 경우도 발생이 가능하다.

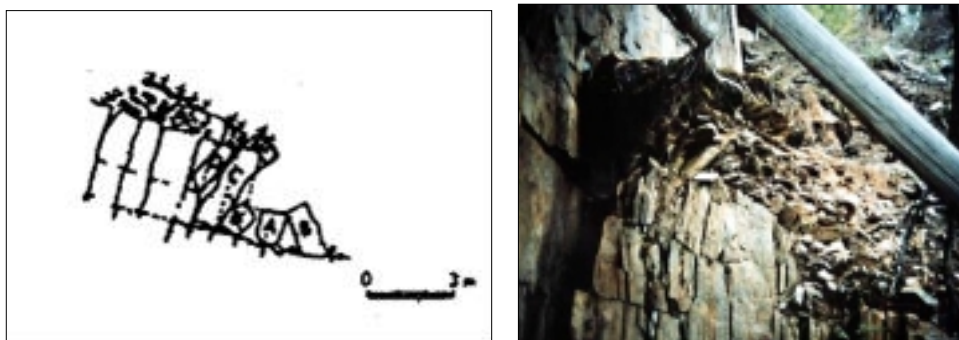


그림 2. 전도(topple)

2.1.3 활동(slide)

흙 또는 암블록이 상대적으로 좁은 영역에서 발생하는 강한 전단 변형에 의해 형성된 전단면, 혹은 교차선 등을 따라 미끄러지는 형태로서, 활동면의 형상에 따라 활동면이 원호에 가까운 회전활동(rotational slide)과 직선에 가까운 병진활동(translation slide)으로 나누어 진다. Varnes는 회전활동의

경우 소규모 사면붕괴에서 많이 발생하고, 대규모 활동의 경우에는 병진활동이 더 많이 발생한다고 하였다.

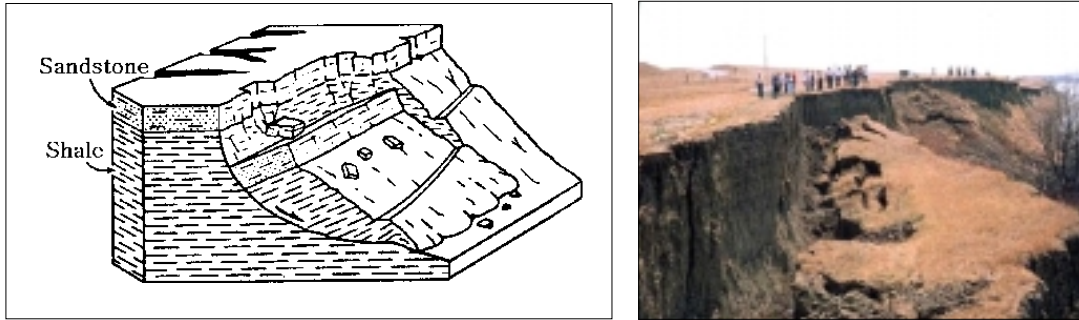


그림 3. 활동(slide)

2.1.4 확장(spread)

하부의 연약한 물질속으로 점성토 혹은 단열이 잘 발달된 암블록이 침하하면서 인장 형태로 붕괴하는 경우를 말한다. 연약 물질의 흐름 또는 분출시 나타나는 액화현상에 의해 발생하게 될 수도 있다.

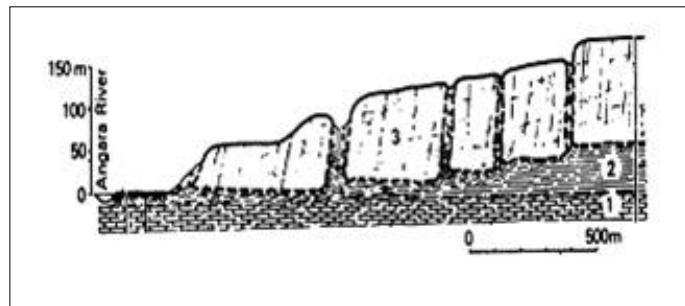


그림 4. 확장(spread)

2.1.5 유동(flow)

공간적으로 연속적인 운동에 의해서 발생하는 경우로, 활동깊이에 비해 활동되는 길이가 매우 길다.

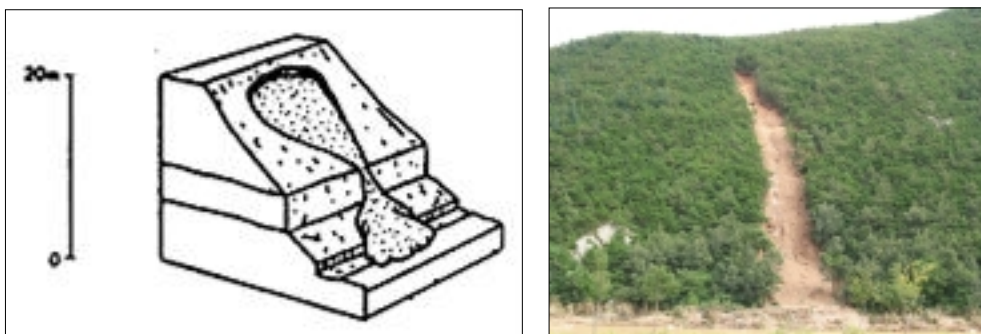


그림 5. 유동(flow)

2.2 사면의 붕괴요인

절토사면의 붕괴요인은 크게 수리적인 요인, 지질적인 요인, 인위적인 요인 등으로 세분할수 있다.

2.2.1 수리적인 요인

사면붕괴는 지반의 안정화과정으로 구성지반의 강도가 현상태를 지탱하기 어려울 때 발생한다. 과거에 안정하게 유지되었던 지반이 현재에 불안정하게 된 요인으로는 물에 의한 열화작용이 가장 주된 요소이다. 사면붕괴의 주요 원인인 물에 의한 수리적인 요인은 크게 기후적 수리, 인위적 수리, 지형적 수리로 나눌 수 있다. 또한 물이 지반에 미치는 영향은 단기적인 영향과 장기적인 영향으로 나눌 수 있다. 단기적인 영향은 지반의 포화에 따른 활동력 증가와 저항력 감소현상 등이며, 장기적인 영향은 물에 의한 지반 및 사면시설의 열화(풍화)작용이 있다. 물이 절토사면의 안정성에 미치는 악영향을 정리하면 다음과 같다. 표 1은 물에 의한 지반의 불안정화에 대하여 설명한 것이다.

표 1. 물에 의한 지반의 불안정화 현상

구 분	내 용
장기적인 작용	<ul style="list-style-type: none"> · 간극에 침투한 물의 동결융해에 의한 지반의 기계적 풍화 · 물과 물에 용해되어 있는 화학성분이 구성지반의 일부성분과 화학작용을 일으켜 발생하는 지반의 화학적 풍화작용 · 사면시설의 부재 부식 등에 의한 노후화
단기적인 작용	<ul style="list-style-type: none"> · 지반포화로 인한 단위중량의 증가 · 간극수압 증가, 유효응력 감소, 마찰저항 감소 등에 의한 저항력 감소 · 지반구성 입자의 유실 (세굴, 침식)

기후적 수리요인은 집중강우와 같은 일련의 기후조건에 의해 좌우된다. 해마다 장마철이 되면 태풍에 의한 국지성 호우로 사면 붕괴가 빈번히 발생하는데 국내 절토사면의 경우 누적강우량 보다는 최대 강우강도에 더 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이는 지속적으로 내리는 비보다는 집중강우에 의해 발생하는 사면붕괴빈도가 높음을 의미한다.

인위적인 수리요인으로는 절토사면 상부에 위치한 전답(농경지)이나 인공저수지 등이 있다. 일반적으로 전답이 상부자연사면에 분포하면 수리적인 측면에서 절토사면의 안정성에 악영향을 미친다. 이는 상부자연사면의 전답이 대부분의 강우를 흡수하여 지하수위를 상승시키고 절토부 방향으로 유선을 형성하여 불안정을 야기하는 것으로 요약할 수 있다. 이를 정리하면 다음과 같다.

지형적 수리요인으로는 절토사면내에 존재하는 계곡부 등이 있다. 절토사면 좌우측부가 아닌 중간부에 위치한 상부자연사면내 계곡부는 사면안정성에 큰 영향을 미치므로 이에 대한 충분한 대책이 필요하다. 계곡부의 불안정성 정도는 집수지형의 유역 면적에 비례한다. 계곡부는 일반적으로 토층심도가 깊고 지반강도가 약한 붕적층으로 구성되는 경우가 많아 표층붕괴나 토석류가 주로 발생된다. 평상시에도 지하수의 이동경로로서 절토사면 지반에 지속적으로 지하수를 공급하며 계절변화에 따른 동결융해로 풍화진행을 가속시킨다.

2.2.2 지질적인 요인

지질적 요인에 의한 붕괴원인은 주로 불연속면에 의한 것으로 단층, 파쇄대, 습곡, 암맥, 절리, 엽리, 층리, 편리 등이 있다.

가. 단층/파쇄대

암반의 상대적 변위를 보이는 전단 파괴면(Price, 1966)이라 정의되며 조구조적(tectonic) 응력변화에 의한 전단응력이 암반내 특정면의 전단강도보다 클 때 생성된다. 단층주변에는 습곡, 힙지선(hinge line),

수반단층 등이 발생한다.

사면에서의 단층은 과거 이 부근의 지반이 심한 변형작용을 받아 지반이 교란, 파쇄되었음을 의미하는 것으로 단층의 방향이나 규모를 감안하여 필요에 따라서는 전문가 자문을 받아 적절한 대책을 수립해야 한다. 단층면과 파쇄대는 지하수의 이동경로로서 풍화가 급속히 진행되며 지반이 열화되어 절토사면의 불안정요인으로 작용한다. 이처럼 절토사면의 불안정성을 가늠하는데 있어서 현장조사에서의 단층의 여부는 중요한 요소가 된다.

단층면 양쪽의 암석은 부서져서 단층각력이나 미끈미끈한 단층점토를 만들기도 한다. 특히 이 단층점토(또는 단층가우지)는 물에 의한 팽창성이 우수하고 강도가 약하므로 단층방향이 절토사면에 불리할 경우 붕괴면으로 작용할 가능성이 높으므로 특별한 주의가 필요하다.

현장조사에서 단순히 대규모의 단열선이 발견되었다고 해서 이것들이 모두 단층이 되는 것은 아니다. 따라서 상기에 열거한 경면, 조선, 각력이나 점토, 상대적인 변위, 특정 절리패턴 등의 단서를 종합해서 판단해서 단층여부를 결정해야 한다. 또한 단층점토층이 불투수막을 형성할 때 지하수위를 상승시킴으로써 붕괴를 유발시킬 수 있으므로 주의해야 한다.

나. 암맥

암반 노출이 양호한 절토사면 중에는 다른 종류의 암이 주입된 경우를 관찰할 수 있다. 이와 같이 절토사면에서 기존암에 층리나 엽리등의 불연속면을 따라 다른 종류의 반심성암체가 용융상태로 뚫고 들어 온 것을 암맥이라 한다. 현장에서 관찰되는 양상은 주로 이들이 여러 갈래로 무리지어 분포하는 이른바 암맥군 형태이며 근접관찰시 암석의 광물결정이나 조직이 관찰되지 않는 특징을 가진다.

암맥의 기원이 기반암의 열극을 따라 뚫고 들어온 다른 종류의 암인 만큼 차별풍화과정을 거쳐 먼저 열화될 경우 암맥이 최초 붕괴면으로 작용할 수 있다. 또한 결정조직을 가지지 않는 암의 특성상 완전 풍화 되었을 때 입도분포가 다양하지 못하므로 입자크기가 균질하여 입자간의 역물림(interlocking)효과를 기대하기 힘든 만큼 낮은 강도정수를 가지는 특징이 있다.

2.2.3 인위적인 요인

60, 70년대의 급속한 경제 발전에 따른 도로개설 과정에서 산악지형에 위치한 도로의 경우 단기간내에 도로를 개설할 목적으로 무리한 화약발파를 실시하여 발파균열에 의한 낙석과 대규모 붕괴위험성을 가진 절토사면이 다수 분포한다. 이러한 절토사면들은 계획, 설계단계에서 지질, 지형, 수리적인 현장여건을 고려하지 못하였으며 일률적인 설계기준을 적용하여 시공하였다. 이러한 부실설계/시공 외에도 절토사면에 대한 유지관리가 전무하거나 효율적이지 못하여 사면 붕괴를 예방하지 못하는 경우도 있다.

3. 사례 연구

3.1 경북 성주 수륜 ○○지구

연구대상 절토사면은 행정구역상으로 경상북도 성주군 수륜면에 속하며, 경상북도 성주군에서 고령군 방향의 국도 33호선 상에 위치하고 있다. 대상 절토사면의 규모는 연장 약 102m, 최대높이 약 29m, 경사 65°(경사방향 : 334~345°), 상부자연사면은 35~40°의 경사로 수직고 10m까지 이어지다 이후로는 하향한다. 본 절토사면은 암반사면으로 사면을 구성하고 있는 암석은 중생대 백악기의 화강암으로 구성되어 있으며, 전경 및 측면사진은 그림 6과 같다.

2003년 7월 4일에 집중호우로 인하여 붕괴가 발생하였고 9월 12일 태풍 매미로 인하여 2차적인 붕괴가 발생하였으며, 총 붕괴규모는 폭 33m, 길이 20m, 두께 4m 내외이다. 1차 붕괴는 지속적인 강우에 따른 전단응력의 증가, 높은 절리밀도, 사면과 평행한 방향으로 발달한 주 절리(75/328)의 기하학적 형태가 주요한 원인으로 판단되며, 2차 붕괴는 암반상태가 양호한 노두 배후에 발달한 구과상 형태로 풍화된 대규모 절리에 집중강우시 지표수가 유입되어 간극수압이 증가하여 발생한 것으로 판단된다(그림 7). 현

재, 붕괴부 상부에 약 1,800m³ 규모의 추가 붕괴위험이 분포하고 있으며, 하부에 쌓인 낙석의 최대크기는 6×4×2m³ 규모이다. 본 절토사면의 안정화 대책으로는 사면구배완화공법과 일부구간 계단식옹벽이 제시되었다.

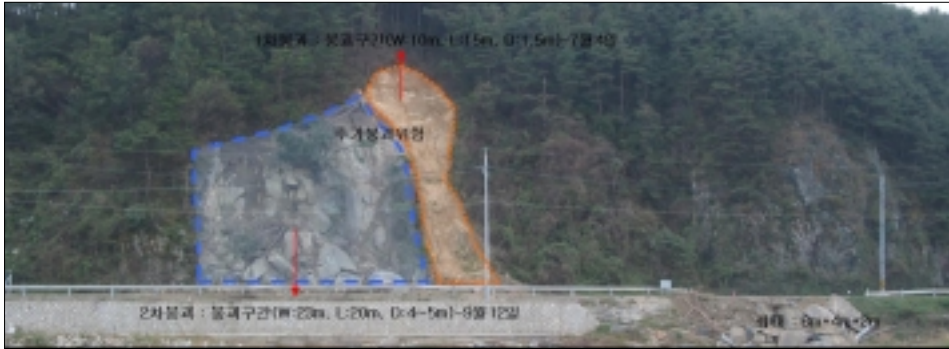


그림 6. 절토사면의 전경

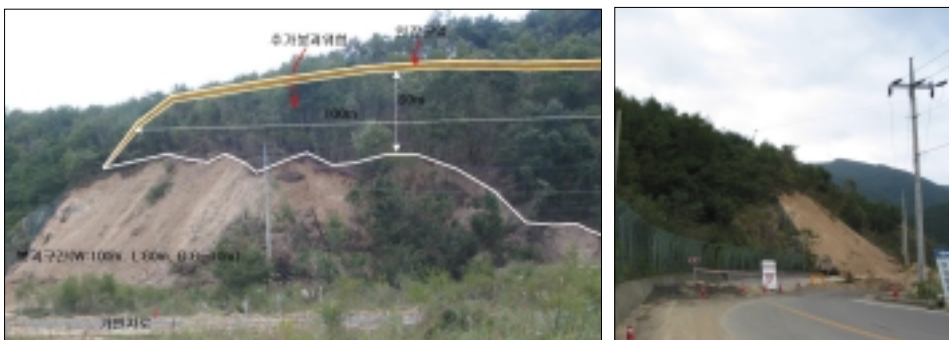


(a) 높은 절리 밀도 및 기하학적 형태 (b) 배후에 발달한 구과상 풍화

그림 7. 1, 2차 붕괴의 주 원인

3.2 경북 청도 운문 ○○지구

연구대상 절토사면은 행정구역상으로 경상북도 청도군 운문면에 속하며, 건천읍에서 운문면 방향의 국도 20호선 상에 위치하고 있다. 대상 절토사면의 규모는 연장 약 130m, 최대높이 약 16m, 경사 70~80°(경사방향 : 090°), 상부자연사면은 30°의 경사로 정상부로 이어진다. 본 절토사면을 구성하고 있는 암석은 중생대 백악기 주산안산암질암, 응회암, 이암, 사암 등으로 구성되어 있으며, 전경 및 측면은 그림 8과 같다.

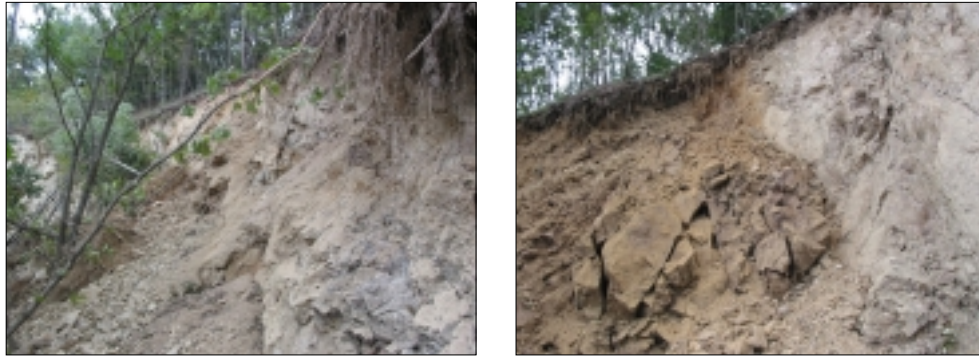


(a) 붕괴부 전경

(b) 붕괴부 측면

그림 8. 절토사면의 전경 및 측면

2003년 9월 13일 대규모 붕괴가 발생하였으며, 붕괴규모는 폭 100m, 길이 60m, 두께 6~10m 내외이다. 토사층 및 풍화암층이 집중호우에 의해 포화되면서 하부의 암반층과 분리되어 슬라이딩이 발생한 것으로 판단되며 암질의 경계부가 중요한 역할을 했을 것으로 판단된다(그림 9). 절토사면 상부에서 낙차가 6~7m의 붕괴경계(failure boundary)가 관찰되며, 산정상부에도 다수의 인장균열이 관찰되고 있어 붕괴경계 내 최대 약 50,000m³ 이상 규모의 토체가 추가적으로 붕괴될 위험성이 높은 상태이다. 본 절토사면의 안정화 대책으로는 성토된 지반쪽으로 도로선형을 개량하여 충분한 이격을 확보하고, 추가붕괴가 예상되는 전면부 이완된 토체를 절토하여 사면에 작용하는 하중을 저감하고 기울기를 완화하는 공법이 제시되었다.



(a) 이암과 응회암의 경계

(b) 사암과 안산암의 경계

그림 9. 암질의 경계

3.3 경북 경산 남천 ○○지구

연구대상 절토사면은 행정구역상으로 경상북도 경산시 남천면에 속하며, 경상북도 청도군에서 경상북도 경산시 방향의 국도 25호선 상에 위치하고 있다. 대상 절토사면은 암사면으로 규모는 연장 107m, 최대높이 평균 20m, 경사는 75°(경사방향 260), 상부자연사면은 20°~30°경사로 정상부로 이어진다. 본 절토사면은 일부구간에서 관입 암맥들이 관찰되는 사암과 셰일 등의 퇴적암으로 구성되어 있으며 전경 사진은 그림 10 과 같다.



그림 10. 남천지구 절토사면의 전경

2003년 9월 12일 태풍 매미 내습시 40~70m 구간 상단부에서 붕괴가 발생했으며, 붕괴규모는 경사 65°, 폭 30m, 높이 최대 24m, 두께 1m 정도이다. 다양한 암상에 따른 풍화도 차이에 의한 상단부 표층 붕괴 및 두 방향으로 발달한 이완 절리의 방향성에 따른 대규모 낙석붕괴가 동시에 발생했다(그림 11). 현재 붕괴부 상단부와 중단부에는 주 절리에 따른 평면파괴가 예상되는 암블럭들이 분포해 있어 추가붕괴 위험성이 있는 상태이며 중·하단부에서 누수현상이 관찰된다. 본 절토사면의 안정화 대책으로는

사면 구배완화공법이 제시되었다.



(a) 암맥 관입 및 이완 절리 발달



(b) 암상변화에 따른 차별풍화

그림 11. 붕괴 원인

4. 결론 및 제언

연구대상 절토사면에 대한 붕괴 발생원인을 종합해 보면 대규모 붕괴사면의 경우, 암종에 따른 풍화 정도의 차이, 암질의 경계부, 암맥의 관입에 의한 차별풍화 등에 의해 생성된 약선대를 따라 발생되었다. 이와 같은 약선대는 강우에 의한 급격한 포화와 같은 불안정 요인이 추가적으로 발생될 때 사면붕괴의 주된 원인으로 작용됨을 알 수 있었다. 또한, 약선대는 절토사면 전면보다는 배후에 위치하는 경우가 대부분이어서 대규모 붕괴를 예측하기 매우 어려우므로, 대규모 붕괴를 방지하기 위해서는 절토사면 조사시 국부적인 조사보다는 광역적인 조사가 더 필요할 것으로 판단된다. 본 연구와 같은 붕괴원인에 대한 고찰은 집중호우 등으로 인한 절토사면의 대규모 붕괴를 예측하고 방지하는데 좋은 자료가 될 것이며, 더 많은 사례의 연구가 필요할 것으로 사료된다.

* 참고문헌

1. 백용, 구호본(2002), “터널 갱구부 붕괴 사면의 안정성 해석 및 보강공법에 관한 연구”, **지질공학회**, 제 12권, 제 4호, pp.367~378.
2. 장현식, 박혁진(2002), “태풍 루사에 의해 발생한 사면재해의 특성”, **자원환경지질학회**, 가을학술 발표회 논문집
3. 전성기(2001), **실무자를 위한 사면안정화 설계실무편람**, 과학기술, 서울, pp.124~130.
4. 행정자치부 방재연구소(2002), **사면붕괴의 유형별 원인과 저감대책 연구**
5. Varnes, D. J.(1978), Slope movement types and processes. In **Landslides-Analysis and Control**. TRB Special Report, National Academy of Science, pp.11~33