
강우로 인한 절취사면의 불안정

Instability of Cut Slopes due to Rainfall

김상규

동국대학교

〈 요 지 〉

산이 많은 우리나라에서는 산지를 절개하여 주택단지나 도로를 개설하는 경우가 많이 있다. 일반적으로 절취사면은 얇은 토층과 그 아래 풍화도가 다른 암반으로 구성된다. 이러한 절취사면이 강우로 인해 붕괴되는 일이 가끔 발생하므로, 강우시의 유출과 지반 침투로 인해 활동가능성이 증대되는 원인을 이 논문에서 자세히 기술하였다. 또한 지질 공학적인 측면에서 불연속면의 발달을 상세히 조사하여 이것을 설계에 반영함으로써 더욱 합리적인 설계가 될 수 있다는 것을 강조하였다.

〈 Abstract 〉

As Korea is a mountaneous country, many cut slopes are formed along the highways and in housing projects, by cutting through the layers which are composed of shallow soil depth and the underlying hard layers with different degrees of weathering. Such slopes are often failed by heavy rainfall, and thus its effects on the slope instability are described in detail in this paper. The importance of discontinuities on the slope stability as well as the effects of rainfall is emphasized for high quality design of cut slopes.

서론

절취사면은 자연사면을 깎아서 만든 것이므로 자연적으로 형성된 층서를 그대로 지낸다. 따라서 도로제방이나 흙댐과 같은 인공사면과는 달리 토층이 불균질하므로, 절취사면의 안정성을 실제와 맞게 예측하기란 쉬운 일이 아니다. 우리나라에서 절취사면이 붕괴되는 원인은 이것이 부적절하게 설계된 경우와 강우로 인한 붕괴로 나누어 생각할 수 있다. 사면이 부적절하게 설계될 수 있는 요인은 조사의 미비, 적절한 해석방법의 결여 등 여러가지 요인이 있을 수 있다. 이 경우에는 사면붕괴가 대개 시공중에 발생하므로 사면불안정의 원인이 잘 밝혀졌다면 특별한 제한조건이 없는 한, 쉽게 설계를 변경하여 안정한 사면을 만들 수 있다.

그러나 적절하게 설계되었다고 생각되는 사면이라 하더라도 갑작스런 폭우에 의해 사면이 붕괴된 예는 얼마든지 찾을 수 있다. 그 이유는 우리나라의 어떤 지방서나 설계기준에도 강우를 고려하여 설계하도록 되어 있지 않기 때문이다. 강우로 인한 사면붕괴가 흔히 발생함에도 불구하고 지금까지 사면의 설계에 이것이 반영되지 않고 있다는 사실은 이와 관련되는 우리의 기술이 아직도 후진성을 면하지 못하고 있다는 것을 반영하는 결과라고 생각한다.

우리나라의 재해통계를 보면 강우로 인해 얼마나 큰 피해를 입고 있는가를 쉽게 이해할 수 있다. 표 1은 남한에서 1983년부터 1992년까지 10년동안 발생한 자연재해 발생빈도의 통계이다(내무부, 1992). 이 표에서 보듯이, 풍수해로 인한 재해가 98.2%를 차지한 반면, 설해, 우박, 해일 등에 의한 기타 피해는 극히 미미하고, 지진은 과거 10년간 1건도 발생하지 아니하였다는 것이 특기할만하다. 피해의 심각성으로 보아, 풍수해는 태풍과 집중호우로 대별할 수 있을 것 같다. 이 표에서는 호우와 태풍을 구별하였지만, 태풍이 내습할 때에는 호우를 동반하므로 풍수해는 사실상 그 대부분이 집중호우로 인한 피해라고 말할 수 있을 것이다.

표 1 최근 10년간(1983-1992)의 자연재해 발생횟수 통계(내무부, 1992)

	호우	태풍	폭풍	폭풍우	폭풍설	우박	호우·우박	기타	합계
발생횟수	650	273	66	62	25	24	19	21	1,140
비율(%)	57	24	5.8	5.4	2.2	2.1	1.7	1.8	100

우리나라의 재해통계에 의하면(내무부, 1992, 김, 1994), 과거 10년간의 풍수해에 의한 피해액은 무려 3조 8333억원(1992년도 기준)에 달하고, 인명의 피해는 2,818명(사망과 실종)이나 된다는 사실을 알 수 있다. 이를 평균하면 매년 282명이 풍수해로 목숨을 빼앗기고, 풍수해 복구를 위해 국고에서 지원하는 금액이 매년 평균 3,543억원이나 된다. 특히, 1987년에는 전국의 피해액이 1조여원을 넘어섰고, 국고지원이 8,261억원이나 되었다.

풍수해로 인한 피해는 홍수와 산사태가 주된 요인이라고 할 수 있다. 이 중 절취사면에 대한 것만 골라 제시된 통계는 나와 있지 않다. 그러나 도로개설, 주택단지 조성시 형성되는 절취사면이 강우로 인해 발생하는 피해는 해마다 무수히 겪고 있다.

여기서는 먼저 절취사면의 안정과 밀접히 관련되는 우리나라의 토질과 지질의 특성을 살펴본다. 다음에는 강우가 절취사면에 대해 어떤 불안한 요인으로 작용하는가를 규명해 보고, 강우로 인한 재해를 감면할 목적으로 이에 대한 개선방향을 제시하고자 한다.

우리나라의 토질과 지질

절취사면의 활동은 지형, 토질 및 지질과 밀접히 관련된다. 특히 지층 깊숙히 발생하는 활동에 대해서는 지질에 대한 충분한 지식이 요구된다. 여기서는 이에 대해 간단히 언급하고자 한다.

지질

한국의 지질은 시생대로부터 신생대에 이르는 여러 시대의 복잡한 지층으로 구성되어 있다. 한반도의 중부는 선캄브리아 누대(시생대와 원생대)와 고생대의 편마암류 복합체가 기반암을 이루며, 중생대에 이르러 화강암이 이를 관입하였다. 중생대에 퇴적된 퇴적암은 경상남북도에 걸쳐 크게 분포하며, 특히 제3기에 퇴적되어 충분히 고결하지 않은 퇴적암이 영일만 일대에 소면적으로 분포한다. 한국의 암석은 화강암, 화강편마암, 및 퇴적암으로 대별되며, 전자의 두 암석이 국토의 반 이상을 차지한다(정창희, 1986).

그림 1에 보인 것은 김옥준(1982)에 의해 지역적인 특징으로 구분한 한국의 지체구조이다. 이 중 남한의 지체구조는 오랜 암석의 순으로 경기육괴, 옥천지향사대, 영남육괴, 경상분지, 연일분지 등으로 나누인다. 각 구조의 특징을 요약하여 적으면 다음과 같다.

(1) 경기육괴 - 한국에서 가장 오래된 암석인 경기편마암 복합체가 여기에 포함된다. 그 암석의 대부분은 준편마암류이며, 심한 화강암화 작용을 받았고, 또 여러번의 변성작용을 받아 암상의 변화가 대단히 심하다.

(2) 영남육괴 - 선캄브리아 누대에 형성된 오래된 암석이며, 영남 북동부로부터 지리산까지 넓게 분포한다. 이 육괴의 남서부인 지리산 지역에는 심한 화강암화 작용과 변성작용을 받은 변성암류가 분포되며, 암석의 구분이 불가능하여 이를 지리산 편마암 복합체라고 부른다. 태백산부근에 분포하는 태백산통은 건운모편암, 운모편암, 규암으로 되어 있으나 화강암류의 관입을 받았다.

(3) 옥천지향사대(퇴적분지) - 충주부근으로부터 남서방향으로 옥천을 지나 이리 부곡 15km까지 길게 분포되고, 구성암석의 변성정도가 대단히 낮아 고생대의 지층으로 알려져 있다. 암석은 천매암, 운모편암, 규암, 각섬암, 사암, 점판암으로 되어 있다.

(4) 경상분지 - 종래 경상계라고 불려온 경상누층군은 경상남북도에 분포되어 있으며, 주로 퇴적암인 역암, 혈암, 이암, 이회암의 호층으로 되어 있다.

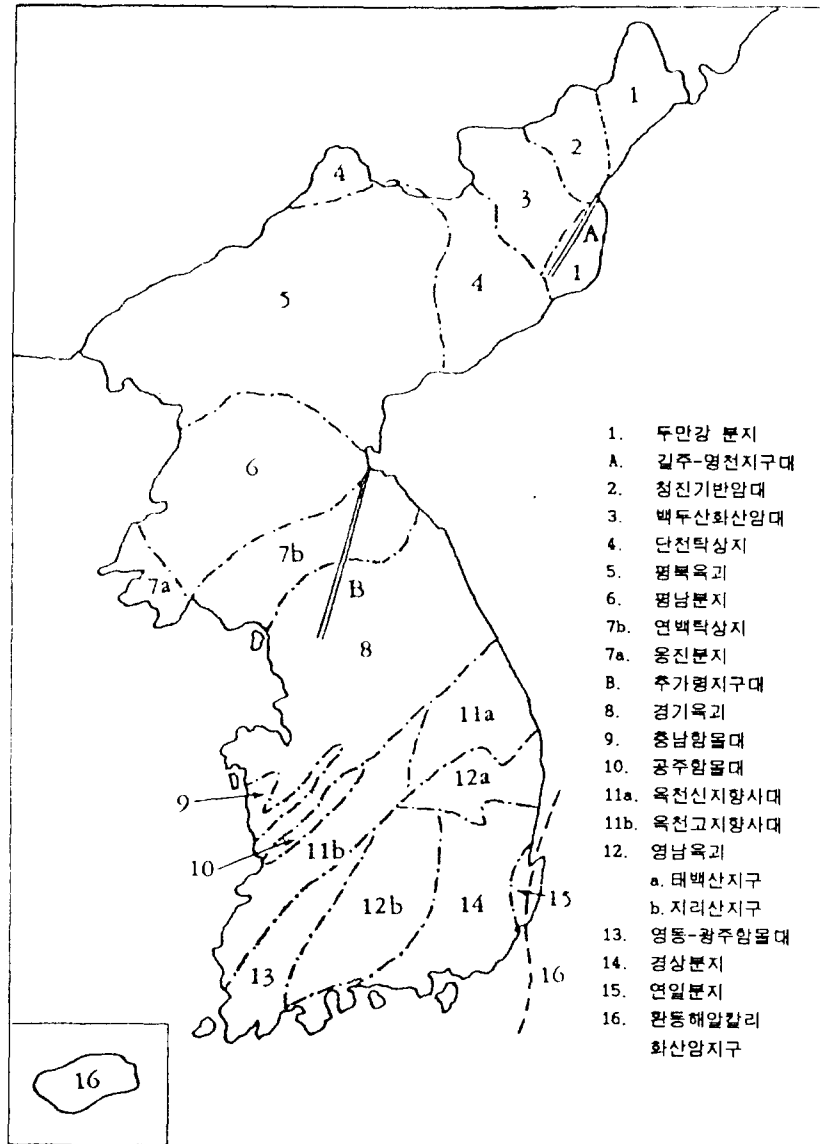


그림 1 한반도의 지체구조도(김옥준, 1982)

(5) 영일분지 - 포항을 중심으로 소변적으로 분포되며, 제3기 마이오세에 퇴적된 영일 층군으로 대표되는 최근의 지층이다. 따라서 고화가 불충분하며, 이 층군은 아래에 역암, 그위에 두께가 약 400m가 되는 혈암이 분포한다.

(6) 화산암지구 - 제주도의 지질을 대표하는 것은 서귀포층이다. 이 층은 제3기 플라이오세에 속하며, 사암 및 이암으로 구성된다. 이 층의 두께는 대단히 얇고, 그 아래와 위에는 거의 동시대에 분출된 알칼리성 조변암이 있다. 이들 암석은 제4기 플라이스토세에 화산활동으로 분출된 조변암과 현무암으로 덮여 있다.

지형과 풍화작용

한반도의 지형의 특징은 태백산맥이 동해안을 따라 남북으로 흐르며, 이것이 남한의

지형을 동서로 가르는 분수령이 되고 있다는 것이다. 여기로부터 동쪽으로는 고도가 급격히 낮아지나 서쪽으로 향해서는 서서히 낮아지며, 비교적 넓고 평탄한 지형은 서해안에 이르러 발견된다. 대부분의 하천은 태백산맥에서 시발하여 남쪽과 서쪽으로 흐르며, 나무가지 모양의 수계를 따라 오랜 지질연대를 통하여 풍화와 침식이 반복되었다.

하천의 범람에 의한 침식과 퇴적이 반복되면서 산록의 평탄한 경사는 점점 가파러져서 거의 모든 산은 급한 경사를 이룬다. 서쪽과 남쪽에 있는 넓은 평야에 띄엄 띄엄 존재하는 작은 산들도 평탄한 경사를 가진 것이 거의 없다. 평야에 있는 이러한 산에서도 산사태가 발생하는 경우가 보고되고 있다.

오랜 지질연대를 걸쳐서 형성된 암석은 풍화와 삭탈작용을 받아왔다. 풍화정도는 전적으로 모암의 광물성분에 의존한다. 석영성분이 우세한 화강암은 풍화작용을 받아 사질토로 변하였고, 장석이 우세한 편마암류는 물리적 및 화학적 풍화작용을 받아 점성토로 변하였다. 가파른 지형과 우량의 편중으로 인해 풍화를 받은 흩은 깊은 토층의 잔류토로 남아있지 못하고 끊임없이 침식을 받았다. 침식속도는 연간 1.5 - 4.0cm나 되는 것으로 보고되고 있다(Lee, 1987). 따라서 특히 경사지에서는 풍화깊이가 대단히 얇아서 토층은 일반적으로 얇다. 또한 절취하는 사면의 깊이가 얇을 때에도 지층은 토사층으로부터 곧 풍화암, 연암, 경암으로 쉽게 변할뿐만 아니라 습곡을 받아 가까운 거리에서도 지층이 극히 불균질한 경우가 많다(그림 2 참조).

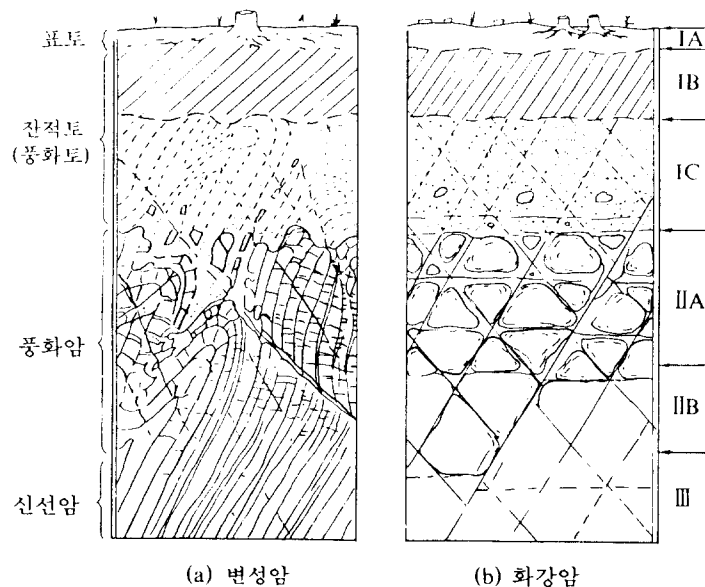


그림 2 화강암과 변성암의 풍화작용

강우가 지반의 공학적 특성에 끼치는 영향

물의 수문학적 순환과정

물은 수문학적 순환과정을 통하여 육지, 바다, 및 대기로 옮겨다닌다(그림 3 참조). 이

러한 순환과정 중 사면의 안정과 관련되는 것은 두말 할 필요도 없이 강수량이다. 강수는 그 일부가 증산(evapotranspiration)되거나 지표면으로 유출되고, 나머지는 땅속으로 침투되어 흙의 함수비와 지하수위를 증가시킨다.

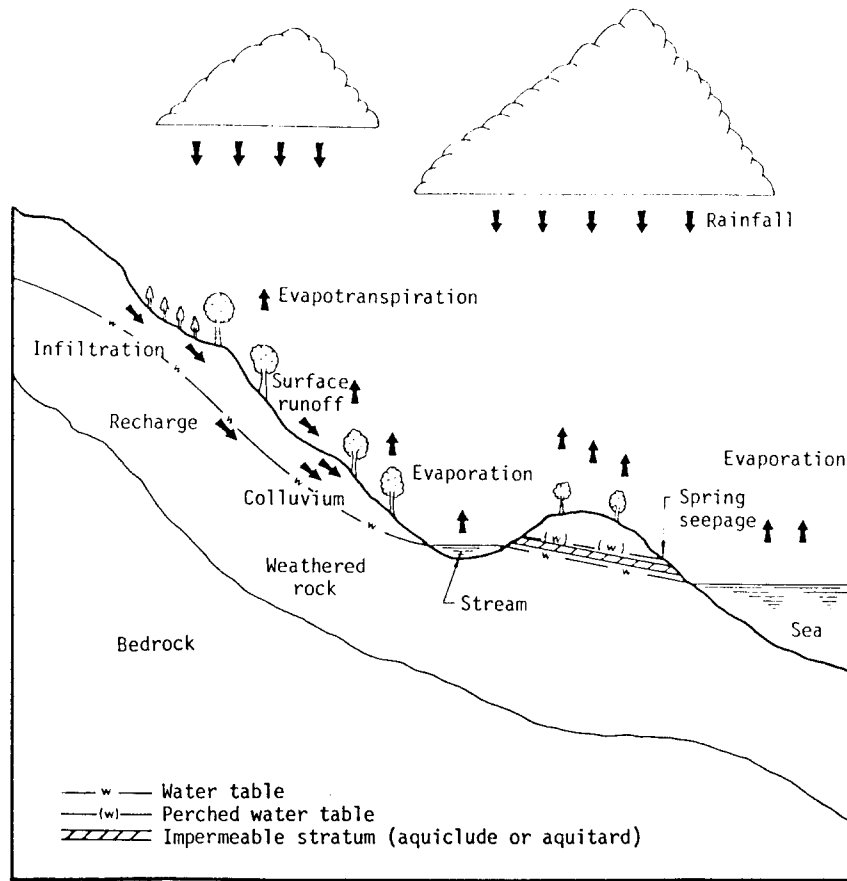


그림 3 물의 순환

강우로 인해 지반으로 물이 침투되면, 사면의 안정상 다음과 같은 영향을 끼친다는 것은 잘 알려진 사실이다.

- (1) 지하수위가 증가하고 간극수압이 발생하므로 지반의 응력조건을 변화시킨다.
- (2) 함수비가 증가됨으로 지반의 단위중량을 변화시킨다.
- (3) 강우의 일부가 지표면을 따라 흘러 지표면을 침식시킨다. 수두가 커지면 지중으로 흐른 침투수가 지반내의 흙을 침식시킬 수도 있다.
- (4) 법면을 형성하는 관물성분을 바꾼다.

강우특성

한국의 연평균 강우량은 1,200mm - 1400mm로 알려져 있다. 강우는 지형과 풍향에 따라 그 양을 달리하므로 해마다 또는 지역마다 강우량은 큰 차이를 보인다. 예를 들면, 1940년도의 서울의 강우량은 2,135mm이었으나, 1949년에는 불과 633.7mm에 지나지 않았다. 1992년도에 성산포관측소에서 연강우량이 1981.4mm로 관측된 반면, 같은 해 진안관측소에서 연강우량은 그 1/6도 안되는 305.9mm로 기록되고 있다(내무부, 1992).

또 강우량은 계절적으로도 크게 편기된다. 다시 말하면, 대부분의 호우는 여름철인 6월부터 9월에 편기되고 그 중에서도 그 대부분이 7, 8월에 집중된다. 그 동안의 강우기록을 보면(내무부, 1992) 집중호우가 발생하는 여름철에는 일강우량이 400mm 이상되는 경우도 흔히 있고(일 최대강우량: 1990/8/6 부여측후소에서 기록된 517.6mm), 80mm 이상되는 시간강우량도 흔히 발생한다(시간최다우량: 1942/8/5 서울측후소에서 118.6mm). 이러한 강우강도는 강우로 인해 산사태가 많이 발생하는 홍콩의 경우와 거의 비슷하다(Brand, 1984).

한국에서의 집중호우는 이동성 저기압(계절적 강우전선), 또는 열대성 저기압(태풍) 때문에 발생한다. 계절적 강우전선은 온난하고 습기가 많은 북태평양 기단이 국토를 덮고 있는 오호츠크해의 차고 젖은 기단에 접근할 때 형성된다. 강우전선은 국토를 남북으로 이동하면서 많은 비를 내린다.

지하수위

침투는 흙이나 암반의 간극 또는 불연속면을 따라 발생한다. 토층에서는 대부분 흙의 간극을 따라 물이 흐르며, 균질한 토층이라면 흡속으로의 물의 흐름은 Darcy의 법칙을 따른다. 암반은 사암과 같이 균질한 것이라면 간극속으로 흐르나, 대부분의 경우 절리와 기타 불연속면을 따라 발생한다. 단층이 있다면 강우로 인해 흡속으로 스며드는 물의 양은 엄청나게 클 수 있다. 흙에서도 지표면에 인장균열이나 건조균열이 있으면 여기를 따라 먼저 물이 흐른다.

물의 일부는 불포화토의 수분을 증가시키면서 대수층까지 흘러 지반의 저수능력을 증가시킨다. 지하수위란 중력의 작용을 받아 아래로 흐르는 대수층의 표면이다. 강수가 많으면 지하수위를 증가시키나 지하로의 유출이 많으면 오히려 이것을 감소시키므로 지하수위의 위치는 지층의 구성, 계절, 환경 등에 따라 항상 변화한다.

지하수위의 변동을 알기 위해서는 오랜 기간의 측정이 요구된다. 강우로 인한 지하수위의 변동을 조사하기 위하여 건기원(1989)에서는 서울 구로구 시흥 2동의 사면 붕괴 위험지역에서 1987년 6월 중순부터 11월 초까지 기존우물과 시추공의 지하수위의 변화를 측정하였다. 원지하수위는 사면의 아랫부분에서는 대략 지표면 아래 1.5m, 윗부분에서는 4.3m에 존재하였다. 약 6개월의 측정기간동안 100mm 이상의 일강우량도 있었고 상당기간동안 건기도 있었는데 지하수위는 강우후에 갑작스런 증가를 보였다. 그러나, 그 변동은 최대 1.3m에 지나지 않았으며, 최고수위는 지표면 아래 1.0m 이상 올라오지 않았다는 사실을 주목할 수 있다(그림 4, 5참조).

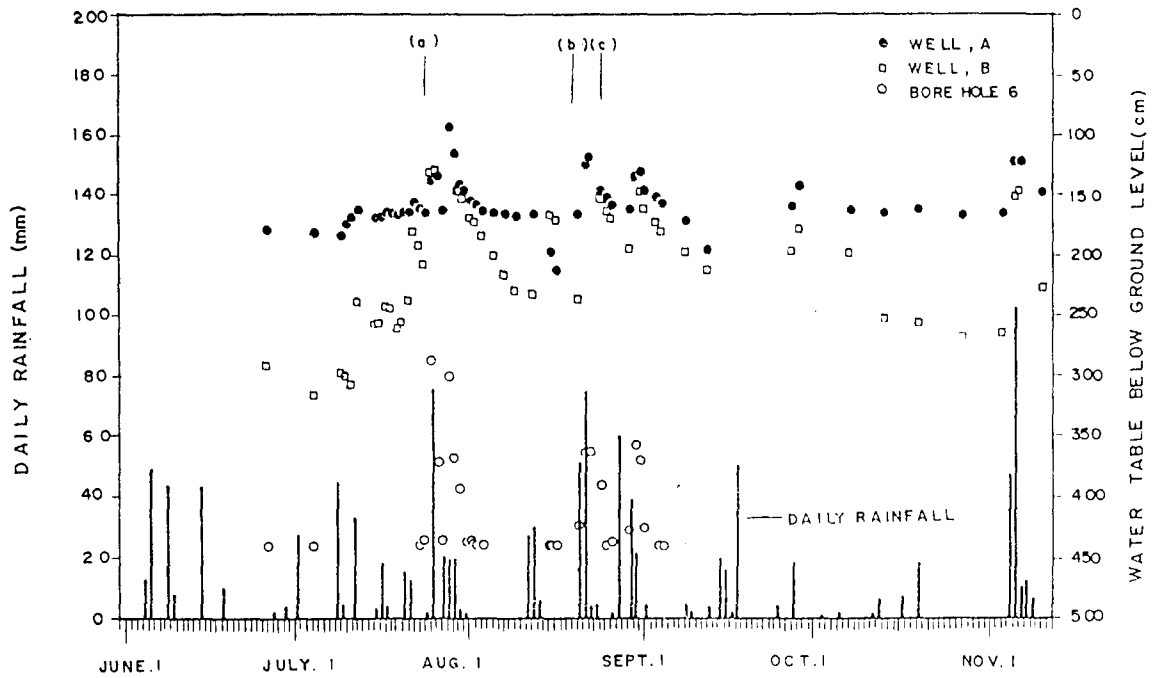


그림 4 서울 시흥 산사태 우심지역에서 측정된 일강우량에 따른 지하수위의 계절적 변동 (건기원, 1989)

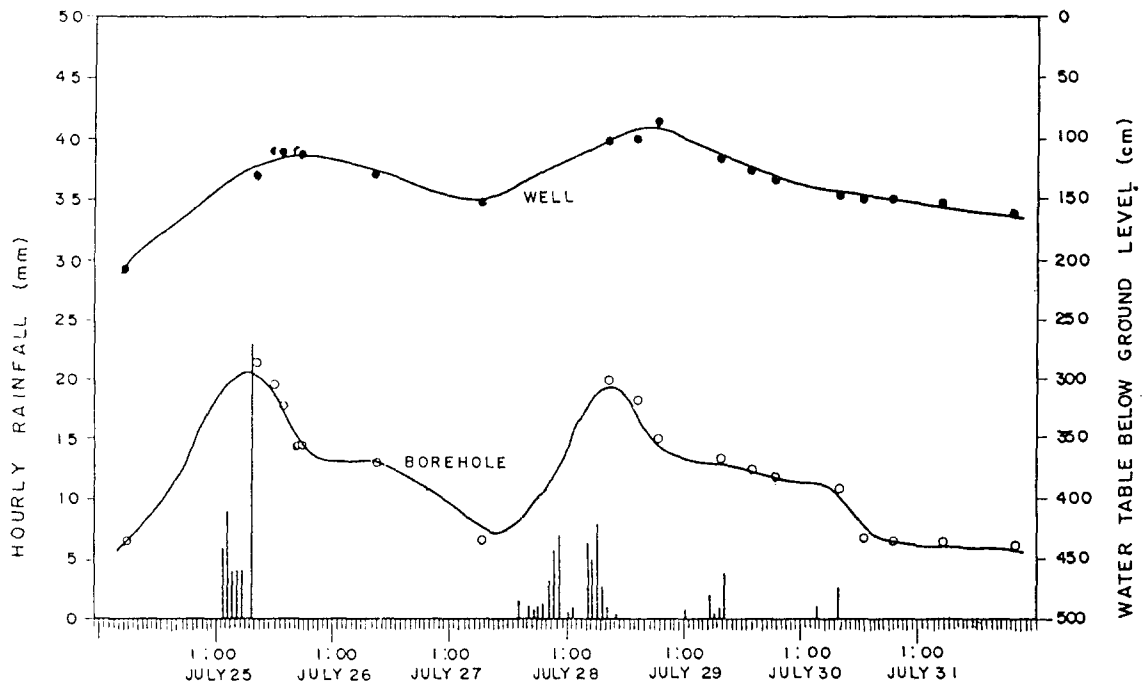


그림 5 서울 시흥 산사태 우심지역에서 측정된 시우량에 따른 지하수위의 계절적 변동 (건기원, 1989)

습윤대에 의한 지하수위 상승의 추정

강우로 인한 지하수위 상승의 실제 측정기록이 없다면, 개략적이기는 하지만 침윤전선의 강하깊이를 계산하여 이의 상승을 추정할 수 있다. 이에 앞서서 강우후에 침윤전선이 어떻게 발전되는가 하는 것을 알 필요가 있다.

그림 6은 지표면이 수평일 때, 불포화지반을 통하여 침윤전성이 어떻게 하강되어 가는가를 수치해석으로 보인 것이다. 여기서, 흙의 간극비는 0.5이고 초기포화도는 50%라고 가정하였다. 강우가 시작되면 물이 불포화지반으로 흐르면서 함수비를 증가시키므로 포화도는 위로부터 100%에 가까워진다. 만일 2.0m 아래 원지하수위 또는 불투수층이 존재한다면 상당한 시간 경과후(여기서는 10시간) 강우전선이 여기까지 이르고, 곧 그 위에 있는 지반전체가 포화도 100%에 가까워지면서 간극수압은 최대치에 도달된다. 간극수압이 최대치에 이르는 시간은 강우강도와 강우지속시간, 지반의 불포화투수계수, 지반의 경사, 지반내로의 유출 등 여러 요소에 좌우된다.

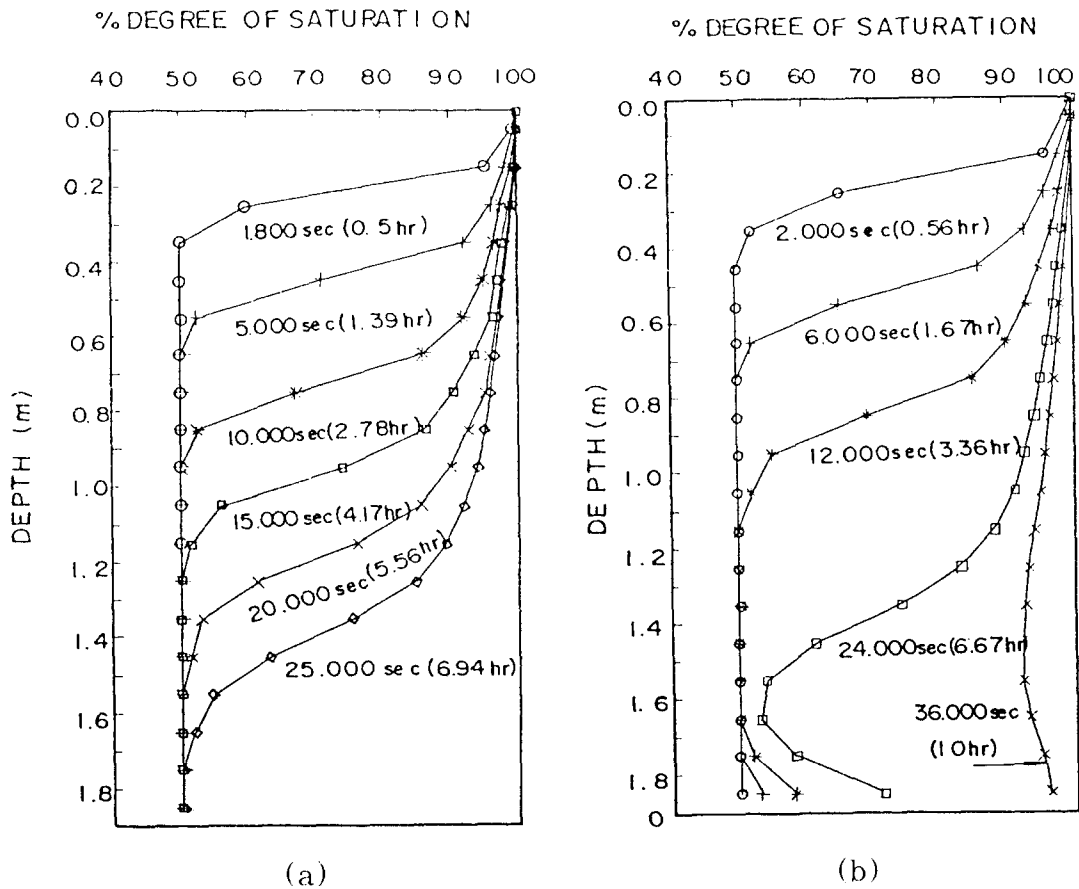


그림 6 침윤전선의 하강
((a) 지하수위가 없는 경우, (b) 지하수위가 2m아래에 있는 경우)

위의 예에서는 지표면 아래 2m깊이에 지하수위 또는 불투수층이 존재하고, 또한 침투에 충분한 일정한 강우강도이상의 강우가 계속된다고 가정하였다. 그러나, 상당한 깊이

아래 이들이 존재하고 강우강도도 시간의 경과에 따라 변화한다고 하면, 습윤전선이 하강하는 속도와 두께도 이에 따라 달라진다는 것은 분명하다. 또한, 강우가 중단된다면 습윤띠의 두께는 더 발전하지 못하나 계속적으로 하강하면서 지하수위까지 도달될 것이다. 따라서 설계에 이용할 수 있는 습윤전선의 두께는 기상학적인 측면을 고려하여 더 심도있게 연구되어야 할 과제이다.

Lumb(1975)는 습윤전선의 두께를 극히 간단한 방법으로 결정할 수 있는 공식을 제안하였다. 이 두께(h)는 지반의 포화투수계수(k), 강우지속시간(t), 지반의 초기포화도(S_0) 및 최종포화도(S_f)와 밀접히 관련되므로 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$h = \frac{k t}{n(S_f - S_0)} \quad (1)$$

이 식을 근거로 하여 습윤띠(wetting band)의 두께는 그림 7의 표를 이용하여 결정할 수 있다.

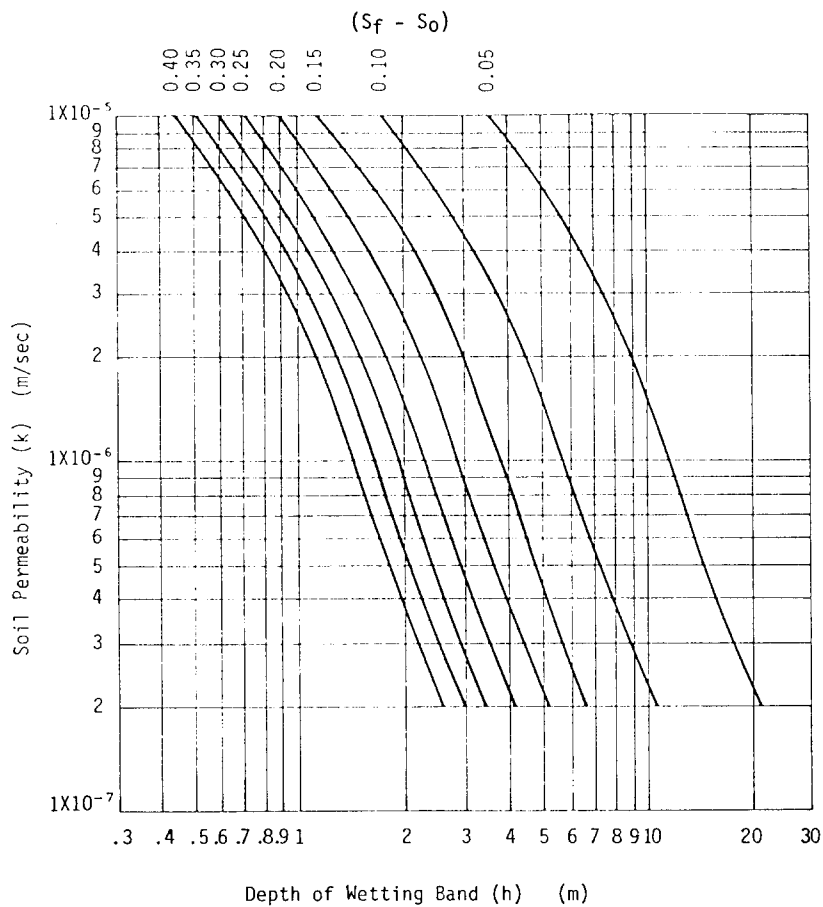


그림 7 습윤띠의 두께를 산정하는 도표(GCO, 1981)

일시지하수위의 형성

습윤띠의 진행은 흙의 투수계수와 밀접히 관련되므로, 만일 토층이 균질하지 않다면 습윤띠가 발전하는 속도도 일정하지 않을 것이다. 다시 말하면, 윗층보다도 투수계수가 현저히 작은 지층을 만나면 습윤띠는 원지하수위까지 하강하지 못하므로 일시적으로 지하수위가 형성된다. 이것을 일시지하수위(perched water table)라고 하며, 원지하수위(main water table)와 구별된다. 이와 같이 일시지하수위는 서로 다른 풍화층의 경계면에서, 성토와 그 아래 있는 지층과의 경계면, 또는 풍화된 암반의 불연속면을 따라 형성될 수 있다. 우리나라의 지질의 층서는 일반적으로 토사층, 풍화토, 풍화암, 연암 등으로 나누어지고 그 두께가 대단히 얇으므로, 폭우시에는 일시지하수위가 자주 형성되는 것 같다. 일시지하수위는 비교적 빨리 형성되어 곧 소멸되므로 이것을 계측하는 것도 사실상 쉬운 일이 아니다.

간극수

지하수위의 위치에 따라 간극수압의 크기는 달라진다. 일반적으로 말하면, 지하수위를 중심으로 그 아래는 정간극수압이 되고 그 위는 부간극수압이 된다. 지하수위의 위치는 스탠드 파이프 또는 피조미터로 측정할 수 있다. 유효응력의 원리를 따르면 간극수압의 크기는 지반의 전단강도와 밀접히 관련된다. 따라서 간극수압이 정이나 부가 되는나 하는 것은 사면의 안정해석에 있어서 대단히 중요하다.

부간극수압을 현장에서 측정하려면 텐서미터(tensiometer)를 사용해야 한다. 실내에서는 공기함입비(air entry value)가 낮은 간극수압계 또는 템피(Tempe)와 같은 기구를 써서 측정할 수 있다. 그러나 부간극수압이 존재하는 한, 사면은 안정측이 됨으로 설계 목적으로는 잘 사용되지 않는다.

지하수위의 흐름이 있으면 간극수압이 0인 위치와 지하수위의 위치는 일치하지 아니한다. 따라서 오픈 스탠드 파이프로서는 지하수위의 위치를 결정할 수 있지만, 이것이 꼭 간극수압이 0이 되는 위치가 아니라는 것을 유의할 필요가 있다. 현장에서 지층 깊이에 따라 여러 위치에 피조미터를 꽂아 두었다면, 어떠한 경우에 대해서도 간극수압의 크기를 결정할 수 있다.

균질한 토층에 있어서는 유선망을 그려 지층내 간극수압의 분포를 결정할 수 있다. 그러나 손으로 이것을 그릴 때에는 2차원에 대한 정간극수압에 대한 것밖에 그릴 수 없다. 최근에 발전된 여러가지 전산프로그램으로 수치해석을 한다면, 비등방 불균질한 토층에 대한 정 및 부의 간극수압의 분포는 물론 간극수압의 시간적 변화도 추정할 수 있다.

경사진 지표면에는 흔히 인장균열 또는 건조균열이 존재한다. 이러한 균열들이 특히 그 아래 견고한 지층까지 도달되면 지층의 경계면을 따라 횡방향의 균열이 발전될 수 있다. 절리까지 도달되면 절리의 폭을 더 증가시키는 경향이 있다. 이러한 횡방향균열은 지표면으로 노출되는 경우도 있고 지반내에 묻히는 경우도 있다. 인장균열의 깊이는 Rankine의 방법으로 예측할 수는 있지만, 실제의 인장균열 또는 건조균열의 깊이나 횡방향균열의 연장을 실측하기는 불가능하다.

이와 같은 균열속으로 강우시 물이 스며들게 되면 국부적으로 간극수압을 증대시킨다.

횡방향균열이 지표면까지 연결되어 있는 경우와 그렇지 않는 경우에 대한 강우시 간극수압의 분포는 그림 8에 보인다. 이 그림을 보면 후자의 경우가 사면의 안정에 심각한 영향을 끼친다는 것을 쉽게 이해 할 수 있을 것이다.

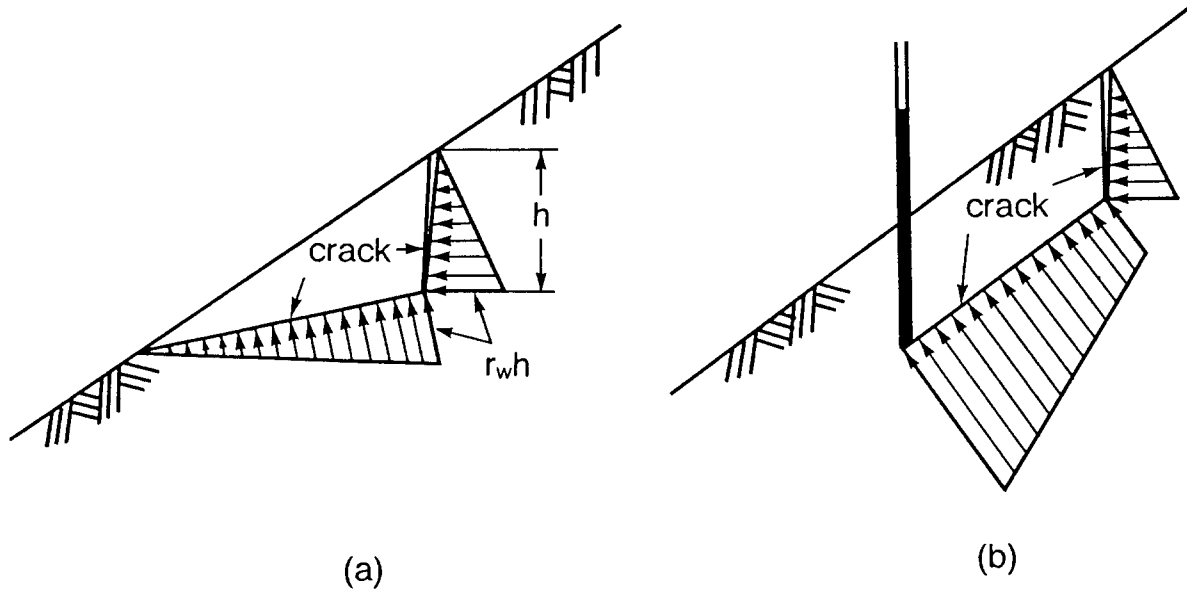


그림 8 인장균열에 작용하는 간극수압 (a) 개방형 (b)폐쇄형

강우로 인한 절취사면의 붕괴사례

절취사면의 붕괴사고는 1994년 4.12.05:30에 발생하였다. 그 위치는 한국도로공사에서 구마고속도로를 건설하기 위하여 경북의 금호기점에서 59.8km되는 위치에 있는 암반사면의 절토부에서 발생하였다. 사고 발생 3일후 현장에 출장하여 조사한 결과, 활동은 혈암의 층리를 따라(각도 $18^{\circ} - 20^{\circ}$) 매끈한 평면활동으로 사면이 붕괴되었다. 활동체는 폭 60m, 높이 80m인 삼각형, 깊이는 최대 15 m정도이고, 전체 활동 토량은 약 15,000m³로 추산되었다(그림 9 참조).

이 사면활동은 강우로 기인되었다. 활동전에 이미 사면은 연암으로 판단되었으므로 1:0.5의 구배로 절취하여 계속적으로 공사가 진행중에 있었다. 그 부근의 측후소의 강우기록에 의하면 폭우가 1994년 4.11.11:00 - 4.12.07:00 사이에 65mm가 내린 것으로 기록되고 있다.

사고위치 부근에서의 지질은 거의 비슷하며 절리가 도로를 향하여 도로축과 대략 각각 90° 및 50° 되는 거의 직선인 연직방향의 긴 절리가 지층내부에 교차하여 존재하였다. 그러나 지표면에서는 수목과 관목때문에 육안으로는 확인 불가하였을 것으로 판단된다. 이 절리 내부에는 방해석이 용해되어 최대 0.5mm정도 부착되어 있는 것으로 미루어 보아 이 절리는 상당히 오랜 연대에 걸쳐 발생되어 왔던 것으로 판단되었다.

이 일대의 지질을 이루는 혈암의 층리는 수평면과 $18^{\circ} - 20^{\circ}$ 로 도로축과 직각방향으로 경사를 이루고, 층리사이에는 오랜 기간에 걸쳐 화학적 풍화가 발생하여 1mm두께이내의 대단히 얇은 점토층이 형성되었다. 폭우시에는 연직방향의 절리를 통하여 층리사이로 물이 침투하고, 폭우가 계속됨에 따라 수위가 상승하면서 수압이 증가되었으리라는 것을 쉽게 추정할 수 있었다. 또한 층리사이로 물이 침투함으로써 이것이 양압력으로 작용하였을 것이다. 층리사이에 있는 박층의 점토는 수분이 첨가됨으로서 윤활제로 작용하여 전단강도를 현저히 약화시킨 것도 사면붕괴요인으로 크게 작용하였을 것이다.

위와 같은 현장조사결과로 미루어 보아, 본 활동사면에서는 강우로 인해 활동하려는 압괴의 단위중량이 증가하였고, 연직균열을 따라 수압이 작용하였으며, 또한 층리면을 따라 발생한 양압력의 하향성분이 작용력으로 추가되어 층리면을 따라 활동하려는 힘이 크게 증가하였다는 것은 분명하다. 반면, 혈암의 층리면을 따라 물이 침투함으로써 전단강도가 현저히 약화되었을 것이다. 그런데, 이와 같은 자세한 사고조사는 파괴이후에는 가능하지만, 설계단계에서 지층단면의 자세한 조사는 물론 강우에 대한 영향을 충분히 감안하므로써 사고를 미리 방지할 수 있을 것이다

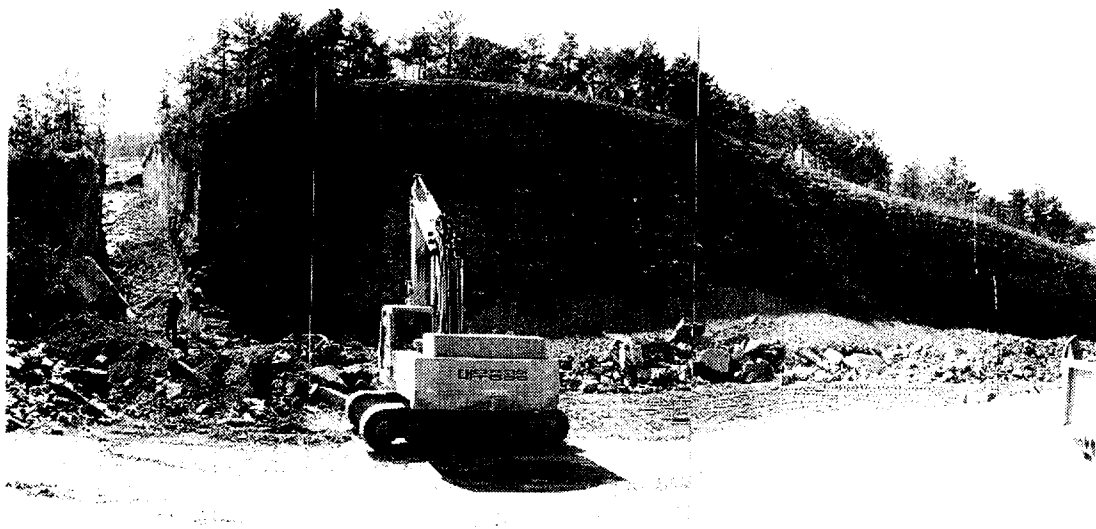


그림 9 구마고속도로 금호기점 59.8km되는 위치에서의 사면활동

절취사면의 설계

지반조사

절취사면을 설계할 때에는 지반조사를 먼저 수행해야 한다. 우리나라에서의 지반조사의 중점은 보오링을 하여 지층을 확인하고, 표준관입시험을 하여 지층깊이를 따라 N값을 구하는 것이다. 절취사면은 주로 잔적토인 토사와 암석으로 구성되는데, 시료는 채취하지만 이에 대한 역학시험은 거의 수행되지 않는다. 불교란상태로 시료를 채취하기가 어렵고 역학시험을 위한 실내시험기구가 보편되어 있지 않기 때문이다. 이의 대안으로 현장에서의

콘관입시험이나 프레스미터 시험도 가능하지만, 현재까지 수행하지 않고 있다. 조사간격도 조사비용의 부족으로 표준보다 훨씬 떨어지며, 이를 보완하기 위한 탄성과 탐사와 같은 간접적인 시험방법도 수행하지 않고 있다. 지반정보에 관한 데이터 베이스가 구축되어 있지 않으므로 이를 사전조사단계에서 이용할 수도 없고, 지질도도 잘 이용되지 않는다.

암반사면에 대해서는 코어를 채취해야 한다. 코어의 회수율은 시추장비에 따라 크게 영향을 받는다. 싱글튜브 코어 바렐(single-tube core-barrel)은 균열이 작은 지층에 적절하다. 그러나 균열이 많으면 코어 회수율이 나쁘므로 더블 또는 트리플 튜브 코어 바렐(double- or triple-tube core-barrel)을 사용하고, 비트(bit)도 당연히 금속제보다 다이아몬드를 써야 한다. 파쇄가 많은 곳에서도 굴진속도를 높이기 위해 싱글튜브를 사용하면 결코 지층 그대로의 코어가 회수될 수 없을 것이다.

또한 시추공의 크기도 코어회수율에 크게 영향을 끼친다. 시추회사에서는 BX(40mm)가 일반적으로 사용되고 있으나 NX(54mm)로 한다면 훨씬 암석 판정이나 코어회수율이 향상될 수 있다.

절취사면의 구배

절취사면의 구배는 지반조사와 토질시험 결과를 근거하여 결정되어야 한다. 토층 또는 암층에 따른 토질역학적 또는 암석역학적 조사와 시험이 불충분하다면, 경험적 또는 시방서에 나와 있는 표준구배에 의존하여 이것을 결정하지 않을 수 없을 것이다. 이런 경우 구배는 거의 전적으로 토목공사 또는 도로공사 표준시방서에서 제안하는 구배를 적용하고 있다. 도로공사에서 발행한 도로설계요령(1992)에 의하면, 사질토인 경우 1:0.8 - 1:1.5로 하고, 땅깁이 높이에 따라 이 구배는 달라지나 절토높이는 최대 10m로 하고 있다. 점성토에 대해서는 1:0.8 - 1:1.2로 하고 최대높이를 10m로 한다. 토질역학적인 관점에서 보면, 두 경우 모두 이와 같은 절취사면은 불안정하다고 하지 않을 수 없다.

사면의 높이가 어느 한계 이상이 되면 소단을 둔다. 우리나라의 경우에는 절토높이를 최대 10m마다 두는 것으로 되어 있지만, 홍콩의 경우에는 7.5m마다 두고 소단의 폭은 최소 1.5m로 하도록 되어 있다. 소단을 두면 사면상의 유출량을 감소시키므로서 침식에 효과가 있을뿐만 아니라 소단 아래 흩이 암성토의 역할을 하므로 안전성을 증가시킨다.

암층에 대한 절취구배는 절리나 단층과 같은 불연속면이 철저히 고려되어야 한다. 이들을 고려하지 않고 시방서에 따라 표준구배로 절취할 때에는 시공시 또는 시공후 사면이 불안정하게 될 수 있다. 소단을 둘때에도 이것이 감안되지 않으면 그림 10에 보인 바와 같이 소단을 뚫으므로 오히려 사면이 불안해질 수 있다.

안정해석

사면의 활동을 역학적으로 해석하려면 (1) 예상활동형상을 추정하고, (2) 지반의 전단강도를 결정하고, (3) 지하수위와 간극수압을 측정 또는 추정하고, (4)한계평형의 이론을 적용하여 안전율을 계산해야 한다. 이와 같은 과정을 거쳐 결정한 안전율이 실제와 어느 정도 합치될 것인가 하는 것은 위의 각 항목들을 결정하는 과정에서의 정확도에 달려 있다. 이에 대해서는 각 항목별로 더 깊이 고찰할 필요가 있을 것 같다.

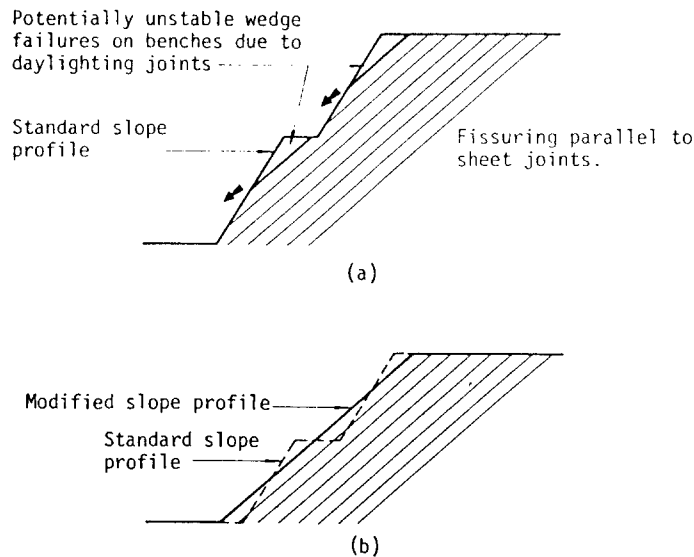


그림 10 암반사면에 대한 소단 설치

((a)소단을 설치함으로써 불안해진 사면 (b)절리에 평행하게 절취함으로써 안정된 사면)

(1) 해석이론

절취사면과 같이 지층이 다르고 활동깊이가 비교적 깊다면, 토질역학적인 방법을 적용할 때에는 절편법이 적절하다. 절편법은 원형해석과 비원형해석을 포함하여 1950년대부터 여러가지 이론이 발전되어 왔다. 이 방법에서는 부정정차수를 줄이기 위해 설정된 가정에 근거하여 여러가지 다른 방법이 제안되었고(Bishop, 1955 ; Janbu, 1954 ; Spencer, 1968 ; Morgenstern and Price, 1965 ; Janbu, 1973 등), 각 해석방법을 바탕으로 하여 안정해석에 실용할 수 있는 전산 프로그램도 많이 개발되었다(백, 1988; 홍, 1986 참조). 해석이론에 있어서는 Fellenius(1936)방법을 제외하면 어떤 이론을 쓰든간에 해석결과의 차이는 5%이내로 알려져 있다(Duncan and Wright, 1980; 백 등, 1990). 사면이 비교적 단순한 경우라면 복잡한 계산을 할 필요가 없이 도해법(백, 1989 참조)으로 해석해도 그 결과는 역학적인 해석과 크게 어긋나지 않는다.

그러나, 우리나라의 절취사면은 한계평형법을 적용하여 해석할 수 있을만큼 균질한 경우가 드물다. 지층깊이에 따라 풍화정도가 심하고 활동이 단층, 절리와 같은 불연속면을 따라 발생하기 때문이다. 자연지반을 절취하면 흩덩이 자중의 제거로 말미암아 지반이 팽창하므로 암반중에 있던 본래의 불연속면은 더 확장된다. 따라서 불연속면의 존재와 방향이 사면의 안정성을 지배하는 경우가 많다.

불연속면이 존재하는 암반사면에 대해서는, 암반에서의 주향(strike)과 경사(dip)를 조사하여 이들을 평사투영도에 표시함으로써 사면안정해석을 할 수 있는 평사투영법(stereographic projection)이 개발되었다(Hoek and Bray, 1977 ; 정과 김, 1989 참

조). 이 기법을 쓰면, 암체가 활동을 일으킬 수 있는 형태와 안정, 불안정의 영역을 판단할 수 있다. 그러나 이 방법은 미리 절취한 사면에 대해서만 해석이 가능하다.

(2) 활동형상

지반이 어떤 형상을 따라 파괴에 이르게 되느냐 하는 것은 해석방법을 결정하는데 있어서 대단히 중요하다. 균질한 토층의 절취면의 활동형상은 원형 또는 원형에 가까운 것으로 알려져 있다. 앞서 설명한 바와 같이 우리나라의 지층은 일반적으로 깊이에 따라 크게 풍화도가 달라지므로, 절취사면이 균질한 경우는 극히 드물다.

암반사면의 활동에 대해서는 범면이나 노두에 대한 지질학적인 관찰과 지반조사를 기초로 해서 그 형상을 결정하지 않으면 안된다. 절리가 규칙적으로 발전된 암반사면에 대해서 Hoek and Bray(1977)은 사면붕괴의 종류를 원형, 평면형, 쐐기형, 및 전도형의 4가지로 분류하였다. 이러한 분류는 기본적인 파괴형상이나, 실제에 있어서는 두개의 기본형의 복합, 또는 특이한 형태를 취하는 경우도 있다.

자연사면을 절취하면, 활동이 범면부근에 한정되지 않고 그 위의 사면을 따라 대규모로 발생하는 지반활동(landslide)으로 발전될 수도 있다는 것을 유의해야 한다. 이러한 예는 댐의 기초와 같이 산록을 깊이 절취할 때 자주 발생하지만, 주택단지나 도로개설을 위해 불과 수 m를 절취함으로써 지반활동을 유발하는 경우도 있다. 이러한 대규모의 지반활동은 산사태처럼 갑작스럽게 일어나는 경우도 있지만, 활동의 진행속도가 느려서 평상시에도 조금씩 진행하다가 우기때마다 더 큰 변형을 일으키는 경우가 많다(예: 진해시, 1987). 또 이와 같은 활동에 있어서는 산중턱에 인장균열이 생기므로, 조금만 주의하면 미리 그 위험성을 예측할 수가 있다. 비교적 큰 규모의 활동의 예는 경상남북도에 분포되어 있는 퇴적암층과 영일분지의 제3기에 형성된 혈암층에서 더러 발생한다.

(3) 전단강도

점성도와는 달리, 풍화토나 연약한 암석의 전단강도를 측정하는 현재의 기술은 전세계적으로 아직도 대단히 낮은 수준에 있다(Brand, 1985). 특히 우리나라에서는 잔적토에 대한 전단강도는 표준관입시험 결과로부터 추정하는 수준을 넘지 못하고 있고, 더욱이 암반사면에 대해서는 자원공학분야에서 전단강도 측정을 수행하고 있을뿐, 토목분야에서는 이에 관련되는 강의, 실험이 아직까지 제대로 이루어지지 않고 있다. 특히, 암반의 사면활동에 관련되는 우리의 관심은 암석의 불연속면을 따라 존재하는 전단강도를 정하는 일이다. 불연속면은 매끈한 경우도 있는 반면, 요철이 있을 수도 있고, 그 사이에는 화학적 풍화작용을 받아 형성된 점토도 존재할 수 있으므로 사실상 시험을 하더라도 대표적인 전단강도를 정하기가 여간 어렵지 않다. 다만, 파괴된 사면에 대하여 역해석을 한 결과를 정리하면, 비교적 신뢰성 있는 전단강도의 추정이 가능하다. 암반의 종류에 따른 불연속면의 전단강도의 개략치는 Hoek and Bray (1977)의 책에 잘 수록되어 있다.

(4) 지하수위와 간극수압

유효응력의 원리를 이해하면 지하수위와 간극수압이 사면의 안정에 얼마나 지대한 영향을 끼치게 될 것인가를 쉽게 이해할 수 있을 것이다. 강우로 인해 지하수위와 간극수압이 어떻게 변화하는가는 이미 앞에서 자세히 설명하였다. 우리나라에서의 사면붕괴는

주로 강우로 기인되므로 강우로 인한 간극수압의 증가를 결정하여 유효응력해석법을 적용하는 것이 편리하다. 따라서 강우강도의 시간적 변화에 따른 간극수압의 변화를 추적할 수 있다면 안정해석의 정도를 높이는 데 크게 기여할 수 있을 것이다. 그러나, 우리나라에서는 안정해석을 위한 지하수위와 간극수압의 측정기술이 아직도 보편화되어 있지 않다.

안전율

절취사면에 대해 한계평형법으로 안정해석을 하였다면 안전율이 결정된다. 이론적으로 말하면, 안전율이 1 이상일 때 그 사면은 안정하다고 말할 수 있다. 홍콩(GCO, 1984)에서는 생명과 재산손실의 두가지 측면을 고려하여 표 2에 보인 바와 같이 안전율을 달리 정하고 있다. 이 표에서 생명에 대한 손실이 높은 경우는 사람이 거주하고 있는 주택, 교육시설, 상업지구, 공장지구 등이 절취사면에 인접해 있을 때를 말하고, 재산손실이 높은 경우는 사면의 붕괴로 인해 과도한 경제적손실을 가칠 수 있는 빌딩, 기본시설, 중요도로 등이 여기에 해당된다. 여기서 이 안전율을 적용하는 데 있어서는 10년주기의 강우가 고려되어 있다는 것을 유의해야 한다. 이 표에서 보는 바와 같이 생명 또는 재산의 손실 위험이 높을 때에는 10년주기의 강우를 감안하여 안전율 1.4를 적용해야 한다는 것을 알 수 있다. 또한, 지하수위에 대한 최악의 조건으로 안정해석을 하여 안전율이 1.1 이상 되도록 추가적으로 요구하고 있다. 그러나 생명과 재산의 위험이 전혀 없을 때에는 1보다 약간 커도 상관없는 것으로 되어 있다.

표 2 사면설계에 있어서 추천하는 안전율

<div style="text-align: center;"> 생명의 위험 / 재산상 위험 </div>		10년빈도 강우의 생명손실에 대한 안전율		
		없음	낮음	높음
10년빈도강우의 재산손실에 대한 안전율	없음	1.0이상	1.2	1.4
	낮음	1.2	1.2	1.4
	높음	1.4	1.4	1.4

사면 배수

사면의 배수시설은 폭우로 인한 침투와 침식을 감소시킬 목적으로 설치된다. 따라서, 배수시설은 유역에서 오는 수량을 효과적으로 집수하여 사면의 안정과 무관한 위치로 유도하도록 설치되어야 한다. 사면의 유출량은 수문학적 공식을 써서 산정하고 이 유출량을

신속히 배출시키도록 배수시설을 설계하여야 한다.

사면이 대규모라면 배수시설은 횡방향은 물론 연직방향으로도 설치한다. 우리나라의 경우에는 절취사면 위로부터 오는 유출량이 사면을 따라 흘러가는 것을 차단할 목적으로 산마루 측구를 두는 경우가 많이 있다. 그러나 이와 같은 측구가 조심스럽게 설계되지 않으면 오히려 침투수의 지반으로의 침투를 촉진하여 강우시 사면의 불안을 더 촉진시킬 수 있다는 것을 유의해야 한다. 그림 11은 산마루측구로부터 인장균열이 유발되어 사면전체가 파괴된 한 예를 보인 것이다.



그림 11 산마루 측구로부터 발전된 인장균열

절취사면의 유지관리

유지관리의 필요성

모든 다른 구조물과 마찬가지로 절취사면도 시일이 지나면 안정성이 떨어진다. 아무리 잘 설계된 절취사면이라 하더라도 유지관리를 소홀히 하면 사면이 붕괴될 수도 있다. 유지관리는 설계자의 책임이 아니고 전적으로 관리자의 책임에 속한다는 것을 이해해야 한다. 절취사면에 대한 유지관리의 필요성은 그림 12를 보면 쉽게 이해할 수 있다.

그림 12는 점토지반을 절취하여 사면을 형성하였을 때의 시간변화에 따른 간극수압, 전단강도, 및 안전율의 일반적인 변화경향을 보인다. 초기의 간극수압은 시공직후에 최소로 감소하고, 점토의 팽창성때문에 조금씩 증가한다. 점토의 전단강도는 시간의 경과에 따라 감소되는데, 이것은 토피하중의 감소로 기인되는 부간극수압의 감소때문이다. 간극수압은 증가하고 전단강도는 감소됨으로 사면활동에 대한 안전율은 시간의 경과에 따라 감소되는 것은 당연하다.

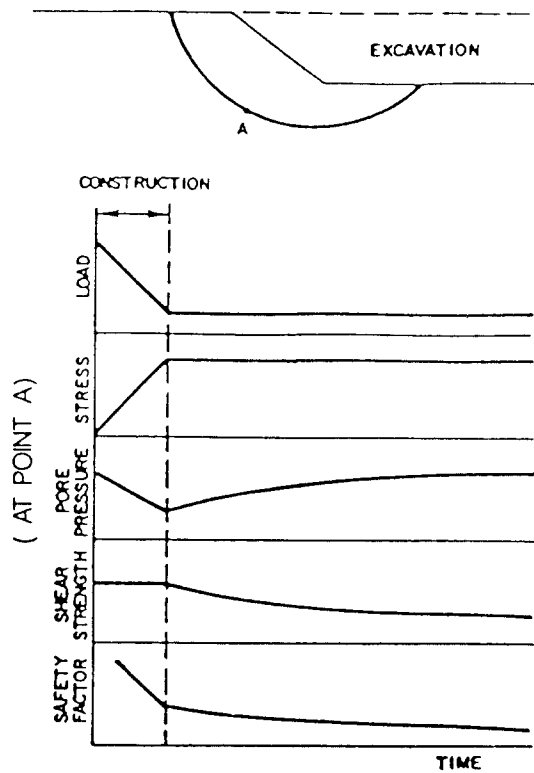


그림 12 점토지반의 절취사면에 대한 전단응력, 간극수압, 및 안전율의 변화

만일 사면의 수명기간동안 강우가 있었다면 앞서 설명한 바와 같이 어떤 지반이든간에 간극수압의 증가를 가져올 것이다. 따라서 전단강도의 변화가 없다고 가정하더라도 안전율이 현저히 감소하게 됨으로 폭우가 있는 다음, 사면이 불안하게 되는 이유가 바로 여기에 있는 것이다. 더욱이 강우와 건조, 또는 동결과 융해가 반복되면 모든 흙은 본래의 전단강도보다 약화된다.

흙이나 암석의 전단강도의 열화는 재료에 따라 많은 차이를 보인다. 또 절취한 사면의 표층에서 가장 심하고 아래로 갈수록 감소한다. 특히 팽창성의 점토와 이암 등은 열화정도가 현저하다. 그림 13은 포항 3기층 이토에 대한 시험결과인데(이, 1994), 5회반복하여 슬레이킹 시험을 한 결과 전단강도가 2.8kg/cm^2 로부터 0.7kg/cm^2 까지 1/4로 감소되었다는 것을 알 수 있다.

이와 같이 절취사면은 시간의 경과에 따라 안정성이 떨어짐으로 주기적으로 검사(inspection)를 하지 않으면 큰 재난을 가져올 수 있다. 생명과 재산의 위험을 가져올 수 있는 가능성이 있다면 검사표(check list)를 작성하여 검사를 주기적으로 시행해야 한다. 검사표에는 사면의 변위, 지표면의 침식, 인장균열의 발생, 누수 등 안정에 영향을 끼칠 수 있는 모든 항목이 포함되어야 한다.

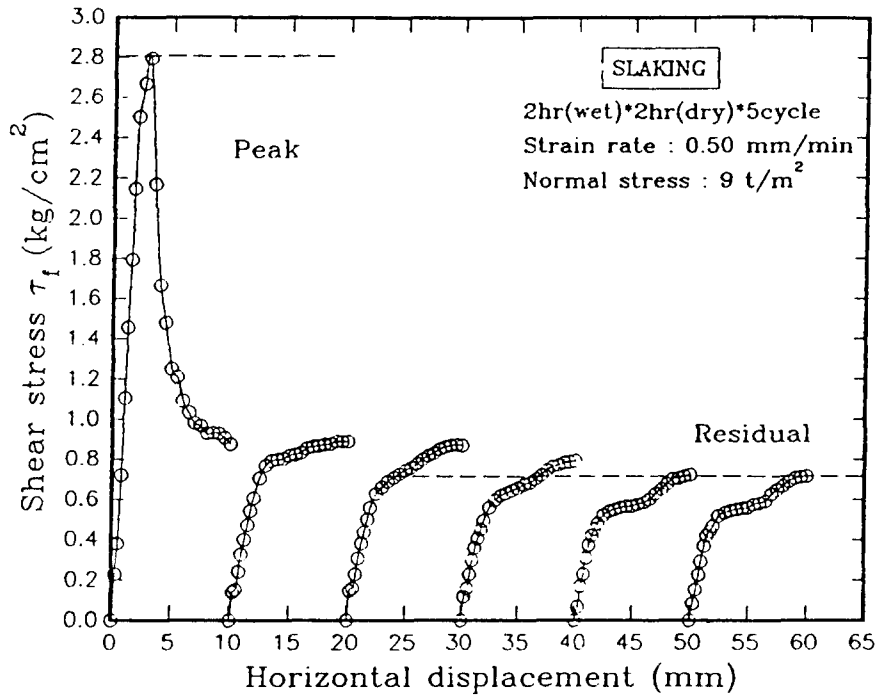


그림 13 포항 제3기층 이암에 대한 슬레이킹 시험 결과(이, 1994)

계측

계측은 위험성이 있는 절취사면에 대하여 시공중 또는 장기간의 거동을 파악할 목적으로 설치된다. 계측기기를 설치할 때에는 설치목적을 분명히 하여 계측기기의 종류와 수량, 계측방법, 관리체계 등을 정해두어야 한다. 장기간의 측정에 있어서는 계측기구가 손상을 받게 되는 일이 흔히 있으므로 실패율을 고려해두어야 한다.

계측은 측정목적에 따라 다음과 같이 네가지로 나눌 수 있다.

- (1) 지하수위와 간극수압
- (2) 표면 변위
- (3) 지중변위
- (4) 우량계

지하수위와 간극수압을 측정하기 위해서는 스탠드 파이프, 피조미터 등의 측정기구가 요구된다. 스탠드 파이프는 시추공에다 케이싱을 박아 설치하되, 그 끝이 지하수위의 변동 범위의 최하단보다 아래로 1 - 2m정도 깊이로 설치하는 것이 좋다. 너무 깊게 매설하여

2, 3개의 토층까지 내려간다면 지하수위의 옳은 위치가 측정되지 아니한다는 것을 유의할 필요가 있다. 그런 경우에는 스탠드 파이프에 구멍을 뚫어 두어야 한다. 간극수압계는 틱이 놓이는 위치에서의 간극수압을 측정한다.

간극수압계는 수압식, 기압식, 전기진동형식, 및 전기저항식으로 나눌 수 있다. 이 중 어떤 형식을 쓰는 것이 좋으나 하는 것은 측정목적에 따라 달라질 수 있다. 예를 들면, 측정기간동안 부간극수압도 측정할 필요가 있다면 공기함입비(air entry value)가 낮은 수압식을 써야 한다. 가장 많이 쓰이는 것은 수압식과 기압식이다. 수압식으로 압력을 읽을 때에는 마노미터, Boudon 게이지, 트랜스듀서(transducer) 등을 이용한다. 기압식은 수압식에 비해 반응이 빠르고 게이지 하우스(gauge house)를 설치할 필요가 없다. 그러나 이것으로는 부간극수압을 측정할 수는 없다. 지중변위는 경사계(inclinometer)로 측정한다. 이것으로 심도에 따른 변위량을 측정할 수 있으며, 변위량을 주의깊게 검토하면 활동이상면을 추정할 수 있다.

공식적인 강우기록은 기상관측소에서 측정하여 발표되나, 실제우량은 좁은 지역에서도 현저히 다를 수 있다. 따라서 강우량과 사면의 변위와의 관계를 정확히 알려면 계측현장에 우량계를 설치하고 강우량과 간극수압의 변화, 사면변위와의 관계 등을 자세히 관찰할 필요가 있다. 간극수압, 지표면 변위, 또는 지중변위는 폭우가 있는 다음 갑작스런 변화를 보이는 일이 있으므로 측정시기와 빈도는 이를 감안해야 한다.

결론

우리나라는 산지가 많으므로 주택단지는 물론 도로를 개설할 때에도 자연지반을 절취하여 사면을 형성하는 경우가 많다. 이렇게 형성된 절취사면은 균질한 경우가 드물고 일반적으로 지층의 변화가 심하다. 절취사면은 폭우가 있는 다음 활동을 이르게 인명과 재산의 손해를 끼치는 일이 가끔 있다.

우리나라에서 절취사면을 설계할 때에는 상세한 지반조사에 의존하지 아니하고, 토사, 풍화토, 연암, 경암으로 분류하여 각 층서에 따라 경사면을 정하는 일이 관행으로 되어 있다. 이렇게 함으로서 시공중 또는 시공후에 설계를 자주 변경하게 되어 공사비가 증가되는 중요한 요인이 되고 있다. 더욱이 절취사면은 폭우시 또는 폭우후에 자주 붕괴되는 일이다. 설계에는 강우에 대한 영향이 거의 고려되지 않고 있다. 따라서 절취사면에 관한 설계의 수준은 상당히 낮다고 하지 않을 수 없다.

강우가 있으면 지반으로 강수량의 일부가 하강하면서 소위 습윤띠(wetting band)를 형성하여 아래로 하강한다. 이 습윤띠의 두께는 지하수위의 상승과 밀접한 관계가 있다. 한편, 습윤전선(wetting front)이 투수계수가 현저히 낮은 지층을 만나면 습윤띠가 더 아래로 내려가지 못하여 이로 말미암아 일시지하수위가 발생한다. 지표면에 인장균열 또는 건조균열이 있으면 이 속으로 침투된 물로 인해 피압지하수가 발생할 수도 있다. 이와 같은 영향이 강우로 인해 사면이 불안해지는 결과가 됨으로 사면의 설계시에는 이들이 당연히 감안되어야 한다.

절취사면의 활동은 법면의 경사각, 법면을 이루는 토층과 암반의 성질에 따라 여러가지의 활동양상을 보인다. 자연사면의 절취로 말미암아 지반활동을 유발하는 경우도 있고,

법면에서 발생하는 사면활동도 있기때문이다. 활동이 법면에서 발생할 때에는 균질한 토층이라면 활동양상이 인공사면과 비슷하지만, 암반사면에서는 이것이 불연속면의 주향과 경사에 의해 지배된다. 따라서 이에 대한 안정해석은 평사투영법과 같은 구조지질학적인 해석이 더 적절하다.

한계평형법을 써서 비탈의 안정해석을 하려면, 해석이론, 활동형상, 지반의 전단강도, 및 간극수압의 지식을 필요로 한다. 해석이론은 더 이상 발전시킬 필요성을 느끼지 않을 만치 발전하였으나, 그외 다른 것은 아직도 더 많은 연구가 요구된다. 다시 말하면, 성질이 다른 여러 지층으로 이루어진 사면에 대해서는 미리 활동형상을 추정하기가 어렵고, 잔적도나 절리를 따른 암석에 대한 강도정수를 결정하는 수준은 아직도 낮다고 말할 수 밖에 없다. 활동을 이르기는데 결정적인 인자인 간극수압은 강우의 강도와 지속시간에 따른 변화때문에 이의 추정이 여간 어렵지 않다. 따라서 지반활동에 대한 토질역학적인 해석방법은 아직도 더 많은 연구를 필요로 한다.

절취사면은 시일이 지남에 따라 지반을 구성하는 물질의 전단강도의 열화와 강우로 인한 간극수압의 갑작스런 증가로 인해 안전성이 떨어진다. 따라서 위험가능성이 있고, 사면이 붕괴되었을 때 생명과 재산의 손실이 크다고 판단되면, 계측기기를 설치함으로써 이를 미리 예방하는 대책이 강구되어야 한다. 이런 경우에는 설계시에도 안전율을 더 크게 하여 사고에 대비할 필요가 있다.

REFERENCES

- 김상규(1994). 한국에서 발생하는 지반활동, *Proc. North-east Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows(Presession)*, Seoul, pp.75-99.
- 건기원(1989). 중장기 재해대책, 건설부.
- 건설부(1988). 방재종합대책 중장기 계획 조사보고서(3권), 건설부.
- 김옥준(1982). 남한의 지질구조 종합, 한국의 지질과 광물자원, 김옥균 교수 정년퇴임 기념 논문집, pp. 158-181.
- 내무부(1992). 재해년보, 내무부 중앙재해본부.
- 백영식(1988). 사면안정 강좌(II), 대한토질공학회지, 4권 2호, pp. 74-104.
- 백영식(1989). 사면안정 강좌(IV), 대한토질공학회지, 5권 1호, pp. 69-86.
- 백영식, 김일현, 김기웅, 양우식(1990). 사례해석에 의한 사면해석의 비교연구, 대한토질공학회지, 6권 2호, pp.47-53.
- 이영휘, 김영수(1994). 포항지역 제3기퇴적층의 잔류강도 특성, *Proc. North-east Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows(Presession)*, Seoul, pp.117-129.
- 정창희(1986). 지질학개론, 박영사.
- 정형식, 김명모(1989). 사면안정 강좌(IV), 대한토질공학회지, 5권 3호, pp. 67-72.
- 한국도로공사(1992). 도로설계요령
- 홍병만(1989). 댐의 사면안전도 검토 프로그램 활용, 농공기술, 6권 4호, pp. 42-60.

- Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5, No.1., 7-17.
- Brand, E. W. (1984). Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong, *Proc. 4th Int. Symposium on Landslides*, Vol.1, Toronto, pp. 377-384.
- Brand, E. W. (1985). Predicting the performance of residual soil slopes. *Proc. 11th Int. Conf. on SMFE*(San Francisco), Vol. 5. Balkema, Netherland, pp. 2541-2573.
- Duncan, J. M. and Wright, D. G. (1980). The accuracy of equilibrium methods of slope stability analysis. *Proc. Int. Symp. Landslides*, New Delhi.
- Fellenius, W. (1936). Calculation of the stability of earth dams. *Trans. 2nd Cong. on Large Dams*, 4, Washington.
- Geotechnical Control Office (1984). *Geotechnical Manual for Slope*, Engineering Development Department, GCO, Hong Kong
- Hoek, E. and Bray, J. (1977). *Rock Slope Engineering*(2nd ed.). The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Janbu, N. (1954). Application of composite slip surfaces for stability analysis. *Proc. European Conf. Stability of Earth Slopes*, Stockholm, 3, pp. 43-49.
- Janbu, N. (1973). Slope stability computations. *Embankment Dam Engineering (Casagrande Volume)*, ed. R. C. Hirschfield and S. J. Poulos, Wiley and Sons, New York, pp. 47-107.
- Kim, S. K. , Jang, Y. S., Seo, H. S. and Han, S. G.(1994). Failure Mechanisms of the landslides in Yongin-Ansung County, *Proceedings, North-East Asian Symposium on Landslides and Debris Flows*, Seoul.
- Lee, S. G. (1987). *Weathering and Geotechnical Characterization of Korean Granites*, Ph D Thesis, Imperial College, University of London.
- Lumb, P. (1975). Slope failures in Hong Kong. *Quarterly J. of Engg. Geology*, London, 8, pp. 31-65.
- Morgenstern, N. R. and Price, V. E. (1975). The analysis of the stability of generalized slip surfaces. *Geotechnique*, 15.
- Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. *Geotechnique*, 17, pp. 11-26.