

# 절토사면 공사 시 주의해야 할 점과 붕괴발생 예방을 위한 검토사항



백 응

한국건설기술연구원  
지반연구실 연구위원  
(baek44@kict.re.kr)

## 개요

도로공사의 일환으로 하부 암반을 절토하고 있었다. 이 암반은 사암과 이암으로 구성되어 있는 퇴적암이다. 착공 전 보링조사에 의하면 풍화가 진행되는 상

황이었다. 사면은 1:1.2의 완만한 경사로 계획되었고 절토공사를 시작할 때 법면의 상부는 강풍화암이었으며, 중단에서 밑으로는 비교적 단단한 연암 (CL~CM급)이었다. 도중에 점토를 얇게 끼고 있는 소단층이 있었지만 눈에 띄는 변상은 없었다. 그런데 최하단이 되

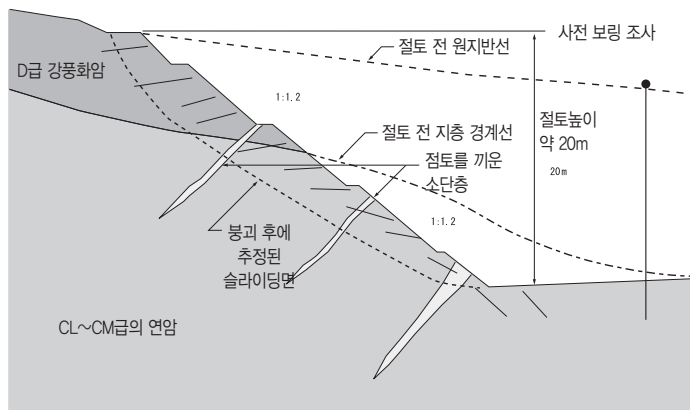


그림 1.

는 5단계 절토시 열화된 암반이 나타났고 대규모로 붕괴가 발생하였다. 견고하게 보이던 절토면이 갑자기 붕괴된 것은 원인을 다각도로 검토하였다

검토결과 불연속면내 점토에 의하여 미끄러짐이 발생했다.

화산암이 관입된 부근의 암반에는 열수변질작용으로 균열면에 점토막이 형성되는 경우가 있다. 이 암반에는 층리면, 절리면, 소단층 등의 틈이 생겨있다. 이런 틈에 존재하는 점토가 활동면이 되어 붕괴가 발생한 것이다.

## 해설노트

암반사면 붕괴는 폭 약 30m, 높이 약 20m, 길이 약 35m의 말발굽 모양으로 발생했다. 법면의 거의 전체에 미치는 대규모 붕괴가 일어났다. 붕괴의 원인을 조사하기 위해 현지조사와 추가적인 보링 조사를 실시하였다.

암반은 강풍화된 사암이 주가 되어 습곡에 의해 상부는 조금 영향을 받은 반상, 중단 이하에서는 미끄러지는 형태의 지반으로 되어 있었다. 보링 코어를 관찰

하면 사암은 심부까지 탈색되어 있었고 곳곳에 점토의 얇은 층을 끼고 있었다.

더욱이 공내경사계의 관측 결과에서 무너진 면은 법면 하부 3~4m 부근에 발생하였고 두부에서 법면의 하부로 통하여 암반이 무너진 것으로 추정하였다. 단 슬라이딩면은 붕괴가 일어난 면이나 단층파쇄대라고는 인정할 수 없었다.

이 지역 부근에는 대규모의 지질 구조선이 있고 과거에 습곡과 단층파쇄 등의 조산운동을 받은 지역이었다. 더욱이 주변에는 화산암인 안산암의 관입암이 있기 때문에 '열수변질작용'으로 불리는 현상의 영향을 받은 것을 예상할 수 있다.

열수변질작용은 마그마의 상승에 동반된 열수가 주변의 암반을 변질시켜 2차적으로 생성된 열수점토가 암반의 벌어진 틈에 침투하여 얇게 분포하는 현상이다. 이와 같은 열수점토는 일반적으로 전단강도가 작으므로 절토법면을 불안정하게 하는 약한 지질의 하나이다.

붕괴된 암반면은 단단하게 보이지만 이하의 지질적인 요인이 있다고 생각된다. ① 습곡작용 등에 의한 층리면과 절리면, 소단층이라고 불리는 벌어진 틈이 발달 ② 열수변질작용에 의해 벌어진 틈 사이로 망상의

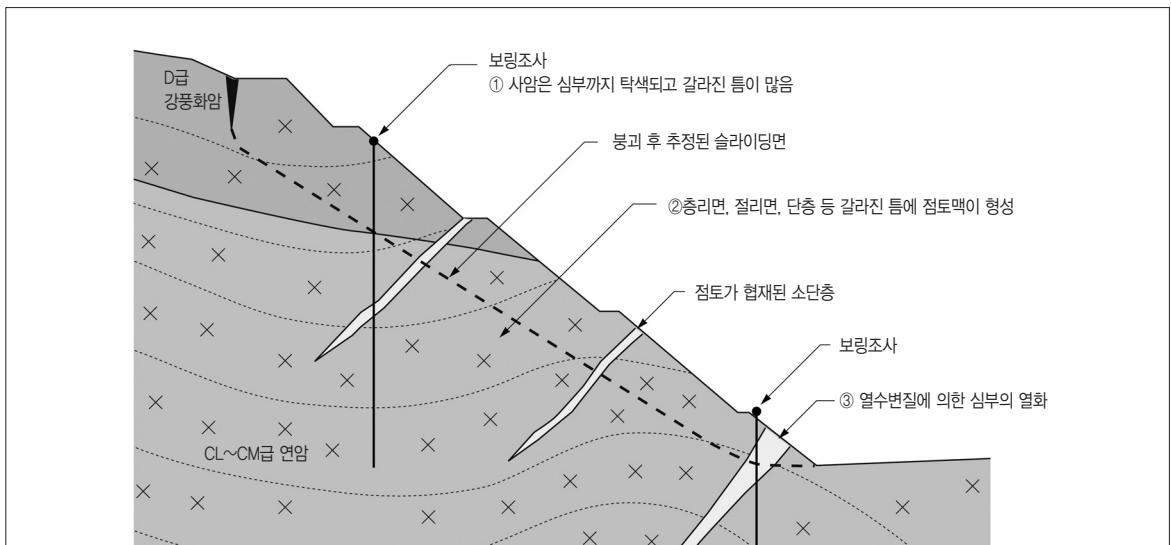


그림 2. 암반 생성과 슬라이딩 면

점토맥이 형성 ③ 열수변질작용에 의해 심부의 암반이 열화. 이 때문에 절토에 동반된 앞면의 카운터 웨이터를 상실하게 된다. 이로 인해 응력해방에 의한 완만함과 강우의 침투에 의한 전단강도의 저하가 진행되었다.

절토를 시작한 당초에는 비교적 단단한 CL~CM급의 암반이었기 때문에 법면은 안정되어 있었다. 그런데 심부의 열화된 암반을 굴착하는 단계에서 결국 법면은 안정을 유지할 수 없었다. 층리면이나 절리면의 벌어진 틈에 생긴 점토맥이 잠재적인 약한 면이었기 때문에 암반법면은 붕괴되었다고 생각한다.

### 열수변질 작용은 사암에 많다

암반의 풍화작용과 열수변질작용의 특징을 비교하면 다음과 같이 다른 점이 있다.

풍화작용은 강우 등에 의해 물리적 작용과 화학적 작용에 의해 바위의 구조와 조직이 파괴되어 점토가 되는 현상이다. 이것에 대해 열수변질작용은 암반 내의 열수의 침투에 동반되어 암반의 파쇄와 점토광물의 생성이 동시에 일어나는 현상이다.

또한 일반적으로 풍화작용은 지표면에서 심부를 향해 풍화가 진행된다. 한편 열수변질작용은 지하에서

암맥에 따라 진행되기 때문에 심부만큼 암반이 열화의 영향을 받기 쉽다는 다른 점도 있다.

이와 같이 열수변질작용의 영향을 받은 암반은 일반적으로 풍화작용과는 열화의 상황이 다르다. 화성암이 관입되거나 온천과 열수성광상 등이 분포하는 장소는 열수변질작용의 영향을 받고 있을 우려가 많다고 보여진다. 절토공사의 조사와 설계, 시공에 있어서 충분히 주의할 필요가 있다.

### 격자공법과 앵커로 대책 방안 마련

붕괴 후 암반 사면의 대책 방법으로는 무너진 암반을 제거하고 무너진 면의 경사에 가까운 1:1.5의 경사로 절토해서 시공하기로 했다. 또한 추가 붕괴할 우려로 인하여 하단에는 격자공법과 그라운드 앵커에 의한 보강을 실시하기로 하였다.

절토법면의 안정성을 평가하기에는 약한 면이 되는 지질구조의 분포와 강도 특성을 파악하는 것이 중요하다. 그러나 일반적으로는 지질조사만으로는 복잡한 지질구조를 정밀하게 추정하는 것은 어렵다. 여기에서 거론한 열수변질작용을 받은 암반사면도 그 하나일 것이다.

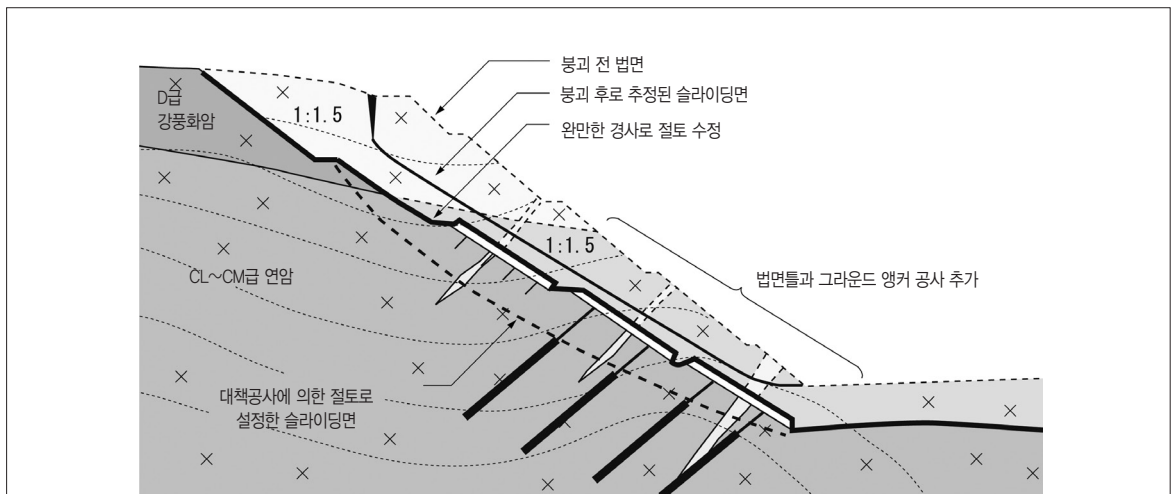


그림 3. 대책공법 (안)

이와 같이 절토사면의 붕괴를 피하기 위해서는 일반적인 지질조사에 덧붙여 열수지질대에 특징적 점토광물의 특성을 X선 회절과 전단시험에 의해 파악한다. 또 복잡한 지질구조에 대해서는 시공 시 법면을 관찰하고 현장에서 계측한 정보를 도입해서 법면의 안정성을 확인하면서 시공하는 것이 좋다.

참고 문헌

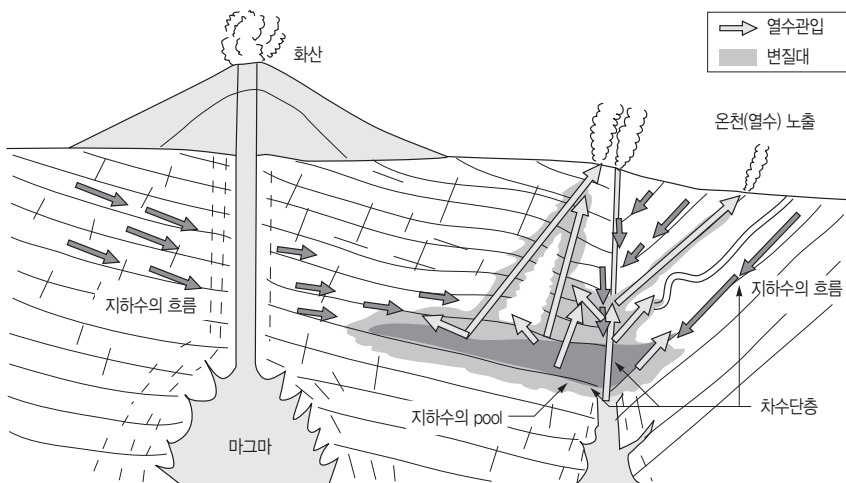
1. 백용, 장범수, 박종호, 송평현, 최경집 번역, "흙은 왜 무너지는가? - 기본을 통해 배우는 법면 방호와 옹벽 대처 요령 -", 니케이건설, 2013. 2월 출간예정

열수변질 작용

열수변질작용은 마그마의 열수에 의해 암반이 변질되는 것이다. 열수에 포함된 많은 광상의 구성 물질이 온도와 수소이온의 농도(pH), 성분 등에 의해 여러 가지 변질광물을 생성한다.

예를 들면 견운모, 카올린, 스멕타이트, 녹니암, 활석, 사문암이라고 하는 점토광물이다. 이것들의 점토광물은 층상의 구조를 가지고 일반적으로 전단 강도가 작다. 층상구조인 점을 이용해서 X선에 의한 회절측정을 함으로써 어떤 점토광물인가를 특정 지을 수 있다.

이와 같이 열수변질은 마그마의 상승에 동반되는 것으로 열수가 주변의 암반을 변질시키는 것과 함께 2차적으로 생성된 열수점토가 암반의 틈이 벌어진 곳으로 침투하여 점토가 얇게 분포한다. 점토의 얇은 층이 암반 속의 약한 면이 되므로 절토공사와 터널 공사 등에서는 붕괴나 지반이 부풀어 오르는 등의 문제가 일어나기 쉽다. 특히 스멕타이트와 같이 물을 흡수해서 부풀어오르는 성질을 가진 점토광물은 절토에 의한 응력해방과 강우의 영향으로 붕괴되기 쉽기 때문에 주의가 필요하다.



열수변질 작용의 이미지

### 얇은 점토층의 전단강도를 구하는 방법

암반의 갈라진 틈 사이에 끼어 있는 얇은 점토층의 전단강도는 어느 정도일까? 현장에서 '교란된 시료'의 채취는 어려우므로 '슬러리 시료'로 전단시험을 실시하였다. 유효응력기준에 의한 전단강도정수는 전단 저항각( $\phi$ )이 27도, 점착력( $c'$ )이 0kN/m<sup>2</sup>가 된다. 역시 작은 전단 저항각이다.

실제로는 토사붕괴의 역산법과 같이 붕괴시의 슬라이딩면의 응력상태에서 역산하여 구하는 평균적인 전단강도 정수  $c$ 와  $\phi$ 를 사용해서 대책공사의 검토를 실시하는 경우가 많다.

여기에서는 무한히 계속되는 사면으로 가정된 안정해석의 계산식을 사용하여 전단강도 정수를 역산한다.

흙덩이의 저면에 작용하는 수직응력을  $\sigma$ , 전단응력을  $\tau$ , 흙덩이의 두께를  $D$ , 단위체적중량을  $\gamma$ , 무너진 면의 경사각을  $\theta$ 로 한다.

$$\sigma = \gamma \cdot D \cdot \cos\theta$$

$$\tau = \gamma \cdot D \cdot \sin\theta$$

횡축을  $\sigma$ , 종축을  $\tau$ 로 해서 일차함수의 기울기를  $\phi$ , 절편을  $c$ 로 구하는 파괴기준선은 다음 식과 같다.

$$\tau_f = c + \sigma \cdot \tan\phi$$

흙덩이의 슬라이딩 파괴에 대한 안전율( $F_s$ )은 다음 식과 같다.

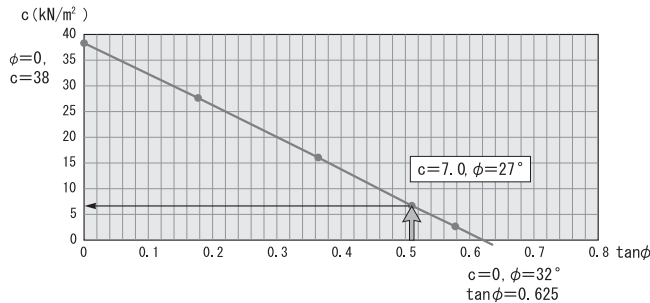
$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c + \sigma \cdot \tan\phi}{\gamma \cdot D \cdot \sin\theta}$$

$$= \frac{c + \gamma \cdot D \cdot \cos\theta \cdot \tan\phi}{\gamma \cdot D \cdot \sin\theta}$$

여기에서  $F_s=1.0$ 으로 하면  $c$ 와  $\tan\phi$ 의 조합을 구할 수가 있다. 예를 들어 토사 두께( $D$ )를 3m, 단위체적중량( $\gamma$ )을 24kN/m<sup>3</sup>, 무너진 면의 경사각( $\theta$ )을 32도로 한다.  $c$ 가 0kN/m<sup>2</sup>일 때  $\phi$ 는 32°, 또는  $\phi$ 가 0°일 때  $c$ 는 38kN/m<sup>2</sup>로 구할 수가 있다.  $c$ 와  $\phi$ 의 어느 쪽을 가정하면 다른 한편이 결정되는 관계에 있다.

이번처럼 얇은 점토층이 전단 파괴되는 케이스에서는 명확한 범위가 발생하기까지 무너진 면은 배수상태로 유지되고 있다고 생각된다. 그렇다면 배수상태의 전단저항각( $\phi_0$ )와 거의 동등한 유효응력기준에 의한 전단저항각( $\phi'$ )이 참고가 될 것이다.

실제의 무너진 면의 전단강도는 점토층의 전단강도 이외에 암반블록의 맞물림 등도 생각할 수 있으므로 종합적으로 검토하는 것이 좋다.



$c$ 와  $\tan\phi$ 의 역산식