

단층의 지반공학적 특성

Geotechnical Characteristics of Fault

구호본, Hobon Koo

한국건설기술연구원, 책임연구원, Researcher Fellow, Korea Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : It is important to identify the fault for solving the problem about slope failure and landslides. This brief report is to review occurrence and characteristics of the fault. Also, this is to introduce the geotechnical characteristics and properties of the fault and suggests how the fault affects to the cut slope stability and propose countermeasures with respect to the fault.

Keywords : fault, slope stability

1. 서론

지구를 구성하는 지각이 인장력, 압축력 등의 외력에 의해 틈이 발생하고 이 틈을 경계로 양측의 지괴가 상대적 이동을 하는데, 이 틈을 단층이라고 한다. 단층의 종류는 변이 양상과 상대적인 지괴의 이동양상에 의해 크게 정단층, 역단층, 주향이동단층 등으로 나눌 수 있다.

이들 단층은 외력에 의해서 암반, 토층이 파괴된 상태와 더불어 상대적 이동이 발생한 것으로, 공학적 의미의 강도특성은 파괴가 발생한 것을 나타낸다. 단층의 강도특성규명은 실내실험, 현장실험 수행의 한계성 등으로 한계성을 가지며, 지반공학자들에게 많은 어려움을 주고 있다. 본 고에서는 국내 단층의 특성을 소개하고, 이들 단층의 지반공학적 특성을 제시하고자 한다

2. 단층의 특성

단층은 정단층과 역단층으로 크게 대별된다. 정단층은 지각에 인장력이 작용할 때, 역단층은 압축력이 작용할 때 발생한다. 일반적으로 사면에서 발견되는 정단층은 단층의 폭이 얇고 주변에 미치는 영향력도 상대적으로 미약하다고 할 수 있다. 이에 반하여 역단층은 작용하는 외력의 크기가 상대적으로 크고, 상대적 단층면의 폭이 매우 넓을 수 있다. 이러한 단층면의 폭이 점진적으로 발달할 때 이를 단층대라고 하며, 공학적으로 파쇄대(fracture zone)라고 한다. 엄청난 횡압력이 지각에 작용하여 생성되는 역단층 지역의 경우, 구성지반이 취성물질로 이루어져 있으면 단층면도 일정한 방향 내지 일정한 형태를 가지지만, 퇴적 중인 연성지반으로 이루어져 있으면, 단층과 동시에 습곡구조가 함께 나타날 수 있어, 단층면이 굴곡을 가지거나 일정한 방향으로 발달하지 않고 매우 복잡한 양상을 가진다. 특히, 역단층 중에서 단층면이 20° 이하에 해당되면, 단층의 오프셋(offset)이 일반적인 역단층에 비해 상당하며 이를 오버트러스트(over thrust)라 하여 단층면의 폭이 상대적으로 훨씬 넓고 주변의 영향범위도 매우 크다고 할 수 있다. 단층대를 포함한 지반의 경우, 현장조사에서 단층의 발달방향, 연속성, 단층 폭 등을 인지하는데 어려움이 수반되어 지반조사에 의한 구조물 설계에 있어서 신뢰성을 낮추는 요인으로 작용한다.

국내 암중에 따른 지질학적 특성을 간략하게 살펴보면, 한반도를 이루는 기반암은 선캄브리아기에 생

성된 변성암이며, 최하부를 이루며, 이 후 석회암, 이암, 셰일 등의 퇴적암들이 고생대에 퇴적되었고, 북중국판과 남중국판의 충돌로 고생대의 지층들은 심하게 교란되어 있다. 중생대에는 현재의 경상도 지역을 중심으로 퇴적암이 형성되었고, 중생대 말에는 이 들을 관입한 화강암이 넓은 저반을 형성하고 있다. 절토사면에서 발견되는 단층의 경우, 변성암에서 가장 많이 관찰되며, 경상도 지역의 퇴적암이나 화성암 분포 지역의 사면에서는 그 출현 빈도가 상대적으로 적다.

단층작용이 절토사면 안정성에 미치는 영향은 매우 크다고 할 수 있다. 국내의 경우 지반조건이 암반으로 구성되어 있는 등 상대적으로 양호하여 절토사면 붕괴가 일본, 홍콩 등의 국가에 비해 낮은 편이지만 단층이 발달하고 있거나 단층작용에 의해 토층이 깊은 지역에서는 사면의 붕괴가 자주 발생하는 경향이 있다. 암반사면에서 붕괴가 발생하는 기본 이론에 의하면, 주요 불연속면 또는 두 불연속면에 의해 형성되는 블록의 경사가 사면의 내부마찰각보다 크고, 사면경사보다 작을 때 발생된다고 알려져 있다. 그러나 단층이 존재하는 사면에서는 불연속면의 방향과 관계없이 붕괴가 발생하는 사례가 다수 보고 되고 있다. 실제, 절토사면이 붕괴되었거나 위험한 경우에는 대부분 소규모 단층이 발달하고 있고, 이들 단층에 의해 낮은 지반강도정수, 지하수의 유동, 슬라이딩에 취약한 점토광물의 집중 분포 등 사면 붕괴나 산사태 발생의 중요한 내적 요인으로 알려져 있다.

그림 1은 2002년 태풍 루사(Rusa)에 의해 발생한 왕산면 사면 붕괴현장으로, 사진에서와 같이 붕괴면 두부(crown)에 단층대가 발달한 것을 알 수 있다. 붕괴의 시나리오를 살펴보면, 강우에 의한 산지 지표수가 자연사면 경사면을 따라 흐르면서 단층대를 세굴 및 흠을 파고, 이들 지표수는 파여진 흠과 하부 단층면을 따라 이동하면서 단층면의 전단강도를 급격히 떨어뜨려 붕괴에 이르게 된다고 할 수 있다. 만일 상기 현장에 파쇄대가 발달하지 않았으면 과연 붕괴가 되었을까 하는 의문이 제기된다. 상기 단층을 현장에서 발견하여 사전에 조치를 취한다거나 이를 반영한 설계가 이루어진다면 절토사면 등 지반구조물의 안정성을 확보할 수 있을 것이다.

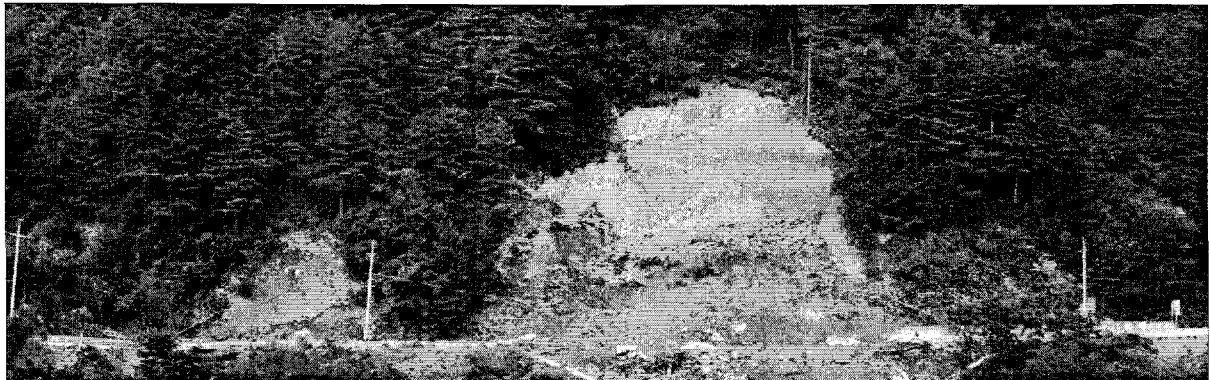


그림 1. 국도 35호선 강릉시 왕산면 도로 절토사면 붕괴현장

상기와 같이 단층은 절토사면, 산사태 발생에 큰 영향을 미치는 것으로, 이들 단층의 인지 방법은 다음과 같다.

-지질구조의 불연속성

지질도를 이용하여 지질도상에 단층이 표기되어 있으면 이를 현장에서 확인하면 보다 쉽게 단층발달 지역을 인지하기 쉽다. 현장에서 지층이나 또는 암반 등에 변위가 생겨 갑자기 다른 지층으로 변하는 것을 직접 관찰할 수 있으면 이를 단층면으로 간주할 수 있다. 그러나 부정합, 암맥이나 심성암 등에 의한 관입접촉 또는 사층리 등에 의해서 지질구조의 불연속성이 생길 수도 있으므로 지질구조의 불연속성은 단층의 특성이긴 하지만 반듯이 단층의 증거는 아니다 라는 것을 명심할 필요가 있다.

- 지층의 굴곡이나 반복 또는 결층

지층이 휘어있으면 그 끝부분에 단층이 존재하기 쉬우며, 지층이 반복되거나 어떤 지층이 갑자기 없어졌다면 그 곳에 단층이 존재하기 쉽다. 그러나 지층이 갑자기 없어지는 경우는 부정합일 수도 있으므

로 주의해야 한다.

- 단층면의 발달

단층조선(slickenside), 단층점토, 단층각력암(breccia & microbreccia), 압쇄암, drag fold, gouge 및 groove, feather, systematic joint 등이 발달되어 있다면 이는 단층의 직접적인 증거가 된다. 단층작용을 받은 암반은 육안으로 암반처럼 보이지만 현장에서 손가락으로 뜯으며 분쇄가 일어나는 등 강도측면에서 토층의 특성을 보이기도 한다(그림 2참조).

- 규화작용과 광물화작용

단층은 용액의 통로가 될 수 있기 때문에 열수와 같은 용액이 단층을 통과할 때 모암과 치환작용을 일으켜 주변 암석이 석영이나 녹니석으로 변한다. 따라서 규화작용이나 녹니석화작용과 같은 광화작용을 받은 곳에는 단층이 존재할 가능성이 있다.

- 퇴적상의 급격한 변화

만일 동시대의 지층이 급격한 퇴적상의 변화를 보이고 또 같은 지역에 퇴적되어 있다면 이런 곳에는 층상단층과 같은 대규모로 이동된 단층이 존재할 가능성이 높다. 왜냐하면 정상적인 분포상태인 경우에는 퇴적상이 점이적으로 변하기 때문이다.

- 지형상의 특징

단층작용이 일어나면 그 수직변위 때문에 fault ridge, fault scarp(scarplets), triangular facet 등이 생기기 쉬우므로 이러한 지형상의 특징을 나타내는 곳은 단층이 발달하기 쉽다. 또한 하상의 구배가 급격하거나 또는 하천의 물이 갑자기 스며드는 곳이나 수계의 형태가 갑자기 변하는 곳에도 단층이 존재하기 쉽고, 샘이 일정한 방향으로 곳곳에 발달되어 있고 특히 샘물이 뜨거운 곳에는 단층이 존재할 가능성이 높다. 그 외에 산맥의 앞부분이 잘려져 없어지는 곳에도 단층이 존재할 가능성이 높다.

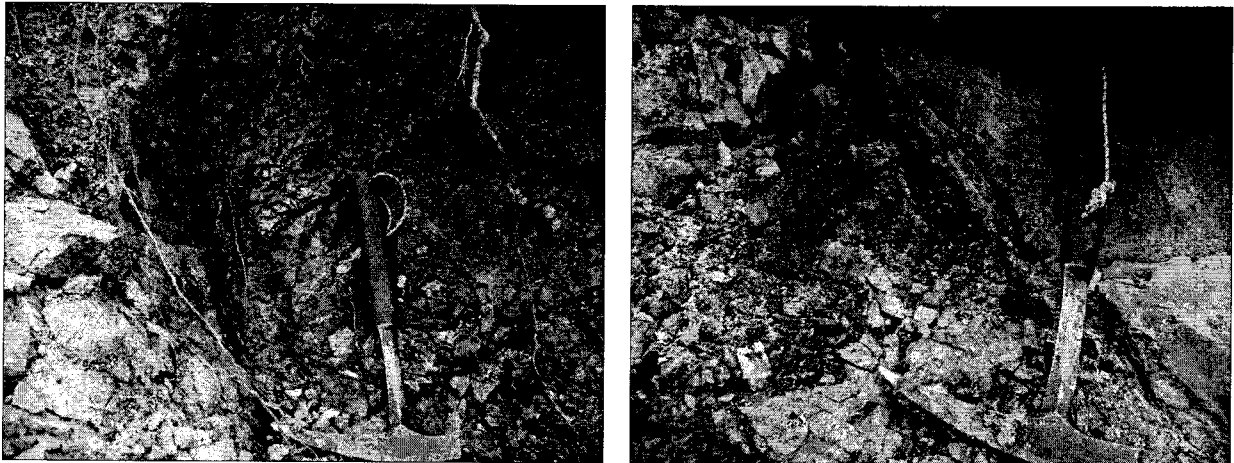


그림 2. 현장에서 인지할 수 있는 단층의 예

3. 단층의 강도정수특성

사면안정성 해석에 있어서 가장 중요한 것은 강도정수 결정으로 설계의 신뢰성을 좌우하는 매우 중요한 항목이다. 일반적으로 암석의 강도는 삼축압축실험, 전단강도실험에 의해서 결정되지만 대부분의 실험은 비교적 상태가 양호한 암석을 대상으로 실시하게 됨으로 절토사면의 전체적인 지반상태보다 과다한 강도정수가 도출 된다. 이는 강도정수 도출을 위한 실험의 한계성을 지적하는 것으로 이러한 문제점을 해소하기 위한 많은 방법들이 제시되고 있다. 절토사면 안정성 해석을 위한 암반 강도정수의 결정은 매우 어려운 과정 중에 하나로서 관련 연구문헌을 고찰할 필요가 있다. 특히, 조사대상 절토사면의 지반상태가 단층가우지 등의 점토물질이 협재되어 있는 암반층일 경우 절토사면의 강도정수 값을 암반시편의 강도 값으로 볼 수는 없다.

국내의 경우 전체 절토사면 중 암반절토사면과 암반과 토층이 혼합된 절토사면의 경우 약 80%를 상회

하고 있으므로 암반층의 강도정수 도출이 절토사면 안정성 해석수행 상 중요한 부분을 차지하고 있으며, 특히 단층대가 발달한 암반층의 경우 강도정수 도출은 더욱 중요하다고 할 수 있다. 일반적으로 암반의 전단강도는 Mohr-Coulomb 이론에 의해 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)으로 표시된다. 이 때, 유효수직응력이 작용하게 되면 $\tau = c + \sigma' \tan \phi$ 로 된다. Wyllie 외1인(1996)은 점토 협재 암반의 강도를 그림 3과 같이 불연속면의 특성별 즉, 연암, 경암이지만 쪼개진 암, 거칠기가 있는 암, 매끄러운 면, 점토 협재암 등 5가지 경우에 대한 강도정수 특성을 나타내었다. 즉, 무결암과 경암이지만 깨어진 암과의 강도정수 변화, 그리고 거칠기(roughness)에 따른 강도정수의 변화, 협재된 암석의 강도정수의 변화특성을 보여준다. 그리고 조사대상 절토사면에 발달하는 단층점토가 협재되어 있는 암 등에 대한 강도정수 값을 잔류강도로 결정해야한다고 제안하였다. 이 때, 잔류강도 특성은 전단강도 값의 경우 급격히 감소하는 반면, 점착력의 감소는 미미한 것으로 나타났다.

Dov Leshchinsky(2001)는 모래질 등 입자성 토층(granular soil)의 경우 내부마찰각에서 첨두 전단강도와 잔류 전단강도의 값의 차이는 내부마찰각의 경우 약 10° 발생하는 것으로 제시하였다.

국내의 경우 절토사면 안정성 해석에서 화성암과 편마암을 기반암으로 하는 경우 단층대의 존재 유무가 매우 중요하고 단층대의 영향을 받을 경우 부분적으로 점토성분이 협재되어 나타난다. 암반의 강도정수 도출은 가능한 열악한 부분을 고려하여 산출하여야 하며, 따라서 협재된 단층면의 고려는 불가피하다. 절토사면 안정성 해석에서 강도정수의 도출이 매우 중요한 부분을 차지하고 있으므로 상기 제시된 이론들을 참고로 조사대상 절토사면의 협재된 단층대 층을 고려한 강도정수 도출에 충실을 기해야 한다.

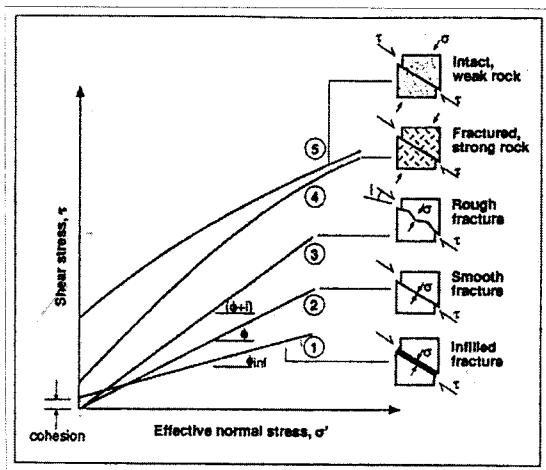


그림 3. 암석 상태에 따른 불연속면의 전단응력과 유효수직응력과의 관계

4. 대책방안

단층과쇄대가 절토사면 등 지반구조물의 붕괴에 대한 직접적인 영향인자로 작용하는 것을 인지할 수 있다. 이들 단층대에 대해서 조치를 취함으로써 절토사면의 붕괴를 예방할 수 있는 방안을 강구할 필요가 있다. 단층면의 사면 노출부분에 대해서 슛크리트, 계단식옹벽 등으로 밀폐시키는 방안을 고려해 볼 수 있다. 단층면에 수평배수공을 설치하여 단층면을 따라 흐르는 지하수를 원활하게 배출시켜 단층면의 미끄럼 윤희유로서의 역할을 차단하는 방법을 들 수 있다. 보강방안으로 단층면 상부층에 앵커, 네일링 등으로 단층면 상·하부층을 통합하여 일체화된 형태를 유지하게 하는 방안 등을 들 수 있다.

참고문헌

1. 정창희(1986), “지질학 개론”, 박영사, 서울, pp.298~306.
2. 홍성완(2006), “지반공학의 현기술과 개선사항”, 구미서관, pp.227~229.
3. Dov Leshchinsky (2001), Desigh Dilemma: Use peak or rediual strength of soil. Geotextiles and Geomembranes, v.19. pp. 111~125.
4. Goodman, R.E.(1993), Engineering Geology : Rock in Engineering Construction, John Wiley & Sons, Ins. 412 p.
5. Wyllie, D. C. and Norrish, N. I.(1996), Rock Strength Properties and Their Measurement. In Landslides : Investigation and Mitigation, National Research Council, pp. 372~390.