

충전된 불연속면과 암반구조물의 안정성 Filled Discontinuity and the Stability of Rock Structure

김영근¹⁾, Young-Geun Kim, 한병현²⁾, Byeong-Hyeon Han

¹⁾ 삼성물산 건설부문 토목기술팀 부장, Civil Tech Team, Samsung Corporation

²⁾ 삼성물산 건설부문 토목기술팀 차장, Civil Tech Team, Samsung Corporation

요약 : 암반내 존재하는 불연속면은 암반거동에 중대한 영향을 미치게 되며, 특히 불연속면내에 충전물이 협재되어 있는 경우에는 암반구조물의 안정성에 보다 심각한 문제를 가져오는 경우가 많다. 이는 불연속면의 거동과 충전물의 거동이 복합적으로 작용하게 되며, 장기적인 시간을 두고 나타나기 때문이다.

본 검토에서는 충전된 불연속면의 특성을 분석하고, 점토나 흑연이 협재되어 문제가 되었던 현장 사례분석을 통하여 충전된 불연속면이 암반사면이나 터널과 같은 암반구조물에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 통하여 충전물의 열화에 의한 장기적이고 잠재적인 거동을 수반할 수 있는 충전된 불연속면의 공학적 문제점을 고찰하였다.

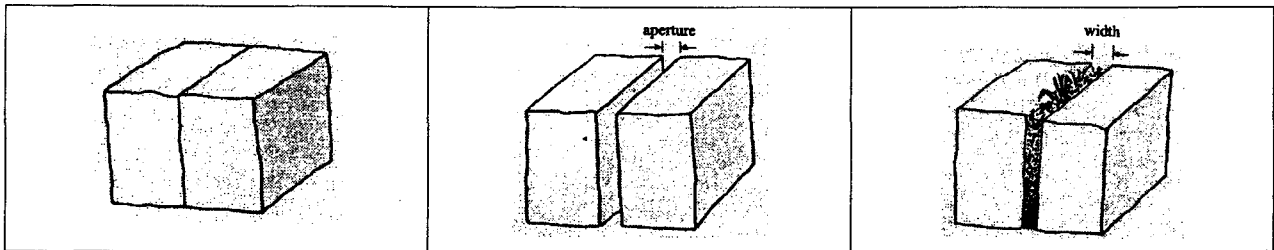
주요어 : 불연속면, 충전물, 전단강도, 암반구조물, 안정성

1. 암반불연속면

암반내 존재하는 불연속면(discontinuity)은 암반의 거동에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 암반사면, 터널과 같은 암반구조물의 설계 및 시공에 있어서 불연속면에 대한 조사는 무엇보다 중요하다 할 수 있다.

불연속면은 인장강도가 없거나 매우 작은 값을 갖는 암반내의 분리면을 말하며, 단층(faults), 층리(bedding planes), 절리(joints), 벽개(cleavage)등으로 구분된다. 국제암반공학회(ISRM, 1978)에서는 불연속면에 대한 정량적 기재에 대한 지침을 만들어, 불연속면의 특성을 기술하기 위한 10가지 요소를 정의하였는데, 방향성(orientation), 간격(spacing), 연속성(persistence), 거칠기(roughness), 벽면강도(wall strength), 간극(aperture), 충전물(filling), 지하수(seepage), 절리군의 수(number of sets), 블록크기(block size) 이다.

또한 불연속면은 충전물의 유무에 따라 그림 1과 같이 닫힌(closed), 열린(open) 그리고 충전된(filled) 불연속면으로 구분된다.



(a) Closed discontinuity

(b) Open discontinuity

(a) Filled discontinuity

그림 1. 불연속면의 종류

2. 충전된 불연속면의 공학적 특성

2.1 충전물과 충전된 불연속면

충전물(filling)은 불연속면에서 인접한 암석 벽면을 분리시키는 물질로 정의되어지며, 전형적인 충전물로는 방해석(calcite), 녹니석(chlorite), 실트, 단층 점토(fault gouge), 각력암(breccia), 석영(quartz), 황철석(pyrite) 등이 있다. 사진 1과 사진 2는 충전물과 충전된 불연속면의 모습이다.

충전물은 불연속면의 전단강도에 중요한 영향을 미치게 되는데, 방해석, 석영, 황철석과 같은 강한 물질을 제외하고는 충전물로 채워진 불연속면(filled discontinuity)은 충전물이 없거나 닫힌 불연속면에 비하여 보다 낮은 전단강도를 가지게 된다. 또한 충전된 불연속면의 거동은 충전물의 광물 특성, 입자크기, 과압밀비, 함수상태와 투수율, 선행전단변위, 거칠기, 폭(width) 등과 같은 요소들에 중요한 영향을 받게 된다.

Brekke와 Howard 등은 충전물에 대한 영향을 고찰하였는데, 방해석이나 석고의 충전물의 경우 용해할 가능성이 있으므로, 장기적인 안정성 또는 침투류에 대한 문제점이 있고, 녹니석, 활석, 흑연의 충전물은 대단히 미끄러지기 쉬운 특성을 가지며, 특히 습윤상태일 경우 더 현저하며, 또한 불활성 점토의 충전물은 매우 연약한 특성을 가져, 밀려나거나 흘러내릴 수 있고, 팽윤성 점토는 팽창에 의한 강도저하 및 큰 팽창압을 일으켜 중대한 문제를 일으킬 수 있다.

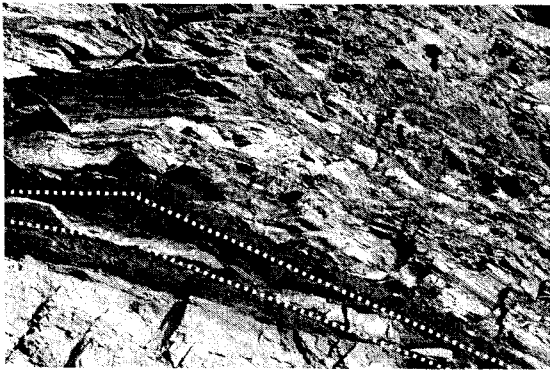


사진 1. 편암지역에서의 충전된 불연속면



사진 2. 흑연질 충전물

Barton은 충전된 불연속면의 발생기원을 변위이력과 하중이력으로 구분하고 그림 2에서 보는 바와 같이 변위이력에 따라 2가지로 분류하였다. 변위가 발생한(displaced) 그룹은 오랜 기간에 걸쳐 전단변위를 겪은 것으로서 단층, 전단대, 활동이 발생한 층리면 등이 있다. 이중 점토 압쇄암과 활동이 발생한 층리면 내에 존재하는 충전물은 습곡작용이나 중력에 의해 활동이 발생하는 동안에 불연속면에 존재하는 충전물이 재형성된 것이며 충전물 내에 활동면을 가지고 있다. 그러나 단층, 전단대 내에 존재하는 충전물은 전단과정 중에 모암에서 발생한 각력이나 gouge 등으로 충전되고 풍화의 진행에 따라 세립의 입자로 변질된다. 변위가 발생하지 않은(undisplaced) 그룹은 셰일, 사암, 석회암과 같이 강도가 약한 퇴적암에서는 변질층이나 점토층으로 나타나며, 화강암과 변성암에서는 변질정도에 따라 충전물의 종류가 매우 다양하며, 그 규모도 변성의 저항정도에 따라 폭이 수 mm에서 수 m로 매우 폭 넓게 나타난다.

2.2 충전된 불연속면의 전단특성

충전된 절리면은 충전물의 두께가 두꺼울수록 최대전단강도가 발현되는 전단변위는 커지며, 최대강도는 감소한다. 그리고 충전물 두께가 두꺼워질수록 수직변위는 팽창에서 압축으로 변화

한다. 그림 3에 나타난 바에 의하면 연약한 충전물의 분포는 절리면의 전단강도와 강성에 영향을 주며, 전단 동안에 절리면의 돌출부의 접촉 발생 유무에 따라 그 특성이 달라진다. 만약 충전물의 두께가 얇다면 암석의 미세한 구조가 지워지더라도 암석의 마찰특성에 의해 지배되며, 이때 기본마찰각은 감소한다. 그러나 충전물이 매우 두껍다면 전단거동은 절리면의 거칠기와는 상관없이 충전물에 의해 그 특성이 나타날 것이다.

Nieto는 충전된 불연속면의 전단거동을 돌출부와 충전물의 상호작용에 근거하여 3가지 범주로 구분하였다. 맞물림(interlocking)은 충전물 두께가 매우 얇아서 전단동안에 돌출부의 접촉이 발생하는 경우이며, 간섭(interfering)은 전단동안에 충전물에 의해 돌출부의 접촉은 발생하지 않으나 돌출부의 지형학적인 특성에 의해 충전된 절리면의 강도가 충전물의 강도보다 큰 경우이다. 그리고 충전물이 돌출부 높이 보다 두꺼워 전단동안에 돌출부의 접촉이 발생하지 않고 충전물에 의해 전단특성이 결정되는 것을 비간섭(noninterfering)으로 정의하였다.

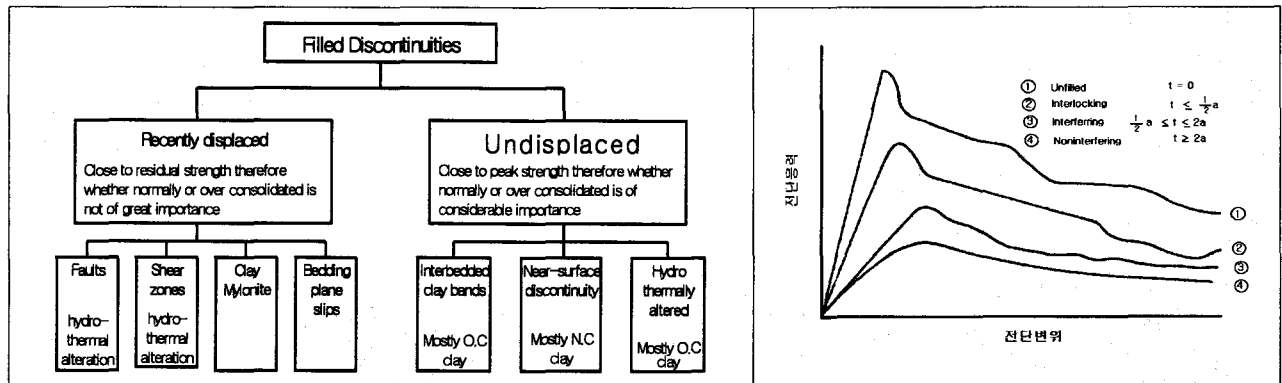


그림 2. 충전된 불연속면의 분류

그림 3. 충전된 불연속면의 전단특성

3. 충전된 불연속면이 암반구조물에 미치는 영향

3.1 암반사면

3.1.1 퇴적암지역에서 점토가 협재된 층리면에 의한 사면붕괴

본 지역은 구성암반이 역암으로 된 지층으로 층리가 발달되어 있으며, 염기성 관입암맥이 나타나고 있다. 특히 층리는 암맥관입시 동반된 열수의 영향으로 열화되어 있고, 층리내에 점토가 협재되어 있는 것으로 조사되었다. 표 1에는 사면의 개요 및 암반상태 평가 그리고 파괴양상이 정리되어 있다. 그림 4에는 본 사면에 대한 Geological Mapping과 층리면을 보여주고 있으며, 사진 3은 점토가 협재된 층리면을 따라 발생한 사면붕괴의 모습이다.

표 1. 사면개요 및 암반상태 평가

위치	사면 개요	현장 상황	파괴양상
A구간	방향 63/048 높이 35 m 구배 1:0.5	구성암반이 역암으로 풍화등급이 SW이고 관입암맥에 동반된 열수의 영향으로 층리가 열화되어 점토를 협재하고 있어 층리를 따라 대규모 평면활동 발생. 단층과 파생절리에 의해 암괴의 측면이 분리되어 사면활동 용이.	대 규모 평면파괴
B구간	방향 63/048 높이 35 m 구배 1:0.5	단층방향을 따라 관입한 관입암맥이 풍화토를 이루고 있으며 상부는 RS, 하부는 MW 정도의 풍화등급을 보임. 원호활동, 평면활동 발생. 층리에 점토가 두텁게 끼여 있음.	평면파괴 원호활동

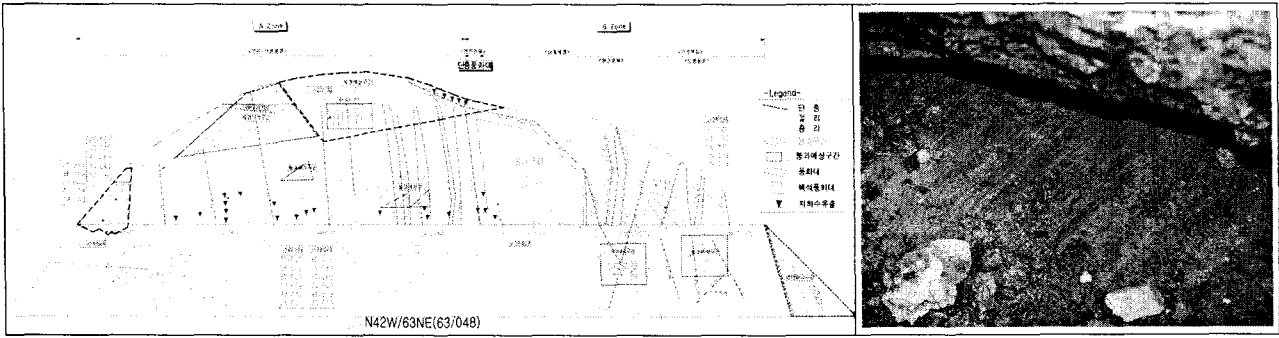


그림 4. Geological Mapping과 점토가 협재된 층리면



사진 3. 사면붕괴의 모습

3.1.2 화산암지역에서 점토가 협재된 층리면에 의한 사면붕괴

본 지역은 백악기 화산암류로 안산암류와 응회암류가 교호 발달하고 있으며, 응회암은 직경 안산 암질 화산력을 포함하는 상부구간과 유문암질 화산력을 포함하는 하부구간으로 구분된다. 응회암류는 미약한 층리구조를 보이며, 염기성 열수세맥이 층리면을 따라 배태하였고 불투수성의 적갈색 점토로 풍화되어 층리에 박층으로 충전되어 있다(사진 4). 이 면이 집중강우로 인한 포화시 불투수 활면(sliding plane)으로 작용하여 사면붕괴가 일어난 것으로 판단되었다(사진 5)



사진 4. 점토가 협재된 층리면



사진 5. 사면붕괴의 모습

3.2.2 흑연질로 충전된 불연속면의 경면화에 의한 터널낙반

본 지역의 지질은 경기 편마암 복합체에 해당하는 호상 흑운모 편마암지역으로, 특히 문제가 되는 흑연은 층상인 경우 외에 단층파쇄대, 절리 등의 불연속면을 따라 2차적으로 충전된 얇은 대상의 흑연이 불규칙하게 분포하고 있다.

흑연질 충전물은 불연속면의 경면화를 야기시켜, 불연속면의 전단강도 및 마찰각이 현저히 저하되고, 특히 이러한 충전된 불연속면의 방향이 터널 굴진방향과 반대방향으로 발달한 경우(against dip)인 낙반의 가능성이 매우 크게 된다. 또한 용수가 있는 경우에는 흑연질 충전물이 급속히 열화되므로 불연속면을 따라 슬라이딩이 발생하게 된다. 그림 6은 위에서 설명한 원인에 의해서 본선터널구간에서 낙반사고가 발생한 예를 보여주고 있다.

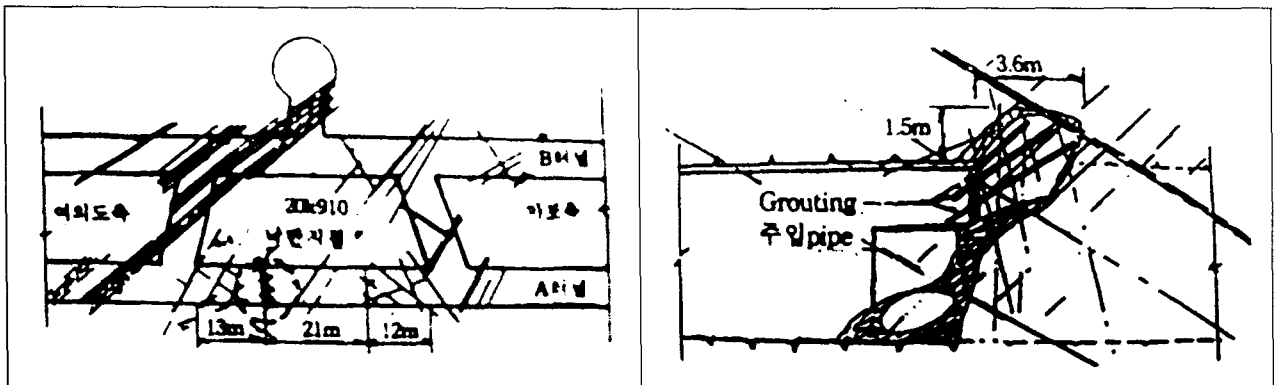


그림 6. 한강하저터널 낙반사고 사례 - 흑연질 충전물로 인한 불연속면의 경면화

3.2.3 점토가 협재된 단층활면으로 인한 터널붕락

본 지역의 지질은 경기 편마암 복합체에 해당하는 호상 흑운모 편마암지역으로서, 터널의 진행방향과 약 50°의 경사각을 가지는 단층파쇄대가 터널방향과 직교하여 분포하고 있으며, 단층점토가 관찰되었다.

붕락의 원인은 against dip으로 발달한 단층파쇄대내 단층점토로 인해 잔류마찰각이 작고, 매끈한 면을 형성하게 되어 자립을 위한 안전율이 급격히 저하되어 붕괴되는 것으로 보인다. 그림 7은 사고발생지역의 종평면도와 단층파쇄대를 포함한 사고현황 전개도를 나타낸 것이다.

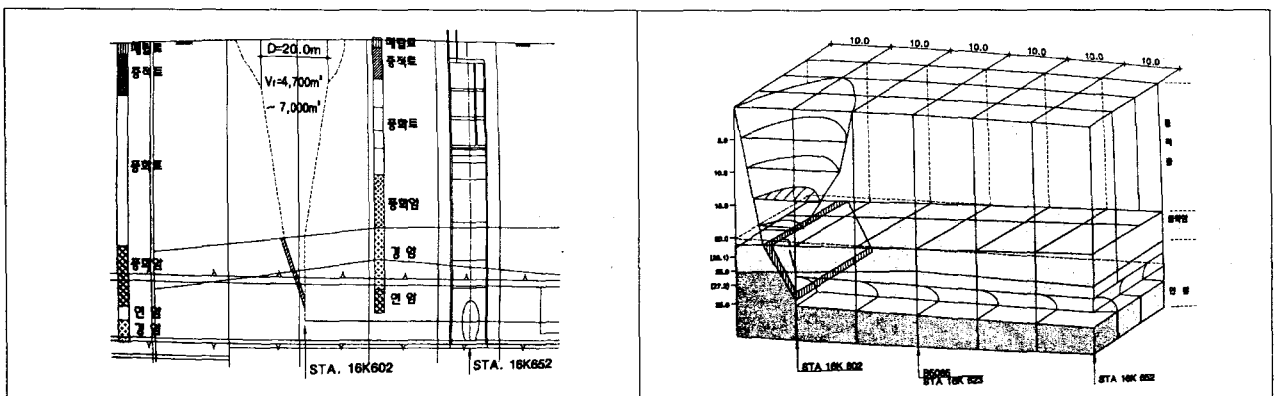


그림 7. 서울시 지하철 5호선 붕락사고 사례 - 점토가 협재된 단층활면

4. 충전된 불연속면의 공학적 문제점 및 대책

암반내 존재하는 불연속면은 암반거동에 중대한 영향을 미치게 되며, 특히 불연속면내에 충전물이 협재되어 있는 경우에는 암반구조물의 안정성에 보다 심각한 문제를 가져오는 경우가 많다. 이는 불연속면의 거동과 충전물의 거동이 복합적으로 작용하게 됨으로서 나타나기 때문이다.

본 검토에서는 충전된 불연속면의 지질공학적 특성을 분석하고, 다양한 현장에 대한 사례분석을 통하여 충전된 불연속면이 암반사면이나 터널과 같은 암반구조물에 미치는 영향을 살펴봄으로서, 충전된 불연속면의 공학적 문제점을 고찰하였으며 이를 정리하면 다음과 같다.

■ 충전된 불연속면의 특성

충전된 불연속면은 충전되지 않는 경우에 비해 보다 낮은 전단강도를 가지게 되며, 충전물의 특성에 의해 영향을 받기 쉽다. 특히 점토나 흑연과 같이 물에 의해 쉽게 팽창하거나 열화되는 특성을 가진 충전물의 경우에는 전단저항이 급격히 저하되어 쉽게 미끄러지는 활동면을 형성하게 되어 급격한 붕괴성의 특징을 가지게 된다.

■ 암반구조물에서의 문제점

터널과 암반사면과 같은 암반구조물에서 충전된 불연속면의 문제점은 일차적으로 암반구조물과의 방향성의 문제, 즉 사면의 경우 충전된 불연속면과 사면의 방향, 터널의 경우 불연속면과 터널의 굴진방향이라 할 수 있으며, 이차적으로 강우나 지하수에 의해 충전물이 장기적으로 열화되므로서 가장 취약한 활동면을 형성하게 된다는 점이다. 이러한 취약한 조건을 가지고 있는 경우, 매우 작은 응력조건 변화나 외력에 의해서 쉽게 거동을 일으킬 수 있으며, 매우 급격하게 확대되는 대규모 붕괴양상을 보이게 된다.

■ 안정성 확보를 위한 대책

조사 및 설계단계에서 충전된 불연속면의 공학적 특성을 파악하기가 매우 어려우며, 시공중에도 터널의 경우 굴착후 곧바로 지보를 타설하기 때문에 충분히 암반상태를 관찰 할 수 없는 경우가 많다. 따라서 시공중 전문 지질 및 지반기술자에 의해 조사 및 관찰을 매우 철저히 수행하도록 하여야 하며, 충전물이 매우 불안정하다고 판단되는 경우, 이에 대한 별도의 대책을 마련하도록 하여야 한다. 특히 암반구조물이 단기적으로 안정성이 확보된 경우라 할지라도 장기간 공사가 진행되는 경우에 충전된 불연속면이 존재하는 구간을 중심으로 세심한 관찰을 통하여 장기적으로 암반구조물에 이상 징후 및 변상이 발생하는지에 대하여 계속적으로 확인하도록 하여야 하며, 필요시 추가적인 보강대책이 즉각적으로 이루어지도록 하여 조치하여야 할 것이다.

참고문헌

1. '공사중 터널사고사례'발표회 논문집, 2001, 한국지반공학회 터널기술위원회.
2. '이암/세일의 공학적 특성 및 문제'학술세미나 논문집, 2002, 한국지반공학회 암반역학기술위원회.
3. '천매암의 공학적 특성 및 문제'학술세미나 논문집, 2004, 한국지반공학회 암반역학기술위원회.
4. Engineering Properties of Rock, Elsevier Geo-Engineering Book Series Vol. 4, 2005, Lianyang Zhang.
5. A Geology for Engineers, F.G.H Blyth and M.H. de Freitas, 7th ed., Elsevier.