

암반 불연속면의 공학적 문제-(General Report) Engineering Problems in Rock Discontinuity

신희순¹⁾, Hee-Soon Shin

¹⁾ 한국지질자원연구원 책임연구원, Principal Researcher, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

SYNOPSIS : Rock masses usually contain such features as bedding planes, faults, fissures, fractures, joints and other mechanical defects which, although formed from a wide range of geological processes, possess the common characteristics of low shear strength, negligible tensile strength and high fluid conductivity compared with the surrounding rock material. In the engineering context here, the discontinuities can be the single most important factor governing the deformability, strength and permeability of the rock mass. Moreover, a particularly large and persistent discontinuity could critically affect the stability of any surface or underground excavation. For these reasons, it is necessary to develop a thorough understanding of the geometrical, mechanical and hydrological properties of discontinuities and the way in which these will affect rock mechanics and hence rock engineering.

Key words : rock masses, discontinuities, deformability, strength, rock engineering

1. 서론

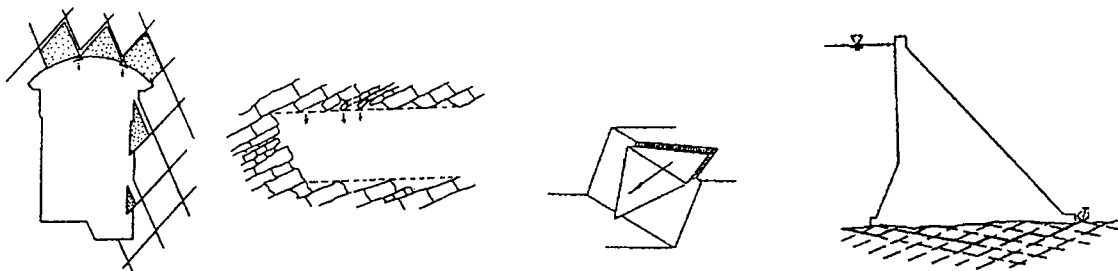
암반구조물은 구조형태로 분류하면 지하공동, 암반사면, 암반기초의 3가지로 크게 분류된다. 지하공동으로는 터널, 지하발전소, 지하석유비축탱크 등과 같이 지하를 굴착하여 공간을 이용하는 시설이며 최근에는 대심도지하공간이용과 관련하여 많은 새로운 지하시설이 구상되고 있다. 암반사면에는 일상적으로 조우되는 인공 또는 자연의 도로·철도사면, 구조물건설에 따른 굴착사면등이 있다. 자연재해가 최근에서는 사면에서 발생하고 있는 현실에서 사회적으로 많은 관심을 모으고 있다. 암반기초에는 댐, 발전소, 교량등 우리의 생활을 지원하는 공공구조물의 기초가 되는 역할을 하는 것이 많다. 또한 댐의 암반은 물을 저장하는 역할을 한다. 현재 화제가 되는 것은 암반이 각종 폐기물의 장기적인 안전한 저장(유해물질의 누출을방지하기 위한)장소로서 사용하는 것이 있다.

이와같은 암반구조물을 구성하고 있는 것이 암반이지만 토질역학적으로 취급하는 방법과는 적지않은 차이점이 있기 때문에 이러한 실체는 지반공학기술자들에게는 매우 익숙한 것이라고 말할 수 없다. 암반에 접근하여 암반표면을 잘 살펴보면 암반이 절리, 층리, 미소균열 등의 현저한 구조특성을 가지고 있지만 또한 조금 떨어져서 보면 암반은 커다란 스케일의 많은 불연속면도 내포하고 있는 것으로 변한다.

그러므로 암반은 본질적으로 불연속체인 것으로(모래는 현실에서는 불연속체. 입상체인 것과 유사)먼저 인식하지 않으면 안된다. 따라서 이러한 거동을 이해하는 데는 암반의 구성요소인 암석과 불연속면 및 이러한 복합체로서의 암반의 형상을 파악할 필요가 있다. 이러한 다른 특성의 중요도는 공학적 적용

방법에 따라 상대적으로 변하지만 암질(암종)에 부가하여 성층상태, 습곡, 단층, 전단면, seam, 절리 등을 포함하는 지질학적인 문제가 크게 부각된다.

본 고에서 취급하려는 불연속성암반으로는 상기한 암반형태중에서 특히 불연속면이 암반거동에 커다란 영향을 미친다는 것 관점에서 취급하고자 한다. 물론 전술한 암반은 본질적으로 불연속체이다. 그러나 암반내의 불연속면은 너무나 복잡한 것이 많다. 여기서 불연속면의 존재가 지하공동, 터널, 암반사면, 댐기초 등의 암반구조물에 그림과 같은 문제가 발생한다. 이와같이 불연속면은 암반구조물의 역학적 안정성을 손상시키는 외에 댐기초에서는 불연속면이 누수문제를 발생시킨다. 이와같은 불연속면의 존재하는 것에 대한 영향은 구조물이 거대하고 복잡한 경우에는 무시할 수 없게된다. 불연속성 암반이 주목을 하게되는 것은 불연속면의 거동을 충분히 파악하게 되면 암반거동의 본질에 다가서는 입장으로 부터 암반을 고려하여 극한상태 또는 파괴에 도달하기 까지의 메커니즘을 이해하게되고 미지의 shape의 구조물과 복잡한 자연사면에서는 안전성의 면에서도, 경제성면에서도 대처가능한 것이다.



(1) 지하공동 · 썩기붕락 (2) 터널 · 천반붕락 (3) 암반사면 · 썩기붕괴 (4) 댐 · 개구성불연속면에 의한 누수 및 역학적 불안정

그림 1. 불연속면의 문제점에 관한 모식도

2. 불연속면의 지질학적 성인과 공학적평가

불연속성암반의 평가에서 취급하는 불연속면은 암반의 공학적 특성(변형, 강도, 투수성)에 영향을 미치는 암반내의 면구조를 정량적으로 평가하는 것이다. 현실적으로 조사에서 얻는 불연속면의 정보는 제한적이다. 이러한 정보부족을 보충하기 위해서는 구성에 있어서 지질 및 형성과정, 형성연대 등 불연속면의 지질학적성인을 이해해야하고 효율적인 조사계획을 입안하고 조사데이터의 합리적인 해석, 암반거동평가의 접근방법의 선택을 행하는 것이 중요하다.

2.1 불연속면의 정의

국제암반역학회(ISRM)의 실내 및 원위치시험법위원회가 편집한 「암반불연속면의 정량적기재를 위한 지침」에 따르면 불연속면이란 지질 및 불연속면의 형성시기 및 형성과정. 성인에는 관계가 없고 방향성(주향·경사), 크기, 빈도, 표면의 형상, 충전물 및 구체적으로 기재가 가능한 암반의 공학적 성질(변형·강도·투수성 등)에 영향을 미치는 면구조라고 하는 것이 가능하다. 또한 이와같은 불연속면은 결정론(決定論)적으로 취급이 가능한 중~대규모인 것과 확률론(確率論)적으로 취급하여 구해지는 중~소규모인 것으로 나누어 평가된다.

2.2 지질학적관점에서의 불연속면의 성인

지구의 표면부근을 구성하는 지질은 그림 2에서와 같이 풍화→침식→운반→퇴적의 표층에 있어서의 지질작용, 퇴적물 및 화산쇄설물의 고결작용(續性작용), 변성작용, 암석의 용해와 마그마의 생성·고결과

지하심부에서 용기된 화성작용, 이외에 造構(plate)응력 및 중력에 의한 변형 및 파단이 생긴 작용등 과거 다양한 지질학적인 이력을 많이 받았다. 지질학적 불연속면이 성인에 있어서 구체적으로는 형성과 정부터, ① 암석의 생성과정, ② 변성작용, ③ 지질구조적 응력(이하 구조응력라 칭한다)의 작용, ④ 지각표층부에서의 풍화·침식·중력작용으로 구분된다. 표 1에는 지질학적 불연속면의 성인과 대표적인 지질학적 불연속면을 보여준다.

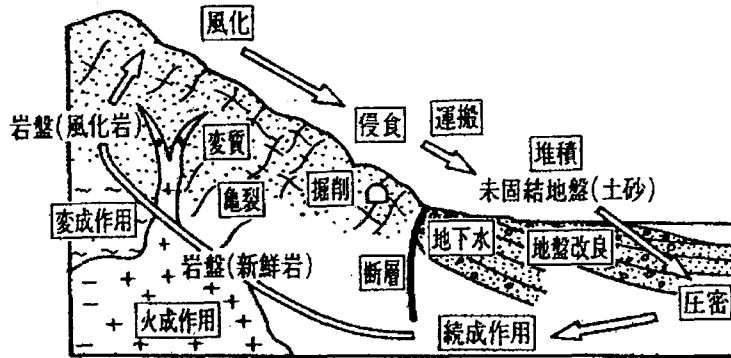


그림 2. 지질순환 개념도

2.2.1 암석의 생성과정에서 형성된 지질학적 불연속면

1) 퇴적암:

퇴적암에서는 퇴적환경의 변화 및 퇴적작용의 일시적인 중단 등에 의하여 층리면 및 부정합면, 미세적으로는 엽리 등이 생성된다. 硬軟이 다른 사암과 이암의 호층을 보이는 층리면 및 호층상에 미세립의 규질과쇄물 및 박층의 점토를 협재하는 층상처트의 층리면 등이 지질학적 불연속면으로서의 대표적인 예이다.

2) 화성암:

화성암에서는 정도의 차이는 있지만 냉각과정에서 생기는 암체의 체적변화(냉각수축) 및 암체의 이동에 수반되는 암체내 및 모암과의 접촉부근에 생기는 힘에 기인한 지질학적 불연속면이 생성된다. 현무암질 용암에서 보이는 주상절리 및 관입암체에 발달하는 절리군, 화강암류에 발달하는 격자상의 절리 등이 대표적인 예이다. 절리의 출현패턴 및 규모, 절리면의 특성은 마그마의 성질 및 냉각과정에서의 온도·압력·시간조건 등에 의해 어느정도의 규칙성을 지니고 있는 것으로 보인다. 예를들어, 화산암에서 보이는 냉각절리에서는 개구절리로 되는 경우가 있다.

2.2.2 변성작용에 따른 지질학적 불연속면

변성작용은 지하심부에 존재하던 암석이 구조운동을 받아 고온·고압환경에서 원암이 광범위하게 변성되는 광역변성작용과 원암이 마그마와의 접촉에 의하여 마그마로부터 열 및 성분을 공급받아 변성하는 접촉변성작용으로 구분된다. 특히 광역변성작용의 경우에는 구조운동도 받아 습곡, 단층을 동반하는 경우가 많다.

1) 광역변성암:

결정 편암 등의 광역변성암은 원암의 다름을 반영하는 岩相과 물성차이를 보이는 것 외에 온도·압력 조건에 대응하는 편리면이 생기며, 또한 냉각 및 침식 除荷에 의한 습곡축과 편리면에 직교하는 절리 및 전단층이 생성된다. 이외에 광물의 평행배열에 의한 선구조과 벽개면이 존재하는 경우가 있다.

2) 접촉변성암:

접촉변성작용에 의해 생성되는 hornfels 에서는 열을 지닌 암체의 냉각시 암체와의 경계면에는 거의 평행한 비교적 날카로운 절리면이 생긴다.

표 1. 성인에서 본 주요 지질학적불연속면과 공학적 불연속면의 관계

불연속면의 성인	지질사례	주요지질학적 불연속면 (면구조)	공학적 불연속면
암 석의 생성과정	퇴적암류 이암, 사암, 역암, chert, 석회암, 화산쇄설암(응회암, 용결응회암)	· 지층: 층리면, 부정합면, 엽리, 斜交葉理, 박리면 · 예: 사암·이암호층 및 층상chert의 층리면등	· 퇴적후 응력에 의해 파단면이 생성되고 이면에 따라 불연속면되는 것이 적지않음
	화성암류(화산암) a) 용암 유문암용암(산성) 현무암용암(염기성)	· 냉각절리(주상, 판상, 방사상) · 용암이 흐르는 과정에서 형성된 각종 절리	· 냉각절리에서는 개구절리로 되는 경우 많음 · 절리군으로 취급하는 경우 많음
	b) 관입암현무암, 안산암, 석영안산암, 유문암	· 관입암체중의 냉각절리, 유리(流理)구조 · 관입암부근의 안행(雁行) 배열된 절리 · 관입암(관입암체와 모암의 경계)	· 냉각절리에서는 개구절리로 되는 것이 있음. · 열수에 의한 수암파쇄부 및 변질대가 불연속면으로 됨. · 절리군으로 취급하는 경우가 많음.
	화성암류(심성암) 반암, 섬록암, 화강섬록암, 화강암	· 냉각과정: 격자상절리, 流理面 · 접촉면(암체와 모암의 경계) · 용기상승과정: 2차적인 절리	· 생성후의 구조응력에 의한 파단면의 방향이 불연속면으로 되기 쉬움
변성작용	변성암류 a) 광역변성암 천매암, 결정편암, 편마암	· 편리면, 편마구조 · 절리, 단층, 벽개면	· 변성작용을 받는 과정에서 구조응력도 동시에 작용 · 생성후의 구조응력에 의한 파단면도 불연속면이 됨.
	b) 접촉변성암 호른펠스	· 절리	· 비교적 날카로운 절리면을 형성하기 때문에 불연속면으로 됨.
구조응력의 작용	· 전국지질	단층 · 정단층, 역단층, 횡단층 · 단층대와 단층계 · 평행단층군, 직교단층군, 안행단층, 공역단층 · 단층파쇄대(단층점토, 단층각력) · 경면(Slickenside)	· 공학적으로 중요한 절리면으로 됨. · 경면이 인식되는 단층은 중요한 불연속면이 됨. · 대규모적인 것은 결정론적으로 불연속면으로 취급됨.
	· 전국지질	절리 · 절리군, 절리계 · 전단절리: 경면, 조선 · 신장절리: 개구절리 많음	· 공학적으로 중요한 불연속면임 · 경면이 인식되는 절리는 중요한 불연속면임. · 절리군으로 취급되는 경우가 많음.
	· 퇴적암 또는 퇴적암을 모암으로 하는 변성암등에서 발견	습곡 · 굴곡습곡: 절리, 단층 · 굴곡-미끄럼습곡: 층면sliding · 벽개습곡: 벽개면 · 렌즈습곡: 공역파단면	· 습곡에 수반하는 파단면은 공학적으로 주요한 불연속면임.
풍화·침식·중력작용	풍화·침식작용 · 전국지질	· 파단면의 개구 · 응력개방에 따른 신규절리면	· 기존의 불연속면이 나타남(개구등)
	지표부근에서의 중력작용 · 전국지질 · 변형성이 다른 사암·세일호층등에서 발견	· 중력작용에 위한 절리면의 개구, 신규파단면	· 응력개방을 받는 사면에서 공학적으로 중요한 불연속면이 됨.

2.2.3 구조응력의 작용에 따른 지질학적 불연속면

다양한 암석의 조합으로 이루어진 지질에는 이외에 구조응력을 받아 파단 및 변형이 생겨 복잡한 지질구조가 형성된다. 형성된 지질구조는 지질의 물성, 구조응력배치(구조응력의 크기와 방향), 온도 압력 조건에 따라 다양하다. 과거에 여러차례의 응력장을 받은 이력이 있는 지질에는 각각의 응력장에서 형

성된 지질구조가 뚜렷하며, 보다 복잡한 지질학적 불연속면을 형성한다. 이와같은 지질학적 불연속면의 변형. 파괴양식에는 단층, 절리 및 습곡과 같은 기본적인 양식이 있다. 지질에 발생하는 파괴면의 내부, 면에 접한 변위가 육안으로 인식되는 것이 단층이며 인식되지 않는 것이 절리이다.

1) 단 층:

지각의 응력에 의해 생긴 어느 규모이상의 전단파괴면에서 양측에 상대적으로 어긋남을 가지는 선상 또는 대상의 부분을 말한다. 파괴면을 단층면이라 부르고 암반상호의 전단에 의해 미끄러진 흔적이 있는 매끄러운 면이 존재할 때 이면을 단층경면(slickenside)이라 부른다. 단층운동에 의해 생긴 암석의 파쇄편은 풍화작용, 열수작용을 받아 점토광물로 변화된다. 이와 같이 생성된 점토를 단층점토라 부르고 단층운동에 의해 생긴 각력상의 파쇄암편을 단층각력이라 부른다.

단층은 운동학적 측면에서 정단층, 역단층, 횡단층으로 구분하며 기본적으로는 그림3에 나타난 구조응력분포에 의해 생성된다. 역단층은 압축력에 의해 생긴 단층으로 인장에 의해 생긴 정단층에 비해 파쇄작용이 크게 일어난다. 단층이 발생하면 그 면을 따라 암석강도가 저하하기 때문에 반복하여 파괴가 일어난다. 그 결과 크기가 다른 여러 가지 규모의 파괴면이 밀집하고 특정한 방향성을 가지는 zone이 형성된다. 이들을 파쇄대 또는 단층파쇄대라고 부르고 파괴면이 촘촘히 모여서 면과 면간에 얇은 판상을 이루는 것을 전단대라고 한다. 단층파쇄대 중에는 압쇄된 점토나 각력이 생기는 경우가 있다.

단층파쇄대를 구성하는 물질은 전단파괴의 정도에 따라 점토, 각력이 혼합된 점토, 각력이 혼합된 모래, 점토가 얇게 피복된 각력, 비교적 큰 암괴와 각력이 혼합된 층, 균열이 발달하는 층, 비교적 균열이 많은 층 등으로 구분할 수 있으며, 단층파쇄대의 강도 특성과 투수성은 파쇄대내의 물질이 점토와 각력 중 어느 것이 주가 되는가에 따라 크게 달라진다

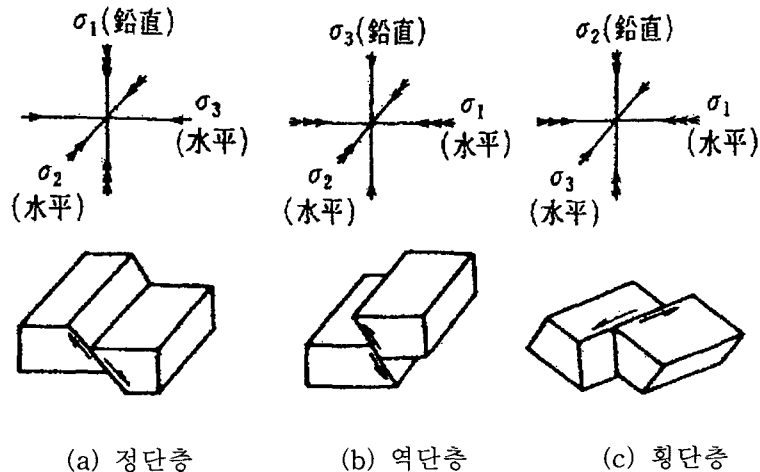


그림 3. 단층의 분류와 응력장

단층파쇄대를 구성하는 물질은 전단파괴의 정도에 따라 점토, 각력이 혼합된 점토, 각력이 혼합된 모래, 점토가 얇게 피복된 각력, 비교적 큰 암괴와 각력이 혼합된 층, 균열이 발달한 층, 비교적 균열이 많은 층으로 구분할 수 있다. 단층파쇄대의 강도적 성질과 투수성은 파쇄대내 물질이 점토 내지는 각력을 주로 하는가에 따라 크게 달라진다. 실제로 현장에서 만날 수 있는 단층파쇄대는 이것들이 조합된 형태들로 되어 있으며, 다음과 같이 분류할 수 있다(그림 4 참조).

가) 파괴작용이 집중적으로 일어난 것

- a) 전부가 점토로 되어 있고, 양 암반은 견고한 암반으로 남는다.
- b) 점토에 각력을 포함하는 것, 양 암반은 파괴작용을 받고 있지 않다.
- c) 모래형태의 파쇄된 암석과 각력으로 되어 있다. 양 암반은 파괴되어 있지 않다.

- d) 양 암반의 경계부는 점토로 되어 있고, 그 사이는 얇은 점토와 혼합되는 각력이 주로 되어 있다.
- e) d)와 같지만 비교적 큰 암괴가 포함된다.
- 나) 파괴작용이 한쪽으로 일어난 것
 - f) 한 암반과 접하여 점토가 있고 반대측으로 향하여 점토가 얇게 끼인 각력층⇒ 균열이 밀집한 암반⇒ 균열이 많은 암반으로 되어 있다. 점토는 견고한 경암반과 접해 있다.
 - g) 점토가 생성되어 있지 않고, 단층면도 불명료하다.
- 다) 파괴작용이 양 암반에 일어난 것
 - h) 중심부에 점토가 생성되어 있고 양 암반을 향해 좌우 대칭적으로 파괴작용이 감소 되는 현상을 보이고 있다.
 - i) 점토물은 생성되어 있지 않다. 단층면이 불명료하다.
 - j) 균열이 밀집한 부분과 균열이 많은 부분으로 구성되어 있고, 명료한 단층면은 없다.

일반적으로 제 3기층의 퇴적암처럼 연암은 단층의 모양이 단순하고 폭이 좁으며, 밀착된 것이 많다. 경암은 여러 개의 단층군을 형성하여 평행하거나 분기가 많고, 폭이 넓은 파쇄대로 나타나기가 쉽다. 이 같은 단층군은 높은 투수성을 나타낸다.

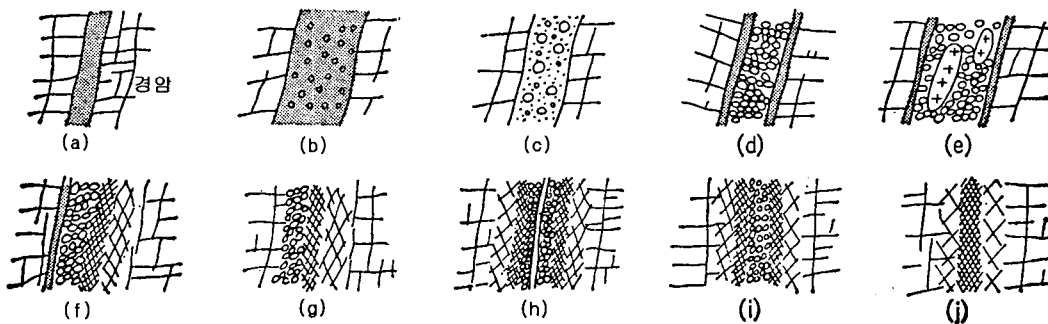


그림 4. 단층파쇄대의 형태

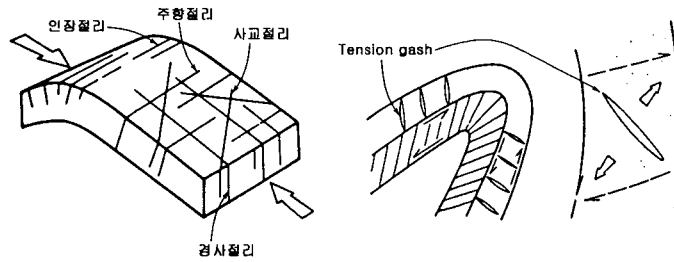
2) 절리

절리는 모든 암석에서 나타나며, 공학적인 면에서 암석과 암반에 많은 영향을 주는 흔한 구조로 거의 모든 암종에 존재한다. 절리는 운동이나 서로 상대되는 암반에 대해 상대적인 변위가 없다는 점이 단층과 구분되어 진다. 지표에서는 보통 절리가 응력의 개방이나 침식, 특히 풍화의 결과로 열려 있다. 서로 주향이 평행한 절리의 그룹을 절리군(節理群, joint set)이라고 하며, 어느 정도 일정한 각도로 2개 이상의 절리군이 교차되는 것을 절리계(節理系, joint system)이라 한다. 쌍 절리군(conjugate joint system)은 다른 구조선이나 구조면을 대칭적으로 교차하고 있는 시스템이다. 보조 절리계에서 생성연대가 같고, 같은 응력장에서 형성된 두 개의 전단 절리군은 약 60°의 각도를 이루면서 교차한다. 모든 보조 절리계는 쌍을 이루지만 쌍을 이룬 절리계가 모두 보조 절리계는 아니다.

가) 퇴적층의 습곡에서의 절리

일반적으로 서로 직각으로 교차하는 두 개 절리군이 발달되며, 많은 경우 성층면에 수직인 경우가 많이 있다(그림 5). 우세한 경향의 절리가 나타나지 않는 부분에서 절리의 경향은 절리를 포함하는 층리의 상태로 알 수 있다. 절리군의 방향은 습곡의 규모나 형태 및 암석의 두께, 경도 등과 관계가 있다.

습곡구조와 절리



관입암체와 절리

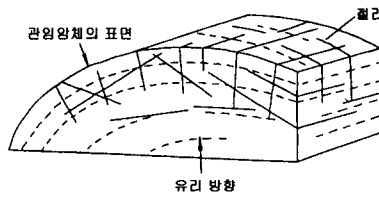


그림 5. 절리의 종류

경사지거나 습곡된 퇴적암에서 절리군중의 한 방향은 지층의 주향과 일치하고, 다른 절리군의 방향은 지층의 경사방향과 일치하는 경우가 많이 있다. 따라서 이러한 절리를 각각 주향절리와 경사절리라고도 하고, 이들 주향 및 경사절리에 사교하는 절리를 사교절리라 한다(그림 5 참조). 습곡이 일어나는 동안에 인장이 가장 크게 일어난 습곡의 정부에서 측면에 평행한 절리가 집중되어 나타난다(그림 5 인장절리). 퇴적암에서의 절리는 다른 층리면으로 연장되지 못하고, 하나의 지층에서 끝나는 경우가 많다.

크기에 따라 절리는 다음과 같이 분류할 수 있다. 몇 개의 암석 층리면을 관통하여 수 백m 뺀어 있는 대규모 절리, 이것보다는 작지만 구조가 잘 정리되어 있는 주절리, 층리면을 통과하지 않는 부절리, 세립질 퇴적층에 흔히 나타나는 미세절리 등으로 구분할 수 있다. 미세절리는 그 크기가 수 mm에 불과하다. 대규모 절리는 보통 얇은 층의 경암 및 연암의 습곡에서는 나타나지 않는다. 얇은 층의 경암 습곡에는 일반적으로 주절리나 부절리가 나타난다

나) 화성암에서의 절리

화성암에서의 절리는 뜨거운 용암체가 찬 재질과의 접촉하거나 고결될 때 수축에 의해 절리가 생성된다. 관입 화강암체에서의 절리계는 관입후 암체가 냉각되면서 생긴다. 냉각은 먼저 암체의 천정과 바닥에서 일어나며, 하부에 액상이나 소성으로 남아 있는 용암의 운동이 더 고체화된 바깥부분으로 열극을 일으키기도 하고 관입되기도 한다. 화강암에서 길게 늘어진 광물들과 같이 방향성을 갖는 관입의 선들을 유선(流線, flow-line)이라 한다. 유체의 점성에 의해 이것은 암체의 천장 가까이에서 평행하게 형성된다 (그림 5).

- ① 직교절리(cross joint) : 급경사 또는 수직이며 유선에 수직되게 나타난다. 이것은 바깥부분의 부분적으로 강성인 껍질이 점성물질의 당김에 의해 열려진 인장열극이다.
- ② 종절리 (longitudinal joint) : 유선구조와 같은 방향이고 직각절리에 직각인 급경사의 면이며 직각절리보다 후에 생성된 것이다.
- ③ 사교절리(diagonal joint) : 유선에 대해 45° 로 교차하는 절리.
- ④ 횡와절리(flat lying joint) : 직각절리와 종절리에 서로 직각으로 나중에 형성된 절리로 표면침식과 제하가 일어나는 동안에 형성된다. 이러한 절리는 남아 있는 유체의 통로나 열린 절리에 영향을 주게 될 뜨거운 가스의 통로로 작용되며, 또한 열수광물의 흐름에 의해 피복되기도 한다. 이러한 구조

는 초기의 원 구조들이다.

- ⑤ 판상절리(sheet joint) : 횡상절리와 같은 방향성을 가지고, 화강암체의 천정부분에 특히 발달되며, 지표침식동안 암체의 제하에 의해 발생하는 인장응력에 의한 것일 가능성이 높다.

다) 단층부근의 절리

단층주위에 단층과 절리들이 많이 관찰되는 것은 이 절리들이 단층생성시 같은 응력 시스템에 의해 생성되어진 것들이며, 단층으로부터 멀어지면서 분포빈도가 적어지게 된다. 절리는 활동중인 지각판의 끝부분에서 발달하거나, 이러한 지각판이 침강하여 발달하는 단층 및 습곡과 관련이 있다. 그러나 절리는 정단층이나 트러스트 단층(thrust fault)과 같은 전단 파괴면에 평행한 형태로 나타나지는 않는다. 단층에 대해 예각으로 놓인 작은 균열들을 우모상 절리(羽毛狀, feather-joints 혹은 pinnate)라 부른다. 이러한 것들은 주요 균열면을 따라 발생한 전단운동의 방향을 알 수 있다. 즉 예각인 경우 우모상 절리 구조가 생긴 측면의 이동방향으로부터 멀어진다.

라) 절리의 간격과 크기

절리면에 나타나는 절리의 크기 정도는 매우 범위가 넓다. 퇴적층의 경우 100m 이상의 연장을 갖는 경우도 많이 있다. 절리간격의 범위도 매우 다양하다. 이러한 요소는 토목공사, 채석, 채굴에서 매우 중요한 요소로 작용한다. 큰 간격의 절리를 가지는 암석의 경우는 큰 암괴를 발생시키지만, 간격이 적은 경우는 파쇄된 암석의 크기가 적어진다. 터널작업, 채석, 채굴 등의 작업의 난이도는 절리의 규칙 또는 불규칙한 성질에 매우 좌우되며 또한 간격과 방향에 의해 영향을 받는다. 또한 절리는 지하수의 이동 문제 그리고 풍화와도 관련되는 중요한 요소이다.

마) 절리의 근원

절리는 인장 및 전단파괴 또는 이 두 가지의 복합적인 파괴를 통해 형성된다. 인장에 의해 형성된 파단면은 암석파편이 거의 없이 깨끗하고 거친 경향이 있다. 따라서 이 파단면이 전단력을 받게 되면 하중-변형곡선상에서 잔류전단강도 보다 매우 큰 최대전단강도를 나타내며, 최대전단강도에 도달하기까지는 매우 큰 변위가 필요하게 된다. 반면에 전단에 의한 파괴면은 일반적으로 매끄럽고, 상당히 많은 양의 암석파편이 존재한다. 전단파괴면은 국부적인 암석의 변화에 영향을 받지 않는다. 이러한 형태의 불연속면을 따라 전단이 발생하면 인장절리에서 발생된 것과 같은 최대 및 잔류 전단강도사이의 큰 차이를 나타내지 않는다. 전단절리를 따라 존재하는 물질이 인장절리를 따라 존재하는 물질보다 변질되기 쉽다.

Price(1966)는 절리의 대다수는 습곡형성 후에 잔류응력의 소실로 형성되는 후압축구조(post-compressional structure)라고 주장하였다. 방사형 인장절리(radial tension joint)와 같이 습곡과 관계가 있으며 공간적으로 제한된 작은 절리는 습곡을 받는 동안 형성된다. 절리가 형성될 당시의 전단응력은 수 백MPa에 달하며, 이러한 전단응력은 일반적으로 전단면을 따라 1mm정도 이상 이동하면 분산될 수 있다. 그러나 이러한 이동에 의해 잔류응력만이 바로 이웃한 절리면에 분산되므로, 넓은 면적을 통하여 응력이 분산되기 위해서는 많은 수의 절리가 형성되어야 한다고 했다.

Hobbs(1968)는 절리의 발생빈도는 층리두께의 역수에 비례하고, 층리의 영률의 제곱근의 역수, 주변 층리의 전단강성계수의 제곱근의 역수에 비례한다고 했다. Price(1966)는 절리의 빈도는 암종과 단위 암석의 크기 및 지각변위의 정도 등과 관계가 있다고 주장하였다. Price(1959)는 암석은 잔류변형에너지를 유지할 수 있고, 잔류변형에너지와 관계가 있는 잔류응력은 응기동안 변화하게 되며 이것에 의해 인장절리가 발생되고 경우에 따라서는 인장절리와 전단절리를 함께 발생된다고 했다. 주 지각변형단계에서 암석의 변형에 대한 저항력은 최대 허용지각응력(available tectonic stress)과 평형을 이룰 때까지 증가한다. 평형상태에 도달하면 더 이상 변형율과 변형에는 변화가 없다. 지각변형 후에는 일반적으로 암석이 응기되고, 지표 물질이 침식에 의해 제거되는 현상이 일어난다고 추정했다. 결과적으로 중력에 의한 하중과 횡방향의 응력은 감소된다. 더욱이 암석이 응기하면 인장응력을 받게 된다. Price는 암석이 약 6,000m 응기했을 때 70MPa정도의 인장응력을 받는다고 추정하였다. 또한 중력에 의한 하중은 심도가

0.3m증가할 때마다 약 7kPa정도 증가한다. 따라서 6,000m를 용기하면 중력에 의한 하중은 140MPa정도 감소한다. 결과적으로 암석이 용기할 때 발생하는 인장응력은 중력에 의한 하중 변화의 약 1/2이다. 용기가 계속되면 인장응력이 암석의 인장강도에 도달할 때까지 인장변형이 계속된다. 이때 절리는 층리의 가장 약한 부분에서 발생하여 층리를 가로질러 형성된다. 불연속적인 지층에서는 한 층에서 시작된 절리가 반드시 주위 지층의 파괴를 유발하지는 않지만, 절리경계에 인접한 주위 지층의 응력증가를 초래한다. 절리가 있는 층과 주위 암석과는 탄성학적 성질이 다르기 때문에 탄성 변위도 서로 다르게 된다. 따라서 전단응력은 인장변형과 평행한 평면에서 발생된다. 절리면을 가로지르는 부분에서는 인장응력이 없다.

전단절리가 발생되면 어느 정도의 잔류응력이 개방되고, 전단절리가 발전하면 최대주응력은 점차 감소하고, 반면에 최소주응력은 증가하게 된다. 결국 중력에 의한 수직하중이 최대주응력의 역할을 하게 된다. 암석이 용기를 계속하면 인장력을 받게 되고, 인장절리가 형성된다. 전단절리는 일반적으로 평탄한 균열이 되고 국부적인 암석의 변화에 영향을 받지 않는다. 반면에 인장절리는 흔히 불규칙한 면으로 나타난다. 약간의 압축을 받은 수평층에는 두 개의 인장절리군이 발달할 수 있다. 그러나 상당히 큰 압축력을 받았으나 습곡이 일어나지 않는 암석에서는 두 개의 전단절리군이 발달하게 된다. 압축 후에 용기가 일어나면 전단절리에 이어 인장절리가 발생한다.

절리는 다른 방법으로도 형성될 수 있다. 예를들어, 화성암에서는 화성암이 초기에 냉각되면서 절리가 발생할 수 있고, 젖은 퇴적암이 건조되면서 절리가 발생할 수 있다. 이 중에서 가장 흔한 것은 용암류, 관입암상, 암맥에 발생하는 주상형 절리이다. 직교절리, 횡방향절리, 대각절리, 수평절리(flat-lying joint) 등은 대규모의 화강암의 관입과 관계가 있다.

판상(sheet)절리는 수평절리와 비슷한 방향을 갖는다. 판상절리가 서로 가깝게 위치하여 잘 발달하게 되면, 모암에 의사성층(pseudo-stratification)을 형성한다. 판상절리의 빈도는 피복층의 두께와 관계가 있다. 즉, 암석의 피복두께가 얇을수록 판상절리는 뚜렷하게 나타난다. 실제로 판상절리는 채석작업을 하는 동안 갑자기 발생되기도 한다. 화강암관입체는 상당량의 잔류변형에너지를 갖고 있는 데 상재하중이 점차 제거됨에 따라 판상절리가 형성되어 잔류응력이 소실된다.

3) 습곡

구조응력에 의하여 지층이 과도형태로 변형하는 현상을 습곡이라한다. 습곡형성시에는 습곡축 및 습곡축면에 거의 직교하는 방향으로 최대압축응력이 작용한다. 습곡은 지층을 구성하는 암석의 종류 및 조합으로 한 개 층의 두께는 형성시의 온도압력조건 등에 의해 구부러진 습곡, 구부러지고 미끄러진 습곡, 흐름습곡, 줄기습곡, 렌즈습곡 등 다양한 형태가 있다. 구부러진 습곡에서는 지층내에 중립면이라고 칭하는 신축되지않은 면을 살펴보면 이면을 경계로 외측에는 인장 등에 의한 신장절리 및 정단층이 생성되고 내측에는 압축에 의한 전단절리 및 역단층이 생성되는 경우가 있다(그림 6). 구부러진 미끄러짐 습곡의 형성시에는 지층면에 접하여 전단이 생기고 이 전단면에 사이에 낀 지층내에는 파단면 및 변형구조가 발달하고 있는 경우가 많다.(그림 7).이외에 습곡에 동반하여 다양한 지질학적 불연속면이 형성된다.

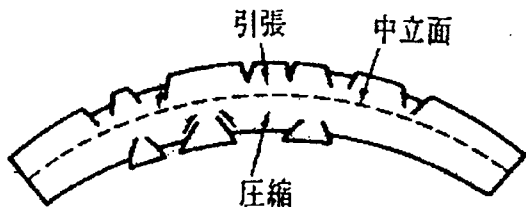


그림 6. 습곡에 발생하는 절리와 단층



그림 7. 습곡에 발생하는 전단면

2.2.4 풍화·침식·중력작용에 따른 지질학적 불연속면

풍화·침식작용과 함께 하중의 제거에 의하여 응력개방, 중력작용, 기온의 변화에 따른 암석의 체적 팽창수축, 지하수의 동결에 따른 압력 및 점토광물의 팽윤에 따른 압력작용 등에 의하여 새로운 절리가 생성되는 것과 이전에 형성된 지질학적 불연속면이 현저하게 되어 개구되는 것이 있다. 화강암층이 심성암에서는 격자형 절리에 가까이 풍화가 진행되며 이의 풍화면이 응력개방면으로 되어 밀착한 절리가 이완되며 여기에 풍화가 진행되는 경우가 많다. 이와같은 경우에는 지질학적 불연속면이 점차로 현저하게 진행되는 경우가 있다. 또한 험준한 지형에 접한 해안에서는 해식에 의한 응력개방면의 내륙측으로 진행에 따라 새로운 지질학적 불연속면이 육지측으로 계속형성하게 된다.

2.3 지질학적 불연속면의 공학적 평가

지질학적 불연속면은 필연적으로 암반의 역학적 안정성을 손상시키는 공학적 불연속면 예를 들어 심성암의 생성과정에서 형성되는 파단면은 충전되는 경우가 많다. 또한 오래된 지질시대의 퇴적암의 층리면 및 오래된 지질시대의 단층은 밀착고결되어 있는 상태에서는 공학적 불연속면은 없다. 그러나 지질학적 불연속면형성후의 구조응력 및 암체의 상승에 따른 응력, 인위적인 응력변화에 의하여 암반내에 새로운 파단면이 발생하는 경우, 이러한 파단면은 지질학적 불연속면에 따라 형성될 가능성이 높다고 보여진다. 토목분야에서 대상으로 하는 지각표층부의 암반을 고려하면 현실적으로 취약화된 단층 및 소규모에서도 경면을 수반하는 단층, 암반전체의 공학적 특성을 지배하는 절리군, 세일 및 사암과 같이 경면호층으로 이루어진 층리면, 변성암에서 보는 편리면 및 절리벽면 등이 대표적인 공학적 불연속면이다.

다음으로 지질학적 불연속면과 공학적 불연속면의 형태관계를 기술한다. 지질학적 불연속면의 형태는 구조지질적인 면에서 다음과 같이 구분된다. 예를 들어 ① 비행기와 인공위성으로부터의 영상으로 인식이 가능한 지질구조를 大構造, ② 인간의 크기에 규제되는 노두 및 표본모양의 구조를 中構造, ③ 광학현미경 및 전자현미경 등의 기기를 이용하여야만 관찰할 수 있는 지질구조를 微小構造로 분류할 수 있다. 공학적 불연속면에 있어서도, ① 대규모인 댐, 단층, 파쇄대, 층리에 있어서 협재하는 취약면(예를 들면, 사암세일호층에 있어서 폭 1m이상의 취약한 세일층) 등 각각의 존재가 암반의 공학적성질에 영향을 미치는 불연속면을 대규모 불연속면, ② 연속성이 높은 편리·절리·광물맥·층리. 상대적으로 인식이 되는 규모가 작은 단층 등 집합체로서 암반의 공학적성질에 영향을 끼치는 불연속면을 중규모 불연속면, ③ 광물의 벽개/ 광물입자간 균열·편리·벽개·엽리 등 암석의 공학적 성질에 영향을 끼치는 불연속면을 소규모 불연속면이라 분리할 수 있다.

일반적으로는 불연속성암반의 평가에 있어서 고려하여야 할 불연속면은 중~대규모 불연속면인 것과 공학적 불연속면은 中構造의 지질학적 불연속면에 관련된다고 생각된다.

다음으로 지질학적 불연속면의 공학적 취급하는 사례를 기술한다. 불연속성 암반의 해석사에서는 절리군 및 단층, 열수변질대가 공학적 불연속면으로 취급되며, 등가연속체해석 및 불연속적해석에 의하여 응력변형문제, 침투문제에 대한 불연속성 암반의 평가가 이루어진다. 예를 들어 화강암류에 건설되는 지하공동(토피 80~100m, 폭 20m, 높이 30m, 연장 100m)에 있어서 터널길이 100m 정도의 단층(대규모 불연속면) 및 지하공동과 동일한 형태의 터널길이 20m 정도의 절리군(중규모 불연속면)을 고려하고, 단층을 결정론적으로 절리군을 확률론적으로 평가하는 암반모델을 작성한바 있다.

3. 불연속면의 조사와 평가

불연속면의 조사는 조사대상 암반이 절벽에 있다던가 식생들로 뒤덮혀 있는 등 노두관찰상의 물리적 제약이 많다. 또한 대상암반의 불연속면에 관한 기하정보가 상세하게 구해졌어도 이러한 불연속면이 암반이 거동에 어떤 영향을 미치는 지 판단하는 것은 쉽지않다. 암반구조물의 안정성을 평가하기 위해서는 모델화가 필요하다. 이럴 경우 확인된 많은 불연속면정보를 어떤 기준으로 모델화하는 것이 최적일

것인가 하는 문제에 부닥치게 된다. 다양한 불연속면을 성인별, 규모별, 형태별로 분류하는 방법은 가지각색으로 실시되고 있지만 아직 확정되어 있는 방법은 없다. 현재 시행적으로 행해지고 있는 모델화를 고려하고 있는 데 이를 소개하면 다음과 같다. ISRM(국제암반역학연합회)에 표시되어 있는 “기하(幾何)정보”와 “역학·투수성정보”의 2가지로 대별된다.

표 2. 불연속면의 파라메타와 성질에 의한 구분

기 하 정 보	위치	3차원적인 불연속면의 위치
	방향	3차원적인 불연속면의 방향
	연속성(trace길이)	노두에 나타난 불연속면의 길이
	간격	인접한 불연속면사이의 수직거리
	set수	교차하는 절리계를 구성하는 불연속면군(joint sets)의 수
	block size	교차하는 불연속면군의 각각의 방향과 간격에 의해 결정되는 암괴의 크기
역 학 · 투 수 성 정 보	거칠기	하나의 불연속면에 의한 평균적인 면을 기준으로 할 때 표면거칠기 및 기복도
	벽면강도	절리의 벽면을 구성하는 암석의 압축강도
	간극폭	공기 및 물로 채워진 불연속면의 양측 벽면사이의 수직거리
	충전물	불연속면 양측의 벽면에 협재하는 물질
	침투수	각각의 불연속면 또는 암체전체에 발견되는 물의 흐름과 자유수

암반역학에서 불연속면의 정의는 암반에서 나타나는 모든 연약면을 총괄적으로 나타내며, 불연속면은 그 크기면에서 작은 단열에서 큰 단층까지 다양하다. 이 면을 경계로 암석은 구조적으로 불연속적이다. 불연속면이 반드시 분리면은 아니지만, 실제로 대부분의 불연속면은 분리면이고 매우 작은 인장강도를 갖거나 인장강도가 없다. 가장 흔한 불연속면은 절리나 층리면, 단층 및 파쇄대 등이며, 이밖에 중요한 불연속면으로는 벽개, 편리, 단열 등이다.

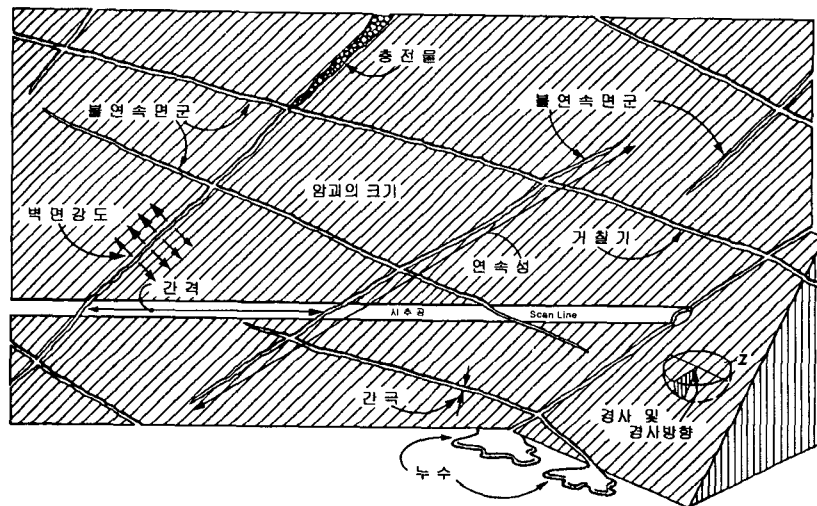


그림 8. 불연속면의 특성을 나타내는 요소들

지표로부터 수 백m 내에 있는 대부분의 암반은 역학적 거동을 결정하는 불연속면들을 내포함으로써 불연속체의 거동을 하게 된다. 그러므로 암반의 구조와 불연속면의 성질을 암석의 종류에 대한 역학적인 서술과 함께 주의 깊게 언급되어야 한다. 예를 들어 암반사면 안정성의 경우 불연속면에 대한 양적인 서술은 초기의 한계평형 분석에 직접적으로 사용될 수 있다. 가장 영향을 미치는 불연속면의 방향, 위치, 연속성, 절리의 수, 전단응력 등은 분석에 사용될 직접적인 자료가 된다. 거칠기, 벽면의 강도, 풍화정도, 충전물의 형태, 지

하수의 용출흔적 등은 공학적인 문제에서 중요한 간접적인 자료가 될 수 있다. 터널의 안정성 문제나 지보의 산정에서는 안정성에 대한 불연속면의 영향에 대한 직접적인 해석방법이 개발이 되지 않고 있기 때문에 불연속면에 대한 이러한 상세한 서술은 간접적인 자료가 될 수 있다. 암반의 구조나 불연속면의 성질에 대한 조심스런 서술은 새로운 암반환경에 대한 지보성능의 경험을 유추할 수 있는 더할 나위 없는 자료가 될 수 있을 것이다.

암반의 구조나 불연속면의 성질에 대한 서술은 암반의 기능적인 분류를 위한 기초가 될 수 있도록 충분히 상세하게 이루어져야 한다. 조만간 암반과 불연속면에 대한 서술이 더욱 완전해지고 통일화가 되어진다면 최소한의 값비싼 현지시험을 공학적인 구조물의 설계가 가능할 수 있을 것이다. 어떠한 경우에 있어서도 조심스런 현장서술은 수행될 현지시험 결과값의 정도를 향상시킬 수 있을 것이다.

Piteau(1970 & 1973)는 설계단계에서 가장 영향을 미치는 불연속면의 성질은 ①방향성, ②크기, ③빈도, ④표면의 기하학적 성질, ⑤ 생성기원 그리고 ⑥충전물이라고 보고하고 있다. 암반의 공학적 거동에 영향을 주는 불연속면의 성질 중요한 요소들은, 불연속면의 방향성, 간격, 연속성, 거칠기, 벽면강도, 간극, 충전물, 누수, 불연속면의 수, 암괴의 크기 등이 있으며 그림 8과 같다. 각 요소에 대한 자세한 설명은 다음의 절들에서 언급된다. ISRM은 1978년 이러한 불연속면의 요소항목들의 기재사항을 제안하였다. (ISRM의 'Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses' 참조)

3.2 불연속면을 공학적으로 취급시 유의점

그림 9는 토목구조물의 규모와 불연속면의 trace 길이와 조사방법과의 개략적인 관계를 표시한 것이다. 동일한 지하구조물에서도 불연속면의 규모 및 간격과 구조물과의 관계는 구조물의 규모에 의하여 상대적인 변화하는 것도 있다는 것을 유의해야할 필요가 있다. 또한 불연속면은 방향을 가진 3차원적으로 분포하기 때문에 구조물과 불연속면의 관계는 보다 복잡하게 된다. 한편 불연속면을 공학적으로 취급하는 경우, 이의 성인에 의하여 대규모-소규모의 3종류로 구분된다는 것은 전술한 바와 같다.

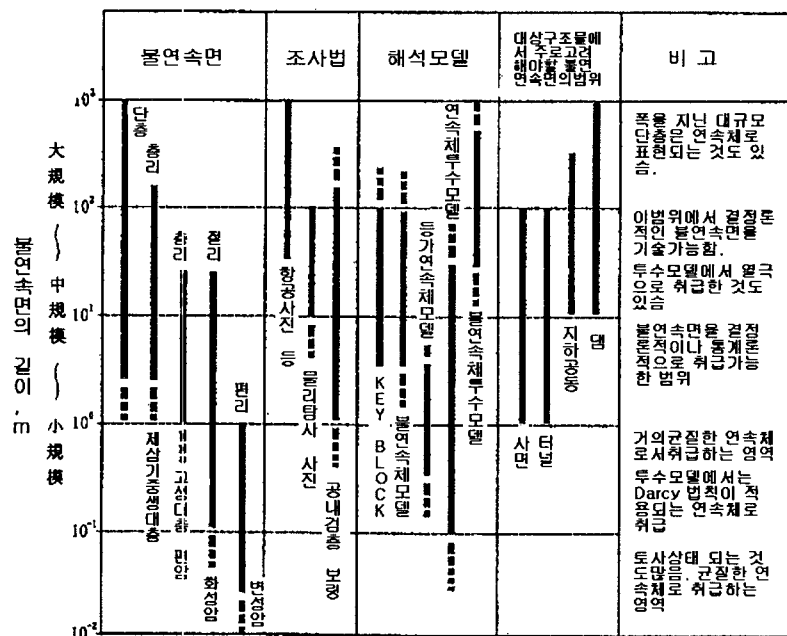


그림 9. 불연속면의 길이와 조사법·해석모델

예를들어 절리에 있어서도 화산암에서의 절리외에 거의 대부분이 응력해방에 따른 sheeting joints 와 같은 것까지 있다. 조사에서는 암반의 공학적 성질에 대하여 불연속면의 각각의 존재가 영향을 미치는가, 집합체로서의 존재가 영향을 미치는가를 충분히 고려하여 구분하는 것으로 크게 나뉜다.

현재, 불연속면을 취급하는 해석법에서는 연속체해석과 불연속체해석이 있으며, 어느것도 중·소규모 불연속면의 취급하는 특징이 있다. 즉 전자에서는 불연속면을 통계적으로 처리하고, 불연속면을 포함한 암반을 거시적으로 연속체로 간주한다. 그러나 후자에서는 불연속면의 분포를 이미 아는 것으로 취급한다. 조사에 있어서도 주의하지 않으면 안되는 것은 불연속체 해석에서는 불연속면의 위치정보가 매우 중요하다는 점이다. 예를들어 특정 암반블럭의 안정을 취급하는 key block 해석에서는 자유면의 위치 및 방향과 불안정블럭을 구성하는 불연속면의 위치와 방향의 관계를 기초로 판정이 된다. 이에 반하여 연속체해석에서는 각 불연속면의 절대위치의 정보는 그다지 중요시되지 않는다. 또한 해석의 목적이 지하공동등에서의 미소한 변위를 목적으로 하는 경우에는 취급되는 불연속면의 길이와 간격도 작게된다. 역으로 블럭의 안정문제에서는 취급되는 불연속면은 수m~수십m의 오더를 대상으로 하게된다. 이와같이 취급되는 불연속면의 정보는 구조물과의 상대적인 관계외에 해석방법 및 목적에 따라서 다르게 된다. 불연속면의 조사와 평가에서는 이러한 점에 대하여 주의할 필요가 있다.

3.3 불연속면의 분포 조사

3.3.1 불연속면의 조사법

1) 직접조사

사업초기단계에서는 지하에 접근하는 것이 어렵다. 따라서 노두에서 암반의 구조 및 공학적인 성질을 구해야 만 한다. 측정은 일반적으로 자연적인 노두나 채굴에 의해 노출된 작업면에서 이루어지기 때문에 주의해야 할 것은 이러한 노출된 표면은 풍화의 영향이 있고 심부의 암반성질과 상당히 다를 수 있다는 것을 명심해야 한다. 이러한 노출된 표면으로부터 구해진 초기 자료들은 계속되는 지하채굴에서 구해진 자료들에 의해 확인되어야 한다. 불연속면의 조사를 실시하기 전에 문제의 지역의 암종 및 주요 구조를 나타내는 지질도를 작성하여야 한다. 가장 효과적이고, 정확한 불연속면의 조사 방법을 고안하는 것은 그 지역의 지질상태에 익숙해진 후에 가능하다. 이러한 경우 중요한 고려해야 할 다음과 같은 근본적인 sampling의 문제가 있다.

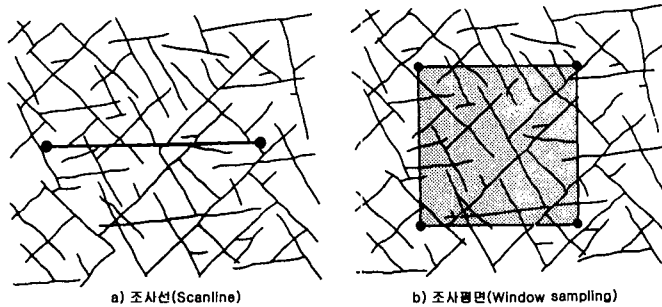
- 만족스러운 결과를 얻기 위해서 암반의 어떠한 성질을 조사해야 하는가?

- 제한된 양의 자료를 사용하여 결정된 불연속면의 성질의 평균값들을 어느 정도까지 신뢰해야 하는가? 그러나 Priest나 Hudson(1981)에 의해 개발된 것과 같은 통계학적인 기술을 사용한다 할지라도 이러한 질문에 대해 완전한 대답을 내릴 수 있는 방법은 없다. 불연속면의 mapping을 위한 통계학적인 접근방법이 가능한 곳일지라도 원하는 지하채굴지점에 접근하기가 곤란한 것과 같은 실제적인 문제는 해석결과에 있어서 조사자의 판단에 따라야 만 한다. 불연속면의 자료를 수집하는데 가장 널리 이용되는 방법은 지표에서 단순히 직접 측정하여 자료를 얻는 방법이다. 직접 조사방법은 중요하게 보이는 구조를 측정하고 기록하는데 주관적으로 수행된다. 이렇게 주관적인 조사 방법에서는 겉보기에 중요하게 보이는 절리군에 많은 노력이 집중된다. 따라서 중요할지도 모르는 절리군을 간과할 위험이 있다.

반면에 객관적 조사방법에서는 암석표면의 고정축 또는 고정면과 교차하는 모든 구조를 측정하고 기록하게 된다. 불연속면의 직접조사방법을 수행하기 위해 몇 가지 방법이 사용되어 왔다. Halstead 등(1968)은 절리군 mapping방법을 사용하였는데, 이 방법에 의해 30m간격으로 위치한 6×2m의 구역내에 발생하는 모든 절리를 기록하였다. Knill(1971)도 암석의 표면에 대해 면적 조사방법(area sampling)을 제안하였다. 반면에, Piteau(1971)와 Robertson(1971)은 일련의 조사선 조사방법(line scanning)을 이용하면 절리조사의 만족스런 방법을 제시할 수 있다고 주장하였다. 이 방법에서는 노두 암반에 테이프를 가로질러 높이를 조정한 후 암반에 잘 고정시키고, 다른 조사선을 처음의 조사선 테이프와 수직을 이루도록 위치시킨다. 그리고 테이프를 따라 테이프와 교차하는 불연속면의 거리를 기록한다.

노두나 지하 mapping에서 불연속면의 조사방법으로써 널리 사용되는 기본적인 기술이 조사선(scanline) 조사방법(그림 10a)이다. 이 조사선(scanline)은 조사할 암반표면 위에 설치한 하나의 선을 나타내며, 조사는 이 선을 따라 교차되는 모든 불연속면에 대해 이루어진다. 이 방법은 노두 또는 굴착

면 등의 암반표면에 조사선을 설정하는 것과 시추공을 조사선으로 간주하고 시추공 TV 관찰 또는 암석 코어의 관찰로 조사하는 두 가지로 분류할 수 있다. 조사선 조사방법 외에 다른 조사방법으로는 암반표면에서 어느 일정 면적상에 존재하는 모든 불연속면들을 측정하는 조사평면을 사용하는 기법(window sampling)이 있다. 조사평면의 형상은 조사의 간편성을 고려하여 정방형으로 하는 것이 보통이다. 이 방법은 조사선 조사방법보다 체계적이지 못하며 조절하기가 어렵다. 조사선(scanline) 조사방법에는 어떤 표준적인 조사방법이 없다. 따라서 특별한 설계를 위해 요구되는 특별한 자료를 제공하거나 지역적인 암반조건에 적합한 기술에 대해 상세항목을 수정할 필요가 있다. 조사에서는 노출된 불연속면의 간격이나 크기에 비해 상대적으로 큰 깨끗하고 평평한 암반표면을 선정한다. 조사지역에는 적어도



a) 조사선(Scanline)

b) 조사평면(Window sampling)

그림 10. 불연속면의 조사기법



그림 11. scanline 조사방법

50%정도가 끝이 보이는 150에서 350개 정도의 불연속면들이 포함되는 것이 좋다. 이러한 노두는 해변 절벽, 골짜기, 채석장, 도로의 절취사면, 노천채광, 무지보 갭도 등에서 발견될 수 있다.

조사선(scanline) 조사방법(그림 11)의 실측에 있어서 이 조사선은 암석에 박힌 못에 묶여진 줄로서 암반에 고정된 측정자가 된다. 이 조사선은 가능한 한 곧게 그리고 약 2~20m 길이로 하여 암석표면의 주향과 최대경사를 따라 설치한다. 두 번째 암반 표면에서는 방향에 의한 표본오차를 줄이기 위해 첫 번째 조사선에 대략 수직되게 설치한다. 한 불연속면에서 각 조사선의 시작점으로 하는 것이 바람직하다. 그리고 암반의 위치(좌표, 번호 등), 방향, 조건과 조사선의 선방향(trend)과 선경사(plunge) 그리고 조사선에 번호를 부여하고 작업장의 방향 등을 기록지에 기록한다(표 8). 표본조사에 영향을 미치지 않는 조사선의 직선으로부터 20도 이내 편차는 무시한다. 이 보다 큰 오차가 발생할 경우는 조사선을 세분하여 측정한다. 불규칙한 암반의 모든 면적을 기록할 수 있도록 여러 방향의 각도에서 사진을 촬영한다. 측정은 약 30m이상에 대해 실시하며, 그것이 전체적인 길이로 보아 대표성이 있어야 하고, 통계학적인 신뢰성을 위해 약 최소한 200개 측정점이 있어야 한다. Priest와 Hudson(1976)은 터널에서 암반의 안정성을 결정하기 위해 절리를 기록하는 조사선 기법을 기술하였다. 비슷한 작업이 Young과 Fowell(1978)에 의해 Kielder 시험 터널에서 수행되었다. 이 경우 터널 벽면전체에 수직, 수평 격자선을 그리고, 격자망과 교차하는 절리를 기록하고, 이를 통하여 불연속면의 공간적 밀도를 나타내는 격자의 등밀도선의 작성이 가능했다. Hudson과 Priest(1979)는 조사선을 따라 나타나는 불연속면의 빈도는 조사선의 방향에 따르는 함수이며, 단위 m당 불연속면의 평균 개수(λ)의 역수인 불연속면의 평균간격인 음지수분포를 나타낸다고 했다. 이 값은 조사선의 총길이를 교차된 구간의 수를 나누어서 간단히 얻을 수 있다. RQD와 단위 m당 평균 불연속면수와의 관계가 제시되었는데 다음과 같다.

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$$

2) 시추와 불연속면 조사

직접조사방법으로 얻은 정보에 부가하여 시추공으로부터 얻은 방향성코어(원래의 방향을 알 수 있는 코어)의 자료를 첨가할 수 있다. 이 자료의 가치는 부분적으로 암질에 의존한다. 즉, 암질이 불량한 경우 많은 양의 코어가 시추도중에 소실된다. 그러나, 절리의 지속성이나 분리된 정도 혹은 본래의 절리표면

을 알기란 거의 불가능하다. 더욱이 충전물질이 매우 연약한 경우 시추에 의해 회수되기는 매우 힘들다. 시추조사 및 결과의 판정에 있어 유의해야할 항목은 다음과 같다.

- 채취된 코아에 의해 지질정보를 얻기 때문에 어떻게 코아채취율을 높이는 문제가 시추조사의 생명이다. 코아채취율은 시추기사의 기량에 따라 크게 달라진다.
- 단층과쇄대나 연질암반부에서는 코아채취가 곤란하고 정확한 정보를 얻기가 어렵다.
- 시추의 보조조사로서 각종·공내검층 및 공내시험이나 borehole TV의 병용이 바람직하다. 또한 시추공벽은 상기의 시험 및 계측을 적절히 하기 위해 양호하게 마무리되어야 한다.
- 코아길이는 지반에서의 균열의 간격을 거의 정확하게 나타낸다. 그러나 풍화대나 연약암반에서는 굴착 및 관을 뽑아내 때 회전이나 충격에 의해 코아를 파손시키기 때문에 균열이 많아지기 쉽다.
- 코아의 사진촬영은 될 수 있는 한 조기에 실시하는 것이 좋다(코아는 시간이 경과하면 변색되거나 붕괴된다).
- 코아는 여러 번 감정하는 일이 있기 때문에 소중히 보관해야 한다.
- 시추위치와 시추공구의 표고는 정확히 측정하여 기록해둔다. 나중에 지질의 재검토를 실시할 경우에 이들이 불명료하면 모처럼의 데이터가 사용될 수 없는 경우가 생긴다.

시추공 조사기법에는 시추공 카메라, 폐쇄회로TV 등이 이용된다. 시추공 카메라에 의해 시추코아나 공내검층 및 시험만으로는 얻을 수 없는 정보, 예를 들면 단층의 상태, 불연속면, 지층의 주향경사, 균열의 간격, 충전물, 공동의 유무, 코아채취를 할 수 없었던 구간의 지질상황 등의 직접조사가 가능하다. Bore hole TV 관찰에 의해 암질(풍화정도, 절리위치, 폭, 빈도, 협재물)이나 단층의 성상(위치, 폭, 협재물질) 등이 밝혀진다. 시추공벽면을 촬영하기 전에 방향조정이 가능하다. TV카메라는 시추공내의 직접적인 모습을 보여주며, 이를 비디오 테이프에 기록할 수 있다. 이 시스템은 상대적으로 공내의 물이 깨끗한 상태에서 이용할 수 있다. 따라서 지하수면 아래에서, 특히 시추공내의 물이 혼탁할 경우는 거의 사용할 수 없게된다. televiewer를 이용하면 시추공 벽면의 음파양상을 알 수 있는데, 이것의 장점은 사용전에 물을 빼낼 필요가 없다는 것이다.

3) 시험 수평갱조사

시험수평갱은 갱벽에 있어서 암반의 상황을 연속적으로 직접 관찰할 수 있다. 또한 원위치 암반시험의 장소를 제공한다. 시험수평갱벽의 관찰에서는 암석의 강도, 풍화의 정도, 불연속면의 빈도, 불연속면의 상태(개구, 밀착, 또는 충전물의 종류 등)을 잘 판단할 수 있다. 그러나 갱벽 암반은 발파에 의해 나빠지기 때문에 수평갱내의 불연속면 수는 지반에서 보다 조금 많이 나타나기 때문에 주의가 필요하다.

4) 사진과 불연속면의 조사

불연속면의 많은 자료를 노두의 사진으로부터 얻을 수 있다. 지상으로부터 암반의 수평 양상과 공중에서의 수직 양상을 볼 수 있고, 때에 따라서는 노두에서 아래쪽으로 기울어진 양상을 볼 수도 있다. 이러한 사진은 조절이 가능한 경우도 있고, 가능하지 않은 경우도 있다. 조절 불가능한 사진은 수동카메라에 의해 혹은 노두면에 평행한 선을 따라 노두면까지의 거리의 약5%의 차이가 나는 지점에서 같은 노두면을 찍은 두 장의 입체사진(stereo-pairs)에서 얻을 수 있다. 주 불연속면의 패턴이나 노두면을 구조적 영역으로 예비 분할하는 작업이 사진에 의해 수행될 수 있다. 그러나 불행히도 이 자료는 정확하게 지도나 도면에 옮겨질 수는 없다. 반면에 조절 사진을 이용하면 절리에 대한 자료를 정확히 지도나 도면에 옮길 수 있다. 조절사진은 지상조절 장비를 갖춘 항공사진이나 지상에서의 사진경위의(phototheodolite) 조사 등에서 얻을 수 있다. 항공사진이나 지상에서 찍은 사진은 보통 판크로매틱(panchromatic)필름을 사용하는데, 칼라 혹은 적외선 기법이 각광받고 있다. 적당한 축적의 항공사진은 불연속면의 조사에 매우 유용하다. 사진경위의를 이용하여 촬영한 사진은 입체비교측정기와 함께 사용되어 stereoscopic model을 만들 수 있다. 이 모델에 있어서 위치 측정은 대상거리의 대략 1/5,000의 정밀도를 갖는다. 결과적으로 사진을 촬영한 면에서 거리가 50m인 점은 10mm의 정밀도로 위치하게 된다. 이런 식으로 절리빈도, 방향, 연속성 등을 알 수 있다. 이 기법은 노두면의 접근이 어렵거나 조사하기에 위험한 경우 유용하게 이용된다.

3.3.2 규모별 조사방법

규모별 불연속의 주요한 조사법으로서 적용은 표 3에 표시되어 있다. 각 조사법에서는 각각의 장점과 단점이 있다. 선택은 목적으로 하는 불연속면의 규모 및 심도와 적용되는 조사법의 정도를 충분히 고려하여 행하는 것이 중요하다. 특히 지중의 불연속면의 분포추정은 여러 가지 조사법을 조합하여야 할 필요가 있다. 예를들어 물리탐사와 같은 간접적인 탐사에서는 위치정보의 정도가 낮기때문에 중규모 이하의 불연속면의 탐사는 일반적으로 곤란하다. 이러한 경우에는 Borehole camera 등의 직접적인 관찰수단을 이용하게 된다. 대규모적인 불연속면에서는 거의 모든 조사가 적용된다.

표 3. 각종 조사법과 불연속면조사에의 적용

조사법	사 진		공내검층								관 찰		물리탐사				
	항공사진	일반사진	시추코아	시추공카메라	속도검층	전기검층	지하수검층	투수시험단공식	투수시험다공식	유향유속	tracer	횡갱	노두	탄성과탐사	전기탐사	지층레이더	전자기탐사
대규모불연속면	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	△	◎	○	○	○	×	○
중·소규모불연속면	×	◎	◎	◎	△	△	△	△	○	○	○	◎	◎	×	×	○	×

주) ◎:적당 ○: 조건부 적당 △: 매우부적당 ×: 부적당한 것이 많음.

1) 대규모불연속면 조사

단층으로 대표되는 대규모불연속면은 일반으로 지형도 등의 기초자료외에도 항공사진판독, 노두, 조사갱, 시추코아, 및 시공굴착면에서의 육안관찰, 이외에 물리탐사등에 의하여 분포위치 및 불연속면특성이 상세하게 조사된다. 조사결과로부터 지질평면도 및 단면도가 작성되며 결정론적인 모델이 작성된다. 다만 대상구조물의 규모에 있어서는 중규모불연속면이 이의 범주에 드는 것이 많다.

2) 중·소규모불연속면조사

중·소규모불연속면에 대한 조사의 기본은 관찰에 의한 스케치가 있다. 스케치에는 불연속면의 연속성 및 방향을, 지질 및 지질구조와의 관계로부터 사진을 찍는 것이 중요하다.

표 4. 중·소규모 불연속면의 샘플링방법

관찰방법	명칭	방법의 개요	모델화를 위한 정보
직접관찰법	scanline	대상이 되는 노두면에 5~10m의 축선(scanline)를 설정하고 축선과 교차하는 불연속면을 조사한다.	불연속면의 방향과 단위축선길이당 불연속면의 밀도(간격), 샘플링정도가 높고, 간격폭 및 충전물 등의 정보입수가 가능하다.
	grid	대상이 되는 노두면에 1.0~1.5m 사방격자봉을 설정하고 이로부터 나타나는 불연속면을 조사한다.	불연속면의 방향과 단위면적당 불연속면의 밀도(간격), 샘플링정도가 높고 간격폭 및 충전물 등의 정보도 입수가 가능하다.
간접관찰법	사진측량	스테레오사진방법, 막장 등의 면등 용이하게 접근이 되지 않는 절벽등에 이용한다. 사진화질이 정도를 좌우한다. 식생이 있는 경우에는 적용이 불가능하다.	3점 XYZ 좌표로부터 불연속면의 방향을 추정한다. 샘플링의 정도는 사진의 촬영조건 및 화질에 의한다. 간격폭 및 충전물의 계측은 곤란하다.
	시추공카메라	시추공에서 사용, 성과는 시추방향에 영향을 받는다. 시추코아와는 정보의 성질이 다른점에 주의한다.	불연속면의 방향과 단위축정길이의 불연속면의 밀도(간격). 샘플링정도는 높고, 간격폭도 측정가능. 시추코아와 함께 분석하는 것이 중요하다.

방향과 연속성 및 간격 등을 통계적으로 처리하는 설계방법을 찾아내기 위해서는 충분한 양의 데이터를 샘플링할 필요가 있다. ISRM 지침에서는 150점 이상의 데이터수를 권장하고 있다. 중·소규모 불연속면의 샘플링방법은 표 4에 나타난 바와 같이 scanline법과 grid 법 등과 같은 직접관찰법과 스케치 및 화상등을 통해 관찰하는 간접관찰법이 있다. scanline법 및 grid법은 종래부터 잘 사용하고 있는 방법이다. 노두를 직접관찰하는 샘플링하기 위해 간격폭 및 충전물의 상황외에 불연속면의 변위 등의 보다 상세한 정보의 취득이 가능하다는 잇점이 있다. 또한 시추공카메라 및 사진촬영 등은 화상을 이용하여 간접 관찰하는 법이다. 사진촬영은 외국에서는 근래 급속하게 보급되고 있는 방법으로 기술자가 직접관찰하기가 가능하지 않은 절벽 및 시간적제약을 동반하는 터널막장 관찰 등에서 이용되고 있다. 이방법은 측량 정도(精度)가 촬영조건에 좌우되는 것과 불연속면의 간격폭 및 충전물, 거칠기 등의 관찰이 곤란하다는 단점이 있다.

3.4 구조물별 불연속면의 조사

3.4.1 사면

자연사면에서는 사진측량이 곤란한 암반사면에서도 답사를 위해서 정도가 높은 지형도(축척 1/200정도)를 작성할 필요가 있다. 또한 5m간격의 횡단측량도를 작성하게 되면 결정론적으로 불연속면도를 추적하는 것이 가능하게 된다. 불연속면은 3차원정보이지만 해석은 통상 2차원으로 행해진다. 3차원정보를 2차원정보로 변환하는 경우에는 기본적으로 최고로 위험한 사면의 경사방향으로 변환하는 축선으로 검토하지 않으면 안된다. 최고로 위험한 방향은 예상되는 파괴모드에 있어서도 다르다. 예를들어 평면과 파괴라면 파괴면으로 되는 불연속면에 수직인 방향이, 썩기파괴이라면 파괴면으로 되는 불연속면간의 교차방향이 주검토단면이 된다. 파괴모드가 확정되지 않은 경우에는 순위가 높은 불연속면간의 교차선 방향을 탐색하는 작업이 필요하게 된다. 어느경우에도 취득되는 3차원정보를 검토단면상에 투영하고 2차원해석모델을 작성하게 된다. 정도가 양호한 자유면(이경우에는 절벽)의 위치정보가 이와같은 검토를 할 경우 중요하게된다.

3.4.2 터널

터널 및 지하공동 등의 막장에서는 막장위치는 통상적으로 알려져있기 때문에 막장관찰결과가 불연속면의 위치(좌표)와 방향을 구하는 것이 비교적 용이하다. 또한 단면이 커다란 경우에는 이와같은 정보를 기초로 시공관리의 하나로 keyblock 해석등이 도입된다. TBM과 같이 크리노메타가 사용할 수 없는 경우에 있어서도 현재에서는 자이로등에 의한 전자(자동)크리노메타에 의하여 측정이 되며 디지털사진의 갱벽전화상으로부터 정보를 추출하는 것이 가능하다. 또한 막장면의 위치는 미리 알고 있기 때문에 터널의 축으로부터 각도를 직접계측하여 불연속면의 방향을 구하는 것이 가능하다.

4. 암반불연속면의 대한 시험

4.1 해석에 필요한 물성과 시험법

암반의 변형은 그림 12에 표시한 바대로 암석자체의 변형과 암석중에 존재하는 불연속면의 변위(개구·폐색·sliding)에 의하여 발생된다. 이러한 거동을 지배하는 불연속면의 성질은 거칠기와 벽면강도, 충전물의 유무이다. 암석과 불연속면의 물성을 나누어 나타내면 표 5와 같다. 불연속면의 대표적인 시험법은 표 6에서와 같다. 불연속면의 성질은 충전물에 의한 영향이 크기 때문에 충전물 유무에 따라서 시험 및 평가방법이 다르다. 또한 중요도가 높은 구조물에서는 원위치시험을 수행하지만 통상적으로는

비용문제 때문에 실내시험이 중심이 되고 있다.

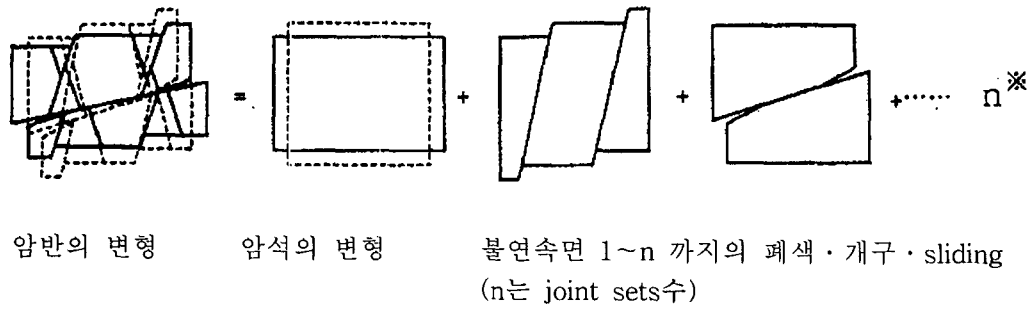


그림 12. 중규모 불연속면에 의한 암반의 변형개념

표 5. 불연속암반해석에 필요한 기본 parameter

구 분	암 석	불연속면(joint sets수)
단위체적중량	○	
탄성계수	○	
포아송비	○	
점착력	○	○
내부마찰각	○	○
수직강성		○
전단강성		○

표 6. 불연속면의 변형과 강도를 구하는 대표적인 시험방법

구 분	시험방법	변형*	강도	비 고	
불연속면 시험	거칠기 계측시험	-	○	대규모불연속면~중규모불연속면 " "	
	벽면 강도시험	-	○		
	원위치 전단시험	○	○		
실내시험	일면 전단시험	○	○	주로 중규모불연속면 " 수직강성. 별도보정이 필요 레이저변위계등에 의한	
	3축 압축시험	○	○		
	일축 압축시험	○	-		
	거칠기 계측시험	-	○		
	벽면 강도시험	-	○		
층진물 시험	tilt 시험	-	○	주로단층점토등의 변형강도특성을 조사 " "	
	원위치시험	표준관입시험	△		△
		공내수평재하시험	○		△
		원위치 전단시험	○		○
실내시험	3축 압축시험	○	○		
	일면 전단시험	-	○		

○ 직접적 정보 △ 간접적 정보 ※ 변형은 수직강성과 전단강성으로 표시

시료는 지하공동과 암반사면 등에서는 블록을 절단하여 시험편을 만드는 방법도 있지만, 일반적으로 시료의 정형 및 채취위치(특히 심도)의 제약이 크기 때문에 시추코어를 사용하는 경우가 많다. 또한 아무리하여도 시료가 채취할 수 없을 경우에는 불연속면을 함유한 낙하암괴등으로부터 목적을 만족하는 시료를 선별하는 방법도 있다. 블록의 안정문제에서는 특정의 불연속면의 강도를 조사하는 것이 목적으로 되지만 변형해석을 목적으로 하는 경우에는 통계론적으로 처리되는 각 joint sets 의 대표값을 조사하

는 것으로 된다. 시료채취시에는 설계 및 시공에서 예측되는 변형 및 파괴의 방향을 기초로 시험시 전단 방향을 결정하지 않으면 안된다.

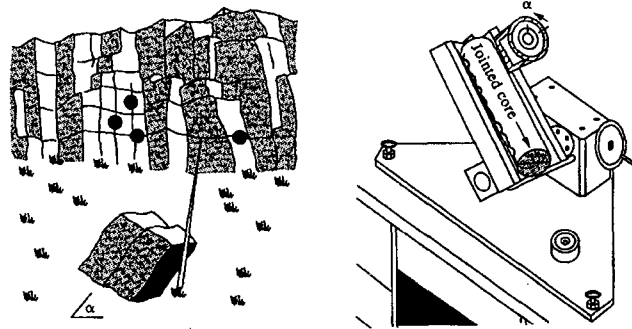


그림 13. 불연속면사이 내부마찰각을 구하기 위한 Tilt test

4.2 충전물에 의한 불연속면의 변형 및 강도특성에 미치는 영향

불연속의 강도를 지배하는 중요한 요인중의 하나로 충전물이 있다. 충전물을 함유한 불연속면의 물리적 성질은 충전물의 광물학적성질, 입도분포, 과압밀의 정도, 함수비와 투수성, 과거의 응력이력, 벽면거칠기, 간격폭, 벽면의 파쇄상태 등 많은 요인에 의존한다. 이외에 충전물은 두께가 수mm정도에 있어서도 불연속면의 강도 및 변형성은 현저히 저하된다(그림 14).

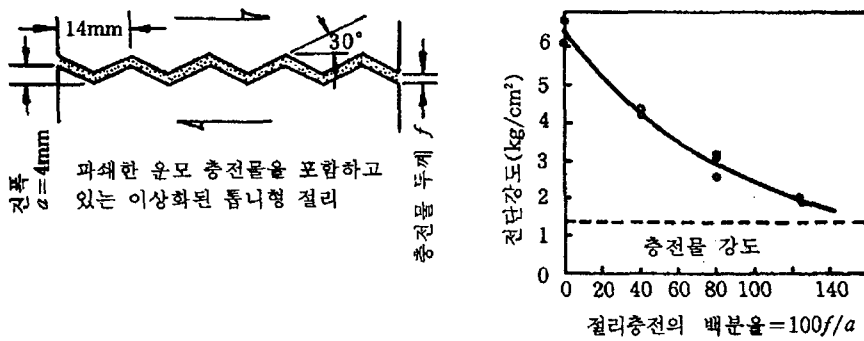


그림14. 충전물의 두께와 전단강도의 관계(Goodman, 1970)

충전물이 있는 경우의 강도 및 변형성을 추정하는 것이 쉽지 않지만, 노두 및 굴착사면에 직접충전물의 상황을 관찰할 수 있으면, 다음식에 의하여 추정하는 것이 가능하다(Barton, 1995).

$$\Phi_f = \tan^{-1}(J_r / J_a)$$

여기서, Φ_f : 불연속면의 접촉상태 및 협재물로 인해 달라진 마찰각

J_r : 불연속면의 거칠기 계수

J_a : 불연속면의 변질계수

단층파쇄대 등의 대규모 불연속면에서도 강도가 문제가 된다. 시료의 채취가 가능한 경우에는 불교란 시료에 의한 시험을 실시하는 것이 바람직하다. 그러나 횡갱 및 굴착시공시에는 직접관찰이 가능한 경우를 제외하고는 사전조사단계에서 충전물의 시료를 구하는 것은 드물다. 미리 파쇄대가 추정되는 장소에 시추를하는 경우 파쇄대폭이 두텁게되면 수평채하시험 및 표준관입시험 등에 의하여 추정하는것도 하나의 방법이다.

표 7. 불연속면의 거칠기 계수(J_r) 와 변질계수(J_a)

불연속면의 거칠기계수	J_r^*
연속적이지 않은 joint	4.0
거칠고, 파상	3.0
매끄러운, 파상	2.0
거칠고, 평면적	1.5
미끄럽고, 평면적	1.0
매끄럽고 평면적	0.5
추진이 된 불연속면	1.0

※ 평균 joint간격이 3m를 넘는 경우에는 1.0을 더함.

충전물 또는 벽면의 변질계수	J_a
a) 본질적으로 충전이 되지 않은 경우	
밀착된(healed)경우	0.75
변질되지 않은 경우	1.0
실트질 또는 사질피복	3.0
점토질 피복	4.0
b) 충전된 경우	
모래 또는 파쇄암의 충전물	4.0
단단한 점토 충전물(< 5mm두께)	6.0
연한 점토충전물(< 5mm두께)	8.0
팽윤된 점토충전물(< 5mm두께)	12.0
단단한 점토충전물(> 5mm두께)	10.0
연한 점토충전물(> 5mm두께)	15.0
팽윤된 점토충전물(> 5mm두께)	20.0

5. 암반구조물에서의 불연속면에 의한 붕락

5.1 암반사면

암반사면은 지질구조에 따라 다양한 붕괴양상을 나타내고 있는 데, 특히 고속도로 공사에서 1995년에서 1999년 중반까지 2,700개의 대상 사면 중에 490여 개의 크고 작은 사면에서 붕괴현상을 보여 보완 조치를 시행한 바가 있다(김성환, 2000). 암반사면의 안정성은 암반 내에 발달하고 있는 이 불연속면에 의해 크게 좌우되며, 암반의 중요한 물리적, 역학적인 특성은 이들 불연속면의 기하학적인 형상, 크기, 분포의 함수가 될 수 있다. 그러므로 암반사면의 안정성 평가는 불연속면의 분포, 형태, 공학적 특성에 의해서 결정되는데 이를 위해서는 암반 내에 분포하는 불연속면의 공학적인 성질을 정량적으로 파악하여야 한다. 전국 고속도로 주변의 암석 종류를 분석한 결과 화성암이 43.7%, 퇴적암이 24.6% 그리고 변성암이 31.7%를 나타내었다. 전체 붕괴빈도중 경기육괴의 편마암지대에서 46.7%를 차지하는 붕괴비율을 나타내고 경상분지를 이루는 퇴적암지대에서는 34.7%, 옥천고지향사대의 퇴적변성암에서는 10.6%, 영남육괴 암층에서는 8%의 붕괴 비율을 나타내고 있다. 표 8 는 암석종류별 불연속면의 특성을 보인다.

표 8. 암종별 사면의 특성(김성환, 2000)

암 종	분포고속도로	풍 화 특 성	불연속면 발달특성	사면붕괴유형
화성암	경부, 88, 영동 중부, 남해 서해안, 중앙, 호남	<ul style="list-style-type: none"> 강한 강도특성 미세균열 심함 동결융해작용에 의해 쉽게 풍화 풍화심도 비교적 얇음 	<ul style="list-style-type: none"> 수직절리발달 절리면 비교적치밀 절리면 거칠기 : Rough 높은 전단강도 	<ul style="list-style-type: none"> 낙석 평면파괴 토층유실 원형파괴 전도파괴
퇴적암	구마(하양층군) 남해, 경부 중부(국부적) 88, 중앙	<ul style="list-style-type: none"> 지표노출시 쉽게 풍화 하부에 호온펠스화 작용을 받은 경암질과 풍화를 받아 있는 연암층이 뚜렷한 경계면을 이룸 (구마선) 암석강도의 이방적 특성을 보임 	<ul style="list-style-type: none"> 층리발달 층리면 경사 : 18-20° (구마선) 수평(남해선) 층리면에 점토층진(구마선) 절리면거칠기 (Planar) 낮은 전단강도 	<ul style="list-style-type: none"> 평면파괴 암괴붕락 (세일의 차별적인 풍화에 의한)
변성암	경부,중부, 영동 호남(옥천층군) 중앙, 서울외곽 서해안, 88, 남해	<ul style="list-style-type: none"> 단층파쇄대, 단층점토 등의 약선대의 존재가능성 큼 암반내에 열수 용액의 작용으로 인한 하부에 풍화대 존재가능성 큼 핵석형 풍화양상 풍화 심도 깊음 	<ul style="list-style-type: none"> 단층에 의해 붕괴 가능성이 큼(서해안, 서울외곽, 중앙춘천측) 복잡한 지질구조 단층파쇄대, 단층점토 등의 약선대의 존재여부를 주의 깊게 판단하여야 함 	<ul style="list-style-type: none"> 평면파괴 썩기파괴 원형파괴

사면붕괴의 주원인이 될 수 있는 불연속면으로는 절리, 엽리, 단층, 층리 등이 있다. 조사된 사면중 특히 암반내에 발달하는 지질구조중 그림 15에서 보는 바와 같이 절리는 모든 암석에 발달하는 지질구조이므로 각 암종에 따라 비교적 고른 분포를 보인다. 층리는 퇴적암의 지질구조로 층리면에 의해 평면파괴가 주로 발생되었으나 세일층의 풍화로 인해 사암이 낙석되기도 한다. 그리고 엽리는 변성암의 지질구조로 인해 평면파괴 및 썩기파괴가 발생하기도 하며 단층에 의한 사면붕괴는 변성암에서 우세하게 나타나고 있다. 그러나 변성암에서 암질불량으로 인한 붕괴양상도 빈번히 나타나고 있다.

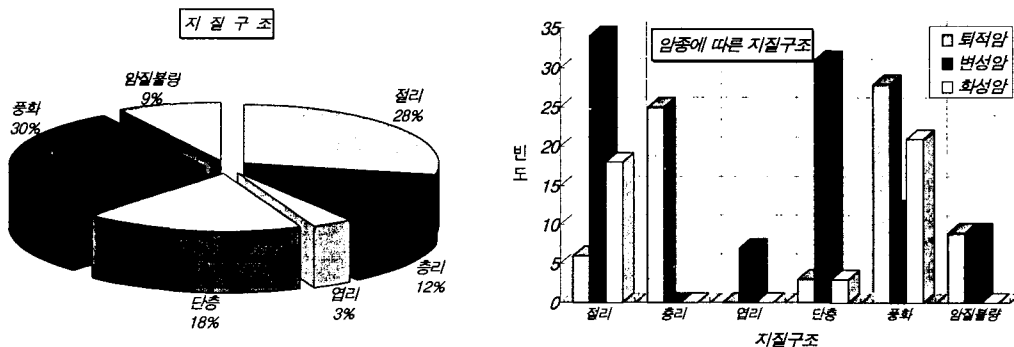


그림 15. 지질구조에 의한 붕괴양상(김성환, 2000)

5.2 터널

지하철, 도로, 철도터널 등 총 21개 현장에 대한 터널심도, 암석종류, 지층 풍화도 등 터널 붕락에 영향을 줄 수 있는 지반요소에 대한 분석을 하였다(배규진, 2000). 이중 불연속면 관련 항목을 소개하면 다음과 같다.

1) 불연속면 수, 방향성 : 절리군이 3개 이상 존재하는 현장이 62% 이상을 차지하고 있는데 붕락 현장의 대부분이 파쇄대가 집중적으로 발달하는 현장이 많아 불연속면의 수가 많은 것으로 판단되며 특히 파쇄대 폭이 커서 막장 전면에 발달할 경우 불연속면 수를 판단하기 곤란하여 “Shattered”상태와 “Earthlike” 상태로 분석된 현장이 4개소가 있었다. 붕락구간에서의 불연속면 방향성은 95%가 터널 굴진 방향에 대하여 불리하게 작용하고 있었다.

2) 절리간격, 절리상태 : 절리간격과 절리상태는 RMR 분류법에 의한 등급으로써 대부분 4~5 등급의 열악한 환경이 많았다. 특히 편마암 지대에서 굴착된 현장중에는 절리 사이에 충전물질로 흑연 등이 포함되어 지반의 전단강도를 크게 저하시키는 경우가 많았으며 토피고도가 낮아 지표 퇴적층중의 점토들이 지하수와 함께 절리틈에 협재되어 있는 경우가 많았다. 이러한 절리들은 붕락현장에서 대부분 터널 굴진방향에 대하여 불리하게 작용하고 있었다.

3) RQD : RQD 항목은 붕락된 막장과 가장 인접한 막장 혹은 시추자료로부터 측정된 자료로써 RQD 50% 이하가 전체 현장의 90%를 차지한다. 이중 38%에 이르는 8개 현장에서는 RQD 값이 0에서 10% 이하로 극히 불량하게 나타났다. 그림 16은 붕락현장의 지반조건중 RQD 항목과 붕락된 현장수에 관한 그림으로써 전체 현장의 70% 이상이 RQD가 20% 이하일 때 붕락이 발생되었다. 이중 38% 현장이 RQD 10% 미만으로서 RQD 값이 0에 가까운 현장도 다수 있었다. 이것은 터널 붕락이 발생한 지반이 대부분 풍화토에 가까운 풍화암일 때 그리고 절리군의 발달해 있는 지반조건하에서 붕락이 발생되었기 때문에 RQD 항목의 점수가 나쁘게 나타나는 것으로 분석된다.

그림 17은 21개소 터널 중 지하철 현장의 8개소 터널에 대한 RQD 값에 따른 붕락규모의 변화에 관한 그림으로서 RQD 값이 10% 이하일 때 비교적 큰 규모의 붕락이 발생한 것으로 분석되었다.

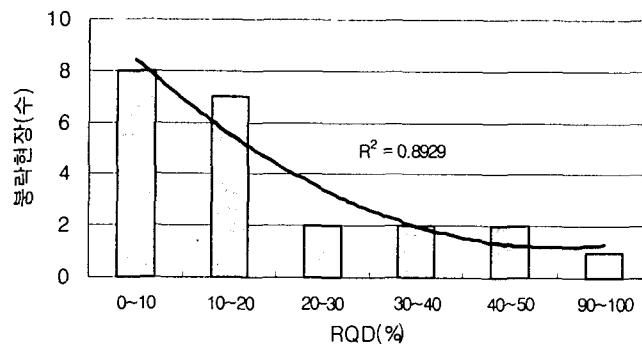


그림 16. 붕락현장에서의 RQD 값과 붕락현장수에 대한 관계(배규진, 2000)

그림 17에서 RQD 값이 20% 이하이면서 붕락규모는 10m³이하로 적은 규모의 붕락을 보이는 현장이 2개소가 있는데 이현장들은 모두 하천통과 구간으로서 굴착전 강관다단 보강 그라우팅과 우레탄 그라우팅으로 사전 보강을 하였기 때문에 붕락규모가 지반상태에 비해 소규모로 발생한 것으로 판단된다.

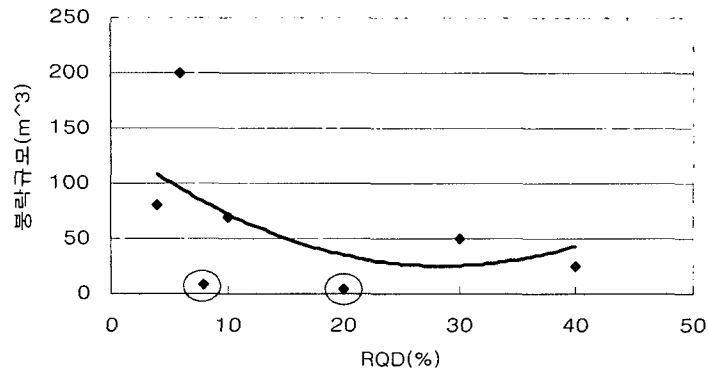


그림 17. 봉락규모와 RQD(배규진, 2000)

그림 18은 21개 터널 봉락부에서 조사된 지반특징으로서 봉락구간에서 지반의 풍화정도가 변하거나 연·경의 혼합지반. 현상이 17개소가 있었다. 봉락부에서 조사된 파쇄대에 단층점토(Fault clay)가 함유되어있는 현상이 12개소가 있었다. 21개 봉락부 현장중 흑연(Graphite)이 발견된 현상이 4개소가 있는데 흑연은 변성작용이 심한 곳에서 주로 발견되므로 흑연이 나타난 구간에서는 과거에 대규모의 변성작용이 있었음을 의미하므로 지반구조 등이 크게 교란되어 있을 가능성이 크다.

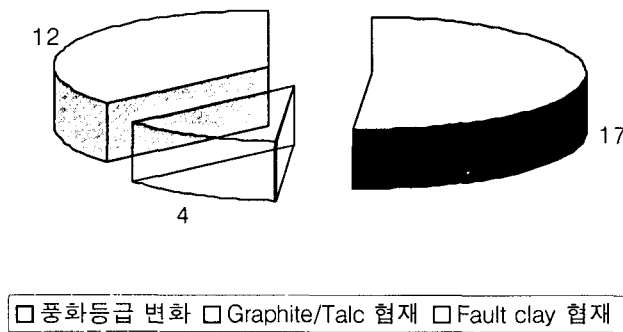


그림 18. 터널 봉락 막장의 지반공학적인 특징(배규진, 2000)

6. 결 언

지표로부터 수 백m 내에 있는 대부분의 암반은 역학적 거동을 결정하는 불연속면들을 내포함으로써 불연속체의 거동을 하게 된다. 그러므로 암반의 구조와 불연속면의 성질을 암석의 종류에 대한 역학적인 특성과 함께 자세하게 조사되어야 한다. 암반사면 안정성의 경우 불연속면에 대한 정량적인 조사결과는 초기의 한계평형 분석에 직접적으로 사용될 수 있다. 가장 영향을 미치는 불연속면의 방향, 위치, 연속성, 절리의 수압, 전단응력 등은 분석에 사용될 직접적인 자료가 된다. 거칠기, 벽면의 강도, 풍화정도, 충전물의 형태, 지하수의 용출흔적 등은 공학적인 문제에서 중요한 간접적인 자료가 될 수 있다.

터널의 안정성 문제에서는 안정성에 대한 불연속면의 영향에 대한 직접적인 해석방법이 충분히 개발이 되지 않고 있기 때문에 불연속면에 대한 이러한 상세한 조사결과는 간접적인 자료가 될 수 있다. 암반의 구조나 불연속면의 성질에 대한 조사는 암반의 기능적인 분류를 위한 기초가 될 수 있도록 충분히 상세하게 이루어져야 한다. 암반과 불연속면에 대한 조사가 더욱 완전해 진다면 최소한의 값비싼 현장 시험으로 공학적인 구조물의 설계가 가능할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 김성환(2000), “암반 절취사면의 붕괴유형 및 보강사례”, 한국지반공학회 암반역학위원회 특별세미나 논문집-암반구조물 붕괴.보강기술, pp.35~53.
2. 배규진, 서경원(2000), “터널붕괴 유형 및 보강사례”, 한국지반공학회 암반역학위원회 특별세미나 논문집-암반구조물 붕괴.보강기술, pp.3~31.
3. 신희순, 선우춘, 이두화(2000), 토목기술자를 위한 지질조사 및 암반분류, 구미서관, 서울, 491p.
4. Goodman, R.E., The deformability of joints, In Determination of the in-situ modulus of deformation of rock. American Society for Testing and Materials Special Technical Publication, Number 477, pp. 174~196.
5. International Society for Rock Mechanics Commission on standardization of Laboratory and field tests(1978), Suggested method for the quantitative description of discontinuities in rock mass; Int. J. Rock Mech.
6. 일본지반공학회(1999), 불연속성암반의 조사·해석과 평가, 일본지반공학회지, pp.61~66.