

토목기술자를 위한 암반공학(V)

신 회 순*

5. 암반의 공학적특성

5.1 개요

터널을 비롯한 지하구조물의 설계는 구조지질조사와 함께 암석 및 암반의 특성을 조사하는 것으로부터 시작된다. 이들중에서 가장 중요한 것은 터널의 안정성이 단층, 절리, 층리, 열리 등의 불연속면에 의하여 크게 영향을 받으므로 구조지질이 으뜸이고 다음으로는 압축강도와 전단강도와 같은 공학적특성이다. 지하구조물의 파괴는 주변 암반내의 응력상태와 암반의 강도와 관련이 있다. 세번째로는 굴착작

업과 안정성에 영향을 끼치는 지하수이다. 본 강좌에서는 특히 암석 및 암반의 공학적 특성에 관하여 되도록이면 실무에 종사하는 토목기술자들이 이해하기 쉽게 기술하고자 한다. 암석과 암반의 특성을 구분하여 이번호에는 먼저 암석의 공학적특성을 기술하고 암반의 공학적특성에 관하여서는 다음호에 기술하기로 한다.

5.2 암석과 암반

터널설계자들은 현장에서 절리, 연약한 층리면, 연약한 편리면, 연약대와 단층과 같은 불연속면을 포함하는 암반과 마주치게 된다.

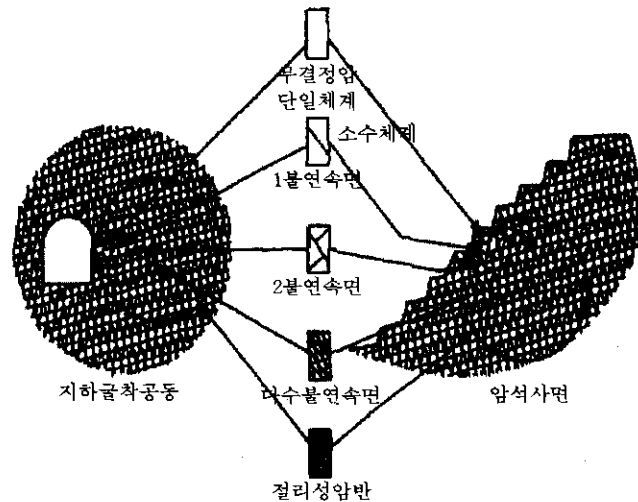


그림 5.2.1 암석의 크기에 따른 암반조건

* 정회원, 한국자원연구소 암반공학연구사업책임자 책임연구원

여기서 암반은 절리, 단층, 층리면과 같은 구조적 특징들에 의해 불연속성을 갖게된 원위 치암체(in-situ rock)로 일반적으로 암반사면을 비롯한 지하구조물은 이러한 불연속면들의 움직임과 관련이 있다. 암석은 무결합암(intact rock)을 의미하는 것으로 암반내 불연속면 사이에서 결합이 없는 블록을 형성하는 고결된 광물입자의 집합체를 말한다. 암질과 불연속면의 어느쪽이 암반의 역학적특성에 지배적인 가는 연암에서는 암질과 불연속면의 역학적 성질의 차이가 적기 때문에 암질을 중심으로 평가가 가능하지만 경암에서는 암질보다도 불연속면의 영향이 크기 때문에 현지에서는 불연속면의 평가가 더욱 중요하게된다(그림5.2.1참조).

5.3 무결합암의 강도에 미치는 영향요소

암석의 강도는 성인, 구조, 조성, 조직, 입자 크기와 공극율에 영향을 받는다. 이외에도 주변 압력, 공극압, 온도 및 수분함유율에 의해서도 영향을 받는다. 시험실시험방법은 일반적으로 확립되어 있는데 시험기술은 국제암반역학회(ISRM: International Society for Rock Mechanics)에 의하여 제안되어 있다. 토질역학 분야에서는 토질시료의 압축강도를 전체 토층의 압축강도로 사용하고 있는데 암석역학분야에서는 무결합암의 압축강도는 각종 암반분류나 암반의 강도를 판단하는 데 기본적으로 사용되는 가장 중요한 요소이다.

이러한 암석의 강도에 영향을 미치는 주요 요소는 다음과 같다.

- 이방성(anisotropy)
- 시험편의 형태과 크기
- 구속압(confining pressure)
- 수분함유율과 공극압
- 시간의존 변형성(creep)과 재하속도(loading rate)

5.3.1 이방성

암석은 대부분 층리나 엽리, 벽개와 같이 일

정한 방향성을 지니고 있으며 금속과 같이 균질한 예가 거의 없다. 화강암은 대부분 치밀한 조직과 비교적 등방향성을 가지고 있다고 알려져 있으나 국내화강암은 실제로는 결방향에 따라 20%이상의 강도의 차이를 보이는 사례도 발표된 바 있다. 셰일, 사암 및 일부 석회암과 같은 퇴적암들은 비등방향성을 지니며 점판암과 같은 변성암들은 층리가 뚜렷하고 비등방향성이 크다. 이와 같이 암석은 대부분 이방성의 특성을 보이기 때문에 강도시험을 실시할 경우가압방향과 층리방향과의 각도에 따라 특이한 변형과 강도특성을 보인다. 실험결과의 예로서 그림 5.3.1에서는 가압방향과 층리방향이 이루는 각(β)이 0° 와 90° 부근에서 일축압축강도가 가장 크며 30° 부근에서 가장 작아 최고값이 최저값의 4~5배에 달하고 있다. 따라서 점판암, 셰일, 이암, 천매암, 편암과 같이 층리, 편리 등의 약면의 존재로 이방성이 강한 암석을 대상으로 시험할 경우에는 시험결과에 반드시 가압방향에 대한 층리의 방향을 기재하여야 한다.

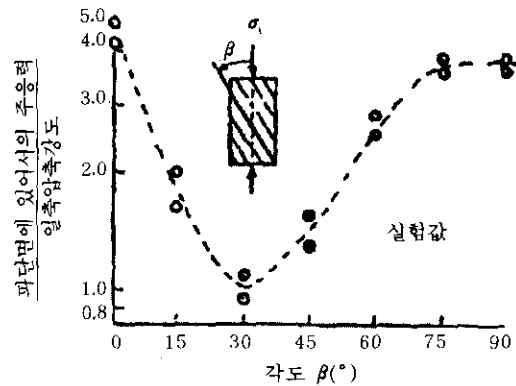


그림 5.3.1 절리면의 경사각도와 강도와의 관계(점판암)

5.3.2 시험편의 형태와 크기

시험편이 시험기의 강재판사이에 압축되어질 때 축방향으로는 짧아지고 횡방향으로는 팽창하는 경향이 있다. 다시말하면 시험편과

강재판사이의 접촉면에서 마찰저항력이 생겨 팽창을 방지하는 경향이 있다. 결과적으로 응력의 분포는 시험편을 통하여 높이/직경(h/d) 비율의 함수로 변하게 된다. h/d가 증가하면 시험편체적의 더 커다란 부분이 균일한 일축압축응력을 받게된다. 바로 이것이 실험실내 일축압축강도시험에서 암석시험편의 h/d 비율이 적어도 2.0이 되어야 하는 중요한 이유이다.

동일한 면적을 지닌 시험편이라도 모양이 예각화되면 변의 길이가 길어지고 강도가 저하되는 데 이것은 시험편의 모서리 수가 작을수록 한모서리에 대한 응력집중이 커지고 모서리 부분이 하중을 지지하는 유효한 면적으로 이용될 수 없기 때문이다. 단면의 형태가 원인 경우 가장 강도가 크며 육각, 사각, 삼각 순으로 강도가 작아진다(그림 5.3.2 참조). 따라서 이러한 모서리효과(edge effect)를 피하기 위해서는 가급적 원주형 시험편을 사용하여야 한다. 시험편의 형태는 국내의 석재에 대한 일축압축강도시험규정(KS F 3033)에서는 각주 또는 원주형으로 되어 있으나 각주의 경우 시험편 제작의 어려움과 정밀도상에 문제점이 있어 ASTM 또는 ISRM에서는 각주는 인정치 않고 원주형을 권하고있다. 크기의 경우 국내에서는 직경에 대한 높이의 비를 1.0으로 하고 있으나 일본의 규정(JIS M 0302)에서는 약 2.0, ASTM(D2938) 또는 ISRM에서는 2.0~3.0을 규정하고 있어 외국의 시험결과와의 비교시 주의할 하여야 한다(그림 5.3.3 (a) 참조).

동일한 단면적을 지닌 시험편이라도 길이대 지름비(h/d)가 작아지면 강도는 증가하고 너무 크면 휨파괴가 일어날 수 있다(그림 5.3.3 참조). 길이대 지름의 비가 2~4가 되면 일축압축강도가 거의 일정하게 된다. 시험편의 크기에 대한 보정식은 다음 5.3.1식과 같다.

$$\sigma_c = \frac{0.889\sigma'_c}{0.778 + 0.222\left(\frac{d}{h}\right)} \quad (5.3.1)$$

여기서, σ_c : 수정된 일축압축강도

σ'_c : 특정 h/d인 경우의 일축압축강도

h: 시험편의 길이

d: 시험편의 직경

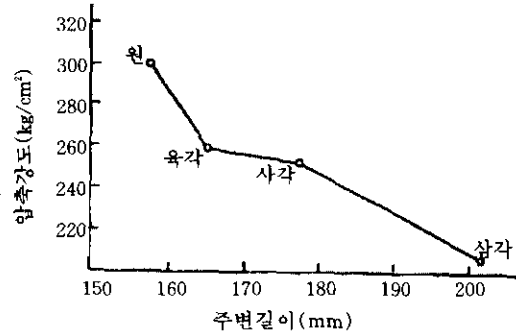
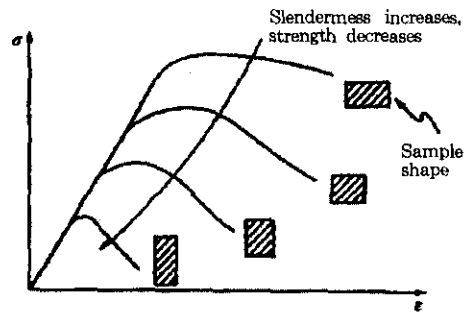
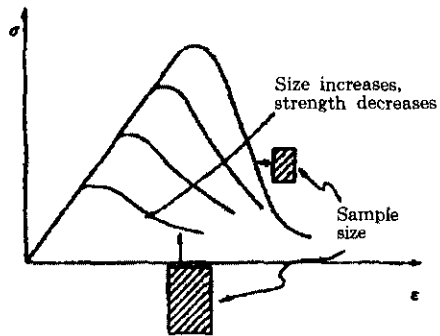


그림 5.3.2 시험편의 모양이 강도에 미치는 영향



(a) h/d 비에 따른 강도비교



(b) 시험편크기에 따른 강도비교

그림 5.3.3 시험편의 크기가 강도에 미치는 영향

암석은 조직상에 결정과 입자로 구성되며 여기에는 균열과 fissures 가 포함되어 있다.

시험편의 크기가 작으면 상대적으로 적은 균열이 존재하여 파괴는 새로운 균열이 성장하게 하며 반면에 커다란 시험편의 경우에는 균열이 발생할 위치에 기존균열을 존재한다. 따라서 암석의 일축압축강도는 크기에 영향을 받는다.

시험편의 크기가 커질수록 시험편에 포함되는 잠재적인 균열들이 많이 존재할 수 있으므로 강도가 저하된다. 따라서 시험편의 크기와 강도는 반비례 관계가 있다. 이와같이 시험편의 크기와 체적이 그 시험편의 강도에 미치는 영향을 강도의 치수효과(size effect)라고 한다 (그림 5.3.3(b) 참조).

5.3.3 구속압(Confining pressure)

지각을 이루는 암석들은 다른 암석들에 의해 모든방향에서 응력을 받고 있는 구속압상태 (Confined state) 에 있다. 그러므로 지하에서 일어나는 모든 응력상태의 범위에서 암석이 어떻게 거동하는 가를 파악하기 위해서는 여러 구속압(confining pressure)하에서 시험을 하여야 한다. 구속압이 증가하면 암석의 압축강도는 증가한다. 대부분의 암석은 높은 구속압하에서는 연성적으로 거동하는 경향이 있으나 화강암이나 규암같은 암석은 높은 압력하에서도 연성거동을 보이지 않는다. 여기서 연성적인 거동이란 하중을 가해졌을 때 하중을 지지할 능력을 잃지 않고 영구변형이 계속되는 상태를 뜻하며 한편 취성거동이란 하중을 지지하는 능력이 변형이 증가함에 따라 감소하는 상태를 뜻한다.

토목공사의 대상이 되는 심도를 고려할 때는 비록 물에 완전포화된 세일과 같은 암석들은 연성적인 거동을 보이지만 대부분의 암석은 취성적인 상태로 간주할 수 있다.

5.3.4 수분함유률

암석내 수분은 광물표면과 상호작용을 하여

표면성질과 접착특성을 변화시킴으로써 일축 압축강도를 변화시킬 수 있다. 많은 조사자들은 수분에 의한 일축압축강도의 감소를 밝혔다.

암석에 수분이 많아지면 강도는 저하된다. 공극중에 포함된 물은 압축에 의하여 공극이 축소되면 썰기와 같은 작용을 해 입자의 틈이나 공극을 넓히며 입자표면에 부착된 물은 입자의 표면에너지에 영향을 미쳐서 입자의 결합력을 작게한다. 수분이 15~45%로 증가함에 따라 사암의 강도는 12~20% 감소함이 발표된바 있다. Colback과 Wild(1965)는 포화된 세일과 사암시험편의 강도는 노건조 시험편의 강도의 1/2로 감소한다는 것을 제시하였다(그림 5.3.4 참조). Broch(1974)는 건조 및 포화시험편의 일축압축강도비가 다음과 같은 시험결과를 발표한 바 있다.

석영섬록암	1.5
반려암(Gabbro)	1.7
편마암(편리에 직각)	2.1
편마암(편리에 평행)	1.6

따라서 실험실 시험에서는 현장에서와 같은 수분조건하에서 암석의 일축압축강도를 구하는 것이 가장 좋으며 시험결과에도 함수량을 비롯한 시험조건을 반드시 기재토록 하여야 한다.

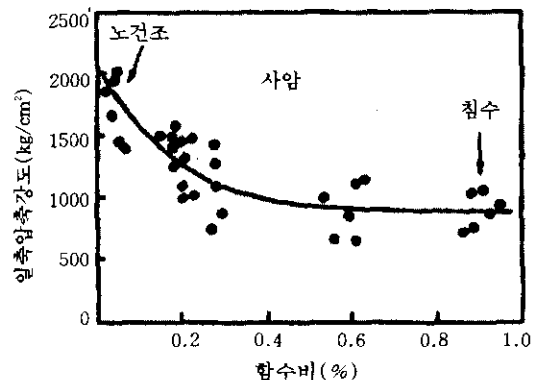


그림 5.3.4 사암의 강도에 미치는 수분의 영향

5.3.5 재하속도

암석의 강도와 변형성은 시간의존적이다. 일반적으로 재하속도가 빠르면 빠를수록 암석의 일축압축강도는 증가한다. 하중속도가 10배 빨라지면 2~10%의 강도가 커진 예가 있다. 그러나, 0.5MPa/sec~3MPa/sec(5~30 kg/cm²/sec)와 같은 재하속도에서는 일축압축강도상의 큰 변화를 가져오지 않는다. 국제암반역학회(ISRM)규정에서는 0.5~1.0MPa/sec를 제안하고 있다.

5.4 암석의 물리·역학적특성

지난번 「토목기술자를 위한 암반공학(Ⅲ)」에서는 암석의 실내시험방법에 대하여 상세히

기술되어 있으므로 이번호에는 국내암석의 시험결과를 중심으로 기술하고자 한다.

5.4.1 비중과 밀도

암석의 비중은 시험편의 질량과 같은 물 질량과의 비율로서 표시된다. 암석에는 많은 공극이 있기 때문에 입자의 체적산정이 곤란하고 진비중을 구하는 것이 매우 어렵다. 암석에 있어서 겉보기 체적에 의하여 얻어진 비중을 겉보기 비중이라 하여 진비중과 구별하고 있다. 밀도는 광물의 조성, 성인이나 생성후의 구조 운동, 풍화, 변질 등의 영향을 받아 크게 변화한다. 표 5.4.1 은 국내암석의 밀도와 공극율의 경향을 보여주고 있다.

표 5.4.1 국내 암석의 밀도와 공극율

암 종	채취위치(시료수)	밀도(gr/cm ³)	공극율(%)
화강암	50(1,352)	2.61±0.05	1.45±1.34
편마암	2(117)	2.63~2.77	5.3~7.1
사 암	24(494)	2.67±0.08	2.86±2.33
세 일	22(354)	2.73±0.10	2.62±1.85
석회암	8(150)	2.73±0.1	0.88±0.3
응회암	2(33)	2.43~2.56	2.0~7.0

5.4.2 흡수율

흡수율은 암석시험편이 공극에 물이 어느정도 침투하는 가를 나타내는 것으로 암석의 기본적인 물성의 하나이다. 흡수율은 구하는 시험은 KS F2518-80 「석재의 흡수율 및 비중시험방법」에 준하여 실시한다. 함수비에 있어서 포화상태의 함수비에 해당한다.

경암의 흡수율은 10%이하이며 신선하고 치밀한 암석에서는 1%에도 달하지 않는 경우가 많다. 풍화진전에 따라 흡수율은 증가한다. 연암에서는 수%에서 60%정도에도 달하며 상당히 변화한다. 흡수율은 일축압축강도와 비교적 양호한 비례관계가 있다. 대략적으로 암석의 종류에 관계없이 흡수율이 5% 이상이 되면

강도는 낮고 10%이상 되면 매우 작게된다. 표 5.4.2는 국내 화강암의 흡수율 경향을 나타내고 있다.

표 5.4.2 국내 화강암의 흡수율분포

암 종	채취위치(시료수)	흡수율(%)
화강암	50(1,352)	0.64±0.50

5.4.3 일축압축강도

암석 시험편의 축방향으로 압축력을 가한 후 파괴 될 때의 하중을 측정하여 일축압축강도를 구하며 또한 시험편의 변형률을 측정하여 응력-변형률 곡선을 얻어 변형계수나 포아송비를 구할 수 있다.

응력-변형률 곡선으로부터 구해지는 탄성계수에는 2가지가 있는데 측정응력에서 곡선에 접하는 접선의 기울기로 구해지는 접선탄성계수(tangential modulus, Et) 와 원점과 임의의 점을 지나는 직선의 기울기로부터 구해지는 할선탄성계수(secant modulus, Es)가 있다. 접선탄

성계수는 할선탄성계수보다 더 크다. 암석역학 분야에서 흔히 쓰이는 탄성계수는 일축압축강도의 1/2 응력에서의 접선탄성계수 Et이다. 표 5.4.3은 국내 주요 암석의 역학적 특성을 나타내고 있다.

표 5.4.3 국내 주요 암석의 역학적특성

암 종	채취위치(시료수)	일축압축강도(kg/cm ²)	영률(10 ⁶ kg/cm ²)	포아송비
화강암	50(2,123)	1,220±530	3.20±1.70	0.23±0.08
편마암	2(117)	660~1550	3.9~8.4	0.15~0.33
사 암	24(494)	1,240±550	8.4±3.6	0.22±0.09
셰 일	22(354)	660±360	4.5±2.5	0.14±0.13
응회암	2(33)	1,080~2,460	4.6~5.6	0.18~0.24
석회암	8(150)	1,030±480	5.55±0.95	0.24±0.03

5.4.4 인장강도

인장강도는 암석과 같은 취성재료에 있어서 파괴에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다. 암석의 인장강도시험방법에는 일축인장시험, 압열인장시험(brazilian test), 압인시험(indentation test), 굴곡시험(bending test) 등 방법들이 있다. 간접인장시험방법인 주로 압열인장시험이 사용되고 있는 데 이 방법은 원주형시험편의 성형이 용이하고 시험방법도 압축에 의하므로 비교적 간단한 잇점이 있다. 시험편의 형태는 원주형이며 직경에 대한 높이의 비는 0.5~1.0이고, 직경은 20~100mm 이다. 표 5.4.4는 국내 암석의 인장강도 분포를 나타내고 있다.

표 5.4.4 국내 암석의 인장강도 분포

암 종	채취위치(시료수)	인장강도(kg/cm ²)
화강암	50(162)	85±40
편마암	2(117)	100~180
사 암	24(494)	145±55
셰 일	22(354)	105±25
응회암	2(33)	160~170
석회암	8(150)	70±20

암석의 인장강도는 압축강도에 비교하여 대단히 작고 일축압축강도의 1/5~1/20 정도이다.

5.4.5 삼축압축시험

암석의 내부마찰각(internal friction angle)과 점착력(cohesion)은 암석의 파괴조건과 관련된 중요한 물성치로서 삼축압축시험으로부터 구할 수 있다. 지하암반내 응력상태와 같이 원주형 시험편을 삼축가압실(tri-axial chamber)내에 넣고 유압으로 주위에 일정한 하중을 가한 후 일축압축에서와 같이 수직으로 하중을 가하여 파괴강도를 얻는다. 암석의 파괴조건과 관련된 중요한 물성치인 내부마찰각과 점착력은 삼축압축시험결과와 일축압축시험, 인장시험결과로부터 Mohr diagram에 의하여 구할 수 있다. 시험편의 형태는 원주형이며 직경에 대한 높이의 비는 2.0~3.0이고, 시험편의 직경은 NX 코아크기가 바람직하며 암석의 최대입자 크기의 10배이상 되어야 한다. 표 5.4.5는 국내 암석에 대한 실험결과로부터 구한 전단강도 및 내부마찰각값들의 예를 나타내고 있다.

표 5.4.5 국내암석의 전단강도 및 내부마찰각
(이희근 외, 1983)

암 종	점착력(kg/cm ²)	내부마찰각(°)
화강암	135~250	51~65
응회암	40~150	35~45
사암	150~400	38~54
셰일	100~250	18~29
석회암	150~340	35~50

5.4.6 탄성파전파속도

암석의 동적인 성질에 관한 정보로서 탄성파속도는 매우 중요하다. 암석내부를 전파하는 탄성파에는 P파와 S파가 있고 그 속도는 암석의 탄성계수, 전단탄성계수(강성률), 포아송비 및 밀도에 크게 의존한다.

탄성파전파속도시험은 시험편을 탄성파가 통과하는데 소요된 시간을 측정하여 탄성파인 압축파(P파, 종파)와 전단파(S파, 횡파)의 전파속도를 구하는 비파괴시험이다. 탄성파속도는 발진기와 수신자사이의 거리를 탄성파의 통과시간으로 나눔으로써 구해진다.

시험편은 일축압축강도, 삼축압축강도 등에 사용되는 시험편을 사용하는 것이 바람직하다. 강도시험을 하지 않고 탄성파전파속도만을 측정하고자 할 때는 시험편의 길이는 5.0~10.0 cm, 최소 단면적을 0.5cm²이상으로 하고 시험편 양쪽 끝면은 서로 평행하며 측정축과 직각으로 되도록 제작하여야 하며 시험편의 형태는 원주형이 아니라도 된다.

압축파전파속도(V_p)와 전단파전파속도(V_s)를 이용해서 동적탄성계수(dynamic Young's modulus, E_d)와 동적포아송비(dynamic Poisson's ratio, d)를 구할 수 있다(식 5.4.1~5.4.3 참조). 표 5.4.6은 국내 암석의 탄성파전파속도의 경향을 나타내고 있다.

$$V_p \text{ or } V_s = L / T \quad (5.4.1)$$

$$\text{동적탄성계수 } E_d = \rho V_p^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (5.4.2)$$

$$= 2\rho V_s^2(1+\nu)$$

$$\text{동적포아송비 } \nu_d = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 2} \quad (5.4.3)$$

여기서, L = 시험편의 길이

T = 시험편 통과 시간

암석의 탄성파속도에 영향을 미치는 요소로는 다음과 같은 것들이 있다.

- 암석의 종류
- 조직: 구성물질, 입자크기, 고결정도
- 밀도: 밀도가 크면 속도는 증가한다
- 공극률: 공극률이 증가하면 속도는 저하한다
- 이방성: 층상을 나타내는 암석에서는 층에 평행방향의 속도는 수직방향속도에 비해 빠르다
- 구속응력: 가해진 압력이 증가하면 속도는 빨라진다
- 함수율: 공극이 많은 암석에서는 P파속도는 함수상태에 따라 변화하며 S파속도는 거의 영향을 받지 않는다.
- 온도: 온도가 상승하면 P파속도는 감소한다

표 5.4.6 국내 암석의 탄성파속도 경향

암 종	채취위치 (시료수)	탄성파전파속도(m/s)	
		종파(P-wave)	횡파(S-wave)
화강암	50(668)	3,870±820	2,350±500
편마암	2(117)	3490~5510	-
사암	24(494)	4,680±610	2,540±480
셰일	22(354)	4,820±680	2,620±360
응회암	2(33)	3,390~4,080	-
석회암	8(150)	5,030±870	2,710±510

5.4.7 전단강도

1) 직접전단시험

일반 압축시험기를 사용하여 힘을 가하는 방향에 대하여 임의 각도로 전단면을 기울이고 각도에 따른 합력의 성분형태로 전단응력을 가

한다. 시험편에 임의의 전단면을 만들어 암석을 파괴시켜 전단특성인 마찰각과 점착력을 구한다.

ISRM 규정은 직경 20~100mm, 길이대 지름의 비를 1.8~2.2로 한 일면전단시험을 추천하고 있다. 이방법으로 구한 마찰각과 점착력은 삼축압축시험에서 구한 마찰각과 점착력과의 일치하지만 시료조건과 크기효과 등에 의

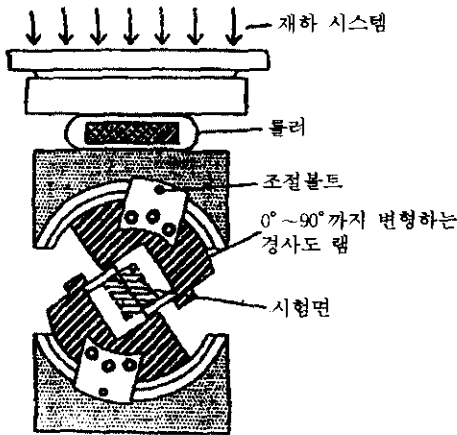


그림 5.4.1 암석의 전단강도시험(회전식 일면전단강도시험)

해 회전식 일면전단시험(그림 5.4.1)에서의 값들이 크게 나타나는 경향을 보이기도 한다.

2) 절리면전단시험

지하에 존재하는 암반은 단층이나 절리, 균열 등을 포함한 불연속체이다. 암반자체의 강도보다는 단층이나 절리는 터널과 같은 암반구조물의 안정성에 실제로 결정적인 영향을 끼친다. 따라서 절리가 없는 암석을 대상으로 삼축압축시험이나 직접전단시험을 통하여 구한 점착력과 마찰각은 구조물설계에 사용하기에는 너무 값이 크다.

화강암의 경우 삼축압축시험을 통하여 구한 점착력은 절리면전단시험으로 구한 값보다 10배이상 크며 내부마찰각은 2배이상 큰 예가 많다. 절리를 포함한 시험편에 대하여 직접전단시험을 실시하여 최대전단강도, 잔류전단강도, 전단강성, 팽창특성을 구하여 수치해석프로그램의 입력자료로 활용하는 것이 바람직하다. 그림 5.4.2는 이동식 절리면전단시험장치를 보여주고 있다. 표 5.4.7은 절리면전단시험과 삼축압축시험결과에 대한 비교한 것이다.

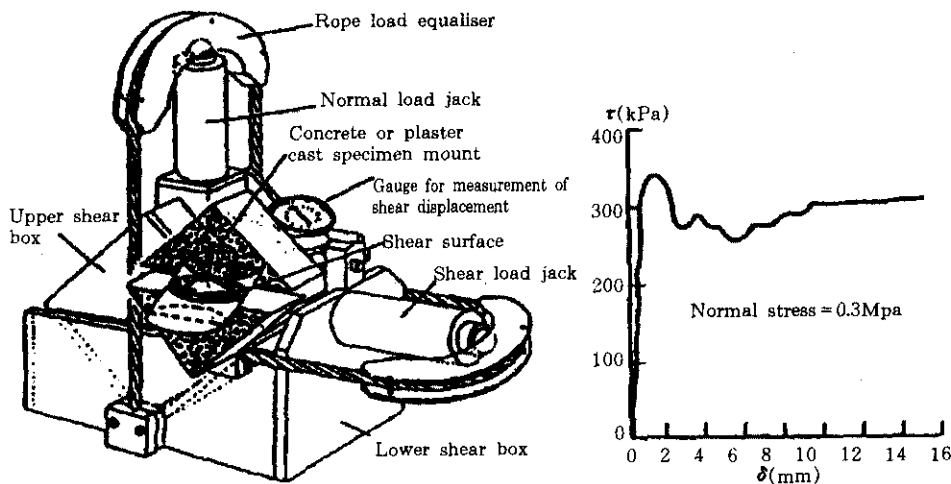


그림 5.4.2 이동식 절리면전단시험장치

표 5.4.7 질리면전단시험과 삼축압축시험결과와의 비교

암 종	위 치	점착력(MPa)		내부마찰각(Degree)	
		질리면전단 시험결과	삼축압축 시험결과	질리면전단 시험결과	삼축압축 시험결과
안산암	부산진구 양정동	0.07±0.04	40±4.2	30.1±7.3	53.1±4.7
화강암	울진군 근남면 행곡4리	0.14	17.0	35.4	56.6
흑운모화강암 질편마암	영덕군 지품면 용추리	0.03	12.0	36.5	49.5

5.4.8 투수계수

지하구조물의 건설에서는 전단강도와 탄성 계수 등 뿐만 아니라 암반의 투수성 평가가 매우 중요하다. 암반의 투수성 평가는 원위치에서의 시험에 의한 경우가 많다. 그러나 원위치에서의 시험에서는 경계조건이 불명확하기 때문에 투수계수 등의 수리정수를 명확히 할 수 없는 경우가 많아 경계조건이 명확한 실내시험은 정량적 평가를 할 때 매우 중요하다.

암석은 토질재료와 비교하여 공극이 작고 투수성이 매우 작은 경우가 많다. 암석의 투수성은 틈방향이나 층리방향에 따라 이방성이 크다. 표 5.4.8 에 제시한 결과는 퇴적암에서의 시험결과와 한 예이지만 수평방향과 수직방향과의 사이에 2배~수 10배 정도의 차이가 나기도 한다(표 5.4.8 참조).

표 5.4.8 퇴적암의 투수계수의 이방성(일본자료)

(단위: 10⁻⁷cm/s)

암 종	수평방향 투수계수	연직방향 투수계수
이 암	0.02	0.09
세 일	22.1	11.6
실 트 암	443.9	24.1
세립사암	157.3	31.9

석회암과 같이 물에 용해되기 쉬운 물질(CaCO₃)로 구성된 암석은 물이동에 따라 서서히 암석이 용해되어 공극이 넓어지고 투수성이 증대해간다. 한번 물에 용해된 물질이 다시

결정화하여 공극을 메울 경우도 있고, 이 경우에는 반대로 투수성이 저하해 간다.

다음 표 5.4.9 는 국제지질공학회(IAEG, 1979)가 제안한 투수율 분류기준이다.

표 5.4.9 투수계수에 의한 암석의 분류 기준

등 급	투수계수k(cm/s)	비 고
1	10 ⁻² 이상	매우 큼
2	10 ⁻² ~ 10 ⁻⁴	큼
3	10 ⁻⁴ ~ 10 ⁻⁵	보통
4	10 ⁻⁵ ~ 10 ⁻⁷	약간
5	10 ⁻⁷ ~ 10 ⁻⁹	매우 약간
6	10 ⁻⁹ 이하	불투수성

균질암(intact rock)의 투수계수를 1차 투수계수라하며 현지암반의 투수계수를 2차 투수계수라 하는데 1차 투수계수는 일반적으로 2차 투수계수보다 작다 표 5.4.10 은 균열정도에 따른 2차투수계수를 나타냈다.

표 5.4.10 2차 투수계수에 의한 암반의 분류

균열간격	투수계수k(cm/s)	비 고
매우좁음	10 ⁻² ~ 1	높은 투수성 암반
보통	10 ⁻⁵ ~ 10 ⁻²	보통 투수성 암반
매우넓음	10 ⁻⁹ ~ 10 ⁻⁵	약간 투수성 암반
없음	10 ⁻⁹ 이하	불투수성 암반

5.4.9 Slaking

자연상태에서 상당한 고결력을 가진 암석이라도 지하수위 변동, 지반굴착에 의한 응력해방과 흡수팽창, 풍화 등에 의하여 암석의 고결력이 저하하는 경우가 있다. 특히 연한 암석에서는 이들 환경 변화에 따른 건조-습윤 반복에 의하여 급격히 고결력을 잃게되어 조적이 파괴된다. Slaking 현상은 이와같이 암석이 건조-습윤의 반복에 의하여 암석입자들사이의 결합이 파괴되어 강도가 저하되고 심할 경우에는 입자가 분리되어 토질화하는 현상이다.

이러한 특성을 지닌 암석에는 이암이나 세일 등 점토함유분이 높은 경우가 많고 사면붕괴나 지압문제 등 암반공학적으로 중요한 문제를 일으킨다. 수면하의 암석이나 물과 접촉해야 하는 암반구조물에 있어서 암석의 물에 대한 내구성이 특히 문제가 되는 경우가 있다.

물에 대한 암석의 물성은 슬레이크 내구성(Slake durability)라고 하며 다음 표 5.4.11, 표 5.4.12에 따라 분류한다. 슬레이크(Slaking)에 대한 내구성시험은 팽윤하는 물질에 대해서는 적합하지 않다.

Slaking정도를 조사하는 방법으로서 KS규정, ISRM지침등이 있다. 내구성은 밀도에 비례하고 함수비에 반비례한다. Gamble은 표 5.4.11과 같은 슬레이크내구성분류기준을 제안하였으며 Franklin과 Chadra (1972)는 표 5.4.12와 같은 슬레이크 내구성분류를 제안하였다.

표 5.4.11 Gamble에 의한 슬레이크 내구성의 분류기준

구 분	1회 10분간 회전 후 잔류량(건조증량) I_{10} (%)	2회 10분간 회전 후 잔류량(건조증량) I_{20} (%)
매우 높은 내구성	> 99	> 98
높은 내구성	98~99	95~98
중~고정도 내구성	95~98	85~95
중정도 내구성	85~95	60~85
낮은 내구성	60~85	30~60
매우 낮은 내구성	< 60	< 30

표 5.4.12 슬레이크 내구성분류(Franklin과 Chadra, 1972)

I_{42} (%)	분 류
0~25	매우 불량(very low quality)
25~50	불량(low quality)
50~75	보통(media quality)
75~90	우수(high quality)
90~95	매우 우수(very high quality)
95~100	극히 우수(extremely high quality)

5.4.10 Swelling

흡수에 의한 암석의 체적팽창에는 공극에 물이 채워지고 물리적으로 체적증가를 일으키는 흡수팽창 현상과 점토광물의 흡수반응에 의거하는 팽윤현상이 있는데 이와같은 현상을 총괄하여 swelling이라 한다. 일반적으로 3층구조를 가진 점토광물에 그 경향이 강하고 특히, montmorillonite를 주성분으로 하는 점토는 팽윤이 심하다. 팽창하는 점토광물에 관계되는 내구성 문제는 팽윤점토의 존재와 팽윤압의 측정시험방법에 의해 추정된다.

다음 그림 5.4.3은 ISRM지침에 제시되고 있는 방법이다. 자연함수 상태에서의 흡수 팽창현상을 조사하는 경우에는 원위치에서의 함수비를 변화시키지 않도록 파라핀 등으로 충분히 밀봉하여 건조방지에 주의하여야 한다. 그림 5.4.4은 이암을 비롯한 여러 암석들의 시간경과에 따른 흡수팽창률 변화양상을 보여주고 있다.

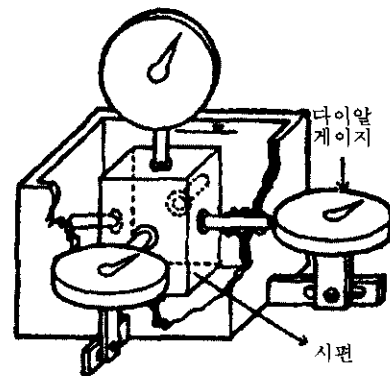


그림 5.4.3 ISRM의 흡수팽창시험장치

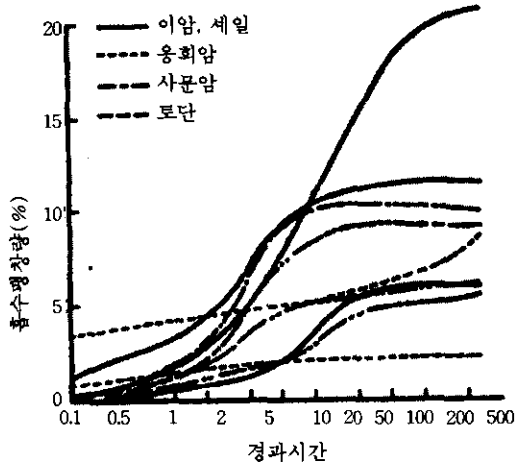


그림 5.4.4 시간경과에 따른 흡수팽창률

참고 문헌

1. 신회순 외. (1998), "도로설계를 위한 지반조사 기술 Workshop", 468p.
2. 신회순, (1998), "터널의 기본계획, 조사 및 시험, 암반분류", 토목기술강좌, pp.69-129.
3. 이회근 외. (1997), "응용암석역학", 서울대학교출판부, 487p.
4. 이부경, (1998), "암석역학의 원리", 도서출판 대운, 631p.
5. 菊地宏吉(윤지선 역), 1992, 토목지질공학, 구미서관, pp.64-69, pp.114-130.

6. Venkata S. Vutukuri. (1998), "Strength of Rock and Rock Mass"; Proceedings of International Conference on Geomechanics /Ground Control in Mining and underground Construction, 14-17 July, 1998, Wollongong, New South Wales, Australia, pp.49-58.
7. American Society for Testing and Materials, ASTM Standard Test Method: Designation D4394-84, D4395-84, D4506-90, D4554-90, D4555-90, D4623-86, D4645-87, D4729-87, D4971-89.
8. Brown, E.T., (1981), "Rock Characterization Testing and Monitoring - ISRM Suggested Method"s, Pergamon Press, pp.129-160.
9. Goodman, R.E., (1980), "Introduction to Rock Mechanics", John Wiley & Sons, pp.96-134, pp.170-193.
10. Lama. R.D. & Vutukuri, V.S., (1978), "Handbook on Mechanical Properties of Rocks", Vol.III, Trans Tech Publications, pp.1-208.
11. Stagg, K.G. & Zienkiewicz, O.C., (1974), "Rock Mechanics in Engineering Practice", John Wiley & Sons, pp.125-202.
12. Vutukuri, V.S. & Katsuyama, K., (1994), "Introduction to Rock Mechanics", Industrial Publishing & Consulting, Inc., pp.87-94, pp.147-168.
13. Wyllie, D.C., (1992), "Foundations on Rock", E & FN SPON, pp.101-113.