1.7
실내시험

박인식

1.7
실내시험

박인식

목 차

1.7.1 서 론 1

1.7.2 물성시험 1
1. 밀도와 비중 1
2. 공극율 1
3. 함수율 2
4. 흡수율 2
5. 흡수팽창도 2
6. 슬레이크 내구성 2
7. 마모도 3
8. 경도 5
9. 탄성파속도 6

1.7.3 역학시험 7
1. 강도의 정의 7
2. 일축압축강도 시험 7
3. 점하중강도시험 9
4. 인장강도 시험 10
5. 전단강도 시험 11
6. 삼축압축시험 11
7. 탄성정수 산출 12

1.7
실내시험

1.7.1 서 론

암석의 물리적 성질이란 암석이 공학적으로 보편화 된 조건인 상온, 상압 하에서 고유하게 지니고 있는 특성으로 비중, 공극율, 강도 등이 있다. 물리적 성질은 무결암을 대상으로 주로 실험실내에서 정해진 방법에 따라 정량적으로 측정할 수 있으며, 특정 암석에서 측정한 여러 가지 값은 해당 암석의 특성을 고유하게 나타내고 있으므로 이를 암석의 물질 정수라고도 한다. 현재 암석의 물리적 성질을 측정하기 위한 방법으로는 국제암반공학회(ISRM, International Society for Rock Mechanics)가 제안한 방법(Brown, 1981)이 가장 널리 적용되고 있다.

1.7.2 물성시험

1. 밀도와 비중

일반적으로 암석의 밀도라 하면 겉보기 밀도를 이르는 말이며, 진비중이라 하면 입자밀도나 입자비중을 나타낸다. 겉보기 밀도는 정형화된 시료를 정밀하게 측정하여 부피를 구하고, 질량은 완전 건조시킨 후 측정하여 계산한다.

암석 대부분은 입자밀도가 매우 유사하므로, 암석의 겉보기밀도는 공극율과 매우 높은 상관성을 가진다. 암석 내에 공극이 존재하는 경우 그 암석의 강도는 저하되고 변형이 용이하게 일어나므로 암석의 겉보기 밀도나 공극율을 측정하는 것은 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

2. 공극율

암석 중에 존재하는 공극은 열, 가스, 지하수 흐름에 큰 영향을 미치며 강도를 저하시킨다.

마그마의 냉각속도가 느려 결정이 크게 자란 암석에서 대체로 공극율이 크게 나타난다.

퇴적암에서의 공극율은 교결 물질의 종류에 크게 영향을 받으며 다른 암석에 비해 비교적 크게 나타난다.

공극 부피는 완전히 물로 포화된 시료의 무게와 완전 건조된 시료의 무게 차로 구한다.

이 방법은 암석 강도가 충분하여 포화 시에도 부서지지 않는 경우에만 사용할 수 있으며, 임의의 형상을 갖는 시료는 입자 비중 측정에서 사용한 포화와 부력의 원리를 이용하여 구한다.

3. 함수율

암석의 함수율은 자연에 존재하는 상태에서 암석 공극 속에 들어 있는 물의 양을 암석의 건조질량에 대한 백분율로 나타낸 것이다.

공극수의 무게는 자연상태의 시료 무게와 시료를 완전 건조시킨 후의 무게 차이다.

4. 흡수율

흡수율은 보통 간극지수(void index)로 나타내는데, 건조시료의 질량에 대하여 이를 1 시간 동안 물에 침수시켜 흡수된 물의 질량의 백분율로 나타낸다.

$$\text{흡수율 } I_v = \frac{M_{w\ after\ 1\ hr\ sat.}}{M_s} \times 100 \quad (\%)$$

5. 흡수팽창도

많은 종류의 암석이나 석탄, 특히 점토광물을 포함하고 있는 암석은 흡수나 건조에 의해 물리적 변화가 생기기 쉽다. 그러므로 지하자원을 개발하거나 지하구조물을 건설할 경우 이러한 흡수나 건조에 의한 물리적 변화를 일으키는 요소를 고려할 필요가 있다. 흡수팽창도를 측정하기 위한 방법은 그 목적에 따라 흡수팽창 압력(swelling pressure)을 측정하기 위한 시험과 흡수팽창 변형률(swelling strain)을 측정하기 위한 시험, 두 가지로 구분한다.

가. 흡수팽창 압력 측정

흡수팽창 압력을 측정하기 위한 방법은 흡수에 의한 시료의 부피팽창이 전혀 일어나지 않도록 구속한 상태에서 수직방향 혹은 측면 방향으로 발생하는 팽창력을 측정하여 이를 팽창력을 측정한 방향과 수직한 방향의 시료 단위 단면적 당 팽창력으로 나타낸다.

$$\text{흡수 팽창 압력 } (Pa) = \frac{\text{최대 팽창력 } (N)}{\text{시료의 단면적 } (m^2)} \times 100$$

나. 흡수팽창 변형률 측정

흡수팽창 변형율에 의한 방법은 흡수에 따른 시료의 기하학적 변화를 측정하는 것으로, 측변 방향의 변위를 구속시킨 상태에서 수직으로 발생하는 변위를 시료의 초기 높이에 대한 백분율로 나타낸 것이다.

$$\text{흡수 팽창 변형율 } (\%) = \frac{\text{최대 팽창 변위 } (mm)}{\text{시료의 초기 높이 } (mm)} \times 100$$

6. 슬레이크 내구성

슬레이크 내구성(slake durability)시험은 침수와 건조가 반복되는 환경에 놓여 있는 암석의 풍화 저항성을 평가하는데 적합하다. 로스앤젤레스 마모시험(Los Angeles abrasion test)과 같은 여러 가지 내구성 및 마모성 시험과 비교할 때, 이들이 내구성이 조금만 차이가 나도 지수가 급격히 변하는 반면, 슬레이크 내구성지수는 지수 변화가 완만하여 암석과 같이 넓은 범위의 내구성 반응을 나타내는 데 보다 유용하다.

가. 슬레이크 내구성 지수 산출

시험은 40-60g의 모서리가 없는 구형의 암석덩어리 10개정도(총 무게 450-550g)를 완전 건조 시켜 회전 원통에 넣은 후 20℃ 수조 내에서 분당 20회전 속도로 10분간 회전시킨다. 이때 수면은 원통 아래 20 mm 부분까지 잠기게 한다. 시험 후 마모된 시료의 완전 건조 무게를 재어 슬레이크 내구성지수를 계산한다.

$$I_{d1} = \frac{\text{마모 후의 완전 건조 시료 무게}}{\text{시험 전 초기 시료 무게}} \times 100 \quad (\%)$$

2회 또는 그 이상의 마모 시험을 반복한 후의 내구성지수는 I_{d2}, I_{d3} 등과 같이 표시한다. 이때 각 회수에서 시료를 건조시키고 다시 침수 회전시키는 과정을 반복한다.

나. 슬레이크 내구성 지수 이용

보통 2차 슬레이크 내구성지수(I_{d2})를 암석분류에 사용하도록 추천하고 있다. 그러나 2차 슬레이크 내구성지수가 0-10% 인 경우에는 1차 슬레이크 내구성지수를 사용하며, 내구성이 매우 높은 암석을 평가할 때는 3차 또는 그 이상의 지수가 유용한 경우도 있다. Gamble(1971)은 I_{d1}, I_{d2}를 이용하여 슬레이크 내구성 정도를 다음과 같이 분류하였다.

표 1.7-1 Gamble의 슬레이크 내구성 분류

내구성 정도	I_{d1}	I_{d2}
매우 높음	〉 99	〉 98
높 음	98-99	95-98
보통 높음	95-98	85-95
보 통	85-95	60-85
낮 음	60-85	30-60
매우 낮음	〈 60	〈 30

7. 마모도

마모시험(abrasion test)은 마모에 대한 암석의 저항력을 측정하는 시험으로, 암석의 마모도는 암석의 광물조성과 광물입자들간의 결합강도에 따라 변화한다. 오늘날 암석에 대해 적용되고 있는 대부분의 시험법은 골재, 콘크리트, 금속에 대한 시험법에서 응용한 것이다.

가. 마모시험 분류

- abrasive wear impact test
- abrasive wear with pressure test
- attrition test

나. 시료 입도 구성

현재 가장 빈번하게 사용되고 있는 로스앤젤레스 마모시험법(Los Angeles abrasion testing method)은 abrasive wear impact test의 일종으로서 충격과 마찰에 대한 저항성을 측정한다. 로스앤젤레스 마모시험용 시료는 골재 입도에 따라 등급별로 선정 채취하여 사용하는데, 입도 38mm 이하의 골재에 대한 시료 입도 구성비는 다음과 같다. 시료 채취 시에는 등급 분류 A, B, C, D 중 적합한 경우를 취하여 시료를 구성한다.

표 1.7-2 입도 38mm 이하의 골재에 대한 시료 입도 구성비

체 눈금, mm		입도별 시료무게			
이하	이상	A	B	C	D
38.0	25.4	1250 ± 25			
25.4	19.0	1250 ± 25			
19.0	13.2	1250 ± 10	2500 ± 10		
13.2	9.5	1250 ± 10	2500 ± 10		
9.5	5.6			2500 ± 10	
5.6	4.7			2500 ± 10	
4.7	2.3				5000 ± 10
계		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

다. 시험방법

시료는 시험기 드럼 속에 마모용 철구와 함께 넣어 일정 수만큼 회전시킨 후 마모정도를 측정한다. 철구는 지름 46.0mm(400g)의 소형과 지름 47.6mm(440g)의 대형이 있으며, 철구는 시료 입도 구성 등급에 따라 다음과 같이 사용한다. 드럼 회전수는 입도가 19mm 보다 작은 골재는 500회, 38mm 보다 큰 골재는 1000회, 19mm-38mm 에서는 1000회 또는 500회로 하는 것이 적당하다. 시료 입도 구성 등급에 따른 철구 투입수는 다음과 같다.

표 1.7-3 시료 입도 구성 등급에 따른 철구 투입수

등 급	소 형	대 형	총중량(g)
A	6 개	6 개	5000 ± 25
B	5 개	6 개	
C	4 개	4 개	84 ± 25
D	3 개	3 개	3300 ± 20
E	6 개	6 개	2500 ± 15

철구 규격 대형 : 지름 47.6mm, 440g, 소형 : 지름 46.0mm, 400g

라. 마모도 산출

마모도(wear ratio)는 500회전의 경우 드럼을 분당 30-33회전의 회전속도로 100회전시킨 후 시료의 무게손실을 측정한 다음 400회전을 추가하여 최종 회전수까지 회전시킨 후 시료의 무게손실을 다시 측정한다. 마모도는 최초의 시료무게에 대한 최종회전 후의 무게 손실량의 백분율이므로 최초 시료무게와 시험 후 눈금크기 1.7mm체로 체분한 후 체에 남아있는 마모된 시료 무게를 측정하여 구한다. 1,000회전의 경우는 200회전 후 800회전을 추가한다.

$$\text{마모도} = \frac{\text{최종회전 후의 무게손실량}(g)}{\text{최초의 시료무게}(g)} \times 100\ (\%)$$

마모도의 균질성(uniformity of wear ratio)은 최종회전수가 500회일 경우는 500회전 후의 무게 손실량에 대한 100회전 후의 무게 손실량의 비로 구할 수 있으며, 최종 회전수가 1,000회일 경우는 1,000회전 후의 무게 손실량에 대한 200회전 후의 무게 손실량의 비로서 구할 수 있다. 일반적으로 마모도의 균질성은 0.2를 크게 초과하지 않아야 한다.

8. 경도

재료의 경도는 재료의 근본적인 성질이라기보다는 상대적인 반발거동 개념이다. 따라서 경도 측정 결과는 시험방법에 따라 달라진다. 암석과 광물의 경도측정방법에는 압입경도측정(indentation), 반발경도시험(rebound test), 긁힘시험(scratch test)이 있다.

가. 압입경도

Brinell 과 Rockwell 시험기들은 금속재료에 자주 이용되는 방법으로서 암석은 그 취성 때문에 일반적으로 적용하기 어렵다. Knoop와 Vicker(1974)의 시험법은 각 암석광물들의 미시적 경도(micro-hardness)를 결정한다. 피라미드 형태의 다이아몬드를 통해 암석표면에 힘을 가하고 그 결과 생긴 자국의 면적을 가한 힘으로 나눈 값으로 경도를 정한다. Knoop 시험은 결정방향에 따른 암석 결정의 경도를 잴 수 있다.

나. 반발경도

상하로 움직이는 뾰족한 침이 시료 표면에 부딪혔을 때 반발되는 높이를 경도의 지표로 한다. 쇼어(Shore)경도나 슈미트(Schmidt)경도가 이에 속하며, 암석 경도 측정에 가장 보편적으로 적용하는 방법이다.

쇼어 경도계는 실험실에서 경도를 구하는 데 사용하는 장치로 조그만 다이아몬드 팁(tip)을 시료표면에 떨어뜨려 반발되는 높이를 측정하여 경도를 구한다. 다이아몬드 팁이 작고 또 암석이 대부분 불균질하므로 한 시료에 대하여 최소한 20회 이상 측정해 평균값을 취한다.

슈미트 해머는 본래 콘크리트 압축강도를 구하기 위해 개발된 비파괴 검사 장비이나, 반발 특성을 조정하여 암석 경도를 구하는데도 이용한다. 슈미트 경도는 해머 속의 스프링에 의해 일정한 힘으로 추진된 피스톤이 암석 표면에서 충격 후 반발되는 높이로 결정하며, 동일한 암석 시료에 대해

20회 이상 측정하여 상위 50%의 평균을 취한다.

다. 광물의 긁힘 경도

이 방법은 광물 경도를 결정하는 방법으로 널리 이용한다. 대표적으로는 1822년 Mohs에 의해 제안된 경도 기준이 아직도 널리 이용되고 있으며, 보다 정량적인 값을 측정하기 위해서는 날카로운 다이아몬드 침으로 시료를 긁을 수 있도록 고안된 scratch sclerometer를 사용하는 것이 좋다.

표 1.7-4 Mohs에 의해 제안된 경도 기준

경 도	1 도	2 도	3 도	4 도	5 도
표준광물	활 석 (talc)	석 고 (gypsum)	방해석 (calcite)	형 석 (fluorite)	인회석 (apatite)
경 도	6 도	7 도	8 도	9 도	10 도
표준광물	장 석 (feldspar)	석 영 (quartz)	황 옥 (topaz)	강 옥 (corundum)	금강석 (diamond)

9. 탄성파속도

탄성파속도는 암석의 탄성과 밀도에 매우 민감하며, 불연속면들의 존재에도 큰 영향을 받으므로 암질이나 암반에 발달한 불연속면 분포상태에 대한 지표가 된다.

탄성파속도를 측정하는 방법은 시료 한 쪽에서 송신기로 파를 보낸 후 다른 한 쪽에서 수신기로 파를 받아 그 지연시간을 측정하여 계산하는 방법과, 시료의 공진주파수(resonant frequency)와 밀도를 측정하여 이로부터 전파속도를 계산하는 방법이 있다.

보통 실험실내에서 종파(P파)와 횡파(S파) 속도를 측정하는 데는 앞의 방법을 많이 쓰며, 파속은 다음과 같은 방법으로 구한다.

$$V_p = \frac{d}{t_P} \quad , \quad V_s = \frac{d}{t_S}$$

여기서, V_p , V_s : 종파 및 횡파 속도 (m/sec)

d : 시료길이 (송신기 및 수신기 사이의 거리, m)

t_P , t_S : 종파 및 횡파의 지연시간 (sec)

1.7.3 역학시험

1. 강도의 정의

무결암의 일축압축강도(uniaxial compressive strength)는 무결암의 특성을 기술하거나 암반을 공학적으로 분류하는 과정에서 중요한 지수이다.

두 개의 강성 가압판 사이에 무결암 시험편을 놓고 서서히 축 방향 하중을 증가시킬 경우, 시료는 변형을 일으키다가 궁극적으로 파괴(failure)에 이르게 된다. 시험편이 파괴에 이른 시점의 축 방향 수직 응력(normal stress)을 암석의 일축압축강도(σ_c)로 정의하며, 파괴에 이른 시점의 극한 하중(Fmax)을 단면적(A)으로 나누어 구한다.

$$\sigma_c = \frac{F_{\max}}{A}$$

일축압축강도는 간단히 압축강도로 지칭하기도 한다. 암석 압축강도는 단위면적 당 작용하는 하중의 세기를 나타내는 응력의 차원을 가진다. 응력 SI 단위는 Pa(N/m^2)이며, 암석역학 분야에서는 kPa($=10^3$Pa), MPa($=10^6$Pa), GPa($=10^9$Pa) 등을 자주 이용한다.

2. 일축압축강도 시험

가. 시험방법

일축압축강도는 시험조건에 따라 그 결과가 달라질 수 있기 때문에 반드시 표준시험법에서 규정한 절차에 따라 시험을 실시해야 시험결과 상호 비교가 가능하다.

국제암반역학회 제안시험법(ISRM Suggested Methods; Brown, 1981)에 따라 실시한다.

단순히 파괴강도만을 측정하는 경우도 있기는 하지만, 일반적으로 일축압축시험에서는 파괴에 이르기까지 서서히 하중을 증가시키면서 하중과 변형의 관계를 연속적으로 기록한다.

일축압축시험에서 시험편의 변형특성은 변형률(strain)이라는 양으로 표시한다.

시험시 축 방향으로 시험편 길이가 줄어들고, 횡 방향으로는 길이가 늘어나게 된다. 이 때 변형률계를 이용하여 축 방향 변형률(axial strain, ε_a)과 횡 방향 변형률(lateral strain, ε_l)을 측정한다.

시험편 표면에 축 방향 및 횡 방향으로 변형률계를 부착하고 축 방향 하중을 가하면 시험편 변형에 따라 변형률계도 수축 또는 신장하게 되며, 이를 전기적 신호로 변환시킴으로써 변형률을 측정한다.

시료 본래 부피(V)에 대한 부피변화량(ΔV)의 비를 체적변형률(volumetric strain, ε_v)이라 하며 다음과 같이 계산한다.

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_a + 2\varepsilon_l$$

나. 일출압축강도에 영향을 미치는 요소

1) 크기효과

암석은 조암광물 입자들의 집합체로서 많은 미시적 혹은 거시적 결함들을 포함하고 있다고 할 수 있다. 시험편의 크기가 커질수록 시험편 내에 더 많은 역학적 결함들이 포함되게 될 것이며, 포함된 결함들이 불리한 방향으로 놓여 있을 확률도 높아질 것이다. 따라서 시험편의 부피가 커짐에 따라 암석의 압축강도는 작아지는 경향이 있으며, 이러한 현상을 크기효과(size effect)라 부른다.

2) 형상효과

앞에서는 시료의 형상이 동일할 때 시료의 크기가 변함에 따라 강도에 차이가 발생함을 보였다. 그러나 시료의 크기를 일정하게 유지시키고 시료의 형상을 변화시키는 경우도 압축강도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이 같은 현상을 형상효과(shape effect)라 한다. 형상효과가 일어나는 것은 시험편의 모양에 따라 시험편 내부의 응력분포에 차이가 발생되기 때문인 것으로 추측하고 있다.

일축압축시험에서는 원기둥 혹은 사각기둥 모양의 시료를 사용할 수 있으나, 일반적으로 길이/지름의 비가 약 2인 원주형 시료를 많이 사용한. ISRM 제안시험법(Brown, 1981)에는 코어의 크기가 NX(직경 약 54mm) 이상이며, 길이/지름의 비가 2.5~3.0인 원주형 시험편 사용을 권장하고 있다. 여기서 NX크기 이상의 코어시편을 사용하도록 권장하는 것은 시험편 지름이 시험편을 구성하는 최대 암석입자 크기의 10배 이상이 되어야 한다는 것과 관련이 있다.

USBM(US Bureau of Mines)은 임의의 길이/지름 값을 갖는 시료의 강도로부터 길이/지름의 비가 2인 시료의 강도를 추정하기 위해 다음과 같은 관계식을 제안하였다(Brook, 1993).

$$\sigma_c = \frac{\sigma_c'}{0.875 + 0.250(D/H)}$$

3) 시험편과 가압판의 접촉상태와 양 단면의 마무리 정도

일축압축시험에서는 시험편 단면에 균등하게 축 방향 수직 응력만 가해서 시험편 전체 길이에 걸쳐 균등한 변위가 발생되도록 해야한다. 그러나 현실적으로 시험편과 가압판 접촉부분에서 마찰로 인하여 어느 정도의 측 방향 구속이 발생되는 것을 피할 수 없으며, 이러한 구속으로 인하여 접촉면에서는 전단 응력이 발생된다. 따라서 시험편 양단 부근에서는 일축 응력 상태를 유지하지 못한다. 형상효과에서 설명하였듯이 시험편 길이/지름의 비를 2 이상이 되도록 하는 이유도 이러한 시험편 양단에서 발생되는 마찰의 영향을 줄이기 위해서이다. 그러나 길이/지름의 비가 너무 커지면 시료에 좌굴(buckling) 현상이 발생할 수 있다는 점도 주의할 필요가 있다.

또한 가압판과 시험편 접촉면이 편평하지 않으면, 그 요철 부분에 응력이 집중되어 이 부분에서부터 파괴가 시작될 수도 있다. 시험편 상하면 평행도가 충분하지 않는 경우에도 시험편이 한쪽으로 치우치는 힘을 받게되어 시험편에 휨 모멘트가 발생될 수 있다. ISRM 제안시험법에서는 시험편 양단이 1/1000 in.(=0.025mm) 이내로 편평해야 하며, 시험편 양쪽면과 시험편 축은 0.001라디

안 오차범위 내에서 수직을 유지하여야 한다고 규정하고 있다.

4) 재하속도

재하속도(loading rate)는 시험편에 가해지는 하중 증가율을 의미한다. 일반적으로 하중속도가 커지면 시험편의 압축강도는 커지는 것으로 알려져 있지만, 실험실 일축압축시험에서 통상적으로 적용하는 하중속도 범위 정도에서는 큰 영향은 없다고 할 수 있다. ISRM 제안시험법에서는 응력 증가율이 0.5~1.0MPa/초를 넘지 않도록 하고 재하 시작 후 5~10분 정도 지난 후 시험편이 파괴되도록 일정한 속도록 하중을 가하여야 한다고 규정하고 있다.

5) 수분함량

공극률이 높은 암석에서는 수분함량이 시험편의 응력-변형률곡선의 형태와 압축강도에 영향을 미친다. 공극 중에 포함된 물은 압축에 의하여 공극이 축소되면 수압을 발생시켜 암석 입자들의 접촉부에 작용하는 수직 응력을 약화시키게 되므로 시험편의 강도를 낮추는 역할을 한다. 따라서 포화상태인 암석의 경우, 시험편에 작용하는 전체 응력에서 공극 내에서 발생된 수압을 뺀 응력값 즉, 유효응력(effective stress)이 중요하다.

또한 사암이나 응회암 같은 암석들 중에는 수분에 노출되면 교결물질(cementing material)이 용해되어 강도가 현저히 낮아지는 것들도 있다. 점토성분을 많이 포함한 암석 시험편도 그 거동특성이 수분의 함량에 민감한 경우가 많다.

일축압축시험에서는 되도록 시험편을 채취한 지점의 자연상태 수분함량을 유지시켜 시험을 실시하는 것이 좋다. ISRM 제안시험법에서는 시험시 수분함량을 기록하여 실험결과와 함께 보고할 것을 권장하고 있다.

3. 점하중강도시험

표준시험법에 따라 시료를 성형하여 일축압축시험을 실시하는 것이 곤란한 상황이거나, 암반의 공학적 분류를 목적으로 단지 암석의 대략적인 압축강도만 알고자 하는 경우에는 점하중강도시험(point load test)을 통하여 현장이나 실험실에서 간단히 일축압축강도를 추정한다.

ISRM 제안시험법(Franklin, 1985)에 따라 실시한다.

끝이 원추형인 재하 장치 사이에 시험편을 끼워서 하중을 가하면 하중방향과 수직인 방향으로 인장 응력이 발생되어 시험편이 파괴된다. 이때 특정형상의 시험편에 가해지는 파괴하중은 시험편의 인장강도 뿐만 아니라 압축강도와 밀접한 상관성을 보이는 것으로 알려져 있다.

ISRM 제안시험법에 따라 NX 규격의 원주형 시험편을 지름방향으로 가압하여 파괴시켰을 때 이 시료의 점하중강도지수(point load strength index), Is는 다음과 같다.

$$I_s = \frac{P}{D^2} \quad (MPa)$$

여기서, P(N)는 시료에 가해진 파괴하중이며, D(mm)는 시료 직경이다.

직경이 50mm인 경우를 표준 점하중강도지수, Is(50)으로 표시한다.

시험편 직경이 50mm가 아닌 경우에는 다음과 같은 방법으로 보정계수 F를 곱하여 Is(50)로 환산한다.

$$I_{s(50)} = F \cdot I_s \ (MPa)$$

$$I_s = \frac{P}{D^2} \ (MPa)$$

원주형 시험편에 축방 향 하중을 가하거나 시험편이 원주형이 아닌 경우에는 다음 식에 의해 등가코어지름(equivalent core diameter), De를 계산한다.

$$D_e^2 = \frac{4}{\pi} WD$$

시험편 일축압축강도, σ c와 점하중강도지수, Is(50) 사이에는 대략 다음과 같은 상관관계가 있다(Franklin, 1985).

$$\sigma_c \approx (20 \sim 25) \cdot I_{s(50)} \ (MPa)$$

휴대용 시험기를 이용하면 현장에서 바로 강도시험이 가능하고, 시험편을 정밀하게 성형할 필요가 없기 때문에 암반분류목적의 강도시험에 점하중강도시험이 아주 적합하다.

4. 인장강도 시험

가. 직접인장강도

단면적이 A인 시험편에 축 방향으로 인장력을 가하여 인장력이 T_{max}일 때 시험편이 파괴되었다면 이 시험편의 인장강도, σ_t는 다음과 같다.

$$\sigma_t = \frac{T_{max}}{A}$$

암석 시험편의 인장강도를 구하는 것은 개념적으로 매우 간단하지만 암석은 인장력을 가하기 쉬운 특수한 형태로 가공하는 것이 어려울 뿐만 아니라 시험편에 굴곡하중을 발생시키지 않으면서 시험편에 인장력을 가해야 하기 때문에 암석 직접인장시험은 일축압축시험에 비하여 매우 어렵다. 시험장치가 완전한 경우라도 시험편 성형과정에서 조그만 결함이 발생되었거나 혹은 시험편 자체가 불균질하다면 시료단면에 균질한 인장 응력이 작용하지 않기 때문에 시험결과를 신뢰할 수 없게 된다.

이와 같이 암석 시험편 직접인장시험이 매우 어려우며 또한 만족할만한 시험결과를 얻기도 어렵기 때문에 거의 이용하지 않으며, 대신 간접인장시험으로 암석 인장강도를 얻는 방법을 많이 사용한다.

나. 압열인장강도

원판형 시험편에 하중을 가하면 수직 중심선을 따라 수평방향으로 인장 응력이 발생하여 시험편

이 두 조각으로 분리되며 파괴에 이른다. 파괴되는 시점의 인장 응력을 시험편 인장강도로 간주하며, 이와 같은 방법으로 암석 인장강도를 구하는 방법을 압열인장시험 혹은 Brazilian test라 한다.

다. 굴곡강도

빔(beam)에 휨 모멘트를 가하면 휘어진 빔의 안쪽 면은 수축이 되고 바깥쪽 면은 신장이 되며 중앙에는 늘어나지도 줄어들지도 않는 중립 축이 형성된다. 암석의 인장강도는 압축강도에 비하여 매우 작으므로 휨 모멘트에 의한 굴곡시험에서 일어나는 파괴는 바깥쪽 면에 작용하는 인장 응력 때문인 것으로 생각할 수 있다. 따라서 바깥쪽 면에서 축 방향으로 작용하는 최대 인장 응력을 측정하여 암석 인장강도를 구한다. 이러한 실험을 굴곡시험(bending test)이라 부르며, 여기서 얻은 값을 굴곡강도(bending strength)라 하여 인장강도와 구별해서 사용한다.

5. 전단강도 시험

암석은 전단에 의해 파괴되는 경우가 가장 흔하기 때문에 암석의 전단강도(shear strength)는 중요한 설계변수가 된다. 암석의 전단강도를 추정하기 위한 실내시험 방법에는 직접전단시험, Protodjakonov 시험, 펀치(punch)시험 등이 있으며, 삼축압축시험도 시험 원리는 다르지만 결국 암석의 전단강도를 추정하기 위한 것이다.

일면전단시험의 경우 예상 파괴면의 면적을 A라 하면 예상 파괴면에 작용하는 전단 응력 τ 는 다음과 같다.

$$\tau = \frac{T}{A}$$

시료가 파괴되는 시점에 파괴면에 작용하는 전단 응력을 그 암석의 전단강도로 정의할 수 있으나 이 경우 일축압축강도나 인장강도와는 달리 전단강도는 단일한 값으로 표시할 수 없다. 일면전단시험의 경우를 예로 들면 전단 파괴면에 작용하는 수직 응력, $\sigma = N/A$가 클수록 전단강도는 커지기 때문이다. 따라서 암석의 전단강도는 전단 파괴면에 작용하는 수직 응력의 함수로써 표시한다.

수직 응력이 0인 경우에 얻는 암석의 전단강도를 점착 강도(cohesion)라 부른다. 몇몇 문헌에서는 점착 강도라는 용어 대신에 전단강도라는 용어를 사용하는 경우가 있음을 주의할 필요가 있다. 수직 응력을 달리하여 여러 번 직접전단시험을 실시하고 여기서 얻은 수직 응력과 전단강도 자료를 도시하여 외삽하는 방법으로 암석의 점착 강도를 구할 수 있다.

6. 삼축압축시험

가. 시험법

원주형 시험편을 초기에 정수압상태로 유지시킨 후 측면의 구속압(confining pressure)은 일정하

게 유지시키면서 축 방향 응력(σ_1)을 서서히 증가시켜 시험편이 파괴에 이르게 하는 시험을 삼축압축시험(triaxial compression test)이라 부른다. 점성이 있는 기름을 채운 용기 내에 시험편을 넣고 유압펌프를 이용하여 압력을 가하는 방법으로 구속압을 발생시킨다. 구속압을 달리하면서 동일 종류의 시료에 대해 시험을 수회 반복하여 암석의 삼축압축강도 특성을 파악한다.

삼축압축시험에서는 다이얼게이지 등을 이용하여 피스톤과 유압 챔버 사이의 상대 변위를 측정함으로써 시험편에 발생하는 축 방향 변형률을 측정한다. 시험편에 직접 변형률계를 부착하여 축 방향 및 횡 방향 변형률을 측정할 수 있다.

나. 삼축압축시험 결과

삼축압축시험의 결과로 얻은 구속 응력(σ_3)과 이에 대응하는 파괴강도(σ_1)를 이용하면 암석 파괴조건에 대한 정보를 얻을 수 있다. 수평축을 수직 응력, 수직 축을 전단 응력으로 표시한 직교좌표계에 σ_3와 이에 대응되는 σ_1을 지름의 양끝으로 하는 Mohr Circle을 그리고 이 원에 공통으로 접하는 포락선을 구하면 이 곡선이 암석시험편의 파괴조건을 표시하게 된다. 공통접선을 직선으로 근사시키면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\tau = \sigma\tan\phi + c$$

여기서 ϕ는 내부 마찰각(internal friction angle)이라 불리는 암석의 역학적 상수이며, 수직축의 절편값 c는 암석의 점착 강도이다. 그러나 실제 파괴포락선은 직선이 아닌 곡선이므로 수직 응력 수준에 따라 내부마찰각과 점착 강도가 변화한다는 점도 명심할 필요가 있다. 그러므로 봉압을 대상 암반 구조물 심도에 해당하는 수직 응력 수준으로 유지하고 삼축압축실험을 실시하여 내부마찰각과 점착 강도를 구하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

7. 탄성정수 산출

암석을 균질(homogeneous), 등방(isotropic), 탄성재료라 가정하면 응력과 변형률 관계는 암석의 탄성계수(elastic modulus 또는 Young's modulus, E)와 포아송비(Poisson's ratio, ν)를 이용하여 표시할 수 있다.

암석의 탄성계수는 일축압축시험에서 얻은 축 방향 응력-변형률 곡선 기울기로 계산하며, 계산방법에 따라 접선탄성계수(tangential modulus), 평균탄성계수(average modulus), 할선탄성계수(secant modulus)로 구분한다.

접선탄성계수는 시험편 강도의 일정 비율에 해당하는 응력 수준에서 축 방향 변형률 곡선의 접선기울기인데, 보통 압축강도의 50% 응력 수준에서 접선기울기로 계산한다.

평균탄성계수는 변형률 곡선의 비교적 직선 부분에 위치하는 두 점 사이를 연결하는 직선 기울기로 계산한다.

할선탄성계수는 원점과 임의 응력 수준에 해당하는 축 방향 변형률 곡선 위의 점을 연결하는 직선의 기울기이다. 보통 원점과 압축강도의 50%에 해당되는 점을 연결하는 직선의 기울기로 계산

한다.

원주형의 시험편에 축 방향으로 압축 응력을 가하면 축 방향으로 수축되고 축과 직각방향으로는 늘어난다. 또한 인장 응력이 가해지면 이와 반대되는 현상이 나타난다. 이러한 변형특성은 재료의 고유한 성질이며, 이 성질을 표현하는 재료상수가 포아송비이다. 즉 포아송비는 일축압축 혹은 일축인장 상태에서 축 방향 변형률에 대한 횡 방향 변형률의 비인 양의 상수이다.

암석의 포아송비는 일축압축시험에서 얻은 축 방향 및 횡 방향 변형률곡선을 이용하여 계산한다. 포아송비는 무차원의 상수이며 암석은 보통 0.1~0.3 정도이다. 또한 포아송비의 역수를 포아송수(Poisson's number)라 부른다.