

퇴적암의 공학적 특성 및 문제점

Engineering Characteristics and Problems in The Sedimentary rock

이영휘¹⁾, Young-Huy Lee

김용준²⁾, Yong-Jun Kim

정강복³⁾, Kang-Bok Jung

1) 영남대학교 공과대학 토목공학과 교수

2) 대림산업(주) 토목사업부 T/K팀 과장

3) 영남대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

퇴적암의 공학적 특성 및 문제점

Engineering Characteristics and Problems in The Sedimentary rock

이영휘*¹, Young-Huy Lee, 김용준*², Yong-Jun Kim, 정강복*³, Kang-Bok Jung

¹⁾ 영남대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yeungnam Univ.

²⁾ 대림산업(주) 토목사업부 T/K팀 과장, Deputy Section Chief, Civil Projects T/K Team. Daelim Industry

³⁾ 영남대학교 공과대학 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yeungnam Univ.

ABSTRACT : The sedimentary rocks deposited in Taegu and Kyongbuk region consist of various rocks such as the shale, mudstone, siltstone and sandstone. The characteristics of the sedimentary rocks are distinguished from those of igneous rocks and metamorphosed rocks for the stratum caused by deposit environment. This study investigated engineering characteristics of the anisotropy, weathering rock and filled rock joints in the notable features of sedimentary rocks.

Key words : 퇴적암, 이방성, 충전재, 풍화암, 전단강도

1. 서론

대구·경북지역의 지층은 주로 중생대 백악기에서 신생대 제 3기에 형성된 암반층으로 층리와 절리가 잘 발달되어 있는 셰일(shale), 이암(mudstone), 실트스톤(siltstone), 사암(sandstone), 역암(conglomerate) 등의 퇴적암류로 대부분 구성되어 있으며, 퇴적환경에 따라 형성된 층리면과 같은 지층구조와 풍화에 대한 내구성 등에 의해 공학적 특성이 화성암이나 변성암과는 다소 차이가 있다. 퇴적암중 셰일로 이루어진 사면은 인장절리와 수축절리의 간격(spacing)이 조밀하게 잘 발달되어 있으며 대기에 노출시 빠른 시간에 풍화를 받는다. 그리고 암석의 강도는 층리 방향에 따라서 큰 차이를 나타내고 있다. 또한 중생대 경상누층군과 같이 역암, 사암, 셰일 등이 호층을 이루고 있는 경우는 셰일의 풍화가 진행된 후 층리면에 점토층이 충전된 경우가 빈번하여 사면의 붕괴가 자주 발생하여 이들에 대한 특성규명이 요구된다.

이와 관련하여, 본 연구에서는 대구·경북지역에 분포하는 퇴적암의 공학적 특성을 규명하고, 퇴적암에서 잘 나타나는 강도 이방성, 풍화암반의 강도정수, 충전된 불연속면의 강도특성을 규명하였다.

2. 퇴적암의 공학적 특성

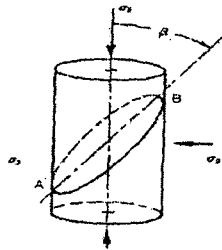
2.1 이방성에 따른 강도특성

퇴적암의 공학적 거동을 좌우하는 가장 중요한 요소는 이방성(anisotropy)이다. 이방성이란

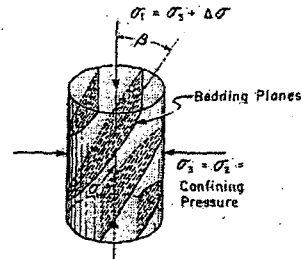
암석의 성질이 방향에 따라서 다르게 나타나는 것으로서, 암석의 이방성은 크게 1차적인 요인과 2차적인 요인으로 구분된다. 전자는 암석의 형성과정과 관계가 있는 것으로서 퇴적암의 생성과정에서 나타나는 퇴적물의 분급, 건조, 다짐, 암석화작용 등이 좋은 예이다. 후자는 주변 환경과 관계가 있는 것으로서 압력, 응력, 온도, 물 및 물과 반응하기 위한 화학조건 등에 의한 것으로서 변성암에서 잘 나타난다.

2.1.1 이방성의 종류

이방성의 종류는 다음과 같이 두가지로 나뉜다. 첫째, 암의 생성기원(즉, 층리, 엽리, 편리)과 관계가 되는 고유 이방성이 있으며 둘째, 암이 형성된 후에 발달하는 즉 응력이방성, 절리, 틈, 전단면과 단층 등의 결과로 나타나는 유도 이방성이 있다. 암석에 인공 절리면의 각도(β)를 표현한 유도 이방성 시험을 위한 암석시편의 형상과 자연층리면을 표현한 고유 이방성 시험을 위한 암석시편의 형상이 [그림 1] 과 [그림 2] 에 나타나 있다.



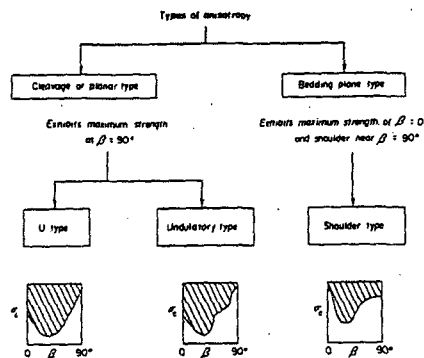
[그림 1] 유도 이방성 β



[그림 2] 고유 이방성 β

2.1.2 이방성에 따른 파괴형태

이방성 암석의 파괴 유형에는 세 가지가 있다. 첫 번째는 U형태 이방성으로 최대강도는 보통 $\beta=90^\circ$ 일 때 발생하며, 최소강도는 $\beta=30^\circ$ 정도에서 발생한다. U형태는 주로 점판암에서 관찰된다. 두 번째는 파동형태의 이방성으로 최대강도는 보통 $\beta=90^\circ$ 일 때 발생하고, 최소강도는 $\beta=30^\circ$ 정도에서 발생하며, 주로 coal과 규조토와 같은 생화학적 암에서 발견된다. 또한, 파동형태는 서로 교차하는 연약면이 한 세트 이상이 존재할 때 발생한다. 세 번째는 어깨형태의 이방성으로 보통 $\beta=0^\circ$ 에서 최대강도를 보이고, $\beta=15^\circ$ 와 30° 사이에서 최소강도를 보이며, 주로 셰일(shale)과 사암에서 이러한 특성을 볼 수 있다.



[그림 3] 파괴형태에 따른 이방성 형태

2.1.3 이방성에 따른 파괴규준

이방성 암석의 파괴규준은 β 각도에 따른 파괴시의 강도를 나타내는 것으로써 Jaeger(1960), Mclamore & Gray(1967), Hoek & Brown(1980), Ramamurthy(1985)의 파괴규준 등이 있다. 이 중에서 Jaeger (1960), Mclamore & Gray(1967)의 파괴규준은 Mohr-Coulomb의 파괴이론을 확장하여 제안되었으며, Hoek와 Brown(1980)은 무결합 암석의 파괴기준을 나타내는데 필요한 재료상수 m 과 s 를 수정한 경험식을 제안하였다. 그리고 Ramamurthy(1985)의 파괴규준은 구속응력에 따라 표준화된 형태의 경험적 모델식을 제안하였다(김 회동, 1999).

이 중 Jaeger(1960)의 파괴규준은 "Single plane of weakness"이론과 "Variable Cohesive Strength" 이론으로 나뉘어진다. 전자는 암석의 파괴형태가 연약면을 따른 파괴(sliding failure)와 연약면을 따라 파괴가 발생하지 않을 경우(matrix failure)로 구분하여 파괴규준을 정의하였다. 후자는 전단파괴강도가 불연속면의 β 각도에 따라 다양한 c (cohesive strength)값에 의해 규명된다는 이론이며, 이때 $\tan \phi$ 값은 가장 critical한 방향인 $\beta=30^\circ$ 일 때의 값으로 일정하다고 가정하였다.

그 후 Mclamore & Gray(1967)는 Jaeger가 제안한 "Variable Cohesive Strength" 이론을 수정하여 식(1)과 같이 나타내었다. 이 파괴규준식은 점착력(c)과 $\tan \phi$ 값 모두가 불연속면의 각도(β)에 따라 변한다는 이론이며, 변하는 양상은 anisotropy type에 따라 다르며 점착력(c)과 $\tan \phi$ 값을 정의할 때 사용되는 지수 n, m 으로 나타난다.

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{(2c + 2\sigma_3 \tan \phi)}{\sqrt{\tan^2 \phi + 1} - \tan \phi} \quad (1)$$

$$\text{여기서, } c = A_{1,2} - B_{1,2} [\cos 2(\xi - \beta)]^n$$

$$\tan \phi = C_{1,2} - D_{1,2} [\cos 2(\xi' - \beta)]^m$$

ξ, ξ' : $c, \tan \phi$ 값이 각각 최소일 때의 각도.

A_1, B_1, C_1, D_1 : $0^\circ \leq \beta \leq \xi^\circ$ 사이에서 결정되어지는 상수.

A_2, B_2, C_2, D_2 : $\xi^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ 사이에서 결정되어지는 상수.

n, m : "anisotropy type" factor.

- "planar" type of anisotropy(cleavage and possibly schistosity)

⇒ 1 or 3

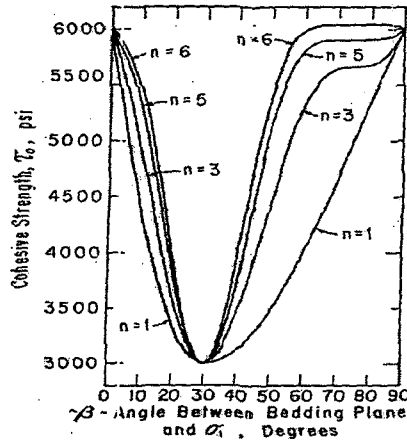
- "linear" type of anisotropy(bedding planes)

⇒ 5 or 6 (or greater.)

여기서 c 값과 $\tan \phi$ 값은 각각의 방향(β)에서의 서로 다른 구속압력하에서 삼축압축시험을 통해서 구해진다. 위에 나타낸 anisotropy type에 대한 지수 n, m 값의 변화에 따른 그래프의 양상이 [그림 4]에 나타나 있으며, 이 그림에 나타난 c 값의 양상은 $\tan \phi$ 값의 양상과 같으며, m 값은 n 과 동일한 것으로 간주한다.

[그림 4]에서 anisotropy type에 대한 지수 n 값의 증가에 따라 그래프의 오목한 부분의 폭과 범위가 점점 좁아지는 경향을 볼 수 있으며, 그래프 오른쪽의 편평한 부분의 범위가 점점 더 커지는 양상

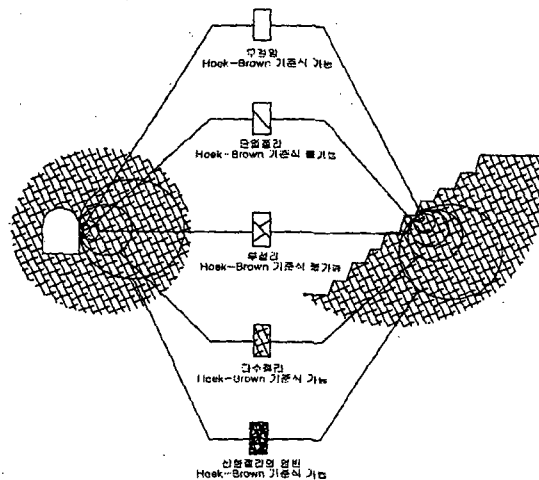
을 볼 수 있다. 그러한 양상은 일반적으로 층리면을 가진 암석에서 두드러진다. 또한 [그림 4] 에서 그래프 오른쪽의 편평한 부분의 파괴는 암석의 비등방 특성보다 오히려 암석 자체의 파괴(matrix failure)에 의해 지배되는 경향을 나타내고 있다.



[그림 4] 점착력(c)과 n과의 관계

2.2 풍화암반의 강도특성

암반은 2개나 3개이상의 절리군으로 구성되어 있으며, 대부분 대기에 노출된 상태에서 건설 반복 등에 의한 외적요인에 의해 풍화가 된다. 특히 대구·경북 지역의 암석은 인장절리와 수축절리가 잘 발달되어 있으며 절리간격(spacing)이 조밀하며, 절리의 방향성이 우세하게 발달하지 않은 경우에 있어서 암반의 파괴는 원호형태를 나타낸다. 이때 암반의 전체적인 강도를 추정하기에는 시험시료의 선정에 불합리한 점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, Hoek & Brown(1980)은 무결합 암석의 일축압축강도와 삼축압축강도를 이용하여 RMR이나 GSI등과 같은 분류법을 이용하여 암반의 강도를 산정하는 방법을 제안하였다.



[그림 5] 시료크기에 따른 암석과 암반의 차이

2.2.1 암석의 강도정수 산정

Hoek와 Brown(1980)은 Griffith이론에 개념적 기초를 둔 경험적 파괴규준을 제시하였다. 실제로 절리 또는 부서진 암석을 포함한 암석강도의 넓은 범위를 맞추기 위해서 시험과 오차의 결과에서 유도하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2} \quad (2)$$

여기서, σ_1 는 파괴시 최대주응력이고, σ_3 는 암석에 작용하는 최소주응력이다. σ_c 는 무결함 암석의 일축압축강도이고, m 은 내부마찰각, 구성입자의 결합성등에 의하여 좌우되는 상수이며, s 는 응력을 가하기 전의 시험편의 파손상태로 인한 인장강도에의 영향에 좌우되는 상수이다.

Balmer(1952)는 파괴면상에 작용하는 τ 와 등방성 암석의 파괴시의 주응력들간의 일반적인 관계를 Mohr원에 대한 식으로부터 식 (3)과 같이 유도하였다.

$$\left[\sigma - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \right]^2 + \tau^2 = \frac{1}{4}(\sigma_1 - \sigma_3)^2 \quad (3)$$

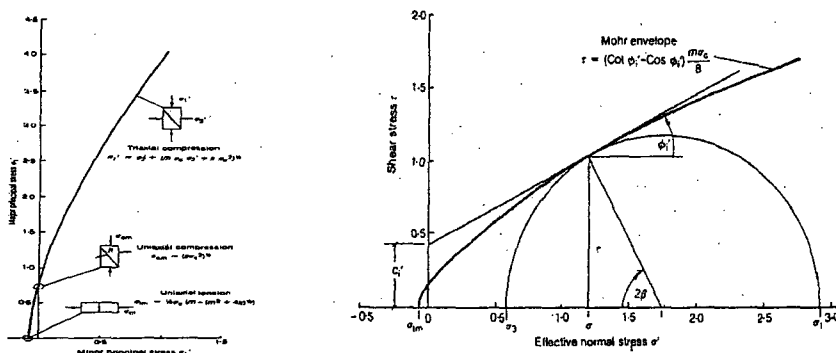
식 (3)과 (4)를 이용하여 각각의 암석의 파괴시의 σ_1 과 σ_3 를 이용하여 Mohr 원을 작도할 수 있다. 그러나 어느 특정한 수준의 응력에서의 전단강도 계산에는 불편하므로 식 (4)와 같이 규준화하여 나타낼 수 있다.

$$\frac{\tau}{\sigma_c} = A \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} - \frac{\sigma_t}{\sigma_c} \right)^B \quad (4)$$

여기서 A, B는 log 축의 $(\tau/\sigma_c) - (\sigma/\sigma_c - \sigma_t/\sigma_c)$ 관계에서 각각 절편과 기울기이다. 그리고 어떤 특정한 수준의 연직응력에서의 마찰각과 점착력은 각각 식 (5), (6)에 의해 산정된다. 그리고 Hoek & Brown의 파괴규준과 파괴포락선은 [그림 6]에 나타내었다.

$$\tan \phi_i = AB \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} - \frac{\sigma_t}{\sigma_c} \right)^{B-1} \quad (5)$$

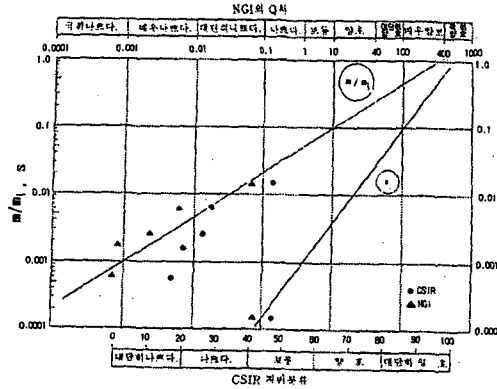
$$c_i = \tau - \sigma \tan \phi_i \quad (6)$$



[그림 6] Hoek-Brown의 비선형 파괴규준

2.2.2 암반의 RMR등급에 따른 전단강도 특성

Hoke & Brown(1980)은 Bieniawski(1974)가 제안한 RMR과 노르웨이 지반공학연구소(NGI)에



[그림 7] 암반등급에 따른 m, s값 산정

서 Barton et al.(1974)이 분류한 Q-system 이용하여 Panguna 안산암의 각 단계별 시료의 상태에 대한 암반분류적인 입장에서 평점을 상세히 기록하고 삼축압축시험 결과를 이용하여 암반등급에 따른 m, s값을 산정하는 식을 아래에 나타내었다.

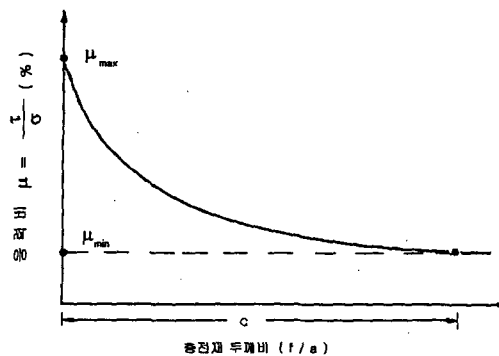
$$m = m_i \exp\left(\frac{RMR - 100}{14I_m}\right) \quad (7)$$

$$s = \exp\left(\frac{RMR - 100}{6I_s}\right) \quad (8)$$

여기서, m_i 는 무결함 암석에 대한 m값이다.(RMR=100) 그리고 I_m 은 불교란 상태일 때 2이고 교란상태일 때는 1이며, I_s 는 불교란상태일 때는 1.5이고 교란상태일 때는 1인 상수이다.

2.3 충전된 절리면의 전단강도

절리면은 환경적인 조건에 의해 풍화가 발생하면 벽면의 강도가 저하할 뿐만 아니라, 절리면 사이에 모래, 점토, 파쇄암석과 같은 충전물을 남기거나, 유수에 의한 흩입자의 이동에 의해 절리면은 모암의 강도보다 상당히 낮은 물질로 충전되게된다.



[그림 8] 충전된 절리면의 전단강도 특성 (Papaliangas, 1990)

[표 1] 충전물을 포함하고 있는 불연속면의 전단강도(Hoek & Bray, 1981)

| 암석명 | 설 명 | 최대강도 | | 암석명 | 설 명 | 최대강도 | |
|------------|--|----------------------------|----------------------|-----------------|-----------------------------|-------------------------|----------------|
| | | c'(kg/cm ²) | φ(°) | | | c'(kg/cm ²) | φ(°) |
| 현무암 | 점토화된 현무암질각력암, 점토에서 현무암까지의 함유량 변화가 큼 | 2.4 | 1.2 | 섬록암, 화강섬록암 및 반암 | 점토충전물 (점토 2%, PI=17%) | 0 | 26.5 |
| | | | | 석회암 | 1~2cm의 점토 충전물 1mm이하의 점토 충전물 | 1 0.5~2.0 | 13~14 17~21 |
| 벤토나이트 | 백악내의 벤토나이트 얇은 층상 삼축시험 | 0.15 0.9~1.2 0.6~1.0 | 7.5 12~17 9~13 | 석회암, 이회암 및 갈탄 | 층상의 갈탄층 갈탄-이회암 접촉면 | 0.8 1 | 38 10 |
| 벤토나이트 질 세일 | 삼축시험 | 0~2.7 | 8.5~29 | 석회암 | 이회질 절리, 두께2cm | 0 | 25 |
| 점 토 | 과압밀, 미끄러짐면, 절리 및 소규모 전단면 | 0~1.8 | 12~18.5 | 갈탄 | 갈탄과 그 하부에 있는 점토 사이의 층 | 0.14~0.3 | 15~17.5 |
| 점토세일 | 삼축시험 | 0.6 | 32 | 몬모틸로나이트 점토 | 백악내에 있는 8cm의 벤토나이트 점토층 | 0.16~0.2 | 7.5~11.5 |
| 백운석 | 변질된 세일층, 두께 약15cm | 0.41 | 14.5 | 점판암 | 세밀한 판상 및 변질상태 | 0.5 | 33 |
| 화강암 | 점토 충전물이 있는 단층 사질양토로 된 단층 충전물과 함께 약화된 구조적 전단대, 편암질 및 파쇄된 화강암 풍화된 암석 및 충전물 | 0~1.0 0.5 | 24~45 40 | 석영/고령토/연방간석 | 혼합시료에 대한 삼축시험 | 0.42~0.9 | 36~38 |
| | | 24.2 | 42 | | | | |

절리면의 전단거동은 절리면 사이에서 절리면과 충전재의 상호작용에 근거하여 구분된다. Nieto(1974)는 점토로 충전된 절리 표면사이의 상호작용을 interlocking, interfering, non-interfering의 3가지 범주로 나누었다. interlocking은 전단동안에 암표면의 접촉이 있을 때 발생한다. interfering은 전단동안에 암의 접촉은 없으나 충전된 절리면의 강도가 충전재만의 강도보다 클 때 발생한다. noninterfering은 전단동안에 암의 접촉이 발생하지 않고 절리면의 전단특성이 충전재에 의해 주어진다.

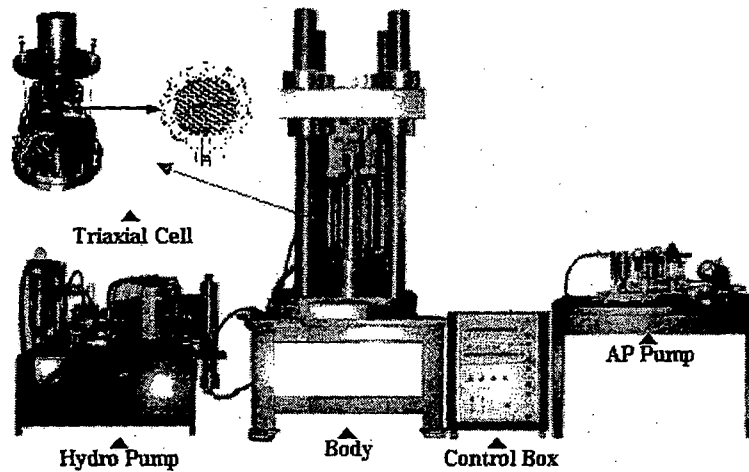
일반적으로 충전된 절리면의 전단강도는 충전재 두께가 증가할수록 강도가 감소하여 일정한 값으로 수렴하는 것으로 알려져 있다. 충전된 절리면의 전단특성은 [그림 8]에 나타내었다. 충전된 절리면의 전단강도 특성은 Hoek & Bray(1981)가 여러 연구자들의 시험 결과를 요약하여 암석과 충전재에 따라서 [표 1] 과 같이 분류하였다. 그러나 표에서 제안된 값들은 개략적인 범위를 제안하고 있어 실제 설계에의 적용에 어려움이 있다.

3. 시험장비 및 시험방법

3.1 삼축압축시험

3.1.1 시험장비

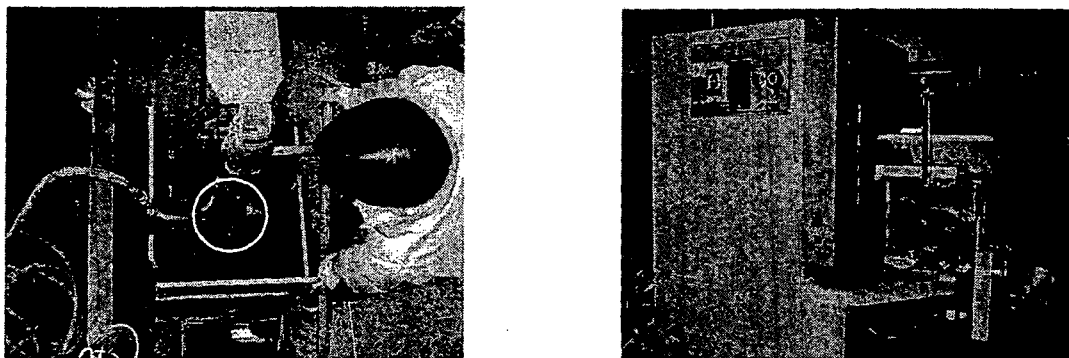
암석 삼축압축시험 장비는 미국의 S.B.E.L., Inc.에서 제작한 것으로써 하중제어는 유압(hydraulic pressure)과 공기압(pneumatic pressure)을 이용하여 삼축셀의 구속압을 가하며, 축하중은 PID 연산방식에 의한 servo 제어를 통해 제어한다. 변형률 측정은 2개의 연직 L.V.D.T에 의해 평균값으로 측정되며, 횡방향 변형률은 원주형 측정장치인 chain gauge에 부착된 L.V.D.T에 의해 측정된다. 그리고 장비의 최대 축하중은 113ton이고, 최대 구속응력은 700kg/cm²이다. [그림 9] 에는 본 연구에 사용된 삼축압축시험 장비의 전경을 나타내었다.



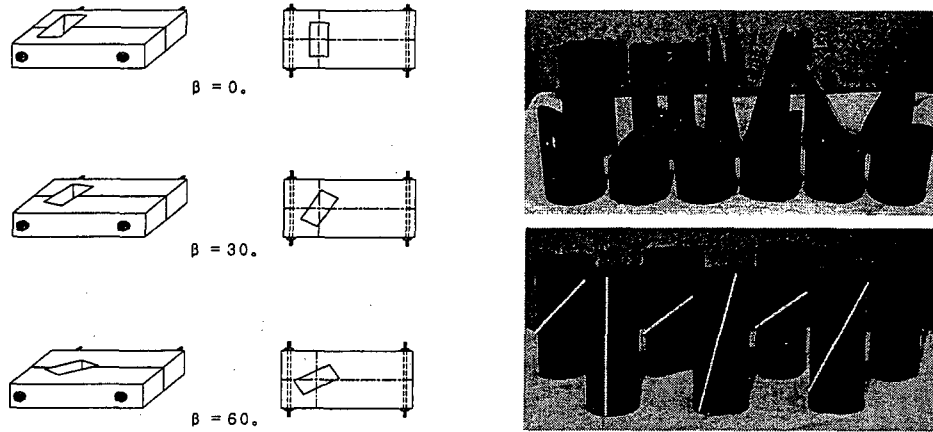
[그림 9] 삼축압축시험장비

3.1.2 시험방법

본 연구에서 사용된 암석 시료는 대구·경북의 7개 지역의 현장에서 시추시에 채취한 NX 코어와 현장에서 채취한 블록 시료를 실험실로 운반하여 [그림 10] 과 같이 코어기를 이용하여 시료를 직접 가공하였다. 코어시료는 암석 절단기에서 직경의 2배 정도 길이로 절단하였으며, 정확한 시험을 위하여 암석의 편평도를 0.02mm까지 연마하였다. 특히, 이방성 암석의 시료 가공을 위하여, 고유 이방성인 층리면은 블록 시료에 대하여 다양한 층리각에 대하여 코어를 가공하였으며, 유도 이방성인 절리면은 인공 절리면을 만들기 위하여 그림 11] 에 나타난 바와 같은 성형틀을 이용하여 절리면을 제작하였다. cell안에서 시료의 안정적인 정착을 위하여 (주) LOCTITE사의 401접착제를 이용하여 접합을 시킨 후 시험에 사용하였다. 유도 이방성 시험을 위해 사용한 시료 성형틀과 접착제로 접합하기 전 공시체의 모습과 접합한 후의 공시체 모습이 [그림 11] 에 나타나 있다. 그리고 본 연구에서 사용한 전단속도는 ASTM D 2664에서 제안한 2분에서 15분 사이에서 암석 공시체가 파괴되도록 하기 위하여 변형률속도를 0.1%/min으로 설정하였으며, 대부분 암석 공시체는 대체로 10분 정도에서 파괴가 일어나도록 하였다.



[그림 10] 시료가공 전경

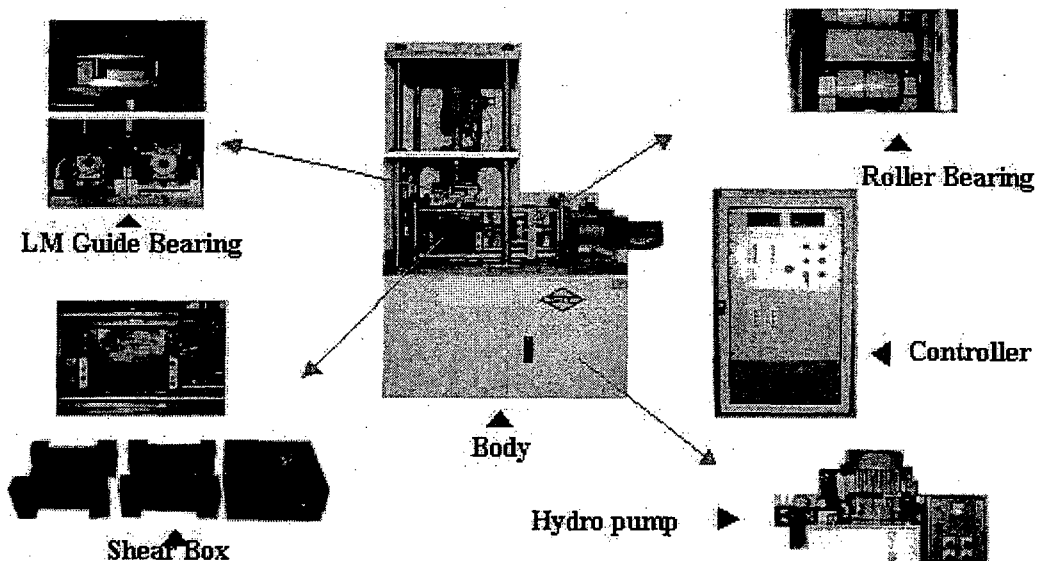


[그림 11] 이방성 암석 성형틀과 시료가공

3.2 충전된 절리면 전단시험

3.2.1 시험장비

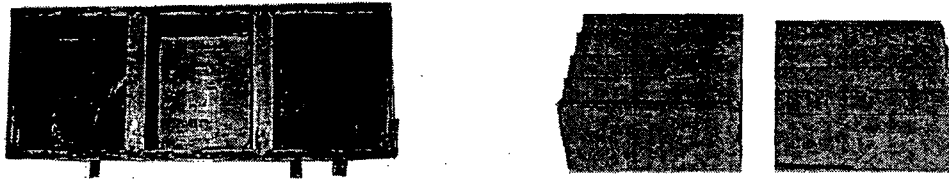
본 연구에서 충전된 절리면의 전단강도를 측정하기 위하여, 절리면 전단시험장비를 신규 제작하였다. 본 연구에서 개발·제작된 시험장비는 현장 암반에서 요구되는 강도정수를 얻기 위해서 실험목적에 맞게 절리면의 경계조건의 변화, 충전물의 전단조건, cyclic 시험등을 할 수 있도록 제작되었다. 개발된 전단시험장비의 전경은 [그림 12]에 나타내었다. 그리고 본 시험장비의 작동을 위해 Lab Windows/CVI를 이용하 software를 개발하였다. 제어방식은 컴퓨터에서 지시한 command를 실제 발생한 변위나 하중을 feedback하여 그 차이를 최소화하여 시스템 제어과정을 최상의 상태로 유지하기 위하여 PID(Propotional-Integral-Derivative) 알고리즘에 의한 제어 방식을 사용하였다.



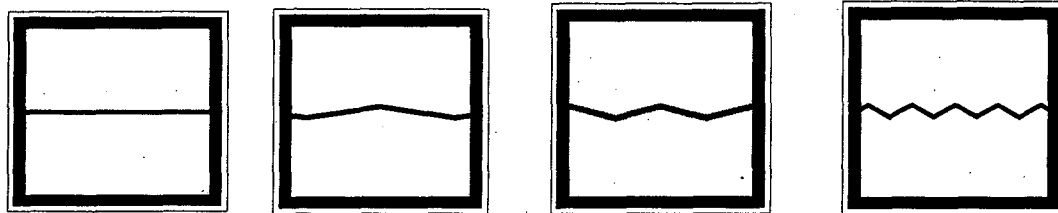
[그림 12] 직접전단시험장비

3.2.2 시험방법

본 시험에서 사용한 절리면은 삼각형 형상의 일정한 각을 가진 유사암석(rock-loke) 시료를 실내에서 제작하여 사용하였으며, 유사암석 시료의 형상은 진폭(amplitude)이 10mm이고, 절리 경사각(i)은 0° , 9° , 15° , 30° 이다. 유사암석 시료의 성형기와 거칠기 형상은 각각 [그림 13] 과 [그림 14] 에 나타내었다. 그리고 시험에 사용한 유사암석 재료는 (시멘트 : 모래) : 물 = (1 : 0.3) : 0.2(중량비)의 배합비로 성형 mold에 타설하여 30일간 양생한 후 시험에 사용하였다. 유사암석 시료의 물리·역학적 특성은 [표 2] 에 나타내었다. 시험에 사용한 충전재의 물리·역학적 특성은 [표 3] 에 나타내었으며, 충전재의 두께조절은 절리면 위에서 동일한 두께가 되도록 하였다. 충전재 두께 측정의 모식도는 [그림 15] 에 나타내었다. 이때 충전재 두께는 각각의 연직응력에 따라 그 압축특성이 달라지므로, 연직응력에 따른 소요의 두께를 얻기 위해서 시료의 초기 밀도는 동일하게 포설한 후, 해당 응력에서 요구하는 두께가 되는 초기 포설 두께를 시행착오에 의한 반복 실험을 통해 결정하였다.



[그림 13] 유사암석시료 성형기



(a) $i = 0^\circ$

(b) $i = 9^\circ$

(c) $i = 15^\circ$

(d) $i = 30^\circ$

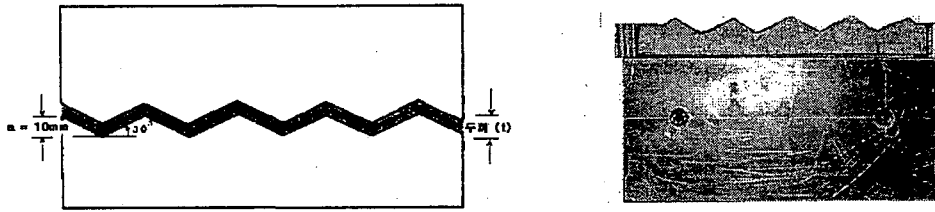
[그림 14] 유사암석 시료의 형상

[표 2] 유사암석 시료의 물리·역학적 특성

| 혼 합 비 | 일축압축강도 σ_c (kg/cm ²) | 탄성과 속도 | | 흡수율 a_b (%) | $I_s(50)$ (kg/cm ²) | 슈미트 반발치(R_o) | |
|-------------|--|----------|----------|------------------|------------------------------------|---------------------|------|
| | | P파(km/s) | S파(km/s) | | | wet | dry |
| (1:0.3):0.2 | 379.6 | 3.27 | 2.30 | - | 22.7 | 36.9 | 39.8 |

[표 3] 충전재의 물리·역학적 특성

| 시료종류 | G_s | W_L (%) | I_p (%) | D_{10} (mm) | 점착력 (c , kg/cm ²) | 내부마찰각 (ϕ , $^\circ$) | U.S.C.S |
|------|-------|--------------|--------------|------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------|
| 표준사 | 2.66 | - | NP | 0.5 | 0 | 32.08 | SP |
| 점토 | 2.69 | 52.50 | 29.00 | 0.0025 | 0 | 34.33 | CH |
| | | | | | 0.21 | 16.98 | |



[그림 15] 충전재 두께측정의 모식도

4. 시험결과

4.1 퇴적암의 물리, 역학적 특성

7개 지역에서 채취한 시료에 대해서 slake 내구성지수, 비중, 유효 간극율, 흡수율 등의 물리적 성질을 [표 4]에 나타내었다. 같은 지역에서 채취한 시료일지라도 물리적 성질이 약간의 차이를 나타내고 있다. 포항 창포동에서 채취한 이암은 흡수율의 차이가 뚜렷하여서 유효 간극율과 흡수율을 기준으로 2가지로 분류하였다. 암석의 강도 특성은 [표 5]에 나타내었다. 7개 지역에서 채취한 암석의 물리적 성질은 비슷한 것으로 나타났으나, 암석의 강도는 비교적 큰 분포를 나타내고 있는데, 그 이유는 암석을 구성하고 있는 광물결정의 하나하나가 일정한 화학조성을 가지고 일정한 결정배열을 하고 있으나, 결정의 방향에 따라 다른 역학적 성질을 나타내기 때문이다. 따라서 암석에 대하여 여러 가지 시험을 하고 그 성질을 논하고자 할 경우 우선 문제되는 것은 시험 결과의 흠어짐이다. 그러므로 암석의 강도를 논할 때 평균치, 분산 등을 고려하여 그 결과의 취급에 충분한 주의를 기울여야 한다.

[표 4] 대구·경북 지역에 분포하는 퇴적암의 물리적 성질

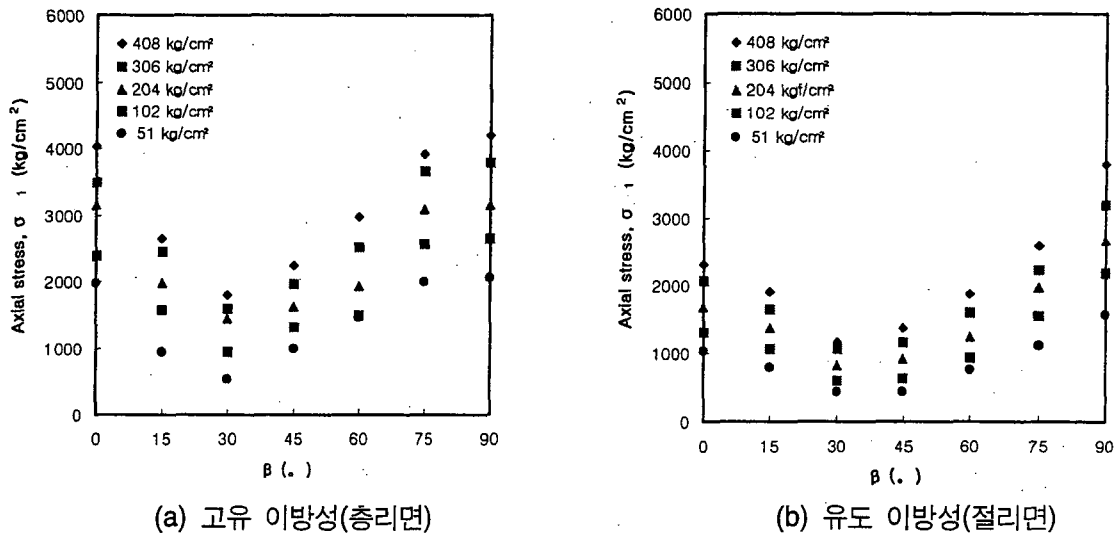
| 시험종류 암종류 | 슬래킹지수 Id ₂ (%) | 진비중 G _s | 겉보기비중 | | | 유효 간극율 n _e (%) | 흡수율 a _b (%) |
|---------------------|------------------------------|-----------------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------|---------------------------|
| | | | G _n | G _d | G _r | | |
| 사 암 (대구 종합전시장) | 99.0 ~ 99.7 | 2.65 ~ 2.67 | 2.59~ 2.71 | 2.57~ 2.71 | 2.59~ 2.73 | 0.9~ 2.59 | 0.34~ 0.97 |
| 이 암 (A) (포항 창포동) | 99.0 ~ 99.5 | 2.82 ~ 2.87 | 2.67~ 2.77 | 2.65~ 2.75 | 2.68~ 2.79 | 2.36~ 2.52 | 0.86~ 1.44 |
| 이 암 (B) (포항 창포동) | 80.0 ~ 91.0 | 2.52 ~ 2.57 | 1.38~ 1.62 | 1.38~ 1.62 | 1.65~ 1.80 | 26.5~ 33.70 | 17.7~ 25.6 |
| 세 일 (대구지하철 2호선) | 99.0 ~ 99.5 | 2.81 | 2.71~ 2.81 | 2.71~ 2.81 | 2.71~ 2.81 | 0.36~ 1.30 | 0.13~ 0.50 |
| 세 일 (대구 종합경기장) | 99.0 ~ 99.5 | 2.71 | 2.50~ 2.79 | 2.53~ 2.77 | 2.54~ 2.79 | 1.11~ 2.33 | 0.41~ 0.87 |
| 실트스톤 (영덕~성내간) | - | 2.53~ 2.72 | 2.51~ 2.73 | 2.50~ 2.72 | 2.52~ 2.72 | 2.31~ 4.68 | 0.81~ 2.74 |
| 석회암 (문경지구) | - | 2.73~ 2.81 | 2.68~ 2.86 | 2.70~ 2.86 | 2.71~ 2.87 | 0.87~ 1.40 | 0.06~ 0.62 |

[표 5] 대구·경북 지역에 분포하는 퇴적암의 강도 특성

| 구분 암종류 | 탄성파속도 | | 슈미트 해머반발치 (R _c) | 점재하 강도 지수 (I _{s(50)}) | | | 압열인장 강도 | 일축압축 강도 |
|--------------------|---------------|---------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------|-------------|--------------------|--------------------|
| | P 파 | S 파 | | Irregular | Axial | Diametric | | |
| | Km/s | Km/s | % | | | | kg/cm ² | kg/cm ² |
| 사암 (대구종합전시장) | 1.42~ 5.73 | 1.40~ 2.00 | 47.0~ 61.5 | 69.5~ 139 | - | - | 124.0~ 229.0 | 1495.0~ 1810.0 |
| 이암 (A) (포항 창포동) | 4.14~ 5.19 | 1.62~ 1.87 | 56.1~ 59.4 | 74~ 102 | 80.5~ 87 | 72~ 81 | 134.5~ 183 | 1870.0~ 3560.0 |
| 이암 (B) (포항 창포동) | 0.6~ 1.05 | 0.8~ 1.05 | 22.0~ 36.0 | 2.35~ 5.5 | 3.95~ 9 | 5.2~ 6.5 | 8.5~ 15.9 | 70.5~ 133.2 |
| 세일 (대구지하철 2호선) | 5.14 | 1.70 | 57.9 | 89.42 | 86.25 | 28.88 | 181.9 | 887.2 |
| 세일 (대구 종합경기장) | 1.10~ 4.80 | 0.85~ 2.95 | 51.5~ 58.0 | 57~ 89.5 | 63~ 110 | 18~ 53.5 | 102.0~ 229.0 | 607.0~ 2285.0 |
| 실트스톤 (영덕~성내간) | 1.98~ 4.57 | 1.60~ 4.20 | 38.5~ 58.0 | - | 19.8~ 63.5 | - | 42.5~ 57.1 | 227.4~ 1231.0 |
| 석회암 (문경지구) | 3.38~ 5.38 | 2.29~ 5.23 | - | - | 27.1~ 70.7 | - | 80.0~ 130.3 | 428.2~ 1100.9 |

4.2 이방성 암석의 강도 특성

[그림 16]은 2가지 이방성 형태에 대해서 구속압과 β 각을 달리하여 수행한 시험결과를 나타낸 것이다. [그림 16]에서 알 수 있듯이 세일은 β=90° 와 β=30° 에서 최대, 최소 강도를 나타내는 U형태의 이방성을 나타내었다.



[그림 16] 이방성 형태에 따른 삼축압축 시험결과

암석의 이방성 정도는 식 (9)와 같이 비등방율(R_c)에 의해 정의된다. 그리고 [표 6]은 비등방율에 따른 등급을 암종별로 나타낸 것이다.

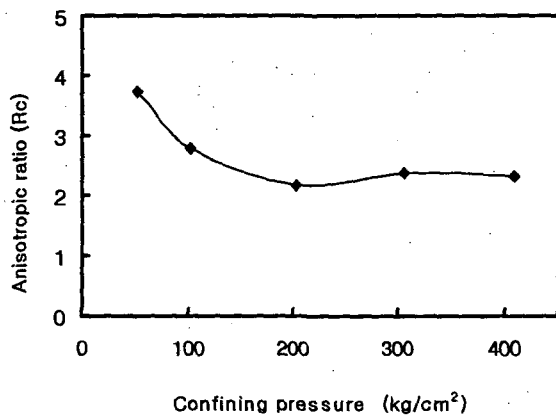
$$R_c = \frac{\sigma_{f(90)}}{\sigma_{f(\min)}} \quad (9)$$

[그림 17]은 이방성의 종류에 따른 비등방율을 구속압에 대해서 나타낸 것인데, 고유 이방성과 유도 이방성의 각각의 비등방율은 대략 2.3~3.7과 3.0~3.6정도이다. 그리고 구속압이 증가할수록 비등방율은 감소하는 것으로 나타났다.

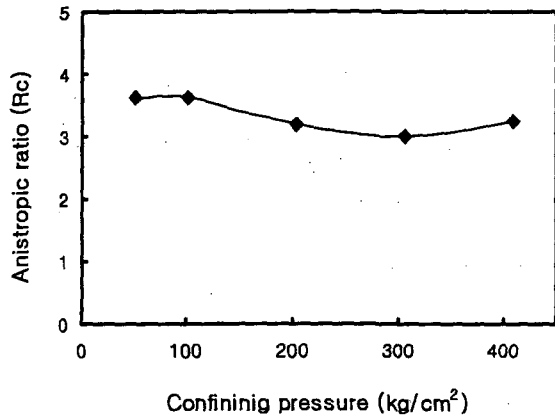
[표 6] 비등방율(R_c)에 의한 이방성 분류

(Ramamurthy, 1993)

| Anisotropy ratio, R_c | Class | Rock types |
|-------------------------|----------------------|-------------------|
| 1.0~1.1 | Isotropic | Sandstone |
| > 1.1~2.0 | Low anisotropy | Shales |
| > 2.0~4.0 | Medium anisotropy | |
| > 4.0~6.0 | High anisotropy | Slates, phyllites |
| > 6.0 | Very high anisotropy | |

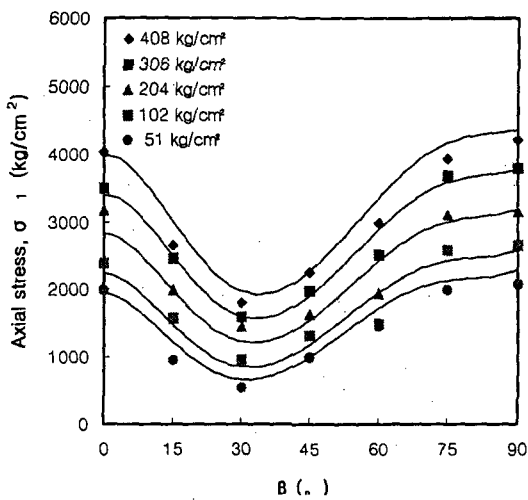


(a) 고유 이방성(층리면)

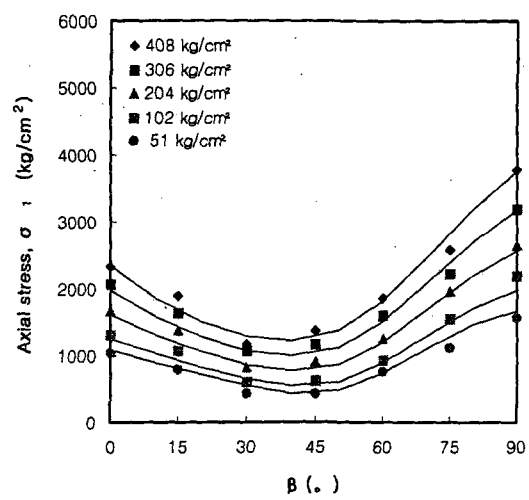


(b) 유도 이방성(절리면)

[그림 17] 이방성 형태에 따른 비등방율



(a) 고유 이방성(층리면)

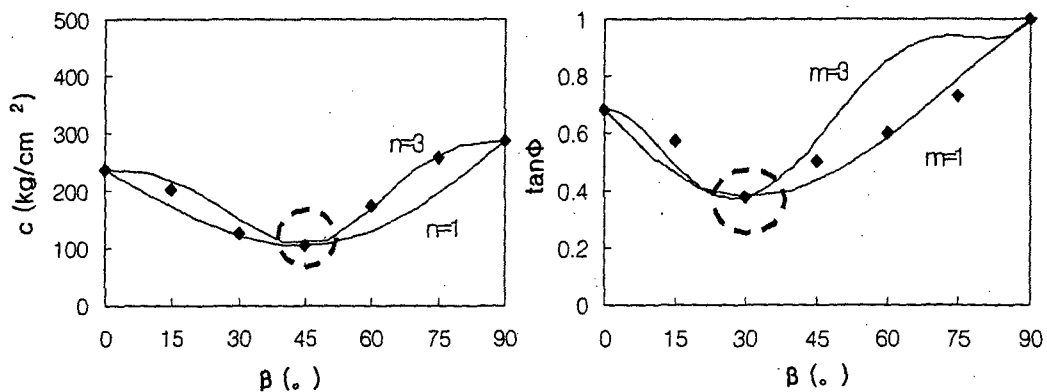


(b) 유도 이방성(절리면)

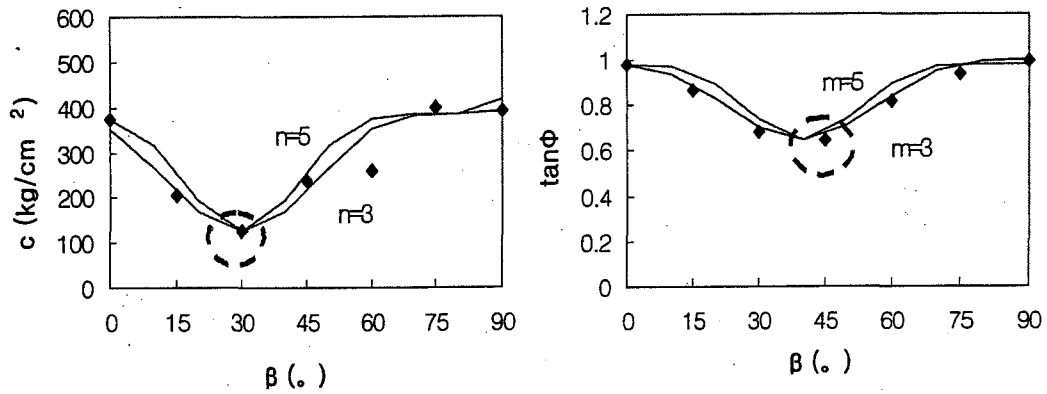
[그림 18] Mclamore & Gray의 이론과 실험치의 비교

유도 비등방과 고유 비등방 시험결과와 가장 유사한 모델식을 적용해본 결과 Mclamore & Gray(1967)의 모델식이 가장 잘 적용되었으며, 그 결과를 [그림 18]에 나타내었다. [그림 18]에서 볼 수 있듯이 분석결과가 유도 비등방에서는 전형적인 U형태의 비등방성이 나타났으며, 고유 비등방에서는 그래프의 오른쪽 부분 즉 $\beta=75^\circ$ 를 전·후로해서 강도값이 크게 상승하는 어깨형태의 비등방성을 보였다. 또한, 유도 비등방과 고유 비등방에 대해 임의의 각도변화에 따라 서로 다른 구속압력하에서 시험한 결과 나타난 c 와 $\tan \phi$ 값의 변화를 [그림 19]와 [그림 20]에 각각 나타내었다. 시험결과에 의해 나타난 비등방의 종류에 따른 c 와 $\tan \phi$ 값을 나타내는 표를 비교해 보면, 강도값이 크게 나타난 고유 비등방 시험에 의한 값들이 더 크게 나타났다. 그러나 c 와 $\tan \phi$ 의 최소값을 나타내는 연약면의 각도(β)가 같은 비등방 종류에서도 각각 다르게 나타나는 것을 볼 수 있었다.

즉, 유도 비등방 시험결과에서 c (점착력)의 최소값을 나타내는 연약면의 각도는 $\beta=45^\circ$ 이며, $\tan \phi$ (마찰계수)의 최소값을 나타내는 각도는 $\beta=30^\circ$ 로 나타났다. 그리고 고유 비등방 시험결과 c (점착력)의 최소값을 나타내는 연약면의 각도는 $\beta=30^\circ$ 이며, $\tan \phi$ (마찰계수)의 최소값을 나타내는 각도는 $\beta=45^\circ$ 로 나타났다. 이러한 결과는 [그림 19]와 [그림 20]에서 명확히 볼 수 있다. 그리고 유도 비등방 시험결과 분석에 있어 식 (1)에 필요한 c , $\tan \phi$ 값들을 나타내기 위해 필요한 지수 즉 "anisotropy type" factor 값 n , m 값들은 보통의 planar type에 속하는 [그림 19]에서 볼 수 있듯이 $n=3$ 과 $m=1$ 의 값으로 나타났다. 그러나 고유 비등방 시험결과 분석에 있어 식 (1)에 필요한 c , $\tan \phi$ 값들을 나타내는데 필요한 "anisotropy type" factor 값인 n , m 은 보통의 linear type에 속하는 5 또는 6이상의 값들로 나타나지 않았으며, [그림 20]에서 볼 수 있듯이 n , m 값들이 모두 planar type에 속하는 지수 3으로 나타났다. 그리고 두 비등방 종류의 "anisotropy type" factor인 지수 n , m 값들을 나타내는 그림에서 볼 수 있듯이 c (점착력)값이 최소인 불연속면의 각도(β)와 $\tan \phi$ 값이 최소인 각도(β)는 서로 다른 값을 나타내었다. 이러한 결과 때문에 [그림 19]와 [그림 20]에서 볼 수 있듯이 예측치를 나타내는 그래프에서 최소값을 나타내는 곡선이 $\beta=30^\circ$ 보다 약간 오른쪽으로 치우치는 경향을 나타낸 것으로 판단된다. 본 연구에서는 고유 비등방 시험결과를 예상하기 위한 "anisotropy type" factor의 값들이 문헌과는 다르게 나타났지만, 시험결과치와는 부합이 잘 되었다.



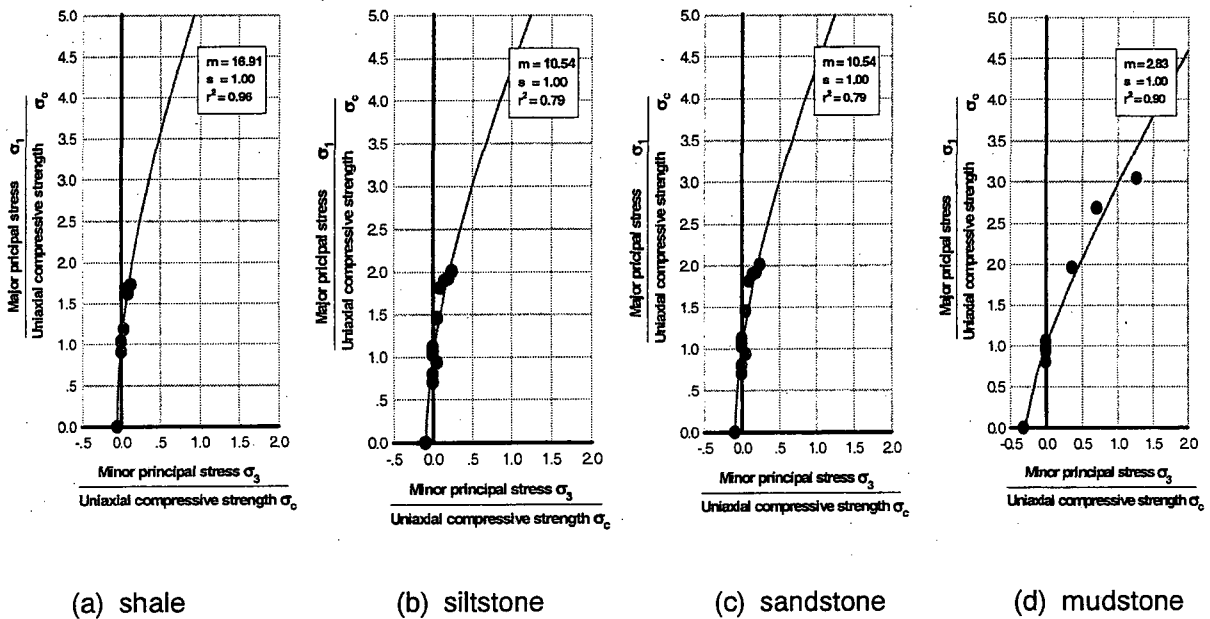
[그림 19] c 와 $\tan \phi$ 값의 변화(유도 비등방)



[그림 20] c와 tan ϕ 값의 변화(고유 비등방)

4.3 풍화암의 공학적 특성

대구·경북 지역의 5 종류의 퇴적암에 대해 삼축압축시험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 대표적인 암석의 시험결과는 [그림 21]에 나타내었으며, 모든 시험 결과는 일축압축강도로 나누어 무차원화된 파괴시의 최대, 최소 주응력으로 나타내었다. 또한 [그림 21]에서 보이듯이 암석의 파괴포락선은 곡선형태를 나타내며, 이는 암석의 강도정수는 연직응력의 크기에 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. [표 8]에서는 무결함 암석에서 삼축압축시험을 통해 얻어진 강도와 암반의 RMR값을 이용하여 Hoek & Brown(1980)의 파괴규준에 적용할 강도정수, m 및 s 를 도출하였다. 본 연구에서 얻어진 대구, 경북지역의 퇴적암에 대한 시험결과는 Hoek & Brown(1980)이 암종별로 나타낸 값과는 다소 차이가 있음을 알 수 있었다.



[그림 21] 각종 암석의 삼축시험 결과

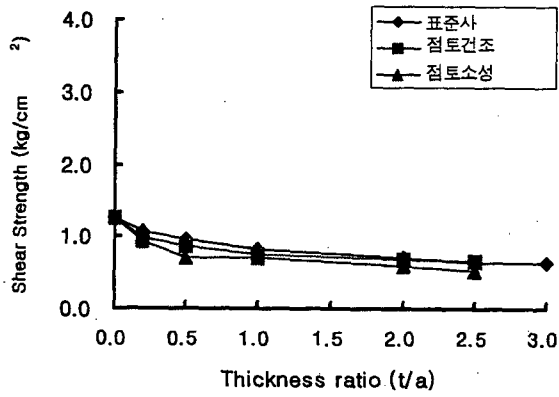
[표 8] 대상 암반등급과 경험식 상수간의 관계

| 경험적 파괴기준 $\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2}$ $r = A \sigma_c \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} - T \right)^B$ 여기서, $T = \frac{1}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4s})$ | 대구종합 경기장 | 낙동강변도 로 대니터널 | 대구 종합 전시장 | 영덕-성내간 절취사면 | 포항 창포동 택지개발 | 점촌-문경간 절취사면 |
|--|---|--|--|---|---|--|
| | 세일(A) | 세일(B) | 사암 | 실트스톤 | 이암 | 석회암 |
| 무결암시료 RMR 100 NGI 500 | m =16.91 s =1.0 A =1.125 B =0.718 T =-0.059 | m =16.83 s =1.0 A =1.121 B =0.717 T =-0.053 | m =8.23 s =1.0 A =0.886 B =0.693 T =-0.110 | m =10.54 s =1.0 A =0.956 B =0.698 T =-0.094 | m =2.86 s =1.0 A =0.616 B =0.607 T =-0.315 | m =36.27 s =1.0 A =0.420 B =0.300 T =-0.028 |
| 아주우수한 등급의 암반 RMR 85 NGI 100 | m =5.79 s =0.08 A =0.118 B =0.167 T =-0.014 | m =5.76 s =0.082 A =0.136 B =0.189 T =-0.014 | m =2.82 s =0.0821 A =0.133 B =0.152 T =-0.0290 | m =3.61 s =0.082 A =0.178 B =0.219 T =-0.023 | m =0.98 s =0.08 A =0.228 B =0.259 T =-0.078 | m =12.42 s =0.082 A =0.173 B =0.254 T =-0.007 |
| 우수한 등급의 암반 RMR 65 NGI 10 | m =1.39 s =0.003 A =0.034 B =0.150 T =-0.0021 | m =1.39 s =0.003 A =0.043 B =0.176 T =-0.0021 | m =0.68 s =0.003 A =0.037 B =0.131 T =-0.0043 | m =0.87 s =0.003 A =0.061 B =0.203 T =-0.0034 | m =0.24 s =0.003 A =0.077 B =0.225 T =-0.012 | m =2.98 s =0.003 A =0.070 B =0.249 T =-0.001 |
| 양호한 등급의 암반 RMR 44 NGI 1.0 | m =0.31 s =0.00009 A =0.0132 B =0.1648 T =-0.0003 | m =0.31 s =0.00009 A =0.0176 B =0.1906 T =-0.0003 | m =0.15 s =0.00009 A =0.0131 B =0.1471 T =-0.0006 | m =0.19 s =0.00009 A =0.025 B =0.2185 T =-0.0005 | m =0.05 s =0.00009 A =0.0307 B =0.2396 T =-0.0016 | m =0.66 s =0.0001 A =0.3275 B =0.2640 T =-0.0001 |
| 불량한 등급의 암반 RMR 23 NGI 0.1 | m =0.07 s =0.000003 A =0.0061 B =0.1879 T =-4E-05 | m =0.069 s =0.000003 A =0.0082 B =0.2127 T =-4E-05 | m =0.034 s =0.000003 A =0.0057 B =0.1714 T =-8E-05 | m =0.43 s =0.000003 A =0.0308 B =0.3468 T =-6E-06 | m =0.012 s =0.000003 A =0.0134 B =0.2631 T =-0.0002 | m =0.148 s =0.000003 A =0.0159 B =0.2803 T =-2E-05 |
| 아주불량한 등급의 암반 RMR 3 NGI 0.01 | m =0.017 s =0 A =0.0030 B =0.2095 T =-6E-06 | m =0.016 s =0 A =0.0040 B =0.2319 T =-6E-06 | m =0.008 s =0 A =0.0027 B =0.1951 T =-E-05 | m =0.01 s =0 A =0.0034 B =0.2169 T =-9E-06 | m =0.003 s =0 A =0.0061 B =0.2822 T =-3E-05 | m =0.036 s =0 A =0.0078 B =0.2932 T =-3E-06 |

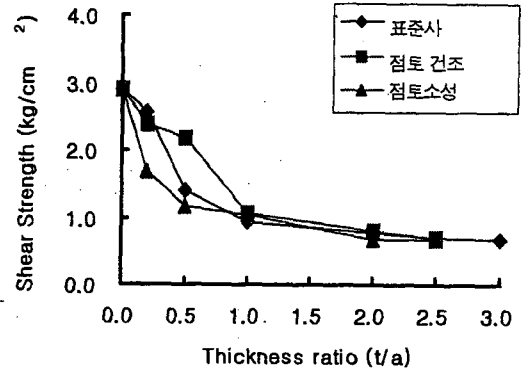
4.4 충전된 절리면의 전단강도

충전된 절리면은 충전재 두께 증가에 따라 강도가 감소하여 충전재의 강도까지 감소하는 경향이 있다. 그러나 본 연구결과 이러한 경향은 충전재 종류와 절리면의 거칠기에 따라 그 경향이 다소 차이가 있었다. [그림 22]는 충전재 두께가 증가함에 따른 전단강도의 감소경향을 절리 경사각과 충전재 종류에 따라 나타낸 것이다. 여기서 알 수 있듯이 충전재의 강도가 약할수록 작은 두께비에서 강도감소가 더욱 크며, 거칠기가 클수록 전단강도의 감소가 큰 것으로 나타났다. 이러한 특성은 [그림 23]의 강도 감소율 특성 곡선에서 잘 나타난다. [그림 23]은 충전된 절리면의 전단특성 중에서 충전재 두께증가에 따른 전단강도 감소특성을 강도감소율로 나타낸 것이다. 여기서 충전재 두께비에 따른 강도 감소율은 충전되지 않은 절리면의 전단강도에 대한 충전된 절리면의 강도비를 백분율로 나타낸 것이다.

[그림 24]는 표준사를 충전재로 사용하였을 때, 충전재 두께에 따른 응력비의 변화를 연직 응력과 절리 경사각에 대해서 나타낸 것인데 연직응력이 클수록 응력비는 다소 낮게 나타났다. 그러나 연직응력이나 절리 경사각에 상관없이 거의 하나의 값으로 수렴하는 특성을 알 수 있다. 여기서 최대 전단강도는 깨끗한 절리면의 응력비이고 최소값은 충전재의 응력비이다.

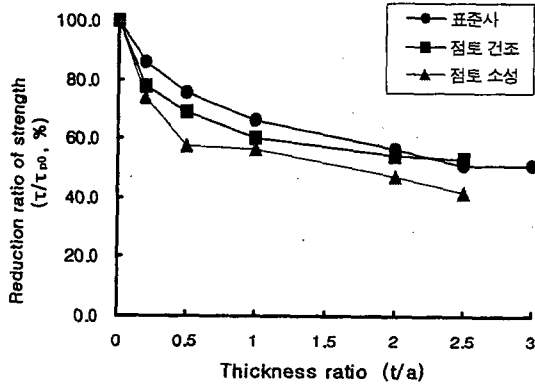


(a) $i = 9^\circ$

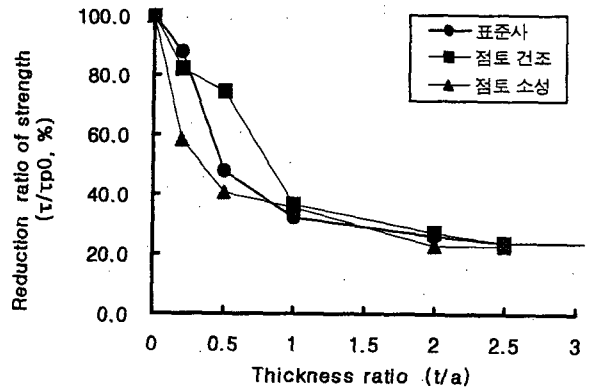


(b) $i = 30^\circ$

[그림 22] 충전재 종류에 따른 전단강도의 변화

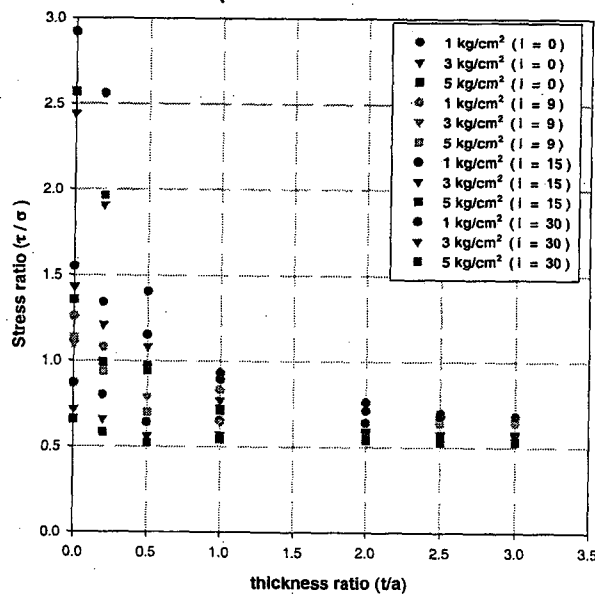


(a) $i = 9^\circ$



(b) $i = 30^\circ$

[그림 23] 충전재 두께에 따른 강도감소를



[그림 24] 충전재 두께비에 따른 응력비의 관계

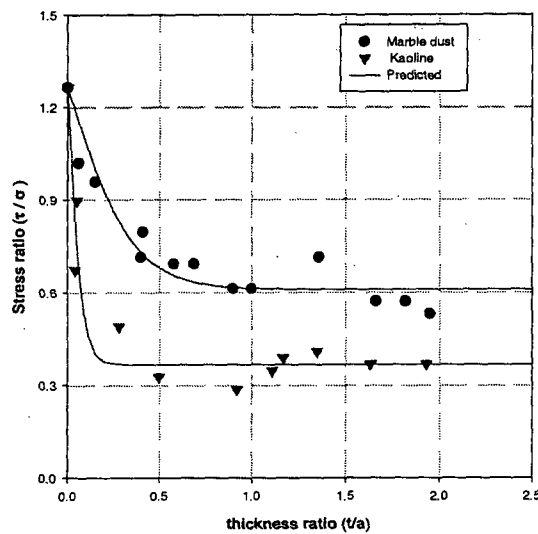
그리고 감소하는 경향은 절리경사각에 따라 거의 유사하며, 연직응력과 충전재의 종류에 관계없이 거의 일정한 특성을 나타내고 있다. 이를 묘사하기 위하여 hyperbolic tangent 함수를 이용하여 전단강도 특성을 식 (10)과 같이 묘사하였다.

$$\mu = \mu_{\max} - (\mu_{\max} - \mu_{\min}) \tanh \left(m \frac{t}{a} \right) \quad (10)$$

- 여기서 μ : 응력비(= τ/σ)
 μ_{\max} : 충전되지 않은 절리면의 응력비
 μ_{\min} : 충전재의 응력비
 t/a : 충전재 두께와 asperity 높이의 비
 m : 상수(degree)

여기서 m 값은 충전된 절리면의 강도감소율을 결정하는 값으로써 충전재 종류와 절리 경사각에 따라 변화하는 값이다. 그리고 hyperbolic tangent 함수의 특성은 m 값이 클수록 최소값에 도달하는 곡선의 기울기가 커지는 특성을 가지고 있다.

본 연구에서 개발된 충전된 절리면의 전단강도 모형을 실제 절리면에서 그 적용성을 검토하기 위하여 Papaligans(1990)가 자연 절리면에서 실험을 통해 얻은 자료에 대해서 digitizer를 이용하여 그 값을 읽고 분석에 사용하였다. Papaligans(1990)는 사암에 대하여 고무를 녹여서 만든 거칠기 형상에 대하여 mold를 제작하고 시멘트를 이용하여 만든 유사암석에 대하여 충전재의 종류를 대리석 가루와 kaoline을 이용하여 충전재 두께를 변화시켜가면서 실험을 수행하였다. 이때 절리의 거칠기는 ISRM(1981)에서 추천한 profile gauge를 이용하여 절리 거칠기와 평균 amplitude를 측정하였다. 측정된 거칠기는 JRC = 8, 평균 amplitude는 6.0mm이었다. 본 연구에서 개발한 모델식을 이용하여 Papaligans(1990)의 실험결과와 비교한 특성을 [그림 25]에 나타내었으며, 제안된 모델식의 예측치는 실측치에 근접함을 알 수 있었다.



[그림 25] 개발된 모델식의 적용

5. 결 론

대구, 경북 지역에 분포하는 퇴적암은 퇴적환경에 의해 형성된 강도 이방성, 풍화에 의한 암반강도의 변화, 층리면 내 충전물의 발생에 따른 강도변화 등의 문제점이 있으며, 이들의 특성을 규명하기 위하여 일련의 시험과 비교·분석을 통해 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 퇴적암에 대하여 흡수율, 단위중량과 같은 성질을 파악하고 일축압축시험, 점재하시험 등을 이용하여 암종별로 그 특성을 나타내었다.
2. 층리와 같이 고유 이방성을 가진 세일은 U형태의 이방성을 나타내며, 비등방율이 2.3~3.7 정도로 중간정도의 비등방성을 나타내었다. 그리고 이방성에 따른 강도 정수는 층리면이 고유 이방성 시험 결과에 의한 강도정수 값이 다소 큰 것으로 나타났다.
3. 퇴적암의 무결함 암에서 삼축압축시험을 통해 나타난 결과를 이용하여 RMR에 따른 퇴적암의 강도정수를 산정하였다. 그리고 그 값은 Hoek & Brown(1980)이 암종별로 추천한 값과는 다소 차이가 있음을 알 수 있었다.
4. 충전된 절리면은 충전재 두께 증가에 따라 강도의 감소는 충전재 종류와 절리면의 거칠기에 따라 그 경향이 다소 차이가 있었다. 그리고 실험결과를 토대로 충전된 절리면의 전단 강도 모형을 개발하였으며, 새로 개발된 모델식은 다른 연구자들의 시험결과와도 잘 일치하였다.

참고문헌

1. 김 용준 (2001), "경계조건을 고려한 충전 절리면의 전단특성", 영남대학교 대학원 토목공학과, 박사학위논문.
2. 김 희동 (1999), "비등방 암석의 파괴기준에 관한 연구", 영남대학교 대학원 토목공학과, 석사학위논문.
3. 이영휘, 오세봉, 임광욱, 허진석 (1998), "삼축압축시험에 의한 암석의 전단강도특성", *대한 토목학회* 1998년도 학술발표회 논문집(II), pp. 121~124.
4. Barton N., Lien, R. andLunde. (1974), "Engineering classification of rock masses for the sign of tunnel support", *Rock Mech.*, vol 6, No. 4, pp.189~236.
5. Bieniawski, Z. T. (1984), "Rock mechanics design in mining and tunneling", A. A. Balkema Rotterdam Boston, pp. 55~136.
6. Hoek, E. & Bray John. (1981), "Rock Slope Engineering", The Institution of Mining and Metallurgy", London.
7. Hoek, E. & Brown, E. T. (1980), "Empirical strength criterion for rock masses", *J. Geotech. Eng. Div. ASCE* 106(GT9), pp. 1023~1035.
8. Jaeger, J. C.(1960), "Shear failure of anisotropic rock", *Geol. Mag.* Vol. 97, pp 65~72.
9. Nieto, A. S. (1974) "Experimental study of the shear-strain behavior of clay seams in rock masses, Ph.D. Thesis, Univ. Illinois.
10. Papaliangas T.(1990), "Shear strength of modelled filled rock joints", *Rock joints*, Barton & Stephansson, pp. 275~282.
11. Ramamurthy T., (1993), "Strength and Modulus Responses of Anisotropic Rocks", *Comprehensive Rock Engineering* vol. I - 1, Pergamon Press, pp. 313~329.