

암석의 파괴규준에 따른 제주도 현무암의 강도 산정

남정만¹ · 윤종만² · 송영석^{3*}

¹제주대학교 해양과학부, ²안산공과대학 건설계열, ³한국지질자원연구원 지구환경연구본부

Estimation to the Strength of Basalt in Jeju Island according to Rock Failure Criterions

Jung-Man Nam¹, Jung-Mann Yun², and Young-Suk Song^{3*}

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Cheju National University

²Department of Civil Engineering, Ansan College of Technology

³Geologic Environment Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

본 연구에서는 제주도 현무암에 대한 삼축압축시험을 실시하고 암석의 Mohr-Coulomb 파괴규준과 Hoek-Brown 파괴규준을 적용하여 강도정수를 산정하였다. 그리고 각각의 파괴규준에 의해 산정된 강도정수를 비교검토하여 각각의 파괴규준에 대한 특성을 고찰하였다. 암석의 Mohr-Coulomb 파괴규준을 적용한 결과 표선리 현무암의 경우 점착력은 5.35 MPa, 내부마찰각은 50.25°이고, 조면암질 현무암의 경우 점착력은 16.99 MPa, 내부마찰각은 60.66°이며, 스크리아의 경우 점착력은 2.33 MPa, 내부마찰각은 37.05°이다. 암석의 Hoek-Brown의 파괴규준에 대한 회귀분석결과를 토대로 암석의 점착력과 내부마찰각을 선정할 수 있다. 표선리 현무암의 경우 점착력은 4.77 MPa, 내부마찰각은 52.47°이고, 조면암질 현무암의 경우 점착력은 14.69 MPa, 내부마찰각은 60.70°이며, 스크리아의 경우 점착력은 2.22 MPa, 내부마찰각은 47.60°이다. 이상의 결과를 토대로 Mohr-Coulomb의 파괴포락선과 Hoek-Brown의 파괴규준으로부터 추정된 파괴포락선을 비교한 결과 Hoek-Brown의 파괴규준은 Mohr-Coulomb의 파괴규준보다 점착력은 대체로 낮게 평가되는 반면, 내부마찰각은 크게 평가되고 있다.

주요어 : 현무암, 삼축압축시험, Mohr-Coulomb 파괴규준, Hoek-Brown 파괴규준, 점착력, 내부마찰각

In this study, a series of triaxial tests on Jeju basalt were carried out and then rock strength parameters were estimated by the Mohr-Coulomb failure criterion and the Hoek-Brown failure criterion using the test results. The characteristics of both failure criterions were investigated through comparing the estimated rock strength parameters. As the result of the Mohr-Coulomb criterion, the cohesions and the internal friction angles are determined as 5.35 MPa and 50.25° of Pyoseonri basalt, 16.99 MPa and 60.66° of Trachy-basalt, and 2.33 MPa and 37.05° of Scoria, respectively. The cohesions and internal friction angles were estimated by the Hoek-Brown failure criterion in the basis of the results of regression analysis. The cohesions and the internal friction angles are determined as 4.77 MPa and 52.47° of Pyoseonri basalt, 14.69 MPa and 60.70° of Trachy-basalt, and 2.22 MPa and 47.60° of Scoria, respectively. As the result of comparison between the Mohr-Coulomb failure criterion and the failure envelope predicted by the Hoek-Brown criterion, the cohesion estimated by the Hoek-Brown criterion is usually lower than that obtained from the Mohr-Coulomb criterion, whereas the friction angle estimated by the Hoek-Brown criterion is higher than that obtained from the Mohr-Coulomb criterion.

Key words : Basalt, Triaxial compression test, Mohr-Coulomb failure criterion, Hoek-Brown failure criterion, Cohesion, Internal friction angle

*Corresponding author: yssong@kigam.re.kr

서 론

최근 제주도는 제주특별자치도로 출범함으로써 세계 속의 국제자유도시로 거듭나기 위하여 대규모 토목공사가 진행중이거나 진행될 예정이다. 이와 같이 대규모 토목공사의 설계시 대상지반에 대한 공학적 특성을 조사하여 적용하는 것은 매우 중요한 일이다.

제주도는 현무암과 같은 특수한 지질학적 조건을 가지고 있으므로 토목 및 건축공사 수행시 수많은 시행착오를 겪고 있다. 즉, 제주도에 주로 분포하고 있는 화산암인 현무암에 대한 역학적 특성에 대한 다양한 조사결과가 요구되고 있다. 최근 들어 제주도 현무암의 공학적 특성에 대한 연구가 보고된 바 있으나(엄관용, 2002; 남정만 외, 2008), 제주도 현무암의 강도특성과 파괴기준에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

암석의 강도특성, 파괴기준 등과 같은 역학적 거동을 조사하기 위하여 다양한 실험방법이 활용되고 있다. 암석의 역학적 거동을 조사하기 위해서는 암석의 응력-변형률 곡선을 반드시 도시하여야 한다. 암석에 하중을 가하게 되면 변형이 발생되고 이는 응력-변형률 곡선으로 표시할 수 있다. 그리고 응력-변형률 곡선을 이용하여 암석의 전단강도, 탄성계수 등을 구하게 된다. 암석의 강도는 일반적으로 압축강도, 인장강도, 휨강도 등으로 구분할 수 있으며, 압축강도의 경우 시험방법에 따라 일축 압축시험, 삼축압축시험 등으로 분류할 수 있다. 특히, 삼축압축시험은 반무한체 지반내의 한 요소는 축대칭상태에 있어 수평방향응력이 연직축을 중심으로 어느 방향으로나 동일하다는 점을 감안하여 실내에서 재현시킨 시험이다. 이 시험에서는 원통형 공시체를 이용한다.

따라서 본 연구에서는 제주도 현무암에 대한 삼축압축시험을 실시하고 이에 대한 역학적 거동을 분석하고자 한다. 특히, 기존에 제안된 암석의 파괴기준을 적용하여 압축강도정수를 산정하고 이를 서로 비교하고자 한다. 이를 위하여 서귀포시 성산읍 일대에 대한 시추를 실시하여 표선리 현무암, 조면암질 현무암 및 스크리아 시료를 채취하였다. 이와 같이 채취된 시료를 대상으로 삼축압축시험을 실시하고, 시험결과를 토대로 암석의 파괴기준을 적용하여 표선리 현무암, 조면암질 현무암 및 스크리아의 강도정수를 산정하고 이를 비교분석하였다.

대상지역 및 지질

Fig. 1은 본 연구에서 이용된 제주도 현무암의 시료채취

위치를 나타낸 것이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 시료채취지역은 제주특별자치도 서귀포시 성산읍 일원에 위치하고 있으며 해발표고는 90.21 m이다. 해안과의 직선 거리는 약 3.4 km 정도이며, 북동쪽에 독자봉(El. 159.3 m)과 통오름이 말발굽 형태로 발달되어 있다. 특히 연구지역 바로 북쪽에 미천굴이 용암동굴 형태로 분포하고 있다.

Fig. 2는 시료채취지역에 대한 지질도를 나타낸 것이다. 시료채취지역의 지질은 밑에서부터 반상휘석현무암과 장석현무암류가 분포하고 있으며, 이들 상부에 침상장석감람석현무암이 대부분 피복되어있는 것으로 나타나고 있다.

시료채취지역의 대부분을 피복하고 있는 침상장석감람석현무암(Acicular Feldspar Olivine Basalt ; FOB)은 일명 표선리 현무암으로 불리워지며 회색 내지 암회색의 다공질 또는 치밀질의 평탄한 대지상의 용암대지를 형성하고 있다. 이 암석은 감람석을 반정으로 함유하고 침상의 장석이 특징적이며 제주도 동부 및 서부지역에 광범위하게 분포하나 남부지역과 북부지역 그리고 중산간 이상의 지역에서는 후기에 분출한 암석에 피복되어 지표노출이 확인되지 않는다. 또한 본 암은 분출 및 고화될 시 점성이 낮아 파호이호이 용암류의 산상을 보이며 이들 용암류의 유로를 따라 다수의 용암동굴이 형성되었다.

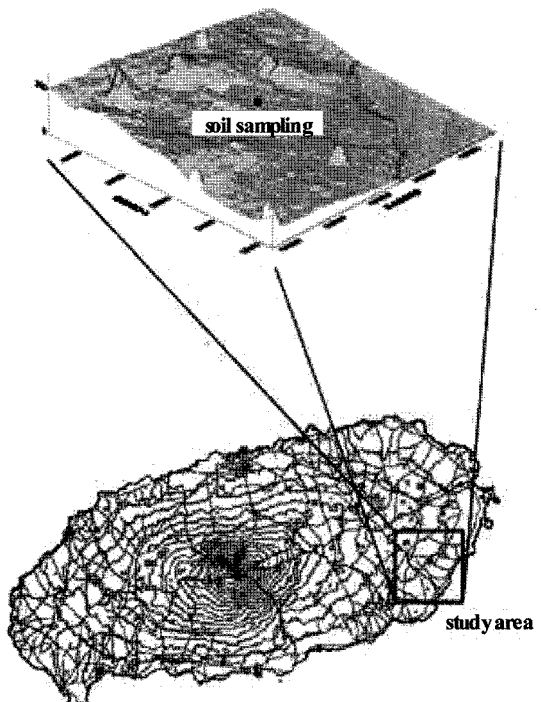


Fig. 1. Location map of the study area (Nam et al., 2008).

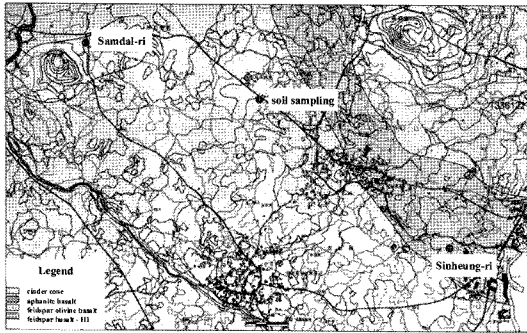


Fig. 2. Geologic map of the study area(Nam et al., 2008).

침상장석감람석현무암은 방사성동위원소(K/Ar) 연대측정 결과, 서귀포층의 퇴적시기부터 퇴적이 완료된 이후까지의 시기에 걸쳐 나타나며 대부분 서귀포층 퇴적 이후에 분출된 것으로 해석하고 있다.

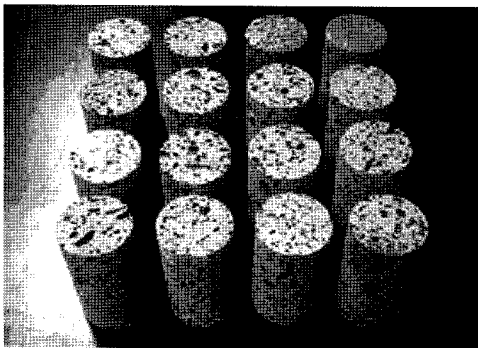
시료채취지점에는 지표에서부터 GL(-)24m까지 치밀한 암회색의 침상장석감람석현무암이 분포하고 있다.

GL(-)24~81 m 구간은 매우 치밀한 조면암질 현무암이 분포하고 있으며 홍갈색의 스킨리층이 2~3매 협재되어 있다. GL(-)81~91 m 구간은 홍갈색의 다공질 화산쇄설층이 분포하는데 화산쇄설물 중 소립자를 많이 포함한 채용암이 굳은 상태이다. GL(-)91~157 m 구간은 다공질의 침상장석감람석현무암이 분포하는데 하부로 갈수록 치밀해지는 경향을 보인다.

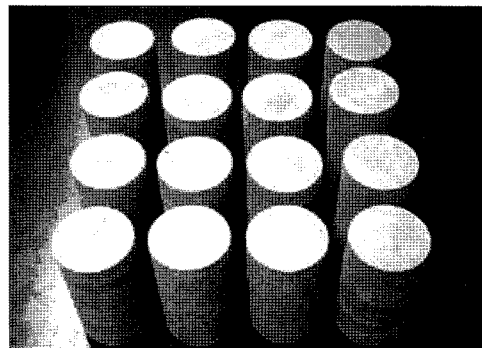
시료채취 및 시험방법

시료채취 및 공시체 제작

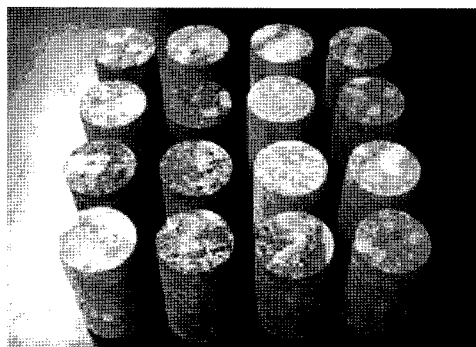
본 연구에서는 방향성을 잃지 않고 교란 및 훼손을 최소로 한 시료를 얻고자 하였으며, 오차를 최소로 하기 위하여 시료채취깊이를 표시하여 동일시험에는 1m 내의 동일깊이의 시료를 사용하였다. 전술한 바와 같이 시료채취지역에는 표선리 현무암, 조면암질 현무암, 비현정질 현무암, 감람석 현무암, 서귀포층, U층 등이 분포하고 있다.



(a) Pvoeonri basalt



(b) Trachy-basalt



(c) Scoria

Fig. 3. Specimens according to rock type.

채취된 암석시료는 diamond thin-wall bit의 탈착이 가능한 코어링 기계를 이용하여 BX크기로 제작하였다. 본 연구에 사용된 암석시편으로서 공시체의 직경은 43 mm, 높이는 86 mm로 제작하였다. Fig. 3은 표선리 현무암, 조면암질 현무암 및 스크리아에 대한 공시체를 각각 나타낸 것이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 표선리 현무암의 경우 다공질이며, 조면암질 현무암의 경우 조직이 치밀함을 알 수 있다.

삼축압축시험

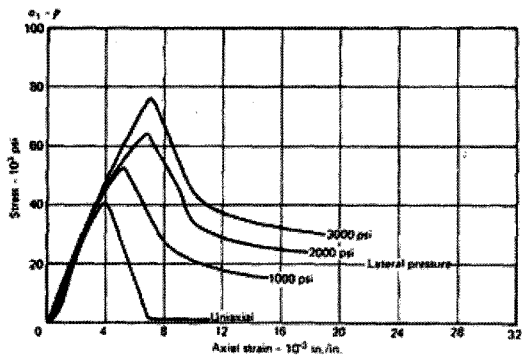
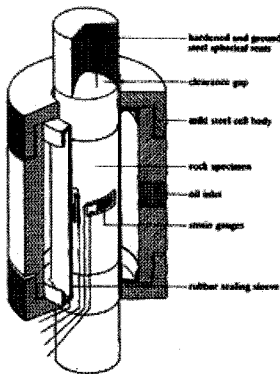
본 연구에서는 표선리 현무암, 조면암질 현무암 및 스크리아에 대한 삼축압축시험을 실시하여 역학적 거동을 분석하고자 한다. 암반에 설치되는 각종 구조물의 안정성을 평가하기 위해서는 암반의 역학적 특성을 파악하는 것이 필수적이다. 가장 중요한 것은 실제 지반에서의 거동과 유사하게 암반 내 응력-변형률 상태를 모사하여 평가하는 것이다. 높은 응력조건 하에 있는 암석의 거동이나 그에 따른 지압현상 또는 단층이나 습곡 등의 지질구조에 관계되는 각종 현상을 해명하기 위해서는 삼축압축시험이 가장 효과적인 것으로 판단된다. 삼축압축시험은 반무한체 지반내의 한 요소는 축대칭상태에 있어 수평방향응력이 연직축을 중심으로 어느 방향으로나 동일하다는 점을 감안하여 실내에서 재현시킨 시험이다. 즉, 삼축상태의 응력을 고려하되 중간주응력과 최소주응력을 동일하게 하여 실시하는 것이다. 일반적으로 암반 내에는 삼축의 주응력이 모두 압축응력인 것이 보통이다. 삼축압축시험은 이와 같은 응력상태를 인공적으로 조절하면서 그때의 암석 거동을 관측할 수 있다.

특히 삼축압축시험은 보다 정확한 지반정수를 산정할

경우 실시된다. 삼축압축시험에서는 먼저 정수압을 구속압(또는 봉압, confining pressure)으로서 원통형의 암석 공시체 표면에 작용시키고, 그 이후에 암석의 파괴가 일어날 때까지 공시체에 축방향 하중을 가함으로서 암석의 강도를 측정하는 것이다. 각각 다른 구속압 상태에서 일련의 시험을 실시하고, 시험결과에 대하여 각종 파괴기준을 적용함으로써 점착력 및 내부마찰각과 같은 강도 정수를 구할 수 있다.

Fig. 4(a)는 삼축셀의 단면도(Hoek and Franklin, 1968)를 나타낸 것이며, Fig. 4(b)는 노라이트(norite)에 대한 삼축압축시험결과로서 구속압에 따른 응력-변형률의 곡선을 나타낸 것이다(Bieniawski, 1972). 그림에서 보는 바와 같이 암석은 일반적으로 취성재료이므로 축압이 없는 상태 즉, 일축압축상태에서는 파괴가 발생된 직후 급격히 응력이 감소하게 된다. 그러나 축압이 존재하는 삼축압축 상태에서는 축압이 점차 증가함에 따라 파괴발생이후의 응력저하 정도가 점차 줄어들게 된다. 따라서 축압이 증가함에 따라 잔류응력이 증가하며 암석은 취성에서 연성으로 전이해 가는 특성을 보이게 된다.

삼축압축시험으로 얻어지는 축압조건과 이에 대한 삼축압축시험 결과는 일축압축강도 및 인장강도 측정결과 함께 암석의 중요한 역학적 특성인 점착력과 내부마찰각을 구하는데 이용된다. Fig. 5는 암석을 이용한 일축압축시험, 삼축압축시험, 인장시험 등을 실시하고 이들 결과를 이용하여 Mohr의 응력원을 작도한 것이다. Mohr의 응력원을 이용하여 파괴포락선을 결정하면 법선응력이 0인 상태 즉, 전단응력축과 파괴포락선의 교점이 점착력이 되고 파괴포락선의 기울기가 내부마찰각이 된다. 실제 암석의 파괴포락선은 Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 포



(a) Cut-away view of the tri-axial cell (b) Stress difference versus axial strain curves

Fig. 4. Tri-axial cell and stress-strain curve.

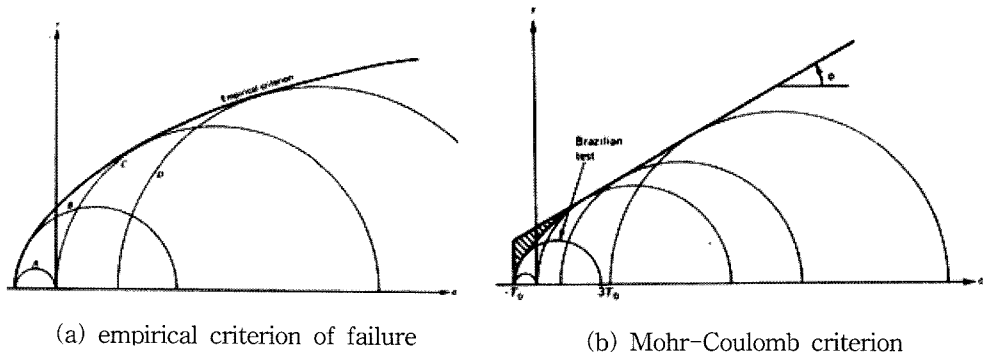


Fig. 5. Mohr's stress circle and failure line(Goodman, 1989).

물선의 형태이지만, 일반적으로 Fig. 5(b)에서 보는 바와 같이 직선의 형태로 가정한다. Fig. 5(b)에서의 직선형태 파괴포락선을 통상 Mohr-Coulomb의 파괴기준이라고 한다. Mohr-Coulomb의 파괴기준에 의한 직선식은 실제적인 면에서 다루기가 쉽고 적용성이 높아서 통상적으로 많이 이용된다. 이러한 경우에는 Fig. 5(b)에서 보는 바와 같이

점착력이 약간 높게 평가되는 경향이 있다. 따라서 인장 강도 및 일축압축강도로 표시되는 상대적으로 낮은 Mohr 응력원 범위에서는 곡선식의 형태로 표현하고, 그 이후에서는 직선식으로 표현하는 복합적 파괴포락선이 이용되기도 한다.

공시체의 직경은 43 mm, 높이는 86 mm로서 BX 크기를 사용하였으며, 직경에 대한 높이의 비는 2.0으로 하였다. 삼축압축시험시 측방변형은 측정하지 않았으며, 삼축셀 내의 봉압력은 각각 5, 10, 20 MPa를 사용하였고, 기타 조건은 ISRM 기준에 준하였다. Fig. 6 및 Fig. 7은 본 연구에서 이용된 삼축압축시험 장치를 나타낸 것이다.

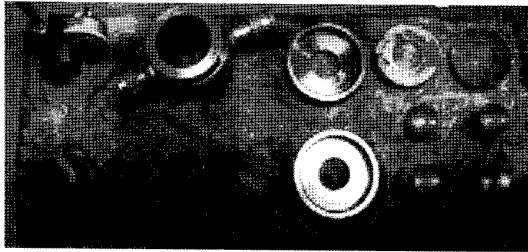


Fig. 6. Apparatus of triaxial compression test.

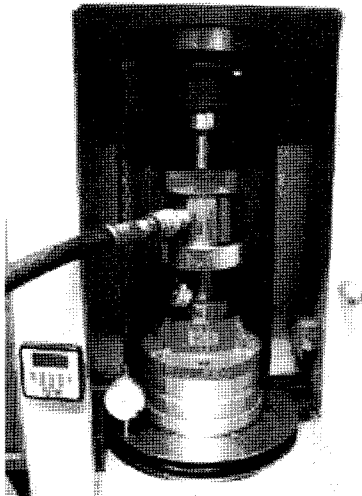


Fig. 7. Photograph of Triaxial compression test.

시험결과 및 고찰

응력-변형률 곡선

제주도 현무암에 대한 강도정수를 산정하기 위하여 삼축압축시험을 실시하였다. 삼축압축시험에서는 암석시료에 먼저 구속압을 가한 후 측방향으로 압축력을 가하여 파괴가 발생할 때까지 하중과 변형량을 측정하였다. 이때 구속압은 5 MPa, 10 MPa 및 20 MPa를 가하였다.

Fig. 8은 제주도 현무암에 대한 삼축압축시험에 대한 결과를 나타낸 것으로 횡축에는 축변형량을 도시하고 종축에는 축차응력을 도시하였다. Fig. 8(a)은 표선리 현무암에 대한 삼축압축시험결과를 나타낸 것으로 하중이 증가함에 따라 변형량이 증가하다가 감소하는 것으로 나타났다. 최대축차응력은 구속압이 5 MPa일 경우 37.53 MPa, 구속압이 10 MPa일 경우 91.72 MPa 그리고 구속압이 20 MPa일 경우 162.65 MPa인 것으로 나타났다. Fig. 8(b)는 조면암질 현무암에 대한 삼축압축시험결과를 나타낸 것으로 역시 하중이 증가함에 따라 변형량이 증가하다가 감소하는 것으로 나타났다. 최대축차응력은 구속압이 5 MPa일 경우 168.64 MPa,

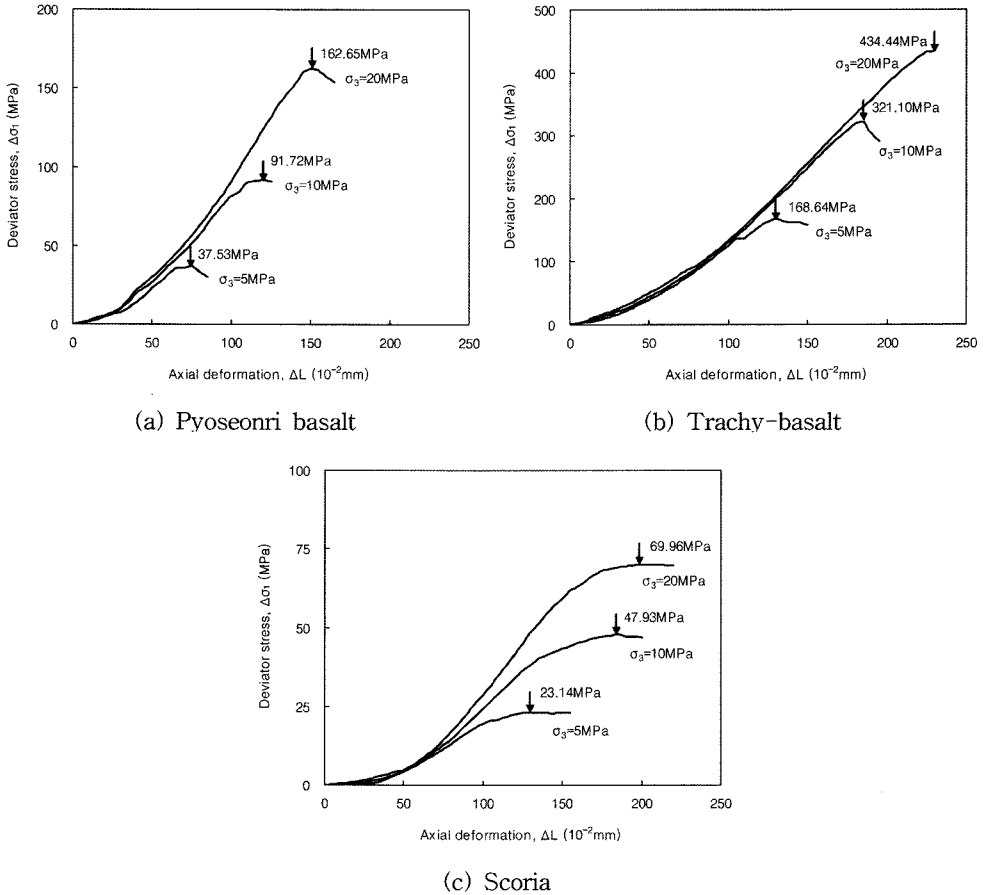


Fig. 8. Stress-strain behaviors according to rock type.

구속압이 10 MPa일 경우 321.10 MPa 그리고 구속압이 20 MPa일 경우 434.44 MPa인 것으로 나타났다. Fig. 8(c)는 스크리아에 대한 삼축압축시험결과를 나타낸 것으로 하중이 증가함에 따라 변형량이 증가하다가 감소하는 것으로 나타났다. 최대축차응력은 구속압이 5 MPa일 경우 23.14 MPa, 구속압이 10 MPa일 경우 47.93 MPa 그리고 구속압이 20 MPa일 경우 69.96 MPa인 것으로 나타났다.

한편 압열인장강도시험(Brazilian test)을 실시하여 인장응력을 측정하였다. 측정결과 인장응력은 표선리 현무암의 경우 -2.78 MPa이고, 조면암질현무암의 경우 -7.28 MPa이며, 스크리아의 경우 -1.33 MPa인 것으로 나타났다.

따라서 삼축압축시험에 의한 최대축차응력 및 압열인장시험에 의한 최대인장응력은 조면암질 현무암이 가장 크고, 그 다음으로 표선리 현무암이 크며, 스크리아가 가장 작은 것으로 나타났다.

Mohr-Coulomb의 파괴기준

Fig. 9는 암석에서의 Mohr-Coulomb 파괴기준을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 파괴포락선은 전단응력과 수직응력의 관계를 나타내는 Mohr-Coulomb의 파괴포락선과 인장강도를 표시하는 최대인장기준선의 두 선으로 구성되어있다. 이 가운데 Mohr-Coulomb의 파괴포락선은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_p = S_i + \sigma \tan \phi \tag{1}$$

여기서, τ_p = 최대전단응력 혹은 전단강도
 ϕ = 내부마찰각(산류강도의 경우 로 표시)
 S_i = 전단강도 절편

한편 최대인장기준은 일축인장강도를 의미하며 어떤 경우의 시험에서도 최소주응력 가 이 값보다 적을 수 없다. 실제 파괴포락선은 Mohr-Coulomb의 파괴포락선 및

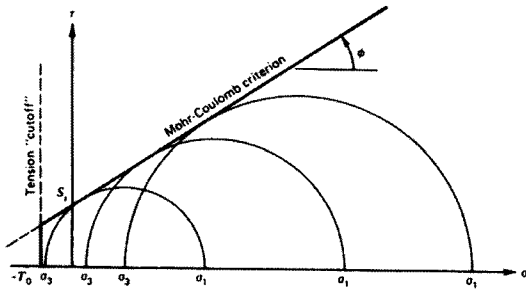


Fig. 9. Mohr-Coulomb failure criterion with a tension cutoff.

최대인장주응력보다 아래에 존재하게 된다. 따라서 실제로 적용할 경우에는 s 를 감소시킬 필요가 있다.

Fig. 10은 제주도 현무암에 대한 삼축압축시험에 대한 결과를 토대로 Mohr의 응력원을 작도하고, Mohr-Coulomb의 파괴포락선을 도시한 것이다. Mohr-Coulomb의 파괴포락선을 이용하여 점착력과 내부마찰력을 산정하였다. Fig. 10(a)는 표선리 현무암에 대한 Mohr-Coulomb의 파괴포락선을 도시한 것으로 점착력은 5.35 MPa이고, 내부마찰각은 50.25°인 것으로 나타났다. Fig. 10(b)는 조면암질 현무암에 대한 Mohr-Coulomb의 파괴포락선을 도시한 것으로 점착력은 16.99 MPa이고, 내부마찰각은 60.66°인 것으로 나타났다. 그리고 Fig. 10(c)는 스크리아에 대한 Mohr-Coulomb의 파괴포락선을 도시한 것으로 점착력은 2.33 MPa이고, 내부마찰각은 37.05°인 것으로 나타났다.

Hoek-Brown의 파괴규준

Hoek and Brown(1980, 1988)은 절리군을 포함하는 암반의 경험적 파괴규준에 대한 평가식을 제안한 바 있다. Hoek-Brown의 파괴규준(1980, 1988)은 Griffith(1921, 1924)가 제안하고 McClintock and Walsh(1962)가 수정한 이론을 토대로 암석의 거동에 관한 이론적 및 실험적 측면에서의 많은 시행착오를 통해 도출한 경험식이다. 식 (2)는 Hoek-Brown의 파괴규준에서 제안된 암석파괴와 주응력들 사이에 관한 관계식을 나타낸 것이다.

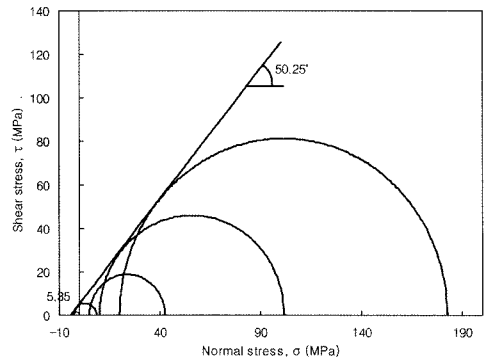
$$\sigma_{1f} = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \tag{2}$$

여기서, σ_{1f} : 파괴시의 최대주응력, : 공시체에 작용하는 최소주응력,
 σ_c : 공시체의 일축압축강도,
 m_b, s, a : 암석의 성질과 응력을 가하기 전 암석의 파쇄정도에 관련된 상수

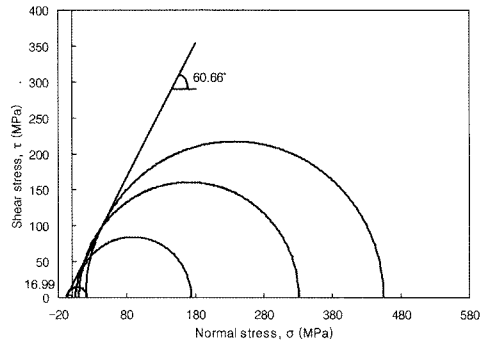
이때, GSI(Geological Strength Index; 지질강도지수) > 25이면

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right)$$

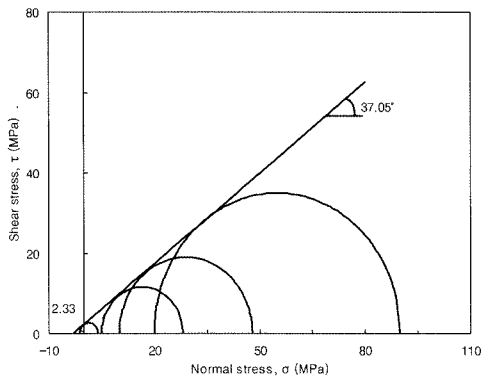
$a = 0.5$ 이 된다.



(a) Pyoseonri basalt

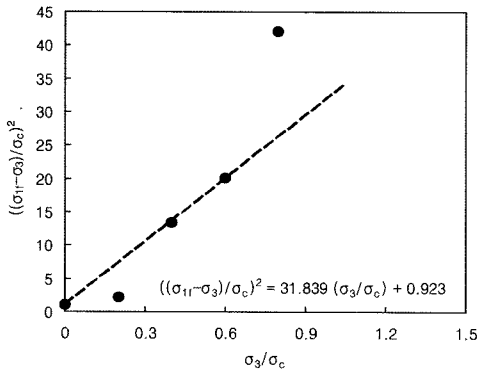


(b) Trachy-basalt

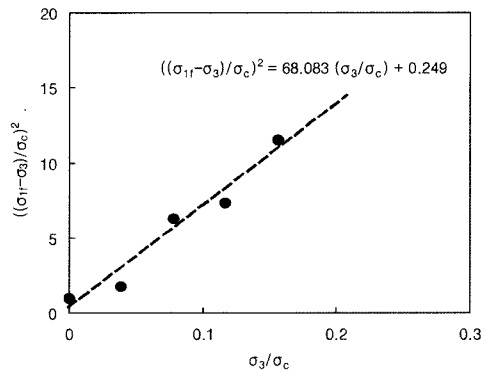


(c) Scoria

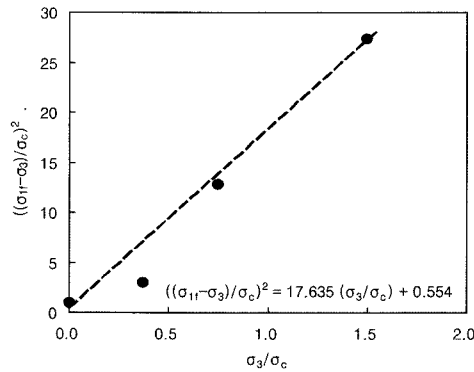
Fig. 10. Mohr-Coulomb failure criterion.



(a) Pyoseonri basalt



(b) Trachy-basalt



(c) Scoria

Fig. 11. Relationship between σ_3/σ_c and $((\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_c)^2$.

Fig. 11은 Hoek-Brown의 파괴포락선을 도시하기 위하여 제주도 현무암에 대한 삼축압축시험결과를 활용한 것이다. 즉, 삼축압축시험결과를 토대로 σ_3/σ_c 와 $((\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_c)^2$ 의 상관관계를 구하고, 이로부터 m_b 와 s 의 값을 산정하였다. 여기서 m_b 는 상관관계 직선의 기울기이고, s 는 상관관계 직선의 절편이 된다. Fig. 11(a)는 표선리 현무암에 대한 σ_3/σ_c 와 $((\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_c)^2$ 의 상관관계를 도시한 것으로 기울기인 m_b 는 31.839이고, 절편인 s 는 0.923인 것으로 나타났다. Fig. 11(b)는 조면암질 현무암에 대한 σ_3/σ_c 와 $((\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_c)^2$ 의 상관관계를 도시한 것으로 기울기인 m_b 는 68.083이고, 절편인 s 는 0.249인 것으로 나타났다. 그리고 Fig. 11(c)는 스크리아에 대한 σ_3/σ_c 와 $((\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_c)^2$ 의 상관관계를 도시한 것으로 기울기인 m_b 는 17.635이고, 절편인 s 는 0.554인 것으로 나타났다.

위에서 구한 m_b 와 s 을 식 (2)에 대입하면 표선리 현무암, 조면암질 현무암 및 스크리아에 대한 Hoek-Brown의 파괴규준을 구할 수 있다. 식 (3), 식 (4) 및

식 (5)은 각각 표선리 현무암, 조면암질 현무암 및 스크리아에 대한 Hoek-Brown의 파괴규준을 나타낸 것이다. 식에서 보는 바와 같이 동일한 구속조건에서 파괴시 최대주응력은 조면암질 현무암이 가장 크며 스크리아가 가장 작음을 알 수 있다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 25.06 \times \left(31.839 \times \frac{\sigma_3}{25.06} + 0.923 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 127.96 \times \left(68.083 \times \frac{\sigma_3}{127.96} + 0.249 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 13.37 \times \left(17.635 \times \frac{\sigma_3}{13.37} + 0.554 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Mohr-Coulomb 파괴규준과 Hoek-Brown 파괴규준 비교

Mohr-Coulomb의 파괴규준을 최대(σ_1) 및 최소주응력

(σ_3)의 함수로 표현하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3 \quad (6)$$

그리고, Hoek and Brown(1997)은 Mohr-Coulomb의 파괴규준과의 상관성을 다음 식 (7)과 같이 표현하였다.

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (7)$$

이와 같은 관계를 토대로 식 (3)에서 식 (5)까지의 제주도 현무암에 대한 Hoek-Brown파괴규준을 이용하여 c 및 ϕ 를 추정할 수 있다. 즉, Hoek-Brown의 파괴규준 식(식 (3)~식 (5))을 이용하여 $0 < \sigma_3 < 0.25\sigma_c$ 범위 안에 있는 임의의 σ_3 값들에 대하여 σ_1/σ_3 값을 구하고 이를 $\sigma_1 - \sigma_3$ 관계도표에 도시한다. 이와 같이 도시된 (σ_3, σ_1) 값들에 대하여 선형회귀 분석을 실시하면 직선식을 구할 수 있

으며, 이 직선식의 기울기는 N_ϕ 가 되고 절편은 σ_{cm} 이 된다. 여기서 N_ϕ 는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

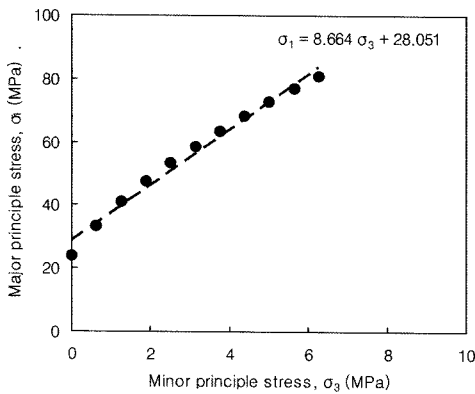
$$N_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (8)$$

따라서, 이상의 상관관계를 정리하면 식 (9) 및 식 (10)과 같이 되며, 이를 이용하여 Hoek-Brown파괴규준으로부터 c 및 ϕ 를 추정할 수 있다.

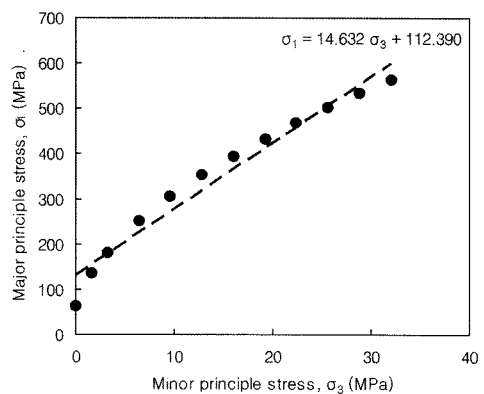
$$\sin \phi = \frac{N_\phi - 1}{N_\phi + 1} \quad (9)$$

$$c = \frac{\sigma_{cm}}{2\sqrt{N_\phi}} \quad (10)$$

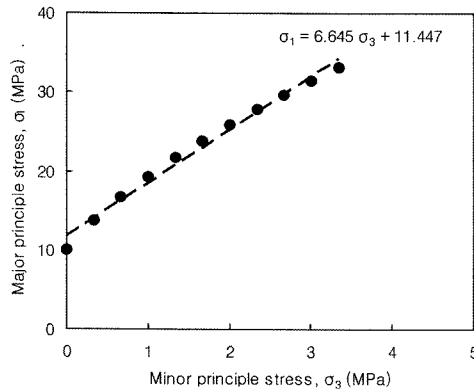
Fig. 12는 Hoek-Brown파괴규준으로부터 c 및 ϕ 를 추정하기 위하여 최소주응력 σ_3 와 최대주응력 σ_1 의 관계도표를 도시한 것이다. 그리고 도시된 σ_3 및 σ_1 에 대



(a) Pyoseonri basalt



(b) Trachy-basalt

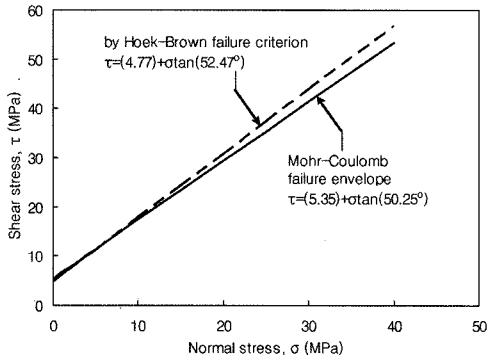


(c) Scoria

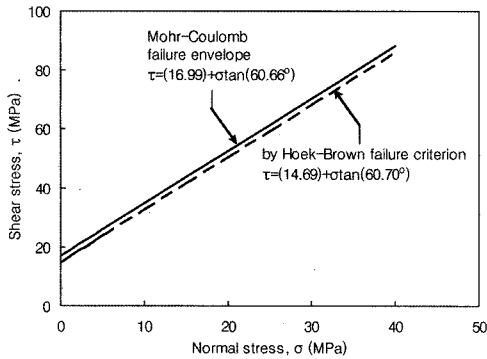
Fig. 12. Estimation of failure criterion by liner regression method.

하여 선형회귀 분석을 실시한 결과를 나타낸 것이다.

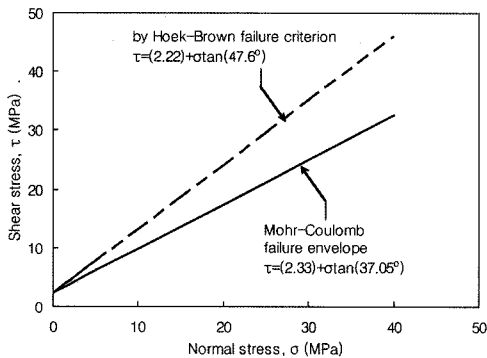
Fig. 12에서 보는 바와 같이 Hoek-Brown의 파괴규준에 4.77 MPa이고, 내부마찰각은 52.47°인 것으로 나타났다. 그리고 조면암질 현무암의 경우 점착력은 14.69 MPa, 내부마찰각은 60.70°이며, 스크리아의 경우 점착력은 2.22 MPa, 내부마찰각은 47.60°인 것으로 나타났다.



(a) Pyoseonri basalt



(b) Trachy-basalt



(c) Scoria

Fig. 13. Comparison between Mohr-Coulomb failure criterion and Hoek-Brown failure criterion.

Fig. 13은 Mohr-Coulomb의 파괴포락선과 Hoek-Brown의 파괴규준으로부터 추정된 파괴포락선을 함께 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 점착력은 Mohr-Coulomb의 파괴포락선이 더 크고, 내부마찰각은 Hoek-Brown의 파괴규준으로부터 추정된 파괴포락선이 더 큰 것으로 나타났다. 표선리 현무암과 스크리아의 경우 두 파괴포락선의 점착력은 유사하지만 내부마찰각은 Hoek-Brown의 파괴포락선이 더 크게 발생됨을 알 수 있다. 그러나 조면암질 현무암의 경우 두 파괴포락선의 내부마찰각이 유사하게 나타나고 점착력은 Mohr-Coulomb의 파괴포락선이 더 크게 발생됨을 알 수 있다.

그리고 낮은 구속압에서는 두 파괴규준사이의 강도차이가 적게 발생되지만 높은 구속압에서는 강도차이가 크게 발생됨을 알 수 있다. 특히 스크리아의 경우 두 파괴규준사이의 구속압이 더 크게 발생됨을 알 수 있다.

이상의 결과로 보아 Hoek-Brown의 파괴규준은 Mohr-Coulomb의 파괴규준보다 점착력은 대체로 낮게 평가되는 반면, 내부마찰각은 크게 평가되고 있다. 이와 같이 암석의 점착력과 내부마찰각은 파괴규준에 따라 서로 다르게 나타나므로 암석의 파괴규준 선정시 신중한 결정이 필요할 것으로 판단된다.

결론 및 요약

본 연구에서는 제주도 현무암에 대한 삼축압축시험을 실시하고 암석의 Mohr-Coulomb 파괴규준과 Hoek-Brown 파괴규준을 적용하여 강도정수를 산정하였다. 그리고 각각의 파괴규준에 의해 산정된 강도정수를 비교 검토하여 각각의 파괴규준에 대한 특성을 고찰하였다. 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 삼축압축시험에 의한 최대축차응력 및 압열인장시험에 의한 최대인장응력은 조면암질 현무암이 가장 크고, 그 다음으로 표선리 현무암이 크며, 스크리아가 가장 작은 것으로 나타났다.

(2) 암석의 Mohr-Coulomb 파괴규준을 적용한 결과 표선리 현무암의 경우 점착력은 5.35 MPa, 내부마찰각은 50.25°이고, 조면암질 현무암의 경우 점착력은 16.99 MPa, 내부마찰각은 60.66°이며, 스크리아의 경우 점착력은 2.33 MPa, 내부마찰각은 37.05°이다.

(3) 암석의 Hoek-Brown의 파괴규준에 대한 회귀분석 결과를 토대로 암석의 점착력과 내부마찰각을 선정할 수 있으며, 선정결과 표선리 현무암의 경우 점착력은 4.77 MPa, 내부마찰각은 52.47°이고, 조면암질 현무암의

경우 점착력은 14.69 MPa, 내부마찰각은 60.70°이며, 스코리아의 경우 점착력은 2.22 MPa, 내부마찰각은 47.60°이다.

(4) Mohr-Coulomb의 파괴포락선과 Hoek-Brown의 파괴규준으로부터 추정된 파괴포락선을 비교한 결과 Hoek-Brown의 파괴규준은 Mohr-Coulomb의 파괴규준보다 점착력은 대체로 낮게 평가되는 반면, 내부마찰각은 크게 평가되고 있다.

사 사

본 연구는 2006 건설기술혁신사업인 ‘국가 주요기반 시설물 안전관리 네트워크 구축’의 세부과제인 ‘GIS기반 급경사지 재해위험 취약지구 선정기법 연구’의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 남정만, 윤중만, 송영석, 김준호, 2008, 제주도 현무암의 공학적 특성 분석, 한국토목섬유학회논문집, 7(1), 13-22.
- 엄관용, 2002, 제주도 화산암의 역학적 특성에 관한 연구, 연세대학교 석사학위논문.
- Bieniawski, Z. T., 1972, Propagation of brittle fracture in rock, Proc. 10th Symposium on Rock Mechanics (AIME), 409-427.
- Goodman, R. E., 1989, Introduction to rock mechanics, 2nd edition, John Wiley and Sons, 55-99.
- Griffith, A. A., 1921, The phenomena of rupture and flow in solids, Phil. Trans. Roy. Soc., A221, 163-97.
- Griffith, A. A., 1924, Theory of rupture, Proc. 1st Congress of Applied Mechanics. Delft, 55-63.
- Hoek, E. and Brown, E. T., 1980, Empirical strength criterion of rock masses, Jour. of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 106(GT9), 1013-1035.
- Hoek, E. and Brown, E. T., 1988, The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update, Proc. 15th Canadian Rock Mechanics Symposium (Ed. Curran, J.C), Toronto, 31-38.
- Hoek, E. and Brown, E. T., 1997, Practical estimates of rock masses strength, Int. Jour. Rock Mechanics and Mining Science, 34(8), 1165-1186.

Hoek, E. and Franklin, J. A., 1986, A simple triaxial cell for field and laboratory testing of rock, Trans. Instn. Min. Metall., 77, A22-6.

McClintock, F. A. and Walsh, J. B., 1962, Friction of Griffith cracks in rock under pressure, Proc. Fourth U.S. Congr. Appl. Mech., Berkeley, American Society of Mechanical Engineers, 1015-21.

2009년 4월 13일 원고접수, 2009년 6월 15일 게재승인

남정만

제주대학교 해양과학대학 토목환경공학전공
690-756, 제주특별자치도 제주시 제주대학교로 66
Tel: 064-754-3454
Fax: 064-725-2483
e-mail: jungman@cheju.ac.kr

윤중만

안산공과대학 건설계열 건설전공
425-792, 경기도 안산시 단원구 초지동 671
Tel: 031-490-6155
Fax: 031-495-7828
e-mail: jmyun@ansanc.ac.kr

송영석

한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지질재해연구실
305-350, 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3035
Fax: 042-868-3414
e-mail: yssong@kigam.re.kr