터널과 지하공간, 한국암반공학회지
제20권 제2호, 2010년 4월, pp. 119~124

TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 20, No. 2, 2010, pp. 119-124
Journal of Korean Society for Rock Mechanics

변형률 속도 및 수분포화가 암석의 인장강도에 미치는 영향

정우진[1)]*

Effects of Strain Rate and Water Saturation on the Tensile Strength of Rocks

Woo-Jin Jung

Abstract Hopkinson's effect tests were carried out for various strain rates on three different types of rock in both saturated and dry states in order to examine the effects of strain rate and water saturation on tensile strength. The tensile strength increased with the increase of the strain rate not only in dry state but also in saturated state. It was also especially recognizable that the dynamic tensile strength of rock in the dry state was proportional to approximately a one-third multiple of strain rate no matter what the type of rock. It was found that water saturation decreased tensile strength in the dry state of sandstone and tuff, both with high porosity, but no significant difference could be recognized between the dry and the saturated states of granite, which has a low porosity of 0.49%.

Key words Rock, Tensile strength, Dynamic load, Strain rate, Water saturation

초 록 암석의 인장강도에 미치는 변형률 속도 및 수분포화의 영향을 파악하기 위하여 건조상태 및 포화상태 3종류의 암석에 대해서 여러 가지 변형률 속도에서의 홉킨슨효과를 이용한 인장파괴실험을 실시하였다. 실험결과 건조상태뿐만 아니라 포화상태에서도 변형률 속도가 증가할수록 암석의 인장강도는 증가하였다. 특히, 건조상태에 있어서 암석의 동적인장강도는 암석의 종류와는 상관없이 변형률 속도의 약 1/3승에 비례하는 경향을 나타내었다. 또한, 수분포화의 영향으로 공극률이 높은 사암과 응회암은 건조상태와 비교하여 인장강도가 감소하였으나, 공극률이 0.49%로 낮은 화강암은 건조상태와 포화상태와의 사이에 유의한 차이는 없었다.

핵심어 암석, 인장강도, 동적하중, 변형률 속도, 수분포화

1. 서 론

발파작업은 안전하고 신속하며 경제적인 이유로 토목광산분야 등에서 많이 이루어지고 있다. 그러나 폭약의 폭굉시 수반되는 진동·소음·비석 등의 문제점도 있어, 이러한 문제를 해결하여 안전하고 정확한 발파작업을 실시하기 위해서는 발파에 의한 파괴현상을 정확히 이해하고, 대상이 되는 암석의 성질을 정확히 알아야 한다. 특히, 발파에 의한 암석파괴상태를 정량적으로 예측하기 위해서는 암석강도의 평가는 필수불가결한 요소라고 할 수 있다. 또한, 컴퓨터의 발달에 힘입어 발파현상과 같은 동적파괴현상의 수치해석이 자주 이루어지고 있다. 그러나 기존의 수치해석에는 파괴의 판단기준이 되는 암석의 인장강도를 정적인 값을 사용하는 경우가 많았으며, 보다 정확한 수치해석을 실시하기 위해서는 동적 인장강도를 사용할 필요가 있다. 지금까지 10^{-1}/s 이하의 비교적 느린 변형률 속도의 영역에서는 변형률 속도의 증가와 더불어 영률 및 인장강도가 증가하고[1)], 파괴 변형률이 감소한다고 알려져 있다.[2)] 이와 같은 정적 조건에서의 인장강도의 변형률 속도 의존성은 응력부식파괴에 의해서 설명되고 있다.[3)] 한편 10^{-1}/s 이상의 빠른 변형률 속도 영역에서는, 암석의 종류에 따라 다르지만 정적인장강도보다 1.2~3.27배 인장강도가 증가한다고 보고되고 있다.[4)] 그러나 이 결과는 하나의 응력속도에서만 구한 인장강도로서 넓은 범위에서의 응력속도와 암석의 인장강도와의 관계를 나타내고 있는 것은 아니다.

또한 10^{-1}/s 이하의 변형률 속도의 영역에서는 암석을 수분으로 포화시킴으로써 강도가 저하되고, 영률 및 그 외의 변형특성에 변화가 일어난다고 보고되고 있다.[5)]

[1)] (주)우진엔지니어링 연구개발부 부장
* 교신저자 : deto90@paran.com
접수일 : 2010년 4월 9일
심사 완료일 : 2010년 4월 22일
게재 확정일 : 2010년 4월 22일

콘크리트에 대해서는 수분의 영향에 의해 함수상태의 정적인장강도는 감소되지만, 관성효과의 증대에 의해 동적인장강도는 증가한다고 보고되고 있다.[6] 그러나 암석의 동적조건에서의 수분의 영향에 대해서는 거의 보고되고 있지 않다.

본 연구에서는 10^{-1}/s 이하의 변형률 속도에서의 인장강도를 정적인장강도, 10^{0}/s 이상의 변형률 속도에서의 인장강도를 동적인장강도로 각각 정의하고, 3종류의 암석에 대해서 정적 및 동적인장강도를 건조상태와 포화상태에서 실험적으로 구하여, 인장강도에 미치는 변형률 속도 및 수분의 영향에 대해서 검토하였다.

2. 실험방법 및 시료

2.1 정적인장강도

시료는 Kimachi 사암, Tage 응회암, Inada 화강암 3종류의 암석을 사용하였다. 건조상태 시료는 사암, 응회암은 65°C에서 120시간, 화강암은 105°C에서 72시간 항온조 내에서 건조후 24시간 진공펌프로 건조하였다. 또한 포화상태 시료는 건조상태 시료를 물을 채운 데시케이터 내에서 진공상태로 24시간 침지시킨 것을 사용하였다. Table 1에 시료의 크기와 물성치를 나타내었다. 암석의 정적인장강도는 압열인장시험으로 측정하였으며, 재료시험기를 사용하여 4~11 종류의 변형률 속도에서의 정적인장강도를 측정하였다.

2.2 동적인장강도

시료는 상기와 같이 3종류의 암석을 사용하였다. Table 1에 시료의 크기와 물성치를 나타내었다.

암석의 동적인장강도는 홉킨슨효과를 이용한 방법[4]으로 측정하였다. Fig. 1에 실험방법 모식도를 나타내었다. 실험은 시료의 한쪽 끝 면에 정밀뇌관의 폭발에 의한 충격압력을 가하고, 다른 쪽 끝 면에서의 변위속도를 레이저 진동계를 사용하여 계측하였다. 또한, 뇌관에 의해 입사한 충격파에 의해 가장 처음 생성된 파단면의 위치를 파악하기 위하여 고속카메라로 촬영하였다. 변형률 속도를 변화시키기 위하여 시료와 뇌관과의 사이에 완충재로서 길이가 다른 PMMA(아크릴수지, Polymethyl Methacrylate)를 사용하였다. Fig. 2는 시료의 한쪽 끝 면(이하 자유면)에서 계측한 변위속도 파형으로서, 완충재의 두께가 증가할수록 변위속도의 피크치까지의 상승시간이 길어지고, 피크치도 낮아진다.

Table 1. Physical properties of rock samples

Sample	Diameter[mm]		Length[mm]		Porosity [%]	Water content [%]	Density ρ [g/cm^3]	P-wave velocity C_O [km/s]	Fracture toughness K_{IC} [MPam$^{1/2}$]	Young's modulus E [GPa]
	Static	Dynamic	Static	Dynamic						
Kimachi sandstone	60	20	31.9~41.8	240~480	16.54	9.89	2.00	2.71	0.90	6.5
Tage tuff	60	20	29.0~37.2	240~480	28.79	17.35	1.76	2.38	0.84	4.5
Inada granite	60	20	29.7~31.6	240~480	0.49	0.31	2.58	3.95	1.99	56.8

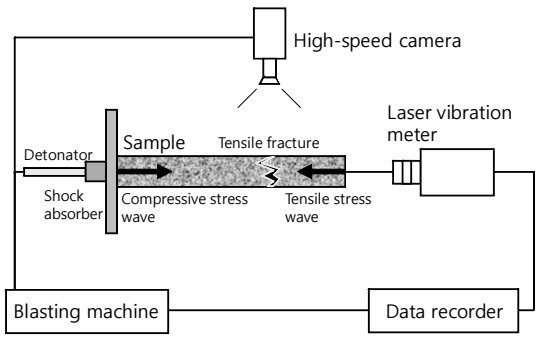

Fig. 1. Schematic diagram of Hopkinson's effect test

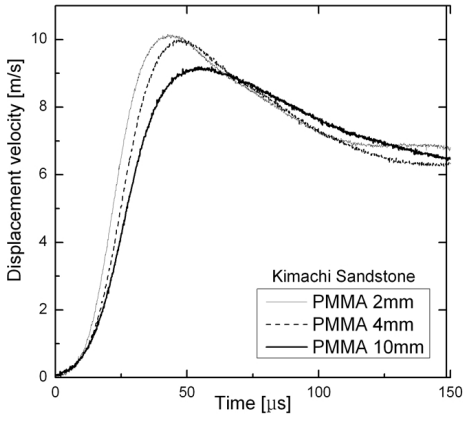

Fig. 2. Effect of shock absorber on the displacement velocity

또한 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 수분포화의 영향으로 변위속도가 변화한 것을 알 수 있다.

변형률 속도는 레이저 진동계로 계측된 자유면에서의 변위속도를 사용하여 구하였다. 식(1)에 나타낸 것과 같이 변위속도를 변위개시부터 변위속도가 최대가 되는 시간까지 적분하여 시료의 변위를 구하고, 얻어진 변위를 시료 전체의 길이로 나누어 변형률을 구하였다. 그리고 식(2)에 나타낸 것처럼 변형률을 최대변위속도까지의 시간으로 나누어 변형률 속도를 구하였다. 여기서 실제로 계측되는 변위속도는 자유면에서의 변위속도이며, 자유면에 입사하는 응력파의 파내 입자속도의 2배가 되므로, 파단면에서의 변위속도는 계측된 자유면 변위속도의 1/2값을 사용하였다.[7)]

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{t_p} 0.5v(t)dt}{L} \tag{1}$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{t_p} \tag{2}$$

여기서 ε는 변형률, $\dot{\varepsilon}$는 변형률 속도, L은 시료길이, t_p는 최대변위속도까지 시간, $v(t)$는 변위속도의 함수이다.

동적인장강도는 파단면에서의 입사압축응력파와 자유면에서 반사된 반사인장응력파와의 합성치가 되며, 식(3)에 나타낸 것처럼, 자유면에서의 변위속도로부터 구했다.[8)]

$$S_D = \rho c_p \frac{v(t_p) - v(t_p + 2\Delta t)}{2} \tag{3}$$

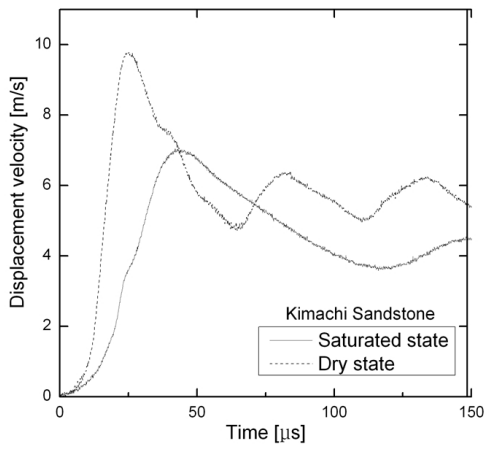

Fig. 3. Effect of Water saturation on the displacement velocity

여기서 S_D는 동적인장강도, $v(t_p)$는 자유면에서의 최대변위속도, Δt는 반사응력파의 자유면으로부터 파단면까지의 전파시간, $v(t_p+\Delta t)$는 파단시의 자유면에서의 변위속도, ρ는 암석의 밀도, c_p는 탄성파속도이다.

3. 실험결과

3.1 변형률 속도의 영향

Fig. 4~Fig. 6에 3종류의 암석의 건조상태에서의 변형률 속도와 인장강도의 관계를 각각 나타내었다. 3종류의 모든 암석에 있어서 변형률 속도가 증가함에 따라 인장강도가 증가하였다. 또한 동적인장강도(S_D)와 변형률 속도($\dot{\varepsilon}$)와의 사이에 아래와 같은 관계가 얻어졌다.

사 암 : $S_D = 5.27 \times \dot{\varepsilon}^{0.356}$ (4)

응회암 : $S_D = 4.97 \times \dot{\varepsilon}^{0.321}$ (5)

화강암 : $S_D = 11.79 \times \dot{\varepsilon}^{0.329}$ (6)

이 관계를 그림에서 점선으로 나타내었다. 이 관계로부터 건조상태에서의 동적인장강도와 변형률 속도와의 관계는 정적인장강도와 변형률 속도와의 관계와는 다른 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 이유로서 정적파괴의 경우 암석 내에서 가장 약한 부분이 파괴에 이르는 것과는 달리, 동적파괴의 경우는 반사인장응력파의 피크 부근의 좁은 영역에서 최대응력집중이 발생하고, 이 영역 내에서 파단면이 형성된다. 즉 암석 내의 가장 약한 부분이 반드시 파괴에 관계하지 않는다고 할 수 있다.[9)] 그리고 동적인장파괴의 경우, 파단면 내의 응력이 인장강도에 도달하기 전까지의 시간이 균열 확장속도보다 빠르기 때문에 인장강도가 증가한 것으로 사료된다. 또한 식(4)~(6) 으로부터, 건조상태에서의 동적인장강도는 암석의 종류와는 상관없이 변형률 속도의 약 1/3승에 비례하는 것을 알 수 있다. 이 관계에 대해서는 Ross[6)]가 불균질 재료의 콘크리트를 대상으로 실시한 균열형성에 대한 고찰과 같은 방법으로, 3종류의 다른 입자구성을 갖는 암석에 대하여 미소균열 파괴선단에서의 관성효과를 고려한 동적선형파괴역학에 근거하여 고찰한다.

균열이 새롭게 생성되기 위해서는 식(7)~(8)로 표현되는 시료가 변형할 때에 시료내부에 축적되는 변형률 에너지 U와 운동에너지 KE와의 합, 즉 외부로부터 가해지는 에너지가 식(9)로 표현되는 표면에너지 Γ보다

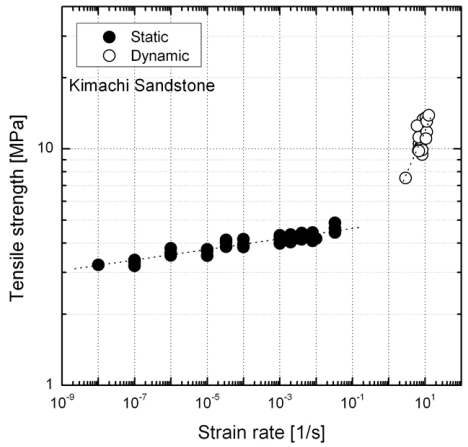

Fig. 4. Relation between strain rate and tensile strength for sandstone in the dry state

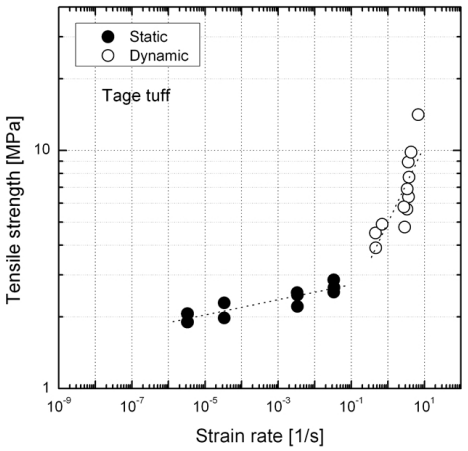

Fig. 5. Relation between strain rate and tensile strength for tuff in the dry state

커야한다. 즉, 균열형성에 의한 파괴성립조건은 식(10)과 같이 된다.

$$U=\frac{\sigma_S^2}{2B}=\frac{\sigma_S^2}{2\rho C_0^2} \tag{7}$$

$$\Gamma=3\frac{K_{IC}^2}{\rho C_0^2 S} \tag{8}$$

$$KE=\frac{1}{120}\rho S^2\dot{\varepsilon}^2 \tag{9}$$

$$KE+U\geq\Gamma \tag{10}$$

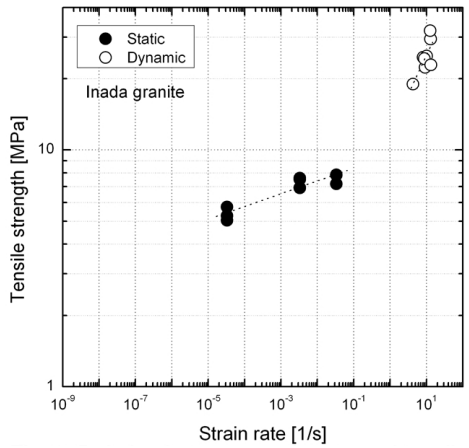

Fig. 6. Relation between strain rate and tensile strength for granite in the dry state

여기서 KE는 운동에너지, U는 변형률 에너지, Γ는 파괴표면에너지, ρ는 밀도, S는 파괴 입자경, $\dot{\varepsilon}$는 변형률 속도, σ_S는 피크응력, B는 체적탄성률, C_0는 탄성파속도, K_{IC}는 파괴인성이다.

여기서 암석의 파괴가 입계를 따라 분리파괴하는 입계파괴에 의한 것이라고 가정하면, 고변형률 속도 조건에서의 파괴는 시료에 고속으로 가해지는 에너지에 의해, 동일 크기의 결정입자를 따라서 균열이 형성되고 파괴가 발생하는 것으로 가정한다. 또한 Fig. 3에 나타낸 것과 같이, 파괴가 발생할 때까지의 시료의 변형은 탄성적으로 거동한다고 가정할 수 있다. 따라서 인장파괴시의 피크응력 σ_S은 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_S=B\varepsilon=B\dot{\varepsilon}t_S=\rho C_0^2\dot{\varepsilon}t_S \tag{11}$$

여기서 t_S는 파괴시간이다. 또한 결정 입자경, 즉 균열길이는 탄성파속도에 의해 결정된다고 가정하면 결정 입자경 S는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S\leq 2C_0t_S \tag{12}$$

일반적으로 U는 KE의 15배 이상이므로 KE의 기여는 무시할 수 있다. 따라서 파괴성립 조건을 다음과 같이 단순화 시킬 수 있다.

$$U=\frac{\sigma_S^2}{2\rho C_0^2}\geq 3\frac{K_{IC}^2}{\rho C_0^2 S} \tag{13}$$

결국 파괴강도 σ_S는 식(11)~식(13)으로부터 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_S = \sqrt[3]{3K_{IC}^2 \rho C_0}\ \dot{\varepsilon}^{1/3} \tag{14}$$

이상과 같이 이론적으로도 실험결과와 마찬가지로 인장강도는 변형률 속도의 1/3승에 비례하는 것으로 나타났다. 또한 식(14)에서의 파괴인성 K_{IC}, 밀도 ρ 및 탄성파속도 C_0에 Table 1에 나타낸 실험치를 대입하여 계산한 결과, 파괴응력과 변형률 속도 간의 비례계수는 사암이 5.09, 응회암이 4.46, 화강암은 10.66으로 나타났다. 이 비례계수는 식(4)~식(6)에 나타낸 실험치의 비례계수와 거의 일치하므로, 식(14)를 이용하여 동적인장강도의 예측이 가능해졌다고 판단된다.

3.2 수분의 영향

Fig. 7과 Fig. 8에 사암과 응회암의 포화상태에서의 변형률 속도와 인장강도와의 관계를 건조상태의 결과와 함께 나타내었다. 사암과 응회암은 포화상태에서도 건조상태의 경우와 마찬가지로 변형률 속도가 증가함에 따라 동적인장강도가 증가하였다. 또한, 수분포화의 영향에 의하여 건조상태와 비교하여 정적인장강도 및 동적인장강도가 저하되었다. 이것은 암석 내의 공극이 압력을 받아 공극에 존재하는 수분이 쐐기작용을 하여 입자간의 간극, 균열을 넓히고, 또한 수분에 의해 교결물질이 용해되어 입자간의 마찰계수, 결합력이 저하되었기 때문으로 판단된다.[5] 정적인강도는 3.31×10^{-6}/s~3.31×10^{-2}/s의 변형률 속도 범위에서 사암은 55%~57%, 응회암은 65%~68%가 저하하였고, 또한 동적인장강도는 사암은 3.1×10^{0}/s~9.1×10^{0}/s 의 변형률 속도 범위에서 42%~51%, 응회암은 2.0×10^{0}/s~5.6×10^{0}/s의 변형률 속도범위에서 16%~53%가 저하하였다.

Fig. 9에 화강암의 포화상태에서의 변형률 속도와 인장강도와의 관계를 건조상태의 결과와 함께 나타내었다. 건조상태의 경우와 마찬가지로 변형률 속도가 증가함에 따라 동적인장강도가 증가하였다. 그러나 화강암은 다른 2종류의 암석과는 달리, 정적인강강도 및 동적인강장도는 건조상태와 포화상태사이에 유의한 차이는 없었다.이것은 화강암의 경우 공극율이 0.49%로서 매우 작기 때문에 포화상태에 있어서도 수분의 영향이 작았기 때문으로 판단된다.

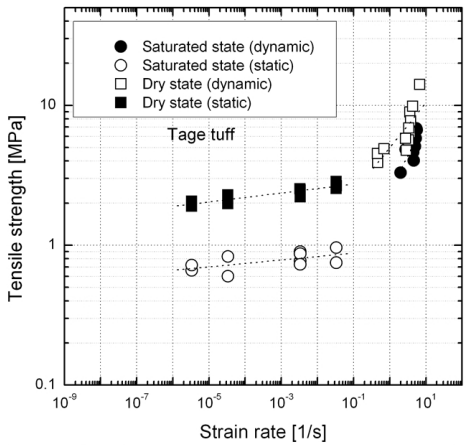

Fig. 8. Relation between strain rate and tensile strength for tuff

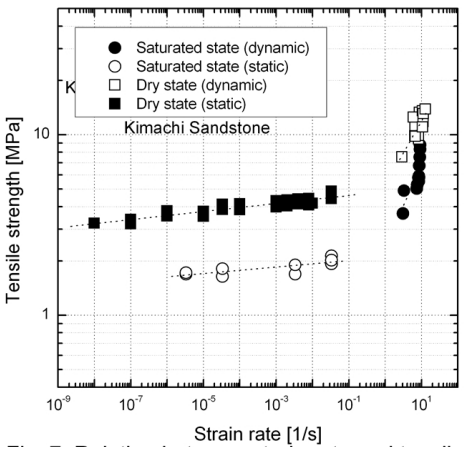

Fig. 7. Relation between strain rate and tensile strength for sandstone

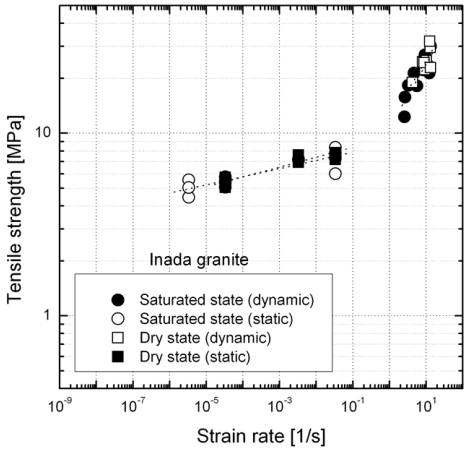

Fig. 9. Relation between strain rate and tensile strength for granite

4. 결 론

암석의 인장강도에 미치는 변형률 속도 및 수분포화의 영향에 대하여 검토하기 위하여, 건조 및 포화상태의 암석에 대하여, 여러 가지 변형률 속도에서 압열인장시험 및 홉킨슨효과를 이용한 실험을 실시하였다. 본 연구에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 암석의 인장강도는 건조상태뿐만 아니라 포화상태에 있어서도 변형률 속도가 증가함에 따라 증가하였다. 특히, 건조상태의 암석의 동적인장강도는 암석의 종류와는 상관없이 변형률 속도의 약 1/3승에 비례하였다.
2) 선형파괴역학에 근거하여 도출된 동적인장강도와 변형률 속도와의 관계식에 의해 동적인강강도의 예측이 가능하게 되었다.
3) 수분포화의 영향에 의해 공극률이 큰 사암과 응회암은 건조상태와 비교하여 정적 및 동적인장강도가 저하되었다. 그러나 공극률이 작은 화강암은 정적 및 동적인장강도에서도 건조상태와 포화상태와의 사이에 유의한 차이는 없었다.

참고문헌

1. 木下直人, 堀田政國, 松井裕哉, 杉原弘造, 1999, 発破振動計測と引張強度試験に基づく掘削損傷領域の評価, 第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.221-225.
2. 小林良二, 1964, 高速静荷重下における岩石の力学的性質 (第1報), 日本工業会誌, 81, pp.429-434.
3. Sano, O., Ito, I. and Terada, M., 1981, Influence of strain rate on Oshima granite under uniaxial compression, J. Geophys. Res., 86, pp.9299-9311.
4. 馬貴臣, 三宅淳巳, 小川輝繁, 和田有司, 緒方雄二, 瀬戸政宏, 勝山邦久, 1998, ホプキンソン効果による応力速度が大きい場合の材料の引張強度, 火薬学会誌, 59, pp.49-56.
5. 山口桃太郎, 西松裕一, 1983, 岩石力学入門, 東京大学出版会, 130.
6. Ross, C.A., Jerome, D.M., Tedesco, J.W. and Chen, E.P., 1996, Moisture and strain rate effects on concrete strength, ACI Materials Journal, 93.3, pp.293-300.
7. 工業火薬協会編, 1988, 新·発破ハンドブック, 山海堂, 394p.
8. 馬貴臣, 1998, 発破による構造物の解体工法の安全性に関する研究, 横浜国立大学学位論文, pp.17-22.
9. Rinehart, J.S., 1965, Dynamic fracture strength of rocks, Proc. 7th Symp. Rock Mech., Univ. Park, Penn., pp.17-22.

정 우 진

1994년 청주대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1998년 요코하마국립대학 대학원 물질공학과 공학석사
2001년 요코하마국립대학 대학원 물질공학과 공학박사

Tel: 042-671-3200
E-mail: deto90@paran.com
현재 (주)우진엔지니어링 연구개발부 부장