

화강암의 응력완화현상에 관한 수침삼축시험

Stress Relaxation Test of Granite under Water-Saturated Triaxial Condition

서 용 석 (Yong Seok Seo)

한국건설기술연구원

요약 / ABSTRACT

화강암의 결을 형성하는 미세균열은 화강암의 장기적인 거동을 지배하는 중요한 요소이다. 본 연구에서는 일본 이바라기현 쓰쿠바지방에 분포하는 세립질 이나다 화강암을 대상으로 조사선법을 이용하여 미세균열을 측정하고, 수침 봉압하에서 응력완화시험을 수행할 수 있는 시스템을 개발하여 시험을 실시하였다. 일축압축강도의 약 75% 응력수준에서 실시한 시험결과에 의하면 시험개시 10시간 이내에 총 완화응력의 39%~49%가 발생하였으며, 시험개시 190시간 이내에 10~24 MPa의 응력완화를 보였다. 또한 재하방향에 평행하게 분포하는 미세균열의 밀도가 높을수록 완화응력은 크게 발생하였다.

주요어 : 화강암, 미세균열, 삼축응력완화시험

Microcracks that consist of quarry planes of granite are an essential factor affecting the long-term behavior of granite. In this paper, fine-grained granite distributed in the Tsukuba area of Japan was selected and microcracks were measured by using scanline method. In addition, a new relaxation testing equipment was developed to carry out stress relaxation test under water-saturated triaxial condition. Based on the relaxation test results with the initial stress level of 75%, the axial stress is decreased by 39%~49% just after the start of the tests, and the totally relaxed stress is 10~24 MPa in 190 ERT (Elapsed relaxation time, hour). In addition, the relaxed stress is increased with the density of cracks which are parallel to axial load direction.

Key Words : granite, microcracks, triaxial relaxation test

1. 서 론

최근 고준위 방사성폐기물을 암반의 차단효과를 이용하여 지하 심부에 매설하는 방법이 주목받고 있다. 이때 장기간에 걸쳐서 방사능을 지니는 방사성 핵종은 인간의 생활 환경으로부터 안전하게 격리되어야만 한다. 수 만년간의 격리를 고려하면 암반에 많이 분포하는 미세균열을 따라 진행되는 지하수의 유동과 방사성 핵종의 확산과정은 밝혀져야 할 중요한 문제이다. 또한 미세균열의 진전 및 풍화에 따른 유로의 변화 등을 고려하여 암석 또는 암반의 장기적인 거동을 파악할 필요가 있다.

지금까지 암석의 시간의존성 거동에 관하여 많은 연구가 행해졌다. 하지만 그 대부분은 일정한 하중 하에서 행해지는 크립시험(Akagi, 1981; Okubo et al., 1991; Boukharov et al., 1997)이며 응력완화시험(Peng and Podnieks, 1972; Haupt, 1991; Seo et al., 1999)은 그다지 많이 행해지지 않았다. 그 이유 중 하나는 일정한 변형률을 장기간 일정하게 유지하는 것이 쉽지 않기 때문이다.

암석중의 미세균열관찰은 파괴, 시간의존성 거동, 투수 등의 메커니즘을 이해하는데 있어서 중요하다. 특히 재하중의 미세균열 발생 및 진전에 관한 연구(Peng and Johnson, 1972; Mardon et al., 1990; Jeong and Ichikawa, 1994)는 파괴 및 비파괴시험을 포함하여 활발히 행해지고 있다.

본 연구에서는 Seo et al.(1999)에 의하여 개발된 일축 응력완화시험기를 개량하여 봉압하에서 응력완화시험을 수행할 수 있고, 또한 실체현미경을 사용하여 응력완화시험 중에 미세균열의 발생, 진전, 상호간섭을 관찰할 수 있는 시험장치를 개발하여 수침 삼축 응력완화시험을 실시한 결과를 보고한다.

2. 화강암의 결과 미세균열 관찰

본 연구에 사용된 암석은 일본 이바라기현 쓰꾸마지방에 분포하는 백악기~고체삼기의 세립질 이나다 화강암(Takahasi, 1982)이며, 그 광물조성과 암석학적 특징은 Table 1과 같다.

화강암에는 외력을 가하면 쉽게 깨어지고, 서로 직교하며 분포하는 세 개의 미세균열 군이 분포한

Table 1. Modal composition and physical properties of Inada fine-grained granite.

Components	Properties
Quartz (Q)	25.5 %
Feldspar (F)	66.8 %
Mica	7.1 %
Others*	0.6 %
Color	Greyish white
Texture	Equigranular
Grainsize of Q and F	1~4 mm

*Others: Zircon and apatite, etc.

다(Simmons et al., 1975; Chen et al., 1997). 이러한 미세균열 군은 화강암의 결을 형성하며, 채석장에서는 잘 깨어지기 쉬운 순서로서 1번결(rift), 2번결(grain), 3번결(hardway)로 불린다. 응력완화시험에 앞서서 시험에 사용되는 시료에 분포하고 있는 미세균열, 즉 결을 상세히 관찰하기 위하여 채석장에서 채취한 암석 블록으로부터 3종류의 결을 따라서 박편을 제작하였다. 제작된 박편은 미세균열의 관찰을 좀더 쉽게 하고 제작시 발생하는 미세균열을 최소화하기 위하여 암석관찰용 박편의 두께인 0.03mm보다 약 3-4배 두껍게 제작되었다. 이 박편은 편광현미경을 이용하여 1.5cm×1.0cm범위로 촬영되었다. 그 후 촬영된 사진을 연결하고, 그 위에 투명용지를 겹쳐서 미세균열, 입간 등과 같은 미세불연속면의 스케치를 실시하였다. 그리고 작성된 그림을 이용하여 조사선법(scanline method)에 의한 미세균열의 발생빈도 및 길이를 측정하였다. 본 연구에서는 화강암에 규칙적으로 분포하는 미세균열, 즉 결을 형성하는 미세균열이 화강암의 거동에 가장 큰 영향을 미치리라 판단하여 이러한 미세균열만을 대상으로 측정을 실시하였다. 선형측정법에서의 측선 1cm 당 계측되는 미세균열의 개수(N)와 평균길이(L)를 Fig. 1에 모식적으로 나타낸다. 그림에 나타난 것처럼 본 화강암의 결과 관계되는 미세균열은 2번결과 1번결의 차가 미미하게 보이지만 2번결, 1번결, 3번결 순으로 발생빈도가 높고 길이도

길다.

Segall(1984)에 의하면 미세균열의 밀도(ρ)는 시료의 단면적(A), 균열길이의 1/2(C), 균열의 수(N)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho = \frac{1}{A} \cdot \sum_{i=1}^N C_i^2 \cdot N \quad (1)$$

Fig. 1에 나타난 평균치를 식 (1)에 대입하여 본 화강암의 균열밀도를 구하면 2번결이 0.12, 1번결이 0.10, 3번결이 0.07로서, 그 차이는 미미하지만 균열 밀도의 이방성을 나타내고 있다.

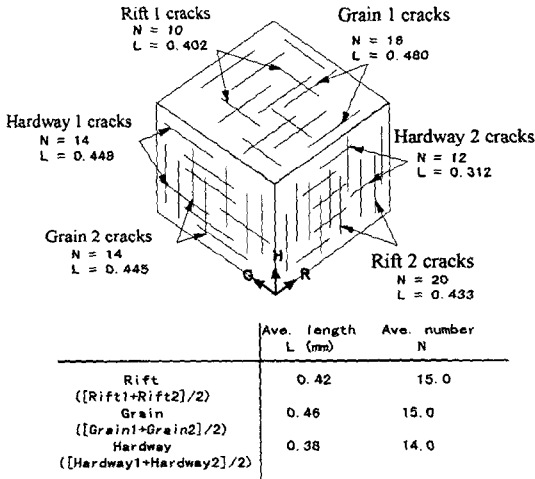


Fig. 1. The average length (L) and number (N) of rift, grain and hardway planes per 1cm scanline in fine-grained granite.

3. 시 험

3.1 공시체

공시체는 응력완화시험과 동시에 미세균열의 발생 및 진전을 관찰할 수 있도록 직육면체로 제작되었다. 규격은 40×20×5mm이며 단면의 평행도와 직각도를 4/1000mm 이내로 정밀하게 제작하여 재하시험 등이 발생하는 것을 막았다.

화강암의 장기저동에는 미세균열의 분포 및 이들의 진전이 영향을 미치는 것으로 사료되어 그 관련성을 알아보기 위하여 화강암의 결을 따라 Fig.

2와 같이 3종류의 공시체를 제작하였다. 본 연구에서 수행된 모든 시험에서의 재하방향은 공시체의 장축방향이다.

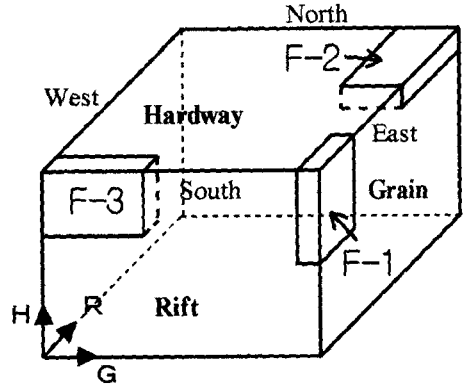


Fig. 2. Oriented specimen preparation for laboratory test.

3.2 삼축 응력완화시험 장치

시험에 사용되는 시스템은 재하장치(loading system), 계측장치(data-recording system), 관찰장치(observation system)로 구성되어 있다(Fig. 3). 재하장치는 유압식 펌프, 봉압용 펌프(Japan Precision Science, NPL-5000), 재하시험기(Fig. 4)로 구성되며, 재하시험기는 암석 공시체를 설치할 수 있는 곳이 박스형으로 되어 있어 뚜껑을 덮음으로서 수침상태의 봉압을 가할 수 있도록 되어 있다. 뚜껑에는 관찰용 창이 있으며 이를 통하여 공시체의 표면을 관찰할 수 있다. 시험기의 표면은 크롬 코팅을 하여 물에 의한 녹을 방지하였다. 응력완화시험은 시험중에 공시체의 변위를 임의의 위치에 고정할 필요가 있다. 이를 위하여 시험기에는 두 개의 변위 고정용 나사를 설치하였다. 이 두 개의 나사는 로드셀의 양측면에 설치된 변형률 게이지에 의해 좌우 균형을 유지할 수가 있다. 로드셀은 자체 설계에 의해 일본 東京測器에서 제작 및 검증을 실시하였다. 계측장치는 AD 변환기(TDS 301), 퍼스널 컴퓨터로 구성되어 있다. 관찰장치는 실체현미경(Nikon, SMZ-U, 최대 110배 관찰가능), 링 라이터(NPI, PLG-TR32), CCD비디오 카메라, 모니터, 비디오 프린터, 스틸 카메라로 구성되어 있다. 실체현미경에 의해 40배까지 화상을 관찰하는

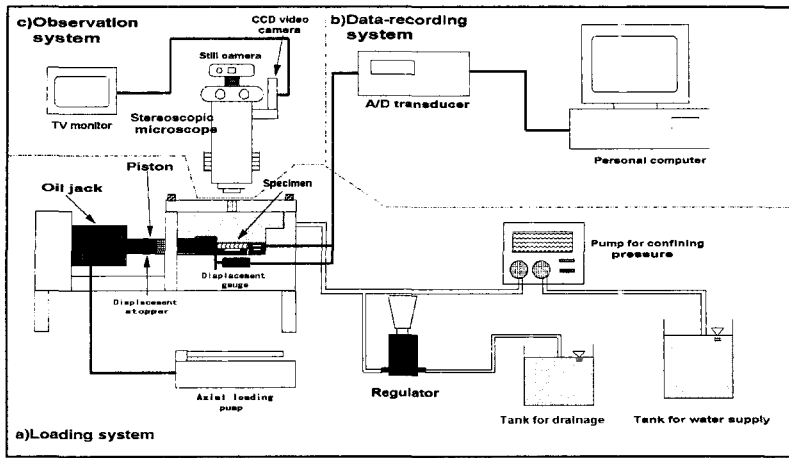


Fig. 3. Schematic diagram of experimental system for relaxation test

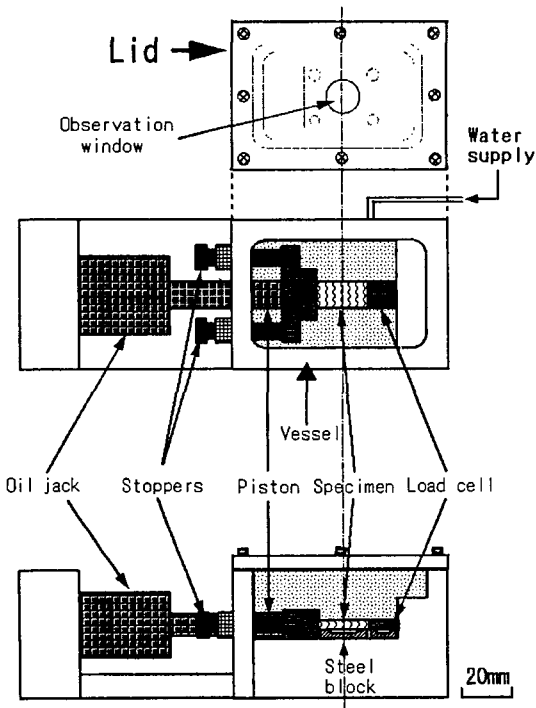


Fig. 4. Each part assembly of loading system

것이 가능하며, 미세균열의 진전양상은 시험과 동시에 CCD비디오 카메라와 스틸 카메라에 의해 연속적으로 촬영된다. 본 시스템을 이용한 삼축압축 시험 중의 현미경 관찰 결과는 Seo and Jeong

(1999)에 의하여 수행되었으며, 응력완화시험 중 수행된 현미경 관찰 결과는 본 논문에서 제외하였다.

3.3 시험방법

응력완화시험은 온도에 의해 크게 영향을 받으므로 온도가 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 이내로 조정된 항온실에서 행해졌다. Fig. 5는 실온과 항온에서 수행된 응력완화 예비시험 결과이며 온도의 변화에 따라 응력완화거동이 크게 영향을 받는 것을 볼 수 있다. 일축압축 시험 및 응력완화시험에 사용된 공시체는 일주일간

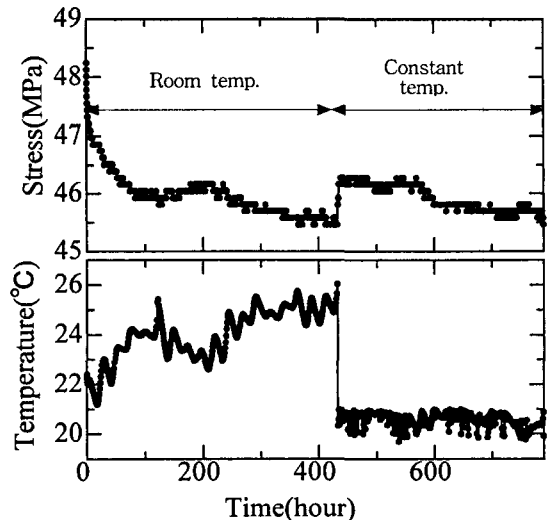


Fig. 5. Temperature effect on relaxation behavior

증류수로 포화시켜 시험하였다.

시험의 순서를 알아보면 먼저 공시체를 재하시험기에 설치하고 증류수로 시험기 내부를 채우며 봉압용 뚜껑을 닫는다. 공시체를 설치할 때 공시체의 표면이 건조하게 되므로 약 10분간 방치 후 시험을 시작한다. 재하속도는 0.2 MPa/sec이며 봉압은 재하축 압력과 동시에 같은 속도로 주어진다. 일축압축시험의 경우는 파괴 시까지 압력을 가하고, 응력완화시험의 경우는 축 압력이 소정의 응력 수준에 도달하면 시험기 양측에 설치된 변위 고정용 나사를 이용하여 변위를 고정시킨다.

4. 시험 결과 및 고찰

4.1 일축압축시험

응력완화시험에 앞서 3종류의 공시체를 이용하여 각 5회씩 일축압축시험을 실시하였다. 시험에는 응력완화시험기를 사용하였으며, 공시체를 물에 포화시킨 후 수침상태에서 시험을 실시하였다. 공시체별 일축압축강도의 분포범위와 산술평균치를 나타내면 Fig. 6과 같다.

일축압축강도는 화강암에 발달하고 있는 결의 영향으로 약간의 이방성을 보여주고 있다.

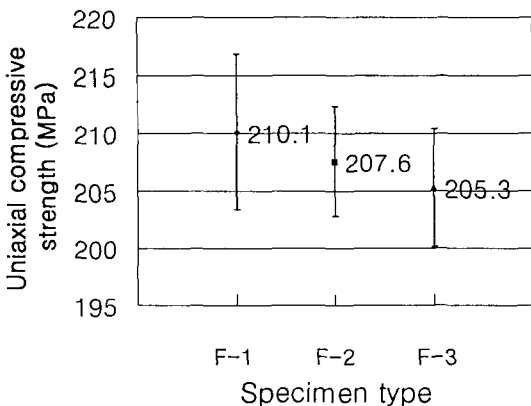


Fig. 6. Distribution of compressive strengths showing their mean values and standard deviations

4.2 응력완화시험

일축압축시험 결과를 바탕으로 일축압축강도의

약 74~77%를 초기 재하응력으로 하여 봉압 5 MPa하에서 응력완화시험을 실시하였다. 시험시간은 약 200시간에서 300시간으로 공시체마다 조금씩 차이가 있다. Fig. 7에서 URF1-2는 Fig. 2와 같이 제작된 No.1 공시체의 두 번째 시험결과를 의미한다. 각 시간에 따른 완화응력(relaxed stress)의 변화(Fig. 8)를 살펴보면 응력완화시험 경과시간(ERT) 10시간이내, 즉 시험 초기에 전체 응력완화의 약 39%-49%정도가 일어나고 있으며, 200 내지 300시간이 경과하여도 응력완화는 계속해서 일어나고 있다. 그러나 약 50 ERT부터는 응력완화속도 $\dot{\sigma}$ 가 일정해 지고 있음을 알 수 있다.

190 ERT를 기준으로 공시체별 완화응력을 살펴보면 F-1시료가 20-23 MPa로 다른 시료의 약 두 배정도 많이 강화되었음을 알 수 있다. 이는 Fig. 2에서 알 수 있듯이 F-1의 장축방향인 재하방향으로 1번결(Rift)과 2번결(grain)이 분포하고 있어서 이들 미세결합이 응력완화현상과 깊은 관련을 가지고 있다고 판단된다(Seo et al., 1999).

응력완화현상의 평형상태 도달여부를 판단하기 위하여 응력완화곡선의 완화 스펙트럼(山本, 1972)을 구해 보았다. 먼저 측정된 응력완화곡선을 7요소의 Maxwell 모델에 최소자승법으로 근사시킴으로써 식 (2)와 같이 지수함수 $F(t)$ 를 구하였다.

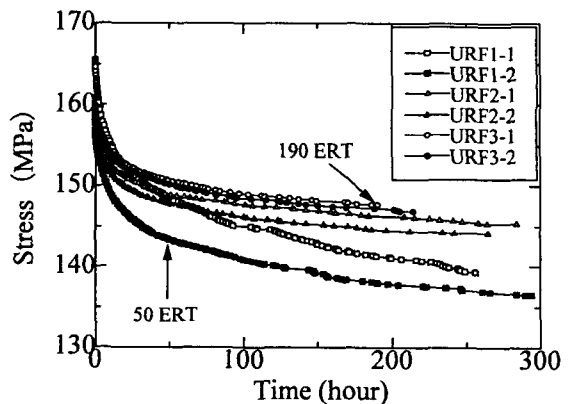


Fig. 7. Relaxation curves at about 75% initially applied stress level under 5 MPa confining pressure

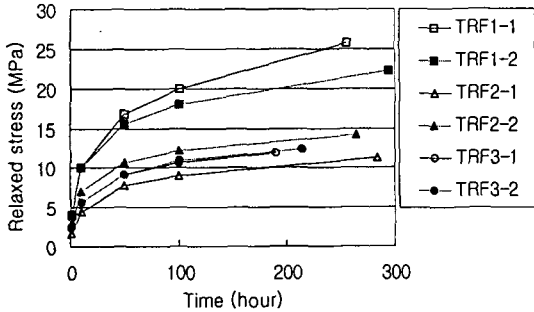


Fig. 8. Relaxed stresses according to the elapsed relaxation time.

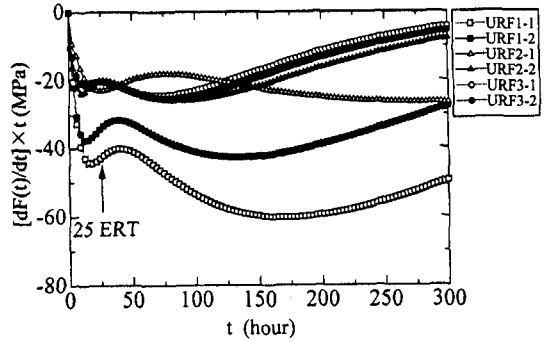


Fig. 9. Relaxation spectrum curves.

$$F(t) = a + b \exp\left(-\frac{t}{c}\right) + d \exp\left(-\frac{t}{e}\right) + f \exp\left(-\frac{t}{g}\right) \quad (2)$$

$F(t)$ 를 시간 t 로 미분하면 응력완화곡선은 단조감소의 지수함수이므로 식 (3)과 같이 음의 함수가 되며, 그 크기는 경과시간 t 에서의 응력완화속도가 된다.

$$\frac{dF(t)}{dt} = -\frac{b}{c} \exp\left(-\frac{t}{c}\right) - \frac{d}{e} \exp\left(-\frac{t}{e}\right) - \frac{f}{g} \exp\left(-\frac{t}{g}\right) \quad (3)$$

구해진 결과를 이용하여 시간 t 에 따른 $\left(\frac{dF(t)}{dt}\right) \cdot t$ 의 변화를 나타내면 Fig. 9와 같은 완화스펙트럼을 구할 수 있다. 이 곡선은 시간경과에 따른 응력완화속도의 감소율이 클 때는 0에 가까워지며, 응력완화속도가 일정 또는 감소율이 작을 때는 0으로부터 멀어진다. 또한 응력완화곡선의 곡률이 가장 클 때, 즉 완화속도의 변화가 가장 심할 때 최고점을 보인다. 그림에 의하면 모든 공시체에서 25 ERT부근에서 첫 번째 최고점을 보이고 있으며, 그 이후에도 모든 공시체에서 응력완화는 계속되고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 암석의 시간의존성 거동을 규명하기 위하여 수침 삼축하에서 응력완화시험을 수행할 수 있는 시스템을 개발하여 세립질 이나다 화강암을 대상으로 시험을 실시하였다. 이상의 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 본 화강암에 분포하는 결을 형성하는 미세균열의 발생빈도 및 길이를 측정한 결과 그 차이는 미미하나 2번결, 1번결, 3번결의 순으로 잘 발달하고 있다.

2. 일축압축강도의 약 75% 응력수준에서 실시한 응력완화시험 결과 시험개시 190시간 이내에 10~24 MPa의 응력완화를 보이며, 1번결과 2번결이 재하방향으로 분포하는 F-1 공시체가 가장 많은 응력완화를 보였다.

3. 응력완화시험 초기에 공시체별 거동의 분산이 심하고, 또한 시험개시 10시간 이내에 약 39%~49%의 완화응력이 발생한다.

4. 스펙트럼 분석결과 응력완화시험 종료시점(경과시간 200~300시간)에서도 모든 공시체에서 평형 상태에 도달하지 못했으며, 본 화강암의 시간의존성 거동을 얻기 위해서는 더 긴 시험시간이 필요하리라 사료된다.

참 고 문 헌

- Akagi, T., 1981, Application of generalized rheological model to creep behavior of rock,

- J. Soc. Mater. Sci., Japan, 30, 898-904.
- Boukharov, G., Chanda, M. and Boukharov, M., 1997, The three processes of brittle crystalline rock creep, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 32, 325-335.
- Chen, Y., Nishiyama, T., Kita, H. and Sato, T., 1997, Correlation between microfracture type and splitting planes of Inada granite and Kurihashi granodiorite, *J. Japan Soc. Eng. Geol.*, 38, 196-204.
- Haupt, M., 1991, A constitutive law for rock salt based on creep and relaxation tests, *Rock Mech. Rock Engn.*, 24, 179-206.
- Jeong, G. and Ichikawa, Y., 1994, An experimental study on damage propagation of intact granite, *J. Soc. Mat. Sci., Japan*, 43, 317-323.
- Mardon, D., Kronenberg, A., Handin, J., Friedman, M. and Russel, J., 1990, Mechanisms of fracture propagation in experimentally extended Sioux Quartzite, *Tectonophysics*, 182, 259-278.
- Okubo, S., Nishimatsu, Y. and Fukui, K., 1991, Complete creep curves under uniaxial compression, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 28, 77-82.
- Peng, S. and Johnson, A., 1972, Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, 9, 37-86.
- Peng, S. and Podnieks, E., 1972, Relaxation and the behavior of failed rock, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, 9, 699-712.
- Segall, P., 1984, Formation and growth of extensional fracture sets, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95, 454-462.
- Seo, Y. and Jeong, G., 1999, Micro-damage process in granite under the state of water-saturated triaxial compression, *지질공학*, 9, 243-251.
- Seo, Y., Seiki, T. and Ichikawa, Y., 1999, Crack generation and propagation during stress relaxation of crystalline rock under water-saturated uniaxial condition, *J. Soc. Mat. Sci., Japan*, 48, 1255-1262.
- Simmons, G., Todd, T. and Baldrige, W., 1975, Toward a quantitative relationship between elastic properties and cracks in low porosity rocks, *Ame. J. Sci.*, 275, 318-345.
- Takahashi, Y., 1982, Geology of the granitic rocks in the Tsukuba area, *J. Geol. Soc. Japan*, 88, 177-184.
- 山本三三三, 1972, 材料科學のための物體の變形學, 誠文堂, 150-219.

서용석

한국건설기술연구원 토목연구부

경기도 고양시 일산구 대화동 2311번지, 411-712

Tel : 031-910-0225

Fax : 031-910-0211

e-mail : ysseo@kict.re.kr