

SCB 試験による水蒸気環境下における 岩石の破壊靱性の評価*

尾原 祐三¹ 佐々木 一裕² 吉永 徹³

Estimation of Fracture Toughness of Rocks Under Water Vapor Pressure by Semi-Circular Bend (SCB) Test

by Yuzo OBARA^{a*}, Kazuhiro SASAKI^a and Toru YOSHINAGA^b

- a. Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, Kumamoto 860-5111, Japan (* Corresponding author: E-mail obara@kumamoto-u.ac.jp)
b. Faculty of Engineering, Kumamoto University, Kumamoto 860-5111, Japan

The influence of water vapor pressure of surrounding environment on fracture toughness of rock is clarified, based on the results of a series of semi-circular bend (SCB) test under various water vapor pressures. The rocks used in the test are Kumamoto andesite and Kunnum basalt, and the range of water vapor pressure is from 10^{-3} to 10^3 Pa. The results obtained in this paper are summarized as follows:

- 1) Elastic modulus at 60% of maximum load depends on water vapor pressure, and decreases with increasing water vapor pressure.
- 2) Fracture toughness depends on water vapor pressure, and decreases with increasing water vapor pressure. The tendency of influence of water vapor pressure on fracture toughness is the same as that on uniaxial compressive strength or tensile strength. The relation between fracture toughness and water vapor pressure can be represented as:
$$K_{IC} = \beta p^{-m}$$
where β is a constant and $-m$ is the slope of the approximated line on the logarithmic graph. The value m is 0.013 for Kumamoto andesite and 0.012 for Kunnum basalt, respectively.
- 3) Based on above results for the SCB test, models for load-displacement curve and for relation between crack velocity and stress intensity factor are suggested.
- 4) The time until fracture was calculated under the assumption of the crack velocity $V = \alpha K_I^n$ and the above equation, where α is a constant and n is stress corrosion index. It is shown that the rock mass of large n and small m should be selected to assure the stability for long term in spite of change in surrounding water vapor environment.

KEY WORDS: Rock, Semi-Circular Bend Test, Fracture Toughness, Water Vapor Pressure, Stress Corrosion

1. 緒 言

岩石に外力が作用すると岩石中の先んき裂先端の応力拡大係数が増大し、この値が岩石固有の破壊抵抗値、すなわち破壊靱性に達すると急激なき裂の進展が起こる。これまでの研究によると、岩石の破壊靱性は温度や水の影響を受けることが知られている。このうち温度の影響に関しては、Meredithら¹⁾が花崗岩と斑レイ岩を用いて真空中で20～400℃の温度範囲でDT (Double torsion) 試験を行い、斑レイ岩の破壊靱性は100℃までは上昇するが、その温度を超えると減少し、400℃では20℃のその60～65%と

なることを示している。また、船津ら²⁾は来待砂岩のSCB (Semi-circular Bend) 試験を実施し、温度が125℃まではほぼ一定の破壊靱性を示すが、その温度以上になると温度の上昇にともなう増加することを示している。一方、水の影響に関しては、花崗岩を用いた実験があり、室温状態の下で大気中と水中において定ひずみ三点曲げ試験結果を比較して一定のひずみ速度下での水中の破壊靱性は大気中のそれに比べて低いことを示している³⁾。また、歌川ら⁴⁾は乾燥させた3種類の岩石供試体を用い、試験中にき裂先端に常に水を供給し続けたCB (Chevron Bend) 試験を行って破壊靱性を評価し、空気中の破壊靱性に比較して10～37%程度低下することを示している。

岩石の一軸圧縮強度や引張強度は、周辺環境、とくに大気中の水蒸気に影響され、周辺環境の水蒸気圧が増加するとそれらの強度は減少することが示されている⁵⁻⁹⁾。しかし、同じ強度特性値である破壊靱性に及ぼす水蒸気の影響については十分に明らかにされていないのが現状である。また、地下空間の周辺岩盤を取り巻く環境が長期に亘って一定であるとは考えられないので、岩盤

*2006年9月17日受付 2007年3月28日受理 資源・素材学会平成17、18年度春季大会において一部発表

1. 普通会員 工博 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 環境共生工学専攻

2. 普通会員 熊本大学学生 大学院自然科学研究科 社会環境工学専攻

3. 普通会員 熊本大学技術職員 工学部技術室

[著者連絡先] FAX: 096-342-3686 (熊本・尾原)

E-mail: obara@kumamoto-u.ac.jp

キーワード: 岩石, 三点曲げ試験, 破壊靱性, 水蒸気圧, 応力腐食

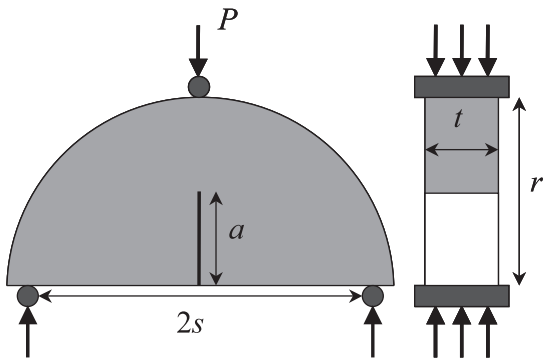


Fig.1 Schematic view of semi-circular bend test.

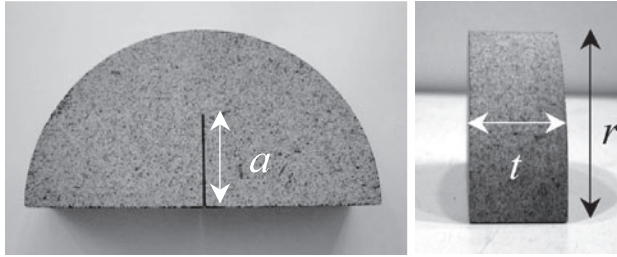


Fig.2 Semi-circular specimen of Kumamoto andesite with artificial notch.

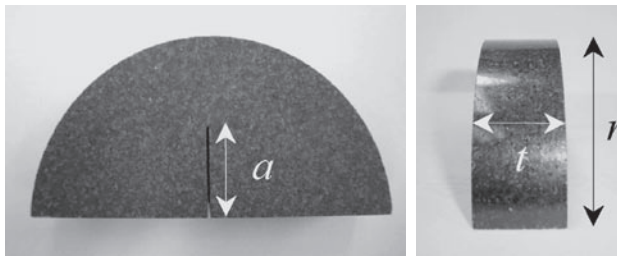


Fig.3 Semi-circular specimen of Kunnum basalt with artificial notch.

の長期安定性を考える上では、水蒸気圧が破壊靱性に及ぼす影響について明らかにしておく必要がある。

さて、岩石を対象とした破壊靱性試験法としては、円柱形のコアを用いた試験法である SENRBB (Single Edge Notched Round Bar in Bending) 試験法^{10,11)}や、岩石特有の非線形性を考慮するためにシェブロンノッチと呼ばれる楔形の子裂を持った試験片を用いた CB (Chevron Bend) 試験法^{12,13)}、SR (Short Rod) 試験法¹⁴⁾、CCNBD (Cracked Chevron-Notched Brazilian Disk) 試験法¹⁵⁾、SCB (Semi-circular Bend) 試験法¹⁶⁻¹⁸⁾などがある。このうち CB、SR 試験法は、国際岩の力学学会 (International Society for Rock Mechanics, ISRM) のモード I の破壊靱性評価の推奨方法である。ここに挙げた試験法の中で、供試体作成および試験装置や方法を考慮すると、SCB 試験法が比較的簡易に実施できると考えられる。

そこで本研究では、熊本安山岩およびクンナム玄武岩 (呼称: インド黒色花崗岩) の供試体を用いて様々な水蒸気環境下において SCB 試験を実施し、それぞれの岩石のモード I の破壊靱性を評価するとともに、破壊靱性の水蒸気環境依存性を明らかにした。さらに、得られた結果に基づいて岩石の破壊に対して簡単なモデル化を行い、岩石が破壊に至るまでの時間を試算し、岩石の長期安定性に関して検討した。

2. SCB 試験

SCB 試験法に用いる供試体を Fig.1 に示す。供試体は半径 r 、

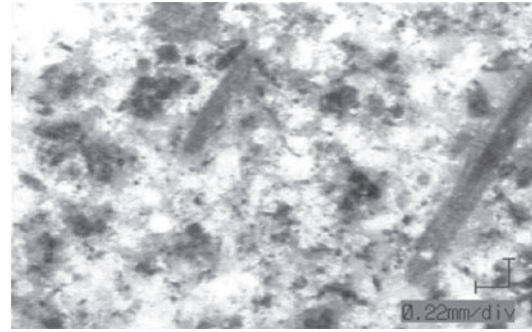


Fig.4 Surface of Kumamoto andesite.

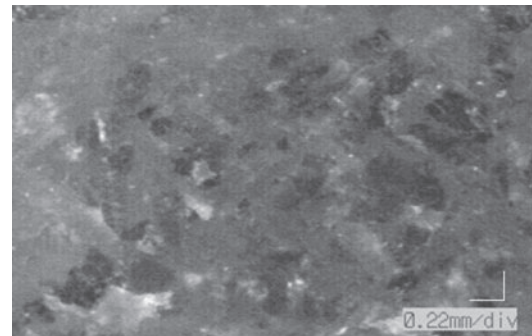


Fig.5 Surface of Kunnum basalt.

厚さ t の半円盤であり、長さ a で前縁が直線の人工き裂を有している。試験では、供試体の下部を $2s$ 離れた 2 つのローラで支え、上部の 1 点をローラで載荷することにより曲げ荷重を負荷し、試験時に記録した最大荷重から破壊靱性を評価する。

モード I の破壊靱性 K_{IC} は、正規化された応力拡大係数 Y_I 、最大荷重 P_{max} および供試体の寸法を用いて次式で表される。

$$K_{IC} = \frac{P_{max} \sqrt{\pi a}}{2rt} Y_I \dots\dots\dots (1)$$

ここで、正規化された応力拡大係数 Y_I は供試体寸法および下部の載荷点距離によって決まる係数である。本試験での $r/s=0.8$ の場合、 Y_I は a/r の関数で与えられ¹²⁾、これを多項式近似すると次式ようになる。

$$Y_I = 5.5634 - 11.219(a/r) + 17.687(a/r)^2 + 124.89(a/r)^3 - 364.54(a/r)^4 + 302.14(a/r)^5 \dots\dots\dots (2)$$

3. 供試体

試験に用いた熊本安山岩とクンナム玄武岩の供試体をそれぞれ Fig.2 および Fig.3 に示す。また、Fig.4 および Fig.5 に示す岩石の表面を見ると、両者はガラス質の石基、斑晶から構成されていることがわかる。熊本安山岩は主に斜長石、輝石および角閃石、その他石基で構成され、空隙率は約 7% である。この安山岩は等方均質であることが確かめられている¹⁹⁾。一方、クンナム玄武岩について X 線回折による成分の定性分析を行った結果、チタン、アルカリ成分等を含んでいるため、玄武角閃石であると推測される。また、一辺が 30cm のクンナム玄武岩の立方体岩石ブロックの弾性波速度測定を行ったところ、弾性波速度の異方性は見られず、どの方向においても約 6600m/s であった。また、Fig.5 に見られるように、構成鉱物の粒径はほぼそろっており、等方均質と

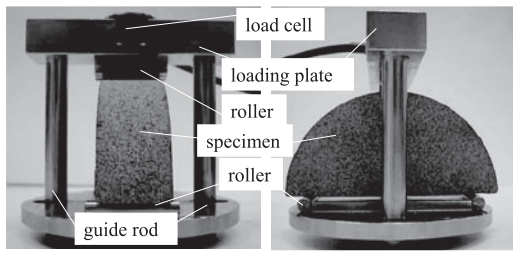


Fig.6 Setup of specimen.

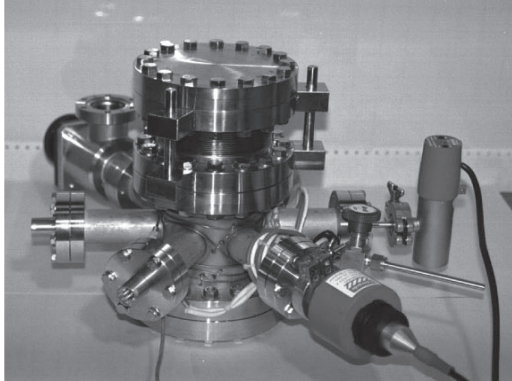


Fig.7 Photograph of vacuum chamber.

みなすことができる。

両岩石とも、半径 r を 37.5mm、厚さ t を約 20mm の円盤を半円形に切断し、円の中心を通り、切断面に垂直な人工き裂をダイヤモンドブレードを用いて作成する。人工き裂の幅は約 0.4mm であり、長さ $a \approx 0.5r = 18.8\text{mm}$ としている。Lim ら¹⁷⁾ は直径 55 ~ 144mm、厚さ 10 ~ 50mm、人工き裂長さ 3 ~ 50mm の供試体を用いて SCB 試験を行い、これらの寸法が破壊靱性に与える影響について検討している。この結果、供試体の厚さは実験の寸法範囲ではほとんど影響が見られず、また、人工き裂が 6mm を越えたとその影響はほとんど見られないこと明らかにしている。本試験での供試体寸法はこの結果を考慮して決定した。

岩石の周辺環境の影響を検討するためには、供試体内の水分を完全に取り除く必要がある。そこで、供試体は温度 100°C で 30 日間炉乾燥を行い、その後試験直前までデジケータ内で保存した。

4. 試験装置

供試体が設置された SCB 試験用治具を Fig.6 に示す。供試体は $2s$ 離れた直径 5mm のステンレスの 2 本のローラ上に置かれ、曲げ荷重は上部のローラを介して載荷される。ロードセルを備えた載荷板はガイド棒によって上下に自由に動く。なお、支点間距離は $2s = 60\text{mm}$ ($s/r = 0.8$) である。

供試体の周辺環境の水蒸気を制御し、その環境下で SCB 試験を実施するために、Fig.7 に示すような真空チェンバーを用いた。チェンバーはステンレス鋼で製作されている。チェンバーには、5 つのポートとガス導入バルブが備えられており、上部には載荷棒を備えたベローズ付きフランジが取り付けられている。5 つのポートのうち、内部に設置したセンサーからの出力取り出しプラグのついたものが 2 つあり、残りのポートには排気装置につながる排気用バルブが取り付けられている。排気用バルブは、Fig.8 に示すように、フレキシブルチューブによって低真空用のロータリーポンプと超高真空用のターボ分子ポンプからなる排気装置に接続されている。

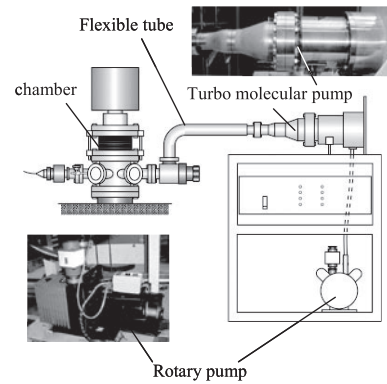


Fig.8 Schematic view of the evacuation system.

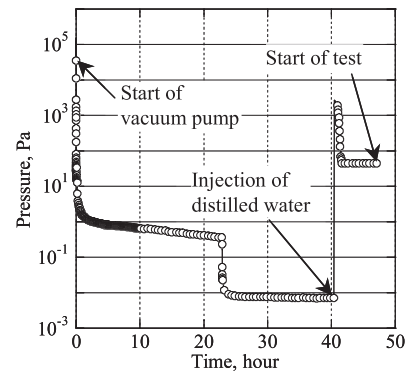


Fig.9 Change of the pressure in the chamber during the test.

SCB 試験用治具は真空チェンバー内の載荷板の上に設置される。チェンバーは材料試験機にセットされ、材料試験機でベローズ付きフランジを下方に押すことにより載荷棒を介し供試体に載荷される。試験時の荷重は、治具の上部載荷板の上に設置されたロードセルで測定される。なおチェンバー内の排気を行う際に上部のフランジが下方に移動して供試体が破壊するため、チェンバー外部に取り付けた 2 本の鋼棒とばねでそれを防止している。

試験は容量 100kN のサーボコントロール材料試験機によって行われる。試験時の荷重データは、治具の上部支持棒の上に設置されたロードセルで測定され、データロガーに送られる。また、載荷点変位は材料試験機の変位計で測定され、コントロールパネルを通してデータロガーに送られる。

チェンバー内の水蒸気圧の測定には、低真空用のピラニー真空計と高真空用のペンギン真空計を用いた。これらの真空計で測定されたチェンバー内の圧力はコントロールパネルを通じて電圧として出力される。

5. 試験方法

試験は、チェンバー内の空気を水蒸気に置き換え、水蒸気圧を様々に設定して行われる。試験中のチェンバー内の圧力変化を Fig.9 に示す。まず、供試体をチェンバー内にセットし、ロータリーポンプを起動させると、チェンバー内の圧力は減少する。次に、 p が 10⁰Pa になったことを確認してターボ分子ポンプを作動させると、 p はさらに減少する。 p がおよそ 10⁻³Pa まで減少した後、排気用バルブを閉じると同時にガス導入バルブより蒸留水をチェンバー内に吸入させる。この時 p は飽和水蒸気圧である $1.0 \times 10^3\text{Pa}$ となり、その後再度ポンプを起動させ、所定の水蒸気圧にまで排気した。この操作によりチェンバー内はほぼ完全に水蒸気環境に置き換えられたと考えられる。この状態を約 6 時間保持し

Table 1 Results and conditions of SCB test for Kumamoto andesite.

Specimen No.	Water vapor pressure p (Pa)	Radius r (mm)	Thickness t (mm)	Crack length a (mm)	Normalised stress intensity factor Y_I	Maximum load P_{max} (kN)	Fracture toughness K_{IC} (MN/mm ^{3/2})
1	7.0×10^2	37.0	19.6	19.3	6.93	1.28	1.51
2	4.4×10^2	37.0	20.3	18.9	6.78	1.35	1.48
3	2.0×10^2	37.1	20.2	19.2	6.88	1.31	1.48
4	1.1×10^1	36.8	19.8	19.0	6.86	1.36	1.56
5	1.4×10^0	37.0	20.3	19.1	6.85	1.44	1.61
6	1.1×10^0	36.8	20.3	18.9	6.82	1.50	1.67
7	1.4×10^{-1}	37.0	20.0	18.8	6.75	1.50	1.66
8	9.5×10^{-3}	36.9	19.9	19.0	6.84	1.47	1.68
9	3.7×10^{-3}	36.8	20.0	19.0	6.86	1.52	1.74

Table 2 Results and conditions of SCB test for Kunnum basalt.

Specimen No.	Water vapor pressure p (Pa)	Radius r (mm)	Thickness t (mm)	Crack length a (mm)	Normalised stress intensity factor Y_I	Maximum load P_{max} (kN)	Fracture toughness K_{IC} (MN/mm ^{3/2})
1	1.4×10^3	38.0	20.1	18.6	6.52	2.05	2.12
2	7.0×10^2	38.5	20.2	18.4	6.39	2.42	2.39
3	4.8×10^2	38.3	20.0	18.5	6.45	2.30	2.33
4	8.0×10^1	38.0	20.1	18.8	6.58	2.26	2.26
5	1.3×10^1	37.6	19.8	19.1	6.75	2.09	2.09
6	6.6×10^0	38.0	20.1	18.6	6.52	2.32	2.39
7	1.2×10^0	38.4	20.1	19.0	6.58	2.40	2.50
8	5.0×10^{-1}	38.0	19.8	19.0	6.65	2.40	2.59
9	5.0×10^{-2}	38.0	19.5	18.6	6.52	2.40	2.56
10	2.0×10^{-2}	38.0	20.0	19.2	6.71	2.29	2.48
11	8.0×10^{-3}	37.7	19.9	19.0	6.69	2.35	2.56

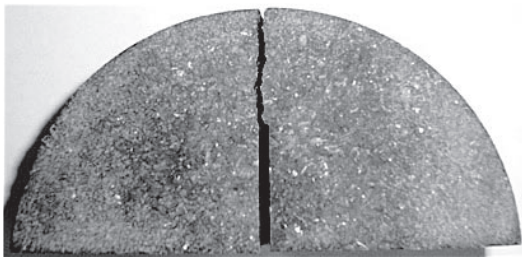


Fig.10 Fractured specimen.

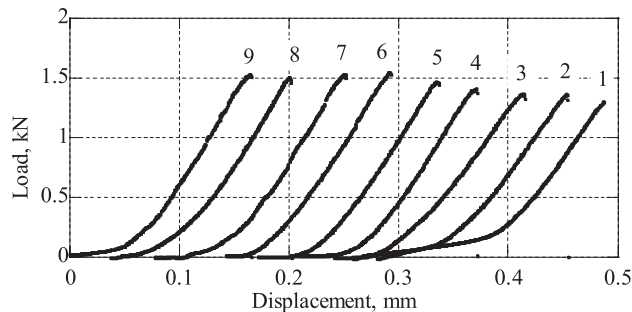


Fig.11 Load-displacement curves of all specimens for Kumamoto andesite.

た後、荷重を行った。荷重は変位制御で行い、変位速度は0.01mm/minに設定した。

6. 試験結果と考察

熊本安山岩を用いた SCB 試験の条件と結果を Table 1 に示す。また、クナム玄武岩を用いた SCB 試験の条件と結果を Table 2

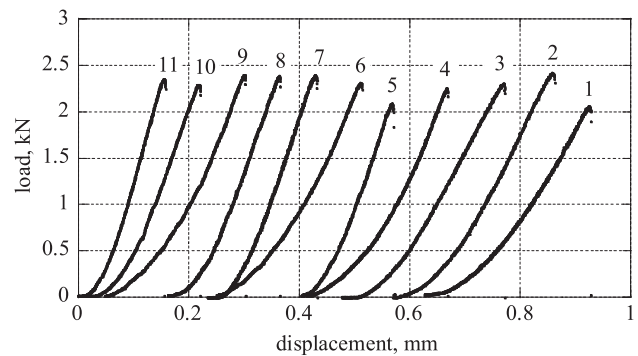


Fig.12 Load-displacement curves of all specimens for Kunnum basalt.

に示す。供試体数は熊本安山岩9個、クナム玄武岩11個であり、水蒸気圧が $3.7 \times 10^{-3} \sim 1.4 \times 10^3$ Pa の下で試験が行われた。

試験後の供試体の破壊の様子を示すと Fig. 10 のようである。人工き裂から上部の荷重点に向かってほぼ直線的に破壊が発生していることが確認できる。

両岩石の荷重-変位曲線を Fig. 11 および Fig. 12 に示す。図はそれぞれの供試体から得られた荷重-変位曲線を一つのグラフ上に表したものである。荷重初期では下に凸の曲線となるが、荷重が進むとほぼ直線を示しており、さらに荷重が進むと直線から離れ、最大荷重を履歴した後、わずかに荷重が減少して破壊が発生している。荷重初期においてグラフの傾きに差が見られるが、これは供試体の面の仕上げの精度の違いや供試体と器具上部のローラとの接触状態に各供試体で差があったためと思われる。

つぎに、荷重-変位曲線において最大荷重の60%の荷重点を通る接線変形係数を Fig. 13 および Fig. 14 に示す。横軸は水蒸

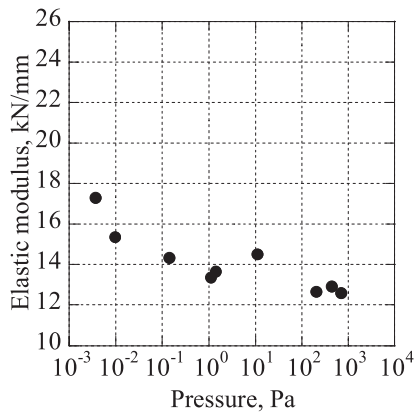


Fig.13 Relationship between elastic modulus of 60% of maximum load and water vapor pressure for Kumamoto andesite.

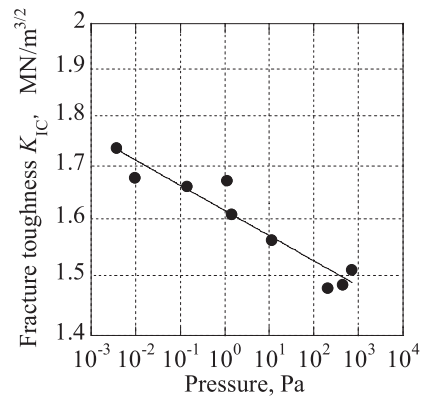


Fig.15 Relationship between fracture toughness and water vapor pressure for Kumamoto andesite.

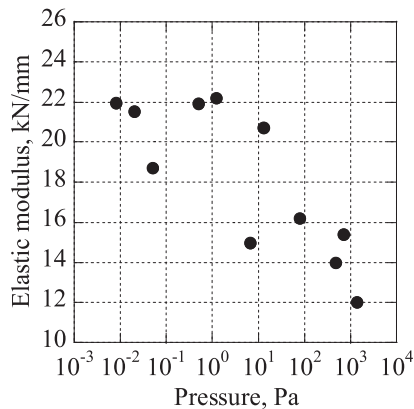


Fig.14 Relationship between elastic modulus of 60% of maximum load and water vapor pressure for Kunnum basalt.

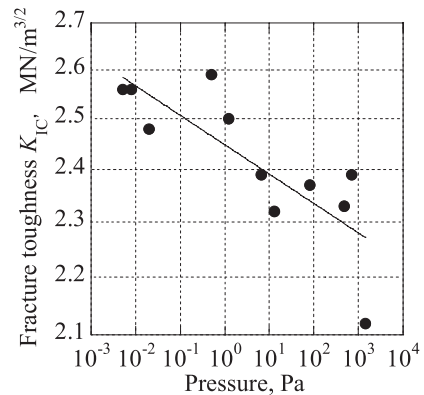


Fig.16 Relationship between fracture toughness and water vapor pressure for Kunnum basalt.

気圧が対数で示されている。バラツキは見られるものの、接線変形係数は水蒸気圧に依存し、水蒸気圧が低くなるとその値は大きくなり、水蒸気圧が高くなるとその値は小さくなる傾向が見られる。
 つぎに、破壊靱性 K_{IC} と水蒸気圧 p との関係を両対数グラフに示すと Fig. 15 および Fig. 16 のようである。各供試体における破壊靱性を黒丸でプロットし、回帰曲線を実線で示す。破壊靱性は水蒸気圧に依存し、水蒸気圧の減少に伴いその値が増加している。また、バラツキはあるものの、その関係は次式で示す直線で表される。

$$K_{IC} = \beta p^{-m} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $-m$ は直線の傾きであり、その値は熊本安山岩で $m=0.013$ 、クンナム玄武岩で $m=0.012$ である。このように、破壊靱性の水蒸気圧依存性が明らかとなった。

また、係数 m は両者でほぼ同じ値となった。これは安山岩と玄武岩はともに火山岩であり、石基の中に斑晶が散在している斑状組織を持っており、造岩鉱物もよく似ている。したがって、強度に違いはあるものの、組織や鉱物組成が類似している岩石における破壊靱性への水蒸気圧の影響は同程度のものであるが、この結論を得るためにはさらに多くの試験が必要と考えられる。

さて、従来の研究による応力拡大係数とき裂進展速度の関係を Fig. 17 (a) に示す。領域 I では、き裂先端部での二酸化珪素と環境物質（ここでは水蒸気）の化学反応、いわゆる応力腐食を起こすことによってき裂が進展する。この直線は次章の式 (4) あるい

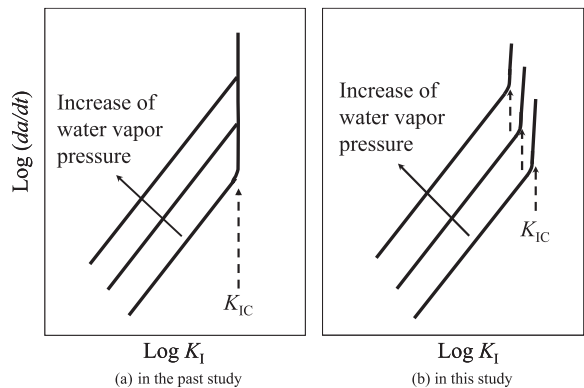


Fig.17 Relationships between crack velocity and stress intensity factor.

は (5) 式で書かれ、その傾きは応力腐食指数と呼ばれている。さらに応力拡大係数が増加すると領域 III が現れる。ここでは、化学的要因や環境には依存せずに、力学的にき裂の進展が起きる。また、周辺環境の水蒸気圧が増加すると、き裂進展速度は速くなると考えられている²⁰⁾。なお、ガラスやセラミックスではこれらの間にき裂進展速度が一定の領域 II が観測される²¹⁾。この領域はき裂先端への環境因子の移動速度によってき裂進展が支配される領域であるが、領域 II は一般には岩石で観測されることはほとんど無く、ある特殊な実験条件下で観測されている。たとえば、瀬戸ら²²⁾によると、乾燥した砂岩を用いて水中で DT 試験を行うと領域 II が現れるが、水で飽和した供試体ではこの領域

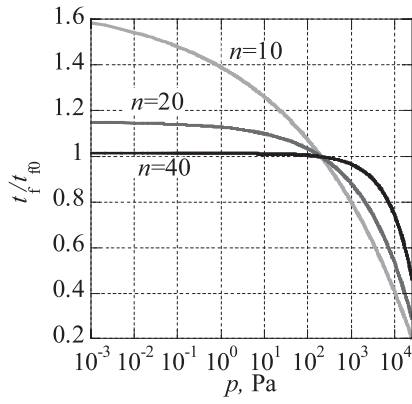


Fig.18 Estimation of long-term stability in $m=0.02$.

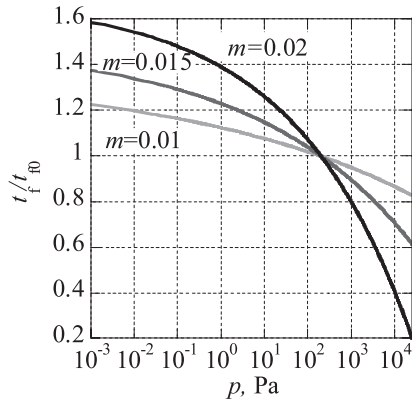


Fig.19 Estimation of long-term stability in $n=10$.

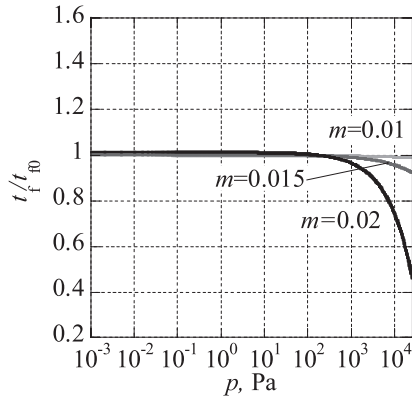


Fig.20 Estimation of long-term stability in $n=40$.

は観測されないことが報告されている。ここでは領域 II については考慮せずに、上記の結果と本研究における水蒸気圧が増加すると破壊靱性は減少するというを総合すると、従来考えられていた関係は Fig.17 (b) に示すようなモデルに修正されると考えられる。

7. 岩石の長期安定性に関する考察

Meredith らは花崗岩を用いて温度を変化させるとともに、水蒸気圧を変化させた DT 試験からき裂進展速度 V を次式のように表している¹⁾。

$$V = V_0 \exp(-H/RT) K_I^n \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 V_0 と n は定数で、 n は応力腐食指数と呼ばれている。 H は活性化エンタルピー、 R はボルツマン係数、 T は絶対温度である。いま、 T が一定ならば H も一定と考えられるので、上式は次のように書ける。

$$V = \alpha K_I^n \dots\dots\dots (5)$$

長さ a_i のき裂が進展して a_c になった時点で岩石が破壊すると仮定して上式を積分すると、一定応力下における破壊時間 t_f を求めることができる。

$$t_f = \int_{a_i}^{a_c} \frac{da}{V} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $K_I = \sigma Y \sqrt{a}$ (Y : 定数) なので、

$$t_f = \frac{2}{\sigma^2 Y^2} \int_{K_{Ii}}^{K_{Ic}} \frac{K_I}{V} dK_I = \frac{2}{\alpha \sigma^2 Y^2} \int_{K_{Ii}}^{K_{Ic}} K_I^{1-n} dK_I = \frac{2}{\alpha \sigma^2 Y^2 (2-n)} (K_{Ic}^{2-n} - K_{Ii}^{2-n}) \dots\dots\dots (7)$$

となる。一方、破壊靱性が水蒸気圧の影響を受け、 $K_{Ic} = \beta p^{-m}$ と表される場合には上式に代入して

$$t_f = \frac{2}{\alpha \sigma^2 Y^2 (2-n)} (\beta^{2-n} p^{-m(2-n)} - K_{Ii}^{2-n}) \dots\dots\dots (8)$$

を得る。ここに、 m は実験定数であるが、式 (4) や (5) に現われる応力腐食指数と同様な物理的な意味を持つ係数と理解される。

いま、 $\alpha = 2.74 \times 10^{-12} \text{m}^{5/2}/\text{MN} \cdot \text{s}$ 、 $\sigma = 5 \text{MPa}$ 、 $Y = 1$ 、 $\beta = 1.62 K_{Ii} = 1.3 \text{MN}/\text{mm}^{1/2}$ と仮定する。まず、 $m = 0.02$ と一定とした場合、 n を変数として破壊時間を求めると Fig. 18 のようである。図の縦軸は $p = 2.0 \times 10^2 \text{Pa}$ (常温において湿度約 10% に相当) の時の破壊時間 t_{f0} で除して正規化した破壊時間 t/t_{f0} として示している。 n が小さい場合は水蒸気圧が減少するとともに、破壊時間が漸増しているが、 n が增大すると、水蒸気圧が低くなっても破壊時間に大きな変化は見られなくなる。一方、水蒸気圧が増加すると n が小さいほど破壊時間が急激に短くなっているが、 10^3Pa を超えると破壊時間の減少の程度は n の値の大小にあまり影響しない。すなわち、 n が小さい場合水蒸気圧の変化に大きく影響を受けるが、その値が大きい場合水蒸気圧の増加に対して敏感に挙動することが明らかである。

つぎに、 $n = 10$ および 40 の場合、 m を変数として破壊時間を算出すると Fig. 19 および Fig. 20 のようである。 $n = 10$ の場合、 m が大きくなると破壊時間に対する水蒸気圧の影響は大きく、反対に小さくなると水蒸気圧の影響は小さくなっている。一方、 $n = 40$ の場合、水蒸気圧が減少しても m に関わらず破壊時間は変化せず、水蒸気圧の影響はほとんど現われないが、水蒸気圧が増大すると m が大きいほど破壊時間は減少の割合が大きくなっている。

これらの結果をまとめると、 n が小さく、かつ m が大きい岩石ほど破壊時間に及ぼす周辺環境の水蒸気圧の影響が大きい。したがって、岩石を構造材料として用いる場合や地下に岩盤構造物を作る場合、 n の値が小さく、 m の値が大きい岩石や地層であるとき、周辺環境の水蒸気圧を低く保つことができれば破壊までの時間を伸ばすことができる。しかし、その反面、水蒸気圧が高くなると破壊時間が急激に減少することがわかる。このため、周辺環境の水蒸気圧の変化に関わらず長期に亘ってそれらの安定性を保障するためには、 n が大きく、かつ m が小さい、すなわち応力腐食の影響の少ない岩石や地層を選定すべきと考えられる。

8. 結 言

熊本安山岩とクンナム玄武岩を用いた SCB 試験を実施し、破壊靱性の周辺環境の水蒸気圧依存性について検討した。さらに、試験より得られた結果から岩石の破壊時間の水蒸気圧依存性を明らかにするとともに、岩石の長期安定性について検討した。以下に得られた結果を示す。

- (1) 周辺環境の水蒸気圧を制御することのできる試験装置を開発し、水蒸気圧が $3.7 \times 10^{-3} \sim 1.4 \times 10^3 \text{Pa}$ の環境下において両岩石を用いた SCB 試験を実施した。
- (2) 両岩石ともに、SCB 試験により得られる荷重-変位曲線における接線変形係数は水蒸気圧に依存することを明らかにした。また、影響の程度はクンナム玄武岩の方が熊本安山岩に比較して大きいことを示した。
- (3) SCB 試験を行った結果、両岩石ともに破壊靱性 K_{IC} は水蒸気圧 p に依存し、水蒸気圧が低いと大きな値となり、水蒸気圧が高いとその値は小さくなる傾向が見られた。また、破壊靱性 K_{IC} と水蒸気圧 p の関係は、次式で表されることを明らかにした。

$$K_{IC} = \beta p^{-m}$$

ここに、 $-m$ は直線の傾きであり、その値は熊本安山岩で $m=0.013$ 、クンナム玄武岩で $m=0.012$ と、ほとんど同じであった。さらに、破壊靱性にも一軸圧縮強度や引張強度と同様な環境依存性があることを明らかにした。また、この係数は応力腐食指数 n と同様な物理的な意味をもつ係数であると論じた。

- (4) n が小さく、かつ m が大きい岩石ほど破壊時間に及ぼす周辺環境の水蒸気圧の影響が大きいことを明らかにした。ま

た、岩石を構造材料として用いる場合や地下に岩盤構造物を作る場合、 n の値が小さく、 m の値が大きい岩石や地層であるとき、周辺環境の水蒸気圧を低く保つことができれば破壊までの時間を伸ばすことができるが、その反面、水蒸気圧が高くなると破壊時間が急激に減少することを明らかにした。さらに、周辺環境の水蒸気圧の変化に関わらず長期に亘ってそれらの安定性を保障するためには、 n が大きく、かつ m が小さい、すなわち応力腐食の影響の少ない岩石や地層を選定すべきと論じた。

References

- 1) Meredith, P.G., B.K. Atkinson: *Phys. Earth Planet. Int.*, **39**(1985), 33-51.
- 2) Funatsu, T., M. Seto, H. Shimada, K. Matsui: *Journal of MMIJ*, **118**(2002), 605-611.
- 3) The Japan Society of Mechanical Engineers: *Rock fracture mechanic and its application*, (Korona-Sha, Tokyo, 1989), pp. 40-47.
- 4) Utagawa, M., M. Seto, K. Katsuyama, K. Matsui: *Journal of MMIJ*, **114**(1998), 856-861.
- 5) Atkinson, B.K.: *Fracture Mechanics of Rock*, (Academic press geology series, Academic press, London, 1979), pp. 111-162.
- 6) Jeong, H.S., S.S. Kang, Y. Obara: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **44**(2007), 321-331.
- 7) Obara, Y., H.S. Jeong, T. Matsuyama, Y. Nara, K. Kanako: *Journal of MMIJ*, **121**(2005), 265-270.
- 8) Jeong, H.S., S.S. Kang, Y. Obara, K. Sugawara: *Journal of MMIJ*, **119**(2003), 19-26.
- 9) Jeong, H.S., Y. Obara: *Journal of MMIJ*, **118**(2002), 599-604.
- 10) Bush, A.J.: *Experimental Mechanics*, **16**(1976), 249-257.
- 11) Ouchterlony, F.: *ASTMSTP*, **745**(1981), 237-256.
- 12) Ouchterlony, F.: *27th U.S. symp. Rock Mech.*, (1986), pp. 177-184.
- 13) Ouchterlony, F.: *Int. J. Rock Mech., Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **23**(1988), 71-96.
- 14) Barker, L.M.: *Eng. Fracture Mech.*, **9**(1977), 361-369.
- 15) Fowell, R.J., Hudson, J.A., Xu, C., Chen, J.F. and Zhao, X.: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **32**(1995), 57-64.
- 16) Chong, K.P. and Kurruppu, M.D.: *Int. J. Fract.*, **26**(1984), 59-62.
- 17) Lim, I.L., Johnston, I.W. and Choi, S.K.: *Eng. Fracture mech.*, **44**(1993), 3, 363-382.
- 18) Lim, I.L., Johnston, I.W., Choi, S.K., Boland, J.N.: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **31**(1994), 185-197.
- 19) Obara, Y., Sakaguchi, K., Nakayama, T., Sugawara, K.: *Proc. ISRM Symposium EUROCK'92*, (Chester, 1992), pp. 7-12.
- 20) Evans, A.G.: *J. Mater. Sci.*, **7**(1972), 1137-1146.
- 21) Nara, Y. K. Kaneko: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **42**(2005), 521-530.
- 22) Seto, M., M. Utagawa, W.J. Jung: *Journal of MMIJ*, **116**(2000), 630-635.