



SCB 試験による水蒸気圧下での 種類の異なる岩石の破壊靱性の評価*

片岡みなみ¹ 尾原祐三²

Estimation of Fracture Toughness of Different Kinds of Rocks under Water Vapor Pressure by SCB Test

by Minami KATAOKA^a and Yuzo OBARA^b

- a. Doctoral Student, Architectural and Civil Engineering, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, 2-39-1, Kurokami, Chuo-ku, Kumamoto, 860-8555 Japan (Corresponding author, E-mail: 127d9401@st.kumamoto-u.ac.jp)
- b. Professor, Civil and Environmental Engineering, Graduation School of Science and Technology, Kumamoto University

In order to investigate the influence of water vapor pressure of surrounding environment on mode I fracture toughness of rock, a series of Semi-Circular Bend (SCB) tests under various water vapor pressures were conducted. The water vapor is the most effective agent which promotes stress corrosion of rock. The range of water vapor pressure used in this paper was from 10^{-3} to 10^3 Pa. The rocks used in this paper were African granodiorite (AG), Korean granite (KG), Kimachi sandstone (KS), Kumamoto andesite (KA) and Kunum basalt (KB). Measurement of elastic wave velocity and observation of thin section of these rocks were performed to make clear the micro structures, namely distribution of inherent micro cracks and grains. The results of the SCB test show that the fracture toughness of AG, KG, KA and KB were dependent on the water vapor pressure of the surrounding environment and decreases with increasing the pressure and that the fracture toughness of KS was independent on the pressure. It is considered that this decrease is due to stress corrosion promoted by water vapor. The experimental results also show that the degrees of influence of the water vapor pressure on the fracture toughness for AG was greater than the others. Together with the results and observed micro structures, it was concluded that the degree of the influence is dependent on the distribution and the density of inherent micro cracks.

KEY WORDS: Rock, Fracture Toughness, Semi-Circular Bend (SCB) Test, Water Vapor Pressure, Stress Corrosion, Inherent Micro Cracks

1. 緒 言

先在微小き裂を有する岩石が外力を受けて破壊する際には、まず、この微小き裂の先端から破壊き裂が発生し、それが成長・連結することにより破断面が形成され、最終的に破壊に至るという過程をたどることが知られている。このような岩石の破壊挙動を理解するため、微視的なき裂の進展を力学的に取り扱う学問である線形破壊力学¹⁾が、1970年代から岩盤力学へ導入され、いくつかの書籍が出版されている²⁻⁵⁾。線形破壊力学では、微小き裂の先端付近の応力集中を、そのき裂の形状・寸法および荷重状態に依存する分布関数として表し、応力拡大係数 K で記述する。

*2013年2月5日受付 2013年4月22日受理 Journal of MMIJ, **123** (2007), 145-151, 資源・素材学会平成17, 18, 22, 24年度春季大会および平成24年度秋季大会において一部発表

1. 学生会員 熊本大学 大学院自然科学研究科 環境共生工学専攻 博士後期課程学生

2. 正会員 工博 熊本大学 大学院自然科学研究科 社会環境工学専攻 教授
[著者連絡先] FAX: 096-342-3686

E-mail: 127d9401@st.kumamoto-u.ac.jp

キーワード: 岩石, 破壊靱性, Semi-Circular Bend(SCB) 試験, 水蒸気圧, 応力腐食, 先在微小き裂

岩石に外力が作用するとこの K が増大し、やがて岩石固有の破壊抵抗値である破壊靱性に達したときに、急激な破壊き裂の進展が起こることとなる。したがって、脆性破壊の判定基準や予測のためには、岩石の破壊靱性を考慮することが重要である。

岩石の破壊靱性評価に関する研究はこれまでに数多くなされており、破壊靱性は岩石の置かれた温度状態、含水状態、応力状態などの周辺環境に影響されることが明らかとなっている^{4, 6-9)}。このような要因の中で、とくに周辺環境中の水蒸気の影響について尾原らの研究グループ¹⁰⁻¹³⁾は、水蒸気圧下における岩石の Semi-Circular Bend (SCB) 試験¹⁴⁻¹⁶⁾を実施し、岩石の破壊靱性は水蒸気圧に依存し、水蒸気圧が増加するとその値は減少することを示している。破壊靱性の低下の原因は、周辺環境中の水蒸気の影響により、先在する微小き裂の先端で応力腐食が発生し、き裂の緩進展現象³⁾が起こるためであると指摘している。応力腐食は、き裂先端の応力集中により活性化される化学反応であるため、岩石の微視的構造特性、例えば先在する微小き裂の密度、配向性、形状や、造岩鉱物の種類、粒径、粒子配列などに影響を受け、破壊靱性の水蒸気圧依存性の程度が変化することが推測される。前

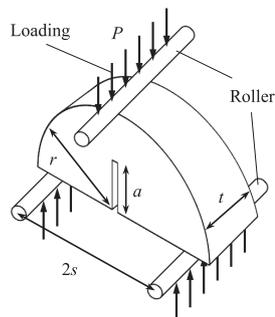


Fig.1 SCB specimen and loading.

述した尾原らの研究では、組織や鉱物の種類が類似している2種類の火山岩のみを対象としており、岩石の微視的構造が破壊靱性の水蒸気圧依存性に及ぼす影響については十分に考察されていない。したがって、破壊靱性の水蒸気圧依存性のさらなる解明のために、岩石の成因の違いによる微視的構造が、破壊靱性の水蒸気圧依存性の有無やその程度に及ぼす影響について明らかにする必要がある。

さて、岩石のモードIの破壊靱性を評価するための試験法がこれまでに数多く提案されており、Single Edge Notched Round Bar in Bending (SENRBB) 試験法¹⁷⁾、Chevron Bend (CB) 試験法¹⁸⁾、Short Rod (SR) 試験法¹⁸⁾、Cracked Chevron-Notched Brazilian Disk (CCNBD) 試験法¹⁹⁾、SCB 試験法などが挙げられる。これらの試験法の中でも、供試体の作製および試験法が簡易であること、同一寸法のコアから多くの供試体が作製可能なことなどから、SCB 試験法は岩石の破壊靱性評価法として多くの研究で用いられている^{10-16, 20-25)}。

そこで本研究では、火山岩のみならず深成岩および堆積岩を含めた5種類の岩石、すなわち、アフリカ産花崗閃緑岩 (African granodiorite)²³⁻²⁵⁾、韓国産花崗岩 (Korean granite)²⁴⁾、来待砂岩 (Kimachi sandstone)²⁵⁾、熊本安山岩 (Kumamoto andesite)^{10-13, 26)}、クンナム玄武岩 (Kunnum basalt)^{11, 12)}を用いて、水蒸気圧下においてSCB試験を実施し、破壊靱性の水蒸気圧依存性を検討した。具体的には、まず、それらの岩石の薄片観察を行い微視的構造の定量化を行った。つぎに、種々の水蒸気圧下においてSCB試験を実施し、それぞれのモードIの破壊靱性を評価した。その後、得られた結果を取りまとめ、岩石の破壊靱性の水蒸気圧依存性について検討するとともに、岩石の応力腐食に関して考察した。

2. SCB 試験

SCB 試験法に用いられる供試体と荷重の様子を Fig. 1 に示す。供試体は半径 r 、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点をローラで荷重することにより曲げ荷重を負荷する。

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 、試験時に記録した最大荷重 P_{max} および供試体の寸法を用いて次式で表される¹⁵⁾。

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

ここで、正規化された応力拡大係数 Y_I は、供試体半径に対する下部の支点間距離 s/r および正規化された人工き裂長さ a/r によって決まる係数である¹⁶⁾。

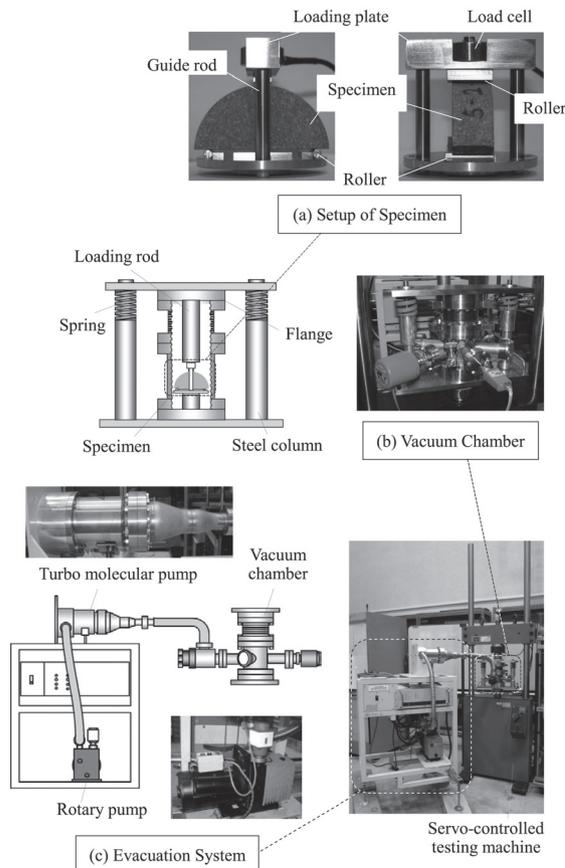


Fig.2 Testing system; (a) Setup of specimen with special equipment placed at vacuum chamber, (b) Vacuum chamber used to control surrounding environment of specimen, (c) Evacuation system.

3. 試験方法

供試体が設置されたSCB試験用治具を Fig. 2 (a) に示す。供試体は直径5mmの2本のステンレスローラ上に置かれ、荷重は上部のローラを介して荷重される。ロードセルを備えた荷重板は、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、Fig. 2 (b) 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、上部には荷重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。ポートには、内部に設置したセンサーからの出力取り出しプラグや、チェンバー内の水蒸気圧を測定するための真空計、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. 2 (c) 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。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のを防ぐため、チェンバー外部に2本の鋼棒とばねを取り付けている。

SCB 試験用治具は、Fig. 2 (b) に示すようにチェンバー内に設置される。さらに、このチェンバーは Fig. 2 に示す容量 100 kN のサーボコントロール材料試験機にセットされ、試験時には材料試験機がチェンバーの荷重盤を押すことにより、荷重棒を介して供試体に荷重される。荷重は変位制御で行い、変位速度は 0.01 mm/min に設定した。試験時の荷重は、治具の上部に設置された

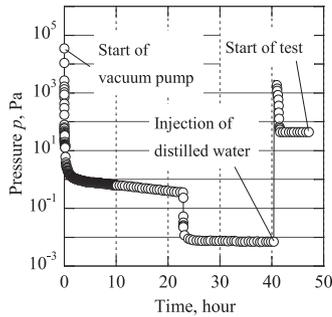


Fig.3 Change of the pressure in the chamber during the experiment.

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。これらのデータ記録時間間隔は1秒である。なお、試験においては岩石が破壊するまでに約20分を要している。

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および高真空用のペンニング真空計を用いた。これらの真空計で測定されたチェンバー内の圧力は、コントローラーを通じて電圧として出力される。

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。試験前のチェンバー内の圧力変化をFig. 3に示す。まず、大気圧においてロータリーポンプを起動させると、チェンバー内の圧力 p は減少する。つぎに、 p が約 10^0 Paになったことを確認し、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^{-2} Pa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。このとき、 p は飽和水蒸気圧である 1.0×10^3 Paとなる。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。この試験環境条件に供試体をなじませるため、この水蒸気圧を約6時間保持した後、載荷を行った。

4. 供試体

4・1 供試体の作製

本研究では、Fig. 4に示すアフリカ産花崗閃緑岩 (African granodiorite, AG), 韓国産花崗岩 (Korean granite, KG), 来待砂岩 (Kimachi sandstone, KS), 熊本安山岩 (Kumamoto andesite, KA) およびクンナム玄武岩 (Kunnum basalt, KB) の5種類の岩石を供試体として使用した。これらのSCB供試体を作製するにあたり、岩石の異方性を確認するため、それぞれの岩石ブロックにおいて直交する3方向の弾性波速度測定を行った。このうちAG, KG およびKSの測定結果をTable 1に示す。この3種の岩石では弾性波速度の異方性が見られたため、Fig. 5に示すように速度の速い方向順にAxis-1, Axis-2, Axis-3と定義し、それぞれの軸と直交する面をPlane-1, Plane-2, Plane-3とした。Axis-3方向の弾性波速度が最も遅いため、これに垂直に存在する微小き裂または空隙が比較的多いといえる。なお、KSのブロックにおいて、堆積層はPlane-1と平行に存在している。一方、KAおよびKBでは弾性波速度の異方性が見られず、どの方向においてもKAで約4500 m/s²⁶⁾, KBで約6600 m/s¹¹⁾であった。この5種の岩石の中では、AG, KBの弾性波速度が6000 m/s台と大きく、最も小さいものは2000 m/s台のKSであった。

SCB供試体は、以下の手順で作製された。まず、それぞれの

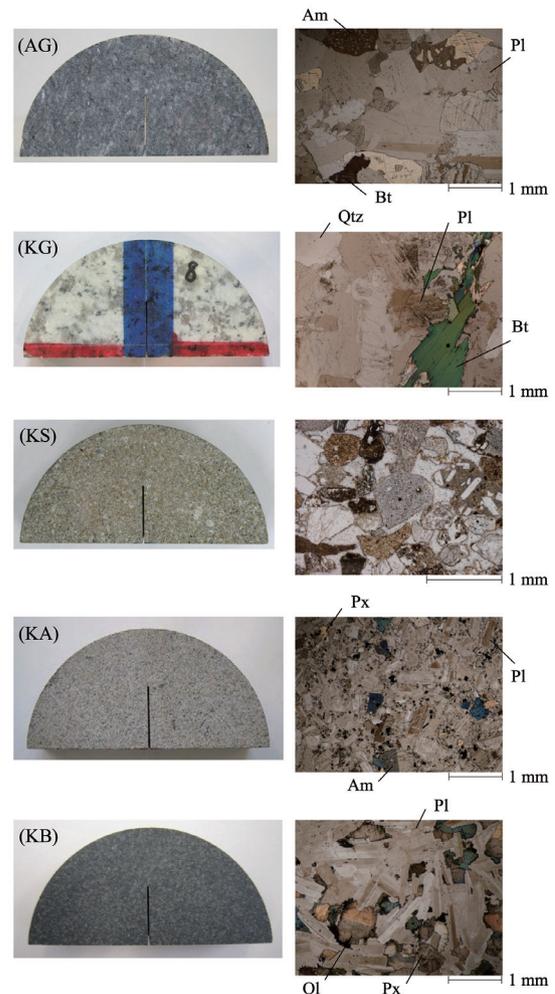


Fig.4 Photographs of SCB specimen and its thin section for African granodiorite (AG), Korean granite (KG), Kimachi sandstone (KS), Kumamoto andesite (KA) and Kunum basalt (KB); Thin sections of AG, KG, KA and KB are crossed nicols and that of KS is parallel nicols. Am: Amphibole, Pl: Plagioclase, Bt: Biotite, Qtz: Quartz, Px: Pyroxene, Ol: Olivine.

Table 1 Elastic wave velocity for African granodiorite (AG), Korean granite (KG) and Kimachi sandstone (KS), and defined axes.

	Elastic wave velocity, m/s		
	Axis-1	Axis-2	Axis-3
AG	6760	6580	6540
KG	3990	3850	3640
KS	2640	2590	2580

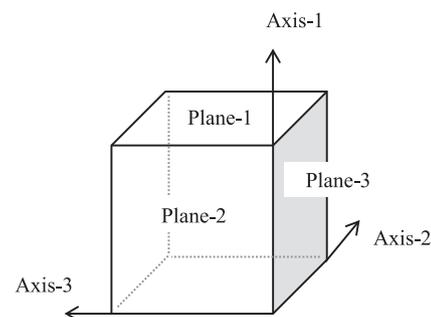


Fig.5 Definition of axes and planes of rock block based on measured elastic wave velocity; Axis-1 is the direction of the fastest velocity, Axis-2 is intermediate and Axis-3 is the lowest.

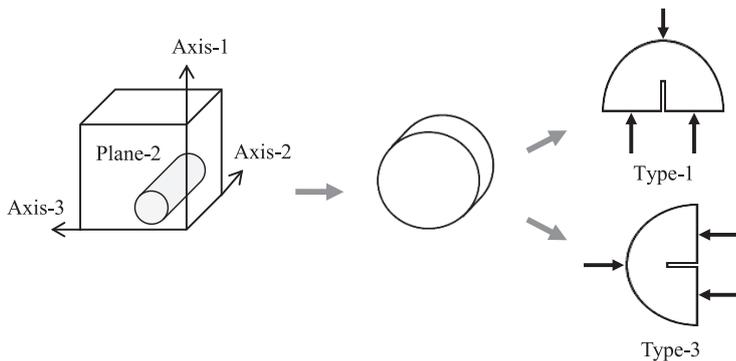


Fig. 6 Schematic illustration of preparation process for obtaining two types of specimen for African granodiorite, Korean granite and Kimachi sandstone.

種類の岩石ブロックから半径 r が 37.5 mm のコアを抜き、厚さ t が約 20 mm の円盤になるように切断する。次に、この円盤を半円形に切断し、その後、円の中心を通り切断面に垂直な人工き裂を作製する。この人工き裂の作製には、厚さ 0.4 mm のダイヤモンドブレードを用い、長さ a は約 $0.5r = 18.75$ mm としている。加工後の供試体は、30 日間以上、乾燥炉を用いて岩石内の水分を取り除き、試験直前までデシケーター内で保管した。

本研究では、弾性波速度測定の結果を踏まえ、AG, KG および KS では、Fig. 6 に示すように岩石ブロックから Axis-2 方向にコアを抜き、作製した円盤を 2 方向から切断することで、2 種類の供試体 (Type-1, Type-3) を作製した。供試体の名前にある番号は、人工き裂の方向であり、試験時に破壊の進展する方向を示している。一方、KA および KB においては弾性波速度の異方性が見られなかったため、任意の方向にコアを抜き、供試体を作製した。なお、どの供試体においても人工き裂は同じ方向を向いている。

4・2 岩石微視的構造の観察とその定量化

岩石の微視的構造を把握するため、偏光顕微鏡を用いた薄片観察を行った。それぞれの岩石における薄片写真を Fig. 4 に示す。薄片は、AG, KG および KS では Plane-1, Plane-2 および Plane-3 の各面から作製し観察を行い、Fig. 4 には、Plane-2 から作製した薄片写真のみを示している。一方、KA と KB では任意の面から薄片を用意した。また、4 種類の火成岩ではクロスニコルの薄片写真を示し、KS ではオープンニコルの写真を掲示している。

深成岩である AG および KG は、全体的に粗粒な鉱物で構成されていることがわかる。火山岩である KA と KB では、石基と斑晶からなる斑晶組織が観察される。また、これらの岩石からは、粒子内や境界に存在する微小き裂が観察された。一方、堆積岩である KS においては、構成粒子とその周りを埋めている基質で構成されていることがわかる。この岩石からは、火成岩にみられるような微小き裂は観察されず、一部の構成粒子内に多少存在している程度で、その数は火成岩と比較して少ない。なお、基質において、偏光顕微鏡での観察限界といわれる $1\mu\text{m}$ 以下の空隙が数多く存在し、それらが KS の全空隙率の大半を占めていることが確かめられている²⁷⁾。

これらの岩石において、微視的構造の定量化を試みた。まず、偏光顕微鏡の鏡筒にカメラを取り付け、薄片を撮影することにより Fig. 4 に示す薄片写真を得る。これを印刷し、そこにみられる微小き裂および粒子境界を、トレーシングペーパーに写し取った。このとき、印刷された薄片写真と同じ領域を実際に偏光顕微鏡で観察しながら、微小き裂や粒子境界の識別を行った。その後、トレースされた微小き裂および粒子境界の分析を実施した。なお、KS においては微小き裂がほとんど観察されなかったため、この

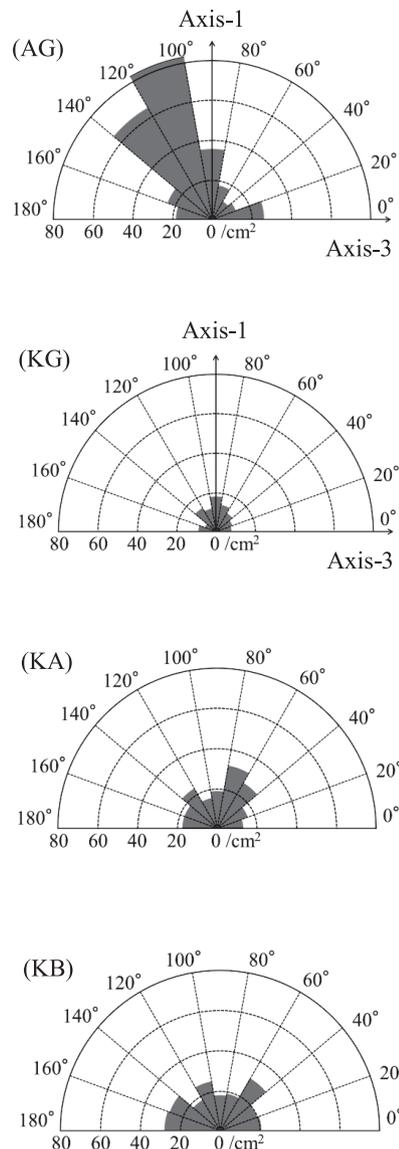


Fig. 7 Micro crack density in Rose diagram for African granodiorite (AG), Korean granite (KG), Kumamoto andesite (KA) and Kunnum basalt (KB).

トレースは行っておらず、また、基質を構成する粒子は薄片観察では識別できないほど微小なため、薄片観察で確認できる大きさの構成粒子のみのトレースを行った。

まず、微小き裂の定量化のために、4 種類の火成岩の薄片写真からトレースされた微小き裂を 20 度方向ごとに集計し、Fig. 7 に示すように単位面積あたりに存在する微小き裂の数、すなわち微小き裂密度としてローズダイヤグラムにまとめた。AG および KG では、Plane-2 での結果を示しており、各ローズダイヤグラムに方向を示している。KA および KB では、任意の方向に始線をとって角度を計測した。AG では、微小き裂は Axis-1 方向に多く存在している。KG でも、Axis-1 方向を向く微小き裂が多い傾向にあり、両岩石とも微小き裂の配向性を有している。また、AG の微小き裂の密度は、KG のそれと比較して大きな値を有している。一方、KA および KB では、ばらつきはあるものの微小き裂の配向性はみられず、等方的であるとみなせる。これらの傾向は、上述した弾性波速度測定の結果と調和的である。

つぎに、岩石の粒子形状を定量化するため、5 種類の岩石の粒子境界をトレースした画像に Intercept method²⁸⁾ を適用し粒子の

Table 2 Average grain diameters of African granodiorite (AG), Korean granite (KG) and Kimachi sandstone (KS).

(AG)			
Plane of thin section	Direction	Average grain diameter (mm)	Aspect ratio
Plane-1	Axis-2	0.57	1.5
	Axis-3	0.84	
Plane-2	Axis-1	0.62	1.3
	Axis-3	0.80	
Plane-3	Axis-1	0.79	1.1
	Axis-2	0.88	
(KG)			
Plane of thin section	Direction	Average grain diameter (mm)	Aspect ratio
Plane-1	Axis-2	0.66	1.2
	Axis-3	0.76	
Plane-2	Axis-1	0.69	1.0
	Axis-3	0.68	
Plane-3	Axis-1	0.73	1.2
	Axis-2	0.63	
(KS)			
Plane of thin section	Direction	Average grain diameter (mm)	Aspect ratio
Plane-1	Axis-2	0.45	1.0
	Axis-3	0.45	
Plane-2	Axis-1	0.46	1.3
	Axis-3	0.60	
Plane-3	Axis-1	0.42	1.1
	Axis-2	0.39	

平均直径を求めた。この方法は、トレース画像上に直線を引き、その直線が横切った粒子の個数を数え、直線の長さを粒子の個数で除したものを平均粒径とするものである。AG, KG および KS では、Plane-1, Plane-2 および Plane-3 から得たトレース画像にこの方法を適用した。結果を Table 2 に示す。AG では、Plane-3 での各方向における平均粒径に差はないが、他の 2 面ではともに Axis-3 方向のものが大きい値を有している。KG においては、Axis-1 および Axis-3 方向の平均粒径が大きい結果となった。KS でも、Axis-3 方向のものが大きい値となっている。このことから、この 3 種類の岩石は粒子形状の異方性を持ち、全体的に Axis-3 方向に細長い粒子で構成されているといえる。一方、KA および KB でも任意の直交する 2 方向で平均粒径を求めたところ、それらはほぼ等しくなり、KA で 0.24 mm, KB で 0.38 mm となった。なお、全体的に、深成岩である AG および KG が、火山岩である KA と KB より大きい粒子で構成されている。

5. 試験結果

5 種類の岩石を用いた SCB 試験の条件と結果を Table 3 に示す。供試体数は AG の Type-1 が 11 個、Type-3 が 14 個、KG の Type-1 が 17 個、Type-3 が 15 個、KS の Type-1 が 8 個、Type-3 が 11 個、KA が 9 個および KB が 11 個であり、水蒸気圧 $3.7 \times 10^{-3} \sim 1.4 \times 10^3$ Pa の下で試験が行われた。試験後の AG 供試体を Fig. 8 に示す。人工き裂の先端から上部の荷重点に向かって破断が発生していることが確認できる。

5 種類の岩石の代表的な荷重-変位曲線を Fig. 9 に示す。それぞれの荷重-変位曲線を、荷重開始点を横軸方向に 0.1 mm ないし 0.15 mm ずつずらして一つのグラフ上に表している。岩石の種類によって最大強度 P_{max} や曲線の傾きに差はあるものの、どの曲線も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す。さらに荷重が進むと直線から離れ、 P_{max} を履歴した後、荷重がわずかに減少したときに破断が発生している。

試験時に得られた P_{max} より評価した破壊靱性 K_{IC} と、水蒸気圧 p との関係を Fig. 10 に示す。図は両対数グラフで取り、各供試体における K_{IC} をプロットするとともに、それぞれの回帰曲線を実線で示している。

火成岩である 4 種類の岩石の場合、破壊靱性 K_{IC} は水蒸気圧 p に依存し、 p が増加するとともに K_{IC} の値は減少する。ばらつきはあるものの、その関係は次式で示す直線で表される。

$$K_{IC} = \beta p^{-m} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 m は直線の傾きである。 β は定数であり、 $p = 1$ Pa のときの K_{IC} である。これらの値と相関係数 R を Table 4 に示す。 m において、AG の Type-1 の値がその他と比較し大きな値となったため、この K_{IC} がより水蒸気圧の影響を受けやすいといえる。一方、KS における K_{IC} においても回帰曲線での近似を試みた。この結果、 m の値が Type-1 では 0.0002, Type-3 では -0.0013 とほぼ零となり、水蒸気圧依存性は認められなかった。このため、Fig. 10 は各 Type の平均値を近似線として描いている。なお、両者の値に対して差の検定を実施し、これらの平均値には有意な差があるという結果を得ている。

火成岩においては、その種類によって K_{IC} は異なり、KB, AG, KA, KG の順に小さくなっている。また、堆積岩である KS の K_{IC} と比較すると、火成岩のそれは相対的に大きいことがわかる。さらに、弾性波速度の異方性を示した 3 種類の岩石、AG, KG, KS では、 K_{IC} においても異方性が認められ、AG および KG では、Type-3 に比べ、同じ水蒸気圧下での Type-1 の K_{IC} の方が大きくなっている。これらの岩石の Type-1 と Type-3 における β の差は、KG の $0.19 \text{ MN/m}^{3/2}$ に対し、AG は $0.55 \text{ MN/m}^{3/2}$ と大きくなっており、AG の K_{IC} の異方性が比較的大きく表れている。一方、KS において、その平均値は Type-1 で $0.69 \text{ MN/m}^{3/2}$ 、Type-3 で $0.74 \text{ MN/m}^{3/2}$ となり、Type-3 の方が大きな値となっている。その差は $0.05 \text{ MN/m}^{3/2}$ であり、KS の K_{IC} の異方性の程度は AG, KG と比較して小さいといえる。

6. 考察

岩石周辺の水蒸気圧が増加するとともに破壊靱性が低下する原因の 1 つは、応力腐食であると考えられる。これは、き裂の先端に応力が集中することでその場所が高エネルギー状態となり、岩石中の SiO_2 と周辺環境中の H_2O との化学反応が活性化され、き裂先端の原子結合の弱化や切断が発生する現象である^{3,29)}。本研究で用いた 4 種類の火成岩では、内部に存在する微小き裂の先端で応力腐食が発生するため、水蒸気圧の増加に伴う破壊靱性の低下が起これらと考えられる。

一方、KS の破壊靱性には水蒸気圧の依存性が見られなかった。この岩石において、偏光顕微鏡による薄片観察では先在する微小き裂はほとんど見られず、また、基質に多くの微小な空隙が存在していることが確かめられている。岩石の応力腐食は先在する微小き裂に関わる現象であり^{3,29)}、微小な空隙において応力腐食は発生しないと考えられる。したがって、KS において水蒸気圧依存性が見られなかったことは、微小き裂の存在がわずかである

Table 3 Results and conditions of the test for African granodiorite (AG), Korean granite (KG), Kimachi sandstone (KS), Kumamoto andesite (KA) and Kunum basalt (KB).

(AG)								(KS)							
Specimen	Water vapor pressure	Radius	Thickness	Crack length	Normalised stress intensity factor	Maximum load	Fracture toughness	Specimen	Water vapor pressure	Radius	Thickness	Crack length	Normalised stress intensity factor	Maximum load	Fracture toughness
No.	p (Pa)	r (mm)	t (mm)	a (mm)	Y_1	P_{max} (kN)	K_{IC} (MN/m ^{3/2})	No.	p (Pa)	r (mm)	t (mm)	a (mm)	Y_1	P_{max} (kN)	K_{IC} (MN/m ^{3/2})
1-1	4.2×10^1	37.5	20.3	18.7	6.63	2.31	2.43	1-1	2.3×10^2	37.5	21.0	18.8	6.65	0.68	0.70
1-2	7.2×10^1	37.5	21.6	18.6	6.59	2.52	2.47	1-2	4.2×10^2	37.5	20.7	19.0	6.75	0.71	0.75
1-3	8.5×10^1	37.5	20.2	19.1	6.77	2.22	2.42	1-3	3.0×10^1	37.5	21.7	18.8	6.67	0.65	0.65
1-4	5.4×10^0	37.5	20.2	19.0	6.73	2.23	2.42	1-4	1.3×10^0	37.5	21.3	18.9	6.71	0.63	0.64
1-5	8.7×10^0	37.5	17.8	18.8	6.65	1.96	2.37	1-5	2.7×10^0	37.5	21.4	18.8	6.65	0.69	0.70
1-6	2.0×10^1	37.5	19.9	19.0	6.73	1.80	1.97	1-6	1.8×10^1	37.5	21.7	18.8	6.65	0.66	0.65
1-7	3.3×10^1	37.5	21.5	18.8	6.65	2.32	2.32	1-7	9.4×10^1	37.5	20.9	18.7	6.63	0.72	0.74
1-8	6.9×10^1	37.5	20.3	18.9	6.69	1.98	2.12	1-8	1.8×10^2	37.5	20.7	18.8	6.67	0.68	0.71
1-9	8.7×10^1	37.5	19.0	18.8	6.65	1.97	2.23								
1-10	2.0×10^2	37.5	20.1	19.0	6.75	1.89	2.06								
1-11	3.8×10^2	37.5	19.0	18.8	6.67	1.73	1.97								
Specimen	Water vapor pressure	Radius	Thickness	Crack length	Normalised stress intensity factor	Maximum load	Fracture toughness	Specimen	Water vapor pressure	Radius	Thickness	Crack length	Normalised stress intensity factor	Maximum load	Fracture toughness
No.	p (Pa)	r (mm)	t (mm)	a (mm)	Y_1	P_{max} (kN)	K_{IC} (MN/m ^{3/2})	No.	p (Pa)	r (mm)	t (mm)	a (mm)	Y_1	P_{max} (kN)	K_{IC} (MN/m ^{3/2})
3-1	8.4×10^2	37.5	20.1	18.9	6.69	1.79	1.94	3-1	2.7×10^2	37.5	20.6	18.8	6.67	0.70	0.73
3-2	2.4×10^1	37.5	17.2	19.1	6.79	1.52	1.96	3-2	4.2×10^2	37.5	21.4	18.9	6.71	0.73	0.74
3-3	5.2×10^1	37.5	20.1	18.9	6.69	1.62	1.75	3-3	4.5×10^2	37.5	20.5	19.1	6.79	0.62	0.67
3-4	8.6×10^1	37.5	18.9	19.1	6.77	1.59	1.86	3-4	1.2×10^1	37.5	20.3	19.0	6.75	0.70	0.76
3-5	1.1×10^0	37.5	19.6	19.0	6.73	1.82	2.03	3-5	1.2×10^1	37.5	21.3	19.0	6.73	0.73	0.75
3-6	2.5×10^0	37.5	19.7	18.7	6.63	1.71	1.86	3-6	1.1×10^0	37.5	21.5	18.9	6.67	0.82	0.83
3-7	4.7×10^0	37.5	18.7	18.5	6.53	1.71	1.91	3-7	2.8×10^0	37.5	21.4	18.9	6.71	0.75	0.76
3-8	1.5×10^1	37.5	21.2	19.0	6.75	1.75	1.82	3-8	1.3×10^1	37.5	21.2	18.9	6.69	0.67	0.68
3-9	3.5×10^1	37.5	17.1	18.8	6.65	1.28	1.62	3-9	2.7×10^1	37.5	21.2	18.9	6.69	0.70	0.72
3-10	4.8×10^1	37.5	19.6	18.8	6.65	1.76	1.94	3-10	3.0×10^2	37.5	20.4	18.8	6.67	0.71	0.75
3-11	9.3×10^1	37.5	19.9	18.7	6.63	1.66	1.79	3-11	5.8×10^2	37.5	21.3	19.0	6.75	0.73	0.75
3-12	1.4×10^2	37.5	19.9	19.0	6.75	1.51	1.67								
3-13	4.2×10^2	37.5	18.9	18.4	6.51	1.67	1.84								
3-14	7.7×10^2	37.5	19.0	18.7	6.61	1.61	1.81								
Specimen	Water vapor pressure	Radius	Thickness	Crack length	Normalised stress intensity factor	Maximum load	Fracture toughness	Specimen	Water vapor pressure	Radius	Thickness	Crack length	Normalised stress intensity factor	Maximum load	Fracture toughness
No.	p (Pa)	r (mm)	t (mm)	a (mm)	Y_1	P_{max} (kN)	K_{IC} (MN/m ^{3/2})	No.	p (Pa)	r (mm)	t (mm)	a (mm)	Y_1	P_{max} (kN)	K_{IC} (MN/m ^{3/2})
1-1	1.0×10^2	37.5	19.6	18.6	6.57	1.18	1.28	1	3.7×10^3	37.5	20.0	19.0	7.04	1.52	1.78
1-2	2.1×10^2	37.5	20.2	18.7	6.63	1.26	1.33	2	9.5×10^3	37.5	19.9	19.0	7.00	1.47	1.71
1-3	3.3×10^2	37.5	20.7	18.9	6.71	1.33	1.40	3	1.4×10^1	37.5	20.0	18.8	6.87	1.50	1.69
1-4	4.5×10^2	37.5	20.6	18.7	6.64	1.26	1.31	4	1.1×10^0	37.5	20.3	18.9	7.00	1.50	1.71
1-5	1.8×10^1	37.5	21.4	18.8	6.67	1.36	1.37	5	1.4×10^0	37.5	20.3	19.1	7.00	1.44	1.64
1-6	4.5×10^1	37.5	21.3	18.7	6.61	1.36	1.36	6	1.1×10^1	37.5	19.8	19.0	7.04	1.36	1.60
1-7	1.1×10^0	37.5	19.6	18.6	6.60	1.26	1.36	7	2.0×10^2	37.5	20.2	19.2	7.00	1.31	1.50
1-8	3.2×10^0	37.5	20.4	18.8	6.66	1.23	1.30	8	4.4×10^2	37.5	20.3	18.9	6.91	1.35	1.51
1-9	4.8×10^0	37.5	20.8	19.0	6.72	1.25	1.31	9	7.0×10^2	37.5	19.6	19.3	7.09	1.28	1.54
1-10	1.2×10^1	37.5	18.8	18.8	6.65	1.26	1.44								
1-11	1.4×10^1	37.5	20.7	18.9	6.70	1.30	1.38								
1-12	2.0×10^1	37.5	20.1	18.8	6.66	1.24	1.34								
1-13	8.7×10^1	37.5	20.7	18.7	6.63	1.27	1.32								
1-14	1.3×10^2	37.5	21.3	18.4	6.52	1.11	1.09								
1-15	2.6×10^2	37.5	20.0	19.0	6.73	1.06	1.16								
1-16	4.1×10^2	37.5	20.7	18.9	6.71	1.24	1.31								
1-17	5.8×10^2	37.5	18.8	18.9	6.70	0.92	1.06								
Specimen	Water vapor pressure	Radius	Thickness	Crack length	Normalised stress intensity factor	Maximum load	Fracture toughness	Specimen	Water vapor pressure	Radius	Thickness	Crack length	Normalised stress intensity factor	Maximum load	Fracture toughness
No.	p (Pa)	r (mm)	t (mm)	a (mm)	Y_1	P_{max} (kN)	K_{IC} (MN/m ^{3/2})	No.	p (Pa)	r (mm)	t (mm)	a (mm)	Y_1	P_{max} (kN)	K_{IC} (MN/m ^{3/2})
3-1	1.1×10^3	37.5	21.3	18.3	6.48	1.22	1.19	1	8.0×10^3	37.5	19.9	19.0	6.67	2.35	2.55
3-2	3.2×10^2	37.5	21.3	18.0	6.36	1.18	1.12	2	2.0×10^2	37.5	20.0	19.2	6.63	2.29	2.45
3-3	8.5×10^2	37.5	19.8	18.8	6.67	1.03	1.13	3	5.0×10^2	37.5	19.5	18.6	6.40	2.40	2.50
3-4	1.9×10^1	37.5	21.2	18.8	6.68	1.17	1.20	4	5.0×10^1	37.5	19.8	19.0	6.55	2.40	2.55
3-5	4.6×10^1	37.5	19.9	18.7	6.61	1.13	1.21	5	1.2×10^0	37.5	20.1	19.0	6.40	2.40	2.43
3-6	1.0×10^0	37.5	19.8	18.9	6.71	1.09	1.19	6	6.6×10^0	37.5	20.1	18.6	6.40	2.32	2.35
3-7	3.5×10^0	37.5	19.1	18.7	6.62	0.91	1.02	7	1.3×10^1	37.5	19.8	19.1	6.75	2.09	2.32
3-8	5.8×10^0	37.5	21.3	19.2	6.81	1.07	1.11	8	8.0×10^1	37.5	20.1	18.8	6.47	2.26	2.33
3-9	1.9×10^1	37.5	20.2	18.9	6.72	0.98	1.06	9	4.8×10^2	37.5	20.0	18.5	6.25	2.30	2.26
3-10	4.4×10^1	37.5	21.4	18.8	6.65	0.98	0.98	10	7.0×10^2	37.5	20.2	18.4	6.14	2.42	2.29
3-11	8.1×10^1	37.5	19.3	18.7	6.63	1.05	1.16	11	1.4×10^3	37.5	20.1	18.6	6.40	2.05	2.07
3-12	9.9×10^1	37.5	19.4	18.7	6.63	1.00	1.11								
3-13	1.7×10^2	37.5	21.3	18.5	6.54	1.15	1.13								
3-14	4.9×10^2	37.5	21.6	18.6	6.60	1.00	0.98								
3-15	6.3×10^2	37.5	21.3	18.8	6.66	1.10	1.12								

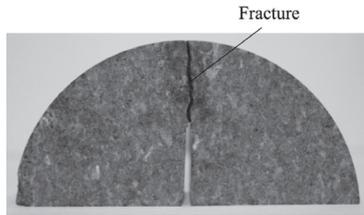


Fig.8 Fractured specimen of African granodiorite.

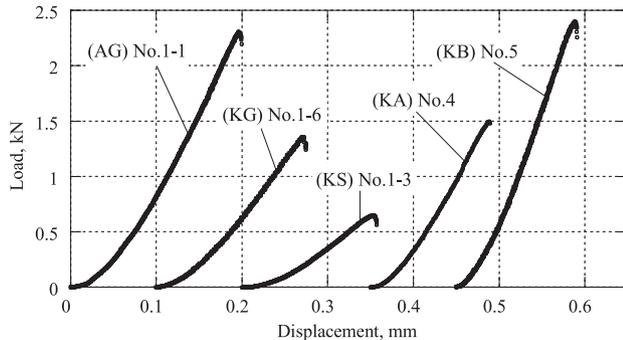


Fig.9 Load-displacement curves of African granodiorite (AG), Korean granite (KG), Kimachi sandstone (KS), Kumamoto andesite (KA) and Kunnum basalt (KB).

ことを示しているといえる。このことから、KSの破壊靱性における水蒸気圧依存性は、火成岩のそれと比較して極めて小さく、応力腐食がほとんど発生しないと考えられる。しかし、この結論を得るためにはさらに他の種類の堆積岩を用いた試験を行う必要がある。

つぎに、水蒸気圧の影響が見られた4種類の火成岩において、その依存の程度を表す関係式の傾き m について考察する。KGの両Type, KAおよびKBの m の値は同程度である。これは、Fig. 7に示すように、これらの供試体において先在する微小き裂の密度が同程度であることが理由であると考えられる。一方、AGにおいては、Type-3の m の値はKG, KA, KBのそれと同程度だが、Type-1の m はより大きい値となっている。AGは先在する微小き裂の配向性を有しており、Fig. 7 (AG) に示すようにAxis-1方向の微小き裂が多く存在しているため、この方向に破壊が進展するType-1の方がより応力腐食に対して敏感となり、 m の値が大きくなったと考えられる。この岩石のAxis-3方向の微小き裂密度はKG, KA, KBのそれらと同程度であるため、Type-3の m の値はこの3種の岩石と同程度になったと考えられる。なお、KGも微小き裂の配向性を有するものの、その全体的な密度はAGのそれと比較して小さく、Axis-1とAxis-3方向における微小き裂密度の違いは、 m の値に異方性を与えるほどの影響はないと推測される。

以上より、岩石における応力腐食は、先在する微小き裂の存在やその配向性、密度が影響を与えていることは明らかである。したがって、岩石の薄片観察などによる先在微小き裂の分布状態を把握することにより、応力腐食の有無あるいはその程度を推測することができると思われる。

最後に、弾性波速度の異方性を示したAG, KGおよびKSでは、破壊靱性においても異方性が認められた。AGでは、Axis-1方向の微小き裂が多く存在しているものの、この方向に破壊が進展するType-1の破壊靱性の方が大きくなっている。一方、AGの平均粒径は、Table 2に示すようにAxis-3方向が大きくなる値となり、この方向に長軸を持つ粒子が配列していることがわかる。したがって、Axis-1方向と比較して、Axis-3方向により直線的な粒子境界

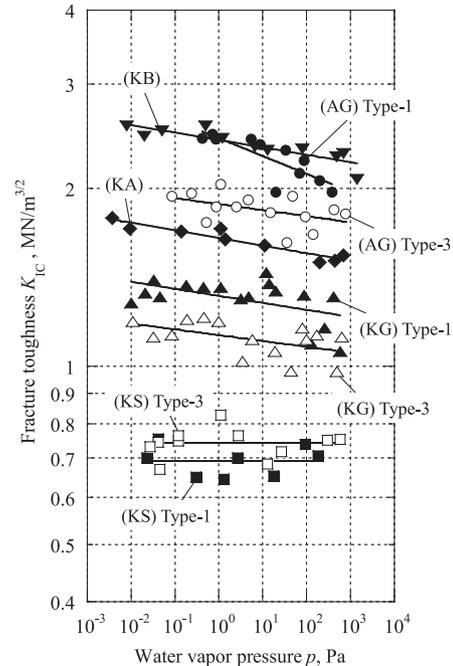


Fig.10 Relation between fracture toughness of African granodiorite (AG), Korean granite (KG), Kimachi sandstone (KS), Kumamoto andesite (KA) and Kunnum basalt (KB), and water vapor pressure.

Table 4 Parameters of approximated curve for African granodiorite (AG), Korean granite (KG), Kumamoto andesite (KA) and Kunnum basalt (KB).

	m	β	R
AG Type-1	0.0301	2.43	0.82
AG Type-3	0.0102	1.88	0.48
KG Type-1	0.0119	1.32	0.50
KG Type-3	0.0098	1.13	0.52
KA	0.0129	1.65	0.95
KB	0.0125	2.41	0.88

が存在しているといえる。この微視的構造と試験結果を考慮すると、破壊き裂は、多くの微小き裂が配列している方向よりも、より直線的な粒子境界を有する方向に進展しやすいと推測される。したがって、AGの破壊靱性の異方性は、先在する微小き裂の存在以上に粒子形状の影響を受けたと考えられる。一方、同じ深成岩であるKGの破壊靱性においては、異方性の程度はAGと比較して小さいものの、Type-1の破壊靱性が大きくなっている。これは、平均粒径がAxis-1とAxis-3の方向で差が見られず、両方向の粒子形状は同様であるが、それらの配列の違いに原因があると推測される。さらに、KSの破壊靱性においては、Type-3の方が大きな値となっている。KSは堆積岩であり、この堆積過程において、堆積方向であるAxis-1方向に大きな上載応力が作用していたと推測される。したがって、この方向と直交するAxis-3方向の破壊抵抗が大きく、Type-3の破壊靱性の方が大きくなったと考えられる。なお、この破壊靱性の異方性についての詳細は、別の機会に発表する予定である。

7. 結 言

本研究では、アフリカ産花崗閃緑岩 (African granodiorite, AG), 韓国産花崗岩 (Korean granite, KG), 来待砂岩 (Kimachi sandstone, KS), 熊本安山岩 (Kumamoto andesite, KA) およびクンナム玄武岩 (Kunnum basalt, KB) の5種類の岩石を用いて、周辺環境の水蒸気

圧を制御することのできる試験装置により水蒸気圧下での SCB 試験を実施し、それぞれのモード I 破壊靱性を評価した。さらに、この実験結果と岩石の微小構造をもとに、破壊靱性の水蒸気圧依存性の有無とその依存の程度について検討した。以下に得られた結果を示す。

- (1) SCB 試験を行った結果、火成岩である AG, KG, KA および KB において、破壊靱性 K_{IC} は水蒸気圧 p に依存し、 p の増加とともにその値は減少する傾向が見られた。また、 K_{IC} と p の関係は、次式で表されることを明らかにした。

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

ここで、 m は両対数グラフ上での関係式の傾き、 β は定数であり $p = 1 \text{ Pa}$ のときの K_{IC} である。 m において、AG の Type-1 の値がその他と比較し大きな値となり、この破壊靱性がより水蒸気圧の影響を受けやすいといえる。一方、堆積岩である KS における K_{IC} の水蒸気圧依存性は認められなかった。

- (2) 岩石内に微小き裂が先在する火成岩では水蒸気圧の増加に伴う破壊靱性の低下が見られたが、微小き裂をほとんど含まない堆積岩では、破壊靱性の水蒸気圧依存性は認められなかった。このことから、岩石内に先在する微小き裂が、応力腐食の発生に影響を与え、破壊靱性が水蒸気圧依存性を示すと考えられる。
- (3) 岩石の破壊靱性における水蒸気圧依存の程度は、先在する微小き裂の配向性とその密度によって異なると論じた。

References

- 1) H. Okamura: *Fundamentals of Linear Fracture Mechanics*, (Baifukan, Tokyo, 1976), pp.1-14.
- 2) H.P. Rossmann: *Rock Fracture Mechanics*, (Springer-Verlag, Berlin, 1983).
- 3) B.K. Atkinson: *Fracture Mechanics of Rock*, (Academic Press, London, 1987), pp.111-166.
- 4) The Japan Society of Mechanical Engineers: *Rock Fracture Mechanics and its Application*, (Korona-Sha, Tokyo, 1989), pp.40-47.
- 5) B.N. Whittaker, R.N. Shingh and G. Sun: *Rock Fracture mechanics: Principles, Design, and Application*, (Elsevier, Amsterdam, 1992).
- 6) P.G. Meredith and B.K. Atkinson: *Phys. Earth Planet. Int.*, **39** (1985), 33-51.
- 7) T. Funatsu, M. Seto, H. Shimada and K. Matsui: *Journal of MMIJ*, **118** (2002), 605-611.
- 8) M. Utogawa, M. Seto, K. Katsuyama and K. Matsui: *Journal of MMIJ*, **114** (1998), 856-861.
- 9) N.A. Al-shayea: *Rock Mech. Rock Engng.*, **35** (4) (2002), 271-291.
- 10) Y. Obara, K. Sasaki, T. Matsuyama and T. Yoshinaga: *Proc. 4th ARMS*, (Singapore, 2006), chap.7.
- 11) Y. Obara, K. Sasaki, T. Yoshinaga: *J. of MMIJ*, **123** (2007), 145-151.
- 12) Y. Obara, K. Sasaki and T. Yoshinaga: *Proc. 11th Cong. ISRM*, (Lisbon, Portugal, 2007), Vol.1, pp.51-54.
- 13) Y. Obara, T. Yoshinaga, A.Hirata: *Proc. ISRM Symp. EUROCK*, (Cavtat, Croatia, 2009).
- 14) K.P. Chong and M.D. Kuruppu: *Int. J. Fract.*, **26** (1984), 59-62.
- 15) I.L. Lim, I.W. Johnston and S.K. Choi: *Eng. Fracture Mech.*, **44** (1993), 3, 363-382.
- 16) M.D. Kuruppu, Y. Obara, M.R. Ayatollahi, K.P. Chong and T. Funatsu: *ISRM suggested method (to be appeared)*.
- 17) A.J. Bush: *Experimental Mechanics*, **16** (1976), 249-257.
- 18) ISRM Testing Commission (F. Ouchterlony and coordinator): *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **25** (1988), 71-96.
- 19) ISRM Testing commission (R.J. Fowell and coordinator): *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **32** (1995), 57-64.
- 20) K.P. Chong, M.D. Kuruppu and J.S. Kuszmaul: *Eng. Fracture Mech.*, **28** (1987), 43-54.
- 21) I.L. Lim, I.W. Johnston, S.K. Choi and J.N. Boland: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **31** (1994), 3, 185-197.
- 22) M.R.M. Aliha, M. Sistaninia, D.J. Smith, M.J. Pavier and M.R. Ayatollahi: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **51** (2012), 128-135.
- 23) M. Kataoka, Y. Obara, T. Yoshinaga and M.D. Kuruppu: *Proc. ISRM Int. Sympo. Rock Mech. and 6th ARMS*, (New Delhi, India, 2010), No.12.
- 24) M. Kataoka, Y. Obara and M.D. Kuruppu: *Proc. ISRM 12th Int. Cong. Rock Mech.*, (Beijing, China, 2011), pp.667-670.
- 25) M. Kataoka, A. Sato and Y. Obara: *Proc. 7th ARMS*, (Seoul, South Korea, 2012), pp.458-465.
- 26) Y. Obara, K. Sakaguchi, T. Nakayama and K. Sugawara: *Proc. ISRM Sym. EUROCK'92*, (London, United Kingdom, 1992), pp.7-12.
- 27) M. Takahashi, C. Ahn, Y. Fuji, H. Park, N. Takahashi and T. Takemura: *Proc. JSEG*, (Shimane, Japan, 2010), pp.145-146.
- 28) ASTM E112-10: Philadelphia, U.S.A (2010).
- 29) T.A. Michalske and S.W. Freiman: *Nature*, **295** (1982), 511-512.