

真壁小目花崗岩の破壊靱性値に関する 実験的研究

竹原 孝^{1*}

¹ 国立研究開発法人産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門
(〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1 中央第7事業所)

*E-mail: t-takehara@aist.go.jp

地層処分や LPG, LNG の地下貯蔵など地下構造物を構築するにあたり、地下の岩盤構造物の長期的な安定性を評価するためには、岩石内部の潜在き裂の挙動を実験的な手法によって明らかにすることが重要である。本研究では結晶質岩を対象として、岩石内部の微小き裂の進展挙動に着目し、き裂進展に対する抵抗力である破壊靱性値を求めることを目的とした。破壊靱性値を求めるためには様々な試験法が提案されているが、ISRM 指針 (2014) による SCB 試験法に準じた実験を行った。破壊靱性試験を行うにあたり、異なる力学的特性を有する三つの軸方向とそれに直交する面を定義した。本実験では、各面に対して圧裂引張試験、破壊靱性試験を行い、それぞれの試験から岩石試料の異方性について考察した。

Key Words : *crystalline rock, fracture toughness, Semi-Circular Bend test, ISRM suggested method, tensile strength*

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分や LPG, LNG の地下貯蔵など地下構造物を利用するにあたり、予め岩盤の長期的な安定性を評価しておくことは重要である。そこで本研究では岩盤の安定性に影響を与える要因の一つである岩石内部の微小き裂の進展挙動に着目し、き裂の進展に対する抵抗力である破壊靱性値を求めることを目的とした。

岩石やセラミック、コンクリートなどの脆性材料は金属などの延性材料に比べ引張に対し低い強度を示すことが多い。そのため例に挙げたような脆性材料に対し破壊靱性試験を行う場合は、圧縮荷重によって引張破壊を誘導させる形式で試験を行う必要がある。こういった要件を満たす試験はその試験方法の開発の困難さからあまり広く行われてこなかったが、1984 年に提案された SCB (Semi-Circular Bend) 試験片¹⁾の三点曲げ試験により簡便に破壊靱性値を求められることが可能となった。

そこで本研究では ISRM (International Society for Rock Mechanics) 指針²⁾によるモード I 破壊靱性値を決定する SCB 試験法に準じた実験を行い、対象とした真壁小目花崗岩の力学特性を調べることにした。これまで SCB 試験は主に力学的な異方性を顕著に示すことが多い堆積岩

を対象として行われてきた。しかし、火成岩、その中でも特に花崗岩について行われた例は少ない。また花崗岩は深成岩であり、対象とした細粒花崗岩体は一つ一つの粒子径が細かくかつ揃っているためき裂の進展挙動が観察しやすいのではないかと考え実験を実施した。

今回の研究では、供試体として真壁小目花崗岩を用いて圧裂引張強度と破壊靱性値求め、岩石試料の異方性の程度について調べることにした。各種試験の前に弾性波速度を測定し、速度の大小関係から異なる力学的な特性を有する三軸方向とそれに垂直に交わる面を定義した。各面を引き離す様式の圧裂引張試験と破壊靱性試験をそれぞれ行い比較することで、今回対象とした真壁小目花崗岩の岩石試料の力学的な異方性について考察する。

2. 試験概要

(1) 弾性波速度測定

花崗岩にはほぼ垂直に交わる方向の石目が知られており、本研究で用いた花崗岩ブロックは石目の方向を同定してから採取された岩石試料を用いた。試験片の作成に用いる一辺が 20cm の立方体状岩石試料に対し弾性波速度のうち P 波速度 (v_p) の測定を行い、hardway plane,

grain plane, rift planeの推定を行った。hardway plane, grain plane, rift planeとは花崗岩の力学的な異方性に関する面の総称であり、一般的にhardway plane, grain plane, rift planeの順に割れ目を発生させるのが困難であると言われている。岩石試料が持つ力学的異方性の模式図を図-1に示す。各面に垂直に交わる軸をそれぞれAxis-H, Axis-G, Axis-Rと定義した。潜在微小き裂とは、岩石中に含まれる個々の結晶に内包されている肉眼では確認できないほどの微視き裂のことで粒界き裂とは異なる。この岩石試料ではrift planeに対して平行（Axis-Rに対して垂直）な面に広がりを持つ潜在微小き裂が多く存在していると考えられる。立方体状の岩石試料を三次元的にみるとこのように三つの軸方向が存在するが、これらのいずれかがAxis-H, Axis-G, Axis-Rのどの方向に当てはまるのか推測する。このようにして初めに岩石試料が持つおおまかな力学的な異方性を仮定し、この結果をもとに圧裂引張試験片と破壊靱性試験片を作成した。

(2) 圧裂引張試験

引張試験は、円柱形の試験片に対し周方向から線载荷し、破壊時の荷重から材料の持つ引張強度を求めるブラジリアン試験で実施した。今回の実験では直径 d が 30mm, 高さ l が 30mm の円柱形試験片を用いて試験を行った。予荷重を約 0.1 kN 与えて上部加圧盤に内蔵されている球座が安定し、上下加圧面と試験片の荷重線が接触するのを待った後、変位制御 $0.3 \mu\text{m}/\text{sec}$ で試験を行った。

圧裂引張強度 S_t は破壊が起きた際に試験片に与えていた荷重 P を (1) 式に代入して求めることができる。

$$S_t = \frac{2P}{\pi dl} \quad (1)$$

P : 荷重 d : 試験片の直径 l : 試験片の長さ

圧裂引張試験では、hardway plane, grain plane, rift plane の三つの面を引き離す試験片を 12 個, 9 個, 10 個ずつ作成して試験を行い、それぞれ平均値を比較して岩石試料が

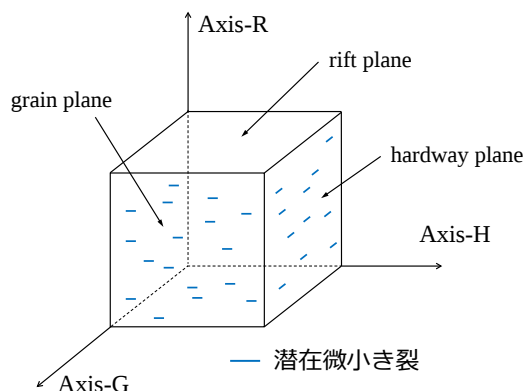


図-1 弾性波速度から推定した岩石試料の異方性

もつ引張強度の異方性を調べた。なお今回の破壊靱性試験は常温常圧下で行うため、圧裂引張試験やその他の予備試験においても常温常圧下で試験を行った。試験片は全て真空乾燥炉で真空脱気の処理を行い、試験までの期間はシリカゲルの入った容器内に保存した。

(3) 破壊靱性試験

破壊靱性試験は図-2 に示す形状の SCB 試験片を用いる。下部の二つの支保ローラで試験片を支え、上部の载荷ローラで試験片を線载荷する三点曲げ試験である。図-2 で人工的に作成したき裂をノッチ、ノッチを含む面内でノッチ以外の部分（試験片がつながっている部分）をリガメントと呼ぶこととする。载荷によって、き裂はノッチの先端からリガメント部へ進展し破断に至る。

試験中に収録するデータは载荷軸変位、荷重、開口変位である。载荷軸変位と荷重は、それぞれ試験機に取り付けられた変位計およびロードセルによって計測される。開口変位とは载荷によってノッチが開口する幅を指し、試験片の底面に取り付けられた治具にクリップゲージを取り付けて計測する。これらのデータは試験中データロガーで収録し、モニターで確認しながら試験を行う。

試験方法は、予荷重を約 0.04 kN 与えて上部载荷ローラおよび下部载荷ローラが試験片の载荷線に接触したことを確認した後、変位制御 $0.01\text{mm}/\text{min}$ で試験を行った。圧裂引張試験と同様、試験片は真空脱気の処理を行い、温度や湿度等の条件が一定となる環境下で試験を実施した。

破壊靱性値 K_{Ic} は ISRM 指針に従って算出する。(2)式³⁾に破壊靱性試験での最大荷重 $P_{\max}$ を代入して求める。諸パラメータの記号は図-2 に示す通りである。

$$K_{Ic} = Y' \frac{P_{\max} \sqrt{\pi a}}{2RB} \quad (2)$$

$$Y' = -1.297 + 9.516(s/2R) - (0.47 + 16.457(s/2R))\beta + (1.071 + 34.401(s/2R))\beta^2 \quad (3)^2$$

Y' は、支点間距離 s および人工き裂長さ a に対する試験片半径 R の比 $s/2R$, $\beta = a/R$ によって決まる係数である。

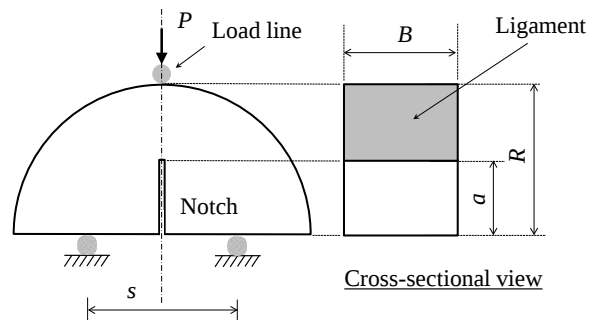


図-2 SCB試験片模式図

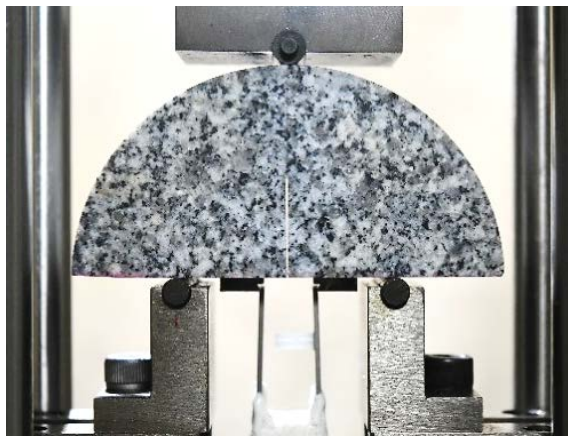


図-3 SCB試験片を試験機に設置した様子

なお今回の試験では各試験片の寸法パラメータが $R = 37.5\text{mm}$, $B = 30.0\text{mm}$, $s/2R = 0.5$, $a/R = 0.5$ となるように試験片を作成した。ノッチの幅は 0.3mm に設定して試験片を加工した。破壊靱性試験では, *hardway plane*, *grain plane*, *rift plane*に沿ったリガメント部に人工き裂を進展・開口させる試験片をそれぞれ12個, 6個, 6個作成して試験を行った。SCB試験片を材料試験機に設置した様子を図-3に示す。

3. 試験結果と考察

(1) 弾性波速度測定結果

今回の試験では図-1に示した一辺が 20cm の立方体状の岩石試料二つから試験片を採取するため、試験片の作成に先立ち二つの岩石試料に対し弾性波速度を測定した。二つの岩石試料は互いに区別するためそれぞれ97B01と97B14と名前を付けた。表-1に測定結果を示す。弾性波速度の速い順にAxis-H, Axis-G, Axis-Rを推測した。

(2) 力学的特性

岩石試料 97B01 を用いて力学的特性を調べた。各軸方

表-1 弾性波測定結果

Specimen ID	Elastic wave velocity v_p (m/s)		
	Axis-H	Axis-G	Axis-R
97B01	$4,540 \pm 20$	$4,440 \pm 20$	$4,260 \pm 60$
97B14	$4,450 \pm 20$	$4,230 \pm 30$	$4,060 \pm 30$

表-2 真壁小目花崗岩の力学的特性

Core direction	Mechanical properties		
	S_c (MPa)	E_{50} (GPa)	ν (-)
Axis-H	213.9 ± 2.5	62.2 ± 0.7	0.35 ± 0.06
Axis-G	219.9 ± 4.2	62.0 ± 0.6	0.37 ± 0.03
Axis-R	221.3 ± 4.9	62.8 ± 1.4	0.34 ± 0.05

S_c Uniaxial compressive strength, E_{50} Young's modulus, ν Poisson's ratio

向から長さ 75mm , 直径 30mm の円柱試験片を採取・整形し3本づつ一軸圧縮試験に供した。各軸方向での力学的特性を表-2に示す。この各軸の結果で t 検定を行った。 t 検定は二つのグループの誤差が偶然誤差の範囲にあるかどうか調べるものである。試験結果は正規分布に従う別の母集団から抽出した標本として扱う。抽出源の母集団の有意差の有無を検定することで試験結果の平均値間に有意差が認められるか否か求めることが出来る。ここでは二つの母平均および母分散は同じであるという前提の基に検定を行った。

結果はそれぞれの軸において一軸圧縮強度, ヤング率, ポアソン比のいずれにおいても検定統計量 (T) が臨界値 (t_α) を上回らず, 有意差は認められないという結果になった。すなわち, 顕著な異方性が認められないこととなる。このことから今回使用した岩石試料において, 内部に存在する微小き裂の分布状況は, 圧縮に対する力学特性に影響を与えないということが推察された。

(3) 圧裂引張試験結果

開口方向別に分類した圧裂引張強度を図-4に示す。また, 分類別で算出した圧裂引張強度の平均値および標準偏差を表-3に示す。なお, 圧裂引張試験においては97B01と97B14の両岩石試料の区別は行わず同一軸方向の力学特性は同じものとして実験を行い, それぞれの平均値と標準偏差を算出した。表-3中で例えば *hardway plane* は *hardway plane* に沿ってき裂を生じさせたことを示す。

三つの面の平均値から二面の組み合わせを抽出して t 検定を行った。合計で三通りの組み合わせに対して t 検定を行ったところ, *rift plane*を引き離す試験と *hardway plane*を引き離す試験および *rift plane*を引き離す試験と *grain plane*を引き離す試験での結果に有意差が認められた (表-4)。また, 各開口方向の平均値を比較すると, *hardway plane* > *grain plane* > *rift plane* となり, 今回使用した岩石試料では内部に存在する微小き裂の数や向きが引張強度に影響を与える可能性が示唆された。

(4) 破壊靱性試験結果

き裂が *hardway plane*, *grain plane*, *rift plane* に沿って開口する4種類の実験により得られた破壊靱性値の開口方向別に分類したグラフを図-5に, 平均値を表-5に示す。試験片はすべて97B14の岩石試料より作成した。

*hardway plane*に破断面を形成させる試験片の向きが二方向あるが, 岩石試料の異方性について考えたとき, 二つは载荷方向は異なるものの同一の破断面を形成させる試験となる。载荷軸方向の違いによる影響を検討した結果平均値がほぼ同一であった事より, 同じグループのデータとして扱うこととした。

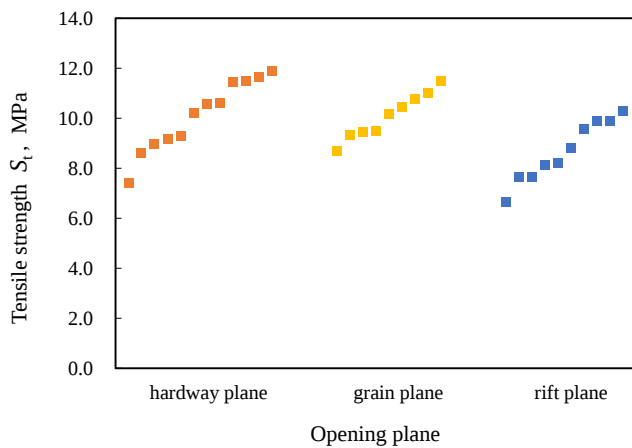


図-4 開口方向別に分類した圧裂引張強度

表-3 圧裂引張試験結果

Tensile strength S_t (MPa)		
hardway plane	grain plane	rift plane
10.11 ± 1.36	10.09 ± 0.86	8.68 ± 1.14

表-4 圧裂引張試験の t 検定結果

	hardway plane grain plane	grain plane rift plane	hardway plane rift plane
検定統計量 T	0.04	2.85	2.53
臨界値 t_α	2.09	2.11	2.09

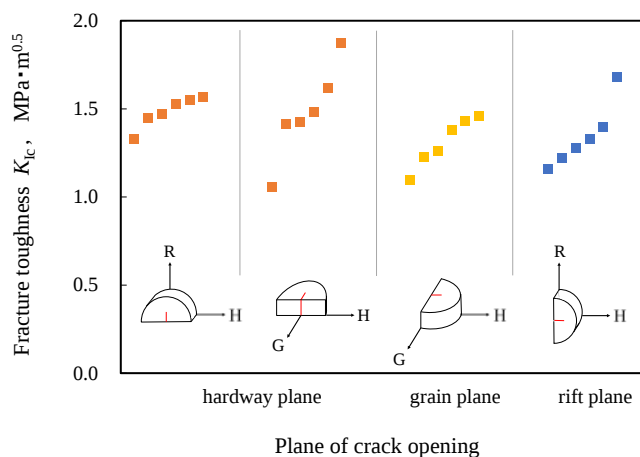


図-5 開口方向別に分類した破壊靱性試験結果

表-5 破壊靱性試験結果

Fracture toughness K_{IC} (MPa·m ^{0.5})		
hardway plane	grain plane	rift plane
1.48 ± 0.18	1.32 ± 0.16	1.34 ± 0.17

表-6 破壊靱性試験の t 検定結果

	hardway plane grain plane	grain plane rift plane	hardway plane rift plane
検定統計量 T	1.84	0.26	1.46
臨界値 t_α	2.12	2.23	2.12

き裂の形成面別に破壊靱性値を分類してみたところ、それぞれのき裂の形成面のグループ間での t 検定結果に有意差は認められなかった（表-6）。弾性波速度測定から推測した各面方向の異方性が岩石本来の異方性と適合していると考え、力学的な性質において潜在微小き裂が多く存在する rift plane に破断面が形成される試験片での破壊靱性値が最も小さくなると予測したが、grain plane と rift plane の結果がほぼ同じという結果となった。hardway plane と grain plane は潜在微小き裂が最も多く存在する面に対して垂直な面であるという意味では岩石試料内において同じ位置状況にあるという事であり、力学的な性質において大きな違いが存在するとは考えにくい。今回の t 検定によると有意差が hardway plane, grain plane, rift plane のそれぞれの組み合わせで認められないことから、今回用いた岩石試料において内部に存在する微小き裂の分布状況は、破壊靱性値に大きな影響を与えないということが考えられる。

(5) 圧裂引張強度と破壊靱性値の比較

岩石のように内部に多数の潜在クラックを含む脆性材料に対して破壊実験を行う際には、実験誤差は避けられないものである。確率論的な考え方を基礎として破壊現象を考える必要がある。試験片に用いた岩石試料が圧裂引張強度に対して示す異方性と破壊靱性値に対して

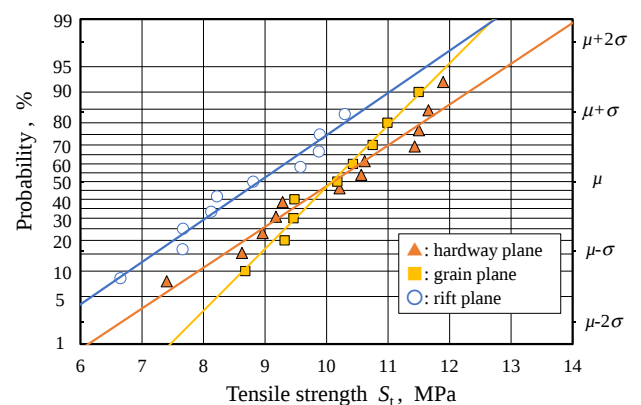


図-6 圧裂引張強度の正規確率紙での分布

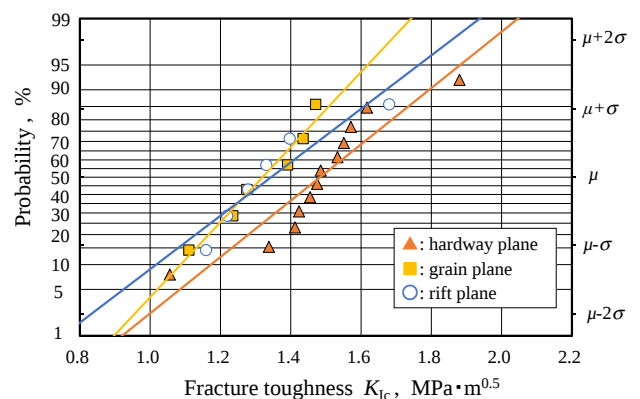


図-7 破壊靱性値の正規確率紙での分布

示す異方性を比較するために正規確率紙の作成を行った。

圧裂引張強度と破壊靱性値の正規確率紙での分布を図-6、図-7に示す。グラフの傾きは分散を表しており傾きが急であるほど確率密度関数の尖度が高く、傾きが穏やかであるほど確率密度関数の尖度が低いことを示す。圧裂引張強度においては *hardway plane* と *grain plane* の平均値に近い値となり、*hardway plane* と *rift plane* で同程度のバラツキが確認できた。破壊靱性値においては、*grain plane* と *rift plane* の平均値に近い値となり、*hardway plane* と *rift plane* で同程度のバラツキが確認できた。両者の *hardway plane* と *rift plane* の結果では、平均値は *hardway plane* > *rift plane* となっており、圧裂引張強度と破壊靱性値の相関関係も伺わせる結果となっている。破壊靱性試験とは予め作成してあるき裂がどのように連結していくのか、そのプロセスを調べるための試験であるが、これは将来的にみた圧裂引張試験という見方をすることもでき、今回明らかになった圧裂引張試験結果と破壊靱性試験結果の比較によって岩石の長期的な破壊挙動の予測に役立てられこともできるのではないかと考えられる。

例えば、岩石固有の破壊靱性値と引張強度の関係について Zhang⁴⁾ は軟岩から硬岩までの広い範囲でモードI 破壊靱性値と引張強度 (σ_t) の関係を文献調査によって取り纏め、次の経験式を導いている (図-8参照)。

$$\sigma_t = 6.88 K_{IC} \quad (4)$$

本研究における実験結果は平均値を見れば式(4)と調和的な関係となっていることがわかる。

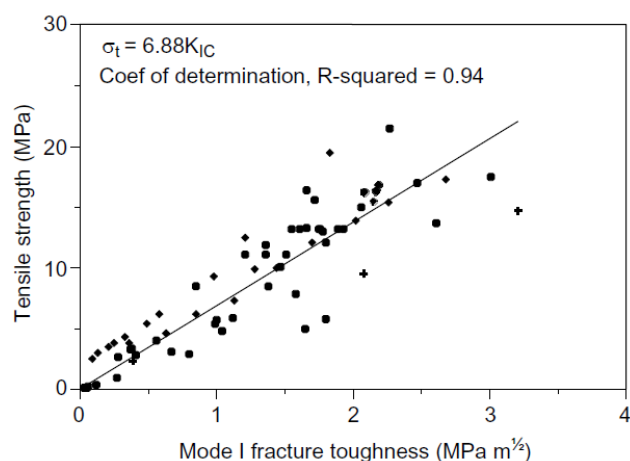


図-8 岩石のモードI破壊靱性値と引張強度の関係⁴⁾

4. おわりに

今回の実験で使用した真壁小目花崗岩は、岩石内部に存在する微小き裂は圧裂引張強度に影響を与えるが、一軸圧縮強度、破壊靱性値には直接的な影響を及ぼさない結果が明らかになった。このことから、真壁小目花崗岩での人工き裂からのき裂進展プロセスにおいては、岩石内部の既存き裂の数や向きがその抵抗力に直接作用するわけではなく、それ以外にも抵抗力に影響を与える要因が存在するということが考えられる。

き裂進展に対する抵抗力の要因として考えられるのは、例えば、破壊靱性試験においては、き裂が次のき裂に連結する際の選択的自由度が挙げられる。仮にき裂の進行方向に平行な向きの既存き裂が多く存在していたとしても、連結するき裂の進展方向が直近のき裂以外に予め決まっていたとしたら、その分抵抗力は大きくなる可能性がある。一方で進行方向に平行な向きの既存き裂があまり存在していなかったとしても、連結するき裂が決まっていなければその分き裂は既存き裂以外 (結晶粒界など) にも自由に連結し易くなり、抵抗力は小さくなる可能性がある。今回の実験では定量的な評価を行うことが出来なかったが、このような選択的自由度に関しては、試験後の試験片の破断面を観察することで予測を行う事が可能であると考えられる。選択的自由度が低い場合は予め連結するき裂が確定しているため破断面は平滑な形状となり、一方で選択的自由度が高い場合はき裂の連結経路が不確定であるため破断面の凹凸は大きくなる可能性やその逆の現象が生じる可能性もある。このような観察からも岩石試料の持つ破壊特性の異方性を予測できると考えられる。

参考文献

- 1) Chong, K.P. and Kurupp, M.D. : New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials, *Int. J. Fracture*, 26, R59-R62, 1984.
- 2) M.D. Kurupp et al. : ISRM-Suggested Method for determining the mode I static fracture toughness using Semi-Circular Bend specimen, *Rock Mech. Rock Eng.*, 47, pp.267-274, 2014.
- 3) Lim, I. L. et al. : Stress intensity factors for semi-circular specimens under three-point loading, *Eng. Fract. Mech.*, 44(3), pp.363-382, 1993.
- 4) Zhang, Z.X. : An empirical relation between mode I fracture toughness and the tensile strength of rock, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 39, pp.401-406, 2002.

EXPERIMENTAL STUDY ON FRACTURE TOUGHNESS AND FRACTURE BEHAVIOR OF MAKABE-KOME GRANITE

Takashi TAKEHARA

In this study, focusing on the crack progression behavior in the rock inside a crystalline rock, the purpose was to find the mode I fracture toughness which is the resistance to crack propagation. Various test methods have been proposed to obtain the fracture toughness, but experiments were conducted according to the Semi-Circular Bend (SCB) test by the ISRM suggested method(2014). In carrying out the fracture toughness test, three axial directions having different mechanical properties and surfaces orthogonal were defined. In this experiment, the tensile strength test and the fracture toughness test were performed on each surface, and the anisotropy of the rock specimen was examined from each test.