

岩石のき裂進展性の定量的評価に関する研究

船津貴弘^{*1}

岩盤構造物を建設し利用する上で、岩石が潜在的に有するき裂をコントロールすることは効果をもたらす。き裂の進展は、岩盤構造物の不安定化、つまりトンネルにおいては落盤や切羽の崩壊、岩盤斜面においては斜面の崩壊につながる。一方で、発破や掘削はき裂の進展の結果であり、これを制御することは効率的な操業に貢献する。このように、き裂は岩盤を対象とした事業を進める上で非常に重要な役割を果たす。そのため、対象となる岩石のき裂の進展性を定量的に知ることが極めて重要である。本論文では、岩石のき裂の進展性の評価法およびき裂の進展に影響を及ぼす要因について論じる。

キーワード：岩盤構造物、岩石、き裂、破壊靱性、試験法、環境要因

1. はじめに

き裂の発生や進展は岩盤工学上の諸問題において重要な因子となる。巨視的なき裂のみならず微小き裂も岩盤の強度や変形特性に影響を及ぼし、山岳トンネル・岩盤斜面などにおいてき裂の進展は岩盤の力学的不安定化をもたらす^{1),2)}。他方、き裂の発生を制御することで発破や水圧破砕などといった岩盤破砕の効率化が可能となる^{3)~6)}。さらに放射性廃棄物の地層処分や二酸化炭素地中貯留では、放射性核種や二酸化炭素の漏えい経路となりうるために、き裂の進展については十分注意を払わなければならない。そのためには岩石のき裂の進展に対する抵抗（破壊靱性）を定量的に評価することが必要である。図-1に示すようにき裂面に作用する応力の方

向によって岩石の破壊は、モードIからモードIIIに分類される。このうち岩石のモードI破壊靱性値の評価法としてInternational Society for Rock Mechanics (ISRM: 国際岩の力学学会)では図-2に示すように、Chevron Bend (CB)⁷⁾試験片、Short Rod (SR)⁷⁾試験片、Cracked Chevron Notched Brazilian Disc (CCNBD)⁸⁾試験片を推奨している。いずれの試験片にもノッチと呼ばれる人口き裂を作製している。そのノッチに対してCBおよびSCB試験片では曲げ载荷、SR試験片は直接载荷、CCNBD試験片では圧裂によって間接的に引張応力を作用させる。本図の説明については後述する。その中でChong and Kuruppu⁹⁾によって提案されたSemi-Circular Bend (SCB)試験片は、岩石コアから容易に作製可能な三点曲げ試験であり、試験装置が複雑ではないことなど

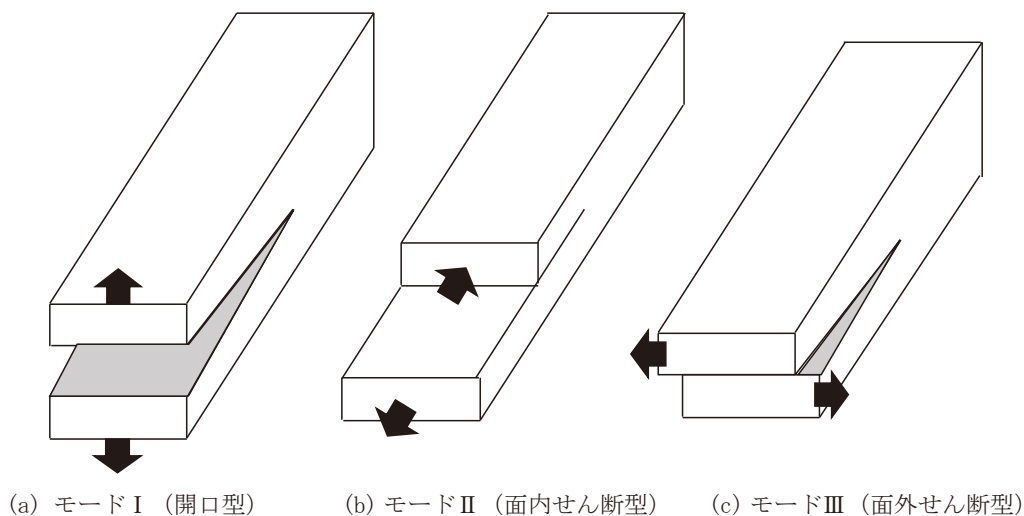


図-1 岩石の破壊モード

*1 土木研究部

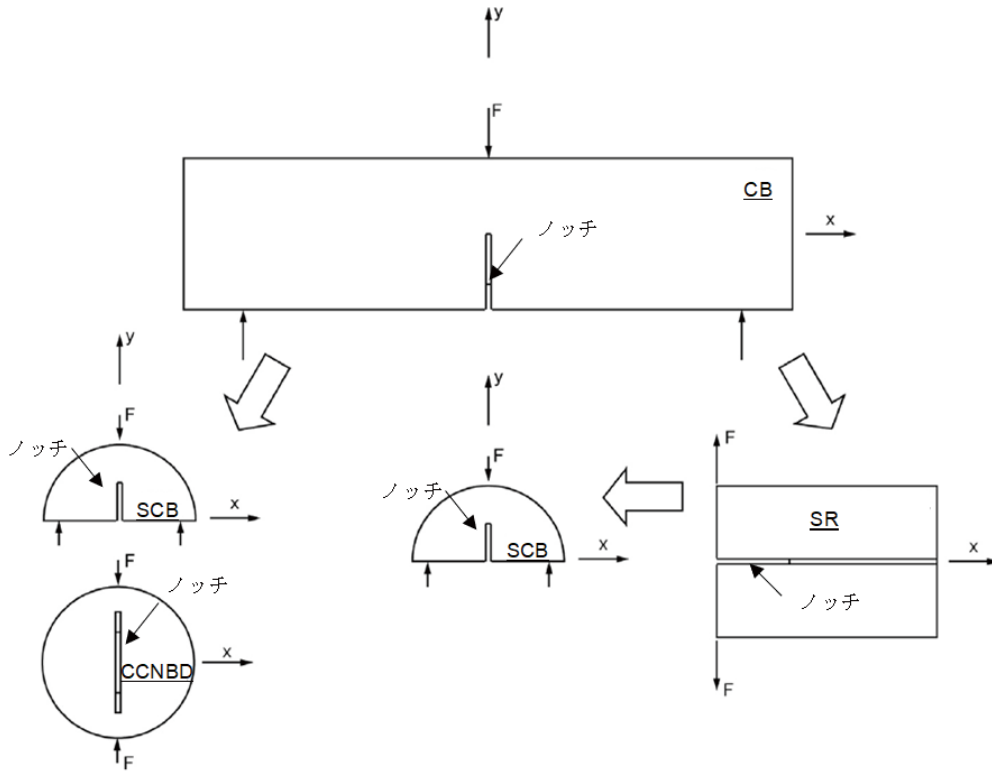


図-2 ISRM 推奨のモード I 破壊靱性試験法

の利点を有している。さらに、岩盤工学上のき裂の進展で特に問題となるモード I，モード II ならびにそれらの混合モードの破壊靱性値を評価可能である点などで他の試験片に対し優位性を持っている。本論文では、まず岩石の破壊靱性の定量的な評価法としての SCB 試験片の破壊靱性試験について述べる。次に破壊靱性試験の際に留意することとしての寸法効果，その影響を除去するための数値解析の活用について説明する。

その上で、岩石のき裂進展挙動に影響を及ぼす要因として、温度および封圧について実験的に調査した結果を論じる。

2. 破壊靱性試験の方法について

2.1 ISRM 推奨案

図-2に、現在(2021年)ISRMにより定められている、モード I 破壊靱性試験に用いられる試験片の形状を示している。同図は、ISRM が推奨する 4 試験片の関係性を示している。試験片の形状の関係から、CB 試験片で破壊靱性試験を行った試験後の試験片から SR 試験片や SCB 試験片、CCNBD 試験片を作製することが可能であり、SR 試験実施後の試験片からは SCB 試験片が作製できる。このように異なる試験片を組み合わせることで、1本の岩石コアから、複数の破壊靱性試験を実施することが可能となる。これは岩石には節理や層理が卓越していた場合に、その影響で破壊靱性値に異方性が生じることがあり、異方性の影響を見るために、層理面に対して異なる方向から载荷することが可能となるためである。

実験から破壊靱性値 K_{Ic} を評価するためには、試験時の最大荷重と試験片の寸法および無次元応力拡大係数が必要となる。図-3に示す SCB 試験片の場合には、破壊靱性値 K_{Ic} は下記の式(1)による¹⁰⁾。

$$K_{Ic} = Y' \frac{P_{max} \sqrt{\pi a}}{2RB} \quad (1)$$

ここで P_{max} は最大荷重、 a はき裂長さ、 R は試験片の半径、

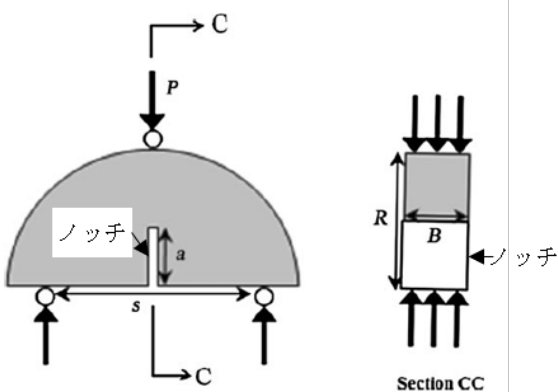


図-3 SCB 試験片の形状 (参考文献 10 を一部修正)

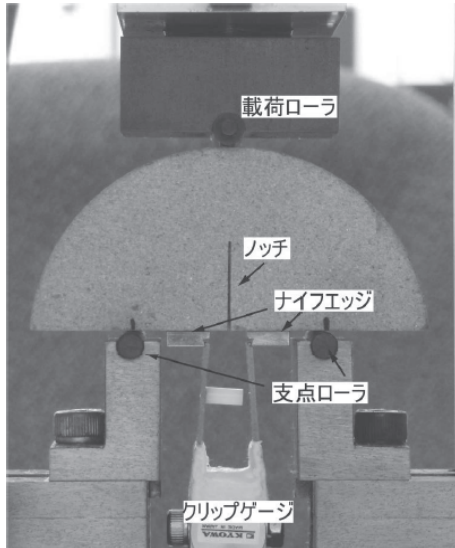


図-4 SCB試験片の荷重装置への設置状況¹¹⁾

B は試験片の直径である。また、 Y' は無次元応力拡大係数であり、下記の式 (2) で表される。

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

ここで $\beta = a/R$ である。

式 (1) に示すように、最大荷重 P_{max} のデータを取得できれば、破壊靱性値は算出できるが、荷重ローラおよび支点ローラの変位を取得することが望ましい。また、き裂の開口変位 (COD: Crack Opening Displacement) を取得するために試験片の下面に金属製のナイフエッジを接着剤で固定し、クリップゲージを設置する場合もある。図-4 に試験片の荷重装置への設置状況を示す。荷重は荷重ローラの変位速度を固定し変位制御で行い、最大荷重に到達後、巨視的なき裂が発生し、試験片が2つに割れるまで行う。

2.2 寸法効果

岩石の破壊靱性値の評価は線形弾性破壊力学に基づいているので、プロセスゾーンの寸法効果の評価が重要となる。プロセスゾーンとは、最終的な破壊が生じる前にき裂先端近傍に発生するマイクロクラックなどで形成される微小破壊領域のことである。この寸法が試験片寸法に対して大きい場合には、プロセスゾーンの形成などに消費されるエネルギーの散逸が無視できず、破壊靱性値に対して影響を及ぼす。このため岩石試料本来の破壊靱性値を得るためには、破壊時に形成されるプロセスゾーンの寸法に影響を受けない大きさの試験片寸法である必

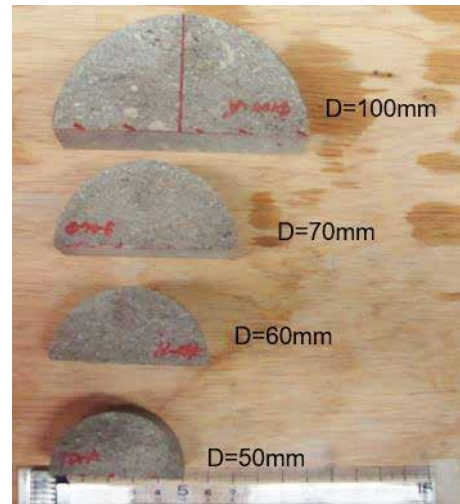


図-5 直径 50mm ~ 100mm の異なる寸法の試験片 (文献 11 を一部修正)

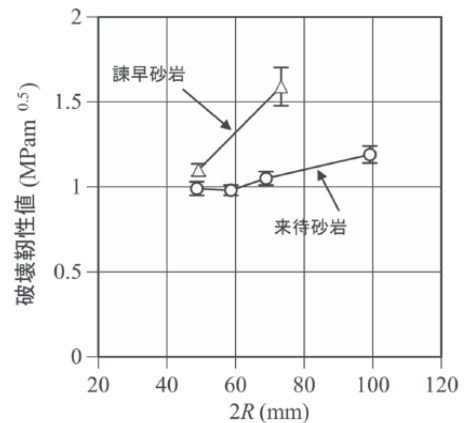


図-6 破壊靱性値と試験片寸法との関係¹¹⁾

要がある。

ISRM 推奨案の中では、試験片の直径が 76mm 以上であることが記載されている。しかしながら、実際の岩盤工学上の操業では、76mm 以上のコアを採取することが困難な場合が多い。また、SCB試験片の最小寸法については、Chong and Kuruppu¹²⁾ は頁岩を対象とした異なる寸法の試験片の実験結果から式 (3) を提案している。

$$D \geq 2.0 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_t} \right) \quad (3)$$

ここで、 D は試験片直径、 K_{Ic} は破壊靱性値、 σ_t は引張強度である。

しかしながら、式 (3) は 1 岩種のみの実験データから導出されており、同論文においても他の岩石を使用し検証することが必要と記述されている。したがって、図-4 に示すように $D=50 \sim 100$ mm の異なる寸法の試験片を作成し、それに対して破壊靱性試験を実施し寸法の

影響を調査した。式 (3) では引張強度の項があることから、対象とした岩石は2種類の異なる引張強度を持つ砂岩である島根県産の来待砂岩と長崎県産の諫早砂岩である。諫早砂岩の一軸圧縮強度および引張強度は来待砂岩のそれと比べて2.5～3倍程度高い値を示す。

図-5に破壊靱性値と試験片寸法との関係を示す。来待砂岩・諫早砂岩ともに寸法が大きくなると破壊靱性値も増大する傾向がわかる。来待砂岩の場合、2R = 50 mmと60 mmでは破壊靱性値に有意な差は見られなかったものの、2R = 70 mmおよび100 mmの破壊靱性値は2R = 50 mmの値と比べてそれぞれ6%, 20%の増加が認められた。諫早砂岩では破壊靱性値の増加はより顕著であり、2R = 72 mmの破壊靱性値は2R = 48 mmの値と比べて45%もの増加が認められた。すなわち砂岩の場合においても寸法効果があり、試験片の寸法が小さい場合には破壊靱性値を過小評価することが示唆された。その理由として、試験片の寸法が小さい場合にはき裂の前方にプロセスゾーンの影響が無視できないことが挙げられる。

破壊靱性試験を行った来待砂岩のようにSCB試験片の最小寸法径に関する式(3)を満たさない試験片寸法の場合は、破壊靱性値を低く見積もる可能性があるために何らかの補正が必要になる。そのための手法としてAE(Acoustic emission)から微小き裂の位置を同定し、プロセスゾーンの寸法を加味したき裂長さを用いることで補正する手法¹³⁾もあるが、筆者らは数値解析による手法¹⁴⁾を提案している。

3. き裂の進展に影響を及ぼす因子について

通常、岩石内部には潜在き裂が含まれており、地下の環境条件や外力条件によって、長期的に潜在き裂の様相が変化し、岩盤構造物の安定性に影響を及ぼすものと考えられる。したがって、岩石のき裂の進展抵抗を示す破壊靱性に関する検討も重要であると考えられる。例えば、高レベル放射性廃棄物の地層処分では、地下300m以深の地下に岩盤構造物を建設することが想定されている(原子力委員会, 2000)ことから、外力条件として高い地殻応力を考慮する必要があり、さらに環境条件としては、地下水質や廃棄体から放出される熱等について考慮する必要がある。したがって、地下岩盤の長期的な安定性を検討する上では、これらの外力条件や環境条件が岩石の力学特性に及ぼす影響について実験的に明らかにする必要がある。

この試験に用いた岩石は前述の島根県産の来待砂岩と

栃木県産の田下凝灰岩である。試験片の準備においては、同一の岩石ブロックから層理面に対して平行な方向と垂直な方向の2方向からコアボーリングを行い試験片の形状に整形した。

試験片は乾燥させた後、真空デシケータの中で脱気を行った。破壊靱性試験で用いた試験装置の最大容量は19.6kNであり、設定可能な最高温度は200℃、最大封圧は30MPaである。試験では試験片をシリコンオイルで満たされた恒温槽の中に入れる必要があるため、シリコンオイルがノッチや試験片内部の空隙に浸入することを防止することを目的として、ノッチ及び試験片をコーティングした。コーティングの方法は、ノッチの周りをテープで巻いた後、その上から試験片全体にシリコン樹脂を均一に塗布した。

次に試験の手順について述べる。まず、試験片を試験用治具にセットし、固定のため約0.5N荷重を負荷した。次に、荷重および変位のゼロ点調整を行った後、試験槽に試験片及び試験治具を格納し試験槽を密閉した。その後、試験槽をシリコンオイルによって満たした。高温下の試験では、試験槽中のシリコンオイルを介して加熱して所定の温度条件を設定した。その際、昇温速度200℃/h(3.3℃/min)以下では熱衝撃による破壊が起こらないことが報告されていることから、本研究では約1℃/minとして加熱した。所定の温度に到達した後、試験片内部の温度を均一にするために、その状態で2時間養生した後に試験を開始した。試験片への荷重は荷重線変位速度を一定(0.075mm/min)とした条件で行い、荷重が最大荷重に到達した後残留強さ状態になるまで荷重を行った。

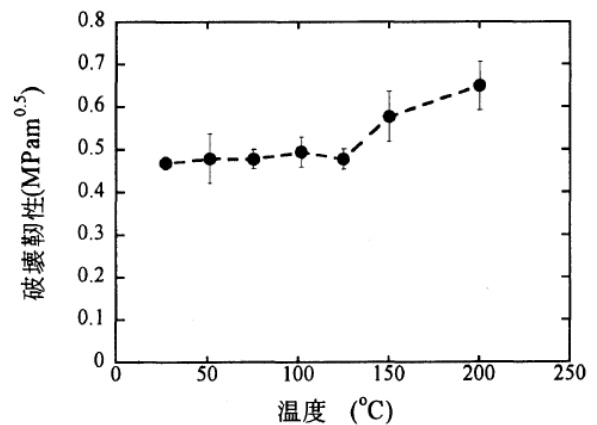


図-7 来待砂岩の破壊靱性と温度との関係 (大気圧下)¹⁵⁾

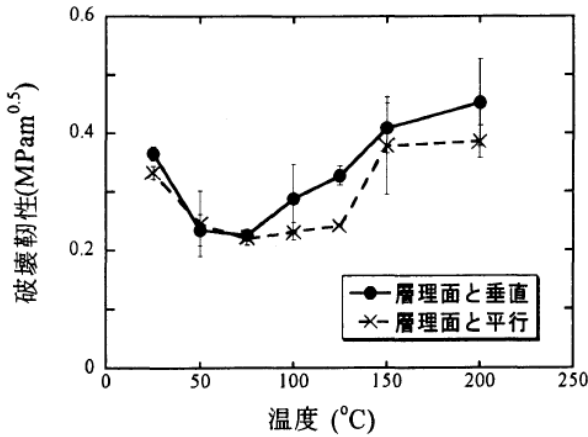


図-8 田下凝灰岩の破壊靱性と温度との関係 (大気圧下)¹⁵⁾

設定した試験条件は、次の2種類である。1) 大気圧下で温度のみを変化させる。2) 室温化で封圧を変化のみをさせる。温度のみを変化させる試験では、温度を室温、50°C、75°C、100°C、125°C、150°C、および200°Cの7条件変化させた。封圧のみを変化させる試験では、大気圧、0.5MPa、1MPa、2.5MPa、5MPa、7MPa、9MPaの7条件変

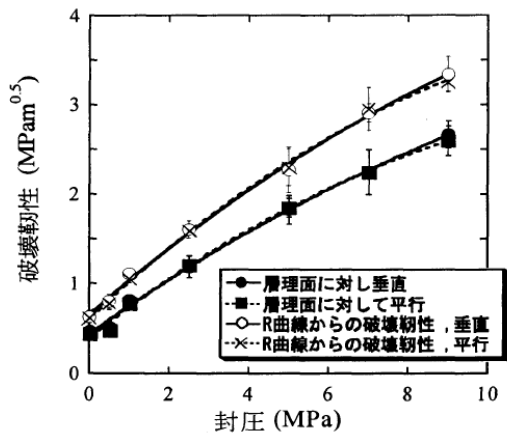


図-9 来待砂岩の破壊靱性と封圧との関係 (室温下)¹⁵⁾

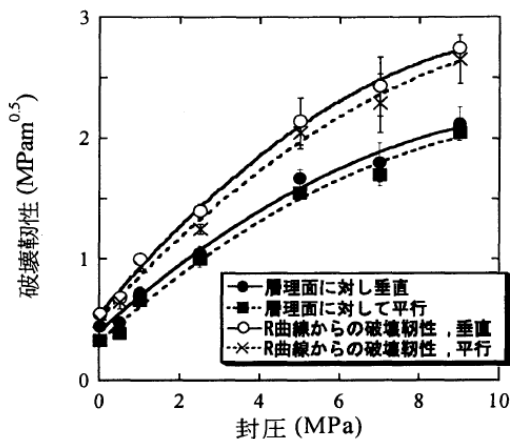


図-12 田下凝灰岩の破壊靱性と封圧との関係 (室温下)¹⁵⁾

化させた。なお、荷重、荷重線変位、き裂開口変位、温度および封圧のデータを記録した。

3.1 温度の影響

図-6に来待砂岩の破壊靱性と温度との関係を示す。同図に示すように来待砂岩の破壊靱性は、温度が室温から125°Cの範囲ではほぼ一定の値を示している。一方、温度が125°C以上になると、温度の上昇とともに破壊靱性が増加している。例えば、150°Cのときの破壊靱性は室温の時と比べて約30%増加しており、200°Cの時の破壊靱性は室温の時と比べて約40%増加している。

図-7に田下凝灰岩の破壊靱性と温度との関係を示す。同図に示すように、田下凝灰岩の破壊靱性は室温から50°Cで低下した後、100°C以上で温度の上昇に伴って破壊靱性は増加している。

温度の上昇に伴う破壊靱性の変化の要因は、温度により生じる鉱物粒子の熱膨張が挙げられる。また、温度の上昇によって岩石中に存在する粘土鉱物が含有している吸着水や層間水が脱水することが要因として挙げられる。前者は、マイクロクラックの発生につながり、破壊靱性の低下の要因となる。一方後者は、粘土鉱物の状態変化による固結化が発生し、鉱物粒子間の摩擦抵抗が上昇することで破壊靱性の増加の要因となる。

破壊靱性と温度との関係が来待砂岩と田下凝灰岩で相違するのは鉱物粒子間のマイクロクラックの発生と粘土鉱物の状態変化のどちらがより支配的かによる。それには粘土鉱物の含有量や間隙率などの岩石の物理化学的な要因が影響をしている。

3.2 封圧の影響

図-8に来待砂岩の破壊靱性と封圧との関係を示す。同図に示すように来待砂岩の破壊靱性は封圧の上昇に伴い増加している。ただしその関係は線形ではなく封圧5MPaを境界に増加率が低くなっている。図-9に、田下凝灰岩の破壊靱性と封圧との関係を示す。田下凝灰岩の場合も来待砂岩の場合と同様、破壊靱性は封圧の上昇に伴い増加しており、また、増加率の低下も見られる。

封圧による破壊靱性の増加の要因として、外力によって潜在き裂が閉じ摩擦力が作用することで、潜在き裂が開口ににくくなるために、き裂進展が抑制されることがある。また、封圧によってき裂が進展した場合にも、脆性的な挙動につながらず、き裂の安定的な成長が生じるようになり、そのことが破壊靱性の増加につながったものとみられる。また、破壊靱性と封圧の関係に異方性は

ほとんど見られなかった。つまり、封圧の上昇と岩石内部の構造には関係性がみられなかった。

4. おわりに

本論文では、岩石のき裂の進展性の定量的な評価法について述べた。破壊靱性値は金属やセラミックス等では一般的に使用されるものの岩石ではこれまで研究段階にとどまっており、支保設計などには活用されていない。しかしながら、き裂の進展性に及ぼす環境要因や岩石の物理化学的な性質を理解することは、将来における放射性廃棄物の地層処分や地下の高度な利用に有用であると考える。また、破壊靱性を取り入れた岩盤の力学的解析手法などを開発することで、岩盤工学上のリスク評価や効率化につながるものと思われる。

本論文で論述した内容は、筆者が過去20年間にわたって実施してきた一連の研究成果の一部であり、必ずしも土木工学を対象としたものばかりではない。しかしながら、本論文が少しでも岩盤を対象とした工事の安全性や効率性につながれば幸甚である。

参 考 文 献

- 1) Scavia, C.: Fracture mechanics approach to stability analysis of rock slopes, Engng. Fract. Mech., Vol. 35, pp.899-910, 1990
- 2) Kemeny, J.: The time-dependent reduction of sliding cohesion due to rock bridges along discontinuities: a fracture mechanics approach, Engng. Fract. Mech., Vol.36, pp.27-38, 2003
- 3) Thallak, S., Holder, J. and Gray, K.E.: The pressure dependence of apparent hydrofracture toughness, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 30, pp.831-835
- 4) Papanastasiou, P.: The effective fracture toughness in hydraulic fracturing, Int J Fract., Vol.96, pp.127-147, 1999
- 5) Takahashi, H. and H. Abe.: Fracture mechanics applied to hot, dry rock geothermal energy, In Fracture Mechanics of Rock, Academic Press, London, pp.241-276, 1987
- 6) Gale, J. F. W., Reed, R. M. and Holder, J.: Natural fractures in the Barnett Shale and their importance for hydraulic fracture treatments, AAPG Bulletin, Vol.91, pp.603-622, 2007
- 7) ISRM: Suggested methods for determining the fracture toughness of rock, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.25, pp.71-96, 1988
- 8) Fowell, R. J.: Suggested method for determining mode I fracture toughness using Cracked Chevron Notched Brazilian Disc (CCNBD) specimens, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.32, pp.57-64, 1995
- 9) Chong, K. P. and Kuruppu, M. D.: New specimens for mixed mode fracture investigations of geomaterials, Engng. Fract. Mech., Vol.30, pp.701-712, 1988
- 10) Kuruppu, M.D, Obara, Y., Ayatollahi, M.R., Chong, K.P. and Funatsu, T.: ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using Semi-Circular Bend specimen, Rock Mech. Rock Eng. Vol.47, pp.267-274, 2014
- 11) 船津貴弘, 竹原孝, 笹岡孝司, 島田英樹, Kuruppu, M.D.: 来待砂岩および諫早砂岩を用いた SCB 試験片によるモード I 破壊靱性値と試験片寸法との関係, 応用地質, Vol.56, No.2, pp.46-55, 2015
- 12) Chong, K. P. and Kuruppu, M. D.: Fracture toughness determination of layered materials, Engng. Fract. Mech., Vol.28, pp.43-54, 1987
- 13) Hashida, T.: Fracture toughness testing of core-based specimens by acoustic emission, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.30, pp.61-69, 1993
- 14) Funatsu, T., Shimizu, N. and Kuruppu, M.D.: Evaluation of mode I fracture toughness assisted by the numerical determination of K-resistance, Rock Mech. Rock Eng., Vol.48, pp.143-157, 2015
- 15) 船津貴弘, 瀬戸政宏, 島田英樹, 松井紀久男: 堆積性の岩石の破壊靱性に及ぼす温度および封圧の影響, 土木学会論文集, No.729/III-62, pp.145-155, 2003

Study on the evaluation of crack propagation in rock

Takahiro FUNATSU

Controlling crack formation and propagation is important for the mechanical stability of rock mass and the efficient operation of excavation and blasting. For that purpose, it is necessary to quantitatively evaluate the criteria for the occurrence and growth of cracks. I have been working on the so-called fracture toughness, which resists the growth of rock cracks, using both experimental and numerical analysis. The result has been adopted by the International Society for Rock Mechanics (ISRM) as a suggested method for a mode I fracture toughness evaluation for rocks. This paper summarizes a series of research results on rock fracture toughness. The purpose is to contribute to the improvement of rock stability and efficient development by sharing the results.