

ボーリングコアを用いた岩石の ISRM 破壊靱性試験における 寸法効果と形状効果

SPECIMEN SIZE AND SHAPE EFFECTS IN THE ISRM FRACTURE TOUGHNESS TESTING OF ROCKS

松木 浩二*・野津山喜晴**・高橋 秀明***

By Koji MATSUKI, Yoshiharu NOZUYAMA and Hideaki TAKAHASHI

In this paper described are the test results on specimen size effect as well as specimen shape effect in the fracture toughness testing of rocks according to the "Suggested Methods for Determining The Fracture Toughness of Rock" proposed by Commission on Testing Method in ISRM. Test results for three kinds of rocks show that even corrected fracture toughness is not independent of specimen diameter, and that there exists a unique relation between corrected fracture toughness and crack extension. That is, both size and shape effects are caused by the difference in crack extension at which fracture toughness is evaluated.

Keywords: rock, fracture toughness, size effect, shape effect, K-resistance curve

1. 緒 言

岩石発破や水圧破碎など、特に岩盤内における亀裂の発生や成長を問題とする工学分野で、亀裂の成長に対する抵抗値としての岩石の破壊靱性を知ることが重要になってきている¹⁾。また、ビットやウォータージェットを用いた岩石切削においても、岩石の破壊靱性を用いて切削性の評価を行う試みがなされるようになってきた^{2),3)}。これに伴い、これまで種々の研究者によって種々の方法で行われてきた岩石の破壊靱性試験を標準化する必要が生じ、このため、ISRM (International Society for Rock Mechanics) の試験法に関する委員会では、Ouchterlonyを中心としたワーキング・グループによって推奨案の作成作業が行われ⁴⁾、1988年に Suggested Methods (以後、ISRM 法とよぶ)⁵⁾ が制定された。同法は、①現場からの採取が容易なボーリングコアを試験片として用い、②疲労亀裂を導入することなく載荷過程で生じる亀裂を利用して破壊靱性を評価することができるシェブロンノッチを予亀裂として採用し、また、③三

点曲げ試験 (Chevron Bend: 以下 CB と略記する) とショートロッド試験 (Short Rod: 以下 SR) の2つの方法を含めることによって、1つのボーリングコアから破壊靱性の異方性を評価することができることなど、岩石の特性を考慮した優れた特徴を有している。

一方、求めた破壊靱性が材料固有の一定値であるためには、試験片寸法に依存しない必要があり、また、このことは、求めた破壊靱性を工学的問題に用いる場合にきわめて重要な意味をもって来る。しかし、ISRM 法では、このために必要な試験片寸法に関する記述がなく、したがって、ある試験寸法について求めた破壊靱性が材料固有の一定値であるかどうかに関してきわめて不明瞭になっている。

そこで、本研究では、3種の岩石に対して ISRM 法に準拠した破壊靱性試験を行い、同方法で求められる破壊靱性の寸法効果と形状効果について検討を行った。

2. 試験装置および試験方法

(1) 試験装置

Fig.1 および Fig.2 は、それぞれ、CB および SR 試験における ISRM 法に準拠した試験装置とシェブロンノッチを含む標準試験片形状を示したものである。ただし、これらの図中の試験片中央断面図には、亀裂が Δa

* 正会員 工博 東北大学助教授 資源工学科
(〒980 仙台市荒巻字青葉)

** 工修 前・東北大学大学院 (現・農水省)

*** 工博 東北大学教授 破壊力学応用研究施設

Table 1 Mechanical properties of rocks in uniaxial tension.

Rock	σ_t (MPa)	E_i (GPa)	E_{50} (GPa)	ν_{50} (-)
Ogino tuff	5.61	11.9	9.14	0.112
Inada granite	5.82	37.6	29.0	0.068
Tohoku marble	4.77	25.6	13.6	0.071

σ_t ; uniaxial tensile strength.
 E_i ; initial tangential Young's modulus.
 E_{50} ; tangential Young's modulus and Poisson's ratio at a half of tensile strength.

だけ成長した場合を示してある。CB 試験では、クリップゲージ⑨を用いて亀裂肩部開口変位を測定するとともに、シェブロンノッチに挿入したヨーク⑥と試験片上に設置したサドル②を用いて LVDT④ (± 2 mm) により荷重線変位を測定した。SR 試験では、試験片端面に 2 枚の硬質アルミ製エンドプレート②を接着してグリップ③により上下に試験片を引っ張るが、荷重線変位はエンドプレートに取り付けた LVDT⑧ (± 2 mm) を用いて測定した。なお、荷重は容量 10 t のサーボコントロール型材料試験機 (東京衡機製) を用いて所定の荷重線変位速度以上になるようにストローク制御で加えた。

(2) 試験方法

試料としては、福島県耶麻郡高郷村産の荻野凝灰岩(以下図中では OT, 本文中では単に凝灰岩), 茨城県笠間市産の稲田花崗岩(図中では IG, 本文中では単に花崗岩) および岩手県東磐井郡大東町産の東北大理石(図中では TM, 本文中では単に大理石) の 3 岩種を用いた。これらの岩石について、直径 30 mm, 有効長 60 mm の試験片を用いて得られた一軸引張強度, 初期接線ヤング率, 50%強度の接線ヤング率およびポアソン比を Table 1 に示す。これらの岩石の中で、大理石は、一軸引張応力下における応力-ひずみ関係の非線形性が特に大きい。

寸法効果と形状効果に関する系統的な試験を行うために、CB 試験と SR 試験のそれぞれについて、凝灰岩と花崗岩については 30, 42, 52, 68, 80, 100 mm の 6 段階, 大理石については 42, 68, 100 mm の 3 段階の試験片直径を用いた。なお、CB 試験で 2 つに分離した試験片の片方を SR 試験に供したので、CB と SR における亀裂進展方向は互いに垂直である。そこで、CB 試験と同じ亀裂進展方向の直径 52 mm の SR 試験片を用いて破壊靱性の異方性もチェックした。なお、Fig. 3 に示すように、CB 試験における亀裂進展方向は成層面または最も弱い面に垂直であり、SR 試験における亀裂進展方向もこれらの面を横切る方向である。なお、大理石と凝灰岩については成層面が目視できるのに対して、花崗岩については目視できなかったため互いに垂直な三方向について行った圧裂引張試験の結果より最も弱い面を決定した。シェブロンノッチは、治具により、CB については厚さが 0.4 mm のダイヤモンドブレードで、直径 52

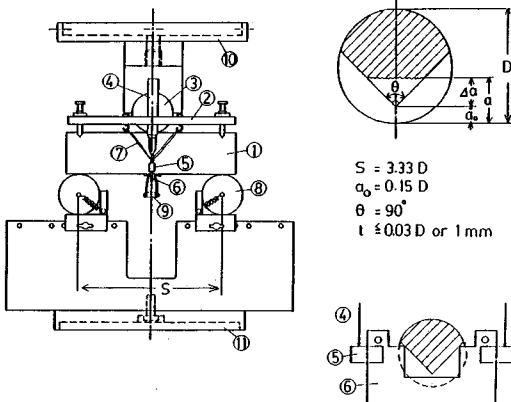


Fig. 1 Testing apparatus and specimen configuration for chevron bend (CB) specimen. (①specimen, ②saddle, ③loading roller, ④LVDT, ⑤shoulder, ⑥yoke, ⑦elastic rubber band, ⑧ support roller, ⑨clip gauge, ⑩upper loading platen, ⑪lower loading platen)

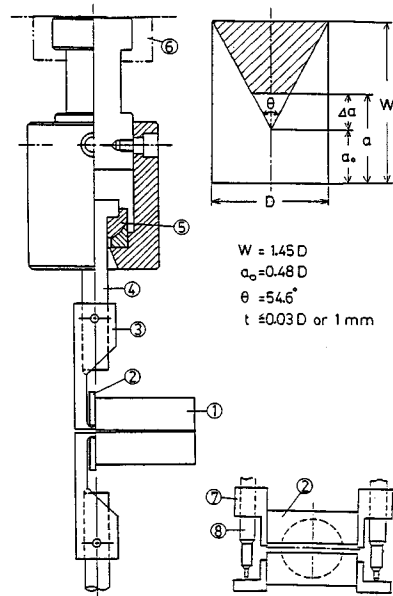


Fig. 2 Testing apparatus and specimen configuration for short rod (SR) specimen. (①specimen, ②end plate, ③grip, ④ pull rod, ⑤spherical swivel bearing, ⑥upper loading platen, ⑦ LVDT holder, ⑧LVDT)

mm 以下の SR では厚さが 0.8 mm, 直径 68 mm 以上の SR では厚さが 1.2 mm のダイヤモンドブレードを用いて作製した。いずれの試験においても, 試験片は約 40°C の乾燥炉中で重量変化がなくなるまで乾燥した後原則として同一条件で 2~4 個試験に供した。

3. 破壊靱性の評価方法

ISRM 法では, 破壊靱性の評価に 2 つのレベルがある。レベル 1 では, 最大荷重 F_{max} のみから式 (1) を用いて破壊靱性 (K_{CB} , K_{SR} : 総称して K_{ISRM}) を求める。

$$K_{ISRM} = A \cdot F_{max} / D^{1.5} \dots\dots\dots (1)$$

ただし, D は試験片直径, A は試験片寸法やシェブロンノッチの寸法・形状などによって決まる係数⁵⁾で, 破壊亀裂の成長過程における最小の無次元応力拡大係数の値である。シェブロンノッチの場合, 無次元応力拡大係数はノッチ先端からの亀裂の成長に伴ってはじめ減少し, 最小値となった後増加に転じる。したがって, 線形弾性体でかつ破壊亀裂が $K_I = K_{IC}$ で成長する場合には, 最小の無次元応力拡大係数で最大荷重となるので, 式 (1) から破壊靱性を求めることができる。ちなみに,

最小の無次元応力拡大係数となる亀裂長さ a_c は, 標準形状の場合, CB 試験ではノッチ先端から約 0.15 D , SR 試験では, 約 0.34 D である。すなわち, 両試験法で破壊靱性を評価する亀裂長さが異なる。このように, シェブロンノッチを用いた場合には, 亀裂がある長さ成長してから破壊靱性を評価することに特徴がある。

しかし, 周知のように, 岩石の応力-ひずみ関係は多かれ少なかれ非線形であり, 線形弾性体とはみなせないことも多い。そこで, レベル 2 では, Barker⁶⁾ の提案した非線形性 (塑性) 補正を行う。Fig. 4 に, ISRM 試験法における荷重-荷重線変位線図を模式的に示したが, レベル 2 では, 何回か除荷-再載荷を行い, まず, 各サイクルについて線形化除荷直線 (linearized unloading line) を求める。レベル 2 では, この除荷直線の傾きに基づいて亀裂長さを決める除荷コンプライアンス法が試験法の基礎をなしている。次に, 線形弾性体の場合に最小の無次元応力拡大係数を与える亀裂長さ a_c に対する荷重点 (F_c 点) を, 作図法によりコンプライアンスの

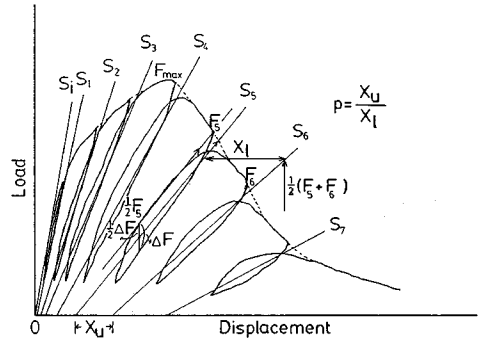


Fig. 4 A schematic diagram of load-load line displacement and principles of non-linearity correction.

変化から求める。すなわち, CB 試験では, 除荷直線の傾きが初期接線の傾き S_2 の約 82 % になる点, SR 試験では 50 % まで減少した点を求める。最後に, F_c 点を含むサイクル間の非線形補正係数 p を用いて次式から破壊靱性 (K_{CB}^c , K_{SR}^c : 総称して K_{ISRM}^c) が求められる。

$$K_{ISRM}^c = \sqrt{(1+p)/(1-p)} \cdot F_c / F_{max} \cdot K_{ISRM} \dots\dots\dots (2)$$

非線形補正係数 p は, Fig. 4 に示すように, 2 つの除荷直線で囲まれる部分について, 永久変位の増分 x_u と除荷点の平均荷重に対応する変位増分 x_i の比で定義される。すなわち,

$$p = x_u / x_i \dots\dots\dots (3)$$

岩石が線形弾性体の場合には $x_u = 0$ であるから $p = 0$ となる。一方, 完全塑性体でこのサイクル間で塑性変形のみが生じた場合には $x_u = x_i$ であるから $p = 1$ となる。すなわち, 岩石の非線形性 (塑性) の程度に応じて p は 0 から 1 の範囲をとる。式 (2) は, このサイクル間における単位亀裂成長面積当たりのエネルギー損失 (有効エネルギー解放率に相当) を p を用いて表わした後, これを応力拡大数の次元に換算したものである。なお, ISRM 法では, この非線形補正を行った後のレベル 2 の破壊靱性に寸法効果のないことを期待している。

4. 試験結果および考察

(1) 寸法効果および形状効果

Fig. 5 は, SR 試験における荷重-荷重線変位線図の例である (花崗岩, 直径 80 mm)。このように, シェブロンノッチを用いた破壊靱性試験では, ノッチ先端からの亀裂成長に伴って最大荷重以前に大きな非線形性を示すことが特徴である。これらから求めた凝灰岩, 花崗岩および大理石に対するレベル 1 の破壊靱性 K_{ISRM} の平均値と試験片直径の関係を示す Fig. 6 に示す。なお, 同図には, 直径 52 mm の試験片について求めた CB と同じ亀裂進展方向の SR 試験片の結果 (SR \perp) も示してある。これから, 破壊靱性の異方性については, 大理石で若干の

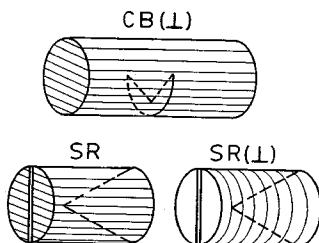


Fig. 3 Direction of crack propagation for CB and SR.

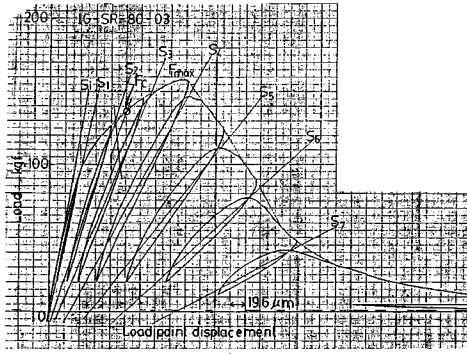


Fig. 5 An example of load-load line displacement diagram (granite, SR, $D=80$ mm).

差が認められるものの、他の2岩種については、ばらつきを考慮すれば亀裂進展方向による破壊靱性の異方性は小さいことがわかる。したがって、これらの岩石については、Fig. 6は、 K_{ISRM} の寸法効果とともに形状効果も示している。花崗岩で大きな寸法効果と形状効果が認められ、大理石についても著しい寸法効果が認められる。凝灰岩については、試験片直径の小さな範囲のCB試験片で寸法効果が認められるだけである。また、形状効果の認められる花崗岩では、同一直径の試験片に対して、SR試験での破壊靱性の方がCB試験の値より常に大きい。

レベル2では、すでに述べたように、 p を用いて非線形補正を行うが、Fig. 7に、CBおよびSR試験における個々の試験片での p の変化の例を示した。ただし、横軸の荷重線変位は、最大荷重における値で基準化して

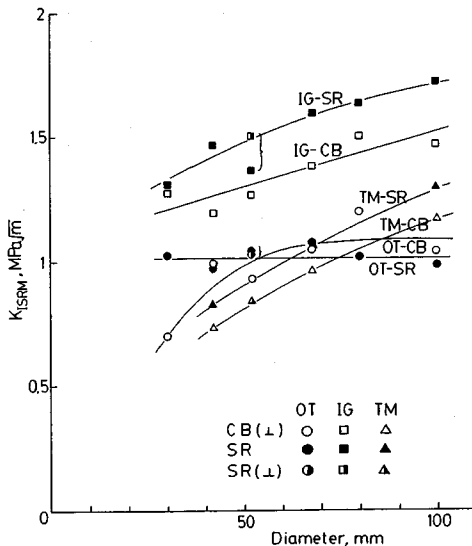


Fig. 6 Dependence of K_{ISRM} (level 1) on specimen diameter for both CB and SR.

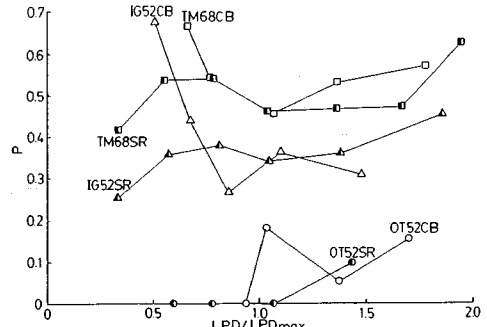


Fig. 7 Variation of non-linearity correction factor p in each run of tests.

ある。これからわかるように、各岩種で同程度の値を示してはいるものの、作図上の誤差の影響を強く受けて各サイクルごとの変動がかなり大きく、したがって、式(2)から求めた破壊靱性のばらつきが大きくなった。そこで、破壊靱性のばらつきを小さくするために、 F_c 点を囲むサイクルとその前後のサイクル間の平均値 \bar{p} を用いて破壊靱性 K_{ISRM}^c を求めた。 K_{ISRM}^c と試験片直径の関係をFig. 8に、また、 \bar{p} と試験片直径の関係をFig. 9に示す。なお、大理石のCB試験では、 F_c 点が求められなかったが、これについては後に述べる。

Fig. 8から、レベル1で寸法効果のある場合には、非線形補正を行った後も依然として寸法効果が残ったま

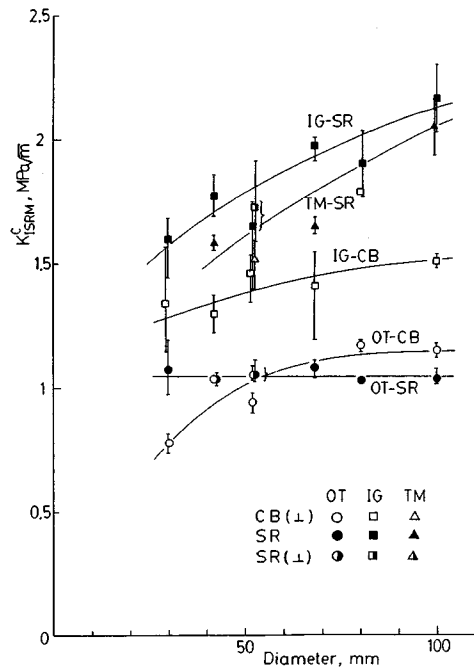


Fig. 8 Dependence of K_{ISRM}^c (level 2) on specimen diameter for both CB and SR.

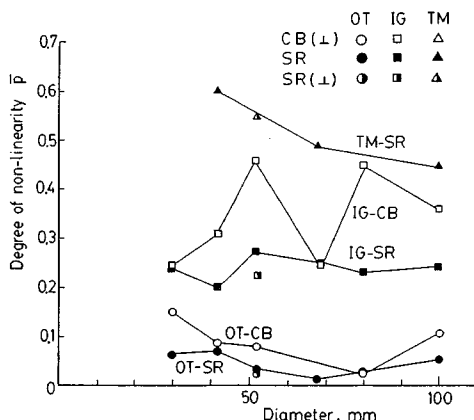


Fig. 9 The relation between average non-linearity correction factor \bar{p} and specimen diameter.

までであることがわかる。これは、Fig. 9からもわかるように、アルミニウムに対する Barker⁶⁾の結果と異なり、寸法とともに \bar{p} が減少しないためである。また、形状効果に及ぼす非線形補正の効果も認められず、花崗岩では、SR 試験の結果の方が CB 試験の値よりも常に大きい。また、 \bar{p} については、CBの方がSRよりも大きな値を示している。すなわち、 \bar{p} も試験方法の影響を受けている。

このように、ISRM 試験法では、本研究の範囲内でも、岩種によって寸法効果が異なり、凝灰岩のように、ある寸法以上になればSR、CB試験を通じてほぼ一定の値が得られる場合と、花崗岩のように、直径が100 mmまでの試験片では寸法効果とともに形状効果が現われる場合とがある。

(2) 大理石のCB試験結果について

前節で、大理石のCB試験では合理的な F_c 点が求められなかったと述べた。Fig. 10に、大理石のCB試験における初期接線の傾き S_i に対する各サイクルでの線形化除荷直線の傾き S の比と荷重線変位の関係を示す。ただし、荷重線変位は最大荷重点での値で基準化しており、また、比較のために、凝灰岩と花崗岩の例も破線で示した。同図から、花崗岩や凝灰岩では低荷重レベルで

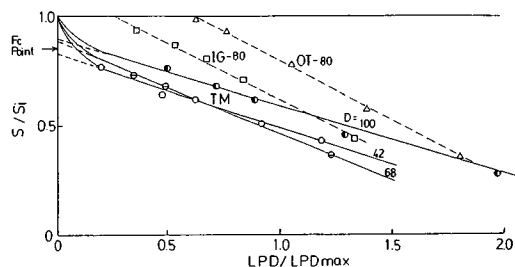


Fig. 10 The relation between S/S_i and normalized load line displacement in CB.

Table 2 Initial tangential Young's modulus E_t measured in CB and SR testing for Tohoku marble.

Diameter (mm)	E_t (GPa)	
	CB	SR
42	14.7	13.6
68	24.3	22.0
100	31.5	23.8

傾きが変わらない $S/S_i=1$ の部分があるのに対して、大理石では、ごく低い荷重で急激に S/S_i が減少した後、ほぼ直線的に減少していることがわかる。このため、 S_i と最初のサイクル間での線形補完では正確な F_c 点が求められないのみならず、急激な S の低下を考慮して F_c 点を求めると、最大荷重の24~36%ときわめて小さな値となる。

このようにして求めた F_c 点が破壊靱性を評価する亀裂長さに対応するか否かを確認する目的で、直径52 mmの試験片を用いて、まず、低荷重で初期スティッフネス S_i を求めた後、厚さ0.4 mmのダイヤモンドブレードを用いて亀裂長さ a_c まで人工的な直線ノッチを作製し、再び、初期スティッフネス S を求めたところ、 $S/S_i=0.65$ という結果が得られた。すなわち、東北大理石では、実際の F_c 点に対応するスティッフネスはISRM法での値よりかなり小さい。このことから、東北大理石のCB試験では、ISRM法に従って求められる F_c 点は評価すべき亀裂長さに対応しておらず、かなり小さい値を与えることがわかる。さらに、Table 2は、CB試験とSR試験から求められた大理石の初期接線ヤング率をまとめたものである。SR試験での直径が68 mm以上の場合を除いて著しい寸法依存性が認められる。一方、凝灰岩や花崗岩については、このような傾向は認められない。したがって、これらのことは、東北大理石に対しては、シェブロンノッチの寸法が小さい試験片の場合、ISRM法で亀裂長さを求めるための基礎となっている除荷コンプライアンス法が適用できないことを示している。この原因としては、東北大理石の場合、粒界の緩みや粒内のへき開が発達しているため、荷重を加える以前から亀裂と等価な微視的緩み領域が存在したことが考えられる。すなわち、この微視的な緩み領域のために、初期ノッチ寸法が小さく、したがって発生した亀裂寸法も小さい場合、この影響が無視できないために、ISRM法によって求められる F_c 点は実際より過小評価され、初期接線ヤング率も試験片寸法とともに大きくなったと考えられる。

(3) 亀裂進展量と破壊靱性の関係

得られた結果を統一的に解釈するために、ISRM法

と同様な考え方を用いて個々の試験片での各除荷点における K_{ISRM}^C を求め、コンプライアンスから求めたシェブロンノッチ先端からの亀裂進展量との関係について検討した。なお、亀裂長さとコンプライアンスおよび応力拡大係数との関係については、CB 試験については Ouchterlony の研究⁷⁾が利用できるが、SR 試験については直接利用できるデータがないので、Shannon ら⁸⁾のコンプライアンスに関する実験結果を内外挿して求めた。この関係が求められれば、各除荷直線の除荷荷重 F_i と傾きから、その亀裂長さ a_i に対する無次元応力拡大係数 $A(a_i)$ を求め、次に、その除荷直線前後のサイクルの p の平均値 \bar{p}_i を用いて、次式から i 番目の除荷直線に対する破壊靱性を求めることができる。

$$K_{ISRM}^C = \sqrt{(1 + \bar{p}_i) / (1 - \bar{p}_i)} A(a_i) F_i / D^{1.5} \dots \dots \dots (4)$$

得られた結果の一例を、花崗岩の直径が 80~100 mm の SR 試験について Fig. 11 に示した。また、CB および SR 試験を通じての全結果を、凝灰岩と花崗岩のそれぞれについて、Fig. 12 と Fig. 13 に示した。なお、煩雑さを避けるために、ISRM 法における F_c 点から求めた破壊靱性のみを○、□印等で表わし、他の除荷点から得られた値は単に直線で結んである。また、大理石については、破壊靱性試験から得られた初期接線ヤング率が一軸引張試験結果とほぼ同じになる SR 試験での直径が 68, 100 mm の場合の結果を Fig. 14 に示した。これらの図から、ノッチ先端からの亀裂進展量と K_{ISRM}^C の関係は、大きなばらつきはあるものの、CB と SR 試験の結果が連続的につながり、亀裂長さが大きいほど見掛けの破壊靱性が増加すること、および、ある亀裂長さに達すると破壊靱性が一定となることがわかる。したがって、Fig. 8 における K_{ISRM}^C の寸法効果と形状効果は、亀裂長さとともに亀裂進展抵抗が増加するために生ずると解釈できる。すなわち、すでに述べたように、同一直径の場合、CB 試験と SR 試験で破壊靱性評価点における亀裂長さが異なり、SR 試験での亀裂長さの方がかなり大きい。したがって、岩石の亀裂進展抵抗が一定ではなく、

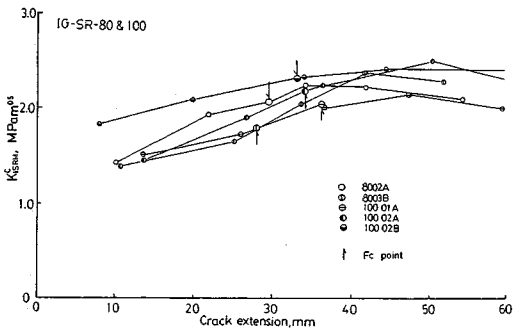


Fig. 11 An example of the relation between K_{ISRM}^C and crack extension (granite, SR, $D=80\sim 100$ mm).

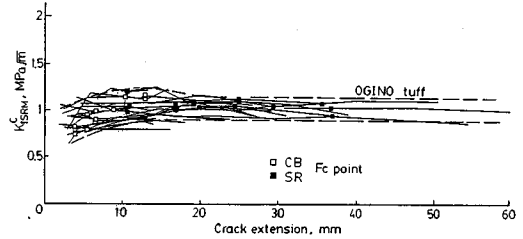


Fig. 12 The relation between K_{ISRM}^C and crack extension for Ogino tuff.

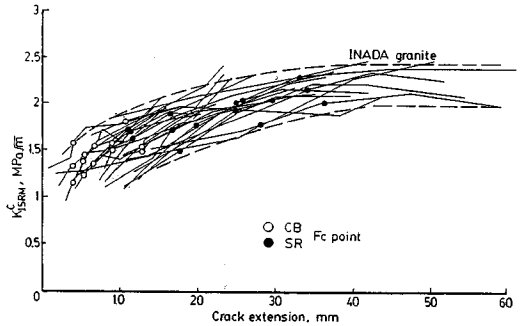


Fig. 13 The relation between K_{ISRM}^C and crack extension for Inada granite.

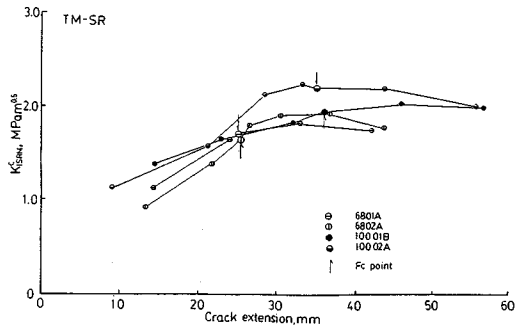


Fig. 14 The relation between K_{ISRM}^C and crack extension for Tohoku marble (SR, $D=68\sim 100$ mm).

亀裂長さとともに増加する場合には、亀裂長さの大きな位置で評価している SR 試験からの破壊靱性が CB 試験からの値より常に大きいことになる。このような亀裂長さとともに破壊靱性が増加する傾向は、ストレートノッチからの亀裂の初生に関してはすでに報告があり、巨視的亀裂先端のプロセスゾーンに由来すると考えられる^{9)~11)}。

このように、ISRM 法で得られる破壊靱性は岩種によって著しい寸法効果と形状効果を示す。したがって、同法を工学的応用分野にも適用できる意義ある標準試験法とするためには、同法に岩石固有の破壊靱性を求めるために必要な最小の試験片寸法に関する規準を含める必要がある。また、一定値を得るために大きな亀裂進展量

が必要な岩石に対しては、より大きな亀裂長さで破壊靱性を評価できる SR 試験の方が有利である。

5. 結 言

3種の岩石試料を用いて ISRM 法に準拠した破壊靱性試験を行い、同法から得られる破壊靱性の寸法効果と形状効果について検討した。

その結果得られた主な結論は次のとおりである。

(1) レベル1の破壊靱性については、稲田花崗岩で大きな寸法効果と形状効果が認められ、東北大理石についても著しい寸法効果が認められた。荻野凝灰岩については、CB 試験での小さな試験片寸法についてのみ寸法効果が認められた。

(2) レベル2における非線形補正を行った後も、(1)で述べた寸法効果と形状効果の改善はみられなかった。これは、岩石の場合、試験片寸法とともに非線形補正係数が小さくならないためであった。

(3) ISRM 法から求められる破壊靱性は、岩種と試験片寸法によっては岩石固有の一定値とならないことから、岩石固有の破壊靱性を得るために必要な試験片寸法に関する規準を同法に含める必要がある。

(4) 引張応力下における応力-ひずみ関係の非線形性が著しい東北大理石については、特にシェブロンノッチの寸法が小さい場合、正確な破壊靱性および初期接線ヤング率が求められない。

(5) 得られた結果を破壊靱性とシェブロンノッチからの亀裂進展量との関係、すなわち亀裂進展抵抗曲線で整理したところ、各岩石試料について、試験方法によらない固有の関係が得られた。したがって、ISRM 法における寸法効果と形状効果は、亀裂成長に伴って亀裂進展抵抗が増加するために生ずると考えられた。

最後に、本研究を遂行するうえで数々の貴重なご教示を賜った東北大学工学部の阿部博之教授に深甚なる謝意を表わします。

参 考 文 献

- 1) たとえば, Takahashi, H. : Hydraulic Fracturing and Geothermal Energy, ed. by S. Nemat-Nasser et al., Martinus Nijhoff Publishers, pp. 291~305, 1983.
- 2) Matsuki, K. et al. : Rock cutting with high speed water jets both in air and in water, Proc. Intern. Waterjet Sympo., Beijing, China, pp. 3.32~3.42, 1987.
- 3) Boone, T.J. et al. : Finite element modelling of fracture propagation in orthotropic materials, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 26, pp. 185~201, 1987.
- 4) 橋田俊之ほか : AE を応用した ISRM 岩石コアサンプル破壊靱性試験法, 第 5 回アコースティックエミッション総合コンファレンス論文集, pp. 161~166, 1985.
- 5) ISRM Commission on testing method : Suggested Methods for Determining The Fracture Toughness of Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 25, pp. 71~96, 1988.
- 6) Barker, L.M. : Theory for determining K_{Ic} from small, non LEFM specimens, Int. J. Fracture, Vol. 15, pp. 515~536, 1979.
- 7) Ouchterlony, F. : Compliance calibration of a round fracture toughness bend specimen with chevron edge notch, SveDeFo Report DS 1983 : 10, Swedish Detonic Research Found., Stockholm, 1983.
- 8) Shannon Jr., J.L. et al. : Extended range stress intensity factor expression for chevron-notched short bar and short rod fracture toughness specimens, Int. J. Fracture, Vol. 19, pp. R 55~R 58, 1982.
- 9) たとえば, Schmidt, R.A. et al. : K_{Ic} and J_{Ic} of Westerly granite-effects of thickness and in-plane dimensions, ASTM STP 678, pp. 166~182, 1979.
- 10) Labuz, J.F. : Experimental analysis of crack propagation in granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22, pp. 85~98, 1985.
- 11) Hashida, T. et al. : Fracture toughness testing of core based specimens by means of acoustic emission technique, Proc. SEM-RILEM Intern. Conference, Houston, Texas, U. S. A., p. 389, 1987.

(1988. 4. 14・受付)