

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：17401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630416

研究課題名(和文) 岩石破壊力学における新展開のための破壊靱性試験イノベーション

研究課題名(英文) Innovation of fracture toughness test for new horizon of rock fracture mechanics

研究代表者

尾原 祐三 (Obara, Yuzo)

熊本大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：50135315

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)： 岩石を構成している岩石マトリックス、鉱物粒子、鉱物粒子境界の破壊靱性を評価するための試験法を開発した、その方法を用い、花崗岩中の長石および石英内に作製した $10 \times 10 \times 50$ マイクロメートルの微小供試体の微視的な破壊靱性および変形特性を評価した。この結果、微視的破壊靱性は、通常の花崗岩供試体から得られる巨視的破壊靱性に比較して小さいこと、ばらつきが大きいことなどが明らかとなった。さらに、得られた値を用いて有限要素被膜法により巨視的破壊靱性試験における破壊進展数値シミュレーションを実施した。この結果、実験による破壊形状と解析結果はよい一致を示し、解析方法の妥当性が明らかとなった。

研究成果の概要(英文)： A new material testing system was developed to evaluate microscopic fracture toughness of mineral grains within rock. This testing system consists of an optical microscope, stages, loading apparatus and data collection unit. The specimen used in this test was micro-sized cantilever beam type ($10 \times 10 \times 50$ micro-m) with an artificial notch. The microscopic fracture toughness test was completed successfully and it is shown that the new testing system is available to evaluate microscopic fracture toughness of rocks. The experimental results show that the microscopic fracture toughness are different from each specimen. It was discussed that these microscopic properties are influenced by the mechanical weak planes such as cleavage due to crystal structures.

Furthermore, numerical fracture tests by FCM were conducted. These numerical tests simulated a conventional semi-circular bending tests. The numerical results agree with that of the experiments in mechanical and fracture behavior.

研究分野：岩盤工学

キーワード：岩石破壊力学 破壊靱性試験 マイクロ岩石供試体 微視的破壊靱性 巨視的破壊靱性 有限被膜法

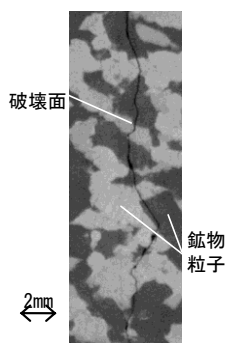
1. 研究開始当初の背景

岩石内部にはクラックが存在しており、それが原因で脆性破壊が発生する。これを説明するために、1970年代に金属を対象として生まれた破壊力学の概念や理論が岩石力学に導入され始め、1980年代には岩石破壊力学として認められ、2000年ごろまでに国内外において岩石破壊力学に関する本が発刊されている。しかし、これ以後、この分野の研究には大きな進展は少なく、新しい概念が導入された本の発行はなく現在に至っている。

岩石破壊力学では、岩石に外力が作用した際に発生するクラック近傍の応力集中を応力拡大係数と定義し、この値がその岩石の持つ固有の破壊靱性に達した時にクラックの進展が開始するとしている。これまで破壊靱性を求めるための種々の試験法が提案されてきた。これらの試験法の基礎は、岩石をクラックをもつ一様な破壊靱性を有する等方均質弾性体と仮定している。しかし、岩石は岩石マトリックスや様々な鉱物粒子より成る不均質体であることは明らかである。

岩石の破壊靱性試験後の花崗岩試験片の破壊の X 線 CT イメージを図 1 に示す[1]。破壊面は黒色の線で示されており、鉱物粒子内や粒子境界を貫いて発生している。このような破壊は不均質体としての岩石特有の破壊であり、この発生機構を解明することができれば岩石破壊力学において新たな局面が開けると考えられる。

岩石特有の破壊は、岩石マトリックス、鉱物粒子、粒子境界などの破壊靱性や変形特性の違いに大きな原因と考えられる。したがって、それらを正確に評価した上で破壊進展機構について議論すべきであると考える。しかし、岩石の巨視的破壊靱性や変形特性を評価する試験方法は確立しているものの、鉱物粒子単体、あるいは粒子境界のようなマイクロスケールでの破壊靱性や変形特性を評価する試験方法は世界的にも確立されていないのが現状である。 図 1 花崗岩中の破壊



2. 研究の目的

岩石を構成している岩石マトリックス、鉱物粒子、鉱物粒子境界のそれぞれにおけるマイクロスケールの破壊靱性試験法を開発し、その方法を用いて岩石の微視的破壊靱性および変形特性を評価するとともに、それらの値を用いて破壊進展数値シミュレーションを実施し、岩石の破壊の進展機構を解明する。本研究の成果をこれまで岩石を均質等方線形体と見なして発展してきた岩石破壊力学に導入することにより、岩石を破壊靱性や変

形特性が異なった微小領域で構成された不均質材料として取り扱うことが可能となり、岩石破壊力学における新しい展開の発端になると考えられる。さらに、過去約 20 年間の間停滞している岩石破壊力学に一筋の光明を与えることになり、その学術的な意義は大きい。

3. 研究の方法

岩石破壊力学の新しい展開のために、以下に示す 2 つの項目について研究を実施した。

① 鉱物粒子や粒子境界の破壊靱性と変形特性の実験的な評価

金属材料工学分野で開発されたマイクロスケールでの材料の力学的性質の評価手法を岩石破壊力学に導入するために岩石用に改良する。さらに、この装置を用いて花崗岩を構成する石英と長石の鉱物粒子内にマイクロ試験片を作製し、微視的破壊靱性を評価する。

② 破壊進展数値解析法を用いた破壊進展メカニズムの解明

不均質材料である岩石に対して、種類の異なる鉱物粒子内や粒子境界における微視的破壊靱性を導入した破壊の発生・進展シミュレーション法 (有限被膜法) により、岩石の鉱物粒子の配列といった微視的構造や微視的破壊靱性が破壊挙動に及ぼす影響について検討を行う。

4. 研究成果

①について[2]

(1) 破壊靱性試験法

本研究に用いる微小供試体と载荷の模式図を図 2 に示す。供試体は人工き裂付きの片持ち梁で、それぞれ人工き裂の長さ $a = 3 \mu\text{m}$ 、人工き裂からの梁の長さ $40 \mu\text{m}$ 、幅 $B = 10 \mu\text{m}$ 、厚さ $w = 10 \mu\text{m}$ とする。試験の方法としては、人工き裂から $S = 30 \mu\text{m}$ 離れた供試体上の 1 点をピンの先端で载荷し、供試体に曲げ荷重を負荷する。試験によって得られた最大荷重 P_{max} および供試体寸法から、次に示す評価式により破壊靱性値 K_{IC} を求める。

$$K_{IC} = \frac{6PS}{w^2 B} \sqrt{\pi a} F(a/w) \quad (1)$$

ただし、 F は正規化された人工き裂長さによって決まる係数である。

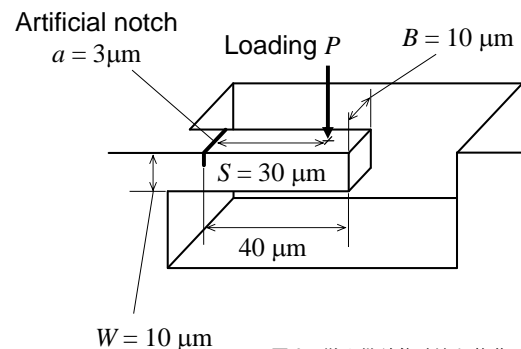


図 2 微小供試体寸法と载荷

(2) 装置の概要

本研究で改良した試験装置のブロック図を図3に示す。本装置を用いて供試体ホルダーに置かれた微小試験片に载荷する(図2)。

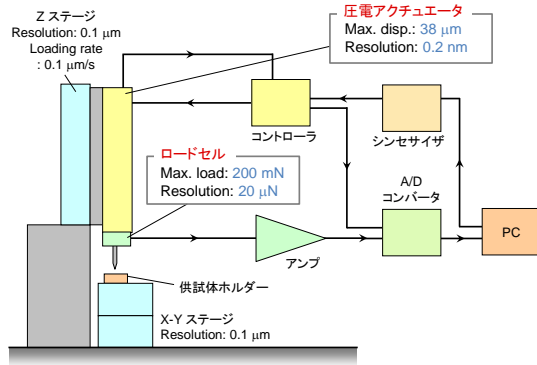


図3 試験装置のブロック図

(3) 供試体の作成

試料としては、図4の薄片顕微鏡写真に示すように、石英、斜長石、アルカリ長石、黒雲母などの鉱物粒子で構成されている韓国産花崗岩を用いた。この平均鉱物粒子サイズは、0.6~0.8 mmである。

花崗岩から3 mm×5 mm×7 mmの直方体の試料を切り出し、直方体試料の2面に鏡面仕上げを施した後、FIBを用いて長石と石英中に微小供試体を作製した。作成後の供試体の様子を図5に示す。

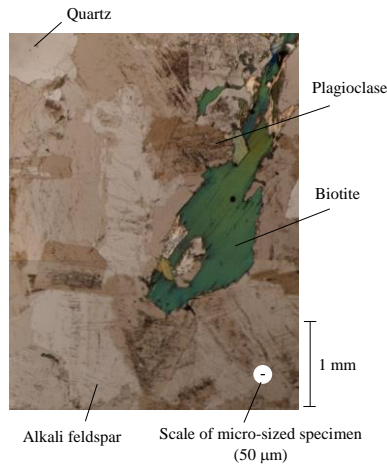


図4 花崗岩の薄片顕微鏡写真と供試体寸法

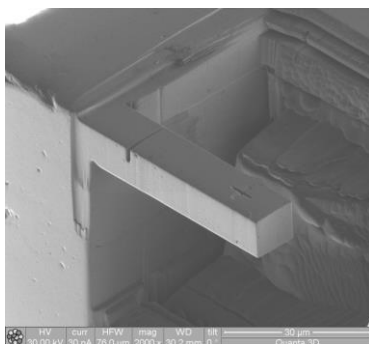


図5 長石岩中の微小供試体

(4) 荷重-変形曲線

微視的材料試験装置を用いて、岩石の鉱物粒子の破壊靱性試験を行ったときの荷重-変形曲線を図6に示す。また、供試体の寸法、得られた破壊靱性の結果を表1に示す。

全ての供試体において、荷重は変位とともに線形に増加し、最大荷重 P_{max} を履歴した直後に破断した。鉱物粒子の破壊靱性 K_{IC} について、供試体 No.1 と No.2、No.3 は同じ長石類の鉱物であり、また供試体 No.4 と No.5、No.6 は同じ種類の鉱物(石英)であるが、それぞれの鉱物で値がばらついていることがわかる。

最後に、No.2 および No.5 の実験後の破壊の様子を図7に示す。No.2 はアルカリ長石であり、破壊面は劈開面に沿って発生していることがわかる。一方、石英は明確な劈開面は見られず、破壊面はなめらかである。このように破壊靱性は弱面の影響を受けると考えられ、今後は供試体中の弱面の確認を行った後に破壊靱性試験を行うことが必要である。

表1 微小供試体の破壊靱性

No	鉱物	K_{IC} MN/m ^{3/2}
1	斜長石	0.64
2	アルカリ長石	0.25
3	アルカリ長石	0.57
4	石英	0.82
5	石英	0.65
6	石英	0.13

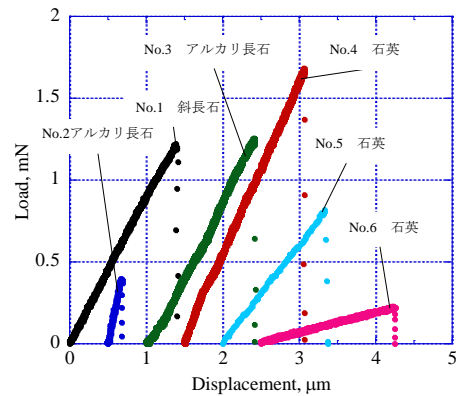
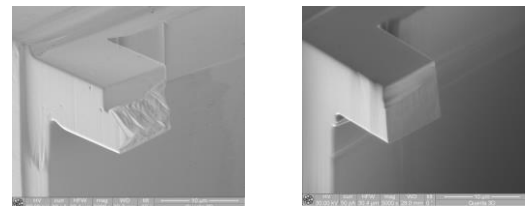


図6 荷重-変形曲線



No.2 : アルカリ長石

No.5 : 石英

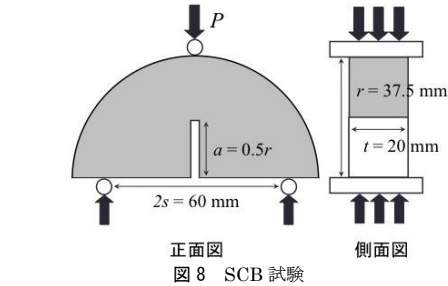
図7 破壊の様子

②について

(1) SCB 試験の破壊進展シミュレーション

本研究では、図 8 に示す SCB 試験[1]の破壊進展シミュレーションを実施した。対象試験体は花崗岩から成り、図 9 の X 線 CT イメージのように、不均質な微視構造を有する。黒線で示す破壊面は鉱物粒子内や粒子境界を貫いて発生する。図 10 に示す SCB 試験での荷重-変形曲線は、微視構造の異方性に依存する。

破壊進展シミュレーションで用いた、2 種の鉱物から成る解析モデルを図 11 に示す。



正面図
側面図
図 8 SCB 試験

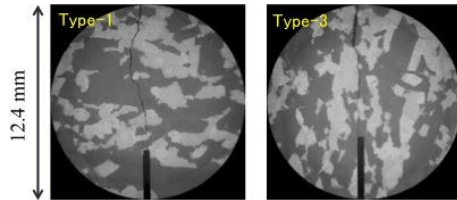


図 9 入りき裂先端の微視構造と破壊

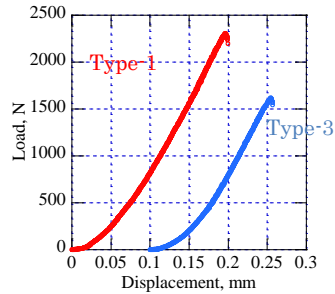


図 10 SCB 試験の荷重-変位曲線



図 11 微視構造を考慮した解析モデル

(2) 微視的破壊靱性による影響

図 11 の解析モデル (Type-1) を用いて、微視的材料特性による破壊挙動への影響を事前検討したときの荷重-変位関係を図 12 に示す。

す。材料パラメータは、母材鉱物 (ヤング率 30GPa、ポアソン比 0.1、引張強さ 5 MPa) に対して、介在鉱物と境界面を表 2 のように変化させた。また、数値実験で得られた最大強度時の破壊の様子を図 13 に示す。

微視的材料特性に応じて異なる破壊挙動を発生し、鉱物の強度特性のみならずヤング率による影響が大きいことを示している。

表 2 材料パラメータ

Test No	介在鉱物		境界面
	ヤング率	引張強さ	引張強さ
Test00 (同種材料)	30 GPa	5 MPa	5 MPa
Test05 (強度大)	30 GPa	8 MPa	5 MPa
Test07 (ヤング率大)	60 GPa	5 MPa	5 MPa

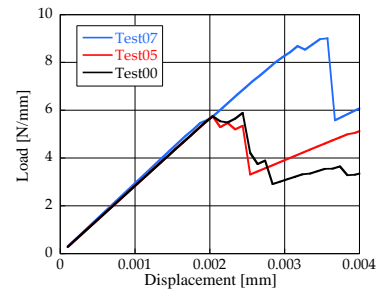


図 12 荷重-変形曲線

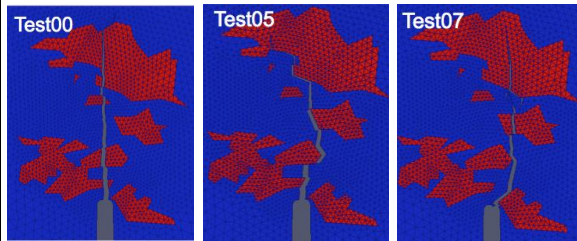


図 13 微視的材料特性による破壊挙動への影響

(3) マイクロ試験に基づく SCB 試験の再現

マイクロ破壊靱性試験結果を片持梁として整理すると、鉱物のヤング率は 20~70GPa、引張強さは数百 MPa になる。そこで、材料パラメータを表 3 のように設定したときの数値実験結果を図 14 に示す。

微視構造の違いによって、図 10 と同様に、試験体強度に違いが生じた。また、実験値と同オーダーの最大荷重やそのときの変形量を得た。この数値実験における最大荷重時の破壊の様子を図 15 に示す。図 9 に示す実験結果と良い一致が見られる。今後は、鉱物粒子数を増やすとともに粒子境界を反映させる必要がある。

表 3 マイクロ破壊靱性試験に基づく材料パラメータ

母材鉱物		介在鉱物		境界面
ヤング率	引張強さ	ヤング率	引張強さ	引張強さ
21 GPa	120 MPa	42 GPa	130 GPa	130 GPa

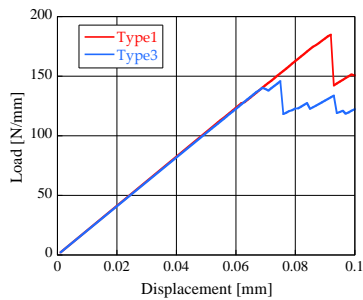


図 14 荷重-変形曲線

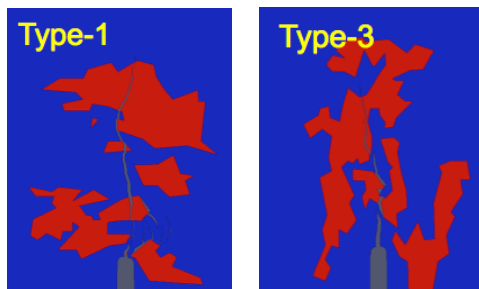


図 15 微視構造の違いによる破壊挙動への影響

- [1] M. Kataoka, Y. Obara, M. Kuruppu, Estimation of Fracture Toughness of Anisotropic Rocks by Semi-Circular Bend (SCB) Tests Under Water Vapor Pressure, Rock Mech Rock Eng, doi 10.1007/s00603-014-0665-y, 2014.
- [2] M. Kataoka, T. Ito, K. Takashima, Y. Obara, A new testing method to estimate microscopic fracture toughness of rock, Proc. of ROCKMEC'14, Turkey, pp-91-96, 2014.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- (1) M. Kataoka, Y. Obara, M. Kuruppu, Estimation of Fracture Toughness of Anisotropic Rocks by Semi-Circular Bend (SCB) Tests Under Water Vapor Pressure, Rock Mech Rock Eng, doi 10.1007/s00603-014-0665-y, 2014. (査読有)
- (2) M. Kataoka, T. Ito, K. Takashima, Y. Obara, A new testing method to estimate microscopic fracture toughness of rock, Proc. of ROCKMEC'2014, Afyonkarahisar, Turkey, pp-91-96, 2014. (査読有)

〔学会発表〕(計 2 件)

- (1) 澤城光二郎、片岡みなみ、伊東孝史、高島和希、尾原祐三、花崗岩を構成する鉱物粒子の破壊靱性の評価、資源・素材学会九州支部例会講演会、平成 26 年 5 月 30 日、九州大学

- (2) 片岡みなみ、澤城光二郎、伊東孝史、高島和希、尾原祐三、花崗岩を構成する鉱物粒子の破壊靱性、資源・素材関係学協会合同秋季大会、平成 26 年 9 月 15 日、熊本大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.civil.kumamoto-u.ac.jp/subsurface/index/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾原 祐三 (OBARA Yuzo)

熊本大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：5 0 1 3 5 3 1 5

(2) 研究分担者

石井 建樹 (ISHII Tateki)

木更津工業高等専門学校・准教授

研究者番号：6 0 4 0 0 2 8 0

(3) 研究協力者

片岡みなみ (KATAOKA Minami)