

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：52501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K21584

研究課題名(和文) マイクロ材料試験とマルチスケール破壊進展解析を融合した岩石材料試験イノベーション

研究課題名(英文) Innovation of rock test combining micro bend test and multiscale fracture analysis

研究代表者

石井 建樹 (Ishii, Tateki)

木更津工業高等専門学校・環境都市工学科・准教授

研究者番号：60400280

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、岩石破壊力学分野における新展開を目的とした基礎的研究である。本研究では、岩石の巨視的変形破壊特性および岩石を構成する鉱物粒子の微視的変形破壊特性を調査して、それらの結果と数値解析法を用いて、岩石の破壊メカニズムを検討した。具体的には、マイクロ材料試験により鉱物粒子単体の微視的特性を評価して、その結果を考慮できる破壊進展シミュレーションを新たに開発して、その応答を検討した。最後に、微視的な物性と構造に伴う破壊挙動から巨視的な岩石の巨視的な破壊強度特性を導き、マルチスケールモデリングにおける今後の課題を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study is a fundamental study aimed at a new development in the rock fracture mechanics. This study investigated microscopic deformation fracture characteristics of mineral grains making up rocks. Macroscopic fracture responses of rocks were then simulated by a newly developed fracture analysis method with these results. Specifically, micro bend tests evaluated the microscopic characteristics of the mineral grains in a granite and the fracture analyses simulated the microscopic fracture response of granite. From these results of simulations, we discussed the fracture mechanism of granite. Finally, we examined the macroscopic strength of granite derived from the microstructural properties and the fracture behaviors and clarified future problems in multiscale modeling.

研究分野：計算力学, 岩盤工学

キーワード：マイクロ材料試験 破壊解析 マルチスケール解析 不均質材料

1. 研究開始当初の背景

(1) 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年代に破壊力学の概念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確立された。また、2000年頃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、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のクラック近傍の応力集中を応力拡大係数と定義し、この値が岩石固有の破壊靱性に達した時にクラックが進展するとしている。岩石の破壊靱性を求めるために種々の試験法が提案されてきたが、これらの試験法では、岩石を、クラックをもつ様な破壊靱性を有する等方均質弾性体と仮定している。しかしながら、岩石は微視的に見ると、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。

(2) 申請者は、こうした不均質な岩石特有の破壊、すなわち、鉱物粒子や鉱物粒子境界のマイクロスケールでの破壊挙動の評価が重要であると考え、鉱物粒子および粒界の破壊を一貫して追跡できるき裂進展解析法を開発している。この手法では、一般化有限要素法の一つである有限被覆法 (Finite Cover Method : FCM) の特徴により、メッシュ形状に依存せずき裂を追跡でき、かつ、モルタル要素の導入により、鉱物の強度が大きい場合には破壊は粒子境界を進行する一方で、強度が小さい場合には破壊は鉱物粒子内を進展するような破壊を一貫して追跡できる。

ただし、これまでは、鉱物粒子や粒子境界の微視的特性を評価できる試験法がなく、これらの数値解析法では、仮想的な物性値を入力して巨視的破壊靱性と比較検討することしかできないままであった。

(3) このような状況の中で、申請者が研究分担者として参加した H25 年度からの挑戦的萌芽研究費 (代表者：熊本大学自然科学研究科・尾原祐三教授) において、斜長石の鉱物粒子内に厚さと幅が約 $10\mu\text{m}$ で長さが約 $50\mu\text{m}$ の片持ち梁のマイクロ試験片の曲げ試験を実施して、マイクロスケールでの破壊靱性試験に世界で初めて成功した。

2. 研究の目的

本研究では、マイクロ材料試験とその結果を考慮できる申請者の破壊進展解析を実施して岩石の破壊メカニズムを解明することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 数 cm の試験体の岩石試験を実施して、岩石の巨視的変形破壊特性を明らかにする。

(2) 岩石材料からマイクロ材料試験片を作成して、マイクロ材料試験を実施する。それにより、花崗岩中の鉱物、たとえば、石英、長石、およびそれら鉱物粒子境界などの微視的破壊靱性を実験的に評価する。

(3) マイクロ材料試験により評価された結果を用いて、破壊進展数値シミュレーションを行い、実験結果と比較することで岩石の微視的な破壊メカニズムを解明する。

(4) マルチスケールモデリングに基づいて、上記の結果を総合して、岩石の破壊メカニズムを検討する。

4. 研究成果

(1) 岩石の巨視的変形破壊特性を把握するために、アフリカ産花崗岩に対して、図 1 に示す、人工き裂を有する半円形の試験片を用いた破壊靱性試験である Semi-Circular Bending 試験 (SCB 試験) を研究協力者のグループと実施した。試験片製作にあたっては、岩石の異方性を把握するために、あらかじめ弾性波測定を実施して、弾性波速度が最大および最小となる軸を選定して、円柱のコアを切り出す方法を変えることで、2種類の試験片 (Type-1, Type-3) を作製した。

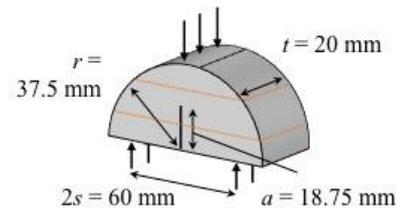


図 1 Semi-Circular Bending (SCB) 試験

図 2 は、2種類の試験片における荷重変位関係である。図では、変位の原点をずらして示している。弾性波速度が大きかった Type-1 試験片の方が、Type-3 よりも大きな強度を示している。図 3 に、実験後の人工き裂先端付近の X 線 CT 画像を示す。X 線 CT 画像では、密度の大きな物質ほど白く映るが、ype-1 試験片では、密度の大きな鉱物がき裂進展を遮るように分布している。

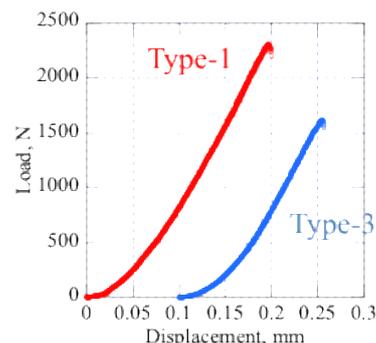
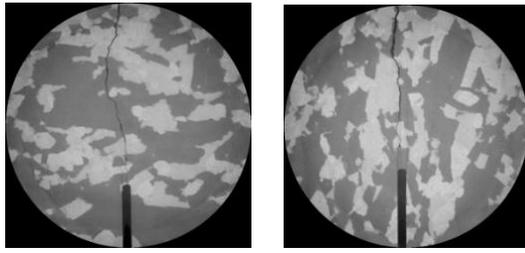


図 2 SCB 試験の荷重変位関係



(a) Type-1

(b) Type-3

図3 人工き裂先端のX線CT画像

一般に、岩石の異方性では、微視クラックの分布が原因とされるが、これらの結果では、鉱物粒子の配置が異方性に影響を与えていることが示唆される。

(2) 花崗岩を構成する鉱物の物性を把握するために、図4に示すマイクロ材料試験を実施した。この試験では、斜長石の鉱物粒子内に厚さと幅が約 $10\mu\text{m}$ で長さが約 $50\mu\text{m}$ の片持ち梁の試験片を作製し、その結果を片持ち梁の弾性計算に当てはめて、鉱物のヤング率と引張強さを求めた。その結果、石英のヤング率は $20\text{GPa}\sim 200\text{GPa}$ 、引張強さは $350\text{MPa}\sim 400\text{MPa}$ 、斜長石ではヤング率が 60GPa 程度、引張強さが 150MPa 程度の値を示した。

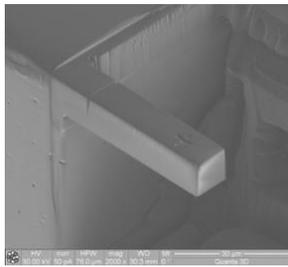


図4 マイクロ材料試験片

(3) き裂進展シミュレーションでは、解析メッシュは、図5のように、X線CT画像から2つ鉱物からなるものと仮定して、その境界線をトレースして生成した。

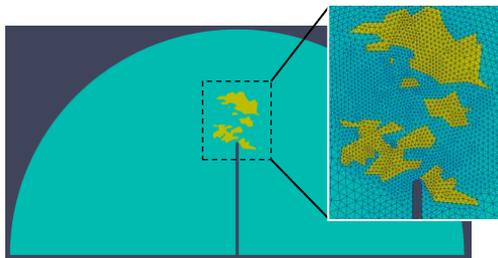


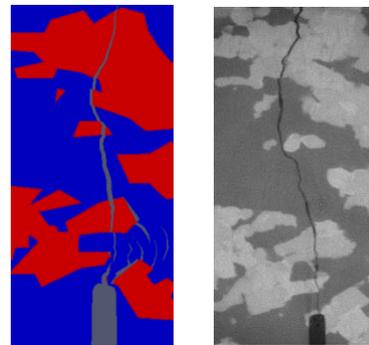
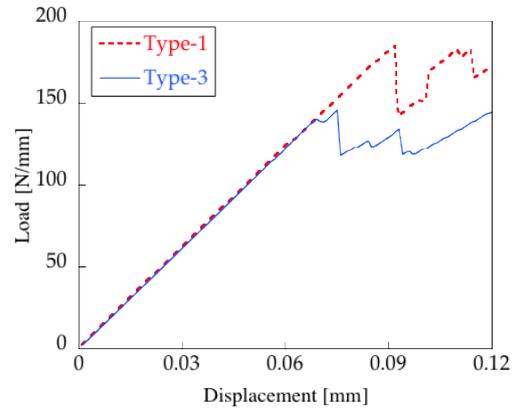
図5 SCB試験の解析メッシュの例 (Type-1)

なお、マイクロ材料試験の実施が限られた時期に実施できないことから解析実施と実験実施が前後したため、あらかじめ仮想的な物性を与えてパラメトリックスタディによる

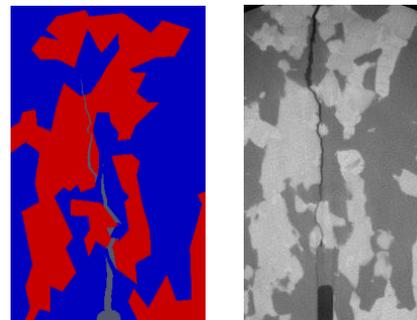
ってもっともらしい物性値を定めた。その際、図6に示すSCB試験の荷重変位関係における荷重と変位のオーダーと、図7に示すき裂進展経路が実験結果(図2,3)と概ね一致する物性値を求めている。表1にパラメトリックスタディによって求めた各鉱物の物性値を示す。

図6に示す数値解析に基づく荷重変位関係では、図2と同様に、Type-1の方が大きな破壊強度を示している。また、実験試験片が 20mm 程度の厚さを有していることから、荷重のオーダーも実験値に近い値が得られている。また、図7に示すき裂進展経路も、図3に示す実験で得られたき裂経路に似通った経路を追跡できている。

図6 数値解析による荷重変位関係



(a) Type-1



(b) Type-3

図7 き裂進展経路の比較

表 1 パラメトリックスタディで求めた物性値

Matrix		Mineral grain		Interface
Young's modulus	Tensile strength	Young's modulus	Tensile strength	Tensile strength
[GPa]	[MPa]	[GPa]	[MPa]	[MPa]
21	120	42	130	120

本研究では、微視クラックについては全く考慮していない。しかし、パラメトリックスタディの結果より、定性的ながら、実験で得られた傾向を再現することに成功した。これより、岩石の異方性は、一般的な原因として挙げられる微視クラックのみならず、鉱物配置による影響が大きいことを示唆される。

一方で、表 1 に示すパラメトリックスタディで定めた数値解析の物性値は、マイクロ材料試験で得た鉱物の物性と比較すると、ヤング率および引張強さともに小さい値を示している。従って、実験で得た物性値を数値解析に用いると、強度特性や剛さを過大に評価することになる。これらについては今後の研究によって改善が必要である。

(4) 上述のように、マイクロ材料試験結果と現状のき裂進展解析をマルチスケール解析に取り込んでも、過大評価になることは明らかである。

パラメトリックスタディを実施する中で、き裂進展経路は引張強さだけでなくヤング率などの物性値によって鋭敏に変化することを確かめた。また、鉱物配置が巨視的破壊強度の異方性に与える影響を考えると、確からしい解析メッシュが重要であると考えられる。

そこで、マルチスケール解析の前準備として、鉱物配置を X 線 CT 画像から自動で取得するツールを開発した。図 8 に、開発したツールにより取得した鉱物粒子の境界線を示す。図中の赤線が取得した境界線を示す。ツールの基本原理は、Threshold 法と線形補間近似という極めて簡易な手法であるが、良好に境界線を取得することができた。図 9 には、取得した境界線を用いて生成した SCB 試験の解析メッシュ例を示す。

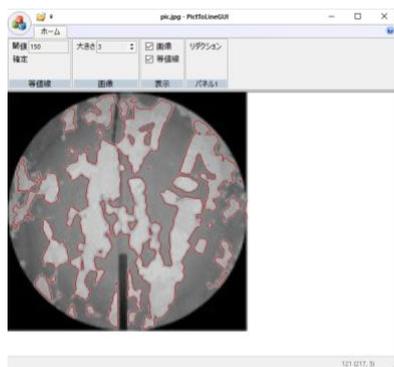


図 8 境界線の自動取得ツール

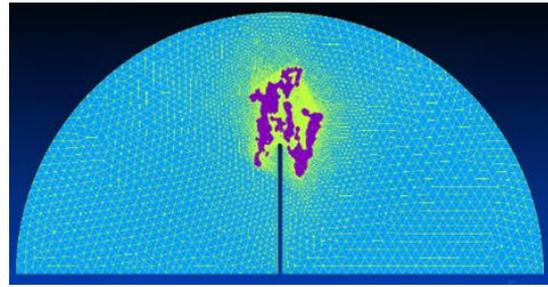


図 9 境界線取得ツールに基づく解析メッシュ例

図 10 は、図 9 に示す Type-3 の解析メッシュを用いたき裂進展解析結果である。解析に用いた物性値は表 1 と同じである。図 7 と比較して、部分的ではあるが、き裂進展経路に改善が見られた。しかし、巨視的な応答は、図 6 に示した応答に対して、大きな違いは見られなかった。

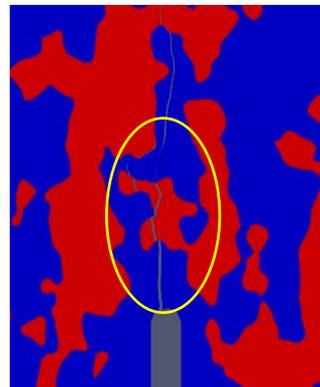


図 10 境界線取得ツールに基づくき裂進展経路

以上より、岩石の異方性の定性的な傾向は、微視的な鉱物配置から得ることが可能であり、その影響が無視できないことを新しく突き止めることができた。一方で、定量的な再現については、今後の研究遂行によって、さらなる検討が必要である。

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 1 件)

- ① Tateki Ishii, Yuzo Obara, Minami Kataoka, Jeong SangSun, Numerical Analysis of Tensile Crack Initiation and Propagation in Granites, *Procedia Engineering*, 査読有, 191, 2017, 674-680, DOI:10.1016/j.proeng.2017.05.231

〔学会発表〕(計 4 件)

- ① 石井建樹, 尾原祐三, 片岡みなみ, 花崗岩内部におけるき裂発生・進展の解析, 計算工学講演会, 2016
- ② 石井建樹, 川口勇一郎, 複合材料のき裂進展挙動における材料パラメータの影響,

土木学会年次学術講演会, 2016

- ③ Ishii Tateki, Obara Yuzo, Kataoka Minami,
Numerical Analysis of Tensile Crack
Initiation and Propagation in Granites,
ISRM European Rock Mechanics Symposium
EUROCK2017, 2017
- ④ 石井建樹, 内藤潤, 花崗岩の X線 CT 画像
によるメッシュ生成とそのき裂進展解析,
日本計算工学会計算工学講演会, 2018

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石井 建樹 (ISHII, Tateki)
木更津工業高等専門学校・環境都市工学
科・准教授
研究者番号 : 60400280

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :

(4) 研究協力者

尾原 祐三 (OBARA, Yuzo)
熊本大学・自然科学研究科・教授