

令和 6 年 9 月 9 日現在

機関番号：52501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18H01536

研究課題名(和文) マイクロ材料試験と蛍光プラスティネーション法に基づく岩石材料試験の新展開

研究課題名(英文) New Developments in Rock Material Testing Based on Micro-Material Experiments and Fluorescence Plastination Methods

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・教授

研究者番号：60400280

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、岩石材料試験における新展開を目指して、マイクロ材料試験による鉱物の物性試験と微細なクラックの形状や配置を明らかにして、数値シミュレーション上で融合することを目指した。花崗岩内部の微細なクラックの形状観察のために、蛍光樹脂のプラスティネーション法を応用した真空含浸技術、真空吸引法による樹脂含浸を実施した。花崗岩に蛍光樹脂を含浸すると、内部に含まれる石英によって光が透過されて、組成鉱物の形状・輪郭をより簡易に捉えることができた。今後、鉱物の間に存在する境界の物性を調査できれば、ミクロな構造から岩石の物性を予測することが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地下構造物の安全性を高めるためには、周囲に分布する岩盤や岩石の材料特性を明らかにすることが欠かせない。天然材料である岩石にはクラックが含まれることが考慮され、岩石破壊力学として確立されている。一方で、岩石は複数の鉱物からなる不均質な材料であり、不均質な異方構造の影響も無視できない。クラックや異方的な構造のどちらが、岩石の材料特性をどのように支配しているのかを明らかにすることは学術的にも大きな意味を持つ。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to propose a new rock material test by testing the physical properties of minerals and revealing the shape and arrangement of microcracks through micro-materials testing. To observe the shape of micro cracks in granite, vacuum impregnation technique using plastination method of fluorescent resin and resin impregnation by vacuum suction method were carried out. When the granite was impregnated with fluorescent resin, the light was transmitted through the quartz contained in the granite, and the shapes and contours of the compositional minerals could be more easily observed. Future studies of the physical properties of the boundaries between minerals are expected to help predict the physical properties of rocks based on their microscopic structure.

研究分野：地盤工学

キーワード：岩石材料 微視クラック 可視化

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

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。

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。

既往の研究では、不均質な岩石特有の破壊、すなわち、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を実施したところ、不均質な鉱物の配置による影響が岩石の強度発現において無視できない可能性が示されている。不均質体でありながら、微細なクラックを有する岩石の材料特性は、どちらの要因によってどのように支配されるのかという問いは明らかになっていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、マイクロ材料試験によって岩石鉱物の物性を調査するとともに、新しい可視化手法によって岩石中の微視的なクラックの形状や配置を明らかにして、その結果から総合的に岩石の破壊メカニズムをより詳細に解明することを目的としていた。

3. 研究の方法

(1) 岩石の各種鉱物物性をマイクロ材料試験によって取得する。当初は、大学より実験支援を受けて実施する当初計画であったが、社会状況の影響で実施不可能となった。鉱物の試験データを提供いただき、数値シミュレーションにより、後述する Semi-Circular Bending 試験 (SCB 試験) とのパラメトリックスタディによって調査することとした。

(2) 岩石内の微視クラックの観察には、UV 励起する蛍光樹脂を真空含浸する。研究を開始するにあたって、すでにコンクリートでの実績が報告された論文を参考にして、真空含浸法を花崗岩に対して適用したところ、劣化の進んでいない花崗岩に対して樹脂を含浸することはできなかった。そのため、蛍光樹脂含浸法によりマイクロクラックを観察するために克服すべき課題として、樹脂を含浸させる含浸力を向上させるために、生物標本製作に用いられるプラスティネーション法を応用した手法を実施した。プラスティネーション法では、前処理として、減圧により帰化する有機溶剤のような別の液体を予め含浸させた後に、改めて真空含浸を実施する。この場合、事前に含浸した液体は大気圧中では液体に戻るため、試験体中に更に大きな空間を空けることができ含浸力を向上すると期待される。

(3) 蛍光樹脂を含浸させる方法として真空含浸法の他に、低粘度の樹脂の中にはシアノアクリレート系の樹脂を浸透させる方法がある。これらは瞬間接着剤として知られている樹脂であり、真空含浸法との相性が悪い。しかし、浸透性の良さから、従来は岩石試料表面に塗布することで試料表面のクラックを観察するシアノアクリレート法として構築されている。

低粘度のシアノアクリレート樹脂を用いつつ、蛍光剤とシアノアクリレートを塗布した際に岩石試料の反対側から吸引するシアノアクリレート吸引法(図2)についても検討した。

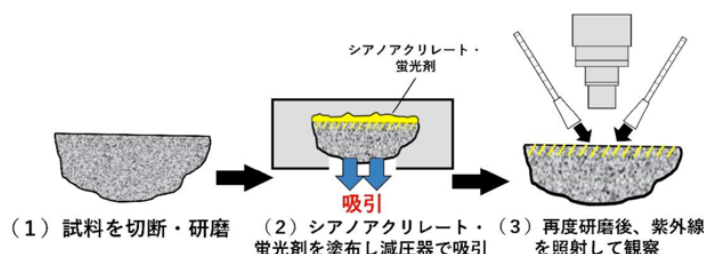


図2 シヤノアクリレート吸引法

(4) 岩石を構成する鉱物物性ならびにクラック分布を明らかにすることで、岩石の微視構造を反映したシミュレーションモデルを生成して、図3に示すSCB試験の結果と比較検討することで総合的に岩石の材料特性の発現機構を調査する。

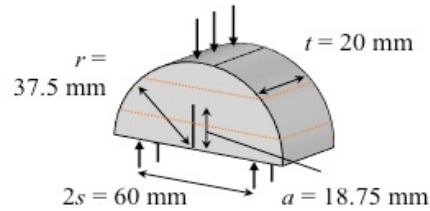


図3 Semi-Circular Bending (SCB) 試験

4. 研究成果

(1) 鉱物の物性を評価するパラメトリックスタディを実施するために、岩石の異方性を把握する目的で、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、図4に示す2種類の試験片 (Type-1, 3) に対する実験データを使用した。

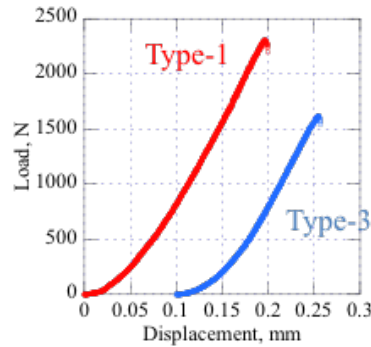


図4 SCB 試験の荷重変位関係

図5,6にはパラメトリックスタディの結果を示す。図4,5を比較することで、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比較しつつ、図6に示すき裂進展経路が実験結果と概ね一致する物性値 (表1) を求めた。数値モデルは、X線CT画像から2つの鉱物からなると仮定して生成した。

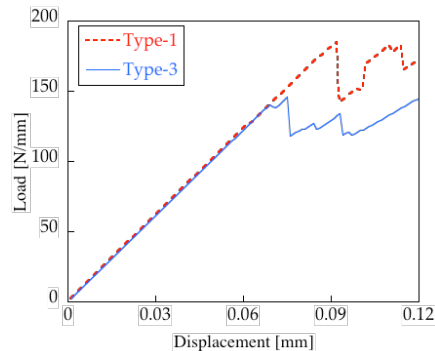
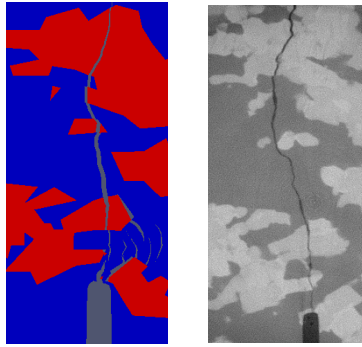


図5 数値解析による荷重変位関係

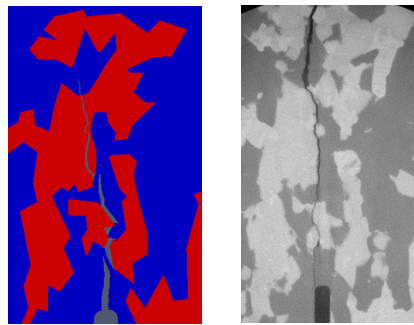
表1 パラメトリックスタディで求めた物性値

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

しかしながら、提供されたマイクロ材料試験データより鉱物のヤング率と引張強さを求めた結果、石英のヤング率は20 GPa~200 GPa、引張強さは350 MPa~400 MPa、斜長石ではヤング率が60 GPa程度、引張強さが150 MPa程度の値を示した。マイクロ材料試験で得た鉱物粒子の材料特性を用いると、巨視的な強度特性が過大に評価されることが明らかになった。したがって、花崗岩中に弱点として存在するクラックの配置や形状を明らかになった。したがって、花崗岩中に弱点として存在するクラックの配置や形状を明らかにして、適切に評価することも重要であることがわかった。



(a) Type-1



(b) Type-3

図6 き裂進展経路の比較

(2) プラスティネーション真空含浸法では、あらかじめ気化しやすい有機溶剤のような別の液体を含浸させた後に、改めて真空含浸で蛍光樹脂を含浸させる。しかしながら、60℃で有機溶剤を真空脱泡させると、脱泡の刺激等でエポキシ樹脂の重合が進んでしまい含浸できない、一方、温度を下げると粘度が高く十分に脱泡しないなどして、安定した樹脂含浸を実施できる技術構築に研究期間中の多くの時間を割くことになった。

最終的には、真空脱泡中は試験片を樹脂の外に置きつつ、十分に脱泡したのちに温度を上昇させて低粘度化した樹脂に浸漬させる機構を取り入れることで、比較的安定して樹脂を含浸できる技術を開発した。

図7はプラスティネーション真空含浸法によって、樹脂を含浸させた花崗岩の顕微鏡写真である。複数の鉱物粒界の他に青白く発光した数十 μm のクラックの像が写っている。しかし、撮影機材や照明条件等の影響についても検討を重ね、より詳細な観察方法の構築が望まれる。

(3) シアノアクリレート吸引法で観察された微視クラックの例を図8に示す。図には、0,4mmまで0,2mm間隔で研磨し断面の像を示している。シアノアクリレートが蛍光塗料の水分と反応して十分な浸透効果を得ることが難しいが、岩石表面に存在するクラック観察に長けている。研磨・含浸・定点観察を繰り返すことは難しく、微視クラックの三次元的な分布を観察するためには、更なるデータ収集が必要である。

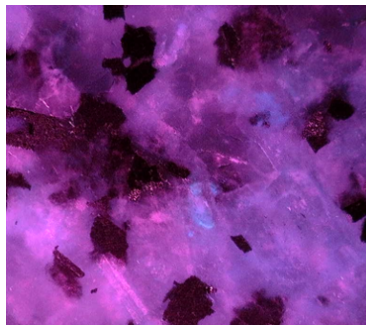
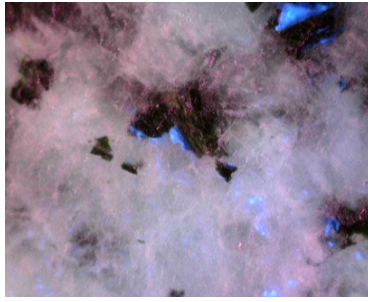
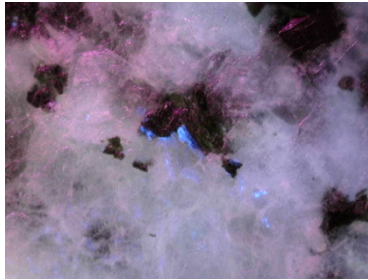


図7 真空含浸法で観察された微細クラック



(a) 表面研磨面



(b) 0.2mm 研磨面



(c) 0.4mm 研磨面

図8 シアノアクリレート吸引法で観察された微細クラック

(4)今回観察された岩石の微視構造は、図6に示した X線CT画像で見るよりも複雑である。特に花崗岩には石英が含まれるため、図9のように強い紫外線を照射すると、鉍物粒界までを明瞭に観察できる可能性を確認した。こうした微視構造観察を利用することで得られた試験を順次まとめていきたい。

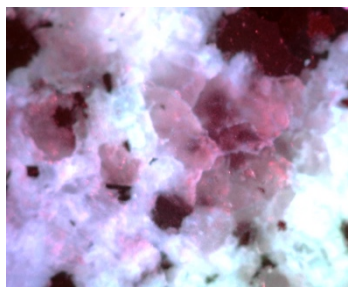


図9 UV 励起により発光する石英と鉍物粒界

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 石井建樹, 内藤潤
2. 発表標題 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
3. 学会等名 計算工学講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------