

論文 鉱物粒子サイズの挙動に着目した微小骨材試験体の直接引張試験

前川 昂輝^{*1}・杉本 宙威^{*1}・丸山 一平^{*2*3}

要旨：この研究ではクラックを取り除いた骨材の薄片を用いて、鉱物関係に着目し直接引張試験時の骨材内部の挙動について画像相関法を用いて明らかにする手法を示した。具体的な手法として直接引張試験を実施しながら偏光顕微鏡を用いて写真撮影し、画像相関法を用いてひずみ分布を得ることで、鉱物粒子の周囲にひずみが発展する様子を確認した。試験体の破壊断面には鉱物粒子が含まれておらず、鉱物粒子間の接着部分が破壊していたが、ひずみ分布図から鉱物粒子がひずみを負担したのち鉱物粒子間の接着部分が破壊を始めると接着部分にひずみが集中し離れていく様子が確認できた。また砂岩の引張強度、ヤング率を取得した。

キーワード：骨材、鉱物、砂岩、画像相関法、引張強度、ヤング率

1. はじめに

日本では原子力発電所が高経年化し、運転期間の延長が計画されている¹⁾。その取扱いには注意が必要で、運転を40年から延長した原子力発電所では構造物の安全評価を実施し、技術的な視点から発電所の運転可否が判断されている。

コンクリート部材については、放射線遮蔽壁として用いられ建物の重要な機能を負担している。一方で放射線照射環境下では、石英を始めとしたシリカを含有した鉱物において結晶がアモルファス化し、体積膨張する(放射線に起因した体積膨張(RIVE))²⁾結果、コンクリート強度と剛性が低下することが明らかになっている²⁾。

この背景において、岩石骨材の放射線膨張について研究を行い、骨材膨張の予測・評価技術の確立が必要となっている。その研究方法として、骨材を数値解析上でモデル化したシミュレーションが考えられる。このとき、異なる岩石粒子を有する骨材において、異方性も含むアモルファス化による鉱物の膨張とそれとともない内部のひび割れなどの変質を予測するためには、鉱物同士の結合力の評価が必要不可欠であるが、過去に行われた研究において、鉱物粒子サイズの挙動に着目した実験は殆どない。本研究はこのような数値解析に必要な背景データの取得段階の研究として位置付けられ、これまでに研究が行われていない骨材の直接引張試験に着目し実験を行った。具体的には骨材の薄片を直接引張し、偏光顕微鏡を用いて画像撮影、画像相関によりひずみ分布を確認することで、薄い試験体の荷重変形関係を取得した。また試験後の薄片を用いて鉱物の分布を把握し、鉱物関係の変化を確認した。また直接引張試験に対する手法として割裂試験を実施し、その結果を比較した。

2. 実験方法

2.1 骨材について

骨材として砂岩を用いた。骨材を構成する鉱物は岩石種によりその組成、サイズが異なっており、その骨材の概要を把握するための重要な情報となる。そのため、骨材について薄片観察を行った。

砂岩は堆積岩である。図-1、図-2を用いて薄片観察を行ったところ、主要鉱物は石英、斜長石、黒雲母であり、一部にオリゴクレス、正長石を含む。ここで、

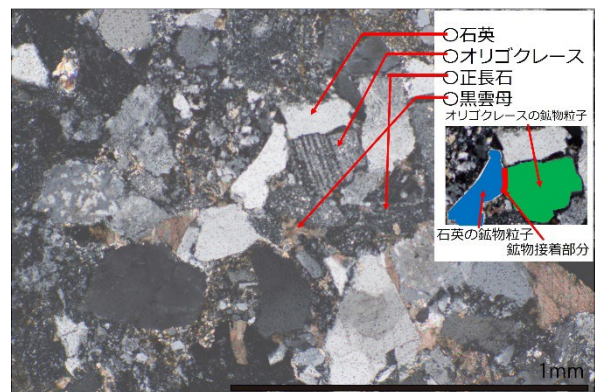


図-1 砂岩の薄片写真(直交ニコル・100倍)

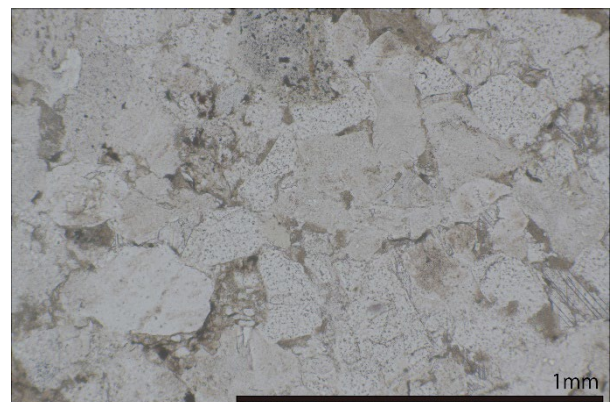


図-2 砂岩の薄片写真(開放ニコル・100倍)

*1 国立大学法人 名古屋大学 大学院環境学研究科 (学生会員)

*2 国立大学法人 名古屋大学 大学院環境学研究科教授 博士(工学) (正会員)

*3 国立大学法人 東京大学 大学院工学系研究科教授 博士(工学) (正会員)

骨材は図－１で青と緑で示すような鉱物粒子が複数組み合わせることにより構成されており、赤で示したような鉱物粒子間の接合部分は特に鉱物接合部分と考えている。

2.2 割裂試験方法

試験には小型引張圧縮試験装置（今田製作所，SV 201NA SH）に平型圧縮治具を用いた（図－３）。試験体はΦ12×2 mmとし，12体作成した。作成した試験体を図－３に示す。試験体作成にはダイヤモンドコアツール（日本ヒルティ株式会社，DD EC-1）を用いΦ12 mmの円柱を切り出した後，ダイヤモンドソーで2 mmの厚さとした。完成した試験体は20℃一定の恒温室にて一日保管し，水分を取り除いたうえで試験を実施した。試験では，試験機から荷重変位関係を出力し，試験体が破断した点の荷重を試験体の破壊荷重とした。その後破壊荷重と試験体の直径，厚さから式(1)を用いて引張強度を計算した。

$$f_t = \frac{2P}{\pi dL} \quad (1)$$

ただし f_t :引張強度(N/mm²)，P:最大荷重(N)，d:直径(mm)，L:長さ(mm)

2.3 引張試験方法

引張試験として図－４に示すようなその場観察用応力負荷試験機（sanko，ISL-T300）を用いた両引き引張試験を行った。この試験機は機械内部のアクチュエーターを通じて試験体の両端を固定している二つの治具に同じ量の変位を与えることにより，試験体に両引き荷重を与え試験を行っている。機械本体からは電圧に係数をかけて変換した荷重の値，並びに変位を出力することができる。ただし本実験では試験体の固定のために治具と試験体の間に接着剤を用いており，変位の値を参考にすることはできない。これに代用する手法として，画像相関を用いてひずみを取得した。

初めに試験体作成手法について説明する。試験体は2×10×0.5 mmの薄片を用いた。試験体の作成にあたってはディスクソーを用いて骨材の原石から切り出し，同じ方向の薄片を複数用意した。その後試験体表面に明らかな傷が含まれるものを取り除いた12体を試験体とし，SA-1のように試験体番号を付けた。なお，実験結果の解析に用いる画像相関法において精度を向上させるため，試験体の表面を，粗い順に#400，#1000，#2000，#3000の研磨剤を用いて研磨してある。また，試験体中央には0.5×0.3×0.5 mmの切れ込みを上下に入れた状態（図－４）で試験を実施した。

試験体作成後，骨材の試験体を試験機に設置した。設置方法は，研磨した表面を試験機上側とし両端部を図の治具で覆い，その間を接着剤で充填し治具と試験体を固定している。また，治具と試験機は4本のねじを用いて

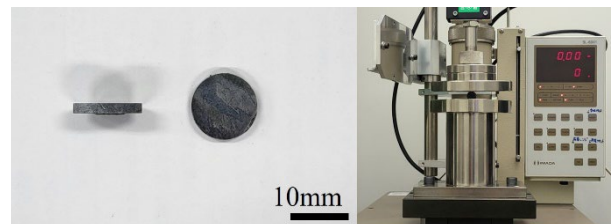
固定した。設置時には接着剤硬化のため1時間静止させた。

試験における荷重速度は岩石の強度に影響のあることが明らかになっている⁴⁾。この試験は鉱物粒子の状態を確認しながら実験を行うほど微細な試験体を用いるため，アクチュエーターの速度を最低の5 rpm，変位速度を2 μm/sとした。試験時には，初期荷重として圧縮と引張の荷重を弾性範囲内で0.5 MPa，1.5 MPaを与え，治具と試験体の固定を確認した。その後，試験体が破断するまで引張試験を実施した。また試験後の試験体は接着剤を取り除き保管した。

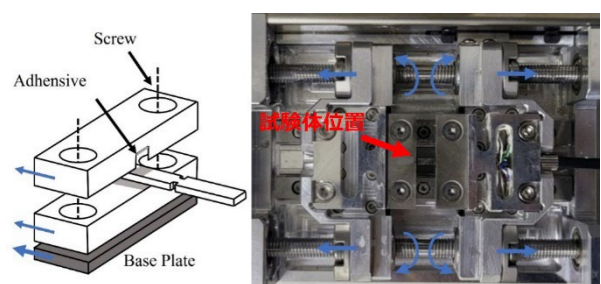
2.4 画像相関法の概要

画像相関法は試験体に変形する前後の画像について，試験体表面の模様を比較し解析することにより，変位及び移動方向を求める手法である。Chuら⁵⁾により研究がされており，コンクリートの分野では篠野ら⁶⁾によりひずみの実挙動と画像相関法を用いて算出した値の妥当性について検討が行われている。

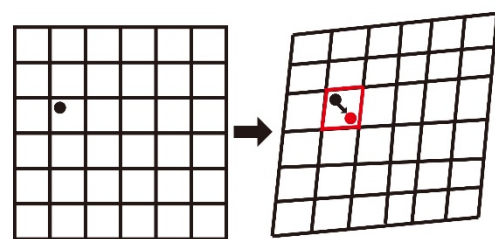
解析にあたっては，初めに画像をN×N個といったサブセットに分割する。この分割したサブセット内のパターンの変化を移動ベクトルとして算出することで画像の画素ごとのひずみを算出する（図－5）。出力の形式とし



図－３ 割裂試験に用いた試験体



図－４ 直接引張試験の概念図と試験機写真



●変形前 ●変形後

図－５ 画像相関法の概念図

表－１ 画像相関法に用いた設定

Subset/Step：追従する正方形の大きさ/1 pixel ごとに計算するか定める	77/20
Subset weight：サブセット内の処理，Gaussian は中央を重み付ける	Gaussian weight
Interpolation：サブセット以下の画素処理では一つのエリアを連続した曲線を用いて濃淡値で表現する。用いる濃淡値の精度を定める	Optimized 6-tap
Criterion：画像相関の判断基準を定める。NSD が一般に用いられる	Normalized squared differences
Exhaustive search：画像相関不良の際に再探索を実施する	ON
Consistency threshold and Matcability threshold：閾値を定める	0.02 pixel

ではひずみ分布図，ある一点や範囲内のひずみの経時的な変化があり，この実験では画像相関法から出力したひずみの経時変化と，試験機から得た応力の時間変化を合わせることで，荷重変形関係を確認している。

2.5 試験結果の解析手法

本実験では試験機から変位を取得することが困難なため，代替手法として試験体写真を用いた画像相関法によるひずみ分布の解析を行った。

画像相関に用いる写真は次の要領で取得した。初めに，試験機を偏光顕微鏡のステージ上に設置した。この偏光顕微鏡は接眼レンズ 10 倍，対物レンズ 4 倍の反射撮影用レンズが設定されており，総合倍率 40 倍である。また写真撮影のため上部の鏡筒に CCD カメラを接続している。CCD カメラのコントロールには Vic-Snap（株）レーザー計測）を用いた。このソフトウェアはカメラと USB ケーブルを介して接続しており，撮影状況の確認やカメラの設定などを行うことができる。

撮影環境は，篠野ら⁹⁾が実施しているように蛍光灯などのノイズを排除するため，偏光顕微鏡周囲に暗幕を設置し室内の照明を落とした状態とした。

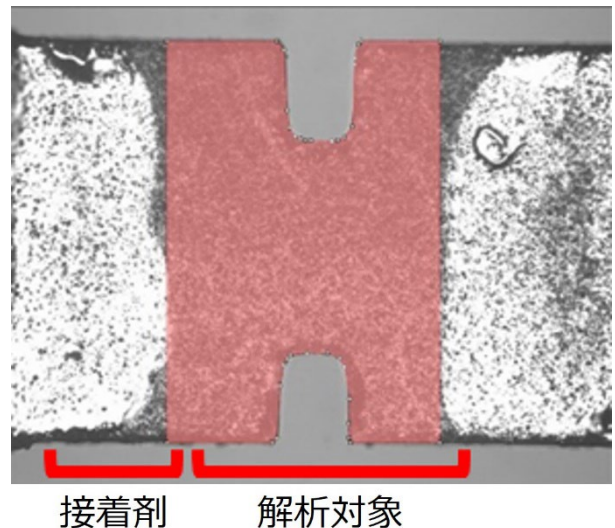
撮影は直接引張試験機の試験開始と同時に開始し，試験体の破壊まで連続して撮影を行った。カメラの露光時間は 7 ms とし，連続撮影間隔は 0.2 秒としている。撮影した画像は TIFF 形式，2448 × 2048 pixels のグレースケールで保存した。この画像を変換することなく，Vic2D（株）レーザー計測）を用いて画像相関を実施した。

画像相関に用いた設定を表－１に示す。この画像で用いたサブセットの大きさは 80 μm に相当する。解析を行う際には図－６のように試験体の中央部を含むように範囲選択し，図－７に示すような X 方向のひずみ分布の結果を得た。ここで，試験体の切り込みを入れた中央部分を代表変位とするために図－７中のひずみを取得した範囲で示した範囲を範囲選択し，範囲内のひずみを平均することで試験体ごとの平均ひずみを求めた。これらの試験結果から応力－ひずみ関係をプロットした。

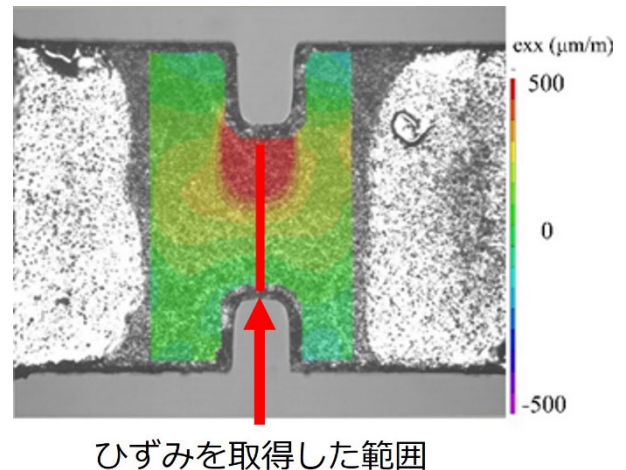
2.6 試験体の薄片作成

直接引張試験後の試験体は画像相関法には十分な表

面状態であるが，薄片観察を行うには粗く厚い。詳細な鉱物粒子の関係の把握のため，試験体の表面部分のみについて薄片を作成した。薄片作成にあたっては，試験体表面を #2000，#3000 の研磨剤を用いて研磨したのち，裏側から研磨し厚さ 30 μm の薄片とした。その後薄片を接着剤（Araldite，HUNTUMAN）を用いてスライドガラスに接着し透過観察可能な試験体を作成した。薄片の観察においては総合倍率 50 倍，100 倍のレンズを用い，直交二



図－６ 画像相関法に用いた画像の範囲選択



ひずみを取得した範囲

図－７ 画像相関法から得たひずみ分布図

コル撮影を基準としながら、1/4 波長の検板を用いて鉱物輪郭を明らかに確認して記録を行った。試験体の観察はスライドガラスに接着した試験体表面について行った。

3. 実験結果と考察

3.1 引張試験と割裂試験の比較

砂岩の割裂試験及び引張試験の結果を表－2 および図－8、図－9 に示す。割裂試験で計測した引張強度は直接引張試験よりも大きい値となった。その比は 1.21 である。試験体サイズや直接引張試験の手法が異なる既往研究⁷⁾で得られた砂岩の試験結果の比は 1.04 や 1.67 といった値であり、同様の結果が得られている。試験体の引張強度、ヤング率のばらつきは骨材の組成の不規則性や自然なクラックの影響が考えられる。実験過程において可能な限りクラックを取り除いているが(図－2)、試験体ごとの最終的な引張強度は 50% 程度の違いがある。

また既往研究⁸⁾における砂岩のヤング率は 30 GPa となっており、実験から得られた値とは異なる。この原因について、試験体形状と寸法効果により、鉱物粒子が試験結果に与える影響が異なっていることが考えられる。この実験で用いた試験体は断面内における鉱物粒子のサイズが大きく、鉱物のある部分の局所的な挙動を大きく反映する。そのため、実験から得られた引張強度やヤング率は骨材の局所的な挙動を表したと考えている。実験で用いたような微小な試験体においても、自然なクラックを取り除いて製作することにより応力－ひずみ関係は線形の挙動を確認することができた。その値の妥当性については、複数の試験体が初期のヤング率において同じ値を示しており、かつ線形の応力－ひずみ関係であることから確認できる。

3.2 薄片写真

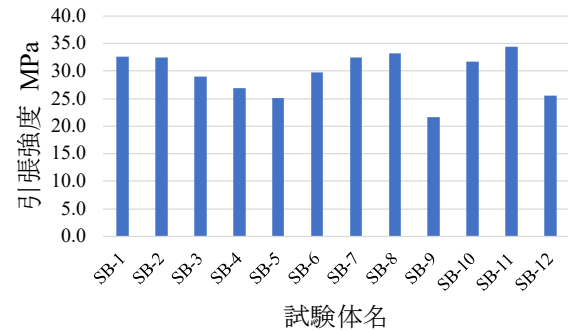
図－10 に薄片写真から作成した鉱物配置図を示す。また中央には引張試験における破壊位置を示す。この試験体は中央部分に石英が配置されており、その大きさは 200 μm 程度であった。破断面を確認すると石英の鉱物粒子の破壊は確認できず、ひび割れは鉱物粒子の周囲を沿うようにして発生していた。

3.3 応力ひずみ関係

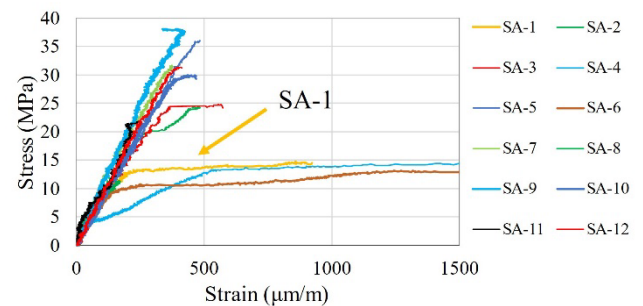
図－9 の結果のように、砂岩の直接引張試験における応力－ひずみ関係は同様の形状を取り、引張強度とヤング率が異なる結果となった。画像相関法のひずみ分布図の変化と試験体と与えている応力の関係を捉えるため、ここでは SA-1 の試験体に着目し鉱物粒子と発生するひずみの特徴について考察を行う。なお、本論文では荷重方向と平行なひずみの挙動に着目するため、取得画像 X 方向のひずみ ϵ_{xx} について議論する。

表－2 割裂試験と直接引張試験結果

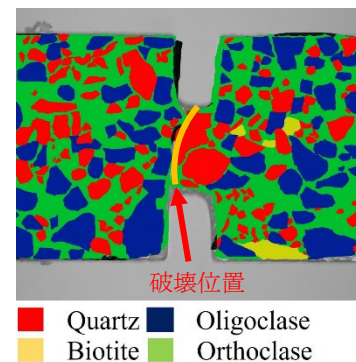
割裂試験	直接引張試験	
引張強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)
29.6 (SD 4.9)	24.4 (SD 13.8)	83.0 (SD 16.3)



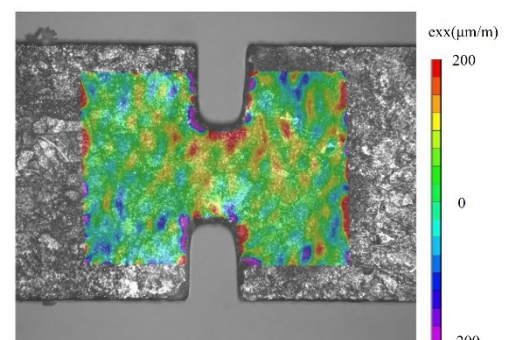
図－8 割裂試験の試験結果



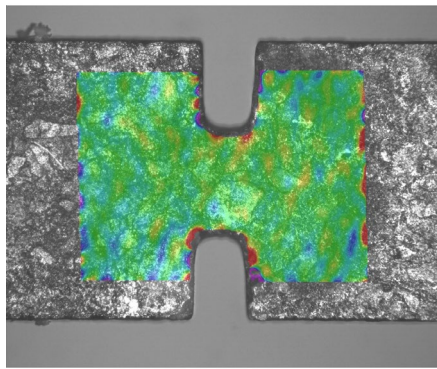
図－9 直接引張試験の応力－ひずみ分布図



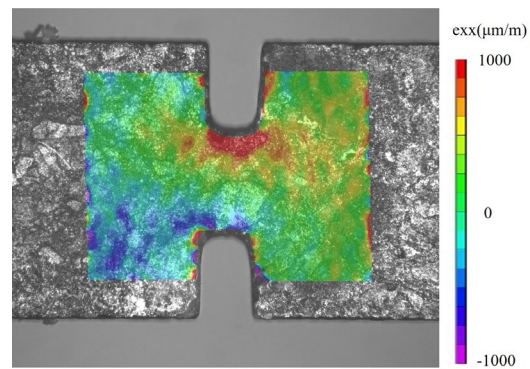
図－10 SA-1 の薄片から得た鉱物配置



図－11 ひずみ 60 $\mu\text{m/m}$ におけるひずみ分布図

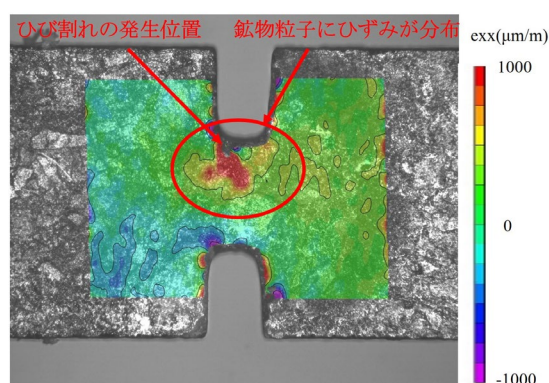


(a) 応力 8 MPa におけるひずみ分布図

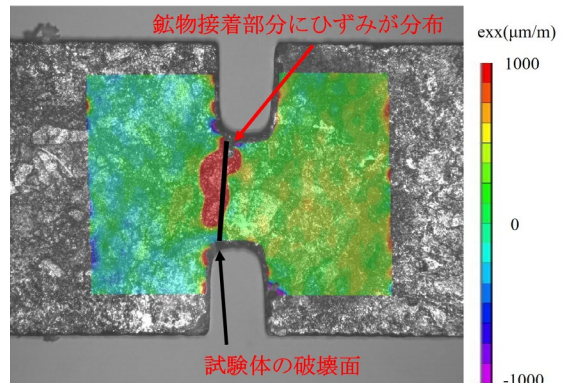


(b) 応力 12 MPa におけるひずみ分布図

図-12 弾性範囲内におけるひずみ分布図



(a) 応力 14 MPa におけるひずみ分布図



(b) 破壊直前のひずみ分布図

図-13 弾性範囲外におけるひずみ分布図

(1) 低応力時

ひずみが $60 \mu\text{m/m}$ までの値について着目する。このような低応力時には試験体全体に均一にひずみが発生し、図-1 1 に示すような引張方向に対して垂直にひずみ分布が表れている。この結果を鉍物配置と合わせて考えると、低応力時には鉍物粒子や鉍物接着部分の損傷なく、試験体全体が一体となっていることが考えられる。

(2) 弾性範囲内

応力 12 MPa, ひずみ $200 \mu\text{m/m}$ までの範囲において、応力ひずみ関係は線形で同じヤング率の値を示した。図-1 2 (a) では試験体全体でひずみの値は同程度であり、(1) で示した状態となっている。応力が増加するに従って試験体上部が大きな値のひずみを負担するようになり、最終的には図-1 2 (b) のように試験体内で偏心が発生し、弾性挙動でなくなっていった。

(3) 弾性範囲外

応力 12 MPa 以降のひずみ分布図はそれ以前と比較して局所破壊の影響を確認することができる。特に図-1 3 (a) の矢印が示す部分は破壊が進行した影響で図-1 4 に示すひび割れが発生し画像相関不能な点が存在する。

図-1 2 (b) と図-1 3 (a) を比較するとひずみの分

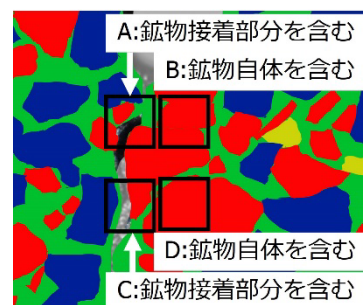


図-14 SA-1 の拡大図

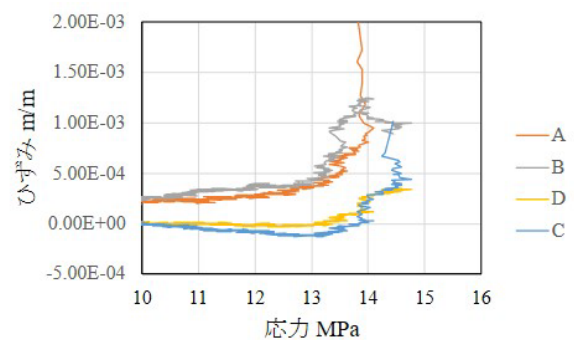


図-15 SA-1 における局所的なひずみの変化

布状況が異なっている。これは試験体の局所破壊が進行する過程で、ひび割れの周囲によりひずみが集中したためである。また試験が進み局所破壊が進行すると、図-13(b)のように破壊断面と大きなひずみの値の位置は一致した。局所応力の発生により破壊が進行したと考えられるが、鉱物粒子は破壊していなかった。

このように画像相関法を用いることによって試験体に生じるひずみの分布と鉱物配置、および破壊過程とともに確認することができ、砂岩の引張破壊過程における微視的変形を明らかにすることができた。

3.4 局所ひずみの変化

図-13から鉱物粒子が破壊せずに試験体がひび割れたことが分かる。ここで骨材に蓄えられたひずみ量をグラフ化するため、図-14に示すように鉱物粒子とひび割れ発生個所の4つの部分それぞれのX軸方向のひずみを算出した。これと図-9の応力との関係を図-15に示す。BやDのひずみの値はAやCと比較して大きかったが、14 MPa 付近でその関係は逆となり、局所破壊が生じたと同時に、引張強度の小さな鉱物接着部分が破壊していき、その結果として大きな値のひずみが発生したと考えられる。特にAは急激にひずみの値が増加しており、局所破壊の影響を確認することができる。またAが破壊したのちCも破壊したため、14.5 MPaの時点においてひずみの値が急激に増加していることが確認できる。

また局所ひずみの変化は試験体にも影響を与えており、試験体が塑性化し始める13 MPa 付近は、3.3節で確認したように非線形挙動となって応力を負担できなくなっているため、鉱物接着部分が次第に離れていくことが骨材の非線形性をもつ応力ひずみ関係と密接な関わりを持つことを示している。

一方で試験体下側の鉱物粒子はひずみをほとんど負担していないため、破壊しなかった。

4. まとめ

この研究では骨材の引張強度やヤング率といった物性を取得する方法を提案した。引張強度について比較のため、割裂試験を行った。また、骨材を構成する鉱物を踏まえた実験を行うため、骨材薄片を用意し、偏光顕微鏡で写真撮影を行いながら両引き荷重与えることで、試験体の応力ひずみ関係やひずみ分布図を取得した。実験を行った試験体の一つに着目すると、画像相関法を用いた新たな手法では以下のような点を明らかにすることができる。

1. 割裂試験は直接引張試験に比べて引張強度が大きな値となった。この結果は既往研究と同様であり、

小さなスケールの試験体を用いた場合でも骨材物性が大きく変わらず同様の性質を持つことを示す。

2. 骨材が破壊した際に鉱物粒子の破壊がみられなかった試験体では、鉱物同士の接着面に沿ってひび割れが発生していた。ひずみ分布図から鉱物粒子周囲のひずみを取得した結果、試験体の応力ひずみ関係において骨材が非線形を示し始めた応力は、鉱物接着部分が離れひずみが単調に増加し始めた部分と一致していた。そのため、骨材の応力ひずみ関係の非線形性の要因として、鉱物接着部分の破壊が深くかかわっていることが視覚的に明らかとなった。

謝辞

本研究は、資源エネルギー庁・受託研究・令和4年度原子力安全性向上に資する技術開発事業の支援を受けた。

参考文献

- 1) 原子力規制委員会：実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請にかかる運用ガイド，2017.9
- 2) Maruyama, I., Ishikawa, I., Yasukouchi, J., Sawada, S., Kurihara, R., Takizawa, M., Kontani, O. : Impact of gamma-ray irradiation on hardened white Portland cement pastes exposed to atmosphere, Cement and Concrete Research, No.108, pp.59-71, 2018
- 3) Hilsdorf, H.K., Kropp, J., Koch, H.J. : The Effects of Nuclear Radiation on the Mechanical Properties of Concrete, ACI Symposium Publication, Vol.55, 1978
- 4) Wu, B., Chen, R. and Xia, K. : Dynamic tensile failure of rocks under static pretension, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Elsevier, Vol.80, pp.12-18, 2015
- 5) Chu, T.C., Ranson, W. F., Sutton, M. A. and Peters, W. H. : Application of digital - image - correlation techniques to experimental mechanics, Experimental Mechanics, Vol.25, No.3, pp.232-244, 1985
- 6) Maruyama, I., Sasano, H., Nishioka, Y., Igarashi, G.: Strength and Young's modulus change in concrete due to long-term drying and heating up to 90 °C, Cement and Concrete Research, Vol.66, pp.48-63, 2014
- 7) Li, D. and Wong, L. N. Y. : The brazilian disc test for rock mechanics applications: Review and new insights, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.46, pp.269-287, 2013
- 8) 平松 良雄, 李 喜根, 岡 行俊, 単軸引張および圧縮試験下の岩石の変形挙動, 日本鉱業会誌, No.93, Vol.1078, pp. 945-949, 1977