

論文 ペシマムを有するアルカリ骨材反応における内部ひび割れ進展の可視化に関する研究

寺本 篤史*1・渡部 雅貴*2・村上 亮太*3・大久保 孝昭*4

要旨：本研究では、ペシマムを有する反応性骨材を使用して、力学的特性が異なる非反応性骨材がマクロな膨張量に及ぼす影響、並びに ASR によって発生する内部ひび割れの進行に及ぼす影響について、画像相関法を用いた検討を実施した。その結果、非反応性骨材の組み合わせによっては膨張量が変化すること、非反応性骨材に人工軽量骨材を用いた場合、ASR 膨張量が大幅に低減されること、ASR に画像相関法を適用する場合、サブセット領域の設定がひずみの計算値に影響を及ぼすこと、ASR によって発生するひび割れの進展は、骨材の力学的特性の影響を受ける可能性があることが示された。

キーワード：アルカリ骨材反応、画像相関法、ペシマム、非反応性骨材、人工軽量骨材

1. はじめに

アルカリ骨材反応 (ASR) は、反応性骨材と細孔溶液中に含まれるアルカリイオンとの化学反応によるゲルの生成及びゲルの吸水が、局所的な膨張圧を生み出し、これらの膨張圧および膨張圧によって発生したひび割れの進展によりコンクリート全体にマクロな膨張を発生させる現象で、膨張の程度によってはコンクリート構造物の構造性能を低下させる可能性を有している。

ASR によるコンクリートの膨張現象の観測は、マクロには数多く研究が実施され、アルカリ量や温度、湿度、拘束度などをパラメータとした莫大な量の実験結果が過去に報告されている。しかしながら、ASR にはペシマムや拘束依存性など、未だ解明されていない現象が存在し、これらの現象の解明にはマクロな膨張量の観察だけでは不十分な場合がある。

その一例として、ASR のペシマムは、反応性骨材と非反応性骨材が、ある混合率のときに最大膨張量を示す現象であるが、ペシマムのメカニズム研究としては、アルカリの骨材表面への吸着による膨張圧の低下¹⁾など、膨張圧に関する見解はあるものの、コンクリート中の反応性骨材と非反応性骨材の配置や形状といった力学的観点から考察した事例はほとんどない。これら未解決問題へのアプローチの一つに、コンクリート中のひずみ分布の可視化が挙げられる。

コンクリート中のひずみ分布の可視化に関しては、過去に画像相関法 (Digital Image Correlation, DIC) を用いた研究事例が報告されている。画像相関法とは、変形前後の 2 つの対象面の輝度分布を比較して、その中から変形前後で最も相関性の高い部分を抽出し、対象部分の変

形前後における変位とその方向を求める画像解析の一種であり、変形前後の状態において試験体をカメラで撮影するため、試験体に非接触かつ非破壊で二次元のひずみ分布を測定することが可能である。

コンクリート材料分野においては、載荷試験中のコンクリートのひび割れ進展の可視化²⁾や、乾燥収縮中に生じる粗骨材周辺の微細ひび割れの可視化³⁾などに用いられた例はあるものの、劣化進展中の ASR に適用した事例はほとんどない。そこで本研究では、ペシマムを有する反応性骨材を使用して、非反応性骨材として力学的特性が大きく異なる骨材を使用した場合に、マクロな膨張量に及ぼす影響、並びに ASR によって発生する内部ひび割れの進行に及ぼす非反応性骨材の影響についてを、画像相関法によって得られる内部ひずみ分布を用いて検証を行う。

2. 実験概要

著者らは既往の研究⁴⁾において、100mm×100mm の断面を有するコンクリートを用いて ASR の進展過程における断面内のひずみ分布を画像相関法により取得する実験を実施した。その結果、試験体の厚さが 10mm 程度の場合には ASR による劣化が進行しないこと、50mm 程度の厚さがある場合には画像相関法により ASR の進行が可視化可能であることを示した。

しかし、上記実験では一般的な方法によるマクロな膨張量の測定を行っていなかったため、従来法との比較が不十分であった。そこで本実験では、100mm×100mm×50mm の試験体断面のひずみを画像相関法により可視化することと同時に、JCI-S-011-2017 を参考に、 ϕ 100mm

*1 広島大学 工学研究科 助教 博(工) (正会員)

*2 広島大学 工学部 (非会員)

*3 広島大学 工学研究科 (非会員)

*4 広島大学 工学研究科 教授 博(工) (正会員)

表-1 調合条件

	W/C (%)	s/a (%)	Unit volume mass (kg/m ³)			Admixture			
			Water (W)	Cement (C)	Sand (S)	Coarse(G)		SP (C×%)	AE (C×%)
						Reactive	Non Reactive		
CS30	50.0	45.0	160	320	805	309	706	1.9	0.002
ALA30	50.0	45.0	160	320	805	309	401	1.8	0.002

×200mm の試験体のマクロな膨張量をコンタクトゲージ法によって取得し、画像相関法により得られるひずみ分布との比較を行えるようにした。

2.1 使用材料並びに調合

本実験で反応性骨材として使用した骨材は、急速膨張性の安山岩（表乾密度：2.69g/cm³，BS 破砕値：12.8%）であり、調合ペシマムを有することが分かっている。既往の研究⁹⁾において、この産地の反応性骨材は、促進材齢 300 日程度において、反応性骨材：非反応性骨材の体積比率が概ね 30%：70%である場合に最大の膨張率が得られると報告されている。そこで本実験でも既往の研究と同様に、反応性骨材を 30%，残りの 70%を非反応性骨材とする調合を採用した。

上記の既往研究では、非反応性骨材として石灰石（同一産地の BS 破砕値：20.7%）が使用されているが、本研究では、力学的特性の異なる非反応性骨材として、黒瀬産石英斑岩砕石（表乾密度：2.68g/cm³，BS 破砕値：13.2%，記号：CS）並びに、膨張頁岩製の人工軽量骨材（絶乾密度 1.28 g/cm³，BS 破砕値：37.1%，記号 ALA）を 24 時間以上吸水したものを使用した。本研究では骨材選定時の力学的特性の代表値として BS 破砕値を採用した。

本実験に使用した調合を表-1 に示す。本実験では、ASR を促進するためにアルカリ総量を 5.5Kg/m³ となるように調合水に水酸化ナトリウムを混和した。

2.2 養生条件

試験体は打設後、材齢 28 日まで 20℃封緘養生を施し、材齢 28 日から 60℃湿布養生の促進養生を行った。本論文の以下の考察では、材齢 28 日を基準とした促進材齢として標記する。

2.3 長さ変化試験

JCI-S-011-2017 に準拠し、マクロな膨張量を取得した。試験体はφ100×200mm のシリンダー状に成型し、封緘養生 28 日後に、ステンレス製のバンドを取り付け、ステンレス製バンドに付属されているゲージプラグ間（基長約 100mm）を対象にコンタクトゲージによる計測を実施した。測定材齢は、促進材齢 0 週，1 週，2 週，5 週，10 週であり、試験体数は同一条件につき 3 体である。コンタクトゲージによる計測は人為的なばらつきが大きくなる可能性があるため、毎回 3 人が計測を行い、本論文では 3 人の測定値を平均したものを使用する。

2.4 圧縮強度及び静弾性係数試験

圧縮強度及び静弾性係数用の試験体として、各調合につきφ100×200 のシリンダーを 12 本ずつ作製し、所定の材齢において JIS A 1108 及び JIS A1149 に準拠し、圧縮強度試験並びに静弾性係数試験を実施した。

まず、ASR 劣化前の試験体として、材齢 28 日封緘養生時点で圧縮強度試験を実施し、その後促進材齢 2 週，5 週，10 週で試験を行った。各材齢の試験本数は 2 本である。

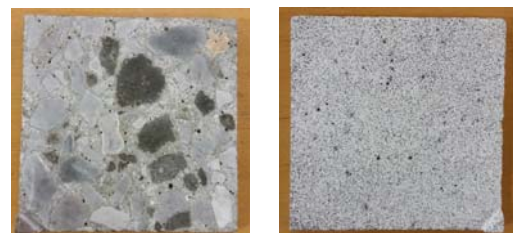
2.4 画像相関法

(1) 画像相関法の基本原理とサブセット

画像相関法は、測定対象物表面を撮影した複数の画像を用い、変形前後の画像を比較し、変形前の着目する輝度値パターンが移動した場所を、変形後の画像から探し出し輝度値パターンの変位を求める。この輝度値パターンの領域はサブセットと呼ばれ、任意の大きさの領域を指定することができる。

サブセットの寸法を小さくするとひずみ分布の画素精度が向上するが、輝度値パターンの変形量が大きい場合（過大なひび割れが生じたときなど）や、輝度値パターンの変化が乏しい場合に解析が不可能となることがある。そのため、後述するランダムパターンの入れ方も適切なサブセット寸法の設定に大きく影響する。一方、サブセットの寸法を大きくすると大変形が生じた場合でも解析を行うことができるが、ひずみ分布の画素が粗くなる。

以上より、コンクリート材料の様々な劣化に対して画像相関法を適用する場合、種々の劣化に対応したサブセット寸法の設定が必要と考えられる。本実験に適したサブセット寸法の検討に関しては 3 章で後述する。



Before random mapping After random mapping

図-1 ランダムパターンの作製

(2) 画像相関法に供する試験体

画像相関法用の試験体の成型には、断面 100mm×100mm、高さ 200mm の型枠を作製し、コンクリートを縦打ちで打設することで断面方向に打設方向による膨張異方性が生じないように配慮した。100×100×200mm の試験体が十分に硬化した後、試験体の高さ方向上下 25mm 程度を取りのぞき、厚さ 50mm 試験体を 3 体、コンクリートカッターにより成型した。

画像相関法を実施するためには、対象断面に適度な輝度値の分布が必要である。しかし、コンクリートの切断面の輝度値パターンは画像相関法を適用する上で不十分であるため、試験体断面にランダムパターンを記す必要がある。本実験では、白色のウレタンスプレーで試験体表裏全面を白く塗布した後、黒色のウレタンスプレーで試験体表面に黒色の斑模様を作製した。模様作製前後の試験体の例を図-1 に示す。

また、試験体には促進養生中に切断面から直接水分が供給されないよう切断面をポリエステルフィルムで覆い、試験体側面のみが湿布と接触する状態とした。以上の試験体を湿布ごとビニル製袋で密封し、ウエスが十分湿潤に保たれた状態にして 60℃ 恒温槽中で養生した。

画像相関法に供する画像の取得には、CCD カメラ Atik383L+(ATIK 社製、3326×2504 ピクセル)、カメラレンズ Ai AF Nikkor 35mm f/2D(Nikon 社製)を使用した。試験体とレンズの距離は等しく 1 ピクセルあたりの撮影面長さは 0.04mm である。撮影材齢は、骨材の配置を取得するためにスプレーを施す前に実施したもの、並びに促進材齢 0, 1, 2, 3, 5, 10 週である。また、本実験において試験体は ASR 反応促進のため 60℃ で養生されているが、画像撮影中に温度分布によるひずみ分布が生じる可能性があるため、画像撮影に際しては、1 日前から 20℃ 恒温槽に移動し、試験体全体が 20℃ となったのを確認した後、20℃ 室内において撮影を行った。

画像撮影を行った試験体は各調合につき 3 体で、一試験体につき表裏 2 面ずつ計 6 面の画像を取得した。

3. 測定結果及び考察

3.1 長さ変化試験

コンタクトゲージによる長さ変化試験の結果を図-2 に示す。図には参考として非反応性骨材として石灰石骨材を使用した既往の研究⁶⁾の結果(記号:L30)も示した。この実験は、本実験と同じ産地の反応性骨材、同じアルカリ総量(5.5kg/m³)、同じ養生温度(60℃)を有するが、試験体の寸法(75mm×75mm×300mm のコンクリートプリズム)及び測定方法が異なる。

図より、同じ反応性骨材を同一体積量で使用した場合でも、非反応性骨材が異なると膨張の程度が変化するこ

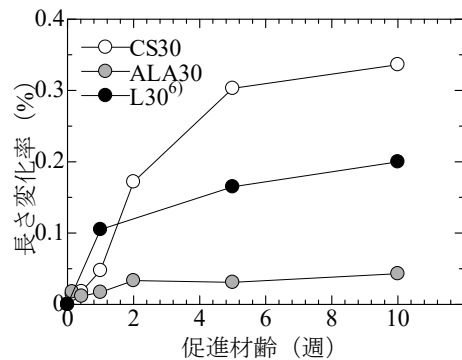


図-2 長さ変化試験結果

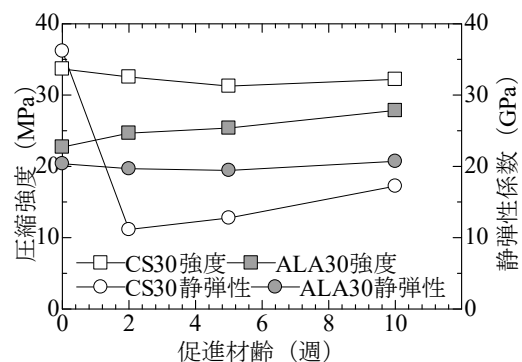


図-3 圧縮強度、静弾性係数試験結果

とが確認できる。特に非反応性骨材として人工軽量骨材を使用した場合には、著しく膨張量が小さくなっている。本件に関して、Collins ら⁷⁾は、ポーラス骨材を使用した場合、ASR による膨張量が大きく減じられることを報告しており、その原因としてアルカリシリカゲルが骨材の空隙に吸収されるためと推察している。同様に、人工軽量骨材を用いた杉山ら⁸⁾の実験においても、人工軽量骨材を用いることで膨張量が小さくなること、骨材の気孔中にアルカリシリカゲルが含まれることが実験的に示されている。

3.2 圧縮強度及び静弾性係数試験

次に図-3 に圧縮強度試験並びに静弾性係数試験結果を示す。図より、促進材齢 2 週から膨張率の顕著な増大がみられた CS30 では、静弾性係数の著しい減少が確認された。しかしながらこの減少傾向は促進材齢 5 週、10 週では継続していない点が、長さ変化試験の結果と異なっている。また圧縮強度の低下傾向は静弾性係数と比較して無視できるほど小さいものであった。

一方で、顕著な膨張がみられなかった ALA30 に着目すると、促進材齢 0 週(封緘 28 日)では、骨材そのものの力学特性を反映して、CS30 より小さい圧縮強度、静弾性係数を示しているが、その後の促進材齢において静弾性係数はほぼ一定値を示し、圧縮強度は緩やかな増大傾向で、促進材齢 10 週までに 5MPa 程度の増加がみられた。この結果は、ASR による膨張がほとんど見られな

った結果と対応している。静弾性係数が増大傾向を示した点については、高温履歴によるセメントの水和の促進と併せて、人工軽量骨材の空隙をアルカリシリカゲルが満たしたことに起因する可能性も考えられ、促進試験終了後に試験体の詳細な検査を実施する予定である。

3.3 画像相関法によるひずみの計算

画像相関法は変形前後の画像から計算により、各画素における各方向の変形ひずみ量を得ることができる。3.1で述べたような試験体のマクロな変形は、ある一軸方向のひずみ成分を積分することで得られると考えられる。また、各画素における最大ひずみを表記することで過度な膨張ひずみが集中している部分を可視化することが可能となる。

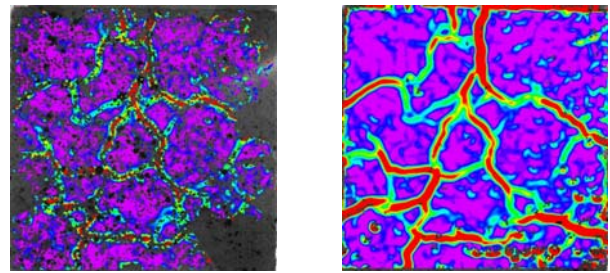
(1) サブセット寸法の検討

2.4.1で述べたように、画像相関法ではサブセット領域の設定が重要となる。図-4に、CS30の促進材齢10週の試験体を使用して、サブセット領域として15ピクセルとしたものと50ピクセルとしたものをそれぞれ示す。

図左の15ピクセルに着目すると、ひび割れらしきひずみ分布が確認できるものの、周辺部を中心にコンターの色が示されていない部分が散見される。また、赤色で示される膨張成分が大きい領域でも、部分的に色が表示されていないところがある。この原因として、ランダムパターンを生成するためのスプレアの密度が十分でなかった点と、過度な変形により変形前後で類似パターンが検出されなかった点が挙げられる。一方、図右に示されるサブセット領域50ピクセルの画像では、画像前面にわたって計算結果が示されており、試験目的に応じてサブセット領域を広げる必要があるといえる。

次に、サブセット領域が平均ひずみの計算結果に及ぼす影響を示したものが図-5である。図-5より、サブセット領域が小さい場合にひずみを過小評価する可能性があることが確認できる。この原因としては、膨張量の大きな部分の画素が計算に反映されていないことによるものと推察される。しかしながら、本実験条件においては、サブセット領域を30ピクセル程度以上とすることで概ね同程度の計算結果が得られることが分かる。以下の議論では、サブセット領域を50ピクセルに固定する。

上記のサブセット条件で、CS30及びALA30の試験体断面6面に対して、促進材齢0週の画像を基準として、促進材齢1, 2, 5, 10週の各画像に画像相関法を適用し、得られたひずみ分布から縦方向と横方向の平均ひずみを計算し、両者をさらに平均した結果を図-6に示す。また、図-6の結果を図-2のコンタクトゲージ法の結果と比較したものを図-7に示す。ここで、図-6には、参考として、文献6)と同一の条件で作製した試験体の結



サブセット領域 15pixel サブセット領域 50pixel
図-4 サブセット領域が異なる場合の内部ひずみ

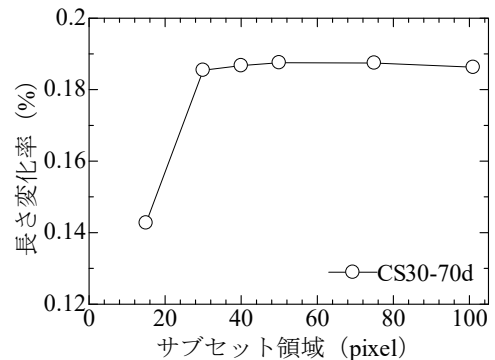


図-5 サブセット領域とひずみの計算値の関係

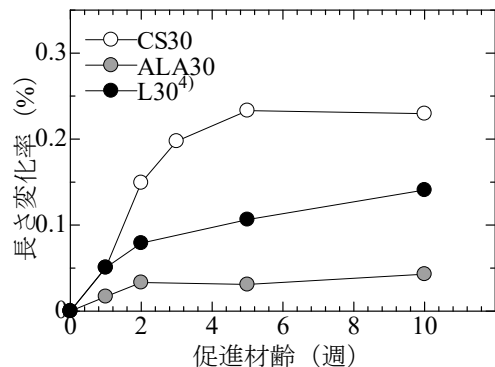


図-6 DICによるひずみの計算結果

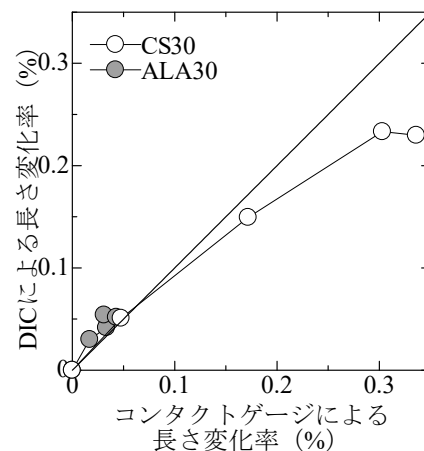


図-7 コンタクトゲージ法との比較

果⁴⁾も併せて示している。

図-6より、画像相関法によるひずみの計算でASRの膨張挙動をほぼ再現できていることが確認できる。また、図-7に示すコンタクトゲージ法との比較から、両者が概ね一致していることが分かるが、促進5週、10週の試験結果においては膨張を過小評価している。この結果の原因に関しては、表面のひずみが内部ひずみと比較して小さい可能性や、試験体厚さが十分ではなくアルカリシリカゲルが面外へ流出した可能性などが考えられ今後の検討課題としたい。

(2) ひずみ分布の可視化

CS30及びALA30の100×100mm断面のひずみ分布の経時的な変化を図-8にそれぞれ示す。図-8右側のチャートはひずみ（無単位）である。図-8のひずみ分布は、各調合条件で撮影した6面の中から著者の判断により抽出したものであるが、CS30は他の5枚ともおおむね同程度のひび割れが確認できるのに対し、ALA30は6面中2面でひび割れらしき膨張ひずみが確認できなかったことを付記する。

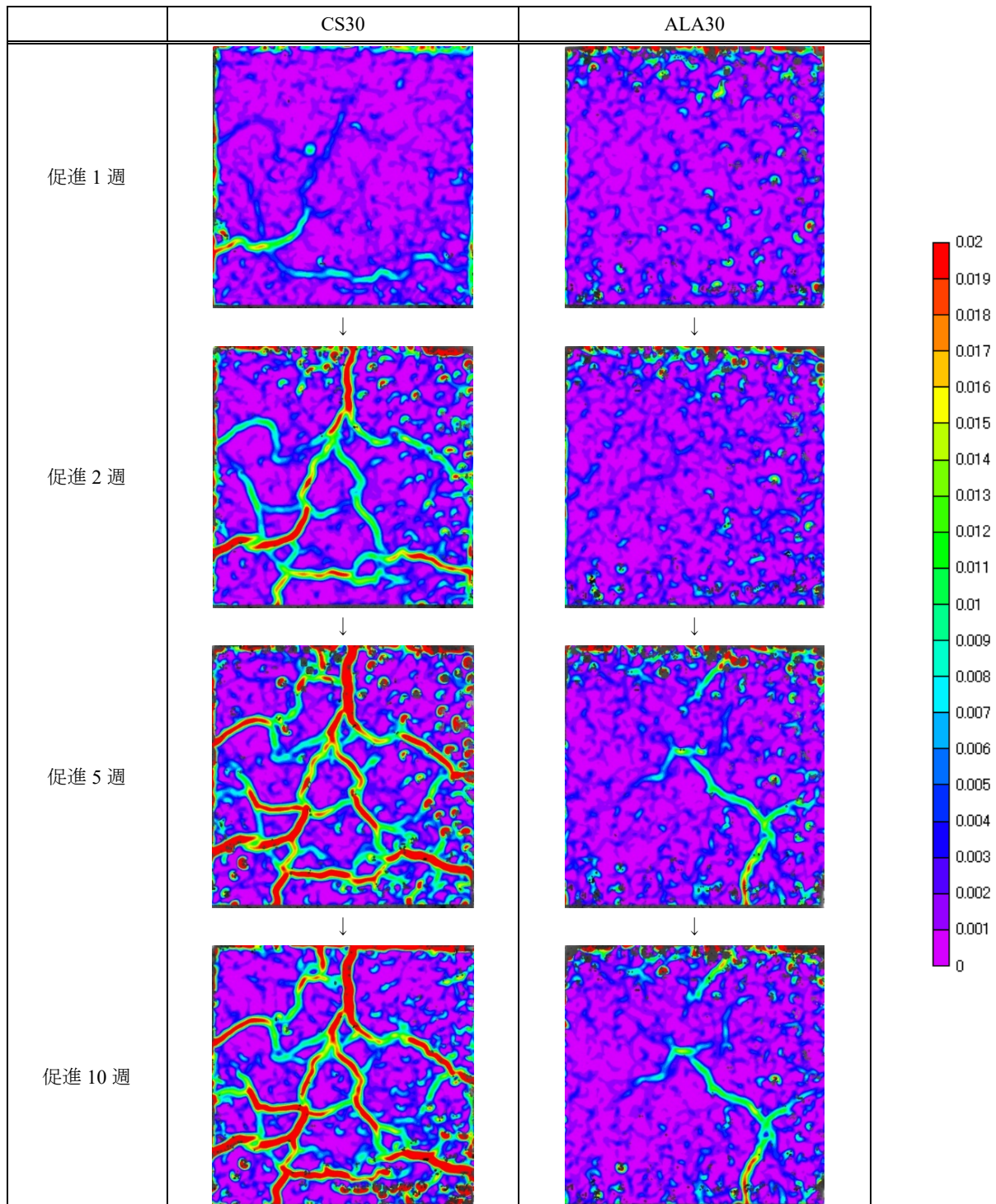


図-8 ASRによるひずみ分布の変化

図-8 の CS30 の結果を見ると、促進材齢の経過に伴ってひび割れらしき膨張ひずみが集中した部分が進展していく様子が確認できる。前節で示した平均ひずみの結果からも、ASR による試験体の膨張および膨張によるひび割れの進展を本実験の手法で可視化できているものと推察される。この結果に、反応性骨材と非反応性骨材の位置情報を上書きしたものが図-9 及び図-10 である。

図-9 によると、破碎値が小さい非反応性骨材を使用した CS30 では、ひび割れが骨材の縁に沿って進展しているのに対し、破碎値の大きい人工軽量骨材を使用した ALA30 では、図-10 の右下の四角で囲った部分のように人工軽量骨材を貫通するひび割れがみられた。このことから使用する骨材の力学的特性によって ASR による内部コンクリートのひび割れ進展挙動は変化する可能性が示唆された。

4. まとめ

本研究では、ペシマムを有する反応性骨材を使用して、力学的特性が異なる非反応性骨材がマクロな膨張量に及ぼす影響、並びに ASR によって発生する内部ひび割れの進行に及ぼす影響について、画像相関法を用いた検討を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) ペシマムを有する反応性骨材を使用した場合、非反応性骨材の組み合わせによって膨張量の経時変化は異なり、人工軽量骨材は ASR 膨張量を緩和する。
- (2) ASR による劣化に画像相関法を適用する場合、サブセット領域がひずみの計算値に影響を及ぼす。適切なサブセット領域を用いた場合、画像相関法から得られた平均ひずみはマクロな膨張量と概ね一致する。
- (3) ASR によってコンクリート内部に発生するひび割れの進展は、骨材の力学的特性の影響を受ける可能性がある。

謝辞：本研究の一部は第 29 回セメント協会研究奨励金の補助を受け実施しました。また、画像相関法の実施に際し名古屋大学丸山教授より貴重なご意見をいただきました。記して謝意を示します。

参考文献

- 1) E. Garcia-Diaz et. al.: ASR pessimism behavior of siliceous limestone aggregates, *Cement and Concrete Research*, Vol.40, pp.546-549, 2010
- 2) 佐川康貴ほか：一軸圧縮力を受けるモルタル供試体のひずみ計測へのデジタル画像相関法の適用性に関する検討, *実験力学*, Vol.7, No.2, pp.114-120, 2007
- 3) I. Maruyama, H. Sasano: Strain and crack distribution in

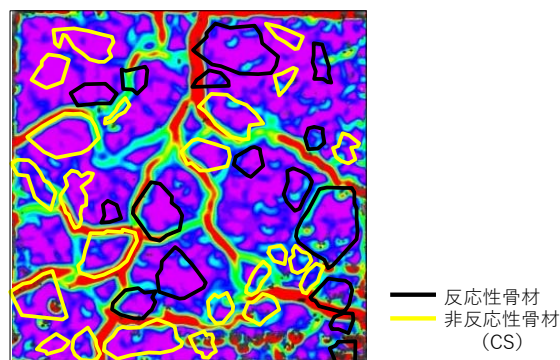


図-9 CS30 のひずみ分布と骨材分布の関係

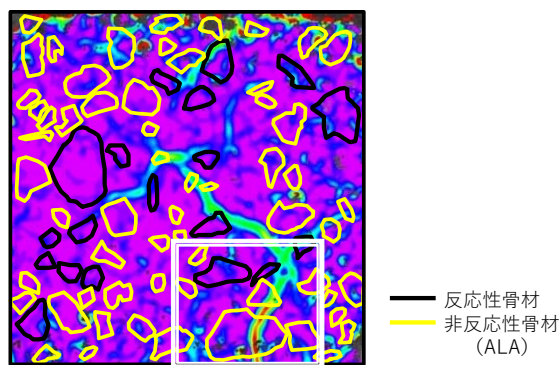


図-10 ALA30 のひずみ分布と骨材分布の関係

concrete during drying, *Materials and Structures*, Vol.47, pp.517-532, 2014

- 4) A. Teramoto, F. Araki, T. Ohkubo, Fundamental study on visualization during ASR degradation by Digital Image Correlation, 13th KOREA-JAPAN Joint symposium on building materials & Construction, pp.30-35, 2017
- 5) 佐川康貴ほか：ペシマム現象を示す骨材を用いたコンクリートの加速試験および暴露試験における膨張挙動, *コンクリート工学論文集*, Vol.25, pp.135-145, 2014
- 6) 三菱総合研究所：平成 28 年度原子力施設等防災対策等委託費（高経年化技術評価高度化（アルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の長期健全性評価に関する研究））事業, 成果報告書, 2017
- 7) Collins et. al. : Alkali-silica reaction: Suppression of expansion using porous aggregate, *Cement and Concrete Research*, Vol.17, pp.89-96, 1987
- 8) 杉山彰徳ほか：人工軽量骨材のアルカリシリカ反応性と ASR 判定試験法の提案, *土木学会論文集 E*, Vol.63, No.1, pp.79-91, 2007