

論文 X 線 CR 画像と画像相関法を用いたコンクリートの水分移動の影響評価

Kim Suji^{*1}・Aili Abudushalamu^{*2}・五十嵐 豪^{*3}・丸山 一平^{*4,5}

要旨：本研究では、X 線 CR と画像相関法を用いてコンクリート試験体の凍結乾燥・吸水過程を観察し、グレースケールによるコンクリートの水分移動の可視化・数値化と表面のひずみという 2 つの観点からの検討を行った。硬質砂岩の粗骨材が乾燥過程で平均-800 μ のひずみが発生し、吸水により-100~500 μ まで回復されることを観測した。モルタルでも同様に乾燥により発生した最小-3500 μ のひずみが 200 μ まで回復することが観測された一方で、吸水しても-1000~-400 μ のひずみが残る箇所も確認された。X 線 CR 画像による吸水高さと画像相関法の膨潤高さを比較することで水分移動と体積変化が対応していることを明らかにした。

キーワード：X 線 CR, 画像相関法, グレースケール, 凍結乾燥, 吸水, 水分移動

1. はじめに

近年、経済・環境的観点からコンクリートの構造物の長期利用が求められている。住宅に限られた研究ではあるが、日本の構造物の使用年月はアメリカとイギリスに比べて短い¹⁾。コンクリートの構造物の長期利用を図るためにはコンクリートの劣化メカニズムを正確に把握する必要がある。コンクリートの劣化において支配的な影響を及ぼす要因の 1 つがコンクリートの水分およびその動的移動である。そのため、これまで水分と水分移動に関しては様々な実験がなされてきた。

コンクリートは多孔体であり、水分移動を評価することが難しいため、試験体を破片に切断し、その破片の含水率を評価する破壊的方法、X 線・セラミックセンサなどを用いて水分分布・移動を可視化する非破壊的方法などが報告されている^{2),3),4)}。特に、水分移動によるコンクリートの挙動に関して Maruyama らはデジタル画像相関法を用いて骨材の種類が異なるコンクリートの乾燥収縮を評価した⁵⁾。

既往の研究はコンクリートを固相が変化しない多孔体として評価した研究が多いが、実際にはセメントペースト中のケイ酸カルシウム水和物 (C-S-H) の乾燥・収縮、あるいは吸水・膨張に伴う動的な組織変化が水分の逸散・侵入時に生じているため、一般的な多孔体と異なる振る舞いを生じる⁶⁾。

そこで、本研究では 2 つのコンクリート試験体を用いて、凍結乾燥・吸水を行い、その経時変化を X 線ラジオグラフィ (CR) 画像により内部の水分移動を、また、画像相関法で表層のひずみ変化を同時に観察した。その測

定結果からコンクリートの内部の水分移動を可視化・数値化し、表面のひずみを分析した。

2. 既往研究

2.1 X 線 CR 画像による含水率の評価

物体に X 線が照射されると、X 線は物質の密度に応じて減衰する。この時の減衰は指数関数的であり、その程度を表す係数を減衰係数と呼ぶ。この減衰係数と含水率は一定の関係を持つため、グレースケールと減衰定数から含水率を求めることが可能である。Lukovic らは単位体積当たりの含水率の変化 ΔC_{water} を (1) 式で表した⁴⁾。ここで、 ΔC_{water} (g/cm³)：各時点における単位体積当たりの含水率、 ρ_{water} ：水の密度 (g/cm³)、 μ_{water} ：水の減衰係数 (cm⁻¹)、 G_{dry} ：乾燥後のグレースケール、 G_{wet} ：乾燥前のグレースケール、 d ：物体の厚さ (cm) を表す。

$$\Delta C_{\text{water}} = -\frac{\rho_{\text{water}}}{\mu_{\text{water}}d} \ln \frac{G_{\text{wet}}}{G_{\text{dry}}} \quad (1)$$

実験開始前の透過画像のグレースケールと実験開始後の透過画像のグレースケールとの差から単位体積当たりの減水量 ΔC_{water} を算出した。 μ_{water} は水の性質に依存する値であり、期間によらず一定であると仮定した。

2.2 画像相関法の概要

画像相関法とは変形前後の 2 枚の画像を比較することで、画像から移動量を算出する手法のことである。Chu ら⁷⁾により研究が進んだ以降、コンクリートの分野においても、鉄筋コンクリート梁のひび割れの進展評価、圧縮力を受けるモルタルの評価などに用いられている^{8),9)}。

*1 国立大学法人 名古屋大学 工学部環境土木建築学科 学部生 (正会員)

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

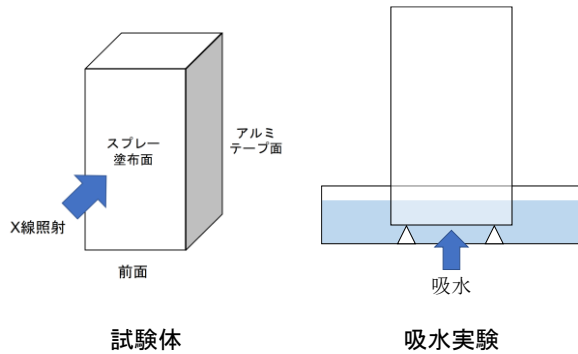
*3 国立大学法人 名古屋大学 大学院環境学研究科 准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 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)

*5 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)

表－1 コンクリートの調合

W/C	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				Ad (%cem)	AE (%cem)	目標空気量 (%)	目標 スランブ (cm)	空気量 (%)	スランブ (cm)
		W	C	S	G						
0.50	46.8	183	366	786	925	0.75	0.01	6.7	18.0	4.9	20.5



図－1 試験体試験体と吸水実験の概要図



図－2 CR 画像と画像相関撮影の様子

青木ら¹⁰⁾と Maruyama et al.⁵⁾により実際の挙動と画像相関法で解析した変形が対応していることが検証された。本研究では乾燥と吸水により発生する骨材とセメントペーストの境界の変化を観測するため、画像相関法を用いた。

画像相関は粗探査、精密探査、ひずみの測定の3段階で行われる。粗探査ではサブセット(変形前の画像中の任意の位置を中心とする画像領域)を基準とし、サブセットと最も相関する位置を変形後の画像から求め、変形量とひずみを計算する。粗探査では画素単位で計算を行うが、実際の移動量は画素単位より小さいため、精密探査で粗探査の結果に基づき空間微分を行い、ひずみを算出する。

3. 実験概要

3.1 試験体の概要

表－1 に本研究で用いたコンクリートの調合を示す。粗骨材は青梅産硬質砂岩を、細骨材は掛川産陸砂を使用した。水中養生で 28 日以上経過したコンクリートを湿式切断機で切断した。吸水時骨材切断面を吸水面にする

試験体(試験体 1)、型枠面を吸水面にする試験体(試験体 2)、2 種類の試験体で比較を行った。各試験体の寸法は約 30 (W) × 25 (D) × 60 (L) mm、である。図－1 (左) の試験体の概要図で示すように向かい合う 2 面にスプレーを塗布し、残りの 2 面にアルミ粘着テープを貼りつけ封緘させた。アクリル塗料スプレーでランダムに模様づけた後、塗布面以外の面を養生テープで包み水分逸散を防止した状態で、スプレーを乾燥させるため 20 ± 1℃ の恒温室で 1 面当たり 1 時間保管した。

3.2 乾燥および吸水方法

上述の試験体の乾燥過程および吸水過程の質量測定、X 線 CR 撮影、光学カメラ撮影を行った。乾燥過程は、D-dry 法を用い、1.5, 12, 24, 48, 72, 120 時間で試験体を取り出し計測を行った。吸水過程は、乾燥過程の計測直後から底面からの一面自然吸水を行い、0.5, 1.5, 3, 6, 9, 12, 18, 24, 48, 72 時間で計測を行った。乾燥・吸水過程ともに透過画像撮影、電子天秤で質量測定、画像相関の撮影順で測定した。吸水実験の概要を図－1 に示す。吸水には、温度および室温 20±3℃ で保たれた水道水を用いて、図－1 (右) のような吸水用のトレーを CR 撮影台に設置し、上記の吸水過程毎の透過画像を撮影した。質量測定、画像相関法の撮影時のみ、試験体をトレーから取り出し、撮影終了後、試験体を再設置した。

3.3 X 線 CR 撮影と水分移動の可視化と含水率の評価

図－2 (左) に X 線 CR 撮影の様子を示す。X 線 CR の撮影には、マイクロフォーカス X 線 CT スキャナ (SHIMADZU 社 inspeXio, SMX-100CTDS) を用いた。撮影ごとの位置調整のために、3D プリンターで制作した治具を CR 撮影台に設置した。本研究では管電圧を 90kV、管電流を 110μA、SDD(X 線源から検出器までの距離)を 500 mm、SRD(X 線焦点から試験体までの距離)を 30 mm、送りライン数を 5line、アベレージ数を 16 と設定し、厚さ 0.4 mm の Cu フィルターを用いた。上記の設定は SN 比とコントラストを考慮したものである。走査時間は 191 秒であった。このように取得した画像のサイズは横 1024 pixel、縦 1792 pixel で 1 pixel は 0.036 mm であった。

吸水実験のグレースケールは吸水面から 45-50 mm のグレースケールを基準にグレースケールを補正した。取得した透過画像処理・グレースケールの数値化には画像分析ソフトウェア ImageJ を用いた¹¹⁾。含水率の評価に用いられる μ_{water} の値は 1/20cm⁻¹ を使用した¹²⁾。

表-2 Vic-2D の詳細設定

Subset	33
Steps	8
Strain computation	Lagrange

3.4 画像相関画像の取得と水分移動によるひずみの評価

画像相関の撮影時の様子を図-2（右）に示す。撮影には USB カメラ（FLIR 社 Grasshopper3, モデル GS3-U3-51S5M-C, 画素数 5.0 MP, フレームレート 75 FPS, イメージセンサー SonyIMX250, Mono), レンズ（Computar 社 1.1 型サイズカメラ用 12 メガピクセルレンズ, モデル V3528-MPY, $f=35$ mm, F2.8）を用いた。安定的な照度を維持するため、対称型 LED 照明を画像相関用の台に設置した。撮影には VIC-Snap, 取得した画像の画像相関解析には VIC-2d（Correlated Solutions, Inc.）を用いた。得られた画像は 2448×2048 pixels, 256 濃度段階のグレースケールで, 1 pixel は約 0.028 mm であった。解析条件を表-2 に示す。解析条件は, 解析誤差が 0.008 pixel 程度, かつすべての画像で安定的に解析結果が得られるサブセットサイズを採用した。試験体表面の気泡は解析対象範囲から除外した。

4. 実験結果と考察

4.1 グレースケールによる水分移動の評価

吸水によるグレースケールの差分を図-3 に示す。吸水前の CR 画像のグレースケールを基準に差分を計算した。いずれの試験体も, 時間が経つことにつれ, グレースケールの差分が増加することから水が浸透している様子が確認できた。吸水開始後 3h の差分において吸水面から 3 mm までの領域で水が浸透し差分が増大することが確認できる。水が浸透していない 25-30 mm 付近のグレースケールは若干のばらつきはあるが, 時間経過によらず 0 に近い値を示している。

グレースケールが吸水開始前の CR 画像のグレースケールと一致しはじめる点をグレースケールからの吸水高さと定めると, 吸水開始後 72 時間の時, 試験体 1 の吸水高さは約 19 mm, 試験体 2 は約 17 mm であった。モルタル面から吸水している試験体 2 の方が骨材面から吸水している試験体 1 と比べて吸水高さが小さい。これは, モルタルに仕上げた面が骨材切断面に比べ緻密であり, 水が浸透することが難しいためだと考えられる。図-3 の 0-7 mm の範囲で時間が経ってもグレースケールが増加しない飽和した領域が表れている。試験体 2 の同範囲ではまだ飽和が見られない。それに加え, 図-3（下）10 mm の付近でグレースケールがほとんど変化しない部分も存在する。このような吸水量の差は面におけるモルタルと骨材の割合によるものと考えられる。

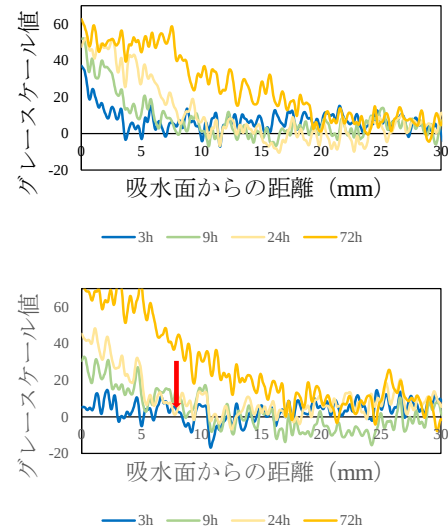


図-3 吸水時のグレースケールの変化
（上：試験体 1, 下：試験体 2）

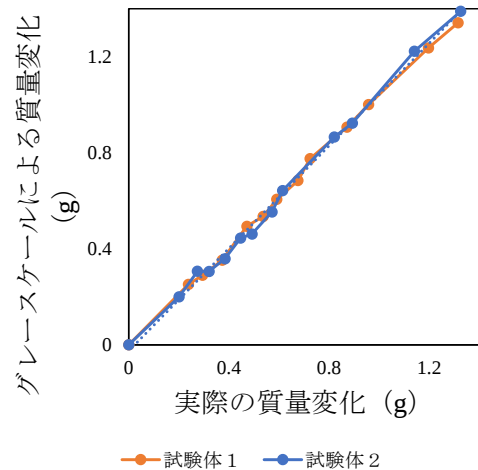


図-4 実際の質量変化量とグレースケールによる質量変化量の関係

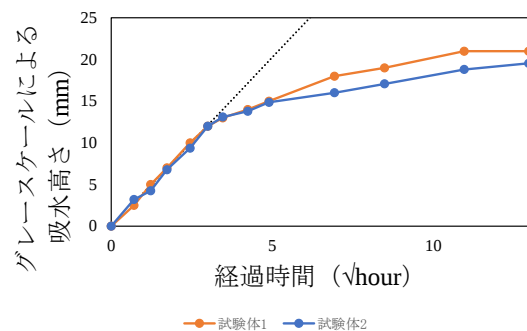


図-5 経時変化に伴う吸水高さの変化

モルタルの割合が

大きい面であるほど, 骨材の割合が大きい面より多くの水分を含むことができ, その面におけるグレースケール差分の絶対値が大きくなる。

図-4 に天秤で測った質量変化と式 (1) を用いてグレースケールから算出した試験体の質量変化の関係を示す。

試験体 1 と 2 の決定係数が各々 0.9972, 0.9927 であった。水分による質量変化とグレースケールから算出した質量変化が高い線形性があることが確認できた。

グレースケールからの吸水高さと経過時間の関係を図-5 に示す。経時変化に伴い、吸水高さの増加率が緩くなっており、乾燥条件は異なるが、著者らの既報における挙動と一致することが確認された¹³⁾。

4.2 画像相関法によるひずみの評価

画像相関法による乾燥・吸水過程におけるひずみの分布を図-6 に示す。図-6 の乾燥後基準 $\varepsilon_{\max}$ は D-dry で 120 時間乾燥後の撮影画像を基準に、乾燥前基準は D-dry での乾燥開始前の撮影画像を基準にしたものである。乾燥開始後 5 日の画像を見ると、試験体 1 と 2 どちらも、赤い領域の粗骨材と紫の領域のモルタルの収縮が確認できる。5 日を基準に骨材の平均的な最小主ひずみは -800 μ であるが、断面に現れている粗骨材の中にはモルタルの乾燥収縮ひずみと同等の -3000 μ よりも収縮する個体が見られた。同一ロットの硬質砂岩系粗骨材を使用しているにもかかわらず、-3000 μ から -200 μ までの広い範囲に骨材の最小主ひずみが分布し、粗骨材個体ごとのばらつきが大きいことを確認した。

図-6 の乾燥前基準 $\varepsilon_{\max}$ は吸水による膨張を示し、最小主ひずみは乾燥開始前の画像を基準にして画像相関を行った結果で吸水による乾燥収縮ひずみの回復の程度を示す。乾燥 5 日と吸水 3h の画像を比較すると乾燥 5 日の画像では粗骨材が乾燥収縮し、粗骨材との境界面のモルタルが膨張する様子が表れているが、吸水により 2 つの試験体とも -100~500 μ の範囲の骨材の膨張が観察された。膨張し赤く示されたモルタルも収縮し回復する様子が確認できた。

乾燥前基準 $\varepsilon_{\min}$ では吸水により -3500~-2000 μ の乾燥収縮ひずみが -800~400 μ まで回復することを確認した。X 線 CR 画像で検討した吸水量が最大に達した 0-7mm の範囲においては過半以上が赤い領域に変わっているが、一部は薄緑の領域の状態、すなわち約 -1000 μ のひずみが残っている。乾燥および吸水の 1 回繰り返しによりコンクリートに塑性的なひずみが発生している。

図-6 の画像相関法による吸水過程の水分移動結果によるひずみ変化について着目する。コンクリートの乾燥下によるひずみの分布はすでに既報において報告しているが¹⁴⁾、ここでは吸水時の同様な挙動が示された。特に水分の移動にともなって (図-5)、ひずみが分布している様子が示される。乾燥によって骨材の周囲にひび割れが骨材-モルタル間ならびに骨材間を結ぶようにひび割れが生じている。このところから、下面から水分が移動するとともにセメントペーストの膨潤挙動が確認される。図-5 に示されるように Washburn 式に代表される多孔

体中の水分移動における時間の平方根に水分吸水量ならびに吸収フロントの変化が比例する関係が、吸水 10 時間前後から逸脱している。このことは図-6 の試験体 1 の下面のひずみが安定状態になる吸水 9 時間以降の挙動と対応している。吸水後 3 時間のときには一部のモルタルが膨潤し、最大主ひずみ $\varepsilon_{\max}$ の赤い部分に表れる微細ひび割れが閉じつつ、ペーストのマトリクス部分の紫のひずみ (2000 μ 以上の収縮ひずみ) が 750 μ 程度の収縮ひずみ (薄い青あるいは緑) にまで収縮が緩和されている様子が確認される。特に下面から 3mm 程度の範囲についてはこの挙動が 9 時間後のデータ以降ほとんど変化していないことから、微細な空隙から水が吸水されたあと、ペースト部分に再分配され、それがさらに粗大空隙から小さな空隙に移動して^{15),16)}、C-S-H の膨潤を生じさせた結果が確認された。すなわち、コンクリート中の水分移動についてもひび割れが閉じる形で、1) C-S-H 内部の空隙構造変化とそれにとまなうセメントペーストの膨潤、2) 微細なひび割れのセメントペーストの膨潤に伴う閉塞によってダイナミックに空隙構造が変化することが示された。

4.3 X 線 CR 画像と画像相関の結果比較

前節において乾燥・吸水過程においてコンクリートは変形が生じていることが観測された。水分の吸水高さとモルタルマトリクスの変形挙動との対応関係を確認するために、図-7 に吸水に伴うグレースケールによる吸水高さに対する画像相関による吸水高さの関係を示す。プロットされている点は各々吸水開始から 0, 0.5, 1.5, 3, 6, 9, 12, 18, 24, 48, 72h の吸水高さを意味する。画像相関からの吸水高さは図-6 の最大主ひずみが 600 μ 以上になる最も高い点を基準にしたものである。9h までは 2 つの手法で求めた吸水高さが比較的線形な関係にあるが、吸水高さが 10mm に達すると画像相関の吸水高さは停滞し、24h から急に吸水高さが増大する様子が表れている。CR 画像で試験体 1 を観察すると吸水面から 10 mm 付近に最も骨材が多く、図-3 から吸水面から 10 mm 付近でグレースケールの差分が減少することが確認できる。骨材が多い面を通る際に吸水速度の低下が画像相関でも明らかになっている。

5. 結論と今後の課題

本研究では、X 線ラジオグラフィ (CR) 画像と画像相関法を用いて水分移動によるコンクリートの挙動についての検討を行った。

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) CR 画像で吸水の様子を観察することが可能であることを確かめた。また、その吸水高さは骨材による吸水の妨げがない限り、画像相関による吸水高さと

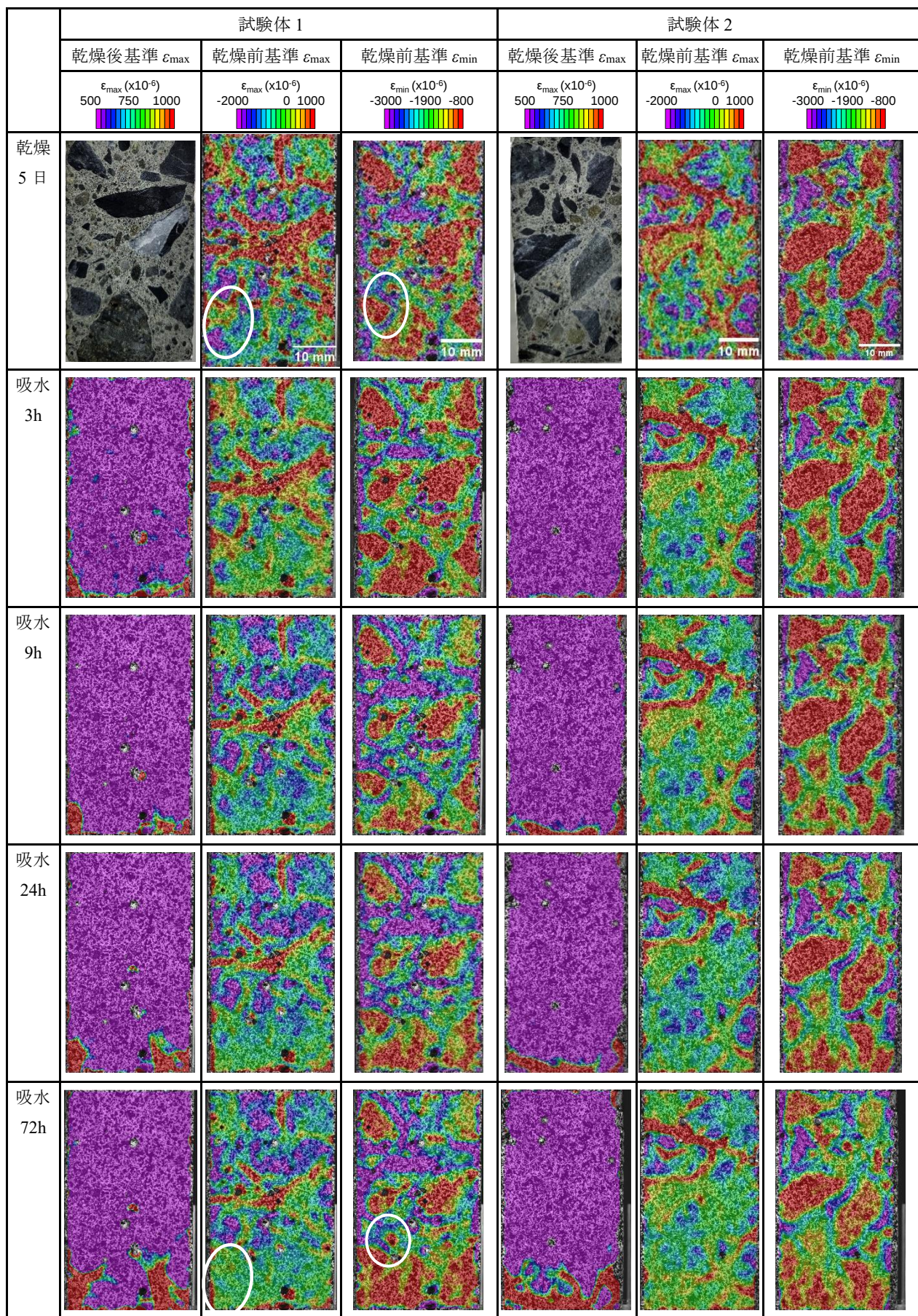


図-6 乾燥・吸水に伴う主ひずみ分布（左：乾燥後基準 $\varepsilon_{\max}$ ，中：乾燥前基準 $\varepsilon_{\max}$ ，右：乾燥前基準 $\varepsilon_{\min}$ ）

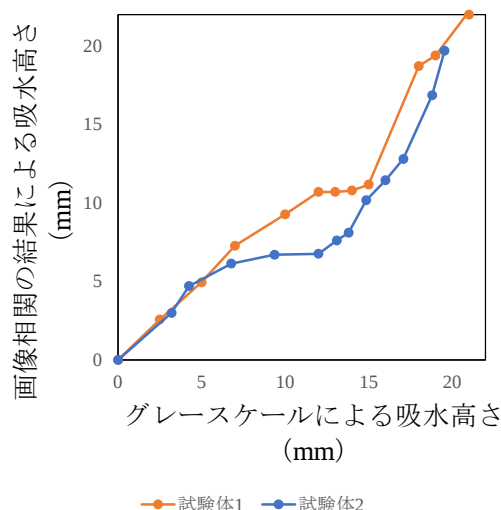


図-7 X線CRと画像相関法の比較

対応している。

- 2) 乾燥環境下で粗骨材が -3000μ から -200μ の範囲に渡り収縮することを確認した。同一な硬質砂岩の粗骨材であっても骨材ごとの乾燥収縮ひずみは大きく異なった。
- 3) 吸水によりモルタルは $-3500\sim-2000\mu$ のひずみが -200μ まで戻ることが観察された。だが、一部の領域のモルタルは完全に回復されず、 $-1000\sim-400\mu$ のひずみが残留していた。

今後、建物の非破壊的手法として、表面のひずみの様子から内部の水分分布を把握することや骨材の影響を考慮した水分移動モデルの改良に活用できると考えられる。

謝辞

本研究は、文部科学省英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 JPJA20P20333545 の助成を受けた。

参考文献

- 1) 小松幸夫：住宅寿命について，財団法人住宅金融普及協会『住宅問題研究』，Vol. 16, No. 2, pp.6, 2000
- 2) 丸山一平，五十嵐豪，岸直哉：セメント硬化体中の水分移動に関する基礎研究，日本建築学会構造系論文集，Vol. 76, No. 668, pp.1737-1744, 2011.10
- 3) 湯浅昇，笠井芳夫，松井勇：埋め込みセラミックセンサの電気的特性によるコンクリートの含水率測定方法の提案，日本建築学会構造系論文集，Vol. 62, No. 498, pp.13-20, 1997.08
- 4) Lukovic, M. et al. : Moisture movement in cement-based repair systems monitored by absorption, Heron, Vol. 62, pp. 21-45, 2017
- 5) Maruyama, I. et al. : 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

- 6) Hall, C. et al. : Water anomaly in capillary liquid absorption by cement-based materials, J. Mater. Sci. Lett. , Vol. 14, pp. 1178-1181, 1995
- 7) Chu, T. C., Ranson, W. F. and Sutton, M. A.: Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics, Experimental Mechanics, Vol. 25, No. 3, pp. 232-244, 1985
- 8) 浜岡広，松田浩，山下務，中島朋史：光学的全視野計測法によるRCはりのひび割れ発生・進展の可視化，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.2, 2008
- 9) 佐川康貴，尾上幸造，内野正和，松下博通：一軸圧縮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
- 10) 青木優介，蓮見亮，嶋野慶次，米村恵一：デジタル画像撮影によるコンクリート表面の収縮ひずみ分布測定のための基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, pp.673-678, 2009.6
- 11) Schindelin, J. et al. : Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. Nature Methods, Vol. 9, No. 7, pp.676-682, 2012
- 12) 藤牧哲也，丸山一平，大竹淑恵，水田真紀：中性子画像とX線画像によるモルタル吸水試験の比較評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.42, No.1, pp. 1648-1653, 2020
- 13) Kiran, R. et al.: Water Uptake in OPC and FAC Mortars under Different Temperature Conditions, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 19, No. 3, pp. 168-180, 2021
- 14) Maruyama, I. and Sasano, H.: Strain and crack distribution in concrete during drying, Materials and Structures, Vol. 47, No. 3, pp. 517-532, 2014
- 15) Gajewicz, A. M., Gartner, E., Kang, K., McDonald, P. J. and Yermakou, V.: A 1H NMR relaxometry investigation of gel-pore drying shrinkage in cement pastes, Cement and Concrete Research, Vol. 86, pp. 12-19, 2016
- 16) Kiran, R., Samouh, H., Igarashi, G., Haji, T., Ohkubo, T., Tomita, S. and Maruyama, I.: Temperature-Dependent Water Redistribution from Large Pores to Fine Pores after Water Uptake in Hardened Cement Paste, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 18, No. 10, pp. 588-599, 2020