

# 論文 コンクリートの乾燥により生じるひずみ分布と微細ひび割れ性状の評価

篠野 宏\*1・堀口 直也\*2・丸山 一平\*3

**要旨:** 本研究は、乾燥によりコンクリートに発生する微細ひび割れの性状を明らかにすることを目的とし、収縮量の異なる2種類の骨材を使用したコンクリートについて実験を行った。コンクリート断面のひずみ分布測定に画像相関法を用い、微細ひび割れの確認に蛍光エポキシ樹脂含浸法を適用した。実験から粗骨材の拘束によりモルタル部にひび割れが生じ、ひび割れは骨材界面並行および界面から垂直方向に入ること、画像相関法における主ひずみ分布と蛍光エポキシ樹脂含浸で確認したひび割れ箇所は相関が大きいことを確認した。収縮が小さい骨材を用いるとコンクリート全体の収縮ひずみは小さくなるが内部で微細ひび割れが蓄積されることが明らかとなった。

**キーワード:** 微細ひび割れ, 乾燥収縮, 蛍光エポキシ樹脂含浸法, 画像相関法, ひずみ分布

## 1. はじめに

コンクリートは、乾燥を受け水分を失う過程で乾燥収縮が生じる。収縮は骨材、セメントペーストともに生じるが、通常、骨材の乾燥収縮ひずみはセメントペーストに比べ非常に小さい<sup>1)</sup>。そのため、相対的に骨材がセメントペーストの収縮を拘束することとなり、拘束を受けるモルタルには微細ひび割れが生じるとされている<sup>2)</sup>。しかし、乾燥収縮による微細ひび割れの性状については研究例が少なく<sup>2),3)</sup>、明らかにされていないことが多い。そこで、本研究では、収縮量の異なる粗骨材を用いたコンクリートを作成し、試験体に発生する粗骨材周辺での乾燥収縮ひずみの分布を測定、その後、乾燥収縮ひずみによって生じる微細ひび割れの確認を行った。

乾燥収縮によって生じる断面内のひずみ分布を測定するためには、モルタル部、粗骨材部のひずみを得る必要がある。しかし、従来あるコンタクトゲージやひずみゲージによる測定では、コンクリート表面の詳細な測定は不可能であるため、本検討では光学的測定方法の一種である、デジタル画像相関法<sup>4)</sup>により測定を試みた。

微細ひび割れは、視認することが困難であるため、蛍光エポキシ樹脂含浸法を適用することにより確認することとした。この手法は、蛍光塗料を添加したエポキシ樹脂を、低真空状態で試験体へ注入させることにより、ひび割れを可視化するものである<sup>5)</sup>。

ひずみ分布とひび割れ分布を比較することにより、粗骨材が微細ひび割れ性状に及ぼす影響について考察を試みた。

## 2. 実験方法

### 2.1 材料・調合

使用材料を表-1、使用したセメントの試験成績を表-2、モルタル(記号: Mortar)、コンクリートの調合およびフレッシュ性状試験の結果を表-3へ示す。粗骨材種類の変化による微細ひび割れ性状の差異を観察するため、粗骨材に石灰岩碎石を用いたコンクリート(記号: LS)と、硬質砂岩碎石を使用したコンクリート(記号: SS)の2種類を作製した。事前の検討で、20℃RH60%環境下での石灰岩碎石、硬質砂岩の収縮量はそれぞれ $-28 \times 10^{-6}$ (3試験体の平均)、 $-159 \times 10^{-6}$ (2試験体の平均)であった。粒子径として15mm-20mmに調整した粒子のみを用いた。これは、粒度を調整することで、試験体間の比較を行いやす

表-1 使用材料

材料	記号	物理的性質など
セメント	C	普通ポルトランドセメント
細骨材	S	大井川水産系陸砂/表乾密度: 2.59g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 2.08%
粗骨材	GL	秩父産石灰岩碎石/表乾密度: 2.64g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.36%
	GS	硬質砂岩碎石/表乾密度: 2.64g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.89%
AE減水剤	AE	AE減水剤標準I種
増粘剤	AS	特殊水溶性高分子化合物

\*1 名古屋大学 工学部社会環境工学科 (正会員)

\*2 名古屋大学 大学院環境学研究科 (正会員)

\*3 名古屋大学 大学院環境学研究科 准教授・博士(工学) (正会員)

表-2 セメントの物性と化学成分

セメント種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ブレン比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	ig.loss (%)	化学成分 (mass%)									
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>	
N	3.16	3230	2.3	20.04	5.21	2.87	64.9	1.46	2.21	0.14	0.34	0.019	

表-3 コンクリート、モルタルの調合

記号	調合										スランプ (cm)	空気量 (%)	練上がり温度 (°C)	乾燥開始材齢 (日)
	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )											
			W	C	S	GL	GS	AE	AS					
Mortar	55	-	271	492	1432	-	-	-	-	2	23	4.9	21	59
LS		51.8	177	322	940	909	-	3	1.3	11.5	2.8	21	58	
SS		177	322	940	-	892	3	1.3	9.5	2.5	21	60		

くするためである。コンクリートおよびモルタルの調合は、ペースト、粗骨材、細骨材、あるいはペースト、細骨材の体積が同一となるよう行った。ブリーディングを低減させるため、増粘剤を使用した。

2.2 試験体の作製

試験体の打設は φ100×200mm のサミットモールドに行い、材齢 1 日および 2 日に脱型、その後それぞれ試験開始まで飽和水酸化カルシウム溶液中で 20°C±1°C 一定下で標準水中養生をした。試験体は φ100×200mm のコンクリートをダイヤモンドカッターで厚さ 9mm に切断し、φ100×9mm としたものを使用した。通常の乾燥収縮試験では、100×100×400mm の試験体を使用されるが、本検討では骨材とモルタルの相互作用を二次元的な分布としてとらえる目的で、試験体を薄く切断している。

2.3 乾燥収縮試験の概要

試験の流れを図-1 に示す。乾燥経過のひずみ分布を測定するため、同一の試験体で 24 時間ごとに質量と長さ変化の測定、デジタル画像の取得を行った。本検討では、乾燥による 24 時間の試験体の質量変化が、全体の質量の 0.03%/day 以下になった時点で収縮が平衡状態に達した

と判断した。平衡状態に達したことを確認後、蛍光エポキシ樹脂の含浸により微細ひび割れの確認を行った。

試験体の乾燥を開始した材齢を表-3 に示した。乾燥条件はすべての試験体で 20°C RH60% であり、調合ごとに試験体を 1 体作製し実験を行った。

2.4 長さ変化測定試験

試験体の長さ変化を、レーザー変位計 LK-G30 (KEYENCE 社製、精度: 1/2000mm) を用いて測定した。長さ変化測定の概要を図-2 に示す。基長となる

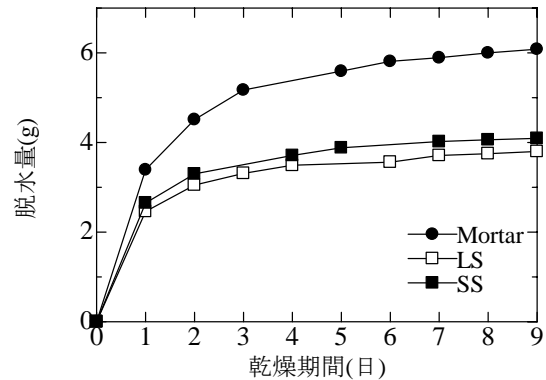


図-4 脱水量の経時変化

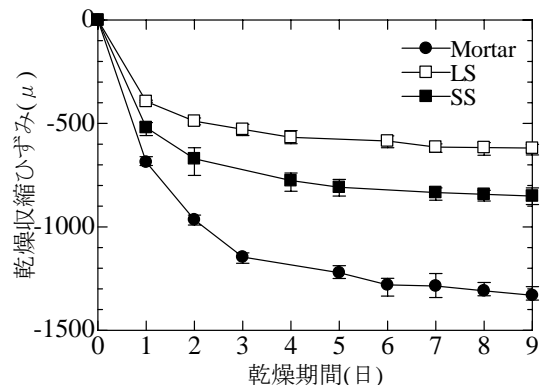


図-5 乾燥収縮の経時変化 (測定: レーザー変位計)

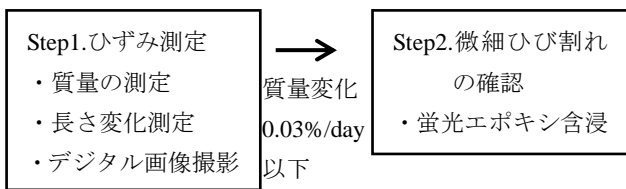


図-1 実験の流れ

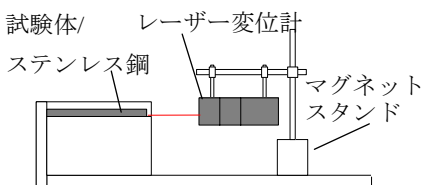


図-2 長さ測定器具

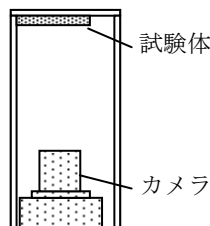


図-3 試験体撮影状況

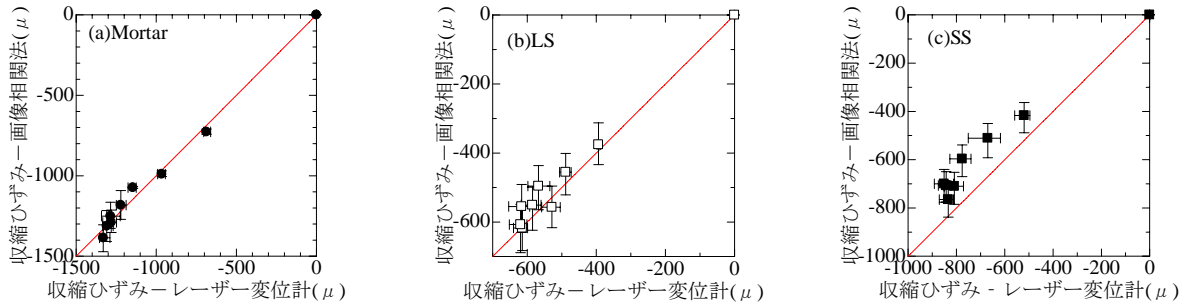


図-6 レーザー変位計と画像相関法での収縮ひずみの比較

長さが既知のステンレス鋼を用意し、ステンレス鋼と試験体の長さの差を測定することにより、試験体の長さを求めた。基長となるステンレス鋼の温度ひずみによる長さ変化を考慮するため、室内の温度を合わせて測定し、線膨張係数を用いて、基長の補正を行った。ステンレス鋼の線膨張係数は実測した  $17 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  とした。なお、温度変化は  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  の範囲であった。各試験体において直径を三方向で測定し、それらから算出されるひずみの平均をとり、試験体の乾燥収縮ひずみとした。

2.5 デジタル画像相関法による二次元ひずみ分布評価

2.4 節と同様の試験体を用いて、デジタル画像相関法により、試験体表面に生じたひずみ分布を測定した。

デジタル画像相関法とは、試験体表面にランダムな模

様を作製し、変形前後をデジタルカメラなどで撮影、得られたデジタル画像の輝度分布から、試験体の変位とその方向を求める方法である。青木らはこの手法により、1次元の微小区間の乾燥収縮ひずみ分布を取得している<sup>4)</sup>。本検討では、二次元のひずみ分布を測定することにより、骨材、ペーストがどのように相互作用しながら収縮するのかを把握することを試みた。

デジタル画像相関法には、CCDカメラ Atik 383L+(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。前処理として、試験体表面には画像相関の探査精度向上のためと、乾燥による試験体表面の輝度変化の影響を少なくするため、白色と黒色のアクリル顔料スプレーを吹き付け、

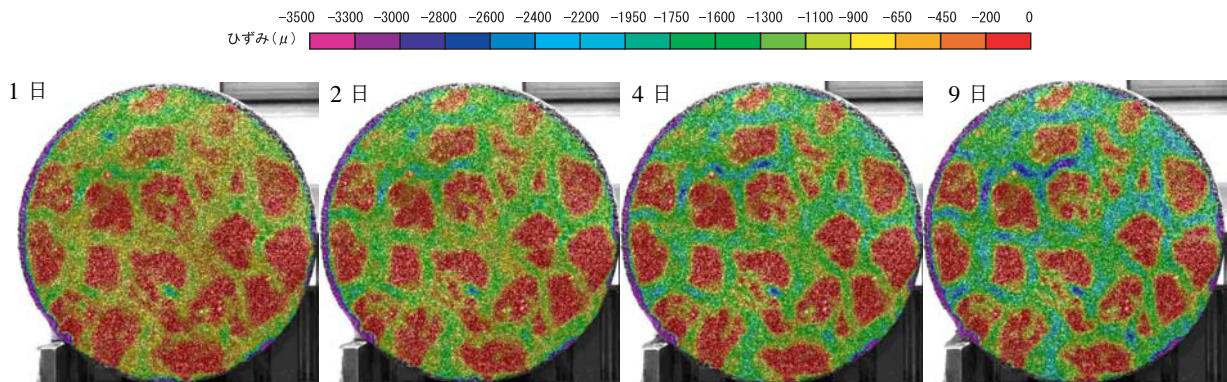


図-7 石灰石を使用したコンクリートの最小主ひずみ分布の経時変化

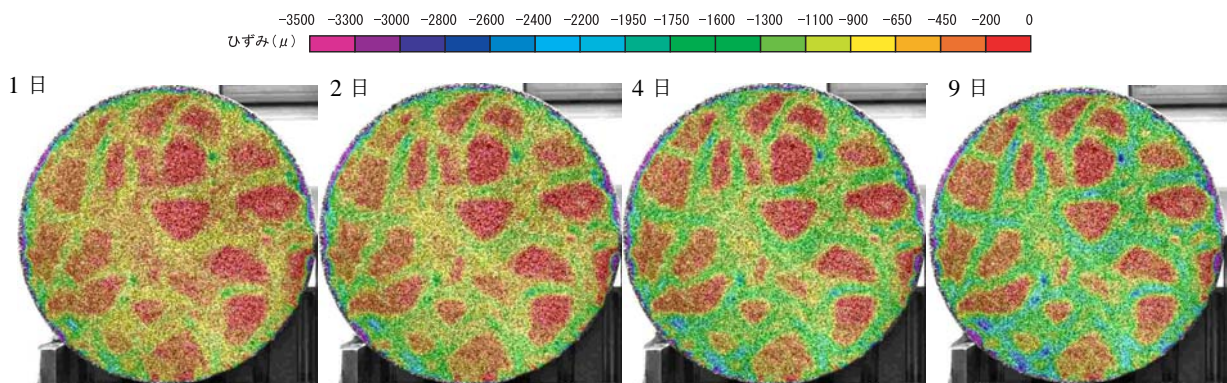


図-8 硬質砂岩を使用したコンクリートの最小主ひずみ分布の経時変化



まだら模様を作製した。スプレアの乾燥後、試験体を再び水中に戻し再度飽水状態としてから基長を撮影、その後乾燥させた。

## 2.6 蛍光エポキシ樹脂含浸による損傷評価

2.4 節と同様の試験体を各条件下で質量が平衡状態に達したのを確認後、蛍光エポキシ含浸し、微細ひび割れを観測した。

本手法の詳細については文献 5) を参考とした。蛍光エポキシ樹脂は、超低粘度エポキシ樹脂<sup>5)</sup>(粘度：130±20mPa・s)の主剤に対し質量比で4%の蛍光塗料<sup>5)</sup>(黄1：紫2)を溶解させたものを用いた。脱気にはロータリーポンプ(到達圧力性能 6.7×10<sup>-2</sup>Pa)を用い、低真空状態で試験体の空隙から放出される気泡が消泡するまで行った。時間にして、低真空状態となってから約10分であった。蛍光エポキシ樹脂硬化後は、試験体を0.2mmほど研磨して表面のエポキシ樹脂を取り除き、観察面とした。その後、紫外線探傷灯を照射し、肉眼による微細ひび割れの観察とデジタルカメラでの撮影を行った。

## 3. ひずみ測定実験結果

### 3.1 質量とレーザー変位計による平均ひずみの経時変化

図-4に脱水量の経時変化を示す。LS, SSともに乾燥から9日ではほぼ質量変化がなくなり、24時間の質量変化の割合は0.03%以下である。

図-5にレーザー変位計による乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。図に示したエラーバーは、各試験体で長さ変化を3点測定した中の最大値、最小値を示す。乾燥期間9日の時点の収縮ひずみはMortar, SS, LSの順に約1300×10<sup>-6</sup>, 850×10<sup>-6</sup>, 600×10<sup>-6</sup>であり、既往の研究が示すように<sup>6)</sup>、石灰石を使用したコンクリートは収縮ひずみが小さくなった。

### 3.2 レーザー変位計と画像相関法の平均ひずみの比較

図-6にレーザー変位計と画像相関法によって得られた乾燥収縮ひずみの比較を示す。画像相関法では、ひずみ測定領域全体のx方向, y方向のひずみ分布の平均値をとり、それらの中央値を試験体の乾燥収縮ひずみとした。Mortarは、レーザーによるひずみと、画像相関法によって得られたひずみがほぼ一致している。LS, SSは画像相関法でのひずみがレーザー変位計での測定と比べて約100×10<sup>-6</sup>ほど収縮が小さく測定されている点が数箇所みられる。この原因は、粗骨材の試験体断面垂直方向の大きさの変化が、試験体断面垂直方向のひずみに変化を生じさせ、試験体の表面のひずみを測定する画像相関法と、試験体断面方向中心のひずみを測定するレーザー変位計の値に差が生じたと考えられる。しかし、全体が均質の材料に近いと考えられるモルタルでは、ひずみを正確に測定できていることから、画像相関法でもひずみを良好な精度で測定可能だと推測される。

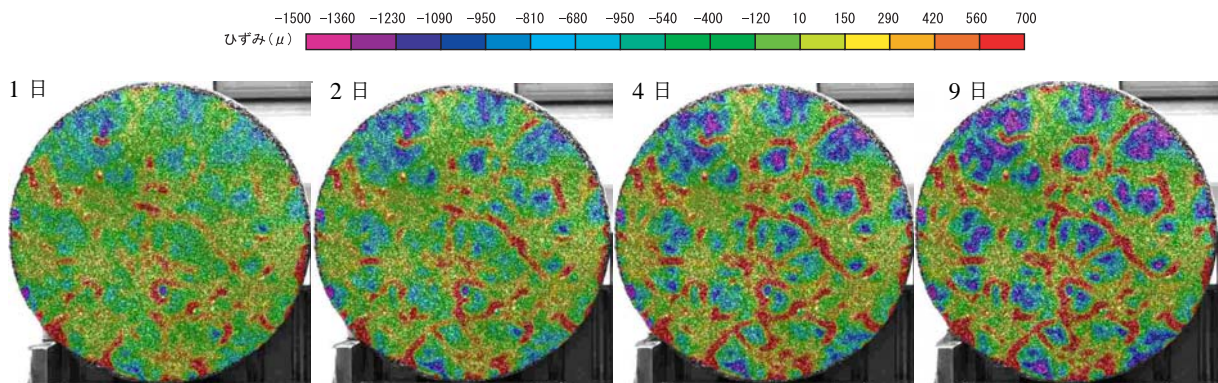


図-9 石灰石を使用したコンクリートの最大主ひずみ分布の経時変化

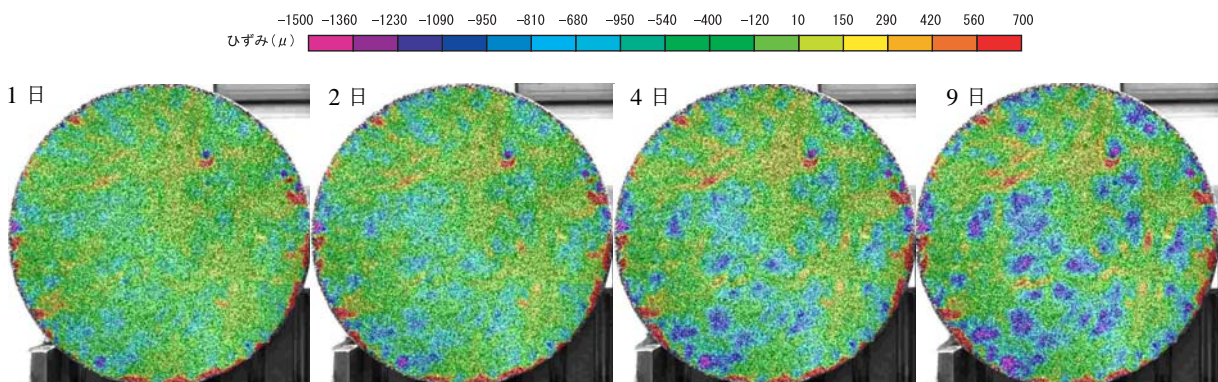


図-10 硬質砂岩を使用したコンクリートの最大主ひずみ分布の経時変化



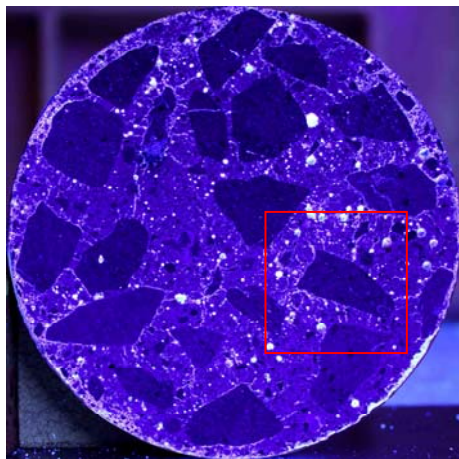
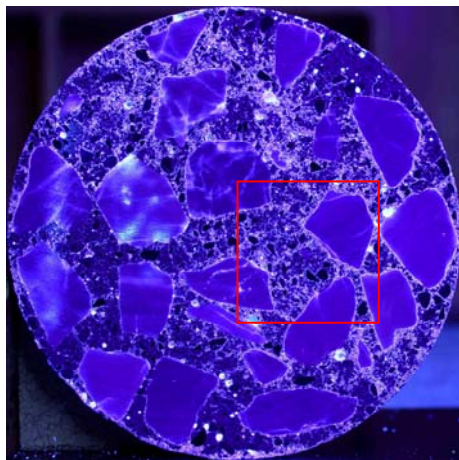


図-11 蛍光エポキシ樹脂含浸試験結果  
(上: LS, 下: SS)

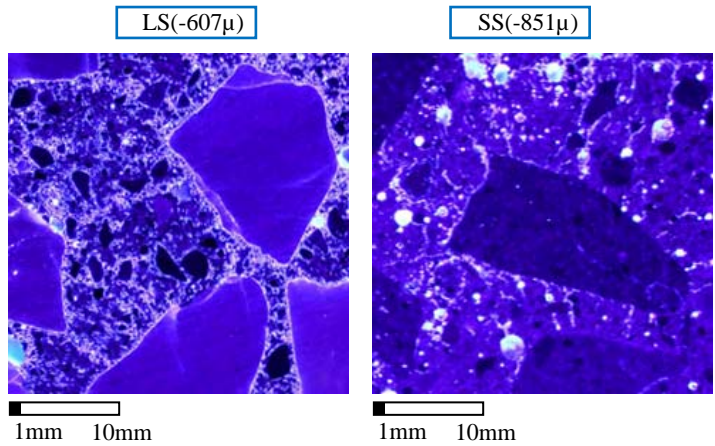


図-12 蛍光エポキシ樹脂含浸結果(拡大図)

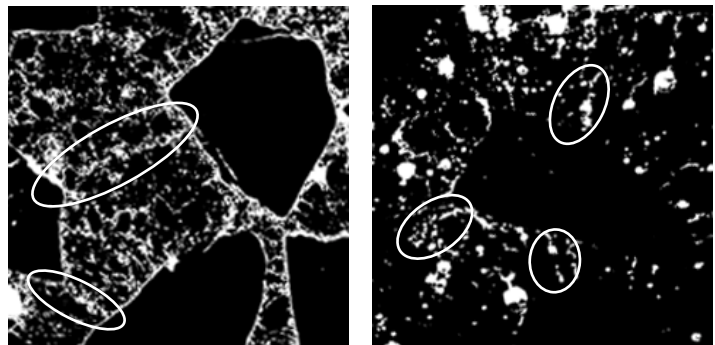


図-13 蛍光エポキシ樹脂含浸結果(二値化画像)

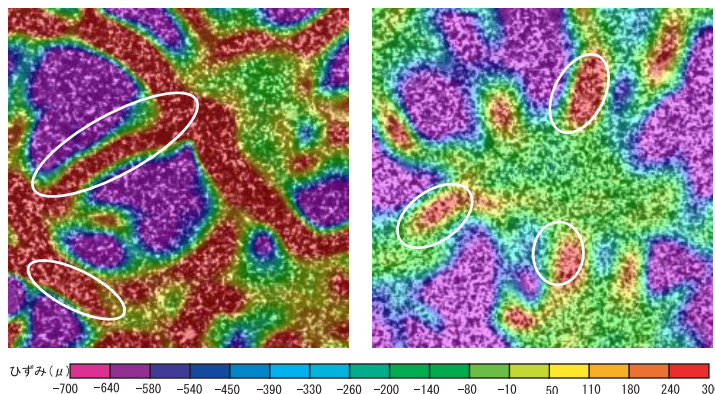


図-14 最大主ひずみ分布(拡大図)

### 3.3 画像相関法によるひずみ分布の経時変化

図-7, 8に画像相関法により得られたLS, SS表面の、乾燥期間1日, 2日, 4日, 9日の最小主ひずみ分布の結果を示す。本論文では、膨張側のひずみを正とし、収縮側のひずみを負とした。この図をみると、LS, SSともに、粗骨材とモルタル部にかなりの収縮ひずみの差があるため、粗骨材の形状がはっきりと表れている。

図-9, 10に画像相関法により測定した最大主ひずみ分布図を示す。LS, SSともにレーザー変位計でのひずみ測定では試験体全体は収縮しているにもかかわらず、画像相関法では最大主ひずみが膨張側に測定される箇所が見られる。この画像相関法で観察される膨張ひずみは、SSでは乾燥の収束する9日目まで進展があまり見られない。一方、LSでは膨張ひずみの分布は乾燥が進むにつれ試験体全体へと広がっていく様子が見られる。図-9に

赤色で示される、最も膨張側のレンジである  $560 \times 10^{-6}$  以上の膨張ひずみは試験体の骨材周辺だけでなく、骨材から離れたモルタル部にまで発達している。モルタルは均一に収縮するため、これらの画像相関法で観察される膨張ひずみは骨材の拘束が原因で引き起こされたものと推察される。

この膨張のひずみは図-9, 10が示すように、骨材種類によりその性状が変化する。今回の実験では、石灰石を用いた試験体は、硬質砂岩を用いた試験体より膨張ひずみが広範囲に生じている。既往の研究にも示されているように<sup>6)</sup>、石灰石骨材は乾燥による収縮が極めて小さく、ヤング率が高いためモルタルの収縮を拘束したときの変形が小さい。このことから、硬質砂岩より石灰石の

方がモルタルを強く拘束するので、膨張ひずみの分布に変化が生じたと考えられる。

#### 4. 蛍光エポキシ含浸試験結果

##### 4.1 蛍光エポキシ含浸による微細ひび割れの確認

図-11 に LS, SS の蛍光エポキシ含浸試験によるひび割れ確認の結果を示す。微細ひび割れは両試験体ともに観察面全域に進展している。図-12 は図-11 の四角で囲った部分を拡大したものであり、図-13 は、ひび割れの状況をわかりやすくするために、図-12 の画像を一定値で二値化したものである。試験体名とともに示した値は、9 日目の乾燥収縮ひずみである。LS, SS とともに粗骨材界面に沿ったひび割れや、粗骨材界面からモルタル部へ垂直方向生じたひび割れが確認される。LS は乾燥収縮ひずみの値は SS よりも小さいものの、LS の方が蛍光エポキシの含浸した範囲が大きいことが分かった。

##### 4.2 微細ひび割れとひずみ分布の関係

図-14 に、図-13 の画像と同じ範囲の最大主ひずみの分布(乾燥期間 9 日目)を示す。図-13, 図-14 を比較すると、図中に丸で示した、図-13 の微細ひび割れの位置と図-14 の膨張ひずみが測定されている部分がほぼ一致しており、良い対応をすることが確認された。このことは、微細ひび割れが生じたために、乾燥収縮によるひずみが解放され、膨張側へひずみが生じたことを示す。これらのことから、LS の試験体全体での乾燥収縮量が小さいのは、石灰石の強い拘束によりモルタルに微細ひび割れが多く発生し、ひずみが解放されているからであると説明できる。反対に、SS は全体の収縮は大きくなるが、骨材もペーストとともに収縮するため拘束は弱く、コンクリートに発生する微細なひび割れが少なくなると説明できる。このため、乾燥を受けたとき、どちらが良いコンクリートとして評価できるかについて今後検討していきたいと考えている。

#### 5. まとめ

本検討では、粗骨材の粒子径として 15mm-20mm の粒子のみを使用したコンクリートを 20°C RH60% 下で乾燥させ、画像相関法によるひずみ分布の経時変化を測定後、蛍光エポキシ樹脂含浸法を用いてひび割れの確認を行った。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 画像相関法とレーザー変位計によって得られたひずみと比較し、モルタルでは画像相関法により良好な対応をすることがわかった。
- 2) 画像相関法によって試験体のひずみ分布の経時変化を測定したところ、試験体全体は収縮をしている

にもかかわらず、最大主ひずみ分布には膨張ひずみが確認された。この膨張ひずみは収縮の小さい石灰石骨材を使用したコンクリートに顕著であった。

- 3) 画像相関法の最大主ひずみと蛍光エポキシ含浸試験の結果を比較して、膨張ひずみが生じる箇所と微視ひび割れが発生している箇所は相関が高いことが確認された。
- 4) 蛍光エポキシ含浸試験により石灰石骨材を使用した試験体では、硬質砂岩を使用した試験体に比べ微細ひび割れが広範囲にわたって生じていることが示された。これは石灰石骨材を使用することにより、コンクリート全体の乾燥収縮ひずみは低減されるが、骨材がモルタルを強く拘束し、コンクリート内部の広範囲にわたって微細ひび割れが蓄積されることが明らかとなった。

#### 参考文献

- 1) 後藤幸正, 藤原忠司: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響, 土木学会論文報告集, No.286, pp125-137, 1979.6
- 2) 最知正芳: 早期材齢において乾燥作用を受けたコンクリート内部の微細ひび割れの定量的評価, 日本建築学会東北支部研究報告集 構造系 vol.68, pp63-66, 2005.6
- 3) 閑田徹志, 市川禎和, 紺谷修, 武田三弘, 大塚浩司: 高温および低湿度環境下におけるコンクリート物性の変化と損傷の定量化に関する実験検討, 日本建築学会構造系論文集 No.615, p.15-22, 2007.5
- 4) 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
- 5) 手塚喜勝, 朝倉啓仁, 中村眞一, 佐々木元茂: 蛍光エポキシ樹脂含浸法によるコンクリートコアサンプルの微細ひび割れの可視化手法, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.61, No.2, 2005
- 6) 兵頭彦次, 谷村充, 藤田仁, 番地成朋: 石灰石骨材がコンクリートの収縮特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.571-576, 2009.6