

# 論文 擬似コンクリート断面の観察による乾燥収縮における骨材役割の検討

北口 将広\*1・篠野 宏\*2・丸山 一平\*3

**要旨：**本研究は、乾燥収縮によるコンクリート断面に生じる微細ひび割れ性状と使用骨材の関係を明らかにすることを目的とし、遮水塗料を用いて試験体の乾燥面を限定し、画像相関法により、断面のひずみ分布の測定を行った。また、骨材種類によるひび割れ性状の差異を確認するため、粗骨材に、石灰石、硬質砂岩、川砂利を使用したものをそれぞれ作成した。実験の結果、画像相関法により乾燥面付近と試験体中心部で収縮量に差が生じたのが確認され、最小主ひずみ分布やひび割れの状態には、骨材種類による差異がみられた。  
**キーワード：**乾燥収縮、微細ひび割れ、デジタル画像相関法、遮水塗料、ひずみ分布

## 1. はじめに

コンクリート構造物のひび割れは耐久性低下、漏水、美観などの観点から長らく問題となっている。中でも乾燥収縮によるひび割れはその代表的なものであり、古くから多くの研究がなされてきた<sup>1)</sup>。

周知のように、コンクリートの乾燥収縮の原因となるのは、コンクリート中の水分の逸散である。乾燥過程においてはコンクリート内の水分量の分布は一樣ではなく、水分の逸散に伴うコンクリートの収縮も、部材内部の位置によって異なると考えられる。解析結果として、乾燥面において乾燥収縮が大きくなることが報告されており<sup>2)</sup>、乾燥収縮ひび割れは乾燥初期に部材の乾燥面で発生し、部材内部の水分量の減少に伴い、徐々に内部へ進展していくことが推測される。このことから、コンクリート内部と乾燥面との収縮量の差を考慮することは、乾燥収縮ひび割れの発生性状を正確に把握するために重要であると考えられる。

そこで本研究では、乾燥下でのコンクリート断面内のひび割れ進展性状と粗骨材種類の関係を明らかにすることを目的とし、非外部拘束条件下での乾燥をおこない、断面内の乾燥収縮によるひずみ分布および微細ひび割れ進展の観測を試みた。実験では、遮水塗料を用いて外気に接する面を限定することで、乾燥面から水分が散逸するコンクリート断面を擬似し(図-1)、断面に生じるひずみ分布の経時変化を測定し、ひずみ分布の挙動から微細ひび割れ性状の検討を行った。乾燥収縮によって生じるひずみ分布はデジタル画像相関法<sup>3)</sup>により測定した。この手法は、コンクリートに生じるひずみ分布の経時変化を観測することが可能であり、さらに、最大主ひずみ分布において膨張ひずみを示す部分が微細ひび割れと良好な対応を示すことから微細ひび割れの観測も可能であることが確認されている<sup>4)</sup>。

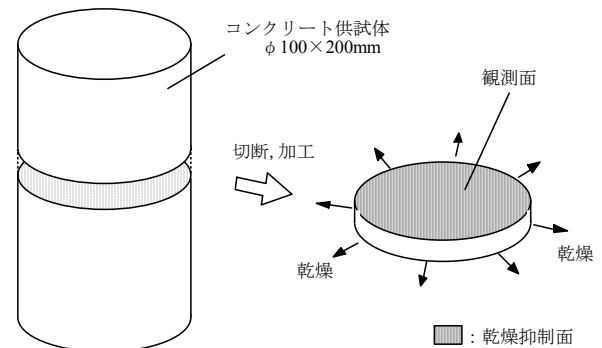


図-1 擬似断面観測の概念図

表-1 使用材料

材料	記号	物理性質など
セメント	C1	普通ポルトランドセメント/ 密度：3.16g/cm <sup>3</sup>
	C2	普通ポルトランドセメント/ 密度：3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S1	大井川水産系陸砂/ 表乾密度：2.59g/cm <sup>3</sup> , 吸水率：2.08%
	S2	砕砂/表乾密度：2.63g/cm <sup>3</sup> , 吸水率：2.85%
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%
	GR	川砂利/表乾密度：2.60g/cm <sup>3</sup> , 吸水率：0.93%, 最大粒径：30mm
AE 減水剤	AE	AE 減水剤標準 I 種
増粘剤	AS	セルロース系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 (学生会員)

\*2 名古屋大学大学院 環境学研究科 (学生会員)

\*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)	LOI (%)	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(C1)	3.16	3230	2.30	20.04	5.21	2.87	64.90	1.46	2.21	0.14	0.34	0.019
N(C2)	3.16	3100	2.65	20.00	5.48	3.03	64.74	0.90	2.06	0.18	0.40	0.016

表-3 コンクリートの調合

記号	調合								スランブ (cm)	空気量 (%)	練上がり 温度(°C)
	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )								
			W	C	S	G	AE	AS			
LS	55	51.8	177	322	940	909	3.0	1.3	10.0	3.0	21
SS	55	51.8	177	322	940	892	3.0	1.3	9.0	2.6	21
RS	55	43.0	165	300	791	1038	0.6	-	13.0	5.0	18

※LS, SSはC1.S1を使用, RSはC2.S2を使用した。

## 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物性と化学成分を表-2, コンクリートの調合およびフレッシュ試験の結果を表-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, 事前の検討によって20°C RH60%環境下において乾燥による収縮が小さかった石灰岩砕石を用いたコンクリート(LS)と, 収縮が大きかった硬質砂岩砕石を使用したコンクリート(SS), 石灰岩砕石, 硬質砂岩砕石と比べ骨材表面が滑らかな川砂利を使用したコンクリート(RS)の3種類の骨材を用いた試験体を作製した。粗骨材の物性値について表-4に示す。LS, SSで使用した粗骨材は, 粒度を5-10mm, 10-15mm, 15-20mmと調整したものを, それぞれ同質量混ぜ合わせて使用し, コンクリートの調合は, ペースト, 粗骨材, 細骨材の体積が同一となるよう行った。RSに使用した粗骨材は通常の粒度分布とした。RSは粗骨材の体積が399L/m<sup>3</sup>であり, LS, SSの粗骨材体積(338L/m<sup>3</sup>)よりも多い。また, プリーディングを低減させるため, LS, SSでは増粘剤を使用した。試験体の打設はφ100×200mmの軽量型枠に行った。材齢2日に脱型, その後試験体の養生は, 飽和水酸化カルシウム溶液中(20°C±1°C一定下)で378~398日間, 標準水中養生を行った。

### 2.2 試験体の寸法

試験体はφ100×200mmの供試体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。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た。

### 2.3 試験体の乾燥条件

乾燥条件はすべての試験体で20°C RH60%とし, 図-1に示すように, 切断した試験体を用いて, 試験体の切断

表-4 粗骨材の物性

	乾燥収縮ひずみ	体積弾性率
石灰岩砕石	-30 μ	71.1 GPa
硬質砂岩砕石	-167 μ	40.8 GPa

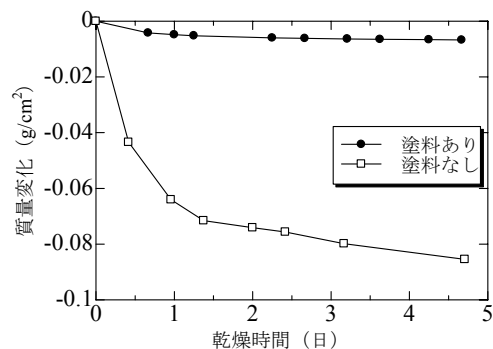


図-2 脱水量の経時変化

面に遮水塗料を塗り, 試験体の側面のみから乾燥が進むように加工した。20°C RH60%で乾燥後, 長さ変化測定とデジタル画像相関法による乾燥後のひずみ分布測定を行った。これらの試験はすべて同一の試験体で行った。

本研究では遮水塗料として二液反応硬化型エポキシ樹脂系塗料(菊水社製, キクスイプライマーEPW)を使用した。図-2は予備実験として100×100×10mm試験体を用い, 100×100mmの1面のみ0.03g/cm<sup>2</sup>の厚さで塗装し, 他面をアルミ粘着テープで覆い, 乾燥による質量変化を測定した結果である。図-2から, この遮水塗料はコンクリートの乾燥を抑制していることが確認された。

### 2.4 長さ変化測定試験

乾燥時の試験体全体の挙動を把握するため, 長さ変化を, マイクロメータヘッドMHN3-25MB(Mitsutoyo社製, 最小読み取り0.001mm, 精度±0.003mm)を用いた器具により測定した。基調となる長さのステンレス鋼を用意し,

ステンレス鋼の長さや試験体の長さの差異を測定することにより、試験体の長さを求めた。いずれの試験体も乾燥開始直前に質量と長さを測定し、その後、20°C RH60%で乾燥させ、乾燥による収縮ひずみの経時変化を測定するため、数日ごとに測定を行った。測定点は各試験体で3点とし、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

2.3節と同様の試験体を用い、乾燥による試験体観測面に生じたひずみ分布の経時変化をデジタル画像相関法によって測定した。

デジタル画像相関法<sup>3)</sup>とは、ランダムな模様をつけた試験体の変形前後のデジタル画像を比較することにより、変形後の試験体表面の変位を定量し、さらに2点間の変位量を用いてひずみ分布を算出するというものである。本検討では、乾燥収縮が内部へと進展していく過程で、断面内のひび割れがどのように進展するかを観察するために測定を行った。

デジタル画像相関法には、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。試験体までの距離は約450mmとし、照明にはLED照明を使用した。

試験体観測面には、前処理として白色の遮水塗料に黒色のスプレーを吹き付け、まだら模様を作成した。スプレーの乾燥後、試験体を再び水中に戻し飽水状態にして基調を撮影、その後乾燥を行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 乾燥収縮ひずみ

図-3に表乾質量に対する脱水量の割合の経時変化を示す。乾燥開始から30日経過した後においても、すべての試験体で質量変化が継続していた。図-4に各試験体の乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。乾燥期間30日の収縮ひずみはLS, SS, RSの順に-446 $\mu$ 、-493 $\mu$ 、-403 $\mu$ であった。RSは脱水量の割合、乾燥収縮ひずみともにLS, SSより小さい値となっているが、これは他の試験体よりペースト相が少ないためと考えられる。

### 3.2 画像相関法

図-5は試験体切断面の最小主ひずみ分布の経時変化を示したものであり、下のグラフは二次元ひずみ分布から数値を抽出し、縦軸を最小主ひずみ、横軸を中心からの距離としてプロットしたものである。グラフに用いる最小主ひずみの数値は、5方向の直径上の分布を平均したものである。この時、5方向の直径はそれぞれが等間隔となるよう選択した。

図-5の最小主ひずみ分布の経時変化より、時間の経過につれ、試験体乾燥面から、徐々に乾燥収縮が進行し

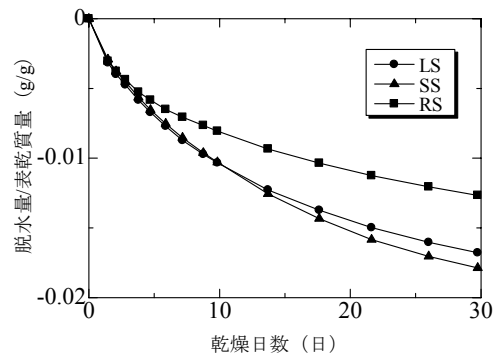


図-3 脱水量／表乾質量の経時変化

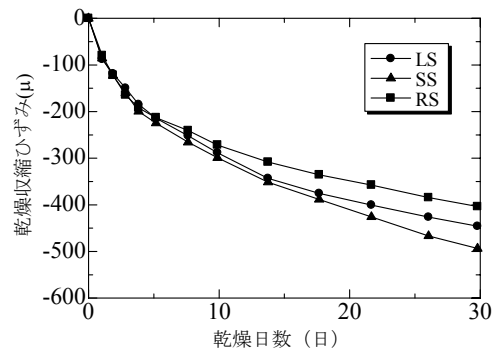


図-4 乾燥収縮ひずみの経時変化

ており、乾燥収縮が試験体中心部へと進行する速度は、LS, SS, RSの順に速いことが確認された。また、図-5のグラフから、乾燥面に近い箇所ほど、収縮が大きい傾向がみられた。

図-6は最大主ひずみ分布の経時変化を示したものである。著者らの研究により<sup>4)</sup>、画像相関法によって測定された膨張ひずみの位置と蛍光エポキシ樹脂含浸法によって確認された微細ひび割れの位置が良好な対応を示すことが確認されており、このことから、本論文では、膨張を示すひずみの箇所には微細ひび割れが生じたものと考え、最大主ひずみの図中の225 $\mu$ 以上(黄緑色～赤色)膨張している部分に微細ひび割れが生じたと評価した。

図-6から、骨材種類によって、ひび割れ性状に違いがあることが確認できる。まず、ひび割れ量に着目すると、LSは全面に多数発生し、SSは比較的少なく、RSは表面付近にのみ多数発生した。また、ひび割れの進展性状を見ると、LSは中心部までひびが進展しているが、SS, RSではひび割れが中心部まで進展しなかった。

図-7に画像相関法により測定した最小主ひずみ分布の経時変化を示す。これは、図-5で示した直径5方向の平均のひずみ分布に、骨材粒径の平均値である12.5mm幅の区間を設け、区間ごとに平均値を取り、この平均値を使用することで骨材による影響が小さい分布図としたものである。なお、乾燥面付近では骨材量が少なく、骨材の影響が小さくなることから、平均化区間幅を半分の6.25mmとした。

図-7から、すべての試験体で乾燥面付近と中心部と

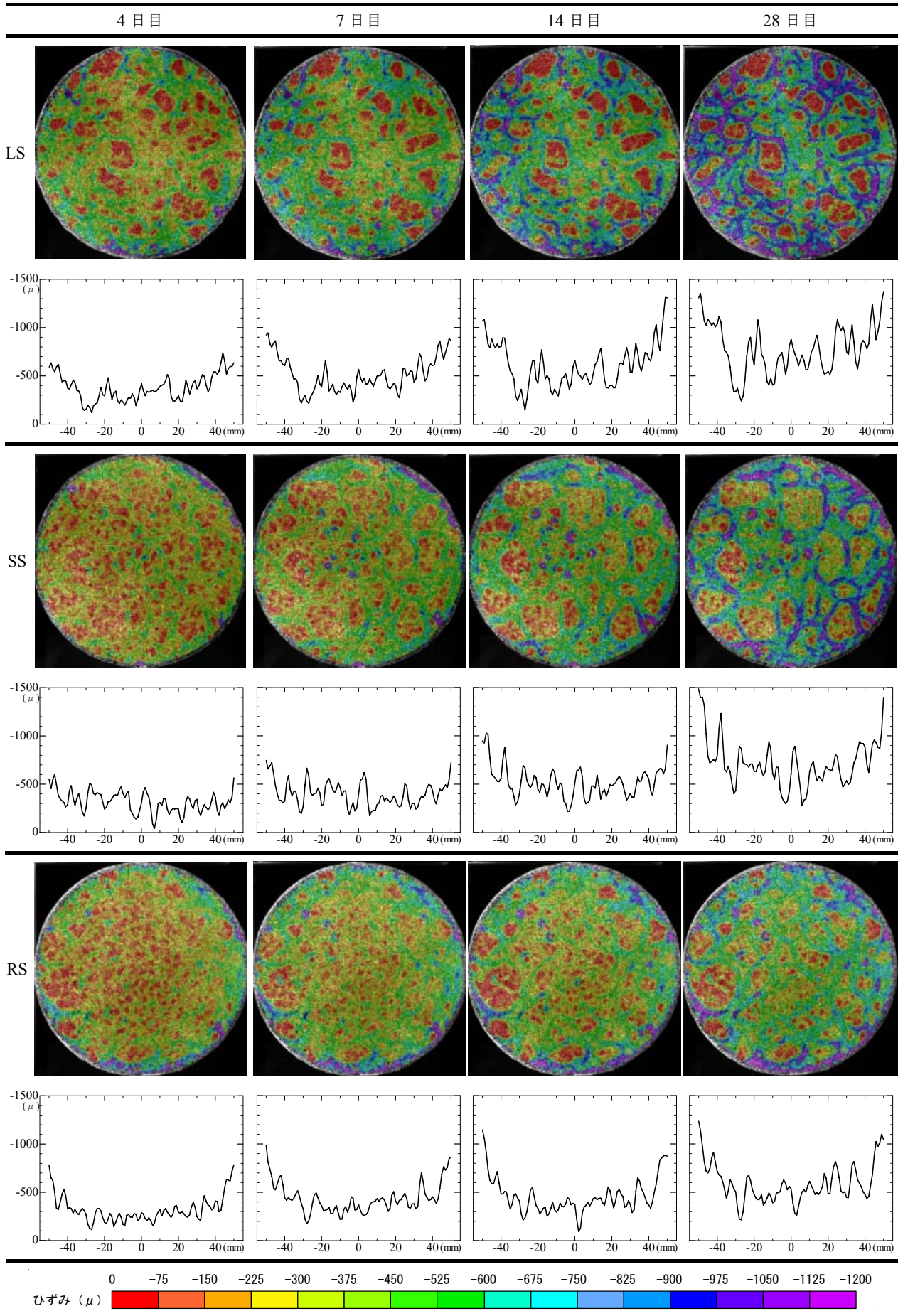


図-5 各試験体の最小主ひずみ分布経時変化 (20°C RH60%乾燥)



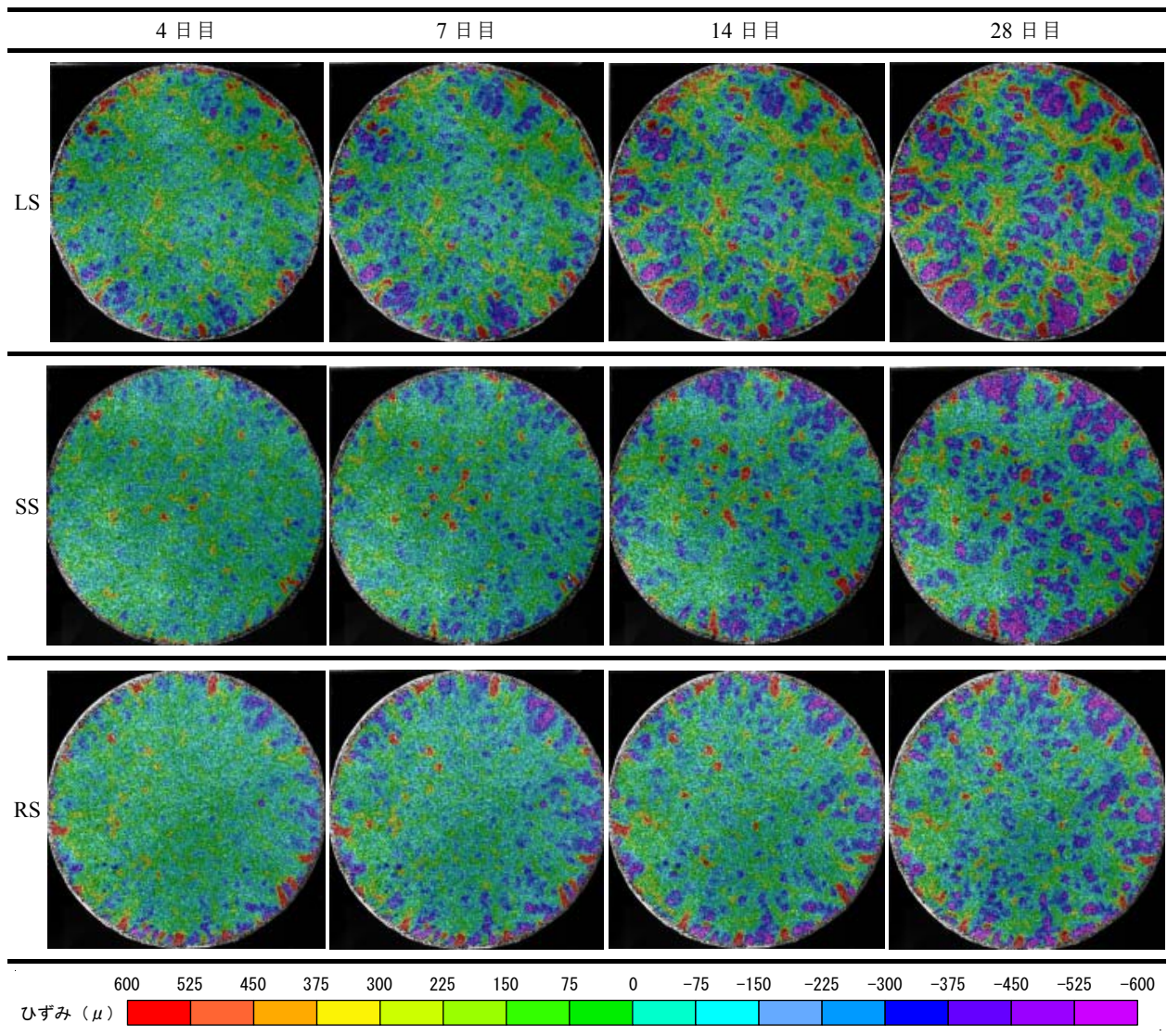


図-6 各試験体の最大主ひずみ分布経時変化 (20°C RH60%乾燥)

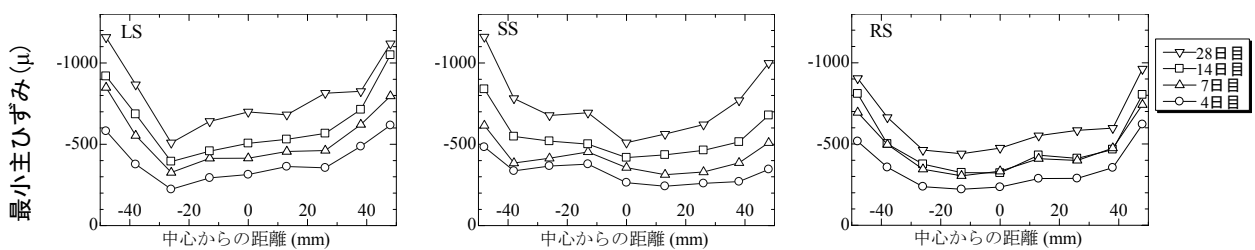


図-7 最小主ひずみ分布の経時変化

で収縮量に差(以下、収縮差)が生じていることが確認でき、ひずみ分布の経時変化は SS では収縮差が経時とともに増加するのに対し、LS, RS では乾燥初期から大きな収縮差が生じるという骨材種類による差異がみられた。

図-7 より、SS では乾燥初期では収縮差が小さく、時間の経過につれ収縮差が増加しているが、図-3 では表乾質量に対する脱水量の割合が一番大きかった。これは、SS では硬質砂岩粗骨材自体が脱水したことで、ひび割れによる急激な乾燥が起こらなかったためと考えられる。

一方 LS, RS では乾燥 4 日目に大きな収縮差が発生しており、その後の収縮差の変化は小さく、全体的に収縮した。これはひび割れが中心部の乾燥を促進したためと考えられる。

#### 4. ひび割れ性状についての考察

ひび割れの発生量と進展性状について、骨材種類と内外コンクリート収縮差の観点から考察する。

LS ではひび割れの発生量が多く、中心部への進展が大

きかった。これは収縮の小さく、体積弾性率の大きい石灰石粗骨材を使用したことで、モルタルが強い拘束を受けるため、ひび割れが生じやすいからだと考えられる。乾燥面付近で生じたひび割れは、中心部付近の乾燥収縮を促し、中心部付近で収縮したモルタルが骨材の拘束を受けひび割れが生じ、この現象が繰り返されひび割れが進展していったと考えられる。また図-6より確認できる乾燥面のひび割れの形状と図-7から、LSで乾燥初期に発生したひび割れは、内外コンクリートの収縮差による内部拘束と骨材種類の影響によるものと考えられる。

SSでひび割れが少なく、中心部への進展もほとんどなかった。これは、硬質砂岩骨材自体が乾燥により大きく収縮し、体積弾性率も小さいため、骨材による拘束が小さかったことが原因と考えられる。またSSの7日目にできたひび割れは、内外コンクリートの収縮差による内部拘束ひび割れに起因していると考えられる。

RSでは乾燥面でひび割れが複数発生したのは、川砂利粗骨材の表面が比較的滑らかであることが影響したと考えられる。川上らの研究<sup>9)</sup>では、骨材表面が滑らかであると、モルタルと骨材の接着力が低下するという可能性について報告している。乾燥表面付近のモルタル部の乾燥収縮によって生じる、内外ひずみ差と骨材とのひずみ差に起因する引張応力は、骨材との接着が弱い場合、ひっかかりがないため比較的均一に分布し、ひび割れが分散する。これに加えて、RSでは骨材量が多いことからモルタル内を移動する水の移動距離が長くなり、中心部の収縮が遅延し、中心部と表面付近の収縮量の差が大きくなり生じたため、内部拘束の影響が増大した。使用粗骨材の表面が滑らかであり、かつ内部拘束の影響が大きかったことから、RSでは乾燥面に多数のひび割れが発生したと考えられる。また図-6より、RSではひび割れが中心部に進展しなかった。これは、RSは他のシリーズと比べ骨材量が多く、モルタルの体積が小さいため、図-3に示されるように逸散水量が少なくなり、その結果、中心部の収縮が小さくなったためと推測される。表-5に本論で得られた結果をまとめて示す。

## 5. まとめ

本検討で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 遮水塗料を用い、画像相関法で測定することで、乾燥面付近と試験体中心部とで収縮量に差が生じていることが確認できた。
- 2) 画像相関法によって試験体観測面のひずみ分布の経時変化を測定したところ、LSではひび割れが大きく進展し、乾燥収縮が内部へと進行する速度も速かった。反対に、SSではひび割れ進展がほとんどみられず、乾燥収縮の進行も遅かった。

表-5 骨材種類による差異のまとめ

LS ひび割れが乾燥面で多数発生し、ひびが深く入る。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・骨材による拘束力が大きい。</li> <li>・ひび割れによる乾燥促進。</li> <li>・内部拘束の影響が大きい。</li> </ul>
SS ひび割れがあまり発生しない。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・骨材による拘束力が小さい。</li> <li>・ひび割れにくいので、乾燥収縮の進行が遅い。</li> <li>・内部拘束の影響が小さい。</li> </ul>
RS ひび割れが乾燥面で多数発生するが、ひびが深く入らない。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・骨材表面が滑らかなので、乾燥面にひびが入りやすい。</li> <li>・骨材量が多いので内部の乾燥が遅い。</li> </ul>

- 3) RSでは使用粗骨材の表面が滑らかであり、かつ内部拘束の影響が大きかったことから、表面付近に多数のひび割れが発生したと考えられる。
- 4) 骨材量が多いと、水分の移動経路が長くなることから中心部の乾燥が抑制されるために、乾燥が遅延することが推察された。
- 5) 乾燥面と中心部とで収縮差が生じると、内部拘束が発生し、ひび割れが誘発される可能性がある。内部拘束によるひび割れ発生性状として、収縮量の差が大きいほどひび割れが多く発生すると考えられる。

## 謝辞

本研究の一部は、平成24年度高経年化技術評価高強度事業の一貫として実施した。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会収縮ひび割れ研究小委員会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ「メカニズムと対策技術の現状」、日本建築学会、2003.5
- 2) 笹橋忍、伊藤祐樹、堀部謙、森本博昭：コンクリートの乾燥収縮によるひずみと応力の解析、コンクリート工学年次論報告、Vol.24, No.1, pp.441-446, 2002
- 3) T.C. Chu, W.F.Ranson, M.A.Sutton, W.H.Peters : Application of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics, Experimental Mechanics, Vol.25, No.3, pp.232-244, 1985
- 4) 篠野宏、堀口直也、丸山一平：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、コンクリート工学年次論文集、Vol.34, No.1, pp.454-459, 2012
- 5) 川上英男：粗骨材とコンクリート強度に関する基礎的研究（その1）、日本建築学会論文報告集、第166号、19-27項、1969