

論文 乾燥により生じる微細ひび割れが割裂引張強度に及ぼす影響

伊藤 充希^{*1}・篠野 宏^{*2}・丸山 一平^{*3}

要旨：本研究では、乾燥収縮によってコンクリートに生じた微細ひび割れが、割裂引張強度や破壊挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。粗骨材に石灰岩碎石を用い、粒径を3種類に調整したものと、それらを混合させたコンクリートを作製し、5種類の湿度環境(飽水, RH95%, RH80%, RH60%, RH11%)で乾燥させた。画像相関法を用いて試験体断面のひずみ分布や損傷度を測定し、その後割裂引張試験を行って強度や破壊性状の検討を行った。実験の結果、損傷度の増加に伴って強度が低下することと、乾燥によって生じた微細ひび割れは、割裂引張試験時における応力の伝搬経路に影響を及ぼすことが確認された。

キーワード：割裂引張強度, 微細ひび割れ, デジタル画像相関法, 損傷, 乾燥収縮, 相対湿度

1. はじめに

コンクリート構造物の長期供用中に生じる問題の一つとして、ひび割れの問題がある。コンクリート中の水分が大気中に散逸することで乾燥収縮が生じ、その際、一般的に骨材の収縮量はセメントペーストの収縮量よりも小さいため、セメントペーストの収縮が骨材に拘束されてセメントペースト部分に微細ひび割れが生じる¹⁾。この微細ひび割れによってコンクリートの圧縮強度や引張強度、ヤング率が変化するという報告がある²⁾一方で、強度のばらつきを超えるような影響は与えないという報告もある¹⁾。実際にコンクリートの破壊挙動にどのような影響を有しているかに関しては研究がなされておらず、微細ひび割れが強度に及ぼす影響に関する評価は未解明である。

一方、この微細ひび割れは目視で確認することは難しく、実在する大規模構造物においては、全体の微細ひび割れを把握することはできない。

これまで、蛍光エポキシ樹脂含浸法³⁾やX線造影撮影法²⁾、デジタル画像相関法⁴⁾といった光学的に微細ひび割れを評価する方法の研究がなされてきた。その中でもデジタル画像相関法は、試験体に施す処理が比較的簡易であり、蛍光エポキシ含浸法やX線造影撮影法では不可能である、微細ひび割れの継時変化を測定することが可能である。また、微細ひび割れの発生位置や程度を評価するだけでなく、微小部分の変位方向やひずみ量、さらには全体のひずみ分布までも得ることが可能であると報告されており⁵⁾、実在する構造物の変形挙動を追い、メンテナンスに活かすことで、コンクリート構造物の長寿命化に寄与すると期待されている。

本研究では、粗骨材粒径が異なると乾燥収縮ひずみに差が生じるという実験的事実により、内部の微細ひび割

れの発生状況の違いに起因するものと推察し、粗骨材として石灰岩碎石を用い粒径別に4種類のコンクリート試験体を作製し、5種類の湿度環境で乾燥させ、コンクリート断面に生じる微細ひび割れや損傷の程度をデジタル画像相関法によって評価した上で、割裂引張試験の結果とを比較・考察することにより、破壊挙動に及ぼす微細ひび割れや損傷の影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び調合

本実験で使用した材料を表-1、使用したセメントの物性と化学成分を表-2、使用した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。

2.2 試験体の作製

粗骨材には石灰岩碎石を用いて、粒径を5~10mm, 10~15mm, 15~20mmに調整したものをそれぞれS, M, L, この3種類を重量で等分に混ぜたものMixとして、

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, 密度: 3.16g/cm ³ , ブレーン値: 3230cm ² /g
細骨材	S	大井川水産系陸砂, 表乾密度: 2.59g/cm ³ , 吸水率: 2.08%
粗骨材	G	秩父産石灰岩碎石, 表乾密度: 2.64 g/cm ³ , 吸水率: 0.36%
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都市環境学専攻 (学生会員)

*3 名古屋大学 大学院環境学研究科都市環境学専攻 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 ³)	ブレン 比表面積(cm ² /g)	LOI (%)	化学成分(mass%)								
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl
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

	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 ³)									
			W	C	S	G	AE	AS				
LS-S	55	51.8	177	322	940	909	3	1.3	6.5	2.9	21	198~199
LS-M									8.5	2.9	21	198~203
LS-L									11.5	2.8	21	200~203
LS-MIX									10.0	3.0	21	199~204

骨材粒径の異なる 4 種類コンクリートをφ100×200mmの軽量型枠に打設し、その後、材齢1日または2日に脱型を行い、試験開始まで飽和水酸化カルシウム水溶液中で20°C±1°Cの一定条件の下で標準水中養生を行った。試験体はφ100×200mmのコンクリート試験体をダイヤモンドカッターで厚さ9mmに切断し、φ100×9mmとしたものを用いた。通常の乾燥収縮試験では、100×100×400mmの試験体が使用されるが、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。また、乾燥条件は飽水、RH95%、RH80%、RH60%、RH11%の計5種類であり、骨材粒径と合わせて計20種類のパラメータとし、1種類につき3体の試験体を用意し、試験体はすべて20°C±1°Cで乾燥を行った。

試験体の表記は、粒径が5~10mmであり、乾燥条件が相対湿度11%の試験体であれば、LS-S RH11%と、飽水の場合はLS-S 飽水と表記する。

2.3 実験の流れ



図-1 実験の流れ

実験の流れを図-1に示す。試験体作製後、試験開始まで標準水中養生を行った。飽水状態で、長さ測定と試験体の撮影を行い、乾燥収縮ひずみの基長と、デジタル画像相関法の基長となる画像を得た後、所定の湿度で乾燥させた。24時間の試験体の質量変化が0.03%以下となった時点で平衡状態に達したと判断し、乾燥終了とした。乾燥終了後、再び長さ測定と試験体の撮影を行い、乾燥収縮ひずみと試験体表面のひずみ分布を得た。最後に割裂引張試験を行い、割裂引張強度の測定や破壊時のひび割れの確認を行った。また、飽水、RH80%、RH60%、RH11%の試験体については、割裂引張試験中に試験体の撮影を行い、画像相関法により載荷中のひずみ分布を取得した。

2.4 乾燥収縮ひずみの測定

乾燥前後の試験体の長さ変化を、レーザー変位計(精度:1/2000mm)を用いて測定した。長さが既知のステンレス鋼を用意し、試験体との長さの差によって試験体の長さを求め、乾燥収縮ひずみを算出した。なお、ステンレス鋼は温度によって長さが変化するため、測定中の室内温度も合わせて測定し、線膨張係数を用いて補正を行った。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。また、1試験体につき3か所の直径を測定し、その平均値をもってその試験体の乾燥収縮ひずみとした。

2.5 画像相関法によるひずみ分布の評価

2.4節で用いた試験体を用いて画像相関法によりひずみ分布の測定を行った。

画像相関法は、変形前後の画像の輝度分布から、試験体の微小部分の変位とその方向を求める方法である。さらに、2点間の変位から試験体のひずみ分布を測定できる。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 Nikon 35mm f/2D(Nikon社製)を使用した。

コンクリートは乾燥により表面の輝度が変化することから、画像相関法における収束計算が安定しなくなる。これを防ぐため、試験体観測面に白色のアクリル顔料をスプレーし、その上から黒色のアクリル顔料スプレーを吹き付けてまだら模様を作製した。スプレー吹き付け後、塗布面のみを45分から1時間程度乾燥させ、再び試験体を飽和水酸化カルシウム水溶液中で十分吸水させて飽水状態とし、基長となる画像を撮影した。その後所定の湿度で乾燥させ、乾燥終了後に再び撮影してコンクリート断面内のひずみ分布を得た。また、筆者らの研究により、蛍光エポキシ樹脂含浸法⁵⁾によって確認された微細ひび割れの位置と画像相関法によって得られる最大主ひずみ分布中の膨張ひずみ位置が良好な対応を示すことが確認されている⁴⁾。このことから、膨張ひずみにより、試験体に生じた微細ひび割れの評価が可能であると考え、微細ひび割れが生じた程度を表す値として、損傷度を以下の式(1)、(2)のように定義した。

$$D_e = \sum_i^n \delta_{\varepsilon_i} \varepsilon_i \Delta A_i / \sum_i^n \Delta A_i \quad (1)$$

$$\delta_{\varepsilon_i} = \begin{cases} 1(\varepsilon_i > 0) \\ 0(\varepsilon_i \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、

D_e : 損傷度(μ)

ε_i : 最大主ひずみ分布におけるひずみの値 (μ)

ΔA_i : 画像相関法のパラメータにより決定する面積 (mm^2)

n : コンクリート断面中のひずみ測定点の数(-)

とする。 ΔA_i は、画像相関法の測定領域のパラメータである step 数(pixel)によって決定し、その面積は step 数×step 数となる。本検討では、乾燥収縮ひずみ分布の測定においては 1pixel=約 0.041mm としたため、 ΔA_i =約 $1.68 \times 10^{-3} \text{mm}^2$ である。また、画像相関法での最大主ひずみ分布における膨張ひずみが乾燥収縮による微細ひび割れを示すことから、損傷度は、値が大きいほど乾燥収縮による微細ひび割れの量または幅が大きいことを意味する。

2.6 割裂引張試験

上記 2.4、2.5 節の試験後、同じ試験体で荷重装置を用いて割裂引張試験を行った。

荷重時のひずみ分布を得るために、2.5 節で用いた CCD カメラとレンズを用いて試験体の撮影を行った。荷重前に撮影した画像を基長として、荷重中に撮影した画像を用いて画像相関法を行い、ひずみ分布を得て、乾燥収縮によって生じた微細ひび割れとの関係性を検討した。また、破壊時のひび割れについても撮影し、破壊時のひび割れの位置と荷重中のひずみ分布や乾燥収縮による微細ひび割れ位置、粗骨材分布の影響についても検討した。

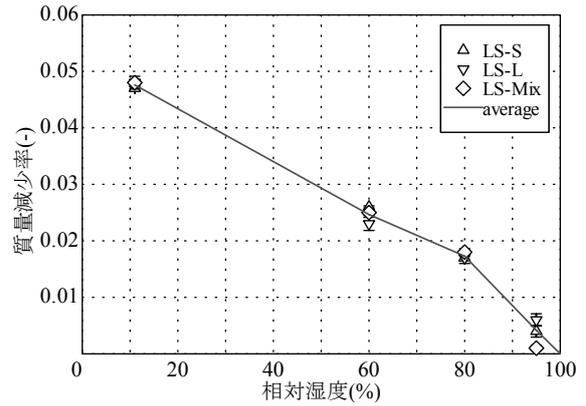


図-2 相対湿度と質量減少率の関係

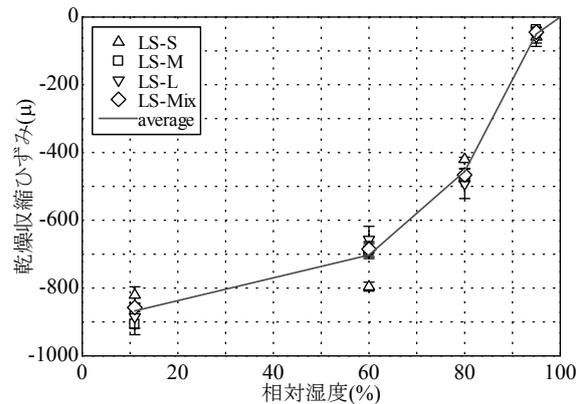


図-3 相対湿度と乾燥収縮ひずみの関係

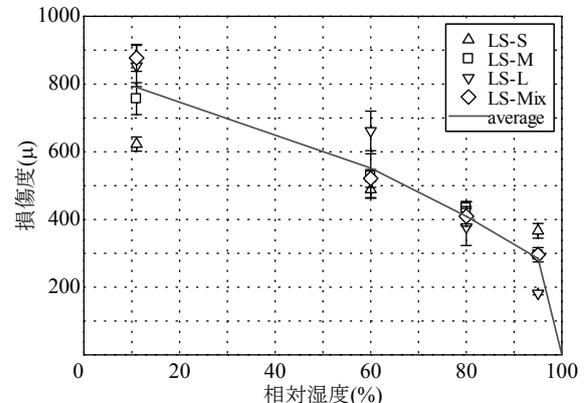


図-4 相対湿度と損傷度の関係

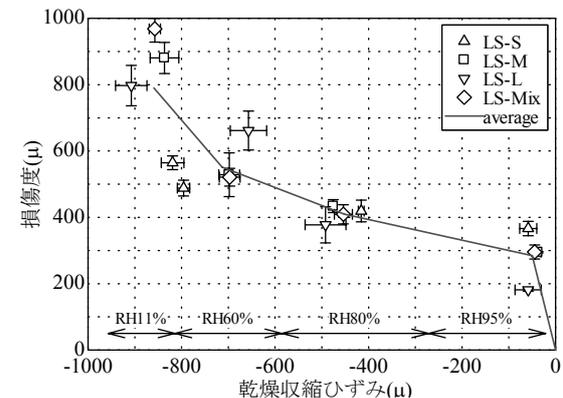


図-5 乾燥収縮ひずみと損傷度の関係

3. 実験結果と考察

3.1 乾燥による物性変化

図-2 から図-4 に、相対湿度と質量減少率、つまり乾燥に伴う水分量の変化や乾燥収縮ひずみ、損傷度の関係を表した。質量減少率とは、乾燥による水分の減少量を表乾質量で除した値である。図-2 を見ると、乾燥に伴う質量減少率に、骨材粒径の違いによる差は見られない。図-3 と図-4 を比較すると、乾燥収縮ひずみにおいては飽水状態から RH11%までひずみの増加する割合が減少していったが、損傷度においては、そのような傾向は見られず、RH95%までは急激に損傷度が増加し、その後の上昇率はほぼ一定となっており、図-5 に示した乾燥収縮ひずみと損傷度の関係や、図-6 に示した質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係、図-7 に示した質量減少率と損傷度の関係からも、RH95%においては、乾燥収縮ひずみの変化は小さく、損傷度の変化は大きいことが示された。

3.2 強度の検討

図-8 では、乾燥時の相対湿度と割裂引張強度の関係を、図-9 から図-12 では、相対湿度と強度比、損傷度と強度比、質量減少率と強度比、乾燥収縮ひずみと強度比の関係をそれぞれ示した。ここで強度比とは、それぞれの試験体の割裂引張強度を、その試験体と同じ骨材粒径における飽水状態の試験体の割裂引張強度の平均値で除した値である。図-8 より、LS-L の試験体の割裂引張強度が全体の平均よりも低い値をとり、LS-Mix の試験体が高い値を取る傾向にあることがわかった。図-13 は、RH60%の試験体の、乾燥収縮によって試験体断面に生じる最大主ひずみ分布を表す。LS-L の 875 μ 以上の膨張ひずみを表している領域の一つ一つが、他の骨材粒径の試験体と比べて大きく、これは微細ひび割れの開口量が大いことを示す。これは、LS-L の試験体は骨材間距離が他の粒径の試験体よりも長いので、一か所のひび割れに寄与するペースト部分が大きくなり、ひび割れの開口量が大きくなったと推測される。割裂引張試験時に、このひび割れの開口量の大きい領域に変形が集中し、他の骨材粒径の試験体よりも割裂引張強度が低下したとみられる。

また、図-8, 9, 10, 11, 12 の強度に関するグラフより、どの骨材粒径でも、飽水から RH80%まで強度は増加していき、RH80%で最大となり、RH60%, RH11%と低下してゆくことが確認された。セメントペースト自体の強度は表面エネルギー⁶⁾の増大によって、常に増加する傾向があり、コンクリート強度の増進要因として捉えられる。一方で、微細ひび割れの発生はコンクリート強度の低下要因である。損傷度 400 μ 、つまり RH95%から

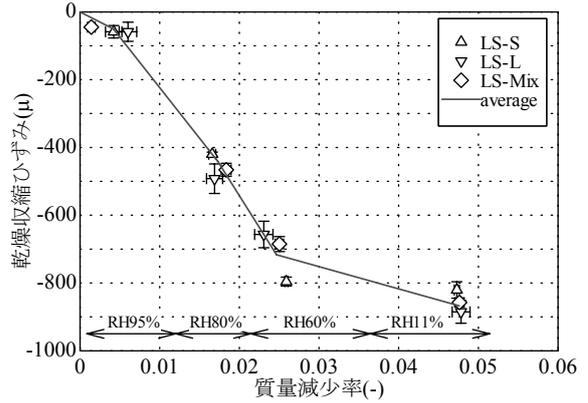


図-6 質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係

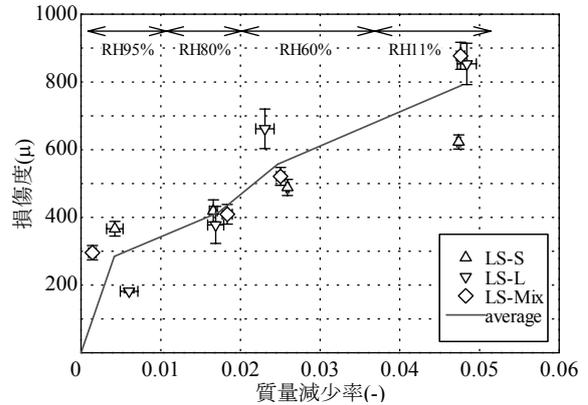


図-7 質量減少率と損傷度の関係

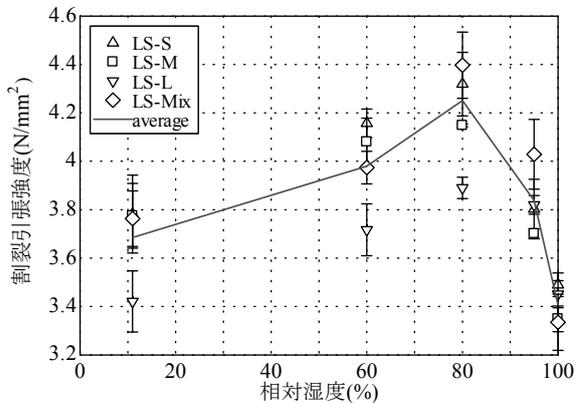


図-8 相対湿度と割裂引張強度の関係

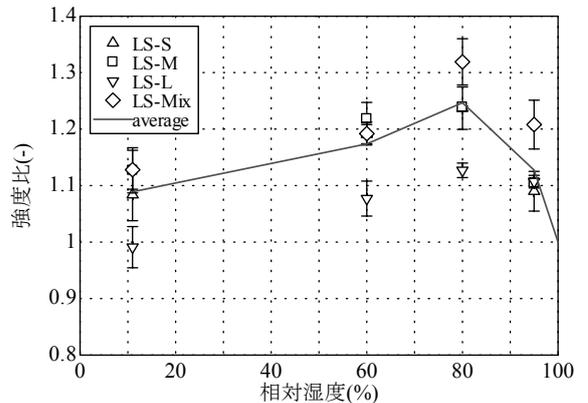


図-9 相対湿度と強度比の関係

RH80%までの範囲では、ひび割れ幅は小さく、軟化域における応力伝達も大きいと、相対的に表面エネルギーによる強度増加要因がひび割れ発生による強度低下要因を上回る。しかし、RH80%からRH11%では、ひび割れ幅が拡大し、損傷度が400 μ 以上になった場合には、表面エネルギーによる強度増加要因よりも、損傷による強度低下要因が卓越し、結果として強度低下挙動が生じるものと考えられた。

3.3 破壊性状の検討

乾燥収縮によって生じた微細ひび割れが破壊時に及ぼす影響をデジタル画像相関法によって得られたひずみ分布を用いて検討した。図-14はLS-S, M, L, MixのそれぞれのRH11%の試験体のスプレー吹き付け前の断面に、画像相関法で得られた乾燥によって生じた1000 μ 以上の膨張ひずみを生じた領域と、割裂引張試験において破壊直前(それぞれの最大荷重の、S:98.2%, M:98.2%, L:98%, Mix:98.1%の荷重時)に875 μ 以上の膨張ひずみが生じた領域、破壊時のひび割れを重ね合わせた図である。この図を見ると、載荷時のひずみと破壊時のひび割れは、乾燥収縮によって生じた微細ひび割れを連結するように生じ、乾燥収縮によって生じた微細ひび割れは応力の伝搬経路に影響を及ぼすことが確認された。その傾向は特に、単粒径で粒径が大きい試験体に顕著であった。

4. まとめ

本研究で得た知見は以下の通りである。

- 1) 飽水からRH80%まで割裂引張強度が上昇したのは、表面エネルギーの増大が影響しており、RH80%からRH11%まで低下したのは、微細ひび割れの増加が影響していると推測される。
- 2) 割裂引張試験時には、載荷時のひずみと破壊時のひび割れは、乾燥収縮によって生じた微細ひび割れと重なる点を連結するように生じた。その傾向は特に、単粒径で粒径が大きい場合に顕著であった。

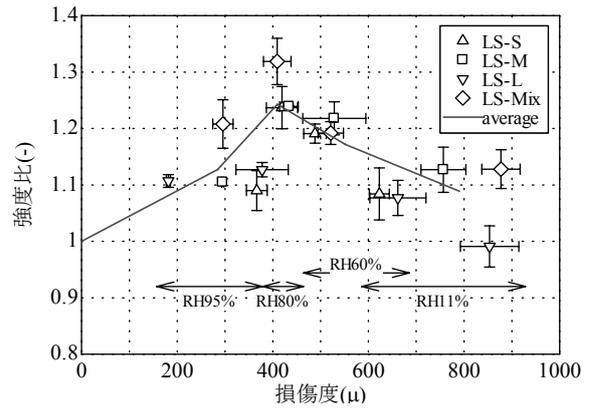


図-10 損傷度と強度比の関係

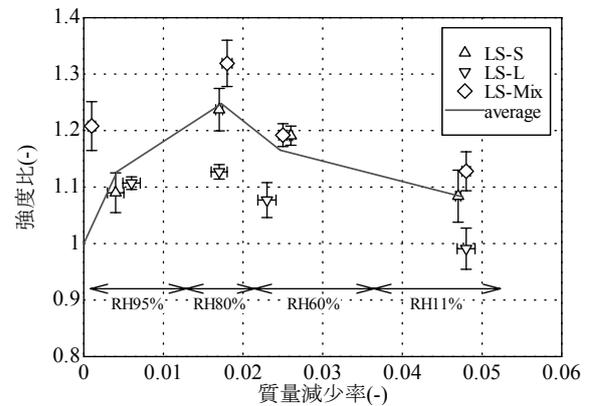


図-11 質量減少率と強度比の関係

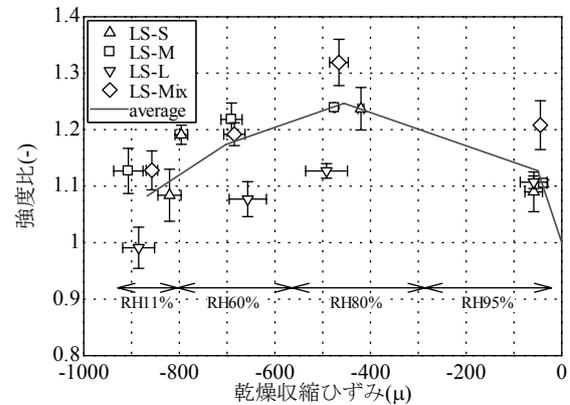


図-12 乾燥収縮ひずみと強度比の関係

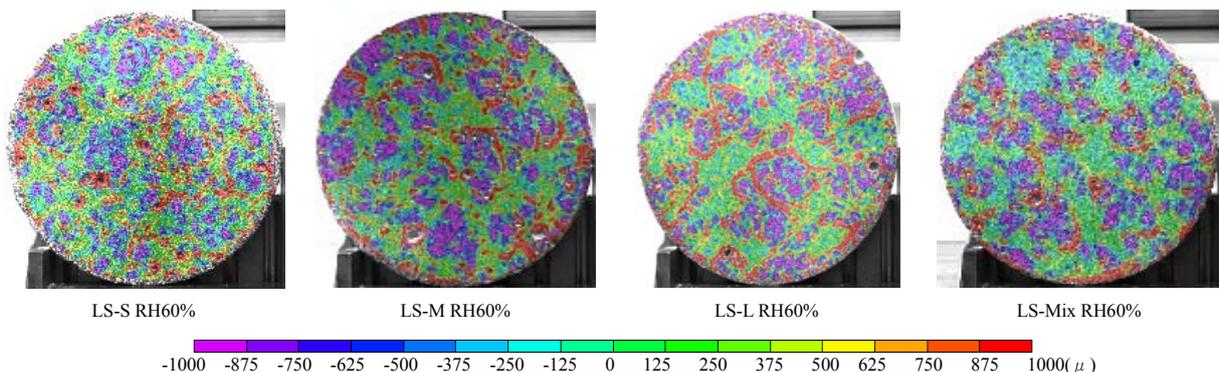
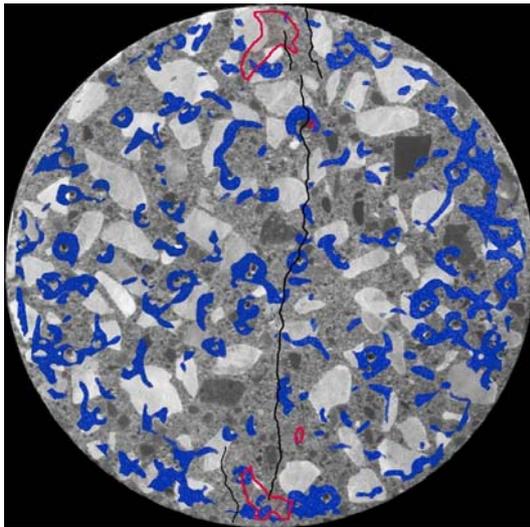
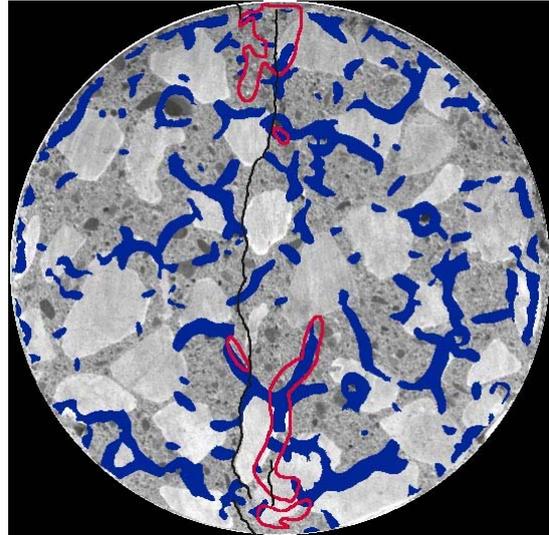


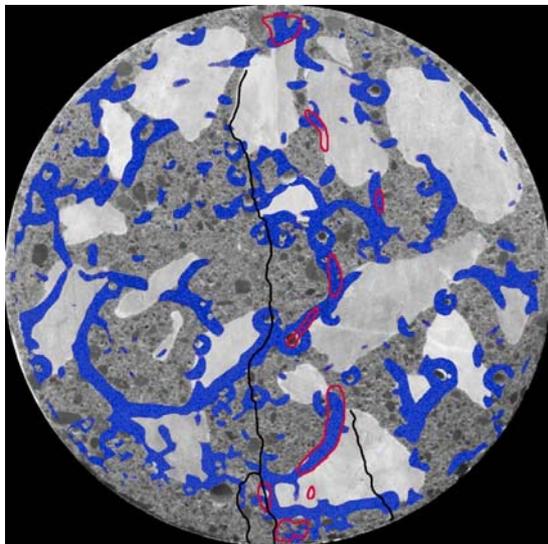
図-13 RH60%の試験体の最大主ひずみ分布



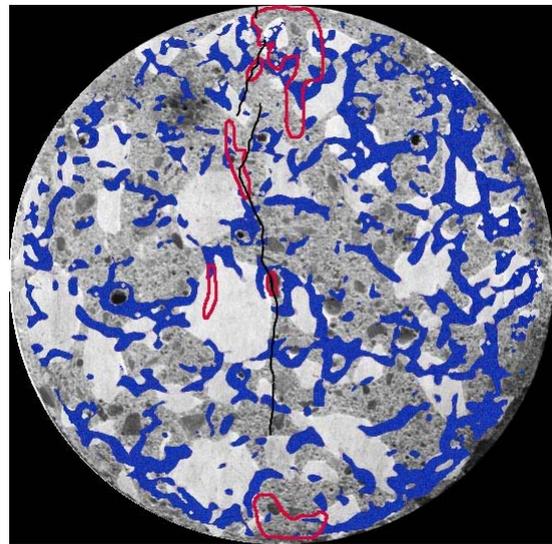
LS-S RH11%



LS-M RH11%



LS-L RH11%



LS-Mix RH11%

■ : 乾燥収縮による 875μ 以上の膨張ひずみ, □ : 載荷時の 875μ 以上の膨張ひずみ, — : 破壊時のひび割れ

図-14 乾燥収縮による膨張ひずみ, 載荷時の膨張ひずみ, 破壊時のひび割れを重ねた図

謝辞

本研究の一部は、平成 24 年度高経年化技術評価高度化事業の一貫として実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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， pp.63-66， 2005.6
- 2) 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， Vol.72， No.615， pp.15-22， 2007.5

- 3) Shiotani T, Bisschop J, Van Mier J.G.M.: Temporal and spatial development of drying shrinkage cracking in cement-based materials, Engineering Fracture Mechanics, Vol.70, No.12, pp.1509-1525, 2003.8
- 4) Chu T.C., Ranson W.F., Sutton M.A., Peters W.H.: Application of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics, Experimental Mechanics, Vol.25, No.3, pp.232-244, 1985
- 5) 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
- 6) 堀素夫：表面エネルギーから見たセメント硬化体の強さ，窯業協会誌， Vol.70， No.7， pp.54-59， 1962