

# 論文 高強度コンクリート中の局所挙動の画像解析による評価

野間 康隆<sup>\*1</sup>・渡辺 健<sup>\*2</sup>・三木 朋広<sup>\*3</sup>・二羽 淳一郎<sup>\*4</sup>

要旨：普通砕石ならびに再生粗骨材を使用し、粗骨材絶対容積が高強度コンクリートの圧縮強度ならびに圧縮ひずみ軟化に及ぼす影響を検討した。その結果、粗骨材種類ならびに粗骨材絶対容積に依存して、異なる圧縮強度ならびに圧縮ひずみ軟化現象を確認した。型変位計ならびに格子法を用いた画像解析を行うことで、供試体載荷直交変位ならびコンクリート中の粗骨材部、モルタル部における載荷直交方向のひずみが、圧縮強度ならびに圧縮ひずみ軟化に影響を及ぼしていることが明らかとなった。

キーワード：粗骨材絶対容積，高強度コンクリート，再生粗骨材，画像解析

## 1. はじめに

近年、資源循環性を考慮したコンクリート材料が開発されている。例えば、都市ゴミ焼却灰や下水汚泥などの廃棄物を主原料としたエコセメント、コンクリート構造物の解体時に発生したコンクリート塊から製造される再生粗骨材が挙げられる。特に再生粗骨材に関しては、粗骨材に付着しているモルタル分を適切に減少できる処理装置が開発され、高品質な再生粗骨材の製造が可能になってきた<sup>1)</sup>。このような、リサイクル材料で大半の構成材料を賄ったコンクリートに関する研究が行われている<sup>2)</sup>。今後建設材料としてのリサイクル材料の普及・促進が期待されていくと考えられる。

さて通常の場合、粗骨材絶対容積が、コンクリートの圧縮強度に影響を及ぼす因子として考慮の対象となることは少ない。しかし一方で、粗骨材絶対容積の変化がコンクリート強度に及ぼす影響が検討されている。野口ら<sup>3)</sup>は、高強度コンクリートにおいて粗骨材絶対容積の増加に従い、圧縮強度が増加する傾向を指摘している。Liu<sup>4)</sup>は、W/Cが一定で粗骨材に普通砕石を使用するという条件下で、実積率の限界まで粗骨材絶対容積を増加させた高強度コンクリートの力学特性を明らかにしている。一連の研究の中で粗骨材絶対容積と圧縮強度の関係を示しており、圧縮強度が粗骨材絶対容積 500 ℓにて最大になり、さらに粗骨材絶対容積を 600 ℓまで増加させると低下する傾向を示している。またこの中で、粗骨材絶対容積の変化により、粗骨材部とモルタル部のひび割れ発生位置ならびに進展の様子が異なる傾向を明らかにしている。粗骨材絶対容積 600 ℓを使用した供試体では、多くのひび割れが粗骨材部とモルタル部の界面にて発生・進展している傾向を報告している。これらの粗骨材絶対容積が圧縮強度に及ぼす影響を破壊メカニズムの

観点から解明するため、本研究では、粗骨材部、モルタル部における各要素の変形特性（以下、局所挙動）に注目した。

本研究では、粗骨材として普通砕石ならびに再生粗骨材を使用し、粗骨材絶対容積の大きいコンクリートに注目した。粗骨材絶対容積の変化が、高強度エコセメントコンクリートの圧縮強度、圧縮ひずみ軟化および局所挙動に及ぼす影響を検討した。粗骨材種類ならびに粗骨材絶対容積を変化させたコンクリート供試体を用いて一方向繰返し圧縮載荷試験を実施した。この時、型変位計を用いて、載荷直交変位を計測した。さらに、コンクリート供試体表面のひずみを非接触で計測する目的で、格子法による画像計測を行った。粗骨材種類ならびに粗骨材絶対容積の変化が、コンクリートの圧縮強度の変化に及ぼす効果を載荷直交変位ならびに粗骨材部、モルタル部のひずみを用いて考察した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

表 - 1 には、本研究で用いたセメント、細骨材、粗骨材および混和剤の物性ならびに成分を示している。粗骨材には、普通砕石（以下、CS）、高品質再生粗骨材（以下、RH）を使用した。高品質再生粗骨材は、実際に供用されていたコンクリート構造物を解体した際に排出されたコンクリート塊から製造された粗骨材である。このコンクリート塊の付着モルタル部を減少させるため、最近開発されたスクリュウ磨砕装置が使用された<sup>1)</sup>。なお、本研究で用いた高品質再生粗骨材は、JIS A 5021 「コンクリート用再生骨材 H」を満たしている。なお、骨材自体の強度や弾性係数は容易に測定できないので、これらの値は把握することができていない。

\*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 修(工) (正会員)

\*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻助教 Ph. D. (正会員)

\*3 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻准教授 博(工) (正会員)

\*4 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

表 - 1 使用材料

使用材料		物性または成分
セメント	エコセメント	密度 3.17 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4310 cm <sup>2</sup> /g
細骨材	小櫃産陸砂	表乾密度 2.66 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.93 %
粗骨材	青梅産砕石 (CS)	表乾密度 2.62 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.65 %, 最大寸法 20 mm
	高品質再生粗骨材 (RH)	表乾密度 2.53 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 2.97 %, 最大寸法 20 mm
混和剤	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系, 密度 1.10 g/cm <sup>3</sup>
	AE 剤	アルキルエーテル系, 密度 1.025 g/cm <sup>3</sup>

表 - 2 示方配合

記号	粗骨材種類	粗骨材絶対容積 (l/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量(kg/m <sup>3</sup> )				高性能 AE 減水剤 (g/m <sup>3</sup> )	AE 剤 (g/m <sup>3</sup> )
							水	セメント	細骨材	粗骨材		
CS-400	CS	400	30	37.7	20.0 ± 3.0	4.0 ± 2.0	150	500	644	1048	170	113
CS-500		500		22.2					378	1310	195	169
CS-600		600		6.6					112	1572	280	263
RH-400	RH	400		37.7					644	1032	170	120
RH-500		500		22.2					378	1290	195	165
RH-600		600		6.6					112	1548	333	315

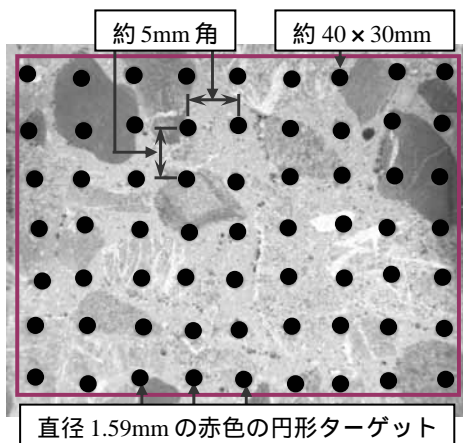


図 - 1 ひずみ算出用供試体

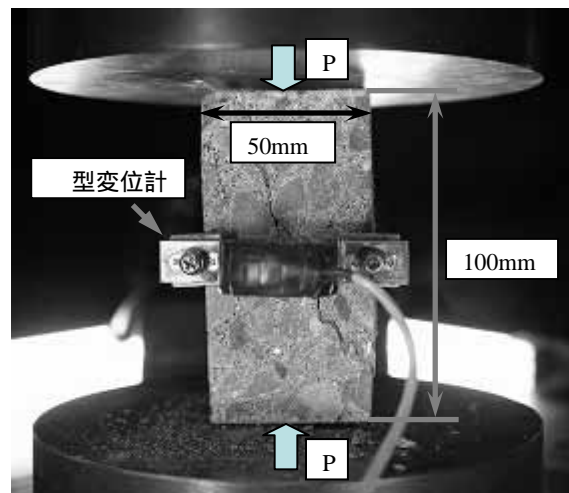


図 - 2 画像を撮影した面と直交方向の面の様子

## 2.2 示方配合

コンクリートの配合は、表 - 2 に示すとおりである。配合は、すべてのケースで単位水量を 150 kg/m<sup>3</sup> で一定とした。スランプおよび空気量は、それぞれ 20.0±3.0 cm、4.0±2.0 % とし、混和剤の添加量を調整した。

## 2.3 試験方法

各水準のそれぞれの試験ごとに、供試体を3体作製し、以下の試験を行なった。

### (1) 圧縮強度

材齢 14 日にて圧縮強度を JIS A 1108 に準じ測定した。

### (2) コンクリート供試体の画像解析

100×100×400 mm の直方体のコンクリート供試体を作製した。14 日経過後、コンクリートカッターを用い、50×50×100 mm の直方体を作製した。格子法を用いた

画像計測<sup>5)</sup>を行うため、図 - 1 に示すように、この供試体表面に赤色の円形ターゲット (直径 1.59 mm) を約 5 mm 角の間隔で配置した。この供試体を用いて一方向繰返し圧縮載荷試験を実施し、所定の荷重段階 (10 kN) ごとに供試体全面に固定した高精細デジタルカメラ (4368 × 2912 ピクセル) を用いて撮影を行った。図 - 2 に示すように画像を撮影した面に直交方向の面には、供試体中央部に 型変位計を設置し、載荷直交変位を計測した。市販の画像処理ソフトにより、撮影されたこれらの画像中の円形ターゲットの中心座標を算出した。変形前後の座標位置を元に、9 節点アイソパラメトリック要素の形状関数を用い、要素内の変位を内挿しひずみを算出した。

0.001 mm まで計測可能なマイクロメータにターゲット

トを配置し、マイクロメータの設定値と画像計測値の比較を行った。この結果を図 - 3 に示している。これより、計測誤差が概ね 0.01 mm 以下であることが確認できる。

### 3. 実験結果

#### 3.1 圧縮強度

図 - 4 には、実験より得られた粗骨材絶対容積に対する圧縮強度の関係を示す。なお、圧縮強度は、3 体の平均値で示している。粗骨材に普通砕石 CS を用いると、Liu の研究<sup>4)</sup>と同様の結果が得られる。すなわち、粗骨材絶対容積 400 ℓ に対して粗骨材絶対容積 500 ℓ で圧縮強度が増加し、粗骨材絶対容積 600 ℓ において圧縮強度が低下している。一方、粗骨材に再生粗骨材 RH を用いると、粗骨材絶対容積 500 ℓ でやや圧縮強度が増大している。CS を用いた供試体ほど粗骨材絶対容積の変化に伴う圧縮強度の変化はほとんどみられなかった。粗骨材絶対容積 400 ℓ ならびに 500 ℓ では、RH を用いるよりも CS を用いるほうが高い圧縮強度を示した。しかしながら、粗骨材絶対容積 600 ℓ においては、CS、RH いずれを用いても圧縮強度の変化はみられなかった。Liu は、CS を使用した供試体で粗骨材絶対容積 600 ℓ に設定すると圧縮強度が低下する傾向に対して、モルタル部におけるブリージング量が多くなり粗骨材部とモルタル部の界面が構造的欠陥となりやすくなるためと報告している<sup>4)</sup>。CS を用いると、この影響により圧縮強度が低下すると考えられる。RH を用いると CS を用いるよりも粗骨材絶対容積が圧縮強度に及ぼす影響はあまりみられなくなる。新たな界面よりも再生粗骨材中の付着モルタル部ならびに再生粗骨材中の旧界面が構造的欠陥となっている可能性があると考えられる。

#### 3.2 圧縮ひずみ軟化

実験より得られた荷重を供試体断面積で除し応力を、載荷方向の変位を供試体初期長さで除しひずみを算出した。図 - 5、6 には、各供試体の一軸圧縮応力 - ひずみ関係を示している。これらの一軸圧縮応力 - ひずみ関係は、一方向繰返し圧縮載荷試験から得られた一軸圧縮応力 - ひずみ関係の履歴曲線の包絡線を示している。なお、粗骨材やひび割れの位置が供試体によって異なるため、画像解析の結果を平均化することに意味はない。そこで、これ以降の評価においては、図 - 4 に示す圧縮強度の平均値に近い圧縮強度を有する供試体の実験結果を代表例として用いることにする。

いずれの配合においても、初期剛性に違いは見られない。しかし、ピーク直前からポストピークにかけ、粗骨材種類ならびに粗骨材絶対容積の違いにより、各配合の圧縮軟化挙動に相違がみられる。普通砕石 CS を用いた供試体に比べ、高品質再生粗骨材 RH を用いた供試体で

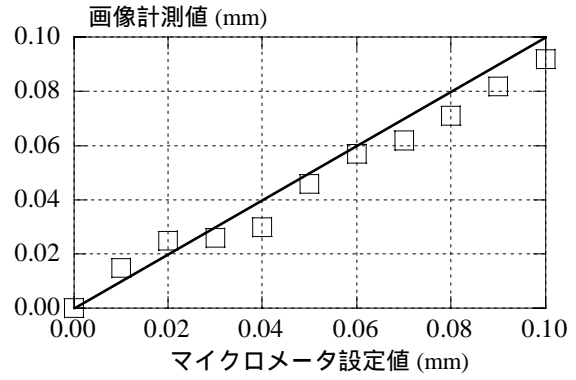


図 - 3 画像計測の精度

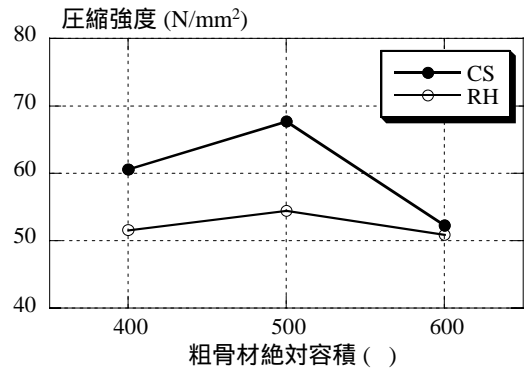


図 - 4 粗骨材絶対容積と圧縮強度の関係

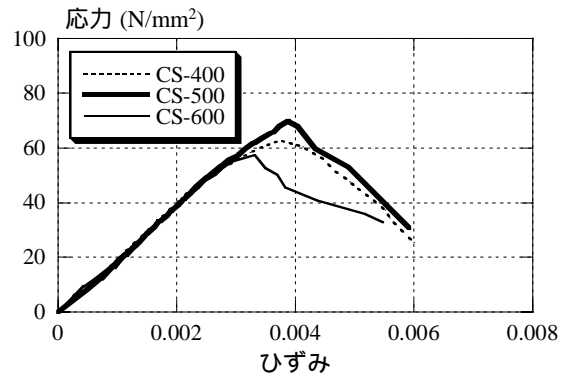


図 - 5 一軸圧縮応力 - ひずみ関係 (CS)

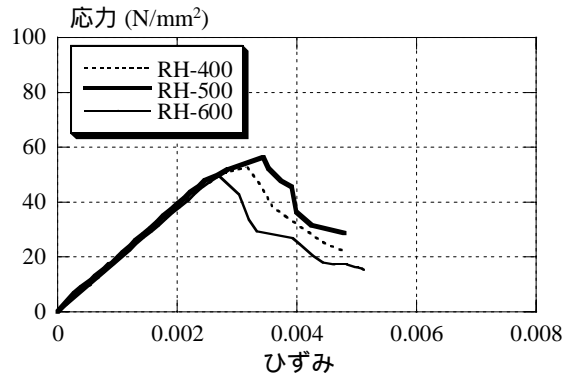


図 - 6 一軸圧縮応力 - ひずみ関係 (RH)

は圧縮強度が低く、軟化の勾配がやや急激になっている。CS ならびに RH いずれを用いた場合においても、粗骨材絶対容積の違いにより軟化の勾配にあまり相違はみられない。粗骨材絶対容積 500 ℓ で CS を用いた配合においては、圧縮強度ならびにピーク時のひずみが最も大きく、

ポストピーク領域においても伝達される応力が大きい。

### 3.3 画像解析より得られた荷重直交方向ひずみ分布

#### (1) CS を用いたケース

実験より得られた一軸圧縮応力 - 荷重直交方向変位関係を図 - 7 に示す。荷重直交方向変位は、型変位計による測定結果である。これらは、荷重開始から第 2 回目の除荷を開始するまでのデータである。いずれの配合においても、一軸圧縮応力 - 荷重直交方向変位関係は荷重後ほとんど直線である。応力が第 1 回目のピーク応力(圧縮強度)に近づくと、応力の増加が低下した。再荷重開始から応力が第 2 回目のピーク応力を迎えるまでの傾向は上記と類似している。

これによると、応力 40 ~ 60 N/mm<sup>2</sup> 間で粗骨材絶対容積 500 ℓの荷重直交方向変位が小さくなっている。なお、粗骨材絶対容積 400 ℓならびに 500 ℓと比較して、600 ℓで

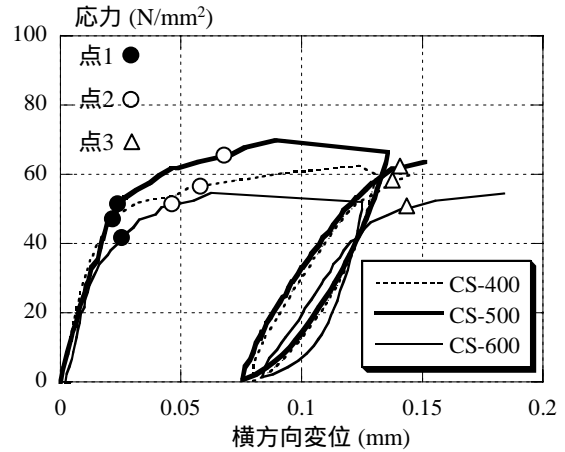


図 - 7 一軸圧縮応力 - 荷重直交方向変位関係 (CS)

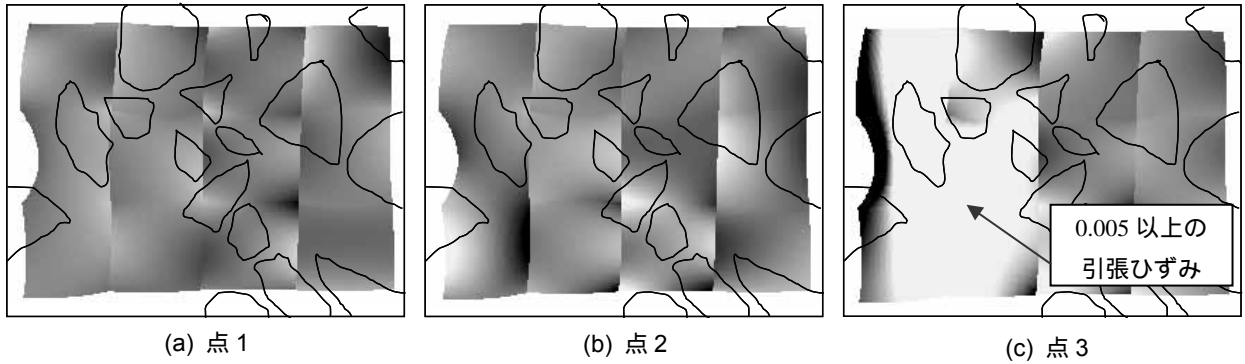


図 - 8 荷重直交方向ひずみ分布 (CS-400)

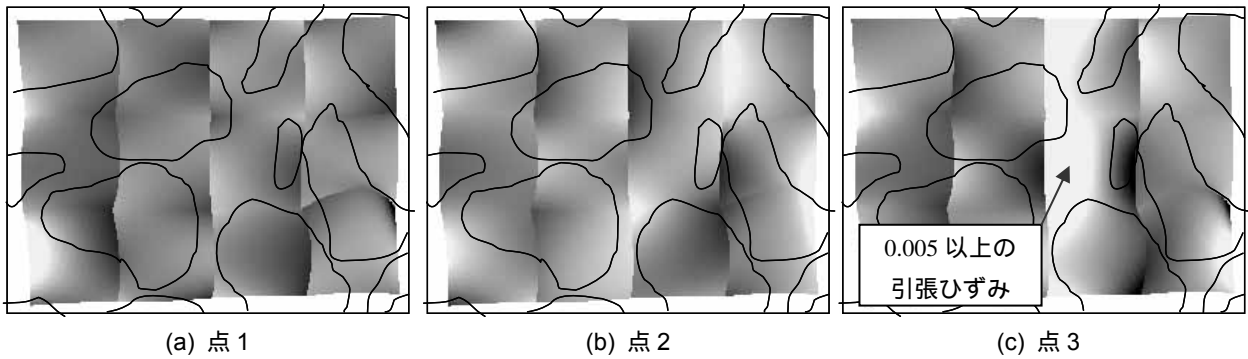


図 - 9 荷重直交方向ひずみ分布 (CS-500)

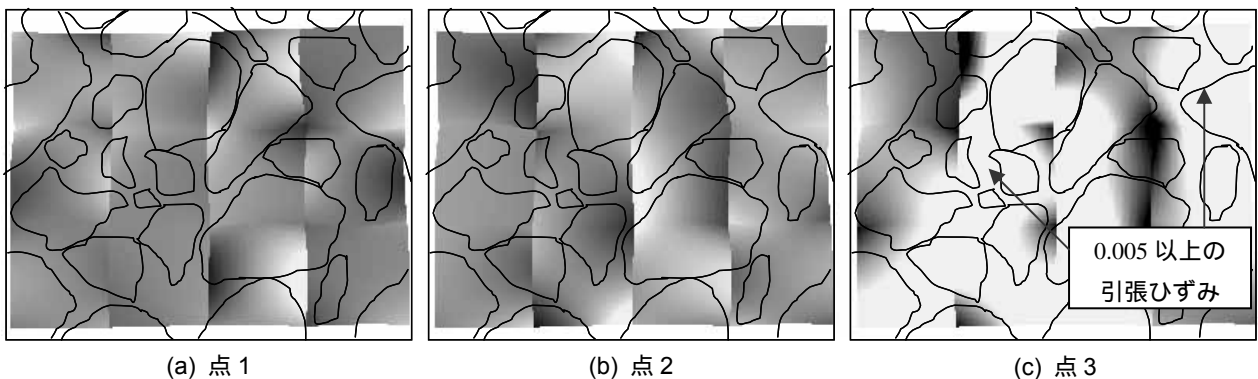


図 - 10 荷重直交方向ひずみ分布 (CS-600)

は応力 50 N/mm<sup>2</sup> 付近において荷重直交方向変位が大きくなっている。

図 - 8 ~ 10 には、一方向繰返し圧縮荷重供試体を対象とし、格子法を用いた画像解析により得た供試体表面の荷重直交方向ひずみの分布を示している。これらは、図 - 7 に示す各点に対応している。同時に、供試体表面で観察された粗骨材分布も示している。点 1 ならびに 2 においては圧縮、引張両方のひずみが確認できるが、大きな引張ひずみが局所的に集中している様子はみられない。特に、粗骨材絶対容積 500 ℓ では、60 N/mm<sup>2</sup> 以上の応力下であるにも関わらず引張ひずみの集中はみられない。ただし、荷重直交方向変位が大きくなるに従って引張ひずみの領域が拡大していく様子がわかる。また、どの配合においても点 3 においては 0.005 以上の引張ひずみが、存在する傾向が確認できる。図 - 7 から、い

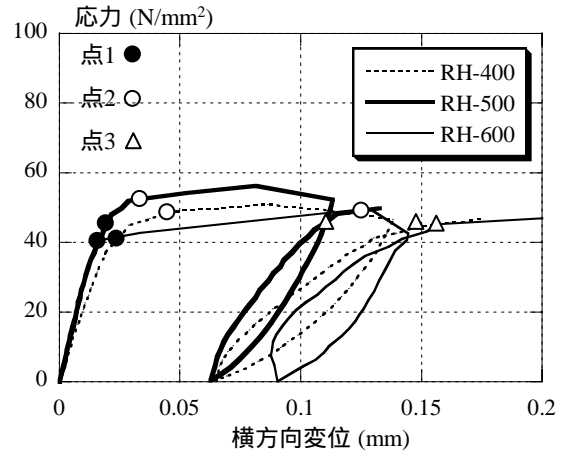


図 - 11 一軸圧縮応力 - 荷重直交方向変位関係 (RH)

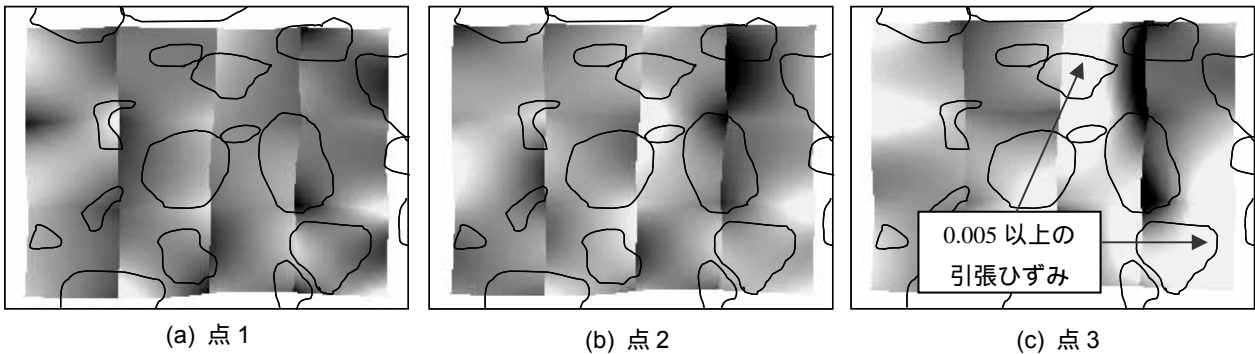


図 - 12 荷重直交方向ひずみ分布 (RH-400)

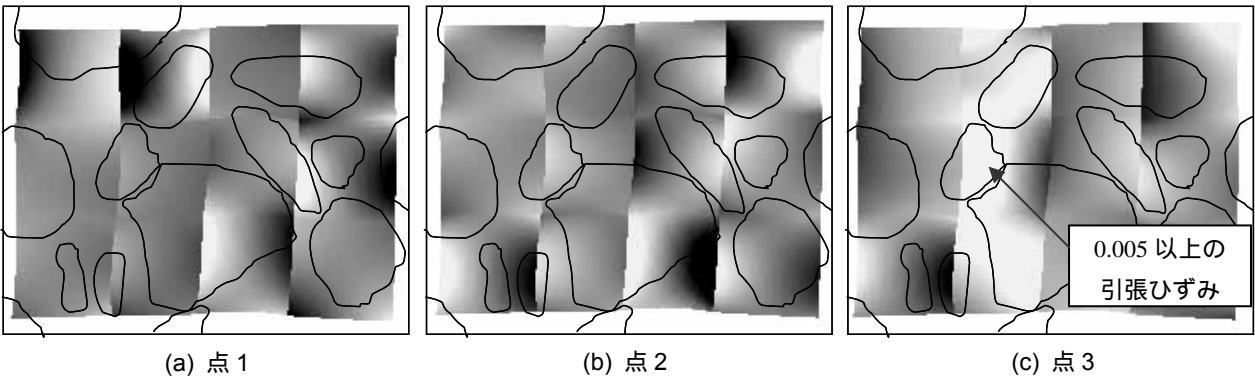


図 - 13 荷重直交方向ひずみ分布 (RH-500)

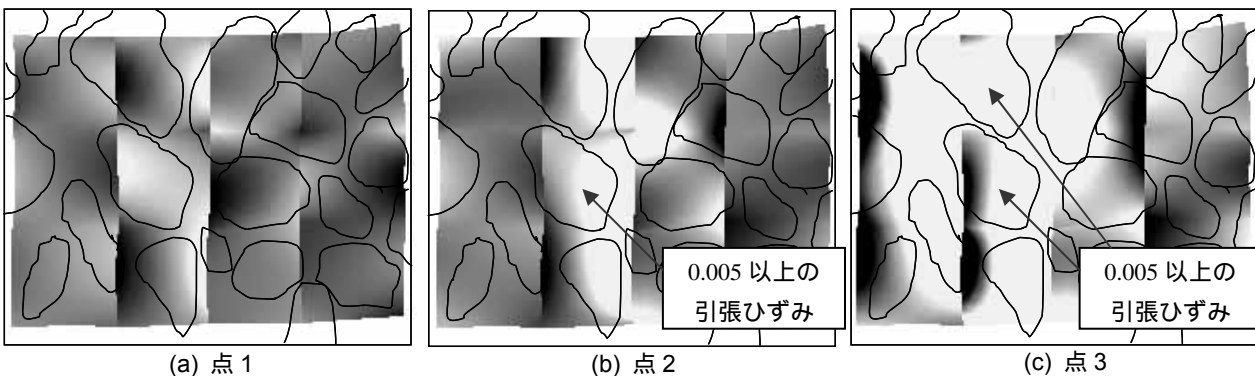


図 - 14 荷重直交方向ひずみ分布 (RH-600)

ずれの供試体においても点3における荷重直交方向変位は同程度であることが確認できる。しかし、粗骨材絶対容積400ℓならびに600ℓのひずみと、500ℓのひずみを比較すると、500ℓでは、供試体荷重直交方向に存在する引張ひずみ領域が小さくなっている。これは、粗骨材絶対容積500ℓにおいて、ひずみがより局所的に存在していることを示している。

粗骨材絶対容積400ℓならびに500ℓの供試体では、点3で、粗骨材部以外のモルタル部で供試体荷重直交方向の引張ひずみが卓越しており、モルタル部で進展するひび割れが予測できる(図-8(c)、図-9(c))。しかしながら、粗骨材絶対容積600ℓの供試体においては、粗骨材が多く存在する領域においても供試体荷重直交方向の引張ひずみが集中している(図-10(c))。Liuは、粗骨材絶対容積600ℓの供試体において、多くのひび割れが粗骨材部とモルタル部の界面にて発生・進展している傾向を報告している<sup>4)</sup>。本研究においても、粗骨材部付近でのひずみ集中が確認されており、界面にて発生・進展するひび割れを示すひずみ集中が推測される。

#### (2) RHを用いたケース

一軸圧縮応力-荷重直交方向変位関係を図-11に示す。RHを用いた供試体においても、応力40~50 N/mm<sup>2</sup>間で粗骨材絶対容積500ℓの荷重直交方向変位が小さくなっている傾向がわかる。さらには、粗骨材絶対容積400ℓならびに500ℓと比較し、600ℓでは、応力50 N/mm<sup>2</sup>付近において荷重直交方向変位が大きくなっている。また、図-7に示したCSを用いた供試体の荷重直交方向変位と比較し、応力50 N/mm<sup>2</sup>付近においてRHを用いたすべての供試体の荷重直交方向変位が大きくなっている。これらは、圧縮強度ならびに圧縮ひずみ軟化に関連性があると考えられる。

図-12~14には、一方向繰返し圧縮荷重供試体を対象とし、格子法を用いた画像解析から得た供試体表面の荷重直交方向ひずみ分布を示している。なお、これらの図に示すひずみ分布も、図-11に示す各点に対応している。

点1においてはCSを用いた供試体と同様、大きな引張ひずみが局所的に集中している様子はみられない。粗骨材絶対容積500ℓでは、50 N/mm<sup>2</sup>以上の応力下であるにも関わらず引張ひずみの集中はみられない。また、点3では、粗骨材絶対容積400ℓならびに600ℓのひずみと、500ℓのひずみを比較すると、500ℓでは、供試体荷重直交方向に存在する引張ひずみ領域が小さい。これらはCSを用いた供試体と同様の傾向である。

粗骨材絶対容積400ℓ、500ℓおよび600ℓのいずれの供試体においても、点3では、粗骨材部にて供試体荷重直交方向の引張ひずみが集中しており、RH自体におけるひずみ集中やひび割れの発生・進展が予想できる(図-

12(c)、図-13(c)、図-14(c))。

なお、本手法を用いるとひずみ分布に不連続性が生じる。また、現状ではひずみ測定精度も把握できていない。これらは、今後の課題としたい。

また、モルタル部、骨材部におけるひずみ集中箇所の測定精度も今後の課題とし明らかにしていく予定である。

#### 4. まとめ

本研究で得られた結論は、以下のとおりである。

- (1) 粗骨材に高品質再生粗骨材を用いた供試体においても、粗骨材絶対容積500ℓで圧縮強度が増加し、600ℓで減少する傾向が得られた。ただし、この傾向は普通砕石を用いた供試体ほど顕著ではない。
- (2) 荷重直交方向変位ならびに荷重直交方向ひずみが圧縮強度ならびに圧縮ひずみ軟化に影響を及ぼしていると考えられる。圧縮強度が高くなるケースではこれらが小さくなる傾向があり、圧縮強度が低くなるケースでは大きくなる傾向がある。
- (3) 画像解析により局所的なひずみ分布を同定でき、粗骨材部あるいはモルタル部どちらにおいてひずみが集中しているのかを概ね予想できる。

#### 謝辞

本研究を実施するに当たって、電力中央研究所の開発した「非接触ひずみ計測ソフトウェア(NCDM)」を使用した。ここに謝意を表します。また、本研究の一部は、平成19年度科学研究費補助金(基盤研究(A)、課題番号19206050)によって実施した。

#### 参考文献

- 1) 早川光敬ほか：製造方法の異なる再生骨材を用いたコンクリートの調合と特性、コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 1, pp. 1247-1252, 2003.7
- 2) 野間康隆ほか：各種リサイクル材料を用いたコンクリートの力学特性に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol. 63, No. 1, pp. 1-13, 2007.1
- 3) 野口貴文ほか：高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす粗骨材の影響, セメント・コンクリート論文集, Vol. 47, pp. 684-689, 1993.2
- 4) Liu, Y. et al: Mechanical Properties of High Strength Concrete with Variance of Coarse Aggregate Quantity, Cement Science and Concrete Technology, Vol. 61, pp. 412-419, 2008.3
- 5) 松尾豊史ほか：鉄筋腐食したRCはり部材のせん断耐荷機構に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol. 15, No. 2, pp. 69-77, 2004.5