

# 画像解析による高強度コンクリートの 圧縮破壊性状の可視化ならびに評価

野間康隆<sup>\*1</sup>・渡辺 健<sup>\*2</sup>・二羽淳一郎<sup>\*3</sup>

本研究では、同一水セメント比下で、単位水量、単位細骨材量ならびに単位セメント量の質量比で表されるモルタル部の配合（以下、 $W : S : C$ ）、粗骨材種類ならびに粗骨材絶対容積に依存して高強度コンクリートの圧縮強度が変化する現象を確認した。これら高強度コンクリートの圧縮強度の変化現象を説明するため、デジタル画像相関法を使用した画像解析を実施した。ひび割れ発生に伴う損傷状況、すなわち画像解析より得られる載荷直交方向の横ひずみ拡大領域に着目して、高強度コンクリートの圧縮破壊性状の相違を考察した。横ひずみ拡大領域のうち、横ひずみが卓越する領域の分布状況や横ひずみ拡大領域の広さから、 $W : S : C$ 、粗骨材種類ならびに粗骨材絶対容積に依存した圧縮強度の変化現象と圧縮破壊性状の関連性を示した。

キーワード：高強度コンクリート、デジタル画像相関法、横ひずみ、損傷

## 1. はじめに

従来、コンクリートの圧縮強度の設計には、水セメント比（以下、 $W/C$ ）則が使用されてきた。しかしながら、同一の $W/C$ 下であるにも関わらず、コンクリートの高強度化に伴った粗骨材絶対容積の変化により $W/C$ 則に即した現象が必ずしも起こりうることはないことが明らかになっている<sup>1),2)</sup>。これらの圧縮強度の変化については、コンクリート材料の特徴的な力学特性として報告されるとともに、起因するメカニズムの解明を目的とした実験も実施されている。

圧縮強度と圧縮破壊性状の関連性の検討は、わが国では例えば、和泉ら<sup>3)</sup>や上迫田ら<sup>4)</sup>により行われている。和泉らは、コンクリートの圧縮破壊性状の評価手法や問題点を詳述するとともに、光弾性皮膜を使用したコンクリートの要素試験を実施している。この実験により、配合、円孔ならびにモデル骨材の有無が圧縮応力下のひび割れ進展挙動に及ぼす影響について明らかにし、考察している。一方、上迫田らは、試験体端部の摩擦を除去した場合の圧縮強度の低減量を圧縮破壊性状と関連付けて議論している。コンクリートの圧縮破壊は、縦ひずみの増加に伴い進行する。応力-縦ひずみ関係では、除々に剛性が低下して、ピークに達し、ポストピーク領域ではひずみ軟化現象を呈する。試験体には、微細なひび割れの集積により成長した縦方向や斜め方向のひび割れが認められる。これらのひび割れの発生、進展によって破壊を評価することが重要であると考えられる。既往の研究においても、コンクリートの圧縮破壊性状が、このようなひび割れの発生、進展に着目すべきことを言及してい

る。同時に、このひび割れの進展挙動を粗骨材やモルタルといった内部構造を用いて考察している。コンクリートの圧縮破壊性状を解明する上では、コンクリートを粗骨材とモルタルから構成される複合材料として取り扱うことが必要になると考えられる。

本研究では、再生粗骨材を使用したコンクリートの圧縮破壊性状の解明も試みる。従来、コンクリートに再生粗骨材を使用すると高い圧縮強度の増加が見込めないことが報告されている<sup>5)</sup>。破壊性状を解明することで、破壊の抑制、防止手法の提案や、このような材料の適用性の評価が可能になると思われる。

ところで近年、各種画像解析手法が開発、提案され、コンクリート構造物の変形解析、損傷評価ならびに破壊メカニズムに関する検討に使用されてきている<sup>6),7)</sup>。これらの手法の利点は、対象物の寸法によらず、コンクリート表面において生じる面的ならびに局所的に変化する情報を非接触に計測することができることである。これまで、計測機器を設置した箇所における変位やひずみのみしか計測できなかったことに対して、計測領域内の任意の位置における破壊性状の観察が可能になる。

これらの解析手法のうち、Chuら<sup>8)</sup>によって研究が進められていたデジタル画像相関法が、セメント系材料の破壊挙動の評価に適用されてきた<sup>9),10),11)</sup>。この手法は、画像中の測定対象物の輝度値がランダムに分布していることを利用し、コンクリート要素、構造物表面の変位を計測する手法である。画像中における画素単位の変位の計算が可能であり、任意の画素の移動量を追跡できる。従来の画像計測によるひび割れ抽出が1個の画素幅の0.1倍程度のひび割れ開口変位を有するひび割れを認識

\*1 技術研究所 \*2 財団法人 鉄道総合技術研究所 \*3 東京工業大学

表－1 使用材料

使用材料	記号	物性ならびに成分
セメント	早強ポルトランドセメント	－ 密度 3.14 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4620 cm <sup>2</sup> /g
細骨材	小櫃産陸砂	－ 表乾密度 2.65 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.55 %
粗骨材	青梅産碎石	CS 表乾密度 2.63 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.67 %, 最大寸法 20 mm, 付着モルタル率 0 %
	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, 付着モルタル率 10.0 %
	低品質再生粗骨材	RL 表乾密度 2.30 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 8.27 %, 最大寸法 20 mm, 付着モルタル率 52.3 %
混和剤	高性能 AE 減水剤	－ ポリカルボン酸エーテル系, 密度 1.05 g/cm <sup>3</sup>

可能であるのに対して<sup>12)</sup>, デジタル画像相関法では上記よりも高精度な変位を計測できたという実験結果がある<sup>13), 14)</sup>。既往の画像計測と比較し, デジタル画像相関法は, コンクリートに生じる目視では観察困難なより微小な変位や微細なひび割れを計測できる可能性がある。本研究では, このデジタル画像相関法を用いて, コンクリート試験体表面のひずみ計測を実施する。コンクリート試験体表面に発生するひずみ拡大領域を用いて, コンクリートの圧縮破壊性状の評価を試みる。

本研究では, 上記に示すような同一W/Cの高強度コンクリートで, 普通碎石を使用した場合の粗骨材絶対容積の増加, あるいは再生粗骨材の使用により圧縮強度が変化する現象に注目する。同一W/C下において, 既往の文献で高強度コンクリートの圧縮強度の影響因子として使用されてきたW : S : C<sup>1)</sup>, 粗骨材種類<sup>5)</sup>ならびに粗骨材絶対容積<sup>1), 2)</sup>が高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を新たに検討する。

さらに, 既往の研究でも議論されてきた圧縮強度と圧縮破壊性状の関連性より, これら圧縮強度の変化現象の原因の評価を試みる。そのため, 高精度な変位計測が可能とされるデジタル画像相関法を用いた画像解析により連結, 進展したひび割れの可視化あるいは微細ひび割れの発生, 累積を含めた損傷状況の把握を試みる。圧縮破壊により生じる縦方向ひび割れの影響, 言いかえれば, 画像解析より得られる横ひずみの拡大領域に着目して圧縮破壊性状の相違を評価することを試みる。この際, コンクリートを粗骨材とモルタルという2つの相で構成される複合材料として捉えて, この材料の破壊性状を評価することも試みる。

## 2. コンクリート試験体の圧縮試験

### (1) 実験概要

本研究では, 同一W/C下で, W : S : C, 粗骨材種類ならびに粗骨材絶対容積が高強度コンクリートの圧縮強度

ならびに圧縮破壊性状に及ぼす影響を解明することを目的としている。強度試験ならびにデジタル画像相関法により得られた横ひずみを用いた評価を行うための平板試験体を用いた面内圧縮試験を実施した。

### (2) 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。

粗骨材として使用する再生粗骨材は, 高品質再生粗骨材と低品質再生粗骨材の2種類である。本研究で粗骨材として用いた低品質再生粗骨材は, 供用されていた元のコンクリート構造物を解体後に, 発生, 排出されたコンクリート廃材をクラッシャーで破砕して粗骨材部分を取り出したものである。一方, 高品質再生粗骨材は, 最近開発されたスクリュウ磨砕装置<sup>15)</sup>によって, この低品質再生粗骨材表面に付着したモルタルを除去することで製作されたものである。このスクリュウ磨砕装置は, 円筒形のコーン中のスクリュウが回転することにより生じるコンクリート塊相互の接触を利用してモルタル分を除去するものである。このコーンに再生粗骨材を投入すると, 付着モルタル分が減少した再生粗骨材が製造される。処理を数回施すことで, 表－1に示すように低い吸水率(2.97%)と低い付着モルタル率(10.0%)とすることができる。なお, 本研究で用いた高品質再生粗骨材は, 低品質再生粗骨材に前述の処理を3回施したものである。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」を満足するものの, 低品質再生粗骨材は, 吸水率が大きく JIS A 5023「再生骨材 Lを用いたコンクリート」の規格に適合していない。

### (3) 実験シリーズならびに配合

実験に用いたコンクリートの配合は, 表－2に示すとおりである。実験ではすべての配合で同一W/C(30%)とし, W : S : C, 粗骨材種類ならびに粗骨材絶対容積の3つの実験因子が, 圧縮強度ならびに圧縮破壊性状に及ぼ

表-2 コンクリートの配合

シリーズ	配合名	粗骨材 最大寸法 (mm)	W : S : C	粗骨材 種類	粗骨材 絶対容積 (L/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	s/a (%)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )			
								W	C	S	G
1	CS350	20	1 : 5.51 : 3.33	CS	350	30	47.1	150	500	826	921
	CS450(1)				450		36.8	126	419	693	1184
	CS550(1)				550		27.7	102	339	560	1447
	RH350			RH	350		47.1	150	500	826	886
	RH450(1)				450		36.8	126	419	693	1139
	RH550(1)				550		27.7	102	339	560	1392
	RL350			RL	350		47.1	150	500	826	805
	RL450(1)				450		36.8	126	419	693	1035
	RL550(1)				550		27.7	102	339	560	1265
2	CS350	20	1 : 5.51 : 3.33	CS	350	30	47.1	150	500	826	921
	CS450(2)		1 : 3.74 : 3.33		450		32.0			561	1184
	CS550(2)		1 : 1.09 : 3.33		550		16.9			296	1447
	RH350		1 : 5.51 : 3.33	350	47.1		826			886	
	RH450(2)		1 : 3.74 : 3.33	450	32.0		561			1139	
	RH550(2)		1 : 1.09 : 3.33	550	16.9		296			1392	
	RL350		1 : 5.51 : 3.33	350	47.1		826			805	
	RL450(2)		1 : 3.74 : 3.33	450	32.0		561			1035	
	RL550(2)		1 : 1.09 : 3.33	550	16.9		296			1265	

※配合名：最初の英文字 2 文字は、使用している粗骨材種類を示しており、表-1 に示す記号を用いている。これらの英文字に付随する数字は、粗骨材絶対容積を示している。末尾に( )を伴わない配合は、シリーズ 1, 2 で共通の配合であり、( )を伴う場合は、( )内の数字がシリーズ名を示している。

す影響を検討した。実験はW : S : Cによって2つのシリーズに分けて行った。シリーズ1では、W : S : Cが一定であり、粗骨材絶対容積の増加に伴い、単位水量ならびに単位セメント量が低下する。ここで、W : S : Cは1 : 5.51 : 3.33である。シリーズ2では、粗骨材絶対容積の増加に伴い、単位水量ならびに単位セメント量が変化しないように設定した配合を設けた。粗骨材絶対容積の増加に従って、単位細骨材量が低下し、W : S : Cが1 : 5.51 : 3.33, 1 : 3.74 : 3.33, 1 : 1.09 : 3.33と変化する。粗骨材種類が同一で、なおかつ使用した粗骨材絶対容積が350L/m<sup>3</sup>の配合は、いずれのシリーズにおいても同一の配合を有したコンクリートである。本研究では、目標スランプおよび空気量はそれぞれ20±3cm, 2.5±2.0%とした。また、すべての配合において練混ぜ後、顕著な材料分離が起こっていないことを目視で確認した。

(4) 練混ぜならびに養生方法

練混ぜは、パン型強制練りミキサ（容量55L）にて行った。すべてのシリーズで、セメントおよび細骨材を投入して30秒間練混ぜを行なった後、30秒かけて水を投入し、かき落しを行なった。この後、粗骨材を投入し、120秒間練混ぜ、排出した。強度試験用の試験体は材齢7日まで水中養生を行なった。画像解析用の平板試験体は材齢6日まで水中養生を行い、その後1日間気中養生を行った。

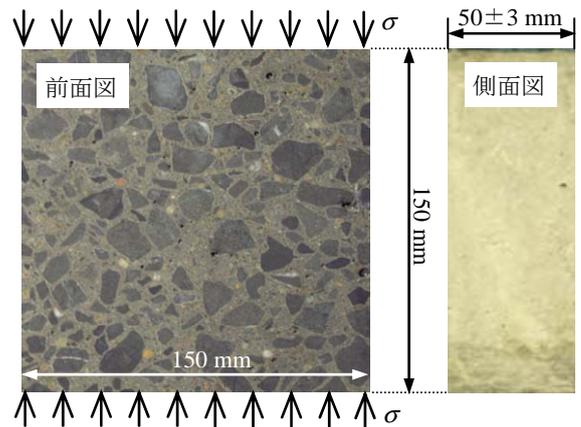


図-1 平板試験体概要図

(5) 試験方法

所定材齢で圧縮強度をJIS A 1108に準じて測定した。また、デジタル画像相関法を適用するため、図-1 に示すような150×150×(50±3mm)の寸法を有する平板試験体を使用して上下方向に面内圧縮試験を実施した。従来、型枠面のコンクリートはモルタルで充填されるため、試験体表面は均一な色彩となる。輝度値のランダムな分布を利用して試験体表面の変位を算出するデジタル画像相関法では、このような試験体を解析対象とすることは困難である。そこで、この試験体のデジタル画像相関法による測定対象面には、輝度値のランダムな分布が現れるようにする必要がある。このため、本研究では、コンクリートカッターで得られる切断面を利用することにした。あらかじめ、150×150×200mmの横打試験体を打設

した。養生6日経過後、コンクリートカッターを用いて上記に示す寸法を有する平板試験体を横打試験体から切り出して製作した。

このようにして製作した試験体の面内圧縮試験を行い、高精細デジタルカメラ（画素数4368×2912）により試験体の撮影を行った。高精細デジタルカメラは、三脚に固定して使用した。すべての撮影において、ズームレンズを使用し、デジタルカメラから被写体までの距離を約500mmとした。デジタルカメラの焦点距離（95mm）は一定である。また、1個の画素幅は、約0.057mmである。撮影と同時にノートパソコンに画像を保存した。実験中の太陽光や電気照明の影響を考慮して、試験装置全体を暗幕でおおい、この中で、定電流で駆動する発光ダイオード照明を使用した。載荷前にキャリブレーションを行い、レンズひずみを補正するためのパラメータとカメラの内部、外部パラメータの算出を行った。載荷開始後、所定の荷重ごとに載荷を中断し、撮影を行った。加圧面の成型は行っておらず、型枠面の平坦性を利用しており、打設方向と直交方向に載荷を行った。なお、減摩パットを使用すると試験体端部の摩擦が減少するために、奥行き方向への移動が生じる。本研究における解析では、奥行き方向への変位を生じた場合、これを計測できない。そのため、本研究では、載荷面の端面拘束の影響を除去せず載荷を実施することにした。この拘束条件は全試験体で一律とした。

### 3. デジタル画像相関法による画像解析

本研究で使用するデジタル画像相関法<sup>10)</sup>では、変形前の画像中の試験体表面部において選択した任意の画素が変形後の画像中でどの位置に移動したかを推定することができる。変形後の位置推定を行う際には、清水・奥富の手法<sup>13), 14)</sup>を使用した。

図-2には本研究で使用した画像解析の手順を示している。あらかじめ、画像中の試験体表面の測定領域を複数の3角形要素で要素分割し、デジタル画像相関法を使用して、節点に相当する選択された任意の画素の変形後の画像中における位置を算出した。本研究では、図-3に示すような画像中の平板試験体表面2100×2100個の画素（約120×120mm）の範囲を解析対象としており、この領域内に縦横50個の画素（約2.9×2.9mm）幅を有する3角形要素を縦横42個配置した。これに付随し、縦横50個の画素（約2.9×2.9mm）間隔で、縦横43個の計1849個の節点となる画素が選択されることになる。本研究では、載荷方向をy方向、載荷直交方向をx方向と設定している。得られた画像座標値にカメラの収差補正を

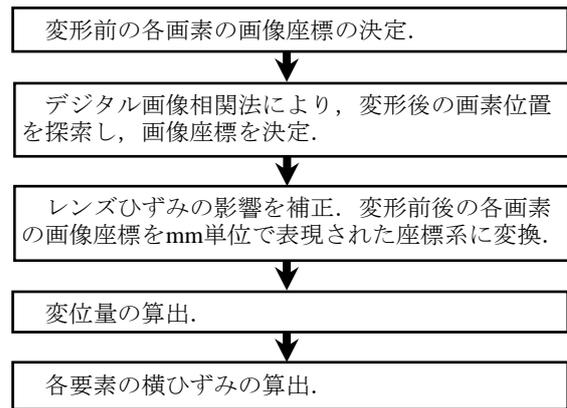


図-2 画像解析の手順

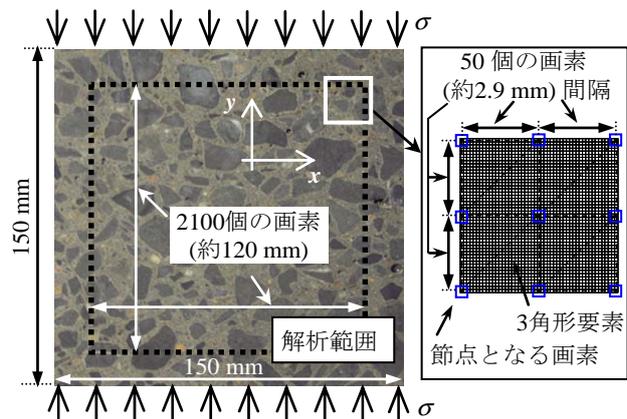


図-3 解析概要図

施し、画像の歪みによる影響を除去した後<sup>16)</sup>、カメラの内部、外部パラメータを用いて、キャリブレーション時に設定した原点を中心としたmm単位の座標系に変換する計算を各選択画素の変形前後の画像座標に施した。変形前後の上述したmm単位の座標を元に、定ひずみ3角形要素の形状関数<sup>17)</sup>を用い、要素内の変位を内挿し横ひずみ（図中における $\epsilon_x$ ）を算出した。この結果、試験体表面の局所的なひずみが計測できることになる。なお、各平板試験体の最大荷重の95%付近で撮影した画像を対象としている。

既往の文献を参考にすると、本研究で使用した手法の変位の計測誤差は、1個の画素幅の0.0016倍になると考えられる<sup>14)</sup>。本研究では、50個の画素幅を横方向の要素幅とする定ひずみ3角形要素を用いて横ひずみの計算を行う。上記の誤差が各節点に生じた場合、横方向に最大で1個の画素幅の0.0032倍の変位の計測誤差が生じると考えられる。この変位の計測誤差を要素幅で除すると、 $64 \times 10^{-6}$ のひずみの計測誤差が生じることになる。しかしながら、画像解析を用いて試験体表面の変位計測を行う際の精度は、試験体の変形の程度<sup>10)</sup>、画像中の輝度値分布<sup>14)</sup>、デジタルカメラの特性<sup>18)</sup>の影響を受けることが報告されており、絶対的な変位計測精度を評価することは困難である。

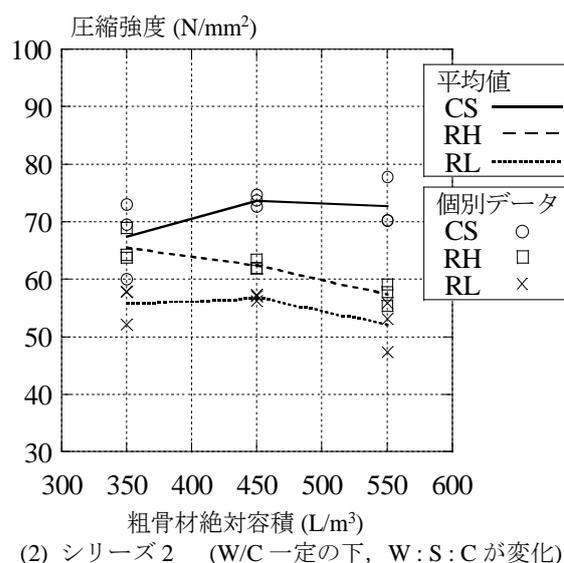
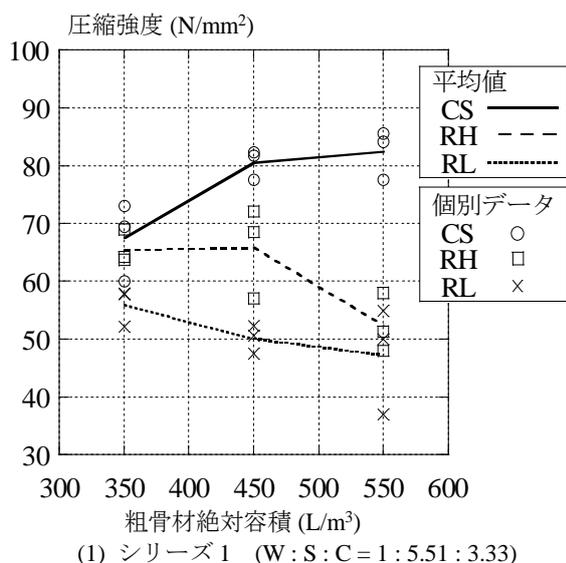


図-4 粗骨材絶対容積と圧縮強度の関係

さらには、デジタル画像相関法を用いて変位計測を行う場合、変形後の試験体にひび割れのような不連続な部分が生じると変位計測精度が低下することが報告されている<sup>19)</sup>。しかしながら、本研究と同様にデジタル画像相関法を用いた画像解析によりコンクリートの圧縮破壊性状の評価を行った研究では、圧縮荷重下でコンクリート中に生じたひび割れは画像解析による変位計測精度に大きな影響を及ぼさないと報告されている<sup>10)</sup>。

コンクリートのひび割れ調査では、0.05mm以上のひび割れ開口変位を有するひび割れが主に問題となる<sup>20)</sup>。本研究では、この状態まで進展する以前の0.01mm以上のひび割れ開口変位を有するひび割れを観察対象とすることにした。今回想定した3角形要素内に0.01mmの横方向のひび割れ開口変位が生じると約 $3500 \times 10^{-6}$ の横ひずみが生じることになる。そのため、連結、進展したひび割れを可視化できる横ひずみ卓越領域を $3500 \times 10^{-6}$ 以上の引張ひずみを示す領域とした。また、微細ひび割れの発生、集積を含めた損傷の領域広さを定量的に評価するため、横ひずみの値が引張ひずみとして $0 \sim 10000 \times 10^{-6}$ を示す要素を対象として累積百分率による評価を行った。

コンクリート内部の破壊は本来3次元的な現象として議論されなければならないと考えられる<sup>3)</sup>。しかしながら、本研究で実施する画像解析では、コンクリート試験体内部の3次元的な破壊に関する情報を得ることは困難である。本研究では、コンクリート表面の2次元的に理想化した粗骨材やモルタルの配置を対象として、破壊性状の評価を試みることにした。

#### 4. 圧縮強度試験結果

図-4は、各シリーズの粗骨材絶対容積とコンクリー

トの圧縮強度の関係を示したものである。圧縮強度は、各配合の試験体数3体の平均値を直線で示すとともに、各試験体の個別のデータをプロットしている。

##### (1) シリーズ1

シリーズ1では、コンクリート配合中のW:S:Cが全ての試験体において1:5.51:3.33である。全試験体のW/Cは、同一であるにも関わらず、粗骨材種類ならびに粗骨材絶対容積の変化とともに圧縮強度が変化していることがわかる。

特に、圧縮強度の変化は、粗骨材種類に依存して顕著になっている。再生粗骨材(RHならびにRL)を使用したコンクリートの圧縮強度は、普通砕石(CS)を使用した高強度コンクリートの圧縮強度よりも減少する傾向が確認できる。特に、高品質再生粗骨材を使用するよりも、低品質再生粗骨材を使用する方が、圧縮強度の低減が顕著になることがわかる。再生粗骨材を使用した場合、粗骨材の吸水率の増加に伴い、圧縮強度が低下することが報告されている<sup>5)</sup>。また、W/Cの低下に伴った圧縮強度の増加現象が確認できなくなることも報告されている<sup>5)</sup>。W/Cを低下させても、再生粗骨材を使用したコンクリートの圧縮強度は頭打ちの傾向になるということである<sup>5)</sup>。この結果、コンクリート強度が高い領域では、同一W/C下であるにも関わらず、CSを使用した高強度コンクリートの圧縮強度と比較して、RHならびにRLを使用したコンクリートの圧縮強度が低下したものと考えられる。CSを使用した配合では、粗骨材絶対容積に依存して圧縮強度が顕著に増加していることがわかる(図-4(1)CS)。粗骨材絶対容積の増加に伴った高強度コンクリートの圧縮強度の変化現象は、Liuら<sup>1)</sup>や野口ら<sup>2)</sup>による実験からも明らかになっており、本実験でも同様な結果が得ら

れた。一方、RHならびにRLを使用すると、粗骨材絶対容積350L/m<sup>3</sup>と比較して、粗骨材絶対容積450L/m<sup>3</sup>で圧縮強度が同等あるいは低下し、粗骨材絶対容積550L/m<sup>3</sup>では明らかに低下する結果となった。(図-4 (1) RH, RL)。

## (2) シリーズ2

シリーズ2では、コンクリート配合中のW/C一定の下、W : S : Cが粗骨材絶対容積に依存して変化する。図-4 (2) に示す通り、シリーズ1と同様にシリーズ2でも、限られたデータ数ではあるが、既往の文献の報告と同様に粗骨材種類ならびに粗骨材絶対容積に依存した圧縮強度の変化を実際に確認した。

粗骨材種類によって圧縮強度が変化する現象は、シリーズ1と同様な傾向にある。再生粗骨材 (RHならびにRL) を使用するよりも普通砕石 (CS) を使用したほうが、コンクリートの圧縮強度が大きくなった。

普通砕石 (CS) を使用すると、粗骨材絶対容積に依存して圧縮強度が変化する現象が確認できる。しかしながら、シリーズ1と比較し、シリーズ2では圧縮強度の増加現象が顕著でない傾向にある。また、再生粗骨材 (RHならびにRL) を使用すると粗骨材絶対容積の増加に伴う圧縮強度の増加がみられない傾向にある。

## 5. 画像解析結果

各配合で2体の平板試験体を用い、画像解析を適用するための面内圧縮試験を実施した。ここでは、各配合1体の画像解析結果しか示していないが、2体目の試験体の圧縮破壊性状に関しても以下に議論することにした。ただし、全15配合の内、CS450(1) ならびにRL350の2体に関しては、同配合の2体目の試験体が顕著な奥行き方向の移動を伴った圧縮破壊を呈したため、画像解析を実施することができなかった。そのため、この2つの配合に関しては、1体の試験体の結果を用いて、議論を行うこととした。

### (1) 横ひずみ卓越領域分布を用いたひび割れ性状評価

図-5 ならびに図-6 は、平板試験体を用いて実施した面内圧縮試験の最大荷重の95%時の画像を対象として、デジタル画像相関法により算出した横ひずみ卓越領域 (3500×10<sup>-6</sup>以上の引張ひずみ) を画像上に青色でマッピングしたものである。デジタル画像相関法を用いることで、試験体表面にて連結、進展したひび割れを横ひずみの卓越する領域として捉えることができる。斜めに形成されたひび割れに関しては、各ひび割れのx方向となす角度を算出し、図中に白色の文字で示すこととした。

斜めに形成された3500×10<sup>-6</sup>以上の引張ひずみを示す要素のmm単位の重心座標を回帰させて得られた最小二乗直線の傾きを用いて角度を算出した。試験体表面の横ひずみ卓越領域の分布状況ならびに横ひずみ卓越領域の存在する相 (粗骨材相あるいはモルタル相) に着目して議論を進めることとした。なお、各図には配合名とともに、図-4 に示している圧縮強度の平均値を示している。配合名中の括弧内の数字はシリーズ番号である。

### a) シリーズ1

CS350の試験体では、図の実線の長方形で囲んだ領域に縦方向のひび割れのみが生じている (図-5 (1) (a))。上迫田ら<sup>4)</sup> は、普通砕石を使用した高強度コンクリートの平板試験体を用い、端部の拘束の影響を除去した面内圧縮試験において、圧縮破壊した後の試験体には縦ひび割れが形成されることを指摘している。この場合、単位粗骨材量は800~1000kg/m<sup>3</sup>であり、本研究の粗骨材絶対容積350L/m<sup>3</sup>に相当するものと考えられる。端部の拘束の影響を除去していない本研究の実験でも、粗骨材絶対容積350L/m<sup>3</sup>では縦ひび割れが発生していることが確認できる。粗骨材絶対容積を増加させたCS450(1) やCS550(1) の試験体には、図の実線の長方形で囲んだ領域の縦ひび割れの他に実線の楕円で囲んだ領域に進展した斜めひび割れが確認できる (図-5 (1) (b) の角度が71° と73° の横ひずみ卓越領域、(c) の角度が67°、72° と65° の横ひずみ卓越領域)。コンクリート試験体の圧縮試験では、斜めにひび割れが発生、進展し破壊に至ることがある。これは、試験体端部の拘束の影響であることが報告されている<sup>2)</sup>。すなわち、目視で観察される斜めひび割れのような破壊現象が見られた場合、端部の拘束の影響が大きくなっていると推察できる。この端部の拘束が大きいほど、コンクリート試験体中に拘束力が発生し、試験体端部の横ひずみの増大を抑制する。この結果、コンクリート試験体の圧縮強度が増加することが報告されている。このような端部拘束の影響は、載荷板の材質や試験体の寸法比の変化による拘束力の影響を受ける領域の広さに依存すると考えられてきた。しかしながら、すべての試験体で同一拘束条件下であるにも関わらず、CS350とは異なって、CS450(1) やCS550(1) の試験体には、斜めひび割れの発生という拘束効果の影響がみられており、圧縮強度も顕著に増加している。CS350ならびにCS550(1) の2体目の試験体でも上記と同様な横ひずみ卓越領域の分布状況が確認できた。粗骨材にRHを使用した全ての試験体では、図の実線の長方形で囲んだ領域に1~3本の横ひずみ卓越領域が確認できる (図-5 (2) (a) ~ (c))。これらの試験体の横ひずみ卓越領域分布状況は、CS350の分布と類似している。

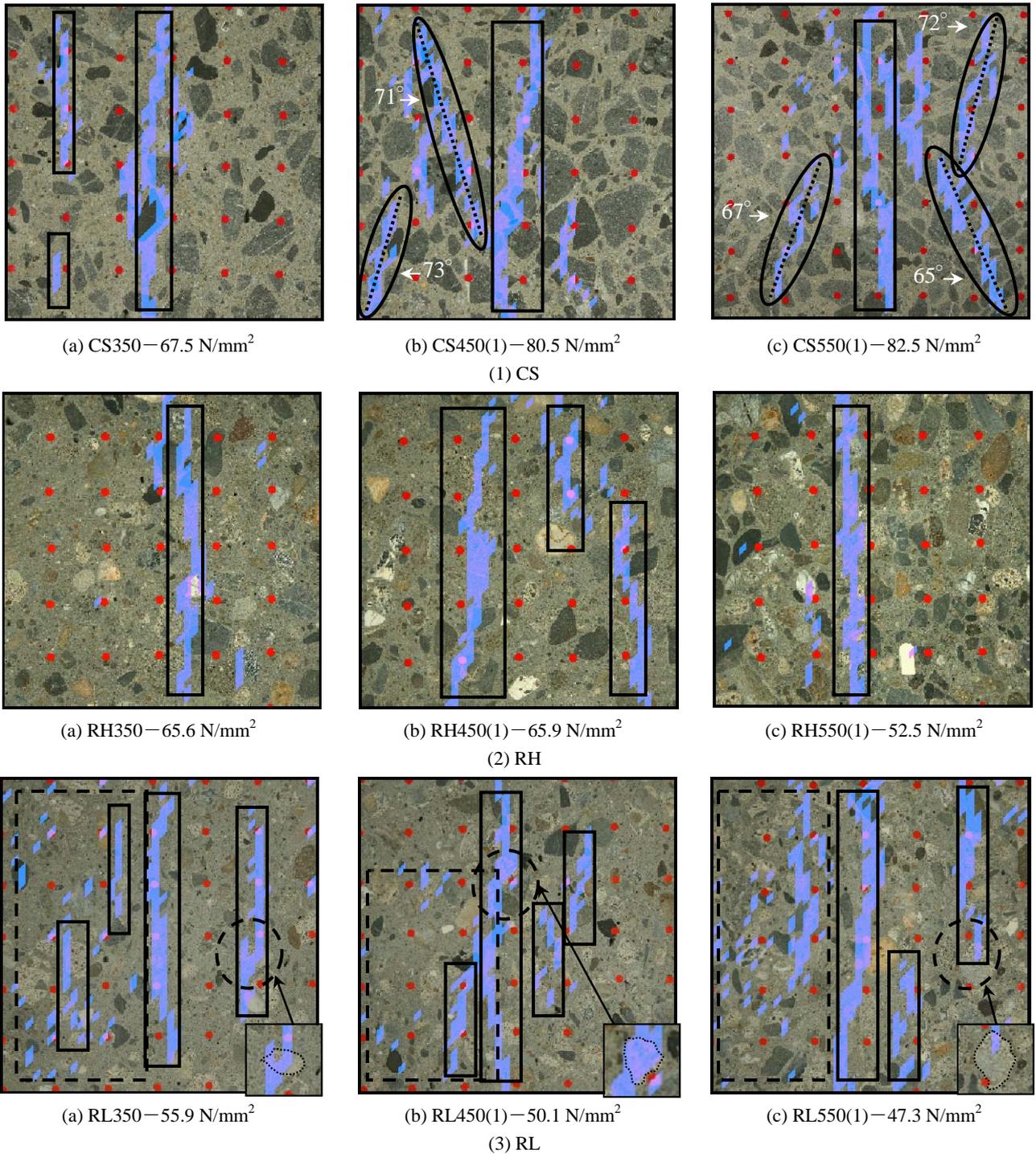


図-5 横ひずみ卓越領域 (シリーズ 1)

粗骨材にRHを使用した場合、粗骨材絶対容積を増加させても斜めひび割れの発生進展は確認できなかった。また圧縮強度の増加も確認できなかった。粗骨材絶対容積が最も大きいRH550(1)では、圧縮強度が大幅に低下した。RH350, RH450(1)およびRH550(1)の2体目の試験体においても斜めひび割れの発生は確認できず、1~3本程度の縦ひび割れと考えられる横ひずみ卓越領域が生じたのみであった。

粗骨材にRLを使用した試験体では、図の実線の長方形

で囲んだ領域の縦ひび割れ以外に、図の破線の長方形で囲んだ領域に多数の横ひずみ卓越領域が確認できる。また、破線の円で囲んだ通りコンクリート中の粗骨材相に存在する横ひずみ卓越領域が確認できる(図-5(3)) (a)~(c)のズームアップした正方形内の破線で囲んだ領域が粗骨材相)。粗骨材にRLを使用すると圧縮強度が大幅に低下し、圧縮強度の低下は粗骨材絶対容積が増加するほど顕著になった。RL450(1)ならびにRL550(1)の2体目の試験体でも多数の縦ひび割れと考えられる横ひ

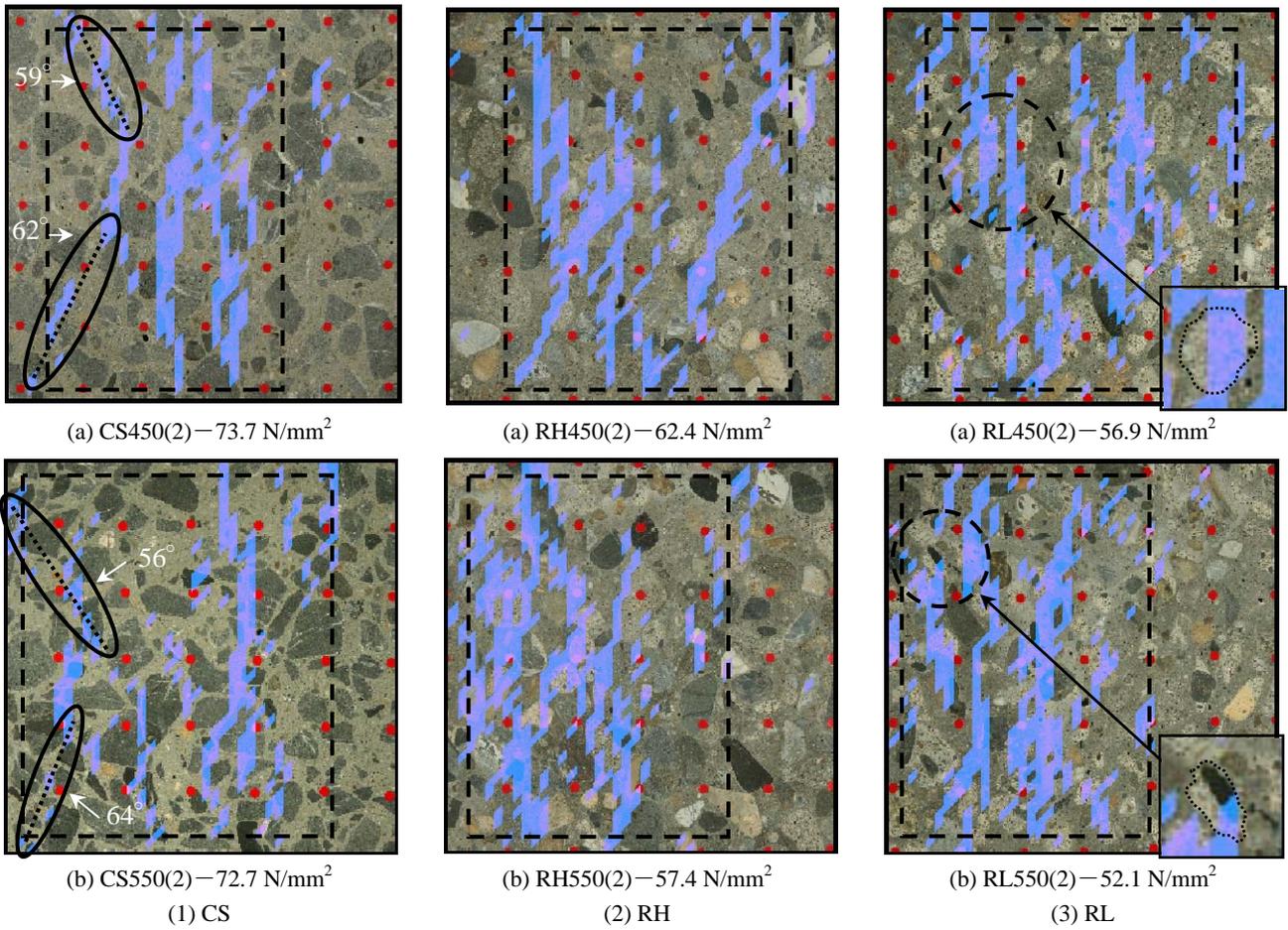


図-6 横ひずみ卓越領域 (シリーズ2)

ずみ卓越領域が確認できた。

b) シリーズ2

シリーズ2のCS350, RH350およびRL350の画像解析結果は、既に図-5に示しており、ここでは、これらの配合以外について考察を行うこととする。シリーズ2のいずれの試験体でも図の破線の長方形で囲んだ領域に多数の横ひずみ卓越領域が確認できる。

CSを使用し粗骨材絶対容積を増加させたCS450(2)やCS550(2)の試験体には、実線の楕円で囲んだ領域に進展した斜めひび割れが確認できる(図-6(1)(a)の角度が $59^\circ$ と $62^\circ$ の横ひずみ卓越領域、(b)の角度が $56^\circ$ と $64^\circ$ の横ひずみ卓越領域)。さらには、図の破線の長方形で囲んだ領域に多数の横ひずみ卓越領域が存在している。多数の縦ひび割れの発生により横ひずみが全体的に大きくなると考えられる。横ひずみの全体的な増大により圧縮強度が低減することが報告されており<sup>22)</sup>、この多数のひび割れの進展によって、圧縮強度の顕著な増加がみられなくなったと考えられる。

粗骨材にRHを使用したRH450(2)やRH550(2)の試験体(図-6(2)(a),(b))、ならびにRLを使用したRL450(2)やRL550(2)の試験体(図-6(3)(a),(b))には、図の破線の長方形で囲んだ領域に多数の横

ひずみ卓越領域が存在している。また、RLを使用した試験体では、シリーズ1と同様に破線の円で囲んだ通り粗骨材相に存在する横ひずみ卓越領域が確認できた(図-6(3)(a),(b)のズームアップした正方形内の破線で囲んだ領域が粗骨材相)。

シリーズ2のいずれの配合においても、1,2体目の試験体のひび割れ状況は類似していた。

(2) 横ひずみを用いた損傷領域広さの評価

デジタル画像相関法を用いた画像解析では、平板試験体を使用して実施した面内圧縮試験の最大荷重の95%時の画像を用いている。図-7には、横ひずみを用いた微細ひび割れの発生、集積をも含めた損傷の領域広さの評価に使用する累積百分率曲線の算出過程の模式図を示している。まず、 $100 \times 10^{-6}$ ごとにレンジを区切り、 $0 \sim 10000 \times 10^{-6}$ を示す全要素数に対する各レンジの横ひずみに該当する要素の数の百分率を算出する。図-7に示すように、横ひずみが拡大することで損傷した領域が広域になると、横ひずみの大きなレンジの百分率が増大することになる。図-7に示す通り、同一の累積百分率では、横ひずみレンジが大きくなるほど、より大きな横ひずみを示す要素数が増加したことになり、試験体中の損

傷領域が広域になったことを意味する。横ひずみの拡大に伴い生じた損傷の領域広さを横ひずみの値を用いて評価することにした。この百分率を用いて、ある横ひずみ以上を示す要素数の  $0 \sim 10000 \times 10^{-6}$  を示す全要素数に対する割合を容易に把握することもできる。試験体中では、全要素はほぼ同じ面積を有している。

図-8ならびに図-9には、各試験体の累積百分率曲線を示している。横ひずみによって示される損傷領域広さと圧縮強度の関連性を容易に把握できるように、各グラフの配合名と共に、図-4に示している圧縮強度の平均値を示した。配合名中の括弧内の数字はシリーズ番号を示している。また、比較のために、すべてのグラフに、一般に使用される高強度コンクリートの配合に近いCS350の結果を示した。

a) シリーズ1

W : S : Cが一定であるシリーズ1でCSを使用すると、粗骨材絶対容積の増加に伴って、同一累積百分率における横ひずみレンジが大きい。これは、試験体表面にて横ひずみが大きくなった要素の数が増大していることを示している。同時に、圧縮強度が顕著に増加していること

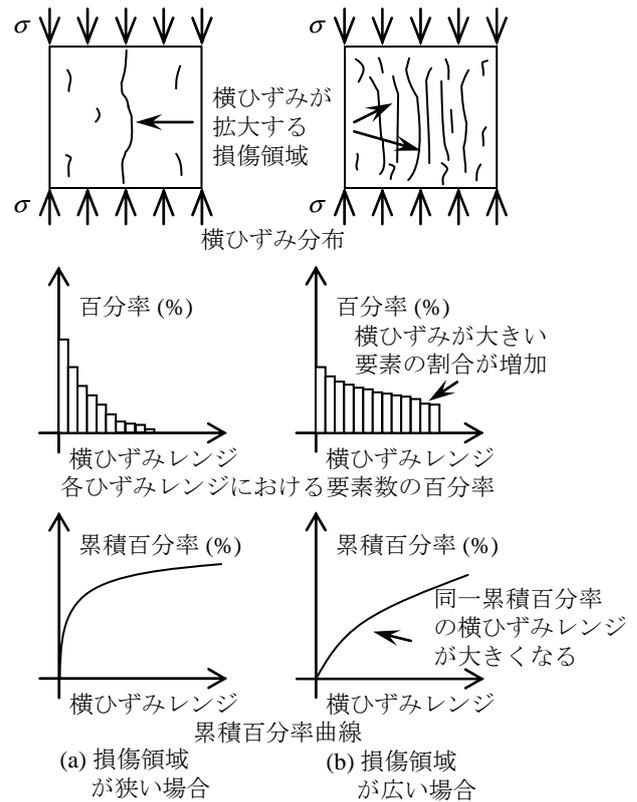


図-7 累積百分率曲線の算出過程 (模式図)

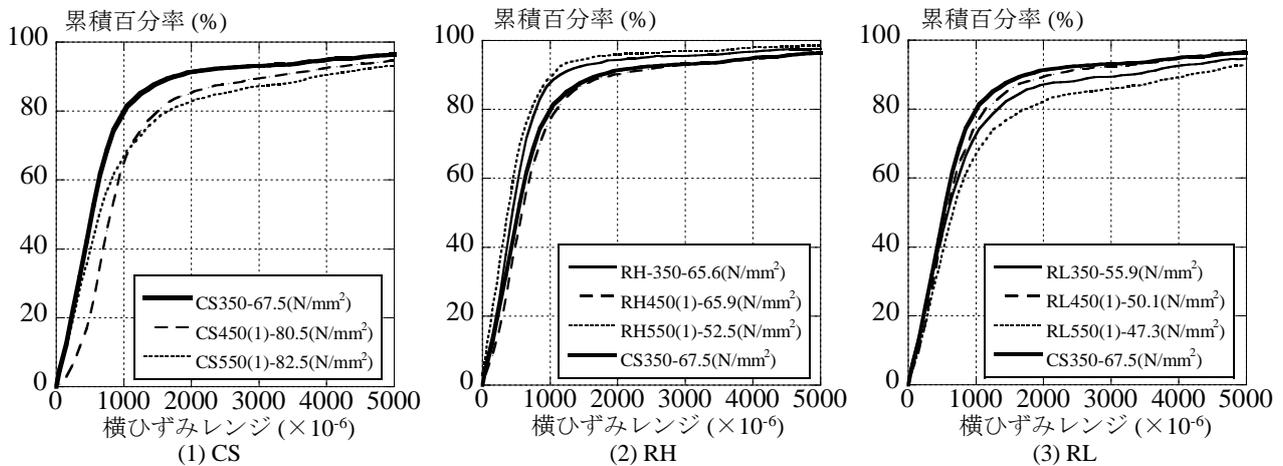


図-8 要素数の累積百分率曲線 (シリーズ1)

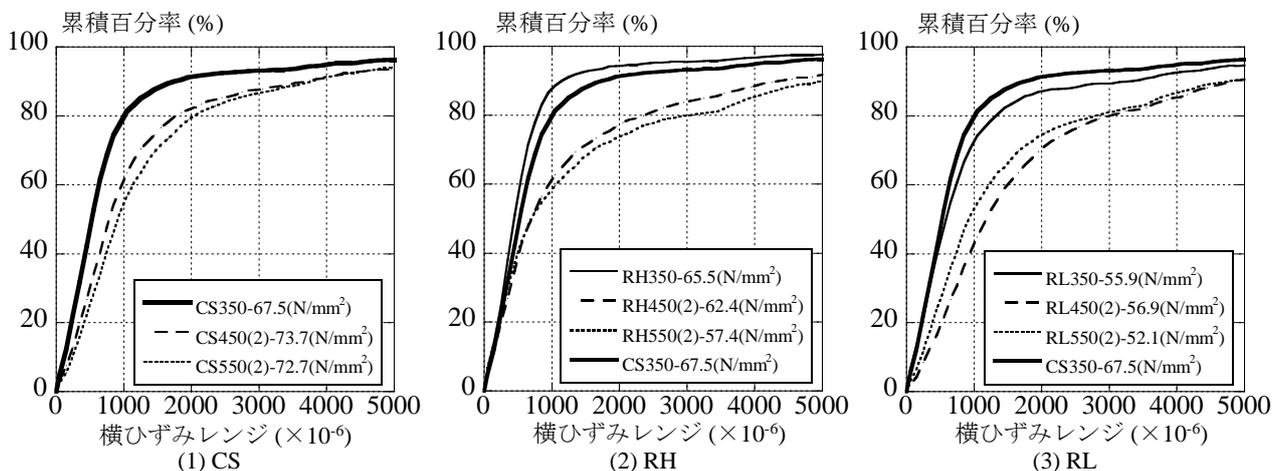


図-9 要素数の累積百分率曲線 (シリーズ2)

がわかる。RH350の試験体の累積百分率曲線ならびに圧縮強度は、CS350の試験体と同程度である。ただし、粗骨材にCSを使用するのと比べて、RHを使用すると粗骨材絶対容積の増加に伴って、試験体表面に存在する横ひずみの卓越した要素の数は大きく変化していないことが確認できる。さらには、粗骨材絶対容積に依存した圧縮強度の増加現象が見られない。

RLを使用すると、CS350に比べいずれの試験体においても同一横ひずみレンジにおける累積百分率が小さく、横ひずみの卓越した要素が多く存在していることがうかがえる。RHと比較しても、RLの累積百分率曲線では、同一累積百分率における横ひずみレンジが大きい。また、これとともにCSを使用した試験体と比較しRLを用いた試験体の圧縮強度は低くなった。

b) シリーズ2

上述のシリーズ1と比較し、W/C一定の下、粗骨材絶対容積に依存してW : S : Cが変化するシリーズ2では、いずれの粗骨材種類でも累積百分率曲線の同一累積百分率における横ひずみレンジが大きく、横ひずみの卓越する要素が多くなっていることが確認できる。シリーズ1と比べ、CSを使用し粗骨材絶対容積を大きくした試験体では、横ひずみの大きい要素が増大するとともに圧縮強度の増加が顕著でなくなっている。RHならびにRLを使用す

ると、シリーズ1と比べ、横ひずみの卓越する要素が増加しているものの圧縮強度に大きな変化はない。RHを使用した試験体と比較して、RLを使用し粗骨材絶対容積を増加させた試験体の同一横ひずみレンジにおける累積百分率が小さく、横ひずみの卓越した要素が増加していることが確認できる。CSやRHを使用した試験体と比べて、RLを使用した試験体の圧縮強度は、大幅に低下している。CS450(1)、RL350以外のシリーズ1ならびに2のいずれの配合においても、同配合における2体の試験体の累積百分率曲線の各横ひずみレンジの累積百分率の差の絶対値の全横ひずみレンジにおける平均値は5%以下であった。2本の累積百分率曲線は完全に一致するものではないが、2体の試験体から得られた累積百分率曲線の傾向は類似していた。

(3) 画像解析結果を用いた圧縮破壊性状の考察

図-10ならびに図-11には、試験体表面にて連結、進展したひび割れのパターン図を圧縮強度と照らし合わせて示している。また、図-12ならびに図-13には、各シリーズの各試験体でのひび割れ発生による損傷領域広さを知ることができる累積百分率曲線の傾向図を示している。いずれも、面内圧縮試験の最大荷重の95%時の情報を用いている。

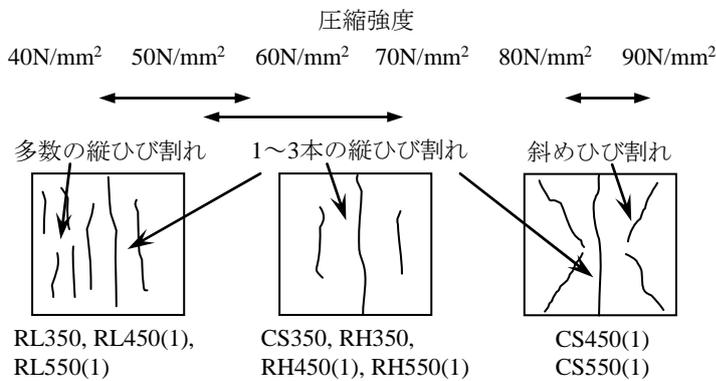


図-10 試験体のひび割れパターン (シリーズ1)

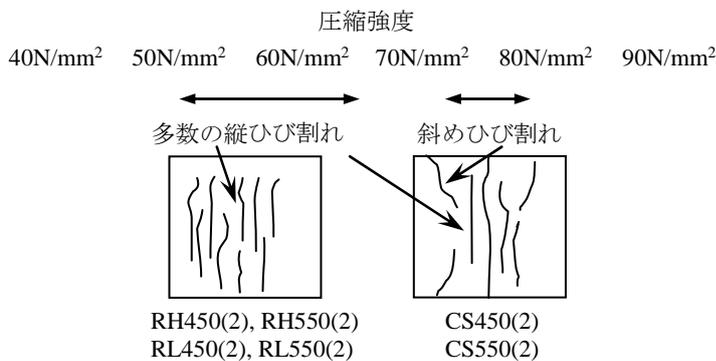


図-11 試験体のひび割れパターン (シリーズ2)

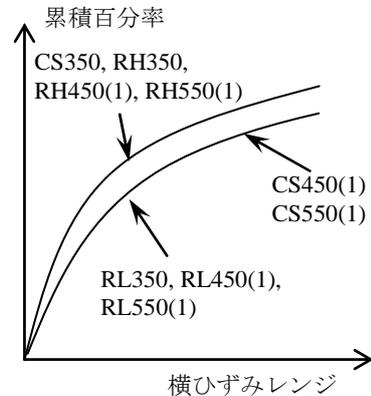


図-12 累積百分率曲線の傾向 (シリーズ1)

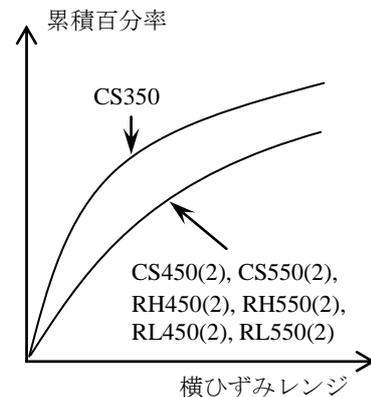


図-13 累積百分率曲線の傾向 (シリーズ2)

### a) シリーズ1

圧縮強度が顕著に増加したCS450(1)とCS550(1)の試験体では、図-10に示すように試験体端部の拘束の影響により生じる内部拘束の結果、斜めひび割れが発生していることが確認できた。さらには、図-12に示すように横ひずみの増大する要素数が増大していた。これらの配合では、斜めひび割れの発生が確認でき、損傷した領域が広域になっていた。

次に、CS350、RH350、RH450(1)およびRH550(1)の試験体では、図-10に示すように1~3本程度のひび割れが発生したのみで、図-12に示すように横ひずみが大きくなる要素数は少なかった。端部の拘束効果が顕著な場合、斜めひび割れが発生すると考えると、逆に端部の拘束効果が顕著でなければ、斜めのひび割れは発生しないと推察される。これらの配合では、斜めひび割れが確認できなかったため、CS450(1)とCS550(1)と比較し、端部の拘束効果が顕著でなかったのではないかと考えられる。

圧縮強度が小さくなったRL350、RL450(1)およびRL550(1)の試験体では、図-10に示すように多数の縦ひび割れが見受けられ、図-5(3)からは低品質再生粗骨材自体に横ひずみの卓越領域が存在していることが確認できた。また、図-12に示すように横ひずみが大きくなる要素の数が増加した。これらの配合では、CS450(1)とCS550(1)の試験体とは異なり、斜めひび割れではなく、粗骨材を貫通するようひび割れを含む多数の縦ひび割れによって横ひずみが大きい要素の数が増加したものと考えられる。

### b) シリーズ2

圧縮強度がやや増加したCS450(2)とCS550(2)の試験体では、図-11に示すように斜めひび割れが見られるものの同時に多数の縦ひび割れも見受けられた。図-13に示すように、CS450(2)とCS550(2)の試験体では、CS350と比較して横ひずみの増大する要素数が増加していることが確認された。上述した多数の縦ひび割れを伴い、損傷領域が拡大したものと考えられる。

図-13からわかるように、CS450(2)とCS550(2)の試験体と比較して、圧縮強度が低下したRH450(2)、RH550(2)、RL450(2)およびRL550(2)の試験体では、試験体表面の横ひずみの増大する領域が増加した。これは、図-11に示すように多くの縦ひび割れが発生していることに起因していると考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、同一W/C下で、異なるW:S:C、粗骨材種類ならびに粗骨材絶対容積がコンクリートの圧縮強度

ならびに圧縮破壊性状に及ぼす影響について明らかにするために、実験的検討ならびにデジタル画像関連法を用いた画像解析を行った。限られたデータではあるが、本研究で得られた結論は以下の通りである。

(1) コンクリートの圧縮破壊時に発生する観察困難な微視ひび割れを含めたひび割れ発生による試験体表面の損傷の位置や程度をデジタル画像関連法を用いた画像解析により得られる横ひずみを用いて評価できる可能性を示した。

(2) ひび割れを局所的な横ひずみ卓越領域として可視化できるデジタル画像関連法を用いた画像解析により、粗骨材相とモルタル相のひずみ情報を識別して評価できるものと考えられる。

(3) 粗骨材絶対容積の増加に伴い、普通砕石を使用した高強度コンクリートの圧縮強度は増加傾向を示す。特にW:S:Cを一律にすると増加傾向が著しい。しかしながら、同一W/C下で粗骨材絶対容積の増加に伴いW:S:Cを変化させると、圧縮強度は顕著には増加しない。

(4) 再生粗骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は、W:S:Cを一定にしても変化させても、粗骨材絶対容積の増加に伴い圧縮強度は同等かあるいは低下した。

(5) W:S:Cを一定にした普通砕石を多量に用いたコンクリートでは、試験体表面の損傷領域が広域で斜めひび割れの発生がみられた。斜めひび割れが発生し損傷領域が拡大すると、圧縮強度の顕著な増加がみられた。

(6) W:S:C一定の条件下で高品質再生粗骨材を使用し、粗骨材絶対容積を増加させた場合、斜めひび割れが生じず、損傷領域の広さが小さくなり、圧縮強度の増加がみられなかった。

(7) W:S:C一定の条件下で低品質再生粗骨材を使用すると、損傷領域が広域になった。特に、粗骨材相を貫通するひび割れを含む多数の縦ひび割れが発生し、圧縮強度が低下した。

(8) 同一W/C下でW:S:Cを変化させると、多数の縦ひび割れとみられる損傷領域が確認された。多数の縦ひび割れの発生による横ひずみの全体的な増加は、圧縮強度の増加現象には寄与しないものと考えられる。

## 謝辞

本研究を実施するに当たり、太平洋セメント株式会社から再生粗骨材を提供頂きました。本研究は、日本学術振興会特別研究員の助成を受けて行いました。ここに記して深謝致します。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)によって実施しました。

この論文は、野間康隆、渡辺健、二羽淳一郎；“画像解析による高強度コンクリートの圧縮破壊性状の可視化ならびに評価”，土木学会論文集E，Vol.66，No.1，pp.68-79，(2010)を一部修正したものである。

#### 参 考 文 献

- 1) Liu, Y., Miki, T., Noma, Y. and Niwa, J.: Mechanical properties of high strength concrete, *Cement Science and Concrete Technology*, Vol.61, pp.412-419, 2008.
- 2) 野口貴文, 小野山貫造, 友澤史紀: 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.
- 3) 和泉正哲, 三橋博三, 佐々木達夫: コンクリートの圧縮破壊発生機構に関する基礎的研究, 日本建築学会論文報告集, No.289, pp.11-25, 1980.
- 4) 上迫田和人, 前川宏一, 岡村 甫: コンクリートの一軸圧縮強度, コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol.4, pp.177-180, 1982.
- 5) 土木学会: 電力施設解体コンクリートを用いた再生骨材コンクリートの設計施工指針(案), コンクリートライブラリー, No.120, 2005.
- 6) 松尾豊史, 酒井理哉, 松村卓郎, 金津 努: 鉄筋腐食したRC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.
- 7) 町田篤彦: コンクリートの圧裂試験に関する基礎研究, 土木学会論文報告集, No.279, pp.99-112, 1978.
- 8) Chu, T. C., Ranson, W. F., Sutton, M. A. and Peters, W. H.: Application of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics, *Experimental Mechanics*, Vol.25, No.3, pp.232-244, 1985.
- 9) 佐川康貴, 尾上幸造, 内野正和, 松下博通: 一軸圧縮力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.20-26, 2007.
- 10) Choi, S. and Shah, S. P.: Measurement of deformations on concrete subjected to compression using image correlation, *Experimental Mechanics*, Vol.37, No.3, pp.307-313, 1997.
- 11) Van Mier, J. G. M., Meyer, D. and Man, H.: Fracture of quasi-brittle materials like concrete under compressive loading, *Advanced Materials Research*, Vol.41-42, pp.207-214, 2008.
- 12) 日本コンクリート工学協会: コンクリート診断技術'09, 2009.
- 13) 清水雅夫, 奥富正敏: 画像のマッチングにおけるサブピクセル推定の意味と性質, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J-85-D-II, No.12, pp.1791-1800, 2002.
- 14) 清水雅夫, 奥富正敏: 領域ベースマッチングのための2次元同時サブピクセル推定法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J-87-D-II, No.2, pp.554-564, 2004.
- 15) 早川光敬, 丸嶋紀夫, 石堂修次, 飯島真人: 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.
- 16) Steger, C., Ulrich, M. and Wiedemann, C. (株式会社リンクス画像システム事業部訳): 画像処理アルゴリズムと実践アプリケーション, 東京書籍印刷, 2008.
- 17) Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L.: The finite element method fourth edition volume 1 basic formulation and linear problems, McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, 1989.
- 18) 内野正和, 小金丸正明, 山口哲也, 米山 聡: デジタル画像相関法によるひずみ分布計測(1)(デジタル画像相関法の高精度化), 日本機械学会2004年度年次大会講演論文集(1), 04-1, pp.293-294, 2004.
- 19) Poissant, J. and Barthelat, F.: A Novel “subset splitting” procedure for digital image correlation on discontinuous displacement fields, *Experimental Mechanics*, in press, 2010.
- 20) 日本コンクリート工学協会: コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針2009, 2009.
- 21) Van Mier, J. G. M., Shah, S. P., Arnaud, M., Balayssac, J. P., Bascoul, A., Choi, S., Dasenbrock, D., Ferrara, G., French, C., Gobbi, M. E., Karihaloo, B. L., König, G., Kotsovos, M. D., Labuz, J., Lange-Kornbak, D., Markeset, G., Pavlovic, M. N., Silmsch, G., Thienel, K-C., Turatsinze, A., Ulmer, M., Van Geel, H. J. G. M., Van Vliet, M. R. A. and Zissopoulos, D.: Strain-softening of concrete in uniaxial compression, *Materials and Structures*, Vol.30, pp.195-209, 1997.
- 22) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2008.

---

---

## Visualization and Evaluation of Compressive Fracture Behaviors of High Strength Concrete by Using Image Analysis

Yasutaka NOMA, Ken WATANABE and Junichiro NIWA

In this study, influences of the mix proportion in mortar expressed by the mass ratio of unit weights of water, fine aggregate and cement ( $W : S : C$ ), the quality and the quantity of coarse aggregate on the compressive strength of high strength concrete under same water to cement ratio were examined. As a result, the phenomenon that the compressive strength varied depending on these parameters was confirmed. The image analysis using the digital image correlation method was carried out to explain the variation of the compressive strength of concrete. The difference of compressive fracture behaviors of high strength concrete was discussed by focusing on the lateral strain magnification zone obtained by this method. Different distributions of lateral strain concentration zones and damage extents in the lateral direction were observed for each case. The relationship between the variation of the compressive strength and the fracture behaviors was concluded from the distribution and the extent of increased lateral strain zones.