

## 論文 画像解析を用いた高強度コンクリートの圧縮破壊進展評価

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

要旨：同一水セメント比下で、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。本研究では、このメカニズムを解明する目的で、デジタル画像相関法を用いた画像解析を実施した。圧縮荷重下で高強度コンクリートの損傷である縦方向ひび割れ、すなわち供試体の横ひずみに着目した検討を行った。この結果、供試体の端部拘束条件は同一であるにも関わらず、粗骨材絶対容積の増大に伴って、拘束効果に相違がみられることがわかった。画像解析から得られる横ひずみを用いて、これらの現象を評価した。

キーワード：画像解析，高強度コンクリート，粗骨材絶対容積，端部拘束，横ひずみ

## 1. はじめに

従来、コンクリートの圧縮強度に最も影響を及ぼす因子は、水セメント比とされている。そのため、コンクリート強度の設計には、水セメント比の決定が不可欠となっている。

一方、同一水セメント比であるにも関わらず、粗骨材絶対容積に依存し高強度コンクリートの圧縮強度が変化するという現象が起きうることを Liu ら<sup>1)</sup>や野口ら<sup>2)</sup>は示している。しかしながら、この現象の要因となるようなメカニズムは未だ明らかになっていないのが現状である。

また、Van Mier ら<sup>3)</sup>は、載荷板の材質や供試体の寸法比によって端部の拘束の影響が変化し、コンクリート供試体の圧縮強度が変化することを報告している。

ところで近年、様々な画像計測手法がコンクリート要素や構造物の変形計測や破壊現象の解明に使用されてきた<sup>4), 5)</sup>。これらの利点は、通常のひずみゲージや変位計と異なり、非接触で対象物の2次元的な変形を計測することができることである。特に、画像解析の中でも、デジタル画像相関法という手法が T. C. Chu ら<sup>6)</sup>により開発、研究されてきた。この手法は、既にコンクリート分野にも適用された例がある<sup>7), 8)</sup>。本研究では、デジタル画像相関法を用いて、圧縮強度の変化現象を、コンクリートの圧縮破壊進展と関連づけることを試みる。デジタル画像相関法では破壊に直接関連するひび割れをひずみの卓越領域として容易に観察できるからである。このようにして得られた圧縮破壊進展の様子はコンクリートの破壊現象を捉える上で、非常に有用であると考えられる。

本研究では、同一水セメント比ならびに同一の端部拘束条件下で、粗骨材絶対容積の変化が高強度コンクリー

トの圧縮強度に及ぼす影響について明らかにする。さらに、デジタル画像相関法を用いた画像解析を実施して、粗骨材絶対容積の変化に伴う圧縮破壊進展の相違を画像解析より得られる情報を用いて検討する。すなわち、上記の圧縮強度の変化現象を、粗骨材絶対容積に依存した圧縮試験供試体の端部の拘束効果と関連づけて評価するものである。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料ならびに配合

表 - 1に、本研究で使用したセメント、細骨材、粗骨材、および混和剤の諸性状を示す。表 - 2には実験に用いたコンクリートの配合を示す。粗骨材絶対容積が、圧縮強度ならびに圧縮破壊進展に及ぼす影響を検討するため、実験ではすべての配合で同一の水セメント比(30%)とした。

この際、モルタル部の配合によって2つのシリーズの実験を行った。具体的には、粗骨材絶対容積の増加に伴いモルタル部の配合が一定であるシリーズと、細骨材の量が低下しモルタル部の配合が変化するシリーズの2シリーズである。モルタル部の配合は、水、細骨材およびセメントの質量比(以下、W:S:C)で評価することとした。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。ただし、粗骨材絶対容積の増加に従って、単位細骨材量は低下し、W:S:Cが1:5.51:3.33, 1:3.74:3.33, 1:1.09:3.33と変化する。なお、目標スランブおよび目標空気量はそれぞれ $20 \pm 3$ cm,  $2.5 \pm 2.0\%$ とした。

\*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 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	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	青梅産砕石	表乾密度 2.63 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.67 %, 最大寸法 20 mm
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>

表 - 2 示方配合

シリーズ	記号	粗骨材 最大寸法 (mm)	W : S : C	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	350-5.51	20	1 : 5.51 : 3.33	350	30	47.1	150	500	826	921
	450-5.51			450		36.8	126	419	693	1184
	550-5.51			550		27.7	102	339	560	1447
2	350-5.51		1 : 5.51 : 3.33	350		47.1	150	500	826	921
	450-3.74		1 : 3.74 : 3.33	450		32.0	150	500	561	1184
	550-1.09		1 : 1.09 : 3.33	550		16.9	150	500	296	1447

## 2.2 供試体概要

実験では、図 - 1 に示す 150×150×(50±3)mm の寸法を有する角柱供試体を使用し、一軸圧縮試験を実施した。通常、コンクリート表面はモルタルで充填されるために、均一な灰色である。このため、コンクリート供試体の表面の輝度値は一定になる。本研究で実施するデジタル画像相関法では、輝度値のランダムな分布を利用して画素の移動を追跡することで、供試体表面の変位を算出するものである。そこで、この供試体のデジタル画像相関法の測定の対象となる面には、輝度値のランダムな分布が現れるように工夫する必要がある。佐川ら<sup>7)</sup>は、黒色スプレーを利用してコンクリート供試体表面の輝度値が、ランダムになるように工夫している。本研究では、あらかじめ、150×150×200mm の角柱供試体を打設し、所定の養生日数経過後、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コンクリート供試体を切り出して作製した。そして、コンクリート供試体表面に粗骨材とモルタルを露出することで、コンクリート供試体表面の輝度値をランダムに分布させた(図 - 1)。

## 2.3 試験方法

圧縮強度を、JIS A 1108に準じて測定した。さらに、デジタル画像相関法を使用して圧縮破壊進展を観察するため、上記のように作製した角柱供試体を用いて一軸圧縮試験を行った。その際に、高精細デジタルカメラ(4368×2912画素)により供試体の撮影を行った。今回の画像計測における画素寸法は、約0.057mmである。高精細デジタルカメラは、三脚に固定して使用した。供試体表面からデジタルカメラまでの距離は、約500mmである。

実験中の太陽光や一般照明の影響を排除するため、試験機全体を暗幕でおおい、直流電圧で使用可能な発光ダ

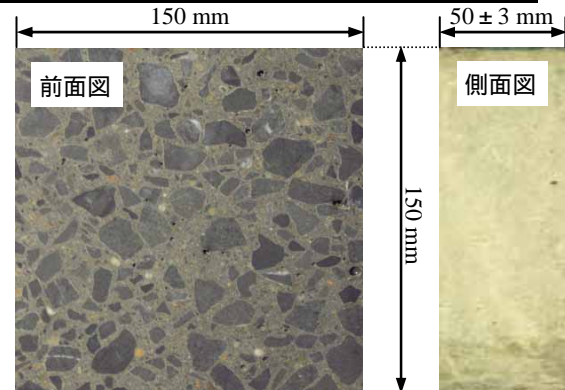


図 - 1 供試体概要図

イオード照明を使用した。載荷前に高精細デジタルカメラのキャリブレーションを行い、カメラレンズひずみの影響を除去するためのパラメータ、ならびにカメラの内部、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保持し、撮影を行った。

なお、載荷板と供試体の間に減摩パットを挿入すると供試体端部の摩擦が減少するが、奥行き方向への移動が生じてしまう。本研究で適用する画像解析では、奥行き方向への変位を生じた場合、これを計測出来ない。そのため、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。これらの拘束条件は全ケースで一律とした。

## 3. 画像解析概要

### 3.1 デジタル画像相関法概要

図 - 2には、デジタル画像相関法<sup>9)</sup>の概要図を示している。変形前画像内で選択した任意の注目画素周辺の領域の輝度値分布と最もよい相関を示す輝度値分布を有する変形後画像内の領域を探索する。この時、使用する画像内の領域をサブセットと呼ぶ(図 - 2)。この作業により、変形後の注目画素の位置ならびに注目画素の変位を算

出することができる。この処理を、複数回繰り返すことで全視野における二次元的な変位を推定することが可能となる。

### 3.2 解析方法

本研究では、図 - 3に示すようにコンクリートの角柱供試体表面の縦横2100個の画素(約120 mm)の範囲を解析対象としている。この領域内にて縦横25個の画素(約1.4 mm)間隔で、縦横85個の計7225個の画素を選択した。

サブセット領域内の輝度値分布の一致度を評価する類似度として輝度差の二乗和を使用した。まず、変形後の画像内でこの類似度が最小になる、すなわち輝度値分布の相違が最小になる画素の位置を算出する(画素の整数単位の探索)。次に、類似度が最小になる画素に隣接する画素の類似度を用い、類似度分布を連続的に補間して、類似度が極小になる位置を推定する。これにより、1画素よりも小さい単位(サブピクセル単位)で変形後の注目画素の位置を推定できる(画素の整数単位以下の探索)。サブピクセル単位での探索は、高精度の推定が可能と報告されており、2次元で同時にサブピクセル単位で推定可能な、清水らの手法<sup>9)</sup>に準拠して行った。サブセットの大きさを61×61個の画素領域として、注目する画素の輝度値分布を用いて変形前後の類似度を算出した。この作業を、変形後の画像における変形前注目画素から縦横61個の画素領域で実施し、変形後のサブピクセル単位での画像座標値を推定した。得られた画像座標値にカメラの収差補正を施し、画像の歪みによる影響を除去した<sup>10)</sup>。

ひび割れたコンクリートの圧縮強度の変化と圧縮力に垂直な方向におけるひずみは密接に関連していることが報告されている<sup>11)</sup>。そのため、本研究の圧縮破壊の評価には、載荷直交方向のひずみ、すなわち、横ひずみ(図 - 3における $\epsilon_x$ )を使用することとした。圧縮力を受けるコンクリート内では散在した複数箇所において発生したひび割れが、載荷と共に徐々に連結、成長する。これらのひび割れが、圧縮力に垂直な方向に開口しながら、進展する破壊を圧縮破壊として捉えることとした。

各水準で、最大荷重の60, 80, 90, 95%付近での横ひずみ分布を解析し、圧縮破壊進展を評価した。この際、平均横ひずみと横ひずみの二次元的分布を算出した。左右両端の列の座標値ならびに変形量を用い、全体的な平均横ひずみを算出した。さらに、領域内の変形前後の座標位置を元に、定ひずみ3角形要素の形状関数を用い、要素内変位を内挿し横ひずみ分布を算出した。

実際には、コンクリート内部の破壊機構は3次的に議論されなければならないと考えられる<sup>12)</sup>。しかしながら、本研究で実施する画像解析によって、3次的な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二次元的に理想化した破壊進展の評価を試みる。

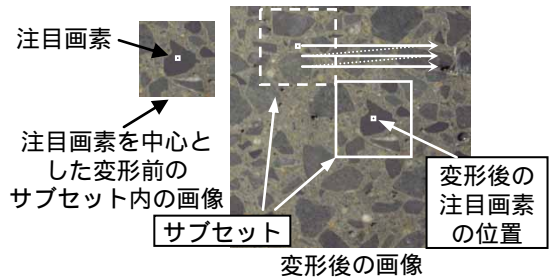


図 - 2 デジタル画像相関法概要図

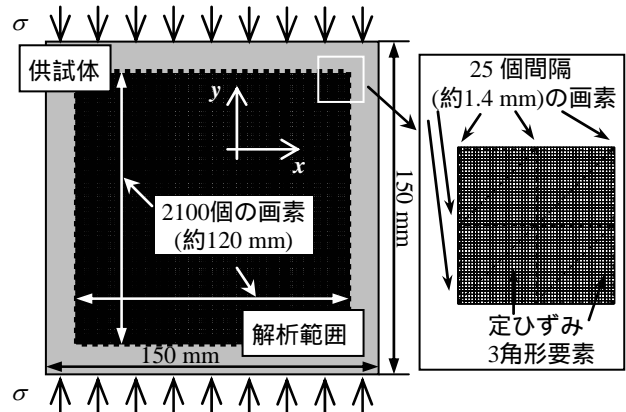


図 - 3 解析概要図

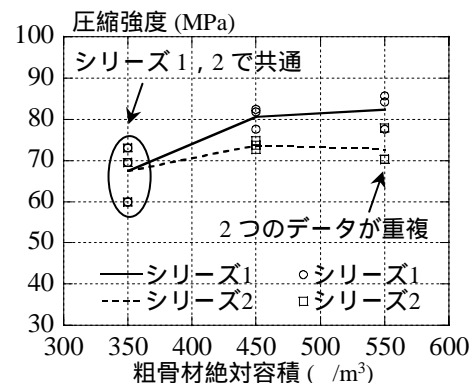


図 - 4 粗骨材絶対容積と圧縮強度の関係

### 4. 圧縮強度

図 - 4に、粗骨材絶対容積と圧縮強度の関係を示す。ここで、JIS A 1108に準拠して測定した圧縮強度は、各試験水準の供試体数3体の平均値を直線で示し、全データをプロットしている。これらの水セメント比は同一であるが、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。このような粗骨材絶対容積に依存して圧縮強度が増加する現象は、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。

本実験では、粗骨材絶対容積のみならず、W : S : Cにも依存して圧縮強度が変化する現象を確認した。図 - 4に示すようにシリーズ1では、粗骨材絶対容積の増大に伴い、圧縮強度が増加している。シリーズ2でも、粗骨材絶対容積350ℓ/m<sup>3</sup>の圧縮強度より、粗骨材絶対容積450, 550ℓ/m<sup>3</sup>の圧縮強度が大きい。しかし、W : S : Cが一定の

場合のように粗骨材絶対容積の増加に伴って、圧縮強度が顕著に増加していない傾向にある。

## 5. 画像解析結果

### 5.1 平均横ひずみ

図 - 5 には、角柱供試体の一軸圧縮試験より得られた各供試体の各荷重段階で撮影された画像を用いて、算出された画像解析領域内の高さ方向の平均横ひずみの変化の様子を示したものである。本研究では、この平均横ひずみを用いた端部拘束の影響の評価に、最大荷重の95%時の供試体高さ中央部付近の平均横ひずみの供試体端部付近の平均横ひずみに対する比率(図 - 5 )を用いることとした。供試体上下端部付近での平均横ひずみのうち、ひび割れの開口により平均横ひずみが大きくなっている方を供試体端部付近での平均横ひずみとして採用した。

供試体 350-5.51 と比較して粗骨材絶対容積を増大させ圧縮強度が増加した供試体 450-5.51, 550-5.51, 450-3.74 および 550-1.09 では、最大荷重の95%の供試体高さ中央部付近と供試体端部付近における平均横ひずみの比率が大きくなっており、端部拘束の増大の様子が伺える。

### 5.2 横ひずみ分布

図 - 6は、一軸圧縮試験を実施した際に撮影した画像を用いて、デジタル画像相関法により得られた横ひずみ分布である。損傷により生じたと考えられるひずみ卓越領域を観察することで、コンクリート供試体の破壊進展を評価することが可能になると考える。

上迫田ら<sup>13)</sup>は、普通砕石を使用した高強度コンクリートの角柱供試体を用いて端部の摩擦を除去した一軸圧縮試験を実施している。そして、圧縮破壊後には、端部の拘束を受けない高強度コンクリート供試体に縦ひび割れが形成されることを報告している。この場合、単位粗骨材量は、 $800 \sim 1000 \text{kg/m}^3$ であり、本研究の粗骨材絶対容積 $350 \text{l/m}^3$ に相当するものと考えられる。ただし、上迫田らの行った実験の供試体寸法は $200 \times 200 \times 50 \text{mm}$ であり、本研究の供試体寸法とは異なる。寸法の相違による圧縮破壊機構に対する影響があると考えられるものの、供試体の縦横の比率が同一であるため上迫田らによる実験結果を参照した。本研究では、端部の拘束の影響を除去していないにも関わらず、350-5.51の供試体の最大荷重の95%で図の実線の長方形で囲んだ領域に縦ひび割れと考えられる局所的に卓越した横ひずみの発生が確認できる。450-5.51, 550-5.51, 450-3.74および550-1.09の供試体でも、最大荷重の60%で図の実線の長方形で囲んだ領域に縦ひび割れが確認できる。

シリーズ1で、圧縮強度の増加が顕著であった450-5.51ならびに550-5.51では、縦ひび割れのみならず図の実線

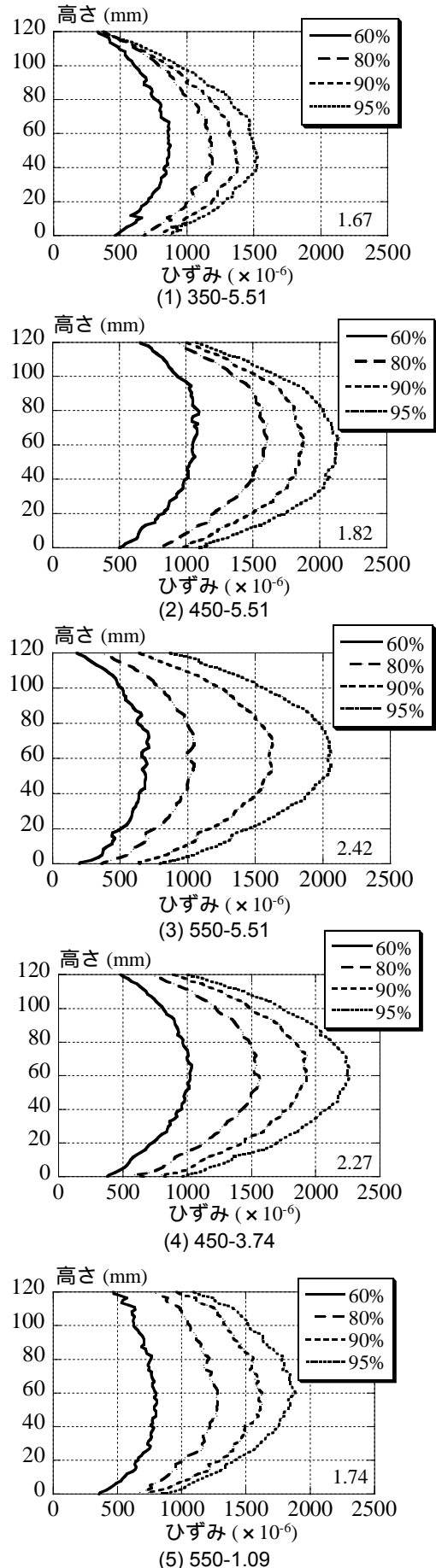
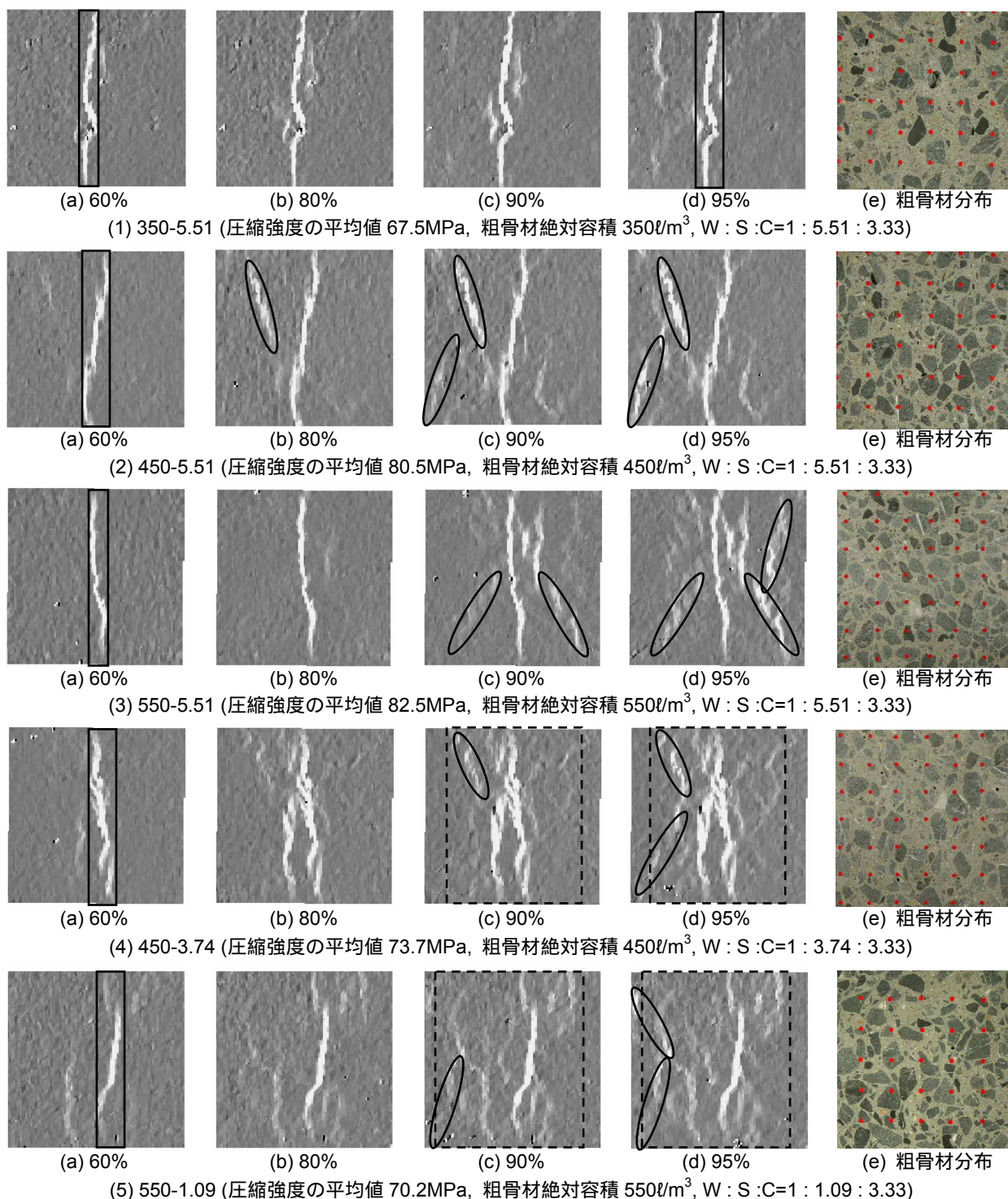


図 - 5 平均横ひずみ



の楕円で囲んだ領域に対角線方向に連結した斜めひび割れが形成されている。荷重の進行により、中央部に形成された割裂状のひび割れ幅が拡大する。端部が拘束され、端部の拘束効果が大きくなると、供試体中央のひび割れ幅のみが大きくなる。この結果、斜めひび割れが形成されると考えられる。

シリーズ2の450-3.74ならびに550-1.09の供試体では、最大荷重の90%付近から図の楕円で囲んだ領域の斜めひび割れの他に、図の波線の長方形で囲んだ領域に多数のひび割れが形成されている。

図 - 6 横ひずみ分布

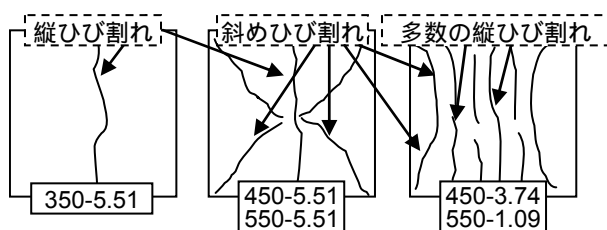


図 - 7 供試体のひび割れパターン

図-7に、試験で観察された最大荷重の95%時のひび割れパターンの模式図を示している。圧縮強度が増加した供試体では、最大荷重の95%で図に示すような斜めひび割れがみられた。

### 5.3 圧縮破壊機構の考察

シリーズ1で粗骨材絶対容積を増大させると、供試体高さ中央部付近の平均横ひずみの供試体端部付近における平均横ひずみに対する比率が増大すると共に、斜めひび割れが形成されていた。コンクリート供試体の圧縮試験では、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、供試体端部の拘束の影響であることが報告されている<sup>3)</sup>。また、端部の拘束が大きいほど、コンクリート供試体の圧縮強度が増加することが報告されている<sup>3)</sup>。同一拘束条件下であるにも関わらず、斜めひび割れの発生のような各供試体の拘束効果が異なっている。これは、コンクリートの粗骨材絶対容積に依存し端部の拘束効果に変化しているためと考えられる。粗骨材絶対容積の増大に伴って端部の拘束による供試体内部の拘束機構が顕著になると考えられる。このように、供試体高さ中央部付近と供試体端部付近における平均横ひずみの比率が増加し、供試体に斜めのひび割れが確認される場合には、供試体端部の拘束効果が顕著になっているものと考えられる。

シリーズ2の450-3.74ならびに550-1.09の供試体では、斜めひび割れ以外の多数の縦ひび割れの発生や進展に伴って、供試体端部付近と供試体高さ中央部付近における平均横ひずみの比率が増大した。450-3.74ならびに550-1.09の供試体の圧縮強度が450-5.51ならびに550-5.51の供試体の圧縮強度ほど増加しなかったのは、多数の縦ひび割れの発生に起因していると考えられる。

## 6. まとめ

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 供試体端部の拘束条件を同一とした場合、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した。この場合、 $W:S:C$ を一律にすると増加が著しい。しかしながら、粗骨材絶対容積の増加に伴って、モルタル部の細骨材の割合が低下するように $W:S:C$ を変化させると、圧縮強度の増加は顕著ではなくなる。
- (2) 供試体高さ中央部付近と供試体端部付近における平均横ひずみの比率が増大し、斜めひび割れを伴う圧縮供試体では、端部の拘束効果が顕著になっていると考えられ、供試体の圧縮強度の増加がみられる。
- (3) 上記のように端部の拘束効果によって依存して現れる現象は、載荷板の材質や供試体の寸法比のみならず、コンクリートの内部因子によっても変化するも

のと考えられる。

## 謝辞

本研究の一部は、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。

## 参考文献

- 1) Liu, Y. et al.: Mechanical properties of high strength concrete, *Cement Science and Concrete Technology*, Vol.61, pp.412-419, Mar. 2008
- 2) 野口貴文ら：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
- 3) Van Mier, J. G. et al.: Strain-softening of concrete in uniaxial compression, *Materials and Structures*, Vol.30, pp.195-209, May 1997
- 4) 松尾豊史ら：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.69-77，2004.5
- 5) 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.99-112，1978.11
- 6) Chu, T. C. et al.: Application of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics, *Experimental Mechanics*, Vol.25, No.3, pp.232-244, Sept. 1985
- 7) 佐川康貴ら：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.20-26，2007.6
- 8) Choi, S. et al.: Propagation of microcracks in concrete studied with subregion scanning computer vision, *ACI Materials Journal*, Vol.96, No.2, pp.255-261, Mar-Apr. 1999
- 9) 清水雅夫ら：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.554-564，2004.2
- 10) 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，東京書籍印刷株式会社，2008
- 11) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，2008
- 12) 和泉正哲ら：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.11-25，1980.3
- 13) 上迫田和人ら：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.177-180，1982.4