

論文 コンクリートひび割れ近傍ひずみ計測におけるデジタル画像相関法適用に関する考察

根本 結衣*1・高橋 典之*2

要旨：ノッチ付き RC 梁の 4 点載荷試験に 2 次元デジタル画像相関法（以下 DIC とする）を適用した実験を行った。既往の研究では DIC を適用する場合はできるだけ大きなサイズのファセットを適用することで精度が安定することが指摘されてきたが、ひび割れをまたぐ不連続部に DIC を適用する場合、ファセットサイズが大きすぎると局所的なひずみの計測値が過剰に平滑化され、精度が悪化する場合がある。そこで、ひび割れをまたぐ位置におけるひずみ計測において、従来のひずみゲージによる計測結果との比較が可能となるような DIC 計測による最適ファセットサイズについて検討した。

キーワード：デジタル画像相関法、ひび割れ進展、損傷量評価

1. はじめに

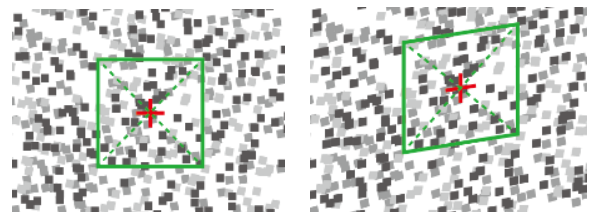
ひび割れが進展する RC 部材表面のコンクリートのひずみを計測しようとする際、ひずみが集中するひび割れ位置を狙ってひずみゲージを貼り付け、コンクリート表面のひずみを計測するのは困難である。実際に 2012 年の伊藤の研究¹⁾ではひずみゲージを用いてひび割れ近傍のひずみ計測を試みたが、ひび割れ発生位置を厳密に狙えず計測がうまくいかない部分もあった。そこで有効であるのが、ピクセルの集まりからなるデジタル画像の特性を利用した、非接触で面的なひずみ計測が可能なデジタル画像相関法²⁾（以下 DIC とする。）である。ひずみゲージを用いた計測ではゲージを設置した箇所のみを計測だが、DIC を用いることで部材全体のひずみ計測が可能になる。

DIC の解析原理^{2), 3)}は、測定対象物表面の模様のランダム性を基にして、測定対象物の模様の変形を撮影し、得られたデジタル画像の輝度地分布から測定対象物表面の変形量と方向を同時に求めるものである。図-1(a)に示すように、変形前の画像において、任意の点（1 画素）を中心とした $N \times N$ 画素の任意領域（ファセット）を指定する。計測対象物に変位を与えると、変形後の画像でのファセットの位置は変化する。変形後のファセットを対象に、変形前のファセットの輝度値分布と高い相関性を示すファセットを数値解析で探索し、ファセット中心の離散変位分布を得る。そして図-1(b)のように離散変位を基に、移動最小二乗法⁴⁾により滑らかな 2 次元分布を構成しそこから任意の点のひずみを求める。

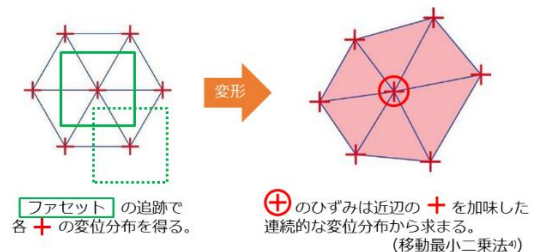
ファセット間距離はファセットサイズの 0.8 倍の大きさが解析するうえで望ましいといわれており⁵⁾、つまりファセットの大きさがひずみの平滑化に影響するといえる。ファセットが小さいほど局所的なひずみを計測し、

大きいほど広域的なひずみを計測する。

鉄骨造などの連続体（弾性範囲内）に DIC を適用する場合、ファセットサイズを大きくするほど計測精度が安



変形前 変形後
(a) ファセットの位置の変化の概略図



(b) 連続的な変位分布への変換の概略図

図-1 DIC の解析原理の概要

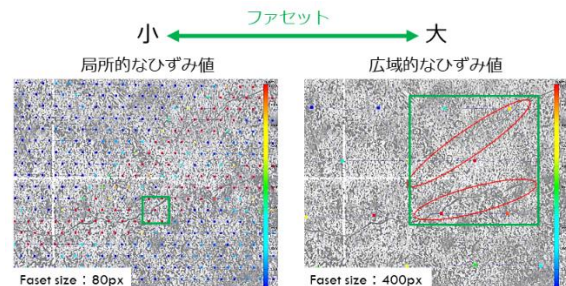


図-2 大きすぎるファセットサイズの例

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 (学生会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科 准教授 博(工) (正会員)

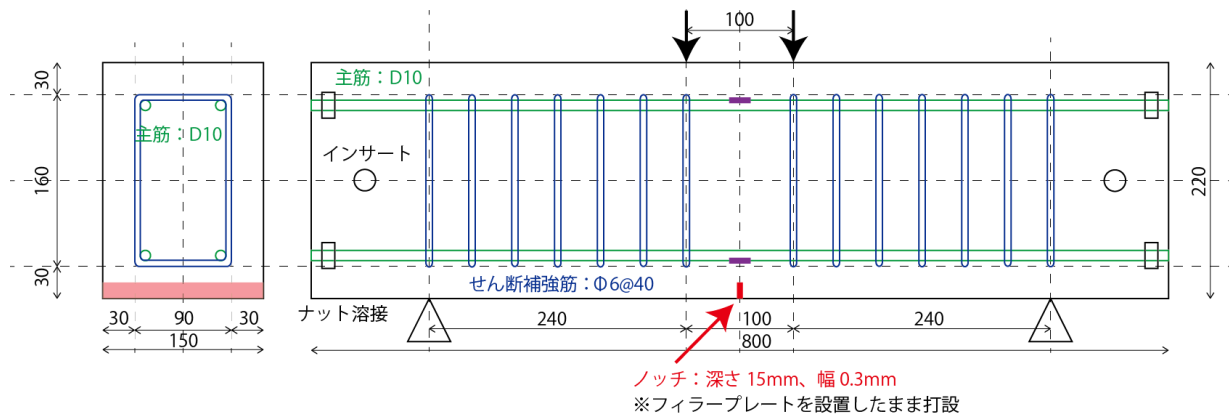


図-3 試験体配筋図 単位[mm]

定することが分かっている⁴⁾。一方で、コンクリート表面に生じるひび割れとひずみの関係を分析するにあたり、ファセットサイズが大きく、図-2 右側の赤丸で囲んだように複数本のひび割れを内包する設定となると、ひずみを過剰に平滑化してしまい、ひび割れ 1 本あたりの近傍ひずみデータが得られなくなる。

そこで本研究では、ひび割れ発生位置を固定するノッチを入れた RC 梁試験体の荷重試験において DIC を適用し、ファセットサイズの大きさを解析条件とし、ひずみゲージから得られるひずみ計測値と、DIC から得られるひずみ計測値を比較することで、コンクリート表面に生じるひび割れ近傍のひずみを計測する際に、ひずみゲージによる計測結果と比較可能となるような、DIC 解析における最適なファセットサイズ(解析条件)を検討する。

2. 試験体概要

ノッチ付き梁試験体を 4 体作成した。梁断面は 150mm × 220mm、長さ 800mm である。長さ 400mm の位置に厚さ 0.3mm のプレートで 15mm の深さで挟んで打設している。試験体配筋図を図-3 に、試験体諸元を表-1 にそれぞれ示す。

4 点曲げ試験において、ノッチを含む試験体の曲げ区間 (100mm) に、図-4 に示すように、部材せい面片側表面にはひずみゲージを貼り付け、反対側表面には DIC 解析用に艶消しカラースプレーを用いてランダムパターンを塗布した。ひずみゲージはゲージ長 10mm の塑性ゲージをロゼット解析ができるように三方向 (材軸方向、材軸から 45° 方向、材軸から 90° 方向) 上下 2 か所設置した (図-5)。

また、ランダムパターンの基となるスペックルサイズは使用するカメラの画素数に対して 3~5px ほどの大きさが望ましいといわれており⁵⁾、本実験では 0.5~1mm のスペックルサイズとなるように模様を塗布した (図-6)。

表-1 試験体諸元

梁[mm]	B×D×L	150×220×800 ※L=400 位置にノッチ
	主筋	2-D10 (SD295A)
	あばら筋	Φ6 (SR235) @40
コンクリート [MPa]	σ_B	26.1
	E_C	23300
	σ_T	2.10

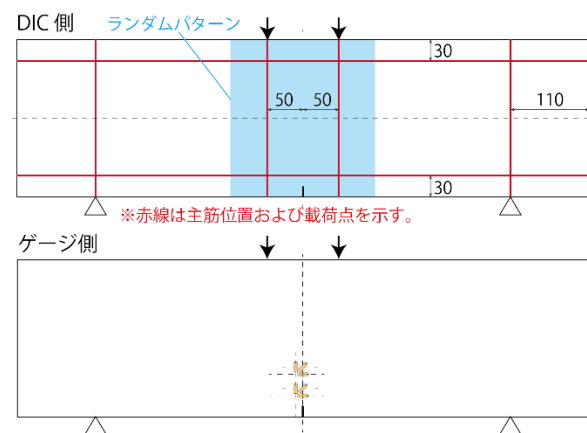


図-4 試験体側面図 単位[mm]

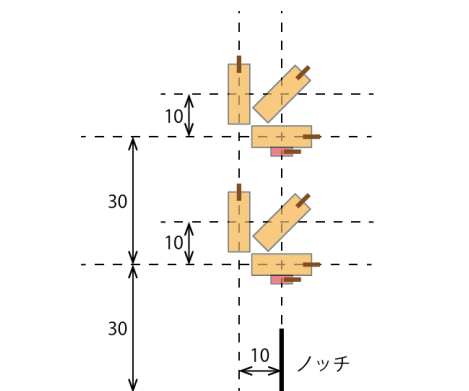


図-5 ひずみゲージ 単位[mm]

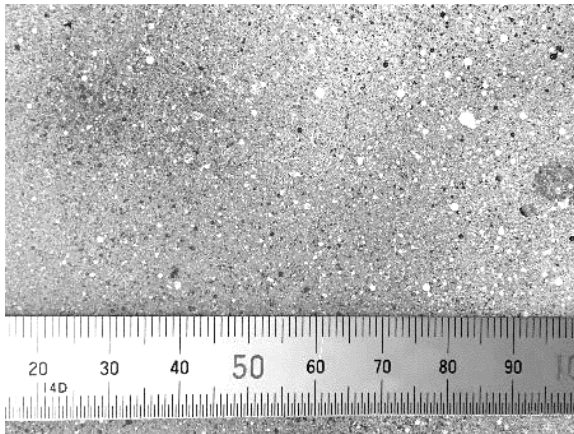


図-6 ランダムパターンの様子

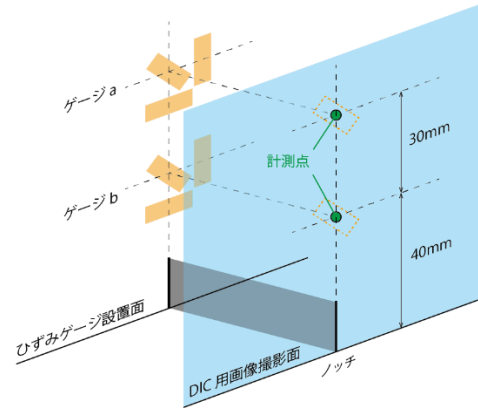


図-9 DIC ひずみの抽出

表-2 載荷・撮影計画

試験体	載荷速度 mm/min	平均ひずみ速度		画像切り出し時間間隔 s
		計画 μ/sec	実際の値 μ/sec	
1	3.6	120	134	1
2	3.6	120	115	1
3	72	2400	2240	0.1
4	72	2400	2600	0.1

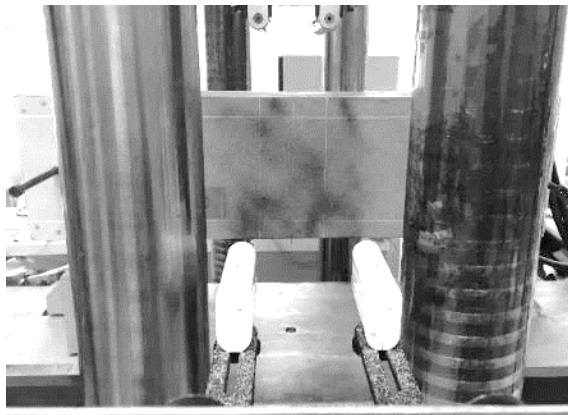
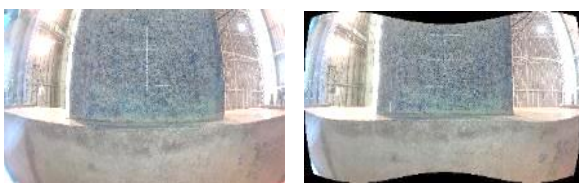


図-7 撮影の様子



補正前 補正後

図-8 樽型収差補正の例

3. 実験計画

載荷計画および撮影計画についてまとめたものを表-2に示す。

3.1 載荷計画

本実験は2パターンの載荷速度について試験体2体ずつ（計4体）を用いて、支点間距離 580mm，加力点間距離 100mm の4点曲げ載荷試験を押し切りで実施した。載荷速度の違いは、動的載荷実験へのDICの適用を想定し、動画フレームレート（fps）による切り出し画像の精細度がDICに与える影響を見るためのものである。表-2中の平均ひずみ速度は引張主筋の平均ひずみ速度を示し、ひずみがゼロのときから引張主筋が降伏するまでの平均値として算出した。

3.2 撮影計画

本実験での画像取得には、市販の4K解像度アクションカム（3840×2160 pixel）を用いている。DIC計測においては、専用機器を用いることが多いが、本研究ではコンクリートの剥落片や粉じんでカメラが故障する可能性がある動的載荷実験や現場環境の悪い状態でDICを適用することを想定した機種選定としている。

圧縮試験機の柱の間から試験体を撮影できるように三脚を設置し、アクションカムを固定した。撮影の様子を図-7に示す。撮影したデジタル画像の解像度は約0.2mm/pixelである。撮影面と反対側に設置したゲージ長10mmのひずみゲージは長手方向において約50pixelで構成される。

各試験体とも載荷開始とともに30fpsで動画を撮影し、載荷速度3.6mm/minは1s（30フレーム）おきに、載荷速度72mm/minは0.1s（3フレーム）おきに画像を切り出しDIC解析に使用した。

なお、市販のアクションカムで4K撮影を実施する場合、一般的には広角撮影用のレンズが採用されている。そのため撮影した画像（動画）には樽型収差が生じる。そこで、載荷前の画像から本実験固有の樽型収差を解消するデジタルフィルタを作成し、切り出した画像を補正したうえでDIC解析に用いることにした。図-8に樽型収差の補正例を示す。なお、本実験では補正とあわせて

色情報をグレースケール化している。

3.3 各ひずみ計測値の比較

DIC 解析には GOM Correlate2018⁵⁾を用いた。全画面のひずみ分布を算出できるが、分析にあたっては、背面のひずみゲージ貼り付け部分と対応する位置のひずみ計測結果を抽出することとした。ロゼット解析におけるひずみ計測点は 3 枚のゲージの計測方向軸線の交点にあたるが、ひび割れ進展経路上に単軸ゲージのゲージ長が重なることも目的としてゲージを貼り付けており、ノッチ軸線上とロゼット計測点とは僅かにずれている。一方、DIC 計測においては、ひび割れ進展経路を踏まえ、図-9 に示す材軸 45° 方向のひずみゲージ中心位置で計測される主ひずみデータを用いることとした。なお、予備検討において、ひずみゲージによるロゼット解析結果の主ひずみと DIC 計測における当該位置の主歪み計測結果が主ひずみの方向と大きさ共に近似することを確認している。また、ロゼット解析用に用いるゲージ位置 a は引張縁からノッチ軸線上 70mm の点に材軸 45° 方向のひずみゲージ中心位置が、ゲージ位置 b は同じく 40mm の点に材軸 45° 方向のひずみゲージ中心位置があたるように貼り付けている。

4. 実験結果および考察

4.1 荷重－変位関係

各試験体の荷重変位関係を図-10 に示す。各試験体の最大荷重は、試験体 1 から順に 111.4kN, 113.6kN, 114.6kN, 117.4kN であった。

4.2 ひび割れ状況

試験体 2 および 4 の最終ひび割れ状況を図-11 に示す。それぞれ上図が DIC 側のひび割れ状況、下図がひずみゲージ付近のひび割れ状況である。なお、試験体 1 及び 3 についてはそれぞれ 2,4 に傾向が似ていることからひび割れ状況の図示を割愛する。ノッチから材軸直交方向に曲げひび割れが入るとほぼ同時に、曲げせん断区間において斜めひび割れも進展し始めた。ひずみゲージ貼り付け面のひび割れ状況は DIC 計測面側と完全対称とはいえないが、おおむね似た状況であり、試験体 1 のゲージ位置 b と試験体 3 のゲージ位置 a 以外では、ゲージ長の内部を貫くようにひび割れが進展し、約 20000 μ でゲージが切れた。

4.3 DIC 解析結果

3 章に記述したひずみの比較方法に従い DIC による歪み計測値とひずみゲージによる計測値を比較するが、ひび割れ進展位置に応じて (3 章に記載した計測点から) DIC 計測点を一部変更している。具体的には、試験体 2 ではゲージ位置 a より右に 4mm の点を、試験体 4 ではゲージ位置 a より左に 10mm の点を計測点とした。

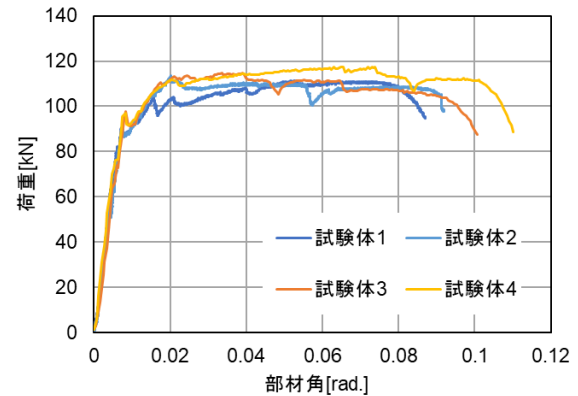
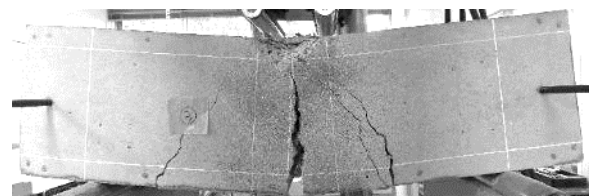
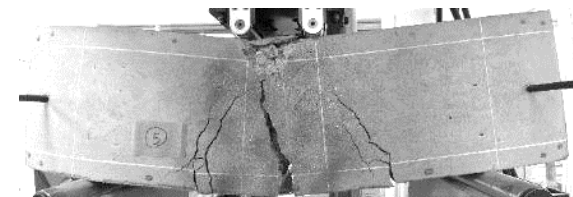


図-10 荷重－変位関係

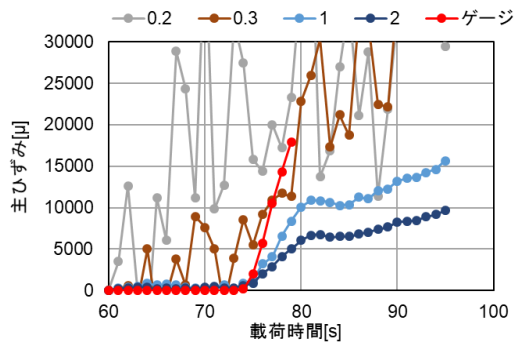


(a) 試験体 2

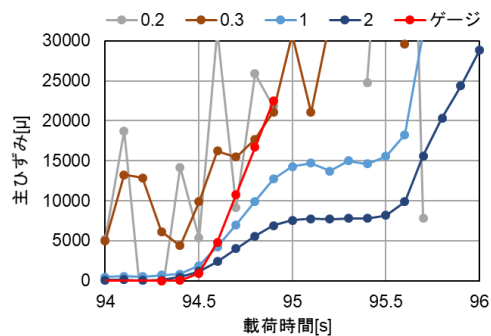


(b) 試験体 4

図-11 各試験体の最終ひび割れ状況

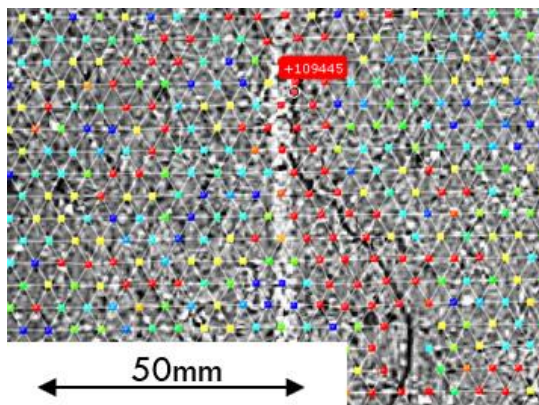


(a) 試験体 2 (荷重速度 3.6mm/min)

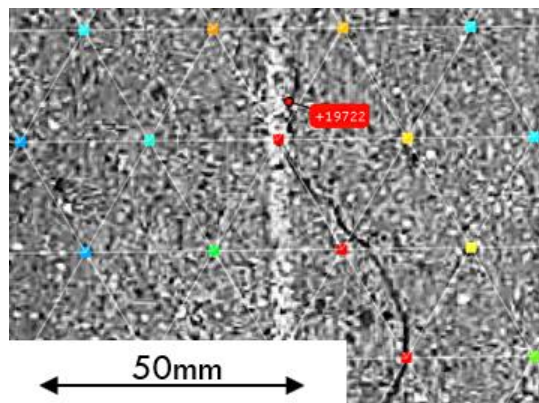


(b) 試験体 4 (荷重速度 72mm/min)

図-12 主ひずみ比較によるファセットサイズ上下限の検討



(a) ゲージ長比=0.3



(b) ゲージ長比=2

図-13 各ファセットサイズにおけるファセット中心点の分布の例

(1) ファセットサイズ上下限の検討

各試験体のゲージ貼り付け位置 a および b についてゲージと DIC の主ひずみ値を比較した。ゲージ内部を貫くひび割れについては、ひび割れ状況同様 DIC 計測面側と完全一致とはいえないが、概ね似た主ひずみ値を示した。例として、図-12(a)に試験体 2 のゲージ貼り付け位置 a と DIC の主ひずみ値を比較したグラフを、また図-12(b)に試験体 4 のゲージ貼り付け位置 a と DIC の主ひずみ値を比較したグラフをそれぞれ示す。縦軸は主ひずみの大きさ、横軸は荷重開始からの経過時間である。凡例は用いたゲージ長の DIC 解析画像における長さ (約 50pixel) を 1 とした時のファセットの 1 辺の長さの比を示す (ファセットサイズ[pixel]/ゲージ長[pixel]と定め、以下これを「ゲージ長比」と呼ぶ)。またファセット間距離は前述のとおりファセット 1 辺のピクセル数の 0.8 倍とした。

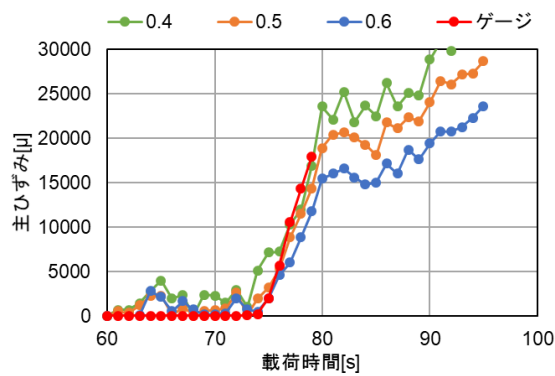
検討の結果、DIC 解析が遂行可能な最小ファセットサイズ (ファセットサイズ下限値) はゲージ長比=0.3 であった。ただし図-12 から分かるように、ゲージ長比=0.3 は DIC 解析が全時間で遂行可能なだけでなく、得られた結果はひずみゲージによる計測結果と比較すると誤差が 10000μ 以上ある部分もあり、精度が良いとは言えない。

一方、ファセットサイズの上限については解析が遂行不可能となる上限値を求めることはできなかったが、ゲージ長比を 1, 2 と大きくするにつれ、図-12 のグラフにおいてひずみゲージによるひずみ計測結果と (時間を追うごとに) 乖離が生じる結果となった。これは、ファセット間距離が大きくなりすぎることで、ひずみゲージが計測しているひび割れ近傍のひずみだけでなく、周りのひずみが小さい部分も含んだひずみを計測したためと考えられる。すなわち、ゲージ長を超える大きすぎるファセットサイズはひび割れ近傍の局所的なひずみを過剰に平滑化してしまい、コンクリート表面に生じるひび割れ近傍のひずみの計測には適切でないといえる。

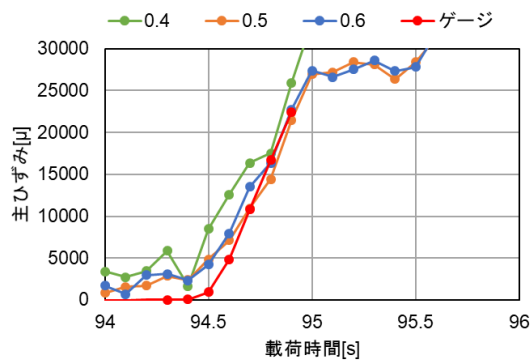
参考までに、ゲージ長比=0.3 および 2 のときのファセット中心点分布図を図-13 に示す。色のついた四角形がファセットの中心点を示し、白い直線はファセット間距離を示す。また数字はゲージ貼り付け位置 a における DIC 計測から得られた主ひずみの値である。図-13(a)(b) どちらも同じ位置の画像を切り出したもので、約 0.6mm のひび割れが入っている状態である。

(2) 最適なファセットサイズの検討

図-14 に、図-12 と同条件の試験に対して、ゲージ長比が 1 よりも小さいゲージ長比のファセットサイズで DIC による主ひずみ計測をした結果を示す。また、表-3 にひずみゲージと DIC の主ひずみの誤差比を示す。ただし、ひび割れ発生時およびそれ以降のひずみ計測を目的としていることから、表-3 の誤差比は主ひずみが



(a) 試験体 2 (荷重速度 3.6mm/min)



(b) 試験体 4 (荷重速度 72mm/min)

図-14 主ひずみ比較による最適ファセットサイズの検討

表-3 ひずみゲージと DIC の誤差比 単位[%]

ゲージ長比	試験体 2	試験体 4
0.3	240%	70%
0.4	64%	58%
0.5	<u>-2%</u>	<u>8%</u>
0.6	-9%	22%
0.8	-34%	-3%
1	-46%	-33%
1.2	-55%	-39%
2	-64%	-62%

200μ 以上の範囲を対象としている。

図-14 において試験体 2 および試験体 4 ともに、ゲージ長比=0.5 の場合が、最もひずみゲージによるひずみ計測結果を近似する結果となった。表-3 においてもゲージ長比=0.5 の場合が最も誤差が小さいことが分かる。

これより、コンクリート表面に生じるひび割れ近傍のひずみ計測に DIC を適用する場合、ファセットの 1 辺の大きさは、ひずみゲージのゲージ長に対して 0.5 倍の大

きさにすると、従来のひずみゲージによる計測方法と近い結果が得られると考えられる。言い換えると、既往の研究結果との比較検討を行うにあたり、ファセットサイズが不適切な DIC 解析によるひずみ計測結果を用いた場合、従来のひずみゲージによるひずみ計測結果との比較検討や分析に適さないデータを提供することになる点に注意が必要である。

5. まとめ

ノッチ付きの梁部材の 4 点曲げ荷重試験において、DIC を適用し、コンクリート表面に生じるひび割れ近傍のひずみを計測するために最適な解析条件（ファセットサイズ）を検討した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) ゲージ長以上のファセットサイズを用いた場合、ひび割れ近傍の局所的なひずみを過剰に平滑化してしまう。そのため、ゲージ長以上のファセットサイズはコンクリート表面に生じるひび割れ近傍のひずみの計測には不適切なサイズであると考えられる。
- (2) コンクリート表面に生じるひび割れ近傍のひずみ計測に DIC を適用する場合、ファセットの 1 辺の大きさはひずみゲージのゲージ長に対して 0.5 倍の大きさにすると、最もひずみゲージによる計測値を近似する結果となった。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費基盤研究(C)（課題番号：18K04422、研究代表者：高橋典之）、および、松井角平記念財団研究助成金の助成を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 伊藤洋一：鉄筋コンクリート梁部材のひび割れ長さ評価手法に関する研究，東京大学修士論文，2012.3
- 2) Peters W, Ranson W: Digital imaging techniques in experimental stress analysis, Opt Eng, Vol.21(3), pp.427-431, 1982
- 3) 長崎大学工学部インフラ長寿命化センター：光学的非接触全視野計測法によるコンクリート構造物のマルチスケール診断法の開発，国土交通省建設技術研究開発費補助金総合研究報告書，2010.7
- 4) 穴戸信之：デジタル画像相関法を用いた微細領域ひずみ場計測とその工学的応用，京都大学博士論文，2009.9
- 5) GOM GmbH. : GOM Testing—Technical Documentation as of V8 SR1, Digital Image Correlation and Strain Computation Basics, 2016