

論文 画像解析を用いたリアルタイム非接触ひずみ計測領域の広域化

梁田 真広^{*1}・松本 浩嗣^{*2}・二羽 淳一郎^{*3}

要旨：本研究では、コンクリート構造物の載荷実験中に供試体表面に発生するひずみ分布を描画する、画像解析を用いたリアルタイム非接触ひずみ計測の広域化を試みた。本システムにより、複数台のデジタルカメラにより撮影された画像を統合し、ひずみ分布を算出することで、供試体の広範囲に対してひずみ分布を可視化した。開発されたシステムを、破壊部位が載荷実験前に不明である斜め引張破壊型 RC はりの載荷実験に適用したところ、ピーク荷重直前において破壊箇所を同定することができた。この結果から、拡張されたシステムが供試体の破壊性状を載荷実験中にリアルタイムに予測できる可能性を示した。

キーワード：画像解析, リアルタイム, 主引張ひずみ, 統合画像, 非接触ひずみ計測

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)構造実験において、従来ではひずみゲージや変位計などの各種計測機器が供試体の変形情報を得るために用いられてきた。しかし、機器の設置位置に依存した計測になり、供試体の破壊時期や破壊部分の同定が困難であることが欠点として挙げられる。一方、最近では、デジタルカメラを用いた画像解析による計測手法が、コンクリート構造分野において盛んに用いられている¹⁾。この手法の利点として、非接触の計測で、かつ供試体全体の変形挙動を可視化できることが挙げられる。また、破壊部位をピーク荷重直前に予測することができれば、破壊形態の観察が容易になる。そこで、東ら²⁾は、ひずみの局所化領域を瞬時に把握し、供試体の破壊モードを実験中に予測することを目的とし、リアルタイム非接触ひずみ計測システムを開発した。このシステムにより供試体の写真撮影と同時にひずみの局所化を可視化することができ、終局時の破壊モードを載荷実験中に予測することに成功している。載荷実験中に供試体に分布するひずみの情報を得ることで、観察のために載荷を中断する必要がなくなり、実験結果の信頼性向上が図れる。しかし、東らの開発したシステムは、デジタルカメラ一台の撮影範囲しか対応できないことが課題であった。実構造物大の供試体の実験を想定すると、計測範囲を拡大したリアルタイム画像解析システムの構築が必要である。

そこで本研究では、大型供試体に対応すべく、リアルタイム非接触ひずみ計測システムの広域化を試みた。具体的には、デジタルカメラ複数台で撮影した画像をリアルタイムに統合、ひずみの算出を行い、ひずみ分布を可視化するシステムへの拡張を図った。そして、広域化されたシステムを、左右のせん断スパンで等しいせん断補

強鉄筋比をもつ斜め引張型の RC はりの載荷実験に適用し、実験中にひび割れ進展の観察、および破壊部位の予測および特定を行った。

2. 広域化リアルタイムシステムの概要

2.1 リアルタイムシステムの構成

広域化したシステムでは、複数台のデジタルカメラにより撮影された供試体の画像を画像処理により統合し、一枚の画像にした上で、東ら²⁾が用いた格子法を適用することでひずみの分布を算出する。図-1 に、カメラを4台用いた際のシステムの構成を示す。デジタルカメラは、一台をメインコンピューター(メイン PC)に接続し、他のデジタルカメラはそれぞれサブコンピューター(サブ PC)に USB ケーブルにより接続する。また、コンピューター同士は、ハブと LAN ケーブルを介することでネットワークを構築する。画像撮影は各コンピューターで操作され、撮影された画像はネットワークを経由してメインコンピューターに転送され、共有のフォルダに保存される。そして、転送された画像に対して、メインコンピューター内で統合および画像処理を行い、ターゲットの重心座標の算出、ひずみ分布の算出、およびひずみ分布の可視化が実行される。

2.2 ターゲットの寸法と配置間隔

格子法における節点には、円形のシールをターゲットとして用いる。ターゲットの色は、松尾³⁾らの研究を参考に、赤色を採用した。また、渡辺ら⁴⁾は、できるだけ多くの節点で変位量を計測するという理由と、ひび割れの通過によるターゲットの剥離の可能性を少なくするという理由から、ターゲットの間隔として 20mm を推奨している。また、ターゲットの寸法は、直径 5mm と 9mm では精度に明確な差は見られないことを報告しており、

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (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 博(工) (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)

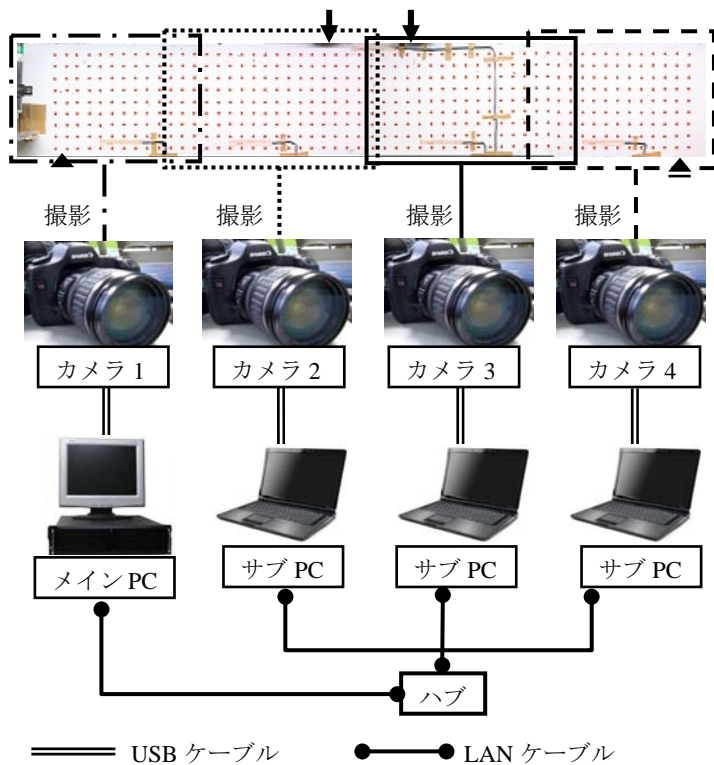


図-1 広域化リアルタイム非接触ひずみ計測システムの構成
(デジタルカメラを4台用いた場合)

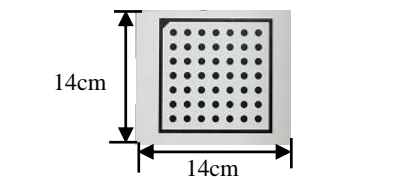
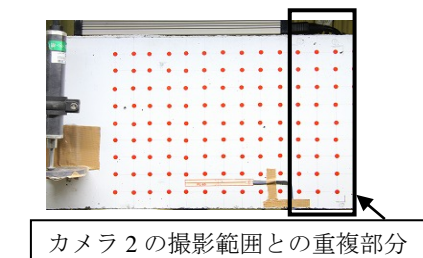
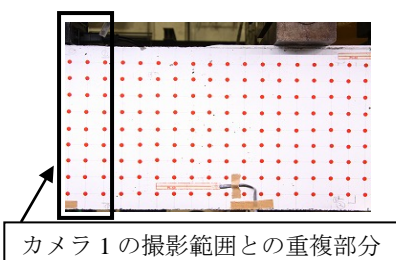


図-2 キャリブレーションプレート

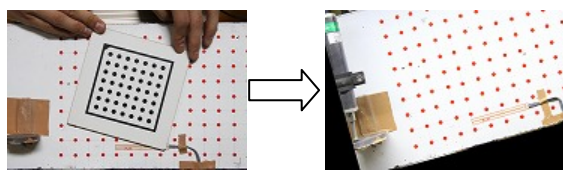


(a) カメラ1の撮影範囲

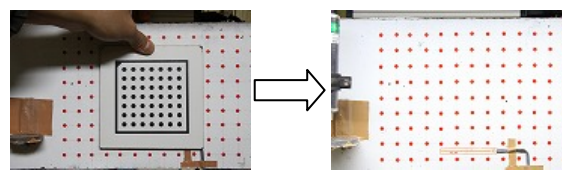


(b) カメラ2の撮影範囲

図-3 撮影範囲共有の例



(a) プレートを傾斜させた場合



(b) プレートを水平にした場合

図-4 一枚目のキャリブレーション画像による統合画像への補正の変化

ひび割れの通過による剥離を防止する目的で直径 5mm のターゲットを採用している。以上より、本研究においても、ターゲットの間隔を 20mm, 直径を 5mm とした。

2.3 カメラのキャリブレーションと画像の統合⁵⁾

一般に、デジタルカメラのレンズは曲面となっているため、撮影された画像は歪みを持っている。そのため、画像解析による正確な計測を実行するために、載荷実験前において各デジタルカメラで図-2 に示すキャリブレーションプレート位置や角度を変えながら複数枚(20枚から30枚程度)撮影することで、その歪みを補正する。キャリブレーションにより、デジタルカメラの焦点距離や撮像素子(CCD: Charge Coupled Devices)の画素の縦横比を示す内部パラメータと、試験体に対するカメラの位置や向きを表す外部パラメータを把握する。結果として、デジタルカメラと供試体の相対位置関係が算出される。撮影画像枚数が多いほど、キャリブレーションによる画像の補正精度は向上する。なお、キャリブレーションによって歪みが補正された各カメラの画像が、統合に用い

られる。

画像統合を実行する条件として、隣り合うカメラ同士で最低一列のターゲットを重複して撮影範囲に収める必要がある。例として、図-3 にカメラ1とカメラ2で重複させる撮影範囲を示す。すなわち、左側に配置されているカメラの撮影範囲における右端最低一列と、右側に配置されているカメラの撮影範囲における左端最低一列に映っているターゲットが共通していなければならない。この例では、カメラ1とカメラ2で共通の3列のターゲットをそれぞれ撮影範囲に収めている。また、キャリブレーションによる画像補正の際、各カメラのキャリブレーション用画像の1枚目におけるプレートの傾斜に応じて、歪みが補正された画像が傾斜する。図-4 に、キャリブレーションプレートを補正前の画像内で意図的に傾斜させた場合と水平にした場合に対して、補正後の画像を示す。すなわち、各カメラに対して補正された画像を統合の際に分を水平に一致させるためには、デジタルカメラとキャリブレーション用画像一枚目にお

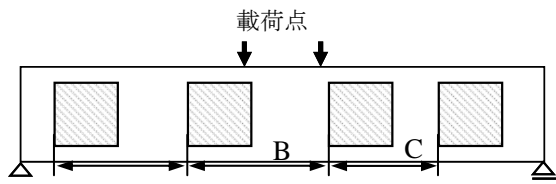


図-5 各カメラにおけるプレートの相対位置

2つのカメラにおける共通の撮影範囲

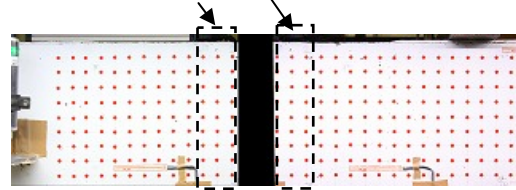
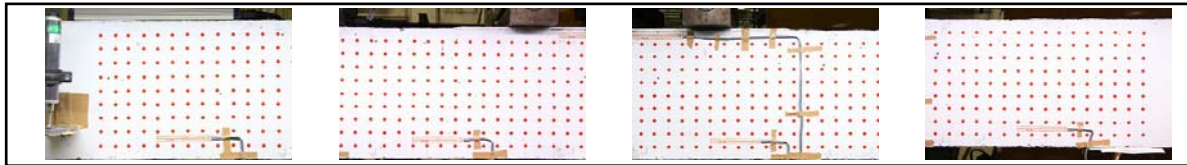
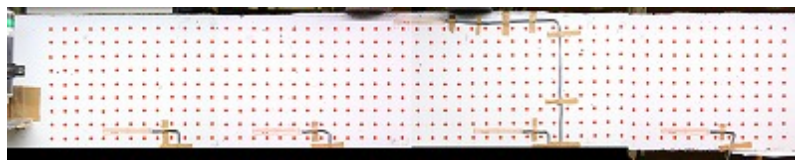


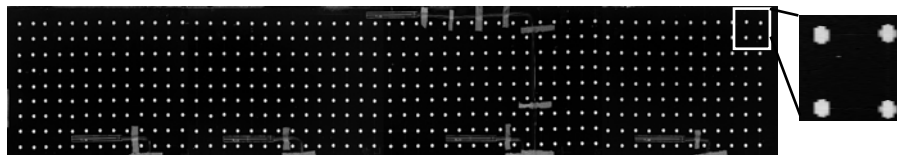
図-6 キャリブレーションプレートの相対位置の値を
実際より大きくしたときの統合画像



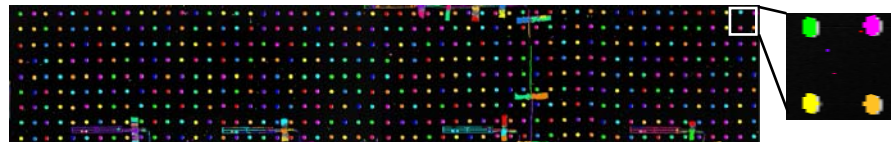
(a) 画像撮影



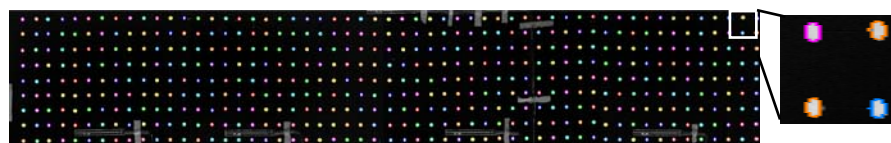
(b) 統合画像(画像の統合には20秒程度を要する。)



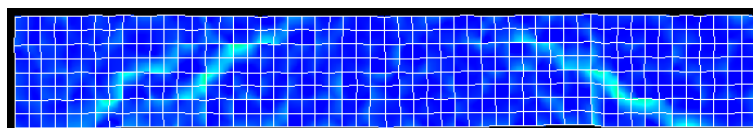
(c) グレースケール化



(d) 2値化



(e) 円近似と重心座標算出



(f) ひずみ分布の算出

図-7 画像撮影からひずみ分布を算出するまでの過程

けるプレートを、それぞれ水準器により水平にしておくことが必須となる。図-5 に、計測するキャリブレーションプレートの相対位置関係を示す。各デジタルカメラにおいて、1 枚目の画像に用いたキャリブレーションプレートどうしの相対位置(図-5 で A, B, C の長さ)を計測し、画像統合のパラメータとして入力する。例として、図-6 に、カメラ 1 とカメラ 2 に対して相対位置を実際より 100mm 大きく入力した場合における統合された画

像を示す。この場合、図に示すように、統合画像の中で 2 台のカメラによる共通の撮影範囲が重なり合わなくなる。また、定義できない区域(黒い部分)が生じる。すなわち、統合された画像が実際の供試体の画像と異なることになる。このように、画像解析の結果の信頼性を向上させるには、正確な相対位置の計測が必要になる。

2.4 ひずみの算出までの過程

図-7 に、2.1, 2.2, 2.3 で述べた手法により複数枚の

画像を撮影および統合してからひずみを算出およびその描画を行うまでの過程を示す。統合された画像に対して、さらに画像処理が施される。まず、図-7(c)に示すように、グレースケール化を行う。そして、図-7(d)に示すように、グレースケール化された画像における彩度の値を用い、しきい値を設定する(動的しきい値処理)ことで2値化画像に変換する。この2値化画像をもとに、図-7(e)に示すように、ターゲットの輪郭のみを抽出し、その輪郭に対して円近似を行ったのち、近似円の重心座標を算出する。さらに、荷重前の重心座標を初期の節点座標とし、各荷重段階における重心座標を、9節点アイソパラメトリック要素を用いて作成した有限要素モデルに組み込むことで、図-7(f)に示すように、ひずみ分布を算出および描画する。本研究において開発したシステムでは、以上の写真撮影から画像の統合、画像処理による重心座標算出、ひずみ分布の算出および描画を、荷重実験中にリアルタイムに行うことを可能とする。画像の統合に要する時間は20秒程度である。重心座標算出からひずみ分布を描画するまでに要する時間は、供試体表面に貼り付けた節点数に応じて変化するが、総節点数

495のときに30秒程度である。また、ひずみの分解能は一画素が表現する寸法に依存する。本研究では、0.00038以上のひずみが認識可能である。

3. RCはりの荷重実験への適用と破壊形態評価

3.1 荷重実験概要

(1) 供試体概要

開発した広域化リアルタイム画像解析システムの有用性を検証し、破壊形態評価を試みる目的で、せん断スパン有効高さ比(a/d)が2.85である斜め引張破壊型RCはりの荷重実験を行った。表-1に、使用したコンクリートの示方配合を示す。セメントには、早強ポルトランドセメントを用いた。図-8に供試体概要図を、表-2に本実験で用いた各種鉄筋の物性を示す。供試体は、定着長を十分にとることで定着破壊を防止した。なお、左右のせん断スパンで等しいせん断補強鉄筋比を有しているため、どちらのせん断スパンで破壊が進行するか、荷重実験前に予測できない供試体となっている。開発したシステムを用いることで、破壊進行部位を荷重実験中に同定することが、本実験のねらいである。

表-1 コンクリートの示方配合

粗骨材最大寸法(mm)	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
20	50	44.6	183	365	769	963	0.73

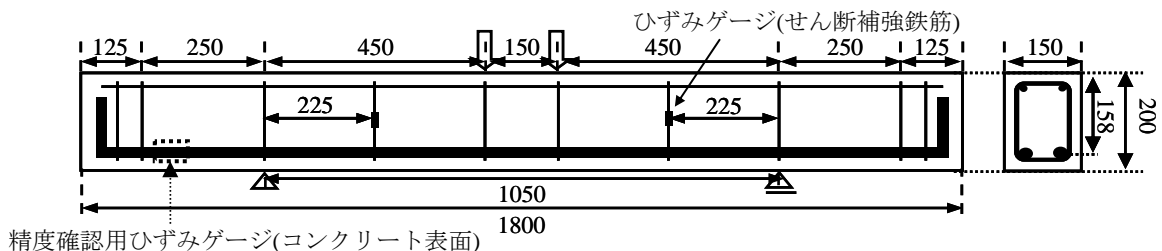


図-8 供試体概要図

表-2 使用した鉄筋の物性

項目	種類	降伏強度(N/mm ²)
軸方向鉄筋	D22 SD345	384
せん断補強鉄筋	D6 SD295A	349

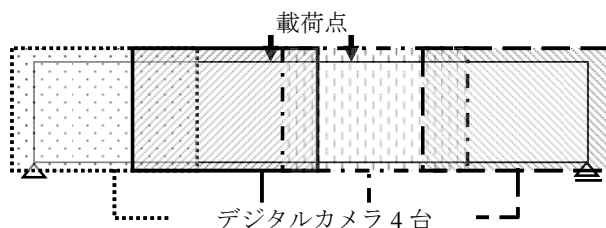


図-9 各カメラ(約1500万画素)の撮影領域

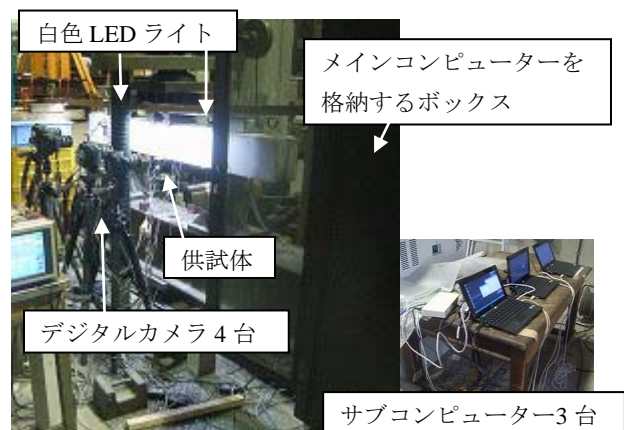


図-10 実験機器設置の様子

表-3 コンクリートの力学特性および載荷実験結果

コンクリートの力学特性			載荷実験結果		
圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	曲げひび割れ 発生荷重(kN)	斜めひび割れ 発生荷重(kN)	ピーク荷重(kN)
53.1	3.9	31.4	約 32	約 90	178.7

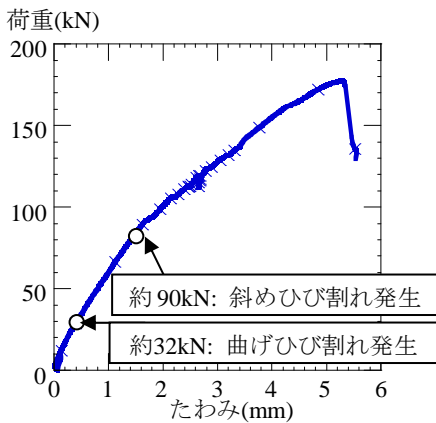


図-11 荷重-たわみ関係

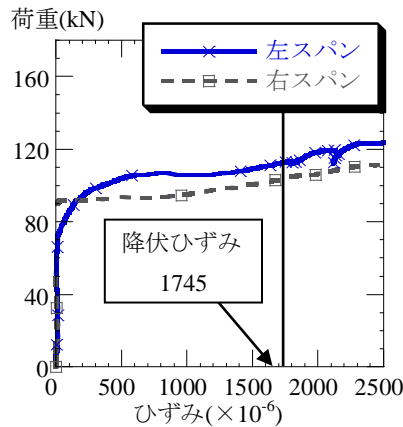


図-12 せん断補強鉄筋のひずみ

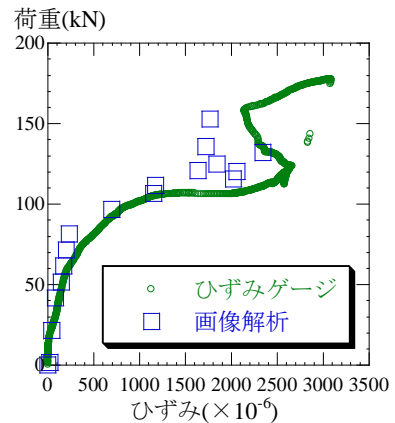


図-13 画像解析の精度

(2) 載荷方法および測定項目

油圧式 2000kN 耐圧試験機を用いて、(1)で述べた供試体に対して静的 4 点曲げ載荷試験を行った。計測項目は、荷重、支点部とスパン中央部の変位、左右のせん断スパンに 1 本ずつ配置したせん断補強鉄筋のひずみ、および図-8 の点線部で示した位置のコンクリート表面のひずみとした。さらに、2 枚のテフロンシートにグリースを挟んだ減摩パッドを、供試体と支点部の間に挿入し、供試体の水平方向の拘束を除去した。

(3) 画像撮影概要

供試体の試験区間である 1050mm の全域を撮影できるように、市販の約 1500 万画素を有するデジタル一眼レフカメラ 4 台(それぞれ横 4752 画素、縦 3168 画素)を横並びに配置した。図-9 に、それぞれのデジタルカメラの撮影範囲を示す。2.3 で述べたように、各デジタルカメラの撮影範囲の一部は重複しなければならない。本実験では、隣り合うデジタルカメラ同士で 30mm から 60mm 程度、撮影範囲を重複させた。また、一般の照明器具では交流電流を使用しており、明るさにちらつき(フリッカー)が生じる。供試体に対して不均一な光量は、画像処理の際に重心座標を算出する精度に影響する。そこで、直流電流によりフリッカーを抑制した、長さ 80cm の白色発光ダイオード(白色 LED)ライトを供試体上方に二本設置し、供試体側面の明るさを一定に保つようにした。図-10 に実験における機器の配置の様子を示す。

3.2 載荷実験結果

表-3 に、本実験において使用したコンクリートの力学特性および載荷試験結果を示す。曲げひび割れ発生荷重と斜めひび割れ発生荷重は、それぞれ目視観察により

確認した際の荷重である。また、図-11 に、支点部とスパン中央に設置した変位計により得られた荷重-たわみ関係を示す。供試体には、32kN で等曲げモーメント区間における曲げひび割れの発生を目視で確認した。その後、約 90kN に達したところで、両せん断スパン内において斜めひび割れの発生を目視で確認した。その後、発生した斜めひび割れが進展し、178.7kN に達したところで、右スパンの圧縮縁においてコンクリートが圧壊し、荷重が低下した。図-12 に、作用荷重と両スパンのせん断補強鉄筋のひずみの関係を示す。この図から、約 105kN でせん断補強鉄筋の降伏を確認できる。特に、右側のせん断スパンに配置したせん断補強鉄筋のひずみが先行して増加していることがわかる。以上より、右側のせん断スパンにおいて、斜め引張破壊を呈したと判断できる。

3.3 画像解析の精度

図-8 の点線で示した位置のコンクリート表面のひずみと、同位置のターゲットの移動量から算出したひずみの値を比較することにより、本研究の画像解析の計測精度を確認した。図-13 に、精度確認の結果を示す。110kN 付近からばらつきが見られるが、概ねひずみの増加傾向は捉えていると言える。

3.4 広域リアルタイム画像解析による破壊形態評価

開発したシステムでは、供試体全体に発生する圧縮ひずみも算出可能であるが、本研究では主引張ひずみについて考える。図-14 に、リアルタイムの画像解析により得られた主引張ひずみ分布を示す。図中の白および黒の実線は、目視により観察されたひび割れを表す。曲げひび割れ発生確認時(32kN)には、ひび割れと明確に判別できる部位を画像解析では確認されなかった。しかし、両

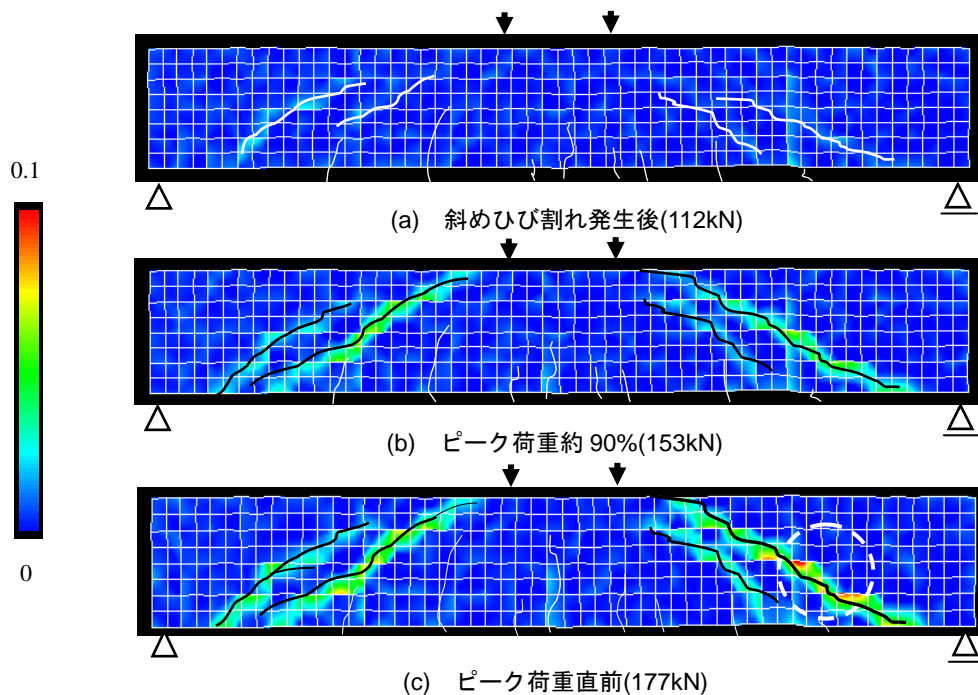


図-14 リアルタイム画像解析による主引張ひずみ分布の変化

側スパンで斜めひび割れ発生を確認後は、図-14(a)に示すように、112kNの時点で斜めひび割れに沿った箇所では主引張ひずみが卓越し始めていることが確認できた。リアルタイムに観察されたこの主引張ひずみ分布の傾向から、供試体が最終的に斜め引張破壊を呈すると言うことが載荷実験途中に予想できた。さらに、図-14(b)に示すように、ピーク荷重約90%の時点では、分布していた主引張ひずみの値が大きくなり、その分布性状が目視で観察したひび割れ性状とほぼ一致した。最終的に、図-14(c)に示すように、ピーク荷重直前(177kN)の時には、左右の斜めひび割れ部分に沿って5%程度の主引張ひずみ(黄緑色で示された部位)がほぼ一様に分布していることが確認できる。局所的に見ると、右側のせん断スパンにおいて、白い破線の手で囲まれた箇所に10%以上の主引張ひずみが観察された。一方、図-12において、右側せん断スパンのせん断補強筋のひずみが降伏後大きく増加している。画像解析により得られた結果は、その事実とも一致する。すなわち、供試体の破壊進行部位を同定することができた。このように、載荷試験開始前には破壊が進行する部位が判別不可能な試験体においても、開発した広域化リアルタイム非接触ひずみ計測システムを用いることで、破壊部位を特定することができる。

4. まとめ

本研究によって得られた知見を、以下にまとめる。

- (1) 従来用いられていたリアルタイム非接触ひずみ計測システムを広域化した。複数台のデジタルカメラにより撮影された画像を統合し、載荷実験中にひずみ

分布の計算結果を表示するシステムを開発した。

- (2) 開発したリアルタイム非接触ひずみ計測システムを斜め引張破壊型RCはりの載荷実験に適用した。その結果、はりのスパン全域におけるひび割れの進展性状を載荷実験中にリアルタイムで可視化することに成功した。
- (3) 本システムにより、事前に破壊進行部位が不明な供試体に対して、ピーク荷重直前に目視で判定できないひずみの卓越部位をリアルタイムに同定することができた。

参考文献

- 1) 酒井理哉ほか：画像計測を利用した鉄筋コンクリート構造のひずみ測定を試み、土木学会第56回年次学術講演会，CS3-002，pp.164-165，2001.9
- 2) 東 広憲，渡辺 健，三木朋広，二羽淳一郎：画像解析を用いたRCはりの破壊性状の予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.793-798，2008.7
- 3) 松尾豊史，酒井理哉，松村卓郎，金津 努：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.
- 4) 渡辺 健，東 広憲，三木朋広，二羽淳一郎：コンクリート構造実験を対象としたリアルタイム画像解析システムの開発，土木学会論文集 E，Vol.66，No.1，pp.94-106，2010.3
- 5) 株式会社リンクス 画像システム事業部：HALCON 活用法，株式会社リンクス出版事業部，2004.10