論文　画像解析を用いた鉄筋コンクリートはりの破壊性状の予測

東　広憲[*1]・渡辺　健[*2]・三木　朋広[*3]　・二羽　淳一郎[*4]

要旨：本研究では，載荷中の供試体の変形を画像解析を用いて計測し，有限要素により算出したひずみの分布を示すことで，視覚的に供試体の変形を捉えるという一連の作業を瞬時に行うことができる，リアルタイム非接触ひずみ計測システム(リアルタイムシステム)を開発した。そして，鉄筋コンクリート(RC)はりの載荷試験を行い，本システムを適用し算出した，RC はり表面に発生したひずみの分布から，ひび割れの特徴，さらに破壊性状の経時的変化を検討した。その結果，このシステムを使用することにより，ひび割れの発生位置および進展を再現できることを確認し，RC はりの破壊性状を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，リアルタイム計測，格子法，ひずみ分布，ひずみの局所化

1. はじめ

RC 構造部材の破壊実験では，各種ゲージを用いて荷重，変位およびひずみが計測される。これらの計測情報は RC 構造部材の耐力，変形特性および破壊モードを特定する上で必須である。しかし，RC 構造部材の破壊は，部材全体に均一に発生せず，ある特定の領域のみに集中して生じる。そのため，ゲージ等の設置位置に依存した，限定的な計測情報のみでは，破壊の発生時期および位置を，載荷中に素早く把握することが困難であった。

以上のような課題を克服できる手法として，画像解析を利用した計測手法が挙げられる。画像解析とは，対象物をデジタル撮影し，その画像データを解析することにより，対象物の数量，サイズおよび変形量などを把握する手法である。近年，土木分野においても，この画像解析を用いた計測手法の研究･開発が報告されている[1),2)]。画像解析を利用した計測手法は，非接触で，かつ撮影範囲全域を同時に計測できるという点で特徴的であるといえる。そこで本研究では，供試体表面に配置したターゲットの変位量を画像から計測し，有限要素により算出した供試体表面上におけるひずみの分布を示すことで変形を視覚的に捉える，格子法によるひずみ計測手法[3)]に着目した。そして，この手法を用いて載荷中に一連の画像解析を行い，結果までを瞬時に表示する，リアルタイム非接触ひずみ計測システムを開発した。リアルタイムシステムを用いることで，載荷試験中に供試体の破壊進展を視覚的に捉えることができ，破壊モードの予測も容易となる。また，供試体のひび割れ進展を確認するために，載荷を一時中止する必要がなくなるという点において，実験の信頼性の向上にもつながると考える。

本研究では，リアルタイムシステムを RC はりの載荷試験に適用し，ひずみ分布による破壊性状，特にひび割れの発生位置，形状，進展の再現性の確認，さらには破壊モードを予測することの可能性を検討した。

2. リアルタイム非接触ひずみ計測システム概要

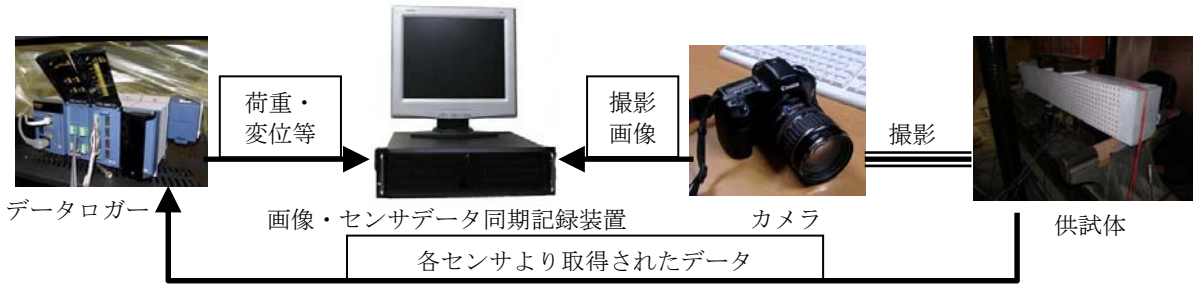
2.1 リアルタイムシステムの構成

本研究では，画像の撮影後，格子法を用いた画像解析を行い，解析結果とセンサデータを表示するという一連の作業を，載荷中にコンピューターが自動的に行うシステムを開発した。**図－1** に，リアルタイムシステムの構成図を示す。このシステムでは，画像・センサデータ同期記録装置(同期記録装置)に，1 台のカメラ，データロガー，ディスプレイを接続している。計測は，載荷中にカメラのシャッターを押すと，撮影画像が同期記録装置に転送され，直後に格子法によるひずみの算出が自動的に行われる。同時に，撮影時に各種ゲージにより計測される，荷重や変位等のデータも同期記録装置に保存される。最終的に，**図－2** に示すように，撮影画像と，算出されたひずみ分布，センサデータが同一のディスプレイに表示される。

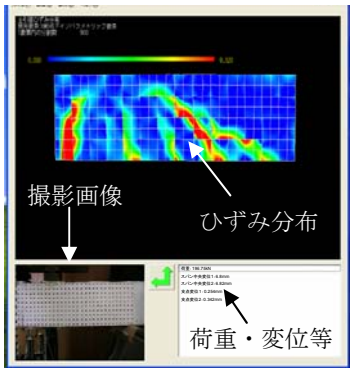
2.2 格子法によるひずみ計測の流れ

格子法は，画像解析より求めた供試体表面上に配置したターゲットの変位量を，ターゲットの位置を節点として作成した有限要素モデルに入力することにより，ひずみ分布を算出する手法である。以下に格子法の手順を示す。まず載荷前に，計測結果の精度向上のために，キャリブレーション用プレートを様々な角度から撮影することで，実験に使用するカメラのキャリブレーションを

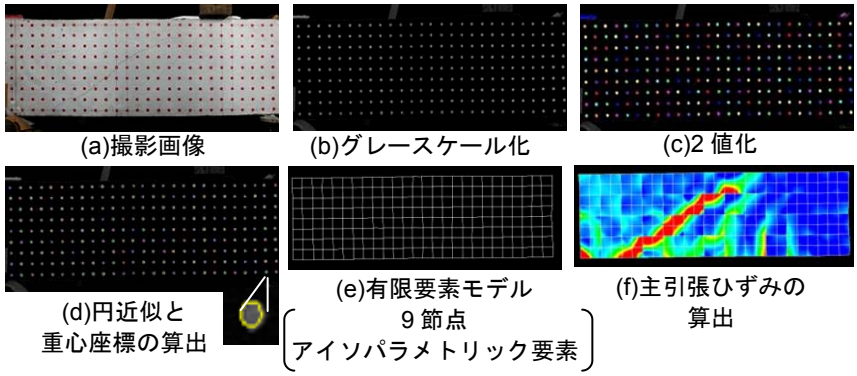
*1 東京工業大学大学院　理工学研究科土木工学専攻　(正会員)
*2 東京工業大学大学院　理工学研究科土木工学専攻助教　Ph.D.　(正会員)
*3 神戸大学大学院　工学研究科市民工学専攻准教授　博(工)　(正会員)
*4 東京工業大学大学院　理工学研究科土木工学専攻教授　工博　(正会員)



図－1　リアルタイム非接触ひずみ計測システム構成図



図－2　画像解析結果の表示例



図－3　格子法の手順

行う。キャリブレーションは，レンズの歪曲収差による画像の歪みを補正するために必要な作業であり，これにより高精度な画像解析が実施可能となる。

図－3 に，キャリブレーション終了以降の格子法の手順を示す。撮影画像(**図－3(a)**)は，載荷中に同期記録装置に取り込まれる。その画像を HSI 色空間に変換し，S(彩度)成分のみを抽出し，グレースケール化する(**図－3(b)**)。赤色のターゲットを用いた本研究においては，この方法がターゲットの認識に最も適していた。グレースケール画像の各画素は，彩度に起因した値を有するため，しきい値を設定することで，2 値化画像を得る(**図－3(c)**)。2 値化画像にはターゲット以外にも認識される部分が含まれる。そこで，ターゲットの特徴(面積，真円率等)を利用し，撮影領域内におけるターゲットのみを抽出し，円近似した後、重心座標を算出する(**図－3(d)**)。そして，載荷によって生じる各ターゲットの変位量を求める。続いて，ターゲットの初期座標位置を節点とした，9 節点アイソパラメトリック要素を用いて対象を離散化した有限要素モデル(**図－3(e)**)により，各要素のひずみを算出する(**図－3(f)**)。リアルタイムシステムではターゲットの変位量計算の初期値となる，載荷開始前の画像に関してのみ，マニュアルで**図－3(b)**～**図－3(d)**までの画像解析を行い，コンピュータにしきい値等の各パラメータを記憶させる。そして，この記憶させた各パラメータを用いて，載荷中に撮影した画像に対し，自動的に画像解析を行う。また本システムの精度は，使用するカメラと撮影環境に影響されると考えられる。本研究で用いたカメラの解像度は 1280 万画素および 630 万画素であり，1 画素の 1 辺の長さはそれぞれ約 0.15mm および 0.2mm であった。**3.3** に示す撮影環境の下で実施した本研究におけるシステムの精度を，**4.2(1)**および**図－10** に詳述する。

3. 実験概要

3.1 供試体概要

表－1 に供試体作製に用いたコンクリートの示方配合を，**表－2** に実験ケースを示す。供試体は，せん断補強鉄筋比をパラメータとし，斜め引張破壊，曲げ引張破壊およびせん断耐力と曲げ耐力が同等で破壊モードが予測しにくい RC はりとなるように設計した。**図－4** に供試体概要図を，**表－3** に各種鉄筋の物性を示す。せん断耐力算出には，式(1)に示す修正トラス理論を用い，せん断耐力のコンクリート貢献分には式(2)[4]を用いた。また供試体表面には，白いスプレーで薄く下地を塗った上に，穴あきトレーシングシートと赤いスプレーを用いて画像解析用の直径 6mm の円形ターゲットを，支点間に 22mm 間隔で格子状にプロットした。

$$V = V_c + V_s \tag{1}$$

$$V_c = 0.20 f_c'^{1/3} p_w^{1/3} d^{-1/4} (0.75 + \frac{1.4}{a/d}) b_w d \tag{2}$$

3.2 載荷方法および測定項目

油圧式 2000kN 耐圧試験機を用いて，RC はりに静的 4 点曲げ載荷を行った。計測項目は，荷重，スパン中央部と支点部における変位，スパン中央部における主鉄筋のひずみ，供試体高さ中央部におけるせん断補強鉄筋のひずみおよびコンクリート圧縮縁のひずみとした。載荷速度は約 4kN/分とし，各項目の計測間隔は 5 秒かつ 2kN

ごととした。また，画像は約 5kN ごとに撮影した。

3.3 画像撮影概要

市販のカメラ A および B の 2 台を三脚に固定して，供試体の両スパンを撮影した。リアルタイムシステムには現状では，1 台のカメラしか接続できないため，カメラ A を接続した。カメラ B は，リモコンを用いて撮影し，データを別途カメラ内の記録媒体に保存し，載荷終了後に画像解析を行った。**図－5** に示すとおり，撮影範囲は，供試体の全スパンが収まるように両カメラで等モーメント区間の一部が重なるように設定した。また，リアルタイムシステムでは，載荷前に記憶させたしきい値を使用し続けるので，一般的な照明器具のフリッカーによる，撮影画像への影響が問題となる可能性があった。そこで，**図－6** および **7** に示す暗幕で試験機を覆い，白色発光ダイオード(LED)ライトを利用し，撮影環境を整えた。

4. 実験結果および考察

4.1 載荷試験結果

(1)荷重たわみ関係

表－4 に，各供試体の載荷試験結果およびコンクリート強度試験結果を，**図－8** に各供試体の荷重たわみ関係を示す。破壊モードは，R-03 では斜め引張破壊，R-08 では曲げ引張破壊，設計段階で曲げ耐力とせん断耐力を意図的に等しくした R-05 は，曲げ引張破壊となった。

図－8(b)，**(c)**から，曲げひび割れ発生後，R-05 および R-08 では，荷重－たわみ関係の傾きがほぼ等しく，荷重の最大値（ピーク荷重）に達した際に等モーメント区間内の曲げひび割れが開き，最終的にコンクリート圧縮縁が圧壊した。また，両者のピーク荷重もほぼ等しい。

一方，R-03 では，曲げひび割れ発生後，斜めひび割れが進展し、載荷点近傍のコンクリート圧縮部まで達すると同時に荷重が低下した。また，R-03 の曲げひび割れ発生後の荷重－たわみ関係の傾きおよびピーク荷重は，R-05 と R-08 より小さい。ポストピーク域においては、R-05 と R-08 では荷重を保持したままたわみが増加しているのに対し，R-03 ではたわみの増加とともに荷重が低下しており，より脆性的な破壊であったことがわかる。

(2)ひび割れ性状

図－9 に，各供試体において観察されたひび割れ性状を示す。せん断破壊した R-03 と，曲げ破壊した R-08 を

表－1　示方配合

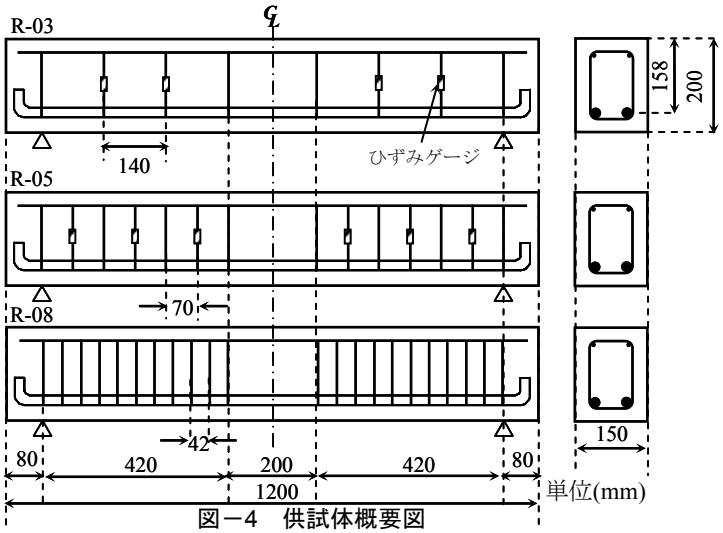
粗骨材最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m^3)			
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
20	50	45	170	340	816	986

表－2　実験ケース

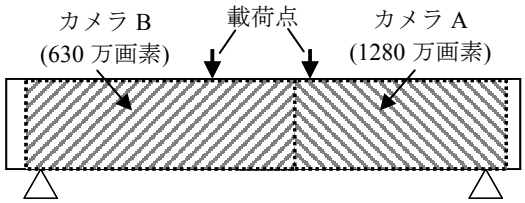
供試体名	せん断補強鉄筋比(%)
R-03	0.3
R-05	0.5
R-08	0.8

表－3　各種鉄筋の物性

項目	種類	降伏強度 (N/mm^2)
主鉄筋	D22 SD295A	356
せん断補強鉄筋	D6 SD295A	317

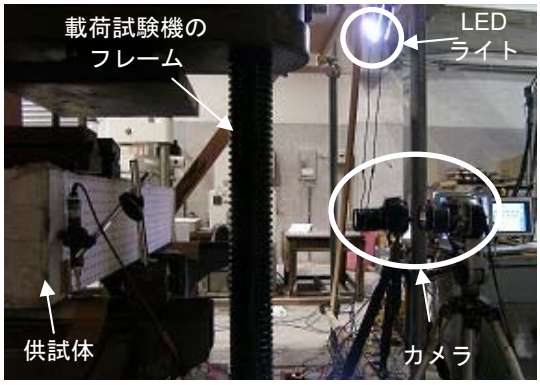


図－4　供試体概要図



図－5　各カメラの撮影範囲と画素数

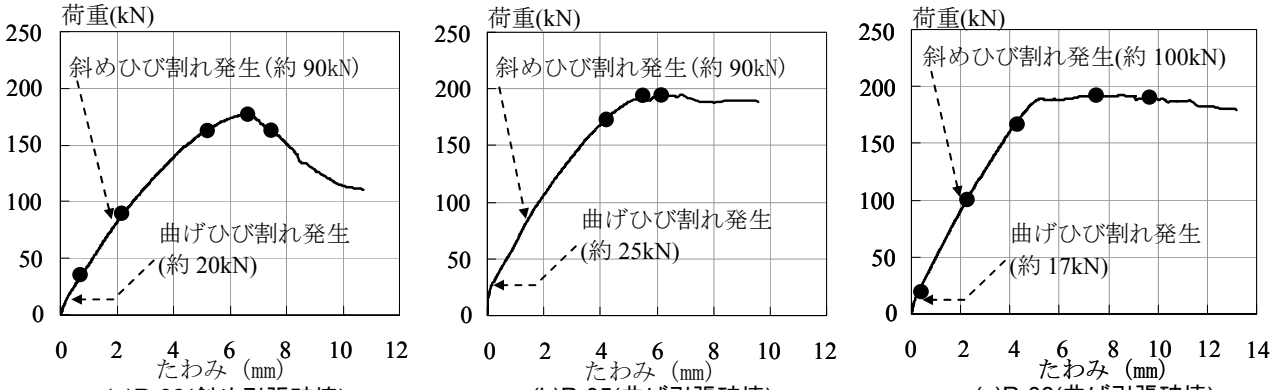
図－6　暗幕外観



図－7　暗幕内部の試験機器設置状況

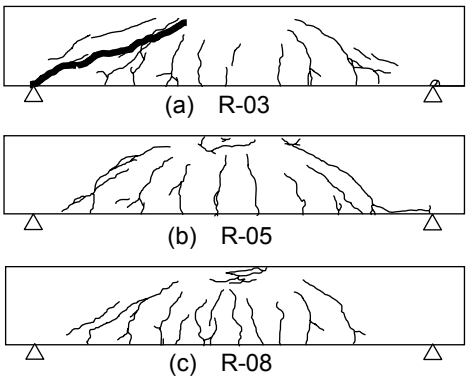
表－4　実験結果

	コンクリート力学特性			RC はり載荷試験結果	
供試体名	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)	ピーク荷重 (kN)	破壊モード
R-03	40.4	2.66	29.3	177.1	斜め引張破壊
R-05	40.0	2.86	29.9	194.98	曲げ引張破壊
R-08	40.4	2.66	29.3	192.42	曲げ引張破壊

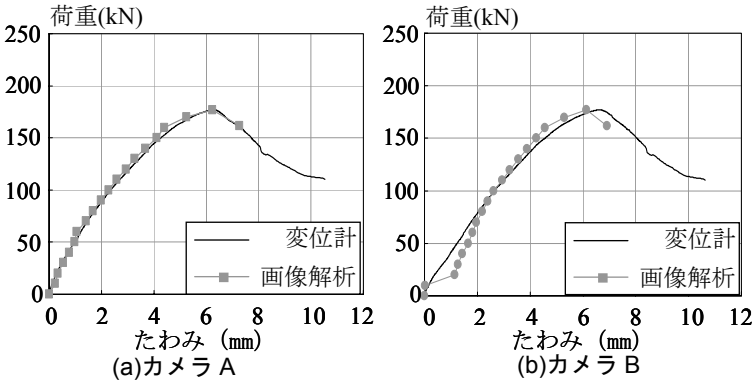


(a)R-03(斜め引張破壊)　(b)R-05(曲げ引張破壊)　(c)R-08(曲げ引張破壊)

図－8　各供試体の荷重－たわみ関係(各黒丸は，4.2 で画像解析結果を示した荷重を表す)



図－9　各供試体のひび割れ性状



(a)カメラ A　(b)カメラ B

図－10　画像解析と変位計から得たたわみの比較

比較すると，前者では斜めひび割れが供試体上縁まで達しており，曲げひび割れは，供試体高さ中央程度までしか進展しておらず，その本数も少ない。一方，後者は斜めひび割れ幅はほとんど増加せず，曲げひび割れが供試体高さ方向に大きく進展しており，その本数も多い。また，同様の曲げ引張破壊を呈した R-05 と R-08 のひび割れ性状を比較すると，R-08 に対し R-05 では斜めひび割れが供試体上縁近くまで進展しており，等モーメント区間の曲げひび割れの本数も少ない。以上のような特徴が，せん断補強鉄筋比を変化させたことによるひび割れの発生および進展の相違として挙げられる。

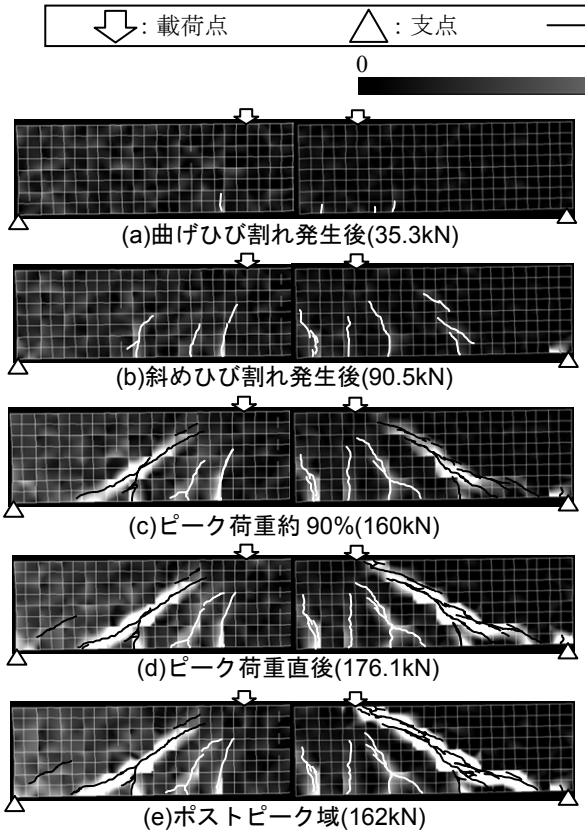
4.2 画像解析結果

(1)画像解析の計測精度の確認

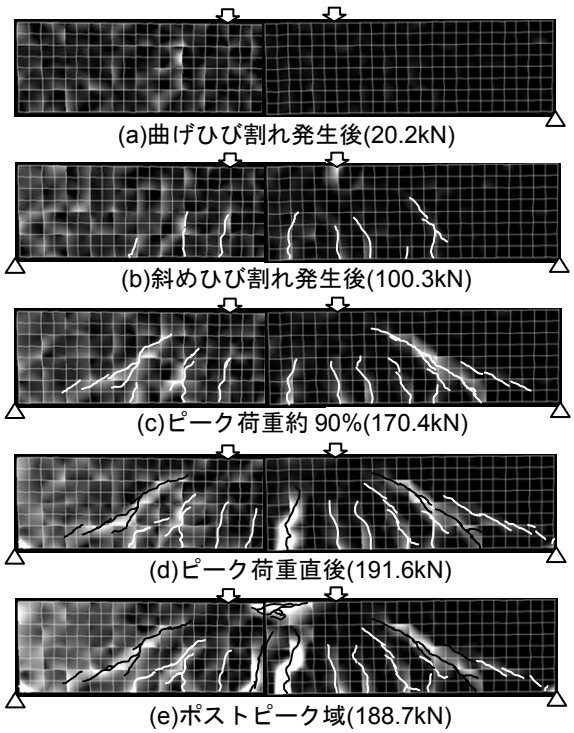
リアルタイムシステムを使用して得た計測値の妥当性を確認するために，**図－10** に，各カメラを用いて行った画像解析および変位計を用いて得たたわみと，荷重との関係を示す。画像解析によるたわみは，格子状にプロットしたターゲットの最下列の中から，スパン中央と，支点に設置した変位計位置に最も近いターゲットの垂直変位量の差分として算出した。**図－10(a)**から，解像度の高いカメラ A を用いた画像解析および変位計を用いて得たたわみと荷重の関係は，終始ほぼ一致していることが認められる。**図－10(b)**から，カメラ B においては，荷重 20kN，160kN 付近で最大で 0.7㎜ 程度の差が生じているが，その他の荷重段階では変位計から得たたわみと近い値を示していることがわかる。ただし，荷重とたわみの増加傾向は，終始追随できている。以上より，画像解析を通して得た変位は，変位計で計測された値をほぼ再現可能であることを示唆していると言える。今後は，ターゲットの抽出方法の改善，より解像度の高いカメラの使用などの検討を加えることにより，さらに高精度な画像解析が可能になると考える。

(2)R-03 の主引張ひずみ分布の経時変化

図－11 に，R-03(斜め引張破壊)の主引張ひずみ分布の経時変化を示す。図中の白，および黒色の実線は，各荷重段階において供試体の画像撮影面に発生していたひび割れを表している。また，各荷重段階は**図－8(a)**に黒丸で示してある。これらは以下，R-08，R-05 についても



図－11　主引張ひずみ分布の経時変化(R-03)



図－12　主引張ひずみ分布の経時変化(R-08)

同様である。R-03 では，曲げひび割れ発生後(図－11(a))，等モーメント区間において供試体下縁から発生した曲げひび割れに沿って主引張ひずみが増加している領域が見られるものの，ひび割れを明確に示すほどの差は見られない。特に左スパンにおいて，曲げひび割れに沿って主引張ひずみは集中しておらず，供試体全体に分布している。これは，図－5 に示したとおり左スパンで使用したカメラ B の解像度が，右スパンで用いたカメラ A よりも小さいにもかかわらず，ほぼ同じ面積の範囲を撮影しているため，ターゲットの重心座標を抽出する際の精度に違いがあったためと考える。

斜めひび割れ発生後(図－11(b))では，右スパンのほぼ中央の位置に斜めひび割れが発生しており，その斜めひび割れに沿う位置に約 1%を示す主引張ひずみが局所的に発生している。また，曲げひび割れの供試体高さ方向への進展に合わせて，主引張ひずみの集中域が拡大していることも確認でき，ひび割れ位置に集中して供試体が変形していることがわかる。その後，図－11(c)に示すように荷重が増加するに従い，主引張ひずみは，曲げひび割れ位置より斜めひび割れ位置において集中して増加している。そして，ピーク荷重直後(図－11(d))において，右スパンの斜めひび割れ位置における 2%以上を示す主引張ひずみが，載荷点付近に達しており，この斜めひび割れが供試体の破壊に支配的に作用したことが推測できる。このことはポストピーク域(図－11(e))において，右スパンの斜めひび割れ位置に 2%以上を示す主引張ひずみの集中域が十分拡大していることから判断できる。

(3)R-08 の主引張ひずみ分布の経時変化

図－12 に R-08(曲げ引張破壊)の主引張ひずみ分布の経時変化を示す。曲げひび割れ発生後(図－12(a))から，斜めひび割れ発生後(図－12(b))までの主引張ひずみ分布とひび割れ性状の変化は，R-03 と同様の傾向を示した。ピーク荷重約 90%時(図－12(c))では，両スパンの斜めひび割れ位置に約 1%を示す主引張ひずみの集中域が発生しており，前述した，R-03 のピーク荷重約 90%時(図－11(c))と比較すると，せん断補強鉄筋比の変化によるひび割れ進展の違いを確認できる。その後，ピーク荷重直後(図－12(d))において，主引張ひずみは等モーメント区間ほぼ中央に発生していた曲げひび割れと，載荷点間のコンクリートに集中して発生し，曲げ引張破壊の特徴を示す結果となったことが推測できる。このことはポストピーク域(図－12(e))において，載荷点間のコンクリートに主引張ひずみが集中し，はり上縁部が圧壊したことからも判断できる。以上から，破壊モードが明確な RC はりにおいて，曲げひび割れ発生後以降の各破壊モードにおけるひび割れ発生位置および形状，さらに進展を良く再現できたといえる。

(4)R-05 のピーク荷重付近における主引張ひずみ分布

図－13 に，R-05(曲げ引張破壊)のピーク荷重約 90%以降の主引張ひずみ分布の経時変化を示す。ピーク荷重約

90%時(図－13(a))では，両スパンにおいて斜めひび割れおよび曲げひび割れに沿って約 1%の主引張ひずみの集中域があるが，特に左スパンの斜めひび割れ位置に約 2%の主引張ひずみが発生しており，この斜めひび割れに変形が集中している。この傾向は斜め引張破壊した R-03 のピーク荷重約 90%時(図－12(c))と類似している。

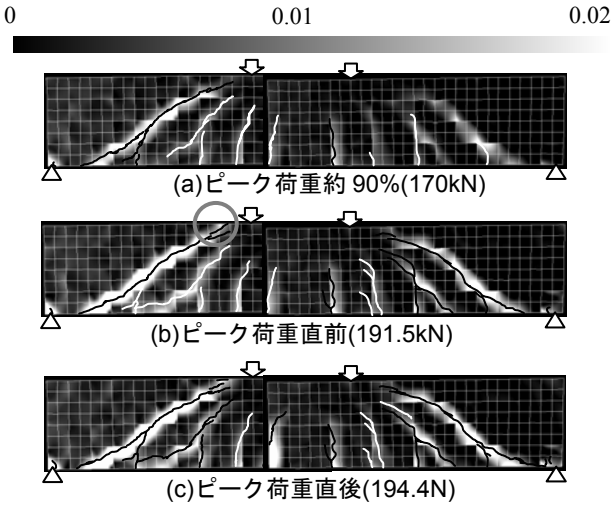
ピーク荷重直前(図－13(b))では，両スパンにおける斜めひび割れ位置に約 2%の主引張ひずみの集中域が形成されており，斜めひび割れ幅が増加したことがわかる。特に，図－13(b)中の円で囲った領域において，斜めひび割れ先端に 2%に近い主引張ひずみが生じている。これは R-03 のピーク荷重直後 (図－11(d))に近い傾向を示していることから，この荷重段階では斜め引張破壊が示す破壊の特徴に近い性状が観察された。しかし，ピーク荷重直後(図－13(c))では，スパンほぼ中央に発生していた曲げひび割れ位置に，2%以上を示す主引張ひずみの集中域が形成，拡大しており，この曲げひび割れが破壊に支配的に作用している。さらに，図－14 に示す，R-05 の載荷点間における，各ターゲットの主引張ひずみの経時変化から，荷重が増加するにつれ，載荷点間中央におけるターゲットの主引張ひずみが増加していることがわかる。これらは，R-08 のピーク荷重直後の主引張ひずみ分布(図－12(d))の特徴に近いことからも，R-05 は曲げ引張破壊したことが判断できる。

以上，破壊モードが曲げ破壊かせん断破壊か予想できない供試体においても，リアルタイムシステムを用いて，主引張ひずみ分布におけるひずみの集中領域を経時的に捉えることで，破壊モードの相違を視覚的に判別できる。今後，システムによる計測精度を向上させることで，目視では判別困難なひび割れ発生位置を，主引張ひずみ集中域として表示できると考えられる。この主引張ひずみ集中域の位置の違いに着目することで，目視では判別できない，曲げ破壊型もしくはせん断破壊型といった，RC はりの最終破壊モードを載荷中に予測できる可能性を示唆していると考える。

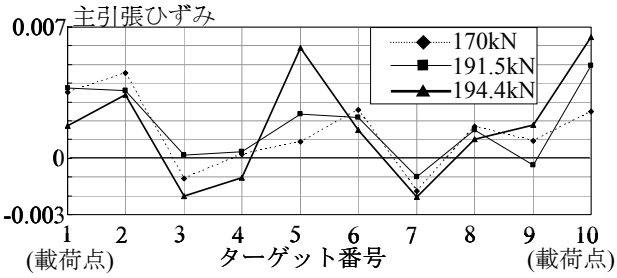
5. まとめ

本研究から得られた知見を以下にまとめる。

1) 載荷中にリアルタイムで供試体表面上のひずみを算出し，その分布を表示することで，供試体の変形を視覚的に瞬時に捉えることができる，リアルタイム非接触ひずみ計測システムを開発した。
2) RC はりの載荷試験に，リアルタイムシステムを適用することで得た主引張ひずみ分布において，ひずみの集中域はひび割れ位置と一致したことから，ひび割れの発生・進展状況を十分に再現できることを確認した。



図－13　ピーク荷重約 90%以降の主引張ひずみ分布の経時変化(R-05)



図－14　載荷点間における各ターゲットの主引張ひずみの経時変化(R-05)

3) 主引張ひずみ集中域の経時変化を視覚的に把握することで，曲げ破壊型，せん断破壊型といった，せん断補強鉄筋比の異なる RC はりの最終破壊モードの差異を十分に判別することができた。

なお，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)によって実施したものである。

参考文献

1) 酒井理哉，宮川義範，松尾豊史，末広俊夫，遠藤達巳：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の試み, 土木学会第 56 回年次学術講演会, CS3-002，pp.164-165，2001.10
2) 浜岡　広，松田　浩，山下　努，中島朋史：光学的全視野計測法による RC はりのひび割れ発生・進展の可視化，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.781-786，2006.7
3) 矢川元基，松浦真一，安藤良夫：点認識画像処理を用いた非接触ひずみ解析法，日本機械学会論文集(A 編)，第 49 巻 447 号，pp.1435-1443，1983.11
4) 二羽淳一郎ほか：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.372/V-5，pp.167-176，1986.8