論文 破断した軸方向鉄筋を有する RC はりの破壊に対する画像解析

東 広憲^{*1}·渡辺 健^{*2}·二羽 淳一郎^{*3}

要旨:本研究では、画像解析を応用して構築した非接触ひずみ計測システムの、鉄筋コンクリート(RC)構造 部材の破壊実験における有用性を高めることを目的とした。そのために異なるひび割れ性状が想定される、 軸方向鉄筋を破断させた RC はりの載荷試験に本システムを適用した。その結果、主引張ひずみ分布上の局 所化領域から、軸方向鉄筋破断位置の違いによるひび割れの発生および進展の差異を載荷試験中に確認でき た。さらに、荷重段階間のひずみ増分および供試体の各高さにおけるひび割れ幅分布に着目することで、RC はりの斜めひび割れの特性を詳細に把握でき、せん断破壊現象の評価における本システムの有用性を示した。 キーワード:画像解析、ひずみ分布、ひずみの局所化、ひび割れ幅、軸方向鉄筋破断

1. はじめに

近年,画像解析を用いた変形計測手法が土木分野にお いて注目され、この手法を用いた研究結果が報告されて いる¹⁾。この計測手法は、非接触の計測手法でありかつ 撮影領域全域を計測可能であるという利点を有してい る。そのため、ある特定の領域に生じる、RC構造部材 の局所的な破壊の発生位置および時期を、容易に特定す ることができる。さらに、画像解析結果を載荷試験中に 得ることが可能となれば、ひずみの局所化した領域に着 目することで、ひび割れが生じた箇所を瞬時に把握する ことができ、終局時の破壊モードを載荷試験中に予測す ることが可能になると考えられる。

以上の背景から,筆者らは,画像解析を利用し,コン クリート供試体表面に発生したひずみ分布を載荷試験 中にリアルタイムに算出することで,供試体の変形を視 覚的に把握可能にした,非接触ひずみ計測システムを開 発した。そして,開発したシステムを,せん断補強鉄筋 比を変化させた RC はりの載荷試験に適用し,得られた 主ひずみ分布からひび割れ性状を把握し,破壊モードの 差異を十分に判別可能であることを確認した²⁾。

そこで本研究では, RC 構造部材の破壊実験における 開発した非接触ひずみ計測システムの有用性を高める ことを目的として,ひび割れの発生位置や進展経路とい ったひび割れ性状が異なることを想定した,軸方向鉄筋 破断位置を変化させた RC はりの載荷試験に,本システ ムを適用した。そして,得られた主ひずみ分布,および ひび割れ幅に着目することで,軸方向鉄筋の破断が,RC はり部材の破壊性状に及ぼす影響について検討を行っ た。さらに,これらの結果を受け,RC 構造部材の破壊 実験,特に RC はりのせん断破壊現象の評価における本 システムの有用性について検証した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

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。表-2に実験ケースを、表-3に供試体諸元を示す。また、 図-1に供試体概要図を示す。3体の供試体(F50, F350, F650)では、配置した2本の軸方向鉄筋のうち1本を、支 点から50mm、せん断スパン中央および載荷点から50mm の位置でそれぞれ切断している。また、基準供試体とし て軸方向鉄筋を切断していない供試体(NF2)、さらに、軸 方向鉄筋の破断が耐力へ与える影響を評価するために、 軸方向鉄筋を1本配置した供試体(NF1)を作製した。表-4に、使用した各種鉄筋の材料特性を示す。せん断耐力 の算出には、式(1)に示す修正トラス理論を用い、せん断 補強鉄筋貢献分(*V*_s)およびコンクリート貢献分(*V*_c)には、 式(2)および式(3)を用いた³。

 $V = V_S + V_C \tag{1}$

$$V_S = A_W f_{WY} \frac{z}{s}$$
(2)

$$V_{c} = 0.20 f_{c}^{\prime 1/3} p_{W}^{1/3} \left(\frac{1000}{d}\right)^{1/4} \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d}\right) b_{W} d \quad (3)$$

供試体表面には、画像解析用に、直径 5mm の赤色の円 形ターゲットを、支点からスパン中央部の区間に接着剤 で20mm 間隔に貼付した。

2.2 載荷試験概要

油圧式 2000kN 耐圧載荷試験機を用いて,静的4点曲 げ載荷を行った。計測項目は、荷重、スパン中央部およ び支点部における変位、等モーメント区間に発生する曲 げひび割れ測定,軸方向鉄筋のスパン中央部のひずみ、 およびスターラップのひずみとした。さらに、載荷中、

*1 東京工業大学大学院	理工学研究科土木工学専攻 (正義	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)

RC はりが面外へ変形する可能性が考えられたため、両 支点部から外側 50mm およびスパン中央から 100mm の 位置に、供試体軸方向と直角方向に変位計を設置した。

3. 非接触ひずみ計測システムの概要

3.1 画像解析手順

筆者らが開発したシステム²⁾では、デジタル画像から 計測した供試体表面のターゲットの変位量と,有限要素 モデルを利用して供試体表面上のひずみ分布を算出す る,格子法によるひずみ計測手法を用いている。図-2 に、画像解析の手順を示す。なお、図-2は、後述する 図-4のE領域(NF2)における撮影画像を用いている。ま ず,撮影画像(図-2(a))を HSI 色空間に変換し,彩度(S) のみの値を抽出することにより、グレースケール画像(図 -2(b))を得る。その後、グレースケール画像が有する彩 度に起因した値に、任意のしきい値を設けることにより 2 値化画像に変換する(図-2(c))。この段階では、ターゲ ット以外にも認識される領域が含まれるので、ターゲッ トの特徴量(真円率および面積)を用いてターゲットのみ を抽出する。その後、円近似することにより各ターゲッ トの重心座標および載荷によって生じる各ターゲット

の変位量を算出する(図-2(d))。そして、載荷前のターゲ ットの座標を初期節点位置として、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および 各ターゲットの変位量を用いて、ひずみ分布を算出する (図-2(e))。本システムでは、コンピュータがこれらの手 順を載荷試験中にリアルタイムで行う。

3.2 画像撮影概要

図-3に各種試験機器状況を、図-4に各カメラの撮 影領域、および解像度を示す。軸方向鉄筋が破断してい る側面(破断面側),および破断していない側面(非破断面 側)を撮影した。なお、撮影した画像の1ピクセルの大き さは,破断面側では約0.1mmであり,非破断面側では約 0.13mm および 0.17mm である。また、載荷試験時に一般 照明のフリッカーによる,画像解析の精度低下を防止す るために、図-3 に示すように、白色発光ダイオード (LED)を供試体周囲に設置した。

4. 載荷試験結果

4.1 荷重--たわみ関係

表-5 に、各供試体のコンクリート強度試験結果およ び載荷試験結果を示す。荷重の最大値(ピーク荷重)は,

表-1 示方配合

粗骨材	水セメント	細骨	単位量(kg/m ³)				
最大寸法	比	材率	71	ヤメント	細骨材	知母材	AF減水剤
(mm)	(%)	(%)	71		小田月小り	伯月初	AL 视外下用
20	60	45	178	296	859	956	0.44

供試体名	鉄筋破断位置 (支点からの距離)(mm)	軸方向鉄筋本数 (破断本数)
NF2	—	2(0)
F50	50	2(1)
F350	350	2(1)
F650	650	2(1)
NF1	—	1(0)

1800

G

P/2×

233

700

650

100

P/2*

※P:荷重(kN)

700

表-2 実験ケース

表-3 供試体諸元

項目	記号	単位	値
せん断スパン	а	mm	700
有効高さ	d	mm	250
せん断スパン有効高さ比	a/d		2.8
軸方向鉄筋比(2本)	p_w		2.1%
せん断補強鉄筋比	r_w		0.18%

各種鉄筋の特性 表-4 降伏強度 項目 種類 (N/mm^2) 軸方向 D22 1046 鉄筋 PC 鋼棒 せん断補強 D6 単位:mm 342 SD295A 鉄筋



100

Λ

150

図-2 画像解析手順(なお(c)および(d)の各色は意味を有さない)



図-3 各種試験機器設置状況



世封休夕	圧縮強度	引張強度	弾性係数	ピーク荷重
文字名	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(kN/mm^2)	(kN)
NF2	35.8	2.60	28.2	183
F50	33.1	2.66	27.1	154
F350	35.2	2.90	28.1	119
F650	38.1	3.27	27.6	201
NF1	36.8	2.79	29.9	158

表-5 実験結果





軸方向鉄筋破断位置が載荷点直下である F650 で最大値 を示し、せん断スパン中央部である F350 で最小値を示 した。また、軸方向鉄筋を1本配置した NF1、および支 点直上で軸方向鉄筋を破断させた F50 のピーク荷重は, ほぼ等しい値を示した。

図-5 に、荷重-たわみ関係を示す。なおたわみは、 支点部に対するスパン中央部の変位として算出した。 NF1 と F50 のピーク荷重は近い値を示しているが, NF1 の剛性が小さいことがわかる。さらに、ポストピーク域 において、軸方向鉄筋が破断してない NF2 および NF1 では、急激な荷重低下が確認されるが、軸方向鉄筋を破 断させた F50 および F350 では、緩やかに低下した。特 に F650 は、ピーク荷重以降、たわみの増加に対して荷 重が低下しない、曲げ破壊特有の挙動を示した。

4.2 ひび割れ性状

図-6 に、各供試体の載荷終了時のひび割れ性状を示 す。図中の太線は、載荷試験中に最も拡幅したひび割れ

を, 斜線部は圧縮破壊領域を示す。なお, 軸方向鉄筋を 破断させた供試体については、破断面側および非破断面 側におけるひび割れ性状を示し、非破断面側では、ひび 割れの方向を破断面側と一致させるために、ひび割れ図 を左右反転させている。NF2では、斜めひび割れが載荷 点と支点を結ぶ直線上に卓越して発生し, 最終的に斜め 引張破壊を呈した。一方,同様に斜め引張破壊を呈した NF1 では、斜めひび割れが載荷点とせん断スパン中央付 近を結ぶ直線上に卓越して発生した。

軸方向鉄筋を破断させた, F50, F350 および F650 の破 断面側には、鉄筋破断位置からひび割れが卓越して発生 し,載荷点付近にまで達した。また,F650では、ピーク 荷重付近にて供試体上縁からひび割れが生じた。一方, 非破断面側に関しては、F50 では斜めひび割れが支点お よび載荷点まで達し,F350では斜めひび割れ先端上部に おいて、広範囲にわたってコンクリートの圧壊が生じた。 また F650 では、卓越した斜めひび割れは観察されず、

ウェブ部に多数のひび割れが発生した。そして最終的に, 載荷点間のコンクリートが圧壊したが,軸方向鉄筋は降伏 しなかった。以上より、軸方向鉄筋を破断させた供試体 では、鉄筋破断位置から発生したひび割れが卓越するこ と、さらに破断面側および非破断面側において異なるひ び割れ性状となることを目視により確認した。5章では、 各供試体の特徴を、さらに画像解析結果から追求する。

5. 画像解析結果

5.1 本研究で使用した非接触ひずみ計測システムの精度

図-7 に, F50 の破断面側において, 載荷点直下の下 縁から 40mm の位置に設置したコンクリートゲージ(測 定長:60mm),および画像解析から得た,ひずみの比較 結果を示す。画像解析では、コンクリートゲージを含む 2つのターゲット間距離(測定長:約80mm)を計測し,各 荷重段階のターゲット間距離を,載荷前の距離で除し, 平均ひずみを算出した。図-7より、プレピーク域では、 コンクリートゲージと画像解析により得られたひずみ の値は、ほぼ一致している。ポストピーク域で一致して いないのは、コンクリートゲージの測定区間以外に発生し たひび割れによる変形を,画像解析が計測したためである。

以上より,本研究で行った画像解析から得たひずみは, ひずみゲージから得たひずみと、プレピーク域において 概ね一致したといえる。

5.2 各供試体の主引張ひずみ分布

以下に載荷中の各供試体表面に発生した主引張ひず み分布をコンター図で示す。ただし、F650では、ピーク 荷重70%付近から、面外への大きな変形が、供試体軸方 向と直角方向に設置した変位計により計測された。本研 究における非接触ひずみ計測システムは、面内方向の変 位を対象としているため、F650の結果を省略している。

(1) NF2



コンクリートゲージの比較

図-8 に、NF2 の各荷重段階における主引張ひずみ分

布を示す。110 kN時において、せん断スパン中央部から 支点よりの位置にひずみの集中域が形成され、斜めひび 割れの発生を載荷試験中にリアルタイムに確認できた。 図-5において、荷重が約110kN以上を示す領域で剛性 が低下しているが、画像解析の結果から斜めひび割れの 発生による減少と考えられる。ピーク荷重時には、載荷 点から支点まで,斜めひび割れに沿ってひずみが局所化 している。その後、ポストピーク域において供試体上縁 にまで、0.02を超えるひずみの局所化領域の形成を確認 できる。図-5において、ポストピーク域の急激な荷重 低下を確認できるが、ひずみ分布から、供試体上縁にま で達した斜めひび割れの拡幅によるものと考えられる。 (2) NF1

図-9に、NF1の各荷重段階における主引張ひずみ分 布を示す。102kN時に、せん断スパン中央付近に、0.02 を超えるひずみの局所化領域が形成され、斜めひび割れ の発生が載荷試験中に確認できた。ここで、図-8(a)お よび図-9(a)を比較する。NF2 では、図-8(a)の円で囲 った領域において、斜めひび割れに沿った、ひずみの局 所化領域の拡大が、軸方向鉄筋位置において抑制されて いるのに対し, NF1 では, 図-9(a)の円で囲った領域に おいて、0.01を超えるひずみの局所化領域が、供試体下 縁まで拡大していることがわかる。これは,NF1の方が, 軸方向鉄筋比が小さいため、斜めひび割れの進展を抑制 する効果が小さいことに起因すると考えられる。さらに, NF1 では NF2 より, 曲げひび割れに沿って発生している ひずみの値が大きいことから,曲げひび割れ幅が大きい こともわかる。その後、ピーク荷重直後(図-9(b))には、 斜めひび割れが載荷点直下まで進展したことを, ひずみ の局所化領域から確認できる。そして、ポストピーク域 では、0.02を超えるひずみの局所化領域が、供試体上縁



主引張ひずみ分布(NF2)

図-9 各荷重段階における 主引張ひずみ分布(NF1) まで達したことを確認できることから,斜めひび割れの 拡幅により,図-5のポストピークにおける,急激な荷 重低下を引き起こしたと考えられるのである。 (3)F50

図-10に、F50のピーク荷重付近における,供試体両 側面に生じた主引張ひずみ分布を示す。図-10(a)より, 142 kN時では,両側面で斜めひび割れに沿ったひずみの 集中領域を確認できる。さらに,破断面側の鉄筋破断位 置(支点部)にひずみの局所化領域が形成され,ひび割れ の発生が載荷試験中に推測できた。その後,ピーク荷重 時には,非破断面側において,ひずみの局所化領域が, 支点と載荷点を結ぶ直線に沿って拡大している。しかし, 破断面側では,載荷点から,はり高さ中央付近までは0.02 を超えるひずみの局所化領域が,1筋のみ形成されてい るが,そこから支点までは,2筋形成されていることが 確認できる。このピーク荷重付近のひび割れ進展状況に ついては,5.3 節にて,荷重の増分に対する,ひずみの 増分に着目してさらに詳細に検討する。

(4) F350

図-11 に, F350 の各荷重段階における,供試体両側 面に生じた主引張ひずみ分布を示す。なお,破断面側に, 軸方向鉄筋に加え、せん断補強鉄筋位置を、一点鎖線で 示している。図-11(a)より, 50 kN 時に, 破断面側にお いて,鉄筋破断位置から,高さ約 240mm の位置まで, ひずみが集中して発生しており,曲げせん断ひび割れの 発生が載荷試験中に推測できた。一方,非破断面側では, ひずみの局所化領域がほとんど確認できないことがわ かる。これは、破断していない軸方向鉄筋が曲げひび割 れの拡幅を抑制しているためと考えられる。その後、ピ ーク荷重直後において、0.02を超える、ひずみの局所化 領域が、非破断面側では支点から載荷点付近まで、破断 面側では,鉄筋破断位置からせん断補強鉄筋位置を避け て供試体上縁部にかけて拡大している。このことから, 破断面側ではせん断補強鉄筋が,ひび割れ幅の抑制に十 分貢献できなかったと考えられ、このことが NF2 に対し てせん断耐力が低下した1つの要因であると推察される。 このことは、スターラップのひずみ計測値が、ピーク荷 重時に 500μ程度を示し,降伏に至らなかったことから も推測される。その後、ポストピーク域において、非破 断面側に発生していた斜めひび割れ先端上部に, 0.02 を 超えるひずみの局所化領域が形成され、終局を迎えたこ とがわかる。

5.3 荷重段階間のひずみの増分に着目した画像解析結果

5.2(3)で述べた、ピーク荷重付近における、F50の破断 面側のひび割れ進展状況について、荷重の増分に対する ひずみ増分量に着目して解析を行った。図-12に、解析 結果を示す。図中の荷重-たわみ関係は、図-5に示し



画像解析結果(F50)

た F50 のピーク荷重付近を拡大したものである。図より, ①-②区間では,斜めひび割れに沿って,0.02 程度のひ ずみが局所化しているが,1 度荷重が低下する②-③区 間では,鉄筋破断位置から供試体高さ中央まで,0.02 以 上のひずみの局所化領域の拡大を確認できる。さらに, ピーク荷重に到達する③-④区間では,①-②区間でひ ずみが集中していた位置より上部で,鉄筋破断位置から 載荷点まで,ひずみの局所化領域が拡大していることが わかる。これらのことから,鉄筋破断位置から発生した ひび割れの進展により,ピーク荷重を迎えたと考えられ る。以上より,荷重の増分に対するひずみ増分に着目す ることで,最終的な破壊モードだけでなく,荷重の増加 に伴い,変形が集中している斜めひび割れの位置を,詳 細に把握することができた。

5.4 画像解析から得たひび割れ幅を用いた検討

本システムから得られる,各ターゲットの移動量を用 いて,ひび割れ幅の算出を試みた⁴⁾。図-13に,算出方 法を示す。本研究では,ひび割れ幅を,ひび割れ方向と 直角方向の変位量とし,ひび割れを挟む1組のターゲッ トの x,y 方向の相対変位と,主引張ひずみ角度(*θ*)を用い て,式(4)にてひび割れ幅(*w*)を算出した。

$$w = (\Delta x_2 - \Delta x_1)\cos\theta + (\Delta y_2 - \Delta y_1)\sin\theta$$
(4)

算出したひび割れ幅を用いて、NF2、およびせん断耐 力が大きく低下した F350 の, 各荷重段階のひび割れ幅 を算出し、供試体の各高さに対してプロットした。図ー 14に結果を示す。なお、ひび割れ幅算出の対象としたひ び割れは、図-6において、太線で表したひび割れであ る。また、各荷重段階において、まだひび割れが発生し ていない、ならびにターゲットの反射により画像解析に 誤差が生じた高さでは、結果を表示していない。**図**-14(a)より, NF2 では, 荷重の増加に伴い, 高さ75mm~ 125mm 付近のひび割れ幅が大きく増加している。また、 いずれの荷重においても,高さが低くなるにつれて,急 激にひび割れ幅が小さくなっており、軸方向鉄筋による ひび割れ開口抑制効果が確認できる。一方,F350 では, 荷重の増加に伴い、ひび割れ全域でひび割れ幅が増加し、 特に供試体下縁に近づくほどひび割れ幅が増加してい る。以上より、供試体の各高さにおけるひび割れ幅に着 目することで、軸方向鉄筋の破断、および 5.2(4)で述べ た, せん断補強鉄筋が有効に作用しなかったことによる, ひび割れ開口抑制効果の低下を確認できたと考える。

せん断補強鉄筋のない RC はりで、せん断に抵抗する メカニズムのうち、軸方向鉄筋のダウエル作用、および ひび割れ面での骨材の噛み合わせ作用は、ひび割れ幅の 関数として示されると考えられている⁵⁾。これまで斜め ひび割れ幅の計測値は、計測機器を設置した限られた位 置のみで得られたものだったが、本システムを利用する ことで、経時的に、かつ斜めひび割れ全域にわたってひ び割れ幅を算出することが可能となる。すなわち、本シ ステムは、せん断破壊現象を評価する一助になると言え る。

6.まとめ

本研究から得られた知見を、以下にまとめる。

主引張ひずみ分布のひずみの局所化領域に着目することで、軸方向鉄筋破断位置の違いによる、ひび



割れの発生および進展過程の差異を載荷試験中に リアルタイムに確認できた。

- 2) 非接触ひずみ計測システムを利用して得られた,荷 重に対するひずみ増分に着目することで,せん断破 壊する RC はりにおいて,最終的な破壊モードだけ でなく,荷重の増加に伴い変形が集中する斜めひび 割れの位置を,詳細に把握することができた。
- 3) 供試体の各高さにおけるひび割れ幅から、軸方向鉄筋の破断による、ひび割れ開口抑制効果の差異を把握できた。また、斜めひび割れ全域でのひび割れ幅を、経時的に計測できる本システムは、せん断破壊現象を評価する一助になると言える。

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。

参考文献

- 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の試み,土木学会第56回年次 学術講演会,CS3-002, pp.164-165, 2001.9
- 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
- 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
- Jeppsson, J.: Contact-free monitoring of cracked concrete, Structural Concrete, Vol.1, No.3, pp.133-141, Sept. 2000
- 5) 田辺忠顕ほか:コンクリート構造,朝倉書店, 1992