#### 論文 鉄筋コンクリート梁部材のひび割れ進展過程におけるひずみ分布に 関する考察

#### 石橋 詩織\*1・高橋 典之\*2・根本 結衣\*3

要旨:鉄筋コンクリート部材の地震時ひび割れ進展過程についての研究が進められている。ひび割れ進展メ カニズムの追求には、ひび割れ近傍のひずみ分布を把握することが重要である。そこで鉄筋コンクリート梁 部材の載荷試験を行い、デジタル画像相関法によってひび割れ近傍の主ひずみ分布を計測し、主ひずみとひ び割れ幅の関係を算出した。ファセット内の主ひずみ分布を追跡することでひび割れ近傍の主ひずみ分布が どのように進展するかを調べたところ、ひび割れの拡幅に伴うコンクリートと内部鉄筋との付着劣化がコン クリート表面の主ひずみ分布に影響していることが示唆された。 キーワード: ひび割れ幅, 損傷量評価, 画像相関法, 梁部材

# 1. はじめに

性能評価型耐震設計のさらなる普及にむけた検討の一 環として,鉄筋コンクリート部材の地震時ひび割れ幅, ひび割れ長さ, コンクリート剥落面積などの損傷量を評 価することの重要性が注目されるようになってきた。な かでも「ひび割れ幅」については、性能評価型耐震設計 が提唱される以前から耐久性の観点で重要な評価項目と 認識されており、さまざまな研究が行われてきた。「ひび 割れ幅」の評価に関する既往の研究 1,2)の多くは、かぶ りコンクリート厚や鉄筋間隔などの物体の幾何学的条件 および載荷による鉄筋のひずみに着目したものが多く、 ひび割れ幅を計測するコンクリート表面のひずみ分布に 着目した研究は殆どなされていない。しかし近年、デジ タルカメラの普及に伴い、デジタル画像相関法<sup>3)</sup> (Digital Image Correlation:以下 DIC と呼ぶ)を用いて、ひび割れ 進展画像からコンクリート表面のひずみ分布を比較的容 易に計測できるようになってきた。

そこで本研究では、鉄筋コンクリート梁部材における ひび割れ進展状況について、DIC を用いてコンクリート 表面の主ひずみを計測し,ひび割れ幅との関係を分析す るとともに、ひび割れ進展過程におけるコンクリート表 面の主ひずみ分布について考察を行う。

### 2. デジタル画像相関法の概要

DIC の解析原理<sup>3)</sup>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値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×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

\*1 東北大学 工学部建築・社会環境工学科 (学生会員)

\*2 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 博(工) (正会員) \*3 東北電力(株)

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。文献4)による と、離散変位分布diから移動最小二乗法により滑らかな 2次元分布d;を構成しそこからひずみ分布を求めるとき, 変位d<sub>i</sub> を評価点(x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>)において x-y 平面上で一次近似 した場合, 次のように定義している。まず, 変位d<sub>i</sub>, 基 底p<sub>i</sub>を次式で定義する。

$$\begin{cases} d_1 \\ d_2 \end{cases} = \begin{cases} u \\ v \end{cases}, \quad \begin{cases} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ x \\ y \end{cases}$$
(1)



ただし, j は総和規約に準ずる。式(1)を踏まえ,変位  $d_i$ を評価点 $(x_0, y_0)$ において x-y 平面上で一次近似した 場合,近似の係数 $a_{ij}$ を用いて次式のように定義している。

$$d_i = a_{ij}p_j$$
 (i = 1~2, j = 1~3) (2)

移動最小二乗法が通常の最小二乗法と異なる点は,近 似の係数*a<sub>ij</sub>*が評価点の座標(*x*<sub>0</sub>,*y*<sub>0</sub>)に依存している点で ある。たとえばある評価点での変位が一次近似された関 数であっても実際には滑らかな曲線となり,変位から導 出したひずみも連続的な値が得られる。サンプリング点 (*x<sup>1</sup>*,*y<sup>1</sup>*)における計測点*d<sup>i</sup>*と近似関数*d<sub>i</sub>* との二乗ノルム *J*を次式のように定義している。ただし,*i*,*n* は総和規 約に準ずる。

$$J = w_n \left\{ \left( d_i - d_i^I \right)^2 \right\}_n \qquad (n = 1 \sim N)$$
(3)

ここで、 $w_n$  は重み関数を示し、Nは重み関数の影響範 囲内に存在する標本点の個数を示す。この重み関数は次 式で定義されている。

$$w_n = \frac{exp\left[-\left(\frac{r_n}{2R}\right)^2\right] - exp\left[-\left(\frac{1}{2}\right)^2\right]}{1 - exp\left[-\left(\frac{1}{2}\right)^2\right]},$$
(4)

$$r_n = \sqrt{(x^I - x_0)^2 + (y^I - y_0)^2}$$

この重み関数の影響領域は評価点を中心とする円で定 義しており、その寸法は影響半径 *R* に依存する。

式(3)のJを最小とする $a_{ij}$ が,最も確からしい近似を示 す係数になる。つまり、 $a_{ij}$ が次式を満足すれば変位の近 似関数が求まる。

$$\frac{\partial J}{\partial a_{ij}} = 0 \tag{5}$$

式(5)を満たす*a<sub>ij</sub>*は式(2),(3)より次式で与えられる。ただし, *m*,*n* は総和規約に従う。

$$a_{ij} = \left[w_n \left(p_m p_j\right)_n\right]^{-1} \left[w_n \left(p_m d_i^l\right)_n\right] \tag{6}$$

以上により標本データから連続的な変位分布が求まり, 次式を用いることで任意点の微小ひずみが得られる。

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{2\partial y} & \frac{\partial}{2\partial x} \end{bmatrix} \begin{cases} u \\ v \end{cases}$$
(7)

また,既往の研究<sup>5,6</sup>から DIC 解析において適切なパ ラメータが明らかになっている。計測対象の試験体表面 は特定のパターンを示している必要がある。これはスペ ックルパターンと呼ばれ,最小スペックルサイズが使用 するカメラの画素の 3~5pixel 程度が好ましい。また,フ ァセットサイズはファセット1辺の長さを(従来のひず みゲージ貼り付けによるひずみ計測結果との整合性を図 るためには)ゲージ長の 0.5 倍にするとひずみゲージに よる計測値を最も近似する結果になることが分かってい る。さらに,ファセット間の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されている。

表-1 試験体諸元

梁	梁せい B[mm]	150		
	梁幅 D[mm]	220		
	梁長さ L[mm]	800※L=400 位置にノッチ		
	主筋	2-D10 (SD295A)		
	補強筋	Φ6 (SR235) @40		
コンク	圧縮強度 σ <sub>в</sub>	26.1		
リート	ヤング係数 Ec	23300		
[MPa]	引張強度 στ	10.2		

試験体	載荷 速度 mm/min	動画画素数 Pixel	試験体画角 の解像度 mm/pixel	ファセット サイズ Pixel	ファセット 間距離 Pixel	スペックル サイズ mm	動画 画像切り出し 間隔 s
1	3.6	3840×2160	0.2037	25	20	0.6~1.0	. 1
2		3840×2160	0.0769	65	52	0.2~0.4	
3		2028x2704(3 台使田)	0 0909	55	44	0.3~0.5	
		2020-2104 (0 1 (2/1))	0.0000			ムラあり	
4	- 72	2840~2160	0 2024	25	20	0.6-1.0	
5		JO4U*210U	0.2024			0.0~1.0	0.1
6		2028×2704 (3 台使用)  0	0.0000	55	44	0.3~0.5	0.1
			0.0909			ムラあり	

表-2 RC 梁載荷実験計測計画





# 3. 試験体概要

試験体諸元を表-1 に,試験体形状を図-2 にそれぞ れ示す。梁断面は150mm×220mm,長さ800mmである。 梁中央下端の位置に厚さ0.3mmのプレートを15mmの 深さで挟んで打設している。主筋には主筋長さ400mmの 位置にひずみゲージを設置した。また,試験体せい面に DIC 計測で撮影に用いるカメラの解像度に応じて3~ 5pixel に相当するスペックル(模様)を塗布した。ただ し,試験体3,6は塗布条件が計測精度に与える影響を確 認するため,塗布量にムラがある(塗布量の少ない箇所 と過剰な箇所が混在している)試験体とした(図-3)。

#### 4. 実験計画

載荷計画および撮影計画を表-2にまとめて示す。

#### 4.1 載荷計画

試験体への載荷点が載荷方向に動く速度を載荷速度と し、載荷速度が異なる試験体3体ずつ(計6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。

#### 4.2 撮影計画

表-2 に示した解像度となる様々な撮影機器を用いて 載荷過程を撮影した(図-4)。試験体1,2,4,5はいず れも4K 解像度のビデオカメラを用いた撮影であるが試 験体をとらえる画角が異なるため,解像度の低い動画と, 解像度の高い動画となっている。試験体3,6は上述の解 像度の中間程度として 0.1mm/pixel 程度の解像度となる ことを狙って撮影した。なお,撮影した動画から表-2に 示した時間間隔ごとに静止画を切り出し,切り出した画 像の色情報をグレースケール化して DIC 解析に用いた。

# 4.3 主ひずみ計測計画

DIC 解析には GOM Correlate2019<sup>6</sup>を用いた。表-2 に 示すファセットサイズ,ファセット間距離を用いてひび 割れを通るファセットの中央の主ひずみを算出した。ひ び割れ幅の計測は,表-2 に示す解像度(mm/pixel)を用い てデジタル画像上でひび割れと認識された部分の画素寸 法を計測しひび割れ幅に換算した。なお,一定速度で載





(a)標準的なスペックル
 (b)ムラのあるスペック
 塗布例(試験体 2)
 ル塗布例(試験体 6)
 図-3 スペックルパターン量の比較



図-5 荷重—変形関係



(a) 試験体 1



(b) 試験体 4 図-6 試験体の最終ひび割れ状況

荷していることを勘案し,ひび割れ幅は,ある時間刻み 内では均しく拡幅するものと仮定して,画素刻みよりも 細かいひび割れ幅情報に換算した。したがって,載荷開 始時点から最初にひび割れが可視された時点までに均し くひび割れが拡幅したと仮定し,ひび割れ発生は載荷開 始と同時に起こっていると仮定する。

#### 5. 実験結果および考察

#### 5.1 荷重一変位関係



各試験体の荷重-変形関係を図-5 に示す。各試験体 の最大荷重はいずれも110kN程度で,曲げ破壊であった。 載荷速度による最大耐力,破壊性状への影響は見られな かった。

### 5.2 ひび割れ進展状況

載荷速度の遅い試験体1および載荷速度の速い試験体



4 の最終ひび割れ状況を図-6 に示す。なお,試験体 2, 3 及び試験体 5,6 についてはそれぞれ試験体 1,試験体 4 に破壊性状が似ていることから図示は割愛した。等曲 げ区間に設けたノッチから材軸直交方向に曲げひび割れ が入るのとほぼ同時に,モーメント勾配のある区間にお いて曲げせん断ひび割れも進展した。

## 5.3 載荷速度の違いによるひずみ進展の違い

試験体に生じた曲げひび割れについて,主ひずみ-ひ び割れ幅関係を算出した。主ひずみとひび割れ幅の関係 を図-7 に示す。ここで,ひび割れ幅および主ひずみ計 測点は,試験体中央に設置したノッチから生じた曲げひ び割れと引張鉄筋が交差する点を含むファセットの中心 とした。併せて,ひび割れ領域以外がすべて剛体変形す ると仮定した場合のひび割れ部主ひずみを「剛体ひび割



れひずみ」とした場合を図-7中に破線で示した。なお, 剛体ひび割れひずみの概念図を図-8 に示す。図-7(a) より, 載荷速度 3.6mm/min の試験体 1, 2, 3 について見 てみると、本実験で仮定したひび割れ幅発生直後はコン クリートの引張による主ひずみがひび割れ近傍で計測さ れ、剛体ひび割れひずみよりも図中プロットの傾きが大 きくなった。ひび割れ幅が 0.2mm よりも大きくなると, プロットの傾きは剛体ひび割れひずみの傾きと近い値に なった。すなわち、コンクリート主ひずみはほぼ変化の ないまま、ひび割れだけが拡幅した。これは、ひび割れ 近傍のコンクリートと主筋との付着が切れ、引張応力が コンクリート表面まで伝達されないことを示唆している。 さらにひび割れ幅が拡幅し、ひび割れ幅 0.3mm を超える と、コンクリートの主ひずみが再度生じ、図中プロット の傾きが剛体ひび割れひずみの傾きよりも大きくなった。 これは、既発ひび割れ間にあるひび割れ未発生区におけ るコンクリートと主筋との付着が切れていない箇所から の応力増分が、コンクリート表面まで伝達したことを示 唆している。また図-7(b)より、載荷速度 72mm/min の 試験体においても似たようなプロットの傾きの変化が見 られた。この一連の挙動を概念図として図-9 にまとめ た。なお、図-7 においてスペックルの塗布にムラのあ る試験体3,6では主ひずみが(他の試験体より)小さく 評価される傾向にあり、後述の詳細な分析には適さない 試験結果と判断した。

また、図-7 においてひび割れがある程度あって主ひ ずみが0に近い値になっている箇所があるが、これはひ び割れ幅が載荷開始から最初に可視された点まで時間刻 みに対し均しく拡幅していると仮定したため、実際には ひび割れが発生せず、DIC での計測ではスペックルパタ ーンの移動が小さく主ひずみが0に近い値が計測された ためであると考えられる。なお、図-7(a)においてひび 割れ幅が0.75mmを越えるような、ある程度以上に拡幅 すると、DICのファセット内のスペックルパターンの追 跡が難しくなり、計測不能点(図中ではひずみが0とし て表示されている)が生じた。また、試験体には曲げせ ん断ひび割れも生じたが、DIC 計測におけるファセット サイズから、曲げひび割れ発生区間近傍のコンクリート 表面のみを対象とし、曲げせん断ひび割れからの付着力 伝達の影響は当該部分の計測に大きく影響しない。

### 5.4 ひび割れ進展位置による違い

前節では,試験体中央に設置したノッチから生じた曲 げひび割れと引張鉄筋が交差する点を含むファセットの 中心を対象に計測結果を分析したが,本節では,ひび割 れ進展位置が異なる場合について検討を行なった。

具体的には、試験体1を対象に、計測位置を図-10に 示す位置(をファセット中心)とした。図-10の計測位



置 1~4 は中央のノッチから曲げひび割れが進展した箇所 である。また,それぞれの計測点と主筋,補強筋の位置 関係を図-11 に示す。図-11 の緑線が主筋,青線がせん 断補強筋の位置を示す。図-12 に各計測位置での主ひず みーひび割れ幅関係を示す。

曲げひび割れ(図-12)に着目すると,引張鉄筋近く の計測位置 3, 4 では, ひび割れ幅 0.2mm までは剛体ひ び割れひずみよりもプロットの傾きが大きく、その後剛 体ひび割れひずみの傾きに近い値になり、ひび割れ幅が 0.4mmを超えると再び傾きが大きくなる傾向が見られた。 一方,計測点1,2ではプロットの傾きが変化する傾向は あまり見られなかった。特に計測点2に着目すると傾き は剛体ひび割れひずみより大きいが、傾きが変化する様 子は見られなかった。これは、引張鉄筋から離れた箇所 のコンクリートは、載荷により断面内に引張力が生じる が(そのためひび割れが発生しているが),引張鉄筋から の距離が遠く、付着による応力伝達状態変化の影響が小 さいため、コンクリート表面主ひずみが一様に進展した ものと考えられる。ひずみゲージで計測した引張鉄筋の 材軸方向ひずみとDICによって計測したコンクリート表 面の主ひずみを比較したものを図-13に示す。引張鉄筋 が降伏によりグラフの傾きが急変していることが読み取 れるが(載荷時間85秒程度のところで),コンクリート 表面は鉄筋降伏前に傾きが急変している(載荷時間 65 秒 程度のところで)。載荷によって引張鉄筋が伸びはじめる と付着力を介してコンクリート表面まで応力が伝達し, 主ひずみがコンクリート表面にも生じるが、鉄筋降伏前 にコンクリート表面にはひび割れが進展し、主ひずみが 急増したことを表している。その後,引張鉄筋が降伏し, 鉄筋の材軸方向ひずみ増分が大きくなると、コンクリー ト表面の主ひずみも同時にさらに増大し始め、その値は



0.2

0

0.2

0

0.2

0

0.2

1

<sub>ال</sub> 0.15

、 う 0.1 H 0.05

1

0.15  6

計測点

6

6

11

11

11

(1)0秒後(ひび割れ幅0mm)



(2) 15 秒後 (0.173mm)



(3) 30 秒後 (0.243mm)



(4) 44 秒後 (0.414mm)







(5) 49 秒後 (0.757mm)

(a) DIC での計測画面 (b) 計測点ごとの主ひずみ 図-14 ひび割れ発生箇所近傍でのひずみ進展

引張鉄筋に近いほど大きくなる傾向があった。なお、最 も引張鉄筋から遠い計測点1は、引張鉄筋降伏後によう やく主ひずみが急増する傾向を示した。鉄筋とコンクリ ートとの付着がコンクリート表面の主ひずみに及ばす影 響は、引張鉄筋との距離に依存し、主筋降伏後は部材全 体の変形が増大することで主筋から離れたコンクリート 表面の主ひずみも急増することがここから読み取れる。



#### 6.1 計測概要

ファセット内主ひずみ分布について詳細な分析を行っ

た。ファセット中心を通る材軸直線上 10pixel(=0.769mm) ごとに計測点を設定した(図-14(1))。

#### 6.2 計測結果

試験体2を対象に計測した結果を図-14に示す。ファ セット内の主ひずみ分布においても、ひび割れの発生箇 所を中心とした主ひずみが最も大きくなり、ひび割れ領 域から離れるほど主ひずみは小さくなった。ただし, 載 荷開始44秒後(ひび割れ幅0.414mm)から49秒後(ひ び割れ幅 0.757mm) にかけての主ひずみ分布では特徴的 な挙動が見られた。図中の計測点11に着目すると、載荷 開始44秒後(ひび割れ幅0.414mm)までは主ひずみが増 加しているが,49秒後(ひび割れ幅0.757mm)に至る過 程で主ひずみが減少した。これは、コンクリートと主筋 との付着が切れて、引張応力が部分的に解放された状態 を示しているものと考えられる。

### 7. まとめ

鉄筋コンクリート梁部材の4点曲げ載荷試験を通して DIC によるひび割れ近傍のコンクリート表面の主ひずみ を追跡し、以下の所見を得た。

- ひび割れ幅が 0.2mm 程度に達するとひび割れ近傍 のコンクリートと鉄筋の付着が急に劣化し切れは じめる。
- さらに曲げひび割れ幅が拡幅すると、コンクリート 2) と主筋の付着が切れていない箇所からの応力増分 がひび割れ近傍のコンクリート表面まで伝達する。

#### 参考文献

- CEB-FIP: Model Code for Concrete Structures, Apr.1978 1)
- 2) 周塬:動的載荷を受ける RC 部材の損傷量評価に関 する研究, 東北大学修士論文, 2018.3
- 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) 宍戸信之: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) 根本結衣:動的載荷を受ける RC 造部材の損傷量評 価に関する研究,東北大学修士論文,2019.3
- 6) GOM GmbH. : GOM Testing—Technical Documentation as of V8 SR1, Digital Image Correlation and Strain Computation Basics, 2016