

論文 ひび割れが進展する RC 部材のひずみ分布を考慮したひび割れ幅推定手法の検討

石橋 詩織*1・高橋 典之*2

要旨 : RC 部材の損傷量評価を目的としたひび割れ進展過程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 RC 梁部材の載荷試験にデジタル画像相関法を適用し、コンクリート表面主ひずみとひび割れ幅の関係を導出することでひび割れ進展過程の分析を行った。載荷速度によって、同じ部材条件でも表出するひび割れ幅が異なること、ひび割れ幅分布モデルの標準偏差が載荷速度により異なることが示唆された。これを踏まえ、RC 部材表面のひずみ分布を考慮したひび割れ幅推定手法の検討を行い、幅と長さを統合した損傷量算出の可能性を示した。

キーワード : ひび割れ幅, ひび割れ長さ, 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の評価することの重要性が注目されるようになってきた。ひび割れの発生を抑制する条件やその影響評価の検討は精力的に進められている一方、ひび割れ発生後の進展挙動を対象とした検討の手法に限られている。ひび割れそのものがどのように進展するのかということやその進展と構造部材の状態変化の関係が明らかにできれば、予測を含むコンクリート構造物の性能評価や維持管理の高度化につながることを期待されている¹⁾。ひび割れ幅の評価に関する既往の研究^(例えば2)の多くは、かぶりコンクリート厚や鉄筋間隔など物体の幾何学的条件と力学的条件としての鉄筋ひずみに着目したものが多く、ひび割れ幅が計測されるコンクリート表面のひずみ分布に着目した研究は少ない。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³⁾(Digital Image Correlation : 以下 DIC と呼ぶ)を用い、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容易に計測できるようになってきた。

本研究では、鉄筋コンクリート梁部材の静的載荷実験および動的載荷実験を行い、ひび割れ進展におけるコンクリート表面ひずみを DIC で計測し、ひび割れ幅との関係を算出した。さらに、計測結果からひび割れ進展に伴い部材内部でどのような変化が起きているかを分析し、ひずみ分布を考慮した損傷量推定手法について検討した。

2. 実験概要

鉄筋コンクリート梁部材の 4 点曲げ載荷試験を行い、撮影画像に DIC を適用しコンクリート表面主ひずみを計測した。

2.1 DIC 計測原理⁴⁾

DIC は、計測対象物の表面の様子のランダム性を基に、変形前後の計測対象物表面をデジタルカメラなどで撮影したデジタル画像を画像処理することにより、計測範囲全体に渡って変位の大きさと方向を求めることができる計測方法である。まず変形前の画像において、任意の点(1 画素)を中心とした $N \times N$ の任意領域(ファセット)を指定する。計測対象に変位が生じると、変形後の画像上のファセット位置が変化する。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、そのファセット中心位置の変位を利用し変位量と方向を算出する。これをすべての小領域で繰り返して全視野の変位データを得る。

2.2 試験体概要

試験体形状を図-1 に、試験体諸元を表-1 に示す。梁断面は $150\text{mm} \times 220\text{mm}$ 、長さ 800mm である。ひび割れ発生位置を制御する目的で梁中央下端に厚さ 0.3mm のプレート 15mm の深さで挟んで打設した。主筋には主筋長さ 400mm の位置にひずみゲージを設置した。試験体せい面には、DIC 計測で撮影に用いるカメラの解像度の $3 \sim 5\text{pixel}$ に相当する $0.6 \sim 1\text{mm}$ の大きさのスペックル(模様)⁴⁾を図-1 の黄色部分で示した部分に塗布した。

2.3 載荷方法

万能試験機による加力を行い試験機のヘッドスピードを載荷速度とし、S1, S2 試験体は静的載荷として $3.6\text{mm}/\text{min}$ を、D1, D2 試験体は動的載荷として $72\text{mm}/\text{min}$ を設定し載荷を行った。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。

2.4 計測計画

本実験に DIC 計測を適用するため、試験体への載荷を 4K ビデオカメラで撮影し、 30fps の動画から表-2 に示

*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 都市・建築学専攻 准教授 博(工) (正会員)

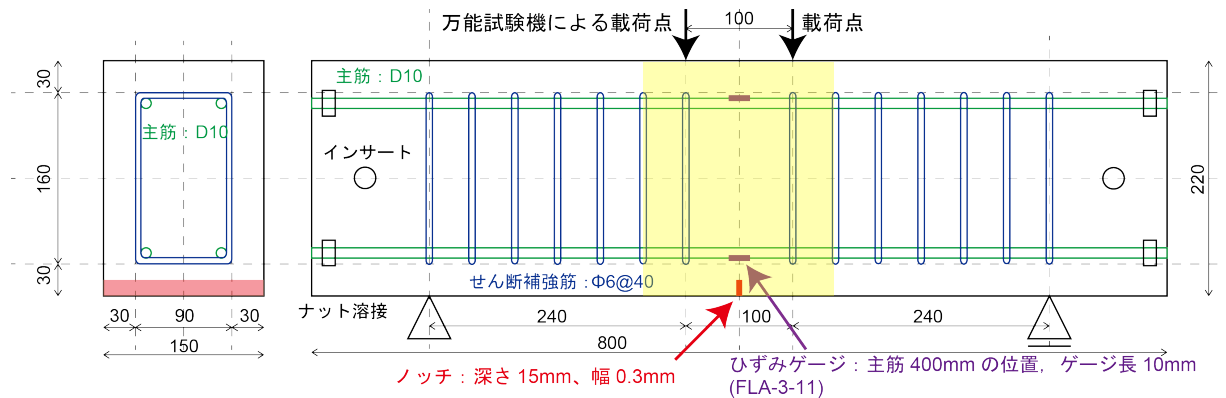


図-1 試験体配筋図 単位[mm] 注) 撮影方向: 試験体せい面に正対 ビデオカメラの設置高さ: 134mm

す間隔で静止面を切り出し、切り出した画像をグレースケール化して DIC 計測に用いた。ノッチから部材中央に生じた曲げひび割れと引張鉄筋が交差する点(図-2)において、画像からひび割れ幅、DIC によりコンクリート表面主ひずみを計測した。ひび割れ幅計測は、ファセット解像度(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換算した。なお、一定速度で載荷することを勘案し、ひび割れ幅は画像切り出し時間刻み内で均しく拡幅するものと仮定して、画素より細かいひび割れ幅は補間算出した。つまり、載荷開始からデジタル画像上でひび割れ可視までの間で均しく(画像解像度以下の)ひび割れ幅が拡幅していると仮定した。DIC 計測では、GOM Correlate2019⁹⁾を用いて図-2 に示す点を通るファセットの中央の主ひずみを算出した。ゲージ長 10mm のひずみゲージを貼付けたのと同様なひずみを算出するよう、既往の研究^{5),6)}からファセットサイズ 5mm、ファセット間距離 4mm を設定した。

2.5 計測結果

試験体の荷重-変位関係を図-3 に示す。変位は万能試験機により計測された載荷(材軸直交)方向変位とした。またひび割れ幅-ひび割れ近傍計測対象領域主ひずみ関係を図-4 に示す。計測区間の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計測対象領域主ひずみを「剛体ひび割れひずみ⁶⁾」と称し、これを図-4 中に破線で示す。すなわち、剛体ひび割れひずみは、DIC のファセットサイズ 5mm 区間の範囲を剛体であるとみなし、ひび割れ幅を区間長さで除した値である。図-4(a)より、試験体 S1, S2 においては、本実験で仮定したひび割れ幅発生直後は計測対象領域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(傾き 0.200)よりも図中プロットの傾きが大きくなった(最小二乗法により算出した傾き S1: 0.284, S2: 0.216)。ひび割れ幅が 0.15mm 程度より大きくなると、プロットの傾きはひび割れ幅 0.15mm 以前よりも小さくなった(傾き S1: 0.279, S2: 0.105)。すなわち、計測対象領域ひずみの増大が鈍化し主

表-1 試験体諸元

梁	梁幅 B[mm]	150
	梁せい D[mm]	220
	梁長さ L[mm]	800※梁中央位置にノッチ
	主筋	4-D10 (SD295A ^{注)})
	補強筋	Φ6 (SR235) @40
コンクリート [MPa]	圧縮強度 σ_B	26.1
	ヤング係数 E_c (1/3 割線弾性係数)	23300
	引張強度 σ_T	2.1

注) SD295 降伏強度: 376.3(MPa), 引張強さ: 534.5(MPa), E_s : 18.95 $\times 10^4$ (MPa)

表-2 計測計画

試験体名	載荷速度 [mm/min]	解像度 [mm/px]	画像間隔[s]
S1	3.6	0.204	1
S2	3.6	0.204	1
D1	72	0.202	0.1
D2	72	0.202	0.1

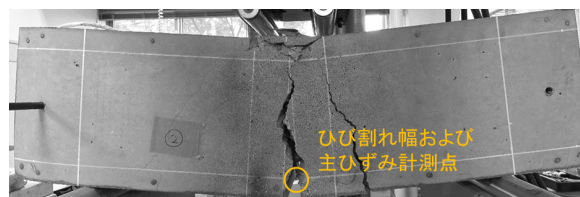


図-2 DIC 計測における計測点

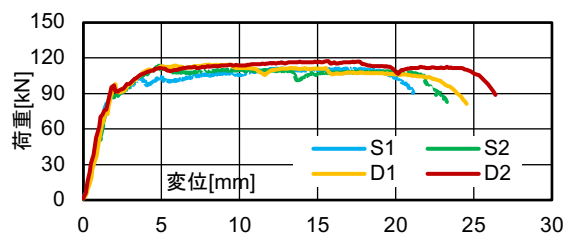


図-3 荷重-変位関係

にひび割れだけが拡幅した。ひび割れ近傍のコンクリートと主筋との付着が切れ、主筋を介した引張応力がコン

クリート表面まで伝達されなかったことを示している。さらにひび割れが拡幅し、幅 0.3mm 程度を超えると、計測対象領域主ひずみが再度増大し、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（傾き S1 : 0.288, S2 : 0.224）。これは、既発ひび割れのあいだの「ひび割れ未発生区間」で、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している。なお、本検討では DIC 計測区間でのひずみ計測となったため、ひび割れ幅が小さい時よりも相対的に大きな値を算出したと考えられる。また、図-4 (b)より試験体 D1 においても同様の傾きの変化が見られた。D2 は荷重点が僅かにずれた影響で、ひび割れが僅かに斜め方向に進展したことが影響し、他試験体と異なる挙動となったと考察された。

なお、図-4 において主ひずみが 0 に近い状態でひび割れ幅が 0 ではないのは、荷重開始からデジタル画像上のひび割れ可視点まで時間刻みに対して均しくひび割れ幅が拡幅したと仮定したためであるが、実際にはマイクロクラック時のスペックルパターン移動量が DIC ひずみ計測の下限だったと考えられる。なお、図-4 においてひび割れ幅が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(図中でひずみが 0 として表示される)が生じた。

3. ひずみ進展過程の分析

3.1 引張鉄筋ひずみの変化

2 章の実験を対象に、ひび割れ進展に伴う引張鉄筋ひずみの変化を検討した。引張鉄筋ひずみ—ひび割れ幅関係を図-5 に示す。引張鉄筋ひずみは試験体に貼付したひずみゲージ(弾性ゲージ: FLA-3-11)により計測した。ゲージ位置を図-1 に示す。なお縮小試験体で主筋径が細いことを踏まえ、ひずみゲージは引張主筋では引張側に一枚貼りとした。ひび割れ幅は 2 章で用いた値とした。

図-5 において、引張鉄筋が降伏ひずみに達したとき(静的荷重でひび割れ幅 0.2mm 程度、動的荷重で 0.3mm 程度)、図-6 右上に示した「一次ひび割れ」の部分で引張鉄筋が塑性化する。さらに鉄筋の塑性化域が進展すると、図-5 の引張鉄筋ひずみの増加が鈍化する(静的荷重でひび割れ幅 0.2~0.3mm 程度、動的荷重で 0.3~0.9mm 程度)。その後再び引張鉄筋ひずみが増大すると(静的荷重でひび割れ幅 0.3~0.5mm 程度、動的荷重で 0.6~1.0mm 程度)、図-6 右下に示した「二次ひび割れ」が発生し、各ひび割れ間の主筋が広範囲にわたり塑性化する。このとき、ひび割れ部の鉄筋でひずみが集中的に増大する状態となる。なお、静的荷重と動的荷重でそれぞれの状態となる曲げひび割れ幅の大きさが異なる。ひずみ速度による付着強度上昇⁷⁾が影響したと考えられる。

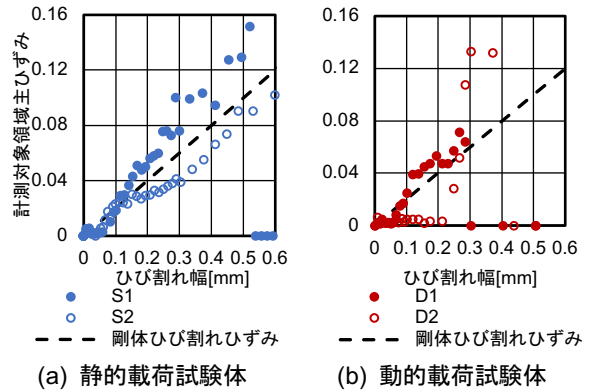


図-4 ひび割れ幅—計測対象領域主ひずみ関係

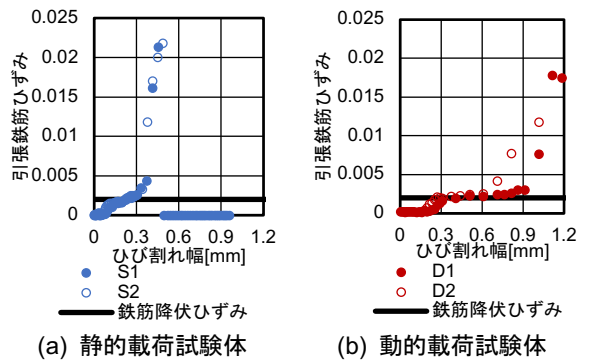


図-5 ひび割れ幅—引張鉄筋ひずみ関係

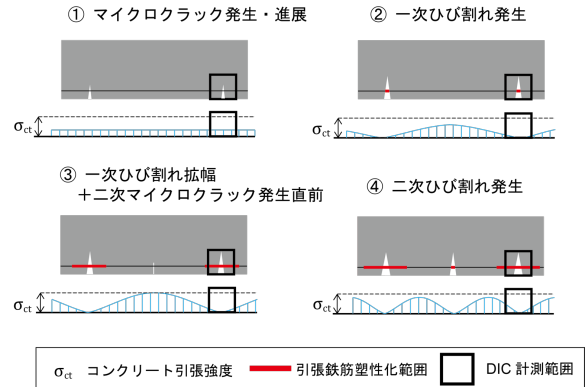


図-6 コンクリート応力進展概念図

3.2 コンクリート表面ひずみ—ひび割れ幅関係の分析

一般に RC 部材にひび割れが入ると、付着力を介して、ひび割れ位置ではコンクリートは応力を負担しなくなり、その分鉄筋の応力が増加する。これを踏まえると、試験体内部においてひび割れ進展に伴い、図-6 の挙動が起きていると考えられる。図-4 においてプロットが剛体ひび割れひずみより大きいときは、マイクロクラックの状態ではコンクリートに引張ひずみが生じており、プロットが剛体ひび割れひずみの傾きと近似するときは、ひび割れ位置でのコンクリート引張ひずみは増大せず、ひび割れ幅分が引張ひずみとして表れる。

図-4 及び図-6 から、静的荷重でプロットの傾きが

ひび割れ幅 0.3mm 程度を超えると再び僅かに大きくなった。静的載荷時に二次ひび割れが生じたひび割れ幅 0.3mm を超えてからの領域で、図-5(a)においては引張鉄筋のひずみが集中的に大きく増加している。このとき鉄筋の塑性化域が進展しながら、鉄筋を介して各ひび割れ間のコンクリートに引張応力が作用し、計測対象領域主ひずみ（ひび割れ幅を含む）プロットの傾きも再び増加している。二次ひび割れ発生段階にあって引張鉄筋のひずみが大きく増加するのは、静的載荷ではひび割れ幅 0.3~0.5mm 程度、動的載荷では 0.6~1.0mm 程度である。動的載荷実験では、DIC で計測対象領域主ひずみ（ひび割れ幅を含む）を追跡できずひずみが 0 に近い値を算出した箇所においても、静的載荷実験結果と同様のメカニズムが作用していたとすると、ひび割れ幅が 0.6~1.0mm 程度で計測対象領域主ひずみ（ひび割れ幅を含む）プロットの傾きが再び大きくなるのではないかと予想される。

4. ひずみ分布を考慮したひび割れ進展メカニズムに基づくひび割れ幅推定手法の検討

4.1 ひび割れ長さ推定手法概要

2 章の実験結果を対象に、筆者らが提案してきた手法²⁾による簡易損傷量推定法について検討した。

一般に地震荷重を受ける部材の材軸方向のモーメント分布は材端から反曲点位置まで三角形分布となる。4 点曲げ載荷では、等曲げ区間では一様モーメントがかかり、それより材端側は三角形分布のモーメントがかかる。このとき、曲げひび割れ発生区間 l_{cr} は以下のように表せる。

$$l_{cr} = 2 \cdot \left(1 - \frac{M_c}{M}\right) \cdot H + L \quad (1)$$

ここに、 H : 勾配モーメント区間長、 L : 等曲げ区間長さ、 M_c : コンクリートの引張強度時モーメント、 M : 危険断面モーメント ($M \geq M_c$) である。4 点曲げ載荷の等曲げ区間では、式(1)の危険断面位置モーメント M と等しいモーメントが一様に作用している。

検討対象試験体では部材中央にノッチを設け曲げひび割れ位置を固定したため、部材中央（材軸方向 400mm）を起点として曲げひび割れ発生区間 l_{cr} において平均ひび割れ間隔 S_{av} ごとに曲げひび割れが発生すると仮定する。このとき曲げひび割れ本数 n は以下のように表せる。

$$n = 1 + \frac{l_{cr}}{S_{av}} \quad (2)$$

既往の研究において平均曲げひび割れ間隔式は幾つか提案されているが、本研究においては平均曲げひび割れ間隔 S_{av} を文献 8) で示された式（以下、PRC 式と呼ぶ）に基づき算出する。曲げひび割れ長さの評価は、断面解析により得られた部材断面のモーメント-ひずみ度関係を用いて、引張縁からコンクリート引張強度時ひずみ度に

到達した部分までの長さを曲げひび割れ長さとする。コンクリートの構成則は、圧縮側は修正 Kent&Park 式⁹⁾、引張側は引張強度までを線形、その後は引張軟化曲線（-1 乗関数型）に従うものとした。ただし、コンクリートの圧縮強度、引張強度は材料試験の値を用いる。鉄筋の構成則は降伏後に勾配を持たないバイリニアとした。

塑性ヒンジ領域の曲げひび割れは部材が曲げひび割れ先端の主応力方向が材軸とのなす角 75°以下になる場合に、せん断ひび割れ強度に到達したら曲げせん断ひび割れに進展し、曲げせん断ひび割れになるものとした。²⁾

4.2 ひび割れ長さ推定結果

ひび割れ長さ発生位置の推定結果を図-7, 8 に示す。荷重一部材角関係が文献 10) に基づくものとし、終局時は文献 10) におけるかぶりコンクリート圧壊点とした。実験値は対応する部材角のときの切り出し画像を使用し、CAD によりひび割れをトレースしたひび割れ図とした。

ひび割れ発生位置については実験結果を概ね近似した。ひび割れ長さは静的載荷の引張鉄筋降伏時に 6 本中 4 本で過大評価となった。これは、試験体に生じたひび割れが非常に小さく、撮影動画解像度で捕捉できなかったためと考えられる。また、動的載荷の引張鉄筋降伏時で、曲げせん断ひび割れが過小評価となった。これは、推定モデルにおいて、曲げせん断ひび割れのせん断区間への屈曲進展が、部材がせん断ひび割れ強度に到達するまで生じないと仮定したためと考えられる。実際には部材のせん断ひび割れ強度到達前に曲げひび割れから曲げせん断ひび割れに移行していた。一方、終局時においては、静的載荷、動的載荷ともに実験結果を概ね近似した。

4.3 ひび割れ幅を含む損傷量推定手法概要

ひび割れ幅の推定においては、ひび割れ幅分布モデル（あるひび割れ幅を有するひび割れ長さの比率）¹¹⁾ の概念を導入する。既往の研究¹¹⁾から、ひび割れ幅分布モデルは対数正規分布に従うことが分かっている。3 章より、同じ部材状態にあっても静的載荷と動的載荷では表出しているひび割れ幅の大きさが異なることが分かっており、ひび割れ幅分布モデルを決定するパラメータ（ひび割れ幅分布の期待値と標準偏差）が異なると考えられる。そこで、引張鉄筋降伏時の引張鉄筋上のひび割れ幅 w_s が静的載荷で 0.2mm 程度、動的載荷で 0.3mm 程度となることに着目し、幾何学的な関係から、引張鉄筋より引張端側では w_s より大きなひび割れ幅が生じるものとし、引張鉄筋から中立軸位置より少し引張側の曲げひび割れ先端までは w_s より小さなひび割れ幅が生じるとする。引張鉄筋降伏時の静的載荷試験体と動的載荷試験体とで、部材中央に生じた曲げひび割れ長さがほぼ等しく、かつ引張鉄筋から引張端までの距離が等しいことから、ひび割れ幅分布モデルにおいて、静的載荷でひび割れ幅が 0mm 以

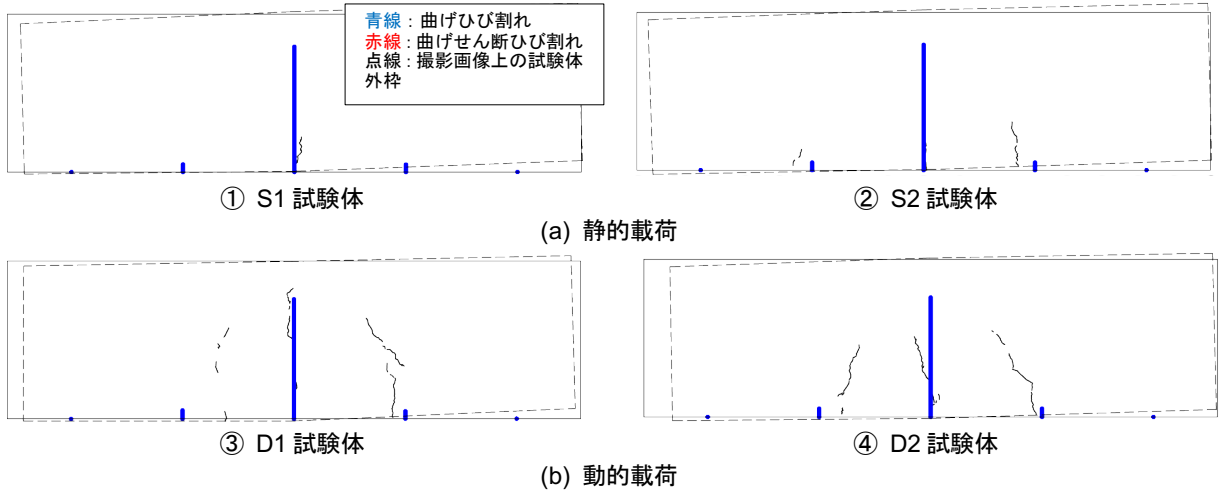


図-7 引張鉄筋降伏時のひび割れ図と推定結果

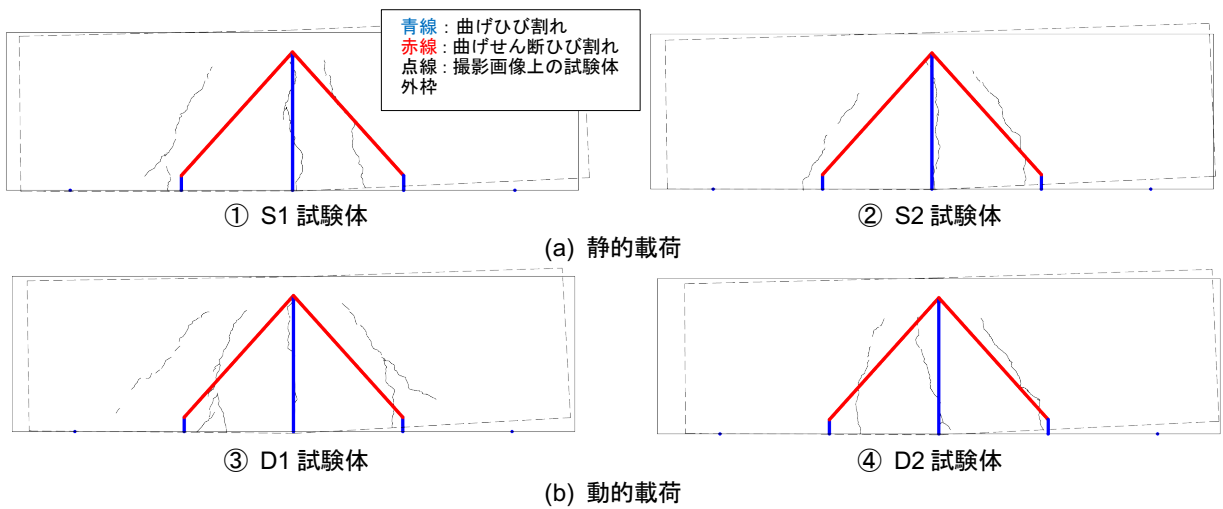


図-8 終局時のひび割れ図と推定結果

上 0.2mm 以下となる累積確率と動的荷荷でひび割れ幅が 0mm 以上 0.3mm 以下となる累積確率 (図-9 斜線部分) が近似し、かつ静的荷荷においてひび割れ幅が 0.2mm 以上最大ひび割れ幅 w_{max} 以下となる累積確率と動的荷荷において 0.3mm 以上 w_{max} 以下となる累積確率 (図-9 格子柄部分) が近似する。これを踏まえ、各試験体のひび割れ幅分布モデルの標準偏差を求める。まず最大ひび割れ幅 w_{max} は幾何学的に求まる式(3)を用いる¹⁰⁾。

$$w_{max} = \frac{(D - x_n) \cdot R_f}{n_f} \quad (3)$$

ここに、 D ：部材せい、 x_n ：断面解析による引張鉄筋降伏時における中立軸高さ、 R_f ：部材角の曲げ変形成分、 n_f ：最大残留ひび割れ幅に対する残留ひび割れ幅合計の比 (文献 10) より 2) である。ひび割れ幅分布の標準偏差は部材角で変化することが指摘されており¹²⁾、静的荷荷の標準偏差を 0~2.4 の範囲で 0.1 ずつパラメトリックに変化させることにした。ひび割れ幅が x_1 mm 以上 x_2 mm 以下 ($x_1 < x_2$) となる確率 $P[x_1 \leq X \leq x_2]$ を式(4)で算出する。なお式(4)において、 σ ： X の対数標準偏差、 μ ： X の対

数平均値で式(5)および式(6)により算出する^{8), 13)}。

$$P[x_1 \leq X \leq x_2] = \int_0^{x_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right] dx - \int_0^{x_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right] dx \quad (4)$$

$$\mu = \log w_{av} - \frac{\sigma^2}{2} \quad (5)$$

$$w_{av} = w_{max}/1.5 \quad (6)$$

4.4 ひび割れ幅を含む損傷量推定結果

4.3 節の推定手法により、パラメトリックに定めた静的荷荷時の対数標準偏差に対し、累積確率差が最小となる動的荷荷時の対数標準偏差を求めた (表-3)。また、表-3 に示す各対数標準偏差時の累積確率差を図-10 に示す。静的荷荷時の対数標準偏差が 1.4 の時に最も累積確率差が小さくなった。そこで表-3 より、本試験体の引張鉄筋降伏時のひび割れ幅分布モデルでは、静的荷荷時は対数標準偏差 1.4 の対数正規分布、動的荷荷時は対数標準偏差 0.6 の対数正規分布に従うものとする。なお算

出した値は、既往の研究¹²⁾で示されているひび割れ幅分布モデルの対数標準偏差ともおおむね整合する。

最後に、推定した試験体中央の曲げひび割れ長さ、(引張鉄筋降伏時の)ひび割れ幅分布モデルを利用して、(引張鉄筋降伏時の)ひび割れ幅と長さの情報を持つ損傷量を算出することができる。 $x_1 \sim x_2$ mm のひび割れ幅を有するひび割れ長さ $l_{x_1 x_2}$ は以下の式で求められる。

$$l_{x_1 x_2} = l_c \cdot P[x_1 \leq X \leq x_2] \quad (7)$$

ここに、 l_c : 試験体中央に生じた曲げひび割れ長さ (mm) である。このとき、本試験体で「0.1~0.2mm のひび割れ幅を持つ試験体中央に生じた曲げひび割れ長さ」を試算すると、静的載荷で33.1mm, 動的載荷で56.3mmである。

5. まとめ

RC 梁部材 4 点曲げ載荷試験に DIC を適用しコンクリート表面のひずみ計測を行うとともにひずみ進展に伴う部材状態について分析し、以下の知見を得た。

- 1) DIC で計測したコンクリート表面ひずみとひび割れ幅の関係から、同じ部材状態のひび割れ幅が載荷速度によって異なっていた。
- 2) 載荷速度によるひび割れ幅分布の違いを考慮した損傷量推定により、ひび割れ長さ と幅を統合した損傷量を算出した。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会: コンクリート構造物のひび割れ進展評価手法に関する研究委員会報告書, 2013
- 2) 周塬, 高橋典之, 佐藤真俊: 静的加振と動的加振を受けた RC 梁部材の損傷量評価についての研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.751-756, 2017.7
- 3) 長崎大学工学部インフラ長寿寿命センター: 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) Freddi, A *et al.*: Experimental Stress Analysis for Materials and Structures, Springer, Chapter 5 Overview of Digital Image Correlation, pp.187-213, 2015
- 5) GOM GmbH.: GOM Testing - Technical Documentation as of V8 SR1, Digital Image Correlation and Strain Computation Basics, 2016
- 6) 根本結衣, 高橋典之: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.805-810, 2019.7
- 7) 栗山昌之, 野口博, 柏崎隆志: 鉄筋コンクリート柱の動的付着特性の影響に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.253-258, 2001.7

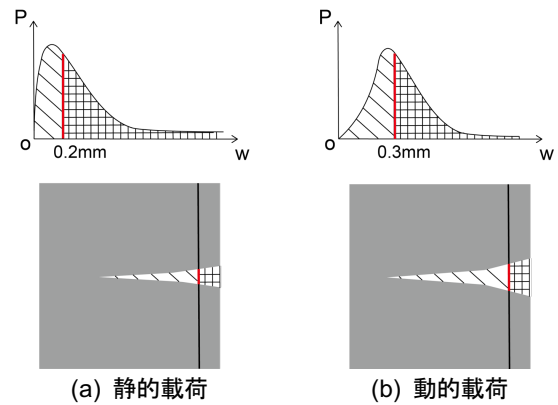


図-9 静的載荷と動的載荷のひび割れ幅分布概念図

表-3 動的載荷時の最適対数標準偏差の推定

静的載荷	動的載荷	静的載荷	動的載荷	静的載荷	動的載荷
0.1	0.3	0.9	0.3	1.7	1.1
0.2	0.3	1.0	0.3	1.8	1.3
0.3	0.3	1.1	0.4	1.9	1.4
0.4	0.3	1.2	0.5	2.0	1.6
0.5	0.3	1.3	0.5	2.1	1.7
0.6	0.3	1.4	0.6	2.2	1.8
0.7	0.3	1.5	0.7	2.3	1.9
0.8	0.3	1.6	1.0	2.4	2.0

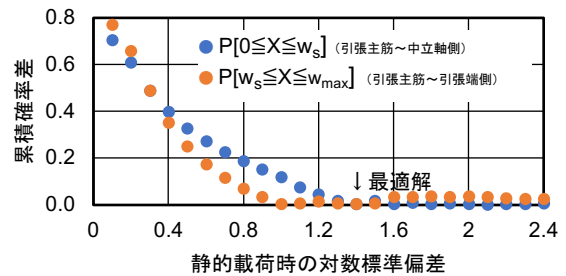


図-10 累積確率差

- 8) 日本建築学会: プレストレスト鉄筋コンクリート (III 種 PC) 構造設計・施工指針・同解説, 2003.2
- 9) Kent, D. C. and Park, R.: Flexural members with confined concrete, Journal of Structural Division, ASCE, Vol.97, Issue 7, pp.1969-1990, 1971
- 10) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針 (案)・同解説, 日本建築学会, 2004
- 11) 滝本和志, 石井清: ひび割れデータを用いた RC 部材の損傷度評価に関する実験的研究, 清水建設研究報告, No.79, 2004
- 12) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート部材の構造性能評価の現状と将来, 2019
- 13) 高橋典之, 中埜良昭: 複数回地震動を受ける鉄筋コンクリート構造物の損傷量推定手法に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, 2008.7