

水平模擬ひび割れを導入した RC 梁の変形挙動の画像解析

Image analysis about the deformation behaviors of RC beams with artificial horizontal cracks

北海道大学工学部
寒地土木研究所
北海道大学大学院工学研究院

○学生員 松江 晃太 (Kota Matsue)
正 員 角間 恒 (Ko Kakuma)
正 員 松本 高志 (Takashi Matsumoto)

1. まえがき

積雪寒冷地の道路橋 RC 床版では、従来報告されてきた疲労による損傷に加えて、凍害によるものと考えられる損傷が報告されている。前者の劣化損傷はよく知られているように、床版下面において一方向ひび割れ形成の後に二方向ひび割れが形成されて、最終的には梁状化した床版が押し抜きせん断破壊をする形態をたどる。一方で、後者は床版上面から劣化損傷が発生し、床版コンクリートには水平方向に層状にひび割れが発生するという形態を呈する。こうした床版の内部に生じる形態の劣化損傷については、劣化損傷の範囲・度合と構造性能との関係がまだ明らかな点が多く、その解明が必要とされている。

本研究では、内部劣化が生じた床版の性能評価手法の確立に向けた基礎的段階として、劣化部を有する梁部材の静的荷重実験を実施する。本検討では、膨張剤とコンクリートの練混ぜ水との反応により発生する膨張圧を利用して人工的に水平方向の模擬ひび割れを導入した RC 梁部材を対象としている。こうした RC 部材においては、荷重前に形成された模擬ひび割れ及び荷重に伴い形成されるひび割れ周辺に複雑な変位が生じ、構造挙動・性能にも影響を及ぼすものと考えられる。ここでは、既往の研究¹⁾²⁾でも有効性が示されている画像解析を用いて、面的な変位場を計測することで、軸方向、せん断方向、最大及び最小主ひずみを算出し、変形挙動の特徴を捉えることを目的としている。

2. RC 梁の曲げ荷重実験

2.1 供試体

曲げ荷重実験に用いた供試体は、図-1に示す長方形断面のRC梁(長さ1700mm、高さ200mm、幅100mm)である。供試体の支間長は1400mm、せん断スパン500mm、曲げスパン400mm、せん断スパン比は3.3であり、せん断スパン内にはせん断補強筋が100mm間隔で配置されている。本供試体はせん断余裕度1.83の曲げ破壊型として設計されている。実験に用いられた3種類の供試体の導入模擬劣化を表-1に示す。模擬劣化は膨張剤の散布により局所的なひび割れを導入している(図-1)。模擬劣化部ではコンクリートのポップアウトや水平ひび割れを荷重前に確認している。

2.2 荷重方法

荷重は 4 点曲げ荷重により行われた(図-1)。荷重は、幅 50mm、厚さ 9mm の荷重板を介して供試体に作用させ、荷重が均一に伝わるように供試体と荷重板の間には

石膏を設置する。荷重は、概ね曲げひび割れの発生までは荷重制御により、それ以降は変位制御で行った。

計測項目は、画像解析に加えて、荷重、変位、表面ひずみとした。

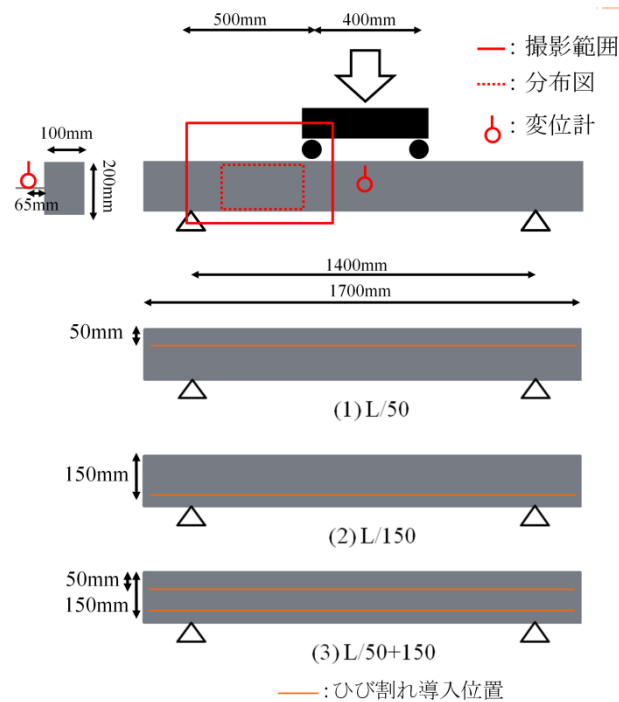


図-1 供試体寸法と供試体構成

表-1 供試体構成

劣化形態 (想定劣化要因)	供試体名	ひび割れ位置 (mm)
水平ひび割れ (疲労)	L/50	50
	L/150	150
	L/50+150	50+150

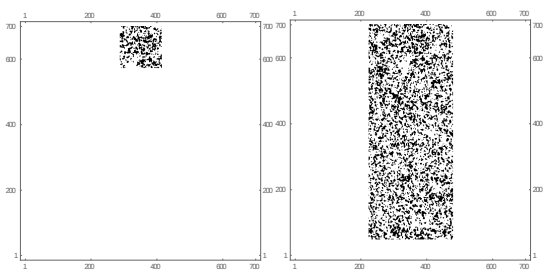


図-2 変形前 (左) と変形後 (右) の着目領域

3. 画像解析手法

3.1 画像撮影

画像撮影には Nikon のデジタルカメラ D3100 を使用した。画素数は 4608×3072 ピクセル(約 1400 万画素)である。撮影は供試体の側面の図-1 に示す実線枠内を対象とした。まず載荷前(変形前)に撮影を行い、載荷開始後(変形後)として、降伏点までは約 10kN ごとに画像撮影を行い、降伏点以降は $1.5 \delta_y$ 、 $2.0 \delta_y$ 、 $3.0 \delta_y$ 時に画像撮影を行った。なお、供試体の撮影表面にはラメスプレーによるランダムパターンを付与している。撮影表面は、変位計設置面と反対側の側面であり、コンタクトゲージとは同じ面としている。

3.2 画像相関

撮影した画像は二値化画像に変換している。二値化画像において、200 ピクセル間隔で格子状に着目点を設定する。着目点は梁軸方向に 24 点、梁周方向に 12 点の合計 288 点とした。

変形前画像において、 128×128 ピクセルの正方形領域を二値化画像から切り出した。一方で、変形後画像からは 256×650 ピクセルの長方形領域を切り出した。長方形領域は、変形した着目点を含むように、変位方向に長辺を取っている。切り出した領域の外の値を 0 (黒)とし、それぞれ切り出した画像を含む 700×700 ピクセルの画像を作成した(図-2)。

変形前後の着目領域画像について相互相関を求め、最大値を得る位置が変形後の着目点である。変形前後の着目点の位置により変位を求めることができる。

変形前の着目領域画像を $g(i,j)$ 、変形後を $f(i,j)$ としたとき、相互相関関数は、

$$(f * g)(k,l) = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^P f(i,j)g(i+k,j+l) \quad (1)$$

である。また、 g は、

$$g(i+p,j+p) = g(i,j) \quad (2)$$

のように循環するとする。

相関定理より、式(1)をフーリエ変換すると、右辺は f と g のフーリエ変換の積となる。この積を求めた後に、逆フーリエ変換をすることで、相互相関係数を求めた。画像相関により得られた変位量はピクセル単位である。より細かく変位量を求めるために、サブピクセル単位で推定を行った¹⁾²⁾。

3.3 ひずみの算出

得られた変位量よりひずみを求める。格子状にある 4 つの着目点の水平方向変位と鉛直方向変位より、梁軸方向ひずみ、せん断ひずみ、最大主ひずみ、最小主ひずみが求められる。

4. 画像解析結果

本論文では、破壊直前の供試体撮影画像について行った画像解析結果について主に述べる。L/50 は荷重 59.9kN、変位 18.62mm 時(図-3①)、L/150 は荷重 58.5kN、変位 16.94mm 時(図-3②)、L/50+150 は荷重 59.3kN、変位 19.32mm 時(図-3③)の結果である。以後の図中には、載荷後の各供試体裏面の導入ひび割れを含

んだひび割れのスケッチを透視図として重ねて白線で表示する。

4.1 L/50

L/50 の分布図について、図-4 に梁軸方向ひずみ、図-5 にせん断ひずみ、図-6 に最大主ひずみ、図-7 に最大主ひずみベクトル、図-8 に最小主ひずみ、図-9 に最小主ひずみベクトルを示す。ベクトルは矢印の傾きで方向を、長さで大きさを表す。

梁軸方向ひずみ分布では曲げせん断ひび割れの周辺で梁軸方向の開口によるひずみが確認された。せん断ひずみ分布では導入ひび割れ周辺で、特に図左側でのひずみの発生が確認できる。ここでは導入ひび割れがせん断方向にずれていることが分かる。最大主ひずみ分布では、上記を合わせた曲げせん断ひび割れと導入ひび割れの周辺でひずみが発生していることが確認できる。特に、スパン左側に発生したひび割れが進展して導入ひび割れ周辺に影響を及ぼしたような分布がみとれる。最大主ひずみベクトルでは導入ひび割れのひびが開くような右下方向の均一な方向のベクトルの分布がみとれる。最小主ひずみ分布では、導入ひび割れ周辺の図右側を中心に大きなひずみが発生していることが分かる。最小主ひずみベクトルでは導入ひび割れに沿って均一なベクトルが分布し、導入ひび割れが圧縮されていると考えられる。以上の分布では、白線で表した裏面のひび割れ位置ともほぼ合致している。

4.2 L/150

L/150 の分布図について、図-10 に梁軸方向ひずみ、図-11 にせん断ひずみ、図-12 に最大主ひずみ、図-13 に最大主ひずみベクトル、図-14 に最小主ひずみ、図-15 に最小主ひずみベクトルを示す。

梁軸方向ひずみ分布では図右側に曲げせん断ひび割れの開口によると考えられる分布が 2 本確認できる。図中央の裏面の斜めひび割れ周辺では垂直方向にのびる分布が確認できる。せん断ひずみ分布図では導入ひび割れの周辺、特に中央に、ひび割れのせん断によると考えられる分布が見られる。最大主ひずみ分布では導入ひび割れ周辺と曲げせん断ひび割れ周辺に顕著な分布が見られる。右側の曲げせん断ひび割れは下面より伸びているようだが、左側のものは導入ひび割れよりつながっている分布が強い。最大主ひずみベクトルでは導入ひび割れ左側か

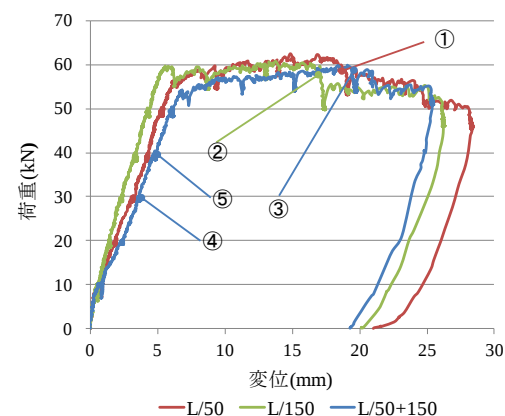


図-3 荷重-変位曲線

ら中央部のななめひび割れにかけて右下方向の均一な向きのベクトルが並んでいる。スパン右側では全体的に右下方向にベクトルの方向が揃っている。最小主ひずみ分布図では導入ひび割れ左側の周辺で大きな値がみとれる。最小主ひずみベクトルでは導入ひび割れ側で均一なベクトル分布がみられ、ひび割れが圧縮されていることが考えられる。

4.3 L/50+150

L/50+150 の分布図について、図-16 に梁軸方向ひずみ、図-17 にせん断ひずみ、図-18 に最大主ひずみ、図-19 に最大主ひずみベクトル、図-20 に最小主ひずみ、図-21 に最小主ひずみベクトルを示す。

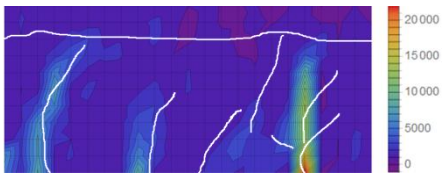


図-4 L/50 梁軸方向ひずみ分布図(59.9kN、18.62mm)

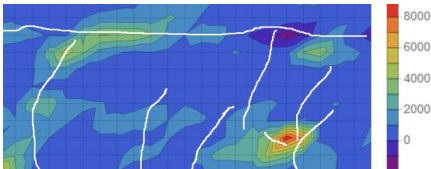


図-5 L/50 せん断ひずみ分布図(59.9kN、18.62mm)

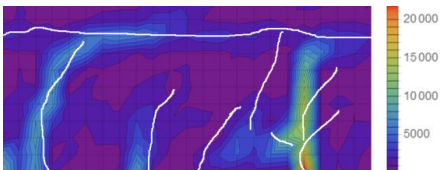


図-6 L/50 最大主ひずみ分布図(59.9kN、18.62mm)

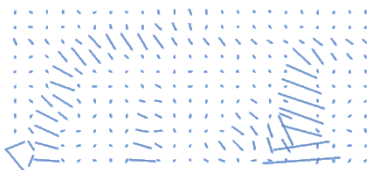


図-7 L/50 最大主ひずみベクトル(59.9kN、18.62mm)

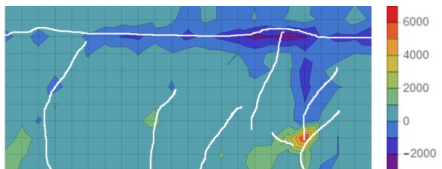


図-8 L/50 最小主ひずみ分布図(59.9kN、18.62mm)

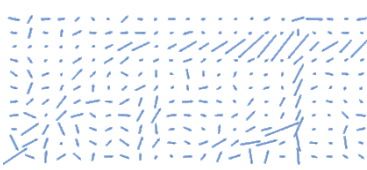


図-9 L/50 最小主ひずみベクトル(59.9kN、18.62mm)

梁軸方向ひずみ分布では導入ひび割れ周辺で顕著なひずみ分布はないことが確認できる。裏面で下の導入ひび割れ中央から発生したひび割れに沿って開口によると考えられる分布がみとれるが、L/50 と L/150 と比較してそれほど大きくはない。せん断ひずみ分布では上と下の導入ひび割れをつなぐように斜めに分布していることが確認できる。最大主ひずみ分布は両図を合わせた形になるが、同様に上下の導入ひび割れをつなぐ斜め分布が顕著である。最大主ひずみベクトルでは中央部のひび割れが斜めに右下方向に開くような分布が確認できる。上下ともに導入ひび割れでは、L/50 と L/150 と異なり、斜めひび割れと同等の大きさのひずみは観察されなかつ

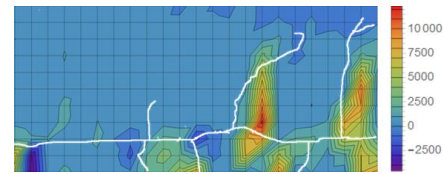


図-10 L/150 梁軸方向ひずみ分布図(58.5kN、16.94mm)

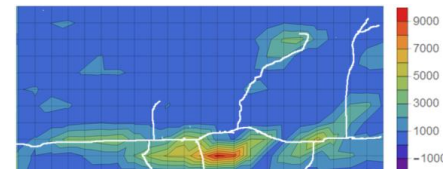


図-11 L/150 せん断ひずみ分布図(58.5kN、16.94mm)

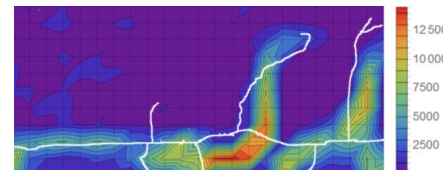


図-12 L/150 最大主ひずみ分布図(58.5kN、16.94mm)

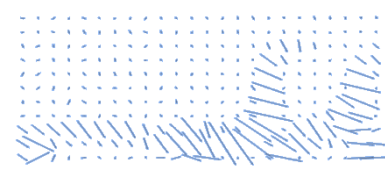


図-13 L/150 最小主ひずみベクトル(58.5kN、16.94mm)

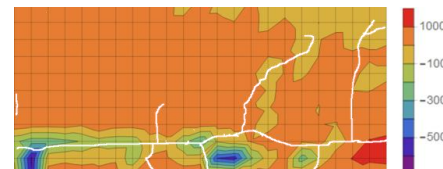


図-14 L/150 最小主ひずみ分布図(58.5kN、16.94mm)

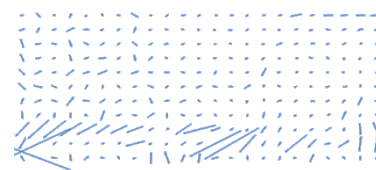


図-15 L/150 最小主ひずみベクトル(58.5kN、16.94mm)

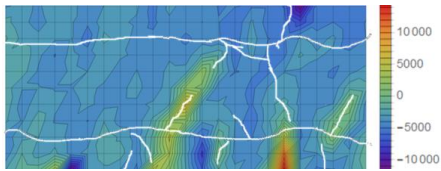


図-16 L/50+150 梁軸方向ひずみ分布図(59.3kN、19.32mm)

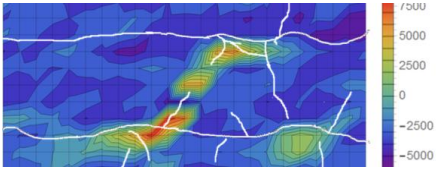


図-17 L/50+150 せん断ひずみ分布図(59.3kN、19.32mm)

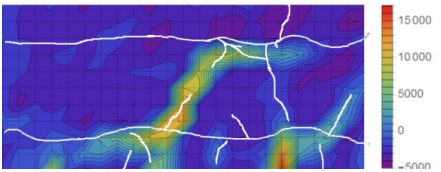


図-18 L/50+150 最大主ひずみ分布図(59.3kN、19.32mm)

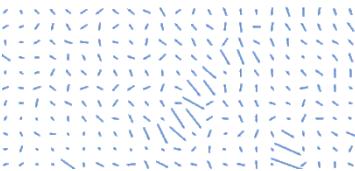


図-19 L/50+150 最大主ひずみベクトル(59.3kN、19.32mm)

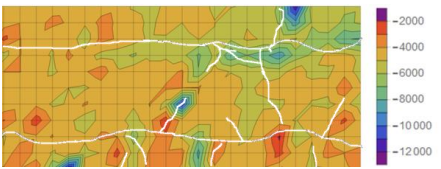


図-20 L/50+150 最小主ひずみ分布図(59.3kN、19.32mm)

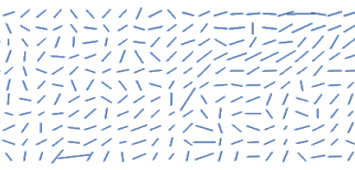


図-21 L/50+150 最小主ひずみベクトル(59.3kN、19.32mm)

た。最小主ひずみ分布では上導入ひび割れの右側で大きな値が確認できる。最小主ひずみベクトルではスパン右上から左下にかけて、対角線上に沿うように最大ひずみ

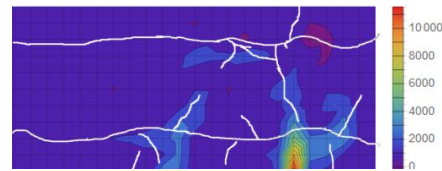


図-22 L/50+150 最大主ひずみ分布図(30kN、3.64mm)

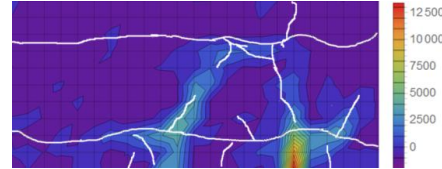


図-23 L/50+150 最大主ひずみ分布図(40kN、4.10mm)

ベクトルと直交する左下方向のベクトルが分布している。

図-22 に載荷 30kN、変位 3.64mm 時(図-3④)の最大主ひずみ、図-23 に載荷 40kN、変位 4.10mm 時(図-3⑤)の最大主ひずみを示す。曲げせん断ひび割れが下面より先行して伸びるとともに、上導入ひび割れでも開口が見られる。荷重増加とともにこれらが伸びてつながっていく過程が推定される。

5. まとめ

本研究では、水平模擬ひび割れを導入した 3 種類の RC 梁供試体の曲げ載荷実験を行い、画像解析により変形挙動の検討を行った。導入ひび割れの影響について以下の点が確認された。

第一に、供試体を導入したひび割れの周辺ではせん断方向の変形が発生していること。

第二に、導入ひび割れが曲げせん断ひび割れとつながる挙動が確認できたこと。上下に二つの導入ひび割れがある場合には、上下からそれぞれ進展し繋がり、一本のひびを形成する挙動が確認できたこと。

今回の報告は、撮影した画像の一部の解析に留まるため、今後各段階の詳細な解析を進めていく。

参考文献

- 1)松本高志、櫻庭浩樹：箱形断面 CFRP 梁の曲げ挙動と画像解析によるひずみ計測、土木学会論文集 A2(応用力学)、Vol.67、No.2(応用力学論文集 Vol.14)、pp.I_793-I_800、2011。
- 2)松本高志、何興文、林川俊郎：画像解析の高密度化による箱形断面 CFRP 梁の損傷挙動の検討、土木学会論文集 A2(応用力学)、Vol.70、No.2(応用力学論文集 Vol.17)、pp.I_909-I_919、2014。