

## (8) 模擬劣化ひび割れを導入したRC梁の 曲げ挙動に関する画像解析

松本 高志<sup>1</sup>・松江 晃太<sup>2</sup>・角間 恒<sup>3</sup>・西 弘明<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 北海道大学教授 大学院工学研究院北方圏環境政策工学部門  
(〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西8丁目)

E-mail: takashim@eng.hokudai.ac.jp

<sup>2</sup>学生員 北海道大学 大学院工学研究院北方圏環境政策工学専攻 (研究当時)  
(〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西8丁目)

<sup>3</sup>正会員 国土交通省北海道開発局釧路開発建設部  
(〒085-8551 北海道釧路市幸町10丁目3番地)

<sup>4</sup>正会員 (国研) 土木研究所寒地土木研究所  
(〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸一条3丁目1番34号)

本研究では、内部劣化が生じた RC 床版の性能評価手法の確立に向けた基礎的段階として、模擬劣化部を有する RC 梁部材の静的載荷実験を実施した。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により人工的にひび割れを導入した梁と導入後に樹脂注入補修を加えた梁の曲げ挙動を比較検討した。これらの梁においては、載荷前に形成された模擬劣化ひび割れと載荷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、画像解析を用いて、面的な変位場を計測することでひずみ場を算出し、模擬劣化ひび割れの存在による曲げ挙動の特徴を把握して、部材性能への影響を検討することを目的としている。

**Key Words:** image analysis, artificial crack, simulated degradation, RC beam, flexure

### 1. はじめに

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、塩害や凍害、アルカリシリカ反応等によるものと考えられる損傷が報告されている。疲労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に至る。一方で後者では、塩害による鉄筋腐食や凍害により局所的な水平方向のひび割れが発生したり、アルカリシリカ反応により拘束度の影響を受けたコンクリートの膨張による亀甲状もしくは方向性のひび割れが発生する形態を示す。こうした形態で床版内部に生じる劣化損傷については、劣化損傷の範囲・程度と構造性能との関係がまだ明らかでない点が多く、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、模擬劣化部を有する RC 梁部材の静的載荷実験を実施した。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もしくはランダム方向にひび割れを導入した供試体と、ひび割れ導入後に樹脂注入補修を行った供試体とを対象とした。こうした RC 梁部材においては、載荷前に形成されたひび割れと載荷に伴い形成されるひび割れの周辺に複雑な変位が生じ、構造挙動と性能にも影響を及ぼすものと考えられる<sup>1,2)</sup>。ここでは、既往の研究<sup>3)</sup>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しひずみ場を算出することで、模擬劣化導入及び導入後補修を行った RC 梁部材について、曲げ挙動の特徴を捉えることを目的としている。

### 2. 模擬劣化 RC 梁の曲げ載荷実験

#### (1) 供試体

図-1に供試体の寸法及び配筋図を示す。曲げ載荷実験に用いた供試体は、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

せん断スパン比は3.3である。引張側鉄筋 (SD345) は D13×2, 圧縮側鉄筋 (SD295A) は D6×2, せん断補強筋 (SD295A) は D6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。図-1 に示す基準供試体 (N), 導入水平ひび割れ位置の異なる供試体 3 種類 (L シリーズ), L シリーズに樹脂注入補修を行なった 3 種類 (RL シリーズ), 導入ひび割れ領域深さの異なる供試体 3 種類 (D シリーズ), D シリーズに樹脂注入補修を行った 3 種類 (RD シリーズ), 合計 13 種類の供試体の実験を行った。

L 及び RL シリーズ供試体の模擬劣化は, 上側鉄筋の内側 (上面から 50mm 位置) もしくは下側鉄筋の内側 (上面から 150mm 位置) の面に膨張剤を散布することにより, 局部的に水平方向のひび割れを導入した。L/50 では上面から 50mm, L/150 では 150mm, L/50+150 では 50mm 及び 150mm 位置の面に水平方向ひび割れを導入している。

D 及び RD シリーズ供試体では, 模擬劣化部に打設するコンクリートに静的破砕剤を添加・練混ぜすることでランダム方向のひび割れを導入した。模擬劣化部の上面からの深さは, D/50 が 50mm, D/100 が 100mm, D/200 が 200mm である。

模擬劣化部に生じたコンクリートのポップアウトやひび割れは荷重前に確認をしている。また, 補修は供試体中央部から水平方向に±100mm, ±300mm の位置の計 4 箇所から上面から 170mm (下側鉄筋位置) まで削孔し樹脂を注入することで行った (図-1)。

## (2) 荷重方法

荷重は 4 点曲げにより行った。荷重は荷重板 (幅 50mm, 厚さ 9mm, 奥行き 120mm) を介して供試体に作用させ, 荷重板と供試体の間は石膏で不陸調整をして, 荷重が均等に伝わるようにした。主鉄筋の降伏までは荷重制御とし, 以降は変位制御として荷重を行った。計測項目は, 画像解析に加えて, 荷重, 変位, 表面ひずみ (コンタクトゲージ法) とした。

## 3. 画像解析手法

### (1) 画像撮影

画像撮影には Nikon のデジタルカメラ D3100 を 2 台使用した。画素数は 4608×3072 ピクセル (約 1400 万画素) である。撮影対象は供試体の側面であり, 計測点追跡のためにラメスプレーによるランダムパターンを付与している。干渉を避けるために変位計は反対側の供試体側面に設置しているが, 画像解析において生じる面外変位の補正を行うためのコンタクトゲージは撮影対象面に設置している。L 及び D シリーズでは, 2 台のカメラを左側

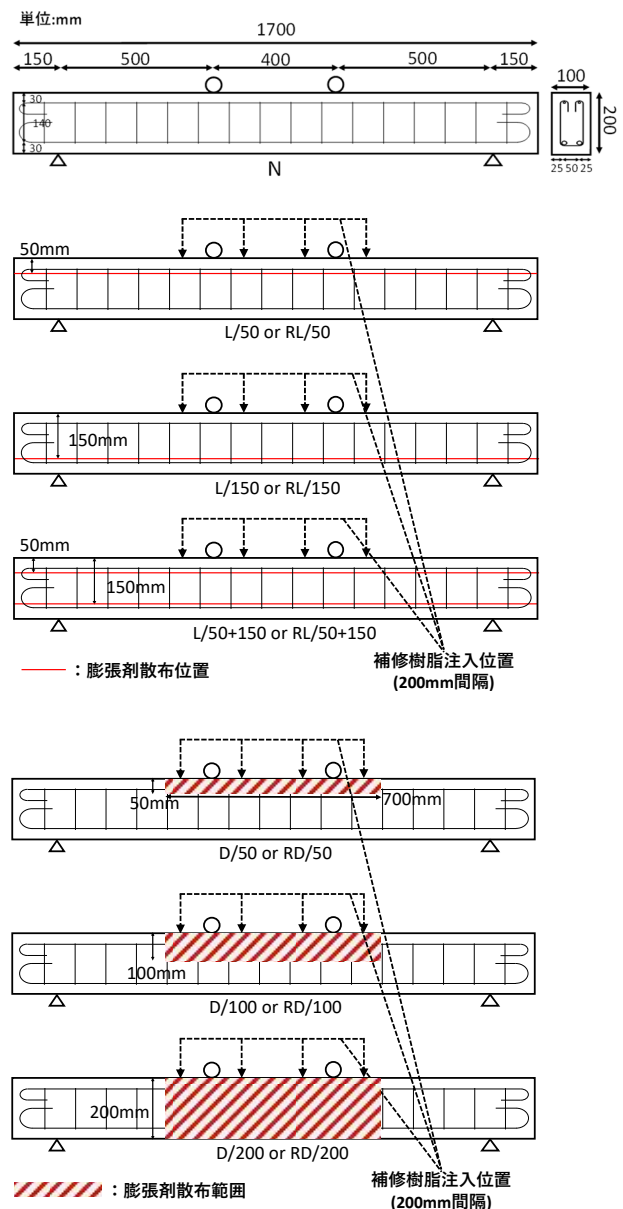


図-1 供試体概要

せん断スパンと曲げスパンそれぞれの撮影に用い, RL 及び RD シリーズでは梁の左右半分それぞれの撮影に用いた。撮影範囲が異なるのは写真解像度が画像解析に及ぼす影響も併せて検討したためである。撮影はまず荷重前 (変形前) に行い, 荷重中 (変形後) には降伏点まで約 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。

### (2) デジタル画像相関法

撮影した画像は輝度値を二値化した画像に変換している。二値化画像において, 供試体側面に 100 ピクセル間隔で格子状に計測点を設定する。計測点は L 及び D シリーズでは各スパンとも梁軸方向に 51 点, 梁高さ方向に 19 点の合計 969 点とし, RL 及び RD シリーズでは各半分とも梁軸方向に 68 点, 梁高さ方向に 19 点の合計 1292 点

とした。

変形前画像において、計測点を中心とした128×128ピクセルの正方形領域を二値化画像から切り出し、変形後画像からは同点周辺の256×650ピクセルの長方形領域を切り出した。長方形領域は変位した計測点を含むように鉛直変位方向に長辺を取っている。切り出した領域の外は二値化輝度値を0（黒）とし、それぞれ切り出した画像を含む700×700ピクセルの計測点周辺画像を作成した。

変形前後の計測点周辺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に計測点の変位した位置である。変形前後の計測点の位置により変位を求めることができる<sup>3)</sup>。

得られた変位場よりひずみ場を求める。格子状にある

4つの計測点の水平方向変位と鉛直方向変位よりひずみが求められる。ここでは、最大主ひずみ、最小主ひずみ、最大せん断ひずみの結果について後述する。

## 4. 結果

### (1) 荷重－変位関係

図-2 に供試体の荷重－変位関係を示す。(a)には基準供試体 N と模擬劣化を導入した L 及び D シリーズを、(b)には模擬劣化導入後に補修を行った RL 及び RD シリーズを示している。また、図-3 及び 4 はそれぞれ L 及び D シリーズの模擬劣化供試体と補修供試体を比較しており、合わせて以下で降伏点前と呼んでいる撮影タイミン

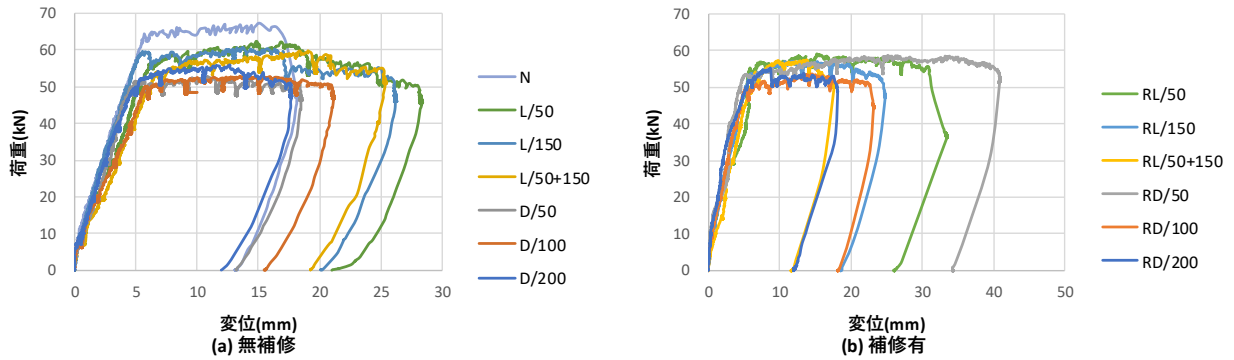


図-2 荷重－変位関係

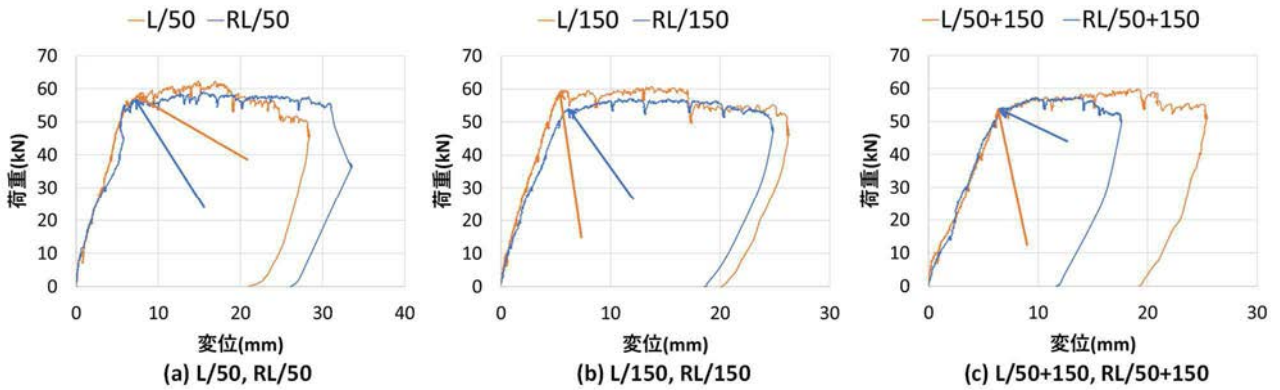


図-3 荷重－変位関係と降伏時の撮影タイミング (Lシリーズ)

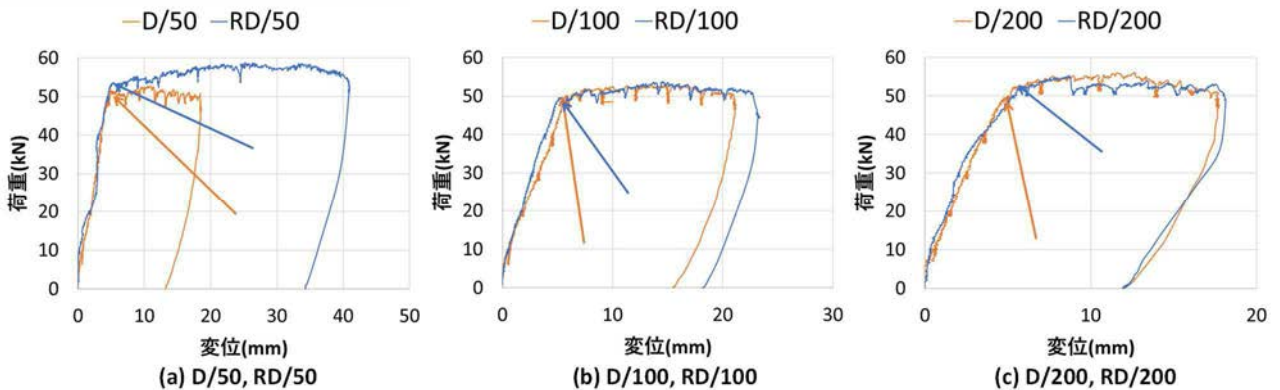


図-4 荷重－変位関係と降伏時の撮影タイミング (Dシリーズ)

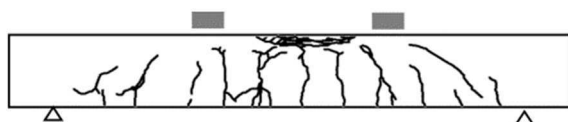


図-5 基準供試体Nのひび割れスケッチ

グを図中に矢印で示している。Nと比較して、L、RL及びD、RDシリーズの降伏荷重、最大荷重は低下した。供試体の破壊形態はいずれも曲げ破壊であった。

本論文では、降伏点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述べる。図-5には比較のために載荷後の基準供試体Nの側面のひび割れスケッチを示す。図-6から図-11には各供試体の降伏点前の最大主ひずみ、最小主ひずみ、最大せん断ひずみの分布図を示す。図中には、載荷後の各供試体反対側側面の導入ひび割れを含む全ひび割れのスケッチを透視図として重ねて表示する。

## (2) L/50とRL/50

図-6にL/50とRL/50のひずみ分布を示す。L/50のひび割れスケッチでは、曲げひび割れの発生位置や本数がNと同様であることが確認できる。また、Nでは曲げひび割れが上縁近辺まで進展しているが、L/50ではほとんどが水平ひび割れより上側へ進展していない。最大主ひずみでは曲げスパンで発生した曲げひび割れに対応する分布が見られ、反対側側面のひび割れスケッチと概ね一致している。左側せん断スパンではひび割れの進行方向が水平ひび割れで方向を変えていることが確認できる。最小主ひずみでは、曲げスパン上縁での水平ひび割れより上側で水平方向に潰れる圧縮の分布が見られる。最大せん断ひずみにおいて特徴的なのは、左側せん断スパンでの水平ひび割れの水平方向のずれが確認できることである。

RL/50のひび割れスケッチでは、ひび割れの傾向はL/50と同様であり、水平ひび割れより上側へほとんど進展していない。最大主ひずみでもL/50と同様の曲げひび割れによる分布が見られ、右側せん断スパンで下方からのひび割れ進展が水平ひび割れにつながる挙動がみられる。最小主ひずみと最大せん断ひずみより、右側せん断支間の水平ひび割れにおいて閉口方向に潰されながらずれていることがわかる。最小主ひずみの曲げスパン上縁での傾向はL/50と概ね同様と見られる。

降伏直前の両供試体において中立軸は水平ひび割れ位置にあると考えられ、曲げひび割れは載荷後のスケッチにおいても水平ひび割れを越えて進展していない。また水平ひび割れはせん断スパンにおいて閉口しなげられる挙動が確認された。

## (3) L/150とRL/150

図-7にL/150とRL/150のひずみ分布を示す。L/150の

ひび割れスケッチでは、水平ひび割れを挟んでひび割れの経路がずれている様子が特にせん断スパンに確認できる。また、Nと比較してひび割れ発生範囲は供試体中央寄りにやや縮小傾向にあるが、上縁への進展はNと同程度であった。最大主ひずみでは、曲げひび割れが水平ひび割れ位置で屈曲して進展している様子が明瞭であり、水平ひび割れに沿った局所的な分布は最大せん断ひずみと合わせると開口しなげられが生じていることを示しており、左右のせん断スパンで確認できる。最小主ひずみでは、曲げスパン上縁での水平方向圧縮の分布はL/50と比べて小さく、鉛直方向の高さも小さいことが確認できる。

RL/150のひび割れスケッチと最大主ひずみでもL/150と同様傾向が確認できる。最小主ひずみでは曲げスパン上縁での水平方向圧縮の分布は確認できなかった。

両供試体は降伏直前までに、下縁側で発生する曲げひび割れが水平ひび割れ位置で屈曲して進展し、Nと同程度に上縁近辺まで進展しており、載荷後のスケッチでも同程度である。水平ひび割れはせん断スパンにおいて開口しなげられる挙動を確認できた。

## (4) L/50+150とRL/50+150

図-8にL/50+150とRL/50+150のひずみ分布を示す。

L/50+150は、曲げひび割れの発生範囲がL/150と同様であり、Nと比較すると発生範囲は供試体中央寄りにやや縮小傾向にある。最大主ひずみでは上下いずれの導入ひび割れ周辺でも顕著な分布はないが、左側せん断スパンにおいて上下の水平ひび割れをつなぐS字状のせん断ひび割れの発生が特徴的である。上側水平ひび割れではL/50と同様に曲げひび割れが多くが水平ひび割れより上側へは進展していない。一方、下側水平ひび割れではL/150と同様に曲げひび割れが水平ひび割れで屈曲して進展している。また、せん断スパンのひび割れの角度は(2)と(3)で既述の4供試体と比較して小さい。これらの傾向はひび割れスケッチからも確認できる。最小主ひずみではL/50と同様に、曲げスパン上縁にて上側水平ひび割れより上側で水平方向圧縮の分布が確認できる。最大せん断ひずみからは、せん断スパンにおける上下の水平ひび割れにおいて水平方向のずれが少し見られるが、(2)と(3)で既述の4供試体ほどその範囲は長くない。

RL/50+150では、曲げひび割れの発生範囲がL/50+150と比較して供試体両端方向に広がっている。最大主ひずみでは、L/50+150でも見られた上下水平ひび割れをつなぐS字状のせん断ひび割れの発生が、左右のせん断スパンそれぞれで確認できる。最小主ひずみは上側水平ひび割れを境界とするような分布は見られなかった。最大せん断ひずみにおいて水平ひび割れのずれが確認できるが、(2)と(3)で既述の4供試体と比べて短く右側せん断スパン

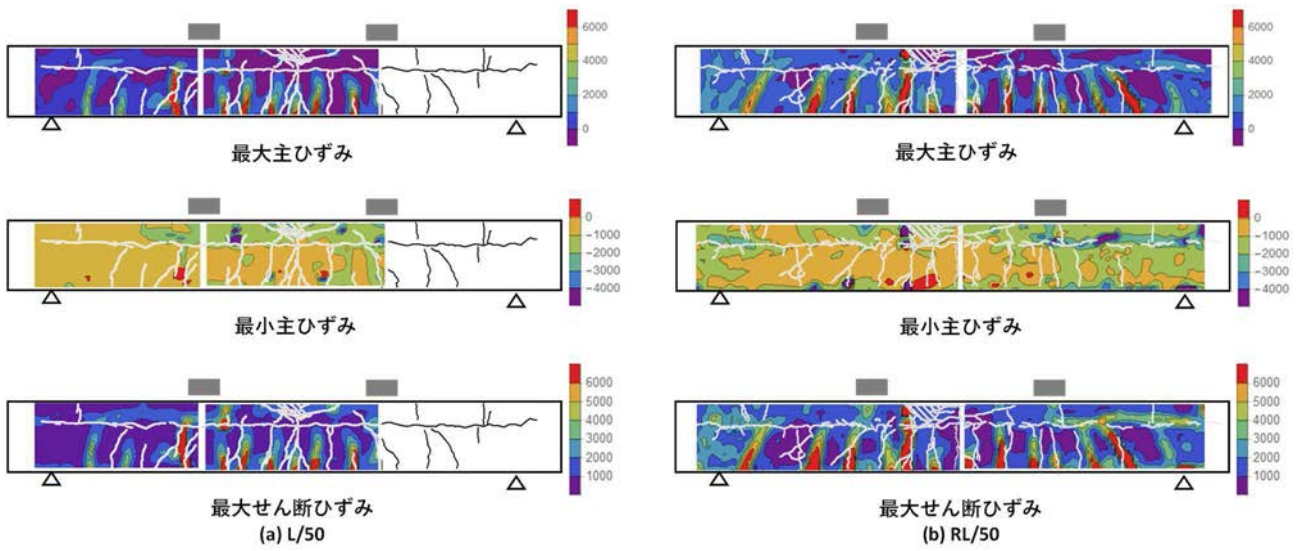


図-6 L/50 及び RL/50 のひずみ分布

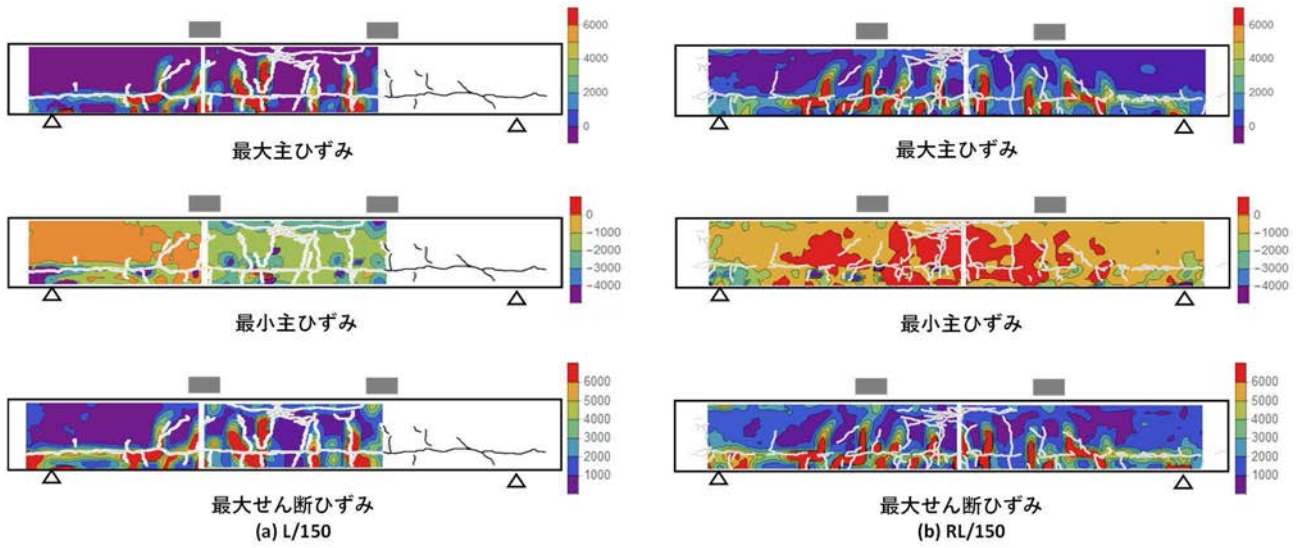


図-7 L/150 及び RL/150 のひずみ分布

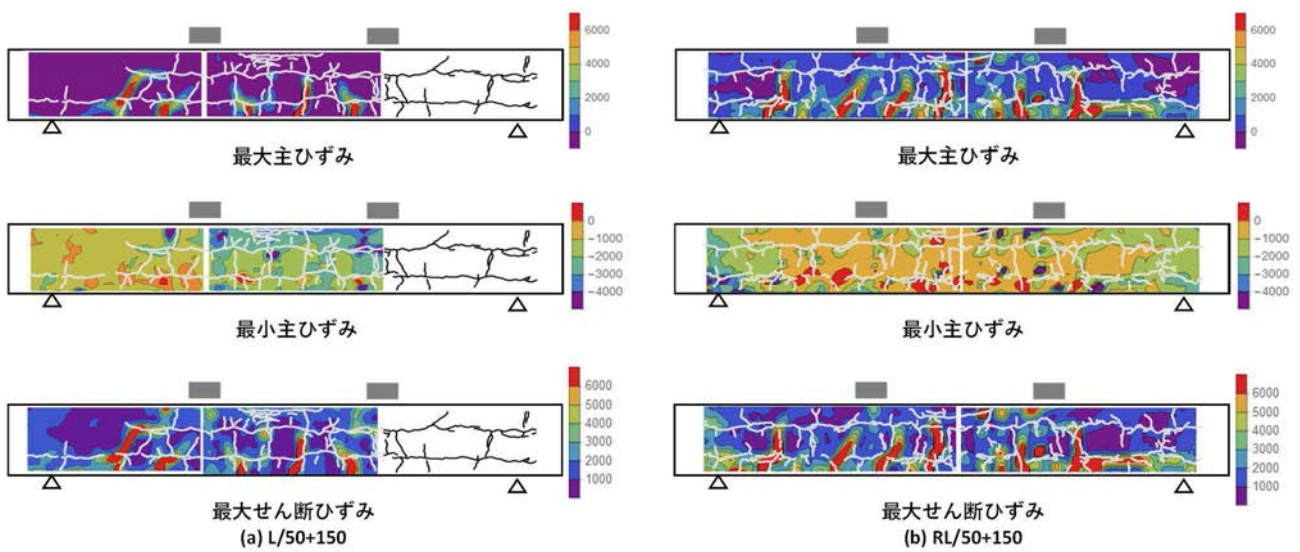


図-8 L/50+150 及び RL/50+150 のひずみ分布

だけにとどまっている。

水平ひび割れを上下に二本導入した場合、上下それぞれのみの場合を足し合わせた挙動が見られた。降伏直前までに、下縁側で発生する曲げひび割れは下側水平ひび割れで屈曲して進展するが、上側水平ひび割れを越えてはほとんど進展していない。中立軸は上側水平ひび割れにあると推察できる。また、上下水平ひび割れのそれぞれでずれの発生があるものの、(2)と(3)で既述の4供試体と比べてその範囲は狭い。

#### (5) D/50 と RD/50

図-9にD/50とRD/50のひずみ分布を示す。ひび割れスケッチとは曲げスパンでのみ一致しており、せん断スパンでは捉えられていない。D/50の曲げひび割れによる最大主ひずみの分布範囲は、Nのひび割れスケッチと比較すると供試体中央寄りにやや縮小傾向にあり、せん断スパンのひび割れが少ない。また、模擬劣化を導入した曲げスパン上縁においては鉛直方向に開く引張の分布がいくつか見られる。最小主ひずみでは、供試体上部に導入した模擬劣化深さに合致した圧縮の分布が見られる。また曲げスパン上縁においては最大主ひずみと同位置で水平方向に潰れる圧縮の分布が見られた。これは模擬劣化のひび割れ損傷が進んだものであると考えられる。

RD/50の最大主ひずみではD/50よりも供試体端部方向へ広がった分布が見られ、多くの曲げひび割れによる分布が見られる。Nのひび割れスケッチとは概ね同様の分布を示している。最小主ひずみでは供試体上部の模擬劣化深さと合致した圧縮の分布がD/50よりも水平方向に広く見られる。D/50と同様に模擬劣化のひび割れ損傷が進んでいる部位がいくつか見られるものの載荷板の近傍に限られている。

D/50供試体上縁部の模擬劣化により、曲げひび割れの範囲は供試体中央寄りに狭まり、模擬劣化領域には進展していない。また、梁軸方向圧縮も模擬劣化深さ内で生じており、載荷に応じて導入ひび割れの損傷が進んでいる。RD/50供試体では導入ひび割れの損傷が抑えられていることでNと同程度に曲げひび割れの範囲が広がっている。

#### (6) D/100 と RD/100

図-10にD/100とRD/100のひずみ分布を示す。ここでもひび割れスケッチとは曲げスパンでのみ一部一致しており、捉えられていないひび割れがある。D/100とRD/100については、D/50とRD/50と概ね同様の傾向である。

D/100供試体の曲げひび割れの範囲はNよりも中央寄りに狭く模擬劣化領域には進展していない。梁軸方向の圧縮は模擬劣化領域と全体的に合致しているわけではな

いが、領域内の導入ひび割れの損傷が局所的に載荷に応じて進んでいる箇所は見られる。RD/100供試体では導入ひび割れの損傷が抑えられ曲げひび割れの範囲が広がったと考えられる。

#### (7) D/200 と RD/200

図-11にD/200とRD/200のひずみ分布を示す。載荷後のひび割れスケッチは導入ひび割れと載荷で生じたひび割れの両方を含むが非常に特徴的なひび割れ性状を示している。D/200は曲げスパン上縁でよく見られる水平方向のひび割れを生じているものの、下縁から伸びるひび割れは鉛直方向ではなく斜め方向であったり曲線形状をとって水平方向に向いていたりする。RD/200では領域全体にひび割れが生じており少し格子状に卓越してるものの規則的な傾向ではない。

D/200について最大主ひずみではせん断スパンで1箇所、曲げスパンでは2箇所、強く幅の広い分布が見られる。D/50及びD/100と異なりいずれも特徴的であり、直線的に進展せずにそれぞれ角度の浅い斜め状と階段状の進展をしている。一部、ひび割れスケッチとは一致している部分もある。最小主ひずみでは曲げスパン圧縮縁で載荷板近傍に圧縮の分布が確認できる。

RD/200について、最大主ひずみの強い分布はせん断スパンで1箇所と曲げスパンで2箇所見られ、RD/50及びRD/100と大きく異なり、D/200と同様である。ひび割れスケッチはD/200と同様に不規則なひび割れの発生を示しているが、最大主ひずみ分布とは一致していない。最小主ひずみでは模擬劣化領域もしくはひび割れと関連した分布は見られず、一部上縁に強い圧縮が見られる。

全断面を模擬劣化させた場合、ひずみ分布はRC梁の実験で通常見られる分布と大きく異なった。不規則な方向と位置にある導入ひび割れに下縁からの曲げひび割れが影響を受けて進展しておりその数、範囲、進展長はNや他の供試体と比較して顕著に小さい。画像解析は表面の変位分布よりひずみ分布を算出しているため、供試体内部のひび割れ性状やひずみについては異なる可能性もあり今後検討していく必要がある。

## 5. まとめ

本研究では、基準供試体1種類、膨張剤の散布により水平ひび割れを導入した供試体3種類(Lシリーズ)、Lシリーズに樹脂注入補修を行なった3種類(RLシリーズ)、膨張剤練り混ぜによりひび割れ領域を導入した供試体3種類(Dシリーズ)、Dシリーズに樹脂注入補修を行なった3種類(RDシリーズ)、合計13種類の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比較を行った。

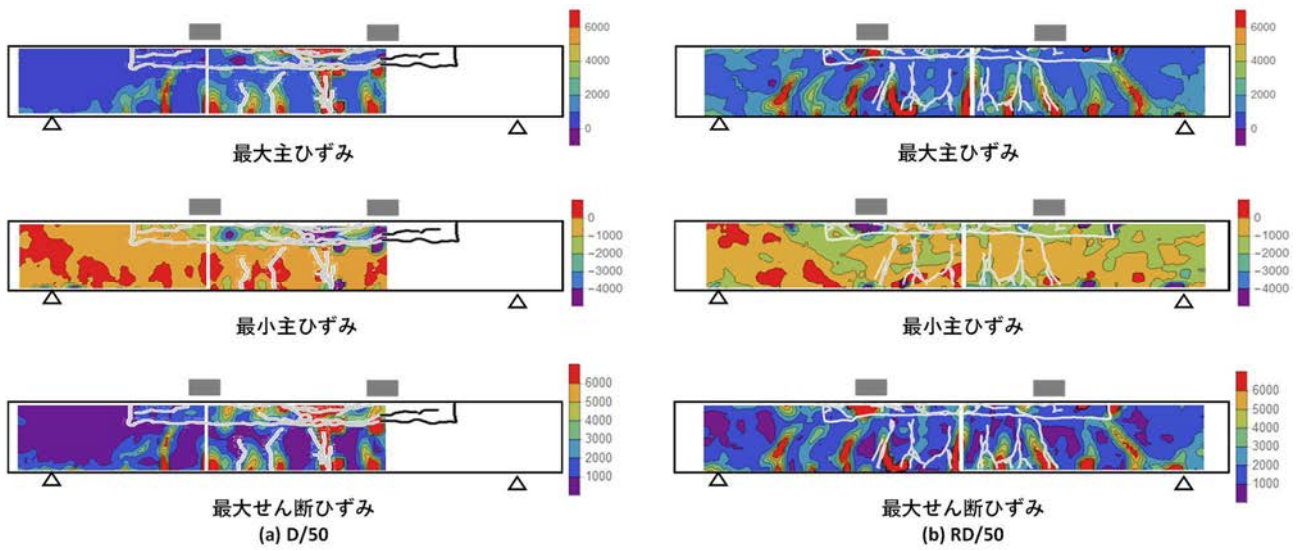


図-9 D/50 及び RD/50 のひずみ分布

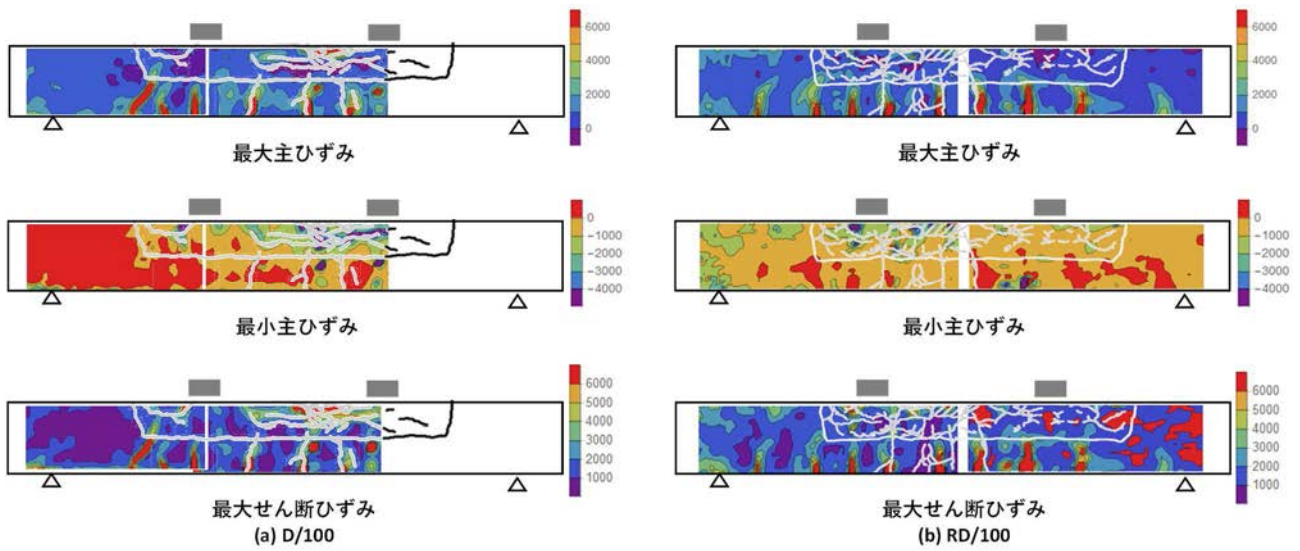


図-10 D/100 及び RD/100 のひずみ分布

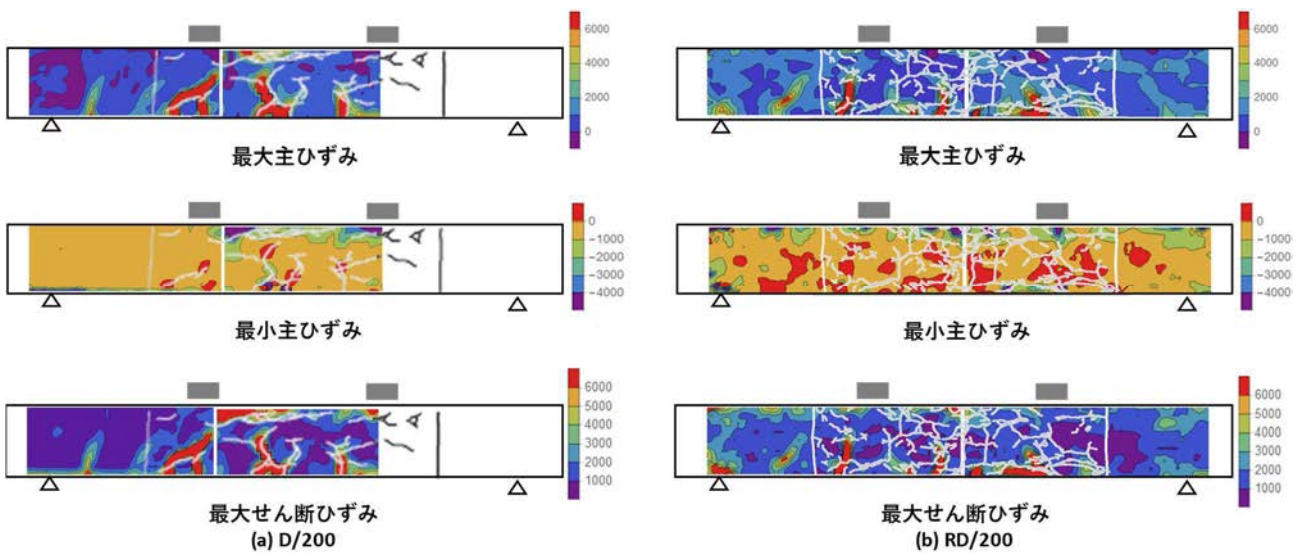


図-11 D/200 及び RD/200 のひずみ分布

模擬劣化における導入ひび割れの影響について以下の点が確認された。

上側に水平ひび割れが導入されている場合、下縁から進展した曲げひび割れはほとんどが水平ひび割れを越えて進展しておらず、中立軸は水平ひび割れ位置にあると考えられる。下側に導入されている場合は、曲げひび割れが水平ひび割れ位置で屈曲して進展し、基準供試体と同程度に上縁まで進展した。

導入された水平ひび割れの挙動は樹脂の注入具合により変わると考えられるが、上側に導入の場合には閉口しながらずれる挙動が、下側に導入の場合には開口しながらずれる挙動がせん断スパンで確認された。

水平ひび割れを上下に二本導入した場合、上下それぞれのみの場合を足し合わせた挙動が見られた。降伏直前までに、下縁側で発生する曲げひび割れは下側水平ひび割れで屈曲して進展するが、上側水平ひび割れを越えてはほとんど進展しなかった。中立軸は上側水平ひび割れにあると推察できる。また、樹脂注入の具合によるためか上下水平ひび割れのそれぞれでずれの発生があるもののその範囲は狭かった。

上縁部にひび割れ領域を導入した場合、曲げひび割れの範囲は基準供試体と比較して供試体中央寄りに狭まり、導入ひび割れ領域には進展しなかった。梁軸方向圧縮は導入ひび割れ領域内にあり、载荷により導入ひび割れの損傷が進んでいった。樹脂注入を行ったことで基準供試

体と同程度に曲げひび割れの範囲が広がったのは、導入ひび割れの損傷進展が抑えられたことによると考えられる。

全断面にひび割れ領域を導入した場合、ひずみ分布は RC 梁の実験で通常見られる分布と大きく異なった。不規則な方向と位置にある導入ひび割れに下縁からの曲げひび割れが影響を受けて進展しておりその数、範囲、進展長は N や他の供試体と比較して顕著に小さい。画像解析は供試体表面の変位計測によっているため、内部のひび割れ性状やひずみについては異なる可能性もあり今後検討していく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 角間恒, 渡邊晋也, 西弘明, 松本高志: 内部劣化を有する RC 部材の曲げ耐荷性能について, 第 73 号土木学会北海道支部論文報告集, A-35, 2017.
- 2) 松江晃太, 角間恒, 松本高志: 模擬劣化 RC 梁の曲げ挙動と補修の効果に関する画像解析, 第 74 号土木学会北海道支部論文報告集, A-46, 2018.
- 3) 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), I\_909-I\_919, 2014.

(Received August 30, 2019)

## IMAGE ANALYSIS ON THE FLEXURAL BEHAVIORS OF RC BEAMS WITH CRACKS INDUCED AS ARTIFICIAL DETERIORATION

Takashi MATSUMOTO, Kota MATSUE, Ko KAKUMA and Hiroaki NISHI

Flexural loading tests of RC beams with cracks induced as artificial deterioration have been conducted as a preliminary research towards the establishment of performance evaluation method for RC slabs with internal deteriorations. Flexural behaviors are observed and compared between artificiall damaged RC beams with cracks induced by the use of static expansive agent and artificially damaged RC beams repaired epoxy resin injection method. Image analysis is conducted for these beams in order to measure their complicated deformation behaviors due to artificially induced cracks and load triggered cracks, and the effects of induced cracks on structural performances are discussed.