

# 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

Image Analysis on the Flexural Behavior of RC Beams with Artificial Damage and the Effects of Repair

北海道大学大学院工学院 ○学生員 松江 晃太 (Kota Matsue)  
 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 正員 角間 恒 (Ko Kakuma)  
 北海道大学大学院工学研究院 正員 松本 高志 (Takashi Matsumoto)

## 1. まえがき

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、凍害や塩害、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。特に積雪寒冷地において凍害の影響は顕著であり、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、劣化部を有する梁部材の静的載荷実験を実施する。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模擬ひび割れを導入したもの、さらにはその後補修を加えたものを対象とし、比較検討する。こうした RC 部材においては、載荷前に形成された模擬ひび割れ及び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<sup>1)</sup>。ここでは、既往の研究<sup>2)3)4)</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することで最大及び最小主ひずみを算出し、補修に関連した変形挙動の特徴を捉えることを目的としている。

## 2. RC 梁の曲げ載荷実験

### 2.1 供試体

曲げ載荷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。6種類の供試体の導入模擬劣化を表-1に示す。図-1に示す導入ひび割れ範囲の異なる供試体3種類と補修有無の2種類、計6種類の供試体を使用した。供試体の模擬劣化は膨張剤の混入により局所的なひび割れを導入している。模擬劣化部ではコンクリートのポップアウトやひび割れを載荷前に確認している。また、補修は供試体中央部から±100mm、±300mmの位置、計4ヶ所に上面から170mm(下側鉄筋位置)まで削孔し樹脂を注入した(図-1)。

### 2.2 載荷方法

載荷は4点曲げ載荷により行われた(図-1)。荷重は、幅 50mm、厚さ 9mm の載荷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載荷板の間には石膏を設置する。載荷は、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(コンタクトゲージ)としている。

## 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

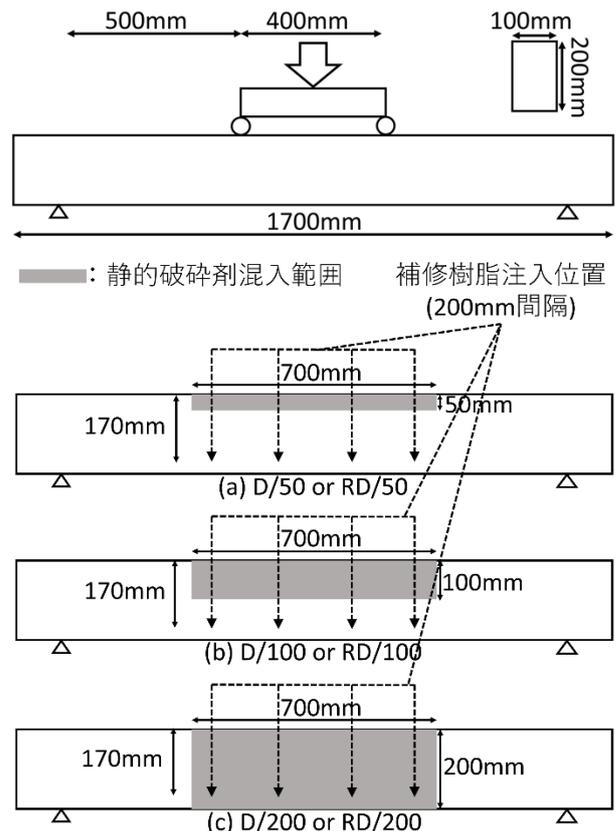


図-1 供試体寸法と構成

表-1 供試体構成

劣化形態 (想定劣化要因)	供試体名	ひび割れ範囲 (mm)
ひび割れ (凍害)	D/50 or RD/50	50
	D/100 or RD/100	100
	D/200 or RD/200	200

る。撮影は供試体の側面の図-2 に示す実線枠内を対象とした。まず载荷前(変形前)に撮影を行い、载荷開始後(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 $\delta$ 、2.0  $\delta$ 、3.0  $\delta$  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図-2 に示す分布図範囲に設定する。着目点は補修無では各スパンそれぞれ梁軸方向に 24 点、梁周方向に 12 点の合計 576 点とし、補修有では各スパンそれぞれ梁軸方向に 23 点、梁周方向に 10 点の合計 460 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。

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。

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、梁軸方向ひずみと梁周方向ひずみを経て、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、降伏点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述べる。D/50 は荷重 51.3kN、変位 4.83mm 時(図-3①)、RD/50 は荷重 52.9kN、変位 5.78mm 時(図-3②)、D/100 は荷重 50.2kN、変位 5.81mm 時(図-3③)、RD/100 は荷重 49.1kN、変位 5.78mm 時(図-3④)、D/200 は荷重 52.2kN、変位 5.32mm 時(図-3⑤)、RD/200 は荷重 51.6kN、変位 5.63mm 時(図-3⑥)の結果である。以後の図-4 から 15 の図中には、载荷後の各供

試体裏面の導入ひび割れを含んだ全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 D/50 と RD/50

D/50 について、図-4 に最大主ひずみ、図-5 に最小主ひずみの分布図を示す。最大主ひずみでは、曲げスパンからせん断スパンに発生した曲げひび割れに対応する分布が見られ、曲げスパン中心部で大きな開口ひび割れに対応した分布が確認できる。これらは反対側側面のひび割れスケッチと概ね一致している。また、曲げスパン圧縮縁においても上下方向に開く引張方向の分布が見られる。最小主ひずみでは、供試体上部に導入した模擬劣化領域(図-1)に合致した圧縮方向の分布が見られる。また曲げスパン圧縮縁において、最大主ひずみと同位置に左右方向に潰れる圧縮方向の分布が見られた。

RD/50 について、図-6 に最大主ひずみ、図-7 に最小主ひずみの分布図を示す。最大主ひずみでは D/50 と同様の曲げひび割れによる分布が見られ、せん断スパン側に少し広がっている様子が見られる。最小主ひずみでは载荷点位置から支点方向に圧縮ひずみの分布が広がっている。D/50 で見られた模擬劣化領域に合致した圧縮方向の分布は見られず、曲げスパン模擬劣化領域中央での圧縮ひずみの改善はみられたが、载荷版近傍よりせん断スパン側で圧縮ひずみが発生していた。

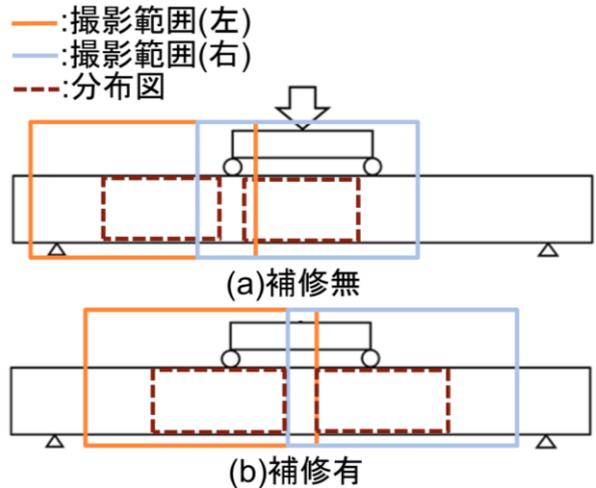


図-2 撮影範囲と分布図

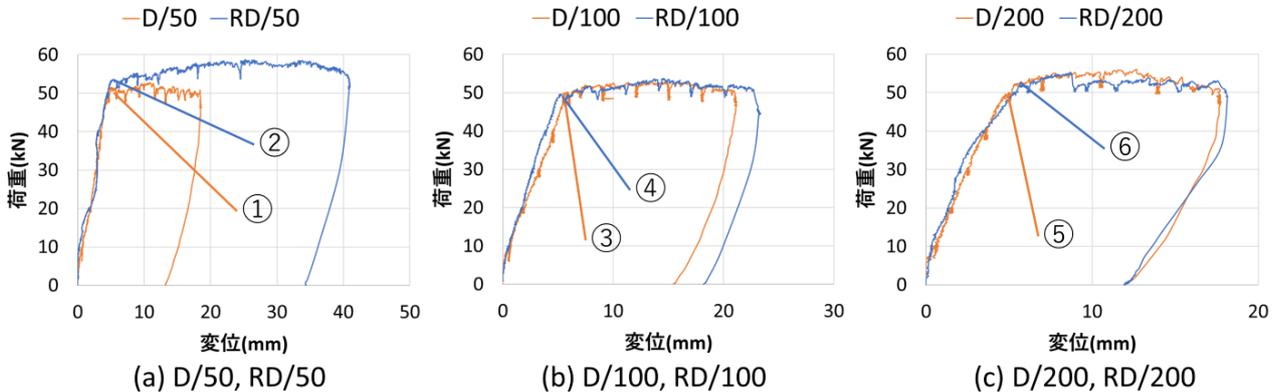


図-3 荷重-変位曲線

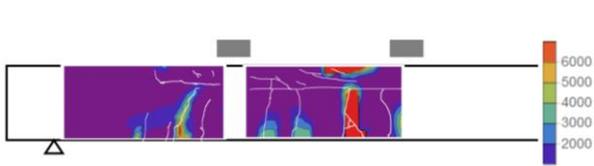


図-4 D/50 最大主ひずみ分布図 (51.3kN,4.83mm)

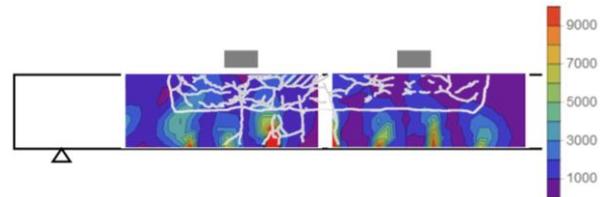


図-10 RD/100 最大主ひずみ分布図 (49.1kN,5.78mm)

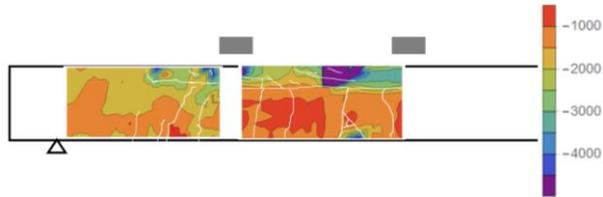


図-5 D/50 最小主ひずみ分布図 (51.3kN,4.83mm)

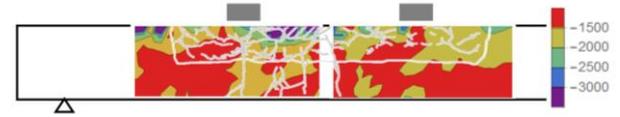


図-11 RD/100 最小主ひずみ分布図 (49.1kN,5.78mm)

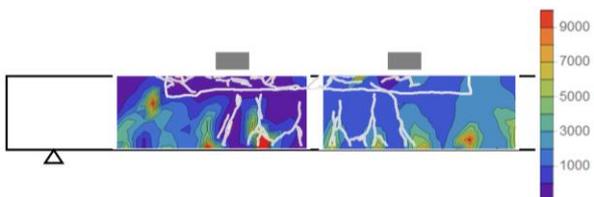


図-6 RD/50 最大主ひずみ分布図 (52.9kN,5.78mm)

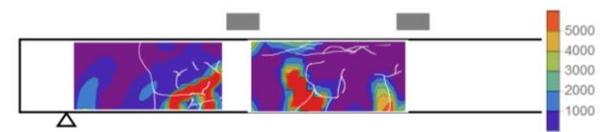


図-12 D/200 最大主ひずみ分布図 (52.2kN,5.32mm)

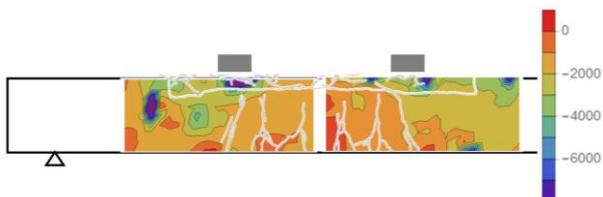


図-7 RD/50 最小主ひずみ分布図 (52.9kN,5.78mm)

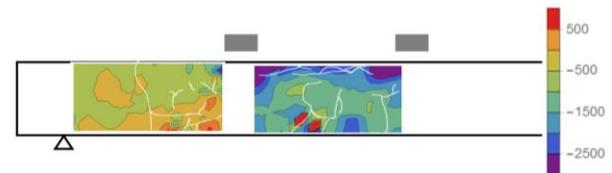


図-13 D/200 最小主ひずみ分布図 (52.2kN,5.32mm)

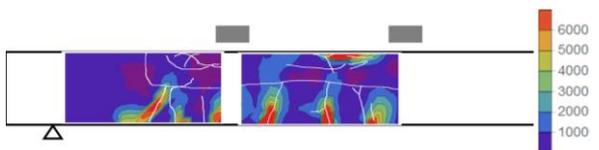


図-8 D/100 最大主ひずみ分布図 (50.2kN,5.81mm)

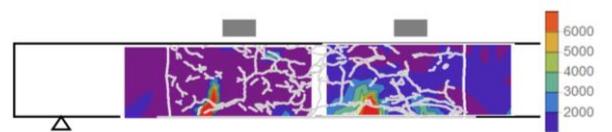


図-14 RD/200 最大主ひずみ分布図 (51.6kN,5.63mm)

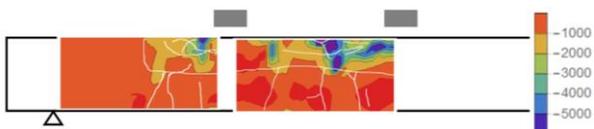


図-9 D/100 最小主ひずみ分布図 (50.2kN,5.81mm)

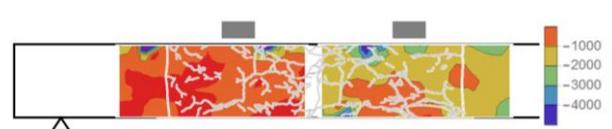


図-15 RD/200 最小主ひずみ分布図 (51.6kN,5.63mm)

以上に基づき、模擬劣化領域の軸方向圧縮については補修による改善効果は曲げスパンに一部あり、せん断スパンには最小主ひずみ分布の変化が現れたとまとめられる。

#### 4.2 D/100 と RD/100

D/100 について、図-8 に最大主ひずみ、図-9 に最小主ひずみの分布図を示す。最大主ひずみでは開口ひび割れによるひずみ分布が見られ、曲げスパン圧縮縁では圧縮による浮き上がりによると考えられる強い分布が確認

できる。最小主ひずみでは模擬劣化領域と概ね合致する圧縮ひずみの分布と鉛直方向の局所的な分布が見られる。

RD/100 について、図-10 に最大主ひずみ、図-11 に最小主ひずみの分布図を示す。最大主ひずみでは D/100 同様、数本の開口ひび割れによる分布が確認できたが、曲げスパン圧縮縁の強い分布は見られなかった。最小主ひずみでは曲げスパン内の圧縮縁で水平方向に広がりのある分布が見られた。しかし模擬劣化領域全域での圧縮ひずみは発生しておらず、領域内外での違いも認められなかった。

以上より、補修によって模擬劣化領域全体の軸応力圧縮の分布は解消方向にあり、局所的な分布は鉛直から水平方向に変化したとまとめられる。

#### 4.3 D/200 と RD/200

D/200 について、図-12 に最大主ひずみ、図-13 に最小主ひずみの分布図を示す。最大主ひずみではせん断スパンで 1 か所、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を中心とした圧縮ひずみの分布が確認できる。

RD/200 について、図-14 に最大主ひずみ、図-15 に最小主ひずみの分布図を示す。最大主ひずみの強い分布はせん断スパンと曲げスパンで 1 箇所ずつ見られ、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補修前の 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、一部圧縮縁に強い分布が見られる。

以上により、全断面を模擬劣化させた場合、載荷によるひずみの分布は通常と大きく異なる。補修による影響はひび割れによる分布形状には認められず、模擬劣化領域内外での違いも認められなかった。

#### 5. まとめ

本研究では、静的破砕剤により模擬劣化を導入した 3 種類とそれらに樹脂注入により補修を加えた 3 種類、計 6 種類の RC 梁供試体の曲げ載荷実験を行い、画像解析

により変形挙動の比較を行った。

模擬劣化における導入ひび割れの影響とそれに対する補修の効果について、以下の点が確認された。

第一に、模擬劣化の深さが梁の圧縮側の一部である場合(D/50 及び D/100)、引張縁からは曲げひび割れによるひずみ分布、圧縮側には模擬劣化領域と合致する圧縮ひずみ分布と圧壊状のひずみ分布が見られた。この場合の補修の効果としては(RD/50 及び RD/100)、最大主ひずみの引張側に特段の変化は見られず、圧縮側では局所的な分布が見られなくなった。最小主ひずみの変化では、模擬劣化領域全体の軸方向圧縮は解消方向にあるものの、局所的な分布は変化して残った。

第二に、模擬劣化の深さが梁高全体に及ぶ場合(D/200)、引張縁からの曲げひび割れによる強いひずみ分布の箇所数は大きく減り、幅は広く、角度の浅い斜め状もしくは階段状の特徴的な分布が見られた。また、圧縮側には曲げスパン圧縮縁で載荷板近傍を中心とした圧縮ひずみ分布が見られたが、模擬劣化領域内外での差異は認められなかった。この場合の補修(RD/200)では効果は認められず、ひび割れによる分布形状にも模擬劣化領域内外差にも確認できなかった。

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

#### 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：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、第 73 号土木学会北海道支部論文報告集、A-33、2017。
- 3)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。
- 4)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。