

論文 損傷を持つ RC はりに対する画像解析の適用

山本 剛史*1・松本 浩嗣*2・二羽 淳一郎*3

要旨：本研究では、初期画像撮影時に既に損傷を持つコンクリート構造物に対する画像解析の適用性を検討するため、除荷・再載荷をともなう静的載荷を受ける RC はりに対して、初期画像撮影のタイミングを変化させて、ひび割れが初期画像撮影時に存在する条件のもとでの画像解析を実施した。その結果、初期ひび割れが存在する場合でも、その後のひび割れの拡幅、進展の過程を捉えられることが確認された。また、初期ひび割れ幅が大きい場合、ひび割れを捉えることができる荷重レベルも大きくなる傾向があり、本研究では初期ひび割れ幅が約 0.1 mm のひび割れを検出するために、降伏荷重の 30%程度 of 再載荷を要した。

キーワード：画像解析, ひずみ計測システム, ひび割れ検出, 初期ひび割れ, 除荷・再載荷

1. はじめに

我が国の土木構造物は高度成長期に作られたものが多く、近年になって供用後 50 年を経過したものが急増し、維持管理の必要性が各所で取り上げられている。例えば、鉄筋コンクリート（以下、RC）やプレストレストコンクリート（以下、PC）の橋梁の検査では、超音波探傷装置を用いた鉄筋の検査や、コア抜きによる残留応力測定を実施するのが望ましいが、これらの検査は大掛かりな機材や足場を必要とし、すべての橋梁で実施できるわけではない。そのため、目視による検査が主流となるのであるが、目視検査は計測者の経験や主観による影響を受けるといった問題点がある。変位計等を橋梁に設置し変状を監視するという方法もあるが、変位計等の計測機器は設置位置における限定的な情報しか得られないため、劣化箇所が既知でない構造物への適用が難しい。この問題を解決する方法として、画像解析が挙げられる。画像解析は変状前後におけるデジタルカメラによる撮影画像の差異からその変形を検出し、ひずみを算出することができる計測方法である。撮影した画像全域におけるひずみの測定を行うことが可能であるという特長を持っている。また、必要な機材は市販のデジタルカメラとコンピュータのみで、専用の機材を必要としない点も魅力的である。渡辺ら¹⁾は載荷中の供試体の撮影画像を、ただちにコンピュータで処理し、載荷中にひずみ分布図を得ることができるリアルタイム画像解析システムを開発した。また、RC はりの載荷試験にそのシステムを適用し、はりの破壊モードを試験中に予測できることを確認している。

しかし、土木分野における画像解析を用いた計測に関する研究は、実験室において無損傷の供試体に対して行う載荷試験を対象にしたものが多く、実構造物への適用を見据えたものは未だ少ない。実構造物への適用が難しい理由として、実構造物では初期状態の撮影画像を得る

ことが困難であるという点が挙げられる。出水ら²⁾は撤去された PCT 型桁に対して載荷試験を行い、画像解析によりその変形性状を計測し、ひび割れの発生や進展挙動を確認できたと報告している。しかし、この PCT 型桁に対する試験は、ひび割れ等の損傷が発生していない箇所を対象としており、ひび割れがあらかじめ発生している供試体に対して画像解析を適用した場合、その拡幅および進展を捉えることができるのか、どの程度の荷重レベルで捉えることができるのかについては明らかになっていない。

そこで、本研究では破壊形態が異なるように鉄筋比を設定した 2 体の RC はり供試体の、除荷・再載荷をともなう静的 4 点曲げ載荷試験に対して画像解析を行い、ひび割れ発生後に画像解析の初期画像を撮影した場合でもひび割れの拡幅および進展、新たなひび割れの発生などを捉えることができるのか、また、それがどの程度の荷重レベルで可能となるのかを検討した。

2. 試験概要

2.1 供試体概要

表-1 に作製した供試体の計画配合を示す。セメントには早強ポルトランドセメントを使用し、水セメント比は 0.38 とした。粗骨材最大寸法は 20 mm、コンクリートの目標圧縮強度は 44 N/mm²である。

図-1 にはり供試体の概要図を、表-2 に供試体諸元を示す。供試体はせん断スパン a が 400 mm、有効高さ d

表-1 計画配合

W/C	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤*
0.38	45	170	445	706	986	2.23

*高性能減水剤

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 助教 博(工) (正会員)

*3 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 教授 工博 (正会員)

が 158 mm および幅 b_w が 150 mm の矩形はりである。したがって、せん断スパン有効高さ比 a/d は 2.53 である。2 体の供試体作製の際は、想定される破壊形態を区別して、せん断補強鉄筋比 r_w および引張鉄筋比 p_w を変化させている。すなわち、破壊荷重を試算した結果、想定される破壊形態が曲げ引張破壊となる R-10 とせん断破壊となる R-03 である。R-10 供試体には、供試体の断面下部に引張鉄筋として、降伏強度が 453 N/mm² である公称直径 19.1 mm の異形鉄筋を 2 本配置し、断面上部に圧縮鉄筋として、降伏強度が 364 N/mm² である公称直径 12.7 mm の異形鉄筋を 2 本配置した。また、せん断補強鉄筋には公称直径 9.53 mm、降伏強度が 358 N/mm² である異形鉄筋を使用した。R-03 供試体は片側（図中右側）のせん断スパンを破壊側として設定している。供試体の断面下部に引張鉄筋として、降伏強度が 451 N/mm² である公称直径 22.2 mm の異形鉄筋を 2 本配置した。また、破壊側のせん断補強鉄筋には公称直径 6.35 mm、降伏強度 (f_{wy}) が 333 N/mm² である異形鉄筋を使用した。非破壊側のせん断補強鉄筋は R-10 供試体と同様である。

せん断耐力の照査には、式(1)に示す修正トラス理論を用い、せん断耐力のコンクリート貢献分 V_c およびせん断補強鉄筋貢献分 V_s には、式(2)および式(3)を用いた³⁾。

$$V = V_c + V_s \quad (1)$$

$$V_c = 0.20 f_c^{1/3} (100 p_w)^{1/3} \left(\frac{1000}{d} \right)^{1/4} \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d} \right) b_w d \quad (2)$$

$$V_s = A_w f_{wy} \frac{z}{s} \quad (3)$$

ここで、 A_w : せん断補強鉄筋 1 組の断面積 (mm²)、 $z=7d/8$ (mm)、 s : せん断補強鉄筋の軸方向間隔 (mm)、および f_c' : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²) である。

2.2 載荷概要および測定項目

RC はりの載荷は、除荷・再載荷をともなう静的 4 点曲げ載荷である。1 サイクル目開始時の供試体 (図-2(a)) の撮影画像を初期画像として画像解析を行った場合、無損傷の供試体に対して画像解析を行うことになる。一方、任意のサイクル開始時の供試体 (図-2(b)) には、それまでの載荷履歴によってひび割れ等が存在している。この時の撮影画像を初期画像として画像解析を行った場合、供試体が初期画像撮影時に損傷を持っていることになり、これは初期損傷を持つ RC はりに対する画像解析という状況を模擬している。また、支点には減摩パッドを挿入し、水平方向の拘束を除去している。

計測項目は、荷重、スパン中央と支点の鉛直方向変位、引張鉄筋のスパン中央ひずみ、コンクリートのスパン中央圧縮ひずみ、および等モーメント区間に標点間隔が 100 mm である π ゲージを配置することで計測した曲げひび割れ幅である。R-03 供試体については、破壊側のせん断スパン内のせん断補強鉄筋の供試体高さ中央位置のひ

表-2 供試体諸元

供試体	f_c' (N/mm ²)	r_w (%)	p_w (%)	破壊荷重算定値		想定される 破壊形態
				せん断 (kN)	曲げ (kN)	
R-10	44	0.95	2.4	234	176	曲げ引張
R-03		0.32	3.3	147	221	せん断

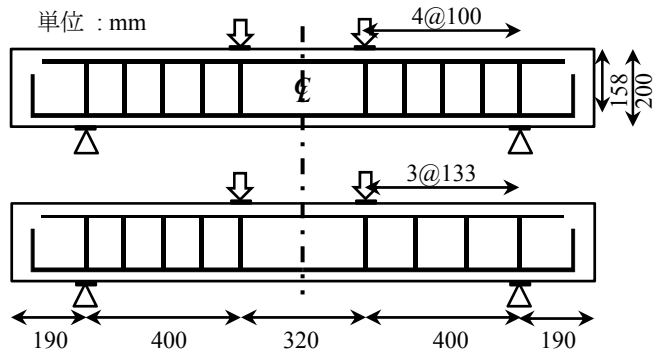


図-1 供試体概要図 (上: R-10 下: R-03)

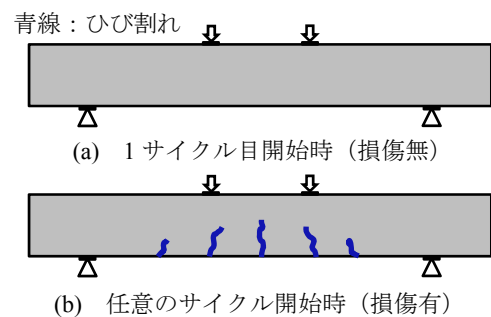


図-2 初期画像撮影時の供試体の状態 (概念図)

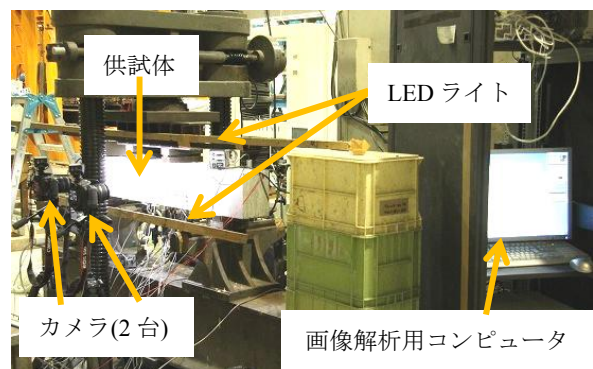


図-3 供試体および計測機器設置状況

ずみの計測も行った。また、画像解析の対象領域の隅に面外方向の変位計を設置することで、面外方向への供試体の回転および移動を監視した。

2.3 画像解析概要

図-3 に供試体および計測機器設置の様子を示す。撮影範囲周辺の供試体表面を白色の塗料で塗装し、R-10 供試体では等モーメント区間を含む 170×600 mm の範囲、R-03 供試体では破壊側のせん断スパンの 170×600 mm の範囲に、直径 9 mm の赤色円形状のターゲットを接着

剤を用いて 20 mm 間隔で格子状に配置し、1510 万画素（横 4762 画素、縦 3168 画素）を持つ 2 台のデジタルカメラで撮影した。図-4 にデジタルカメラの撮影範囲を示す。緑色・水色の破線で囲まれた範囲が各カメラの撮影範囲である。各撮影画像の 1 画素が約 0.08 mm に相当する。各カメラの設定値（シャッター速度、F 値、ISO 値、焦点距離）は、試験ごとに臨機応変に設定し、载荷中は固定した。カメラは三脚で固定し、ワイヤレスリモコンを用いてシャッターを押すことで振動の影響を除去した。また、撮影領域の明るさを均一にするために、供試体の上下から LED ライトを用いて供試体を照らした。

画像解析の手順は東ら⁴⁾の方法に従った。各カメラに対してキャリブレーションを実施後、载荷を行った。撮影された画像はコンピュータ内で処理され、撮影領域に格子状に配置されたターゲットの重心座標値が算出された。各荷重段階におけるターゲットの重心座標値を有限要素モデルに組み込み、ひずみを算出し、ひずみ分布図を得た。ひずみの算出には著者ら⁵⁾が改良したシステムを用いた。この際、撮影範囲の隅の面外方向に設置された変位計の値から、面外方向への供試体の回転および移動に起因する画像の歪みが計算され、ターゲットの重心座標値が補正された。

3. 载荷試験結果

3.1 供試体破壊性状

表-3 に载荷試験の結果をまとめる。図-5 に試験終了後の供試体のひび割れ性状を示す。図中の青線は目視で観察されたひび割れ、緑斜線部は圧壊部を表す。また、図-6 に各供試体の荷重-たわみ関係を、図-7 に画像解析により得た各供試体の主引張ひずみ分布の経時変化を示す。なお、これは 1 サイクル目開始（無損傷）時に初期画像を撮影した画像解析による結果である。以下に各供試体の破壊状況について述べる。

(1) R-10 供試体

7 サイクルの除荷・再载荷をともなう静的载荷を行った。各サイクルの载荷後、約 5 kN まで除荷を行って、次のサイクルの载荷を行った。

1 サイクル目は 30 kN 時に曲げひび割れの発生を確認し、除荷を行った。その後 2, 3, 4 サイクル目は 45 kN, 76 kN, 120 kN まで载荷し、除荷を行った。4 サイクル目の 95 kN 時に斜めひび割れの発生を確認した。5 サイクル目は 181 kN 時の軸方向鉄筋降伏後、189 kN 時に荷重の伸びが緩やかになり、たわみが増えだしたことから除荷を行った。6 サイクル目は 193 kN 時に斜めひび割れが圧縮縁に達したため除荷を行った。7 サイクル目は 192 kN 時にピークを迎えた後、荷重が徐々に低下し、179 kN 時に载荷点の外側のコンクリートの剥離を確認したため

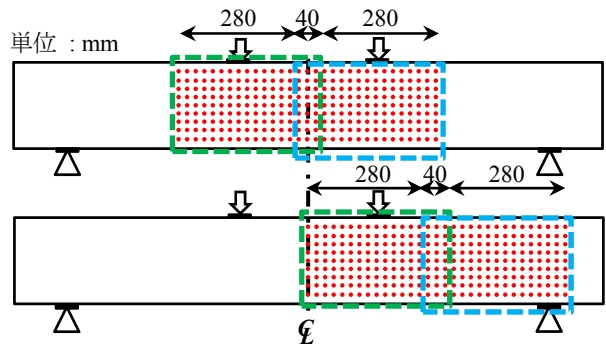


図-4 カメラの撮影範囲（上：R-10 下：R-03）

表-3 载荷試験結果

供試体	f'_c (N/mm ²)	P_{crack} (kN)	P_{max} (kN)	破壊モード
R-10	48.2	29.7	193.3	曲げ引張
R-03	46.0	27.8	221.1	せん断圧縮

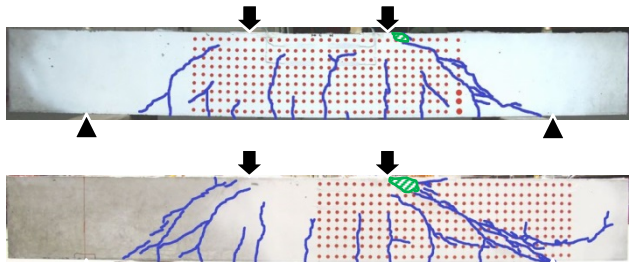


図-5 供試体のひび割れ性状（上：R-10 下：R-03）

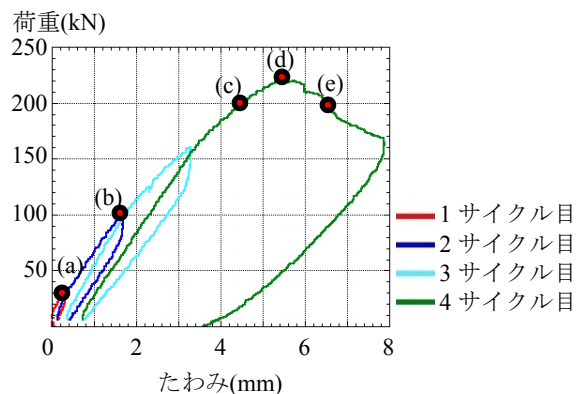
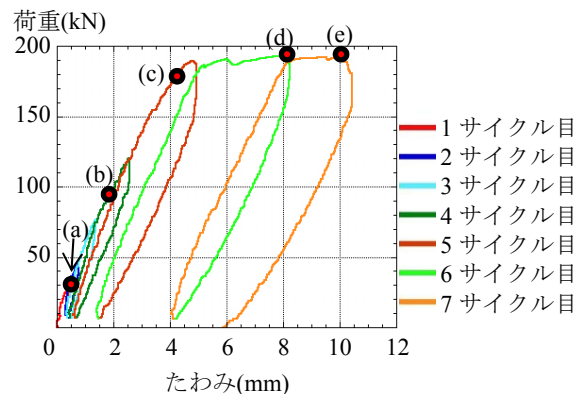


図-6 荷重-たわみ関係（上：R-10 下：R-03）

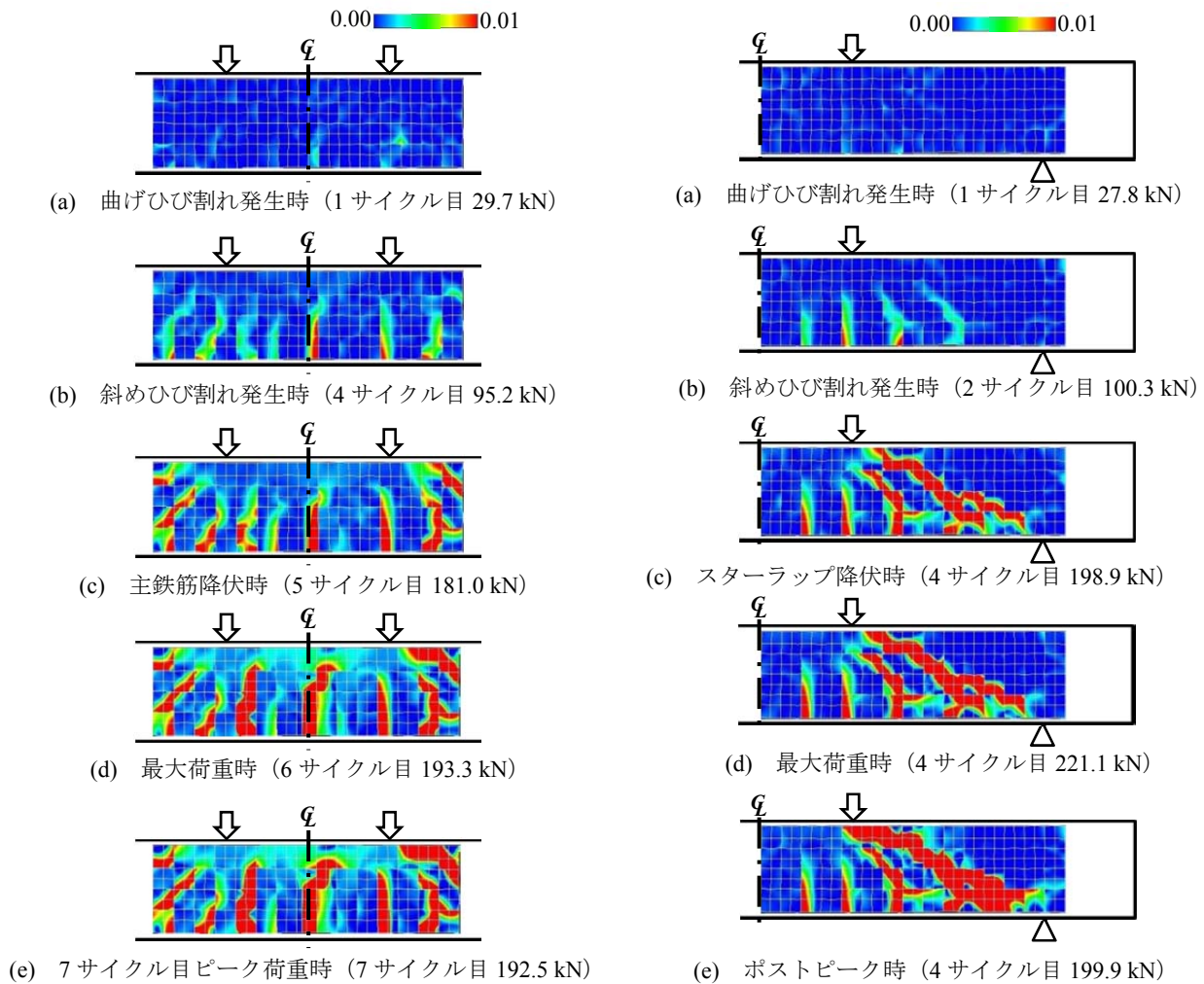


図-7 主引張ひずみ分布の経時変化 (1 サイクル目初期画像, 左: R-10 右: R-03)

除荷し, 試験を終了した。

画像解析による主引張ひずみ分布図の経時変化から曲げひび割れの進展していく様子が観察できる。

(2) R-03 供試体

4 サイクルの除荷・再載荷をとまなう静的載荷を行った。各サイクルの載荷後, 約 5 kN まで除荷を行って, 次のサイクルの載荷を行った。

1 サイクル目は 27 kN 時に曲げひび割れの発生を確認し, 除荷を行った。2 サイクル目は 100 kN 時に斜めひび割れの発生を確認し, 除荷を行った。3 サイクル目は 160 kN まで載荷し, 除荷を行った。4 サイクル目の 193 kN 時および 199 kN 時に斜めひび割れを通過するせん断補強鉄筋の降伏を確認した。せん断補強鉄筋降伏後も荷重は伸び続け, 221 kN でピークを迎えた。その後, 載荷点の外側のコンクリートが剥離・圧壊しながら徐々に荷重が低下し, 165 kN まで荷重が低下したところで除荷し, 試験を終了した。

画像解析による主引張ひずみ分布図の経時変化から曲げひび割れ, 斜めひび割れの進展していく様子が確認で

きる。

3.2 初期画像をひび割れ発生後に撮影した画像解析

本節では 3 サイクル目開始時の撮影画像を初期画像として画像解析を行い, ひび割れを捉えることが可能か, また, それがどの程度の荷重レベルであるかを検証する。R-10, R-03 両供試体ともに 1~2 サイクル目において曲げひび割れの発生・進展を確認しており, 3 サイクル目の初期画像撮影時にはすでに供試体に損傷がある状態と考えてよい。

(1) R-10 供試体

図-8 に初期画像を 1 サイクル目 (ひび割れ発生前) に撮影した場合と, 3 サイクル目 (ひび割れ発生後) に撮影した場合の主引張ひずみ分布の経時変化を示す。ひずみ分布図はそれぞれ, (a)35.1 kN 時 (曲げ降伏荷重の 20%), (b)45.2 kN 時 (曲げ降伏荷重の 25%), (c)55.0 kN 時 (曲げ降伏荷重の 30%) のものである。また, 図-9 に 2 サイクル目最大荷重 (45.1 kN) 時のひび割れ発生位置および 2 サイクル目終了 (6.5 kN) 時の供試体下縁のターゲット間の水平方向変位分布を示す。変位分布は 1

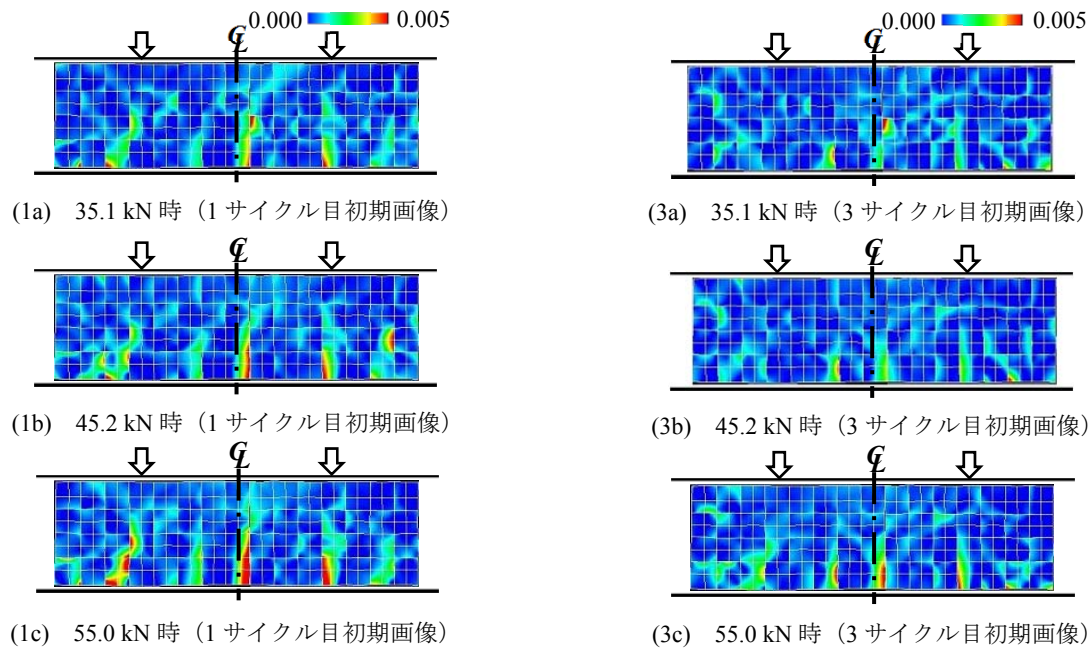


図-8 主引張ひずみ分布の経時変化 (R-10)

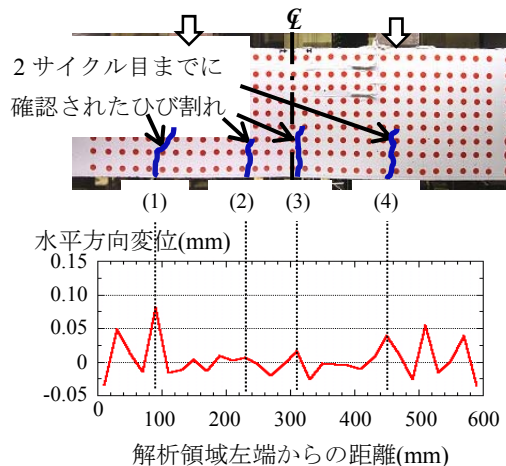


図-9 ひび割れ位置および下縁部の水平方向変位 (R-10)

サイクル目開始時に初期画像を撮影した画像解析により得たもので、2 サイクル目終了時の残留変形を表している。

初期画像を1 サイクル目に撮影した場合は35.1 kN 時 (図-8(1a)) のひずみ分布図から線状の明確なひずみの局所化が観察でき、ひび割れが存在していることが読み取れる。一方、初期画像を3 サイクル目に撮影した場合は図-9 中(2)~(4)の3本のひび割れは確認できるが、初期画像を1 サイクル目に撮影した場合ほどひずみの値は大きくない。また、(1)のひび割れに関しては、45.2 kN 時 (図-8(3b)) までは判別できない。55.0 kN 時 (図-8(3c)) には、このひび割れに沿ったひずみの集中が見られる。2 サイクル目終了時の供試体下縁部の水平方向変位分布 (図-9) を見ると、(1)のひび割れの位置は0.08 mm ほどの残留変形があり、ひび割れが開いた状態で初期画像が撮影されたことがわかる。

(2) R-03 供試体

図-10 に初期画像を1 サイクル目 (ひび割れ発生前) に撮影した場合と、3 サイクル目 (ひび割れ発生後) に撮影した場合の主引張ひずみ分布の経時変化を示す。ひずみ分布図はそれぞれ、(a)40.2 kN 時 (せん断補強鉄筋降伏荷重の20%)、(b)50.0 kN 時 (せん断補強鉄筋降伏荷重の25%)、(c)59.8 kN 時 (せん断補強鉄筋降伏荷重の30%) のものである。また、図-11 に2 サイクル目最大荷重 (100.3 kN) 時のひび割れ発生位置および2 サイクル目終了 (5.6 kN) 時の供試体下縁部のターゲット間の水平方向変位分布を示す。変位分布は1 サイクル目開始時に初期画像を撮影した画像解析により得たもので、2 サイクル目終了時の残留変形を表している。

初期画像を1 サイクル目に撮影した場合は40.2 kN 時 (図-10(1a)) のひずみ分布図からひずみの局所化が確認でき、ひび割れが存在していることが読み取れる。一方、3 サイクル目に撮影した場合はひび割れは確認できるが、初期画像を1 サイクル目に撮影した場合ほどひずみの値は大きくない。特に、図-11 中(3)のひび割れは59.8 kN 時 (図-10(1c)) に0.005 以上の主引張ひずみが発生しているにもかかわらず、3 サイクル目に初期画像を撮影した場合 (図-10(3c))、主引張ひずみの分布は明確ではない。2 サイクル目終了時の供試体下縁部の水平方向変位分布 (図-11) を見ると、(3)のひび割れの位置は0.1 mm 以上の残留変形があり、ひび割れが開いた状態で初期画像が撮影されたことがわかる。

以上の結果から、初期に損傷を持った構造物に画像解析を適用することで、ひび割れの発生、進展は捉えらるものの、その荷重レベルは高くなることが推察される。

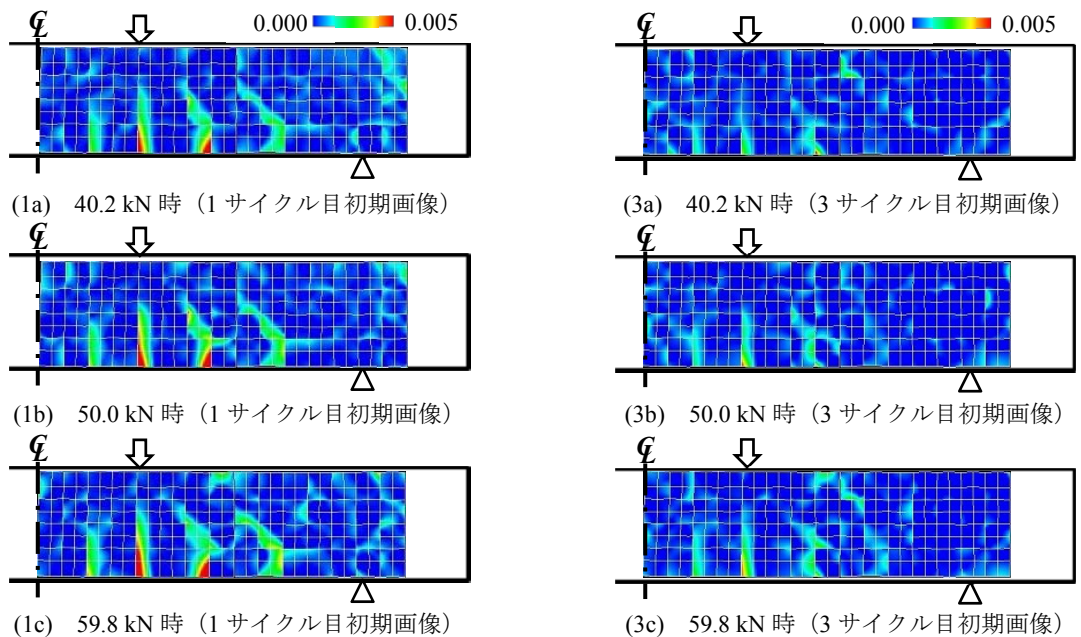


図-10 主引張ひずみ分布の経時変化 (R-03)

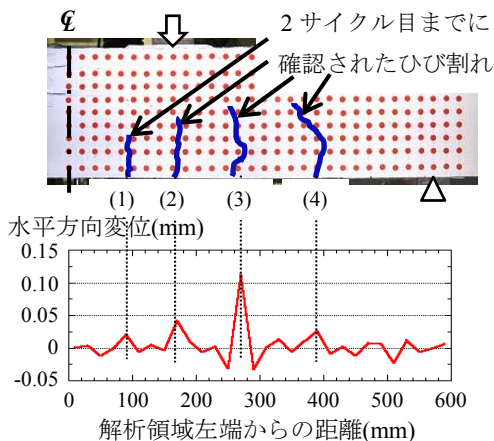


図-11 ひび割れ位置および下縁部の水平方向変位 (R-03)

これは画像解析が初期画像と試験中に撮影した変形後画像の差分によってひずみを算出しているためであり、ひび割れの検出が可能となる荷重レベルは初期画像を撮影した状態からのひび割れの拡幅の程度によって変化すると考えられる。本試験においては、曲げ降伏荷重およびせん断補強鉄筋降伏荷重の約30%の荷重を再載荷した段階で、除荷状態で0.1 mm程度の幅を持っていたひび割れを確認することができた。

4. 結論

本研究から得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 画像解析システムを除荷・再載荷をともなうRCはりの載荷試験に適用し、初期画像をひび割れ発生後に撮影した場合でも、その後のひび割れの拡幅、進展挙動を捉えることができることを確認した。
- 2) 初期画像撮影時の供試体にひび割れが存在している場合は、初期画像を無損傷時に撮影した場合と比較

して、ひび割れの確認が可能となる荷重レベルが大きくなる。

- 3) 本研究で行った試験においては、曲げ降伏荷重およびせん断補強鉄筋降伏荷重の30%の再載荷で、初期ひび割れ幅0.1 mm程度のひび割れを捉えることができることを確認した。

参考文献

- 1) 渡辺 健, 東 広憲, 三木朋広, 二羽淳一郎: コンクリート構造実験を対象としたリアルタイム画像解析システムの開発, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.1, pp.94-106, 2010.3
- 2) 出水 享, 松田 浩, 伊藤幸広, 木村嘉富: デジタル画像相関法を用いた撤去PCT桁橋の載荷試験時における変位, ひずみ, ひび割れ計測, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.1411-1416, 2012.7
- 3) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村 甫: せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No.372/V-5, pp.167-176, 1986.8
- 4) 東 広憲, 渡辺 健, 三木朋広, 二羽淳一郎: 画像解析を用いた鉄筋コンクリートはりの破壊性状の予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.793-798, 2008.7
- 5) 山本剛史, 松本浩嗣, 二羽淳一郎: 圧縮破壊するRC部材に適した画像解析によるひずみ計測・算出手法の開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.68, pp.145-146, 2013.9