

論文 画像解析を用いた RC はりに内在する鉄筋破断位置の検出

山本 剛史*1・松本 浩嗣*2・中村 拓郎*3・二羽 淳一郎*4

要旨: 画像解析を用いて RC 構造物の鉄筋破断を検知できるか検討するために、軸方向鉄筋を切断した RC はりの載荷試験において、はり底面を含む 3 面に画像解析を実施し、ひび割れ幅の変化について検討した。その結果、土木学会コンクリート標準示方書によるひび割れ幅算定値と比較して、健全供試体の降伏荷重の 30% 時において損傷供試体の最大ひび割れ幅の計測値が 2.5~4.9 倍となり、鉄筋の損傷をひび割れ幅から検出できる可能性が示唆された。また、初期画像撮影時にコンクリートが損傷を有する状態でも、ひび割れ幅の計測値は小さくなるものの損傷供試体において計測値が算定値より大きくなることが確認された。

キーワード: 画像解析, 鉄筋破断, 非対称断面, 損傷検出, ひび割れ幅, 初期ひび割れ

1. はじめに

我が国の土木構造物は供用後 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。なかでも点検の実施は重要であり、目視調査が主流として行われているが、目視調査に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。そこで、変状前後のデジタルカメラの撮影画像から構造物の変形を定量的に計測できる、画像解析技術を用いた計測が注目されている。画像解析による計測は撮影範囲内全域の変形を計測することが可能で、市販のカメラやコンピュータを用いて計測を実施できるという特長を持っている。

しかし、土木分野における画像解析に関する研究は盛んに行われているが、実構造物に適用するには解決すべき課題が多く残っている。筆者ら¹⁾は初期画像撮影時にひび割れを有する RC はりに画像解析を適用し、損傷を有する構造物に対しても画像解析を用いてひび割れの拡幅・進展挙動を捉えられることを確認した。しかし、上記の試験はコンクリートのひび割れのみを対象としており、他の損傷については検討していない。

そこで、本研究では鉄筋損傷を捉えることを目的として、はり幅方向に対する軸方向鉄筋の切断箇所を変化させた RC はりの載荷試験に対し、はり底面を含む 3 面に画像解析を実施し、ひび割れ幅の変化について検討した。本研究における鉄筋損傷は疲労による破断などを模擬しており、軸方向鉄筋を切断した供試体を作製した。また、除荷・再載荷を行い、初期状態においてコンクリートにも損傷が発生している場合も同様の検討を行った。

2. 試験概要

2.1 供試体概要

表-1 に作製した供試体に使用したコンクリートの計

画配合を示す。セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。粗骨材最大寸法は 20 mm、コンクリートの目標圧縮強度は 35 N/mm² である。コンクリート打込み後、1 日間湿潤養生をした後脱型し、5 日間湿布養生を行い、その後画像解析のターゲット設置のため 1 日間気中養生を行った。

表-2 に供試体諸元を、図-1 にはり供試体の概要図を示す。引張鉄筋の中心間隔は 40 mm、供試体底面における純かぶりは 20 mm である。また、表-3 に使用した鉄筋の物性を示す。ここで、 f'_c : コンクリートの目標圧縮強度、 r_w : せん断補強鉄筋比、 p_w : 引張鉄筋比である。なお、各損傷供試体の引張鉄筋比は鉄筋切断断面における値である。4 体の供試体は、4 本の軸方向鉄筋の供試体幅方向の損傷パターンが異なる。それぞれ、すべての鉄筋が健全である健全供試体、片側の 2 本の軸方向鉄筋を切断した片側破断供試体、外側の 2 本の軸方向鉄筋を切断した外側破断供試体、内側の 2 本の軸方向鉄筋を切断

表-1 コンクリートの計画配合

W/C	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
0.55	45	165	300	807	1016	2.4

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 (kN)	想定される破壊形態
健全	35	0.61	2.2	107	曲げ引張
片側破断			1.1	59	
外側破断					
内側破断					

*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 (地独) 北海道立総合研究機構 建築研究本部北方建築総合研究所環境科学部 博(工) (正会員)

*4 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)

した内側破断供試体である。損傷供試体の部材軸方向の鉄筋切断位置は共通で、荷重点付近の最大曲げモーメント区間である（図-1 中×印）。

2.2 荷重概要

RC はりの荷重は、除荷・再荷重をとまなう静的 4 点曲げ荷重である。本試験では、画像解析の基準となる初期画像の撮影タイミングを変化させて解析を行った。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、コンクリートが健全な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、それまでの荷重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、供試体のコンクリートが初期画像撮影時に損傷を有していることになり、これはコンクリートにも損傷を有する RC はりに対して画像解析を行うことになる。

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。本研究の供試体には、はり幅方向に左右非対称な断面となる片側破断供試体が含まれており、幅方向の応力が不均一となることが予想されたため、両側面および底面の 3 面に対して画像解析を実施した。撮影範囲周辺の供試体表面を白色の塗料で塗装し、両側面は 125×280 mm の範囲、底面は 170×280 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（側面は領域上端において、底面は領域上下端においてのみ縦方向が 25 mm 間隔）で格子状に配置し、2103 万画素（横 5616 画素、縦 3744 画素）を持つデジタルカメラで撮影した。図-1 中にデジタルカメラの撮影範囲（ターゲット設置範囲）を示す。水色・緑色・赤色の線で囲まれた

範囲または面が各カメラの撮影範囲である。各撮影画像の 1 画素が約 0.05 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、試験ごとに撮影画像が明瞭になるように調整し、荷重中は固定した。カメラのシャッターをワイヤレスリモコンを用いて押すことで撮影時のカメラの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²⁾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、荷重を行った。撮影した画像をコンピュータ内で処理し、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を算出した。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³⁾が改良したシステムを用いた。この際、側面においては撮影範囲の四隅近傍の面外方向に設置された変位計の計測値から、底面においては側面の画像解析で得られる鉛直方向変位値から、それぞれ面外方向への供試体の回転および移動、たわみに起因する画像の歪みを計算し、ターゲットの重心座標値を補正した。

3. 荷重試験結果

3.1 供試体破壊状況

表-4 に荷重試験の結果をまとめる。また、図-4 に試験終了後の供試体各面のひび割れ性状を、図-5 に各供試体の荷重-たわみ関係を示す。たわみは側面 A、側面 B の平均値を用いている。表-4 中の見かけの剛性とは、ひび割れ発生後から鉄筋降伏時までの荷重-たわみ曲線の傾きのことで式(1)で定義する。

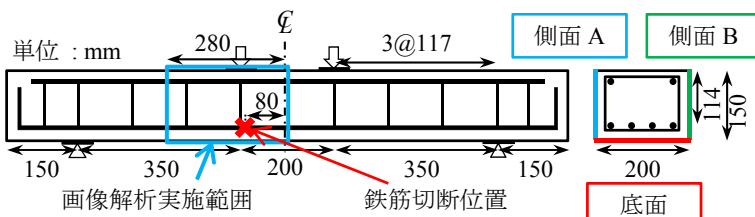


図-1 供試体および画像解析範囲概要図

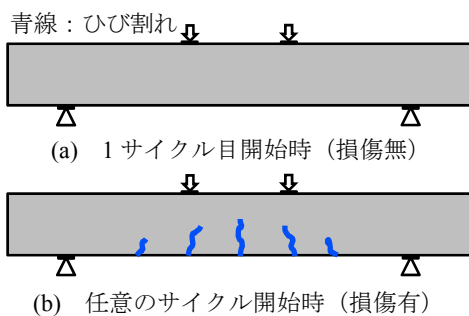


図-2 初期画像撮影時の供試体の状態（概念図）

表-3 各種鉄筋の物性

項目	呼び名	種類	降伏強度 (N/mm ²)
引張鉄筋	D13	SD345	381
圧縮鉄筋	D13	SD295A	380
せん断補強鉄筋	D10	SD295A	391

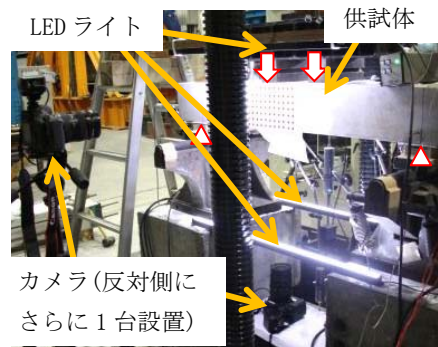


図-3 供試体および計測機器設置状況

$$\text{見かけの剛性} = \frac{0.9P_y - 1.5P_{cr}}{\delta_{0.9P_y} - \delta_{1.5P_{cr}}} \quad (1)$$

ここで、 P_y ：曲げ降伏荷重(kN)、 P_{cr} ：曲げひび割れ発生荷重(kN)、 $\delta_{0.9P_y}$ ：曲げ降伏荷重の90%時におけるたわみ(mm)、 $\delta_{1.5P_{cr}}$ ：曲げひび割れ発生荷重の150%時におけるたわみ(mm)である。曲げ降伏荷重は、図-5の荷重-たわみ関係において降伏前であることが自明な荷重30 kNと55 kNの点を結んだ直線と、降伏後であることが自明なたわみ3 mmと5 mm（外側破断供試体のみ4 mm）の点を結んだ直線の交点の荷重と定義する。

各供試体について、4~6サイクルの除荷・再載荷をとも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。各供試体ともに1サイクル目は20 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、健全供試体は60 kNまで、片側破断および内側破断供試体は50 kNまで、外側破断供試体は40 kNまで10 kNずつ各サイクルの最大荷重を増加させながら再載荷、除荷を行った。最終サイクルでは、軸方向鉄筋が降伏し、たわみが9 mm程度（外側破断供試体のみ4 mm）に達した後に除荷し、試験を終了した。全供試体が曲げ引張破壊を呈した。以下に各供試体の破壊状況について述べる。

(1) 健全供試体

6サイクル目の119 kN時に軸方向鉄筋の降伏を確認した。その後123 kN時にピークを迎えた後、圧縮縁のコンクリートの圧壊を確認し、除荷を行った。

供試体のひび割れ分布図からひび割れが供試体幅方向にほぼ均一に発生していることが確認できる。

(2) 片側破断供試体

5サイクル目の58 kN時に軸方向鉄筋の降伏を確認した。その後63 kN時にピークを迎えた後、たわみが9.3 mmとなった段階で除荷を行った。

健全供試体と比較して降伏荷重およびはりの見かけの剛性が半減している。これは軸方向鉄筋の切断により鉄筋比が半減している影響と考えられる。

供試体のひび割れ分布図を見ると、側面B（鉄筋健全側）では曲げひび割れがスパン中央を中心として複数分布している一方で、側面A（鉄筋切断側）では鉄筋切断位置付近の曲げひび割れしか発見されなかった。底面の分布図でも側面B側と側面A側で同様の傾向が確認できる。このことから片側破断供試体においては、鉄筋切断によりはり断面が非対称となり、側面A側の鉄筋切断位置付近に変形が集中したと推察される。

(3) 外側破断供試体

4サイクル目の58 kN時に軸方向鉄筋の降伏を確認した。その後、緩やかに荷重が伸び続け、たわみが4 mmとなった段階で除荷を行った。

健全供試体と比較して降伏荷重が半減、はりの見かけの剛性が6割程度となっている。

表-4 載荷試験結果

供試体	f'_c (N/mm ²)	P_{cr} (kN)	P_y (kN)	P_{max} (kN)	見かけの剛性 (kN/mm)
健全	32.6	20.5	119.0	122.6	36.3
片側破断	31.3	20.6	57.7	62.8	18.5
外側破断	34.8	20.4	58.0	61.6	20.9
内側破断	34.7	20.1	61.9	74.4	26.5

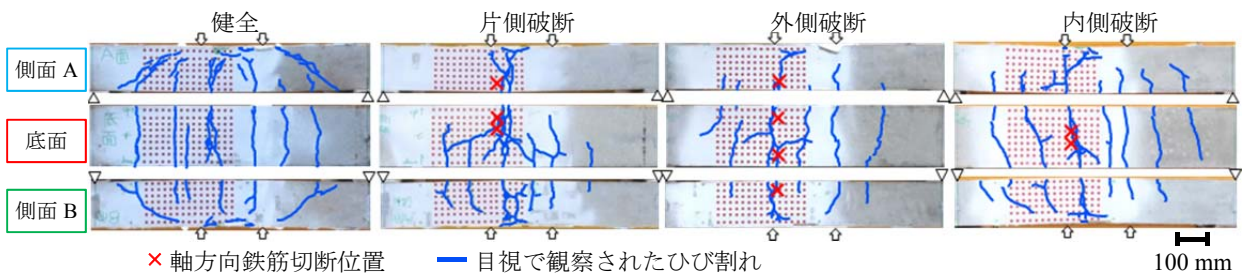


図-4 供試体のひび割れ性状

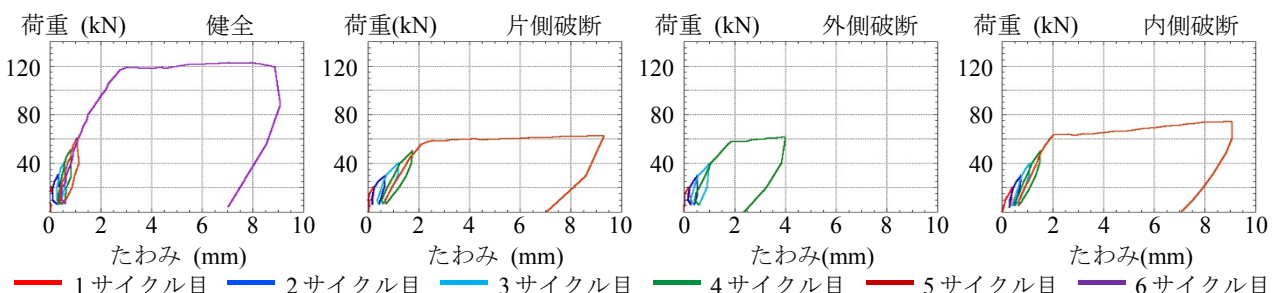


図-5 荷重-たわみ関係

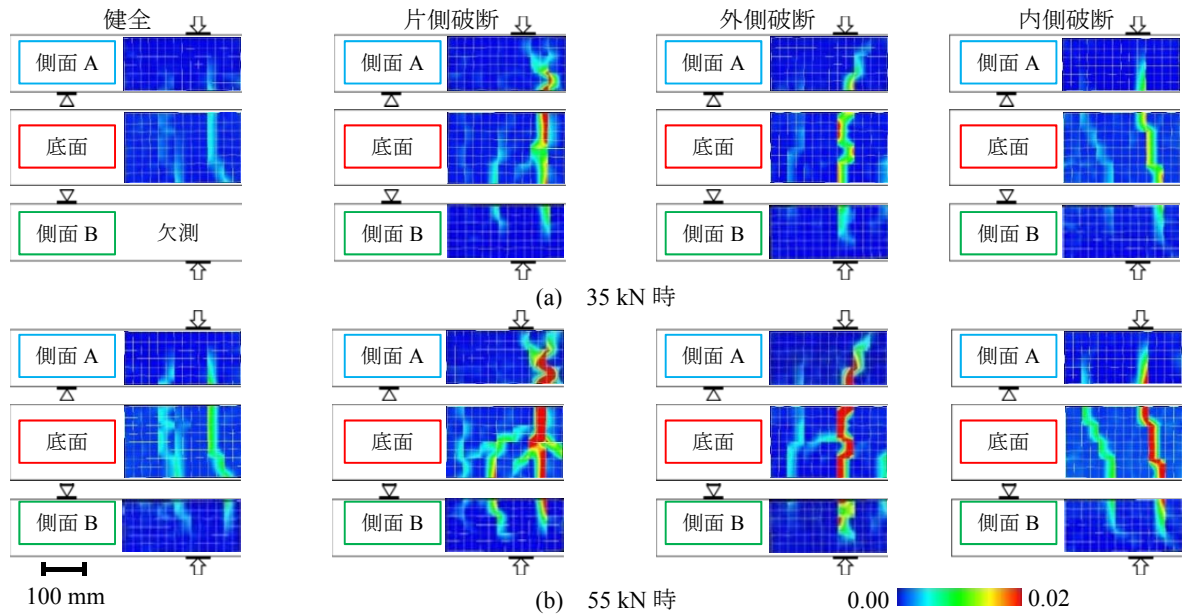


図-6 主引張ひずみ分布図 (1 サイクル目初期画像)

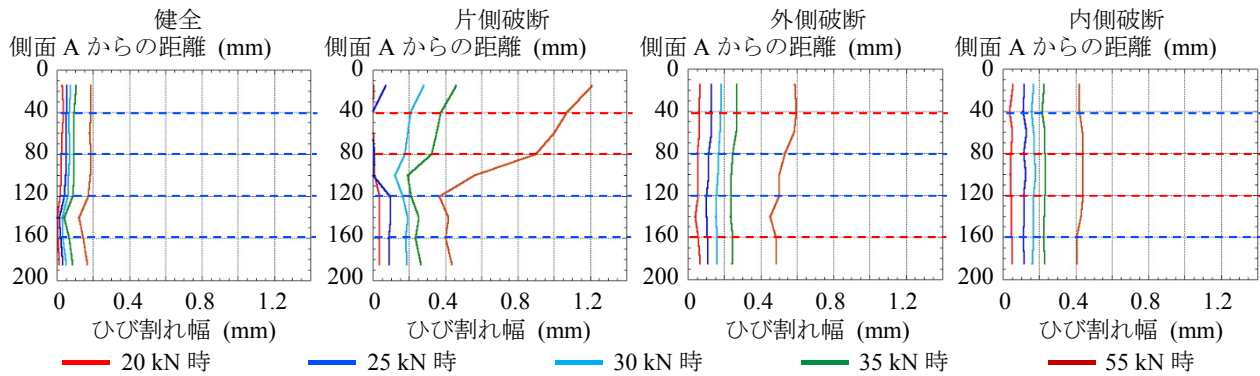


図-7 底面ひび割れ幅分布 (1 サイクル目初期画像)

供試体のひび割れ分布図から、側面 A と側面 B の間に差異は認められないものの、健全供試体や内側破断供試体と比較して鉄筋切断位置付近のひび割れ以外のひび割れの進展が小さい。

(4) 内側破断供試体

5 サイクル目の 62 kN 時に軸方向鉄筋の降伏を確認した。その後、緩やかに荷重が伸び続け、たわみが 9 mm となった段階で除荷を行った。

健全供試体と比較して降伏荷重が半減しているものの、はりの見かけの剛性は 7 割程度の減少に留まっている。また、最大荷重は片側破断供試体に対して 1.2 倍となっており、同じ鉄筋減少率でも、損傷パターンによりはりの見かけの剛性および最大荷重が異なることがわかった。

供試体のひび割れ分布図からは、側面 A と側面 B の間に大きな差異は認められない。

3.2 初期画像を載荷開始時に撮影した画像解析

本節では載荷試験開始時の撮影画像を初期画像として画像解析を行い、各供試体のひずみ分布、およびひび割れ幅の変化を検討した。

図-6 に画像解析により得た各供試体の 35 kN 時 (健全供試体の曲げ降伏荷重の 30%) および 55 kN 時 (健全供試体の曲げ降伏荷重の 45%) における主引張ひずみ分布図を示す。なお、本研究における「ひずみ」とは、連続体の有限要素内における平均ひずみであり、ひび割れによる変形を含んだものである。健全供試体と各損傷供試体と比較すると、損傷供試体のほうが同荷重時における主引張ひずみが大きくなることが読み取れる。また、片側破断供試体の分布図に注目すると、側面 A (鉄筋切断側) のほうが側面 B (鉄筋健全側) よりひずみの値が大きくなっており、このことから鉄筋切断によりはり断面が非対称となり、側面 A 側の鉄筋切断位置付近に変形が集中したことが推察できる。

図-7 に各供試体のひび割れ幅が最大となった鉄筋切断位置付近に発生したひび割れの供試体底面におけるはり幅方向のひび割れ幅分布を示す。ひび割れ幅はひび割れを挟むターゲットの距離変化から算定した。当該ターゲット間に複数のひび割れが存在する場合、ひび割れ幅を正確に評価できない可能性があるが、通常曲げひび

割れの間隔と比較して、本試験におけるターゲット間隔 20 mm は十分に小さいため、複数のひび割れが発生する可能性は小さい。ひび割れ幅分布は 1 サイクル目 20 kN 時、2 サイクル目 25 kN および 30 kN 時、3 サイクル目 35 kN 時、5 サイクル目 (外側破断供試体のみ 4 サイクル目) 55 kN 時のものである。グラフ中の青色の破線は健全な鉄筋の位置を、赤色の破線は切断した鉄筋の位置をそれぞれ表している。健全供試体と各損傷供試体の最大ひび割れ幅を比較すると、損傷供試体のほうが 35 kN 時で 2.2~4.3 倍、55 kN 時で 2.3~6.4 倍と大きくなることが読み取れる。また、鉄筋の切断数は同じでも、損傷パターンの違いによって最大ひび割れ幅が異なることが確認できる。また、健全、外側破断、内側破断供試体については、ひび割れ幅分布が供試体幅方向にほぼ一定であるのに対して、片側破断供試体では、側面 A 側で側面 B 側の約 3 倍にもなる大きなひび割れ幅となっており、この結果はひび割れ分布や主引張ひずみ分布で見られた、鉄筋切断位置付近に変形が集中するという現象に一致する。

また、図-8 に各供試体の各荷重段階における、画像解析により計測した最大曲げひび割れ幅の計測値 (w_{exp}) と土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾による曲げひび割れ幅算定値 (w_{cal}) との比率を示す。算定式は式(2)で表される。

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right] \quad (2)$$

ここで、 k_1 : 鋼材の表面形状に関する係数で異形鉄筋の場合 1、 k_2 : コンクリートの品質に関する係数で式(3)によって表される。なお、 f'_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)である。

$$k_2 = \frac{15}{f'_c + 20} + 0.7 \quad (3)$$

k_3 : 引張鋼材の段数に関する係数で一段配筋の場合 1、 c : かぶり (mm)、 c_s : 鋼材の中心間隔 (mm)、 ϕ : 鋼材径 (mm)、 ε'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープ等による値である。本試験では材齢が短かったことから、収縮、クリープの影響は無視しようと仮定し $\varepsilon'_{csd} = 0$ としている。また、算定値を計算する際に 4 本全ての軸方向鉄筋が健全であるとしている。健全供試体では計測値と算定値がほぼ一致し比率がほぼ 1 であるのに対して、損傷供試体では荷重の増加とともに、算定値に対する計測値の倍率が増加していき、35 kN 時において 2.5~4.9 倍、55 kN 時において 3.0~8.2 倍となっている。この結果から、画像解析で得られた解析領域内の各箇所におけるひび割れ幅の計測値と、その箇所におけるひび割れ幅の算定値を比較し、計測値が算定値を上回る箇所を抽出することで鉄筋の損傷を検出できる可能性が示唆された。

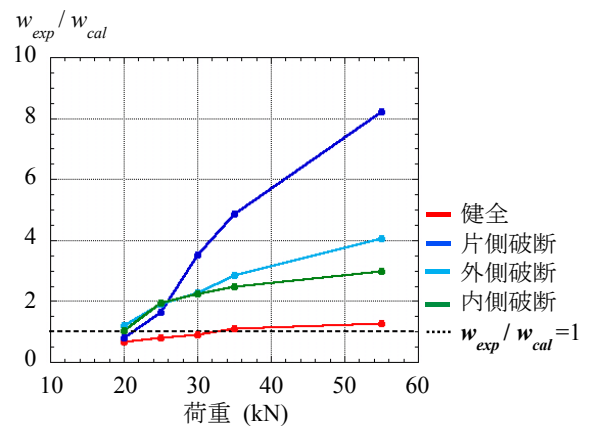


図-8 最大曲げひび割れ幅の計測値と算定値の比率 (1 サイクル目初期画像)

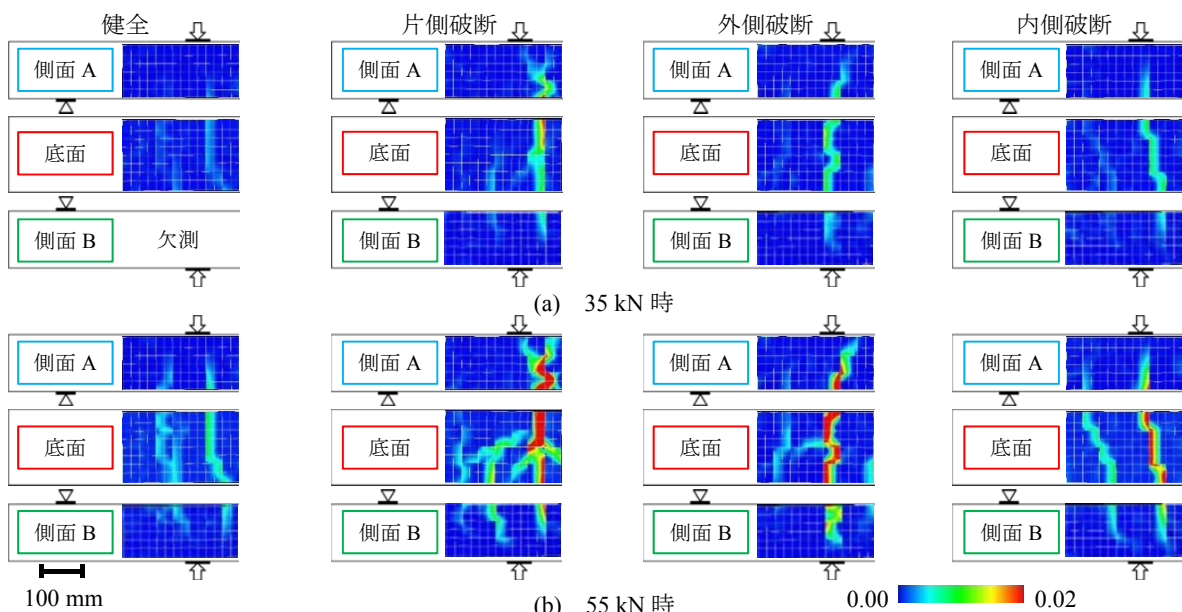


図-9 主引張ひずみ分布図 (3 サイクル目初期画像)

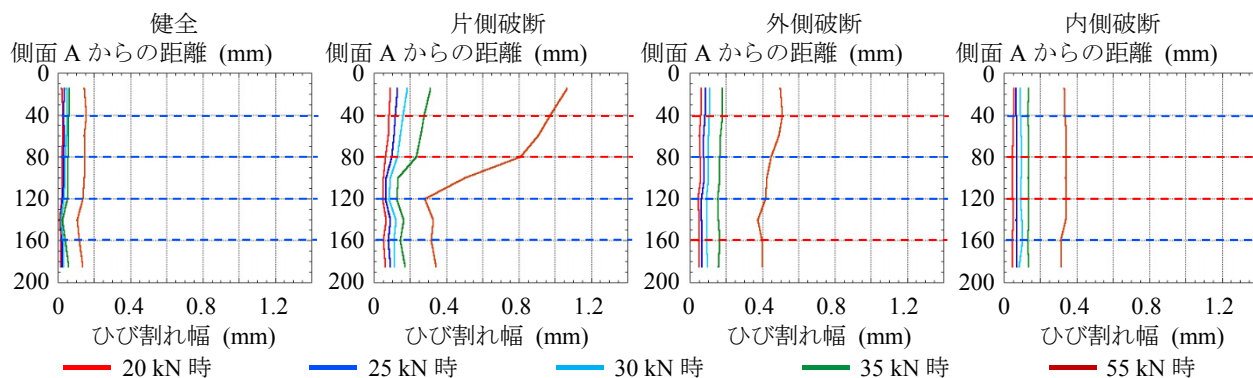


図-10 底面ひび割れ幅分布 (3 サイクル目初期画像)

3.3 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、3.2節で確認された現象が初期画像を変化させた場合でも確認できるかを検証する。すべての供試体について、2サイクル目の最大30kNまでの荷重によっ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のコンクリートに損傷がある状態と考えてよい。

図-9に3サイクル目開始時の撮影画像を初期画像として用いた画像解析により得た各供試体の35kN時(健全供試体の曲げ降伏荷重の30%)および55kN時(健全供試体の曲げ降伏荷重の45%)における主引張ひずみ分布図を示す。初期画像撮影時に発生している損傷の影響でひずみの値は小さくなっているものの、1サイクル目の撮影画像を初期画像として用いた解析結果と同様に、損傷供試体のほうが健全供試体よりひずみが大きくなる。また、片側破断供試体の側面Aのほうが側面Bよりひずみの値が大きくなるという傾向が見られた。

図-10に各供試体のひび割れ幅が最大となった鉄筋切断位置付近に発生したひび割れの供試体底面におけるはり幅方向のひび割れ幅分布を示す。ひび割れ幅分布は3サイクル目20kNおよび、25kN、30kN、35kN、5サイクル目(外側破断供試体のみ4サイクル目)55kN時のものである。グラフ中の青色の破線は健全な鉄筋の位置を、赤色の破線は切断した鉄筋の位置をそれぞれ表している。1サイクル目の撮影画像を初期画像として用いた結果と比較すると、特に2サイクル目までに受けた最大荷重である30kNまではひび割れ幅の拡幅が小さくなっている。また、初期画像撮影時の残留変位の影響で55kN時における最大ひび割れ幅も、各供試体で1サイクル目の撮影画像を初期画像として用いた結果と比較して0.78倍~0.88倍の値となっている。

以上の結果から、画像解析の初期画像撮影時にコンクリートに損傷が発生している場合、変形の増大を捉えることは可能なものの、その計測値が小さくなることがわかった。特に過去に受けた最大荷重履歴より小さい荷重

時においてはその傾向が顕著である。

4. 結論

本研究から得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 軸方向鉄筋を切断したRCはりの除荷・再載荷をともなう荷重試験に画像解析を適用し、供試体底面を含む3面の破壊の進行を捉えることができた。
- 2) 軸方向鉄筋の切断数が同じでも、損傷パターンにより最大ひび割れ幅およびひび割れ幅分布が大きく異なることがわかった。
- 3) 土木学会コンクリート標準示方書のひび割れ幅算定式による算定値と比較を行った結果、各損傷供試体の計測値は鉄筋が健全と仮定した算定値に対して35kN時において2.5~4.9倍となった。このことから、画像解析で得られた各箇所におけるひび割れ幅の計測値が算定値を上回る箇所を抽出することで鉄筋の損傷を検出できる可能性が示唆された。
- 4) 初期画像を損傷発生後に撮影した場合、ひび割れ幅の計測値が小さくなることがわかった。特に過去に受けた最大荷重履歴を超えない範囲内では、ひび割れ幅の拡幅も小さくなることがわかった。

参考文献

- 1) 山本剛史, 松本浩嗣, 二羽淳一郎: 損傷を持つRCはりに対する画像解析の適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1435-1440, 2014.7
- 2) 東 広憲, 渡辺 健, 二羽淳一郎: 破断した軸方向鉄筋を有するRCはりの破壊に対する画像解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.727-732, 2009.7
- 3) 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
- 4) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書[設計編], pp.223-226, 2013.3