ステレオ方式三次元形状計測法を併用したデジタル画像相関法による 鉄筋コンクリート構造物のひび割れ発生検知手法の研究*

畛田道雄^{*1}, 戸島幹夫^{*2}, 佃 善彦^{*3}, 宮里心一^{*4}, 石川憲一^{*5}

Crack Generating Detection Technique of Reinforced Concrete Structure Using Three-Dimensional Measurement Based on Stereo Camera System

Michio UNEDA^{*1}, Mikio TOSHIMA, Yoshihiko TSUKUDA, Shin-ichi MIYAZATO
and Ken-ichi ISHIKAWA

^{*1} Kanazawa Institute of Technology,
7-1 Ohgigaoka Nonoichi Ishikawa, 921-8501 Japan

It is extremely important to measure the strain distribution of reinforced concrete structures and to detect the generated cracks location. Currently, the digital image correlation (DIC) method is applied for measuring technique. However, the DIC method has several problems concerning accuracy; an out-of-plane deformation of structures has an adverse effect on the strain measurement accuracy. For improving the strain measurement accuracy of the DIC method, it is essential to compensate the equivalent strain owing to the out-of-plane deformation of the measurement objects so that it is necessary to measure the three-dimensional surface geometrization using the stereo camera system. This paper discusses the crack generating detection technique of reinforced concrete structure using the three-dimensional method measurement based on the stereo camera system. In particular, the previously our proposed compensation method for the equivalent strain is used. As a result, it is found that the three-dimensional measurement method based on stereo camera system with our compensation method is superior to existing both the strain distribution and the crack generating detection technique, on a basis of a series of experimental examination using the large-scale four-point bending test.

Key Words : Three-Dimensional Measurement, Digital Image Correlation Method, Stereo Measurement System,
Crack Generating Detection, Reinforced Concrete Structure

1. 緒 言

高度成長期に建設された道路橋, 河川施設, 港湾岸壁などの社会資本において, 建設後 50 年以上経過するものの割合が 2030 年頃には約 50% にまで達し, その老朽化対応の方策検討は国家的な課題とされている⁽¹⁾⁽²⁾. 特に, 海岸からの飛来塩分によるビルや橋などの鉄筋コンクリート (Reinforced Concrete : 以下, RC) 構造物の塩害は深刻であることは周知のとおりである. ここで, 塩害とは塩化物イオンがコンクリート内部の鉄筋に浸透し, 鉄筋周囲の不動態皮膜が破壊されて腐食が進行するものである. この塩害によって, かぶりコンクリート (鉄筋を覆うコンクリート) が剥落するとともに, 鉄筋自体の断面が減少する. その結果, RC 構造物の景観が悪化するばかりか, その性能も低下する⁽²⁾. したがって, 現在, RC 構造物の簡便, 且つ正確なヘルスマニタリングの方策が重要視されている⁽³⁾.

RC 構造物のヘルスマニタリングを行う場合, 一般的に構造物のひび割れに注目することが多い⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾. すなわち, 過酷環境下で使用される RC 構造物にひび割れ部位を生じると, 当該部位を起点として腐食要因物質の浸透が促進され, マクロセル (局部) 腐食を誘発することによって構造物の劣化が進行し, 耐久性能は低下する⁽²⁾. この

* 原稿受付 2012 年 2 月 2 日

^{*1} 正員, 金沢工業大学 (〒921-8501 石川県野々市市扇が丘 7-1)

^{*2} 学生員, 金沢工業大学大学院

^{*3} 金沢工業大学大学院

^{*4} 金沢工業大学

^{*5} 正員, 永年会員, 金沢工業大学

E-mail: uneda@neptune.kanazawa-it.ac.jp

ことから、安全・安心・快適な社会資本の維持において、RC 構造物のひずみ分布やひび割れの発生を早期に発見することを通じた、合理的な補修・補強を行うことが必須となる。

このような事柄を背景に、新しいヘルスマonitoring技術として非破壊・非接触計測を可能とする画像解析手法が様々な分野で検討され、たとえば、電子スペックル干渉法⁽⁴⁾、格子法⁽⁵⁾、デジタル画像相関法⁽⁶⁾⁽⁷⁾ (Digital Image Correlation Method : 以下、DIC 法) などによって構造物表面の面内ひずみ⁽⁸⁾を求める手法が提案されている。特に、DIC 法による手法は、変形前後の計測物をデジタルカメラ (以下、カメラ) で撮影した画像を用いるのみによって広範囲のひずみ分布計測が可能という特徴を有し、実構造物に対する検証も一部で進められている⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。さらには、構造物表面の面内ひずみ分布を計測・解析することで、構造物に生じるひび割れの検知に応用できることが著者らによって実験的に明らかにされてきている⁽¹⁸⁾。

DIC 法による面内ひずみ計測手法における問題点を挙げると、変形前後の計測物のカメラ光軸方向における剛体変形 (以下、面外変位) が DIC 法によるひずみ計測精度に悪影響を及ぼすことである⁽⁸⁾。すなわち、面外変位が発生すると撮影画像中における計測物の大きさが拡大あるいは縮小することに起因して、それに付随する見かけ上の面内ひずみが計測される⁽⁸⁾。そして、計測物が大型となる場合には面外変位の問題が発生しやすいと考えられる。したがって、DIC 法によって RC 構造物表面の面内ひずみを計測し、それに基づいてひび割れ発生を検知を高精度に行おうとする場合、以下の2つの工程が必要であると考えられる。すなわち、①ステレオ方式三次元形状計測法⁽⁹⁾を併用し、変形前後における計測物の三次元形状を評価すること、②三次元形状の評価を通じて変形前後における面外変位を把握し、その結果に基づいて面内ひずみの補正処理を行うこと、である。

そこで本研究では、ステレオ方式三次元形状計測法を併用した DIC 法による RC 構造物のひび割れ発生を検知を試みるとともに、大型 RC 梁を対象とした4点曲げ載荷試験によって、その有効性を検証した結果を述べる。

2. デジタル画像相関法を用いたステレオ方式三次元形状計測法による面外変位・ひずみ計測の概要

2・1 デジタル画像相関法を用いたステレオ方式三次元形状計測法の概要

図1(a)に本研究で用いた DIC 法⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を採用したステレオ方式三次元形状計測法の原理を示す。なお、図1(a)において、世界座標系を左カメラの画像素子中心で原点とする X_w - Y_w - Z_w 座標軸、左右カメラの撮影画像における座標系を x - y 座標軸と定義する。本法の原理は一般的にも広く知られているが、左右カメラの定義など本論文特有の内容も含まれることから、ここでは簡便に記述する。図1(a)のとおり左右カメラを設置し、それぞれのカメラで得た撮影画像を左画像、右画像とする。カメラ間距離 L (既知) は左右カメラの画像素子中心間隔として定義され、それが大きいほど高精度であることが知られる⁽⁹⁾。本論文では左右カメラの高さが同一で、各光軸が平行、且つ焦点距離 f が同一として扱う。焦点距離 f に関しては無限遠方を対象とした焦点距離 (公称値 f_0) ではなく、カメラキャリブレーション⁽¹²⁾⁽¹³⁾によって事前に算出した実焦点距離 f_a を用いた。本法では DIC 法によって、左右画像の照合処理を行うことによって計測物の対応点を計測し、各計測点の移動量を算出する。DIC 法による画像照合法に残差二乗和相関⁽¹¹⁾を使用し、加えて応答曲面法によるサブピクセル処理⁽¹⁰⁾を行うことによって、計測精

Fig.1 Schematic of stereo system measurement method using two digital camera

度の向上を図った。

図 1(a)の計測点 P における x, y 軸方向の移動量をそれぞれ $\Delta x[\text{pixel}]$, $\Delta y[\text{pixel}]$, 図 1(a)の左右画像上における計測点 P の位置をそれぞれ $Q_a(x_a, y_a)$, $Q_b(x_b, y_b)$ とするとき, 右画像上での計測点 P の位置である $Q_b(x_b, y_b)$ の x_b, y_b は左画像上での計測点 P の位置である $Q_a(x_a, y_a)$ を基準に考えると, 移動量 Δx 及び Δy との関係から, それぞれ式(1), 式(2)で表すことができる。

$$x_b = x_a + \Delta x \quad (1)$$

$$y_b = y_a + \Delta y \quad (2)$$

なお, $\Delta x, \Delta y$ は図 1(b)のように模式的に表されるものであり, Δy は左右カメラが水平にあるときは 0 となる。

そして, この移動量から, 左画像を基準画像とすると, 計測物の三次元座標計測点 $P(X_{wp}, Y_{wp}, Z_{wp})$ は, 左右画像上における計測点 P の位置に基づいて, 式(3)~(5)によって算出できる。

$$X_{wp} = \frac{L \cdot \sin \theta_b \cdot \cos \theta_a}{\sin(\theta_a + \theta_b)} \quad (3)$$

$$Y_{wp} = \frac{Z_{wp} \cdot \tan \phi_a}{\sin \theta_a} \quad (4)$$

$$Z_{wp} = \frac{L \cdot \sin \theta_b \cdot \sin \theta_a}{\sin(\theta_a + \theta_b)} \quad (5)$$

これを全計測点で行うことによって三次元形状計測を可能にする。なお, $\theta_a, \theta_b, \phi_a$ はそれぞれ式(6)~(8)で与えられる。

$$\theta_a = \pi/2 - \tan^{-1}(x_a/f_a) \quad (6)$$

$$\theta_b = \pi/2 - \tan^{-1}(x_b/f_a) \quad (7)$$

$$\phi_a = \tan^{-1}\left(y_a/\sqrt{f_a^2 + x_a^2}\right) \quad (8)$$

2・2 ステレオ方式三次元形状計測法を用いた面外変位を原因とする面内ひずみの補正方法の概要

本節ではステレオ方式三次元形状計測法を用いた, 計測物の変形前後における面外変位を原因として計測される見かけ上の面内ひずみと, その補正方法を述べる。図 2 に面外変位の定義を示す。図 2 において, 本研究の DIC 法による面内ひずみ (ε_x あるいは ε_y) 計測は, 計測物の変形前後を比較するために左カメラ (左画像) を用いるものとし, 図 1 で示したとおり, 左カメラの座標系を基準とする。図 2 において計測物の左カメラ光軸 (Z_w 軸) 方向への変位が面外変位であり, [1], [2] はそれぞれ面外変位が正, 負の状態を示す。なお, 図 2 においてカメラの実焦点と計測物表面の距離を被写体距離 Z_s とする。図 2 のように, 計測物が Z_w 軸方向に微小に変位 (ΔZ_m) することによって被写体距離 Z_s が変化し, このことを面外変位と呼ぶ。

ここで, 面外変位の発生によって, 撮影画像中の計測物の大きさは拡大あるいは縮小される。DIC 法では撮影

Fig.2 Definition of out-of-plane deformation

画像内で計測物が拡大及び縮小する場合、それぞれ引張方向及び圧縮方向のひずみが発生したとして計測されるため、計測結果には全体に一樣な見かけ上の面内ひずみ分布が表れる。この面外変位を原因とする見かけ上の面内ひずみの大きさ ε_{eq} は、面外変位量 ΔZ_m と被写体距離 Z_s の関係から、式(9)によって表すことができる⁽⁸⁾。このことから、式(9)を用いて算出した見かけ上の面内ひずみ ε_{eq} を、DIC 法による面内ひずみ計測手法⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を用いて算出した面内ひずみから差分することによって、見かけ上の面内ひずみ ε_{eq} が含まれない本来の面内ひずみ (ε_x あるいは ε_y) を求めることができる。

$$\varepsilon_{eq} = \frac{\Delta Z_m}{Z_s} \quad (9)$$

3. 4点曲げ載荷試験における供試体のステレオ方式三次元形状計測法を併用した鉄筋コンクリート構造物のひび割れ発生検知手法の有効性検証

3・1 供試体の概要

3・1・1 鉄筋コンクリート梁の概要

4点曲げ載荷試験の供試体として使用する RC 梁の概要を図3に示す。図3から、RC 梁の外形寸法は梁幅×梁成×梁長さ：80×140×1460mm である。この RC 梁に直径約 13mm の異形棒鋼⁽¹⁴⁾（規格⁽¹⁵⁾：SD345 D13）を主鉄筋とし、かぶり（主鉄筋を覆うコンクリートの厚さ）20mm で埋設した。さらに、直径約 6mm の異形棒鋼（規格⁽¹⁵⁾：SD295A D6）をせん断補強鉄筋⁽¹⁴⁾（以下、スターラップ）とした。以下、この供試体を健全体と呼ぶ。

3・1・2 供試体の電食方式の概要

本研究では健全体とともに、主鉄筋部分に腐食を生じさせた場合の供試体（以下、腐食体）を用いた実験を行うことによって、これらの計測結果から本研究による手法の有効性を確認する。そこで、RC 梁の主鉄筋部分を腐食させる方法として、鉄筋の腐食を比較的短期間で実現でき、腐食量の制御が可能な電食方式を採用した。図4に電食方式の概要を示す。すなわち、3.0wt%の食塩水で供試体の半分の高さまで満たした後、鉄筋を陽極側、銅板を陰極側に接続し、直流安定化電源から電流（0.6A）を32日間流すことで腐食体を作製した。

3・2 4点曲げ載荷試験と実験条件の概要

4点曲げ載荷試験方法の概要を図5に示す。本実験では等曲げ区間を280mmとした。また、載荷途中において任意の載荷を保持させた状態で、公称値 $f_0=60\text{mm}$ のレンズ（株式会社ニコン製 AF マイクロニッコール 60mm

Fig.3 Outline of reinforced concrete beam

Fig.4 Electrical corrosion method

Fig.5 Four-point bending test model

Table 1 Loading conditions

Case	W/o corrosion	With corrosion
Load	4.7	1.9
kN	17.9	8.2

Fig.6 Photo of experimental setup

Table 2 Experimental conditions

Case	W/o corrosion		With corrosion	
Camera	Left	Right	Left	Right
Object distance Z_s mm	2392.12		2392.65	
Actual focal length f_a mm	62.879		62.350	
Size of 1 pixel μm	231.88		233.90	
Distance between cameras L mm	20.000			

Table 3 DIC parameters

Sub-set size S pixel	151
Scan step interval Δm_p pixel	10
Averaged point size N_s	5

F2.8S) とデジタル一眼レフカメラ (株式会社ニコン製 Nikon D200) を用いて供試体を撮影した. 図 5 の赤枠が計測範囲 ($150\text{mm} \times 750\text{mm}$) である. この計測範囲の座標軸を供試体表面の中心を原点とする X - Y - Z 座標軸と定義した. ここで, 表 1 に撮影した载荷条件, 図 6 に 4 点曲げ载荷試験の実験風景の外観を示す. さらに, 表 2 に実験条件, 表 3 に DIC 法における解析パラメータを示す. なお, 本研究ではひずみ分布の誤差低減を目的として平均化処理を施した⁽¹⁾. 図 6 の载荷試験機は供試体を載せた試験台の上昇 (Y 軸正方向) による位置制御方式で供試体に载荷するものである. なお, 次節に示す実験結果における Y 軸方向面内変位のコンター図では载荷点を基準にした.

本実験では左右カメラの位置を正確に合わせるため, 1 台のカメラを用いて供試体の左右画像を撮影した. 具体的には, 1 台のカメラを精密ステージ (最小分解能: $0.5\mu\text{m}$) に取り付けた. そして, カメラをカメラ間距離 L の中心 (計測範囲の中心) 位置にセットし, 供試体に対して, カメラのオートフォーカス機能を用いて焦点を合わせた. そして, 焦点を合わせた状態を維持しながら, 精密ステージを用いてカメラを所定位置に移動させて撮影した. 撮影画像の大きさは $3400\text{pixel} \times 1400\text{pixel}$ であり, この画像を用いて DIC 法による左右画像における供試体の対応点移動量を計測し, 各载荷条件における三次元形状計測を行った. さらに, 各実験条件における無载荷状態の左画像を基準画像, 各载荷状態の左画像を比較画像として DIC 法によって解析し, 各载荷状態における X 軸方向・ Y 軸方向の面内変位, 及び X 軸方向面内ひずみ ϵ_x を計測した. 各実験における被写体距離 Z_s と実焦点距離 f_a は表 2 に示すとおりである.

3・3 ステレオ方式三次元形状計測法を併用した鉄筋コンクリート梁のひび割れ発生検知手法の有効性検証

本節では, 健全体と腐食体の場合における実験結果から, ステレオ方式三次元形状計測法を併用した RC 梁の面内ひずみ分布の計測とそれに基づくひび割れ発生検知手法の有効性を検証する.

3・3・1 供試体が健全体の場合

図7に健全体の各载荷下における三次元形状の鳥瞰図を示す。図7から载荷が増加するに伴い、図中の赤矢印が示す健全体の右下部（载荷点付近）から下部全体に広がるように健全体表面がZ軸の負方向に変形（以下、凹む）した。したがって、健全体の下部全体に変形前後で面外変位が発生したことになる。

図8に健全体の各载荷条件における(I)X軸方向の面内変位分布図、(II)Y軸方向の面内変位分布図を示す。図8(I)、(II)における(a)、(b)はそれぞれ4.7kN、17.9kNの場合の計測結果である。なお、19.1kNの载荷によって健全体は破断した。図中のカラースケールは各軸方向の面内変位量に対応し、図中の黒色部は陰の影響によって除外した範囲（左上部分）も含め、計測対象範囲外を示す。図8から健全体は载荷の増加に伴い、(I)のX軸方向の面内変位分布では、図中の青点線枠が示す右下部の領域からX軸の正方向、(II)のY軸方向の面内変位分布では図中の赤点線枠が示す拘束点周辺の領域からY軸の負方向に変形した。

図9に健全体の無载荷状態を基準とした、各载荷条件における(I)Z軸方向の相対変位（面外変位）分布図、(II)面外変位によって生じることになる見かけ上の面内ひずみ分布 ε_{eq} のコンター図を示す。図9(I)の面外変位分布は、無载荷状態を基準として各载荷条件における変形前後の対応点のZ軸座標を差分した結果である。図9(II)の面外変位による見かけ上の面内ひずみ分布 ε_{eq} は、図9(I)の面外変位分布から式(9)によって算出した。図9(I)(a)、図9(II)(a)から、4.7kNの载荷では図中の青点線枠が示す右下部の領域において約20mmの面外変位を生じており、

Fig.7 Bird's-eye view of three dimensional surface measurement result when RC beam w/o corrosion was tested

Fig.8 Contour diagrams of in-plane deformation when RC beam w/o corrosion was tested

Fig.9 Contour diagrams of out-of-plane deformation and equivalent strain when RC beam w/o corrosion was tested

Fig.10 Crack detection results when RC beam w/o corrosion was tested

これによって約-6000 μ の圧縮ひずみが発生することになる。また、図 9(I)(b), 図 9(II)(b)から、载荷の増加 (17.9kN) に伴い、この約-6000 μ もの見かけ上の圧縮ひずみが発生する領域は、図中の赤点線枠が示す領域にまで拡大した。すなわち、本実験での健全体は载荷に伴う曲げ変形の際、カメラから遠ざかったことになる。また、コンクリートの引張ひずみ限界は一般的に 100~200 μ ⁽¹⁶⁾、コンクリートの乾燥収縮ひずみの上限値は 1000 μ ⁽¹⁷⁾とされているため、上記の見かけ上の面内ひずみ ϵ_{eq} は無視できないレベルである。

図 10 に健全体のひび割れ検知の結果を示す。図 10 において、(I)は破断直前となるひび割れ性状をスケッチした結果であり、このスケッチは破断（この場合は 19.1kN）直前に撮影した载荷 (17.9kN) 状態の画像を拡大し、目視によってひび割れを詳細に観察し検知した結果である。また、(II)は 17.9kN の载荷における健全体の外観写真を示し、(III), (IV)は前者が面外変位による面内ひずみの補正なし、後者が補正ありの場合における X 軸方向の面内ひずみ分布 ϵ_x のコンター図を示す。さらに、図 10(III), (IV)における(a), (b)はそれぞれ 4.7kN, 17.9kN の場合の計測結果を示し、コンター図における白色部は 8000 μ 以上の面内ひずみ ϵ_x が計測された部位を示す。なお、

本実験は 4 点曲げ載荷試験による RC 梁の面内ひずみとひび割れの検知実験であり、 X 軸方向への面内ひずみ ε_x がひび割れの原因となるため、 X 軸方向の面内ひずみ分布 ε_x に基づくひび割れの兆候の評価を行った。

図 10(I)から健全体の破断直前のひび割れ性状において、図中の赤矢印で示す 4 箇所になかなひび割れを撮影画像の拡大による詳細な目視観察によって確認できた。一方、図 10(II)の 17.9kN の外観写真において、大きなひび割れに発展すると考えられる箇所を外観目視によっては図中の赤枠が示す 1 箇所のみ確認にとどまった。このことから、破断直前となる載荷状態であっても、外観目視のみによるひび割れ発生の検知は難しいと言える。

ここで、図 10(III), (IV)から、面外変位による見かけ上の面内ひずみ ε_{eq} の補正の有無における X 軸方向の面内ひずみ分布 ε_x を比較する。図 10(I)と図 10(III)(a), (IV)(a)をそれぞれ比較すると、図 10(III)(a)の面外変位による見かけ上の面内ひずみ ε_{eq} の補正なしの場合においてはひび割れの兆候として、図中の青枠が示す 2 箇所のみ確認できた。しかしながら、図 10(IV)(a)の補正ありの場合においては図中の青枠で示すように、図 10(I)の 4 つのひび割れ箇所すべてにひび割れの兆候を確認できた。したがって、面外変位による見かけ上の面内ひずみ ε_{eq} を補正した本研究の手法を用いることによって、低載荷の状態の段階において破断の原因となるひび割れの兆候が従来よりも詳細に検知可能であると言える。また、17.9kN を載荷後の図 10(I)のスケッチと図 10(III)(b), (IV)(b)の計測結果をそれぞれ比較すると面外変位による見かけ上の面内ひずみ ε_{eq} 補正の有無に関わらず、図中の青枠で示すとおり図 10(I)の 4 つのひび割れ箇所すべてにおいて、ひび割れの兆候を確認することができた。しかしながら、図 10(III)(b)の面外変位による見かけ上の面内ひずみ ε_{eq} の補正なしの場合、健全体における X 軸の正方向の部位ほど面内ひずみ ε_x の値は減少する。これは、図 9 から健全体は載荷に伴う曲げ変形の際、健全体の右下部が凹むことによって、見かけ上の圧縮面内ひずみ ε_{eq} が発生したことが原因であると考えられる。この見かけ上の圧縮面内ひずみ ε_{eq} によって、本来は図 10(IV)(b)の補正ありの場合のように健全体の全体にひび割れの兆候が発生していたにも拘わらず、図 10(III)(b)では確認できなかったものと考えられる。

さらに、図 10(IV)(a)で示した低載荷の 4.7kN の場合、供試体表面の下部における X 軸座標で 400mm 付近や 600mm 付近で比較的大きな面内ひずみ ε_x が計測された。この結果は 4 点曲げ載荷試験における載荷点 (630mm) の近傍であることに起因すると考えられる。すなわち、本実験では載荷点に丸棒を使用したのが、供試体の変形に伴って丸棒が回転する機構を採用していない。したがって、載荷に伴う供試体の変形に起因して、載荷点 (丸棒) で供試体との間に摩擦力が発生し、それが 600mm 付近における面内ひずみ ε_x の結果に影響を与えたと考えられる。

加えて、図 10(I)のスケッチと図 10(IV)の計測結果を比較すると、ひび割れ検知位置には 10mm オーダでの差異が見受けられる。しかしながら、大型構造物の補修はミリメートルオーダではなくセンチメートルあるいはメートルオーダで行われることから、実用上を考えると十分な精度で計測できていると考えられる。また、図 10(I)のスケッチは既述のとおり破断直前に撮影した載荷状態の画像を拡大し、目視によって詳細にひび割れを検知した結果である一方で、画像計測結果は載荷前 (無荷重状態) を基準画像、各載荷状態を比較画像として DIC 法によって解析した結果であることから、画像計測結果の座標は無荷重状態に基づくものとなる。このことも、図 10(I)と図 10(IV)を比較したとき、ひび割れ検知位置に 10mm オーダ程度の差異を生じた理由と考えられる。

3・3・2 供試体が腐食体の場合

図 11 に、図 7 と同様に各載荷条件における腐食体の三次元形状の鳥瞰図を示す。図 11(b)の 1.9kN の載荷では腐食体全体が Z 軸の正方向に変形した。しかしながら、載荷の増加に伴って同図(c)の 8.2kN では腐食体全体が凹み、無載荷状態とほぼ同じ位置に腐食体に変形した。また、11.5kN の載荷で破断した。

図 12 に、腐食体の各載荷条件における(I) X 軸方向の面内変位分布図、(II) Y 軸方向の面内変位分布図を示す。ここでも図 8 と同様に、図中のカラースケールは各軸方向の面内変位量に対応し、図中の黒色部は陰の影響によって除外した範囲 (左上部分) も含め、計測対象範囲外を示す。図 12 から腐食体において、図 8 の健全体と同様に載荷の増加に伴い、(I)の X 軸方向変位分布では図中の青点線枠で示す右下部の領域が X 軸の正方向、(II)の Y 軸方向の面内変位分布では図中の赤点線枠によって示す拘束点周辺の領域が Y 軸の負方向に変形した。

図 13 に、図 9 と同様に腐食体の各載荷条件における(I)面外変位分布図、及び(II)面外変位による見かけ上の面内ひずみ分布 ε_{eq} のコンター図を示す。図 13(I)(a), (II)(a)から 1.9kN の載荷では、図中の青点線枠で示す腐食体の拘束点周辺の領域においては約 13mm も Z 軸の正方向へ面外変位を生じ、約 5000 μ の見かけ上の引張面内ひずみ ε_{eq} が発生した。さらに、腐食体全体においても約 3000 μ の引張面内ひずみ ε_{eq} が発生した。また、図 13(I)(b), (II)(b)

Fig.11 Bird's-eye view of three dimensional surface measurement result when RC beam with corrosion was tested

Fig.12 Contour diagrams of in-plane deformation when RC beam with corrosion was tested

から、載荷の増加 (8.2kN) に伴い、腐食体全体の表面は凹み、面外変位による見かけ上の面内ひずみ ε_{eq} が約 400 μ 発生した。すなわち、腐食体は載荷に伴う曲げ変形の際、低載荷の 1.9kN の状態では腐食体全体が Z 軸の正方向への面外変位を生じたが、載荷の増加に伴って腐食体全体が凹み、8.2kN の載荷では無載荷状態とほぼ同じ位置に変形したと言え、不安定な面外変位状態となった。

図 14 に腐食体のひび割れ検知の結果を示す。なお、各図(I)~(IV)は図 10 の各項目と同様である。図 14(I)から腐食体の破断後におけるひび割れ性状において、図中の赤矢印で示す 3 つの大きなひび割れと、青矢印で示す 2 つの小さなひび割れが確認できた。一方、図 14(II)の破断直前となる 8.2kN の載荷状態の写真からは腐食体表面が腐食していることが確認できるが、この腐食に伴う腐食模様の斑によってひび割れに発展すると考えられる箇所は目視では確認できなかった。

ここで、図 14(III), (IV)から、面外変位による見かけ上の面内ひずみ ε_{eq} の補正の有無における X 軸方向の面内ひずみ分布 ε_x を比較する。図 14(I)と図 14(III)(a), (IV)(a)をそれぞれ比較すると、図 14(III)(a)の面外変位による見かけ上の面内ひずみ ε_{eq} の補正なしの場合ではひび割れの兆候は確認できない。しかしながら、図 14(IV)(a)の補正ありの場合では、低載荷にも拘らず図中の青枠と赤枠によってそれぞれ示すように、図 14(I)の大きなひび割れは 2 箇所、小さなひび割れでは 2 箇所すべてにおいて、その周辺に面内ひずみ ε_x の斑が生じた。そのため、図 14(IV)(a)

Fig.13 Contour diagrams of out-of-plane deformation and equivalent strain when RC beam with corrosion was tested

Fig.14 Crack detection results when RC beam with corrosion was tested

の上記のひび割れ箇所では大きな圧縮面内ひずみ ϵ_x が発生し、その周辺に面内ひずみ ϵ_x の斑が生じた場合もひび割れの原因になると考えられる。

また、図 14(I)と図 14(III)(b)、(IV)(b)における 8.2kN の载荷をそれぞれ比較すると、面外変位による見かけ上の面内ひずみ ϵ_{eq} の補正の有無に関わらず、図中の青枠と赤枠で示すとおり、図 14(I)のひび割れ箇所すべてにひび割れの兆候を確認できた。さらに、図 14(III)(a)の面外変位による見かけ上の面内ひずみ ϵ_{eq} の補正なしの場合よりも、図 14(IV)(a)の補正ありの場合のほうが小さなひび割れの兆候をより確認しやすいことが明らかとなった。

以上の検討結果から、RC 梁を対象とした 4 点曲げ载荷試験において、本研究のステレオ方式三次元形状計測法を併用した DIC 法による RC 構造物のひび割れ発生検知手法は有効であると言える。

4. 結 言

本研究において得られた結果を要約すると、以下のようになる。

- (1) RC 構造物における構造物表面の面内ひずみとひび割れ発生検知手法の計測精度の向上を目的として、ステレオ方式三次元形状計測法を併用した DIC 法による RC 構造物のひび割れ発生検知手法を検討し、その有効性を確認した。
- (2) RC 梁を対象とした 4 点曲げ載荷試験において、本研究の面外変位による見かけ上の面内ひずみを補正した面内ひずみ及びひび割れ発生検知手法は有効であり、低載荷の場合においても、ひび割れ発生を高精度に検知できる。

最後に、RC 構造物に生じる面内ひずみ分布を高精度に計測し得る結果は、あくまでも安全側の判定結果であり、大規模なひび割れを生じる前段階で高精度に面内ひずみ分布を検出できる手法の確立が重要であると言える。その一つが本論文で提案する手法であり、たとえば、実構造物の周辺に定点モニタリングシステムを設置することによって、本手法の具現化を可能にすると考えられる。そして、このような手法を使用することで、工学的・定量的な判断に基づく合理的で、安心・安全、且つ持続可能な社会資本整備が可能になる。一方、本手法は実構造物のみならず、たとえば、研究レベルとしての RC 構造物用新規材料・構造の評価を行う上で非常に有効であり、この場合には本論文で示したとおり比較的簡便なセットアップで評価可能という極めて高い有用性があると言える。

謝 辞

本研究の一部は金沢工業大学若手教員研究助成の援助を受けて行われた。記して謝意を示す。

参 考 文 献

- (1) 国土交通省, 国土交通白書 2008 平成 19 年度, ぎょうせい, (2008), p. 50.
- (2) 花岡大伸, 矢野真義, 宮里心一, “鉄筋コンクリート梁の腐食形態と腐食量が曲げ性状に及ぼす影響”, 土木学会論文集 E, Vol. 63, No. 2 (2007), pp. 300-312.
- (3) コンクリート委員会, コンクリート技術シリーズ No.76 コンクリート構造物のヘルスマニタリング技術, 土木学会, (2007), pp. I-1-I-6.
- (4) 出水 淳, 松田 浩, 中島朋史, 浜岡 広, “非接触全視野計測によるコンクリートの材料試験”, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1 (2006), pp. 473-478.
- (5) 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 (2010), pp. 94-106.
- (6) Shih-Heng, T., Ming-Hsiang, S., and Wen-Pei, S., “Development of Digital Image Correlation Method to Analyze Crack Variations of Masonry Wall”, *Sadhana*, Vol. 33, No. 6 (2008), pp. 767-779.
- (7) 出水 淳, 松田 浩, 山下 務, 浜岡 広, “光学的全視野計測法による RC はりのひび割れ発生・進展の可視化”, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 2 (2006), pp. 781-786.
- (8) 畝田道雄, 松石正克, 岩田節雄, 石川憲一, “撮影画像を用いたひずみ分布計測法に関する研究—ひずみ計測精度に及ぼす被測定物の面外変位の影響とその補正—”, 精密工学会誌, Vol. 73, No. 6 (2007), pp. 659-664.
- (9) 吉澤 徹, 最新光三次元計測, (2006), pp. 32-68, 朝倉書店.
- (10) 畝田道雄, 柴原正和, 松石正克, 石川憲一, 岩田節雄, 北村幸嗣, “サブピクセル画像処理を用いた構造物の非接触変形・応力計測法に関する研究”, 精密工学会誌, Vol. 72, No. 3 (2006), pp. 360-365.
- (11) 畝田道雄, 奥畑 峻, 石川憲一, “デジタル画像相関法を用いた全視野変形・ひずみ測定の精度評価研究”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 763 (2010), pp. 587-594.
- (12) デジタル画像処理編集委員会, デジタル画像処理, (2006), pp. 252-261, 画像情報教育振興協会.
- (13) Zhang, Z., “A Flexible New Technique for Camera Calibration”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 11 (2000), pp. 1330-1334.
- (14) 太田 実, 鳥居和之, 宮里心一, 鉄筋コンクリート工学, (2009), pp. 1-19, 森北出版.
- (15) 日本工業規格, 鉄筋コンクリート用棒鋼 JIS G3112, (2010).
- (16) 吉川弘道, 鉄筋コンクリートの解析と設計 - 限界状態設計法と性能設計法 -, (2004), p. 76, 丸善出版.
- (17) コンクリート委員会, コンクリート標準示方書 施工編, 土木学会, (2008), p. 232.

- (18) 畝田道雄, 岩田節雄, 松石正克, 芦田史史, 岡田 潤, 石川憲一, “撮影画像を用いたひずみ分布計測法に関する研究—高ひずみ条件下における計測精度及び疲労亀裂発生位置の推定に関する実験検証—”, 精密工学会誌, Vol.75, No.3 (2009), pp.437-442.
-