非接触変位場計測によるコンクリート構造物 のき裂検出システムの開発

日下 貴之¹・野村 泰稔²・日根野 陽介³・久木 祥平⁴

¹非会員 立命館大学教授 理工学部機械工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail:kusaka@se.ritsumei.ac.jp

²正会員 立命館大学助教 理工学部機械工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail:y-nomura@fc.ritsumei.ac.jp

³非会員 立命館大学大学院生 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail: rm009088@ed.ritsumei.ac.jp

⁴非会員 立命館大学大学院生 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail: rm009088@ed.ritsumei.ac.jp

近年、航空機や社会基盤施設等、大規模構造物の安全性確保の観点から健全性をリアルタイムに監視する技術（構造ヘルスモニタリング）が注目されている。健全性を評価する上で、き裂の検出は極めて重要であり、これまでに数多くの方法が提案されている。コンクリート構造物の表面き裂を評価する場合、設置性や作業性の観点から、赤外線や可視光画像を用いた非接触式の方法が有望視されており、現在、対象物の変位場やひずみ場などの力学情報を抽出する研究が行われている。本研究では、コンクリート構造物を対象として、デジタル画像相関法から得られるき裂周辺の力学情報に着目し、表面の変位場からき裂を検出するシステムを開発することを試みた。各種様々な表面状態の供試体に対して実証試験を行い、開発システムの有効性を検証した。

Key Words : structural health monitoring, crack detection, digital image correlation

1. はじめに

近年、航空機や社会基盤施設といった大規模構造物の安全性を確保することへの要求が高まっており、センサを用いてその応答から構造物の健全性を自動的に診断する技術（構造ヘルスモニタリング, SHM）が注目されている。構造物の健全性を評価する上で、構造物の劣化や破壊を引き起こす大きな要因の1つであるき裂を検出することは特に重要であるため、き裂の発生と進展を評価することを目的とした SHM システムの研究は数多い。コンクリート構造物の表面き裂を評価する場合、設置性や作業性の観点から、赤外線や可視光画像を用いた非接触の方式が有望である。その中でも可視光画像を用いた手法は低価格かつ簡便であり、これにパターン認識技術を組み合わせたき裂評価システム等が既にいくつも提案されている^{1)~5)}。例えば、Abdel-Qader らは、高速ハール変換など、各種様々なフィルタ理論を用いてき裂検出を行い、高速ハール変換がき裂のエッジ検出において最も信頼性が高いことを明らかにしている¹⁾。河村らは、デジタル画像からのひび割れ抽出に必要とされる画像処理手法の組み合わせや、これらの画像処理に伴う各種パラ

メータの最適化に対話型遺伝的アルゴリズムを利用した手法を提案している²⁾。また、Hutchinson らは、パラメータの推定に ROC 解析を用いた Canny フィルタとウェーブレット変換によるき裂検出を行い、その有効性を示している³⁾。これらの方法は、ある一定の条件下では専門技術者による診断と同等かそれ以上の精度を達成しているものの、画像上に現れるき裂そのものの特徴を形態学的視点から評価する手法であることから、視認困難なき裂に対してはシステムの原理上、誤検出は避けられない。これに対し、現在、可視光画像からデジタル画像相関法を用いて対象物の変位場やひずみ場などの力学情報を抽出する研究が行われるようになってきている^{6),7),8)}。Choi らは圧縮荷重下におけるコンクリート表面の不均一な変形の測定に成功し⁷⁾、佐川らは一軸圧縮下におけるモルタル供試体表面のひずみ解析において解析パラメータを適切に設定すれば従来のひずみゲージ法と同等の精度でひずみを解析できることを明らかにしている⁸⁾。

本研究では、コンクリート構造物を対象として、デジタル画像相関法から得られる変形情報およびき裂周辺の力学情報に着目し、表面の変位場からき裂を検出するシ

図-1 き裂検出アルゴリズム

図-2 き裂と離散化要素の関係

システムを開発することを試みた。獲得される表面の変位場から見かけ上の最大主ひずみおよびその方向を推定し、これらの値を用いて、き裂開口時におけるき裂開口量に相当する評価パラメータを算出することを考えた。このき裂評価パラメータはき裂開口量に相当するものであり、検査要件により指定される検出対象のき裂開口量の閾値との比較を通じて、定量的にき裂を検出することが可能となると考えられる。

以下では、提案するき裂検出システムの概要を示し、表面の変位場情報からき裂開口量へ換算する方法について述べる。また、き裂開口量を推定する際に生じる誤差について理論的に明らかにし、それを低減するための方法について述べる。そして、各種様々な表面状態の供試体に対して実証試験を行い、開発システムの有効性を明らかにする。

2. き裂検出システム

(1) システム概要

提案システムのフローチャートを図-1に示す。対象物のき裂進展前の画像（参照画像）をあらかじめ取得しておき、測定対象となる画像（評価画像）を取得する（図中1）。参照画像と評価画像をいくつかの正三角形領域に分割して離散化を行い（図中2）、デジタル画像相関法を用いて参照画像と評価画像の間の節点の変位場を算出する（図中3）。この節点の変位場からひずみ-変位関係式を適用することで各要素のひずみが算出でき、三角形領域内の平均ひずみとして各要素の最大主ひずみ ε_1^* とその方向 θ_1^* が得られる（図中4）。本研究ではこれらの最大主ひずみ ε_1^* および主方向 θ_1^* を利用することでき裂開口時におけるき裂開口量に相当する評価パラメータ δ_{crk} （以下、き裂評価パラメータ δ_{crk} と称す）を各

要素で算出し（図中5）、構造物の検査要件から決定される閾値との比較を通じてき裂を評価する（図中6）。

(2) システム原理

図-2に示すように内部にき裂を含む三角形要素を考える。この要素の節点の変位ベクトルから算出された見かけ上の最大主ひずみ ε_1^* には材料そのものに生じているひずみ ε_{mat} の他にき裂開口変位に起因する成分 ε_{crk} が含まれる。すなわち、 ε_1^* は次式のように与えられる。

$$\varepsilon_1^* = \varepsilon_{mat} + \varepsilon_{crk} \quad (1)$$

き裂先端を除きき裂周辺では、ひずみ ε_{mat} はき裂進展に伴う応力開放によって小さくなる。特に、本研究が対象としているコンクリートのような脆性材料ではこの傾向が顕著になることから、き裂開口変位に起因する成分 ε_{crk} は次式のように与えられる。

$$\varepsilon_{crk} \approx \varepsilon_1^* \quad (2)$$

一方、脆性材料の破壊は最大主応力に支配され、き裂は主方向に対し垂直方向に進展すると仮定できるため、き裂進展方向 $\hat{\theta}_{crk}$ を三角形要素の見かけ上の主方向 θ_1^* を用いて次式のように表すことができる。

$$\hat{\theta}_{crk} \approx \theta_1^* + \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

提案システムでは式(2)、(3)で与えられる ε_{crk} と $\hat{\theta}_{crk}$ を用いてき裂評価パラメータ δ_{crk} を算出する。

(3) き裂評価パラメータの算出

本研究では三角形要素内を開口幅 δ のき裂が進展方向 θ で直線的に進展すると仮定する。三角形要素に対

図-3 離散化要素に対するき裂経路

するき裂経路は図-3に示すように3通りに場合分けできる。これらのき裂経路をそれぞれ Crack path 1, Crack path 2, Crack path 3 とする。き裂開口による変位は節点 i, j, k それぞれで起こるが、簡単のため Crack path 1 では節点 i のみが、Crack path 2 では節点 j のみが、Crack path 3 では節点 k のみが以下のように変位すると考える。

$$\begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\delta \sin \theta \\ \delta \cos \theta \end{Bmatrix} \quad (\text{Crack Path 1}) \quad (4)$$

$$\begin{Bmatrix} u_j \\ v_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\delta \sin \theta \\ \delta \cos \theta \end{Bmatrix} \quad (\text{Crack Path 2}) \quad (5)$$

$$\begin{Bmatrix} u_k \\ v_k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \delta \sin \theta \\ -\delta \cos \theta \end{Bmatrix} \quad (\text{Crack Path 3}) \quad (6)$$

ここで、前述のように $\delta = \hat{\delta}_{\text{crk}}$, $\theta = \hat{\theta}_{\text{crk}}$ と近似すると、ひずみ-変位関係式を用いてき裂開口量 δ の推定値としてき裂評価パラメータ $\hat{\delta}_{\text{crk}}$ が次式のように与えられる。

$$\hat{\delta}_{\text{crk}} = \frac{6L\hat{\varepsilon}_{\text{crk}}}{2\sqrt{3} + 2\sqrt{3}|\cos \hat{\theta}_{\text{crk}}|} \quad \left(\text{Crack Path 1 ; } \begin{matrix} 0 \leq \hat{\theta}_{\text{crk}} < \pi/3 \\ 2\pi/3 < \hat{\theta}_{\text{crk}} < \pi \end{matrix} \right) \quad (7)$$

$$\hat{\delta}_{\text{crk}} = \frac{6L\hat{\varepsilon}_{\text{crk}}}{2\sqrt{3} + |3 \sin \hat{\theta}_{\text{crk}} - \sqrt{3} \cos \hat{\theta}_{\text{crk}}|} \quad (\text{Crack Path 2 ; } \pi/3 < \hat{\theta}_{\text{crk}} < \pi) \quad (8)$$

$$\hat{\delta}_{\text{crk}} = \frac{6L\hat{\varepsilon}_{\text{crk}}}{2\sqrt{3} + |3 \sin \hat{\theta}_{\text{crk}} + \sqrt{3} \cos \hat{\theta}_{\text{crk}}|} \quad (\text{Crack Path 3 ; } 0 < \hat{\theta}_{\text{crk}} < 2\pi/3) \quad (9)$$

ただし、 $\hat{\varepsilon}_{\text{crk}}$ はき裂開口に起因する成分であり、 $\hat{\theta}_{\text{crk}}$ は

き裂進展方向である。また L は離散化された三角形要素の一辺の長さである。ここで、3通りのき裂経路における $\hat{\theta}_{\text{crk}}$ の範囲が重複していることに注意を要する。すなわち、き裂進展方向 $\hat{\theta}_{\text{crk}}$ に対して、き裂経路は常に2通り存在し、画像から得られるき裂進展方向 $\hat{\theta}_{\text{crk}}$ からき裂経路を同定できない。

これらの式(7)から式(9)を用いた場合に生じる理論上のき裂開口量のずれ率を図-4に示す。縦軸は推定すべきき裂開口量 δ とその推定値であるき裂評価パラメータ $\hat{\delta}_{\text{crk}}$ とのずれ率を表し、横軸はき裂進展方向 θ を示している。図中に示される線は式(7)から式(9)で計算されるき裂評価パラメータの理論上のずれである。ここで、き裂がある要素に対し、き裂経路：Crack Path 1で、方向： $0 \leq \theta < \pi/3$ で進展する場合を考える。この時、画像から推定されるき裂進展方向 $\hat{\theta}_{\text{crk}}$ から、き裂経路として、Crack Path 1およびCrack Path 3が候補となり、き裂評価パラメータの換算式としてはそれぞれ式(7)と式(9)が候補となるが、実際のき裂経路と一致しない場合、正しい方の式(7)を用いたときの値に対して、実際のき裂経路と異なる方の式(9)を適用すると、き裂評価パラメータ $\hat{\delta}_{\text{crk}}$ には-25.0 ~ 33.3%のずれが生じることとなる。このことは、き裂が他のき裂経路：Crack Path 2およびCrack Path 3に進展する場合も、そのき裂経路の同定に失敗する場合、同様のずれが生じる。

一方、各き裂経路において、き裂進展方向を Crack path 1 では $\hat{\theta}_{\text{crk}} = 0$, Crack path 2 では $\hat{\theta}_{\text{crk}} = 2\pi/3$, Crack path 3 では $\hat{\theta}_{\text{crk}} = \pi/3$ と近似することで、式(7)から式(9)は次式のように統合される。

$$\hat{\delta}_{\text{crk}} = \frac{\sqrt{3}L\hat{\varepsilon}_{\text{crk}}}{2} \quad (10)$$

図-5に式(10)を用いてき裂開口幅を同定した場合に生じる理論上のずれを示す。縦軸は推定すべきき裂開口量 δ とその推定値であるき裂評価パラメータ $\hat{\delta}_{\text{crk}}$ とのずれ

図4 き裂評価パラメータの理論上のずれ

図5 統合化されたき裂評価パラメータの理論上のずれ

図6 試験状況(単位:mm)

率を示し、横軸はき裂進展方向 θ を示している。図中に示される線は式(10)で計算されるき裂評価パラメータの理論上のずれである。図-5から明らかなように、ずれは全てのき裂経路において-25 ~ 0%生じるものの、前述の式(7)~(9)と比較して大幅に低減されることが分かった。そこで本研究では、各要素において式(10)で表されるき裂評価パラメータ δ_{crk} を用いてき裂開口量を推定し、き裂検出を行うこととした。

3. 実証試験

(1) 試験概要

提案システムの有効性を検証するため、コンクリート梁の供試体に曲げ試験を行い、き裂発生状況をモニタリングした。図-6に試験状況の模式図を示す。負荷方式はき裂の発生位置を事前に予測出来ない条件にするため、2つの荷重点に挟まれた区間内のどこにでもき裂が発生し得る4点曲げとした。また、不安定なき裂進展を防止するため底面にはCFシートを貼付している。供試体は市販の無筋コンクリート梁で、表面が無地の状態のもの(供試体A)、表面に塗装を施したもの(供試体B)、表面をタイル貼りしたもの(供試体C)の3種類を用いた。本研究では、文献⁹⁾に従い、早期に補修の必要があると判定される開口量として、0.2 mm以上のき裂を検出対象とする。なお、画像の撮影には有効画素数3456×2304 pixelのCCD

カメラを用い、三角形要素の一辺の長さ L は90pixelとした。また、き裂の実測にはクラックゲージを用いた。

(2) 試験結果

図-7に供試体 A に対する試験結果を示す。図 7(a)に供試体 A のき裂進展後の評価画像および変位場の取得結果を示す。また、図-7(b)に変位場から獲得された見かけ上の最大主ひずみ分布を示す。コンター図から明らかなように、コンターの濃い高ひずみ領域と実際のき裂分布が概ね一致していることが分かる。ただし、正確なき裂の発生位置、長さ、開口量を把握することは容易ではない。これらの見かけ上の最大主ひずみからき裂評価パラメータ δ_{crk} が式(10)により計算される。図-7(c)は測定対象範囲内の検証要素を色分けしたコンター図である。実際にき裂が通っており、かつ δ_{crk} もしきい値以上を示した検出成功要素は緑色、実際にはき裂が通っているが、 δ_{crk} がしきい値を超えなかった検出欠落要素は青色、実際にはき裂は通っていないが、 δ_{crk} がしきい値以上を示した検出過剰要素は赤色で示している。また、実際のき裂分布も上から重ねて表示している。図-7(c)に示されるように、提案システムの評価結果は実測結果と比較して若干の検出欠落 (11 個) と過剰検出 (9 個) が見られるものの、き裂の位置、進展方向および長さがほぼ一致していることが分かる。また、前述の通り、図-7(b)に示された最大主ひずみのコンター図と実際のき裂分布も概ね一致しているが、各要素において、き裂評価パラメータ

δ_{crk} を算出し、閾値処理を施すことによりき裂検出精度が改善していることが確認できる。なお、画像から得られたき裂進展方向 $\hat{\theta}_{crk}$ を考慮することで算出されるき裂分布を図-7(d)に示す。これは各要素の重心位置からき裂進展方向 $\hat{\theta}_{crk}$ を与えたことにより得られた結果である。供試体 B および供試体 C については、き裂進展方向 $\hat{\theta}_{crk}$ を与えて出力されるき裂分布の結果と実測結果を評価する。

図-8 に供試体 B に対する試験結果を示す。図-8(a)に供試体 B のき裂進展後の評価画像を示し、クラックゲージによる実測結果と提案システムによる評価結果をそれぞれ図-8(b),(c)に示す。なお、図-8(b)に示す実測結果は曲げ試験後に表面の塗装を剥がしてき裂を計測したものである。評価画像から供試体の表面き裂の発生・進展状況の視認は極めて困難であり、パターン認識処理により画

像上のき裂を形態学的視点から評価する方法ではき裂検出は極めて困難であると考えられる。一方、提案システムの評価結果は実測結果と比較して若干の検出欠落と過剰検出が認められるものの、き裂の位置、進展方向および長さは実測結果とほぼ一致していることが分かる。

図-9 に供試体 C に対する試験結果を示す。図-9(a)にき裂進展後の評価画像を示し、クラックゲージによる実測結果と提案システムの評価結果をそれぞれ図-9(b),(c)に示す。実測結果は曲げ試験後にタイルを剥がして表面のき裂をクラックゲージにより計測したものである。提案システムの評価結果は実測結果と比較してき裂分布に若干の相違が見られ、検出欠落と過剰検出が生じているものの、き裂の位置、進展方向および長さは実測結果と概ね一致しており、き裂の発生を正確に予測することができている。

以上のことから、提案システムを用いることでき裂の視認が容易な状況だけでなく、き裂の視認が困難な状況、またき裂が不可視な状況においても、高精度にき裂を評価することができたとと言える。

4. 結言

本研究では、コンクリート構造物を対象として、デジタル画像相関法から得られるき裂周辺の力学情報に着目し、表面の変位場からき裂を検出するシステムを開発した。各種表面処理を施した供試体に対して実証試験を行い、提案システムの有効性が確認された。以下に本研究を通じて得られた知見をまとめる。

- ・ 要素内の見かけ上の最大主ひずみとその方向に着目し、これらをき裂開口量に換算して評価パラメータとすることによってき裂を高精度に検出することができた。またその際、要素内のき裂経路を同定することなく、き裂進展方向を近似することで、き裂開口量の推定が可能であることが分かった。
- ・ 実証実験を通じて、提案システムはき裂の視認が容易な状況だけでなく、き裂の視認が困難な状況下においてもき裂を高精度に検出できることが明らかとなった。さらに、表面がタイルで覆われき裂が不可視の状況においても、コンクリート表面に発生するき裂を正確に検知することに成功した。

本システムでは、き裂評価の際に用いる画像として、評価時点での画像の他に、き裂が発生あるいは進展する前のベースラインとなる画像を必要としている。また、デジタル画像を用いる手法であることから、き裂の検出精度は画像の解像度に大きく依存し、用いる画像にはある程度の精細さが要求される。本システムの適用範囲を

より広げるために、ベースライン画像を必要としないベースラインレス手法の提案や、サブピクセル単位での高精度な変位同定手法の導入などが今後の課題として考えられる。

参考文献

- 1) Abdel-Qader, I., Abudayyeh, O. and Kelly, M. E.: Analysis of edge detection techniques for crack identification in bridges, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 255-263, 2003.
- 2) 河村 圭, 宮本文穂, 中村秀明, 砂糖亮: 対話型遺伝的アルゴリズムによるデジタル画像からのひび割れ抽出, 土木学会論文集, Vol. 742, pp. 115-131, 2003.
- 3) Hutchinson, T. C. and Chen, Z.: Improved image analysis for evaluating concrete damage, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 20, No. 3, pp. 210-216, 2006.
- 4) 山口友之, 橋本周司: 既設コンクリート構造物におけるひび割れ幅の実画像計測 (特集実利用マシンビジョン技術), 電気学会論文誌 C, 電子・情報・システム部門誌, Vol. 742, No. 4, pp. 605-614, 2007.4
- 5) 広兼道幸, 野村泰稔, 楠瀬芳之: コンクリート構造物のひび割れ形状に基づく損傷度分類への線形 SVM の適用, 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 4, pp. 739-749, 2008.
- 6) Sutton, M.A., Orteu, J.-J., Schreier, H., *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*, Springer, 2009.
- 7) Choi, S. and Shah, S. P.: Measurement of deformations on concrete subjected to compression using image correlation, *Experimental Mechanics*, Vol. 37, No. 3, pp. 307-313, 1997.
- 8) 佐川康貴, 尾上幸造, 内野正和, 松下博通: 一軸圧縮力を受けるモルタル供試体のひずみ計測へのデジタル画像相関法の適用性に関する検討, 実験力学, Vol. 7, No. 2, pp. 20-26, 2007.
- 9) 阪神高速道路公団監修, 都市高速道路研究会編著: 都市高速道路における道路橋の点検・補修マニュアル, 2004.

(2013. 7. 12 受付)

DEVELOPMENT OF CRACK DETECTION SYSTEM FOR CONCRETE STRUCTURES USING NON-CONTACT DISPLACEMENT MEASUREMENTS

Takayuki KUSAKA, Yasutoshi NOMURA, YOSUKE HINENO and Shouhei HISAKI

A convenient and reliable SHM (Structural Health Monitoring) system based on non-contact displacement measurements was proposed for applying to the crack growth monitoring of concrete structures in this study. The displacement vectors of the nodes of discretized elements on digital image are measured with a CCD camera and an image processor. The maximum principal strain and the principal direction, which are calculated from the displacement vectors, are the prime parameters for crack identification. In this study, crack initiation and growth behavior is detected by evaluating the crack opening displacement in each discretized element from maximum principal strain and the principal direction. The validity of the proposed SHM system was demonstrated through the experimental results using a four-point bending specimen.