

局所損傷を有する構造部材の性能評価に向けた画像ひずみ計測の適用性検討

筑波大学大学院 学生会員 ○佐藤 開

筑波大学 正会員 西尾 真由子

1. 目的

老朽化が進む既存橋梁の耐荷性能評価において、センシングで得る応答から実際の劣化損傷状態を反映する数値解析モデルを構築して用いるデータ同化を考える。ひずみゲージや加速度センサなどを用いた構造モニタリングに関する既往研究は多数あるが、その多くの場合で、センシングデータは構造物の全体的な応答である。一方、例えば鋼製桁橋の耐荷性能は桁端部の腐食など局所的な損傷が影響していることが指摘されており¹⁾、このような実構造物で耐荷性能解析を行うには局所的な劣化損傷の影響のセンシングが必要である。その1つとして期待されるのが非接触で高密度にひずみ分布を計測できる画像計測法で、各分野で適用例も多いデジタル画像相関法(以下 DIC)である。局所的な損傷を有する構造部材のひずみ分布を DIC で取得しデータ同化に適用できれば、構造物の耐荷性能と局所損傷の関係の定量的評価が可能となると考えられる。本研究では局所損傷を有する構造部材の応答に着目し、鋼製平板供試体の引張試験によって DIC の局所損傷評価への適用可能性を検証した。

2. デジタル画像相関法

デジタル画像相関法(DIC)は、スペックルパターンと呼ばれる模様を施した構造物の表面をカメラで撮影し、その画像をサブセットと呼ばれる小領域に分割しその移動量を相互相関関数により算出することで、供試体の変位及びひずみを計測する手法である。本研究では、Matlab で動作するフリーウェアの Ncorr²⁾ を用いて、DIC 計測を実施した。DIC では、サブセットのサイズを大きくして間隔を短くするとひずみの分散誤差が低減され高い計測精度が得られるが、計算負荷も増加するうえ、ひずみ分布の過剰な平滑化により定常誤差が増え局所損傷の評価が困難となる³⁾。また、スペックルパターンや撮影条件も精度や解像度に影響を与える重要な因子である。本研究の実験では事前検討によって、サブセット半径 25 px、サブセット間隔 5 px、ひずみ半径 15 サブセットとして検証を行った。

3. 鋼製部材引張試験の概要

本研究は、鋼構造部材の応答における局所損傷の影響を捉えることを考えるため、平板部材引張試験の装置を作製して実験を行った。供試体は、両端をボルト接合の治具で挟んだ鋼製平板として4体(#1-#4)作成した。鋼材はSS400、寸法は引張方向の長さ300mm、幅250mm、厚さ3.2mmである。表面に、図-1に示すように、スプレー塗料で黒色の下地と白色のスペックルパターンを塗装した。また裏面には、比較用のひずみゲージ(ゲージ長2mm)を引張方向に10点貼り付けた。平板供試体は引張治具に11個のストリップボルトで固定されており、ボルトを撤去し境界条件変状を模擬できるものとした。試験装置は供試体を設置する鋼製フレームに最大300kN油圧ジャッキを取り付けロードセルで手動載荷を行うものとした。また、供試体の直上1.9mにDIC撮影用のCMOSカメラ(510万画素、レンズ焦点距離35mm、解像度2560×1440px、分解能0.256mm/px)を設置した。実験の様子を図-2に示す。



図-1 スペックルパターン



図-2 引張試験機

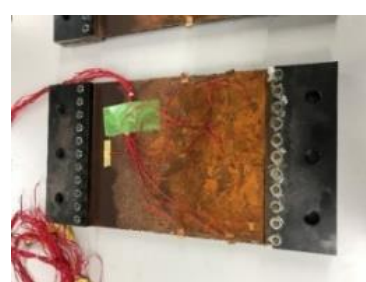
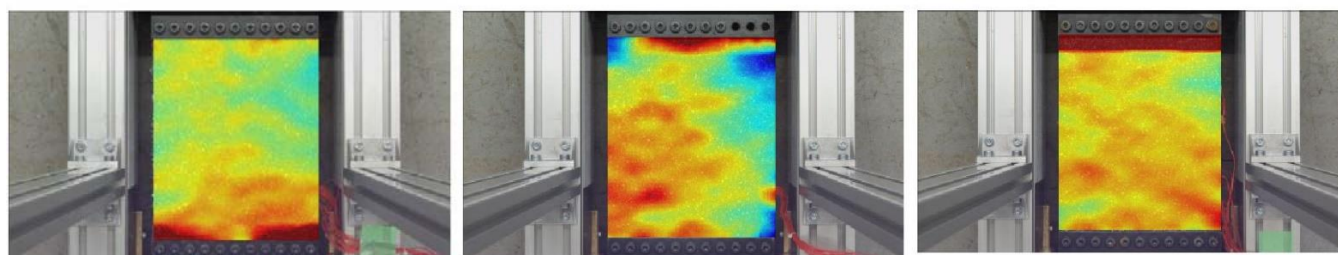


図-3 腐食供試体

キーワード 鋼部材 局所損傷 腐食 デジタル画像相関法 ひずみ分布計測 有限要素モデル

連絡先 〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1 TEL 029-853-6192



(a) 初期状態

(b) ボルト外しによる境界条件変化状態

(c) 部分的に腐食させた状態

図-4 引張載荷時の DIC によるひずみ分布計測結果

引張試験は、初期の健全状態、アダプタのボルトを端部3点外して境界条件変化を与えた状態、そして供試体に部分的に腐食を与えた状態について実施した。いずれのケースにおいても、約100kNまで約10kNごとに静的載荷し、DIC計測と合わせてひずみゲージ計測、アダプタ間距離を測る変位計測を行った。腐食は、4体の供試体のうちの2体に対してアダプタ付近に3.5%食塩水を霧吹きで1日1～2回、1回約20ml、10日間噴霧して生成した。

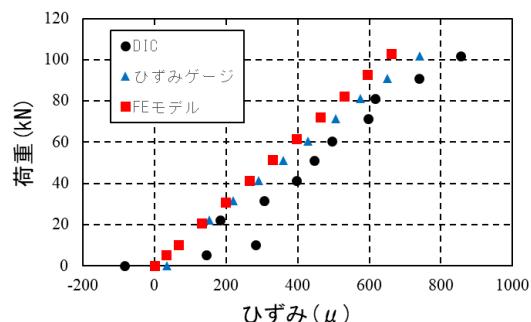


図-5 DIC、ひずみゲージ及び FEM の比較

4. ひずみ分布計測結果と考察

図-4に約100kN載荷時での各状態のDIC計測結果を示す。上側が固定端、下側が油圧ジャッキ側の端部である。この図では、面内ひずみ分布が一樣とならず両端のアダプタ付近で影のように大きなひずみの領域が見える結果となった。これはスペックルパターンの影響、光線や露光時間などの撮影条件の影響が考えられる。図-5には、健全状態における平板中央部でのひずみ値の比較をDICとひずみゲージの計測値、また汎用ソフトAbaqusによる有限要素解析で得られた軸方向ひずみ値について示す。有限要素解析では供試体と同じ寸法と材質の平板をシェル要素で作成し、実験と整合する境界条件を与えて弾塑性解析を行った。その結果、ひずみゲージ計測値と解析結果は載荷の全域でおおむねよく一致する結果が得られた。一方、DICと比較すると、81.0kN載荷時にDICで $617\mu\epsilon$ 、ひずみゲージが $575\mu\epsilon$ で、相対誤差は6.8%であった。しかし、 $300\mu\epsilon$ 以下の領域では、ひずみゲージ計測値や解析値との乖離が著しく、相対誤差も大きい結果となった。その上で、ボルトを外して境界条件変化を与えたケースのひずみ分布では、その端部付近で局所的に大きなひずみが生じている分布が図-4(b)より観察できる。一方、図-4(c)の腐食ケースでは、図の上側で0.1mm程度の板厚減少が生じ、ボルト周りも腐食が生じていたが、DICで得たひずみ分布からは、その影響を明確には捉えられなかった。鋼桁橋端部で見られるような局所的な腐食を再現できる実験手法への検討と合わせて、画像撮影法やDICによるひずみ推定法への検討を行っていく必要がある。

5. 結論

本稿では、構造部材の応答における局所損傷の影響をひずみ分布で捉えて評価することを目指し、平板部材供試体の引張試験によってDICの適用性を検討した。その結果、DICではひずみゲージ等と比較してひずみ値が大きくなる傾向にあったが、局所的な境界条件変状による不均一なひずみ分布の計測可能性を認識できた。腐食供試体では板厚の変化が小さくひずみ分布の変化を明確に捉えるには至らなかったが、今後はスペックルパターンの影響や撮影条件への検討、DICのひずみ推定法への検討を進め、高密度な画像ひずみ分布計測による構造部材の局所変状による応答変化を、データ同化に適用可能な精度の計測を試みる。

参考文献

- 1) 有村ら: 桁端部に腐食劣化の生じた鋼 I 桁橋の耐荷性能評価に関する解析的検討, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol73. P232-247, 2017.
- 2) Ncorr v1.2 公式ウェブサイト, <http://www.ncorr.com/index.php>
- 3) International Digital Image Correlation society: A Good Practices Guide for Digital Image Correlation, 2018.