

インフラ設備の余寿命を短時間で評価する画像診断技術

Image-Based Diagnostic Technology for Rapid Assessment of Remaining Service Life of Infrastructure Facilities

*設計技術開発センター(工博)

要 旨

サステナブルな社会を実現するために、老朽化したインフラ構造物の安全性と補修の必要性を評価する検査技術が重要である。構造物にき裂が生じると進展して故障につながるおそれがあるが、インフラのような大型構造物のき裂を検査するには多大な時間を要する。三菱電機は、短時間で構造物内部のき裂を広範囲にわたって検査する手法として、デジタル画像相関法(Digital Image Correlation : DIC)で画像から表面変形を測定し、表面変形とき裂の内部形状の相関を学習したAIを用いてき裂の内部形状を推定するCrack Shapes Prior EAP(CSP-EAP)法を開発した。今回、当社のAI技術“Maisart”(マイサート)の一つであるき裂推定手法のCSP-EAP法を、橋梁(きょうりょう)や電力機器の構造物の溶接不溶着部の検査に適用できるように改良した。従来はひずみ(変位の一次微分)の変化量をAIの入力に用いていたが、溶接不溶着部のように表面にき裂が表れる場合では測定誤差が増大しやすいという課題があった。AIへの入力をひずみよりも測定誤差の影響を受けにくい変位に変更し、き裂の開口方向と面外方向の2方向の変位に変更することで、測定誤差を低減した。この技術を用いて、溶接不溶着部を模した試験片のき裂を推定し、推定結果が実際のき裂とおおむね同じ形状で、面積も約3%の誤差で一致していることを確認した。き裂の大きさと形状から余寿命を高精度に推定し、インフラ構造物の補修要否・メンテナンス時期の判断がこの技術を用いて短時間で可能になる目途を得た。

1. ま え が き

サステナブルな社会を実現するためには、既存の社会インフラや電力設備を安定的に保全することが重要である。社会インフラや電力設備の健全性を把握するためには、構造物のき裂の有無や進展状況を定期的に検査する必要がある。特にインフラ構造物の余寿命を適切に評価するには、き裂の内部形状を把握することが不可欠である。インフラや電力設備のような大型の構造物を広範囲に検査する場合、超音波探傷のような接触型の検査手法では検査時間が長くなる。広範囲を短時間で検査するため、当社はドローンなどに搭載可能なカメラを用いて検査する手法を開発した。カメラを用いた検査は主に表面のき裂に限られる。そのため、表面情報から内部のき裂形状を推定する技術が必要である。そこで、DIC⁽¹⁾で得られる表面のひずみ分布からき裂の内部形状を推定する手法としてCSP-EAP法⁽²⁾を開発し、当社のAI技術Maisartの一つとして適用を進めている。

CSP-EAP法では、破壊力学に基づく多数のき裂形状の候補と、それぞれが発生した場合に予測される表面の変形を用いてき裂を推定する。この報告では、大型構造物で多く用いられる溶接継手の不溶着部の検査を想定し、開発手法を検証した結果を示す。先行研究⁽²⁾では入力の変形としてひずみ(変位の一次微分)を用いていたが、き裂の開口で局所的に大きな変形が生じるとひずみの測定誤差が大きくなるという課題があった。そこで、本稿では入力をひずみから変位分布に変更することでき裂開口による誤差の影響を低減した。改良手法を検証するために、表面に現れている溶接不溶着部を模した試験片の画像から得た変位分布を入力に用いて、き裂の形状を推定した。その結果、従来手法では面積比で10%以上あった誤差を3%に低減し、更に高い精度で補修要否・メンテナンス時期の評価を行えることを確認した。

2. き裂形状を推定する手法の改良

今回は、橋梁などに用いられる溶接継手の不溶着部を対象に、開発手法で内部き裂の形状を推定する。対象の形状とき裂推定の模式図を図1に示す。図1左は不溶着部を持つ溶接継手の模式図であり、この側面を撮影した画像からき裂の形状を推定する。図1中央は繰り返し荷重での撮影タイミング、図1右上は撮影画像からDICで得た変位分布、図1右下はその変位分布から逆解析によって推定したき裂の開口量の分布を示す。ステレオカメラ三次元の変位をDICで求めた。

図1左に示すように、溶接不溶着部のき裂は測定面に現れており、DICで計測した変位量は、図1右上に示すように溶接不溶着部の開口によって大きな値になる。このような場合、変位の急激な変化によって、ひずみ計算時の誤差が増大しやすい。そこで、先行研究⁽²⁾では入力にひずみを用いているが、今回は更に測定誤差の影響を受けにくい変位を入力に用いることで、この測定誤差の影響を低減した。また、先行研究⁽²⁾では荷重方向のひずみだけを入力としていたが、き裂の仮想面での形状を精度良く推定するために、面内方向(図1左Z方向)と面外方向(図1左Y方向)の2方向の変位を入力するようにき裂推定モデルを改良した。き裂の内部形状によっては観測面が湾曲する。この湾曲をき裂の推定に取り入れるために、面外方向の変位を入力に追加した。

入力を面内・面外の2方向の変位とするため、観測値である表面の変位からき裂の形状を求める観測方程式は、次のとおりである。

$$\tilde{U}_Z = H_Z \cdot u + \beta_Z, \quad \tilde{U}_Y = H_Y \cdot u + \beta_Y \quad \dots\dots\dots (1)$$

$\tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y$: 表面のZ方向及びY方向の変位分布の測定結果

u : き裂の開口量の分布

β_Z, β_Y : 計測誤差を含む誤差を離散化したベクトル

H_Z, H_Y : それぞれ、 U_Z と U_Y と u の関係を表す定数行列

ただし、 U_Z と U_Y はそれぞれZ方向とY方向の誤差を含まない表面の変位量であり、有限要素法で求められる⁽²⁾。

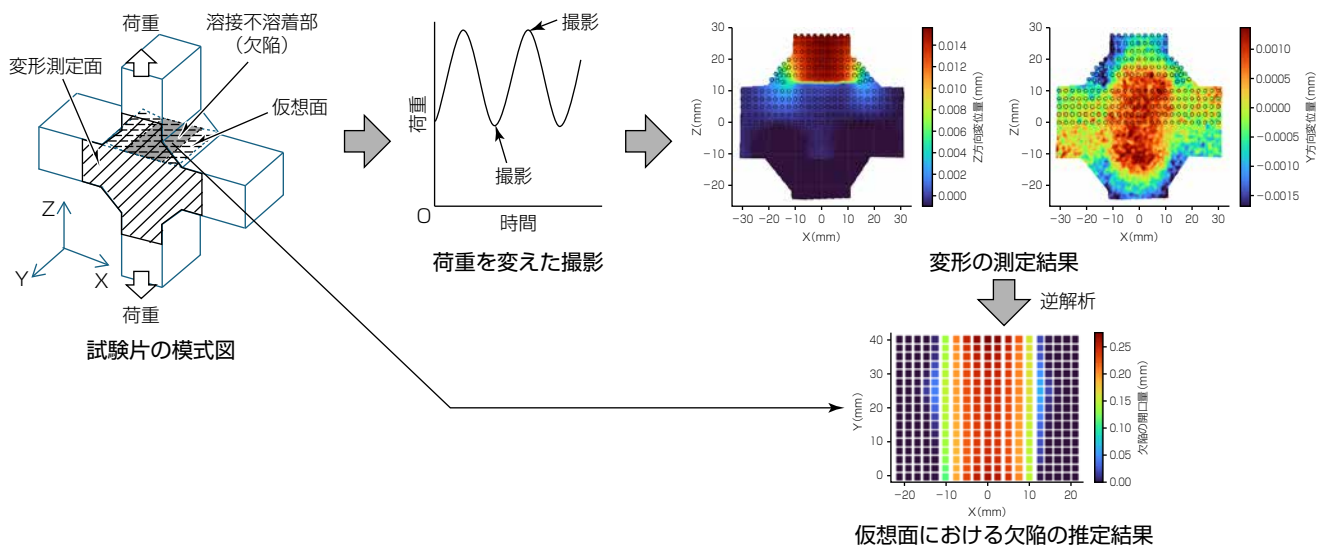


図1 - き裂の推定の模式図

3. き裂推定手法

CSP-EAP法では、発生し得るき裂形状の候補(以下、“候補形状”という。)を準備し、各候補形状に対する表面の変形を解析で求めて、測定結果と比較してき裂形状を推定する。候補形状として、溶接不溶着部の想定形状と、そこからき裂が進展した形状を作成した。破壊力学に基づいてき裂が進展した形状を作成し、合計56,747個の候補形状を用意した。

作成した候補形状からき裂を推定するために、AIの予測計算に用いられるベイズ推定の一つであるEAP法⁽³⁾を使用し、各候補形状の事後分布を求める。なお、事後分布は、事前分布(観測前の各候補形状の確率)と尤度(ゆうど)(観測結果に基づく各候補形状の生起確率)の積に比例して与えられる⁽⁴⁾。この研究では事前分布を $Pri[\gamma] = 1/56,747$ の一様離散分布と仮定し、全候補形状が等しく発生し得るとした。

図2に尤度を求める模式図を示す。ある候補形状(γ)の尤度は、解析で算出した表面のZ方向変位分布とY方向変位分布とDICの測定結果($\tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y$)との差で算出する。具体的な尤度 $L[\gamma | \tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y]$ の算出式は次のとおりである。

$$L[\gamma | \tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y] = N[U_Z(\gamma) - \tilde{U}_Z | \mu, \Sigma] \times N[U_Y(\gamma) - \tilde{U}_Y | \mu, \Sigma] \quad \dots\dots\dots (2)$$

γ : 候補形状の番号を示すパラメーター
 $N[U | \mu, \Sigma]$: 平均ベクトル μ , 分散・共分散行列 Σ の多次元正規分布の,
 U における確率密度

μ と Σ の値は、次のとおりである。

$$\mu = 0, \Sigma = \begin{bmatrix} \sigma^2 & 0 \\ 0 & \sigma^2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(2)では、Z方向変位分布とY方向変位分布がDICでの計測結果に近いほど候補形状の尤度が大きくなる(その形状である確率が高くなる)ことを表している。

上記の $Pri[\gamma]$ と尤度 $L[\gamma | \tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y]$ を用いて、観測量 $\tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y$, γ を使用した事後分布は、次のとおりである。

$$Pos[\gamma | \tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y] = \frac{L[\gamma | \tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y] Pri[\gamma]}{\sum_{\gamma} L[\gamma | \tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y] Pri[\gamma]} \quad \dots\dots\dots (4)$$

最後に、各仮想面のき裂の開口量 $u(\gamma)$ の事後分布 $Pos[\gamma | \tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y]$ での重み付き平均で、き裂の推定結果 $\tilde{u}$ を得る。

$$\tilde{u} = \sum_{\gamma} u(\gamma) Pos[\gamma | \tilde{U}_Z, \tilde{U}_Y] \quad \dots\dots\dots (5)$$

このようにして、開発手法では、面内方向と面外方向の二つの変位を入力し、破壊力学に基づいて作成した事前分布、尤度分布からバイズ推定でき裂の形状を推定する。

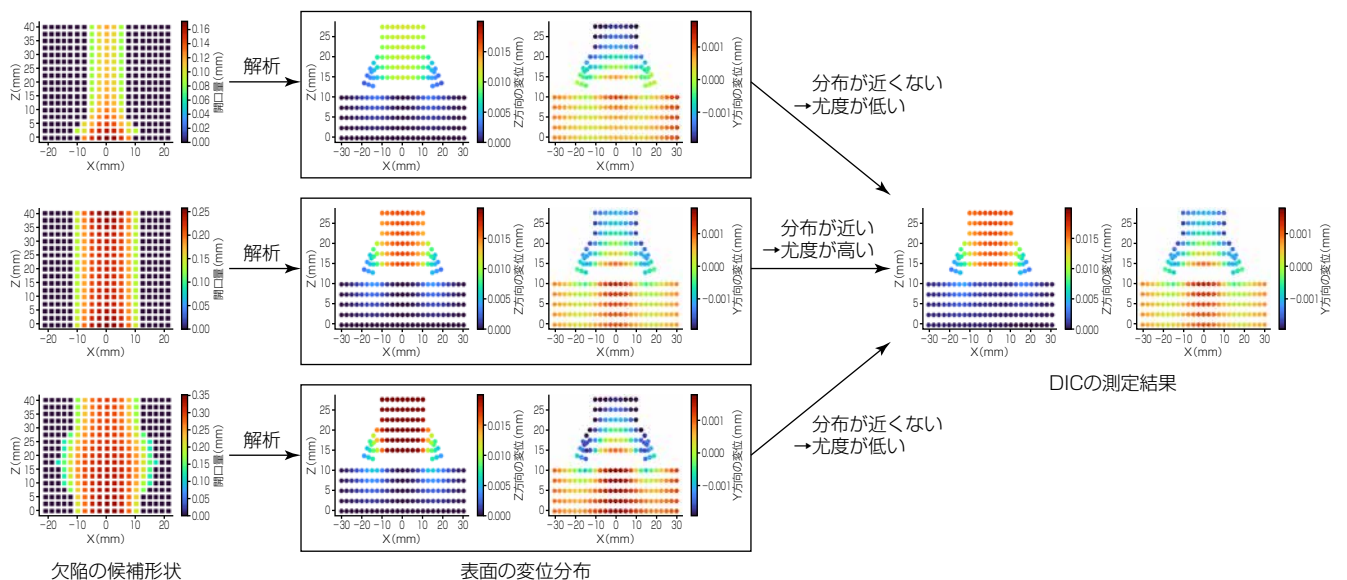


図2-各候補形状の表面の変位分布から尤度を算出する模式図

4. 推定方法の検証結果

この章では、推定方法の検証結果について述べる。

4.1 試験片と試験条件

図3(a)(b)に試験片の形状を示す。この試験片の表面に、DICで変位を計測しやすくするために、ランダムパターン(図3(c))を塗布した。荷重が異なるタイミングで撮影した画像から、DICで変位分布を取得した。

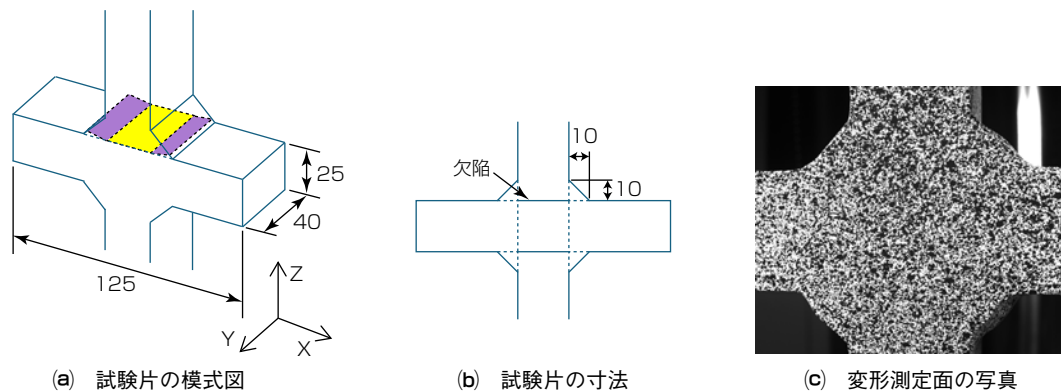


図3-試験片の模式図と、表面のランダムパターン

4.2 計測結果

図4にDICで得られた変位分布を示す。座標軸は図3の軸と同一である。図4(b)のY方向はき裂面に対して面外方向の変位であり、撮影面が盛り上がる(凸状)場所では値が正に、凹(くぼ)む(凹状)場所では値が負になっている。図4の(a)(b)それぞれに表示されている丸印は、式(2)の $\tilde{U}_z$ と $\tilde{U}_Y$ として入力した点である。

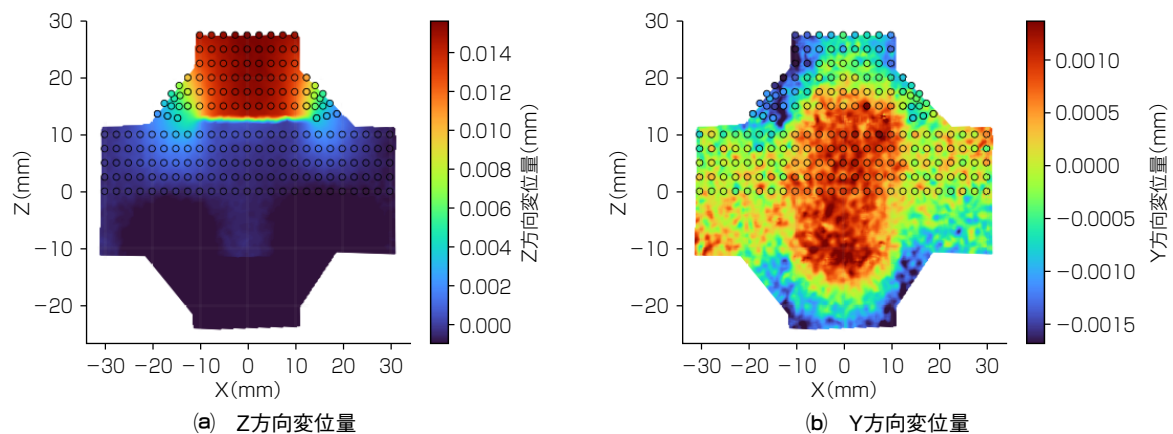


図4-DICの測定結果

4.3 検証結果

図5に、試験片の破面の写真(図5(a))、実際のき裂形状(図5(b))、3章の方法でき裂を推定した結果(図5(c))、及び今回の手法の開口量の推定結果(図5(d))と先行研究の手法での推定結果(図5(e))を示す。図5(c)のき裂の領域を決定する際は、先行研究⁽²⁾を踏襲し、き裂の最大開口量の10%をしきい値として、図5(d)と図5(e)の赤破線の領域で示す。き裂の推定結果は、先行研究の手法では実際のき裂と面積が10%以上異なるが、この手法では約3%の誤差で一致し、形状もおおむね一致していることを確認できた。

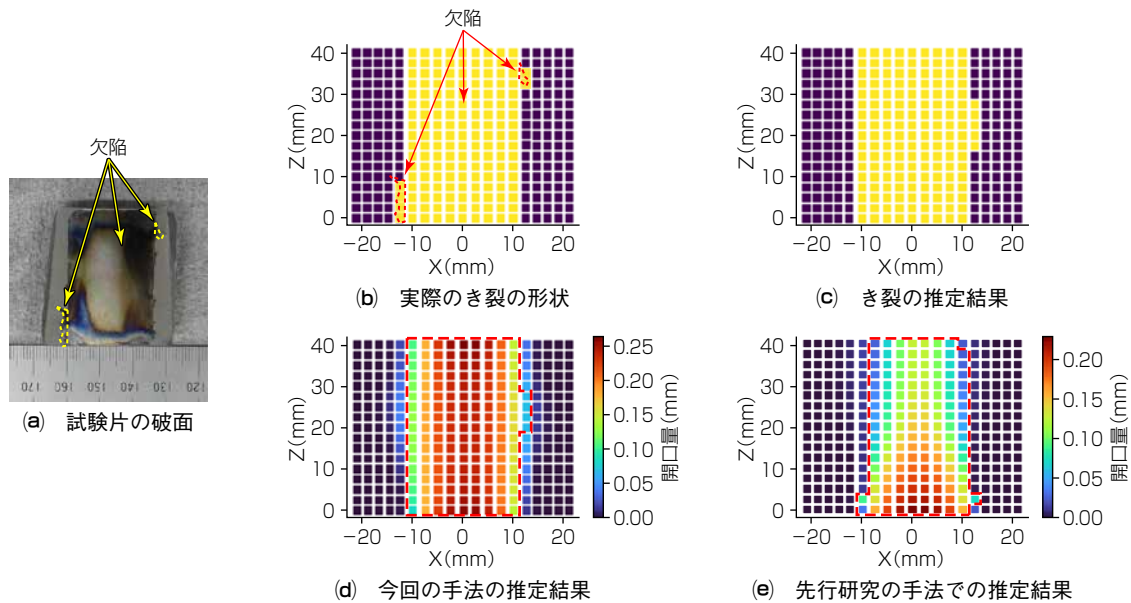


図5-実際のき裂と推定結果の比較

5. む す び

当社のAI技術Maisartの一つである、表面に現れていないき裂を表面のひずみ分布から予測する技術を、橋梁や電力機器での溶接不溶着部のき裂検査に適用できるよう改良した。改良した手法では、入力をひずみから変位分布に変更した。さらに、先行研究⁽²⁾が最大変化方向のひずみだけを入力としていたのに対して、今回は推定精度の向上を目的に面内及び面外の変位を入力とするようアルゴリズムを改良した。改良後のアルゴリズムを用いて溶接不溶着部を模した試験片のき裂を推定した。き裂の推定結果は実際のき裂とおおむね形状が一致し、面積も先行研究の手法では10%以上の誤差が生じていたところ、3%未満に改善した。き裂の形状と大きさを正確に把握することは、余寿命の評価を行う上で非常に重要であり、インフラ構造物の補修要否・メンテナンス時期の判断がこの技術を用いて短時間で可能になる目途を得た。

参 考 文 献

- (1) Sutton, M., et al. : Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, 81 (2009)
- (2) Hana, N., et al. : Crack Identification by Digital Image Correlation Method Using Crack Shape as Prior Information: Journal of Pressure Vessel Technology, 145, No.4, 041601 (2023)
- (3) Mazzoni, T. : Expected A Posteriori Estimation in Financial Applications (2008)
- (4) 竹村彰通：新装改訂版 現代数理統計学，学術図書出版社（2020）