塗膜割れパターンによる疲労き裂画像診断 システムの開発

小西 拓洋¹・小屋 裕太郎²・梶原 仁³

¹正会員 東京都市大学 総合研究所 教授 (〒158-0082 東京都世田谷区等々力 8-15-1)

E-mail: konishi@tcu.ac.jp

²工博 東京都市大学 総合研究所 特別研究員 (〒158-0082 東京都世田谷区等々力 8-15-1)

E-mail: yk85_tsubata@yahoo.co.jp

³工学 首都高速道路株式会社 保全技術課 課長代理 (〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関 1-4-1)

E-mail: m.kajihara136@shutoko.jp

疲労き裂点検の効率化を目標に、塗膜割れ画像から疲労き裂の可能性を判定するシステムの開発を行った。判定は、まず塗膜除去前の画像より塗膜割れを抽出し、これをパターン化する。同様の手法で、過去の疲労き裂をパターン化した疲労き裂データベースを準備し、塗膜割れのパターンと、データベースのパターンとのマッチングを行うことで、両者の一致度の高さとで判定を行うものである。塗膜割れ抽出には、画素強度値による輪郭抽出に加え、塗膜割れ特有の色の違いを利用した色フィルタを適用した。またパターン化には、標準的な溶接ビードを模したテンプレートへの画像投影を利用した。パターンマッチング解析を行うことで、実用レベルの検出精度が達成できた。

Key Words: image processing, fatigue crack, detection, paint crack, pattern matching

1. はじめに

点検・診断の分野において、デジタル画像を利用した診断技術は、目視では困難な高精度な識別・比較性能を利用した技術として、欠陥検知などに利用されるようになってきた。疲労き裂の点検においては、図-1に示すような塗装の割れを発見し、磁粉探傷試験など非破壊検査を実施しき裂の有無を確認している。これに対し、鋼材表面に生じた塗膜割れの画像を利用して、塗膜下のき裂の有無を判定する疲労き裂の画像診断システムを開発し実画像にて検証を行った。点検・診断に適用できる検出性能が確認できたことから、その手法、性能確認試験結果について報告する。

(1) 開発の背景

橋梁の点検において、疲労き裂の点検については専門家による近接目視が義務化されている。これら損傷の発見のためには損傷部位に近接して点検を行うことが重要であるが、実際には点検困難な箇所を含め、全ての損傷位置に近接し磁粉探傷試験などの非破壊検査を実施するには大きな手間とコストを要

する。

現在、疲労き裂の点検においては塗膜割れを見つけ、その全数に対して塗膜を除去し磁粉探傷試験を実施するのが一般的である。しかし実際には塗膜割れから疲労き裂が発見される割合は10~20%程度といわれ疲労き裂の有無とは無関係に発生する塗膜割れが非常に多いことが分かっている^{1),2)}。今後き裂点検の効率を上げるためには、非破壊検査前に検査対象を選別するための、簡易で経済的な一次スクリーニングや、塗膜上からの非破壊検査によりコストのかかる磁粉探傷試験回数を減らすことが有効と考えられる。このような理由から塗膜除去を必要とせず、効率よく塗膜下の疲労き裂の有無を推定する手法が求められている。

一方、近年格段な進歩がある画像撮影や画像処理技術を利用して、損傷画像を健全度診断に利用する試みが報告されはじめている。画像を利用した点検の利点は、デジタル化された画像データを利用することで、特別な機器を必要とせずに損傷情報を取得し加工することが出来ることである。またアクセス困難箇所や狭隘部等の点検では、画像を利用したデータが有益な点検情報となると考えられる。画像

図-1 塗膜割れからのき裂検出（磁粉探傷試験）

図-2 疲労き裂診断システムの流れ

処理による損傷検知は土木以外の自動車、機械、情報科学の分野などで進んでおり、工場製品の欠陥検出などに、すでに広く利用されている^{3), 4), 5)}。土木構造物の損傷検知についても研究が進められており、画像による変形、ひずみの計測⁶⁾や、き裂評価⁷⁾、コンクリートのひび割れを画像により把握する処理手法⁸⁾、ひび割れ開口量の画像計測手法⁹⁾などが報告されている。

このような背景から、本研究では塗膜割れ画像から画像処理技術を利用して塗膜下のき裂を検知する手法の開発を試みた。疲労き裂の判定手法と、実画像による識別性能試験結果について報告する。

(2) き裂検知対象

本システムによる検知対象は、主として主桁ウェブの面外ガセット（図-1 参照）、横桁フランジと主桁ウェブ接合部の回し溶接部を想定している。これらの部材では回し溶接部からのき裂発生が大半を占め、さらに進展経路も、類似のパターンを示す。さ

らに類似の溶接ディテールを持つウェブギャップ板、垂直補剛材上端の回し溶接部に対しても本システムを適用することが可能である。

疲労き裂の発生位置や進展経路については点検報告写真などに記録されており、疲労き裂の表面パターンがある程度特定されている。回し溶接部には微小なビード底割れ、融合不良などの溶接欠陥が溶接止端部に生じやすく、さらに回し溶接止端部は応力が溶接線直交方向に生じ、かつ止端形状による応力集中が高いことから疲労き裂が発生しやすいと考えられている。一方、塗膜割れについても回しビード止端付近において塗膜厚が不均一となりやすいこと、加えてこの位置にひずみが集中することによりき裂と同様の割れパターンを示しやすいと考えられる。従って塗膜割れパターンとき裂パターンの類似性に着目して、疲労き裂の有無が判定できる可能性がある。

2. き裂診断のための画像処理

(1) 画像診断システムの概要

図-2 に本システムの画像データの処理の流れを示す。システムは大きく分けると、塗膜割れ抽出処理部とパターン化処理部より構成される。

塗膜割れ抽出処理部では画像から塗膜割れのみを抽出する。次にパターン化処理部で、抽出した塗膜割れ画像を共通のテンプレート上に投影する。この投影処理により様々な形状の溶接ビードに発生する塗膜割れを、パターン化して比較判定の処理を行うことが出来る。

塗膜割れと別に、過去に撮影された疲労き裂画像に対して同様のパターン化処理を適用し、き裂パターンデータベースを準備する。塗膜割れのパターンと疲労き裂パターンデータベースとの照合をパターンマッチングにより行い、パターン画像同士の一一致度を計算する。この一致度をもとに疲労き裂判定を行う。

(2) 塗膜割れの抽出

本システムでは塗膜割れ抽出のために図-3 に示すように、輪郭抽出処理と色フィルタ処理の2系統のフィルタを用いた抽出を別々に行い、それぞれで得られた2値画像の共通部分を取り出すことで塗膜割れを抽出する。

a) 輪郭抽出フィルタリング

画像の中で塗膜割れは画素の強度変化が大きいという特徴がある。そこで画素の強度変化部分を強調

図-3 輪郭抽出フィルタリング過程

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

図-4 ラプラシアン・フィルタ係数マトリクス

する処理として輪郭抽出フィルタリングを行う。輪郭抽出はいくつかのフィルタやノイズ除去処理を順に使用する。図-3に輪郭抽出のために使用したフィルタおよび処理結果を示す。

塗膜割れ画像には、塗膜の抽出を阻害する多くのノイズが存在することから、そのまま画素強度による輪郭抽出を行ってもノイズが共に抽出される場合が多い。このためまず最初に、Laplacian Of Gaussian (LOG) フィルタを用いた。LOG フィルタは、ラプラシアン・フィルタにノイズ除去フィルタの一つであるガウシアン・フィルタを組み合わせたフィルタである。

ラプラシアン・フィルタは、着目画素の周りの画素強度の空間的勾配を計算する手法¹⁰⁾であり、4近傍（上下左右の画素）の画素を用いてx方向、y方向の2階微分を行い、それを足しあわせた結果を出力するフィルタである。ラプラシアン・フィルタによる輪郭抽出は、雑音も同時に強調される効果があるため平滑化等の処理と組み合わせて雑音を低減する処理が行われることが多い。

ガウシアン・フィルタはフィルタ中心に近い画素に対して大きな重みをつけて平滑化を行う加重平均化フィルタの一種で、重み付けにガウス分布を用いる。原画像の画素 (i, j) の画素値を $f(i, j)$ としたとき、ガウシアン・フィルタを適用した画像 $g(i, j)$ は式 (1) となる。但し、 n はフィルタの窓のサイズとする。ガウス分布 $G(x, y)$ は式 (2) で表される。ここでは n

$= 5$, $\sigma = 0.4$ とした。

LOG フィルタはガウシアン・フィルタ結果にラプラシアン・フィルタを作用させることにより2階微分を行うもので結果は式 (3) で表される。画像処理においては、ラプラシアン・フィルタは着目画素を含む周辺9画素に、図-4に示す係数マトリクスを掛け、和を取ることで輪郭強調画像 $h(i, j)$ を簡単に計算することが出来る。

$$g(i, j) = \sum_{x=-n}^n \sum_{y=-n}^n G(x, y) f(i+x, j+y) \quad (1)$$

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

$$h(i, j) = \nabla^2 g(i, j) \quad (3)$$

次に輪郭強調された画像 $h(i, j)$ に対してノイズ除去フィルタを施し、グレー画像を白黒画像に変換（二値化）する。ノイズ除去フィルタは Wiener フィルタ¹¹⁾を用いる。Wiener フィルタは劣化した画像の復元に用いられる方法で、画像の劣化過程を推定することでフィルタ設計を行う方法である。入力画像 I_p のある画素を中心とした行数 N 、列数 M の近傍 η を定める。一般的には領域幅を奇数とすれば着目点に対して処理領域幅が対称となる。領域幅は除去するノイズのサイズにより決められるが、ここではノイズの最大画素数を2～3画素と想定し領域幅は6行×6列に設定した。領域幅を6とした場合、着目点に対し2:3に領域が分割される。近傍 η の範囲内にある画素の輝度値の平均値を μ_η 、分散の値を σ_η^2 とし、画像全体に分布しているノイズの強さを表すノイズ分散を v_n^2 としたとき、Wiener フィルタを適用した出力画像 I_q の画素の値は次式で求められる。

$$I_q(x, y) = \mu_\eta + \frac{\sigma_\eta^2 - v_n^2}{\sigma_\eta^2} (I_p(x, y) - \mu_\eta) \quad (4)$$

ここでノイズ分散 v_n^2 の値は入力画像 I_p から真値を得ることができないことから、全ての画素で算出された近傍 η の範囲内の分散 σ_η^2 の平均値と仮定する。式 (4) はある画素 $I_p(x, y)$ の近傍 η の範囲内の輝度値のばらつき（分散 σ_η^2 ）がノイズ分散 v_n^2 に近い場合はノイズがあると判断して強い平滑化が行われ、エッジ部分のように輝度値のばらつきがノイズよりも大きい場合はエッジを保存するために弱い平滑化が行われることを表している。これにより、エッジを保存しつつホワイトノイズのような不規則かつ広範囲に広がっているノイズを除去することができる。

その後2値化を行う。2値化の閾値については、最大値の1/2を標準と設定したが元画像のコントラ

図-5 2値画像のノイズ除去

図-6 塗膜割れ抽出フィルタリング

ストが低く塗膜割れが消失する場合には画像毎に手動で補正した。

二値化後の画像のノイズ除去として、孤立した白画素の除去を行う。二値画像の中から白画素を探索し、注目した白画素の周辺8近傍の画素が全て黒画素であれば、注目画素を黒画素に置き換える。これにより点状のノイズを除去する。処理方法を図-5 (a) に示す。

以上のような多段のノイズ除去を行っているが、図-3 に示したように画素強度が同程度のノイズを完全に除去することは難しく、ビード上の塗膜面の汚れが輪郭として残っていることがわかる。

b) 色フィルタリング

輪郭抽出で除去出来ないノイズを取り除くために、色に着目したフィルタリングを行う。塗膜割れが生じると錆、下塗りの色などが現れ、他の汚れ、埃などと異なる赤系の色を呈することが多い。そこで塗膜割れの色に着目したフィルタリングを行うために、撮影画像を色の色相種類を持つHSV色空間に変換する。RGB色空間の赤成分の値を r 、緑成分の値を g 、青成分の値を b 、3成分の最大値を MAX 、3成分の最小値を MIN としたとき、HSV色空間の色相の値 h 、彩度の値 s 、明度の値 v は次式によって求められる。 $MIN=MAX$ の場合、 h は定義されない。

$$h = \begin{cases} \frac{60(g-r)}{MAX-MIN} + 60, & \text{if } MIN = b \\ \frac{60(b-g)}{MAX-MIN} + 180, & \text{if } MIN = r \\ \frac{60(r-b)}{MAX-MIN} + 300, & \text{if } MIN = g \end{cases} \quad (5)$$

$$v = MAX \quad (6)$$

$$s = MAX - MIN \quad (7)$$

フィルタリングは画像毎に、塗膜割れのHSV色空間値の範囲を調べる。その後元画像から塗膜割れ部のHSV色空間値の範囲の画素のみを抽出し、これを二値画像とする。この二値画像を画素強度による輪郭抽出結果に掛け合わせ、共通部分を選択することで塗膜割れ以外のノイズを除去する。図-6に塗膜割れ抽出のフローを示す。輪郭抽出では除去出来なかったビード上のノイズが除去され、塗膜割れのみが抽出されているが、一部塗膜割れが途切れたり、細くなっている部分が見られる。

c) ノイズ除去と形状補正

次に得られた共通部分の二値画像に対して、同一色の画素の連結関係を調べるラベリング処理を行う。これにより抽出画素の塊の面積を調べ、一定以上の面積の画素のみを抽出することでノイズを除去する。閾値は5画素とし、これ以下の画素数の抽出画素はノイズと判断した。またここまで行ったフィルタリングや共通部分の抽出の際に、塗膜割れの線が途切れてしまう場合がある。そこで途切れた部分の間隔が狭い部分に限り再接合を行うために、二値画像のクロージング処理を行う。白画素の周辺を幅1pixelだけ増加させる膨張処理を行い、処理後に白黒境界部に限り、1pixelだけ減少させる収縮処理を施すことにより、図-5 (b) のように途切れた線の間を埋めることができる。

(3) 塗膜割れ画像のパターン化

撮影された塗膜割れは、撮影した際の方向、距離が定まっておらず、また溶接ビードの形状もさまざまであり、さらに凹凸のあるビード上の塗膜割れの寸法、位置を正確に把握することは難しい。このような塗膜割れ画像は、他の画像とパターンマッチング解析を行うことができない。そこで共通のテンプレートに画像を投影し、同じビード上にあるごとく変換した上でパターンマッチング解析を行う。

そのために回し溶接ビードを2次元に展開した標準テンプレートを準備し、抽出した塗膜割れ画像を

図-7 テンプレートへの投影とパターン画像生成

テンプレートに貼り付ける。この操作をパターン化と呼ぶ。

画像のパターン化の流れを図-7に示す。使用するテンプレートは図-7 (b) に示すもので、テンプレートは横桁フランジ回し溶接部をモデルとし、22mmのリブ板が溶接サイズ 10mm のビードで主板に取り付けられた状態を想定している。通常リブ板厚が薄い場合には回し溶接部のビードは円弧形状となり、厚い場合には直線状となるため両者は形状が一致しない。このためテンプレートのリブ板厚を実構造に一致させることが望ましいが、その場合板厚毎にデータベースが必要となり又、撮影画像の板厚決定が必要となることからここではひとつのテンプレートに統一した。テンプレートと実際のビード形状が

異なっても、塗膜割れ画像と疲労き裂画像の板厚が近くビード形状が近ければ検出精度は低下しないと考えられる。

まず抽出された塗膜割れ画像の特徴点とテンプレート上の対応点を決定し、対応点同士が一致するように抽出画像を射影変換によりテンプレート上に投影する。対応点の選択はテンプレートと塗膜割れ画像を並べ、対応点をマウスでクリックすることによりマニュアルで簡単に行なうことが出来る。作業時間は 10 秒程である。特徴点の選択の際には、特に止端と塗膜割れの位置関係が正確に保存されるよう注意する必要がある。対応点は溶接止端の方向変化点など 2 つの画像の共通点を選ぶ必要がある。従って回し溶接が円弧状の場合や溶接線が波打つような場合には、テンプレートとの対応が不正確となり判定精度が低下する可能性がある。本作業は撮影済みの画像を用いる場合には、撮影角度、照明が統一されていないこと、塗装の上から止端を判断しにくいことから自動化は難しいが、新規に塗膜割れ画像を撮影する場合には撮影条件を規定することで自動化も可能と考えられる。

投影においては回し溶接部の表面は様々な角度の面で構成されていることから、画像全体を一回の射影変換では正確に変換することができない場合がある。そこで、面の角度が近い領域ごとに分割し、それぞれの面ごとに射影変換を行い、該当領域の部分の結果を切り出して合成する。今回の対象部位の場合は、図-7 (c) のようにリブ板のコバ前面とその両側の R 部の計 3 つの領域に分割する設定とした。

このように実寸のテンプレートに投影することにより、元の画像は部分的に異なる拡大、縮小率で射影変換され、画像解像度もテンプレートの解像度に変更される。この結果塗膜割れ画像の尺度は、テンプレート上では $1\text{pixel} = 0.176\text{mm}$ に統一される。この射影変換により溶接ビードに沿った塗膜割れについては、塗膜割れのビード上の位置、ビード止端との離れ、母材への進展経路などのパターンが保存される。抽出されたパターンを図-7 (d) に示す。

疲労き裂パターンデータベースについては、塗膜割れとは別に、これまでに発見された疲労き裂の写真の中から溶接継手の回し溶接部のき裂、および、その塗膜割れ写真を選び、本手法を用いてパターン化を行い登録する。

- 1) 主桁ウェブ側止端き裂
- 2) ビードき裂
- 3) リブ側止端き裂

図-8 疲労き裂位置

表-1 塗膜割れとき裂の一致状況

①	ほぼ一致	34%
②	き裂<塗膜	40%
③	き裂>塗膜	4%
④	止端は一致	2%
⑤	別止端	19%
	合計	100%

3. 塗膜割れによるき裂判定

疲労き裂の有無の判定にあたり、塗膜割れや疲労き裂のどのようなパターン特徴量が一致すれば、き裂を伴う塗膜割れと判断出来るかの判定基準が必要となる。このために磁粉探傷試験前の塗膜割れ写真を集め調査を行った。具体的には、き裂パターンと塗膜割れパターンの一致状況を調査するとともに、その塗膜割れ画像に診断システムを適用した診断結果を調べ判定の精度を調査した。この結果をもとに正解率の高い判定式を構築した。ここでは便宜上、テンプレートの溶接止端に沿った方向をd軸、それに直交する方向をt軸とする座標をとる。

(1) 判定のためのパターンの特徴量抽出

塗膜割れと疲労き裂のパターンの関係性について、過去に撮影された疲労き裂写真、損傷事例^{12), 13)}などから調べることができる。ガセット回し溶接部の疲労き裂の一般的な位置を図-8に示す。回し溶接部の疲労き裂発生位置は、1) 主桁ウェブ側止端、2) 溶接ビード上き裂、3) リブ側止端き裂があり、そのいずれか、もしくは複数の場所にき裂は発生する。ただし、回し溶接部の溶接始末端部にはクレータ割れなどの溶接割れが残存していることもあるが、ここでは検出対象外とした。

多くの塗膜割れはき裂とは無関係に発生すると述べたが、き裂が存在する場合に限れば、き裂位置周辺に塗膜割れが生じる場合が多い。塗膜割れとき裂

の位置について、ガセットき裂38箇所より両者の位置、長さの関係を分類し分類毎の塗膜割れ数を調査した。結果を表-1に示す。通常のき裂点検では、き裂長さは計られているが塗膜割れ長さは計られないため、ここでは塗膜割れ画像から推定したおよその値を用いている。分類毎の実例写真を図-9に示す。

表-1中の①～③は、塗膜割れとき裂が一致しているか、あるいは一部重なるものであり、全塗膜割れ数の78%を占める。この場合でも①「長さがほぼ一致する」、②「き裂長<塗膜割れ長」である場合がその95%（全数の74%）とほとんどを占めており、③「塗膜割れ長<き裂」である場合は少ない。表中、④は塗膜割れと同じ止端の別の位置にき裂があり、⑤はき裂とは別の止端、あるいは溶接ビード上に塗膜割れが生じている（19%）。④、⑤のようなパターンに対して画像診断による検知が可能かは今のところ不明であるが、同様の発生パターンがデータベースに存在すれば、き裂が存在するとの判定が可能となる。参考に⑥塗膜割れのみでき裂が存在しない場合の写真を追加した。この画像を見る限りき裂のある塗膜割れとの判別が難しく、「き裂がない」ことの判定の難しさが推測できる。き裂のない塗膜割れ画像の特徴として、塗膜割れが止端に対して平行でない、止端からずれる、いくつもの割れに分断される、などの傾向が観察されるものがある。これらは塗膜劣化による塗膜割れに典型的なパターンと考えられる。

また、塗膜割れパターンに関する基本的特徴として、同一部材の回し溶接部において、き裂は溶接ビードの特定位置に発生する傾向がある。この位置はき裂データベースに記録されており、これと照合することにより一般的なき裂発生位置から外れた塗膜割れは自動的に評価値が下がる結果となる。

結論として、き裂がある場合の塗膜割れのd、t座標値が疲労き裂のそれと一致するか、あるいは塗膜割れの方が長い場合が74%あることから、このような場合をき裂がある場合の基本パターンとする。また、塗膜割れのパターンが、止端から外れた場合（d座標が一致してもt座標が不一致の場合）にはき裂の可能性を低くする。このような要因を一致度評価式に反映させる。評価式の適用性を実画像による検証を行って調べ、正解率が上がるように評価式を補正する。

(2) 疲労き裂判定

疲労き裂判定は、塗膜割れとき裂データベースのき裂で、d、t座標が一致する長さを画像で判断し、これを元に疲労き裂の可能性を評価するものである。

図-9 塗膜割れとき裂の生成位置の関係

図-10 塗膜割れとデータベースの比較

一致度 D を次式により計算する.

$$D = \frac{B}{A+B+C} \quad (8)$$

但し、一致度 D をき裂の可能性を示す指標とし、塗膜割れのみの部分の長さを A 、塗膜割れとき裂が一致した長さを B 、き裂のみの部分の長さを C とする。図-10 が A, B, C 算出時の診断画像で、 A, B, C に対応する部分をそれぞれ、青黄赤で示している。

一致度の計算に際して、単に一致する長さで判定するとデータベースに長い疲労き裂がある場合に

は、どの塗膜割れも疲労き裂と判断されてしまう。逆に長い塗膜割れは疲労き裂の可能性が低くなる可能性がある。また、き裂を伴わない塗膜割れのパターンとして、止端に沿わないき裂、止端に対して傾いたき裂などがみられる。このような特性を反映するため、塗膜割れとき裂の位置が一致した場合に一致度を高く評価できるように、式 (8) を評価式とした。式 (8) は塗膜割れとき裂の位置が、完全に一致したときに最大の値となり、塗膜割れとき裂で、一致しない長さが大きくなるほど D の値は小さくなる。

画像より一致長さを計算する際には、次のルールを設定した。

- ・塗膜割れ、き裂で、溶接ビード形状も異なることから、その t 座標方向の位置のずれを許容するための閾値を設ける。ここでは塗膜割れがき裂の外側 3 画素 (テンプレート上の実寸で 0.528mm) 以内にある場合は一致とした。
- ・回し溶接のビードは左右対称であるので、軸に対して反転させたデータベース画像ともマッチングを行う。

最後に一致度 D を用いて判定を行う。 D の値がある閾値以上であればき裂ありと判定し、閾値未満ならき裂なしとする。

4. 判定精度の検証

過去に撮影された塗膜割れ写真を用いて塗膜割れ判定システムの判定精度の検証を行った。使用した診断システムの解析パラメータを表-2 に示す。き裂点検写真にはき裂部を拡大したものが多く、このような画像は診断に利用出来ないため、検証ではリブ板や回し溶接部全体が写っている写真を使用した。対象とした塗膜割れは疲労き裂がある塗膜割れ写真 11 枚、疲労き裂がない塗膜割れ写真 10 枚で、これらを検証用データと呼ぶ。検証用データは過去の疲労き裂点検の報告にあげられた写真で、ウェブガセットの回し溶接、横桁フランジと主桁ウェブ接合部で発見された塗膜割れに限っている。

疲労き裂パターンデータベースの登録画像枚数は、疲労き裂の磁粉探傷試験写真が 59 枚、疲労き裂が存在することが分かっている塗膜割れ画像が 24 枚である。

(1) 診断システムによる判定

a) 検証データによる診断結果

検証用データの塗膜割れ画像、および診断画像を

表-2 診断システム解析パラメータ

検証用データの画像サイズ		最大：1024×768 pixel 最小：640×480 pixel
LOG フィルタ	フィルタサイズ (n×n)	5×5 pixel
	標準偏差(σ)	0.4
Wiener フィルタのサイズ(N×M)		6×6 pixel
ラベリングによる面積閾値		5 pixel
半径方向の位置ずれ許容量		3 pixel

図-11 き裂のある場合の塗膜割れ判定画像

図-11, 12 に示す。診断画像とは、塗膜割れパターンとデータベースのパターンマッチングの状況を示す画像である。図-11 は「き裂がある塗膜割れ」の場合（画像番号 A1～A11）、図-12 は「き裂がない塗膜割れ」の場合（画像番号 B1～B10）を示す。パターンマッチングの結果より、表-3 に示す閾値を用いて判定を行う。判定結果を表-4 に示す。判定においては、画像によるマッチング解析の結果より、一致度 D を計算し、この一致度を元にき裂判定を行うが、ここでは判定結果は、○：き裂あり、△：き裂の可能性あり、×：き裂なしの3段階で示している。表中の一致度 D は、データベースの全パターン画像との間でマッチング計算を行い、得られた一致度の中で最高値を示している。

b) 診断精度の評価

診断システムの精度を、検証用データの診断結果より評価する。まず計算された一致度 D の分布を図

-13 に示す。横軸は画像番号、縦軸には一致度を取り、青丸は図-11 に示したき裂ありの画像（A1～A11）の一致度、赤三角は図-12 に示したき裂なしの画像（B1～B10）の一致度を示している。き裂ありの塗膜割れは一致度が 0.2～0.5 の間に分布し、き裂のない塗膜割れは 0～0.3 の間にほぼ収まっている。この結果、一致度が 0.2～0.3 の間にはき裂ありのグループとき裂なしのグループが混在する領域となる。

点検や非破壊検査の精度は、検知率と空振り率の2つによって評価できる。検知率はき裂のある塗膜割れを「き裂あり」と正しく検知できる割合、空振り率は、き裂のない塗膜割れを「き裂あり」と誤判定する割合を示す。

塗膜割れ診断システムにおいては、塗膜割れがすでに検出されており、診断により非破壊検査の実施を判断するような場合には、き裂の検知率だけでなく空振り率の低さが重要な意味を持つ。

図-14 に検証用データに対して、き裂判定の閾値を変化させた場合の検知率と空振り率の変化を示す。図中 $N=21$ は図-11, 図-12 に使用した 21 枚の画像での診断結果で、 $N=38$ は画像データを増やした場合の診断結果である。 $N=21$ の結果について以下の通り評価出来る。閾値を 0.21 以下とすれば、検知率 100% が達成できるが、この時の空振り率は 60% 以上と高い。空振り率 10% 以下に抑えるためには、閾値は 0.32 以上とする必要があり、この時の検知率は 73% 以下となる。検知率を 91% と高くとした上で空振り率を最小とするためには、閾値を 0.26～0.27 とすれば空振り率 40% となる。

き裂判定において、判定が誤りであったもの、あるいは△の判定が生じた塗膜割れについて分析した。まず、き裂がありながら△評価となったものは画像番号 A4, A6, A8（図-11 参照）がある。A6, A8 については画像中の塗膜割れが非常に薄い、あるいは塗膜割れの一部にのみ錆の発生が見られる。A4 については診断画像を見ると汚れ等が塗膜割れとして検知されているように見える。以上は塗膜割れの抽出における精度が原因と考えられる。また A8 は塗膜割れが母材側、リブ側の 2 つの止端に存在しているが、実際に疲労き裂が両止端にある場合は少ない。このことから判定においては各止端を別々に判定することとした。

次にき裂なしの画像をき裂ありと判定した空振りのケースとして、画像番号 B1, B2, B4, B6, B7, B9（図-12 参照）がある。B1, B2, B9 については目視でもき裂特有の塗膜割れと区別がつかないことから、さらなる分析を要する。B4, B6, B7 については、劣化した塗膜割れ特有の途切れた割れパターンが確認でき

図-12 き裂がない場合の塗膜割れ判定画像

表-3 き裂有無の判定基準（閾値）

評価値 D	判定	記号
$D \geq 0.30$	き裂あり	○
$0.20 \leq D < 0.30$	き裂の疑いあり	△
$D < 0.20$	き裂なし	×

表-4 塗膜割れ判定結果

疲労き裂がある場合			疲労き裂がない場合		
撮影画像	評価値 D	判定結果	撮影画像	評価値 D	判定結果
A1	0.4269	○	B1	0.5536	○
A2	0.4871	○	B2	0.2751	△
A3	0.4050	○	B3	0.1073	×
A4	0.2984	△	B4	0.2838	△
A5	0.3952	○	B5	0.1548	×
A6	0.2165	△	B6	0.2505	△
A7	0.4831	○	B7	0.2121	△
A8	0.2753	△	B8	0.0797	×
A9	0.3877	○	B9	0.3163	○
A10	0.4628	○	B10	0.0720	×
A11	0.3289	○			

判定結果 ○：疲労き裂あり
△：疲労き裂の疑いあり
×：疲労き裂なし

るが、割れが比較的 1 本の線上に集中している。このような場合判定においてはき裂幅方向の少量のずれを許容しているため、一致度が高くなったと考えられる。

図-14 には画像データを追加した検証結果を示した。前回の画像を含めてき裂ありの画像 20 枚、き裂なしの画像 18 枚に対して閾値は前回と同じ値で診断を行った結果、前回に比べ検知率が低下し空振り

塗膜割れ評価

図-13 き裂データベースとの一致度の分布

率が上がっている。この理由として追加した写真は前回未使用の点検画像で、塗装面が汚れているなど診断用としては画質が劣っており、これが一因と考えられる。このように使用する塗膜割れ写真の画質は診断結果に影響を与える。

(2) 診断システムの適用

本システムは、現場にてその場でき裂の有無の推定が可能であり、運用の手間もかからない。しかし、き裂ありの判定が出た場合には、最終的には非破壊検査による確認が必要となる。このような 1 次判定システムに対しては、2 つの利用方法が考えられる。ケース 1 は見逃しが許されない主部材、重要損傷の点検の一次スクリーニングに用いる場合で、100% 近い検知率が要求される場合である。この場合空振り率が大きくなるため、非破壊検査回数は多くなる。ケース 2 は閾値を高くすることで、き裂の可能性が高いものだけを抽出する場合で、空振りが減るため、非破壊検査数を減らすことができる。この場合見逃しが増すため、見逃しによる安全リスクが大きくなる。このように対象とする損傷部材により閾値を変えることで、非破壊検査の効率化を図ることが出来る。2 つのケースで、閾値を変えた場合の検知率、空振り率を表-5 に示す。

例えば、2 次部材の疲労き裂は、き裂が小さい場合には、安全性への影響が小さく、経過観察が許容される場合も多い。一方で、その数は全き裂の 8 割近くを占めることから、塗膜割れ数も多く、非破壊検査数の大部分を占めている。このき裂に対しケース 2 の方式を採用すれば、大きな点検コスト削減を達成できる可能性がある。特に、点検に手間のかかるアクセス困難な箇所、狭隘部の 1 次点検には画像の利用が有効と考えられる。

表-5 診断ケース毎の検知率と空振り率

	ケース1(閾値=0.16)				ケース2(閾値=0.32)			
	判定	枚数	検知精度		判定	枚数	検知精度	
き裂あり画像	あり	11	検出率	100%	あり	8	検知率	73%
	なし	0			なし	3		
き裂なし画像	あり	6	空振り率	60%	あり	1	空振り率	10%
	なし	4			なし	9		

(3) 診断精度の向上

診断システムの精度向上の可能性について、最後にまとめる。システムの精度は検知率の高さに加え、空振り率の低さで評価される。検知率を上げ、同時に空振り率を下げるためには、き裂のない塗膜割れとき裂のある塗膜割れの識別性能を上げるための評価アルゴリズムの改良が必要と思われる。

一致度を評価する式(8)は塗膜割れとき裂の長さや位置が一致した場合に一致度が最も高くなるように設定しているが、実際の塗膜割れは、塗膜割れが疲労き裂長より長めとなる傾向がある。これを考慮するため、次式のように評価式を修正することが考えられる。

$$D = \frac{B}{aA + B + cC} \quad (9)$$

塗膜割れのみ長さ A の重み係数 a と、き裂のみ長さ C の重み係数 c の値の関係を $a < c$ とすることで、 A の増加による一致度の減少を、 C による減少より小さくすることが出来る。 a, c の値は実画像を用いた検証実験により決定することができる。このような重みを導入することにより判定精度を上げられる可能性がある。

次に、 t 座標方向の離れを精度良く計ることにより識別性能を向上することが考えられる。き裂のない塗膜割れのパターンとして、止端からずれたき裂、止端に対し傾いたき裂などがある。パターン・マッ

チングにおいて、 t 座標方向のずれに対する許容値(閾値)が大きくなると、止端からずれている塗膜割れを、止端のき裂と一致していると判断することになり、空振りを増やす原因となる可能性がある。空振りに対する対応策として、止端位置を正確に抽出し、止端からのずれを精密に検知して判定に反映することができれば改善されと考えられる。このためには、塗膜割れ画像から止端を正しく認識させることが必要となる。

パターン化を行うためのテンプレートについては、現時点では部材サイズの異なる溶接部に対して、統一したテンプレートを使用しているが、部材サイズ毎にグルーピングしてテンプレートを準備し、パターンマッチングを行うことで、識別精度が向上する可能性がある。但し、この場合には、データベースをサイズグループ毎に準備する必要がある。

以上のような、画像検知精度の改善により、診断精度が向上出来る可能性がある。

5. まとめ

本研究では過去に取得された疲労き裂写真をパターン化したデータベースを利用した塗膜割れ判定システムを開発した。主な成果を以下にまとめる。

- ・画像処理技術を組み合わせることにより、塗膜割れ画像より、塗膜割れの特徴をパターン化することで、き裂のある塗膜割れとき裂のない塗膜割れを分類できることができた。
- ・検知率と空振り率は、判定の閾値を変えることにより変化する。例えば検知を優先する場合検知率 100%、空振り率 60%。空振り率を下げることを優先する場合検知率 73%、空振り率 10% が検証データに対して達成できた。
- ・検知率をさらに上げるためには、画像から塗膜割れを抽出する精度を上げることが有効と考えられる。
- ・空振り率をさらに下げるためには、止端位置検出精度の向上、特に止端直交方向の位置ずれ等を考慮した精密なマッチング判定アルゴリズムが必要と考えられる。

本システムにより、き裂の可能性の低い塗膜割れを除外し、非破壊検査数を減らすことで、点検の効率化が期待出来る。

謝辞：本研究開発は、首都高速道路(株)、(株)首都高技術、(一財)首都高速道路技術センターと東京都市大学との共同研究の一環として行われた非破壊検

査の高度化に関する研究の一環として行われました。過去のき裂点検写真等有用なデータを提供頂いたことを感謝します。

参考文献

- 1) 栗原友則, 福島貴仁, 村野益巳: 渦流探傷を用いた鋼橋のき裂検出効率化の検討, 土木学会年次学術講演会, I-165, 2014.
- 2) Luiza H. Ichinose, 水江正弘, 坂野昌弘: 渦流探傷試験を用いた鋼橋の疲労き裂調査の効率化に関する検討, 土木学会年次学術講演会, CS5-009, 2014.
- 3) 包躍, 小屋裕太郎: ブロック分割による輝度情報を用いた金属部品表面のキズ検出, 計測自動制御学会産業論文集, 9, 15, pp.108-114, 2010.
- 4) 片淵典史, 佐野睦夫, 大原修一, 奥平雅士: 差分画像最大連結領域の分散に着目したしきい値決定法, 1997年電子情報通信学会総合大会, p.320, 1997.
- 5) 見浪護, 朱佳寧, 三浦正人, 前泰志: ヘアラインを利用した金属表面上の微細なキズの発見と定量的評価, 日本機械学会論文集C編, 72-719, pp.2240-2247, 2006.
- 6) 今井道男, 太田雅彦, 露木健一郎, 今井浩, 三浦悟, 村田一仁, 高田巡: 高速撮影動画を用いたデジタル画像相関法によるコンクリート構造物の動的挙動把握, 土木学会論文集, Vol. 72, No. 1, pp.279-289, 2016.
- 7) 館石和雄, 小山田拡人, 足立一郎, 魚本健人: 画像計測による応力拡大係数の簡易測定手法, 鋼構造論文集, 6, 23, pp.99-103, 1999. 9.
- 8) 小山哲, 丸屋剛, 堀口賢一, 澤健男: ガボールウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析技術の開発, 土木学会論文集, 68, 3, pp.178-194, 2012.
- 9) 車谷麻緒, 松浦遵, 根本忍, 呉智深: コンクリートのひび割れ進展計測のための画像解析手法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A2, 70, 2, pp.135-144, 2014.
- 10) 新井康平: 画像処理アルゴリズムの基礎理論, 3, pp. 21-32, 学術図書出版社, 1999. 4.
- 11) 池原雅章, 島村徹也, 真田幸俊: MATLAB マルチメディア信号処理 下, pp.74-83, 倍風館, 2004. 12.
- 12) 木ノ本剛, 平林泰明: 鋼 I 桁横構ガセットスカラップ部に発生した疲労き裂の原因分析, 土木学会年次講演会講演概要集, 2007. 9.
- 13) 三木千壽: 鋼橋の疲労と破壊, pp.44-49, 2011. 10.

(2016. 6. 24 受付)

DEVELOPMENT OF FATIGUE CRACK DETECTION SYSTEM BASED ON IMAGE DIAGNOSIS OF PAINT CRACK PATTERN

Takuyo KONISHI, Yutaro KOYA and Masashi KAJIHARA

Crack detection system is developed to rationalize nondestructive testing of fatigue crack. This system judges possibility of existence of fatigue crack beneath the paint crack without removing the paint. The judgement is based on pattern-matching of paint crack pattern and fatigue crack patterns. Paint crack profile is extracted first from the inspection photograph. Mapping transformation is applied on the profile in order to compare 2 different crack images. The original crack profile images are projected on standardized weld bead 2D expansion plan. The image is compared with pattern image of fatigue cracks in crack DB. Those images are previously obtained by same procedure as paint crack pattern image. Possibility of fatigue crack is judged by coincidence factor of pattern matching of 2 images. The performance of this image diagnosis system is accurate and high enough to apply this for preliminary judgments for ordinary NDT.