当て板補修されたき裂の FSM による進展モニタリングに関する基礎的研究

Propagation monitoring by FSM for cracks repaired with patch plates

廣畑幹人*, 岐山雄亮**, 金裕哲***

Mikihito Hirohata, Yusuke Hageyama and You-Chul Kim

*正会員, 博士 (工学) 名古屋大学大学院 工学研究科 助教 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
(研究当時 大阪大学 接合科学研究所 特任助教)

**工修, 大阪大学大学院工学研究科 (研究当時) (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1)

***正会員, 工博 大阪大学 接合科学研究所 教授 (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1)

In order to investigate whether propagation of cracks repaired with patch plates could be monitored by FSM or not, a series of experiments and analyses were carried out. A slit imitating a crack was inserted in a plate covered by patch plates and its propagation was monitored by FSM. The experiment was simulated by an electric field analysis. Although the potential difference, which was the measure of FSM-monitoring, was affected by the patch plates and the bolts, the crack propagation in the invisible area covered by the patch plates could be monitored with high accuracy by FSM.

Key Words: FSM, Fatigue crack, Monitoring, Repair with patch plates

キーワード: FSM, 疲労き裂, モニタリング, 当て板補修

1. 緒言

鋼橋に疲労き裂が散見されており, き裂の検出, 進展のモニタリングおよび補修は維持管理における最重要課題となってきた。

鋼橋の桁端では, ソールプレート取り付け部や主桁切欠き部から発生し, 主桁ウェブに進展するき裂に対して, 先端へのストップホール穿孔および当て板の高力ボルト接合による作用応力の低減などの補修が施される¹⁾。ところが, ストップホールが適正な位置に穿孔されていない場合, あるいは, 作用応力の低減が十分でない場合, き裂が再発生, 進展するおそれがあるため, 補修後においても, 継続的にき裂の進展を監視する必要がある。

高力ボルトによる当て板補修²⁾に注目すれば, 当て板により, き裂補修後の部位は目視できなくなる。また, き裂補修部の近傍にはひずみゲージなどを貼付することができない。さらには, 当て板とき裂補修部の間に空隙が存在するため, 超音波, 放射線を用いた当て板表面からの検査も不可能となる。すなわち, 当て板補修後の非可視部におけるき裂の再発生を検知, 進展をモニタリングできる手法は現在のところ皆無である。

一方, 著者らは, 疲労き裂の発生検知と進展モニタリングに対し, 電位差法を応用した非破壊検査手法である FSM (Field Signature Method: 電場指紋照合法) の適用性を種々検討してきた^{3,4)}。

本稿では, 疲労き裂の当て板補修による非可視部

におけるき裂の再発生・進展に対し, これらをモニタリングする手段として, FSM の適用を考え, 一連の実験および数値シミュレーションを実施する。結果を基本として, FSM により, 当て板補修による非可視部においてき裂の再発生・進展がモニタリングできるか否か, その基本的な適用性を検証する。

2. 実験

2.1 FSM モニタリングの原理

FSM では, 検査対象部材に多数のセンシングピンを設置し, 任意のペアを形成する。検査対象部材に直流パルス電流を印加し, ペア間の電位差を逐次計測する。ペア間にき裂が発生, 進展すれば, 電位差が変化するため, この電位差変化を基本として, き裂の位置および大きさを特定することができる^{3,4)}。

FSM では, この電位差変化を FC 値^{3,4)} (電場指紋係数: 各ペアの初期電位差に対する電位差変化の千分率) に換算し, FC 値に注目することでき裂の発生および進展挙動をモニタリングする。

ペア i の FC 値は(1)式により求められる。

$$FC_i = (R_0 / R \times \Delta\Phi_i / \Delta\Phi_{0i} - 1) \times 1000 (\%) \quad (1)$$

ここに, R_0 : 照合対の初期電位差

R : 計測時における照合対の電位差

$\Delta\Phi_i$: 計測時におけるペア i の電位差

$\Delta\Phi_{0i}$: ペア i の初期電位差

照合対とは、ペア間の電位差変化に及ぼす温度や湿度変化の影響を補正するため、検査対象とは別の鋼板に設置したペアである。

ところで、検査対象の構造および寸法の違い、初期状態におけるき裂の有無などにより初期電位差は異なるため、FC 値の大きさは一般性を持たない。FSM によるき裂の進展モニタリングでは、FC 値の増減の挙動に注目する。

作用変動荷重の影響、き裂の進展方向の変化など考慮した各種実験および数値シミュレーションの結果から、き裂の発生（再発生）および進展挙動と FC 値の間には明確な相関関係があることが明らかとなっており、FSM モニタリングの精度については検証済みである³⁶⁾。

2.2 実験方法および実験供試体

当て板による非可視部におけるき裂の発生・進展をモニタリングするには、疲労試験を実施すべきである。しかし、当て板接合した部材にき裂を発生・進展させること、また、非可視部におけるき裂の挙動を観察することなど、この種の実験は困難を極める。

一方、本研究の目的は、非可視部のき裂挙動モニタリングに対する FSM の基本的適用性を検証することである。このため、本研究では、作用荷重の影響、き裂の進展方向の変化などは考慮せず、幅 0.5mm のワイヤソーを用いて供試体に擬似き裂を直線的に挿入することで、最も基本的なき裂の発生・進展挙動を模擬することとする。

(a) 供試体 A

(b) 供試体 B

図-1 実験供試体

供試体の形状および寸法を図-1 に示す。

長さ 870mm、幅 400mm、板厚 9mm の SM400A 鋼板を基板と称す。

FSM によるモニタリング精度を検証するための基礎供試体として、基板のみのものを供試体 A (図-1(a)) とする。

これに対し、高力ボルト F10T, M22 を用いて、基板を二枚の当て板 (240×320mm、板厚 9mm, SM400A) で挟み込んだものを供試体 B (図-1(b)) とする。

高力ボルトには、設計ボルト軸力の 10%増をトルク法により導入した⁷⁾。

摩擦面の処理であるが、既設鋼橋における当て板補修を想定し、基板の摩擦面は黒皮を除去し、当て板には無機ジンクリッチペイントを塗布した。

擬似き裂挿入の起点として、基板の幅方向中央部、上端から 150mm の位置に直径 2mm の孔を設けている。また、擬似き裂を挿入するため、供試体 B の当て板の中央部に長さ 60mm、幅 120mm の窓を設けている。窓を設けることで、擬似き裂は当て板に覆われなくなるため、非可視部とはならないが、本実験におけるこの問題点は、次章にて実施する数値シミュレーションにより補完する。

なお、挿入する擬似き裂の長さは 100mm である。

FSM モニタリングのため、基板には図-1 に示す位置に電流印加用電極およびセンシングピンを設置した。電極間隔は 650mm である。なお、電極には直径 6mm、センシングピンには直径 3mm のスタッドボルトを用いた。

2.3 FSM モニタリングにおけるペアの構成

図-1 に示すセンシングピンから構成した FSM モニタリングにおけるペアを図-2 に示す。

図中の丸数字は、ペアの番号を示している。

供試体 A では、擬似き裂を挟み込むように、ピン間隔 130mm のグループ 1 と、290mm のグループ 2 を構成した。各グループにおいて、き裂の進展方向に 30mm 間隔でペアを形成した。

供試体 B では、長さ 240mm の当て板を挟み込むように、ピン間隔 290mm のグループ 2 のみを構成した。

擬似き裂を 10mm 挿入する毎に、100A の直流パルス電流を印加し、各ペアの電位差を計測した。

図-2 FSM モニタリングにおけるペアの構成

2.4 実験結果

(1) グループ1のモニタリング結果

供試体 A のグループ 1 におけるモニタリング結果を図-3(a)に示す。

図中、横軸はき裂長さであり、縦軸はFC 値である。

き裂の進展に伴い、ペア①、②、③の順にFC 値が増加した。き裂長さが 100mm の時点では、ペア②を中心としてペア①と③は上下対称となるため、ペア②のFC 値が最も大きく、ペア①と③のFC 値はほぼ同じとなっている。

き裂長さとFC 値の間に明確な相関関係が認められ、グループ 1 のモニタリング結果はき裂の進展挙動を捉えていることがわかる。

(2) グループ2のモニタリング結果

供試体 A および供試体 B のグループ 2 におけるモニタリング結果を図-3(b)に示す。

グループ 1 の場合とは縦軸の大きさが異なることに注意されたい。

供試体 A のモニタリング結果（オープンシンボル）に注目する。

グループ1の場合に比べ、グループ2のFC 値は小さい。また、ペアを形成しているピンの間隔（290mm）に対し、き裂進展方向のピン間隔（30mm）が狭いため、き裂の進展に伴うペア④ー⑥の反応が同程度となっている。しかし、き裂長さとFC 値の間には明確な相関関係があり、グループ2においても、き裂の進展挙動がモニタリングできている。

次に、供試体 B のモニタリング結果（ソリッドシンボル）に注目する。

当て板を取付けた供試体 B のFC 値は、ピン間隔が同じ（290mm）でも、当て板のない供試体 A のFC 値に比べ、小さい。供試体 B のFC 値は、供試体 A のFC 値の3ー4割程度である。これは、基板に印加した電流が、当て板およびボルトにもある程度流入しているためと推測される。しかし、き裂長さとFC 値の間には相関関係があり、当て板を取り付けた場合でも、き裂の進展挙動がモニタリングできている。

3. 電場解析によるシミュレーション

前章の実験において、当て板を取付けた場合でも、FSM によりき裂の進展挙動がモニタリングできる可能性を示した。ところが、前章の実験では、き裂は当て板に覆われているわけではない。実構造を想定すれば、き裂が当て板に完全に覆われていても、その進展挙動がモニタリングできるか否かを検討しておくことは重要と考える。

2.2 節でも述べたが、この種の実験は極めて困難であるため、本研究では、電場解析⁹⁾によるシミュレーションを実施し、前章の実験を補完する。

ここでは、まず、解析プログラムの妥当性を検証すると共に、解析における基板と当て板の接触部およびボルト部の取扱いを明確にする。そして、当て板に覆われた非可視部におけるき裂の進展モニタリングを想定した実験シミ

図-3 FSM によるモニタリング結果

ュレーションを実施する。

結果を基本として、FSM により、当て板補修による非可視部におけるき裂の再発生・進展がモニタリングできるか否か、その適用性を検討する。

3.1 解析プログラムの妥当性検証

解析には、自開発の3次元静電場解析プログラム⁹⁾を用いる。

3次元静電場理論では、対象領域内に電荷が存在しない場合、(2)式に示すラプラス方程式が基礎方程式となる。

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2)$$

ここに、 ρ ：比抵抗

ϕ ：電位ポテンシャル

(2)式に変分原理を適用し、空間的に離散化することで(3)式に示す連立一次方程式が得られる。

$$[K]\{\phi\} = \{Q\} \quad (3)$$

ここに、 $[K]$ ：電流マトリックス ((4)式)

$\{Q\}$ ：電流密度ベクトル ((5)式)

$[N]$ ：形状関数

$$[K] = \int_V \left[\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) \right] dV \quad (4)$$

$$\{Q\} = \int_V q [N]^T dV \quad (5)$$

この方程式を所定の境界条件の下で解くことで、節点電位ベクトル $\{\phi\}$ が求まる。

図4 解析モデル A

(a) グループ 1

(b) グループ 2

図5 解析結果 (モデル A)

なお、本プログラムでは、8 節点アイソパラメトリックソリッド要素を用いている。

まず、解析プログラムの妥当性検証のため、供試体 A に対して実施した実験 (図-1(a)) をシミュレーションする。解析モデル (モデル A と称す) を図-4 に示す。

解析では、電極およびセンシングピンとして用いたスタッドボルトは考慮していない。

正側電極の位置に相当する節点に電流：100A を与え、負側電極の位置に相当する節点の電位を 0V として、ペアを形成した節点間の電位差： $\Delta\phi$ を求める。

比抵抗は $\rho_0=18.0 \times 10^{-8} (\Omega \cdot m)$ とする。

き裂進展のモデル化であるが、き裂位置の要素を取除くことで表現した。

解析結果を図-5 に示す。

ところで、解析プログラムの妥当性を議論するには、無次元量である FC 値ではなく、電位差そのものに注目する

(a) き裂周辺図

(b) A-A 断面図

(c) B-B 断面図

Unit: mm

図6 解析モデル B

のが妥当と考える。このため、ここでは縦軸に電位差、横軸にき裂長さを示している。

グループ 1, 2 共に、実験結果と解析結果は良く一致しており、使用する解析プログラムの妥当性が確認できた。

3.2 基板と当て板の接触部およびボルト部の取り扱い

前章の実験において、基板に印加した電流が、当て板およびボルトにある程度流入する可能性のあることがわかっていて、すなわち、供試体 B に対して実施した実験を解析により再現するには、当て板およびボルトへの電流の流入を考慮する必要がある。

ここでは、供試体 B に対して実施した実験をシミュレーションするに際し、基板と当て板の接触部およびボルト部の取り扱いを明確にする。

(1) 基板と当て板の接触部およびボルト部のモデル化

解析モデル（モデル B と称す）を図-6 に示す。

当て板およびボルトへの電流の流入を考慮するため、基板と当て板の境界に厚さ 0.5mm の要素を設け、この要素

（境界要素と称す）とボルト部の要素（径はボルト孔と同じとし、頭部およびナットは考慮していない：ボルト要素と称す）の比抵抗を調整することで、当て板およびボルトへの電流の流入を表現することとした。

境界要素およびボルト要素の比抵抗を決定するため、前章における実験終了後、図-7 に示すように、当て板およびボルト頭部にセンシングピン（1-16）を設置し、これらと基板に設置したピン（ペア⑤）を形成するピン：①および②との電位差を計測した。

新たに形成したペア⑦-⑫の組み合わせを表-1 に示す。対称の位置にあるペアに対しては、同じ記号（P1, P2 および B1, B2, B3）を与えている。

計測したペア⑦-⑫の電位差が再現できるように、境界要素およびボルト要素の比抵抗： ρ' を種々変化させ、トライアンドエラー方式で解析を実施した。

解析結果を図-8 に示す。

図の横軸： β は、基板の要素の比抵抗： ρ_0 （ $=18.0 \times 10^{-8}$ （ $\Omega \cdot m$ ））に対する境界要素およびボルト要素の比抵抗：

表-1 基板と当て板および基板とボルト頭部のペア構成

基板と当て板			基板とボルト頭部		
ペア番号	ピンの組合せ	記号	ペア番号	ピンの組合せ	記号
⑦	① - ②	P1	⑬	① - ⑦	B1
⑧	① - ③	P2	⑭	① - ⑧	B2
⑨	① - ⑤	P1	⑮	① - ⑨	B2
⑩	② - ③	P1	⑯	② - ⑩	B1
⑪	② - ④	P2	⑰	② - ⑪	B3
⑫	② - ⑥	P1	⑱	② - ⑫	B3
			⑲	③ - ⑬	B1
			⑳	③ - ⑭	B2
			㉑	③ - ⑮	B2
			㉒	③ - ⑯	B1

図-7 当て板およびボルト頭部におけるセンシングピンの配置

(a) 基板と当て板間の電位差

(b) 基板とボルト間の電位差

図-8 境界要素およびボルト要素の比抵抗決定のための解析結果

ρ' の比である。すなわち、 $\beta=\rho'/\rho_0$ である。一方、縦軸は、実験で得られた各ペアの電位差： $\Delta\Phi_{EXP}$ に対する解析結果： $\Delta\Phi_{SM}$ の比である。同じ記号（P1、P2 および B1、B2、B3）のペアはそれぞれ対称の位置にあるため、解析では、これらのペアの電位差は同じとなる。一方、実験では、ピン位置の誤差などに起因し、これらのペアの電位差は同じとならない。ただし、これらの変動係数（平均値に対する標準偏差の百分率）は最大で約 6.8%であり、ばらつきはさほど大きくないことを確認している。よってここでは、同じ記号（P1、P2 および B1、B2、B3）のペアの電位差の平均値を用いて $\Delta\Phi_{EXP}$ としている。

β を1から徐々に増加させたところ、 $\beta=3000$ 、すなわち、境界要素およびボルト要素の比抵抗： ρ' を、基板の要素の比抵抗： ρ_0 ($=18.0\times10^{-8}$ ($\Omega\cdot m$)) の 3000 倍 (54.0×10^{-5} ($\Omega\cdot m$)) としたとき、実験および解析で得られた全てのペアの電位差がほぼ一致する ($\Delta\Phi_{SM}/\Delta\Phi_{EXP}=1.0$) ことが確認できた。

以上より、これ以降の実験シミュレーションにおいては、境界要素およびボルト要素の比抵抗： ρ' を、基板要素の比抵抗： ρ_0 の 3000 倍とすることとした。

この比抵抗の値は、基板および当て板の摩擦面の処理状態、ボルトと円孔の接触、ワッシャーの有無、ボルト軸力などに依存すると推察される。本解析におけるこの比抵抗の値や、境界要素の厚さおよびボルト要素の形状などは何ら一般性を有するものではない。ただし、本研究における実験をシミュレーションするうえでは妥当なモデルであると考え、採用することとした。

(2) 解析結果

上述の境界要素およびボルト要素の比抵抗を用いて、供試体 B に対して実施した実験をシミュレーションした。

解析結果を図-9 に示す。

実験結果と解析結果は良く一致しており、き裂の進展に伴う電位差の変化が精度高く再現できている。すなわち、上述の基板と当て板の接触部およびボルト部の取り扱いの妥当性が確認できた。

以上より、次節において、当て板に覆われた基板の比可視部におけるき裂進展モニタリング実験をシミュレーションする手法が明確になった。

3.3 当て板による非可視部におけるき裂進展モニタリングのシミュレーション

ここでは、前節の結果を基本として、当て板に覆われた非可視部におけるき裂の進展モニタリング実験を想定したシミュレーションを実施する。

(1) 解析モデル

解析モデル（モデル C と称す）を図-10 に示す。

基板および当て板の形状、寸法は供試体 B（図-1(b)）と同じであるが、当て板には窓を設けていない。また、供試体 B の当て板において、窓が存在していた当て板中央部にボルトを 2 本追加している。

き裂は、基板中央部、すなわち、当て板に覆われた非可視部において進展するものとする。なお、き裂長さは 40mm である。

図-9 解析結果（モデル B）

センシングピンの配置は供試体 B におけるグループ 2 の場合と同じと想定する。すなわち、き裂を挟むように間隔 290mm で基板にピンを設置することを想定し、ペア④、⑤、⑥を形成する。

電極間隔は 650mm とし、印加電流は 100A とする。

き裂進展のモデル化、基板と当て板の接触部およびボルト部の取り扱いは、前節の結果を基本とする。

(2) 解析結果

解析結果を図-11 にオープンシンボルで示す。

なお、比較のため、供試体 B のペア④、⑤、⑥の FC 値（図-3(b)；き裂長さ 40mm まで）を図中にソリッドシンボルで示している。

解析により得られたペア④、⑤、⑥の FC 値は、窓のある供試体 B のペア④、⑤、⑥の FC 値に比べやや小さいが、き裂の進展に伴い増加する挙動は同じである。き裂部が当て板に完全に覆われていても、それが FC 値の挙動に及ぼす影響は小さく、窓のある供試体 B に対する実験結果と同程度の精度で、き裂の進展挙動がモニタリングできるといえる。

当て板補修による非可視部におけるき裂進展モニタリングに FSM が適用可能であることを以上の結果は示唆している。

4. 結言

当て板補修による非可視部におけるき裂の再発生・進展が FSM によりモニタリングできるか否か、その適用性を明らかにするため、一連の実験および数値シミュレーションを実施した。

得られた知見を以下に示す。

幅 0.5mm のワイヤソーを用いて、窓付きの当て板をボルト接合した供試体（基板）に擬似き裂を挿入し、き裂の進展挙動を FSM によりモニタリングした結果によれば；

- (1) 基板に印加した電流の一部が当て板およびボルトに流入するため、当て板を取り付けない場合に比べ、FC 値（センシングピン間：ペアの電位差）は小さくなることがわかった。

- (2) 当て板を挟むように基板に設置したペアの FC 値の変化に注目することで、基板に進展するき裂の挙動が精度良くモニタリングできることを確認した。

電場解析により上述の実験をシミュレーションした結果によれば；

- (3) 基板と当て板の接触部に厚さ 0.5mm の境界要素を設け、境界要素とボルト部の要素の比抵抗を基板要素の 3000 倍とすることで、上述の実験で得られる電位差を解析により精度良く再現することができた。
すなわち、本研究における基板と当て板の接触部およびボルト部の取り扱いの妥当性が検証できた。
- (3)に示す結果を基本として、窓のない当て板に覆われた基板非可視部におけるき裂進展モニタリングをシミュレーションした結果によれば；
- (4) 当て板に覆われた非可視部におけるき裂の進展に伴う FC 値の変化の挙動は、窓によりき裂部を可視化した場合とほぼ同じであった。
- (5) 基板に発生・進展するき裂が当て板に完全に覆われていても、FSM により非可視部のき裂の挙動がモニタリングできる可能性を確認した。

謝辞

本研究の一部は、社団法人日本鉄鋼連盟「2009 年度鋼構造研究・教育助成事業」の助成を受けて行ったものである。また、実験では新井拓也君（研究当時 大阪大学学部生）の協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 平林泰明：首都高速道路の鋼道路橋の疲労損傷および対策，溶接学会得論文集第 24 巻第 1 号，pp.127-132（平成 18 年度春季全国大会シンポジウム講演概要），2006。
- 2) 日本鋼構造協会：供用下にある鋼構造物の高力ボルトによる補強・補修指針（案），JSSC レポート，1989。
- 3) 奥 健太郎，有田圭介，金 裕哲：電場指紋照合法による疲労き裂の発生・進展モニタリング，鋼構造論文集，Vol.13，No.50，pp.35-43，2006。
- 4) 金 裕哲，奥 健太郎：電場指紋照合法による疲労き裂の発生と進展の監視，溶接技術，Vol.55，pp.73-78，2007。
- 5) 金 裕哲，麻 泰宏，奥 健太郎：FSM による鋼床版の疲労き裂発生と進展の監視，溶接学会論文集，Vol.25，No.4，pp.542-547，2007。
- 6) 金 裕哲，廣畑幹人，奥 健太郎，北澤正彦：FSM モニタリングにおけるき裂の進展評価指標について，溶接学会論文集，Vol.28，No.2，pp.187-192，2010。
- 7) （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，丸善，2002。

（2011 年 3 月 8 日受付）