

電場指紋照合法 (FSM) を用いた 疲労亀裂モニタリングの実橋梁における実用性検討

(財) 阪神高速道路管理技術センター調査研究部 川上 順子
(財) 阪神高速道路管理技術センター企画部 金治 英貞

要 旨

近年、重交通路線を中心に鋼床版の疲労損傷が問題となっており、その損傷発見および進展監視する効率的で有効な手法が必要とされている。そこで常時観測が可能なモニタリング技術として既に発電所や各種プラントにおける配管の腐食や減肉のモニタリングに適用されている電場指紋照合法 (Field Signature Method, 以下 FSM と称す) に着目し、鋼床版橋等実橋梁への適用性について検討を行った。

キーワード: 鋼構造物, 疲労損傷, FSM (電場指紋照合法), モニタリング

はじめに

近年、重交通路線を中心に鋼床版の疲労損傷が問題となっている。鋼橋に生じる疲労損傷は、発生頻度は低いですが、一度発生すると脆性破壊を引き起こし、最悪の場合落橋にも至るほど、その影響度は非常に大きなものとなる。発生箇所を予測し、予防保全 (補強) を講じることが最善と考えられるが、一般に疲労損傷の発生は、溶接部の形状や溶接欠陥に起因する応力集中の影響を受け、また特に鋼床版では輪荷重載荷位置により応力状態が複雑に変化するため、発生箇所の予測は容易ではない。また補強についても鋼床版においては上面からの床版増厚等、交通遮断を伴う方法が中心となるため、広範囲での適用は困難である。当面は点検の強化により亀裂を発見することが重要であるが、定期的な点検においても亀裂発生をリアルタイムで検出することは困難であり、また、海上部や桁高の高い部分では、点検そのものが容易に

行えない場合が多い。そこで目視による点検とあわせて、常時観測が可能なモニタリング技術の導入が有効と考えられる。本稿では、既に発電所や各種プラントにおける配管の腐食や減肉のモニタリングに適用されている電場指紋照合法 (Field Signature Method, 以下 FSM と称す) に着目し、鋼床版橋等実橋梁への実用性について検討を行った。

1. FSMの基本原理

1-1 基本原理

FSMは、導電性を有する検査対象物に直流パルス電流を印加して瞬間的に電場を形成し、その電場内の特定箇所の電位差を計測し、その計測値から、損傷の程度を特定する非破壊検査手法である¹⁾。測定部位に減肉や亀裂が発生すると、その部分の電気抵抗は大きくなる。従って、一定電流 (I_0) を供給した場合、オームの法則により電位

差は大きくなる。図-1 は対象部位に減肉，亀裂が発生した場合の電位差の変化を模式的に表す。健全部の電位差を V_0 とすると，減肉，亀裂が生じた箇所の電位差 V_1 は， V_0 よりも大きくなる。この健全状態からの電位差の変化率 $(V_1 - V_0)/V_0$ を観測することにより，検査対象物の減肉あるいは亀裂の発生・進展を検出するものである。

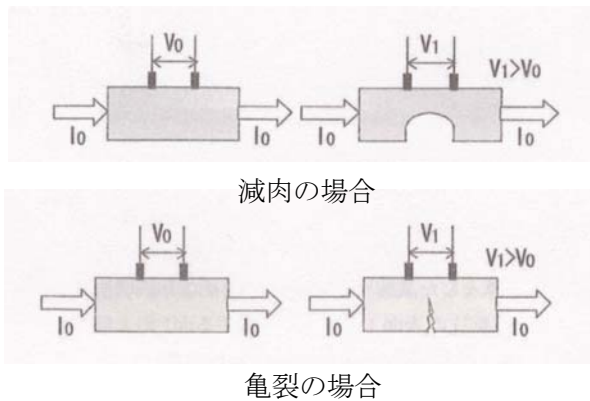


図-1 基本原理

1-2 FSM システム構成

今回の研究には，小型・軽量化により携帯可能な測定装置 FSM - IT (写真-1) を使用した。そのシステム構成の概念図を，図-2 に示す。まずモニタリングエリアに電流を与える 2 本の電極（以下、印加電極という）を設置する。その後腐食・亀裂損傷の発生予測部，あるいは既に発生している周辺部分にセンシングピンを格子状に設置する。このモニタリングエリアに設置した印加電極，センシングピンと FSM - IT とをケーブル類で接続する。モニタリングでは，電極間に直流パルス電流を印加することにより生じる各センシングピン間 (pair) の電位差を計測する。FSM - IT は，電流の印加から pair の電位差の計測までを自動で行う機能を有しており，測定者の技能に関わらず，測定誤差のない計測を可能にしている。測定時間は 1 箇所につき約 5 分で完了するため，短時間で広範囲のモニタリングが可能である。なお，採取したデータは FSM - IT 本体に保存され，そのデータをパソコンに取り込むことにより，一元管理することができる。採取された一連のデー

タは，専用ソフトによって解析することができる。このソフトでは，腐食・亀裂が 2 次元・3 次元線図で表示され，損傷箇所の検出，さらに経時的変化の観察が可能である。また，FSM-IT は，遠隔測定機能を有しており，電話回線，携帯電話を用いた遠隔監視が可能である。



写真-1 測定装置 FSM-IT

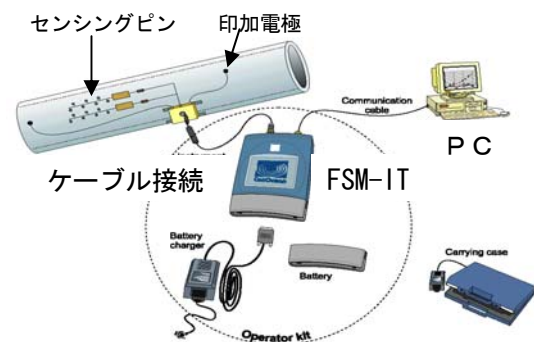


図-2 システム構成概念図

2. 実橋梁での適用事例

2-1 鋼床版 U リブスカラップから発生した疲労亀裂の進展監視

モニタリング箇所とその模式図を写真-2，図-3 に示す。ここで対象としているのは，U リブスカラップから発生している既存亀裂であり，この亀裂の進展の有無を監視し，進展が生じた場合，その進展量を特定することを目的としている。

ここでは，①～⑥の pair の電位差を同時に計測している。このケースでは印加電極，センシングピンに接続したケーブルを歩道からアクセスできる橋脚まで延長して，そこに中継器を設置し，実際の測定はこの中継器に測定器を接続して行っ

ている（写真-3）。このように，歩道からアクセスできる箇所や非常駐車帯などに中継器を設置することにより，交通を規制することなく測定することが可能である。また，計測位置まで足を運ぶ必要がないので大幅な省力化が図られる。

本ケースでは，約一年間の計測期間中に亀裂進展は観測されず，磁粉探傷試験による確認においても進展は見られなかった。

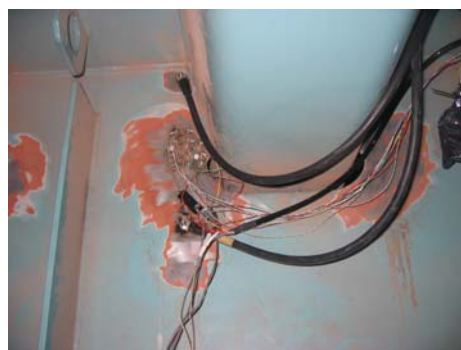


写真-2 スカラップ亀裂発生部計測状況

2-2 鋼床版バルブリスカラップ部から発生した疲労亀裂への補修補強箇所の健全性診断

モニタリング箇所とその模式図を写真-4 に示す。ここでは，スカラップ廻し溶接部より亀裂が発生し，補修・補強がなされている部分を一部（横リブ 4 本分，デッキプレート 3 パネル分）モニタリングしている。一定期間モニタリングを実施し，亀裂の進展が止まっていることが確認できれば，採用した補修補強法の妥当性が示されることになる。

また，橋梁単位等広範囲でのモニタリングを想定し，効率的に亀裂発生の有無，亀裂進展の程度を特定することを目的として，pair の間隔を前述 2-1 のケースと比べ，広くしている（最大約 2m）。pair の間隔を広げた場合も，亀裂発生・進展による溶接部の電位差の変化を問題なく捉えられることは，鋼床版を用いた実験により，既に示されている²⁾。本ケースでは約 1 年間の計測期間中に亀裂進展は観測されていない。

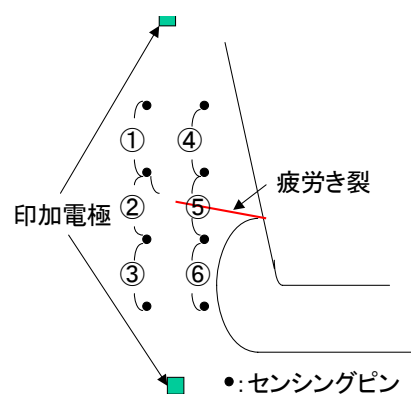


図-3 モニタリング箇所模式図

2-3 鋼床版Uリブとデッキプレート溶接部に発生した亀裂の進展監視

モニタリング箇所とその模式図を写真-5，写真-6，図-4 に示す。ここでは，鋼床版箱桁内Uリブとデッキプレート溶接部に発生し，Uトラフウェブに進展した亀裂について，進展監視を行うと共に，前述 2-2 のケースよりも更に長距離粗探傷モニタリング（センシングピン間および印加電極間の距離を広げる）の実用性を検証している。今回の検証では，2-1 のケースにおいてセンシングピンを数センチ間隔で配置していたものを，最



写真-3 中継器設置箇所



写真-4 スカラップ補強部計測状況

大 12m まで広げ、印加電極間隔については 90m 程度まで広げている。計測結果については 3-2 にて述べる。

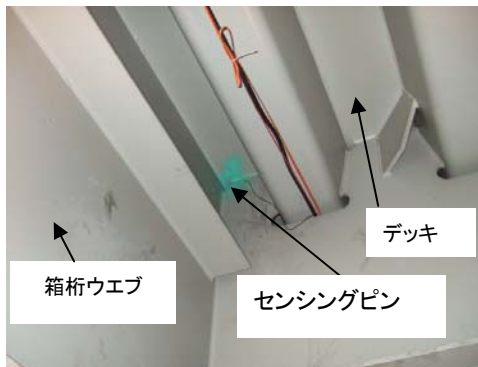


写真-5 Uリブ溶接部計測状況

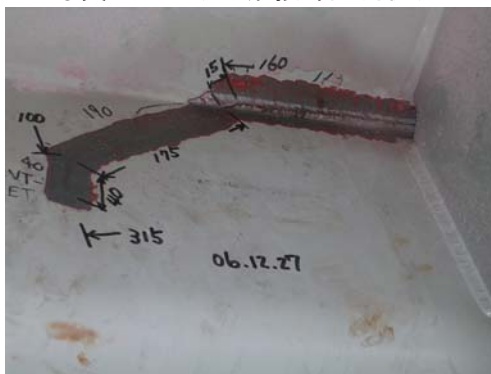


写真-6 Uリブ溶接部亀裂発生状況

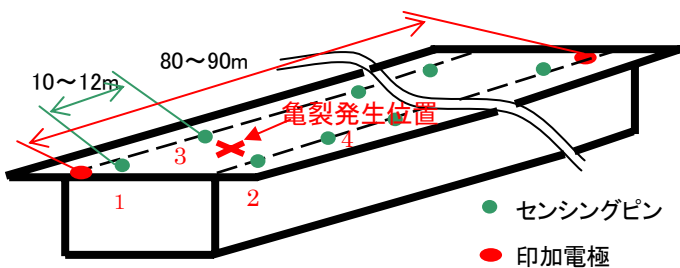


図-4 モニタリング箇所模式図

3. 実橋梁での実用性

3-1 振動・変動応力下におけるモニタリングの精度

FSMにて測定する電位差は橋梁で生じる振動、応力変動に影響されることが予測される。この影響によって生じる測定値のばらつきが、そのまま検出精度に反映されることが考えられるが、これがどの程度であるのか、また、pair間隔の違いによる影響を明らかにする必要がある。そこで、2-2に示した箇所における間隔の違うpairを設定し、

振動・変動応力下におけるモニタリングの精度について考察を行う。FSMでは損傷箇所の電位差の変化率を千分率で表した電場指紋係数FC値により、結果を整理する。FC値が上昇した場合、そのpair間に亀裂が発生・進展したことになる。2-2にて記述した箇所における図-5に示す各pairのFC値を図-6に示す。既往の研究により、貫通亀裂が0.1mm進展した場合、それを挟むpair間では約10pptのFC値の上昇があることがわかっている。一方、実橋梁に生じる振動・応力変動により、FC値にばらつきが生じることが懸念されたが、図-6に示すようにばらつきは10ppt以下である。よって、貫通亀裂進展を少なくとも0.1mm程度の精度でモニタリング可能であると同時に、対象箇所ではそれ以上の亀裂の進展はないことが確認された。一方、ショートペアのばらつきに比べ、ロングペアのほうが大きく、ショートペア(pair①, ②, ③, ④)が約1ppt, ロングペア(pair⑤)が約4ppt程度である。これにより、pairの間隔を広げれば、ひとつのpairでモニタリングできる範囲は広がるが、その分、振動等の影響によるばらつきは大きくなることが確認された。

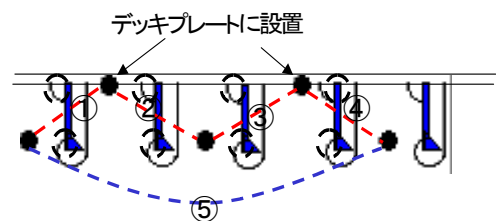


図-5 モニタリング箇所模式図

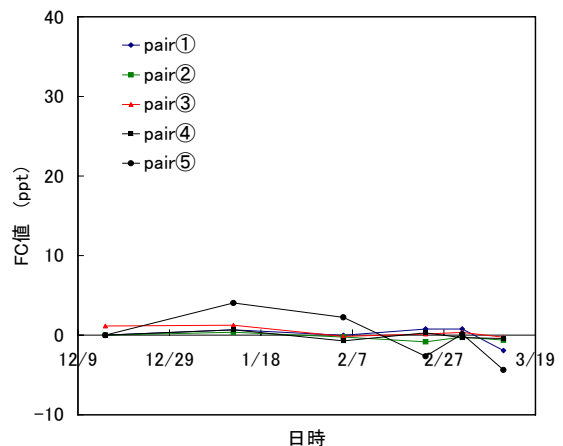


図-6 モニタリング結果

3-2 長距離粗探傷モニタリングの実用性

2-3 に示した箇所における各 pair の F C 値を図-7 に示す。亀裂の存在する箇所を挟む pair2 の値が増加しており、亀裂の進展が見られる。一方、亀裂の存在しない箇所 (pair1, pair3) においては F C 値の上昇は見られない。pair2 部の亀裂進展については、目視においても 1mm 程度の進展を確認しており、その他の場所における亀裂発生は確認されていない。また図-8 に亀裂近傍に設置したセンシングピンの配置図および、図-9 にそれぞれの各 pair の F C 値を示す。亀裂の進展により、亀裂を挟む pair の変化率が増加しており、pair 間隔が短いほど、電位差の変化率 (グラフ縦軸) が大きい。

今回、印加電極間隔を約 90m、センシングピン間隔を最大 12m まで広げた計測において亀裂進展を検知していることから、全橋等を対象とした広範囲なモニタリングに適用可能であることがわかった。

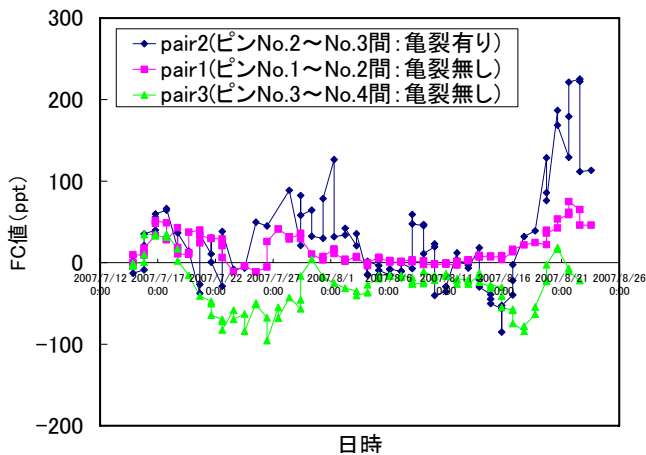


図-7 亀裂有無による F C 値計測結果

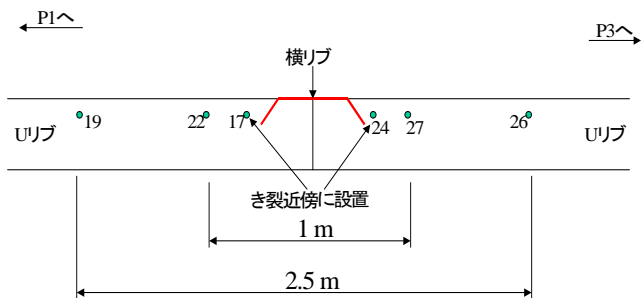


図-8 亀裂近傍のセンシングピン配置図

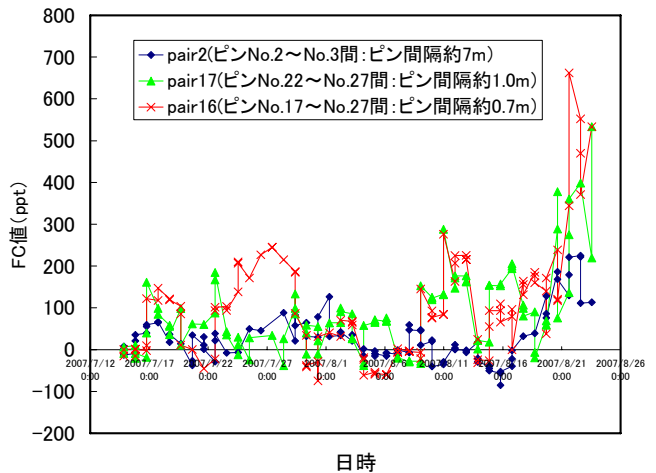


図-9 ピン間隔による F C 値計測結果

4. まとめと今後の課題

鋼構造物の疲労亀裂モニタリング手法として F S M に着目し、鋼床版等実橋梁における実用性について検討を行った。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 実橋梁に生じる振動・応力変動による F C 値のばらつきは 10ppt 以下であり、亀裂進展を少なくとも 0.1mm 程度の精度でモニタリングが可能である。
- (2) 長距離粗探傷モニタリングにおいても亀裂進展を検知することができたことから、F S M は特定の亀裂の進展監視のみならず、全橋等広範囲なエリアにおける損傷発生 の 1 次スクリーニング (異変を粗い精度で検知し、詳細調査実施の判断材料とする) に適用可能であることがわかった。

今後の課題としては、これまでの計測結果から実橋梁で適用する場合の各仕様 (必要精度に応じたセンシングピン間隔の規定、亀裂発生・進展の F C 値による判定基準等) を決定する必要がある。また、F S M の導入について、現在の点検や補修補強計画を踏まえた上で、どのような箇所を対象にどのくらいの頻度で実施するか検討する必要がある。

謝辞：本検討を実施するにあたり，大阪大学金裕哲教授に多大なるご指導とご助言を頂きましたことを厚く御礼申し上げます。また本検討の（財）阪神高速道路管理技術センターの共同研究者である㈱アトラス社にこの場を借りまして謝意を表します。

参考文献

1) 奥健太郎，有田圭介，金裕哲：電場指紋照合法による疲労亀裂発生・進展モニタリング，鋼構造論文集，13-50 (2006)，pp35-43.

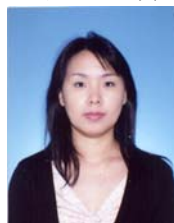
- 2) 金裕哲，麻泰宏，奥健太郎：電場指紋照合法による疲労亀裂発生・進展の監視，溶接構造シボジウム2007
- 3) 奥健太郎，川上順子，金裕哲：鋼橋に生じる疲労亀裂の監視に対する電場指紋照合法の適用，土木学会第62回年次学術講演会論文集，I-426，2007.9
- 4) 金裕哲，麻泰宏，奥健太郎：FSMによるUリブ鋼床版に生じる疲労亀裂の監視，土木学会第62回年次学術講演会論文集，I-427，2007.9

STUDY ON APPLICATION OF FIELD SIGNATURE METHOD (FSM) TO FATIGUE CRACK MONITORING ON STEEL BRIDGES

Yoriko KAWAKAMI and Hidesada KANAJI

Recently, a number of fatigue cracks have been detected in orthotropic steel decks in Japan. An effective inspection method for detecting cracks and monitoring crack propagation needs to be established urgently. In this study, Field Signature Method (FSM) which is one of the non-destructive inspection methods was examined. FSM is a method that evaluates damage in the steel structures from measurement results of potential difference obtained by applying electric current to the objects. This method had already been applied to the detection of corrosion or cross sectional reduction of the plumbing in power stations and other various plants. The current study examined its applicability to the detection and monitoring of fatigue cracks in steel bridges including those with orthotropic steel decks. FSM system was installed to several real orthotropic steel deck bridges under different conditions and tested for any unwanted influence of bridge vibration on the measurement results due to the traffic passing over the bridge. Then, the sensors of the system were installed at wider intervals to investigate the practical applicability to wide area monitoring on an entire bridge. As a result, the effectiveness of this system in monitoring fatigue cracks in steel bridges was verified.

川上 順子



阪神高速道路管理技術センター
調査研究部 調査研究課
Yoriko Kawakami

金治 英貞



阪神高速道路管理技術センター
企画部企画課
Hidesada Kanaji