

電場指紋照合法（FSM）を用いた疲労き裂 モニタリングの実橋梁への適用性検討

高田 佳彦・金治 英貞・川上 順子

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、疲労損傷のモニタリングとき裂検出を目的に鋼床版橋等実橋梁への適用性とその高度化について検討を行った。

キーワード：FSM, 鋼床版, 疲労き裂, FC値, ハザードカーブ

1. はじめに

近年、鋼道路橋の疲労損傷が数多く報告されている。特に鋼床版の疲労損傷は都市高速、直轄国道などで数多く発見されており、その対策は道路管理上喫緊の課題である。鋼床版は、図-1に示すように、薄板であるデッキプレートと縦リブと横リブとで補強した構造で、軽量で、架設が容易かつその施工が速いため、湾岸線など死荷重を軽減する必要のある軟弱地盤区間の橋梁、長大橋などに多数採用されている。

鋼床版は、自動車輪荷重が直接載荷されるために応力の変動が大きく、またその繰返し数が極めて多い構造部材である。また、溶接による薄板集成構造であるため全体的に剛性が小さく、鋼床版を構成する板要素が複雑な挙動をし、応力集中が大きい。部材交差部などで局所的に大きい応力が繰返し発生することにより、疲労損傷に繋がる。

鋼床版に発生しているき裂のタイプは多岐にわたっているが、縦リブの構造がUリブ形式の主要なき裂

タイプは、図-2に示すとおりである。その内、デッキプレート（以下、デッキという）とUリブ溶接線を起点に発生するき裂（ビード貫通き裂）は、進展性が高く、床組構造への耐荷力の影響が懸念される。また、デッキに進展し貫通した場合（デッキ貫通き裂）、交通荷重の支持機能の低下や舗装の損傷を誘発する恐れがあるなど道路管理上深刻な課題となっている（図-3参照）。

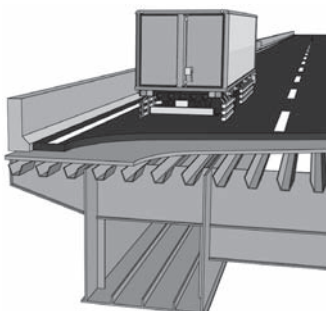


図-1 鋼床版の構造

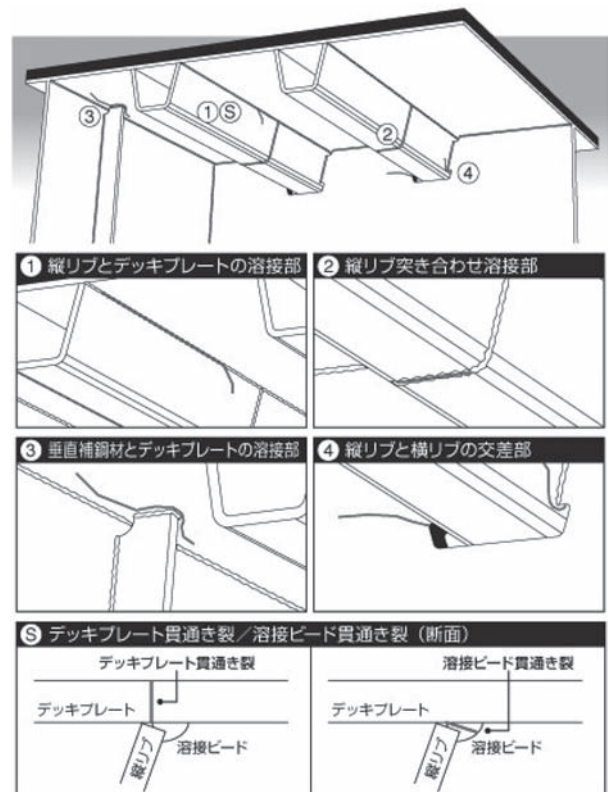
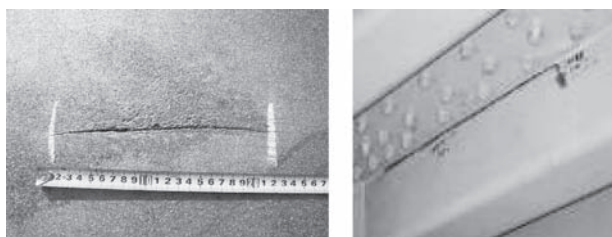


図-2 鋼床版の主要なき裂タイプ



(a)デッキプレート貫通き裂 (b)溶接ビード貫通き裂

図-3 疲労き裂の状況

鋼橋の点検は、接近目視を基本に渦流探傷試験や磁粉探傷試験など非破壊試験と組み合わせて定期的を実施している。鋼床版は、長大橋や海上部の橋梁に使われることが多く、接近点検には多額のコストと時間を要する。一方、デッキプレート貫通き裂は、舗装を除去しない限り目視では捉えることができず、接近点検でも検出は不可能である。

構造物点検において、目視点検を補完し、対象部材に接近することなく、損傷の検出や常時観測が可能なモニタリング技術が道路管理上必要とされている。そこで、電場指紋照合法 (Field Signature Method, 以下FSMと称す) に着目し、検討を行ってきたものである。

FSMは、電気特性を利用した非破壊検査の一種で、検査対象箇所に取り付けた測定端子 (ピン) 間の電位差を測定することにより、き裂、腐食等の損傷を特定する技術である。ノルウェーで開発され、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実績がある。

FSMは、鋼床版の微細なき裂の進展を捉えることができ、特に目視では捉えることができないデッキプレート貫通き裂の検出が可能である。また、高架橋においては一旦ピンなどの計測機器を設置すると、以降、アクセスしやすい路下で検査が実施できる。また、電話回線、携帯電話を用いた遠隔監視が可能である。

本文では、FSMを用いて、都市内高架橋の鋼床版橋を対象に、実橋梁への適用性とその高度化を検討した。

2. FSM 技術の原理

(1) FSM の基本原理

電的にき裂損傷を検出する手法である電位差法は、印加する電流の種類 (直流、交流など) により、種別が分けられるが、FSMでは、直流のパルス電流を使用している。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⁾。測定部位に減肉やき裂が発生すると、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-4は対象部位に減肉、き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、き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き裂の発生・進展を検出するものである。FSMでは、この電位差は、測定対象を挟む形でセンシングピンと呼ぶ測定機器を設置し、センシングピン間 (以下 pair と記す) の電位差を測定する。

この計測値 V_1 または健全状態からの電位差の変化率 $(V_1 - V_0) / V_0$ と、予め模擬実験や電位差解析等により準備したマスターカーブとを比較・照合することにより、き裂長さや腐食量を定量化する。なお、計測に用いる電流電圧は、モニタリング範囲やピン間隔により決定されるが電圧で $60 \sim 100 \mu\text{V}$ 、電流で $30 \text{ A} \sim 100 \text{ A}$ である。

従来、疲労き裂の検出や腐食発生部位の残存板厚の測定には、浸透探傷法 (PT)、磁粉探傷法 (MT)、超音波探傷法 (UT) 等の非破壊検査手法が用いられてきた。それに対し、FSMの優位性など、特徴を以下に述べる。

- ・従来法が局部・点測定であるのに対し、FSMは面測定のため損傷等の見逃しが少ない。
- ・溶接箇所はもちろん、導電材料であれば、複雑な形状の箇所の診断もできる。
- ・全自動化されているため、測定員の違いによる測定誤差がほとんどない。
- ・測定時間は10分程度と短時間で検査ができる。
- ・遠隔操作で診断が可能。

これらの特徴を有するFSMは、デッキプレート貫

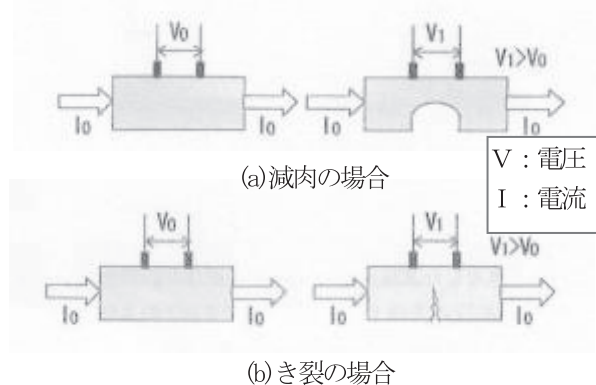


図-4 FSMの基本原理

通き裂を UT よりも合理的に検出できる，補強鋼板の下の疲労き裂の進展を確認できるなど，他手法では実現困難であった検査が可能である。これら，FSM の特徴を十分理解した上で，その効果を最大限発揮する形態で，モニタリングを実施することが望ましい。

(2) FSM のシステム構成

FSM のシステム構成は，印加電極，センシングピンおよび測定装置 (FSM-IT) から構成され，そのシステム構成の概念図を図一5に示す。印加電極は，測定対象エリアに電流を供給するもので，モニタリングエリアの両端に1本ずつ設置する。センシングピンは，対象エリア内のき裂損傷の発生箇所，あるいは，予想される箇所に格子状に設置する。

印加電極，センシングピンと FSM-IT とはケーブル類で接続し，印加電極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



図一5 システム構成概念図



図一6 測定装置 FSM-IT

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。FSM-IT を図一6に示すが，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。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。

(3) FSM による損傷判定

き裂が発生・進展すると，pair の電位差に変化が生じ，この変化量からき裂の発生および進展量を求める。この際，pair に生じる電位差の変動は非常に微弱であるため，温度の違いによる影響を受ける。これを補正するために，健全な箇所に参照用のピン (照合対) を設置し，センシングピンとの電位差の補正を行い，得られる電位差の変動を電場指紋係数 FC 値に変換して表す。

時間 i における pair A の電場指紋係数 FC 値は次式によって求めることができる。

$$FC = (Bs/As \times Ai/Bi - 1) \times 1000 \text{ (ppt)}$$

ここに，

As : モニタリング開始時の pair A の電位差

Bs : モニタリング開始時の照合対の電位差

Ai : 時間 i における pair A の電位差

Bi : 時間 i における照合対の電位差

測定に用いる FSM 装置，電位差計測用インターフェイスは，電位差の変化を 1/1000 の解像度で検出できるものを用いる。よって FC 値は千分率 (pair per thousand, ppt) で表記する。この FC 値が上昇した場合，その pair 間にき裂が発生・進展したことになる。

3. 実鋼床版における FSM のモニタリング測定結果

(1) Uリブと横リブ交差部スリットのき裂進展監視

図一7に示すように，Uリブと横リブ交差部における横リブウェブのスリットを起点とするき裂に対して，FSM により進展監視モニタリングを実施した。センシングピンは，図一8に示すとおり，き裂を挟んで 100 mm 間隔程度に設置している。

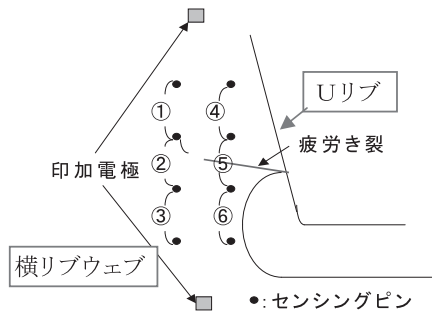
ここでは，①～⑥の pair の電位差を同時に計測している。このケースでは印加電極，センシングピンに接続したケーブルを図一9のように路下の歩道からアクセスできる橋脚まで延長して，そこに中継器を設置し，実際の測定はこの中継器に測定器を接続して行っ

ている。

FSM 測定時に、目視もしくは磁粉探傷試験を行い、FC 値とき裂との相関を検証している。本ケースでは、約一年間の計測期間中に、FC 値が変化せず、目視においてもき裂の進展は観測されなかった。



図一七 スカラップき裂発生部計測状況



図一八 モニタリング箇所模式図



図一九 橋脚基部における中継機の設置状況

(2) バルブリブ交差部スリットのき裂の進展監視

バルブリブと横リブ交差部スリットのき裂に対して FSM により監視を行っている。図一十に示すように、横リブウェーブにき裂が発生している箇所はあて板による補強が行われている。補強によるき裂進展抑制効果、および、未補強箇所のき裂発生検出を目的にモニタリングを行った。測定対象エリアは、箱桁内の横リブ

4本から構成されるパネルとした。橋梁単位等広範囲でのモニタリングの基礎検討として、センシングピンの pair の間隔を、最大約 2 m 程度と拡くしている。なお、このレベルに pair の間隔を広げた場合も、き裂発生・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⁾。

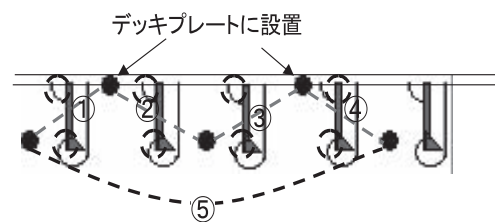


図一十 計測状況

一方、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、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の検証を行った。

測定対象エリアにおける図一十一に示すセンシングピンの各 pair の FC 値を図一十二に示す。ピン間隔の異なる pair 同士を比較すると、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 (pair ①, ②, ③, ④) が約 1 ppt, ロングペア (pair ⑤) が約 4 ppt 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。

既往の研究¹⁾により、貫通き裂が 0.1 mm 進展した場合、それを挟む pair 間では約 10 ppt 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



--- : ショートペア - - : ロングペア ⊕ : き裂発生懸念箇所

図一十一 モニタリング箇所模式図

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-12 に示すようにばらつきは 10 ppt 以下と小さい。

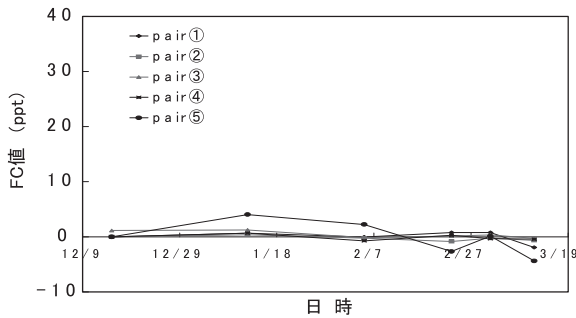


図-12 モニタリング結果

(3) 鋼床版 U リブとデッキプレート溶接部に発生したき裂の長距離粗探傷モニタリング

前述した 2 ケースの実測結果を踏まえ、FSM の一層の実用化と効率化を目的に、更にピン間隔を延ばした長距離粗探傷モニタリング技術の確立を検討するため、常時連続測定を平成 19 年 7 月から実施し、現在も継続している。測定箇所は、図-13 に示すように、鋼床版箱桁内における横リブ交差部近傍のデッキと U リブを起点に発生したビード貫通き裂で、U リブウェブに進展している。U リブウェブの発生応力は高く、進展しやすい傾向にある。図-14 にき裂近傍の計測状況を、図-15 にピン設置位置図を示す。センシングピンの間隔を最大 12 m まで、印加電極間隔は 90 m

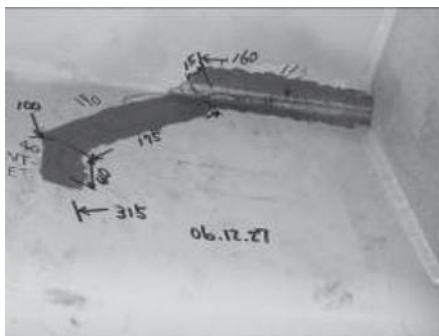


図-13 測定開始時点の U リブ溶接部き裂発生状況

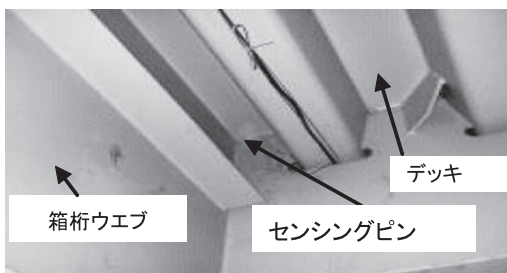


図-14 U リブ溶接部計測状況

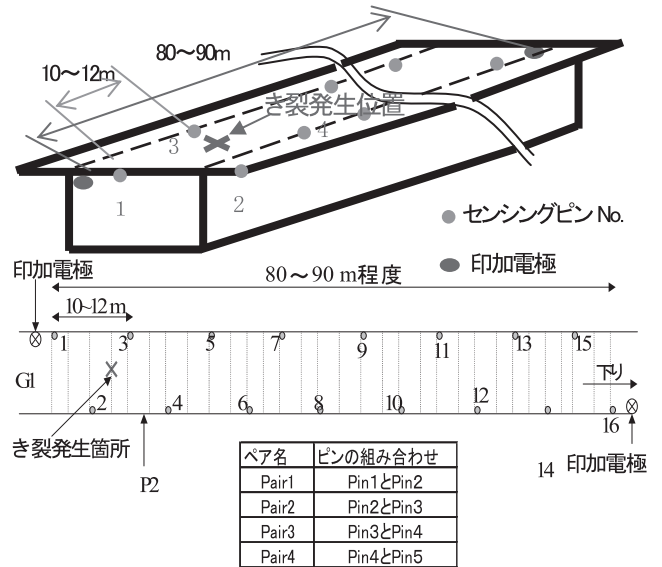


図-15 ピン設置位置とピンのペア

程度まで広げて設置している。

き裂は、センシングピンの組み合わせペアである Pair2 である Pin2 と Pin3 を挟む U リブ横リブ交差部に位置している、FSM 測定結果は PHS 無線で送信しており、き裂は定期的に目視および MT で進展を監視している。

図-16 に計測開始時点からの FC 値の測定履歴を示す。測定開始から pair2 の FC 値が増加し、150 ppt の時点で、MT で 33 mm 程度のき裂進展、また 300 ppt の段階でさらに 6 mm の進展を確認しており、FSM でき裂進展が捕らえられていることが確認された。その際、図-16 の Mar08 で FC 値が低下しその後 May08 手前で 300 ppt を越えるまで増加しており、その間もき裂が進展していた。図-17 (a) は現時点でのき裂状況であるが、き裂の進展方向は複雑に変動し U ターンを描くように横リブに向けて弧を描くような形状である。このような進展はこれまでの阪神高速道路の点検結果では見られない傾向である。き裂の進展形状が FC 値に影響を与えている可能性がある。一方、き裂の確認されていない他のピンペアでも FC 値の変動がみられるが、Pair2 に対しては大幅に小さい。ただ、ピン間隔を広げたことで、車両走行、振動などの影響を受けやすくなっており、また、測定したデータは 1 日に 3 回取得したデータを単純平均しており、その際振動の影響などにより大きな電位差が生じるはずれ値の除去しておらず、今後連続測定の長所を生かして計測データの処理方法を検討し、き裂長と FC 値との相関を明らかにしたい。

その後 Sep08 の計測時に、図-17 (b) に示すように、き裂のあった U リブの延長線上の隣接横リブ近傍で

L=120 mm と L=370 mm のき裂が発見された。き裂の発生時期は不明であるが、新規き裂をはさむ Pair3 は Nov07 あたりから FC 値が増加傾向にあることからその時期にき裂の進展が顕著になったと予想されるとともに、このき裂が Pair2 の FC 値の変動に影響を与えていると考えられる。

これらの結果から、センシングピン間隔を 10 m 程度に広げた長距離粗探傷モニタリングでき裂の検出が確認でき、き裂モニタリングに成功した。今後、印加時の鋼床版の電圧分布を電場解析で再現することで、FC 値の変動因子を特定し、き裂長と FC 値の相関曲線であるき裂サイジング用のマスターカーブを検討し、高度化を図っていきたい。

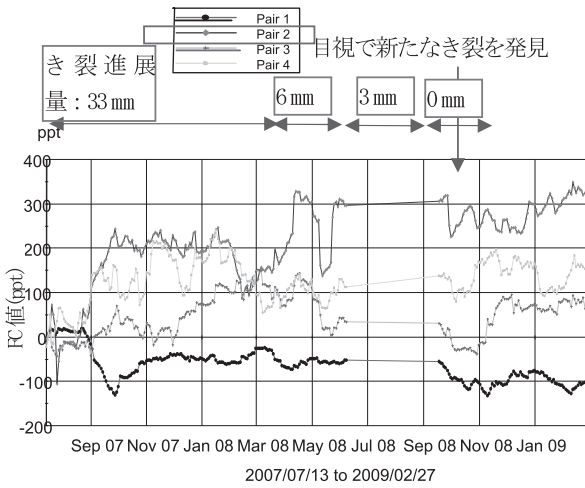
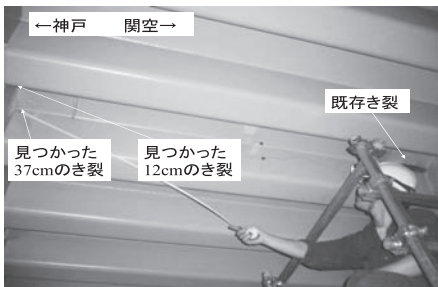


図-16 FC 値の測定履歴結果



(a) き裂進展状況 (L=902 mm)



(b) 平成 20 年 8 月に発見されたき裂(L=370 mm および L=120 mm)

図-17 現在のき裂発生進展状況

4. 今後の展開

(1) 長距離粗探傷モニタリング

前述した 3 (2) で紹介した鋼床版桁において、大規模粗探傷によりき裂の進展を捕らえ、き裂モニタリングに成功した。そこで、平成 21 年度より湾岸線において、7 橋程度を対象に、図-18 に示すように、FSM の長距離粗探傷によりき裂をモニタリングするとともに、FSM 高度化に向けたデータ取得を行い、一層の精度向上、合理化を検討する。

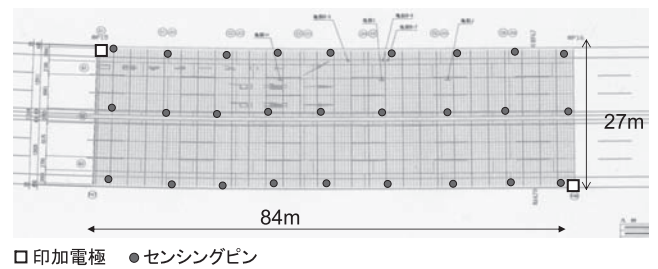


図-18 長距離粗探傷によるモニタリング計画

(2) デッキプレート貫通き裂の監視・モニタリング

湾岸線のニールセンアーチ橋において、デッキプレート貫通き裂が昨年度に発見され、今春に鋼板による補修が検討されている。その補修までの間、き裂の進展を監視するため、き裂近傍に詳細にセンシングピンを配置し、監視を行う。あわせて、今後、新たなき裂の発生を継続的に監視するため、図-19 に示すように長距離粗探傷によるモニタリングを行う。

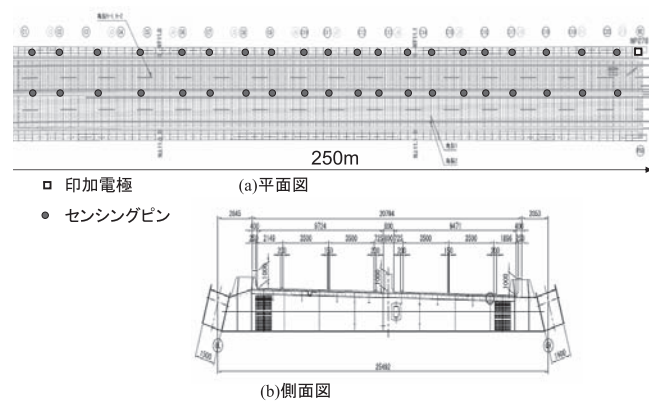


図-19 新浜寺大橋の長距離粗探傷によるモニタリング

5. まとめ

鋼構造物の疲労き裂モニタリング手法として FSM 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き裂近傍に着目したき裂モニタリング測定結果において、センシングピン間隔は2m程度では、実橋梁に生じる振動・応力変動によるFC値のばらつきは10ppt以下であり、き裂進展を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き裂進展を検知することができたことから、FSMは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実用性が検証できた。
- ③長距離粗探傷では、き裂の確認されていないピンペアでもFC値の変動がみられる。これは、ピン間隔を広げたことで、車両走行、振動、温度分布差などの影響を受けやすくなっている。今後、データを蓄積し、き裂有無の閾値を検討する予定である。また、測定したデータは1日に3回取得したデータを単純平均しており、その際振動の影響により大きな電位差が生じるはずれ値の除去しておらず、今後連続測定の特長を生かして計測データの処理方法を検討する。
- ④き裂の進展形状がモニタリングの結果に影響を与えている可能性がある。今後、印加時の鋼床版の電圧分布を電場解析で再現することで、FC値の変動因子を特定し、き裂長とFC値の相関曲線であるき裂サイジング用のマスターカーブを作成し、高度化を図っていく。
- ⑤FSMの高度化を図り、これまでの点検手法や補修補強計画を踏まえた上で、道路管理のニーズに対応した安全、確実でより経済的なモニタリング手法を策定したい。

謝辞：本検討を実施するにあたり、電場指紋照合法(FSM)の実橋梁での実用性に関する検討委員会(委

員長：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。なお、本検討の一部は大阪大学および(株)アトラス社との共同研究によるものであり、金教授ならびに同社有田氏、奥氏には深謝する次第です。

JICMA

《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き裂発生・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き裂発生・進展の監視, 溶接構造シンポジウム 2007
- 3) 奥健太郎, 川上順子, 金裕哲: 鋼橋に生じる疲労き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き裂の監視, 土木学会第62回年次学術講演会論文集, I-427, 2007.9

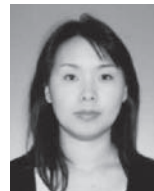
【筆者紹介】



高田 佳彦 (たかだ よしひこ)
 阪神高速道路管理技術センター



金治 英貞 (かなじ ひでさだ)
 阪神高速道路管理技術センター



川上 順子 (かわかみ よりこ)
 阪神高速道路(株)保全交通部