

道路橋の維持管理における状態把握技術の適用性に関する研究（1）

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 28～令 1

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：石田雅博、上仙靖、高橋実、
山本将、廣江亜紀子

【要旨】

本研究は、橋梁の高齢化や対策が必要と判断される橋梁数の増加に対応するため、効果的な維持管理手法としてモニタリング技術に着目し、1)モニタリング技術についてコンクリート橋の目視困難な損傷・変状を把握するセンシング技術の適用可能性を検証・評価した。また、鋼橋の各種劣化損傷への既往調査技術として、2)塗膜を剥がさずに塗膜上から鋼部材表面の疲労亀裂を調査する技術に関する基礎的な検討、3)目視点検が困難な鋼床版デッキプレート進展亀裂を対象とした既開発の調査技術を取り上げ現場適用性の検討を行った。

その結果、1)については、部材の終局に向かう破壊の進行をモニタリングすることが可能であることを実証した。研究によって得られた知見を土木研究所が組合員の一員であるモニタリングシステム技術研究組合がガイドラインとして取りまとめた。2)については、各種調査技術の性能に影響を及ぼす因子の影響度について基礎的な実験に基づく技術的知見の累積を図った。また、目視点検が困難な鋼床版の閉断面リブ(Uリブ)の溶接部に生じるビード亀裂を対象として取り上げ塗膜を剥がさずに塗膜上から検出する超音波探傷法を開発した。3)については、現場実用を重ね鋼床版デッキプレートに内在している疲労亀裂の経年変化の把握に貢献するとともに当該技術の適用性を確認した。

キーワード：モニタリング、載荷実験、たわみ、加速度、非破壊検査技術、疲労亀裂

1. はじめに

平成 26 年度からの定期点検の義務化にともない、橋長 2m 以上の橋梁での定期的な点検が実施されている。これにより橋梁の高齢化と合わせ、対策が必要と判断される橋梁数が増加することが予想されるが、財政的制約等により全てにすぐに対応していくことは困難である。

点検・管理の効率化・信頼性向上の観点から、新技術の診断への活用が望まれる一方で、多様な既設橋の条件に対する新技術を使った点検・診断やモニタリングの技術開発は土木以外の業種も含めては進められるものの確立された技術が無いのが現状である。

本研究では、1)モニタリング技術について目視困難な損傷・変状を把握するセンシング技術の適用可能性を検証・評価した。2)鋼橋の点検技術のうち、鋼床版の閉断面リブ(Uリブ)の溶接部に生じるビード亀裂を対象として取り上げ、塗膜を剥がさずに塗膜上から検出が可能な超音波探傷法を開発した。また、塗膜を剥がさず塗膜上から鋼部材表面に発生する疲労亀裂を調査する既存非破壊検査技術について基礎的な検討を行った。3)目視点検が困難な鋼床版デッキプレート進展亀裂を対象とした既開発の調査技術を用いて、同亀裂の経年変化を調査するとともに、当該技術の現場実

績を踏まえた適用性を確認した。

2. モニタリングシステムの適用性に関する検討

2.1 モニタリングシステム技術研究組合との連携

民間企業等で開発されているモニタリングシステムについて、道路構造物への適用性を確認するため、モニタリングシステム技術研究組合（以下 RAIMS）と協力し、撤去桁を用いた載荷実験において、モニタリング技術の適用性を確認する実験を行った。

RAIMS は、平成 26 年に土木研究所と民間企業（高速道路会社、建設会社、建設コンサルタント、電気・通信メーカー）が組合員となって設立した。新技術などの活用により維持管理のトータルコストの縮減・平準化や作業の省力化・効率化が求められ、構造物の損傷・劣化のセンサによる計測技術や、計測データを収集・伝送する通信技術、データを分析評価するための技術開発が進む一方で、これらをインフラの維持管理の現場に活用するための具体的な方法や考えなどが整理されていないため、どのような構造・部位にどのような技術を適用すべきかをインフラ管理者が判断できず、本格的な現場導入に至っていないのが現状であった。それに対し、RAIMS がセンサや通信・データ解析技術等を組み合わせ、効率的・合理的なモ

モニタリングについてガイドラインを作成して提案することで、損傷・劣化の状態監視を社会インフラの維持管理業務へ導入することを目的としている。

2. 2 撤去桁を用いた载荷実験

2. 2. 1 実験の概要

地方公共団体が管理する橋梁においては RCT 桁橋や RC 床版橋の割合が多く、支間長としては 10~20m 程度のものが最も多い。そこで、RCT 桁橋を対象として、主桁のたわみと振動特性を劣化の指標としたモニタリングシステムの実証を RAIMS と連携して行った。RCT 桁橋の撤去桁の疲労载荷試験による構造劣化の進行と各種モニタリング技術による計測結果を比較し、損傷などの検知が可能かを確認した。対象橋梁を図-2.1・表-2.1 に示す。



図-2.1 撤去橋梁の外観

表-2.1 撤去橋梁の諸元

構造形式	RCT 桁橋 (T15 : 架設年より推定)
竣工年	昭和 2 年
特徴	コンクリートの剥落、鉄筋露出確認
備考	平成 28 年 9 月架け替えにより撤去

土木研究所所有の 50/75t 構造物繰返し载荷装置を用いて疲労载荷試験、静的载荷試験を実施した(図-2.2)。疲労载荷試験では、10~200kN の荷重制御で载荷した。静的载荷では、0~200kN の荷重で载荷し、桁の変位や主鉄筋ひずみを計測した。図-2.3 に示す試験装置を用いて、上方に 5kN の引張力を加えた後、その張力を一気に解放することで、桁を自由振動させた。この時の加速度を各種モニタリング技術にて計測した。



図-2.2 疲労・静的载荷試験の装置図と外観



図-2.3 加振試験の装置図と外観

2. 2. 2 設置センサの概要

本試験で検証したモニタリング技術の一覧を表-2.2 に、また各種センサの設置位置を図-2.4 に示す。たわみに関して 2 種類、振動に関して加速度計を用いた 4 種類の技術を検証した。

表-2.2 検証したモニタリング技術の一覧

	導入技術名称		備考
	技術名	センサ・機器名	
たわみ	変位計測	変位計	不動梁に固定し対象測定
	サンプリングモアレ	サンプリングモアレカメラ	測定対象に格子シールを添付
振動	加速度計測	サーボ型加速度計	サーボ機構による加速度計
	固有振動数分析技術	無線加速度センサ	電池駆動、無線マルチホップ通信
	低周波加速度特徴解析	加速度・傾斜センサ	3 軸加速度センサ(回転角も測定可能)
	振動可視化分析	加速度センサ	対象構造物の動特性を測定

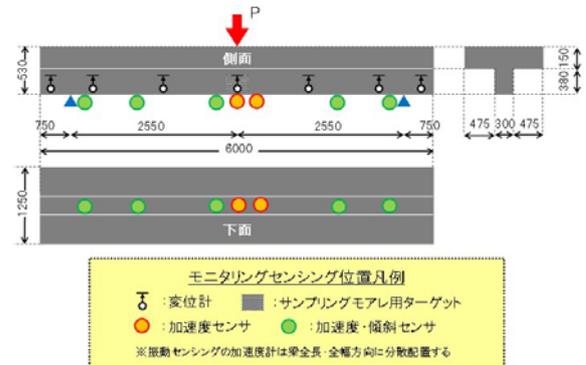


図-2.4 センサの配置図

2. 3 試験結果

2. 3. 1 载荷試験結果

疲労载荷試験では 1,800 回頃から変位が急増し、2,000 回実施した時点で载荷を終了した。その後、静的に荷重を载荷したが 200kN まで達せず、試験を終了した。

静的载荷試験は(1、100、1,000、1,849、2,000 回目)の時点で実施した。また、加振試験を(0、1、100、1,000、1,849、2,000 回後)に実施した。

図-2.5 に示す主鉄筋のひずみは、100 回目までは 4 本ともほぼ同じ値であったが、1,000 回目では 2 本の主鉄筋の付着破壊により、残り 2 本の主鉄筋に応力が集中し、ひずみに差が生じた。付着破壊した主鉄筋は

重ね継手を有しており、その継手付近にせん断ひび割れが発生していた。

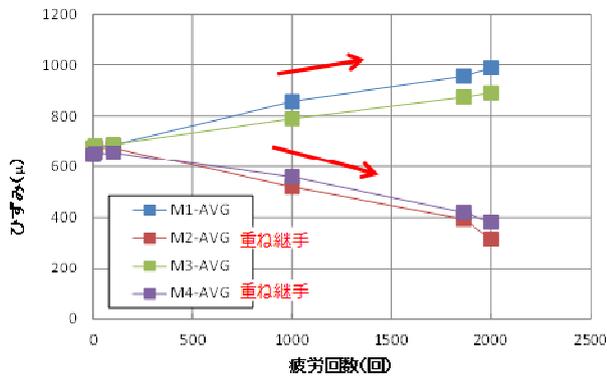


図-2.5 荷重回数と主筋ひずみの関係

2. 3. 2 モニタリング結果 (たわみのモニタリング)

支間中央たわみを変位計で測定した値と疲労回数の関係を図-2.6 に示す。疲労荷重試験の荷重回数の増加に伴い、支間中央たわみが増加していることが分かる。各荷重段階におけるたわみ分布を図-2.7 に示す。1,000 回目時点の静的荷重試験の計測時に全体変位が増加し、変位が右側スパンに傾いていることがわかる。せん断破壊により終局を迎えた右側スパンにせん断変形が卓越する傾向が見てとれる。

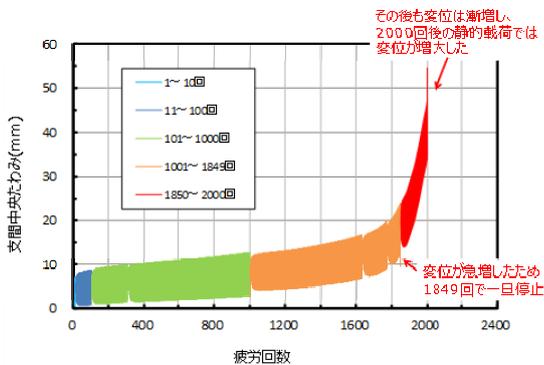


図-2.6 荷重回数とたわみの関係

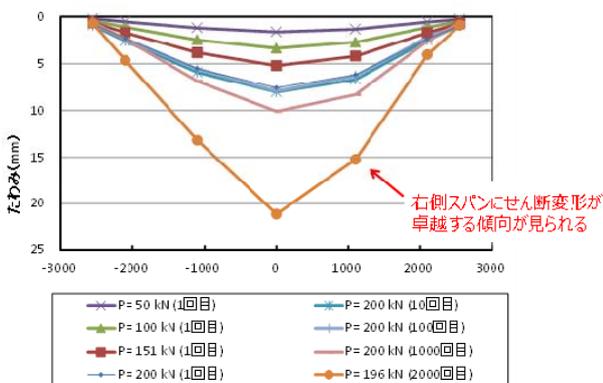


図-2.7 主桁のたわみの推移

サンプリングモアレカメラでもたわみ値は変位計による計測値とほぼ一致する結果が得られた。

2. 3. 3 モニタリング結果 (加速度による振動モニタリング)

低周波加速度特徴解析では、たわみ量やたわみ角の算出、スペクトル解析等を行った。たわみ角の算出では、加速度・傾斜センサにより計測された加速度から、静的荷重試験の荷重前と除荷後で橋軸方向の傾きの差を求め、残留たわみ角[deg]を算出した。図-2.8 に荷重回数と残留たわみ角の関係を示す。

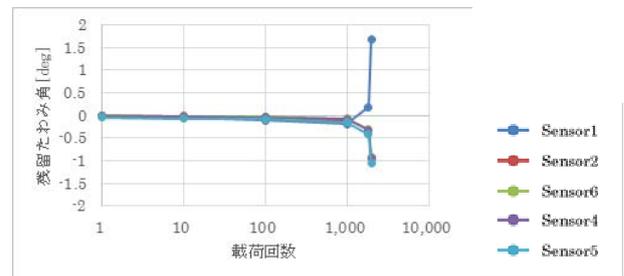


図-2.8 荷重回数と橋軸方向の残留たわみ角の関係

荷重 1,000 回以降で顕著に Sensor1 の残留たわみ角が増加し、損傷が進行する様子を捉えられていることが分かる。なお、剥落箇所 Sensor2 が設置されていたため、算出結果が欠損している。

サーボ式加速度計による加速度計測、固有振動数分析技術、振動可視化分析などによる振動モニタリングにおいても、荷重 1,000 回以降での振動の傾向の変化を捉えることができた。

2. 4 土木構造物のためのモニタリングシステム活用ガイドライン (案)

2. 3 で示した荷重実験やその他現場実証実験の結果をもとに、RAIMS は、多様なモニタリング技術をインフラ構造物の維持管理業務に適用するためのガイドライン「土木構造物のためのモニタリングシステム活用ガイドライン (案)」を作成し、土木研究所は組合員としてこれに貢献した。

ガイドラインの全体の構成は、表-2.3 に示す 9 編に分かれている。

表-2.3 ガイドラインの構成

第1編	総則
第2編	RC床版のモニタリング
第3編	コンクリート桁のモニタリング
第4編	鋼桁のモニタリング
第5編	塩害環境下のコンクリート構造物のモニタリング
第6編	橋脚および基礎のモニタリング
第7編	のり面・斜面の安定性評価のモニタリング
第8編	モニタリングデータの伝送
第9編	データの保存・活用

ガイドラインは、モニタリングについて各編に共通するような事柄やモニタリングの活用イメージを提案する「第1編 総則」と、橋梁の各部材や塩害、土工などに対するモニタリング技術の具体的な手法を示した第2編～第7編、センサが取得したモニタリングデータを取得する手法を整理した第8編、取得したデータの保存・活用について示した第9編で構成されている。モニタリング技術を紹介する第2編～第8編では、表-2.4のような内容が記載されており、道路構造物の維持管理において使用できるモニタリングの種類とその役割、使用手順などを示している。

表-2.4 第2編～第8編の内容概略

第1章	モニタリングの位置づけと種類
	紹介するモニタリング技術が
	・どのような目的において活用できるか
	・どの程度の健全度において活用できるか
第2章～	個別のモニタリング技術の紹介
	・技術の概要
	・モニタリングの手順（計画～計測）
	・費用の目安
	・結果の評価
	・保守

2.5 まとめ

本検討では、目視困難な損傷・変状の発生など、道路構造物の状態を把握することに対して、RAIMSと連携し、モニタリング技術の適用可能性を検証・評価した。その結果、撤去桁を用いた載荷実験において、検証したモニタリング技術によって破壊に至るたわみや振動の変化を捉えることができた。このことから、モニタリング技術によって部材の終局に向かう破壊の進行をモニタリングすることが可能であることが実証された。なお、ここで示したモニタリング結果は一例であり、検証を行ったその他の技術の結果は、参考文献

に示すRAIMSのウェブサイトより公表資料を確認されたい。これらの知見をもとに、RAIMSはモニタリング技術を道路構造物へ適用するためのガイドライン案を作成し、土木研究所がこれに貢献した。

今後は、技術革新が進むセンシング技術等の新技術を適切に評価し、ガイドライン案を充実させていく必要がある。

ここで紹介した内容は、モニタリングシステム技術研究組合（RAIMS）が実施した研究に、組合員として土木研究所として参画した成果をまとめたものであり、RAIMSが受託した、国土交通省所管のSIPである「社会インフラへのモニタリング技術の活用水深に関する技術研究開発」委託事業研究の成果を含む。

2.の参考文献

- 1) モニタリングシステム技術研究組合（RAIMS）：
<http://raims.or.jp/>
- 2) 松尾健二、山口岳思、廣江亜紀子、小原孝之、杉谷真司：撤去桁の疲労載荷試験におけるモニタリング技術検証（その1）～疲労載荷試験概要と試験結果～、土木学会第73回年次学術講演会 CS9-008、2018年8月、（公社）土木学会
- 3) 木下翔平、葛西茂、清川裕、小原孝之、山口岳思、松尾健二：撤去桁の疲労載荷試験におけるモニタリング技術検証（その2）～実験モード解析による疲労損傷評価～、土木学会第73回年次学術講演会 CS9-009、2018年8月、（公社）土木学会
- 4) 皆川翔輝、遠藤義英、山岸貴俊、小原孝之、廣江亜紀子、松尾健二、山口岳思：撤去桁の疲労載荷試験におけるモニタリング技術検証（その3）～低周波3軸加速度の多点同期計測による疲労損傷解析～、土木学会第73回年次学術講演会 CS9-010、2018年8月、（公社）土木学会
- 5) 廣江亜紀子：RAIMS活動報告 モニタリングシステム活用ガイドラインについて、土木技術資料2019年10月号、pp.42-43

3. 塗膜上から疲労亀裂の有無を調査する技術に関する基礎的検討

3.1 既往の調査技術

塗膜上から疲労亀裂の有無を調査する技術のうち、既に鋼橋へ適用されている技術及び適用の期待される技術を対象として、既往の調査技術の文献調査を行い抽出、整理を行った。対象とする亀裂は、塗膜による防錆処理された鋼部材（鋼板で構成された主構部材と

表-3.1 塗膜上から疲労亀裂の有無を検出するための既往の主な調査技術の概要

技術の種類	概 要	
	物理量の種類	原 理
電磁誘導技術	渦電流 (交流連続波)	交流を流したコイルにより鋼材表面に励起した渦電流が亀裂の有無によって変化すること(検出電力の振幅と位相の変化)を利用 ⁶⁾
超音波技術	超音波(パルス状の縦波又は横波)	時間的に短いパルス状の超音波を送信し、亀裂から反射された超音波(エコー)の有無を利用 ⁷⁾
磁気探傷技術	(漏洩)磁束	磁化により亀裂部から漏洩した磁束に磁粉が付着することを利用 ⁸⁾
画像処理技術	可視画像	塗膜除去前の塗膜割れ画像パターンマッチングを利用 ⁹⁾

し、パイプや鋼棒やボルト等の部材を除く)の表面に発生した疲労亀裂の有無を塗膜上から調査する技術とした。

表-3.1に、文献調査により抽出した既往の主な調査技術の概要を示す。様々な種類の既往の調査技術が開発されている。

3.2 塗膜下亀裂の調査技術の簡易的な性能確認試験方法の基礎的検討

(1) 対象とした既往の非破壊調査技術

表-3.1に示す既往調査技術のうち、電磁誘導技術及び超音波技術から適用が期待できる技術としてそれぞれ渦流探傷法と超音波探傷法の調査技術を選定した。

各手法の概要を以下に示す。

1) 渦流探傷法

渦流探傷法(以下「ET」という。)は、交流を流したコイルを有するプローブを金属表面に近づけることによって金属表面付近に渦電流を生じさせ、鋼材表面の亀裂があることにより生じる渦電流の変化を検知することで表面亀裂の有無等を把握するものである。図-3.1に使用したET装置の外観を示す。

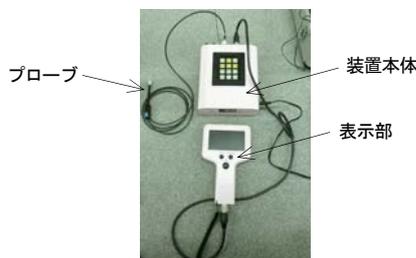


図-3.1 ET装置の外観

表-3.2に対象としたETのプローブの主な仕様を示す。コイルの種類は全て上置コイルとし、励磁・検出の方式として2種類、渦電流の信号検出方式として1種類、コイルの相対サイズとして概ね3種類、探傷周波数として1種類とした。

表-3.2 対象としたETのプローブの主な仕様

ETの装置の種類	ET-1	ET-2	ET-3	ET-4
コイルの種類	上置コイル			
励磁・検出の方式	相互誘導形			自己誘導形
信号検出方式	自己比較方式			
コイルの相対サイズ	大	中	小	大
接触部サイズ (縦×横)(mm)	12×5	9×3	4×4	12×12
リフトオフ時の相対雑音	小	小	中	大
探傷周波数(kHz)	30			

(値は公称値)

2) 超音波探傷法

超音波探傷法(以下「UT」という。)は、鋼材表面に探触子をあて、時間的に短いパルス状の超音波を鋼材中に入射し、内部又は表面の亀裂などの欠陥の表面で反射して戻って来たパルス状の超音波(エコー)から亀裂等の有無等を把握するものである。図-3.2に使用したUT装置の外観を示す。



図-3.2 UT装置の外観

表-3.3に対象としたUTの斜角探触子の主な仕様を示す。対象とする亀裂が表面亀裂であることを考慮し、波の種類として2種類、屈折角として3種類とした。伝搬経路としては、直射と1回反射の2種類とした。

表-3.3 対象としたUTの斜角探触子の主な仕様

UTの装置の種類	UT-1	UT-2	UT-3	UT-4	UT-5
本体	1	2	3	1	1
波の種類	SH波	SV波			
周波数	5MHz				
屈折角	90度	90度	55度注1)	70度	45度
振動子寸法	5×5	10×10	10×0.8	10×10	
素子数	—	—	16素子	—	—
接触媒質	SH波用		グリセリンペースト		

注1:斜角探傷用ウェッジの使用時かつ各素子の励起の遅延なし時。
(値は公称値)

(2) 性能確認試験

1) 試験体

a) 試験体を用いる方法の技術的課題と検討方針

調査技術の検出性能を確認する方法のひとつに、試験体を用いる方法があるが、塗膜割れ下の亀裂を模擬した試験体を用いる場合は、次に挙げる技術的課題がある。1) 塗膜下の疲労亀裂の状態が塗膜を剥がさないと視覚的に正確に把握できない、2) 一端塗膜を剥がしてから再塗装すると、表面開口亀裂内部に塗料が侵入し、非破壊調査技術の種類によってはその検出性能に影響を及ぼす可能性がある、3) 塗膜は経年変化により硬さや膜厚が変化するなど性質が変化するため、非破壊調査技術の種類によっては調査時点の塗膜の性質についてその都度確認する必要があり手間がかかる、4) 塗膜はスプレー、はけ、ローラー等の道具を手で持って塗布するあるいは機械やロボットで塗布しても、端部や隅角部など試験体の構造や位置によっては試験体の塗膜厚にばらつきがある、等。

本検討では、これらの技術的課題を解決する一つの方法として、塗膜の代わりにシートやフィルム（以下「シート」という。）を用いた性能確認方法について基礎的な検討を行った。なお、塗膜及びシートに関する検討については、(1)に示す非破壊調査技術のうち UT のみを対象とした。

b) 試験体に用いるシートの主な仕様

塗膜を模擬するシートを選定するにあたり、次に示すシートの特徴（長短所）や非破壊検査に影響を及ぼす因子などを考慮した。

シートは、材質や厚さが塗膜に比べ均一であり、貼付けや除去が簡単にできる長所がある。一方、貼付け時に空気が気泡としてシートと鋼材との間に混入したり、シートと鋼材との間で密着せずに剥がれてしまうことがあるなどの短所がある。塗膜を模擬するためにシートを用いる場合、塗膜下亀裂の調査技術の性能に及ぼす影響が塗膜と同等である必要がある。

UTの性能に影響を及ぼすシートの影響因子として、前述した短所の他に、厚さ、音響インピーダンス、音響結合性などが考えられる。

前述した塗膜の代わりに用いるシートの特徴（長短所）や非破壊検査に影響を及ぼす因子などのうち、気泡の混入及び密着性については施工時にシートを丁寧に貼付けるよう留意することで防止できるとした。また、シートの材質や厚さについては一定の品質が保たれているものとした。音響インピーダンスと音響結合

性については、これらの因子と関連性が高いと考えられる材質と粘着力に着目した。

以上を踏まえ、本研究で対象としたシートの主な仕様を表-3.4に示す。主として材質、粘着力、厚さに着目し、シートの種類は、7種類とし、PVC-1~PVC-3は単独で用い、S-2~S-4は直接鋼材に貼付けずにS-1を鋼材に貼付けてから、そのS-1の上に貼付けて組合せて用いた（メーカ仕様）。

表-3.4 対象シートの主な仕様

名称	組合せ	主な基材	厚さ(mm)	粘着力(N/25mm)
PVC-1	-	PVC(ポリ塩化ビニル)	0.08	0.8 注2)
PVC-2			0.13	0.4 注2)
PVC-3			0.13	2.5 注2)
S-1	-	特殊アクリル	0.06	13 注3)
S-2	あり注1)	PVC(ポリ塩化ビニル)	0.06+0.14	-
S-3		特殊アクリル	0.06+0.12	-
S-4		フッ素系フィルム	0.06+0.07	-

注1: S-1をベースにその上にシートを貼付け、2枚を組合せたシートとした(メーカ仕様)。注2: アルミニウム板に幅25mmのシートを貼付け、180度方向に引張剥がれるときの引張力。注3: 注1でアルミニウム板の代わりにメラミン塗装板を用いた場合の値。いずれもメーカカタログ値。

c) 表面亀裂試験体

図-3.3に表面亀裂試験体の寸法形状等を示す。対象とした疲労亀裂は、面外ガセット回し溶接部の溶接止端に別途疲労試験により発生させたものとした。表面には、無機ジンクリッチプライマーと塗装の2種類の防錆処理が施されているものを対象とした。このうち塗装あり試験体は、既設橋撤去部材から切り出して加工したものである。

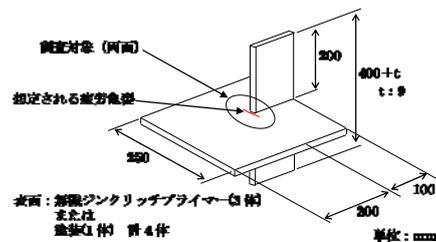


図-3.3 表面亀裂試験体の寸法形状

d) 塗膜試験体

図-3.4に試験体の寸法形状を示し、表-3.5に対象塗膜の主な仕様を示す。塗膜は、6種類とし、各種類の塗膜に対して、膜厚が基準値の約2~3倍までの範囲のものをを用いた。



図-3.4 塗装試験体の寸法形状

表-3.5 対象塗膜の主な仕様

試験体	塗装系	膜厚	厚さ(mm)
		注1)	注2)
No.1	B-1系	a	0.173
		b	0.378
		c	0.56
No.2	C-1系	a	0.221
		b	0.439
		c	0.594
No.3	D系	a	0.238
		b	0.495
		c	0.725
No.4	E系	a	0.07
		b	0.117
		c	0.113
No.5	C-4系	a	0.28
		b	0.483
		c	0.672
No.6	D-4系	a	0.26
		b	0.517
		c	0.732

注1) 鋼道路橋塗装便覧(No.1~4は1974年版、No.5~6は1990年版)における標準仕様をa、その2倍3倍の厚さを目指して塗布した膜厚をそれぞれb、cとする。

注2) 膜厚は、各面の異なる3点を電磁膜厚計で計測した平均値。

2) 試験方法

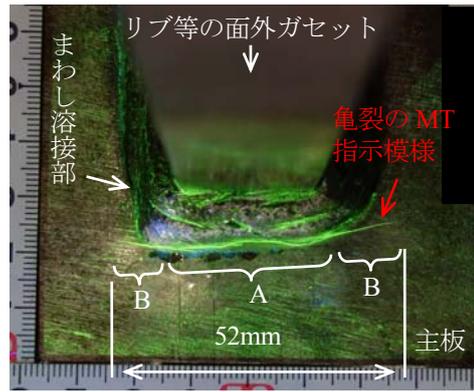
ETについて、1)c)表面亀裂試験体の表面亀裂の検出性能を確認した。UTについては、さらに、シート上から調査した際の検出性能を確認するために、1)c)表面亀裂試験体の無機ジンクリッチプライマーの上にシートを貼り付け、その上から表面亀裂の検出性能を確認した。なお、剥がしたシートは、再利用せずに1回使用で廃棄した。また、人工きずではあるが1)d)塗膜試験体を用いて、同じドリル横穴φ3mmの反射源を対象とした場合の、塗膜とシートの上から探傷した際のエコー高さの違いを確認した。

なお、ETの検出レベルは、感度調整用試験体スリットに対する電圧振幅を探傷画面フルスケールの80%となる設定で、亀裂と判別できる電圧振幅が確認できる場合とした。UTの検出レベルは、UT-1以外はφ3mm横穴からのエコー高さを80%、UT-1はスリットからのエコー高さを50%とする感度で、亀裂と判別できるエコーが確認できる場合とした。

(3) 試験結果と考察

1) 表面亀裂試験体

図-3.5にETによる亀裂の検出分布領域を示す。ET-1~ET-4の全てにおいて、図に示す領域Aは未検出であったが、領域Bは全亀裂8個のうち6個を検出し、いずれも空振りはなかった。領域Aは、溶接ビードの形状による検出電圧の変化に、亀裂による電圧変化が埋もれてしまったこと、及び単位長さ当たりの亀裂の深さなどの変化がほとんど無い領域であったことなど



A: ETで亀裂が見逃されやすい領域(溶接ビード内または溶接ビード止端の領域)

B: ETで亀裂の見逃しが比較的小さい領域(溶接ビードから外れた主板の領域)

図-3.5 ETで検出が困難な亀裂の分布領域

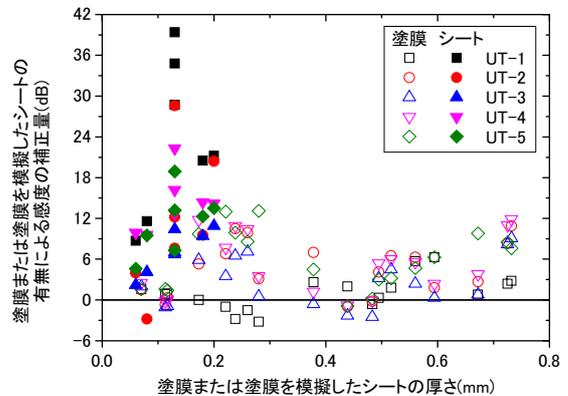


図-3.6 塗膜上及びシート上からのUTの感度補正量

の要因により判別困難であったと考えられる。一方、領域Bは、溶接ビードから離れた板厚一定の鋼板母材の位置であり、溶接ビード形状や鋼材体積変化がない位置であること、また、亀裂の先端付近であり亀裂深さ変化が生じている位置であることから、亀裂の検出が比較的可能となったと考えられる。

UTでは、UT-1~UT-5の全てにおいて、また、PVC-1~PVC-3、S-1~S-4の全てのシートにおいて、全ての表面亀裂を検出し、空振りはなかった。ただし、シートによってはS/N比が低く、検出の判断に影響を及ぼすものがあつた。

2) 塗膜試験体

図-3.6にUTによる塗膜とシートの感度補正量の比較を示す。感度補正量とは、塗膜上からのUTの場合、塗膜なしの状態で作られた人工きずからのエコー高さに対して、塗膜ありの状態で作られた同人工きずからのエコー高さと同じ値になるように感度を補正した量を示す。感度補正量の範囲は、塗膜では約-3~+15dB、

シートでは約-3~+40dB となった。従って、感度に及ぼす影響は、シートの方が塗膜に比べて大きい傾向となった。PVC-2 のシートは、対象としたシートや塗膜の中で、厚さが 0.13mm と比較的薄いのが、超音波の減衰が大きく、感度に及ぼす影響が大きかった。

3.3 鋼床版Uリブ溶接部ビード亀裂の超音波探傷法の開発

(1) 概要

1) 対象とする亀裂

鋼床版デッキプレートとU型の閉断面リブ(以下「Uリブ」)との溶接部のルートを起点とする亀裂のうち、図-3.7 に示す溶接ビード方向に進展する疲労亀裂(以下「ビード進展亀裂」)は、表面に至るまでは目視検査では見つけることはできず、この内部亀裂の状態を検出するためには超音波探傷法などの非破壊検査技術を用いる必要がある。また、このビード進展亀裂が溶接ビードの表面に到達しても、塗膜割れとの区別を目視検査で行うことは困難であり、表面に生じたビード進展亀裂の有無の調査には非破壊検査技術を用いる必要がある。

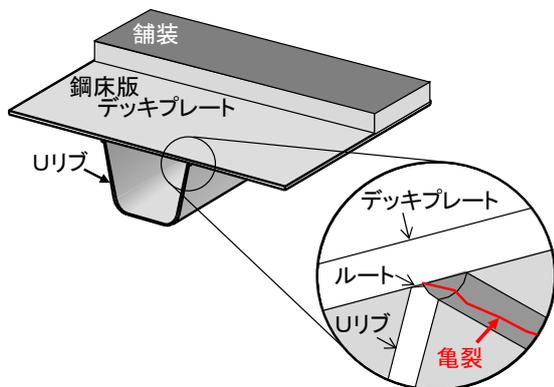


図-3.7 鋼床版Uリブ溶接部のビード進展亀裂

2) 亀裂の検出方法

図-3.8 にビード進展亀裂の超音波探傷法の装置の模式図を示す。既開発の横波臨界屈折角探傷法¹⁰⁾の探触子をUリブ側面に配置し、デッキプレートに向けて横波を伝搬させると、送信波の波面のうち多くの波面成分が溶接部を透過してデッキプレートへ伝搬する。受信探触子をデッキプレート下面に図中に示すように配置すると、受信可能な2つの伝搬経路が存在する。1つは、図中の実線の伝搬経路であり、屈折角90度の波面成分で亀裂に最初に到達する(第一到達波)経路である。もう1つは、図中の破線の伝搬経路であり、屈折角の小さい成分でUリブ裏面での1回反射の伝搬経

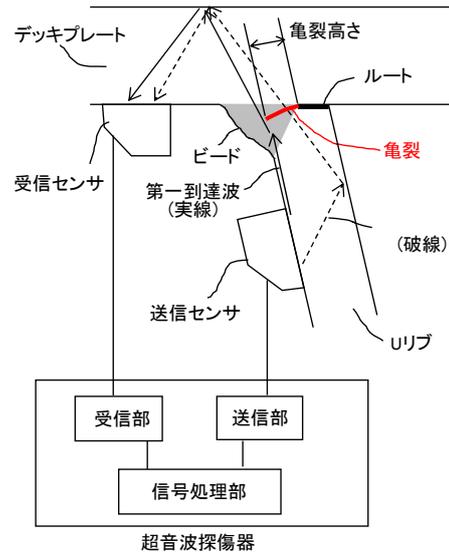
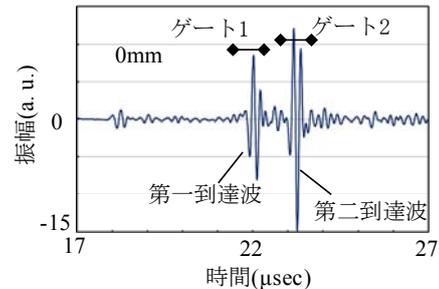
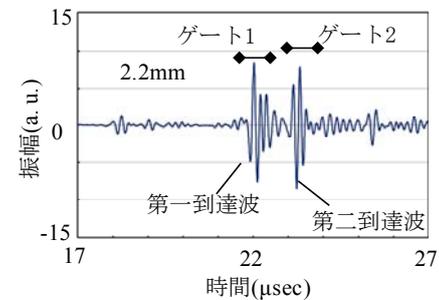


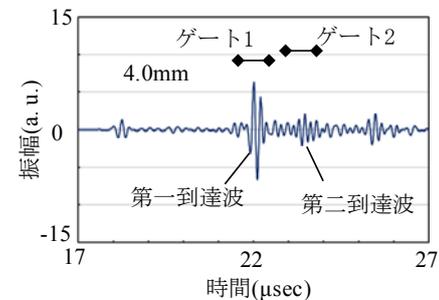
図-3.8 ビード進展亀裂を検出するために開発した超音波探傷法の検出方法



(a) ビード進展亀裂高さ 0mm



(b) ビード進展亀裂高さ 2.2mm



(c) ビード進展亀裂高さ 4.0mm

図-3.9 数値シミュレーションにおける受信波の波形(振幅と伝搬時間の関係)

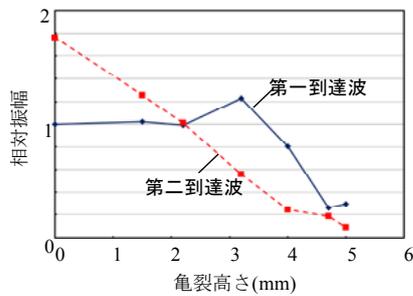


図-3.10 数値シミュレーションにおける亀裂高さと受信波の相対振幅の関係

路の成分であり、第一到達波の次に亀裂やルートに到達する(第二到達波)経路である。この2つの伝搬経路が時間的に十分に分離して計測できれば、第一到達波の有無により亀裂の有無を判断できる。

(2) 数値シミュレーションによる適用性の検討

鋼床版Uリブ溶接部のビード進展亀裂の有無を検出する超音波探傷法として、伝搬数値シミュレーションを行い、適用性の検討を行った¹¹⁾。

デッキプレートの板厚を12mm、Uリブの板厚を6mm、ルートは溶込み量75%を想定し1.5mmとした。ビード進展亀裂の亀裂高さは0~5.5mmまで変化させた。

図-3.9にビード進展亀裂の亀裂高さが0mm、2.2mm、4.0mmの場合に得られる受信波の振幅を示す(亀裂高さについては図-3.8参照)。第一到達波の振幅は、亀裂高さに対して変化が少ない。一方、第二到達波の振幅は、第一到達波に比べて、変化が大きく、亀裂高さが大きくなると小さくなることわかる。

図-3.10に亀裂高さを0mm~5.5mmまで変化させたときに得られる受信波の振幅を示す。図の縦軸の相対振幅は、亀裂高さ0mmのときの第一到達波の振幅で無次元化した。第二到達波は、亀裂高さの増加に対して単調に減少している。一方、第一到達波は、亀裂高さが2mm程度まではほとんど変化せず一定であるが、亀裂高さが3mmを超えると減少傾向となった。また、受信波の振幅比を用いるため、塗膜の影響を受けない。よって、塗膜を剥がさずに塗膜上から検出可能である。

3.4 鋼床版デッキプレート進展亀裂の調査技術の現場適用性の検討

(1) 対象とする亀裂

鋼床版デッキプレートとUリブとの溶接部のルートを起点とする亀裂のうち、図-3.11に示すデッキプレート方向に進展する疲労亀裂(以下「デッキプレート進展亀裂」)は、目視点検で発見することは困難であり、舗装を剥がさずにこの亀裂を検出するためには超

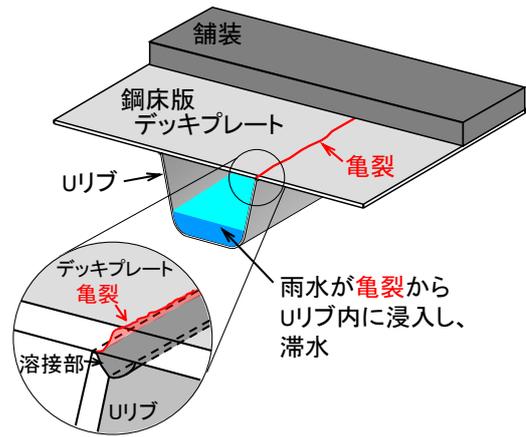


図-3.11 鋼床版デッキプレート進展亀裂

音波探傷法などの非破壊検査技術を用いる必要がある。

(2) 調査技術の概要

一般に、超音波探傷法は溶接内部の亀裂や溶接欠陥を検出する方法として広く活用されているが、探傷結果については検査技術者の技量に左右されやすい面がある。精度・信頼性の高い亀裂の情報を得るためには、探触子の選定、探傷方法、亀裂の状態とエコー高さ(亀裂からの反射波の相対的な大きさ)の関連付け等について十分な検討が必要となる。また、鋼材表面の塗膜等による探傷面の状態の違いが探傷結果に影響を及ぼすが、これらの感度補正方法の検討も必要である。さらに、実用面では上向き姿勢での探傷となるため、輪荷重直下の溶接線を橋全長にわたって調査するには現場作業性が高く、探触子の位置精度が確保される探傷法であることが求められる。

これらの技術的課題を解決するために、本技術では次に示す方式を採用した。検査技術者の技量に左右され難く、かつ、精度・信頼性の高い亀裂の情報を得るために、レールを用いて探触子走査を行う超音波自動探傷法(Automatic Ultrasonic Testing、AUT)とした(図-3.12)。また、走査の駆動は、上向き姿勢での橋全長にわたる調査に耐えるように、検査技術者が手で動かす手動方式ではなくリモコン操作で動作するモータ駆動方式とした。さらに、既設橋の鋼材表面の塗膜を剥がすことなく塗膜の上から探傷しても塗膜厚さや塗膜面の凹凸状態の違いが探傷結果に影響を及ぼさない臨界屈折角探傷法を開発した(詳細は参考文献12)13)を参照)。本技術と実用化段階の他の調査技術を対象とした実橋梁での亀裂検出性能の相対比較が行われ、本技術が浅い初期の亀裂の検出に優れている点などが示されている¹⁴⁾。

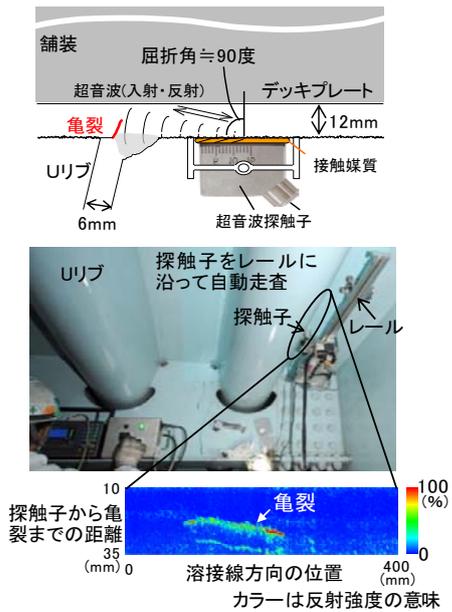


図-3.12 鋼床版亀裂の超音波探傷法の概要

表-3.6 鋼床版亀裂の超音波探傷法の適用実績 (20橋)

橋名	建設年次	ADTT _{SL}	調査長 (m)	亀裂検出の有無	調査年次
G橋	S52	4,487	74.2	無	H21
SH橋	H5	5,789	22.3	有※	H20
CY橋	S50	3,635	575.0	有※	H21,H26
SK橋	H4	6,850	422.0	有	H21
K橋	S53	2,424	62.4	有	H21
SW橋	S53	4,487	28.0	有	H22
ST橋	S54	4,487	132.0	有	H22
MY橋	S57	3,419	220.0	有	H22,H28
T橋	S54	1,485	193.0	有※	H22
I橋	S55	5,981	25.3	有※	H23
SJ橋	S56	1,678	109.5	無	H23
MU橋	H1	3,419	716.3	有	H23,H26
SW橋	S53	4,487	28.0	無	H23
NK橋	H12	2,777	155.6	無	H24
NR橋	S54	1,805	41.6	有	H26
KU橋	S59	4,364	444.0	有※	H22,H27
SJ橋	S56	1,678	44.0	有	H29
RK橋	H10	6,850	54.0	無	H30
TH橋	H3	3,332	100.2	無	H30
KS橋	H12	5,383	44.0	有	H30
計 20橋			3,491.4		

※ デッキ貫通亀裂有り(舗装を剥がして磁粉探傷試験により確認)

注1) ADTT_{SL}: 一方向一車線当たりの日大型車交通量(2015年道路交通センサスの結果より)

注2) 点検・詳細調査により亀裂発生が報告されているもしくは疑われる鋼床版橋を対象として調査範囲を限定して実施。

図-3.12に超音波探傷法による実橋での亀裂調査の概要を亀裂の二次元画像の例と合わせて示す。現場では対象とする溶接線に沿って自動走査装置をデッキ下面に磁石で固定し、探触子を自動走査することにより超音波探傷器上で探傷結果データをカラー画像で確認しながら自動で記録できる。超音波探傷試験に関するレベル3(最上位)のJIS資格を有する検査技術者が

簡単な訓練を積むことにより使用できる技術である。

(3) 適用性の検討

点検・詳細調査により、デッキ貫通亀裂が確認された鋼床版橋や、舗装の損傷が比較的早期に繰返し発生しているためデッキ貫通亀裂の発生が疑われる鋼床版橋を対象として、道路管理者により鋼床版亀裂の超音波探傷法による調査が行われた事例を表-3.6に示す。調査対象の溶接線は輪荷重位置直下から抽出し、過去10年間で合計20橋、調査延長約3.5kmの調査が行われ、デッキ貫通亀裂を含むデッキ進展亀裂の検出および亀裂始端位置や亀裂長さ等の状況把握が行われた。調査対象を前述のとおり限定しているため、亀裂有りという結果が多い。また、亀裂の状態にもよるが、デッキ貫通亀裂の発生している箇所では舗装の変状が生じていない場合も見られた。

本手法を適用してデッキ進展亀裂の挙動を把握するための分析も進められている¹⁵⁾。表-3.6のうち大型車交通量の比較的多い4橋については、デッキ進展亀裂の進展状況を把握するために同じ箇所を3~6年経過後に再度調査した。これらの調査の比較から1年あたりの亀裂進展量(亀裂進展速度)を求めた結果、ばらつきは大きいものの、亀裂長さが約5~50mm程度までの比較的短い亀裂では約6mm/年、亀裂長さが50~180mm程度の亀裂では約10mm/年と、長くなるに従って、亀裂進展速度が速くなる傾向が確認された。

3.5 まとめ

鋼橋の各種劣化損傷への既往調査技術として、塗膜を剥がさずに塗膜上から鋼部材表面の疲労亀裂を調査する技術に関する基礎的な検討を行った。その結果、渦流探傷法の基本性能を確認した。また、超音波探傷法を用いる際の性能確認方法として塗膜の代わりにシートを用いた場合の性能評価法の適用性については、シートの材質や厚さなどを適切に選定するとともに、シートの貼付け方に留意するなど適切に施工すれば、実現可能性があることを示唆できた。また、目視点検が困難な鋼床版Uリブ溶接部に生じるビード亀裂を対象として取り上げ塗膜を剥がさずに塗膜上から検出する超音波探傷法を開発した。また、現場実用を兼ね鋼床版デッキプレート進展亀裂の経年変化の把握に貢献するとともに当該技術の適用性を確認した。

今後は、塗膜を剥がさずに塗膜上から鋼部材表面の疲労亀裂を調査する技術の性能評価手法について、さらに検討を行っていく必要がある。

3.の参考文献

- 6) 例えば、古東佑介、小西拓洋、三木千壽：渦流探傷試験結果の C-スコープ画像化による疲労き裂検出性能向上への試み、鋼構造論文集、第 23 巻第 92 号、pp.21-30、2016.12
- 7) 深沢誠、大畦久雄、加藤昌彦、三木千壽：非破壊試験による表面疲労亀裂検出に及ぼす塗膜の影響、土木学会論文集、第 398 号 / I-10、pp.395-404、1988 年 10 月
- 8) 例えば、藤田智：前処理を必要としない「密閉型磁粉探傷法」の開発、検査機器、pp.69-73、2012.7
- 9) 例えば、小西拓洋、小屋裕太郎、梶原仁：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、土木学会論文集 A2(応用力学)、Vol.72、No.2(応用力学論文集 Vol.19)、pp. I_687- I_697、2016
- 10) 村越潤、高橋実、小池光裕、木村友則：臨界屈折角近傍に調整した超音波斜角探触子による鋼床版デッキ進展き裂の探傷法の検討、土木学会論文集 A1(構造・地震工学)、Vol. 68、No. 2、pp. 453-464、2012
- 11) 木村友則、細谷朗、小池光裕、高橋実、村越潤：二探触子法による鋼床版の溶接部内進展亀裂長さ評価法、日本非破壊検査協会、秋季講演大会、2017
- 12) 村越潤、木村嘉富、高橋実：鋼床版デッキプレート進展亀裂の調査のための超音波探傷マニュアル(案)、土木研究所資料、第 4138 号、2009.3.
- 13) (独)土木研究所、菱電湘南エレクトロニクス(株)、三菱電機(株)情報技術総合研究所：鋼床版デッキプレート進展き裂の調査のための超音波探傷法に関する共同研究報告書、第 452 号、2013.3.
- 14) 村野益巳、平山繁幸、谷村豊、塚本裕子、村越潤、高橋実、小池光裕：鋼床版デッキ貫通き裂検知手法の適用性に関する検討、土木学会第 71 回年次学術講演会、I -245、pp.489-490、2016.9.
- 15) 高橋実、上仙靖、村越潤、入江健夫：鋼床版橋のデッキ進展亀裂に対する非破壊調査技術の適用事例、土木技術資料、第 61 巻 9 月号、2019

A STUDY ABOUT APPLICABILITY OF TECHNOLOGY OF GRASPING CONDITION FOR BRIDGE MANAGEMENT

Research Period : FY2016-2019

Research Team : Bridge and Structural Engineering
Research Group

Author : ISHIDA Masahiro

JOSEN Yasushi

TAKAHASHI Minoru

YAMAMOTO Susumu

HIROE Akiko

Abstract : Monitoring technology is remarked on for effective approach of bridge maintenance because aging of bridges and increase of the number of bridges which need repairment. In this study, some monitoring technologies are evaluated from the prospective of applicability to bridge maintenance, and it is revealed to capable to monitor progress of fracture of bridge members by loading test. And on the painting, a ultrasonic inspection method with unique technique of the sensitivity calibration procedure was proposed for detecting longitudinal bead cracks in existing painted orthotropic steel decks.

Key words : monitoring, loading test, deflection, acceleration, nondestructive evaluation technology, fatigue crack