戦-62. 非破壊検査技術の道路橋への適用性に関する研究

研究予算:運営費交付金(一般勘定)

研究期間: 平22~平25

担当チーム:橋梁構造研究グループ

研究担当者:木村嘉富、村越潤、高橋実

【要旨】

道路橋の点検は、近接目視点検を主体に行われているが、点検部位によっては目視点検だけでは診断に必要な 情報が得られない場合や、必ずしも効率的・合理的でない場合があり、ニーズを踏まえた信頼性の高い非破壊検 査技術が求められている。本研究では、道路橋の各種劣化損傷への既存技術の適用性について検討を行うもので ある。平成22年度は、腐食欠損部の残存板厚計測を対象として、これまで開発もしくは提案されている既存の非 破壊検査技術を調査するとともに、適用が期待される非破壊による計測手法を抽出した。これらの計測手法とキ ャリパー及びレーザ変位計を用いて、人工欠損試験体及び実腐食試験体を対象とした残存板厚計測に関する性能 確認試験を実施した。

キーワード:非破壊検査技術、腐食、渦流探傷法、超音波探傷法

1. はじめに

道路橋の点検は、近接目視点検を主体に行われている が、点検部位によっては目視点検だけでは診断に必要な 情報が得られない場合や、必ずしも効率的・合理的でな い場合があり、ニーズを踏まえた信頼性の高い非破壊検 査技術が求められている。一方、他分野を含め数多くの 非破壊検査技術の研究開発が行われているが、道路橋の 維持管理への適用を考えた場合に、本来必要とされる性 能を有する技術であることは少なく、技術開発のシーズ とニーズが必ずしも一致していないことが多い。すなわ ち、点検・調査技術に求められる性能・仕様を明確にし た上で、対策検討の意志決定に資する情報を提供するた めのツールとしての適用条件、適用方法を個別に明らか にしていく必要がある。本研究では、鋼橋の腐食損傷を 対象とした非破壊検査法の検討を行うとともに、道路橋 の各種劣化損傷への既存技術の適用性について検討を行 うものである。

平成22年度は、腐食欠損部の残存板厚計測を対象とし て、これまで開発もしくは提案されている既存の非破壊 検査技術を調査するとともに、適用が期待される非破壊 による計測手法を抽出した。これらの計測手法とキャリ パー、レーザ変位計を用いて、人工欠損試験体および実 腐食試験体を対象とした残存板厚計測に関する性能確認 試験を実施した。

2. 既往の非破壊検査技術の調査

2.1 調査方法

腐食欠損部の残存板厚の計測を対象とし、他分野を含 め既往の非破壊検査技術の文献調査を行い、適用の期待 される技術について抽出、整理を行った。調査対象は、 鋼部材(鋼板で構成された主構部材)の腐食欠損部の残存 板厚を計測するための技術とし、計測するためのセンサ は腐食欠損の生じている部位の直上に接触または近接し て配置することを前提条件とした。対象とした鋼構造物

非破壊検査技術					
痲	類	センサ	透過/反射 の区分	特 徵	対象施設
超音波法	横波	電磁超音波 探触子	反射	様々な周波数のバースト波を送次入射させ、横波の多重反射における共鳴(共振)現象により強められた2つ以上の 卓越周波数を利用(センサ数量:1) ^{10%}	配管 (発電, 化学, ガスプラント 等)
	ガイド波			電磁シールドの効果によるSN比の改善で高感度とした電磁超音波センサを用いたガイド波を利用(センサ数量:1) ²⁾	
	ねじり波			管周に配置したセンサにより生じる長距離まで伝搬するねじり波を利用(センサ数量:管周に多数) ³⁾	
	縦波	圧電素子	透過	腐食部に沿って伝搬する表面波との伝搬時間差を利用(センサ数量:2) ⁴⁾	
			反射	センサ内に充水することにより超音波ビーム幅を細めた垂直縦波センサと高感度ログアンプ探傷器を組合せて利用 (センサ数量:1) ^{5)※}	水門扉 (ダム, 堰等)
電磁誘導法 (パルス式渦流探傷法)		コイル	反射	低い周波数(5~27Hz)により鋼板全体の磁場の浸透がより均等になることを利用(センサ数量:1) ⁶⁾	配管 (発電, 化学, ガスプラント 等)
				バルス電流励磁直後に受信される瞬間的な渦電流の時間変化を利用(センサ数量:1~管周に多数) ^{7)※}	
放射線法		イメージング プレート	透過	高感度のイメージングプレートを用いたデジタル放射線画像システムを利用(センサ数量:1) ⁸⁾	

表-2.1 腐食欠損部の残存板厚を対象とした既往の非破壊検査技術に関する調査結果

※性能確認試験の対象とした技術

は,鉄道橋,石油・化学プラント,発電プラント,石油 精製,電力鉄塔,照明柱(標識柱,信号柱),海洋構造物, 港湾構造物である。

表-2.1 に,調査により抽出した主な非破壊検査技術を 示す。配管や石油タンク底面の腐食を対象とした主な技 術としては,超音波法,電磁誘導法(パッレス式渦流探傷法), 放射線法による非破壊検査技術がある。共通の課題とし て,鋼材表面に錆が層状に生じているような著しい腐食 の場合には,腐食欠損量の計測は難しい点が挙げられる。

3. 非破壊検査技術の性能確認試験

3.1 対象とした非破壊検査技術

腐食欠損の生じた試験体を用いて既往の非破壊検査技術の腐食欠損部の残存板厚計測に関する性能確認試験を行った。表-2.1の技術のうち,現時点で試験可能な技術で,手法の種類として分類される電磁誘導法(パルス式渦流探傷法)及び超音波探傷法からそれぞれ1手法以上を抽出した。その結果,電磁誘導法として,パルス式渦流探傷法 ⁿを,超音波探傷法として,局部水深探触子による超音波探傷法⁵及び電磁超音波共鳴法¹⁰の2手法を選定した。各手法の概要を以下に示す。

(1)パルス式渦流探傷法7)

図-3.1(a)に、パルス式渦流探傷法の原理の概要を示し、 図-3.1(b)に、計測装置の外観を示す。本手法では励磁電 流にパルス状の電流が用いられている(通常の渦流探傷 法ではコイルの励磁電流には連続波(正弦波)が用いられ ている。)。通常の渦流探傷法がセンサを走査するのに対 し、パルス式渦流探傷法ではコイルを計測部位に押し当 て、励磁直後にコイルで受信される瞬間的な渦電流の時 間変化により腐食を検出する。コイルにより励磁された 磁場内の被調査物の平均肉厚が計測される。被調査物の 板厚および保温材厚によって、直径 50mm~200mm 程度 のコイルが用いられる。本検討では直径 \$46mm 及び\$ 63mm のコイルを使用したが、\$46mm のコイルは錆層 が厚い箇所では適切な計測値が得られなかったので、こ こでは \$63mm の結果を示す。

(2)局部水浸探触子による超音波探傷法5)

図-3.2(a)に、局部水浸探触子の概要を示し、図-3.2(b) に、計測装置の外観を示す。通常の超音波厚さ計の探触 子では、腐食の孔食径と比べて振動子の直径が大きいた め(通常多く用いられる 5MHz では振動子の直径は約 10mm)、腐食の凹凸した面には適用できないことが多い。 このため、局部水浸探触子では、ピンポイントで探傷で きるような、ペンシルの先端のような細い径を使用して いる点に特徴がある。図に示すとおり水チャンバー部に 水を充水することにより,探触子内で超音波ビームを集 束させている。探触子の寸法は,外寸高さ 32mm, 胴部 直径 ϕ 17mm, 先端径 ϕ 3.5mm(内径 ϕ 2.5mm)である。 (3)電磁超音波共鳴法¹⁾

電磁超音波共鳴法は、電磁気作用によって、材料表面 に直接駆動力を起こして超音波を発生させ、その超音波 の多重反射エコーを用いて板厚を計測する方法である。 図-3.3(a)に、今回の計測で用いた電磁超音波センサ (Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT とも呼ばれ る)の概要を示す。センサは、トラック状渦巻きコイルと 一対の永久磁石で構成される。 センサを金属に近づけ、 コイルに交流電流を流すと、試験体表面には時間的に変 化する磁場が生じ、この変化を打ち消す方向に渦電流が 誘導される。渦電流は、永久磁石が作る静磁場と作用し 合い, 金属内に磁歪力(磁性体)やローレンツ力(非磁性 体)が働く。その結果、試験体表面近傍は超音波振動源と なり、金属内に直接超音波が励起される。 図に示すよう に、渦巻(トラック状)コイルの上に永久磁石を2個配置 すると非接触で横波の超音波が板厚(垂直)方向に伝搬す る。図-3.3(b)に、試験装置の外観と性能確認試験の状況



3.2 試験体

試験体には、腐食欠損を模擬した人工欠損試験体2体と、撤去された側道橋の腐食の著しい桁端から切り出した腐食欠損試験体1体の2種類を用いた。図-3.4に、対象とした人工欠損試験体の寸法形状を示す。また、写真-3.1に、腐食欠損試験体の撤去前、及び溶断による切り出した状況を示し、図-3.5に、腐食欠損試験体の寸法形状を示す。







写真-3.1 腐食欠損試験体の撤去前状況



図-3.5 腐食欠損試験体の寸法形状

3.3 試験方法

3.1に示した3種類の非破壊検査技術の計測精度を 調査するため、錆除去後にレーザ変位計を用いた残存板 厚計測を実施した。レーザ変位計については残存板厚を 算出するために試験体の表裏面を計測した。併せて,超 音波厚さ計及びキャリパーによる計測を行った。以下, ここでは、レーザ変位計の計測値が真値と仮定して他の 計測手法の計測精度等の適用性を評価することとした。 図-3.6に、欠損試験体の計測ライン、計測面及び計測ピ ッチを示す。人工欠損試験体の計測では、欠損部を裏面 にして、欠損のない平面側に各種のセンサを配置し計測 した。なお、実際の計測範囲は、人工欠損試験体では、 欠損部の中央を中心として1mm×1mmの格子ピッチで 欠損部が含まれる範囲,腐食欠損試験体では,試験体中 央から 1cm×1cm の格子ピッチで 20cm×20cm の範囲で ある。なお、計測は、人工欠損試験体では、窪みのない 平滑面側より、腐食欠損試験体では、ウェブのないフラ ンジ下面側から行った。



(11) 計測面(1), ② (b) 腐食欠損試験体 図-3.6 欠損試験体の計測位置(計測ライン,計測面)

4. 試験結果と考察

4.1 人工欠損試験体

図-4.1 (a),(b)に、人工欠損試験体の計測結果を示す。 人工欠損試験体については、各計測手法ともにほぼ同様 の結果であり、レーザ変位計では設計図値(実寸法)との 誤差がほとんどない計測値が得られた。超音波厚さ計は、 窪みをある程度認識しているが、設計図値との誤差が大 きく、レーザ変位計ほどの精度は見られなかった。その 他、パルス式渦流探傷法、局部水浸超音波探傷法及び電 磁超音波探傷法における計測値は、窪み部分について、 窪みであることを認識できない計測値や適切な計測値が 得られない(以下、計測不能)箇所が見られた。

図-4.1 (c),(d)に、パルス式渦流探傷法による計測値と、そのコイル直径(φ63mm)を考慮し、これに内接する一辺 40mmの正方形面積内の板厚平均値(以下、□40mm 計測 平均値)と比較した結果を示す。板厚平均値は、実板厚よ りも小さくなるが、それでも差は見られている。後述す る腐食欠損試験片では、計測値と比較的良好な相関性が 見られており、計測精度には計測面が影響している可能 性が考えられる。





図-4.1 人工欠損試験体の計測結果



4.2 腐食欠損試験体

(1)計測ラインに対する各計測手法の計測精度の比較 図-4.2 に、レーザ変位計で計測した腐食欠損試験体の

形状を示す。ここでは、基準高さを決めて、上下面の各 計測箇所の変位を計測することにより板表面の凹凸形状 を計測し、上下面の変位量の差より残存板厚を算出して いる。すなわち、上面及び下面の折れ線グラフは、計測 ライン①では腐食が比較的軽微であることを、計測ライ ン②では腐食が苦しい位置であることを示している。

図-4.3 に、腐食欠損試験体の計測ライン①②における 計測結果を示す。錆が鋼材表面に付着している状態で残 存板厚を計測できるかを確認する目的で、錆を除去する 前の状態(以下、錆除去前)で計測した。また、残存板厚 を正確に把握するために、錆を完全に除去した状態(以下、 錆除去後)にして板厚計測を行った。キャリパーと、レー ザ変位計の計測結果を併せて示した。

計測ライン①における腐食が比較的軽微な箇所では, 超音波厚さ計を除く計測手法の場合,近似的な計測値と なった。計測ライン②における腐食が比較的著しい箇所 では,超音波厚さ計,電磁超音波法及び水浸超音波法の 場合、適切な計測値が得られなかった。錆除去後のキャ リパーとレーザ変位計の計測値はある程度の相関性がみ られたが、錆除去前のパルス式渦流探傷法は計測値を得 られたものの、錆除去後におけるキャリパーやレーザ変 位計の計測値との相関は見られなかった。錆除去前と錆 除去後におけるキャリパーの計測値を比較すると、計測 ライン①側は桁外面側で腐食が比較的軽微な箇所で、計 測ライン②は桁内面側で腐食が著しい箇所であることを 端的に示している。パルス式渦流探傷法の計測値が周辺の形状に影響する性質があることから、図-4.4 に、渦流 探傷法の錆除去前及び錆除去後の計測値と除去後のレー ザ変位計の□40mm 計測平均値との差を示す。図-4.3 に おける計測ライン②では、レーザ変位計とパルス式渦流 探傷との差(ともに、錆除去後)は最大約7mmの差が生 じていたが、計測差が最大でも4mm弱まで近づく結果 となった。





(2) 計測面に対する各計測手法の計測精度の比較

図4.5及び図4.6に、全計測位置について、それぞれ 錆除去前後におけるレーザ変位計による板厚計測値と各 計測手法との比較結果を示す。計測不能点については、 縦軸の値をゼロとして図中にプロットしている。その他 の計測手法では計測ライン①側(ほとんど腐食していな い側)の結果はほぼ計測できているものの,計測ライン(2) 側(腐食の厳しい側)では計測できないか計測できたとし ても計測精度は低いことがわかる。パルス式渦流探傷法 では、計測値がレーザ変位計計測値よりも厚く評価して いる。なお、図-4.6(b)より、錆除去後についても計測精 度としては必ずしも高いとは言い難い。また、図中では 5mm 程度以下の薄い板厚の計測値が得られていないが, 計測技術者へのヒアリングによれば、板厚のキャリブレ ーション(本計測では板厚13mm)に対して、40%程度以 下の板厚(5.2mm)では適切な計測値が得られない可能 性があるとしており、 適切な計測値が得られる範囲を超 えているものと考えられる。

超音波厚さ計については、接触媒体を用いても、表面の 凹凸が激しい場合には、値が安定しない、もしくは誤っ た値が生じる等、計測不能な場合が多かった。垂直探触 子による探傷を試みたが、やはり板厚を推定するのが難 しい点では同様の傾向であった。

図-4.6(a)より、錆除去前のキャリパー計測値は、残存 板厚によらず10~22mmの値を示しており、少なくとも 外観からの残存板厚の推定は難しいと言わざるを得ない。

(3) パルス式渦流探傷法の計測値に対する考察

図-4.7 に, 錆除去後におけるレーザ変位計による□ 40mm 計測平均値とパルス式渦流探傷計測結果の比較 を示す。赤丸でプロットしたウェブの形状の影響を受け た可能性が高い計測箇所(ウェブ中心から 36.5mm まで の範囲)は、□40mm 計測平均値と比較した結果、影響 を受けた可能性が低い青丸でプロットした計測箇所より も大きく評価している。また、青丸のプロットは計測値と 相対的に近づく傾向がみられる。



図4.5 レーザ変位計計測値との計測結果の比較(錆除去前)





図-4.6 レーザ変位計計測値との計測結果の比較(錆除去後)(続き)



図-4.7 レーザ変位計計測平均値とパルス式渦流探傷法計測値の比較

6. まとめ

鋼部材の腐食欠損量の計測を対象として、電磁誘導法 (パルス式渦流探傷法)、局部水深探触子による超音波探 傷法及び電磁超音波共鳴法の3手法を選定し、腐食欠損 試験体を用いた計測性能確認試験を行い、一般的に用い られている計測手法とともに、計測精度等、適用性の評 価を行った。以下に主な結果をまとめる。

- 1)人工欠損試験体において、パルス式渦流探傷法、局部 水浸超音波探傷法及び電磁超音波共鳴法では、窪みを 認識できない計測結果が得られ、計測精度は低いもの であった。
- 2)腐食欠損試験体において,鋼板表面の錆層の厚さがあ る程度以上の腐食では,超音波探傷法,電磁超音波共 鳴法では計測困難であった。
- 3)パルス式渦流探傷法では計測値は得られたものの、レ ーザ変位計の直接の計測値との相関性は錆除去前後に おいて高いものではなかった。同手法がコイル部分の 平均的な板厚量が計測されるという特徴を踏まえ、コ イル部に対応する範囲の計測値平均値と比較したとこ ろ、相関性が相対的に改善された。一方では、人工欠損 試験片では円錐くぼみの定量評価には至っておらず、 計測精度の評価にあたっては、計測面と減肉している 面との関係等詳細な検討が必要と考えられる。

参考文献

- 例えば、三谷欣也、中山吉晴、金井英一、望月正人、豊田政男:電磁超音波共鳴スペクトルによる鋼板の減肉評価、(社) 溶接学会、溶接学会論文集、第25巻、第4号、pp.507-513、 2007.
- 2) 例えば、林山:先進的な超音波方法を用いた配管の減肉計測 法の開発, 一第1報:ガイド波及び電磁超音波探触子を用い た計測システムの開発一,(財)電力中央研究所,電中研報告, 報告書番号:Q05006, 平成18年8月.
- 3) 例えば、淡島敬一、兵藤雅巳、高村健一、長谷川圭司、越智 則夫、永井辰之、森雅司、佐々木晃史、大根田浩之、諸富隆 太郎、坂中一彦、堀本光男、岩田裕之:製油所内配管設備の 信頼性評価技術、(財) 石油産業活性化センター、第17回技 術開発研究成果、2003.
- 4) 例えば、四辻美年:配管検査の現状と保守検査への適用例、 出光技報、50巻、2号、2007.
- 5) 上林正和,川上善道,高木直樹,土生川直二,前川伸:鋼構 造物(水門扉)の腐食劣化に対する余寿命診断技術及びシステ ム(CLAS-G), 三菱重工技報, vol.43, No.1, 2006.
- 例えば、<u>http://www.testex-j.com/</u>(有限会社テステックス・ジャパン ホームページ)
- 7) 例えば、<u>http://www.toandi.co.jp/japanese/incotest.htm</u>(東亜非破 壊検査(株) ホームページ)

8) 例えば,

http://fujifilm.jp/business/healthcare/digital_xray_imaging/fcr/index.html

(富士フイルム(株) ホームページ, デジタル X 線画像診断シ ステム)

RESEARCH ON THE APPLICATION OF NONDESTRUCTIVE INSPECTION TECHNOLOGY TO HIGHWAY BRIDGES

Budged : Grants for operating expenses General account Research Period : FY2010-2013 Research Team : Bridges and Structures Research Group Author : Yoshitomi KIMURA Jun MURAKOSHI Minoru TAKAHASHI

Abstract : Inspection of highway bridges has mainly been performed with visual inspection. However, deterioration and damage that do not manifest some visible symptom are not detected or qualified. It is needed to establish rational and effective nondestructive evaluation technologies for investigating deterioration and damage in highway bridges. In this research, a number of NDE technologies are investigated to evaluate their applicability for effectively/efficiently collecting quantitative data about bridge conditions.

In FY2010, various kinds of existing techniques to measure thickness loss due to corrosion without removing the rust layer are investigated. Based on literary surveys, focusing on three methods, which are eddy current testing, ultrasonic testing and electromagnetic acoustic resonance testing, their applicability were tested by corroded specimens cut out from demolished steel bridges.

Key words : inspection, nondestructive evaluation technology, corrosion, eddy current testing, ultrasonic testing