

## 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，本間英貴，  
高橋実，廣江亜紀子

## 【要旨】

道路橋の点検は、近接目視を主体に行われているが、部位によっては目視点検が適用できない場合等があり、このような部位の点検に適用できる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調査技術として、1)鋼桁端等の腐食欠損部の残存板厚計測、2)コンクリート等埋込部の鋼材に生じる腐食欠損部の残存板厚計測を対象とし、これらの非破壊調査技術の検討を行った。また、3)コンクリート埋込み部の境界部腐食が柱の耐荷力や変形性能に及ぼす影響を明らかにするために実験による基礎検討を行った。さらに、4)撤去された橋梁部材を用いて、他分野の各種の非破壊検査手法の橋梁検査への適用可能性の調査を行った。その結果、1)については、簡易計測法を提案し、撤去部材による性能確認・改良を重ね、実用化に向けた現地適用性を確認した。2)については、共鳴振動法および遮断周波数を利用したSH板波による超音波法について、それぞれ適用性を提示した。3)については、境界部腐食による耐荷力低下が生じない場合でも、変形性能やエネルギー吸収性能が低下する場合があること等の技術的知見の蓄積を図った。4)については、東京大学等と連携し、高出力X線源によるコンクリート橋検査技術の適用性を確認するとともに、理化学研究所と連携して、放射線の一種である中性子線を構造物の透過観察に用いるための技術の適用性を確認した。

キーワード：非破壊検査技術，腐食，共鳴振動試験，超音波試験，正負交番載荷試験

## 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、道路橋の各種劣化損傷への既存調査技術として、1)鋼桁端等の腐食欠損部の残存板厚計測、2)コンクリート等埋込部の鋼材に生じる腐食欠損部の残存板厚計測を対象とし、これらの非破壊調査技術の検討を行った。また、3)コンクリート埋込み部の境界部腐食が柱の耐荷力や変形性能に及ぼす影響を明らかにするために実験による基礎検討を行った。さらに、4)撤去された橋

梁部材を用いて、他分野の各種の非破壊検査手法の橋梁検査への適用可能性の調査を行った。

本報告では、先ず、1)鋼桁端等の腐食欠損部の残存板厚計測について、適用性の期待される技術（各種波による超音波探傷法）についての調査結果を述べるとともに、抽出した調査技術を対象として、人工欠損試験体及び実腐食試験体を対象とした各技術の適用性の検討結果を述べる。また、非破壊検査技術ではないが、実用的で簡易な板厚計測手法（以下、電気抵抗検知式厚さ計）を開発し、実腐食試験体を対象とした残存板厚の計測を実施し、錆層除去前後での性能確認および適用性の評価を行った。次に、2)コンクリート等埋込部の鋼材に生じる腐食欠損部の残存板厚計測について、共鳴振動試験および遮断周波数を利用したSH板波による超音波試験の適用性の検討結果を述べる。さらに、3)コンクリート埋込み部の境界部腐食を対象に、境界部腐食が柱の耐荷力や変形性能に及ぼす影響を明らかにするために、境界部を腐食させた試験体の正負交番載荷試験結果について述べる。最後に、4)撤去された橋梁部材を対象として検出性能試験を行った結果に基づき、他分野の各種の非破壊検査手法の橋梁検査への適用可能性について述べる。

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

技術の種類	概要		
	波の分類	原理	主な対象施設
電磁誘導法 (パルス渦流試験法)	渦電流	板厚に応じた渦電流の変化に伴う検出電力の周波数分析により特定の周波数を選択増幅し、その検出電力の振幅とそれがゼロになるまでの時間変化を利用 <sup>1)</sup>	配管 (発電、石油・化学プラント等)
		上記と同様の検出電力の振幅と位相を利用 <sup>2)</sup>	
超音波法	縦波または横波	電磁誘導を利用する非接触の電磁超音波センサを用いて、反射されるエコーを受信するまでの経過時間と音速を利用 <sup>3)</sup>	水門扉 (ダム、堰等)
	縦波	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、反射されるエコーを受信するまでの経過時間と音速を利用 <sup>4)</sup>	
共鳴法 (共振法、打音法)	可聴波	板厚に対して固有に定まる卓越周波数(共振周波数)の変化を利用 <sup>5)</sup>	船舶
	縦波または横波	様々な周波数のパルス波を逐次入射させ、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 <sup>6)</sup>	配管 (発電、石油・化学プラント等)
放射線透過法	X線	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用いて、透過線量の差を利用 <sup>7)</sup>	

2. 鋼桁端等の腐食欠損部の残存板厚計測に関する検討

2.1 既往の非破壊検査技術の調査

鋼桁端等の腐食欠損部の残存板厚計測を対象とし、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(パルス式渦流探傷法)、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。

2.2 既往の非破壊検査技術の性能確認試験

(1) 対象とした既往の非破壊検査技術

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を、超音波探傷法として、局部水浸探触子による超音波探傷法及び電磁超音波共鳴法の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

図-2.1(a)に、パルス式渦流探傷法の原理の概要を示し、

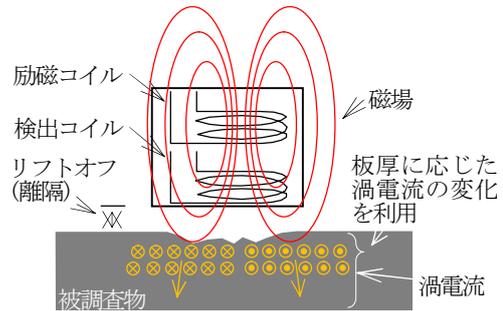


図-2.1 パルス式渦流探傷法

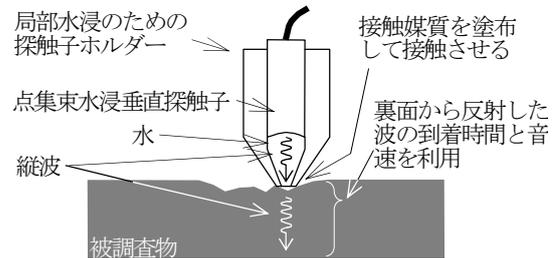


図-2.2 局部水浸探触子による超音波法

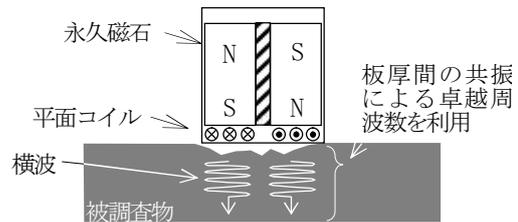


図-2.3 電磁超音波共鳴法

図-2.1(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φ46mm 及びφ63mm のコイルを使用した。φ46mm 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ため、ここではφ63mm の結果を示す。

2) 局部水浸探触子による超音波探傷法

図-2.2(a)に、局部水浸探触子の概要を示し、図-2.2(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 φ17mm、先端径 φ3.5mm(内径 φ2.5mm)である。

3) 電磁超音波共鳴法

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-2.3(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-2.3(b)に、試験装置の外観と性能確認試験の状況を示す。

(2) 性能確認試験

1) 試験体

試験体には、腐食欠損を模擬した人工欠損試験体1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-2.4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-2.1に、腐食欠損試験体の撤去前、及び溶断による

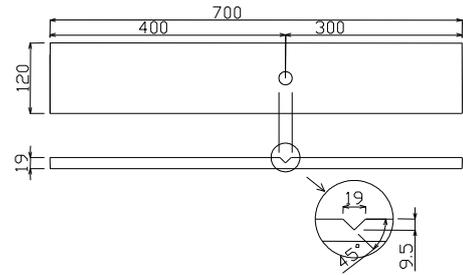


図-2.4 人工欠損試験体(φ19円錐くぼみ)の寸法形状



写真-2.1 腐食欠損試験体の撤去前状況

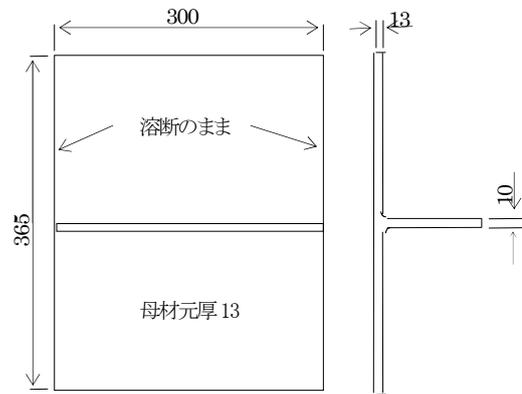
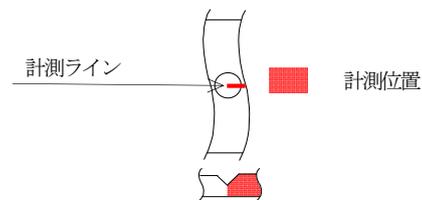
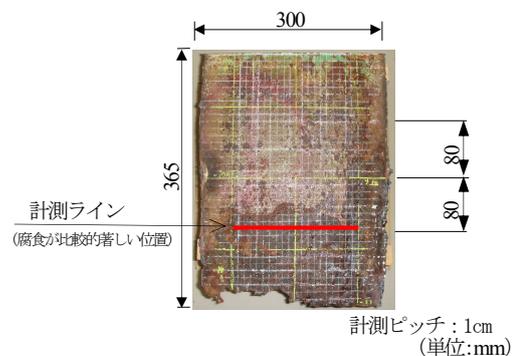


図-2.5 腐食欠損試験体の寸法形状



(a) 人工欠損試験体



(b) 腐食欠損試験体

図-2.6 欠損試験体の計測位置(計測ライン)

切り出した状況を示し、図-2.5 に、腐食欠損試験体の寸法形状を示す。

2) 試験方法

(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-2.6 に、欠損試験体の計測ライン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、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。

(3) 試験結果と考察

1) 人工欠損試験体

図-2.7 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、窪みの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。

2) 腐食欠損試験体

図-2.8 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、計測ラインでは著しい腐食が生じていることを示している。

図-2.9 に、腐食欠損試験体の計測ライン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。

比較的著しい腐食が生じている計測ラインでは、超音

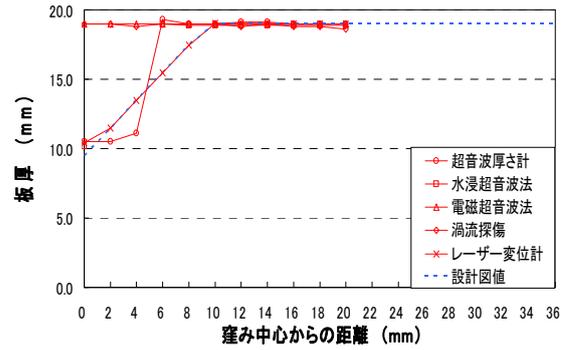


図-2.7 人工欠損試験体(φ19円錐くぼみ)の計測結果

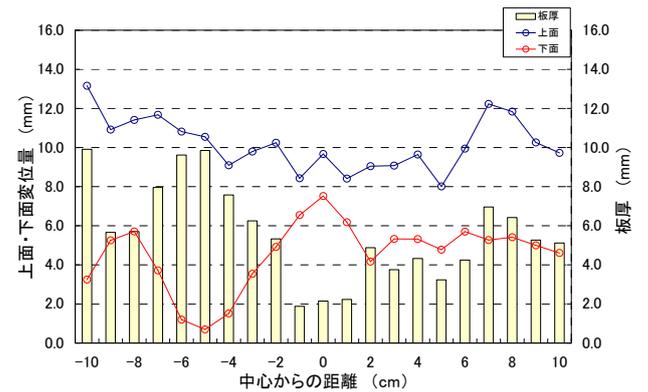


図-2.8 腐食欠損試験体の上面・下面変位量

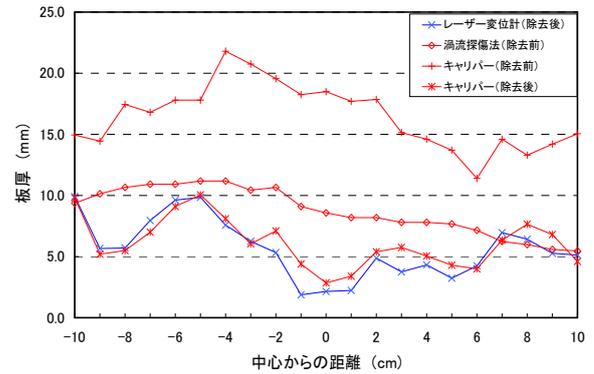


図-2.9 腐食欠損試験体の計測結果

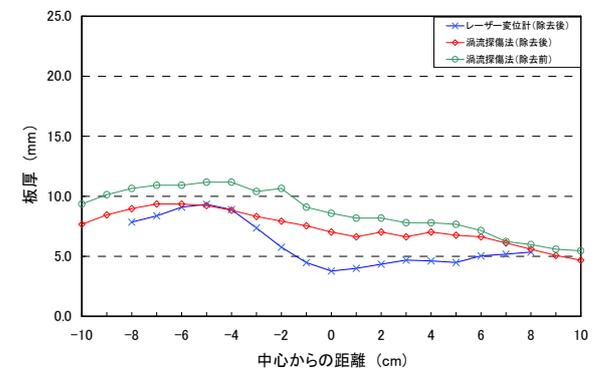


図-2.10 腐食欠損試験体の計測ラインにおけるレーザ変位計(周囲平均)及び渦流探傷の板厚計測値

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のが図示していない。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、計測ラインでは桁内面側で腐食が著しく生じてい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-2.10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-2.9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. 3 電気抵抗検知式厚さ計の開発

#### (1) 概要

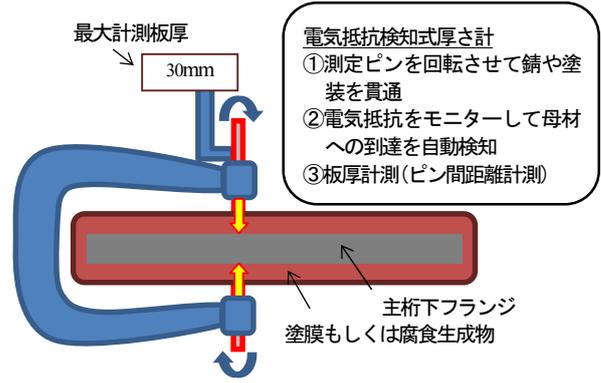
##### 1) 厚さ計の特徴

図-2.11に、電気抵抗検知式厚さ計の模式図とプロトタイプを示す。キャリパー方式の厚さ計測器と同様に、対象鋼板両面側から計測部を当てて、計測部間の距離によって板厚を計測するものである。計測部先端には測定ピンを設け、これを錆(腐食生成物)に貫通させて、対象物の厚さを直接計測するものである。計測手順としては、図に示すように、1)計測部先端の測定ピンを回転させながら腐食生成物等に貫入させる、2)測定ピンの鋼材表面への到達を電氣的抵抗値によって検知し、測定ピンの貫入を停止させる、3)この時点での上下の両測定ピン先端間の距離を内蔵した変位計により厚さを計測する、となる。腐食生成物や塗膜の電氣的な抵抗が鋼材のそれより著しく高いことを利用したものである。

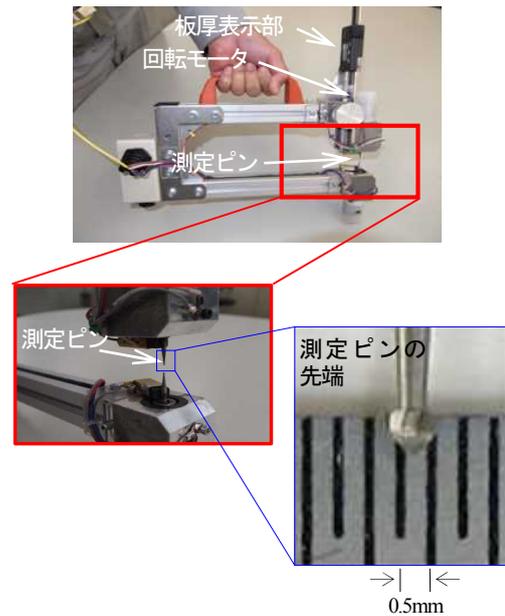
なお、図中のプロトタイプはフランジ等を両面から挟み込んで計測することを想定したものであり、形状寸法などは洗練されたものではないが、今後、鋼板厚さを計測する場合の奥行について、鋼桁端部のウェブの範囲までの計測を可能とした治具への改良、ウェブを対象として片面側からの計測を可能とした改良、及びよりコンパクトで扱いやすい装置への改良等を進めたいと考えている。

##### 2) 鋼材表面の検知方法の検証

同厚さ計の原理は簡単なものであるが、実橋の鋼材面の場合には、塩を含む水分の付着により、抵抗値が低下し、鋼材表面位置を捉えられなくなることが、装置の考



(a) 電気抵抗検知式厚さ計と計測方法の模式図



(b) 計測装置プロトタイプ

図-2.11 電気抵抗検知式厚さ計の概要

表-2.2 電気抵抗の計測結果

	端子間距離		
	1mm	1cm	5cm
蒸留水	2,500	350	1,270
塩水(5%濃度)	30	30	28
塩水(10%濃度)	22	27	24

(単位: kΩ)

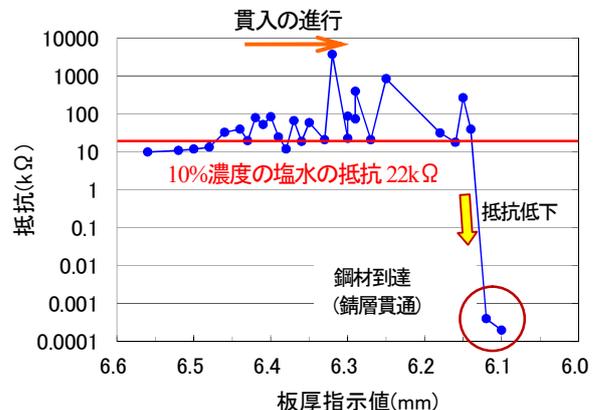


図-2.12 腐食生成物貫入量と電気抵抗の変化

案段階で懸念された。

そこで、プロトタイプ製作の事前検討として、蒸留水や塩水そのものの電気抵抗や、塩水を散布した腐食鋼板を用いて、ピンの貫入とともに変化する電気抵抗を計測した。表-2.2 は、蒸留水や塩水に電極を挿入し、電極間の抵抗を計測した結果を示す。多少のバラツキはあるものの、10%濃度の塩水の電気抵抗が最も小さく、その値は端子間距離1mmでは22k $\Omega$ であった。次に、腐食した鋼板に、10%濃度の塩水を完全な湿潤状態となるように散布し、測定ピンの貫入ともなう電気抵抗の変化を計測した。その結果を図-2.12に示す。測定ピンが腐食生成物内を進入しているときの電気抵抗は10k $\Omega$ 以上を示していたが、鋼材に到達（腐食生成物を完全に貫通）したときには、電気抵抗は1 $\Omega$ 以下と著しく低下した。

以上のことから、塩水等が附着していても、測定ピンと鋼板間の電気抵抗をモニターしながら測定ピンを貫入することで、腐食生成物に覆われた鋼材の表面位置を正確に捉え、残存板厚を計測することが可能であることが確認できた。また、測定ピンの電気抵抗の変化を検知することにより客観的に計測が可能であり、技術者の技量による精度の違いはほとんどない手法と考えている。なお、プロトタイプでは測定ピンが鋼材に接触した時点で測定ピンを停止するようにしており、鋼材表面にきずを付けるようなことはなかった。測定ピンによる鋼材到達（錆層貫通）の判断基準となる電気抵抗のしきい値（図-2.12より約1~0.001 $\Omega$ ）については、1橋梁の錆層に対する値であり、今後、実橋の錆層の条件下での現場検証によるデータの蓄積が必要と考えている。

## (2) 性能確認試験の結果と考察

試験体は、2.2(2)に示す腐食欠損試験体を用い、計測位置は、計測ラインとした。

計測状況を写真-2.2に示す。測定ピンによる鋼材到達（錆層貫通）の判断基準となる電気抵抗のしきい値は1 $\Omega$ とした。図-2.13に、腐食欠損試験体の計測ラインにおける、レーザ変位計及び同厚さ計による計測値の比較結果を示す。両者は良く一致しており、錆を除去しなくても精度の高い計測値が得られた<sup>8)</sup>。

## 3. コンクリート等埋込部の鋼材に生じる腐食欠損を対象とした非破壊調査技術の適用性の検討

コンクリート等埋込部の鋼材に生じる腐食欠損を対象とした非破壊調査技術として、共鳴振動試験および遮断周波数を利用したSH板波による超音波試験の適用性の検討を行った。以下に、これらの検討結果を示す。

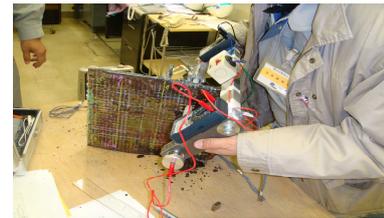


写真-2.2 電気抵抗検知式厚さ計による残存板厚計測状況

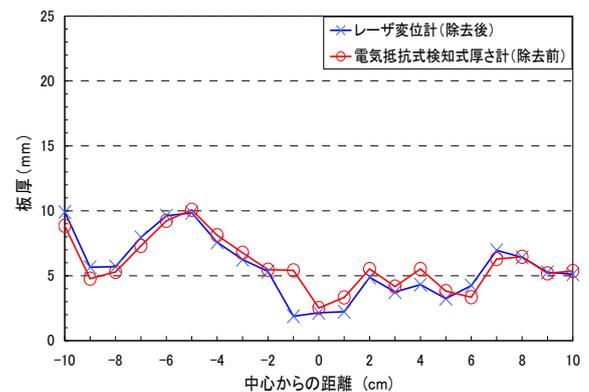


図-2.13 腐食欠損試験体の計測ラインにおける板厚計測値

## 3.1 共鳴振動試験の適用性の検討

### 1) 試験体

表-3.1に試験体の形状寸法を示し、図-3.1に試験体の一般図を示す。試験体は、鋼製柱(H形鋼)がコンクリートに埋め込まれる接合形式とし、後述する電気腐食によりコンクリート中のH形鋼の目標腐食率(腐食区間における鋼材の平均質量減少率)を20%と40%として腐食させた2体(CL20とCL40)を製作した。

CL20とCL40のH形鋼の断面寸法は、200mm×200mm×8mm×12mm(断面高さ×断面幅×ウェブ厚さ×フランジ厚さ)であり、材質はSS400を使用した。コンクリートフーチングは、断面幅1,380mm、断面高さ1,500mm、フーチング高さ1,250mmとした。H形鋼は、コンクリートフーチング底面まで埋め込み、フーチング内のH形鋼端部は鋼製ベースプレート(400mm×400mm×25mm)に溶接した。H形鋼の材料特性は、降伏強度264N/mm<sup>2</sup>、引張強さ433N/mm<sup>2</sup>、伸び32%であり、コンクリートの材料特性は、圧縮強度26.1N/mm<sup>2</sup>、動弾性係数28,200N/mm<sup>2</sup>、密度2,250kg/m<sup>3</sup>であった。

文献9)の道路付属物の点検データを参考にして、CL20とCL40では、コンクリートフーチング上面から深さ100mmまでのH形鋼全面を腐食対象とし、それよりも深い位置ではH形鋼表面にエポキシ系塗料を塗布して腐食を防止させた。

2) 電食試験

対象とする鋼コンクリート接合部に発生している腐食は、鋼材の表面積が大きく、その腐食程度も著しい事例も見受けられる。このような事例を踏まえて、本研究での試験体製作では、コンクリート内部の鋼材のみを腐食させることに注意を払って、電食試験によって鋼材腐食を発生させ促進させる方法を用いた。

図-3.2 に電食試験の概略図を示す。電気腐食試験では、H 形鋼のフランジとウェブに面して深さ 100mm まで金網を埋め込み直流電流を流した。このとき、濃度 5% の塩水を供給する孔(直径 8~10mm, 深さ 100mm)を複数設け、錆汁の閉塞を防ぐために塩水を循環させた。循環方法は、塩水供給孔を深さ 100mm の最深部の位置で直角に曲げてフーチング側面まで通した孔を設け、フーチング上面の孔を入口、側面の孔を出口として、両孔を透明なナイロン製チューブと電動ポンプにより接続し、流水状態を監視しながら塩水を 24 時間常時循環させた。なお、塩水供給孔の水平部分(長さ約 1,300mm の部分)には、ナイロン製チューブを埋込んだままにして、コンクリート中への塩水の浸透を防止させた。

CL20 と CL40 では、目標腐食率(100mm の腐食区間における鋼材の平均質量減少率)をそれぞれ 20% と 40% とし、そのときの目標積算電流量をそれぞれ 1,142A・hour と 2,285A・hour とした。通電させる電流量は、積算電流量 1,142A・hour まで電流密度 1.01mA/cm<sup>2</sup> の直流電流を流し、以降は電流密度 1.47mA/cm<sup>2</sup> を基本とした。なお、同じ断面寸法の H 形鋼をコンクリートに埋め込んだ試験体を製作して電食の予備試験を行い、積算電流量 1,872A・hour に対して鋼材質量計測による腐食率が 32% であることを確認した。この結果から CL20 と CL40 の目標とする積算電流量を 1,142A・hour と 2,285A・hour に設定した。

3) たわみ振動試験

図-3.1 に CL20 と CL40 の加振位置と計測位置を示す。試験方法は、文献 10) に掲載されている方法と同様に、加振器を用いて H 形鋼のたわみ振動を計測した。たわみ振動試験における加振方向は、図-3.3 中の赤色の両矢印として示すように、H 形鋼の強軸方向(フランジ面を面外方向に加振する方向)とした。加振は、加振器と H 形鋼の間に伝達棒(質量 380g の鋼板)を介して行った。加振位置は、フーチング上面から 600mm 位置とし(図-3.1 中の赤色の丸印、図-3.3 中の赤色の両矢印)、伝達棒先端(フランジ面との設置位置)の加速度振幅 2m/s<sup>2</sup> を基本として、5 分間で周波数を 70Hz から 130Hz まで連続的に

表-3.1 試験体の形状寸法

試験体名	鋼製柱(H形鋼)		コンクリートフーチング		腐食区間	目標腐食率(%)
	断面寸法	高さ	断面幅×断面高さ	高さ		
CL20	200×200×8×12	1315	1380×1500	1250	100	20
CL40						40

(記載のない単位:mm)

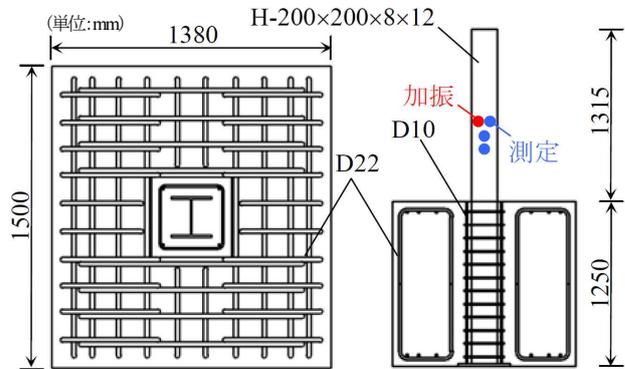


図-3.1 試験体の一般図

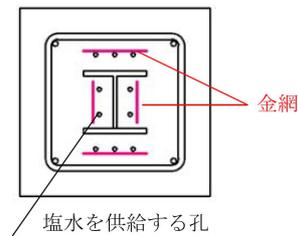


図-3.2 電食試験の概略図

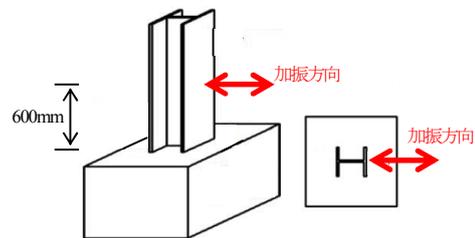


図-3.3 たわみ振動試験の概略図

上昇させた。このとき、加振位置と同じフランジ面側に加速度計を貼付し、共振曲線を得た。加速度計の貼付位置は、コンクリートフーチング上面から 400, 500, 600mm のフランジ面上の 3 箇所とした。

4) 試験結果

図-3.4 に換算腐食率が 1.5, 12.5, 20, 40% のときの CL40 のひび割れ進展状況を示す。CL20 と CL40 のいずれも、換算腐食率 0.9~1.5% 程度になるとフランジ端部から斜め方向に腐食ひび割れが発生・進展した。なお、電食試験終了時でもコンクリートフーチング側面に明確なひび割れの発生は見られなかった。

H 形鋼のたわみ振動を励起し、1 次モードの固有振動数と減衰定数を求めた。図-3.5 に 0~3% までの換算腐食

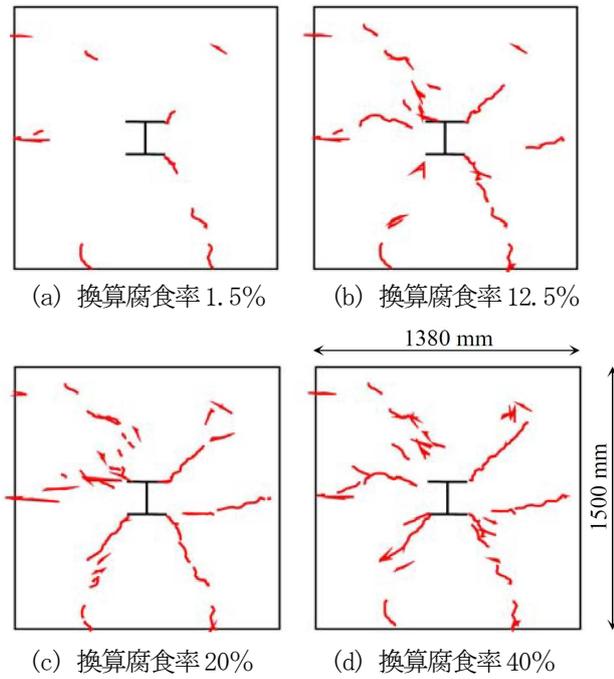


図-3.4 CL40 のひび割れ進展図

表-3.2 電食試験前の健全時のたわみ振動試験結果

試験体名	鋼製柱(H形鋼)	
	固有振動数(Hz)	減衰定数(%)
CL20	101	0.98
CL40	98	0.53

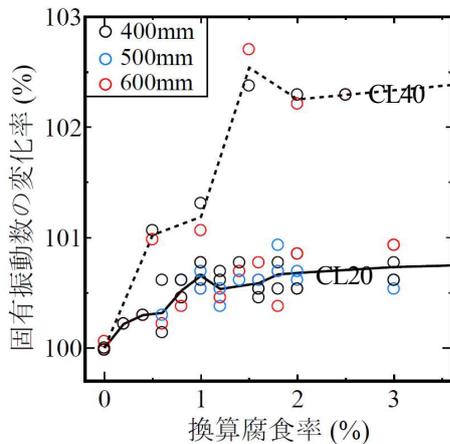
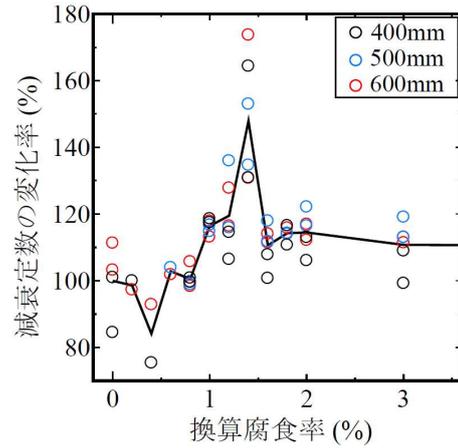
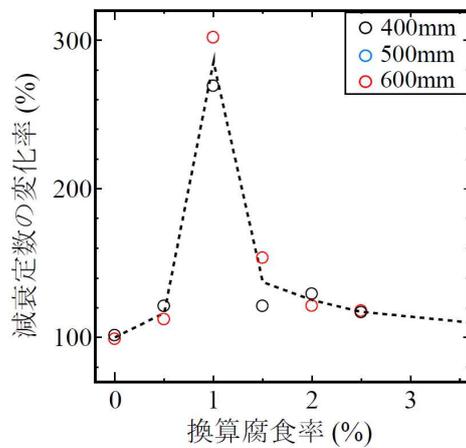


図-3.5 換算腐食率と固有振動数の変化率

率と固有振動数との関係を示す。図の縦軸の固有振動数の変化は、表-3.2 に示す電食試験前の健全時の固有振動数を基準とした変化率として示した。なお、換算腐食率3%以降では固有振動数や減衰定数の変化に特定の傾向は見られなかった。2体の固有振動数の変化はわずか3%程度以内に収まるため、鋼材腐食量の推定には有用ではないと判断した。しかし、CL20とCL40のいずれも換算腐食率0~2%程度までにわずかな固有振動数の増加が見られた。詳細な試験データは計測していないが、H形鋼の腐食による周辺コンクリートのひび割れ(H形鋼の



(a) CL20



(b) CL40

図-3.6 換算腐食率と減衰定数の変化率

フランジ端部からの斜めひび割れが発生・進展するまでに腐食生成物の膨張圧がH形鋼基部を拘束したと推察される。

図-3.6に換算腐食率とハーフパワー法<sup>11)</sup>による減衰定数の関係を示す。なお、図中の計測値については、複数回の計測を実施して試験データの再現性を確認している。図より、換算腐食率0~2%程度までに減衰定数が健全時の1.5~3倍程度に増加する傾向が見られた。減衰が増加するメカニズムは明らかではないが、文献12)でも鋼部材のボルト接合は溶接の2倍程度の減衰定数を示すことや、文献10)の他の接合部試験体でも腐食ひび割れの発生前後までに減衰定数の増加が示されていることから、H形鋼周辺の腐食生成物やコンクリートひび割れに減衰効果があるものと推察される<sup>13)</sup>。

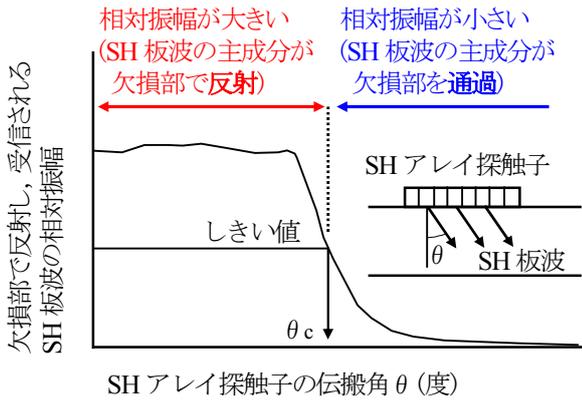


図-3.7 SH 板波の相対振幅と伝搬角 (SH 板波の周波数に対応) の関係の概念図

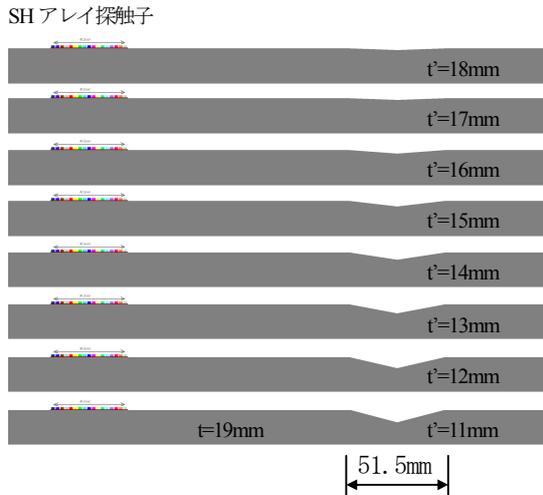


図-3.8 数値シミュレーションで対象としたモデル

### 3.2 遮断周波数を利用した SH 板波による超音波試験の適用性の検討

腐食欠損部の検知と腐食欠損量を計測する方法として、遮断周波数を利用した SH 板波に着目し、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。広帯域の SH アレイ探触子を用いて入射角を変化させることにより、SH 板波の周波数を変化させ、腐食部における遮断周波数  $f_c$  (遮断伝搬角  $\theta_c$ ) 前後での SH 板波の反射波の振幅の変化を捉え、その時の伝搬角より残存板厚を定量的に計測する手法の適用性を確認した。図-3.7 に遮断周波数を利用した SH 板波の相対振幅と伝搬角の関係の概念図を示す。

図-3.8 に対象モデルを示す。三角溝の形状を幅一定 (深さ毎に傾斜角度が変化) として深さ 0~8mm まで変化させた。

図-3.9 に伝搬数値シミュレーションの結果を示す。図-3.10 には、遮断周波数  $f_c$  と等しくなった時の遮断伝搬角  $\theta_c$  から求めた残存板厚と、対象モデルの残存板厚を比較した図を示す。

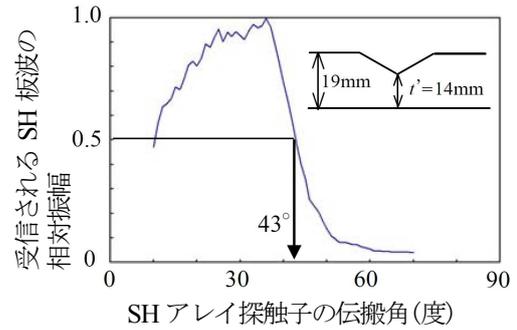
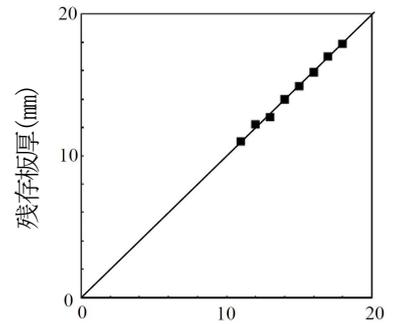


図-3.9 数値シミュレーションにおける SH 板波の振幅と伝搬角の関係



数値シミュレーションより SH 板波の振幅が半減する伝搬角から求めた残存板厚 (mm)

図-3.10 数値シミュレーションでモデル化した残存板厚と、SH 板波の相対振幅の変化から求めた残存板厚の関係

以上の検討結果より、遮断周波数を利用した SH 板波を用いば、コンクリート等埋込部の鋼材に生じる腐食欠損の残存板厚の計測が可能であることを確認した<sup>14)</sup>。

### 4. 境界部を腐食させた試験体の正負交番荷重試験

#### (1) 対象とした試験体の寸法形状

試験体は、図-3.1 と表-3.1 に示した CL20 と CL40 とし、比較のための同形状寸法の健全試験体 CL00 を含めた、計 3 体とする。H 形鋼の鋼種、鋼材の引張試験結果、コンクリートの材料試験結果は、3.1 1) に記載したものと同一である。

#### (2) 正負交番荷重試験

3.1 に記載した電食試験およびたわみ振動試験後に、コンクリートフーチング上面から H 形鋼の高さ 1,000mm 位置に正負交番荷重を載荷した。荷重の方向はたわみ振動試験の加振方向 (図-3.3) と同じ方向とした。H 形鋼に軸力は作用させなかった。健全試験体の柱基部 (フーチング上面から 5mm 位置) に貼付したひずみゲージの値が、材料試験の降伏ひずみに達した変位を降伏変位  $\delta_y$  と定

義し、変位制御によって  $\delta y$  の整数倍ごとに 1 回の正負交番荷重を与えた。なお、CL20 と CL40 の荷重についても、健全試験体の降伏変位  $\delta y$  を基準として正負交番荷重試験を行った。

正負交番荷重試験に先立って、フーチング上面のコンクリートを 50mm 程度はつきり、鋼材の腐食状況を確認した。目視による観察の限りでは、写真4.1 に示す鋼製柱基部とフーチング面の境界に断面欠損が見られた。載荷試験後に型取りゲージで測定した板厚減少量は、フランジ表面において 1~2mm 程度であったが、裏面は表面ほどの断面欠損は見られなかった。また、ウェブにも著しい断面欠損が見られた。今後、供試体を解体して詳細調査と鋼材の質量計測を予定している。

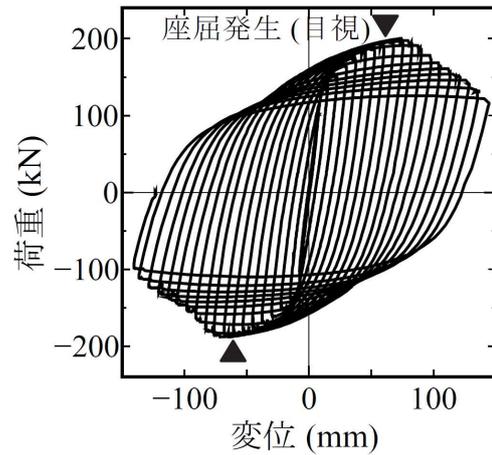
(3) 載荷試験結果

図4.1 に荷重-変位関係を示し、表4.1 に降伏点と最大荷重時および累積エネルギー吸収量を示す。3 体の試験体は、変位 7.5mm で圧縮側と引張側のフランジがほぼ同時に降伏し、その後、 $8\delta y$  の荷重時に圧縮フランジに局部座屈が観察された。健全試験体は  $9\delta y$  で最大荷重となり、載荷ストロークの限界 ( $\pm 150\text{mm}$ ) まで鋼材にき裂・破断は生じなかった。このような鋼コンクリート接合部は、フーチングからの鋼材の伸び出しに起因する回転変位が柱の全変形量の半分程度を占めており、大変形域まで紡錘型の履歴ループを描いた。一方、境界部腐食を生じさせた場合には、表4.1 に示すように、最大荷重および最大荷重時変位が腐食率に応じて低下している。さらに、CL20 は  $15\delta y$  でウェブにき裂が生じ、 $18\delta y$  でフランジが破断して耐力を失った。そして、CL40 供試体でも  $12\delta y$  でウェブ-フランジ接合部にき裂が発生し、 $13\delta y$  でフランジが破断した。これらのき裂や破断は、いずれもコンクリート内部の腐食区間において発生した。表3.2 の累積エネルギーも腐食率に応じて低下しており、腐食欠損によるエネルギー吸収性能の低下が確認できた<sup>15)</sup>。

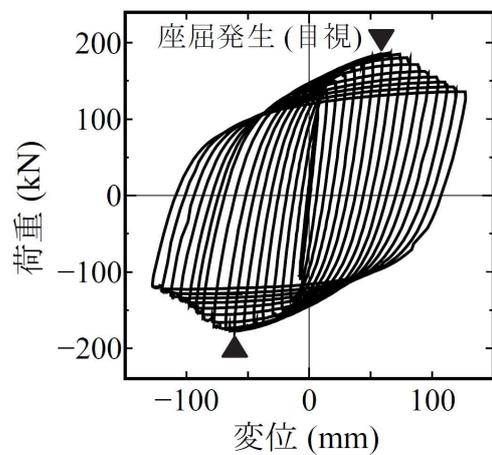
以上より、コンクリートフーチングに H 形鋼を埋め込んだ接合形式では、境界部腐食が柱の耐力を低下させるだけでなく、特に、局部座屈後の変形性能やエネルギー吸収性能を低下させる可能性があることを確認した。



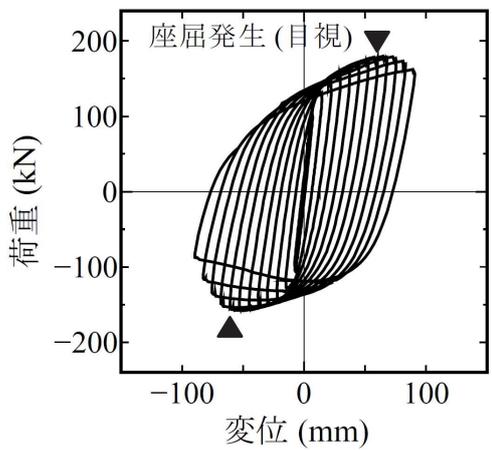
写真4.1 H形鋼基部の腐食欠損状況



(a) 健全



(b) CL20



(c) CL40

図4.1 荷重-変位関係

表4.1 降伏点と最大荷重時および累積エネルギー吸収量

試験体名	降伏点		最大荷重時		累積エネルギー吸収量(kJ)	
	変位(mm)	荷重(kN)	変位(mm)	荷重(kN)	最大荷重時	載荷終了時
健全	-7.7	-103	-68.2	-188	132	593
CL20	-7.5 (97%)	-111 (107%)	-60.7 (89%)	-178 (95%)	96 (73%)	470 (79%)
CL40	-7.8 (101%)	-106 (103%)	-53.0 (78%)	-158 (84%)	67 (51%)	215 (36%)

注) 括弧内は健全時に対する割合。荷重と変位は負載荷側を示した。

5. 他分野の各種の非破壊検査手法の橋梁検査への適用可能性の調査

既設コンクリート部材の耐荷力評価のためには、コンクリート内のひび割れ状況や、鉄筋・PC鋼材の位置、直径、腐食状況を把握する必要がある。非破壊検査技術の一つであるX線透過法ではこれらの情報を得ることができ、また、コンピュータトモグラフィ (CT) 技術を用いることにより複雑な内部構造を可視化できる可能性がある。しかし、現在橋梁調査で用いているX線源はその出力が300keVまでであること、適用限界厚さは30~40cm程度といわれていること、厚い部材の場合は撮影に時間がかかることなど、従来の非破壊検査技術には限界がある。そこで、他機関と連携し、新たな非破壊検査技術の道路橋への適用に取り組んだ。

東京大学等との連携により、高出力X線源によるコンクリート橋検査技術の開発を行った。X線の利用を規定している放射線障害防止法においては、屋外で使用する場合、橋梁検査に限って4 MeVまでの加速器の使用が認められている。そのためX線源として、上坂ら<sup>16)</sup>が開発した可搬型3.95MeVライナックに注目した。3.95MeVライナックの全体像を写真-5.1に、加速管のイメージを図-5.1に示す。装置は、X線源、高周波発生装置、電源、水冷ポンプから構成されている。高出力他装置に比べ重量が小さいのが特徴であり、既存の橋梁点検車に搭載可能なように、X線源等を200kg以下に抑えている。開発装置の基本性能を確認するため、撤去橋梁より切り出したプレストレストコンクリート桁の下フランジ部(写真-5.2)を撮影した。この部材の寸法は40cmであり、従来の装置では撮影時間に1時間程度を要していたが、わずか数秒で写真-5.3の画像を得ている。この桁はポストテンション方式による桁であり、一つのシース内に直径7mmのPC鋼線が12本配置されている。写真-5.3は1方向からの撮影であるため、各シース内のPC鋼線は、3本しか確認できていない。また、撮影中心から離れたシース③では、本数までは確認できない。しかし、本装置は角度を変化させた複数枚の画像も短時間で撮影することが可能であり、検出精度向上のため、装置開発と並行してCT技術にも取り組んでいる。

放射線の一種である中性子線を構造物の透過観察に用いるための技術開発については、理化学研究所と連携して行った。X線は原子内の電子との相互作用を生じるため原子番号が大きくなるにしたがって透過しにくくなるが、中性子線は電荷を持たず原子核との相互作用である



写真-5.1 3.95MeV ライナック 全体像

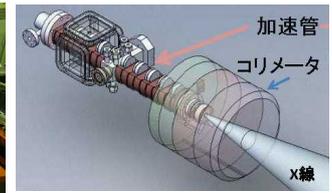


図-5.1 加速管イメージ

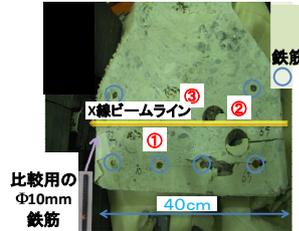


写真-5.2 撮影対象 (PC 桁下フランジ部)

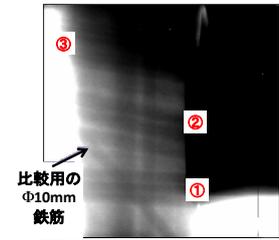


写真-5.3 X線画像 (撮影時間 1秒)

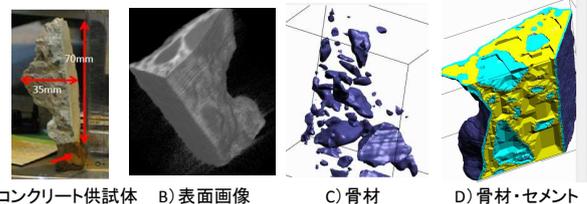


図-5.2 中性子ラジオグラフィ例<sup>17)</sup>



図-5.3 可搬型中性子イメージング装置

(理化学研究所提供) ために

透過性は原子核ごとに異なっている。例えばX線が透過しにくい鉄を透過することができる一方、水素原子は透過しにくい。この特徴を利用して、すでに生コンクリート圧送配管内の水分計測に中性子線が用いられている。図-5.2に中性子ラジオグラフィの例を示す<sup>17)</sup>。供試体として長さ70mm、最大厚さ35mmのコンクリート片を用い、180度回転させて0.6度ごとに撮影した300枚の画像を、コンピュータトモグラフィ技術を用いて三次元画像として解析されたものである。ここでは、透過結果から骨材とセメント分とに分離解析することにより、コンクリートの内部構造まで描き出している。また、水によって大きく減衰するという特徴から、コンクリートひび割れ部における水分移動を可視化した事例もある。中性子線を用いた道路橋の透過観察装置の開発イメージを図-5.3に示す。現在、可搬可能な小型中性子源システム

が理化学研究所内に整備され、小規模な橋梁部材等の撮影が可能となっている<sup>18), 19)</sup>。

高出力X線や中性子線を既設橋梁の非破壊検査に利用するためには、さらなる技術開発や、得られる情報から耐荷力を評価する手法の確立が必要である。平成25年度には中性子線だけでなくテラヘルツ光、レーザー光など、多様な光量子技術も視野に入れた新たな協力協定を理化学研究所と締結した。今後は、東京大学や理化学研究所等との連携をより深めて研究を行うことにより、既設コンクリート部材の耐荷力を把握できる非破壊検査技術の確立と橋梁点検への適用を目指していきたい。

## 6. まとめ

道路橋の各種劣化損傷への既存調査技術として、1) 鋼桁端等の腐食欠損部の残存板厚計測、2) コンクリート等埋込部の鋼材に生じる腐食欠損部の残存板厚計測を対象とし、これらの非破壊調査技術の検討を行った。また、3) コンクリート埋込み部の境界部腐食が柱の耐荷力や変形性能に及ぼす影響を明らかにするために実験による基礎検討を行った。さらに、4) 撤去された橋梁部材を用いて、他分野の各種の非破壊検査手法の橋梁検査への適用可能性の調査を行った。

以下に主な結果をまとめる。

- 1) 鋼桁端等の腐食欠損部の残存板厚計測を対象とした非破壊調査技術の検討
  - ・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。
  - ・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。
  - ・パルス式渦流探傷法では計測値は得られたものの、レーザー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。
  - ・腐食欠損部の残存板厚を直接計測する計測手法として電気抵抗検知式厚さ計を開発し、実腐食試験体対

象とした性能確認試験を実施し、適用性の評価を行った。その結果、錆上からの計測値は、錆除去後のレーザー変位計の計測値と相関性が高いことを確認した。

- 2) コンクリート等埋込部の鋼材に生じる腐食欠損部の残存板厚計測を対象とした非破壊調査技術の検討
  - ・コンクリート等埋込部の鋼材に生じる腐食欠損を対象とした非破壊調査技術として、遮断周波数を利用したSH板波による超音波試験の適用性の検討を行った。その結果、遮断周波数を利用したSH板波による超音波試験では、コンクリート等埋込部の鋼材に生じる腐食欠損による残存板厚の計測が可能であることを確認した。
  - ・コンクリート等埋込部の鋼材に生じる腐食欠損を対象とした非破壊調査技術として、共鳴振動試験の適用性の検討を行った。その結果、境界部腐食に伴う鋼製柱(H形鋼)の固有振動数の変化は小さかった。一方、コンクリートフーチングに腐食ひび割れが発生する前後(腐食率0~2%)までの間、鋼製柱(H形鋼)の減衰定数は、健全時の1.5~3倍に増加する傾向があるが、残存板厚の計測への適用にはさらなる検討が必要であることを示した。
- 3) コンクリート埋込み部の境界部腐食が柱の耐荷力や変形性能に及ぼす影響に関する検討
  - ・コンクリート等埋込部の鋼製柱(H形鋼)の境界部腐食が柱の耐荷力や変形性能に及ぼす影響を明らかにするために、境界部を腐食させた試験体の正負交番載荷試験を実施した。その結果、柱基部を腐食欠損させた場合には、局部座屈発生後の繰返し荷重によって鋼材にき裂が発生し、破断による終局を早期に迎えた。このことから、コンクリート境界部における鋼材の腐食欠損は、部材の耐荷力のみならず、変形性能やエネルギー吸収能を低下させる要因となることを示した。
- 4) 他分野の非破壊検査手法の橋梁検査への適用可能性の調査
  - ・高出力X線や中性子線のコンクリート部材の内部のひび割れや鉄筋・PC鋼材の腐食状況の把握への適用性について、撤去橋梁部材を用いて検出性能を調査する等の基礎検討を行った結果、今後の実用化に向けた技術開発により現地における非破壊検査に適用できる可能性があることを確認した。

本文中2. 3で示した電気抵抗検知式厚さ計の開発については、施工技術総合研究所((一社)日本建設機械施工

協会)との共同研究「鋼部材の腐食状況の簡易計測機器の開発に関する共同研究(平成21~22年度)」において、本文中3.1で示した共鳴振動試験の適用性の検討については、国立大学法人東北大学との共同研究「コンクリート埋込部における鋼部材の腐食欠損等の共鳴振動評価法に関する共同研究(平成23~24年度)」において、本文中3.2で示した遮断周波数を利用したSH板波による超音波試験の適用性の検討については、菱電湘南エレクトロニクス(株)及び三菱電機(株)情報技術総合研究所との共同研究「コンクリート埋込部における鋼部材の腐食欠損の非破壊検査手法に関する共同研究(平成23~25年度)」において、それぞれ検討されたものである。

#### 参考文献

- 1) 例えば、小海寛：保温材上や防食材上からの肉厚測定-INCOTEST、日本非破壊検査協会、非破壊検査、第55巻3号、pp.109-113、2006。
- 2) 例えば、杉本和彦、木村幸夫：金属管路の肉厚測定に関する一考察、土木学会、年次学術講演概要集、第42回、VI-27、pp.70-71、1987.9。
- 3) 例えば、藤懸洋一、川島捷宏、山田敏行：(654)横波電磁超音波法による腐食残存肉厚の測定、日本鉄鋼協会、鐵と鋼、日本鉄鋼協会々誌、71(13)、S1437、p.233、1985.9。
- 4) 例えば、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。
- 5) 例えば、島田道男、吉井徳治、成瀬健：鋼板の反発を利用した厚さ測定法の検討、-インパルスハンマによる方法-、日本非破壊検査協会、超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集、第8回、7-6、pp.153-158、2001.1。
- 6) 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、溶接学会、溶接学会論文集、第25巻、第4号、pp.507-513、2007.11。
- 7) 例えば、<http://www.nstr.co.jp/haikanxsen.htm>((株)日鐵テクノロジーサーチホームページ)
- 8) 村越潤、高橋実、飯塚拓英、小野秀一：腐食鋼部材の残存板厚計測への各種計測技術の適用性の検討、土木学会、構造工学論文集、Vol.59A、pp.711-724、2013.3。
- 9) 星野誠、玉越隆史：道路附属物支柱基部の腐食発生傾向に関する検討、土木学会、土木学会年次学術講演会、Vol.66、VI-231、pp.461-462、2011.9。
- 10) 岩岸現、柏宏樹、内藤英樹、鈴木基行：鋼コンクリート接合部に生じた鋼材腐食量の推定に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.34、No.2、pp.1231-1236、2012.7。
- 11) 長松昭男：モード解析入門、コロナ社、2009。
- 12) 伊藤学、片山恒雄：橋梁構造の振動減衰、土木学会論文集、No.117、pp.12-22、1965.5。
- 13) 佐野善紀、柏宏樹、高橋実、村越潤、内藤英樹、鈴木基行：コンクリート埋込部が腐食欠損した鋼製柱の非破壊検査に関する研究、土木学会、平成24年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集、I-25、2013.3。
- 14) 木村友則、小池光裕、和高修三、高橋実、村越潤：SH板波による鋼板の残存肉厚測定方法、日本音響学会、日本音響学会講演論文集、2012年秋季研究発表会、1-5-14、pp.1333-1336、2012.9。
- 15) 横手加奈、佐野善紀、高橋実、村越潤、内藤英樹、鈴木基行：コンクリート埋込部が腐食欠損したH形鋼柱の正負交番載荷実験、土木学会、第69回年次学術講演会講演概要集、2014.9(掲載予定)
- 16) Mitsuru Uesaka et.al : "950 keV, 3.95 MeV, 6 MeV X-band Linacs for Nondestructive Evaluation and Medicine", Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, NIMA53737, S0168900211014586, 10.1016/j.nima. 2011.
- 17) Shin-ya Morita et al. : Neutron radiography for the structural simulation using VCAD system, ICANS XIX meeting, 2010
- 18) 木村嘉富：橋梁診断高度化の為の非破壊検査技術、理研から発信する中性子利用の新たな展開、ものづくり産業利用に向けた小型中性子源の開発、(独)理化学研究所、2011.11。
- 19) 木村嘉富：コンクリート構造物の非破壊検査、橋梁と基礎、第47巻第3号、pp.49-52、2013.3。

## RESEARCH ON THE APPLICATION OF NONDESTRUCTIVE INSPECTION TECHNOLOGY TO HIGHWAY BRIDGES

**Budget** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2010-2013

**Research Team** : Bridge and Structural Engineering

Research Group

**Author** : Yoshitomi KIMURA

Jun MURAKOSHI

Hidetaka HONMA

Minoru TAKAHASHI

Akiko HIROE

**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. Laboratory tests were conducted focusing on following needs: measurement of section loss of corroded steel plate covered with rust layer, evaluation of crevice corrosion of steel column embedded into concrete and evaluation of soundness of inside of concrete members.

**Key words** : nondestructive evaluation technology, corrosion, Resonant vibration tests, ultrasonic tests, cyclic loading tests