

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 24 年度は、1) 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。また、2) 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。

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、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 24 年度は、1) 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。また、2) 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。

2. 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。

2. 1 共鳴振動試験の適用性の検討

(1) 対象とした試験体の寸法形状

表-2.1 に試験体の形状寸法を示し、図-2.1 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/mm²、引張強さ 433N/mm²、伸び 32%であり、コンクリートの材料特性は、圧縮強度 26.1N/mm²、動弾性係数 28,200N/mm²、密度 2,250kg/m³であった。

文献 1)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-2.2 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/cm²の直流電流を流し、以降は電流密度1.47mA/cm²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-2.1にCL20とCL40の加振位置と計測位置を示す。試験方法は、文献2)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-2.3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-2.1中の赤色の丸印、図-2.3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/s²を基本として、5分間で周波数を70Hzから130Hzまで連続的に上昇させた。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-2.4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。

表-2.1 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	200×200×8×12	1315	1380×1500	1250	100	40

(記載のない単位:mm)

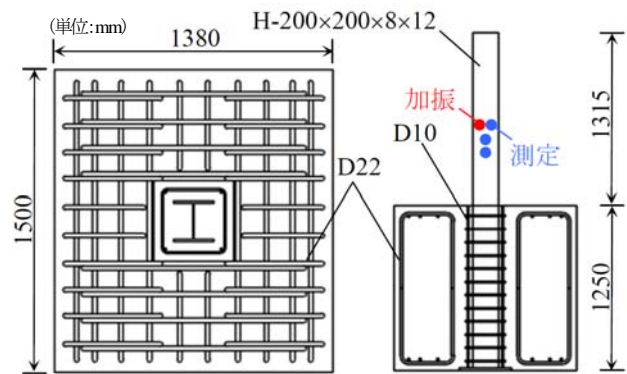


図-2.1 試験体の一般図

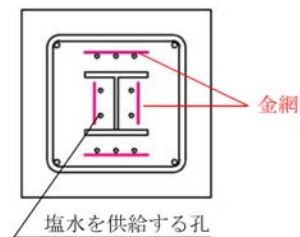


図-2.2 電食試験の概略図

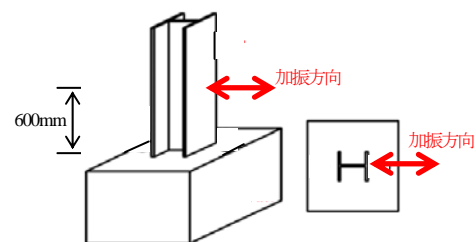


図-2.3 たわみ振動試験の概略図

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-2.5に0~3%までの換算腐食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-2.2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-2.6に換算腐食率とハーフパワー法³⁾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4)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2)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。

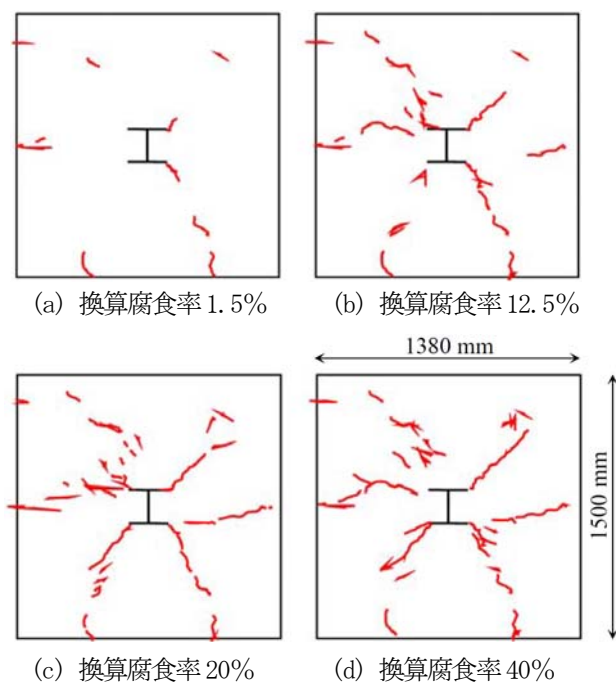


図-2.4 CL40のひび割れ進展図

表-2.2 電食試験前の健全時のたわみ振動試験結果

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

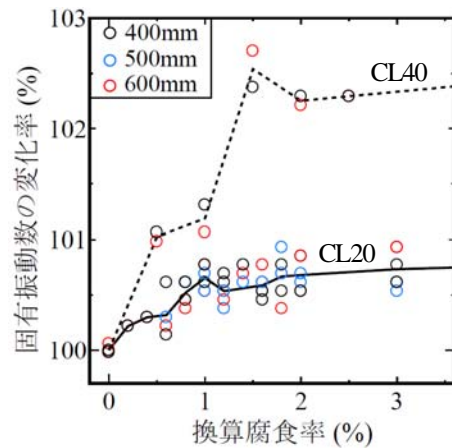
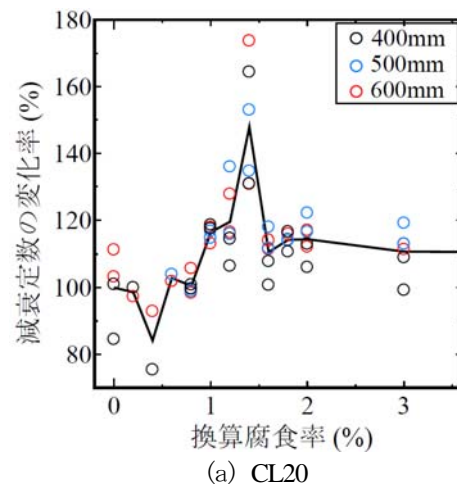
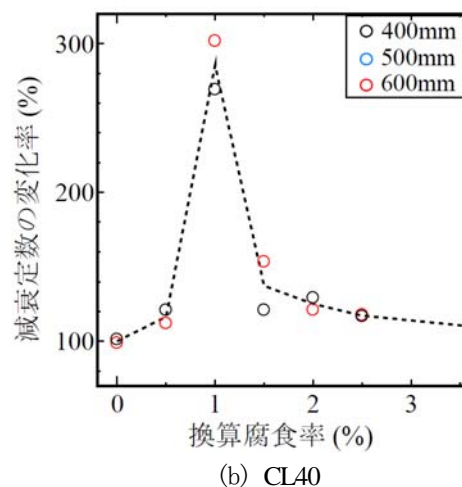


図-2.5 換算腐食率と固有振動数の変化率



(a) CL20



(b) CL40

図-2.6 換算腐食率と減衰定数の変化率

2.2 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 θ_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-2.7 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-2.8 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-2.9 に伝搬数値シミュレーションの結果を示す。図-2.10 には、遮断周波数 f_c と等しくなった時の遮断伝搬角 θ_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。

以上の検討結果より、遮断周波数を利用した SH 板波を用いれば、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。

3. 境界部を腐食させた試験体の正負交番载荷試験

(1) 対象とした試験体の寸法形状

試験体は、図-2.1 と表-2.1 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、2.1 に記載したものと同一である。

(2) 正負交番载荷試験

2.1 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

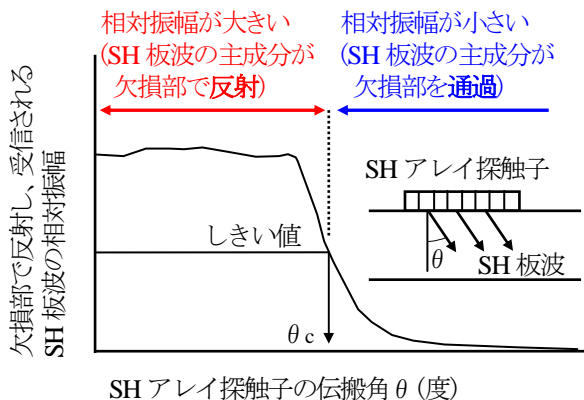


図-2.7 SH 板波の相対振幅と伝搬角 (SH 板波の周波数に対応) の関係の概念図

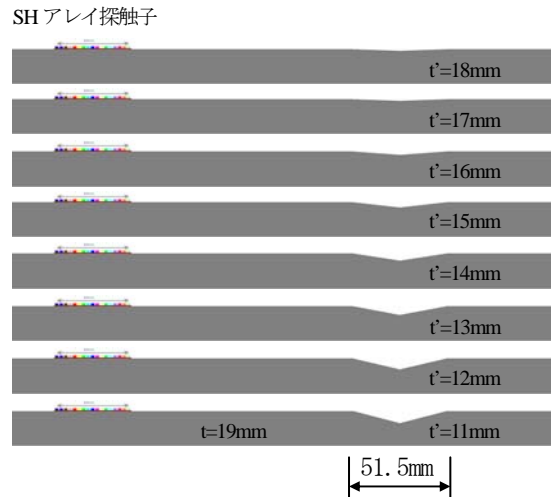


図-2.8 数値シミュレーションで対象としたモデル

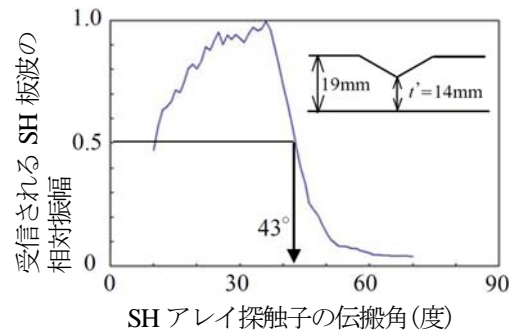


図-2.9 数値シミュレーションにおける SH 板波の振幅と伝搬角の関係

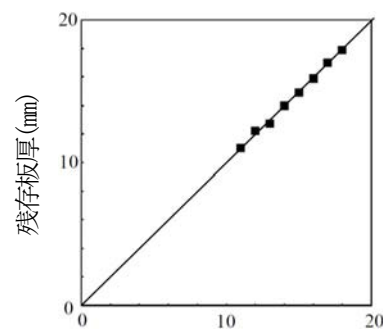


図-2.10 数値シミュレーションより SH 板波の振幅が半減する伝搬角から求めた残存板厚 (mm)
数値シミュレーションでモデル化した残存板厚と、SH 板波の相対振幅の変化から求めた残存板厚の関係

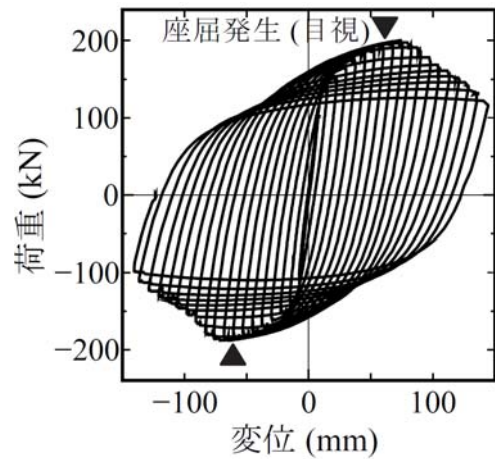
位置に正負交番荷重を載荷した。載荷の方向はたわみ振動試験の加振方向(図-2.3)と同じ方向とした。H形鋼に軸力は作用させなかった。健全試験体の柱基部(フーチング上面から5mm位置)に貼付したひずみゲージの値が、材料試験の降伏ひずみに達した変位を降伏変位 δ_y と定義し、変位制御によって δ_y の整数倍ごとに1回の正負交番荷重を与えた。なお、CL20とCL40の載荷についても、健全試験体の降伏変位 δ_y を基準として正負交番載荷試験を行った。

正負交番載荷試験に先立って、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-3.1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。

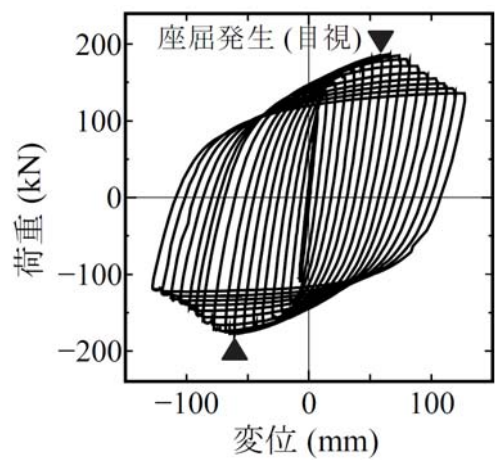
(3) 載荷試験結果

図-3.1に荷重-変位関係を示し、表-3.1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、 $8\delta_y$ の載荷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-3.1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-3.1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。

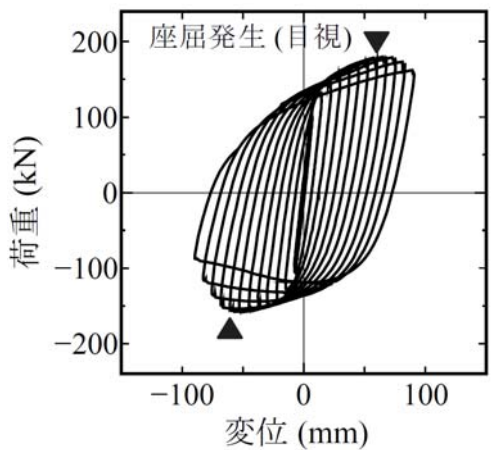
以上より、コンクリートフーチングにH形鋼を埋め込んだ接合形式では、境界部腐食が柱の耐力を低下させるだけではなく、特に、局部座屈後の変形性能やエネルギー吸収性能を低下させる可能性があることを確認した。



(a) 健全



(b) CL20



(c) CL40

図-3.1 荷重-変位関係

表-3.1 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。荷重と変位は負載側を示した。



写真-3.1 H形鋼基部の腐食欠損状況

4. まとめ

平成 24 年度は、1) 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。また、2) 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、1) 共鳴振動試験では、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ことを確認した。また、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の残存板厚の計測が可能であることを確認した。また、2) 正負交番載荷試験では、健全試験体では、局部座屈の発生後も載荷ストロークの限界までき裂が生じることはなかった。一方、柱基部が腐食欠損した CL20 と CL40 試

験体では、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る結果となった。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。

参考文献

- 1) 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, 土木学会年次学術講演会, Vol.66, VI-231, pp.461-462, 2011.9.
- 2) 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.
- 3) 長松昭男: モード解析入門, コロナ社, 2009.
- 4) 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.
- 5) 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, (公社)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.
- 6) 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, (一社)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.
- 7) 内藤英樹, 柏宏樹, 高橋実, 村越潤, 鈴木基行: コンクリート埋込部が腐食欠損した鋼製柱の正負交番載荷試験, (公社)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-24, 2013.3.

RESEARCH ON THE APPLICATION OF NONDESTRUCTIVE INSPECTION TECHNOLOGY TO HIGHWAY BRIDGES

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2010-2013

Research Team : Bridge and Structural Engineering

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 FY2012, resonant vibration testing and ultrasonic testing methods for measuring section loss due to corrosion at invisible parts of critical structural components are focused, and their applicability were investigated using H-column specimens with embedded. Also, corroded parts using the same specimens cyclic loading tests were conducted to clarify influence of section loss on ultimate behavior.

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