

地際腐食の非接触・非破壊検査システム

バウンダリーチェッカー

細見直史・山田隆明・貝沼重信

鋼製橋脚の基部や道路標識・照明支柱などの地際部では、マクロセル腐食により著しい腐食損傷が生じる。この地際部の損傷を検査するには、根巻きコンクリートのはつり作業や塗膜の除去などの煩雑な作業を要する。そこで、渦流探傷検査（以下、ECT）による探傷波形の非線形回帰分析を行うことで、構造物を傷めることなく、非接触、非破壊でかつ簡易に鋼材地際部の目視できない部位の残存板厚を推定する非破壊検査システムを開発した。

本報では、ECTによる検査信号から地際部の残存板厚を推定する手法、および非接触・自動非破壊検査装置の概要を説明し、実構造物への本検査システムの適用事例について紹介する。

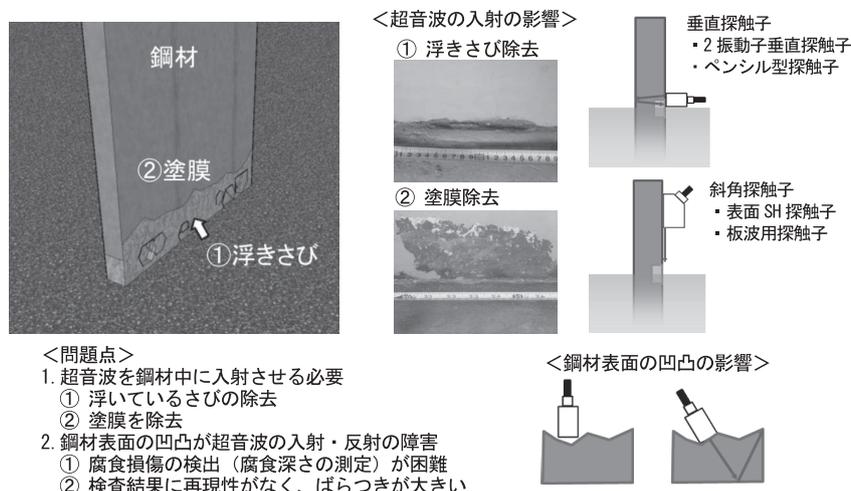
キーワード：鋼構造、維持管理、腐食、地際、非破壊検査、渦流探傷検査

1. はじめに

鋼製橋脚や道路標識・照明柱基部の地際部、下路トラス橋の斜材とコンクリート床版との境界部に著しい腐食損傷が数多く報告されている¹⁾。地際構造は、鋼アーチ橋の垂直材や波形鋼板ウェブPC橋、複合トラス橋の斜材、送電鉄塔基部などに多用されており、今後、同様の腐食損傷が懸念される²⁾。これらの損傷は、局部的かつ板厚方向に進行するマクロセル腐食による損傷で、腐食の進行性が著しく高く、コンクリートに埋設された目視できない部位にも生じることが少なくない。目視できない地際部を検査するには、コンクリートのはつり作業や地際部に生じた浮きさびを除去するな

どの多大な労力を要する。

これまで、地際部の腐食損傷の非破壊検査法としては、図-1に示すように超音波を用いた方法が主として検討されてきた。しかし、超音波探傷を適用する場合、鋼材表面の腐食生成物や塗膜を除去する必要があり、腐食した鋼材表面の凹凸が超音波の入射反射の障害となることなどから、超音波で腐食損傷を検出することは原理上、困難であった。そこで、ECTによる検査波形の非線形回帰分析を行うことで、地際部の目視できない部位における腐食損傷の位置と平均腐食深さを推定³⁾し、非接触で地際部の残存平均板厚の検査が可能な非破壊検査システムを開発した⁴⁾。また、実際の鋼製橋脚基部を対象に本検査システムによ



<問題点>

1. 超音波を鋼材中に入射させる必要
 - ① 浮いているさびの除去
 - ② 塗膜を除去
2. 鋼材表面の凹凸が超音波の入射・反射の障害
 - ① 腐食損傷の検出（腐食深さの測定）が困難
 - ② 検査結果に再現性がなく、ばらつきが大きい

図-1 従来の非破壊検査方法

る実証試験を実施し、検査結果と腐食表面形状の3次元計測結果とを比較することで、その妥当性および作業性を確認した⁵⁾。本報では、ECTを用いた非接触・自動非破壊検査装置を用いて、鋼製橋脚や道路標識・照明支柱の地際腐食検査を実施した事例を紹介する。

2. 非接触・非破壊検査

(1) 渦流探傷検査

ECTは電磁誘導現象によりコイル（以下、センサと呼ぶ）に交流電流を流したときに生じる磁界によって、導体に渦電流を発生させ、腐食損傷部や疲労き裂などのきずにより乱れた渦電流の変化を検知してきずを検出する。そのため、センサを鋼材に接触させることなく、非接触での検査が可能である。渦電流が変化すると、導体とセンサとのインピーダンスに変化が生じ、センサの電圧が変化する。このECTセンサの電圧変化は、腐食による欠損体積に対してセンサの電圧が変化するため、腐食損傷を模擬したような人工きずでは、センサがきず直上（最大の腐食深さ位置）を通過した際に最大となる。そのため、この最大の電圧変化を検出することで最大の腐食欠損体積を求めることができる。しかし、従来のセンサではセンサが腐食の直上を通過する必要があるため、地際腐食部の検査には適用困難である。そこで、ECTを鋼材のコンクリー

ト地際部の腐食検知に適用するため、図-2に示すような腐食検知用のECTセンサを開発した。

(2) 平均残存板厚の推定手法

図-2に示す鋼材の地際部において、地際腐食を通過するようにセンサを走査させた場合のECT波形の一例を図-3に示す。図中に太線で示す探傷波形は、鋼材の腐食による断面減少に伴う電圧低下を示している。細実線は探傷波形に近似するガウス関数の非線形回帰分析により近似した確率密度関数を示している。腐食がない場合には、電圧変化は生じず、腐食がある場合には、ECT探傷波形はガウス関数にほぼ一致しており、センサがきず直上を通過する際に最大の電圧変化が生じている。

ECTの検査波形がガウス関数にほぼ一致することから、正規分布の確率密度関数を用いて、その平均値から地際腐食位置Yを推定し、最大電圧値から地際部の平均腐食深さDを推定した。

地際腐食損傷部のECTおよび平均腐食深さの推定は、以下で示す手順で行った。

- ① 対比試験片を用いて探傷機器を調整する。
- ② 実構造物のECTを実施する。
- ③ ECT波形の非線形回帰分析を行い、ガウス関数の最大電圧振幅、電圧振幅の標準偏差、最大振幅の位置、および振幅の初期値のパラメータを推定す

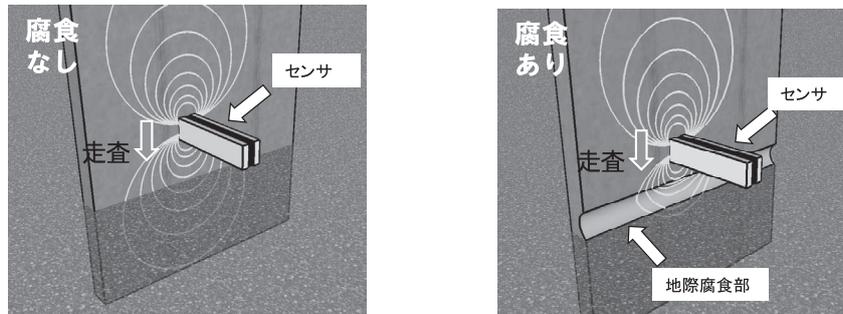


図-2 渦流探傷検査

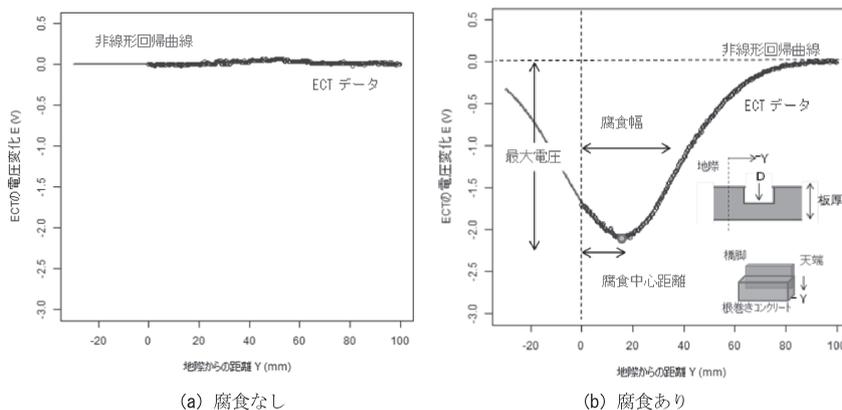


図-3 非線形回帰分析

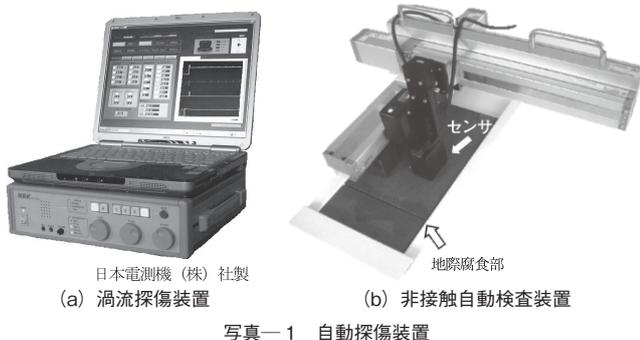
る。

- ④ 対比試験片の感度調整値と実構造物の被検査材の諸条件を用いて3)の推定結果から地際平均腐食深さDと地際腐食位置Yを計算する。
- ⑤ 設計板厚から地際平均腐食深さを差し引くことで、残存平均板厚を算出する。

(3) 非接触・自動非破壊検査装置

非接触・自動非破壊検査システムを写真—1に示す。非接触自動検査装置は、PC制御により縦方向に300 mm、横方向に300 mm可動する2軸のスクナ装置の可動部にECTセンサを取り付けたものである。検査は、センサが検査面に接触しないようにギャップ量を調整して非接触で行う。ECTの波形データは、ECTセンサを地際腐食部に向かって空中を100 mm走査させることで計測する。この走査を1測線とし、この走査を計測間隔毎に繰り返すことで自動検査を行う。なお、1測線の計測に要する時間は5秒程度であるため、例えば、幅300 mmを5 mm間隔で合計60測線の計測に要する時間は、5分程度である。また、自動探傷装置の寸法は縦(X)545×横(Y)545×高さ(Z)240 mmであり、重量は12.6 kgである。

これにより、コンクリートや腐食生成物、塗装を除去することなく、非接触かつ非破壊で効率的に平均腐食深さを推定する検査を可能にした。



写真—1 自動探傷装置

(4) 本検査システムの特徴

本検査システムの特徴を以下に示す。

- ① 電磁誘導作用を用いた非接触検査のため、煩雑な前処理作業(コンクリートのはつり、さび・塗膜除去)や検査後の後処理作業(コンクリートの復旧、検査面の再塗装)が不要である。
- ② 独自開発のセンサ、自動探傷装置、推定手法により、検査員の技量に依存せずに地際埋設部の残存板厚と腐食位置(境界から20 mm範囲)が推定可能である。

(5) 本検査システムの適用範囲

本検査システムの適用には、対比試験片により基礎的な検討を積み重ねることで、適用の可否を確認する必要がある。現状では、以下を基本とする。

- ① 被検査材は、鋼材とし、板厚は9 mm以上とする。
- ② 鋼材の形状は平滑材であること。
- ③ 地際近傍(外面)にボルト・添接板などの鋼部材がないこと。
- ④ 地際埋設部の残存板厚の推定が可能な検査深さは、埋設部の境界から20 mm程度であり、基部コンクリートに割れが生じ、埋設部奥深くに腐食が生じている可能性のある場合は不可である。

(6) 本検査システムにより期待される効果

本検査システムにより期待される効果を以下に示す。

- ① 非接触検査のため、煩雑な前後処理作業が省略でき、調査・点検費用が抑制できる。
- ② 従来の定点計測ではなく、自動非破壊検査による面計測が可能で検査結果が検査員の技量に依存しない。そのため、定期点検による経年劣化の追跡調査ができる。
- ③ 検査結果を用いて、腐食劣化診断や健全度評価、残存寿命の予測が可能である^{6)~8)}。

3. 調査事例

(1) 実証試験

本検査システムによる地際腐食損傷の実証試験は、角形鋼製門型ラーメン橋脚の基部を対象に実施した。対象橋脚とその検査状況を図—4(a)~(c)に示す。調査を実施した対象部位の使用鋼材はSM400Aであり、橋脚柱の幅は2050 mm、板厚は19 mmである。なお、調査時における対象橋脚の供用年数は31年(1981年10月竣工)である。ECTは、センサを地際の100 mm上端から地際に向けて手で走査する手動検査により実施した。この走査を5 mm間隔で橋脚幅方向に繰り返し、1面全線で合計409測線のデータを採取した。ECT検査後に根巻きコンクリートを除去し、セルフポジショニング・レーザスキャナを用いて実腐食深さの計測を行った。実測およびECT推定による腐食損傷位置とそれらの平均腐食深さを図—4(f)および(g)に示す。地際腐食による損傷位置は、地際からコンクリート埋設側に約10 mm深い位置で生じ、その平均腐食深さは最大で4 mm程度となっており、ECTによる推定結果は実際の損傷位置や腐食深

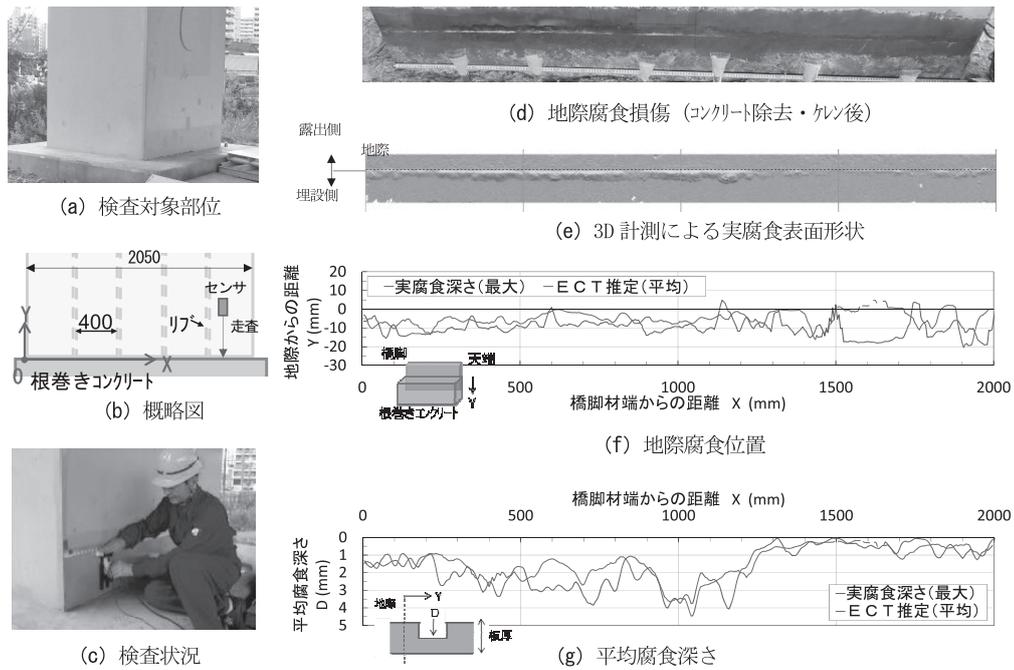


図-4 手動検査による鋼製橋脚基部の実証試験結果

さと比較的良く一致している。

(2) 自動検査事例

写真-1 に示す非接触自動検査装置を用いて角形鋼製門型ラーメン橋脚の基部を対象に本システムによる自動検査を行った。その対象橋脚とその検査状況、および ECT 推定結果の一例を図-5 に示す。対象橋脚の使用鋼材は SM490YA であり、橋脚柱の幅は 2000 mm、板厚は 15 mm、供用年数は 34 年 (1979 年

11 月竣工) である。自動検査は、一度に検査できる橋脚幅方向の範囲が 300 mm 程度であるため、1 面あたり 7~8 回装置を盛り替えることで、4 面全周で約 1680 測線のデータを採取した。図-5 (g) は腐食による減肉分布の一例を示している。地際腐食による推定損傷位置は、埋設側に 10 mm 程度であり、その平均腐食深さは最大で約 8 mm と推定した。また、検査速度は、非接触・自動非破壊検査装置を用いることで、図-4 (c) に示す手動検査に比べて約 4 倍向上した。

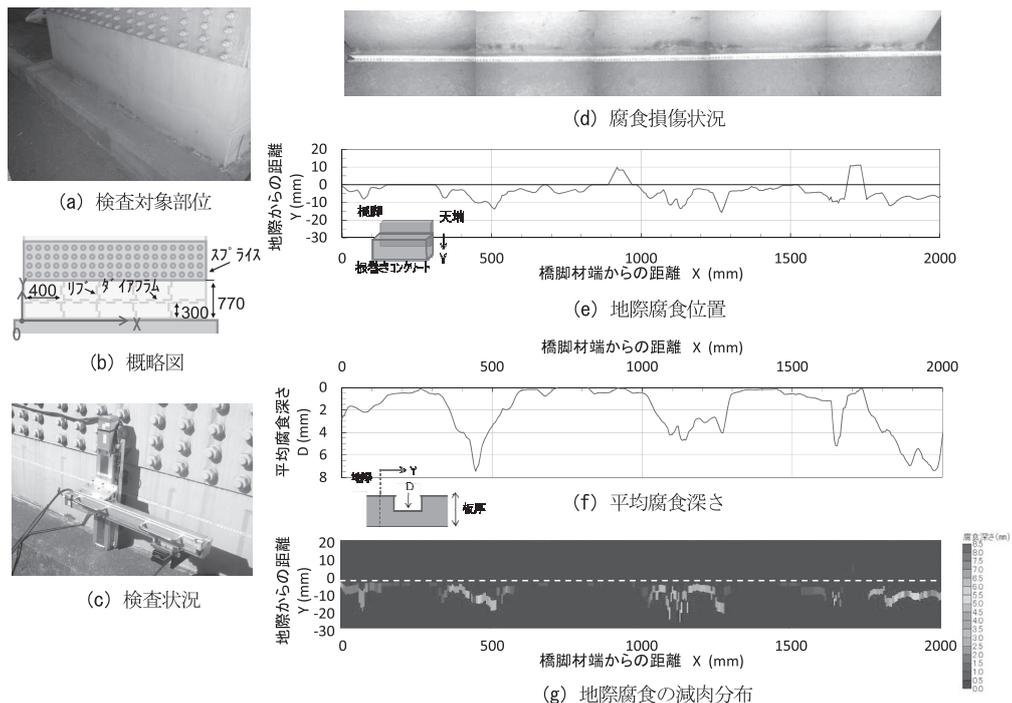
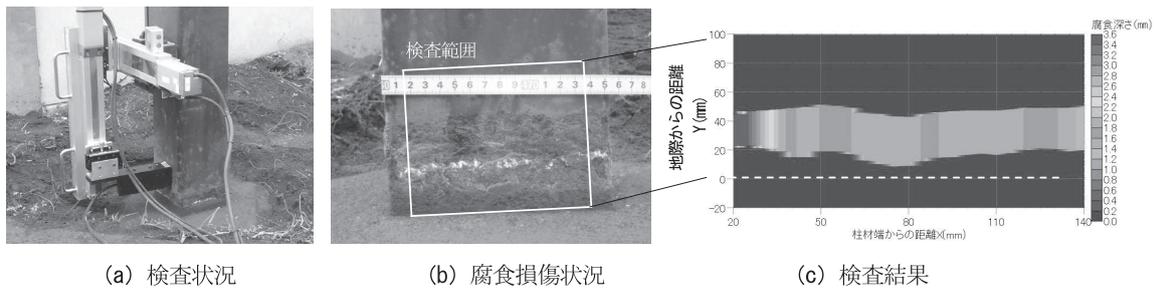


図-5 自動検査による鋼製橋脚基部の検査結果



図一6 道路照明柱基部の検査結果

次に、道路照明柱の角形鋼製支柱に生じた地際腐食損傷部の検査結果を図一6に示す。支柱幅は155 mm、板厚は4.5 mm、供用年数は19年（1995年3月設置）である。支柱の基礎コンクリート上には、約30～70 mm厚さの土壌が堆積しており、地際腐食は支柱の土壌地際部で生じていた。検査ではコンクリート地際部の損傷状況も検査するため、支柱周辺の土壌を掘削してセンサが地際腐食損傷部の直上を通過するように基礎コンクリートの100 mm上方から直近までECTセンサを走査させた。この走査を支柱幅方向に5 mm間隔で繰り返し、4面全周の自動検査を行うことで、約100測線を自動計測した。鋼製支柱の腐食損傷状況、および検査結果の一例を図一6(b), (c)に示す。非線形回帰分析を行った結果、地際腐食の中心位置は、基部コンクリート上面から露出側に19～68 mmで生じており、その平均腐食深さは2.1～0.2 mmとなった。なお、本検査システムでは、鋼材の板厚が4.5 mmにおける基礎的な検討が十分ではないため、本検査データは参考値とする。今後は、板厚が9 mm未満の薄板への適用についても検討する必要がある。

4. おわりに

本報では、本検査システムの概要を説明し、その調査事例を紹介した。鋼製橋脚基部の地際腐食検査では、センサ走査の自動化を図ることで、手動検査に比べて検査速度が約4倍向上した。しかし、現状の自動検査では、その検査時間の大半は、装置の据付け時の調整に時間を要する。そのため、今後は、自動探傷装置で一度に検査できる範囲を広げて装置の盛り替え回数を少なくするとともに、簡易に装置の据付けが行えるように装置を改良することで、検査現場での更なる省力化・効率化が図れるものと考えられる。

最後に、現場での調査にあたりご協力いただきました関係者の皆様に謝意を表します。

JCMMA

《参考文献》

- 1) 日本道路協会：道路橋補修・補強事例集 2007年版，山海堂，2007.
- 2) 日経BP社：日経コンストラクション 2011年10月10日号，2011.
- 3) 入部孝夫，細見直史，貝沼重信，山田隆明，永野徹：地際腐食損傷部の平均腐食深さの推定による残存平均板厚推定方法（特願2013-071117）.
- 4) 細見直史，入部孝夫，貝沼重信，山田隆明，永野徹，片山英資：鋼材のコンクリート地際における残存板厚の評価・予測（その1），第68回年次学術講演会，2013.
- 5) 入部孝夫，細見直史，貝沼重信，山田隆明，永野徹，片山英資：鋼材のコンクリート地際における残存板厚の評価・予測（その2），第68回年次学術講演会，2013.
- 6) 貝沼重信，細見直史，金仁泰，伊藤義人：鋼構造部材のコンクリート境界部における経時的な腐食挙動に関する研究，土木学会論文集，No.780/I-70，pp.97-114.2005.
- 7) 細見直史，貝沼重信：コンクリート境界部で腐食した鋼構造部材の疲労挙動に関する基礎的研究，土木学会論文集 A, Vol.64, No.2, 2008.
- 8) 細見直史，貝沼重信：コンクリート境界部で腐食した鋼構造部材の応力集中係数の評価・予測手法，土木学会論文集 A, Vol. 66, No.4, pp.613-630, 2010.

【筆者紹介】



細見 直史（ほそみ なおふみ）
（株）東京鐵骨橋梁 技術本部技術研究所
係長



山田 隆明（やまだ たかあき）
日本電測機株式会社
技術研究所
主査



貝沼 重信（かいぬま しげのぶ）
九州大学大学院
工学研究院社会基盤部門
准教授