

渦流探傷法による社会インフラの非破壊診断技術



わが国では、高度成長期に整備された社会インフラが急速に老朽化し、今後20年間で、建設後50年以上経過する施設の割合が急激に加速する見込みである。国土交通省の調べでは、橋長2mを超える橋梁は、2033年には約67%が建設後50年を経過すると言われている*1)。

耐用年数を迎えた社会インフラをこれまでの基準で更新した場合、維持管理・更新費は今後とも急増し、2030年頃の維持管理・更新費は2010年の約2倍になると予想されており(第1図)*2)、わが国の大きな課題となっている。これらの背景から、更新、補修の時期を判断するための非破壊検査技術のニーズが高まっている。2012年12月には、中央自動車道笹子トンネルにおいて天井板が落下する重大事故が発生しており、遠望目視等による検査方法が見直された。2014年3月に改正された道路法施行規則では、道路の維持または修繕に関する技術的基準に基づき、橋梁・トンネル等は、5年に1回の頻度で近接目視による点検を実施することが定められている。しかし、斜張橋・吊橋のケーブル類の保護被覆下あるいは道路照明柱の地際部は近接目視でも劣化状況の診断ができず、有効な評価方法が求められている。斜張橋・吊橋は約1200箇所、道路照明柱は約300万本設置されている重要な社会インフラである。このような社会的背景から、当社では、斜張橋・吊橋に使用されているケーブル類の腐食劣化や鋼管製道路照明柱の評価を目的として渦流探傷法を応用した非破壊試験技術の開発を進めてきた。ケーブルに対してはケーブル径に適合した既設構造物に設置可能な構造の渦流探傷センサを使用し、被覆部の腐食段階評価を行っている。鋼管製道路照明柱の地際部については、通常の渦流探傷で掘削しない限り腐食減肉は検知できない。しかし、当社ではパルス渦流法を適用し、かつセンサを地上部に斜めに配置することによって、地中の腐食減肉を検知する技術を開発中である。開発した非破壊検査技術の概要と腐食判定方法について紹介する。

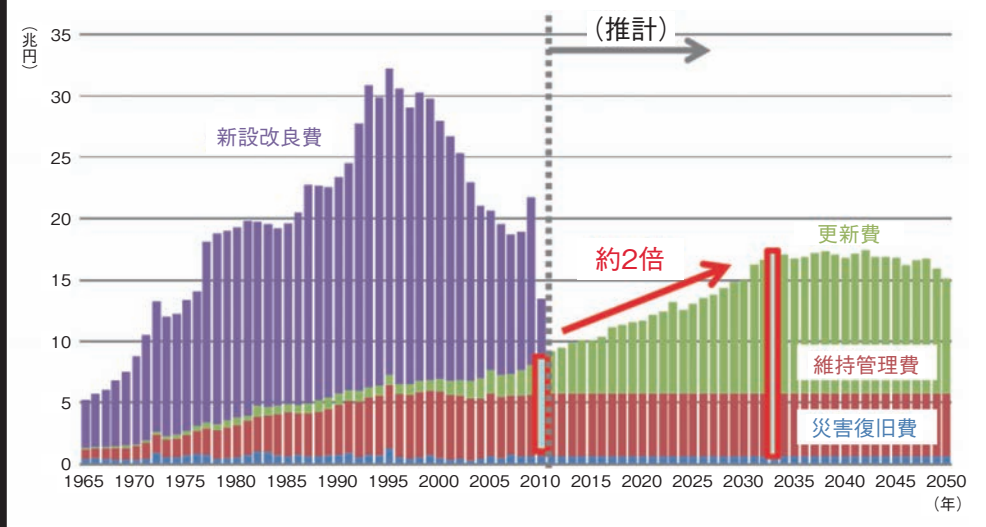


技術本部
材料ソリューション事業部
うえだ けいじ
上田 啓司



技術本部
材料ソリューション事業部
腐食防食技術部
はしもと いくろう
橋本 郁郎

第1図 維持管理・更新費の将来見通し



C-1 渦流探傷法の原理

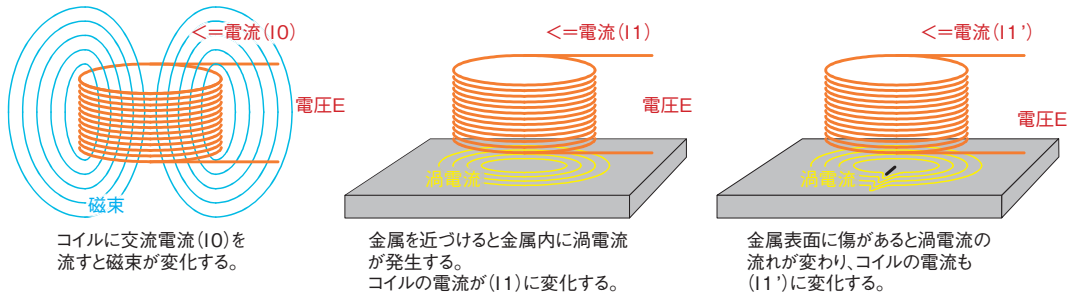
渦流探傷法は電磁誘導現象を応用して金属表面の傷を検知する技術である。原理を第2図に示す。コイルに交流を流し、金属(導体)表面に近づけると、その交流に対応して金属内の磁束密度が変化する。この時、金属にはコイルの電流による磁束密度の変化を小さくするように電流が流れる。この電流は渦電流と呼ばれている。渦電流が金属表面の傷によって変化するとコイルのインピーダンス(電圧と電流の比)が変化する。このインピーダンスの変化から金属表面の傷を検知する試験が渦流探傷試験である。渦電流は傷以外にも金

属の腐食減肉などによっても変化する。腐食部にコイルが直接接触しなくてもその変化を検知できることから、被覆された橋梁ケーブルや道路照明柱の地際部腐食減肉検知に適用できると考えた。橋梁ケーブルや道路照明柱は磁性材料であり、磁気特性の不均一に起因するノイズや表面に集中する特性(表皮効果)がある。そのため、従来は渦流探傷法による肉厚測定に適さない材料とされてきた。しかし、コイル構造や周波数条件などを最適化することにより、従来では困難であった腐食減肉検知が可能になった。

参考文献

- *1) 平成25年度国土交通白書(2014)第1章第3節,28
- *2) 国土審議会政策部会長期展望委員会:「国土の長期展望」中間とりまとめ(2011)図Ⅲ-13

第2図 渦流探傷法の原理



C-2 交流渦流探傷法によるケーブル類の検査

参考文献

- *3) 特許第4101110号
- *4) 橋田芳朗ら:土木学会第64回年次学術講演会講演概要集, (2009) I-602

斜張橋の斜材ケーブルや吊橋のハンガーロープにはめっき鋼線を束ねたものが主流であるが、その多くは表面を保護する目的でポリエチレン等の被覆が施されている。そのため、外部からの目視点検では内部のめっき鋼線の劣化状況を観察することはできず、劣化を評価するためには被覆を部分的に破壊する必要があった。被覆の破壊と復旧に多大な費用・時間を要するため、定期修理の際にも被覆に異常が発見された場合などを除いて、ケーブルの劣化度調査は実施されないことが多い。

当社では第3図のように貫通型コイル(検出コイル)をケーブルに取り付けてバランスコイル(同じ特性で内部に導体がないコイル)を基準として測定する方法(標準比較方式)を採用することにした。既設のケーブルに貫通型コイルを設置するにはケーブルにコイルを巻く必要

があるが、毎回再現性良くコイルを巻く作業は煩雑であり、実用的ではない。そこで、コイルの1カ所を分離・結合できるような構造とすることにより、既設ケーブルについても一定の特性を持つ貫通型コイルによる測定ができるようにした。測定時はコイルとケーブル表面の距離の変動によって信号が大きく変化するが、その距離を一定以上に*3)、かつ適当なスペーサを用いて変動を最小にすることによって、距離変動の影響を低減してケーブルの腐食による信号変化を捉えることができるようになった。この方法で斜張橋ケーブルを測定している状況を

第3図 ケーブルの渦流探傷

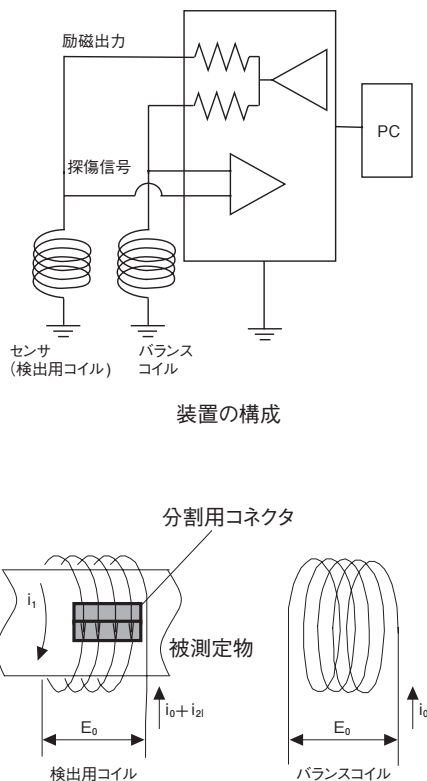


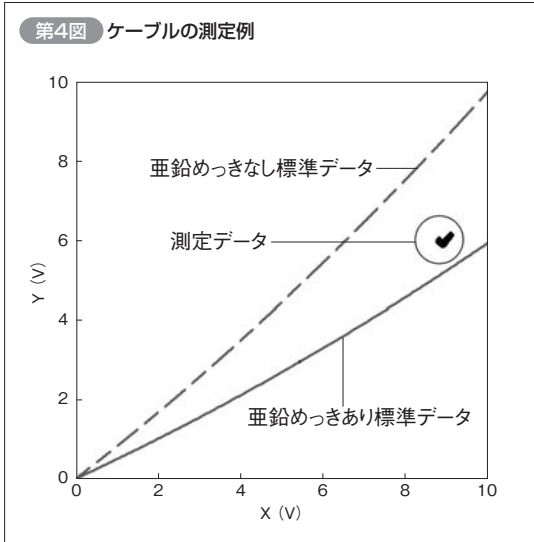
写真1 斜張橋ケーブルの渦流探傷法による測定状況



写真1に示す。コイルをケーブルの長さ方向に移動して各位置の渦流探傷信号を計測する。このとき、計測器本体と基準コイルは固定されており、測定コイルは計測器から約30m以内で移動させることができる。足場状況にも依存するが、高さ20m程度までの斜張橋ケーブルについては全長の評価が可能である。

この方法で吊橋のメインケーブルを評価した結果を第4図に示す*4)。実際の探傷信号(ここではバランスコイルと検出コイルの差)は電圧の振幅・位相として取り出され、XY図上に表記される。この結果を別途測定した標準品(亜鉛めっきあり、めっきなし)の信号と比

第4図 ケーブルの測定例

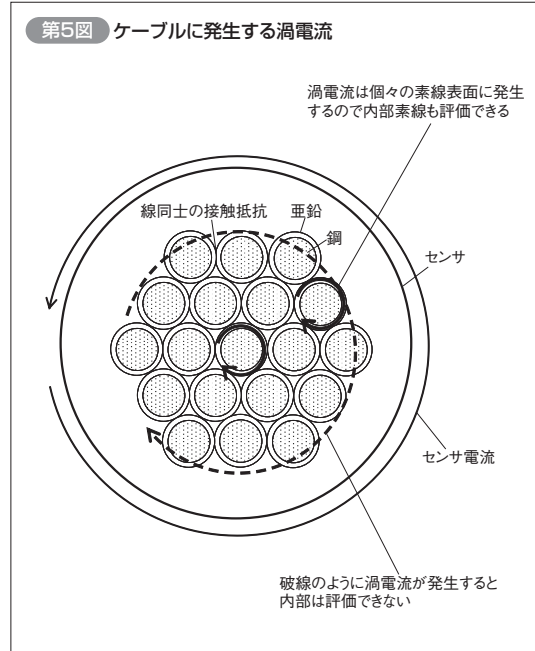


較すると、亜鉛めっきあり標準データに近いことから、めっきの残存量が新品の1/2以上であると推定することができる。めっきの厚さは約 $50\mu\text{m}$ であり、鋼線の直径(5mm)の1/100にすぎないが、亜鉛(非磁性材料)がわずかでも減肉すると内部の鋼(磁性材料)の影響を受けて信号が大きく変化する。そのため、めっきの減肉を磁気特性の不均一や表面からの距離に起因するノイズに対して、めっき減肉による信号変化は大きく、めっき減肉を感度良く検知することができる。一方、ケーブルは複数のめっき鋼線を束ねたものであり、渦電流は最外層の劣化しか検出できず、内部の劣化を見逃す

懸念があった。しかし、この吊橋のケーブルは平行線ケーブルであり、各線表面の接触は小さく素線間には電流がほとんど流れないため、第5図の実線矢印のように各線の表面に独立して渦電流が発生して、内部も含めた評価を行うことができた。

被覆を除去せずに評価する方法により、被覆除去前に劣化部を特定できるため、被覆除去点検を実施する際にも除去範囲を最小限にすることができる。

第5図 ケーブルに発生する渦電流



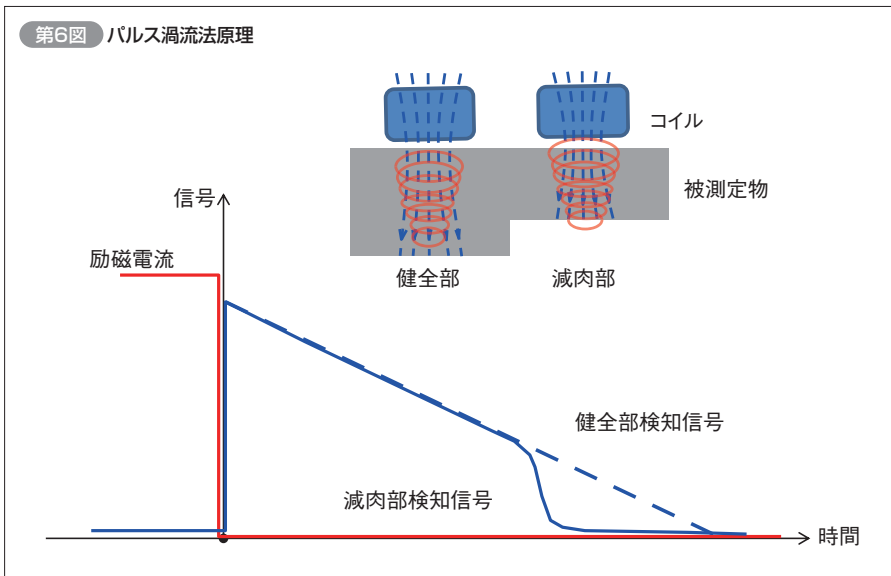
C-3 パルス渦流法による道路照明柱地際腐食の検査

土壌のように中性環境下における鋼材の腐食は、大気中から供給される酸素が鋼表面の水膜に拡散されることにより腐食が進行するいわゆる酸素拡散律速型の腐食形態を示す。しかし、道路照明柱のように地面に垂直方向に埋設された鋼管柱の根元部では、土中埋設深さが深くなると空気すなわち酸素の供給が少なくなり、地表部と地中部に酸素濃淡電池が形成される。これにより、ある程度の地中深さの鋼管柱に局部的な

腐食が集中する現象が地際腐食である。

鋼材の非破壊減肉量計測法としては、目視検査やデプスゲージや超音波板厚計による板厚測定が一般的であるが、これらの手法を照明柱の地際腐食部に適用する場合は、いずれも埋設環境の掘削が必要となる。そこで、地際腐食部の評価に渦流探傷法を適用すれば掘削をせずに検知できると考えたが、前項の交流を

第6図 パルス渦流法原理



用いた方法では、磁性材料の場合、非常に肉厚が薄い範囲(約1mm以下)に限られ、一般的な照明柱(約4.5mm)には適用できなかった。そこで、炭素鋼(磁性材料)の肉厚測定法として研究されているパルス渦流法^{*5)}を応用することを検討した。第6図に測定原理の概要を示す。励磁コイルに直流電流を与えると、

参考文献

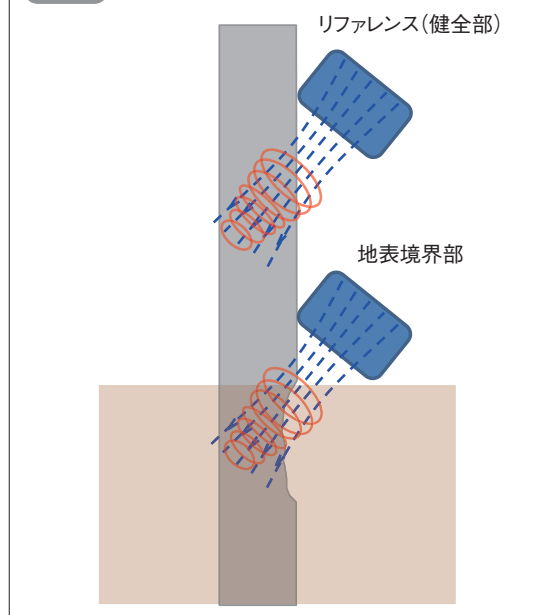
- *5) 小坂大吾ら:非破壊検査,63,(2014),245
- *6) 特願2014-125506

センサ周囲に磁場が形成される、この直流電流を遮断した直後には磁場の变化で誘導された渦電流が鋼材に発生し、その後減衰する。この渦電流は、表面から板厚深さ方向に進展し、板厚が小さい鋼材では板厚が大きい鋼材に比べ、渦電流の持続時間が短くなる。鋼材の材質あるいは透磁率等の電磁気特性が同じであれば、この渦電流の持続時間の差から板厚の変化すなわち減肉量を求めることができる。

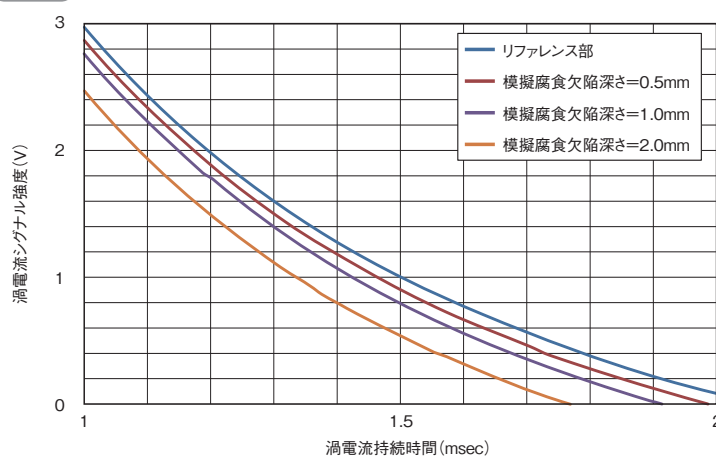
照明柱に一般的に用いられている溶融亜鉛メッキ鋼管に3水準の減肉量(0.5・1.2mm深さ)の模擬腐食欠陥を与えた試験片を製作し、パルス渦流法により減肉量を計測した。また、土・コンクリート・アスファルト中に試験体を垂直に埋設した状態で計測することにより、埋設環境の影響を確認した。第7図のように、模擬欠陥境界部および150mm離れた地点をリファレンス部として計測した。この時に、コイルを測定面に平行ではなく、30~60度の角度になるように配置すると模擬欠陥の検知感度が向上した*6)。第8図に渦電流減衰カーブを示す。減肉量の増加にともない渦電流持続時間の差が増加することがわかる。第9図より、リファレンス部と模擬欠陥部境界の渦電流持続時間の差は、減肉量に対して直線的に増加することがわかる。また、埋設環境(空気、土、アスファルト、コンクリート)が変化しても計測結果に影響がないことがわかった。

以上の結果より、開発したパルス渦流計測装置を用いて、地際境界部と150mm離れたリファレンス部において計測した渦電流持続時間の差から地中の鋼材減肉量を求めることができることがわかった。

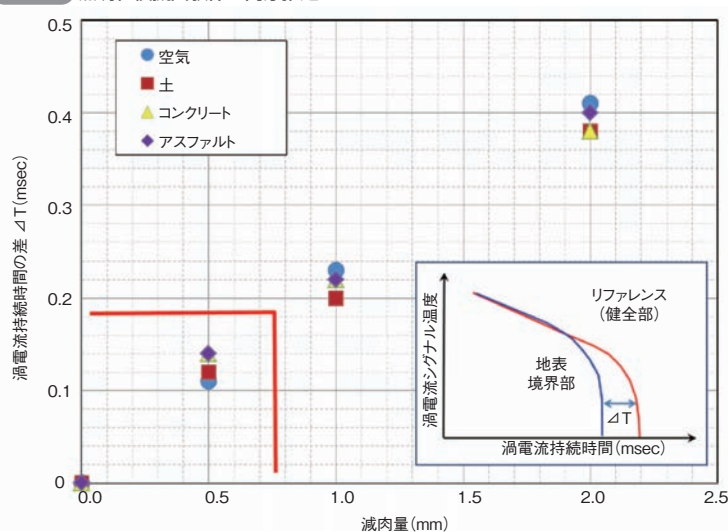
第7図 照明柱模擬試験体の測定



第8図 照明柱模擬試験体の測定結果



第9図 照明柱模擬試験体の肉厚推定



渦流探傷法を橋梁ケーブルや道路照明柱の健全性評価に適用し、従来は被覆除去や掘削などの準備作業が必要であった劣化状況調査を、被覆等を破壊せずに短時間で評価することができる。今後、実構造物

へ適用してデータを蓄積するとともに、コイル構造・測定条件・信号処理を改良することにより、精度の向上や適用部材の拡大を図る。