

点検・検査技術および評価方法の最前線②

鋼構造物中の「がん」を
見つけて延命化！

坂野 昌弘 正会員 関西大学教授

探しものは何ですか？

鋼構造物の主要な劣化要因は腐食と疲労である。

これらのうち、腐食は本質的には化学反応であり、1cm〜数cmの厚さの鋼部材が消失するためにはある程度の時間(年数)を要し、また錆汁が出たり腐食面積もある程度の大きさとなることから、通常の目視点検などで見つけることは比較的容易である。それに対して、疲労は繰返し荷重による亀裂の発生・進展現象であり、寸法が数mm程度以下の微小な亀裂の発生と進展に寿命の大半を費やし、引張応力下では長さが数十mmを超えると亀裂が一気に進展して脆的な破壊をもたらす可能性があることから、数年に1回程度の目視点検で見つけることは難しく、予防保全的な維持管理が必要と考えられる。

疲労亀裂の中でも部材の表面から発生する亀

裂に対しては、磁粉探傷法などの従来から用いられている手法により検出が可能であるが、部材内部から発生する亀裂の検出は難しく、現場での適用性に配慮して超音波や赤外線、電磁誘導などを用いたさまざまな検査手法が開発されている。ここでは、主に疲労亀裂を対象とした点検・検査技術および評価方法の最前線についていくつかの事例を紹介する。

超音波を用いた技術

長大橋トラス部材等の角溶接部にはブローホールなどの溶接欠陥が内在していることが知られている。工場製作時にはそれらの検出にX線が用いられるが、現場では安全性の面から超音波を用いることが多い。また、鋼製橋脚の隅角部では板組みの関係で溶接が困難な箇所が存在し、

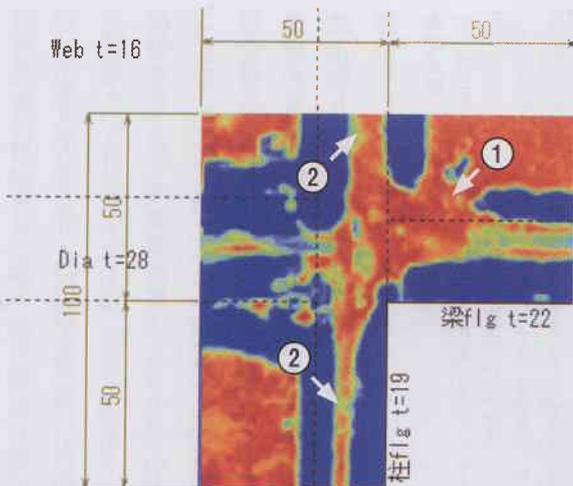
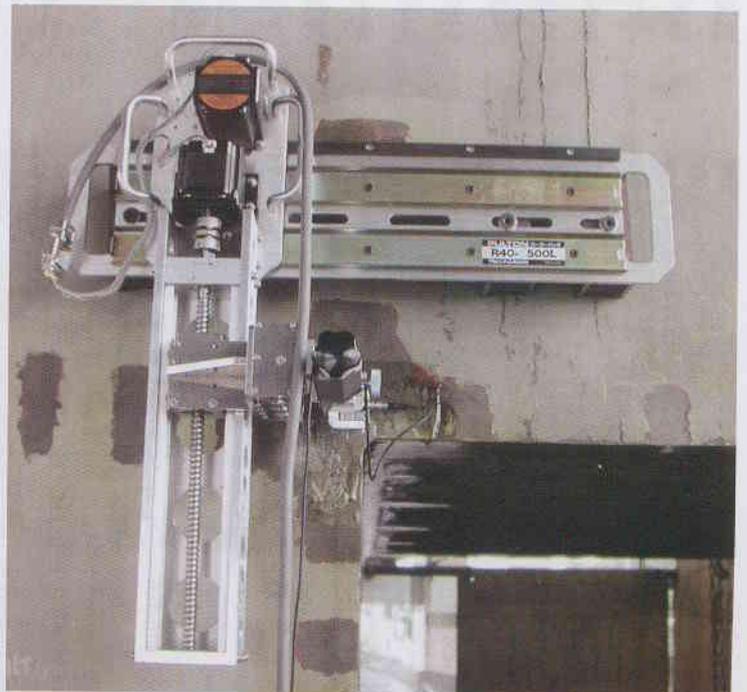


図1 計測結果の画像化例

写真1 隅角部の探傷状況

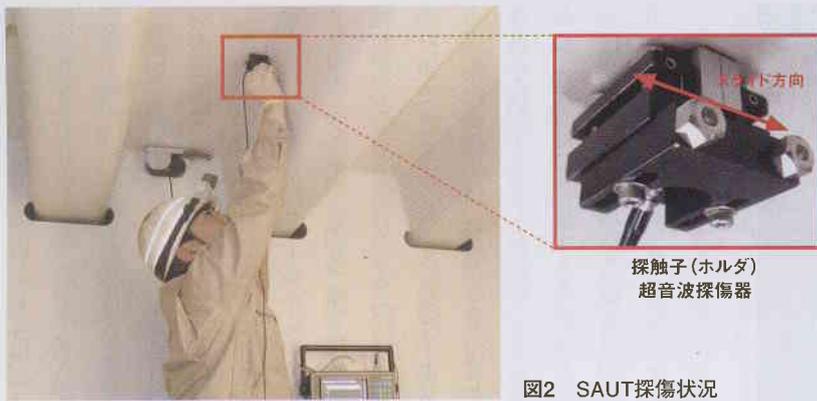


図2 SAUT探傷状況

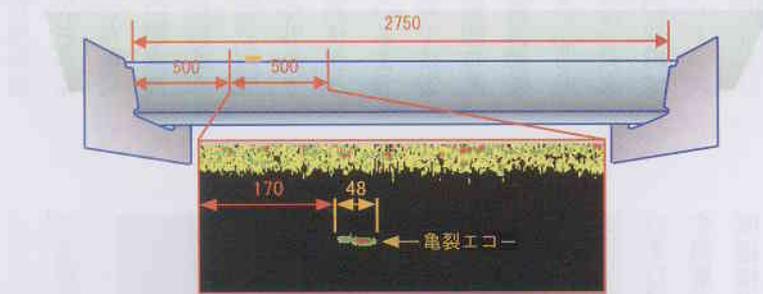


図3 試験体探傷結果

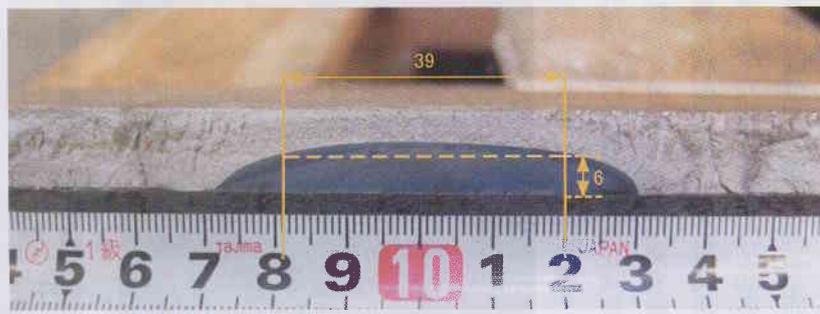


写真2 亀裂破面観察結果

それらの不溶着部から多数の疲労亀裂が発生している。そのような疲労亀裂を対象として開発された自動垂直探傷装置(AUT・Automatic Ultrasonic Testing)を写真1に示す。図1は、写真1のウェブ板厚近傍での超音波の反射状態を画像化した結果である。図の青色の部分で溶接の溶込みにより反射エコーが戻らなかった範囲、赤い部分は不溶着部などウェブ裏面で反射された箇所を示している。①では梁内面のすみ肉溶接が途切れており、②の下側では、柱フランジの面に溶接が施されているが、上側で

は片面しか施されていないことが推定できる。鋼床版のトラフリブはデッキプレート下面に片面すみ肉溶接で接合されている。近年、トラフリブ内面側の溶接ルート部を起点としてデッキに進展する亀裂の発生事例が多く報告されており、亀裂が進展しデッキプレートを貫通することにより、路面の陥没、さらには走行車両への第三者被害を招く危険性から、その対策検討が急がれている。デッキ亀裂はトラフ内面側から発生するため、鋼床版下面(トラフ外面)からの目視点検では検出不可能である。そこでさまざまな超

音波探傷装置が開発されている。

図2は、トラフリブ専用の探触子ホルダに集束型斜角探触子を固定し、直射領域による探触子のスライド操作でデッキ亀裂を捕える半自動超音波探傷装置(SAUT)である。試験体による検証の結果、デッキ板厚の半分である深さ6mm以上のデッキ進展亀裂を検出できることが確認されている。図3は疲労試験中の探傷結果、写真2は疲労試験後に確認した疲労亀裂の破面を示しており、板厚の半分程度以上の深さの亀裂長さに着目すれば、両者はよく一致している。

一方、探触子に連続状に並べた各振動子を電子的に制御し、超音波を放射状に自由な角度に放出させることが可能なフェイズドレイ超音波探傷装置も開発されており、実橋梁で発見されたデッキ貫通亀裂の寸法とその装置で推定された大きさを比較して、やはり高精度で亀裂を検出できることを確認している。

赤外線を用いた技術

赤外線サーモグラフィは、物体から放射される赤外線線の放射エネルギーを計測することにより物体表面温度を測定する装置であり、非破壊、非接触で遠隔から検査が可能であること、短時間に広範囲を検査できること、その結果を視覚的な熱画像として表示できることなどの特徴を有しており、点検・調査分野での応用が期待されている。



図4 舗装面上の高速走行による赤外線検査

鋼床版への適用事例としては、デッキ貫通亀裂によりトラフリップ内部に雨水などが滞水している個所の検出と、さらに高精度な装置を用いた亀裂先端の検出が挙げられる。トラフリップ内の滞水個所の検出は、鋼床版の下面と上面の両面から試みられている。図4に、一般的な規制速度(時速80km)で走行しながら舗装上面から撮影した赤外線カメラの画像を示す。赤丸で囲ったリブは他のリブと比較して低温であり、リブ内に滞水していることが推定できる。なお、赤外線サーモグラフィによる損傷部の検出は、日射により生じる損傷部の温度差を検知することが重要であるため、撮影日の天候、時間帯に留意する必要がある。また、温度差は、直射日光が当たる個所や、塗装むら、表面汚れなどによっても生じるので、欠陥部の抽出に

電磁誘導を用いた技術

図6に示す渦流探傷検査は、従来の渦流探傷技術を改良し、非磁性体であるアスファルト舗装(舗装厚70mm、一般的には80mm)の上から鋼床版デッ

は写真画像との対比が必要である。また、より高度な赤外線サーモグラフィ装置を利用して、亀裂発生個所近傍の微小温度差を直接検出する手法も研究開発されている。赤外線カメラからの時系列画像データを自己相関ロッキング処理によって高精度化および高効率化した自己相関ロックインサーモグラフィによって、実橋の鋼床版に生じた防食塗装下のビード亀裂を地上から望遠レンズ付きの赤外線カメラで検出した事例を図5に示す。

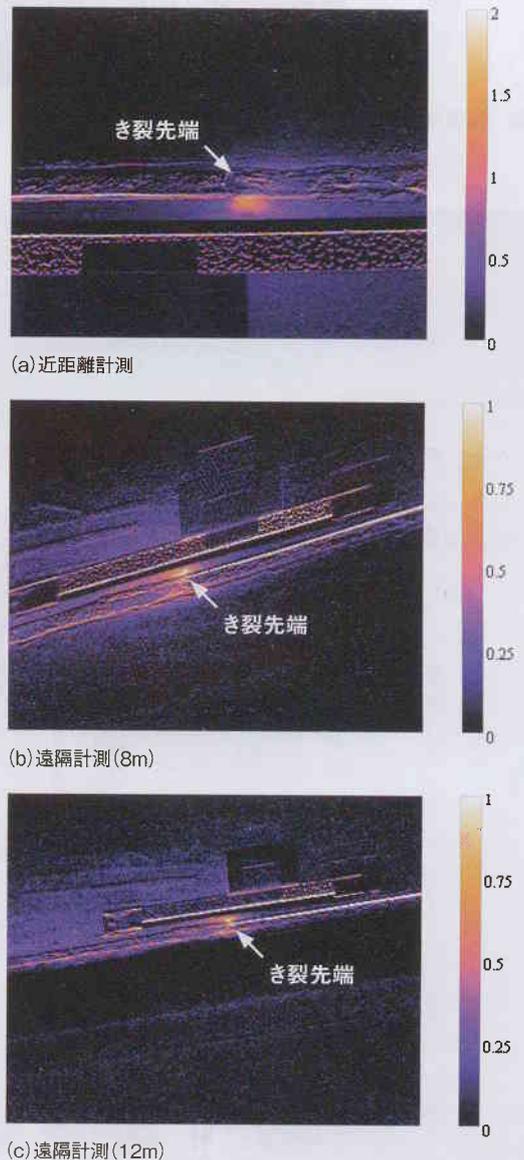


図5 阪堺大橋における鋼床版ビード亀裂の検出

キ貫通亀裂を検出するものである。デッキ貫通亀裂を有する橋梁で検査したところ、図中に示すような欠陥信号が検出されることを確認している。なお、検出の精度は検出コイルやコアに依存しており、200mm程度のリフトオフ(センサーとデッキ表面の距離)でも亀裂の検出が可能なセンサーも開発されている。また、一般的には目視点検で発見された溶接部近傍の塗膜割れに対して塗膜を除去し、磁粉探傷試験や浸透探傷試験によって亀裂を確認しているが、鋼床版では損傷部位が多岐にわたるとともに損傷数も非常に多く、塗膜割れが実際に亀裂である確率はそれほど高くない。そこで、塗膜上から検査が可能な渦流探傷法を目視点検と併用することにより、あらかじめ亀裂の有無をある程度推定した後に磁粉探傷試験や浸透探傷試験に移ることによって、点検の効率化を図

ることも試みられている。

疲労寿命評価

これまでは、鋼構造物の耐久性を低下させる疲労亀裂やその原因となる内部欠陥等の検出を目的とした検査技術を紹介してきたが、構造物や構造部材の疲労寿命を直接評価しようという試みもなされている。

疲労センサーは犠牲金属材料を橋梁の表面に貼付するもので、活荷重によつて生じるくり返しひずみにより犠牲金属に亀裂が発生し、この亀裂長さから累積疲労損傷度を推定し、当該部位での疲労寿命を予測するものである。センサーの大きさは十数mmで、ひずみゲージのように疲労亀裂が想定される溶接継手部の近傍に貼付する。疲労センサーは対象とする応力範囲により、いくつかのタイプがある。疲労センサーは測定器の配線が不要であることなど現地作業は効率的である。ひずみゲージを用いる従来法と比較した結果、相対的にはよい一致を示したことから、疲労センサーによる簡易的な疲労寿命評価は可能と考えられている。

また、鋼構造物の溶接部の疲労寿命は、一般に公称応力と該当継手等級のS-N線図により評価されるが、公称応力が測定あるいは定義できないような場合には、ホットスポット応力を用いて評価される。その場合、ホットスポット応力の定義に基づく2点の応力値とそれらを用いた外挿

処理が必要となるが、溶接部近傍2点の応力の外挿値で定義されるホットスポット応力を一枚のゲージと一つの測定チャンネルで計測可能とする特殊なセンサーが開発されている。このセンサーは、1枚のゲージベース上の2断面にひずみ検出部を設け、その2点のひずみを内部処理し、ホットスポット応力を直接出力する仕組みを持たせたものであり、計測チャンネル数の削減とゲージ貼付け作業の簡略化、および計測精度の向上が可能となる。

一方、従来より有限要素法(FEM)と破壊力学の手法を用いた疲労亀裂進展寿命評価が行われてきたが、最近では拡張有限要素法(eXtended FEM: XFEM)を用いた直接的な疲労亀裂進展挙動のシミュレーションが試みられている。実物大のバルブ鋼床版試験体の疲労試験結果に対してXFEMによる疲労亀裂シミュレーションを行い、疲労亀裂の進展経路と進展寿命の両方ともに実用上十分な精度で推定可能なことを示した事例もある。このような手法を用いることにより、さまざまな疲労亀裂に対する緊急度が定量的に評価可能となり、補修補強対策や予防保全に関する優先度をより正確に判断できるため、より合理的な維持管理が可能になることが期待される。

以上、さまざまな点検・検査技術および評価方法を紹介したが、最後に、これらの技術や方法に万能選手はいないことを強調しておきたい。たとえ最新の機器を用いた技術であっても得手不

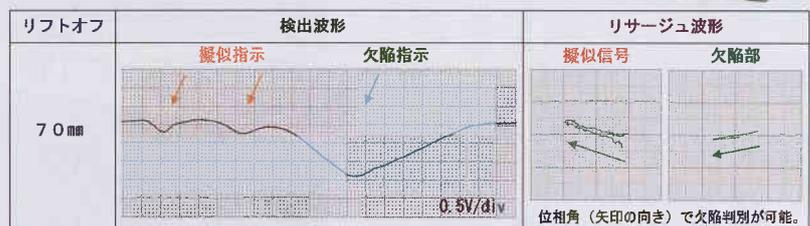
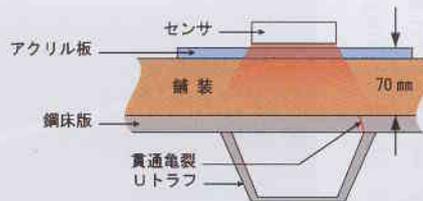


図6 塗装面上からの渦流探傷検査

得手は必ずあるため、適材適所に用いることが肝要である。医師の問診や触診と同様に、点検・診断の基本は専門家による目視であり、検査技術はあくまでも補助手段であることをゆめゆめ忘れてはいけない。

なお、本文をまとめるにあたり、神戸大学、首都高速道路(株)、阪神高速道路(株)、本四高速道路(株)、(財)鉄道総合技術研究所、西日本旅客鉄道(株)、日本非破壊検査協会、日本非破壊検査工業会からさまざまな情報を提供いただいた。記して謝意を表する次第である。