特集

溶接構造物の疲労診断技術の最新動向

鋼構造物溶接部の非破壊検査*

田上 稔**

Non destructive Inspection for Weld Joint of Steel Structure*

by TAGAMI Minoru**

キーワード 橋梁、欠陥寸法、き裂、超音波探傷試験、放射線透過試験

1. はじめに

近年橋梁に代表される国内の鋼構造物の多くは高度成長期に集中的に建設されたため老齢化が急速に進んでおり、これら共用中の鋼構造物の安全性、信頼性の確保は社会的、経済的に重要な課題となっている。そのため非破壊検査による合理的な健全性評価手法が望まれている。非破壊検査は、構造物の製造時に適用されて所定の品質を確保するための一手段として用いられる他、構造物の稼動中に生じる種々の劣化の度合いを評価する重要な手段として適用される。この目的で、表面のきずに対しては磁粉探傷試験 (MT) や液体浸透探傷試験 (PT) が、内部のきずに対しては放射線透過試験 (RT) や超音波探傷試験 (UT) が多く用いられている。しかしながら検査方法の適用に当たっては検査方法の特性をよく理解して、適切な検査手法を用いることが重要である。また、非破壊検査によるきずの検出限界に関する検討も多くなされてきており留意しておく必要がある。

また、近年鋼製橋脚隅角部の疲労損傷が多数報告され、疲労耐久性を確保するためにも非破壊試験を用いた溶接部の品質診断が求められている。特に隅角部の検査は三次元的に複雑な構造をもつため、通常の超音波探傷では検査の難易度が高く、検査技術者の技量に依存する場合も多い。したがって、現在では従来非破壊検査法に加えて超音波フェーズドアレイ法や TOFD 法などの新しい技術の適用が検討されている。

ここでは、非破壊検査技術の特徴と欠陥検出性を説明

するとともに各種構造物への適用状況を紹介する。また、新しい超音波探傷試験の原理・特徴を説明し、構造物検査への適用のための留意点を解説する。

2. 非破壊検査の特徴と適用

非破壊検査技術は、目視を除けば、見えないきず、見えにくいきずを何らかの物理現象を利用して顕在化させる技術といえる。今後も熱、光、電磁気などの多くの現象の活用が期待されている。表面探傷手法でも利用している物理的性質により、きずの種類や位置で検出性に差異が生じる。例えば、MT は、試験体に磁束を流し、きずの存在で生じる漏洩磁束を活用する手法である。経年的損傷は表層部の割れとして生じることが多いため、磁粉探傷試験や液体浸透探傷試験などの表面検査が重要な役割を果たすことも多い。

一日一回の応力繰返しを受ける球形ガスホルダーでは、MT による開放検査を行い、指示模様を全て除去してもまた 4 年後程度の次の開放検査で指示模様がみられることがあった。一般に極間法を用いた磁粉探傷試験では、表面下数 mm の埋没欠陥も検出可能とされている。しかし、Fig. 1 に示すように、自然欠陥は開口幅が狭いため、

Fig. 1 磁粉探傷試験 (極間法) による埋没した割れの検出性

*原稿受付 平成 19 年 3 月 16 日

**正 員 石川島播磨重工業 (株) 技術開発本部 生産技術センター 生産技術開発部 溶接・非破壊評価技術グループ Member, Welding & Non Destructive Evaluation Technology Group Production Engineering Department Advanced Production Engineering Center Research and Development

たとえ欠陥高さが高くても表面からの距離が0.5 mm以上に位置するとMTによる検出は困難である⁹⁾。Fig. 2に表面直下に埋没した割れに対する疲労試験結果の例を示す。表面直下の埋没したと割れは1500回以下の応力繰返しで表面に開口し、コンピュータシミュレーション結果もよく一致した。すなわち、表面探傷を重ねてもMT指示模様が再発する理由は、前回の検査でMTの検出限界以下であったきずが次の検査までに成長し、検出限界を超えて検出されたと判断された。このため従来のMTと併用してUTによる外部探査が提唱されている¹⁾。

塗膜を施されたり、酸化皮膜で表面が覆われている場合の磁粉探傷試験や液体浸透探傷試験では、原則として表面の塗膜や酸化皮膜を除去して検査を行う必要がある。塗膜や酸化皮膜を除去することなく表面検査する方法として、ACFM (Alternating Current Field Measurement) 法が提案されている。この方法は電磁的手法の一つで、一様な交流磁場を与え、試験体表面に均一の電流を流す。きずの存在で電流の流れに乱れが生じ、電流によって励磁される板厚方向ときずの長手方向の磁束分布を測定する方法である。渦流探傷のような事前のキャリブレーションが不要で、リフトオフの影響を受けにくいことが特徴である。きずの長さ、深さも磁束分布から測定できることも知られている。

内部に発生するきずの検査法としては、放射線透過試験と超音波探傷試験が一般的に用いられる。一般的に、放射線透過試験と超音波探傷試験の検出性については以下のように言われている。放射線透過試験ではブローホールやスラグ巻込みのような塊状の欠陥の検出性に優れているが割れなどの面状の欠陥は検出しにくい。一方、超音波探傷試験では、超音波ビームの進行方向に垂直な面を持つ割れや融合不良のような面状の欠陥は検出しやすく、反面ブローホールのような微小な球状の欠陥は検出しにくい。

放射線透過試験は、欠陥の存在に起因して起こる放射線の透過量の差異をX線フィルムに感光させて行う方法で、1.5ないし2%程度の板厚差の線状を検知する能力を

持っている。板厚を10 mmとすると、0.15ないし0.2 mm程度の線状のきずを十分に検知できることを実証するようにしている。一方、超音波探傷試験はパルス状の波を試験体に送信し、欠陥で反射する波を受信し、この振幅値を評価する方法で、このときの超音波の波長は0.6 mmから1.6 mmのものをを用いることが多い。しかし、0.2 mmのブローホールは波長の1/3以下の大きさに相当し、また、形状が丸いためにブローホールからの反射波は方々に散乱する結果となり、これを受信して評価することは困難である。

一方、割れや融合不良などの面状のきずでは、塊状欠陥のようなきずによる板厚差が生じにくく、放射線透過試験では塊状きずほどは検出しにくくなる。一方、超音波がこのような面に当たった場合には、非常にわずかな薄い空間がある限り、超音波は面でほぼ完全に反射し、反射する波を受信して検出ができる。

ここで板厚の影響を考えておくことは重要である。放射線透過試験はきずの存在によって生じる板厚差をフィルム濃度として識別する方法であり、き裂などが存在した場合には、放射線の透過方向でのき裂の開口幅が濃度差として現れる。すなわち、き裂を放射線透過試験で検出するには、き裂の開口幅に相当した最小識別線径が要求される²⁾。

上記に注意を払った上で超音波探傷試験を適用すれば様々な面での効果が期待できる。例えば現地大型構造物の検査や供用中検査への適用を考えた場合、放射線透過試験が適用できない狭隘部、つまり大型線源の配置が困難な近接部位の検査が可能になることや、放射線透過試験は試験体の両側へのアクセスが必要であることに対して超音波探傷試験では片側のアクセスで検査が可能になるなど検査の容易さにおいて優れる。経済性の観点では、放射線透過試験では被爆の恐れがあるため試験中の混在作業はできないが、超音波探傷では可能であることや超音波探傷は即座に合否判定が可能であること、板厚が増加しても探傷時間に大きな変化はないことなどがあげられる。他にも経年構造物に対しては余寿命評価が必要な

Fig. 2 繰返し応力が負荷されたときの表面直下の埋没した割れの挙動例

ケースが多く、その際には板厚方向の情報が求められる。放射線透過試験は投影図であり原理的に深さ方法の情報は含まれないが、超音波探傷試験は欠陥の深さ方向の位置および寸法測定が可能である。また経年構造物では疲労き裂の評価が重要であり、特に厚板に対しては、UTが好ましいといえる。

3. 超音波探傷試験の定量化

UTによるきずの定量化に関しては多くの議論がなされてきている。探傷方法の違いによる低温割れの検出性の違いを検討した例を Fig. 3 に示す⁹⁾。横軸は通常一般的に用いられる、垂直探傷、屈折角45度と60度の斜角探傷 (C type scans) を行って得られた最大のエコー高さを表しており、縦軸は可能な限り屈折角を細かく区分した種々の斜角探傷や垂直探傷及びタンデム探傷 (A type scans) を行い、できるだけ詳細な探傷を行って得られた最大エコー高さを示しており、作製した各々の割れに対して比較している。割れの傾きが種々異なるために、C type scans で同一のエコー高さが得られる割れの一群であっても、更に詳細な A type scans を行えば、16 dB もエコー高さの違いが割れによって得られることがわかる。一般の探傷方法は、きずからのエコー高さを基準とするために、用いる超音波ビームの広がりなきずの測定精度に大きな影響を及ぼす。集束探触子は一般には凹面の振動子を用いて、一定の距離で超音波ビームを集束させることができる。超音波ビームの集束した位置できずの評価を行うことで、探触子を走査して得られるエコー高さ分布の広がりを小さくして、測定精度を向上させることが期待される。Fig. 4 に、平板振動子を用いた通常の探触子と比較して、集束探触子を用いて自然欠陥を対象にきずの高さ

Fig. 3 試験体の片面両側から垂直、45度、60度 (又は70度) 斜角探傷した時の最大エコー高さが、割れ面に超音波が垂直入射した時に比べて低下する度合いの検討結果

(板厚方向のきずの寸法) の測定精度を検討した試験結果を示している⁹⁾。横軸は、きずの端を定義するエコー高さレベル (しきい値) を示している。縦軸は誤差を示す誤差の平均値と標準偏差値を示している。通常の探触子の場合には、例えば誤差の平均値が零になるしきい値を採用しても、誤差の標準偏差値は大きく、測定値は相当分散して、十分な測定精度が得られにくいことがわかる。一方、集束形探触子を用いた場合、誤差の平均値及び標準偏差値ともに零に近づき改善された範囲のあることが注目される。

TOFD 探傷は、エコー高さを基準とする方法とは異なり、きずの端部で散乱するエコーの伝搬時間を求めて、幾何学的にきずの端部位置を求める方法である。Fig. 5 に示すように、面での反射波を受信しないように探触子に対向させて配置して、きずを探触子間に位置するようにして走査する方法である。探触子間距離を固定させて、きずの長手方向に平行に走査し、探触子位置にあわせてカラー (濃淡) 区分で示した波形を並べると TOFD 画像が得られ、きずの側面からの情報を得ることができる。超音波探傷では伝搬時間をきわめて精度よく測定できるので、きずの上端及び下端位置を精度よく求めてきずの

Fig. 4 きずの寸法測定に及ぼす超音波ビーム幅と評価レベルの影響

Fig. 5 超音波 TOFD 法の概要

高さを精度よく測定することができる。Fig. 6は疲労き裂を三点曲げ試験で進展させ、き裂の各進展過程でそれぞれ TOFD 法によりき裂高さを測定して実測値と比較した結果である⁵⁾。TOFD 探傷法でき裂高さを測定した時点で破面にビーチマークを残しておき、試験終了後に破断した破面からビーチマークを読み取って実測値とした。き裂の進展を精度よく監視できているといえる。板継溶接部でのきず端部深さの測定精度は高く、有効な手法ではある。複雑な構造部位への適用にはまだ多くの課題が残されている。

近年注目を集め、実機への適用が進められてきている方法にフェーズドアレイ探傷法がある。フェーズドアレイ探傷試験は振動子を微小に分割して、それぞれの素子を独自に励起させ、互いの素子からの波を干渉させることで、一つの連結した振動子と同様の音場を形成する技術である。Fig. 7は固定焦点（深さ 25 mm）の従来の集束探触子と比較して、フェーズドアレイの電子フォーカシングによる各深さ位置の 3mmφ 横穴の探傷結果を示している。固定焦点の従来の集束探触子の場合、焦点位置に近いきずの像は鮮明に捉えることができるが、焦点位置からきずが外れるにつれて像の広がりも大きくなっている。一方、フェーズドアレイでは電氣的に焦点位置

Fig. 6 超音波 TOFD 法による疲労き裂進展監視の例

Fig. 7 固定焦点（深さ 25 mm）集束探触子とフェーズドアレイ探傷（電子フォーカシング）の探傷結果の比較

を変えることで、広がりの少ないより鮮明な画像を高速で得ることができ、きずの寸法測定精度の向上に寄与できると言える。

Fig. 8に橋梁の隅角部に発生したラメラテアに対してフェーズドアレイ法を用いて調査した結果の一例を示す⁶⁾。Xは柱幅方向を示しており、柱フランジ端部から柱幅中心方向に 350 mm の位置までの探傷結果を表示している。d=0, d=3 mm と表面から板厚方向に深くなっていくにつれ画像の上部にきずの指示が見られ、d=6 mm でその指示がはっきりと現われている。また、Fig. 9にフェーズドアレイ法による測定結果とコア抜き結果の比較を示す。探傷した視野の関係から、きずの長さとしては実際よりもやや小さく評価されるなど、きずの方向や深さに多少の誤差はあるものの、複雑な形状の部位でも、通常の探傷試験より比較的容易に損傷形状を把握できることが確認されている。

フェーズドアレイ探傷では、ビームの進行方向を任意に変えるセクタスキャンも可能である。先に述べたように、面状の割れなどのきずの検出性を改善するために、複数の方向からの探傷を組み合わせることで面の法線により近い方向より超音波を入射させることが効果的である。フェーズドアレイのセクタスキャンによれば、電氣的に高

Fig. 8 鋼製橋脚隅角部に発生したラメラテアのフェーズドアレイ探傷結果の一例

Fig. 9 測定結果とコア抜き調査結果との比較

速で斜角探傷の屈折角を順次変えた探傷を行うので、きずの検出性改善にも大きく貢献できるだろう。

4. ま と め

鉄鋼構造物の非破壊評価技術に関して概説した。国内でも構造物の長寿命化の傾向が加速して現実の課題となり、より一層の合理的な保全が求められてきている。これに伴って非破壊評価技術もますます重要になってきており、なかでも非破壊評価により損傷をより定量的に評価することが求められている。本報告が構造物の保全に対する非破壊評価技術の重要性と取組み、課題などについて理解の一助となれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 中西, 吉川, 千葉, 荒川, 片山: 溶接構造物の余寿命診断システムー球形貯槽の稼動中検査と健全性評価, 石川島播磨技報, 1992/5.
- 2) 荒川: 溶接部の品質検査の動向, 容器・配管溶接の最新技術, 溶接学会 (1999) pp. II-159-163.
- 3) T. Arakawa, S. Hirose, T. Senda "The detection of weld cracks using ultrasonic testing" NDT INTERNATIONAL Vol.18 No.1 (Feb.1985) pp. 9-16.
- 4) Arakawa, ooka: Dimensional measurement accuracies obtained by focused ultrasonic beam on flaws in heavy section steel plate weldments, ASME/JSME PVP conference (Code standards session) July-1995 Hawaii p. 16.
- 5) 芝田, 中代, 米山, 馬木, 佐久間, 渡部, 奥山: 日本非破壊検査協会平成5年度秋季大会後援概要集 pp. 19-26.
- 6) 坪野, 田口, 田上, 池谷: フェイズドアレイ法を用いた鋼製橋脚隅角部亀裂調査結果, 土木学会第59回年次学術講演会講演概要集, 2004/9.