

論文・報告

トラフリブとデッキプレートの縦方向溶接部における溶け込み量測定を目的とした超音波探傷技術の開発（その4）

The Development of Ultrasonic Measuring Method for Penetration of Trough Rib Welding (Report 4)

藤田 敏明 *1
Toshiaki FUJITA

湯田 誠 *2
Makoto YUDA

トラフリブとデッキプレートの縦方向溶接部はトラフリブ板厚の75%の溶け込み深さが要求されている。この要求に対して、溶け込み量を測定する超音波探傷技術の開発を行い、エコー高さ法および端部エコー法による評価手法について過去に報告した。これら手法は探傷精度が高く、現場的に実用性の高い検査技術となることが期待される。本報告では、この超音波探傷技術に対する検証試験の結果、更には課題として残されていたトラフリブ板厚6 mmへの適用技術の検討とその検証において得られた有益な結果について報告する。

キーワード：トラフリブ、溶け込み量、超音波探傷、エコー高さ、端部エコー

はじめに

鋼橋製作では、疲労上の問題からトラフリブ溶接部に板厚の75%溶け込みが求められている¹⁾。しかし、薄板のトラフリブの評価寸法は小さく（板厚6 mmの溶け込み残り寸法は1.5 mm、板厚8 mmは2.0 mm）、この寸法に対して探傷精度を確保することは難しいとされ、溶接部に対する直接評価は一般に行われていない。このような背景から、超音波探傷技術を応用し、簡便に、かつ溶け込み量を精度良く推定可能とする方法として、エコー高さ法をもちいた手法に着目し検討を行った^{2), 3)}。また、トラフリブの板厚に関わらず溶け込み量の評価を可能とする手法として、SV波の高屈折角探触子をもちいた端部エコー法の検討も行った⁴⁾。

本報告では、これらの溶け込み評価技術をもちいた検証結果の紹介とともに、板厚6 mmのトラフリブへの適用に向けた新たな技術とその検証結果について報告する。

1. これまでの検討成果

(1) エコー高さ法^{2), 3)}

図1にエコー高さ法の概要を示す。この技術は、トラフリブ溶接部の溶け込み残り部から反射されるエコーの高さを指標とし、事前に整理を行った実きず寸法とエコー高さの関係から溶け込み量を推定する手法である。本手

法では、最適な探傷位置を確保し、この位置から精度良く探傷することが重要となる。板厚8 mmの溶接部では、探触子と溶接ビードが干渉しない最適な組み合わせ条件として、周波数5 MHz、入射屈折角70°、振動子寸法5 mm×5 mmの探触子を選定し、きず分解能が最適な探傷位置0.5スキップ点よりマイナス側（溶接ビードに近づく側；4～8 mm）の位置を決定、常に最適位置を維持するための専用治具をもちいることにより精度の良い溶け込み評価が可能となることを報告した。

一方、本手法を板厚6 mmのトラフリブへ適用した場合、探触子が溶接ビードに干渉する可能性があるため、最適な探傷位置が確保できないことが予想された。検討の結果、探触子と探傷位置の組み合わせの点で課題を残すこととなった。

(2) 端部エコー法⁴⁾

エコー高さ法では、トラフリブ板厚に応じて探触子とその探傷位置の組み合わせを最適化する必要があり、限定された同一条件での適用は難しい。そこで、板厚に依存しない評価法として期待したSV波の高屈折角探触子（入射屈折角；約80°）をもちいた端部エコー法の検討を行った。図2に本手法の概要を示す。デッキ面より高屈折角で入射した超音波は、ビード止端部で回折し溶着金属内にも伝搬すると考えてトラフリブ裏面と溶け込み残り部の先端からの反射エコーを特定、両エコーのビーム

*1 川田工業株式会社技術研究所生産技術研究室係長

*2 川田工業株式会社技術研究所生産技術研究室室長

路程差から溶け込み量を推定する方法である。

人工スリットきず試験体（溶け込み残り寸法1.0 mm, 3.0 mm, 5.0 mmの3種類）をもちいた検討では、いずれの試験体もトラフリブ裏面からのエコー（W2）ならびに溶け込み残り部の先端からのエコー（W1）がAスコープ上に明瞭に観察され、ビーム路程差（W2-W1；直線的な位置関係）による溶け込み評価は可能と判断した。超音波探傷器の音速調整は横波音速3 230 m/sとしている。

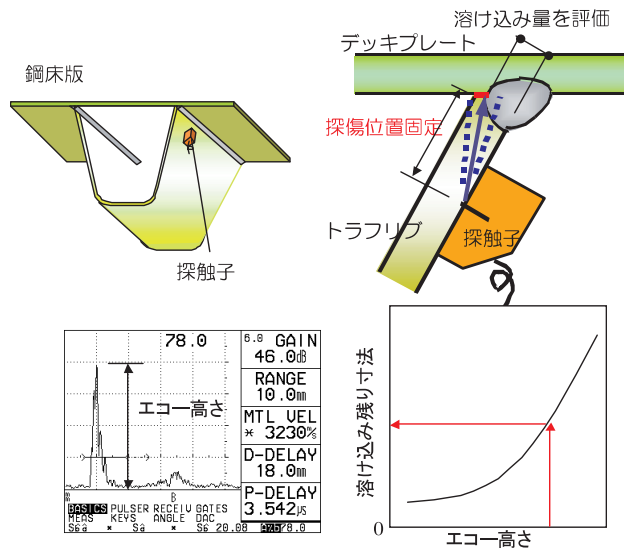


図1 エコー高さ法の概要

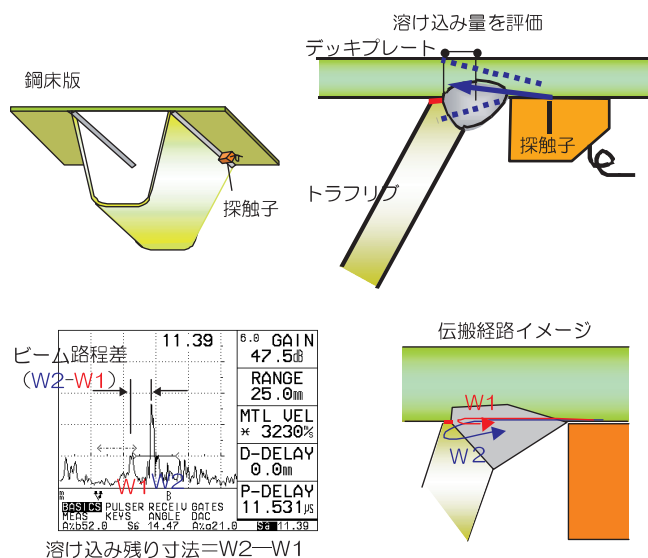


図2 端部エコー法の概要

2. 評価技術に対する検証

(1) エコー高さ法

エコー高さ法の検証試験は、トラフリブ板厚8 mmの新設橋梁の代表的なディテールとして、デッキプレートとトラフリブの構成角が107°、開先角度52°（ルート部に1Cカット）の継ぎ手とした。試験体の製作は、さまざまな溶け込み量に対して評価が行えるよう溶接条件を適

宜調整した。指標には、このディテールの実継ぎ手を持ちい事前に整理しておいた溶け込み残り部からの反射エコー高さとその寸法との関係を持ちいた。なお、溶け込み残り部の形状は単純なスリット形状と開先面の残留する矩形状スリットの2つが考えられる。後者の場合、形状を識別することで所定の溶け込みが得られていないことが明白となるが、本検証ではこの場合にも敢えて寸法推定を試みた。

探傷作業は、写真1に示す専用治具をもちい、探傷器はクラウトクレマー製のUSD-15、接触媒質はグリセリンペースト（ソニーコート）とした。



写真1 エコー高さ法による探傷状況

溶け込み残り部の実寸法と超音波探傷による推定値の関係を図3に示す。実寸法の計測は、溶け込み残り部が損傷しないよう溶接部に切り欠きを設けて破断したのち、板厚方向の投影寸法を溶け込み残り寸法として求めた。

溶け込み残り部の寸法が小さい場合、推定値が若干大きくなる傾向（生産者危険側の評価）にあったが、推定値と実寸法は全般的に良く対応していることがわかった。トラフリブ板厚8 mmに対する評価技術として有効と判断される。

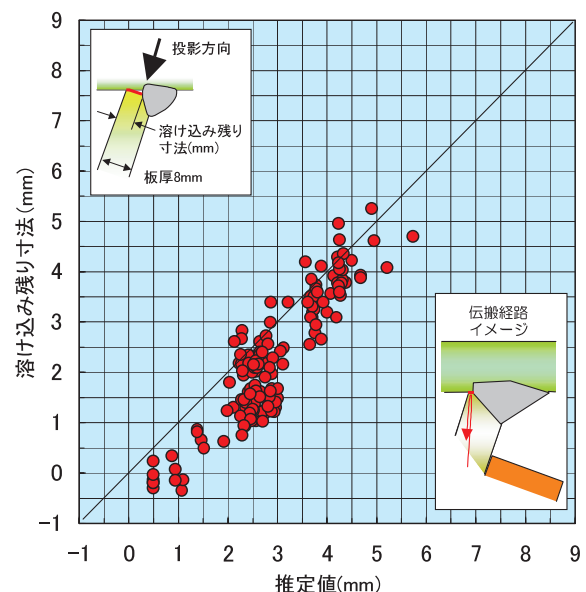


図3 エコー高さ法によるトラフリブ板厚8 mmの検証結果

(2) 端部エコー法⁶⁾

端部エコー法に対する検証は、トラフリブ板厚6 mmとデッキプレート12 mmの組み合わせとした。デッキプレートとトラフリブの構成角は103°，開先なしのディテールとした。試験体はさまざまな溶け込み量が得られるよう溶接条件を適宜調整した。探傷は、図4に示す対比試験片φ3.0横孔を感度調整用にもちい、探傷器および接触媒質はエコー高さ法と同じとした。なお、この対比試験片は、実溶接部の形状と溶け込み残りの標準的な位置関係を考慮して製作したもので、反射源となる溶け込み残り部とほぼ同一位置にφ3.0の横孔が設けられている。

探傷状況を写真2に示す。この治具には高屈折角探触子が組み込まれている。

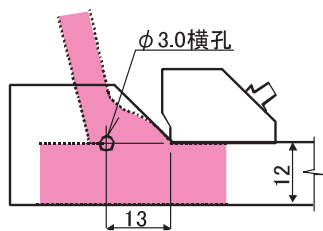


図4 対比試験片

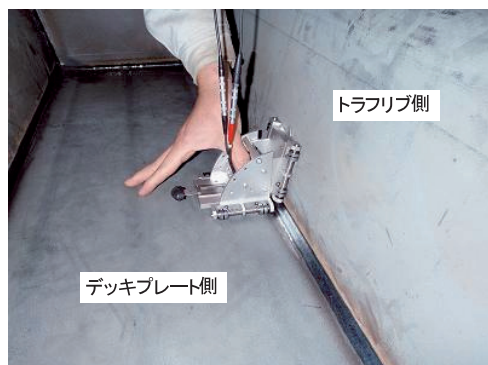


写真2 端部エコー法による探傷状況

検証結果を図5に示す。図には前報⁴⁾で紹介した人工スリットきず試験体の結果もあわせてプロットした。溶け込み残り寸法と推定値には若干のバラツキが認められるものの、溶け込み残り寸法が4.0 mm程度までは概ね対応していた。しかし、4.0 mm以上では対応せず、実寸法よりも大きく推定される傾向にあった。これらについては、マクロ試験片の観察から次のように推察される。溶け込みが浅い場合、溶け込み残り部は△状のスリット形状として残り、単純なスリットではない（写真3の右側）。このためトラフリブ裏面からの反射エコー（図2のW2エコー）は、溶け込み残り部の先端を迂回するような伝搬経路となり、直線的な距離関係だけでなく迂回による伝搬距離が加算されて観察され、過大評価となったと考えられる。

溶け込みが十分に得られ溶け込み残り部が1.5 mm程度

と小さい場合にも幾分かバラツキが認められる。これらは、溶け込みが大きいほど溶け込み残り部の先端半径が極小化され（写真3の左側）先端部からの反射効率が低下したこと、更には、Aスコープ上でトラフリブ裏面と溶け込み残り部先端の反射エコーが近似した位置に現れ、反射エコーを誤認したことなどが考えられる。

端部エコー法は、溶け込み残り寸法が比較的大きい2.0～4.0 mmの範囲に対しては有効となるが、トラフリブ板厚6 mmにて要求される75 %溶け込みの判定評価には最適とは言い難い。しかし、明らかに溶け込みが得られていない継ぎ手の寸法推定や、エコー高さ法にて不適と判断された部位を再チェックする場合など、補完的手法としては有効と考える。

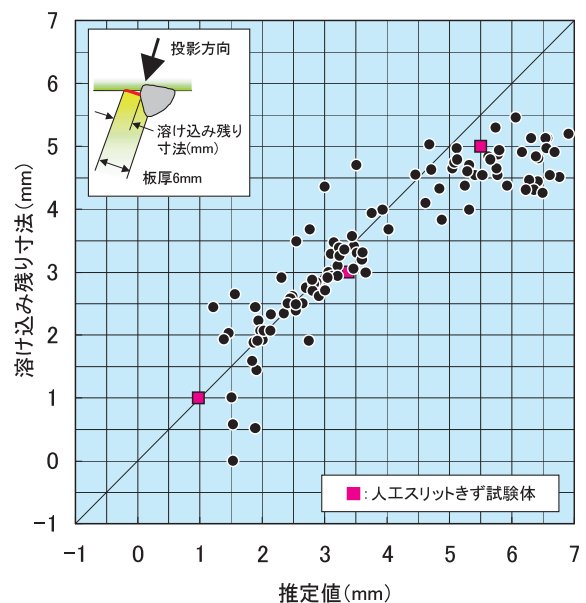


図5 端部エコー法によるトラフリブ板厚6 mmの検証結果

3. トラフリブ6 mmへの適用技術⁵⁾

板厚に関わらない溶け込み評価手法と期待した端部エコー法は、ルート近傍の溶け込み形状によっては適切な評価が難しくなることを認識した。このため、トラフリブ板厚6 mmを対象とした評価方法として、これまで取り組んだエコー高さ法を基に再検討を行うこととした。エコー高さ法での問題は、トラフリブ板厚が6 mmと薄くなった場合に入射点位置が必然的に溶接ビード側に近づく、溶接ビードと探触子が干渉して最適探傷位置を選択できないことにあった。このためトラフリブ板厚が薄くても最適探傷位置を確保でき、1.5 mm程度の溶け込み残り部を精度良く推定することができる探触子を選定しなければならない。

そこで、高屈折角タイプの探触子を新たに試作し検討を試みた。探触子は、表面波等の影響を抑えるためさまざまな工夫を施した。

(1) 人工スリットきず試験体による検討

人工スリットきずを内包した試験体を図6に示す。トラフリップ板厚6 mmのディテールとしてデッキプレートとトラフリップの構成角は103°，75%溶け込み評価に必要なきず寸法は0.6～3.0 mmの範囲とした。

検討にもちいた探傷器および接触媒質は前述と同一とし、探傷はトラフリップ外面からの直接接触とした。溶接ビードに干渉せず要求された75%溶け込み前後の識別が最も明瞭となる探傷位置について、得られたエコー高さと人工スリットきず寸法の関係を整理し図7に示す。溶け込み残り部からの反射エコーの高さと人工スリットきず寸法には、きず寸法0.6～3.0 mmの範囲においてエコー高さ差が十分に得られており、この探傷条件を安定的に再現することによって溶け込み評価は可能と判断した。

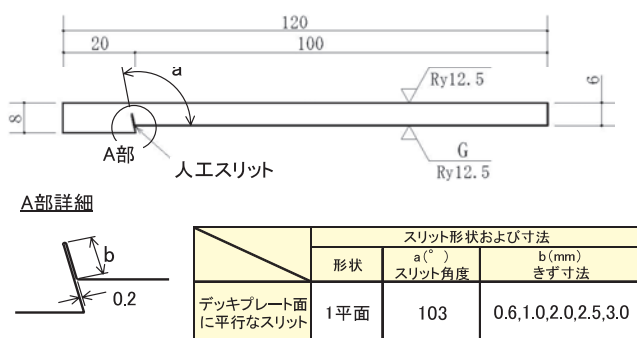


図6 人工スリットきず試験体

(2) 実継ぎ手試験体による検討

実継ぎ手試験体は、端部エコー法の検証試験体と同ディテールとし、製作方法も同じとした。

探傷作業は、探傷位置の固定化、作業の簡略化、耐摩耗性を考慮して治具化した装置に試作の探触子を組み込みもちいた。探傷はギャップ法である。

実継ぎ手試験体の溶け込み残り部からの反射エコー高さと溶け込み残り寸法との関係を図7にプロットする。人工スリットきず試験体と実継ぎ手試験体の結果を比較すると、感度レベルに違いを生じているが、溶け込み残り部が0.5～2.0 mm程度の範囲では類似の相関が得られていた。しかし、2.0 mmを越える溶け込み残り部については、寸法に応じたエコー高さ差が十分に得られず、2.0 mm程度を境に異なる傾向が得られた。この点について溶け込み残り部の形状から考察する。写真3に溶け込み量の大小によって溶け込み残り部の形状が異なるマクロ例を示す。これによると、溶け込みが深く溶け込み残り寸法が小さい場合は、デッキプレートに平行なスリット状態となり、溶け込みが浅く溶け込み残り寸法が大きい場合には△状のスリットとして残留している。実継ぎ手部の場合、溶け込み残り部の超音波反射面は溶け込み状態によって傾

きが変動すると考えられ、その結果として超音波の受信効率も変化すると推察される。

エコー高さ法にて実継ぎ手を評価する場合には、対象とする溶接部の溶け込み性状を反映した継ぎ手を持ち、エコー高さとその寸法との関係を事前に整理しておくことが重要となる。

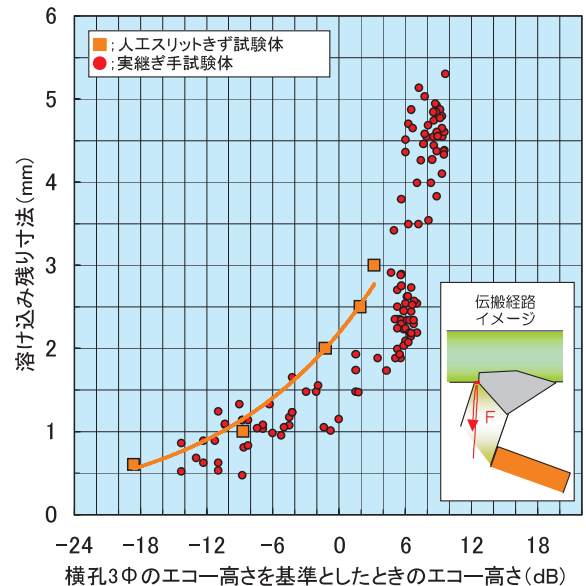


図7 エコー高さときず寸法の関係

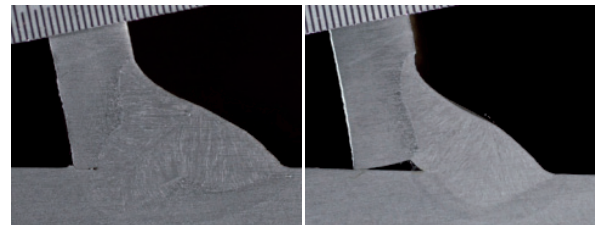


写真3 溶け込み残り部の残留形状例

本検討では、溶け込み残り部からの反射エコーの他、デッキプレートを反射源とした底面エコーを評価にもちいる方法についても着目した。この底面エコーは、対象とした溶接部を伝搬する際、溶け込み残り部の反射を免れた超音波であり、溶け込み残り部の寸法に反比例したエコー高さとなること、また得られるエコーは、溶け込み残り部の形状や傾きの影響が少なく、安定した評価につながる事が予測される。

デッキプレートからの反射エコーである底面エコー高さと溶け込み残り寸法との関係を図8に示す。両者には十分な相関が得られ、0～3.0 mm程度の溶け込み残り寸法は、寸法に応じたエコー高さ差が十分に得られていた。底面エコーは、溶け込み残り部を反射源としないエコーであることから、溶け込み残り部の残留形状の影響は少なく、一方で溶け込み量に応じたエコー高さが得られ有効な指標と言える。

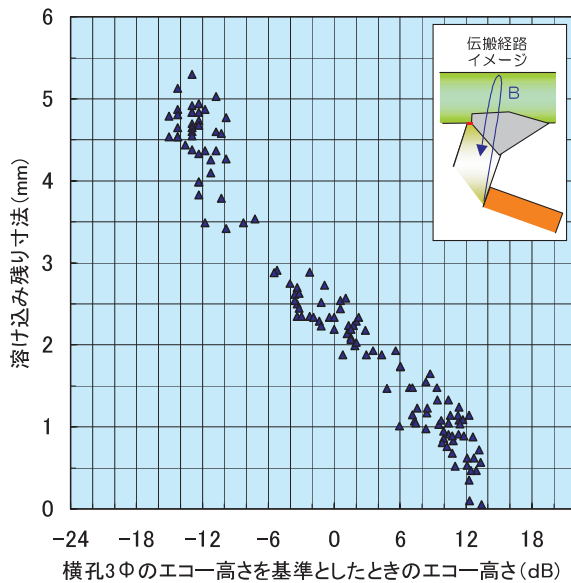


図8 底面エコー高さときず寸法の関係

4. トラフリブ6 mmの評価技術に対する検証

前項に示すように、トラフリブ板厚6 mmの実継ぎ手の溶け込み評価では、得られる反射エコーの情報とその評価精度について概ね把握することができた。これらを基にエコー高さ法の検証を行った結果を以降に述べる。溶け込み残り寸法の推定は、溶け込み残り部からの反射エコー（F）、底面からの反射エコー（ B_F ）、溶け込み残り部の反射エコーと底面エコーとの比（ F/B_F ）の各指標にて行い、事前検討にて整理したエコー高さと溶け込み残り寸法との関係（図7および図8）などから求めた。実際の溶け込み量の計測は、破断試験を行い、板厚方向の投影寸法を溶け込み残り寸法として求めた。

それぞれの指標での推定値と溶け込み残り寸法との関係を図9～11に示す。

(1) 溶け込み残り部の反射エコー（F）による評価

図9は溶け込み残り部からの反射エコーを指標に推定した結果である。推定値のほとんどが過小評価となり、溶け込み残り寸法が1.5 mmを超えた範囲ではいずれも大きな誤差が生じていた。これは事前調査で得られた溶け込み残り寸法とエコー高さの相関に加え、検証ではエコー高さが全体的に低く計測されたことが原因と考えられる。

(2) デッキプレート底面の反射エコー（ B_F ）による評価

図10は底面からの反射エコーを指標に溶け込み残り寸法を推定した結果である。推定値はいくらか過大評価の傾向がうかがえるが、2.5 mm程度までの溶け込み残り寸法に対しては良く一致していることがわかる。過大評価の原因については、溶け込み残り部からの反射エコーのケースと同様にエコー高さが全般的に低く計測された結

果と考えられ、何らかの対策が必要となる。

(3) F/B_F による評価

図11は溶け込み残り部からの反射エコーと底面エコーとの比（ F/B_F ）を指標に溶け込み残り寸法を推定した結果である。溶け込み残り部が大きくなるほど若干の過小評価となっているが、2.0 mm程度までの溶け込み残り寸法については良く一致している。この評価指標は、前述の対策として検討した方法であり、またトラフリブ板厚6 mmの要求値1.5 mm前後を精度良く推定できていることから、トラフリブ板厚6 mmの評価技術の指標として有効と判断される。

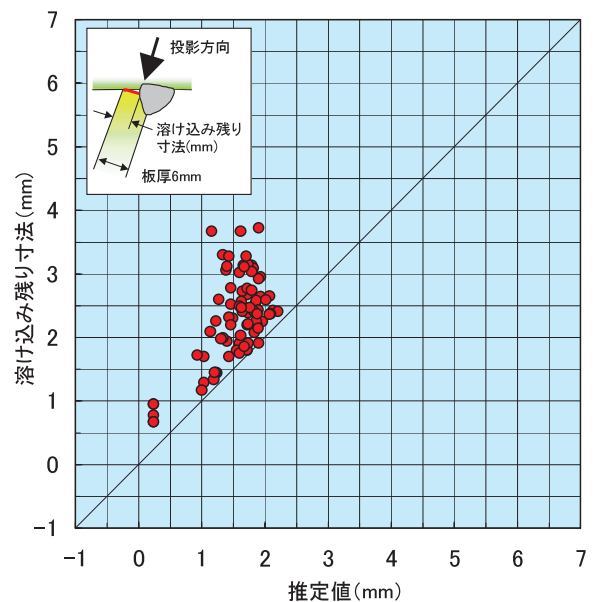


図9 Fを指標とした検証結果

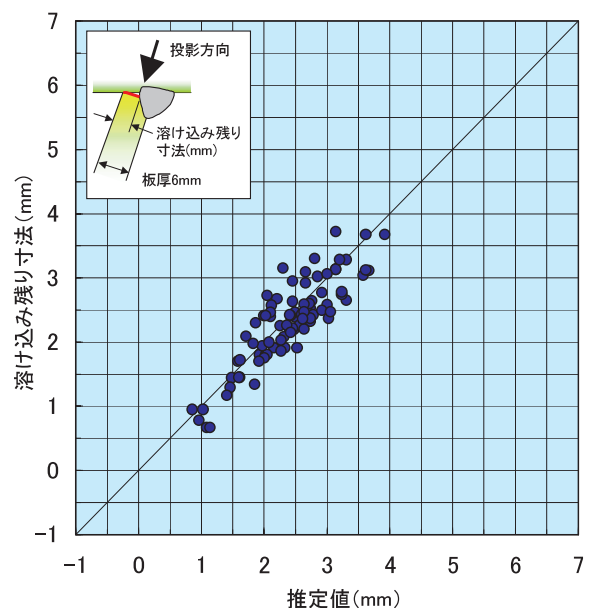
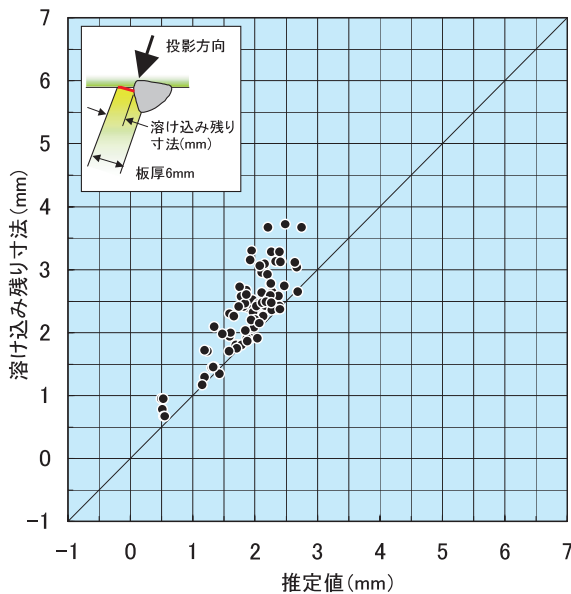


図10 B_F を指標とした検証結果

図11 F/B_Fを指標とした検証結果

5. まとめ

トラフリブとデッキプレートの縦方向溶接部の溶け込み評価技術として期待したエコー高さ法および端部エコー法について検証試験を行い、有益な結果を得た。また、課題として残されていたトラフリブ板厚6 mmへの適用では、高屈折角タイプの探触子をもちいることで対応が可能となり、検証試験でも有効であることを確認した。以下に結果をまとめる。

(1) エコー高さ法に対する検証

板厚8 mmのトラフリブをもちいた検証の結果、精度向上に向けた過去の取り組みによって、溶け込み要求値2.0 mm前後の寸法を精度良く推定できることを確認した。評価技術として有効と判断される。

(2) 端部エコー法に対する検証

板厚6 mmのトラフリブをもちいた検証において、溶け込み残り寸法が比較的大きい2.0～4.0 mmの範囲では推定が可能であった。しかし、板厚6 mmの要求値1.5 mm前後の推定は難しく、誤判定が生じやすい状況にあった。適用を検討する場合には、要求値前後の寸法が明瞭に識別できるよう、分解能を向上させるなど対策が必要である。

(3) トラフリブ板厚6 mmへの適用技術

高屈折角タイプの探触子をもちいたエコー高さ法により、トラフリブ板厚6 mmの評価は可能となった。評価指標は、溶け込み残り部からの反射エコーの他、デッキプレートからの底面エコーを利用することも可能であった。

実継ぎ手の溶け込み残り部の残留性状は、溶け込み量によって異なることが確認された。評価に際しては、これらの性状を反映した実継ぎ手の事前調査とその整理から評価指標を決定し、もちいることが重要となる。

(4) トラフリブ板厚6 mmの評価技術に対する検証

実継ぎ手をもちいた検証において、デッキプレートからの底面エコー (B) および溶け込み残り部からの反射エコーと底面エコーとの比 (F/B_F) を指標とした推定が良好であり、2.0 mm程度までの溶け込み残り寸法について良い一致を示した。要求値1.5 mm前後の寸法を精度良く推定できており、評価技術として有効であることを確認した。

特に、 F/B_F を指標とする場合には、伝達効率の影響が排除でき、感度調整が簡素化され、安定した評価が可能となる。

6. おわりに

平成14年の道路橋示方書の改訂以来、トラフリブの75%溶け込み要求を確認する方法として超音波探傷技術をもちいた評価方法を検討してきた。現場的に扱いやすく実用性の高い検査技術とすること、トラフリブ板厚6 mmおよび8 mmに対して探傷精度を確保することを目的に開発を行い、現在、自社製品に対する品質管理ツール「トラフチェッカー」としてもちいている。当該溶接部の品質向上、品質証明のための一助となれば幸いである。

最後に、これまでの検討に際して終始多大なるご支援とご協力をいただきました(有)プレテックエンジニアリングの田中氏には厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説, pp. 492-493, 2002.
- (2) 湯田, 藤本:トラフリブとデッキプレートの縦方向溶接部における溶け込み量測定を目的とした超音波探傷技術の開発(その1), 川田技報Vol. 24, pp. 20-25, 2005. 1.
- (3) 藤田, 湯田:トラフリブとデッキプレートの縦方向溶接部における溶け込み量測定を目的とした超音波探傷技術の開発(その2), 川田技報Vol. 26, pp. 20-25, 2007. 1.
- (4) 藤田, 湯田:トラフリブとデッキプレートの縦方向溶接部における溶け込み量測定を目的とした超音波探傷技術の開発(その3), 川田技報Vol. 28, pp. 102-103, 2009. 1.
- (5) 藤田, 湯田, 田中:トラフリブ溶接部の溶け込み量測定を目的とした超音波探傷技術の開発(その3), 土木学会第65回年次学術講演概要, I-137, pp. 273-274, 2010. 9.
- (6) 湯田, 藤田, 田中:トラフリブ溶接部の溶け込み量測定を目的とした超音波探傷技術の開発(その4), 土木学会第65回年次学術講演概要, I-138, pp. 275-276, 2010. 9.