

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)

The Development of Ultrasonic Measuring Method for Penetration of Trough Rib Welding (Report 2)

藤田 敏明
Toshiaki FUJITA

川田工業株式会社技術研究所溶接研究室

湯田 誠
Makoto YUDA

川田工業株式会社技術研究所溶接研究室室長

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。前報では、この要求に対し超音波探傷法をもちい溶け込み残り量を特定するためにエコー高さ法を利用した評価手法に着目し検討を行った結果、定量評価が可能であることを報告した。本報告ではこの超音波探傷技術の評価精度向上に向けたさらなる取り組みとして、最適条件の模索、探傷治具の開発、溶け込み残り部特有の形状を考慮した検討を行い実測定における課題や問題点に対して検討を行ったので報告する。

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

1. はじめに

鋼橋製作において鋼床版を構成する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%の溶け込み深さが道路橋示方書¹⁾にて要求されている。一方、この要求に対する品質確認はタブテストに代表される施工試験での溶け込み量の事前確認と、その溶接条件の管理が一般に行われ、製品溶接部の直接的な評価が行われていない。このため本溶接部に対して定量評価が可能となる検査技術の開発が望まれていた。

この課題に対し前報^{2),3)}では、超音波探傷の斜角一探触子によるエコー高さ法の検討を試み、実験から定量評価が可能であることを報告した。この超音波探傷技術はトラフリブ溶接部の溶け込み残り部からの反射エコーをエコー高さとして計測し、事前に整理を行った人工スリットきず寸法とエコー高さの相関関係から溶け込み深さの推定を行う手法である。

本報告はこの超音波探傷技術の評価精度向上に向けたさらなる取り組みとして実測定で問題となる内容について模索や改善を行い対策を検討したので報告する。

2. 検討内容

(1) スリットきず寸法とエコー高さの相関関係の改善

溶け込み残り量を明確に評価するためにも、スリットきず寸法ごとに大きなエコー高さ差を得ることが重要となる。前報でもちいた探触子の種類と探傷位置(入射点)の組み合わせでは2.0 mm以下の寸法において識別可能なエコー高さ差が得られていたが、スリットきず寸法が2.0 mmを超えるとエコー高さ差は小さくなり識別が難し

くなる状況にあった。

道路橋示方書の溶け込み要求から計算される溶け込み残り量はトラフリブ板厚が8.0 mmの場合、2.0 mm以下が要求されることから、品質評価の基準となる2.0 mm前後の精度向上を含めた新たな探触子と探傷位置の組み合わせについて模索するものとした。

(2) 探触子位置の固定化

これまでにもちいたガイドローラー探傷治具を写真1に示す。この治具は最適探傷位置での位置決めを簡便に行えるように工夫したものであるが、この治具ではデッキプレートとトラフリブの構成角の違いが生じた場合、探傷位置に微小な差異が生じることとなり、結果として無視できない測定誤差を含むことがわかった。

エコー高さ法をもちいた評価では探触子位置の固定化が重要であることから、構成角の違いに対応可能な新たな治具を開発することとした。



写真1 ガイドローラー探傷治具

(3) 溶け込み残り部の形状を考慮した評価

前報では評価対象部である溶け込み残り部の形状を一元化し面状きずとして検討を行った。しかし実際の溶け込み部には開先面の融合不良、溶け込み不足、ルート部に残存するブローホールなどの欠陥が内在することが考えられ溶接部の品質は一定ではない。本法は明らかな形状のスリット部から得られるエコー高さを指標として実継ぎ手溶け込み残り部の寸法を推定するものであるが、実継ぎ手から得られるエコー高さには溶け込み残り部の面積の他、形状、傾き、反射エコーの受信位置などの影響が含まれている。したがって正しく溶け込み残り量を評価するためにもこれらの外乱が評価精度にどのように関わるかについて明確にしておくことが重要となる。

ここでは探傷面に対し異なる傾きを有する面状のスリットと開先面の融合不良について検討を行うこととした。

3. 最適条件の模索

検討では新たな探触子として周波数や振動子寸法が異なる表1に示す探触子をもちいた。試験体は前報で使用した長方形スリットを有する人工きず試験体をもちいた。エコー高さはコーナー部（0.5スキップ点）を基準としマイナス側（溶接ビードに近づく側）8 mm～プラス側（溶接ビードから遠ざかる側）2 mmの前後走査における各探傷位置について各スリットきずのエコー高さが80%となるゲイン値（dB）を計測した。図1に前報での探触子のエコー高さ測定結果を、新たな探触子の測定結果を図2、図3に示す。なお、もちいた探傷器はUSD-15（クラウトクレマー社製）、接触媒質はソニーコートBSLとした。

表1 探触子の種類

形式	くさび材質	STB屈折角(°)	入射点(mm)
5K10×10A70	ポリスチレン	70.0	10.0
3K10×10A70		70.0	10.5
B5K5×5A70		70.0	6.0

図2は周波数を3 MHzとした探触子の測定結果であるが、図1と比べて全般的にエコー高さが低下し、同探傷位置で比較しても2.0 mm以上のきずに対するエコー高さ差の飽和レベルが改善する傾向がうかがえる。また振動子寸法を5 mm×5 mmに小さくした探触子の測定結果(図3)においては図2の傾向が著しくなり、広い範囲のきず寸法に対する識別能がより改善された。また他の探触子では識別不能であった探傷位置においてもエコー高さ差が得られる傾向にあることが確認された。このことは、実際の溶接部を評価する上で、様々な余盛り形状が生じることを考えると探傷位置と接近限界の点でも有利であり、振動子寸法の小型化は最適探傷位置の確保の点で有効な組み合わせであることが考えられる。

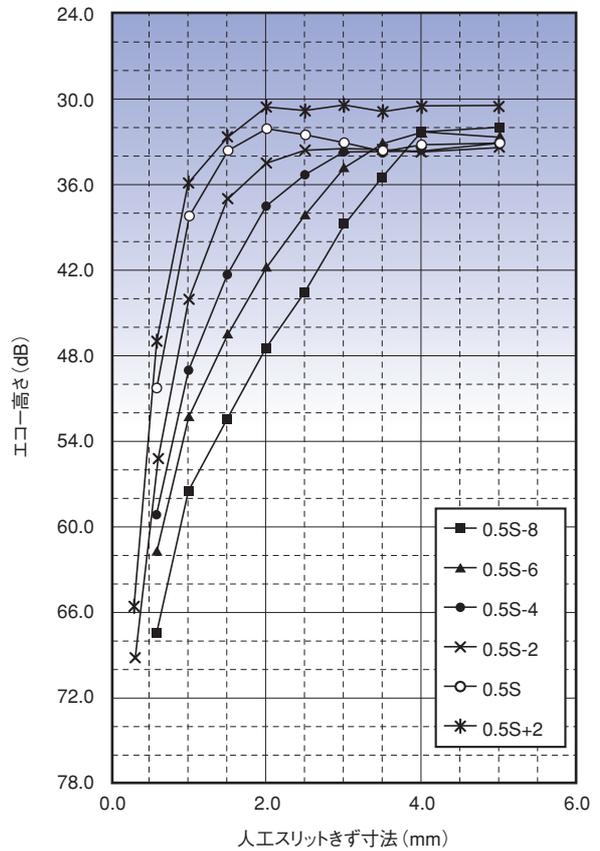


図1 5K10×10A70のエコー高さ測定結果

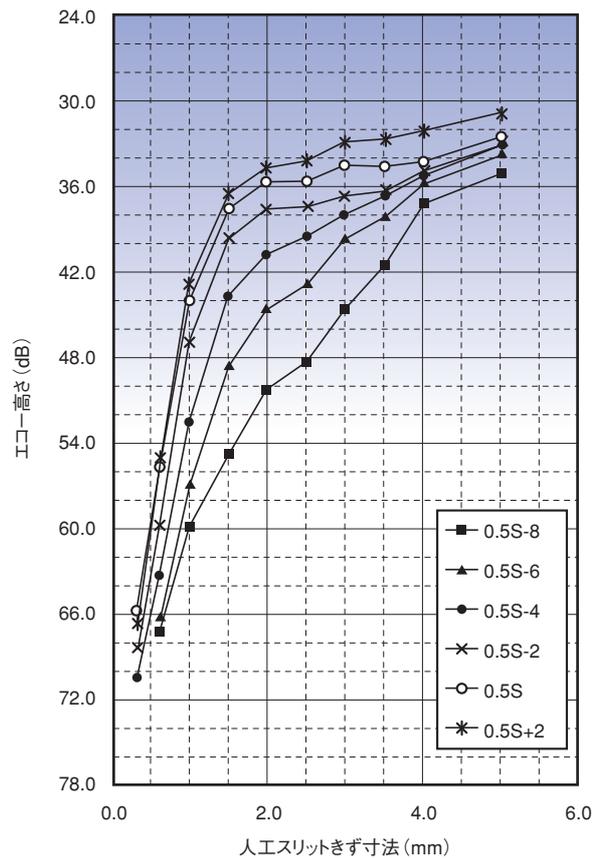


図2 3K10×10A70のエコー高さ測定結果

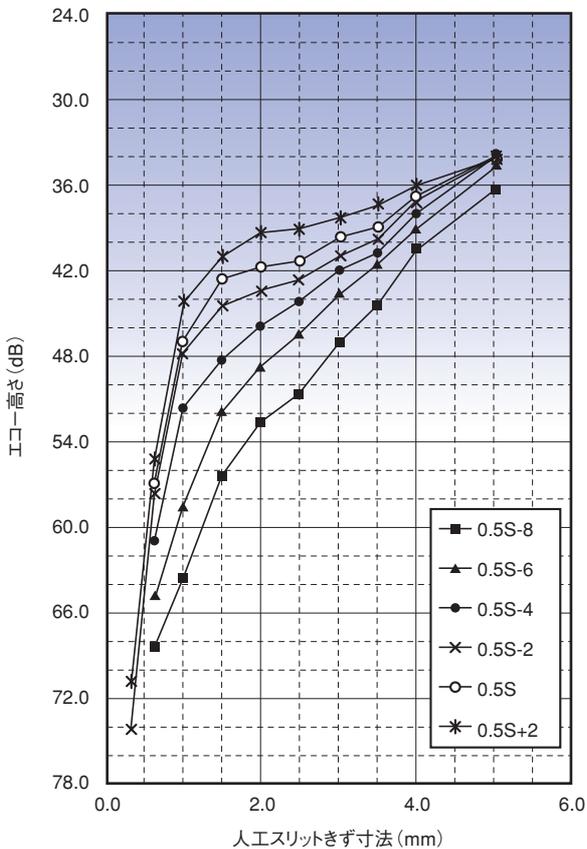


図3 B5K5×5A70のエコー高さ測定結果

溶け込み残りの推定精度の向上に効果的なこれらの特性は、図3の0.5スキップ点マイナス側4~8 mmのような直線性に富んだものを最適条件と判断するならば超音波の基本原則⁴⁾から以下のように推察できる。鋼中に伝搬した超音波ビームの音軸上の音圧は遠距離音場において周波数と振動子面積に比例する。このため音軸上の音圧は周波数を5 MHzから3 MHzに変更した場合に0.6倍、振動子面積を100 mm² (振動子寸法10 mm×10 mm) から25 mm² (振動子寸法5 mm×5 mm) に変更した場合に0.25倍に低下する。一方、指向性 (振動子の一辺のみの指向性に着目) については周波数と振動子寸法に反比例することから、周波数の変更は指向角1.6倍、振動子寸法の10 mmから5 mmの変更は2倍の指向角と広がりをもつ。この2点から新たな探触子はいずれも音軸上の音圧が低く指向角が広がったなだらかな音圧分布であるといえる。

次に反射源となるスリット部の大きさとスリットに入射される音場の関係 (音圧とその分布) を考える。エコー高さはスリット部のコーナー (トラフリップ内面側) から先端部 (溶着金属側) に至る全領域からの個々の反射エコー成分が積み重ねられブラウン管上で観察されたものであるが、入射される超音波ビームの音場に著しい音圧分布がある場合、音圧分布と反射源の位置関係から強

弱が異なる個々の成分が積み重ねられることになり反射面積に比例したエコー高さが得られにくくなる。これに対し音圧分布がなだらかな場合、反射源がどの位置であっても入射される超音波ビームの音圧に差異が少なく、個々の反射エコー成分は音圧差の少ないものの積み重ねとなる。その結果、スリットきず寸法とエコー高さに比例関係が得られやすくなったものと推察される。

スリット部に入射される超音波ビームは音圧分布が均一であればあるほどスリット部の面積に比例したエコー高さが得られやすく溶け込み残りの推定に有効となる。よって以後の検討では周波数5 MHz、振動子寸法5 mm×5 mmの探触子を中心に調査を行った。

4. 新たな治具の開発

探触子位置の固定化はエコー高さ法において最も重要である。写真2に新たに開発した治具を示す。この開発治具には、被検査面の表面状態の影響を避けエコー高さを安定化するため0.2 mmのギャップが設けられている。またデッキプレートとトラフリップの構成角に応じた最適探傷位置を常時固定化するための自己保持機構が組み込まれている。これらの機能に対する性能確認は、構成角96~110°範囲に可変可能な治具をもちい2°ごとに同位置にある人工スリットきずからのエコー高さとビーム路程の測定を行い検証した。表2に測定結果を示す。

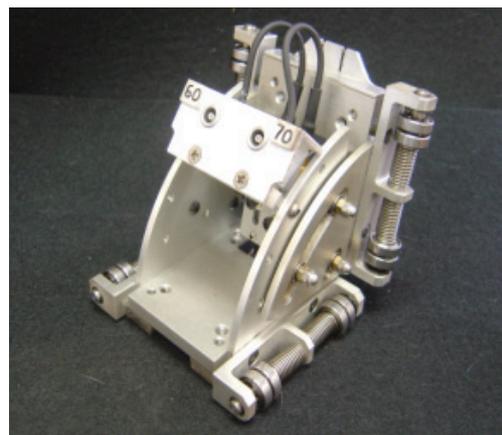


写真2 開発治具

表2 開発治具の検証結果 (エコー高さとビーム路程の測定)

構成角 (°)	エコー高さ (%)	ビーム路程 (mm)
96	81.5	20.27
98	81.5	20.21
100	81	20.16
102	82	20.18
104	82.5	20.17
106	82	20.17
108	82.5	20.17
110	81.5	20.15
平均値	81.9	20.2
標準偏差	0.54	0.04

エコー高さはいずれの角度においても一定しており、エコー高さの誤差は1.5% (0.5 dB以下) にも満たない結果となった。またビーム路程にも変化がみられずほぼ一定していることから、構成角の変化に応じた最適探傷位置の確保が可能であることを確認した。

この開発治具により探触子位置は固定化され、再現性のある安定したエコー高さが得られる。なおエコー高さの安定性の上では前述のギャップ法に加え、接触媒質と近似した音響インピーダンスを保持するくさび材 (ポリスチレン) の選定が効果的であると判断している。

5. 溶け込み残り部の形状を考慮した評価

前報の検討は健全な溶け込み状態を想定したスリット形状であったが、ここでは図4に示す②, ③のような実際の溶接継ぎ手部に生じるおそれのある溶け込み状態を想定し検討を行った。溶け込み残り部に入射された超音波ビームは反射源との位置関係、面の方向、寸法、形状などに影響された反射が行われ、この反射エコーは伝搬方向と受信位置との関係を経てエコー高さとして観察される。このためエコー高さをもちい溶け込み残り量の推定を行う場合、反射源となる溶け込み残り部の特徴を把握し、その状態に合わせた個別の評価が必要となる。

ここでは図4に示す溶け込み状態を模擬化した形状として、探傷面に対し傾きが異なる面状スリットおよび開先面の融合不良に代表されるくの字状のスリットに着目し、これらのスリット形状の識別とスリットきず寸法の推定について検討を行った。

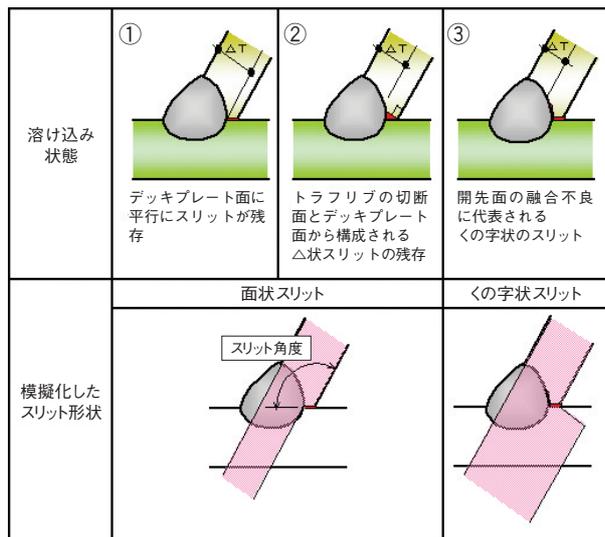


図4 実際の溶接継ぎ手で想定される溶け込み状態

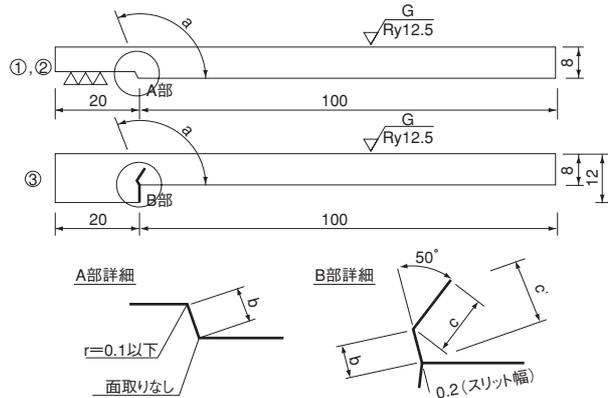
(1) 傾きの異なる面状スリット

探傷面に対して傾きがそれぞれ異なる面状スリットの検討は図5に示す①, ②人工スリットきず試験体をもちいた。これらのスリット形状は以下を想定した。

- ① デッキプレート面に平行にスリットが残存し、ト

ラフリブとデッキプレートの構成角によって探傷面に対する傾きが異なる面状のスリット部。傾き角はトラフリブとデッキプレートの構成角103°を基準に±5° (以下、スリット角度98°, 103°, 108°と記す) とした。

- ② トラフリブ切断面とデッキプレート面から構成される△状のスリットがルート部に残存したスリット部。探傷面に対する傾きはトラフリブとデッキプレートの構成角に依存せず常に一定 (以下、スリット角度90°と記す)。



形状	スリット形状および寸法					
	a (°) スリット角度	b (mm) きず寸法			c (mm) 寸法	c (mm) 見掛け寸法
①デッキプレート面に平行なスリット	98	1	2	3	0	-
	103					
	108					
②△状のスリット	90	0.6	1.5	3	4	-
③開先面を含むくの字状のスリット	103	2			1	2.53
					2	3.07
					3	3.62

図5 人工スリットきず試験体

図6にスリット角度103°のスリットきず寸法2 mmを基準感度とした各種スリット形状のエコー高さを示す。

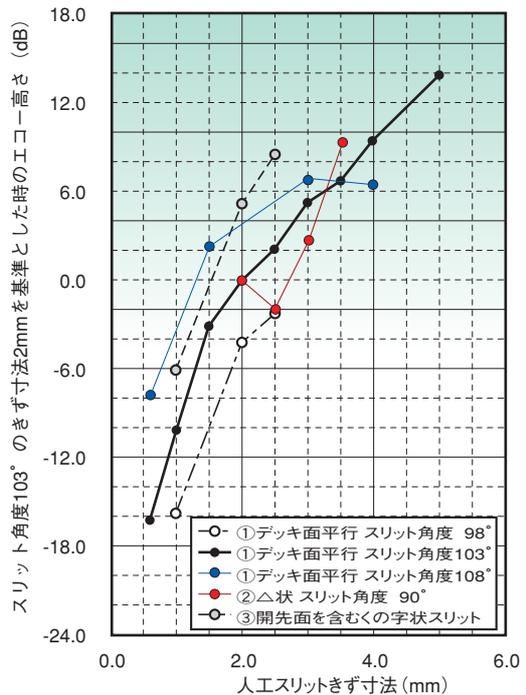


図6 各種スリット形状のエコー高さ測定結果 (B5K5×5A70 0.5 s-6 mm)

いずれのスリット角度においてもスリットきず寸法とエコー高さに相関関係が得られ、①のデッキプレート面に平行なスリット形状は構成角 $98 \sim 108^\circ$ 範囲においてエコー高さをもちいたきず寸法の推定が可能であった。②の△状のスリット形状については 3.0 mm 以上のスリットきず寸法においてエコー高さ差が得られていないが、要求値 2.0 mm 前後では十分なエコー高さ差が認められ評価は可能と判断される。

一方、得られたエコー高さについてスリット角度ごとに比較してみると、スリット角度 108° と 90° のエコー高さは高く、スリット角度 98° は逆に低いエコー高さとして観察された。この違いは超音波ビームの入射方向と反射源となるスリットの角度、反射エコーを受信する探触子位置との幾何学的な位置関係によるものと考えられる。図7に超音波ビームの伝搬経路の模式図を示す。スリット角度 108° 、 90° では入射経路と反射経路がほぼ一致し反射エコーが効果的に受信され、スリット角度 98° は入射経路と反射経路が大きく異なり最も受信されにくいことが解る。

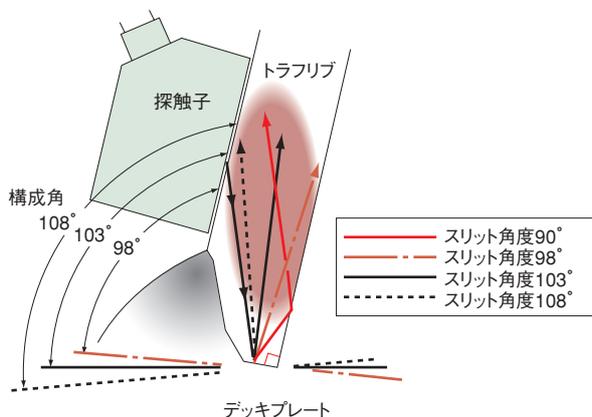


図7 超音波ビームの伝搬経路の模式図

スリット角度 90° のきず寸法 3.0 mm 以上においてエコー高さ差が得られなかった要因についてもこの伝搬経路より以下のように解釈できる。スリット角度 90° の超音波ビームの伝搬経路はスリット面とトラフリブ裏面の2回反射により決定されるため、きず寸法が大きくなるほどスリット部の先端側からの反射エコーは入射経路から遠ざかった位置(きず寸法 $\times \tan(70^\circ)$: 屈折角)に伝搬することになる。このため、小さいきず寸法ほど入射経路と反射経路が近似する傾向となり効率のよい受信状態が期待できるが、 3.0 mm 以上のスリットきず寸法の場合、上述の傾向から受信効率が劣り結果として、きず寸法に応じたエコー高さ差が現れにくくなる。

以上のことから、溶け込み残りを正しく評価するためにもスリット部の傾きに対する事前の調査と傾きに応じた評価を行うことが重要であることを改めて認識し

た。

(2) 面状スリットの傾き予測

次に溶け込み残り部の傾きの予測方法について述べる。①のスリット形状であればトラフリブとデッキプレートの構成角を計測することで溶け込み残り部の傾きは把握できる。しかし①か②のいずれのスリット形状であるかは外観上の情報から識別はできない。ここでは伝搬経路の違いから生じるエコー高さの差異に着目した手法として、屈折角 60° の探触子と探傷位置の組み合わせから得られる両スリット形状のエコー高さ比較による識別を試みた。

試験体は前報の長方形スリットの人工きず試験体(スリット角度 103°)と図5に示す②の人工スリットきず試験体をもち、基準感度は深さ 8 mm の $\phi 3 \text{ mm}$ 横孔を 80% とした。図8に測定結果を示す。

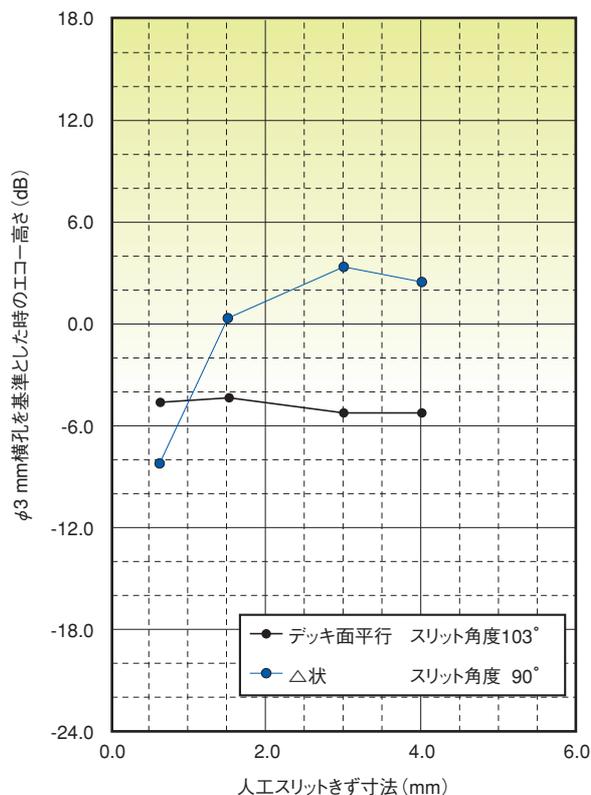


図8 屈折角 60° の探触子によるエコー高さの測定結果

スリットきず寸法 1.0 mm 近傍ではエコー高さに大きな違いは認められなかったが、 1.2 mm 程度以上であればスリット角度 103° とスリット角度 90° から得られるエコー高さに十分な違いが生じていた。溶け込み残りの要求値が 2.0 mm であるため小さなきずの識別は品質管理上大きな問題とならないと考えれば、 $\phi 3 \text{ mm}$ 横孔の基準感度 -2 dB 程度を境界として両スリットの識別は可能と考えられる。溶け込み残り部の傾き予測は反射面の傾きに対して受信されにくい入射角を決定し活用することで識別が可能と考えられる。

(3) く の字状スリット

トラフリブ開先面の融合不良とルートフェイス面が連続したくの字状スリットの検討は、図5に示す③の人工スリットきず試験体をもち行った。先の図6にくの字状スリット試験体のエコー高さの測定結果を示す。図中のきず寸法は超音波ビームの入射方向に対するきずの投影寸法を見掛け寸法としている。

くの字状スリットはきず寸法とエコー高さに相関関係が認められておらず、見掛け寸法2.53 mmのようにエコー高さが低下するきず寸法が存在した。このエコー低下の要因はルートフェイス面と開先面の2平面から反射されたエコーの干渉と考えられる。図9は面状スリットとくの字状スリットのAスコープ波形である。くの字状スリットでは他の人工スリットきずにはない特徴として複峰が認められ、2平面から反射された伝搬経路の異なるエコー成分が存在していることが観察される。

スリット部の形状がくの字状である場合、開先面が残存し要求された溶け込み深さが得られていない可能性が高い。このため溶け込み残りの推定評価以前に波形観察からの品質評価が重要になると考えられる。

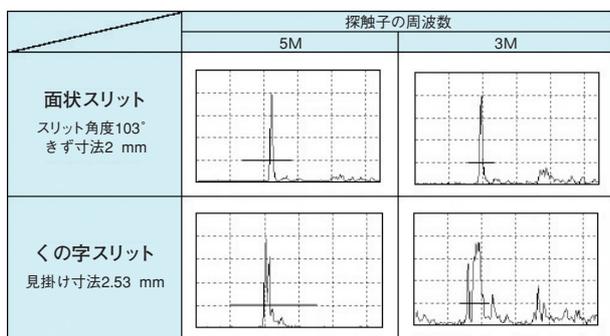


図9 面状スリットとくの字スリットのAスコープ波形

6. まとめ

トラフリブとデッキプレートの縦方向溶接部に対する溶け込み量を評価する超音波探傷技術について精度向上に向けた取り組みを行い以下の結果を得た。

(1) スリットきず寸法とエコー高さの相関関係の改善

人工スリットきず寸法に対し良好な推定精度が得られる最適条件を模索した。最も効果的な探傷条件は、周波数5 MHz、振動子寸法5 mm×5 mmの探触子を用い、探傷位置として0.5スキップ点マイナス側4～8 mmの組み合わせであることを確認した。

(2) 探触子位置の固定化

デッキプレートとトラフリブの構成角の変化に応じ常に最適探傷位置を維持可能とする専用治具を開発した。この治具をもちいることで探触子位置は固定化され、再現性のある安定したエコーが得られるようになった。

(3) 溶け込み残りの形状を考慮した評価

スリット部の傾きはエコー高さに大きく影響を与えることが確認された。溶け込み残りの推定は傾きに応じた評価が必要であり事前の傾き予測が必須となる。その傾き予測の試みとして行った面状スリットと△状スリットの識別では、屈折角60°の探触子をもち得られたエコー高さを比較することが有効であった。

開先面の融合不良に代表されるくの字状のスリットはきず寸法（見掛け寸法）に対するエコー高さの相関は得られなかったが、くの字特有の波形観察による識別が可能であることを確認した。

エコー高さ法をもちい求められた溶け込み量を評価するためには、これまで得られた知見をふまえることでより精度の高い推定が可能と考えられる。

7. おわりに

本超音波探傷技術は2005年9月「溶接部の超音波検査方法」として特許登録されました。ご協力いただいた関係者の皆様に深く感謝いたします。

最後に、本検討に際して(有)プレテックエンジニアリングの田中氏より終始多大なご支援とご協力をいただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，pp.492-493, 2002
- 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，川田技報Vol.24, pp.20-25, 2005.1.
- 竹内，湯田，藤本，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技術の開発，土木学会第58回年次学術講演会論文集，I-244, pp.487-488, 2003.
- 例えば：超音波探傷試験Ⅱ，Ⅲ(社)日本非破壊検査協会編テキスト，2001年度版