

I-87

白鳥大橋補剛桁現場鋼床版デッキ溶接の自動超音波探傷について

日本鋼管(株) 橋梁建設部 正員 前田直寛
 北海道大学(名誉教授) 正員 渡辺 昇
 北海道開発局室蘭開発建設部 正員 西本 聡
 (株)日本製鋼所室蘭製作所 正員 田中秀秋
 日鋼検査サービス(株) 杉山敏幸

1. まえがき

白鳥大橋補剛桁の現場における鋼床版デッキプレート溶接部は、作業性が高く全線検査が行えることと、記録が残り検査結果に信頼性があることから、自動超音波探傷(AUT)を採用した。本稿では、白鳥大橋の4工事の中の「その4工事」の探傷概要について報告する。

現場溶接部の探傷結果では、補修すべき欠陥は検出されず良好な溶接が行われた。しかし、①探傷装置の作動確認と日常の管理方法が明確でない、②疑似エコーが多数発生した、③放射線透過試験(RT)に比べ検出能に問題はないか、④全数検査の必要性はないか、の4つの課題について実験を含め考察したので、その結果も合わせて報告する。

2. 検査対象部位と探傷装置の概要

現場鋼床版デッキプレート溶接部には、始末端部、及び、部材取付部を除いた、ほとんどの部分に自動超音波探傷を適用した。自動では探傷のできない部分、及び、欠陥発生が予想される始末端部においては手探傷も実施した。手探傷では、粗探傷時の補助として、クリーピングウェーブによる探傷も行った。

表. 1 に使用した探傷機器リストを示す。また、現場の自動超音波探傷状況を写真. 1 に示す。

表. 1 超音波探傷条件

項目	条 件	
自動探傷	探傷装置 探触子	αUT-2 アスペクト社製 5MHz 10×10 屈折角70° (カップリングチェック用垂直探触子付)
	探傷感度 接触方法 検出レベル	RB-4 No. 1 : 80%+6dB ギャップ法 L/2 検出レベル (L/2:20% L:40% M:80% H:160%)
手探傷	探傷器 探触子	USL-42 クラウトクレマー社製 5MHz 10×10 屈折角70° クリーピングウェーブ 2MHz
	探傷感度 接触方法 検出レベル	RB-4 No. 1 : 80%+6dB 直接接触法 L/2 検出レベル (L/2:20% L:40% M:80% H:160%)

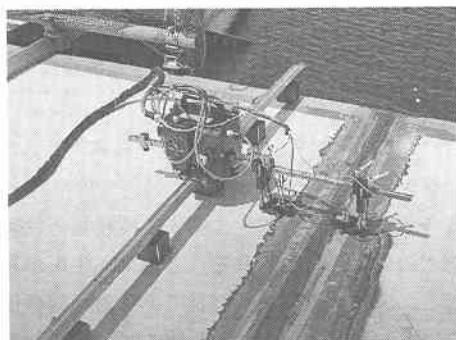


写真. 1 現場の自動超音波探傷状況

3. 検査作業の流れ

溶接部の探傷は図. 1 に示すように、まず探傷面の状況を確認し、スパッターなどの探傷を阻害するものがないか、また、取付けられている部材によって、自動走行の行えない部分がないかを確認したのちに探傷が行われる。自動超音波探傷では500mmを1区間として、検査結果が印刷出力される。自動探傷中には、この探傷結果を確認しながら、自動探傷で検出されたエコーや、始末端部、及び、部材取付部は自動探傷に並行して、手探傷が行われる。

手探傷では、先ずクリーピングウェーブによる探傷を行い、次に通常の斜角探傷を行っている。

Ultrasonic inspection of steeldeck welds of HAKUCHO-OHASHI bridge.
 by Naohiro MAEDA, Noboru WATANABE, Satoshi NISHIMOTO, Hideaki TANAKA, Toshiyuki SUGIYAMA

傷エコーの等級分類や合否判定は、5MHz、70°の斜角探傷による詳細探傷にて行われる。

探傷装置は、探傷開始前に感度、屈折角、DAC（電気的距離振幅補償回路）などの機器の調整と測定が行われる。機器調整が終了した後、実際の溶接線を探傷する前に、ダイナミックキャリブレーション試験を実施している。これは、探傷システム全体が正常に作動し、更に初回の探傷時と差異がないかを確認するためのもので、人工欠陥が内在した試験体を用い、実際と同じ条件で探触子を走査しながら行う。

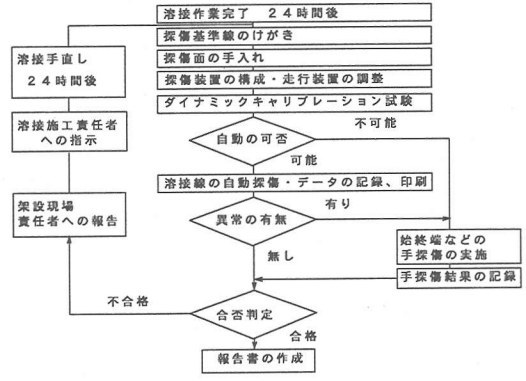


図. 1 検査作業の流れ

4. 白鳥大橋の超音波探傷結果

表. 2には、白鳥大橋補剛桁製作架設「その4工事」における各区分毎のエコー検出例を示す。探傷結果としては、傷エコーを43箇所（L検出レベル以上12ヶ所）検出したが、いずれも小さな欠陥で規格に合格するものであり、補修すべき欠陥は検出されなかった。他の工事区間でも補修すべき欠陥は検出されておらず、白鳥大橋の現場鋼床版デッキプレート溶接部は、1回の溶接で完了している。

表. 2では、500mm毎の各区分において1ヶ所でもエコーの検出された場合を、エコー有りとして数えた。また、傷エコーと疑似エコーの両方が検出された場合は傷エコーの方を記録した。表に示す数字は傷エコーの指示長さを示す。この工事区間で検出された傷エコーの最大指示長さは8mmで、そのエコー高さはL/2~L線（領域Ⅱ）の範囲である。また、疑似エコーと欠陥エコーの検出された区間は156箇所であり、全区間518箇所の30%に相当する。

白鳥大橋の検査では、傷エコーの検出レベルをL/2線以上としたことから、傷エコー以外の疑似エコーも検出し易くなった。疑似エコーとしては、接触媒質が探触子の前後走査により、ビードの際に集まることにより発生するものが最も多く、次に表側のビードと裏波からの反射エコーとなっている。各工事区間では探傷装置調整における欠陥抽出範囲の調整に若干の違いがあり、疑似エコーの検出数に違いがでている。

表. 2 各区分（500mm）毎のエコー検出の調べ

キ：表面側の疑似エコー ク：裏波の形状エコー 数値：傷エコーの指示長さ

継手番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	合計
A	キ			キ	キ		2	キ			6	3			4	6	キ	キ	ク							5	キ										6	
B				キ	キ						キ					キ	キ	キ	キ																			
C	3			キ	キ			キ	キ	キ	3	キ			キ	キ	キ	キ	ク	ク	ク	ク	ク	ク	ク	ク	ク	ク	ク	ク	ク	ク	ク	ク	ク	ク	ク	
D	キ	キ	キ	4	キ			キ					7	8	ク	ク	ク	ク	ク	ク							2	4	ク		キ	キ	キ	ク	ク	ク		ク
E	キ	3									ク	4																										
F	キ					2	キ	キ					4		2		3			キ					3		3										キ	
G																					6	キ					キ	キ	キ	キ	キ	キ	キ	キ	キ	キ		キ
H	8	キ	キ					キ	キ																													キ
I																	2																					キ
J	8	2	7	6	キ	キ	キ	キ	キ	キ																											キ	
K											2																											キ
L						5									6						キ																4	
M	ク	ク	ク	ク	ク						ク	ク								ク	ク																5	
N			キ	キ																							キ	4	8	4					キ	キ	キ	
疑似エコー	3	3	4	5	7	4	3	4	5	2	2	2	2	2	2	2	4	1	0	5	1	1	1	0	3	3	3	4	3	4	2	4	1	3	2	1	1	98
裏波エコー	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	2	0	1	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	15	
傷エコー	3	2	1	2	0	2	0	1	0	1	3	1	2	1	3	2	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	3	2	1	2	0	1	0	0	0	3	2	43

検査終了区間数 : 14 × 37 = 518

5. 自動超音波探傷の適用における考察

5.1 ダイナミックキャリブレーション試験

探傷機器の調整において、感度、時間軸、ゲート、DACなどを個別に正確に調整することは重要な点であるが、それらの調整した値が正しく、更に周辺の電子機器等も正しく動作しているかを実際の探傷と同様に、探触子を走査した結果で確認することも必要である。試験体にて、実際の探傷と同じ探傷を行うダイナミックキャリブレーション試験は、以下の目的がある。

- (1)全ての機器が正常に動作しているかの確認。
- (2)機器の劣化、損傷、摩滅などによる初期状態からの変化がないかの確認。
- (3)ゲートが正しく調整され、検出すべき欠陥を正しく検出しているかの確認。
- (4)DAC、及び、探傷感度が正しく調整されているかの確認。

白鳥大橋の自動超音波探傷においては、図. 2に示す試験体を用い、上記(1)、(2)、(3)の確認が行われた。探傷結果は図. 3に示す通りで、この記録が初期に採取した探傷結果と変化のない事を確認し探傷を行っている。(4)の感度の確認は、記録上のエコー高さの違いから、探傷感度調整に差異のないことを確認できるが、DACが正しく調整されたかは記録上から確認できない。

これは、同一走査ラインで検出される最も高いエコーが記録に残り、0.5スキップ、1.5スキップなどの、それぞれのエコー高さを検出できない問題があるためである。現状の探傷装置にてこの問題を解決する方法として、図. 4に示すようにエコーを検出たくない位置に薄い鋼板を貼り付ける方法を開発した。この試験片を用いることによって各スキップのエコー高さを検出することが可能となった。

自動超音波装置の日常点検としては、上記(1)~(4)を確認するために、図. 2、及び、図. 4に示す両方の試験片を用いたダイナミックキャリブレーション試験を実施する事を推奨する。

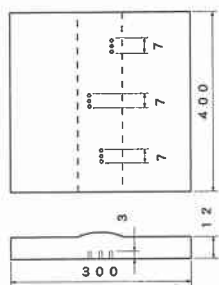


図. 2 ダイナミックキャリブレーション試験体



図. 3 ダイナミックキャリブレーション試験体の探傷結果

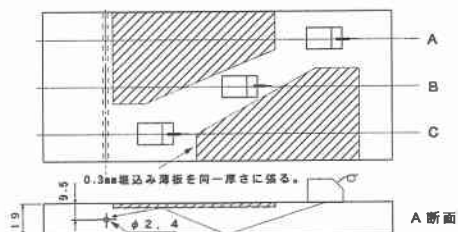


図. 4 各スキップ毎のDAC確認試験片

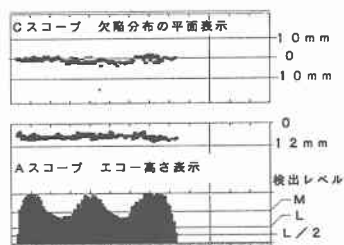


図. 5 DAC確認試験片探傷結果

5.2 傷エコーと疑似エコーの判別

突き合わせ溶接部では、ビード余盛からの形状エコー及び、接触媒質による疑似エコーが検出されることがある。接触媒質からのエコーは、反射源と思われる位置の接触媒質を除去することにより消えることから判別できる。表側の余盛による形状エコーの場合は、ビード部を媒質のついた指でさわることによって、エコーが息継ぎすることで判断する。裏波による形状エコーの場合、ビード部を媒質のついた指でさわ

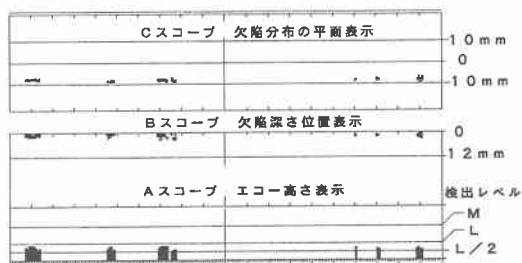


図. 6 疑似エコーの検出例

ことができない場合があり、このような場合は裏波形状を見て確認している。また、自動探傷の記録からもエコー検出位置、エコー高さ、指示長さ、左右からの探傷結果の比較などで判別する事が可能である。図. 6 に自動探傷で検出された疑似エコーを示す。欠陥検出位置がビードの際で、欠陥深さが表面近くであることから、疑似エコーの可能性が推察できる。しかし、自動探傷においては、このような疑似エコーが検出される場合、作業性が著しく低下する。疑似エコーの多くは接触媒質によるものであり、その対策としては、疑似エコーの発生をできるだけ低減させるため粘性の低い接触媒質の使用や接触媒質の溜まりを無くする改善による方法があり、ソフト処理としては、エコー検出状況から疑似エコーか欠陥エコーかを人的な判断と同様な処理を行うニューラルネットワークのシステムを適用する方法があるが、いずれも新たな改善・開発を行う必要がある。

6. エンドタブを用いた欠陥検出能の調査

6.1 調査の目的

通常使用する5MHz、70°の横波斜角探触子でL検出レベルを用いた場合、欠陥傾き15°までしか検出できず、高温割れのように欠陥が垂直に立っていると検出されない場合がある^{(1)・(2)}。しかし、検出レベルをL/2検出レベルとした場合は垂直な欠陥も検出可能であると言われている。

溶接の始末端部では高温割れが発生しやすく、このためエンドタブを用い実橋には残存させない施行が行われている。この高温割れは、垂直な面を持った欠陥であるため上記の理由により超音波探傷では検出しにくい欠陥である。

このような事から、エンドタブに内在する垂直な欠陥を用いL/2検出レベルでの検出能の確認と、放射線透過試験と超音波探傷との検出能の比較を行った。また、クリーピングウェーブの検出能についても調査した。

6.2 クリーピングウェーブ

クリーピングウェーブは図. 7に示すように縦波斜角の中で探傷面に添って伝搬する波を言う。主ビームは85°近くにあり、垂直な欠陥を検出しやすいが、更に、底面で反射した波は底面側のクリーピングウェーブとなって欠陥を検出する。また、縦波を使用していることから波長が長く、欠陥の傾きに対するエコーの低下は少ない。図. 8に示すように直径φ2mmの傷を内在させた試験片を用い欠陥の傾きによるエコーの低下を求めると、2MHzのクリーピングウェーブでは6dB(1/2)の低下で欠陥傾きによる影響は少ない。通常の横波5MHz、70°の探触子では20度の傾きで20dB(1/10)と大幅に低下する。

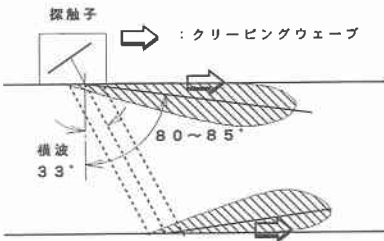


図. 7 クリーピングウェーブ

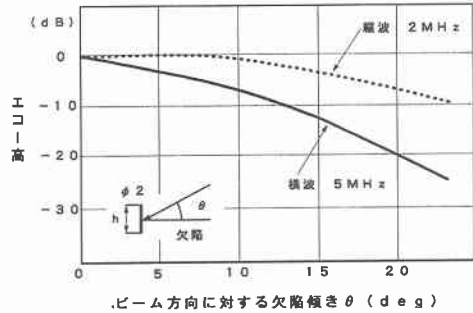


図. 8 欠陥傾きと反射エコー高さ

6.3 エンドタブに内在した欠陥の切断調査

工事区間の鋼床版デッキプレート溶接部14箇所で見られる28枚のエンドタブを用い、斜角70°による探傷、クリーピングウェーブによる探傷、および、放射線透過試験を実施した。その結果、5枚のエンドタブに欠陥が検出され、これらの試験片を切断調査し、実体欠陥の内在状況を磁粉探傷(MT)にて確認した。この探傷結果を用い、斜角70°、クリーピングウェーブ、と放射

線透過試験の結果の比較を行った。

それぞれの検査方法による探傷結果を図. 9に示す。その結果、以下のことが判明した。

- (1).斜角探傷におけるL検出レベルでは、欠陥高さ4mmでも検出されない部分ある。(図中の太線がL検出レベル) しかし、L/2検出レベルでは、欠陥高さ2mm以上の欠陥部を検出しており、十分な検出能⁽⁵⁾であることが確認された。
- (2).超音波探傷の斜角探傷やクリーピングウェーブの方が放射線透過試験より欠陥の検出能が優れていた。これは、放射線透過試験では欠陥が非常に狭い場合や、照射方向に対し傾いている場合には検出されない場合があるため、今回も欠陥幅が狭いために欠陥が検出されない場合があった。
- (3).クリーピングウェーブでは、斜角探傷や放射線透過試験より検出能が優れており、このような垂直な欠陥の検出を目的とした場合、クリーピングウェーブを使用することが有効であることが確認された。

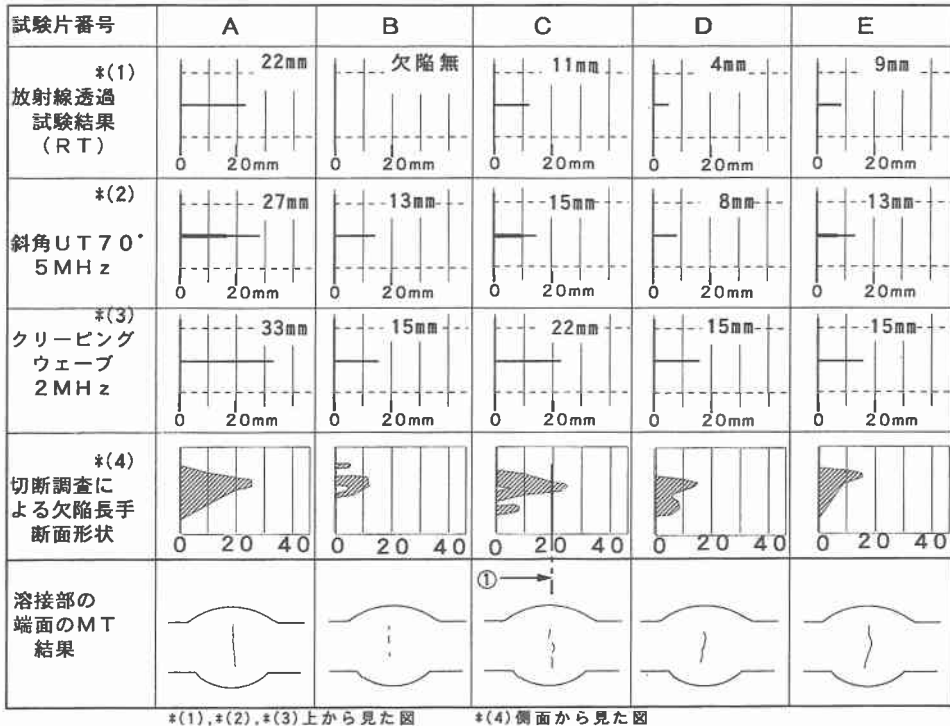


図. 9 エンドタブに内在した欠陥による放射透過試験と超音波探傷試験の比較

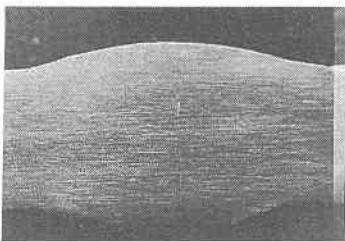


写真. 2 [試験片: C] 切断面①のMT

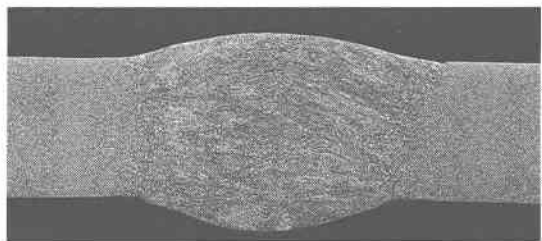


写真. 3 [試験片: C] 切断面①のマクロ

超音波の反射特性として、欠陥形状によって検出されるエコー高さは異なるが⁽³⁾、以上の3点の結果から斜角探傷の検出レベルをL/2検出レベルとすることは、放射線透過試験の検出レベルと同等かそれ以上であることが確認された。また、自動超音波探傷のできない部分の探傷には、クリーピングウェーブの適用が有効であることが確認された。

7. 抜き取り検査と全数検査

突き合わせ溶接部の非破壊検査では一般的に抜き取り検査が行われている。白鳥大橋補剛桁の現場鋼床版デッキプレート溶接部は全線検査を施行したが、これを抜き取り検査⁽⁴⁾を行った場合として調査した。「その4工事」における抜き取り検査の条件を全長の40%とし、始末端部と継手長さ10mを越える場合にその中間を検査箇所とすると、図10に示す探傷範囲となる。この範囲の欠陥検出総数は21個で、全欠陥検出数の43個に対し、49%を検出可能であった。この結果、全体の40%の面積を探傷し、欠陥の49%を検出できたことから、検査範囲を適切に選択すると抜き取り検査でも溶接部の品質保証は行える事になる。

抜き取り検査は溶接線が同一作業条件で行われていることを前提にし、その品質評価を目的としている。しかし、突き合わせ溶接部の強度を保証する事では、全線検査を行うことが望ましい。

また、作業性を考慮した場合は、今回のように継手全長が18mと短い場合には、全線を探傷した場合も抜き取りを行った場合も、さほど大きな差はなく、全線検査を行っても問題は無い。

継手番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	合計
疑似エコー	3	3	4	5	7	4	3	4	5	2	2	2	2	1	2	2	4	1	0	5	1	1	1	0	3	3	3	4	3	4	2	4	1	3	2	1	1	98
漏波エコー	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	2	0	1	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	1	0	0	1	0	15	
傷エコー	3	2	1	2	0	2	0	1	0	1	3	1	2	1	3	2	1	1	0	1	0	0	1	0	1	3	2	1	2	0	1	0	0	0	0	3	2	43



図. 10 40%抜き取り検査の場合の検査箇所

8. まとめ

白鳥大橋補剛桁の現場鋼床版デッキプレート溶接部に自動探傷を適用し調査検討した結果、以下の4点が明らかになった。

- (1) 自動探傷の運用確認用としてダイナミックキャリブレーション試験片を用いた。この結果、装置が常に正しく調整、運用されていることを、短時間に正確に行えることを確認した。
- (2) 検出レベルが高いため、疑似エコーが多数検出されたが、自動探傷と並行して手探傷を実施することで、タイムラグ無く確実な検査が実施された。疑似エコーの減少方法では、接触媒質適用の改善やソフト処理の開発など、今後の開発が必要である事を示唆した。
- (3) 検出能の確認は欠陥の内在しているエンドタブを用いた試験片にて行った。その結果、超音波探傷のL/2検出レベルは放射線透過試験と同等か、それ以上であることが確認された。この種の欠陥は橋梁部材としては致命的で自動超音波探傷の有効活用が期待される。
- (4) 抜き取り検査を行った場合と、全線検査を行った場合の欠陥検出数の比較を行った。その結果、抜き取り検査でも品質保証が可能であることが確認された。しかし、自動超音波探傷では作業性が良く全線検査でも問題なく行えることから、より確実な検査が行えることを確認した。

この結果から、自動超音波探傷は検査結果の即時性・作業性・安全性と探傷結果の信頼性から、鋼橋製作・架設の合理化を目的とした検査に有効であることが確認された。

《参考文献》

- (1) 緒方、平澤、長谷川；平面状欠陥への超音波の入射角度とエコー高さの関係
日本非破壊検査協会、平成5年度秋季大会（平成5年）
- (2) Matsumura, Itoga, Ogata, Hirasawa: QUANTITATIVE EVALUATION METHOD OF PLANAR DEFECTS BY UT USING SPECIMENS WITH SIMULATED DEFECTS ; 13th World Conference on N.D.T (1992)
- (3) 鋼橋技術研究会、非破壊検査適合性研究部会 ; 板継ぎ溶接継手への自動超音波探傷検査の適用に関する研究（平成6年）
- (4) 阪神高速道路公団 ; 超音波自動探傷検査要領（平成5年）
- (5) 土木学会 ; 鋼構造シリーズ4 鋼床版の疲労（平成2年）