

TOFD 法による橋梁溶接試験体の超音波探傷

村井康生*・斉藤賢司*・鈴木紀生**・杉井謙一(工博)***

*技術開発本部・材料研究所 **神鋼検査サービス㈱ ***都市環境カンパニー・構造技術部

Ultrasonic Testing of Welded Joint Models for Bridge Construction Based on the TOFD Method

Yasuo Murai・Kenji Saito・Norio Suzuki・Dr. Kenichi Sugii

The applicability of TOFD (Time of Flight Diffraction) method for non-destructive inspection of bridge construction in the field is discussed in this paper. Non-destructive inspection was carried out on test pieces using the TOFD method, conventional ultrasonic testing, and radiation inspection. One of the test pieces was a real-life model of an I-girder welded joint; the other was a welded joint with hot-cracks in the welded metal. The results of the evaluation indicated clearly that the TOFD method was more promising than other methods in terms of defect detection ability.

まえがき = 橋梁溶接部の検査は、X線の使用が制限されるケースがあることから、超音波探傷が適用される。しかし、欠陥の種類・高さがわからない、探傷結果に直感性がない、記録性に欠ける¹⁾、などの問題が残されている。また、一部の橋梁で自動超音波探傷の適用例がみられるものの、前述の問題のすべてを解決するには至っていない状況といえる²⁾。本研究では、新しい自動超音波探傷の手法である TOFD (Time of Flight Diffraction) 法の橋梁分野への適用性を確認するため、実機サイズの I 桁溶接継手に対して探傷をおこない、その欠陥検出精度を、放射線検査(以下 RT と記す)および一部従来のパルスエコー法と比較した。また、意図的に溶接金属縦割れを内在させた溶接試験体についても、それぞれの探傷法の検出精度を比較検討した。

1. TOFD 法の概要

通常のパルスエコー法は第 1 図 a) に示すように、欠陥からの反射波を受信し、欠陥エコーの持続する距離から、欠陥の長さ、大きさを評価する方法である。しかしながら、高温割れや融合不良のように、欠陥が平面の場合、超音波が欠陥面に垂直に入射しない場合はエコー高さが小さくなり、エコー高さを基準とした評価方法では欠陥の形状を評価することが困難である。

これに対して TOFD 法は第 1 図 b) に示すように、広い指向角の超音波を発信させ、超音波が欠陥に当たることにより発生する微弱な回折波を検出して探傷するシステムであり、基本的に広い範囲を好感度で探傷していることになる³⁾。高感度で探傷することでノイズが懸念されるが、TOFD 法では縦波を使用していることからノイズが少ない利点がある。TOFD 法では欠陥の高さは、欠陥の上下端からの回折波の遅れ時間に基づきサイジングされる。また、TOFD 法では監視範囲が広いため、溶接線をまたいで対向プローブを移動させ、波形時間軸(板厚方向)を縦軸に、移動距離を横軸にとって画像表示する D スコープを採用するのが一般的である。

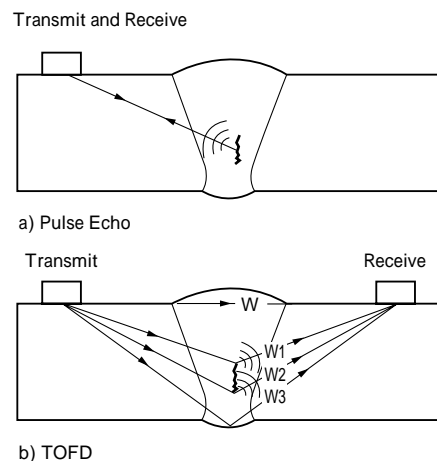
このシステムでは、探触子対の平行走査で探傷が完了し、欠陥の長さおよび高さの測定ができる、面状欠

陥の傾きによる検出性の低下がない、溶接線方向の断面透視記録がリアルタイムでえられる、などの特徴を有している。

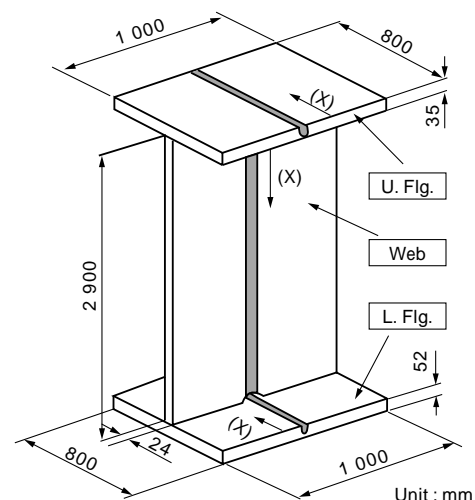
2. 実験方法

2.1 桁溶接継手モデル

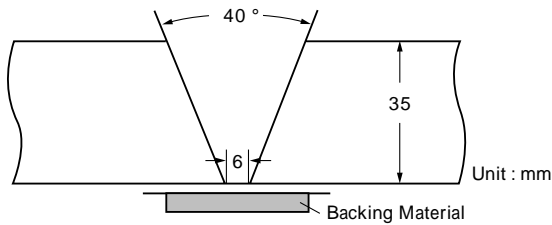
第 2 図に示す形状の少数主桁橋梁の I 桁用溶接モデル



第 1 図 TOFD 法の概要
Fig. 1 Outline of TOFD method



第 2 図 I 桁溶接継手モデル形状
Fig. 2 Shape of I girder weld joint model



第3図 溶接継手開先形状
Fig. 3 Groove shape of weld joint

に対して、ウェブおよびフランジとも溶接ポットにより、融合不良、ブローホールを介在させながら CO₂ 溶接による多層溶接をおこなった。そして、ウェブおよび下フランジ溶接部について、RT、TOFD 法およびパルスエコー法による自動超音波探傷を実施し、欠陥検出度合を比較した。また、RT 結果を基準として、適宜、断面マクロを採取し、検査結果との対応を調べた。

2.2 平板溶接継手試験片

第3図に示す開先形状の SM490A の継手（溶接長さ 600mm）に対して、市販の裏当材をもちいて CO₂ による多層溶接をおこなった。溶接に際し、第1層目の溶接条件に溶接金属の縦割れ（高温割れ）が発生しやすい条件を選定し、割れを内在させた。また、初層における割れが開口しないよう、裏面から溶接ビードを形成させ、形状を手入れした。このような方法で製作した試験片に対して、RT、TOFD 法およびパルスエコー法による自動探傷をおこない、欠陥検出度合を比較するとともに、TOFD 法における欠陥位置、欠陥高さについての検出精度を、断面マクロ調査との対応で詳細に調べた。

3. 試験結果

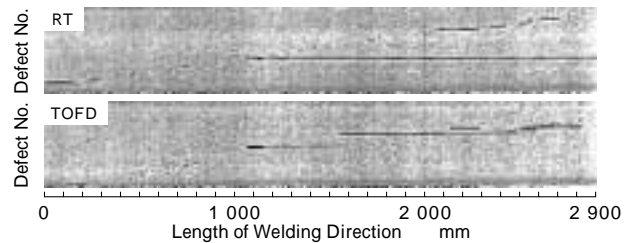
3.1 桁溶接継手モデルの探傷結果

第4図にI桁溶接モデルにおけるウェブの評価結果を示す。横軸は溶接線位置を、縦軸は欠陥数を表し、その欠陥の始点と終点を棒で表示している。TOFD 法による探傷結果は RT とよく対応している。

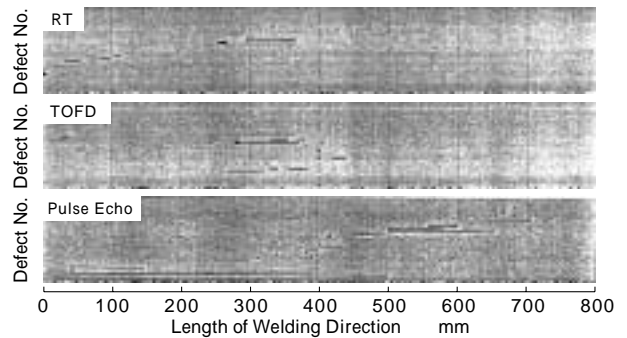
第5図は下フランジの評価結果を示すものであり、RT においてはウェブ直下にあたる 400mm 前後の箇所が探傷できていないが、その他の範囲においては、RT と TOFD 法の探傷結果はよく対応している。

いっぽう、パルスエコー法によるものは、RT、TOFD 法ともほとんど無欠陥領域である 500 から 800mm の範囲で、欠陥ありと判定されている。欠陥検出数について、ウェブにおいては RT で 58 個、TOFD 法で 158 個、下フランジにおいては、RT で 32 個、TOFD 法は 62 個検出されており、TOFD 法は微小欠陥も捕らえていることから、RT の 2~3 倍程度検出されている。パルスエコー法については、不合格欠陥と判定されたものが抽出されるため、両者に比べて検出欠陥数としては少なくなっている。

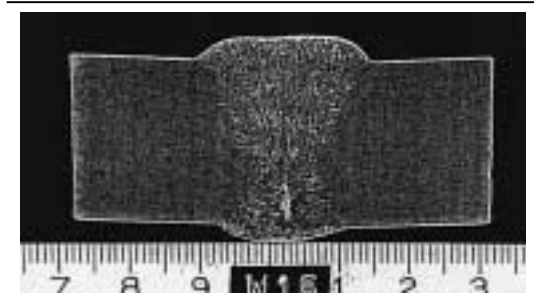
RT の探傷結果を基準として、ウェブおよび下フランジからそれぞれ断面マクロを採取し、探傷結果との対応を調べた。写真1はウェブにおける溶接線 2200mm の位置から採取した例であり、板厚方向に2箇所融合不良



第4図 I桁溶接継手モデルの探傷結果（ウェブ）
Fig. 4 Inspection result of I girder weld joint (web)



第5図 I桁溶接継手モデルの探傷結果（フランジ）
Fig. 5 Inspection result of I girder weld joint (flange)



Judgment of TOFD

Depth of Defect	d1 (mm)	6.6	12.6
	d2 (mm)	10.8	14.6
Height of Defect	h (mm)	4.2	2.0

写真1 断面マクロ組織
Photo 1 Macrostructure of cross-section

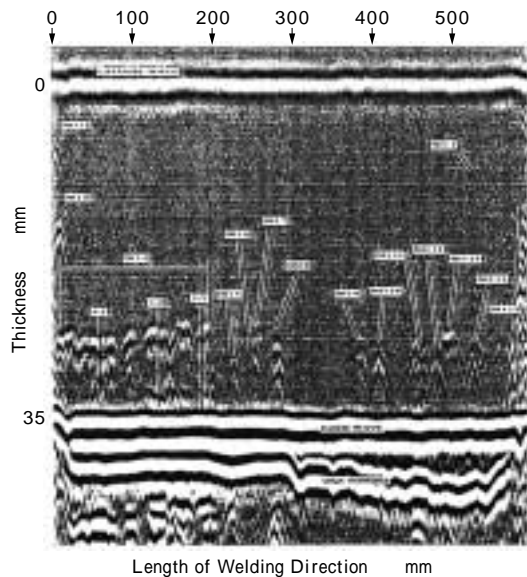
がみとめられる。TOFD 法での評価結果を併せて示しているが、2箇所の欠陥検出とともに、欠陥の位置についてもよく対応している。

下フランジにおけるパルスエコー法による判定結果で2列の欠陥が検出された溶接線 470mm 近傍の断面マクロを調べた結果、裏波ビードの形成が不十分である以外、内部欠陥はみとめられなかった。このことから、パルスエコー法よりも検出精度が高いといえる。

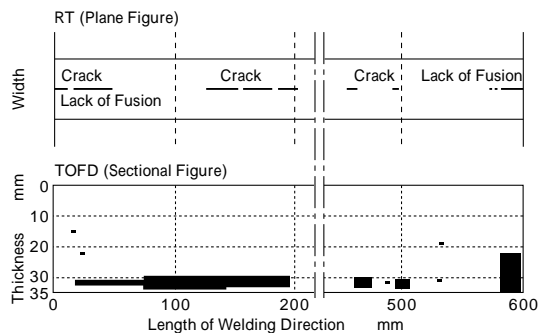
3.2 平板溶接継手試験片の探傷結果

第6図に TOFD 法による D スコープ画像例を示す。画像から、スタート部から溶接線 200mm 近傍にかけて、板厚底部に高さをもった欠陥が検出されている。

第7図に探傷結果を RT と TOFD 法で比較した例を示す。横軸は溶接線方向長さを示し、縦軸は RT については板幅方向の平面図、TOFD 法については板厚方向の深さを表しており、黒い帯はその欠陥の高さを表してい



第6図 TOFD法でのDスコープ画像
Fig. 6 Picture of D-scope in TOFD



第7図 RTとTOFD法の探傷結果比較
Fig. 7 Comparison between RT and TOFD of inspection results

る。溶接長 20mm 付近から 200mm にかけて, および 460 mm, 500mm 近傍での割れ状欠陥については, 両者の結果が比較的良く対応している。ただし, 溶接長 50~130 mm の範囲については, RT では欠陥を捕らえていない。なお, パルスエコー法による判定結果では, 溶接長 200~580mm で連続欠陥を含めて検出しており, RT および TOFD 法によるものと対応していない領域がみられた。

TOFD 法の検出精度を確認するため, 溶接線 200mm 程度までの領域に対して, 走査方向の欠陥位置検出分解能を向上させる開口合成手法を適用し, 欠陥分布の詳細を調べるとともに, 断面マクロとの対応を確認した。

写真 2 に溶接線 100mm 前後の領域から採取した断面マクロのカラーチェック結果を示す。

第 8 図に, 断面マクロにおける実欠陥と TOFD 法による詳細探傷結果との対応を示す。詳細探傷によると欠陥は分断されているが, No.13 断面は欠陥のない部分となっており 断面調査と一致していることが確認された。通常の D スコープ画像では, 欠陥の長さ方向両端の減衰波も崩落線状に表示され, 近接した欠陥を連続欠陥と判断しがちであるが, 必要に応じてこのような手法を適用することにより, 欠陥長さに対する検出精度を改善できることが確認された。

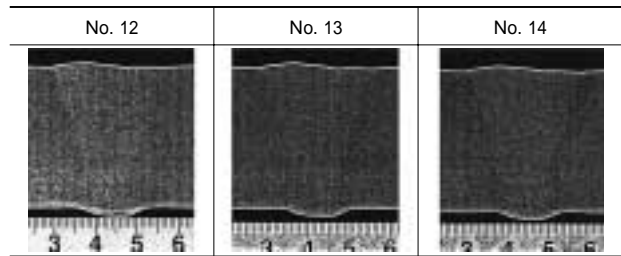
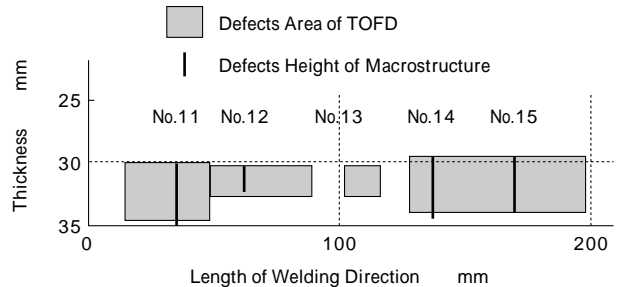


写真 2 断面マクロのカラーチェック結果
Photo 2 Liquid penetrant test result of macrostructures



第 8 図 TOFD 法における実欠陥との対応
Fig. 8 Correspondence of actual defects size in TOFD

第 1 表 探傷法の性能比較

Table 1 Comparison of performance in inspection method

Method	Pulse Echo	TOFD	RT
Sensitivity			
Measurement of Defect Length			
Measurement of Defect Height			×
Measurement of Location in Width Direction			
Effect of Defect Shape			
Effect of Bead Shape			
Function of Coupling Check			-
Restriction by Environment			
Inspection Speed			
Weight of Equipment			
Preserve of Data			
Suitability of Thick Plate			

4. 各探傷法の比較

第 1 表に各探傷法における欠陥検出能および適用性についての比較例を示す。TOFD 法での平行走査では欠陥の幅方向の特定ができない点が他の方法とくらべて劣っているが, その他の項目については, 探傷速度も含めてパルスエコー法に比べて優れていると考えられる。RT は欠陥の高さが測定できないこと, 使用環境により適用が制限される点が問題となる。

むすび=少数主桁橋梁モデル継手, および縦割れを内在させた継手に対して, RT, TOFD 法およびパルスエコー法により探傷をおこない, TOFD 法は検出精度, 検出能において RT を上回る傾向がみとめられた。また, 1 回の平行走査で継手全長を検査できる特長を有しており, 橋梁の溶接検査に十分適用が可能と判断される。

参考文献

- 1) 西田健陽ほか; 溶接技術, No.10 (1995), p.72.
- 2) 三木千寿; 東工大土木工学科報告, Vol.53 (1996), p.147.
- 3) 田中秀秋; 北海道土木技術講演会資料, (1997)