

I-89

TOFD法に於ける亀裂と超音波散乱の関係

(株)日本製鋼所 正員 田中 秀秋
北見工業大学 フェロー 大島 俊之

1. はじめに

近年の鋼橋の動向として、工場製作工程の省略化や部材数の減少を目指した合理化橋梁が注目されている。これは鋼橋の複雑な構造を単純化することにより鋼橋全体のコストダウンを図るものである。しかし、部材の肉厚は増加し、内部品質を評価する非破壊試験は難しくなる。

鋼橋の突き合わせ溶接部の非破壊検査には、これまでの放射線透過試験に変わって超音波探傷が多く適用されるようになり、厚肉溶接部に対しても超音波探傷が適用されている。

超音波探傷は、亀裂状欠陥などの内部欠陥の検出には有効であることから、広範囲に用いられているが、より詳細で高精度な探傷には、以下の問題があることが言われている。

- ①きずの性状判別が困難である。
- ②欠陥分布や断面形状を得る探傷には、高度な技術が必要である。
- ③探傷で得られるAスコープ波形と、内部状況とは直観性がない。
- ④探傷結果の再現性が悪く、バラツキがある。
- ⑤記録性に欠ける。

これらの問題を解決するため、最近では超音波探傷の自動化・機械化が進み、現場溶接部においても自動超音波探傷が適用され始めている。しかし、きずからの反射を用いる現在の探傷方法では亀裂高さの測定精度や経年変化の追跡等に十分とは言えない問題がある。

本文では、これらの問題を解決できる方法として注目される新しい超音波映像方法であるTOFD法を用いた探傷と、TOFD法を適用することによる亀裂先端での超音波散乱波について実験したので、その結果を報告する。

2. 通常の斜角探傷による溶接部の探傷

斜角探傷では、一探触子の振動子から超音波パルスを発振し、材料内に超音波を伝搬させる。この伝搬した波は欠陥部で反射し、その波(エコー)を振動子が受信することによって、きずの存在を検知している。この時、欠陥の大きさは、図. 1に示すように反射したエコー高さと、そのエコー高さの検出範囲によって求めている。

反射した超音波には、探触子固有の音波の拡がり量が含まれているが、その拡がり量は反射エコーの強さと相関があり、一定とはならない。また、反射エコーの最大高さは、超音波の入射方向ときずの反射面の角度によって変化するため一定とはならない。このように通常の斜角探傷では探触子の特性と欠陥部で反射する超音波の特性の影響を大きく受けるため測定精度向上には限界がある。

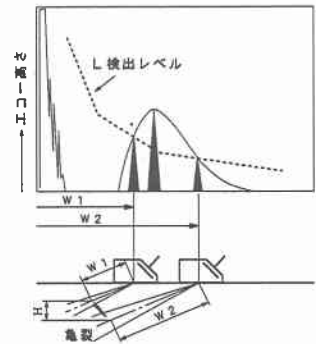


図. 1 斜角探傷による亀裂高さの測定方法

3. TOFD法 (TIME OF FLIGHT DIFFRACTION)

1970年代にイギリスで開発された手法で⁽¹⁾、図. 2 に示すように探触子を2個使い、欠陥部を跨いで片側から超音波を送信し、超音波が欠陥部に当り欠陥の上端・下端で散乱及び回折した波を反対側に設置した探触子で受信する方法である。

2個の探触子間の距離はあらかじめ固定しておき、この距離と欠陥端での散乱波の伝搬時間から、求められる距離によって得られる三角形から、計算によって探傷面からその欠陥端までの深さを求めるものである。これを探触子の移動距離を横軸に、深さを縦軸に取り、エコー高さを白黒濃淡で示すDスコープによって表示する超音波映像方法である。

使用する探触子には縦波を使用していることから横波に比べ同一周波数で波長が長く、更に、振動子寸法の小型なものをを用いていることから、超音波の拡がりりは20°以上ある。このため、探傷する材料厚さに対し探触子間と屈折角を適切にとり、超音波ビームの検出範囲が肉厚全体をカバーするように設定する。ビーム幅よりも厚い材料の場合は図. 3 に示すように2回又は数回の探傷によって全厚をカバーする。この時、探触子は通常の斜角探傷で行う前後走査は行わず、溶接線に沿った走査のみを行うため、数回の探傷を行っても通常の斜角探傷と大差ない時間で探傷を完了できる。

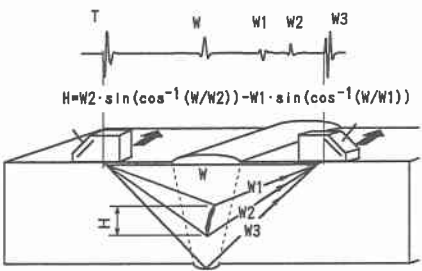


図. 2 TOFDによる亀裂高さの測定方法

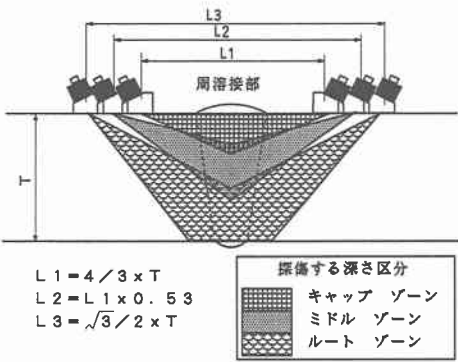


図. 3 材料厚さと探傷回数

表. 1 通常の斜角探傷法／TOFD法の比較

探傷方法	斜角探傷法	TOFD法
項 目		
探傷結果を得る所要時間	○	○
きず種類の判別	△	△
記録性と再現性	△	○
小さいきずの検出性	○	△
横断面のきず位置	○	×
きず高さの測定精度	△	○
きず指示長さの測定精度	△	△
継手形状に対する多様性	○	△

○：良 △：可 ×：不可

- TOFD法での探傷の特徴は
- ①きずの高さの測定精度が良い。
 - ②探傷結果の再現性が良い。
 - ③断面透視記録がリアルタイムに得られる。

などがある。通常の一探触子斜角探傷法による探傷とTOFD法を比較すると、表. 1 に示すようになる。TOFDの欠点としては、きずの横断面での位置がわからない、また、探傷できる被検査材の探傷側の形状に制限がある事である。

4. 人工欠陥を内在させた試験片のTOFDによる探傷結果

TOFD法の亀裂高さ測定精度を確認するため、図. 4 に示す菱形の人工欠陥を内在させた試験片を作成し、その高さ測定を行った。TOFD探傷によって得られるDスキャン映像では、図. 5 に示すように欠陥部の上

端エコー・下端エコーが明瞭に検出されている。しかし、人工欠陥の彫り込みを端面から行い、その間を溶接して継いだため、溶接部における音速の変化によって溶接部にて画像のうねりが見られる。その影響で欠陥長さを正確に測定することはできなかった。

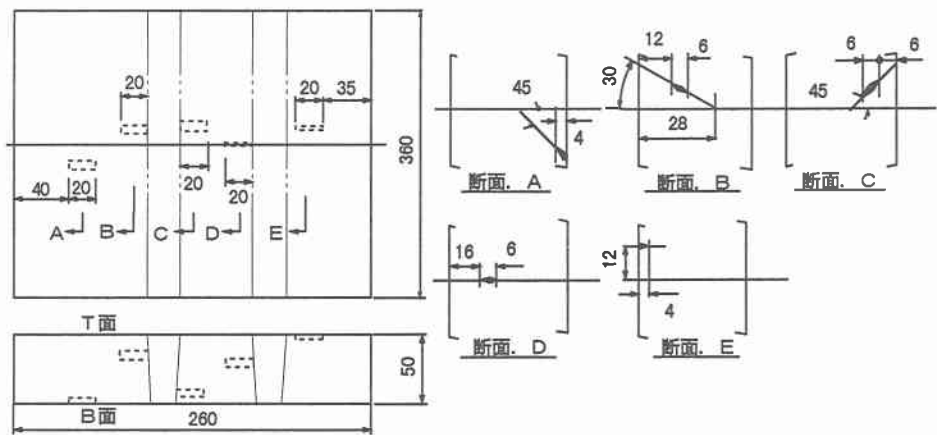


図. 4 人工欠陥を内在させた試験片の形状

表. 2 探傷方向と人工欠陥の
欠陥高さ測定結果

欠陥 番号	人工欠陥		T O F D 探傷結果	
	* 1 距離 (mm)	実体欠陥 高さ (mm)	T 面から の欠陥 高さ (mm)	B 面から の欠陥 高さ (mm)
A	4.8	4	不感帯	3.6
B	1.2	6	5.4	5.8
C	3.8	6	6.1	5.6
D	1.6	6	5.4	5.6
E	0	4	3.5	不感帯

* 1 T 面から欠陥までの距離

T面とB面の探傷による欠陥高さ測定結果を、表. 2 に示す。表中の不感帯は探傷面側において表層を伝搬する波によって、表層にある欠陥の下端を通過する波が分離できないために検出不可能となったものである。欠陥の高さ測定結果は、欠陥の傾きに関係なく実体欠陥に対し-0.1～+0.6mmと非常によく精度であった。

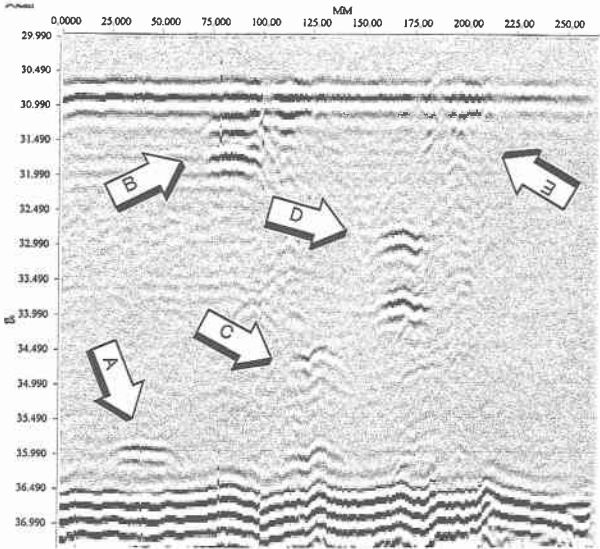


図. 5 人工欠陥のTOFDによるDスキャン映像

5. 亀裂と亀裂先端での超音波散乱波の関係

TOFD法では、通常の斜角探傷とは異なり、探触子2個を探傷する部位を跨いで配置し、一方から超音波を送信し、反対側の探触子にてきずの上端・下端での散乱波を検出する手法であるため、これまでの超音

波探傷で主に用いていた、きずの大きさ、傾き、形状と反射エコー高さの関係はここでは用いることはできない。T O F D法では反射波も検出されるが検出の目的とするエコーは、きずでの散乱波である。

このきずにおける散乱波の挙動は弾性波としての解析が行われ、コンピューターのシミュレーションによる波動伝搬の映像化などが行われている^{(2)・(3)}。また、亀裂に入射した弾性波の反射・回折の実験報告で、伊達ら⁽⁴⁾は亀裂先端の開き量を約 $0.1\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ の範囲で変化させたときの開き量と反射・回折エコーの強度変化を明らかにしている。しかし、これらの実験目的は亀裂先端での反射波である端部ピークエコーの評価が目的であり、縦波が亀裂で散乱・回折する波の実験例は少ない。

このため、ここでは亀裂の開口量と亀裂上端・下端の散乱波エコー高さの測定、及び、亀裂を傾けたときの上端・下端の散乱波エコー高さの測定を行った。

5.1 試験片形状

試験片はきず先端までの距離を一定とすることと、傷に対してあらゆる方向からの超音波の入射を行うために、図. 6 に示すように、外周面をきず先端を中心とした円形とした。この円形の周囲を探触子の接触安定のためと、探傷方向を正確にするため、 10° 毎の平面加工を行い36面体とした。また、疲労亀裂を入れるためV型の溝も加工した。この溝部に疲労亀裂を入れるため、図. 6 に示すA、B穴を用い引張りと圧縮の繰り返し応力を加え疲労亀裂を作成した。また、探傷感度の基準とするため図. 7 に示すように、図. 6 と同一形状でその中心に $\phi 1.6\text{mm}$ の横穴を加工した試験片も作成した。

疲労亀裂の開口量の測定は、超音波による測定が終了した後、亀裂部を2mm程度掘込みその面の亀裂を顕微鏡にて測定を行った。亀裂の開口量の調整は、図. 6 に示すA、B穴を利用してV溝先端の疲労亀裂に引張り及び圧縮の応力を加え、その開口量を変化させた。

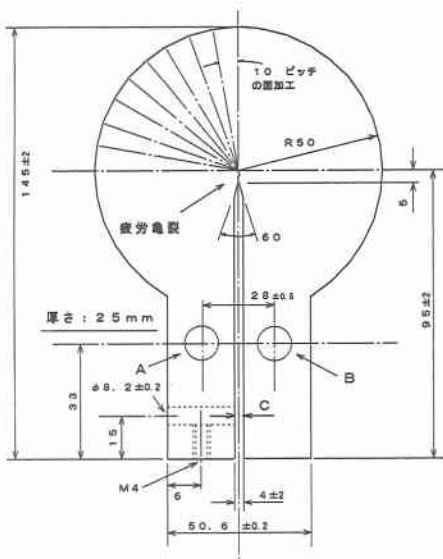


図. 6 疲労亀裂を内在させた試験片の形状

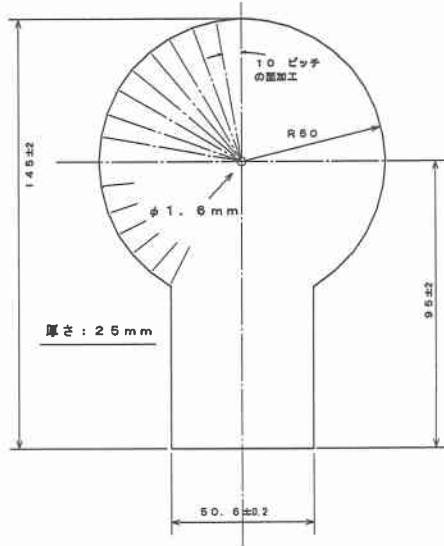


図. 7 感度基準用試験片の形状

5.2 超音波の入射方向と散乱波のエコー高さ

T O F D探傷時のきずに対する入射角と検出されるエコーの関係を調査するため、亀裂に対し超音波の入射角を左右同一とし、 $35^\circ\sim 75^\circ$ とした場合の亀裂先端の上端エコー、及び、下端エコーの高さを測定した。感度の基準は図. 7 に示す試験片で、同じ入射角における $\phi 1.6\text{mm}$ 横穴からの反射エコーを基準の0 d Bとした。この試験における亀裂の開口量は $0.5\mu\text{m}$ と一定とし、探傷に使用した探触子は周波数5MHzで振動子径は

φ6mmである。その結果、図. 8 に示すように入射角が狭い場合は上端エコー・下端エコーとも低くなっているが、入射角が大きくなると散乱波も高くなってくる。下端エコーと上端エコーの比較では下端エコーの方が3～5 dB高く検出される。

この結果から、亀裂の上端・下端エコーをより高く検出するには、探触子間を広く取り50～60° 程度の屈折角で探傷するのが良いことが判明した。

欠陥が傾いていることを想定し、超音波の入射角を片側45° に固定し、他方を35° ～75° に変化させた測定結果を、図. 9 に示すと、図. 8 と同様に送受信角が狭いところでは上端エコー・下端エコーとも低く、角度が広がると高くなって来ている。これは、欠陥が傾くと散乱エコーは低下する事を示しており、上端と下端では、上端エコーよりも下端エコーで著しく低下している。このため、下端エコーは上端エコーよりも低くなっており、図. 8 の場合の上端エコー・下端エコーの高さ関係が逆転している。これは、亀裂が傾くことにより亀裂面で超音波を受ける強度が低下するために起こるものと考えられる。このため、亀裂状欠陥が傾いている可能性がある場合は、送信・受信探触子の配置を変化させて探傷する必要がある。

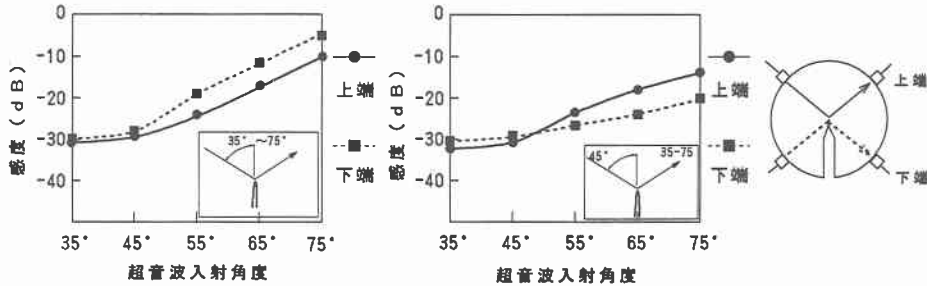


図. 8 入射角を左右同角にした場合の亀裂先端での散乱エコー 図. 9 片側45° に固定し他を変化させた亀裂先端での散乱エコー

5.3 亀裂開口量と散乱波エコー高さ

亀裂の先端に於ける開口量と、その先端に於ける散乱波のエコー高さについて、周波数5MHz、振動子サイズφ6mmの探触子を用い測定を行った。

亀裂先端の開口量は、測定位置により異なるため、表. 3 に示すように、図. 6 試験片においてA、B穴に応力を加え図中C位置における開き量を0～300μmとしたときの、亀裂先端から0.25, 0.5, 0.75mm位置における亀裂開口量の測定を行いなした。以下の図においては亀裂先端から0.5mmの位置を基準として作成した。そのときの、亀裂の状況を写真. 1、写真. 2 に示す。

超音波の入射角を45° とし、亀裂先端から0.5mmの位置に於ける開口量を0.5～6μmとしたときの上端・下端での散乱エコー高さは、図. 10 に示すように上端エコーよりも下端エコーの方が高く現れ、亀裂開口量が1μm以下になると急激に散乱エコーの高さが低下し、亀裂開口量が4μm以上になると散乱エコーの高さが一定となっている。また、図. 11 に超音波の入射角を65° とした場合の亀裂での散乱エコー高さを示すが、この場合も同様に、亀裂開口量が1μm以下になると急激に散乱エコーの高さが低下し、亀裂開口量が4μm以上になると散乱エコーの高さが一定となっている。これは、亀裂開口量が1μm以下では亀裂面が密着し、ほとんどの超音波は亀裂を通過するため散乱波の発生が低下することによるためと考えられる。亀裂開口量が1μm～4μmの範囲では亀裂面が弾性的接触しているため、一部の超音波が亀裂を通過し、その程度は弾性接触の状況で変化すると考えられる。亀裂開口量が4μm以上亀裂面ではほとんど弾性接触がなくなり、その影響を

受けないため散乱エコーの高さが一定となる。

亀裂開口量と超音波の入射角の関係では、図. 1 1 に示すように入射角45° よりも65° の方が散乱エコーは高く現れ、図. 8 の結果と一致する。

表. 3 試験片開き量と亀裂開口量 (μm)

*(1)	先端からの距離 (mm)		
	0. 2 5	0. 5	0. 7 5
0	0.2	0.5	0.3
5 0	0.5	0.7 *2	1.2
1 0 0	1.0	1.5 *3	2.5
1 5 0	1.5	3.0	4.5
2 0 0	1.5	4.0	5.5
2 5 0	1.8	5.0	6.5
3 0 0	2.0	6.0	8.0

*(1) : 図. 6 b の C 位置の変化量 (μm)

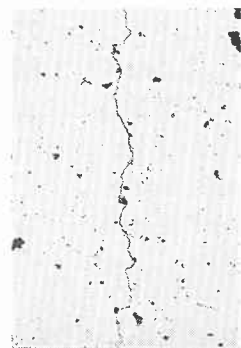


写真. 1 *2位置の亀裂
(X200)

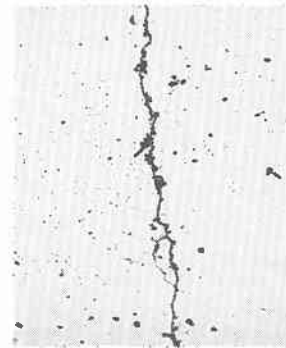


写真. 2 *3位置の亀裂
(X200)

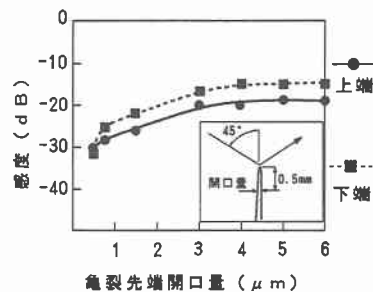


図. 1 0 入射角45° における
亀裂開口量と散乱エコー高さ

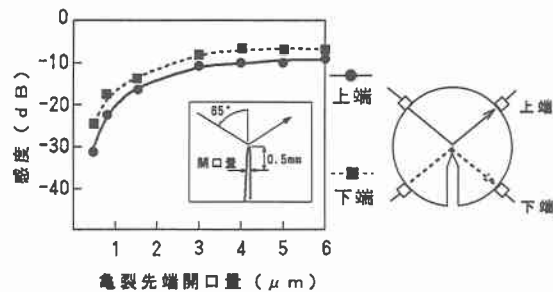


図. 1 1 入射角65° における
亀裂開口量と散乱エコー高さ

6. おわりに

通常の超音波探傷法であるAスコープ表示の問題点を、直観性のあるリアルタイムDスコープで表示するT OF D法は、探傷結果への信頼性を向上させるとともに、探傷の自動化を図るためにも有効な超音波探傷法と考えられる。このようにコンピューター・グラフィクス⁽⁶⁾を用いることにより、探傷結果を分かり易くするだけでなく、これまで見逃されていた情報をも表示し、より詳細な結果や新たな結果を得ることが可能である。今回の実験においては、亀裂先端での散乱波の特性が得られたので、これらの結果を用い特に厚肉の溶接部へのT OF D法の適用について、今後とも実験・検討を行っていく予定である。

《参考文献》

(1)W. E. Gardner, J. A. Hudson;ULTRASONIC INSPECTION OF THICK SECTION PRESSURE VESSEL STEEL BY THE TIME OF FLIGHT DIFFRACTION METHOD;Fifth International Conference on Nondestructive Evaluation in the Nuclear Industry(1982)

(2)春海他； 無限長帯状クラックによる弾性波の反射 ； 日本非破壊検査協会
第2分科会資料2788 (昭和55年)

(3)春海他； 端部エコーのシミュレーション映画 ； 日本非破壊検査協会
第2分科会資料21257 (1989)

(4)伊達他； 弾性波の反射・回折におよぼすき裂先端の開き量について ； 日本非破壊検査協会
第2分科会資料2903 (昭和57年)

(5)菅原、大島他； ON THE ACCURACY IMPROVEMENT IN ULTRASONIC INSPECTION BY USING COMPUTER GRAPHICS AND WAVEFORM ANALYSIS, 土木学会論文集、(1993)