

擬似欠陥を埋設した厚板溶接部の超音波探傷手法に関する検討

Investigation of Artificial Defect Detection Technique of Thick Steel Plate Welding by Ultrasonic Testing

(株)ズコーシャ ○ 正 員 高田 直幸 (Naoyuki Takada)
 北見工業大学 フェロー 大島 俊之 (Toshiyuki Oshima)
 北見工業大学 正 員 山崎 智之 (Tomoyuki Yamazaki)
 北見工業大学大学院 学 生 員 藤井 裕子 (Hiroko Fujii)
 (株)日本製鋼所 正 員 田中 秀秋 (Hideaki Tanaka)

1. はじめに

近年の公共事業費縮減とライフサイクルコスト (LLC) ミニマムの考えから、様々な分野で研究開発が盛んに行われている。橋梁の分野も例外ではなく、部材数の低減・溶接延長の短縮を図り、材料費や人件費を削減する少主桁形式の橋梁が注目されている。この形式は主桁間隔が広くなることによる支間方向の曲げ応力の増加に対応するため、フランジ厚は 100mm 程度にもなる場合がある。このような厚さの部材を従来のように添接板を用いて高力ボルト接合することはボルトの長さや添接板の厚さを考えると現実的に困難であるので、桁の連結は現場溶接で行われている。

溶接部の欠陥は疲労亀裂の発生や脆性破壊等を引き起こす構造上の欠陥となるので従来から非破壊検査で品質管理が行われている。しかし、現場溶接は高所等の作業性が悪いことや、気象条件にも左右されることから、溶接部の品質管理を適切に行わなければならない。非破壊検査は放射線透過試験 (RT)、超音波探傷試験 (UT)、磁粉探傷試験 (MT)、浸透探傷試験 (PT) 等が行われているが、放射線透過試験を例にとると板厚が増すことで X 線が十分に透過しない可能性があり、欠陥の検出が難しくなる。

本研究では、厚さ 100mm の鋼板溶接部に擬似欠陥を埋設した供試体を作成し、自動超音波探傷試験により欠陥の可視化を行った。また、得られた強度データおよび路程データから三次元画像を作成して欠陥の形状や位置を確認した。

2. 実験概要

本実験で用いた供試体は、板厚 100mm の鋼板 (SMn420H) を突合せ溶接する際、その内部に図-1 の様に擬似欠陥を埋設したものを作成した。A～D は 6×3mm となるように埋設した割れ状欠陥で、A と B の擬似欠陥は亀裂間隔 0.2mm のワイヤ加工スリットであり、C と D は亀裂間隔 0.1mm 以下のシャルピー試験破断片である。E～G は $\phi 5\text{mm}$ と $\phi 3\text{mm}$ のセラミックボールを埋設した球状欠陥である。これらの欠陥は表面から 50mm と 75mm に埋設した。割れ状欠陥の内、A と B は供試体表面に対して水平に亀裂面を設置したもので、C と D は鉛直に設置したものである。欠陥形状一覧を表-1 に示す。また、供試体表面は垂直探傷を行うために表面加工を行っている。

超音波探傷試験は図-2 で示すシステムからなる超音

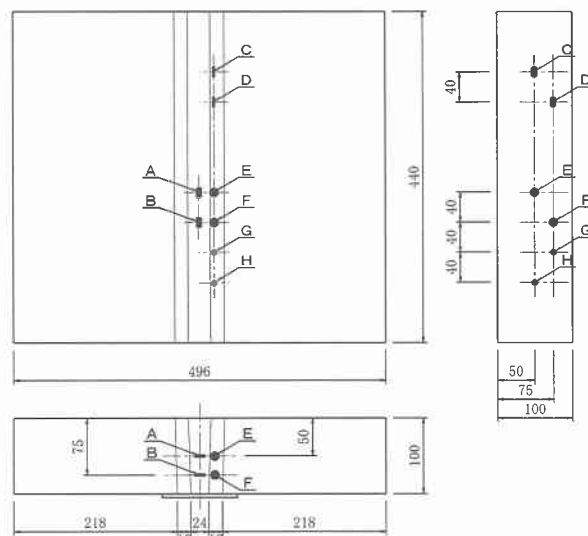


図-1 供試体 (単位: mm)

表-1 欠陥形状一覧

名称	形状	寸法	深さ	割れ方向	備 考
A	割れ	6×3mm	50mm	水平	ワイヤ加工スリット
B	割れ	6×3mm	75mm	水平	
C	割れ	6×3mm	50mm	鉛直	シャルピー破断片
D	割れ	6×3mm	75mm	鉛直	
E	球	$\phi 5\text{mm}$	50mm	—	セラミックボール
F	球	$\phi 5\text{mm}$	75mm	—	
G	球	$\phi 3\text{mm}$	75mm	—	
H	球	$\phi 3\text{mm}$	50mm	—	

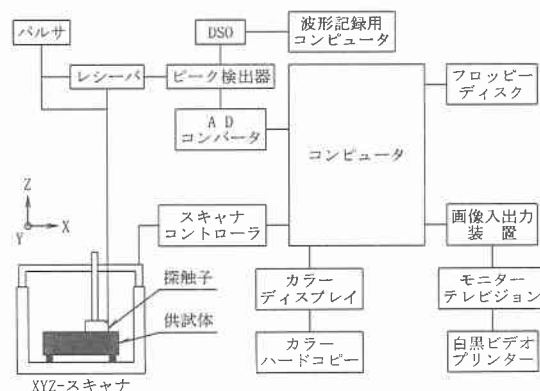


図-2 超音波探傷映像装置

波探傷映像装置（AT3000、日立建機（株））を用いた自動探傷を行い、グリセリンペーストを媒質とした1探触子の接触法で行った。探傷装置は共振周波数2MHzの垂直探触子を用いた。また、斜角探傷は屈折角が45度となる楔を入れて行った。実験は上記の装置により垂直探傷および斜角探傷でA～Gの欠陥を探傷した。斜角探傷はA、Bの欠陥に対しては図-1の表面左側から、C～Hに対しては表面右側から行った。探傷は欠陥を中心として40×40mmの範囲とし、ピッチ0.2mmで行った。また、受信波の増幅率（GAIN）は垂直探傷で35dB、斜角探傷で49dBに設定した。

埋設した疑似欠陥の位置および形状を確認するため、垂直探傷を行った。斜角探傷は図-3で示すように供試体底面に一回反射させた超音波を欠陥に照射する方法で行い、垂直探傷で得られた結果と比較した。この場合の超音波伝達経路は図-3（a）で示すように欠陥で反射した超音波が同じ経路で受信される場合と、図-3（b）で示すように別経路で受信される場合が考えられる。このことを考慮して欠陥深さを算出した。欠陥の深さの算出に用いた鋼材中の音速は、垂直探傷の場合では、縦波速度の5900m/s、斜角探傷の場合では横波速度の3230m/sを用いて算出した。欠陥深さが50mmと75mmの場合の理論的な伝達距離を表-2に、伝達時間を表-3に示す。

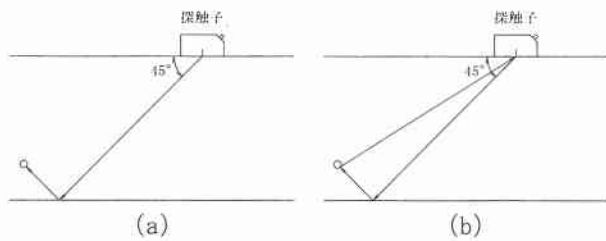


図-3 超音波伝達経路

深さ	垂直探傷	斜角探傷 経路（a）	斜角探傷 経路（b）
50mm	100	424.26	370.25
75mm	150	353.55	322.55

	深さ	経路	垂直探傷 (μs)	斜角探傷 (μs)
底面	100mm		33.90	87.57
欠陥	50mm	(a)	16.95	131.35
		(b)		114.63
	75mm	(a)	25.42	109.46
		(b)		99.86

3. 実験結果

欠陥H（球状欠陥、φ3mm、深さ50mm）の垂直探傷で得られた波形データを図-4に、斜角探傷で得られた波形データを図-5に示す。これらの波形の中で残響エコーとは超音波が探触子内部や楔内部で反射を繰り返したエコーで、この範囲内に欠陥が存在した場合は検出が不可能となる、いわゆる探傷不能領域と呼ばれている。垂直探傷および斜角探傷で得られた波形データから亀裂

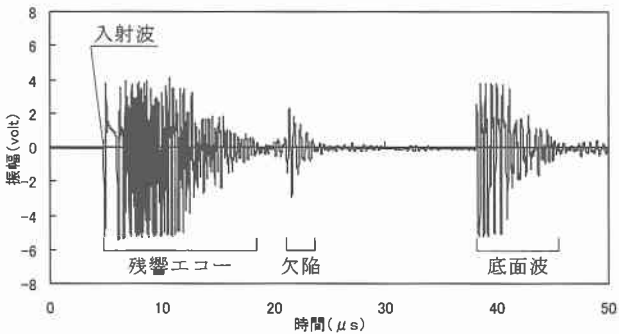


図-4 垂直探傷波形（欠陥H）

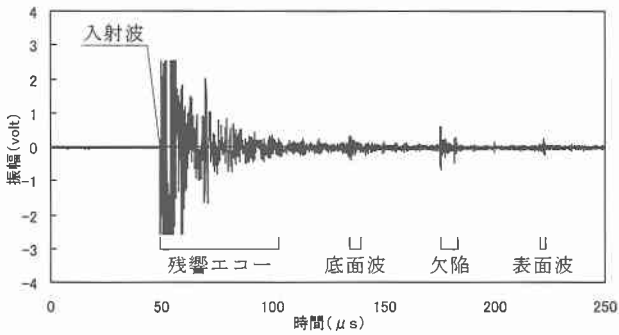


図-5 斜角探傷波形（欠陥H）

表-4 欠陥深さ測定一覧（単位：mm）

名称	深さ	垂直探傷(d)	斜角探傷(d')	d-d'
A	50	47	44	3
B*	75	74	59	15
C	50	48	52	-4
D	75	72	77	-5
E	50	49	51	-2
F*	75	72	78	-6
G*	75	71	79	-8
H	50	48	47	1

*底面波を87.57μsとして算出

深さを算出した一覧を表-4に示す。*印がついている欠陥B、F、Gは底面波が判断できないので表-3で示した底面までの理論時間（87.57μs）を用いて計算した。欠陥Bにおける斜角探傷で得られた深さは垂直探傷と比較して15mmの差がある。これは、疑似欠陥を埋設する際に発生した欠陥であると考えられる。その他の欠陥においても垂直探傷と比較して1～8mmの誤差がある。これは、斜角探傷で探傷した場合、表-3で示したように路程が長くなるので、ビームが拡大したことと、減衰が大きくなり、GAINを増加させて測定したことによるものと考えられる。欠陥D以外の斜角探傷は図-3の超音波伝達経路において（a）で示した経路であることが理論的な伝達時間と比較して予想できる。しかし、図-6で示す欠陥Dの斜角探傷は（a）と（b）で示した経路の2通りで伝達したことがわかる。これは、欠陥Dが表面に鉛直な割れ状欠陥で、底面に近いことが原因と考えられる。

経路（b）は欠陥からの反射角が45度ではないので深さを求めることができない。しかし、経路（a）より伝達距離が短く、割れ状欠陥の端部からの反射なので振幅は大きくなり、欠陥からの波形を取り出して可視化した場合、経路（b）によるピークが表示されることになるので深さの評価は注意が必要である。

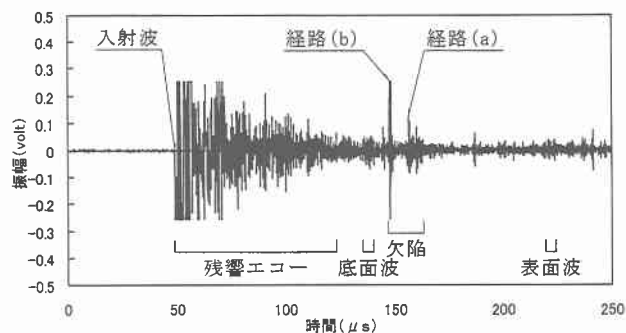
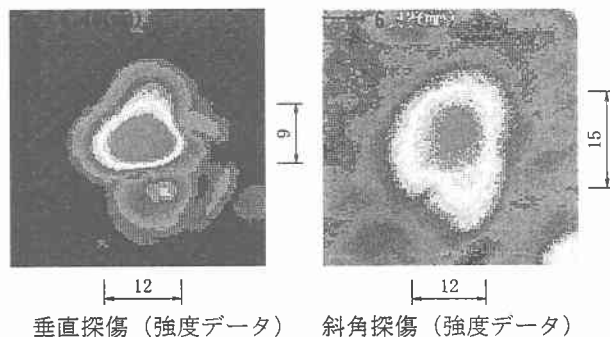


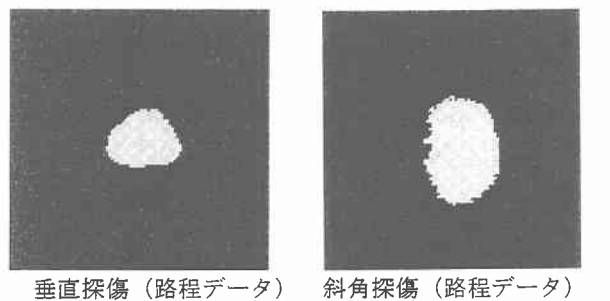
図-6 斜角探傷波形 (欠陥D)

次に、それぞれの欠陥を自動探傷により可視化した強度データ画像 (40×40mm) と、強度データと路程データを合成して三次元化した画像を示す。強度データ 256 段階で測定されたデータを 16 階調 (赤～青) で表示しており、赤い部分 (画像の中心部) が強い反射を示している。また、三次元画像の平面軸は探傷位置を示し、高さ軸は路程を示す。白い部分が強い反射を示しており、路程が短いものを高く示している。

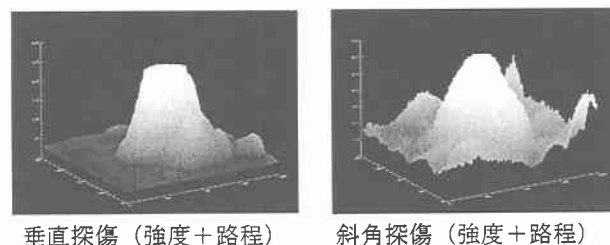
図-7 に欠陥AとEの探傷画像を示す。左側は垂直探傷画像であり、右側は斜角探傷画像である。また、上段は強度データで、寸法は欠陥の大きさを示している。中段は路程データで、下段は強度データと路程データを合成した三次元画像である。欠陥AとEの垂直探傷画像はそれぞれの欠陥同士が近いため、一つの大きな欠陥のよ



垂直探傷 (強度データ) 斜角探傷 (強度データ)

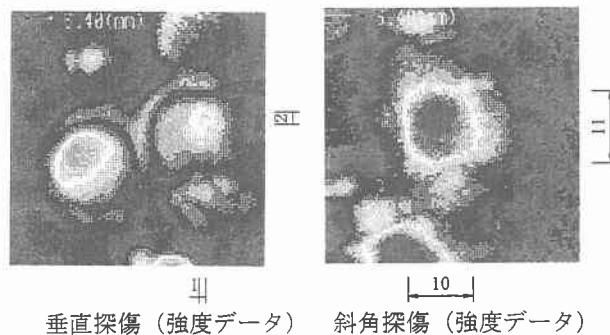


垂直探傷 (路程データ) 斜角探傷 (路程データ)



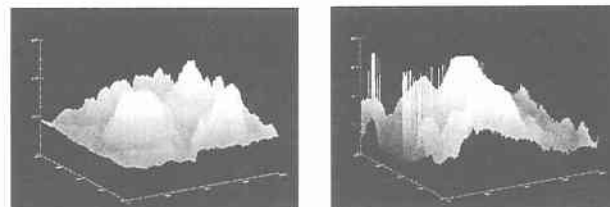
垂直探傷 (強度+路程) 斜角探傷 (強度+路程)

図-7 欠陥A、E探傷画像 (単位: mm)



垂直探傷 (強度データ)

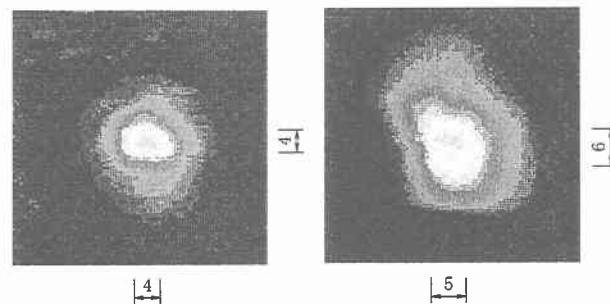
斜角探傷 (強度データ)



垂直探傷 (強度+路程)

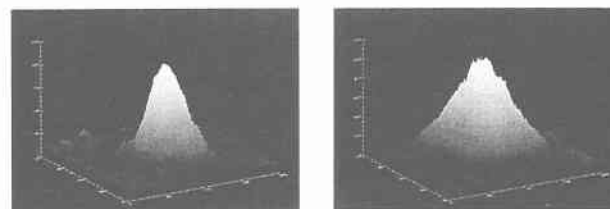
斜角探傷 (強度+路程)

図-8 欠陥C探傷画像 (単位: mm)



垂直探傷 (強度データ)

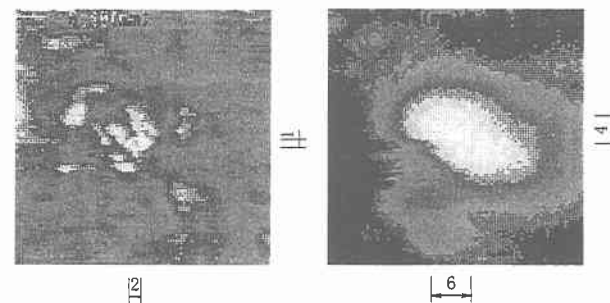
斜角探傷 (強度データ)



垂直探傷 (強度+路程)

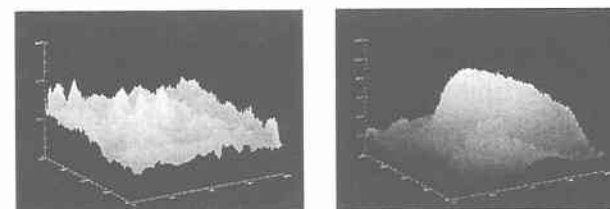
斜角探傷 (強度+路程)

図-9 欠陥G探傷画像 (単位: mm)



垂直探傷 (強度データ)

斜角探傷 (強度データ)



垂直探傷 (強度+路程)

斜角探傷 (強度+路程)

図-10 欠陥H探傷画像 (単位: mm)

うになっている。これは欠陥Aが超音波を反射しやすい面を向いていることや擬似欠陥を埋設する際に発生した欠陥の影響が考えられる。また、三次元化した画像や斜角探傷においても二つの欠陥は判断できず、一つの大きな面状欠陥のように現れた。図-8 に割れ状欠陥である欠陥Cの探傷画像を示す。垂直探傷画像を見ると欠陥と思われる位置では強い反射を得られていないが、斜角探傷画像を見ると強い反射が捉えられている。また、三次元画像を見ると、この反射源は面状の欠陥であることがわかる。このことは欠陥Cが鉛直割れであるので、垂直探傷では超音波の伝達方向と割れ方向が平行であるため可視化しにくく、斜角探傷で欠陥形状が可視化できたためである。しかし、斜角探傷で得られた欠陥の大きさ(11×10mm)は擬似欠陥の大きさ(6×3mm)より、大きくなっている。これは、GAINの違いもあるが、斜角探傷の路程が垂直探傷に比べて324mm長いことで超音波が拡散したためと考えられる。

次にφ3mmの球状欠陥で、深さが異なる欠陥GとHについて比較する。欠陥Gの探傷画像を図-9に、欠陥Hの探傷画像を図-10に示す。それぞれの欠陥で垂直探傷画像を比較すると、擬似欠陥の大きさがほぼ正確に表現されている。しかし、欠陥Hの画像は擬似欠陥の他にも多くの反射が見られる。この時の探傷波形は図-4に示したが、欠陥による反射波が残響エコー(探傷不能領域)の近くに存在するためと考えられる。図-9の三次元画像からは球状の欠陥形状がはっきりとわかるが、反射強度がもっとも高い部分を中心に円錐形状を示している。これは、使用した探触子が焦点を持たないタイプであるので超音波が拡散し、欠陥形状をシャープに捉えることができないためである。そのため、欠陥周辺に存在する別の欠陥を図-7のように判別できないことがある。また、三次元化した画像でも、強度データ・路程データはゲート内のピークに対するものであるので、小さな欠陥が他に存在する場合でも可視化することができない欠点を持っている。

次に、斜角探傷画像を比較すると、欠陥Hは欠陥Gに比べて反射波の範囲が広いことがわかる。これは、二つの欠陥の深さがそれぞれ75mmと50mmにあるため、反射経路の距離が異なり、欠陥Hの方が71mm長いと考えられる。三次元画像からは球状の欠陥と判断できる。

最後に、それぞれの欠陥の垂直探傷画像と斜角探傷画像を比較すると、垂直探傷では欠陥の大きさがほぼ正確に現れているが、斜角探傷では垂直探傷の2倍程度まで拡大している。この原因も反射経路の距離によるものであると考えられる。

4. まとめ

本実験を行った結果から次のことが得られた。

- (1) 超音波探傷試験の斜角法(屈折角45度)によって、100mmの厚板中の欠陥を検出することが可能である。
- (2) 強度データと路程データから三次元画像として可視化することで表面の形状や深さを判断することができる。
- (3) 探傷画像から欠陥の位置、形状を推測することは可能であるが、斜角探傷では実際の欠陥より大きく現れるため、大きさの把握には路程との相関関係を明らかにする必要がある。

本実験により垂直探傷によって探傷する方が精度良く欠陥形状を判定することがわかったが、実際の突合せ溶接部を垂直探傷する時は表面の状態を平滑に加工しなければならないため、迅速な探傷を行えない。今後は、得られた探傷結果から路程の長さや超音波ビームの広がりとの相関関係を求め、斜角探傷においても欠陥の大きさが判定できるようにする必要がある。また、反射時間ごとの周波数解析を行うことができるウェーブレット変換を用いて波形処理を行うことで、探傷不能領域である残響エコー内にある欠陥の検出が可能であるか検討する必要がある。探傷不能領域での探傷が可能になれば、厚板の斜角探傷でも図-3で示したような底面で1回超音波を反射させずに、直接欠陥に照射する方法が可能であるので、路程が短くなり、超音波の減衰や拡散等の影響が少なくなることから、精度の高い探傷が可能になると考えられる。さらに、溶接部の表面加工を行っていない供試体による探傷も必要であると考えられる。

本論文をまとめるにあたり、北見工業大学の赤坂宏昌氏には実験において多大なご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本学術振興会製鋼第19委員会編：超音波探傷法(改訂新版)、日刊工業新聞社、昭和49年7月
- 2) (社)日本建築学会：鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査基準・同解説、昭和48年5月
- 3) 佐藤：溶接・接合工学概論、理工学社、1990年8月
- 4) 藤井、田中、小枝、寺田、大島：超音波探傷による厚板溶接部欠陥検出の検討、土木学会第56回年次学術講演会、P.184、平成13年10月