爆着クラッド鋼の接合強さと非破壊試験結果との関係*

篠原 申之**

Relation between the Results of Nondestructive Testing
and the Strength of Explosively Bonded Clad Steel*

by Nobuyuki Shinohara**

The relation was investigated, between nondestructive tests (electro resistance method and ultrasonic method) and destructive tests (shear strength test and ram tensile strength test), with explosively bonded steel, SUS316L (6.5 mm) + ASTMA204 (22 mm), which contains unbonded area.

The electro resistance method, the JIS ultrasonic method by the reference block and Cross's ultrasonic method by the amplitude difference provide quantitative results, while the JPI ultrasonic method by the damping of multiple reflection produces only qualitative results and requires some delicate manipulations. The indicate voltage of electro resistance method represents the shear strength, and the amplitude difference of Cross's ultrasonic method corresponds to the shear strength and ram tensile strength.

For the nondestructive tests at the boundary between completely bonded area and unbonded area, the position of the probe has significant influence on the test results.

1. 緒 論

クラッド鋼の接合状況を非破壊的に試験する方法として、電気抵抗法あるいは種々の超音波探傷法が提案されている。しかし従来の研究ではこれらの非破壊試験結果の相互の比較検討及び判定結果と接合強さとの関係などについては十分解明されていない。本研究では接合不良部を含む爆着クラッド鋼を用いて、電気抵抗法及び三種類の超音波探傷法、すなわち超音波減衰法による JPI 法¹⁾、対比試験片を用いる JIS 法²⁾及び境界面エコー高さと底面エコー高さの比による Cross の方法³⁾による判定結果の相互の比較と、これらの非破壊試験結果とせん断試験及びはく離試験との関係について考察した。

2. 実験方法

2.1 供試材

板厚 22 mm の ASTMA 204 鋼板に板厚 6.5 mm の SUS 316 L 鋼板を爆着したもので、爆着クラッド鋼メーカーにおける超音波探傷試験⁴⁾の結果、非接合部を含むため不合格となった 140×650 mm の爆着クラッド鋼を入手して実験に用いた。

2.2 電気抵抗法による接合状況の測定

使用した電気抵抗式探傷器は日進電機製の“スメック

ゲージ”で、元来き裂深度計として開発されたものであるが、原理的にクラッド鋼の接合状況の測定にも応用可能である⁵⁾。

探触子には標準四針の P-410 形を用い、端面近くを測定するときは端面効果による誤差を避けるため、端面と接触子との距離を通電接触子の間隙よりも大きくして測定した。供試クラッド鋼板を 30×30 mm の区画に区分し、接合不良端面から 30 mm, 45 mm, 60 mm の線上の各区画について測定した。

2.3 超音波探傷法

超音波探傷器は帝国通信製の UFD-S1-H 形、探触子は 5 Q 20 N 又は 7 Q 20 N、接触媒質はマシン油を用いた。非接合部を含む供試クラッド鋼板を Fig. 1 のように 30×30 mm の63区画に区分し、それぞれの区画について次の三種類の超音波探傷試験を行った。Fig. 1 の斜線の範囲は爆着クラッド鋼メーカーの超音波検査で非接合部と判定された圧域である。

Fig. 1 Test divisions of nondestructive test

*原稿受付 昭和55年5月6日(昭和55年度春季全国大会にて発表)

**正 員 徳島工業短期大学 Member, Tokushima Junior Technical College

Fig. 2 Reflection patterns of multiple bottom echo (JPI method)

Fig. 3 Reflection patterns of ultrasonic test (Cross's method)

2.3.1 超音波減衰法 (JPI 法)

日本石油学会 (JPI) のステンレスクラッド鋼板の超音波探傷基準¹⁾では、Fig. 2 のように底面からの多重反射波の指示波形の大きさと分布状態を観測して超音波の減衰状態から完全接合形、不完全接合形及びはく離形に定性的に判定する。

この実験では探触子は 5 Q 20 N リジェクションは零、感度は STB—GV 15—4=10%として、供試材の各区画を合せ材側から探傷し、底面からの多重反射波の減衰状態を観察、JPI の判定基準に従って完全接合形、不完全接合形及びはく離形に分類した。

2.3.2 対比試験片法 (JIS 法)

JIS のクラッド鋼の試験方法²⁾に従って、供試材の完全接合部より合せ材側のみぞを入れた対比試験片を採取、探触子 5 Q 20 N を用い、リジェクションを零とし、完全接合部の底面エコー高さを80%として、対比試験片及び供試材の各区画をそれぞれ母材側より探傷して欠陥エコー高さを求めた。JIS の評価方法に従って欠陥エコー高さが対比試験片の欠陥エコー高さ以上のときその区画を非接合部、以下のとき接合部とした。

2.3.3 境界面エコー高さと底面エコー高さの比による方法 (Cross の方法)

C. O. Cross³⁾の提案した境界面エコー高さと底面エコー高さの比より接合状況の評価するには次の測定手順に従った。

(1) まず探傷波形を求め、Fig. 3(a) のように境界面エコー高さ A_i 又は底面エコー高さ A_b の小さい方をある一定の高さ h_i になるよう減衰器を調整し、そのときの減衰器の読みを AdB とする。

(2) Fig. 4 (b) のように A_b 又は A_i の大きい方が h_i 高さになるよう減衰器を調整し、そのときの減衰器の読みを BdB とする。

(3) 以上のようにして求めた減衰器の読み AdB と BdB の差 $(A-B)$ dB を求める。

(4) $A_i < A_b$, すなわち接合状況のよい場合の $(A-B)$ dB 値を正とし、 $A_i > A_b$, すなわち接合状況の悪い場合の $(A-B)$ dB 値を負とし、 $(A-B)$ dB 値の符号の正負で接合状況の評価する。

Fig. 4 は $A_i < A_b$ のときの測定手順を示したものである。

この実験では、探触子 7 Q 20 N を用い、リジェクションを零として、供試材の各区画を前に述べた手順で探傷した。JPI 法、JIS 法ともに探傷周波数は 5 MHz を用いたが、この方法で 7 MHz を用いた理由は、周波数を高くしたほうが A_i と A_b の分離がよいためである。

2.3 せん断及びはく離試験

非破壊試験結果と破壊試験結果との対応を求めるため、非破壊試験を終った供試材より JIS²⁾のせん断試験片及び JIS の解説に掲載されているはく離試験片 (外径 15 mm, 内径 12 mm) を採取した。すなわち Fig. 1 の No. 0, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 15, 19 よりせん断試験片を、No. 4, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18 よりはく離試験片を採取した。このうち No. 2 は供試材の端面より 75 mm の位置、No. 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 は端面より 30 mm の位置、その他は端面より 15 mm の位置が試験面の中心にほぼ一致するようせん断試験片及びはく離試験片の採取位置をきめた。

3. 実験結果

3.1 電気抵抗法

端面から 30 mm の距離では測定区画により指示電位は大きく変化しており、電位の低い区画は接合状況の良いこと、電位の高い区画は接合状況の悪いことを示している。一方端面から 45 mm 及び 60 mm の距離では、どの区画も指示電位は低く、接合状況の良いことを示している (Fig. 4)。

3.2 超音波減衰法 (JPI 法)

JPI 基準¹⁾の解説に従って波形をはく離形、不完全接合形、完全接合形に分類して Fig. 5 に示す。端面より 15 mm の距離では、区画 No. 1, 2, 16, 17, 18 は完全接合形、区画 No. 14, 15 は不完全接合形、その他の区画はいずれもはく離形の波形を示す。45 mm の距離では No. 20 のみはく離形で他はいずれも完全接合形の波形を示し、75 mm の距離ではいずれの区画も完全接合

Fig. 4 Results of electro resistance test

Fig. 5 Results of ultrasonic test (JPI method)

Fig. 6 Results of ultrasonic test (JIS method, tested from base metal)

Fig. 7 Results of ultrasonic test (Cross's method)

形の波形を示す。

3.3 対比試験法 (JIS 法)

JIS²⁾に従って、母材側から探傷した結果を Fig. 6 に示す。これを JIS の非接合部の評価方法に従って分類すると、端面より 15 mm の距離では、区画 No. 1, 2, 3, 15, 16, 17, 18 以外はすべて非接合部であり、端面より 45 mm の距離では、区画 No. 20 のみ非接合部であったが、75 mm の距離では非接合部は存在しなかった。

3.4 Cross の超音波探傷法

境界面エコー高さと底面エコー高さの比より接合状況の評価する Cross の超音波探傷法による実験結果を Fig. 7 に示す。境界面エコー高さ A_i と底面エコー高さ A_b との比 A_i/A_b は、クラッド鋼の接合片況のみならず合せ材及び母材の材質で決る密度、音速及び板厚の組み合わせによっても異なるので、材質及び板厚組み合わせに無関係に A_i/A_b の値を接合状況の一般的な評価基準とすることはできない。そのため $A_i = A_b$ のとき、すなわち $(A_i - A_b)$ dB 値が零のときを接合状況の評価基準とし、 $(A_i - A_b)$ dB 値が正の符号のときを接合部、負の符号のときを非接合部と判定することとした。それによると Fig. 7 より端面より 15 mm の距離の区画では No. 1, 2, 15, 16, 17, 18 は接合部、それ以外は非接合部と判定され、端面より 30 mm の距離の区画では No. 4, 5, 6, 7, 11, 12, 20 が非接合部、端面より 45 mm の距離の区画では No. 20 のみが非接合部と判定された。

3.5 セン断試験とはく離試験

せん断試験及びはく離試験片の試験後の破断面の一例を Fig. 8 に示す。右上のせん断試験片は加工中に合せ材が脱落した非接合部であり、破面は錆びて黒色を呈している。上中央のはく離試験の破面は黒色の非接合部と金

Fig. 8 Fractures of shear test specimens and tensile test specimens

属光沢の完全接合部の破面が混在している。左上のせん断試験片の破面は全面に金属光沢を呈し、完全接合部であることを示している。このように爆着クラッド鋼では非接合部（はく離部）と完全接合部とに明瞭に分れており、それらの中間部は存在しない。したがって破壊試験結果は Table 1 のように非接合部と完全接合部との面積比によって決まる。なお非接合部の混在する試験片でも ASTM⁶⁾ のせん断強さ 20,000 psi (14 kg/mm²) 以上の値を示している。

Table 1 Results of destructive test

Results of shear test											
Section No.	0	1	2	3	5	6	7	8	15	19	
Distance from the edge, mm	15	15	75	15	30	30	30	30	15	15	
Shear strength, kg/mm ²	12.3	45.8	45.5	20.7	0	0	42.6	42.6	42.0	16.2	
Fractured surface	△	○	○	△	×	×	△	△	△	△	
Results of ram tensile test											
Section No.	4	9	10	11	12	13	14	16	17	18	
Distance from the edge, mm	15	30	30	30	30	30	15	15	15	15	
Ram tensile strength, kg/mm ²	0	57.0	24.5	14.9	19.7	34.0	22.4	94.6	93.4	90.7	
Fractured surface	×	△	△	△	△	△	△	○	○	○	

○ bonded area × unbonded area
 △ mixture of bonded and unbonded area

○ indicate voltage VS ram tensile strength
 △ [Ai-Ab]dB VS shear strength
 ● [Ai-Ab]dB VS ram tensile strength

Fig. 9 Relations between destructive test results and nondestructive test results

4. 結果に対する考察

4.1 非破壊試験方法と判定結果

電気抵抗法 (Fig. 4), 超音波減衰法 (Fig. 5), 対比試験片法 (Fig. 6), Cross の方法 (Fig. 7) それぞれによる判定結果を比較すると, 全体としては相互により対応を示しているが, これらの判定結果を各区画ごとに比較するとわずかの相違がみられる。すなわち端面から 15 mm の距離の区画では, 非接合部及び完全接合部では判定結果はよく一致しているが, 非接合部と完全接合部の

混在する不完全接合部 (区画 No. 0, 3, 14, 15) では測定法により判定結果が異なる。この理由は超音波減衰法による判定が定性的であること, また対比試験片法及び Cross の方法は定量的とはいえ非接合部と完全接合部との境界線上を探傷するときは, 探触子の位置のわずかなずれによって探傷面における非接合部と完全接合部の面積比が異なるので, 測定位置により判定結果が微妙に異なることは避けられないためである。

4.2 非破壊試験結果と破壊試験結果との対応

Fig. 9 に電気抵抗法による指示電位とはく離強さとの関係及び Cross の方法による A_i-A_b の dB 値とせん断強さ, はく離強さとの関係を示す。なお対比試験片法によるエコー高さと破壊試験結果との間には相関性が認められなかったので図示しなかった。

Cross は炭素鋼の母材に材質の異なる数種類の合せ材を接合させたロールクラッド鋼及び爆着クラッド鋼について, A_i-A_b の dB 値とせん断強さとの関係を求めているが, Fig. 9 の結果は Cross の結果と類似している。

はく離試験結果は試験片寸法への依存度が大きいので, クラッド鋼の試験方法として公式に認められていないが, Cross の方法による超音波探傷結果では, はく離試験結果はせん断試験結果に劣らない良い相関性を示した。

なお電気抵抗法による指示電位とはく離強さの関係にはよい相関性が認められた。電気抵抗法は安価な装置, 定量的で容易な測定法などの点から, 超音波探傷法に劣らない非破壊試験方法と言える。

5. 結 言

電気抵抗法及び三種類の超音波探傷法 (超音波減衰法対比試験片法及び Cross の方法) により, 接合不良部を含む爆着クラッド鋼の探傷試験を行った結果を要約すると次のとおりである。

(1) 破壊試験の結果, 接合不良部を含む爆着クラッド鋼は完全接合部と非接合部 (はく離部) とより構成されていることがわかった。従って超音波減衰法で “不完全接合形” と判定された箇所は, 完全接合部と非接合部の混在する部分を探傷した結果, 中程度の多重反射波が観察されたに過ぎない。

(2) 超音波減衰法は定性的な判定法で熟練を必要とするが, 電気抵抗法, 対比試験片法 (JIS 法) 及び Cross の超音波探傷法は定量的な判定法で熟練を必要としない。ただし JIS 法は対比試験片を準備する必要がある。

(3) いずれの非破壊試験方法でも, 完全接合部と非接合部 (はく離部) の混在する部分の探傷では, 接触子又は探触子のわずかな位置のずれによって判定結果が微妙

に変動することは避けられない。

(4) 電気抵抗法の指示電位とはく離強さ, Cross の方法の A/A_0 の dB 値とせん断強さ及びはく離強さとの間にはよい相関性が認められたが, 対比試験法 (JIS 法) のエコー高さと破壊試験結果との間には相関性が認められなかった。

参 考 文 献

- 1) 日本石油学会: ステンレスクラッド鋼板 及び 加工基準, JPI-7R-

- 19-67 (1967) 及び解説
 2) JISG0601-77, クラッド鋼の試験方法及び解説
 3) N.O. Cross: An ultrasonic test for measuring the shear strength of clad plate, 6th Inter. Conf. on NDT, June, 1970, Hannover, Germany
 4) 旭化成工業(株): BA クラッドの規格・基準集録, HPI クラッド委員会資料 No. HC-25-70 (1970)
 5) 三菱重工業(株): 爆着部の電気抵抗非破壊検査, 日本溶接協会化学機械溶接研究委員会爆接小委員会資料, No. B-15-70 (1970)
 6) ASTM A-264-71, Specification for Stainless Cr-Ni Steel Clad plate

平板の突合せ溶接進行中における グループ間隙の変化について*

第3報 熱源前方に開先内仮付け溶接を有する場合

佐藤 邦彦**, 野原 和 宏**

Changes of Root Gap during Welding in Case of Butt Weld Joints*

3rd Report: In Case of Butt Weld Joints with Tack Welds

by Kunihiko Satoh** and Kazuhiro Nohaara**

The present paper deals with the effect of welding conditions, plate length and tack weld pitch on changes of root gap during welding in butt weld joints. The calculations of changes of root gap during welding are carried out under various conditions of heat input, plate length and tack weld pitch, using the finite element method explained in the previous report²⁾. In this case it is assumed that the rigidity of tack weld is infinite.

The main conclusions obtained in this report are summarized as follows:

- (1) In case of butt weld joints with tack welds under the condition of relative small tack weld pitch, the root gap at heat source closes between the weld start position and the first tack weld position. The behaviour of released displacement at tack weld position is divided into the following classes. In the first case the released displacement at tack weld position increases as the heat source moves. In the second case the released displacement increases after decreasing as the heat source moves.
- (2) The maximum closing displacement between the weld start position and the first tack weld position $((u_H)_s)$ and the released displacement at the end tack weld $((u_H)_e)$ have the following characteristics. The remarkable displacement $((u_H)_e)$ increases as the heat input (q/vh) increases under the condition of constant molten pool length l_M lead from the mechanical point of view (l_M) . It decreases as the molten pool length (l_M) increases under the condition of constant q/vh .

The remarkable displacement $((u_H)_e)$ increases as the heat input (q/vh) increases under the condition of constant l_M .

Effect of plate length (L) on $(u_H)_e$ depends on the welding conditions $(q/vh, l_M)$ and the range of plate length.

The remarkable displacement $(u_H)_e$ increases as the tack weld pitch increases.

1. 結 言

前報¹⁾で、熱源前方に面外拘束材を有する場合の突合せ溶接中のグループ間隙の変化について述べたが、開先

*原稿受付 昭和55年2月4日 (溶接学会第57回WD委員会にて発表)

**正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka University