Self-reacting tool を用いた摩擦攪拌接合の制御方法の検討*

田中 直**, 熊谷 正樹**

Optimization of controlling method of FSW using self-reacting tool*

by TANAKA Sunao** and KUMAGAI Masaki**

Friction stir welding (FSW) by using the self-reacting tool offers a solution to conventional FSW problem by using the fixed tool. Self-reacting tool is composed of upper and lower shoulder. To weld distorted material without inner pores, controlled pinch force between upper and lower shoulder succeeded in self-reacting FSW. The optimum welding condition of self-reacting tool was not wider than that of fixed-tool. Mechanical property of weld section by using the self-reacting tool was as strong as by fixed tool.

Key Words: FSW, self-reacting tool, optimum control, 6N01, mechanical property

1. 緒 言

FSW (Friction Stir Welding の略, 以下 FSW とする) は1991年に The Welding Institute が開発¹⁾して以来, 従来の溶融溶接に比べて接合部の欠陥が少なく, 入熱が少ないことから, 画期的な接合方法として注目を浴び, 研究が盛んに行われた²⁾. それらの成果により, FSW が鉄道車両³⁻⁵⁾, 船舶, 航空機⁶⁾等の多くの輸送機材に適用されてきた. しかし, 従来の溶融溶接から FSW に置換する場合, FSW 装置および施工治具の導入のため高い初期投資が必要なこと, FSW 施工の課題, 継手性質のデータが不足していること, 規格への登録の必要との課題が見えてきた. 施工の課題は, 従来の固定ピンでの接合の場合, 突合せ面の底部に攪拌不十分により底部の欠陥が発生する場合がある (Fig. 1). また, パイプを製作する際, 固定ピンの FSW により丸めた板を接合する場合, 裏当て治具の搬入および搬出に工数がかかるため, 溶融溶接と比べて, FSW のメリットが出にくい. そこで, 本研究では底部の欠陥を抑制するためおよび裏当て治具の搬入搬出の工数削減のため, 裏当て治具を備えた Self-reacting tool の適用を検討した⁷⁾. 特に, Self-reacting tool による接合制御方法の検討および供試材を挟み込むピンチ荷重が接合部継手に及ぼす影響について調査した.

2. 実 験 方 法

材質は鉄道車両で汎用的に使用している 6N01-T5 材, 板厚は 8 mm, 長さ 400 mm とした. 回転工具は, 上下を挟み込

む Self-reacting tool と従来法の Fixed tool を使用した. Fixed tool による FSW は, 生産性が高いため鉄道車両, 橋梁で一般的であることから, Self-reacting tool の比較として検討した. 回転工具の最適制御方法を調査するため, 回転工具を位置固定制御および荷重固定制御で接合した. 制御した荷重は, 主軸荷重⁸⁾とした. 制御は他に主軸トルク制御があるが, ここでは主軸方向の影響を見るため, 位置固定制御および荷重固定制御の比較とした⁹⁾. ピンチ荷重は, 下側ショルダの荷重から上側ショルダの荷重を減算した値である. 接合開始は, 上側と下側のショルダの位置関係を同じとした. 回転工具の形状は, Self-reacting tool 及び Fixed tool とともにショルダー径 23 mm, ピン径 10 mm, ピン円周部 M10 の溝加工を施した形状と統一した. 接合可能範囲を調査するため, 接合速度は 250~1000 mm/分, 回転速度は 500 rpm, 750 rpm, 1000 rpm とした. 継手の特性を比較するため, 引張試験を実施した. 引張試験片は, 接合方向に対して直角方向に, 接合部を中央に切り出して, JIS5 号片に成形して, 引張試験を実施した.

3. 実 験 結 果

3.1 制御方法の検討

回転工具の最適制御方法を調査するため, JISH4100 に規定される型材の曲がりを想定した接合を実施した. 供試材の尾部に板厚 1 mm の板を挟み込むことで底上げして, 供試材に傾斜を付けた状態で Self-reacting tool を用いて接合した (Fig. 2). 回転工具の制御は位置および荷重の 2 通りで実施した. 各制御方法で接合した結果を Fig. 3 に示す. 位置固定制御による接合の場合, 上側及び下側ショルダの位置は一定であり, 接合尾部でバリが発生した. 接合部断面組織においても攪拌部と母材との接合部表面の境界に 1 mm 程度の段差が発生しており, 疲労強度の低下が懸念される. 一方, 荷重固定制御による接合の場合, 上側及び下側ショルダの位置

*受付日 平成23年4月8日 受理日 平成23年12月6日 平成16年度秋季全国大会で発表

**正 員 住友軽金属工業(株) Member, Sumitomo Light Metal Ind., LTD.

Fig. 1 Schematic view of FSW by (a) Fixed tool and (b) self-reacting tool.

Fig. 2 Schematic view of FSW experiment.

Fig. 3 Effect of control method on weld bead and macrostructure.

は、約 1 mm 上昇し、バリはほとんど発生しなかったことから供試材表面に追従していると推定される。接合部断面の組織においても攪拌部と母材との境界に段差はほとんどなかった。以上の結果から、Self-reacting tool による FSW 接合の制御は、荷重固定制御が位置固定制御より良い。

3.2 Self-reacting tool におけるピンチ荷重の影響

Self-reacting tool を用いて接合する場合、接合パラメータとして従来の回転速度および接合速度以外に供試材を挟み込むピンチ荷重がある。ピンチ荷重は、下側ショルダ荷重から上側ショルダ荷重を減算した値である。荷重固定制御でピンチ荷重が接合部継手に及ぼす影響について調査した。接合

速度 400 mm/min においてピンチ荷重を 5 kN とした結果、ビード表面に亀裂が認められた。ピンチ荷重を 9 kN とした結果、バリが多発した。そこで、ピンチ荷重を 6~8 kN の範囲で、断面欠陥の有無を調査した (Fig. 4)。ピンチ荷重 6 kN および 7 kN では接合部に内部欠陥が発生した。一方、8 kN では接合部は健全であった (Fig. 5)。よってピンチ荷重を 8 kN に設定することにより内部欠陥は抑制可能であることが分かった。以上の結果から、板厚 8 mm における Self-reacting tool による接合は可能であると判断した。

3.3 接合可能範囲

Self-reacting tool は、上下のショルダが材料に接触するこ

Fig. 4 Effect of pinch force on weld quality.

Fig. 5 Macrostructure of welds on each pinch force.

Fig. 6 Effect of self-reacting and fixed tools on weld quality.

とから、従来の Fixed tool よりも摩擦熱が多く発生し、接合速度の向上が期待できる。接合可能範囲を Self-reacting tool と Fixed tool とで比較した結果、接合可能な最高速度は Self-reacting tool が 400 mm/min で Fixed tool が 1000 mm/min であり、接合可能範囲は Self-reacting tool が Fixed tool より狭い範囲であった (Fig. 6)。Fixed tool による接合は、ショルダの接触を安定させるため、位置固定制御とした。

3.4 継手の特性

Self-reacting tool による攪拌部は、Fixed tool の攪拌部と同様に、微細な再結晶になっている (Fig. 7)¹⁰⁾。引張試験の破断位置は、Self-reacting tool と Fixed tool とともに攪拌部ではなく、接合中央部から 10 mm 離れた熱影響部であった (Fig. 8)。断面での破断位置は、Self-reacting tool は表面に対して直角、Fixed tool は攪拌部に沿って傾斜した形状であった。破断位置は、最軟化部の硬さである (Fig. 9)。熱影響部の範囲は、Self-reacting tool と Fixed tool とともに、接合中央部から 20 mm であ

り、同等であった。継手の機械的性質も Self-reacting tool と Fixed tool とともに同等である (Table 1)。

4. 考 察

接合可能な最高速度は、Self-reacting tool が 400 mm/min で Fixed tool の 1000 mm/min より遅い結果となった。Self-reacting tool は材料の上面および下面から均等に加熱、攪拌されるため、Fixed tool より接合速度が速くなると推測したが、遅い結果であった。この原因は調査中であるが、Self-reacting tool による高速度接合での欠陥は内部の板厚中央に認められたことから、材料の上面側の攪拌および下面側の攪拌との交点で攪拌が不十分であったと推測する。最適な制御方法は、本実験では位置の制御は固定としたが、材料表面の高さを読み取った後、位置を変動させるフィードバック制御にすれば、ひずんだ材料の対応が可能となると推定する。

機械的性質は、Self-reacting tool および Fixed tool とともに熱影

Fig. 7 Macrostructure of welds by the self-reacting tool.

Fig. 8 Fractured area on fixed tool and self-reacting tool.

Table 1 Mechanical property on welding condition.

welding speed (mm/min)	tool type	UTS (MPa)	YS (MPa)	EL (%)	fractured zone
250	Self-reacting	214	124	15	HAZ
	Fixed	202	124	13	HAZ
400	Self-reacting	200	124	14	HAZ
	Fixed	192	116	13	HAZ
Base metal		289	269	10	-

響部の破断であったが、引張強さおよび伸びが Self-reacting tool が高かった。伸びが高い原因は、破断形態の差と推測する。Fixed tool の破断形態は、攪拌形態が材料表面に対して斜角のため、せん断破断が支配的である。Self-reacting tool の破断形態は、くびれを伴う延性破断であることから、破断形態が異なるためと推測する。

Fig. 9 Hardness profiles of welds by self-reacting tool and fixed tool.

5. 結 論

- (1) Self-reacting tool の最適制御方法を検討した結果、ひずんだ材料に対して位置固定制御より荷重固定制御が良好であった。
- (2) Self-reacting tool のピンチ荷重が 6N01-T5 材の板厚

8 mm の接合部に与える影響を調査した結果、接合速度 400 mm/min では、ピンチ荷重 8 kN で欠陥がなく、健全な接合部であった。

- (3) Self reacting tool の接合部を引張試験した結果、破断位置は、接合中央部から 10 mm 離れた熱影響部であり、攪拌部は破断することなく、健全であった。

参 考 文 献

- 1) Thomas W M, Nicholas E D, Needham J C, Murch M G, Temple-Smith P and Dawes C J: European Patent Specification 0615480B1.
- 2) K. Colligan: Welding Research, 78-7 (1999), 229-237.
- 3) H. Hori, S. Makita, and H. Hino: Proceedings of 1st International Symposium on Friction Stir Welding, Rockwell Science Center, June (1999).
- 4) T. Kawasaki and T. Makino: Proceedings of 2nd International Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, June (2000).
- 5) D. Otsuka and Y. Sakai: Proceedings of 7th International Symposium on Friction Stir Welding, Awaji island, (2008).
- 6) 後藤智彦, 坂口秀明, 佐藤広明ら: 三菱重工技報 42 (2005), 234-237.
- 7) M. Skinner, R. L. Edwards: Proceedings of 4th International Symposium on Friction Stir Welding, Utah, May (2003).
- 8) S. Hirano and K. Okamoto: Proceedings of 3rd International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, (2001).
- 9) 社団法人溶接学会 産報出版(株) 摩擦攪拌接合 (2006) 36.
- 10) G. D. Sylva and C. A. Widener: Proceedings of 8th International Symposium on Friction Stir Welding, Timmendorfer Strand, May (2010).