論文

熱間バー接合用強変形せん断接合法の開発

—— 熱間エンドレス圧延用バー接合への

固相接合方式の適用に関する研究 第 4 報 ——

堀井 健治* 舟本 孝雄** 芳村 泰嗣*

古元 秀昭*** 李 鍾燮****

Development of Super Deformation Joining Method for Hot-Bar Joining

—— A Study of Solid-State Joining for In-Line Bar Joining of Endless Hot Rolling IV ——

Kenji HORII*, Takao FUNAMOTO**, Yasutsugu YOSHIMURA*,

Hideaki FURUMOTO*** and JongSub LEE****

(Received on November 19, 2008)

The endless hot rolling concept was introduced to meet the demand for diverse hot-rolled steel sheet products produced by a process that is cost-effective compared with the conventional batch-type process. Endless rolling involves joining the head and tail ends of two bars after rough rolling. A new solid-state joining technology was proposed to instantaneously obtain a joint with high integrity using relatively simple equipment. The process requires no external heating since the bar temperature on the line is sufficiently high for joining. In this report, we present the super deformation joining (hereinafter referred to as “SDJ”), specifically, the introduction of the developed process and the effects of joining conditions on the characteristics of joints. The new model, the type II SDJ device, improved joint shape and performance compared with the type I SDJ device, mentioned in a previous paper. In laboratory tests, the joint strength of carbon steel was within 70 - 85 % of the base metal strength, which is from 394 to 440 MPa, and the grain size across the joint interface was very fine. Elucidating the SDJ mechanism and evaluating the characteristics of joints to rolling remain to be performed.

Key words: endless hot rolling, conventional batch-type process, joining, solid-state joining, super deformation joining (SDJ), joint strength, stroke ratio, lap.

1. 緒 言

強変形せん断接合(Super Deformation Joining: 略称「SDJ」)法は、バー材 2 枚を重ね、刃物でこれらを同時にせん断することによって生ずる変形で得られた新生面同士を、せん断終了と同時に接合する方式である¹⁾。

第 3 報²⁾では、SDJ 法を熱間エンドレス圧延用のバー接合に適用するため、接合部を 1 個所とするタイプ I-SDJ 装

置を考案しその接合性について検討した。市販の SS400 において重ね合せ面に厚さ 14~24 μm の酸化スケールが存在しても、上下刃物のラップが 0.5~5.0 mm の広い範囲で高い接合強度を得ることができた。しかし、タイプ I-SDJ 装置は、接合部に曲がりを生ずるためクロップ分断処理が難しくなるなど接合部形状に課題を残していた。また、幅 20 mm の狭幅での接合性評価では、実機における幅 700~1900 mm 程度のバー材の接合性を評価するには不十分であった。

本報では、これらタイプ I-SDJ 装置の課題を克服するためタイプ II-SDJ 装置を考案し、広幅材での接合特性を検討したので報告する。

2. 熱間バー接合用強変形せん断接合法の概要

2.1 タイプ II-SDJ 装置の特徴

Fig. 1 は、タイプ I および II の 2 つの SDJ 装置を示す。タイプ I-SDJ 装置においては、接合部に曲がりを生じバー

* 三菱日立製鉄機械(株) 〒108-0014 東京都港区芝 5-34-6
Mitsubishi-Hitachi Metals Machinery, Inc.

5-34-6 Shiba, Minato-ku, Tokyo 108-0014, Japan.

** 日立協和エンジニアリング(株) 〒317-0072 日立市弁天町 3-10-2
Hitachi Kyowa Engineering Co., Ltd.

3-10-2 Benten-cho, Hitachi-shi 317-0072, Japan.

*** 三菱重工業(株) 〒733-8553 広島市西区観音新町 4-6-22

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

4-6-22 Kan-on-shin-machi, Nishi-ku, Hiroshima 733-8553, Japan.

**** POSCO

1, Goedong-dong, Nam-gu, Pohang, Gyeongbuk 790-785, Korea.

厚さ分の段差が生ずるため、実機でのクロップ分断処理が難しくなることや下クロップが長くなり歩留まりが低下するなどの問題が残った。これに対しタイプ II-SDJ 装置は、刃物に近接したクランプと刃物をセットとした上下刃物台がせん断方向に移動して接合するようにしたものである。クランプは油圧シリンダによって支えられ、相対する刃物によって重なり合ったバーがせん断される際に、バーからうける力に対抗し所定の力を作用させながらバーの水平状態を維持しつつバーとクロップと一緒にせん断方向へ移動する動作を実現させたものである。これにより、タイプ I-SDJ 装置のバー厚さ相当の大きな段差および曲がりがなくなり、クロップも最小の長さとなる。

Fig. 1 Two types of SDJ device

2.2 接合条件の定義と接合プロセス

Fig. 2 は、タイプ II-SDJ 装置の刃物まわりにおける接合条件の定義を示す。ストローク率 α_s は、ストローク量 D_p と試験片の板厚 t_b から算出される値である。ラップ L_o は、上下の刃物が水平方向でオーバーラップしている状態をプラスと定義した。 α_s と L_o の設定によって接合強度や接合角度 θ_j が変化する。刃物の突起は、接合部から外部へのメタルフローを抑え接合界面へ押圧力が作用するように働く。刃物の移動方向は垂直に対してやや傾斜している。これは接合角度 θ_j を小さくするように作用する。

Fig. 2 Definition of stroke ratio α_s , lap L_o and joint angle θ_j of the Type II SDJ device

Fig. 3 SDJ process

Fig. 3 は、SDJ 適用の接合プロセスを示す。ステップ 1 の部分デスケリングでは、接合部となる重ね合せ面の酸化スケール除去を目的として高圧水を噴射する。重ね合せでは後行材を加速減速して、先行材後端部に後行材先端部を接合に必要な十分な長さだけ重ねる。接合は刃物のせん断

動作により行われ、上下刃物の最接近間隔が接合厚さとなる。クロップ分断処理は、接合時生ずるクロップ連結部を分断して除去するものである。

本報では、曲がりや段差が少なくクロップ長さが短くなる方法として考案したタイプ II-SDJ 装置を用い、重ね合せ面の酸化スケール厚さが実機の接合過程において生じるものと同等の条件で、広幅までの接合特性検証を目的とした。

3. 接合特性

3.1 実験方法

(1) SDJ 基礎試験 Fig. 4 は、タイプ II-SDJ 装置の基礎試験機を示す。重ね合せた 2 枚の接合試験片を下刃物と下クランプの上にセットし、上クランプを下降させて接合材を保持した。次に、油圧プレスを用いて上刃物を下降させてせん断しつつ接合を完了した。接合中に生ずる垂直力と水平力をロードセルで測定した。基礎試験機では幅 100 mm まで接合可能である。

Fig. 4 Fundamental joining test device (Type II)

Fig. 5 Fundamental joining test procedure

Fig. 5 は、基礎試験機による接合試験の手順を示す。接合材の温度と重ね合せ面の状態を実際の熱間圧延に合わせるため、電気炉で 2 枚重ね状態で 1200～1300 °C に加熱し、出炉後に 2 枚を開放して重ね合せ面に酸化スケールを生成した。その後、高圧水で接合部位を部分的にデスケリングして再度重ね合せ、Fig. 4 のように基礎試験機へセットして接合を行った。接合後に、手作業でクロップ連結部を数回折り曲げてクロップを分断し、接合材から引張試験片などを採取し分析に供した。クロップ分断においては、接合部の接合開始位置とクロップ側の未接合部との間のクロップ連結部が分断されており、クロップ分断によって接合開始位置に変動が無いことから、クロップ分断による接合

部への影響は無いと考えられる。

各条件で接合を行った後、前報^{1), 2)}と同様に引張試験、接合部の断面組織観察、引張試験後の破面観察などを行った。断面組織観察は研磨、腐食後に光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡(SEM)で、引張試験後の破面はSEMで観察した。

(2) SDJ 広幅試験 Fig. 6 はSDJ 広幅試験機を、Table 1 はその主仕様を示す。SDJ 広幅試験機で接合できる最大幅は450 mmであり、接合手順はFig. 5と同様である。接合機はペンジュラム式で、接合時間は上下刃物の刃先が接合試験片に接触してから最接近して接合完了状態となるときのまでの時間と定義した。また、垂直方向の接合速度はFig. 2のストローク量 D_p を接合時間で割った値であり、接合時間内の平均速度である。この垂直方向の接合速度は最大150 mm/sであり、接合時間は通常1 s以下である。

Fig. 6 Layout of SDJ pilot plant (wide plate test)

Table 1 Specification of SDJ pilot plant

Item	Specification
Materials joined	SS400, SUS304 and others
Bar thickness	20~30 mm
Bar width	450 mm max.
High pressure descaler	~25 MPa
Joining machine	pendulum type
Joining time	~1 s
Vertical joining speed	150 mm/s max.
Crop removal	hydraulic cylinder stroke

Fig. 7 Schematic drawing of joining action of the pendulum type joining machine

Fig. 7 は、ペンジュラム式接合機の接合動作を示す。a) は待機状態を示すもので、クランク軸には2つの偏心があり、1つの偏心は上刃物と上クランプに、他の1つの偏心は下刃物と下クランプに連結されていて、クランク軸を回転させると上下刃物が接近離反する。また、クランク軸と

揺動軸がレバーで連結されていて、クランク軸を回転するとペンジュラムハウジングがバー進行方向に揺動する。重なり合った接合部が上下刃物間に進入してきたところでクランク軸を時計回りに回転させると、上下刃物が接近しつつペンジュラムハウジングが水平方向にも移動する。上下刃物が最も接近したときがb)接合完了位置となる。クランク軸をb)の状態からさらに時計方向に回すと刃物が離反していく³⁾。SDJ 広幅試験機では切り板での接合試験となるため、Fig. 4の基礎試験機と同様に、重ね合わせた2枚を下刃物と下クランプの上にのせて、クランク軸をまわして接合試験を行った。

3.2 実験結果および考察

接合材は、引張強度が394~440 MPaの炭素鋼(以下、CSと略す)およびSUS304を用いた。また、ラップ L_o を約8 mm一定とし接合試験を行った結果について述べる。

(1) 重ね合せ面の酸化スケール厚さ Fig. 8 は、部分デスケーリングから重ね合せまでの開放時間と酸化スケール厚さの関係を示す。□は後述する重ね合せ放冷法により、また、◆、■は液体ガラス凍結法⁴⁾により、酸化スケール厚さを測定した結果である。

T_d : Partial descaling temperature, p_d : Partial descaling pressure

□: CS, $T_d = 1170$ °C, $p_d = 25$ MPa

◆: CS, $T_d = 1050$ °C, $p_d = 15$ MPa

■: CS, Opening temp.: 1180 °C, no partial descaling

Note: 1) White points were measured by overlapping and natural air cooling. 2) Black points were measured by liquid glass freezing method

Fig. 8 Relationship between time elapsed from partial descaling and scale thickness

部分デスケーリング温度 T_d はデスケーリング時のバー材表面温度、 p_d はデスケーリング圧力を示す。デスケーリングの噴射距離は100 mmとした。 T_d が高いほど、部分デスケーリングから重ね合せまでの開放時間 t_e が長いほど、酸化スケールは成長している。重ね合せ放冷法では、幅100 mmの試験片を用いてFig. 5に示す部分デスケーリング(No. 3)から重ね合せ(No. 4)まで所定時間放置して酸化スケールを生成し、その後重ね合わせて室温まで空冷した後、断面を観察して酸化スケール厚さを測定した。■はFig. 5中を示す開放時(No. 2)のバー材表面温度が1180 °Cで、その後デスケーリングを行わないで所定時間開放後、液体ガラス凍結法で得られた酸化スケールの厚さである。□と■は、部分デスケーリング時および開放時のバー材表面温度が1170~1180 °Cで、そのときの酸化スケール厚さがほぼ0

μm と想定でき、その後の経過時間と酸化スケール厚さの関係がほぼ同一曲線上にあることから、重ね合せ放冷法では重ね合わせて室温まで空冷する間に酸化スケールが成長していないことを示していると考えられる。一方、実機では重ね合せ時に上下のバー材を完全に密着させることは構造的に難しく、上下刃物がバー材に接触する接合開始時に大気遮断状態となると考えられる。したがって、Fig. 8 の横軸の開放時間を部分デスケリングから接合開始までと考えて、実機条件での酸化スケール厚さを推定した。実機では、部分デスケリングから接合開始までの時間は4~9 sで、部分デスケリング時のバー材の温度は1100 °C以下であるので、接合時のCSの酸化スケール厚さは20 μm 程度であると考えられる。また、部分デスケリングを行わなかったときは、粗圧延後から接合開始まで50 s以上要するので、酸化スケール厚さは40 μm 以上であると考えられる。そこで、実機と同じ酸化スケール厚さとなるように部分デスケリングからの開放時間を調整して基礎試験機や広幅試験機を用いて接合試験片を作製し、接合部の強度、組織分析などを行った。

(2) 接合部の強度 Fig. 9 は、a)接合部の断面マクロ組織およびb)接合率 η_j とc)接合強度に及ぼすストローク率 α_s の影響を示す。接合材の板厚は重ね合せた状態で上が30 mm、下が28 mmであった。異厚接合の場合、薄い側の板厚 t_{bmin} と接合厚さ t_j を用い図中に示す式で α_s を求めた。この求め方によれば、同厚接合の場合はFig. 2に定義された α_s と同じ値となる。 η_j は接合部断面を研磨し鏡面まで仕上げた後、5と25倍の光学顕微鏡で観察し図中に示す式で算出した。 $L_{sl} \sim L_{sn}$ は、それぞれ接合長さ L_j 内で観察された酸化スケールの長さである。 L_j の範囲の接合界面には、部分的にやや大きな酸化スケールがランダムに存在している。 η_j は、 α_s が1.33以上では80%程度、 α_s が1.31では74%であり、 α_s が小さいと η_j が小さくなり、酸化スケールの介在が多くなる傾向にあった。接合部の引張強度(以下「接合強度」)は、 α_s が1.40以上で300 MPa以上の安定した値を示している。Fig. 9 a)の断面マクロ組織写真に矢印で示すところは接合開始位置と判断されるが、接合開始位置は α_s が大きくなると t_j より外側となり、 α_s が小さい1.31では t_j より内側となっている。 $\alpha_s = 1.42$ の接合は、刃物ストローク途中で $\alpha_s = 1.31$ の状態を通過したことになるので、 $\alpha_s = 1.31$ の状態からストロークが進行すると接合開始位置が t_j の内側から外側へ移動するものと考えられる。矢印で示す接合開始位置よりもクロップ側(L_j よりも外側)では、重ね合せ面の酸化スケールが引き伸ばされることなく残存し接合に至らなかった領域であり、接合開始位置は、接合前に重ね合せ面に存在した酸化スケールの影響を受けると考えられる¹⁾。接合開始位置が t_j より内側に存在する場合、引張試験過程で切欠きとして作用し接合強度を低下させると推測される。 α_s が小さい場合の接合強度の低下は、この接合開始位置が切欠きとして作用したことと L_j の範囲に存在した酸化スケールが多く η_j を下げたことによると考えられる。

Fig. 10 は、接合強度に及ぼす接合速度の影響を示す。接合速度が40 mm/s以上では、接合強度はほぼ一定であることがわかった。接合速度が2~4 mm/sの極低速の場合、接合時間は12~24 sを要し上下刃物が接触している時間が長

くなったため、接合材は接合開始時1000 °Cであったが接合完了時には接合部まわりの温度が低下し黒色化していた。極低速のときに接合強度が低くなったのは、接合部の温度が極端に低かったことが要因であると考えられる。

Fig. 9 Effect of stroke ratio α_s on joint ratio η_j and joint strength; Material: CS, Size: Thickness 30 and 28 $\times$ width 100 mm, $p_d = 25$ MPa, Tensile strength of base metal: 436 MPa

Fig. 10 Effect of vertical joining speed on joint strength; α_s : 1.40 ~ 1.44, Tensile strength of base metal: SUS304 - 674 MPa, CS - 394 MPa

Fig. 11 は、板幅方向位置と接合部の対母材強度比 β_j の関係を示す。CS接合材の母材の引張強度は394 MPaであり、 β_j は接合強度を母材の引張強度で割った値である。板幅方向位置における接合強度は、板幅端部を除きほぼ等しい値となっており、 β_j が0.70~0.85程度であることがわかった。引張破断面の観察によれば、板幅端から数mmの範囲に未接合部が見られることから、板幅端部の接合強度が低いのは、この未接合部の影響がでていると考えられる。デスケリング圧力 p_d が高いほど接合強度が高くなる傾向があるが、これはデスケリングによって酸化スケールがより少なくなっているためと考えられる。

Fig. 11 Relationship between position in width direction and β_j ; Material: CS, Size: Thickness $28 \times$ width 200 mm, α_s : 1.40, Tensile strength of base metal: 394 MPa

Fig. 12 は、CS 接合材の引張破断面の SEM 観察結果を示す。接合材から幅 30 mm の引張試験片を切り出して引張試験を行い、破断面中央部を観察した。破断面はディンプル状の延性破面を示しており、良好な接合状態であることがわかった。

Material: CS,
Chemical compositions
(mass %): $0.15\text{C} - 0.14\text{Si} - 0.53\text{Mn} - 0.021\text{P} - 0.023\text{S}$,
Size: Thickness $28 \times$ width 100 mm,
Tensile strength: 287 MPa

Fig. 12 SEM fractograph of tensile-tested joint interface; Tensile strength of base metal: 440 MPa

(3) 接合部の組織分析 **Fig. 13** は、**Fig. 9** のストローク率 $\alpha_s = 1.43$ の場合の接合部断面と母材原質部のミクロ組織を示す。観察位置は接合部の厚さ方向中央部である。接合線近傍はフェライトとパーライトの組織からなり、接合界面部の結晶粒は母材原質部に比べ細粒で母材と一体化しており、接合線を明確に識別できない状態になっている。また、結晶粒内には接合時に分断され形成されたと考えられる微細な酸化スケールも認められた。結晶粒の細粒化は、接合時の強変形と再結晶によって生成されたことを示すもので、接合過程での強変形が短時間接合一体化に大きく寄与しているものと考えられる。

Fig. 13 Microstructure of CS joint; Chemical compositions (mass %): $0.19\text{C} - 0.18\text{Si} - 0.56\text{Mn} - 0.023\text{P} - 0.005\text{S}$, Size: Thickness 30 and $28 \times$ width 100 mm

Fig. 14 は、SUS304 の接合部断面の a) マクロ組織と b) ミクロ組織を示す。b) は a) に○印で示した厚さ方向中央の接合部を拡大したものである。断面マクロ組織から、接合界面をはさんでせん断された双方が強変形していることがわかる。組織はオーステナイトで、接合界面部の結晶粒は細粒で母材と一体化しており接合線を識別することが難しく、

接合強度も **Fig. 10** に示すように 400 MPa 以上の値を示した。

Fig. 14 Cross section of the joined material; Material: SUS304, Chemical compositions (mass %): $0.05\text{C} - 8.32\text{Ni} - 18.12\text{Cr}$, Size: Thickness $27 \times$ width 100 mm

4. 結 言

熱間エンドレス圧延用強変形せん断接合法においてタイプ II-SDJ 装置を新たに考案し、板幅 100 mm までの基礎試験機および板幅 450 mm までの広幅試験機を準備し、実際に近い条件で接合試験を行い、以下の結論を得た。

- 1) CS の場合、実機における接合時の重ね合せ面の酸化スケールの厚さは、部分デスケリング後接合開始までの時間を勘案すると約 $20 \mu\text{m}$ に抑えられる。
- 2) ストローク率 α_s が大きくなるほど接合強度が増加する傾向にあった。垂直方向の接合速度が 40 mm/s 以上では、CS および SUS304 ともに接合速度が増加しても、ほぼ一定の強度となることから、接合速度の影響はほとんど無いことがわかった。板幅端を除き幅方向ではほぼ均一な接合強度であることを確認した。CS の接合強度は、 α_s が 1.40 以上のとき対母材強度比 β_j が $0.70 \sim 0.85$ 程度であった。
- 3) 接合部では、CS、SUS304 ともに結晶粒が細粒で母材と一体化し接合線を明確に識別できない状態であった。タイプ II-SDJ 装置によって、接合部の曲がりや段差が少なく、クロップ長さが短い接合が可能となった。また、CS、SUS304 とも良好な接合状態であることがわかった。実機適用にあたっては、SDJ の接合機構を明確にし、さらに、接合部の耐圧延割れ性について実機を通板させるために必要な対母材強度比 β_j を明らかにする必要がある、今後の検討項目と考えられる。

謝 辞

本研究にあたり、西野忠様、青天目隆治様、石川文紀様、益子隆様、白銀重徳様、難波晋司様の協力を得た。また、論文の作成には東北大学大学院工学研究科の藤田文夫教授の助言を得た。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 堀井健治・舟本孝雄・芳村泰嗣：塑性と加工，**50**-577(2009)，144-148.
- 2) 堀井健治・舟本孝雄・芳村泰嗣：同上，**50**-579(2009)，354-358.
- 3) Horii, K., Funamoto, T., Lee, J.S., Kim, J.K. & Kim, Y.M.: AISE Steel Technology, **79**-6(2002)，55-60.
- 4) 賀屋章・水田桂司・福森淳三・川水努・関庚俊：三菱重工技報，**36**-6(1999)，300-303.