

技術論文

形鋼圧延ロールに適用した狭開先軸接合技術

A combination technology of narrow-gap shaft welding and CPC process for rolls used in section mills



技術開発センター
大野 京一郎
Kyoichiro Oono

技術開発センター
芳谷 和政
Kazumasa Yoshitani

技術開発センター
尾崎 健一
Kenichi Ozaki

要旨

当社が独自に開発した、CPCプロセス（Continuous Pouring process for Cladding）は、クラッド厚を問わずに1層肉盛が可能なメリットを有し、すでに各種ローラ類の実績からその効果は明らかである。

特にハイスロールは、これまで熱延・冷延帯鋼、棒鋼、線材、平鋼等の圧延ロールで非常に良好な耐用を収めており、現在では当社の主要な製品のひとつとなった。

しかし、これらのロールは、主に複合一体ロールとして製造しており、長軸を有するものにおいては、1チャージ複数本採りが困難であった。

そこで、CPCプロセスに狭開先軸接合技術を新たに導入し、従来の品質を維持したまま、ロール胴部材の複数本採りを可能とした経済的なロール製作方法を開発したので、ここに報告する。

Synopsis:

The CPC process, the FUJICO's metal cladding innovation, offers an advantage of thickness-free single-layer cladding as track records of many FUJICO's rolls in field service evidence.

Among others, high-speed rolls have been demonstrating their higher durability in the production of hot and cold rolled steel shapes including strip coils, bars, rods and flat bars, and make one of FUJICO's major product lines.

However, with the CPC process alone, since the roll was produced as a monobloc roll of clad barrel and shaft portions, only one roll was obtainable per charge of operation.

We have developed a technology to combine narrow-gap shaft welding with the CPC process to obtain two or more barrels per charge as a breakthrough to reduce roll production costs without sacrificing their quality. This report presents the combined technology.

1 緒言

形鋼圧延において圧延材の高品質化と省力・省エネルギーを図るため、より過酷な圧延条件に耐え、かつ長寿命のロール材が求められてきた。近年開発された高速度鋼（ハイス）系多合金白鉄ロールは、従来使用したダクタイル鉄やアダマイト鉄に比して、耐摩耗性、耐肌荒れ性に優れ、数倍の寿命を有するロール材として、圧延材の品質や生産性の向上に大きく寄与している。

当社では、圧延用ハイスロールの製造プロセスとして、

CPC法（連続注入クラッド法）を用いている¹⁾。CPC法とは Continuous Pouring process for Cladding の略称であり、概要は Fig.1 に示す様に、中実または中空の芯材をモールド中心にセットし、黒鉛モールドと芯材との間にクラッドしようとする溶融金属を鑄込み、高周波誘導加熱により予熱された芯材に融接させながら、断続的に下方に引き抜き複合材を成形するプロセスである。CPC法の特徴は、一層肉盛法であるため、熱の集中度が極めて小さく、従来の溶接肉盛法では不可能であった材質、例えば過共晶材等の

クラッドを可能にした。また、溶接肉盛り法に見られるビードマーク発生は皆無である。

これより、CPC法による圧延用ハイスロールは国内外で広く採用され、かつ非常に良好な耐用を収めており、現在では当社の主要な製品のひとつとなった。

しかし、CPC法によるロールの製造は主に複合一体型であり、長軸を有するものは、1チャージ複数本採りが困難であり、客先の要望に対応すべく納期短縮および製造コスト削減に大変苦慮していた。

そこで、ロール胴部材の複数本採りを可能にするため、狭開先軸溶接技術を新たに導入し、短納期で経済的なロール製造方法を開発した。

本報告では以下に、狭開先溶接法の概要および溶接部位の特徴について述べる。

できるので、均一で安定した開先側壁の溶込みが得られる。

(3)開先内で回転するアーク電圧を検出することによる、自動開先微制御が可能な放置溶接システムである。

(4)狭開先なので、CPCの余長が短い。

ここで、高速回転アーク法の原理、特徴などを紹介する。

2.1 高速回転アーク溶接法の原理

高速回転アーク式狭開先溶接法の原理をFig.2に示す。溶接ワイヤは、電極ノズルの中心に送給され、通電チップの偏心孔によって偏心される。電極ノズルは、ベアリングを介して軸受けで支持され、電動モータで同一方向に高速回転される。

従って、ワイヤ先端のアークは、通電チップ孔の偏心量に対応した直径の円周状に単一の溶融池上を回転することになる。

アークの高速回転は、アークの物理的効果を周辺に分散させ、ビード形成現象、ワイヤ溶融現象に以下のような顕著な効果を与える。

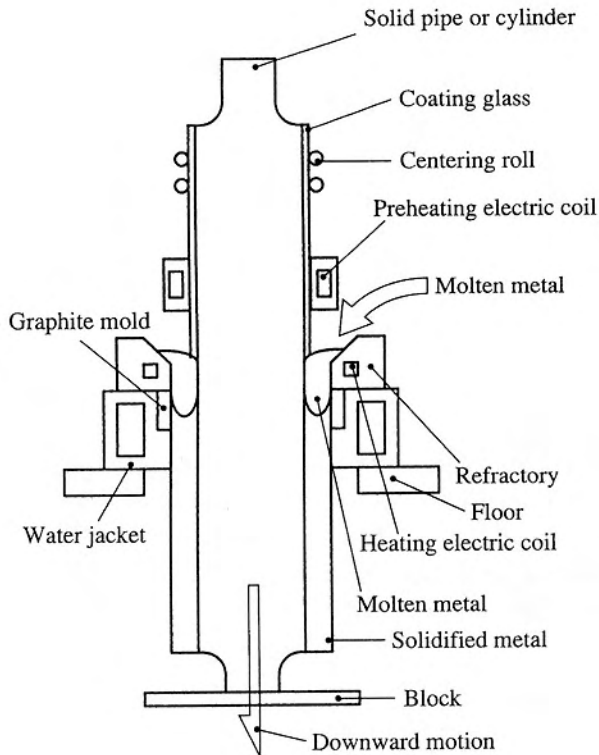


Fig.1 CPC process

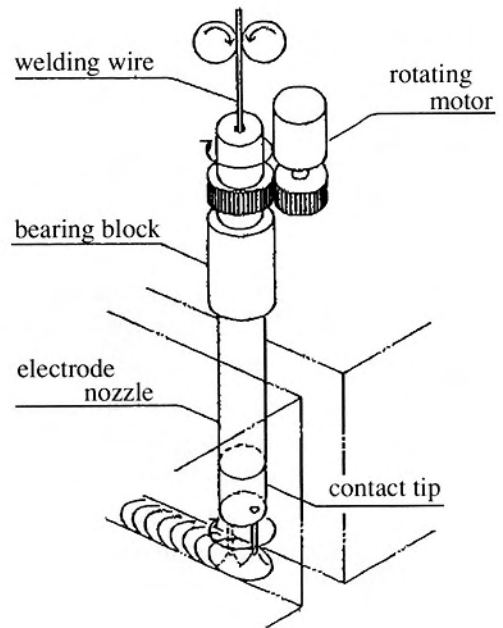


Fig.2 Rotating mechanism²⁾

2 狭開先溶接法

今回、狭開先軸溶接法に使用する溶接装置は、压力容器や橋梁、重機械などの狭開先溶接で適用実績がある、高速回転アーク式自動溶接装置^{2)~5)}を採用した。

採用理由は以下の通りである。

(1)ワイヤに強制的な曲げぐせを与えることなく、アークを常に一定の幅で揺動させるので、曲げぐせに起因した溶接欠陥が発生しにくい。

(2)機構的にアークの回転速度を電源周波数なみの高速に

(1)ビード形成現象

ビード形状に及ぼすアークの回転効果をFig.3に示す。回転なしの場合には、MAG溶接特有の中央集中型の溶け込み形状となるが、本法では周辺分散型の溶込みに変わる。

また、溶融池に作用する実効的なアーク圧力が、作用

面の分散により減少するため、ビード表面が平滑化されビード幅も増加する。

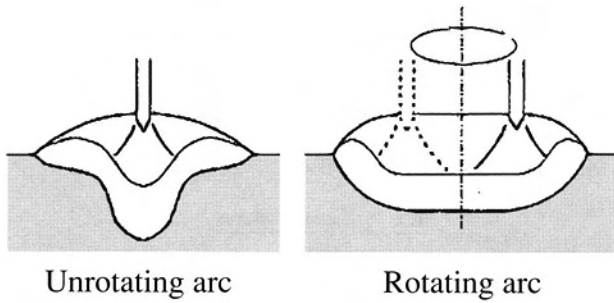


Fig.3 Effect of rotating arc on bead shape²⁾

(2)ワイヤ溶融現象

アークの高速回転は、Fig.4に示すように、ワイヤ先端の溶滴に回転遠心力が働き横方向に飛ぶと共に、アークもそれに引きずられる形で横に広がり、結果、開先壁の溶込み形成能力を増している。

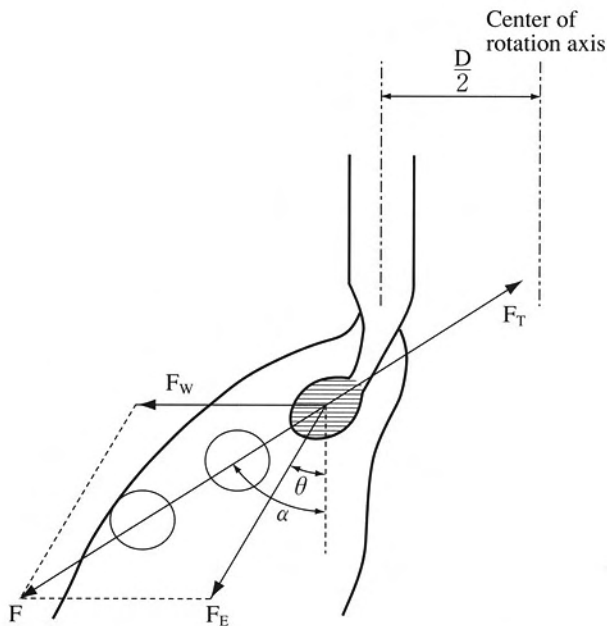


Fig.4 Relation of power acting on molten drop²⁾

2.2 アークセンサによる自動開先倣い制御⁶⁾

アークセンサとは、溶接トーチを開先内で揺動させ、このときの溶接電流やアーク電圧波形から開先と揺動中心のずれを検出し、トーチの狙い位置を修正する方法である。特徴は以下の通りである。

- (1)アーク自身がセンサとなるため特別な検出器が不要
- (2)トーチ廻りの簡素化が可能

(3)アーク直下の情報が常時検出可能

2.3 溶接装置

高速回転式アーク自動溶接装置の外観をFig.5に、溶接ノズル部の外観をFig.6に示す。

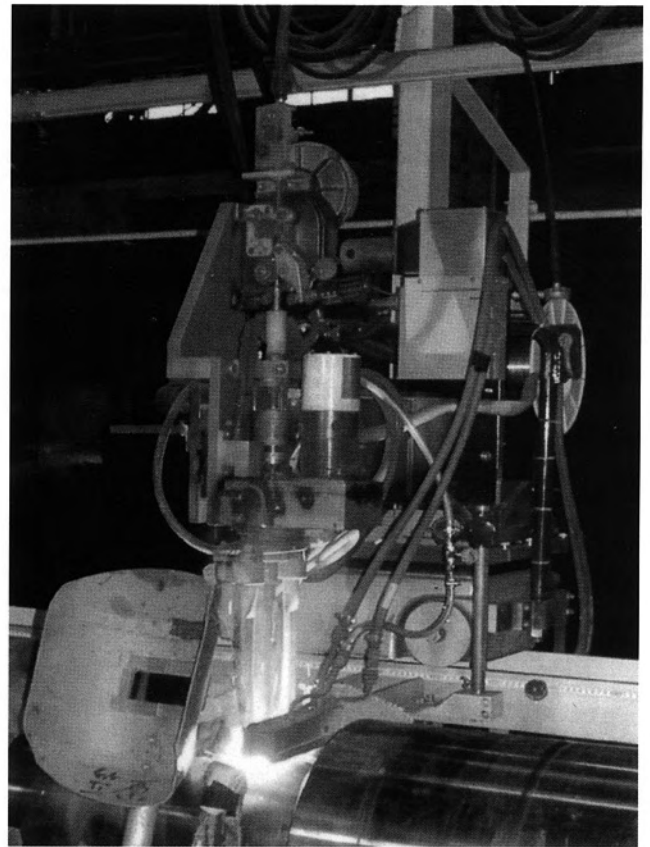


Fig.5 Narrow gap welding equipment with high speed rotating arc

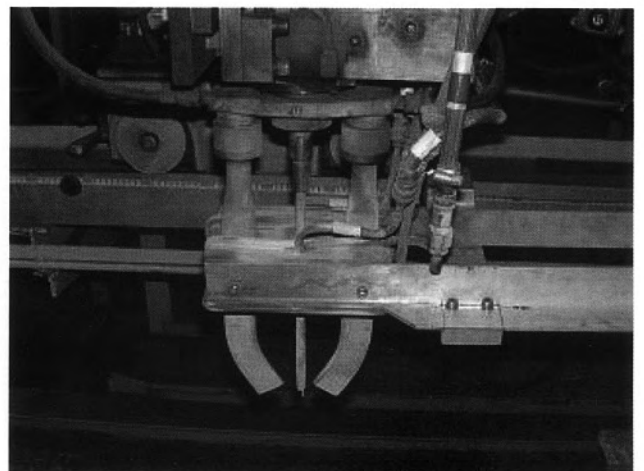


Fig.6 Welding torch

溶接ノズルの形状は多くの圧延ロールに適応できるよう、ノズル外径はφ8、ノズル長さは250mmと比較的長尺なものを使用する。

ガスシールドは、溶融池近傍では扁平ノズルを2本用い、開先表層部ではボックス型ノズルを併用する。

溶接電流の回転ノズルへの給電は、Fig.7に示す摺動式カーボンブラシが用いられている。

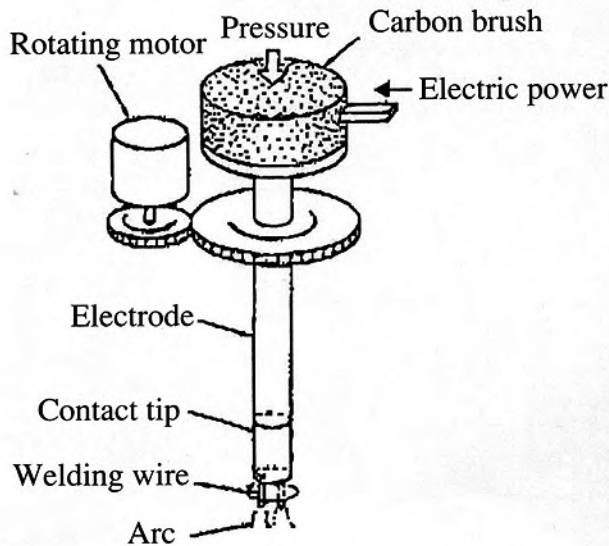


Fig.7 Rotation mechanism of welding torch

3 狭開先軸接合技術の開発主旨

本法を適用した圧延ロールの製造概要図をFig.8に示す。特長は通常のCPCロールと比して、開先加工を施したロール胴部と軸部を、高速回転アーク式自動肉盛装置を用いて溶接することである。

接合技術の開発を実行すべく、以下の事項を念頭においた。

- 溶接金属 : 機械的強度の維持、溶込み
- 溶接施工 : 溶接欠陥、破断しない
- 製造法 : 品質の安定化、生産性の向上

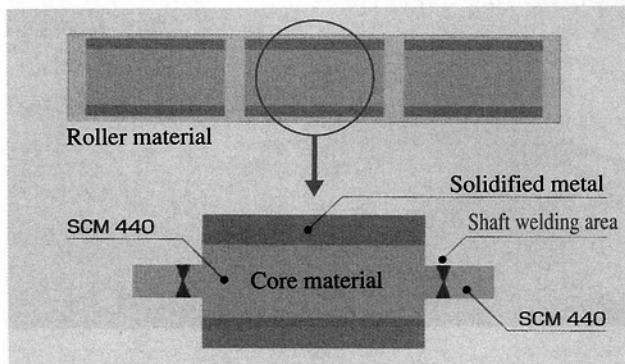


Fig.8 Roll shaft joint by CPC process

3.1 溶接材料の選定

形鋼圧延において、ハイスロールを適用する以前はダクタイル鋳鉄およびアダマイト鋳鉄を使用していたが、軸部が使用中に破断していた。

そこで、接合部の強度はダクタイル鋳鉄の1.5倍以上あれば破断しないと仮定し、これを踏まえた上で溶接材料の選定を行った。

溶接材料の選定は次式を用いた。

$$\sigma_{y.weld} \geq \frac{1.5 \times S_{weld} \times \sigma_{FCD}}{S_{FCD}}$$

ここで、

- $\sigma_{y.weld}$: 溶接金属部の引張強さ(N/mm²)
- σ_{FCD} : FCDの引張強さ(=500N/mm²)
- S_{weld} : 溶接部の接合断面積(mm²)
- S_{FCD} : FCDの軸断面積(mm²)

結果、溶接金属の引張強さ $\sigma_{y.weld} \geq 720 \text{ N/mm}^2$ (=73.5Kgf)となるので、溶接材料は780 N/mm²級高張力鋼を選定した。

3.2 溶込みの目標

自動車用鋳物の接合において、溶込みが13%以上あれば、溶接欠陥が多く発生しても破断が生じない⁷⁾。

本法では、この事例を適用し、溶込みの目標を13%以上とした。

溶込み量を多くするため、以下の2点で溶込みの比較を行った。

- (1)通電チップの偏心孔を改良し、より側壁方向へワイヤを送給させる。
- (2)トーチ回転を速くし、遠心力によりワイヤの溶滴を側壁へ向ける。

3.3 母材の選定

供試材は従来の品質維持を念頭に置き、複合一体型製造法と同様、SCM材を選定した。

3.4 溶接条件

上記の供試材を使用し、ビード形状およびトーチ食い制御が損なわれないことを念頭に置いた溶接条件を選定した。

- 開先形状 : H型
- 開先幅 : 開先底部 : 13 mm 開先表層部 : 18 mm
- 開先深さ : 120 mm
- 溶接電流 : 300 A
- 溶接電圧 : 33 ~ 34 V
- 溶接速度 : 250 mm/min

4 結果

4.1 溶接状況

Table 1 に各溶接条件で溶接した結果を示す。

通電チップの偏芯孔は2.1mmと2.3mmの2種類を準備した。結果、溶接性は共に良好であった。

また、トーチの回転速度は溶接装置の仕様上、50Hz,65Hz,80Hzの3種で比較した。結果、回転速度が50Hz,65Hzは良好であったが、80Hzではトーチ回転に振れが生じ、溶接アークが不安定になったので、不適と判断した。

Table 1 Results of welding test

No.	Rotating speed of torch (Hz)	Deviation of contact tip (mm)	Welding	Penetration ratio (%)	UT results		
					Results	Defect point	Defect type
1	50	2.1	○	9	○	—	—
2	50	2.3	○	13	×	Center of weld zone	Slag inclusion
3	65	2.1	○	10	×	Center of weld zone	Slag inclusion
4	80	2.1	×	—			

4.2 溶接部断面の状況

溶接性が良好なNo.1~3を施工後、UT検査および断面を切断し、溶接部の状況を調査した。

(1) 断面マクロ組織

溶接施工後のUT結果をTable 1に、断面マクロ組織の一例をFig.9に示す。

溶接部は肉盛り厚4mm程度で均一であるが、溶接金属の中心部に溶接欠陥が生じていた。

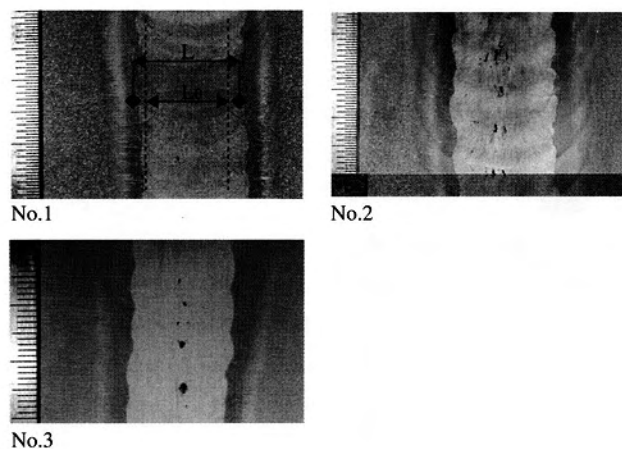


Fig.9 Microstructure of weld section

(2) 溶接金属の溶込み

Table 2およびFig.10,11に各サンプルの溶込み量を示す。Lを溶接金属幅、Loを溶接前開先幅とすると、溶け込み率Mは、次式で求められる。

$$M(\%) = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100$$

その結果、No.2が目標値13%に達している。

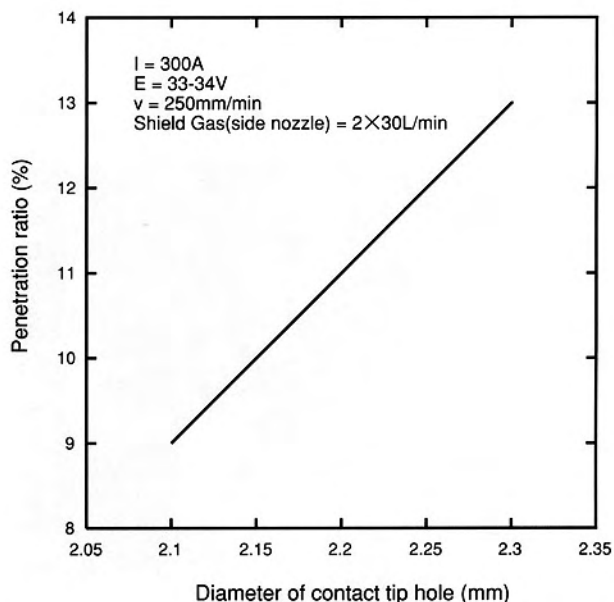


Fig.10 Penetration ratio versus contact tip hole diameter

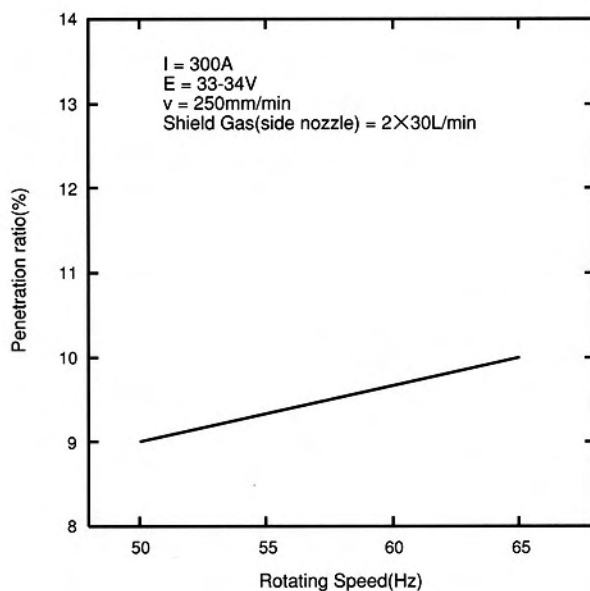


Fig.11 Penetration ratio versus rotating speed (Hz)

4.3 機械的強度測定結果

溶接したサンプルは、ハイスロールの製造仕様同様、熱処理（焼入れ・焼戻し）を施した後試験片に加工した。試験片は表層部、開先中央部、開先底部の3カ所から採取した。

引張試験にはJIS Z 2201 4号の試験片を用いた。試験は万能引張試験機を用いて常温で行った。

また、曲げ試験はJIS Z 2204 1号の表曲げ試験片を用いた。試験は事前に目視および浸透探傷試験（PT）にてサンプル表面の状況を確認した後、Fig.12に示すローラ曲げ試験方法で行った。評価は試験後のサンプル外観を観察した。

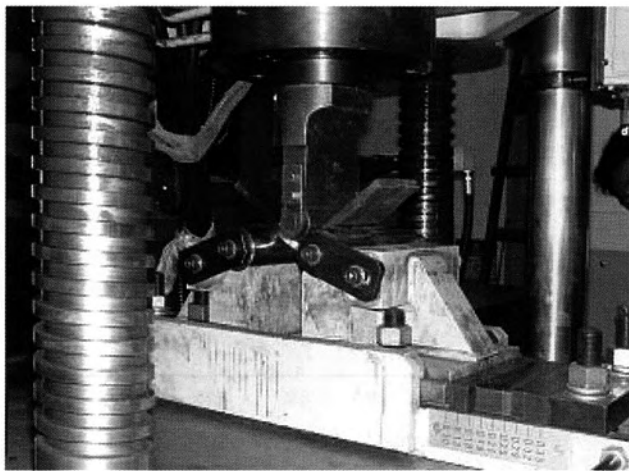


Fig.12 Method of roller bending test

(1) 引張試験

引張試験結果をTable 2に、破断した試験片の外観をFig.13に示す。引張強さは目標値720(N/mm²)を満足し、かつ破断位置は溶接欠陥の有無に関わらず、接合部以外である。

Table2 Results of tensile test

		mechanical factor				Fracture point
		Proof stress (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Reduction (%)	
NGW	1	640	810	16	42	SCM
	2	630	800	15	37	SCM
	3	630	800	14	43	SCM
	SCM-H	610	785	17	39	—
	FCD-H	450	500	2	0.21	—
	Weld material	755	870	22	—	—

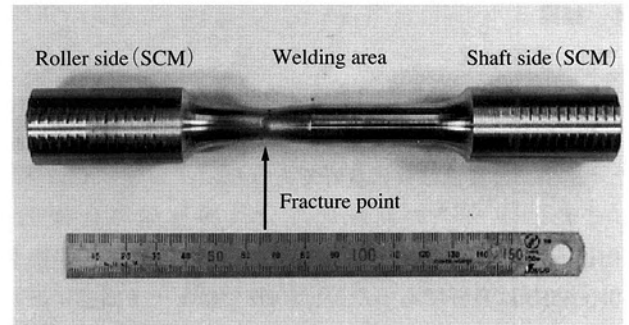


Fig.13 Tensile test piece after fracture

(2) 曲げ試験

試験前に行った表面の状況確認とローラ曲げ法で試験した結果をTable 3に示す。なお表中、破断および亀裂模様がなものは◎、溶接中央部に亀裂が発生したものを△、破断が鋼材と溶接金属との熱影響部で生じたものを▲、溶接中央部にて生じたものを×と表記した。

結果、表面欠陥の有無に関わらず破断していた。

Table 3 Results of bend test

No	Gap top area		Gap middle area		Gap bottom area	
	Welding defect	Test	Welding defect	Test	Welding defect	Test
1	None	▲	None	△	None	×
2	None	×	Found	×	None	◎
3	Found	×	None	×	None	×
SCM	None	△	None	△	None	△
FCD	None	×	None	×	None	×

5 考察

5.1 溶接欠陥の発生原因

溶接金属の中央部に発生した溶接欠陥を走査型電子顕微鏡(SEM)でマイクロ観察した結果を、Fig.14に示す。また、溶接欠陥およびビード表面に付着していたスラグをEDAX分析した結果、ほぼ同等な分析値を示した。従って、溶接欠陥はスラグの巻込みであると推察した。

そこで、No.2の施工条件で、各パス毎に発生したスラグを除去し、ビード表面を清浄にした結果、溶接欠陥は回避できた。Fig.15にその時のマクロ断面組織を示す。

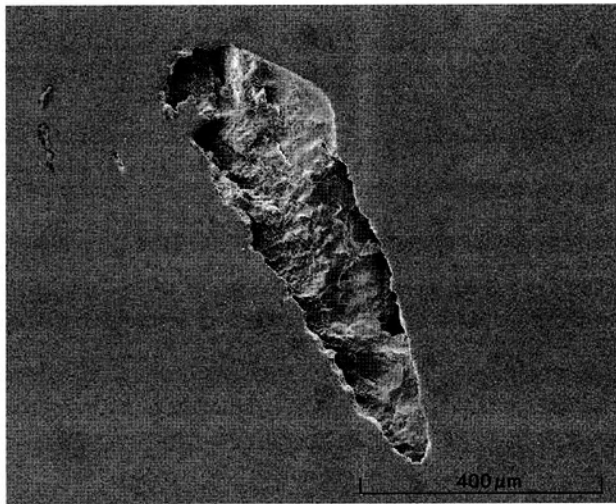


Fig.14 Microstructure of weld defect by SEM

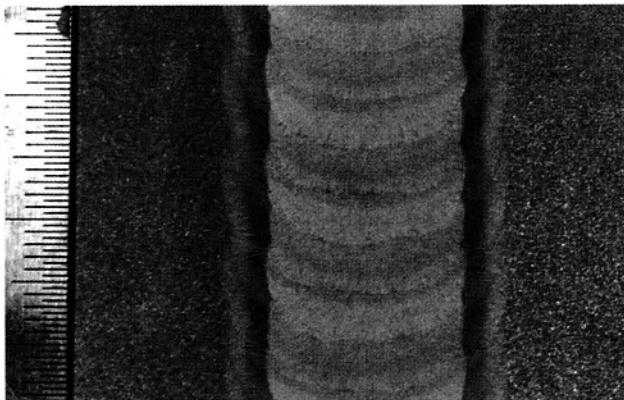


Fig.15 Microstructure of bead section after cleaning

5.2 引張試験

今回、溶接材料は、母材（SCM）と比較してやや高い機械的性質を有する780N/mm²級高張力鋼を用い、かつ完全に溶込んでいます。

また、応力が溶接線に垂直にかかるので、強度の低い部分で破断する^{8),9)}。従って、破断は母材で起こったと推察した。

5.3 曲げ試験での破断

曲げ試験において、サンプルが破断した原因は以下の通りと推察する。

(1)溶接金属中にスラグが巻込んでいるため、スラグに応力が集中し脆性破壊が生じた。

(2)結晶粒が溶接金属より大きい、溶接金属間の熱影響部がサンプルの表面に存在し、その影響で破壊靱性値が低下した。

(3)伸びの不足により、亀裂の伝搬・破断に至る。

6 結言

形鋼圧延ロールに適用した狭開先軸接合技術として、ロール胴部と軸部に狭開先加工を施し、開先内を多層肉盛することで、在庫生産ならびに製作工期の短縮が期待できる。接合技術確立のため、溶接テストを行った結果、以下のことが推察できた。

(1)溶接金属の中央部に介在した溶接欠陥はビード表面に発するスラグの巻込みであった。対策として、肉盛溶接と並行してスラグを除去し、溶接ビード表面を清浄することにより、溶接欠陥は回避できた。

(2)開先側壁への溶込みはチップの偏芯孔を大きくし、機械的に側壁方向へ溶接ワイヤを送給することで、目標値13%を確保できた。

(3)溶接施工後、引張試験を行った結果、引張強さはダクタイル鑄鉄の1.5倍以上であり、かつ溶接金属部以外で破断した。

今後、ロール形状での施工確立を行い、生産性の向上を図る。

7 謝辞

本施工技術の遂行に際し、高速回転式アーク溶接装置の立上げにあたり、ご指導、ご協力して頂いた（株）ジャパノテクノメイト殿に深く感謝いたします。

また、機械的強度の測定および溶接欠陥の調査にあたり、ご指導、ご協力して頂いた広島県立東部工業技術センター材料技術部坂村研究員殿に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 坂本眞一：フジコー技報No.4(1996)44
- 2) 杉谷祐司：金属65（1995）10、p 23
- 3) 野村博一ほか：日本鋼管技報No.112(1986)75-80
- 4) 溶接学会編：溶接法ガイドブック ナロウギャップ溶接(狭開先溶接)、黒木出版社
- 5) 堀勝義、羽田光明：溶接学会誌Vol.68(1999)3,41-61
- 6) 杉谷祐司ほか：溶接技術No.2(1990)92-98
- 7) 例えば、竹本ほか：自動車技術(1997.2)
- 8) 溶接学会編：溶接・接合技術、産報出版(1998)
- 9) 鈴木春義：改訂 最新溶接工学、コロナ社(1974)