
パイプラインの内外面同時自動溶接技術

Internal and External Simultaneous Girth Welding Process for Pipeline

石井 秀明 (Hideaki Ishii) 福原 昇 (Noboru Fukuhara) 阿草 一男 (Kazuo Agusa)

要旨：

パイプラインの現地高能率溶接を指向し、内外面同時円周自動溶接技術を開発した。本技術は、鋼管内面と外面の 2 電極を同時に使用する多電極化の効果と、X 形開先採用による開先断面積低減（従来 V 形開先の約 1/2）の相乗効果により、従来、約 100 min を要していた $\varnothing 600$ A 3 15 t 鋼管の突合わせ溶接の所要時間を約 1/3 の 37 min に短縮した。同時に、アーク監視モニタの導入により、1 オペレータによる管内面・外面 2 電極の同時遠隔操作を可能とし、作業環境の改善のみならず、省力化をも達成した。さらに、本溶接法による溶接継手品質が、ガスパイプライン溶接に十分適用可能であることを確認した。

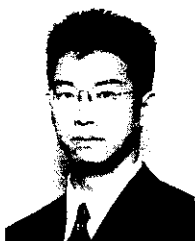
Synopsis：

To promote pipeline welding efficiency through an internal/external simultaneous welding method, an internal welding robot has been newly developed to be combined with external ones currently in service. In this method, shortening of welding time has been aimed by simultaneously using dual (internal/external) electrodes, and reducing the groove section area almost to the half through a change of groove shape. As a result, the total welding time is 37 min when the new method is applied to a pipe with $\varnothing 600$ A 3 15 t size i.e., the welding time has been reduced to approximately one third of that of the conventional single electrode method. Furthermore, by applying an arc monitoring system, it has become possible for a single operator to operate two welding heads (internal/external) simultaneously. Concerning quality, pipe joints welded by the new method have demonstrated satisfactory mechanical properties readily applicable to practical pipeline constructions.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Internal and External Simultaneous Girth Welding Process for Pipeline



石井 秀明

Hideaki Ishii

技術研究所 溶接・鉄粉研究部門



福原 昇

Noboru Fukuhara

技術研究所 溶接・鉄粉研究部門 主任研究員(課長補)



阿草 一男

Kazuo Agusa

技術研究所 溶接・鉄粉研究部門 主任研究員(部長)・工博

要旨

パイプラインの現地高効率溶接を指向し、内外面同時円周自動溶接技術を開発した。本技術は、鋼管内面と外面の2電極を同時に使用する多電極化の効果と、X形開先採用による開先断面積低減(従来V形開先の約1/2)の相乗効果により、従来、約100minを要していた $\phi 600 \text{ A} \times 15 \text{ t}$ 鋼管の突合わせ溶接の所要時間を約1/3の37minに短縮した。同時に、アーク監視モニタの導入により、1オペレータによる管内面・外面2電極の同時遠隔操作を可能とし、作業環境の改善のみならず、省力化をも達成した。さらに、本溶接法による溶接継手品質が、ガスパイプライン溶接に十分適用可能であることを確認した。

Synopsis:

To promote pipeline welding efficiency through an internal/external simultaneous welding method, an internal welding robot has been newly developed to be combined with external ones currently in service. In this method, shortening of welding time has been aimed by simultaneously using dual (internal/external) electrodes, and reducing the groove section area almost to the half through a change of groove shape. As a result, the total welding time is 37 min when the new method is applied to a pipe with $\phi 600 \text{ A} \times 15 \text{ t}$ size i.e., the welding time has been reduced to approximately one third of that of the conventional single electrode method. Furthermore, by applying an arc monitoring system, it has become possible for a single operator to operate two welding heads (internal/external) simultaneously. Concerning quality, pipe joints welded by the new method have demonstrated satisfactory mechanical properties readily applicable to practical pipeline constructions.

1 緒 言

天然ガスの需要拡大に対応するため、広域天然ガスパイプライン網の建設が計画され^{1,2)}、それに供すべき高効率施工が可能なパイプライン溶接施工法の開発が望まれている³⁾。しかしながら、パイプラインの現地溶接は、他分野の溶接施工にくらべ効率の向上が困難とされてきた。すなわち、

- (1) 下向き、立向きおよび上向きの全姿勢溶接条件を、溶接姿勢に応じて適切に変化させていくコントロールが必要となる。
 - (2) 全姿勢溶接となるため、大電流溶接の適用が困難となる。
 - (3) ラインの安全性を確保するため、内部品質ならびに機械的性能の両面に関して、信頼性の高い継手品質が要求される。
- などの点が、障壁となってきた。

当社ではこのような背景を踏まえ、管内面自動溶接機を開発し、これをすでに実用化している管外面自動溶接機^{4,5)}と同時適用することにより、溶接時間の短縮化と同時に省力化を達成した。本報で

は、この管内面溶接機とパイプライン内外面同時溶接工法の概要について述べる。

2 パイプライン敷設作業の概要

一般に、わが国のパイプライン敷設には、公道を掘削して埋設する埋設工法がとられている。その他、特殊な敷設方法として、推進工法(交通量の多い道路、鉄道、河川などの地下)、架管(河川、軌道、道路などの上部)、洞道内配管(共同溝内、トンネル内)や海底パイプラインがある。

一般埋設部の作業は掘削、配管敷設、溶接・検査、塗覆装および埋戻しの手順でおこなわれる。高圧ガスパイプラインに使用する鋼管は厚肉かつ大径(口径： $\phi 400 \sim 900 \text{ A}$ 、管厚：11~20t)なので、工事全体に占める溶接作業時間の割合が大きい。特に、公道下での埋設工法の場合は、工事中は多少なりとも交通を阻害するため、交通量の少ない夜間に限定して施工せざるを得ない場合もある。このような状況下では、さらに溶接時間の短縮が重要になる。

また、周継手溶接はパイプラインの安全性を直接左右する重要な作業であるが、狭隘かつ劣悪な作業環境の下で連続的に変わる溶接姿勢に対応する必要がある、極めて高度な技量が要求され、数少な

* 平成9年3月4日原稿受付

い熟練溶接士の技量に依存してきた。しかし昨今は、外面1電極方式の自動溶接機が現場に導入され、パイプライン溶接作業の効率化、作業環境の改善および脱技能化がはかられている。

3 パイプライン内外面同時溶接技術

3.1 溶接方法の概要

新たに開発した内外面同時溶接^{6,7)}と従来の外面自動溶接の比較を、Table 1 に示す。新技術は、現状の自動溶接と同様に、MAGアークを溶接熱源とするが、管内面と管外面の2電極を同時使用することによる多電極化の効果と、X形開先の採用による開先断面の低減効果（従来の約1/2）により、溶接時間の短縮をねらっている。また、開先は裏当て材なしのメタルタッチ（ルートギャップ0 mm）とし、開先組立て精度を確保しがたい現地溶接においても、迅速かつ簡易な開先組立てを可能にした。積層方法は、ウィーピングを用いた1層1パス多層盛り溶接法であり、パス数を管内面と管外面に分割した。

3.2 システム構成

新たに開発したパイプライン用内外面同時溶接システムの構成をFig. 1 に示す。システムは、管外面自動溶接機、管内面溶接機およびアーク監視モニターなどから構成される。

(1) 外面溶接機

外面溶接には、外面自動溶接機として、すでに各地のパイプライン敷設現場で、多くの実用実績を重ねてきた装置を流用した^{4,9)}。本装置は、パイプ外面に取付けたレール上を走行しながら、溶接電流・電圧、溶接速度およびウィーピングパターンなどの管周1°ごとにプリセットされたデータと、溶接位置検出情報に基づいて、コンピュータが自動的に制御して溶接を行う。開先微い制御については、パイプの良円度不良や走行レールの取付け位置のずれに対応するため、接触プローブで溶接開

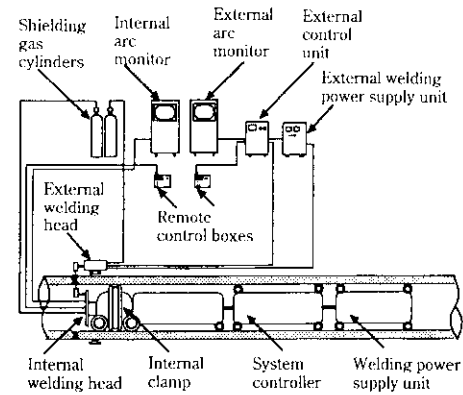


Fig. 1 System lineup of the internal/external welding machines

始前に開先位置の測定を管全周にわたり行い、メモリーに記憶する。溶接中は、これに基づいた微い制御を行う。外面溶接機の主な仕様は、次のとおりである。

溶接ヘッド外寸：500 L×350 W×200 H mm

溶接ヘッド重量：約18 kg

適用パイプ径：φ350 A 以上

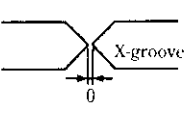
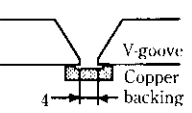
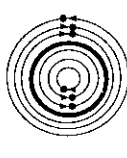
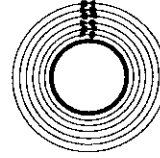
開先微い：接触プローブ使用

(2) 内面溶接機

内面溶接機は、溶接ヘッド、インナークランプ、制御部および溶接電源などの機能を有する3台の台車から構成される管内面自走式ロボットである。先頭の溶接台車は、自走機構、トーチの移動ならびにワイヤ送給を行う溶接ヘッド、パイプ端突合わせ部を管内面から固定する油圧クランプおよび管内面の溶接状態を監視するカメラ装置から構成される。中間の制御台車は、管内走行、クランプ、開先微いおよび自動溶接などの統括制御を行う。後尾の溶接電源台車は、外部から引き込んだ AC 200 V の電源を用いて、溶接電流・電圧を出力する。

管内面の円周方向への開先微いおよび管長手方向への開先位置の検出については、Fig. 2 に示すような光切断法の原理を用いた非接触式の視覚センサを用いた。Photo 1 は開先形状画像処理中のモニタ画像の例であり、左・右開先肩および開先底部の3つの特徴点の位置を抽出することにより、開先位置のみでなく開先寸法（開先幅、開先深さおよび開先面積など）の測定も同時に行っている。内面溶接機の主な仕様は、次のとおりである。

Table 1 Comparison between the internal/external simultaneous welding and external welding (for φ600 A×15 t pipe)

Welding method	Internal/external simultaneous welding	External welding
Heat source	MAG arc	MAG arc
Number of electrode	2 (Internal/external)	1 (External)
Groove shape	 X-groove	 V-groove Copper backing
Groove area	95 mm ²	190 mm ²
Build up method		

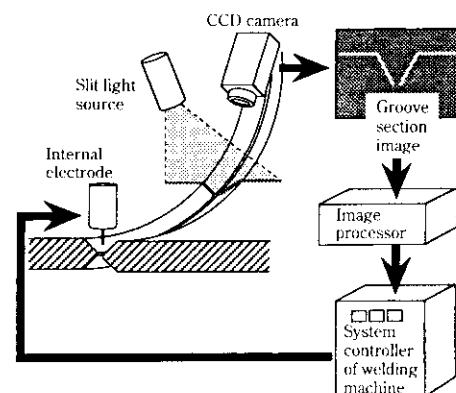


Fig. 2 System lineup of the visual sensor

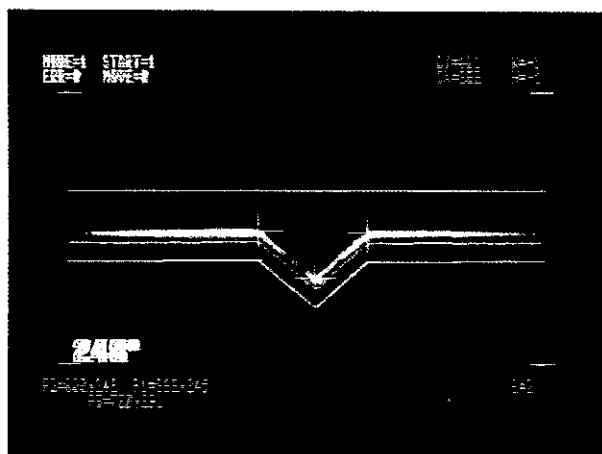


Photo 1 An example of the processed image of a groove cross-section



Photo 2 An example of the picture taken by the arc monitor system

内面溶接機外寸：8.4 m（運搬時は2分割可能）

内面溶接機重量：約 950 kg

適用パイプ径：φ600 A 以上

走行速度：最大 5 m/min

登坂可能な傾斜：最大 6°

クランプ力：約 200 t（油圧）

開先做い：視覚センサ使用

(3) アーク監視モニタ

管内部の溶接作業は人間の直接監視が困難なため、遠隔操作技術が必要となる。また管外面の溶接作業についても、狭隘な溝内での溶接という3K作業改善の面から、遠隔操作が望まれている。

内外面同時溶接システムに搭載したアーク監視モニタは、溶接遠隔操作用のモニタリングシステムであり、Fig. 3 に示すように内面および外面溶接トーチのそれぞれ前方および後方に取付けられた計4台のカメラと、内・外面用の2台のモニタから構成される。オペレータは、状況に応じてトーチ前方もしくは後方画面の選択が可能である。

Photo 2 はアーク監視モニタ画像の例である。アーク光の波長領域のみを減光する特性の光学フィルタの採用により、アークスポット、溶融池および形成ビードがモニタ画像から認識可能となった。さらに、溶接姿勢や溶接条件などの全姿勢溶接の遠隔オペレーションに欠かせない情報をモニタ画面にリアルタイムにスーパーインポーズし、溶接オペレータへの支援を行っている。本システムを導入することにより、1人のオペレータで内・外面の2ヘッドの遠隔オペレーションが可能となり、作業環境の改善のみならず省力化をも達成できた。

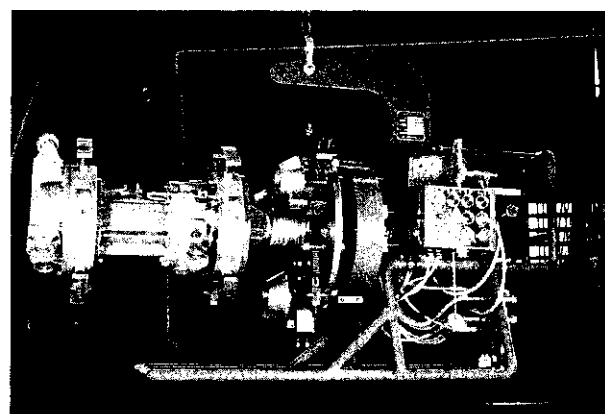


Photo 3 Appearance of the pipe facing machine

(4) 管端開先加工機

管敷設現場では鋼管を現地切断して管長を調整することもある。このような事態に対応して、現地でX形開先加工が可能な管端開先加工機を準備した（Photo 3）。加工機本体重量は約 150 kg で、最大 1569 N/cm² の油圧駆動源を有し、鋼管特性に合わせて切削速度および送り速度を調整できる。本加工機使用時は、重機などで管内に挿入し、ブランジャを張って固定し切削操作する。

本機の特徴は、做いローラによる管内面做い機能を有していることである。そのため、パイプは鋼管の形状に左右されずに板厚に做って位置決めされるので、鋼管の真円度が悪くても、均一な開先深さとルートギャップを確保できる。したがって、本機を用いて加工した開先を、内面溶接機に組込まれている高出力なインナークランプで組立てることにより、高精度なX形開先の組立精度が得られ、信頼性の高い溶接品質を保障できる。

3.3 溶接施工手順

Fig. 4 にもとづき、内外面同時溶接の施工手順を説明する。

・ Step 1

既設管の溶接が終わると、既設管先端へと内面溶接機を前進させ停止させる。走行台車先端部のコネクタからケーブル類（電

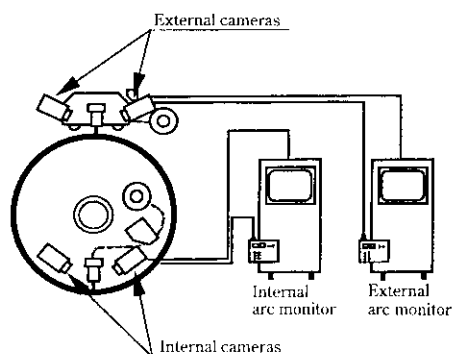


Fig. 3 System lineup of the arc monitor

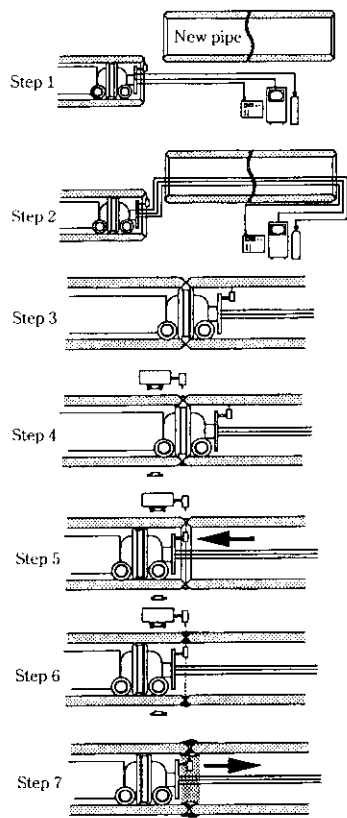


Fig. 4 Procedure of the internal/external simultaneous welding

源供給ケーブル、シールドガスホース、モニタケーブルおよびリモコンケーブル)を取り外す。

・ Step 2

新設管を吊りおろし、ケーブル類を通し、コネクタに再接続する。溶接ワイヤが不足している場合は、新しいワイヤリールに交換する。

・ Step 3

既設管と新設管を突合わせた後に内面溶接機を前進させ、クランプヘッドがパイプ突合わせ開先部へ移動した時点で溶接機を停止させ、開先をクランプする。

・ Step 4

外面溶接機のレールと溶接ヘッドをパイプ外面に取付け、外面開先做い後に外面初層溶接を行う。

・ Step 5

外面初層溶接終了後クランプを解除し、管内面トーチが開先部付近に来るまで内面溶接機を後退させる。この際の、トーチと開先の位置合わせは、視覚センサにより自動で行われる。その位置で、内面溶接機の位置固定のために再度クランプする。

・ Step 6

内面開先做いを視覚センサで行った後に、内面溶接を開始する。同時に、外面 2 パス目以降の溶接も行う。

・ Step 7

内・外面溶接完了後、外面溶接機のレールと溶接ヘッドを取り外す。内面溶接機のクランプを解除し、次の新設管の溶接部へと前進させる。

4 溶接条件および試験結果

4.1 溶接条件

溶接ワイヤは直径 0.9 mm のソリッドワイヤ、シールドガスは 70%Ar-30%CO₂ の混合ガスを用いる。内・外面ともにウィービングを用いた 1 層 1 パス多層盛り溶接を行う。Fig. 5 に、内外面同時溶接を $\phi 600 \text{ A} \times 15 \text{ t}$ 鋼管に適用した場合の積層方法を示す。内・外面ともにアーク起動の容易な下向き姿勢を溶接開始位置として、積層数はともに 3 層とした。溶接方向は、1~2 パスはパス間の溶け込みを重視した同方向溶接とし、3 パスは余盛り量を整えるために、反転溶接とした。

円周溶接の場合、溶接姿勢ごとに最適条件が異なるので、溶接姿勢に応じた細かな条件設定が必要となる。溶接条件は、パスごとに溶接電流、溶接速度、ウィービング幅、ウィービング速度およびウィービング停止時間などの 11 項目につき、管周 1° ごとに設定する。

Table 2 に、内外面同時溶接の溶接条件を示す。

両面溶接の課題となるルート部の溶け込み不足防止のためには、外面初層溶接の条件は溶接電流、溶接速度、ウィービングパターンなどを選定し、管全周にわたり裏波溶接となる条件に設定した。

Photo 4 は、その代表 4 姿勢位置の断面マクロ写真である。さらに、内面初層溶接の条件についても、外面初層溶接で用いた裏波溶

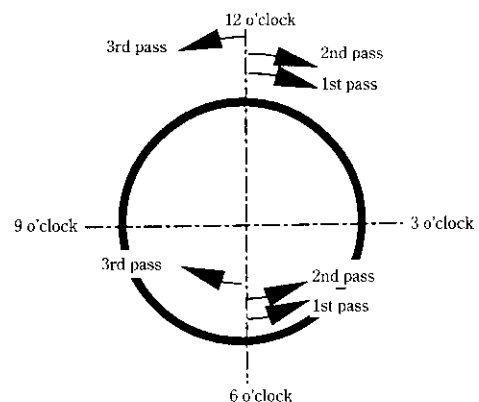
Fig. 5 Weld build-up sequence ($\phi 600 \text{ A} \times 15 \text{ t}$)

Table 2 Welding conditions for the internal/external simultaneous welding

Side	Pass	Welding current (A)	Welding voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Groove geometry
External	1st pass	140~180	18~22	35~63	
	2nd pass	140~160	18~21	15~25	
	3rd pass	100~145	17~20	9~20	
Internal	1st pass	160~185	19~23	36~66	
	2nd pass	140~160	18~21	15~25	
	3rd pass	100~145	17~20	9~20	

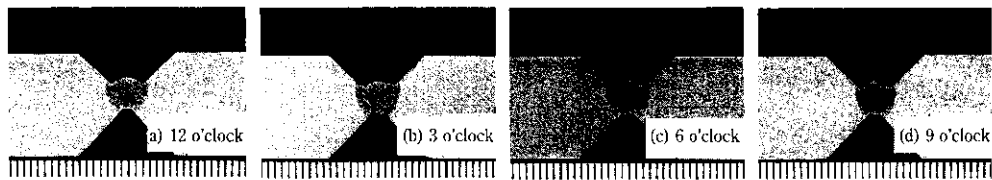


Photo 4 Macro photographs of the external 1st pass bead sections

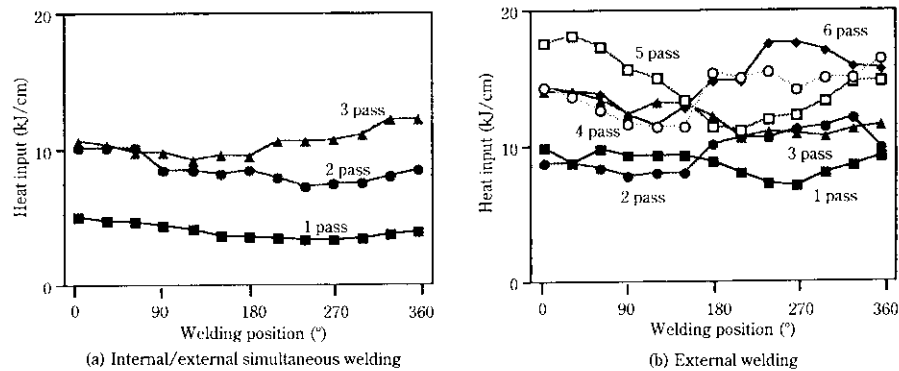
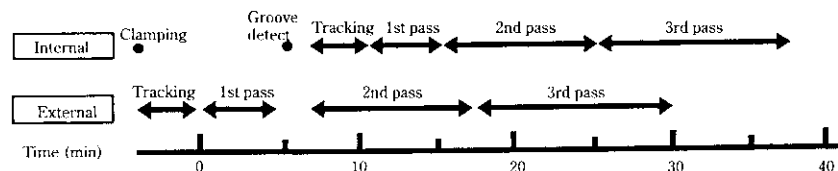


Fig. 6 Comparison of the heat input between the internal/external simultaneous welding and the external welding

Fig. 7 Welding time chart ($\phi 600 \text{ A} \times 15 \text{ t}$)

接の条件と同等のものをを用いて、ルート部の溶け込み不足を防止している。

4.2 溶接材料の選定

Fig. 6 (a) に内外面同時溶接の場合の、同図 (b) に外面自動溶接の場合の溶接パス・姿勢ごとの入熱を示す。内外面同時溶接の入熱範囲は $4 \sim 12 \text{ kJ/cm}$ 、外面自動溶接の入熱範囲は $7 \sim 18 \text{ kJ/cm}$ であり、内外面同時溶接は外面自動溶接の 60% 程度の小入熱溶接となっている。したがって、冷却速度の差から、同成分の溶接材料を用いた場合、得られる溶接継手強度および硬さは異なることが予想される。そこで、内外面同時溶接においても、従来自動溶接と同等の溶接継手強度および硬さを得るために、合金成分量を調整した溶接材料を供した。

4.3 溶接所要時間

内外面同時溶接を $\phi 600 \text{ A} \times 15 \text{ t}$ 鋼管に適用した場合の、溶接タイムチャートを Fig. 7 に示す。各パスのアークタイムは、1 パス: 4 min 、2 パス: 10 min 、3 パス: 13 min であり、全アークタイムは外面初層溶接開始から内面最終パス終了までで 37 min である。従来の外面 1 電極溶接による同鋼管に対する溶接所要時間約 100 min に比較し、ほぼ $1/3$ までに短縮できた。

Photo 5 は、短管を用いた内外面同時溶接の状況であり、外面溶接は 9 時位置で、内面溶接は 8 時位置で行われているところである。本溶接方法においては、内面溶接と外面溶接のアークが交差する部位が生じるが、その際にアークの乱れ、ビード形状の崩れ、内

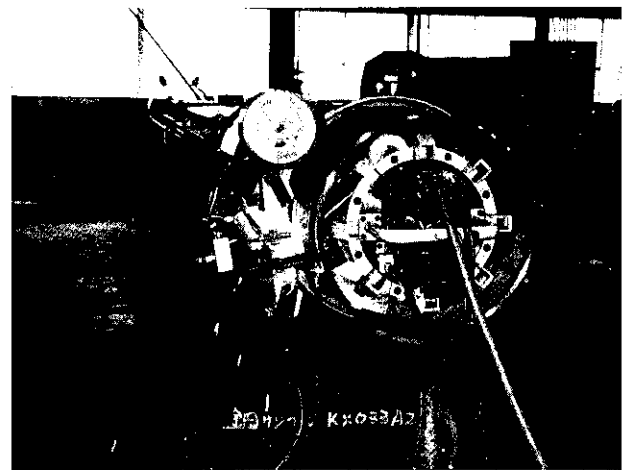


Photo 5 View of the internal/external simultaneous welding system

部欠陥の発生および継手性能の劣化といったアークの相互干渉による不具合の発生は認められなかった。

4.4 溶接継手性能

API 5L X60 $\phi 600 \text{ A} \times 15 \text{ t}$ 鋼管の内外面同時溶接継手の品質確性試験を行った。Photo 6 に、代表 4 姿勢位置の断面マクロ写真を示

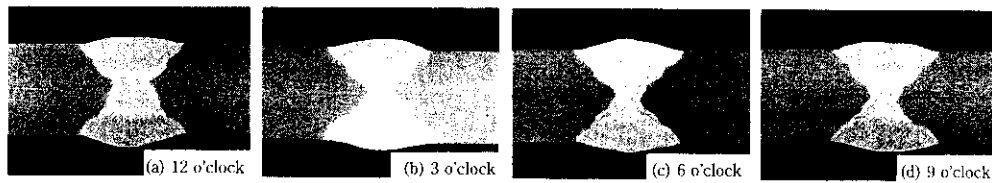


Photo 6 Macrophotographs of the bead sections removed from four representative welding positions

Table 3 Results of mechanical property examinations (for API 5L X65, $\phi 600\text{ A} \times 15\text{ t}$)

Tensile test	Fractured in base metal (574 N)
Surface bend test (R = 30)	No defects
Root bend test (R = 30)	No defects
Charpy impact test (Welding metal, at 0°C) (J)	Ave. 207
Charpy impact test (HAZ at 0°C) (J)	Ave. 271
Vickers hardness test (Load: 98 N) (Hv)	Max. 234

す。いずれの姿勢においても内面溶接と外面溶接の初層の溶込みが約 2 mm オーバーラップしていて、ルート部に溶込み不足のない、安定した溶接がなされたことがわかる。余盛り量についても、内・外面ともに管全周にわたり 1.0～2.5 mm の範囲におさまっており、良好なビード形状が得られた。

X 線透過試験においては、管全周にわたって JIS 1 級に合格して

おり、確認された溶接欠陥はすべてブローホールであり、融合不良や溶接割れは認められなかった。

その他の継手性能試験として、引張り試験、曲げ試験、衝撃試験および硬さ試験を行った。Table 3 に、試験成績の一覧を示す。全試験において、パイプライン溶接に適用可能な良好な継手性能を得ることができた。

5 結 言

- (1) パイプの内面と外面から同時に溶接を行う高能率円周自動溶接方法および装置を開発した。
- (2) アーク監視モニタの導入により、1 オペレータによる管内・外面 2 トーチ同時遠隔操作溶接を可能とし、作業環境の改善のみならず省力化をも達成した。
- (3) 本溶接方法のアークタイムは $\phi 600\text{ A} \times 15\text{ t}$ 鋼管の場合で約 37 min であり、従来の自動溶接工法による溶接時間 100 min のほぼ 1/3 までに短縮できた。
- (4) 本法による溶接継手の品質は、内部品質ならびに機械的性能ともに、パイプライン溶接に適用可能なレベルであることを確認した。

参 考 文 献

- 1) 鶴田東洋彦：「天然ガス新時代」，(1993)，224-240，[にっかん書房]
- 2) 山村政彦：「天然ガスパイプラインネットワーク計画」：配管技術，**38**(1996)8，49-53
- 3) 藤本智也：「パイプライン溶接の自動化と高速化」：配管技術，**38**(1996)8，74-76
- 4) 福原 昇，中野昭二郎，藤本智也：「パイプライン円周継手全自動溶接装置の開発」，配管技術，**36**(1994)2，50-54
- 5) 鎌倉和彦，福原 昇，阿草一男：「パイプラインの自動溶接」，川崎製鉄技報，**27**(1995)4，54-56
- 6) 福原 昇，石井秀明，阿草一男：「パイプラインの内面溶接ロボット」，建設機械，**32**(1996)2，74-79
- 7) H. Ishii, N. Fukuhara, and K. Agusa: "Internal and External Simultaneous Girth Welding Process for Pipeline", The 6th Int. Welding Sym. Jpn. Welding Soc. Nagoya (Japan), November (1996), 355-360