

赤秀 公造*2 古谷 博明*3 石田 昌弘*4

Application of High-Efficiency Submerged-Arc Welding to Circumferential Butt Joint

Kohzo Akahide, Hiroaki Furuya, Masahiro Ishida

要旨

大径厚肉鋼管の突合せ溶接継手を対象として、溶接法の高効率化の可能性について検討した。そして、溶接法としてサブマージークを採用し、2電極化、狭開先化した技術を確認した。鋼管径が1000 mm 以上の場合には2電極化が特に効果的な手法になり、たとえば1500 mm 径では単電極に比較して50%の効率向上が可能となる。次に、鋼裏当金を用いる継手の場合に関し、初層ビードに発生する気孔の防止策として高速度条件の有効性を示した。上記結果を総合化した2電極円周サブマージーク溶接法を台湾電力社シーバース建設工事に適用した結果、約40%の効率向上が得られ、その高能率性が確認された。

Synopsis:

A circumferential SAW technique characterized by a two-electrode system and narrowly grooved joint has been developed. The welding process is applicable to butt joints of large diameter heavy wall steel pipes. The two-electrode SAW technique is especially effective in welding steel pipes larger than 1000 mm diameter and the welding efficiency was experimentally confirmed to be up to about 50% higher than that by the conventional single electrode. In welding a V-groove joint with steel backing, blowholes are apt to occur in the first pass bead and so their cause and countermeasure have been studied. As a result of an application of this new technique to the construction of offshore berth facilities in Taiwan, 40% increase in efficiency was attained in welding steel pipes of 1500 mm diameter and thus its high productivity and practicality have been proved.

1. 緒 言

海洋構造物をはじめ各種土木、建築構造物に厚肉鋼管が利用されている。これらの構造物の製作に際しては、溶接技術の良否が品質およびコストを左右する大きな要因となるため、各溶接継手に対応した技術的検討が重要となっている。

鋼管同士の突合せ継手は鋼管構造での代表的なものであり、その溶接には管径、板厚、要求品質、適用作業条件などを勘案して、サブマージーク溶接(以下SAWと記す)、ガスシールドアーク溶接、被覆アーク溶接などが下向、横向または全姿勢で適用される。これらの溶接では、ほとんどの場合曲面でのビード形成が課せられるため、能率的な施工法の採用が制限され、一般的には高能率なSAWを用いたとしても小入熱条件での応用が強いとされている。したがって、その効率改善が構造物製作コスト低減のための重要課題となっている。そこで、厚肉鋼管の突合せ継手を対象に鋼管を回転させながら下向姿勢で施工するSAW法に関し、高能率化の可能性について研究を実施した。合わせて、鋼管構造の継手として多用される鋼製裏当金併用、片側溶接の場合の気孔防止手法についても検討した。本報告では、それらの研究概要と確立した溶接法の実工事、すなわち台湾電力興達発電所シーバース建設工事¹⁾への適用について述べる。

2. 円周溶接の高能率化に関する検討

2.1 ビード形成上の特異性と高能率化の基本思想

溶接効率を向上させる策としては、①単位時間あたりの溶着量の増加、②開先断面積の減少による所要溶着金属量の低減、が考えられる。いずれの場合も、高能率性に関しアーク発生時間の減少による直接的効果が期待できるとともに、パス数の減少に基づくスラグ剥離所要時間の短縮が有効に作用する。①では、大電流化と多電極化が具体的手法であり、大径管の4電極シーム溶接²⁾や造船での4電極片面溶接³⁾などがその例である。②では、最近圧力容器をはじめ多くの分野で実用化が図られている狭開先溶接法⁴⁾を挙げることができる。また、大電流条件を採用して深溶込み化することにより狭開先を可能としたKX法⁵⁾は両者の効果を狙ったものである。

ところで、本報で対象としている円周溶接においては、水平面で行う下向姿勢での突合せ溶接と異なり、傾斜面でのビード形成という条件が付加されるため、高能率化に対する制約が生じる。すなわち、アーク溶接でのビード形成は、溶融池内における溶融金属の静圧とアークの圧力が平衡しながら、凝固が進行して行われる。一般的には、母板が水平の場合に溶融池内の

*1 昭和58年9月14日原稿受付

*2 エンジニアリング事業部構造技術研究所構造研究室主任研究員(課長)・工博

*3 エンジニアリング事業部土木技術部土木技術室主任(課長)

*4 エンジニアリング事業部土木技術部土木技術室主任(課長補)

力の平衡がビード形成上適当な状態となり、Fig. 1 (b) に示すような円滑な形状のビードが得られる。一方、母板を傾斜させた場合には、静圧の変化に対応して溶融池内溶接線方向への溶融金属の流れが生じる。したがって、下り傾斜溶接では、Fig. 1 (c) に示すように中央部が凹状かつオーバーラップ傾向のビードが、また上り傾斜溶接では (a) 図のように両端がくぼみ気味で、中央が凸状のビードが形成される。鋼管の外面から円周溶接を行う場合には、下り姿勢から上り姿勢へ移行しながらビードが形成されるため、(d) 図に示すようにビード止端部が下り溶接の、中央部が上り溶接の特性を備えたビードとなる。

上記の現象から、円周溶接でのビード形成に対しては、溶融池が適当な傾斜角の範囲^{*)}になるように溶接を進行させることが最重要事項となる。したがって、高能率化の手法としては、溶融池の長さが大きくなるような方法、すなわち溶着量を増加させるに効果的な大電流化、多電極化には限界が生じる。一方、所要溶着量を低減できる狭開先化は溶接姿勢にかかわらず溶接時間の短縮を図るに有効となる。なお、一般的には多層溶接となる厚肉の円周突合せ継手では、開先内への肉盛りとなり、単位時間当たりの溶着量が能率を左右する。この場合、溶接速度の大小は基本的には能率性とは無関係になる。

以上の観点から、鋼管円周突合せ溶接の能率を向上させるには各パスでの電流値を許容しうる範囲で最大に設定するとともに開先形状の選定、すなわち狭開先化が効果的な策になると考えられる。

2・2 平板上溶接での溶接条件と溶融池長さの関係

2・2・1 単電極の場合

傾斜面の溶接では、溶融池長さ a の小さい溶接条件の設定が

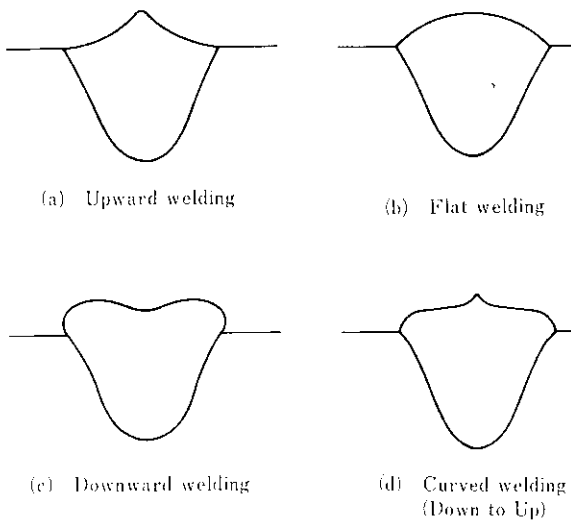


Fig. 1 Schematic illustrations of cross sectional weld bead at various welding positions

*) 右図のように中心が円弧の頂点 A になるよう長さ a の溶融池を形成して円周溶接が進行していると仮定すると、溶融池先端での接線 cd が水平面となす角度 θ は溶融池が形成する円弧角、 $2\theta = 360a/\pi D$ の関係から求まる。すなわち、この場合下り θ から上り θ の範囲で溶接が進行することになり、溶融池長さ a が大きいほど、また鋼管径 D が小さいほど、より大きな傾斜角 θ でのビード形成が必要となる。

基本となるため、 a と溶接条件因子との関係について検討を行う。Christensen ら⁹⁾は溶接熱源を移動点熱源と仮定して熱伝導解析することにより(1)式のように無次元化した溶融池長さ λ と溶接パラメータ n の関係を求めている。

$$\lambda = n \dots\dots\dots(1)$$

λ 、 n は(2)、(3)式で定義される。

$$\lambda = \frac{va}{2\alpha} \dots\dots\dots(2)$$

$$n = \frac{qv}{4\pi\alpha^2c\gamma(T_c - T_0)} \dots\dots\dots(3)$$

ここで a : 実際の溶融池長さ

v : 溶接速度

α : 平均的熱拡散率

q : 熱量 (電流と電圧の積)

c : 比熱

γ : 比重

T_c : 鋼の溶融温度

T_0 : 母板の初期温度

(1)~(3)式から溶融池長さ a は(4)式となる。

$$a = \frac{q}{2\pi\alpha c\gamma(T_c - T_0)} \dots\dots\dots(4)$$

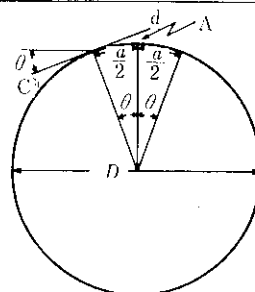
この式で分母は熱定数であるから、 a は熱量すなわち電流と電圧の積に比例し、溶接速度には無関係な値となる。

溶接条件の設定においては、アーク電圧は電流、速度に応じて適正に選定されるものであり、実用範囲で30~40V程度とほぼ一定値とみなせる。したがって、溶融池長さは溶接電流によって決まる値として取り扱うことができ、平板上溶接実験で両者の関係を求めたのが Fig. 2 である。溶融池長さが電流に比例するとともに、速度に依存しないことが実験からも証明される。

2・2・2 2電極の場合

実験から求めた2電極溶接溶融池長さを単電極の場合と合わせて Fig. 2 に示した。なお、極間距離は25 mm である。図から分かるように、先行極と後行極の合計電流値で整理すれば、単電極の場合とほぼ同じ関係で、 a は電流に比例するとみなすことができる。すなわち、一定の a に対して電流値に単電極溶接と2電極溶接間で差がみられない。このことから傾斜溶接に対する2電極溶接の有利性を認めることができない。

しかし、ビード形状と溶接条件の関係において、単電極溶接の場合、高電流、高速度条件範囲で、アンダカットなどの表面欠陥発生から実用条件が制限されるが、2電極溶接では相当広い範囲 (電流、速度ともに単電極の約2倍) にまで広がる。したがって、このような場合には2電極溶接による高能率化の可能性が生じる。すなわち、大径鋼管の場合に2電極溶接の有効性が発揮されると推定できる。



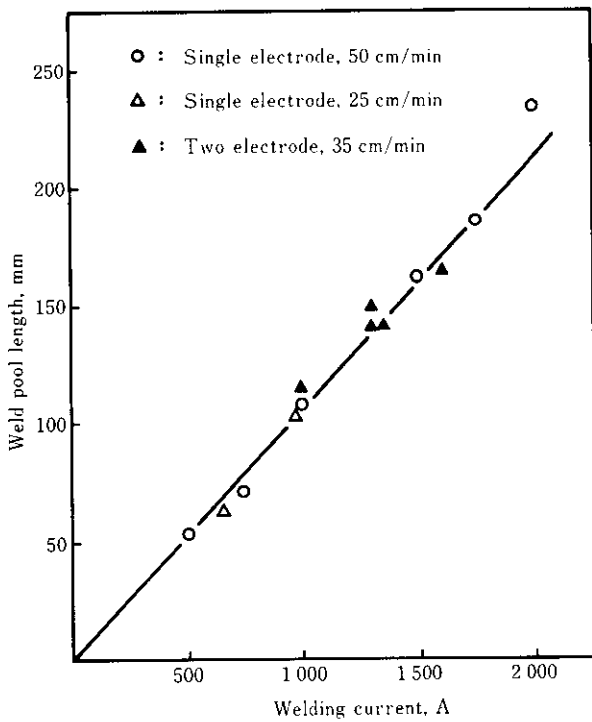


Fig. 2 Relationship between welding current and weld pool length

2.3 2 電極溶接の条件設定

2.3.1 母板傾斜角がビード形状におよぼす影響

前節で述べた溶融池長さや溶接条件因子の関係は水平面でのものである。傾斜面上での溶接では、溶融池内における溶融金属の流れに重力が影響して、溶融池長さが変化することも考えられる。溶融池長さおよびビード形状と母板傾斜角の関係についての実験結果をまとめたのが Fig. 3, Photo. 1 である。溶融

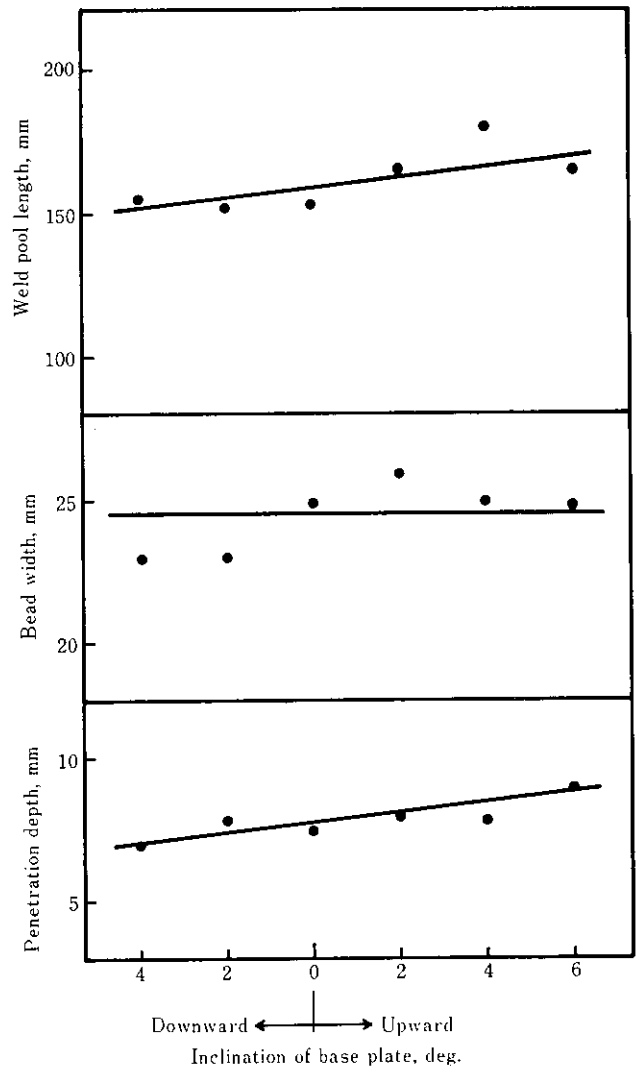


Fig. 3 Change in bead shape and weld pool length by inclination of base plate

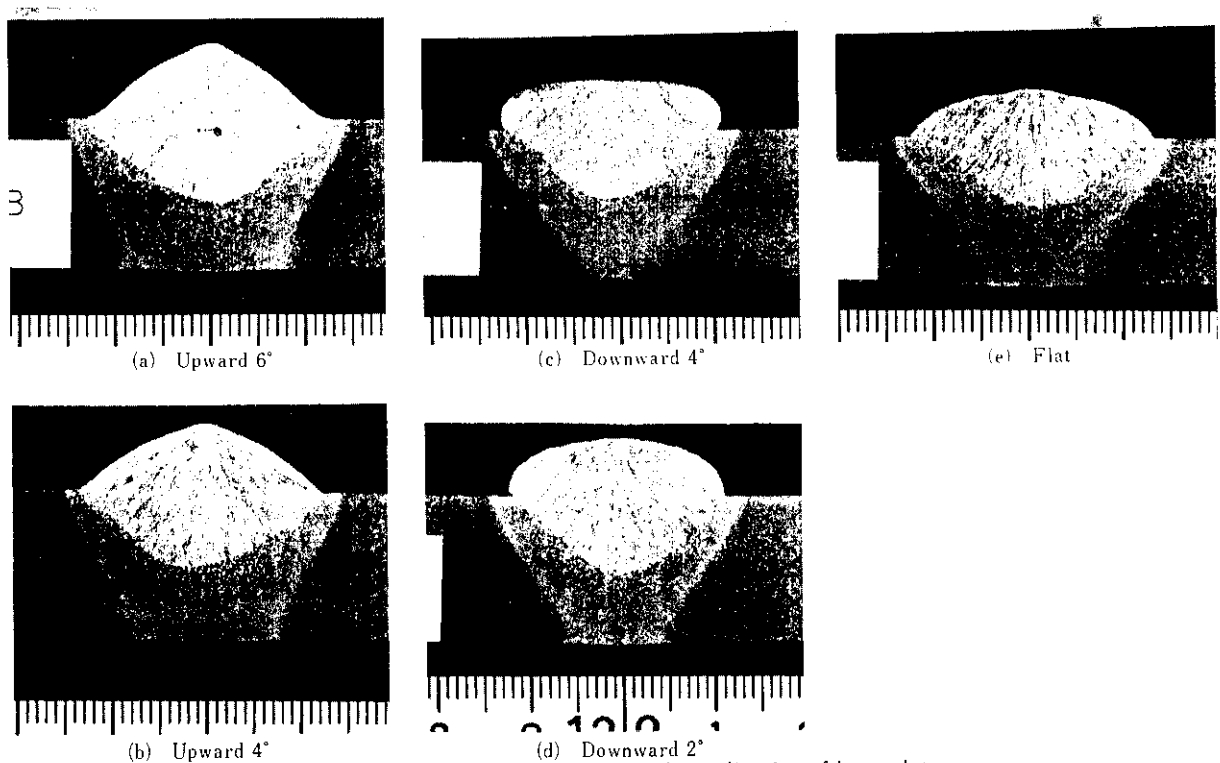


Photo. 1 Variation of bead shape by inclination of base plate

池長さ a は下りから上りへの移行につれて角度が大きくなるほど増加するが、その量は 5° の変化に対して 10 mm で初期長さの 10% 以下である。したがって、条件設定に際しては、 a に水平面での値を用いても大きな相違は生じないと考えられる。余盛形状については、平板上溶接のため **Photo. 1** にみられるように余盛量が過剰となり、下り傾斜においてはオーバーラップが生じ、また上り傾斜では極度な凸形ビードとなっている。しかし、開先内への溶接で適正余盛とした場合には、同一条件でも欠陥のない実用可能なビードになることが **Photo. 2** に示すように下り 4° の実験例からも確認される。



Photo. 2 Bead shape of 4° downward welding with V-groove

2・3・2 円周溶接条件の推定

径 1500 mm の場合を例として、円周溶接条件の設定を試みる。円周溶接での溶接可能母板傾斜角は、この程度の径の場合、単電極での施工実績から円弧角 θ として $10\sim 12^\circ$ を目安にできる。そこで、 θ を 10° に仮定するとビード形成が進行する範囲(単電極の場合には溶融池長さに相当)は 130 mm になる。ここでの2電極溶接では、極間距離が 25 mm であるから、それを加えた

155 mm の溶融池長さとなる条件が能率を考慮したものとして推定できる。具体的には先行極、後行極の合計電流値、 1400 A が **Fig. 2** から求まる。

余裕を有する値として、先行、後行極ともに 650 A とした条件を基本に、2段V形状とした狭開先および一般的V開先について標準的溶接条件を設定し、**Table 1** にまとめて示した。(A) の場合には、シール溶接に採用した炭酸ガスアーク溶接で、裏当金までの溶込みが確保できることを前提とした。そして、これらの条件が水平面での溶接のみならず、上り 4° ~ 下り 4° の範囲で実用上問題のないビード形状になることを確認している。

なお、**Table 1** の条件において、狭開先化に基づく能率向上は約 12% であり、板厚が 25 mm とさほど大きくないため、その効果は少ない。しかし、板厚が更に増大する場合には、狭開先化は能率改善に著しく有効なものとなる。一方、2電極化に基づく能率向上は、単電極溶接での適用可能電流が 900 A 程度であるから約 50% に相当する。したがって、ここで設定した溶接条件では、従来技術に比較して、狭開先化した(B)で 60% 、通常開先の(C)で 50% 程度の能率向上が期待できる。

2・3・3 実管による溶接条件の確認

溶接条件の設定手法に関する実験の一環として、鋼管を用いた実大モデル試験を実施した。実験の状況を **Photo. 3** に示す。供試鋼管は SM-50、外径 1500 mm 、肉厚 25 mm 、長さ 4000 mm のもので、開先をルート間隔 $2\sim 4\text{ mm}$ 、角度 60° のV形状とし、ルート間隔 4 mm 、角度を 60° と 32° に2段に変化させて狭開先化を図った変形V形状の2種類とした。溶接条件を前述の板状試験体の実験に基づき2電極方式で電流を $600\sim 700\text{ A}$ 、速度を $25\sim 50\text{ cm/min}$ に設定した。供試溶接材料は焼成型フラックス KB-120とワイヤ KW-50C の組合せである。

ビード形状におよぼす電極位置の影響を求めたのが **Photo. 4** である。これから、溶融池が下り 8° ~ 上り 6° の範囲にある場

Table 1 Estimated welding parameters for pipe with diameter of 1500 mm and thickness of 25 mm

	Joint geometry (mm)	Seal welding process	Submerged arc welding				
			Layer	Pole	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)
(A)		CO ₂ gas shielded arc welding	1st	Lead	650	29	50
				Trail	650	29	
			2nd	Lead	650	29	50
				Trail	650	29	
			3rd	Lead	650	29	40
				Trail	650	29	
(B)		Shielded metal arc welding	1st	Lead	700	30	50
				Trail	700	30	
			2nd	Lead	700	30	40
				Trail	700	30	
			3rd	Lead	650	30	35
				Trail	650	30	
(C)		Shielded metal arc welding	1st	Lead	750	32	40
				Trail	750	32	
			2nd	Lead	750	32	40
				Trail	750	32	
			3rd	Lead	650	30	30
				Trail	650	30	

合に実用性のあるビードが形成できると考えられ、電極の設定位置として後行極で下り4°が最適と判断できる。また、写真からもわかるようにビードは一樣傾斜の場合に比較して形状が滑らかなものであり、2種類の開先ともに一樣傾斜での実験から推定した円周溶接条件の妥当性を確認できた。

2.3.4 鋼管径と溶接条件の関連性

鋼管径に対応させ、溶接電流の上限を推定したのが Fig. 4 である。これは前述の実験からビード形成可能傾斜面角度を10°と仮定して求めたものである。直線で示したように径に比例的



Photo. 3 Circumferential welding of large diameter pipes

に溶接電流を増加することができ、大径ほど高能率化が図れる。しかし、径の増大にしたがい一樣傾斜に近づくため、許容傾斜

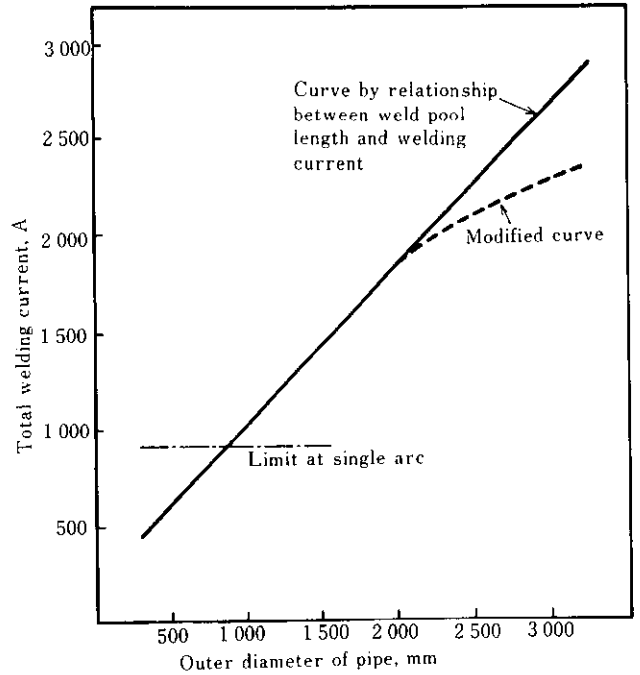
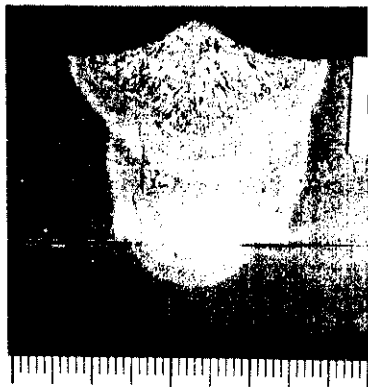
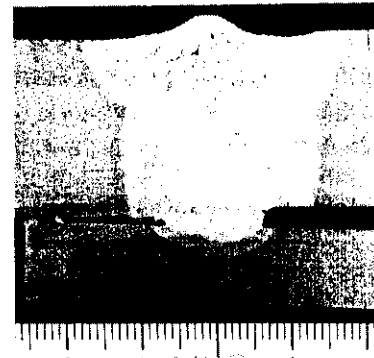


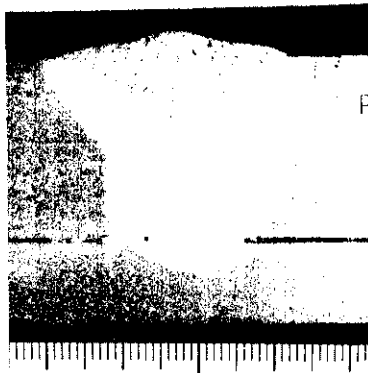
Fig. 4 Available maximum welding current estimation for various outer diameter of pipe



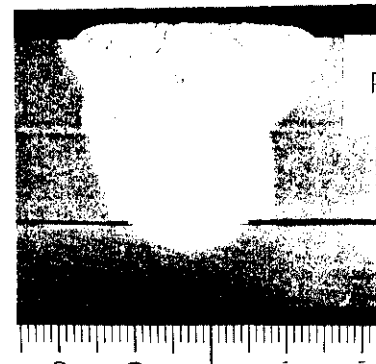
a) Flat position at trail
(Weld pool : 2° downward)
~10° upward



b) 2° downward position at trail
(Weld pool : 4° downward)
~8° upward



c) 4° downward position at trail
(Weld pool : 6° downward)
~6° upward



d) 6° downward position at trail
(Weld pool : 8° downward)
~4° upward

Photo. 4 Change in bead shape of curved welding by position of electrode

面角度が縮小されるはずであり、点線で示したように最大溶接電流は漸次飽和する。したがって、各径ごとの条件設定に際しては、Fig. 4 が目安になるものの最終的には実験的検証が必要といえる。

3. 鋼裏当金初層ビードに発生する気孔の形態と防止策

3.1 気孔の発生傾向と形態

鋼裏当金を併用する継手の2電極円周溶接において、初層ビード部に気孔発生確率の高いことが前章の実験過程でみられた。このような継手での気孔は通常ルート部から発生し、プライマー塗布鋼板にすみ肉溶接したときに生じるもの⁷⁾と類似している。

そこで、円周SAWで生じた気孔に関し、まずその形態について調査した。気孔の発生状態の例を示したのがPhoto. 5, 6である。それぞれはビード横断面マクロ組織、裏当金を削除した後の母材裏面における水平断面マクロ組織であり、同時に模式図に示したようにルート部から1mm径程度の気孔(点線部分)がまず発生して、次にその部分に溶融金属が流入し、一部が再溶融されるものの部分的に気孔が残存(実線部分)していることがうかがえる。この気孔の形態から、成因はFig. 5に模式的に示すように裏当金と母板裏面の隙間に生じた気体(6)の溶接熱による圧力上昇と凝固途上溶接金属(1)から溶融金属(2)への逸脱現象にあると推測される。

このような気孔の生成機構から、対策として(1)水分、有機物などのガス発生源の排除、(2)生成ガスの圧力低減などが考えられる。

3.2 ガス源に対する実験的検討

気孔発生に関し円周溶接の特殊性のないことを確認したうえ、

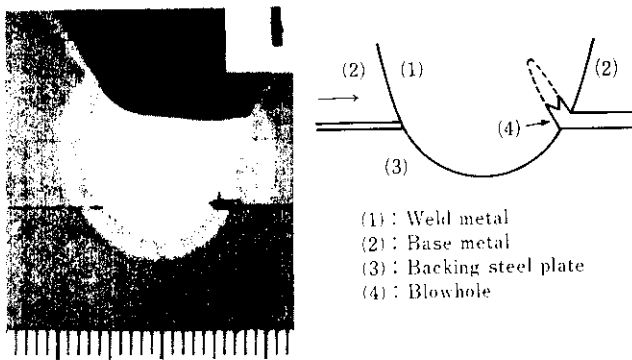


Photo.5 Cross bead section showing blowhole occurred

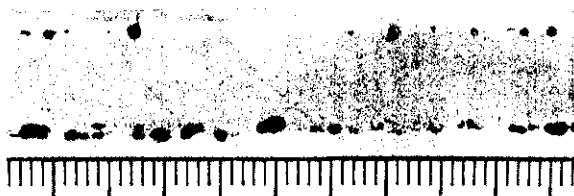
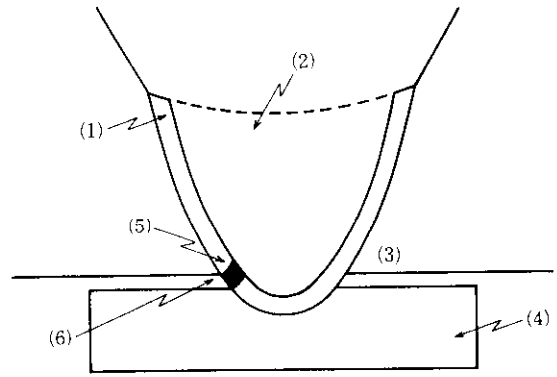


Photo. 6 Horizontal bead section at root showing blowholes occurred



- (1) : Solidified weld metal
- (2) : Molten weld metal
- (3) : Base metal
- (4) : Backing steel plate
- (5) : Blowhole
- (6) : Pressed gas

Fig. 5 Schematic illustration showing occurrence of blowhole

板状試験体を用いて気孔とガス源との関連性について検討を行った。溶接材料はフラックス KB-120、ワイヤ KW-50 C の組合せである。開先は角度60°、ルート間隔4 mm のV形状とした。実験条件として、(1)フラックスの吸湿状態、(2)鋼裏当金表面の有機物付着状況、(3)予熱状況、(4)母板と裏当金の間隙を変化させた。

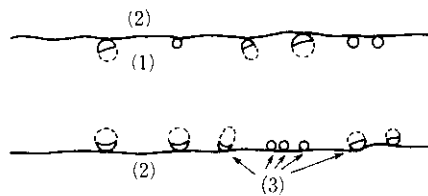
実験の結果、次のことが明らかになった。

- (1) ガスバーナで予熱を行う場合、燃焼ガスの急冷で生成する結露水分が裏当金と母板の隙間に入り、気孔の発生傾向が著しく増加する。
- (2) 前記した裏当金への付着水分は母板を150°C程度の高温に予熱しても完全には除去できない場合がある。
- (3) フラックス中水分はこの種の気孔の発生にさほど影響をおよぼさない。
- (4) 裏当金と母板との隙間は気孔の発生量を低減させるに有効である。
- (5) 裏当金に付着した有機物は気孔発生を促進させる。
- (6) 裏当金、母板を清浄にして、200°C予熱を行った場合でも気孔発生確率が高い。

以上の結果から、気孔防止策の確立には更に詳細な検討の必要が示唆される。

3.3 溶接条件による気孔の防止策

溶接フラックスの種類、単電極と2電極溶接の比較を含め、溶接条件と気孔発生傾向の関係について実験を行った。フラックスを変化させた実験では、2電極溶接の場合、フラックス間



- (1) : Weld metal
- (2) : Base metal
- (3) : Blowhole

で気孔の発生数に多少の相違が認められるが、本質的には有意差はないと判断できた。このことの妥当性は後述する単電極溶接の実験 (Fig. 6 参照) から証明される。2電極溶接の単電極溶接での気孔発生傾向を比較したのが Table 2 である。本実験では、前節と同一の溶接材料を用い、気孔の発生を加速させる目的で、裏当金に有機物を付着させて溶接を行った。2電極溶接では、いずれの条件でも極めて多数の気孔の発生が認められる一方、単電極の場合には大幅に気孔数が減少する。このことから単電極溶接の優位性が示唆される。

そこで、単電極溶接の場合に関し溶接条件と気孔発生との関連性について検討した。溶接速度による気孔発生度の変化をまとめて示したのが Fig. 6 である。実験条件として、適正な溶込み深さになるよう速度に応じて電流、電圧を600 A, 30 V から850 A, 35 V の範囲で変化させた。図で溶接速度と気孔との明ら

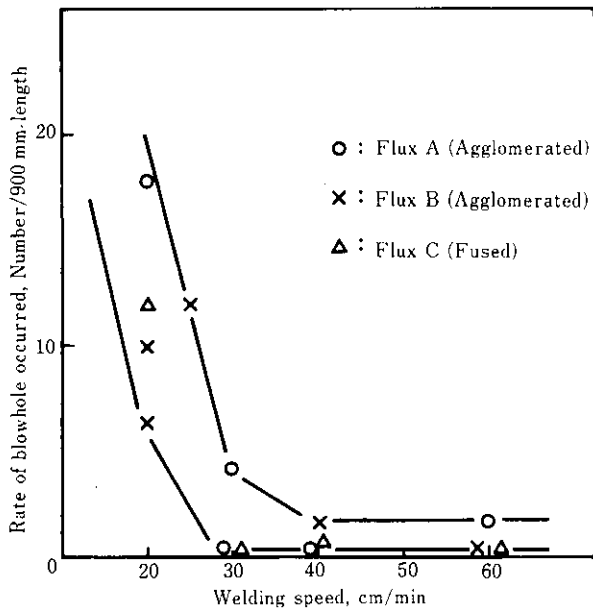


Fig. 6 Relationship between welding speed and rate of occurrence of blowhole

Table 2 Comparison of blowholes occurred by various welding parameters

No.	Welding process	Welding Speed cm/min	Heat input kJ/cm	Index of blowhole occurred*
21	Two electrode SAW	80	37	4
22		60	42	5
23		40	59	5
24		40	62	5
25		40	67	5
11	Single electrode SAW	60	27	1
12		40	34	2
13		30	39	1
14		30	42	2

* Index 1: Number of biowhole occurred, 0 / m
 2: 1~5/m
 3: 6~10/m
 4: 10~20/m
 5: more than 21/m

かな相関関係が示され、高速度条件ほど発生しやすいという一般的に理解されている相関³⁾に反して、低速度で多発する現象が認められる。そして、30 cm/min が気孔多発の臨界速度条件となっている。なお、入熱量と気孔の関係については大入熱ほど気孔発生数が増加する傾向がみられるが、速度との関係ほどには明りょうなものではない。

3・4 発生機構からみた気孔と溶接条件の関連性

前節の実験結果と気孔の発生機構を考え合わせると、気孔と溶接速度の関連性を次のように推測できる。気孔は Fig. 7 のように溶接金属の凝固途中段階で発生するが、その生成条件は凝固過程において変化する溶接金属の強度、 S と裏当金と母材間に存在する気体圧力、 P の相対関係に依存する。すなわち、模式的に Fig. 8 に示すように、時間経過につれて P 、 S とともに上昇するが、 P が S を越えた場合に気孔が生成し、その瞬間同時に P は低下する。 P と S の関係は溶接条件で変化するが、Fig. 9 で溶接速度の上昇は S の増加を加速させ、逆に P の増加を減速させるため、気孔防止に効果的な対策となる。また、2電極溶接では、溶接金属の凝固が後行極通過後にはじめて進行するようになるため、凝固金属の強度上昇曲線が大幅に長時間側へず

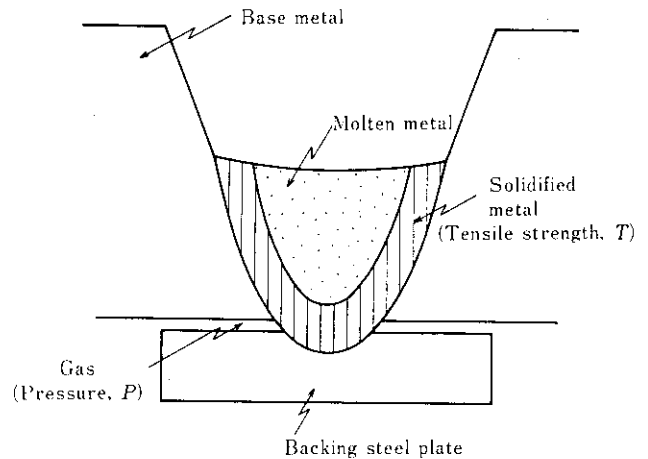


Fig. 7 Schematic illustration showing bead formation

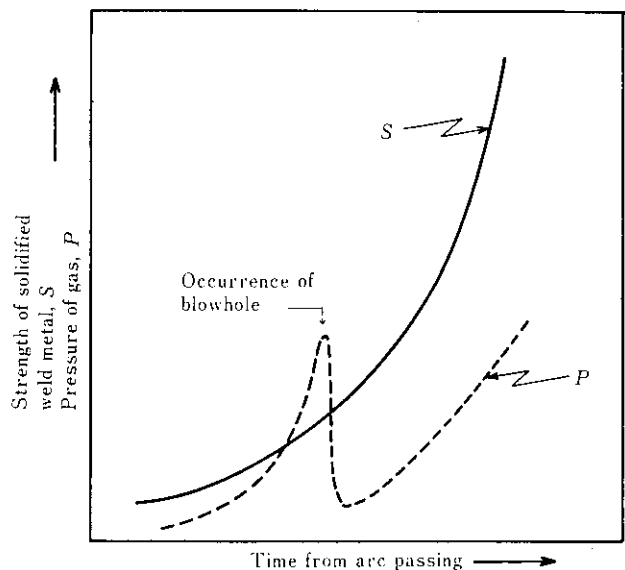


Fig. 8 Time curves of solidified weld metal strength and gas pressure at root during welding

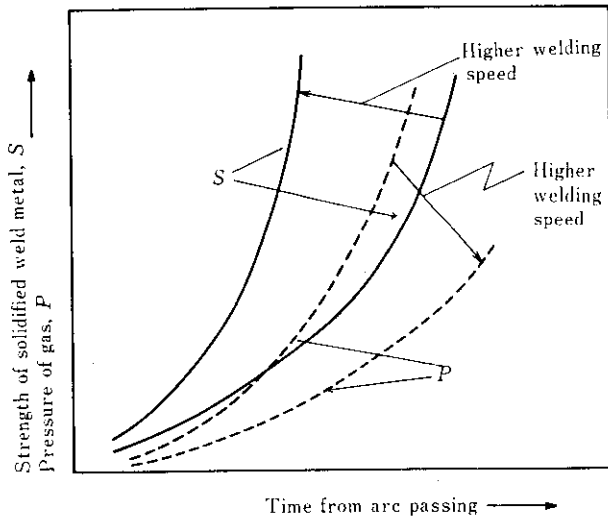


Fig. 9 Change in time curves of solidified weld metal strength and gas pressure by welding speed

れるのに対し、その間気体の圧力上昇は先行極通過後から進行して気孔が生成しやすくなると推定できる。

以上のように、鋼製裏当金を用いて外面側からのみ溶着する円周溶接において、初層ビードの気孔の発生を防止するためには、適当な溶接速度範囲とした単電極溶接条件が有効なものとなる。したがって、高能率化を狙った2電極溶接条件は第2層以後に適用すべきであり、Table 1 に示した溶接条件はこの点に対する修正が必要となる。

4. 円周溶接技術の工事への適用例

確立した溶接法を昭和56年8月～57年3月にわたって現地溶接施工を実施した台湾電力興達火力発電所の石炭荷揚げ用シーバース工事に適用した。溶接条件は初層単電極、第2層～最終層を2電極とし、高品質を確保しつつ高品質化を図ったものである。本工事においても、初層溶接条件と気孔発生率の関連について実験を実施したが、単電極で速度30 cm/minの場合、48継手に対してX線透過試験 JIS 1級が98%、同じく速度40 cm/minの場合、16継手に対して100%とすぐれた成績が得られた。また、継手の機械的性質についても Table 3～6 に示すように適

Table 4 Welding consumables used

SAW wire	KW-50 C (4.0 mm φ)
SAW flux	KB-120 (12×200 mesh)
Covered electrode for tack welding	KS-76 (4.0 mm φ)

Table 5 Tensile strength of welded joints

Steel	Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)
ASTM A572-45	41.1	53.2
ASTM A572-55	40.9	53.2
ASTM A572-45	—	59.8
ASTM A572-55	—	59.1

Table 3 Steel plates for mock-up test

Steel	Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Chemical composition, %					
				C	Si	Mn	P	S	Nb
ASTM, A572-45 (25 mm t)	37.5	49.7	30	0.15	0.21	0.90	0.020	0.006	0.009
ASTM, A572-55 (36 mm t)	42.3	57.5	25	0.15	0.24	1.57	0.020	0.004	0.026

Table 6 Absorbed energy of welded joint, kg · m

Steel	Notch position		Testing temperature (°C)			
			-20		0	
ASTM A572-45	Face	WM	7.4, 6.1, 5.3	(6.3)	9.3, 10.0, 11.3	(10.2)
		Bond	19.0, 10.8, 20.0	(16.6)	17.7, 14.0, 17.6	(16.4)
		HAZ	9.9, 19.1, 19.1	(16.0)	11.0, 21.5, 20.5	(17.7)
		BM	11.0, 16.7, 16.3	(14.6)	20.0, 23.2, 20.7	(21.3)
	Center	WM	5.4, 5.5, 6.4	(5.7)	9.8, 8.7, 8.7	(9.1)
		Bond	16.1, 11.0, 16.0	(14.4)	12.2, 14.8, 19.7	(15.6)
		HAZ	16.1, 16.1, 14.4	(15.6)	21.5, 24.1, 22.0	(22.6)
		BM	12.1, 16.1, 13.9	(14.0)	18.4, 17.3, 19.2	(17.3)
ASTM A572-55	Face	WM	4.0, 4.3, 5.1	(4.5)	6.0, 6.0, 7.0	(6.3)
		Bond	5.0, 2.2, 5.9	(4.4)	9.1, 19.8, 19.7	(16.2)
		HAZ	14.4, 18.9, 8.2	(13.8)	27.1, 25.3, 19.6	(24.0)
		BM	21.2, 16.1, 13.6	(16.9)	29.1, 29.5, 29.0	(29.2)
	Center	WM	4.0, 4.1, 4.7	(4.3)	10.4, 9.3, 5.9	(8.5)
		Bond	3.1, 3.2, 4.1	(3.4)	4.4, 4.1, 13.6	(7.3)
		HAZ	4.1, 6.9, 3.1	(4.7)	17.9, 11.6, 11.0	(13.5)
		BM	5.6, 5.6, 6.4	(5.9)	8.7, 7.7, 8.1	(8.1)

度な強度と高靱性を備えたものである。能率については、従来技術である単電極 SAW 法によれば0.5本/日(平均3継手/本)製作と予想されたが、適用技術では40%の能率向上に相当する0.7本/日処理することができ、その高能率性を確認した。

以上のように、大径鋼管の突合せ溶接を対象に確立した2電極サブマージアーク溶接法の有効性を実工事において実証することができた。

5. 結 言

鋼管の円周突合せ溶接の高能率化を目的として、サブマージアークを2電極で用いる溶接技術の適用性に関し検討を行い、技術の確立を図るとともに実工事への応用を試みた。得られた主な結果を以下にまとめる。

- (1) 円周溶接では、ビード形成上から溶融池長さに径に対応する限界値が存在し、そのため高能率化が制約される。そして、溶融池長さが溶接電流に比例して増大し、溶接速度では変化しないことを示した。
- (2) 2電極方式の場合、先行極と後行極の電流値の和に比例して溶融池長さが変化する。したがって、円周継手へのその適

用が小径では限定されるが、大径ほど効果的な方法となる。たとえば、1500 mm 径の場合には単電極に比較して50%の能率向上が期待できる。

- (3) 狭開先化は厚肉鋼管ほど能率改善に有効な手法であるが、25 mm 厚ではその効果は10%程度と比較的小さい。
- (4) 1500 mm 径鋼管を具体例として、2電極サブマージアークを用いた高能率溶接技術を確立した。
- (5) 鋼当金を用いた継手の溶接では、初層ビードでの気孔発生確立が高い。この気孔はルート部近傍、裏当金と母板の間に存在する気体の膨張に基づき生成すると考えられる。
- (6) この種の気孔は単電極溶接よりも2電極溶接のほうが生成しやすい。また、単電極の場合低速度条件ほど発生率が高い。したがって、防止策として高速化した単電極溶接条件が有効となる。
- (7) 気孔の生成条件は気体の圧力と溶接金属高温強度の相対関係から推測できる。
- (8) 確立した2電極サブマージアーク円周溶接技術を台湾電力興達発電所シーバース建設工事に適用し、その高能率性を実証した。

参 考 文 献

- 1) 富永真生ら：「オフショア構造物への大径U₂OE鋼管杭の利用」, 川崎製鉄技報, 15 (1983) 4, 308-317
- 2) 川端文丸ら：「UOE大径鋼管製造への4電極サブマージアーク溶接の適用」, 川崎製鉄技報, 14 (1982) 4, 436-443
- 3) K. Terai *et al.* : "Development of One-Run One-Side Automatic Welding Process" Trans. of Japan Welding Society, 4 (1973) 2, 199-206
- 4) たとえば, 平井征夫ら：「狭開先サブマージアーク溶接法—NSA法—」, 川崎製鉄技報, 14 (1982) 1, 56-68
- 5) K. Akahide *et al.* : "Development of One-Run One-Side Automatic Process", Preprint of the 2nd International Symposium on the Advanced Welding Technology, The Japan Welding Society, Osaka (Japan), August (1975)
- 6) N. Christensen *et al.* : "Distribution of Temperature in Arc Welding" British Welding Journal, 12 (1965) 2, 54-75
- 7) 坂本昇ら：「プライマー塗装鋼板のサブマージアーク水平すみ肉溶接部に発生する気孔について」, 溶接学会溶接法研究委員会, (1971)
- 8) たとえば, 鈴木春義, 田村博：「溶接金属学」(1978), 108, [産報出版]