Fig. 9 Results of bending tests

Table 7 Results of Charpy impact tests (0°C)

Weld No.	Impact value (J/cm ²)
1	22 (19-16)
2	32 (22-42)
3	40 (33-48)
4	62 (57-66)
5	73 (68-78)
SM41	43 (38-49)
SM50	147 (145-151)

(Dimension of specimen)

である。なお、衝撃値は数個の試験片の平均値で示しているが、参考のためその最小値と最大値を括弧中に示した。表より SM41 材においては、シールドしない場合の衝撃値が約 22 J/cm² であるが、これに対してパテシールド法を用いた場合のそれは 40 J/cm² で母材のその 43 J/cm² にかかなり近い値を示している。一方、SM50 材においては、パテシールド法による水中溶接部の衝撃値は 62 J/cm² で、大気中溶接部の 73 J/cm² に近い値を示しており、実用上問題ないことがわかる。

以上の結果を総合すると、シールド法によって溶接部の冷却速度の低下を計れば、湿式水中溶接における溶接

部の延性及び靱性を改善し得ることが明らかとなった。

4. 結 言

得られた主な結果は以下のようにまとめられる。

(1) シールド法を用いることによって湿式水中溶接部の冷却速度を低下し、その硬化を防止できる。

(2) シールドなし、耐火材シールド及びパテシールドによる水中溶接部冷却速度 (R) 及び 800°C から 500°C と 300°C までの冷却時間 (S_{500} , S_{300}) を溶接諸条件から推定するための実験式を導いた。

(3) SM50 級鋼板の水中溶接に際して、溶接部の冷却速度 R を 35°C/s 以下 (S_{500} を 6 s 以上)、最高硬さ Hv 360 以下ないしは板厚 9 mm 程度までをビード下割れ防止の目安となしうる。この冷却速度は、パテシールド法により容易に達成しうる。

(4) SM41 材及び SM50 材のいずれにおいても、パテシールド法を用いて溶接部の冷却速度を緩和すれば、十分な引張強さと、曲げ延性及び切欠き靱性等を有する水中溶接継手を得ることができる。

末尾ながら本研究にご協力頂いた慶応義塾大学理工学部の蓮井淳教授及び本実験に協力された実験当時本塾大学院の関水信之君 (現在日本鋼管㈱) 及び岸信典君 (現在住友金属工業㈱) に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 蓮井, 菅: 溶誌, 43-8 (1974) p.767
- 2) 蓮井, 菅: 溶誌, 48-12 (1979) p. 1077
- 3) 菅: 溶論, 2-4 (1984) p.676
- 4) T. Brown, et al.: Underwater J., 6 (1973) p.202
- 5) H. Ozaki, et al.: Weld. J., 8 (1977) p.232 s
- 6) H. Hoffmeister: DVS 57, p.91
- 7) 菅: 溶論, 3-4 (1985) p.830
- 8) 佐藤他: 溶誌, 51-8 (1982) p.665
- 9) 蓮井, 衣川, 菅: 溶誌, 42-1 (1973) p.18
- 10) 浜崎, 榎原: 溶誌, 48-2 (1979) p.115
- 11) 衣川, 福島, 福島: 溶誌, 50-1 (1981) p.65
- 12) E. A. Silva, et al.: Weld. J., 50-6 (1971) p.406

湿式水中プラズマ溶接の横向姿勢への適用性*

福島 孟**, 福島 貞夫**, 衣川 純一**

Applicability of Underwater Wet Plasma Welding with Developed Attachment to Horizontal Position Welding*

by Takeshi Fukushima**, Sadao Fukushima** and Junichi Kinugawa**

The applicability of underwater wet plasma welding in the horizontal position was examined by using a welding attachment developed. This assembly, which is designed simply, is attached to the front face of plasma torch.

Welding was carried out in pressurized city water. Appearances of weld beads, cooling cycles at weld bonds and hardnesses of weld metals and HAZ's were investigated by varying weld rotation and welding conditions.

The use of the developed attachment stabilizes a gas cavity formed by plasma jet and protects any molten pool in this cavity from the invasion of environmental water in the horizontal wet welding. This

*原稿受付 昭和61年12月2日 昭和57年度春季全国大会で発表

**正 員 金属材料技術研究所 Member, National Research Institute for Metals

leads to good welds.

Molten metal tends to hang down with increasing in the angle of rotation from 0 deg. (flat position) to 90 deg. (horizontal position). Therefore, from the standpoint of welding procedure, multi-pass welding with a reduced amount of weld metal may be advantageous in the horizontal position.

The ranges of adaptable plasma arc current and plasma gas flow rate in the horizontal position become narrow comparing with those in the flat position.

Cooling of welds in the horizontal position is rapid comparing with that in the flat position. This difference is caused by the fact that the dissipation of heat is accelerated by the repetition of contact with water flowing in immediately after the floating of steam bubbles formed on the backside of base plate.

Key Words: Underwater welding, Plasma welding, Welding position, Cooling characteristics, Plasma gas cavity.

1. 緒 言

洋上作業台や沖合人工島など海洋空間の利用にあたって、これらの構造物に万一局部的な破損が生じた時、早急に補修を行う必要がある。この時の補修溶接は、垂直に近い被溶接材に対して行うことが多く、これに用いる溶接は横向きあるいは立向姿勢での溶接が不可欠である。

さて、湿式水中溶接において良好な溶接結果を得るための必須条件であるアーク発生用空洞の安定化を計る目的で、一般のガスシールドアーク溶接用に開発された噴流水を用いる二重シールド法²⁾や水カーテン法³⁾は、溶接アークを保持する空洞は安定するが、溶接箇所全周が噴流水に吸引されて生じた細泡で囲まれるので直接の目視確認が不可能であり、かつ、この噴流水を発生させるための付帯設備も必要となるなど、補修溶接に要求される手軽さの面で検討の余地がある。

本研究では、プラズマジェットを併発するプラズマ溶接法（湿式水中プラズマ溶接）が他の溶接法に比べ、下向湿式水中溶接において溶接アークを保持するための空洞形成能が大である³⁾ことに着目し、各種溶接姿勢において良好な溶接結果を得るための簡便な溶接用保護具（以下アタッチメントと称する）を開発⁴⁾し、本方法の横向溶接への適用の可否を明らかにする目的で、98×10² MPa までの静水圧下で溶接を行う場合の空洞形成の状況、ビード外観、冷却特性及び溶接部の硬さについて検討を行い、アタッチメントの有効性を確認した。

2. 実験方法

本実験遂行のために開発したアタッチメントを装着できるようトーチノズル前面を改造した以外、使用した設備は既報³⁾と同一である。

アタッチメントは、Fig. 1 に示すごとくトーチノズル前面に取付け、加圧機構によって先端が母板と接触を保ちつつ移動しうる固体摺動壁をノズル孔を隔てて上下に対向して設け、溶接線方向を開放にしてある。したがって、溶接線方向から溶接状況が目視確認できる。また、逃散ガスが大きな体積のまま浮上した場合、溶接箇所を保護する空洞の体積変化が大きく、かつ、不安定になる。これを防止するため、ガスの浮上方向に位置する摺動壁に数個の小孔を設け、この小孔からガスを逸散させて空洞の安定を得ている。なお、アタッチメントは母板と接触するため窒化珪素を用いてノズルと母板の絶縁を計っている。

Fig. 2(A)にノズルに取付けたアタッチメントの状況を、同(B)には母板上に設置した状況を示す。

Fig. 1 Illustration of underwater plasma welding with welding attachment developed

(A) Nozzle with attachment

(B) Plasma torch set on a base plate

Fig. 2 Overall view of plasma torch and close-up of nozzle with attachment

本実験に用いた母材は、板厚 19 mm の JIS-SM 41 A 鋼の熱圧材である。溶接は母板の溶接方向の傾斜角を 0° 一定にし、回転角を 0° (下向き)、 45° 及び 90° (横向き) に変えたビード溶接とした。

母板の化学成分を Table 1 に、また、実験条件を Table 2 に示す。この条件は、既報³⁾ の下向溶接におい

Table 1 Chemical composition of base plate and its mechanical properties

Base plate	Chemical composition (wt %)					Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
	C	Si	Mn	P	S		
JIS-SM41A 19 mm thick	0.15	0.23	0.84	0.015	0.020	461	26

Table 2 Welding environment and main welding conditions

Welding environment	: City water
Gas for pressurizing	: Compressed nitrogen
Base plate	: JIS-SM41A steel plate 19 mm thick
Welding conditions	
Ambient water pressure	: $0.39 \sim 98 \times 10^2$ MPa
Plasma jet current	: 100 A
Plasma arc current	: 100 ~ 125 A
Plasma gas	: Ar
Flow rate of plasma gas	: $1.5 \sim 7.0$ l/min
Welding speed	: $0.83 \sim 2.5$ mm/s
Welding position	: Horizontal position Angle of slope : 0° Angle of rotation : $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$
Welding procedure	: Bead welding
Shielding gas	: None

て良好なビードが形成されるものである。なお、作動ガス流量は各水压下における流量である。

3. 実験結果及び考察

3.1 ガス空洞の挙動

前述のごとく、水中溶接においては溶接箇所を保護する空洞の良否が溶接結果を支配する。そこで、母板の回転角を変えた場合の空洞形成状態を観察するため、逆光(シュリーレン法⁵⁾)を用いて毎秒2コマで写真撮影した。なお、撮影に際してアーク光の母板表面における反射を防ぎ、かつ、溶隔池の形成による母板面形状の変化を避けるため、厚さ7mmの黒鉛板を母板相当材として用いた。また、空洞内でアークを発生すると上述の現象が強調され空洞の明瞭な撮影が困難になるのでアークの発生は中止したが、肉眼観察の結果ではアーク発生時の空洞形状は幾分大となるもののその変化は少なかった。このことから、本報では実際の溶接においてもその形状に大差はないものとして、プラズマジェットのみによる空洞の挙動について述べる。

Fig. 3 は一例として、水压 39 MPa、母板の回転角を 90° 一定にし、作動ガス流量を3, 5, 7 l/min に変化した場合のアタッチメント未使用時の空洞形成状態を示したものである。写真にみられるごとく、いずれの作動ガス流量においても溶接箇所からガスが浮上すると同時

Water pressure : 39 MPa, Plasma jet current : 100 A

Fig. 3 Shapes of gas cavities formed by plasma jet when welding attachment is not applied

Water pressure : 39 MPa, Plasma jet current : 100 A

Fig. 4 Shapes of gas cavities formed by plasma jet when welding attachment is applied

に下方から水が浸入する場合と空洞が一時的に溶接箇所を覆う場合とが繰返され、不安定な保護状態となっている。一方、Fig. 4 に示すごとく、開発したアタッチメントを装着した場合は、低ガス流量では幾分水の浸入がみられるものの、その度合はアタッチメントを装着しない場合に比べてかなり少ない。特に、作動ガス流量 7 l/min では水の浸入はほとんどみられず安定な空洞が形成されており、アタッチメント装着による空洞浮上抑止効果が顕著であることが判る。このことは、 49×10^2 及び 98×10^2 MPa の水中においても同様である。

3.2 ビード外観と溶融形状

アタッチメントを用いれば横向姿勢において空洞が安定することが明らかになった。そこで、板厚 19 mm の JIS-SM 41 A 鋼を母板としてアタッチメントを装着して横向きビード溶接を行い、得られるビードの形成状態を検討した。

Fig. 5 は比較のための一例（板厚 12 mm の SM 41A 鋼を使用）として、 98×10^2 MPa の水圧下においてプラズマアーク電流 125 A、作動ガス流量 2.5 l/min 一定にし、アタッチメントを装着せず、母板の回転角を 45° 及び 90° に変えた場合のビード外観と横断面マクロ組織を示したものである。母板の回転角 45° におけるビード外観は、不斉でスラグの生成が著しく、マクロ組織においても気孔の生成がみられ、かつ、溶融金属がガスの浮上方向に押し上げられている。これは、ガスが浮上する際、アークがガスの浮上方向に引張られ、かつ、アークの推力が溶融金属の重力ベクトルに打ち勝ってガスの浮上方向に作用するためと推察される。また、母板の回転角 90° では、母板上に穴が掘られるだけでビードが形成されない。このことは、前述のごとく母板の回転角が大となるとガスの浮上に伴い下方から溶接箇所へ水が浸入してアークの発生が断続的になり、アークの発生した部分のみが溶融するのでビードが形成されなかったものと思われる。事実、溶接時の電流-電圧波形記録からアークの発生は断続的であった。

Fig. 6 は一例として、アタッチメントを装着し水圧 98×10^2 MPa、プラズマアーク電流 100 A、作動ガス流量 2.5 l/min 一定にし、母板の回転角を 0° （下向き）、 45° 及び 90° に変化した場合のビード外観と横断面マクロ

Fig. 5 Appearances of weld beads and its photo-macrograph when welding attachment is not applied

Fig. 6 Appearances of weld beads and their photo-macrographs in each weld rotation when welding attachment is applied

組織を示したものである。母板の回転角 0° 及び 45° では良好なビードが得られているが、 90° では前二者に比べてやや不齊なビードとなっている。このことは、前述のごとく母板の回転角が大となるに伴い溶接箇所へ水が浸入する度合も大となり、アークが不安定になり易くなるためと思われる。これに関しても、電圧波形記録から母板の回転角 90° の場合前二者よりやや不安定であることを確認している。また、マクロ組織においては、母板の回転角が大となるに伴い溶融金属がたれ下る傾向が大となっている。これは、アタッチメントを装着しない場合に溶融金属が押し上げられるのとは異なり、ガスの浮上方向に位置する摺動壁によってガスの浮上が抑制され、かつ、アーク推力も母板と直角に作用するようになり、溶融金属の重力ベクトルが浮上ガスと溶融金属表面の摩擦力などの力に打ち勝って溶融金属は押し上げられることなく多少たれ下がるようになるものと思われる。なお、このことは水圧 39 及び 49×10^2 MPa でも同様であった。

Fig. 7 は、水圧 39 MPa、作動ガス流量 5 l/min 及び母板の回転角 90° 一定にし、プラズマアーク電流を変化させた場合のビード外観、マクロ組織及び放射線透過写真を示したものである。

ビードは、プラズマアーク電流の増加に伴って溶融量が増しその幅及び深さともに大となるが、放射線透過写真にみられるごとく気孔などの欠陥はみられない。しかし、マクロ組織にみられるごとく、プラズマアーク電流が増し溶融量が

Water pressure : 39 MPa, Flow rate of plasma gas : 5 l/min, Welding speed : 0.83 mm/s

Fig. 7 Influence of plasma arc current on weld bead appearances, their radiographs and weld metal profiles

Water pressure : 39 MPa, Plasma arc current : 100 A, Welding speed : 0.83 mm/s

Fig. 8 Influence of plasma gas flow rate on weld bead appearances, their radiographs and weld metal profiles.

増すとともに溶融金属が下方にたれ下る度合が大となる。したがって、横向溶接を行う場合は既報³⁾の downward 溶接の適正溶接電流 100~200 A に比べてその範囲が狭くなることが判る。これは陸上での溶接と同様である。

Fig. 8 は、水圧 39 MPa、プラズマアーク電流 100 A 及び母板の回転角 90° 一定にし、作動ガス流量を変化させた場合のビード外観、マクロ組織及び放射線透過写真を示したものである。ビードは、作動ガス流量 3 及び 5 l/min ではその外観、マクロ組織とも大差なく、放射線透過写真においても欠陥はみられない。しかし、7 l/min ではビードを形成しておらず、過度の作動ガス流量の増

加は前述のごとくガス空洞の形成には寄与するもののビード形成にはかえって有害であることが示された。このことは、作動ガス流量の増加に伴いプラズマジェットの推力が大となり溶融池を乱すためと思われる。すなわち、作動ガス流量についてもプラズマアーク電流と同様、下向溶接に比べてその適正範囲が狭くなる。

以上は溶接速度を 0.83 mm/s に一定した場合のプラズマアーク電流及び作動ガス流量がビード形成に与える影響を例示したものであるが、これら一連の実験を通して各水圧下におけるアーク電流及び作動ガスの上限は母板の回転角 45° 及び 90° に対して、水圧 39 MPa では 125 A, 5 l/min, 水圧 49 × 10² 及び 98 × 10² MPa における母板の回転角 45° では 125 A, 2.5 l/min また、母板の回転角 90° では 110 A, 2.5 l/min であることが判明した。

さて、既に下向溶接において溶接金属量が気孔の生成に関係することが知られている⁶⁾。この点に着目して溶接入熱と溶融断面面積の関係を検討した。Fig. 9 はこの関係を示したものである。同図から、いずれの水圧下及び母板角度においても欠陥のない良好な溶接部が得られるのは溶融断面面積がほぼ 65 mm² 以内である。したがって、実際の溶接にあたっては溶融断面面積が 65 mm² 以内になるように溶接条件を設定すべきである。

外観が良好で、かつ、気孔を含まない溶接金属を得るためには 1 パスで得られる溶接金属量を増せないことが判った。このことは、施工時の能率を考えた場合に不利である。そこで、溶接速度を増しうかを検討した。

Fig. 10 は一例として、水圧 49 × 10² MPa、プラズマアーク電流 100 A、作動ガス流量 2.5 l/min 及び母板の回転角 90° 一定にして溶接速度を 0.83, 1.67, 2.50 mm/s と変化した場合のビード外観、横断面マクロ組織及び放射線透過写真を示したものである。溶接速度の増加に伴って溶融量が減少しているが、計算

上の溶接入熱の減少に対応するほど顕著でない。また、いずれも気孔等の欠陥は生じていない。したがって、施工面から考えると、狭められた許容プラズマアーク電流範囲において溶接速度を増加させて多層溶接を行うことが有利と思われる。

3.3 溶接部の冷却特性と硬さ

湿式水中溶接においては、水の冷却作用が溶接部の性能を低下させることは周知である。特に、下向溶接に比べて横向きあるいは立向溶接では母板表裏面の影響を受け易く冷却が急峻になることが知られている⁷⁾。そこで、既報³⁾と同様の方法で横向溶接における溶接部の冷

Fig. 9 Relation between cross-sectional area of weld metal and weld heat input

Water pressure: 49×10^2 MPa, Plasma arc current: 100 A, Flow rate of plasma gas: 2.5 l/min

Fig. 10 Influence of welding speed on weld bead appearances, their radiographs and weld metal profiles

却特性と硬さについて検討した。

Fig. 11 は、39 MPa の水圧下でアタッチメントを装着して母板の回転角を変えた場合と下向きでアタッチメントを装着しない場合の冷却曲線を示したものである。なお、それぞれの冷却曲線に相当する入熱を図中に記入してある。下向きでアタッチメントを装着した場合と装着しない場合における冷却時間は、溶接入熱がほぼ等しいにもかかわらず前者が後者より延長している。例えば、800～500℃の冷却時間では約2秒前者の方が延長しておりアタッチメントの効果が顕著であることが判る。一方、アタッチメントを装着して母板の回転角を変えた場合、母板の回転角0°（下向き）と45°では45°の方が入熱が大であるにもかかわらず冷却が急峻となっている。45°と90°では冷却時間に大差はみられない。

下向溶接においては、母板表面からの熱逃散が冷却過程を支配する大きな因子であることが示されている⁷⁾。このことから、アタッチメントを装着した場合の冷却の緩和は、空洞の安定と空洞及び摺動壁によって覆われる溶融池近傍の母板表面の面積が拡大したことによるものと思われる。また、母板の回転角が45°及び90°になると冷却が促進されるのは、母板表面における空洞が下向きに比べて浮上し易くなり、空洞に覆われる面積が減少すること及び母板裏面に形成される蒸気塊が容易に離脱・浮上して、その面が常に新しい水と接触を保ち放熱が促進されることによる。

Table 3 は、各水圧下で得られた冷却曲線をもとにして求めた800～500℃及び800～300℃の冷却時間と、得られた溶接金属並びに熱影響部（HAZ）の硬さの最高値を溶接入熱とともに一覧したものである。外観良好でほとんど気孔を含まない溶接金属が得られる条件下での冷却は、同一母板回転角において水圧の増加に伴って延長される傾向が認められる。しかし、これらに対応した HAZ の最高硬さは Hv 353～390 程度で、しかも冷却時間との相関は認められない。なお、最高硬さが

Table 3 Weld heat input, cooling time from 800°C to 500°C and Vickers hardness of welds

Water pressure ($\times 10^2$ MPa)	Angle of rotation (°)	Weld heat input (kJ/cm)	Cooling time from 800°C to 500°C (sec)	Vickers hardness of welds (load: 1 kg)	
				Weld metal	HAZ
0.39	45	80	5.3	183	373 *
	90	74	4.8	180	373
4.9	45	85	6.0	190	390
	90	86	6.6	183	368
9.8	45	105	5.8	165	353
	90	123	7.9	157	358
Base plate (19 mm thick)				140	

* Maximum value

Fig. 11 Cooling curves from peak temperature in each weld rotation

既報⁸⁾のそれら(Hv 322~330)と比べて幾分高いのは、供試母材のC量が0.15%と既報⁸⁾におけるそれと比べて0.02%高いことによる。一方、溶接金属の硬さはHv 157~190であるが、これも既報⁸⁾に示すごとく母材中のC, Si, Mnがアーク雰囲気中の水蒸気によって酸化され、それらの量が減じているためである。

4. 結 言

加圧静水下において、開発した溶接用保護具(アタッチメント)を用いた湿式水中プラズマ溶接を行い、その横向溶接への適用の可否について検討した。

得られた結果を以下に要約する。

1) 横向溶接への適用にあたって、開発したアタッチメントを用いれば空洞が安定し、溶接箇所への水の浸入が抑制され良好な溶接が行える。

2) 母板の回転角が0°(下向き)から90°(横向き)になるに伴い、溶融金属が下方にたれ易くなる。したがって、横向溶接においては溶融量を減じて多層溶接を行うことが施工上有利と思われる。

3) 横向溶接においては、プラズマアーク電流及び作動ガス流量いずれも下向溶接に比べて、良好な溶接部を得る適正条件範囲が狭くなる。本実験におけるそれは、水圧 39 MPa において母板の回転角45°及び90°いずれにおいてもプラズマアーク電流 125 A、作動ガス流量 5 l/min、49×10²及び98×10² MPa において母板の回転角45°では125 A、2.5 l/min、また、母板の回転角90°では110 A、2.5 l/minである。さらに、いずれの水圧及び

母板の回転角においても溶融断面積をほぼ65 mm²以内になるよう溶接条件を設定すれば欠陥のない良好な溶接部が得られる。

4) 溶接部の冷却は、下向きから横向きになるに伴って急峻になる。これは、母板表裏面における熱伝達が促進されることによる。母板の回転角45°と90°では冷却時間に大差はない。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、終始熱心に実験に協力された芝浦工業大学学生山崎二郎氏に深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) J. Kinugawa, T. Fukushima and S. Fukushima ; Development of shielding method with water jet and gas in underwater plasma welding, Trans. NRIM 16-5 (1974) 183-193
- 2) 品田幸三郎; 局部乾式水中自動溶接システムの開発, 学位請求論文(慶応義塾大学), 昭和56年, 2-2~2-4
- 3) 福島(貞), 福島(孟), 衣川; 加圧水中における湿式水中プラズマ溶接, 金材技研報告, 20-2 (1977) 82~97
- 4) 福島孟; 湿式水中溶接装置, 特許 1217552, (1984)
- 5) 衣川, 福島(孟), 福島(貞); 水中におけるプラズマ溶接, 本誌 43-2 (1974) 192
- 6) 菅泰雄; 水中アーク溶接に関する基礎的研究, 学位請求論文(慶応義塾大学), 1977, 58~66
- 7) 衣川, 福島(孟), 福島(貞); 水中プラズマ溶接部の冷却, 本誌 44-10 (1975) 834~839
- 8) 福島(孟), 福島(貞), 衣川; 加圧下における湿式水中プラズマ溶接の冷却特性と溶接金属の組織, 本誌 50-9 (1981) 887~893