水中における重力式アーク溶接 (第1報)*

蓮井 淳** 菅 泰雄**

On Underwater Gravity Arc Welding (The 1st Report)*

by Atsushi Hasui** and Yasuo Suga**

Abstract

Underwater welding by gravity arc welding process is investigated by using coated electrodes of six types and SM41 steel plate of 6 mm thickness as base metal. And it is ascertained that this process may be put to practical use.

Main results are summarized as follows:

- (1) Sound weld can be obtained easily by any unskilled welding operator using any type electrode except low hydrogen one, due to stable arc. Especially appearances of beads obtained using high titanium oxide type and lime titania type electrode are good.
- (2) The proper range of combinations of welding current and diameter of electrode for the high titanium oxide type is relatively wider than that for the ilmenite and the iron powder iron oxide type.
- (3) Weld metal has the same tensile strength as base metal.
- (4) Weld metal has an impact value of 40 - 50% of that of base metal.
- (5) Cooling rate at 500°C at bond is about 140°C/sec in water and 18°C/sec in air, the former being about 8 times higher than the latter.

1. 緒 言

現在、各方面で海洋開発への関心が高まりつつある。それに伴い、近年、海洋構造物の加工および補修の手段としての水中溶接技術の開発研究が行なわれはじめ、すでに、プラズマ溶接^{1),2)}、炭酸ガス溶接³⁾および被覆アーク溶接⁴⁻⁶⁾など各種溶接法が湿式水中溶接に適用され、良好な結果を得たことが報告されている。しかし、被覆アーク溶接では、潜水技術と優れた溶接技能とを兼ね備えた溶接工を必要とし、また、他の溶接法では、溶接の自動化あるいは機械化は容易であるが複雑な設備を必要とし、簡単な溶接作業には適さないという欠点を有している。これに対し、被覆アーク溶接棒を用いた重力式アーク溶接法では、手軽な装置で自動的に安定に維持されるアークによって良好な溶接が得られるため、水中での簡単な溶接に適していると思われる。そこで、著者らは、市販の各種被覆アーク溶接棒を用いて、種々の溶接条件によって水中溶接実験を行ない、溶接条件と溶接現象ならびにそれによって得られた継手の性質などについて2, 3の検討を行ない、水中溶接への本法の適用性

ならびに各系統の溶接棒の実用性について調べた。

なお、本報は、主に、水中での重力式アーク溶接の実用の可能性について述べたもので、溶接姿勢に対する検討ならびに水中溶接現象の解明については、第2報以下によって報告する予定である。

2. 実験装置と供試材料

Fig. 1 は、実験装置の構成を示したものである。実験は、運棒比 (ビードの長さ/溶融した溶接棒の長さ)、

Fig. 1 Arrangement of equipment

* 原稿受付 昭和48年11月20日 (48年度春季全国大会に発表)

** 正 員 慶応義塾大学 Member, Faculty of Engineering, Keio University

溶接棒の角度および棒径を任意に変えうる重力式溶接装置を用い、直流正極性で、水道水中、水深約 20 cm において下向き溶接を行なった。用いた溶接棒は、市販のイルミナイト系 (D4301), ライムチタニヤ系 (D4303), 高セルローズ系 (D4311), 高酸化チタン系 (D4313), 低水素系 (D4316) および鉄粉酸化鉄系 (D4327) の 6 種類である。全体を通して棒径 4 mm のものを用いたが、とくに、イルミナイト系では 3.2, 4, 6, 7, 8 mm, 高酸化チタン系では 4, 5, 6, 6.4 mm, 鉄粉酸化鉄系では 4, 5, 6 mm の棒径の溶接棒についても検討を加えた。なお、溶接棒には防水剤を塗布していない。

供試母材は、厚さ 6 および 9 mm の溶接用構造鋼材 SM41A 材で、その化学成分分析値を Table 1 に示している。

Table 1 Chemical composition of base metal

C	Si	Mn	P	S
0.17	0.06	0.85	0.027	0.027

3. 溶接条件の検討

Photo. 1 は、棒径 4 mm のイルミナイト系溶接棒を用い、厚さ 9 mm の鋼板に溶接棒の角度を 10° , 20° および 40° と変えてビード置溶接を行なった場合のビードの外観と溶接断面のマクロ組織を示したものである。いずれの溶接棒の角度においても、ビードの外観および溶込みの良好な溶接結果が得られている。

Photo. 2 は、溶接棒の角度を 20° と一定に保ち、溶接電流を 90, 150 および 210 Amp と変えた場合のビード

Photo. 1 Effect of electrode angle on bead appearance when ilmenite type electrode is used

外観と溶接断面のマクロ組織を示したものである。(A) は 90 Amp の場合で、溶込みが不足している。これは電流が過小なためである。(C) は 210 Amp の場合で、ビードの外観が乱れ、アンダカットが生じ、これは過大な電流によったためと思われる。これに対し、(B) は電流を 150 Amp とした場合の結果で、溶接欠陥の認められないビード外観の美しい良好な溶接が得られ、この溶

Photo. 2 Effect of welding current on bead appearance when ilmenite type electrode is used

Photo. 3 Effect of diameter of electrode on bead appearance when ilmenite type electrode is used

接電流は適正であると認められる。

Photo. 3 は、イルミナイト系溶接棒を用い、溶接棒の角度を 20° に一定にして、4, 6 および 8 mm の棒径の溶接棒を用い、溶接電流を種々に変えた場合のビードの外観例を示している。イルミナイト系溶接棒においては、(C) に示すように、棒径 8 mm の溶接棒では、適正と思われる 240~360 Amp でも、良好な結果は得られなかった。

Fig. 2 は、上記のイルミナイト系以外に、鉄粉酸化鉄系および高酸化チタン系溶接棒についても以上のような実験を繰返し、良好なビード位置溶接が得られる棒径と溶接電流の組合せの適正範囲をまとめたものである。図から、イルミナイト系の場合、棒径の増加に伴って溶接電流の適正範囲は狭くなることがわかる。これに対し、高酸化チタン系の場合は、良好なビードが得られる棒径と溶接電流の組合せの適正範囲が比較的広く、鉄粉酸化鉄系においては、これとイルミナイト系の中間の状態にあることがわかる。

Fig. 2 Effect of arc current and diameter of electrode on appearance of weld

Photo. 4 Bead appearance and X-ray inspection of welds

4. 溶接部の試験結果

4.1 溶接部の外観と X 線透過試験

Photo. 4 は, 棒径 4 mm の各種被覆アーク溶接棒について, 溶接棒の角度を 20°, 運棒比を 0.94 とし, 適正電流値で厚さ 6 mm の母材上にビード置溶接した場合の溶接部の外観と X 線透過試験結果を示している. 低水素系溶接棒によるビードがはなはだしく乱れている以外は, いずれの系統の棒によっても, ブローホールおよびアンダカットなどの溶接欠陥の認められない良好な溶接が得られている. とくに, 高酸化チタン系とライムチタニヤ系の溶接棒による溶接部は, スパッタの少ない極めて良好な外観を示している.

4.2 溶接部の機械的性質

Table 2 は, 低水素系を除く 5 系統の棒径 4 mm の被覆アーク溶接棒を用い, 厚さ 6 mm の鋼板を溶接する場合の溶接条件例を示している. 表中の溶接番号の 1~5 は, V 形開先によって銅裏当金を用いて片面 3 パス溶接した場合, 溶接番号 6 は, 高酸化チタン系溶接棒を

用いて, X 形開先で両面 2 パス溶接した場合, 溶接番号 7 は, 高酸化チタン系溶接棒を用いて, すみ肉重ね溶接した場合の条件例を示している. なお, 開先形状は, Table 2 の下に添記してある.

Table 2 の条件で得られた溶接継手の引張試験結果を Table 3 に示してある. なお, 表中の溶接番号は, Table 2 のそれに対応させてある. 表中左欄は, 幅 16 mm, ゲージ長 90 mm の平行試験片による結果を示したもので, いずれも母材で破断している. 右欄にあげた結果は, 表の下に示すような溶接金属に深さ 2 mm の V 切欠きを入れた試験片によるもので, 95~103% の継手効率を有しており, ほば, 母材と同程度の強さを有することが明らかとなった. しかし, 伸びはいずれの試験片においても母材のそれより低い値を示している.

Table 4 に, 各種被覆アーク溶接棒による溶接部および母材の衝撃試験結果を示してある. これに用いた試験片も, Table 2 に示した番号に対応した溶接条件によって作成した. なお, 試験片は表の下に示す形状を有し, 先端の半径 0.25 mm, 深さ 1 mm の V 切欠きを第 2 層

Table 2 Examples of welding condition

Weld No.	Electrode	Root gap t (mm)	No. of pass	Welding current (Amp)	Arc Voltage (Volt)	Electrode angle (°)	Bead length / Electrode length	Welding speed (cm/min)
1*	D4301	1.5—1.8	3	140—150	32—34	20	0.94	29—31
2	D4303	1.6—1.8	3	160—170	29—32	20	0.94	27—28
3	D4311	1.3—1.4	3	120—140	30—31	20	0.94	26—28
4	D4313	1.7—1.9	3	140—150	29—31	20	0.94	27—29
5	D4327	1.5—1.8	3	150—160	30—33	20	0.94	29—31
6**	D4313	0.8—1.0	2	160—180	29—32	30	0.86	27—29
7***	D4313		1	175	32	30	0.86	29

Note: Edge preparation

* Single Vee groove ** Double Vee groove

*** Fillet lap welding

Table 3 Mechanical properties of welds

Weld No.	Electrode	Welded joint			Weld metal		
		Ultimate strength (kg/mm ²)	Elongation (GL=90mm) (%)	Location of fracture	Ultimate strength (kg/mm ²)	Joint efficiency (%)	Elongation (GL=20mm) (%)
1	D4301	45.1	20.6	Base metal	52.4	99	10.8
2	D4303	45.6	20.9	Base metal	50.3	95	8.7
3	D4311	45.8	21.7	Base metal	50.5	96	7.4
4	D4313	45.5	25.7	Base metal	53.6	102	8.5
5	D4327	45.9	20.2	Base metal	54.3	103	10.9
Base metal		46.5	27.9		52.8	100	22.4

Note: Dimension of weld metal specimen

および第3層側の溶接金属中心部に入れたものである。試験結果によると、水中溶接による溶接金属のシャルピ衝撃値は約 3.3~4.1kg-m/cm²、母材のそれは

Table 4 Results of Charpy impact tests (15°C)

Weld No.	Electrode	Impact value (kg-m/cm ²)
1	D4301	3.7 (3.2—4.1)
2	D4303	3.9 (3.5—4.3)
3	D4311	4.1 (3.9—4.5)
4	D4313	3.3 (2.8—3.5)
5	D4327	3.5 (3.2—3.7)
Base metal		7.8 (7.7—7.8)

Fig. 3 Hardness distribution of weld in case three-pass welding

7.8kg-m/cm² で、前者の値は後者の約40~50%である。なお、これらの値は、数個の試験片によって得られた測定値の平均値であるが、その最大値と最小値は括弧の中に示してある。

Fig. 3 と 4 に高酸化チタン系溶接棒を用い、3パス溶接および2パス溶接を行なった場合の溶接部横断面に

Fig. 4 Hardness distribution of weld in case two-pass welding

Table 5 Maximum hardness of welds

Weld No.	Electrode	Max. hard. Hv (500g)
1	D4301	429
2	D4303	433
3	D4311	378
4	D4313	390
5	D4327	360

Three pass welding (Weld No.4)

Two pass welding (Weld No.6)

Fillet lap welding (Weld No.7)

Photo. 5 Macro-structures of welds when high titanium oxide type electrode is used

おけるマイクロビッカース硬度 (荷重 500 g) の分布を示してある。溶接条件として, Table 2 において対応した溶接番号のものをを用いた。いずれにおいても, 最終パスのボンドに接する母材熱影響部に最高硬さが見られる。これは, 初層溶接あるいは第2層溶接で増大されていた硬さが, その後に続く層の溶接による再加熱によって低下したためである。これ以外の系統の溶接棒による

溶接部においても同様な結果が得られている。

Table 5 に, 各種被覆溶接棒による溶接部の最高硬さを示してあるが, 母材の硬さ Hv 140 に対して Hv 360 から Hv 433 と高い値を示している。

4.3 溶接部の組織

Photo. 5 に高酸化チタン系溶接棒を用いた場合の3パス, 2パスおよびすみ肉重ね溶接部のマクロ組織を示

Photo. 6 Micro-structures of base metal and weld when high titanium oxide type electrode is used ($\times 150$)

してある。いずれにおいてもアンダカットは認められず、十分な溶込みが得られている。また、初層あるいは第2層目が、その後続く溶接によって再加熱され、組織的な変化を生じている状態が観察される。

なお、これらの試験片および後掲の顕微鏡組織観察用の試験片は、それぞれ、Table 2 の溶接条件によって作成した。

Photo. 6 は、高酸化チタン系溶接棒による3パス溶接の顕微鏡組織を示したものである。(A)は第3層目の溶接金属、(B)はボンド、(C)～(E)は母材熱影響部、(F)は第3層溶接により熱影響を受けた第2層溶接金属、(G)は第3層溶接により熱影響を受けた第1層熱影響部、(H)は母材である。

第3層目の溶接金属(A)では、主として、ペーナイトとパーライトから成り、粒界にフェライトが見られる。ボンド部(B)の母材では、粗大なフェライトの網目構造を生じ、粒内にはマルテンサイト、ベイナイトおよび少量のパーライトが形成されている。ボンドから0.5 mm 離れた熱影響部(C)は、マルテンサイト、ベイナイト、パーライトおよびごく少量の粒界フェライトから成る粗大組織を有している。ボンドから1.2 mm 離れた部分(D)では、組織は細かくなり、微細フェライトとパーライトを生じ、さらに1.7 mm 離れた部分(E)

では、フェライトと粒状パーライトから成る組織が観察される。これらに続いて、(H)に示すようなフェライトとパーライトが均一な分布をなす通常の母材組織がみられる。

第2層溶接による溶接金属(F)は、第3層溶接によって再加熱されて微粒化し、微細粒フェライトとパーライトが形成されている。第1層溶接のボンドから0.5 mm 離れた熱影響部(G)は、同様に、第3層溶接の熱影響を受けて細粒化し、パーライトとフェライトが認められる。

5. アークの安定性

Fig. 5 は、本実験に用いた各系統の被覆剤の水中アークの安定性に対する影響を示す電流および電圧のオシログラムである。これは、溶接棒の角度を20°、溶接電流を150 Amp に一定にした場合の電流—電圧変動を示している。(A) イルミナイト系、(B) ライムチタニヤ系、(D) 高酸化チタン系、(F) 鉄粉酸化鉄系の溶接棒の場合は、短絡の発生が比較的少なく、安定したアークが得られている。(C) セルローズ系の場合は、短絡の発生がやや多く認められるが、比較的安定なアークが得られている。しかし、(E) 低水素系の場合は、アークの消滅と短絡が断続的に生じ、アークはきわめて不安定

Fig. 5 Effect of type of flux on arc stability

で、その維持さえ困難であった。したがって、低水素系以外の系統の溶接棒は、いずれも、水中におけるアークの安定性から判断すれば、水中溶接に用いることができるといえる。

6. 熱サイクルの測定

溶接部断面の硬さ分布試験の結果および顕微鏡組織の観察から、水中溶接の場合、溶接部の冷却速度が非常に高いことが予想された。そこで、幅100、長さ150、厚さ9mmの母材に径4mmの溶接棒を用いて溶接ビードを置き、ボンドおよびその付近の熱サイクルを母材の裏面から種々の深さにあけた1.5mmの孔の中へアルメル・クロメル熱電対を挿入し、その先端を孔底に溶接しておいて測定した。Fig. 6は、水中において溶接した場合のボンド部、ボンドからそれぞれ、0.5、1.9および3.0mm離れた部分の熱サイクルを比較したものである。

Fig. 6 Thermal histories of weld

Table 6 Effect of electrode on cooling rate at bond

Electrode	Cooling time (sec)		Cooling rate at 500°C (°C/sec)	Weld input (Joule/cm)
	800-500°C	800-300°C		
D4301	1.9	3.3	140	9.5×10^3
D4303	1.9	3.4	140	10.5×10^3
D4311	2.1	3.5	135	9.5×10^3
D4313	1.9	3.4	145	9.1×10^3
D4327	2.0	3.4	140	10.7×10^3
D4313*	10	29	18	9.1×10^3

* In air

Welding condition :

Welding current : 150 Amp
Welding speed : 25-31cm/min
Diameter of electrode : 4mm
Electrode angle : 20°
Backing plate : None
Thickness of base metal : 9mm

る。なお、これらと比較のため、同溶接棒による大気中溶接の場合のボンド部の熱サイクルを同図の中に一点鎖線で示してある。

Table 6 に、各種溶接棒を用いて溶接した場合のボンド部における 800°C から 500°C、800°C から 300°C までの冷却時間および 500°C における冷却速度を示してある。これから、水中溶接の場合、冷却速度は、被覆剤の系統の違いによる差異はほとんど認められず、たとえば、500°C におけるそれは、いずれも 135~145°C/sec であることが明らかとなった。

また、大気中溶接の場合の 500°C における冷却速度は 18°C/sec であり、これに比べ、水中の冷却速度が非常に高いことがわかる。

7. 結 言

被覆アーク溶接棒を用いた重力式アーク溶接法では、手軽な装置で自動的に安定に維持されるアークによって良好な溶接が得られるため、水中での簡単な溶接に適していると考えられるので、この方法の水中溶接への適用性ならびに各系統の溶接棒の実用性について検討を加えた。用いた溶接棒は、市販のイルミナイト系、ライムチタニヤ系、高セルローズ系、高酸化チタン系、低水素系および鉄粉酸化鉄系の6種類である。母材には、厚さ6mmの溶接用構造鋼材 SM41A を使い、突合せ溶接とすみ肉重ね溶接を行なった。その結果、本法の水中溶接への適用の可能性が認められた。

本実験の主な結果は、次のようなものである。

- 1) 重力式アーク溶接を用いて、熟練を必要とせずに容易に突合せおよびすみ肉溶接ができる。
- 2) 溶接棒の角度（すなわち、運棒比）は、ビード外観に影響を与えない。
- 3) 低水素を除く他の系統の溶接棒によると、安定したアークが維持され、良好な溶接が得られる。とくに、高酸化チタン系溶接棒によるビード外観が美しい。
- 4) 高酸化チタン系溶接棒においては、適正な溶接電流と棒径の組合せの範囲が比較的広い。
- 5) 本法によって得られた突合せ継手は、95~103%の継手効率を有し、母材とほぼ同程度の引張強さをもつ。また、溶接金属中央部のシャルビ衝撃値は、母材のその約40~50%である。
- 6) 水中溶接の場合、ボンドにおける冷却速度は大気中溶接に比べてはなはだしく高く、たとえば、500°C における冷却速度は、大気中の 18°C/sec に対して、水中は約 140°C/sec であり、大気中の約8倍である。

最後に、本実験中たえず協力して下さった三菱原子力工業の加藤富一君（実験当時、慶応義塾大学）ならびに慶応義塾大学の当麻英夫君に感謝の意を表する。

文 献

- 1) 蓮井, 猪又, “水中におけるプラズマ溶接”, 溶誌, 40 (1971) 7, 622~631
- 2) 蓮井, 衣川, 菅, “水中におけるプラズマ溶接 (第2報)”, 溶誌, 42 (1973) 1, 18~28

- 3) 浜崎, 榊原, “ソリッドワイヤによる水カーテン式水中炭酸ガスアーク溶接”, 溶接技術誌, 21 (1973) 2, 83~91
- 4) 益本, 中島, 近藤, 松田, “水中溶接に関する研究 (第1報)”, 溶誌, 40 (1971) 7, 683~693
- 5) 河村, 山口, 吉田, 田所, “市販被覆アーク溶接棒は水中溶接に適用できるか”, 溶接技術誌, 20 (1972) 6, 53~68
- 6) E. A. Silva and T. H. Hazlett “Shielding Metal Arc Welding Underwater with Iron Powder Electrodes” W. J. Vol. 50, June, 1971, 406~415

次 号 予 告

論 文

金属の再結晶におよぼす高温圧縮応力および冷間加工度の影響……	{ 上紅 益本	崎 露 川 本	孝 孝 研	一 哉 一 功
水カーテン式水中炭酸ガスアーク溶接法の研究(3)……………	{ 浜 神	崎 原	正 実	信 雄
高張力鋼の残留応力特性に関する研究……………	{ 菊 青 高 中 神 高	池 木 木 峯 谷 井	洋 尚 靖 周	一 夫 夫 明 浩 茂
溶接アークの最大長さにおよぼす風向風速の影響(第2報)……………	棟		徹	夫
鉄鋼溶接部における硫化物の挙動と凝固割れ(7)……………	{ 仙 松 中 矢	田 田 川 地	富 福 博 道	男 久 二 治
粒子分散強化形合金の溶接性に関する基礎的研究(4)……………	{ 井 新 垣	川 生	成 宗	博 夫 英
鋼中水素拡散と集積の数値解析および溶接部への応用……………	{ 小 矢 百	平 竹 合 岡	一 信	丸 丘 孝

資 料

48年度溶接学会関西支部主催学術シンポジウム
「立向自動溶接」