水中におけるサブマージーク溶接 (第2報)*

—フラックス入りワイヤによる SM 41 鋼および SM 50 鋼の溶接—

蓮井 淳**, 菅 泰雄**, 岸 伸典***, 寺西光夫****

On Underwater Submerged-Arc Welding (The 2nd Report)*

—Welding of SM 41 steel and SM 50 steel by Using Flux Cored Wire—

by Atsushi Hasui**, Yasuo Suga**, Shinsuke Kishi*** and Mitsuo Teranishi****

Underwater welding by the submerged-arc welding process is investigated by using the 1.6 and 2 mm diameter flux cored wires and a flux MF43 mixed with water glass.

Welding experiments are done by using SM41 and SM50 steel base metals of 6,9 and 12 mm in thickness 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 using flux cored wires and a special flux mixed water glass with MF43, due to stable arc.
- (2) Weld metal does not include a blowhole. And cracks are not observed at heat-affected zone and in weld metal.
- (3) The welds resulting from this process have excellent mechanical properties in both tensile strength and notch toughness.
- (4) Cooling rate at 500°C at bond is 13–15°C/s and it seems to be much lower value than those by any other underwater welding processes.

1. 緒 言

サブマージーク溶接法は溶接中にフラックスおよびスラグが溶接部全体を覆っているため、溶接部の冷却が著しく緩和されてその硬化を防止することができ、かつ、本法は機械化あるいは自動化が容易なため作業の困難な水中における溶接に適していることを、すでに、第1報¹⁾で報告した。この場合、溶接ワイヤとしてサブマージーク溶接用の中実ワイヤを用いたが、溶接金属中に若干のブローホールを生ずるという懸念を残した。

そこで、従来の中実ワイヤに代えて、炭酸ガスアーク溶接用のフラックス入りワイヤを用い、溶接構造用鋼 SM 41 材および SM 50 材の溶接を行なったところ、極めて安定に維持されるアークにより、ブローホールやビード下割れなどの溶接欠陥の全く認められない良好な溶接を得ることができた。本報は、水中におけるサブマージーク溶接にフラックス入りワイヤを適用することに

より、溶接欠陥の認められない、すぐれた機械的性質を有する溶接継手を得ることができた経過ならびにその結果について述べるものである。

2. 実験装置と供試材料

実験は、既報¹⁾と同一のサブマージーク溶接装置を用い、水道水中、水深約 10 cm で行なった。電源には垂下特性の直流電源を用い、極性は逆極性とした。

溶接ワイヤについては、炭酸ガスアーク溶接用の市販のフラックス入りワイヤ数銘柄について予備実験を行ない、比較的ビードの外観の良好な溶接が得られた炭酸ガスアーク溶接用フラックス入りワイヤ (DW 53 A) を採用した。ワイヤの径は 1.6 および 2 mm である。フラックスについては、前報¹⁾の結果より、粘性剤である水ガラス (3 号) を 40 wt% 混入した溶融型フラックス MF 43 を用いた。

溶接母材は、厚さ 6, 9, 12 mm の溶接構造用鋼 SM 41 および SM 50 材である。Table 1 に、溶接母材の化学成分分析結果を示す。

3. ビード溶接実験結果

フラックス入りワイヤを用いたサブマージーク溶接

*原稿受付 昭和53年10月23日 (昭和52年度秋季全国大会にて発表)

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

***正 員 慶応義塾大学大学院 (現在住友金属工業(株))
Graduate School of Keio University (Present
Address: Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

****慶応義塾大学大学院 Graduate School of Keio University

Table 1 Chemical composition of base metals (%)

	C	Si	Mn	P	S
SM41	0.13	0.045	0.66	0.012	0.019
SM50	0.12	0.36	1.38	0.022	0.006

法を水中溶接へ適用するに当って、まず、溶接電流、アーク電圧、溶接速度などの溶接諸条件を種々に変えてビード溶接を行ない、良好な溶接結果が得られる溶接条件について検討した。

Table 2 は、その結果をまとめたもので、径 1.6 および 2 mm のフラックス入りワイヤならびに水ガラスを 40 wt % 混入したフラックスを用いて水中でビード溶接する場合に、比較的良好な溶接が得られる溶接条件の範囲を示している。ちなみに、径 1.6 mm のワイヤを用いた場合の適正と思われる溶接条件は、溶接電流：160 A、アーク電圧：35 V、溶接速度：20 cm/min であり、径 2 mm のワイヤを用いた場合のそれらは、溶接電流：240 A、アーク電圧：35 V、溶接速度：40 cm/min であった。したがって、以後の溶接ではすべてこの溶接条件を用いることにする。

Table 2 Examples of welding conditions

Diameter of wire (mm)	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)
1.6	150 - 170	30 - 40	10 - 20
2.0	230 - 250	30 - 40	20 - 40

Note : Wire : DW53A
Flux : 60%MP43 + 40%WG
Base metal : SM41, SM50

Fig. 1 は、径 1.6 および 2 mm のフラックス入りワイヤを用いて、それぞれ上記の溶接条件でビード溶接した場合に得られるビードの外観および横断面マクロ組織ならびに X 線透過試験結果を示したものである。写真より、いずれの径のワイヤを用いた場合においても、ブローホールやアンダカット等の溶接欠陥の認められない良好な溶接が得られていることがわかる。

Fig. 2 は、Fig. 1 を得た場合と同一の溶接条件を用いて水中でビード溶接した場合のアークの安定性を示す電流—電圧変動のオシログラムである。比較のために、水中溶接とはほぼ同一の溶接条件で得られた大気中溶接（フラックスに粘性剤は混入していない。）におけるそれも示してある。図より、径が 1.6 および 2 mm のいずれのワイヤを用いた場合においても、水中アークは消滅および短絡を生ずることなく、大気中溶接の場合と同様に極めて安定しており、アークの維持に関しては本法は全

Fig. 1 Appearance, macro-structures and X-ray inspection of welds **Fig. 2** Effect of environment on arc stability

く問題を生じないことがわかる。

水中溶接部は、比較的冷却速度が速く、かつ、溶接部に多量の水素を含有しているために、ビード下割れ等が発生しやすい^{2,3)}。そこで、SM 41, SM 50 について 6, 9, 12 mm の三種類の板厚の鋼板上にビード溶接し、溶接終了後約一週間水中に放置した試験片について、溶接部横断面を顕微鏡で詳細に観察し、割れ発生の有無を確認した。その結果、母材として SM 41 鋼および SM 50 鋼のいずれを用いた場合においても、本実験の板厚の範囲内では、溶接金属および母材熱影響部には割れの発生は全く認められなかった。これは後に述べるように、溶接箇所を覆っているフラックスの保温効果によって溶接部の冷却が著しく緩和され、そのために溶接部（とくに

Table 3 Mechanical properties of welds

Diameter of wire (mm)	Base metal	Welded joint			Weld metal		
		Ultimate strength (Kgf/cm ²)	Elongation (GL=90mm) (%)	Location of fracture	Ultimate strength (Kgf/cm ²)	Joint efficiency (%)	Elongation (GL=20mm) (%)
1.6	SM41	40.9	21.6	Base metal	52.0	114	11.5
2.0	SM41	41.4	24.9	Base metal	51.8	113	14.9
2.0	SM50	49.1	17.1	Base metal	59.6	107	12.0
	SM41	41.2	32.6	—	45.8	100	23.7
	SM50	49.1	26.1	—	55.6	100	26.2

Dimention of weld metal specimen

母材熱影響部)の硬化が防止されているためと考えられる。

4. 溶接部の機械的性質

径 1.6 および 2 mm のフラックス入りワイヤを用い, 厚さ 6 mm の SM 41 鋼および SM 50 鋼を両面 2 層突合せ溶接 (開先形状: I 型) して得られた溶接継手の機械的性質について検討を加えた。

Table 3 に, 水中溶接して得られた溶接継手の引張試験結果を示してある。表中, 左欄は巾 16 mm, ゲージ長 90 mm の溶接のまま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, 溶接部の余盛を削除し, 表の下に示すような深さ 2 mm の V 切欠きを溶接金属に入れた試験片によるもので, いずれも 100 % 以上の継手効率を有しており, 母材以上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。

Fig. 3 に, 水中溶接継手の型曲げ試験後の試験片の外観を示す。写真より, 第 1 層溶接部および第 2 層溶接部がそれぞれ伸び側になるように曲げたいずれの試験片においても, 溶接金属表面にクラックを発生することなく, すべて曲げ角度 180° まで曲っており, 本法により得られた水中溶接継手が十分な曲げ延性を有することがわかる。

Table 4 は, 水中溶接部および溶接母材の衝撃試験結果を示したものである。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 1 層溶接金属中心部に入れたものである。なお, 表中の値は数個の試験片によって得られた測定値の

Fig. 3 Results of bending tests

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。試験結果によると, 水中溶接による溶接金属の衝撃値は 5~7 kgf・m/cm², 母材のそれは 10~15 kgf・m/cm² で, 前者の値は後者の約 50 % である。しかし, この程度の値を有していれば, 水中溶接継手は衝撃値に関して実用上なんら問題を生じないものと考えられる。

Fig. 4 は, 板厚 9 mm の SM 41 材および SM 50 材上に径 2 mm のワイヤを用いてビード溶接した場合の溶接部横断面において, ビード中心, 母材垂直方向のマイクロビッカース硬さ (荷重 500 g) の分布をまとめて示したものである。比較のために, 同一溶接条件で得ら

Table 4 Results of Charpy impact tests (at 0°C)

Diameter of wire (mm)	Base metal	Impact value (Kgf·m/cm ²)
1.6	SM41	5.4 (5.1-5.7)
2.0	SM41	5.1 (4.8-5.3)
2.0	SM50	6.5 (6.1-6.9)
Base metal(SM41)		10.6 (10.3-10.9)
Base metal(SM50)		15.0 (14.7-15.3)

Note : Dimensions of specimens

Fig. 4 Hardness distribution of welds

れた大気中溶接部のそれも示した。図より明らかなように、水中溶接による母材熱影響部の硬さは、大気中溶接によるそれに比べて若干高い値を示している。しかし、母材として SM 41 および SM 50 材のいずれを用いた場合においてもその最高硬さは Hv 280 であり、この値は他の溶接法⁴⁻⁷⁾によるそれらに比べると著しく低い値と考えられる。SM 50 材のビード溶接部に割れの発生が認められなかった前節の結果は、溶接部に著しい硬化が認められない以上の結果と強く関連しているものと推察される。

一方、水中溶接による溶接金属の硬さは約 Hv 180 であり、大気中溶接金属のその Hv 220 よりむしろ低い値を示している。これは、後に述べるように、水中溶接金属の炭素当量が大気中溶接金属のそれに比べて低いこ

とに起因しているものと考えられる。

5. 溶接部のマクロ組織

Fig. 5 に、厚さ 6 mm の SM 41 材を突合せ溶接して得られた溶接部の横断面マクロ組織を示してある。いずれの溶接部も溶込み不足、アンダカットあるいはブローホールなどの欠陥は認められず健全な溶接が得られている。また、第 1 層溶接部が第 2 層溶接によって再加熱され、組織的な変化が生じている状態が観察される。

(A) Dia. of wire : 1.6mm (B) Dia. of wire : 2 mm

Fig. 5 Macro-structures of welds

6. 溶接金属の化学成分

Table 5 は、径 2 mm のワイヤを用い、板厚 9 mm の SM 50 材上に水中および大気中でビード溶接した場合の溶接金属の化学成分分析結果を示したものである。表より、C 量に関しては、大気中溶接と水中溶接との間に顕著な差は認められないが、Mn 量および Si 量はいずれも水中溶接金属の方が著しく少ないことがわかる。水中溶接の場合、溶接性の向上を計るためにフラックス中に多量の水ガラスを混入しており、これがアーク熱によって解離して多量の酸素を放出し、熔融金属中の Mn、Si と反応してそれらをスラグとして外へ排出するものと考えられる。その結果、水中溶接金属中の Mn、Si 量が著しく減少するものと推察されるが、この点に関しては、今後さらに検討したい。

なお、表中には、表の下に示す式を用いて計算した炭素当量 Ceq % も示してある。表より、水中溶接金属の炭素当量は 0.28 % で、大気中溶接金属のその 0.41 % に比べて著しく低い値を示している。前節において、水中溶接金属の硬さが大気中溶接金属の硬さより低い値を

Table 5 Chemical composition of weld metals (%)

	C	Si	Mn	P	S	Ceq *
Underwater	0.099	0.33	0.99	0.020	0.010	0.28
In air	0.086	0.84	1.74	0.0093	0.030	0.41

Note : Base metal : SM50

Welding current : 240 A

Welding speed : 40 cm/min

* Ceq = $C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24}$

示した主な理由は, 以上のような溶接金属中の化学組成の違いにあるものと考えられる。

7. 拡散性水素量

Table 6 は, 直径 1.6 および 2 mm の溶接ワイヤを用い, 水中でビード溶接した場合の水素試験結果を示したものである。比較のために, 大気中溶接の場合の結果も併記してある。水素試験は JIS Z 3113 に規定されているグリセリン法に準拠して行なった。なお, 試験結果は溶着金属 100 g に対する水素量 H_D で示してあるが, 参考のために, 水素試験後試験片を 4 箇所切断してビードの横断面積を測定し, 溶接金属量を推定して溶接金属 100 g に対する水素量 H_W についてもその値を示した。表より, いずれの径のワイヤを用いた場合も, 水中溶接部の拡散性水素量は大気中溶接部のそれに比べてはなはだしく多いことがわかる。

8. 溶接部の冷却速度

Table 7 は, 厚さ 9 mm の母材に水中および大気中でビード溶接した場合の溶接ボンドにおける 800℃ から 500℃, 800℃から300℃までの冷却時間および500℃における冷却速度をまとめて示したものである。なお, 熱サイクルは, 既報¹⁾と同様の方法で測定している。表より, たとえば 500℃における冷却速度は, 水中溶接の場合約 13–15℃/s であり, 大気中溶接の場合の 6–7℃/s に比べると若干高い値を示している。しかし, これらの値は, 被覆アーク溶接棒を用いた重力式アーク溶接法の

場合の 140℃/s⁵⁾, プラズマ溶接法による場合の 44–100℃/s⁶⁾ と比べると著しく低いことがわかる。本法によって得られた水中溶接部が比較的曲げ延性および切欠き靱性に富み, 母材熱影響部の硬さが低いという良好な結果が得られた理由は, その冷却速度が著しく低くなっていることにあると考えられる。

9. 結 言

フラックス入りワイヤを用いたサブマージアーク溶接法の水中溶接への適用性について検討を加えた。溶接ワイヤは, 径 1.6 および 2 mm の炭酸ガスアーク溶接用フラックス入りワイヤを用いた。また, 溶接箇所をシールドするためのフラックスには, 市販の溶融型フラックス (MF 43) に粘性剤である水ガラス (3号) を 40 wt % 混入したものを用いた。母材には, 溶接構造用鋼 SM 41 および SM 50 材を用い, 突合せ溶接を行なった。その結果, 本法の水中溶接への実用性が認められた。

本実験の主な結果は, 次のようにまとめられる。

(1) フラックス入りワイヤを用いたサブマージアーク溶接法を用いると, 安定したアークが維持でき, かつ, ブローホールやビード下割れなどの溶接欠陥の認められない良好な溶接が得られる。

(2) 本法によって得られた溶接部は, 十分な引張強さ, 曲げ延性および切欠き靱性を有し, その機械的性質は良好である。

(3) 水中溶接による母材熱影響部の最高硬さは約 Hv 280 であり, 著しい硬化は認められない。

(4) 本法による水中溶接部の冷却速度は比較的遅い。たとえば, 500℃における溶接ボンドの冷却速度は13–15℃/s で, 他の水中溶接法^{4,5)}のそれに比べて著しく遅い。

最後に, 本実験に協力して下さった三井造船(株)の城雅昭君(実験当時慶応義塾大学工学部)および慶応義塾大学工学部の栗原 幹君, 石井 功君に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 蓮井, 菅, 関水: 水中におけるサブマージアーク溶接 (第1報), 本誌, 48-9 (1979), p. 689-695
- 2) 蓮井, 菅, 岸: 水中における重力式アーク溶接 (その10), 本会全国大会講演概要第21集 (1977), p. 200
- 3) 安藤, 朝比奈, 鶴羽: 重力式溶接法による水中溶接 (第1報), 本会全国大会講演概要第11集 (1972), p. 160
- 4) 蓮井, 菅, 衣川: 水中におけるプラズマ溶接 (第2報), 本誌, 42-1 (1973), p. 18-28
- 5) 蓮井, 菅, 当麻: 水中における重力式アーク溶接 (第1報), 本誌, 43-8 (1974), p. 767-775
- 6) E. A. Silva, T. H. Hazlett: Shielded Metal-arc Welding Underwater with Iron Powder Electrodes, Weld. J., 50-6 (1971), p. 406-415
- 7) C. E. Grubbs, O. W. Seth: Multipass All Position Wet Welding—A New Underwater Tool, OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, Dallas, Texas (1972), Paper No. OTC 1620

Table 6 Content of diffusible hydrogen

Environment	Diameter of wire (mm)	Diffusible hydrogen	
		Depo. metal H_D (ml/100g)	Weld metal H_W (ml/100g)
Underwater	1.6	50	23
Underwater	2.0	53	21
In air	1.6	4.5	3.0
In air	2.0	7.3	3.9

Note: Base metal: SM41

Table 7 Effect of environment on cooling rate at bond

Environment	Diameter of wire (mm)	Cooling time (s)		Cooling rate at 500℃ (°C/s)	Weld heat input (KJ/cm)
		800–500℃	800–300℃		
Underwater	1.6	16	32	13	18
Underwater	2.0	14	30	15	13
In air	1.6	26	86	6	18
In air	2.0	24	77	7	12

Note: Base metal: SM41
Thickness of base metal: 9 mm