高張力鋼の水中溶接*

浜崎 正信** 榊原 実雄**

Underwater Welding of High Tensile Strength Steel*

by Masanobu Hamasaki** and Jitsuo Sakakibara**

With improvement of shielding method and prevention of heat dissipation from the surface of the mother metal, the study on the possibility of underwater welding of HT50 and HT60 was undertaken.

The results obtained are as follows.

- 1) With the use of water curtain, surrounding water did not intrude the welds and fluctuation in welding thermal cycle curve shown in the usual underwater welding was not recognized.
- 2) With improvement of shielding method under water, the cooling rate was moderated and resembled to that in the air.
- 3) The method covering the surface of the mother metal with tape was available for prevention of heat dissipation from the surface and moderated the cooling from the side of the bead.
- 4) The hardness of the weld metal and HAZ decreased with increasing of heat input and showed the qualitative correlation with the cooling rate.
- 5) The maximum hardness of HT50 was less than 380Hv and would not cause the actual problem.

1. は し が き

著者らは水カーテン式 CO₂/MIG 溶接法により軟鋼の水中溶接を行ってきたが、良好なビードが得られ、問題となるほどの硬さの上昇は認められず、溶接部の機械的性質も良好であった。¹⁻⁷最近海洋開発の進展に伴い、海洋開発関連の大型構造物や装置が数多く製作され、その重量を軽減する必要などのために、これらの構造物や装置に高張力鋼の使用される機会がますます高まるものと考えられる。

本報告ではシールド報告の改良、母材からの放熱防止をはかり、HT 50、HT 60高張力鋼の水中溶接を行い、主として溶接部の硬さを調べることににより、その適用の可能性について検討した。

2. 実験材料及び実験方法

2.1 ノズル形状

実験に使用した水中溶接ノズルの概略図を Fig. 1 (a), (b) に示す。(a) は従来使用してきた水カーテン式円形ノズル(以後通常ノズルと略称する)であり、(b) はこの通常ノズルの後方にトレーサノズルを追加した水カーテン式矩形ノズル(以後トレーサノズルと略称)である。

2.2 溶接電源及び供試材

溶接電源は直流定電圧型 500 A 用のもので逆極性を採用した。供試材は幅 100 mm、長さ 300 mm、板厚 12 mm の HT 50 及び HT 60 高張力鋼板で、溶接用ワイヤは 1.2 mmφ の高張力鋼用のものを使用した。これらの成分の一例を Table 1 に示す。

2.3 実験方法

実験は水深 30 cm の水道水中で行い、シールドガスとしては CO₂ を使用し、通常ノズルでは 50 l/min、トレーサノズルでは 100 l/min (50+50) を採用した。またカーテン水の流量は通常ノズル、トレーサノズルに対しそれぞれ 6 l/min 及び 8 l/min を採用した。ノズル-母材間隔は実験を通じて 8 mm で一定とした。

水カーテンの使用により、Fig. 2 (a) に示すように、母材表面には常にカーテン水が衝突し、冷却速度を大きくすると考えられるので、Fig. 2 (b) に示すようにカーテン水が母材表面に直接接触しないよう、厚さ約 1 mm の布テープをビード側方に貼付し、その効果を検討することにした。

熱サイクル測定は Fig. 3 に示すように、母材表面下約 0.5 mm の位置でアルメル・クロメル熱電対により行った。また母材表面下 0.5 mm における母材熱影響部及び溶接金属のマイクロビッカース硬さを測定した。これらの結果を大気中溶接における結果と比較検討した。

溶接条件として 19 V—150 A の短絡アーク条件及び 31 V—300 A のドロップ移行条件(この条件の場合、

*原稿受付 昭和53年3月7日(昭和50年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 通産省工技院四国工業技術試験所 Member, Govt.
Industrial Research Inst., Shikoku

Fig. 1 Schematics of nozzles used in this experiment
(a) Circular nozzle (b) Tracer nozzle

Table 1 Chemical composition of mother metal and wire employed in this experiment

	C	Mn	Si	P	S	Mo
HT50	0.17	1.35	0.36	0.016	0.006	
HT60	0.17	1.40	0.45	0.014	0.004	
MG-52	0.10	1.06	0.55	0.011	0.010	
MG-60	0.07	1.34	0.49	0.008	0.010	0.25

Fig. 2 Schematics of tape covered method

1.2 mmφ のワイヤを使用し溶滴の大きさは平均 2.5 mmφ, つまり溶接径はワイヤ径の2倍になっているのでこの表現をとった。)を採用し, 試験片中央にビードオンプレート溶接を行った。溶接速度の変化により入熱条件を変化している。

3. 実験結果及び考察

3.1 ビード形状

Fig. 4 は溶接速度 30 cm/min の場合のビード外観及び X 線透過試験結果で, (a) は大気中, (b) は水中でトレーサノズルを使用し, 母材表面にテープカバーを貼付した場合 (以下 Case 1 と略記), (c) はトレーサノズ

Fig. 3 Position of thermo-couple attached

Fig. 4 Bead appearances and X-ray inspection results obtained with various shielding method

(a) In the air (b) Case 1 (Tracer nozzle, Tape covered) (c) Case 2 (Tracer nozzle) (d) Case 3 (Circular nozzle)

ルを使用した場合 (Case 2), (d) は通常ノズルを使用した場合 (Case 3) を示す。低入熱の溶接条件では水中でのシールド法のいかににかかわらず, 大気中における溶接ビードと大差ないものが得られているが, 溶接電流 300 A の比較的大入熱の場合, Case 3 では溶融金属が完全に凝固する以前にカーテン水に当たるため, ビード仕端が変形している。しかし, いずれの場合もブローホールや割れの発生は認められなかった。

3.2 溶接熱サイクル

Fig. 5 は 19V-150A-30 cm/min の溶接条件における溶接熱サイクル曲線の一例で、(a) は大気中、(b)、(c)、(d) はそれぞれ水中における Case 1, Case 3 及び水カーテンを使用しない場合 (Case 4) を示す。熱電対を溶接した位置は Fig. 3 に示したように各点 15 mm ずつずらしているため、熱サイクル曲線には時間的なずれがある。図中の数字は溶接後切断してボンドから熱電対の溶接位置までの距離を求めたものである。Fig. 6 は溶接速度 30 cm/min におけるボンド近傍の最高温度分布を求めたもので、Case 1 や Case 2 のようにトレーサノズルを使用する場合は、大気中とほぼ同一の温度まで加熱され、Case 3 及び Case 4 においては大気中より低い最高温度しか示さず、熱影響部の幅は狭くなることが予想できる。溶接入熱が大きい場合には更にこの傾向が明瞭になる。

Fig. 7 及び Fig. 8 はそれぞれの溶接条件において、シールド条件の影響を明らかにするため、冷却曲線をトレースして示す。Fig. 6 からわかるように同一温度に加熱される位置、つまりボンドからの距離 L (mm) はシールド条件により多少異なっている。短絡アーク条件下では Case 4 から Case 1 へとシールド条件の改善によって冷却速度が緩和されているのが明白であるが、300 A の例では Case 4 において 800℃ 以上の高温領域では冷却速度が速いにもかかわらず、それ以下の温度では水カーテンを使用した場合より冷却速度が遅くなっている。これは溶融池形状が大きくなるに伴い、水カーテンによる冷却開始温度が高くなっていることによる。Table 2 はそれぞれのシールド条件に対して、900℃～800℃、800℃～500℃、500℃～300℃ の冷却時間を求めたものである。

3.3 各種シールド条件と冷却曲線の関係

水カーテンを使用しない場合の熱サイクル曲線には、Fig. 5 (d) に示されるように、加熱過程あるいは冷却過程において鋸歯状の不規則な変動が認められる。その原因としては、局部的に浸入した水の沸騰現象が関与しているという見方もあるが、ボンド近傍での熱サイクルの変動の周期が $1/2 \sim 1/3$ sec であることより考察すると、水中に放出されたシールドガスの挙動が不安定なため、溶接部へ水が不規則に浸入するという巨視的な現象が測

Fig. 5 Oscillograms of thermal cycle in HAZ obtained with various shielding methods (19V-150A-30 cm/min)

(a) In the air (b) Case 1 (c) Case 3 (d) Case 4 (Without water curtain)

Fig. 6 Maximum temperature distribution near the bond

(a) 19V-150A-30 cm/min
(b) 31V-300A-30 cm/min

定されていると考えた方が自然である。この不規則性がアークの不安定現象及び一定しないビード形状の原因となっている。

一方 Fig. 5 (b) (c) に示すように、水カーテンを使用した場合は、母材表面下 0.5 mm の表面近傍においても上記のような不連続性を示さず、極めてスムーズな熱サイクル曲線が得られる。しかし大気中での冷却曲線と比較すると、ある温度領域から急冷され、冷却曲線に明らかな変曲点が存在する。いまアークが通過した後、その点がノズル後端に達するまでの時間は、ノズル形状及び溶接速度から計算すると、トレーサノズルにおいて約 7 sec, 通常ノズルにおいて約 3 sec を要することにな

Fig. 7 Comparison of cooling curves from max. temperature 1200°C (a) and 800°C (b) (19V-150A-30 cm/min)

Fig. 8 Comparison of cooling curves from 1300°C (31V-300A-30 cm/min)

Table 2 Cooling time under various shielding methods

Welding condition	31V-300A-30cm/min			19V-150A-30cm/min		
	Cooling time (sec)			Cooling time (sec)		
	900-800°C	800-500°C	500-300°C	900-800°C	800-500°C	500-300°C
In the air	2.3	28.7	97.2	0.7	2.9	6.0
Underwater, Case 1	2.0	3.5	7.9	0.7	2.7	4.0
Case 2	1.4	1.9	3.9	0.6	2.4	3.8
Case 3	0.8	1.7	3.7	0.5	2.0	1.7
Case 4	1.0	2.8	5.6	0.4	1.2	1.3

り、実測された熱サイクル曲線の急冷開始点までの経過時間と良く一致しており、この急冷の原因がカーテン水の衝突によるものであることを明確に示している。

溶接金属や熱影響部の硬さに影響を与える、 A_3 変態点温度以上に加熱されたボンドのごく近傍では、水カーテンが衝突するまでは大気中における冷却速度と近似し

ている。板厚や入熱量の相違により、放熱条件の相違の影響を考慮する必要があり、薄板の突合せ溶接のように、二次元熱流に対しては、シールド面積を増大しても裏面での熱伝達の相違により、冷却速度を近似させることは困難であろうが、三次元熱流に近づくほど、シールド面積の増大によって大気中溶接熱サイクルに近似し得るものと考えられる。板厚 12 mm に対しては 5 kJ 以下の入熱に対して三次元熱流とみなせるため、⁸⁾ Fig. 7 に示すようにほぼ三次元熱流とみなせる入熱に対しては、大気中における冷却曲線との差異が小さくなる。いずれにせよシールド面積を増大させることは冷却速度緩和に対して有効であるが、水中構造物の溶接に際しては、突合せ継手よりむしろ重ね継手とかすみ肉継手が大部分を占めるものと考えられ、これらの継手に対し、ノズル径を大きくすることはシールド効果の観点から好ましくない。しかし、トレーサノズル形式であれば、ビード側方やアーク後方の寸法を任意に選択することが可能であり、上述の継手形状に対しても有効なシールド効果を得ることができる。

3.4 テープカバーの影響

Fig. 5 (b) (c) を比較したとき、母材表面に直接カーテン水が衝突する (c) の場合は急冷開始点から水温レベルまでの冷却時間が短かく、ボンドからの距離の影響はあまり認められない。しかし、テープカバーを貼付した (b) の場合はこの間の冷却速度が比較的遅く、ボンドからの距離が大になるほど、この時間が長くなっている。テープカバーを行った場合でもボンドのごく近傍はカバーできないため、カーテン水により直接冷却され、テープカバーを行わない場合と同様な水冷状態にあると考えられるが、実際には冷却曲線にずれが生じている。これはボンドから離れ、テープカバーされた部分の冷却過程が Fig. 7 (b) に示すように大いに異なるためと考えられる。例えば Case 1 の場合、Fig. 7 (a) において水冷を受けた直後の 10 sec における温度は約 200°C であるのに対し、(b) 図においては 250°C を示している。ボンドからの距離が大になるほど最高温度に達する時間の遅れがあるため、実際には更に大きな温度差があることになり、ボンドが水冷された直後には温度勾配が逆転し、ボンドにおける冷却速度を緩和しているものと考えられる。すなわち、テープカバー等の断熱材の貼付により、ビード側方からの冷却を緩和することが可能であり、実際に有効な方法であることを示している。

3.5 溶接金属及び母材熱影響部の硬さ

Fig. 9 は HT 50 鋼溶接部の硬さ分布の一例を示す。溶接速度が速くなると冷却速度も速くなりシールド法の相違が相対的に現われにくくなるため、ここには 19 V

Fig. 9 Vickers hardness distribution in welds

Fig. 11 Influence of heat input on maximum hardness in HAZ and average hardness in weld metal (HT60)

Fig. 10 Influence of heat input on maximum hardness in HAZ and average hardness in weld metal (HT50)

—150 A—15 cm/min のものを示した。溶接金属、母材熱影響部共にシールド法の相違が硬さの差として明確に現われている。Fig. 10 (a) (b) は HT 50 鋼について入熱を変化した場合の溶接金属の平均硬さ及び熱影響部の最高硬さを示す。また Fig. 11 (a) (b) は HT 60 鋼についての同様の結果を示す。

水中溶接熱影響部の硬さを問題とすると、溶接入熱ばかりでなく、周囲の水を排除する広さや溶接部への水の不規則浸入、あるいはカーテン水のような冷却水流があるか否かによって冷却速度は異なるため、一般的に論ずることは困難である。

大気中溶接部の溶接線上における冷却速度は三次元熱流においては入熱に逆比例する。⁹⁾ このためビード形状が著しく異ならない限り、溶接金属や熱影響部の冷却速度も入熱に逆比例するものと考えられる。このため入熱の増加に伴い溶接部の硬さは低下する傾向を示している。また大気中溶接部の硬さは、移行形態の異なる溶接条件であってもほぼ同一の曲線上にプロットできるが、水中溶接においては同一入熱条件であってもシールド方法の相違あるいは溶接速度の相違により硬さは大いに異なってくる。これは同一入熱であっても、溶接速度が異なれば溶融池形状が異なり、大電流・高速溶接を行うと溶融池は長くなり、カーテン水により急冷される温度が高くなるため、Fig. 10 (a) (b) を比較すると同一入熱においては短絡移行条件の方が硬さはむしろ低下している。

熱サイクル曲線に急冷の変曲点が存在するため、水中溶接におけるシールド条件の硬さに与える影響については定性的に判断するしかないが、Table 2 に示した冷却速度を基準にすると、短絡移行条件においては大気中、水中 Case 1, Case 2, Case 3 の順に冷却速度は速くなり、HT 50 鋼については熱影響部の最高硬さの差として明確に示されている。一方 HT 60 鋼においては、溶接金属については同様の傾向が認められるものの、熱影響部については大気中においても 400 Hv 以上を示しており、水中におけるシールド法の差異はほとんど認められない。一方ドロップ移行条件下では、入熱の大きい領域で特に大気中溶接部との差が大きい、これは溶融面積が増大し、800℃～1100℃の高温から水冷されるためである。しかし、Case 1 の場合の冷却速度は大気中短絡

移行条件における冷却速度より遅く、硬さも低下し、定性的には冷却速度と良い対応関係を示している。このように高張力鋼の水中溶接においては、比較的大入熱を採用し、トレーサノズル等によるシールド面積の増大あるいは母材表面からの放熱防止が硬さの低下に有効であることがわかる。

4. 結 言

HT 50 及び HT 60 鋼について各種シールド法により水中溶接を行い、熱サイクル測定及び硬さ分布の測定を行い、大気中溶接部との比較検討を行った結果、次の結論を得た。

- 1) 水カーテンの使用により間歇的な水の浸入がなく、熱サイクル曲線は従来水中溶接で示された不規則な変動を示さない。
- 2) 水中におけるシールド法の改善により、冷却速度を緩和し、大気中における冷却速度に近似させることが可能であることを示した。
- 3) 母材表面にテープを貼付する方法は、母材表面からの放熱防止に有効であり、ピード側方からの冷却を緩和する。
- 4) 溶接金属及び母材熱影響部の硬さは、入熱の増加と共に低下する傾向を示し、冷却速度との間に定性的な相関関係が得られた。
- 5) HT 50 鋼については、小型トーチであっても 380

Hv. max 程度であり、実用上問題となる程の硬さの上昇は認められなかった。

本論文をまとめるにあたっては大阪大学溶接工学研究所長、荒田吉明教授の指導を得た。また溶融池の凝固時間の考察については大阪大学工学部、西口公之教授の有益な助言を得た。ここに誌上をかり厚く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 浜崎、榊原：“水カーテン式水中炭酸ガスアーク溶接法の研究”，本誌，Vol. 42，No. 9，p. 897 (1973)
- 2) 榊原、立岩、浜崎：“フラックス入りワイヤによる水カーテン式水中炭酸ガスアーク溶接について（第1報）”，本誌，Vol. 43，p. 141 (1974)
- 3) 浜崎、榊原、立岩：“同上（第2報）”，本誌，Vol. 43，p. 141 (1974)
- 4) 浜崎、榊原：“水カーテン式水中炭酸ガスアーク溶接法の研究”，本誌，Vol. 43，p. 868 (1974)
- 5) M. Hamasaki, J. Sakakibara, Y. Arata: “Underwater MIG Welding”, Metal Const., Vol. 8, p. 108 (1976)
- 6) 荒田、浜崎、榊原：“水カーテン式水中 MIG 溶接（第1報）”，本誌，Vol. 46，p. 648 (1977)
- 7) 荒田、浜崎、榊原：“同上（第2報）”，本誌，Vol. 46，p. 728 (1977)
- 8) ZVI Paley, J.N. Lynch, C.M. Adams: “Heat flow in welding heavy steel plate”, Welding J. Vol. 43, p. 71a (1964)
- 9) C.M. Adams: “Cooling rates and peak temperature in fusion welding”, Welding J., Vol. 37, p. 210s (1958)

純チタン-304 ステンレス鋼の抵抗スポット溶接について*

市川 理 衛** 大橋 照 男**

Resistance Spot Welding of Pure Titanium to 304 Stainless Steel*

by Riei Ichikawa** and Teruo Ohashi**

The weldability of commercial pure titanium to 304 stainless steel by resistance spot welding was investigated by means of tensile shear test and macro- and microstructural observations. The results obtained are as follows:

- 1) It is rarely successful to obtain reliable joint strength by directly welded titanium to 304 stainless steel because of the formation of brittle intermetallic compounds mainly composed of TiFe₂.
- 2) Ductile weld joints are produced by an application of the insert metal sheets of 1100 aluminum and their maximum tensile shear strength reaches about 350 kg/spot.

*原稿受付 昭和53年4月11日（昭和51年度春季全国大会にて発表）

**正 員 名古屋工業大学 Member, Nagoya Institute of Technology