水中溶接における冷却過程の評価 — 流速の影響 —*

福岡 俊 道**

Evaluations of Cooling Process of Underwater Welding — Effects of Flow Velocity —

By Toshimichi Fukuoka

Underwater welding technologies are of growing importance with increasing of waterfront projects. Underwater welding technique also provides effective means for repairing many kinds of offshore structures. It should be pointed out, however, that such important properties as the cooling cycle and the joint strength in the underwater welding are not fully understood. In the previous studies, cooling cycle of underwater welding conducted in the water at rest was investigated. From a site welding point of view, it is necessary to elucidate how a tidal current and a wave affect the welding operations and the strength of welded joint.

In this paper, underwater welding is performed in the running water, and the effects of water flow velocity on the cooling process are studied. The experiments are conducted in a water tank especially designed for this purpose, where the flow velocity is varied up to 30cm/sec. Accordingly, significant characteristics of the cooling curves and cooling rates are estimated.

1. はじめに

欧州では、わが国に比較して水中溶接の実用化が進んでいる。海底油田、海底ケーブルなどに関連する技術が進んでおり、またかなり以前から多くの海洋構造物が存在していることが主たる原因であると考えられる。水中溶接は、溶接部が急冷されるために大気中溶接に比較して継手の強度が低く、積極的に実施されるべき溶接作業ではない。しかしながら、海洋構造物の補修あるいは船舶などの応急修理には欠くことのできない接合技術である。その際、大気中で溶接した場合に比較してどの程度継手強度が低下するかは、工学的な観点から極めて重要である。一方、溶接継手の強度は溶接部の熱サイクルに大きく依存することが知られている。したがって、溶接部の冷却速度は継手強度を評価する有効な指針であり、従来の水中溶

接に関する研究の多くは、冷却速度の評価が重要なテーマとなっている^{1), 2), 3)}。

静止水中で溶接を実施した場合については、前報⁴⁾において三次元差分法により母材表面の熱伝達率の影響を考慮した数値解析手法を提案している。そこでは、母材表面温度分布、表面熱伝達率分布、ボンド部の冷却曲線、冷却速度などを評価することにより、水中溶接の基本的な熱特性を明らかにしている。ところで、実際の海洋構造物は波や潮流にさらされており、溶接部周辺の水の流動が母材の冷却サイクルを中心として継手の特性に種々影響を及ぼすと考えられる。しかしながら、水中溶接の冷却過程に対する流速の影響を定量的に評価した研究は見あたらないようである。そこで本研究では、流速が種々変化する環境下で溶接実験を実施するために回流水槽を製作し、溶接部の冷却過程に及ぼす流速の影響を定量的に明らかにすることにより、水中溶接技術に対して基礎的知見を提供することを目的としている。

*原稿受付 平成12年3月6日

**正会員 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

2. 水中溶接と大気中溶接の冷却特性の比較

溶接継手の強度は、溶接加工中に溶接部がどのような熱サイクルを受けたかに強く影響される。その場合、溶接作業後とくに硬度が高くなる溶着金属と熱影響部の境界部分であるボンド部の熱履歴が重要となる。ここでは大気中溶接との比較を通して、水中溶接ではどのような機構で急冷現象が生じるかを考察する。

図1は、水中溶接および大気中溶接において、母材に与えられたアーク熱が周辺に拡散していくメカニズムを模式的に示したものである。いずれの溶接においても、溶接アークから与えられた熱は母材中を熱伝導で伝わるが、母材表面から周囲環境への放熱現象は複雑である。まず大気中溶接では、非常に高温になる溶接ビード表面およびその近傍ではふく射の影響も大きいが、主として対流熱伝達により放熱されると考えられる。ところで、溶接加工中あるいは溶接加工終了直後については、母材表面温度は溶接線周辺を除いてさほど上昇していないために、溶接ボンド部の熱サイクルに対する大気中への熱の拡散の影響は比較的小さいと考えられる。その後、熱伝導により溶接線から離れた部分の母材表面温度が上昇するにつれて、大気中への放熱される熱の総量が増加すると推察される。しかしながら、継手強度に影響する800℃から500℃あたりの温度領域でのボンド部の熱サイクルについては、溶接加工中が対象となるので母材表面からの熱伝達の影響は比較的小さい

といえる。

水中溶接における母材表面からの放熱現象はさらに複雑である。前報⁴⁾では、静止水中における水中溶接の冷却過程を評価するために、表面温度の上昇に伴って母材表面からの放熱が自然対流、核沸騰、遷移沸騰を経て膜沸騰熱伝達に変化するとして解析した。その場合、RohsenowやBromlyなどが提案している式を用いて、母材表面温度と表面熱伝達率の関係を図2のように表している。図に示したような急激な熱伝達率の変化、例えば核沸騰から膜沸騰への変化は、わずか数10℃の違いによっておこるので、母材表面の極めて狭い領域で熱伝達率は大きく変化していると考えられる。図1の左半分はその様子を示したものである。また図3は、大気中および静止水中における溶接実験の結果得られたボンド部の熱サイクルを比較したものである⁵⁾。以上の結果は、いずれも静止水中での溶接実験から得られたものであるが、実際の海洋構造物においては、潮流あるいは波の影響があり、ある大きさの流速の中での溶接作業となる。その場合、母材表面は強制対流中での沸騰を伴う熱伝達現象となり、静止水中よりもさらに厳しい環境下における溶接となる。

3. 水中溶接実験装置

3.1 回流水槽の製作 過去に実施した水中溶接実験^{4)~6)}においては、いずれも静止水中で溶接を実施した。本研究の目的が水中溶接における流速の影響の評価である点を考慮して、図4に示した

図1 水中溶接と大気中溶接におけるアーク熱の拡散メカニズム

図2 水中溶接における母材表面温度と熱伝達率の関係

ように、流速を種々変化させて水中溶接が可能な回流水槽を製作した。実験装置の全体のレイアウトは、流体力学の流れの観察に用いられる回流水槽を模倣している。回流水槽の寸法は約180cm×75cmで、外壁は塩化ビニルを使用している。水深は約20cmとした。また定常な流れの中で溶接するためにアルミニウム製の整流板を取り付けている。水流は、表1に仕様を示したモータ3基をアルミパイプを介してプロペラに接続することにより発生させる。流速は、電源に直流交流変換器を用いてプロペラの回転数を制御することにより変化させる。本研究で製作した装置では、流速が30cm/secを越えると波や大きな渦が発生して安定した流れが得られなかったため、最大流速を毎秒30cmとした。溶接試験片は、プロペラと反対側の定常な流

れが得られる直線部分に置く。溶接トーチは台車に固定されており、台車を動かすことにより自動で水中溶接が実施される。

3.2 溶接試験片と温度測定方法 図5は、試験片まわりの詳細と溶接トーチ先端のノズル形状を示している。クロメル-アルメル熱電対を取り付けた試験片は溶接台に固定されており、熱起電力をオシログラフィックレコーダーにより連続的に記録する。溶接トーチは水の流れと同じ方向に移動させる。また水中でのシールドガスの効果を高めるために、トーチの先端にはノズルを装着している。ノズル先端の開口部は、多数の穴がけられた厚さ3mmの銅板で塞がれている。ここで銅板の中心部には直径6mmの穴がけられており、そのまわりに20ヶ所にわたって直径1.5mmの穴が配置されている。さらに、ノズルのまわりにスカート設けて、シールドガスの母材表面を覆う効

図3 水中溶接と大気中溶接における冷却曲線の比較

表1 プロペラ駆動用モータの仕様

名称	マブチモータ RS540SH
限界電圧	12 V
適正電圧	7.2 V
適正負荷	200 gf・cm
無負荷回転数	15800 rpm
適正負荷時の回転数	14000 rpm
適正負荷時の消費電流	6 A
シャフト径	3.17 mm

図4 実験装置全体図

図5 測定部分とノズル形状の詳細

果を高めている。図6は熱電対によるボンド部温度の測定方法を示している。試験片に直径2mmの穴をあけて、予備実験より求めたボンド部の溶け込み位置まで熱電対を挿入し、先端を母材にスポット溶接する。熱電対の挿入孔は、水の浸入を防ぐために耐熱パテで塞いでいる。なお溶接ボンド部の深さは、予備実験より約2.5mmであった。ビード始末端部では端部の影響によって特徴的な冷却特性を呈する点を考慮して⁷⁾、温度測定は試験片の両端から離れた5点で実施する。

3.3 実験条件 溶接実験は、シールドガスを用いて平板上をアークが移動するビード溶接により実施する。試験片はSS400で、寸法は長さ250mm、幅100mm、板厚9mmである。また溶接ワイヤには、直径1.2mmの軟鋼及び50キロ級高張力鋼用のものを使用する。シールドガスとしては、アルゴンと炭酸ガスを約8：2で混合したものを使用し、流量は毎分60ℓする。溶接電圧と溶接電流は、それぞれ37.0Vと220Aとし、溶接速度は30cm/min一定とした。流速は、0、10、20、30cm/secと変化させる。

4. 実験結果

4.1 溶接ビードの形状 溶接条件が変化すると溶接ビードの形状は変化するが、とりわけ溶け込み形状は継手強度に大きく影響する。蓮井らは、重力式アーク溶接を水中溶接に適用した場合について、溶接棒の材質が溶け込み形状に及ぼす影響について示している⁸⁾。本研究では、流速が溶接ビード形状に及ぼす影響を検討した。図7は、流速を零から30cm/secまで変化させた場合の溶接ビード形状の変化を示している。また表2には、各流速に対するビード幅と余盛高さの測定結果を示して

いる。流速が大きくなると余盛高さは減少し、目視によりブローホールなどの欠陥の増加が認められるが、ビード幅の変化は小さい。また表には示していないが、ここで実施した条件下では、溶け込み深さは流速の影響をほとんど受けないようである。

4.2 冷却曲線 アーク溶接における冷却曲線は、一般に図6に示したボンド部における温度履歴を指すことが多い。その理由としては、溶接部においてボンド部の硬度がもっとも高く、継手強度に支配的な影響を持つことによると考えられる。図8は、本実験で得られた冷却曲線の測定結果を示している。図中のパラメータは流速であり、参考のために同じ溶接条件で実施された大気中溶接の結果も示している。水中溶接では、いずれの流速においても900℃と1000℃の間でボンド部の温度変化率が非常に小さい、すなわち勾配が極端に小さくなるという特徴的な曲線となっている。そのような傾向は、以前の研究において母材の板厚の影響を評価した実験でも現れている⁵⁾。しかしながら、板厚を6mmから19mmまで変化させた場合、冷却曲線の勾配が小さくなり始める温度が約1200℃から700℃までかなり大きく低下した。図8から、流速が大きくなるとボンド部温度が再び急

図6 ボンド部温度の測定

図7 溶接ビード形状に及ぼす流速の影響

表2 ビード幅と余盛高さに対する流速の影響

流 速 (cm/sec)	0	10	20	30
ビード幅 (mm)	16.3	17.2	16.8	17.0
余盛高さ (mm)	3.8	3.5	3.3	2.8

激に低下し始めるまでの時間が短くなっているのが認められる。一方流速が零、すなわち静止水中における実験結果は、流速が大きい場合と比較的近い結果となっている。この原因を明らかにするためには、強制対流中での沸騰熱伝達現象の解明が不可欠である。

4.3 冷却速度 冷却速度については種々の定義が提案されているが、本研究では冷却曲線の各温度における時間に対する変化率、すなわち冷却曲線の勾配として評価する。なお勾配は負の値となるが、便宜上その絶対値とする。図9は、横軸

にボンド部の温度をとり、縦軸にその温度に対する冷却速度をプロットしたものである。なお、図中に大気中溶接の結果も示している。従来の研究と同様、冷却速度はある温度でピークを示すという水中溶接独特の特性を示している^{2), 4), 5)}。今回の実験では、流速零の場合を除いていずれの場合も500℃付近でピークが現れており、明らかに流速の増加に伴って冷却速度の最大値は大きくなっている。また図8の冷却曲線と同様に、流速零の場合やや傾向が異なっている。したがって、実際の現場での作業を想定した場合、静止水中での溶接、すなわち流速零の状態は、冷却特性の観点からはやや特別な場合であると考えられる。

図10は、各流速における冷却速度の最大値をプロットしたものである。各データの下に数字は、最大冷却速度が発生したボンド部の温度を示している。流速の増加に伴って冷却速度はほぼ直線的に増加している。本実験での最大流速は30cm/secで、これは約0.58ノットに相当する。流速がさらに大きい場合の冷却速度は、ここで得られた結果を単純に外挿して評価することはできないが、いずれにしても極めて高い値となることが予測される。

5. 結 言

水中溶接を現場で実施する場合に問題となる潮流、波などの影響を評価するために、周囲流体の

図8 冷却曲線に及ぼす流速の影響

図9 冷却速度に及ぼす流速の影響

図10 冷却速度の最大値に及ぼす流速の影響

流速を変化させて溶接実験を行った結果、以下に示す結論を得た。

- (1) 現場における水中溶接作業を想定して、周囲の流体の運動がどのように影響するかを検討するために回流水槽を製作し、母材の冷却特性に対する流速の影響を定量的に明らかにした。
- (2) 本研究で採用した溶接条件において、冷却速度の最大値はボンド部温度が500℃付近で現れ、流速の増加とともにほぼ直線的に増加した。
- (3) ボンド部温度の時間変化率が小さくなり始める温度は、板厚を変化させた場合と異なり、ほぼ900℃と1000℃の間で現れた。
- (4) 流速が大きくなると、余盛高さは減少しブローホールなどの欠陥が増加するが、ビード幅の変化は小さい。また、溶け込み深さは流速の影響をほとんど受けないようである。

本研究の多くの部分は、神戸商船大学における卒業研究として実施されたものである。自らの創意工夫で実験装置を完成させ、実験データを収集された柳井隆志君(現福伸電機(株))に謝意を表します。

参考文献

- 1) 蓮井・他2名, 水中における重力式アーク溶接(第3報), 溶接学会誌, 44-6, (1975), pp459-465.
- 2) 蓮井・菅, 水中溶接部の冷却について, 溶接学会誌, 48-12, (1979), pp1077-1083.
- 3) 衣川・ほか2名, 水中プラズマ溶接部の冷却, 溶接学会誌, 44-10, (1975), pp834-839.
- 4) 福岡・杉浦, 水中溶接における冷却過程の解析(熱伝達機構を考慮した数値シミュレーション), 舶機誌, 31-12, (1996), pp874-882.

- 5) 福岡・福井, 水中溶接における冷却過程の解析(大気中溶接との比較), 舶機誌, 28-12, (1993), pp767-774.
- 6) 福岡・福井, 水中溶接における冷却過程の解析(表面熱伝達率と温度分布特性), 舶機誌, 28-3, (1993), pp208-215.
- 7) 福岡, アーク溶接における冷却過程の解析(ビード始端部における冷却サイクル), 舶機誌, 27-8, (1992), pp563-569.
- 8) 蓮井・他2名, 水中における重力式アーク溶接(第2報), 溶接学会誌, 44-4, (1975), pp337-344.

~~~~~メッセージ~~~~~

福岡 俊道

アーク溶接に関連する研究は多数発表されていますが、その中で水中溶接を扱ったものは極めて少ないといえます。研究者の立場からすれば、実験の再現性が乏しい、あるいは解析する場合には極めて非線形性が強いということがその理由ではないでしょうか。このことは、ややもすれば研究者のわがままのように聞こえますが、逆に水中溶接の難しさを表しているとも考え

られます。わが国の大学等の研究機関において、水中溶接に関する研究は1970年代を中心にかなり実施されていましたが、その後急激に減少したように思えます。海洋構造物をつくり、できあがったものを保守管理するという観点から、水中溶接は極めて重要な技術であると考えられます。数年前ある水産高校を訪問したときに、水中溶接実習用の設備があることを知り大変うれしく思いました。今後産学官の連携により、海洋国日本の基盤技術のひとつとして水中溶接がとりあげられることを期待しております。