

水中溶接部の割れに及ぼす板厚の影響

長 谷 川 正 義*

The Effect of Plate Thickness on Cracks of Underwater Welds

Masayoshi HASEGAWA*

(Received March 26, 1986)

The cracks of underwater welded joints of mild steel of varying thickness was experimentally investigated by CTS and Y-groove cracking tests in shallow water, using coated electrodes.

From these experiments the following results were obtained :

- 1) Cracks in the heat affected zone of CTS and Y-groove cracking test specimens increased with the decrease of plate thickness.
- 2) Cooling rate and maximum hardness of welds of CTS and Y-groove cracking test specimens increased with the decrease of plate thickness.
- 3) The cause for the increased cooling rate of underwater welds with the decrease of plate thickness was explained by a calculation which considered the heat transfer coefficient of the surface of welds under water.

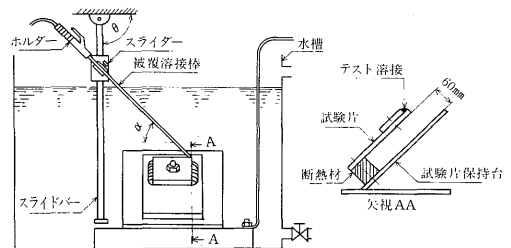
1. 緒 言

著者はすでに、各種被覆アーク溶接棒による軟鋼の水中溶接について若干の実験的研究を行ったことがある^{1,2)}。そして、低水素系以外の被覆アーク溶接棒では気孔のない、外観も良好な溶接が可能であり、得られた継手の引張強さは母材のそれと同程度以上であるが、延性が劣ることを示した。また、水中でのビード溶接部には軟鋼においてもベイナイト及びマルテンサイト組織を生成し、硬化が著しいことも報告した。したがって、水中溶接ではアーク雰囲気の水素分圧も大気中溶接に比べ著しく高いので、軟鋼においても割れ発生の危険性が考えられる。

本研究では、各種被覆アーク溶接棒を用いて、水中で種々の板厚の軟鋼板のCTS及び斜めY形溶接割れ試験を行い、水中溶接継手の割れに及ぼす板厚の影響を調べ

た。

さらに、溶接時の冷却速度及び溶接部の硬さ測定並びに顕微鏡組織観察を行った。これらの結果について報告する。



第1図 水中溶接実験装置

2. 実験装置及び溶接電源

水中溶接の実験は第1図に示すごとく、水槽(縦 500×

*機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

横 600×深さ 500 mm) に約 120 ℓ の水道水を入れ、水温約 18℃で、水深約 200 mm の位置で行った。

溶接にあたっては、同図に示すごとく被覆アーク溶接棒の角度 α 及びスライドバーの角度 θ を変えることにより、所定の溶接速度を得ることができる重力式アーク溶接装置を作製して用いた。

溶接電源には、容量 200 A の垂下特性の交流アーク溶接機を用いた。

第 1 表 供試母材の化学組成

材 料		板 厚 (mm)	化 学 组 成 (Wt.%)					炭素当量 (%)
			C	Si	Mn	P	S	
母 材	A	12	0.14	0.20	0.58	0.027	0.022	0.25
	B	22	0.13	0.22	0.55	0.022	0.023	0.23

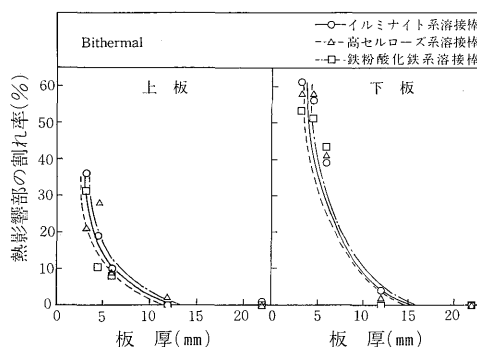
注：炭素当量=C+Mn/6+Si/24(%)

3. 実験方法及び結果

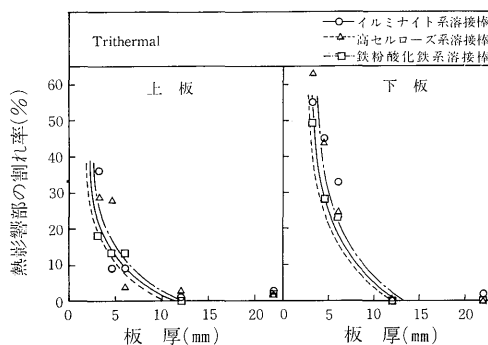
3.1 CTS 割れ試験

第 1 表に記号 A 及び B で示す化学組成を持つ板厚 12 及び 22 mm の軟鋼板を母材とし、棒径いずれも 4 mm のイルミナイト系 (D 4301)、高セルローズ系 (D 4311) 及び鉄粉酸化鉄系 (D 4327) の 3 種類の軟鋼用被覆アーク溶接棒を用い、いずれも 100℃に 1 時間乾燥した後、防水しないで直ちに水中で CTS 割れ試験を行った。実験は JIS Z 3154-1962 (重ね継手溶接割れ試験方法) に準拠して行った。板厚は 3.2、4.5、6、12 及び 22 mm とし、上板及び下板はそれぞれ同一板厚の組合せとした。なお、板厚が 3.2、4.5 及び 6 mm の試験片は、いずれも第 1 表に記号 A で示す板厚 12 mm の鋼板からそれぞれの板厚に機械加工により削り出したものを用いた。拘束溶接は鋼板の圧延方向と試験溶接方向とが一致するように大気中で 2 パスで行った。試験溶接はいずれの溶接棒の場合も溶接電流 170 A、アーク電圧 30~38 V、溶接速度 15 cm/min 及び被覆アーク溶接棒の角度 45°の条件で、まず試験溶接 1 (熱流 2 方向側で、以下 Bithermal という) を行い、試験片全体が完全に水温 (約 18℃) まで冷却してから溶接棒を取り替え、試験溶接 2 (熱流 3 方向側で、以下 Trithermal という) を行った。なお、試験片は下板の裏面も十分水冷されるように、第 1 図に示すごとく、溶接台表面との間隔を約 60 mm あけ、取付具を用いて固定した。試験溶接を完了した試験片は水中に 48 時間放置した後、2 本の試験溶接について、外観検査及び X 線写真の撮影を行ってから、割れ観察用試料を機械加工により採取した。そして、各測定面は電解研磨を行い、3%ピクリン酸アルコール溶液に濃硫酸 3%を加えた液で腐食した後、溶接熱影響部及び溶接金属の割れの有無並びに長さを調べ、さらに硬さの測定を行った。割れの検査には顕微鏡の倍率を 100~400 倍とした。

水中溶接部の外観検査及び X 線写真によれば、いずれの溶接棒及び板厚の場合も外観は良好で、溶接金属にも気孔は全く認められなかった。



第 2 図 熱影響部の割れ率に及ぼす板厚の影響



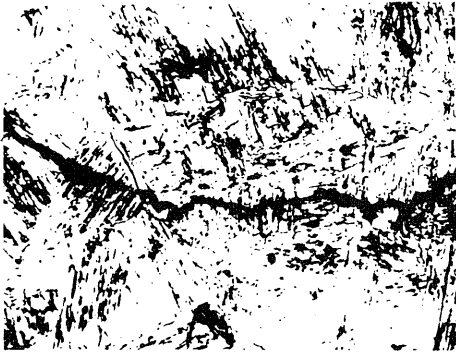
第 3 図 熱影響部の割れ率に及ぼす板厚の影響

第 2 及び 3 図は各種溶接棒を用い、水中で種々の板厚の軟鋼板の CTS 割れ試験を行った場合の溶接熱影響部の割れ率に及ぼす板厚の影響を示す。なお、熱影響部の割れは JIS Z 3154 により求めた割れ率で示した。同図によれば、水中溶接による熱影響部の割れ率は第 2 図の Bithermal 及び第 3 図の Trithermal のいずれについても、板厚 22 及び 12 mm では約 5%以下であるが、12 mm 以下では板厚が減少するとともに割れ率は著しく増大する傾向が認められる。たとえば、イルミナイト系溶接棒による Bithermal 下板の割れ率は板厚 6 mm で約 40%、板厚 4.5 mm で約 55%であるが、板厚 3.2 mm では約 60%にも達している。この点は周知のごとく、大気中溶接の場合では板厚が増加するとともに熱的拘束数 TSN (Thermal Severity Number) が大となり、割れ率も増大すると全く逆の傾向にある。

また、Bithermal と Trithermal とにおける割れ率の差はいずれの板厚の場合にもほとんど認められなかった。しかし、上板と下板との割れ率の差は、板厚 12 mm 以下では著しく、上板に比べ下板の方がはるかに高い割

れ率を示している。

熱影響部に発生した割れの形態はすべてビード下割れで、板厚 3.2 及び 4.5 mm の Bithermal 及び Trithermal 下板には長さ約 2 mm にも達する大きな割れも観察されたが、ほとんどが約 1 mm 以下の大きさであった。第 4 図は一例として、板厚 4.5 mm の Bithermal 下

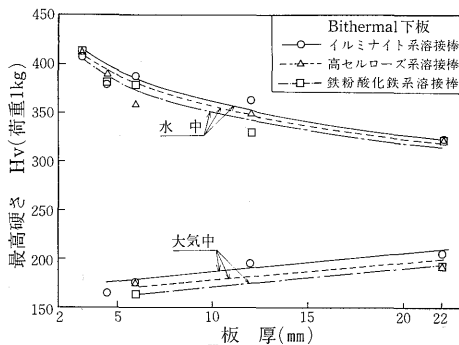


第 4 図 熱影響部に発生した割れの一例

板の熱影響部に発生した割れの顕微鏡写真を示す。地はマルテンサイト組織で硬化が著しいことが認められる。

なお、水中溶接金属には、いずれの板厚の場合にも割れが観察された。この割れの大きさは最も大きなものでも 0.5 mm 程度でほとんどが 0.1 mm 前後のマイクロ割れであった。また、板厚及び Bithermal と Trithermal との相違による溶接金属の割れの大きさ及び発生数の差はほとんど認められなかった。

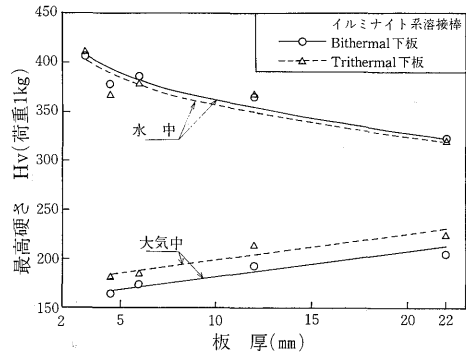
また、大気中でも種々の板厚の CTS 割れ試験を行ったが、熱影響部及び溶接金属にも割れは全く認められなかった。



第 5 図 最高硬さに及ぼす板厚の影響

第 5 図は熱影響部の最高硬さをビッカース硬度計（荷重 1 kg）により測定した結果を大気中の場合と比較して

示す。図は一例として Bithermal 下板について示したものである。水中溶接による最高硬さは板厚が減少するとともに上昇する傾向が認められ、大気中溶接熱影響部の最高硬さの変化と全く逆の傾向を示している。また、水中溶接の場合は第 6 図に示すごとく、Bithermal と



第 6 図 最高硬さに及ぼす板厚の影響

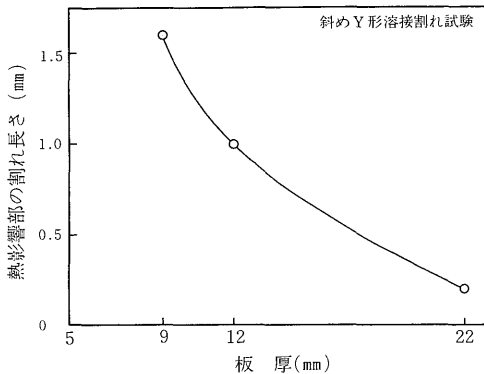
Trithermal とで最高硬さの差はほとんど認められないが、大気中では Trithermal の方が Bithermal よりもやや高いことが認められる。

水中溶接金属のビッカース硬さも Bithermal と Trithermal との差はほとんど認められなかった。また、板厚 3.2 mm から 6 mm までの範囲では硬さはほとんど変化しなかったが、板厚 6 mm 以上では板厚の増加とともにわずかに低下する傾向が認められた。

3.2 斜め Y 形溶接割れ試験

第 1 表に記号 A 及び B で示す化学組成を持つ板厚 12 及び 22 mm の軟鋼板を母材とし、鉄粉酸化鉄系溶接棒を用いて水中で斜め Y 形溶接割れ試験を行った。実験は JIS Z 3158-1966 (斜め Y 形溶接割れ試験方法) に準拠して行った。試験片の板厚は 9, 12 及び 22 mm とし、板厚 9 mm の試験片は第 1 表に記号 A で示す板厚 12 mm の鋼板から 9 mm に機械加工により削り出したものを用いた。拘束溶接には低水素系溶接棒を用い、鋼板の圧延方向と試験溶接方向とが一致するように大気中で両面溶接を行った。拘束溶接完了後、試験片全体が完全に室温まで冷却した後、試験片を水深約 200 mm の位置に置き、溶接電流 170 A、アーク電圧 30~34 V、溶接速度 15 cm/min 及び被覆アーク溶接棒の角度 45°の溶接条件で重力式アーク溶接装置を用い、下向姿勢で試験溶接を行った。試験片は裏面も十分水冷されるように、溶接台表面との間隔を約 60 mm あけて固定した。なお、クレータ処理は同一箇所でも約 8 秒間溶接を継続し、クレータを完全に盛り上げた。試験溶接を完了した試験片は水中に 48 時間放置した後、外観検査及び X 線写真を撮影してから

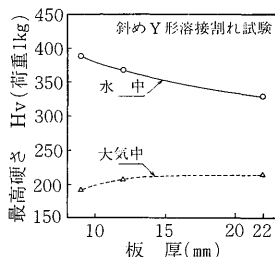
試験溶接部断面の割れ観察用試料を機械加工により採取した。その後、電解研摩したのち腐食し、熱影響部及び溶接金属の割れの有無並びに長さを調べ、さらに硬さの測定を行った。水中溶接部の外観検査及びX線写真によれば、いずれの板厚の場合も外観は良好で、溶接金属にも気孔は全く認められなかった。



第7図 熱影響部の割れ長さに及ぼす板厚の影響

第7図は水中で種々の板厚の軟鋼板の斜めY形溶接割れ試験を行った場合の溶接熱影響部の割れの有無並びに長さを測定した結果を示したものである。なお、熱影響部及び溶接金属の割れの発生箇所をJIS Z 3158に示す試験溶接部の5横断面について調べたが、ルートから発生している割れはほとんど観察されなかったため、JIS Z 3158に示す断面割れ率を求めることができなかった。そこで、第7図に示す熱影響部の割れは5横断面についてそれぞれ測定した割れの長さの平均値で示した。同図によれば、水中溶接による熱影響部の割れの長さは板厚22 mmで約0.2 mm、板厚12 mmで約1.0 mm及び板厚9 mmで約1.6 mmで、板厚が減少するとともに増大する傾向が認められる。また、熱影響部に発生した割れの大きさは板厚22 mmの場合、最も大きなものでも0.5 mm前後であるが、板厚9及び12 mmの場合には約1.5 mmにも達する大きなものもあった。

溶接金属の割れの大きさ及び発生数は板厚の相違による差はほとんどなく、いずれも0.1 mm前後のマイクロ割れであった。



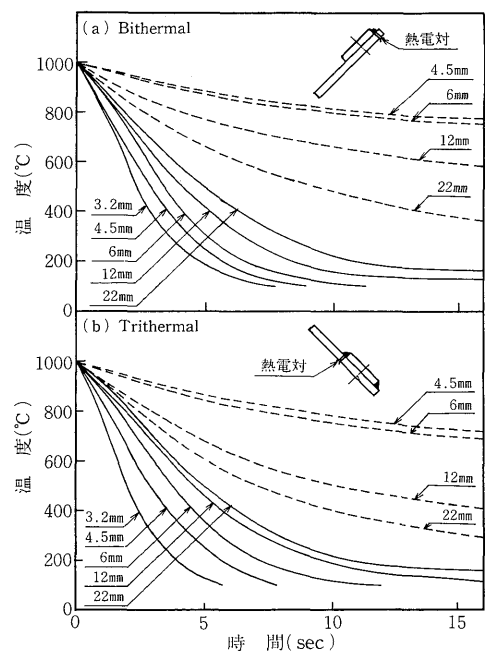
第8図 最高硬さに及ぼす板厚の影響

また、水中溶接部の板厚の変化による最高硬さの変化は第8図に示すように、板厚の減少とともに上昇する傾向が認められ、大気中熱影響部の最高硬さの変化と全く逆の傾向を示している。

一方、大気中で斜めY形溶接割れ試験を行った場合にはいずれの板厚の場合も割れは全く観察されなかった。

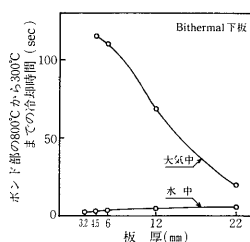
3.3 冷却速度の測定

以上の実験結果に示したように、水中におけるCTS及び斜めY形溶接割れ試験片の熱影響部の割れ率及び最高硬さは、いずれも板厚が減少するとともに増大する傾向が認められ、大気中の場合と全く逆の傾向が認められた。したがって、水中では溶接部の冷却速度が著しく大であるのみならず、母材の板厚と冷却速度との関係が大気中の場合と異なっていることが考えられる。そこでCTS及び斜めY形溶接割れ試験片の水中溶接時における冷却速度を測定し、大気中でのそれと比較検討した。測定にあたっては、下板の裏面から試験溶接中央のボンド部に達するように直径1.8 mmの穴を明け、アルメル・クロメル熱電対の先端を挿入し、その先端をバーカッション溶接した後、穴の中に水が入らないように耐火セメントで固めた。溶接棒は鉄粉酸化鉄系を用い、前述の条件で溶接した。この場合の溶接入熱は約23000 Joule/cmである。

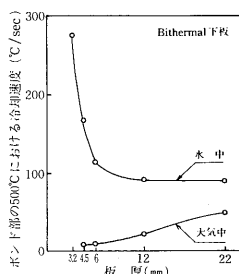


第9図 CTS割れ試験における1000℃からの冷却曲線の比較 (実線は水中、破線は大気中を示す)

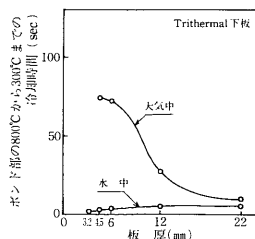
第9図は種々の板厚のCTS割れ試験片を水中で溶接した場合の Bithermal 及び Trithermal 下板のボンド部における冷却曲線を大気中の場合と比較して示したものであり、第10及び11図は Bithermal 下板のボンド部の800℃から300℃までの冷却時間並びに500℃における冷却速度を、第12及び13図は Trithermal 下板のボンド部について示したものである。なお、同図中の500℃における冷却速度は、 $(500+20)^{\circ}\text{C}$ から $(500-20)^{\circ}\text{C}$ までの温度低下に要する時間で、その温度差(40℃)を除して得られる平均速度で示した。図に示す水中と大気中との冷却速度の差は板厚の減少とともに著しく増大する。この傾向は第14及び15図に示す斜めY形溶接割れ試験の場合も同様であった。また、大気中では Trithermal の冷却速度が Bithermal のそれよりも大であるのに比べ、水中では両者の差はほとんど認められない。



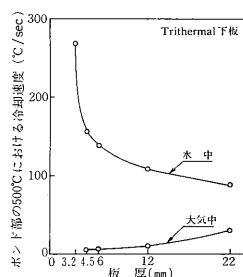
第10図 ボンド部の800℃から300℃までの冷却時間に及ぼす板厚の影響



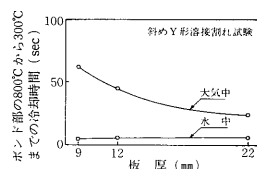
第11図 ボンド部の500℃における冷却速度に及ぼす板厚の影響



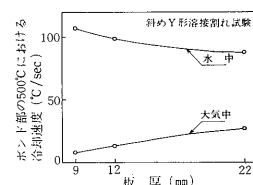
第12図 ボンド部の800℃から300℃までの冷却時間に及ぼす板厚の影響



第13図 ボンド部の500℃における冷却速度に及ぼす板厚の影響



第14図 ボンド部の800℃から300℃までの冷却時間に及ぼす板厚の影響

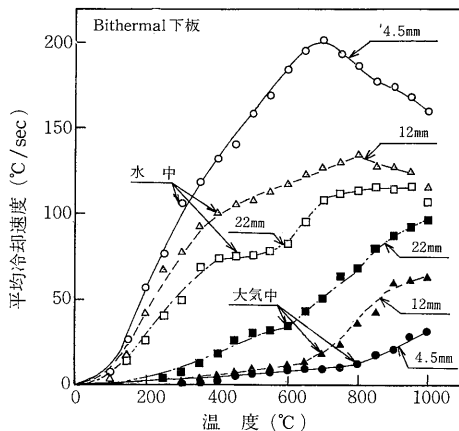


第15図 ボンド部の500℃における冷却速度に及ぼす板厚の影響

3.4 実験結果の考察

以上の実験結果から、水中溶接によるCTS及び斜めY形溶接割れ試験片の熱影響部の割れ発生傾向が板厚の減少とともに著しく増大するのは、板厚が減少するとともに冷却速度が増大し、熱影響部の最高硬さも上昇するためと考えられる。そして、板厚と冷却速度との関係が、大気中の場合のそれと全く逆の傾向を示しているのは水の熱伝達率と空気のそれとが著しく異なることが主因と考えられる。すなわち、一般の大気中溶接での冷却速度では熱伝達率は考慮しないが、水中溶接の場合には水の熱伝達率を考慮しなければならないものと考えられる。

第16図は第9図の冷却曲線を用いて得られたボンド部の温度と平均冷却速度(40℃)との関係を示したものである。水中溶接と大気中溶接の場合とでは平均冷却曲線が全く異なった様相を示している。すなわち、大気中溶接の場合、温度と冷却速度との関係はほぼ単純増加の傾向を示しているが、水中溶接の場合のそれは600～850℃付近に極大値を有する複雑な傾向を示している。これは、大気中溶接部の冷却が主に母材への熱伝導によるのに対し、水中溶接部の冷却は主に水の沸騰現象を伴っ



第16図 平均冷却速度に及ぼす温度の影響

た水中への熱伝達によるものと考えられる。

そこで、熱伝達率 $0.0001, 0.001, 0.01, 0.05$ 及び $0.1 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec}^\circ\text{C}$ ($3.6, 36, 360, 1800$, 及び $3600 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$) を仮定し、板厚が 2 mm から 30 mm まで変化した場合の 800°C から 300°C までの冷却時間をそれぞれ計算により求めた。計算には準定常状態において、板表面からの熱放散を無視しない場合の移動熱源による有限板厚の平板の温度分布を求めるための次式³⁾を用いた。

$$T = T_\infty + \frac{Q}{\pi \lambda h} e^{-ux/2k} \sum_{n=0}^{\infty} A_n \left(\cos \frac{U_n z}{h} + \frac{hd}{U_n} \sin \frac{U_n z}{h} \right) \times K_0 \left\{ \frac{r}{h} \sqrt{U_n^2 + \left(\frac{vh}{2k} \right)^2} \right\}$$

ただし、 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

U_n : $\tan U_n = 2hdU_n / (U_n^2 - h^2d^2)$ の正の固有値

A_n : $U_n^2 / (U_n^2 + h^2d^2 + 2hd)$

ここで、 x : 熱源を原点とした溶接方向の座標 (溶接方向を正とした) (cm)

y : 溶接線と直角方向の座標 (cm)

z : 板厚方向の座標 (cm)

A : 溶接電流 (A)

V : アーク電圧 (V)

v : 溶接速度 (cm/sec)

Q : 鋼板に与えられる実効熱量 (cal/sec)

$$Q = 0.24 \eta A V$$

η : 溶接熱効率 (-)

h : 板厚

$T(x, y, z)$: 温度 ($^\circ\text{C}$)

T_∞ : 雰囲気温度 ($^\circ\text{C}$)

λ : 母材の熱伝導率 (cal/cm sec $^\circ\text{C}$)

k : 熱拡散率 (cm^2/sec)

α : 熱伝達率 (cal/cm² sec $^\circ\text{C}$)

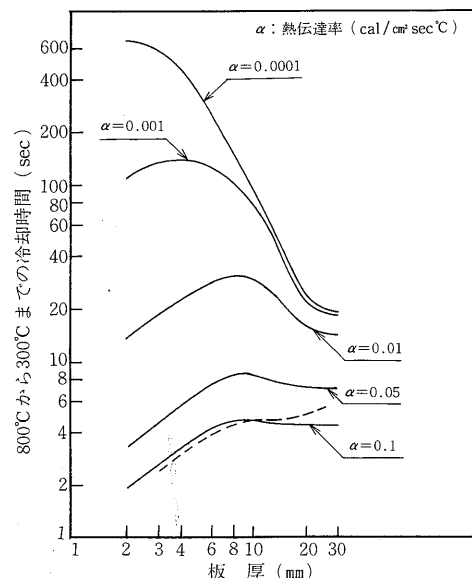
d : 放熱係数 $= \alpha / \lambda$ (cm^{-1})

K_0 : 0 次のKベッセル函数

なお、計算にあたっては、 $y = 0 \text{ cm}$, $z = 0 \text{ cm}$, $A = 170 \text{ A}$, $V = 34 \text{ V}$, $v = 0.25 \text{ cm/sec}$, $Q = 971 \text{ cal/sec}$, $\eta = 0.7$, $h = 2 \sim 30 \text{ mm}$, $T_\infty = 18^\circ\text{C}$, $\lambda = 0.072 \text{ cal/cm sec } ^\circ\text{C}$, $\alpha = 0.0001 \sim 0.1 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C}$, $d = 1.3888 \times 10^{-3} \sim 1.3888 \text{ cm}^{-1}$ 及び $k = 0.45 \text{ cm}^2/\text{sec}$ を用い、熱的定数は温度に依存しないものと仮定した。

第17図に示す計算結果によれば、平板におけるある板厚範囲での母材の板厚と 800°C から 300°C までの冷却時間との関係は熱伝達率の値によって逆の傾向となることが認められる。すなわち、熱伝達率が空気熱伝達率⁴⁾ ($0.00008 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C}$, 常温付近温度差 10°C) にほぼ等しい $0.0001 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C}$ の場合には、板厚 20 mm までは板厚の増加とともに冷却時間も著しく減少する傾向が認められるが、熱伝達率が $0.001 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C}$ よりも大きくなると、板厚に対する冷却時間がある板厚で極大を示し、ある板厚以下では板厚の増加とともに冷却時間も増大する傾向が見られる。また、冷却時間が極大を示す板厚は熱伝達率の増加とともに厚板側に移行することが認められる。

本実験におけるCTS及び斜めY形溶接割れ試験のような特殊の形状を持つ試験片の結果として、第17図に示した有限平板上を点熱源が移動するというビード溶接に近い状態による解析結果がそのまま適用できるものと



第17図 800°C から 300°C までの冷却時間に及ぼす板厚の影響 (種々の熱伝達率を仮定して計算した場合、破線は実験値を示す)

は思われない。しかし、第 17 図に示した計算結果から、CTS 及び斜め Y 形溶接割れ試験片の水中溶接による板厚と冷却速度との関係が大気中の場合のそれと全く逆の傾向を示しているのは、水の熱伝達率と空気のとが著しく異なるためであると考えられる。なお、第 17 図中に破線で示した実測による CTS 割れ試験片の場合の板厚と 800℃から 300℃までの冷却時間との関係は、熱伝達率 $0.1 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C}$ を与えて計算で求めたそれと傾向が比較的良く一致している。したがって、本実験における水の熱伝達率は約 $0.1 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C}$ と推定される。

水の熱伝達率⁴⁾は単相自然対流熱伝達で $0.007 \sim 0.008 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C}$ ($260 \sim 300 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$: 常温付近温度差 10°C)、沸騰熱伝達では膜沸騰で $0.033 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C}$ ($1200 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$: 大気圧 $\Delta T_{\text{sat}} = 500^\circ\text{C}$)、核沸騰で $0.22 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C}$ ($8000 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$: 大気圧 $q = 10^5 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$ 付近) 及びバーンアウト点近傍で $1.388 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C}$ ($50000 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$: 大気圧 $q = 10^6 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$ 付近) であり、本実験における水の熱伝達率の推定値 $0.1 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C}$ は水の膜沸騰による熱伝達率と核沸騰によるそれとのほぼ中間の値である。水中溶接時における溶接部及びその近傍の水は沸騰していることが観察されるが、この沸騰形態は溶接部及びその近傍の母材の温度から見て、核沸騰又は膜沸騰あるいは両者が生じていると考えられる。

したがって、水中溶接部の冷却は母材の熱伝導のほか、沸騰熱伝達による熱放散が著しいため、水中溶接部の冷却速度が著しく大となるばかりでなく、母材の板厚と冷却時間との関係が大気中溶接の場合のそれと逆の傾向を示すものと推察される。

4. 結 言

軟鋼用各種被覆アーク溶接棒を用いて水中で種々の板厚の軟鋼板の CTS 及び斜め Y 形溶接割れ試験を行い、次の結論を得た。

- (1) 熱影響部の割れはいずれの割れ試験の場合も板厚の減少とともに増大する。
- (2) 熱影響部の最高硬さはいずれの割れ試験の場合も板厚の減少とともに増大する。
- (3) 溶接時における冷却速度はいずれの割れ試験の場合も板厚の減少とともに増大する。
- (4) 板厚の減少による冷却速度の増大は、水中溶接部の冷却が母材の熱伝導と水の熱伝達によるためと考えられる。そして計算の結果、板厚の増加とともに冷却速度の増大の傾向が熱伝達率の値により減少の傾向に逆転することを明らかにした。

本研究は昭和 60 年度本学特別研究費の交付により行われたことを付記し、本学関係者各位に対し、深甚の謝意を表します。また、本研究を遂行するにあたり、終始ご懇切なご指導を賜りました元本学教授故松田一夫博士に対し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 松田，長谷川：水中における被覆アーク溶接Ⅰ，中部工業大学紀要，第 8 巻 A (1972)，9～20
- 2) 松田，長谷川：水中における被覆アーク溶接Ⅱ，中部工業大学紀要，第 9 巻 A (1973)，1～12
- 3) 田中：移動熱源による熱伝導について，溶接学会誌，13-9 (1944)，347～359
- 4) 内田他：熱伝達特論 (技術シリーズ)，裳華房，(1966)，88