

非低水素系すみ肉溶接棒使用時の 溶接金属割れに及ぼす鋼板表面状態の影響

Influence of Surface Conditions of Steel Plate upon Cracks
in Fillet Welds by Non-low-hydrogen Electrode

堀川浩甫* ・ 山本孝雄** ・ 下畑隆司*** ・ 和田 俊****

By Kohsuke HORIKAWA, Takao YAMAMOTO, Takashi SHIMOHATA and Takashi WADA

This paper describes the influence of surface conditions of steel plate upon cracks in fillet welds by non-low-hydrogen type coated electrode on the basis of the experimental investigation on TMCP(Thermo Mechanical Control Process) steel.

It is confirmed that only lower diffusible hydrogen content electrode of non-low-hydrogen type can be applied to high strength steel plates like TMCP with a certain thickness limitation of primer coating under limited welding atmosphere.

1. まえがき

本報告は、非低水素系溶接棒をすみ肉溶接に使用した場合の、溶接金属割れに及ぼす鋼板表面状態の影響に関する実験結果をまとめたものである。すなわち、昭和60、61年度に、土木学会鋼材規格小委員会で開催されたTMCP(Thermo Mechanical Control Process)鋼に対する一連の検証実験のうち、非低水素系溶接棒のすみ肉溶接へ適用する可能性の試験において一部の溶接金属に割れが見られたことから、委員会終了後も継続課題として若干の追加実験を実施したが、その結果の報告である。

TMCP鋼の土木構造物への適用に関する研究成果は、上記委員会の報告書¹⁾に詳述されており、その概要が土木学会誌²⁾に、さらに実験の詳細が土木学会論文集³⁾にそれぞれ掲載されている。また、造船分野では、既に50キロ級鋼のTMCP鋼を船舶用鋼板として有効に使用するための大々的な実験・研究が行われており、その成果が昭和60年5月に「新製造法による50キロ級高張力鋼の有効利用に関する研究」と題して報告されている⁴⁾。非低水素系溶接棒の適用に関しても、工作上及び材料上の観点から既に検討が加えられている^{4)~6)}。一方、道路橋示方書・同解説⁷⁾などでは、高張力鋼に対して低水素系溶接棒の使用が原則とされているが、TMCP鋼の出現による非低水素系溶接棒の適用の可能性を検討する観点から、委員会では改めて非低水素系溶接棒の溶接性について検証実験を行い、続いて拡散性水素量をパラメータとして鋼板の表面状態と溶接割れとの関係を検討した。

以下、非低水素系溶接棒のすみ肉溶接への適用についての検証実験での委員会の成果の概要を2章で述べ、

-
- * 工博 大阪大学 溶接工学研究所 教授 (〒567 大阪府茨木市美穂ヶ丘11-1)
 - ** 工修 住友重機械工業(株) 橋梁鉄構本部技術室 課長 (〒550 大阪市西区江戸堀1-18-11)
 - *** 工修 (株)神戸製鋼所 鉄鋼生産本部厚板開発室 主任研究員 (〒675-01加古川市金沢町1番地)
 - **** (株)神戸製鋼所 溶接棒事業部技術部 主任研究員 (〒251 藤沢市宮前字裏河内100-1)

3章以降に追加実験の成果である発生した溶接金属割れの原因ならびに鋼板の表面状態の影響についての実験結果を紹介すると共に、プライマー塗布鋼板に対する溶接施工上の問題へ言及し、さらに今後の非低水素系溶接棒による溶接の施工管理の問題についての若干の考察を述べるものとする。

2. TMC P 鋼検証実験の概要

2.1 試験対象及び溶接条件

図－1 に示す拘束試験体を用いて一層水平すみ肉溶接を行い評価した。本試験体においては、下記に示す2種類のルートギャップを設け、2種類のプライマーを塗布した。

- ルートギャップ
- ①立板端面が機械加工でルートギャップが0mm
 - ②立板端面がガス切断でルートギャップが1mm
- プライマー
- ①無機ジンクリッチプライマー
 - ②長曝型ウォッシュプライマー

供試鋼板であるTMC P鋼の化学成分及び機械的性質を表－1 に示す。

- また、本実験では高張力鋼で25mmの板厚を用いていることから表－2 に示す溶接材料及び溶接条件を採用した。表－3 に供試溶接棒の諸性能を示す。試験温度は施工条件の厳しい時を想定して室温（5℃以下）とした。その他、溶接に当たっては、
- ①仮付位置は中央部1ヶ所80mmとし本溶接前に位置をチェックした。
 - ②拘束ピースを脚長4mmで溶接した。
 - ③試験体温度が室温となるまで放冷させた。
 - ④I側を脚長7mmで本溶接した。
 - ⑤試験体温度が室温になるまで放冷させた。
 - ⑥II側を脚長7mmで本溶接した。

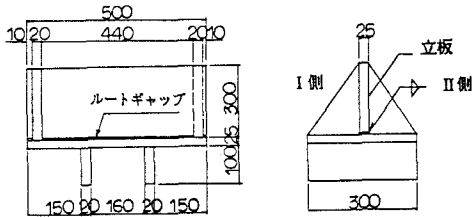
なお、本溶接については条件を一定にするためにグラビティ溶接とした。

2.2 観察方法と結果

ビード外観・ビット、表面割れ、断面割れ、断面マクロ、縦断破面及びH A Zのミクロ組織の6項目について下記の方法により観察した。

1) ビード外観・ビット

溶接ビードを目視でチェックした。
結果はすべての試験とも滑らかで美しいビードであり、ビットは発生していなかった。



図－1 すみ肉拘束割れ試験体の形状と寸法

表－1 供試鋼板の化学成分および機械的性質

鋼種	板厚 (mm)	化学成分(%)						機械的性質		
		C	Si	Mn	P	S	Ceq	Y.P	T.S	E.L
SM50YB	25	0.100	0.350	1.300	0.019	0.004	0.35	40	51	27

Ceq : $C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14 (\%)$
Y.P : 降伏点 (kg/mm²)
T.S : 引張強さ (kg/mm²)
E.L : 伸び (%)

表－2 溶接材料及び溶接条件

溶接棒	棒径	溶接条件	拡散性水素量
ライムチタニア系 市販棒（非低水素系）	6.0mm	280A-30V-25cm/分	公称 ≤25ml/100g

表－3 供試溶接棒の諸性能

溶接棒		機械的性質					化学成分(%)					拡散性水素量 (ml/100g)
棒径 (mm)	棒長 (mm)	Y.P (kgf/mm ²)	T.S (kgf/mm ²)	E.L (%)	I.V (kgf.m)		C	Si	Mn	P	S	
6.0	700	45.2	53.2	26	8.3	6.1	0.06	0.40	0.70	0.016	0.008	約 2.5

2) 表面割れ

溶接後48時間後にビード表面に対し染色浸透探傷試験を行い、表面割れを右式で評価した。

その結果、無機ジंकリッチプライマーを塗布したものでルートギャップが0mmのものに数%の割れ(縦割れ)が認められた。

3) 断面割れ

溶接後48時間後に試験体を切断し、図-2に示す5横断面を検鏡し、以下の式により割れ率を算出した。

$$\text{断面割れ率} = \frac{\Sigma \text{割れ長さ}}{\Sigma \text{脚長}} \times 100 [\%]$$

ただし、この場合の脚長は割れが発生した方の脚長とし5横断面は、始末端を除いたビード長さ420mmを6等分した面とした。

その結果、ルートギャップやプライマーの種類に拘らず一部で20~30%の割れが観察された。

4) 断面マクロ

断面割れの観察に供した試験片を用い、マクロ観察をした。その結果、断面は滑らかできれいなビードであることが確認できた。写真-1に無機ジंकリッチプライマーを塗布し、ルートギャップが0mmのもので図-2に示す断面割れが認められたものの断面マクロを示す。

5) 縦断破面

断面割れ用に切断した同じ試験片よりⅠ側ビードを削除し、Ⅱ側ビードにノッチを入れ、破面を現出させた(図-3参照)。次に、破面上で溶込み量及びブローホールの径・長さ及び個数を記録し、その面積を‘径(w)×長さ(l)’で表して、ビードののど断面に占める割合(破面占有率)を下式で求めた。

$$\text{ブローホールの破面占有率} = \frac{\Sigma (\text{径} \times \text{長さ})}{\text{ビード長さ} \times \text{のど厚}} \times 100 [\%]$$

溶込み量、ブローホールならびに割れについて次のような結果が得られた。

① 溶込み量

図-4に溶込みの測定方法を、さらに表-4に溶込み量の測定結果をそれぞれ示す。どちらのルートギャップの場合もルートは溶けており問題はなかった。

表-4 溶込み量の測定結果

	ルートギャップ 0mm	ルートギャップ 1mm
溶込み量	ルートは溶けている + 0.2 ~ 0.3 mm 程度	ルートは溶けている 溶込み量としては、 + 0.3 ~ 0.5 mm 程度

$$\text{表面割れ率} = \frac{\Sigma \text{割れ長さ}}{\text{ビード長さ}} \times 100 [\%]$$

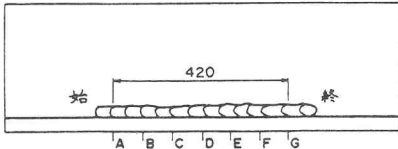
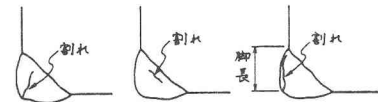


図-2 断面割れとその検鏡位置

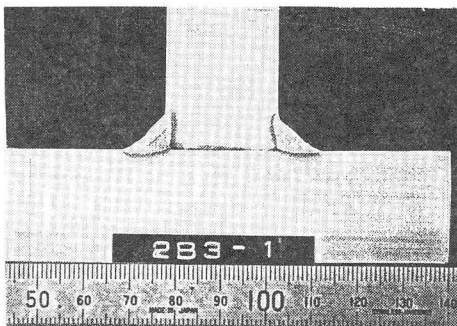


写真-1 水平すみ肉溶接断面マクロ

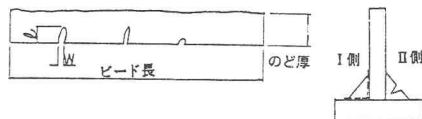


図-3 すみ肉ビード縦破断面とブローホール

図-4 溶込みの測定方法

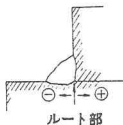


表-5 ブローホールの破面占有率

プライマー	無機ジंक		ウォッシュ	
ルートギャップ	1 mm	0 mm	1 mm	0 mm
ブローホールの破面占有率 (%)	1.7	6.0	1.0	6.3

② ブローホール

ブローホールについては幅を0.5mm毎、長さを1mm毎に整理し、破面占有率を求めると表-5のようになった。

この表から、ルートギャップの有無によりブローホールの発生に大きな違いがあることが分る。即ち、プライマーの種類に関係なくルートギャップを0mmにした方が1mmにした場合より、個数で約4倍近く発生している。この原因は、ルートギャップがあることにより、溶接中に発生したガスが抜け易くなった為と考えられる。厳密な比較の為には一般にブローホール・ビットが発生し易いとされる低水素系溶接棒を用いたデータと比較検討する必要があるが、総じて今回のブローホール発生状況からすれば、特に問題はないレベルと言える。

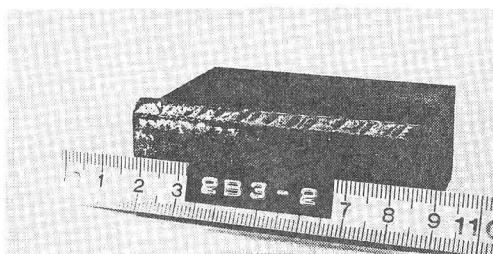


写真-2 縦断に破断させた割れの状況

③ 割れ

写真-1に示す断面割れが生じた試験体をビードに平行に縦断に破断させて割れの状況を調べたところ、割れは写真-2に示すように半月状の突起物として認められた。

6) HAZのミクロ組織

断面割れに用いた試験片のうち一つを使ってHAZのミクロ組織を撮影、観察した。結果を写真-3に示す。

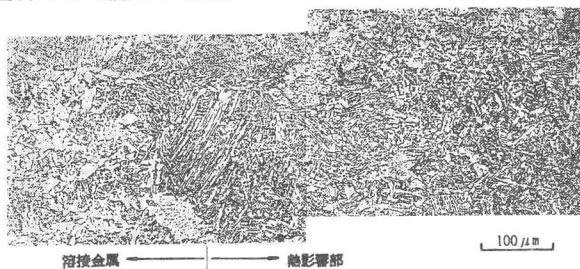


写真-3 HAZのミクロ組織

3. 再現確認実験

以上が委員会でのTMCP鋼の検証実験における非低水素系溶接棒の適用についての実験の概要であるが、その中でジンクリッチプライマーの塗布量が多いものに一部溶接金属に割れが発生していることから、原因究明のため、亜鉛(Zn)の存在も考慮した上で以下の要領で割れの再現確認実験を実施した。

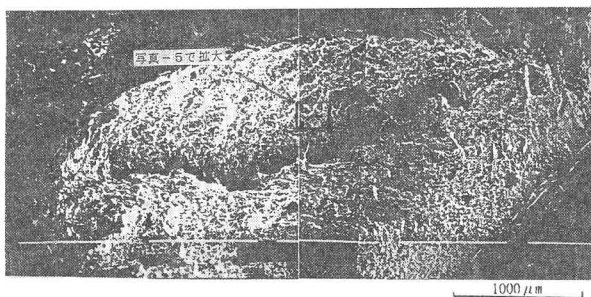


写真-4 破面の観察結果

3.1 走査型電子顕微鏡による破面の観察

走査型電子顕微鏡(SEM)による破面の観察を実施し割れの確認を行った。その結果、破面は擬へき開破面で水素による遅れ割れと推測され、粒界割れは生じてい

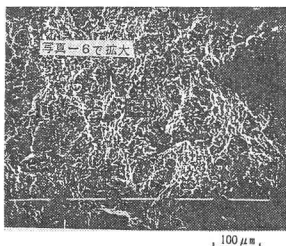


写真-5 拡大写真

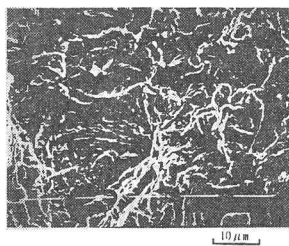


写真-6 拡大写真

なかった。写真-4は、写真-2に見られる割れの一例を示し、さらに、写真-5及び6においてそれぞれを拡大したものを示す。

3.2 ブライマーの塗布量を増加させた場合の再現実験

次に、水素による遅れ割れの主原因と見られるブライマーの塗布量について、通常15～20μm程度の膜厚が50～60μmもあったのと同じTMCP鋼に対して再現実験を実施した。表-6に試験条件及び溶接条件を示す。表-7にブローホールの破面占有率と同じ要領で実施した割れの観察結果を示すが、割れが再現されている。

表-6 試験条件および溶接条件

試験 番号	ブライマー		供試棒 再乾燥 の有無	試験温度 (℃)	溶 接 条 件		
	種 類	膜 厚			溶接方法	電流 (Amp)	運棒比
1	無機ジクリッチ	60μm	有	0	グラビティ	280	1.3
2	長曝型ワッシュ	30μm	無	0	グラビティ	280	1.3

表-7 割れ観察結果

試験 番号	溶接入熱 (KJ/CM)	溶接 順序	表面割れ (数字は割れ率) 割れ率 = $\frac{\text{割れ長さ}}{\text{ビード長}} \times 100$	断面割れ (数字; 割れ率 = $\frac{\text{割れ長さ}}{\text{脚長}} \times 100$)				すみ肉ビード横断面の割れ $\frac{\text{割れ個数}}{\text{観察ビード長 (mm)}}$
				A	B	C	D	
1	21.7	1		100	100	100	100	37 / 161
	21.7	2		100	100	100	100	
2	20.6	1		100	100	100	100	2 / 179
	19.2	2		100	100	100	100	

3.3 溶接金属割れ部のZn分析

発生した割れは、その破面から擬へき開破面を呈していることから水素による遅れ割れと考えられるが、Znを多量に含むブライマーを厚く塗布した試験体の溶接金属に多く発生していることから、Znの存在状態につきE PMA (Electron Probe Micro Analyzer)により調査した。試料は、無機ジंकリッチブライマーを60μm塗布された試験体より、溶接金属部を強制破断させ割れを現出させたものと、割れを含む断面を切り出したものの2種が採取された。そして、前者については割れ破面部とその周辺の強制破断部(延性破面部)とで面分析を、後者については鏡面研磨の後、線分析を行った。なお、割れの存在状態とE PMA分析域は図-5に示されている。分析の結果、いずれの試料及び分析位置においても、割れ部とその周辺部でZnの濃度差はもとよりZnの偏析も認められず、Znの存在状態が直接割れに影響していないであろうことが推定された。

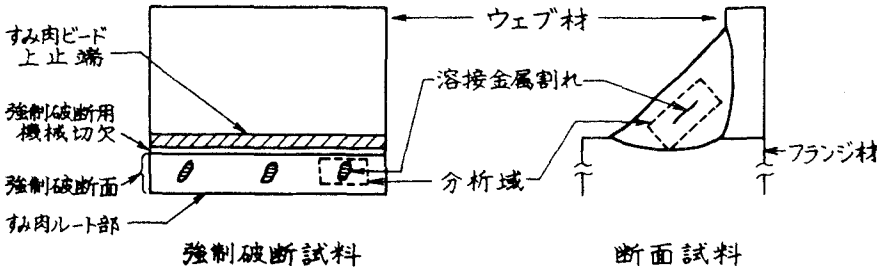


図-5 割れの存在状態とE PMA分析域

3.4 プライマーを塗布しないTMC P鋼による再現実験

プライマーを塗布しないTMC P鋼を用い、溶接金属割れが発生したときと同一の条件で実験を実施したが、§ 2.2 で見られたような割れは発生しないことが確認された。

4. 鋼板の表面状態の影響調査実験

前章の再現確認実験において発生した溶接金属割れが、プライマー塗布量の影響による水素割れと考えられたことから、溶接棒そのもののもつ拡散性水素量との関連において鋼板表面状態と割れとの関係を調査した。

(1) 供試材料

供試鋼板については、鋼板の化学成分そのものの割れに対する影響はないと考えられるが、対象としたテーマがTMC P鋼の検証実験という性格上、同じTMC P鋼板を用いるものとした。
さらに、供試溶接棒については拡散性水素量が、23 [ml/100g]と29 [ml/100g]の2種類とした。諸性能を表-8に示す。

表-8 供試溶接棒の諸性能

溶 接 棒			機 械 的 性 能						化 学 成 分〔 % 〕					擴 散 性 水 素 量 (ml/100g)
記号	棒 徑 (mm)	棒 長 (mm)	Y . P (kgf/mm ²)	T . S (kgf/mm ²)	E . L (%)	I . V (kgf·m)		C	S i	M n	P	S		
						0 ℃	-20 ℃							
A	6 . 0	7 0 0	43.2	51.2	31	9.8	7.8	0.08	0.22	0.80	0.014	0.007	23.3	
B			43.6	52.1	30	10.2	8.3	0.08	0.24	0.82	0.014	0.007	29.1	

(2) 鋼板の表面状態

鋼板の表面状態は、みがき（黒皮をグラインダーで除去）、黒皮、錆およびプライマー塗布を基本とし、表-9に示す9種類とした。

表-9 鋼板の表面状態

	みがき	黒 皮	錆	無機ジンクリッチプライマー			ウォッシュプライマー		
				15〔μm〕	30〔μm〕	60〔μm〕	15〔μm〕	30〔μm〕	60〔μm〕
表面状態	ミルスケールをグラインダーで除去	ミルスケールのまま	グラインダーがけした後に屋外に放置し2日間に渡り水を数回散布した。	ショットの後15〔μm〕の膜厚に塗布	ショットの後30〔μm〕の膜厚に塗布	ショットの後60〔μm〕の膜厚に塗布	ショットの後15〔μm〕の膜厚に塗布	ショットの後30〔μm〕の膜厚に塗布	ショットの後60〔μm〕の膜厚に塗布

(3) 試験および溶接条件

鋼板の表面状態と供試溶接棒の組合せおよび溶接条件等を表-10に示す。

(4) 試験項目

試験項目としては、①鋼板表面状態の拡散性水素量の測定（JIS Z 3113に基づく）、②表面割れ（溶接終了後24時間0℃に保持した後、染色浸透探傷試験法による）、③断面割れ（断面をサンドペーパーで研磨し、腐食後50倍の顕微鏡で観察）、④縦断面における割れの観察（本試験では観察面を機械切断後バフ研磨し、腐食させないまま100倍にして観察。割れはSR193（委）⁴⁾に従い0.5mm以上のものを対象）、⑤硬さ測定（Hv：荷重10kgf）である。

表-10 鋼板の表面状態と供試溶接棒の組合せ

No	溶接棒	鋼板の表面状態	溶接方法	溶接電流	試験雰囲気
1	A	みがき, 黒皮, 錆	グラビティ 運棒比(1.3)	270 Amp	0℃×60%RH 30℃×78%RH
25	B	無機ジंकリッチプライマー 15,30,60μm ウォッシュプライマー 15,30,60μm			

* RH：相対湿度 * 組合せについては全ケースで25個とし、各繰返し数は1とした。

(5) 試験結果及び考察

拡散性水素量について、鋼板の表面状態の影響による増加を、割れとの関係も含めて図-6に示す。これによると、鋼板表面状態においてみがき、黒皮および錆の場合はほぼ等しく、プライマーを塗布した場合は無機ジंकリッチプライマーの方が増加量は大きい。膜厚15μmに対しては、約5ml/100gでSR193（委）の結果とよく一致している。また溶接雰囲気間で見ると30℃×78%RHと0℃×60%RHの場合とでは、大きな差がなく溶接雰囲気の拡散性水素量に及ばず影響は小さいと言える。

次に表面割れ、断面割れについては、試料の採取位置を図-7とした場合、全ての断面で割れは認められなかった。さらに、図-8示したすみ肉ビードを2等分に縦断した観察面では、プライマー塗布のものに膜厚が厚くなるに従って割れが多く認められた。図-6はその割れと拡散性水素量及び鋼板表面状態との関係を示すが、これによると、試験温度が0℃で割れが発生し始める拡散性

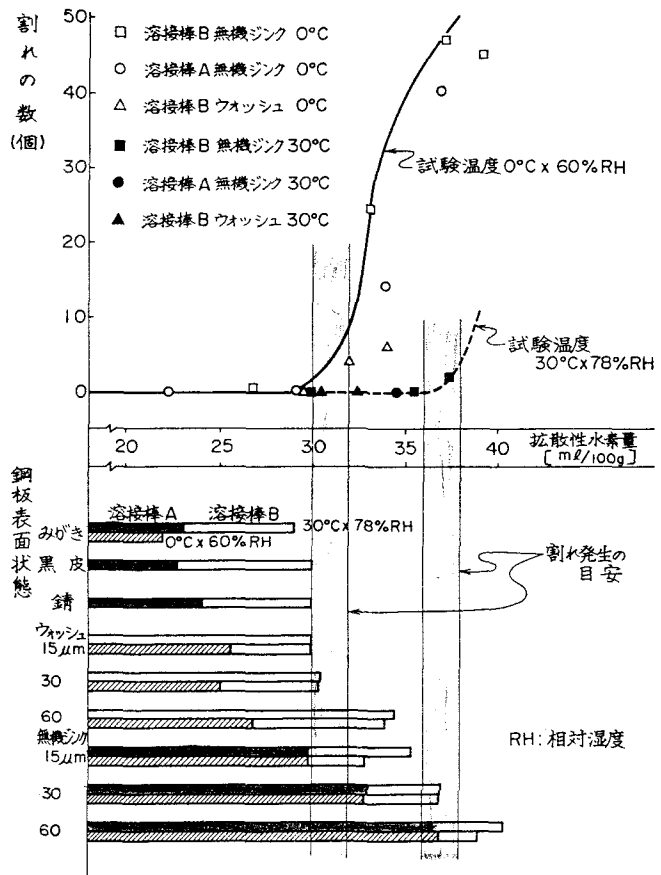


図-6 鋼板の表面状態による
拡散性水素量の増加と割れの関係

水素量は32ml/100g（溶接棒Bとウォッシュプライマー30μmの組合せ）であり、一方、30℃の場合は37ml/100g（溶接棒Bと無機ジソクリッチプライマー30μmの組合せ）であった。この原因は、冷却速度が遅くなったために残留する拡散性水素量が減少したこと、および、溶接金属の硬さが低くなったことによると考えられる。硬さについては表面状態の影響は認められなかったが、試験温度0℃でHv≒210で、30℃では200程度であった。図-9に硬さ測定位置を示し、図-10に結果の一例を溶接棒A、試験温度0℃において示す。

以上の結果を考慮し、鋼板の表面状態と溶接棒との関係から再整理すると表-11のようなことが考えられ、非低素系溶接棒のすみ肉溶接への適用に際しての一応の目安が示されることになる。

5. プライマー塗布とすみ肉溶接の現況

5.1 プライマーの塗布量

以上の考察は、原板プラスト方式によるショッププライマーを対象としているが、このプライマーは本塗装時までの鋼板の防錆を目的として塗布される。従って、膜厚が薄ければ防錆力が落ち、厚いと溶接、溶断性に問題が生じることとなる。そこで、公団・公社等の基準を見ると、一次プライマーの膜厚に対しては、15μmを標準としているところが多く、ミルメーカ-の原板プラストラインでも15±5μmとして管理されている。したがって、これまでの考察によれば、この膜厚が管理されており、溶接棒A程度の溶接棒が使用されている場合は溶接金属割れはないものと推定される。

5.2 溶接施工の現況

今日、溶接の機械化、自動化が進むにつれてサブマージアーク溶接及びガスシールドアーク溶接が広く普及しているのが現状と言える。しかしながら、これらの溶接方法は発生する拡散性水素量が少なく、プライマー塗布鋼板上に溶接施工を行っても割れは生じないが、ビットやブローホールの欠陥が生じ易い。それ故、これらの溶接方法を適用する場合、通常事前に溶接部のプライマーを除去しておくことが必要とされている。例えば、鉚桁を製作する場合、ウェブ対フランジの首溶接部は、一般に自動溶接化されているが、水平及び垂直補剛材やガセットの溶接はなかなか自動化しにくいとため、手溶接に頼っているのが実情であろう。この

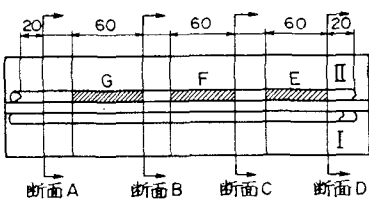


図-7 試料の採取位置

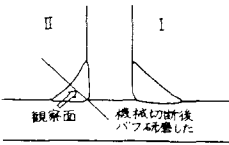


図-8 2等分した縦断観察面

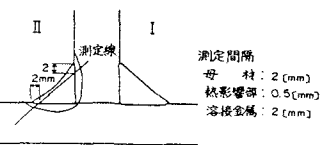


図-9 硬さ測定位置

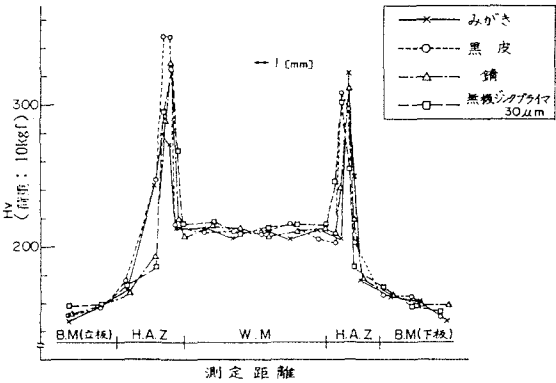


図-10 硬さ測定結果の一例
(溶接棒A、試験温度0℃)

表-11 非低水素系すみ肉溶接棒使用の目安

鋼板表面状態	使用可能溶接棒	
	夏 期	冬 期
みぎき、黒皮、錆	水素量の多い棒でも使用可	水素量の多い棒でも使用可
ウォッシュプライマー	水素量の少ない棒は使用可 水素量の多い棒で膜厚のある場合も使用可	水素量の少ない棒は多分使用可 水素量の多い棒では膜厚の薄い場合に限る。
無機ジソクリッチプライマー	水素量の少ない棒では膜厚のある場合も使用可 水素量の多い棒では膜厚の薄い場合に限る。	水素量の少ない棒でも膜厚の薄い場合に限る。

観点からすれば、被覆アーク溶接棒を使用するそのような箇所に対してこれまで議論してきたプライマーの膜厚と拡散性水素量に関する溶接金属割れが懸念されることになる。

ところが、主桁のウェブは主要部材であり、使用材料のほとんどが、50kg級以上の高張力鋼であることから、この部位の溶接棒には低水素系が用いられる。低水素系溶接棒の拡散性水素量は10ml/100g以下であるため、一次プライマーの膜厚が管理値の $15 \pm 5 \mu\text{m}$ である限りにおいては、溶接金属割れは、生じないであろうし、これまでに生じていなかったのではないかと考えられる。

6. まとめ

以上、非低水素系溶接棒によるすみ肉溶接の溶接金属割れに及ぼす拡散性水素量と鋼板表面状態の影響について検討してきた。現行の溶接施工方法が遵守され、プライマーの標準膜厚が適正に管理されている限り、溶接金属割れに及ぼす影響はないということが言える。しかし、将来TMCP鋼を適用するに当たっては、非低水素系の溶接棒の使用が想定され、その場合、表-11に示すような使用基準が考えられるが、逆に言えば、薄板などに対してはHAZでの割れを考慮した上で、従来鋼に対してもプライマーの種類、溶接時期によって非低水素系溶接棒の使用が検討されても良いのではないかと考えられる。

本結果を弾力的に運用し、溶接の効率化の参考にして頂ければ幸いである。

なお、今回はプライマーや溶接棒については、メーカー毎の違いやロットの影響を考慮していないため、今後その影響を明確にしていく予定である。また、溶接時の温度と湿度についても高温多湿である程割れが増加するという報告もあり⁸⁾、施工時温度が高いからと言って、溶接金属割れが生じないという保証もないことからこれらの相関関係についても今後の課題となろう。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会鋼材規格小委員会：TMCP鋼の土木構造物への適用（検証実験報告書）、昭和62年7月
- 2) 土木学会鋼構造委員会鋼材規格小委員会：TMCP鋼の土木構造物への適用、土木学会誌、Vol.73、1988年2月
- 3) 土木学会鋼構造委員会鋼材規格小委員会：TMCP鋼の加工性に関する研究、土木学会論文集、No.392/I-9、1988年4月（掲載予定）
- 4) 日本造船研究協会第193研究部会：新製造法による50キロ級高張力鋼の有効利用に関する研究（総合報告書）、昭和60年5月
- 5) 共研分科会報告：溶接と塗料第1報及び第2報、溶接棒の研究 No.10及び No.11、昭和44年及び昭和47年
- 6) 日本溶接協会溶接棒部会技術委員会：溶接棒の研究 No.13、昭和48年
- 7) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編、Ⅱ鋼橋編）、昭和55年2月
- 8) 百合岡他外：TMCP鋼の溶接性と非低水素系棒の適用、溶接学会溶接冶金研究委員会「TMCP鋼の溶接冶金シンポジウム」、資料35、昭和60年5月

（1987年10月16日受付）