技術資料

鉄鋼新素材, TMCP 鋼の溶接部割れ感受性*

小 溝 裕 —**

Cracking Tendency of Steel Plates Produced by Thermo-Mechanical Control Process (TMCP)*

by Yu-ichi Komizo**

キーワード: TMCP 鋼, 溶接低温割れ, 硫化水素割れ, 溶接性, ラメラテア,
予熱, ショートビード

1. はじめに

TMCP 鋼 (Thermo-Mechanical Control Process) を今日まで至らしめたのは、製造コスト低減と必要性能の過酷化の時代的要求があったからであるが、N, O, P, Sなどを低減し、Nb, V, Ti, Bなどの微量元素を正確にコントロールする製鋼技術の進歩、および高精度圧延制御技術へのコンピュータの活用があったことも見のがせない。そのため、TMCP 鋼の出現により

- (i) 鉄鋼業では製造工程の簡略化・連続化が可能
- (ii) 製鋼技術との組み合わせにより多量の合金成分添加なしに新性能を付与できる、または既存鋼の合金成分の削減が可能
- (iii) これまで考えられていた元素の作用と異なる用い方、効果が期待できる
- (iv) ユーザーにとっても溶接施工の簡略化などのメリットを含んだ鋼材の開発が可能

などの利点がある。

本報では、これらの中で TMCP 鋼の使用性能について考えてみたい。TMCP 鋼の特性といっても加工性や耐ぜい性破壊特性など種々の性能が検討されている。個々の議論は本シリーズでも他の資料で述べられるため、ここでは、とくに溶接部の割れ感受性を中心とした溶接性について現状をとりまとめた。

2. 造船用鋼板

造船用鋼板への TMCP 鋼の適用は、日本造船研究協会第 193 研究部会により検討され、「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」としてまとめられている。

表 1 は TMCP 鋼の特性と、それと関係する施工上の改善点、問題点をまとめたものである¹⁾。溶接低温割れに関係する項目として、①溶接予熱省略、②非低水素系溶接棒の採用、③ショートビード制限の緩和などがあげられる。

2.1 溶接予熱条件の緩和

溶接施工において予熱が不要な鋼板は化学組成から求まる P_{CM} 値を下げれば可能である。TMCP 鋼は 50 キロ級の強度を有しながら、化学成分では軟鋼に近い低 P_{CM} 化が可能となり、低温割れ特性は著しく改善されている。造船用の EH 36 級鋼を例にとりて図 1 に示す。50 mm 厚の EH 36 に対する斜め y 形溶接割れ試験割れ防止予熱温度を比較すると、従来の焼ならし材では 120℃ 予熱が必要であったものが、制御圧延+加速冷却では低 P_{CM} 化により割れ防止の予熱温度が室温以下となり、予熱省略が可能である。

しかし、溶接予熱が不要となることについては、従来の高張力鋼 (HT) において、炭素当量 (Ceq. IACS = Ceq. IIW) を 0.41% 以下と規制し、寒冷時以外は予熱を行なわないこととなっており、よくいわれる TMCP 鋼の予熱不要の効果は、定量的には生産性に効果を及ぼさないと考えられる。

2.2 非低水素系溶接棒の採用

造船の溶接は、その 90% 以上がすみ肉溶接である。とくに水平すみ肉溶接施工については、従来よりその大部分にグラビティー溶接が採用されてきた。しかしながら、HT に対しては低水素系溶接棒を使用するため、一般軟鋼材の溶接に比べ耐ピット性が劣るという欠点がある。そこで、TMCP 鋼の優れた耐低温割れ特性を利用して、中水素系グラビティーすみ肉棒の使用が検討された。

*原稿受付 昭和61年1月9日

**正 員 住友金属工業(株)中央技術研究所 Member,
Central Research Laboratories
Sumitomo Metal Industries, Ltd.

表 1 TMCP 鋼の特性および施工上の改善点と問題点

製 法	特 性	施工上の改善点と問題点	備 考（実用化の程度）
低 炭 素 量 (Ceq)	長所 1) 耐溶接冷間割れ性の向上	① 溶接予熱温度の低下，不要 ② 非低水素系溶接棒の採用 ③ ショートビード制限の緩和	従来から造船用 HT は予熱無しが原則 水平すみ肉溶接に一部で実用化 —
	2) 急冷熱サイクルに対するじん性劣化の減少	① 線状加熱の施工条件の緩和	—
	短所 1) 大入熱溶接時の HAZ の軟化	① 大入熱溶接の制限 ② Ceq の下限値の設定	Ceq の下限を仕様にはける
	2) 母材の dilution による溶接金属の強度低下	① 自動溶接フラックス，ワイヤ成分中の合金成分の増大 ② Ceq の下限値の設定	実用化が検討されつつある Ceq の下限を仕様にはける
制御圧延と急冷	長所 1) じん性の向上	① 大入熱溶接の入熱制限の緩和	特殊処理を併用して実用化
	短所 1) 鋼板内部応力の偏在	① ガス切断，溶接時の変形の発生とその矯正	短冊切りにおける歪直し，短冊切り部材への適用回避
	総合的特性 1) 溶接性とじん性の向上による母材の基本性能の向上	① HT の溶接部の実質的性能向上による安全性の増大	船体構造の HT 化率の上昇と船体鋼材重量の減少

図 1 TMCP 技術適用による溶接予熱温度の低減
(造船用 EH 36 級鋼)
SHT：制御圧延，SH-DAC：加速冷却した鋼材

表 2 に SR 193 研究部会で検討された非低水素溶接棒の適用基準を示す²⁾。船体構造のすみ肉継手を想定して拘束板付きすみ肉試験体に，鋼材の化学組成，溶着金属の拡散性水素量，板厚を変化させた組合せで，水平すみ肉 1 パス溶接を行ない，溶接部の表面・断面割れを調査した結果を図 2 に示す²⁾。Ceq. が増加すれば，小さな板厚，低水素量で割れが発生している。作業性に優れたこの種の水平すみ肉専用溶接棒の拡散性水素量(H_{JIS})の上限値が 25 cc/100 gr. 程度であることや，造船用 TMCP 鋼の製造実績から鋼材の炭素当量は 0.36% 以下，適用板厚は 25 mm 以下とした。また，多層溶接では，上向すみ肉割れ試験，窓枠拘束割れ試験において溶接金属に割れが発生する危険性があるため，水平すみ肉継手の補修溶接には従来どおり，低水素系溶接棒を使用すべきであるとしている。

表 2 TMCP 型 50 キロ級高張力鋼への非低水素系溶接棒適用基準

項 目	適 用 基 準	備 考
鋼 材	鋼 種 TMCP 型 50 キロ級高張力鋼 AH 32, DH 32, AH 36, DH 36	
	炭 素 当 量 Ceq (IACS) $\leq 0.36\%$	
溶 接 棒	拡散性水素量 $H_{JIS} \leq 25 \text{ cc/100 g}$	JIS Z 3113-75 による
	乾 燥 ・ 管 理 メーカー推奨条件にて再乾燥。 また，現場への持出し時間は 4 時間以内とする。	
溶接施工	脚 長 脚長 7 mm 以下の水平すみ肉 1 パス溶接	
	板 厚 25 mm 以下

図2 溶接低温割れ感受性と鋼材の化学組成、板厚、拡散性水素量の関係（水平すみ肉1パス溶接）

鋼板表面に塗布されたペイントが H_{HIS} におよぼす影響を表3に示す²⁾。プライマー塗布鋼板に溶接することによって、 H_{HIS} が増加することがわかる。プライマー膜厚を変えて溶接金属割れを調査した結果を図3に示す³⁾。プライマー膜厚が増すと割れ発生を促す。プライマー塗布のまま非低水素系溶接棒を用いる場合、膜厚は可能な限り薄い方が望ましい。

非低水素系クラビティーすみ肉棒の使用により、鋼板表面のペイントによるピットの発生防止のみならず、ビード形状が良好であるため、疲労強度の上昇につながる。さらに、熔融速度が速く、運棒比が高いので溶接能率が向上する。

図3 プライマー膜厚と溶接金属割れ

2.3 ショートビード制限の緩和

ショートビードおよびアークストライクの適用基準を表4に示す²⁾。従来型50キロ高張力鋼に対しては、溶接熱影響部の硬化、溶接割れなどの観点から、長さ50 mm以下のショートビードが禁止されてきた。ところが、低炭素当量のTMCP鋼を船体に採用する場合には、溶接熱影響部の硬化が従来材より小さいことが予想される。そこで、従来ショートビード長制限の基準とされてきた $H_{Vmax} 400$ を目やすに、許容されるショートビード長さを検討した。最高硬さ試験によるビード長と最高硬さの関係を図4に示す²⁾。ビード長が50 mm以上では、最高硬さがほぼ一定であるが、50 mmより短くなると最高硬さが高くなりはじめ、ビード長10 mmでは H_{Vmax} が約80高くなっている。炭素当量が0.37%以上の鋼では、ビード長10 mmで $H_{Vmax} 400$ を超える。そのため、炭素当量0.36%以下のものについて10 mm以上のショートビードが許容されると考えられる。

アークストライクについては、炭素当量0.36%のTMCP鋼でも、溶着金属にマイクロ割れが発生したことから、従来通りTMCP鋼に対してもアークストライク

表3 プライマー塗布鋼板による拡散性水素量の増加

Diameter of electrode (mm ϕ)	Painting*	Diffusible hydrogen content H_{HIS} (cc/100g)				
		1	2	3	4	Ave.
5.0	No paint	20.4	21.2	22.0	20.8	21.1
	Painted	25.4	26.2	24.6	27.1	25.8
6.0	No paint	20.8	21.7	22.1	21.8	21.6
	Painted	24.6	26.6	26.0	26.8	26.0

Note * Kind of paint: Inorganic Zinc primer
Paint thickness: 15~20 μ m

表4 TMCP 型50キロ級高張力鋼へのショートビード制限の緩和

適用箇所	項目	許要値	備考
TMCP 型 50キロ級高張力鋼 Ceq. (IACS) ≤ 0.36 %	ショートビード	10 mm 以上	やむを得ず10 mm 未満のショートビードを行う必要のある時は100±25℃の予熱を行う。 誤まって10 mm 未満のビードをおいた時は，グラインダでビードを削除し，割れの有無を検査したのち10 mm 以上の溶接を行う。 溶接部の補修溶接の場合は，30 mm 以上のビードをおく。
	アークストライク	許容しない	誤まってアークストライクを行った場合には，下記いずれかの補修を行う。 (1) アークストライク上に長さ10 mm 以上のビードをおく。 (2) 硬化部をグラインダで削除する。

図4 最高硬さ試験によるビード長と最高硬さの関係は禁止されている。

3. 海洋構造物，氷海船舶等の低温構造用鋼

低温域に使用される海洋構造物，氷海船など高度な品質を要求される構造物に対し，溶接熱影響部の硬化性が小さく，低温靱性が向上しているなどの優れた特性を有する TMCP 鋼が有効に活用されつつある。

北海等の寒冷地海洋構造物に必要な性能の一例を次に示す。

- (1) 優れた低温靱性，とくに溶接継手に対する破壊靱性値の要求（ -10°C において COD 値 0.25 mm 以上）

- (2) 溶接低温割れや有害な欠陥の防止
- (3) ラメラテア防止のための母材板厚方向特性（板厚方向引張試験の絞り値20%以上，鋼材中のS含有量 0.007% 以下）
- (4) 使用中の水素誘起による応力腐食割れ防止のため，溶接部の最高硬さの制限（ $H_v \leq 300$ ）

このうち，HAZ 靱性に関する問題は別の資料にゆずる。ここで問題としている溶接性のうち，低温割れに関し，TMCP 鋼を使用することによる低 P_{CM} 化の効果は前記造船用鋼板と同様である。ただし，海洋構造物用鋼材として強度保証のため微量合金成分を含むものは，その低温割れ感受性におよぼす影響を考慮しなければならない。

斜め y 形溶接割れ試験結果におよぼす Nb 含有量の影響を図5に示す⁴⁾。Nb 含有量が 0.04% 以下の場合， P_c 式により計算される割れ防止予熱温度により施工条件が良く推定される，すなわち Nb の影響は無視できるのに対し，Nb 量が 0.04% を超えると推定温度よりも高い予熱が必要となってくる。また，実測値と推定値がずればじめる Nb 量は，共存する V 量により変化することがわかる。すなわち，V を含まない系では，0.08% Nb 程度まで P_c 式による推定が可能であるが，0.07% V 系では 0.04% 以上の Nb 量が添加されると，割れ防止予熱温度が上昇する。このように，溶接低温割れ感受性におよぼす Nb 量の影響は，0.04% までは考慮する必要がないものと考えられる。

一方，ラメラテア防止は海洋構造物では大きな問題である。クランフィールド試験における板厚方向の割れ率と S 含有量の関係を図6に示す⁵⁾。S 含有量を低く制限することによりラメラテアは防止できると考えられる。一般に，耐ラメラテア鋼の規格は板厚方向引張絞り値により定められている。図7に鋼中の S 量と板厚方向絞り

Tekken tests

$$\Delta T = (\text{measured}) - (\text{estimated})$$

$$= (\text{measured}) - (1440 P_c - 392)$$

$$\text{where } P_c = P_{cm} + H/60 + t/600$$

H : Hydrogen content measured by glycerine method (cc/100gr)

t : plate thickness (mm)

図5 溶接低温割れ感受性におよぼす Nb 含有量の影響 (斜め y 形溶接割れ試験)

Chemical composition (%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Nb	sol. Al	Ca
A (0.016 S)	0.14	0.33	1.38	0.016	0.016	—	0.038	—
B (0.013 S)	0.16	0.40	1.49	0.027	0.013	—	0.031	—
C (Nb-low S-Ca)	0.09	0.35	1.34	0.017	0.008	0.02	0.048	0.0020
D (Nb-0.010 S)	0.15	0.26	1.37	0.020	0.010	0.02	0.012	—

Mark	Rolling	Manufacturing practice
1	Ordinary rolling	Reheating temperature : 1250°C Finishing temperature : 950°C
2	Controlled rolling-1	Reheating temperature : high Finishing temperature : high
3	Controlled rolling-2	Reheating temperature : high Finishing temperature : low

図6 クランフィールド試験における板厚方向の割れ率と S 含有量の関係

値の関係を示す。極低S化等の製鋼技術の進歩が今日のTMCP鋼の発展をささえていることを強調したい。また、TMCP鋼のうち非水冷型で圧延仕上温度が低い場合、セパレーションが発生することがある。セパレーションは圧延面に平行な形で観察されるため、ラメラテアに与える影響が検討された。圧延条件を大きく変え、セパ

図7 鋼中S含有量と板厚方向引張絞り値の関係

レーションインデックス SI を 0 から 0.8 まで変化させた材料についてクランフィールド試験を行なった結果を図8に示す⁵⁾。50キロ級も60キロ級も板厚方向の割れ率はセパレーション密度 SI の影響を受けないことがわかる。ラメラテア特性は制御圧延の厳しさ、またはそれに伴うセパレーション密度よりむしろ鋼中S含有量に依存するといえる。使用中の水素誘起による応力腐食割れ防止のため、海洋構造物ではHAZ最高硬さを規制されることが多い。汚染海水中では硫化水素がある程度の濃度で存在することから、硫化水素割れが硬化した溶接止端部から発生することがある。予熱温度を変化させて最高硬さ試験を行なった結果を図9に示す⁶⁾。P_{CM}を抑えたTMCP鋼では、0°Cにおいても最高硬さは300 Hv以下と通常鋼に比べて極めて低い値となっている。

このように寒冷地用海洋構造物へTMCP鋼を適用することは、その具備する特性から効果的であるといえる。

4. ラインパイプ用鋼

ラインパイプ用鋼の製造にTMCP技術を適用することは、性能向上やコスト面から大きなメリットである。HAZ靱性や現地円周溶接性がTMCP技術の開発により改善された⁷⁾。その多くは、低C化・低P_{CM}化されても強度が確保できることに起因している。

低C化のもう一つのメリットは、中心偏析が軽減されることである。図10⁸⁾に示すように炭素量が0.05%以下の場合、MnやPの中心偏析が著しく軽減されていることがわかる。これにより、耐水素誘起割れ性が大きく改善され、NACE環境下(硫化水素飽和5% NaCl-0.5% CH₃COOH水溶液)でもHIC (Hydrogen In-

図8 板厚方向の割れ率におよぼすセパレーションの影響 (クランフィールド試験)

図9 予熱温度を変化させた最高硬さ試験結果

duced Cracking) が発生しない API (American Petroleum Institute) grade 5 LX-60 や 70 鋼が開発されている。

5. その他低温用鋼，高張力鋼

LPG タンク用などの低温用鋼へ TMCP 技術を適用することは，均一微細粒組織が得られることから，脆性亀裂伝播停止特性の飛躍的な向上をもたらす。

一方，高張力鋼の製造に対して，これまでの再加熱焼入焼戻法 (RQT) にかわって，安定オーステナイト域で圧延を行なった後焼入れを行なう直接焼入焼戻法 (DQT) が採用されるようになり，これも広義の TMCP 鋼と呼ばれる。DQ を行なうと強度が低下する冷却速度が RQ に比べ緩冷却側に移行し，RQ よりも焼入性が増加することから，厚肉・高強度鋼の製造に適する⁹⁾。

これらの材料の溶接部の割れ感受性は，低 C 化や低 P_{CM} 化に起因するものが多く，従来材と同等以上の性能を有する鋼板の製造が TMCP 技術の適用により可能となる。

図10 C 含有量と Mn, P の中心偏析度の関係 (0.2% Si—0.8/1.5% Mn—0.01/0.02% P 鋼)

6. おわりに

鉄鋼新素材として TMCP 鋼の溶接性，とくに溶接部割れ感受性についてとりまとめた。TMCP 鋼の出現は，厚肉高強度化の時代的流れに対し，強度上昇と低炭素化を同時に満足させることを可能ならしめた。また省エネルギー，省資源の要求に答えることにもなる。

TMCP 鋼の特性については，溶接部の割れ感受性ばかりでなく，HAZ 靱性やその他の多くの性能と結びついて考えるべきであろう。ここでは割れ感受性に焦点をあてて述べたため，その他の特性に関する解説もあわせて参照されたい。また，TMCP 鋼とは完全に確立し終えたものではなく，現在も日進月歩新しい研究が行なわれていることを強調しておきたい。とくに，これまで考えられていた元素の作用と異なる用い方により，新しい成分系の TMCP 鋼が開発実用化される動きもある。そ

れらに対し。今後とも、新しい問題を一つ一つ解決していく必要がある。

参 考 文 献

- 1) 山田: "HT 材の船体構造への適用例と工作上的課題", 造船学会シンポジウム報告書, 1984, 11月.
- 2) 日本造船研究協会第193研究部会総会報告書, 1985, 5月.
- 3) 百合岡, 堀井, 奥村, 大北, 永野, 山根, 小塩: "TMCP 鋼の溶接性と非低水素系棒の適用", 溶接冶金研究委員会第100回記念シンポジウム, 1985, 5月.
- 4) Y. Ito, M. Nakanishi and Y. Komizo: IIV Doc. 1 X-1349-85
- 5) 日本圧力容器研究会議(JPVRC)材料部会圧力

容器用鋼材専門委員会: "CR 鋼板の性能と施工に際し検討を要する課題" 1981, 4月.

- 6) 染谷, 藤本, 瀬田, 木村, 中西: "加速冷却法による海洋構造物用高張力鋼の開発", 住友金属誌, Vol.37, No.1 (1985), 24
- 7) 例えば沢村, 橋本, 小溝, 山口, 中塚: "低炭素 Ti-B 系高強度・高靱性ラインパイプの開発", 住友金属誌, Vol.37, No.1 (1985), 57
- 8) H. Ohtani, T. Hashimoto, Y. Komizo, J. Murayama, T. Sawamura, K. Bessyo and T. Kyogoku: "Development of low P_{CM} high grade line pipe for arctic service and sour environment", ASM Int. Conf. on Technology and Applications of HSLA Steels, Philadelphia, Oct. 1983
- 9) 小松原, 渡辺, 大谷: 鉄と鋼, 69 (1983), 8, 975

《出版案内》

JWS BULLETIN No.8

スポット溶接 (下) (各種材料への適用編)

スポット溶接 (上・下) は, 国内外の研究資料を集約整理したものであるが, 研究報告の数は極めて多く, 内容も豊富である。そこで, 利用の便を考え, 「スポット溶接」を, 前回出版した上巻 (基礎編) と, 施工を重視した下巻 (各種材料への適用編) の2分冊とした。なお, 調査した文献は約700件に及んでおり, これらの標題は引用または参考文献欄のいずれかに記載し文献探査の範囲を明示した。

スポット溶接現象は, 薄板溶接に普通に採用されている「定常的溶接部形成方式」と, 厚板の溶接あるいは電極による圧痕抑制などの目的で薄板溶接に適用されている大電流・短時間通電の「非定常的溶接部形成方式」とで, 若干趣きが異なる。本書では, このような現象・利用の差異が読者に誤解を与えないように記述には細心の注意を払った。

このように, 本書は学術研究の粋を集めているが, 記述の水準は抵抗溶接に対する一応の常識ないし経験のある人が独学で理解できるところにとった。企業においては, 抵抗溶接及びその応用製品の研究開発や改善さらにトラブル対策や品質保証などに幅広く応用できよう。■
体裁 B 5 版 265 頁 ■ 4,500 円 (会員特価 4,000 円) 送料 300 円

〔好評発売中〕

○重ねおよび突合せプロジェクション溶接・アブセット溶接

○スポット溶接 (上・基礎編)

生々文献サービス

東京都渋谷区千駄ヶ谷 3-13-22 電話 03(478)4062

社団法人溶接学会文献サービス係

〔振込銀行〕三菱銀行新宿支店 (当座) No. 9202993

〔郵便振替〕東京 5-31877