

極厚 100 kgf/mm² 級高張力厚鋼板^{*1}

三宅 孝則^{*2} 小林 英司^{*3} 小川 隆生^{*4} 小関 智也^{*5} 寺嶋 久栄^{*6}

TS 100-kgf/mm² Class Heavy Section Steel Plate

Takanori Miyake, Eiji Kobayashi, Takao Ogawa, Tomoya Koseki, Hisaei Terashima

1 はじめに

現在、周知のごとく HT 80 kgf/mm² 鋼がペンストック、橋梁、海洋構造物、球形ホルダーに適用されている。最近、溶接構造物の大型化は、高靱性でかつ溶接性にすぐれた極厚調質高張力鋼の開発によって飛躍的に推進され、鋼板の厚肉化傾向が高まり、80 kgf/mm² 級だけでなく、構造物の軽量化を図った 100 kgf/mm² 級の適用が望まれてきた。HT 100 kgf/mm² 鋼の検討はすでに 70 年からなされ、一応の性能確認がなされているものの具体化するまでには至っていない。しかし、近年の製鋼技術の進歩により、高品質鋼板が安定して製造できるようになり、100 kgf/mm² 鋼が具体的に使用検討の対象とされるようになってきている。こういった状況下で当社は、極厚 HT 80 kgf/mm² 鋼と同等の耐溶接割れ感受性を有し、かつ同一使用条件下で十分にその性能を発揮できる板厚 100 mm HT 100 kgf/mm² 鋼の製造技術を開発した^{1,2)}ので、ここに母材特性、溶接継手特性、破壊特性等について紹介する。

2 鋼材の製造技術

極厚 HT 80 kgf/mm² 鋼 (120~150 mm 厚) と同等の炭素当量 ($C_{eq} \leq 0.60\%$) で母材諸特性はもとより、溶接入熱 60 kJ/cm の大入熱狭開先溶接の適用を考慮し、 $C \leq 0.14\%$ 、 $Si \leq 0.25\%$ 、 $Mn \leq 1.0\%$ 、 $Ni \leq 3.0\%$ の成分範囲で板厚 100 mm の HT 100 kgf/mm² 鋼の開発に

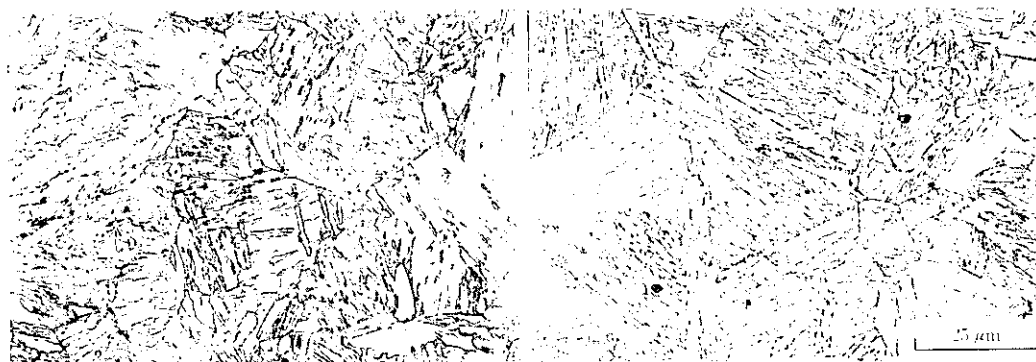
ついて成分および製造方法の両面から検討した。

HT 80 kgf/mm² 鋼と同一成分で高強度の鋼板を製造しようとする場合、焼戻し温度を低くし、強度を確保する手段が一般にとられる。

反面、焼戻し温度の低下は靱性劣化を生じ、とくに鋼板表層部でその傾向が著しくなり、焼戻し温度の選定だけでは板厚各部で十分な強度、靱性を有した高品質鋼板の製造は難しい。

ここで、鋼板表層部では粗大なマルテンサイト単相組織となり靱性劣化が生じる。従来より、焼入れ後の組織をマルテンサイトと下部ベイナイトの混合組織とすることで焼戻し後の靱性は最も良好になるといわれており、本開発にあたっては、板厚各位置で上記混合組織となる成分系や合金添加量について検討した。その結果、Ni の適量添加、Mn および Si の低減を図ることで組織変化の冷却速度依存性が小さくなり、板厚方向の組織と強度をあまり変化させずに表層部の靱性が改善されることを見出した。なお、添加量については経済性の考慮から Ni 添加量の上限を 3% とし、強度低下および靱性向上のバランスから、Mn 添加量の下限を 0.8% とした。ここで、低 Si 化による靱性向上効果は、Si 量の低減により鋼板の焼入れ性が若干低下し、Photo 1 に示すように同一粒径のオーステナイト中のマルテンサイト組織が細分化されることによると考えられる。また、低 Si 化により溶接部の島状マルテンサイト量が低減することが予想され、鋼板および溶接部とも、低 Si 化は靱性確保から望ましい成分系である³⁾。

さらに、極厚鋼板では溶接の高効率化がより重要であり、入熱量



(a) 低 Si 鋼 (0.11% Si)

(b) 通常 Si 鋼 (0.25% Si)

Photo 1 Si 量による焼入れマルテンサイト組織の変化

*1 昭和63年4月26日原稿受付

*2 水島製鉄所 管理部厚板管理室 主査(掛長)

*3 水島製鉄所 管理部厚板管理室 主査(課長)

*4 水島製鉄所 厚板製造部厚板鍛造技術室

*5 鉄鋼研究所 鋼材研究部厚板条鋼研究室 主任研究員(掛長)

*6 鉄鋼研究所 鋼材研究部強度接合研究室 主任研究員(課長)・工博

45 kJ/cm 以上の狭開先大熱 SAW 溶接においても溶接熱影響部の軟化が小さい成分系について検討した。その結果、溶接熱影響部の軟化防止対策にはV添加が熱影響部の靱性を劣化させることなく、効果的であることが明らかとなり、本開発鋼では適量のV添加を必須とした。一方、鋼板製造技術としては、表層部のオーステナイト粒の粗大化を抑制し靱性を確保するため、板厚中心部の強度を確保しうる範囲で焼入れ温度を下げる焼入れ法を用いた。

3 溶接材料

HT 100 kgf/mm² 鋼用溶接材料としてサブマージーク溶接 (SAW), 被覆アーク溶接 (SMAW), MIG および TIG 溶接材料を開発した。いずれの溶接材料ともに耐低温割れ性にすぐれ、高靱性、好作業性を具備するものとした。

- (1) SAW 溶接材料では、フラックスの塩基度を高塩基度側に設計し溶接金属の拡散性水素量、酸素量の低減を図った。さらに、適量の炭酸塩を添加することにより、極低水素化を達成し、耐低温割れ性を向上させた。靱性改善に関しては、溶接金属中の酸素量を制御して高靱性化を図った。また、作業性については、狭開先、内溶接におけるスラグ剝離性を考慮し、MgO-CaF₂ 等のスラグ組成を調整し、スラグの収縮を大きくすることにより、良好な作業性を確保できるようにした。
- (2) SMAW 溶接材料については、極低水素化を図るとともに、被覆剤中の水素源の低減および無吸湿固着剤使用による被覆剤の難吸湿化対策により、極低水素化し、耐低温割れ感受性の改善が行えた。

4 開発鋼材の特性

Table 1 に板厚 100 mm HT 100 kgf/mm² 鋼材の母材特性、加工

Table 1 母材特性

母材性能	化学成分 (%)														C _{eq}	P _{cm}				
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	B	N							
	0.13	0.08	0.84	0.001	0.001	0.24	2.67	0.47	0.48	0.059	0.067	0.0012	0.0021	0.558	0.299					
組織・清浄度	組織					清浄度					オーステナイト粒度									
	マルテンサイトおよびベイナイト					1/4t, dA=0%, dB=0%, dC=0.01%					約7番									
硬度分布	表・裏面: HV=330, 1/2t: HV=320																			
引張, 曲げ シャルピー衝撃特性	引張試験																シャルピー衝撃試験			曲げ試験
	目 標		YS≥90 (kgf/mm ²)			TS=97~115 (kgf/mm ²)			伸び (%)		√E ₄₀ ≥4.8 (kgf·m)		√T _s ≤-60 (°C)		√T _F (°C)		曲げ半径 R=2t			
	結 果	L	1/4t	94.4	98.6	23	22.4	-88	-88	良好										
			1/2t	95.8	98.7	24	23.2	-102	-101											
		T	1/4t	94.8	98.4	22	23.7	-86	-86											
			1/2t	95.8	98.6	22	22.8	-111	-109											
脆性破壊特性 脆性き裂特性	CTOD 試験				ディープノッチ試験				ESSO 試験											
	結 果				0.764 mm, 0.731 mm (at 0°C)				σ _{net} =102.5 kgf/mm ² , K _{IC} =1048.4 kgf/mm ^{3/2} (at -60°C)				K _{ICa} =812 kgf/mm ^{3/2}							
加工性	至時効シャルピー衝撃試験																			
	至量 3%, 250°C×1 h																			
	目 標		√E ₄₀ ≥4.8 (kgf·m)			√T _s ≤-60 (°C)			√T _F (°C)		√E ₄₀ ≥4.8 (kgf·m)			√T _s ≤-60 (°C)		√T _F (°C)				
	L	1/4t	22.2	-82	-82	17.2	-72	-73												
1/2t		23.5	-100	-97	21.0	-97	-94													
溶接性	最高硬さ試験																			
	HV		397 (at 0°C)								387 (at 50°C)									
	斜めY形割れ試験																			
霧 囲 気																				
30°C×80%																				
結 果																				
100°C 予熱で割れ無し																				

Table 2 SAW 溶接継手特性 (入熱量 45 kJ/cm)

位置	溶接継手引張試験			限界CTOD値 δ _a at 0°C (mm)	√E ₀ (kgf·m)		√E ₋₄₅ (kgf·m)	
	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	破断位置		WM	FL	WM	FL
F side	99	36	WM	0.739	7.0	21.0	7.0	9.1
B side	99	35	WM					

Table 3 SMAW 溶接継手特性 (入熱量: 18 kJ/cm)

位置	溶接継手引張試験				溶接継手曲げ試験 (R=2t, 180°)		√E ₀ (kgf·m)		√E ₋₄₅ (kgf·m)	
	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	破断位置	側曲げ試験	表曲げ試験	WM	FL	WM	FL	
F side	102	20	HAZ	良好	良好	10.0	20.2	8.2	16.3	
B side	103	21	HAZ	良好						

性、溶接性を、また、Table 2 に SAW 溶接、Table 3 に SMAW 溶接時の溶接継手特性を示す。

4.1 母材性能

低 Si 化と Ni, Mn および B 添加量の適正化を基本として成分設計し、再加熱焼入れ焼戻し処理によって製造した。鋼板の化学成分は Table 1 に示すように、0.08% Si-0.84% Mn-2.67% Ni-0.0012% B 系で、C_{eq} は 0.558% と HT 80 kgf/mm² 鋼の極厚材と同程度である。

母材の板厚各位置でのマイクロ組織を Photo 2 に示す。マルテンサイトと下部ベイナイトの混合組織であり、その機械的性質は目標性能を十分に満足している。

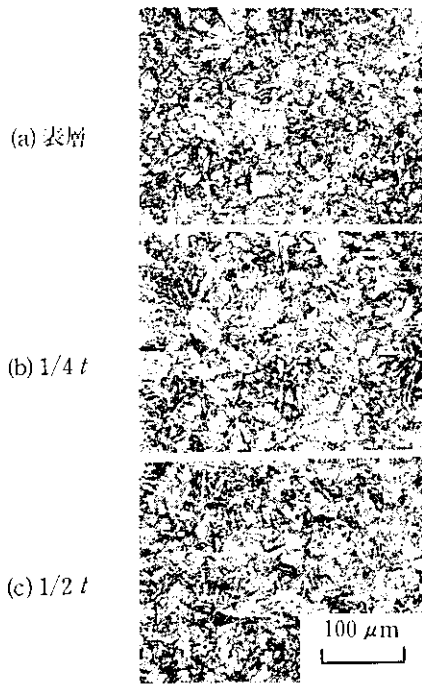


Photo 2 板厚各位置のマイクロ組織写真

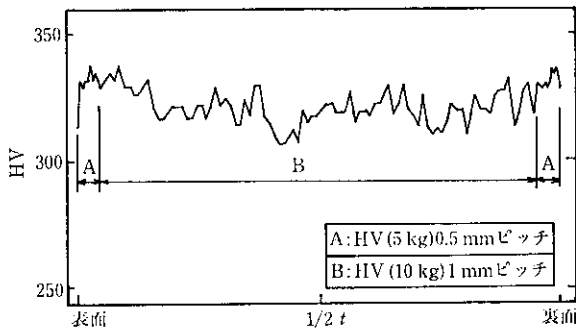


Fig. 1 板厚方向硬さ分布 (母材)

また、Fig. 1 に母材の板厚方向の硬さ (HV) の測定結果を示すが、表・裏面部で HV 約 330、中心部で HV 約 320 であり、極厚材にもかかわらず、板厚方向での機械的性質のバラツキが少なく、均質性の優れた高品質鋼板であることがわかる。

4.2 加工性

歪時効処理後のシャルピー衝撃特性は、歪量 3% ではほとんど変化せず、歪量が 5% に増加すると靱性は若干低下する。しかし、 vT_s は $1/4t$ 部で、 -72°C 、 $1/2t$ 部で -97°C と -60°C 以下の高靱性を有したままであり、十分な加工性を有していることがわかる。

4.3 溶接性

最高硬さ試験の結果、 H_{max} は鋼板初温度 0°C において 397、また斜め Y 形溶接割れ試験 (SMAW 適用) における割れ防止予熱温度は 100°C である。

以上の両結果から、本開発鋼板は HT 80 kgf/mm² 鋼と同等の優れた耐溶接割れ感受性を有していることがわかる。また、溶接金属に発生する横割れに関する窓型拘束割れ試験でも、SAW 溶接において予熱バス間温度 $125\sim 150^{\circ}\text{C}$ で割れが発生しないことも確認できた。

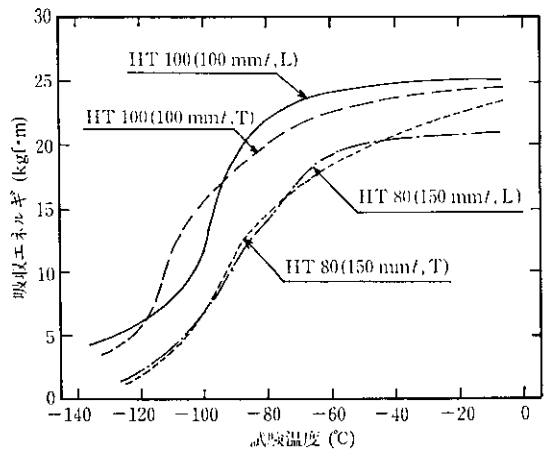


Fig. 2 HT 100 kgf/mm² 鋼と HT 80 kgf/mm² 鋼のシャルピー遷移曲線の比較

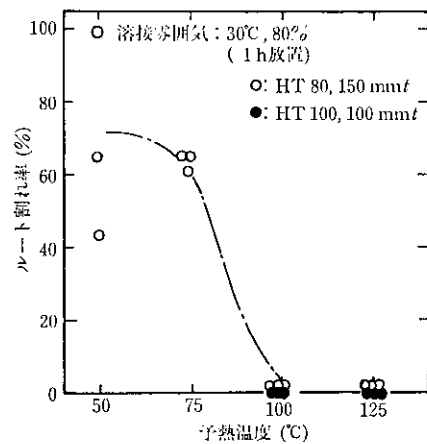


Fig. 3 HT 100 kgf/mm² 鋼と HT 80 kgf/mm² 鋼の斜め Y 形溶接割れ試験結果の比較

4.4 溶接継手性能

極厚材であることを考慮して、SAW 溶接、SMAW 溶接、MIG 溶接、TIG 溶接の狭間先溶接継手を作成し、基本継手性能および脆性破壊特性を調査した結果、それぞれ十分な継手特性を有していることがわかる。

4.5 HT 80 kgf/mm² 鋼との性能比較

本開発鋼の性能を板厚 150 mm HT 80 kgf/mm² 鋼 (2% Ni, 0.56% C_{eq}) のそれと比較して Fig. 2 および Fig. 3 に示すが、母材靱性、溶接性とも HT 80 kgf/mm² 鋼と同等以上の性能を有していることがわかる。

参考文献

- 1) 皆川 章, 今中 誠, 寺嶋久栄, 阿山義也, 志賀千晃, 西山 昇: 鉄と鋼, 71 (1985) 9, S1523
- 2) 三宅孝則, 小林英司, 小川隆生, 小関智也, 皆川 章, 寺嶋久栄: 鉄と鋼, 73 (1987) 13, S1398
- 3) 今中 誠, 阿山義也, 寺嶋久栄, 志賀千晃, 田中智夫: 鉄と鋼, 72 (1986) 11, S615

<問い合わせ先>

	厚板営業部	鋼材技術部
東京 本社	03 (597) 3929	03 (597) 3538
大阪 支社	06 (315) 4528	06 (315) 4635
名古屋支店	052 (204) 5311	