

極厚TMCP鋼の母材特性および溶接性の研究

A Study of Characteristics of Extremely Thick TMCP Steel as a Base Metal and Its Weldability

田中一男* 中野秀二** 大月真一***
 Kazuo TANAKA Shuuji NAKANO Shinichi OHTSUKI

Summary

Recently, extremely thick steel has been used in steel building structures, where unfavorable weldability has presented itself as a problem.

On the other hand, TMCP (Thermo Mechanical Control Process) steel, which is used in marine vessels and marine structures, has come to be used in the above field.

Tests on extremely thick TMCP steel were performed to confirm its characteristics as a base metal and its weldability.

The test results proved that TMCP steel possesses favorable weldability and mechanical performance, and therefore there should be no problems when it is used for steel structures.

1. はじめに

近年、建築物の高層化に伴って使用される鋼板の厚さが、増々厚くなる傾向にある。従来、極厚の50キロ高張力鋼は圧延のまま又は焼ならし処理により造られており、炭素当量が高く溶接時の割れ、熱影響部の硬化、大入熱溶接時のぜい化等、溶接性が悪くなる事が問題とされてきた。

一方、数年前から船舶、海洋構造物用鋼板などを中心に相当量使用されているTMCP鋼(Thermo-Mechanical Control Process)が、建築鉄骨の極厚化に伴い、この分野でも用いられ始めている。

そこで、極厚TMCP鋼の母材特性と溶接性を確認する為に、母材試験及びエレクトロスラグ溶接、二電極サブマージドアーク溶接の大入熱溶接と、一般的な炭酸ガス半自動溶接、サブマージドアーク溶接(一電極)による研究を行なったのでここに報告する。

2. 試験材料

本試験のTMCP鋼は材質S M50 Bで、板厚は製鉄メーカーA社、50、90mm、B社、40、80mmを使用して試験を行った。

溶接材料は、通常のS M50材と同様のものを使用した(表-3参照)。

表-1 母材試験一覧表

種類	方向	試験片採取位置	母材板厚(mm)				試験片形状
			40	50	80	90	
引張試験	L	板厚断面	1	1	1	1	JIS Z 2201 1号
		丸棒表層下2mm 14φ	1	1	1	1	JIS Z 2201 14号
		丸棒t/2 14φ	1	1	1	1	JIS Z 2201 14号
		丸棒t/2 6φ	1	1	1	1	JIS Z 3111 A2号
	C	板厚断面	1	1	1	1	JIS Z 2201 1号
		丸棒表層下2mm 14φ	1	1	1	1	JIS Z 2201 14号
丸棒t/2 14φ		1	1	1	1	JIS Z 2201 14号	
Z	丸棒 10φ	3	3	3	3	WES 1106	
衝撃試験	L	表層下2mm	1	1	1	1	JIS Z 2202 4号
		t/2	1	1	1	1	JIS Z 2202 4号
	C	表層下2mm	1	1	1	1	JIS Z 2202 4号
		t/2	1	1	1	1	JIS Z 2202 4号
	Z	表層下2mm	1	1	1	1	JIS Z 2202 4号
		t/2	1	1	1	1	JIS Z 2202 4号
硬さ	L	t/2	1	1	1	1	JIS Z 2244
	C	t/2	1	1	1	1	JIS Z 2244
側曲	L		1	1	1	1	JIS Z 3122 3号
	C		1	1	1	1	JIS Z 3122 3号
超音波探傷	L	音響異方性	1	1	1	1	JIS Z 3060
	C						
ミクロ組織	L	表層下、1/4t 1/2t	1	1	1	1	
	C	表層下、1/4t 1/2t	1	1	1	1	

* 衝撃値試験は、1組3本とする。

* 松本工場製造部次長 *** 松本工場製造部生産技術課
 ** 松本工場製造部生産技術課係長

3. 試験の種類及び方法

試験の種類及び方法は、表-1 母材試験一覧表、表-2 溶接試験一覧表に示す要領で実施した。

図-1 に溶接試験体と試験片採取要領、図-2 に広幅引張り試験体の歪ゲージ貼り付け要領の例を示す。

なお、溶接試験のうち、継手丸棒引張り、熱影響部丸棒引張り及び広幅引張りについては、データ解析中であり、後日報告する。

4. 溶接条件

表-3 に本試験の溶接材料、開先形状等溶接条件を示す。

5. 結果及び考察

本試験で確認されたT M C P鋼の特性について以下に

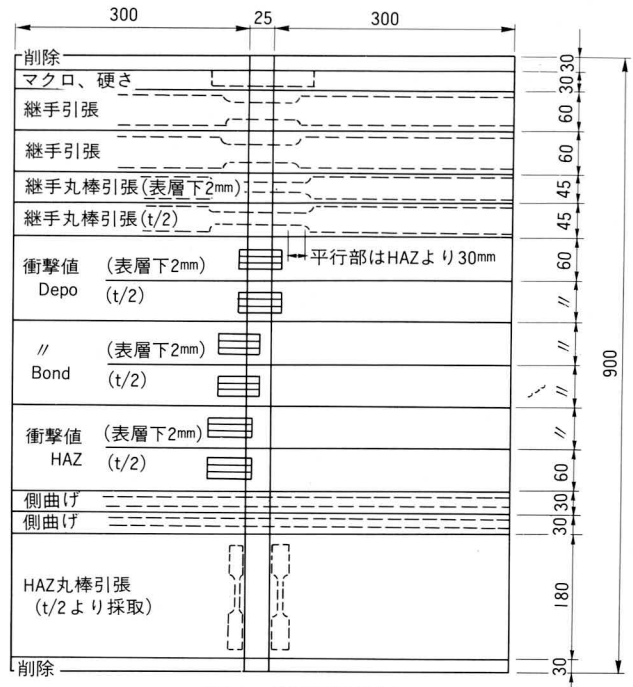
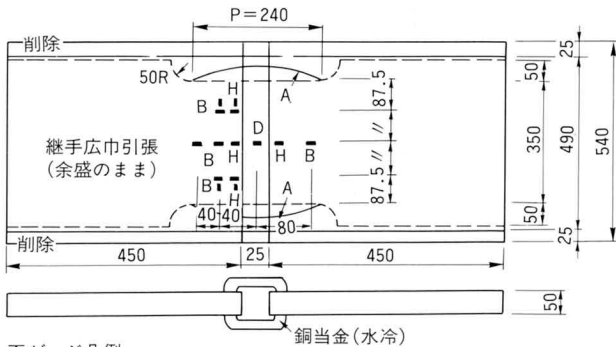


図-1 溶接試験片採取要領

表-2 溶接試験一覧表

溶 接 方 法		CO ₂ 半自動溶接				レ ス ラ (平型) 溶接				エ レ ス ラ (十字型)溶接				サブマージド アーク 溶接				タンデムサブマージドアーク 溶接			
形 状																					
板厚 (S M 50 B)		40	50	80	90	40	50	80	90	40	50	80	90	40	50	80	90	40	50	80	90
試験体マーク		C4	C5	C8	C9	E4	E5	E8	E9	W4	W5	W8	W9	S4	S5	S8	S9	T4	T5	T8	T9
マクロ、硬さ	JIS G 0553 JIS Z 3101																				
継手引張	JIS Z 3121	2	2	2	2	2	2	2	2	-	-	-	-	2	2	2	2	2	2	2	2
十字引張	JASS 6(付則3)	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-
丸 棒 引 張	表層下 2mm									-	-	-	-								
	t/2									-	-	-	-								
衝 撃 試 験	Depo 表層下 2mm																				
	t/2																				
Bond 表層下 2mm	JIS Z 3111 JIS Z 3111																				
t/2	JIS Z 3111 JIS Z 3111																				
HAZ 表層下 2mm	JIS Z 3111 JIS Z 3111																				
t/2	JIS Z 3111 JIS Z 3111																				
側 曲	JIS Z 3122	2	2	2	2	2	2	2	2	-	-	-	-	2	2	2	2	2	2	2	2
十 字 曲	JASS 6(付則3)	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-
HAZ 丸棒引張	JIS Z 3111	-	-	-	-	2	2	2	2	-	-	-	-	2	2	2	2	-	-	-	-
継手広巾引張	JIS Z 3127									-	-	-	-					-	-	-	-
最 高 硬 さ	JIS Z 3101	各板厚とも予熱温度RT、50、100、150℃各1体実施																			
斜め Y形ワレ	JIS Z 3158	// 各3本実施																			

※衝撃値試験片は1組3本とする。



歪ゲージ凡例
 D: Depo A: 弓形ゲージ
 H: HAZ *両面に貼付
 B: BM

図-2 広幅引張試験片採取要領、歪ゲージ貼付要領

列挙する。

① ロールメーカー2社の鋼材を比較すると、各鋼材共機械的性質に顕著な差は認められない。

しかし、マイクロ組織(写真-1)の板厚方向の変化及び音響異方性にやや違いが認められる。これは表-4の化学成分を見てもわかる様に、製鋼、圧延を通じて鋼材を製造する時の考え方の違いによるものと推察される。

従来鋼に比べ炭素当量がおよそ0.05~0.1%低い。これは、TMC P鋼の本来の目的である溶接性の向上を裏付けている。

② 表-5に示すごとく一部(80mm)に音響異方性の大きなものがあったが、これは仕上げ圧延温度の違いによって形づけられる結晶粒の違い、とりわけ表層部の結晶粒の影響を強く受けているものと思われる。その他の板厚については良好であった。

③ 表-6に母材引張試験、図-3に応力-歪曲線を示すがいずれも良好な結果である。

表-3 溶接条件表

溶接方法	溶接材料	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	姿勢	開先形状
炭酸ガス半自動溶接	YM-26 1.2φ CO ₂ 100%	280 340	32 38	15 25	F	
エレスラ溶接(平型)	40mm、50mm YM-55A 1.6φ YF-15 *1	370 390	48 52	1.5 2.5	V	 鉛当金(水冷) *1 消耗式一電極 *2 非消耗式二電極
	80mm、90mm US-49 2.4φ YF-15 *2 DIAノズル	320 340	36 40	1.0 1.5		
"(十字型)	同上	370 390	48 52	1.5 2.5	V	 銅当金(水冷)
サブマージドアーク溶接	Y-DL 4.8φ YF-15	650 800	32 40	30 50	F	
タンデムサブマージドアーク溶接	Y-A 6.4φ NSH-52	1000 1800	36 44	25 50	F	
斜めY形われ試験	手溶接 L-55 4φ	150	—	—	F	
最高硬さ試験	同上	170	—	15	F	

表-5 音響異方性

板厚 (mm)	60°	70°	音速比 SC/SL
	角度差 (L-C)	角度差 (L-C)	
40	0.6	2.1	1.015
50	0.4	1.2	1.00
80	2.2	2.8	1.023
90	1.2	1.9	1.01

製鉄メーカー A社50mm 90mm B社40mm 80mm

表-4 供試鋼のミルシート値と化学分析結果

板厚 (mm)		C	Si	Mn	P	S	衝撃値 (Kgf·m)	降伏点 (Kgf/mm ²)	引張強さ (Kgf/mm ²)	伸び (%)	降伏比 Y·R(%)	(Wt%)
												Ceq (%)
40 (SM50B)	ミルシート	0.13	0.19	1.10	0.009	0.002	27	39	56	26	70	0.33
	t/4分析	0.13	0.19	1.10	0.008	0.001	—	—	—	—	—	0.33
50 (SM50B)	ミルシート	0.12	0.23	1.30	0.007	0.002	35	38	52	28	73	0.35
	t/4分析	0.11	0.24	1.32	0.007	0.002	—	—	—	—	—	0.35
80 (SM50B)	ミルシート	0.11	0.27	1.39	0.006	0.002	30	41	55	34	75	0.36
	t/4分析	0.11	0.27	1.38	0.006	0.001	—	—	—	—	—	0.35
90 (SM50B)	ミルシート	0.15	0.28	1.32	0.01	0.002	27	40	56	34	71	0.38
	t/4分析	0.14	0.28	1.32	0.009	0.002	—	—	—	—	—	0.38

製鉄メーカー A社 50mm 90mm B社 40mm 80mm

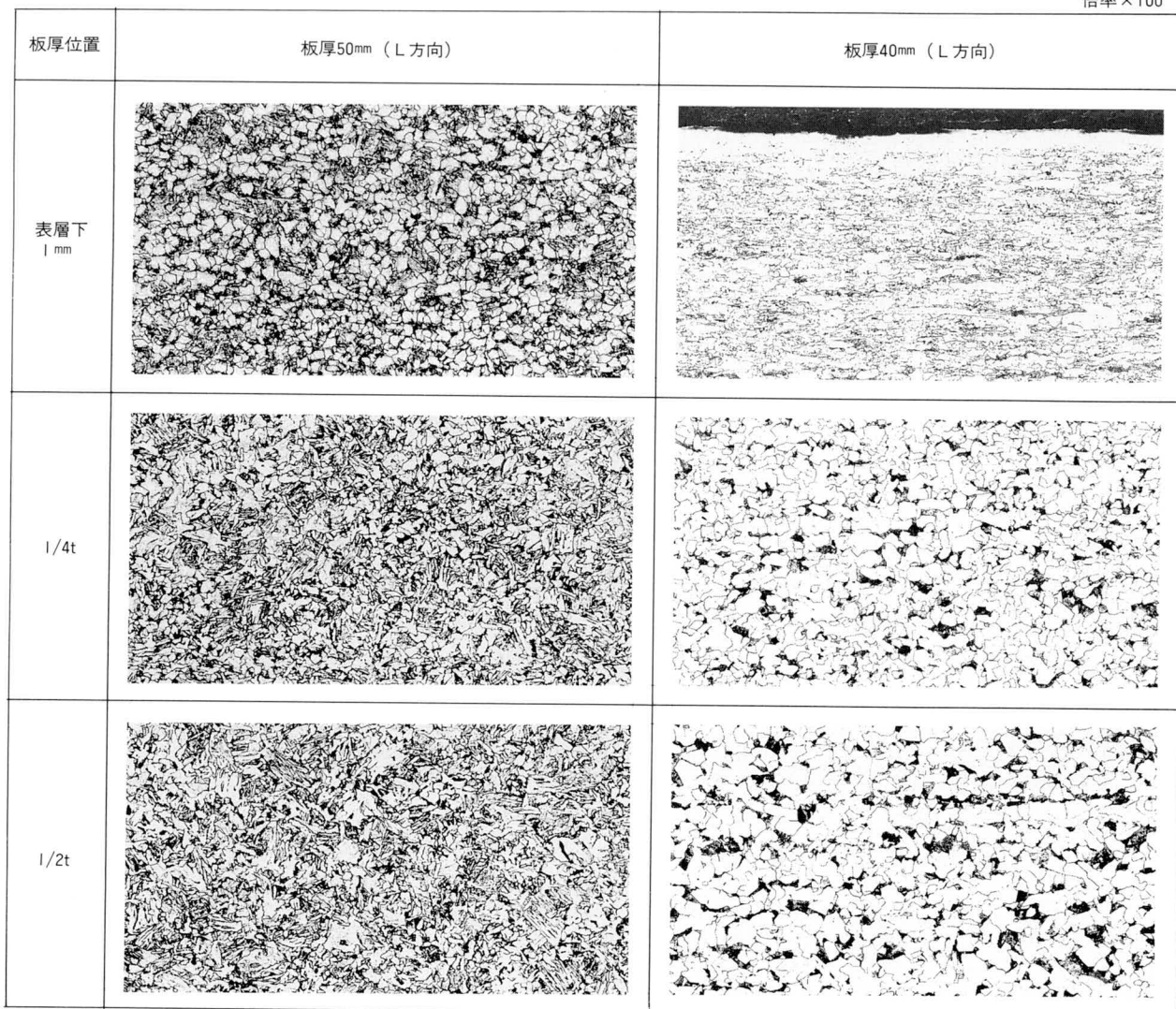


写真-1 顕微鏡組織

表-6 母材引張試験

板厚 (mm)	方向	降伏点 (Kgf/mm ²)	引張強さ (Kgf/mm ²)	降伏比 (%)	伸び (%)
40	L	37	52	72	36
	C	38	53	72	35
50	L	40	54	75	28
	C	39	50	77	34
80	L	44	58	77	35
	C	41	58	71	30
90	L	41	57	71	27
	C	41	57	72	28

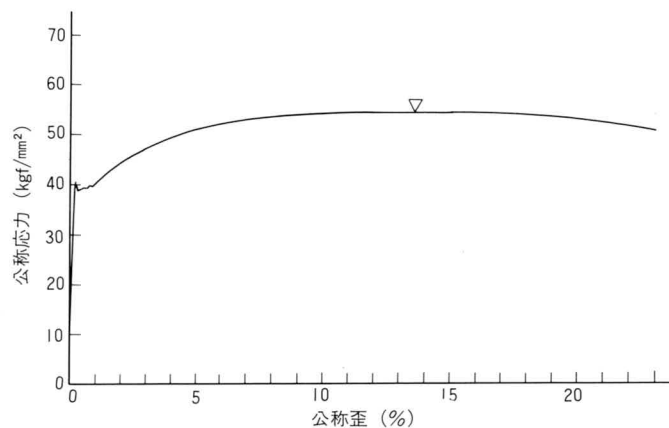


図-3 母材引張応力-歪曲線 (t=80mm)

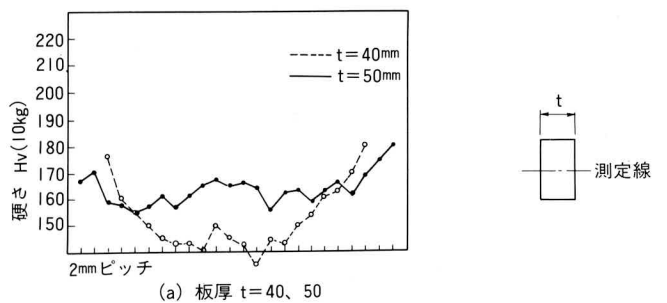
母材丸棒引張りにおける表層下2mmの降伏点、引張り強度は表-7に示す如く、板厚中央の位置のそれに比べてやや高い値を示している。

また、図-4に示す板厚方向の硬さ分布も、表層下の硬さが中央部に比べやや高い値を示す傾向にある。

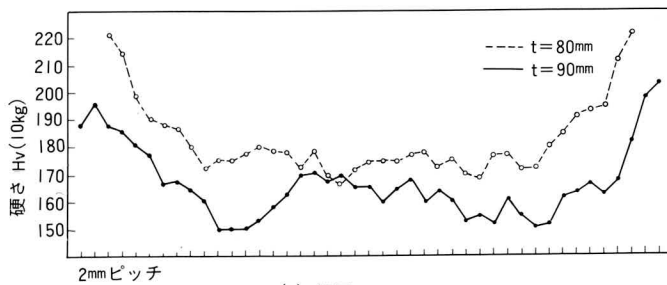
表-7 母材丸棒引張試験

板厚 (mm)	方向	採取位置	降伏点 (Kgf/mm ²)	引張強さ (Kgf/mm ²)	降伏比 (%)	伸び (%)
40	L	表層下 2mm	37	53	71	34
		t/2	36	51	70	31
		t/2 *	39	51	76	39
	C	表層下 2mm	38	53	72	32
		t/2	36	51	71	32
50	L	表層下 2mm	40	54	75	28
		t/2	39	54	73	27
		t/2 *	38	53	71	32
	C	表層下 2mm	37	54	74	34
		t/2	39	54	73	32
80	L	表層下 2mm	49	62	78	26
		t/2	40	55	73	29
		t/2 *	42	57	74	33
	C	表層下 2mm	45	62	72	26
		t/2	39	54	73	31
90	L	表層下 2mm	47	61	77	26
		t/2	39	55	71	26
		t/2 *	38	54	70	34
	C	表層下 2mm	48	62	78	27
		t/2	38	55	70	29

* : 直径6φ、他は直径14φ



(a) 板厚 t=40、50



(b) 板厚 t=80、90

図-4 母材硬さ(板厚方向)分布

これは、硬さ分布は強度及びマイクロ組織にそれぞれ関連しており、TMCP鋼の製法を考えるとわずける事である。

また、表-8に母材板厚方向の引張り強度の結果を示す。板厚の違いによる差はほとんど見られず、絞り値も75%程度で非常に良好な値を示している。

表-8 母材板厚方向引張試験

板厚 (mm)	降伏点 (Kgf/mm ²)	引張強さ (Kgf/mm ²)	降伏比 (%)	絞り (%)
40	—	51	—	74
	—	51	—	75
	—	50	—	76
50	38	52	73	76
	37	52	71	77
	38	52	74	76
80	40	55	72	66
	41	55	73	76
	41	55	74	75
90	36	54	67	75
	37	54	68	75
	36	54	67	77

* : 直径は10φ

表-9 母材衝撃試験

板厚 (mm)	板厚位置	方向	吸収エネルギー kgf・m			
			L	2	3	平均
40	表層下 2mm	L	23.8	24.6	23.9	24.1
		C	18.9	19.3	17.1	18.4
	t/2	L	29.9	27.0	25.0	27.3
		C	11.2	14.2	15.5	13.6
	板厚	Z	15.9	16.9	18.5	17.1
	50	表層下 2mm	L	22.0	26.1	21.7
C			26.6	28.7	29.0	28.1
t/2		L	25.4	21.0	23.9	23.4
		C	20.3	24.4	23.9	22.9
板厚		Z	7.9	9.2	17.6	11.6
80		表層下 2mm	L	34.0	31.9	33.5
	C		25.6	32.5	29.3	29.1
	t/2	L	32.9	32.8	24.6	30.1
		C	10.4	10.1	12.0	10.8
	板厚	Z	4.6	15.3	2.6	7.5
	90	表層下 2mm	L	18.8	19.1	20.8
C			26.8	23.2	29.0	23.7
t/2		L	16.7	17.6	17.9	17.4
		C	15.3	16.4	19.6	17.1
板厚		Z	6.5	3.2	9.6	6.4

④ 表-9に母材衝撃試験結果を示す。いずれも非常に良好な値を示している。採取位置別に見ると、いずれの方向においても表層下2mmが板厚中央部をやや上回る傾向にある。

⑤ 曲げ試験においては、表面曲げ(80、90mmは40mmに減厚)、側曲げいずれも良好であった(写真-2)。

以上母材試験においては、引張り、衝撃、曲げ等の各種機械試験の結果は勿論JIS規格を満足しており、機械的性質のロール方向、ロール直交方向での異方性も見られない事及び、板厚方向の機械的性能も従来鋼に比較し良好である事から、建築鉄骨用鋼材として何ら問題ないと考えられる。

また、炭素当量の低減により、溶接時の耐割れ性、溶接熱影響部のじん性の向上等、溶接性の改善が期待できるものと考えられる。

次に溶接試験の結果について述べる。

① 継手部のマクロ試験はいずれも良好であった(写真-3)。

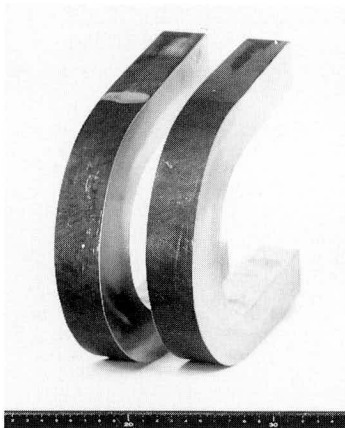


写真-2
母材表曲げ(板厚80mm L方向)

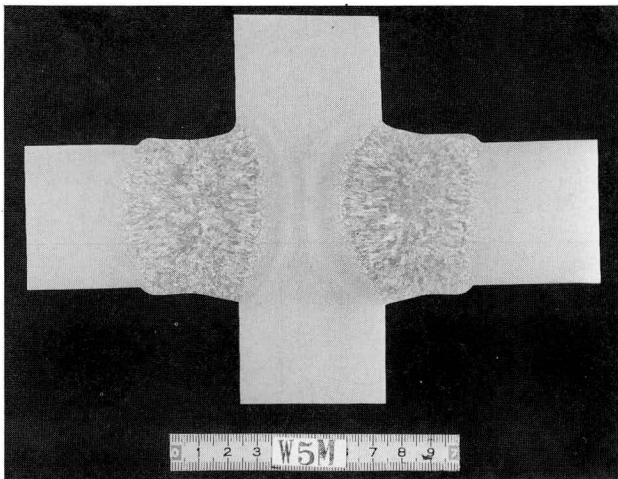


写真-3 エレスラ溶接(十字型)マクロ(板厚50mm)

② 斜めY形割れ試験の結果を図-5、最高硬さ試験の結果を図-6に示す。従来の鋼材に比較してかなり改善された結果であり、極厚鋼材の子熱の軽減が期待できる。

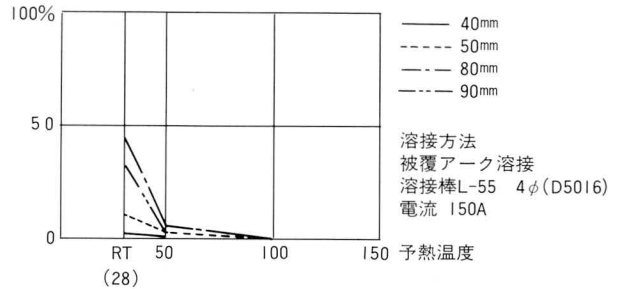


図-5 斜めY形割れ試験(断面われ率)

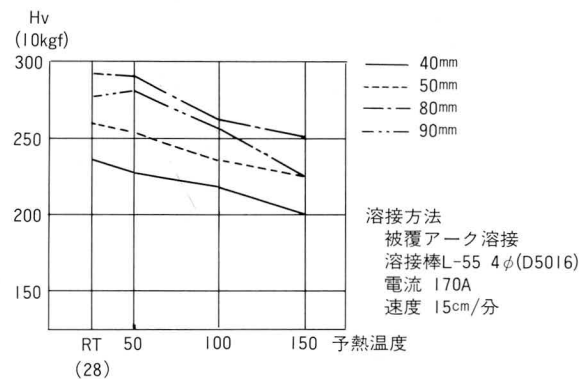


図-6 最高硬さ試験

③ 溶接継手部の硬さ試験について、板厚50mmの場合の大入熱溶接の例として十字エレクトロスラグ溶接、並びに二電極サブマージドアーク溶接、小入熱溶接の例として炭酸ガス半自動溶接の結果を図-7に示す。

炭酸ガス半自動溶接の場合、

$$Hv \text{ min}=160、Hv \text{ max}=220$$

であり、十字エレクトロスラグ溶接においては

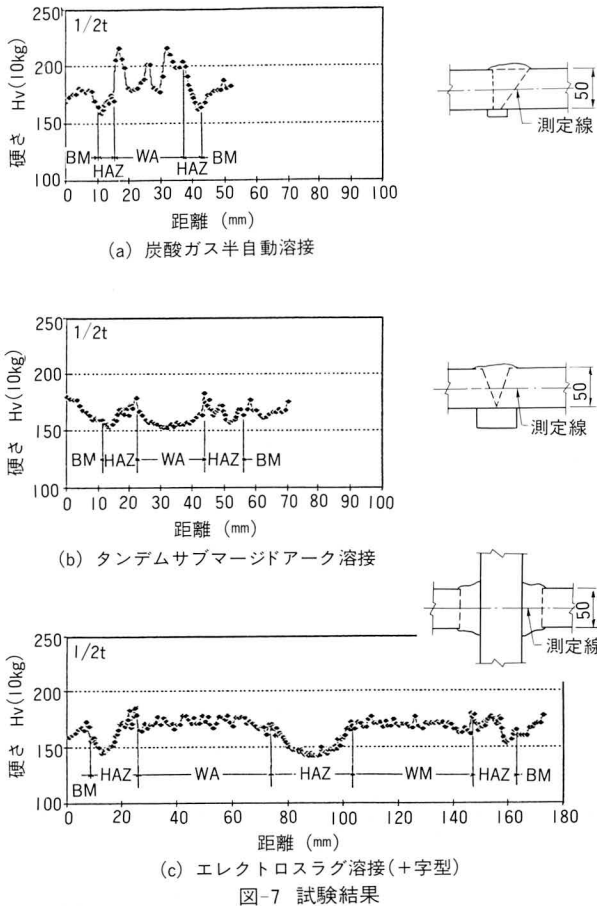
$$Hv \text{ min}=140、Hv \text{ max}=180、$$

二電極サブマージドアーク溶接は

$$Hv \text{ min}=150、Hv \text{ max}=170$$

であった。

④ 上述の溶接部硬さ分布から分かる様に、TMCP鋼においては熱影響部に若干の軟化は認められるが、表-10の溶接継手全断面引張り試験結果に示すとおり、全断面引張り試験では十分な強度が得られた。また



溶接継手部の伸びは評価の方法、基準が無い為参考値であるが良好な値を示している。

- ⑤ 衝撃試験の結果を表-11に示す。エレクトロスラグ溶接では他の溶接方法に比べ低くなる傾向にあるのは従来鋼と同様であるが、すべての位置において規格を満足し良好な結果である。
- ⑥ 側曲げ（一部十字曲げ）試験はいずれも欠陥は無く、良好な曲げ性能が得られた（写真-4）。

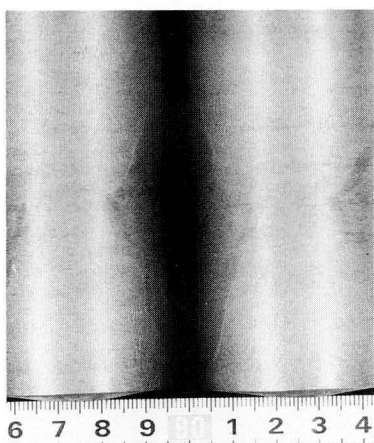


写真-4
サブマージドアーク
溶接側曲げ(板厚90mm)

表-10 溶接継手全断面引張試験結果

	板厚 (mm)	降伏点 (Kgf/mm ²)	引張強さ (Kgf/mm ²)	伸 び (%)	破断位置
CO ₂ 半自動 溶 接	40	— 39	52 52	51 48	BM-HAZ BM-HAZ
	50	42 42	55 55	40 41	BM-HAZ BM-HAZ
	80	42 42	56 56	31 22	HAZ-Depo HAZ-Depo
	90	45 44	60 59	50 48	BM-HAZ BM-HAZ
エレスラ (平型) 溶 接	40	39 38	54 54	40 40	HAZ H Z
	50	38 38	54 54	34 36	HAZ HAZ
	80	42 40	58 59	44 37	Depo Depo
	90	42 45	58 58	57 55	Depo Depo
エレスラ (十字型) 溶 接	40	— —	54 54	— —	BM BM
	50	41 40	56 56	— —	HAZ HAZ
サブマージド アーク溶接	40	38 38	54 54	43 43	Depo Depo
	50	41 41	54 54	45 34	Depo Depo
	80	43 43	56 56	21 22	Depo Depo
	90	40 40	53 53	32 30	Depo Depo
タンデム サブマージド アーク溶接	40	36 36	51 51	44 44	HAZ-Depo HAZ-Depo
	50	41 39	52 52	36 39	HAZ-Depo HAZ-Depo
	80	49 49	62 62	48 50	HAZ HAZ-Depo
	90	44 43	55 55	36 36	Depo Depo

6. おわりに

T MCP鋼を今後建築鉄骨に使用するに当たって、その母材の性能及び溶接性を中心に調査、研究した結果、母材の性能、溶接性とも良好であることが確認できたと考えられる。

以下に今回の研究で確認できた点をまとめる。

母材特性について

- ① 母材の機械的性質は十分な性能を有している。
- ② 従来鋼に比べ炭素当量が低い。
- ③ 音響異方性は、一部メーカーの材料に異方性のやや大きなものがあったが他は良好であった。

表-11 溶接継手衝撃試験結果

溶接方法	板厚位置	ノッチ位置	吸収エネルギー平均 (kgf-m)			
			40mm	50mm	80mm	90mm
CO ₂ 半自動溶接	表層下2mm	Depo	11.5	11.3	10.7	8.0
		Bond	16.0	24.8	16.1	13.5
		HAZ	26.8	24.9	30.0	29.4
	t/2	Depo	12.9	8.3	15.9	5.3
		Bond	28.0	16.5	7.5	16.0
		HAZ	26.9	25.6	30.0	26.0
サブマージドアーク溶接	表層下2mm	Depo	12.6	11.6	10.1	6.1
		Bond	13.4	13.6	9.2	11.5
		HAZ	25.6	25.8	29.1	23.8
	t/2	Depo	12.6	13.9	7.1	10.9
		Bond	18.3	19.2	8.2	11.7
		HAZ	20.6	21.7	18.1	19.0
タンデムサブマージドアーク溶接	表層下2mm	Depo	11.8	11.7	11.6	10.0
		Bond	18.2	11.1	19.3	14.2
		HAZ	24.7	23.1	30.0	21.8
	t/2	Depo	13.9	13.3	18.6	14.6
		Bond	13.2	12.6	26.3	14.4
		HAZ	24.8	24.6	30.0	27.7
エレスラ(平型)溶接	表層下2mm	Depo	12.3	12.1	3.8	5.4
		Bond	13.4	17.0	5.9	13.5
		HAZ	20.3	24.5	30.0	28.0
	t/2	Depo	11.7	12.8	3.0	7.3
		Bond	9.3	3.0	5.7	12.7
		HAZ	16.2	21.7	24.0	27.7
エレスラ(十字型)溶接*	表層下2mm	Depo	9.9	6.0		
		Bond	9.3	16.3		
		HAZ	23.5	21.6		
	t/2	Depo	7.0	6.7		
		Bond	9.3	9.4		
		HAZ	11.8	19.1		

*: 板厚方向試験片 (はさみ板より採取)

これは鋼材の製法の違いに起因しており、実際の工事の施工に当っては、事前調査、検討が必要な事項である

と共に、ミルメーカーにたいして更に異方性の軽減を御願いたい。

溶接性について

① 耐溶接割れ性能は、従来鋼より良好であり、特に予熱温度の低減が期待出来る。

② 大入熱溶接部の熱影響部に若干の軟化が見られ、局部的には強度低下が予想されるが、継手全断面引張り強度は十分な性能を有しており、使用上は何ら問題ない事が確認された。

詳細については、熱影響部の局部的挙動あるいは大形引張り等の性能を調査の上、後日報告したい。

③ 継手部の各部位での衝撃値は、従来鋼に比較して良好である。

以上、T M C P 鋼の母材特性と溶接性について研究結果の一部を報告をしたが、今後さらに各種の検討を行い第II報として報告したいと考えている。

最後に、本研究を行うに当たり多大な御協力をいただいた新日本製鐵株式会社及び住友金属工業株式会社の関係各位に誌上を借りて心より御礼申し上げます。

〈参考文献〉

- 1) 社団法人 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
- 2) 住友金属工業(株)；超高層ビル用極厚T M C P 鋼の開発、1988.1
- 3) 新日本製鐵(株)；君津C L Cプロセスの概要とC L C 鋼板の特性、1988.4

グラビア写真説明

古川高架橋 琵琶湖南部および京都南部は、現在市街化が急速に進みつつあり、近畿内陸における開発の中核として今後も土地利用の高度化、交通需要の増加が予想されています。京滋バイパスはこれらの情勢に備えるため、京阪神都市圏の広域幹線道路網計画の一環として建設され、一般国道1号(滋賀・京都間)および名神高速道路の交通難緩和に寄与するとともに、沿道地域の交通サービスと発展に貢献しようとするものです。本バイパスは、滋賀県草津市を起点とし、京都府久世郡久御山町を終点とする延長約27.0kmの路線である。古川高架橋は、この久御山I. C近くで古川を跨ぐ高架橋として、63年京都国体の開会前に開通すべく、製作・架設の両面にわたり工期短縮に努力し、63年8月供用開始することが出来ました。(藤原勉)

香川高架橋 藤沢市～茅ヶ崎市附近の国道1号線は神奈川県内でも有数な交通渋滞箇所であり、それによる交通安全及び経済的損失には測り知れないものがある。この渋滞の解消を目指し計画された新湘南バイパス(約8.4km)は、藤沢市の辻堂で山側へ分岐されたコースを取って南下し、茅ヶ崎の西端で国道1号線に合流する。また辻堂より西茅ヶ崎の間は全線高架橋で、盛土平面交差部分は皆無である。香川高架橋は新湘南バイパスの中間点よりやや西よりあり、J R相模線(茅ヶ崎～橋本)を横断する3径間の高架橋で、これに連続して終点側に附近住民車両および一般車両の有効利用のためにOn.Offランプが設置されている。(柳川)