

---

委員會報告

*Committee Report*

## 委員会報告

# TMCP 鋼の加工性に関する研究

## A STUDY ON THE WORKABILITY AND WELDABILITY OF STEEL PLATE PRODUCED BY THERMO-MECHANICAL CONTROL PROCESS

鋼構造委員会鋼材規格小委員会

*By Subcommittee on Steel Standard Committee on Steel Structure*

### 1. はじめに

TMCP 鋼は、熱間圧延および冷却工程を単に鋼板の形成工程だけではなく、熱処理工程としても有効に利用した新しい方法(Thermo-Mechanical Control Process)により製造された鋼である。従来の製法による鋼材(以後、従来鋼とよぶ)と比較して、TMCP 鋼には次のような特徴がある。

- ① 热処理工程により結晶粒が微細化されているため、高強度・高じん性である。
- ② 同一強度レベルの従来鋼に比べて炭素当量が低く、溶接性に優れている。すなわち、非低水素系の溶接棒を使用しても溶接部の高いじん性、ショートビートや入熱量の制限の緩和、予熱条件の緩和・省略が期待できる。
- ③ 水冷型 TMCP 鋼では熱間圧延後の冷却工程において強度上昇を計るため強制水冷を行う。その際、鋼板内で温度が不均一となることが予想され、残留応力が従来鋼よりも大きくなる可能性がある。そのため、ガス切断した際に変形が生じやすい。
- ④ 制御圧延により高強度化が計られているため、溶接時の再加熱による影響を受けやすい。特に大入熱溶接した際に溶接部の軟化が懸念される。

TMCP 鋼はすでに船舶や海洋構造物に広く用いられており<sup>1)</sup>、船舶用鋼板への適用については、日本造船研究協会第193研究部会で、溶接を含めた広い範囲から詳細に検討されている<sup>2)</sup>。また、現在 JIS 規格(JIS G 3106)の改訂原案が審議中であり、その中の熱処理の記号に TMCP(規格中では TMC)が追加される予定である。このことは TMCP 鋼の使用が広く一般に認識されたこ

とを示すものであり、橋梁、建築、圧力容器、その他従来鋼が適用されている分野にも TMCP 鋼の使用が広がっていくものと考えられる。

このような情勢に鑑み、鋼構造委員会・鋼材規格小委員会では、昭和61・62年度の2年間にわたり TMCP 鋼の製造プロセス、冶金的特徴、機械的性質、溶接性を中心とした加工性についての調査を行った。また、TMCP 鋼を橋梁などの土木構造物に適用する際の問題点について検討し、その結果以下の項目については実験的に調べることとした。

- 1) ガス切断時の変形
- 2) 大入熱溶接部の性能
- 3) 非低水素系溶接棒の使用

ここでは、これらの実験で得られた成果の概要について報告する。

### 2. 供試鋼材

TMCP 鋼の製造法としては、非水冷法と水冷法とに大別されるが、ここで用いた鋼は水冷法により製造されたものである。水冷法とは、熱間制御圧延後に水冷により制御冷却を行う製造法であり、非水冷法よりもさらに高強度化、低炭素量化を計った方法である。

供試鋼材は板厚 12 mm, 25 mm および 30 mm の 3 種類であり、それらの鋼材の化学成分および機械的性質は表-1 に示すとおりである。以後、板厚 12, 25, 30 mm の鋼材をそれぞれ A 材、B 材、C 材とよぶ。A 材、B 材は、SM 50 YB 相当の鋼であり、炭素当量はそれぞれ 0.34, 0.35 % である。C 材は SM 50 C 相当の鋼であり、炭素当量は 0.34 % である。図-1(a), (b) は A 材、B 材のミクロ組織を示したものである。いずれもフェ

表-1 供試鋼材の化学成分および機械的性質

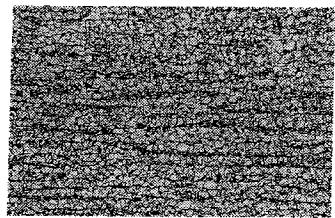
鋼材	板厚 (mm)	化 学 成 分 (wt %)						機械的性質		
		C	Si	Mn	P	S	$C_{eq}$	Y.P	T.S	EL
A	12	0.15	0.18	1.10	0.012	0.005	0.34	460	550	24
B	25	0.10	0.35	1.39	0.019	0.004	0.35	400	510	27
C	30	0.15	0.18	1.09	0.019	0.005	0.34	420	540	28

$$C_{eq} = C + Mn/6 + Si/24 + Cr/5 + V/14 + Ni/40 + Mo/4$$

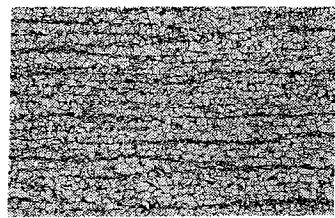
Y.P.: 降伏点 (MPa)

T.S.: 引張強さ (MPa)

EL: 伸び (%)

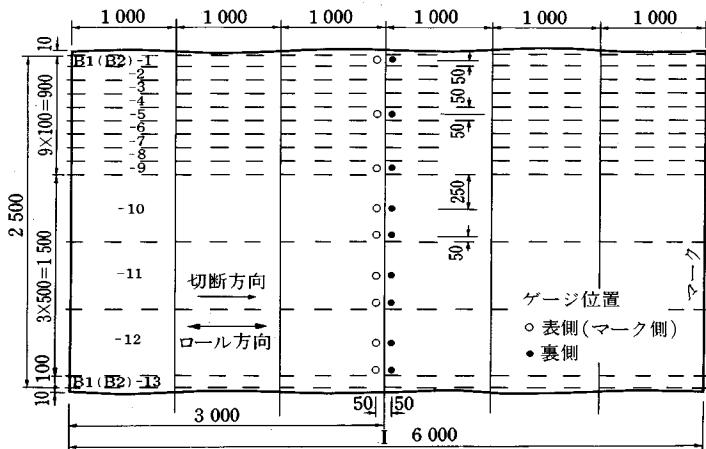


(a) A 材

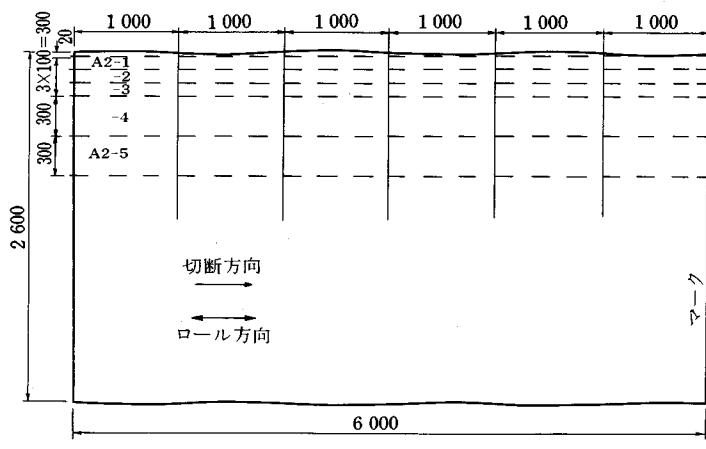


(b) B 材 0.1mm

図-1 母材のミクロ組織



(a) A1, B1, B2 材 (A1 材のみ切代なし)



(b) A2 材

図-2 残留応力の測定位置および鋼板の切断位置

ライト・パーライト組織を示しており、その平均粒径は A 材で  $8 \mu\text{m}$ , B 材で  $12 \mu\text{m}$  となっている。なお、SM 50 Y 従来鋼の平均粒径は  $20 \sim 35 \mu\text{m}$  程度といわれており、

A 材で  $35 \text{ cm}/\text{min}$ , B 材で  $20 \text{ cm}/\text{min}$  である。平行切断を行う場合、切断直角方向のロール縁に  $10 \text{ mm} \sim 50 \text{ mm}$  程度の切代を設けるのが通常であり、ここでは B 1,

TMCP による結晶粒の微細効果は明らかである。

### 3. 残留応力および切断時の変形

#### (1) 試験方法

切断試験には、A 材、B 材それぞれ 2 枚ずつの鋼板を用いた (A 1, A 2, B 1, B 2)。切断試験を行う前に、A 1, B 1, B 2 鋼板の表裏面での残留応力を測定した。測定位置を図-2(a) に示す。測定は、ゲージ長  $2 \text{ mm}$  の 2 軸ひずみゲージを所定の位置に貼付し、そのままわりを穿孔機でくりぬき、残留応力を解放することにより行った。その際、ゲージ貼付部近傍の温度が  $40^\circ\text{C}$  を超えないように注意した。なお、表裏面での測定位置は穿孔機を用いる関係で、 $100 \text{ mm}$  離れている (図-2 参照)。

切断試験では、図-2(a), (b) に示すように、鋼板のロール方向で平行切断を行った。切断幅は、 $100, 300, 500 \text{ mm}$  であり、 $100 \text{ mm}$  はスティフナー、 $300, 500 \text{ mm}$  は I 断面桁のフランジを想定している。切断は、プロパンガスを燃料としたフレームプレーナーを用い、全線同時に切った。その際の切断速度は

B 2 材で 10 mm, A 2 材で 20 mm とした。ただし、A 1 材では切代なしとした。

変形の測定は、鋼板が室温まで冷却した後、面内および面外方向について行った。面内変形の測定はまず切断前に鋼板に直線を描き、切断・冷却後その線の両端にピアノ線を当て、ピアノ線と切断前に描いた線との距離を図-2 に示すように 1 000 mm ピッチで測ることにより行った。面外変形の測定においては、切断前後に定盤上で鋼板端の反り量を測り、その差を面外変形量とした。

## (2) 残留応力測定結果

熱間圧延後水冷された TMCP 鋼板の残留応力は 1) 鋼板の縦横方向の温度や冷却速度の不均一、2) 鋼板の表面・内部・裏面での温度差によって生じると考えられる。これらのうち、1) が切断により生じる面内変形、2) が面外変形の原因となる。

A 1 材および B 1 材での残留応力の測定結果を図-3(a), (b) に示す。なお、B 2 材での残留応力は B 1 材とほぼ同じであり、図は省略した。板厚 12 mm の A 材での鋼板表裏面の残留応力は、ロール方向で -23~26 MPa、ロール直角方向で -3~13 MPa である。板厚 25 mm の B 材の残留応力は A 材に比べ大きく、ロール方向で -125~-116 MPa、ロール直角方向で -132~-2 MPa であった。このように厚板の B 材で大きい残留応力が生じるのは、板が厚くなるに従って表面と内部での温度や冷却速度の差が大きくなるためと考えられる。

ここで示した残留応力は切断前の原板に対するものであり、この残留応力は切断により再配分されるとともに、

ガス切断の熱により新たに残留応力が付加される。さらに、溶接部材では通常溶接部に降伏点程度の引張残留応力が存在し、それにつり合うような圧縮残留応力が他の部分に生じる。したがって、ここで測定された程度の残留応力が TMCP 鋼板に生じていても、従来鋼に比べて部材の強度上特に問題となることはないと考えられる。

## (3) 変形測定結果

平行切断により生じた面内変形量の測定結果を図-4(a)~(d) に示す。鋼板の縁部に切代を設けなかった A 1 材では、両端の切断板 (A 1-1, A 1-13, 図-4(a) 参照) に外側への大きな曲がり変形が生じており、その変形量は A 1-1 で 18.5 mm, A 1-13 で -25.0 mm である。しかし、他の部分での変形量は小さく、特に曲げ剛性の高い広幅の切断板での変形量は小さい。縁部での変形量が大きいのは、切代を設けていないために板の片側のみがガス切断の熱を受け、切断板の両側で入熱の差が大きくなるためである。実施工においては、このような変形を小さくするために縁部に切代を設けるのが通常であるため、A 1 材での変形は特異なものといえる。図-4(b) に示す A 2 材では、20 mm の切代を設けているため、縁部の切断板 (A 2-1) においても変形量は小さい。

図-4(c), (d) に示す B 材の変形量は A 2 材に比べ若干大きくなっているが、B 1 材の縁の切断板 (B 1-1) を除いて、変形量は容易に矯正できる程度のもので、特に問題となる大きさではない。また、B 1-1 での変形は、他の縁の板においても (B 1-13, B 2-1) 外側に大きい変形が生じていることから考えて切代の幅が狭いために

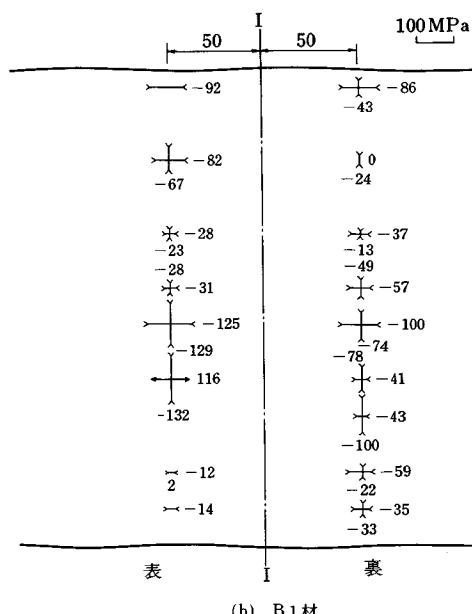
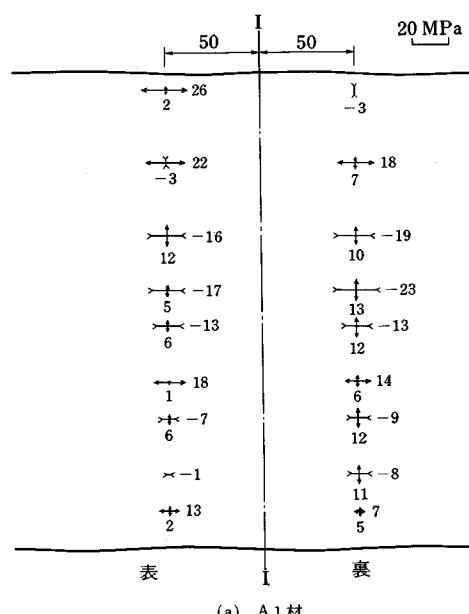


図-3 残留応力の測定結果

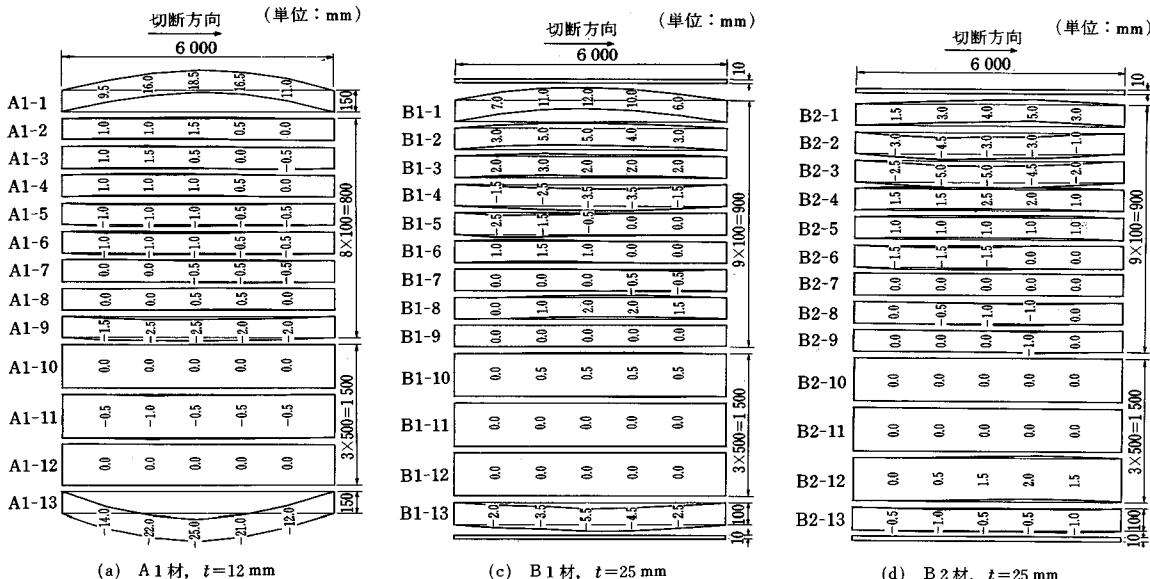


図-4 面内変形量の測定結果

生じた切断板の両側での冷却速度の差に原因があり、TMCP鋼特有のものではないと思われる。したがって、B材の両縁の切断板においてもさらに大きな切代を設ければ、面内変形は十分に小さくなるものと予想される。

図-5(a), (b) は、比較のために板厚 16 mm, 22 mm の従来鋼の切断変形量を示したものである<sup>3)</sup>。切断幅や切代が異なるため、単純に比較することはできないが、縁部の切断板を除いて TMCP 鋼と従来鋼で面内変形に顕著な差は認められない。

以上のように、TMCP 鋼においても切代などの切断条件を工夫することにより、変形量を鋼橋部材の製作上特に問題のない程度におさえることができるものと考えられる。

次に面外変形量の測定結果について示す。切断材の面外変形量は、切断幅や切断位置による差は認められず、A 材で最大 6.5 mm, B 材で 30 mm であった。この結果より、残留応力の影響がうかがわれるが、ガスの火口側

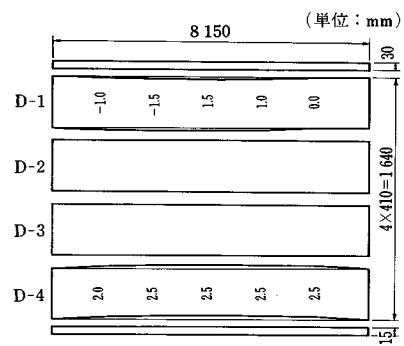
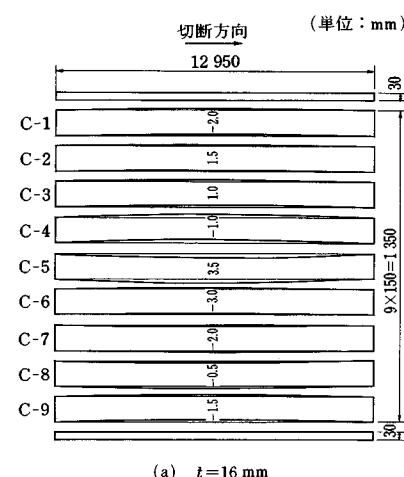


図-5 従来鋼の面内変形

表-2 大入熱溶接の溶接方法、溶材および継手形状

				試験片形状
				エンドタブ
				圧延方向 1 000
1	A	片面 1パス SAW	Y-D 4.8φ YF-15 YKC	
2-1	B	両面 2パス SAW	US-36 4.8φ PFH-55E	
2-2	B	両面 4パス SAW	US-36 4.8φ MF-38	
2-3	C	両面 8パス SAW	Y-D 4.8φ NF-310	
3	B	片面 1パス EGW	EG51S 1.6φ	

の面とその裏面では温度や冷却速度に差が生じるため、従来鋼でも同程度の面外変形が生じることもある。したがって、特に TMCP 鋼の面外変形が大きいとはいはず、またこの程度の大きさであれば、鋼橋部材の製作時に特に問題となることはない。

#### 4. 大入熱溶接部の性能

##### (1) 溶接方法

供試鋼材は、A 材（板厚 12 mm）、B 材（板厚 25 mm）および C 材（板厚 30 mm）である。また、比較のために A 材と同じ板厚 12 mm の SM 50 Y 従来鋼も用いた。各供試鋼材それぞれについて、長さ 1 m、幅 250 mm の板に加工し、それを 2 枚突合させて溶接した。溶接方法、溶材、継手形状を表-2 に、溶接条件を表-3 に示す。溶接法は以下の 3 タイプであり、タイプ 2 ではさらにパス数によりタイプ 2-1, 2-2, 2-3 に分類している。

タイプ 1 は鋼床版デッキプレートの溶接を想定した片面 1 パスのカットワイヤを散布したサブマージアーク溶接（SAW）である。この溶接には A 材および SM 50 Y

表-3 大入熱溶接の溶接条件

タイプ	パス	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/分)	入熱 (kJ/cm)
1	1	750	32	32	45
2-1	B 1	750	36	30	54
	F 2	850	36	22	83
2-2	B 1	770	35	40	40
	2	680	38	30	52
2-3	F 3	800	35	30	56
	4	700	38	26	61
B	1	700	38	35	46
	2	680	38	40	39
	3	600	38	55	25
	4	600	38	55	25
	5	700	38	35	46
	6	670	38	45	34
	7	600	38	55	25
	8	600	38	55	25
3	1	400	39	10	94

B : パックパス

F : ファイナルパス

従来鋼を使用している。カットワイヤを散布した SAW には、入熱を小さくできる、アークの安定性がよい、母材希釈率（溶接金属断面積に対する母材溶融面積の比）が小さいなどの特徴がある。溶材には従来鋼用のものを使用し、裏当て材にはソフトパッキング（ガラステープ + 耐火材）を用いた。

タイプ 2 は主桁フランジの溶接を想定している。タイプ 2-1 は両面 2 パス（B 材使用）、タイプ 2-2 は両面 4 パス（B 材使用）、タイプ 2-3 は両面 8 パス（C 材使用）のサブマージアーク溶接（SAW）である。タイプ 2-1 と 2-2 では従来鋼用の一般溶材を、タイプ 2-3 では低温鋼用の溶材を使用している。

タイプ 3 は箱断面鋼脚の現場溶接を想定した片面 1 パスのエレクトロガスアーク溶接（EGW）であり、B 材を使用している。溶材には低温鋼用のものを、裏当て材には（ガラステープ + 銅板）を用い、溶接姿勢は立向きとしている。

##### (2) 溶接部の組織および硬さ

各タイプの溶接部マクロ写真を図-6 に、ミクロ写真を図-7 に示す。いずれの溶接部にも欠陥の存在は認められない。タイプ 1, 2 の溶接金属には粒界フェライト、粒内アシキュラーフェライトが存在し、タイプ 1 には粒内に塊状のフェライトも生じている。タイプ 3 では均一なアシキュラーフェライト組織となっている。ボンド部

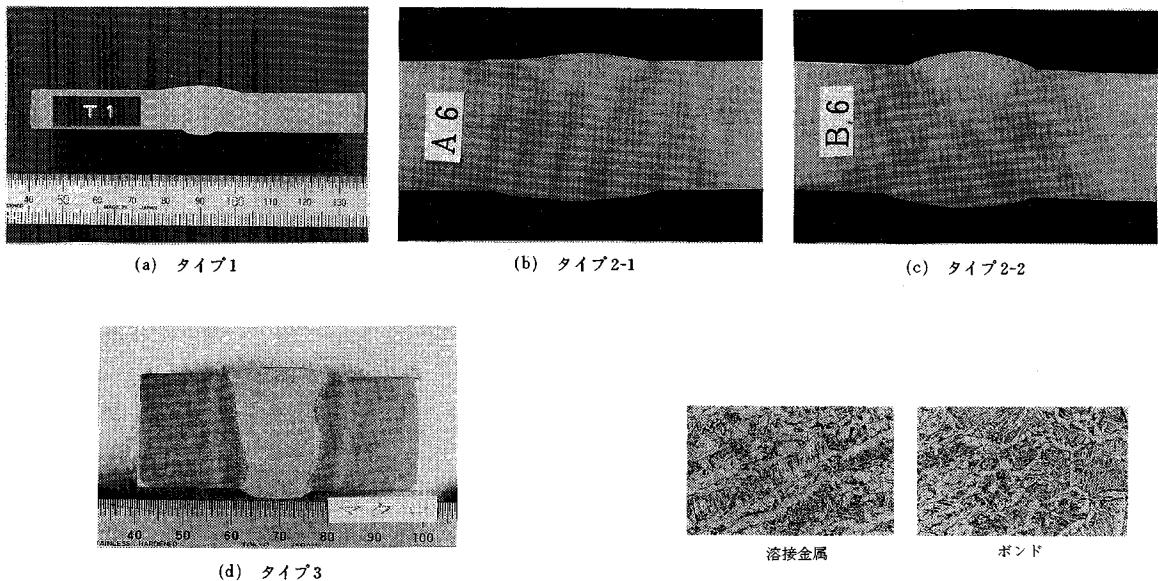


図-6 大入熱溶接部のマクロ組織

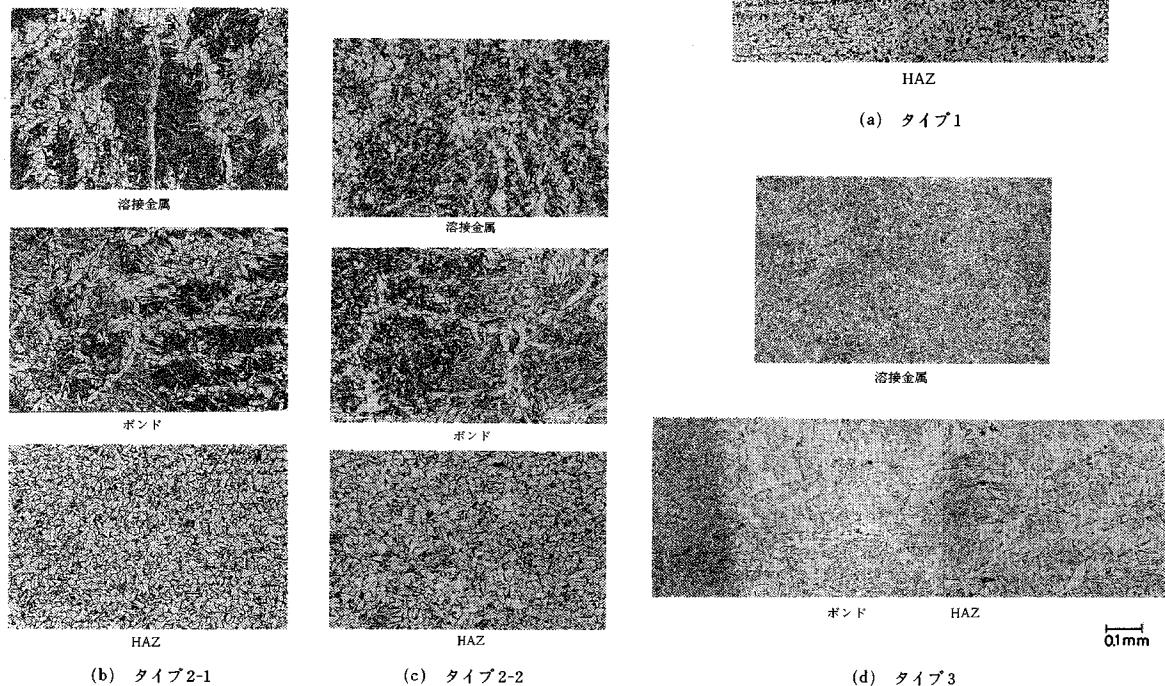


図-7 大入熱溶接部のミクロ組織

では、旧オーステナイトが粗大化し、粒界にフェライトが生じている。また、熱影響部(HAZ)は細粒域となっているが、母材に比べて結晶粒は若干粗く、パーライトが減少している。

図-8は溶接部の硬さ分布を示している。硬さは、ピッカース試験により求めており、その際の荷重はタイプ

2-3で49N、その他で98Nとした。HAZの最高硬さは、タイプ2-3で193HV、その他で170~176HVであった。いずれの場合も HAZに軟化域が生じており、軟化域での硬さは母材に比べ10HV程度低く、その幅は5~6mm程度である。

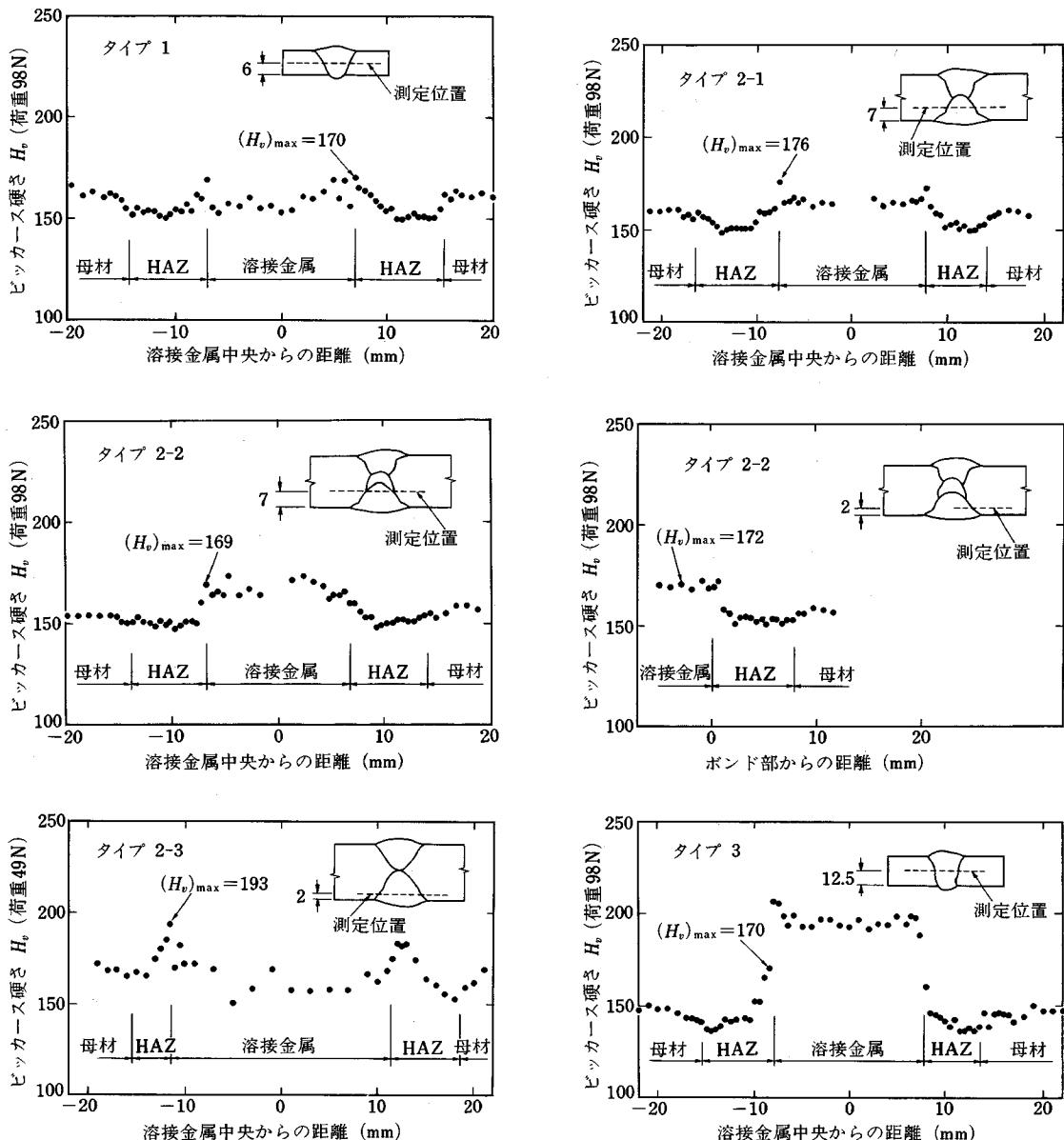


図-8 大入熱溶接部の硬さ分布

## (3) 溶接部の引張強度および曲げ性能

図-9に示す短標点試験片 (JIS Z 3121 1号試験片) および長標点試験片 (JIS Z 2201 1号試験片) を用いて、溶接部の引張試験を行った。その結果を表-4に示す。短標点試験片の破断位置は溶接金属、HAZ、母材とまちまちである。長標点試験片では、溶接金属と母材の平均硬さの低い側で破断しており、HAZの軟化域が狭く塑性拘束を受けるために軟化域では破壊しなかった。いずれの試験片においても、引張強さはそれぞれの母材の規格値を満たしている。

大入熱溶接を行うと、溶材とともに母材も多量に溶融され、母材希釈率は 30~50 % 程度になるといわれている<sup>4)</sup>。本試験で用いた各溶接タイプでの母材希釈率は、マクロ試験結果より判断して、30~40 % 程度である。したがって、大入熱溶接を行った際、溶接金属の機械的性質は母材の化学成分に著しく影響される。本試験で用いた TMCP 鋼の炭素当量は 0.35 % 程度であるため、特に強度上の問題は生じていないが、さらに炭素当量が低い場合には注意を要する。たとえば、炭素当量が 0.30 % 以下の TMCP 鋼を用いた場合には、溶接金属

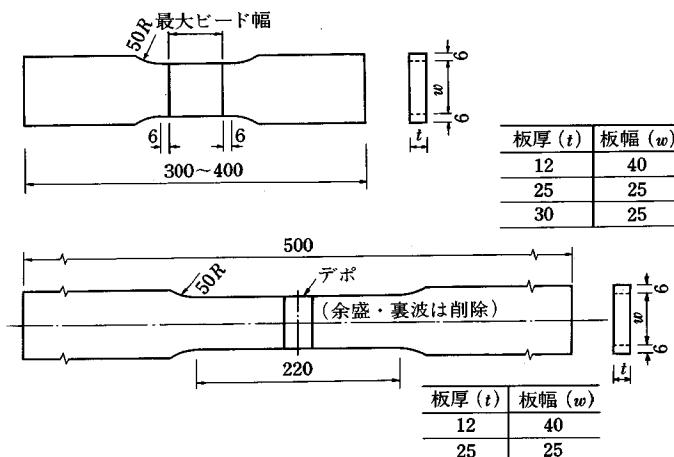


図-9 引張試験片の形状・寸法

の機械的性質が規格値を満足しない可能性があるとの報告もあり<sup>5)</sup>、溶材に対する検討が必要となる。

各タイプ溶接継手について、型曲げ試験を行った。道路橋示方書の規定に従い、タイプ1の継手（板厚12 mm）では裏曲げ試験、タイプ2、3の継手（板厚25, 30 mm）では側曲げ試験とした。いずれの溶接継手においても割れは生じず、すべて良好な曲げ変形性能を示した（表-4参照）。

#### （4）溶接部のじん性

溶接部のじん性を調べる目的で、シャルピー衝撃試験を行った。試験片の形状、寸法および採取位置は図-10に示すとおりである。ノッチの位置は溶接金属、ボンド、HAZとなるようにした。試験結果を図-11(a)～(c)に示す。各プロットは試験片3本の結果の平均値を示している。普通鋼用の溶材を用いたタイプ1, 2-1, 2-2では溶接金属の吸収エネルギーがHAZに比べ低くなっている。ただし、いずれのタイプの溶接、ノッチ位置においても、その吸収エネルギーはJISの規格値（0°Cにおける吸収エネルギーが、SM 50 YB (A, B材)で27 J以上、SM 50 C (C材)で47 J以上）を満たしている。したがって、本実験の範囲内においては、TMCP鋼に対し、普通鋼用の溶材を用いて橋梁で想定される程度の大入熱溶接を行っても、溶接部のじん性に特に問題はないといえる。

大入熱溶接した場合、最も問題となるのはボンド部の脆化である。厳密にはボンド部近傍のHAZの粗粒域をいう。この原因としては、第一に結晶粒の粗大化が挙げられる。TMCP鋼では、母材が細粒化されているため、ボンド部の脆化が従来鋼に比べ改善されるといわれている。図-11(a)には、タイプ1の溶接を行った従来鋼のシャルピー吸収エネルギーを併記している。TMCP鋼のボンド部の吸収エネルギーは、従来鋼に比べ20 Jほ

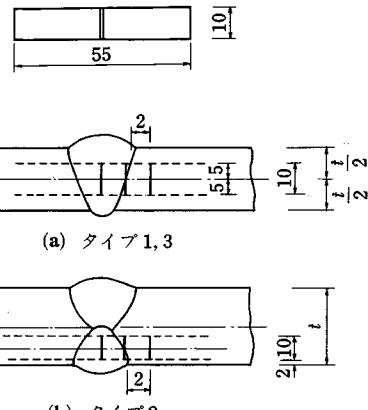


図-10 衝撃試験片の採取位置およびノッチ位置

表-4 引張試験および型曲げ試験の結果

タイプ	引張試験				型曲げ試験	
	長標点		短標点			
	T.S.	破断位置	T.S.	破断位置		
1	513 513	溶接金属	533 528	溶接金属	良好	
2-1	514 512	母材	520 523	HAZ <sup>+</sup> 母材	良好	
2-2	514 506	母材	523 523	HAZ <sup>+</sup> 母材	良好	
2-3	—	—	511 515	溶接金属	良好	
3	500 503	母材	541 547	母材	良好	

T.S.：引張強さ (MPa)

ど高くなっているものの、他のタイプのボンド部に比べると低くなっている。これは、タイプ1の溶接継手では溶接熱の冷却速度が遅いこと、ノッチ位置の組織が不均一で衝撃値の低い溶接金属の影響を受けていることが原因と考えられる。したがって、寒冷地などにおいてさらに高いじん性値が要求される場合には、TMCP鋼に対しても溶材や熱処理に対する検討が必要である。

#### 5. 非低水素系溶接棒の使用と予熱条件の緩和

##### （1）試験方法

本章では、TMCP鋼に対する非低水素系溶接棒の使用と溶接時の予熱条件の緩和の可能性について、斜めY形溶接割れ試験を行うことにより検討する。

供試鋼材はB材であり、試験体は図-12に示す斜めY形溶接割れ試験体 (JIS Z 3158) である。溶接は手溶接で行った。その際の溶接材料および溶接条件は表-5に示すとおりである。ここでは、溶接材料として低水素

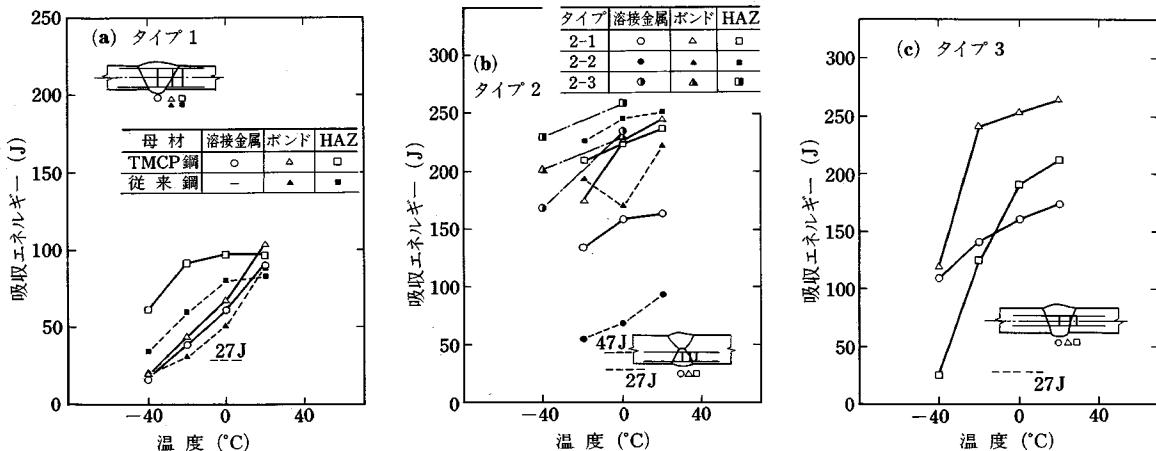


図-11 シャルピー衝撃試験結果

系と非低水素系（ライムチタニア系）の溶接棒を用いている。溶接時の気温は4°C程度であった。なお、道路橋示方書では気温（室内の場合は室温）が5°C以下の場合、予熱を行うように規定している。溶接割れ試験の手順は以下のとおりである。

- 拘束溶接を行う。
- 予熱を行う。予熱温度は、低水素系、非低水素系いずれの溶接棒を用いる場合も同じであり、4°C（予熱なし）、40°C、70°C、100°Cとしている。
- 試験溶接を行う。
- 48時間経過した後、溶接始点部、終点部およびその間を4等分した5つの位置を溶接線直角方向に切断し、ルート割れの有無を確認する。

このような試験を1試験条件（溶接棒、予熱温度）につき2回ずつ行った。

## (2) 試験結果

試験結果の一例として、図-13に非低水素系溶接棒を用いて予熱なしで溶接を行った試験体の溶接部のマクロ写真を示す。溶接部に割れの存在は認められない。他の予熱温度、溶接棒を用いた場合にも溶接部に割れは生じなかった。従来鋼（板厚30mm、炭素当量0.40%）を用いた割れ試験では、非低水素系の溶接棒を用い、気温20°C、予熱なしで溶接した際に表面に達するような長い割れがほぼ溶接全線にわたって生じたという報告<sup>6)</sup>もある。

本試験では、板厚25mmのTMCP鋼を用いていることから、それ以上の板厚に対する予熱温度の緩和・省略についてはさらに実験を重ね検討すべきであるが、ここでの結果は、低水素系の溶接棒を用いた場合にはもちろんのこと非低水素系の溶接棒を用いた場合にも、予熱温度の緩和は十分に期待できることを示している。

表-5 溶接割れ試験の溶接材料および溶接条件

溶接棒	棒径	被覆の系統	溶接条件
JIS D 5016 (LB-52)	4.5 mm	低水素系	200A 30V 18cm/分
JIS D 5003 (LTB-50)	4.5 mm	ライムチタニア系 (非低水素系)	200A 31V 24cm/分

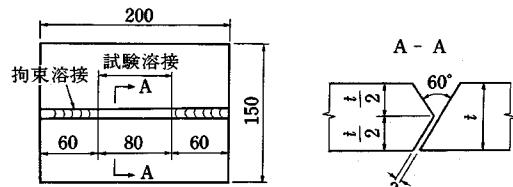
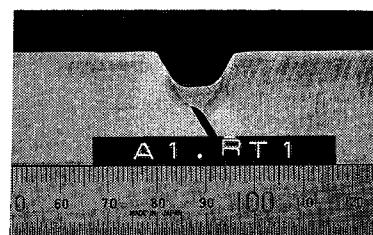


図-12 斜めY形溶接割れ試験体

図-13 溶接割れ試験体の溶接部  
(非低水素系溶接棒、4°C)

## 6. おわりに

本報告では、TMCP鋼を橋梁部材に適用する際に問題になるとされるガス切断時の変形および大入熱溶接部の性能について実験的に検討し、ここでの実験の範囲内では特に問題はないという結果が得られた。また、TMCP鋼の溶接施工上の大きな利点と考えられる予熱

条件の緩和および非低水素系溶接棒の使用が可能であることが確かめられた。

TMCP 鋼は、低温においてもじん性が優れていることから、特に寒冷地の橋梁に利用することが有効と考えられ、北海道で TMCP 鋼が試験的に使用された例もある。また、今日特に橋梁製作の省力化が叫ばれているが、溶接条件の緩和が期待できる TMCP 鋼の利用は有効と考えられる。しかし、使用するにあたっては、その部材に TMCP 鋼を用いる必要があるのか、溶接条件をどの程度緩和できるかについて十分に検討することが重要である。本報告がその一助となれば幸いである。

当委員会では、「TMCP 鋼の土木構造物への適用」と題した報告書を作成し、学会図書室に保管している。報告書の目次は、1 章：製造プロセスと冶金的性質、2 章：船舶用鋼材としての利用、3 章：ガス切断時の変形、4 章：大入熱継手部の性質、5 章：非低水素系溶接棒の適用、6 章：まとめ、となっている。ここでは、これらのうち 3, 4, 5 章の概要を紹介した。3, 4, 5 章は、それぞれ入部委員、石本氏、山本委員が中心となってまとめたものである。なお、報告書全体の概要は学会誌 (Vol. 73, 1988. 2) に掲載されている。

当小委員会のメンバーは以下のとおりであった。

委員長：堀川浩甫（阪大）

幹事：甲村 皖、重藤宗之（日立造船）

委員：岩熊哲夫（東北大）、森 猛（東工大）、桂樹正隆、西川和弘（建設省）、稻葉紀昭（鉄建公団）、角 昌隆、猪熊康夫（道路公団）、春元靖弘（大阪市）、内藤 泰、山本孝雄（住友重機械）、入部孝夫（東京鉄骨）、片上幹夫、川合亜之、桑部行正（新日鐵）、矢野和彦、下畠隆司（神戸製鋼）

協力者：石本憲司（日本鉄塔）、深沢 誠（横河橋梁）

事務局：黛 巍（土木学会）

#### 参考文献

- 1) 渡辺 之：鉄鋼新素材・TMCP 鋼の適用分野、溶接学会誌, Vol. 55, No. 1, pp. 49~55, 1986.
- 2) 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），1985.
- 3) 日本国鉄道資材局内部資料：TMCP 鋼使用に伴う切断変形の調査, 1986.
- 4) 神戸製鋼所溶接事業部技術部：新制御圧延鋼用溶材について、船舶・鉄鋼海洋構造物部会総会資料, 1984.
- 5) 奥田直樹：鉄鋼新素材・TMCP 鋼の溶接材料、溶接学会誌, Vol. 55, No. 4, pp. 201~207, 1986.
- 6) 神戸製鋼所：スリット型拘束割れ試験結果、(財)建材試験センター JMC 委員会溶接分科会報告, 1985.

(1987. 10. 9・受付)