

非調質 80kg/mm² 高抗張力鋼 HTP 80 について

Low Carbon Low Alloy 80kg/mm² Steel Plate

安 田 達*

Tohoru Yasuda

片伯部 忠 行**

Tadayuki Katakabe

Synopsis :

HTP 80 steel plate, low carbon low alloy 80kg/mm² high tensile steel plate with good weldability and bend-formability, has been developed by Kawasaki Steel Corporation. Manufactured by the combination of suitable chemical compositions and tempering heat-treatment instead of quenched and tempered heat-treatment for the usual 80kg/mm² high tensile steel plate, HTP 80 has good flatness and surface appearance. And especially, it has excellent bend formability at right angle with final rolling direction: it is able to be endured for 90 degrees, 6mm in inside diameter bending without any special technique during hot rolling process such as cross-rolling.

1. 緒 言

最近、全油圧式トラッククレーンが開発され、そのブーム材などに高張力鋼板が使用されている。

この種の用途には従来 60kg/mm² 高抗張力鋼板が使用されているが、さらにクレーンの軽量化、つり上能力の増加、ブーム長さの長尺化などのための設計上の要請から 80kg/mm² 高抗張力鋼を使用するようになって来た。

80kg/mm² 高抗張力鋼は、通常、熱間圧延後の鋼板に、焼入れ・焼もどし熱処理をほどこして製造されているが、上記に用いられる鋼板は比較的厚さが薄く(板厚 6mm 以下)、しかも歪が少なく、曲げ加工性および溶接性が優れていることが要求される。当社ではこの要望に答えて、いち早く、歪の少ない曲げ加工性と溶接性のすぐれた非調質高張力鋼板、HTP 80 を開発し、業界の好評を博

している。この HTP 80 の機械的性質と溶接性について以下に述べることにする。

2. 母材の特性

この種の鋼板に要求される性質としては次のようなものが挙げられる。

- (1) 歪が少ないこと
- (2) 板厚精度が高いこと
- (3) 表面が美麗で、過度のスケールなどが付着していないこと
- (4) 曲げ加工性がすぐれていること
- (5) 溶接性がすぐれていること

HTP 80 は、ホットストリップミルで圧延された鋼板に、700°C 以下のテンパー熱処理をほどこしたもので、熱処理時に変態を伴わないため、比較的厚さの薄い鋼板でも熱処理によって歪が生じることがなく、かつ AGC の設置されたホットストリップミルにより圧延されるため厚み精度が

* 千葉製鉄所管理部厚板管理課課長

** 千葉製鉄所管理部厚板管理課課長

表 1 HTP 80 の化学成分の例 (照合分析値) (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Nb	sol-Al	Ceq*
0.08	0.07	1.53	0.010	0.006	0.04	0.02	0.21	0.38	0.031	0.071	0.031	0.030	0.47

$$*Ceq = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} (\%)$$

高く、熱処理温度が比較的低いことと相まって、表面が美麗であることが特徴である。

曲げ加工性および溶接性については、本鋼板開発時に特に意を用いた所であり、化学成分および製造条件を適切に定めることにより、HTP 80 は以下に示すように、引張強さを低下させることなく優れた曲げ加工性と溶接性とを兼備している。

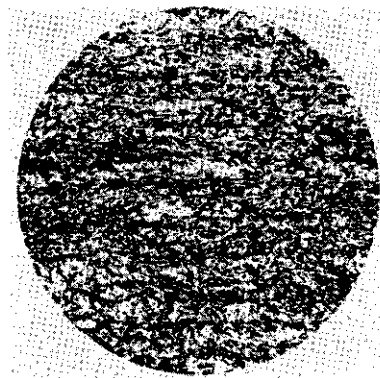
HTP 80 の化学成分の一例を表 1 に示す。曲げ加工性および溶接性をすぐれたものにするために C をできるだけ少なくしており、それによる引張強さの低下を Mn および Cr を添加することにより補っている。さらに圧延後の組織を靱性の優れたベイナイト状の組織にするために、Mo を添加している。また、固溶硬化およびテンパー熱処理による析出硬化を利用して所定の降伏強度を得るために、若干の V、Nb を添加している。

曲げ加工性をすぐれたものにするためには、カーバイトをできるだけ少なくする目的から、前述のように C 量を低くしているが、さらにワレ発生の原因となる A 系介在物を減少させるために Si、S をできるだけ低めに押え、かつ、Ti-Al キルド

鋼とすることにより、硫化物系介在物を TiS にして方向性を少なくし、特に圧延方向に直角方向の曲げ加工性の改良を図っている。

HTP 80 の化学成分および機械的性質の規格を表 2、3 に示す。

写真 1 に顕微鏡組織の一例を示す。



HTP80 4.5mm (×330)

写真 1 顕微鏡組織の一例

表 2 HTP 80 化学成分規格 (wt %)

C	Si	Mn	P	S
0.18以下	0.35以下	2.00以下	0.030以下	0.030以下

注) 必要に応じて合金元素などを添加できる。

表 3 HTP 80 の機械的性質の規格

適 用	引 張 試 験				曲 げ 試 験		衝 撃 試 験		
	降 伏 点 (kg/mm ²)	引 張 強 さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	試 験 片 JIS	曲 げ 角 度	曲 げ 半 径	試 験 試 験 (°C)	衝 撃 値 (kgm/cm ²)	試 験 片 JIS
8.0mm 以下の鋼板 (テンパリング)	70以上	80~95	18以上	5号	180°	1.5t	-5	4.5以上	4号

注) 曲げ試験片の方向は、圧延方向に直角 (C 方向) とする。

表 4 引 張 試 験 結 果

板 厚 (mm)	引 張 試 験 (JIS 5 号, C 方向)				
	降 伏 点 (kg/mm ²)	引 張 強 さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	破断部の板厚減少 (%)	降 伏 比
3.2	78	82	19	59	95
4.5	78	83	22	57	94
6.0	76	82	23	56	93
(比較材 50kg/mm ² 鋼)					
4.5	37	53	31	46	70

注) 比較材の照合分析値 (%)

C/0.15, Si/0.08, Mn/1.19, P/0.022, S/0.010, Sol-Al/0.015

2.2 切欠靱性

HTP 80 の 2mmV ノッチシャルピー衝撃試験結果を図 1 に示す。遷移曲線で飽和するエネルギーすなわち Shelf energy は、厚さ 3.2mm, 4.5mm について、おのおの L 方向 14.6kgm/cm², 16.3kgm/cm², C 方向 9.7kgm/cm², 9.4kgm/cm²

と高く、加工性がすぐれていることがわかる。また、これらの -5°C における衝撃値はいずれも 9kgm/cm² 以上で規格値を満足している。これらの破面遷移温度はいずれも L 方向 -140°C 以下, C 方向 -95°C 以下であり、すぐれた切欠靱性を有していることがわかる。

2.3 曲げ加工性

一般に厚さの比較的薄い鋼板はプレスブレーキで曲げられる。プレスブレーキで V ダイスを使用して直角曲げを行なった場合の、曲げ半径による材料の板厚の変化の一例を図 2 に示す。この図からわかるように、曲げ半径が比較的大きい場合には、ポンチおよびダイスと材料との接点は、ポンチ先端より比較的離れた所(この例では 12~15mm)にあり、ポンチの先端付近での板厚の変化はほぼ一定で、曲げの中心部に近い範囲では、曲げ変形のみが行なわれていることがわかる。これに対して曲げ半径が比較的小さい場合にはポンチ先端部での歪が最大で、ポンチ先端から離れるにつれて歪は急激に減少する。このことはポンチ、ダイスの材料との接点がほぼポンチ先端であり、ここでは一様変形を超えた局部変形が行なわれていることを示している。

今、簡単のために、降伏応力として 0.5% under load を採用すると、降伏応力 $\sigma_{0.05}$ および引張強さ $\sigma_{0.2}$ はそれぞれ (1) および (2) 式で示されるので、降伏比と加工硬化指数 n との間の関係は、(3) 式で示される。これを図 3 に示す。

$$\sigma_{0.05} = F(0.005)^n / e^{0.005} \quad (1)$$

$$\sigma_{0.2} = F(n/e)^n \quad (2)$$

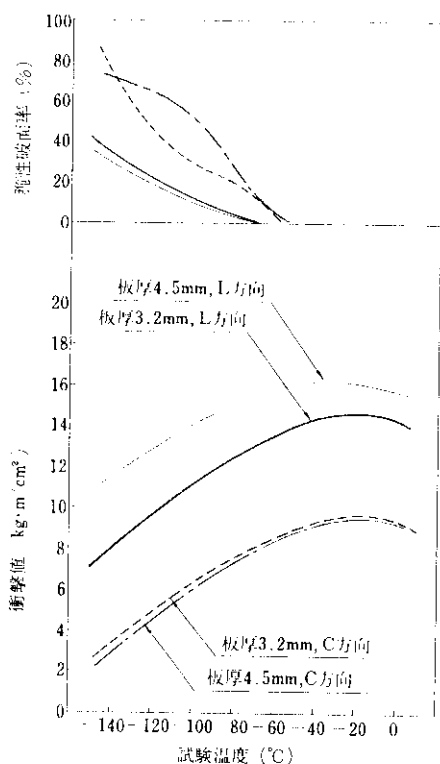


図 1 HTP 80 の 2mmV ノッチシャルピー衝撃試験結果

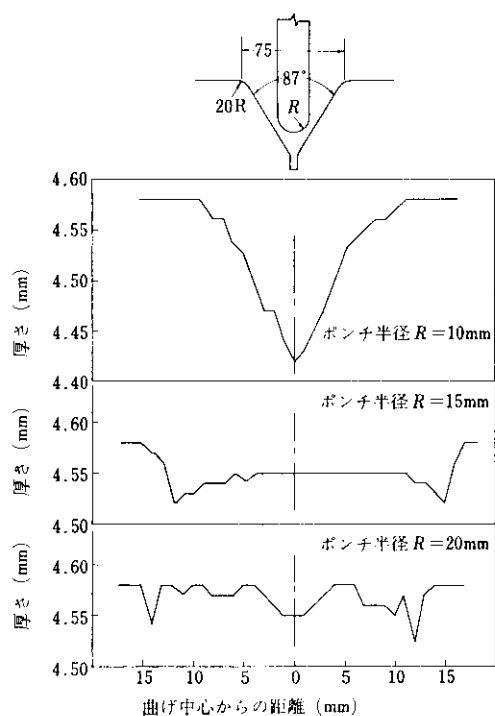


図 2 Vダイスを用いた曲げ加工による板厚の変化
(HTP 80, 板厚 4.58mm)

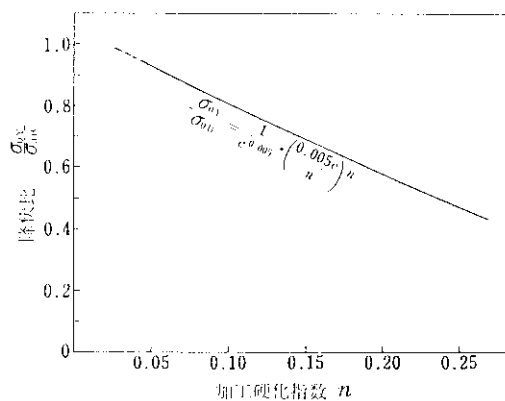


図 3 加工硬化指数と降伏比との関係

$$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.2}} = \frac{1}{e^{0.005}} \left(\frac{0.005e}{n} \right)^n \quad (3)$$

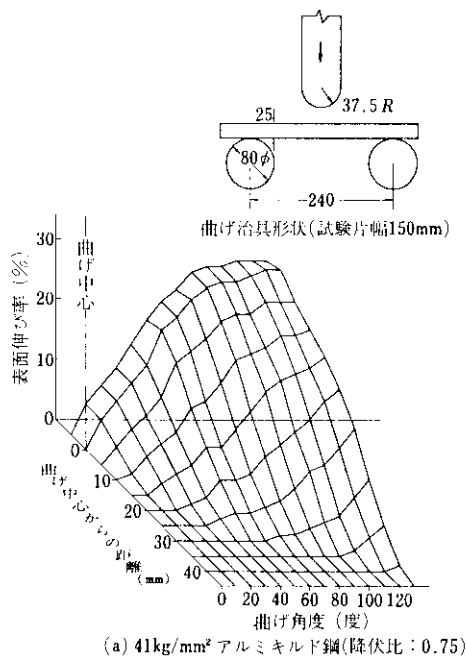
ただし

$$\sigma_t = F \cdot \varepsilon_t^n$$

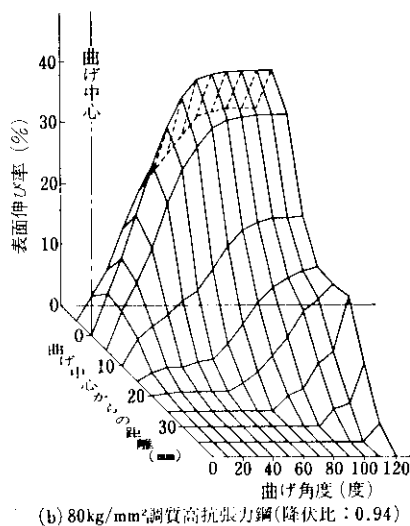
σ_t : 実応力

ε_t : 対数歪

F, n : 定数



(a) 41kg/mm² アルミキルド鋼(降伏比:0.75)



(b) 80kg/mm² 調質高抗張力鋼(降伏比:0.94)

図 4 降伏比の異なった材料による表面伸び分布図

この図から、降伏比の大きい材料は加工硬化指数が小さいことがわかる。

加工硬化指数が小さいと、曲げ加工などを行なった場合に歪の伝播が行なわれにくくなり、局部変形が起こりやすくなる。図 4 に一例として、同

一工具による、降伏比の異なった材料の曲げ角度と曲げ外周部の歪分布との関係を示すが、降伏比の高い材料の方が局部変形の度合いが大きいことがわかる。

一般に、鋼では引張強さが高くなるにつれて、降伏比も高くなるといわれており、高抗張力鋼板の曲げ加工性を改善するには、局部変形能を増加させる必要がある。

HTP 80 では前述のように、延性破壊に重要な役割を果たす微小クラックの発生源の一つとなるカーバイトや非金属介在物の絶対量を減少させるとともに、それらをできるだけ球状化させている。このために本鋼材は表4の破断部の板厚減少率に示されるように局部変形能が一般材に比べて優れており、降伏比が高いにもかかわらず、優れた曲げ加工性を有している。

表 5 曲げ試験結果 (C 方向)

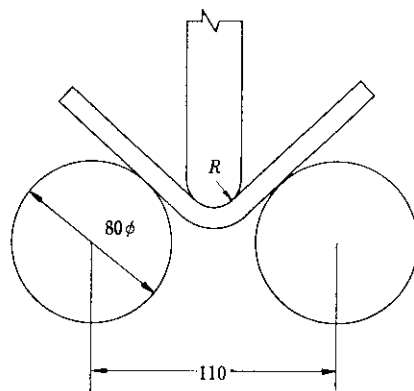
板厚 (mm)	試験幅40mm		試験片幅120mm(広幅曲げ試験)					
	曲げ角度180°		曲げ角度 90°					
	R=1.5t	R=1.0t	R=15mm	R=10mm	R=8mm	R=6mm	R=4.5mm	
3.2	○	○	○	○	○	○	○	
4.5	○	○	○	○	○	○	○	
6.0	○	○	○	○	○	○	○	●

○欠陥なし、●ヘアークラック発生

表5に HTP 80 の曲げ試験結果を示す。曲げは、ローラーダイスによる押曲げ法で行ない、JIS, Z 2204 による幅 40mm の試験片と、幅 120mm の広幅試験片による試験結果を同時に示している。曲げ試験結果は良好で、厚さ 3.2mm, 4.5mm および 6.0mm の鋼板とも $R=6\text{mm}$ の曲げに十分耐えることがわかる。一般に鋼板の曲げ性は試験片の幅が大きくなるほど変形の際の拘束が大きくなり、苛酷になると言われている。幅 120mm の広幅試験片の表面伸びの実測値を図6に示すが、実際のVダイスによる図7の試験結果と良く一致しており、幅 120mm の広幅試験片による曲げは、実際の曲げ加工時の加工度を良く表わしていると言える。

鋼板を実際に工場で使用する場合には、特に板が薄く長いと鋼板がたわみ易くスリキズやカキズなどがつきやすい。曲げ加工の際にこれらの表

面欠陥がノッチとなり、そこから破断することが多い。特に圧延方向に直角に曲げる場合には、



試験片幅：120mm

図 5 広幅曲げ試験治具形状

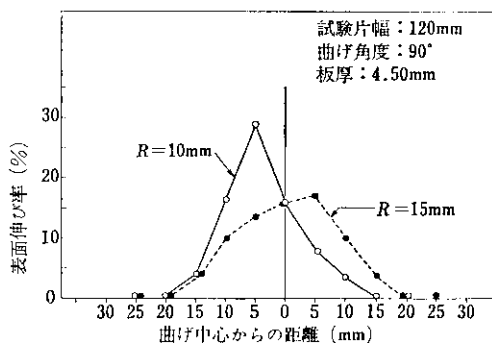


図 6 広幅曲げ試験による表面伸び率の分布 (HTP 80)

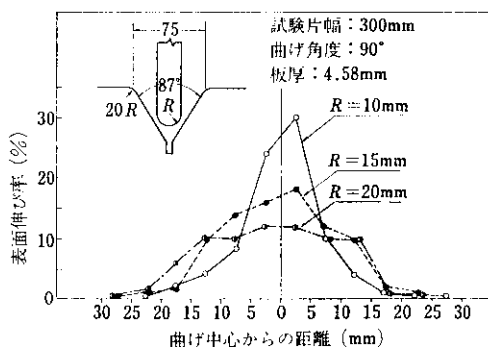


図 7 Vダイスによる曲げ加工時の表面伸び率の分布 (HTP 80)

般にこの現象が顕著である。鋼板を取り扱う場合には、これらのキズをつけないように十分に注意することが必要であるが、これらのキズがあっても、このキズからワレが発生せず成形されれば、実用上さしつかえない場合が多い。このため材料としては、これらのキズがついてもワレが発生せず、かつ大きくならないような材料が要求される。HTP 80 について、この特性を調べるために、前述の広幅試験片の中央に図8に示すように、ケガキ針にてスクラッチを入れ、このスクラッチが開く方向に曲げ試験を行なった。結果を表6に示す。曲げはローラーダイスによる押曲げ法で行なった。

試験結果は良好で、HTP 80 はカキキズなどがあっても $R=6\text{mm}$ のきびしい曲げに耐えることがわかる。

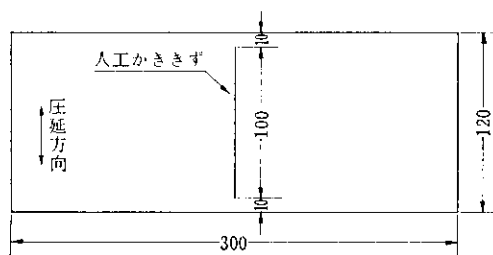


図8 人工かききずをつけた広幅曲げ試験片の形状

表6 人工かききずをつけた試験片の広幅曲げ試験結果 (C方向)

(繰返し数 $n=5$)

板厚 (mm)	人工かききず の寸法		広幅曲げ試験結果 試験片幅、120mm		
	ケガキ 回数	深さ (μ)	曲げ角度 180°		
			曲げ角度 90° $R=6.0\text{mm}$	$R=6.0\text{mm}$	$R=4.5\text{mm}$
3.2	1	20	○	○	○
	2	30	○	○	○
	3	40	○	○	●
4.5	1	20	○	○	○
	2	30	○	○	○
	3	40	○	○	●
6.0	1	20	○	○	○
	2	30	○	○	●
	3	40	○	●	●

○ 欠陥なし ● ヘアー・クラック発生

3. 溶 接 性

HTP 80 を実際に使用する際には溶接を行なうことが多いので、HTP 80 の溶接性を調べるために、厚さ 4.5mm の鋼板で被覆アーク溶接と CO_2 ガスアーク溶接により、溶接最高硬さ試験・溶接ビード曲げ試験・隅肉溶接拘束われ試験・隅肉溶接曲げ試験を行なった。また、実際の溶接における溶接部の特性を調べるために、被覆アーク溶接および CO_2 ガスアーク溶接にて溶接継手を製作して試験した。

3-1 溶接最高硬さ試験

溶接熱影響部の硬化性を調べるために、溶接最高硬さ試験を行なった。溶接条件を表7に、試験結果を表8に示す。溶接最高硬さは、被覆アーク溶接の溶接入熱量 10,000J/cm で 306Hv、 CO_2 ガスアーク溶接の溶接入熱量 5,500J/cm で 340Hv であり、入熱量が少ない場合でも硬化度は少なく、硬化性は低いことがわかる。ただし、同一溶接条件でのアークストライク直下の硬さは、被覆アーク溶接で 429Hv、 CO_2 ガスアーク溶接で 416Hv と高くなるので、極端な小入熱量で溶接する場合には、アークストライクをつけないように十分注意する必要がある。

表7 溶接最高かたさ試験片の溶接条件

溶 接 方 法	被覆アーク溶接	CO_2 ガス・アーク溶接
溶 接 材 料(直径)	KS 116 (3.2mm ϕ)	YM 70 (1.6mm ϕ)
溶 接 電 流 (A)	100	230
溶 接 電 圧 (V)	25	24
溶 接 速 度 (mm/min)	150	600
溶 接 入 熱 量 (J/cm)	10,000	5,500
溶接ビード長さ (mm)	125	125
試 験 片 寸 法 (mm)	4.5×150×200	4.5×150×200
溶 接 初 温	室 温	室 温

表8 溶接最高かたさ試験結果

測 定 個 所	被覆アーク溶接	CO_2 ガス・アーク溶接
溶 接 ビ ード 直 下	306	340
アークストライク直下	429	416

3.2 溶接ビード曲げ試験

溶接部の伸び延性を調べるために、縦ビード曲げ試験を行なった。ビードの溶接条件を表9に、試験片および治具形状を図9に示す。試験結果を表10に示すが、曲げ角度は 120° 以上（表面伸び率10.4%以上）であり、亀裂は発生せず、溶接部の伸び延性は良好であることが確認された。

表9 溶接ビード曲げ試験片の溶接条件

溶 接 方 法	被覆アーク溶接	CO ₂ ガス・アーク溶接
溶 接 材 料(直径)	KS 116 (3.2mmφ)	YM 70 (1.6mmφ)
溶 接 電 流 (A)	100	230
溶 接 電 圧 (V)	25	25
溶 接 速 度 (mm/min)	150	600
溶 接 入 熱 量 (J/cm)	10,000	5,700
溶 接 初 温	室 温	室 温

表10 溶接ビード曲げ試験結果
(縦ビード曲げ試験)

被覆アーク溶接		CO ₂ ガス・アーク溶接	
われ発生時の 曲り角(度)	表面伸び率 (%)	われ発生時の 曲り角(度)	表面伸び率 (%)
>120°	>10.4	>120°	>10.4
>120°	>10.4	>120°	>10.4

なお、表面伸び率と曲げ角度との関係は、溶接ビードのない平滑試験片について溶接ビードのある場合と同一条件で曲げ試験を行なって求めた(図10参照)。

3.3 隅肉溶接拘束われ試験

隅肉溶接を行なった時の溶接熱影響部のわれ感受性を調べるために、図11に示す形状の試験片により、隅肉溶接拘束われ試験を行なった。溶接条件を表11に、試験結果を表12および写真2に示

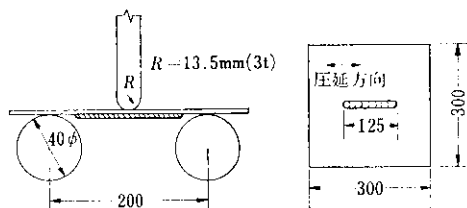


図9 溶接ビード曲げ試験治具および試験片形状

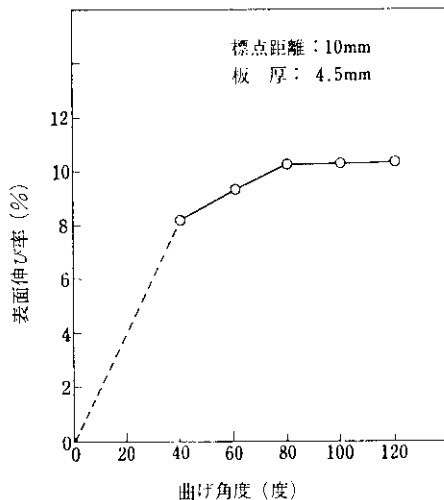


図10 溶接ビード曲げ試験治具による表面伸び率と曲げ角度との関係 (HTP 80)

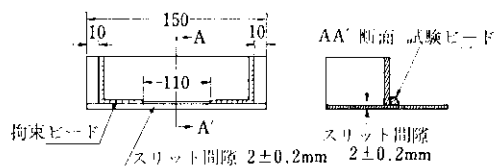


図11 隅肉溶接拘束割れ試験片形状

す。試験結果は良好で、溶接初温 -10°C の場合でも、被覆アーク溶接、CO₂ ガスアーク溶接とも

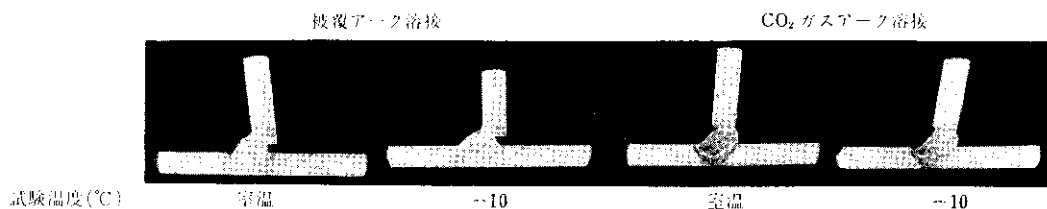


写真2 隅肉溶接拘束われ試験結果

表 11 隅肉溶接われ試験片の溶接条件

溶 接 方 法	被覆アーク溶接	CO ₂ ガス・アーク溶接
溶 接 材 料(直径)	KS 116 (3.2mmφ)	YM 70 (1.6mmφ)
溶 接 電 流 (A)	100	220
溶 接 電 圧 (V)	25	25
溶 接 速 度 (mm/min)	150	320
溶 接 入 熱 量 (J/cm)	10,000	10,300
溶 接 初 温	室温および -10°C	室温および -10°C

表 12 隅肉溶接われ試験結果

溶接方法	被覆アーク溶接	CO ₂ ガス・アーク溶接
溶接初温		
室 温	われ発生せず われ発生せず	われ発生せず われ発生せず
-10°C	われ発生せず われ発生せず	われ発生せず われ発生せず

にわれは発生しておらず、溶接われは、非常に起こりにくいことがわかる。

3.4 隅肉溶接曲げ試験

隅肉溶接部の曲げ延性を調べるために、隅肉溶接を行なった試験片の曲げ試験を行なった。試験方法を図12に溶接条件を表13に試験結果を表14と写真3とに示すが、溶接トオ部よりわれは全く発

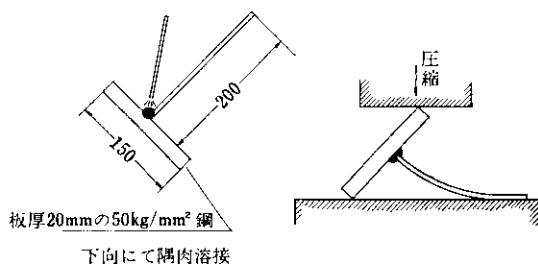


図 12 隅肉溶接曲げ試験片形状および曲げ試験方法

表 13 隅肉溶接曲げ試験片の溶接条件

溶 接 方 法	被覆アーク溶接	CO ₂ ガス・アーク溶接
溶 接 材 料(線径)	KS 116 (3.2mmφ)	YM 70 (1.6mmφ)
溶 接 電 流 (A)	100	230
溶 接 電 圧 (V)	25	25
溶 接 速 度 (mm/min)	150	600
溶 接 入 熱 量 (J/cm)	10,000	5,800
溶 接 初 温	室 温	室 温

表 14 隅肉溶接曲げ試験結果

被 覆 ア ー ク 溶 接	CO ₂ ガス・アーク溶接
曲り角度	曲り角度
90°	90°
90°	90°

生せず、すべて 90° まで曲がっており、溶接熱影響部も含めて、隅肉溶接部の曲げ延性は良好である。なお、この試験を行なった試験片の隅肉溶接熱影響部の最高硬さは、被覆アーク溶接で 357Hv、CO₂ ガスアーク溶接で 394Hv であった。

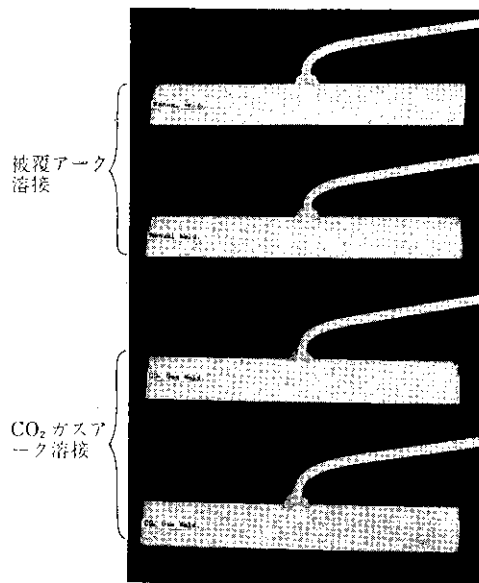


写真 3 隅肉溶接曲げ試験結果

3.5 突合わせ溶接継手性能試験

被覆アーク溶接継手および CO₂ ガスアーク溶接継手の溶接条件を表15に示す。溶接継手引張り

表 15 突合わせ溶接継手試験片の溶接条件

溶 接 方 法	被覆アーク溶接	CO ₂ ガス・アーク溶接
溶 接 材 料(線径)	KS 116 (3.2mmφ)	YM 70 (1.6mmφ)
溶 接 電 流 (A)	100	400
溶 接 電 圧 (V)	25	32
溶 接 速 度 (mm/min)	150	500
溶 接 入 熱 量 (J/cm)	10,000	15,800
溶 接 初 温	室 温	室 温
開 先 形 状	I 開 先	I 開 先

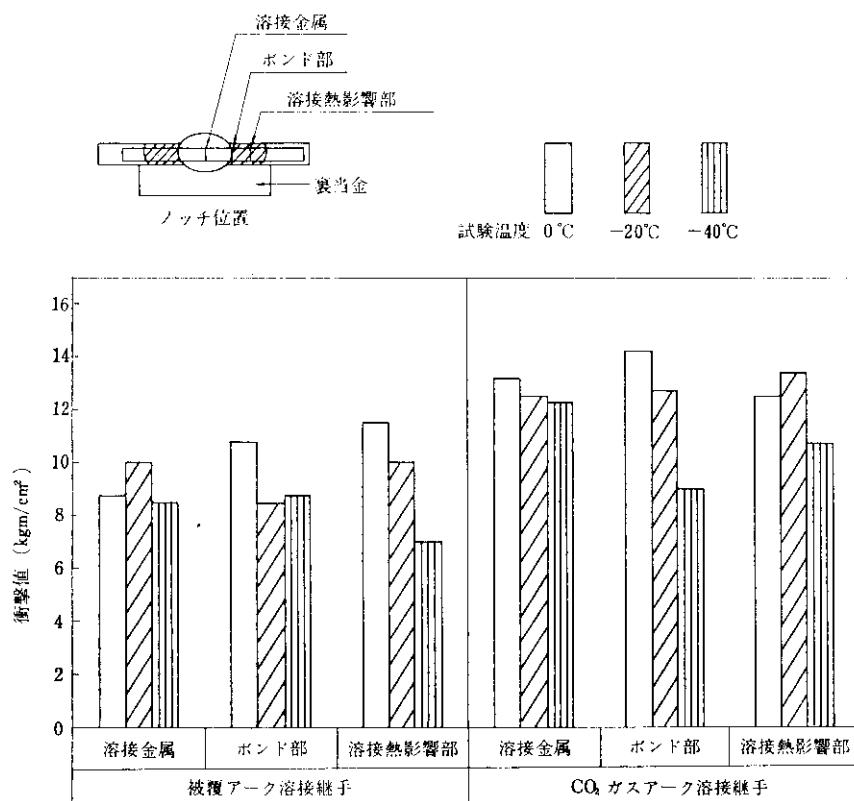


図 13 突合せ溶接継手の 2mmV シャルピー衝撃試験結果

および曲げ試験結果を表 16 に示す。図 13, 14 に溶接継手の衝撃試験結果および硬さ試験結果を示す。破断後の引張試験片を写真 4 に、継手曲げ試験結果を写真 5 に示す。

引張試験では、いずれも、溶接金属で破断しているが、被覆アーク溶接継手の引張強さは、母材の規格値を満足している。CO₂ ガスアーク溶接の

表 16 突合せ溶接継手引張りおよび曲げ試験結果

溶 接 方 法	引 張 試 験		曲 げ 試 験	
	引張強さ (kg/mm ²)	破断位置	表曲げ 120° R=3t	裏曲げ 120° R=3t
被覆アーク溶接	81	溶接金属	良	良
	83	溶接金属	良	良
CO ₂ ガス・アーク溶接	78	溶接金属	良	良
	77	溶接金属	良	良

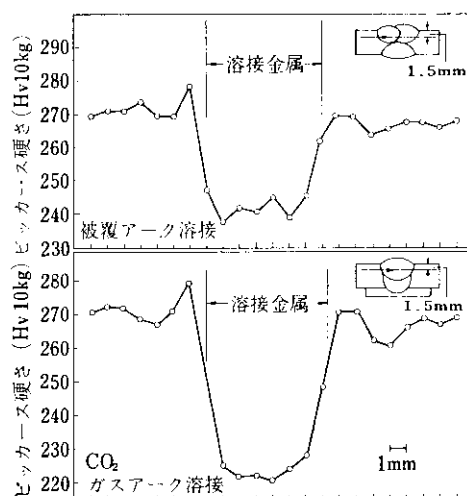


図 14 継手硬さ試験結果

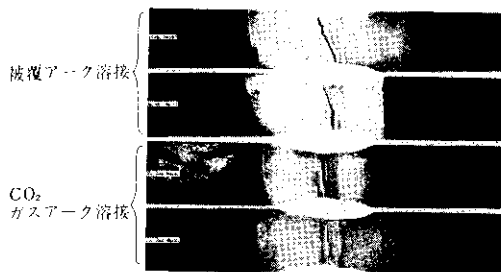


写真4 破断後の溶接継手引張試験片

引張強さが、母材規格値に対して2~3kg/mm²低い値を示しているのは、使用した溶接材料、YM 70が、本来60または70kg/mm²高抗張力鋼用の溶接材料であるためである。曲げ試験結果は良好で、表曲げ、裏曲げともに結果は良好で欠陥は発生していない。衝撃試験値は良好で、0°Cにおける衝撃値は、被覆アーク溶接継手の場合、溶接金属 8.8kgm/cm²、ボンド部 11.0kgm/cm²、溶接熱影響部 11.3kgm/cm²、CO₂ガスアーク溶接継手の場合、溶接金属、13.2kgm/cm²、ボンド部 14.0kgm/cm²、溶接熱影響部12.4kgm/cm²と高い。溶接継手の断面硬さ分布では、溶接金属の硬

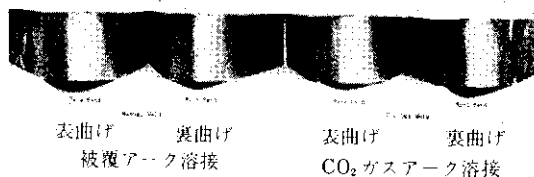


写真5 溶接継手曲げ試験結果

さが、母材に比べて低い値を示しており、特にCO₂ガスアーク溶接においてこの傾向が強い。

4. 総 括

非調質 80kg/mm² 高抗張力鋼板 HTP 80 は、曲げ加工性、溶接性ともにすぐれた鋼板であり、特に圧延方向に直角な曲げ加工性は、従来の引張強さの低い鋼板に比べても遜色がないため、産業機械はもちろんのこと、高抗張力と厳しい曲げ加工とが要求される分野でも大いに利用されるものと考えられる。