

橋梁用高性能鋼板 次世代合理化設計を可能とする溶接性に優れた高強度厚板

High Performance Steel Plates for Bridge Construction

—High Strength Steel Plates with Excellent Weldability

Realizing Advanced Design for Rationalized Fabrication of Bridges—

西村 公宏 NISHIMURA Kimihiro JFE スチール スチール研究所 厚板・形鋼研究部 主任研究員(課長)

松井 和幸 MATSUI Kazuyuki JFE スチール 厚板セクター部 主任部員(副部長)

津村 直宜 TSUMURA Naoyoshi JFE エンジニアリング 鋼構造事業部 計画部開発技術室長

要旨

橋梁用高性能鋼材 (BHS500 (BHS: bridge high performance steel)) の要求性能に対応した YP500 MPa 級の高強度厚板を開発した。極低炭素ベイナイト組織制御技術と Super-OLAC による制御冷却技術を適用し、低 P_{CM} (溶接割れ感受性組成) で高降伏点鋼の非調質製造を実現した。開発鋼は冷間加工後の衝撃特性および線状加熱後の機械的特性においても要求性能を満足した。溶接熱影響部 (HAZ) の最高硬さはアークストライクのような小入熱条件でもビッカース硬さで 280 ポイント以下であり耐溶接硬化性に優れるという特徴を有し、また、y 形溶接割れ試験においても割れ発生はなく予熱不要の要求に十分応えられる鋼材である。さらに、エレクトロガスアーク溶接 (EGW) およびサブマージアーク溶接 (SAW) 継手の評価結果から開発鋼は優れた溶接性を有することも確認した。

Abstract:

A new, YP500 MPa grade high strength steel plate was developed to meet the requirements of BHS500 (bridge high performance steel). Microstructure control of extremely-low carbon bainite associated with thermo-mechanical controlled rolling and advanced cooling by Super-OLAC were applied to attain manufacturing a high yield strength steel plate of low P_{CM} (weld cracking coefficient) by on-line process. The produced steel plates satisfied the required mechanical properties, and showed sufficient toughness after cold working and no deterioration of mechanical properties after lineheating process. The maximum heat affected zone (HAZ) hardness value was below 280 in Vickers number under arc-strike conditions, and the results of y-groove weld cracking test showed that preheating is not needed for welding. Evaluation of butt welded joints produced by electro gas welding (EGW) and submerged arc welding (SAW) revealed that the developed steel plate also had good weldability.

1. はじめに

橋梁分野では年間数十万トンの鋼材が用いられているが、近年、省エネルギー、初期建設コストの低減の観点から、鋼製橋梁製作においても設計および施工の両面で一層の合理化が強く求められるようになった。設計面で合理化した鋼橋が実用化される一方、溶接施工性に優れた高強度鋼の適用も増加傾向にある。橋梁用としての高強度鋼としては、日本工業規格 (JIS) に規定されている SM570 (YP \geq 450 MPa (YP: 降伏点)) が最高強度材として一般的に用いられている。しかし、米国ではすでに 1997 年に high performance steel として HPS70W (YP \geq 485 MPa) が実

用化されており、鋼橋製作のコスト低減に寄与したと報告されている¹⁾。

このような背景から、日本でも橋梁用途としての適正な性能を考慮した橋梁用高性能鋼材 (BHS: bridge high performance steel) として BHS500 (YP \geq 500 MPa)、BHS700 (YP \geq 700 MPa) が提案されている²⁾。鋼橋においても鋼の高強度化は鋼材重量の削減に寄与するが、座屈や疲労の問題から降伏点の上昇と鋼材重量の減少は単純な比例関係になく、一般的な橋梁では 500 MPa 程度が合理的な強度グレードの上限と考えられている。一方、トラス構造のように鋼材の引張強度を最大限に利用できる橋梁形式では、さらに高強度である YP700 MPa 級鋼も有効である。

BHS700 に対応する鋼としてはすでに予熱低減型 HT780

鋼が開発されている^{3,4)}。一方、BHS500 は従来の SM570 に対して高強度化しながら、かつ TMCP (thermo-mechanical control process) 技術を駆使し、溶接施工時の予熱を不要とする先進的な高性能鋼材である。さらに、製作用性についても従来鋼と同等以上の性能も具備するものである。

この要求に対し、極低炭素ベイナイト組織制御技術と Super-OLAC による制御冷却技術の活用により、低 P_{CM} (溶接割れ感受性組成) で高降伏点鋼を非調質で製造することを可能にした。本報告では母材材質制御の冶金的特徴と鋼板の機械的特性、加工性、溶接性、継手性能について述べる。

2. 目標性能

BHS500 の目標特性を JIS SM570 の規格と比較して Table 1 に示す。JIS SM570 に対して、降伏点、シャルピー吸収エネルギーが高い値となっている。また、溶接時の予熱作業の軽減を目的として $P_{CM} \leq 0.20$ が規定されている。一般に、鋼材の強度上昇に応じて P_{CM} 値は大きくなる。すなわち、新鋼材は、従来鋼よりも高強度化しながら P_{CM} を低く抑えて溶接施工性を向上させるという相反する要求に対応した極めて高性能な鋼材と言える。

溶接施工については、大入熱溶接として 10 kJ/mm までが許容できる鋼材となる。これは現場溶接でのウエブ接合へのエレクトロガスアーク溶接 (EGW) の適用を想定したものである。

さらに、橋梁製作工程を考慮し、板厚の 7 倍の半径での曲げ加工が可能な優れた冷間加工性が要求される。なおガス炎加熱法による溶接後の矯正作業が従来鋼と同等の条件で可能であることも必要な性能である。

3. 極低炭素ベイナイト型

YP500 MPa 級鋼板の特徴

鋼の炭素含有量をフェライトへの固溶限である 0.02 mass% 以下とし、かつ化学成分の調整によりベイ

ナイト単相組織とした場合、鋼は広い冷却速度範囲でミクロ組織がほとんど変化しない特徴的な変態挙動を示す。この特徴を利用し、すでに、厚板圧延後空冷ままで JIS SM570TMC 規格を満足する鋼板が実用化されている⁵⁻⁷⁾。極低炭素ベイナイト鋼はミクロ組織の冷却速度依存性が少ないため板厚方向の強度ばらつきが小さく、また優れた溶接施工性を有する。

極低炭素ベイナイト鋼の特徴を活かしながら、非調質 YP500 MPa 級鋼へ展開するため、高降伏点化を検討した。極低炭素ベイナイト組織は形態において擬ポリゴナル・フェライト、グラニューラ・ベイニティック・フェライト・ベイニティック・フェライトに分類され⁸⁾、前者ほど高温で変態しやや低強度となる。前述した SM570TMC 規格 (YP \geq 450 MPa) に対応した極低炭素ベイナイト鋼はグラニューラ・ベイニティック・フェライト主体の組織を利用しているが、一部に擬ポリゴナル・フェライトを含んだ混合組織となっている。擬ポリゴナル・フェライトは高温で変態する軟質の相であり、降伏点を低下させる要因となる。YP500 MPa 級鋼に対応するためには、このような軟質相の生成を避け、組織制御としてグラニューラ・ベイニティック・フェライトあるいはベイニティック・フェライトとの混合組織とする必要がある。Photo 1 に化学組成は同じであるが、降伏点の異なる鋼のミクロ組織の例を示す。どちらも極低炭素ベイナイト組織となっているが YP500 MPa 級に対応する Photo 1(b) の組織では旧オーステナイト粒界が明瞭に観察され、粒界からの擬ポリゴナル・フェライト生成が抑制されている。

上記の組織制御を達成するために、圧延後に加速冷却を

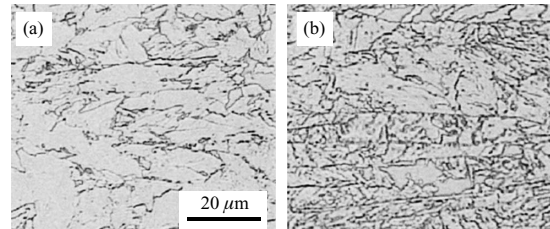


Photo 1 Examples of microstructure of extremely-low carbon bainitic steel (a) YS = 485 MPa (b) YS = 535 MPa

Table 1 Property targets of steel plates and their welded joints

Grade	Steel plate					Welded joint			
	Tensile test			Charpy impact value, $\sqrt{E_{-5}}$ (J)	P_{CM} (%)	Heat input (kJ/mm)	$\sqrt{E_{-5}}$ (J)		
	Yield strength and tensile strength		Elongation						
Thickness (mm)	YP (MPa)	TS (MPa)	Thickness (mm)	El (%)					
BHS500	$6 \leq t \leq 100$	≥ 500	≥ 570			≥ 100	≤ 0.20	≤ 10	≥ 47
JIS G 3160 SM570	$t \leq 16$	≥ 460		$t \leq 16$	≥ 19				
	$16 < t \leq 40$	≥ 450		$16 < t \leq 20$	≥ 26		$\leq 0.28 (t \leq 50)$		
	$40 < t \leq 75$	≥ 430	570-720	$20 < t \leq 100$	≥ 20	≥ 47	$\leq 0.30 (50 < t)$	$\leq 7^9)$	≥ 47
	$75 < t \leq 100$	≥ 420							

適用した。一般的な低炭素鋼では、マイクロ組織の冷却速度依存性により、表面から板厚中心部まで最適組織とすることができず、厚肉鋼板の非調質製造は困難である。しかし極低炭素ベイナイト組織と Super-OLAC による均一冷却技術を活用することによりこの問題を克服し、YP500 MPa を超える厚肉鋼板を非調質で製造可能とした。

4. 開発鋼の特性

4.1 母材の機械的性質

Table 2 に開発鋼の化学組成を示す。炭素含有量を 0.02 mass% とし、ベイナイト単相組織が得られるように板厚に応じて合金成分を添加している。 P_{CM} は板厚 25 mm, 60 mm においてそれぞれ 0.13 mass%, 0.16 mass% と極めて低い。

Photo 2 に各鋼板の板厚 1/4 部, 1/2 部のマイクロ組織を示す。いずれもグラニューラ・ベイニティック・フェライト

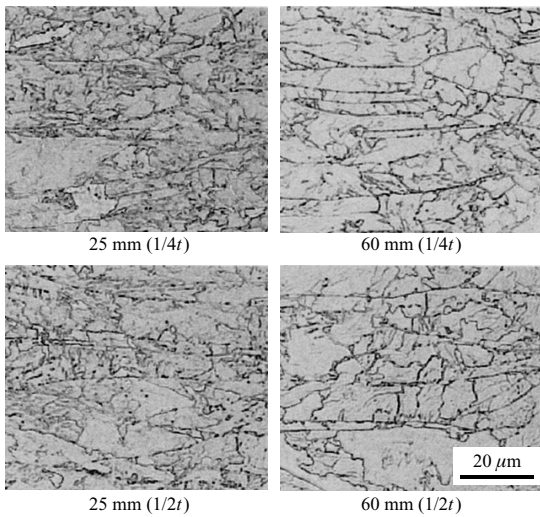


Photo 2 Microstructure of YS500 MPa grade extremely-low carbon bainitic steel

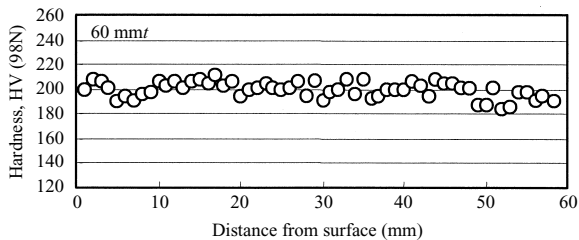


Fig. 1 Hardness distribution over the thickness of the steel plate

Table 3 Mechanical properties of steel plates

Thickness (mm)	Position	Direction	YP (MPa)	TS (MPa)	El (%)	$\sqrt{E_{-5}}$ (J)
25	1/4t	L	587	684	27	361
		C	611	709	26	276
	1/2t	L	582	681	27	355
		C	611	703	25	278
60	1/4t	L	513	595	29	311
		C	529	613	27	256
	1/2t	L	508	589	28	340
		C	527	610	28	252

あるいはベイニティックフェライトとの混合組織に制御され、板厚および板厚位置に依存したマイクロ組織の差はほとんど認められない。Fig. 1 に板厚 60 mm の鋼板の断面硬さ分布を示す。板厚方向に 200 ポイント前後の平坦な硬さ分布となっており、表面での硬さの上昇もなく、板厚方向に極めて均一な材質であることが分かる。

Table 3 に鋼板の引張試験結果およびシャルピー衝撃試験結果を示す。いずれの鋼板も降伏点は目標値である 500 MPa を満足している。また -5 での吸収エネルギーは 250 J 以上であり、目標値の 100 J を十分満足しており優れた靱性を有していることを確認した。

4.2 加工性試験

冷間加工を行うと鋼材の靱性は劣化するおそれがある。曲げ加工後もシャルピー吸収エネルギーが 47 J を確保できることを確認するためにひずみ時効試験を行った。すなわち、5%、10%の塑性ひずみを付与した後、250 で 1 h 時効処理した試験片のシャルピー衝撃試験を行った。ここで、10%の予歪は板厚の 5 倍の曲げ半径の加工に相当し前述した 7 倍の曲げ半径の加工に対してより厳しい評価となる。試験結果を Table 4 に示す。シャルピー吸収エネルギーは試験温度 -5 で 47 J を超えており、曲げ加工特性は十分に有している。

鋼橋の製作においては、溶接施工後の寸法精度を確保す

Table 4 Results of strain aging test

Thickness (mm)	Position	Direction	$\sqrt{E_{-5}}$ (J)	
			5% strain	10% strain
25	1/4t	L	285	130
60	1/4t	L	173	142

Table 2 Chemical compositions of steel plates

Thickness (mm)	Chemical compositions (mass%)						C_{eq}	P_{CM}
	C	Si	Mn	P	S	Others		
25	0.02	0.30	1.57	0.008	0.003	Cu, Ni, Cr	0.31	0.13
60	0.02	0.25	1.54	0.014	0.003	Nb, Mo, B	0.39	0.16

$$P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + 5B$$

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

Table 5 Mechanical properties of the steel plates after line-heating treatment

Thickness (mm)	Maximum heating temperature (°C)	Cooling conditions	YP (MPa)	TS (MPa)	El (%)	$\sqrt{E_{-5}}$ (J)		Maximum hardness, HV
						Side notch	Surface notch	
25	900	Immediate WQ WQ from 600°C	599	697	33	300	396	277
			607	675	34	358	416	246
	1 000	Immediate WQ WQ from 600°C	566	676	38	357	379	275
			575	667	34	396	394	238
60	900	Immediate WQ WQ from 600°C	521	610	52	301	247	267
			518	602	52	254	392	239
	1 000	Immediate WQ WQ from 600°C	516	605	48	315	199	265
			509	589	51	264	372	223

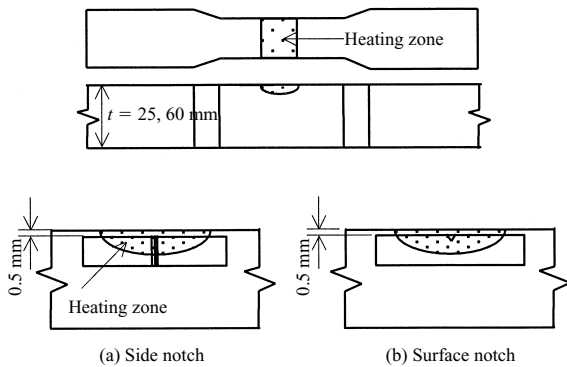


Fig. 2 Preparation of tensile test specimen and location of V-notch Charpy specimen

るために、ガス炎加熱法による矯正作業は避けられない。熱加工制御鋼の線状加熱条件については、炭素当量 0.38 mass% 超では鋼板表面温度 900 以下で空冷または空冷後 500 以下で水冷として、炭素当量 0.38 mass% 以下では鋼板表面温度 900 以下、加熱直後水冷または空冷が道路橋示方書に規定されている⁹⁾。このような線状加熱後に鋼板の材質が劣化しないことも確認する必要がある。ここでは、より厳しい条件である最高温度 1 000 までの線状加熱試験を行い Fig. 2 に示す位置での全厚の引張試験および表層部のシャルピー衝撃試験を行った。また、加熱部の硬さ試験も行った。

Table 5 にその結果を示す。母材強度はすべての条件において、降伏点として 500 MPa 以上を満足している。靱性についてもまったく劣化は見られなかった。加熱部の硬化も最も高い場合でもピッカース硬さで 277 ポイントであった。以上のことから、本鋼は鋼板表面温度 1 000 という線状加熱後も十分な母材特性が維持され、ガス炎加熱法による矯正作業も問題なく行えることが確認された。

4.3 溶接性試験

JIS Z 3101 による最高硬さ試験を行った。試験片は 20 mm の減厚試験片とし、ビード長を 125 mm から 10 mm と変化させ、さらにアークストライク条件での試験も行った。比較のため従来の調質鋼 (SM570Q $P_{CM} = 0.22$ mass%) についても試験した。Fig. 3 にビード長と

溶接熱影響部 (HAZ) の最高硬さの関係を示す。本鋼はショートビード化にともなう冷却速度の増加による硬化は極めて小さく、アークストライク条件でも、ピッカース硬さで 280 ポイント以下であった。これは、一般的に溶接割れ防止のための HAZ の最高硬さ上限とされる 350 ポイントよりも十分低い値である。現在、道路橋示方書では冷間割れ防止の観点から隅肉溶接の脚長は $\sqrt{2t}$ (t : 板厚) 以上と規定されているが、これを緩和できる可能性がある。

板厚 60 mm 材を用いて JIS Z 3158 による y 形溶接割れ試験を行った結果を Table 6 に示す。試験環境として 20 ℃、湿度 60% の条件で実施し、予熱なしでも割れ発生は認められなかった。したがって、一般的な溶接施工においては十分に予熱不要の要望に応えられる鋼材であるといえる。

4.4 溶接継手性能

板厚 25 mm および 60 mm の鋼板を用い、単層 EGW 多層 SAW 継手を作製し、溶接継手の機械的性質を調査した。Table 7 に溶接継手作製条件を示す。板厚 25 mm 材では、許容入熱として提案されている 10 kJ/mm を超える 12 kJ/mm の大入熱溶接を適用した。溶接材料は、それぞれ、従来の JIS Z 3319 YFEG-32C 該当品 (EGW)、JIS Z 3183 S624-H3 該当品 (SAW) を使用した。

Fig. 4 に各継手の表面下 2 mm の溶接部の硬さ分布を示す。多層 SAW 継手においては HAZ の軟化はわずかである。単層 EGW 継手では HAZ の硬さの最小値がピッカース硬

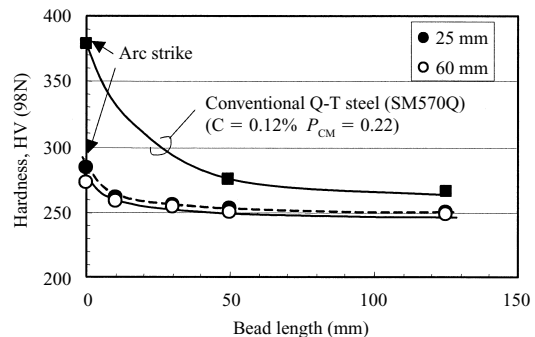


Fig. 3 Result of maximum hardness test

Table 6 Welding condition for y-groove weld cracking test and results

Thickness (mm)	Atmosphere		Preheat temperature (°C)	Welding conditions				Crack ratio		
	Temperature (°C)	Humidity (%)		Rod	Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/s)	Surface (%)	Root (%)	Section (%)
60	20	60	20	LB-62UL (4 mmφ)	170	25	2.5	0.0	0.0	0.0
								0.0	0.0	0.0

Table 7 Welding conditions

Welding method	Thickness (mm)	Welding wire	Welding flux	Shielding gas	Preheating temperature (°C)	Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/s)	Heat input (kJ/mm)	Groove shape
EGW	25	DWS-60G 1.6 mmφ	-	CO ₂ 100%	Room temperature	380	38	1.17	12.3	V
SAW	60	KW101B 4.8 mmφ	KB110	-	Room temperature	750-850	34-38	4.6-5.5	5.1-6.9	X

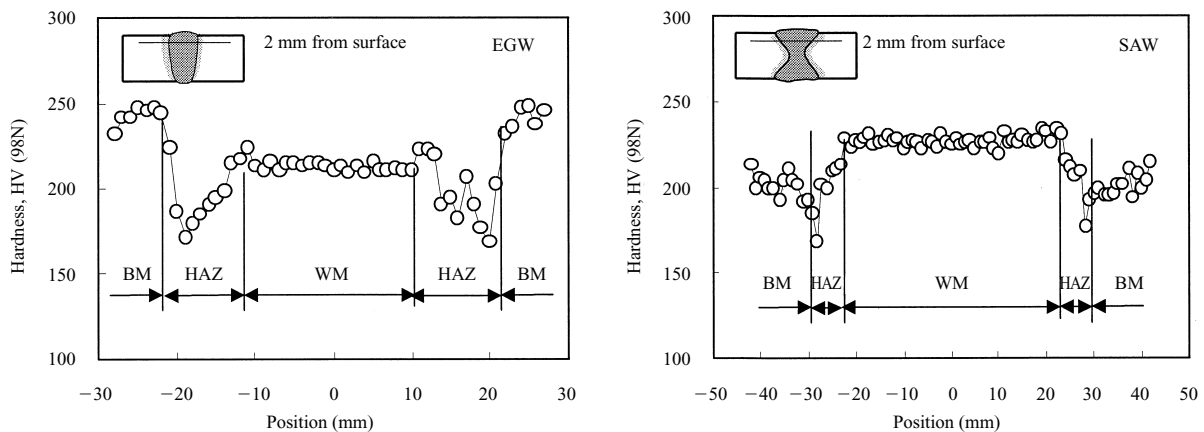


Fig. 4 Hardness distribution of the welded joints

Table 8 Mechanical properties of butt welded joints

Welding method	Thickness (mm)	Tensile test		Bend test	Charpy impact value, \sqrt{E}_{-5} (J)				
		TS (MPa)	Position of failure	Side bend, $R = 2.0t$	Weld metal	Bond	HAZ 1 mm	HAZ 3 mm	HAZ 5 mm
EGW	25	619	HAZ	Good	109	86	187	213	331
SAW	60	620	BM	Good	154	178	250	282	333

さで 170 ポイントとやや軟化が見られたが Table 8 に示すように継手強度は 619 MPa が確保されている。また多層 SAW 継手の継手強度は母材と同等の値を示している。さらに、継手の側曲げ試験も良好な結果であった。継手シャルピー衝撃試験のノッチ位置は板厚 1/4 部の溶接金属、ポンド部、HAZ の溶融線から 1 mm, 3 mm, 5 mm とした。各継手のいずれのノッチ位置においても、衝撃値は規格を満足しており、良好な継手靱性を示している。

5. おわりに

橋梁用高性能鋼材 (BHS500) に対応した溶接施工性に優れた YP500 MPa 級の非調質厚板を開発した。本厚板の特徴と得られた結果を以下にまとめる。

1. 極低炭素ペイナイト鋼に制御冷却を適用することにより 50 mm 以上の厚肉材においての $Y_P \geq 500$ MPa を満足する高強度鋼板が製造可能である。
2. 溶接熱影響部 (HAZ) の最高硬さはアークストライクのような小入熱条件でもピッカース硬さで 280 ポイント以下であり耐溶接硬化性に優れる。また、y 形溶接割れ試験においても割れ発生はなく耐低温割れ性にも優れる。
3. ひずみ時効試験の結果、10%の予歪後も十分なシャルピー吸収エネルギーを有し、板厚の 7 倍の半径での曲げ加工性も問題ないことを確認した。
4. 線状加熱試験において、最高温度 1000 加熱の条件でも母材の材質はほとんど劣化せず、ガス炎加熱法による矯正作業の効率的な実施が可能である。

Table 9 List of JFE Steel's steel plates for bridge construction

用途・種別		JFE 規格	JIS 規格	
構造用鋼板	極軟鋼板	JFE-LY100 JFE-LY160 JFE-LY225		
	普通鋼板		JIS G 3101 SS400 JIS G 3101 SM400	
	高張力鋼板	予熱低減	SM490Y-EX	JIS G 3106 SM490Y
			SM520-H-EX	JIS G 3106 SM520
			SM570(-H)-EX	JIS G 3106 SM570
	高張力鋼板	大入熱	JFE-HITEN780EX	JIS G 3128 SHY685
SM490Y-EG			JIS G 3106 SM490Y	
高張力鋼板	高施工	SM570-EG	JIS G 3106 SM570	
耐候性鋼板	普通鋼板		JIS G 3114 SMA400W	
	高張力鋼板	予熱低減	SMA490W(-H)-EX	JIS G 3114 SMA490W
			SMA570W(-H)-EX	JIS G 3114 SMA570W
			SMA490W-EG	JIS G 3114 SMA490W
	高張力鋼板	大入熱	SMA570W-EG	JIS G 3114 SMA570W
高施工			SM570WTMC(-H)(-LB)	JIS G 3114 SMA570W
ニッケル系 高耐候性鋼		JFE-ACL400Type 1, 2 (SMA400W-MOD) JFE-ACL490Type 1, 2 (SMA490W-MOD) JFE-ACL570Type 1, 2 (SMA570W-MOD)		
LP 鋼板 (テーパプレート)		適用強度レベル 400, 490, 570 N/mm ²		

5) 単層EGW,多層SAW継手の特性は継手強度,継手シャルピーとも要求値を満足した。

このような優れた性能から,本鋼板の利用とその特性を最大限に活用した設計によって,よりいっそうの鋼橋製作の合理化が達成されるものと考えている。

最後に, JFE スチールで製造可能な代表的な橋梁用鋼板の規格を Table 9 にまとめて示す。

- 岡津光浩ほか. 非調質 570 MPa 級極低炭素ベイナイト鋼の機械的特性. 材料とプロセス. vol. 10, no. 6, 1997, p. 1430
- 岡津光浩ほか. 非調質 570 MPa 級極低炭素ベイナイト鋼のHAZ 靱性材料とプロセス. vol. 10, no. 6, 1997, p. 1431
- 日本鉄鋼協会ベイナイト調査研究部会編. 鋼のベイナイト写真集-1 日本鉄鋼協会, 1992, p. 4
- 〔社〕日本道路協会編. 道路橋示方書・同解説書I 共通編, II 鋼橋編 〔社〕日本道路協会, 2002, p. 425

参考文献

- High Performance Steel Designers' Guide. 2nd ed. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 2002-04.
- 三木千尋ほか. 橋梁用高性能鋼材 (BHS500, BHS700) の提案. 土木学会論文集. N738/I-60, 2003, p. 1-10
- 松井和幸ほか. 橋梁用高性能鋼板. NKK 技報. no. 165, 1999, p. 11-16
- 中川一郎ほか. 予熱低減型 HT780 調質高張力厚鋼板. 川崎製鉄技報 vol. 30, no. 3, 1998, p. 188-189.
- 岡津光浩ほか. 極低炭素ベイナイトを利用した非調質 570 MPa 級厚肉高張力鋼板とその溶接部特性. 川崎製鉄技報. vol. 30, no. 3 1998, p. 131-136.



西村 公宏



松井 和幸



津村 直宜