

BHS500 鋼の製作性評価試験と溶接継手特性（第1報）

－BHS500 鋼の規格と特性－

住友金属工業(株) 厚板技術部 正会員 ○安藤 隆一 *

新日本製鐵(株) 厚板営業部 正会員 田中睦人 **

JFEスチール(株) 厚板セクター部 松田 穰 ***

(株)神戸製鋼所 厚板商品技術部 正会員 岡野重雄 ****

1. はじめに

橋梁用高性能鋼として提案されている BHS500, BHS500W, BHS700W 鋼¹⁾について、鋼材の規格を(社)日本鉄鋼連盟製品規定²⁾として制定し、それに基づき製造した BHS500 鋼について少数 I 桁モデルの製作性試験及び溶接継手の性能評価試験を行った。

2. BHS500 鋼材規格の特徴

BHS 鋼は、厚さ 100mm まで従来の SM570 鋼以上の一定の降伏強度を有しながら、板厚方向特性および低温靱性に優れ、かつ溶接性を従来の 490N 級鋼と同等以上とした新しい鋼材である。これらの品質を実現するために、炭素、窒素、硫黄の上限を JIS G 3106 の規定よりも低く規定し、かつ製造方法は熱加工制御(TMC)を適用する。また、板厚の 5 倍以上の冷間曲げ加工や、寒冷地使用の要求に対応するため特別品質規定を設けている²⁾。

3. BHS500 鋼材の規定概要²⁾

表 1 化学成分と Pcm (%)

(1) 化学成分と溶接割れ感受性組成 (Pcm) : 化学成分、溶接割れ感受性組成の規定を表 1 に示す。硫黄の低減により板厚方向特性は Z35S 相当であり、予熱なしの溶接が可能な Pcm 値である。

(2) 機械的性質 : 表 2 に引張試験と厚さ 12mm 以上の鋼材に対するシャルピー吸収エネルギーの規定を示す。シャルピー吸収エネルギーは板厚の 7 倍までの冷間曲げ加工を想定して規定した¹⁾。

名称	厚さ	C	Si	Mn	P	S	N	Pcm
BHS500	6mm 以上	0.11	0.55	2.00	0.020	0.006	0.006	0.20
	100mm 以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下
JIS G 3106	100mm	0.20	0.55	1.60	0.035	0.035	—	—
SM490YB	以下	以下	以下	以下	以下	以下	—	—
JIS G 3106	100mm	0.18	0.55	1.60	0.035	0.035	—	0.30
SM570	以下	以下	以下	以下	以下	以下	—	以下

表 2 引張試験とシャルピー吸収エネルギー

種類の記号	降伏点 又は耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び		シャルピー吸収エネルギー		
			試験片	%	試験温度 (℃)	3 個の平均値 (J)	試験片
BHS500	500 以上	570 以上 720 以下	厚さ 16mm 以下 5 号 厚さ 16mm 超 5 号 厚さ 20mm 超 4 号	19 以上 26 以上 20 以上	—5	100 以上	V ノッチ 圧延直角 方向
JIS G 3106 SM490YB*1	355 以上	490 以上 610 以下	1 A 号	19 以上	0	27 以上	V ノッチ 圧延方向
JIS G 3106 SM570*1	450 以上	570 以上 720 以下	厚さ 16mm 超 5 号 厚さ 20mm 超 4 号	26 以上 20 以上	—5	47 以上	V ノッチ 圧延方向

*1 板厚 16mm 越え 40mm 以下の例

キーワード: BHS500, 橋梁, 溶接性, 予熱温度, 高性能鋼

* 〒104-6111 東京都中央区晴海 1-8-11 Tel 03-4416-6413 Fax 03-4416-6791

** 〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3 Tel 03-3275-7814 Fax 03-3275-5638

*** 〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-3 Tel 03-3597-3368 Fax 03-3597-3533

**** 〒141-8688 東京都品川区北品川 5-9-12 Tel 03-5739-6261 Fax 03-5739-6934

4. 溶接性

y 形溶接割れ試験 (JIS Z 3158) の結果を図 1 および図 2 に示す。室温においても割れの発生は認められず、予熱なしの溶接が可能であることが確認された。

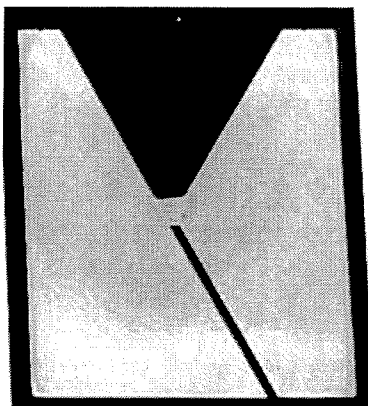


図 1. Y 形溶接割れ試験

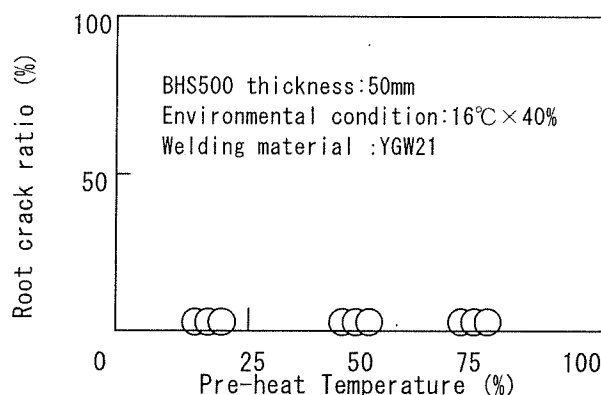


図 2. 予熱温度と断面割れ率

5. 溶接材料と溶接部の性能

BHS500 鋼材の溶接には引張強さ 570N 級の鋼に使用されている低水素系の材料が使用できる。適用可能な溶接材料の例を表 3 に示す。これらの溶接材料を使用した場合、一般的には表 4 に示す溶接継手の性能が得られる。

表 3 BHS500 鋼材用溶接材料

溶接方法			
SMAW	GMAW		SAW
	CO ₂ ガス	Ar+20%CO ₂ ガス	
D5816	YGW21	YGW23	S582-H, S584-H
D6216			S622-HX, S624-HX

6. 大入熱溶接特性

板厚 22mm, 40mm, 50mm の BHS500 鋼材を使用して大入熱溶接を行った結果を表 5 に示す。9.1KJ/mm から 19.5KJ/mm までの溶接入熱に対しても、継手の引張強さ及び溶接金属、ボンド部、溶接熱影響部のシャルピー吸収エネルギー

表 4 BHS500 鋼材の溶接継手性能 (表 3 適用)

継手引張試験		溶接金属の シャルピー吸収エネルギー	
引張強さ (N/mm ²)	破断位置	試験温度 (°C)	3 個の平均値 (J)
570 以上	規定しない	-5	47 以上

ともに表 4 の性能を有している。

規定では、溶接作業や試験時のばらつき等を考慮し、10KJ/mm 以下の溶接入熱に対して表 4 の継手性能が得られることを BHS500 鋼材の標準的な性能としている。

表 5. 大入熱溶接特性

試験材の 厚さ (mm)	溶接 方法	溶接 入熱 (KJ/mm)	継手引張 強さ (N/mm ²)	シャルピー吸収エネルギー(J)					
				試験 温度	WM	Bond	HAZ 1mm	HAZ 3mm	HAZ 5mm
22 ¹⁾	SAW	19.5	582	-5℃	131	82	74	85	109
40		9.3-10	609		151	213	276	—	—
50		9.1	614		86	140	214	—	—

7. まとめ

BHS500 の規定内容および BHS500 鋼材の標準的な特性について述べた。第 2 報、第 3 報では規定に従って製造した鋼板を用いた製作性評価試験の結果及び溶接継手特性について報告する。

参考文献

- 1) 三木, 市川ら: 橋梁用高性能鋼材 (BHS500, BHS700) の提案, 土木学会論文集 No.738/I-64, 1-10, 2003.7
- 2) 日本鉄鋼連盟: 製品規定 MDCR0014-2004「降伏点 500N/mm² 及び降伏点 700N/mm² 溶接構造用圧延鋼材」

BHS500鋼の製作性評価試験及び溶接継手特性（第2報） —少数I桁橋桁モデルによる製作性評価試験—

新日本製鐵㈱ 厚板営業部 正会員 ○田中睦人 *

JFEスチール㈱ 厚板セクター部 松田 穰 **

住友金属工業㈱ 厚板技術部 正会員 安藤 隆一 ***

㈱神戸製鋼所 厚板商品技術部 正会員 岡野重雄 ****

1. はじめに

橋梁用高性能鋼として BHS500・BHS500W・BHS700W 鋼が開発され、2005 年 3 月(社)日本鉄鋼連盟製品規定により、“降伏点 500N/mm²及び降伏点 700N/mm²溶接構造用圧延鋼材”として規定化が図られている¹⁾。また、鉄鋼メーカーにより各種評価試験が実施され、その特長が確認されている^{2,3,4)}。

BHS500 鋼の主な特長は、従来の SM570 鋼以上の強度を持ちながら SM490Y 鋼と同等な製作性能を有することを目指して開発されたことにある。そこで、今回 BHS500 鋼について、少数 I 桁橋を想定した供試体を製作し各種製作性評価を行ない、従来の 50^{*}鋼の製作性と比較を行った。

表1 供試材化学成分(wt%, *ppm)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B*	N*	Pcm
t=50	0.09	0.27	1.53	0.008	0.002	0.01	0.01	0.02	0	0.04	1	24	0.18
t=20	0.09	0.29	1.57	0.014	0.003	0.01	0.01	0.02	0	0.04	1	21	0.18
BHS500	0.11	0.55	2.00	0.020	0.006	-	-	-	-	-	-	60	0.20
規格	以下	以下	以下	以下	以下	-	-	-	-	-	-	以下	以下

2. 試験概要

2.1 使用鋼材：桁モデルには、板厚 20,30,50mm の BHS500 鋼を用いた。化学成分例を表 1 に示す。いずれの鋼材も BHS500 鋼の規格を満足するものであった。機械的性質例を表 2 に示す。いずれも BHS500 鋼の規格を満足する一般的なものであった。

2.2 溶接材料：溶接材料には、全ての溶接継手において通常 SM570 に用いられる JIS の一般的な材料を使用した。

2.3 桁モデル製作について：今回製作した桁モデルの概略を図 1 に示す。桁高 3000mm、上フランジ厚 30mm、下フランジ厚 50mm、ウェブ厚 20mm、長さ 6000mm とした。なお、今回は工場溶接に加え現場溶接を想定して、図 1A 部に現場継手箇所を設けることとした。また、部材切断や各種溶接条件は橋梁メーカー数社の標準的条件をヒアリングの上決定した。評価項目は、部材切断、組立溶接、本溶接、現場溶接の各工程を想定して行った。

表2 供試材機械的性質

板厚	YP	TS	EL	vEc-5
	(N/mm ²)		(%)	(J)
t=50	550	643	31	281
t=20	613	693	35	302
BHS500	500	570/720	20	100
規格	以上		以上	以上

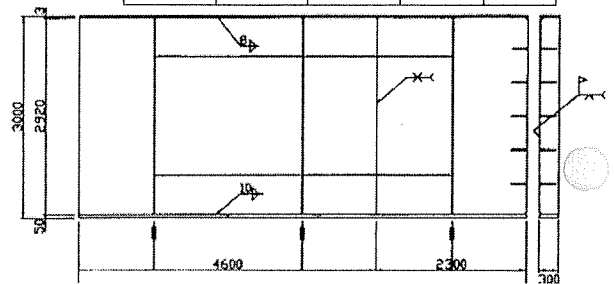


図1 桁モデル形状

3. 評価結果

3.1 切断性：標準切断条件(燃焼ガス：プロパン(0.8kg/cm²)、アシストガス：酸素(4.0kg/cm²)、切断速度(270cm/min))において、切断品質は規格内(50 μ mRy 以下)であり、作業中の状況も SM490Y 鋼と比較して同等であった。

3.2 孔明け性：性能評価は自動機により、孔径の精度と孔面粗度により品質低下がないかを評価することとした。超硬ドリルを用い、回転数 400(rpm)、送り量 0.25(mm/rev)で、孔明け面粗度および精度を確認し、いずれも良好で有る事を確認した。

3.3 組立溶接：BHS500 鋼では溶接作業における予熱が不要であることから普通鋼材と同様の作業性が期待されているが、組立溶接部に溶接割れが発生しないことが絶対条件であり、ショートビードにおける溶接欠陥有無の評価を行った。本体組立溶接は CO₂半自動溶接により溶接長さ 80mm で 400mm ピッチにて行った。

表3 組立溶接性能試験結果

溶接条件	0.57kJ/mm, 予熱なし	
溶接長さ	50mm	20mm
評価結果	割れ無し	割れ無し

キーワード：BHS500鋼、橋梁、溶接性、予熱温度、高性能鋼

* 〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3 Tel 03-3275-7814 Fax 03-3275-5638

** 〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-3 Tel 03-3597-3368 Fax 03-3597-3533

*** 〒104-6111 東京都中央区晴海 1-8-11 Tel 03-4416-6416 Fax 03-4416-6413

**** 〒141-8688 東京都品川区北品川 5-9-12 Tel 03-5739-5261 Fax 03-5739-6261

本体とは別に、組立溶接のすみ肉溶接長さは道路橋示方書に従い低 Pcm 仕様(≦0.22%)鋼材に適用出来る 50mm に加え、BHS500 鋼の高性能仕様(Pcm≦0.20%)を活用すべく、より厳しい条件であるすみ肉溶接長さ 20mm についても試験を行った。その結果、いずれの条件でも割れは発生せず良好な結果を得ることができた(表3)。

3.4 組立溶接: 予熱無しで組立溶接を行ない磁粉探傷試験で検査の結果、溶接割れは認められず良好な結果であった。また、組付作業においても特に支障となる事項は発生しておらず、予熱無しにより SM490Y 鋼と同等の施工性が得られた。

3.5 突合せ溶接: 通常 SM570 材の溶接では、入熱制限や予熱作業、パス間温度管理等のため SM490Y 材と比較して作業効率は低下する。特に、突合せ溶接においてはこの傾向が顕著であるが、BHS 鋼では予熱フリーの他 10kJ/mm の入熱が可能であることから、施工性向上が図れるとともに従来の溶接条件と比較して溶接パス数を減らすことが可能となっている。そこで今回の試験においては、溶接効率向上のため極力大入熱溶接を採用してパス数削減を図ることとした。なお、パス間温度管理は本四公団の SM570 鋼適用基準に従い 230℃ 以下⁵⁾に設定した。非破壊検査の結果、いずれの継手においても溶接欠陥は発生せず良好な溶接であった。

3.6 現場溶接: 現場溶接においても突合せ溶接と同様に、SM570 鋼の作業効率は SM490Y 鋼と比較して一般的に低下する。また、鉋桁の上下フランジ現場溶接は溶接線長さが比較的短く、ウェブにより溶接線が分断されている等の理由により従来の施工に代わる選択はほとんど望めない。しかし、ウェブの立ち向き溶接部では板厚が 25mm 程度までならエレクトロガスアーク溶接による大入熱溶接施工が可能であることから、本試験では上下フランジは従来工法にて行ない、ウェブはエレクトロガスアーク溶接にて施工を行った。現場溶接部について、いずれの継手においても溶接欠陥は発生しておらず良好な結果であった。

4. まとめ

今回は、少数 I 桁橋を想定した部材を用いて BHS500 鋼の製作性能評価を行った。切断・孔明け・切削・組立溶接・突合せ溶接・現場溶接等各工程の試験結果について表 4 にまとめて記す。結果、SM490Y 鋼と同じ施工手順、施工方法で施工可能であり品質も同等であったことから、BHS500 鋼が従来の 50 鋼と同等の施工性を有することが確認できた。今回確認できなかったパス間温度規制に対する性能評価は、別途第3報で紹介する⁴⁾。

BHS 鋼は東京港臨海大橋へ約 6,800 t、適用が予定されており^{6,7)}、BHS 鋼の特長を發揮できるものと期待する。最後に、今回の製作性評価試験を実施するに際し各種施工条件等にご助言を頂いた、国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所殿に感謝を申し上げます。

参考文献 1) (社)日本鉄鋼連盟製品規定、降伏点 500N/mm² 及び降伏点 700N/mm² 溶接構造用圧延鋼材, MDCR 0014-2004
2) 三木、市川ら：橋梁用高性能鋼材(BHS500,BHS700)の提案, 土木学会論文集 No.738/ I -64, 1-10, 2003.7
3) 安藤ら：BHS500鋼の製作性評価試験及び溶接継手特性(第1報), 土木学会第 61 回年次学術講演会
4) 岡野ら：BHS500鋼の製作性評価試験及び溶接継手特性(第3報), 土木学会第 61 回年次学術講演会
5) 本州四国連絡橋公団：鋼橋等製作基準, 1989.4
6) 三木：橋梁用高性能鋼BHS, 橋梁と基礎, 2005-8, P41-43
7) 鋼構造ジャーナル, 2005/10/3, P10

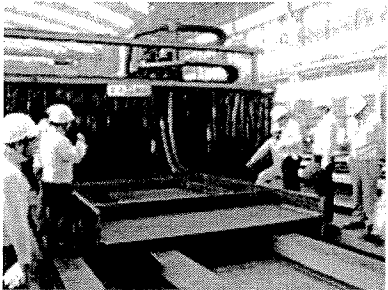


図2 溶接立会

表4 製作試験結果まとめ

試験項目		SM490Y との比較	備考(HI=**kJ/mm)
切断性能	t=50	同等	切断面粗さ
孔明け性能	t=50	同等	孔明け精度
切削性能		同等	2R
組み立て溶接	t=20,50	同等以上	仮付け溶接長 20 mm可能
突合せ溶接	WEB t=20	同等	予熱無し,最大 HI=6.1,T-SAW
	U FLG t=30	同等	予熱無し,最大 HI=9.9,T-SAW
	L FLG t=50	温度待ち発生	予熱無し,最大 HI=10.0,T-SAW
隅肉溶接	WEB-FLG	同等	予熱なし
	補剛材	同等	予熱なし
歪み矯正	プレス矯正	同等	
	ローラー矯正	同等	
現場溶接	WEB t=20	同等	予熱無し,最大 HI=9.7,EGW
	U FLG t=30	温度待ち発生	予熱無し,最大 HI=4.1,CO ₂
	L FLG t=50	温度待ち発生	予熱無し,最大 HI=3.9,CO ₂

BHS500鋼の製作性評価試験及び溶接継手特性（第3報）

一 溶接継手特性に及ぼすパス間温度の影響確認試験結果 一

(株)神戸製鋼所 厚板商品技術部 正会員 ○岡野重雄 *

新日本製鐵(株) 厚板営業部 正会員 田中睦人 **

住友金属工業(株) 厚板技術部 正会員 安藤 隆一 ***

JFE スチール(株)厚板セクター部 正会員 松田 穰 ****

1. はじめに

前報^{1),2)}で報告したように、少数1桁橋桁モデルによる製作性評価試験の結果、BHS500 鋼は従来の SM570 鋼以上の強度を持ちながら SM490Y 鋼と同等な製作性能を有することを確認したが、パス間温度を本四の鋼橋等製作基準³⁾に規定された 230℃以下として試験をおこなったため、一部の溶接においてパス間の待ち時間が発生すると評価となった。

そこで、パス間温度を意図的に変化させて、パス間温度が高くなった場合でも、BHS500 鋼の溶接継手特性がどの程度のレベルかの確認を行った。あわせて実施工として、パス間温度がどの程度まで上昇するかの見極めも行った。

2. 試験内容

2.1 使用鋼材：

今回の試験には、板厚 40～50mm の4種類の BHS500 鋼を用いた。その化学成分を表 1 に、機械的性質を表 2 に示す。いずれの鋼材も BHS500 鋼の規格を満足するものである。

2.2 溶接方法：

溶接方法は、X 開先の突合せ SAW と K 開先の十字継手 GMAW とし、溶接入熱は SAW では 10kJ/mm 以下 (BHS 鋼への適用基準上限)、GMAW では 5kJ/mm (実施工の通常範囲の上限)とした。パス間温度については 200、250、300℃の3水準に変化させるようパス間時間を調整した。板厚 50mm の場合の開先形状を図 1 に示す。パス間温度の計測は溶接長中央部の開先表面から 10mm の位置で行った。使用溶接材料は通常 SM570 鋼に用いられる第1報に示す JIS の規格材を使用した。溶接長は試験溶接であるため、SAW で 800mm、GMAW で 600mm と、実施工の場合よりも短めであり、パス間温度は上がりやすい条件である。なお、パス間温度を変化させることが目的ではあるが、実施工時の状況再現を前提として、狙いどおりに上昇しない場合にも予熱などの補助的手段は採用しないこととした。

2.3 評価項目：

試験項目および目標性能を表 3 に示す。強度、靱性は母材規格と同等であることを目標とした。

表1 供試材の化学成分(wt%,*:ppm)

略号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B*	N*	Pcm
A: (40t)	0.08	0.28	1.55	0.012	0.002	0.01	0.01	0.02	0.00	0.04	1	35	0.17
B: (50t)	0.09	0.25	1.46	0.014	0.002	0.01	0.02	0.04	0.11	0.04	0	25	0.18
C: (45t)	0.08	0.32	1.53	0.010	0.001	0.01	0.01	0.03	0.14	0.06	0	30	0.19
D: (50t)	0.04	0.10	1.53	0.006	0.001	0.01	0.25	0.90	0.15	0.001	11	51	0.18
BHS500規格	以下	以下	以下	以下	以下	-	-	-	-	-	-	60以下	0.20以下

表2 供試材の機械的性質

略号	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	VE-5 (J)
A: (40t)	546	634	316
B: (50t)	593	682	303
C: (45t)	541	676	316
D: (50t)	588	643	337
BHS500規格	500以上	570～720	100以上

注) 衝撃試験: 圧延直角方向

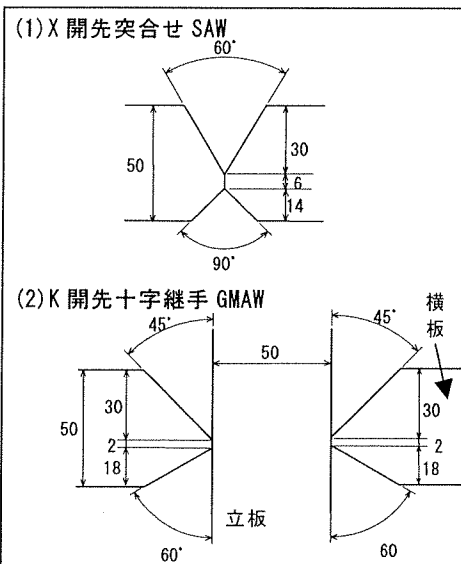


図1 開先形状の一例(50tの場合)

表3 評価項目

試験項目	測定項目	目標性能
継手引張	引張強さ	TS ≥ 570N/mm ²
溶接金属引張	0.2%耐力、引張強さ	0.2%YS ≥ 500N/mm ² TS ≥ 570N/mm ²
衝撃試験	吸収エネルギー (ノッチ位置3カ所)	VE ₅ ≥ 47J(av.)
側曲げ試験	亀裂の有無、長さ	原則として亀裂がないこと
マクロ試験	有害な欠陥の有無	欠陥がないこと

キーワード: BHS500、橋梁、溶接性、予熱温度、高性能鋼

* 〒141-8688 東京都品川区北品川 5-9-12 Tel 03-5739-6261 Fax 03-5739-6934

** 〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3 Tel 03-3275-7814 Fax 03-3275-5638

*** 〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-3 Tel 03-3597-3368 Fax 03-3597-3533

**** 〒104-6111 東京都中央区晴海 1-8-11 Tel 03-4416-6413 Fax 03-4416-6791

3. 試驗結果

3.1 溶接継手特性：

表 4 に SAW の試験結果を、表 5 に GMAW の試験結果を示す。パス間温度は実測値を使用した。パス間温度の上昇にともない、継手の TS や靱性は低下する傾向はあるものの、いずれの場合にも目標とする母材規格値を十分に満足している。

3.2 溶接条件の実績：

SAW よりもパス数が多くなり、パス間温度管理が煩雑となる K 開先十字継手 GMAW の場合の、最高パス間温度と最大入熱の実績を表 6 に示す。左右の横板の連続溶接や溶接入熱アップや断熱材での保温によりパス間温度の上昇を図ったが、パス間温度の狙い値を確保できない場合が多かった。

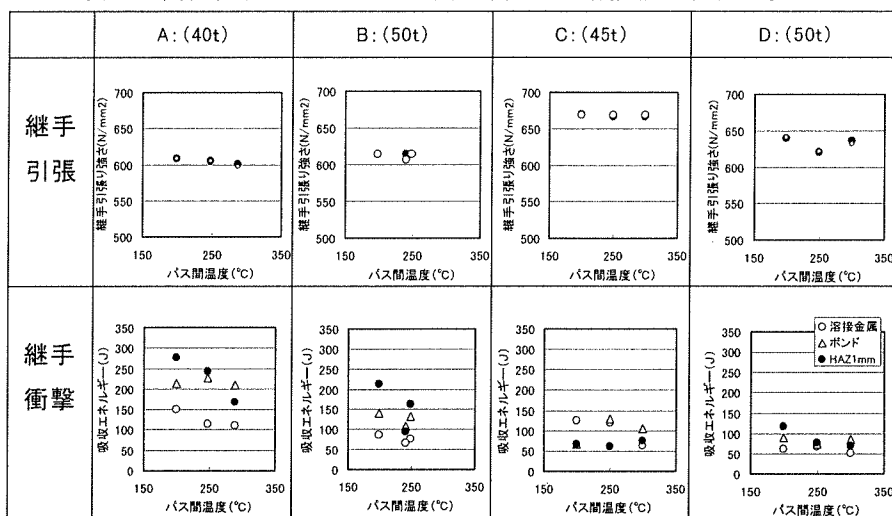
また、X 開先突合せ SAW の場合の詳細データは省略するが、鋼板 B の 300℃狙いは実績で 240℃程度であった。なお、板厚の厚いものほどパス間温度の確保が困難な傾向があり、板厚の増加により冷却速度が大きくなる影響が現れているものと推察される。

4. まとめ

パス間温度を意図的に 300℃程度まで上昇させた場合にでも、溶接継手の引張・衝撃特性は母材規格値を十分に満足する良好な値であり、BHS500 鋼はパス間温度という意味でも SM490Y 鋼と同等の管理で施工が可能と考えられる。また、溶接長 800mm 以下というパス間温度が上昇し

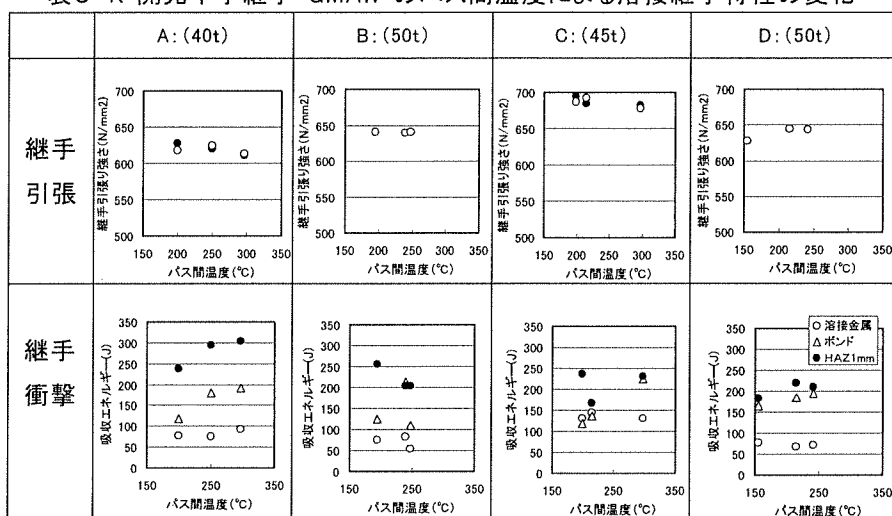
やすい条件であっても 300°C まで上昇することは少なく、特にパス数の多い GMAW でその傾向が顕著であった。

表4 X開先突合せSAWのパス間温度による溶接継手特性の変化



(引張の○、●は $n=2$ の各テータ)

表5 K 開先十字継手 GMAW のパス間温度による溶接継手特性の変化



(引張の○、●は $n=2$ の各テータ)

表6 K開先十字継手 GMAW のパス間温度の実績

狙い パス間 温度 (℃)	区分	鋼板ごとの実績溶接条件							
		A: (40t)		B: (50t)		C: (45t)		D: (50t)	
		最高 パス間 温度 (℃)	最大 入熱 (kJ/mm)	最高 パス間 温度 (℃)	最大 入熱 (kJ/mm)	最高 パス間 温度 (℃)	最大 入熱 (kJ/mm)	最高 パス間 温度 (℃)	最大 入熱 (kJ/mm)
200	1st	188	3.6	195	3.7	193	3.0	155	3.0
	2nd	200	3.6	195	3.7	199	3.0	154	3.0
250	1st	248	3.8	240	3.7	215	3.0	215	3.0
	2nd	250	3.8	207	3.7	213	3.0	203	3.0
300	1st	297	3.7	243	3.7	288	3.0	241	3.6
	2nd	275	3.4	248	3.7	297	3.0	220	3.6

注1) 鋼板 B のパス間 300℃狙いの場合には、横板の溶接を連続しパス間温度上昇を図った
注2) 鋼板 C の " 上記に加え溶接入熱の上昇と横板の断熱材による
覆いを併用しパス間温度の上昇を図った

参考文献

- 1)安藤ら：BHS500鋼の製作性評価試験及び溶接継手特性(第1報)、土木学会第61回年次学術講演会 (2006)
2)田中ら：BHS500鋼の製作性評価試験及び溶接継手特性(第2報)、土木学会第61回年次学術講演会 (2006)
3)本州四国連絡橋公団：鋼橋等製作基準(1993.5)