

2章 高性能鋼を使用した橋梁の製作

2.1 新しい橋梁用高性能鋼

2.1.1 新しい橋梁用高性能鋼開発の経緯

1997年から3年間、当時の(社)鋼材倶楽部から(社)日本鋼構造協会に委託して「次世代土木鋼構造研究特別委員会」(委員長：伊藤學)が設立され官庁・大学・民間の連携のもと、より高度な、かつ効率的な研究を実行してきた。その小委員会である「高機能鋼材の橋梁への利用小委員会」(委員長：三木千壽)より、成果の一つとして、表2.1.1に示す降伏強度400, 500, 700 N/mm²の3グレードの橋梁用高性能鋼材の提案がなされた。この時、日本の技術であるTMCPによる鋼材製造を想定して降伏強度500 N/mm²を標準グレードとし、それを補う目的で400 N/mm²グレードを、トラス・吊構造などの特殊用途に700 N/mm²グレードが提案され、各グレードに耐候性仕様が設けられている[2000, 日本鋼構造協会]。

表2.1.1 橋梁用高性能鋼材 (試案)

クラス	400	500	700
降伏点(N/mm ²)	400	500	700
引張強度(N/mm ²)	520	600	800
47Jシャルビ°-吸収エネルギー-試験温度 あるいは 0°Cシャルビ°-吸収エネルギー	-20°C 100J	-40°C 100J	-40°C 100J

その後、東京工業大学の創造プロジェクト研究体に設置された高性能鋼の利用技術研究会において、鉄鋼メーカー、橋梁メーカー参画のもと産学連携プロジェクトとして、橋梁における要求性能や鋼材仕様について具体的に検討が行われてきた[2003, 三木ら]。

橋梁の要求性能に適合した鋼材仕様として、まず鋼橋の代表的な形式である鈹桁を対象とし、有効活用可能な鋼材降伏強度の検討を実施した。降伏強度増加に伴い鋼材重量は低減すること、一方、降伏強度500N/mm²程度を越えると、橋梁に作用する繰り返し荷重に起因する疲労限界状態(Fatigue Limit State)が設計を支配する要因となり、それ以上の高強度化は効果的でない[1996, 村越ら] [2000, 小西ら]。ここで降伏強度500N/mm²が有効活用できるほぼ上限にあることから、橋梁用高性能鋼の基本的な降伏強度を500N/mm²とすることが提案された。また、吊橋や斜張橋のように、鋼橋上部工の死荷重軽減が経済性に大きな影響を及ぼす橋梁形式においては、本州四国連絡橋で使用された降伏強度700N/mm²クラスの高強度鋼活用が有効であるため、500 N/mm²に加えて700 N/mm²が提案され、これら鋼材はBHS鋼(Bridge High Performance Steel)と呼称された。従来種類の記号(規格表記)には引張強さの保証下限値が一般的に用いられてきたが、橋梁設計の考え方から降伏強度の保証下限値を表記することが提案され、BHS500,BHS700と呼称された。強度以外の要求性能としては、溶接性能・冷間曲げ性能・耐ラメラティア性能など、現規格の骨格がこの時提案されている[2003, 三木, 市川ら]。

その後BHS鋼は、(社)日本鉄鋼連盟橋梁用鋼材研究会(委員長：川崎博史)により国土交通省の新技术情報システムに登録され(NETIS KTK-040005) [2004, 田中ら]、更に、(社)鉄鋼連盟製品規定「降伏点500 N/mm²及び降伏点700 N/mm²溶接構造用圧延鋼材」(MDCR 0014-2004)として取りまとめられた[2005, (社)日本鉄鋼連盟]。

BHS500が、東京港臨海道路Ⅱ期事業の「南北水路横断橋」および「東京港臨海大橋（仮称）」に鋼材出荷ベースで約 17,500^t適用されることから、鋼材のJIS規格化の要望が強まり、(社)日本鉄鋼連盟標準化センター橋梁用高性能鋼材JIS化WGで、2006年11月から約1年間規格化について検討され、鋼材の新JISとしては14年振り、橋梁用としては初めて2008年11月に橋梁用高降伏点鋼板(JIS G3140)として公示された。この際、JISの種類の記事のルールに従いSBHS(Steels for Bridge High Performance Structure)と表記されることとなった[2009, 日本規格協会]。

各方面の鋼橋設計基準などへの反映も順次実施され、2009年4月に「土木材料仕様書」改訂[2009, 東京都建設局]、2009年7月に「鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物」改訂[2009, (財)鉄道総合技術研究所]、でSBHS鋼が構造用鋼材として各々解説されている。

これら橋梁用高性能鋼の仕様提案から実適用、JIS規格化までの変遷を表2.1.2に示す。

表2.1.1 SBHS鋼開発年表

年	内容	報告書等
1997～2000	橋梁用高性能鋼の概念提案(YP400, 500, 700)	(社)日本鋼構造協会, 三木ら
2003	橋梁用高性能鋼材(BHS500, 700)の提案	土木学会論文集, 三木ら
2004	NETIS登録 (橋梁用高性能鋼材(BHS鋼))	関東地方整備局, KTK-040005
2005	BHS500, 500W, 700W(社)日本鉄鋼連盟製品規定設定	(社)日本鉄鋼連盟, MDCR0014-2004
2006	南北水路横断橋に約1,200 ^t 初適用	東京都港湾局
2007	東京港臨海大橋(仮称)に約17,000 ^t 適用	関東地方整備局
2008	SBHS500, 500W, 700, 700W鋼材JIS規格公示	(財)日本規格協会, JIS G3140
2009	土木材料仕様書	東京都建設局
	鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物改訂	(財)鉄道総合技術研究所

2.1.2 SBHS鋼の特徴

SBHS鋼は前述の通り降伏強度保証下限値が500 N/mm²と700 N/mm²の2種類の高強度鋼であり、設計の容易さからニーズの高い降伏点一定鋼としている。

また、鋼橋製作効率化の観点から、橋梁用鋼材における溶接施工性の向上は重要である。従来SM570鋼級以上の高強度鋼では冷間割れ防止対策として溶接時に100℃以上の予熱が必要であり、高強度鋼を用いた時の鋼橋製作効率低下要因のひとつとなっていた。SBHS鋼では、高強度と溶接性を両立させるべく、TMCP技術を用い予熱温度の指標となる溶接割れ感受性組成(P_{CM})を低く抑え、予熱の省略、または低減を図っている。表2.1.3に示すように、SBHS500(W)ではP_{CM}を0.20以下にすることによって予熱省略可能な仕様となっている。また、溶接入熱量について、道路橋示方書ではSM570では7kJ/mmが上限とされているが[2002, (社)日本道路協会]、SBHS500(W)ではSM490と同等である10kJ/mmまで緩和できる性能とすることにより、溶接パス数を減らした効率的な大入熱溶接が適用可能な仕様となっている。これら性能を満足することで、SBHS500(W)は高強度鋼でありながら製作性は従来50キロ鋼と同等程度となっている。

表2.1.3 SBHS鋼の溶接割れ感受性組成、予熱条件と適用可能な溶接入熱

種類の記号	鋼板の厚さ mm	P _{CM}	予熱条件	溶接入熱 kJ/mm
SBHS500 SBHS500W	6 ≤ t ≤ 100	0. 20	予熱なし	10
SBHS700 SBHS700W	6 ≤ t ≤ 50	0. 30	50℃	5
	50 < t ≤ 75	0. 32		

鋼材の冷間曲げ加工は、主桁、塔、橋脚、床版、鋼管構造を始め各種部材で用いられており、鋼橋製作の有用な手法の一つである。しかしながら、鋼材の冷間加工は、歪時効による脆化に対して十分な配慮が必要である。SBHS鋼では、各強度クラスの試験温度においてシャルピー吸収エネルギー100J以上を保証し、かつ窒素添加量上限を規制することにより、より設計自由度の高い、曲率の小さな曲げ加工半径に対応可能な仕様としている。しかし、現在の道路橋示方書[2002, (社)日本道路協会]との整合性を考慮し、曲げ半径15t以上の加工の際には特別仕様を明記することとした。また、シャルピー試験片採取方向を、圧延直角方向とすることによって、板取り方向の制約を受けずに橋梁部材採片が可能となり、ロス率低減が図れるよう配慮されている(表2.1.4)。

橋梁部材においては、板厚方向に力を受ける継手が多く存在しており、厚さ方向特性にも配慮している。SBHS鋼では、耐ラメラテア特性に影響を及ぼす硫黄含有量を0.006%以下に抑えるとともに、厚さ方向特性としてJIS G 3199の最高レベルである、厚さ方向絞り値Z35の性能を有することを目安とした。

橋梁用高性能鋼SBHSでは、以上の各種性能に加えて、ミニマムメンテナンスのニーズに応じて、耐候性仕様(SBHS500W, SBHS700W)も用意している。これらSBHS鋼の化学成分規定を表2.1.5に示す。なお、従来鋼材との性能比較を図2.1.1, 図2.1.2に示す。

表2.1.4 SBHS鋼の降伏点または耐力、引張強さ、シャルピー吸収エネルギー

種類の記号	鋼板の厚さ	降伏点又は耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	シャルピー吸収エネルギー		
	mm			試験温度	エネルギー	試験片採取方向
SBHS500	6 ≤ t ≤ 100	500以上	570~720	-5°C	100J	圧延直角方向
SBHS500W						
SBHS700	6 ≤ t ≤ 75	700以上	780~930	-40°C		
SBHS700W						

表2.1.5 SBHS鋼の化学成分規定

種類の記号	単位 %											
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	N
SBHS500	0.11 以下	0.55 以下	2.00 以下	0.020 以下	0.006 以下	—	—	—	—	—	—	0.006 以下
SBHS500W	0.11 以下	0.15 ~0.55	2.00 以下	0.020 以下	0.006 以下	0.30 ~ 0.50	0.05 ~ 0.30	0.45 ~ 0.75	—	—	—	0.006 以下
SBHS700	0.11 以下	0.55 以下	2.00 以下	0.015 以下	0.006 以下	—	—	—	0.60 以下	0.05 以下	0.005 以下	0.006 以下
SBHS700W	0.11 以下	0.15 ~0.55	2.00 以下	0.015 以下	0.006 以下	0.30 ~ 1.50	0.05 ~ 2.00	0.45 ~ 1.20	0.60 以下	0.05 以下	0.005 以下	0.006 以下

注 必要に応じて、この表で規定されている以外の合金元素を添加してもよい。

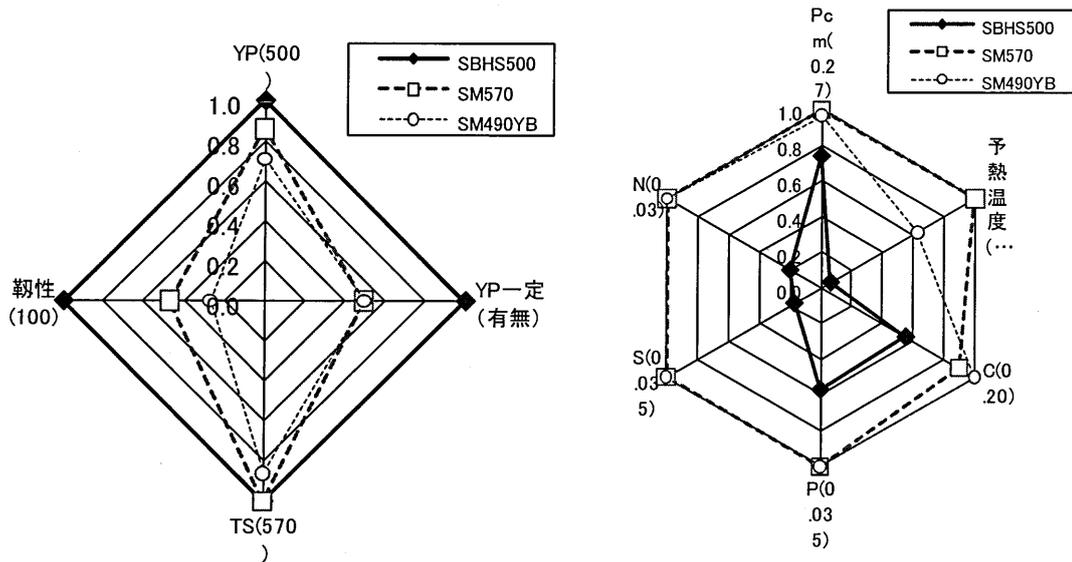


図2.1.1 SBHS500の従来材との比較

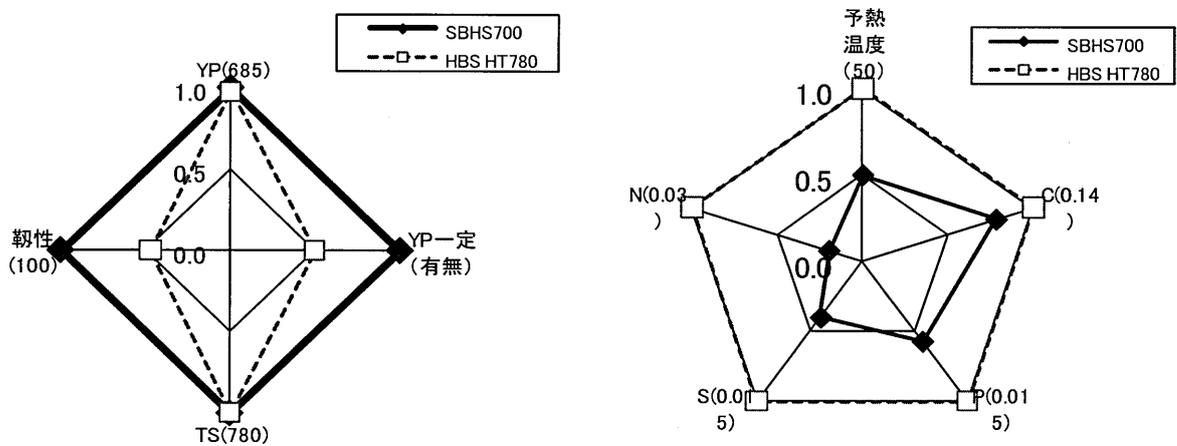


図2.1.2 SBHS700の従来材との比較

2.1.3 SBHS500の母材性能について

SBHS500の化学成分・母材性能について、国内初のSBHS鋼使用橋梁である南北水路横断橋の実績(最大板厚59mm)[2007, 本間ら]に加え、東京港臨海大橋(仮称)向けの実績(最大板厚50mm)を加えたものが報告され、十分な性能を保有することが確認されている(図2.1.3～図2.1.6)[2008, 武野ら]。

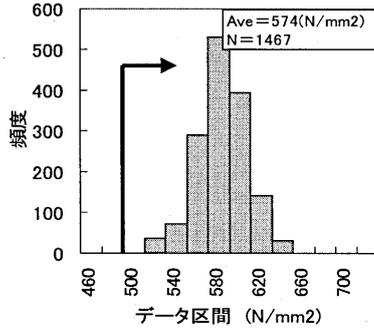


図2.1.3 降伏点の実績

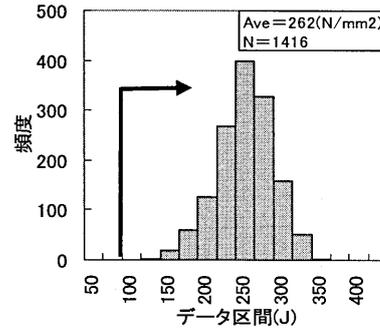


図2.1.4 シャルピ-吸収エネルギーの実績

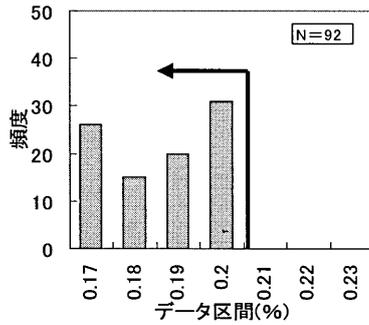


図2.1.5 P_{CM}の実績

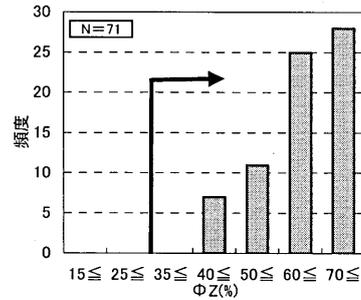


図2.1.6 厚さ方向特性の実績

2.1.4 SBHS500溶接継手特性

SBHS500, SBHS500Wの溶接継手性能や冷間割れ評価に関して種々報告されており、図2.1.7に冷間割れ評価の一例を示す[2003, 三木ら]。予熱なしで冷間割れ防止という要求特性を満足しており、その他評価事例でも同様である[2006, 安藤ら] [2006, 藤田ら]。

組立溶接ショートビードにおける溶接欠陥有無の評価も実施されている。組み立て溶接長さは道路橋示方書[2002, (社)日本道路協会]により低P_{CM}仕様(≤0.22%)鋼材では50mmとされているが、SBHS500の高性能仕様(P_{CM}≤0.20%)を活用すべく、より厳しい条件である溶接長さ20mmについても評価を行ない、割れの発生はなく良好な結果が確認されている(表2.1.6) [2006, 田中ら]。この時の一連の評価に際し、溶接パス間温度を本州四国連絡橋公団の鋼橋等製作基準に規定された230℃[1973, 土木学会]としたため、一部の溶接においてパス間での冷却待ち時間が発生し溶接作業性を低下させた。そこで、溶接パス間温度の影響を評価するため、実際の溶接作業で上限と考えられるパス間温度300℃程度での継手性能評価も行われ、表2.1.7に示す通り十分に良好な特性が得られ、この点からもSM490Yと同等の管理で施工可能なことが確認されている[2006, 岡野ら]。

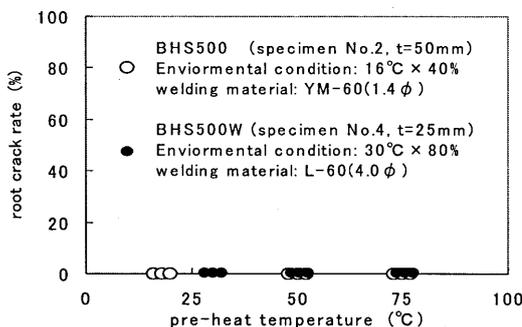
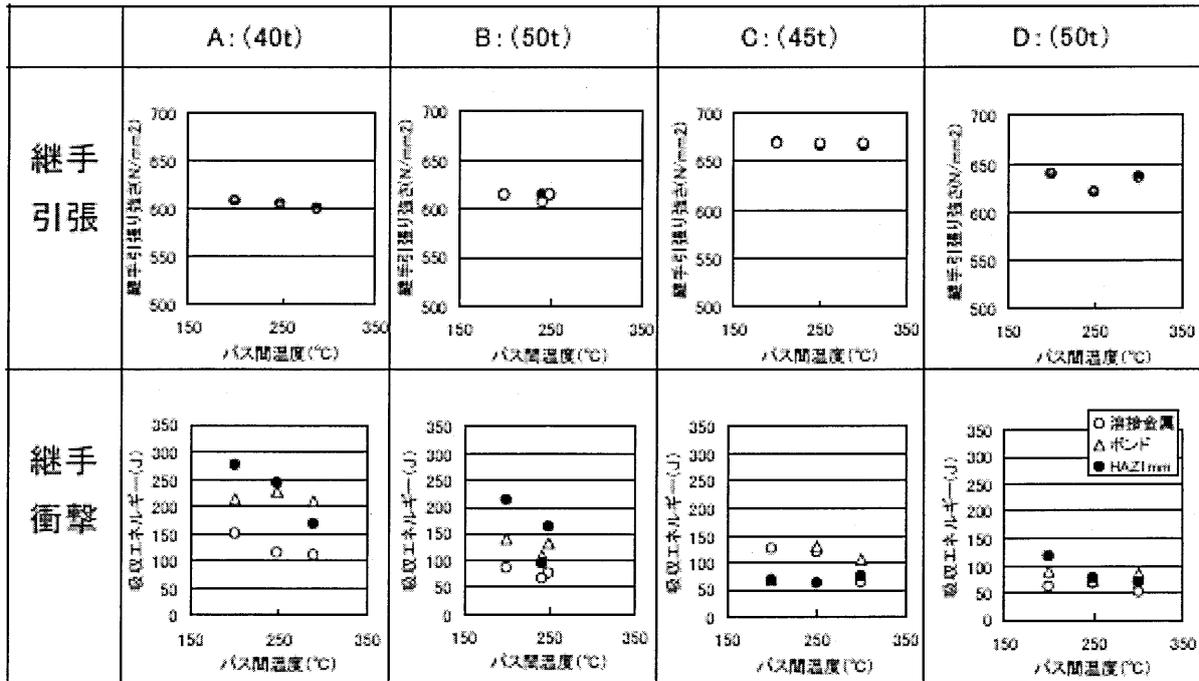


図2.1.7 予熱温度と断面割れ率

表2.1.6 ショートビード評価結果

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

表2.1.7 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の各データ)

継手性能についても種々報告あり，大入熱溶接評価も良好な結果を得ており表2.1.8に一例を示す[2006, 安藤ら].

その後「南北水路横断橋」および「東京港臨海道路橋（仮称）」の溶接施工試験で，各橋梁メーカーにより多くのデータが得られており国土交通省からの報告[2008, 林ら]に加え，2.4章で試験結果を紹介する。

表2.1.8 大入熱溶接継手評価試験結果

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°C	131	82	74	85	109
40		9.3-10	609		151	213	276	—	—
50		9.1	614		86	140	214	—	—

2.1.5 SBHS500製作性評価試験

SBHS500の主な特長は，従来のSM570以上の強度を持ちながらSM490Yと同等な製作性能を有することを目標に開発されたことにある．そこで(社鉄鋼連盟橋梁用鋼材研究会では橋梁メーカーの協力を得て，少数I桁橋を想定した供試体を製作し，切断・孔明け・切削・組立溶接・突合せ溶接・現場溶接等各工程において製作性の評価を行った．その結果，SBHS500はSM490Yと同じ施工手順，施工方法で橋梁製作が可能であり，品質も同等であったことから，SBHS500が従来の50⁺鋼と同等の施工性を有することが確認されている（表2.1.9）[2006, 田中ら].

表2.1.9 SBHS500製作性評価試験結果

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20mm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

2.1.6 SBHS700(W)について

SBHS700WもSBHS500同様、製作性能向上が得られる鋼材であるが、SBHS500に比べ更に高強度であり、シャルピー試験温度も厳格となるため、溶接金属割れを防止する目的で予熱温度は50℃、最大溶接入熱を5kJ/mm以下としている。SBHS700Wは、平成6年に明石海峡大橋の補剛桁用に予熱温度低減(120→50℃)を目的に採用された、低炭素、ボロン無添加とし強度確保のためCu析出を活用したタイプ[1994, 岡村ら] [1995, 岡村ら]と、低P_{CM}タイプ[1998, 中川ら] [1995, 大西ら][1995, 岡野ら]の製造方法に準じ、下限保証降伏強度を15N/mm²向上させたものである。しかし、明石海峡大橋での最大適用板厚が34mmであったことから、その後60mmまでについて、母材・継手基本的な性能について確認され良好な結果が得られている[2004, 田中ら]。

2.2 新しい橋梁用高性能鋼の溶接材料

2.2.1 SBHS鋼に対応する溶接材料

SBHS鋼は2008年11月にJIS規格化されており、これに並行して溶接材料のJIS改訂も進められている。溶接材料のJIS規格の改訂状況を表2.2.1に、改訂された溶接材料の機械的特性の規定値を表2.2.2に示す。例えば、「軟鋼、高張力鋼及び低温用鋼用のマグ溶接及びミグ溶接ソリッドワイヤ」(JIS Z 3312)の改訂に際しては、SBHS500(降伏点500MPa以上)に対応した溶接材料を「57J」、SBHS700(降伏点700MPa以上)に対応した溶接材料を「78J」として強度区分を追加制定している。また、現時点で改訂が実施されていないサブマージアーク溶接や耐候性鋼用の溶接材料についても今後順次改訂される予定である。

SBHS鋼の施工においては、その溶接金属が適用される鋼材の規格値と同等以上の機械的特性を有する溶接材料を使用しなければならない。

しかし、「南北水路横断道路橋」および「東京港臨海大橋(仮称)」の製作においては、改訂前のJIS規格に規定された溶接材料を使用しており、溶接金属の強度規格値はBHS鋼の母材の規格値を満足するものではなかった。このため、溶接金属が母材と同等以上の特性を有していることを溶接施工試験により確認した上で使用している。この施工試験の結果は2.4章で紹介する。

表2.2.1 SBHS鋼に対応する溶接材料のJIS規格の改訂状況

溶接方法	鋼板の種類			
	SBHS500	SBHS500W	SBHS700	SBHS700W
SMAW	○ JIS Z3211	△ JIS Z3214	○ JIS Z3211	—
GMAWソリッドワイヤ (CO ₂ ガス)	○ JIS Z3312	△ JIS Z3315	○ JIS Z3312	—
GMAWソリッドワイヤ (Ar+20%CO ₂ ガス)	○ JIS Z3312	△ JIS Z3315	○ JIS Z3312	—
GMAWフラックス入りワイヤ (CO ₂ ガス)	○ JIS Z3313	△ JIS Z3320	○ JIS Z3313	—
GMAWフラックス入りワイヤ (Ar+20%CO ₂ ガス)	○ JIS Z3313	△ JIS Z3320	○ JIS Z3313	—
SAW	△ JIS Z3183	△ JIS Z3183	△ JIS Z3183	—

○：SBHS鋼板に合せた規格強度の改訂済み

△：対応規格はあるが、規格強度の改訂が未実施

—：対応規格なし

表2.2.2 SBHS鋼に対応する溶接材料の機械的特性

強度区分	溶接方法	JIS規格	種類の記号	引張試験			衝撃試験	
				耐力 MPa	引張強さ MPa	伸び %	試験 温度 ℃	シャルピー吸収 エネルギー J
500MPa級	SMAW	JIS Z3211	E57J**-**** U ¹⁾	500以上	570以上	16以上	-5	47以上
	GMAWソリッドワイヤ (CO ₂ ガス)	JIS Z3312	G57J*1UC **** ²⁾	500以上	570-770	17以上		
	GMAWソリッドワイヤ (Ar+20%CO ₂ ガス)		G57J*1UM **** ²⁾					
	GMAWフラックス入りワイヤ (CO ₂ ガス)	JIS Z3313	T57J1T*-*C*-****-U ³⁾					
	GMAWフラックス入りワイヤ (Ar+20%CO ₂ ガス)		T57J1T*-*M*-****-U ³⁾					
700MPa級	SMAW	JIS Z3211	E78J**-**** U ¹⁾				700以上	780以上
	GMAWソリッドワイヤ (CO ₂ ガス)	JIS Z3312	G78J*2UC **** ²⁾	700以上	780-980	13以上		
	GMAWソリッドワイヤ (Ar+20%CO ₂ ガス)		G78J*2UM **** ²⁾					
	GMAWフラックス入りワイヤ (CO ₂ ガス)	JIS Z3313	T78J2T*-*C*-****-U ³⁾					
	GMAWフラックス入りワイヤ (Ar+20%CO ₂ ガス)		T78J2T*-*M*-****-U ³⁾					

1) * : 被覆剤の種類、化学成分の記号

2) * : 後熱処理、化学成分の記号

3) * : 使用特性、溶接姿勢、後熱処理、化学成分を表す

2.2.2 SBHS700Wに対応する溶接材料

SBHS700W鋼の施工においては、降伏強度が700MPa級の耐候性鋼用溶接材料が必要であるが、現在、これに対応するJIS規格は現在存在しない。

一方、SBHS700鋼用の溶接材料にはJIS規格が存在し、これに該当する溶接材料には高強度を確保するためNiを含む数種類の合金元素が添加されている。これらの合金元素の中には、鋼材の耐候性能を向上させる効果を持つものがあり、その耐候性能は、耐候性合金指標V値で把握できることが知られている[2003, 三木ら]。この指標は、各種鋼材の耐候性能に及ぼす合金元素の影響をそれぞれの元素ごとに検討して定められたものである。この耐候性合金指標V値は、橋梁用高降伏点鋼板(JIS G 3140)の付属書[2008, 日本規格協会]にも記載されており(ここでは、vと記載)、次式により計算される。このV値が高い鋼材ほど高い耐候性能を示すことになり、鉄鋼連盟製品規格BHS700W鋼[2005, 日本鉄鋼連盟]での必要な耐候性能として、 $V \geq 1.0$ が規定されている。

$$V=1 / \{ (1.0-0.16[C]) \times (1.05-0.05[Si]) \times (1.04-0.016[Mn]) \times (1.0-0.5[P]) \times (1.0+1.9[S]) \\ \times (1.0-0.10[Cu]) \times (1.0-0.12[Ni]) \times (1.0-0.3[Mo]) \times (1.0-1.7[Ti]) \}$$

ただし、 $0.9 \leq V \leq 2.5$

$$0 \leq C < 1.5, 0.1 \leq Si < 5, 0.1 \leq Mn < 10, 0 \leq P < 0.15, 0 \leq S < 0.03, 0 \leq Cu < 1.1,$$

$$0 \leq Ni < 5, 0 \leq Mo < 0.6, 0 \leq Ti < 0.12$$

表2.2.3にSBHS700用溶接材料の実績成分の一例を示す。これらの実績成分を元に耐候性合金指標Vを算出すると、いずれも $V \geq 1$ を満足しているため、同溶接材料はSBHS700W鋼で規定されている耐候性能を有

していると考えられる。したがって、SBHS700W鋼の施工においては、施工試験等による性能確認を実施した上で、SBHS700鋼用の溶接材料を使用することが可能と考えられる。

表2.2.3 SBHS700鋼用の溶接材料の成分実績の一例

溶接方法	種類の記号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V値
SMAW	E78J16-N4CM2 U	0.08	0.52	1.50	0.009	0.006	—	1.90	0.28	0.43	1.44
GMAW(ソリッドワイヤ)	G78JA2UM N5CM3T	0.09	0.32	1.05	0.008	0.010	—	2.71	0.24	0.49	1.64
SAW	S804-H4	0.09	0.35	1.68	0.012	0.005	—	2.53	—	0.75	1.79 ¹⁾

注1) Moが耐侯性評価指標V式の適用範囲を超えているため、V値は参考値。

2.3 製作基準・品質基準とガイドライン

鋼橋における製作基準・品質基準は、各発注機関により多少の差異があるものの、通常は「道路橋示方書・同解説」の施工編によるのが一般的である。しかし、近年の製鋼技術の発達により開発されている高性能鋼は、従来の鋼材に比べて著しく施工性が改善されているものがあり、その性能を最大限活用して製作を行うことは経済的にも有効である。

このため、鋼橋の製作においてはこれらの高性能鋼を一般的に使用できるようにすることが重要であり、これらの鋼材の特性を考慮した製作基準・品質基準を別途定める必要がある。これにより、高性能化によるメリットのほか製作効率の向上や施工管理の軽減など、作業の簡略化による効果が期待できる。

2.3.1 製作基準・品質基準の提案

今回、東京港臨海道路の南北水路横断道路橋（仮称）と東京港臨海大橋（仮称）にSBHS500が大量に使用されたことから、国土交通省にて新たにSBHS鋼に適合した製作基準書が纏められた。また、各工事において各種溶接施工試験が実施されるなど施工におけるデータが得られたことや、実際の製作がほぼ完了したことからSBHS500における製作基準・品質基準について、道路橋示方書の施工編との対比により提案を行う。

ただし、SBHS700についてはいまだ施工実績が無いことや、実施工に即した施工試験が実施されていないことから、使用に当たっては施工試験等により確認を行うことが望ましい。

鋼種の選定

1. 6 鋼種の選定
 2) 溶接により拘束力を受ける主要部材で主として板厚方向に引張力を受ける場合には溶接部又はその周辺部にわれが発生する可能性があるため、絞り値等鋼材の板厚方向の特性に配慮しなければならない。
 具体的には、表一解1.6.11に示すJIS G 3199を参考にし、板厚方向の絞り値の保証された鋼材を使用するのがよい。

表一解 1.6.1 厚さ方向の絞り値及び硫黄含有量

クラス番号	厚さ方向の絞り値		硫黄含有量
	3個の試験値の平均	個々の試験値	
Z15S	15%以上	10%以上	0.010%以下
Z25S	25%以上	15%以上	0.008%以下
Z35S	35%以上	25%以上	0.006%以下

- 3) 主要材料において冷間曲げ加工を行う場合、内側半径は板厚の15倍以上とするのが望ましい。ただし、鋼材規格で衝撃試験が規定されている鋼種でJIS Z 2242に規定するシャルピー衝撃試験の結果が表一解1.6.2に示す条件を満たし、かつ化学成分中の全窒素量が0.006%を超えない材料については、内側半径を板厚の7倍以上又は8倍以上としてよい。

表一解 1.6.2 シャルピー吸収エネルギーに対する冷間曲げ加工半径の許容値

シャルピー吸収エネルギー(J)	冷間曲げ加工の半径	付記記号
150以上	板厚の7倍以上	-7L、-7C
200以上	板厚の5倍以上	-5L、-5C

SBHS鋼は、S量を極めて低く抑えられていることから、Z35S相当の耐ラメラリア性能を有していると考えられる。

種類の記号	S
SBHS500、500W	0.006%以下

SBHS鋼は、ひずみ時効に関係する窒素を大幅に減少させるとともに、シャルピー吸収エネルギーを100Jとしている。最近の鋼材データによれば、100Jでも時効後の27Jを満たしていることから、SBHS500、SBHS500Wにおいては最小曲げ半径を板厚の7倍(塑性ひずみ7.5%程度)以上とすることも可能である。

種類の記号	N	(J)
SBHS500、500W	0.006%以下	VE-5 100以上

製作

17. 3. 1 加工
 1) 板取り
 主要部材の板取りは、主たる応力の方向と圧延方向を一致させるのを原則とする。ただし、圧延方向についても、設計で要求する規格の機械的性質を満足する場合にはその限りではない。

SBHS鋼は、圧延直角方向についても設計で要求する規格の機械的性質を満足することを示していることから、主要部材の圧延方向と主たる応力の方向を一致させる必要はない。東京港湾臨海大橋(国土交通省 関東地方整備局 東京港湾事務所)の製作基準書では、本趣旨により圧延方向との一致を要求していない。

SBHS鋼																			
<p>2) ひずみどり i) 溶接によって生じた部材の変形は、プレス又はガス炎加熱法等によってきよ正するものとする。 ii) ガス炎加熱法によってきよ正する場合の鋼材表面温度及び冷却法は表一17.3.4によるものとする。</p> <p>表一17.3.4 ガス炎加熱法による線状加熱時の鋼材の表面温度及び冷却法</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>鋼種</th> <th>鋼材表面温度</th> <th>冷却法</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">調質鋼 (Q)</td> <td>750°C以下</td> <td>空冷または空冷後</td> </tr> <tr> <td>900°C以下</td> <td>600°C以下で水冷</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">熱加工制御鋼</td> <td>Ceq > 0.38</td> <td>空冷または空冷後</td> </tr> <tr> <td>Ceq ≤ 0.38</td> <td>500°C以下で水冷</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">その他の鋼材</td> <td>900°C以下</td> <td>加熱直後水冷</td> </tr> <tr> <td>900°C以下</td> <td>または空冷 赤熱状態からの水冷を避ける</td> </tr> </tbody> </table>	鋼種	鋼材表面温度	冷却法	調質鋼 (Q)	750°C以下	空冷または空冷後	900°C以下	600°C以下で水冷	熱加工制御鋼	Ceq > 0.38	空冷または空冷後	Ceq ≤ 0.38	500°C以下で水冷	その他の鋼材	900°C以下	加熱直後水冷	900°C以下	または空冷 赤熱状態からの水冷を避ける	<p>SBHS鋼は、最新のTMC技術により製造されていることから従来のTMCと同じ鋼材表面温度および冷却法を用いてもよいものとする。</p> <p>また、SBHS鋼は低Ceq化と大入熱溶接に対応する特性を併せ持つことから、TMCと同等の表面温度と冷却法としたが、より厳しい条件(1000°C加熱後水冷)でも性能劣化が認められないとの報告もあり、十分なデータで確認が出来る場合は加熱矯正温度を高く設定することも可能である[2004, 鉄鋼連盟], [2006, 藤田, 湯田ら]。</p>
鋼種	鋼材表面温度	冷却法																	
調質鋼 (Q)	750°C以下	空冷または空冷後																	
	900°C以下	600°C以下で水冷																	
熱加工制御鋼	Ceq > 0.38	空冷または空冷後																	
	Ceq ≤ 0.38	500°C以下で水冷																	
その他の鋼材	900°C以下	加熱直後水冷																	
	900°C以下	または空冷 赤熱状態からの水冷を避ける																	
<p>溶接</p> <p>17.4.4 溶接施工法 2) 溶接施工試験 SM570, SMA570, SM520及びSMA490WIにおいて、1パスの入熱量が7,000J/mmをこえる場合は、溶接施工試験を行うものとする。</p>	<p>SBHS500, SBHS500WIにおいては1パスの入熱量が10,000J/mmをこえる場合は、溶接施工試験を行うものとする。</p> <p>また、SBHS鋼を用いて溶接施工試験を行う場合は、鋼材の要求特性から溶接金属及び溶接熱影響部での衝撃試験の判定基準が異なっていることや、溶接金属の降伏点を別途確認する必要があることに注意しなければならない。</p> <p>(判定基準変更)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>試験項目</th> <th>試験片の形状</th> <th>試験方法</th> <th>判定基準</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>衝撃試験</td> <td>JIS Z 2202 4号</td> <td>JIS Z 2242</td> <td>溶接金属及び溶接熱影響部で47J以上 (母材の規格値より低く設定されていることに注意)</td> </tr> </tbody> </table> <p>(追加試験)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>試験項目</th> <th>試験片の形状</th> <th>試験方法</th> <th>判定基準</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>溶接金属引張試験</td> <td>JIS Z 3111</td> <td>JIS Z 2241</td> <td>降伏点及び引張強さが母材の規格値以上</td> </tr> </tbody> </table>	試験項目	試験片の形状	試験方法	判定基準	衝撃試験	JIS Z 2202 4号	JIS Z 2242	溶接金属及び溶接熱影響部で47J以上 (母材の規格値より低く設定されていることに注意)	試験項目	試験片の形状	試験方法	判定基準	溶接金属引張試験	JIS Z 3111	JIS Z 2241	降伏点及び引張強さが母材の規格値以上		
試験項目	試験片の形状	試験方法	判定基準																
衝撃試験	JIS Z 2202 4号	JIS Z 2242	溶接金属及び溶接熱影響部で47J以上 (母材の規格値より低く設定されていることに注意)																
試験項目	試験片の形状	試験方法	判定基準																
溶接金属引張試験	JIS Z 3111	JIS Z 2241	降伏点及び引張強さが母材の規格値以上																

3) 組立溶接
 ii) 組立溶接のすみ肉(又は換算)脚長は4mm以上とし、長さは80mm以上とする。ただし、厚い方の板厚が12mm以下の場合又は次の式により計算した鋼材の溶接われ感受性組成 P_{cm} が0.22%以下の場合には50mm以上とすることができる。

$$P_{cm} = C + Mn/20 + Si/30 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + Cu/20 + Sb \quad (\%)$$

また、SBHS500、500Wについては $P_{cm} \leq 0.20\%$ と規定されていることや、20mmの組立溶接でもわれの発生がないとの報告もあることから、十分なデータで確認ができる場合は組立溶接の脚長を小さくしたり、長さを短くすることが可能である[2004, 鉄鋼連盟]。

4) 予熱
 鋼種、板厚及び溶接方法に応じて、溶接線の両側100mm及びびアークの前方100mm範囲の母材を表一17.4.5により予熱することを標準とする。

表一17.4.5 予熱温度の標準

鋼種	溶接方法	予熱温度(°C)			
		25以下	25をこえ 40以下	40をこえ 50以下	50をこえ 100以下
SM400	低水素系以外の溶接棒による 被覆アーク溶接	予熱なし	50		
	低水素系の溶接棒による 被覆アーク溶接	予熱なし	予熱なし	50	50
	サブマージアーク溶接	予熱なし	予熱なし	予熱なし	予熱なし
	ガスシールドアーク溶接	予熱なし	予熱なし	予熱なし	予熱なし
SMA400W	低水素系の溶接棒による 被覆アーク溶接	予熱なし	予熱なし	50	50
	サブマージアーク溶接	予熱なし	予熱なし	予熱なし	予熱なし
SMA490 SMA490Y	ガスシールドアーク溶接	予熱なし	予熱なし	50	80
	低水素系の溶接棒による 被覆アーク溶接	予熱なし	予熱なし	50	50
SM520 SM570	サブマージアーク溶接	予熱なし	予熱なし	80	100
	ガスシールドアーク溶接	予熱なし	予熱なし	50	80
SMA490W SMA570W	低水素系の溶接棒による 被覆アーク溶接	予熱なし	予熱なし	80	100
	サブマージアーク溶接	予熱なし	予熱なし	50	80

(注) 予熱なしについては、気温が5°C以下の場合には20°C程度に加熱する。

SBHS500	低水素系の溶接棒による 被覆アーク溶接	予熱なし	予熱なし	予熱なし	予熱なし
SBHS 500W	サブマージアーク溶接	予熱なし	予熱なし	予熱なし	予熱なし
	ガスシールドアーク溶接	予熱なし	予熱なし	予熱なし	予熱なし

(注) 予熱なしについては、気温が5°C以下の場合には20°C程度に加熱する。

道路橋示方書

SBHS鋼

5) 入熱制限

1) SMA570, SMA570W, SM520及びSMA490Wの場合、1パスの入熱量を7,000J/mm以下、SM490, SM490Yの場合、入熱量を10,000J/mm以下に管理することを原則とする。

(参考) 本州四国連絡橋公団 鋼橋等製作基準より抜粋

【要求品質】

調質高張力鋼の溶接においては、溶接部に軟化、ぜい化をまねかないように入熱量および層間温度の規定を守らなければならない。

【作業基準】

調質高張力鋼の入熱量および層間温度は下表によるものとする。

鋼種	板厚t(mm)	最大入熱量Q(KJ/cm)	最高層間温度T(°C)
SM58 SMA58W	t < 25	Q ≤ 50	T ≤ 230
	25 ≤ t < 50	Q ≤ 70	T ≤ 230
	50 ≤ t < 75	Q ≤ 80	T ≤ 230
HT70 HT80	t < 25	Q ≤ 40	T ≤ 200
	25 ≤ t < 50	Q ≤ 50	T ≤ 200
	50 ≤ t < 75	Q ≤ 50	T ≤ 230

5) 入熱制限

1) SM570, SMA570W, SM520及びSMA490Wの場合、1パスの入熱量を7,000J/mm以下、SBHS500, SBHS500W, SM490及びSMA490Yの場合、入熱量を10,000J/mm以下に管理することを原則とする。

6) 溶接施工上の注意

v) 溶接/パス間温度

SBHS500, SBHS500W, SM570及びSM570Wの場合、パス間温度が高温となると継ぎ手性能が急激に低下する。本州四国連絡橋公団基準では、60K鋼についてはパス間温度を230°C以下と規定しており、溶接作業性の支障となっている。

SBHS500, SBHS500Wでは、熱影響部のじん性低下を防ぐため細粒高じん化技術が導入されており、実験ではCO₂溶接にて5,000J/mm以下の入熱にてパス間温度が250°C, SAW溶接では10,000J/mm以下の入熱にてパス間温度が300°Cの条件でも継ぎ手性能が確保できるとの報告もあり、施工に当たっては施工試験にて確認を行うなどにより性能を保証できる場合は、パス間温度を緩和することが可能である[2006, 藤田, 湯田ら]。

2.4 溶接施工試験結果

本章では、南北水路横断橋（仮称）および東京港臨海大橋（仮称）において、新鋼材の使用にあたり、溶接継手の性能を確認する目的で実施された溶接施工試験について紹介する[2008, 東京都][2009, 関東地方整備局].

2.4.1 溶接施工試験の試験内容

道路橋示方書Ⅱ.17.4.4では使用鋼材の溶接性や溶接方法の適正を確認する方法として、開先溶接試験、すみ肉溶接試験、およびスタッド溶接試験の3種類の溶接施工試験があげられている。表-2.4.1に道路橋示方書にあげられている溶接施工試験と、南北水路横断橋および東京港臨海大橋の両工事で実施された溶接施工試験の種類を示す。南北水路横断橋では、施工対象の橋梁においてスタッド溶接がないためスタッド溶接試験は実施されていない。一方、東京港臨海大橋では、y形溶接割れ試験（JIS Z 3158）を実施してBHS500鋼における最小予熱温度の確認を行っている。さらに、板継ぎ溶接以外の工場溶接継手で完全溶け込み溶接が要求され、その溶接施工がガスシールドアーク溶接で行われる十字継手に着目して、十字継手溶接試験を溶接施工試験の内容に加えている。

表-2.4.1 溶接施工試験の種類

試験の種類		道路橋示方書	南北水路横断橋	東京港臨海大橋
①	y形溶接割れ試験	—	—	○
②	開先溶接試験	○	○	○
③	十字継手溶接試験	—	—	○
④	すみ肉溶接試験	○	○	○
⑤	スタッド溶接試験	○	—	○

開先溶接試験、十字継手溶接試験、およびすみ肉溶接試験における非破壊検査の試験項目と判定基準を添付資料2.3.1に、機械的性質確認試験の試験項目と判定基準を添付資料2.3.2～2.3.4に示す。衝撃試験の判定基準には、溶接材料の規格値を用いている。両工事とも溶接材料のJIS規格の改訂前に溶接施工試験を実施しているため、シャルピー吸収エネルギー47J (-5℃)を衝撃試験の判定基準としている。さらに、東京港臨海大橋では開先溶接試験および十字継手溶接試験の機械的性質確認試験において、溶着金属の引張試験を加えて溶着金属の引張強さと耐力（または降伏点）の確認を行っている。

2.4.2 溶接施工試験の結果

添付資料2.3.5にy形溶接割れ試験の試験結果を、添付資料2.3.6～2.3.8に開先溶接試験、十字継手試験およびすみ肉溶接試験における機械的性質確認試験の結果の一覧を示す。また、開先溶接試験および十字継手溶接試験における試験結果のグラフを図-2.4.1～2.4.6に示す。

図-2.4.1は溶接施工試験に用いられたBHS鋼の板厚と試験溶接時の最大入熱量の実績を示したものである。溶接施工試験に用いられたBHS鋼の板厚は24mm～59mmで、試験溶接時の最大入熱量はサブマージアーク溶接で3,700J/mm～7,900J/mm、ガスシールドアーク溶接で2,600J/mm～5,800J/mmの実績である。

図-2.4.2は母材と溶接継手の引張強さの関係を、図-2.4.3は母材と溶着金属の引張強さの関係を、そして、

図-2.4.4に母材と溶着金属の耐力（降伏点）の関係を示す。母材の引張強さおよび耐力は、供試鋼材のミルシート（Mill Sheet）の値を用いて整理している。溶着金属の引張強さおよび耐力は、母材と同等の性能を有している。

図-2.4.5に母材と溶着金属の衝撃値（シャルピー吸収エネルギー）の関係を、図-2.4.6に母材と熱影響部の衝撃値の関係を示す。母材の衝撃値は、供試鋼材のミルシートの値を用いている。溶着金属および熱影響部の衝撃試験結果は、溶接材料の規格値を満足している。しかしながら、母材の有する衝撃値と比較すると、溶着金属の衝撃値は母材の20~40%と低い。両工事における溶接施工試験の結果で、溶着金属の衝撃値が母材と同等、或いは上回っているものはない。

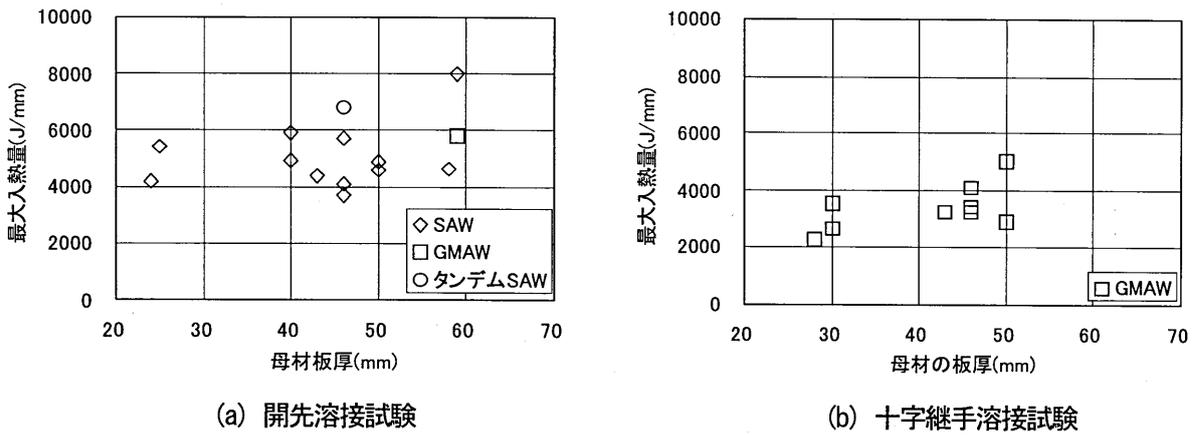


図-2.4.1 母材の板厚と最大入熱量の溶接施工試験実績

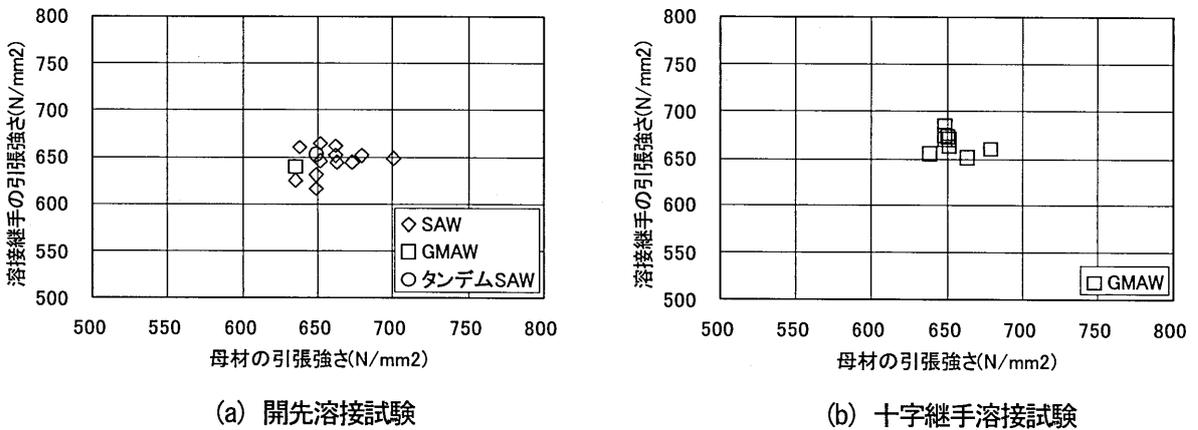
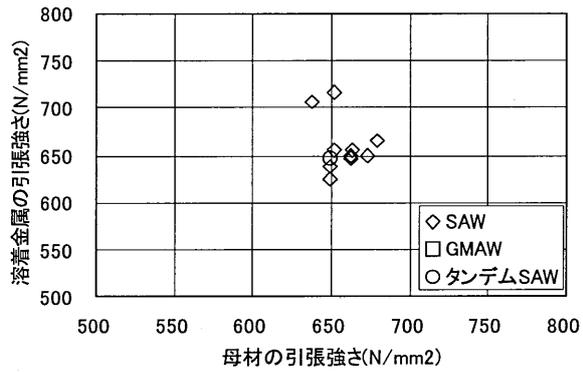
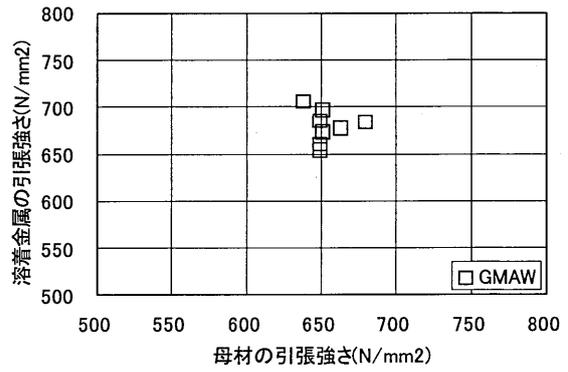


図-2.4.2 母材と溶接継手の引張強さの比較

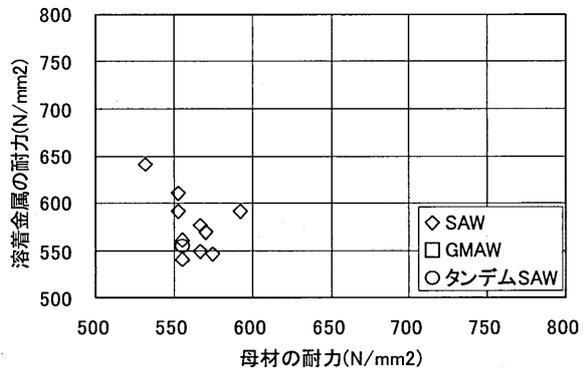


(a) 開先溶接試験

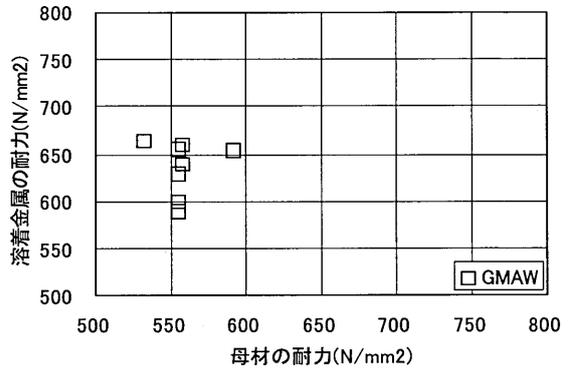


(b) 十字継手溶接試験

図-2.4.3 母材と溶着金属の引張強さの比較

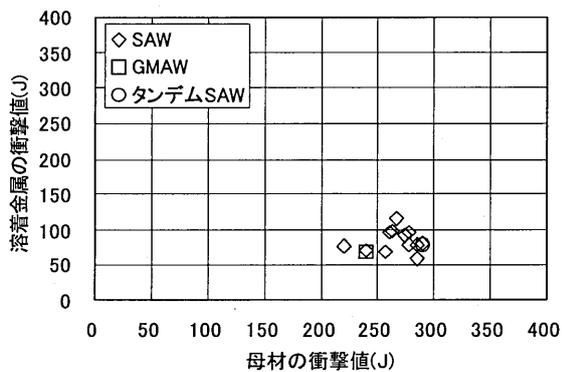


(a) 開先溶接試験

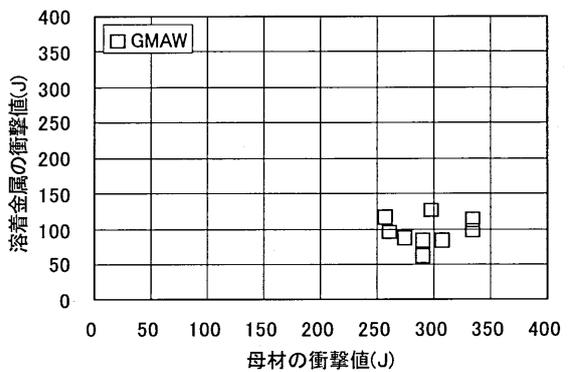


(b) 十字継手溶接試験

図-2.4.4 母材と溶着金属の耐力（降伏点）の比較

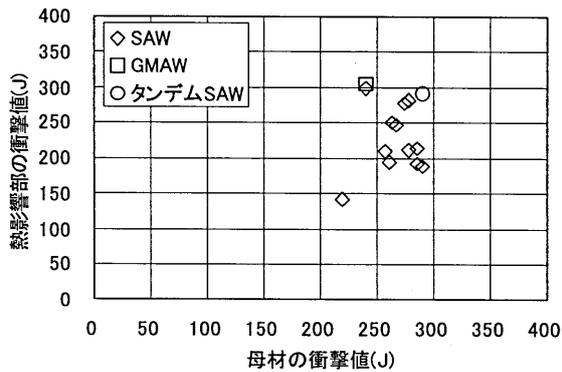


(a) 開先溶接試験

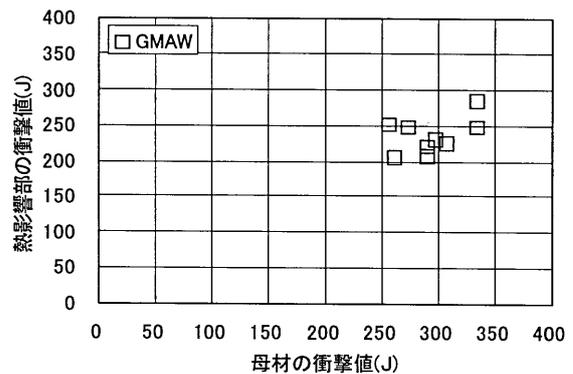


(b) 十字継手溶接試験

図-2.4.5 母材と溶着金属の衝撃値の比較



(a) 開先溶接試験



(b) 十字継手溶接試験

図-2.4.6 母材と熱影響部の衝撃値の比較

参考資料

- [1973, 本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書, 土木学会・本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会・鋼材分科会, 1973. 3]
- [1994, 岡村義弘, 糟谷正, 山場良太, 田中睦人, 為広博: 鋼構造論文集, 第一巻, 第一号, 1994. 3]
- [1995, 岡村義弘, 田中睦人, 奥島基裕, 山場良太, 為広博, 井上肇, 糟谷正, 瀬戸厚司: 新日鉄技報, 第356号, 1995]
- [1995, 岡野重雄, 今村弘樹, 岩井清: 神戸製鋼技報, 第4号, vol145, No. 1, 1995]
- [1995, 大西一志, 末田恭輔, 岡口秀治, 原修一, 別所清: 圧力技術, 第33巻, 第4号, 1995]
- [1996, 村越潤: 強度特性から見た高性能鋼材の橋梁への適用性について 土木技術資料, 38-2, 1996]
- [1998, 中川一郎, 大井健次, 板倉教次: 川崎製鉄技報, 1998]
- [2000, 日本鋼構造協会: 次世代土木鋼構造研究特別委員会 高機能鋼材の橋梁への利用小委員会 高機能・高性能鋼材の橋梁への利用研究報告, 2000. 3]
- [2000, 小西拓洋, 高橋和也, 三木千壽: 高強度鋼の適用による鋼橋の合理化設計の可能性, 土木学会論文集 No. 654/I-52, pp. 91-103, 2000. 7]
- [2002, 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, (社)道路協会, 2002. 3]
- [2003, 三木千壽, 市川篤司, 楠隆, 川端文丸: 橋梁用高性能鋼材 (BHS500, BHS700) の提案, 土木学会論文No. 738/I-64, pp. 1-10, 2003. 7]
- [2003, 三木千壽, 市川篤司, 鶴飼真, 竹村誠洋, 中山武典, 紀平寛: 無塗装橋梁用鋼材の耐候性合金指標および耐候性評価法の提案, 土木学会論文集, No.738/ I -64, pp.271-281, 2003.7]
- [2004, 田中睦人, 松井和幸, 安藤隆一, 湊田保司: 橋梁用高性能鋼材(BHS鋼), 国土交通省関東地方整備局 新技術情報システム, KTK-040005, 2004. 7]
- [2004, 日本鉄鋼連盟: BHS鋼性能評価試験報告書]
- [2005, 日本鉄鋼連盟: 降伏点500 N/mm²及び降伏点700 N/mm²溶接構造用圧延鋼材, 鉄鋼連盟製品(MDCR 0014-2004)], 2005. 3]
- [2006, 安藤隆一, 田中睦人, 松田穰, 岡野重雄: 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-, 土木学会第61回学術年次講演会, 2006. 9]

- [2006, 岡野重雄, 田中睦人, 安藤隆一, 松田穰: BHS500鋼の製作性評価試験と溶接継手特性 (第3報) —溶接継手特性に及ぼすパス間温度の影響確認試験結果—, 土木学会第61回学術年次講演会, 2006. 9]
- [2006, 田中睦人, 松田穰, 安藤隆一, 岡野重雄: BHS500鋼の製作性評価試験と溶接継手特性 (第2報) —少数 I 桁橋モデルによる製作性評価試験—, 土木学会第61回学術年次講演会, 2006. 9]
- [2006, 藤田敏明, 湯田誠, 米山徹, 多田賢: 川田工業技報, vol25, 2006. 1]
- [2007, 本間宏二, 田中睦人, 松岡和己, 糟谷正, 川崎博史: 新日鉄技報, 第387号, pp. 47-52, 2007. 10]
- [2008, 林智樹, 千葉照男, 公平和裕, 保坂鐵矢, 町田文孝: 東京港臨海大橋 (仮称) で採用された高性能鋼 (BHS) の溶接施工試験結果, 土木学会第63回学術年次講演会, 2008. 9]
- [2008, 武野正和, 本間宏二, 田中睦人: 橋梁用高性能鋼BHS500の製造と試設計によるコスト縮減評価, 土木学会第63回学術年次講演会, 2008. 9]
- [2008, 日本規格協会: 橋梁用高降伏点鋼板 JIS G3140, 2008. 11]
- [2008, 東京都 港湾局 東京港建設事務所: 委員会提供資料, 2008]
- [2009, 土木材料仕様書, 東京都建設局, 2009.4]
- [2009, 鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物, (財)鉄道総合技術研究所, 2009.7]
- [2009, 国土交通省 関東地方整備局 東京港湾事務所: 委員会提供資料, 2009]

SBHS鋼とSM材の鋼材規格・保有性能比較資料

SBHS500とSM570比較(HPS含め)

1. 適用板厚と熱処理

	適用厚さ	熱処理	備考
SBHS500	6 ≤ t ≤ 100	熱加工制御による。但し、受渡当事者間協定で焼入焼戻等も可	-
SM570	6 ≤ t ≤ 100	指定なし	-
A709	相当規格なし	-	A709 HPS485Wとして耐候性鋼の規定あり

2. 化学成分

	板厚区分	C	Si	Mn	P	S	N	Ceq.	Pcm	備考
SBHS500	≤ 100	≤ 0.11	≤ 0.55	≤ 2.00	≤ 0.020	≤ 0.006	≤ 0.006	規定なし	≤ 0.20	
SM570	≤ 50 ≤ 100	≤ 0.18	≤ 0.55	≤ 1.60	≤ 0.035	≤ 0.035	規定なし	≤ 0.44 ≤ 0.47	≤ 0.28 ≤ 0.30	Ceq., Pcmは受渡当事者間で選択

SBHS500の特徴

- ・[C]上限を抑制し最高硬さの低減など溶接性能を向上
- ・[P]上限を抑制し高纯净鋼とし高靱性と優れた溶接性を確保
- ・[S]上限を抑制し高纯净鋼とし耐ラメラティア性能を、道路橋示方書で規定されている最上級グレードのZ35Sと整合
- ・[N]上限を抑制し、道路橋示方書の強曲げ加工材に規定されている上限規定値と整合
- ・[Pcm]を大幅に低減し、予熱フリー化(道路橋示方書予熱フリー基準に比べても、大幅に抑制)

3. 機械的性質

①引張

	板厚区分	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	伸び(%)	試験片形状	耐ラメラティア性能(参考)
SBHS500	≤ 16	500 ≤	570 ~ 720	19 ≤	5号	Z35相当(試験実施は個別対応)
	26 ≤					
	20 ≤					
SM570	≤ 16	450 ≤	570 ~ 720	19 ≤	5号	規定なし(特別仕様選定要)
	26 ≤					
	430 ≤					
	420 ≤					

SBHS500の特徴

- ・全厚において、降伏強度を高位で一定で保証 (⇒SM570に比べ、薄手で約10%、厚手で約20%降伏強度アップ)
- ・耐ラメラティア性能(Z35相当)を保有

②シャルピー吸収エネルギー

	板厚区分	試験温度(°C)	シャルピー吸収エネルギー(J)	試験片
SBHS500	12 < t ≤ 100	-5	100 ≤	Vノッチ 圧延直角方向
SM570	12 < t ≤ 100	-5	47 ≤	Vノッチ 圧延方向

- ・吸収エネルギーを高位に保証 (⇒冷間曲げ性能として曲げ内側半径7φ相当の性能を有す)
- ・試験方向を厳格な圧延直角方向で保証 (⇒道路橋示方書による板取り方向指定が不要となる)

4. 溶接品質(道路橋示方書より)

	板厚区分	予熱温度(°C)	備考	溶接入熱上限(kJ/cm)	最高層間温度(°C)
SBHS500	≤ 100	予熱なし		≤ 100	(300)
SM570	≤ 25	予熱なし	GMAWの場合	≤ 70	230*
	≤ 50	50°C			
	≤ 100	80°C			

SBHS500の特徴

- ・予熱なし
- ・道路橋示方書でSM490, SM490Yにのみ許容される溶接入熱上限まで適用が可能

*本四

SBHS500WとSMA570比較(HPS含め)

1. 適用板厚と熱処理

適用厚さ	熱処理	備考
SBHS500W 6 ≤ t ≤ 100	熱加工制御による。但し、受渡当事者間協定で焼入焼戻等も可	-
SMA570 t ≤ 100	指定なし	-
HPS485W t ≤ 100	指定なし	Q ≥ 900℃、T ≥ 590℃

2. 化学成分

板厚区分	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	N	Ceq	Pcm	備考
SBHS500W 6 ≤ t ≤ 100	≤ 0.11	0.15 ~ 0.55	≤ 2.00	≤ 0.020	≤ 0.006	0.30 ~ 0.50	0.05 ~ 0.30	0.45 ~ 0.75	≤ 0.006	規定なし	≤ 0.20	
SMA570 ≤ 50 ≤ 100	≤ 0.18	0.15 ~ 0.65	≤ 1.40	≤ 0.035	≤ 0.035	0.30 ~ 0.50	0.05 ~ 0.30	0.45 ~ 0.75	規定なし	≤ 0.44 ≤ 0.47	≤ 0.28 ≤ 0.30	Ceq, Pcmは受渡当事者間で選択
HPS485W ≤ 65 ≤ 100	≤ 0.11	0.30 ~ 0.50	1.10 ~ 1.35 1.10 ~ 1.50	≤ 0.020	≤ 0.006	0.25 ~ 0.40	0.25 ~ 0.40	0.45 ~ 0.70	≤ 0.015	規定なし	規定なし	Mo: 0.02 ~ 0.08、V: 0.04 ~ 0.08、AL: 0.010 ~ 0.040、6.0 ≤ WI

SBHS500Wの特徴

- ・[C]上限を抑制し最高硬さの低減など溶接性を向上
- ・[P]上限を抑制し高清算鋼とし高靱性と優れた溶接性を確保
- ・[S]上限を抑制し高清算鋼とし耐ラメラシア性能を、道路橋示方書で規定されている最上級グレードのZ335Sと整合
- ・[N]上限を抑制し、道路橋示方書の強曲げ加工材に規定されている上限規定値と整合
- ・[Pcm]を大幅に低減し、予熱フリー化(道路橋示方書予熱フリー基準に比べても、大幅に抑制)
- ・耐候性合金指標(v値)を参考として表記

3. 機械的性質

①引張

板厚区分	YS(N/mm ²)	TS(N/mm ²)	伸び(%)	試験片形状	耐ラメラシア性能(参考)
SBHS500W ≤ 16 16 < t ≤ 20	500 ≤	570 ~ 720	19 ≤ 26 ≤ 20 ≤	5号 4号	Z335相当(試験実施は個別対応)
SMA570 ≤ 16 ≤ 20 ≤ 40 ≤ 75 ≤ 100	460 ≤ 450 ≤ 430 ≤ 420 ≤	570 ~ 720	19 ≤ 26 ≤ 20 ≤	5号 4号	規定なし(特別仕様選定要)
HPS485W ≤ 100	485 ≤	585 ~ 760	17 ≤	A370参照	Ca添加規定あり

- ・全厚において、降伏強度を高位で一定で保証 (⇒SMA570に比べ、薄手でも約10%、厚手で約20%降伏強度アップ)
- ・耐ラメラシア性能(Z335相当)を保有

②シャルピー吸収エネルギー

板厚区分	試験温度(℃)	シャルピー吸収エネルギー(J)	試験片	備考
SBHS500W 12 < t ≤ 100	-5	100 ≤	Vノッチ 圧延直方向	
SMA570 12 < t ≤ 100	-5	47 ≤	Vノッチ 圧延方向	
HPS485WT HPS485WF ≤ 100	-23	34 ≤ 48 ≤	Vノッチ 圧延方向	実降伏強度により試験温度低下(585MPa超、70MPa毎に8℃)

- ・吸収エネルギーを高位に保証 (⇒冷間曲げ性能として曲げ内側半径が相当の性能を有す)
- ・試験方向を縦横な圧延直方向で保証 (⇒道路橋示方書による板取り方向指定が不要となる)

4. 溶接品質(道路橋示方書より)

板厚区分	予熱温度(℃)	備考	溶接入熱上限(kJ/cm)	最高層間温度(℃)
SBHS500W ≤ 100	予熱なし		≤ 100	-
SMA570 ≤ 25 ≤ 50 ≤ 100	予熱なし 50℃ 80℃	GMAWの場合	≤ 70	230*
HPS485W ≤ 100	記述なし		記述なし	-

SBHS500Wの特徴

- ・予熱なし
- ・道路橋示方書でSM490、SM490YIのみ許容される溶接入熱上限まで適用が可能 (*本四)

SBHS700、HBS G3102-HT80、明石海峡大橋向け予熱低減型HT780比較

1. 適用板厚と熱処理

規格	適用厚さ	熱処理
SBHS700	6mm以上 75mm以下	熱加工制御による。但し、受渡当事者間協定で焼入焼戻等も可
HBS HT80	8mm以上 75mm以下	焼入焼戻
明石 Cu析出強化型HT780	20mm以上 34mm以下	焼入焼戻
明石 低Pcm型HT780	-	-
米国相当規格なし	-	-

2. 化学成分

規格	板厚区分	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SBHS700	6 ≤ t ≤ 75	≤ 0.11	≤ 0.55	≤ 2.00	≤ 0.015	≤ 0.006	-	-	-	≤ 0.60
HBS HT80	8 ≤ t ≤ 75	≤ 0.14	0.15 ~ 0.55	0.60 ~ 1.55	≤ 0.015	≤ 0.015	-	-	-	-
明石 Cu析出強化型HT780	20 ≤ t ≤ 34	≤ 0.07	0.15 ~ 0.45	0.60 ~ 1.30	≤ 0.015	≤ 0.015	0.80 ~ 1.20	≤ 1.50	≤ 0.80	≤ 0.80
明石 低Pcm型HT780	-	≤ 0.09	0.15 ~ 0.55	-	-	-	≤ 0.50	-	-	-
米国相当規格なし	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

SBHS700の特徴

- ・[C]上限を抑制し溶接性能を向上
- ・[S]上限を抑制し高滑浄鋼とし溶接品質、耐ラメラリア性能を向上
- ・[N]上限を抑制し、曲げ加工材後の靱性劣化防止に配慮

①引張、曲げ

規格	板厚(mm)	強度		TS(N/mm ²)	伸び試験片	伸び(%)	曲げ性		耐ラメラリア性能(参考)
		YS(N/mm ²)	YS(N/mm ²)				試験片	試験片	
SBHS700	6 ≤ t ≤ 75	700 ≤	780 ~ 930	780 ~ 930	5号	16 ≤	-	-	Z35相当(試験実施は個別対応)
	8 ≤ t ≤ 50	685 ≤	780 ~ 930	780 ~ 930	4号	24 ≤	180	JIS1号	1.5t(t<32)、2.0t(32 ≤ t)
	50 < t ≤ 75	665 ≤	760 ~ 910	760 ~ 910	4号	16 ≤	-	-	-
明石 Cu析出強化型HT780	20 ≤ t ≤ 34	685 ≤	780 ~ 930	780 ~ 930	5号	22 ≤	180	JIS1号	-
	20 ≤ t ≤ 34	685 ≤	780 ~ 930	780 ~ 930	4号	22 ≤	180	JIS1号	-
	20 ≤ t ≤ 34	685 ≤	780 ~ 930	780 ~ 930	4号	16 ≤	-	-	-
明石 低Pcm型HT780	20 ≤ t ≤ 34	685 ≤	780 ~ 930	780 ~ 930	5号	22 ≤	180	JIS1号	-
	20 ≤ t ≤ 34	685 ≤	780 ~ 930	780 ~ 930	4号	17 ≤	180	JIS1号	-
	20 ≤ t ≤ 34	685 ≤	780 ~ 930	780 ~ 930	4号	16 ≤	-	-	-

- ・全厚において、降伏強度を高位置で一定で保証
- ・耐ラメラリア性能を保有

②シャルピー吸収エネルギー

規格	板厚区分	試験温度(°C)	シャルピー-吸収エネルギー(J)
SBHS700	12 ≤ t ≤ 75	-40	100 ≤
HBS HT80	12 ≤ t ≤ 75	-40	47 ≤
明石 Cu析出強化型HT780	12 ≤ t ≤ 34	-40	47 ≤
明石 低Pcm型HT780	12 ≤ t ≤ 34	-40	47 ≤

- ・吸収エネルギー-老高位に保証
- ・試験方向を縦横が圧延角方向で保証
- (⇒冷間曲げ性能として曲げ内側半径7相当の性能を有す)
- (⇒道路標示方角による縦取り方向指定が不要となる)

4. 溶接品質

規格	板厚区分	予熱温度(°C)	最高硬さ規定	最大入熱kJ/cm	最高密閉温度°C
SBHS700	6 ≤ t ≤ 75	50°C	-	50	-
HBS HT80	6 ≤ t ≤ 75	100 ~ 120°C	12 ≤ t ≤ 50: ≤ 420, 50 ≤ t ≤ 75: ≤ 430	t < 25: 50, t ≤ 75: 40*	t < 25: 200, t ≤ 75: 230*
明石 Cu析出強化型HT780	20 ≤ t ≤ 34	50°C	≤ 350を有す	-	-
明石 低Pcm型HT780	20 ≤ t ≤ 34	50°C	≤ 350を有す	-	-
米国相当規格なし	-	-	-	-	-

- ・予熱50°C程度にまで低減

*本四

SBHS700WとHPS690Wの比較

1. 適用板厚と熱処理

規格	適用厚さ	熱処理
SBHS700W	6mm以上 75mm以下	熱加工制御による。但し、受渡当事者間協定で焼入焼戻等も可
国内相当規格なし	-	-
HPS690W	65mm以下	焼入焼戻

・板厚75mmまで製造対応

2. 化学成分

規格	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
SBHS700W	≤0.11	0.15~0.55	≤2.00	≤0.015	≤0.006	0.30~1.50	0.05~2.00	0.45~1.20	≤0.60	≤0.05
国内相当規格なし	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HPS690W	≤0.08	0.15~0.35	0.95~1.50	≤0.015	≤0.006	0.90~1.20	0.65~0.90	0.40~0.65	0.40~0.65	0.04~0.08

・[C]上限を抑制し溶接性能を向上

・[S]上限を抑制し高清算鋼とし溶接品質、耐ラメラティア性能を向上

・[N]上限を抑制し、曲げ加工材後の韌性劣化防止に配慮

B	N	Al	Nb	Pcm	
				6 ≤ t ≤ 50	50 < t ≤ 75
≤0.005	≤0.006	-	-	≤0.30	≤0.32
-	-	-	-	-	-
-	≤0.015	0.02~0.05	0.01~0.03	-	-

3. 機械的性質

①引張、曲げ

規格	強度		TS (N/mm ²)	伸び		耐ラメラティア性能(参考)	
	板厚(mm)	YS (N/mm ²)		板厚(mm)	試験片		
SBHS700W	6 ≤ t ≤ 75	700 ≤	780~930	6 ≤ t ≤ 16	試験片	Z35相当(試験実施は個別対応)	
				16 < t	5号		16 ≤
				20 < t	4号		24 ≤
国内相当規格なし	-	-	-	-	-	-	
HPS690W	t ≤ 65	690 ≤	760~895	t ≤ 65	A370参照	16 ≤	

SBHS700Wの特徴

・全厚において、降伏強度を高位で一定で保証

・耐ラメラティア性能を保有

②シャルピー吸収エネルギー

規格	板厚区分	試験温度(°C)	シャルピー吸収エネルギー(J)	試験片	備考
SBHS700W	12 < t ≤ 75	-40	100 ≤	Vノッチ 圧延直角方向	-
国内相当規格なし	-	-	-	-	-
HPS690W	t ≤ 65	-34	34 ≤	Vノッチ 圧延方向	-
			48 ≤		

SBHS700Wの特徴

・吸収エネルギーを高位に保証

・試験方向を厳格な圧延直角方向で保証

(⇒冷間曲げ性能として曲げ内側半径7φ相当の性能を有す)

(⇒道路橋示方書による板取り方向指定が不要となる)

4. 溶接品質

規格	板厚区分	予熱温度(°C)	最大入熱kJ/cm	最高層間温度°C
SBHS700W	6 ≤ t ≤ 75	50°C	50	-
国内相当規格なし	-	-	-	-
HPS690W	t ≤ 65	記述なし	-	-

SBHS700Wの特徴

・予熱50°C程度にまで低減

B H S 鋼製作性能評価試験報告書

平成16年 7月

(社)日本鉄鋼連盟 橋梁用鋼材研究会

目 次

1. はじめに
2. 試験体形状と使用材料
3. 試験結果
 - 3-1 切断性能の試験結果
 - 3-2 孔明け性能の試験結果
 - 3-3 切削性能の試験結果
 - 3-4 組立溶接性能の試験結果
 - 3-5 溶接性能の試験結果
 - 3-6 歪み矯正性能の試験結果
 - 3-7 現場溶接性能の試験結果
 - 3-7 現場溶接試験結果
4. まとめ

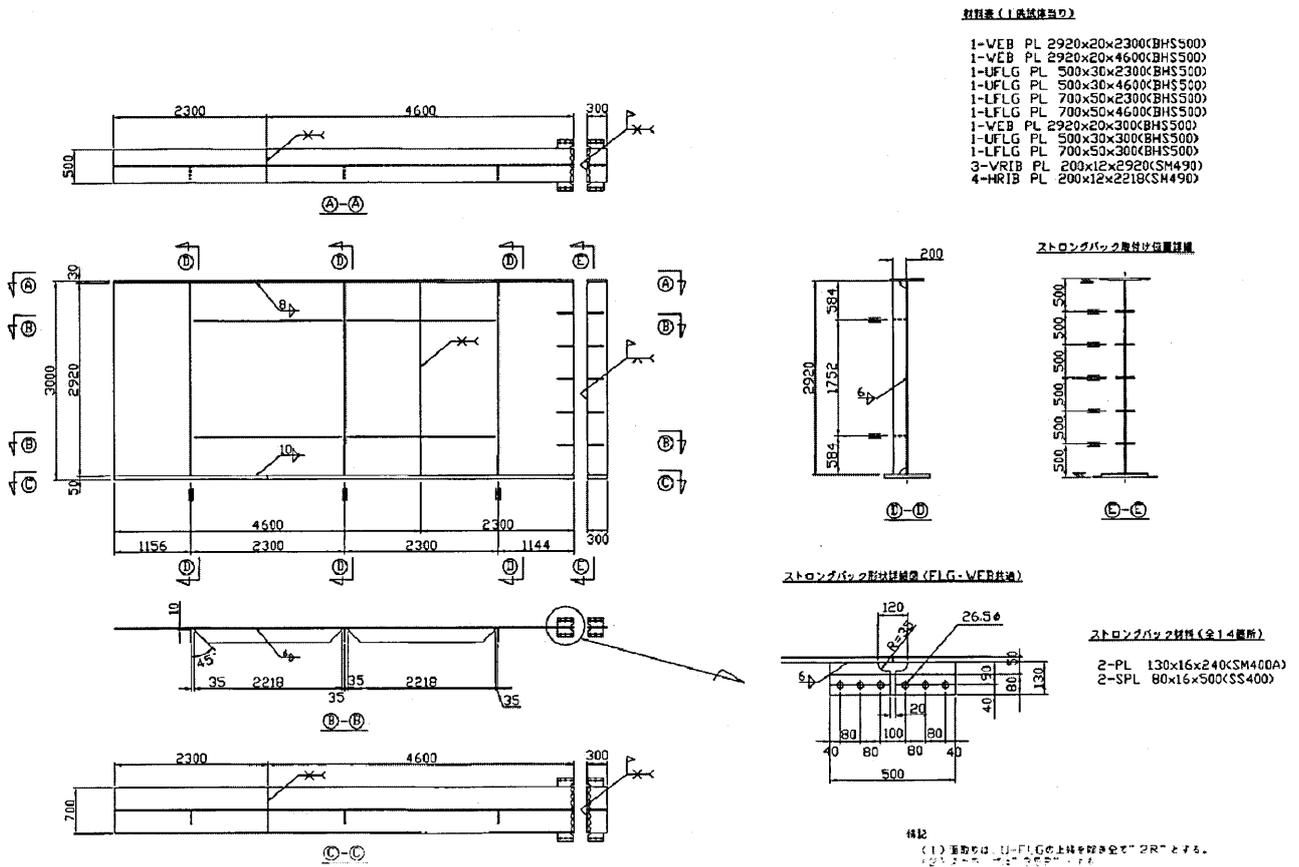
1. はじめに

近年、様々な特性を有した鋼材が開発されており、それらの特性をうまく利用して橋梁の性能に適合した鋼材を選定できれば、橋梁の性能向上の他建設コストを縮減する事が可能になる。

本報告書は、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標に開発された BHS500 鋼について、少数主桁橋を想定した供試体を用いて性能評価を行った結果について報告するものである。

2. 試験体形状と使用材料

2-1 試験体形状



2-2 使用材料

本試験に使用した材料は以下の通りである。

1) 鋼材

鋼材は新日本製鐵(株)の鋼材を用いて行い、鋼材の板厚及び規格は下表の通りである。

材 質	板 厚	規 格
BHS 500	t = 50, 30, 20	MDCR0014-2004
SM490Y	t = 12	JIS G 3106

2) 溶接材料

本試験に用いた溶接材料を下表に示す。

溶接部位	溶接方法	溶接材料	ワイヤ径 (mm)	メーカー
工場溶接				
組立溶接	CO ₂ 半自動	YM-60C	1.2	日鐵住金
突合せ溶接	1, 2パス CO ₂ 半自動	YM-60C	1.2	日鐵住金
	3パス以降 タンデムSAW	Y-DM × NF-320	4.8, 4.8 × 32D	日鐵住金
主桁 Web と Flg の隅肉溶接 (首溶接)	タンデムSAW	Y-DM × YF-800	4.8, 4.8 × 12×48	日鐵住金
Web と 補剛材の隅肉溶接	CO ₂ 自動 (多関節ロボット)	MX-Z200	1.4	神鋼
その他隅肉溶接	CO ₂ 半自動	SF-60	1.2	日鐵住金
現場溶接				
Flg 突合せ溶接	CO ₂ 半自動	YM-60C	1.2	日鐵住金
Web 突合せ溶接	CO ₂ 自動 (エリガス)	DWS-60G	1.6	神鋼

3. 試験結果

各試験条件については、川田工業・JFE エンジニアリング・新日本製鐵各社における製造条件を考慮して設定した。

3-1 切断性能の評価

鋼板の切断は、ガス切断・プラズマアーク切断機・レーザー切断機が主に使用されているが、一般的には材質により切断条件を変更はしていないことから製作性能上の差異はない。したがって、切断性能の評価は標準の切断条件において切断された切断面の品質が規格を満足し、補修作業等が不要であることを確認した。

1) 切断方法

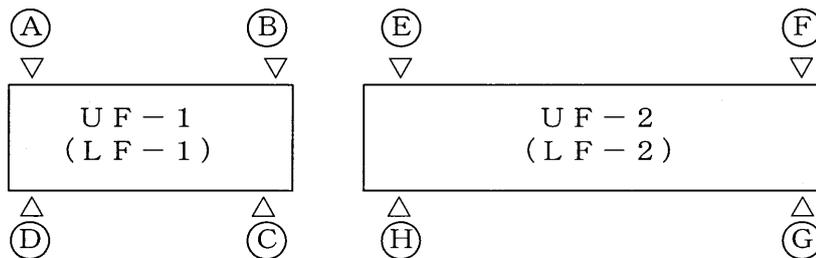
切断方法はガス切断とし、NCガス切断機を使用した。切断条件は下表の通りである。

燃 焼 ガ ス	プロパン (0.8kg/cm ²)
アシストガス	酸素 (4.0kg/cm ²)
切 断 速 度	(270cm/min)

2) 試験位置

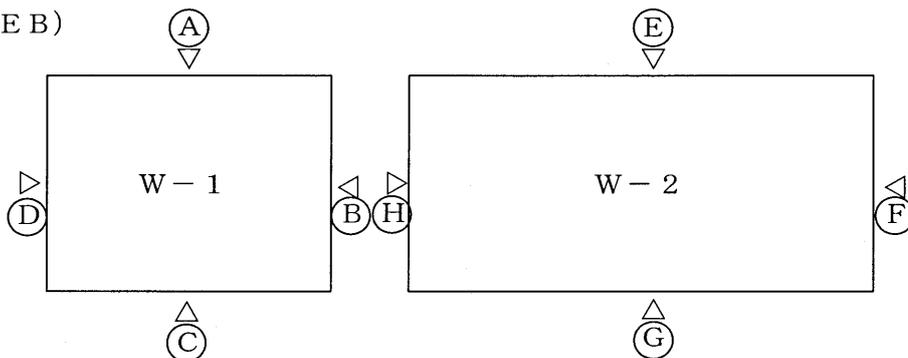
試験位置は下図の通りとした。

(FLG)



- ① ノッチ、スラグ、上縁の溶込みについては、全線を評価対象とした。
- ② 表面粗さは、上図の8箇所を計測した。

(WEB)



- ① ノッチ、スラグ、上縁の溶込みについては、全線を評価対象とした。
- ② 表面粗さは、上図の8箇所を計測した。

3) 試験結果

標準条件による切断において切断品質は規格内であり、作業中の状況も SM490Y 鋼と比較して差異は認められなかった。切断粗さの計測結果を表 3-1 に示す。

表 3-1 切断試験結果

場所		粗さ (μmRy)		備考
		規格値	計測値	
UFLG	A	50	18.61	ノッチ、スラグ、上縁の溶け込み等、有害な欠陥は認められなかった。
	B	50	20.37	
	C	50	17.87	
	D	50	18.74	
	E	50	16.38	
	F	50	23.59	
	G	50	19.14	
	H	50	24.97	
WEB	A	50	34.19	ノッチ、スラグ、上縁の溶け込み等、有害な欠陥は認められなかった。
	B	50	25.37	
	C	50	30.94	
	D	50	19.69	
	E	50	19.31	
	F	50	20.25	
	G	50	24.32	
	H	50	25.80	
L. FLG	A	50	27.52	ノッチ、スラグ、上縁の溶け込み等、有害な欠陥は認められなかった。
	B	50	14.38	
	C	50	28.37	
	D	50	23.42	
	E	50	26.21	
	F	50	19.41	
	G	50	29.15	
	H	50	29.02	

3-2 孔明け性能の評価

孔明けは、NC孔明け機・ラジアルボール盤・電気ドリル等が使用されているが、近年はNC高速穿孔機（超硬ドリル使用）が主流となっていることからNC高速穿孔機を使用して性能評価を行う。

一般に孔明け条件は、鋼板の硬度が増すにしたがって穿孔速度を低下させるが、自動機による孔明けが主流となっていることや、孔明け作業自体がクリチカルとならないことから製作工程全体において作業性を低下させる要因とならない。

このため、性能評価は孔径の精度と孔面粗度により著しく品質の低下を招かないかどうかを評価することとした。

1) 孔明け方法

孔明けはガントリー孔明け機（NC高速穿孔機）を使用して行った。

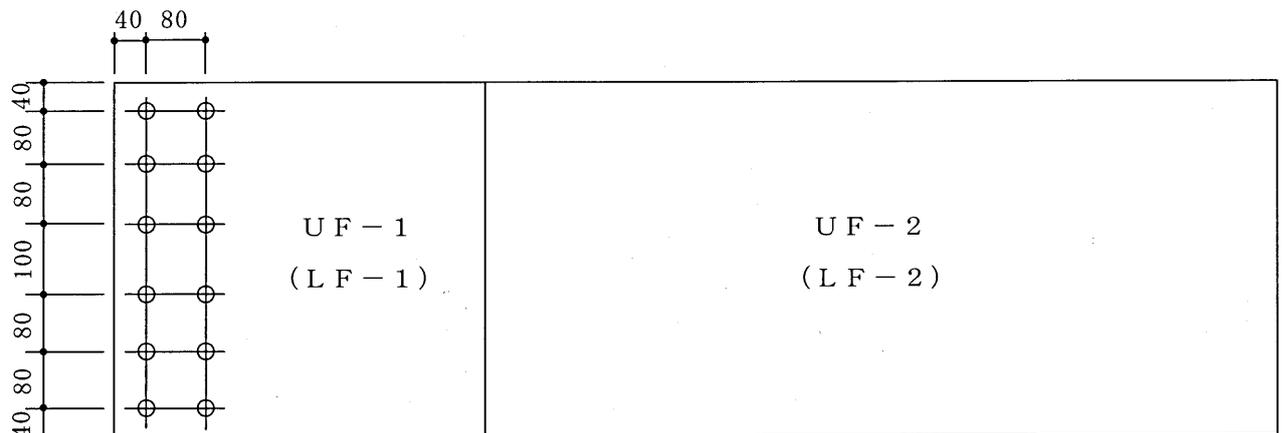
孔明け条件は下表の通りとした。

使用ドリル		超硬ドリル
条 件	回転数	400 (vpm)
	送り量	0.25 (min/rev)

2) 試験位置

孔明けは、フランジの片端側について次頁のピッチにて行った。

孔径は標準的な 24.5φとし、孔径および孔面の粗さについて全カ所計測した。



3) 孔明け試験結果

試験結果を表3-2に示す。

孔明け作業における孔径は規格内であるとともに、SM490Y鋼穿孔時の径との差異は認められなかった。また、孔面粗さもほぼ同等と認められた。

表3-2 孔明け試験結果

	孔 径		粗さ (μmRy)	
	規格値	計測値	規格値	計測値
1	24.5 ϕ	24.5 ϕ	50	32.73
2	24.5 ϕ	24.5 ϕ	50	36.87
3	24.5 ϕ	24.5 ϕ	50	37.70
4	24.5 ϕ	24.6 ϕ	50	17.39
5	24.5 ϕ	24.5 ϕ	50	44.38
6	24.5 ϕ	24.5 ϕ	50	35.11
7	24.5 ϕ	24.5 ϕ	50	34.64
8	24.5 ϕ	24.5 ϕ	50	17.03
9	24.5 ϕ	24.6 ϕ	50	27.53
10	24.5 ϕ	24.5 ϕ	50	21.71
11	24.5 ϕ	24.5 ϕ	50	18.54
12	24.5 ϕ	24.5 ϕ	50	29.83

3-3 切削性能の評価

切削作業は鋼橋製作においてはあまり用いられないが、製作後自由縁となる部分の面取り作業に自動R面取り機として主に用いられている。

自動R面取り機の切削条件は特にHT材と一般材では区別されていないことから、標準条件による作業において規定の面取りがなされるかどうかにより評価を行った。

1) 切削方法

自動R面取り機により面取り（2R面取り）を行った。

2) 切削試験結果

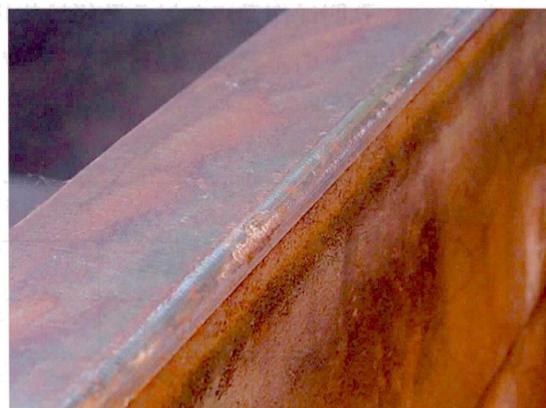
自動R面取り機による面取り試験においても、規定の面取りが加工出来ており、SM490Y鋼との差異は認められなかった。

施工前の状況を写真-1に、施工後の状況を写真-2に示す。

写真-1 面取り施工前



写真-2 面取り施工後



3-4 組立溶接

旧来の高張力鋼（SM570Q 材等）では溶接割れ防止のための予熱作業が必要であり、組立溶接時にも同様の作業が必要となることから作業時のやけど防止や予熱による部材の曲がりなどにより、作業の支障となっていた。

BHS 鋼では溶接作業における予熱が不要とな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、組立溶接部に溶接欠陥（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の有無により評価を行った。

1) 組立溶接

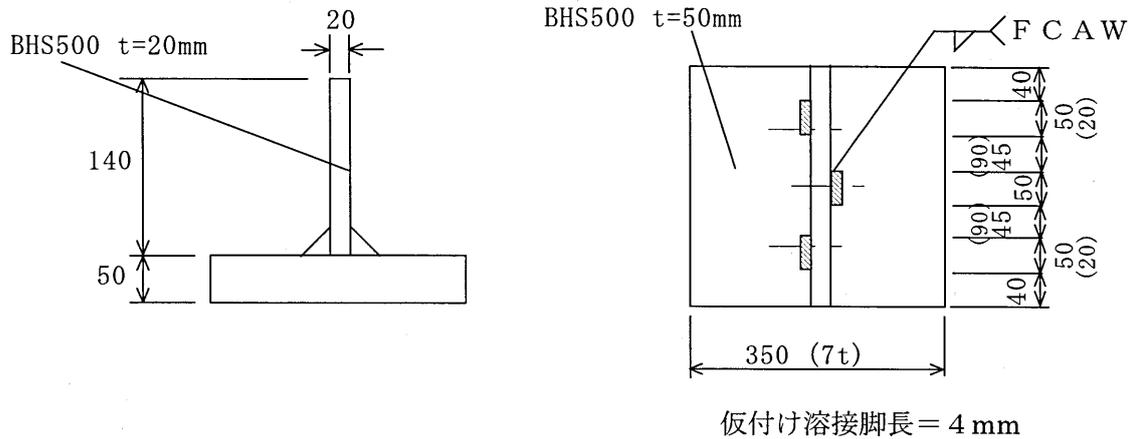
本体の組立溶接は CO2 半自動溶接（ソリッドワイヤー）にて 80-400 のピッチにて行ったが、本体とは別に仮付ビード長を道路橋示方書の低 Pcm 仕様（ ≤ 0.22 ）鋼材に適用出来る 50mm に加え BHS 鋼の性能を活用すべく、より厳しい条件であるビード長 20mm について、各 5 体の試験を行った。

溶接条件は下表の通りとした。

ワイヤー径	電 流	電 圧	速 度	入 熱
1. 2φ	250A	30V	80cm	5700J

2) 試験体形状

別に製作する小試験体の形状は以下の通りである。



3) 組立溶接試験結果

表3-3に示す通り、予熱無しの場合にて組立溶接を行った結果、溶接われが発生した試験体は認められず良好な結果であった。添付資料-3に磁粉傷試験結果を示す。

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。

表3-3 組立溶接試験結果

	組立溶接長	欠陥の有無	備考
No. 1	50	無	
2	50	無	
3	50	無	
4	50	無	
5	50	無	
6	20	無	
7	20	無	
8	20	無	
9	20	無	
10	20	無	

3-5 溶接

3-5-1 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 鋼材については予熱フリーの他 10KJ/mm の入熱が可能であることから、施工性の向上が図れるとともに従来の溶接条件に比較して溶接パス数を減らすことが可能となっている。

また、入熱の増加により歪み量が増加することが予想されるが、一般にはプレス等により矯正が行われることから歪み矯正作業が特段増加することはないので、本試験では大入熱施工によりパス数を低下させ溶接施工性を改善することが可能かどうかを検証した。

なお、試験においては、SM570 鋼と同様にパス間温度を 230℃以下と設定して各層溶接後の温度と冷却に要した時間も別途計測した。

1) 溶接方法

突合せ溶接はサブマージアーク溶接にて行った。

溶接条件及び作業時間、溶接待機時間を表 3-4 (1)、(2) に示す。

2) 突合せ溶接試験結果

突合せ溶接部については、いずれの継手においても内部欠陥は発生しておらず、良好な溶接であった。

また、大入熱施工により従来の施工方法に比べて溶接パス数を削減する事は出来たが、50mm の溶接においては 2 層目以降でパス間温度確保のための溶接待ち時間が発生することから、そのメリットを完全に生かすことは出来なかった。

6-4-(1) 突合せ溶接部の溶接条件
WEB (t=20 L=3000)

溶接法	パス数	層数	電極	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (J/cm)	パス間温度 (°C)		作業時間 (min)	溶接待機時間 (min)	
								作業開始前	作業直後			
組立												
CO2	1st	1	-	260	33	79	6600	35	70	3.7	0	
	2	2	-	280	33	29	19200	69	120	10.8		
部材移動												
T-SAW	3	3	L	800	34	57	61100	26	192	5.2	0	
			T	700	44							
部材反転												
裏はつり										15		
T-SAW	2nd	4	1	L	800	32	68	49800	91	-	4.5	0
				T	700	44						
積層図												
						<p>総パス数：4パス</p> <p>作業時間：39.2min 溶接作業 24.2min 裏はつり作業 15min</p> <p>溶接待機時間：0min</p>						

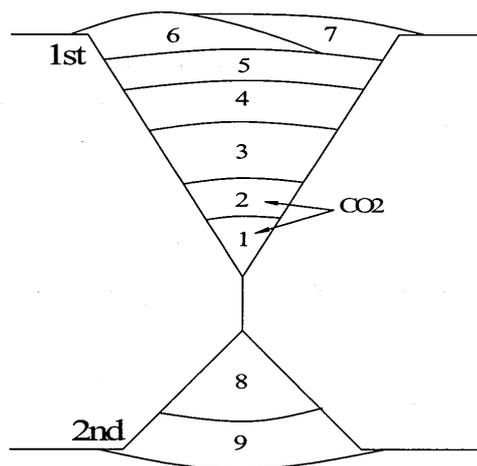
U-FLG (t=30 L=500)

溶接法	パス数	層数	電極	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (J/cm)	パス間温度 (°C)		作業時間 (min)	溶接待機時間 (min)	
								作業開始前	作業直後			
組立												
CO2	1st	1	-	260	33	85	6100	40	70	0.6	0	
	2	2	-	290	33	35	16500	70	140	2.4		
部材移動												
T-SAW	3	3	L	950	36	44	97700	26	286	1.1	0	
			T	850	44							
部材反転												
T-SAW	2nd	4	1	L	1050	32	43	99100	182	-		1.2
				T	850	44						
積層図												
						<p>総パス数：4パス</p> <p>作業時間：5.3min 溶接作業 5.3min 裏はつり作業 0min</p> <p>溶接待機時間：0min</p>						

6-4(2) 突合せ溶接部の溶接条件
L-FLG(t=50 L=700)

溶接法	パス数	層数	電極	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (J/cm)	パス間温度 (°C)		作業時間 (min)	溶接待機時間 (min)	
								作業開始前	作業直後			
組立												
CO2	1st 1	1	—	280	33	65	8600	40	70	1.1	0	
	2	2	—	280	33	25	22200	70	133	4		
部材移動												
T-SAW	3	3	L	950	36	45	95500	26	172	1.6	0	
			T	850	44							
	4	4	L	950	36	45	95500	130	291	1.6		10.2
			T	850	44							
	5	5	L	950	36	45	95500	200	352	1.6		13.3
			T	850	44							
	6	6	L	950	36	45	95500	200	358	1.6		17.2
			T	850	44							
	7	6	L	950	36	51	84300	200	355	1.4		5.3
			T	850	44							
部材反転												
T-SAW	2nd 8	1	L	1050	32	44	96900	200	342	1.6	18.2	
			T	850	44							
	9	2	L	950	36	43	100000	200	—	1.6	0	
			T	850	44							

積層図



総パス数：9パス

作業時間：16.1min
溶接作業 16.1min
裏はつり作業 0min

溶接待機時間：64.2min

3-5-2 主桁WebとFlgの隅肉溶接（首溶接）

首溶接においては予熱フリーからSM490Y鋼と比較して施工性の低下は考えられないことから、溶接性能の評価は標準の溶接条件における溶接品質と溶接後の角変形量について評価した。

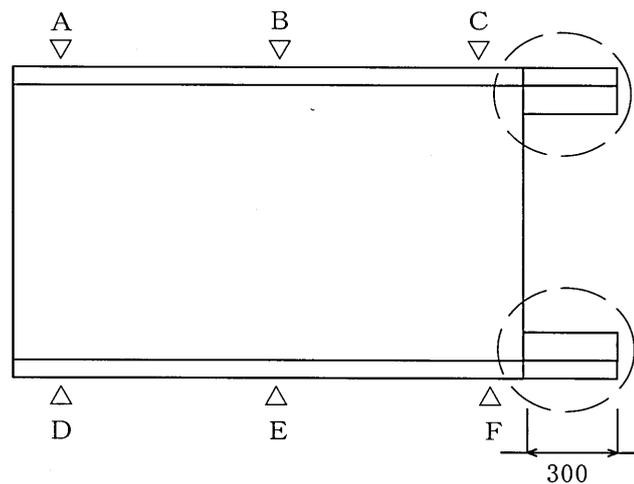
1) 溶接方法

主桁WebとFlgの隅肉溶接は、サブマージアーク溶接にて行った。
溶接条件は下表の通りである。

脚長	電流 (A)		電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (J/cm)
10mm	先行	750	33	70	42,400
	後行	650	38		
8mm	先行	750	33	100	29,700
	後行	650	38		

2) 試験位置

溶け込みおよび脚長については溶接終端側に 300mm のエンドタブを取り付けエンドタブより試験片を取り出して計測した。



3) 試験結果

溶接ビード形状については通常の溶接ビードとまったく同様であり、溶接脚長についても十分満足出来るものであった。また、溶接施工においても特に問題となることはなかった。

試験体の溶接ビード形状を、写真-3に、また、溶接ビードマクロ写真を写真-3, 4, 5に示す。



写真-3

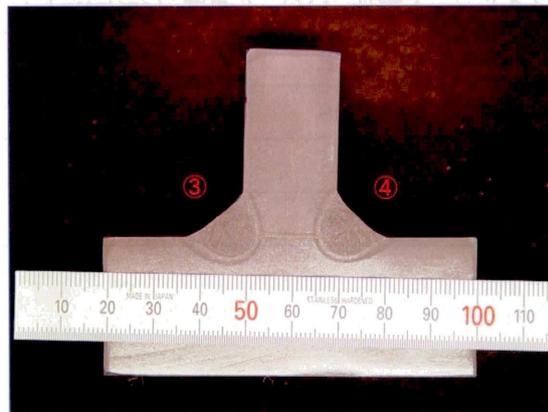


写真-4

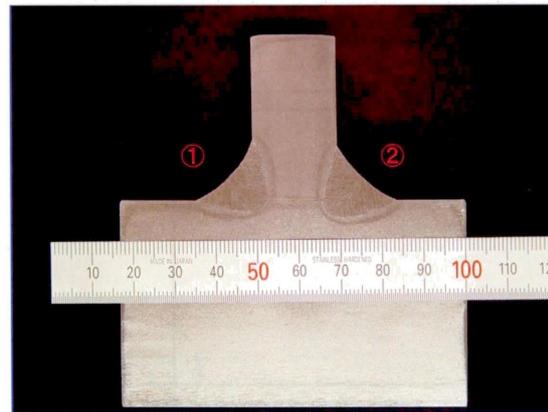


写真-5

3-5-3 Webと補剛材の隅肉溶接

補剛材の溶接については、低強度側の鋼材に合わせた溶接材料を使用することから施工性を低下させる要因がないため、溶接性能の評価は標準の溶接条件による溶接品質と溶接後の歪み（やせ馬）量により行った。

1) 溶接方法

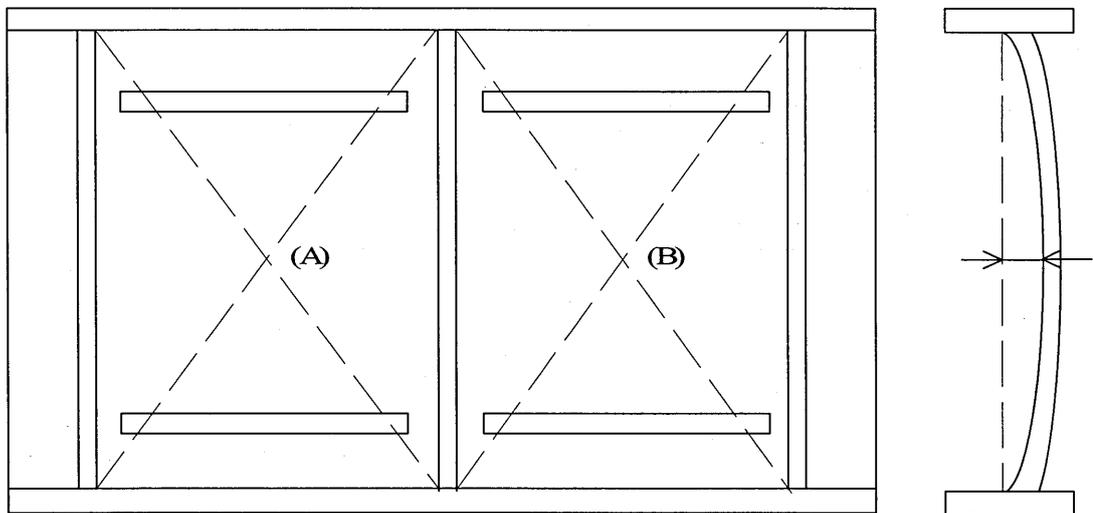
溶接方法は溶接ロボットを使用したFCAWとした。

溶接条件は下表の通りである。

脚長	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (J/cm)
6mm	250	30	36	12,500

2) 試験位置

やせ馬の計測位置は下図の通りとした。



3) 試験結果

溶接ビード形状は通常の溶接ビードとほぼ同等のものであり、溶接施工中も特に問題は生じなかった。

3-6 歪み矯正の評価

3-6-1 プレスによる矯正

突合せ溶接部について溶接完了後プレスにて歪み矯正を行い、作業状況の確認を行った。

1) 試験結果

特に、通常の歪み矯正作業と変わりなく、施工性に問題はなかった。

3-6-2 ローラー矯正機による矯正

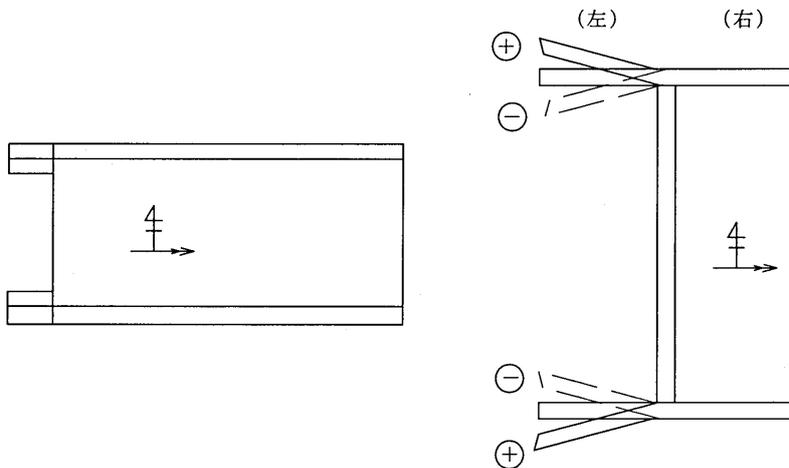
主桁の首溶接部の歪み矯正をローラー矯正機により行い、歪みの除去状況と施工性の確認を行った。

1) 試験結果

特に、通常の歪み矯正作業と変わりは認められなかった。

本体における溶接後の歪み量と矯正後の値を下表に示す。

	角変形量		ローラー矯正後	
	左	右	左	右
A	+1.1/100	-2.5/100	±0/100	±0/100
B	+1.3/100	-2.2/100	±0/100	±0/100
C	±0/100	-1.9/100	±0/100	±0/100
D	-1.3/100	±0/100	±0/100	±0/100
E	-1.0/100	+1.0/100	±0/100	±0/100
F	-1.3/100	+1.0/100	±0/100	±0/100



3-6-3 加熱矯正

Webと補剛剤の隅肉溶接後に加熱矯正を行う予定であったが、本試験体はWeb板厚が20mmと厚く、桁長約7mと短いことからやせ馬の量が約1.5mmとほとんど発生しなかった。

このため加熱による矯正は行っていないので加熱矯正の施工性については本試験では評価できなかった。

3-7 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、鋼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変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施工が可能であることから、本試験においては上下フランジは従来工法にて行い、ウェブについてはエレクトロガスアーク溶接にて施工を行った。

1) 溶接条件

本試験にて行った溶接条件を表3-5(1)(2)に示す。

2) 試験結果

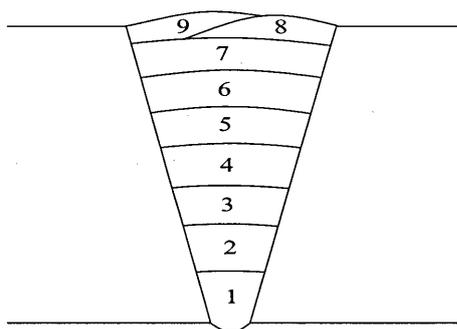
現場溶接部について、いずれの継ぎ手においても内部欠陥は発生しておらず良好な溶接であった。また、溶接外観についても大きな異常は認められなかった。

従来工法によるフランジの溶接では、5～7層以降でパス間温度確保のための待ち時間が生じており予熱フリーによるメリットはあるもののSM490Y鋼と同等の施工性は確保できなかったが、ウェブについては大入熱溶接による1パス施工のため溶接待ち時間が無くパス数も低減出来ることから、施工性を改善できることが確認された。

表6-5(1) 現場溶接部の溶接条件 U-FLG(t=30 L=500)

溶接法	パス数	層数	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (J/cm)	パス間温度 (°C)		作業時間 (min)	溶接待機時間 (min)
							作業開始前	作業直後		
CO2	1	1	200	30	18	20000	26	97	3.1	
	2	2	210	30	29	13100	71	122	2	0
	3	3	300	40	30	24000	50	135	1.9	0
	4	4	310	40	33	22600	135	183	1.7	0
	5	5	310	40	25	29800	161	236	2.3	0.3
	6	6	310	40	27	27600	230	278	2	2.9
	7	7	310	40	18	41400	230	322	3	5.5
	8	8	310	40	43	17400	195	255	1.3	0.8
	9	8	310	40	33	22600	230	—	1.7	

積層図



総パス数：9パス

作業時間：19min

溶接作業 19min

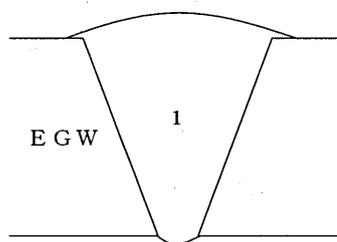
裏はつり作業 0min

溶接待機時間：9.5min

WEB(t=20 L=2220)

溶接法	パス数	層数	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (J/cm)	パス間温度 (°C)		作業時間 (min)	溶接待機時間 (min)
							作業開始前	作業直後		
EGW	1	1	370	38	8.7	97000	26	—	27.2	

積層図



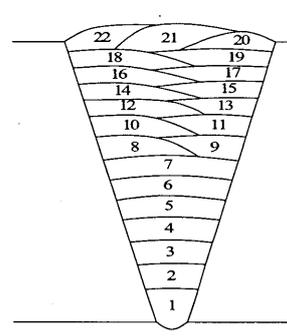
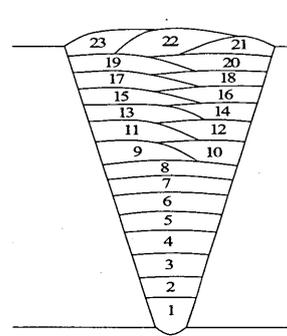
総パス数：1パス

作業時間：27.2min

EGW溶接作業 27.2 min

溶接待機時間：0min

現場溶接部L-FLG (t=50 L=700)の溶接条件

a側											
溶接法	パス数	層数	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (J/cm)	パス間温度 (°C)		作業時間 (min)	溶接待機時間 (min)	積層図
							作業開始前	作業直後			
CO2	1	1	190	28	15	21300	35	80	2.4	0	
	2	2	250	33	32	15500	58	81	1.2	0	
	3	3	300	42	30	25200	58	88	1.2	0	
	4	4	300	41	33	22400	88	116	1.2	0	
	5	5	300	40	22	32800	131	150	1.7	0	
	6	6	310	40	24	31000	150	193	1.5	0	
	7	7	300	41	18	41000	186	250	2	1.8	
	8	8	300	41	46	16100	230	265	0.8	2.3	
	9	8	320	40	28	27500	230	269	1.3	2.1	
	10	9	300	41	31	23900	228	272	1.1	2	
	11	9	300	41	30	24600	230	278	1.3	8.8	
	12	10	300	41	30	24600	178	233	1.3	0.5	
	13	10	310	41	26	29400	230	259	1.4	1	
	14	11	310	41	28	27300	225	307	1.4	3.3	
	15	11	310	41	28	27300	230	312	1.3	5.3	
	16	12	320	41	24	32800	215	315	1.6	5.5	
	17	12	310	41	30	25500	230	341	1.3	6.1	
	18	13	310	41	27	28300	230	343	1.4	11.5	
	19	13	310	41	22	34700	230	371	1.8	0.5	
	20	14	310	41	24	31800	111	-	1.5	0.3	
	21	14	310	41	35	21800	-	-	1.1		
	22	14	310	41	33	23200	-	-	1.1		
棒継ぎ部ガウジング									21.5		
b側											
溶接法	パス数	層数	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (J/cm)	パス間温度 (°C)		作業時間 (min)	溶接待機時間 (min)	積層図
							作業開始前	作業直後			
CO2	1	1	200	29	17	20500	29	78	2.1	0	
	2	2	250	33	37	13400	46	123	1	0	
	3	3	300	42	34	22300	73	105	1.1	0	
	4	4	300	42	28	27000	105	169	1.3	0	
	5	5	300	42	29	26100	158	228	1.3	0	
	6	6	300	41	24	30800	220	230	1.6	0	
	7	7	300	41	19	38900	230	283	1.9	3	
	8	8	300	41	19	38900	230	298	2	4.2	
	9	9	300	41	34	21800	220	280	1.1	2.5	
	10	9	300	41	34	21800	230	315	1.1	3.5	
	11	10	300	42	29	26100	230	310	1.3	2.8	
	12	10	310	42	30	26100	230	323	1.2	5.9	
	13	11	300	41	30	24600	228	326	1.3	4.1	
	14	11	310	41	26	29400	230	345	1.5	4.5	
	15	12	300	41	28	26400	230	344	1.3	4.5	
	16	12	310	41	25	30600	230	360	1.5	6.6	
	17	13	300	41	27	27400	230	366	1.4	7.5	
	18	13	310	41	28	27300	230	367	1.3	4.3	
	19	14	310	41	28	27300	230	337	1.3	16.4	
	20	14	310	41	30	25500	230	371	1.2	0.1	
	21	15	310	41	27	28300	178	-	1.4	0.2	
	22	15	310	41	36	21200	-	-	1.1		
	23	15	310	41	31	24600	-	-	1.2		
総パス数：45パス 作業時間：83.9min 溶接作業 62.4min 棒継ぎ部はつり作業 21.5min 溶接待機時間：132.1min											

4. まとめ

今回は少数主桁橋の鈹桁を想定した部材を用いて BHS 鋼の製作性能評価を行ったが、評価項目の内切断・孔明け・切削・組立溶接・歪み矯正の各工程については 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、同等の施工性があると確認できた。

また、溶接作業においても予熱フリーから隅肉溶接では同等の施工性が得られることは確認できたが、突合せ溶接や現場溶接など多層溶接の場合は溶接パス間温度確保のため(230℃以下)に待ち時間が生じることにより同等の施工性は得られなかった。

下表に各評価項目における施工性の比較結果を示す。

試験項目		SM490Y 鋼との比較	備 考
切断性能		同 等	切断粗さ
孔明け性能		同 等	孔明精度
切削性能		同 等	
組立溶接		同等以上	仮付け溶接長 20mm でも予熱なし施工が可能
突合せ溶接	Web t=20	同 等	溶接待ち時間もなく、大入熱にて施工可能
	U. Flg t=30	同 等	溶接待ち時間もなく、大入熱にて施工可能
	L. Flg t=50	作業時間が 5 倍となり、 作業効率は低下	(溶接時間 + 待ち時間) / 溶接時間 = 4.99 16.1min 64.2min 16.1min
隅肉溶接	Web と Flg の 首溶接	同 等	予熱不要、施工性に問題無し
	補剛材の溶接	同 等	予熱不要、施工性に問題無し
歪み矯正	プレス矯正	同 等	施工性に問題無し
	ローラー矯正	同 等	施工性に問題無し
	加熱矯正		やせ馬量が少なく、試験出来ず
現場溶接	Web t=20	同 等	1パス大入熱施工により施工可能
	U. Flg t=30	作業時間が 1.5 倍となり、 作業効率は低下	(溶接時間 + 待ち時間) / 溶接時間 = 1.50 19min 9.5min 19min
	L. Flg t=50	作業時間が 2.6 倍となり、 作業効率は低下	(溶接時間 + 待ち時間) / 溶接時間 = 2.57 83.9min 132.1min 83.9min

本試験による結果から、BHS 鋼は溶接パス間温度の制約から多層溶接による作業において SM490Y に及ばない項目が存在するものの、かなりの項目で SM490Y 鋼と同等の施工性能を有していることが確認されたことから、パス間温度規定を緩和できる溶接材料の開発・改良が為されれば更に施工性改善を図ることが可能と考えられる。

機械的性質確認試験の試験項目および判定基準

添付資料2.3.1 開先溶接試験, 十字継手溶接試験, およびすみ肉溶接試験の非破壊検査の試験概要

開先溶接試験における非破壊検査の試験項目および判定基準

試験項目	南北水路横断橋		東京港臨海大橋									
	試験箇所	判定基準	試験箇所	判定基準								
外観検査	—	—	継手全長	割れ： あってはならない ピット： あってはならない ビードの凹凸： 長さ25mmの範囲で3mm以下 アンダーカット： 0.3mm以下 オーバーラップ： あってはならない 余盛高さ： <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td>ビード幅B(mm)</td> <td>余盛高さH(mm)</td> </tr> <tr> <td>B<15</td> <td>H≤3</td> </tr> <tr> <td>15≤B<25</td> <td>H≤4</td> </tr> <tr> <td>25≤B</td> <td>H≤(4/25)×B</td> </tr> </table>	ビード幅B(mm)	余盛高さH(mm)	B<15	H≤3	15≤B<25	H≤4	25≤B	H≤(4/25)×B
ビード幅B(mm)	余盛高さH(mm)											
B<15	H≤3											
15≤B<25	H≤4											
25≤B	H≤(4/25)×B											
超音波探傷試験	継手全長	L/2検出レベルできず指示長さが板厚の1/3以下	継手全長	L/2検出レベルできず指示長さが板厚の1/6以下								

十字継手溶接試験における非破壊検査の試験項目および判定基準

試験項目	南北水路横断橋		東京港臨海大橋	
	試験箇所	判定基準	試験箇所	判定基準
外観検査	—	—	継手全長	割れ： あってはならない ピット： あってはならない ビードの凹凸： 長さ25mmの範囲で3mm以下 アンダーカット： 0.3mm以下 オーバーラップ： あってはならない
超音波探傷試験	—	—	継手全長	L/2検出レベルできず指示長さが板厚の1/6以下

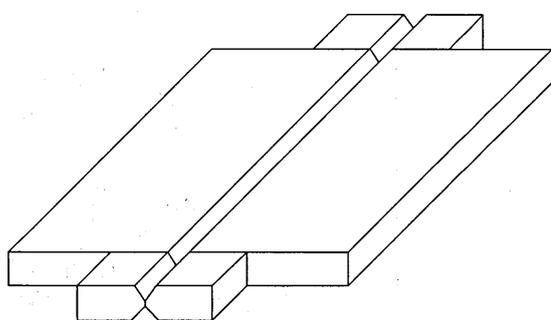
すみ肉溶接試験における非破壊検査の試験項目および判定基準

試験項目	南北水路横断橋		東京港臨海大橋	
	試験箇所	判定基準	試験箇所	判定基準
外観検査	—	—	継手全長	割れ： あってはならない ピット： あってはならない ビードの凹凸： 長さ25mmの範囲で3mm以下 アンダーカット： 0.3mm以下 オーバーラップ： あってはならない

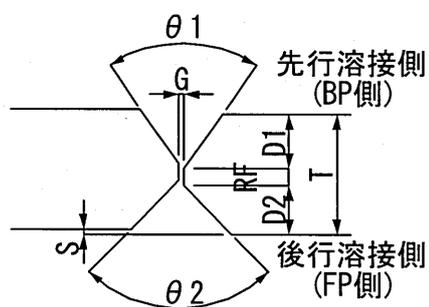
添付資料2.3.2 開先溶接試験の機械的性質確認試験の概要

開先溶接試験における機械的性質確認試験の試験項目および判定基準

試験項目	試験方法・試験片形状	南北水路横断橋		東京港臨海大橋	
		試験片個数	判定基準	試験片個数	判定基準
引張試験	JIS Z 2241 JIS Z 3121 1号	2個	引張強さ $\geq 570\text{N/mm}^2$	同左	同左
溶着金属の引張試験	JIS Z 2241 JIS Z 3111 A2号	—	—	2	引張強さ $\geq 570\text{N/mm}^2$ 降伏点または耐力 $\geq 500\text{N/mm}^2$
型曲げ試験	JIS Z 3122 JIS Z 3122	2個	原則としてきれつが生じてはならない	同左	同左
衝撃試験	JIS Z 2242 JIS Z 2202 Vノッチ	DEPO : 3個 HAZ : 3個	各所で3個の平均が 47J (-5°C) 以上	DEPO : 3個 BOND : 3個 HAZ : 3個	各所で3個の平均が 47J (-5°C) 以上
マクロ試験	JIS G 0553 に準ずる	1個	有害な欠陥があつてはならない	同左	同左
硬さ試験	JIS Z 2244 に準ずる	1個	最高硬さ $\leq 370\text{Hv}$	同左	同左



試験体概要図

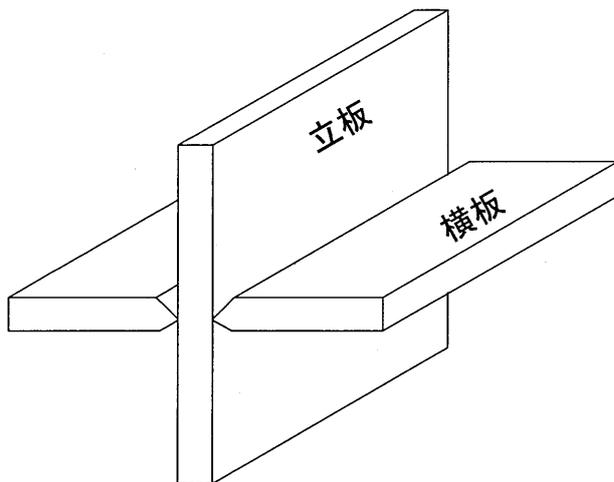


開先形状図

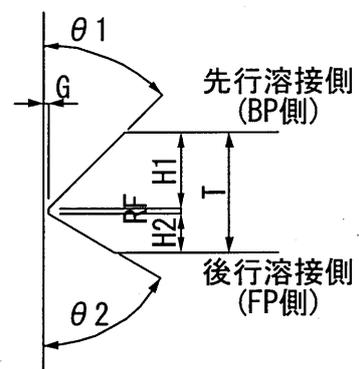
添付資料2.3.3 十字継手溶接試験の機械的性質確認試験の概要

十字継手溶接試験における機械的性質確認試験の試験項目および判定基準

試験項目	試験方法・試験片形状	南北水路横断橋		東京港臨海大橋	
		試験片個数	判定基準	試験片個数	判定基準
引張試験	JIS Z 2241 JIS Z 3121 1号	—	—	2個	引張強さ $\geq 570\text{N/mm}^2$
溶着金属の引張試験	JIS Z 2241 JIS Z 3111 A2号	—	—	2個	引張強さ $\geq 570\text{N/mm}^2$ 降伏点または耐力 $\geq 500\text{N/mm}^2$
衝撃試験	JIS Z 2242 JIS Z 2202 Vノッチ	—	—	DEPO : 3個 BOND : 3個 HAZ : 3個	各所で3個の平均が 47J (-5°C) 以上
マクロ試験	JIS G 0553 に準ずる	—	—	1個	有害な欠陥があつては ならない
硬さ試験	JIS Z 2244 に準ずる	—	—	1個	最高硬さ $\leq 370\text{Hv}$



試験体概要図

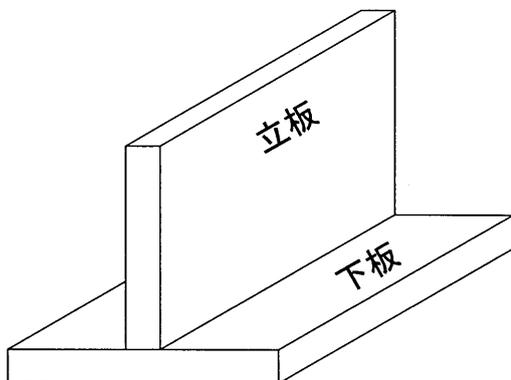


開先形状図

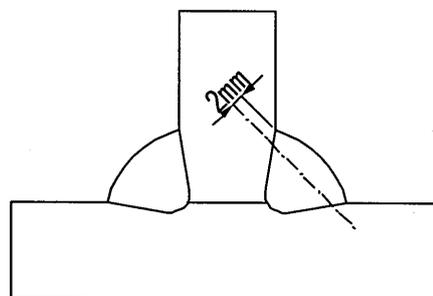
添付資料2.3.4 すみ肉溶接試験の機械的性質確認試験の概要

すみ肉溶接試験における機械的性質確認試験の試験項目および判定基準

試験項目	試験方法・ 試験片形状	南北水路横断橋		東京港臨海大橋	
		試験片個数	判定基準	試験片個数	判定基準
マクロ試験	JIS G 0553 に準ずる	1個	有害な欠陥があつては ならない	一般部：1個 組立溶接部： 2個	有害な欠陥があつては ならない
硬さ試験	JIS Z 2244 に準ずる	1個	最高硬さ $\leq 370\text{Hv}$	同左	同左



試験体概要図



硬さ測定位置

添付資料2.3.5 y形溶接割れ試験の結果(その1)

データNo.	No.1		No.2		No.3	
	①	②	①	②	①	②
溶接方法	SMAW	GMAW	SMAW	GMAW	SMAW	GMAW
溶接姿勢	下向き	下向き	下向き	下向き	下向き	下向き
材質	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500
板厚(mm)	50	50	50	50	50	50
降伏点・耐力(N/mm ²)	532	532	532	532	532	532
引張強さ(N/mm ²)	638	638	638	638	638	638
伸び(%)	30	30	30	30	30	30
衝撃値(J)	274	274	274	274	274	274
Pcm(%)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
メーカー	A社(2)	A社(2)	A社(2)	A社(2)	A社(2)	A社(2)
規格	JIS Z 3212 D5816	JIS Z 3312 YGW21	JIS Z 3212 D5816	JIS Z 3312 YGW21	JIS Z 3212 D5816	JIS Z 3312 YGW21
溶接材料	4Φ	1.2Φ	4Φ	1.2Φ	4Φ	1.2Φ
棒・ワイヤ径	—	CO2	—	CO2	—	CO2
シールドガス	H19.6	H19.6	H19.6	H19.6	H19.6	H19.6
年月	6(目標)	6(目標)	6(目標)	6(目標)	6(目標)	6(目標)
溶接環境	85以上	85以上	85以上	85以上	85以上	85以上
予熱(°C)	無	無	無	無	無	無
y形溶接割れ試験結果						
試験片の形状						
ルート間隔(mm)						
試験片①	JIS Z 3158					
	2	1	2	1	2	1
	1,710	806	1,740	827	1,730	778
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
試験片②	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1,700	800	1,710	824	1,750	804
試験片③	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1,700	798	1,700	819	1,740	778
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
試験片③	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

添付資料2.3.5 Y形溶接割れ試験の結果(その2)

	No.4		No.5		No.6		No.7	
	①	②	①	②	①	②	①	②
データNo.								
溶接方法	SMAW	GMAW	SMAW	GMAW	SMAW	GMAW	SMAW	GMAW
溶接姿勢	下向き							
材質	BHS500							
板厚 (mm)	46	46	43	43	58	58	30	30
降伏点・耐力 (N/mm ²)	567	567	592	592	570	570	577	577
引張強さ (N/mm ²)	662	662	679	679	649	649	661	661
伸び (%)	31	31	31	31	25	25	28	28
衝撃値 (J)	285	285	257	257	263	263	229	229
Pcm (%)	0.17	0.17	0.19	0.19	0.16	0.16	0.18	0.18
メーカー	A社(1)	A社(1)	D社	D社	B社	B社	C社	C社
規格	JIS Z 3212	JIS Z 3312						
溶接材料	D5816	YGW21	D6216	YGW21	D5816	YGW21	D5816	YGW21
棒・ワイヤ径	4Φ	1.2Φ	4Φ	1.2Φ	4Φ	1.2Φ	4Φ	1.2Φ
シールドガス	—	CO2	—	CO2	—	CO2	—	CO2
年月	H19.2	H19.2	H20.11	H20.11	H20.2	H20.2	H20.2	H20.2
雰囲気温度 (°C)	8	8	5(目標)	5(目標)	6(目標)	6(目標)	6(目標)	6(目標)
雰囲気湿度 (%)	38	38	—	—	60以上	70以上	70以上	70以上
予熱 (°C)	無	無	無	無	無	無	無	無
Y形溶接割れ試験結果								
試験片の形状	JIS Z 3158							
ルート間隔 (mm)	2	1	2	1	2	1	2	1
試験片①	1,700	1,700	1,700	1,700	1,683	891	1,785	934
入熱量 (J/mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
表面割れ率 (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ルート割れ率 (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
断面割れ率 (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
試験片②	1,700	1,700	1,700	1,700	1,632	975	1,696	825
入熱量 (J/mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
表面割れ率 (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ルート割れ率 (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
断面割れ率 (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
試験片③	1,700	1,700	1,700	1,700	1,733	966	1,584	898
入熱量 (J/mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
表面割れ率 (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ルート割れ率 (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
断面割れ率 (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

添付資料2.3.6 開先溶接試験の結果(その1)

テストNo.	No.1		No.2		No.3		No.4		No.5		No.6		No.7		No.8		No.9			
	①		②		③		④		⑤		⑥		⑦		⑧		⑨			
	SAW	GMAW	SAW																	
溶接方法	下向き	下向き	下向き	下向き	下向き	下向き	下向き	下向き	下向き	下向き	下向き	下向き	下向き	下向き	下向き	下向き	下向き	下向き	下向き	
溶接姿勢	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	
使用鋼材	材質	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	
	板厚(mm)	539	532	532	532	532	532	532	532	532	532	532	532	532	532	532	532	532	532	
	張力点・耐力(N/mm ²)	635	635	638	638	638	638	638	638	638	638	638	638	638	638	638	638	638	638	638
	引張強さ(N/mm ²)	29	29	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	伸び(%)	240	240	274	274	278	278	278	278	278	278	278	278	278	278	278	278	278	278	278
衝撃値(J)	0.17	0.17	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	
Pcm(%)	A社(1)	A社(1)	A社(2)																	
メーカー																				
開先条件	開先形状	X開先																		
	BP側θ1(°)	50	50	70±5	70±5	70±5	70±5	70±5	70±5	70±5	70±5	70±5	70±5	70±5	70±5	70±5	70±5	70±5	70±5	
	FP側θ2(°)	70	70	90±5	90±5	90±5	90±5	90±5	90±5	90±5	90±5	90±5	90±5	90±5	90±5	90±5	90±5	90±5	90±5	
	BP側H1(mm)	31	33	29±2	29±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2
	FP側H2(mm)	24	22	20±2	20±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2	17±2
ルート面RF(mm)	4	4	7±2	7±2	6±2	6±2	6±2	6±2	6±2	6±2	6±2	6±2	6±2	6±2	6±2	6±2	6±2	6±2	6±2	
ルート間隔G(mm)	0	0	0.5以下																	
目盛りS(mm)	—	—	1以下																	
溶接材料	規格	JIS Z 3183																		
	ワイヤ径	S624 H4該当	YGW21	S624 H4該当																
	シールドガス	4.8Φ	1.2Φ	4.8Φ																
溶接環境	年々	H18.9	H18.9	H19.7																
	室温(°C)	28	28	23	23	26	26	24	24	12	12	24	24	20(16)	20(16)	14	10	10	19	
	湿度(%)	64	64	79	79	70	70	91	84	68	68	44	44	44	62(64)	41	—	—	42	
ハス間温度	管理値(°C)	—	—	230以下																
	最高(°C)	341	273	155	155	163	163	177	180	130	299	299	299	230	230	210	210	217	205	
	最低(°C)	86	88	26	26	30	30	26	4	9	43	43	43	18	18	18	18	10	10	
入熱量	管理値(J/mm)	—	—	7000以下																
	最高(J/mm)	7956	5829	4896	4896	4911	4911	5900	4624	5395	4100	4100	4100	4600	4600	6800	6800	5700	4200	
	最小(J/mm)	2960	2886	3216	3216	3375	3375	3800	2604	3042	2600	2600	2600	2900	2900	5200	5200	2500	3000	

添付資料2.3.6 開先溶接試験の結果(その2)

データNo.	No.1		No.2		No.3		No.4		No.5		No.6		No.7		No.8		No.9	
	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②
溶接継手の性能試験結果																		
溶接継手の引張試験結果																		
試験片の形状	JIS Z 3121 1号																	
試験片数	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
①(N/mm2)	625	639	662	647	665	647	653	664	630	653	664	652	649	643	651	612	645	
破断位置	DEPO	DEPO	BM	BM	BM	BM	DEPO	DEPO	DEPO	DEPO	DEPO	DEPO	BM	BM	HAZ	DEPO	BM	
②(N/mm2)	624	641	638	643	663	644	631	659	631	644	659	651	654	644	654	620	643	
破断位置	DEPO	DEPO	BM	BM	BM	BM	DEPO	DEPO	DEPO	DEPO	DEPO	DEPO	BM	BM	HAZ	DEPO	BM	
平均(N/mm2)	625	640	660	645	664	649	631	662	631	649	662	652	652	644	653	616	644	
溶着金属の引張試験結果																		
試験片の形状	JIS Z 3111 A2																	
採取位置	FP側より																	
試験片数	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
①(N/mm2)	640	588	620	579	620	579	588	543	588	543	592	592	558	554	554	541	553	
②(N/mm2)	643	601	605	605	601	605	553	571	557	557	557	557	563	555	555	541	539	
平均(N/mm2)	642	611	592	592	611	592	571	577	550	550	592	592	561	555	555	541	546	
①(N/mm2)	700	641	719	643	719	643	655	643	655	643	666	666	653	652	652	638	651	
②(N/mm2)	714	714	714	655	714	655	608	650	648	648	648	648	656	640	640	638	646	
平均(N/mm2)	707	717	717	655	717	655	625	650	646	646	646	646	655	646	646	638	649	
溶接継手の衝撃試験結果																		
試験片の形状	JIS Z 2202																	
採取位置	Vノッチ																	
溶着金属	FP側より																	
①(J)	70	69	91	85	80	85	91	86	80	80	86	67	97	75	77	77	106	
②(J)	74	65	104	107	79	107	94	54	76	76	71	61	91	75	82	82	108	
③(J)	70	70	79	96	79	96	110	64	74	74	77	77	99	85	82	82	132	
平均(J)	71	68	91	96	79	96	98	59	77	77	78	68	96	78	80	80	115	
採取位置	FP側より																	
①(J)	186	151	151	169	84	76	84	84	76	76	154	154	154	154	154	154	154	
②(J)	140	138	138	138	126	126	133	133	126	126	133	133	133	133	133	133	133	
③(J)	259	124	220	220	123	69	69	124	69	69	154	154	154	154	154	154	154	
平均(J)	195	121	175	175	148	90	148	148	90	90	147	147	147	147	147	147	147	
採取位置	FP側より																	
①(J)	307	305	283	292	270	292	247	227	135	135	227	159	212	290	173	173	273	
②(J)	304	276	287	264	191	264	251	189	154	154	192	192	156	207	168	168	228	
③(J)	289	334	282	292	171	292	224	224	138	138	224	224	258	280	225	225	239	
平均(J)	300	305	277	282	211	282	250	213	142	142	192	192	209	194	189	189	247	
溶接継手の硬さ試験結果																		
測定位置	BPおよびFP側より	BPおよびFP側より	FP側より															
最高硬さ	246	238	251	238	237	238	275	245	245	245	225/266	224/240	230/226	216/219	257/263	234/228	242/238	242/238

添付資料2.3.7 十字継手溶接試験の結果 (その1)

データNo.	No.1		No.2		No.3		No.4		No.5		No.6		No.7		No.8	
	GMAW 下向き															
使用材料	BHS500															
	50		30		30		28		43		46		46		46	
	532		558		558		540		592		555		555		555	
	638		651		651		650		679		663		649		649	
	30		30		30		27		31		30		28		28	
	274		334		334		307		257		261		298		290	
	0.20		0.20		0.20		0.18		0.19		0.20		0.19		0.19	
	A社(2)		A社(2)		A社(2)		B社		D社		A社(2)		A社(2)		A社(2)	
	BHS500		BHS500		BHS500		BHS500		BHS500		BHS500		BHS500		BHS500	
	50		40		40		28		43		46		46		46	
開先条件	532		553		553		540		592		555		555		555	
	638		652		652		650		679		649		649		649	
	30		29		29		27		31		28		28		28	
	274		278		278		307		257		257		298		290	
	0.20		0.20		0.20		0.18		0.19		0.19		0.19		0.19	
	A社(2)		A社(2)		A社(2)		B社		D社		A社(2)		A社(2)		A社(2)	
	BHS500		BHS500		BHS500		BHS500		BHS500		BHS500		BHS500		BHS500	
	50		40		40		28		43		46		46		46	
	532		553		553		540		592		555		555		555	
	638		652		652		650		679		649		649		649	
開先形状	K開先															
	45±5		45±5		45±5		45±5		45±5		45±5		45±5		45±5	
	60±5		60±5		60±5		45±5		60±5		45±5		50±5		50±5	
	32±2		25±2		25±2		17±2		27±2		26±2		29±2		26±2	
	16±2		13±2		13±2		10±2		14±2		18±2		15±2		19±2	
	2±2		2±2		2±2		1±1		2±2		2±2		2±2		1±2	
	—		—		—		—		0~1		0~1		0~1		0~1	
	JIS Z 3312		JIS Z 3312		JIS Z 3312		JIS Z 3312		JIS Z 3312		JIS Z 3312		JIS Z 3312		JIS Z 3312	
	YGW21		YGW21		YGW21		YGW21		YGW21		YGW21		YGW21		YGW21	
	1.2Φ		1.2Φ		1.2Φ		1.2Φ		1.2Φ		1.2Φ		1.2Φ		1.2Φ	
溶接材料	JIS Z 3313		—		—		—		—							
	YFW-C60FM		YFW-C60FM		YFW-C60FM		YFW-C60FM		—		—		—		—	
	1.2Φ		1.2Φ		1.2Φ		1.2Φ		—		—		—		—	
	CO2 100%		CO2 100%		CO2 100%		CO2 100%		CO2 100%		CO2 100%		CO2 100%		CO2 100%	
	H19.7		H19.7		H19.7		H20.2		H20.6		H20.10		H20.1		H20.4	
	26		27		25		5		27		20(16)		13		18.5(16.0)	
	70		65		92		90		44		62(64)		—		66(72)	
	無		無		無		無		無		無		無		無	
	230以下		230以下		230以下		230以下		230以下		230以下		230以下		230以下	
	155		174		176		153		228		228		212		140	
溶接環境	26		29		21		4		28		10		16		31	
	5000以下		5000以下		5000以下		5000以下		5000以下		5000以下		5000以下		5000以下	
	4983		2661		3500		2273		3200		2900		4100		3400	
	1365		1223		800		1284		1300		1300		2000		1500	
	開先内(規格)		開先内(ワイヤ径)		余盛(規格)		余盛(ワイヤ径)		シールドガス		年月		室温(°C)		湿度(%)	
	管理値(°C)		最高(°C)		最低(°C)		管理値(J/mm)		最高(J/mm)		最低(J/mm)		入熱量			
	230以下		174		21		5000以下		2661		1365		4983			
	155		174		21		5000以下		2661		1365		4983			
	26		29		21		4		28		10		16		31	
	5000以下		5000以下		5000以下		5000以下		5000以下		5000以下		5000以下		5000以下	
4983		2661		3500		2273		3200		2900		4100		3400		
1365		1223		800		1284		1300		1300		2000		1500		

添付資料2.3.7 十字継手溶接試験の結果(その2)

データNo.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5		No.6	No.7	No.8
					①	②			
溶接継手の性能試験結果									
溶接継手の引張試験結果									
試験片の形状	JIS Z 3121 1号								
試験片数	2	2	2	2	2	2	2	2	2
① (N/mm ²)	651	662	671	675	662	651	687	675	669
破断位置	BM+DEPO	BM	BM+DEPO	BM	BM	BM	BM	HAZ	BM
② (N/mm ²)	658	662	668	670	658	651	683	672	671
破断位置	BM+DEPO	BM	BM+DEPO	BM	BM	BM	BM	HAZ	BM
平均 (N/mm ²)	655	662	670	673	660	651	685	674	670
溶着金属の引張試験結果									
試験片の形状	JIS Z 3111 A2	JIS Z 3111 A2	JIS Z 3111 A2	-	JIS Z 3111 A2				
採取位置	FP側より	FP側より	FP側より	-	FP側より	FP側より	FP側より	FP側より	FP側より
T/4の深さ		T/4の深さ	T/4の深さ	-	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ
試験片数	2	2	2	-	1	2	2	2	2
① (N/mm ²)	664	646	655	-	654	628	596	587	660
② (N/mm ²)	664	631	663	-	-	629	601	592	649
平均 (N/mm ²)	664	639	659	-	654	629	599	590	655
① (N/mm ²)	708	678	695	-	684	676	656	662	685
② (N/mm ²)	703	669	699	-	-	679	654	658	685
平均 (N/mm ²)	706	674	697	-	684	678	655	660	685
溶接継手の衝撃試験結果									
試験片の形状	JIS Z 2202								
採取位置	Vノツ子								
FP側より	FP側より	FP側より	FP側より	FP側より	FP側より	FP側より	FP側より	FP側より	FP側より
T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ
① (J)	83	116	66	79	120	106	108	140	76
② (J)	94	124	126	89	106	95	72	131	70
③ (J)	84	96	101	82	124	83	72	109	67
平均 (J)	87	112	97	83	117	95	84	127	63
採取位置	FP側より	FP側より	FP側より	FP側より	FP側より	-	-	-	-
T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	-	-	-	-
① (J)	198	223	174	83	166	-	-	-	-
② (J)	216	250	291	57	226	-	-	-	-
③ (J)	134	258	291	76	252	-	-	-	-
平均 (J)	183	244	252	72	215	-	-	-	-
採取位置	FP側より								
T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ
① (J)	236	269	275	239	269	181	220	246	221
② (J)	250	282	287	201	235	249	200	251	225
③ (J)	259	189	291	236	250	186	201	192	214
平均 (J)	248	247	284	225	251	205	207	230	220
溶接継手の硬さ試験結果									
測定位置	FP側より	FP側より	FP側より	FP側の	FP側より	FP側より	FP側より	FP側より	FP側より
T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	T/4の深さ	ピード表面	2mmおよび	2mmおよび	2mmおよび	2mmおよび	2mmおよび
				か52mm	T/2の深さ	T/2の深さ	T/2の深さ	T/2の深さ	T/2の深さ
	HV10								
	251	245	279	283	248/232	235/230	267/263	262/229	238/240
最高硬さ	Depo	HAZ	HAZ	HAZ	DEPO/BM	DEPO/HAZ	DAPO/BM	DEPO/DEPO	DEPO/DEPO

添付資料2.3.8 すみ肉溶接継手試験の結果 (その1)

データNo.	No.1		No.2		No.3		No.4		No.5			No.6		
	GMAW	水平	GMAW	水平	GMAW	水平	GMAW	水平	①	②	③	④	⑤	
溶接方法	GMAW	水平	GMAW	水平	GMAW	水平	GMAW	水平	GMAW	水平	GMAW	水平	GMAW	水平
溶接姿勢	GMAW	水平	GMAW	水平	GMAW	水平	GMAW	水平	GMAW	水平	GMAW	水平	GMAW	水平
使用材料	<立板>													
	材質	BHS500												
	板厚 (mm)	32	50	50	40	40	58	40	40	40	58	16	16	16
	降伏点・耐力 (N/mm ²)	551	532	553	553	553	570	591	591	594	594	594	594	554
	引張強さ (N/mm ²)	654	638	652	652	652	649	684	684	661	661	650	650	646
	伸び (%)	30	30	29	29	29	25	25	29	28	28	34	34	32
	衝撃値 (J)	258	274	278	278	278	263	233	233	229	229	293	293	167
	Pcm (%)	0.17	0.20	0.20	0.20	0.20	0.16	0.17	0.17	0.18	0.17	0.17	0.17	0.19
	メーカー	A社(1)	A社(2)	A社(2)	A社(2)	A社(2)	B社	A社(1)	A社(1)	C社	A社(2)	A社(2)	A社(2)	D社
	<下板>													
	材質	BHS500												
	板厚 (mm)	59	50	40	40	40	58	40	40	30	40	16	16	16
	降伏点・耐力 (N/mm ²)	539	532	553	553	553	570	591	591	577	594	594	594	554
	引張強さ (N/mm ²)	635	638	652	652	652	649	684	684	661	661	650	650	646
伸び (%)	29	30	29	29	29	25	25	29	28	28	34	34	32	
衝撃値 (J)	240	274	278	278	278	263	233	233	229	229	293	293	167	
Pcm (%)	0.17	0.20	0.20	0.20	0.20	0.16	0.17	0.17	0.18	0.17	0.17	0.17	0.19	
メーカー	A社(1)	A社(2)	A社(2)	A社(2)	A社(2)	B社	A社(1)	A社(1)	C社	A社(2)	A社(2)	A社(2)	D社	
溶接材料	規格													
	ワイヤ径													
	シールドガス													
	年月	H18.9	H19.7	H19.7	H19.7	H19.7	H20.2	H20.2	H20.2	H20.2	H20.2	H19.5	H19.5	H20.10
	室温 (°C)	27	23	—	—	—	100	100	100	100	100	53	53	62
	湿度 (%)	64	79	—	—	—	無	無	無	無	無	無	無	
	予熱温度 (°C)	無	無	無	無	無	6	6	6	6	6	6	6	
	指定脚長 (mm)	11	6	6	6	6	1	1	1	1	1	1	1	
	パス数	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	上脚長 (mm)	13.0	6.7	8.0	8.0	8.0	8.9	8.0	8.0	8.0	8.0	7.3	7.3	
下脚長 (mm)	13.5	6.9	7.3	7.4	7.4	8.4	8.1	8.1	8.4	8.1	8.0	8.0		
入熱量	1596	1493	1260	1300	1300	1392	1356	1356	1400	1600	1600	1550		
溶接継手の性能試験結果														
溶接継手の硬さ試験結果														
測定位置	ビード表面	から2mm	ビード表面	から2mm	ビード表面	から2mm								
最高硬さ	HV10	241	287	289	299	251	275	273	240	236	254	267	264	
	DEPO BM	HAZ	HAZ	HAZ	DEPO	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	DEPO	DEPO	HAZ	HAZ	
	ビード表面	から2mm												

添付資料2.3.8 すみ肉溶接継手試験の結果（その2）

データNo.	No.7			No.8			No.9		
	①	②	③	①	②	③	①	②	③
溶接方法	GMAW	GMAW	GMAW	GMAW	GMAW	GMAW	GMAW	GMAW	GMAW
溶接姿勢	水平	水平	水平	水平	水平	水平	水平	水平	水平
使用材料	<立板>								
	材質	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500
	板厚 (mm)	16	16	16	16	16	16	16	16
	降伏点・耐力 (N/mm ²)	576	576	576	576	576	576	576	576
	引張強さ (N/mm ²)	646	646	646	646	646	646	646	646
	伸び (%)	35	35	35	35	35	35	35	35
	衝撃値 (J)	289	289	289	280	280	280	280	280
	Pcm (%)	19	19	19	19	19	19	19	19
	メーカー	A社(2)	A社(2)	A社(2)	A社(2)	A社(2)	A社(2)	A社(2)	A社(2)
	<下板>								
材質	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	BHS500	
板厚 (mm)	16	16	16	16	16	16	16	16	
降伏点・耐力 (N/mm ²)	576	576	576	576	576	576	576	576	
引張強さ (N/mm ²)	646	646	646	646	646	646	646	646	
伸び (%)	35	35	35	35	35	35	35	35	
衝撃値 (J)	289	289	289	280	280	280	280	280	
Pcm (%)	19	19	19	19	19	19	19	19	
メーカー	A社(2)	A社(2)	A社(2)	A社(2)	A社(2)	A社(2)	A社(2)	A社(2)	
規格	JIS Z 3313	JIS Z 3313	JIS Z 3312	JIS Z 3313	JIS Z 3313	JIS Z 3312	JIS Z 3313	JIS Z 3312	JIS Z 3313
ワイヤ径	YFW-C602R	YFW-C60FM	YFW-C60FM	YFW-C60FR	YFW-C60FM	YFW-C60FM	YFW-C60FM	YFW-C60FM	YFW-C60FM
シールドガス	1.2Φ	1.2Φ	1.2Φ	1.2Φ	1.2Φ	1.2Φ	1.2Φ	1.2Φ	1.2Φ
予熱温度 (°C)	CO2 100%	CO2 100%	An80%+CO2 20%	CO2 100%					
湿度 (%)	H19.12	H19.12	H19.12	H20.1	H20.1	H20.1	H20.1	H20.1	H19.4
指定脚長 (mm)	10	10	10	15	15	15	15	15	18.5
バス数	71	71	71	無	無	無	無	無	66
上脚長 (mm)	無	無	無	無	無	無	無	無	無
下脚長 (mm)	6	6	6	6	6	6	6	6	6
入熱量 (J/mm)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
入熱量 (J/mm)	7.2	7.2	7.1	6.6	6.3	7.1	7.1	7.1	7.5
入熱量 (J/mm)	8.5	8.6	8.6	8.1	8.8	8.7	8.7	8.7	9.3
入熱量 (J/mm)	1870	1900	1910	1750	1900	2100	2100	2100	2200
溶接継手の性能試験結果									
溶接継手の硬さ試験結果									
測定位置	ビード表面	ビード表面	ビード表面	ビード表面	ビード表面	ビード表面	ビード表面	ビード表面	ビード表面
最高硬さ	から2mm	から2mm	から2mm	から2mm	から2mm	から2mm	から2mm	から2mm	から2mm
	HV10	HV10	HV10	HV10	HV10	HV10	HV10	HV10	HV10
	291	280	276	289	272	257	257	257	274
	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	DEPO