

# 橋梁用高性能鋼材の加工性・溶接性について

The Investigation of Workability and Weldability of Bridge High Performance Steel Materials

藤田 敏明  
Toshiaki FUJITA

川田工業㈱技術研究所  
溶接研究室

湯田 誠  
Makoto YUDA

川田工業㈱技術研究所  
溶接研究室室長

米山 徹  
Toru YONEYAMA

川田工業㈱橋梁事業部生産本部  
四国工場橋梁生産設計課課長

多田 賢  
Satoshi TADA

川田工業㈱橋梁事業部生産本部  
四国工場長

鋼橋の高品質化と製作コスト縮減を目的とした橋梁用的高性能鋼材が近年開発された。この鋼材には、降伏点で500 N/mm<sup>2</sup>と700 N/mm<sup>2</sup>の2種類があり、従来の引張強さ570 N/mm<sup>2</sup>級鋼や780 N/mm<sup>2</sup>級鋼よりも降伏点が高く、加工性・溶接性も優れており、高強度化による鋼重の低減や施工工数の低減が期待されている。本報告では、この新しい鋼材の特性把握を行うとともに、実橋の製作へ反映させるため加工性・溶接性の調査を行ったのでその結果を報告する。

キーワード：BHS鋼材，降伏点，予熱，大入熱

## 1. はじめに

鋼橋製作においては、これまで高強度材の利用や少数主桁橋の採用による部材数の低減や構造の簡素化から施工コストの縮減が図られてきた。しかし、施工面でのコスト縮減には、切断箇所数や溶接長等の作業量低減の他、予熱低減や高能率溶接などによる施工性の向上も重要な要素であり、従来は必要に応じて個別のプロジェクト毎に対応が行われてきた。また、より合理的な構造の採用には鋼材性能の更なる向上が不可欠となっていた。

このような背景から、東京工業大学の創造プロジェクト研究体の中に設置された高性能鋼材の利用技術研究会に始まる、ミルメーカー、橋梁会社を含む大規模な産学連携プロジェクトにより橋梁向け鋼材の高性能化に関する研究・検討が取り組まれた。その結果として、最新の製鉄・製鋼技術により製造されたものが橋梁用高性能鋼材（Bridge High Performance Steel：BHS鋼材と称す）である。

本鋼材は、BHS500、BHS500W（570 N/mm<sup>2</sup>級）とBHS700W（780 N/mm<sup>2</sup>級）の3種類が開発され<sup>1)</sup>、橋梁構造から要求される必要性能を基に、製作コストの縮減を具現化するための特性が計画的に付与されており、材料、設計、製作のすべてにおいて、より高い経済性が期待される。公共工事のコスト縮減がこれまでも増して要望

される中、鋼橋製作では、本鋼材により経済的合理性の考慮された設計・製作技術が活用され、近い将来、多くの新設橋梁に採用されるものと考えられる。

本稿では、この開発されたBHS鋼材が有する母材特性と、その施工性について確認試験により調査を行った結果を報告する。

## 2. 鋼材の特性

本鋼材は、最新の高度な熱加工制御（TMCP）技術と合金元素の適正添加による組織制御、析出強化など、これまでの技術を最大限に活用し創出され、従来鋼よりも低炭素、低合金にてバランス良く高強度化と高靱化が図られている。加えて、高纯净化技術により硫黄量が極めて低減され、十分な絞り特性を有する。溶接性に対しては、低炭素化による熱影響部の硬さの抑制や低炭素当量（Ceq）化による熱影響部の焼入れ性の抑制により、結果として冷間割れ指標の一つである溶接低温割れ感受性組成（Pcm）を低くして耐冷間割れ特性を向上している。また、低炭素化によって島状マルテンサイトを抑制する他、結晶粒の粗大化の防止のため、熱的に安定な析出物や酸化物などを微細分散させ、変態核やオーステナイト粒成長の抑制に利用し、結晶粒を微細化させる細粒高靱化技術が導入されるなど、熱影響部の靱性劣化の防止が図られている。

BHS鋼材の標準特性の例としてBHS500の特性<sup>2)</sup>を表1に示す。付与された特性とその特性を担保するための各値が規定化されている。降伏点を基準とした鋼橋の製作に有効な高い降伏点が保証され、従来の同クラスの鋼材よりも優れた加工性や溶接性を有し、施工性は490 N/mm<sup>2</sup>級鋼と同等レベルとされている。

本調査において供したBHS500鋼材の機械的性質を表2に示す。

表1 BHS500鋼材の標準特性

項目	規定	目安		
鋼材	降伏点・耐力	500 N/mm <sup>2</sup> 以上	—	
	引張強さ	570 N/mm <sup>2</sup> 以上 ~720 N/mm <sup>2</sup> 以下	—	
	機械的性質	伸び	厚さ16 mm以下5号 19%以上 厚さ16 mm超 5号 26%以上 厚さ20 mm超 4号 20%以上	—
		シャルピー 吸収エネルギー	試験温度-5℃ 100J以上	—
	加工性	冷間曲げ加工の 内側半径	窒素 [N] ≤0.006%	板厚の7倍以上
	厚さ方向特性	絞り値	硫黄含有量 0.006%以下	JIS G 3199 Z35
溶接性	溶接入熱	10 kJ/mm以下	溶接熱影響部 <sup>注(1)</sup> シャルピー吸収エネルギー <sup>注(2)</sup> 試験温度-5℃ 47 J以上	
	予熱温度	溶接低温割れ 感受性組成 (Pcm) 0.20%以下	予熱不要	
溶接材料	継手引張強さ <sup>注(3)</sup>	570 N/mm <sup>2</sup> 以上	—	
	溶接金属 シャルピー吸収 エネルギー <sup>注(2)</sup>	試験温度-5℃ 47 J以上	—	

注(1) 試験位置はHAZ1 mm  
注(2) 三個の試験片の平均値  
注(3) 破断位置を規定しない

表2 BHS500の機械的性質 (供試材)

板厚 (mm)		40			
方向		L	C	Z	
JIS4号 引張試験	YP (N/mm <sup>2</sup> )	532	546	Z方向 引張試験	75
	TS (N/mm <sup>2</sup> )	623	634		75
	EL (%)	31	30		77
採取t/4 衝撃試験	vE-5 Ave (J)	329	316	備考	Ave 76
	vTrs (℃)	≤-60	≤-60		Z35相当
Ceq (%)		0.36			
Pcm (%)		0.17			

Ceq=C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14  
Pcm=C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B

### 3. 施工性調査

施工性の調査は、鋼材の特性を活用し、製作効率の向上の上でポイントとなる以下の項目に着目し実施した。

- ①切断性 ②冷間加工性 ③加熱矯正  
④予熱 ⑤溶接施工性

#### (1) 切断性

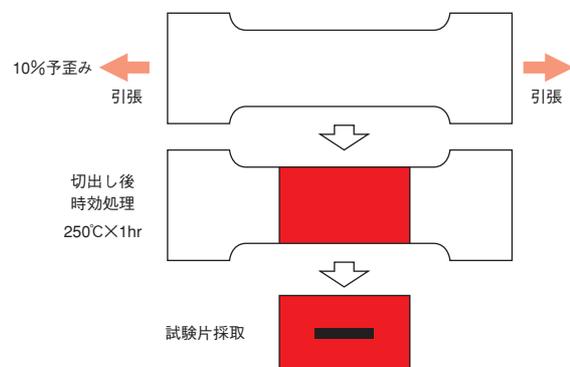
従来鋼と同条件でガス切断を行った結果、切断面の品質は道路橋示方書（以下、道示と記す）の基準である50 μmRy以下を十分に満足し、切断スラグの剥離性や上縁の溶け状態について特に問題は認められなかった。作業性や品質に大きな違いはないものと考えられる。

#### (2) 冷間加工性

冷間加工では歪み時効により靱性が低下することが知られ、道示では構造物に脆性破壊が生じないように、時効後においても使用鋼材のJIS要求靱性値を満足することが求められている。このため、低下要因とされる鋼材の窒素量 ([N]) と歪み時効による靱性低下分を見込んだ初期シャルピー吸収エネルギー値 (vE) が規定化されている。製鋼技術の進歩により大幅な窒素の低減が可能となった最近の鋼材データの調査からは、初期vE ≥ 100 Jにおいて時効後にも要求靱性値を満足することが確認されており、BHS500では、vE ≥ 100 Jかつ [N] ≤ 0.006% を規定化し、目安として冷間曲げの内側半径は板厚の7倍までの加工を可能としている。

本供試材のvE-5は300 J以上と規格値よりも遙かに高靱性であることから、高い冷間加工性を有することが推測された。このことから板厚の5倍程度の曲げ半径に相当するとされる10%の歪み時効処理を試験条件とした引張歪み試験を行った。試験方法は、10%の歪みを引張歪みとして導入し、予歪み後の時効促進に250℃×1 hrの処理を行い、シャルピー衝撃試験にて確認を行った。表3に試験方法および試験結果を示す。

表3 歪み時効による試験方法および結果



試験結果	処理	衝撃試験片採取位置t/4		
		方向	vE-5 Ave (J)	vTrs (℃)
	歪み時効	L	273	-45
		C	298	-40

10%歪み時効処理を施した場合においても圧延方向（L方向）および圧延直角方向（C方向）ともにvE-5が200 J以上と十分な値で、シャルピー遷移温度も-40℃以下と良好であった。また、歪み時効によるvE-5の変化は20~60 Jと小さかった。高軋化され、極めて低い窒素量にて製造されたBHS鋼材では、冷間曲げ内側半径は板厚の5倍以上と判断され、目安とされた7倍半径は十分に満足していることが確認された。

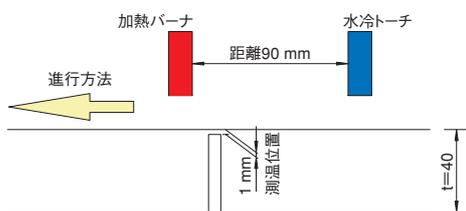
### (3) 加熱矯正

ガス炎加熱法による線状加熱では、加熱条件や冷却条件によっては熱処理にて得た強度や靱性などの性能消失や焼入れによる靱性劣化を生じることから、鋼種に応じた最高温度と冷却方法が決められている。道示においては、調質鋼は鋼材表面温度750℃以下かつ空放冷または空放冷後600℃以下での水冷とされ、その他鋼材では鋼材表面温度900℃以下かつ水冷開始条件が鋼種ごとに規定されている。

BHS鋼材は低Ceq化と大入熱溶接に対応する特性を併せ持つことから、 $Ceq \leq 0.38$ のTMC鋼の規定と同等以上の線状加熱条件が適用可能と推察された。そこで、同加熱条件とともに、より厳しい条件での線状加熱試験を実施し、性能劣化が生じないかの確認を行った。試験条件および試験結果を表4に示す。

表4 線状加熱試験条件および結果

試験条件	施工方法		使用ガス				火口高さ (mm)	冷却水量 (L/min)
	加熱温度 (℃)	冷却法	O <sub>2</sub>		C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>			
			圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	流量 (L/min)	圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	流量 (L/min)		
900	空冷	水冷	5	50	0.5	20	14	—
								6
1000	空冷	水冷	5	50	0.5	20	14	—
								6



試験結果	施工方法		C方向JIS4号 引張試験			表面下1mm 衝撃試験	
			YP (N/mm <sup>2</sup> )	TS (N/mm <sup>2</sup> )	EL (%)	方 向	vE-5 Ave (J)
	900	空冷	水冷	534	637	30	L
C							293
1000	空冷	水冷	529	633	29	L	287
						C	295
1000	空冷	水冷	538	637	30	L	299
						C	289

実施した線状加熱条件のすべてにおいて引張、シャルピー衝撃試験の結果は規格値を十分に満足し、加熱処理の前後において大きな性能劣化がないことを確認した。本鋼材は、道示基準よりも厳しい鋼板表面温度が1000℃の空放冷および水冷のいずれの施工も可能であり、ひずみ矯正においては作業能率の向上が図れるものと考えられる。

### (4) 予 熱

道示での予熱標準は、Pcmと溶着金属の拡散性水素量、標準的な鋼橋の継手拘束度などにより整理され、従来鋼の溶接では、 $t \leq 25$  mmを除いて板厚や溶接法に応じて予熱の実施が要求されている。ただし、鋼材のPcmや継手の拘束度によっては標準よりも高温に予熱する配慮も必要とされ、逆に、Pcmが低い場合には標準よりも予熱温度の低減が可能とされている。

BHS500はPcmが $\leq 0.20$ と極めて低く規定されていることから、標準的な継手の拘束状態においては予熱不要と判断される。しかし、継手ディテールによっては高い拘束度と応力集中を考慮した予熱の必要性を評価しておくことも重要である。このことからy形溶接割れ試験（JIS Z 3158）を用いて予熱温度の確認を行った。試験は、CO<sub>2</sub>溶接と被覆アーク溶接の室温条件に対し各3体ずつとし、JISに従い、表5に試験条件および試験結果を示す。

表5 y形溶接割れ試験条件および結果

試験条件	溶接法	溶接材料	径	予熱温度	相対湿度
	SMAW	L-62CF	φ4	室温 (20℃)	60%
	GMAW (CO <sub>2</sub> )	YM-60C	φ1.2		
溶接条件					
SMAW : 170A-25V-15 cm/min 入熱量1.7 kJ/mm 乾燥400℃×1hr 保管110℃ 吸湿なし					
GMAW : 280A-30V-30 cm/min 入熱量1.7 kJ/mm CO <sub>2</sub> 流量25 L/min					
試験結果	溶接法	表面割れ (%)	断面割れ (率%)	判 定	
	SMAW	0	0	割れなし	
		0	0		
		0	0		
	GMAW (CO <sub>2</sub> )	0	0	割れなし	
0		0			

いずれの溶接法ともに室温20℃、湿度60%において表面割れおよび断面割れは認められず、耐冷間割れ特性が確認された。高拘束度下においても予熱を不要とした施工が可能であり、施工性の向上に寄与するものと考えられる。

### (5) 溶接施工性

本鋼材には熱影響部の韌性低下を防ぐため細粒高靱化技術が導入されており、大入熱溶接条件を用いた高能率施工が可能とされている。また、この特性はパス間温度が本四基準（層間温度230℃）よりも高温となる場合においても有効と考えられる。これらの点は、特に施工性の向上に寄与することから、本鋼材に対応可能な組み合わせ溶接材料に対して認識を深めるとともに、入熱量とパス間温度の組み合わせによって決定される熱履歴が性

能に与える影響の調査を行った。調査は道示基準の入熱量（7 kJ/mm）を超えた条件を含め、パス間温度をパラメータとした施工を行い、溶接継手の機械的性質の確認により行った。

CO<sub>2</sub>溶接では、一般的に実施されている条件範囲として入熱量5 kJ/mm以下、建築分野での同クラス溶接材料の試験結果<sup>3)</sup>を参考にパス間温度250℃以下での検討を行った。また、タンデムSAW溶接では、本鋼材に規定の最大入熱量10 kJ/mmとともに、パス間温度300℃までの施工を行った。機械的性質の確認は、引張強度やシャルピー衝撃値などの一般的な施工試験項目に加え、参考までに溶着金属の0.2%耐力についても調査した。表6に調査条件を示す。

表6 溶接施工性の調査条件

溶接法	溶接材料	予熱	入熱量	パス間温度(℃)	試験体形状
CO <sub>2</sub> 溶接	YM-60C 1.2φ	なし	≦5	150	
				200	
				250	
タンデム SAW溶接	L:Y-DM 4.8φ T:Y-DM 4.8φ フラックス NF-320 32XD	なし	≦10	200	
				250	
				275	
				300	

試験片形状

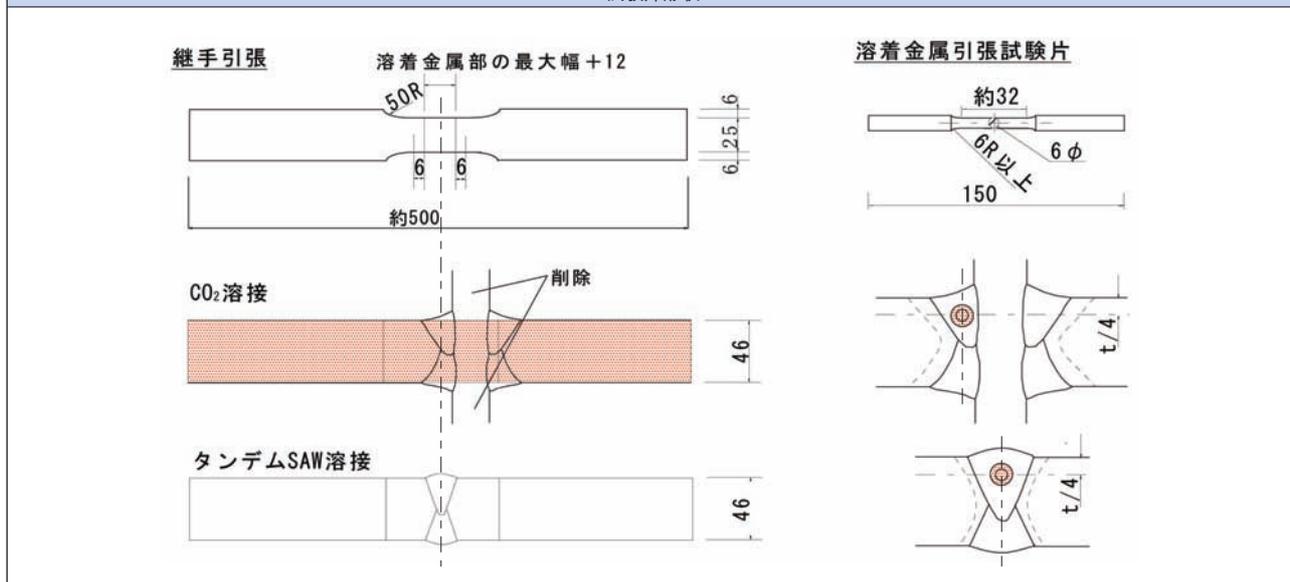


図1, 2にCO<sub>2</sub>溶接の結果を, 図3, 4にタンデムSAW溶接の結果を示す。なお, 図中には一部別件にて得たデータも合わせて示す。CO<sub>2</sub>溶接では入熱量 $\leq 5.0$  kJ/mm, パス間温度150~250℃の範囲において, タンデムSAW溶接では入熱量 $\leq 10$  kJ/mm, パス間温度50~300℃の範囲

において, いずれも本鋼材の規格値<sup>2)</sup>を満足していた。また, 曲げ, マクロ試験も特に問題は認められなかった。以上の結果から, 本鋼材の性能と検討に用いた溶接材料の組み合わせについては, 従来から認識のある施工条件範囲を超えた溶接施工が可能であると判断された。

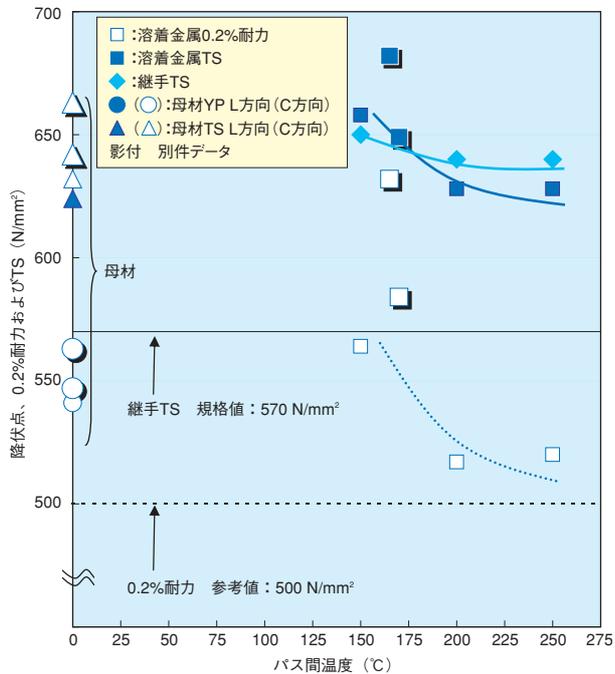


図1 CO<sub>2</sub>溶接継手の引張試験結果

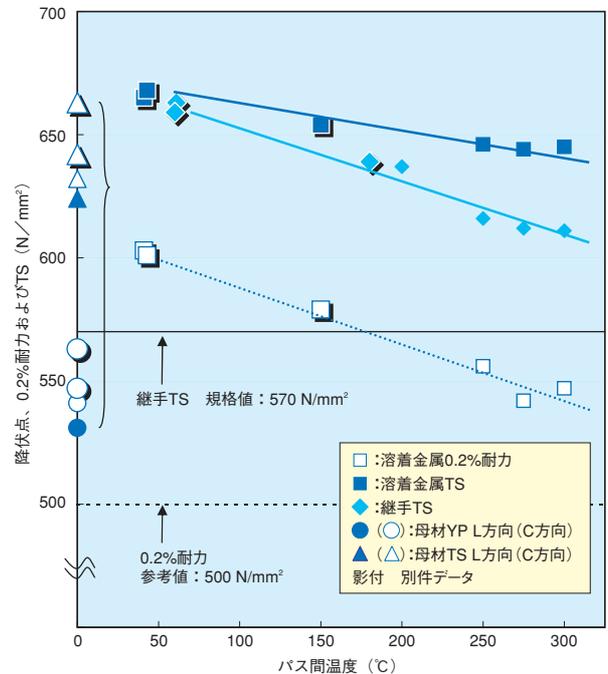


図3 タンデムSAW溶接継手の引張試験結果

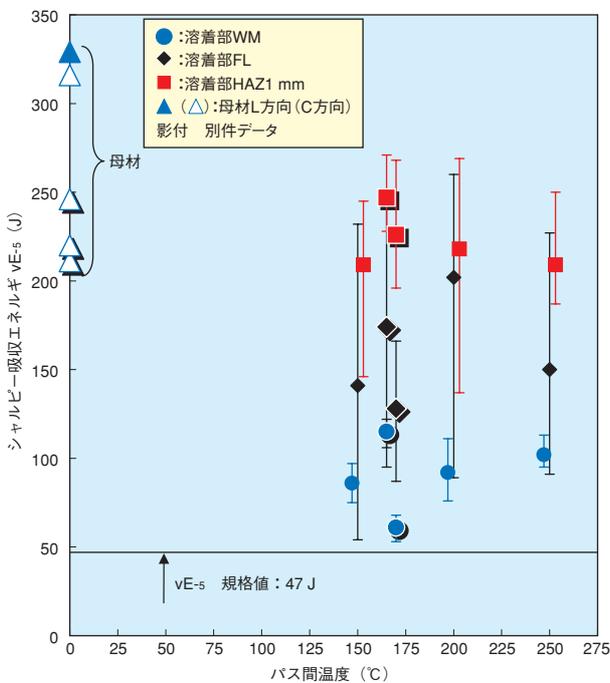


図2 CO<sub>2</sub>溶接継手の衝撃試験結果

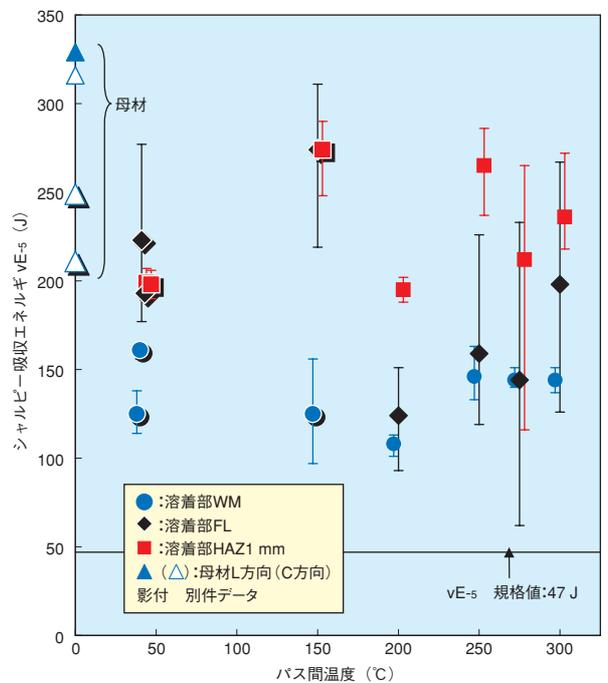


図4 タンデムSAW溶接継手の衝撃試験結果

#### 4. まとめ

BHS500の特性と施工性について以下の知見を得た。

- ① 切断条件やその品質は、従来鋼とはほぼ同等であった。
- ② y形割れ試験では、室温で割れは認められなかった。
- ③ 鋼材のシャルピー吸収エネルギーは規格値100 Jよりも十分に大きく、冷間曲げの内側半径は目安の板厚7倍を超え、板厚5倍でも満足することを確認した。
- ④ 線状加熱は鋼板表面温度1 000 ℃以下の空放冷および水冷のいずれの条件においても問題はなかった。
- ⑤ CO<sub>2</sub>溶接では入熱量 $\leq 5$  kJ/mmかつパス間温度 $\leq 250$  ℃、タンデムSAW溶接は入熱量 $\leq 10$  kJ/mmかつパス間温度 $\leq 300$  ℃と高能率な施工が可能であった。

橋梁用に開発されたBHS500は、490 N/mm<sup>2</sup>級鋼と比較して加工性・溶接性は同等以上であり、従来570 N/mm<sup>2</sup>級鋼と比べ大幅な施工性改善が図られると判断される。

ただ、これまで多くの議論はなされていないが溶着金属部の性能に関して、0.2%耐力での評価や強度マッチングの要求、あるいは更なる高能率施工の要求があった場合には、性能と施工性の観点から組み合わせる溶接材料に対する最適性の議論と事前の検討が必要と考えられる。なお、一般に橋梁の実製作では大型継手が多く、溶接部の冷却速度の点で小型試験体よりも有利となる。冷却速度は性能に影響を及ぼす直接因子であることから、これを基に入熱量やパス間温度などの条件を決定することがより合理的であると言え、対象とする溶接部の熱履歴と冷却速度、冷却速度と溶着金属の性能に関わる詳細な検討も今後は重要な検討課題となろう。

#### 5. あとがき

本調査での知見やデータがBHS鋼材を用いて計画される実橋製作の参考になれば幸いである。

最後に、BHS鋼材に関するデータ提供ならびに施工性調査の実施にあたり、ご協力いただいた新日本製鐵(株)、日鐵住金溶接工業(株)の皆様には心より感謝いたします。

##### 参考文献

- 1) 三木, 市川, 楠, 川端: 橋梁用高性能鋼材 (BHS500, BHS700) の提案, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp.1-10, 2003.7.
- 2) 日本鉄鋼連盟: 降伏点500N/mm<sup>2</sup>及び降伏点700N/mm<sup>2</sup>溶接構造用圧延鋼材, 2005.3.
- 3) AW検定評議会, 研究評価委員会WG5: 溶接条件の適正化と溶接材料の特性に関する調査研究・研究報告書, p.61,2000.3.