

鋼橋の溶接材料と施工技術

佐藤正晴

溶接カンパニー・技術開発部

Welding Consumables and Welding Processes for Steel Bridge

Masaharu Sato

Many kinds of MAG welding flux-cored wires have been used for steel bridge construction. This paper outlines the characteristics of flux-cored wire for shop-primer coated steel plate welding and electro-gas arc welding. In addition a newly developed welding wire for a high heat-input welding process and the welding consumables for atmospheric corrosion resistant steels and also the weld quality of portable robotic welders for I-girder flanges are reported.

まえがき = 近年、鋼橋の建設コストや維持コストの低減を目的として合理的な鋼橋構造の採用や性能/コストの高い新しい鋼材の使用が検討されている。具体的には第二東名・名神高速道路の橋梁を始めとして各地で新概念にもとづく鋼橋が設計・施工されている。その一つである2主1桁橋では板厚が大きく、フランジは最大75mmもの大型部材となるものもある。このため、現場継手には従来の高力ボルト接合に代わってアーク溶接法が採用されているが、工期の短縮のために高能率な溶接施工法が望まれている。また、鋼材では鋼橋の塗装などのメンテナンスコストを低減するために耐候性鋼が目ざされている。とくに最近では、飛来する海塩粒子や冬季に使用される融雪剤の影響を受けずに無塗装使用が可能なレベルの高耐候性鋼も新しく開発されている。

当社では、このような鋼橋工事のコスト節減ニーズに応えるべく、より高能率・高品質な溶接を可能とする溶接材料、施工法の開発に取り組んできた。本稿では、鋼橋においてもっとも多い590N/mm²級以下の強度レベルの鋼に使用される一般的な溶接材料に加え、最近の高性能鋼板に適用できる新しい溶接材料について述べるとともに、少数主桁橋の現場溶接に対応した施工法について概説する。

1. 鋼橋の溶接材料

1.1 溶接材料の現状

鋼橋に使用される溶接材料の使用比率は、橋の構造や溶接の自動化率などによっても異なるが、MAG溶接材料が50~60%、サブマージアーク溶接材料が20~30%、被覆アーク溶接材料やエレクトロガスアーク溶接材料が10~20%程度と推定される。

MAG溶接材料は、そのほとんどが炭酸ガスアーク溶接フラックス入りワイヤやソリッドワイヤで、半自動溶接、自動溶接装置あるいはロボットとの組合せで使用されている。また工場内や現地を問わず、鋼橋の主溶接材料として使われている。MAG溶接にもちいられる汎用的なフラックス入りワイヤには、全姿勢溶接に適用するチタニヤ系フラックス入りワイヤ(以下チタニヤ系

FCW)と、すみ肉溶接に適用するメタル系フラックス入りワイヤ(以下メタル系FCW)があり、それぞれ軟鋼・SM490鋼用と高強度のSM570鋼用とがある。

サブマージアーク溶接材料は工場内でのフランジとウェブの大脚長下向すみ肉溶接、板継溶接のほか、現地の鋼床版の片面溶接に適用されている。エレクトロガスアーク溶接材料は箱桁のウェブ立向溶接や、後述する1桁ウェブの現地立向溶接にもちいられている。いずれの溶接材料にも、それぞれ軟鋼・SM490鋼用と高強度のSM570鋼用とが揃えられている。第1表に鋼橋の溶接に使用されている主な溶接材料の例を示す。

1.2 代表的な溶接材料とその特徴

1.2.1 水平すみ肉溶接用フラックス入りワイヤ

鋼橋のMAG溶接においてしばしば取りあげられる課題の一つに、すみ肉溶接時の気孔欠陥がある。鋼橋の製作期間中の錆防止を目的として、鋼板の表面にはウオッシュプライマや無機ジंकプライマなどの一次防錆塗料(プライマ)が塗装されていることが多い。このようなプライマ塗装鋼板のすみ肉溶接では、アーク熱でプライマが分解し、生成したガス(水素ガスや亜鉛などの低沸点金属蒸気)を原因とする気孔欠陥(ピット、ブローホール)が溶接金属中に生じやすい。通常の溶接条件範囲では溶接速度を大きくするほど欠陥数も多くなるので、ロボットなどによって溶接の高速化を図る上で避けることのできない課題である¹⁾。


第1表 鋼橋の代表的な溶接材料(SM490, SM570鋼用)

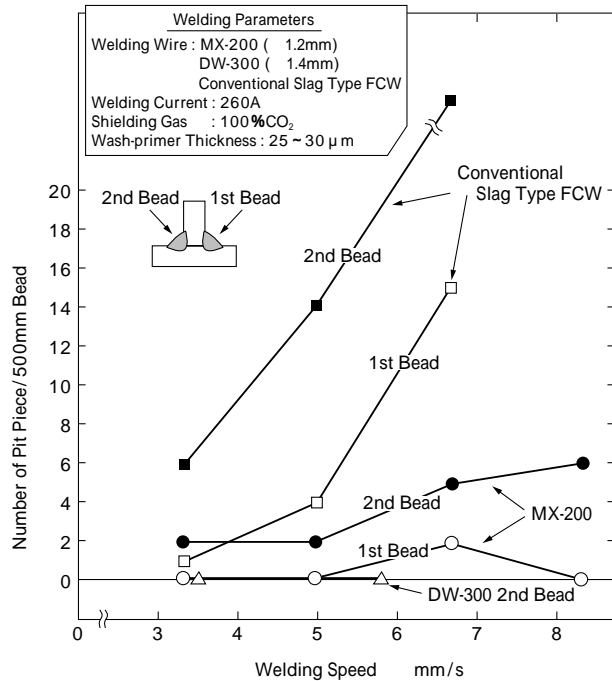
Table 1 Welding consumables for bridge construction

Welding Procedure		Weld Joints		Welding Consumables
		Factory	Site	
GMAW (MAG)	Butt Welding	Plate-to-plate	I-girder Flanges	Welding Wires : MG-1, MG-50, MG-60, DW-100/DW-Z100, DW-60, DWA-50
	Fillet Welding	Box Girder Panels		Welding Wires : MX-200/MX-Z200, MX-200S, DW-300
SAW	Butt Welding		Steel Deck Plates	Fluxes : MF-38/MF-38A Welding Wires : US-36, US-49 Backing Material : FAB-1 Filler Materials : RR-2, METALGRITS
	Fillet Welding	Flat Corner Joints		Fluxes : MF-53, MF-63 Welding Wires : US-36, US-49
EGW	Butt Welding		I-girder Webs	Welding Wires : DWS-43G, DWS-60G

第2表 DWS-60G による突合せ継手の溶接条件および機械的性能

Table 2 Typical mechanical properties of the weld metals of an electro-gas arc welding by DWS-60G

Type of Steel	Groove Preparation	Welding Parameters				Mechanical Properties		
		Current A	Voltage V	Speed mm/s	Heat Input kJ/mm	0.2% Offset Strength MPa	Tensile Strength MPa	Absorbed Energy at -5 J
JIS G 3106		380	40	1.1	13.8	505	665	126
SM570Q								135
								134



第1図 フラックス入りワイヤの耐気孔欠陥性
Fig. 1 Porosity resistance in fillet welding of wash-primer coated plates

第1図は、ウォッシュプライマが塗装された鋼板に対して、市販されている数種のフラックス入りワイヤによる気孔欠陥（ピット発生数）を調査した試験結果である。図示されているフラックス入りワイヤのうち、MX-200は無機ジンクプライマ塗装鋼板での耐気孔欠陥性を改善するために開発したすみ肉溶接用メタル系FCWで、ウォッシュプライマ塗装鋼板においても優れた耐気孔欠陥性を有している。DW-300はさらに耐気孔欠陥性を向上させたチタニヤ系FCWであるが、非低水素系のフラックス入りワイヤなので、板厚などに使用上の制限を設けているワイヤである。

このほかに、大脚長（約9mm）がえられやすいDW-200（チタニヤ系FCW）や、とくに高速溶接時のビード形状や耐気孔欠陥性に優れたMX-200S（メタル系FCW）なども開発されている²⁾。

1.2.2 サブマージアーク溶接用ワイヤ，フラックス

サブマージアーク溶接に使用するフラックスには、ボンドフラックスと溶融フラックスがあるが、橋梁分野では溶融フラックスが多くもちいられている。また鋼床版の片面溶接には、ガラスペーストと耐火固形フラックスなどから構成される消耗型の裏当て材（FAB-1）や開先充填材（メタルパウダ，メタルグリッツ）がもちいられている。

1.2.3 エレクトロガスアーク溶接用ワイヤ

ウェブの立向継手に適用されるエレクトロガスアーク溶接法（以下EGW法）は、細径（1.6mm）のフラックス入りワイヤに大電流を供給するため、ほかの溶接法

第3表 耐候性鋼用溶接材料の例

Table 3 Welding consumables for atmospheric corrosion resistant steel

	SMA400 SMA490	SMA570	Newly Developed Atmospheric Corrosion Resistant Steel
SMAW	LBW-52B, LTW-52B	LBW-62G	LB-50WT
GMAW (MAG)	DW-50W, MX50W MGW-50TB, MGW-50B	DW-60W, MX-60W MGW-60B	DW-50WT, MX-50WT MG-50WT
SAW*	MF-38 USW-52B x MX-38A MF-53	USW-62B x MF-38 MF-63	USW-50WT x MF-38 MF-53

* Note : Welding Wire x Fluxes

に比較して溶着速度が格段に大きいことが特長である。しかし大入熱の施工となるので、溶接部の衝撃靱性の安定化が溶接材料に求められる重要な課題である。第2表はエレクトロガスアーク溶接用フラックス入りワイヤDWS-60Gによる溶接金属の機械的性能例を示したもので、板厚25mmのJIS G 3106 SM570Q鋼材を13.8kJ/mmの溶接入熱で施工した例である。

1.3 最近の溶接材料

上記の汎用溶接材料とは別に、新しく開発された鋼材用の溶接材料や、大入熱溶接金属の品質の観点から特別に設計された溶接材料について以下に紹介する。

1.3.1 耐候性鋼用溶接材料

塗装などの鋼橋のメンテナンスコストを低減する目的で使用される耐候性鋼には、その使用条件から塗装仕様と無塗装仕様にわけられるが、大部分の溶接材料は無塗装仕様に合致するように化学成分（たとえばCu, Cr, Niなどの耐候性成分）が設計されている。さらに最近では、海岸地域での飛来海塩粒子や寒冷地で多く使用される融雪剤に含まれる塩化物イオンの影響を受けずに、無塗装での使用が可能な新型高耐候性鋼材が開発されており、この鋼材に対応する各種の溶接材料も製品化している。第3表に現在JISに規定されている溶接構造用耐候性鋼（SMA400, SMA490, SMA570）に使用する代表的な溶接材料と、新しく開発された高耐候性鋼（490N/mm²級）用の溶接材料を示す。

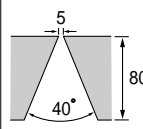
1.3.2 大入熱炭酸ガスアーク溶接フラックス入りワイヤ

一般的に溶接金属の強度や靱性はその冷却速度に大きく依存している。冷却速度は入熱の増加とともに小さくなり、溶接金属の引張強さや靱性は低下する傾向がある。これは、溶接金属への合金元素の歩留まり減少や結晶粒の粗大化が原因とされる。したがって所定の機械的性能をえるには溶接入熱の管理が必要であり、とくに大入熱となりやすい鋼橋のウェブの現地立向溶接などにおいて、大入熱で溶接できる高能率な溶接材料が求められていた。

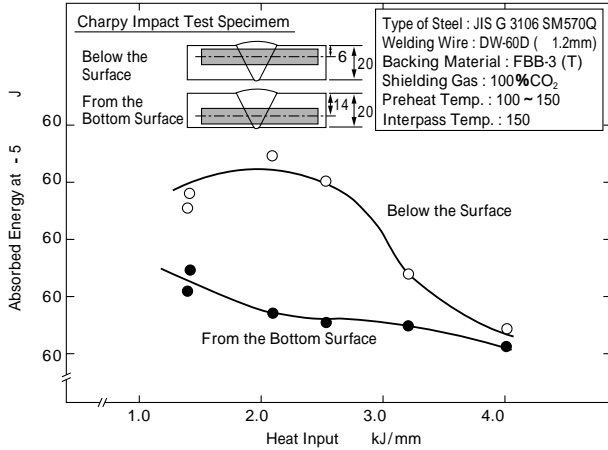
このような背景から新しく開発されたフラックス入りワイヤDW-60Dは、大入熱溶接時の機械的性能を向上させた570N/mm²級高張力鋼用炭酸ガスアーク溶接フ

第4表 大入熱炭酸ガス溶接ワイヤ「DW-60D」の性能例

Table 4 Typical mechanical properties of the weld metal by DW-60D

Type of Steel	Groove Preparation	Welding Parameters	Mechanical Properties			
			* Yield Strength MPa	Tensile Strength MPa	Absorbed Energy at -5 J	
JIS G 3106 SM570Q		Root Pass : 200A-24V Filler-capped Passes : 220A-26V Pass Seq. : 14 layers-26 passes Heat Input (avg.) : 5kJ/mm Preheat Temp. : 100 ~ 150 Interpass Temp. : 150	F	544	615	114
			C	559	620	142
		B	595	653	70	

* Note : Location of specimen
 F : At 6mm below the surface
 C : At the center of the thickness
 B : At 6mm from the bottom surface



第2図 溶接金属の衝撃吸収エネルギーに及ぼす溶接入熱の影響
 Fig. 2 Effect of heat input on absorbed energy of weld metal

ラックス入りワイヤ(チタニヤ系FCW)である。第2図はDW-60Dによる溶接金属の衝撃靱性に及ぼす溶接入熱の影響を調査した例、第4表に鋼製の橋脚を想定した板厚80mmのJIS G 3106 SM570Q鋼材における立向溶接部の機械的性能例を、また、写真1に断面マクロ組織写真例をそれぞれ示した。

2. 鋼橋の溶接施工技術

重要なインフラの一つである東名・名神高速道路の慢性的な渋滞を改善するために、第二東名・名神高速道路の建設が現在進められている。これらの高速道路では、建設コストを低減するための工法が強く求められており、鋼橋においては合理化2主1桁橋などが提案されている³⁾。この1桁橋の現地溶接工事に適用される施工法について以下に紹介する。

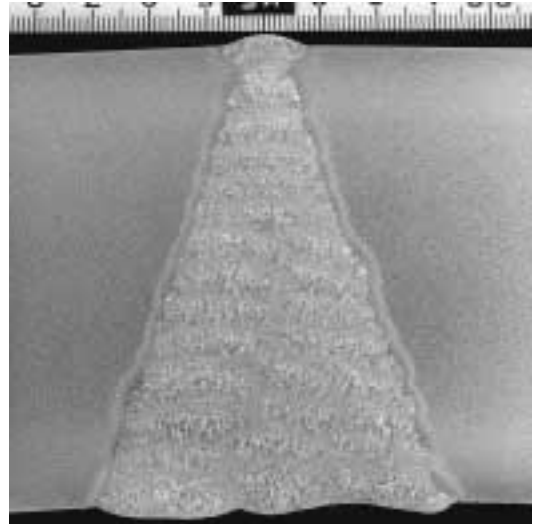


写真1 厚板の立向片面溶接における溶接断面マクロ組織

Photo 1 Cross sectional macrostructure of welded joint (Vertical-up welding)

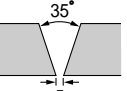
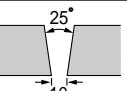
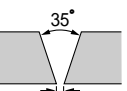
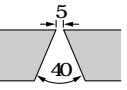
2.1 フランジの片面溶接

上下フランジの溶接法の主なものを第5表に示す。上フランジの溶接では簡易溶接台車(PICOMAX-2)による下向炭酸ガスアーク片面溶接がもっともシンプル、かつ低コストの自動溶接法である。また、下フランジの施工法のうち、専用溶接装置(OH-AUTO)による上向マグ片面溶接方法は、全断面溶接(ウェブのノンスラップ化)という難しい課題に応えようとする技術として位置づけられている。

さらに、上下フランジのいずれにも適用可能で、高効率な炭酸ガスアーク溶接をおこなう直交型簡易ロボットもすでに第二東名・名神高速道路高架橋工事に適用されている。上フランジは1台のロボットによる下向片面溶

第5表 フランジの主な溶接施工法

Table 5 Main welding procedures for I-girder flanges

Welding Procedure		Groove Preparation	Welding Consumables	Welding Parameters	Weld Joints
GMAW	Semi-automatic Arc Welding		Welding Wire : MG-50, MG-60 Wire Dia. : 1.4mm, 1.6mm Backing Material : FBB-3 Shielding Gas : CO ₂	Welding Current ,Voltage 250 ~ 400A 27 ~ 40V Wire Extension 20 ~ 30mm	Upper Flange Lower Flange
	Machine Welding (PICOMAX-2 : Carriage with Torch Oscillator)				
	Robotic Welding (Portable Robot)			Welding Current ,Voltage 240 ~ 360A 25 ~ 37V Wire Extension 30mm	Upper Flange Lower Flange
GMAW + SAW	Machine Welding (Carriage)		GMAW : do . SAW Welding Wire : US-36, US-49 Wire Dia. : 4.8mm Flux : MF-300	Welding Current ,Voltage GMAW (Root Pass ~ 4th Layer) 250A-27V SAW Leading Electrode : 800A-34V Trailing Electrode : 700A-36V	Upper Flange
GMAW	Machine Welding (OH-AUTO : Overhead One-side Welding Equipment)		Welding Wire : DWA-50 Wire Dia. : 1.2mm Backing Material : FBB-3 Shielding Gas : Ar-20%CO ₂	Welding Current ,Voltage 120 ~ 220A 15 ~ 26V Wire Extension 15mm	Lower Flange

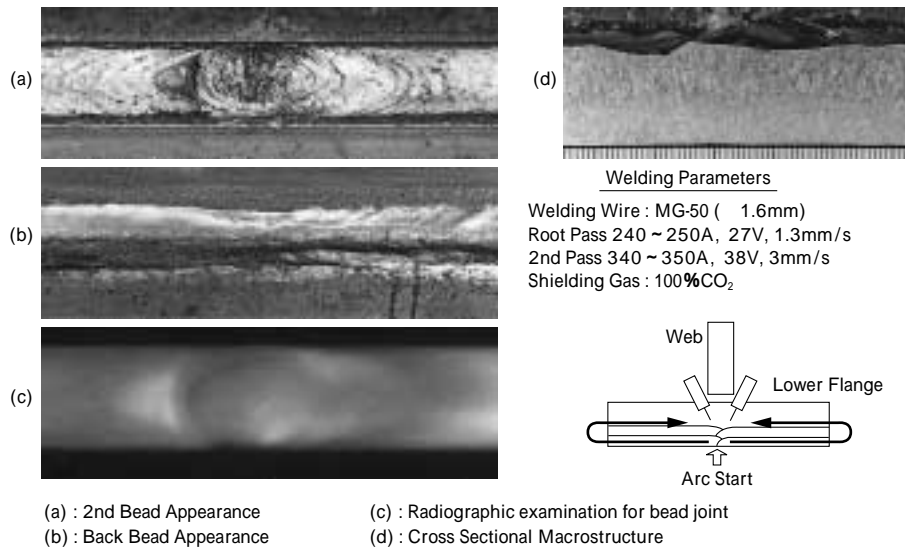


写真2 下フランジ溶接ビード会合部の状況
Photo 2 Bead appearance and macro-structure of bead joint

第6表 ウェブの主な溶接施工法
Table 6 Main welding procedures for I-girder webs

Welding Procedure		Groove Preparation	Welding Consumables	Welding Parameters
GMAW	Semi-automatic Arc Welding		Welding Wire: DW-Z100, DW-60D Wire Dia.: 1.2mm, 1.4mm Backing Material: FBB-3 Shielding Gas: CO ₂	Welding Current ,Voltage 200~220A 22~25V Wire Extension 20mm
	Machine Welding (PICOMAX-2: Carriage with Torch Oscillator)			
	Robotic Welding (Portable Robot)			
EGW	Machine Welding (SEGARC-2: Electro-gas Arc Welding Equipment)		Welding Wire: DWS-43G : DWS-60G Wire Dia.: 1.6mm Backing Material: KL-4GT Shielding Gas: CO ₂	Welding Current ,Voltage 380~400A 40V Wire Extension 35mm

接とし、下フランジでは2台のロボットがウェブ直下のスカルップ部分でビード継のある下向片面溶接をおこなう⁴⁾。このウェブ直下のビード継部、とくに初層溶接でのビード継が下フランジ溶接部の品質を左右することになるが、1台目のロボットがアークスタートした後、2台目を数秒後にスタートさせることにより、良好なビード継をおこなうことができる。写真2は初層ビード継部の健全性を確認するために、第2層まで溶接した後の試験体のビード外観写真、放射線透過試験写真、および溶接線方向に切断した断面マクロ写真である。金属組織の凝固成長方向から、2層とも写真中央部でビード継ぎがおこなわれていることがわかる。これは、溶接電流やアーク電圧などの溶接条件と、溶接トーチのウィーピングや2台のロボットの動作タイミングを適正化した結果である。

2.2 ウェブの立向溶接

ウェブの溶接法の主なものを第6表に示す。第二東名・名神高速道路の鋼橋I桁ウェブは、最大3000mmもの溶接長となるので、溶接法の選択には施工効率をもっとも重要視され、EGW法が実績の面からも有力である。また、このEGW法は開先の精度に対して余裕があるので、現地溶接法としてもっとも適した施工法といえる。

使用する専用装置 (SEGARC-2) は、造船などの立向

溶接で数多くの実績があり、操作性に優れた小型軽量の溶接装置であるが、上フランジ直下では装置本体や溶接トーチの形状的な制限から溶接残しが発生する。この溶接残しを避けること、およびそれほど長尺ではないウェブの溶接では、簡易溶接台車や直交型簡易ロボットによる立向炭酸ガスアーク片面溶接法も多く採用されている。溶接材料はチタニヤ系FCWで、溶接入熱が大きくなりやすいことから、1.3.2項で述べたような溶接ワイヤがもちいられる。

むすび=鋼橋の溶接にもちいられる溶接材料と、2主1桁現地溶接に適用される溶接施工法について概説した。鋼橋はその建設・維持コストの低減という時代の要請から、材料面では大入熱溶接用高張力鋼や高耐候性鋼の採用、そして構造面では部材の単純化や合理化した少主桁橋などの新しい技術が提案されている。このような新しい技術に対応するべく、より使いやすく安定した品質の溶接材料、溶接施工法の開発に今後とも鋭意取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 黒川剛志ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.45, No.1(1995), p.17.
- 2) 菅 哲男ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.45, No.1(1995), p.60.
- 3) 山縣敬二：JSSC, No.13 (1994), p.2.
- 4) 小西正人：R&D 神戸製鋼技報, Vol.46, No.3 (1996), p.3.