

宮地鐵工所における鋼橋のヤード・現場溶接工法の技術的変遷(その1)

Changes in Yard and In Situ Welding Technology Applied to Steel Bridges

by Miyaji Iron Works (Part 1)

成 宮 隆 雄*¹ 村 上 貴 紀*² 浪 花 勝 利*³
 Takao NARUMIYA Takanori MURAKAMI Katsutoshi NANIWA

Summary

Until recently, the technology of yard and in situ welding on steel bridges (hereinafter field welding) has mostly been applied to the steel plate decks to improve the durability of the pavement, to the steel piers (designed primarily to fit the landscape), and to the full-section butt welding of their main girders. However, this technology is increasingly being considered to reduce the total construction cost of these bridges.

Since the mid-1960's, our company has studied applications of field welding technology to joints in the steel plate decks, steel piers, and the main girders to improve welding quality, shorten the welding process, reduce welding costs, and establish measures against welding shrinkage and distortion. Because of this long history, extensive technical knowledge and field welding know-how have accumulated, and many problems have been solved. We summarize our experience with field welding technologies over the last 30 years to serve not only as a reference, but also as a stepping-stone for future development in field welding technology.

キーワード：現場溶接，ヤード溶接，鋼床版現場溶接，鋼脚現場溶接，主桁全断面現場溶接

1. はじめに

鋼橋設計思想において、鋼材重量ミニマムから労働量ミニマムへの最初の変換は鋼床版橋梁が比較的早く発達した西ドイツにおいて見られている。一般に鋼床版は加工度、特に溶接工数が大きな比率を占めていることから、加工法、特に溶接工法の進歩に適応した鋼床版構造の合

理化が進められてきた。西ドイツにおいて1958年頃まではどちらかというと鋼材価格の上昇率が労務賃金の上昇率を上回っていた。1958年以降、鋼材価格はほぼ横ばい状況となったが、労務賃金はさらに右肩上がりの上昇を続けることになった。図-1に1950年から1965年の15年間の西ドイツにおける労務賃金と鋼材価格の推移を示した。

このような事情から西ドイツにおいては、鋼橋の製作費、架設費等を含めた総コストの低減を目的として労働量ミニマムの設計思想が重視されるようになり、1960年には鋼材重量ミニマムを目標とした競争設計は終止符が打たれるようになった。鋼床版においては①縦リブ、横リブの断面形状、②縦リブ、横リブの間隔とその交差部の構造、③現場継手の配置、④継手構造等が重要な設計課題となった¹⁾。

一方、日本においては1980年頃を境に、鋼材価格はほぼ横ばいになったが労務費は相変わらず右肩上がりの上昇を続け、必然的に鋼材重量ミニマムから労働量ミニマムへの移行が議論されるようになってきた。図-2に1972年から1992年の20年間の日本における労務賃金と鋼材価格の推移を示した²⁾。奇しくも20年前の西ドイツの傾向と同じような推移を示している。特にバブル崩壊以後、建設業における内外価格差問題等から公共工事のコ

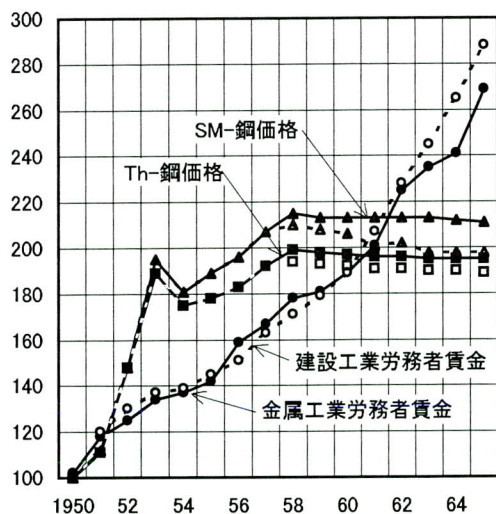


図-1 北ライン、西ファイレン地区の金属工業と建設工事における年平均熟練労務者賃金指数、およびSM、Th-鋼の型鋼と板の年平均価格指数

*1 常務取締役

*2 千葉工場生産技術研究所

*3 (株)東京フラッグ

スト縮減が図られるようになり、1994年12月に建設省は「公共工事の建設費の縮減に関する行動計画」を策定し、本格的に鋼橋建設のトータルコスト削減に動き出した。

従来、鋼橋の積算体系は鋼重ベースであったが、1995年以降は部材、部品、素材数を減少しシンプルな構造として製作作業工程を省力化した上で製作における労働量を加味した体系へと移行することになった。鋼橋の構造をシンプルにし、部材、部品、素材数を減少させることにより必然的に橋梁部材鋼板は厚板化の傾向を示し、トータルコストの立場から現場接合への溶接の採用が積極的に検討されるようになってきた。

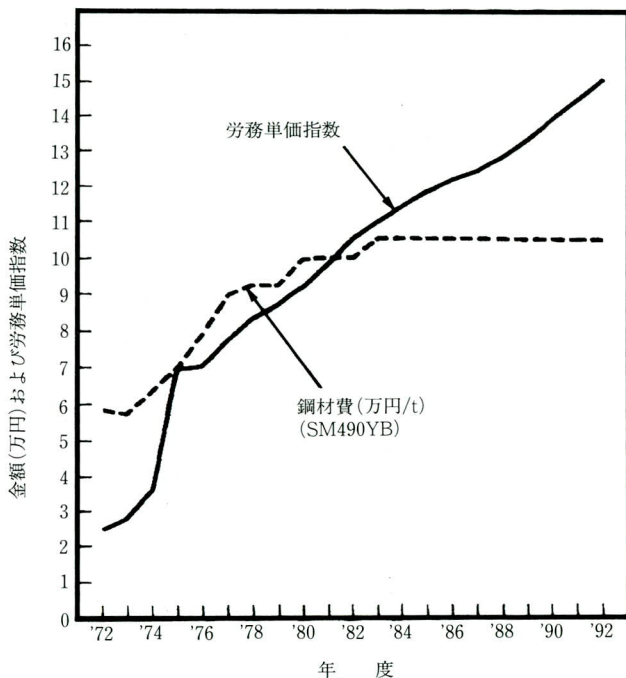


図-2 過去20年間における鋼材費と労務費の推移

日本における鋼橋の現場溶接の適用は以外に古く、リベット桁の補強に溶接が採用されており、1931年（昭和6年）に奥羽本線松山川橋梁を皮切りに終戦まで1,200連を超える橋梁に溶接補強がなされたと報告されている。鋼橋の溶接は現場溶接から始まったといえる。そのためか、新鋼橋の現場溶接が本格的に試みられたのは全溶接橋時代が到来する前であり、1950年（昭和25年）誉鳩橋（4主桁プレートガーダー）で代表される十数橋においてI桁の全断面溶接が施工されている³⁾。

宮地鐵工所が本格的な現場溶接を行ったのは1967年（昭和42年）北海道国有鉄道の月寒川橋梁鋼床版縦シーム溶接である。また1969年（昭和44年）大阪万博5号橋

（3径間連続3箱桁）のノンガスアーク溶接による全断面現場溶接を初めて実施した。

その後、鋼床版溶接、鋼脚、箱桁および板桁等のヤード・現場全断面溶接工法の開発・改善、溶接收縮・変形の対応、溶接品質の向上、および現場溶接継手の非破壊検査方法の確立等の研究を継続的に行い、多くの実績を上げてきた。1989年（平成元年）には鋼橋のヤード・現場溶接（以後特別な場合以外はヤード溶接を含めて現場溶接と称する）の増加に対応して、現場溶接施工を専門に行う関連会社を設立し、鋼橋建設における現場溶接のあらゆる技術的要請に応えられる体制を確立してきた。

本報は、宮地鐵工所における過去30数年に亘る鋼橋の現場溶接の研究と実績を基に技術的な変遷をまとめ、次代への技術継承を期すことを目的としたものである。

2. 鋼床版現場溶接の変遷

日本における最初の鋼床版桁は1954年（昭和29年）の中里跨線橋（板桁・東京都・平成2年に架け替えられた）といわれている。初期の鋼床版箱桁は1957年の馬橋（京都府）、西大橋（大阪府）であるが、本格的な鋼床版箱桁は1959年の城ヶ島大橋（神奈川県）であろう。

鋼床版の現場溶接が最初に施工された時期と橋名は資料がなく定かではないが、1964年～1966年にかけて、大阪市が施工した一連の鋼床版桁（田蓑橋、肥後橋、渡辺橋、新淀川橋、新十三大橋）において、裏当金を用いた被覆アーク溶接、サブマージアーク溶接による鋼床版現場溶接が施工された⁴⁾。

宮地鐵工所が施工した現場溶接は前述した通り、1967年（昭和42年）に月寒川橋梁、大崎電車区高架橋等の鉄道橋において施工された。月寒川橋梁では鋼床版縦シーム接合に高力ボルト一面摩擦接合の添接板を裏当金兼用としたサブマージアーク溶接が行われた。以後、宮地鐵工所において多くの鋼床版現場溶接が施工された。宮地鐵工所における鋼床版現場溶接の技術的な推移を図-3に示した。また宮地鐵工所の鋼床版現場溶接の実績を表-1に示した。

現在、サブマージアーク片面裏波溶接による鋼床版現場溶接工法はほぼ確立されているが、ここに至るまでの技術的な変遷、特に高温割れ防止対策の経過を以下に記述する。

図-3 宮地鐵工所における鋼床版現場溶接の技術的変遷要約

年代/代表的な橋梁名称	溶接工法の技術的特徴	技術的な問題点および変遷
昭和40年代前半 月寒月橋梁 大崎電車区高架橋	①裏当て金を用いたサブマージアーク片面溶接	①裏当て金を用いない片面裏波溶接法の開発
昭和40年代後半 新吉野川橋	①ソフトバックキングを用いたサブマージアーク片面裏波溶接施工 ②マグネットによるバックキング取り付け ③本溶接に先立ち開先目違い等修正のための仮付け溶接施工 ④横継手と縦継手の交差部拘束溶接施工	①仮付け溶接施工のため溶接施工能率の低下 → 仮組立時および現場施工時における開先目違いの加熱矯正施工 ②ソフトバックキングの取り付け押え力の強弱による溶鋼の吹き上げと抜け落ち → 取付け方法の改善 ③高温割れ発生 → 高温割れ発生機構の解明と炭酸ガスアーク片面裏波溶接法(S&W・CO ₂ 法)の開発 ④横継手と縦継手の交差部と溶接ジョイント部の効率処理方法および高温割れの防止
吉田橋/鶴川橋 ・炭酸ガスアーク片面裏波溶接併用期	①仮付け溶接の中止 ②横継手に高温割れ防止溶接法(S&W・CO ₂ 法)	①多層溶接による溶接能率低下 ②防風対策とシールド不足 ③炭酸ガスアーク溶接とサブマージアーク溶接併用による現場機材の増大
昭和50年代前半 千住新橋/新利根川橋 ・鋼床版現場溶接工法の確立 ・開先精度向上、キャンパー等の溶接変形制御検討期	①仮付け溶接中止 ②横継手と縦継手の交差部の拘束溶接中止 ③2枚制エンドタブ使用とエンドタブ内カースケード拘束溶接による先端割れ防止	①サブマージアーク片面裏波溶接における高温割れ防止施工方法の確立 ②炭酸ガスアーク片面裏波溶接法の中止
昭和50年代後半 大鳴門橋等本四連絡橋 ・本州四国連絡橋公団「鋼床版現場溶接施工基準(案)」の制定 ・サブマージアーク片面裏波溶接法の確立 ・自動超音波探傷法の採用	①全国的に鋼床版現場溶接継手への仮付け溶接無し工法の普及 ②一部を除いてサブマージアーク片面裏波溶接施工の普及 ③キャンパー等変形制御計画の確立	①更なる効率的なソフトバックキング取付け方法の検討 ②疲労強度向上の立場から鋼床版裏面の横リブのスカラップレスの検討 ③効率的な非破壊検査の検討と自動化

(1) サブマージアーク片面波溶接におけ高温割れ発生機構とその防止対策の変遷

サブマージアーク片面裏波溶接の高温割れの放射線透過試験写真を写真-1に断面マクロを写真-2に示した。一般にサブマージアーク溶接等の大入熱溶接における高温割れは溶接金属における低融点不純物の凝固過程における偏析と溶収縮等における変位(引張力)により、凝固過程に柱状樹枝組織の会合部に発生する。従って高温割れ発生は溶接金属の低融点不純物(フィルム状偏析)の位置および溶接ビード形状(例えば梨の実状ビード)に影響される。鋼床版現場溶接でのサブマージアーク片面裏波溶接ビードはルートギャップが過大な場合を除いて特に形状的に不適切なものではなく、また原則的に1パス溶接であるため溶収縮による引張力も大きくはない。しかしながら溶接継手が長く、かつ連続溶

表-1 鋼床版現場(地組立)溶接施工実績

施工時期	橋名	施主	橋梁形式	溶接方法
1967年	大崎電車区新設鋼高架橋	日本国有鉄道	鋼床版箱桁	SAW(FB)
1967年	月寒川橋梁	日本国有鉄道	鋼床版箱桁	SAW(FB)
1972年	新吉野川橋	四国地方建設局	鋼床版箱桁	SAW
1972年	吉田橋	横浜市	鋼床版箱桁	CO ₂
1973年	鶴川橋	茨城県	鋼床版箱桁	横継手:CO ₂ 縦継手:SAW
1975年	市川3号水路上部工	関東地方建設局	鋼床版箱桁	SAW (一部CO ₂ 併用)
1976年	BT251工区	首都高速道路公団	鋼床版箱桁	SAW
1976年	千住新橋	関東地方建設局	鋼床版箱桁	SAW
1978年	八戸港改修臨海道路橋梁	青森県	鋼床版箱桁	SAW
1980年	新利根川橋	関東地方建設局	鋼床版箱桁	SAW
1981年	大鳴門橋	本州四国連絡橋公団	吊橋	SAW
1981年	新常盤寺川橋	北陸地方建設局	鋼床版箱桁	SAW
1982年	横川橋	日本道路公団	鋼床版箱桁	SAW
1983年	浦安橋	東京都	鋼床版箱桁	SAW
1984年	蓮河工区	名古屋高速道路公社	鋼床版箱桁	SAW
1984年	浜市B.Pメリケン工区	近畿地方建設局	鋼床版箱桁	SAW
1984年	宝珠花橋	埼玉県	鋼床版箱桁	SAW
1985年	鶴川大橋	室蘭開発建設部	鋼床版箱桁	SAW
1986年	大島大橋	本州四国連絡橋公団	吊橋	SAW
1986年	下町屋高架橋	関東地方建設局	鋼床版箱桁	SAW
1987年	札幌大橋	札幌開発建設部	鋼床版箱桁	SAW
1987年	水辺の散歩道	江東区役所	鋼床版箱桁	SAW
1987年	港第2工区	阪神高速道路公団	鋼床版箱桁	SAW
1988年	Y141,Y142工区	首都高速道路公団	鋼床版箱桁	SAW
1988年	金沢シーサイド	横浜市	鋼床版箱桁	SAW
1989年	B101工区	首都高速道路公団	鋼床版箱桁	SAW
1989年	BY411工区	首都高速道路公団	鋼床版箱桁	SAW
1989年	BY552工区	首都高速道路公団	鋼床版箱桁	SAW
1989年	KE31,KE32工区	首都高速道路公団	鋼床版箱桁	SAW
1989年	大出橋	静岡県	鋼床版箱桁	SAW
1989年	大清水橋	神奈川県	鋼床版箱桁	SAW
1989年	関口橋	江東区	鋼床版箱桁	SAW
1989年	中島西工区	阪神高速道路公団	鋼床版箱桁	SAW
1989年	鶴川橋	茨城県道路公社	鋼床版箱桁	SAW
1989年	D31工区	首都高速道路公団	鋼床版箱桁	SAW
1989年	関西空港連絡橋	関西国際空港特	トラス	SAW
1990年	言問橋右岸テラス連絡橋	東京都江東治水事務所	鋼床版箱桁	SAW
1990年	八田大橋	高知県	鋼床版箱桁	SAW
1990年	BY421工区	首都高速道路公団	斜張橋	SAW
1991年	1212工区	首都高速道路公団	鋼床版箱桁	SAW
1991年	岩倉橋	群馬県	鋼床版箱桁	SAW
1991年	鹿狩戸橋	宮崎県	ヒンジアーチ橋	SAW
1991年	新万代橋	茨城県	斜張橋	SAW
1991年	高崎橋	千葉県	鋼床版箱桁	SAW
1991年	東京湾連絡橋台場海上部	東京都港湾局	鋼床版箱桁	SAW
1991年	名古屋IC	日本道路公団	鋼床版箱桁	SAW
1992年	芝浦幹線臨海道路	東京都港湾局	ローゼン橋	SAW
1993年	松丘橋	千葉県	鋼床版箱桁	SAW
1993年	OJ61工区	首都高速道路公団	鋼床版箱桁	SAW
1993年	ウエストフロント橋	東京臨海副都心建設株	鋼床版箱桁	SAW
1993年	白鳥新交通	中国地方建設局	鋼床版箱桁	SAW
1993年	横平橋	札幌市役所	鋼床版箱桁	SAW
1993年	名港中央大橋	日本道路公団	斜張橋	SAW
1994年	明石大橋	本州四国連絡橋公団	吊橋	SAW
1994年	荒川河口橋	関東地方建設局	鋼床版箱桁	SAW
1994年	奉魂橋	関東地方建設局	斜張橋	SAW
1994年	東京湾横断道路	東京湾横断道路株	鋼床版箱桁	SAW
1994年	生保大橋	札幌開発建設部	鋼床版箱桁	SAW
1994年	白鳥大橋	室蘭開発建設部	鋼床版箱桁	SAW
1995年	湘南新道橋	神奈川県	鋼床版箱桁	SAW
1995年	新狩野川大橋	静岡県	鋼床版箱桁	SAW
1995年	函館臨港高架橋	函館開発建設部	鋼床版箱桁	SAW
1995年	山城大橋	京都府	鋼床版箱桁	SAW
1995年	豊田大橋	豊田市	ニルセローゼン橋	SAW
1995年	横島橋	高知県	鋼床版箱桁	SAW
1996年	乃木坂橋	東京都	鋼床版箱桁	SAW
1996年	多々羅大橋	本州四国連絡橋公団	斜張橋	SAW
1996年	巴川高架橋	中部地方建設局	鋼床版箱桁	SAW
1997年	BY524工区	首都高速道路公団	鋼床版箱桁	SAW (SM570材CO ₂)
1997年	東島大橋	本州四国連絡橋公団	吊橋	SAW
1997年	静川高架橋	室蘭開発建設部	鋼床版箱桁	SAW
1997年	手形山大橋	秋田県	鋼床版箱桁	SAW
1998年	BY541工区	首都高速道路公団	鋼床版箱桁	SAW
1998年	尾坂橋	関東地方建設局	ニルセローゼン橋	SAW
1998年	柴崎高架橋	東京都	鋼床版箱桁	SAW
1998年	頼野大橋	福岡県	鋼床版箱桁	SAW
1999年	香椎IC	福岡市港湾局	ハラストアーチ橋	SAW
1999年	東西水路橋	東京都	鋼床版箱桁	SAW
1999年	広島南道路	広島高速道路公社	鋼床版箱桁	SAW

SAW: 片面裏波サブマージアーク溶接
SAW(FB): 裏当て金を用いた片面サブマージアーク溶接
CO₂: CO₂片面裏波自動溶接

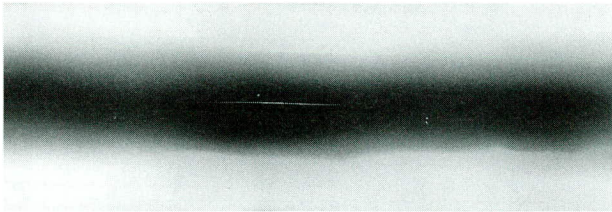


写真-1 サブマージアーク片面裏波溶接の高温割れの放射線フィルム

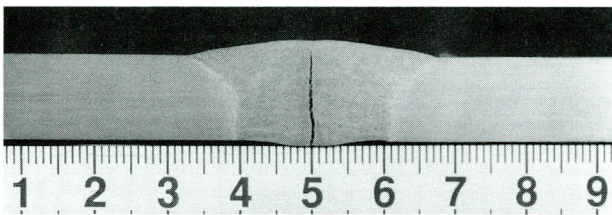


写真-2 サブマージアーク片面裏波溶接の高温割れの断面マクロ

接される大入熱溶接では図-4に示すように母材のバイメタル効果が生じ、溶接部に引き裂き力が働き、継手の拘束状態（例えば仮付け溶接ビード、交差部の拘束溶接ビードおよび溶接始末端部等）が変化すると、溶接ビードに急激な引き裂き力を生じるため、高温割れが発生し易くなる。これらの原因により発生する高温割れを始末端割れと称している。サブマージアーク片面裏波溶接における始末端割れの発生機構を図-5に示す⁹⁾。

現場継手に仮付け溶接（被覆アーク片面溶接、ビード長50mm、ピッチ300mm）を行い、ソフトバックを用いてサブマージアーク片面裏波溶接を施工した昭和40年代後半の鋼床版溶接では始末端割れが多発し、その手直しに多大な労力を費やした。これらの施工反省に基づき、サブマージアーク片面裏波溶接における高温割れ(特

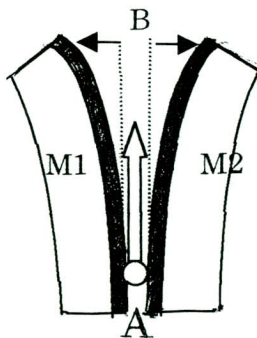
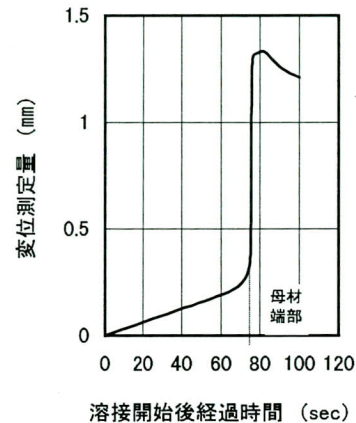
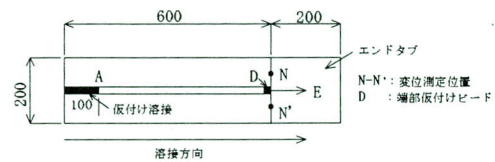


図-4 大入熱溶接におけるバイメタル作用



A点から溶接を開始すると、N点の変位は徐々に増加する。母材端部の仮付けビードを溶融すると、急激に変位が増大し、凝固が始まり、ビード中央に低融点不純物が偏析している箇所に終端割れを生じる。

図-5 片面膜子溶接の終端割れ発生機構

に始末端割れ) 防止に関する研究を行った。図-6に窓型拘束棒に試験体を取りつけた継手における高温割れ試験結果の一例を示した⁹⁾。継手直角方向の拘束距離が短い場合（S1試験体）も長い場合（L1試験体）も仮付け溶接がない場合は高温割れが発生しない。

また継手に仮付け溶接（K1,K2）を行った場合、拘束距離が短い継手（S2）には高温割れが発生しなかったが、拘束距離が長い継手（L2試験体）では高温割れが発生した。また拘束距離が短い場合でも、継手中央部に全層拘束溶接ビード（T1）を置いて母材を十分伸ばしてから仮付け溶接（K2,K3）を行い、その後拘束ビードをガウジングで除去して、これによるスプリングバックを仮付け溶接ビードに受け持たせてから、本溶接を行う（S3試験体）と高温割れが発生した。また横継手と縦継手が交差している十字継手（L3試験体）ではいずれの継手とも交差部近傍で高温割れが発生している。これらの原因は図-4～図-5で明らかのようにサブマージアーク溶接によるバイメタル作用で開先を開こうとする力が働き、これを仮付け溶接ビードで一次的に抑制すると本溶接で仮付け溶接ビードを再溶融した時、本溶接ビードに急激な変位を生じ、既に大部分の溶鋼が凝固し、フィルム状の未凝固の低融点不純物フィルムが存在している（アーク点より後方100mm前後）ビード中央部が開裂することによるものである。

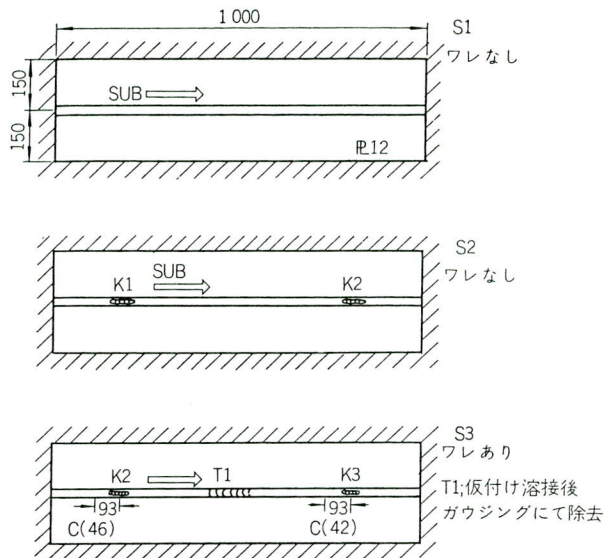


図6-1 窓型拘束枠を用いたサブマージアーク片面裏波溶接試験
 [拘束距離の短い(150mm)の場合] [C:割れ
 ()内数字は割れ長さ]
 仮付けビード(K)長さ50mm、ピッチ300mm

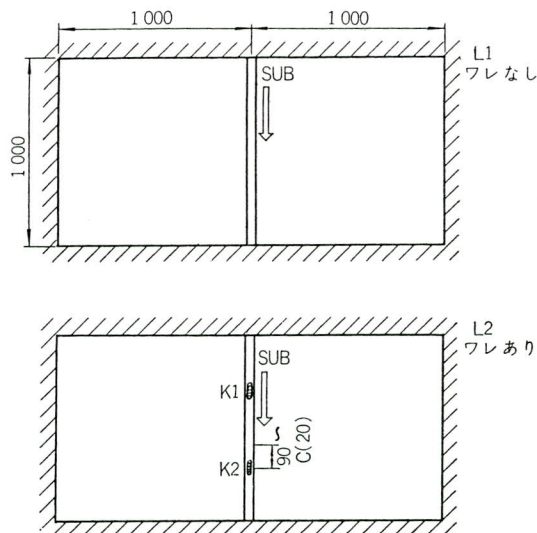


図6-2 窓型拘束枠を用いたサブマージアーク片面裏波溶接試験
 [拘束距離の長い(1000mm)の場合]

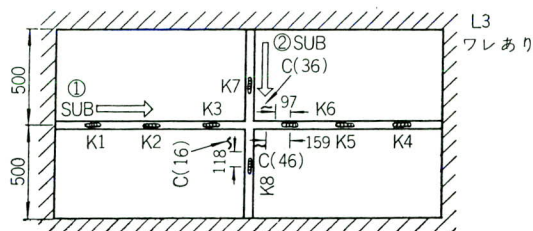


図6-3 窓型拘束枠を用いた十字継手のサブマージアーク片面裏波溶接試験

以上の知見から、拘束が強く、拘束距離が長く、かつ拘束の状態が複雑な鋼床版継手では仮付け溶接を行うと継手始末端、十字交差部等拘束状態が複雑な個所に限らず、一般部においても高温割れが発生する可能性が高いことが確認された。

1973年(昭和48年)の鰐川橋鋼床版現場溶接より、継手内への仮付け溶接を禁止し、継手の目違い等の修正は加熱矯正で丁寧に行うこととした。これによりサブマージアーク片面裏波溶接における一般部の高温割れはほとんど発生しなくなった。しかしながら継手の十字交差部および鋼床版横継手の終端部においては相変わらず始末端割れが発生することがあった。

1975年(昭和50年)の市川3号水路(千鳥大橋)では横継手と縦継手の十字交差を避けるため、図-7に示すように、横継手をシフトさせT字交差とした。しかしながら、横継手の始末端の高温割れ防止には対して効果がなく、クレーター等の始末端の処理に多大な労力を要し、また製作上も複雑となる等の難点があり、その後は十字交差方式に戻るようになった。

エンドタブが取付け可能な材端部には積極的にエンドタブを取付けてクレーター等を継手内に残さないようにするとともに、端部の拘束強化による始末端割れ防止を図った。図-8にエンドタブの形状とその取付け方法を示した。当初はa)に示すような1枚エンドタブを用いて母材に強固に取りつけたが、始末端割れ防止には効果がなかった。

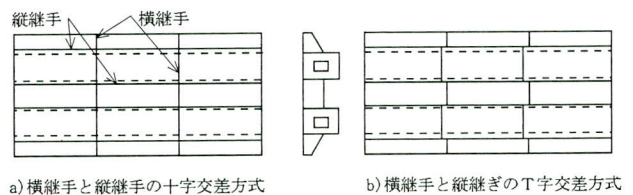


図-7 横継手と縦継手の配置

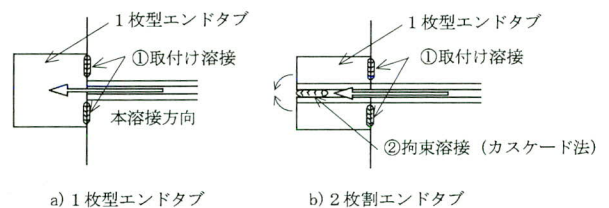


図-8 エンドタイプ取付け方法

表-2 サブマージアーク片面裏波溶接法とS & W・CO₂法の比較

比較事項	サブマージアーク片面裏波溶接法		S & W・CO ₂ 法	
	比較	原因および対策	比較	原因および対策
高温ワレ	×	終端ワレ防止のため、シーリングビード法・エンドタブ法などの採用。 溶接ビードに引裂れを生じさせないため、仮付溶接・拘束状態・溶接順序および開先矯正方法の検討	◎	初層は小電流溶接、仕上げ層はウィピング溶接のため高温ワレは起らない 拘束溶接などまったく不要
溶落ちおよび突抜け	×	目違い、バックングの付け方およびバックングの継目などで溶落ちを生じやすい	○	溶接速度不適正のとき、ワイヤの突抜けを生じるが再アーク容易
溶鋼の吹上げ	×	充てん材・フラックスの吸湿および溶接条件不適正のとき、溶鋼の吹上げを生じる場合がある	◎	
ルートギャップおよび目違い許容量	×	ルートギャップ0~10mm、ギャップに応じて充てん材の量、電流および速度をかえる 目違い0~4mm	◎	オシレートウィピング法採用によって、ルートギャップ1~15mmただし、2mm以下では裏波出にくい。オシレート幅および速度の調整のみ。目違い0~5mmギャップ、目違いの局部的変化に対して適応大
溶接能率	◎	1層20~30cm/min	×	2層・各層6~20cm/min
熟練度	○	ルートギャップに応じて溶接条件を適正に保つだけで簡単	×	良好な裏波およびワイヤの突抜けを起さないため、アークの監視に熟練を要する
防風対策	○	簡単（ほとんど必要なし）	×	十分なる対策が必要
連続溶接	○	制限なし	×	ノズル内へのスパッタ付着のためガスシールド効果低下するため最大5mが限度
開先の清掃	×	丁寧に	○	やや簡単でよい
溶接材料費	×	ワイヤ、フラックス、充てん材、バックング	○	ワイヤ、バックング、シールドガス2~3割安価
耐ブローホール、ウォームホールおよびパイプ	○	開先の清掃不十分、溶接材の吸湿など、施工管理で防止可能	×	シールド効果の低下、アーク不安定など対策たてにくい

◎非常に有利 ○有利 ×不利

そこで図-8のb)に示すような2枚割エンドタブを別々に取付け、エンドタブの先端約半分に小入熱のカスケード拘束溶接（段々畑状に積層する）を行い、拘束溶接による開先収縮力を利用して本溶接の開先バイメタル作用を吸収するようになったところ始末端割れは激減した。

図-9に横継手と縦継手の交差部処理方法の変遷を示した。a)の交差部仮付け溶接法は仮付け溶接の有害性が判明した時点で中止し、b)の被覆アーク溶接または炭酸ガス溶接によるカスケード拘束法をしばらく採用したが、昭和50年度後半の千住新橋以降はc)に示したように、仮付け溶接も、交差部拘束溶接も一切行わない直接本溶接法を採用するようになった。初期においては、仮付け溶接が現場溶接全工程の1/2程度の日数および工数がかかっており、現場溶接は工期が長くなる原因の一つとなっていた。サブマージアーク片面裏波溶接の高温割れを防止するための合理的な施工法研究が最終的には工期短縮、工数低減に寄与した典型的な例であり、ここに至りサブマージアーク片面裏波溶接による鋼床版現場

溶接法が確立した。

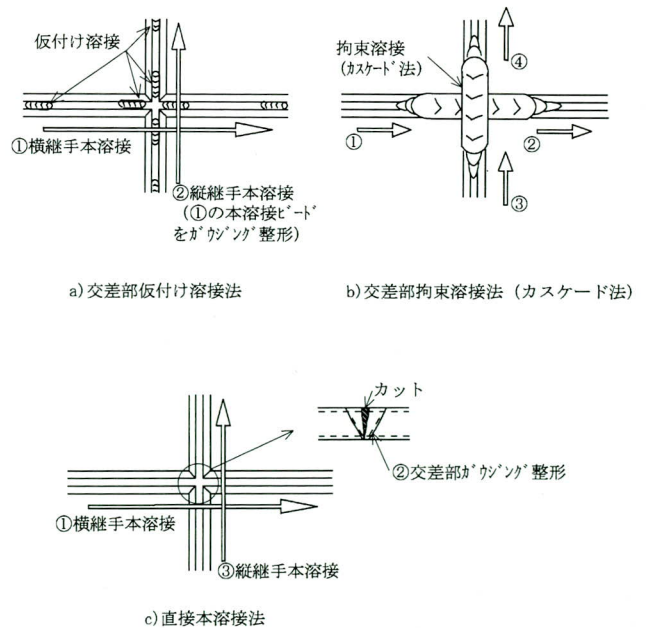


図-9 横継手と縦継手の交差部処理方法

筆者らの1人はその後、本州四国連絡橋公団より委託された土木学会における「鋼床版現場溶接施工基準(案)」⁷⁾の作成委員会に参加して鋼床版現場溶接法の確立を図ることができた。また、大鳴門橋鋼床版現場溶接には仮付け溶接を中止したサブマージーク片面裏波溶接法が採用され、ようやく全国的に認知された施工方法となった。

(2) 鋼床版現場溶接における炭酸ガス片面裏波自動溶接工法の開発

大入熱のサブマージーク片面裏波溶接において始端割れと称する高温われが発生していた昭和40年代後半に、その防止研究と並行して高温割れ発生の危険がない溶接工法の開発に着手した。サブマージーク片面裏波溶接に代わる自動溶接法として炭酸ガスアーク溶接が考えられたが、炭酸ガスアーク溶接でも入熱を大きくして鋼床版の板厚12~14mmを1パス溶接した場合、高温割れを皆無にすることは難しいと考えた。またサブマージーク片面裏波溶接は溶接能率が抜群であるが、ルートギャップ許容値が0~8mm程度で比較的許容範囲が狭く、例外的なルートギャップ対応が難しかった。鋼床版橋梁の工場仮組立時と現場溶接時の温度差が大きい場合は鋼床版の伸縮により、現場溶接時のルートギャップが許容値に入らない場合もあり、ルートギャップ許容範囲の大きい溶接工法が望まれていた。高温割れ防止とルートギャップが大きい場合の対応が容易な溶接工法として初層の裏波溶接を炭酸ガスショートアーク溶接(1.2φソリッドワイヤ、溶接電流200A前後)、二層目を比較的大電流(1.6φソリッドワイヤ、溶接電流250A前後)で行う溶接工法(S&W・CO₂法)を開発し、1972年(昭和47年)吉田橋(2径間連続鋼床版桁桁中路橋)の鋼床版継継手に採用した⁷⁾。S&W・CO₂法は初層を炭酸ガスショートアーク溶接によるため、ワイピングの採用により、ルートギャップ15mm程度の大ギャップにも対応可能となった。本法は2層溶接のため高温割れはまったく発生しないが、溶接能率はサブマージーク片面裏波溶接に比べ著しく低下した。表-2にサブマージーク片面裏波溶接とS&W・CO₂法の比較を示した。

写真-3にサブマージーク片面裏波溶接施工状況写真を、写真-4に局部防風装置をつけたオスコンFB(日鉄溶接工業製)によるS&W・CO₂法施工状況写真を示した。その後、しばらくの間S&W・CO₂法とサブマージーク溶接法の併用期が続いたが、サブマージーク片面

裏波溶接工法における高温割れ防止が確立された昭和50年代後半以降は能率の良いサブマージーク片面裏波溶接法(仮付け溶接、拘束溶接無し)に戻るようになった。

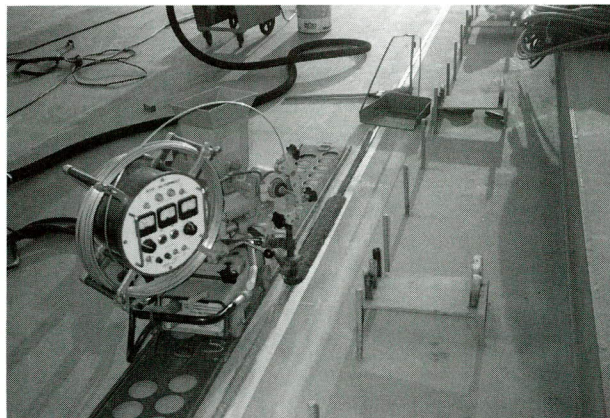


写真-3 サブマージーク片面裏波溶接施工



写真-4 S & WCO₂法施工状況

3. 鋼脚の現場溶接の変遷

宮地鐵工所における鋼脚の現場溶接で記録に残っているものとしては1977年（昭和52年）の首都高速道路公団925工区高架橋上部工Y橋脚現場溶接であり、**図-10**にその一般図を示した。本橋脚は矩形断面で、最大板厚36mmの現場溶接継手をK開先の被覆アーク両面溶接で施工した。どういうわけか裏ガウジング施工の両面溶接でありながら標準ルートギャップを2mmとし、鋼脚の鉛直度とルートギャップ修正をジャツキで行うため脚内4箇所にジャツキ受けを設けた。また本溶接に先立ち仮付け溶接を行ったが、本溶接時の全線同時予熱（線状ガスバーナー）により仮付け溶接ビードが割れたことを記憶している。同じ頃、名古屋高速道路公社市道2号味鏡工区鋼脚において丸鋼脚（2000φ、SMA50B、 $t=25$ ）のK

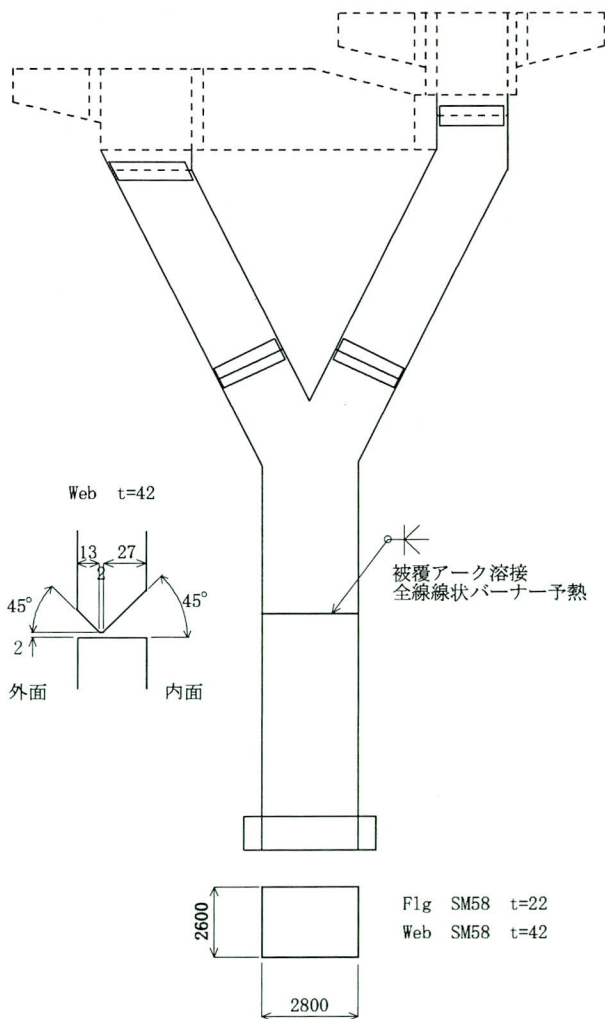


図-10 Y鋼脚現場溶接(925工区その2)

開先被覆アーク両面溶接を施工したが、鋼脚内部での溶接量を少なくするため内側の開先深さを小さくし、外面にエクシジョンピースを取付けた以外は前述の925工区Y橋脚とほとんど同じ施工条件であった。ただし両橋脚とも仮付け溶接および初層溶接には軟質の極低水素系溶接棒を用いて、予熱とともに低温割れ防止に配慮した。

昭和50年代前半になって、首都高速道路公団の葛飾江戸川線において鋼脚の現場溶接が本格的採用されるようになった。鋼脚の現場接合継手は高力ボルトと溶接の併用から、全継手が現場溶接となり、溶接継手数も増大した。継手数が多くなるに従い、溶接能率の向上から炭酸ガスアーク溶接が検討されるようになったが、狭い脚内での炭酸ガスアーク溶接は作業者の安全上の問題もあり、かつ自動化も脚内では難しく、外側からの炭酸ガスアーク片面裏波自動溶接工法の開発が望まれた。

宮地鐵工所は1982年（昭和57年）に首都高速道路公団KE53工区（その2）、KE54工区高架橋橋脚構造新設工事（矩形橋脚）を受注し、新たに開発した炭酸ガス片面裏波自動溶接工法により現場施工を行った。**図-11**に小型走行台車（PICOMAX-2型、神戸製鋼所製）を用いた炭酸ガス片面裏波自動溶接（フラックス入りワイヤ）工法の概略図を示した。また、この時より予熱による不必要な温度上昇と熱応力の導入を避けるため、予熱温度管理を的確に行うことのできる温度センサー付きの電気ヒーターを用いることにした。片面裏波溶接では溶接時のルートギャップ確保が重要な課題であり、架設時に仮組立

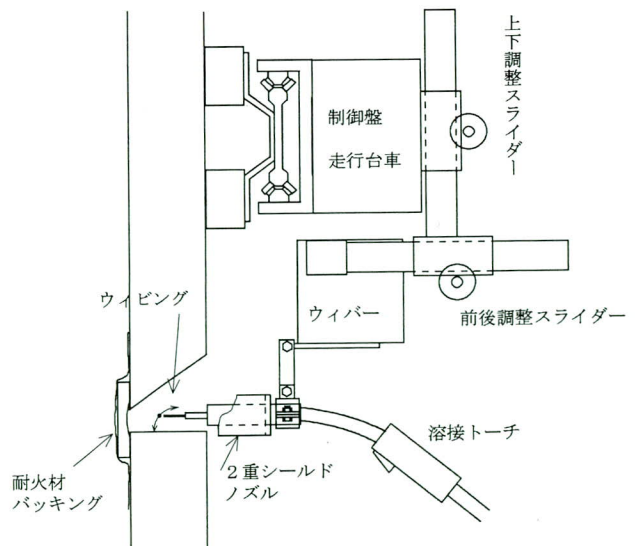


図-11 横向き炭酸ガスアーク片面裏波自動溶接法概略図

時のルートギャップおよび橋脚の鉛直度を確保するため、**図-12**に示した要領で角部開先内に架設時メタルタッチする当たり面を設けることにした。本工事の実施工に先立ち、実断面の試験体を製作し、施工試験を行って溶接施工条件および溶接収縮、変形計測および鋼脚縦リブの高力ボルト締付け時期の検討等を行った。なお、施工試験は屋外で行い、最大風速8mの送風機を配置し、防風対策の有効性の確認も行った⁸⁾。本工事の施工により横向き炭酸ガスアーク片面裏波溶接施工法を用いた全断面現場溶接施工法が確立された。

昭和50年代後半より架設の合理化を目的とした大ブロック架設が増大し、工場ヤード等での大ブロックヤード溶接が行われるようになった。1989年（平成元年）に関西国際空港株式会社空港連絡橋のフーチング一体型鋼製橋脚の大ブロックヤード溶接を施工した。**写真-5**に地組立後のフーチング全景写真を、**図-13**にフーチング付き鋼脚大ブロックのスケッチ図を示した。フーチングは工場パネル製作し、工場岸壁ヤードで組立・溶接を行った。鋼脚大ブロックは工場単部材製作を行い、同ヤードにおいて横置き地組立後、全断面溶接を行った。フーチングの内部隔壁板のT型完全溶け込み継手は最大板厚34mm、継手長さ6mの立向き溶接であり、通常の両面溶接では溶接足場等の作業性確保が難しいことおよび溶接量が膨大となるため、エレクトロガスアーク自動溶接によるK開先継手の両面2パス溶接（片面1パス）を採用し、溶接能率の向上を図った。なお実施工に先立ち大

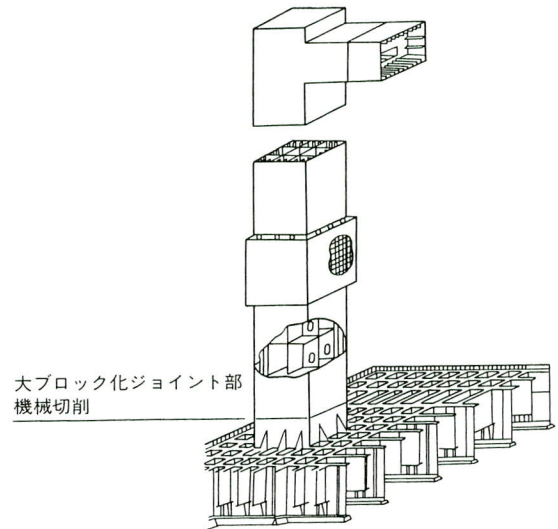


図-13 フーチング付き鋼脚概略図(関西空港連絡橋)

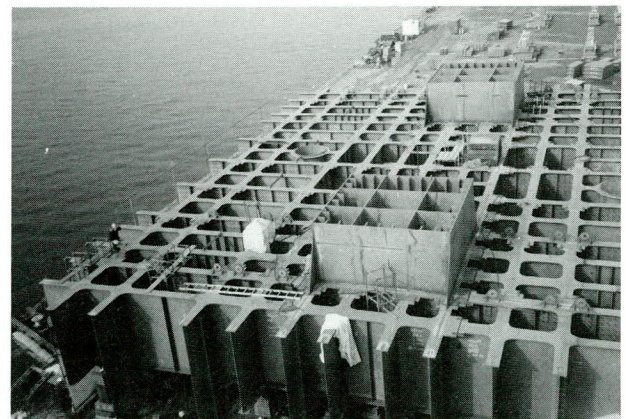


写真-5 関西空港連絡橋のフーチング全景写真（地組立後）

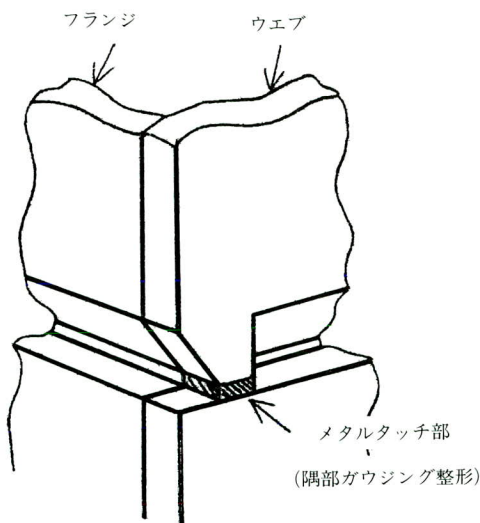


図-12 矩形断面鋼脚の現場溶接継手限部のメタルタッチ部

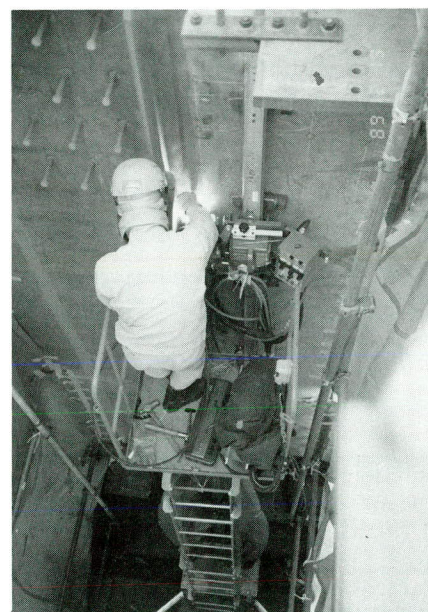


写真-6 エレクトロガスアーク自動溶接状況

表-3 主桁全断面現場(地組立)溶接施工実績

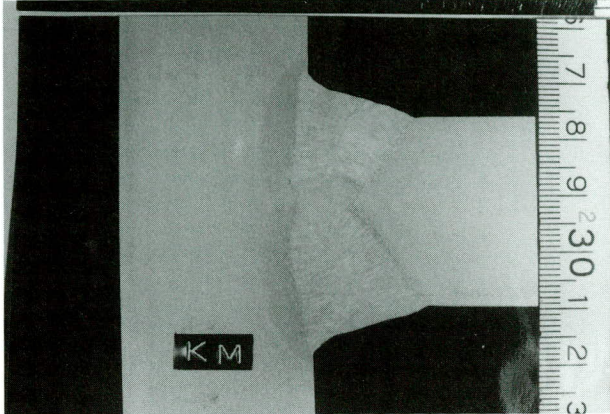


写真-7 エレクトロガスアーク自動溶接による断面マクロ (T継手)

型試験体による溶接施工試験を行い、溶接施工条件、溶接品質および継手性能の確認を行った。写真-6 にエレクトロガスアーク自動溶接状況写真を、写真-7 に同溶接継手のマクロ写真を示した。

鋼脚の全断面ヤード溶接は横置き地組立状態で、全て外側からの溶接とし、下向き、立向きおよび上向きでの全姿勢片面裏波自動溶接(4.主桁全断面溶接の変遷参照)で行った⁹⁾。1992年(平成4年)には阪神高速道路公団の鳴尾沖工区鋼製橋脚(ラーメン橋脚)の鋼脚全体大ブロック一括架設におけるヤード全断面溶接の立向き継手の一部にエレクトロガスアーク溶接が採用された。

その後東京湾横断道路P7橋脚の変形6断面大ブロックヤード溶接(下向き、斜め下向き、縦向き、斜め上向きおよび上向き姿勢)¹⁰⁾、名港中央大橋東塔下段水平梁の大ブロックヤード溶接(横向き、下向き、縦向きおよび上向き姿勢)¹¹⁾等の多くのヤード溶接施工を実施した。これらの実施工により、部材形状、材質、板厚、溶接姿勢および継手条件等を勘案し、サブマージアーク片面裏波溶接、下向き・上向き・横向きCO₂(またはMAG)片面裏波溶接、エレクトロガスアーク片面裏波溶接等の中から、継手の形式、現場およびヤード溶接条件に最適な溶接法を採用する技術が確立された。

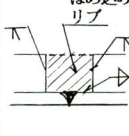
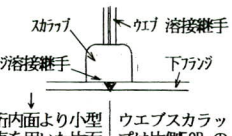


4. 主桁全断面現場溶接の変遷

宮地鐵工所が施工した主桁全断面現場溶接の実績を表-3に示した。また、主桁全断面溶接工法の技術的変遷を図-14に示した。

施工時期	橋名	施主	橋梁形式	溶接方法
1969年	万国博5号橋	(財)日本万国博覧会協会	非合成箱桁	UF 下向きノガス半自動(FB)
				LF 下向きノガス半自動
				W 立向き被覆アーク(FB)
1976年	BT251工区	首都高速道路公団	鋼床版箱桁	UF 下向きSAW
				LF 下向きSAW
				W 立向きCO ₂ 自動
1978年	八戸港改修臨海道路橋梁	青森県	鋼床版箱桁	UF 下向きSAW
				LF 下向きSAW
				W 立向きCO ₂ 自動
1981年	新永安橋第4工区	岡山県	非合成箱桁	UF 下向きSAW
				LF 下向きSAW
				W 立向きCO ₂ 自動
1981年	隅田公園歩行者専用橋	東京都台東区役所	非合成箱桁	UF 下向きSAW
				LF 下向きSAW
				W 立向きCO ₂ 自動
1984年	浜手B.Pメリケン工区	近畿地方建設局	鋼床版箱桁	UF 下向きSAW
				LF 下向きSAW
				W 立向きCO ₂ 自動
1986年	大島大橋	本州四国連絡橋公団	吊橋	UF 下向きSAW
				LF 下向きSAW
				W 立向きCO ₂ 自動
1987年	港第2工区	阪神高速道路公団	鋼床版箱桁	UF 下向きSAW
				LF 下向きSAW
				W 立向きCO ₂ 自動
1988年	大和橋	東京都	非合成箱桁	UF 下向きSAW
				LF 上向きMAG自動
				W 立向きCO ₂ 自動
1989年	KE31、KE32工区	首都高速道路公団	鋼床版箱桁	UF 下向きSAW
				LF 上向きMAG自動
				W 立向きCO ₂ 自動
1989年	中島西工区	阪神高速道路公団	鋼床版箱桁	UF 下向きSAW
				LF 上向きMAG自動
				W 立向きCO ₂ 自動
1991年	東京湾連絡橋台場海上部	東京都	鋼床版箱桁	UF 下向きSAW
				LF 上向きMAG自動
				W 立向きCO ₂ 自動
1990年	吾間橋右岸テラス連絡橋	東京都江東治水事務所	鋼床版箱桁	UF 下向きSAW
				LF 上向きMAG自動
				W 立向きCO ₂ 自動
1991年	東京湾連絡橋台場海上部	東京都港湾局	鋼床版箱桁	UF 下向きSAW
				LF 上向きMAG自動
				W 立向きCO ₂ 自動
1993年	辰巳新橋	東京都江戸川区	ニールセンローゼ桁	UF 下向きSAW
				LF 上向きMAG自動
				W 立向きCO ₂ 自動
1993年	荒川河口橋	東京都江戸川区	鋼床版箱桁	UF 下向きSAW
				LF 上向きMAG自動
				W 立向きCO ₂ 自動
1994年	BY551工区	首都高速道路公団	非合成箱桁	UF 下向きSAW
				LF 上向きMAG自動
				W 立向きCO ₂ 自動
1995年	大島・小松川公園橋梁	東京都	非合成箱桁	UF 下向きSAW
				LF 上向きMAG自動
				W 立向きCO ₂ 自動
1996年	豊田大橋	豊田市	ニールセンローゼ桁	UF 下向きSAW
				LF 上向きMAG自動
				W 立向きCO ₂ 自動
1996年	盛岡駅西口1号線交通広場	盛岡市	人工地盤	UF 下向きSAW
				LF 上向きMAG自動
				W 立向きCO ₂ 自動
1997年	名和高架橋西	日本道路公団	板桁(省力桁)	UF 下向きSAW
				LF 上向きMAG自動
				W 立向きCO ₂ 自動
1997年	来島大橋	本州四国連絡橋公団	吊橋	UF 下向きSAW
				LF 上向きMAG自動
				W 立向きCO ₂ 自動
1998年	飛島高架橋西	日本道路公団	板桁(省力桁)	UF 下向きSAW
				LF 上向きMAG自動
				W 立向きCO ₂ 自動
1999年	香椎IC	福岡市港湾局	バランスドアーチ橋	UF 下向きSAW
				LF 上向きMAG自動
				W 立向きCO ₂ 自動
1999年	東西水路橋	東京都	鋼床版箱桁	UF 下向きSAW
				LF 下向きSAW
				W 立向きCO ₂ 自動
1999年	広島南道路	広島高速道路公社	鋼床版箱桁	UF 下向きSAW
				LF 上向きMAG自動
				W 立向きCO ₂ 自動

ノガス半自動:ノガス半自動片面裏波溶接(FBは裏当金)
 被覆アーク:被覆アーク溶接(FBは裏当金)
 SAW:サブマージアーク片面裏波溶接
 CO₂自動:CO₂片面裏波自動溶接
 MAG自動:MAG片面裏波自動溶接
 CO₂半自動:CO₂片面裏波半自動溶接

図-14 宮地鐵工所における箱桁の全断面溶接工法の変遷

年代 橋梁名称	箱桁・アーチリブ等全断面溶接継手			
	上フランジ継手	下フランジ継手	ウェブ継手	下縦リブ継手
昭和50年頃 首都高速道路公団 湾岸線BT251	片面サブマージアーク溶接工法 (鋼床版裏波溶接技術の転用)	箱桁内面より小型台車を用いた片面サブマージアーク溶接(ウェブは溶接トーチが通過する程度に大きなスカラップを設けた)	ソリッドワイヤを用いた立向片面ショートアークCO ₂ 自動溶接。スカラップは最後にはめ込み溶接	下フランジ溶接継手を挟んで400mmは下フランジ溶接後はめ込み溶接 
昭和57年頃 阪神高速道路公団 浜手バイパス 台東区 桜橋		箱桁内面より小型台車を用いた片面サブマージアーク溶接およびウェブ直下は鋼当て金を用いた被覆アーク溶接の併用溶接 	ウェブスカラップは片側50Rの通常寸法。溶接工法はソリッドワイヤを用いた立向片面ショートアークCO ₂ 自動溶接	縦リブははめ込み板を用いた高力ボルト添接方式 
OWP (Outsid Welding Procedure for Butt Joint of Box Girder)の開発				
平成元年 東京都 大和橋 東京都 東京港連絡橋	片面サブマージアーク溶接工法(SM570には高温割れ防止のため初層にCO ₂ 溶接の併用)	フラックス入りワイヤを用いた上向片面マグ自動溶接(OH-AUTO)のためウェブおよび縦リブ直下も連続的に溶接出来る)	ウェブスカラップは片側50Rの通常寸法。Piconaxによるフラックス入りワイヤを用いた立向片面CO ₂ 自動溶接。	通常の高力ボルト摩擦接合。 
平成5年 江戸川区 辰巳新橋	上フランジか油面をもち、溶接継手が2m程度と短いためフラックス入りワイヤを用いた片面CO ₂ 自動溶接	地上20mの高所でのアーチリブ全断面溶接。継手全体の風防施設の設置。全継手自動超音波探傷による品質保証。		
平成6年 建設省関東地建 荒川河口橋	片面サブマージアーク溶接工法	箱桁等箱断面部材のOWP全断面溶接工法完成 → 板桁への適用		

(1) 箱桁の全断面溶接の変遷

宮地鐵工所が主桁の全断面現場溶接を初めて実施したのは1969年(昭和44年)、財団法人日本万国博覧会協会発注の万国博5号橋主桁全断面溶接(主桁断面1300mm×500mm、SS41最大板厚14mm)である。全断面溶接はノーガス半自動および被覆アーク溶接により、下フランジは内面からの片面裏波溶接、ウェブおよびはめ込みフランジ部は外面からの鋼製裏当を用いた片面溶接を行った。写真-8に現場溶接前の主桁組立状況を示した¹²⁾。ノーガス半自動溶接は現場溶接に適した溶接工法であるが、溶接金属の靱性確保にやや問題があるとされている。万国博5号橋は主桁の材質がSS41であり、施工試験による確認を経て採用された。余談であるが、筆者らの一人が1994年(平成6年)に橋建協を代表して欧州の鋼橋の設計・製作・架設の実情視察をした際見学したハンブル

グ市に架設中のワーレントラス鉄道橋の全現場溶接接合における架設状況を写真-9に示したが、トラス弦材の全断面現場溶接工法は25年前に施工した万国博5号橋の施工方法とほとんど同じであり、歴史や技術における保守と革新のバランスに対する彼我の差に複雑な感慨を得たことが思い出された。

1976年(昭和51年)に首都高速道路公団湾岸線BT251工区構造新設工事の3径間連続鋼床版箱桁橋主桁(主桁断面2.0×2.19m)の全断面ヤード溶接による大ブロック施工を行った。溶接施工は上下フランジをサブマージアーク片面裏波溶接、ウェブを炭酸ガスアーク片面裏波溶接で行った。下フランジのサブマージアーク片面裏波溶接は内面より小型のサブマージアーク自動溶接機を用いた。下フランジ側ウェブは溶接機の一部が通過しウェブ直下も連続溶接できるようウェブに大きな切り込みを入れ、ウェブ継手溶接後に切り欠き部のはめ込み溶接を行

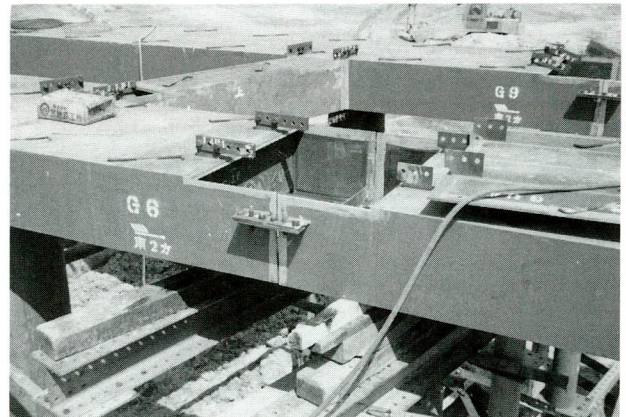


写真-8 万博5号橋の主桁組立状況



写真-9 ハブルグ市鉄道橋(ワーレントラス弦材)の全断面現場継手

った。実施工に先立ち、屋外において実断面試験体による施工試験を行い、溶接施工条件、溶接収縮、変形、キャンパー変化、残留応力、継手品質および継手性能等の確認を行った¹³⁾。下フランジを内面より下向き自動溶接で施工するには溶接継手部の縦リブおよびウェブ直下対応が必要であり、ウェブはめ込み溶接の品質、下フランジの溶接作業性、工期等の面からの問題が残った。なお、参考のため下フランジを自動溶接する場合の継手部縦リブ処理方法を図-15に示した。

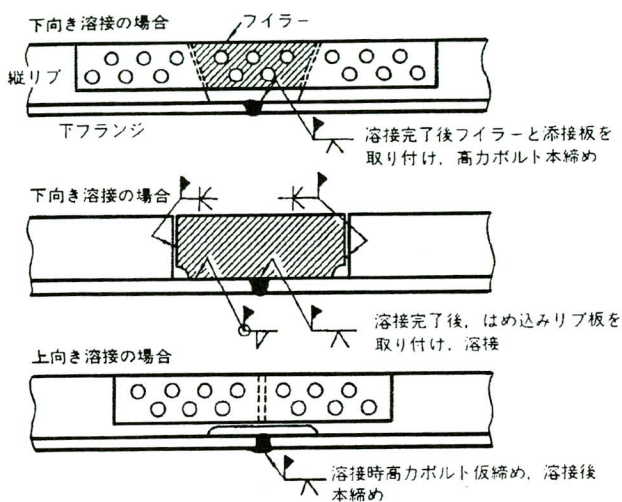


図-15 箱桁下フランジ縦リブの処理方法

1978年(昭和53年)に青森県から発注された八戸港改修臨海道路橋(3径間連続鋼床版箱桁)の中央径間の一部に大ブロック架設が行われ、大断面主桁(主桁断面5m×4m)の全断面溶接を行った。下フランジ以外は前述のBT251施工法が踏襲されたが、下フランジはウェブ直下のウェブの大きな切り欠きをとることは中止し、下フランジのコバは外側より被覆アーク溶接を行い、内面のみサブマージアーク片面裏波溶接を採用した。また、縦リブのはめ込み溶接は被覆アーク溶接棒を用いたI開先1パス自動溶接法(GEOM溶接:神戸製鋼所製)の開発を行い、本工事に始めて採用した。なお、本橋の支点上部材(8台)は最大高さ6.5mあり、当時の東京工場から隣接する運河を通しての海上輸送が困難のため、工場ではフランジ・ウェブのパネル製作を行い、岸壁のある大ブロック地組立場において、パネル組立・溶接を施工した。図-16にパネル組立概略図を示した。ヤードにおけるパネル組立後の溶接は部材の反転作業を行わず、正立状態で全姿勢溶接を行ったが、上フランジとウェブの外

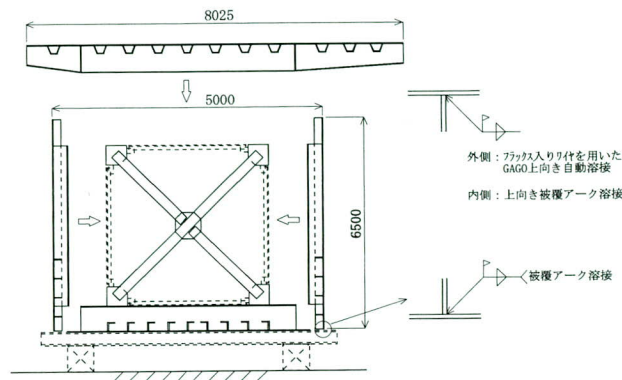


図-16 パネル組立概略図(八戸港改修臨海道路橋)

側角継手のすみ肉溶接はBAGO台車を用いてフラックス入りワイヤによる上向き自動溶接開発し、採用した。BAGO全姿勢台車を用いた上向きすみ肉自動溶接装置はその年の全世界のユーザーを対象としたBAGOコンクールで3等に入賞し、記念品と賞金\$500(当時で約11万円)を貰ったことを憶えている。千葉工場製作において箱桁のフランジ、ウェブのパネル組立・溶接工法が本格的に採用されたのは1986年(昭和61年)からであり、既に8年前には箱桁のパネル組立・溶接工法をヤードにおいて実施していたことになる。今後ヤードにおけるパネル組立・溶接工法は陸送制約のある大型箱桁の製作方法として注目される工法になるものと思われる。

1988年(昭和63年)東京都発注の大和大桥(3径間連続3箱桁、主桁断面3.5×2m)が全橋長3分割の大ブロック架設で計画された。これまでの箱桁全断面溶接は下フランジを内面より下向き溶接する施工法が取られていたが、本橋の施工を契機にウェブ直下の溶接品質の向上、継手部の縦リブ処理(図-15参照)の省略および全断面溶接に関連する諸作業の効率化を図るため、シンプルな形で全ての溶接を箱外面より施工できる[外側からの全断面溶接工法](OWP工法: Outside Welding Procedure For Butt Joint of Box Girder)の開発、特に上向き片面裏波自動溶接法の実用化開発を行った。外側からの全断面溶接(OWP工法)のメリットを纏めると下記ようになる。

- ① 下フランジの縦リブの切り欠きおよびはめ込み溶接が不要となり、縦リブは通常の高力ボルト継手にできる。
- ② ウェブ直下も連続溶接ができ、溶接継手の信頼性が向上する。
- ③ 箱桁内での溶接が不要となり、箱内に溶接装置等を

持ち込む必要がなくなる。また構造的に現場溶接用排煙口等の設置が不要となり、かつ作業員への換気上の安全が確保される。

- ④ 箱内溶接がなくなるため、箱内部の塗膜の損傷が少なくなる。
- ⑤ 上下フランジの同時溶接が可能となり、溶接工程の短縮がはかれる。

OWP工法での上向き溶接はフラックス入りワイヤを用いたショートアーク溶接による片面裏波MAG自動溶接法であり、上向き専用自動溶接装置OH-AUTO(神戸製鋼所製)により適正な裏波溶接のための溶接速度自動制御、アークセンサーによる左右開先倣いおよび機械式上下倣い等の機能が付与されている。図-17に大和大桥に適用したOWP全断面溶接工法の概要図を示した。また写真-10にOH-AUTOの施工状況写真を示した¹⁴⁾。これ以降OWP工法は宮地鐵工所における箱断面構造主桁、および横置き鋼脚における全断面溶接の標準的な工法となった。

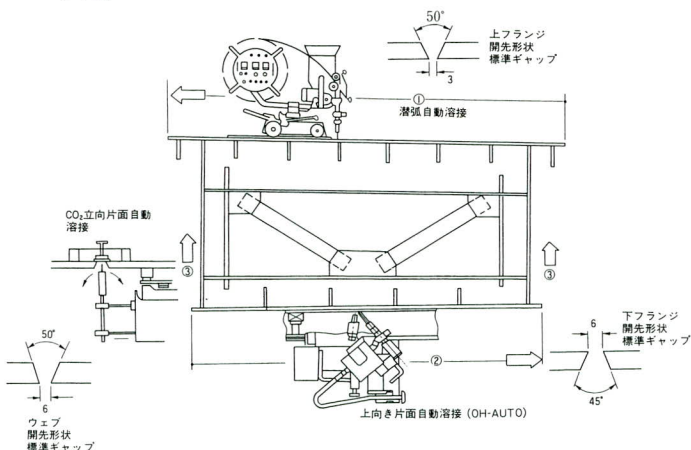


図-17 OWP全断面溶接工法

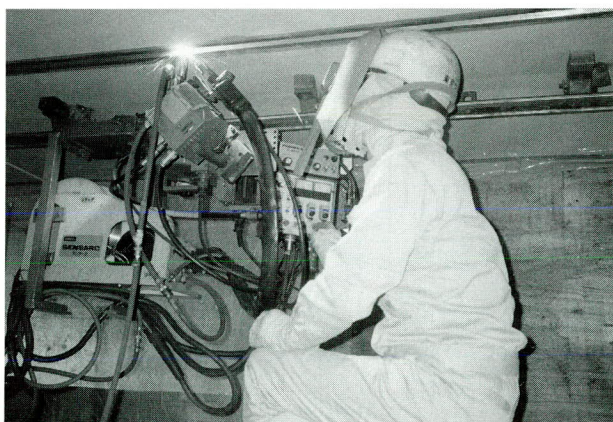


写真-10 OH-AUTOによる上向き自動溶接の施工状況

1993年(平成5年)江戸川区発注の辰巳新橋(ニールセンローゼ鋼床版橋)アーチリブの全断面現場溶接を施工した。辰巳新橋は景観を考慮した橋であり、現場継手のほとんどが現場溶接であり、アーチリブはウェブの傾きが20°、かつ上フランジは曲面を有する菱形箱断面(断面約1.9m×1.4m)である。アーチリブの全断面溶接にはOWP工法が採用されたが、小型断面であることおよび現場架設用エレクションピース(エンドタブ兼用)の関係上、ウェブ継手の現場溶接を最初に行っている¹⁵⁾。このような断面寸法の小さく、かつ変形した複雑な条件の継手の全断面溶接はOWP工法以外では為し得ないものである。

(2) 板桁の全断面溶接の変遷

前述した通り、日本における板桁の全断面溶接の施工は以外に古く、本格的な全溶接橋梁での製作が確立する前の1950年(昭和25年)に、誉鳩橋(4主桁プレートガーダー)で代表される十数橋において全断面溶接が施工されている。誉鳩橋I桁の全断面溶接の施工は ①ウェブの片側溶接 ②上下フランジの片側溶接、続いて裏面のガウジングおよび溶接 ③ウェブの裏面溶接、の順序で施工したところ、ウェブが面外に大きくはらみ出し、関係者一同大いに困窮し、その後の現場溶接敬遠の素地を作ってしまったと報告されている³⁾。宮地鐵工所におけるI桁の全断面溶接は確かな資料がないが、筆者の記憶によると昭和40年代末にクレーンガーダーのI桁梁を当時の東京工場第3工場で行っている。図-18にその施工要領を記憶により再現したが、本工法は ①全ての溶接が同じ高さでかつ足場の要らない地上で施工できること ②溶接量の多いフランジを両フランジを同時溶接できること。またフランジに溶接能率の良いエレクトログラスアーク溶接が採用可能なこと ③溶接線の長いウェブ継手

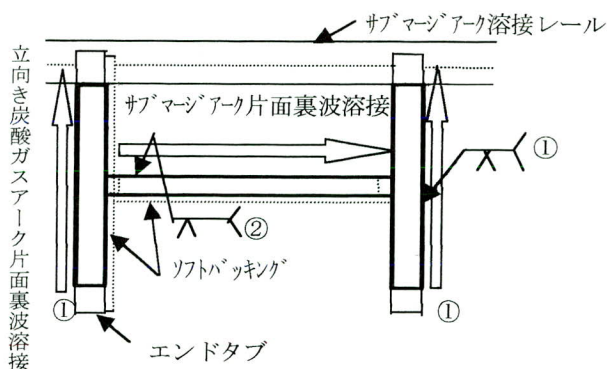


図-18 I桁の横置き全断面ヤード溶接法

にサブマージアーク片面溶接が使えること ④各継手を連続溶接できること 等ヤードにおけるI桁全断面溶接工法としては今考えても合理的な施工法であったと思われる。

宮地鐵工所が本格的にI桁の全断面溶接を施工したのは日本道路公団が省力桁によるトータルコスト縮減に取り組み、現場溶接をトータルコスト縮減の選択肢とした第二東名高速道路建設以降となる。1996年(平成8年)に同公団名古屋建設局から受注した名和高架橋西(3主桁11径間連続板桁)において全断面現場溶接を施工した。宮地鐵工所は箱桁の全断面溶接で確立したOWP工法の技術を基に、上フランジは溶接長が短く、かつ高所で作業スペースの狭いことを考慮し、自動溶接機器が軽量で簡便な炭酸ガスアーク片面裏波溶接、下フランジは連続溶接可能な上向きMAG片面裏波溶接、およびウェブは立向き炭酸ガスアーク片面裏波溶接による全姿勢のI桁全断面溶接工法を採用した。本省力桁のフランジ最大厚は75mmであり、上向き溶接でのパス数は膨大となるが、下向きでの溶接ではウェブ直下で溶接が不連続となり(いわゆる棒継ぎ)、溶接品質を確保のため溶接始末端の処理に多大な労力を要する。宮地鐵工所は、溶接特に多層溶接での品質確保は1継手を連続溶接し、溶接始末端を継手内に残さないことが重要との信念から溶接工法を開発してきた。名和高架橋西ではウェブ上下にスカラップを設けている。引張サイドのスカラップは埋め戻す場合もあり、スカラップレスの施工法を検討してきたが、名和高架橋西には間に合わなかった。なお、本橋は11径間連続で橋長は610mもあり、現場溶接継手における収縮、変形が支間長やキャンパー等の全体寸法、形状に及ぼす影響が大きいと見られ、現場施工に先立ち、予め長めに製作した部材を用いた実部材溶接施工試験を行い、溶接施工法の確認および収縮、変形等の基本データを得て、実施工に反映させた。

1998年(平成10年)に同じく日本道路公団飛島高架橋西(3主桁連続板桁等)においてI桁の全断面現場溶接を施工した。基本的な溶接工法は名和高架橋と同じであるが、下フランジ側のウェブはスカラップレスとし、下フランジとウェブ溶接交差部の溶接品質の向上と現場溶接作業の簡潔化を図った。図-19に飛島高架橋西でのスカラップレスの溶接手順を示した。スカラップレス工法は箱桁全断面溶接技術の延長線にあるものであり、溶接交差部に溶接始末端を残さない工法として非常に優れたものであると自負している。しかしながら、現在のI桁全断面

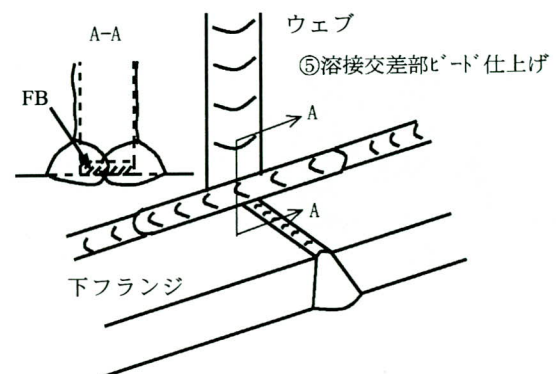
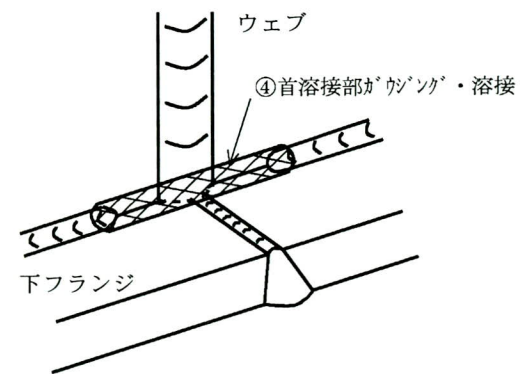
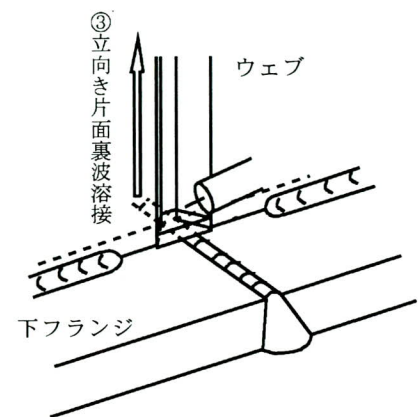
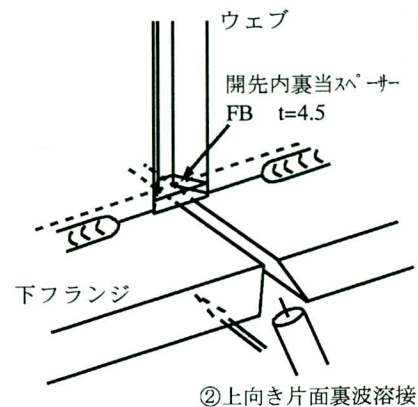


図-19 スカラップレスI桁全断面溶接工法(飛島高架橋西)

面溶接法は全ての継手が一断面上にきており、架設保持材としてのフランジのエンドタブ兼用エレクトロガスアーク溶接はフランジ厚が極厚の場合、かなりの大きさと重さとなる。十分な配慮をして施工しているが、溶接完了後のエレクトロガスアーク溶接の切断は高所作業となることもあり安全上憂慮すべき点がある。次回計画しているI桁全断面溶接施工ではフランジ厚が極厚の場合エンドタブ兼用エレクトロガスアーク溶接の板厚は必要最小限としている。また、比較的薄板であるウェブ継手の目違い合せのため、**写真-11**に示すように、ウェブにかなりの拘束材を配置している。

現在、名和高架橋西、飛島高架橋西の施工反省に基づき、I桁の現場溶接継手を**図-20**に示すように各継手をシフトさせた完全スカラップレスI桁全断面溶接工法の開発に取り組んでいる。継手シフト完全スカラップレスI桁全断面溶接工法は、①架設における断面合せを容易にし、かつエレクトロガスアーク溶接、拘束材を極力少なくする ②上下フランジ同時溶接施工時の作業上の安全性を確保する ③非鋼製エンドタブの適用を可能とする④将来のウェブ溶接に消耗ノズルを用いたエレクトロガスアーク溶接によりウェブの一气通間連続溶接を可能とする等を考えている。

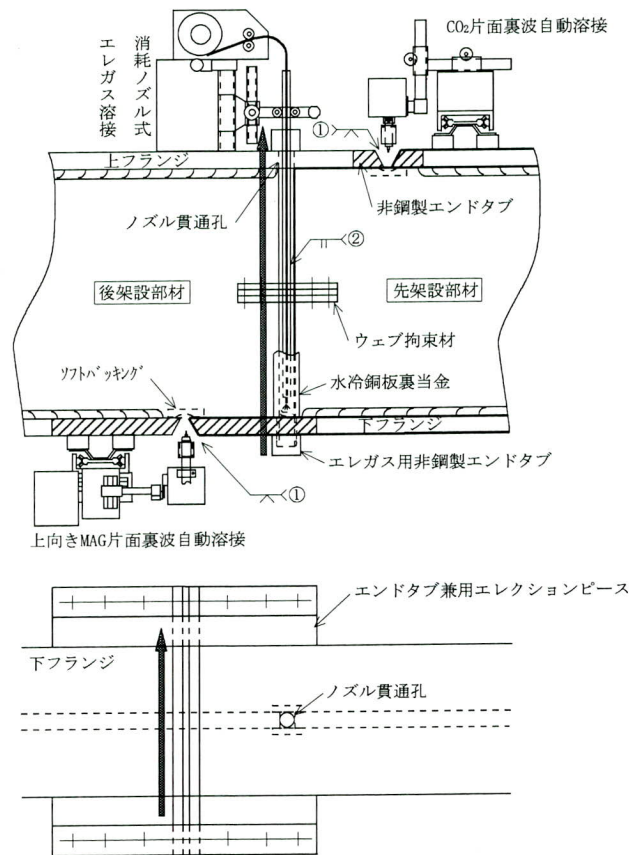


図-20 継手シフト・スカラップレスI桁全断面溶接工法の構想図

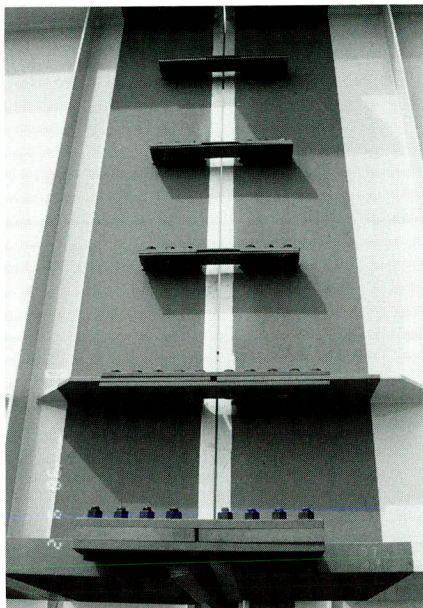


写真-11 I桁全断面溶接ウェブ継手の拘束材

5. 現場溶接における足場および防風設備

ガスシールドアーク溶接を用いた現場溶接では溶接品質を確保するため、風防の問題は重要であるとともに、現場溶接費用および現場工期にも影響する。また高所に全断面溶接継手のあるI桁およびアーチリブの全断面現場溶接では安全な溶接作業および付随作業をするため、堅固な作業足場の設置が欠かせない。

I桁の全断面溶接の風防装置は**写真-12**に示すように、鋼製の移動型風防装置を製作して溶接の進捗状況の応じて移動して対応している場合が多いが、1機100万円単位の設備費を要する。一般には**写真-13~15**に示すようにベニヤ板を用いて継手毎に風防装置を設置している。今後、風に強い溶接工法（**図-20**のエレクトロガスアーク溶接）または鋼床版継手のガスシールドアーク溶接で指向したような、大型の風防装置の要らない局部風防装置を用いた全断面溶接工法の開発が望まれる。

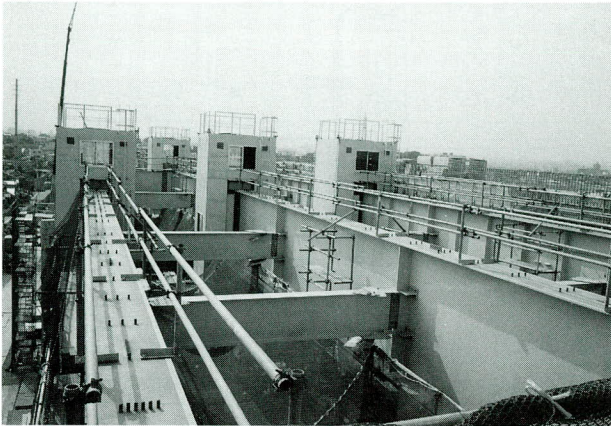


写真-12 I桁全断面溶接の鋼製移動型風防装置

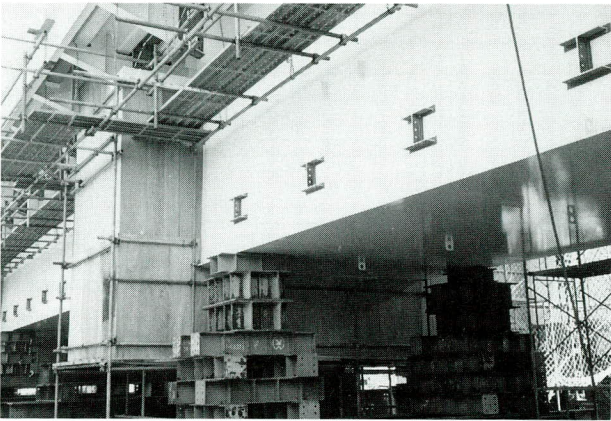


写真-13 ヤード溶接における箱桁風防装置

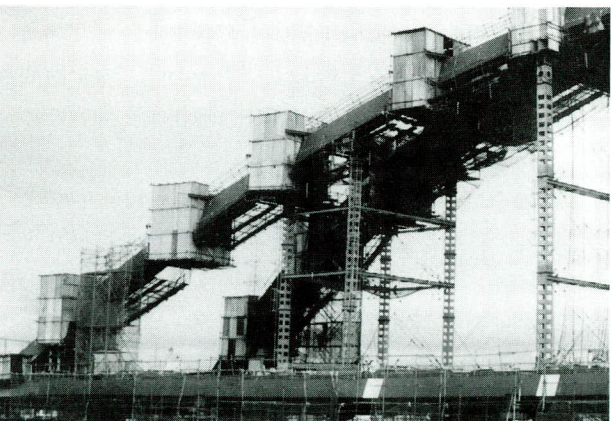


写真-14 アーチリブの現場溶接風防装置

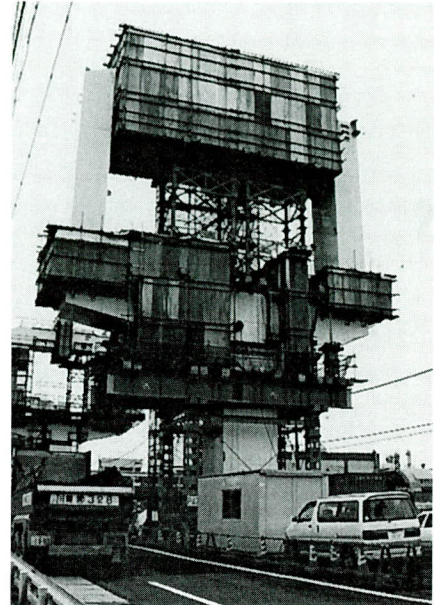


写真-15 橋脚の現場溶接風防装置

6. 現場溶接継手性能に関する留意点

全姿勢でのガスシールドアーク溶接は同じ溶接材料を用いても、上向き溶接と立向き溶接では溶接入熱がかなり異なるため、板厚および溶接層間温度に応じて継手性能が著しく変化する。その一例として、図-21に60キロ級フラックス入りワイヤを用いた炭酸ガスアーク溶接における溶接姿勢、溶接入熱、板厚と溶接金属の引張強度の関係を示した¹⁶⁾。

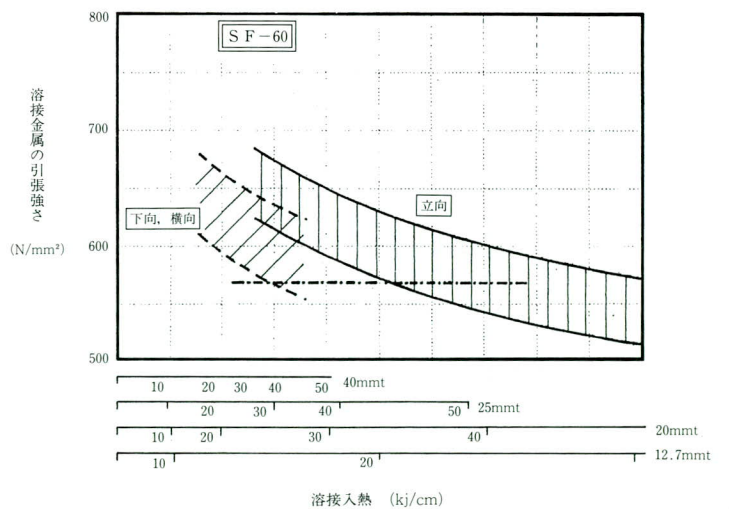


図-21 SF-60継手溶接金属の引張強さ溶接入熱との関係 (バス間温度100°C, 突合せ溶接の場合)

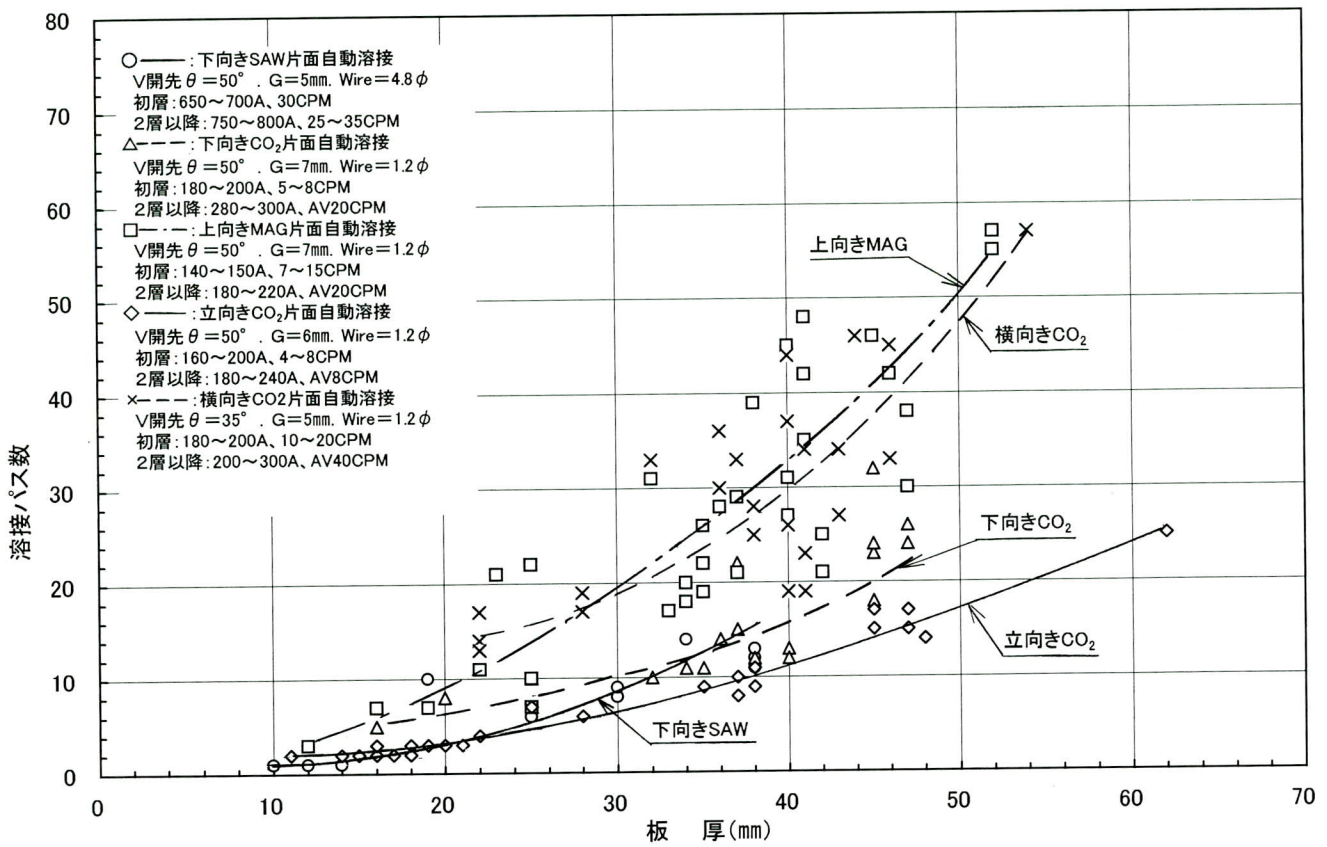


図-23 各溶接方法、溶接姿勢における板厚とパス数の関係

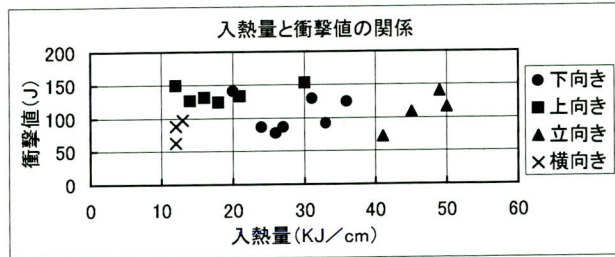
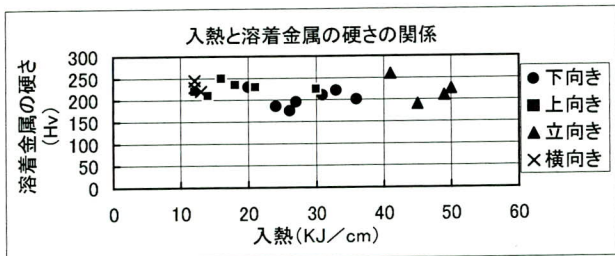


図-22 全断面溶接継手(SM570)の溶着金属の入熱と硬さおよび靱性

ガスシールドアーク溶接の場合入熱が15KJ/cmから100 kJ/cm (エレクトガスアーク溶接) の広範囲の入熱になるため、継手強度のアンダーマッチングおよびオーバーマッチングへの対応および溶接部の靱性に対して、入熱に応じた溶接ワイヤの使用および必要に応じてTMCP鋼を使用する等の配慮が必要である。また、継手の強度が極端にオーバーマッチングの場合は溶接金属の低温割れの恐れもある。図-22に宮地鐵工所が施工した現場溶接の溶接施工試験(SM570Q)における各溶接姿勢毎の入熱と溶着金属の硬さおよび靱性の関係を示した。いずれも継手部の機械的性質は適正な範囲に収斂している。

7. 現場溶接における溶接能率

実施工における溶接管理シートからプロットした下向き、横向き、立向き炭酸ガス片面裏波溶接および上向きMAG片面裏波溶接の板厚とパス数の関係を図-23に示した。片面裏波溶接ではルートギャップによって開先断面面積が大きく変化するため、実施工ではデータそのもののバラツキも大きい。目安としての板厚とパス数の相関曲線が求められる。各板厚におけるアークタイムT(継手1mの溶接に要する時間)は図-23から求められるパス数Nと平均的な溶接速度S(cm/min)から、 $T(\text{hour/m}) = [5N/3S]$ として算出される。図-24に横向き炭酸ガスアーク片面裏波溶接における標準開先、標準溶接条件での板厚、開先断面面積、パス数およびアークタイムの関係の実験値を示した。例えば図-23で求めた板厚40mmにおける横向き炭酸ガスアーク片面裏波溶接のアークタイムTは $T = 1.25\text{hours/m}$ ($N = 30$ 、平均溶接速度40cm/min)となる。一方図-24での実験値はアークタイム $T_0 = 1.42\text{hours/m}$ (パス数 $N_0 = 31$ 、平均溶接速度40cm/min)であり、それほど大きな差はなく、概略目安としては妥当なところであろう。また図-23から溶接能率 $W(\text{m/day})$ を求める場合はアークタイム率 $\alpha\%$ 、8hours/dayとすると、 $[W(\text{m/day}) = 8 \times \alpha / 100T = (6S \times \alpha) / 125N]$ となる。仮に板厚40mm($N = 30$)、一辺が2.5m正角橋脚(継手実長10m)を2台の溶接機を用いて横向き片面裏波溶接($S = 40\text{cm/min}$)を行う場合、アークタイム率 $\alpha = 50\%$ として計算すると、1断面の所要日数Dは $[D(\text{day}) = (2.5 \times 4) \times 125N / 6S \times \alpha = [(10 \times 125 \times 30) / (6 \times 40 \times 50T)] / 2 = 1.6\text{day/断面}]$ と算出される。

現場溶接継手の設計に当たって、溶接姿勢に応じた効率的な溶接方法を採用することが必要であるが、極厚継手では開先形状、開先角度を工夫して開先断面面積をできるだけ小さくするための溶接技術の開発が重要となる。一般に現場施工の工期は現場の天候、段取り時間、装置の設置および移動時間、エンドタブの取付け・取り外し等の付随作業時間で決まるアークタイム率によって左右される。天候は別としてそれ以外の付随作業時間を少なくし、アークタイム率を上げることが、現場溶接施工のノウハウとなる。

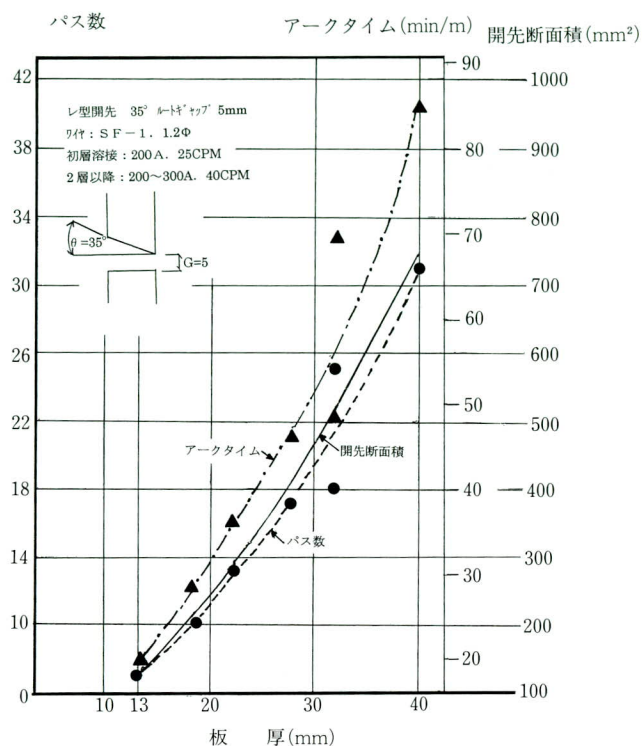


図-24 横向きCO₂アーク片面裏波溶接における板厚と開先断面面積、パス数、アークタイムの関係

8. おわりに

従来、鋼橋の現場溶接は主として景観上の理由から採用されることが多かったが、昨今は鋼橋建設におけるトータルコストの低減策として見直されるようになってきた。現場溶接は工場溶接に比べて作業環境は良くないないが、鋼床版および全断面溶接では溶接継手が類似しており、溶接の自動化が積極的に推進されている。従って溶接そのものが溶接作業者の技能に依存する度合いは少なく、溶接品質のバラツキは少ないが、今後、継手精度確保の製作技術は益々重要となる。また、溶接施工条件は工事毎に著しく変わるため、緻密な施工計画が非常に重要な課題となる。

本報では宮地鐵工所が1/4世紀に亘り施工してきた鋼橋の現場溶接施工の技術的な変遷を中心に、新たな21世紀への技術継承を果たす目的をもつて纏めた。ここに至るまで多くの諸先輩たちの地道な努力に感謝と敬意を表するとともに、今後も絶え間なく切磋琢磨して、さらなる現場溶接技術の向上を願うものである。

なお次号には現場溶接の非破壊検査、溶接収縮、変形等について実績データを基に纏める予定である。

〈参考文献〉

- (1) 西村：調査研究報告書，関西道路研究会「第7章鋼床版に関する研究」，1970
- (2) 成宮：鋼構造技術総覧「5.1溶接接合」，日本鋼構造協会，技報堂出版
- (3) 明石：製作工法の発達，橋梁と基礎，81-8
- (4) 関西道路研究会接合小委員会資料
- (5) 安藤他：片面自動溶接における終端割れの発生機構，溶接学会誌，vol39，No8
- (6) 成宮他：鱈川橋鋼床版現場溶接，橋梁と基礎，75-2
- (7) 本州四国連絡橋公団「鋼床版現場溶接施工基準(案)」
- (8) 社内報告書，KE53(その2)，KE54工区高架橋橋脚—現場溶接施工試験(その2) 大型試験対現場溶接実験報告書，1983年2月
- (9) 鈴木他：フーチング一体型の大型鋼製橋脚（関西国際空港連絡橋）の製作と組立，宮地技報，1991，No7
- (10) 青木他：景観を考慮した曲線橋脚（東京湾横断道路P7橋脚）の設計と製作，宮地技報，1992，No8
- (11) 松枝他：名港中央大橋東塔の下段水平梁の製作，宮地技報，1995，No11
- (12) 社内報告書，万国博5号橋上部工現場溶接施工に関する報告とその考察，1970.6
- (13) 成宮他：箱桁橋の全断面溶接—首都高速旧江戸川橋梁，橋梁と基礎，78-7
- (14) 成宮他：箱桁全断面溶接に用いる上向き片面自動溶接工法の開発と適用，宮地技報，1988，No4
- (15) 森下他：全断面溶接を用いたニールセンローゼ橋，橋梁と基礎，94-12
- (16) 570N/mm²クラス高張力鋼用シームレスフラックス入りワイヤ SF-60の使用条件，日鐵溶接工業(株)技術資料，1991.5

1999.11.1 受付

グラビア写真説明

山ノ田地区高架橋

長崎県内の一般国道57号は、島原半島地域と諫早市及び大村市（長崎空港）等を結ぶ幹線道路として重要な役割を果たしてきました。しかし、198年ぶりの雲仙・普賢岳の噴火に伴う災害、土石流に対し安全な構造の高架橋道路が必要になり島原市から深江町までの延長約4.6kmの内、終点側に近い深江町に本橋は位置しています。

島原深江地区の安全な通行を確保し、更には本地域の復興の核となる本格的な幹線道路の一橋として期待されていると信じます。

(矢野)

百道浜地区横断歩道橋

福岡都市高速1号線を百道ランプで降りると博多湾に面し、近未来型の海浜都市として天神と並ぶ人気エリアのシーサイドももち海浜公園がある。周囲には海浜タワーとして日本一の高さ234mの福岡タワー、日本初の開閉式屋根を持つ福岡ドーム、博多湾に突き出した形のウォーターフロントのマリゾンがある。博多湾沿いにある人工海浜公園の中にある風の公園と呼ばれる風光明媚な場所にウレタン充填タイプの百道浜歩道橋はあり、福岡市民の憩いの場になっています。

(矢野)

グラビア写真説明

温見橋

本橋は、滋賀県坂田郡伊吹町曲谷に位置し、緊急地方道路整備工事の一つとして位置づけられた事業です。伊吹町は岐阜県と県境にあり、県道40号線（山東本巢線）は南北に走る路線で、道路幅員の狭い区間が多く、今までも各地で改良が進められて来ました。今回改良された区間は本橋を含め3橋あり、架橋地点付近が絶壁地域の為、下には姉川も流れており、自然を損なわないよう注意しながら、特に架設に留意致しました。

本橋が完成し、橋名も「温見橋」と命名され、地元住民の方々からも愛着を持たれていると聞いていますが、この路線の奥には滋賀県でも有名な奥伊吹スキー場もあり、本橋の開通でこの改良道路を利用するスキーヤーを初めとし、この橋を利用される全ての方が、「便利になったなあ」と感じられれば幸いです。

(三橋)

新三国橋

新三国橋は、一般国道354号整備の一環として、茨城県古河市牧野と埼玉県北埼玉郡北川辺町を結び、渡良瀬川をわたる橋梁です。渡良瀬川は川幅が広い為、橋長137mのアーチ橋5連という長大橋となります。橋の構造は地域のシンボルになることが予想されるため景観に配慮し、主部材にケーブルを使用したニールセンローゼ桁が採用され、又アーチは内側に傾くバスケットハンドル型となっており優美さを引出しています。新三国橋の完成により茨城、埼玉、群馬の3県にまたがる広域幹線が形成され、地域の発展につながり、又総合公園の利用、渡良瀬遊水池の様々なレクリエーション、バードウォッチングを楽しめるなど生活に潤いをもたらし、人々の交流を深めるものと思われます。

(宮本)

新黒瀬川橋

本橋の形式において特徴的なのは、片側が中路式、もう片側が下路式となっている変形中路ローゼ桁である事です。

国道197号線のうち本橋を含む区間は、鹿野川道路と呼ばれ、平成11年6月に開通しました。これにより、高知県須崎市と愛媛県大洲市の区間すべてで改良が完了した事になり、2県の行き来が大変便利になりました。

本橋の位置する愛媛県野村町付近は、ダム湖とその支流に多くのアーチ・トラス橋が架橋されており、トンネルも多くなっています。

架設にあたっては地形の制約上、ケーブルエレクション（斜吊）工法をとっています。

(藤田)

中津川大橋

一般国道140号は、埼玉県熊谷市を起点とし、花園町、秩父市、大滝村等の市町村を経て山梨県三富村に入り、牧丘町、山梨市、石和町、甲府市を経て終点の南巨摩郡増穂町に至る、延長180kmの幹線道路です。しかし、県境にある雁坂峠は日本三大峠のひとつに数えられる難所。これをはさんだ約10kmの区間は長い間自動車の通行ができず、俗に「開かずの国道」と呼ばれてきました。この難所の雁坂トンネルの完成とともに埼玉・山梨県民をはじめとする悲願が達成されました。

中津川大橋は、大滝村の風光明媚な中津川溪谷に架かる橋で、経済性、構造的性、景観性により中路式鋼ローゼ橋を採用しました。特徴として、V字谷の地形に対する力学的特性とアーチの曲線による美観性に優れています。

(関根)

尾坂橋1号橋

尾坂橋は、ハツ場ダム関連道路対策として国道145号の最初の工事で、地域高規格幹線道路として、4車線にて整備します。

本橋は、一級河川の吾妻川に架かり、その源は群馬・長野県境の鳥居峠に発します。

また、西吾妻観光地域にふさわしい景観に配慮した形式として2連のアーチ橋を採用しました。主な特徴は、第1に、アーチの曲線がやわらかいイメージを与え、かつモニュメントとしての役割も果たしています。第二に、鋼橋の採用により、周辺環境に調和した色彩を選ぶ予定です。第三に、橋脚形状も曲線部を設け景観に配慮しています。

(関根)