

【論文】

本州四国連絡橋(道路・鉄道併用橋)の トラス部材の製作・検討

Fabrication Procedure of Truss Chord Members
of Honshu-Shikoku Highway & Railway Bridges

今井 謙二郎 *
Kenjiro Imai
高田 和 守 **
Kazumori Takada
尾崎 元 宣 ***
Motonobu Ozaki
菅野 啓 行 ***
Yoshiyuki Kanno
多田 賢 ****
Satoshi Tada

〔要旨〕 本州四国連絡橋Dルートの道路・鉄道併用長大橋の製作では、当社技報Vol. 3で述べたように部材の疲労強度を確保するため種々の厳しい品質が要求されている。

そこで、基礎実験結果をもとに、実物大の試験桁（パイロットメンバー）を製作し、各種の試験・計測を行い、その作業要領、管理要領の妥当性を検討した。

さらに、櫃石島橋の床トラス下弦材は調質高張力鋼を用いていないものの鉄道桁が直接乗るため、その製作は調質高張力鋼を用いた部材の製作に準じて製作しなければならない。このため、床トラス下弦材についても実橋製作に先立ち、実物大のパイロットメンバーを製作して作業要領および管理要領を検討した。

本報では、これらの試験結果について、以下の二項目に分けて報告する。

1. 調質高張力鋼を用いたトラス弦材の製作・検討（第二報）
2. 櫃石島橋床トラス下弦材パイロットメンバーの製作

1. 調質高張力鋼を用いたトラス弦材の製作 ・検討（第二報）

1-1 まえがき

調質高張力鋼を用いた道路・鉄道併用橋トラス弦材では、軸方向のくり返し応力が作用するため、特に溶接継手部の形状不整が構造物の疲労寿命に重大な影響を及ぼす因子であることが旭らの報告により明らかになっている。^{1)~3)}

表一 疲労強度に影響を及ぼす溶接継手の形状不整

かど溶接（部分溶け込み又はすみ肉継手。）				ダイヤグラムのすみ肉ビード形状	
1)	ルート部のブローホール。			1)	止端部の滑らかさ。
2)	ルート部のスラグ巻き込み。			2)	継ぎ目の形状。
3)	溶着金属のルート部への溶け落ち。			3)	コーナー部ビード外観及び溶け込み深さ。
4)	ルート部の溶け込み線の著しい凹凸。			4)	スカラップの回し溶接ビード外観。
中本四国併用橋の許容ブローホール試験				調質高張力鋼の部材の等級分類	
欠陥サイズ	特A部材	A部材		特A部材 $0.7 \leq R_B$ or $0.85 \leq R_C$	
短 径 (W寸法)	1.5 mm以下	3.0 mm以下		A部材 $0.5 \leq R_B < 0.7$ or $0.6 \leq R_C < 0.85$	
長 径 (H寸法)	4.0 mm以下	6.0 mm以下		B部材 $R_B < 0.5$ or $R_C < 0.6$	
				ここに $R_B = \sigma_T / \sigma_{fa}^B$ 、 $R_C = \sigma_T / \sigma_{fa}^C$ であり σ_T は応力範囲、 σ_{fa}^B 、 σ_{fa}^C はそれぞれ角溶接部ダイヤグラムのすみ肉溶接の許容応力範囲を示す。	

すなわち、大型疲労試験結果によると、弦材かど溶接部に発生したブローホールや溶け落ちにより小型試験に比べ疲労強度がかなり低下する事が分った。そのため切欠感受性の高い調質高張力鋼の縦ビード継手の疲労許容応力度を一等級下げ、かつ、溶接施工面より欠陥を少なくする事が要求されてきた。ブローホールの大きさは、疲労試験結果をもとに破壊力学的手法をもちいて解析され、⁴⁾目安となる許容サイズとして示された（表一）。

そこで本四連絡橋の製作にたづさわる我々は、従来の鋼橋の製作では類を見ない厳しい品質（表二）を確保し、構造物の信頼性向上の重要性を認識し一連の実験・検討を行なってきた。先の基礎実験では、各作業方法とその品質について報告したが、⁴⁾ここでは次の段階として実物大の部材の製作を行い、基礎実験で確立した施工法の妥当性を総合的に照査した。製作部材はDルートの斜張橋の主橋トラス下弦材を採用した。（パイロット・メンバー）板厚は、施工能力に幅をもたせるため実橋より約15mm厚くし、65mm（SM58Q）とした。

表-2 製作上の管理項目

	主観管理目標	製作上の管理項目
I	ルートギャップを 0.5mm以下に組み 立てる。 (併用機特記仕様)	イ) 下フランジ・・・プライマー除去後の平坦度。 ロ) ウェブ・・・プライマー除去面の平坦度。 切断木口の直角度。 ドラグライン除去面の直角度。 " 平坦度。 ハ) 上フランジ・・・開先加工後の部材寸法。 " 大曲り。 " ルートフェイスの直角度。 " 平坦度。 ニ) 突合せ溶接・・・横曲り変形, 角変形, 変形の修正方法 板の目違い, 余盛の仕上げ精度 エンドタブの取付・除去・仕上げ ホ) ダイアフラム寸法・・・ダイヤの溶接収縮量と上フ ランジの落し込み代 ヘ) フランジとウェブの組み立て・・・組立て順序, 予熱, 仮付。 ト) 組み立て作業・・・部材の圧着治具
II	溶接線清浄度	イ) プライマー, ドラグライン除去。 ロ) 組み立て直前の機手部に付着したホコリや軽いサビ。 ハ) 組み立てで中間先内に侵入したゴミ。 ニ) 組み立て場所の周辺のホコリや砂等。 ホ) 予熱による結露の防止。
III	溶け込み深さの 安定化 (アークの安定)	イ) 十分な容量と外部の電力変動の影響を受けない溶接電源。 ロ) 二次側キャパティヤに不要なインピーダンスの変化がない事。 ハ) 溶接機の円滑な走行。(異常な振動防止) ニ) 仮付溶接の間をソーリング溶接する。

1-2 試驗體形狀

試験体形状を図-1に示す。

1-3 製作フロチャート

製作のフロチャートを図-2に示す。

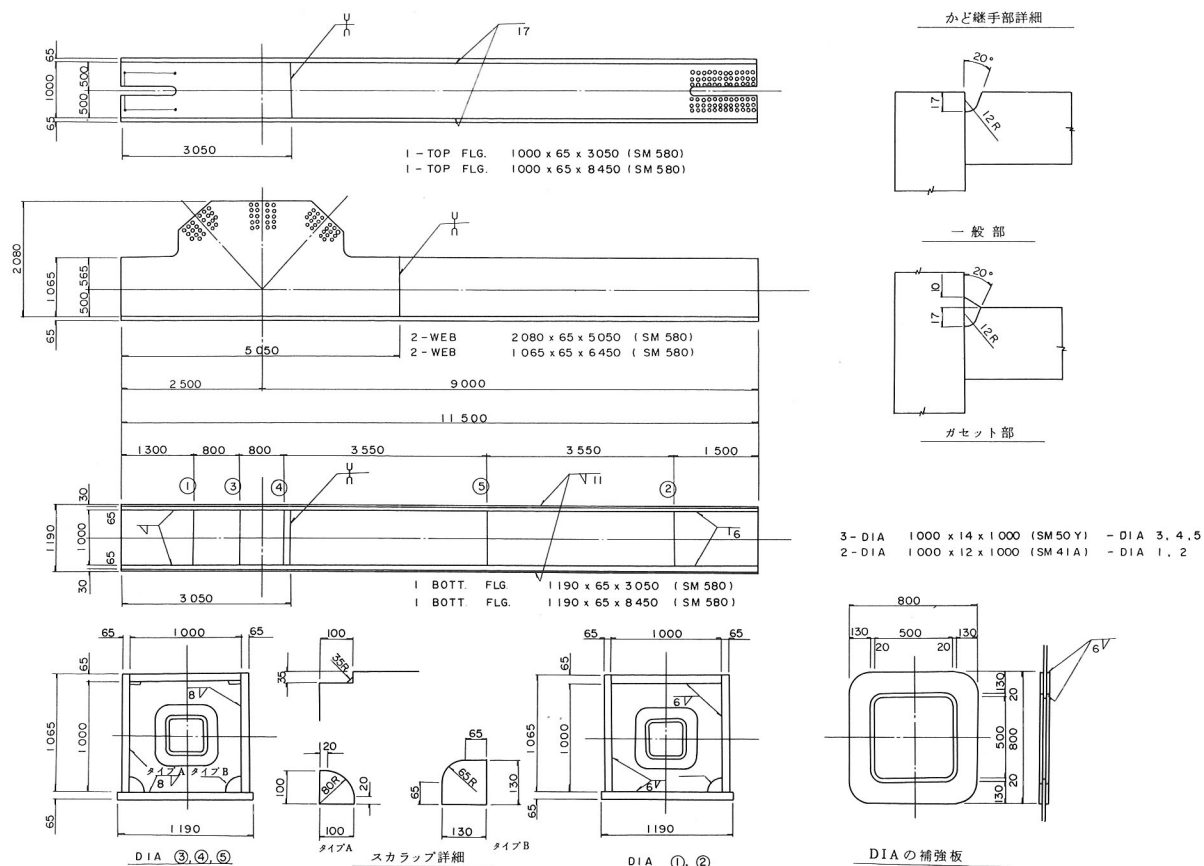
1-4 使用鋼材

1-4-1 鋼材の規格

パイロット・メンバーの製作に用いた主要鋼材は川崎製鉄製のものを用了。鋼材の購入規格は、HBSまたはJISにより、耐ラメラテア仕様や脱磁仕様はつけなかった。

1-4-2 鋼材の平坦度

入荷した鋼材の平坦度は最大で $0.45\text{ mm}/500\text{ mm}$ であり良好であった。



圖一1 試驗體形狀

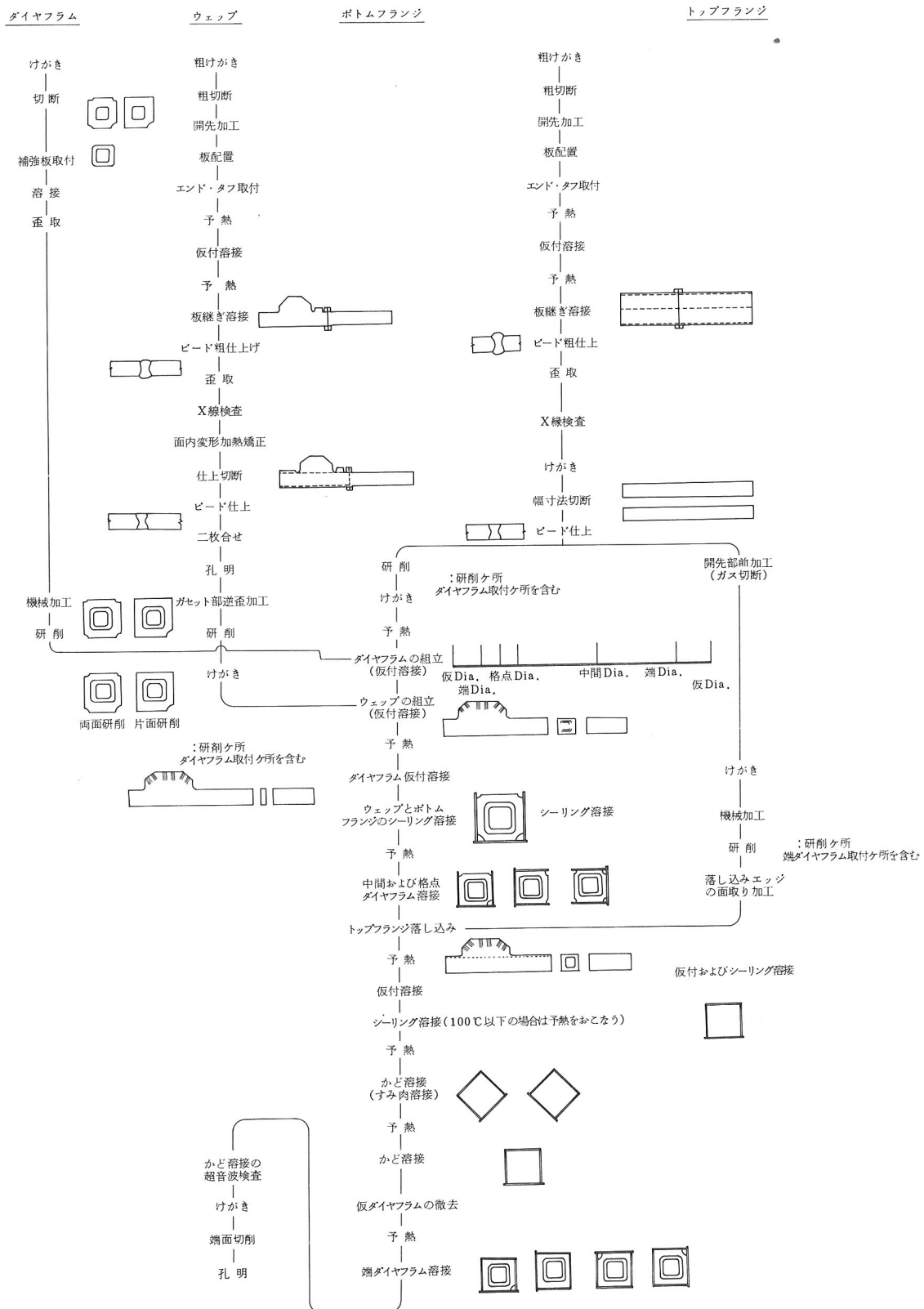


図-2 製作フローチャート

1-5 素材加工

素材加工で特に配慮すべき点は、溶接継手として組合せられる部材相互の精度である。この精度を向上させるためには、素材の各加工段階での品質が重要であり、各工程で社内的な基準（管理目標値）を設けて品質管理を行った。

1-5-1 ウェブ材の加工

ウェブ材の加工で継手精度に影響のあるのは、上下フランジと継手を構成する側面と木口である。したがって、ウェブ材では、これらの箇所の平坦度（小波）や直角度の管理目標値を定めて管理した。

1) ガス切断面の直角度

ドラグライン除去後の直角度に影響が大であるため、 $0 \sim 0.3 \text{ mm}$ を目標としたが、実測では正の値のものも発生した。

2) ドラグライン除去後の直角度

ドラグライン除去後は、負の値の直角度となった。研削は、自走式のベルト研削機に粒度 60 番の研削ベルト使用して行った。

3) ウェブの曲り変形

R側のウェブは溶接後、全長で 2.4 mm 程度の回転変形を生じたため、加熱矯正し 0.8 mm とした。加熱矯正は、 $620^\circ\text{C} \sim 650^\circ\text{C}$ に加熱して行った。

ウェブ材の加工品質を表-3に示す。

1-5-2 フランジ材の加工

フランジ材の加工で継手精度に影響のある箇所はウェブ及び下フランジと継手を構成する部分である。

1) 下フランジ

下フランジでは、ブライマー除去面の平坦度や表面粗さに加えて板継ぎ溶接部の角変形が重要であり、積層法を管理しHBS基準内(10 mm/1000 mm以下)の値に収めた。

2) 上フランジ

上フランジの木口の機械加工では、直角度が一部で正の値になった。そのためルートギャップの確保や上フランジの落し込みキズが発生しやすく施工上不利となった。直角度が正の値になった原因は、研削テーブルへの部材の設置のし方であり今後配慮すべき点であった。また組立て直前に木口をフラップホイールで軽く研削し、研削目を溶接方向に仕上げた。

フランジ材の加工品質を表-4に示す。

表-3 ウェブの加工品質

部材	位置	項目	管理目標値	加工成績
ウェブ材	ウェブ木口面	ガス切断面直角度	± 0.5 (目標: $0 \sim 0.3 \text{ mm}$)	$+ 0.25 \sim - 0.07 \text{ mm}$
		ドラグライン除去後の直角度	$\pm 0.5 \text{ mm}$ (目標: $0 \sim 0.3 \text{ mm}$)	
	(下フランジとの接触面)	ドラグライン除去後の平坦度	0.3 mm/500 mm 以下	
		表面粗さ	50 S 以下	2.0 ~ 4.2 S
	ウェブ内側 かど溶接継手部	ブライマー除去後の平坦度	0.3 mm/500 mm 以下	
		ブライマー除去後の表面粗さ	50 S 以下	5.4 ~ 4.7 S
突合せ溶接部		角変形 内側 (-)角変形	HBS 溶接後: 10 mm/1000 mm 以下 修正後: 0.3 mm/500 mm 以下	5.4 ~ 7.2 mm -0.1 ~ -0.15 mm
		横曲り変形	1.5 mm/全長 全長 11500 mm	溶接後: L, web 0.4 mm, R, web 2.4 mm 修正後: — 0.8 mm

表-4 フランジ材の加工品質

部材	位置	項目	管理目標値	加工成績
下フランジ材	ウェブとの接触面	ウェブ	ブライマー除去後の平坦度	0 ~ 0.3 mm/500 mm
	下フランジ	ブライマー除去後の表面粗さ	HBS 50 S 以下	ベーターマシン 60 # 3.6 ~ 4.9 S フラップホイール仕上 1.6 ~ 3.0 S
突合せ溶接部		角変形 BOX内側 (-)変形	HBS 溶接後: 10 mm/1000 mm 修正後: 0.3 mm/500 mm	+5.8 ~ +6.4 -0.2 ~ -0.15
上フランジ材	ウェブとの接触面	直角度	± 0.5 以下 目標: $0 \sim 0.3 \text{ mm}$	
		平坦度	0.3 mm/500 mm 以下	0 (0.04 以下)
	ウェブ	表面粗さ	25 S	8 ~ 15 S
		J型開先部	開先長さ d 開先幅 W	1.7 +1.0 -0.5 mm 1.45 +2.0 -0 mm
	機械加工面	部材幅寸法	1000.0 $\pm$ 0.3 mm	999.7 ~ 1000.3 mm
		部材の大曲り	1.5 mm 以下/全長 全長 = 11500	1.3 mm L側に凸
突合せ溶接部		角変形 BOX内側 (-)変形	HBS 溶接後: 10 mm/1000 mm 修正後: 0.3 mm/500 mm	+5.4 ~ +5.9 mm -0.2 ~ -0.3 mm

1-5-3 ダイアフラムの加工

ダイアフラムは、機械加工した。幅寸法は溶収縮、落込み代を考慮して、中間ダイアフラムでは「設計寸法+1.0 mm」、端ダイアフラムでは「設計寸法+0.7 mm」とした。

1-6 組立精度

1-6-1 ウェブ立込後のウェブ間距離と大曲り

上フランジを落し込む直前、すなわちダイアフラムの溶接が完了した後のウェブ間距離と大曲り量が組立て精度に大きな影響を与える。格点部のガセット付近ではダイアフラムが集中(3枚)しており、これらの溶接による収縮が予想以上に大きく、ウェブ間隔が上フランジ幅より小さく(0.2~0.3 mm)なった。そのため上フランジ木口をフラップホイールで研削し幅を調整した。一方、上フランジの大曲りは、中央部で1.3 mm、ウェブの大曲りは1.4~1.7 mmであり両者共L側に凸となったため落込みには支障なかった。

1-6-2 ルートギャップ調査結果

発生した最大のルートギャップは、J型かど継手では中間ダイアフラム部で0.45 mm、すみ肉溶接ではガセットの立ち上がり部で0.4~0.45 mmであった。一方、J型かど継手のガセット部では、圧着しない状態ですでにルートギャップが、殆んど“0”であった。組立精度についてまとめると次のようになる。

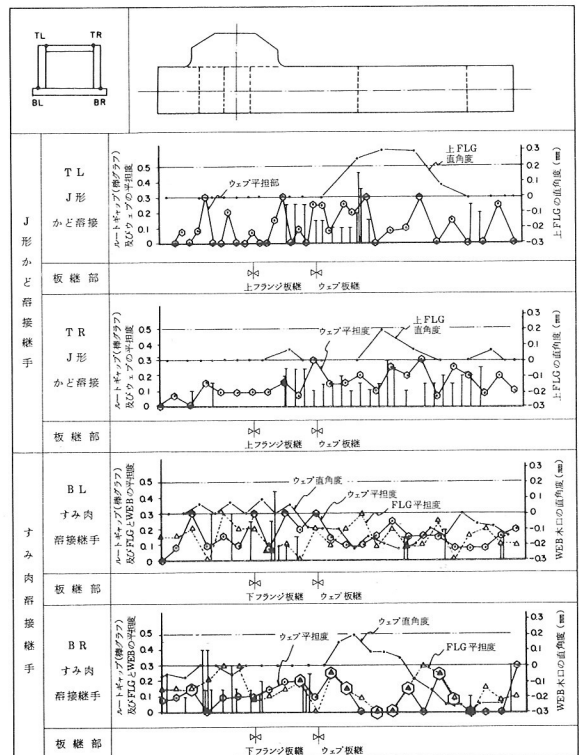
- ルートギャップの0.5 mm以下は達成できた。
- 上フランジ直角度+0.3 mm、下フランジの平坦度0.3 mm/500 mmの箇所でルートギャップが0.45 mm生じた。(中間ダイヤの位置)
- ガセットの立ち上がり部で、治具の圧着力が有効に伝わらないすみ肉継手では、0.4~0.45 mmとなった。この位置での部材相互の平坦度は0.3 mm/500 mmと0.2 mm/500 mmであった。

以上の結果より0.5 mm以下のルートギャップを確保するには、ルート面の直角度を0~-0.3 mm/500 mmに、平坦度は0.3 mm/500 mm以下が望ましく、すみ肉継手ではガセット付近での圧着をよくする事が大切である。圧着後のルートギャップと部材精度を表-5に示す。

1-7 溶接施工とその品質

1-7-1 仮付およびシーリング溶接

表-5 圧着後のルートギャップと部材精度



仮付・シーリングはMA G溶接で行ない、サブマージアーク溶接での再溶融を考慮して脚長および溶込深さを管理した。スパッタの発生による開先内の清浄度の低下を防ぎ、清掃作業を容易にするため、スパッタの少ない施工条件(電流190~200 A、電圧20~21 V、速度35~45 cm/分)を選んだ。なお、目標脚長は4~5 mm、溶け込み深さは0より大きく1.0 mm以下とした。

1-7-2 かど溶接施工

かど溶接は、サブマージアーク溶接を用い表-6と表-7に示す条件で行った。電源は、クレーン等とは別の独立した500 KVAのものを使用した。J形かど継手では、左右の継手を同時に溶接する予定であったが、一方の溶接機の品質が劣る事が分ったため、やむなくSWT-4 1型機で一線づつ初層を溶接した。第二層以後は、2台の溶接機で同時に溶接した。実橋の溶接では、溶接機をもう一台追加し、その性能を確認した上で左右同時に溶接する予定である。

表-6 すみ肉サブマージアーク溶接条件

溶接装置						専用電源 先行 後行		脚 長 (11mm目標)	
						500KVA+KRUMC 1000+KRUMC 1000+SWT-24			
条 件	電流(A)	電圧(V)	速度(cm/min)	極間(mm)	入熱 KJ/cm			L 側	R 側
R 側 先行	650	3.0						$\bar{S}_1 = 123$	$\bar{S}_1 = 12.6$
(B.R.) 後行	550	3.4	5.5	5.0	41.67			$\bar{S}_2 = 118$	$\bar{S}_2 = 11.5$
L 側 先行	645	3.0							
(B.L.) 後行	550	3.4	5.5	5.0	41.51				
使用溶接材料						ワイヤ フラックス			
						Y-DM (48φ)×YF-15 (20×200)			

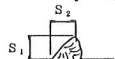


表-7 J形かど継手のサブマージアーク溶接

溶接装置		専用電源		先行	後行	溶接機
		500KVA+KRUMC 1000+KRUMC 1500+SWT-41				+KRUMC 1000+KRUMC 1500+SWT-24
条件	電流(A)	電圧(V)	速度(cm/min)	極間(mm)	入熱 KJ/cm	
R側先行	610	3.0	3.5	—	51.37	
T.R.第二層	625	3.2	3.5	—	34.29	
第三層	655/600	31/34	5.5	5.0	44.41	
第四層	700/650	32/34	4.5	5.0	59.33	
L側先行	645	3.0	3.5	—	32.40	
T.L.第二層	615	3.3	3.5	—	34.79	
第三層	650/600	32/32	5.5	5.0	43.64	
第四層	700/660	31/34	4.5	5.0	58.85	
第五層	615	3.3	4.0	—	30.44	
使用溶接材料	ワイヤ		フラックス			
	Y-DM (48φ)×YF-15 (20×200)					

※第一層目は、いづれの継手もSWT-41使用。

1-7-3 ダイアフラムの溶接

ダイアフラムの溶接には、技量訓練を十分に積んだ溶接工が従事した。ルート部の溶け込みを得るため初層をMAGで全線前処理し、その上に改良形すみ肉棒を用いて本溶接を行ない良好なビード外観を確保した。溶接は、図-3のように反転して水平姿勢で行なった。溶接部の検査は目視とθゲージで行なった(写真-1)。検査の結果、一般部、回し部、コーナー部共に良好であったが、棒継ぎ部の一部でθゲージ検査が不合格となり、その箇所はグラインダーで仕上げた。溶接材料、条件を表-8に示す。

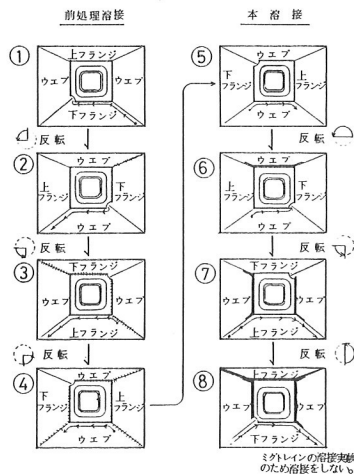


図-3 端ダイヤ溶接順序と溶接方向

表-8 溶接材料および溶接条件

	脚 長 および 積層法	パス数	溶接方法	溶 接 材 料		溶 接 条 件		
				銘 柄	棒 径 (mm φ)	電 流 (A)	電 圧 (V)	速 度 (cm/min)
中間・ 格点 ダイヤ		1	MAG 溶接	YM-28	1.2	250～260	23	70～80
		2	手 溶 接	LBF-52A	6.0	300～310	27～28	22～25
		3	手 溶 接	LT-52	4.5	180～200	26～27	25～30
端 ダイヤ		1	MAG 溶接	YM-28	1.2	250～260	23	70～80
		2	手 溶 接	LBF-62A	6.0	300～310	27～28	22～25

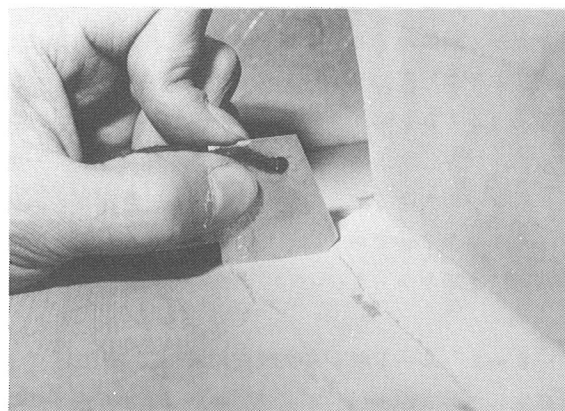


写真-1 θゲージ検査

1-8 パイロット・メンバーの部材精度

製作したパイロット・メンバーの部材精度測定結果を表-9に示す。各項目ともH.B.S.の許容公差以内であった。

表-9 パイロット・メンバー部材測定結果

測定項目	設計寸法 (基準長さ) mm	H.B.S 許容公差	パイロットメンバー測定結果 (mm)			
部 材 高	1130	H > 1m ± 3 mm	矢 元 側		矢 先 側	
			L 側	R 側	L 側	R 側
			+1.0	+1.5	+0.5	+1.0
部 材 幅	上 F L G. 1 1130 下 F L G. 1190	W > 1m ± 3 mm	矢 元 側		矢 先 側	
			上 F L G.	下 F L G.	上 F L G.	下 F L G.
			+0.2	+1.5	-0.5	0
木口の対角 線 長 さ	(127.45)	± 3 mm	矢 元 側		矢 先 側	
			+0.5		+0.5	
断面の鉛直度		± 3 mm				
部 材 長 さ	11500	L > 10m ± 3 mm	各部で+0.2~+0.5			
部 材 大 曲 り	y ≤ $\frac{L}{1000}$ L: 11500 ∴ y ≤ 115mm		大 曲 り 水 平 力 向	下 F L G R 上 下 力 向	下 F L G L 側 上 下 力 向 上 側	
			L 側に 2.5 凸	下に凸 2.0	下に凸 1.0	

1-9 破壊試験

1-9-1 破面試験

破面試験は、かど継手のルート部より破断した破面よりブローホールやルートの溶け込み線の均一性、溶け落ちの有無を調べた(写真-2)。全長11,500mmのパイロット・メンバー内、J形かど溶接線の53%, すみ肉溶接線の41%を破断し、計測顕微鏡(20x, 最小目盛0.05mm)を用いて観察・測定した。特に溶け込み深さについては、10mmピッチで測定した。試験片の採取位置は、自動超音波探傷試験によって異質なエコーが認められた箇所を重点的に選んだ。

1) 溶け込み深さの測定

溶け込み深さは、継手ごとにデータを集計し母平均、及び母標準偏差の推定を行い、溶け込み深さやルートの形状を数量化して検討した。その結果、仮付・シーリング溶接ビードの再溶融は達成できたと考えられる。J形かど継手では、溶け込み深さの変動も小さく良好なルート線が得られた。すみ肉溶接では深さの変動がやや大きかった。

かど溶接の溶け込み深さを表-10に示す。

表-10 かど溶接の溶け込み深さ

	J形かど継手の溶け込み深さ		すみ肉かど継手の溶け込み深さ	
	R側継手	L側継手	R側継手	L側継手
母平均 μ (99%)	$3.1 \leq \mu \leq 3.2$	$3.6 \leq \mu \leq 3.7$	$4.6 \leq \mu \leq 4.8$	$5.0 \leq \mu \leq 5.1$
母標準偏差 (99%)	$0.4 \leq \sigma \leq 0.5$	$0.3 \leq \sigma \leq 0.4$	$0.5 \leq \sigma \leq 0.6$	$0.4 \leq \sigma \leq 0.5$
$d = \mu \pm 3\sigma$ max (再溶融 $d \geq 1$)	1.6	2.3	2.7	3.0
備考	R側初層電流 610A L側初層電流 645A 両者共深さの変動は、少なく良好。		RとLはほぼ同等の品質で、両者共深さの変動がやや大きい。	

2) ブローホールの発生量

疲労強度低下因子の一つであるルート部のブローホールの調査結果を図-4に示す。特に疲労強度が重要な部材(特A)では限界サイズとして、幅1.5mmφが示されており、破面試験結果より長径が0.5mmφを越すブローホールにつ

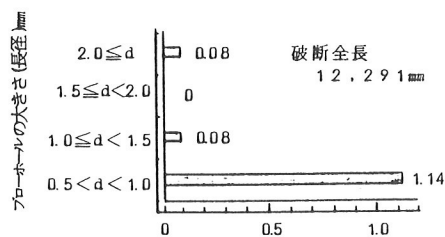
いて調べた。J形かど継手では1.5mmφを越すブローホールが、破断長12,290mmの中で1個発生し、その大きさは幅2.25mm, 高さ0.85mmであった。一方すみ肉溶接では破断長9,490mm中に4個発生したが、いずれも幅0.15~0.35mmの微細なパイプ状のブローホールであった。J形かど継手に発生したブローホールの原因を電流・電圧記録、開先精度、清浄度、レールの継目の異状やキャプタイヤの送りムラ等について追跡調査をしたが直接的な原因を断定するにはいたらなかった。すみ肉溶接で発生したものは、カセットのR部で、組立ルートギャップが0.3~0.45mmの箇所であり、隙間の大きいルートギャップよりルート面に侵入した異物が原因と思われる。

すなわち、ダイヤフラムの溶接では、部材を回転させながら行なうため、部材内部のゴミ等がすみ肉溶接部に混入しやすい状態であった。

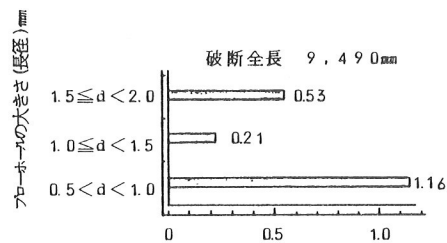
したがって、このブローホールに対しては、反転前に部材内部の清掃を入念に行う方法やルート部を内側から養生する方法で発生を防止できるとと思われる。

3) その他のルート部の品質

その他のルート部の品質としては、「溶着金属の溶け落ち」や上フランジの落し込み中に発生する「落し込みキズ」がある。溶け落ちは、J形かど継手では発生しておらず良好であった。すみ肉溶接では、ガセット部のルートギャップが0.45mmの付近で数箇所発生した。この防止策は、第一にルートギャップを小さくすること、第二に溶接条件を再検討し、深い溶け込みを避けることが重要である。次に落し込みキズは、J形かど継手のガセット部で数箇所認められた。この原因は、中間・格点ダイヤが合わせて三枚入っている格点部で、ダイヤフラムの溶接による収縮が予想以上に大きく、落し込み代が充分確保できなかったためである。そのため格点ダイヤフラムの施工法を再検討する必要がある。

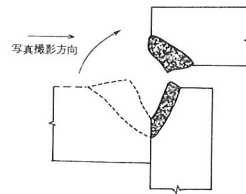
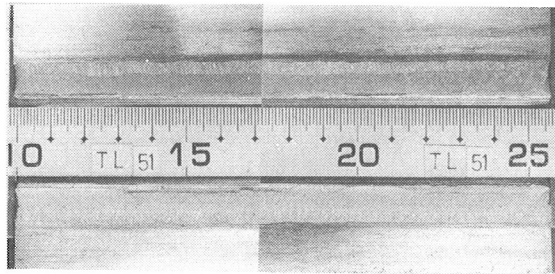


1) J形かど溶接のブローホール発生率(個/m)

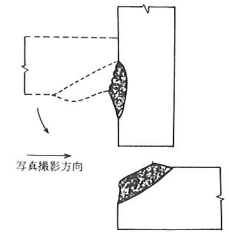
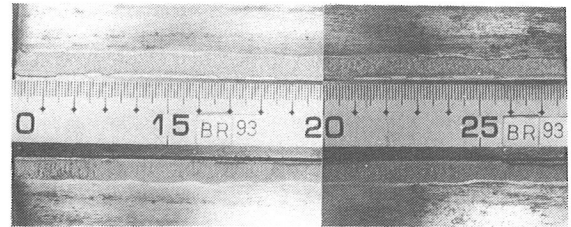


2) すみ肉かど溶接のブローホール発生率(個/m)

図-4 かど溶接継手に発生したブローホールの発生率



1) J形かど溶接継手の破面写真



2) すみ肉溶接の破面写真

写真-2 かど溶接継手の破面写真

1-9-2 継手性能試験

各継手より試験片を採取し溶着金属の機械的性質を調べた。試験結果を表-11と表-12に示す。

表-11 板継溶接部機械試験結果

試験項目	判定基準	試験片番号	試験結果	判定
引張試験	引張強さが母材の規格値以上 (T-S56~71kg/cm ²)	T-A	DEPO 66.5kg/cm ²	合格
		T-B	DEPO 67.1kg/cm ²	合格
側曲げ試験	原則として亀裂が生じてはならない	G-A	亀裂なし	合格
		G-B	亀裂なし	合格
衝撃試験 VB-10	HBS G 3106 VE-10 $\geq 4.8kgf/m$ (3個の平均値)	B側 C-1	6.7	合格
		C-2	8.0	
		C-3	7.0	
		Ave	7.2	
		中央 A-1	7.5	合格
		A-2	7.6	
		A-3	8.6	
		Ave	7.9	
		F側 G-1	7.0	合格
		G-2	7.5	
		G-3	6.7	
		Ave	7.0	

表-12 かど継手部全溶着金属機械試験結果

試験項目	判定基準	試験片番号	試験結果	判定
全溶着金属 引張試験	HBS G 3106 Y-P $\geq 44kg/cm^2$ T-S56~71kg/cm ² 伸び(%) 20 $\leq$	T D-1	Y-P 60.1kg/cm ² T-S 69.9kg/cm ² 伸び 24.0%	合格
		T D-2	Y-P 60.1kg/cm ² T-S 70.2kg/cm ² 伸び 24.0%	
		B D-3	Y-P 53.7kg/cm ² T-S 70.0kg/cm ² 伸び 22.5%	
		T 2-1	6.2	合格
		R 2-2	7.0	
		R 2-3	6.7	
全溶着金属 衝撃試験	HBS G 3106 VE-10 $\geq 4.8kgf/m$ (3個の平均値)	T 3-1	7.0	合格
		L 3-2	7.2	
		L 3-3	7.2	
		B 1-1	7.8	合格
		R 1-2	8.0	
		R 1-3	7.5	

1-10 自動超音波探傷試験

かど溶接完了後、全線に渡って自記式の自動超音波探傷試験を行なった(写真-3, AUT-3, No-1 エースエンジニアリング(株))。試験方式は、大鳴門橋工事に準じた仕様で行ない、探触子は65mmの鋼板に合わせたフォーカス型のものを用いた。自動探傷では、現物と1対1に対応可能な時間軸とし、エコー高さとその形状より欠陥の種類と位置を読み取る方式である。探傷結果をもとに、欠陥の疑いのある箇所とその部分の破面試験の対比を表-13と表-14に示す。



写真-3 自動超音波探傷試験

表-13 J形かど継手のAUT探傷結果
(AUTで見逃した欠陥も含む)

AUT判定	件数	有害欠陥				過大評価(対応なし)			
		BH2.0	R2.5	キズ	溶落ち	BH<1.5	R<2.5	凹み	小計
BH2.0	7	1	0	1(2)	0	2(2)	2	0	1
BH1.5	16	0	2	1(1)	0	3(1)	4	2	4
BH?	6	0	0	0	0	0	0	0	0
R	2	0	1	0	0	1	0	0	1
N	4	0	0	3	0	3	0	0	1
Total	27	1	3	5	0	9	6	2	10
見落し	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G・Total	27	1	3	5	0	9	6	2	10
有害欠陥の 発見率		9/25				過大評価 18/27			

記号説明

BH2.0 : 2mmφのブローホール

BH? : ブローホールの疑い

R : ルートの凹凸

N : 落とし込みキズ

2mmφルート線

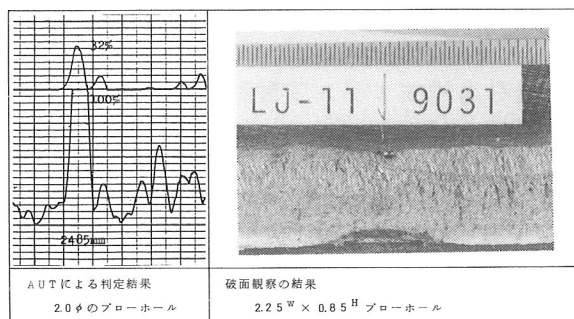
R=2/15

表-14 すみ肉かど継手のAUT探傷結果
(AUTで見逃した欠陥も含む)

AUT判定	件数	有害欠陥				過大評価(対応なし)			
		BH2.0	R2.5	溶落ち	小計	BH<1.5	R<2.5	凹み	小計
BH2.0	12	1	0	6	7	3	1	0	4
BH1.5	13	1	4	5	10	1	0	1	2
BH	1	0	0	0	0	0	2	1	3
R=2/15	1	0	0	0	0	0	1	0	1
Total	27	2	4	11	17	4	4	2	10
見落し	3	3	0	0	3				
G・Total	30	5	4	11	20	4	4	2	10
有害欠陥の 発見率		20/30				過大評価 10/30			

以上の対比結果によると、今回行なった自動探傷試験結果は次のように要約できる(写真-4)。

- a) 2.0mmφのブローホールと判定されたものの多くは、溶け落ちであり(すみ肉溶接)、一部に落とし込みキズも見られた。(J形かど継手)
- b) 2.0mmφを越す丸い形状のブローホールはAUTでよく捕えられた。(J形かど継手)

写真-4 自動超音波探傷試験(AUT)結果
とブローホールの破面写真

- c) AUTで1.5mmφのブローホールと判定したものの大部分は、1.5mmφ以下のブローホールやわずかなルー

トの凹凸、落とし込みキズであり、実際1.5mmφを越すブローホールは29件中1件であった。

- d) "BH?" すなわち、ブローホールの疑いをもたれたものは、破面試験では対応なしが、基準以下のルート

- e) J形かど継手に発生した落とし込みキズは高い確率で発見された。

- f) J形かど継手では欠陥の見逃しは少なく、全般に過大評価が多かった。

- g) すみ肉溶接では、1.5mmφを越す細長いブローホールを見逃したものが3件、発見したものが1件あった。その形状を図-5に示す。

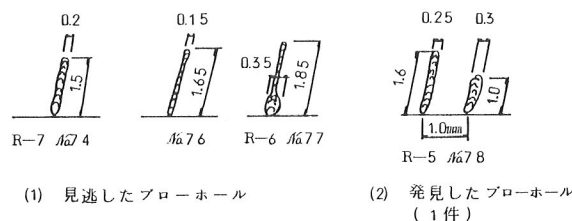


図-5 すみ溶接のブローホール形状とAUT探傷結果

1-11 まとめ

パイロット・メンバーの製作を通じ、ほぼ所期の目的が達成でき、一連の製作工程での管理目標値の妥当性及製作方法について貴重な経験とデータが得られた。これらの結果を詳細に検討した結果、施工法についていくつかの改善を行なった。次にその主なものを示す。

1) 溶接条件

J形開先をより一般性のある60°レ形開先として再度実験した結果、J開先と同等の品質が得られることが分った。実験結果と標準条件を図-6、表-15に示す。

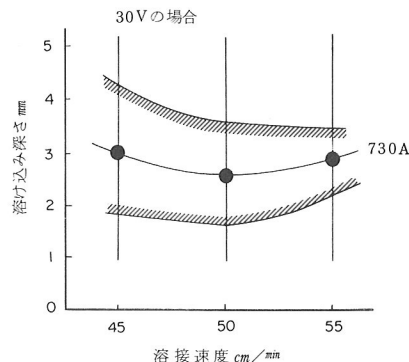


図-6 60°レ形かど溶接の先行条件と溶込深さの関係

表-15 60°レ型部分開先 SAW 初層溶接条件

	フ ラ ッ ク ス		ワ イ ヤ		ねらい位置	
溶 接 材 料 (日鉄)	YF-15(20×200)		Y-DM(4.0φ×4.8φ)			

すみ肉溶接では、単電極サブマージアーク溶接として溶け込み線の均一化を計った。その結果を図-7、表-16に示す。

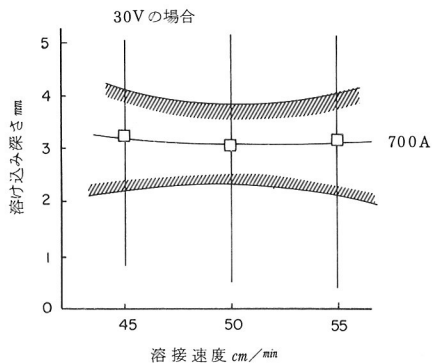
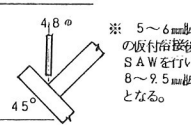


図-7 すみ肉溶接条件と溶込深さの関係

表-16 スミ肉初層 SAW 溶接条件

溶接材料 (日鉄)	フラックス		ワイヤ		ねらい位置 
	YF-15(20×200)		Y-DM (4.8φ)		
溶接条件 26 KJ/cm	電流 (A)	電圧 (V)	速度 cm/min		※: 5~6mmの板付溶接後、 SAWを行い、 8~9.5mmの板長 となる。
	700	31	50		

2) 圧着治具の改善

組み立て時の圧着作業を能率化するため電動油圧ジャッキを備えた。また仮付・シーリング作業空間を広くし作業性をよくした。圧着力は、10トン程度とし、強く押してルートギャップを確保する方式は採用しない事とした(写真-5)。

3) 組立て精度の改善

組立て工程で最も、部材精度上重要な箇所はウェブの木口(下フランジとの接触部)であり、上フランジの開先加工である。そこで、その重要性を認識し、大型フェーシング機械を導入し、これらの加工精度の飛躍的な向上をねらった(写真-6)。また、これにより組立時の

の圧着力も大幅に低減できる。

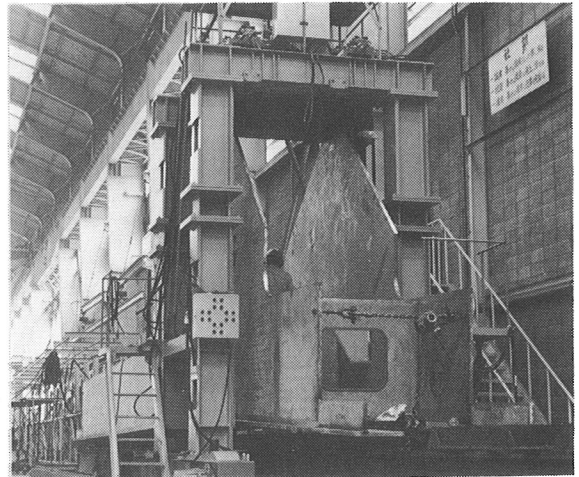
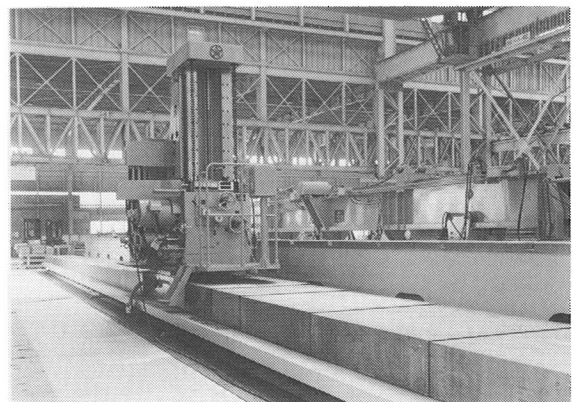
写真-5 改善された圧着治具(組立治具)
10tonの油圧ジャッキ使用

写真-6 全長30Mのフェーシングマシン

2. 櫃石島橋床トラス下弦材パイロットメンバーの製作

2-1 まえがき

櫃石島橋上部工製作における床トラス下弦材は、直接鉄道桁が乗るため設計上、部材のねじれおよび繰り返し荷重等の考慮がなされている。一方、製作は、断面寸法800mm×1,000mm、長さは24,900mm箱断面部材でかつ鉄道桁受台が上フランジ側に8箇所も取り付けられており、溶接量が上フランジ側に非常に多く、部材の寸法精度維持が難しい状態である。さらに、内面すみ肉溶接が要求されており、その施工に際しても予熱および作業空間の制約等により厳しい作業条件下における継手品質

の確保を図らなければならない。

そこで、櫃石島橋上部工製作に先立ち、床トラス下弦材の製作について、製作方法全般の見直し、組立要領および溶接要領の確立、内面すみ肉溶接施工方法の妥当性の検討、管理要領の確立を目的として実物大のパイロットメンバーを製作した。

2-2 床トラス下弦材パイロットメンバーの概要

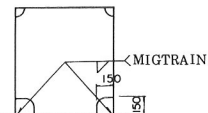
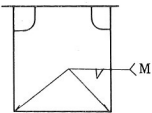
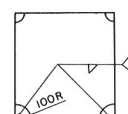
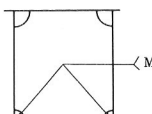
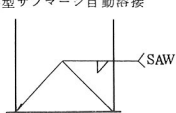
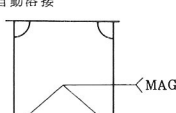
2-2-1 パイロットメンバーの形状・寸法

製作試験を行ったパイロットメンバーは、最も一般的な中間床トラス下弦材（使用鋼材は非調質鋼）とした。パイロットメンバーの形状および寸法を図-8に示す。

2-2-2 内面すみ肉溶接方法および試験体数量

内面すみ肉溶接方法は、表-17に示す3通りの方法が提案されているが、当社は、下フランジ側内面すみ肉溶接を長尺すみ肉自動溶接装置（ミグトレイン・MAGバルス溶接）で施工するA試験体の製作試験を行った。

表-17 内面すみ肉溶接方法

試験体 記号	内面すみ肉溶接方法	
	下フランジ側内面	上フランジ側内面
A 試験 体	1. ガスシールドアーク溶接法 2. MIGTRAIN 使用 	1. 被覆アーク溶接 2. 手溶接 
B 試験 体	1. 被覆アーク溶接法 2. リレーオート使用（連続アーク） 	1. 被覆アーク溶接 2. 1部リレーオート，1部手溶接 
C 試験 体	1. サブマージアーク溶接 2. 小型サブマージ自動溶接  ※ ダイアフラム後付け。	1. MAG 溶接 2. 半自動溶接 

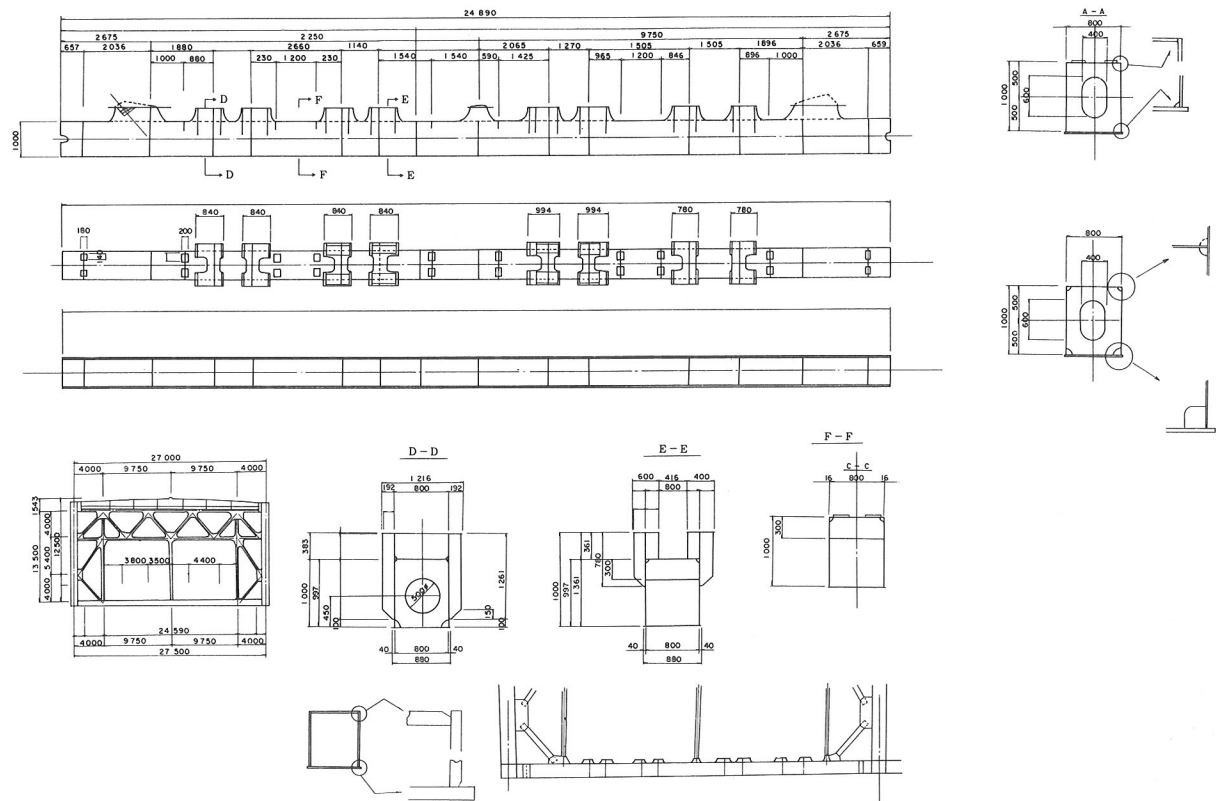


図-8 パイロットメンバーの製作形状

2-3 パイロットメンバーの製作

2-3-1 製作上の方針

床トラス下弦材は、鉄道桁が直接乗り、列車による繰り返し荷重を受けるので、かど継手はできる限り調質高張力鋼の部材製作要領に準じて製作するものとし、A試験体においては、以下の基本方針に基づいて施工した。

- 部分溶け込みかど継手のルートギャップは0.5 mm以下を目標とする。
- 部分溶け込みかど継手および内面すみ肉溶接継手のドラグラインおよびプライマー塗膜は除去する。
- 部分溶け込みかど継手は、組立直後シーリング溶接を行う。
- 部分溶け込みかど溶接では、途中でアークを切らないようにして施工する。
- ダイヤフラム等のすみ肉溶接継手は、C2継手に準じて止端部がなめらかになるすみ肉溶接専用棒を用いる。
- 部材の縦曲り変形を考慮して、製作時に付加キャンバーをつける。
- 部材のねじれ変形を防止するため、ウェブの一体形状を確保する。
- A試験体では、ダイヤフラムの下フランジ側のスカラップを150×150とする。また、端ダイヤフラム(密閉ダイヤ)の下フランジ側にもスカラップを設け、あとでフタ(バッチ)をする。

2-3-2 製作順序

床トラス下弦材パイロットメンバーの製作工程フローチャートを図-9に示す。

2-3-3 材片加工

かど継手のルートギャップを0.5 mm以下に保つためには、材片の加工精度を向上させることが不可決の要因である。先に行なった主構下弦材パイロットメンバー製作の結果でも、ウェブ、フランジの部材精度がルートギャップに大きな影響を及ぼすことがわかっているため、材片の加工に際しては、各部材の精度を確保するための製作要領、溶接およびガス切断によって生じる変形量、発生した歪の矯正方法を検討した。

1) 板継ぎ溶接と角変形

ウェブ、フランジの板継ぎ溶接で生じた角変形量および角変形矯正後の平坦度を表-18に示す。

この結果、板継ぎ後の角変形量は本四基準以下であり、

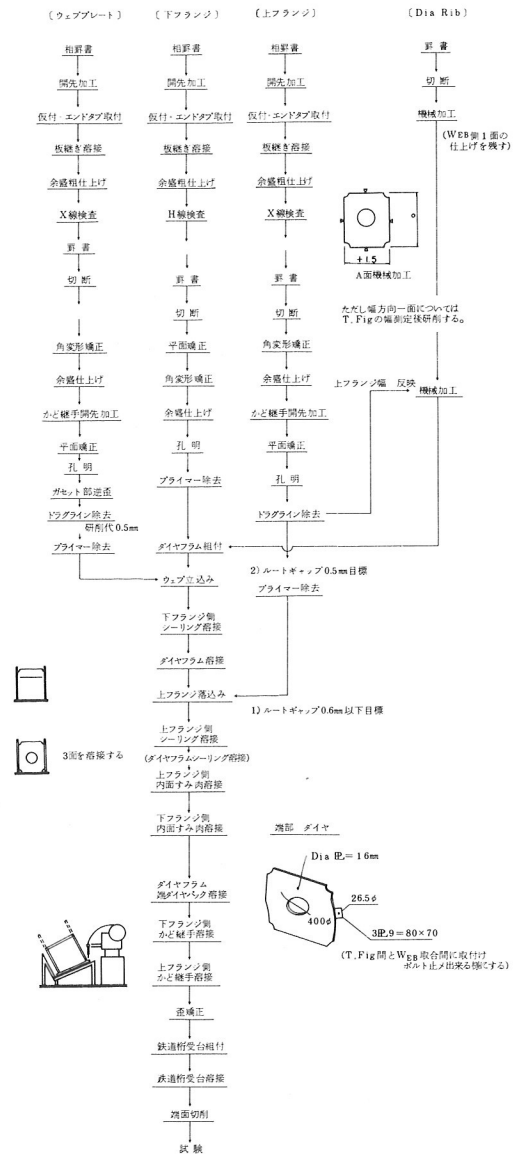


図-9 樫石島橋床トラス下弦材パイロットメンバー製作フローチャート

プレスで矯正することによって鋼板面の平坦度も管理目標値以下まで修正できることがわかった。

2) ガス切断と面内変形(平面曲り)

ウェブ、上フランジは板継ぎ溶接、角変形矯正後、型切断、かど継手の開先加工を行った。下フランジは板継ぎ溶接、角変形矯正後幅切断のみで、開先加工は行っていない。

発生した平面曲りは加熱矯正によって管理目標値以下まで修正できることが確認できた。

各作業過程で生じた平面曲りを図-10, 11に示す。

表-18 板継ぎ溶接後の角変形量

(単位: mm)

測点	部材	溶接後の角変形量		歪矯正後の平坦度	
		発生量	本因基準	修正後	管理目標値
かど溶接部	L・Web	2.36/1000	10/1000 以下	0.2/500	0.3/500 以下
	R・Web	1.68/1000		0.25/500	
	B・Flg	9.2/1000		0.15/500	
一般部	L・Web	2.86/1000	10/1000 以下	0.3/500	0.5/500 以下
	R・Web	0.84/1000		0.15/500	
	B・Flg	9.8/1000		0.3/500	
	T・Flg	6.5/1000		0.3/500	

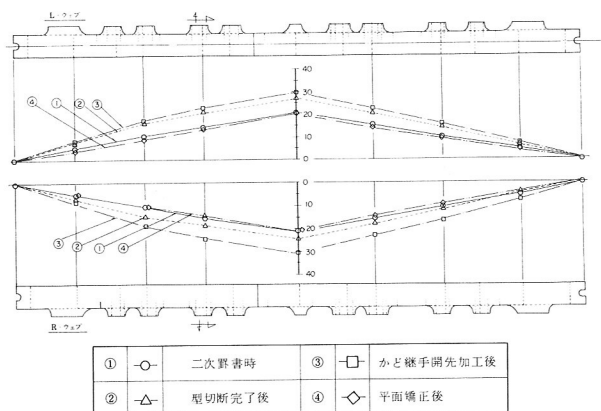


図-10 ウェブのキャンバー(平面曲り)測定結果

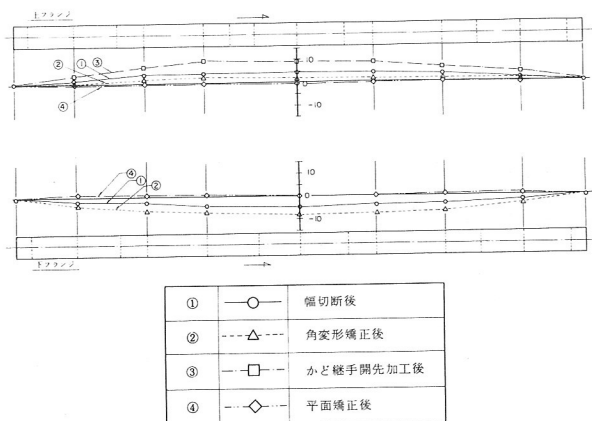


図-11 上下フランジの平面曲り測定結果

3) ウェブ形状の一体化

部材のねじれを防止するため、両側のウェブは平面曲り矯正後重ね合せて互いの形状を確認し、2枚重ねのまま孔明を行うことによってウェブ形状の一体化を確保した。

4) ドラグラインおよびブライマー除去と研削面の品質

かど継手部のドラグラインおよびブライマーを自走式ベルト研削機で除去した。この研削面の品質(平坦度, 直角度)は、かど継手のルートギャップに影響を与えるので研削後、平坦度, 直角度を測定したが、いずれの部材においても研削面の品質は管理目標値(平坦度は $0.3\text{mm}/500\text{mm}$ 以下, 直角度は $\pm 0.3\text{mm}$ 以下)以下で研削できていることがわかった。

5) ダイヤフラムの形状および加工

ダイヤフラムの形状・寸法を図-12に示す。

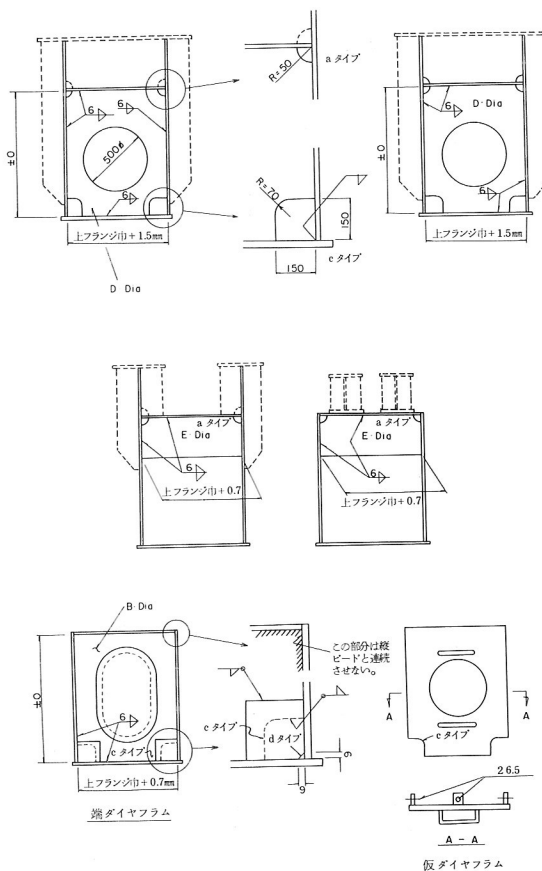


図-12 ダイヤフラムの形状、寸法

ダイヤフラムの幅寸法は上フランジのドラグライン除去後、その幅を測定し、これに溶接収縮量, 上フランジの落し込み代を加えた寸法とした。ただし、E・Dia と B・Dia については上フランジ落し込み後溶接するので溶接収縮量は見込んでいない。ダイヤフラムの加工は幅寸法精度確保のため、D・Dia, B・Dia, 仮ダイヤについては4辺機械加工, E・Dia は3辺機械加工とした。

2-3-4 組立

各部材の材片加工後、レベル調整した組立て架台上に下フランジをセットし、ダイヤフラムをフランジに直角に取り付けた。なお、この段階ではE・Diaは取り付けしていない。

次に両側のウェブを建て込み、仮付・シーリング溶接を行い、シーリング溶接後内面すみ肉溶接継手への異物混入を防止するため、継手全長にテープ養生を行った。

仮付後のルートギャップは全て0.5mm以下であり、しかも、そのほとんどは0.3mm以下で、材片加工精度、組立方法が妥当であることを確認できた。

ウェブの建て込み完了後、E・Diaをはめ込んだ。

2-3-5 ダイヤフラムの溶接と溶接收縮量

組立後、D・Diaの3辺溶接を行った。ただし、端ダイヤおよびE・Diaはボックス形成後に溶接を行った。

ダイヤフラムの溶接後、幅方向の溶接收縮量(ウェブ間隔)を測定した結果、その値は平均0.75mmであり、想定した値とほぼ一致している。

ボックス形成後のダイヤフラム溶接は狭陰部での溶接作業となるので図-13に示すように部材の両端に送風機を設置してボックス内の換気に注意を払って施工したがボックス内での溶接作業は2名が限度であることがわかった。



図-13 換気要領

2-3-6 組立(上フランジの落とし込み)

ダイヤフラム溶接後上フランジを落とし込み、組み立て治具で圧着しながら仮付けを行い、仮付け後直ちにシーリング溶接を行った。なお、上フランジの吊り上げには、加工面を傷つけないようナイロンスリングロープを用いた。

仮付け後のルートギャップはウェブと下フランジの継手同様全て0.5mm以下であった。

2-3-7 内面すみ肉溶接

1) 上フランジ側内面すみ肉溶接

上フランジ側の内面すみ肉溶接はダイヤフラムのスカ

ラップを大きくできないため手溶接で行った。この時も図-13に示したような換気を行って、ボックス内の作業環境を確保した。

2) 下フランジ側内面すみ肉溶接

上フランジ側内面すみ肉溶接完了後、下フランジ側内面すみ肉溶接を図-14に示すミグトレイン(MAGパルス溶接)施工した。

a) 自動溶接であるため連続して溶接ができ、しかも、均一で安定した品質が得られる。

b) 手溶接に比べ、より深い溶け込みが得られる。

c) MAG溶接であるのでSM50材では、板厚32mmまで予熱が不要である。

等の利点を有するためである。

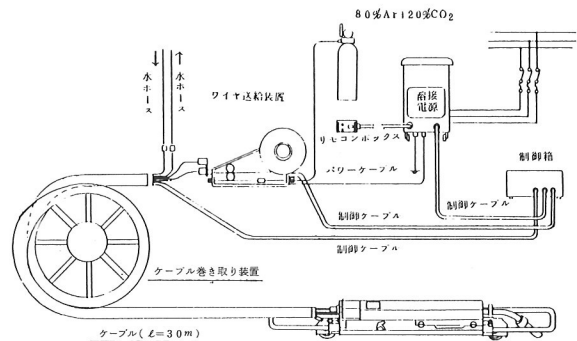


図-14 溶接装置(ミグトレイン)

2-3-8 部分溶け込みかど溶接

部分溶け込みかど溶接の順序はキャンパー量を考慮して下フランジ側を先に溶接し、次に上フランジ側の溶接を行った。

1) 下フランジ側部分溶け込みかど溶接

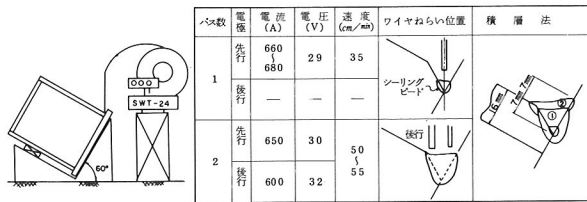
下フランジ側のかど溶接は部材をポジショニングして下向姿勢で、片側づつサブマージアーク溶接を用いて行った。

溶接要領および溶接状況を図-15、写真-7に示す。

2) 上フランジ側部分溶け込みかど溶接

上フランジ側の部分溶け込みかど溶接は正立状態で、2台のサブマージアーク溶接を用いてほぼ同時に両側の溶接を行った。

溶接要領を図-16に示す。



注) 極間距離は 50 mm とする。

図-15 部分溶け込みかど溶接要領(下フランジ側)

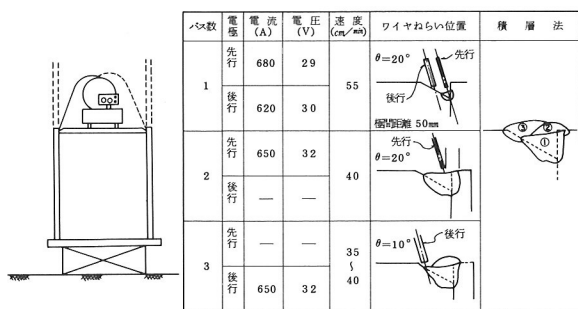


図-16 部分溶け込みかど溶接要領(上フランジ側)

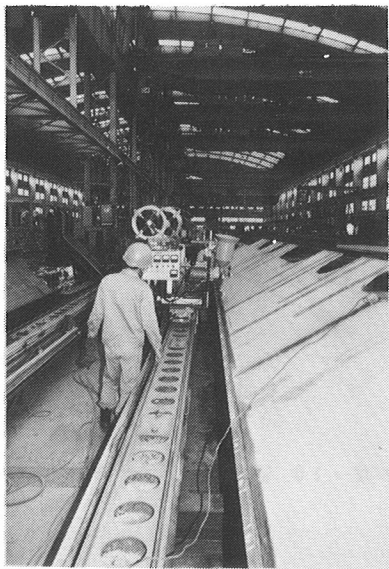


写真-7 部分溶け込みかど溶接(下フランジ側)

2-4 部材の変形

2-4-1 部材のキャンバー

各作業過程でのキャンバー測定結果を図-17に示す。

部材のキャンバーは全溶接完了後、部材の中央で、 -6.15 mm となった。特にタワミが著しかったのは、 $\square$ 組立後(仮付・シーリング溶接完了後)と内面すみ肉溶接終了後(ダイヤ溶接も完了)の間で 2.2 mm 降下し、かど溶接後と鉄道桁受台溶接完了後の間で $2.8.5\text{ mm}$ の降下が

認められた。これは、上フランジ側に溶接継手が多く集中していることから容易に理解できる。

そこで、実橋の製作では次の対策をほどこして施工することにした。

a) キャンバーの上げ越し量を 40 mm とする。

b) 内面すみ肉溶接において、下フランジ側を先に溶接する。

c) ガセット部、鉄道桁受台部には、あらかじめ逆歪を与えておき、製作途中で上フランジ側への入熱量を最小限に押える。

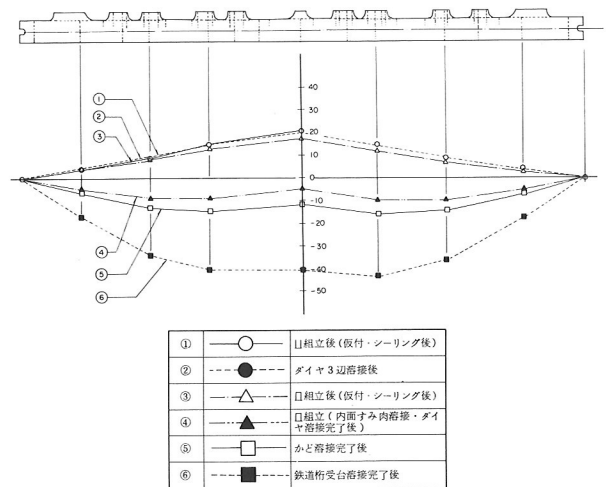


図-17 部材のキャンバー(縦曲り)測定結果

2-4-2 部材の横曲り

横曲り測定結果を図-18に示す。

全ての溶接完了後、部材の横曲りは 1.0 mm/全長 であり、特に問題はなかった。

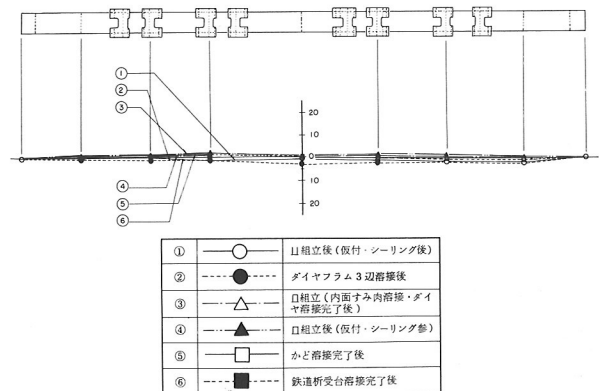


図-18 部材の横曲り測定結果

2-4-3 ガセット部の面外変形

部分溶け込みかど継手の仮付・シーリング溶接および本溶接によって生じるガセット部、鉄道桁受台部の面外変形は、図-19に示すように $6.4 \sim 8.4 \text{ mm} / 100 \text{ mm}$ であったので、逆歪量を $10 \text{ mm} / 100 \text{ mm}$ 与えて製作を行うことにした。

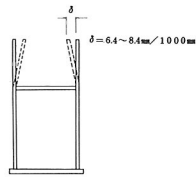


図-19 ガセット部の面外変形

2-4-4 鉄道桁受台部の変形

鉄道桁受台部のベースプレートは鉄道桁の脊が乗るため溶接後、沓接触面の平坦度の精度を確保しなければならない。本橋での許容値は、リブまたはウェブプレート上で $1 \text{ mm} / \text{全長}$ 以下である。鉄道桁受台部の溶接完了後、ベースプレートの平坦度は $1.75 \text{ mm} / \text{全長}$ であったが加熱矯正により規定値以下まで修正できた。

2-5 マクロ試験および破面試験

部材完成後、パイロットメンバーよりマクロ試験片、破面試験片を採取して部分溶け込みかど溶接部と内面すみ肉溶接部についてマクロ試験および破面試験を行った。

2-5-1 マクロ試験結果

部分溶け込みかど溶接部は溶け込みが十分あり、内面すみ肉溶接部についても脚長、のど厚は設計寸法を満足しており健全な溶接継手が得られている(写真-8, 9)。

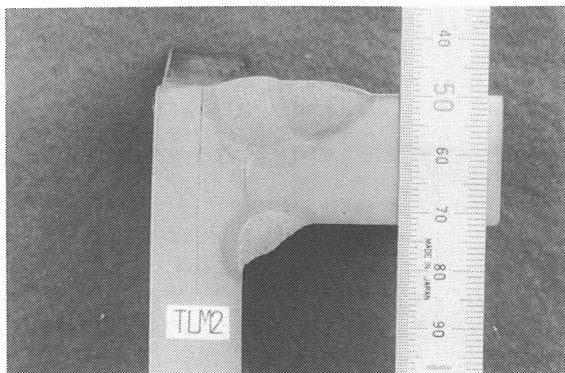


写真-8 マクロ試験結果(上フランジ側)

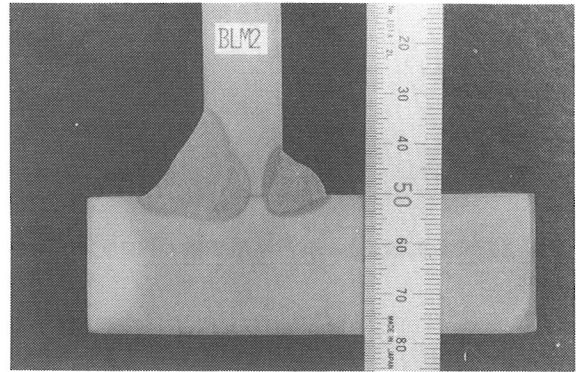


写真-9 マクロ試験結果(下フランジ側)

2-5-2 破面試験結果

1) 部分溶け込みかど溶接部の破面試験結果

試験片を破断後、破面を計測顕微鏡で観察した結果、上・下フランジ側いずれのかど溶接部にも、長径が 1.0 mm を越えるブローホールはみられなかった。また、溶け込み線もなめらかであった(写真-10, 11)。

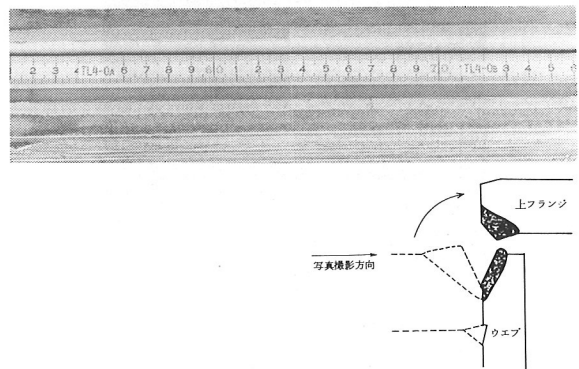


写真-10 破面写真(上フランジ側)

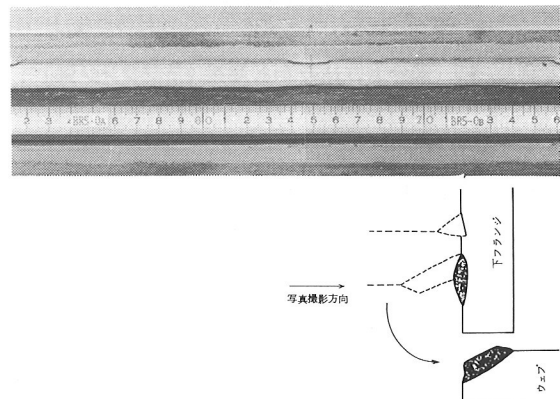


写真-11 破面写真(下フランジ側)

2) 内面すみ肉溶接部の破面試験結果

ミグトレインを用いて施工した下フランジ側内面すみ肉溶接部では、長径が1.0 mmを越えるブローホールは各試験片において0～1箇所であり、その大きさは1.0 mm強のものであった(写真-12)。

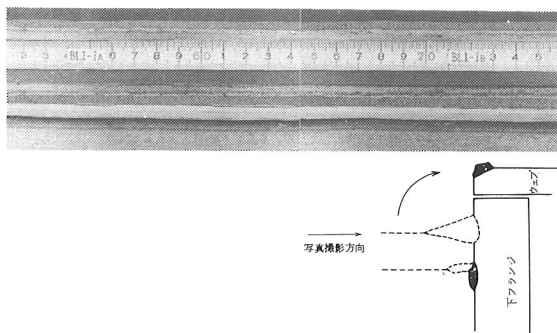


写真-12 破面写真(ミグトレイン溶接部)

一方、上フランジ側内面すみ肉溶接部においては微小なブローホールの発生が下フランジ側より多くみられた。この原因としては、ダイヤフラム3辺溶接の際生じた微小なゴミ、スラグ、スパッタ等が残留し、部材回転時にこの不純物が溶接部付近に付着して溶接前の清掃でも十分除去しきれなかったためであると推定される。そこで、実施工に際しては以下の対策を行ってブローホールの発生防止を図ることとした。

- a) 上フランジ落し込み後、ルート部にゴミ等の不純物が入りこまないよう溶接部のテープ養生を行う。
- b) ダイヤフラム3辺溶接後の清掃を十分に行う。
- c) 内面すみ肉溶接前の清掃をより一層十分に行う。

2-6 まとめ

床トラス下弦材パイロットメンバーの製作試験を行い種々の計測・試験を行った結果、本製作試験で行った製作要領および管理要領はほぼ妥当であると思われる。またキャンバー量や上フランジ側内面すみ肉溶接施工法についても、上述したような対策を行うことによって十分対応できるものと考えている。

3. あとがき

主構および床トラス下弦材を対象としたパイロットメンバーの製作を通じて、実橋を製作するための作業要領は確立できたものと考えている。

今最盛期を迎えた櫃石島橋をはじめとする本四連絡橋の製作には、これらの成果を活用し、適切な品質管理のもとで、より一層製品の信頼性向上に反映して行きたい。

最後に、これらの検討を進めるにあたり、東大名誉教授 奥村敏恵先生、埼玉大学教授 田島二郎先生、大阪大学助教授 堀川浩甫先生ならびに本四公団の方々に多大の御指導をいただきましたことに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋の補剛トラス製作に関する検討報告書(S 56,57), 海洋架橋調査会・本州四国連絡橋製作検討委員会。
- 2) 旭・竹名・平野：疲労許容応力の見直し, 本四技報, Vol. 5, No.18, 1981。
- 3) 竹名・岸本・伊藤：リブ十字継手の許容応力, 本四技報, Vol. 5, No.16, 1981。
- 4) 今井・高田・尾崎・管野・一井：調質高張力鋼を用いたトラス弦材の製作・検討(第一報), 川田技報, Vol. 3, 1983。