

1. 特記色の材質はSM58
2. 特記色のボルトはφ33(M30 F10T)
3. 特記色のスカープは100R
4. 開閉角度は60°を標準とする
5. 主支柱材の上下フランジ 板の溶接裏面区間は100mmとする
6. 主支柱の径と材質の要項品質は特Aである
7. 特記色の部分を含む溶接は特A表示は開閉角度とする
8. 主支柱材は製作標準外とする
9. 印刷部材の取付位置は口孔の寸上+印以外は製作範囲外とする
10. ピンブートの板厚テンパー部(1+140-65)の仕上げ方向は横軸方向とする
11. フランク角の規定は別紙による。
12. 主支柱材の上下フランジと主支柱口下フランジの溶接部はならぬとする

— 18 —

を管理目標値として機械加工した。

上フランジは $+0.08 \sim 0.18\text{mm}$ 、また、ダイヤフラムは $-0.15 \sim -0.26\text{mm}$ の加工精度で仕上げる事ができた。

(7) 組立

a) 組立方法

中間支点部下弦材は、ピンプレート内側寸法が上フランジ幅より狭い構造であるため、組立方法として従来用いられた、いわゆる「フランジ落とし込み方式」が採用できないので「ウェブ払い込み方式」と呼ばれる方法で部材の組立てを行った(図-3参照)。この方法は、「フランジ落とし込み方式」に比べ、作業性が良好で、フランジ落とし込み時に生じやすいスリ傷等の問題も生じなかった。

写真-1に試験体の組立て状況を示す。

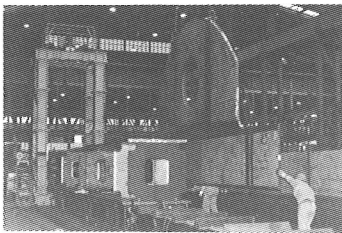


写真-1 試験体の組立

b) かど継手のルートギャップ

試験体の組立、仮付溶接後、かど継手のルートギャップを測定した結果を図-6に示す。

レ形かど継手及びすみ肉かど継手のルートギャップはいずれも最大で 0.3mm 未満であり良好であった。

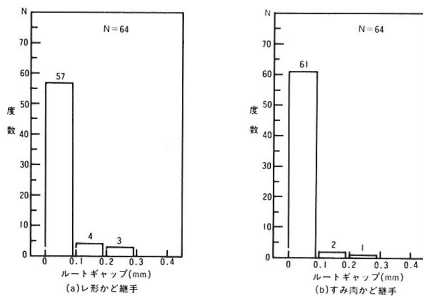


図-6 かど継手のルートギャップ

(8) かど溶接

かど溶接は図-7に示す順序で施工した。

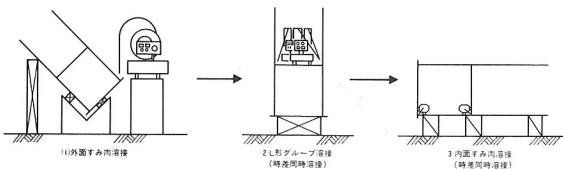


図-7 かど継手の溶接順序

外面すみ肉溶接及びレ形かど溶接はサブマージアーク溶接、内面すみ肉溶接は「ミグトレイン」と呼ばれるMAG自動溶接で行った。

サブマージアーク溶接では、電源はクレーン等とは別系統の500KVAのものとし、さらに、電流制御器を用いて溶接電流の安定を図り、ルートブローホールの発生防止、

溶込み線の均一化に努めた。一方、ミグトレインでは、パルス電源を用いてスパッタ発生を減らし、溶接機の走行安定、ワイヤねらい位置の安定、言い換えれば、溶込み線の均一化に努めた。また、試験体組立後、直ちに内面すみ肉溶接継手部のテープ養生を行い異物の混入を防ぎ、ルートブローホールの発生防止に努めた。

表-5にかど溶接条件を示し、写真-2, 3にかど溶接の状況を示す。

表-5 かど溶接の溶接条件

		溶接条件			入熱量 (KJ/cm)	積層法	実脚長 (mm)
		電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)			
外面 すみ肉溶接	1	700	31	50	26.0		12.0
	2	660	35	35	39.6		14.5
レ形 かど溶接	1 ¹⁾	L: 730 T: 600	29	50	47.0		11.0
	2	650	34	40	33.2		
	3 ¹⁾	L: 630 T: 630	32	60	49.3		
	4	610	34	48	25.9		
	5	610	34	45	27.7		
内面 すみ肉溶接	1	310	38	30	25.0		7.0
	2	320	39				11.0

注) 1) ... L: 先行電極 T: 後行電極

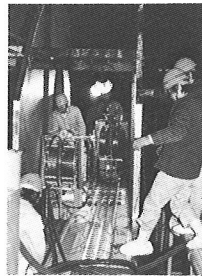


写真-2 レ形かど溶接



写真-3 内面すみ肉溶接

(9) ダイヤフラムの溶接

ダイヤフラムの溶接は、C2溶接技量試験に合格した溶接作業者が止端形状改良棒を用いて行った。溶接後、ビード止端形状を θ ゲージを用いてチェックし、棒継ぎ部等一部でグラインダー仕上の必要な箇所はあったものの、ほぼ良好な形状であった。

表-6にダイヤフラムの溶接条件等を示す。

表-6 ダイヤフラムの溶接条件

溶接方法	電ダイヤフラム		反点トダイヤフラム				
	シーティング溶接: MAG溶接 本溶接: 手溶接 MAG溶接: MGS-63B 手溶接: LBF-62A	側面内溶接: MAG溶接 全盛溶接: 手溶接 MAG溶接: MGS-63B 手溶接: LBF-62A, LM-60G	1	2	3	4	5
溶接材料	MAG溶接: MGS-63B (1.2g)	手溶接: LBF-62A (6.0g)	MAG溶接: MGS-63B (1.2g)	MAG溶接: MGS-63B (1.2g)	MAG溶接: MGS-63B (1.2g)	手溶接: LBF-62A (6.0g)	手溶接: LM-60G (4.5g)
電流 (A)	250~280	300~310	250~280	250~280	250~280	300~310	180~210
電圧 (V)	26~28	27~28	26~28	26~28	26~28	27~28	27~28
積層法							

(10) ウインドシュー補強リブ・ブロックの製作

ウインドシュー補強リブ・ブロックは、ウインドシューから1600トンの反力を受けるもので中間支点部特有の部材である。また、この部材は、狭隘な作業スペースでの溶接が避けられない構造となっている。

a) 製作順序

ウインドシュー補強リブ・ブロックの製作順序を図-8に示す。

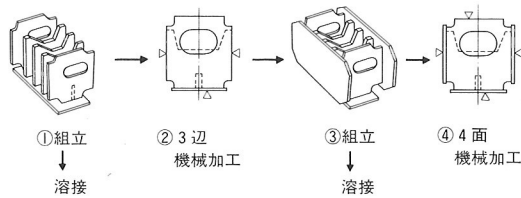


図-8 ウインドシュー補強リブ・ブロックの製作順序

b) 溶接施工

ウインドシュー補強リブ・ブロックの溶接は、狭隘部での溶接作業であるうえ、ビード形状のなめらかさが要求されている。そのため模型等を作成して溶接順序、溶接要領等を十分検討して試験体の製作を行った。溶接は、ルート部の溶込みを確保するため初層及び開先内はMAG半自動溶接で行い、仕上げはビード形状を良好にするため手溶接で行った。

溶接終了後、ビード形状をチェックし、棒継ぎ部等一部についてグラインダー仕上げを行うことで、ほぼ良好な形状が得られた。

c) 機械加工及び精度

溶接完了後、溶接歪の加熱矯正を行い、4面の機械加工を行って仕上げた。補強リブ・ブロックは、図-3に示すように試験体に組みこまれることから、機械加工に際しては、幅寸法は上フランジの幅寸法を反映して「上フランジ幅 $+0_{-0.3}$ mm」、また、高さについては「設計 ± 0.3 mm」を管理目標値とした。

補強リブ・ブロックの溶接による歪は2~6mmであったが加熱矯正、機械加工で吸収できた。また、機械加工精度は、幅寸法は $-0.1 \sim -0.14$ mm、高さは $-0.16 \sim -0.2$ mmであった。さらに、組立時には試験体と仮ボルトで接合し、すきま等の問題は生じなかった。

(II) 主横トラス仕口の製作

a) 製作順序

図-9に主横トラス仕口の製作順序を示す。

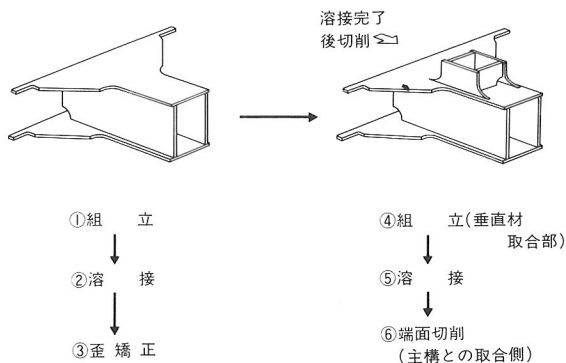


図-9 主横トラス仕口の製作順序

b) 溶接施工

主横トラス仕口は、完全溶込み溶接部が多いため、溶接による歪を極力小さくするよう、溶接順序に注意した。しかし、下フランジとウェブの溶接では、溶着量を削減する目的で部分溶け込み溶接としたが、逆に脚長19mmを確保するためには溶着量が完全溶込みより大きくなり、ウェブ板厚に対して偏心も大きいため、仕口の断面変形が大きくなってしまった。この結果を踏まえ、実橋製作に際しては、この溶接継手は完全溶込み溶接とすることにした。

表-7に仕口のかど溶接条件を示す。

表-7 仕口のかど溶接条件

	溶接方法	溶接材料	溶接条件		積層法
			電流(A)	電圧(V)	
上フランジとウェブ	MAG溶接	MGS-63B (1.2g)	260~320	26~36	
	手溶接	LBFG-62A (6.0g)	300~320	27~28	
	手溶接	LM-60G (4.5g)	190~210	27~28	
ウェブと下フランジ	〔内面〕MAG溶接	MGS-63B (1.2g)	260~280	26~28	
	手溶接	LBFG-62A (6.0g)	300~310	27~28	
	手溶接	Y-DM (4.0g, 4.8g)	26~28		
	サブマージアーク溶接	YF-15 (20x200)	600~750	29~34	

(12) 部材精度

試験体完成後の部材精度測定結果を表-8に示す。

いずれの項目もHBSの許容範囲内であった。

表-8 部材精度

(単位: mm)

	L _上 (上方全長)	L _下 (下方全長)	δ _h (キヤンバー)	δ (大曲り)	δ _c (ネジレ)
設計値	9,200	9,200	0	0	0
試験体完成後	-0.5	-1.5	-0.5	+1.5	0.5

	W 1 (ガセット内径)	W 2 (ガセット内径)	W 3	W 4	H 1	δ ₁ (Pin 影響なし)	δ ₂ (Pin 影響あり)
設計値	1,200	1,200	935	1,100	1,200	0	0
試験体完成後	-1.5	0	-1.0	+1.0	-1.5	-0.5	+1.5

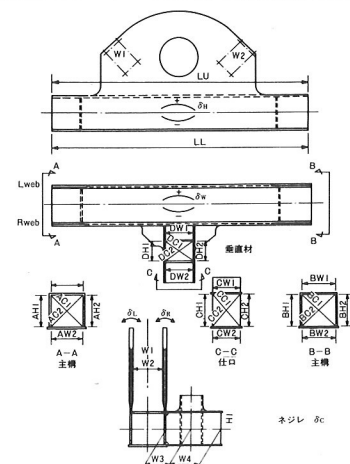
	設計値	試験体完成後	備考
--	-----	--------	----

主横 A断面			

主横 B断面			

仕 口			

垂直材			



(13) 超音波探傷試験と破面試験

a) 超音波探傷試験と破面試験

試験体のかど溶接完了後、内面すみ肉溶接部を含むかど溶接部全線にわたって自動超音波探傷試験を行い、欠陥（主にルートブローホール）の有無とそのサイズ、溶込み深さ及び溶込み線の均一性等を検査した。

破面試験は、試験体の製作完了後、所定の位置及び自動超音波探傷試験で異常のあった箇所より試験片を採取し、プレスで破断後、欠陥の有無とそのサイズ、溶込み深さ及び溶込み線の均一性を計測顕微鏡等を用いて調査した。

超音波探傷試験及び破面試験とも、小さなブローホールはいくつかあったものの、特Aの要求品質を超える欠陥は見あたらなかった。このブローホールは大きさが1mm前後のもので、溶接部の清浄度をより向上させることによって防止できるものと考えられる。また、溶込み深さ、溶込み線の均一性も良好で、全体的に満足すべき結果であった。

表-9及び図-10に破面試験結果を示し、図-11, 12に超音波探傷試験結果と破面試験結果の比較を示す。また写真-4自動超音波探傷試験の検査状況、写真-5に破面の例を示す。

表-9 破面試験結果

溶接	ブローホール、スラグ巻込					溶込み深さ	たれ込み	底面キズ
	領域I	領域II	領域III	領域IV	領域V			
外面レ形かど溶接	0	0	0	0	0	なし	なし	なし
外面すみ肉かど溶接	1	0	0	0	0	なし	なし	なし
内面すみ肉溶接	5	4	0	0	0	なし	なし	なし
合計	6	4	0	0	0	なし	なし	なし

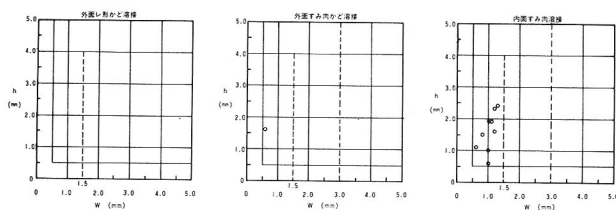
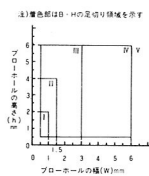


図-10 破面の実欠陥寸法

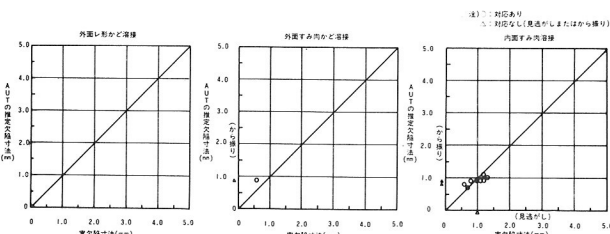


図-11 AUTの推定欠陥寸法と実欠陥寸法の関係

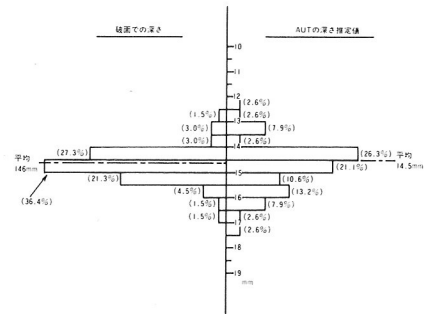


図-12 溶込み深さ測定結果（レ形かど溶接）

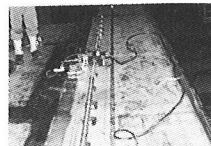


写真-4 自動超音波探傷試験

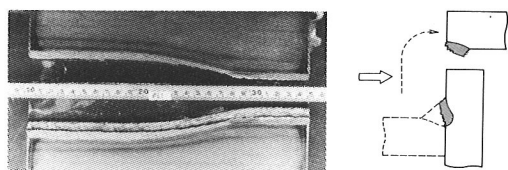


写真-5 破面試験結果（外面すみ肉溶接部）

b) 断面マクロ試験

かど溶接部及びウインドシュー補強リブ・ブロック部のマクロ試験結果を表-10, 写真-6, 7に示す。マクロ試験片は全て健全である。

表-10 断面マクロ試験結果

採取位置	試験片番号	Y試験体	判定基準
カド溶接部	L web上 中間部	GLM2	異常なし
	R web上 中間部(仕口取合)	GRM2	異常なし ※係付シーリングが完全に内溶融している事。
	L web上 端部	GLM1	異常なし
	R web上 端部	GRM1	異常なし ※われ等の有る欠陥がない事。
	L web下 中間部	FLM	異常なし
	R web下 中間部	FRM	異常なし
補強ブロック	上Flg上 中間部	WBF	異常なし ※われ等の有る欠陥がない事。
	Web上 中間部	WBW	異常なし

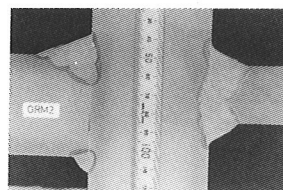


写真-6 マクロ試験

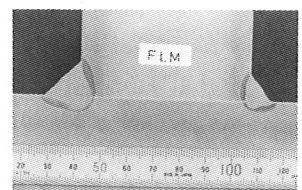


写真-7 マクロ試験

c) 継手性能試験

板継ぎ溶接部の継手性能試験結果を表-11に示す。結果は全て判定基準を満足していた。

表-11 継手性能試験結果

項目	試験片番号	K試験体	判定基準
引張試験	T-1	66.7kg/mm ²	TS=56~71kg/mm ²
	T-2	66.2kg/mm ²	
側曲げ試験	SB-1	異常なし	原則としてき裂が生じてはならない。
	SB-2	異常なし	
衝撃試験	X1~3	平均 9.3kg-m	$vE-10 \geq 4.8 \text{ kg-m}$ 初層側 t=140 t/4 X t/2 Y 3t/4 Z ガウジング側
	Y1~3	平均 7.6kg-m	
	Z1~3	平均 11.7kg-m	
マクロ試験	—	異常なし	欠陥があってはならない

(14) まとめ

南備讃瀬戸大橋中間支点部下弦材のパイロットメンバーを製作した結果は次のとおりである。

a) 極厚鋼板の板継ぎ溶接による角変形の防止および矯正については、溶接時の反転回数を多くすることや、プレス矯正を用いることで対処できることがわかった。

また、箱断面組立時の所要ルートギャップ確保のことを考えた場合、原板の平坦度管理が最も重要であることがわかった。

b) ウインドシュー補強リブ・ブロックの製作では、事前に模型等を用いて組立順序、反転回数、拘束方法及び機械切削による仕上げを検討して施工した結果、所定の品質のものが得られた。

c) 箱断面の組み立ては、ピンプレートの内側寸法が上フランジ幅よりせまいこともあって、両側のウェブを上フランジより後にセットする、いわゆる「ウェブ払い込み方式」を考案採用したことにより、落し込み傷等の問題もなく組立てることができた。

d) 横トラス仕口部の箱断面製作では、当初は、歪防止の観点より、かど継手に出来るだけ部分溶込み溶接を用いる方針で計画し、施工した。しかし板厚及び開先形状から計算される必要のど厚が大きくなり完全溶込み溶接よりかえって溶着量が大きく、歪も多く生じ、かつ、端部のスカラップ処理も難しくなることがわかり、完全溶込み溶接の方が望ましいという結果を得た。

e) 内面すみ肉溶接の施工については、ミグトレインによるガスシールドアーク溶接を採用した。この際、弦材の内面にウインドシュー補強リブ・ブロックもあることから、ミグトレインが通過できるよう種々検討し、ダイヤフラム等のスカラップ形状を160mmの空間を有するものとし、この形状の有効性を確認した。

f) 内面すみ肉溶接の品質については、所要のものが得られたが、いくつかの問題があることがわかり、溶接部の養生方法、清掃の徹底等の実施工にあたっての改良点を得た。

以上述べてきたように、本試験体の施工を通じ実施工に際しての貴重なデータが得られた。また、設計面に反映すべきものは反映させ、製作方法等で対処できるものは、その方策を決めることにより問題点の解消を計ることができ、本試験体の製作の目的、意義を十分に満たすことができた。

2. 番ノ州高架橋トラス溶接施工試験体の製作

本州から四国へ児島・坂出ルートを進むと、前章で述べた南備讃瀬戸大橋を渡り、次が番ノ州高架橋トラスである図-13に一般図示す。その後、PCや鈑桁の高架橋になり鉄道は宇多津へ、道路は坂出北インターへと分岐

する。

このトラス橋は、海上部最南端に位置する大型橋梁で一部は番ノ州陸上部の高架橋となる。橋の形式は三径間連続曲線ワーレントラスでダブルデッキ構造の道路・鉄道併用橋である。吊り橋に比べたわみ剛性の期待できる構造であり、部材断面（高さ1100×幅1200mm）も大きく、鋼種はHT80材まで使用されている。また、主構の格点で軸線を折って曲線ワーレントラスを構成し、剛性を高めるため圧縮・相反応力部材には縦リブが部材の内側に溶接されている。

当社では7Aから海上部8パネルの上部工を製作するが、製作に先立って実物大の部材を作り施工法や品質管理要領を検討した。

本州四国連絡橋の調質高張力鋼を用いた部材の製作方法については、一連の施工試験体の製作で確立してきた^{7,8)}。本橋の基本的な製作方法はその延長上に位置しているが、一部の特殊性を加味して施工法の改善を行い、検討したのでその結果を報告する。

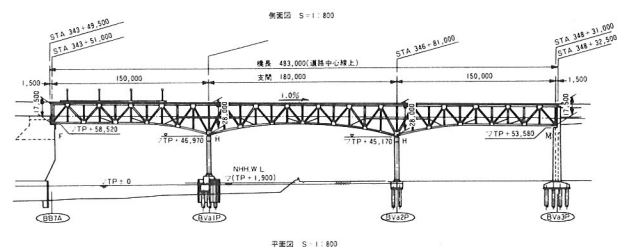


図-13 番ノ州高架橋トラス一般図

(1) 試験体形状とHT80材の使用

試験体は、図-14に示す実物大のものであり、サイドプレートのガセット部に板厚36mmのHT80材を使用している。HT80材は合金成分が多く（表-12参照）、ガス切断性、溶接性が低下するためあらかじめ予備実験で切断条件（表-13）や溶接条件を定めた。表-14にHT80材の機械的性質を示す。

表-12 HT80材の化学成分表

化 学 成 分 (%)										
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ceq
0.12	0.24	0.94	0.008	0.002	0.21	0.76	0.47	0.42	0.039	0.51

表-13 HT80(t=36mm)の切断条件

火口番号	酸素圧 (kgf/mm ²)	プロピレンガス圧 (kgf/mm ²)	切断速度 (mm/min)
ダイバーゼント NO.2	4.0	0.5	250

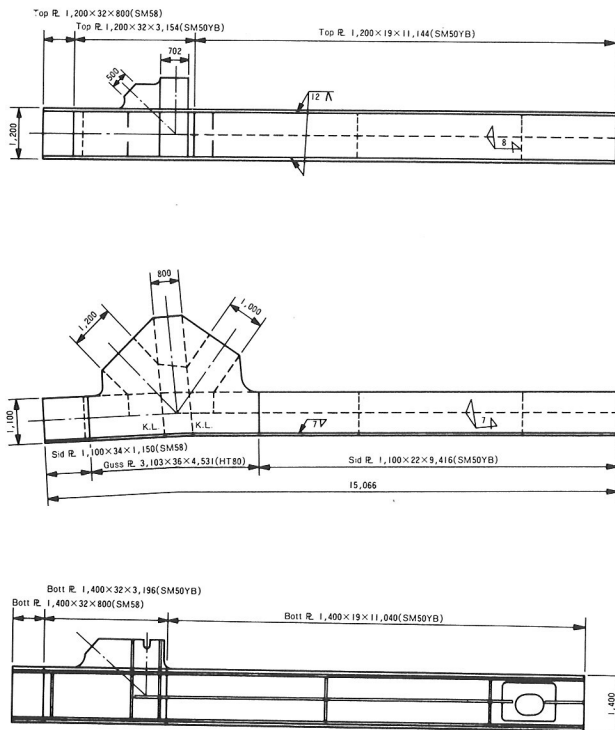


図-14 番ノ州高架橋トラス溶接施工試験体

降伏点 kgf/mm ²	引張強さ kgf/mm ²	伸び %	衝撃値 kgf-m, -40°C
83 (70≤)	87 (80~95)	24 (16≤)	21.8 (4.8≤)

()はH.B.S規格値

かど溶接材料は「本四製作基準」に従って60キロクラスのものを用了。表-15にかど溶接材料及び縦リブ溶接材料を示す。

表-15 HT80部材の角溶接と縦リブ溶接材料

溶接継手	ワイヤ	フラックス	水素量 (メーカー値)JIS法
角溶接	Y-DM	YF-15(K)	0.93ml/100g
縦リブ溶接	US-49	MF-63	2~3ml/100g

(2) 軸線変化した格点部の密着性

下弦材では、格点部で軸線が変化し、図-15のように二枚の格点ダイヤフラムの位置でそれぞれ2.8%勾配で折れている。この形状に合わせて型板を作り、下フランジの曲げ加工、サイドプレートの切断・研削を行った。

下フランジの曲げ加工は比較的容易であり問題は生じなかった。サイドプレートの切断は、NC切断された型板を用いてアイトレーサー切断し、その切断ドラグラインは自走式ベルト研削機を用いて除去した。仕上げはグラインダーで型板にすり合わせた。ガス切断面の粗さが大きいと自動研削回数が増え、折れ点部の形状が損われるため、表面粗さを50S以下とした。また、下フランジとの密着性をよくするために、切断面の直角度が±0

3mm以下となるよう厳しく管理した。

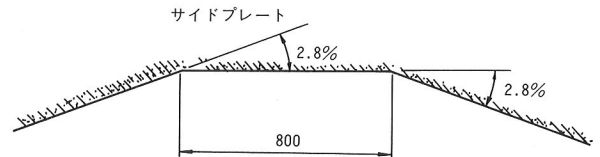


図-15 サイドプレートの軸線折れ部

(3) 組立後のルートギャップ

かど継手の仮付溶接部及び仮付溶接後のルートギャップは、全て特記仕様書の規定(ルートギャップ≤0.5mm)を満足した。図-16にかど継手のルートギャップに関するヒストグラムを示す。グラフより上フランジのルートフェイスを機械加工した60°レ形かど継手の密着性が良好であり、軸線折れのため機械加工が行えず、ガス切断後ベルト研削したサイドプレートのすみ肉継手では最大0.4mmのルートギャップを生じ、部材の加工にも多大の労力を要した。

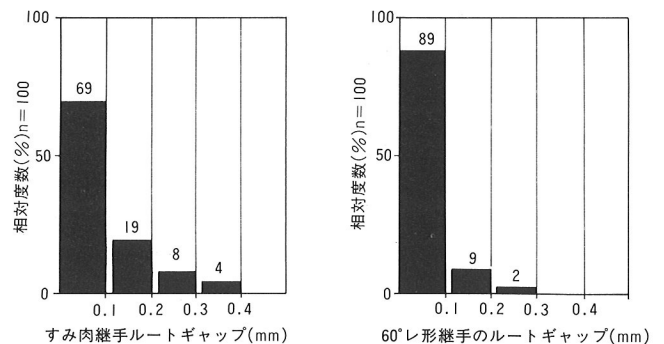


図-16 かど継手の仮付溶接後のルートギャップ

(4) 軸線変化部での溶接性

格点部の軸線折れが、2.8%×2=5.6%である。したがって、図-17のように、60°レ形かど継手では最大5.6%、次が2.6%の登り勾配、その他は水平になるよう部材を置き溶接した。

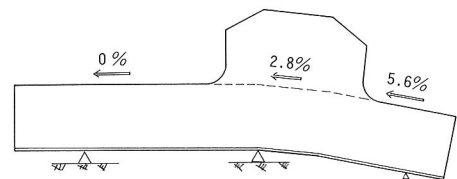


図-17 レ型角溶接の勾配

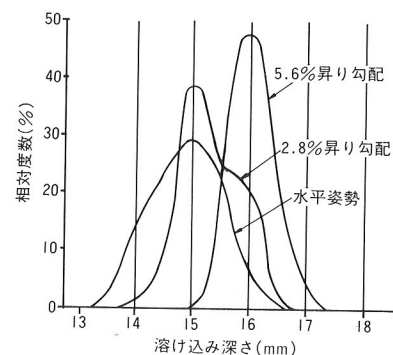


図-18 60°レ型部分溶込角継手の破面試験による溶込深さ調査結果(開先深さ12mm)

このため図-18に示すように、5.6%登り勾配では、水平姿勢に比べ約1mm程溶込が深くなった。

すみ肉溶接では、部材を45°ポジショニングして溶接したため最大4%の登り勾配となった。一方、サイドプレートの板厚変化を外側に逃しているためこの部分で溶接線が14mm/70mmの勾配で急変している。また、軸線折れのため溶接線が200mm漸変する。このような溶接線の変化部でも均一な溶込深さと欠陥のない溶接継手を得るため、特殊な溶接線倣い装置を導入した。本機は、上下、左右±200mmのスライドユニットを搭載し、電極と同位置に配位したセンサーで時間差のない倣いを可能にしたものである。なお、4%登り勾配ではや、凸形ビードを呈したが、溶込深さは水平に比べて大差なかった。

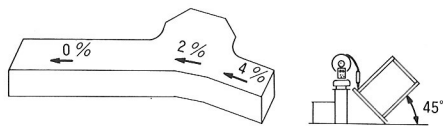


図-19 すみ肉継手の溶接姿勢

(5) かど溶接の健全性

すみ肉溶接では超音波探傷試験及び破面試験により高い品質が確認され、ルート部ブローホールや他の欠陥は認められなかった。また、登り勾配や軸線変化部でも溶込の急変や外観不良は認められず良好であった。

部分溶込かど溶接では、一部にブローホールが発生した。破面試験などの調査結果より、鋼板の一部にプライマーがアンカーパターン内に残存していることやサブマージアーク溶接機のワイヤーの送給系の不調が原因であった。

5.6%登り勾配の溶接では溶込の異状や外観不良は発生せず、ビード形状がや、凸形となったものの品質上は全く問題にならなかった。

(6) 縦リブ溶接の健全性

HT80材に取り付けられた縦リブは、水平すみ肉サブマージアーク溶接(4.0φ)溶接した。自動超音波探傷試験や破面試験の結果、溶込の急変やブローホールの発生は認められず、かど継手に匹敵する品質が得られた。ビード外観はや、凸気味であったが良好であった。

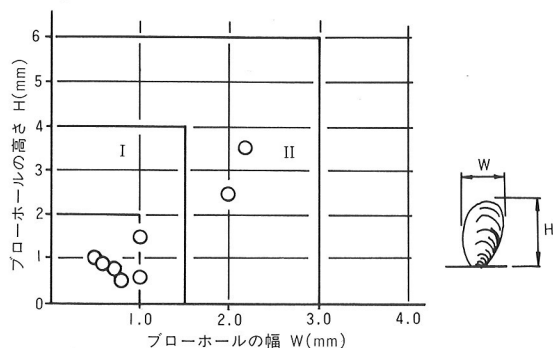


図-20 60°レ型角溶接に発生したブローホール

(7) まとめ

施工試験体の製作結果を総合すると、本橋の特徴であるHT80材の使用・格点部の軸線変化や縦リブ溶接に対する施工性が「調質高張力鋼を用いた部材の製作基準」⁹⁾を満足する十分な品質の得られることが確認できた。実工事では、製作の基本に忠実に、細心の注意を払って施工し、また、軸線変化部のフランジとウェブの密着性をいかに能率よく達成するかが重要である。

3. あとがき

南備讃瀬戸大橋や番ノ州高架橋トラスの実験桁の製作により特殊な構造においても調質高張力鋼を用いた部材の製作基準を満足する品質が確認できた。

一部の反省点は、施工法の改善や設計図の変更により実工事に十分反映させている。

おわりに、実験桁の計画から施工、結果の検討まで長期に渡って適切な御指導と貴重な御助言を賜りました本四連絡橋製作検討委員会(奥村敏恵委員長)の先生方や本州四国連絡橋公団の関係者の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 村田正信：本州四国連絡橋事業の概要と推移，橋梁と基礎，Vol.18，No.8，1984.
- 2) 竹名・岸本・伊藤：リブ十字継手の疲労許容応力，本四技報，No.16，1981.
- 3) 旭・竹名・平野：疲労許容応力の見直し，本四技報，No.18，1981.
- 4) 本州四国連絡橋製作検討委員会編：溶接構造部材における溶接欠陥と疲労き裂の発生の一例(写真集)，1983.
- 5) 土木学会編：疲れに関する検討，本州四国連絡橋上部構造に関する調査研究報告書，別冊1，1981，別冊2，1980.
- 6) 堀川浩甫：本四連絡橋の溶接は何故むずかしいか，東骨技報，No.19，1985.
- 7) 今井・高田・尾崎・菅野・一井：調質高張力鋼を用いたトラス部材の製作・検討(第一報)，川田技報，Vol.3，1983.
- 8) 今井・高田・尾崎・菅野・多田：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，川田技報，Vol.4，1985.
- 9) 本州四国連絡橋公団第二建設局編：番ノ州高架橋トラス(その1)特記仕様書，1983.