

HT80材を用いたトラス主構弦材の施工試験

伊藤 裕彦¹⁾ 上野 祥昭²⁾ 千歳 耕一³⁾

中央径間が1500mを超える長径間吊橋の場合、補剛トラスの主構弦材にはHT80材が使用されることが考えられる。そこで、HT80材を用いたトラス主構弦材の製作方法について、今までの本州四国連絡橋の吊橋の調質高張力鋼を用いた主構弦材の製作方法を基準に小型試験、中型試験、および実物大試験を行い差異を確認し、製作方法の検討を行った。

はじめに

HT80材は、従来のSM58Q材等の調質高張力鋼と比較して、成分面でNi、Cr、Mo等の添加元素が多く含まれ、炭素当量が高いという特徴がある。また弦材のかど継手には、溶接材料として軟質の60kg級の溶接材料を使う場合と、80kg級の溶接材料を使う場合とがある。80kg級の溶接材料を使う場合には、フラックスが焼結タイプとなるために従来使用している溶融タイプのフラックスとの溶込み量および作業性の違いがある。従って今回は80kg級の溶接材料を用いて確認を行った。

また従来の調質高張力鋼を用いた主構弦材の製作方法と比較して、どこに差異があるのか、どんな点に問題があるのか、あるいはそのままの延長上で製作を行って問題が無いかどうかを調査するために各種の実験を行った。

この報告書はこれらの一連の実験結果をまとめたものである。

1. 実験概要

まず製作に関する基本的な条件である溶接、切断、矯正および曲げ加工の性状を調査するために、各種小型試験を行った。

つぎに小型試験では分からない実施工における問題点を抽出する目的で、箱型断面を有する長さ4mの中型試験体を製作した。

小型試験、中型試験で調査した事項、新たに分かった問題点の対処方法などの最終確認のために、長さ28mの実物大トラス弦材を製作した。

2. 試験用供試材料

(1) 鋼材

本施工試験に使用したHT80材の諸性質を表-2.1に示す。小型試験と中型試験は同一の鋼材で行った。

(2) 溶接材料

施工試験に用いた各溶接部の溶接材料を表-2.2に示す。

表-2.1 供試鋼材の諸性質（ミルシートによる）

	引張試験			曲げ試験	衝撃試験 -40℃ (kgf・m)								
	降伏点又は耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)										
小型・中型試験体	83	88	22	良	21.7								
実物大試験体	83	88	23	良	25.8								
化学成分					炭素 当量 Ceq								
C	Si	Mn	P	S		Cu	Ni	Cr	Mo	V	N	B	
	×100		×1000		×100		×100		×10000		×1000		
小型・中型試験体	13	28	79	7	4	25	72	43	46	4	48	11	49
実物大試験体	12	21	84	5	2	—	73	46	45	4	39	10	49

ミルメーカー：川崎製鉄

表-2.2 溶接材料

溶接箇所	溶接方法	適用	芯線		フラックス		メーカー	シールドガス
			銘柄	径(φ)	銘柄	粒度		
突合せ 溶接	MAG	仮付溶接	YM-80C	1.2	—	—	日溶工	CO ₂
	S-SAW	本溶接	US-80BN	4.0	PFH-80AK	10×48	神戸製鋼	—
中間ダイヤ フラム	MAG	仮付溶接	YM-80A	0.9	—	—	日溶工	Ar+CO ₂
	SMAW	本溶接 1層目	L-60	5.0	—	—	日溶工	—
		本溶接 2、3層目	LBFB-62A	5.0 6.0	—	—	神戸製鋼	—
端ダイヤ フラム	MAG	仮付溶接	YM-80A	0.9	—	—	日溶工	Ar+CO ₂
	SMAW	本溶接	LBFB-62A	5.0 6.0	—	—	神戸製鋼	—
すみ肉 溶接	MAG	仮付溶接	YM-80A	0.9	—	—	日溶工	Ar+CO ₂
	S-SAW	本溶接	US-80BN	4.0	PFH-80AK	10×48	神戸製鋼	—
かど溶接	MAG	仮付溶接	YM-80A	0.9	—	—	日溶工	Ar+CO ₂
	T-SAW	本溶接	US-80BN	先4.0 後4.8	PFH-80AK	10×48	神戸製鋼	—
補修溶接	SMAW	—	LB-80UL	4.0	—	—	神戸製鋼	—

1) 大阪工場 製造部生産技術課係長 2) 大阪橋梁設計部設計一課 3) 大阪工場 技術部長

3. 小型試験

(1) 突合せ溶接

1) 目的

HT80材の突合せ溶接を行う場合の溶接条件を確定するための試験を行った。また、フラックスは焼結タイプを使用するため、その作業性も併せて確認をした。

2) 試験体形状

試験体形状を図-3.1に、開先形状を図-3.2に示す。

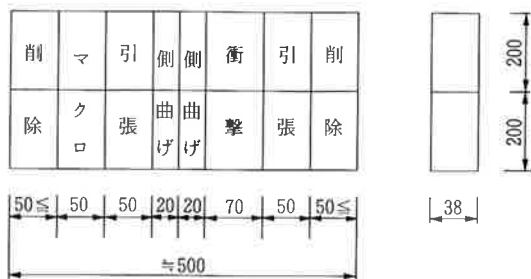


図-3.1 試験体形状および試験片採取位置

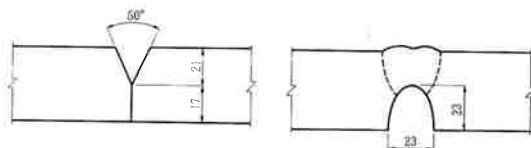


図-3.2 開先形状

3) 試験結果

突合せ溶接は入熱量の制限 (50kJ/cm) があるため、条件設定の行い易いシングルサブマージーク溶接で行った。溶接条件を表-3.1に示す。溶接部に対する放射線透過試験の結果は無欠陥1級であり、機械試験の結果もすべて満足できるものであった。

フラックスについては、従来使用している溶融タイプと比較してスラグの剥離性が良いことを確認した。

また、溶着金属から熱影響部にかけて、ガウジングの影響による侵炭層の調査を行った結果、ほとんど変化は見られず健全であることを確認した。

表-3.1 突合せ溶接条件表

表裏	層	パス	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (J/cm)
表	1	1	600	30	30	36,000
	2	1	600	30	30	36,000
	3	1	610	30	40	27,500
	4	1	500	30	40	22,500
裏	4	2	550	30	40	24,800
	1	1	600	30	30	36,000
	2	1	660	34	32	42,100
	3	1	660	33	32	40,800
	4	1	660	33	32	40,800
	5	1	600	26	35	26,700
	5	2	600	26	35	26,700

(2) 部分溶込みかど溶接

1) 目的

HT80材の最大入熱量の基準を満足しつつ、部分溶込みかど溶接の要求品質を確保できる溶接条件を選定した。

部分溶込みかど溶接の要求品質とは、①溶込み底部にブローホールなどの溶接欠陥を生じないこと、②仮付け溶接を再溶融し溶込み底部の形状が滑らかであること、である。

また予期せぬトラブルの発生による溶接の中断や、欠陥の発生による補修溶接を想定し、溶込み線が不連続にならないような補修方法の確認も併せて行った。

2) 試験体形状

試験体は、一般部とガセット部を同一の溶接条件で試験を行えるように、図-3.3に示すような一個の試験体に一般部とガセット部が含まれる形状とした。

3) 溶接条件

表-3.2に示す溶接条件で試験を行った。

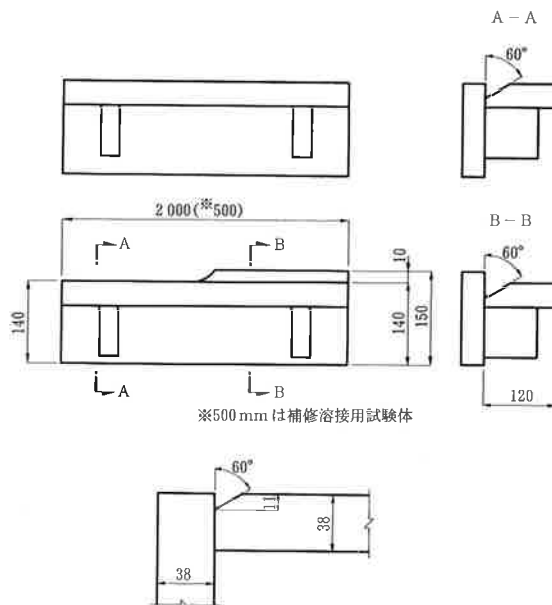
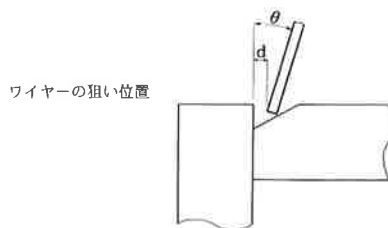


図-3.3 試験体形状

表-3.2 部分溶込みかど溶接条件

層	パス	ワイヤー径 (φ)	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (J/cm)	θ (°)	d (mm)	極間距離 (mm)
1	先行	4.0	730	30	55	49,600	17	0.0	38
	後行	4.8	620	38					
2	1	—	4.8	650	35	39,000	10	—	—
	2	—	4.8	650	38	42	35,300	10	—



4) 補修溶接

次の2つのケースを想定し、溶込み線に不連続が生じないように補修することを前提として行った。

① 初層溶接が中断した場合

中断後そのビードを整形し、中断以前の箇所へ少し戻ってサブマージアーク溶接を再開する。

② 非破壊検査により補修の必要のある欠陥が発見された場合

ガウジングによりルート部が見えるまではつり取り、手溶接により補修する。

試験体は、部分溶込みかど溶接と同様の形状で長さだけを変えて行い、溶接は表-3.2に示す条件で行った。

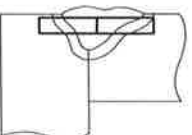
5) 試験結果

部分溶込みかど溶接は、タンデムサブマージアーク溶接で入熱量を配慮しながら溶込み量が確保できる溶接条件を見いだした。その結果溶込み量は3mm程度確保でき、溶込み線も一定の品質が得られた。

補修溶接についてはSM58Q材と同様の方法で行った。マクロ試験の結果、補修溶接を行った後も溶込み線は滑らかに移行していることを確認した。

部分溶込みかど溶接の衝撃試験結果を表-3.3に示す。また、マクロ試験、破面試験結果をそれぞれ写真-3.1~写真-3.4に示す。

表-3.3 部分溶込みかど溶接部の衝撃試験結果

採取位置	吸収エネルギー (kgf・m) (-40℃, ≧4.8)			
	①	②	③	平均
	5.9	5.1	5.5	5.5

(3) 下向きすみ肉溶接

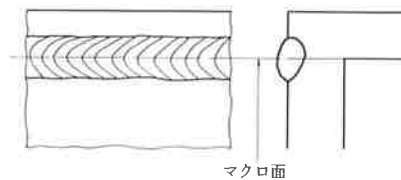
1) 目的

本実験では、80kg級の溶接材料を使用してトラス弦材の下向きすみ肉溶接施工における溶接条件

の範囲を求めた。

2) 試験体形状

試験体形状を図-3.4に示す。



マクロ面



写真-3.1 マクロ試験 (一般部)



写真-3.2 マクロ試験片
初層溶接が中断した場合の補修溶接

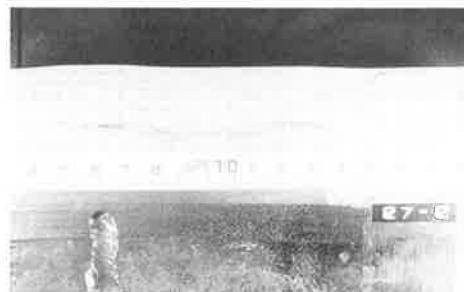


写真-3.3 マクロ試験片
溶接後欠陥が発見された場合の補修溶接



写真-3.4 破面試験結果 部分溶込みかど溶接 (一般部)

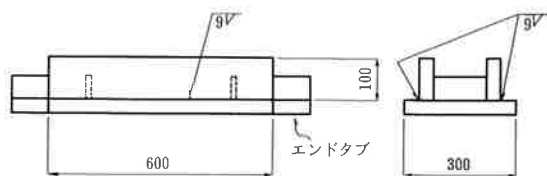


図-3.4 下向きすみ肉溶接試験体形状

3) 試験結果

すみ肉溶接は溶接条件範囲の確認試験として、12通りの溶接条件で行った結果、脚長9mmはすべて確保されていたが、溶込み深さを2mm程度確保できる条件としては、表-3.4の試験結果の中の試験体No.4-1~6-2の条件で行うのが望ましいと考えられる。

マクロ試験、破面試験結果の一例をそれぞれの写真-3.5~写真-3.6に示す。

表-3.4 下向きすみ肉溶接結果一覧表

試験体 No.	溶接条件			入熱量 (J/cm)	脚長 (mm)	のど厚 (mm)	溶込み深さ (mm)	溶込み線
	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)					
1-1	600	32	30	38,400	11.0×10.5	7.2	1.0~2.0	○
1-2	600	34	30	40,800	10.5×12.0	7.6	2.0~3.0	○
2-1	600	32	35	32,900	11.0×10.0	7.2	1.5~2.5	○
2-2	600	34	35	35,000	11.0×12.0	7.1	1.5~2.5	○
3-1	650	32	30	41,600	13.0×12.0	8.1	1.0~2.0	○
3-2	650	34	30	44,200	11.5×10.5	7.9	1.0~2.0	○
4-1	650	32	35	35,700	11.0×11.0	7.2	2.0~3.0	○
4-2	650	34	35	37,900	11.5×11.0	7.5	2.0~3.0	○
5-1	700	32	30	44,800	13.5×11.5	8.2	2.5~3.0	○
5-2	700	34	30	47,600	13.0×12.0	8.2	2.0~3.0	○
6-1	700	32	35	38,400	12.5×11.5	8.0	2.5~3.5	○
6-2	700	34	35	40,800	12.0×10.0	8.0	2.5~3.5	○

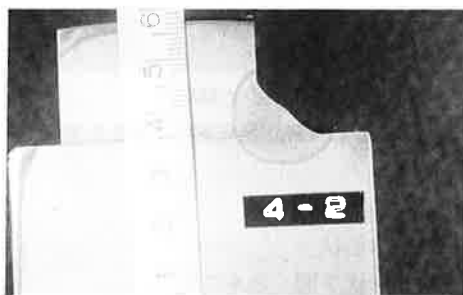


写真-3.5 下向きすみ肉溶接マクロ試験片の一例

(4) ダイアフラムのすみ肉溶接

1) 目的

ダイアフラムの溶接は疲労を考慮して止端形状を滑らかにする必要がある。そのため止端形状改良棒を使用し、止端形状の確認を行った。

2) 試験体形状

① 中間ダイアフラム試験体

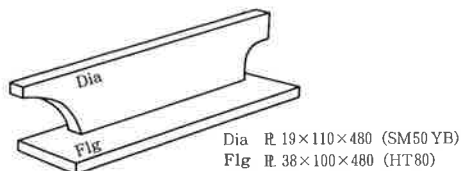
図-3.5に示す試験体を作成して、マクロ試験およびρ、θ、dの測定を行った。

② 端ダイアフラムコーナー部試験体

図-3.6に示す試験体を作成し、マクロ試験およびρ、θ、dの測定を行った。

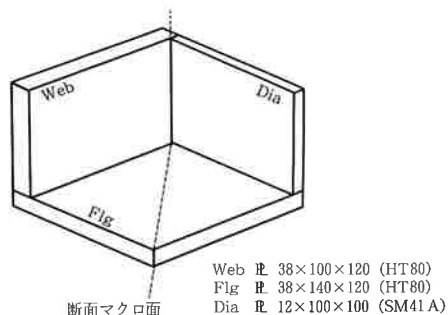
3) 溶接条件

中間ダイアフラムのすみ肉溶接は脚長9mmの多層盛り溶接、端ダイアフラムは脚長7mmの1層溶接を行った。溶接条件を表-3.5に示す。



スカーラップの半径は25R、100Rとする。

図-3.5 中間ダイアフラム試験体



断面マクロ面

図-3.6 端ダイアフラムコーナー部試験体

表-3.5 ダイアフラム溶接条件

適用	溶接方法	溶接条件		
		電流 A	電圧 V	Ar + CO ₂
仮付溶接	MAG	180	28	20 ℓ/min
本溶接	SMAW	230	-	-

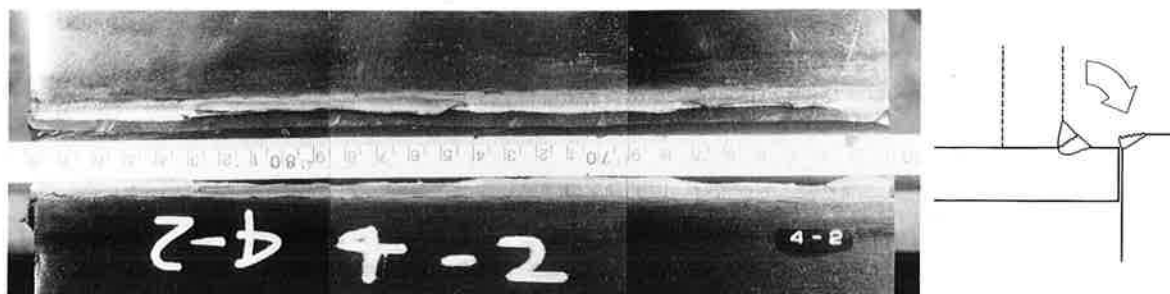


写真-3.6 下向きすみ肉溶接破面試験結果の一例

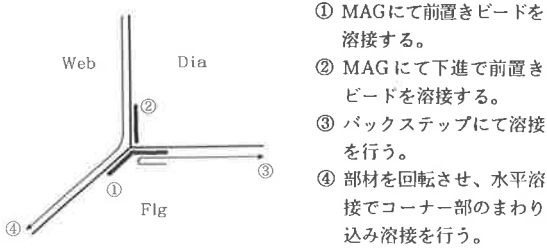
4) 溶接施工法

a) 中間ダイヤフラム

施工はまわし溶接部の溶込み不良を避けるため、1層目は低水素系溶接棒を使用し、溶込み量の確保を行った。2層目、3層目は、改良棒を用い止端形状を確保した。各層ともまわし溶接部より2名の作業員で同時施工で溶接を行った。

b) 端ダイヤフラムコーナー部

溶接順序を図-3.7に示す。



- ① MAGにて前置きビードを溶接する。
- ② MAGにて下進で前置きビードを溶接する。
- ③ バックステップにて溶接を行う。
- ④ 部材を回転させ、水平溶接でコーナー部のまわり込み溶接を行う。

図-3.7 端ダイヤフラム溶接順序

5) ρ 、 θ 、 d の測定

シリコンゴム系歯科用印象材により型取りを行い、20倍の拡大投影機にて ρ 、 θ 、 d の測定を行った。中間ダイヤフラムはコーナー部を含む16箇所、端ダイヤフラムは4箇所より採取した。測定方法を図-3.8に示す。

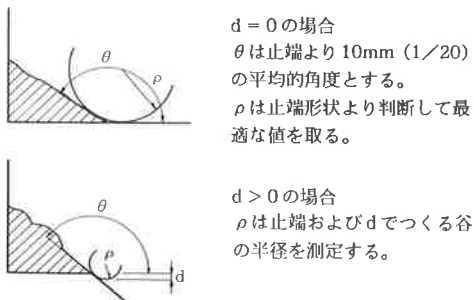


図-3.8 ρ 、 θ 、 d の測定方法

6) 試験結果

ダイヤフラムのすみ肉溶接についてはSM58Q材で行った溶接条件、施工方法と同じであるので確認を目的とした。脚長は中間ダイヤフラムが9mm、端ダイヤフラムが7mmという設計値に対し従来の溶接条件でサイズ、溶込み量ともに確保されることを確認した。

止端形状については、補修を要するアンダーカットも無く良好なビードが得られた。

(5) 最高硬さ試験

1) 目的

溶接熱影響部の最高硬さ試験で仮付け予熱温度(100℃)が適正であることを確認した。

2) 試験方法

JIS Z 3101により試験荷重10kgfで最高硬さ試験を行った。溶接方法は被覆アーク溶接とし、溶

接条件は下記のとおりとした。

溶接電流：170 ± 10A

溶接速度：150 ± 10mm/min

溶接開始直前の試験体の温度は室温(21℃)、50℃、75℃、100℃、120℃の5段階とした。

3) 試験結果

最高硬さ試験を室温から予熱温度120℃で行った結果、375~387Hvの値を得た。予熱温度による最高硬さの変化はほとんど見られず、HBS G 3102(鋼材規格)に示される $Ceq \geq 0.53$ のときの規定である420Hvを十分に満足した結果となった。

それぞれの予熱温度による最高硬さのグラフを図-3.9に示す。

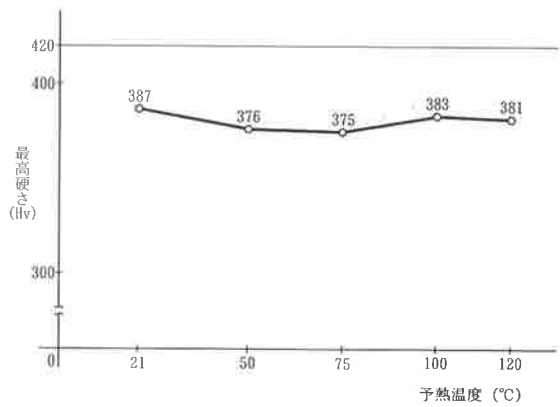


図-3.9 最高硬さ試験結果

(6) Yスリット溶接割れ試験

1) 目的

被覆アーク溶接および仮付け、シーリング溶接に使用するMAG溶接の割れ停止予熱温度の確認を行った。

2) 試験方法

試験はJIS Z 3158に従って行い、各割れ率の算出を行った。試験温度は室温、50℃、75℃、100℃、120℃の5段階とし、被覆アーク溶接とMAG溶接でそれぞれ各1体ずつ行った。

3) 試験結果

Yスリット溶接割れ試験は仮付け、シーリング溶接に使用するMAG溶接と補修溶接に使用する被覆アーク溶接のどちらも室温から予熱温度120℃の間で割れは認められず良好な結果となった。

(7) ガス切断試験

1) 目的

ガス切断によって生じる鋼材表面硬さの変化、切断面の品質および作業性を確認した。品質の確認としては、切断面の曲げ試験を行うと共に、切断条件の確認として日本溶接協会規格 WES 2801に

よる切断面品質基準モデルと比較を行った。

また、硬さ試験を実施し、切断面近傍の硬度を調査した。

2) 試験方法

① 切断条件

切断は最適と思われる条件に、速度を±5cm/min変化させた3条件で行った。

切断条件を表-3.6に示す。

② 試験体形状

③ 試験方法

切断された切断面全面をWES 2801による標準見本と比較した。

また、硬さ試験および曲げ試験を行った。硬さは図-3.11に示すA、B、Cの3ラインにおいて測定した。測定ピッチは0.5mmとした。曲げ試験は、JIS Z 2248に従って行い、曲げ角度は180°とした。

表-3.6 切断試験条件表

試験体No	火口	加熱ガス		酸素圧力 (kgf/mm ²)	火口と母材との距離 (mm)	切断速度 (cm/min)
		種類	流量 (ℓ/min)			
1	No2 P-3500	プロピレンガス	6.8	2.8	10	25
2	"	"	"	"	"	20
3	"	"	"	"	"	15

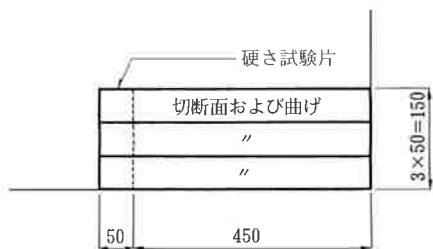


図-3.10 試験体形状

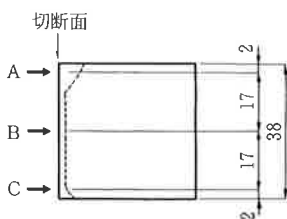


図-3.11 硬さ試験片形状

3) 試験結果

今回3種類の切断速度を変えた条件で行った結果、すべてWESの規格による切断面の品質は問題無く、切断粗さは50Sを満足するものであった。また曲げ試験、硬さ試験もこの条件範囲では問題無く、目標としている20cm/minで十分な品質が得

られることを確認した。それぞれの最高硬さを表-3.7に示す。

表-3.7 最高硬さ一覧表

試験体No	最高硬さ
1	365.5
2	366.9
3	344.5

試験荷重：10kgf

(8) 加熱矯正試験

1) 目的

本四公団の製作基準では、調質高張力鋼の最高加熱温度はHT80等については750℃以下であり、かつ冷却方法は空冷となっている。本試験もこの範囲内で行い、加熱方法、素材の機械的性質に及ぼす影響、矯正効果、温度管理等について検討を行った。

2) 試験方法

① 最高加熱温度管理条件

最高加熱温度は本四公団の製作基準による750℃で行った。温度測定は図-3.12に示すように、鋼板表面下2mmの箇所にCA熱電対を取り付け連続加熱冷却曲線を求めた。最高温度の制御は、自動走行台車に取り付けたバーナーの移動速度により制御し、他の条件(ガス流量、火口の高さ等)は一定とした。加熱条件を表-3.8に示す。

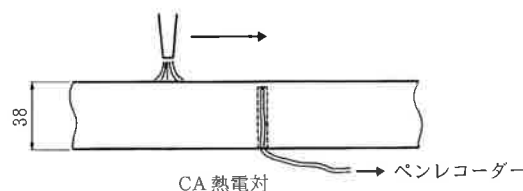


図-3.12 最高加熱温度試験方法

表-3.8 加熱温度試験条件

項目		条件
火口		#2500 (田中)
加熱ガス	種類	プロピレン
	流量 (ℓ/min)	7.0
酸素圧力 (kgf/mm ²)		5
火口と母材との距離 (mm)		20
移動速度 (cm/min)		20

② すみ肉溶接後の歪取り効果

弦材のダイヤフラム溶接による角変形を想定し、図-3.13に示す試験体で溶接による変形量と歪取り効果を測定した。また、線状加熱を行った位置から衝撃試験片、引張り試験片、曲げ

試験片を採取し、吸収エネルギー、引張り強度、曲げ強度の確認を行った。

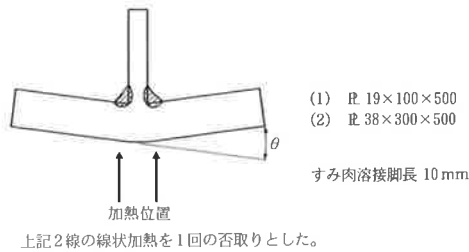


図-3.13 すみ肉溶接歪取り試験体

3) 試験結果

① 最高加熱温度

最高加熱温度管理のため、加熱冷却曲線を求めた。

表-3.8の条件で加熱試験を行った結果を図-3.14に示す。

② すみ肉溶接後の歪取り効果

すみ肉溶接後の歪取り効果については、2回の加熱矯正によって歪が除去できることを確認した。また機械試験についても良好な結果が得られた。

歪取りの効果を表-3.9に示す。また、機械試験結果を表-3.10に示す。

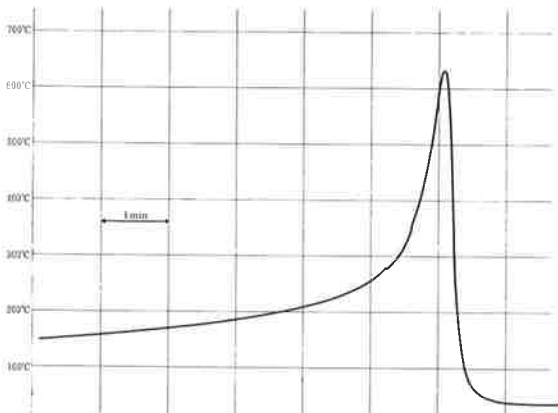


図-3.14 加熱冷却曲線

表-3.9 加熱矯正試験結果

	100	150	150	100
	[Diagram showing a specimen with four measurement points labeled ①, ②, ③, and ④]			
	①	②	③	

	角変形量 (deg)			
	①	②	③	平均
歪取り前	0.191	0.229	0.229	0.216
1回目	0.172	0.153	0.153	0.159
2回目	0.057	0.057	0.038	0.051

表-3.10 加熱矯正試験機械試験結果

引張り強さ	87.1 kgf/mm ²		曲げ	良
衝撃試験 (-40°C, kgf·m)				
	①	②	③	平均
C 1	12.6	12.2	11.5	12.1
C 2	12.4	8.8	11.3	10.8
C 3	8.6	10.1	8.4	9.0
平均				10.6

(9) 冷間曲げを想定した歪時効衝撃試験

1) 目的

主構弦材の製作時にカド溶接の角変形を考慮してガセット部に逆歪加工を行う。通常逆歪は油圧プレスによる冷間での曲げ加工を行っている。冷間加工では加工硬化による材質劣化を起こす。HT80材が冷間加工によってどの程度の材質劣化を起こすか調査した。

2) 試験方法

試験は一軸方向に塑性歪を与えた引張り試験片を作成し、その中心から衝撃試験片を採取した。試験体形状を図-3.15に示す。試験を行う予歪量は、3、5、10%とした。

3) 試験結果

歪を与えた引張り試験体より採取した衝撃試験片の試験結果を図-3.16に示す。

3、5、10%の塑性歪を与えた試験片より衝撃試験を行った。鋼橋等製作基準によれば、冷間曲げ加工の内側半径の大きさは板厚の15倍と決められている。この場合の歪量は3%程度であるが、今回の場合10%の歪を与えたときの値でも19.0 kgf·mとなっており、全く問題無かった。

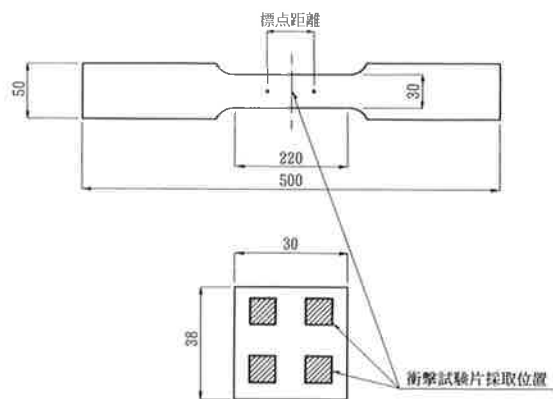


図-3.15 歪時効試験体

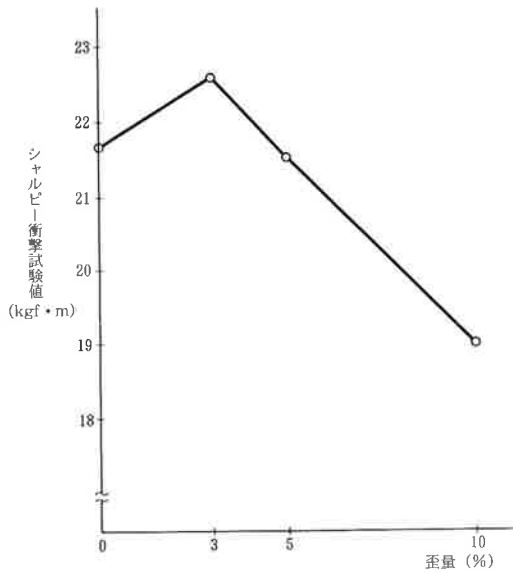


図-3.16 歪による衝撃の変化

4. 中型試験

(1) 中型試験体形状

中型試験体の形状を図-4.1に示す。

(2) ウェブ・フランジの平坦度

鋼板の平坦度は、1mのストレッチとすきまゲージを用いて行った。測定単位は、1/10mmとした。

本中型試験体に供されたHT80材鋼板は、長さが4m、幅870mmと部材が小さいこともありウェブ上で最大値1.1mmという箇所があったが、その他はすべて0.4mm以下という非常に良い値であった。最大値が1.1mmであったので、突合せ溶接後の平坦度、角変形でも影響はみられず、何等問題はなかった。

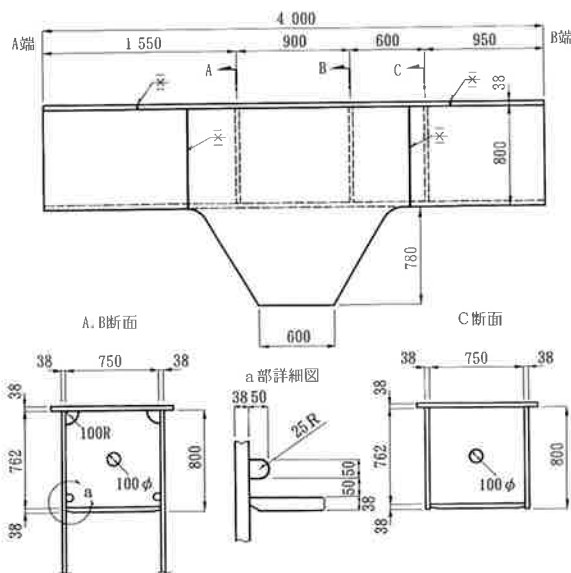


図-4.1 中型試験体形状

(3) プライマーの膜厚

供試鋼板のジンクリッチプライマーの膜厚を参考として電磁式膜厚計で測定した。測定単位は、1/1000mmとした。

5点平均を1測点として82点を測定した結果、最大45 μ 、最小14 μ であり全体でやや厚めの膜厚であった。

(4) 突合せ溶接条件

1) 開先精度

突合せ溶接の開先形状は、切断トーチ角度の設定がやや大きくなり、54°となった。目標としていた開先形状は、

開先角度：50°

ルートフェイス：17mm

である。突合せ溶接は多層盛り溶接であり、裏面はガウジングによる開先整形を行った。外観および放射線透過試験において、欠陥は認められなかった。

2) 予熱温度測定

CA熱電対を使用して予熱温度の測定と、温度分布およびその経時変化を測定した。測定位置を図-4.2に示す。

鋼板温度22℃より予熱実験を開始し、開先近傍の測定点1~6がすべて100℃に達するまで、約55分を要した。また、冷却速度としては100℃前後の温度で10分間につき10℃~12℃下降する。ヒーターを外してから突合せ溶接のアーキスタートまでの時間は10分~15分を要するので、予熱は120℃まで行えば最小予熱温度以上で溶接可能であることを確認した。

3) 収縮量

突合せ溶接における横収縮量は、1溶接線あたり2mmを見込んで製作を行ったが、実験における収縮量は平均0.79mm、最大1.39mmであった。この結果より、板厚38mmの場合は収縮量1mmが妥当であると考えられる。

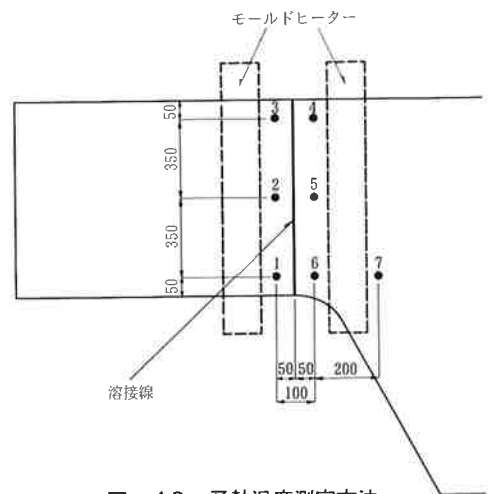


図-4.2 予熱温度測定方法

SM58Q材でパイロットメンバー (t = 42) を製作した時の収縮量は、平均1.02mmであった。それと比較すると、HT80材は収縮量が幾分か小さいようであるが全体としては同一の収縮量で施工可能であると考えられる。

4) 角変形

突合せ溶接前、溶接後、プレスによる矯正後の角変形を表-4.1に示す。

突合せ溶接後の角変形は、プレスにより最大2.0mmまでに矯正を行った。組立精度への影響は、平坦度が最大値の箇所でも落とし込みフランジのルートギャップが0mmであり、落とし込みの線上では全く問題の無い値であった。

表-4.1 角変形量の測定結果

	測定数 (n)	最大 (mm)	最小 (mm)	平均 (mm)	標準偏差 (σ_{n-1})	落とし込み線の最大
本溶接前	36	1.6	0.0	0.53	0.427	1.6
本溶接後	36	3.9	0.0	1.30	1.244	2.8
矯正後	36	2.0	0.0	0.87	0.636	1.6

5) 部材寸法

部材長については、1~1.5mmの収縮であった。各部材で溶接継ぎ手数が2箇所であるので、平均収縮量0.79mmとほぼ合致した値となっている。

角変形は溶接前と比較してすべて開先加工を行った側が凹となる変形を起こしている。角変形を極力少なくするためには、開先角度の許容値を+4°、-5°とし、開先深さを±1mmほどの精度で製作する必要があると考えられる。

曲がりについては0.5~1mm程度生じているが、今回の場合部材が短いこともあり、鋼橋等製作基準の許容値内であるので加熱矯正は行わなかった。

(5) 部分溶込みかど溶接およびすみ肉溶接の開先近傍の表面処理

開先近傍の表面処理は、ガス切断面は完全にドラグラインを削り込むこと、プライマー塗布面はプライマーの除去を行い完全な金属面を出すこととし、グラインダーの目は溶接線に平行になるように行わなければならない。処理方法を図-4.3に示す。

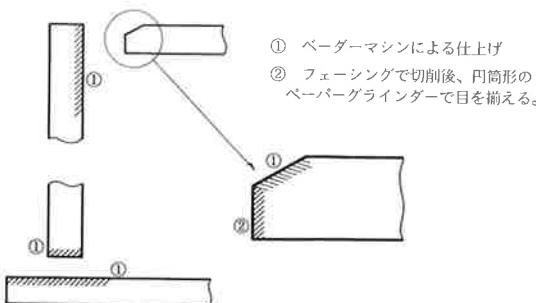


図-4.3 開先近傍の表面処理方法

(6) ダイアフラムすみ肉溶接の ρ 、 θ 、 d

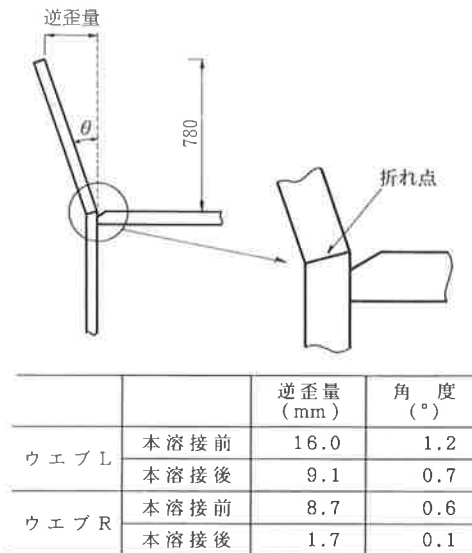
止端形状をHT80材とSM58Q材とで比較すると、溶接材料が同一であったこともあり、ほとんど差異はみられなかった。 θ については鋼橋等製作基準で $\theta \geq 120^\circ$ 、 $d \leq 0.3\text{mm}$ の基準が設けられているが、すべて基準以上の品質で施工できた。

(7) 組立完了後および本溶接後の供試体寸法

逆歪量を把握するため、表-4.2に示すように今回は左右で逆歪量を変えて施工を行った。施工前後の角変形量の差はL、Rとも0.5°であった。逆歪量だけを考えると0.5°が妥当であるが、フランジを落とし込む時の作業性を考えると、今回R側で施工した逆歪量が最良であると考えられる。

本中型試験における供試体は部材長が4mであるため、製作後の幅、曲がり、断面寸法はすべて設計値の±1mm以内におさまっており、精度よく製作できた。しかし部材が短いため、これらの測定は実物大試験で詳細の検討を行う。

表-4.2 逆歪量測定結果



(8) 部分溶込みかど溶接予熱温度測定

従来は、本四架橋のトラス弦材部分溶込みかど溶接およびすみ肉溶接における予熱方法として遠赤外線ヒーターの移動方式による3方向からの左右対象全体予熱を行ってきた。しかし、この方法では予熱温度50°Cまでしか施工できない。そこで、今回モールドヒーターを使用した予熱方法を採用することとし、予熱実験を行った。

ヒーターを取り付けたままでは溶接が施工できないため、ヒーターを取り除いてから溶接開始までに冷却される温度が、どの程度であるかを調査する必要があった。

測定位置は、図-4.4に示すように、供試体の中央部にCA熱電対を8箇所設置し、ペンレコーダーで加

熱冷却曲線を求めた。

加熱時間は開先に最も近い測定点3が100℃になるまでで50分程度を要した。冷却速度は100℃近くで10分間に5~6℃低下した。ヒーターを外してから溶接開始まで20分を要すると考えると120℃まで予熱しておけば最低予熱温度を満足すると思われる。

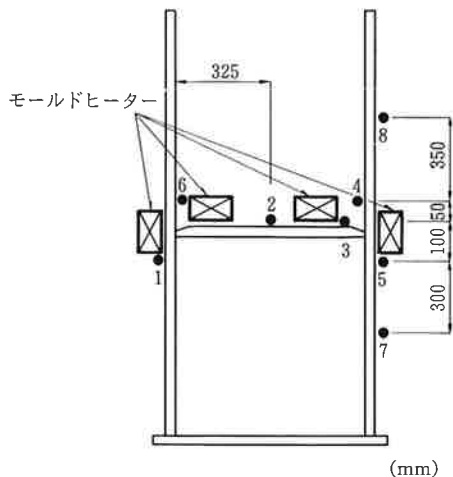


図-4.4 予熱温度測定位置

5. 実物大試験

(1) 実物大試験体形状

試験体形状を図-5.1に示す。

(2) 製作手順

試験体の製作手順を図-5.2のフローチャートに示す。

(3) 鋼板の平坦度

鋼板の平坦度は、1mのストレッチとすきまゲージを用いて行った。測定単位は1/10mmとした。最大値は0.6mmであり平均では0.14mmであり、非常に良い値であった。

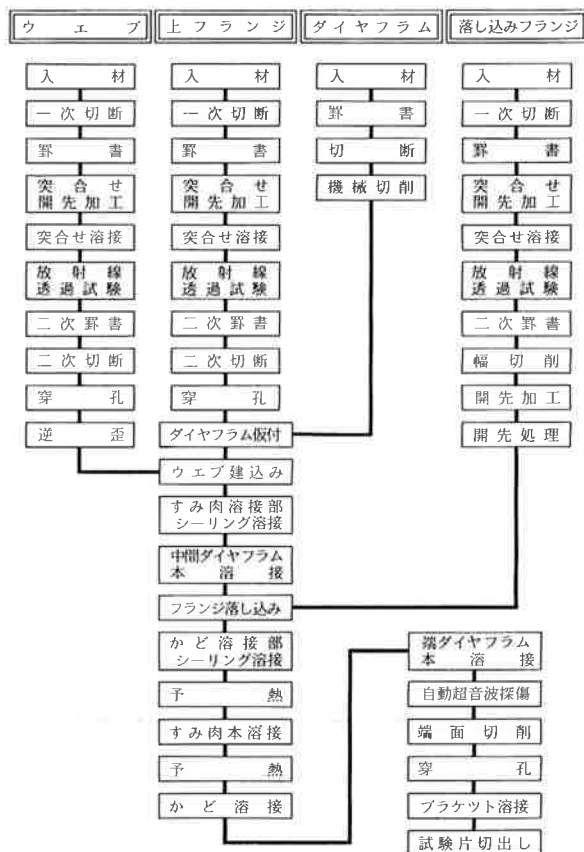


図-5.2 試験体製作フローチャート

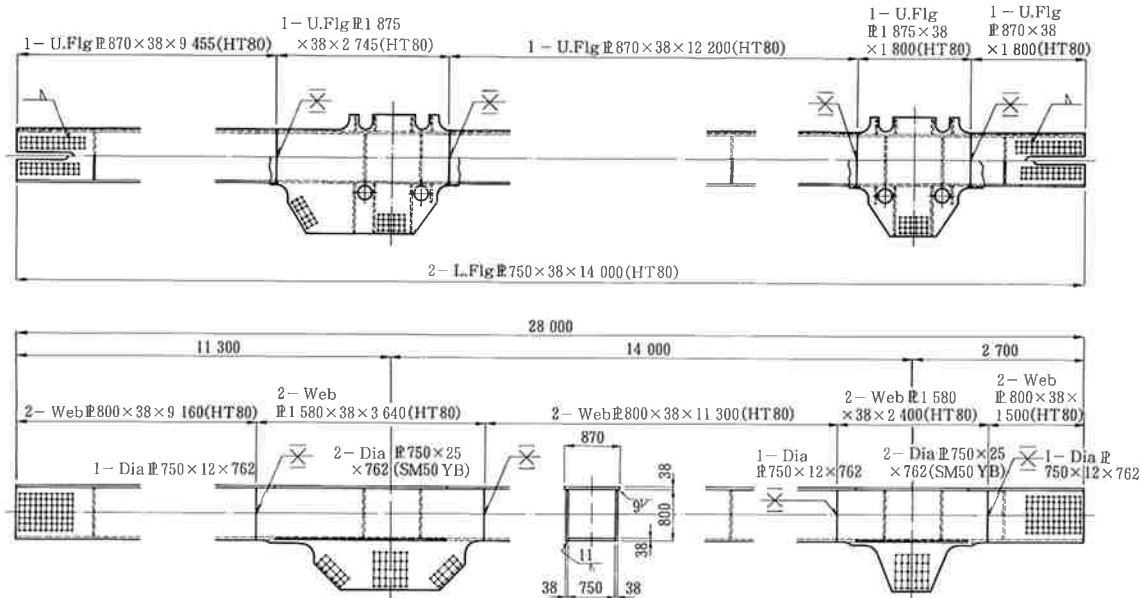


図-5.1 実物大試験体形状

(4) プライマーの膜厚測定

供試鋼板のジンクリッチプライマーの膜厚を参考として電磁式膜厚計で測定した。測定単位は、1/1000mmとした。測定結果は最大値30.6 μ 、最小値は14.4 μ であった。標準膜厚は20 \pm 5 μ であるので最大値、最小値で若干数値を超えてはいいるが、ほぼ標準膜厚を満足している結果が得られた。

(5) 突合せ溶接

1) 収縮量

突合せ溶接による収縮量の測定結果はn = 39で平均0.64mmであった。中型試験での収縮量はn = 18で平均0.79mmであり、今回の結果との差は0.15mmであった。HT80材で板厚38mm程度の突合せ溶接の収縮量は、中型試験と同様に1mmを見込んでおけば良いと考えられる。

2) 矯正後の面外変形

面外変形量は1mのストレッチを用いて、溶接線上で測定を行った。

測定結果はn = 117で最大値1mm、平均値0.32mmであった。

3) 組立前のフランジ・ウェブの寸法精度

突合せ溶接前後の部材長の変化は、落とし込みフランジは突合せ溶接線が1箇所であるので1mm、その他は溶接線が4箇所であるので2.5~3mm収縮している。これは1溶接線当りの収縮量と部材長の収縮量はほぼ一致する結果となっている。

板の曲がりについては落とし込みフランジである下フランジは突合せ溶接線が他の部材に比べて1箇所と少ないこともあり \pm 1.5mm以内の精度で製作を行うことができた。図-5.3に部材の曲がりを示す。ウェブについては加熱矯正を行ったが最大6mmの曲がりが残った。

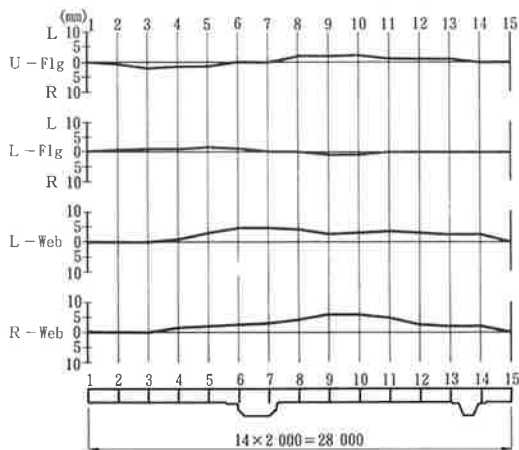


図-5.3 突合せ溶接後の部材の曲がり

(6) かど継手部の精度

SM58Q材製作の経験から、部分溶込みかど溶接、すみ肉溶接におけるルート部の健全性を確保するためには組立精度を良くする必要がある。具体的にはルートギャップを0.5mm以下とし、開先面は完全に金属面を露出させ、溶接線と研削の目が平行になるようにすることが必要である。そこで開先精度、研削後のこば面の直角度および研削によるすり込み量を測定した。

1) 部分溶込みかど溶接部の開先精度

開先精度の測定はストレッチおよび分度器を用いて行った。測定単位は0.5mm、0.5 $^{\circ}$ 測定ピッチは2mとした。測定結果は平均値で開先角度60.9 $^{\circ}$ 、開先深さ11.3mmであった。

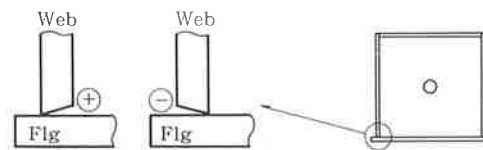
2) ウェブこば面の直角度

直角度は、スコヤを用いてこば面の隙間をすきまゲージで測定した。

測定結果を表-5.1に示す。最大値の0.15mmは角度にして0.2 $^{\circ}$ である。

表-5.1 こば直角角度測定結果

	測定数 (n)	最大 (mm)	最小 (mm)	平均 (mm)	標準偏差 (σ_{n-1})	備考
直角度	30	± 0.15	0	-0.03	0.069	



3) プライマー除去すり込み量

ウェブおよび上フランジのルートフェイスに接触する面は金属面を露出させなければならない。そのため研削によるすり込み量は、組立精度に影響を及ぼすのでそのすり込み量の計測を行った。

すり込み量はスコヤとすきまゲージを用いて測定を行った。

研削結果は0.1mm~0.2mmの範囲で均等な研削面がえられた。研削時に小波が生じた箇所もあったが溶接に大きな影響を与えるものではなかった。また、ドラグライン除去のためのこば面切削で、突合せ溶接部の材質変化によるすり込み過ぎが考えられたが、こば面のすり込み過ぎは無く、突合せ溶接部のすり込み量は0.35mmであった。

(7) ダイアフラムの溶接条件

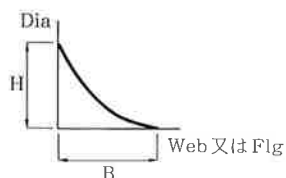
ダイアフラムの組立精度はかど溶接のルートギャップや部材の曲がり、ねじれ等の精度に大きく影響を及ぼすため、4面を機械仕上げを行い組立を行った。その結果フランジ側のルートギャップはすべて0mmでありウェブ側は最大で0.4mmで組み立てることができた。

(8) ダイヤフラムすみ肉溶接の ρ 、 θ および d の測定

ダイヤフラムすみ肉溶接部の止端部の形状を測定した。測定結果を表-5.2に示す。

表-5.2 ダイヤフラムすみ肉溶接の ρ 、 θ 、 d 測定結果

			測定数 (n)	ρ (mm)	θ (deg)	d (mm)	B (mm)	H (mm)
一般部	中間ダイヤフラム	平均	6	1.7	140.8	0	13.8	12.3
		標準偏差		1.32	6.71	0	0.76	0.52
	端ダイヤフラム	平均	8	2.8	147.6	0.03	10.4	8.4
		標準偏差		1.56	12.06	0.07	0.78	0.58
まわし溶接部	中間ダイヤフラム	平均	12	1.5	130.3	0	12.4	10.4
		標準偏差		0.64	13.05	0	1.83	1.21
コーナ一部	端ダイヤフラム	平均	8	3.3	138.6	0	10.3	9.1
		標準偏差		1.30	6.07	0	1.28	1.35



(9) ルートギャップの測定

部分溶込みかど溶接部およびすみ肉溶接部は、サブマージーク溶接によるたれ落ち等が生じる事なく滑らかな溶込み線を得る必要があるため、鋼橋等製作基準ではルートギャップを0.5mm以下にするよう規定されている。

結果は許容値を超えた箇所はなく、平均0.06mmと精度良く組み立てることができた。

(10) 仮付け、本溶接条件

部分溶込みかど溶接およびすみ肉溶接の仮付け、本溶接条件は小型試験を行って求めた条件を用いた。

溶接順序ははじめにすみ肉溶接を片側ずつ行い、その後部分溶込みかど溶接を左右同時に行った。

(11) 組立、溶接後の供試体寸法

1) ガセット部の逆歪量

ガセットの逆歪量は中型試験において求めた0.6°で施工を行った。大ガセットで0.46°、小ガセットで0.39°と逆歪の戻り方は小さかった。

2) 組立、本溶接後の試験体寸法

シーリング溶接完了時およびかど溶接終了時に、試験体の寸法を計測した。計測はウェブ間隔、断面形状および部材長の3項目とした。計測はノギス、コンベックス、50m テープを使用した。

ウェブ間隔は本溶接前後で、平均0.2mm狭くなっている。これはかど溶接による収縮量であると考えられる。

断面形状は対角線の差で最大1mmであり、組立時の最大値も1mmであるので、溶接による断面形状の変化はあまり生じることはなく、組立時の形状管理が大切であると考えられる。

部材長については上フランジ、落とし込みフランジとも差はなく、全長で2~3mmの収縮量であった。この結果より、かど継手の溶接による縦収縮量は1mあたり0.1mm程度を見込めばよいと考えられる。

3) 試験体の曲がりおよびキャンバー

曲がり、シーリング溶接後、すみ肉溶接後および部分溶込みかど溶接後の3回測定を行い、その変化を確認した。キャンバーは溶接完了後格点の上フランジで支持して計測後、反転して下フランジで支持して計測し、死荷重のたわみを除いた値を計測した。測定結果を表-5.3、表-5.4に示す。

曲がりの溶接前後の変化量は、最大で2mmであり最終形状の曲がりは最大2.5mmであった。

キャンバーは製作後で最大24mmあった。突合せ溶接後に行った幅切断でウェブには6mmのキャンバーがついていたので、組立、溶接によって18mmほど新たにキャンバーがついたと考えられる。

これはすみ肉溶接、部分溶込みかど溶接を行うと部分溶込みかど溶接の方が溶着金属の量が多く、収縮量が大きくなるためキャンバーが生じるものである。

(12) 放射線透過試験結果

突合せ溶接部は放射線透過試験で検査を行った。対象は全溶接線の全長を検査した。

試験結果はすべて無欠陥の1級であった。

(13) ビード形状および外観

本溶接終了後の部分溶込みかど溶接、すみ肉溶接のビード形状および外観を記録した。すみ肉溶接の脚長は設計値9mmに対し平均11mm程度で幅と高さの差がほとんどなく等脚長に施工できた。

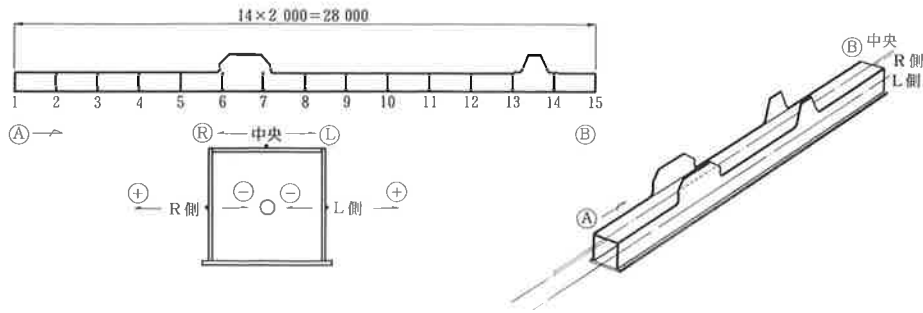
(14) 自動超音波探傷試験 (AUT)

部分溶込みかど溶接と、すみ肉溶接の溶接線全長にわたり探傷試験を実施し、ルート部溶込み線とルート部欠陥の調査を行った。なお、探傷結果と破面試験結果とを対比した。

(15) 破面試験

超音波探傷完了後、溶接部を切り出しビード縦方向の破断を行い破面試験を行った。試験片の長さは250mm程度とし、超音波探傷試験の結果をもとに欠陥が発生した箇所を含めてガセット部および一般部

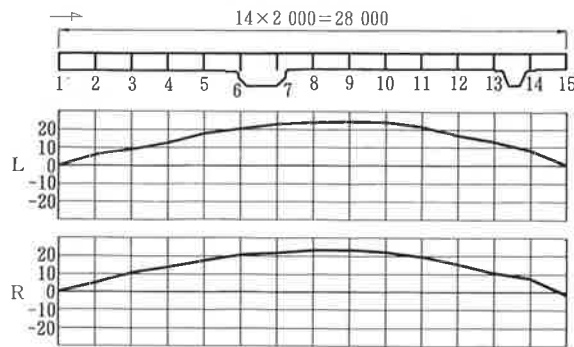
表-5.3 試験体の曲がり



単位：mm

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
L側	シーリング溶接後	0	0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.5	-1.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-1.0	-1.5	0	
	すみ肉本溶接後	0	0	-1.0	-1.0	-0.5	-1.0	-1.0	0	+1.0	0	0	0	0	-1.5	0
	かど本溶接後	0	0	-0.5	-0.5	-0.5	-1.0	-1.0	-0.5	0	-1.0	-0.5	0	-0.5	-1.0	0
中央	シーリング溶接後	0	0	R1.0	R1.0	R1.5	R1.0	R0.5	R0.5	R0.5	R1.5	R2.0	R1.0	R1.5	0	0
	すみ肉本溶接後	0	0	L0.5	L1.0	L1.0	L1.0	L1.0	L1.0	L2.0	L1.5	L0.5	L0.5	L1.0	0	0
	かど本溶接後	0	0	0	0	R1.0	R0.5	0	0	0	R0.5	0	0	0	0	0
R側	シーリング溶接後	0	+1.0	+1.0	+2.0	+1.0	+1.0	0	+1.0	0	0	+1.0	+1.0	+1.0	0	0
	すみ肉本溶接後	0	+1.0	+0.5	+1.0	+1.0	+0.5	0	0	0	-1.0	0	0	0	0	0
	かど本溶接後	0	+2.0	+2.0	+2.5	+2.5	+2.0	+1.5	+1.0	+1.0	+1.0	+1.0	+2.0	+1.0	+0.5	0

表-5.4 製作完了後のキャンバー



		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
L側		0	6	9	13	18	21	23	24	24	23	21	17	13	8	0
R側		0	5	10	14	18	21	22	24	24	22	19	15	11	7	-1

単位：mm

より採取し、破面写真を撮影した。調査項目は、下記のとおりとした。

- ① 溶込み深さ
- ② ルート部の欠陥
- ③ 溶込み線のなめらかさ

(16) 断面マクロ試験

断面マクロ試験片は一般部、ガセット部の両方から採取を行った。一例を写真-5.4~写真-5.6に示す。

(17) 機械試験

部分溶込みかど溶接部より、全溶着金属引張り試験片および溶接部の衝撃試験片を採取し、試験を行

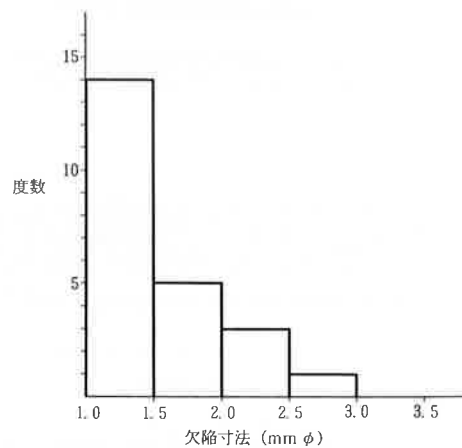


図-5.4 AUTによる欠陥寸法と度数

った。どちらも母材の規格値以上であり良好な結果であった。

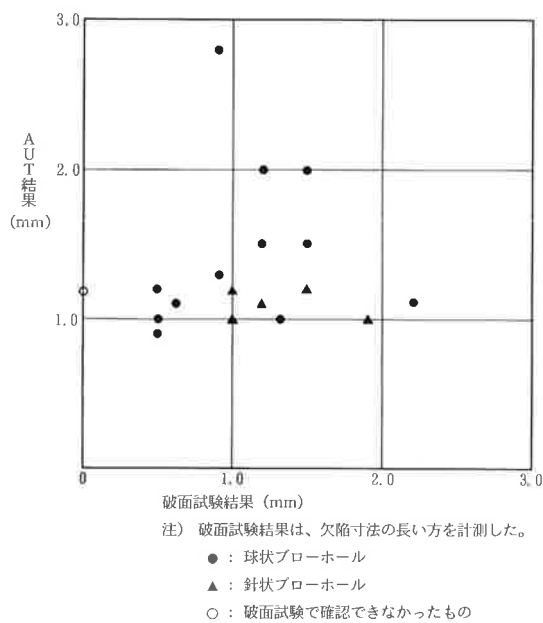


図-5.5 AUT結果と破面試験結果の比較

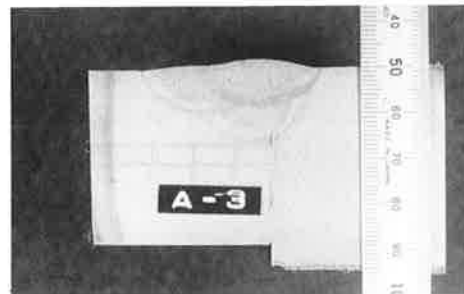


写真-5.4 マクロ試験片の一例
部分溶込みかど溶接 (一般部)

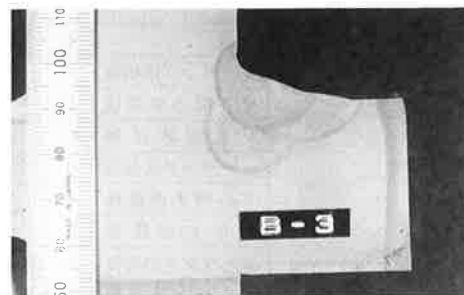


写真-5.5 マクロ試験片の一例
部分溶込みかど溶接 (ガセット部)

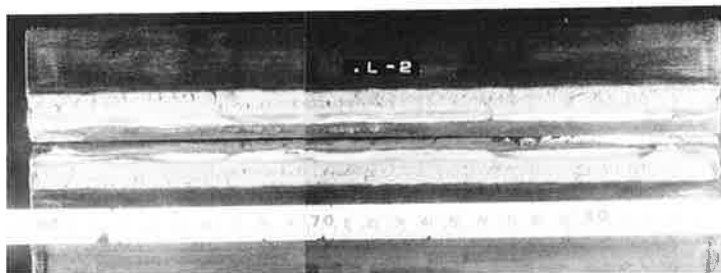


写真-5.1 破面試験結果の一例
部分溶込みかど溶接 (一般部)

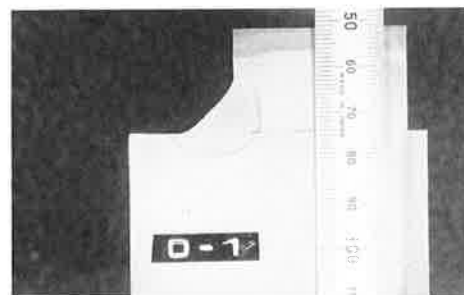


写真-5.6 マクロ試験片の一例
下向きすみ肉溶接



写真-5.2 破面試験結果の一例
部分溶込みかど溶接 (ガセット部)

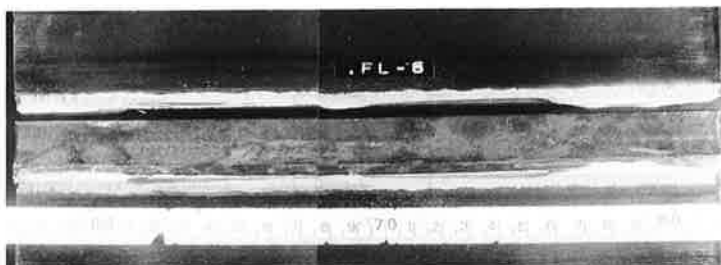


写真-5.3 破面試験結果の一例
下向きすみ肉溶接

お わ り に

HT80材の溶接を主とした施工確認試験を小型試験で行い、溶接条件・ガス切断条件等の基本的な施工条件を定めることができた。また、中型試験では4mの箱型断面部材の製作を行い、小型試験での検討結果を実施工に適用することが可能かどうかについての確認を行った。同時に、予熱方法、使用機器等の検討も併せて行った。

中型試験に引続いて28mの実物大試験を実施した。目的としては、中型試験により確認された諸事項および治具の改善が28mの長尺部材に対しても適応できるかどうかを確認することにあった。その結果、組立精度・溶接品質・部材形状とも要求品質を満足する製作ができることを確認した。今回は特に鋼板の平坦度が良かったことで、良好な組立精度が得られた。なお溶接に対しては残留磁気の問題があるので部材のハンドリングはマグネットを一切使用せずに行った。