

建築構造用高性能590N/mm² 耐火鋼の母材特性 および溶接施工試験報告（その2：溶接施工試験）

Base-Metal Property and Welding Procedure Test of 590N/mm² High-Performance Fire-Resistant Steel for Building Structure (Part 2: Welding Procedure Test)

中野 秀二*¹ 武井 智彦*² 平林 洋*³ 吉川 薫*⁴
Shuuji NAKANO Norihiko TAKEI Hiroshi HIRABAYASHI Kaoru YOSHIKAWA

Summary

In preparation for the use of 590N/mm² fire-resistant steel for box columns of building steel frames, a welding procedure test with a full-scale box column was performed. The main purpose of this test was to better understand the conditions that should be dealt with during the welding of this steel. This test clarified the welding conditions, such as the preheating temperature, the interpass temperature, and the welding heat input, which are necessary for the production of steel frames.

キーワード：80キロ耐火鋼材，溶接施工試験，入熱量，パス間温度

1. まえがき

前報その1では、60キロ耐火鋼（SA440-FR）（商品名BT-HT440-FR新日本製鐵製）を建築鉄骨の四面ボックス柱に使用するに当たり、その鋼材の特性を確認するための素材試験の結果を報告した。結果は機械的性能・化学成分等は材料仕様を十分満足している。その2では実施工に先だって行った、予備試験および実大四面ボックス柱梁施工試験の結果を報告する。

2. 材料仕様

60キロ（BT-HT440-FR）鋼材の機械的性能仕様を表-1に示す。

表-1 機械的性質

	降伏点又は 0.2%耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	降伏比 %	伸 び %	衝 撃 J	Z方向 絞 り %
常温	440～ 540	590～ 740	≤ 80	≥ 20	≥ 47	≥ 15/25
高温	≥294	—	—	—	—	—

衝撃試験温度：0℃ 高温：600℃

Z方向絞り：Each/Av

3. 試験計画

試験計画の内、予備試験の概要を項目3-(1)、実大四面ボックス柱梁施工試験の概要を項目3-(2)に示す。

(1) 予備試験

本鋼材が建築鉄骨に初めて使用されることから四面ボックス柱梁施工試験を実施するに当たり、入熱量の比較的大きいボックス角溶接部と柱梁接合部の二部位について、溶接入熱量とパス間温度を変数とした予備試験を実施した。

ボックス角溶接部は1.6φの溶接ワイヤを使用した炭酸ガス自動溶接でSA440級鋼材の溶接に多用され、通常パス間温度250℃以下、入熱量70KJ/cm以下に規定している。（建築構造用高性能590N/mm²鋼材設計・溶接施工指針）本試験Kシリーズにおいてパス間温度は同様の250℃以下とし、入熱量を変化させその上限値を求めた。柱梁接合部は1.2φの溶接ワイヤを使用した炭酸ガス半自動溶接であり、その適的な入熱量の限界値は40KJ/cm程度である。そこでBシリーズでは入熱量を40KJ/cm以下とし、溶接線が短い場合の溶接効率に影響の大きいパス間温度を変数とした。表-2に試験変数を示す。

*1松本工場品質管理部品質管理課課長

*2橋梁営業本部第一橋梁営業部

*3鉄構事業本部鉄構営業部次長

*4松本工場製造部製造課課長代理

表-2 試験変数

対象試験部位	試験記号	試験変数	
ボックス 角溶接部 (Kシリーズ)	K-1	パス間温度 250℃以下	入熱50KJ/cm以下
	K-2		〃 70 〃
	K-3		〃 40 〃
柱梁接合部 (Bシリーズ)	B-1	入熱量 40KJ/cm以下	パス間温度150以下
	B-2		〃 250 〃
	B-3		〃 350 〃
予熱	50℃以上		

予熱温度はその1試験結果より50℃以上とした。試験体の形状については、Kシリーズは板厚80mm (SA440C-FR) の溶接長1000 mm平突合わせ、Bシリーズは80mm (SA440C-FR) と板厚55 mm (SN490B-FR) の溶接長450 mm T形突合わせとし表-3に示す機械試験を実施した。試験片の採取部位はKシリーズ80mmの1/4 t と1/2 t、Bシリーズは55mmの1/4 t と1/2 t の溶着金属である。

表-3 機械試験計画

試験記号	試験項目	板厚方向採取部位
Kシリーズ (ボックス角溶接部)	マクロ・硬さ試験	全厚
	継手引張	全厚
	溶着金属引張 (室温)	1/4t 1/2t
	溶着金属引張 (高温)	1/4t 1/2t
	衝撃試験 Depo	1/4t 1/2t
	〃 Bond	1/4t 1/2t
	〃 HAZ	1/4t 1/2t
〃 Depo(クレーター部)	1/4t 1/2t	
Bシリーズ (柱梁接合部)	マクロ・硬さ試験	全厚
	継手引張	全厚
	溶着金属引張 (室温)	1/4t 1/2t
	溶着金属引張 (高温)	1/4t 1/2t
	衝撃試験 Depo	1/4t 1/2t
	〃 Bond	1/4t 1/2t
	〃 HAZ	1/4t 1/2t
〃 Depo(クレーター部)	1/4t 1/2t	

衝撃試験温度：0℃ 高温：600℃

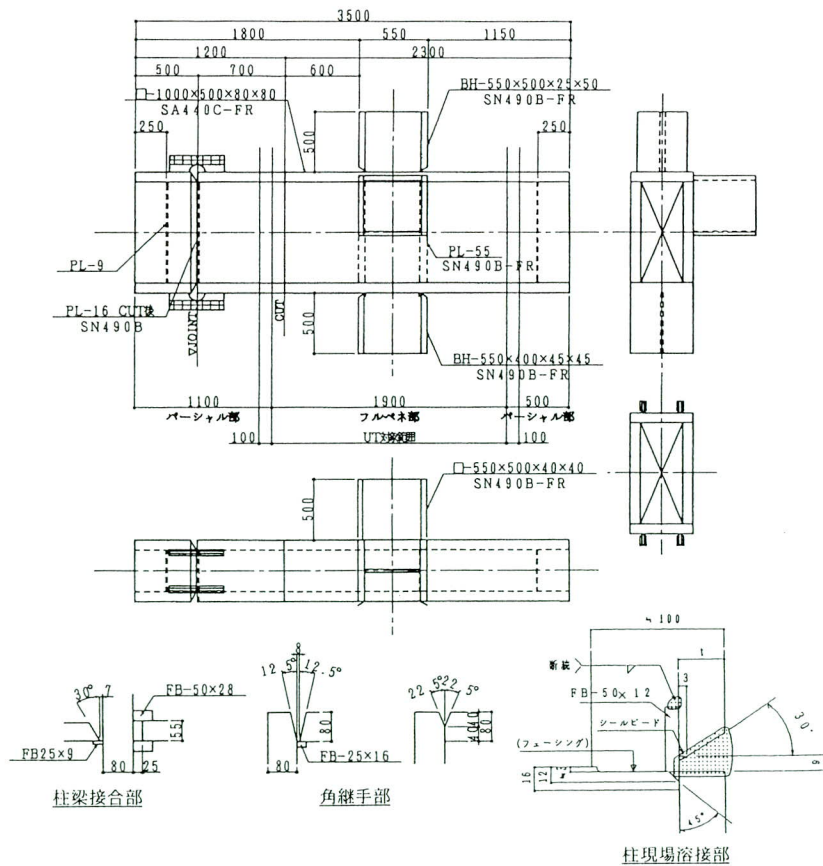


図-1 実大ボックス柱梁試験体形状

(2) 実大四面ボックス柱梁施工試験

実大四面ボックス柱梁施工試験は、実際に製作される代表的な部位を想定して柱長3.5mとし、また柱現場溶接部の試験も合わせて実施した。使用鋼材を表-4に、試験体形状を図-1に示す。表-5に使用した溶接材料を示す。

表-4 使用鋼材

部位	使用部材	材質
柱主材	□-1000×500×80×80	SA440C-FR
梁主材	BH-550×400×45×45	SN490B-FR
	BH-550×500×25×50	
	□-550×500×40×40	
ダイアフラム	PL-55	SN490B-FR

表-5 溶接材料

溶接方法	規格	銘柄	径 粒度	使用部位
非消耗式 エレスラ溶接	—	YM-50FRS YF-15I	1.6φ 20×200	内ダイアフラム
炭酸ガス 半自動溶接	JIS Z 3312	YM-60FR	1.2φ	梁フランジ 溶接
炭酸ガス 半自動溶接	JIS Z 3312	YM-60FR	1.2φ	柱現場 溶接
炭酸ガス 自動溶接	JIS Z 3312	YM-60FR	1.6φ	柱角溶接

メーカー：日鐵溶接工業（株）

(3) 機械試験計画

機械試験計画の概要を表-6a、b、cに示す。

表-6a 柱梁接合部・角溶接部

	試験対象部位	記号	
引張試験	常温 柱梁接合部	T1, T2	
	〃 角継手溶着金属	T3~T5	
	高温 角継手溶着金属	T6~T8	
衝撃試験	エレスラ溶接	Depo	1
		Bond	2
		HAZ	3
	角継手	Depo	4
		Bond	5, 7
		HAZ	6, 8
	柱梁接合部	Depo	9
		Bond	10, 12
		HAZ	11, 13
マクロ試験	柱梁接合部・角溶接部	M~	
硬さ試験	柱梁接合部・角溶接部	H~	

高温試験：600℃

表-6b 柱現場継手部

	試験対象部位	記号	
引張試験	常温 柱現場継手溶着金属	T9~T11	
	高温 〃	T12~T14	
	常温 継手引張	T15, T16	
衝撃試験	柱現場継手	Depo	16
		Bond	15, 17
		HAZ	14, 18
マクロ試験	柱現場継手部	M~	
硬さ試験	柱現場継手部	H~	

高温試験：600℃

表-6c 角溶接とボックス梁溶接交差部

	試験対象部位	記号	
衝撃試験	角溶接と ボックス梁溶 接交差部	Depo	19
		Bond（柱側）	20
		1/2HAZ（柱側）	21
		HAZ3mm（柱側）	22
		HAZ5mm（柱側）	23
	柱主材（非熱影響部）	24	
マクロ試験	角溶接とボックス梁溶接交差部	M~	
硬さ試験	角溶接とボックス梁溶接交差部	H~	

4. 試験結果

各種溶接部位の溶接条件、溶接中の温度測定、製作における寸法測定結果および機械試験の結果を述べる。

(1) Kシリーズ予備試験

パス間温度を250℃以下とし溶接入熱を変えて行ったボックス角溶接部の予備試験の結果について述べる。

1) 溶接条件

予備試験の溶接条件を表-7に示す。

表-7 溶接条件

	下向き溶接
溶接ワイヤ（φ）	1.6
電流（A）	330 ~ 390
電圧（V）	32 ~ 36
速度（cm/分）	13 ~ 25
パス数	21（70KJ/cm）~ 26（40KJ/cm）

2) 機械試験

継手引張試験の結果を図-2、常温および高温溶着金属引張試験の結果を図-3、図-4、衝撃試験の結果を図-5に示す。

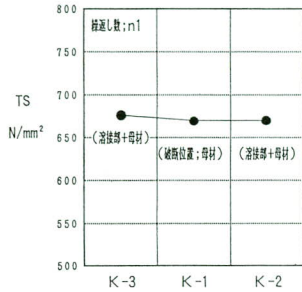


図-2 継手引張試験

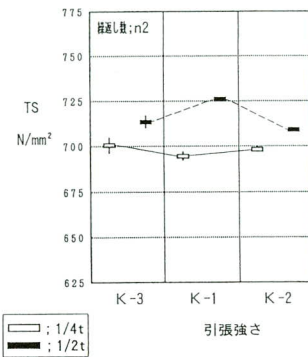


図-3 常温引張試験

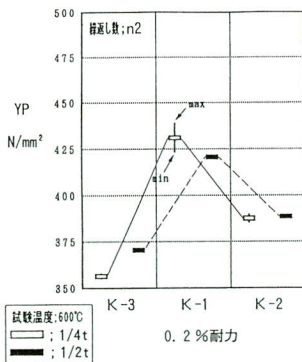


図-4 高温引張試験

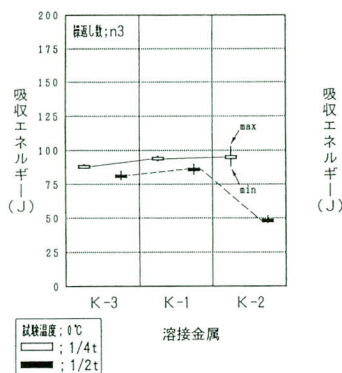


図-5 衝撃試験

3) 考察

引張試験結果の内、常温における継手および溶着金属引張試験の引張り強さの結果、高温における溶着金属引張試験の0.2%耐力の結果を示す。常温における引張り強さの結果は入熱量に対して大きな変化は見られない。また、試験片採取部位では常温引張試験に1/2t>1/4tの傾向が見られる。高温における0.2%耐力の結果に変動が見られるが、常温・高温いずれの結果も表-1に示す母材規格値を十分満足している。

衝撃試験の結果は、溶接入熱70KJ/cmでは溶着金属の衝撃値が50J程度であり、クレーター部分の溶着金属の結果も同様の傾向であった。ボンド部および熱影響部の結果はすべて100J以上を示した。硬さ試験およびマクロ試験の結果は良好である。

したがって角溶接の溶接条件は衝撃試験の結果から、衝撃値が70J程度以上確保される50KJ/cm以下を規定値とする。

(2) Bシリーズ予備試験

溶接入熱を40KJ/cm以下としパス間温度を変えて行った柱梁接合部の予備試験の結果について述べる。

1) 溶接条件

予備試験の溶接条件を表-8に示す。

表-8 溶接条件

	下向き溶接
溶接ワイヤ (ϕ)	1.2
電流 (A)	290 ~ 320
電圧 (V)	36 ~ 37
速度 (cm/分)	17 ~ 42
パス数	20 ~ 21

2) 機械試験

溶接長さ方向中央部の開先より10mmの位置で測定した溶接中の温度測定結果を図-6に示す。パス間温度150°C以下のB1は各パス毎、250°C以下のB2では2~3パス毎に待ち時間が発生し、350°C以下のB3では連続溶接となっている。常温および高温引張試験の結果を図-7、図-8、衝撃試験の結果を図-9に示す。

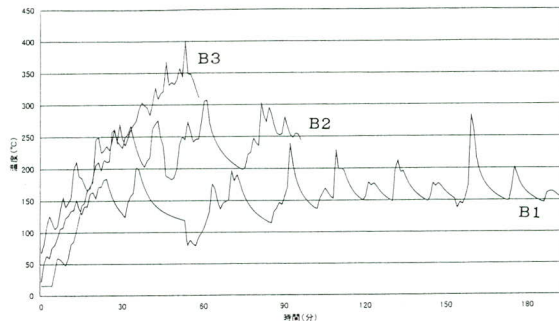


図-6 Bシリーズ温度測定図

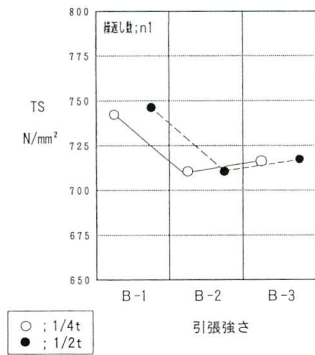


図-7 常温引張試験

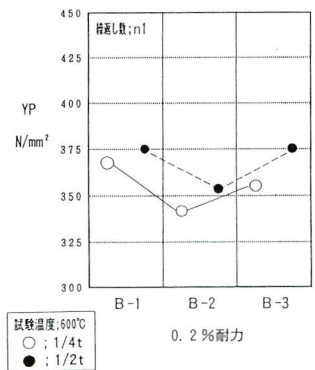


図-8 高温引張試験

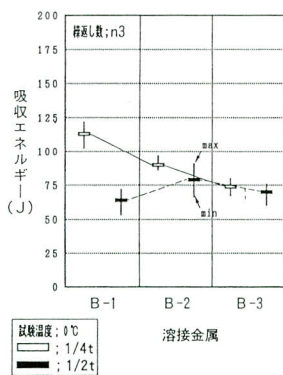


図-9 衝撃試験

3) 考察

引張試験結果の内、常温における溶着金属引張試験の引張り強さの結果、高温における溶着金属引張試験の0.2%

耐力の結果を示す。

常温における引張強さの結果はパス間温度を150℃としたB-1で高く、250℃と350℃のB-2 B-3ではほぼ同じ値を示している。試験片採取部位では、1/2t>1/4tの傾向が見られる。また、高温における0.2%耐力にはバラツキが見られるが、常温・高温いずれの結果も表-1に示す母材規格値を十分満足する。

衝撃試験の結果は、パス間温度350℃では溶着金属の衝撃値が70J程度である。また、クレーター部分の溶着金属も一般部と同様の傾向であった。ボンド部および熱影響部はすべて170J以上を示した。硬さ試験およびマクロ試験の結果は良好である。

したがって柱梁接合部の溶接条件は衝撃試験の結果から、パス間温度250℃以下を規定値とする。以上、予備試験の結果からボックス角溶接部と柱梁接合部の溶接条件を次のように設定する。

- ①角溶接部の溶接条件はパス間温度250℃以下、入熱量50KJ/cm以下とする。
- ②柱梁接合部の溶接条件は入熱量40KJ/cm以下、パス間温度250℃以下とする。

(3) 実大ボックス施工試験

1) 溶接条件

実大ボックス柱梁施工の溶接条件は予備試験の結果を反映し表-9に示す条件とした。

表-9 溶接条件

	角溶接部	柱梁接合部 柱現場溶接部	内ダイアフラム
溶接方法	CO ₂ 自動	CO ₂ 半自動	エレスラ溶接
角溶材料	YM-60FR 1.6φ	YM-60FR 1.2φ	YM-50FRS 1.6φ
溶接姿勢	F	F, H	V
パス数	26	F (15) H (110)	1
電流 (A)	330~ 380	280~320	380
電圧 (V)	33~37	30~36	55
速度 (cm/分)	16~24	17~60	1.3~1.4
入熱 (KJ/cm)	≤50	≤40	≤1000
予熱 (℃)	50	50	—
パス間温度 (℃)	≤250	≤250	—

2) 寸法測定

ボックス柱梁製作過程の溶接による寸法変化（組立時と製作完了時の差）を表-10に示す。

表-10 寸法変化

測定部位	寸法変化 (mm)
柱全長	-1.0 ~ -1.5
フランジ側 柱成 (D=500側)	0
ウェブ側 柱成 (D=1000側)	-4.5 ~ -5.0
梁長 (H型梁)	-0.5
柱現場溶接部	-2.25 ~ -3.75

試験体全長3.0mでの寸法変化は-1.0~-1.5mm、柱成ではフランジ側に変化はなく、ウェブ側で角溶接がフルペネの部分について-4.5~-5.0mmのマイナスが見られた。またパーシャル部について変化は見られなかった。梁仕口長は-0.5 mm、柱現場溶接部では-2.25~-3.75mmのマイナスが発生した。ここで、角溶接フルペネ部で発生した柱成-4.5~-5.0mmのマイナスは、ボックス角部での値であり柱成中央部では発生しない。角溶接によりボックス角部約100mmの範囲に部分的に発生する片側約2.5 mmの角変形によるものである。これは溶接施工法により多少の相違があるものの同部位では一般に見られる傾向である。また、80mmの柱現場溶接部の縮み代はおよそ2~4mmであることが分かった。

3) 機械試験

各部位の機械試験の結果を以下に示す。

(a) 引張試験

柱梁接合部および柱現場継手の引張試験結果を示す。

表-11 溶接継手部引張試験

試験対象部位	記号	引張強さ (N/mm ²)	破断位置	規定値
柱梁接合部 (十字継手)	T1	530	梁側母材	≥490
	T2	535		
柱現場継手 (全厚)	T15	660	HAZ~母材	≥590
	T16	658		

表-12 溶着金属の引張試験

試験部位	試験温度	記号	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	規定値
角溶接	常温	T3	621	723	引張強さ ≥590
		T4	619	718	
		T5	617	722	
	高温	T6	354	430	0.2%耐力 ≥294
		T7	362	435	
		T8	353	430	
柱現場溶接	常温	T9	645	753	引張強さ ≥590
		T10	639	757	
		T11	645	762	
	高温	T12	358	441	0.2%耐力 ≥294
		T13	358	439	
		T14	377	456	

試験温度 常温：22℃ 高温：600℃

(b) 衝撃試験

各部位の衝撃試験の結果を示す。角溶接と梁溶接の重複部の試験片採取要領を図-10に示す。

表-13 衝撃試験

採取部位		記号	吸収エネルギー (J)	限界値/目標値
エレスラ溶接	Depo	1	63	27/40
	Bond	2	51	27/40
	HAZ	3	230	27/70
角溶接	Depo	4	89	27/70
	Bond (F)	5	113	27/70
	HAZ (F)	6	207	27/70
	Bond (W)	7	227	27/70
	HAZ (W)	8	231	27/70
柱梁接合部	Depo	9	117	47/70
	Bond (C)	10	206	47/70
	HAZ (C)	11	204	47/70
	Bond (G)	12	179	47/70
	HAZ (G)	13	215	47/70
柱現場継手	HAZ (開)	14	216	47/70
	Bond (開)	15	172	47/70
	Depo	16	164	47/70
	HAZ (直)	17	245	47/70
	Bond (直)	18	194	47/70
角継手梁溶接重複部	Depo	19	82	27/70
	Bond (C)	20	87	27/70
	1/2HAZ (C)	21	70	27/70
	HAZ3 (C)	22	71	27/70
	HAZ5 (C)	23	109	27/70
	母材	24	240	47/70

表-13 衝撃試験の採取部位の凡例は以下である。

- (F) : Flg側 (W) : Web側
- (C) : 柱側 (G) : 梁側
- (開) : 開先側 (直) : 直面側

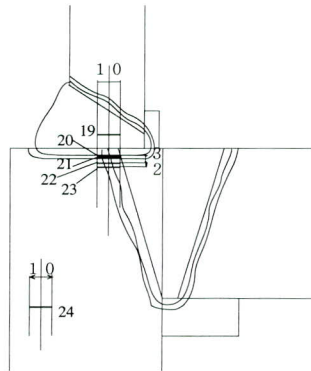


図-10 角溶接と梁溶接重複部試験片採取要領

(c) 硬さ試験

硬さ試験の結果の一例を示す。

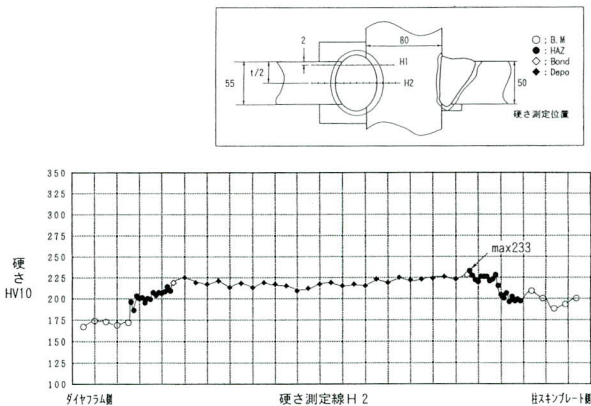


図-11 エレスラ溶接部硬さ分布図

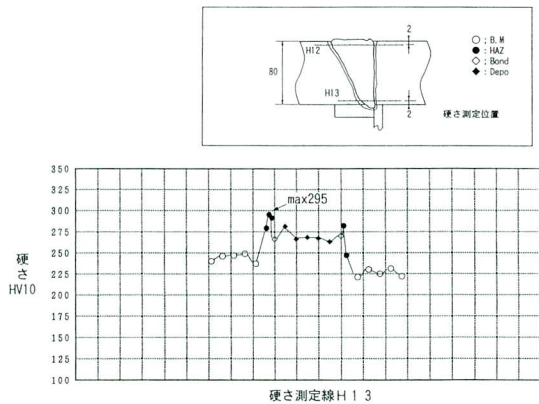


図-12 柱現場溶接部硬さ分布図

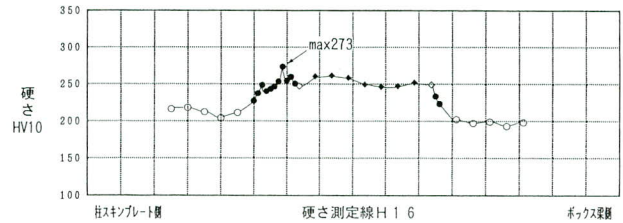
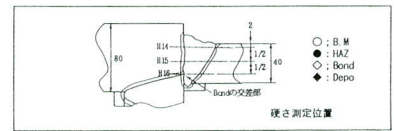


図-13 角溶接と梁溶接の重複部硬さ分布図

(d) マクロ試験

なお、事前に行った超音波探傷検査の結果は全て良好であった。マクロ試験試験片の一例を写真-1、2に示す。

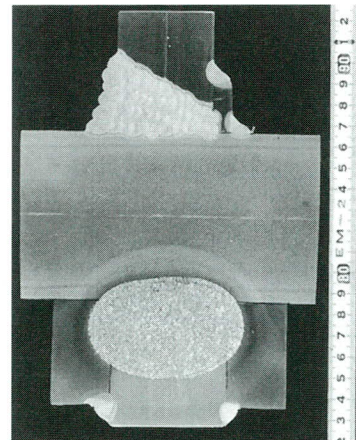


写真-1 柱梁接合部マクロ試験

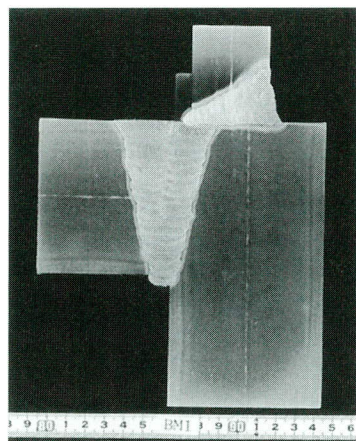


写真-2 角溶接と梁溶接重複部マクロ試験

5. 考察

本形状（80×1000×500mm）の四面ボックス柱の製作においては、柱長さは約0.5mm/mの縮みが発生する。また、部分的ではあるが完全溶込み角溶接によって溶接される方向の柱成が片側約2.5mm角変形することが明らかになった。しかし、本工法では避け難い現象であることと、梁の取合う中央部では発生しないことから精度に与える影響は少なく問題ないと考えられるが今後、出来るだけ少なくするよう工夫が必要である。

柱梁接合部引張試験はダイアフラム板厚が梁材より2サイズアップ設計のため破断は梁材側（SN490B）に発生し、十分な引張り強さを確保している。柱現場継手もSA440Cの引張り強さを十分満足した。また、角溶接部および柱現場継手の常温・高温引張試験はいずれも溶接入熱量の低い柱現場継手の方が高い引張り強さを示す傾向が見られるが、いずれもそれぞれの規定値を十分満足している。

衝撃試験ではエレスラ溶接のDepoとBondが従前と同様低い傾向を示しているが要求限界値および目標値を上回っている。また、角継手と箱梁溶接が重複する箇所においては1/2HAZとHAZ3mmが低い傾向を示すものの要求限界値および目標値を上回っている。その他部位の衝撃試験も良好な結果である。

硬さ試験結果においては、入熱量の大きいエレスラ溶接のHAZ部の最低値はHv190程度の値を示し軟化の発生はない。また、最高値は柱現場溶接の初層部で発生したHv295であり、判定値Hv350を十分満足する。角溶接と箱梁溶接が重複する箇所においても軟化および硬化の発生はない。

6. まとめ

60キロ耐火鋼材を建築鉄骨に使用するに当たり溶接条件を確認するための予備試験および製作方法を確認するための実大四面ボックス柱梁施工試験を実施した。目的の溶接条件は把握されまた、施工は適切に出来ることが確認された。各部位の機械試験の結果も良好であった。以下に実施工の条件をまとめる。

- ・ 予熱温度は50℃以上で行なう。
- ・ 炭酸ガス自動溶接でワイヤ径1.6φを用いて角溶接部を溶接する溶接条件はパス間温度250℃以下、入熱量50KJ/cm以下とする。
- ・ 炭酸ガス半自動溶接でワイヤ径1.2φを用いて柱梁接合部を溶接する溶接条件は入熱量40KJ/cm以下、パス間温度250℃以下とする。この条件は柱現場溶接にも適用する。
- ・ 内ダイアフラムの溶接は一般に用いられている非消耗式エレクトロスラグ溶接を適用する。
- ・ 柱の長さ方向の縮み代は0.5mm/mとする。
- ・ 柱成の縮み代は考慮しない。
- ・ 梁長（ブラケット）の縮み代は考慮しない。
- ・ 柱現場溶接部の縮みの影響は各工程毎の現場架設後の結果による高さ調整による。

以上で60キロ耐火鋼材に関する素材及び溶接施工試験の報告を終了する。鉄骨製作は本試験で得られた結果を踏まえ施工するものとする。

本施工試験に対してご協力頂いた、株式会社大林組、新日本製鐵株式会社、日鐵溶接工業株式会社の関係各位に心より感謝申し上げます。

<参考文献>

- 1) 武井, 平林, 中野, 吉川: 建築構造用高性能590N/mm²耐火鋼の母材特性および溶接施工試験報告 (その1: 母材特性), 宮地技報 No.16, 2000

2001. 9. 4 受付