大断面薄肉スキンプレート溶接四面ボックス柱の製作と溶接部靭性

正会員　　○西出 大介*1

大断面　　薄肉スキンプレート　　溶接四面ボックス柱
エレクトロスラグ溶接　　サブマージアーク溶接　　490N/mm² 級鋼材

1　はじめに

近年、建築鉄骨柱に大断面薄肉 CFT の溶接四面ボックス柱が採用されることが増えてきている。このような柱は、鉄骨製作において、スキンプレートの板厚が薄いことに起因するサブマージアーク溶接や、溶接線が長くなることに起因するエレクトロスラグ溶接の溶接難易度が上がる等の課題がある。また、柱に取り付く梁フランジの板厚が大きく、内ダイアフラムの板厚も大きくなる場合には、エレクトロスラグ溶接時に溶接入熱が大きくなるためにスキンプレートの溶接溶け落ちや溶接熱影響部（以下、HAZ）の靭性低下等の懸念もある。

本報では、上記のような大断面薄肉スキンプレート溶接四面ボックス柱を対象として、製作方法および溶接部の性能に関して報告する。

2　試験概要

2.1　試験体

試験用鋼材を表 1 に、試験用溶接材料を表 2 に示す。試験体形状を図 1 に示す。試験体は、スキンプレート板厚 22mm－ダイアフラム板厚 28mm、スキンプレート板厚 28mm－ダイアフラム板厚 40mm の 2 体とし、いずれも梁フランジを CO_2 半自動溶接で溶接した柱梁仕口形状とした。試験体に使用したスキンプレート用鋼材の化学成分および機械的性質を表 3,4 にそれぞれ示す。スキンプレートには、エレクトロスラグ溶接における HAZ 部の靭性劣化を抑え、安定した HAZ 性能を確保することを目的に高 HAZ 靭性仕様の鋼材を使用した。当該材は Ti や Mg 等の微細酸化物を活用して溶接時の HAZ 部の粒径粗大化防止と変態核として活用することでγ粒内からの粒内変態を活用し結晶粒径を小さくすることで靭性を上げるというコンセプトの鋼材である。

また角溶接継手および内ダイアフラム溶接の開先形状を図 2 に示す。

表 1　試験用鋼材

試験体	適用部位	板厚	規格	材質
試験体 A1	スキンプレート	PL-22	JIS G 3136	SN490C（高 HAZ 靭性仕様）
	内ダイアフラム	PL-28	JIS G 3136	SN490B
	裏当て金	SB-22×22 FB-28×50 FB-9×25	JIS G 3136	SNR490B SN490B SN490B
試験体 A2	スキンプレート	PL-28	JIS G 3136	SN490C（高 HAZ 靭性仕様）
	内ダイアフラム	PL-40	JIS G 3136	SN490B
	裏当て金	SB-22×22 FB-28×50 FB-9×25	JIS G 3136	SNR490B SN490B SN490B

表 2　試験用溶接材料

溶接方法	規格	銘柄
CO_2 半自動溶接（組立溶接）	JIS Z 3312 YGW11	YM-26（1.2ϕ）
CO_2 半自動溶接（下向）	JIS Z 3312 YGW18	YM-55C（1.4ϕ）
CO_2 半自動溶接（横向）	JIS Z 3312 YGW18	SM-55H（1.2ϕ）
非消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接	JIS Z 3353 YES562-S FES-Z	YM-55HF（1.6ϕ） YF-15I（75μm～850μm）（20×200）
サブマージアーク溶接	JIS Z 3183 S582-H	Y-DL（6.4ϕ） NSH-60S（150μm～1.4mm）（12×100）

表 3　スキンプレート用鋼材の化学成分

鋼種	板厚（mm）	C（%）	Si（%）	Mn（%）	P（%）	S（%）	Ceq（%）
SN490C（高 HAZ 靭性仕様）	22	0.12	0.30	1.54	0.010	0.002	0.40
	28						

表 4　スキンプレート用鋼材の機械的性質

鋼種	板厚（mm）	降伏点又は耐力（N/mm²）	引張強さ（N/mm²）	伸び（%）	降伏比（%）	シャルピー吸収エネルギー Ave（J）
SN490C（高 HAZ 靭性仕様）	22	402	521	31	77	357
	28	348	501	34	69	347

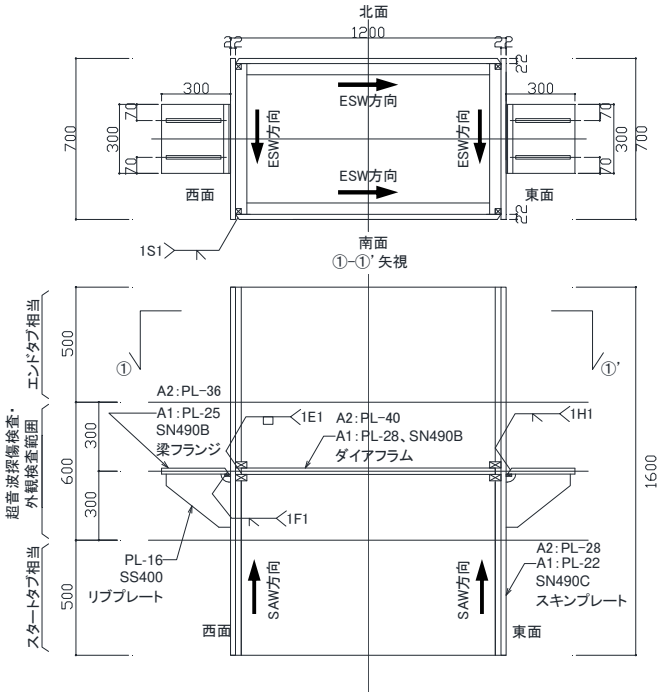
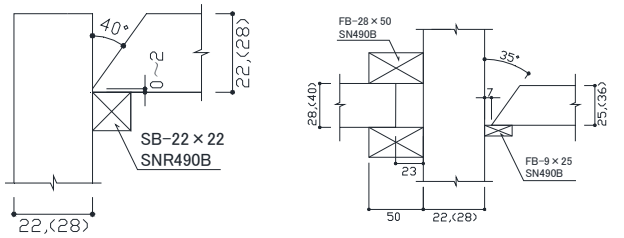


図 1　試験体形状
（スキンプレート厚 22mm（A1）、28mm（A2））



(a) SAW　　(b) ESW

図 2　開先形状

2.2　機械試験概要

本報で対象とする大断面薄肉スキンプレート溶接四面ボックス柱の内ダイアフラム溶接や角溶接に、エレクトロスラグ溶接や多電極のサブマージアーク溶接の大入熱溶接を採用する場合、HAZ 部の結晶が著しく粗大化し、靭性の劣化が懸念される。機械試験では、この HAZ 部靭性の確認を主目的としている。

表 5 に実施した試験の概要を示す。前述した試験体を用いて外観検査、超音波探傷検査を実施した後に、マクロ試験、シャルピー衝撃試験を行った。各試験片の採取位置を図 3 に示す。また衝撃試験片のノッチ位置を図 4 に示す。衝撃試験は図 5 に示す JIS Z 2242 V ノッチ試験片とし、試験本数は各ノッチ位置で 3 本とし、試験実施温度は 0℃とした。

また本試験では、角溶接部および内ダイアフラム溶接部に加え、梁フランジ溶接部の靭性も合わせて確認した。

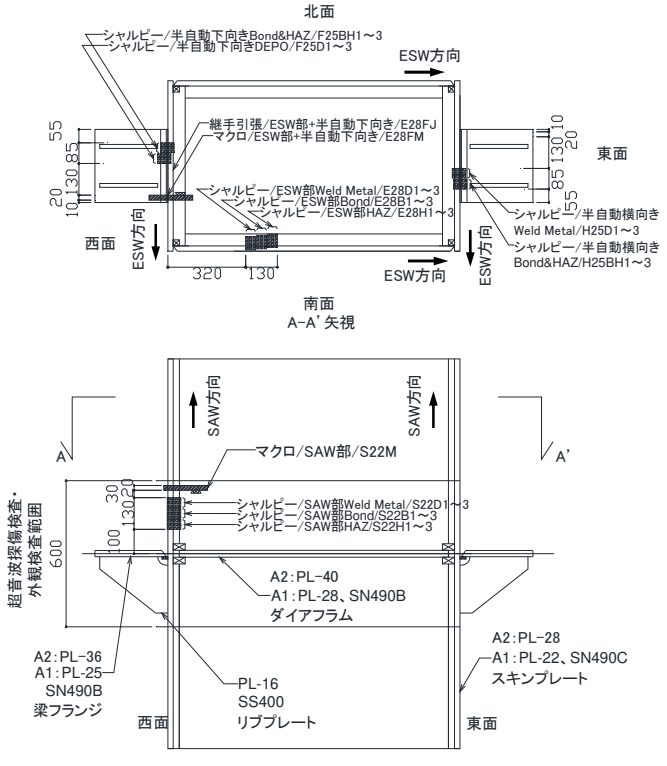
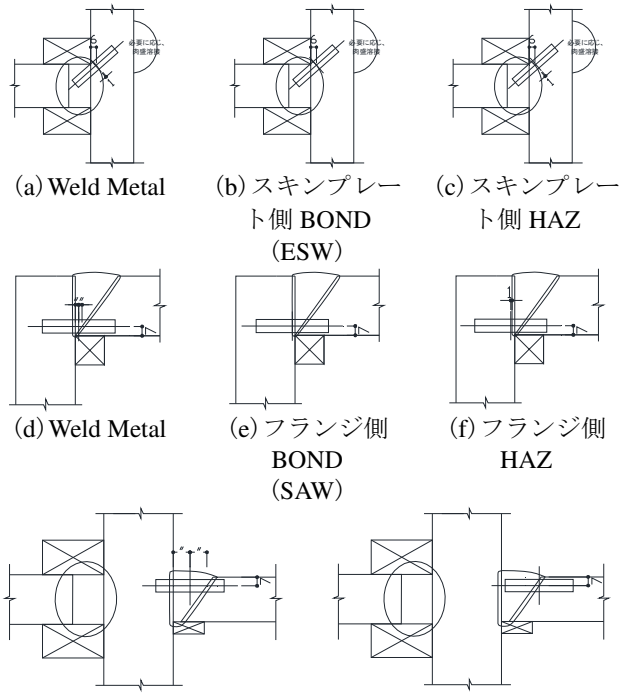


図 3　試験片採取位置

表 5　試験概要

溶接部位	溶接方法	溶接部記号	部位	材質	板厚 (mm)	試験体名	試験項目
角継手	SAW	1S1	スキンプレート	SN490C	22	A1	外観検査 超音波探傷検査 マクロ試験 シャルピー衝撃試験
		2S1			28	A2	
内ダイアフラム溶接	ESW	1E1	スキンプレート	SN490C	22	A1	
			内ダイアフラム	SN490B	28		
		2E1	スキンプレート	SN490C-HF	28	A2	
			内ダイアフラム	SN490B	40		
梁フランジ	GMAW	1C1 1Y1	梁フランジ	SN490B	25	A1	
		2C1 2Y1			36	A2	



(a) Weld Metal　(b) スキンプレート側 BOND (ESW)　(c) スキンプレート側 HAZ

(d) Weld Metal　(e) フランジ側 BOND (SAW)　(f) フランジ側 HAZ

(g) 表層 Weld Metal　(h) 表層 BOND&HAZ (GMAW)

図 4　シャルピー衝撃試験片採取位置

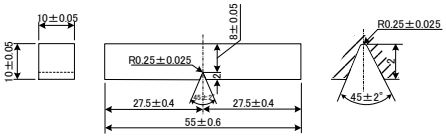


図 5　シャルピー衝撃試験片形状

3　試験体製作

3.1　試験体製作手順

試験体の製作手順を以下に示す。鋼板の寸法けがき、切断後に角溶接部の開先加工を行い、角溶接用の裏当て金を取り付け、コ形組立てを行う。その後、箱形組立てを行い、角継手溶接を行う。角溶接後、エレクトロスラグ溶接用の孔あけ加工を行い、エレクトロスラグ溶接を行う。エレクトロスラグ溶接始終端部の仕上げを行い、超音波探傷検査を行う。その後、梁フランジの組立て溶接および本溶接を行い、超音波探傷検査後に試験体製作完了となる。

3.2　溶接条件

溶接条件を表 6 に示す。エレクトロスラグ溶接の入熱は、内ダイアフラム板厚 28mm で約 425kJ/cm、板厚 40mm で約 633kJ/cm、角溶接の入熱は、スキンプレート板厚 22mm で約 140kJ/cm、板厚 28mm で約 227kJ/cm となった。

3.3　製作上の留意点

今回のように薄肉スキンプレートの溶接四面ボックスにおいてエレクトロスラグ溶接を行う場合、スキンプレートの板厚が薄いことで溶接溶け落ちの発生が懸念される。このようなの場合、スキンプレートの外側から水冷銅板を当てる等の対応を実施し、スキンプレートの温度上昇を防止しながら溶接を行うことも多いが、今回は製作の合理性を考えた上で、水冷銅板は使用せずに入熱を細かく管理することでスキンプレートの溶接溶け落ちを防ぐ手法を取ることとした。具体的には、溶接作業時に非接触温度計でスキンプレートの表面温度を測定し、表面最高温度を確認しながら入熱を調整し、溶接溶け落ちが発生しない溶接条件の絞り込みを行った（写真 1）。なお、表 7 に示すように初回（改善前）の条件では溶け込み深さが小さかったことにより、溶接溶け落ちの発生しない範囲で入熱を上げ、最終的な条件（改善後条件）を設定した。

また試験体が大断面でありエレクトロスラグ溶接の溶接線が長いことから、ノズルセット位置の精度が落ちてしまい、当初溶接スタート付近の溶け込み不足が発生した。その後、ノズルセット手順を基準化して管理することで改善を図っており、以下に具体的な手順を示す。ノズルを溶接箇所に差し込んだ後にノズル位置をダイアフラム幅の中心に目視でセットし、スキンプレート側面にセット位置をマーキングする。芯ずれが±1mm 以下であることを確認した後に、スタートタブをセットし、エレクトロスラグ溶接を開始する。また溶接中にはスキンプレートの焼け具合を確認しながらノズル位置の微調整も行うこととした。これらの手順で製作することにより、表 7（改善後）に示す通り安定的な溶け込み深さが得られることを確認した。

4　試験結果

4.1　外観検査および超音波探傷検査

外観検査では、平成 12 年度建設省告示 1464 号 [1]および日本建築学会：JASS6 鉄骨工事付則 6 鉄骨精度検査指針（2018）[2]に基づき、ビード外観および余盛高さに関して問題ないことを確認した。また超音波探傷検査は、JIS G 0901[3]および日本建築学会：鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準・同解説（2018）[4]に基づき、各溶接部で問題ないことを確認した。

4.2　マクロ試験

写真 4 に断面マクロ写真を示す。エレクトロスラグ溶接部、サブマージアーク溶接部ともに十分な溶け込みが得られており、スラグ巻き込み、ブローホールなどの溶接欠陥は認められなかった。

表 6　溶接条件

溶接方法		溶接姿勢	ワイヤ径（mm）	電流（A）	電圧（V）	溶接速度（cm/min）	入熱（kJ/cm）	パス間温度（℃）	予熱（℃）
SAW	A1	下向	L:6.4 T:6.4	1400 900	36 48	40	140	－	無
	A2		L:6.4 T:6.4	1550 1200	36 48	30	227	－	無
ESW	A1	立向	1.6	380	49	2.63	425	－	無
	A2	上進	1.6	380	51	1.84	633	－	無
GMAW	A1	横向	1.2	330	32	20.9	30.3	307	無
		下向	1.4	290	33	28.6	20.1	209	無
	A2	横向	1.2	350	33	22.0	31.5	328	無
		下向	1.4	280	33	27.3	20.3	239	無

写真 1　ESW 時の表面温度計測状況

表 7　溶け込み深さ実績

測定位置	改善前		改善後	
	上	下	上	下
1	3	4	10	9
2	2	2	6	4
3	5	3	7	4
4	5	2	5	6
5	6	2	5	6
6	7	2	7	6
7	4	3	6	7
8	4	3	6	7
9	3	5	6	7
10	2	4	5	4
11	5	4	4	5
12	3	2	4	6
13	-2	9	5	9

（単位：mm）

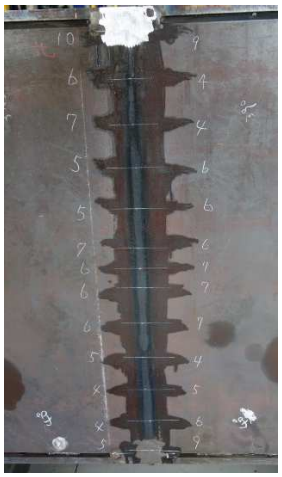
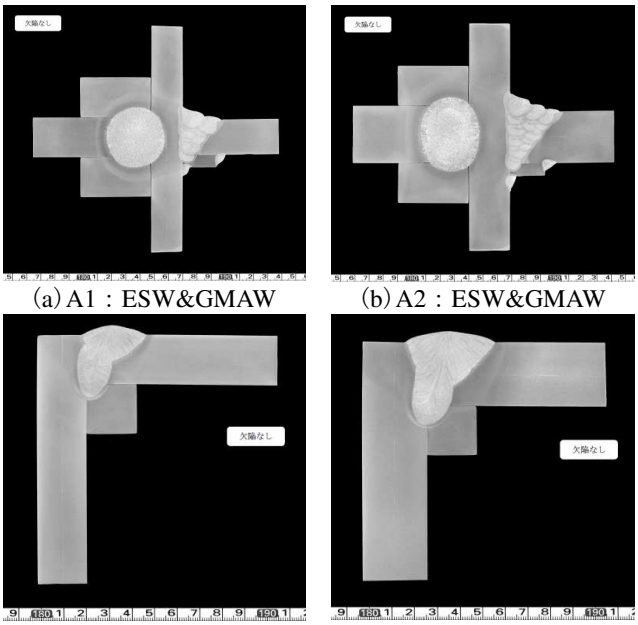


写真 2　溶け込み深さ測定実績

写真 3　ESW ノズルセット状況：芯ずれ量の計測



(a) A1：ESW&GMAW　(b) A2：ESW&GMAW

(c) A1：SAW　(d) A2：SAW

写真 4　断面マクロ写真

表 8　シャルピー衝撃試験結果（ESW）

部位		試験体	吸収エネルギー(J)		脆性破面率(%)		試験温度
			個値	平均値	個値	平均値	(℃)
A1	スキンプレート側 Weld Metal	E28D	202,245,234	227	45,13,18	26	0
	スキンプレート側 Bond	E28B	173,79,82	111	43,73,73	63	
	スキンプレート側 HAZ	E28H	182,233,214	210	34,18,25	26	
A2	スキンプレート側 Weld Metal	E40D	207,208,188	201	30,26,39	32	
	スキンプレート側 Bond	E40B	142,141,31	105	55,58,83	65	
	スキンプレート側 HAZ	E40H	179,169,169	172	36,44,44	41	

表 9　シャルピー衝撃試験結果（SAW）

部位		試験体	吸収エネルギー(J)		脆性破面率(%)		試験温度
			個値	平均値	個値	平均値	(℃)
A1	Weld Metal	S22D	99,122,110	110	27,23,27	26	0
	フランジ側 Bond	S22B	61,151,133	115	75,44,48	55	
	フランジ側 HAZ	S22H	151,138,216	168	28,40,0	22	
A2	Weld Metal	S28D	98,100,88	95	18,20,22	20	
	フランジ側 Bond	S28B	121,128,91	113	57,59,68	61	
	フランジ側 HAZ	S28H	215,197,216	209	0,19,0	6	

表 10　シャルピー衝撃試験結果（GMAW）

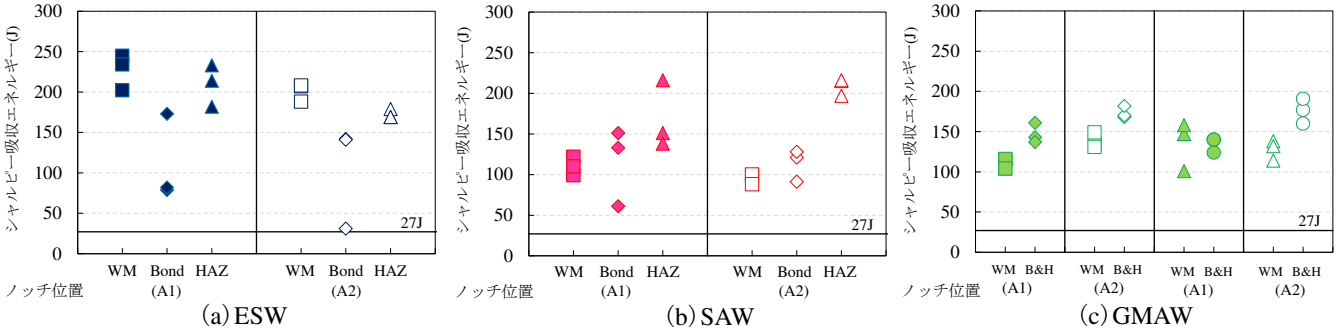
部位			試験体	吸収エネルギー(J)		脆性破面率(%)		試験温度
				個値	平均値	個値	平均値	(℃)
下向	A1	Weld Metal	F25D	115,116,104	112	22,20,33	25	0
		フランジ側 Bond&HAZ	F25BH	143,161,137	147	24,14,24	21	
	A2	Weld Metal	F36D	135,131,149	138	13,15,9	12	
		フランジ側 Bond&HAZ	F36BH	168,170,182	173	13,10,8	11	
横向	A1	Weld Metal	H25D	147,158,101	136	25,13,28	22	
		フランジ側 Bond&HAZ	H25BH	124,140,140	135	34,24,20	26	
	A2	Weld Metal	H36D	114,138,132	128	38,31,21	30	
		フランジ側 Bond&HAZ	H36BH	177,191,160	176	14,15,20	16	

4.3　シャルピー衝撃試験

表 8～10、図 6 に各ノッチ位置でのシャルピー吸収エネルギーを示す。エレクトロスラグ溶接部においては、両試験体ともにスキンプレート側 Bond および HAZ においても母材の規格値 27J を大きく上回る性能を有していることを確認した。サブマージアーク溶接部においても母材規格値 27J 以上の性能を十分に確保できていることが確認できた。CO_2 半自動溶接部においては、試験体および溶接姿勢による影響はほとんど見られず、いずれも十分な靭性を有していることを確認した。

5　まとめ

大断面薄肉スキンプレート溶接四面ボックス柱の溶接部靭性の確認試験を実施し、各溶接部において十分な靭性を有していることを確認した。またスキンプレートの板厚が薄いことで溶接溶け落ち等の懸念もあったが、安定的な製作手法を確立することができた。



(a) ESW　(b) SAW　(c) GMAW

図 6　シャルピー衝撃試験結果

参考文献
1) 平成 12 年度建設省告示 1464 号
2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事　第 11 版, 2018.1
3) 日本規格協会：JIS G 3129　鉄塔用高張力鋼鋼材
4) 日本建築学会：鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準･同解説, 2018.12

*1　株式会社平野鐵工所

*1 HIRANO IRON WORKS CO., LTD.