

(技術資料)

# 建築構造用高性能490 N/mm<sup>2</sup>級および550 N/mm<sup>2</sup>級冷間プレス成形角形鋼管

山口徹雄<sup>\*1</sup>・伊藤冬樹<sup>\*2</sup>・岡野重雄<sup>\*3</sup>・高橋弘志<sup>\*4</sup>

## High-Performance Cold-Press-Formed Rectangular Columns (490 N/mm<sup>2</sup> and 550 N/mm<sup>2</sup> Grades) for Building Structures

Tetsuo YAMAGUCHI・Fuyuki ITO・Shigeo OKANO・Hiroshi TAKAHASHI

### 要旨

本稿では、490 N/mm<sup>2</sup>級 (SBCP325TF) および550 N/mm<sup>2</sup>級 (SBCP385TF) の高性能冷間プレス成形角形鋼管の開発とその特性を紹介する。本鋼管の開発では角部および溶接熱影響部 (Heat Affected Zone : HAZ) におけるじん性の安定確保を、TMCP (Thermo-Mechanical Control Process) の適用による素材鋼板の高じん性化と低<sub>f<sub>HAZ</sub></sub>管理とした化学成分により達成した。これにより、従来必要とされた脆性 (ぜいせい) 破壊防止溶接積層法を適用せずに告示で要求される設計付加事項を除外可能とした。構造性能 (短柱圧縮・部材曲げ) においても優れた結果を示し、大臣認定および日本建築センター評定を取得している。既に実物件への適用も進行中である。

### Abstract

This paper presents the development and characteristics of high-performance cold-press-formed rectangular columns, SBCP325TF (490 N/mm<sup>2</sup> grade) and SBCP385TF (550 N/mm<sup>2</sup> grade). To ensure stable toughness in the corners and heat-affected zones (HAZ), the thermo-mechanical control process (TMCP) has been applied to enhance the toughness of the base steel plate, while the chemical composition has been optimized to achieve a low <sub>f<sub>HAZ</sub></sub> index. As a result, the additional design requirements specified in the public notice can be omitted, eliminating the need for the previously required non-brittle-fracture welding. Furthermore, both short-column compression and member bending tests confirmed excellent structural performance, and these achievements led to ministerial approval and certification by the Building Center of Japan. These columns are already being used in actual buildings.

### 検索用キーワード

490 N/mm<sup>2</sup>級鋼材, 550 N/mm<sup>2</sup>級鋼材, 冷間成形角形鋼管, TMCP, 溶接部性能, 短柱圧縮試験, 塑性変形性能

まえがき = 冷間成形角形鋼管は、柱梁接合部を通しダイアフラム形式とし、その溶接にロボット溶接を適用することで鉄骨生産性が高く、広く普及している。しかし、冷間プレス成形角形鋼管は角部が冷間加工されて鋼管角部のじん性は低下しやすいことが一般的に知られている。また、通しダイアフラム溶接の溶接熱影響部 (Heat Affected Zone, 以下、HAZ) からの早期の脆性 (ぜいせい) 破壊も懸念される。これらを防止するため、冷間プレス成形角形鋼管を柱に用いる場合、溶接組立箱形断面柱には適用されない設計付加事項による安全率が告示により課されている (昭和55年建設省告示第1791号第2、平成19年国土交通省告示第594号第4)。

従来から、冷間プレス成形角形鋼管の合理的な設計の観点において告示により課される設計付加事項を除外するために、冷間曲げ加工によりじん性が低下する角部でのじん性確保と、通しダイアフラム溶接部のHAZのじん性改善が求められていた。これらの要求に沿う十分な角部じん性を有し、脆性破壊防止溶接積層法を適用することで通しダイアフラム溶接部のHAZじん性が確保された冷間プレス成形角形鋼管が開発されBCP325Tとして知られている<sup>1),2)</sup>。BCP325Tは告示により課される

設計付加事項を除外可能であり、設計上の取り扱いを溶接組立箱形断面柱と同条件とすることが可能である。しかしながら、脆性破壊防止溶接積層法の適用が不可欠であったため、その施工に必要なビードサイズや位置の管理などの手間が大きく、ファブリケーターからはさらなる改善が求められていた。

そこで、当社では脆性破壊防止溶接積層法の適用が不要で、従来、告示により課されてきた設計付加事項を除外できる冷間プレス成形角形鋼管を、佐々木製罐工業株式会社と共同で開発した<sup>3)~7)</sup>。本稿では、建築構造用高性能490 N/mm<sup>2</sup>級冷間プレス成形角形鋼管SBCP325TF<sup>注1)</sup>、550 N/mm<sup>2</sup>級冷間プレス成形角形鋼管SBCP385TFについて紹介する。

### 1. 開発コンセプト

SBCP325TFとSBCP385TFでは鋼管角部のじん性の安定確保は、熱加工制御 (Thermo-Mechanical Control Process : 以下、TMCP) 技術を活用した素材鋼板製造時の温度の厳格管理により素材鋼板を高じん性化するこ

脚注) SBCPは佐々木製罐工業(株)の登録商標(第5926438号)である。

<sup>\*1</sup> 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 鋼板開発部 <sup>\*2</sup> 鉄鋼アルミ事業部門 厚板ユニット 厚板商品技術部

<sup>\*3</sup> 元 佐々木製罐工業株式会社 技術部 <sup>\*4</sup> 佐々木製罐工業株式会社 技術部

とを前提とした。これをもとに、合金設計の最適化によりHAZじん性の向上を図ることとした。

マグ溶接熱影響部靱性指標である $f_{HAZ}$ が高く、Ti・N管理がなされていない従来の鋼材成分では、一般的には単層溶接のHAZ組織は粗粒化しぜい化する<sup>8)</sup>。そこで、本開発鋼管では、低合金化、および低P・S化とTi・Nの成分管理により低 $f_{HAZ}$ 化(0.46%以下)した成分設計としている。古谷らの報告<sup>8)</sup>にある単層溶接と同等条件にて溶接施工(入熱40 kJ/cm, パス間温度350℃)して作製したサンプルのマイクロ組織写真を図1に示す。本開発鋼管においては、従来、脆化しやすかった単層溶接のHAZ組織においても、一般的にHAZのじん性が良好

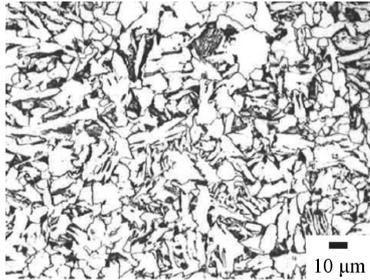


図1 ミクロ組織例(SBCP385TF)

Fig.1 Example of microstructure (SBCP385TF)

な多層溶接と同程度の微細なフェライト状組織となっている。これにより、HAZじん性の安定確保を図った。

## 2. 開発鋼管の特性

### 2.1 成分および鋼管母材特性

表1、表2に鋼管母材の化学成分と機械的性質の一例、およびその規格を示す。化学成分は1章の開発コンセプトのとおり低 $f_{HAZ}$ 化を達成する成分設計としている。機械的性質の評価における引張試験片は、平板部では圧延直角方向に、角部は管軸方向に採取した。平板部の引張特性は十分にスペックを満足している。角部では冷間加工の影響によって、平板部より降伏点・引張強さとも上昇が認められる。シャルピー衝撃試験片は、管軸方向にて平板部では表面から $t/4$ を、角部では外表面から6 mm内側の位置を中心として採取した。角部のシャルピー吸収エネルギーは平板部より若干低下するものの、TMCP技術を活用した高じん性な素材鋼板を用いることで、角部・平板部ともに70J(試験温度:0℃)を超える安定した値を実現している。

### 2.2 溶接部特性

角形鋼管柱と通しダイヤフラムの溶接部を模した試験体を用いて溶接部の特性を確認した。本鋼材の通しダイ

表1 化学成分  
Table 1 Chemical compositions

Type symbol	Size (mm)	Chemical composition(%)									
		C	Si	Mn	P	S	Ti	N	C <sub>eq</sub>	P <sub>CM</sub>	f <sub>HAZ</sub>
SBCP325TF	□400×16	0.14	0.35	1.23	0.007	0.001	0.011	0.0042	0.36	0.22	0.35
	□600×25	0.14	0.34	1.22	0.007	0.001	0.011	0.0035	0.36	0.21	0.34
	□550×40	0.14	0.35	1.23	0.007	0.001	0.011	0.0042	0.36	0.22	0.35
	Spec.	≤0.18	≤0.55	≤1.60	≤0.020	≤0.005	0.005≤ ≤0.025	0.002≤ ≤0.006	≤0.38	≤0.24	≤0.46
SBCP385TF	□600×19	0.14	0.32	1.21	0.007	0.001	0.011	0.0043	0.36	0.21	0.35
	□550×25	0.14	0.32	1.21	0.007	0.001	0.011	0.0043	0.36	0.21	0.35
	□450×28	0.14	0.35	1.26	0.007	0.001	0.012	0.0041	0.37	0.22	0.35
	□450×40	0.14	0.32	1.21	0.007	0.001	0.011	0.0043	0.36	0.21	0.35
	□650×60	0.13	0.35	1.48	0.012	0.001	0.013	0.0047	0.40	0.22	0.40
	Spec.	≤0.20	≤0.55	≤1.60	≤0.020	≤0.005	0.005≤ ≤0.025	0.002≤ ≤0.006	≤0.40	≤0.26	≤0.46

$$C_{eq}=C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14$$

$$P_{CM}=C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B$$

$$f_{HAZ}=C+Mn/8+6(P+S)+12N-4Ti \quad (\text{Set } Ti = 0 \text{ when } Ti \leq 0.005)$$

表2 機械的性質  
Table 2 Mechanical properties

Type symbol	Size (mm)	Flat section					Corner section				
		YP (N/mm <sup>2</sup> )	TS (N/mm <sup>2</sup> )	EL (%)	YR (%)	vE <sub>0</sub> (J)	YP (N/mm <sup>2</sup> )	TS (N/mm <sup>2</sup> )	EL (%)	YR (%)	vE <sub>0</sub> (J)
SBCP325TF	□400×16	396	517	29	77	296	517	597	23	87	253
	□600×25	364	504	28	72	309	481	565	25	85	261
	□550×40	397	525	33	76	257	506	560	26	90	245
	Spec.	325≤ ≤445	490≤ ≤610	21≤	≤80	70≤	—	—	—	—	70≤
SBCP385TF	□600×19	442	599	22	74	261	594	678	19	88	223
	□550×25	449	581	26	77	261	566	654	20	87	230
	□450×28	442	586	27	75	295	564	641	17	88	254
	□450×40	422	589	29	72	244	586	661	21	89	212
	□650×60	447	589	35	76	286	615	688	21	89	228
	Spec.	385≤ ≤505	550≤ ≤670	19≤ 21≤	≤80	70≤	—	—	—	—	70≤

Tensile test specimen from flat section: JIS Z 2241 No.1A (t≤40), No. 4 (40<t)-1/4t, transverse

Tensile test specimen from corner section: JIS Z 2241 No.14

Charpy impact test specimen from flat section: JIS Z2242 full size-1/4t-longitudinal

Charpy impact test specimen from corner section: JIS Z2242 full size-surface- longitudinal

表3 通しダイアフラム溶接部の入熱・パス間温度管理条件

Table 3 Heat input and interpass temperature control conditions for through diaphragm welds

Type symbol	Welding consumables	Pre-heating	Heat input (kJ/cm)	Interpass temperature (°C)
SBCP325TF	YGW18 (MG-56R)	None	≦ 30	≦ 250
SBCP385TF	G59JA1UC3MIT (MG-60)	None	≦ 30	≦ 250

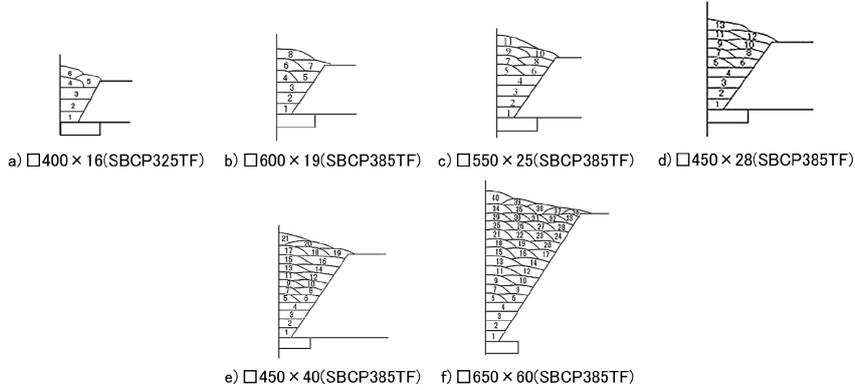


図2 溶接積層図の例

Fig.2 Examples of weld build-up diagram

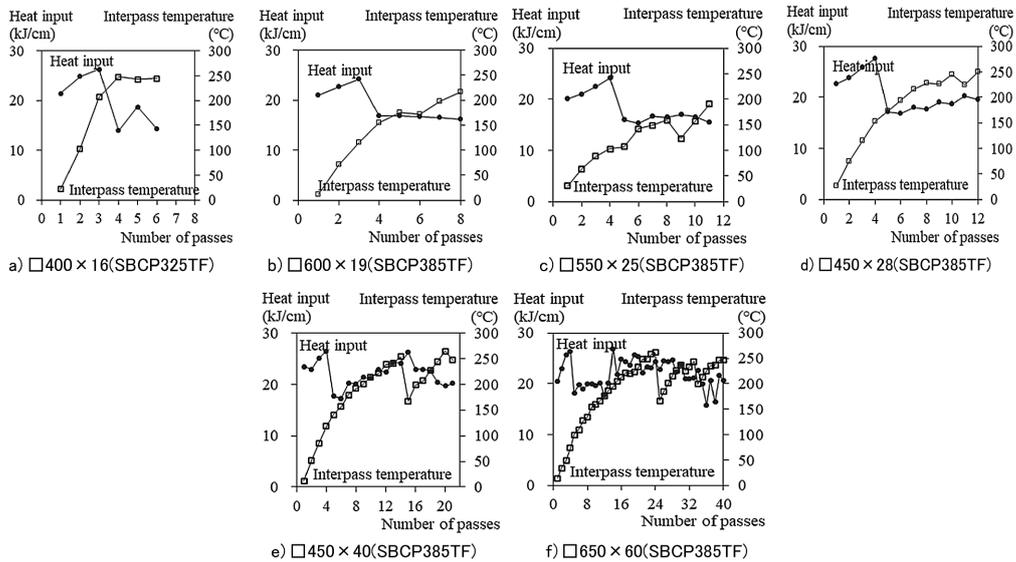


図3 入熱・パス間温度実績例

Fig.3 Examples of heat input and interpass temperature records

アフラム溶接部の入熱・パス間温度管理条件を表3に示す。溶接材料は角部の強度上昇を考慮してSBCP325TFには550 N/mm<sup>2</sup>級を, SBCP385TFには590 N/mm<sup>2</sup>級を用いた。また, 通しダイアフラムはSBCP325TFには490 N/mm<sup>2</sup>級鋼材を, SBCP385TFには550 N/mm<sup>2</sup>級TMCP鋼材を用いた。

溶接施工はロボットにて実施した。積層計画を図2に示す。16 mm厚では5層6パス, 19 mm厚では6層8パス, 25 mm厚では8層11パス, 28 mm厚では9層13パス, 40 mm厚では12層21パス, 60 mm厚では16層40パスである。入熱・パス間温度実績の一例を図3に示す。パス間温度は平板部で測定している。28 mm厚, 40 mm厚および60 mm厚では, 一部のパス間温度で250°Cに近い実績も見られている。図4に断面マクロの一例を示すが, 図2の積層図の通り溶接され, 溶接欠陥も見られな

かった。

表4に, 溶接部特性の一覧を示す。パス間温度が高いと冷却速度は遅くなり, 溶接金属強度やHAZじん性の低下が考えられる。28 mm厚, 40 mm厚, 60 mm厚のパス間温度は250°Cに近かったが, 溶接金属引張試験では鋼管母材より1グレード高い強度クラスを満足することを確認した。加えて, 継手引張試験においても平板部, 角部のいずれも母材で破断し鋼管母材の引張強さの下限を満足することを確認した。シャルピー衝撃試験では, 1章の開発コンセプトのとおり低 $f_{HAZ}$ 管理とした角形鋼管母材を用いることにより, パス間温度が250°Cに近い試験体のBOND位置も含め, いずれの試験位置においても70J(試験温度: 0°C)を超える安定した値が確保できていることを確認した。

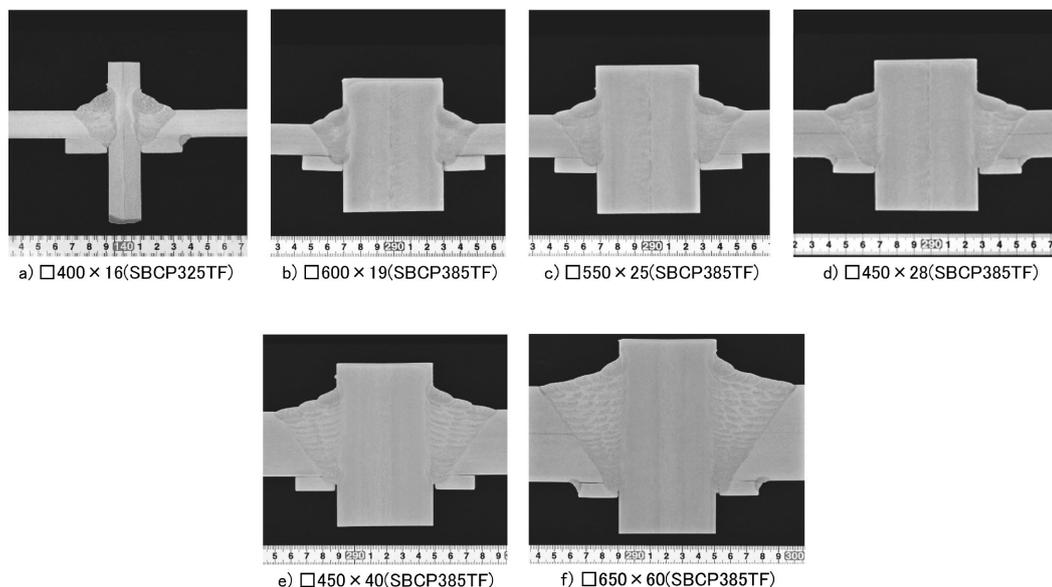


図4 断面マクロ写真例(平板部)

Fig.4 Examples of cross-sectional macrograph (flat plate section)

表4 溶接継手および溶接金属の引張試験, 溶接部のシャルピー衝撃試験結果  
Table 4 Results of tensile tests on welded joints and weld metal, and Charpy impact test of weld zone

	Size (mm)	Tensile test of welded joint <sup>※1</sup>				Tensile test of weld metal <sup>※2</sup>		Charpy impact test of welded joints (0°C,J)					
		Flat section		Corner section		Flat section		Flat section			Corner section		
		TS (N/mm <sup>2</sup> )	Fracture position	TS (N/mm <sup>2</sup> )	Fracture position	YP (N/mm <sup>2</sup> )	TS (N/mm <sup>2</sup> )	DEPO	BOND	BOND+1mm	DEPO	BOND	BOND+1mm
SBCP325TF	□400×16	514	Base metal	630	Base metal	531	620	106	219	288	89	225	281
	□600×25	512	Base metal	608	Base metal	558	620	187	193	219	175	180	227
	□550×40	533	Base metal	625	Base metal	540	609	189	261	288	204	215	232
SBCP385TF	□600×19	599	Base metal	713	Base metal	653	678	182	237	252	188	218	262
	□550×25	579	Base metal	660	Base metal	621	659	181	246	222	195	206	215
	□450×28	585	Base metal	659	Base metal	575	633	169	249	233	175	216	236
	□450×40	570	Base metal	664	Base metal	584	630	80	177	173	89	191	229
	□650×60	558	Base metal	660	Base metal	541	605	126	185	223	156	191	226

※1 JIS Z 3131 No.4

※2 JIS Z 3111 No.A1 φ12.5mm

### 3. 構造性能

#### 3.1 短柱圧縮試験 (SBCP385TF)

一般的に、柱材では構造耐力上支障のある局部座屈を生じさせないために昭和55年建設省告示第1791号第2、同第1792号第1および第3に示される幅厚比制限値が適用される。しかしながら、その適用強度クラスは基準強度で235~375 N/mm<sup>2</sup>となっている。SBCP385TFは、基準強度375 N/mm<sup>2</sup>を超えるため、短柱圧縮試験を行い、局部座屈に対する塑性変形性能を確認した。

試験体と実験結果の一覧を表5に示す。試験体は16 mm厚と12 mm厚の鋼板から冷間プレスにより成形した幅厚比をパラメータとした計3体である。鋼構造建築物の構造性能評価試験法に関する研究<sup>9)</sup>にある短柱圧縮試験と同様に、試験体高さ(H)は、辺長(D)の3倍とした。

応力-ひずみ関係を図5に、短柱圧縮試験後の外観例を図6に示す。いずれの試験体においても最大荷重を経過後に局部座屈が進行し終局した。D/tが小さくなるに従い、局部座屈の発生するひずみは大きくなり、塑性

変形倍率・応力上昇率とも大きくなる結果を得た。限界状態設計指針<sup>10)</sup>に示される幅厚比ランクごとの目標値との比較を図7に示す。本鋼管は幅厚比ランクごとの目標値を満足する塑性変形能力を有していることが分かる。

これらの結果より、基準強度が385 N/mm<sup>2</sup>である本鋼管においても、昭和55年建設省告示に示される幅厚比制限値を適用しても問題ないことを確認し、日本建築センター評定を得ている。

#### 3.2 部材曲げ実験

##### 3.2.1 実験計画

角形鋼管柱-通しダイアフラム溶接部の柱部材としての塑性変形能力確認のため、部材曲げ実験を実施した。部材曲げ実験に用いた鋼管、ダイアフラム、溶接材料および溶接条件は、短柱圧縮試験で適用した条件と同一である。試験体は図8に示すように、中央部に2枚の通しダイアフラムを溶接したものを用いた。試験体一覧を表6に、試験載荷状況を図9に示す。通しダイアフラム溶接部からの破断による塑性変形能力を評価するため、断面の幅厚比ランクは座屈が生じないようにFAランクと

表 5 短柱圧縮試験体一覧

Table 5 List of stub column compression test specimens

Specimen	Width D (mm)	Thickness t (mm)	Yield strength $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	Generalized width-to-thickness ratio	rank
FA	285	16	427	0.81	FA
FB	295	12	442	1.14	FB
FC	350			1.35	FC

Generalized Width-to-Thickness Ratio;  $D/t \cdot \sqrt{(\sigma_y/E)}$

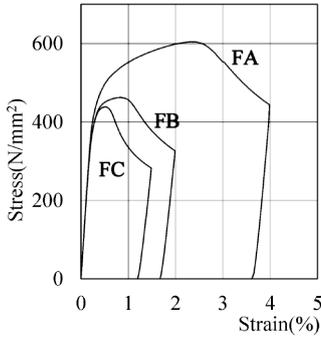


図 5 応力-ひずみ関係

Fig.5 Stress-strain relationship



図 6 短柱圧縮試験後の外観 (試験体FB)

Fig.6 Appearance after stub column compression test

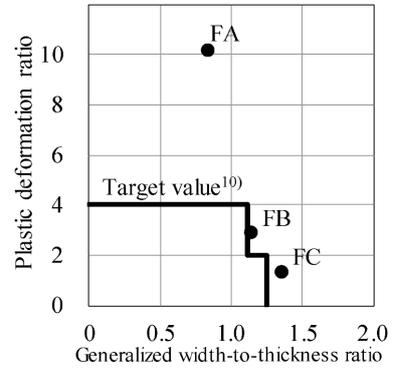


図 7 塑性変形倍率-一般化幅厚比関係

Fig.7 Plastic deformation ratio-generalized width-to-thickness ratio relationship

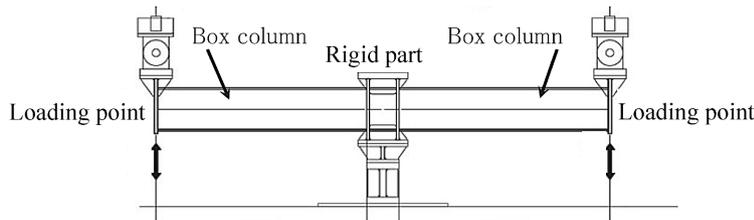


図 8 部材曲げ試験体セットアップ

Fig.8 Configuration of bending test specimen for structural component

表 6 部材曲げ実験 試験体一覧

Table 6 List of specimens for bending test

	Size (mm)	length (mm)	Loading direction (deg)	Width-to-thickness ratio	Equivalent width-to-thickness ratio
SBCP325TF	□600×25	3,900	45	24.0	0.99
	□550×40			13.8	2.77
SBCP385TF	□550×25	3,160	45	22.0	0.91
	□450×40			11.3	3.84

Equivalent width-to-thickness ratio;  $E/\sigma_y \cdot (t/D)^2$



図 9 試験载荷状況

Fig.9 Loading condition in member bending test



図10 SBCP385TF (□450×40) 実験終了時の破断部外観  
 Fig.10 Fracture appearance at the end of the test for SBCP385TF (□450×40)

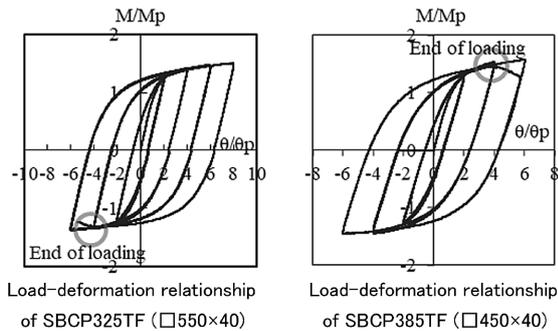


図11 M-θ関係の例  
 Fig.11 Examples of M-θ relationship

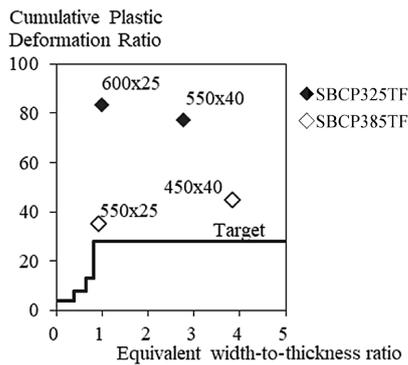


図12 幅厚比-累積塑性変形倍率関係  
 Fig.12 Width-to-thickness ratio-cumulative plastic deformation

し、SBCP325TF、SBCP385TFとも幅厚比を変化させて2体ずつ実験を行った。载荷方向は45°とした。

载荷は、全塑性耐力の計算値 $M_p$ に対応する弾性部材角 $\theta_p$ に対して、 $\pm 0.5\theta_p$ で予備载荷した。その後、 $2\theta_p$ 、 $4\theta_p$ 、 $6\theta_p$ 、…の変形量を正負各2回ずつ与える正負交番漸増繰返し载荷とした。荷重が最大荷重の90%まで低下した時点で载荷終了とした。

### 3.2.2 実験結果

部材曲げ実験終了後の試験体の破断部外観写真を図10に、曲げモーメント-部材角関係の一例を図11に示す。図11の縦軸の曲げモーメントは $M_p$ で、横軸の部材角は $\theta_p$ で無次元化している。SBCP325TF、SBCP385TFの計4体のいずれも終局サイクルで延性き裂の進展により荷重が低下し、実験を終了した。

図12には、幅厚比と累積塑性変形倍率の関係を示しており、今回の部材曲げ実験で得られた各試験体の結果(プロット)と「各ランクの柱に必要とされる累積塑性

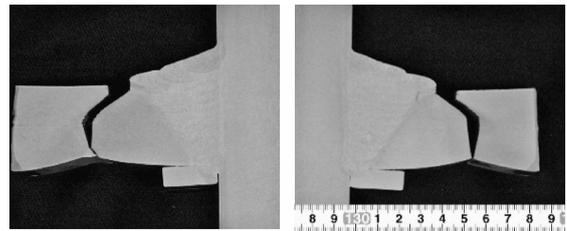


図13 破断サイクル後の破断角部 断面マクロ写真 (SBCP385TF □450×40)  
 Fig.13 Cross-sectional macrograph of fractured corner after failure cycle (SBCP385TF □450×40)

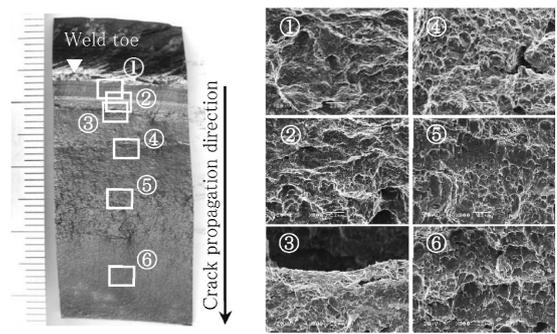


図14 破断面のSEM観察写真 (SBCP385TF □450×40)  
 Fig.14 SEM images of fracture surface (SBCP385TF □450×40)

変形倍率<sup>11)</sup>」との比較を示している。破面性状も確認しており、図13に破断部の断面マクロ写真を、図14に破面のSEM観察の一例を示すが、延性的に破断していた。これらの結果から、鋼管角部とHAZのじん性を向上させることで、早期の脆性的な破断を防止し、柱に必要なとされる累積塑性変形倍率を安定して上回っていることを確認した。

## 4. 角形鋼管の製造可能範囲と製造実績

製造可能範囲と製造実績について紹介する。表7および表8に製造可能寸法表を示す。SBCP325TFは最大で□1000 mm×40 mm、SBCP385TFは最大で□1400 mm×60 mmの大径厚肉サイズまでの製造が可能である。

SBCP325TF、SBCP385TF製造の角部じん性の実績を図15および図16に示す。角部のシャルピー衝撃試験片は、管軸方向にて外表面から6 mm内側の位置を中心として採取したものである。これまで多くの製造実績があるが安定したじん性を確認している。

表7 SBCP325TF直管製造寸法表

Table 7 Fabrication dimension table for straight columns in SBCP325TF

		Thickness t (mm)				
		16 ≤ t < 25	25 ≤ t < 28	28 ≤ t < 36	36 ≤ t < 40	40
Side length D (mm)	350 ≤ D < 400	○	—	—	—	—
	400 ≤ D < 450	○	○	—	—	—
	450 ≤ D < 500	○	○	○	—	—
	500 ≤ D < 550	○	○	○	○	—
	550 ≤ D ≤ 1000	○	○	○	○	○

Note 1: The above table refers to square cross-sections.

Intermediate sizes listed in the table are also available for production.

Note 2: In the case of rectangular cross-sections, production is possible as long as both the shorter and longer sides fall within the range specified in the above table.

表8 SBCP385TF直管製造寸法表

Table 8 Fabrication dimension table for straight columns in SBCP385TF

		thickness t (mm)					
		19 ≤ t < 40	40 ≤ t < 45	45 ≤ t < 50	50 ≤ t < 55	55 ≤ t < 60	60
Side length D (mm)	400 ≤ D < 450	○	-	-	-	-	-
	450 ≤ D < 500	○	○	-	-	-	-
	500 ≤ D < 550	○	○	○	-	-	-
	550 ≤ D < 600	○	○	○	○	-	-
	600 ≤ D < 650	○	○	○	○	○	-
	650 ≤ D ≤ 1400	○	○	○	○	○	○

Note 1: The above table refers to square cross-sections.

Intermediate sizes listed in the table are also available for production.

Note 2: In the case of rectangular cross-sections, production is possible as long as both the shorter and longer sides fall within the range specified in the above table.

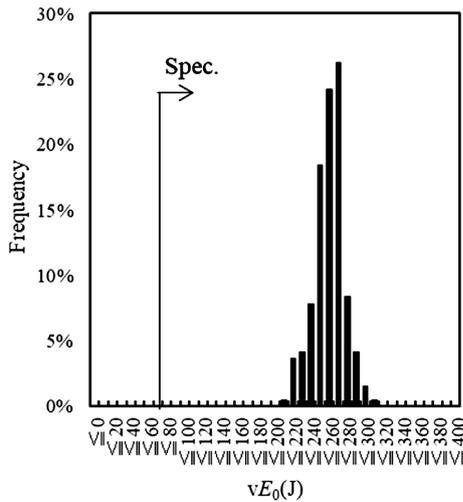


図15 SBCP325TFの角部じん性実績  
Fig.15 Corner toughness performance of SBCP325TF

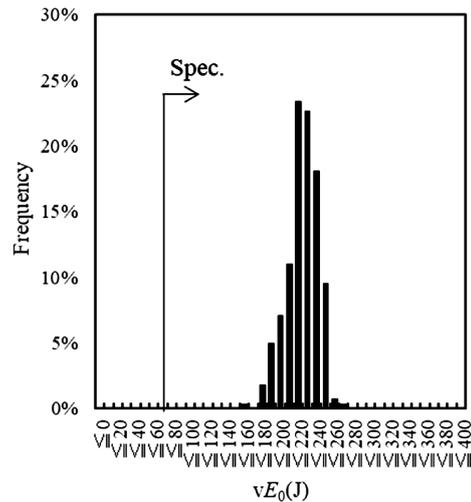


図16 SBCP385TFの角部じん性実績  
Fig.16 Corner toughness performance of SBCP385TF

むすび = 高性能冷間プレス成形角形鋼管SBCP325TF、SBCP385TFは、角部も含めた良好な母材特性および溶接部特性を有するとともに、優れた構造性能を有することを確認した。2020年6月に大臣認定を取得するとともに、脆性破壊防止溶接積層法の適用なく溶接組立箱形断面柱には課されない設計付加事項を除外できる設計上の取り扱いについて、日本建築センターの評定を取得している。

既に実物件での適用も進んでおり、今後も適用の拡大が期待される。

参考文献

1) 形山忠輝ほか. 鋼構造論文集. 2004, Vol.11, No.41, p.1-9.  
2) 石井 匠. 溶接学会誌. 2011, Vol.80, No.6, p.546-552.

3) 高橋弘志ほか. 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東). 2020, p.991-992.  
4) 伊藤冬樹ほか. 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東). 2020, p.993-994.  
5) 高橋弘志ほか. 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海). 2021, p.831-832.  
6) 岡野重雄ほか. 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海). 2021, p.833-834.  
7) 佐々木製鐵工業株式会社・株式会社神戸製鋼所. 鉄構技術. 2021, vol.34, No.401, p.21-24.  
8) 古谷仁志ほか. 鋼構造論文集. 2000, Vol.7, No.27, p.23-37.  
9) 建設省建築研究所. 社団法人鋼材倶楽部. 鋼構造建築物の構造性能評価試験法に関する研究 委員会報告書. 2002, p.36-39.  
10) 日本建築学会. 鋼構造限界状態設計指針・同解説. 2010, p.124-133.  
11) 建設省建築研究所. 社団法人鋼材倶楽部: 角形鋼管設計研究会研究報告書. 1993, p.145-149.