

1000N/mm²級鋼を用いた溶接4面ボックス柱－梁接合の開発

鈴井 康正 時野谷 浩良 丹羽 博則
 山中 昌之 中塚 光一 岡田 郁夫
 (本社設計本部) (本社設計本部) (本社設計本部)

Development of Beam-to-box Column Connection with 1000-N/mm²-class Ultra-high-strength Steel

Yasumasa Suzui Hiroyoshi Tokinoya Hironori Niwa
 Masayuki Yamanaka Koichi Nakatsuka Ikuo Okada

Abstract

The Obayashi Corporation has developed beam to box column connections with 1000-N/mm²-class ultra-high-strength steel and has used it in the construction of the new building of the Technical Research Institute (TRI). Columns with the 1000-N/mm²-class ultra-high-strength steel are built by partial penetration welding at the corner seams and enable simplification of the welding procedure. This paper presents the properties of these beam-to-box column connections and describes the test results of inspecting its welding procedure, structural performance, and fire-resistant properties. Furthermore, the paper describes its application to the design and construction of the new building of the TRI.

概 要

構造物の大型化・高層化，大地震時無損傷構造物の実現，柱の細径化による意匠性の向上などの観点から，建築物に高強度鋼を適用する事例が増加している。今回，建築構造用としては世界最高強度の1000N/mm²級鋼を用いた外ダイアフラム形式の溶接4面ボックス柱－梁接合を開発し，実建物に適用した。1000N/mm²級鋼の適用に際しては高度な溶接施工とその品質管理が課題であったが，開発した溶接4面ボックス柱では，角溶接を部分溶込み溶接とすることにより，溶接施工性の向上や品質管理の簡略化を図っている。本報では，開発した溶接4面ボックス柱－梁接合の概要，溶接性能・構造性能・耐火性能に関する検証試験の結果，実建物への適用状況について報告する。

1. はじめに

構造物の大型化・高層化に伴い，建築物の構造部材に高強度鋼を適用する事例が増加している。高強度鋼を構造部材として活用することにより，部材断面サイズの縮小や鋼材重量の削減が可能となるため，建物の意匠性の向上，部材の製作・運搬・施工を含めたトータルコストの削減，環境負荷低減への貢献が期待できる。また，最近では，弾性範囲が大きいという高強度鋼の特徴を活かした新たな架構形式の提案や実施例も出始めている¹⁾。

当社はこれまでに，建築構造用780N/mm²級鋼(H-SA700)を用いた柱部材(超高強度CFT柱)を技術研究所の本館テクノステーションに適用する²⁾など，高強度鋼を用いた部材・接合技術の開発を進めてきた。

今回，世界最高強度の建築構造用1000N/mm²級鋼³⁾を用いた外ダイアフラム形式の溶接4面ボックス柱－梁接合を開発し，技術研究所に新たに建設する研究施設(オープンラボ2)に適用した。

1000N/mm²級鋼の適用には高度な溶接施工とその品質管理が課題であったが，開発した溶接4面ボックス柱では，

角溶接を部分溶込み溶接とすることにより，溶接施工性の向上や品質管理の簡略化を図っている。

本報では，開発した溶接4面ボックス柱－梁接合の概要，溶接性能・構造性能・耐火性能に関する検証試験の結果，実建物への適用状況について報告する。

2. 溶接4面ボックス柱－梁接合の概要

2.1 開発ディテールの構成と特徴

今回開発した柱－梁接合の概要をFig. 1に示す。柱は1000N/mm²級鋼(引張強さ1000N/mm²クラス)を用いた溶接4面ボックス柱である。梁には当社の「ウィングビーム[®]」⁴⁾を採用し，梁フランジ端部に水平ハンチを設けることにより，大地震時における梁端接合部の変形性能を高めている。また，柱に対する加工量を減らすために，外ダイアフラム形式としている。

1000N/mm²級鋼溶接4面ボックス柱における角溶接の仕様をFig. 2に示す。角溶接の仕様は初層を低強度溶接材料によるシールビード，第二層以降を1000N/mm²級溶接材料によるサブマーリアーク溶接(SAW)としている。

通常、柱の角溶接は完全溶込み溶接とすることが多いが、部分溶込み溶接とすることにより、溶接パス数の削減による溶接施工の省力化、品質管理の簡略化が期待できる。ただし、部分溶込み溶接とするには、設計および施工の種々の観点からの検討が必要である。設計においては、地震時に角溶接部に要求されるせん断耐力の大きさから、部分溶込み溶接の必要のど厚を決定している。

2.2 1000N/mm²級鋼について

鋼材の引張試験により得られた1000N/mm²級鋼の応力-ひずみ関係の例を490N/mm²級鋼や780N/mm²級鋼と比較してFig. 3に示す。1000N/mm²級鋼は、建築分野で一般に使用される490N/mm²級鋼の約2倍の引張強さを有し、弾性範囲が極めて大きい。

なお、780N/mm²級鋼の構造物への適用については、建築分野で実施例が数件ある他、橋梁、水圧鉄管、パイプライン、建設機械などで適用実績がある。1000N/mm²級鋼に関しては、水圧鉄管で適用実績があるが、建築分野では実施例がわずかに1件ある³⁾のみである。

3. 溶接性能の検証

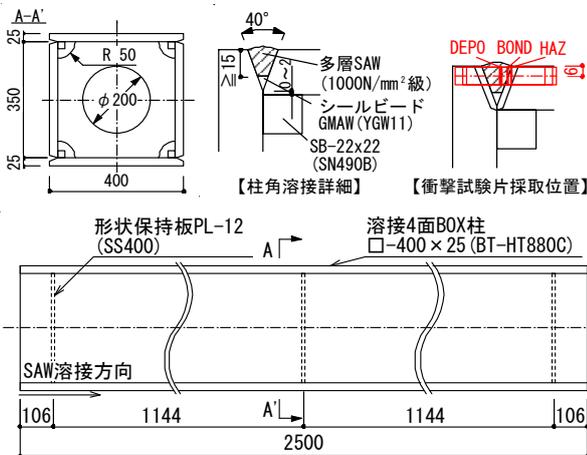
3.1 溶接施工性試験の目的

1000N/mm²級鋼溶接4面ボックス柱の実構造物への適用を想定して、実大断面の柱部材を用いた溶接施工試験を実施し、溶接欠陥の有無や機械的特性を確認した。

3.2 試験計画

溶接施工試験体概要をFig. 4に示す。柱断面サイズは□-400×25とし、角溶接部の開先形状は、開先角度40°のV形開先とした。試験体数は計2体である。柱に使用する1000N/mm²級鋼には、建築構造用高強度1000N/mm²級鋼材「BT-HT880C」（新日鐵住金製、大臣認定品）を使用した（以降の章についても同様）。

柱に使用する鋼材の引張試験結果をTable 1、使用溶接



※SAW：サブマージアーク溶接，GMAW：ガスシールドアーク溶接，DEPO：溶着金属，BOND：ボンド部，HAZ：熱影響部

Fig. 4 溶接施工試験体 Specimens of Welding Procedure Test

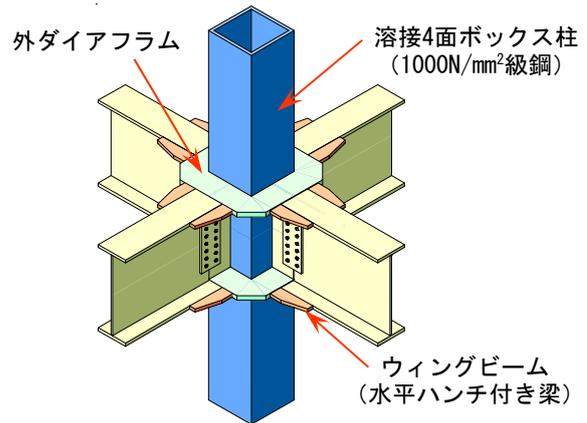


Fig. 1 柱-梁接合概要 Outline of Beam to Box Column Connection

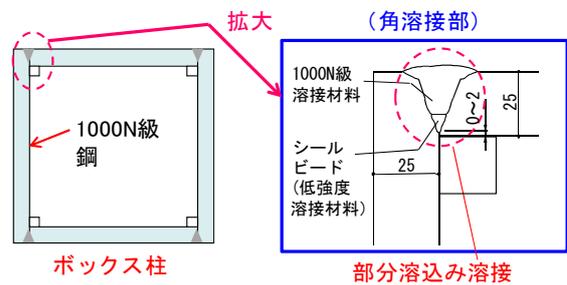
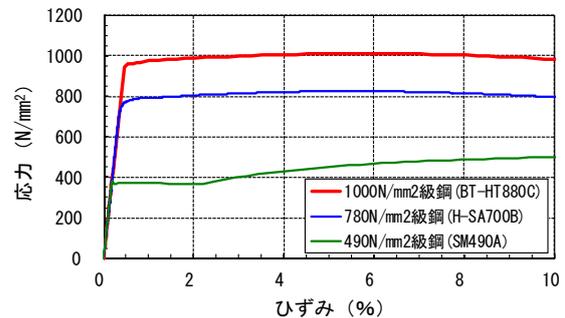


Fig. 2 溶接4面ボックス柱の角溶接部 Corner Welding of Box Column



※板厚25mm，ひずみ10%までを表示

Fig. 3 鋼材の応力-ひずみ関係 Stress-Strain Relationship of Steel Material

Table 1 鋼材の機械的性質 (素材試験結果) Mechanical Properties of 1000N/mm² Class Ultra High Strength Steel

鋼種	板厚 (mm)	試験体 No.	降伏点 又は 0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	伸び (%)	シャルピー衝撃値 (0°C) (J)
BT-HT880C	25	1	955	1007	94.9	18.1	170
		2	964	1013	95.1	17.8	172
鋼材規格値			880 ~ 1060	950 ~ 1130	98以下	13以上	70以上

※引張試験結果は、JIS Z2241 4号試験片 2本の平均値

※シャルピー衝撃試験結果は、JIS Z2242 2mmVノッチ試験片3本の平均

Table 2 使用溶接材料 Applied Welding Material

適用部位	溶接方法	銘柄	規格
柱角溶接部 (1000N級溶接材料)	SAW	ワイヤ：Y-100S(4.0φ)	大臣認定品
		フラックス：NB-100S(12×48)	
柱角溶接部 (シールドビード)	GMAW	ワイヤ：KC-50(1.2φ)	YGW11 (JIS Z 3312)

材料をTable 2, 適用溶接条件をTable 3に示す。溶接部における割れの発生を防ぐために, 予熱, 後熱を実施した。試験項目は, 角溶接部の硬さ試験, マクロ試験, シャルピー衝撃試験などとした。

3.3 試験結果

ここでは, 柱角溶接部のサブマージアーク溶接 (SAW) を対象に行った試験結果の一部について報告する。

マクロ試験結果の例をPhoto 1に示す。設定した溶接条件で溶接を行うことにより, 溶接部に割れ等の欠陥が生じることがなく, 十分な溶込みが得られた。

硬さ測定試験結果の例をFig. 5に示す。溶接部のピッカース硬さ値 (HV) は概ね350以下であり, 溶接部の割れに繋がるような著しい硬化は見られなかった。

シャルピー衝撃試験結果をTable 4に示す。溶着金属 (DEPO), ボンド部 (BOND), 熱影響部 (HAZ) のいずれのノッチ位置でも, 0°での吸収エネルギーは70J以上の値であり, 1000N/mm²級鋼の規格値を上回る靱性を示した。

4. 構造性能の検証

4.1 構造性能検証実験の目的

柱-梁接合部パネルには地震時に大きなせん断力が作用するため, 柱の角溶接を部分溶込み溶接とした場合, 構造性能を確認する必要がある。ここでは, 1000N/mm²級鋼溶接4面ボックス柱を対象として, 柱-梁接合部パネルの十字骨組実験を実施し, 部分溶込み溶接におけるのど厚がパネルの力学的挙動や耐力に及ぼす影響を調査した。併せて, 溶接管理が比較的容易な低強度溶接材料による溶接を適用した場合の構造性能を確認した⁵⁾。

4.2 実験計画

4.2.1 試験体 試験体概要をFig. 6に示す。試験体は柱, 梁, ダイアフラム, 接合部パネルからなる十字形部分架構とし, 柱高さは2H=3000mm, 梁スパンは2L=4000mm, 外ダイアフラム形式とした。試験体一覧をTable 5に示す。試験体数は計3体である。角溶接仕様について, 試験体No.1は1000N/mm²級溶接材料による1パスのサブマージアーク溶接 (SAW) とし, No.2は初層を低強度溶接材料によるシールド, 第二層以降を1000N/mm²級溶接材料による多パスのSAWとし, SAWにおけるのど厚の影響を比較した。No.3は, No.2と同一の開先形状で全層を低強度溶接材料による多パスのガスシールドアーク溶接 (GMAW) とし, 低強度溶接材料の適用可能性を検討した。また, 接合部パネルまたはパネル内の角溶接部が先行して降伏・破壊するように試験体を設計した。試験体の柱母材の機械的性質をTable 6に示す。

4.2.2 荷重・計測方法 荷重方法は, Fig. 6に示すように柱端をピン支持として梁端に逆対称荷重を行うものとし, 地震時の曲げモーメント分布を再現した。荷重スケジュールをFig. 7に示す。柱母材の降伏せん断歪 γ_y

Table 3 適用溶接条件 (1000N/mm²級溶接材料)
Applied Welding Condition

適用部位	溶接方法	予熱温度 (°C)	入熱 (kJ/cm)	パス間温度 (°C)	後熱処理	
					温度 (°C)	保持時間 (hr)
柱角溶接部 (1000N級溶接材料)	SAW	≧150	≦35	125~200	200~250	1.0

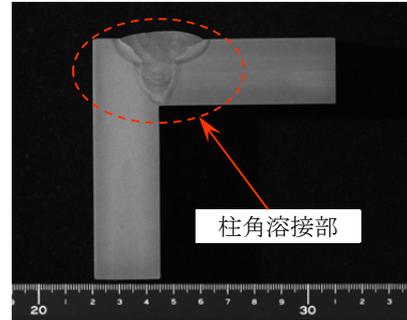


Photo 1 マクロ試験結果
Results of Sectional Macro Test

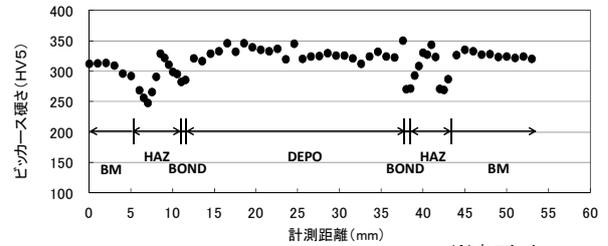


Fig. 5 硬さ試験結果
Results of Hardness Test

Table 4 シャルピー衝撃試験結果
Results of Charpy Impact Test

適用部位	試験体 No.	ノッチ位置	吸収エネルギー (J)
柱角溶接部 (1000N級溶接材料)	1	DEPO	152
		BOND	126
		HAZ	181
	2	DEPO	156
		BOND	92
		HAZ	192

※DEPO: 溶着金属, BOND: ボンド部, HAZ: 熱影響部

($= \sigma_y / \sqrt{3G}$, σ_y : 柱母材の降伏点=963N/mm², G: せん断弾性係数=7.9×10⁴N/mm²) を基準とし, 接合部パネルにせん断変形角 $\gamma = \pm 1/4 \gamma_y, \pm 1/2 \gamma_y, \pm 1 \gamma_y, \pm 2 \gamma_y, \pm 3 \gamma_y, \pm 4 \gamma_y$ を各2サイクル与えた後, 正側に単調荷重を行う計画とした。

変位計測方法をFig. 8に示す。これらの値より, 接合部パネルモーメント pM および接合部パネル変形角 γ を(1)~(2)式で求めた。

$$pM = ({}_b P_R + {}_b P_L) \times L \times \left(1 - \frac{h'}{2H} \right) \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{d_{p1} - d_{p2}}{2} \sqrt{\frac{1}{(B-t)^2} + \frac{1}{h^2}} \quad (2)$$

Table 5 試験体一覧
List of Test Specimens

	No.1	No.2	No.3
柱角溶接部仕様			
マクロ写真			
溶接方法	SAW	GMAW+SAW	GMAW
のど厚	8.5mm	SAW : 12.7mm GMAW : 4.0mm	16.1mm
バス間温度	—	125~200℃	350℃
入熱	35kJ/cm以下	35kJ/cm以下	40kJ/cm以下
予熱温度	150℃以上	150℃以上	予熱なし
後熱温度	後熱なし	250~300℃ 0.5hr	後熱なし
溶接材料	Y-100S(4.0φ) NB-100S(12×48)	Y-100S(4.0φ) NB-100S(12×48) KC-50(1.2φ)	KC-50(1.2φ)

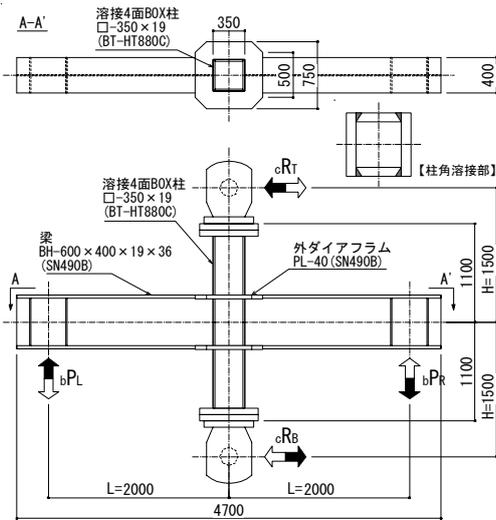


Fig. 6 試験体概要
Outline of Test Specimens

Table 6 使用鋼材 (柱母材) の機械的性質
Mechanical Properties of Steel Material

鋼種	板厚 (mm)	降伏点 又は 0.2%耐力 (N/mm ²)	引張 強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	伸び (%)
BT-HT880C	19	963	1001	96.2	30.3
鋼材規格値		880 ~1060	950 ~1130	98以下	19以上

※JIS Z2241 5号試験片

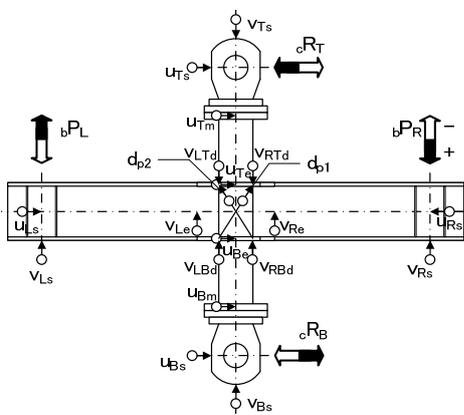


Fig. 8 変位計測概要
Measurement of Displacement

ここで、H：柱高さの1/2，L：梁スパンの1/2，h'：梁フランジ中心間距離，B：柱幅，t：柱母材板厚，b_{pR}：右側梁端への載荷荷重，b_{pL}：左側梁端への載荷荷重，d_{p1}，d_{p2}：接合部パネル対角方向変位

4.3 実験結果

4.3.1 実験経過 試験体No.1では、正側2γ_yの1サイクル目において、接合部パネル内のうちの角溶接線が破断し最大耐力に達したが、急激な荷重低下は生じなかった。その後、同振幅で2回繰り返す途中で全ての角溶

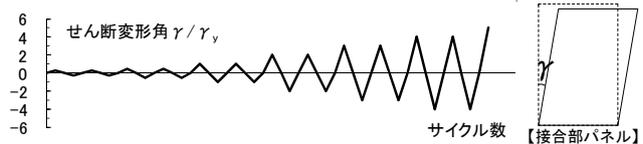
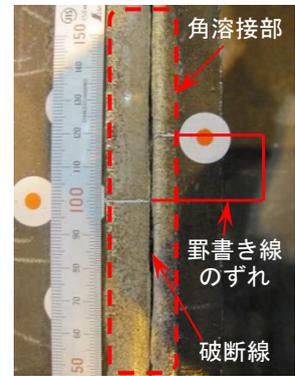


Fig. 7 載荷スケジュール
Test Program



(a) 接合部パネルのせん断変形(No.2)



(b) 柱角溶接部の破断(No.3)

Photo 2 試験終了時の損傷状況
Failure Mode after Loading Test

接線が破断した。試験体No.2では、4γ_yまで角溶接部で破断することなく、接合部パネル内の柱鋼管壁がせん断変形し塑性化が進んだ (Photo 2(a))。試験体No.3では、4γ_yまでは試験体No.2と同様の破壊経過を辿ったが、その後、正側単調載荷を継続すると、接合部パネル内の全ての角溶接線が破断した (Photo 2(b))。

4.3.2 接合部パネルの荷重-変形関係 接合部パネルのパネルモーメント_{pM}-パネルせん断変形角γ関係をFig. 9に示す。図中には、パネルひずみ降伏時 (パネル中央部の3軸ゲージにより判定)、最大耐力時を各々○印、

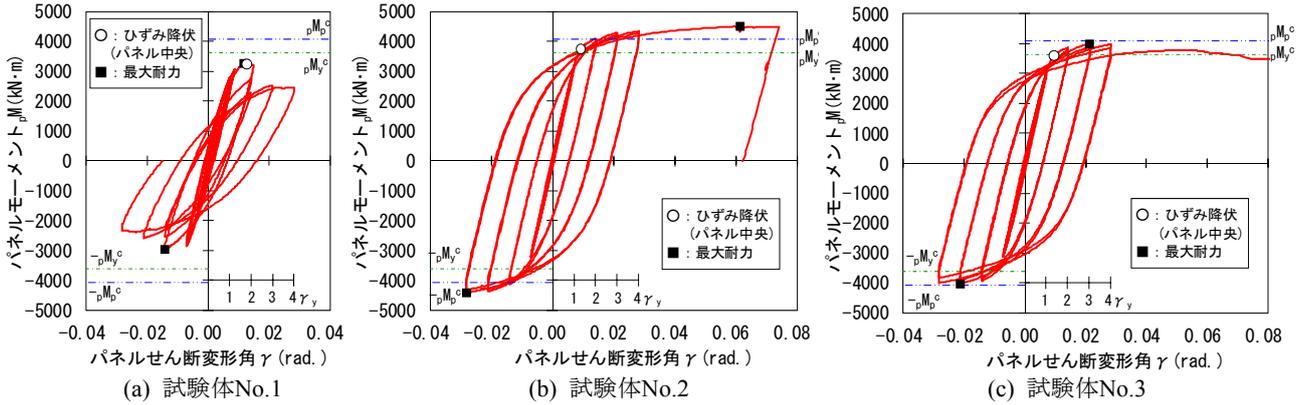


Fig. 9 パネルモーメント-パネルせん断変形角関係
Moment - Shear Deformation Angle Relationship of Panels

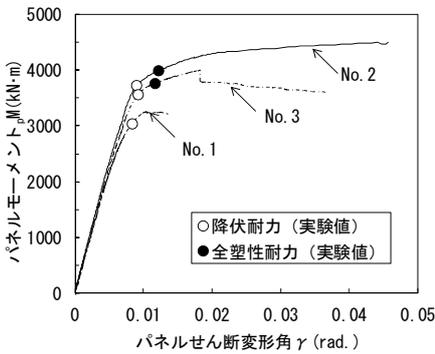


Fig. 10 骨格曲線 (正側)
Skelton Curve

Table 7 パネル耐力一覧
List of Strength of Panels

試験体 No.	降伏耐力		全塑性耐力			最大耐力		[備考] パネルの 破壊モード	
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	実験値			
	pM_y^c (kN·m)	pM_y^c (kN·m)	$\frac{pM_y^c}{pM_y^c}$	pM_p^c (kN·m)	pM_p^c (kN·m)	$\frac{pM_p^c}{pM_p^c}$	pM_u^c (kN·m)		$\frac{pM_u^c}{pM_p^c}$
1	3038	3610	0.84	—	4061	—	3260	0.80	柱角溶接き裂
2	3725	3627	1.03	3990	4081	0.98	4502	1.10	パネルせん断降伏進展
3	3560	3627	0.98	3760	4081	0.92	4030	0.99	柱角溶接き裂

※ [実験値] pM_y^c : 1/3 slope factor⁶⁾により算出したパネル降伏耐力, pM_p^c : 0.35%オフセット法⁶⁾により算出したパネル全塑性耐力, pM_u^c : パネル最大耐力 (正側, 負側の絶対値の最大値)
[計算値] 柱母材の引張試験結果に基づき計算。柱板厚には試験体の実測値 (試験体No.1: 19.6mm, 試験体No.2, 3: 19.7mm) を使用。 pM_y^c : パネル降伏耐力⁶⁾, pM_p^c : パネル全塑性耐力⁶⁾

■印で示している。また、文献6)に基づき計算したパネル降伏耐力 pM_y^c 、パネル全塑性耐力 pM_p^c を併記している。角溶接のど厚が小さい試験体No.1は、パネルのひずみ降伏が生じる前に剛性が低下しているが、角溶接のせん断降伏が先行したためと考えられる。試験体No.2, No.3では、 $\gamma = 4\gamma_y$ までの荷重振幅において紡錘形の履歴性状を示した。

4.3.3 接合部パネルの耐力挙動 Fig. 9の $pM-\gamma$ 関係図をもとにFig. 10に示す骨格曲線 (正側) を作成し、パネル降伏耐力の実験値 pM_y^c (○印)、パネル全塑性耐力の実験値 pM_p^c (●印) を算出した。ここで、 pM_y^c は接線剛性が弾性剛性の1/3に低下したときの耐力、 pM_p^c は0.35%オフセット法による耐力⁶⁾である。各試験体における初期剛性の違いは小さい。また、試験体No.2, No.3間での pM_y^c 及び pM_p^c の差も比較的小さい。

接合部パネルの耐力一覧を Table 7に示す。試験体 No.2では、パネル降伏耐力、全塑性耐力の実験値と計算値は良い対応を示している。すなわち、1000N/mm²級の鋼材や溶接材料を用いた接合部パネルに対して、現行の指針による耐力評価式を準用することにより、安全側の耐力評価が可能である。また、角溶接の全層に低強度溶接材料を適用した No.3 では、1000N/mm²級溶接材料を適用した No.2 と比較して、パネルの剛性や耐力は若干低下する傾向にあるものの、溶接材料強度の違いほどの顕著な差は生じなかった。

5. 耐火性能の検証

5.1 耐火性能検証実験の目的

前述の通り、1000 N/mm²級鋼の建築分野での実施例は未だ1件のみであり、その高温時における力学的性質に関する実験データ等は未だ十分に蓄積されていない。そこで、1000 N/mm²級鋼溶接4面ボックス柱の耐火性能を確認することを目的として、鋼材の高温引張試験および柱部材を対象とした荷重加熱実験を実施した。

5.2 鋼材の高温引張試験

5.2.1 試験方法 1000 N/mm²級鋼「BT-HT880C」の高温強度特性を把握することを目的として、JIS G 0567「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」に準拠した高温引張試験を実施した。供試体は、II-10形試験片 (平行部の径 ϕ 10 mm, 標点距離50 mm) として厚44 mmの鋼板の1/4厚より削り出して製作し、各設定温度 (常温~700℃の8水準) につき各2体を試験に供した。荷重速度は、ひずみ10 %までは0.3 %/分の一定ひずみ速度とし、同10 %以降は7.5 %/分の速度で破断まで荷重した。

5.2.2 試験結果 高温引張試験の結果について、1.0%ひずみ時耐力 (降伏強度) と引張強さをFig. 11に、ヤング率をFig. 12に示す。なお、Fig. 11は鋼板の基準強度880 N/mm²で無次元化した値を示しており、さらに耐火

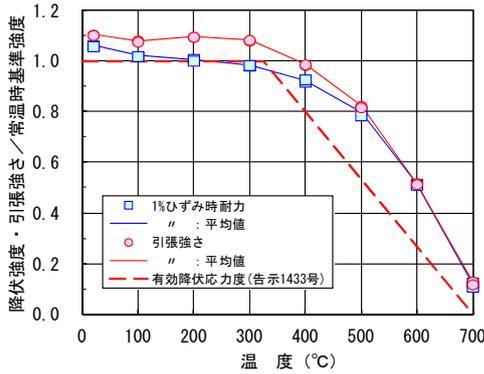


Fig. 11 鋼材の高温強度特性
Mechanical Properties at High Temperature

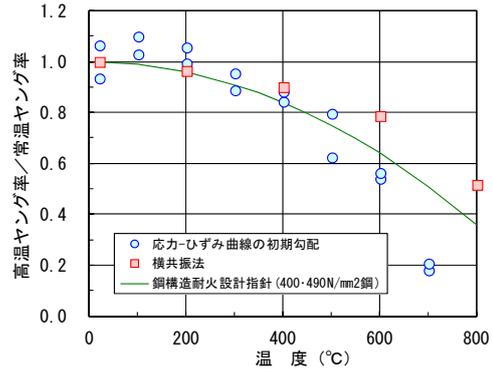


Fig. 12 鋼材の高温ヤング率
Young's Modulus at High Temperature

Table 8 試験体の諸元
Properties of Specimens

試験体No.	A	B
断面寸法 [mm]	□-400×25	
幅厚比	16.0	
柱長さ [mm]	3,500 (加熱区間2,800)	
細長比	22.8	
耐火被覆材	繊維混入けい酸カルシウム耐火被覆板 (FP060CN-9445)	
被覆厚さ [mm]	20	
比重 (含水率)	0.40 (3.3%)	
载荷軸力 [kN]	18,255	9,113
軸力比	0.60	0.30

Table 9 鋼材の引張試験結果
Mechanical Properties of Steel

鋼種	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	降伏比 (%)	破断伸び (%)
BT-HT880C	967	1017	95.1	20.7

※JIS Z 2241 4号試験片, 降伏点は0.2%オフセット耐力

性能検証法(平12建告1433号)に規定される高温時の有効降伏応力度⁷⁾を破線で示している。Fig. 12についても、常温時のヤング率測定結果で無次元化して示しており、また応力-ひずみ曲線の初期勾配から求めた値に加え、JIS Z 2280「金属材料の高温ヤング率試験方法」の横共振法によって別途測定したヤング率、ならびに「鋼構造耐火設計指針⁸⁾」に規定された400・490 N/mm²級鋼を対象とした高温時ヤング率を併せて示している。

1.0%ひずみ耐力については、300°Cまでの温度域においては告示1433号の規定による有効降伏応力度とほぼ同等の値を示しており、400°C以上の温度域では有効降伏応力度の規定値を十分に上回る高温強度を示している。ヤング率についても、測定値に若干ばらつきがあるものの、概ね600°Cまでの温度範囲では鋼構造耐火設計指針の規定値とほぼ同等の値を示している。

以上の結果より、「BT-HT880C」の高温時における材料強度およびヤング率については、従来の普通強度鋼材とほぼ同等の強度特性を有しているものと考えられる。

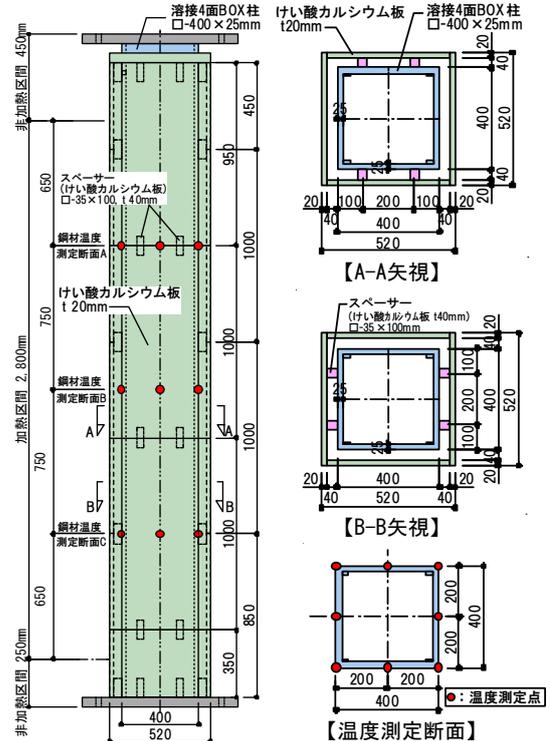


Fig. 13 試験体の形状寸法
Configuration of Specimens

5.3 溶接4面ボックス柱の载荷加熱実験

5.3.1 試験体 载荷加熱実験に供した試験体の諸元および形状寸法をTable 8とFig. 13に示す。試験体は、技術研究所に新設する研究施設オープンラボ2に用いる実大断面サイズの溶接4面ボックス柱(□-400×25 mm)2体とし、柱長さを3,500 mm(加熱区間2,800 mm)として、1時間耐火仕様のけい酸カルシウム板で耐火被覆を施した。試験体に用いた鋼材の引張試験結果をTable 9に示す。

5.3.2 载荷加熱実験 载荷加熱実験は、大林組技術研究所が保有する汎用耐火炉を用いて実施した(Fig. 14参照)。加熱条件はISO834⁹⁾標準加熱温度曲線に従い、载荷条件は試験体の柱頭・柱脚をピン支持とした中心圧縮载荷として、軸力支持能力を喪失するまで载荷加熱を継続させるものとした。試験体Aの载荷軸力は、溶接4面ボックス柱の基準強度(溶接部の基準強度810 N/mm²)に基づく長期許容圧縮軸力に相当する軸力比0.60(载荷軸力

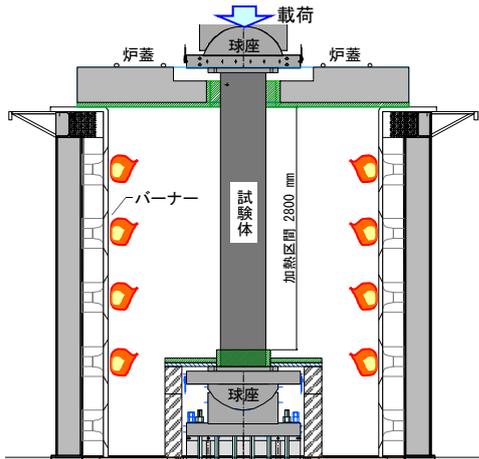


Fig. 14 荷重加熱実験のセットアップ状況
Setup of Fire Resistance Test

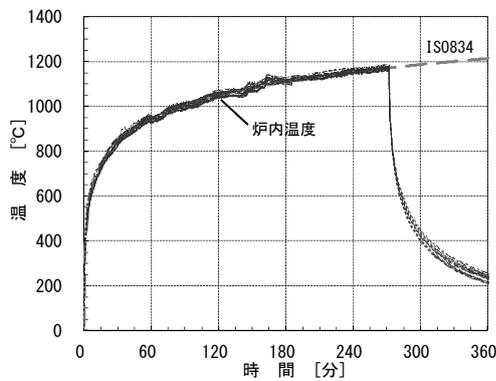


Fig. 15 炉内温度
Heat Temperature

18,225 kN), 試験体Bはその半分に減じた軸力比0.30(載荷軸力9,113 kN)とした。

温度測定項目は、炉内温度および鋼材温度とし、試験体の鋼材温度はFig. 13に示す3断面にて測定した。また、柱頭部の荷重盤上部に変位計を設置し、試験体の軸方向変位を測定した。

5.3.3 実験結果

(1) 温度測定結果 試験体Aにおける炉内温度の測定結果の例をFig. 15に示す。いずれの試験体においても、炉内温度はISO834標準加熱温度曲線にほぼ一致しており、加熱制御は良好であった。

次に、各試験体の鋼材温度(各温度測定断面における平均値)の経時変化をFig. 16に示す。鋼材温度は、両試験体ともに、けい酸カルシウムの熱収縮に起因すると推察される目地開きの影響で、柱頭部側の目地部(温度測定断面A)における温度が最も高い傾向を示しており(加熱中の観察では数ミリ程度の隙間が発生)、最終的には同目地部の近傍に局部座屈が発生し、軸力支持能力を喪失した。実験終了時の鋼材温度(測定断面Aにおける平均温度)は試験体Aで約610°C、試験体Bで約680°Cであった。

(2) 軸方向変位 各試験体の軸方向変位の経時変化をFig. 17に、また軸方向変形速度の経時変化をFig. 18に示す。なお、Fig. 17に示す軸方向変位は、加熱開始時の変位をゼロとして示している。試験体AとBを比較する

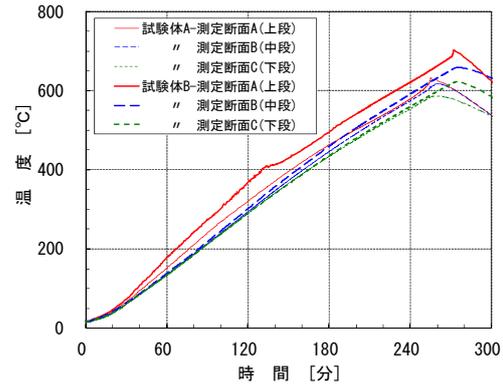


Fig. 16 鋼材平均温度の比較
Temperature of Steel Surface

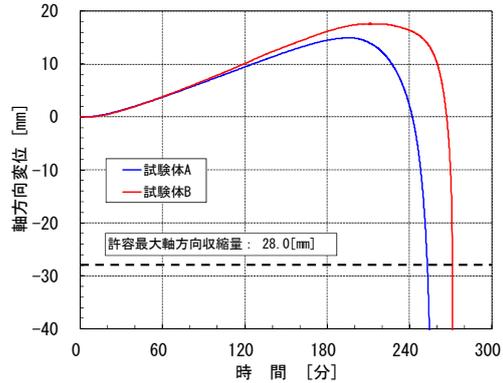


Fig. 17 軸方向変位の比較
Axial Displacement

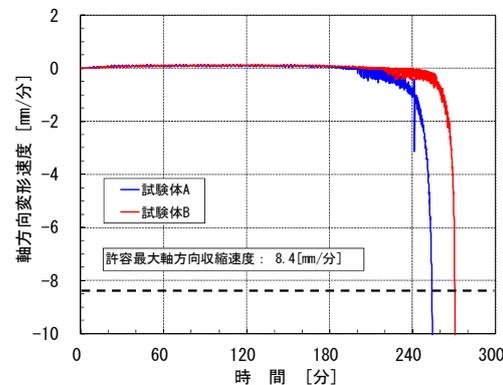


Fig. 18 軸方向変形速度の比較
Axial Displacement Rate

と、軸力比の小さい試験体Bの方が熱膨張変形量が大きい傾向を示しており、試験体Aの最大伸び量14.9 mm(加熱開始後194分)に対して、試験体Bでは17.6 mm(同210分)に達している。伸び変形がピークを示した後は、両試験体とも徐々に収縮速度が増してゆき、試験体Aは加熱開始255分後、試験体Bは同271分後に軸力支持能力を喪失して実験を終了した。

(3) 耐火時間 ISO834では、荷重加熱実験における軸収縮変位($h/100$ [mm], h : 柱長さ)および軸方向収縮速度($3h/1000$ [mm/分])の限界値を規定しており、本試験体の加熱長さ2,800 mmに基づく、それぞれ28 mmおよび8.4 mm/分となる。本規定値によれば、試験体AとBは軸力支持能力を喪失する直前に、試験体Aでは253分、試



Fig. 19 建物外観
Perspective of the Building

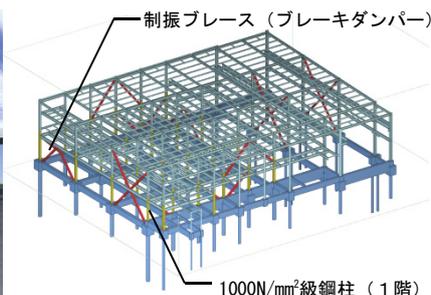


Fig. 20 構造フレーム
Structural Frame



Photo 3 現場施工状況
View of Onsite Construction

験体Bでは270分に上記の限界値を超過している。さらに、これに耐火性能評価試験における評価法に倣い、1.2倍の安全率を考慮すると、各試験体の耐火時間は試験体Aで210分、試験体Bは225分となり、1時間耐火仕様のけい酸カルシウム板被覆に対して、3時間30分以上の十分な安全裕度を有する耐火性能を保持していることが確認された。

6. 実建物への適用

開発した1000N/mm²級鋼溶接4面ボックス柱-梁接合を大林組技術研究所（東京都清瀬市）に新たに建設する研究施設（オープンラボ2）に適用した¹⁰⁾。

本建物の外観パースをFig. 19、構造フレームをFig. 20に示す。本建物は地上2階、高さ約15m、東西方向64.8m、南北方向49.5mの鉄骨造建物である。架構形式は、制振ブレース付きラーメン構造であり、1階の柱のうち、計26本に1000N/mm²級鋼柱を採用している。制振ブレースには、当社が新たに開発した2段階ブレイキダンパーを組み込んでいる。1000N/mm²級鋼柱を1階に配置することにより、架構の剛性を低くし、ダンパーの制振効果を高めている。また、弾性範囲の大きい1000N/mm²級鋼と制振ダンパーを組み合わせることにより、レベル2の大地震時においても構造体が無損傷となる設計が可能となっている。

本建物の建設現場における1000N/mm²級鋼柱の設置状況状況をPhoto 3に示す。

7. まとめ

世界最高強度の建築構造用1000N/mm²級鋼を用いた溶接4面ボックス柱-梁接合を新たに開発し、実建物（大林組技術研究所オープンラボ2）に適用した。1000N/mm²級鋼を適用する上での課題であった溶接施工の省力化を図るために、柱の角溶接に部分溶込み溶接を採用した。

開発に際して、まずは溶接施工試験により、設定した溶接条件で必要な溶接部強度や靱性が得られることを確認した。また、荷重実験により、1000N/mm²級鋼柱と梁との接合部パネルが大地震時を想定した変形に対して、十分な耐力を発揮することを確認した。さらに、1000N/mm²級鋼柱の荷重加熱実験により、所定の耐火性能が得られることを確認した。

今後は、1000N/mm²級鋼の高い強度や大きな弾性範囲を活かすことができる構造物、架構形式を中心に適用拡大を進めていく予定である。

謝辞

本報に掲載した成果の一部は、新日鐵住金株式会社、株式会社駒井ハルテックとの共同開発によるものです。関係各位に深謝致します。

参考文献

- 1) 例えば、中井政義，他：高強度鋼を用いた構造システムの実大静的荷重試験による性能検証，日本建築学会構造系論文集，第687号，pp.1007～1016，(2013)
- 2) 鈴木康正，他：超高強度コンクリート充填鋼管(CFT)柱，大林組技術研究所報，No.74，(2010)
- 3) 川畑友弥，他：1000N級鋼(950N/mm²鋼)の建築構造物への適用性について(その1)～(その18)，日本建築学会大会学術講演梗概集，(2005～2010)
- 4) 杉本浩一，他：耐震性に優れた鋼構造柱梁接合部に関する研究(その2)，大林組技術研究所報，No.58，pp.51～58，(1999)
- 5) 岡田郁夫，他：角溶接を部分溶込み溶接とした1000N/mm²級鋼溶接組立箱形断面柱-梁接合部の性能(その1)～(その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.771～774，(2013)
- 6) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，第3版，(2012)
- 7) 国土交通省住宅局建築指導課，他編集：2001年版 耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説，井上書院，pp.188～189，(2001)
- 8) 日本建築学会：鋼構造耐火設計指針，丸善，pp.15～20，(2008)
- 9) International Organization for Standardization: ISO834 Fire-resistance tests - Elements of building construction, Part 1: General requirements, (1999)
- 10) 中塚光一，他：1000N/mm²級鋼と2段階滑りタイプの高力ボルト摩擦接合滑りダンパーの実建物への適用(その1)～(その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.679～682，(2013)