

高強度ロールコラム JBCR[®]385 の溶接継手性能と構造性能

Welded Joint Performance and Structural Performance of High Strength Cold Roll-formed Column JBCRTM385

金城 陽介 KANESHIRO Yosuke JFE スチール 建材センター 建材技術部 建築技術室 主任部員 (副課長)
鈴木健太郎 SUZUKI Kentaro JFE スチール 建材センター 建材技術部 建築技術室

要旨

冷間ロール成形角形鋼管 BCR295 は中低層建築物の柱材として広く普及している。JFE スチールは、BCR295 の基準強度 295 N/mm² の 1.3 倍の基準強度 385 N/mm² をもつ高強度冷間ロール成形角形鋼管 JBCR[®]385 を開発し、2018 年 11 月に国土交通大臣の認定を取得した。JBCR385 は、独自の最適な成分設計と製造方法を駆使することで高強度と高靱性を両立させており、柱-柱継手および柱-ダイアフラム継手の溶接に JIS Z 3312 の YGW18 (銘柄指定あり) が使用できることも大きな特徴である。本稿では、JBCR385 の材料特性や溶接継手性能、構造性能について紹介する。

Abstract:

Cold roll-formed square steel pipe BCR295 is widely used as column for medium- and low-rise buildings. JFE Steel has developed high-strength cold roll-formed square steel pipe JBCRTM385, which has 1.3 times the standard strength of BCR295 and received certification from the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism in November 2018. JBCR385 has both high strength and high toughness by making full use of unique and optimal component design and manufacturing methods. Another major feature of JBCR385 is that JIS Z 3312 YGW18 can be used for column-column joint and column-diaphragm joint. This report introduces material properties, welded joint performance, and structural performance of JBCR385.

1. はじめに

建築構造用冷間ロール成形角形鋼管 (ロールコラム) BCR295 は、主に中低層の鉄骨造建築物の柱材として広く普及している。昨今、需要旺盛な物流施設など建築物の大型化が進むとともに、南海トラフ地震や首都直下地震といった想定地震動の巨大化により、建築物の柱材にはこれまで以上に高い耐力や耐震性能が求められている。

このような背景のもと、JFE スチールでは BCR295 の最大鋼管厚さ (以下、管厚) 25 mm を上回る管厚 28 mm まで製造可能とした国内最大管厚のロールコラム『JBCR[®]295』を開発し、2017 年 3 月に国土交通大臣の材料認定を取得した。さらに、BCR295 の基準強度 (F 値) 295 N/mm² を約 1.3 倍に高めた基準強度 385 N/mm² のロールコラム『JBCR[®]385』を開発し、2018 年 11 月に国土交通大臣認定を取得した。

表 1 に JFE スチールのロールコラムの製造サイズを示す。表 1 のように、JBCR385 は最大外径 550 mm、最大管厚 25 mm まで製造でき、なおかつ短納期での納入が可能で、溶接条件も平易であることから順調に受注実績を伸ばし、2023 年度には累計受注量 20 000 トンを達成した。

本稿では、JBCR385 の材料特性や溶接継手性能、構造性能について報告する。

2. 材料特性

建築物の構造には地震や火災といった災害時に倒壊しないことが第一に要求され、地震が頻繁に発生する日本では、

表 1 JBCR[®]385 の製造サイズ
Table 1 Size of JBCRTM385

		Thickness (mm)						
		6	9	12	16	19	22	25
Width (mm)	250×250	○	○	○	○			
	300×300	○	○	○	○	○		
	350×350		○	○	○	○	○	
	400×400		○	○	○	○	○	○
	450×450		○	○	○	○	○	○
	500×500		○	○	○	○	○	○
	550×550			○	○	○	○	○

2024 年 4 月 19 日受付

表 2 JBCR[®]385 の化学成分Table 2 Chemical composition of JBCRTM385

Section size	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	N (%)	C _{eq} (%)	P _{cm} (%)
	≤0.18	≤0.55	≤1.60	≤0.030	≤0.015	≤0.006	≤0.44	≤0.26
□400×25	0.15	0.02	0.98	0.012	0.003	0.004	0.34	0.21

$$C_{eq} = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14, P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

表 3 JBCR[®]385 の機械的性質Table 3 Mechanical property of JBCRTM385

Section size	Plate part					Corner part				
	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	YR (%)	EL (%)	√E ₀ (0°C, J)	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	YR (%)	EL (%)	√E ₀ (0°C, J)
	385 ≤ ≤535	520 ≤ ≤670	≤90	33*1 ≤	70 ≤	No standard				
□400×25	494	570	87	45	262	526	625	84	39	239

YP: Yield point, TS: Tensile strength, YR: YS/TS, EL: Elongation, √E₀: Charpy absorbed energy at 0°C *1Depends on thickness

大地震時に構造部材が塑性化することで地震エネルギーを吸収して、建築物の倒壊を防ぐことを前提に建築物が設計される。そのため、構造部材には十分な塑性変形性能が要求され、建築用鋼材には化学成分、機械的性質が厳しく規定されている。

表 2 に JBCR385 の化学成分の一例を示す。化学成分については基本 5 元素の他に、フリー N、炭素当量 C_{eq}、溶接割れ感受性組成 P_{cm} の上限値が規定されている。フリー N は時効硬化¹⁾と相関があり、フリー N が多いほど時効硬化の影響が大きくなる。ロールコラムは成形の際に冷間加工を受けるため、時効硬化の影響が大きいと、硬く、脆くなって塑性変形性能が低くなる恐れがあるため上限値を規定している。また、C_{eq} と P_{cm} が高いと、低温割れが発生しやすくなるため、溶接性の確保のために上限を規定している。

表 3 に JBCR385 の機械的性質を示す。JBCR385 は降伏耐力下限値 385 N/mm²、引張強さ下限値 520 N/mm² の国内最高強度のロールコラムで、降伏比上限値は BCR295 と同じ 90% である。一方、シャルピー衝撃吸収エネルギーの下限値は BCR295 より高い 70 J である。また、表 3 には、参考として角部の機械的性質も記載している。角部については機械的性質の規定値を設けていないが、シャルピー衝撃吸収エネルギーが 200 J 以上となっており、高い靱性を保有している。一般に、鋼材は強度が高くなると靱性が低下するが、JBCR385 は JFE スチール独自の最適な成分設計と製造方法を駆使し、高強度と高靱性の両立を実現している。

3. 溶接継手性能

建築物の柱材に用いられるコラムは、柱梁接合部におい

て梁の応力を伝達するためのダイアフラムと溶接接合、または柱と柱の継手においてコラム同士で溶接接合される。特に、ダイアフラムとの溶接接合部付近は柱端に位置するため地震時に大きな曲げモーメントが作用し、さらに溶接接合部は形状の不連続性によって応力が集中するため、溶接接合部には十分な強度、靱性が要求される。

一方で、溶接接合部のボンド (BOND) や熱影響部 (HAZ) は、溶接の熱の影響で元の母材と異なる金属組織に変質するため、元の母材に比べて靱性が低下する恐れがある。BOND、HAZ の靱性が低いと、溶接部で脆性破断が先行し、塑性変形性能を十分に発揮できなくなる²⁾ため、溶接部の靱性を確保することは極めて重要である。

そこで、JBCR385 とダイアフラム (HBL[®]385C) の炭酸ガスシールドアーク溶接による溶接継手試験体を製作し、種々の試験を実施した。

表 4 に JBCR385 のコラム-コラム継手およびコラム-ダイアフラム継手の溶接条件を示す。JBCR385 は、鉄骨製作会社の利便性を鑑みて、JIS Z 3312 の G59JA1UC3M1T に加えて、YGW18 の溶接材料も適用可能となっており、本稿の溶接継手試験体も YGW18 で溶接施工を行った。

図 1 に試験体概要を示す。コラムは表 2 および表 3 と同じ JBCR385 である。溶接材料は YGW18 の MG-56R (N) を使い、ロボット溶接によって製作した。開先はルートギャップ 7 mm の 35°レ形開先で、予熱は行わず (外気温 7.5°C・湿度 58%)、溶接入熱とパス間温度は、安全側の検討になるように、表 4 より厳しい「溶接入熱 40 kJ/cm 以下・パス間温度 350°C 以下」の条件とした。なお、溶接実績としては、最大入熱 31.1 kJ/cm・最大パス間温度 294°C であった。

表 5 に試験項目一覧を示す。試験項目は、マクロ試験・

表 4 JBCR[®]385 の溶接条件
Table 4 Welding condition of JBCRTM385

Welding method	Joint	Welding wire	Heat input (kJ/cm)	Interpass temperature (°C)
CO ₂ gas shielded arc welding	Column-column	JIS Z 3312 YGW18 ^{*1}	≦30	≦250
		JIS Z 3312 G59JA1UC3M1T	≦40	≦350
	Column-diaphragm	JIS Z 3312 YGW18 ^{*2}	≦30	≦250
		JIS Z 3312 G59JA1UC3M1T	≦40	≦350

*1 "Heat input: ≦25 kJ/cm and interpass temperature: ≦300°C" is also possible for semi-automatic welding

*2 Brand designation: MG-56, MG-56 (N), MG-56R, MG-56R (N), YM-55C, YM-55C (R), KC-55G or "C_{eq} = C + Si/24 + Mn/6 + Mo/4 ≧ 0.40"

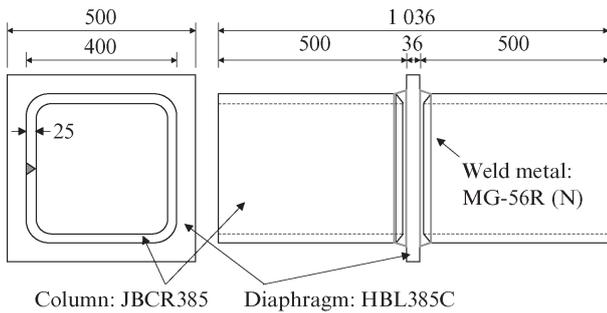


図 1 溶接継手試験体の概要

Fig. 1 Overview of welded joint test specimen

表 5 溶接継手試験の試験項目

Table 5 Test items of welded joint test

Contents	Part	Test condition
Macro test	Plate Corner	-
Hardness test	Plate Corner	1 ^{mm} below the surface
Cross joint tensile test	Plate Corner	Full thickness (JIS Z3121 1A)
Charpy impact test	Plate Corner	DEPO, BOND, HAZ 6 ^{mm} below the surface

硬さ試験・溶接金属引張試験・十字継手引張試験・シャルピー衝撃試験である。以下に各試験の考察を示す。

[マクロ試験 (写真 1)]

写真 1 より、有害な欠陥は確認されなかった。

[硬さ試験 (図 2)]

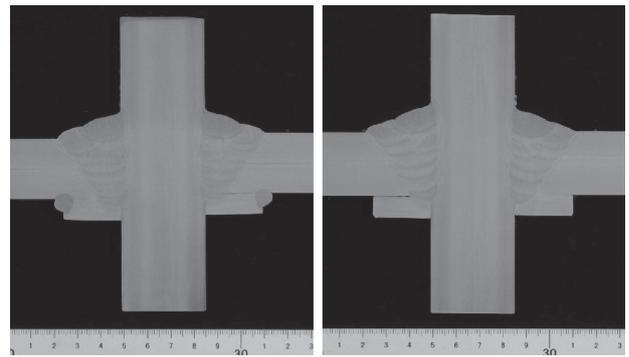
図 2 より、すべての位置で 350 Hv 以下となっており、著しい硬化は確認されなかった。

[十字継手引張試験 (表 6・写真 2)]

表 6 のように、十字継手の引張強度は平板部・角部ともに母材の引張強度を上回り、写真 2 のように、溶接部で破断することなく母材で破断した。

[シャルピー衝撃試験 (図 3)]

図 3 より、BOND では母材より靱性が低下したが規格値



(a) Plate part

(b) Corner part

写真 1 マクロ試験結果

Photo 1 Result of macro test

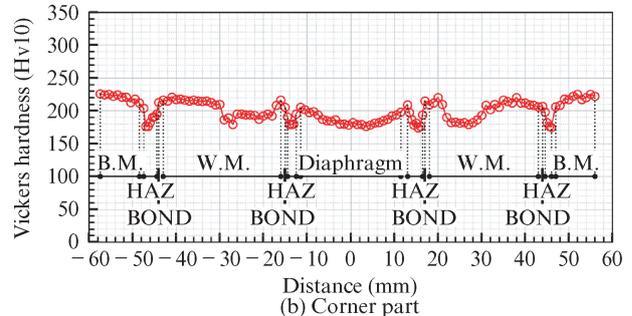
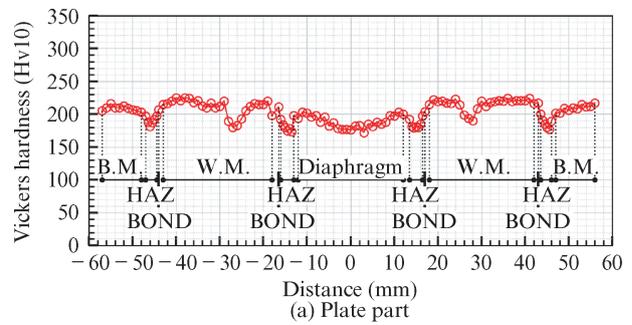


図 2 硬さ試験結果

Fig. 2 Result of hardness test

の 70 J に対しては十分に上回り、HAZ では母材と同程度の靱性が確認された。また、平板部と角部で大きな差異は見られなかった。

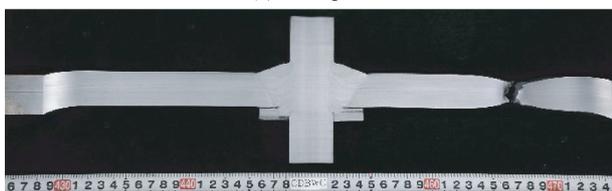
表 6 引張試験結果

Table 6 Result of tensile test

		YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	EL (%)
Cross joint	Plate	—	621	—
	Corner	—	720	—
Base metal	Plate	494	570	45
	Corner	526	625	39



(a) Plate part



(b) Corner part

写真 2 十字継手引張試験結果

Photo 2 Result of cross joint tensile test

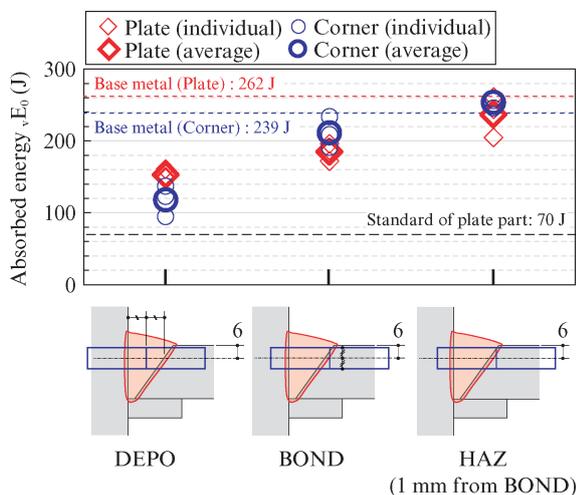


図 3 シャルピー衝撃試験結果

Fig. 3 Result of Charpy impact test

以上より、MG-56R (N) を用いた JBCR385 のコラム-ダイアフラム溶接継手では、良好な溶接性が確認された。

4. 構造性能

地震時、建築物には多数回の揺れが生じ、柱端には大きな曲げモーメントが繰り返し作用する。柱に大変形が生じた

場合、ダイアフラムとの溶接部付近でコラムの局部座屈もしくは溶接部からの破断によって耐力が低下し、最悪の場合、建築物が倒壊する可能性がある。

そこで、JBCR385 に対して、大地震時の応力状態を模擬した繰り返し曲げ変形を生じさせる 3 点曲げ試験を行い、塑性変形性能を確認した。

図 4 に試験装置の概要、写真 3 に 3 点曲げ試験の様子を示す。コラムは表 2 および表 3 と同じ JBCR385 であり、中央部にはダイアフラムを想定した HBL385C が溶接接合されている。開先形状、溶接材料、溶接加熱・パス間温度の条件は 2 章の溶接継手試験体と同様である。試験体の両端はローラー支持されており、中央部のダイアフラムを鉛直方向に载荷することで、溶接部付近に曲げモーメントを生じさせる。なお、柱にとって最も厳しい 45° 方向入力となるように試験体を設置している。

载荷は、試験体に設置した変位計から計算したコラムの回転角で制御する。振幅はコラムに生じる曲げモーメントが全塑性モーメント M_p に到達する時点のコラムの回転角 θ_p を基準に、 θ_p の ± 2 倍、 ± 4 倍、 ± 6 倍、・・・の変形量を各 2 サイクルずつ与え、局部座屈もしくは破断により耐力が最大耐力の 90% に低下するまで载荷を行う。なお、試験機は鉛直下方向のみ载荷可能であるため、負側载荷時は、試

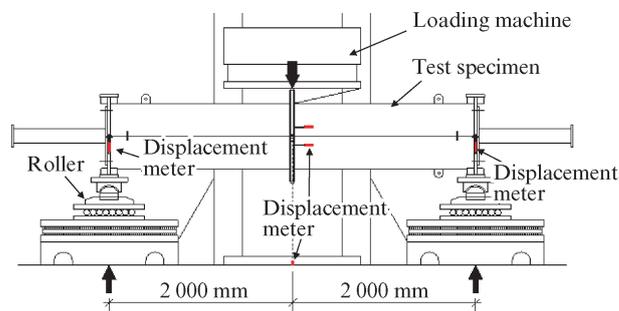


図 4 試験装置の概要

Fig. 4 Setup of 3-point bending test



写真 3 3 点曲げ試験の様子

Photo 3 3-point bending test scene

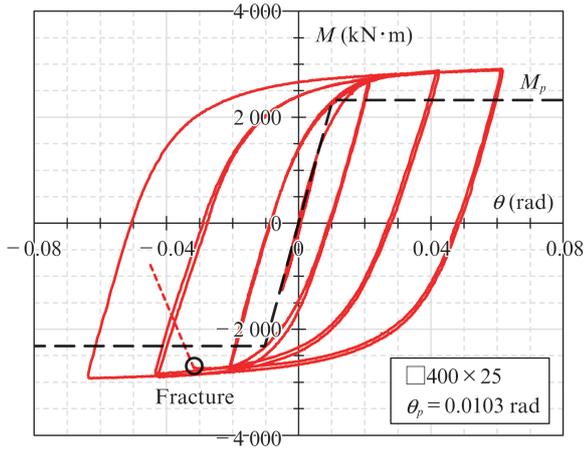


図5 曲げモーメント M —回転角 θ 関係

Fig. 5 Relationship between moment M and deformation angle θ

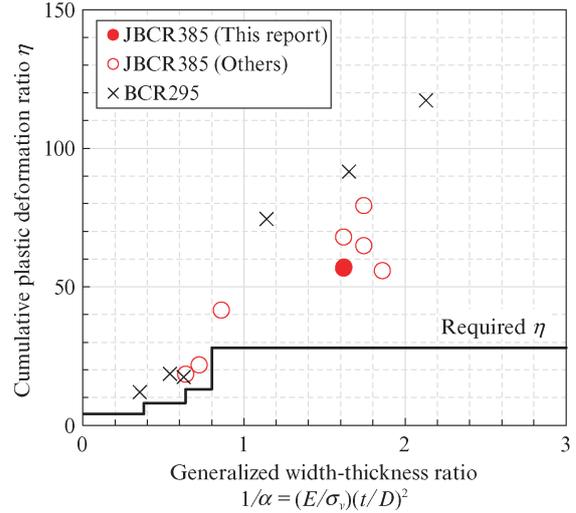


図6 累積塑性変形倍率 η —基準化幅厚比 $1/\alpha$ 関係

Fig. 6 Relationship between cumulative plastic deformation ratio η and generalized width-thickness ratio $1/\alpha$



写真4 コラム角部の破断

Photo 4 Fracture of column corner part

試験体両端部に取り付けられた反転用パイプによって試験体を上下反転して載荷する。

図5に曲げモーメント-回転角関係を示す。振幅 $4\theta_p$ の1サイクル目に角部溶接止端部で亀裂が発生し、徐々に亀裂が進展したが脆性破断することなく、振幅 $6\theta_p$ の1サイクル目終了まで安定した履歴形状を示した。その後、振幅 $6\theta_p$ の2サイクル目負側で亀裂が貫通し、耐力が大きく低下して載荷を終了した。写真4にコラム角部の破断の様子を示す。

図6に、耐力が最大耐力の90%に低下した時点までの累積塑性変形倍率と基準化幅厚比の関係を示す。図6には、本稿の試験体とは別のJBCR385の結果およびBCR295の結果³⁾を併記した。累積塑性変形倍率は回転角の塑性変形成分の累積値を基準回転角で除した値で、塑性変形性能の評価指標の一つである。累積塑性変形倍率は幅厚比と相関があり、幅厚比ごとに必要な累積塑性変形倍率の値が定められている⁴⁾。本稿の試験体の場合、その必要値は28であり、それに対して十分に上回る累積塑性変形倍率を保有している。

一方、従来のBCR295と比較すると、JBCR385の累積塑

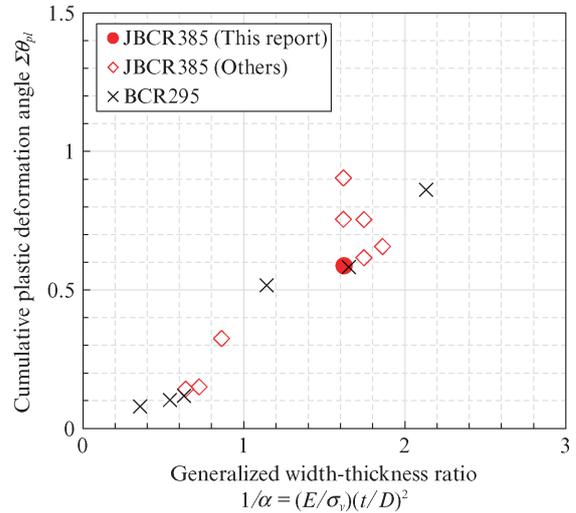


図7 累積塑性変形倍率 η —基準化幅厚比 $1/\alpha$ 関係

Fig. 7 Relationship between cumulative plastic deformation angle $\Sigma\theta_p$ and generalized width-thickness ratio $1/\alpha$

性変形倍率は小さい。これは、JBCR385はBCR295より強度が高いため載荷振幅が大きく、亀裂発生位置で歪がより集中したためと考えられる。そこで、図7のように、図6の縦軸を回転角の塑性変形成分の累積値、すなわち累積塑性回転角で整理すると、JBCR385とBCR295は同程度の塑性変形性能を保有していることがわかる。

上記の構造性能をうけ、JBCR385は一般財団法人日本建築総合試験所の性能証明 (GBRC 性能証明 第23-31号) を取得している。これにより、表7のように、JBCR385は従来のBCR295と同じ柱応力割増係数・幅厚比規定・柱耐力低減係数が認められており、設計上の利便性も高い。

表 7 JBCR[®]385 の設計上の付加事項 (GBRC 性能証明 第 23-31 号)Table 7 Additional design considerations using JBCRTM385

Items	Contents
Root 1: column stress amplification factor	Inner diaphragm: 1.2 (Excluding drop-in diaphragm) Other than the above: 1.3
Root 2: depth-thickness ratio regulations	FA: $33 \sqrt{(235/F)}$ FB: $37 \sqrt{(235/F)}$ FC: $48 \sqrt{(235/F)}$
Root 3: column strength reduction factor	Inner diaphragm: 0.80 (Excluding drop-in diaphragm) Other than the above: 0.75

5. おわりに

本稿では、基準強度 385 N/mm² の建築構造用冷間ロール成形角形鋼管 JBCR[®]385 の材料特性、溶接継手性能、構造性能について紹介した。JFE スチールでは、新材料の開発のみならず、ロールコラムを最大限活用できる『耐火被覆低減工法』や『異幅仕口工法 SHIBORAN-NEO[®]』といった施工省略化技術も開発している。今後も、お客様のニーズにお応えできる付加価値の高い建築建材商品の開発を通して、

持続可能な社会の実現に貢献していく。

参考文献

- 1) たとえば, Cottrell, A. H.; Bilby, B. A. Dislocation Theory of Yielding and Strain Ageing of Iron. Proceedings of the Physical Society. 1949, Section A, vol. 62. p. 49-62.
- 2) 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部. 1995 年兵庫県南部地震 鉄骨造建物被害調査報告書. 1995.
- 3) 日本建築センター. 2018 年度版冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル. 2018.
- 4) 建築研究所, 鋼材倶楽部. 角形鋼管設計研究会研究報告書. 1993.