

耐力および塑性変形性能に着目した鋼材ブレースのデータベース

Database on Strength and Inelastic Deformation Capacity of Steel Braces

建築都市空間デザイン専攻 空間防災講座 建築構造工学研究室 張怡珩

Abstract

In this paper a database on experimental results of steel braces was developed to quantify their strength and inelastic deformation capacity. The database included 102 wide flange sections, 99 rectangular structural hollow sections, and 178 circular hollow sections. The database discussed the following: dimension properties such as width-thickness ratios and slenderness ratios; maximum tensile strength; buckling strength; and post-buckling strength.

Keywords: steel brace, database, loading test, tensile strength, compression strength

1. はじめに

鋼材ブレースは、柱や梁と比較し高い耐力および剛性を有することから、効率的かつ経済的な建築部材で多用されている。弾塑性範囲におけるブレースの構造性能は数多の実験で検証され、Tremblay¹⁾、Fell²⁾、橋本³⁾らがデータベースを構築している。本研究では、以上に挙げた論文で取り上げられていない文献 4)-23)も含め、鋼材ブレースの寸法および耐力を整理して示す。文献²⁴⁾の手法で適用範囲外となるブレースが、破断に至るまでの塑性変形性能を評価する。

2. 鋼材ブレース試験体の諸元

表 1 に示すように、文献 1)~23)で繰返し荷重を受けた鋼材ブレース計 502 体の試験体を採用した。図 1 に示すような H 形、中空円形、中空角形の断面を有する鋼材ブレースが多数を占めた。特に、海外で中空角形、日本で中空円形の試験体が多く採用されている。これは、施工時に多数用いられている鋼材ブレースの断面を反映しているものと考えられる。図 2 に示すようなブレース軸長 L と境界条件より、採取した試験体の座屈長さを分類した。座屈長さ係数 K は、タイプ (b) が 1.0、(c) が 0.5、(d) が 0.7 とした。タイプ (a) は、図 3 の示すようにガセットプレートの曲げ剛性を回転バネに置換した固有値で評価した。図 4 に、H 形、中空円形、中空角形断面の鋼材ブレースの幅厚比、径厚比と細長比 KL/i との関係を示す。ここに、断面 2 次半径 i は、原則として断面の座屈を生じた軸まわりの値とするが、2 つの軸まわりに座屈を生じた場合は弱軸まわりとした。同図には、構造特性係数 D_s を決定するブレースの種別 BA、BB、BC (SS400 相当) を併せて示している。文献 1)~23)の実験データは、主として BB および BC に相当する KL/i が 30 程度より大きい範囲に分布しているが、BA 相当の試験体は、H 形が 19 体、中空

表 1 文献調査による鋼材ブレースの内訳

断面形状	試験体数	断面形状	試験体数
角形	52	T形	2
H形	102	山形組立	28
中空円形	99	山形	31
中空角形	178	T形組立	4
溝型組立	6	計	502

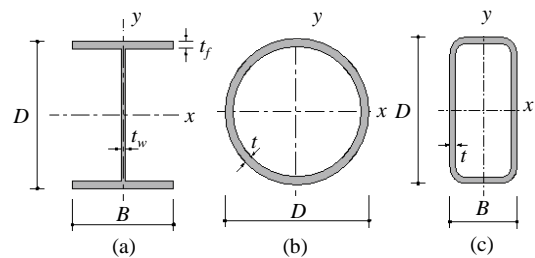


図1 断面形状：(a) H形；(b) 中空円形；(c) 中空角形

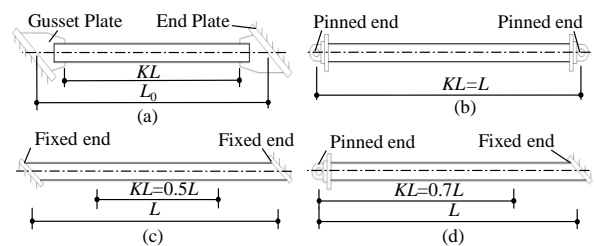


図2 ブレース座屈長さと境界条件

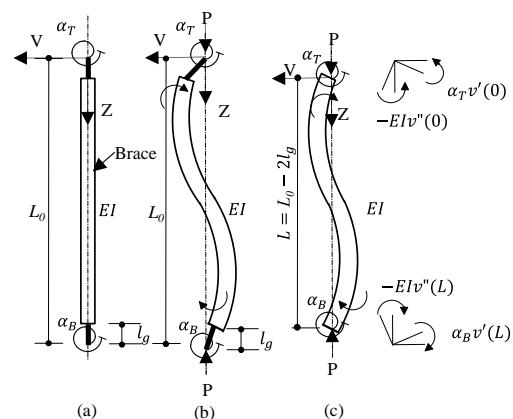


図3 ブレースのモデル：(a) 真っ直ぐ状態；(b) 圧縮加力状態；(c) 仮定のモデル

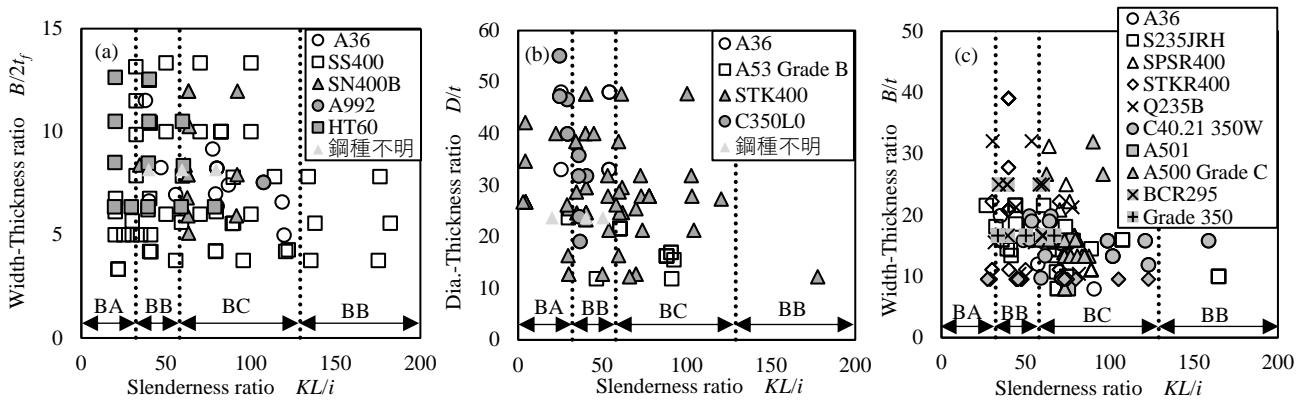


図4 試験体分布：(a) H形；(b) 中空円形；(c) 中空角形

円形が16体、中空角形が6体、山形が0体と少ないことが確認された。

3. 鋼材ブレース試験体の耐力

本章では、2章で採取したブレース試験体の耐力を整理して示す。

3.1 引張耐力の評価

図5に、ブレース試験体の引張耐力 N_{max} を、降伏耐力 $N_y (= \sigma_y A)$ と、Fellら²⁾が提案した降伏耐力 N_y と引張耐力 $N_u (= \sigma_u A)$ との比で分析した結果を接合部係数 α 、各鋼種の $0.5(N_y + N_u)$ の平均値と併せて示す。図5(c)では、図5(b)の指標である耐力 $0.5(N_y + N_u)$ を $0.5(N_y + N_{max})$ に置換し、引張耐力比を分析した。 σ_y 、 σ_u はそれぞれ、素材引張試験より得られた降伏強度および引張強度で、 A は断面積である。表1に示した試験体のうち、 σ_y が明記されていない、もしくは引張耐力が降伏耐力に達していない試験体は除外した。対象とした試験体数の合計は、図5(a)、(c)で175体に対し、引張強度 σ_u が記載されていない文献が見られたため、図5(b)で139体であった。鋼材の強度の規格値 F_y が 300 N/mm^2 より大きいと、ひずみ硬化の影響を受けず、引張耐力比は最大で1.2程度の値を示した。引張耐力比の最大値は、SS400 ($F_y = 235 \text{ N/mm}^2$) 級相当に該当する試験体で見られ、 N_{max}/N_y で1.5、 $N_{max}/0.5(N_y + N_u)$ で1.3であった。図5(c)に示した

$N_{max}/0.5(N_y + N_{max})$ は、図5(b)の $N_{max}/0.5(N_y + N_u)$ とほぼ同程度の範囲に分布し、最大値は1.3程度であった。接合部設計指針²⁵⁾ではブレース接合部で要求される耐力は、ブレースの降伏耐力の1.1~1.3倍と規定され、降伏耐力には N_y より $0.5(N_y + N_u)$ もしくは $0.5(N_y + N_{max})$ を採用する方が、適していると考えられる。一方でAISC-341²⁶⁾では1.1~1.5倍で規定されており、ブレースの降伏耐力には N_y が適切と考えられる。引張耐力比の平均値は、 N_{max}/N_y で1.13~1.14、 $N_{max}/0.5(N_y + N_u)$ で1.04~1.08、 $N_{max}/0.5(N_y + N_{max})$ で1.06となった。引張耐力比の変動係数は、 N_{max}/N_y で0.09程度と大きく、 $N_{max}/0.5(N_y + N_u)$ および $N_{max}/0.5(N_y + N_{max})$ では0.03から0.05程度の値をブレースの耐力が $0.5(N_y + N_{max})$ に達した時点の接合部係数の平均値は弾性係数 E の0.14倍程度であった。図5(a)に示した接合部係数 α 、および図5(b)、(c)に示した $N_{max}/0.5(N_y + N_u)$ は、鋼材種がSS400級相当の場合、引張耐力比の平均値前後となるが、SM490A ($F_y = 325 \text{ N/mm}^2$) 級相当の場合では、引張耐力比の上限値を抑える傾向が見られた。

3.2 座屈耐力の評価

図6に、実験データの座屈耐力の実験値 σ_c と評価値 σ_{cr} を示す。評価値は、文献²⁵⁾に示された許容圧縮応力度の安全率を1とした(1)式および(2)式で算定した。

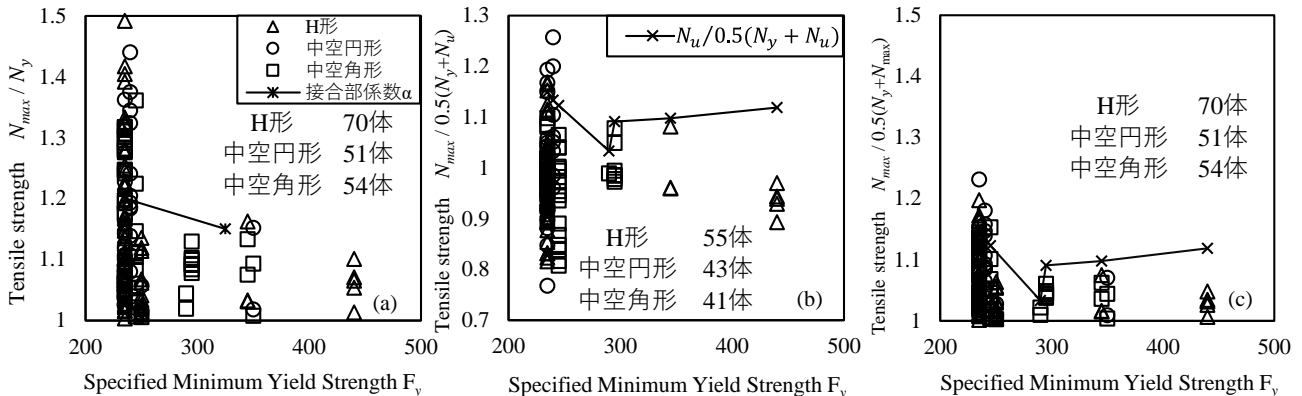


図5 $N_{max}/N_y - F_y$ 分布：(a) N_y ；(b) $0.5(N_y + N_u)$ ；(c) $0.5(N_y + N_{max})$

$$\sigma_{cr} = \{1 - (KL/i/\Lambda)^2\}F_y \quad (KL/i \leq \Lambda) \quad (1)$$

$$\sigma_{cr} = 0.6E/(KL/i)^2 \quad (\Lambda \leq KL/i) \quad (2)$$

ここに、 F_y は鋼材の公称強度、 Λ は限界細長比を示す。文献から軸力-変形関係または鋼種を読み取れない試験体を除き、H形は 89 体、中空円形は 89 体、中空角形は 109 体で、合計 287 体であった。分類は SS400 相当のマーカ―は白抜き、SM490A 相当は濃い灰色として示した。座屈耐力の評価式は、実験結果の下限値を概ね捉えていた。中空円形と中空角形は、大半が冷間成形で製作された円形鋼管と角形鋼管で、残留応力の影響により、公称強度が同程度で熱間成形された H 形より高い座屈耐力を示したと考えられる。どの断面も、 KL/i が 50 以上になると、評価式の 40%以上下回る試験体が確認されたが細長いことから、初期不整や荷重偏心の影響によるものと推測される。

図 7 に、実験値 σ_c と、各試験体の素材引張試験の降伏応力度 σ_y を(1)、(2)式に代入して計算した座屈耐力 σ_{cr} との比率 σ_c/σ_{cr} を示す。 σ_c/σ_{cr} の平均値、標準偏差、変動係数は、H 形で 0.97、0.21、0.21、中空円形で 1.00、0.20、0.19、中空角形で 0.90、0.12、0.13 となった。

3.3 座屈後安定耐力の評価

本節では、図 8(a)に示すように、最大短縮量 2% および 4%のときの圧縮耐力 $\sigma_{u,2}$ 、 $\sigma_{u,4}$ を、座屈後

安定耐力で評価することを試みた。軸方向ひずみ $\Delta L/L$ が 1%から-1%に達したときを最大短縮量 2%、 $\Delta L/L$ が 2%から-2%に達したときを最大短縮量 4% 定義し、1 サイクル目の軸方向ひずみはそれぞれ 1.5%、3%とした。载荷形式が正負交番繰返し载荷である試験体のみを対象とした。文献から最大短縮量 2%または 4%の耐力を読み取れた試験体は、H 形で 50 体、中空円形で 37 体、中空角形で 52 体、合計で 139 体であった。図 8(b)、(c)に、竹内ら²⁸⁾の H 形ブレースを一例として、 $\sigma_{u,2}$ 、 $\sigma_{u,4}$ と細長比 KL/i の関係を示す。 KL/i と $B/2t_f$ が大きいと、 $\sigma_{u,2}$ 、 $\sigma_{u,4}$ が小さい傾向が見られた。初期座屈耐力の 1/3 倍を座屈後安定耐力と評価する規準²⁵⁾を参考に、ブレースの圧縮耐力を分析した。 $\sigma_{u,2}$ が座屈耐力評価値の 1/3 倍以下の試験体数は、H 形で 50 体のうち 38 体、中空円形で 37 体のうち 16 体、中空角形で 52 体のうち 27 体見られた。いずれの断面も座屈安定耐力 $\sigma_{u,2}$ が座屈耐力の評価値の 1/3 以下の試験体数は総数の 43%以上となった。

4. 数値解析による塑性変形性能の分析

本章では、数値解析プログラム Opensees により、ブレースの破断を再現することを試みた。図 9 に示す部材モデルは、文献 24)の適用範囲から若干外れる後藤ら¹²⁾の実験を参照して設定した。部材を 9 つの節点で分割し、1 要素あたり軸方向に 5 つの積分点を設けた。要素には Displacement-

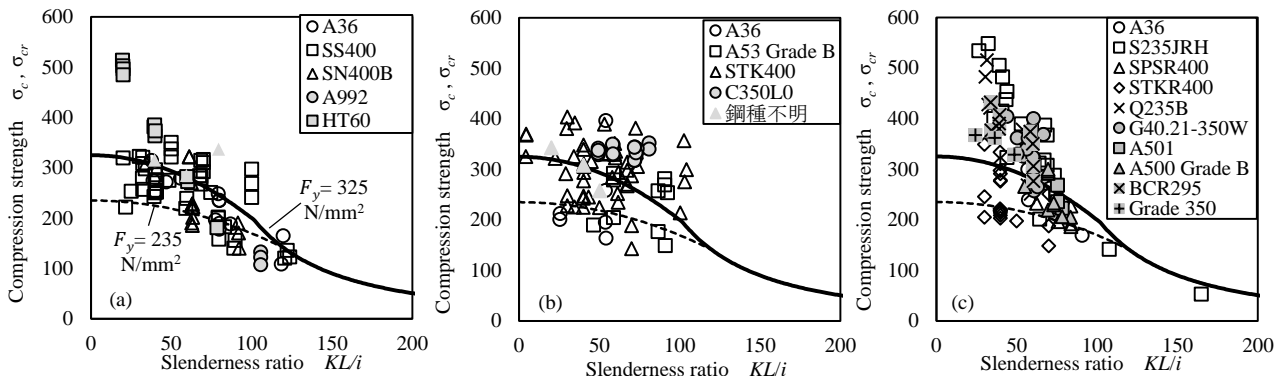


図 6 座屈耐力 σ_{cr} - KL/i 分布 : (a) H 形 (89 体) ; (b) 中空円形 (89 体) ; (c) 中空角形 (109 体)

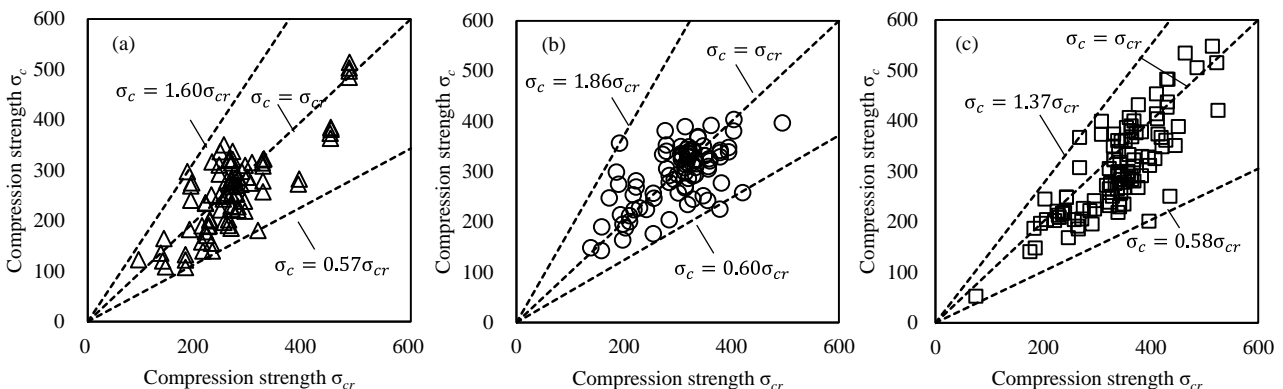


図 7 σ_{cr} - σ_c 分布 : (a) H 形 ; (b) 中空円形 ; (c) 中空角形

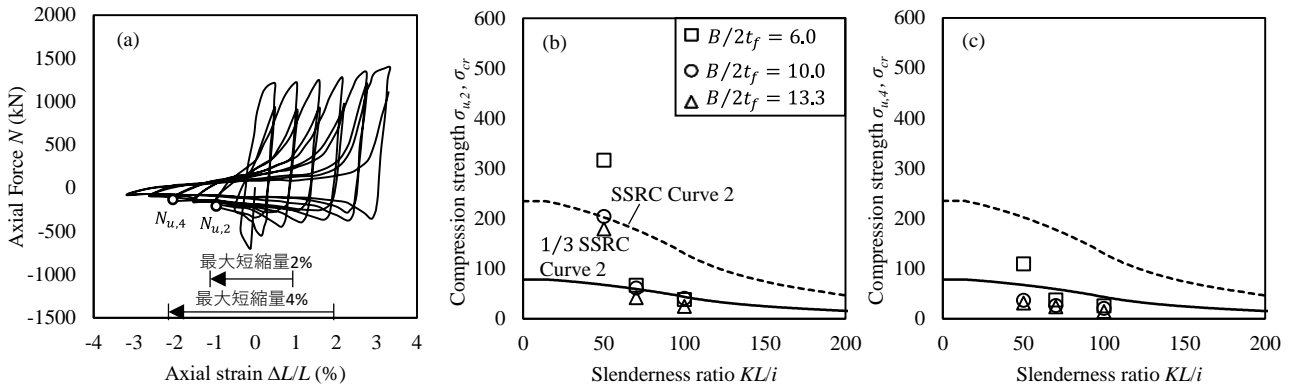


図 8(a) 座屈後安定耐力の定義 (後藤¹²⁾ H140-9.0-61-1); (b) 竹内²⁸⁾ $\sigma_{u,2}$ - KL/i 分布; (c) $\sigma_{u,4}$ - KL/i 分布

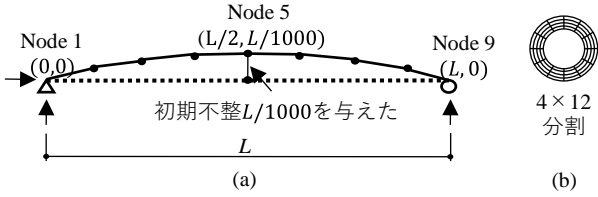


図 9 : (a) ブレースのモデル; (b) ファイバーの分割

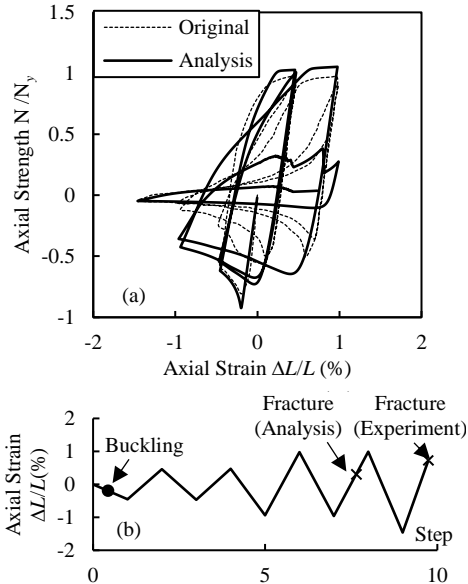


図 10 実験と解析結果の比較 (P3. 7-39-1)

(a) 軸力 N -軸ひずみ $\Delta L/L$ の関係; (b) 载荷履歴

Beam-Column Element を採用し、断面は厚さ方向 4 分割、円周方向に 12 分割した。 $E = 2.05 \times 10^5$ N/mm²、 $\sigma_y = 430$ N/mm²、 $b = 0.005$ のバイリニアとし、Giuffre-Menegotto-Pinto と等方硬化則を組み込んだ。各要素のファイバーの累積ひずみが、文献 24) で提案されている (3) 式に達した時点でブレースが破断すると定義した。

$$\epsilon_o = 0.748 \times \left(\frac{KL}{r}\right)^{-0.399} \times \left(\frac{D}{t}\right)^{-0.628} \times \left(\frac{E}{\sigma_y}\right)^{0.201} \quad (3)$$

図 10 に荷重-変形関係の実験結果と解析結果を示す。両者の圧縮耐力、引張耐力を概ね対応しているものの、バウシinger 部では両者に差異が見られた。文献 24) の手法では、実験値と 1 サイクル分程度の差異で、ブレースが破断する時点を概

ね捉えられた。

5. まとめ

- ・ 繰返し荷重を受けるブレースの引張耐力は、降伏軸力の 1.5 倍程度にまで達した
- ・ 文献 25) で計算したブレースの座屈耐力の評価値は、実験値と 40% 程度の誤差であった。
- ・ 座屈後安定耐力は、4% 程度の最大短縮量で、座屈耐力の 1/3 の値より下回る傾向が見られた
- ・ 適用範囲をやや外れる仕様でも、文献 24) の手法でブレースが破断する時点を概ね捉えられた。

参考文献

- 1) Tremblay, R.: J. of Constructional Steel Res., 58, 665-701, 2002
- 2) Fell, BV et al.; Rep. No. TB172, John A Blume Earthquake Engineering Center, Stanford Univ., Stanford CA, 2010.8
- 3) 橋本ら：鋼構造年次論文報告集，第 25 巻，825-832，2017.11
- 4) Haddad, M. et al., Can. J. Civ. Eng., 38(1), 110-123, 2011.1
- 5) 八巻ら：日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 III，755-756，1996.9
- 6) 今西ら：日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 III，685-686，1998.9
- 7) 八巻ら：日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 III，853-854，1998.9
- 8) 岩井ら：京都大学防災研究所年報，第 34 号，B-1，71-85，1991.4
- 9) 岩井ら：京都大学防災研究所年報，第 35 号，B-2，509-524，1992.4
- 10) 加藤ら：日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，1319-1320，1972.9
- 11) 加藤ら：日本建築学会論文報告集，第 260 号，99-108，1976.10
- 12) 後藤ら：日本建築学会関東支部研究報告集 I，465-468，2016.3
- 13) 高橋ら：日本建築学会関東支部研究報告集 I，469-472，2016.3
- 14) 田中ら：日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，973-974，1973.10
- 15) 辻ら：日本建築学会近畿支部研究報告集，構造系，25，449-452，1985.5
- 16) 辻ら：日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，787-788，1987.8
- 17) 辻ら：日本建築学会近畿支部研究報告集，構造系，28，245-248，1988.5
- 18) 辻ら：日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，1023-1024，1988.9
- 19) 若林ら：日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，381-382，1971.11
- 20) 山田ら：日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，893-894，1970.9
- 21) 山田ら：日本建築学会近畿支部研究報告集，245-248，1971.5
- 22) 安井ら：日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 III，397-398，1999.9
- 23) Zhou, F.: Engineering Structures, 171, 72-85, 2018.9
- 24) Karamanci E, Lignos, DG: J. Struct. Eng., 140(8), 2014
- 25) 日本建築学会，鋼構造接合部設計規準，2012
- 26) 国土交通省国土技術政策総合研究所ほか監修：2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書，2015.6
- 27) AISC : Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 341-16, 2016.7
- 28) 竹内ら：日本建築学会大会構造系論文集，73(632)，1875-1882，2008.10