

〈一般研究課題〉 建築構造物の火災時安全性評価に関する研究
助成研究者 名城大学 大塚 貴弘



建築構造物の火災時安全性評価に関する研究

大塚貴弘、安部武雄
(名城大学、東京工業大学)

Evaluation for Structural Redundancy of Steel Structures Exposed to Fire

Takahiro Ohtsuka, Takeo Ave
(Meijo University, Tokyo Institute of Technology)

Abstract

This paper describe about buckling behavior of cruciform section steel stub column at high temperature. We experiment stub column test with parameters of b/t ($=8,10,12$) and temperature (room temperature, 400°C , 500°C , 600°C). And we analyze these models by FEM. Then finally we proposed a new method to calculate load-displacement curve of plate buckling at high temperature.

1. はじめに

鋼構造物の耐火設計においては局部座屈発生後も部材の残余耐力に期待し、局部座屈後架構が安定なつりあいを保つことができる部材温度の上限を架構の崩壊温度としており¹⁾、常温以上に局部座屈後の部材の耐力を精度良く評価することが重要となる。

H形鋼および角形鋼管部材の高温時局部座屈後耐力に関して上杉ら²⁾⁻⁶⁾は短柱圧縮実験の結果からの局部座屈挙動を含めた平均応力-平均ひずみ関係式を提案し、その応力-ひずみ関係を用いて軸力と曲げモーメントが作用する部材の局部座屈後の耐力を算定している。短柱圧縮実験に対するこの提案式は、局部座屈後の性状を表現できているもののばらつきが大きく、変数の次数についても曖昧な点を有している。

一方、十字形鋼短柱の座屈耐力に関しては、井上による一連の研究^{7),8)}が挙げられるが、井上らは塑性座屈耐力を主眼としており、座屈後の耐力劣化挙動については明らかにしていない。

そこで、本研究では幅厚比と温度をパラメータとした実験および数値解析を通して、十字形鋼短柱の高温時座屈挙動の分析を行い、新たな高温時座屈後耐力評価手法を提案することを目的とする。

2. 実験概要と結果

2.1 試験体鋼材の力学的特性

本研究で用いた試験体鋼種はSN400Bである。材料試験では、常温(RT)から800℃まで100℃刻みの一定温度状態で加力速度を0.2[%/min]として各温度3体の単軸引張試験を行った。図1(a)に応力-ひずみ関係、図1(b)にひずみが4[%]までの応力-ひずみ関係を示す。また、表1に各温度に対する引張強度を示す。

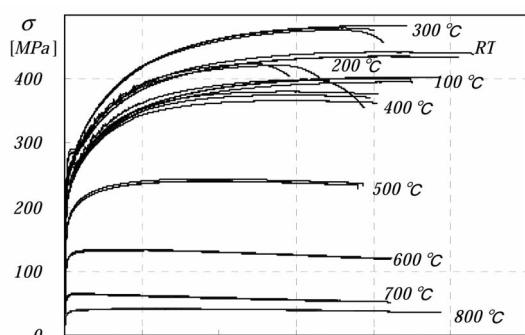


図1(a) 応力-ひずみ関係

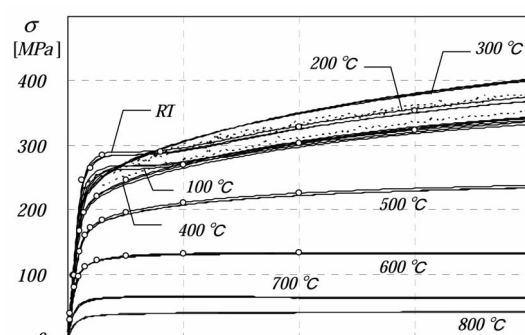


図1(b) 応力-ひずみ関係

表1 引張試験強度

		RT	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃	800℃
		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Tensile strength	Coupon1	435.7	402.8	421.6	476.4	380.4	244.2	132.0	65.3	41.7
	Coupon2	435.5	395.5	399.4	483.2	374.8	240.8	133.0	63.5	40.7
	Coupon3	442.0	401.2	423.8	470.0	366.2	240.2	133.7	64.0	41.4
	Mean	437.7	399.8	414.9	479.8	373.8	241.7	132.9	64.3	41.2

2.2 実験方法

試験体は図2に示すような形状・寸法を持つ十字形鋼短柱であり、幅厚比は $b/t=8,10,12$ の3種類を設定した。ただし、材長 L について座屈波形を考慮して短柱試験の場合の $L=3B$ よりも若干長く、 $L=150[\text{mm}]$ とした。この試験体は板厚 $3[\text{mm}]$ の鋼板を所定の板厚に削った後、溶接により組立、 $12[\text{mm}]$ のエンドプレートに溶接されている。実験時エンドプレートには文献9)同様材軸変位計測用の治具が取り付けられる。

加力装置は文献9)同様ヴォールドウィン大型万能試験機および同機付属の円筒形大型電気炉を用いた。変位は材軸方向変位のみ4点計測した。試験体の温度は常温(RT),400℃,500℃,600℃の4種類とし、一定温度下において加力した。試験体は幅厚比、温度に対して2体ずつ実験を行ったが、常温の場合の $b/t=8,12$ の試験体に対して600℃まで焼鈍しを行った後の試験体を追加した。

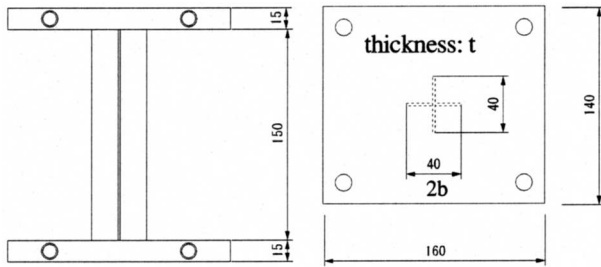


図2 試験体形状

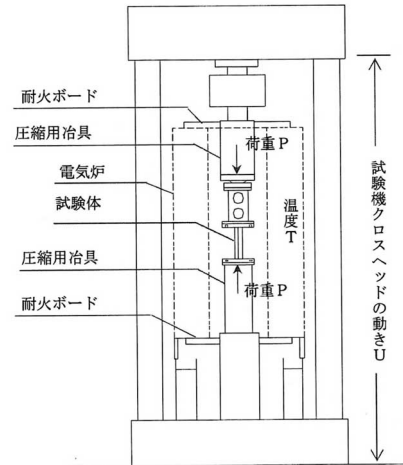


図3 加力装置概略

2.3 実験結果

図4(a)(b)(c)に各幅厚比に対する荷重—変位関係を実線で示す。なお、図4(a),(c)中の点線は焼鈍しをした試験体による結果を表している。また、それぞれの図には、材料試験による各温度に対する応力—ひずみ関係の代表値を細線と併せて記す。図4より座屈する前は材料の応力—ひずみ関係と同一の関係となるはずであるが、常温の場合大きく異なっている。これは試験体制作過程における加工硬化によると考えられ、図4(a)の点線で示すように焼鈍しをすることでその影響が小さくなったと考えられる。これに対し、幅厚比が12の試験体については図4(c)の点線に見られるように降伏後早期に耐力低下が生じていることから分かり難いが幅厚比8の場合と同様、焼鈍しをしたものは加工硬化による影響が小さくなったと考える。また、十字形断面の場合、座屈後緩やかに耐力は低下し、変形が進展すると耐力が停留する様子が見られる。

図5に文献1)と同様に整理した残余耐力—ひずみ関係を示す。横軸は軸変位を材長で除した値を表し、縦軸は荷重を断面積で除したものを横軸をひずみとみなした場合の値に対応する引張試験における応力で除し、さらに幅厚比を乗じた値である。

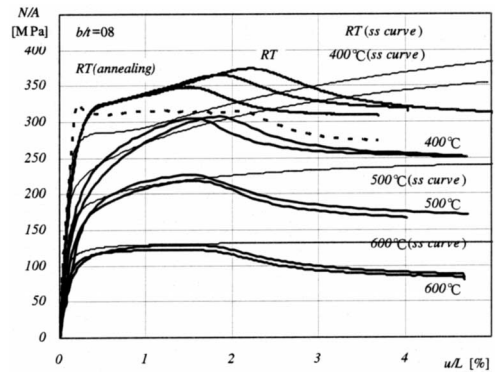


図4(a) 荷重—変位関係 ($b/t=8$)

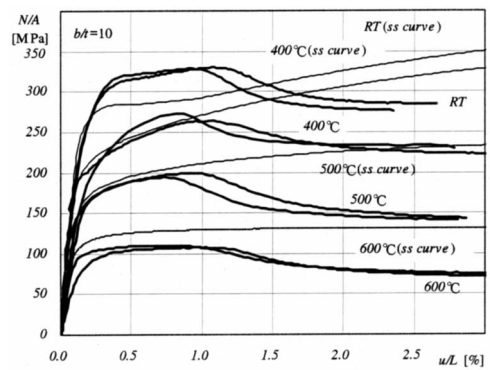


図4(b) 荷重—変位関係 ($b/t=10$)

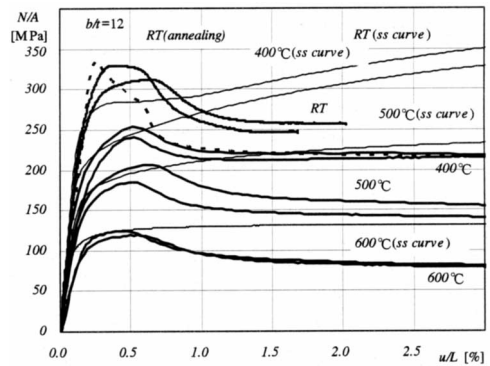


図4(c) 荷重—変位関係 ($b/t=12$)

幅厚比10のモデルの常温,500℃の場合に対する実験終了後の変形形状を写真1(a),(b)に示す。常温の場合はこれまでの知見と同様、座屈波形が幅Bとほぼ同じ長さで生じているが、高温の場合座屈波形が長くなっている様子が見られる。本論文では紙面の都合により割愛するが、この傾向は他の幅厚比の試験体でも確認できた。

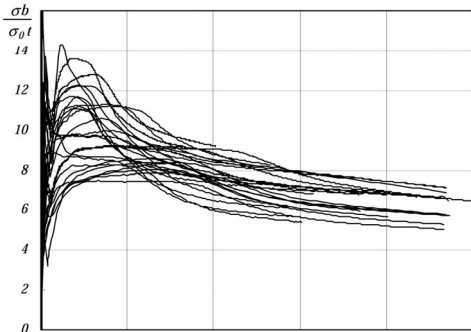
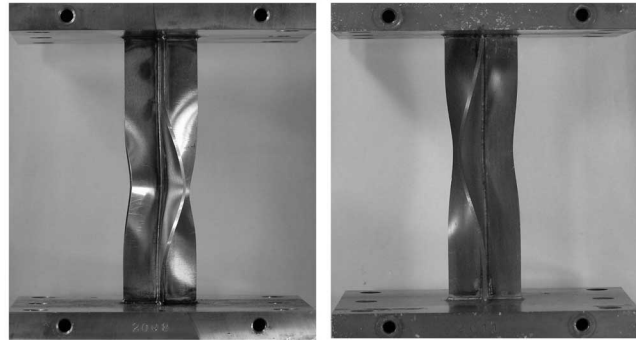


図5 $\frac{\sigma}{\sigma_0} - \epsilon$ 関係



(a) 常温 (b) 500℃
写真1 変形形状 ($b/t=10$)

3. 数値解析

3.1 数値解析概要

ここでは、有限要素法による材料的幾何学的非線形解析により得られた結果と実験結果を比較することで、解析手法の適用性を確認し、座屈後挙動について検討する。用いた要素は4節点シェル要素であり面内方向に 2×2 、板厚方向に7点の積分点を有し、要素分割は図6に示す通りである。境界条件について下端は固定、上端は軸方向変位のみ自由とし、上端の節点に強制変位を与え制御している。材料特性について、文献10)では高温時にヤング係数は常温時から低下するとあるが、本論文ではヤング係数 $E=206[\text{GPa}]$ とし温度によって変化しないものとする。解析に用いた応力-ひずみ関係は図3(b)のプロット(○)を直線で結んだものを採用した。また、降伏条件式や塑性流れ則について高温時多軸応力状態に対する適用については不明な点が多く存在するが、常温の場合と同様にvon Misesの降伏条件式、Associate flow則に基づいている。ひずみ硬化については、等方硬化則を用い、引張試験結果から相当応力-相当塑性ひずみが一軸引張状態の場合と等しくなるよう硬化係数を決定する。なお、本論文では高温クリープひずみは考慮していない。初期不整は、図7に示す固有値解析から得られた座屈モードに対して最大振幅が板厚の1/100になるように与えている。

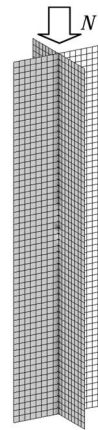


図6 解析モデル

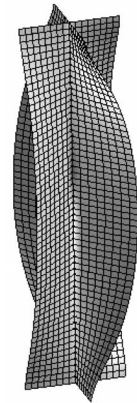


図7 座屈モード

3.2 数値解析結果

図8(a),(b),(c)にそれぞれ幅厚比8,10,12のモデルに対する荷重-変位関係を示す。図中プロット(○)が解析結果を表し、実践または点線(焼鈍し)が実験結果を表す。常温においては焼鈍しを行ったものと座屈により耐力が低下する箇所からその後の耐力低下挙動においても一致し、高温

については全ての結果に対してよく一致している。ただし、図8(b)の幅厚比10,600℃のモデルに対して解析結果が耐力を高く評価しているが、これは図4(b)の結果から判断して試験体の材料特性が低かったものと考えられる。耐力が低下し始めるひずみは、幅圧比12,常温の場合において多少早く生じるがその他のモデルにおいては材料強度のかかわらず幅圧比毎にほぼ同じ値となっている。

図9(a),(b)に幅厚比10, 常温および500℃の場合の解析終了時の変形形状を示す。常温に比し、座屈長さが長くなり、500℃の場合には最大振幅が材軸方向に続く波形になっている。これは他の幅厚比のモデルにおいてもみられた。

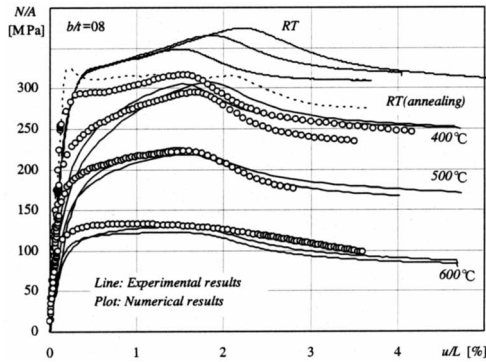


図8(a) 荷重—変位関係 (b/t=8)

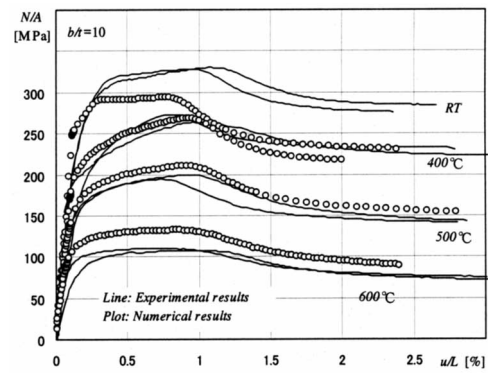


図8(b) 荷重—変位関係 (b/t=10)

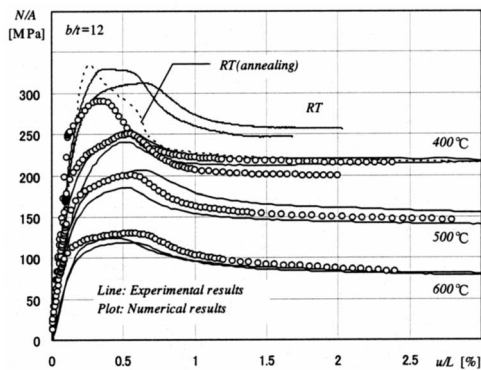
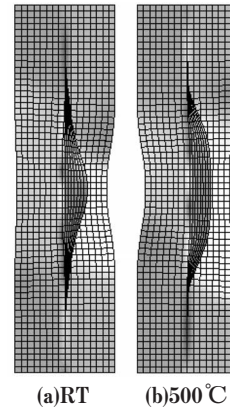


図8(c) 荷重—変位関係 (b/t=12)



(a)RT (b)500℃

図9 変形形状

4. 座屈後耐力推定

鋼板の座屈耐力に関して文献11)において弾完全塑性体の場合の耐力関数を示し、文献12)にてbilinear型の応力—ひずみ関係をもつ場合の座屈後耐力について示した。本論文では同様の手法による鋼板モデル高温時の座屈後耐力を算出し、十字形鋼短柱の実験結果と比較することでその適用について検証する。図10に座屈後耐力算出手順を示す。実験結果と比較するためには、十字形鋼短柱の弾性座屈応力 σ_{cr} から求めた弾性座屈変位 u_{cr} が必要となる。座屈点を面外変位が急激に増大する点とすると、実験では面外変位を計測していなかったことから座屈点算出には数値解析結果を利用するものとする。また、フランジ鋼板モデルの座屈係数は十字形短柱の断面中心の境界条件がピン支持と固定支持の間にあると判断し、式(1-b)を採用するものとする。

$$\sigma_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2, \quad k = 0.8 \left\{ \left(\frac{2b}{l}\right)^2 + 1 \right\} \quad (1-a,b)$$

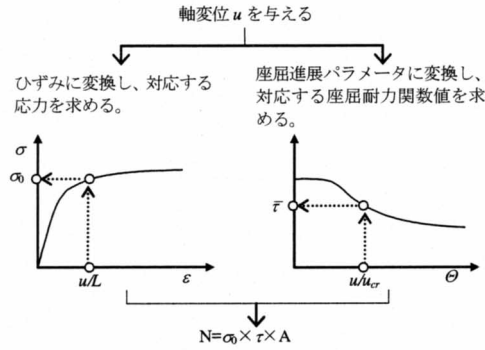


図10 座屈耐力算定手順

図11に式(1)の弾性座屈応力を用いて導いた弾性座屈変位 u_{cr} で無次元化した軸変位と座屈部面外変位 w の関係を示す。文献11)と同様 $u/u_{cr}=1.0$ を閾値として座屈が生じていると言える。

次に、上記のように求めた座屈後の耐力と実験結果を比較する。図12(a),(b),(c)に $b/t=8,10,12$ に対する荷重—変位関係を示す。図中プロット(□)で示される推定曲線は実験結果(実線)とよく対応していると言える。

また、図13に本手法による $\frac{\sigma}{\sigma_0} \frac{b}{t} - \varepsilon$ 関係を示す。

なお、 $\frac{\sigma}{\sigma_0}$ は本手法では $\bar{\tau}$ に対応する。

文献1)においてH形断面短柱の耐力の下限を表す式として式(2)が提案されているがこれは鋼板の弾性座屈応力が式(1-a)のように表現されることを考えると変数の次数としては本手法と同じであることを示している。

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} \frac{b}{t_{eff}} = 0.36 \left(\frac{2.5}{\sqrt{\varepsilon}} + 3 \right) \quad (2)$$

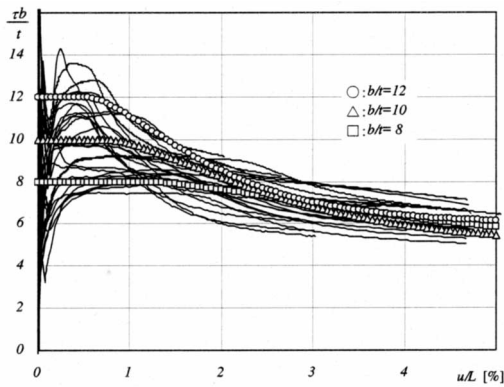


図13 $\frac{\sigma}{\sigma_0} \frac{b}{t} - \varepsilon$ 関係

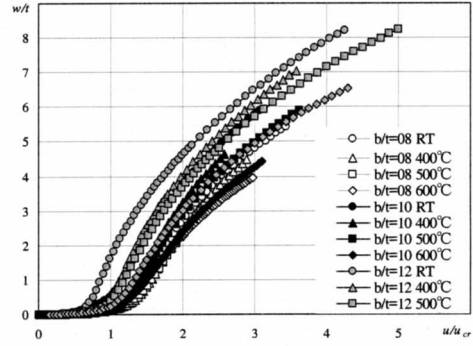


図11 $w/t-u/u_{cr}$ 関係

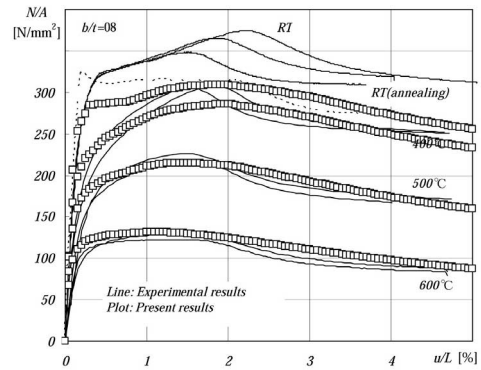


図12(a) 荷重—変位関係 ($b/t=8$)

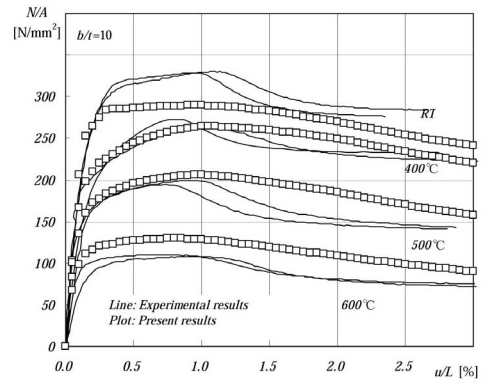


図12(b) 荷重—変位関係 ($b/t=10$)

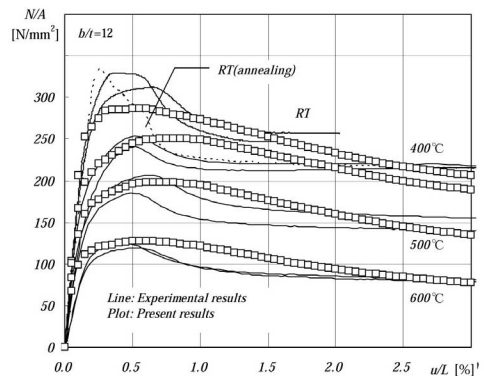


図12(c) 荷重—変位関係 ($b/t=12$)

5. まとめ

幅厚比、温度をパラメータとした十字形鋼短柱の座屈実験および解析を行い、鋼板モデルの高温時座屈後耐力を常温時座屈後耐力式から算出する手法を提案した。本手法は常温から高温まで系統的に評価できるだけでなく、その意味も明解である。

謝辞

本研究の一部は平成20年度財団法人日比科学技術振興財団研究開発助成一般研究課題、平成20年度東京工業大学応用セラミックス研究所共同利用研究一般Bの支援による。なお、数値解析には東京工業大学大学院元結研究室開発プログラム「Shiden」を利用した。ここに記して謝辞を表す。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鋼構造耐火設計指針, 2008.3
- 2) 染谷朝幸, 窪田伸, 作本好文, 上杉英樹, 齋藤光：耐火鋼を用いたH形・箱形断面柱の高温時耐力, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.39B, pp.393-404, 1993.3
- 3) 平島岳夫, 窪田伸, 上杉英樹, 齋藤光：耐火鋼を用いたH形・溝形断面部材の圧縮変形性能, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.197-200, 1995
- 4) 上杉英樹, 鈴木隆生, 平島岳夫, 倉本真介, 齋藤光：耐火鋼を用いた角形・H形断面柱の耐火性, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.42B, pp.407-414, 1996.3
- 5) 上杉英樹, 鈴木隆生, 平島岳夫, 齋藤光：高温時における耐火鋼部材の応力変形状, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.43B, pp.359-366, 1997.3
- 6) 平島岳夫, 織茂俊泰, 菊田繁美, 高橋孝二, 掘昭夫, 中込昭, 松戸正士, 鈴木隆生, 吉田正友, 山内泰之, 中村賢一, 上杉英樹, 齋藤光：高温時における鋼構造部材の耐力変形性能に関する研究, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.46B, pp.735-746, 2000.3
- 7) 井上哲郎：十字形断面鋼板の塑性座屈, 日本建築学会構造系論文報告集, 第422号, pp.117-122, 1991.4
- 8) 井上哲郎, 加藤勉：塑性域における鋼板のねじりとねじり座屈, 日本建築学会構造系論文報告集, 第383号, pp.29-34, 1988.1
- 9) 古村福次郎, 安部武雄, 岡部猛, 篠原保二：高温度におけるT形断面鋼柱のクリープ座屈, 日本建築学会構造系論文報告集, 第420号, pp.171-180, 1991.2
- 10) 古村福次郎, 安部武雄, 岡部猛, 金和中：火災温度域を考慮した鋼材の単軸応力-ひずみ関係式とその鋼構造骨組熱変形解析への適用, 日本建築学会構造系論文報告集, 第363号, pp.110-117, 1986.5
- 11) 元結正次郎, 大塚貴弘：局部座屈を考慮したH形鋼梁要素モデルの提案, 日本建築学会構造系論文報告集, 第582号, pp.81-88, 2004.8
- 12) 尾山雅文, 大塚貴弘, 元結正次郎, 森孝男：フランジ鋼板モデルの座屈後挙動に関する研究, 日本建築学会北陸支部研究報告集, 第47号, pp.96-99, 2004.7