

建築構造用鋼材(SN490B)を用いた柱材の高温時の座屈強度

BUCKLING STRENGTH OF STEEL COLUMNS USING STRUCTURAL STEEL (SN490B) AT HIGH TEMPERATURE

岡部 猛*, 安部武雄**
Takeshi OKABE and Takeo AVE

An experimental study was performed to obtain the data about the buckling strength of the columns using structural steel(SN490B) at high temperature. Two kinds of experiments under the centrally compressive load with rectangular cross-sections of thickness 10mm × width 26mm, (1)tests at constant high temperature, and (2), tests at increasingly higher temperature under a constant axial load. By the tests(1), the buckling loads of column models which were enforced axial edge compression at a constant high temperature were examined. And, by the tests(2), the collapse temperatures of the column models at increasingly higher temperature under a constant load were examined. The results of these tests were compared on a chart of buckling curves, and the effect of creep strain on the buckling strength of the column models was investigated. Furthermore, numerical simulations of the tests were performed. And the results of the calculations clearly show that numerical analysis can be used to provide accurate predictions of the buckling characteristics of columns at high temperatures, when an appropriate mechanical model and data of steel materials at high temperature are used. Comparing the results of tests and analyses, the effects of creep strain (time effect) on the buckling characteristics of steel columns at high temperature are shown.

Keywords: SN490B, column, buckling load, creep strain at high temperature, fire-safe design, steel structure

SN490B, 圧縮材, 座屈荷重, 高温クリープ歪, 耐火設計, 鋼構造

1. はじめに

中心圧縮荷重を受ける鋼柱の高温時の座屈荷重は、鋼構造建築物の耐火設計において基本的で重要な資料である^{1,2)}。

火災を想定した高温時の鋼柱の座屈実験は、我が国では昭和30年代末に高野^{3,4)}が報告しており、一般鋼柱の許容鋼材温度を平均350℃以下(最高450℃以下)に制限する資料となった。その後、1980年代後半になって、耐火設計の枠組みを建物の火災性状や構造体の荷重支持能力に基づく合理的なものにする動きが起こったこと⁵⁾や、鋼構造分野で各種の新素材の開発ならびにその実用化のための研究が活発に行われたこと^{6,7)}等に連動する形で、鋼構造新素材の材料や部材の高温時の強度特性が検討された^{8~16)}。

これらの新素材のうちSN鋼材は、従来のSS鋼材やSM鋼材に相等するものであり、昭和56年6月に施行された新耐震設計法の精神との適合を意識した建築用途の特別規格を満たすものとして開発されたものである。従って、その高温特性は従来のSS鋼材やSM鋼材に類似するものと予想されるが、実験的確認が不可欠として鋼材料の高温強度特性の検討^{12~14)}と中心圧縮荷重を受けるH形断面鋼柱部材の載荷加熱実験^{15,16)}等が既に行われている。文献12~16)は、極めて貴重な設計資料であるが、柱材に関する文献15)における試験体総数は僅かに4体であり、耐火設計をより確実に運用するためには、

今後さらに広範囲の実験データの蓄積が必要であると思われる。

本研究は、建築構造用鋼材(SN490B)を用いた鋼柱の高温下での座屈強度に関する一実験資料を得ることを主目的として、鋼柱小形模型の載荷加熱試験を行うものである。実験は、中心圧縮荷重を受ける両端ピン支持の矩形断面鋼柱を対象にして二種類の高温座屈実験((1)一定温度実験と(2)一定荷重下漸増温度実験)を行う。また、数値解析法を用いて実験結果のシミュレーションを行い、高温弾塑性クリープ挙動解析法の妥当性を検討する。

なお、筆者はSS400, SM490, SA440B, NSFR490A鋼材を用いた同様の研究^{20~23)}を既に報告しており、本論文はSN490Bに関連する文献24~27)を取り纏めたものである。

2. 実験方法

本研究で用いた実験装置(図1)、試験体(図2)、測定項目等は文献20~23)と同様であるので、ここでは説明の重複を避け、試験体鋼材SN490Bの機械的特性と柱座屈実験の制御のみ記述を行う。

2.1 試験体鋼材の応力・ひずみ関係

本研究で用いた試験体の鋼種は建築構造用鋼材SN490Bであり、ミルシートによる化学成分を表1に、常温時の引張試験による機械的性質を表2に、一定温度下の引張試験による応力・ひずみ関係を

* 熊本大学工学部環境システム工学科 助教授・工博

** 東京工業大学建築物理研究センター 助教授・工博

Assoc. Prof., Department of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kumamoto University, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

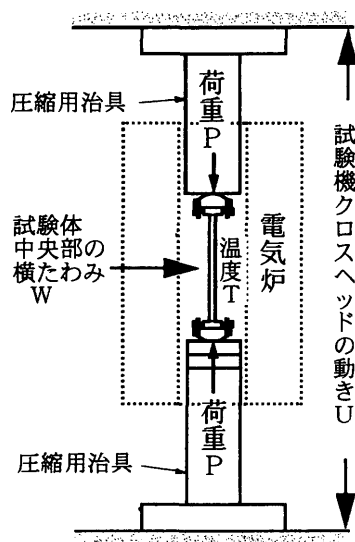


図1 高温座屈実験装置

表1 試験体鋼板の化学成分 (ミルシート値) (%)

Symbol	C	Si	Mn	P	S
	x100			x1000	
SN490B	18	34	126	14	4

表2 試験体鋼板の機械的性質 (常温引張試験)

TEST PIECE (Plate 28mm)	E_{RT} (GPa)	$\sigma_{y,RT}$ (MPa)	$\sigma_{u,RT}$ (MPa)	Elong. _{RT} (%)
SN490B	208	332	510	31

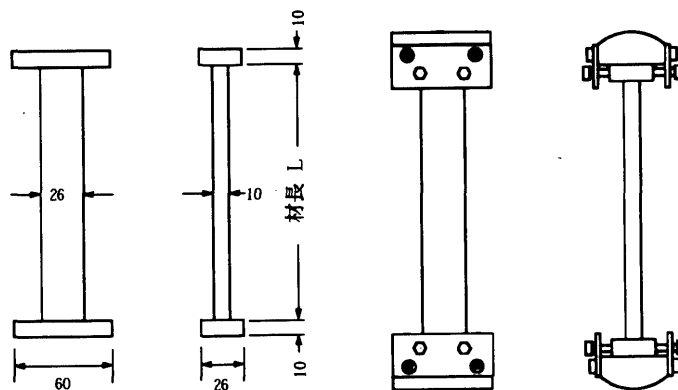


図2 柱試験体寸法 (単位: mm) とピン治具取付け状況

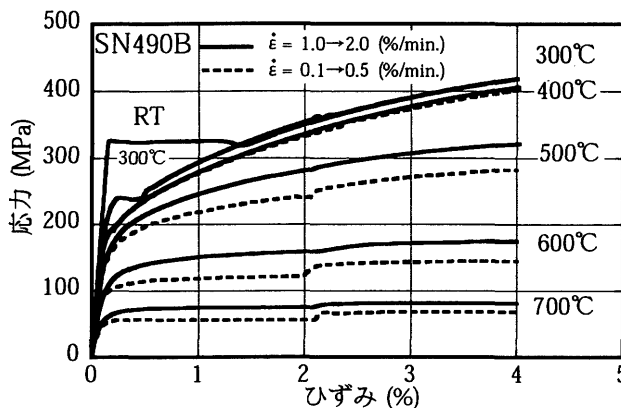


図3 応力・ひずみ関係 (一定温度下引張試験)

図3に示す。

引張試験のうち400℃以上の高温時のものでは、ひずみ値2%を境にしてひずみ速度を毎分0.1%から0.5%に変化させたもの(破線)と毎分1.0%から2.0%に変化させたもの(実線)の二種類の引張試験を行っている。これは、高温下の漸増ひずみ状態における試験体鋼材の高温クリーブ特性によるひずみ速度依存性を調べる目的で行ったものである。

図3より、鋼材温度400℃では降伏棚は痕跡しか見られなくなり応力・ひずみ関係は曲線形になること、破線と実線はほぼ重なっており速度の依存性は殆ど見られないことが分かる。しかし、鋼材温度500℃と600℃では破線は実線よりもかなり低い値を示すこと、ひずみ値2.0%を境にしてひずみ速度を変化させた時、破線の応力値の変動は実線の応力値の変動よりも大きいことが分かる。これは、高温時における試験体鋼材の高温クリーブ現象によるひずみ速度依存性を表しており、破線のひずみ速度域ではこの効果が大きいことを示している。後に示す数値解析法による高温時の鋼柱座屈実験のシミュレーションにおいては、このひずみ速度依存性を文献18)で示した鋼材の高温挙動の力学モデルによって表現することを試みる。

2.2 実験の制御方法

本研究で実験に用いた試験体の常温時の無次元化有効細長比(以下、単に細長比と呼ぶ)は $\lambda' = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ の4種類であり、対応する材長はそれぞれ $L = 91, 136, 181, 226 \text{ mm}$ である。

この試験体と図1の試験装置とを用いて図4で模式的に説明する二種類の実験((1)一定温度実験と、(2)一定荷重下漸増温度実験を行った。

(1)一定温度実験は、試験機クロスヘッドの移動速度を試験体の軸方向ひずみに換算して約0.1%/分程度となるように制御し、4種類の細長比 $\lambda' = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ の試験体を5種類の温度 $T = RT, 400, 500, 600, 700 \text{ }^\circ\text{C}$ 状態で実験し、合計20体を使用した。

(2)一定荷重下漸増温度実験では、電気炉内部を温度速度 $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{分}$ で時間に線形に上昇させ、4種類の細長比 $\lambda' = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ に対して4種類の軸力比 $P/P_{y,RT} = 0.2 \sim 0.6$ を設定し、合計16体を使用した。

3. 実験結果および考察

3.1 (1)一定温度実験の結果

一定温度実験で得られた荷重・変形関係を図5にまとめて示した。図5の縦軸は、試験体に加わった軸荷重 P を常温時の降伏軸力

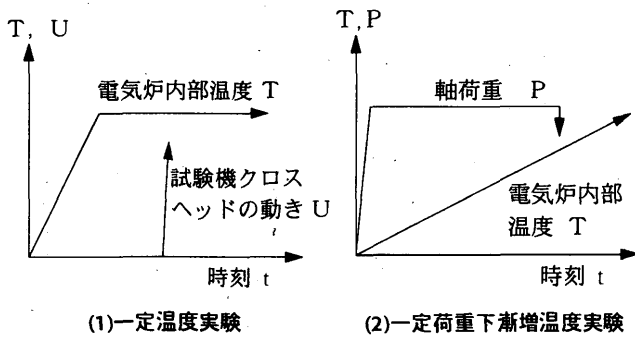


図4 実験の制御方法

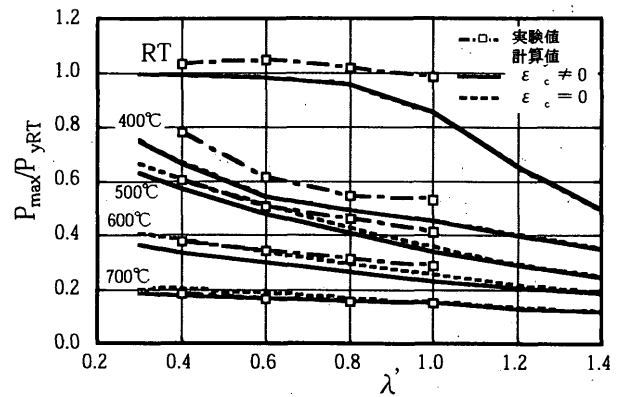


図6 座屈荷重 ((1)一定温度実験)

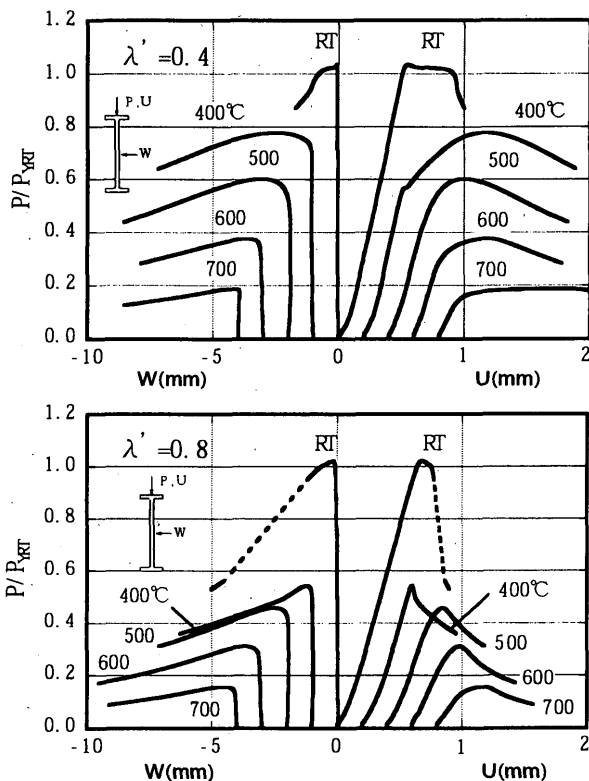
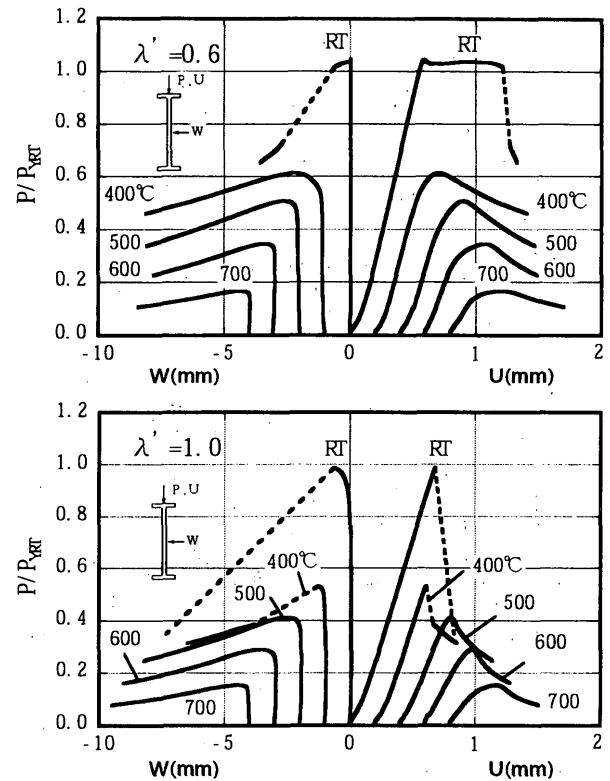


図5 荷重P・変形W、U関係 ((1)一定温度実験)



$P_{yRT} = A \cdot \sigma_{yRT}$ で無次元化したものである。ここで、 A は柱材の断面積、 σ_{yRT} は鋼材の常温時の降伏応力度である。また、横軸は原点から左側に試験体中央部の横たわみ W を、右側に柱伸縮 U を表わしている。ただし、異なる温度の試験結果が重なり合うことを避けるため、試験温度に応じて始点を左右にずらしてある。従って、左右2本1組で1体の実験結果を表わしている。また、座屈時の試験体の横たわみの発生方向には特に規則性は見られなかった。

この図から、細長比 λ' や試験温度 T が高いほど最大強度 P_{max} が低下する様子や、同一温度 T では細長比 λ' が大きいほど挙動に粘りがなくなる傾向があることが分かる。

細かく見ると、細長比 $\lambda' = 0.4$ で温度 $T = RT, 400^\circ C$ の場合は降伏棚の影響が見られる。また、高温時には横たわみ W が増加しながらも、若干の荷重上昇が見られる。細長比 $\lambda' = 0.8, 1.0$ では急激な座屈挙動が生じるようになる。特に、温度 $T = RT \sim 400^\circ C$ に見られる破線は、座屈時に瞬時に変位が生じた部分を表わしている。試験温度

$T = 500 \sim 700^\circ C$ の高温時にはこのような挙動は見られない。従って、試験温度 $T = 500 \sim 700^\circ C$ のものは試験温度 $T = RT \sim 400^\circ C$ のものに比較すると相対的に安定した挙動を示していると言える。

図6は座屈実験で得られた最大荷重 P_{max} を座屈曲線上に□印で示したものである。本研究では、最大荷重を座屈荷重と呼ぶことにする。また、図中には後で述べる数値計算法による計算結果もそれぞれ実線と破線により示している。

この図より、SN490B鋼柱の座屈強度がどのように温度 T と細長比 λ' に依存するかが分かる。すなわち、本研究で実験を行った細長比 $\lambda' = 1.0$ 以下の範囲であれば、試験温度 $T = 400^\circ C$ で常温時の約5割程度まで、試験温度 $T = 500 \sim 600^\circ C$ で常温時の約4~3割程度まで座屈強度が低下することが分かる。

図5、6を相互に比較して考察すると、試験温度 $T = RT$ と $400^\circ C$ の座屈強度は、断面に残留応力のない完全弾塑性材料を持つ柱材の座屈曲線の特徴を示しており、特に $T = 400^\circ C$ の場合の細長比 $\lambda' = 0.6$

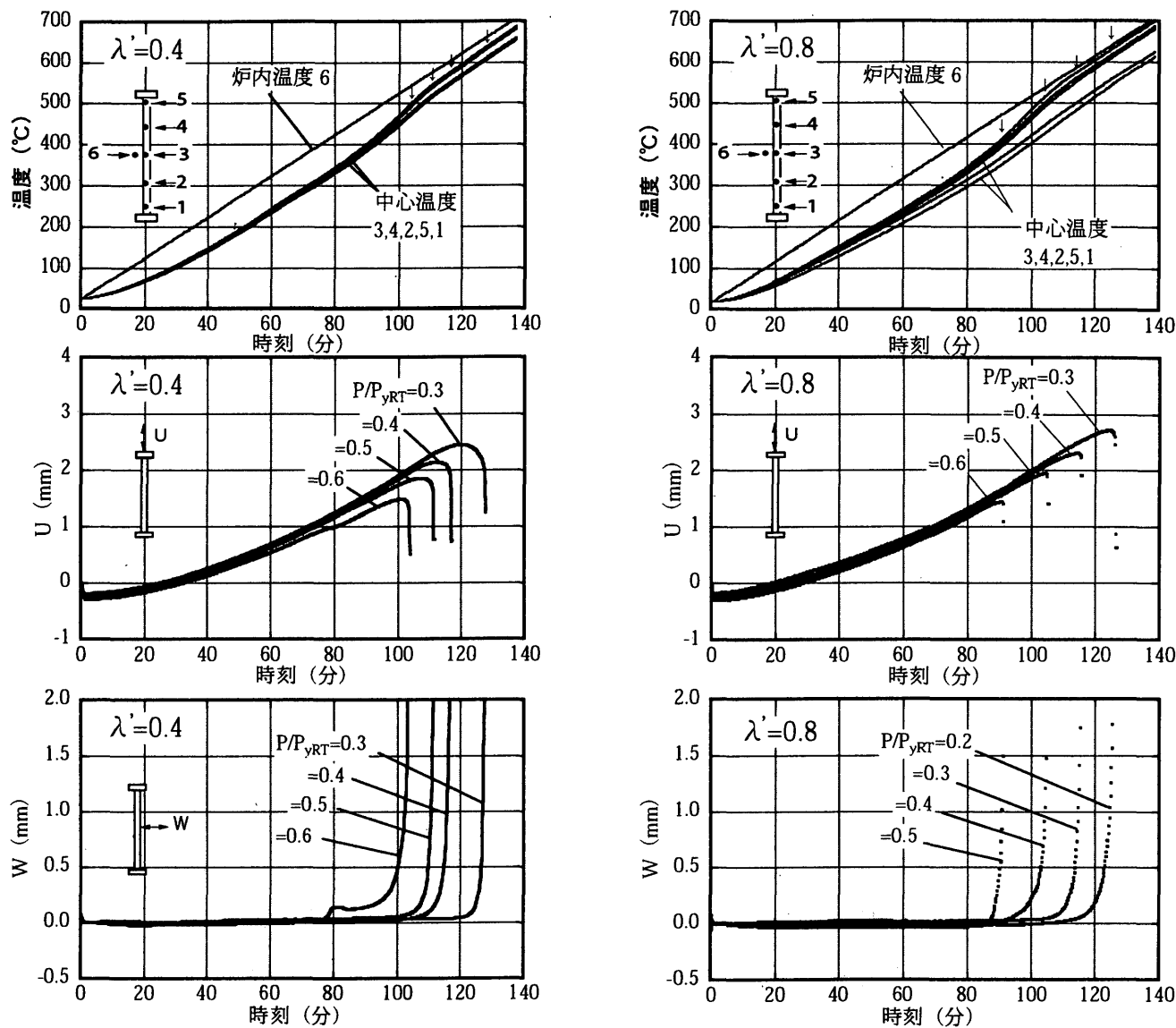


図7 温度T, 荷重P, 変位U, W の時刻歴 (2)一定荷重漸増温度実験

以下の領域ではひずみ硬化の影響が見られることが分かる。また、試験温度 $T=500\sim 700^{\circ}\text{C}$ の場合は曲線型の応力ひずみ関係を持つ柱材の座屈曲線を示しており、座屈強度は細長比 λ' とともに単調に低下することが分かる。

なお、座屈実験後の目視による観察によると、すべての試験体で正弦半波の残留変形モードが見られた。

3.2 (2)一定荷重下漸増温度実験の結果

細長比 $\lambda' = 0.4$ と 0.8 の場合の一定荷重下漸増温度実験の結果を図7に示す。同図の上段は試験体各部の温度の時刻歴を、中段と下段は柱伸縮 U と試験体の中央部の横たわみ W の時刻歴を示している。

図7上段の温度時刻歴より、試験体の中心部の温度は電気炉内部の温度に対して $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ ほど遅れて上昇すること、また電気炉内部温度と試験体の中心部には温度差が生じるが、その差は時刻100分以降 (400°C 以上) では小さくなること等が分かる。

図7中段の柱伸縮 U は、上段の試験体温度と相似形に増加し、座屈崩壊直前には増加が停止し、崩壊時には減少に転じることが分かる。また、図7下段の試験体の中央部の横たわみ W は、座屈崩壊直

前に分枝が生じて徐々に増加を始め、崩壊時には急激に増加する。最終的に試験体は軸荷重を支持できず、万能試験機の荷重が急激に抜けるという状態となるが、本論文では、この時の時間を座屈時間 t_{cr} 、この時の鋼柱温度を座屈温度 T_{cr} とする。図7上段の温度時刻歴上に各実験において座屈崩壊が生じた時点を下印で示した。

なお、図7中段の柱伸縮 U は、試験体や蒲鉾形治具や圧縮用治具の熱膨張量を含んだままの測定値で示している。また、図7下段の試験体の中央部の横たわみ W は、実験時の測定値から石英棒の熱膨張量 ($P/P_{yRT}=0.0$ の測定値) を差し引いた正味のたわみ量だけを示している。なお、実験後の目視による観察によると、すべての試験体で正弦半波の残留変形モードが見られた。

最後に、文献20~23)と同様に座屈崩壊温度に及ぼす高温クリープ現象の影響評価を試みる。図8は、(2)一定荷重漸増温度実験で得られたすべての座屈崩壊時温度 T_{cr} を座屈曲線上の実験条件の点に記入したものである。なお、図中の実線は(1)一定温度実験の結果である。また、図9は図8の□印の座屈温度 T_{cr} を線形補間して等温線を求め、座屈曲線の形で表わしたものである。今回、補間に

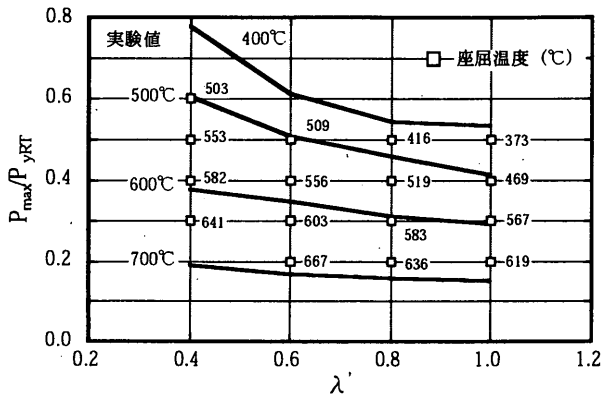


図8 座屈温度 (2)一定荷重漸増温度実験

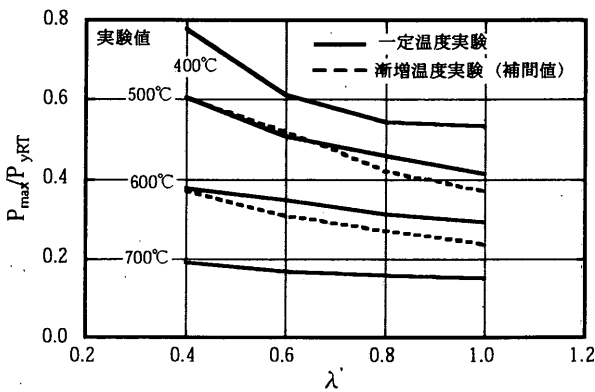


図9 高温クリープの影響 (実験値)

よって完全な等温線が得られたのは $T=500, 600^{\circ}\text{C}$ の場合だけである。

図9によると実験(2)の結果(破線)は実験(1)の結果(実線)よりも全般的に低い値を示しており、常温時軸力比 P/P_{yRT} で考えて鋼材温度 600°C の時5~6%程度低いことが分かる。従って、本実験の範囲では高温クリープの影響により鋼柱の鋼材温度 600°C の座屈強度は常温時軸力比で6%程度低下する考えられる。

4. 実験挙動の数値解析的検討

ここでは、文献(19)に示した一次元有限要素法による弾塑性クリープ変形解析法を用いて、鋼柱部材の高温座屈実験挙動をシミュレートする。本解析法は、線材のはり理論に基づき幾何学的非線形性と材料的非線形性とを同時に考慮する複合非線形解析法である。

4.1 試験体鋼材の高温挙動モデル

図3の引張試験結果から分かるように、ひずみ速度が増加すると応力の応答も増加する。この挙動は、ひずみ速度による応力の上昇現象と高温クリープによる応力の緩和(低下)現象の両方の影響を同時に含んだひずみ速度依存性を表していると考えられる。

ここでは、鋼柱の本座屈実験における温度域とひずみ速度の大きさから判断して、ひずみ速度による応力の上昇現象は大きなものではないと仮定し、高温クリープ現象による応力の緩和効果のみを考慮する鋼材の高温挙動モデル¹⁰⁾により図3の材料挙動を表現する。文献(18)の高温挙動モデルを用いるためには、一定温度の鋼材の応力ひずみ関係と高温クリープひずみ式が必要であるが、これらは以下

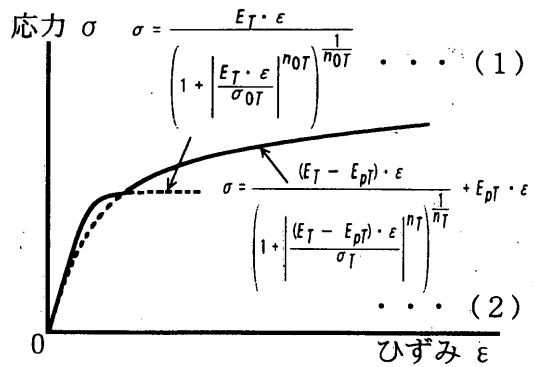


図10 応力・ひずみ関係の近似式 (一定温度)

表3 応力・ひずみ関係近似式の諸係数値 (一定温度)

Temp (°C)	$\frac{E_T}{E_{RT}}$	$\frac{\sigma_{0T}}{\sigma_{yRT}}$	n_{0T}	$\frac{E_T - E_{pT}}{E_{RT}}$	$\frac{\sigma_T}{\sigma_{yRT}}$	n_T
RT	1.000	1.000	82	0.981	0.814	2.966
300	0.887	0.752	3.332	0.869	0.883	1.073
400	0.865	0.010	4.719	0.844	0.736	1.480
500	0.710	0.010	4.719	0.698	0.703	1.499
600	0.549	0.010	4.719	0.545	0.432	1.766
700	0.307	0.010	4.719	0.306	0.215	2.721

T : temperature, RT : room temperature, E : Young's modulus, σ_y : yield strength

に説明するように設定した。

4.1.1 一定温度下の応力・ひずみ関係

図3より、ひずみ速度を毎分1.0%から2.0%に変化させた場合の応力の変化は、毎分0.1%から0.5%に変化させた場合の応力の変化に比較すると無視できるほど小さいことが分かる。これは、毎分1.0%~2.0%程度のひずみ速度域では、高温クリープ現象による応力緩和が殆ど表れず、この時の応力・ひずみ関係は高温クリープひずみの影響が入っていない弾塑性挙動のみを表すものと考えられることを示している。本研究では図3に示した引張試験の応力・ひずみ関係のうち、毎分1.0%から2.0%のひずみ速度で実施した引張試験結果(実線)を高温挙動モデルの応力・ひずみ関係と見なす。

なお、応力ひずみ関係の近似式は図10に示すRalphの式(1),(2)を用いる。400°Cまでに見られる降伏棚やその痕跡を式(1)で表し、その他の曲線型の部分を式(2)で表すことにする。

図3の引張試験値(実線)にフィットするように図10の近似式の諸係数値を決めた結果は表3のようになった。この時の実験値(図3の実線)と近似式の値(図10に示すRalphの式(1),(2)と表3のデータによる計算値)を図11に比較して示す。図11より、ひずみ4%までは計算値は実験値を精度良く近似していることが分かる。

4.1.2 高温クリープひずみ式 $\epsilon_c(t)$

高温挙動の力学モデルを用いるためにはSN490B鋼材の高温クリープひずみ式 $\epsilon_c(t)$ も必要である。しかし、現時点ではこの実験データは得られていない。本研究では、次の(3)式に示すSM490A鋼材の高温クリープ式¹⁷⁾を参考に用いる。

$$\epsilon_{c0}(t) = 10^a T + b \cdot \sigma^c T + d \cdot t^e T + f \quad (\text{for SM490A}) \quad (3)$$

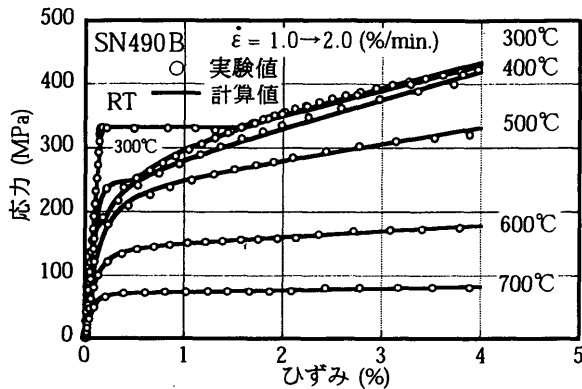


図11 応力・ひずみ関係の比較 (一定温度、 $\dot{\epsilon}_c=0$)

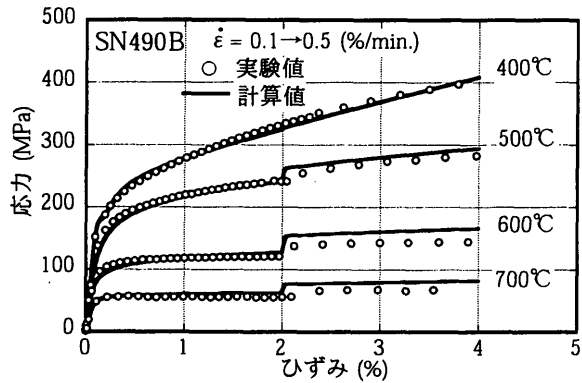


図12 応力・ひずみ関係の比較 (一定温度、 $\dot{\epsilon}_c \neq 0$)

ここで、 ϵ_{c0} :クリープひずみ (%), t :時間 (分) σ :応力度 (kgf/mm^2)、 T :絶対温度 (K)、材料定数は $a=-8.48 \times 10^3$ 、 $b=4.50$ 、 $c=3.06 \times 10^3$ 、 $d=2.28 \times 10^{-1}$ 、 $e=2.00 \times 10^{-3}$ 、 $f=-1.10$ である。

文献 18) に示されている鋼材の高温挙動モデルに、図10の応力ひずみ関係式(1),(2)と表3のデータならびに式(3)で与えられるSM490A鋼材の高温クリープひずみ式 $\epsilon_{c0}(t)$ 等を適用すると、例えば図3の破線に示されるような鋼材の高温弾塑性クリープ挙動をシミュレートすることができる。

しかし、SM490A鋼材の高温クリープ式(3)を直接用いた予備解析を試みたところ、図3の破線が過大に算出されてしまうことが分かった。つまり、予備解析の結果では、SN490B鋼材の高温クリープひずみはSM490A鋼材のそれよりも大きいことが分かった。

そこで、式(3)を下式(4)のように温度の関数で表される係数 $\kappa(T)$ 倍して割増し、シミュレーション結果を図3の破線とフィットするようにキャリブレーションすることを試みる。

$$\epsilon_c(t) = \kappa(T) \cdot \epsilon_{c0}(t) \quad (\text{for SN490B}) \quad (4)$$

試行錯誤を行って、適当な $\kappa(T)$ を求めたところ、次式(5)のように温度の一次関数式となることが分かった。

$$\kappa(T) = 0.015 \cdot T - 5.0 \quad (5)$$

図3の実験結果の破線(実験(1)の結果)と、式(1),(2),(4),(5)を用いて行ったシミュレーション結果とを図12に比較して示す。図12より、ひずみ4%までは計算値は実験値を精度良く近似していると言える。

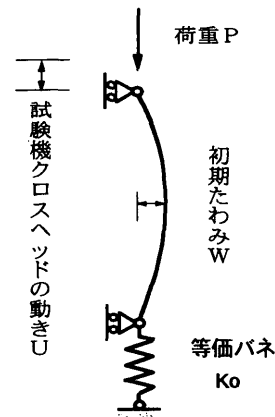


図13 柱試験体の数値解析 ((1)一定温度実験)

表4 試験装置の剛性

温度 T (°C)	材端バネ K_0 (kN/mm)			
	$\lambda=0.4$	0.6	0.8	1.0
RT	30.2	34.3	31.9	33.2
400	30.3	30.3	35.0	33.3
500	25.6	27.3	25.3	31.0
600	26.7	25.1	18.5	20.4
700	14.7	16.0	15.5	13.2

4.2 解析モデル

図13は(1)一定温度実験の数値解析モデルを示したものである。図1の実験における柱伸縮 U (万能試験機のクロスヘッドとテーブル間の動き)には、柱試験体以外の装置部分の剛性の影響も含まれており、実際の柱試験体の伸縮よりも若干大きい。本研究では、この影響を考慮するために柱部分に直列に材端バネ K_0 を連結した解析モデルを用いる。

なお、(2)一定軸荷漸増温度実験では、材端バネ K_0 を考慮しない。この理由は、(2)一定軸荷漸増温度実験では万能試験機のクロスヘッドとテーブル間の動き U には温度変化による圧縮用の治具の熱膨張が加わり、計算で実験値をシミュレーションするのは無理があるので実験値と計算値の比較は行わないからである。この場合は、柱試験体中央点の横たわみ W の時刻歴のみ実験値と計算値の比較を行う。

材端バネ K_0 の値は、鋼柱試験体の材長方向の温度分布と引張試験で得られた鋼材料データより柱試験体の計算剛性値 k を算出し、材端バネ K_0 と直列に繋がった計算モデルの全体剛性が、実験の剛性値 $K = P/U$ と等しくなる条件から求めた。表4はこのようにして求めた K_0 の値を示している。

なお、解析モデルには、材長 L の5,000分の1の最大振幅を持つ正弦半波形の微小な初期たわみを与え、座屈を伴う柱の変形挙動を、初期不整を持つ柱材の釣り合い問題の解として求める。

なお、材長方向には20個の有限小要素に、有限小要素の両端の断面は20個の断面小要素に分割した。また、解析に用いた温度分布は、鋼柱試験体の材長方向4等分割点で測定した実験値を材長方向に線形補間して設定した。

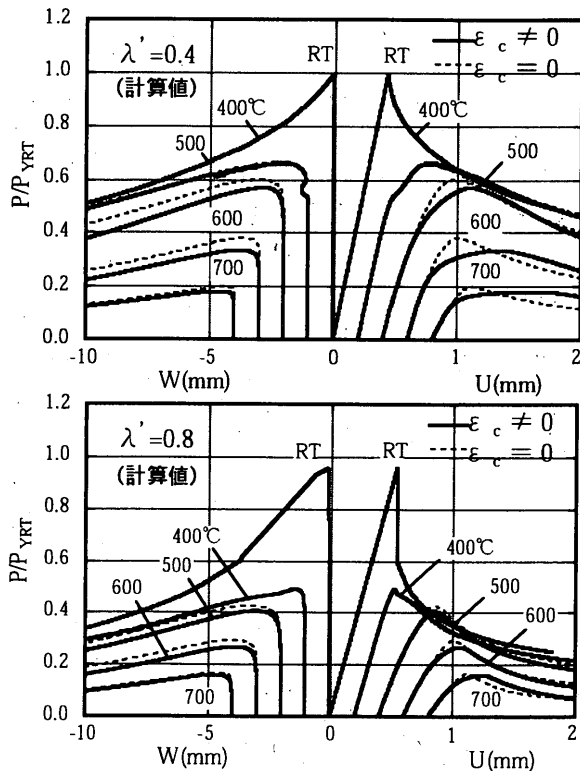


図14 荷重P・変形W, U関係 (計算値) (1)一定温度実験

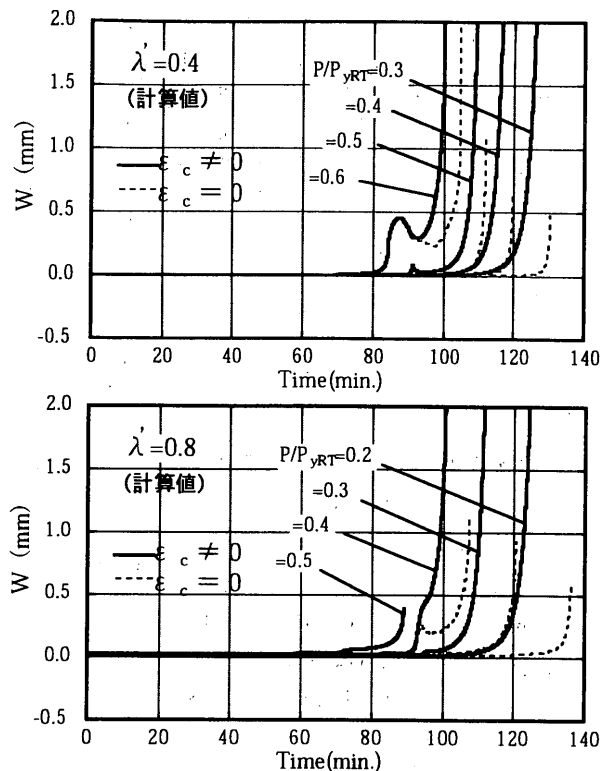


図15 たわみ時刻歴 (計算値) (2)一定荷重漸増温度実験

4.3 解析結果の考察

4.3.1 (1)一定温度実験の結果

図14に解析で得られた細長比 $\lambda' = 0.4, 0.8$ の場合の荷重・変形関係を示す。この図は図5左列の実験値と比較するものである。

計算においては変位制御法を用い、試験機クロスヘッドの移動量Uの速度は試験体の軸方向ひずみに換算して約0.1%/分程度となるように制御した。また、解析結果の変位Wには、実験で含まれる蒲鉾形治具(半径30mm)の転がりによる変位量を治具を剛体と仮定して考慮する。

図5の実験値と図14の解析値を比較すると、特に常温の場合は両者の挙動に一致しない点も見られるが、温度 $T=500, 600, 700^{\circ}\text{C}$ の場合は両者は良く対応している。とくに、高温クリーブを考慮した解析(実線)は無視した解析(破線)に比較して実験結果の挙動を良く表していると言える。

図6には、解析による最大荷重を実線と破線で示している。破線は高温クリーブを無視した結果であり、実線は考慮した結果である。定量的には破線の方が実験結果に一致しているように見えるが、実線の方が安全側である。また、温度 $T=500\sim 700^{\circ}\text{C}$ の場合は、実験値と計算値は良い対応を示している。

4.3.2 (2)一定荷重下漸増温度実験の計算結果

数値計算で得られた細長比 $\lambda' = 0.4, 0.8$ の場合のたわみWの時刻歴の例を図15に示した。ここで、クリープひずみを考慮したものを実線で、無視したものを破線で示している。この図は図7下段の試験体の中央部の横たわみWの実験値と比較するものである。

図15の変形Wは、座屈崩壊する直前から徐々に増加し始め、崩壊時には急増する。また、軸力比 P/P_{yRT} が大きいほど早期に座屈崩壊する。細長比 $\lambda' = 0.4$ で軸力比 $P/P_{yRT} = 0.6$ の試験体の挙動は特徴的

で、時刻80分ほどに一旦分枝を起こし、その後わずかに戻る傾向を示し、最終的に時刻100分過ぎに崩壊する。

変形Wの解析のうち、クリープひずみを考慮したもの(実線)は実験挙動と良く対応している。しかし、細長比 $\lambda' = 0.4$ で軸力比0.6の試験体挙動は、時刻80分過ぎの挙動が実験値よりも極端に表れているように見える。この辺りの挙動は鋼材温度では $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ に対応し、材料の応力・ひずみ関係で考えると降伏棚の痕跡が急激に消失する時点に対応する。解析ではこの材料挙動を図10で示した形に設定しているが、実験では異なる法則に従っていることが考えられる。

図16は、実験と解析で得られた座屈崩壊時の試験体温度 T_{cr} をそれぞれ横座標値と縦座標値に取って、解析値と実験値の相関を表したものである。ただし、解析において高温クリープひずみの影響を無視した結果を+印で示し、高温クリープひずみの影響を考慮した結果を図中の諸記号で示した。

この図から、 500°C よりも低い温度域では解析値は実験値よりも低めの崩壊温度となる。また、 500°C よりも高い温度域では、高温クリープひずみの影響を無視した解析値は実験値よりも高めの崩壊温度となるが、高温クリープひずみの影響を考慮した解析値は実験値よりも低めの崩壊温度となり安全側となる。このことから、実験挙動を詳細にかつ安全側に予測するためには、高温クリープひずみの影響を考慮した解析を行う必要があることが分かる。

5. まとめ

本研究では、建築構造用鋼材(SN490B)を用いた柱材の二種類の高温時中心圧縮座屈実験((1)一定温度実験と(2)一定荷重下漸増温度実験)を行い実験資料を得るとともに、数値計算によるシミュレー

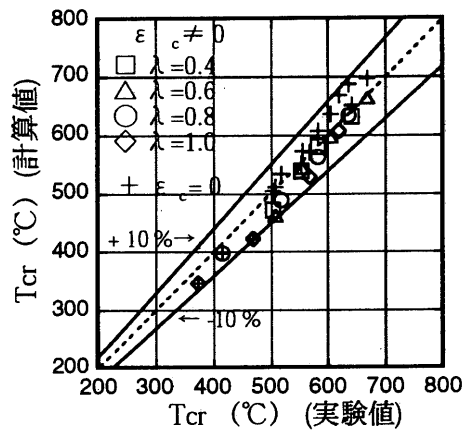


図16 座屈温度の比較 (2)一定荷重下漸増温度解析

シオンを行った。その結果を以下に示す。

[1] 一定温度実験を行い、全体曲げ座屈を伴う柱材の荷重・変形関係を調べた結果、細長比 $\lambda' = 1.0$ 以下の領域であれば、鋼柱の座屈強度は試験温度 $T = 400^\circ\text{C}$ で常温時の約5割程度、試験温度 $T = 500 \sim 600^\circ\text{C}$ で常温時の約4~3割程度まで低下することが示された。

[2] 一定荷重下漸増温度実験を行い、崩壊温度 T_{cr} を得るとともに、一定温度実験結果と比較することにより、漸増温度下の鋼柱の座屈強度に及ぼす高温クリープの影響評価を試みた。その結果、比較的遅い温度上昇速度 $5^\circ\text{C}/\text{分}$ で行った実験では、高温クリープの影響により鋼材温度 600°C の座屈強度は常温時軸力比で6%程度低下することが示された。

[3] ひずみ速度を階段状に変化させたSN490B鋼材の高温引張試験の結果に適合するようにSM490鋼材の高温力学モデルをキャリブレーションした。この構成則を一次元有限要素法による複合非線形解析法に組み込みSN490B鋼柱の座屈実験挙動をシミュレートした。計算結果は実験結果を良好に説明する面があり、SN490B鋼材の高温クリープ特性の重要性が示された。

今後、材料試験を行うことによりSN490B鋼材の高温クリープ特性を定量的に明かにするとともに、H形や箱形断面を持つSN490B柱試験体を用いて座屈実験を行い局部座屈を伴う高温挙動を明かにすることが必要であると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、平成14年度科学研究費補助金基盤研究(C)(2) (課題番号12650578)ならびに平成14年度東京工業大学建築物物理研究センター共同研究(一般共同研究B)の補助を受けた。また、実験用鋼材料は他日本鉄鋼連盟より支給を受けた。付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鋼構造耐火設計指針 第6章、1999.1
- 2) 鈴木弘之：火災時における鋼骨組の崩壊温度、日本建築学会構造系論文集、第477号、pp.147~156、1995.11
- 3) 高野孝次：各種防火被覆をほどこした鉄骨柱の耐火試験結果について、日本建築学会論文報告集、第89号、pp.419、1963.9
- 4) 高野孝次：高温時の鉄骨柱の座屈温度に関する実験、日本建築学会論文報告集、第103号、pp.385、1964.10
- 5) 国土開発技術センター、日本建築センター：建築物の総合防火設計法、1989
- 6) 日本建築学会・構造委員会・鋼構造運営委員会：鋼構造新素材と構造

- 特性、1994.7
- 7) 日本建築学会・構造委員会・鋼構造運営委員会：鋼構造新素材の利用技術、1997.1
- 8) 作本好文、大橋 守、計良光一郎、斎藤 光：建築構造用耐火鋼材の高温強度特性、日本建築学会構造系論文報告集、第427号、pp.107~115、1991.9
- 9) 作本好文、山口種美、岡田忠義、吉田正友、田坂茂樹、斎藤 光：建築構造用耐火鋼材の耐火性能に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文報告集、第434号、pp.149~158、1992.4
- 10) 作本好文、中里卓三、松崎昭博：建築構造用ステンレス鋼の高温特性、構造工学論文集、Vol.37B、pp.213~224、1991.3
- 11) 石田和人、上杉秀樹、小野徹郎、橋本篤秀、堀川達弥：アルミニウム合金を用いた建築構造に関する研究(その22) 建築構造部材としてのアルミニウム合金圧縮部材の高温座屈実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、pp.711~712、1998.9
- 12) 本多孝行、池辺卓、菅田恒治、瀬田一郎、塩飽豊明：SN鋼材の高温時特性調査、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、pp.15~16、1999.9
- 13) 雑喉良介、村上行夫、平山博巳、塩飽豊明、猪砂利次：建築構造用鋼材の高温特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、pp.113-114、2000
- 14) 井出義人、古平章夫、藤中英生：SN鋼材の高温時強度特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、pp.115-116、2000
- 15) 村上行夫、雑喉良介、猪砂利次、平山博巳、塩飽豊明、遊佐秀逸、茂木武：被覆鉄骨柱の耐火性能に関する研究—その4 H形鋼柱の載荷加熱実験—、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、pp.123-124、2000
- 16) 平山博巳、雑喉良介、猪砂利次、村上行夫、塩飽豊明：被覆鉄骨柱の耐火性能に関する研究—その5 機械的性質のばらつきの影響の検討—、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、pp.125-126、2000
- 17) Fujimoto, M., Furumura, F. and Ave, T.: "Primary Creep of Structural Steel (SM50A) at High Temperatures", Trans. of A.I.J., No.306, August 1981, pp.148-156
- 18) Furumura, F., Ave, T., Kim, W.J., and Okabe, T.: "Nonlinear Elasto-plastic Creep Behavior of Structural Steel under Continuously Varying Stress and Temperature.", J. of Structural and Construction Engineering, Trans. of A.I.J., No.353, July, 1985, pp.92-102.
- 19) 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
- 20) 岡部猛：漸増温度下の鋼柱の座屈強度に及ぼす高温クリープの影響評価、構造工学論文集、Vol.43B、pp.367~376、1997.3
- 21) 岡部猛：矩形断面を持つ鋼柱模型(SM490)の高温時の座屈強度、日本建築学会構造系論文集、第515号、pp.169~171、1999.1
- 22) 岡部猛：鋼構造新素材(SA440B)を用いた柱模型の高温時の座屈強度、日本建築学会構造系論文集、第521号、pp.169~171、1999.7
- 23) 岡部猛、安部武雄：建築構造用耐火鋼(NSFR490A)を用いた柱材の高温時の座屈強度、日本建築学会構造系論文集、第535号、pp.171-178、2000
- 24) 茶園 敦、安部武雄、岡部猛：矩形断面鋼柱模型の高温時座屈実験(その5 SN490Bの場合)、日本建築学会研究報告九州支部 第40号、pp.457-460、2001
- 25) 岡部猛、茶園 敦、安部武雄：鋼圧縮材の高温時の座屈強度に関する研究(その8 SN490B鋼柱の高温座屈実験と数値解析法)、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、pp.55-56、2001
- 26) 茶園敦、岡部猛、安部武雄：鋼圧縮材の高温時の座屈強度に関する研究(その9 SN490B鋼柱の実験結果と数値解析結果)、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、pp.57-58、2001
- 27) A.Chan, T.Ave, T.Okabe: "The Effect of Time on the Buckling Characteristics of Steel Columns Subjected to High Temperatures", Proceedings of Sixth Pacific Structural Steel Conference, pp.527-532, 2001

(2004年6月10日原稿受理、2004年8月6日採用決定)