

矩形断面鋼柱模型の高温時座屈実験 (その4. 耐火鋼材NSFR490Aの場合)

正会員 ○岡部 猛*
同 安部 武雄**

1. はじめに

鋼構造建築物の耐火設計資料を得るために、前報1～3)では鋼種SS400, SM490, SA440Bを用いた矩形断面鋼柱小型模型を対象に、高温時の中心圧縮座屈実験を行い座屈強度特性を調べた。

本研究では、耐火鋼材を用いた矩形断面鋼柱小型模型に関して、前報と同様の実験を行ったものである。

2. 試験体及び実験方法

図-1に実験装置および試験体部分の概略を示す。

実験時の試験体の両端には蒲鋒形の治具が取り付けられ、座屈時に転がることによりピン状態を実現する。蒲鋒形治具(半径30mm)の回転中心は試験体平行部の両端部に位置する。この試験体を、万能試験機に筒型電気炉(内法直径10cm、高さ40cm)を組込んだ装置で加力することにより、試験体両端をピン状態とした中心圧縮試験を行った。

試験体は、厚み10mm×幅26mmの矩形断面を持つ鋼柱小型模型である。鋼種は建築構造用耐火鋼材NSFR490Aであり、表-1に化学成分、表-2に常温時の機械的特性、図-2に各種の一定温度下で行った引張試験の結果を示す。図-2から、常温時に鋭い降伏点が見られないこと、鋼材温度500℃で既に降伏棚は見られず応力ひずみ関係は曲線形になること等が分かる。なお、引張試験においてはひずみ速度が毎分0.1%程度となるように制御した。

図-3には、NSFR490Aと文献2)で取り扱った普通鋼SM490との高温時の降伏強度(0.2%オフセット耐力)の比較を示した。この図によると、普通鋼SM490は400℃付近で常温規格値の2/3(22kg/mm²)まで低下するが、耐火鋼NSFR490Aは600℃までこの値を超えている。

なお、本研究で実験に用いた柱の試験体の細長比は

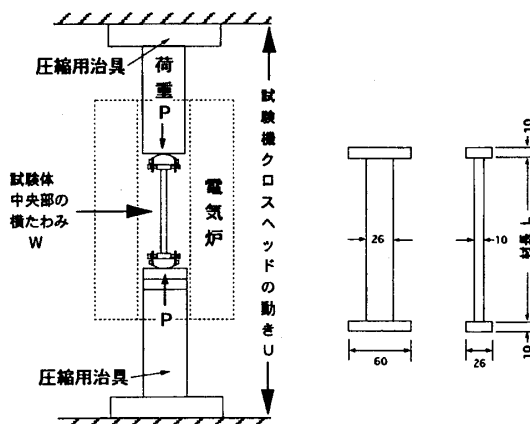


図-1 高温座屈実験装置と鋼柱試験体寸法

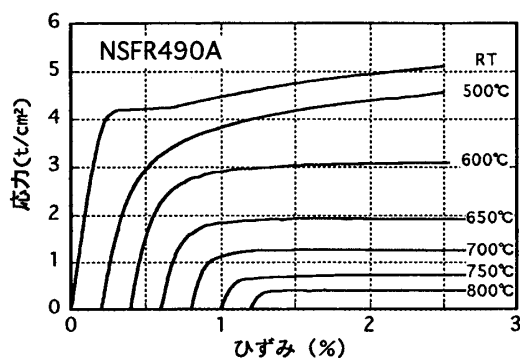


図-2 応力ひずみ関係(一定温度下引張試験結果)

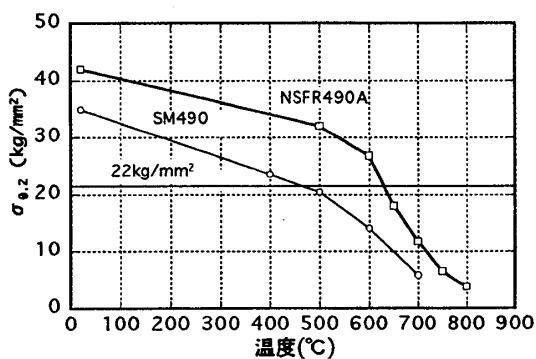


図-3 高温時の降伏強度の比較(一定温度下の引張試験結果)

表-1 試験体鋼鉄の化学成分(ミルシート値)(%)

Symbol	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
	x100			x1000		x100	
NSFR490A	11	25	115	9	2	2	55

表-2 試験体鋼鉄の機械的性質(常温引張試験)

Test Piece	E_{RT} (tf/cm ²)	$\sigma_{y,RT}$ (tf/cm ²)	$\sigma_{u,RT}$ (tf/cm ²)	Elong _{RT} (%)
NSFR490A	2101	4.20	5.67	25

*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

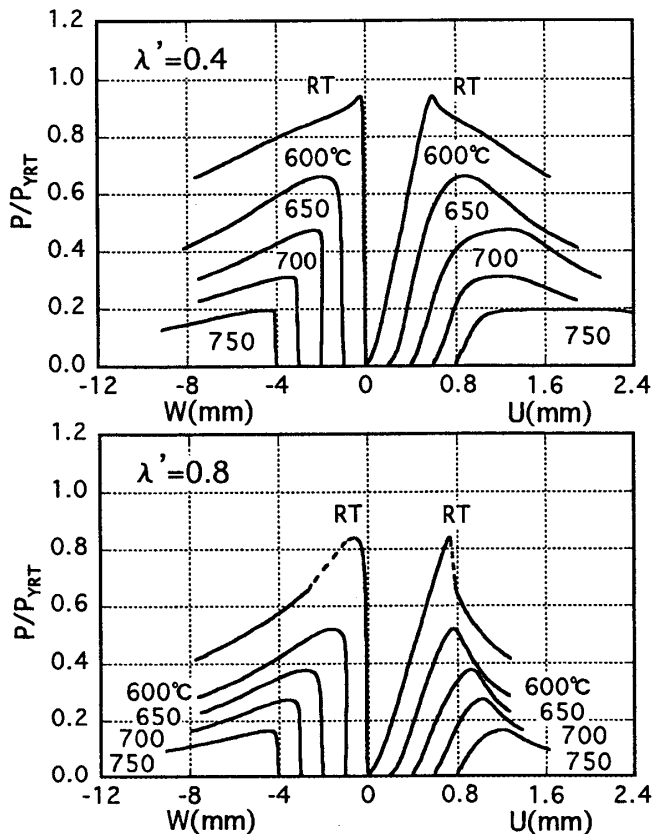


図-4 荷重 P ・変形 W 、 U 関係 ($\lambda' = 0.4, 0.8$)

$\lambda' = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ の 4 種類であり、対応する材長はそれぞれ $L = 8.2, 12.2, 16.3, 20.3$ mm である。

本研究では、文献1～3)と同じく二種類の実験(①一定温度実験と、②一定荷重漸増温度実験)を行った。①の実験は、温度を目的値に上昇させ一定に保持した後に荷重を加えるものであり、②の実験は荷重を目的値に上昇させ一定に保持した後に温度を上昇させるものである。これは、裁荷履歴の異なる二種類の実験を行って結果を比較することにより、特に高温クリープ現象が座屈荷重に及ぼす影響を直接実験的に示すことを目的とするものである。

試験体中央部の横たわみ W は、石英棒を介して水平方向に非接触型の差動トランスで測定し、柱試験体の伸縮に関しては試験機のクロスヘッドの動き U を変位計で測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 一定温度実験の結果

本実験では4種類の細長比 ($\lambda' = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$) に対して5種類の温度 ($T = RT, 600, 650, 700, 750$ °C) を設定し、合計20体の実験を行った。

①一定温度実験で得られた荷重・変形関係の例を図

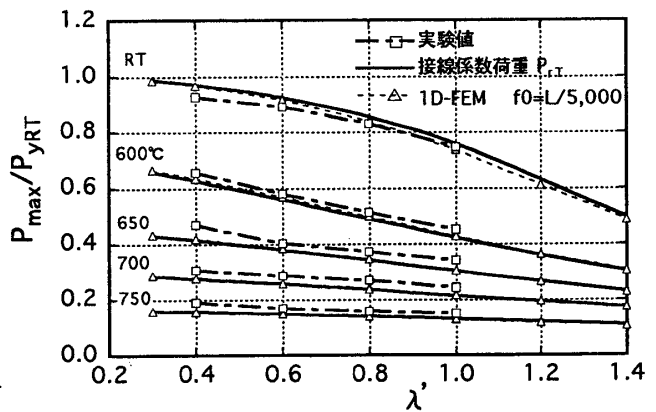


図-5 座屈曲線 (①一定温度実験)

表-3 応力ひずみ関係式の諸係数値

Temp (°C)	$\frac{E_T}{E_{RT}}$	$\frac{E_{1T}}{E_{RT}}$	$\frac{\sigma_{0T}}{\sigma_{YRT}}$	n_T
RT-1	1.000	1.000	1.013	5.410
RT-2	1.000	0.982	1.014	1.739
500	0.833	0.816	0.913	1.624
600	0.809	0.807	0.721	1.945
650	0.653	0.653	0.461	2.130
700	0.608	0.608	0.301	2.035
750	0.372	0.372	0.164	2.728
800	0.238	0.238	0.098	3.109

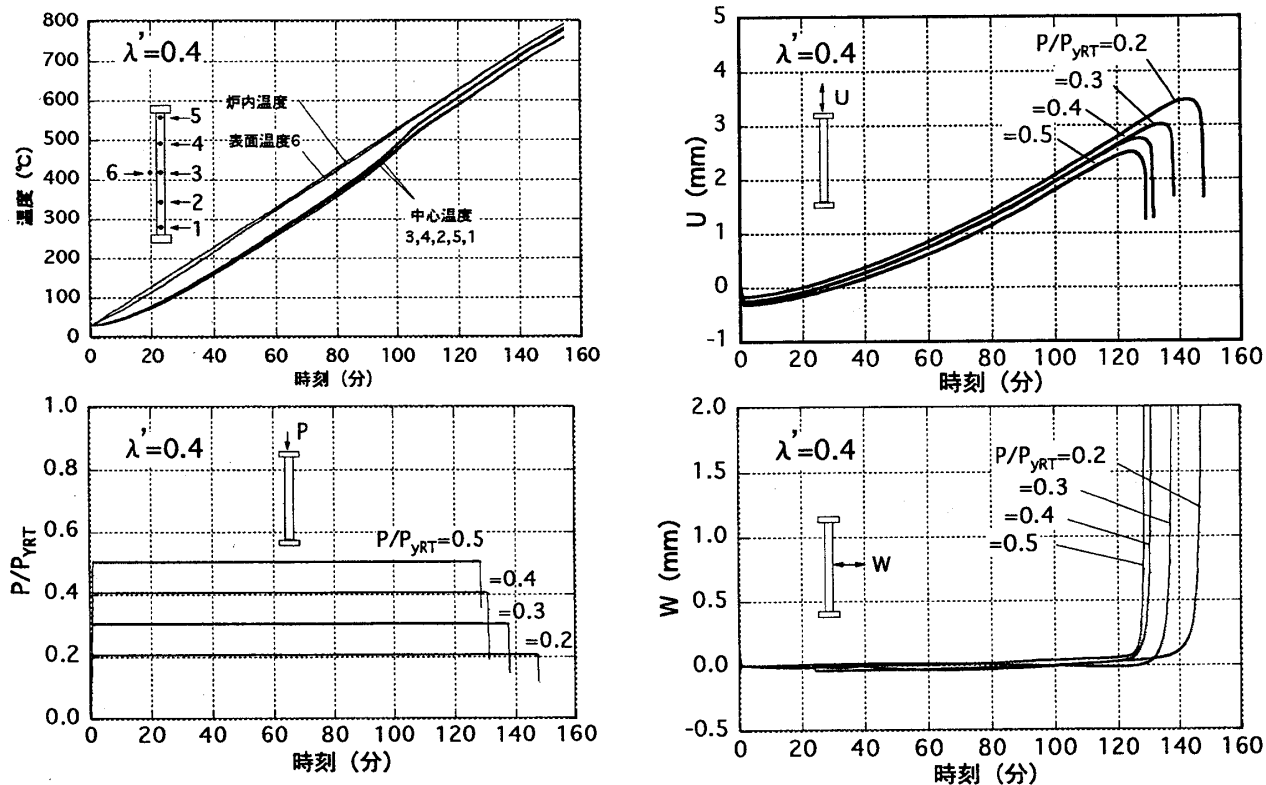
T: 温度, RT: 常温, E: ヤング係数, σ_y : 降伏応力

4示した。この図の縦軸は軸荷重 P を、横軸は原点から左側に試験体中央部の横たわみ W を、右側に試験機のクロスヘッドの動き U を表している。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。この図から、同一の細長比 λ' では試験温度 T が高いほど最大強度 P_{max} が低下する様子が分かる。

図-5の□印は全ての実験における最大荷重 P_{max} を座屈曲線の形に表わしたものである。本研究では、最大荷重を座屈強度と呼ぶことにする。また、この図には非弾性座屈荷重(接線係数荷重)および一次元有限要素法による座屈荷重(最大荷重)もそれぞれ実線および△印付き破線で示している。

なお、上記計算に用いた応力ひずみ関係はRalphの式(1)を用い、図-2に示す一定温度下で行った引張試験結果を用いて諸係数値を表-3に示すように決定した。

$$\sigma = \frac{E_{1T} \cdot \epsilon}{\left(1 + \left| \frac{E_{1T} \cdot \epsilon}{\sigma_{0T}} \right|^{n_T}\right)^{\frac{1}{n_T}}} + E_{pT} \cdot \epsilon \quad (1)$$


 図-6 温度 T , 荷重 P , 変位 U, W の時刻歴 ($\lambda' = 0.4$)

また、一次元有限要素法では、材長の1/5,000を最大振幅とする正弦半波の初期たわみを持つ解析モデルを用い、材軸方向に20有限要素分割、断面の寸方向に20層分割した。

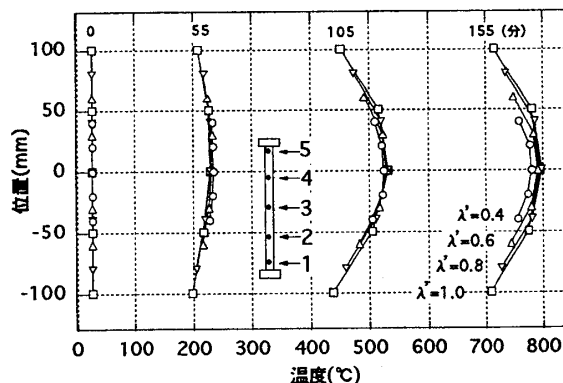
図-5より、本研究で実験を行った細長比 $\lambda' = 1.0$ 以下の範囲であれば、試験温度 $T = 600^\circ\text{C}$ で常温時の約4~6割程度、試験温度 $T = 700^\circ\text{C}$ で常温時の約2~3割程度まで低下することが分かる。また、試験温度 $T = 600 \sim 750^\circ\text{C}$ の場合は曲線型の応力ひずみ関係を持つ柱材の座屈曲線を示しており、座屈強度は細長比 λ' とともに単調に低下することが分かる。

なお、図-5では実験値と理論値は概ね対応しており、一定高温下での鋼柱の座屈荷重は一定高温下での鋼材の応力ひずみ関係を用いた非弾性座屈理論等により概ね予測できると言える。

3.2 一定荷重漸増温度実験の結果

本実験では4種類の細長比($\lambda' = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$)に対して5種類の軸力比(約0.1~0.5)を設定し、合計20体の実験を行った。

細長比 $\lambda' = 0.4$ の試験体の実験結果を図-6に示す。左上段は各部温度の時刻歴、下段は軸荷重の時刻歴、右上下段は柱試験体の変形 U, W の時刻歴である。


 図-7 中心温度の材軸方向分布 ($P/P_{yRT} = 0.0$)

温度の時刻歴より、実験中の試験体温度は必ずしも均一にはなっていないことが分かる。図-7は全試験体温度の材軸方向の不均一分布を分かりやすく示したもので、時刻 $t = 0, 55, 105, 155$ 分での中心温度の材軸方向分布を表わしている。この図に見られるように本実験では材軸方向にも温度の不均一分布が生じ、試験体の材軸方向の中央部分ではそれ程でもないが、端部では温度が低くなることが分かる。

このように柱試験体の温度分布は不均一であり、座屈温度 T_{cr} を決定すること自体に困難を伴うが、ここでは、文献1~3と同様に座屈崩壊時の試験体中央部の中心温度(測定点3の温度)を座屈温度に採用した。

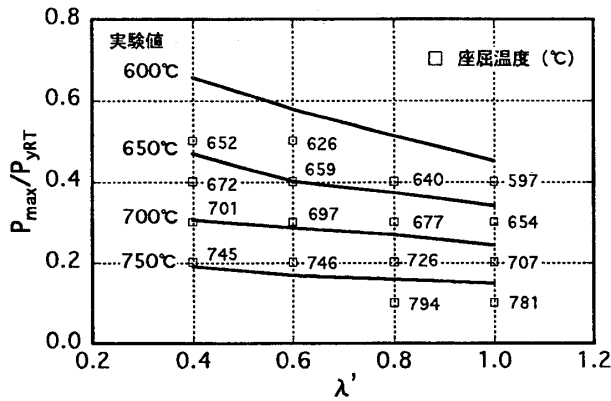


図-8 座屈温度 (②一定荷重漸増温度実験)

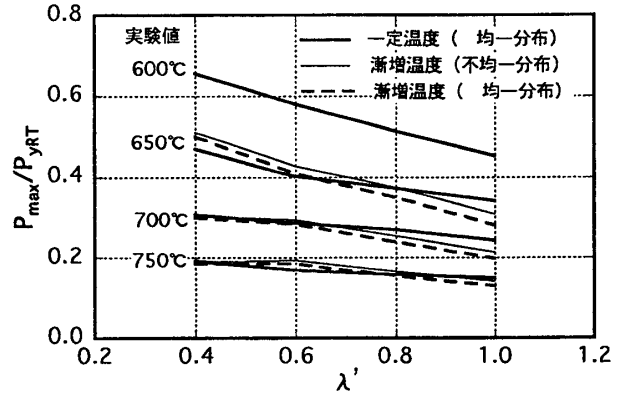


図-10 座屈荷重の比較

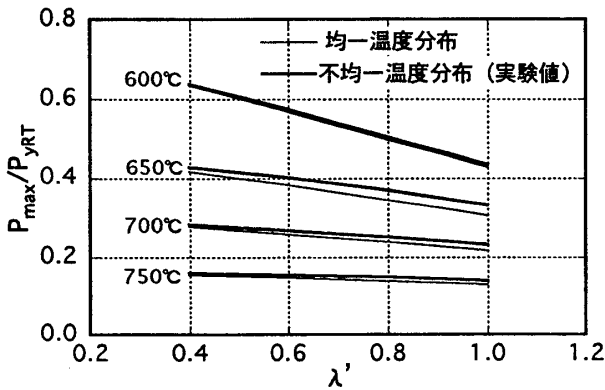


図-9 温度分布による座屈荷重の変化

図-8は、実験結果から得られた座屈崩壊時の材軸中央部の中心温度(測定点3の温度) T_{cr} のすべてを座屈曲線上の実験条件の点に記入したものである。すなわち、実験で得られた座屈崩壊時の材軸中央部の中心温度 T_{cr} を、試験体の軸荷重の常温時軸力比 P/P_{yRT} を縦座標値、細長比 λ' を横座標値とする□印の点に数字で示してある。なお、同図中の実線は①一定温度実験で得られた座屈荷重を直線で結んだ座屈曲線である。

3.3 二種類の座屈実験結果の比較と考察

ここでは、二種類の実験(①一定温度実験と、②一定荷重漸増温度実験)の結果を直接比較するために、②一定荷重漸増温度実験の結果を一定温度での座屈曲線で表わす。それは、図-8の温度 T_{cr} を補間して等温線を求めることにより得られ、図-10の細い実線で表わした座屈曲線となった。

しかし、図-6、7で示したように図-8の座屈温度は座屈崩壊時の材軸中央部の中心温度(測定点3の温度)であり、試験体内で均一に分布している訳ではない。そこで、温度分布の不均一性によって座屈荷重にどの程度の差異が生じるのかを数値解析的に調べた。

図-9は、実験で得られた座屈時の正確な温度分布

(不均一)の場合と、図-8の座屈温度(測定点3の実験温度値)が柱全体に均一に分布すると仮定した場合の座屈荷重を、図-5と同様に次元有限要素法を用いて計算したものである。太い実線が不均一温度分布の場合の座屈荷重を、細い実線が均一温度分布の場合の座屈荷重を表しており、実験で得られた不均一温度分布での座屈荷重は均一に仮定された温度分布での座屈荷重よりも僅かに高い値を示すことが分かる。

この結果を参考にして、図-10の細い実線を補正したものが太い破線である。今回、このようにして $T=650, 700, 750^{\circ}\text{C}$ の場合の完全な等温線が得られた。

図-10によると、細長比が $\lambda' = 0.60$ よりも大きな領域では実験②の結果(太い破線)は実験①の結果(太い実線)よりも小さくなる傾向がみられるが、全体的にみると両者の差は僅かであることが分かる。

文献1~3)でも述べたように、実験②の結果(太い破線)が実験①の結果(太い実線)より小さくなるのは高温クリープの影響であると考えられるが、今回取り扱った耐火鋼材では、座屈荷重に及ぼす高温クリープ現象の影響は小さいものと考えられる。

4. むすび

建築構造用耐火鋼材NSFR490Aを用いた矩形断面鋼柱小型模型の高温時中心圧縮座屈実験を行い、鋼柱材の座屈挙動に関する実験資料を得るとともに、座屈荷重に及ぼす高温度や高温クリープの影響を考察した。

謝辞 本研究の一部は、平成11年度東京工業大学建築物理センター共同研究(一般共同研究B)の補助を受けた。付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 岡部猛: 矩形断面鋼柱模型の高温時座屈実験、日本建築学会九州支部研究報告、1995年、
- 2) 岡部猛: 同題(その2、SM490鋼柱の場合)、同研究報告、1998年、
- 3) 岡部猛: 同題(その3、SA440B鋼柱の場合)、同研究報告、1999年