

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)

正会員 ○岡部 猛*¹

同 茶園 敦*² 同 安部 武雄*³

耐火構造、鋼柱、SN490、座屈荷重、高温クリープ

1. はじめに

鋼構造建築物の耐火設計資料を得るために、建築構造用鋼材SN490Bを用いた矩形断面鋼柱模型を対象に高温時の中心圧縮座屈実験を行い、座屈挙動特性を調べた。また、実験挙動をシミュレーションする数値解析を実行した。

2. 実験方法及び試験体

図-1に高温座屈実験装置の概要を示す。実験時の試験体の両端には薄錐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。薄錐形治具(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)を組込んだもので加力することにより、各種の高温下で試験体両端をピン状態とした中心圧縮試験を行う。

実験に用いた試験体は、厚み10mm×幅26mmの矩形断面を持つ鋼柱小型模型であり、試験体の柱部分は板厚28mmの鋼板より削り出し、両端にエンドプレートを溶接した。鋼種は建築構造用鋼材SN490Bであり、表-1に試験体鋼板の化学成分、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。

引張試験においては、ひずみ値2%を境にしてひずみ速度を毎分0.1%から0.5%に変化させるもの(破線)と毎分1.0%から2.0%に変化させるもの(実線)の二種類を行った。図-2から、鋼材温度400℃で降伏棚は見られず応力ひずみ関係は曲線形になること、500℃以上ではひずみ速度の大きさにより応力の応答もかなり異なることが分かる。

以上の実験装置と試験体を用いて、本研究では、荷重と温度の履歴が異なる二種類の実験((A)一定温度実験と、(B)一定荷重下漸増温度実験)を行った。

実験の結果は、以下に説明する数値解析の結果と比較して本論(その9)に示す。

3. 一次元有限要素法弾塑性クリープ熱変形解析

柱材の全体曲げ座屈を伴う変形挙動をシミュレーションする数値解析方法として、ここでは一次元有限要素法による弾塑性クリープ熱変形解析¹⁾を用いる。本解析法は、幾何学的非線形性と材料的非線形性を同時に考慮する複合非線形解析法である。ただし、図-1に解析モデルを示すように、試験体柱には最大振幅が材長Lの5,000分の1の微小な正弦波初期たわみを与え、初期不整を持つ柱材の釣り合い問

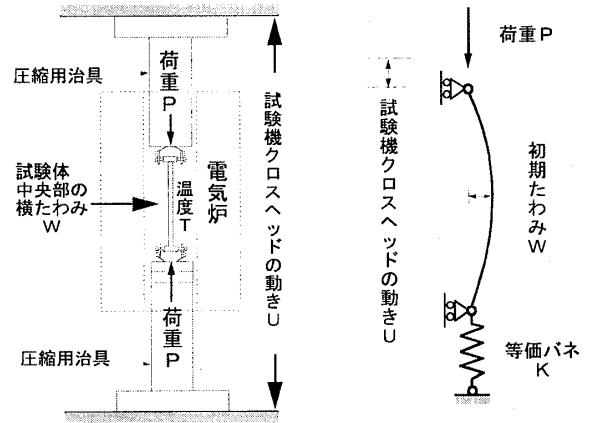


図-1 高温座屈実験装置と解析モデル

表-1 試験体鋼板の化学成分(%)

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

表-2 試験体鋼板の常温時の機械的特性

TEST PIECE (Plate 28mm)	E _{RT} (GPa)	σ _{y,RT} (MPa)	σ _{u,RT} (MPa)	E _{long,RT} (%)
SN490B	208	332	510	31

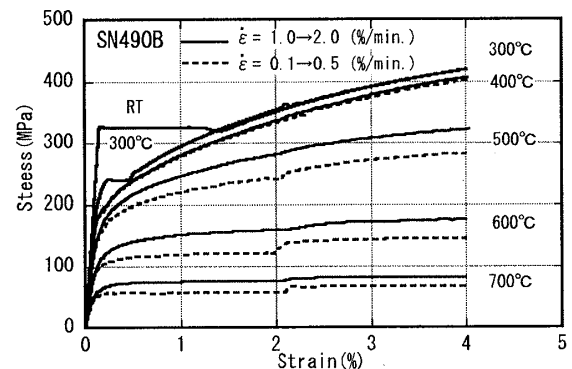


図-2 試験体鋼材の応力ひずみ関係

題として解を求める。以下、材料挙動に限定して解析法を説明する。

3.1 応力ひずみ関係の近似式(Ralphの式)

図-2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、ひずみ速度による強度の上昇現象と高温クリープによる応力の緩和

A Study on the Column Strength at High Temperatures

Part 8 Buckling Tests of SN490B Steel Columns and Numerical Analysis Procedure

OKABE Takeshi

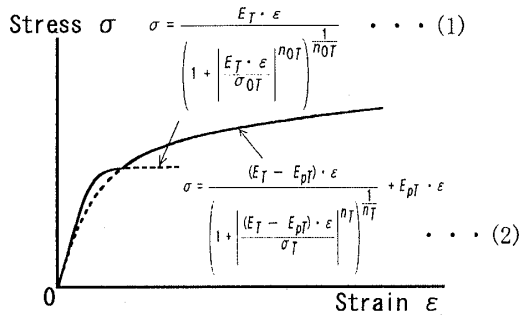


図-3 応力ひずみ関係の近似式(一定温度)

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}	$\frac{E_T - E_{plT}}{E_{RT}}$	$\frac{\sigma_T}{\sigma_{YRT}}$	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

(低下) 現象の影響の両方を含んでいると考えられる。

ここでは、問題にしている柱座屈現象のひずみ速度の大きさと温度域を考慮して、ひずみ速度による強度の上昇現象は無視し、高温クリープによる応力の緩和(低下)のみを解析に考慮することにする。つまり、鋼材の熱弾塑性クリープ挙動で図-2の挙動を表現することを試みる。

そのためにはまず、高温クリープひずみを含まない、弾塑性挙動のみを表す鋼材の応力ひずみ関係を設定する必要があるが、ここでは毎分1.0%から2.0%のひずみ速度で実施した引張試験結果(図-2の実線)をそれと見なす。

応力ひずみ関係の近似式は図-3に示すRalphの式を用いる。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。

図-2の引張試験値(実線)にフィットするように図-3の近似式の諸係数値を決めた結果を表-3に示す。また、実験値と近似式の値を図-4に比較して示す。

3.2 高温クリープひずみ式 $\epsilon_c(t)$

熱弾塑性クリープ挙動を表現するためには鋼材SN490Bの高温クリープひずみ式 $\epsilon_c(t)$ が必要である。しかし、現状ではこのデータは得られていない。ここでは、式(3)に示すSM50Aの高温クリープひずみ式²⁾を参考にする。

$$\epsilon_{c0}(t) = 10^{a/T+b} \cdot \sigma^{c/T+d} \cdot t^{eT+f} \quad (\text{for SM50A}) \quad (3)$$

図-3と表-3の応力ひずみ関係式(1),(2)と式(3)で表されるSM50A鋼材の高温クリープひずみ式 $\epsilon_{c0}(t)$ を用いて、文献³⁾に示す鋼材の高温挙動モデルを考慮すると鋼材

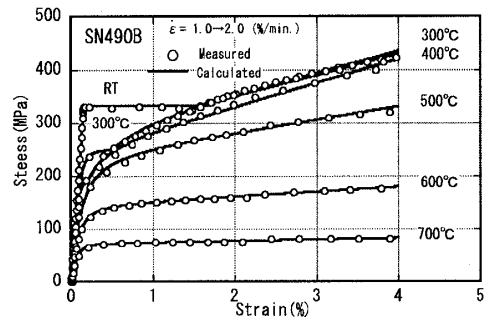


図-4 応力ひずみ関係の比較(一定温度、 $\epsilon_c = 0$)

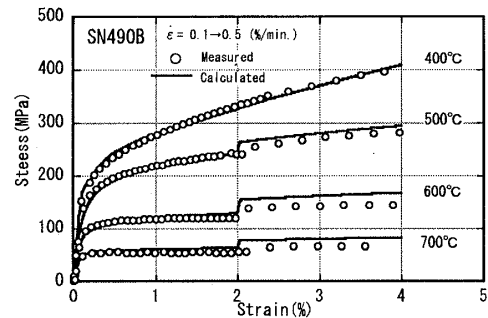


図-5 応力ひずみ関係の比較(一定温度、 $\epsilon_c \neq 0$)

の高温弾塑性クリープ挙動、例えば図-2の破線をシミュレーションすることができる。

ただし、式(3)はSM50A鋼材の高温クリープ式であり、そのまま用いたのでは図-2の破線を過大評価する結果となることが分かった。そこで、式(3)の値を下式(4)のように温度の関数で表される係数 $\kappa(T)$ 倍し、シミュレーション結果を図-2の破線とフィットさせることを試みる。

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

試行錯誤により $\kappa(T)$ を求めると、次の温度の一次関数となった。

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

式(1),(2),(4),(5)を用いて行った図-2の破線のシミュレーション結果を図-5に示す。

3.3 鋼材の熱膨張ひずみ式 ϵ_T

$$\epsilon_T = 5.04 \times 10^{-9} \cdot T^2 + 1.13 \times 10^{-5} \cdot T \quad (6)$$

参考文献

- 1) Furumura, F and Shinohara, Y.: Inelastic Behavior of Protected Steel Beams and Frames in Fire, Trans. of A. I. J., No. 300, 1981,
- 2) Fujimoto, M., Furumura, F. and Ave, T.: Primary Creep of Structural Steel (SM50A) at High Temperatures, Trans. of A. I. J., 1981,
- 3) Furumura, F., Ave, T., Kim, W. J. and Okabe, T.: Nonlinear Elastoplastic Creep Behavior of Structural Steel under Continuously Varying Stress and Temperature, Trans. of A. I. J., No. 353, 1985

*1 熊本大学工学部環境システム工学科 助教授・工博

*2 東京工業大学 大学院生

*3 東京工業大学建築物理研究センター 助教授・工博

*1 Assoc. Prof., Department of Architecture and Civil Engineering,

Faculty of Engineering, Kumamoto University, Dr. Eng.

*2 Graduate Student, Tokyo Institute of Technology

*3 Assoc. Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.