

一定軸荷重と強制部材角を受ける鋼柱の高温時の崩壊挙動

COLLAPSE BEHAVIOR OF STEEL COLUMNS SUBJECTED TO INDUCED JOINT TRANSLATION ANGLE AND CONSTANT AXIAL LOAD AT HIGH TEMPERATURE

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

An experimental and analytical study was conducted to evaluate the effects of induced deformation caused by the thermal elongation of connected heated steel beams on the buckling behavior of steel columns at increasingly higher temperatures under a constant axial load. The buckling tests were performed using steel columns (SN490B JIS grade) with rectangular cross-sections. The result of tests indicated that the reduction in the column failure temperature T_{cr} due to induced deformation can be from 10°C to 50°C, depending on the axial force ratio. And also, the behavior of tests were simulated by the one-dimensional finite-element procedure, and the evaluation of the effect of induced joint translation angle on the column failure temperature T_{cr} was carried out.

Keywords: *Induced displacement, Buckling load, Creep strain at high temperature, Fire-safe design, Steel structure*

強制変形, 座屈荷重, 高温クリープひずみ, 耐火設計, 鋼構造

1. はじめに

鋼構造建築物に発生した火災により加熱された鋼はり部材は材長方向に熱膨張し、隣接する柱部材に水平方向の強制変位を与えるので、柱部材は軸荷重と同時に逆対称形に近い曲げモーメントを受けて変形する^{1,2,8)}。この時、柱部材の柱頭柱脚部分には早期に降伏領域が発生して剛性が低下するとともに、強制変形によるたわみと柱の軸荷重による付加曲げモーメント($P-\delta$ 効果)が発生する。このように考えると、火災時の鋼柱材の鉛直荷重支持能力は、強制変形を受けない中心圧縮状態の柱材の鉛直荷重支持能力よりも相当に低下することが懸念される。

加熱された鋼はり部材の熱膨張による強制変形が、鋼柱部材の鉛直荷重支持能力に及ぼす影響を系統的かつ分析的に取扱った研究例は数少ない。著者らの知る限りでは、数値解析的研究としてBailey³⁾や鈴木他⁴⁾の研究例が見出されるのみであり、実験的研究に至っては皆無である。

文献3,4)は何れも火災加熱を受ける鋼骨組を対象とし、加熱されるはり部材の長さ等の柱部材の崩壊温度に影響を及ぼすと考えられる各種の要因を系統的に設定し、その影響度を調べたものであり、いくつかの有用な知見が示されている。今後、これらの数値解析モデルのみで導かれた知見をより確実なものとするために物実験

的研究による裏付けや検証が必要と考えられる。

このような観点から筆者等は文献17)において、はり部材の熱膨張による強制変形を受ける柱部材の挙動を、両材端回転固定で強制部材角を受ける柱部材の挙動に理想化した実験装置を開発し、常温から高温に至る各種の一定温度下で強制部材角 R と軸方向の荷重 P を同時に加える加力実験((A)一定温度実験と呼ぶ)を行い、最大軸荷重 P_{max} に及ぼす部材温度 T と強制部材角 R の影響を調べた。なお、この研究では強制部材角を全く加えない実験(中心圧縮実験 $R=0.0$)と強制部材角 R を加える実験($R=1/50, 1/25$)の両方を行い、両者の結果を比較することにより最大荷重に及ぼす強制部材角の影響を実験的に直接明らかにした。

その結果、柱部材温度が常温の場合には強制部材角が $R=1/25$ ほど加わることで最大軸荷重が10%以上も低下することが明らかとなった。一方、柱部材温度が400°C以上の高温域の場合は強制部材角 R による最大軸荷重 P_{max} の低下は高々3%程度と僅かなものになることも明らかになった。このように強制部材角 R の高温時の最大軸荷重 P_{max} の低下に及ぼすの影響が小さいということは、文献9~16)等で得られている両端ピン支持で中心圧縮荷重条件で行った柱の実験資料を耐火設計に有効に活用できることを示すものであった。

本研究は文献17)の続編であり、文献17)で行った(A)一定温度実験

* 熊本大学工学部環境システム工学科 助教授・工博

Assoc. Prof., Department of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kumamoto University, Dr. Eng.

** 東京工業大学建築物理研究センター 助教授・工博

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

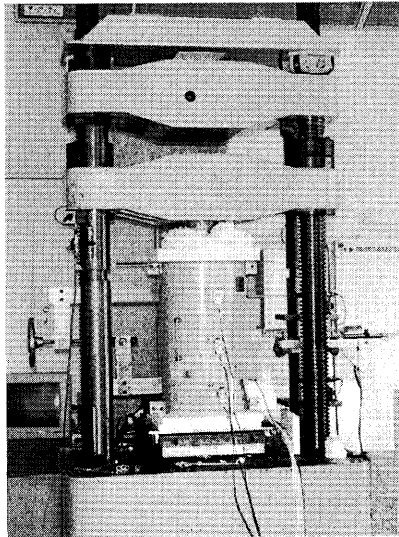


図1 強制部材角を受ける柱材の座屈実験装置の全景と概要

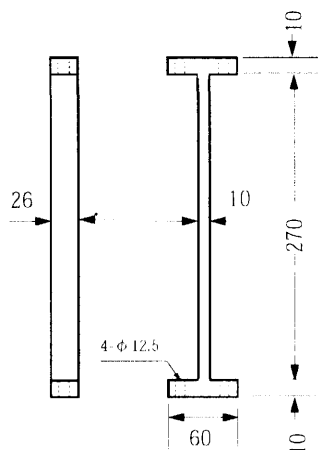
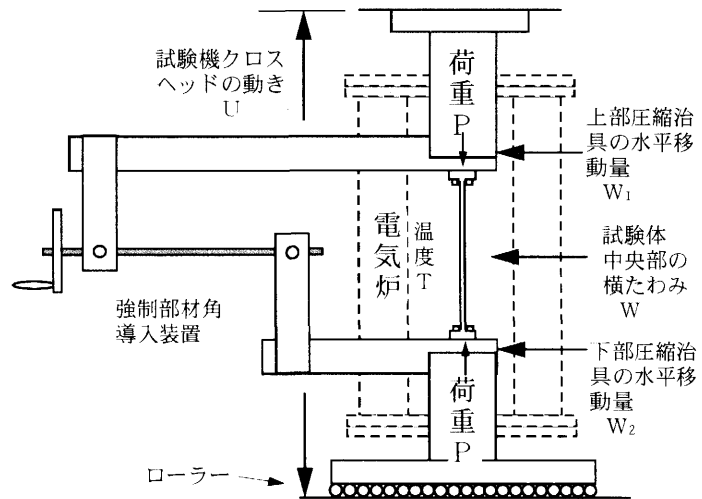
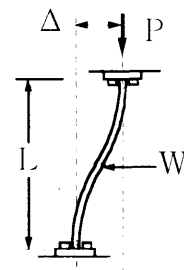
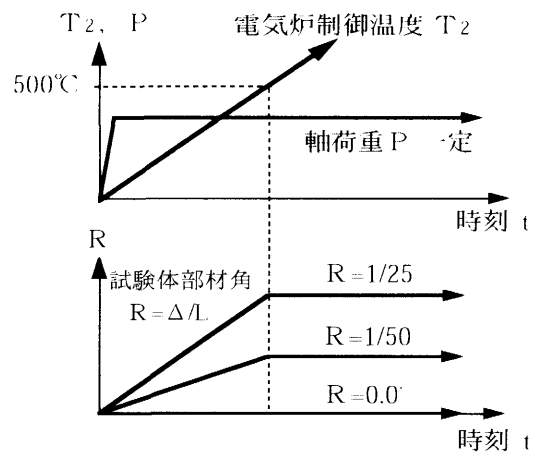


図2 試験体の寸法 (単位: mm) $\lambda = 0.6$



- 実験条件 1 2 種類
- (i) 一定軸荷重 P 4 種類
 $P/P_{VRT} = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$
 - (ii) 強制部材角 R 3 種類
 $R = \Delta/L = 0.0, 1/50, 1/25$
 の組合せ



(B)一定荷重漸増温度実験

図3 実験条件と実験の制御方法

に比較してより現実の火災に近い条件と思われる、一定軸荷重Pが加わる状態で温度Tと強制部材角Rとが同時に漸増する場合の鋼柱材の座屈崩壊実験（以下、(B)一定荷重漸増温度実験と呼ぶ）を行い、崩壊挙動に及ぼす強制部材角の影響を検討するものである。本論文と文献17)の両方の実験で得られた結果は、強制部材角Rを受ける鋼柱材の高温時の荷重支持能力を考察するための相互補完的資料となるものである。

従って、本論文の主目的は、文献17)と同様に鋼柱部材の崩壊挙動に及ぼす強制部材角の影響を実験的に明らかにするものであり、また、数値解析により実験挙動をシミュレートすることにより実験挙動の考察の一助とするものである。

2. 実験方法及び試験体

図1と図2に高温座屈実験装置の概要と柱試験体の寸法を示す。この装置と試験体は文献17)と同じものであり、試験体に軸荷重Pを加える圧縮用治具、部材角 $R = \Delta/L$ を与えるL型の腕、筒型電気炉（内法直径20cm、高さ60cm）等を万能試験機の加力フレーム内に

組み込んだものである。本実験装置では、試験体圧縮用の治具に取付けたL型の腕をネジ切り棒で連結して、それを回転させることにより手で強制部材角を加える方法を採用した。

図からも明かなように、柱試験体の境界条件は上下端完全固定であり、従って座屈長さは柱試験体全長の半分になる。なお、本実験の柱試験体も文献17)と同じく常温時の無次元化有効細長比（以下、

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)	σ_{vRT} (MPa)	σ_{uRT} (MPa)	Elong _{RT} (%)
SN490B	208	332	510	31

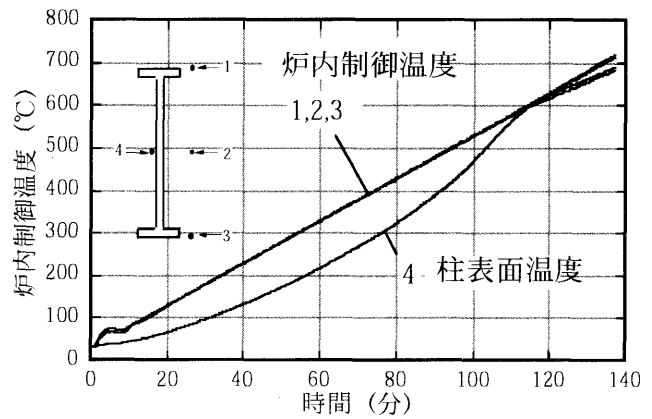


図5 一定温度実験の温度時刻歴

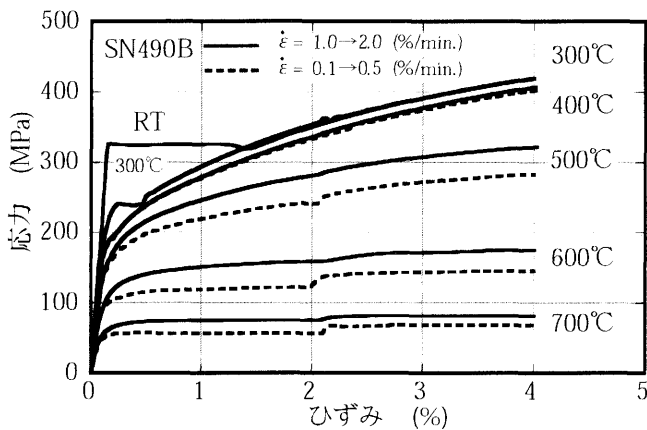


図4 応力ひずみ関係（一定温度下引張試験）

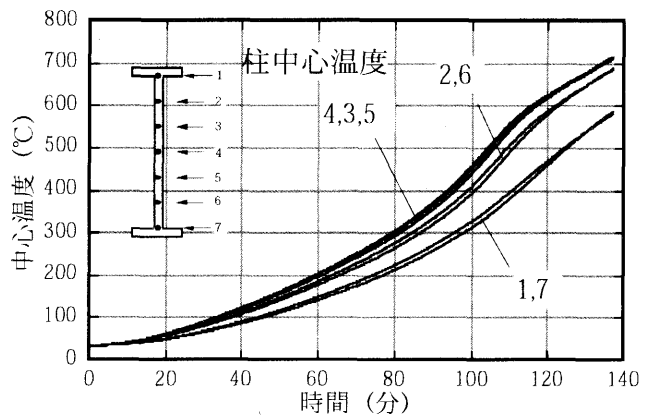


図6 一定温度実験の温度時刻歴

単に細長比と呼ぶ) $\lambda = 0.6$ のものを用いた。

図3に本論文で用いた実験条件とその制御方法を示す。文献17)で行った実験は(A)一定温度実験であるが、本実験は(B)一定軸荷漸増温度実験である。

この実験では、鋼柱試験体を実験装置にセットした後、最初に軸荷重 P を所定の軸力比 ($n = P/P_{vRT} = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ のいずれか) に従って柱試験体に加え、その後一定値に保持する。次に電気炉の内部温度 T を温度速度 $5^\circ\text{C}/\text{分}$ のペースで線形に上昇させながら、同時に強制部材角 R を手動で加える。この時、強制部材角 R の時間変化は電気炉の内部温度 T に比例するものとし、その大きさは電気炉内部温度 T が 500°C に達する時点で $R = 0.0, 1/50, 1/25$ となるような3種類を設定する。 $R = 0.0$ の場合は強制部材角 R を加えない中心圧縮実験であり、強制部材角が $R = 1/50, 1/25$ と加わる場合の結果と直接比較することにより、その影響を明かにする。なお、電気炉内部温度が 500°C を超えた時点では強制部材角 R の増加を中止し一定値に保持する。

実験は柱試験体が温度上昇に伴い一定軸荷重 P を支えられなくなり崩壊するまで継続し、柱試験体が崩壊する時点の柱試験体中央部の中心温度を崩壊温度 T_{cr} とする。

なお、本論文では4種類の軸力比 $n = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ に対して電気炉の内部温度 $T = 500^\circ\text{C}$ の時点での3種類の強制部材角 $R = 0.0, 1/50, 1/25$ の組合せで12体の実験を行った。

実験時には、万能試験機の荷重 P 、試験体中央部の水平方向横たわみ W 、上下の圧縮用治具の水平移動量 W_1, W_2 、試験機のテーブ

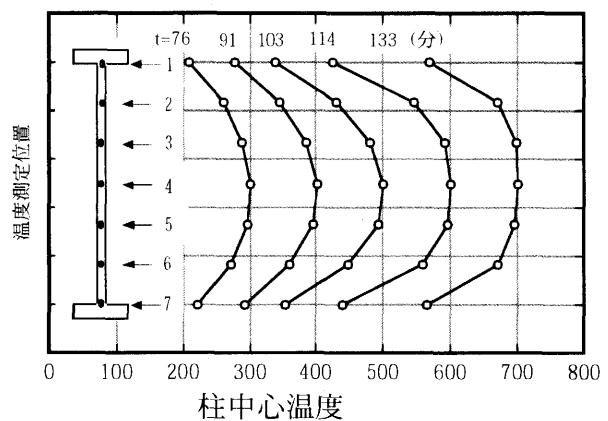


図7 一定温度実験の温度分布

ルとクロスヘッド間の動き U 、ならびに電気炉内部温度や柱試験体温度等の時刻歴を5秒間隔で測定した。柱試験体の部材角 R は、上下の圧縮用治具の水平移動量 W_1, W_2 の差より得られる。

試験機テーブルとクロスヘッド間の動き U には、試験体の伸縮量のほかに試験機や圧縮治具の熱膨張変形等が含まれており、試験体自身の伸縮量を正確に表わすものではない。しかし、以後簡単のためこの量を柱伸縮 U と呼ぶことにする。

また、試験体の鋼種は建築構造用鋼材SN490Bであり、文献17)と同じものである。表1に試験体鋼板の化学成分、表2に常温時の機

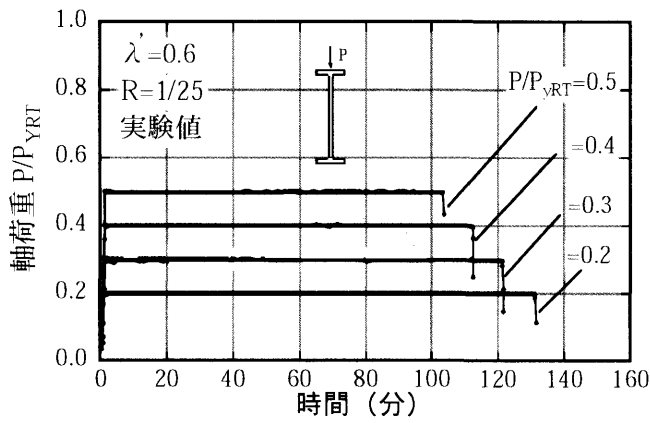


図8 一定軸荷重Pの時刻歴

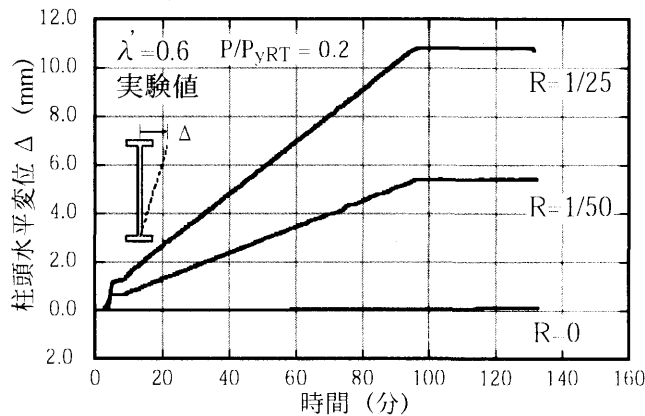


図9 柱頭水平変位Deltaの時刻歴

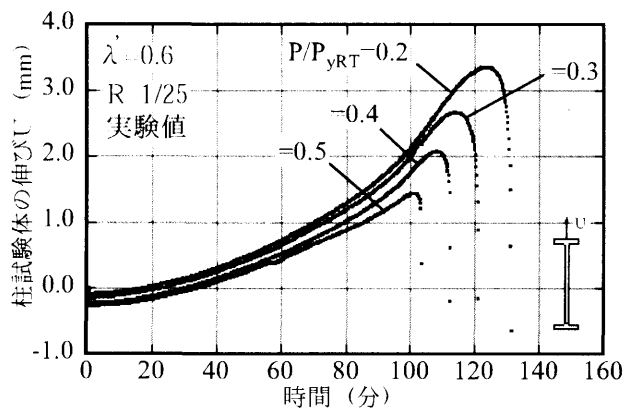
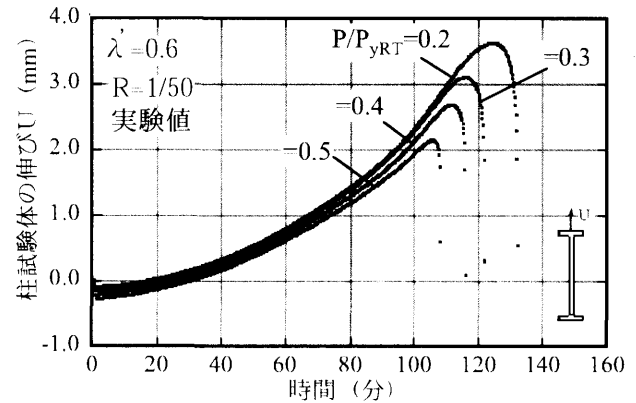
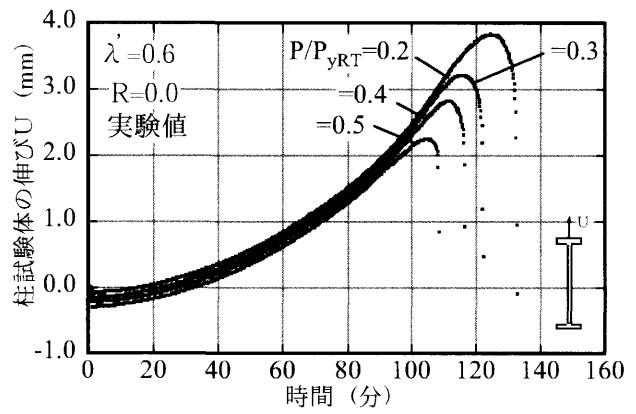


図10 柱試験体の伸縮量Uの時刻歴

機械的特性、図4に一定温度下で行った引張試験により得られた応力ひずみ関係を示す。

次に、電気炉の加熱能力を調べる目的で行った予備加熱実験の結果を述べる。図5～7は、(B)一定軸荷重漸増温度実験用の電気炉温度の加熱パターンを加えた場合の、柱試験体中心温度の測定結果である。なお、この試験体に軸荷重Pは加えていない。また、後述の載荷加熱実験では温度測定用のドリル小穴の断面欠損が座屈荷重に及ぼす影響を考慮して柱試験体の中心温度の測定は行わないが、シミュレーションに必要な温度分布データはこの実験結果を用いる。

図5は、電気炉の制御温度(上、中、下3点)と柱試験体中央部の表面温度の時刻歴であり、図6は、柱試験体の平行部を材軸方向に6等分する点の中心温度の時刻歴である。また、図7は柱試験体中央部の中心温度が300,400,500,600,700℃となった時点での柱試験体中心温度の材長方向の分布図である。

これらを見ると、文献17)の(A)一定温度実験の場合よりも今回の(B)一定軸荷重漸増温度実験の場合の方が、柱試験体の上下端部の温度が上がりにくいこと、中央点と材端部の温度差は100℃以上になり、試験体全体から見て均一温度分布からは程遠いことが分かる。

従って、これらの試験体の座屈崩壊時の温度(崩壊温度) T_{cr} を評価する場合は、実験においては材材内部の温度分布は完全に均一ではなく、図のような分布をしていることを考慮に入れる必要がある。本報告では、先に述べたようにとりあえず崩壊時の柱試験体中央部の温度を崩壊温度 T_{cr} として示す。

3. 実験結果の考察

以下、本実験で得られた実験結果を示す。

図8は一定軸荷重Pの時刻歴の例であり、強制部材角 $R=1/25$ の場合である。この実験の柱崩壊時には試験体は軸荷重を支持することができなくなり、試験機の軸荷重Pが急激に低下することが分かる。強制部材角 $R=0.0, 1/50$ の場合も同様の結果となった。

図9は柱試験体の柱頭部と柱脚部の相対水平変位 $\Delta = W_2 - W_1$ の時刻歴の例であり、一定軸荷重Pが最も小さい軸力比 $n=0.2$ の場合のものである。この量 Δ は、炉内温度500℃の時点で柱試験体強制部材角 $R = \Delta/L$ が $R=0.0, 1/50, 1/25$ となるように制御されていることが分かる。なお、本実験では測定は5秒間隔で行われている。

図10は柱試験体の伸縮量Uの時刻歴であり、図11は柱中央部の水平変位(たわみ量)Wの時刻歴である。上中下段の図はそれぞれ強制部材角 $R=0.0, 1/50, 1/25$ の場合に対応している。

これらの図から実験挙動を観察すると、加熱初期の柱試験体の軸

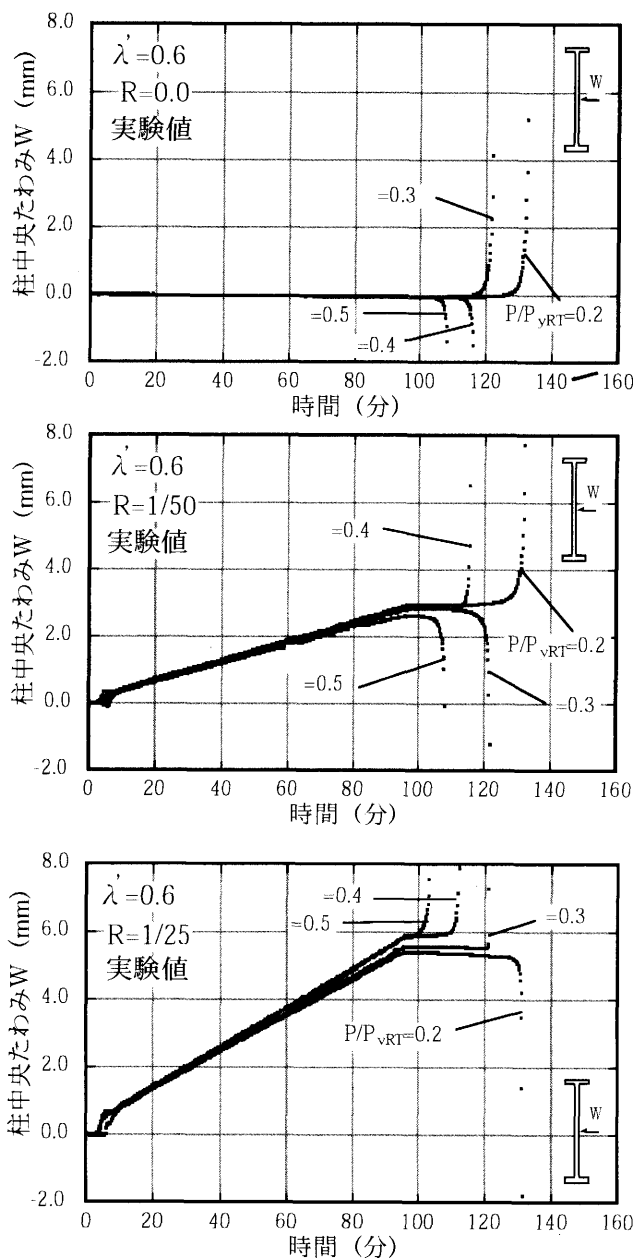


図11 柱中央点の水平変位（たわみ量）Wの時刻歴（実験値）

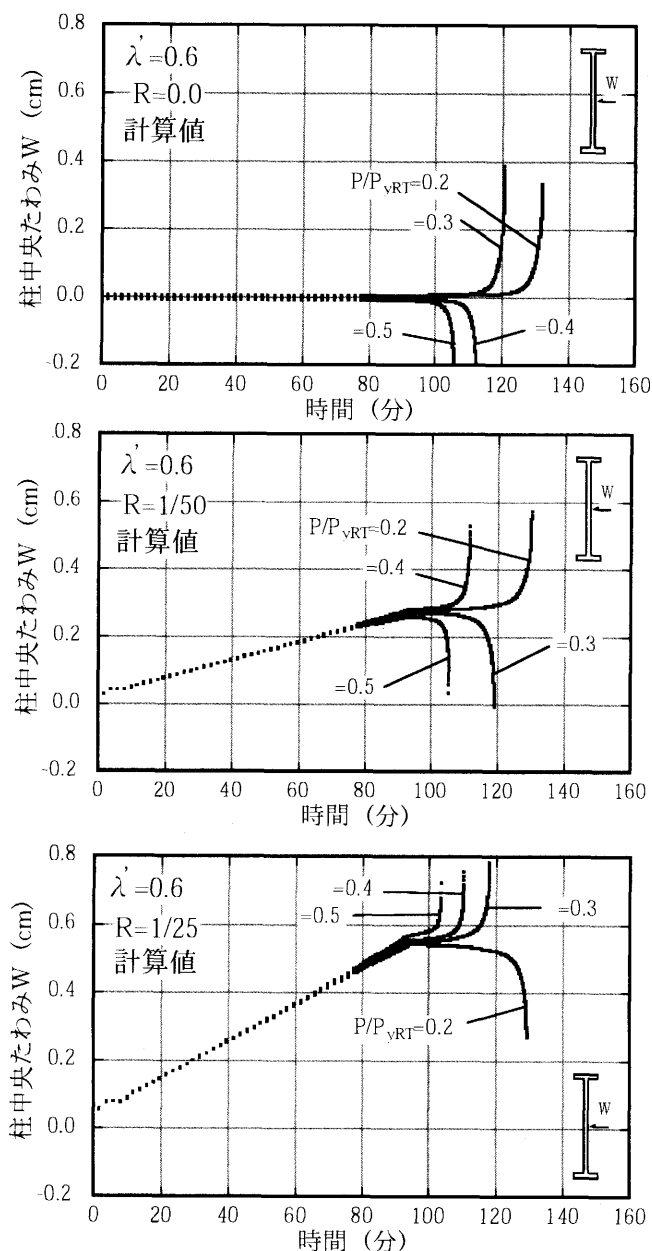


図12 柱中央点の水平変位（たわみ量）Wの時刻歴（計算値）

方向伸縮 U は柱試験体等の熱膨張のため鋼材温度（図6）に比例して増加し、崩壊直前に増加が止まる。この時点までの柱中央点の水平変位（たわみ量） W は、図9の柱試験体の柱頭と柱脚の相対水平変位 Δ のほぼ半分の値となっており、上下逆対称形の曲げせん断型の変形をしていることが分かる。また、最終的な崩壊時にはどの強制部材角 R の柱も、柱伸縮量 U が減少するとともに、柱中央点の水平変位（たわみ量） W は急激に増加する挙動を示している。このことは、強制部材角 R を加えない場合($R=0.0$)も加える場合($R=1/50, 1/25$)も、崩壊時には上下逆対称の曲げせん断型変形の釣合い状態から上下対称形の分岐モードを伴う不安定現象が起っていることを示している。なお、図11から分かるように強制部材角 R が加わっている場合の崩壊挙動は、いずれの場合も電気炉内温度が500℃以上になり強制部材角 R が一定値に保持されている時点で起こっている。

また、図10、11より、軸力比 $n=P/P_{vRT}$ が大きい程、早期に崩壊すること、強制部材角 $R=0.0, 1/50, 1/25$ による崩壊時刻の差は殆どないように見えることが分かる。

図13は実験後の試験体の残留変形状態の写真と実測値を強制部材角 $R=0.0, 1/50, 1/25$ の順に示したものである。

これらの写真と図から、強制部材角 $R=0.0$ の場合は上下対称形の1次の座屈モード形の変形が残留していること、強制部材角 $R=1/50, 1/25$ の場合は、上下逆対称の曲げせん断型の変形に上下対称形の1次の座屈モード型の変形が重ね合わさったような変形が残留していることが分かる。従って、図11の柱試験体中央点の横たわみ W の図でも考察したように、強制部材角 R が存在する場合($R=1/50, 1/25$)は、両端固定の柱試験体に部材角 R が加わって起こる上下逆対称形の曲げせん断変形に、軸荷重 P による座屈時に上下対称形の分岐モードが生じて終局状態に至ったと思われる。

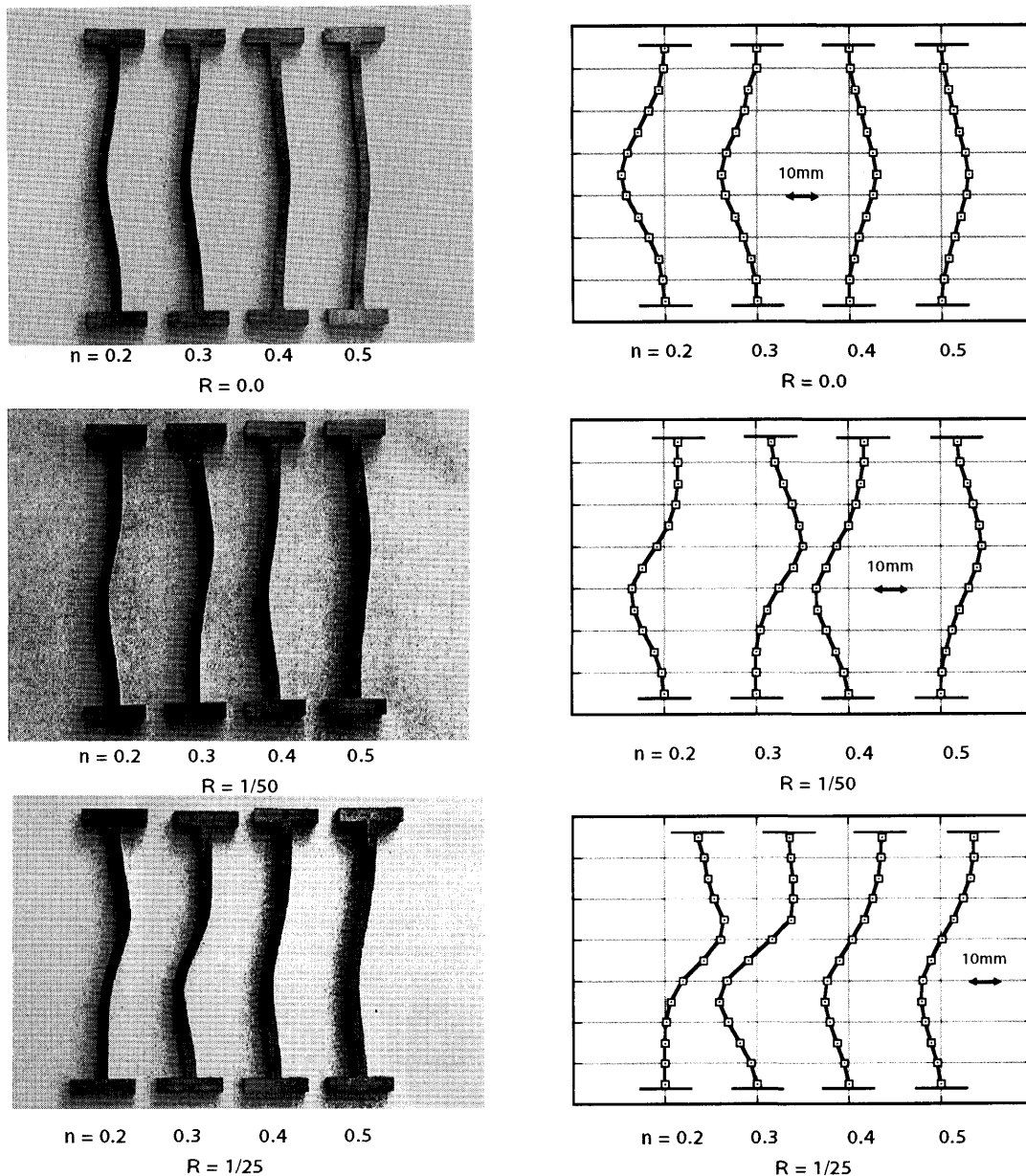


図13 実験後の残留変形状態 (写真および測定値)

図14は、図10と11で得られた柱崩壊時点の柱試験体の温度 T_{cr} を、強制部材角 R を横軸にとって□印で示したものである。ただし、この場合の柱試験体の温度分布は図7で示したように均一ではないので、ここでは文献(17)と同様に柱崩壊時点の柱部材中央点の中心温度を崩壊温度 T_{cr} とした。

図14より、崩壊温度 T_{cr} に及ぼす軸力比 n や強制部材角 R の影響度が分かる。すなわち、軸力比 n が0.2~0.5と変化すると崩壊温度 T_{cr} は700~500℃と大きく変化するが、強制部材角 R が0.0~1/25と変化しても崩壊温度 T_{cr} はあまり変化しないことが分かる。例えば、軸力比 $n=0.2$ の場合は、強制部材角が $R=0.0$ の場合と $R=1/25$ の場合との崩壊温度の差は僅か数度である。また、軸力比 $n=0.5$ の場合でも強制部材角が $R=0.0$ の場合と $R=1/25$ の場合との崩壊温度の低下は50℃程度と大きなものではない。

4. 実験挙動の数値解析的検討

本研究で用いた熱変形解析法^{7,8)}、高温時の鋼材の特性^{5,6)}、解析モデルには、材長 L の5,000分の1の最大振幅を持つ両端固定の中心圧縮材の1次座屈モード波形の微小な初期たわみを与えたこと等、全て文献(17)と同様であるので、これらの説明は省略する。

以下、数値解析で得られたシミュレーション結果を示す。

図12は柱中央点の水平変位(たわみ量) W の数値計算結果である。ここでは高温クリープを考慮した解析結果($\epsilon_c \neq 0$)のみを示している。なお、図11から分かるように実験においては崩壊時のたわみ W の起こる方向に規則性は見られない。従って、数値計算では実験で横たわみ W が生じた方向に微小な初期たわみを与えることにより、数値解析のたわみ W の生じる方向を実験結果と合わせて示してある。

図12の計算結果と図11の実験結果とを比較すると、崩壊の起こる時刻や変形挙動の様子はともに良く対応しており、高温時の鋼材の特性を考慮した一次元有限要素法による数値計算法で実験挙

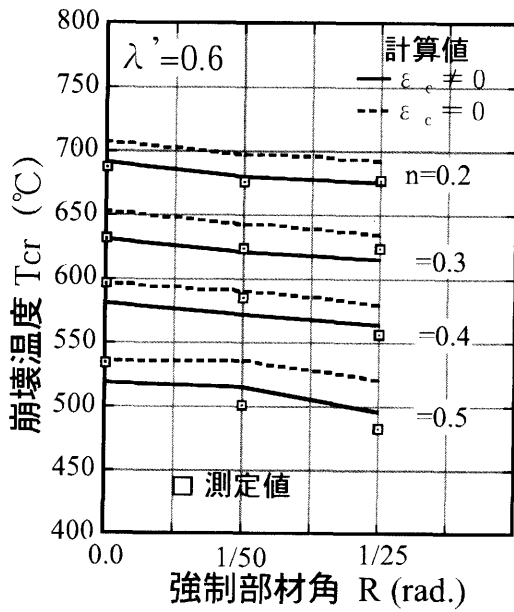


図14 座屈温度と強制部材角

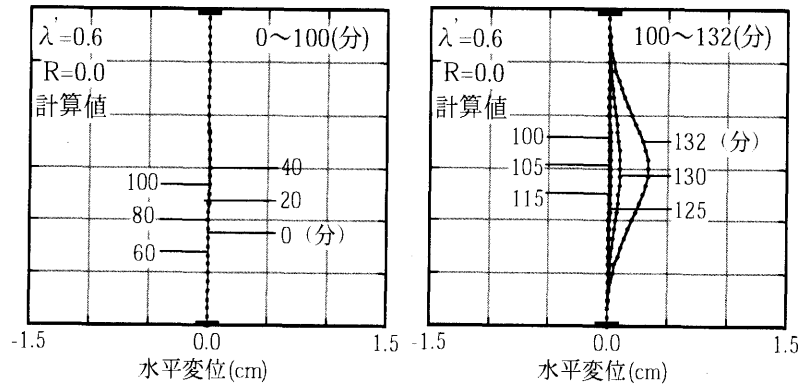


図15 変形図 (n=0.2, R=0.0)

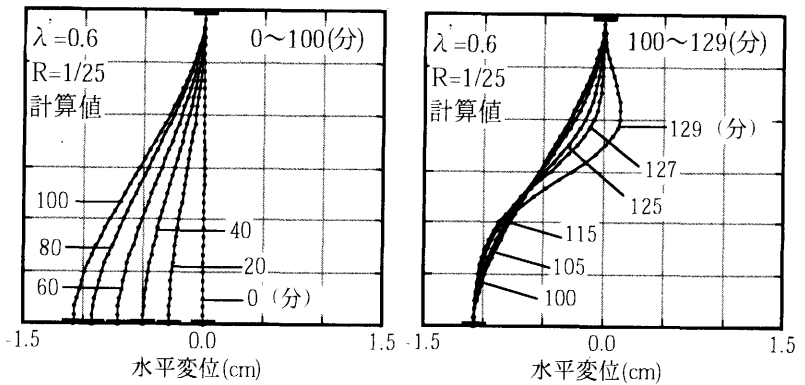


図16 変形図 (n=0.2, R=1/25)

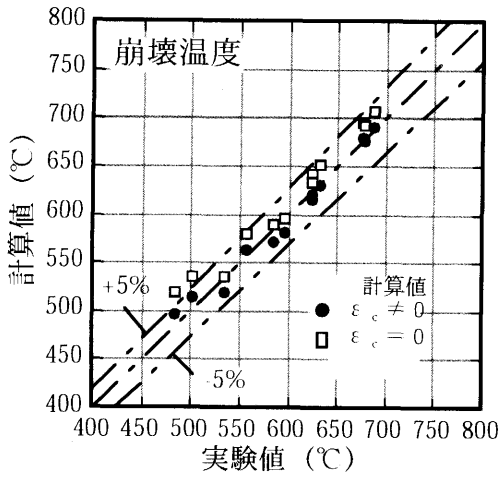


図18 座屈温度と高温クリープ

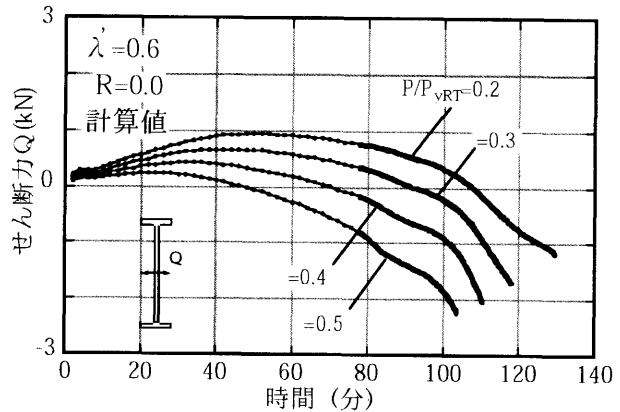


図17 せん断力の時刻歴 (R=1/25)

動を極めて精度良くシミュレートできることが分かる。

図14には、図12で得られた数値計算による柱崩壊時点の柱試験体の温度 T_{cr} も示されている。数値計算では、高温クリープを無視した解析 ($\epsilon_c=0$) を破線で、考慮した解析 ($\epsilon_c \neq 0$) を実線で示している。この図より、高温クリープを考慮した解析 ($\epsilon_c \neq 0$ 、実線) は高温クリープを無視した解析 ($\epsilon_c=0$ 、破線) よりも安全側であり、かつ実験結果の□印に良く対応していることが分かる。従って、実験の崩壊温度 T_{cr} を数値計算により精度良くシミュレートするためには、高温クリープ現象を考慮する必要があることが分かる。

図15,16は数値計算により得られた軸力比 $n=0.2$ の場合の中心圧縮 $R=0.0$ の場合と強制部材角 $R=1/25$ の場合の柱試験体の変形図を示したものである。どちらの図も実験開始後100分までを左図に、100分以降の崩壊に至る様子を右図に示している。なお、図16の左図より計算モデルでも実験と同様に柱脚部分に左向きの強制変位が加えられて部材角 R が発生していることが分かる。

図15,16の右図を観察すると、中心圧縮($R=0.0$)の場合、崩壊時

には上下端固定の中心圧縮柱の1次の座屈モード状の変形が見られる。また、強制部材角($R=1/25$)の場合は、当初は上下逆対称形の曲げせん弾型の変形を示しているが、崩壊時には上下対称形の変形増分が加わる形の不安定現象が起っていることが分かる。

図17は、数値計算で得られた強制部材角 $R=1/25$ の場合の柱部材のせん断力の時刻歴である。軸力比 n によって程度の差はあるが、加熱初期の柱試験体のせん断力 Q は途中で方向を変えて、崩壊時には全く逆方向を向いていることが分かる。従って、この場合の最終的な崩壊時挙動は、当初強制部材角 R を与えるために加えた上下逆対称形の曲げモーメントが分布した状態で起こっているのではないことが分かる。

最後に、実験と数値計算による崩壊温度を図18比較して示した。この図は、実験値を横軸に数値計算値を縦軸にとって表したもので

ある。ただし、数値計算値で、高温クリーブを無視した解析値 ($\varepsilon_c=0$) を□印で、考慮した解析値 ($\varepsilon_c \neq 0$) を●印で示している。この図より、高温クリーブを考慮した解析 (●印) で実験値と数%の差異が見られ、高温クリーブを無視した解析 (□印) でも6%程度の差異しか見られないことが分かる。このように鋼材の高温時の挙動特性を考慮した数値解析法で実験挙動を極めて精度良くシミュレートできることが分かる。

5. まとめ

本研究では、建築構造用鋼材(SN490B)を用いた両端固定支持の矩形断面鋼柱試験体を対象に、一定軸荷重下で漸増温度と強制部材角とを同時に加える鋼柱材の座屈崩壊実験を行い、柱の崩壊温度に及ぼす強制部材角の影響を調べた。また、数値計算によるシミュレーションを行い、実験挙動の考察の一助とした。その結果、次のような知見が得られた。

[1] 一定荷重下漸増温度実験の結果から、強制部材角 $R=1/50$ と $1/25$ の影響による鋼柱の崩壊温度 T_{cr} の低下は、軸力比 $P/P_{VRT}=0.2$ の場合で数度と小さく、軸力比 $P/P_{VRT}=0.5$ の場合でも高々 50°C 以下であることが示された。

[2] 実験後の試験体の残留変形を観察すると、強制部材角 $R=0.0$ (中心圧縮) の場合は、上下対称形の1次の座屈モードの変形が残留しており、強制部材角 $R=1/50$ 、 $1/25$ の場合は、上下逆対称の曲げせん断変形に上下対称形の1次の座屈モードの変形が重ね合わさったような変形が残留している。従って、強制部材角 R が加えられたことにより当初上下逆対称変形を呈する場合でも、軸力 P による崩壊時には上下対称形の分岐座屈挙動を起こすと考えられる。

[3] 実験値と計算値は全体的に良い対応を示しており、鋼材料の詳細な応力ひずみ関係式を用いた弾塑性クリーブ熱変形解析法により、一定軸荷重下で強制部材角と漸増温度を受ける鋼柱材の崩壊に至る実験挙動を精度良く予測できることが示された。

以上のように本研究では、一定軸荷重を受ける矩形断面鋼柱部材を対象に強制部材角が崩壊挙動に及ぼす影響を調べた。その結果、本実験の範囲では強制部材角 R が鋼柱部材の高温時の荷重支持能力に及ぼす影響は大きなものではないことが示された。

このことは、従来から行われている鋼柱部材の両端ピン支持の中心圧縮載荷加熱実験の結果(9~16)を、鋼構造建築物の耐火設計に直接適用できるという見通しを与えるものである。

一方、本論文の結果は全体曲げ座屈によって軸荷重支持能力が支配される場合の一資料が得られたことを意味するものであって、局部座屈が全体曲げ座屈と連成して生じる場合の荷重支持能力に及ぼす強制変形の影響については不明な点が多い。今後の課題とした。

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) C.G.Bailey: "The Influence of The Thermal Expansion of Beams on The Structural Behavior of Columns in Steel-Framed Structures During a Fire", Engineering Structures, Vol. 22, pp. 755~768, 2000
- 4) 尾崎文宣、ルアンタヌラック ナラー、鈴木弘之：火災加熱を受ける鋼構造骨組の崩壊温度(その37 外柱の座屈崩壊温度)、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、pp.39~40、2002.8
- 5) Fujimoto, M., Furumura, F. and Ave, T.: "Primary Creep of Structural Steel (SM50A) at High Temperatures", Trans. of A.I.J., No. 306, pp. 148~156, 1981.8
- 6) 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, pp. 92~102, 1985.7
- 7) 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
- 8) 古村福次郎、右田健児、安部武雄、岡部猛、金和中：塑性設計された鋼構造骨組の弾塑性クリーブ熱変形挙動、日本建築学会構造系論文報告集、第368号、pp.68~77、1986.10
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 作本好文、山口種美、岡田忠義、吉田正友、田坂茂樹、斎藤 光：建築構造用耐火鋼柱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
- 12) 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ブの影響評価、構造工学論文集、Vol.43B、pp.367~376、1997.3
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 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
- 16) A. Chaen, 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
- 17) 岡部猛、安部武雄、立川貴之：強制部材角を受ける鋼柱の高温時の座屈荷重、構造工学論文集、Vol.49B、pp.375~382、2003.3

(2004年7月1日原稿受理、2004年10月13日採用決定)