

## 論文の内容の要旨

論文題目 火災加熱を受ける鋼構造部材の変形性状に関する実験的研究

氏名 平島 岳夫

### 本研究の目的

建物に耐火性を持たせる基本方策は、建物の内部を区画化して火を封じ込めることである。火を封じ込める防火区画がなされておれば、避難と消防活動の安全が確保されるとともに財産の保全が可能となる。防火区画を具体的に実現するには、区画部材である床・壁とこれらを支える柱・梁などの構造部材を、耐火性のある材料で構成することが必要となる。従来、鋼構造骨組の耐火性は、鋼材温度を平均 350°C以下となるように耐火被覆を施すことで保たれてきた。

一方、建物の開口条件や燃種<sup>もえぐさ</sup>などに応じて火災性状を予測し、その火災に対する鋼構造骨組の熱変形挙動を追跡し、建物の耐火性を合理的に評価する手法が提案されている。この手法を用いて、燃種の少ない建物や開放性のある建物においては、耐火被覆を用いない鋼構造骨組の可能性が追求され、耐火鋼が開発された。このような状況下において耐火被覆を用いない一般鋼による建物の実現を試みたが、350°C以上における鋼構造部材の変形性状に関する実験データが極めて少なく、一般鋼を用いた建物において合理的な耐火設計を適用することが困難であった。

本研究の目的は、従来の耐火試験では得られなかった 350°C以上における鋼構造部材の変形性状を実験により確認することである。区画火災を受ける鋼構造骨組における熱応力変形解析の結果によると、耐震設計を施された骨組は鋼材温度が 600°C位になるまで耐火性を有することが示されているが、部材に生じる熱変形は極めて大きく、局部座屈を避けがたいことが指摘されている。本研究においては、火災加熱を受ける鋼構造部材の局部座屈後における変形性状を明らかにすることを目的とし、この目的を達成するために 4 種類の高温実験を行なった。

## 高温引張試験

火災加熱を受ける鋼構造部材と鋼構造骨組の変形状を把握する上で、高温時における鋼材の応力・ひずみ曲線は基本的かつ重要なデータである。

本論では、溶接構造用圧延鋼材(SM490A)における高温引張試験結果に関して、高温時の応力・ひずみ曲線をはじめ、弾性係数・0.2%オフセット強度・引張強度・伸びなどの高温時力学的特性を示した。既往の研究結果と比較すると、本試験に用いた鋼材の高温時耐力は若干低い値を示した。

また、高温時の応力・ひずみ曲線を数値化し、高温部材実験の数値解析に用いる応力・ひずみ曲線式として妥当な数式モデルを得た。

## 高温時におけるH形断面・箱形断面部材の短柱圧縮実験

鋼構造部材の局部座屈に関する研究については、常温では数多くの応力変形性能実験が実施され、板要素の幅厚比を制限することにより局部座屈を防ぐことが構造設計に反映されている。高温時における局部座屈現象についても常温時の現象と力学的には大差ないと思われるが、耐火設計の場合、熱膨張による局部座屈を避けがたいので、局部座屈後における残存応力に着目している点が、常温時の構造設計と大きく異なる。火災時特有の局部座屈後における残存応力に関する実験データは、耐火鋼についてはあるが、一般鋼についてはわずかである。

本研究では、一般鋼による幅厚比  $b/t=7.5$  と幅厚比  $b/t=10$  のH形断面部材および幅厚比  $d/t=25$  と幅厚比  $d/t=30$  の箱形断面部材を用いて短柱圧縮実験を行ない、常温・ $400^{\circ}\text{C}$ ・ $500^{\circ}\text{C}$ ・ $600^{\circ}\text{C}$ における最大耐力と局部座屈後の大変形時における残存応力を得た。鋼材の基準強度を指標として15%位までのひずみにおける実験結果を整理すると、耐火設計において重要な目安となる局部座屈後の残存応力は、H形断面部材と箱形断面部材ともに $500^{\circ}\text{C}$ においては基準強度の0.4倍程度、 $600^{\circ}\text{C}$ においては基準強度の0.2倍程度であった。

また、高温時における局部座屈後の応力・ひずみ曲線を実験的に導き、鈴木らの提案式に基づき局部座屈後の応力・ひずみ曲線を数式化した。計算結果と実験結果を比較すると、両者は定性的に概ね一致し、定量的には実験値に対して計算値の方がやや下回る安全側の値を示した。短柱圧縮実験結果より得た応力・ひずみ曲線を用いることで、一般鋼を用いた部材および骨組の熱応力変形解析に、局部座屈後の応力低下を考慮することが可能となった。

## 高温時におけるH形断面部材の純曲げ実験

鋼構造骨組の耐火性を検討する手段として、鋼材の熱劣化と長期荷重を考慮して得られる骨組の崩壊温度を求める設計手法が提案されている。この設計手法は、塑性ヒンジ部分における曲げモーメントは曲率の増大にかかわらず全塑性モーメントを維持すると仮定した塑性設計手法に基づいている。火災加熱を受ける鋼構造部材に降伏曲率の20倍を超える曲げ変形が生じた解析例など報告されているので、鋼構造骨組の耐火性を熱応力変形解析あるいは塑性設計により検討

する場合には、鋼構造部材の大変形後における曲げモーメントの低下について実験により把握しておく必要がある。

火災加熱を受ける鋼梁の曲げ変形状に関する研究については、標準加熱温度を与えた単純梁の荷重加熱試験によるものが多く、主に全体的な横座屈や床拘束を伴う梁の曲げ変形状に関するものが多い。一方、高温時における局部座屈を伴う鋼構造部材の曲げ変形状に関する実験データは、耐火鋼についてはあるが、一般鋼についてはわずかである。

本研究では、一般鋼による幅厚比  $b/t=7.5$  と幅厚比  $b/t=10$  のH形断面部材を用いて純曲げ実験を行ない、常温・ $400^{\circ}\text{C}$ ・ $500^{\circ}\text{C}$ ・ $600^{\circ}\text{C}$ における局部座屈後の大変形時における曲げモーメントの値を得た。幅厚比  $b/t=10$  以下のH形断面部材を用いた本実験においては、ISOあるいはECCSの基準における梁の限界たわみに相当する大変形が生じて、局部座屈に伴い曲げモーメントが低下していく様子が見られず、塑性設計が適用可能であることが示された。

また、引張試験および短柱圧縮実験より得た応力・ひずみ曲線を用いて純曲げ実験の数値解析を行なった結果、大変形時における曲げ変形状を概ね安全側に追跡できることが示された。

#### 高温時におけるH形断面・箱形断面部材の曲げ圧縮実験

外柱を含む区画において火災が生じた場合、鋼梁の熱膨張により外柱は外側へと押し出され、図1に示すように、外柱の柱頭・柱脚に局部座屈が生じる可能性がある。よって、火災時における鋼構造骨組の構造安定性を検討する際には、梁の伸びだしによる水平変形を受けた外柱が存在軸力を維持できるか否かを確認することが重要である。しかし、鋼柱の耐火性に関する研究は、耐火試験によるものが多く、梁の伸びだしを考慮した実験的研究は少ない。

本研究では、一般鋼による幅厚比  $b/t=7.5$  と幅厚比  $b/t=10$  のH形断面部材および幅厚比  $d/t=25$  と幅厚比  $d/t=30$  の箱形断面部材を用いて曲げ圧縮実験を行ない、常温・ $400^{\circ}\text{C}$ ・ $500^{\circ}\text{C}$ ・ $550^{\circ}\text{C}$ ・ $600^{\circ}\text{C}$ における曲げ圧縮変形状を明らかにし、火災時における鋼梁の伸びだしを受ける鋼柱の荷重支持能力を確認した。

鋼柱における水平変形の許容値を階高の  $1/30$  として設定し、その変形に達するまで所定の存在軸力を維持したものを荷重支持能力ありと見なすと、軸力比  $0.3$  以下の鋼柱については  $600^{\circ}\text{C}$  まで荷重支持能力を有し、軸力比  $0.5$  以下の鋼柱については  $500^{\circ}\text{C}$  まで荷重支持能力を有することが確認された。

また、引張試験および短柱圧縮実験より得た応力・ひずみ曲線を用いて、曲げ圧縮実験の数値解析を行なった結果、局部座屈を考慮した解析は、加熱梁の伸びだしにより大きく折れ曲る外柱柱頭の曲げ圧縮変形状を概ね追跡できることが示された。

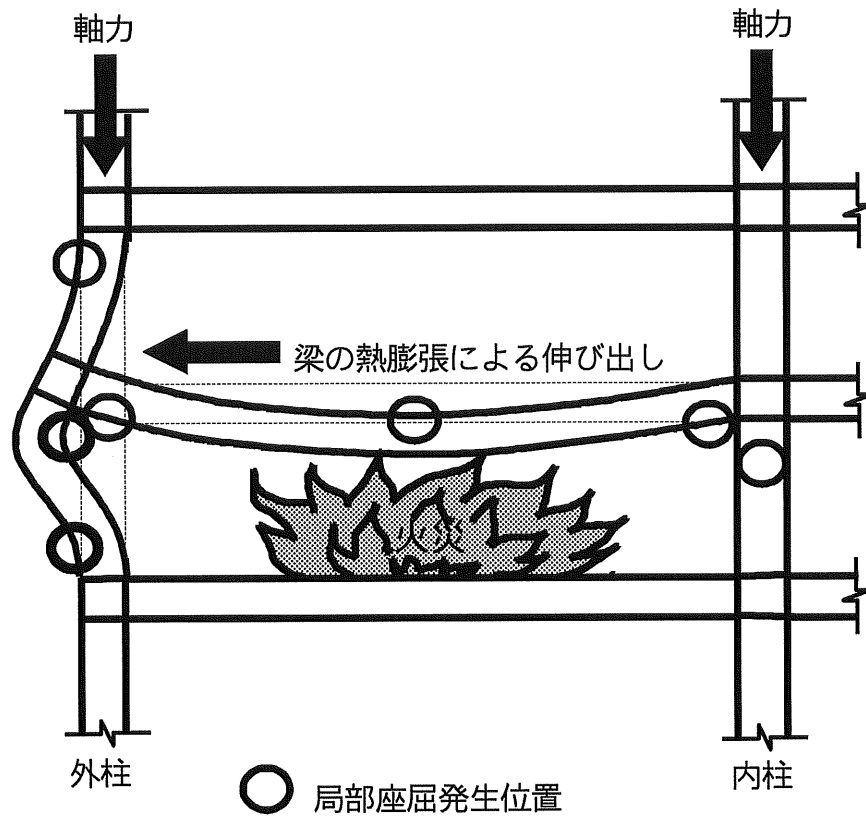


図1 火災加熱を受ける鋼構造骨組の挙動

### 耐火設計への適用

本論では、ヨーロッパ鋼構造協会連合（ECCS）において規定されている変形量の許容値と高温部材実験の結果を組み合わせ、実存する鋼構造骨組における耐火性の検証を試みた。本設計例は、既に検討された高層鉄骨架構48棟の中で、外柱における軸力比が最も大きく、また600℃までの熱応力変形解析において鋼梁のたわみが最も大きかった例であったが、骨組としては鋼材温度500℃までの耐火性を有することが確認された。

また、鋼構造骨組の熱応力変形解析においては、短柱圧縮実験より得た局部座屈後における応力-ひずみ曲線を用いて、局部座屈を考慮した解析を行なった。本設計例では、局部座屈ありと局部座屈なしの解析結果において575℃までは大きな差が見られなかったが、収束不可能となる温度において大きな差が見られた。局部座屈を考慮した熱応力変形解析を行なうことで、より安全側の結果が得られることが示された。

### 結論

本研究では、従来不足していた一般鋼に関する基礎資料を600℃までの部材実験により蓄積し、局部座屈の発生を前提とした鋼構造部材の変形性状を実験により明らかにした。本研究の成果を活用することにより、熱応力変形解析と実験の両面から、鋼構造骨組の耐火性を検討できるようになった。