

1章 序論

1.1 研究背景

鋼材は温度上昇に伴い、降伏応力度、引張強度、ヤング率が低下する。また鋼部材は温度上昇に伴い線膨張を発生する。火災加熱を被る鋼部材の線膨張が常温下の火災周辺区画構造に拘束されることで、火災加熱を被る鋼部材には、長期荷重により発生する応力に加えて、線膨張を拘束されることで発生する圧縮軸力を被る。常温時において安全に長期荷重を支持する鋼構造は、高温時において、火災加熱による鋼部材温度上昇に伴う材料強度低下と線膨張を拘束されることで発生する圧縮軸力増大により常時作用荷重を支持できなくなり、部分的、あるいは全体的に崩壊してしまう。

火災時における鋼構造建築物の倒壊を防ぎ、火災の拡大を防止するため、我が国では、鋼材の表面に火災熱が鋼に伝達するのを妨げる耐火被覆を施すことを建築基準法により定めている。この基準法下では、耐火被覆の厚さが、火災時において鋼部材の表面温度が平均で 350℃、最高で 450℃のどちらかを上回らないように設定されなければならない。鋼部材の平均温度の上限を 350℃に定めているのは、鋼材の降伏応力度がこの温度で常温時の降伏応力度の 2/3 まで低下し、この温度を境にして、鋼部材の耐力が長期許容荷重に対して構造上必要な耐力を下回り、火災加熱を被る鋼部材の局部が塑性化し、350℃以上の温度域において鋼構造骨組の安全性を保証できなくなると考えられるためである。

以上に示した建築基準法の考え方は、根拠として、350℃において鋼材の降伏強度が常温の 2/3 まで低下し、鋼部材局部に塑性化が生じるので、鋼構造は 350℃以上では崩壊の危険性が生じると結論づけている。しかしながら、建築基準法が示す因果関係が適確に鋼架構の危険温度を予測するのは、次に示す 2 つの条件のみに限られる。その条件とは、火災周辺架構が高温部材の線膨張を拘束することで発生する圧縮軸力が高温部材に発生しないという条件と、鋼架構には一様に最大限の長期許容荷重が作用しているという条件である。

火災加熱を被る鋼部材を単純支持のような静定構造に限れば、鋼部材に線膨張が発生しても、線膨張が拘束されることなく、結果として圧縮軸力は発生せず、基準法の示す因果関係は適確に鋼架構の危険温度を評価できる。しかしながら、通常の建築鋼構造骨組は、高次不静定であり、火災加熱を被る高温部材の線膨張が火災周辺架構に拘束され、圧縮軸力が発生するのは明らかである。特に、ブレース構造のような、火災加熱を被る鋼梁の線膨張を強く拘束する鋼架構骨組においては、鋼梁温度が 350℃以下でも鋼梁局部が塑性化することが考えられる。即ち、我々の対象とする鋼架構は火災時において、線膨張を拘束することで生じる軸力が発生するので、基準法を高次不静定骨組架構に適用すると、基準法は、鋼架構の耐火性能を過大に設定すると考えられる。

鋼架構部材には一様に最大限の長期許容荷重が作用しているならば、基準法の示す因果関係により適確に鋼架構の危険温度を評価できる。しかしながら、我が国の建築構造物は耐震、耐風設

計が施されており、常時荷重に対しての余力は相当大きい傾向にある。鋼部材には最大限の長期許容荷重が作用しているわけではないので、火災時において鋼部材温度が 350℃を上回っても、鋼部材が塑性化せず、さらに高温まで歪が弾性域内に留まり、長期荷重を支持すると考えられる。即ち、我々の対象とする鋼架構には、長期許容荷重が鋼部材に作用しているわけではないので、基準法を長期許容荷重の作用していない鋼架構に適用すると、基準法は、鋼架構の耐火性能を過小に評価することになる。

以上に示したように、我々が鋼構造建築物の火災に対する安全性について考察する場合、基準法の許容温度 350℃では鋼架構の危険温度を適確に評価できない。鋼架構の危険温度を適確に評価する為には、架構毎に詳細な精算解析を行い、部材局部が塑性化する危険温度を算出しなければならない。

次に、この法が示す因果関係それ自体にも根本的問題が内在することを示す。鋼部材局部が塑性化すると鋼架構が崩壊する危険性が生じると結論づけている。確かに、単純支持された、2 フランジ断面に近い H 形鋼梁などの部材のフランジ局部が塑性化すると、ただちに全塑性ヒンジを形成し、崩壊することが考えられる。しかしながら、我々の対象とする架構は高次不静定架構であり、このような架構の部材局部が塑性化しても、塑性化した局部の応力は周辺の弾性部分に再配分され、架構はただちに崩壊しないと考えられる。架構全体から見ても、火災区画などの設備が有効に働かならば、高温に至る部材は架構局部であり、火災区画部架構内の応力は常温の周辺部材に再配分され、高温部材局部が塑性化しても崩壊の危険性はないと推測できる。実際の鋼構造物の耐火性能は、部材局部が塑性化する点に着目しなければならない程低いものではなく、さらなる塑性化を促す火災外乱が作用したとしても建物全体が倒壊に至る可能性は非常に少ない。1990 年 6 月にイギリスで発生した Broad Gate 火災は上で述べたことを象徴的に示している。この火災は建設中の鋼構造建築物の 1 区画で発生したもので、架構内の鉄骨が無被覆のまま火災加熱を受けた。鋼材温度は 350℃を大幅に超え、火災発生点付近での構造部材の変形は大きく、柱材に局部座屈、梁材に横座屈が発生したにもかかわらず、建物全体の崩壊には至らなかった[文献 1]。

単純支持された H 形鋼梁では局部塑性化発生がただちに架構の崩壊を意味するのに対して、ラーメンやブレース部材の局部が塑性化しても応力再配分により、ただちに架構の崩壊にいたらない。架構の耐火性能を評価する際、部材局部が塑性化し始める点に着目すると、火災周辺架構の拘束度により発生の大きさが異なる熱応力が原因となって塑性開始温度を適確に予測できないばかりでなく、鋼架構の応力再配分能力を評価できないので、着目すべき架構の崩壊に対して一定の安全率を保持した鋼架構を設計できない。即ち許容応力度的耐火設計では、単純支持された H 形鋼梁では架構の崩壊に対して安全率は小さくなり、ラーメンやブレース架構では架構の崩壊に対して安全率は大きくなるといったように、架構毎に崩壊に対する安全率が異なってしまう。

鋼架構の耐火性に一定の安全性を保証するには、部材局部が塑性化し始める温度に着目する許容応力度的方法ではなく、架構が崩壊メカニズムを形成する温度に着目する終局強度的方法の方が望ましい。それは、終局強度的方法により導いた架構の崩壊温度に一定の安全率を掛ければ、着目すべきである架構の崩壊に対して一定の安全性を保証できるからである。終局強度的方法による架構の崩壊温度は、崩壊メカニズムが充分発達した状態の架構の釣合により算出するので、圧縮熱応力が架構の変形に伴って大きく減少しており、熱応力を考慮する必要はなく、簡便であ

る。長期荷重と架構メカニズムの釣合により架構の崩壊温度を定めれば、架構が本来有するであろう作用荷重に対応した耐火性能を適確に評価できる。

終局強度的耐火設計を実現する為には、火災区画の温度予測と火災区画における鋼構造の崩壊温度に関する事柄が研究により明らかにされる必要がある。これらの事柄が研究により明らかになれば、火災区画内の可燃物量により鋼構造が火災時安全に長期荷重を支持できるかどうか判断できる。例えば、火災区画温度が鋼構造の安全上限温度を上回れば、鋼部材に施す耐火被覆厚を増すか、鋼部材に作用する長期荷重を低減するように構造設計を改良する。また逆に鋼構造の安全上限温度が火災区画温度を上回れば耐火被覆量を低減できる。即ち、火災外乱に対して鋼構造が一定の安全率を保持するような構造設計が可能である(図 1.1)。

近年の諸研究により、火災区画内の可燃物が時間経過に伴いどのように燃焼し、また、その区画内における伝熱、対流、放射により区画内温度がどのように上昇するかが実用的範囲で明らかになっている。また、高温時における鋼の特性、火災加熱を被る鋼構造の高温時挙動や鋼構造が崩壊する温度に関しても数多くの研究が行われてきた。これらの諸研究を統合し、鋼構造の終局的耐火設計に関して具体的な方法を詳述した「鋼構造耐火設計指針」[文献 2]が 1998 年に発表された。

1.2 火災加熱を被る鋼構造に関する既往の研究

高温時における構造の研究は、航空機、ミサイル、宇宙船や原子炉の工学分野に関しては 20 世紀初頭から行われ、多大な研究成果が蓄積されていた[文献 3, 4, 5, 6]。しかし、原子炉等の工学分野は、火災加熱を被る鋼構造の分野とは考慮しなければならない温度域、クリープ時間、対象とする材料が大幅に異なり、その当時蓄積されていた研究成果が直接、鋼構造の耐火設計に役立つものではなかった。戦後、建築物の高層化に伴い、鋼構造建築物が急増した。同時に、鋼構造の火災に対する安全性を保証するために、火災加熱を被る鋼構造建築物に関する研究の必要性が高まった。

鋼構造の高温時耐火性能は鋼材の高温時特性に大きく依存する。鋼材は高温時において力学特性、即ち、線膨張係数、降伏応力、引張強度、ヤング係数等が著しく変化するので、火災時、鋼構造が荷重を安全に支持するために、まず、常温～高温領域において正確に鋼材の材料特性を把握する必要があった。鋼材の高温時における材料特性に関して多くの実験的研究が行われたが[文献 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]、その代表的な研究として、Brockenbrough の研究が挙げられる[文献 16]。Brockenbrough は実験により、鋼材 ASTM A36 の温度上昇による降伏強度低下率とヤング率低下率の近似曲線を提案した(1968 年)。Brockenbrough は鋼材の線膨張に関しても実験を行い、線膨張係数に関する近似式も提案した[文献 16]。Brockenbrough によると ASTM A36 の線膨張係数は 649℃までは温度上昇に伴い増加し、649℃から 816℃までは減少し、最終的に、816℃以降、再び増加することが分かった。Tall[文献 17](1961 年)と Stanzak も Brockenbrough 同様に、高温時における鋼材 ASTM A36 の近似曲線を提案したが、Brockenbrough、Tall、Stanzak の提案した材料強度提案式は確定的な定説が構築されるまでには至らなかった。よって提案式を構造解析に適用する場合、これら提案式の差異を認識することが重要であった。また、

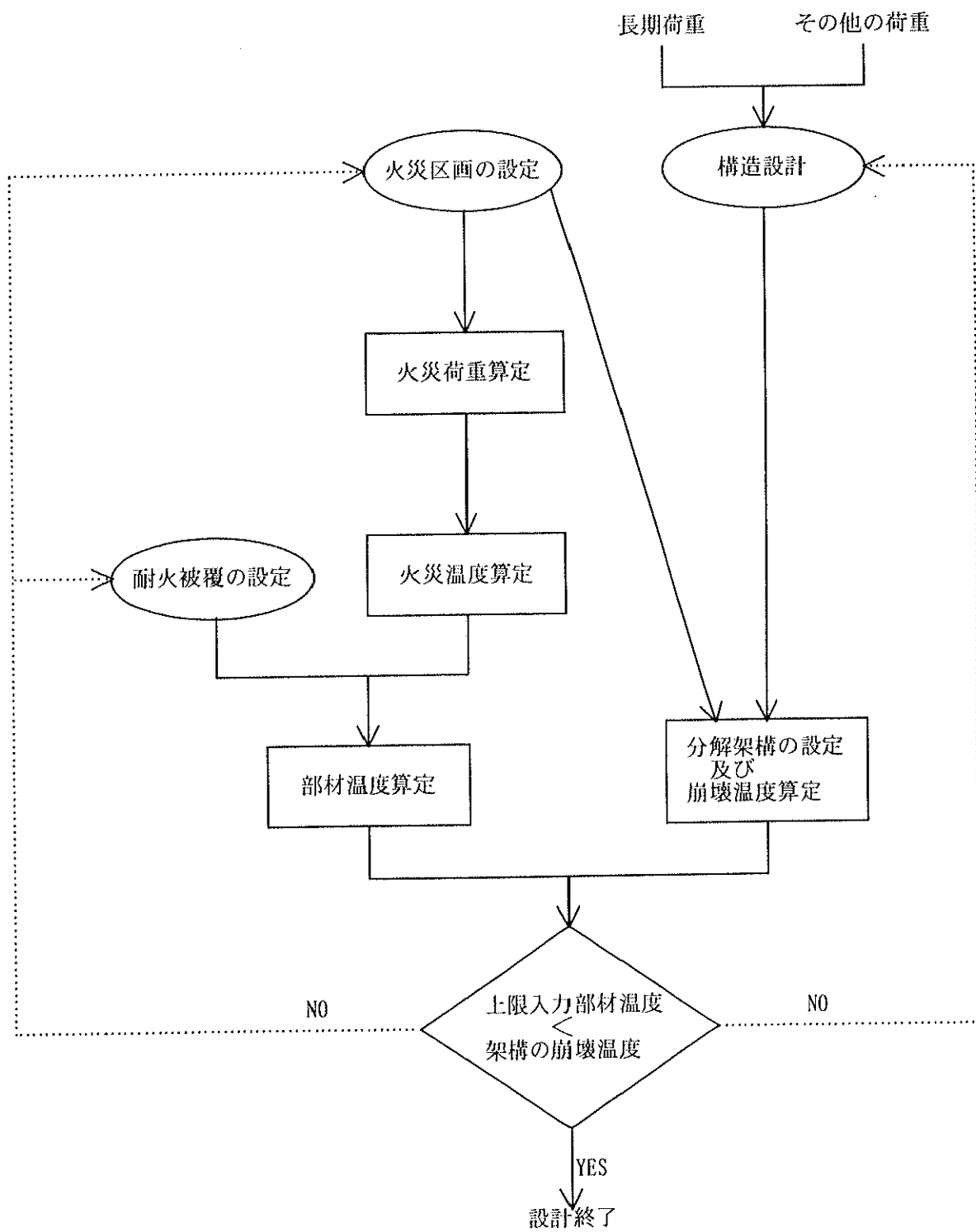


図 1.1 終局強度的耐火設計の手法

Brockenbrough, Tall, Stanzak の高温時における鋼材強度の実験的研究は、721℃以上に関する実験データを示していない。当時は終局的耐火設計の考え方は存在しておらず、700℃以上では、降伏強度、ヤング率が常温時のそれらより半減する為、700℃以上の材料特性に関しては、研究対象外であった。

諸外国で高温時における鋼材特性が明らかにされるなか、日本においても、高温時における鋼材の材料強度特性が斎藤によって研究された[文献 18, 19]。斎藤は単純支持、等曲げを受ける鋼梁を均一に加熱し、計測した変位から鋼材の高温時ヤング率と降伏応力の低減式を提案した(1963年)。

高温時における鋼材の材料強度近似式が利用可能になると、次第に部材レベルでの解析的研究の必要性が高まった。柱、梁の部材レベルでの高温時耐力を明らかにすることで、設計者が火災に対して、常にある一定の安全率を持った構造を設計する必要性があったからである。初期の解析的研究の代表的な研究としては、Culver, Aggarwal, Ossenbruggen の研究が挙げられる(1973年)。Culver 等は、様々な残留応力、断面形、境界条件に関して、高温時における鋼柱の座屈耐力を明らかにしている[文献 20]。また Culver 等は、温度勾配が存在する場合の Beam-Column の軸力～曲げに関する相関強度曲線を明らかにしている[文献 21]。当時の工学レベルでは火災加熱を被る鋼部材の適確な温度勾配を算定することは不可能だったので、温度勾配は部材丈、部材軸方向に直線的に勾配を持つ温度勾配と仮定した研究であった。Culver 等のこれらの研究は、クリープを考慮するには至らなかった。Culver 等がクリープを解析に組み込めなかった理由は、当時、建築用鋼材のクリープに関する実験的研究が解析に適用できるまでには完成されていなかった理由も考えられる。また、原子炉等のクリープに関する研究は存在したが[文献 3, 4, 5, 6]、火災は数時間単位で継続する現象であり、原子炉等の様に数ヶ月単位で継続する現象とは異なるので、これらの研究成果を建築鋼構造に適用できなかった。Culver の研究に代表されるように、高温時における鋼構造部材の挙動や座屈耐力の解析的研究は Galambos の手法[文献 22]や Newmark's numerical integration method[文献 23]に示される数値計算法に限られていた為、柱・梁の部材レベルに限定されていた。しかしながら、Culver 等の諸研究は当時のフレーム鋼構造耐火設計に際して深い洞察を与えるものであった。

Culver と同時期の日本における部材レベルの解析的研究としては斎藤[文献 24, 25](1969年)、原田、右田[文献 26](1966年)の研究が挙げられる。斎藤は高温部材の周辺架構の拘束を考慮にいたした熱応力の発生する高温部材の応力、変形性状を明らかにした。また原田、右田は高層鋼構造の高温時における変形量を計算した。しかし、これらの研究は撓み角法に高温時のヤング率低減式を組み込んだ解析方法のため、弾性範囲に限定された研究であった。

時代が 1970 年代に差し掛かると、建築の高層化への需要がさらに高まった。それと同時に、火災時における鋼構造骨組の安全性を部材レベルではなく、Frame レベルで検証する重要性が高まった。Zienkiewicz[文献 27]や Washizu[文献 28]等の功績により、有限要素法の研究が急激に進歩し、Cheng と Mark が初めて高温時における鋼構造架構の有限要素モデルを提案した[文献 29](1975年)。Cheng と Mark の提案した有限要素モデルは、高層鋼構造のある火災区画において火災が生じた場合の鋼構造の挙動を幾何学的非線型、材料弾塑性、高温クリープを考慮にいたした詳細な解析モデルであった。Cheng と Mark はクリープの近似式として、当時におけるクリープの代表的研究である Sander, McComb, Schleche らの研究[文献 30]や Pian の研究[文献 31]により

提案されたクリープ近似式を数値解析モデルに組み込んだ。

ChengとMarkの火災時における鋼構造の数値解析に続く研究として、Harmathy[文献32](1976年)、Thor[文献33](1977年)の研究が挙げられる。日本においては、古村・篠原が初めて1層1スパン門型ラーメンの数値解析の研究[文献34]を行った(1981年)。ChengとMarkやHarmathy、Thorの研究は解析法を示すことに重点がおかれており、また、古村・篠原の研究は単純な門型ラーメンの解析に限られている。この当時の解析は、多層・多スパンの架構レベルの熱変形性状を考慮した工学的な耐火設計を目指すには、程遠いものであった。鋼構造骨組の熱変形挙動に関する研究がこのような単なる例題解析の段階にとどまり、系統的に検討されていないことの原因は解析の基礎となる鋼材料の特性、中でも温度変化を伴うクリープ法則などの構成法則が不明確であったことなどが挙げられる。しかし、これら高温時の鋼材料の問題は、古村等の一連の研究[文献35~42]により、詳細に検討され、骨組解析自体の精度と同程度の詳細なデータが得られた。

高温時における材料特性が明らかになると、多層・多スパンの高温時解析の研究が多数行われるようになった[文献43,44]。古村・右田は8層3スパン架構のクリープを考慮した弾塑性、大変形解析の解析例を示した[文献45](1986年)。これに続く研究として、右田・岡部は古村・右田の解析モデル[文献45]に演算時間短縮の手法を施した解析例を示している[文献46](1982年)。また、上杉はより大規模な架構の高温時解析を行うために、架構を、火災を直接被る局部架構、その周辺架構と火災の影響をほとんど受けない外周架構に3分割して、計算時間の短縮を工夫した解析モデルを示し、さらに解析例を示した[文献47](1987年)。右田、岡部等や上杉が計算時間短縮に関する研究を行ったのは、この時期におけるコンピュータの演算速度と記憶容量が大規模解析をするには不十分で計算能力が限られていたからである。以上に示した多層・多スパンの高温時解析は例題的研究であったが、部材温度上昇過程における部材の局部的塑性化は骨組の崩壊には直結しないことを明らかにした。さらに建築基準法の定める許容部材温度(350℃)を遥かに上回る高温に至っても鋼骨組の構造的健全性は損なわれないことも明らかにした。これらの研究が契機となり、日本では終局強度的耐火設計が模索されはじめた。

火災加熱を受ける大規模架構の一連の研究は例題的研究の範疇にあった。一連の研究に理論的枠組を与えるものとして、鈴木は単純塑性理論より導出される基本崩壊温度という鋼架構が健全性を保つ合理的限界温度の予測式を提案した[文献48](1995年)。基本崩壊温度とは単純塑性理論により算出される軸力・曲げ強度を保持するヒンジを有する崩壊メカニズムと鉛直荷重の釣合より導出される架構の崩壊温度略算式である。よって基本崩壊温度はクリープを考慮しない評価式である。しかし、鈴木による鋼架構の高温クリープに関する諸研究[文献49]は、クリープを有限要素解析に組み込んでも、火災のような比較的短時間でしか発生しない現象においては、組み込まない解析結果と比較して顕著な差異は認められないことを示している。つまり、鋼骨組の崩壊温度は、軸力・梁上荷重と崩壊温度が一对一に対応した時間に依存しない簡便な評価式により評価できることが示された。鈴木は平面骨組の数値解析により得た架構の崩壊温度と基本崩壊温度を比較することで、提案した基本崩壊温度の妥当性を検証し、基本崩壊温度が鋼架構の合理的限界温度であることを示した。

しかし、柱の座屈、柱の局部座屈、ボルト接合部の破断等により、架構の実際の崩壊温度は、基本崩壊温度を下回る。これらの諸問題は鈴木による諸研究[文献50~63]により明らかにされ、これらの諸問題が発生する場合の簡便な評価式が提案されている。さらに、鈴木は詳細な有限要

素解析により、提案した評価式の妥当性を検証している。

1.3 研究の目的

以上に示した高温時における鋼架構の諸研究は平面骨組解析であった。鈴木は平面骨組解析により基本崩壊温度の妥当性を検証した。柱に関しては、鋼架構において BOX 型が多用されるので、横座屈を本来考慮する必要はなく、高温時局部座屈解析、全体座屈解析においても平面骨組有限要素解析により適切に実構造の持つ崩壊温度を精算することが可能である。しかしながら、梁に関しては H 型鋼梁が多用され、H 型鋼梁は強・弱軸の断面剛性が異なるため、3 次元的な横座屈が発生することが考えられる。またスラブ付き鉄骨梁においても、高温域での変形の増大に伴い、ウェブが面外に反る 3 次元挙動が発生すると考えられる。梁に関しては、平面骨組解析の解析結果を根拠に基本崩壊温度の妥当性を検証することはできない。それは、梁が 3 次元挙動を示すと、梁中央と梁端部で単純塑性理論により算出される全塑性モーメントに到達できず、鋼梁の崩壊温度は基本崩壊温度を下回る可能性が考慮されるからである。

高温時における鋼梁が、曲げを受ける面内の外に変形を受ける挙動を明らかにした研究は未だ存在しない。H 型鋼梁の 3 次元有限要素解析を行うには梁を Shell 要素に分割する必要がある。Shell 要素に関しては、Bathe の 4-node shell 要素の研究[文献 64]が挙げられる。Bathe は、この 4-node shell により、任意形状の shell 構造を解析できることを示している。しかしながら、Bathe の 4-node shell 要素は、shell 要素境界において互いに接する shell 要素の法線ベクトルが一致する shell 構造に限られている。その理由は、Bathe の提案する要素が 4-node shell の各接点に並進 3 自由度、面外回転 2 自由度を保持するので、互いに接する shell 要素の法線ベクトルが一致しない構造を解析する場合には、shell 境界で変形の連続性が保持されないからである。つまり鋼梁のようなウェブ・フランジ接合部分において shell 要素が直交する解析を行う場合、Bathe の shell 要素を解析モデルに適用することはできない。

小河等は常温時における鋼梁の解析に際し、Bathe の shell 要素の各節点に面内回転を 1 自由度付加した shell 要素を提案した。この小河等の手法により、ウェブ・フランジ部分において shell の変形が連続する。小河等は、提案した shell 要素を H 型鋼梁に適用し、H 型鋼梁の局部座屈解析[文献 65]、せん断座屈解析[文献 66]、円形開口を有する H 型鋼梁の塑性変形性能に関する諸研究[文献 67]を示し、3 次元変形を呈する様々な鋼梁の強度～変形関係を明らかにした。

しかし、小川等の提案した shell 要素にも問題が内在する。Bathe の各節点に面内回転 1 自由度を付加しただけではウェブ・フランジ部分において変形を拘束してしまう。小河等は shell を微小にすることでこの問題に対処しているが、ウェブ・フランジ部分で本質的に変位を拘束しない手法が必要となる。よって、小河等の shell 要素を改良し、ウェブ・フランジ部分において変位を拘束しない shell 要素を提案し、本来鋼梁が示すであろう変形を自然に解析できる数値解析モデルを提案する必要がある。

また、火災時において、3 面加熱を被る鋼梁には梁の断面方向、特に長い梁には軸方向に温度勾配が発生することが考えられる。梁内に温度勾配が発生すると、梁には、荷重により発生する応力以外に、梁の線膨張が火災周辺架構に拘束されることで発生する軸力が生じる。従って、鋼

梁内に温度勾配が存在する場合、それが存在しない場合と比較して、軸方向の荷重が増大するので3次元的不安定現象が発生しやすくなり、鋼梁の崩壊温度が低下することが推測される。数値解析を行う際、数値解析モデルに温度勾配を考慮することは重要である。しかしながら、火災時における鋼梁内の時間に関して変化する温度勾配を適確に予測するのは困難である。本研究では、実際の火災に近い加熱を被る鋼梁の実験を行い、温度勾配が鋼梁内に存在する場合の高温時挙動や崩壊温度を明らかにする。

次に、解析に組み込む鋼材の応力～歪関係の近似式について述べる。高温時における解析的研究では、古村の提案した応力～歪近似式[文献 68]が多用されてきた。しかしながら、古村の提案式は、温度 600℃以下、歪 2.5%以下の実験結果に curve fitting を施したものである。この温度、歪域を超える領域での解析では古村式を数値解析モデルに組み込むことは妥当ではない。梁の3次元解析では温度 600℃、歪 2.5%を超える領域も解析対象とするので、梁温度 850℃、歪 10%程度の領域内で適確な高温時応力～歪関係を提案する必要がある。

以上で鋼梁の問題点を概括した。本研究の目的を以下にまとめる。

- 小河等の shell 要素を改良し、ウェブ・フランジ部分において変位を拘束しない shell 要素を提案し、本来鋼梁が有するであろう変形を解析できる数値解析モデルを提案する。
- 古村の提案した応力～歪近似式を修正し、解析対象範囲である温度 800℃、歪 10%程度の領域内において実情の鋼材の応力～歪関係を示す近似式を提案する。
- 提案した数値解析モデルにより、鋼梁の高温時挙動、崩壊温度を明らかにする。
- 鋼梁内に温度勾配が生じる場合に関しては、鋼梁内に実際の火災加熱に近い温度勾配が生じる実験を行い、温度勾配が生じる場合の鋼梁の高温時挙動、崩壊温度を明らかにする。
- 鋼梁の崩壊温度推定式を提案し、精算より得た崩壊温度と比較し、その妥当性を検証する。

1.4 本研究の構成

上記に示した目的を達成するために、本論文を5章で構成し、鋼梁の崩壊温度を明らかにする。以下に各章の概要を示す。

1章では、本研究に関する終局強度的鋼構造耐火設計について述べる。続いて、国内外の数多くの研究者により行われてきた高温時における鋼構造の諸研究に関して述べ、既知の知見を概括する。これを踏まえて、1章後半では、本研究を行うに至った経緯、研究の必要性、及び研究の目的を述べる。

2章では、本研究で提案した数値解析の解析モデルと解析モデルに組み込んだ鋼材の高温時応力～歪曲線近似式について述べる。

3章では、前半において、提案した数値解析モデルの妥当性を弾・塑性、常温・高温領域において、精算結果と理論値を比較することによって検証する。3章後半では、高温時における鋼梁の解析結果を示し、高温時における鋼梁の挙動、崩壊温度を明らかにする。特に、鋼梁周辺架構の鋼梁に対する拘束度が鋼梁の崩壊温度に与える影響に着目する。数値解析は、純鉄骨梁と合成梁に関して行う。解析によると、梁の横座屈発生温度はこれを軸方向に拘束する周辺部材の剛性、

即ち軸方向拘束度の影響を大きく受ける。大きな拘束を受ける梁ほど座屈発生温度は低い。しかし横座屈の発生は梁の崩壊に直結せず、梁は、下方たわみの増加と横座屈変形の成長を伴いながらも、更に高温に耐え得る。温度上昇と共に、梁の拘束軸力は漸次解除される。終局時には梁の拘束軸圧縮力はほぼ消滅し、あるいは引張り軸力に転じ、周辺部材の拘束の影響はほとんど解消されてしまう。実際、同じ梁上荷重を伝達する同寸法の梁は、周辺部材の拘束度の大・小に関わりなく、終局時、ほぼ同一の荷重～変形挙動を呈する。従って、横座屈変形は発達するものの、梁の終局状態は、近似的には、梁の形状・寸法とそれが伝達する梁上荷重の大きさのみに支配され、ここに至るまでに受けた軸方向拘束の大きさや履歴には支配されないと考えられる。一連の解析により得るこの知見を踏まえ、3章後半では、鋼梁の簡明な崩壊温度予測式を提案する。当該予測値を清算崩壊温度と比較することによって、予測式の妥当性を検証する。

鋼梁に温度勾配が発生する場合に関しては、正確な温度勾配を得るために実験を行ったが、この実験方法と実験結果は4章に示す。実験により得た温度勾配を、提案した数値解析モデルに組み込み、解析結果と実験結果を比較することによって、数値解析モデルの妥当性を検証した。

5章では、本論で得た知見を結論として概括する。