

鋼構造建築部材の高温時限界耐力解析と設計用評価法

LIMIT-STATE STRENGTH ANALYSIS AND EVALUATION METHOD FOR DESIGN OF STRUCTURAL STEEL MEMBERS AT ELEVATED TEMPERATURES

高木 次郎*
Jiro TAKAGI

Limit-state strengths of I-shaped structural steel members at elevated temperatures are analytically investigated by using detailed finite shell element models. Elastic and inelastic flexural buckling and lateral-torsional buckling are simulated for the limit-states of columns and unbraced beams, respectively. The simulations are conducted using steel design properties at elevated temperatures described in *Recommendation for Fire Resistant Design of Steel Structures* and *Eurocode 3*, which are compared with existing test data by several researchers. Pursuing realistic and practical evaluation of structural performance, equations for column and unbraced beam strengths are proposed as functions of elevated temperatures and member length. The proposed strengths agree well with the simulation data using the steel properties from *Eurocode 3*, which are more representative of the test data. This member-based strength evaluation is expected for use as an alternative simple design approach for future limit-state design in structural fire engineering.

Keywords : steel structures, elevated temperatures, fire resistant design, limit-state, member strength
鉄骨構造, 高温, 耐火設計, 限界状態, 部材耐力

1. はじめに

性能設計の時代を迎えて、耐火建築構造工学の分野においても、建築設計者が構造物の耐火性能をより正確に評価することにより建築主や社会に対して説明責任を果たし、より安全で自由な設計を実現する動きが世界各国で広まりつつある。そのような動きの1つとして、設計規準や指針などの整備がある。火災時の建築構造物の挙動は複雑で不確定な要素が多く、研究で解明されていない現象も多い上、数値解析には高度な技術が必要である。そのような状況で設計の枠組を整備するためには、精緻な解析や実験にもとづく高度な設計法と共に、ある程度の安全率を確保した上で問題を簡略化し、設計過程を簡素化する手法が必要になる。耐火鉄骨建築構造分野におけるこのような2本立ての耐火設計の枠組は、わが国の鋼構造耐火設計指針¹⁾(AIJ)の他に、欧州のEurocode 3²⁾(EC3)や近年耐火設計項目を追加した米国の鉄骨構造設計指針³⁾(AISC)などに見受けられる。

AIJにおいては、構造架構の火災時の安全性評価を常時荷重を支持しうる架構の最高温度(限界温度)と架構温度との比較により実施する手法が提案されている。限界温度の算出には、温度上昇が予想される部分架構を抽出し、周辺架構との関係や熱応力、3次元効果などの影響を限定して考慮することにより簡素化を実現している。ここでの単純化は、安全側の評価になるとの判断で行われており、結果として得られる解析上の利点は大きく、実用性の高い手法が提

案されている。一方、EC3の簡易設計法の枠組では、柱や梁などの個々の構造部材に対して指定高温下の耐力評価式が提案されている。これは、限界状態設計法(LRFD)の考え方を採用した常温下の部材断面耐力評価式を高温時の耐力評価用に修正したもので、実用性は高い。また、AISCにおいては、近年追加された耐火設計条項において、EC3で定める鋼材の高温時の材料低減率と常温時の部材耐力評価式を用いて高温時の部材耐力を評価する簡便法が提示されている。この手法では、高温時の鋼材の接線剛性の低下と座屈耐力低減の関係を無視することになり、結果として危険側の評価になる。著者らはその問題を指摘し、AISCのLRFDによる常温時部材耐力評価式を修正する形で高温時の部材耐力評価式を提案した⁴⁾。

AIJとEC3あるいはAISCとの違いに見られるように、火災時の構造物の限界状態の評価は温度と耐力の両方の指標で可能である。つまり、ある一定荷重条件下で限界状態に至る温度を評価するか、一定温度条件下で限界荷重を評価するかの違いになる。前者は実際の火災挙動に即した形で限界状態の評価が可能であり、火災解析から一貫して温度を変数にできるという概念上の明確さがあるのに対し、後者では一定高温時の材料特性を使用して、一般の非線形解析手法の適用が容易であるという利点がある。一般的に、非線形問題は解析経路に依存するが、本論文で扱う個材の耐力評価の範囲では、一定荷重条件下で算出される限界温度と、その温度下において算出される限界耐力とは同じ状態に至ると考えられる(著者らは荷重固

* オーヴ・アラップ・アンド・パートナーズ・ジャパン・リミテッド 構造エンジニア, Ph.D.

Structural Engineer, Ove Arup and Partners Japan Limited, Ph. D.

定の温度漸増と温度固定の荷重漸増の2種類の経路によって求められた柱個材の限界状態がほぼ一致することを確認している⁴⁾。

AIJ では、高温時の部材に局部座屈や曲げ座屈が発生しても、必ずしも骨組としての終局状態を意味しないことから、応力再分配が行われた後の終局形を限界状態として評価している。この考え方について柱を対象にして考察してみる。柱座屈後の代替荷重支持経路の存在是非は、建物の形状や架構、火災時のシナリオに依存する。耐震設計を施されたわが国のラーメン骨組においては、高度な耐力と高い不静定次数から代替荷重支持経路が存在する場合が多いと考えられるが、それは全ての鉄骨骨組についてあてはまるわけではない。例えば、合成梁とウェブのみでボルト接合された柱などについては、接合部の実際の回転剛性は高く⁵⁾ 火災時の柱の熱応力は無視できない一方で、代替荷重支持経路の存在は保証できない^{6), 7)}。このような状況を考慮して、本論文では、代替荷重支持経路の存在を前提とした形で議論を進めない。熱応力はあくまで火災時の建物固有の外力として考慮されるものとし、別途骨組解析で求めることとする。火災時の部材付加軸力を算出する簡便な手法としては、例えば弾性熱応力骨組解析がある。弾性解析で算出される部材熱応力は過大評価される可能性があるが、それに対して部材耐力が比較検討されれば安全側の評価になり問題はない。これは、高い安全率を見込むことで比較的容易な検討手段とする簡便法の考え方に合致している。EC3 や AISC においても同様に、簡便法における部材耐力評価式そのものには熱応力の影響を含んでおらず、本論文もこの考え方に準じて、わが国の耐火設計簡便法の可能性を議論する。この場合の評価式の使用手順としては、(1)火災のシナリオに応じた骨組の熱応力解析の実施、(2)部材の温度および熱応力を含めた応力度の算出、(3)部材温度における評価式を用いての耐力評価、が考えられる。

AIJ では、鋼材の常温時規格降伏強度が、実降伏強度分布の下限にあたることに対応させて、高温時材料特性も実分布の下限に設定している。安全側の評価として一貫した考え方であるが、高温時降伏強度のばらつきは常温時のばらつきよりも大きいことを考慮すると、AIJ の高温時鋼材特性は実情(平均値)よりも相当低い値で定義されていることになる。そして、結果的にそれは材料強度に大幅な安全率を見込んでいても解釈できる。ここで改めて LRFD について考えてみたい。LRFD は、荷重および耐力をそれらに寄与する不確定要素の関数として評価することで、限界状態に至る確率を許容地値以下に制御する設計法である。AISC-LRFD などの実用性の高い LRFD 簡便法では、確定的に求めた荷重および耐力にそれぞれ係数を乗じることで信頼性解析で確認できる安全性と同等の安全性を確保している。構造物の安全率はそれらの係数によって代表的に調節されることから、確定的に求める荷重あるいは耐力に別途安全率を含むことは LRFD の考え方に馴染みにくい。その意味で、今後 LRFD の適用を考えるに際しては、鋼材の設計用高温時材料特性のあり方について慎重に議論する必要がある。

本研究では、わが国の耐火構造設計における将来的な LRFD 採用を視野におき、簡便な高温時鋼構造部材限界耐力評価式を提案する。評価式は柱と梁を対象に鋼構造限界状態設計指針⁸⁾ (AIJ-LRFD) あるいは鋼構造設計規準⁹⁾ (AIJ-ASD) と同様の形式とする。また、高温時限界状態を荷重指標で解析的に評価し、提案式による限界耐力が解析による限界値にほぼ一致することを示す。数値解析の実施に

あたっては、鋼材の高温時材料特性として実験データの平均値に近い EC3 が定めるものを採用し、解析値が EC3 の高温時耐力評価値とよく一致することを確認する。EC3 は耐火建築構造分野における研究の集積であり、それと比較することは、本研究の提案評価式の妥当性を確認する一手段と考えられる。AIJ の材料特性式を使用した場合の解析も行い、結果の比較を行う。温度指標で定義される AIJ の耐力評価式の荷重指標への変換と、AIJ が定める鋼材の高温時材料特性を使用した場合の有限要素解析も行い、提案評価式および EC3 評価式による限界耐力との比較を行う。

2. 鋼材の高温時応力-歪関係

本章では、数値解析で用いる建築用鋼材の高温時の材料特性について、既往の実験データと AIJ および EC3 の設計用応力-歪関係とを比較して整理する。建築構造材料の実験的耐火性能研究はこれまで数多く実施されているが、鋼材の応力-歪関係が入手できる資料はあまり公開されていない。ここでは、入手可能であった 1970 年代および 80 年代にカナダ、豪州、米国、日本、英国の 5 カ国で実施された実験結果を用いる。鋼材、研究者名、実験方法などを表 1 にまとめる。実験方法は DeFalco¹²⁾ の一定温度下の圧縮耐力試験と Kirby¹⁵⁾ の一定荷重下の温度上昇試験以外は、いずれも一定温度下の引張耐力試験である。

各実験で測定された常温時の 0.2% オフセット降伏応力で高温時の応力-歪関係を正規化して比較すると、500°C までは実験間で近い応力を示す(500°C における 1% 歪時正規化測定応力の最大値は最小値の 125%) のに対し、600°C ではばらつきが拡大している(同 195%)。700°C 以上の実験は Kirby¹⁵⁾ のみ実施しており比較できないことから、600°C 以上の高温で一般的にばらつきが大きくなる傾向にあるのか特定できない。ただし、500°C から 600°C にかけての鋼材の耐力低下は著しく(500°C の 1% 歪時平均応力が規定降伏応力の 78% なのに対して、600°C では 48%)、低下率のばらつきの影響があることは類推できる。

500°C と 600°C における実験結果を図 1 に示す。いずれの応力-歪関係においても、常温時の鋼材の特徴である降伏棚が見られず、非線形性が顕著になっている。また、AIJ と EC3 の設計用応力-歪関係を同図で比較する。AIJ では SN490 および SN400 級鋼材と異なる応力-歪関係が設定されているのに対し、EC3 では降伏応力で正規化した応力-歪関係は材料強度によらず一様である。材料に安全率を

表 1. 高温時の鋼材の実験データ

鋼材	規格降伏耐力 (MPa)	研究者	実験方法
ASTM A 36	250	Harmathy and Stanzak ¹⁰⁾ (カナダ, 1970)	一定温度下 漸増引張荷重
CSA G40.12	300		
AS A 149	245	Skinner ¹¹⁾ (豪州, 1972)	一定温度下 漸増引張荷重
ASTM A 36	250	DeFalco ¹²⁾ (米国, 1974)	一定温度下 漸増圧縮荷重
ASTM A 441	345		
JIS SS 41	235	Fujimoto <i>et al.</i> ^{13), 14)} (日本, 1980, 1981)	一定温度下 漸増引張荷重
JIS SM 50A	325		
BS Gr. 43A	255	Kirby and Preston ¹⁵⁾ (英国, 1988)	一定引張荷重下 漸増温度
BS Gr. 50B	355		

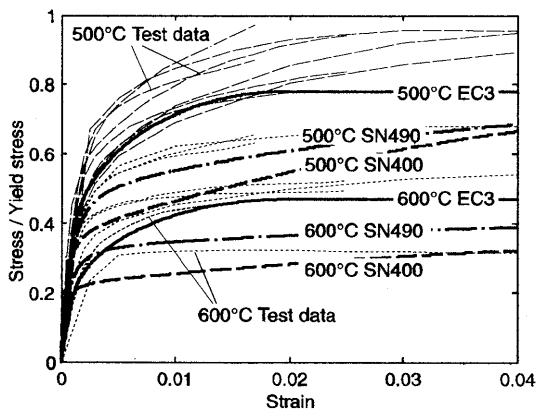


図1. 実験値とAIJ, EC3の応力-歪関係比較 (500-600°C)

見込むAIJの設計応力は概ね実験値を下回っており、SN490級鋼材よりもSN400級鋼材のほうが高温時耐力低下率が大きい。500°Cと600°Cを比較すると、500°CにおいてAIJと実験値の差が大きく、例えば1%歪時応力は実験平均値の約70% (SN490)と60% (SN400)である (同様の傾向は400°Cでも観察される)。一方、EC3の設計応力は、500°Cと600°Cの両方において、実験平均値よりもやや低いものの近い値を示している。

AIJ (SN490級材)とEC3の常温から800°Cまでの応力-歪関係を図2に比較する。AIJでは100°Cから300°Cにおいて降伏棚が定義されているのに対して、EC3では簡略化されている。400°C以上において、AIJの設計応力はEC3のそれを全般的に下回り、800°CのEC3では常温の10%程度の耐力を残すのに対してAIJではほとんど残らない。また、EC3では2%以上の歪域では完全弾塑性なのに対し、AIJではより大きい歪域に対してまで歪硬化が定義されている。関係式の詳細は原典¹⁾²⁾に委ねるが、EC3について特徴を以下に簡潔に記す。

EC3では高温時の耐力低減率を最大応力を与える2%歪時で評価する。高温時の応力-歪関係は、図3(a)に示すように弾性域、塑性域、完全塑性域の3領域に分類でき、弾性係数 E と弾性限界応力 F_p 、降伏応力 F_y (2%歪時応力)の3つのパラメータによって定義される。これらのパラメータは温度の関数であり、高温時の常温時に対する低減率は(1)式で与えられる。

$$K_E(T) = \frac{E(T)}{E_0}, \quad K_p(T) = \frac{F_p(T)}{F_{p0}}, \quad K_y(T) = \frac{F_y(T)}{F_{y0}} \quad (1)$$

式中、 (T) は温度 T の関数であることを、下添え字の0は常温時の値であることを示す。各パラメータの高温時低減率を図3(b)に示す。弾性係数は100°Cで低下し始め約530°Cで半減するのに対して、降伏応力は400°Cから急激に低下し約600°Cで半減する。

3. 数値解析モデル

本章では、鉄骨H型柱および梁の高温時限界耐力解析を行うため有限要素モデルの詳細をまとめる。モデルの作成および解析には汎用解析ソフトのABAQUS¹⁰⁾を使用し、幾何学的非線形と材料非線形を考慮した弾塑性曲げ座屈および横座屈に対する限界耐力を評価する。シェル要素を使用し、局部座屈および残留応力の影響を考慮する。主要な解析モデルの特徴と解析条件は以下の通りである。

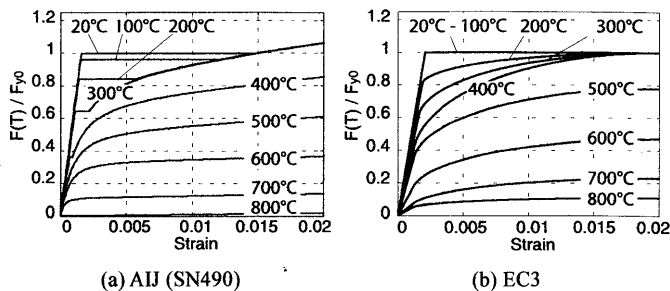


図2. AIJとEC3の設計用応力-歪関係

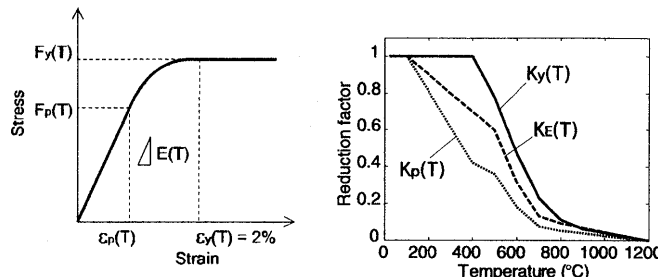


図3. EC3の高温時鋼材特性

- 部材長に対して32要素、フランジおよびウェブは幅方向に8要素に分割する。各要素は8節点、4ガウス積分点を有し、シェルの厚さ方向についてはシンプソン法による3積分点を有する。
- 高温時の鋼材の材料特性としてAIJとEC3の両方で定義される応力-歪関係を使用し、結果を比較する。
- 部材温度は一樣と仮定し、指定高温時の鋼材の材料特性を用いて最大荷重を算出し、限界耐力と定義する。柱については最大圧縮軸力、梁については上下フランジの材軸方向に圧縮および引張集中荷重を載荷し、強軸まわりの純曲げモーメントに対して限界耐力を算出する。
- 材端のフランジとウェブ端辺の変形を線形に拘束し、ウェブ中央を支持する。図4中、部材右端では変位と材軸周りの回転を拘束し、弱軸および強軸まわりの回転を自由とする。左端は材軸方向の変位を自由とする以外右端同様である。上下フランジの部材弱軸まわりの回転は独立して自由とし、材端部分のねじり変形に対して自由支持とする。
- 幾何学的初期不整を弱軸方向に正弦曲線で与える。不整は部材中央で最大値とし、材長の1/1000とする。また、残留応力を図5に示す分布で与える。圧縮および引張の最大残留応力は常温時に69MPaとし、高温時には $K_y(T)$ に比例して低下すると仮定する。

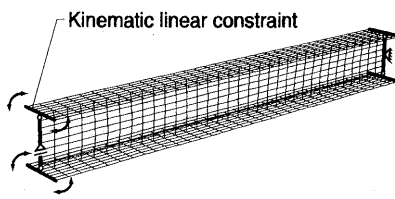


図4. 有限要素解析モデル

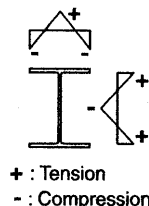


図5. 残留応力分布

本解析モデルと同様のモデルを用いた著者らの研究⁴⁾では、柱について既往の実験データとの高温時耐力比較を実施しており、解析手法の妥当性を確認している。

残留応力の限界耐力への影響について調査したところ、500°Cの柱の場合で最大約15%であった⁴⁾。また、シェル要素を使用することで局部座屈を解析できるが、本研究では常温時に局部座屈の影響が小さいH型断面(AIJ-LRFDにおける幅厚比区分P-IあるいはP-II)を対象とし、これらの断面に対して高温時に局部座屈問題が顕著化しないことを示す。その際、局部座屈に対する初期不整は特に考慮しないが、線形座屈解析で算出した局部座屈に対する最悪不整による柱の限界耐力への影響は、本解析モデルの場合、最大で5%程度にとどまることを確認している⁴⁾。

4. 柱の高温時耐力評価

鉄骨柱個材の高温時の挙動および限界耐力については、数多くの数値解析的あるいは実験的研究が実施されている¹⁷⁾²⁴⁾。中でも、Franssenら^{22), 23)}およびTalamonaら²⁴⁾は、さまざまな断面、材長、材料強度、荷重条件下でH型鋼柱の高温時の圧縮耐力を有限要素解析を用いて調査するとともに、一定高温下の限界耐力を材長の関数として評価する手法を提案した。EC3はこれを受ける形で柱の高温時耐力評価式を改訂している。

LRDFの枠組では、構造物の安全性や機能性の評価において、確率統計的処理にもとづいた耐力と外力との合理的な比較方法を構築していく必要がある。そのような全体的な枠組の整備は今後の課題であるが、将来的なLRDFの適用を視野において、実情に近い形で柱の限界耐力を評価することを考える。一定高温時の柱の圧縮耐力 $P_{prop}(T)$ を部材長の関数として、AIJ-LRFDあるいはAIJ-ASDの常温時耐力算定式同様の形式で以下のように提案する。

$\lambda_c \leq 2$ のとき

$$P_{prop}(T) = \{1 - 0.686\lambda_c + 0.145\lambda_c^2\} P_y(T) \quad (2)$$

$2 < \lambda_c$ のとき

$$P_{prop}(T) = \frac{P_y(T)}{1.2\lambda_c^2} \quad (3)$$

ここで、 $\lambda_c = \sqrt{\frac{P_y(T)}{P_c(T)}}$, $P_c(T) = \frac{\pi^2 E(T) A}{(L/r)^2}$ (4)

ここで提案している評価式の趣旨と使用法は本質的にEC3における評価式と同様である。ただし、常温時のAIJ-LRFD評価式に準じた形式の高温時評価式とすることで、わが国における高い実用性が期待できる。式(2)は塑性座屈に支配される限界耐力を示し、式(3)は弾性座屈による耐力を示す。両式の境界値は高温時の鋼材弾性域の縮小に伴いAIJ-LRFDで定める値よりも大きく設定した。結果として、塑性座屈式が支配する領域が拡大している。式(3)はAIJ-LRFD

表 2. 解析部材断面寸法 (mm)

断面	h	t_w	b	t_f
A	356	11.2	369	18.0
B	349	5.8	127	8.5

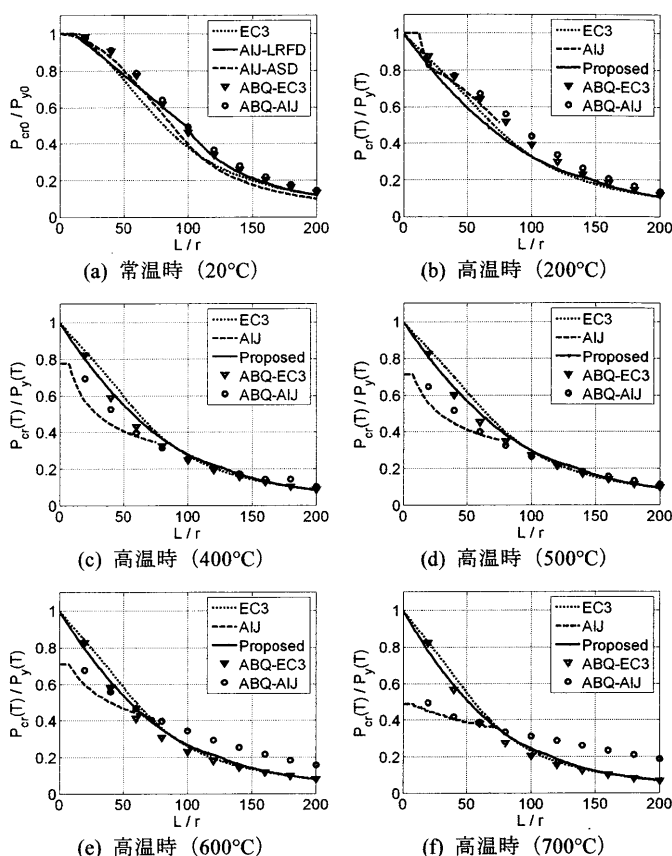


図 6. 一定高温時の H 型鋼柱の限界耐力

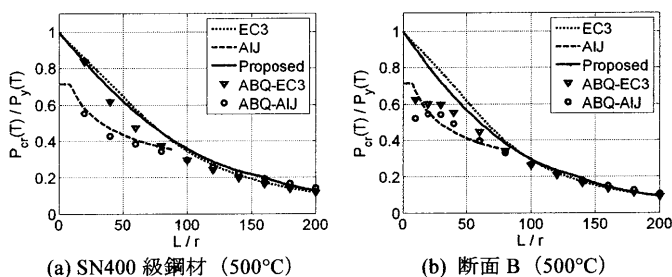


図 7. 異種鋼材あるいは異種断面の柱の限界耐力

の限界耐力式であり、弾性理論耐力の83%である。式(2)の塑性座屈域の限界耐力評価値は接線剛性理論値とは異なる。これは、一般の接線剛性理論では、残留応力および限界耐力時変形の影響を考慮しないため、中程度の長さ(細長比60-120程度)の柱に対して解析値を上回る傾向があるためである⁷⁾。そして、式(2)は式(3)との境界点で限界耐力の値が連続することを条件に、解析結果により近時を示すよう定義した。境界点で勾配は連続しないが、常温時のAIJ-LRFD式にも勾配の不連続性があり特に問題はないと考える。

H型柱の常温時と高温時(200°C-700°C)の限界耐力と細長比の関係を解析的に求めた結果を図6に示す。さらに、AIJおよびEC3の設計用耐力と提案評価式による限界耐力を同図に比較する。本図における柱の軸耐力は、EC3の高温時鋼材強度をもとに、各温度の完全塑性軸力 $P_y(T) = A F_y(T)$ によって正規化してある。ここで、 A は断面積である。従って、AIJ評価式およびAIJ材料特性を使用した解析結果では細長比が0に漸近しても耐力は1に収束しない。

AIJ-LRFD と AIJ-ASD では細長比の定義が異なるが、AIJ-LRFD のそれは材料特性に依存し、結果として温度の変数になることから、図では温度に依存しない AIJ-ASD の定義、 $\lambda = L/r$ を用いて表現した。ここで、 L は部材長、 r は断面 2 次半径である。鋼材は SN490 級で断面寸法は表 2 の A に示す。ここで、 h 、 b 、 t_w 、 t_f はそれぞれ、H 型断面成、フランジ幅、ウェブ板厚、フランジ板厚である。断面 A は AISC³⁾ における W14×90 であり、局部座屈の影響が少ない断面区分 (Compact Section) のうち最も大きな幅厚比を有する断面の 1 つである。そして、AIJ-LRFD における幅厚比区分では P-II に近い P-III に属する (P-I および P-II 区分では局部座屈の影響は考慮不要)。常温時の柱の限界耐力について、局部座屈が支配的でない断面については、特に高温時に問題になることはないことが報告されているが²⁵⁾²⁷⁾、それを確認する目的でこのような断面を選定した。強軸と弱軸まわりの座屈耐力を比較したが、同一細長比下の耐力には大きな差がないことから弱軸まわりの限界耐力のみを示した。

常温時については、解析結果と AIJ-LRFD⁸⁾ の終局限界耐力、AIJ-ASD⁹⁾ の短期許容耐力および EC3 の設計用耐力を比較した結果を図 6(a) に示す。解析結果と設計用耐力はほぼ一致していることが確認できる。AIJ と EC3 それぞれの鋼材の材料特性を使用して高温時の限界耐力を解析した結果を比較すると、高温になるにつれてその差が大きくなるのがわかる。特に、細長比の比較的小さい部材で差が顕著なのは、崩壊形として柱降伏あるいは塑性座屈が支配的な材長において材料の降伏耐力の影響が大きいためである。また、600°C および 700°C において AIJ の材料特性を用いた解析のうち細長比の大きい部材 (弾性座屈支配域) の限界耐力が EC3 の材料特性を用いた場合の耐力を大きく上回っている。これは両設計指針間の鋼材の高温時初期剛性の定義の違い (AIJ では 600°C の初期剛性は常温時の 64% なのに対し EC3 では 31%、同様に 700°C では AIJ 51% に対し EC3 では 13%) による。初期剛性に関しては、前述の材料実験との比較からは、AIJ と EC3 のどちらの材料特性がより現実的なのか定かでないが、本論文では EC3 の材料特性に準拠して以下の話を進める。

図 6 では、温度指標で定義される AIJ の高温時設計用限界を、耐力指標に換算して示した。AIJ ではわが国の耐震設計を施された建築主架構断面を想定して比較的小さい細長比 (本例の場合で約 80 以下) の柱についてのみ限界耐力が定義されている。その値は AIJ の材料特性を用いた解析結果とよく一致している。

一方、提案評価式で算定される限界耐力は材長の短い部材も含めて EC3 の材料特性を用いた解析結果に概ね一致している。異なる鋼材強度および断面について検討した結果を図 7 に示す。図 7(a) は鋼材を SN400 級鋼材に変更した場合、図 7(b) は断面を表 2 の断面 B に変更した場合で、いずれも温度は 500°C である。断面 B は梁としては局部座屈を起こさない断面区分⁸⁾ に入るが、柱としてはウェブの板厚が薄く局部座屈を考慮する必要がある。図 7(b) では、細長比が小さい範囲 (30 以下) で、解析値が評価式を大きく下回っている。これはウェブの局部座屈の影響であり、他の高温でも完全塑性軸力の 60% 程度が限界耐力になっている。断面 B ように柱として実用的でない板厚の断面については局部座屈の発生が確認されたが、断面 A のように常温時に局部座屈が支配的でない断面については解析では限界耐力における局部座屈の影響は認められず、高温時にその

問題が顕著化しないことを例証できた。

以上により、提案式による限界耐力は、解析値に概ねよい近似を示すことが確認できた。また、本提案式による限界耐力は 200°C より低い温度では解析値よりも安全側の評価を示すが (20°C では AIJ-LRFD あるいは AIJ-ASD の設計用耐力に一致しない)、これは、構造物に崩壊の可能性がある高温時 (300°C 以上) の耐力をできるだけ正確に評価することを目的とするもので、EC3 の評価式においても同様の特徴が見られる。

5. 梁の高温時耐力評価

横補剛のない H 型梁が強軸まわりに曲げを受ける場合の限界状態を評価するためには横座屈の影響を考慮する必要があるが、柱や補剛のある梁に較べて補剛のない梁の高温時の挙動に関する研究は、これまであまり行われていない。Baily ら²⁸⁾ は様々な梁断面に対して、限界温度を異なる荷重条件下で解析的に算出し、当時の EC3 が危険側の限界耐力を与えることを指摘した。Piloto ら²⁹⁾ は電気的に加熱した横補剛のない梁の挙動を実験的に調査した。その結果は現象の複雑さと実験の難しさから理論値に較べて大きくばらつくことを報告している。Vila Real ら³⁰⁾³²⁾ は限界温度および耐力を様々な断面、材料強度および荷重条件下で解析し、温度と部材長に対する耐力評価式を提案した。それらの評価式は EC3 に採用されている。

AIJ では、横補剛のない梁は火災時に横座屈から免れないものとし、特に限界耐力の規定を設けていない。ただし、たとえば門型ラーメンフレームの柱のように長期的に圧縮および曲げを受ける部材の存在などもあり、今後の高温時の梁-柱の研究への展望を含めて、横座屈耐力を研究しておくことは重要である。

本研究では、H 型梁が強軸まわりに純曲げを受ける場合の高温時限界耐力を算出する。純曲げ状態のみの検討を行うのは、それが最も基本的な荷重状態であり、理論解との比較も容易なためである。その他の荷重状態に対する検討は今後の課題とする。

一定高温時の純曲げ下の梁の限界耐力を部材長の関数として、AIJ-LRFD あるいは AIJ-ASD の耐力算定式と同形式で評価する。

$\lambda_b(T) \leq 2$ のとき

$$M_{prop}(T) = \{1 - 0.725\lambda_b(T) + 0.175\lambda_b^2(T)\} M_p(T) \quad (5)$$

$2 < \lambda_b(T)$ のとき

$$M_{prop}(T) = \frac{M_p(T)}{\lambda_b^2(T)} \quad (6)$$

ここで、

$$\lambda_b(T) = \sqrt{\frac{M_p(T)}{M_c(T)}} \quad (7)$$

$$M_c(T) = \sqrt{\frac{\pi^4 E(T) I_y E(T) C_w}{L^4} + \frac{\pi^2 E(T) I_y G(T) J}{L^2}} \quad (8)$$

$M_{prop}(T)$ は提案純曲げ耐力、 I_y は弱軸まわりの断面 2 次モーメント、 C_w は曲げねじり係数、 J はサンブナンのねじり係数である。本式の決定過程は柱の提案式とほぼ同様である。

解析によって求められた常温時と高温時 (200°C-700°C) の限界耐力と細長比の関係を EC3 で定義される設計用耐力と比較する (図 8)。鋼材は SN490 級で断面寸法は表 2 の B に示す。本断面は AIJ-LRFD

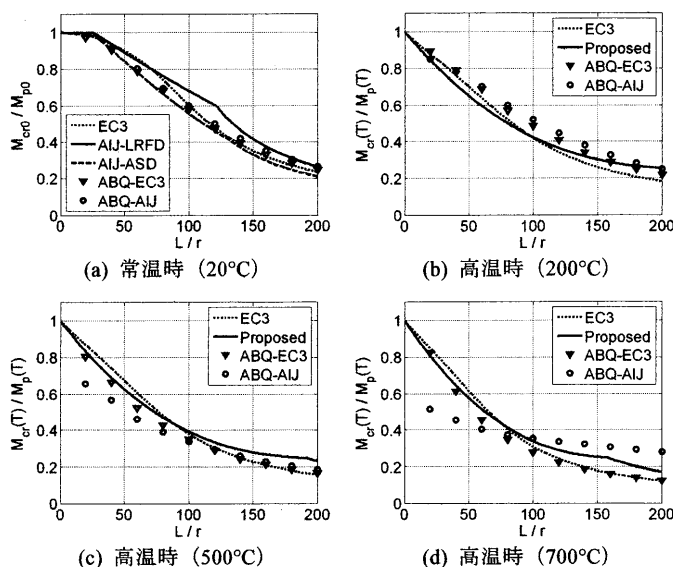


図 8. 一定高温時の H 型鋼梁の限界耐力

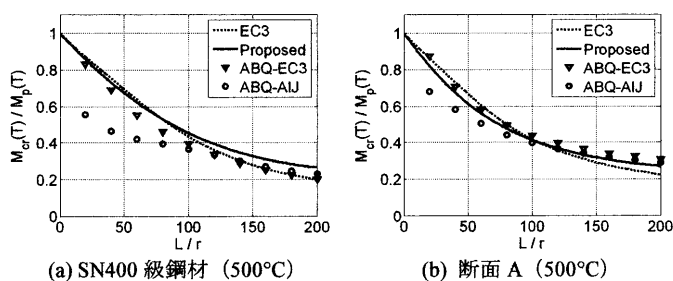


図 9. 異種鋼材あるいは異種断面の梁の限界耐力

の幅厚比区分で P-II に属し、局部座屈に対する検討が不要な部材の中では比較的幅厚比の大きな部類に属する。耐力は各温度の EC3 による全塑性モーメント $M_p(T) = Z_x F_y(T)$ で正規化してある。ここで、 Z_x は強軸まわりの塑性断面係数である。

図 8(a) に示すように常温時の解析結果は AIJ-ASD および EC3 の設計用耐力とよく一致しているが、AIJ-LRFD の限界耐力は細長比 120 付近でやや危険側 (EC3 の材料特性を用いた解析値の約 120%) の評価になっている。また、高温時においては、AIJ と EC3 それぞれの材料特性を用いた解析結果の違いが、細長比の小さい部材で顕著である。これは、柱の検討で確認された傾向と同様で、材料強度の影響が大きいからである。そして、図 8(d) の 700°C の例で細長比の大きい部材の AIJ の材料特性による解析結果が EC3 による結果を上回るのも、柱同様に両設計指針間の初期剛性の定義の違いによる。

提案評価式による曲げ耐力は EC3 による解析結果によく近似を示しているものの、500°C および 700°C ではやや危険側の評価になっている。これは、式(6)で AIJ-LRFD で定める弾性横座屈支配時の設計限界耐力を採用した結果である。また、200°C 以下の比較的低温域では安全側の評価になっているのは柱同様に高温域を重視して評価式を定義したためである。

異種鋼材および断面の検討を図 9 に示す (500°C の SN400 級鋼材を図 9(a)、表 2 の断面 A の場合を図 9(b))。いずれも提案評価式は EC3 の材料特性を用いた解析結果によく一致している。図 9(b) と図 8(c) を比較すると、図 9(b) では大きな細長比の部材において EC3 に

よる解析値が評価式を上回っている。これは、フランジ幅が比較的広く横座屈しにくい断面では、座屈前変形が大きくその結果として横座屈耐力が向上するためである。以上の検討から、提案評価式は高温時の梁の純曲げ耐力を適当な近似で評価できると考えられる。

6. 結論

建築構造用鋼材の高温時の応力-歪関係について、過去の実験データを整理し、鋼構造耐火設計指針 (AIJ) および Eurocode 3 (EC3) で定義される設計用応力-歪関係と比較した。AIJ 式は実験値を概ね下回るのに対し、EC3 では実験平均値に近いことを確認した。

一定高温時の限界耐力評価式を材長の単純な関数として鋼構造限界状態設計指針あるいは鋼構造設計規準の常温時耐力算定式と同様の形式で提案した。また、詳細な有限要素モデルを作成し、鉄骨建築構造部材 (H 型柱および梁) の一定高温時限界耐力 (柱の弾塑性曲げ座屈耐力および梁の純曲げモーメント下の弾塑性横座屈耐力) の部材長に対する変化率を評価した。複数の鋼材強度や断面による検討を行い、提案評価式が一般的な H 型断面について適用できることを例示した。

AIJ と EC3 のどちらの応力-歪関係を設計で用いるべきかについてはさらなる議論の余地があるものの、将来的な耐火構造設計の方向性の 1 つとして限界状態設計の枠組の適用を考えるとき、材料強度に過度の安全率を見込まないほうが望ましいとの判断から、数値解析における高温時の鋼材の材料特性としては実験平均値に近い EC3 の設計用応力-歪関係を使用した。本研究で提案されている柱および梁の一定高温時限界耐力評価式は、これまでの耐火設計法の枠組みにとらわれない新しい方向性の観点から有意義と考えられ、将来的な活用が期待できる。

7. 本評価式適用における条件

本論文の数値解析による部材耐力評価において、クリープの影響は考慮されてない。これは、EC3 が定める鋼材の高温時材料特性においてクリープによる強度低下の影響を含んでいると考えられていることと^{2), 3)}、一般的な火災継続時間では、クリープの影響は顕著ではないとの報告²⁵⁾ に準拠している。ただし、特殊な事情により長時間高温にさらされる部材の耐力評価に本式を採用する場合には、別途クリープの影響を考慮する必要がある。

謝辞

本研究では、Stanford 大学の Gregory G. Deierlein 教授に指導いただいた研究^{4), 7)} の基本的な考え方を引き継ぎ、わが国の耐火構造設計法への応用を考察した。同教授に感謝いたします。また、京都大学荒木慶一助教授には貴重な助言をいただいた。最新の Eurocode の入手に際してポルトガル Averio 大学の Vila Real P. M. M. 教授に、他の参考文献の入手に際して株式会社日建設計構造設計室の柳原雅直氏に協力いただいた。さらに、留学および研究費助成を Fulbright 大学院留学プログラムおよび Stanford 大学の John A. Blume Earthquake Engineering Center よりいただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会, 鋼構造耐火設計指針, 丸善, 1999
- 2) European Committee for Standardisation (CEN): Eurocode 3 Design of Steel Structures – part 1-2 General rules – Structural fire design, Draft prEN 1993-1-2, Stage 49 Draft, Brussels, Belgium; 2003
- 3) American Institute of Steel Construction, Inc. (AISC): Specification for structural steel buildings, Chicago, IL; 2005
- 4) Takagi J, Deierlein GG: Strength Design Criteria for Steel Members at Elevated Temperatures, *Journal of Constructional Steel Research*, 63, pp.1036-1050, 2007
- 5) Liu J, Astaneh-Asl A: Moment-Rotation Parameters for Composite Shear Tab Connections, *Journal of Structural Engineering*, 130(9), pp.1371-1380, 2004
- 6) Takagi J, Deierlein GG: Stability Investigation of Steel Members and Frames under Fire Conditions, *Proceeding of Annual Stability Conference, Structural Stability Research Council*, pp. 317-337, 2007
- 7) Takagi J: Collapse Performance Assessment of Steel-framed Buildings under Fires, Ph.D. Dissertation, Stanford University, 2007
- 8) 日本建築学会, 鋼構造設計規準 – 許容応力度設計法 –, 丸善, 2005
- 9) 日本建築学会, 鋼構造限界状態設計指針・同解説 (SI 単位版), 丸善, 2002
- 10) Harmathy TZ, Stanzak WW: Elevated-temperature Tensile and Creep Properties of Some Structural and Prestressing Steels, *Fire Test Performance, ASTM STP 464*, American Society of Testing and Materials, pp.186-208, 1970
- 11) Skinner DH: Measurement of High Temperature Properties of Steel, BHP Melbourne Research Laboratories, Report MRL6/10, Australia, 1972
- 12) DeFalco FD: Investigation of the Compressive Response of Modern Structural Steels at Fire Load Temperatures, Ph.D. dissertation, the University of Connecticut, 1974
- 13) Fujimoto M, Furumura F, Ave T, Shinohara Y: Primary Creep of Structural Steel (SS41) at High Temperatures, *Trans. of Arch. Institute of Japan*, 296: pp.145-157, 1980
- 14) Fujimoto M, Furumura F, Ave T: Primary Creep of Structural Steel (SM50A) at High Temperatures, *Trans. of Arch. Institute of Japan*, 306: pp.148-156, 1981
- 15) Kirby BR, Preston RR: High temperature properties of hot-rolled structural steels for use in fire engineering studies, *Fire Safety Journal* 13(1): pp.27-37, 1988
- 16) Hibbit, Karlsson & Sorensen: ABAQUS Version 6.3, User's Manual, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., 2002
- 17) Burgess IW, Olawale AO, Plank RJ: Failure of steel columns in fire, *Fire Safety J.*, 18, pp.183-201, 1992
- 18) Poh KW, Bennetts ID: Behavior of steel columns at elevated temperatures, *Journal of Structural Engineering*, 121(4): pp.676-684, 1995
- 19) Talamona D, Kruppa J, Franssen JM, Recho N: Factors influencing the behaviour of steel columns exposed to fire, *J. of Fire Protection Engineers*. 8(1): pp.31-43, 1996
- 20) Toh WS, Tan KH, Fung TC: Compressive resistance of steel columns in fire: Rankine approach. *Journal of Structural Engineering*, 126(3): pp.398-405, 2000
- 21) Baker DJ, Xie YM, Dayawansa PH: Numerical predictions and experimental observations of the structural response of steel columns to high temperatures, *Fire Safety Science, Proceeding of the Fifth International Symposium*, pp.1165-1176, 1997
- 22) Franssen JM, Schleich JB, Cajot LG: A simple model for the fire resistance of axially loaded members according to Eurocode 3, *J. of Const. Steel Res.*, 35: pp.49-69, 1995.
- 23) Franssen JM, Talamona D, Kruppa J, Cajot LG: Stability of steel columns in case of fire: experimental evaluation, *J. of Structural Engrg., ASCE*, 124(2): pp.158-163, 1998
- 24) Talamona D, Franssen JM, Schleich JB, Kruppa J: Stability of steel columns in case of fire: numerical modeling. *J. of Structural Engrng, ASCE*, 123(6): pp.713-720, 1997.
- 25) Wang YC: Steel and composite structures behaviour and design fore fire safety, Spon Press, 2002.
- 26) Uy B, Bradford MA: Local buckling of cold formed steel in composite structural elements at elevated temperatures, *Journal of Constructional Steel Research*, 34: pp.53-73, 1995
- 27) Ranby A: Structural fire design of thin walled steel sections, *Journal of Constructional Steel Research*, 46(1-3): pp.303-304, 1998
- 28) Bailey CG, Burgess IW, Plank RJ: The lateral-torsional buckling of unrestrained steel beams in fire, *Journal of Constructional Steel Research*, 36(2): pp.101-119, 1996
- 29) Piloto PAG, Vila Real PMM: Lateral torsional buckling of steel I-beams in case of fire - experimental evaluation, *Proceedings of the First International Workshop on Structures in Fire, Copenhagen, Denmark*, pp.95-105, 2000.
- 30) Vila Real PMM, Franssen JM.: Lateral torsional buckling of steel I-beams in case of fire - numerical modeling, *Proceedings of the First International Workshop on Structures in Fire, Copenhagen, Denmark*, pp.71-93, 2000
- 31) Vila Real PMM, Cazeli R, Simoes da Silva L, Santiago A, Piloto P: The effect of residual stress in the lateral torsional buckling of steel I-beams at elevated temperature. *Journal of Constructional Steel Research*, 60: pp.783-793, 2004
- 32) Vila Real PMM, Lopes N, Simoes da Silva L, Franssen JM: Lateral-torsional buckling of unrestrained steel beams under fire conditions: improvement of EC3 proposal, *Computers and Structures*, 82: pp.1737-1744, 2004
- 33) Buchanan AH: *Structural Design for Fire Safety*, John Wiley & Sons, LTD, 2002

(2006年11月1日原稿受理, 2007年4月24日採用決定)