



耐火性能設計法における無被覆鋼材の温度算定方法に関する提案

角谷, 三夫
吉田, 俊之
中道, 明子
北後, 明彦
田中, 哮義

(Citation)

日本建築学会環境系論文集, 68(573):17-24

(Issue Date)

2003-11-30

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90001096>



耐火性能設計法における無被覆鋼材の温度算定方法に関する提案

A METHOD TO ESTIMATE TEMPERATURE OF UNPROTECTED STEEL STRUCTURES
IN A FIRE ROOM FOR PERFORMANCE BASED FIRE-PROOF DESIGN

角谷三夫*1, 吉田俊之*2, 中道明子*3, 北後明彦*4, 田中喺義*5

Mitsuo KADOYA, Toshiyuki YOSHIDA, Akiko NAKAMICHI,
Akihiko HOKUGO and Takeyoshi TANAKA

Performance-based fire safety designs have been greatly facilitated since the revised Building Standard Law was put into effect in 2000. But some improvements still remain to be desired in the calculation method for temperature of unprotected steel prescribed in the order of Ministry of Land, Infrastructure and Transportation. Two methods for calculating it are presented in this paper. One is a simple numerical calculation method consisting of several formulas. The other is a formula that can be more valid for a wider range of fire temperature rise coefficient α than that prescribed in the above order.

Keywords: verification of fire-resistant performance, unprotected steel temperature, simple temperature calculation method, fire temperature rise coefficient, basic temperature rise coefficient of steel

耐火性能検証、無被覆鋼材温度、簡易温度計算方法、火災温度上昇係数、基本温度上昇速度

1. はじめに

平成12年施行の建築基準法性能規定化の一連をなす耐火性能検証法(平成12年建設省告示1433号、以下単に告示と言う)の制定により、耐火建築物の性能設計を比較的容易に行う道が開かれた。これにより建築の耐火設計に大きな可能性を与えたといえる。しかし、このような新しい手法の導入時には初期不具合が生じる可能性も稀ではない。

告示における無耐火被覆鋼材の保有耐火時間を計算するための鋼材温度算定方法¹⁾(以下、単に告示式と言う)によると、火災温度上昇係数 α が標準火災($\alpha=460$)より小さい場合には火災温度よりも鋼材温度の方が高くなるという矛盾が生じ(図1-1)、また α が標準火災より大きい場合には火災温度と較べて鋼材温度が異常に低く計算されるという矛盾がある(図1-2)。

この前者の矛盾に対して、告示式のなかでは“火災温度より鋼材温度の方が高くなる場合は火災温度を採用する”という主旨の計算式を補って論理上の問題にはならないように処置されている。また、後者の矛盾に対しては、このような激しい火災が予想される条件は無耐火被覆の鋼材が実際に使えない領域のため、この矛盾が顕在化する可能性は低いかも知れない。

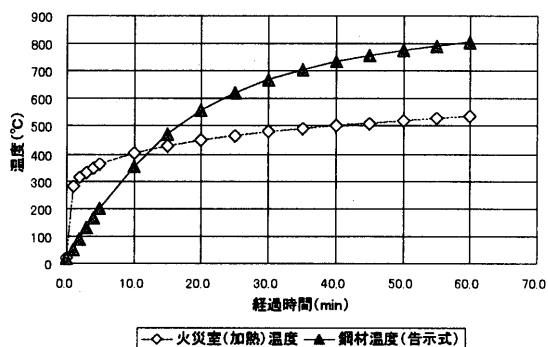


図1-1 火災室温度(加熱温度)と告示式による鋼材温度・例1
(角型鋼管柱 300・300・6, $\alpha=260$ の場合)

しかし、上記のような矛盾を潜在させる計算方法は、工学的な手法として健全ではないといえる。また、このような矛盾を式構成上の処理によって回避する処理は利用者である技術者にとっては告示の意味の理解を妨げる要因となる。全般に現在の告示の内容は難解という評価もあり²⁾、工学的な明快性を保つことは非常

*1 京都大学防災研究所 研究生

(前橋奥村組)

*2 神戸大学大学院自然科学研究科 大学院生・工修

*3 勸業建築総合試験所 工修

*4 神戸大学都市安全研究センター 助教授・学博

*5 京都大学防災研究所 教授・工博

Student, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Graduate Student, Graduate School of Science and Technology, Kobe University, M. Eng.

General Building Research Corporation, M. Eng.

Assoc. Prof., Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, Ph. D.

Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Dr. Eng.

に重要なことと考える。

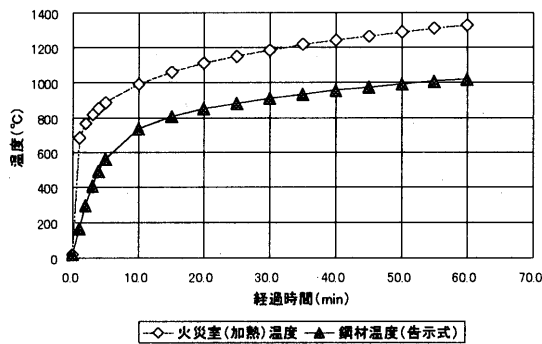


図1-2 火災室温度(加熱温度)と告示式による鋼材温度・例2
(角型鋼管柱 300・300・6、 $\alpha=660$ の場合)

本報では、前記の告示式に見られる矛盾を緩和できるような耐火設計用鋼材温度簡易予測式について検討した内容を報告する。

2. 研究の方法

2.1 告示における算定方法の概要

告示では、標準火災時における無耐火被覆鋼材の温度算定式は下記(1)～(3)で与えられている¹⁾。

$$T_s = T_0 + (T_f - T_0)\{1 - \exp(-ht)\} \quad (1)$$

$$h = \frac{h_t}{\rho_s c_s A_s} = K_0 \frac{H_s}{A_s} [\text{min}^{-1}] \quad (2)$$

$$K_0 = \frac{h_t}{\rho_s c_s} \quad (3)$$

ここに h : 部材温度上昇係数[1/min]、 t : 経過時間[min]

K_0 : 基本温度上昇速度[m/min]、 h_t : 総合熱伝達率[W/m²°C]

H_s : 部材加熱周長[m]、 A_s : 部材断面積[m²]

ρ_s : 鋼材密度[kg/m³]、 c_s : 鋼材比熱[J/kg°C]

T_f : 火災室温度、 T_s : 鋼材温度、 T_0 : 初期温度[°C]

式(1)は、火災室温度 T_f 、総合熱伝達率 h_t 一定を前提とした場合の理論式から求めたものであり、実際の火災での T_f が変化する場合に対応するため、標準火災に対応する K_0 を標準加熱実験データに基づき、下式(4)により同定している。

$$\log_e \left(1 - \frac{(T_s - T_0)}{(T_f - T_0)} \right) = \log_e \left(\frac{T_f - T_s}{T_f - T_0} \right) = -K_0 \frac{H_s}{A_s} t \quad (4)$$

火災室温度は火災温度上昇係数 α [°C/min^{1/4}] を用いて式(5)で表され、標準火災は $\alpha=460$ の場合に相当する。

$$T_f = \alpha^{1/4} + T_0 \quad (5)$$

一般火災時の鋼材温度は、上記(1)式中の時間 t に代えて、次の等価時間 t_{eq} [min] を用いる。

$$t_{eq} = \frac{t}{(460/\alpha)^{3/2}} \quad (6)$$

以上における各変数の名称・定義は、以下の当報告でも同様に使用する。

2.2 研究の方向と方法

告示式の前記矛盾は、標準火災時の算定方法においてではなく、一般火災時の算定において生じている。告示の方法をベースとすると、上記の矛盾の改良方向としては、

- ①標準火災時の鋼材温度を求める方法を、一般的な火災条件にも直接的に使える算定方法に拡張すること、
- ②一般的な火災条件での鋼材温度算定に用いる、標準火災との等価時間を求める方法を改良すること、

の二つの方向があると考えられる。標準火災時の鋼材温度上昇算定方法の根拠は文献(3)で報告されており、ここではこの成果をもとに、上記①の方向で一般的な火災条件にも大きな矛盾なく適用できるように拡張する方法を検討する。

また、検討の方法として鋼材の火災実験を多数行う方法も考えられるが、標準火災以外の条件での加熱は非常に困難である。一方、無耐火被覆鋼材を対象とする場合には、簡易な数値計算によっても多様な火災条件・鋼材条件に対して相当信頼の出来る結果が得られるので、数値計算方法の信頼性を既往の火災実験の結果と照合することによって確認したうえで、数値計算結果を用いて上記検討を行う。

3. 簡易数値計算利用の提案

無耐火被覆鋼材の鋼材温度を予測するための、簡易な差分数値計算方法とそれによる計算結果等を以下に示す。

3.1 簡易数値計算の方法

以下のステップで計算する。これは、従来にも示されている方法⁴⁾とほぼ同様の方法によるものであるが、後述の実効形態係数 F_{eff} を導入している点は新しい提案である。

$$(i) \quad T_n = T_{s1} = T_0$$

$$(ii) \quad t_j = t_{j-1} + \Delta t$$

$$(iii) \quad T_f = \alpha t_j^{1/4} + T_0$$

$$(iv) \quad hc_j = \text{一定値}$$

$$(v) \quad hr_j = F_{eff} \varepsilon_g \varepsilon_s \sigma \{ (T_{fj-1} + 273)^2 + (T_{sj-1} + 273)^2 \} * \{ (T_{fj-1} + 273) + (T_{sj-1} + 273) \}$$

$$(vi) \quad q_j = (hc_j + hr_j) * A_s * (T_{fj-1} - T_{sj-1}) * \Delta t$$

$$(vii) \quad T_{sj} = T_{sj-1} + q_j / (\rho c A_s)$$

$$(viii) \quad j=j+1 \text{ として (ii) に戻り、必要な時間反復する}$$

ここに、 Δt : 計算時間増分[min] ($\Delta t=0.5$ とした)

T_s : 鋼材温度[°C]、 T_f : 火災室温度[°C]

T_0 : 初期温度[°C] ($T_0=20$ とした)

α : 火災温度上昇係数[°C/min^{1/4}]

hc : 対流熱伝達率[kW/m²K] ($hc=0.010$ とした)

hr : 輻射熱伝達率[kW/m²K]

ε_g : 輻射率(ガス) [$\varepsilon_g=1.0$ とした]

ε_s : 輻射率(鋼材) [$\varepsilon_s=0.7$ とした]

σ : ステファンボルツマン定数[kW/m²K⁴] ($=5.67 \times 10^{-8}$)

F_{eff} : 実効形態係数[-] (下記3.2に示す)

q : 単位鋼材長さ当り熱流入速度[kW/m]

A_s : 鋼材加熱周長[m]、 A_s : 鋼材断面積[m²]

ρ : 鋼材密度[kg/m³]、 c : 鋼材比熱[kJ/kgK]

添字: j は時刻を表す

3.2 実効形態係数 F_{ef}

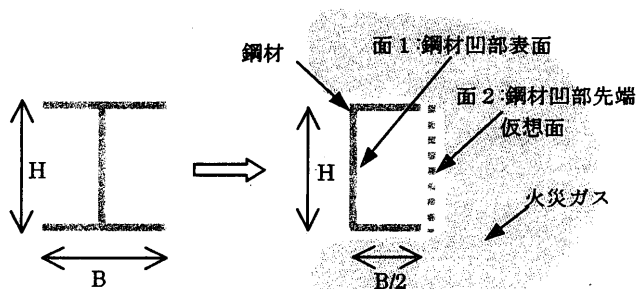
周辺高温ガスと鋼材との間の熱移動のうち、輻射熱伝達分は鋼材と周辺高温ガスとの間の形態係数が関係するので、鋼材形状による影響が生じる。たとえば、H型鋼柱（4面加熱）およびH型鋼梁（3面加熱）の場合は、鋼材のコの字部分内側は凹面であるため、その自己形態係수에相当する部分の考慮が必要となる（図2参照）。この点を考慮した周辺高温ガスと鋼材間の形態係数を、ここでは実効形態係数 F_{ef} といい、この形態係数を簡易数値計算の中で適用した。

実効形態係数 F_{ef} は以下の要領で求める。なお、角型鋼管、丸型鋼管柱（4面加熱）の場合は、鉄骨加熱面の全面が周辺高温ガスで覆われて自己形態係数に関わる部分もないことから、実効形態係数も $F_{ef}=1.0$ とした。

a. H型鋼柱（4面加熱）の場合

H型鋼柱（4面加熱）について、以下の条件を前提とする。

- (a) 鋼材は無限に長い
- (b) 鋼材の熱伝導率は十分高いため、温度は至るところ均一
- (c) 鋼材面でコの字型に囲まれる部分は輻射光路長が小さいためガス輻射率は無視
- (d) 火災ガスは黒体



（鋼材は対称だから、半分の部分について考える）

図2 H型鋼柱の実効形態係数算出のモデル

上記(a)の仮定により、輻射熱伝達は2次元で考えれば良い。図2のように面1を鋼材凹面の表面、面2をフランジ先端に仮想する面とすると、それぞれの面積（鋼材単位長さ当り）は

$$A_1 = H + 2 \times \left(\frac{B}{2}\right) = H + B \quad (7)$$

$$A_2 = H \quad (8)$$

形態係数の総和、相反関係から

$$F_{11} + F_{12} = 1, F_{21} + F_{22} = 1, A_1 F_{12} = A_2 F_{21} \quad (9)$$

であるが、面 A_2 は平面のため $F_{22}=0$ 、 $F_{21}=1$

従って

$$A_2 F_{21} = A_2 = H,$$

$$A_1 F_{11} = A_1(1 - F_{12}) = A_1 - A_1 F_{12} = A_1 - A_2 F_{21} = (H + B) - H = B \quad (11)$$

ここで鋼材面全体（半分）への正味の輻射熱伝達 q_r を考えると、

$$q_r = (\varepsilon \sigma T_G^4 A_2 F_{21} + \varepsilon \sigma T_s^4 A_1 F_{11} - \varepsilon \sigma T_s^4 A_1) + 2 \times \left(\varepsilon \sigma T_G^4 \times \frac{B}{2} - \varepsilon \sigma T_s^4 \times \frac{B}{2} \right) \quad (12)$$

ここに、 A_1 : 鋼材凹部内面1の鋼材単位長さ当り表面積[m²/m]

A_2 : 鋼材凹部上端面2の鋼材単位長さ当り表面積[m²/m]

F_{ij} : 面 i に対する面 j の形態係数[-]

q_r : 鋼材への単位長さ当り輻射熱流入速度[W/m]

T_s : 鋼材温度[K]、 T_g : 火災ガス温度[K]

なお、(12) 式右辺の最初の()内は凹部内側面、2番目の()内はフランジ外側面についての輻射熱伝達である。

これに面積と形態係数の関係式 (7~11) を用いると式 (12) は

$$q_r = \varepsilon \sigma (T_G^4 - T_s^4) H + \varepsilon \sigma (T_G^4 - T_s^4) B = \varepsilon \sigma (T_G^4 - T_s^4) (H + B) \quad (13)$$

一方、H型鋼の伝熱面積として加熱周長を用いると、加熱周長は $H + 2B$ であり、実効形態係数を F_{ef} とすると輻射熱伝達は

$$q_r = \varepsilon \sigma (T_G^4 - T_s^4) \times F_{ef} (H + 2B) \quad (14)$$

として計算されるが、式(13)と(14)は等しいので F_{ef} は以下となる。

$$F_{ef} = \frac{H + B}{H + 2B} \quad (15)$$

従って、H型鋼柱で $H=B$ の場合、 $F_{ef}=2/3=0.67$ となる。

b. H型鋼梁（3面加熱）の場合

上記と同様、鋼材面全体（半分）への正味の輻射熱伝達 q_r は

$$q_r = (\varepsilon \sigma T_G^4 A_2 F_{21} + \varepsilon \sigma T_s^4 A_1 F_{11} - \varepsilon \sigma T_s^4 A_1) + 1 \times \left(\varepsilon \sigma T_G^4 \times \frac{B}{2} - \varepsilon \sigma T_s^4 \times \frac{B}{2} \right) \quad (16)$$

$$= \varepsilon \sigma (T_G^4 - T_s^4) H + \varepsilon \sigma (T_G^4 - T_s^4) \times \frac{B}{2} = \varepsilon \sigma (T_G^4 - T_s^4) (H + 0.5B) \quad (17)$$

H型鋼梁（3面加熱）の加熱周長は $H + 1.5B$ であるから、 F_{ef} は以下となる。

$$F_{ef} = \frac{H + 0.5B}{H + 1.5B} \quad (18)$$

従って、H型鋼梁で $H=2B$ の場合、 $F_{ef}=5/7=0.71$ となる。

角型鋼柱、H型鋼柱およびH型鋼梁に対する実効形態係数 F_{ef} の相互関係 1:0.67:0.71 は、文献(3)における基本温度上昇速度 K_0 の相互関係 0.00116:0.00089:0.00067 = 1:0.77:0.58 とはおおよそ似た傾向ではあるが、細部では異なっている。この差の原因としては、基本温度上昇速度には対流熱伝達成分の影響も含むものであること、および輻射熱伝達成分に限ると実験におけるH型鋼梁では加熱炉内の高温ガス温度よりも相対的に低温になるスラブ部分からの輻射の影響も受けていることが考えられる。

3.3 実験結果と簡易数値計算結果の対照

簡易数値計算によって計算した値を、実験値とともに図3に示す。なお、実験値は告示の根拠となる実験内容を示した文献(3)より読み取った値である。この実験は、ISO834に従って45分間加熱されたものである（簡易数値計算は60分後までの計算結果を示しているが、45分以降の実験値との比較はできない）。また、実験結果・数値計算結果とも鋼材温度上昇値に同一の初期温度値を加えた鋼材温度値[°C]としてグラフに示している。

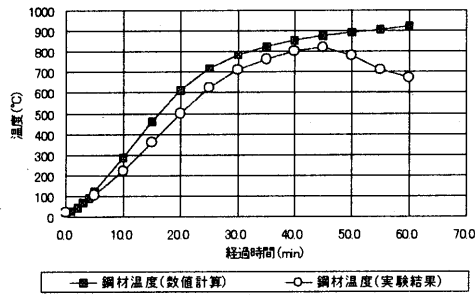


図 3-1 鋼材温度 (実験結果および数値計算結果)
(角型鋼管柱 400・400・19、 $\alpha=460$ の場合)

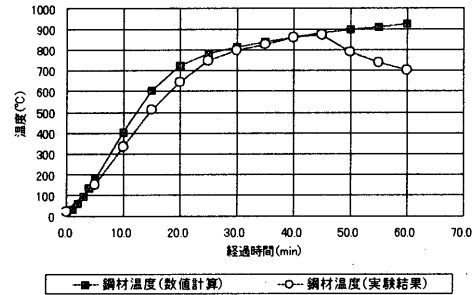


図 3-2 鋼材温度 (実験結果および数値計算結果)
(角型鋼管柱 300・300・12、 $\alpha=460$ の場合)

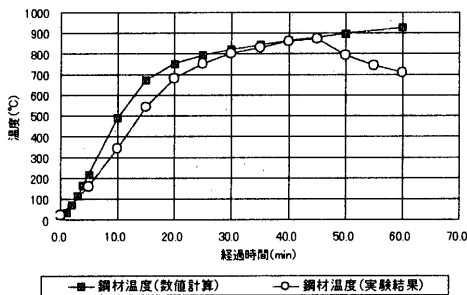


図 3-3 鋼材温度 (実験結果および数値計算結果)
(角型鋼管柱 300・300・9、 $\alpha=460$ の場合)

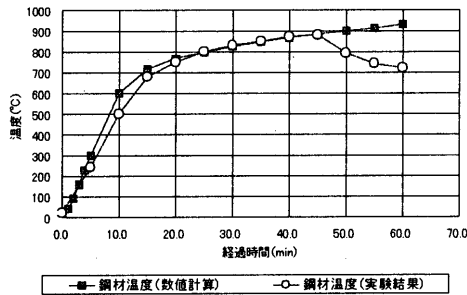


図 3-4 鋼材温度 (実験結果および数値計算結果)
(角型鋼管柱 300・300・6、 $\alpha=460$ の場合)

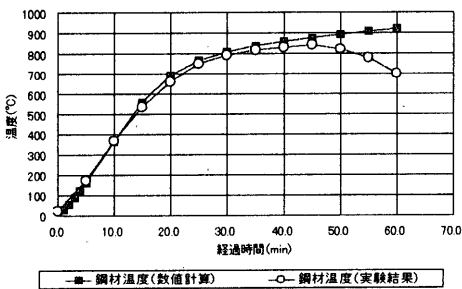


図 3-5 鋼材温度 (実験結果および数値計算結果)
(H型鋼柱 400・400・13・21、 $\alpha=460$ の場合)

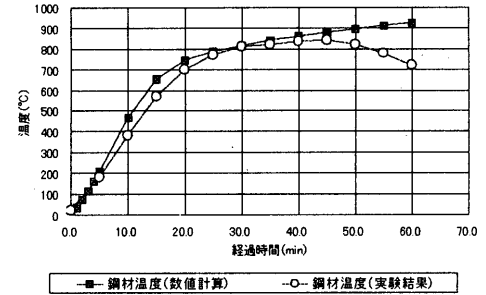


図 3-6 鋼材温度 (実験結果および数値計算結果)
(H型鋼柱 300・300・10・15、 $\alpha=460$ の場合)

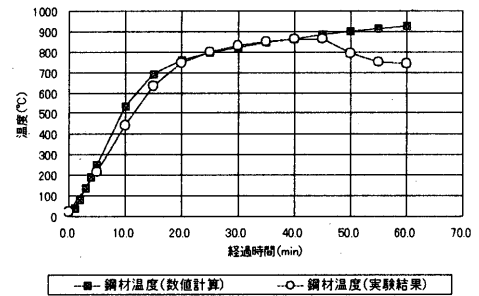


図 3-7 鋼材温度 (実験結果および数値計算結果)
(H型鋼柱 200・200・8・12、 $\alpha=460$ の場合)

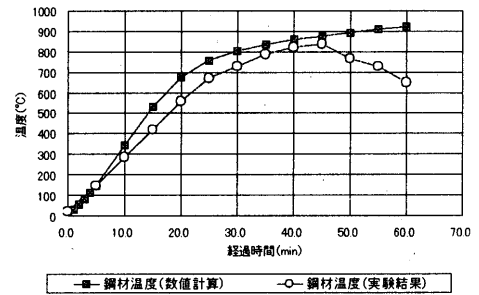


図 3-8 鋼材温度 (実験結果および数値計算結果)
(H型鋼梁 594・302・14・23、 $\alpha=460$ の場合)

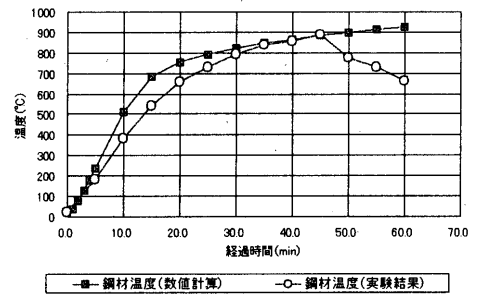


図 3-9 鋼材温度 (実験結果および数値計算結果)
(H型鋼梁 400・200・8・13、 $\alpha=460$ の場合)

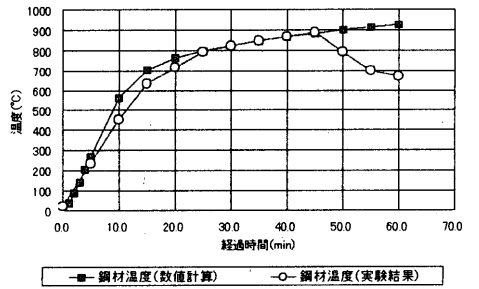


図 3-10 鋼材温度 (実験結果および数値計算結果)
(H型鋼梁 350・175・7・11、 $\alpha=460$ の場合)

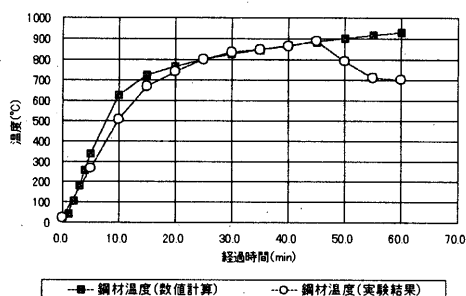


図3-1-1 鋼材温度(実験結果および数値計算結果)
(H型鋼梁 200・100・5.5・6、 $\alpha=460$ の場合)

3.4 簡易数値計算方法の効果・問題点・今後の課題

上記3.3の比較対照から次のことが言える。

標準火災条件下の同条件の簡易数値計算結果と実験データと比較すると、簡易数値計算の結果はおおむね実験データを再現できている。ただし、加熱開始10～30分頃の鋼材温度が急激に上昇をしている時期に、計算結果が若干高めになる傾向にある。なお、この傾向は耐火性の評価からは安全側といえる。

このように簡易数値計算の結果が実験データと若干異なる要因として、

①対流熱伝達率を火災温度に関わらず一律に指定している(0.010[kW/m²k])こと、

②加熱炉内の温度分布および鋼材内の温度分布は一様としていること、

も考えられるが、これらについての影響は大きくはないと考える。最も有効な誤差要因としては、

③実験においては、炉内ガス温度は規定通りの温度状況であっても、炉内壁温度の上昇は遅れる傾向があること、がある。このため、特に鋼材温度が急上昇する段階では、炉内ガスが黒体でない限り炉内壁から炉内ガスを透過して鋼材に伝達される輻射が小さくなることが想定され、炉内ガス温度に基づいた輻射熱伝達を評価している数値計算結果のほうが高めになることが考えられる。

この簡易数値計算手法は、わずか6ステップの計算を繰り返すものであり、現在広く普及しているEXCEL等の表計算ソフトで簡単に計算可能な方法である。多少の手間が必要とはいえ、ある程度精度の高い設計法や検証法として十分利用価値があると考えられる。

4. 拡張型鋼材温度簡易予測式の提案

4.1 基本温度上昇速度の同定

次に、鋼材温度を数値計算によるのではなく、一般火災にも適用できる一つの計算式で予測する方法について考える。ここでは文献(3)で示されている基本温度上昇速度 K_0 を一般加熱条件下にも適用できる変数とする方向で検討する。

鋼材温度算定の基本構造式(式(1)～(3))における基本温度上昇速度 K_0 (または、部材温度上昇係数 h)をある鋼材について一定値とすることは、加熱温度・熱伝達率等が変化する実際の加熱状況では本来無理ではあるが、式の簡略化のために一定値として用

いる上では、その同定方法を事前に確定しておく必要がある。

部材温度上昇係数 h を同定するため、式(4)を用いたグラフの一例を図4-1、2に示す。当グラフにおける勾配が $-h$ に相当する³⁾。

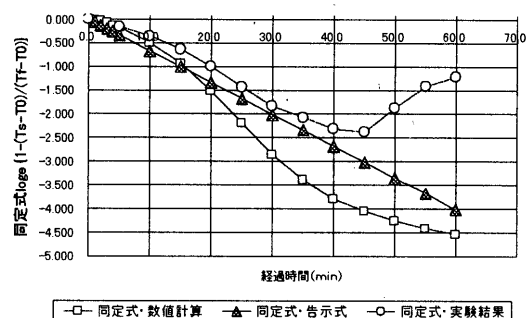


図4-1 部材温度上昇速度・基本温度上昇係数の同定グラフ
(角型鋼管柱 400・400・19、 $\alpha=460$ の場合)

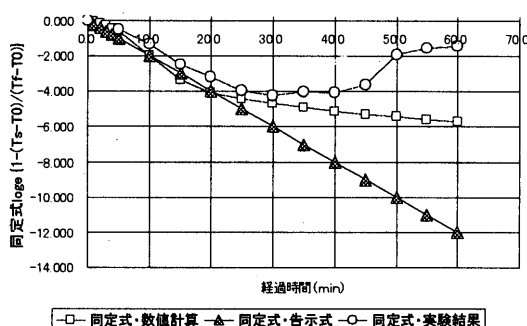


図4-2 部材温度上昇速度・基本温度上昇係数の同定グラフ
(角型鋼管柱 300・300・6、 $\alpha=460$ の場合)

K_0 を固定値として同定するための考え方として、次のようなものが考えられる。

- ①加熱時間が、ある一定期間の温度上昇速度を近似するように h を定める
- ②鋼材温度が、ある一定温度上昇する間の温度上昇速度を近似するように h を定める
- ③鋼材温度の火災温度に対する比が、ある一定割合上昇する間の温度上昇速度を近似するように h を定める

上記の中で①のように、ある一定期間の鋼材温度上昇速度を合わせるように h を定める考え方は、上記の例(図4-1、2)のように鋼材形状による温度上昇の様子は、ある固定した期間内で較べると大きく異なるため、多様な鋼材に一律に適用するのは適当ではない。一方、②または③は、各鋼材の温度等が同等な状態になるまでの時間を合わせる考え方であり、多様な鋼材の温度変化状態の比較にはより適当と考えられる。

ここでは、各々の鋼材種類および火災温度上昇係数毎のケースに対して、式(1)による鋼材温度が初期温度から550°Cになる間の温度上昇速度を数値計算結果とあわせる上記②の考え方で K_0 を同定することとする[注1]。550°Cは告示においてはボルト接合部などの性能維持の限界温度とされている温度であり、実務的にはこの温度までの鋼材温度予測の精度が問題となる。

4.2 同定した基本温度上昇速度等の概要

a. 基本温度上昇速度 K_0 および部材温度上昇係数 h の値

簡易数値計算の結果から、前記の考え方で同定した基本温度上昇速度 K_0 および部材温度上昇係数 h の値を、文献(3)における数値とともに以下に示す。

表1 基本温度上昇速度 K_0 と部材温度上昇係数 h の同定結果

型鋼種類：角型鋼・柱						
鋼材サイズ	K_0 の値			h の値		
	α =260	α =460	α =660	α =260	α =460	α =660
□400・400 ・19 Hs/As=57.7	0.00075	0.00122 (0.00129*) (0.00116**)	0.00169	0.044	0.070 (0.075*)	0.097
□300・300 ・12 Hs/As=89.2	0.00059	0.00114 (0.00120*) (0.00116**)	0.00157	0.053	0.102 (0.107*)	0.140
□300・300 ・9 Hs/As=117	0.00049	0.00110 (0.00106*) (0.00116**)	0.00149	0.057	0.128 (0.124*)	0.175
□300・300 ・6 Hs/As=172	0.00038	0.00105 (0.00112*) (0.00116**)	0.00141	0.066	0.181 (0.194*)	0.243

型鋼種類：H型鋼・柱						
鋼材サイズ	K_0 の値			h の値		
	α =260	α =460	α =660	α =260	α =460	α =660
H400・400 ・13・21 Hs/As=109	0.00046	0.00082 (0.00098*) (0.00089**)	0.00112	0.050	0.090 (0.106*)	0.122
H300・300 ・10・15 Hs/As=150	0.00038	0.00080 (0.00080*) (0.00089**)	0.00108	0.057	0.119 (0.120*)	0.162
H200・200 ・8・12 Hs/As=186	0.00032	0.00077 (0.00082*) (0.00089**)	0.00104	0.059	0.144 (0.152*)	0.193

型鋼種類：H型鋼・梁						
鋼材サイズ	K_0 の値			h の値		
	α =260	α =460	α =660	α =260	α =460	α =660
H594・302 ・14・23 Hs/As=95.2	0.00051	0.00088 (0.00078*) (0.00067**)	0.00121	0.048	0.084 (0.074*)	0.115
H400・200 ・8・13 Hs/As=166	0.00036	0.00082 (0.00061*) (0.00067**)	0.00110	0.059	0.136 (0.101*)	0.183
H350・175 ・7・11 Hs/As=197	0.00031	0.00080 (0.00065*) (0.00067**)	0.00107	0.062	0.158 (0.128*)	0.211
H200・100 ・5.5・6 Hs/As=258	0.00025	0.00079 (0.00065*) (0.00067**)	0.00103	0.066	0.203 (0.167*)	0.266

注：表1にて、*を付した数値は、文献(3)に示された実験による各部材の数値（同一寸法鋼材の場合は第一番目の鋼材）。**を付した数値は、同実験結果の鋼材種類毎平均値（いずれも標準火災のみ対象）。注記のない数値は、簡易数値計算結果から同定した数値である。

b. 同定した基本温度上昇速度 K_0 及び部材温度上昇係数 h の傾向

簡易数値計算の結果から同定した基本温度上昇速度 K_0 および部材温度上昇係数 h は、火災温度上昇係数 α 、断面形状係数 Hs/As に依存して変化することが分かる。これらの関係を以下に示す。

(a) 火災温度上昇係数 α と基本温度上昇速度 K_0 の関係(図5-1)

各部材の基本温度上昇速度 K_0 は、火災温度上昇係数 α にほぼ正比例的に増大している。なお、ここでの α の範囲は実際の火災で生じ得る範囲をほぼカバーしている。

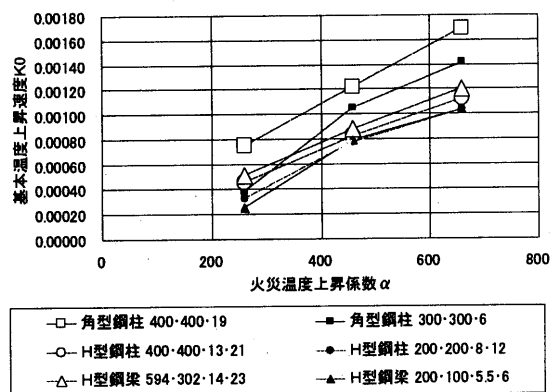


図5-1 各鋼材の火災温度上昇係数 α と基本温度上昇速度 K_0

(b) 断面形状係数 Hs/As と基本温度上昇速度 K_0 の関係(図5-2)

各部材の基本温度上昇速度 K_0 は、概ね各鋼材種類毎・火災温度上昇係数 α 毎に、断面形状係数 Hs/As の増加に対してやや減少する傾向がある。

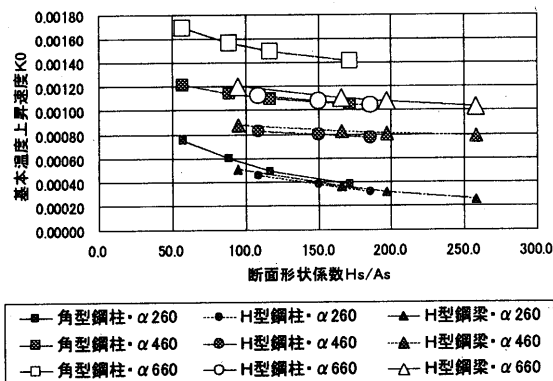


図5-2 各鋼材の断面形状係数 Hs/As と基本温度上昇速度 K_0

(c) 断面形状係数 Hs/As と部材温度上昇係数 h の関係(図5-3)

各部材の部材温度上昇係数 h は、断面形状係数 Hs/As にほぼ比例的に増大している (K_0 が Hs/As に対して一定値であるとすれば、 h は Hs/As に正比例する関係になる)。

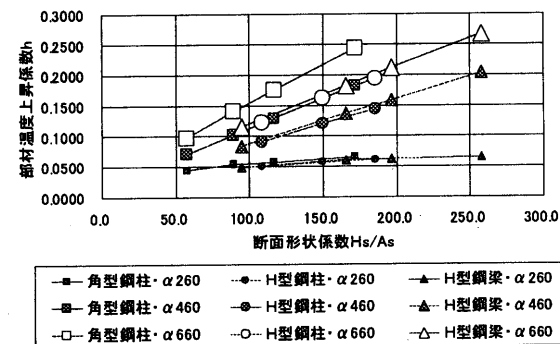


図5-3 各鋼材の断面形状係数 Hs/As と部材温度上昇係数 h

4.3 拡張型鋼材温度簡易予測式

前記の簡易数値計算による検討結果から、以下の無耐火被覆鋼材に対する拡張型鋼材温度簡易予測式を提案する。予測式の基本

構造は、文献(3)における標準火災時予測式の基本構造を踏襲する[注1]。

a. 標準火災時の基本温度上昇速度 K_0

図5-2に示されるように、基本温度上昇速度 K_0 は、部材断面形状係数 (H_s/A_s) の増加に応じて若干は減少する傾向である。この傾向は、 H_s/A_s が大きい(鋼材が薄い)と鋼材温度が一定温度になる時間が早くなり、その時の火災温度は相対的に低いことから総合熱伝達率 h_i および基本温度上昇速度 K_0 が相対的に低減することによる。しかし、この関係の影響は比較的小さい(断面形状係数による差が比較的小さい)ので、簡便のためこの関係は無視して K_0 は型鋼種類と火災温度上昇係数 α だけで定まる、と見なす。表1から各型鋼種類の標準加熱時 ($\alpha=460$) の K_0 は、各鋼材種別の各寸法の平均値である下記数値とする。

$$\text{角型鋼・柱: } K_0 (\alpha=460)=0.00113 \quad (19)$$

$$\text{H型鋼・柱: } K_0 (\alpha=460)=0.00080 \quad (20)$$

$$\text{H型鋼・梁: } K_0 (\alpha=460)=0.00082 \quad (21)$$

b. 一般火災時の拡張型基本温度上昇速度 K_0

一般火災時の火災室の温度上昇度合を示す火災温度上昇係数 α と、鋼部材の温度上昇度合を示す基本温度上昇速度 K_0 の間には、複雑な関係があると考えられる。しかし、現実的な一般火災時の火災温度上昇係数 α の範囲内であれば、基本温度上昇速度 K_0 は、火災温度上昇係数 α に正比例するとすると近似して十分と考える(図5-1参照)[注2]。

従って、各鋼材種類の任意の火災温度上昇係数 α における拡張型 $K_0(\alpha)$ は、以下のように近似する。

$$\text{角型鋼・柱: } K_0 (\alpha)=0.00113 * (\alpha/460) \quad (22)$$

$$\text{H型鋼・柱: } K_0 (\alpha)=0.00080 * (\alpha/460) \quad (23)$$

$$\text{H型鋼・梁: } K_0 (\alpha)=0.00082 * (\alpha/460) \quad (24)$$

c. 拡張型簡易温度予測式

文献(3)と基本構造が同形式の式(1)(2)に、上記拡張型基本温度上昇速度 $K_0(\alpha)$ 、拡張型部材温度上昇係数 $h(\alpha)$ を用いて、下式を任意の火災に適用する拡張型簡易温度予測式とする。

$$h(\alpha) = K_0(\alpha) \times \frac{H_s}{A_s} \quad (25)$$

$$T_s = T_0 + (T_f - T_0) \{1 - \exp(-h(\alpha)t)\} \quad (26)$$

この式は、任意の火災に対して、告示におけるように等価時間による補正を行う方法ではなく、直接的に鋼材温度を求める方法である。この式による鋼材温度予測結果例を、告示式および前記簡易数値計算結果と比較して、4.4に示す。

4.4 拡張型簡易予測式を用いた計算例

この提案式を用いた計算例を、告示式および簡易数値計算結果と比較して、角型鋼柱 300・300・6 を例として図6-1～3に示す。図6-1～3の結果から次のことが言える。

標準火災 ($\alpha=460$) の場合、提案式も告示式とはほぼ同様の結果になる。 α が小さい小火災の場合、告示式では火災温度より鋼材温度の方が高くなるという矛盾があったが、提案式ではその矛盾は生じない。 α が大きい大火災の場合、告示式での鋼材温度は低めに計算される傾向があったが、提案式ではその傾向も生じていない。また、提案式は20～550℃の実務的範囲での精度良い予測を目標としたが、

結果としてはそれを超える範囲でも精度よい予測を可能にしている。

a. 標準火災 ($\alpha=460$) の場合

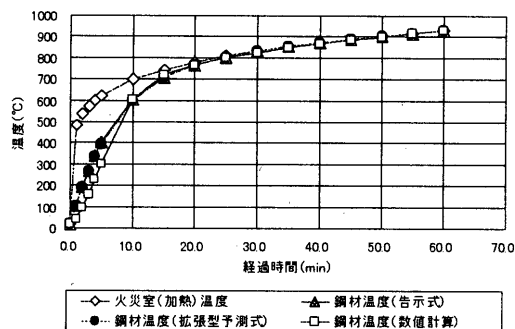


図6-1 火災室温度(加熱温度)と鋼材温度計算結果(角型鋼管柱 300・300・6、 $\alpha=460$ の場合)

b. 小火災 ($\alpha=260$) の場合

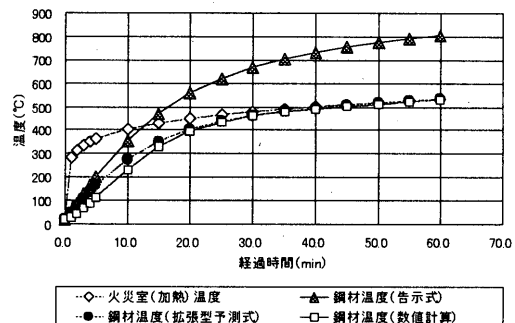


図6-2 火災室温度(加熱温度)と鋼材温度計算結果(角型鋼管柱 300・300・6、 $\alpha=260$ の場合)

c. 大火災 ($\alpha=660$) の場合

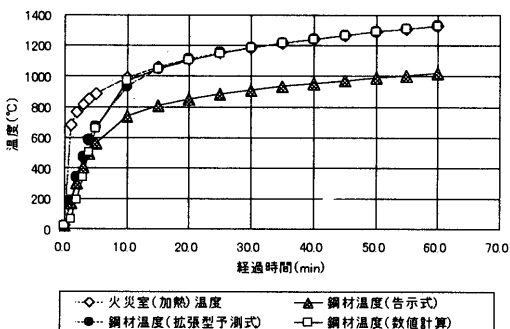


図6-3 火災室温度(加熱温度)と鋼材温度計算結果(角型鋼管柱 300・300・6、 $\alpha=660$ の場合)

4.5 拡張型簡易予測式の効果・問題点・今後の課題

標準火災を対象とする文献(3)の無被覆鋼材温度簡易予測式を、一般火災にも適用できる形に拡張した簡易予測式を提案し、ほぼ妥当と思われる鋼材温度が計算できることがわかった。

この簡易数値計算結果に基づいて簡易温度予測式を導出する方法が確立すれば、他の鋼材種別や加熱面数別の予測式にも容易に拡張することが可能であり、実務対応の幅が格段に広がる。

当拡張型簡易予測式をさらに改良するためには、各係数値の精度を向上することが必要である。同時に、これを実務的に使用で

きる予測式とするためには、適切な安全率を確保する対策が必要である。

5. 研究のまとめと今後の課題

無耐火被覆鋼材の一般火災時の鋼材温度を計算する手法として、比較的高度な設計法に利用可能な簡易数値計算手法を提案した。実験結果とほぼ良好な整合性を得られた。

同時に、もう少し簡易に使える手法として、一般火災にも対応可能な拡張型簡易予測式を提案した。ここでは、無耐火被覆鋼材を対象としてきたが、今後耐火被覆鋼材への拡張を検討する必要がある。

注記：

[注1]基本温度上昇速度 K_0 の同定方法補注

基本温度上昇速度 K_0 または部材温度上昇係数 h を実験結果から同定しようとする、実験の性質上加熱開始直後の不安定さや温度計測上の検知能等の問題もあり、典型的な温度上昇を始めるまでの時間を補正する考え方が導入されている。文献(3)では t_0 を時間補正項として、下記の予測式構造が示されている。

$$T_s = T_0 + (T_f - T_0)[1 - \exp\{-h(t - t_0)\}]$$

当報告では、数値計算結果を当係数値同定の対象としているので、この問題を考慮する必要はない。さらに K_0 または h の同定に当たっては、初期温度（加熱開始時点）から設定温度までの上昇過程を対象としているので、4.3 で示した拡張型簡易予測式には時間補正項は設けていない。この方法から得た簡易予測式によると、加熱前半は数値計算結果よりやや早めの温度上昇を示し、後半はやや遅めの温度上昇を示すことになるが、設定温度（ここでは $T_s = 550^\circ\text{C}$ とした）になる時間は一致するという近似となる。また、それ以降も数値計算結果とは若干異なることになるが、その差は非常に小さく実務的には無視できる程度である。

[注2]基本温度上昇速度 K_0 と火災温度上昇係数 α の関係補注

基本温度上昇速度 K_0 は総合熱伝達率 h_i の関数である。 h_i は加熱温度がある程度高いと輻射成分が卓越するため、

$$h_i = F_{\text{eff}} \varepsilon_{\text{eff}} \sigma (T_f^2 + T_s^2)(T_f + T_s)$$

と見なせば、火災室温度 T_f は本文(5)式で示されるように、 $\alpha t^{1/6}$ の関数となることから、結局 h_i および K_0 は α の3次多項式に近い関数になると考えられる。例えば、鋼材温度 T_s が 550°C となる時の h_i は

$$h_i \propto \alpha^3 t_{550}^{3/6} + (1.70E3)\alpha^2 t_{550}^{2/6} + (1.42E6)\alpha t_{550}^{1/6} + (8.52E8)$$

という近似関係になる。

一方、鋼材がある温度になる時間 t は、 α が大きいほど短くなる性質があり、結局前記の α の3次多項式となる関係はその次数が幾分低下することになって、 α の影響も幾分緩和された影響を及ぼす関係になる。

このように、 K_0 は α に関して一様増加の関係になるが、その関係は単純ではない。当報告では、建物火災における現実的な α の範囲は限定できることと、予測式を使う上での簡易性を考えると単純な1次式の有利性は得がたいことから、 K_0 は定数項も持

たない単純な α の1次式で近似することとした。

[参考文献]

- 1) 国土交通省他編集「耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説2001年版」井上書院、2001.03
- 2) 「建築知識」2002.9号、特集：改正「建築基準法x消防法」、(株)エクスナレッジ
- 3) 鈴木淳一他「火災時における無被覆鋼材の温度上昇簡易予測式」日本建築学会構造系論文集No.553、pp.143~148、2002.03
- 4) 例えば、日本建築学会「鋼構造耐火設計指針」1999、島村誠他「裸鉄骨の耐火試験、その2鋼材温度の予測手法」日本火災学会研究発表会]概要集、pp.358~359、200.5、等

(2003年2月10日原稿受理、2003年8月8日採用決定)