鋼材柱の耐火試験結果の外挿法

AN EXTRAPOLATION METHOD OF THE STEEL TEMPERATURE RISE
IN FIRE RESISTANCE TEST

石原慶大*¹, 原田和典*², 遊佐秀逸*³, 若松孝旺*⁴
Takahiro ISHIHARA, Kazunori HARADA, Syuitsu YUSA
and Takao WAKAMATSU

A theoretical method is proposed to extrapolate the steel temperature under standard fire tests for various cross sectional areas of steel and insulation thickness. The method utilizes the parameter estimation technique, where the parameter in the lumped heat transfer model is estimated to fit to the steel temperature rise in a standard fire resistance test. By using the estimated parameters, the steel temperature rise of similar assemblies can be calculated changing the steel cross sectional area and insulation thickness. An example is shown for a steel column (H-section, 300×300×13×15) insulated with calcium silicate board. The extrapolated results are compared with fire test data. It is shown that the extrapolated results give conservative results for most of the cases. Thus the method is useful for engineering calculations. However, the extrapolation overestimates the time to critical temperature if the method is applied to thinner columns under more severe mechanical conditions thus identifying the limitations of this method.

Keywords : fire resistance test, extrapolation method, parameter estimation, steel cross section, insulation thickness

耐火試験, 外挿法, パラメータ推定, 鉄骨断面, 被覆厚さ

1. はじめに

鋼材は火災による加熱を受けると部材の温度が上昇し、その強度は低下する。^{文1, 2, 3)}この温度上昇によって部材の崩壊に影響を及ぼす限界温度が定まる。^{注1)}鋼構造建築物では耐火被覆を施すことにより、火災時に鋼材の温度が著しく上昇しないように計画されている。現在、部材の耐火性能は、標準断面(H-300×300×10×15)の鋼材に耐火被覆を施したものを試験体とし加熱を行い、温度上昇を測定することによって判定を行っている。そして、建築設計においては、要求性能を満たす部材を選定することにより設計が完結する。しかし、本質的には鋼材の熱容量と被覆材の熱抵抗により温度上昇の速さは変化する。実際に使われる柱断面は標準断面よりも太く熱容量が大きいことが多く、鋼材の熱容量から考えれば、同じ厚さの被覆を施せば温度上昇は標準断面よりも遅くなる。逆に言えば、温度上昇の速さが同じになるように耐火被覆の厚さを減らすことが理論的に可能である。この点を考慮し耐火被覆の必要厚さを求めることができれば合理的である。直接的には、種々の鋼材断面と被覆厚さの組合せにつき耐火試験を行えばこのような設計が可能となる。しかし、多数回の耐火試験を行うのは実用的ではない。標準断面における温度上昇を外挿し、任意の鋼材断面と被覆厚さでの温度上昇を予測する方法を考える

のが現実的な手段である。

茂木は、多数回行った耐火試験結果をもとに耐火被覆した鋼材の熱収支の構造に基づいて、耐火性能を被覆等の仕様と関係付ける統計モデルを構成し、試験結果に適用して、耐火性能予測法としての有効性を検討した。^{文4)}また、Gandhi は 1 次元解析により耐火試験結果を崩壊温度の到達時間と鋼材断面積、加熱周長、耐火被覆材厚さのパラメータ関係により整理した。^{文5)}

本研究は、パラメータ推定法を用いて、標準断面にケイカル板で耐火被覆を施した柱の温度上昇の測定結果を外挿し、任意の鋼材断面に任意の厚さの耐火被覆を施した時の温度上昇を求める方法を提案し、外挿が可能な範囲を実験的に示した。

2. パラメータ推定法を用いた外挿方法

鋼材柱の温度上昇を一次元差分法^{文6)}や有限要素法等を用いた数値解析により求めることが可能である。このような解析プロセスでは、被覆材および鋼材の比熱、密度、熱伝導率等既知の物性値を使って、温度上昇が計算により求められる。今、鋼材柱の温度上昇の測定結果があるが、この測定結果を鋼材の熱容量に関して補正するため、通常の解析プロセスを逆方向に行って、測定結果から物性値を求める。次に、求められた物性値を使って通常の

*¹ 東京理科大学理工学研究科建築学専攻 工修

*² 京都大学 助教授・工博

*³ 建設省建築研究所 工博

*⁴ 東京理科大学 教授・工博

Graduate Student, Science University of Tokyo, M. Eng.

Assoc. Prof., Kyoto University, Dr. Eng.

Building Research Institute, MOC, Dr. Eng.

Prof., Science University of Tokyo, Dr. Eng.

方法で解析を行えば、任意の鋼材断面と被覆厚さの組合せに対する温度上昇を求めることが可能となる。以下に、その方法を具体的に示す。

2.1 熱伝達モデル

鋼材柱内の熱伝達を表すモデルは任意のものが利用可能であるが、ここでは集中定数法を用いる。図1に示す耐火被覆された鉄骨柱を考える。全ての熱容量が1質点に集中していると近似すれば、柱1m当たりの熱収支は、

$$\rho c A \frac{dT_s}{dt} = k(T_f - T_s) \quad (1)$$

となる。ここで、 ρ :密度[kg/m³]、 c :比熱[J/kgK]、 A :断面積[m²]、 T_s :鋼材温度[K]、 T_f :加熱温度[K]、 k :炉内ガスから鋼材柱までの熱コンダクタンス[W/m²K]である。

図1 対象とする部材(四面加熱を受ける鉄骨柱)

熱容量 $\rho c A$ については、鋼材と被覆材の和とする。すなわち、

$$\rho c A = (\rho_i c_i A_i + \rho_s c_s A_s) \quad (2)$$

ここで、添字 i :被覆材、 s :鋼材を表す。

一般的な耐火被覆材には含水があり、それが 100℃付近の温度で蒸発潜熱を奪うことにより温度上昇を遅延させる。潜熱の与え方としては、川越と若松が行ったように 100℃の一定温度での蒸発を仮定する方法⁹⁾や、水分移動を含めた場の方程式を連立して解析する方法等があるが、煩雑にならないことを考え、80℃から120℃の間で、三角形のパターン(図2)で含水の蒸発が起こると近似した。

$$\rho c A = \rho_i c_i A_i + \rho_s c_s A_s + c_w A_i w(T) - L_w \rho_0 A_i \frac{dw(T)}{dT} \quad (3)$$

$$-\frac{dw(T)}{dT} = w_0 \begin{cases} 0 & (T < T_e - \delta) \\ \frac{T - (T_e - \delta)}{\delta^2} & (T_e - \delta < T < T_e) \\ \frac{(T_e + \delta) - T}{\delta^2} & (T_e < T < T_e + \delta) \\ 0 & (T_e + \delta < T) \end{cases} \quad (4)$$

ここに、式(3)右辺第3項は含水の有する顕熱、第4項は蒸発潜熱である。 c_w :水の比熱(=4190)[J/kgK]、 $w(T)$:温度 T での含水率、 L_w :水の蒸発潜熱(=2260)[kJ/kgK]、 $-dw/dT$:温度上昇 1℃当たりの蒸発量[kg/kgK]、 w_0 :耐火被覆材の初期含水率、 T_e :蒸発中心温度(=100)[℃]、 δ :蒸発温度幅[K]である。

図2 含水の蒸発パターン

熱コンダクタンスは

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_{f,io} l_{io}} + \frac{1}{\frac{\lambda_i}{d_i/2} \frac{3l_{io} + l_{ii}}{4}} + \frac{1}{\frac{\lambda_i}{d_i/2} \frac{l_{io} + 3l_{ii}}{4}} + \frac{1}{l_{ii} h_{ii,s}}} \quad (5)$$

で与える。(記号は図3を参照)

ここで、総合熱伝達率は、式(6)、(7)のように表す。

$$h_{f,io} = h_{c,f} + \varepsilon_f \sigma (T_f^2 + T_{io}^2) (T_f + T_{io}) \quad (6)$$

$$h_{ii,s} = h_{c,s} + \varepsilon_s \sigma (T_{ii}^2 + T_s^2) (T_{ii} + T_s) \quad (7)$$

図3 対象とする部材(一部詳細)

式(1)を時間間隔 Δt の後退差分で表すと、

$$T_s^j = \frac{(\rho c A / \Delta t) T_s^{j-1} + k T_f^j}{(\rho c A / \Delta t) + k} \equiv f(T^{j-1}; \mathbf{p}; \mathbf{g}) \quad (8)$$

T^{j-1} 、 $\mathbf{p}$ 、 $\mathbf{g}$ はそれぞれ、以下のようなパラメータを表す。添字 j は、時間間隔 j 番目、時間($t = j \Delta t$)を表す。

$$\mathbf{T}^{j-1} = \{T_s^{j-1}, T_f^j\} \quad (9)$$

$$\mathbf{p} = \{\rho c A / \Delta t, h_{c,f}, \varepsilon_f, \lambda_i, h_{c,s}, \varepsilon_s\} \quad (10)$$

$$\mathbf{g} = \{l_{ii}, d_i, l_{io}\} \quad (11)$$

式(8)は「正しい」温度履歴 $\{T_s^1, T_s^2, T_s^3, \dots\}$ については

正確に成り立つが、測定データ $\{\overline{T_s^1}, \overline{T_s^2}, \overline{T_s^3}, \dots\}$ を代入すると実験誤差等により正確には満たされない。 j 番目のデータを代入した時の残差 e^j は、

$$e^j = \overline{T_s^j} - f(\overline{T_s^{j-1}}; \mathbf{p}; \mathbf{g}) \quad (12)$$

であるから、測定区間全体での残差二乗和は、

$$S = \sum_j (e^j)^2 = \sum_j \left(\overline{T_s^j} - f(\overline{T_s^{j-1}}; \mathbf{p}; \mathbf{g}) \right)^2 \quad (13)$$

と表現できる。ゆえに、残差二乗和を最小とするパラメータ ($\mathbf{p}_{opt}$) を最小二乗法により決定し、これから被覆材の熱伝導率を求めることができる。

$$\frac{\Delta S}{\Delta \mathbf{p}} = \frac{\Delta}{\Delta \mathbf{p}} \left\{ \sum_j (e^j)^2 \right\} = 0 \quad (14)$$

式(8)の全てのパラメータを未知として扱うことも可能であるが、簡単のため以下では熱伝導率 λ だけを未知とする。

最適なパラメータの値を用いることにより、試験データに近い ($\mathbf{g} = \mathbf{g}_{similar}$) 鋼材の温度履歴を、計算により求めることが可能となる。

$$T_s^j = f(\overline{T_s^{j-1}}; \mathbf{p}_{opt}; \mathbf{g}_{similar}) \quad (15)$$

3. 試験データの外挿例

3.1 試験条件

所与の火災条件下で鋼材柱の耐火設計を考える際には、部材の温度上昇に影響する要因として、(1)鉄骨の熱容量、(2)耐火被覆材の特性(熱抵抗、熱容量、含水率)がある。力学的条件としては、(3)所与の荷重条件下での崩壊温度が関連する。差し当たって、荷重条件が決まれば、崩壊温度は鋼材の特性として決まると考えれば、鉄骨の熱容量に応じて必要な耐火被覆を施すことを考えればよい。

このため、ケイカル板被覆した柱の荷重加熱試験と熱容量試験が行われた。図4(a)に荷重加熱試験(series L)、(b)に熱容量試験(非荷重加熱試験)(series N)の試験体、表1に荷重加熱試験の、表2に熱容量試験の試験条件を示す。これらの実験は建設省総合プロジェクト「防・耐火性能評価技術の開発(H5~9年度)」の一部として行われたものである。

図4 (a) 荷重加熱試験 (series L)

(b) 熱容量試験 (series N)

表1 荷重加熱試験条件

記号	鋼材断面	被覆厚 [mm]	軸力比	崩壊時間 [min]
L100/40-1.55	H-100×100×6×8	40	1.55	265.5
L200/40-1.20	H-200×200×8×12	40	1.2	210
L250/40-0.59	H-250×250×9×14	40	0.59	249
L300/40-0.62	H-300×300×10×15	40	0.62	274
L300/40-0.93			0.93	234
L300/40-1.14			1.14	207.5
L300/40-1.20			1.2	182
L300/40-1.23			1.23	180.5
L300/40-1.37			1.37	126
L300/25-0.29	H-400×400×13×21	25	0.29	213.5
L400/40-0.62		40	0.62	337

表2 熱容量試験条件

被覆厚 [mm]	20	25	40	50
断面形状				
H-100×100×6×8	N100/20	N100/25	N100/40	N100/50
H-200×200×8×12	N200/20	N200/25	N200/40	N200/50
H-300×300×10×15	N300/20	N300/25	N300/40	-
H-400×400×13×21	N400/20	N400/25	-	-

3.2 試験結果

試験結果を被覆厚さごとに分類して図5~9に示す。いずれのグラフでも、同じ被覆厚さであっても鋼材の断面が大きいものほど温度上昇が遅くなる傾向がある。また、各図においては、同一被覆厚で同一鋼材断面であれば荷重加熱試験の方が熱容量試験結果よりも温度上昇は少し早い。顕著な例は図7に示されている。ここでは、すべての条件が同一であるが、荷重条件(軸力比)が大きいものほど温度上昇が高い。この理由としては、荷重加熱試験では、鋼材の変形に伴い、被覆材の変形や亀裂が生ずることが考えられる。また、荷重加熱試験と熱容量試験における被覆方法の差異も影響を及ぼしていると考えられる。

図5 厚さ20mm H鋼柱の温度上昇

図6 厚さ 25mm H 鋼柱の温度上昇

図7 厚さ 40mm H 鋼柱の温度上昇

図8 厚さ 50mm H 鋼柱の温度上昇

図9 厚さ 40mm H 鋼柱(標準断面)の温度上昇

図10 パラメータ推定結果

図11 外挿結果

3.3 外挿結果

前節までの結果から、力学条件が厳しい程、温度上昇が早いことが分かった。そこで、一連の実験の中で最も厳しい条件のデータを基にパラメータを推定して外挿すれば安全側の解が得られることが予想される。

標準条件(L300/40-1.23)の温度上昇データに最小二乗法を適用して、温度上昇曲線を当てはめた結果を図10に示す。熱伝導率を $\lambda=0.149$ とした場合が最も試験結果と近くなったが、この値はケイカル板の熱伝導率の測定値(0.12程度)よりは少し大きめであるが、ここで求めた値は、亀裂や板の継ぎ目の隙間等の影響も含んだ値であるから、妥当と言える。

図10で求めた熱伝導率 $\lambda=0.149$ [W/mK]を式(8)に用いて、L400/40-0.62の試験の温度上昇を予測した。結果を図11に示す。両者は概ね一致しており、妥当な精度で外挿が可能であることを

確認した。

図5～8のデータから、鋼材温度が350Kから500K上昇するまでの時間を読み取ってプロットした結果ならびに、図10で求めた熱伝導率を用いて、他の試験条件での鋼材温度を計算したものから同様に、350Kから500K上昇するまでの時間を読み取ってプロットした結果を図12～15に示す。各図の縦軸は限界温度上昇(350K、400K、450K、500K)までの時間、横軸は加熱周長あたりの鋼材厚さ A_s/l_o [m] (A_s : 鋼材断面積[m²]、 l_o : 耐火被覆材の内側周長[m])(図4参照)である。これを設計に使うためには、データを補完しておくが必要となるが、(1)载荷と非载荷(熱容量試験)で限界温度上昇までの時間が大きく異なること、(2)データがない部分への補外が難しいこと、の2つに注意すべきである。

軸力比については、外挿する対象が全て1以下であれば、結果は全て安全側となる。さらに標準断面よりも太い断面(A_s/l_o 大)に

図 12 限界温度(350K)上昇までの時間

図 13 限界温度(400K)上昇までの時間

図 14 限界温度(450K)上昇までの時間

図 15 限界温度(500K)上昇までの時間

図 16 標準断面鋼材柱の限界温度(350K)における試験データと外挿値の比較

図 17 標準断面鋼材柱の限界温度(500K)における試験データと外挿値の比較

外挿すれば概ね安全側の結果が得られる。反対に、細い断面(A_s/I_{t0} 小)へ外挿すれば試験データよりも到達時間を長く評価してしまい危険側の評価となる。この原因は前節での考察と同様に、細いもの程被覆材の亀裂、脱落が大きいことが理由と考えられる。

なお、同図中での外挿値は含水率の影響も補正してある。試験体の含水率は必ずしも平衡状態ではないが、補正により 1%に外挿した値をとれば、異なる実験間のデータ比較も可能となる。ちなみに、350K 上昇までの時間には、含水率は多少の影響を及ぼすが、500K 上昇時間になるとその差はほとんどなくなる。

外挿の誤差を調べるため、図 16、17 にそれぞれ、限界温度上昇 350K、500K における、試験データと外挿値を比較したものを示す。限界温度 350K において、試験体 L100/40-1.55、L200/40-1.20、L250/40-0.59、N100/25、N100/40 では、標準断面より鋼材断面が

小さい、もしくは、軸力比が上回っていることより、危険側の評価がされている。また、限界温度 500K において、試験体 L100/40-1.55、L250/40-0.59、N100/25、N100/40 では、同様の評価がされている。

これより、以下のことがいえる。

- (1) 載荷条件により温度上昇は影響を受け、軸力比が大きい程温度上昇が早くなる。ゆえに、ある軸力比を与えた試験結果を外挿する際は、試験の軸力比よりも小さいことが必要条件となる。
- (2) 鋼材の断面(熱容量)に対する外挿は、試験を行った断面よりも太いものに対しては安全側の誤差を伴い可能である。細い断面では、被覆材の亀裂や剥離が生ずるため危険側に評価されてしまう。
- (3) 被覆材の厚さに対する補正は、脱落や亀裂の性状が厚さにより大きく変わらないことが確認されていれば可能である。

4. まとめ

本研究で得られた結論をまとめると以下の通りである。

1) ケイカル板被覆された鋼材柱の温度上昇について、鋼材の断面積に応じた熱容量補正を、パラメータ推定法を利用した外挿により行うことが可能である。

2) 適用範囲は、試験を行った条件よりも力学的条件(軸力比)が緩く、かつ断面が太い場合への外挿に限られる。

この方法を利用すれば、数例もしくは 1 例の耐火試験結果(鋼材温度上昇)から、種々の鋼材断面と被覆材厚さの組合せでの温度上昇を求めることができるので、実用的設計図表を容易に作成することができる。

注 1) 部材の崩壊要因には、温度だけでなく、幅厚比、長さ、端部拘束度合なども影響する。

使用記号

A	断面積 [m^2]
c	比熱 [J/kgK]
c_w	水の比熱 ($=4190$) [J/kgK]
$h_{c,f}, h_{c,s}$	対流熱伝達率 ($h_{c,f}=23, h_{c,s}=12$) [$\text{W/m}^2\text{K}$]
$h_{f,io}$	炉内ガス-耐火被覆材表面間の総合熱伝達率 [$\text{W/m}^2\text{K}$]
$h_{i,i,s}$	耐火被覆材内側表面-鋼材表面間の総合熱伝達率 [$\text{W/m}^2\text{K}$]
k	炉内ガス-鋼材柱間の熱コンダクタンス [$\text{W/m}^2\text{K}$]
l_{io}	耐火被覆材表面全周長 [m]
l_{ii}	耐火被覆材内側表面全周長 [m]
L_w	水の蒸発潜熱 ($=2260$) [kJ/kgK]
T_e	蒸発中心温度 ($=100$) [$^{\circ}\text{C}$]
T_f	炉内温度 [K]
T_{io}	耐火被覆材表面-中心間代表温度 [K]
T_{ii}	耐火被覆材中心-内側表面間代表温度 [K]
T_s	鋼材温度 [K]
w_0	耐火被覆材の初期含水率 [kg/kg]
$w(T)$	温度 T での含水率 [kg/kg]
$-dw/dT$	温度上昇 1°C 当たりの蒸発量 [$\text{kg/kg}\cdot\text{K}$]
δ	蒸発温度幅 ($=20$) [K]
ε_f	炉内ガス-耐火被覆材表面間の輻射率 ($=0.9$) [-]
ε_s	耐火被覆材内側表面-鋼材表面間の輻射率 ($=0.7$) [-]
ρ	密度 [kg/m^3]
σ	Stefan-Boltzmann 定数 [$\text{kW/m}^2\text{K}^4$]
Δt	時間間隔 [s]

参考文献

- 1) 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報告集, 第 477 号, pp.147-156, 1995.11
- 2) 古村 福次郎, 安部 武雄, 「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
- 3) 作本 好文, 大橋 守, 「建築構造用耐火鋼材の高温強度特性」, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 427 号, pp.107-115, 1991.9
- 4) 茂木 武, 「耐火試験結果に基づく耐火性能予測法」, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 427 号, pp.99-106, 1991.9
- 5) Pravin D. Gandhi, "Correlations of Steel Column Fire Test Data", Fire Technology, pp.20-32, 1988.2
- 6) 「建築物の総合防火設計法」第 4 巻, (財)日本建築センター, pp.52-61, 1988.12

(2000年6月10日原稿受理, 2000年10月20日採用決定)