

耐火塗料の耐火性能評価 (その2) 鋼材断面寸法に応じた膜厚算定のための計算方法

耐火塗料	耐火性能	乾燥膜厚
鋼構造	熱容量	断面形状係数

正会員	○近藤 英之* ¹	同	遊佐 秀逸* ²
同	関 正明* ¹	同	藤原 武士* ³
同	岡 義則* ⁴	同	植原 秀郎* ⁵
同	谷辺 徹* ⁶		

1. はじめに

耐火塗料の耐火認定において、構造部材の熱容量を考慮した必要膜厚の算定方法が欧州を中心に導入されている¹⁾²⁾。また、国際標準化機構 (ISO) でも近年その導入に向けた検討が活発化されている。この算定方法は、実験データを基に、構造部材の熱容量を示す因子である断面形状係数 {Hp/A (Hp: 加熱周長, A: 部材断面積)} と乾燥膜厚から耐火時間を求める計算式を作成し、この式から必要膜厚を求めるものである。日本でもこれらを参考に算定方法が提案および適用されている³⁾⁴⁾。

今回筆者らは、これらの算定方法をより理解しやすく計算できるように再検討したので報告する。

2. 耐火被覆材の厚さを決める計算式

必要膜厚の算定する計算方法は、以下のような式が提案されている。

これらの式は回帰分析を用いて、構造部材の断面形状係数 (Hp/A)、規定温度到達時間 (FR)、耐火塗料乾燥膜厚 (DFT) の関係式を熱容量試験の実験データより作成する手法である。

① CEN の計算式

$$FR = k_0 + k_1 \cdot DFT + k_2 \cdot DFT / (Hp/A) + k_3 \cdot q + k_4 \cdot DFT \cdot q + k_5 \cdot DFT \cdot q / (Hp/A) + k_6 \cdot q / (Hp/A) + k_7 / (Hp/A) \quad (\text{式 1})$$

② YellowBook の計算式

$$FR = k_0 + k_1 \cdot 1 / (Hp/A) \cdot DFT + k_2 \cdot DFT \quad (\text{式 2})$$

③ 建築研究所の計算式 (以下建研式と記す)

$$FR = k_0 \cdot (1 / (Hp/A) + k_1) \cdot (DFT + k_2) + k_3 \quad (\text{式 3})$$

FR: 規定温度到達時間(min)

Hp/A: 断面形状係数(m⁻¹)

DFT: 耐火塗料乾燥膜厚(mm)

k_{0~7}: 実験結果から求まる係数

q: 平均温度上昇量(K)

3. 各式の考え方

建研式の構成は、耐火塗料乾燥膜厚が一定ならば、断面形状係数の逆数に比例し、断面形状係数が一定ならば、耐火塗料乾燥膜厚に比例するという考え方を基にしている。

CENの計算式は、建研式に温度上昇の項(q+b₃)を追加した式 4 を展開した式 5 から、建研式と同様であることがわかる。

$$FR = b_0 \cdot (1 / (Hp/A) + b_1) \cdot (DFT + b_2) \cdot (q + b_3) + b_4 \quad (\text{式 4})$$

$$FR = b_0 b_1 b_2 b_3 + b_4 + b_0 b_1 b_3 \cdot DFT + b_0 b_3 \cdot DFT / (Hp/A) + b_0 b_1 b_2 \cdot q + b_0 b_1 \cdot DFT \cdot q + b_0 \cdot DFT \cdot q / (Hp/A) + b_0 b_2 \cdot q / (Hp/A) + b_0 b_2 b_3 / (Hp/A) \quad (\text{式 5})$$

k₀: b₀b₁b₂b₃+b₄

k₁: b₀b₁b₃

k₂: b₀b₃

k₃: b₀b₁b₂

k₄: b₀b₁

k₅: b₀

k₆: b₀b₂

k₇: b₀b₂b₃

一方、建研式のk₂を0とした場合に、式3は式6で表わされ、展開すると式7になる。これはYellowBookの計算式(式2)と同じ計算式になる。

$$FR = c_0 \cdot (1 / (Hp/A) + c_1) \cdot DFT + c_2 \quad (\text{式 6})$$

$$FR = c_0 \cdot DFT / (Hp/A) + c_0 c_1 \cdot DFT + c_2 \quad (\text{式 7})$$

k₀: c₂

k₁: c₀

k₂: c₀c₁

これより、YellowBookの計算式の考え方は、DFTに補正係数のk₂を行わない(k₂=0)、という考え方であることがわかる。

4. 建研式の適用

今回は、今までの建研式を変形し、重回帰分析のしやすい式を提案する。

式3を用いて実験結果を解析する場合、式の形が重回帰分析を行いやすい、Y = a₁X₁ + a₂X₂ + a₃X₃・・・の形ではないため、係数の決定は試行錯誤法による方式で行わなければならない。

そこで、式3を展開すると

$$FR = k_0 \cdot DFT / (Hp/A) + k_0 \cdot k_2 \cdot 1 / (Hp/A) + k_0 \cdot k_1 \cdot DFT + k_0 \cdot k_1 \cdot k_2 + k_3 \quad (\text{式 8})$$

となり、係数を置き換えると式9と書く事が出来る。

$$FR = \alpha_0 \cdot DFT / (Hp/A) + \alpha_1 \cdot 1 / (Hp/A) + \alpha_2 \cdot DFT + \alpha_3 \quad (\text{式 9})$$

α₀: k₀

α₁: k₀·k₂

α₂: k₀·k₁

α₃: k₀·k₁·k₂+k₃

k₀~k₃の係数4つが、α₀~α₃の係数4つに変わったが、この関係は、独立のk₀~k₃に対してα₀~α₃の値が従属的に決まり、その逆も成り立つ関係である。そのため、式3と式9から導き出された係数は、各々変換可能であり、大きく異なることは無い。よって今回は重回帰分析が容易な、式9を提案する。

他の計算式との比較を行う。

CENの計算式は、式4ではb₀~b₄の係数5つであったが、

式 1 では $k_0 \sim k_7$ の係数 8 つに変わった。この関係は、独立の $b_0 \sim b_4$ に対して $k_0 \sim k_7$ の値が従属的に決まるが、この逆は成り立たない。そのため、式 1 の $k_0 \sim k_7$ の係数を独立的に扱った場合は、式 1 から導き出された係数と、式 4 から導き出された係数は、大きく異なる場合がある。

YellowBook の計算式は、 $c_0 \sim c_2$ の係数 3 つが、 $k_0 \sim k_2$ の係数 3 つに変わった。この関係は、独立の $c_0 \sim c_2$ に対して $k_0 \sim k_2$ の値が従属的に決まり、その逆も成り立つ関係である。そのため、式 6 と式 2 から導き出された係数は、各々変換可能であり、大きく異なることは無い。

表 1 を鋼材サイズ別（断面形状係数別）に耐火塗料乾燥膜厚と、規定温度到達時間の関係を、YellowBook の計算式 2 を使った場合の結果を図 1 に、今回提案の計算式 9 を使った場合の結果を図 2 に示す。

図 1 と図 2 を比較した場合、図 2 の方が実験値との誤差が少ない事がわかる。

これは、YellowBook の計算式は DFT に補正係数の k_2 を行っていないためであり、どんな鋼材でも、被覆厚が 0 の場合は規定温度到達時間が一定になってしまうためである。

そのため、熱容量の差が大きい場合は、実験値と計算値の誤差が大きくなる。

5. まとめ

各種計算式が提案されているが、CEN の計算式は、解析方法が困難であり、YellowBook の計算式は、実験値と計算値との誤差が大きい、従って解析には建研式が良く、さらに試行錯誤法方式で解を探す建研式の式 3 より、一般的な重回帰分析方法が使える、今回の式 9 が现阶段では最も適している。

（参考文献）

- 1) Fire protection for structural steel in buildings. (2nd Edition-Revised)
- 2) Test method for determining the contribution to the fire resistance of structural members part 4 : applied protection to steel members.
- 3) 臼井信行、遊佐秀逸、近藤英之「熱容量試験をもとにした鋼材寸法に応じた耐火被覆厚さの決定（耐火塗料を用いた場合）」
日本建築学会大会学術講演梗概集，1999年，A-2，pp3～4
- 4) 谷辺徹、山本盛男、遊佐秀逸、金城仁「水系発泡性耐火塗料の性能評価 その1-膜厚推定方式適用性に関する実験的検討-」
日本建築学会大会学術講演梗概集，2006年，A-2，pp139～140

表 1. 実験データ及び FR の実験値と計算値の比較

部材寸法	被覆厚	FR 計算値(分)		
		実験値	建研式	YellowBook 式
400×400×19	0.88	62.75	62.95	55.07
400×400×19	4.88	135.00	135.04	136.33
300×300×12	0.90	49.00	48.66	49.67
300×300×12	2.84	78.50	76.22	76.55
300×300×9	0.88	39.75	42.07	46.93
300×300×9	4.88	90.25	92.29	91.17
300×300×6	2.87	59.00	57.07	60.58
300×300×6	4.94	79.50	79.50	77.45

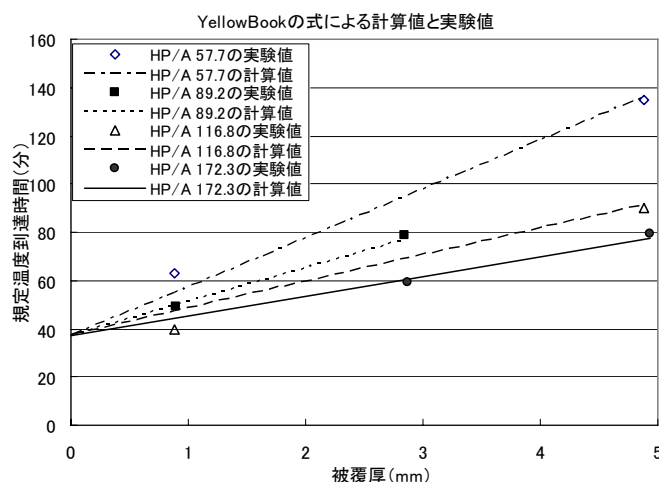


図 1. YellowBook の式による計算値と実験値の関係

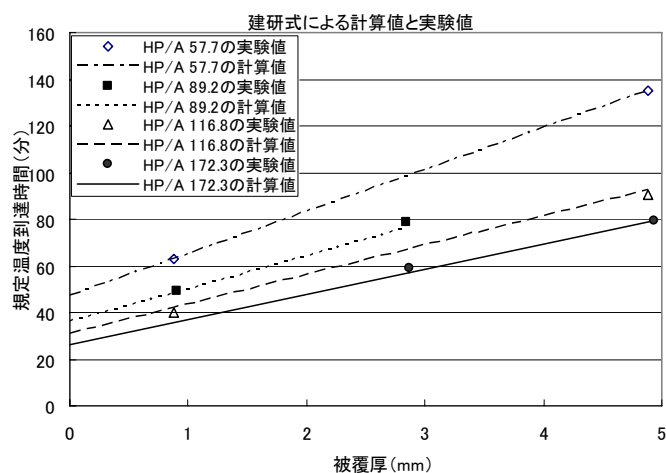


図 2. 建研式による計算値と実験値

*1 菊水化学工業株式会社

*2 (財)ベターリビングつくば建築試験研究センター

*3 エスケー化研株式会社

*4 化工機商事株式会社

*5 日本ペイント株式会社

*6 太平洋マテリアル株式会社

*1 Kikusui Chemical Industries CO.,LTD.

*2 Tsukuba Building Research & Testing Laboratory, Center for Better Living

*3 SK Kaken CO.,LTD.

*4 KAKOKI TRADING CO.,LTD.

*5 NIPPON PAINT CO.,LTD.

*6 Taiheiyo Materials Corporation