

耐火試験データに基づく被覆材性能指標

A Performance Index for Fire Resistive Covering Materials Based on Fire Tests

建築確認評定センター 建築確認評定部 性能評定課

1. はじめに

耐火防火試験室では、建築基準法に基づく国土交通大臣認定を取得するための性能評価業務を実施しています。防耐火構造等の大臣認定を取得するためには、耐火試験に合格し、性能評価委員会の審査を受ける必要があります。耐火試験には試験費用のみならず、試験体製作にも多額の費用がかかるので、耐火試験で不合格とならぬよう、既往の文献や耐火試験データから仕様の性能水準を見定める必要があります。これまでの耐火試験データの蓄積から、平成12年建設省告示第1433号では、吹付けロックウールと繊維混入ケイ酸カルシウム板の熱的特性値が与えられており¹⁾、簡易に被覆材の厚さと耐火時間を算定することが可能です。また、鋼構造耐火設計指針²⁾では、温度依存性を考慮した材料の熱定数が与えられており、一次元差分法による耐火被覆部材の温度予測方法が示されています。しかし、熱的特性に関する高温物性値が整理されている材料ばかりではありません。また、複数の材料を組合せた耐火被覆仕様や熱変形に伴う亀裂によって性能が決まってしまう被覆工法などは、数値計算が難しく、既往の実験データに基づき耐火被覆材の性能を把握し、耐火性能を簡易に予測することが求められます。ここでは、耐火試験から得られた加熱温度と鋼材温度のデータから耐火被覆材の性能指標として「熱コンダクタンス」を求め³⁾、これを用いた鋼管柱の耐火性能の検討例を紹介します。

2. 熱コンダクタンスとは

熱コンダクタンスは熱抵抗の逆数として定義され、壁等の断熱性能を算定するのに用いられます。ここでは、耐火試験を対象にし、以下のように定義します。

$$K = \frac{q}{T_f - T_s} \quad \text{--- (0)}$$

ここで、

K：熱コンダクタンス [W/mK]

q：鋼材に流入する単位時間当たりの熱量 [W/m]

T_f ：加熱温度 [K]

T_s ：鋼材温度 [K]

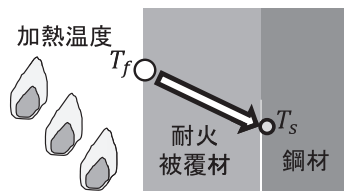


図-1 熱コンダクタンスのイメージ

ここでの熱コンダクタンスは、鋼管柱の耐火被覆材の両側（加熱側：炉内加熱温度・非加熱側：鋼材）に温度差がある場合に、単位面積、単位時間あたりに伝わる熱量のことです。熱伝導や熱伝達の理論を用いて詳細に鋼材温度の予測計算をするためには、被覆材の形状や材料の熱物性値のデータが必要になるだけでなく、目地部の影響や発熱特性、部材の熱橋等の影響を考慮する必要があります。一方、それらを含んだ試験データを用いた熱コンダクタンスの考え方をを用いると、簡易に耐火被覆材全体の性能を把握できるメリットがあります。

3. 計算手順

3.1 熱コンダクタンスの算出

鋼管柱の耐火試験を例に示します。耐火試験で得られた時系列の加熱温度 (T_f)・鋼材温度 (T_s) のデータを基に、以下の手順で熱コンダクタンスを算出します。

[Step1] 単位時間当たりの鋼材温度上昇 ΔT_s の算定

$$\Delta T_{s(n)} = T_{s(n)} - T_{s(n-1)} \quad \text{--- (1)}$$

[Step2] 鋼材に流入する単位時間当たりの熱量 q の算定

$$q_{(n)} = \frac{\rho_s c_s \Delta T_{s(n)}}{H_s/A_s} \quad \text{--- (2)}$$

[Step3] 単位時間当たりの熱コンダクタンス K の算定

$$K_{(n)} = \frac{q_{(n)}}{T_f(n) - T_s(n)} \quad \text{--- (3)}$$

ここで、 ΔT_s (n) : n分時の鋼材温度上昇 [K]

ρ_s : 鋼材の密度 (= 7850 [kg/m³])

c_s : 鋼材の比熱 (482+8.0 × 10⁻⁷T_s² [J/kgK])

H_s/A_s : 鋼材の断面形状係数 [m⁻¹]

(H_s : 鋼材の周長 [m], A_s : 鋼材の断面積 [m²])

表-1に示すように、表計算ソフトを用いて計算し、時間ごとの熱コンダクタンスの値を算出します。

表-1 熱コンダクタンスの算定表(例)

t[min]	T _f [°C]	T _s [°C]	ΔT _s [K]	q[W/m]	K[W/mK]
0	20	20	-	-	-
1	349	23	3	2174	6.7
2	445	27	4	2900	6.9
3	502	30	3	2173	4.6
...
72	973	548	11	7982	18.8

入力値
出力値

3.2 鋼材温度の予測

表-1に示した例では、加熱開始後72分時の鋼材温度が約550℃であり、鋼管柱が所定の荷重を保持できずに不合格となる可能性があります。そこで、鋼管の厚さを増すことで熱容量を増やし、鋼材温度上昇がどのくらい抑えられるかを算定してみます。表-1で得られた耐火被覆材の熱コンダクタンス K の値を基に、以下の手順を時間ステップごとに算定すると、表-2のように鋼材温度が算定されます。ここでは鋼管の厚さを3mm増した結果を示します。72分時の鋼材温度が407℃となり、十分合格できる予測結果になりました。時間と温度、時間と熱コンダクタンスの関係を図-2に示します。

[Step4] 鋼材に流入する単位時間当たりの熱量 q' の算定

$$q'_{(m)} = K_{(m)}(T_f(m) - T'_{s(m-1)}) \quad \text{--- (4)}$$

[Step5] 単位時間当たりの鋼材温度上昇 $\Delta T'_s$ の算定

$$\Delta T'_{s(m)} = \frac{q'_{(m)}H'_s/A'_s}{\rho_s c_s} \quad \text{--- (5)}$$

[Step6] 鋼材温度 T'_s の算定

$$T'_{s(m)} = T'_{s(m-1)} + \Delta T'_{s(m)} \quad \text{--- (6)}$$

表-2 鋼材温度の算定表(鋼材厚さを3mm増した場合)

t[min]	K[W/mK]	q'[W/m]	ΔT' _s [K]	T' _s [°C]
0	-	-	-	20
1	6.7	2194	2	22
2	6.9	2935	2	24
3	4.6	2200	2	26
...
72	18.8	10801	9	407

入力値
出力値

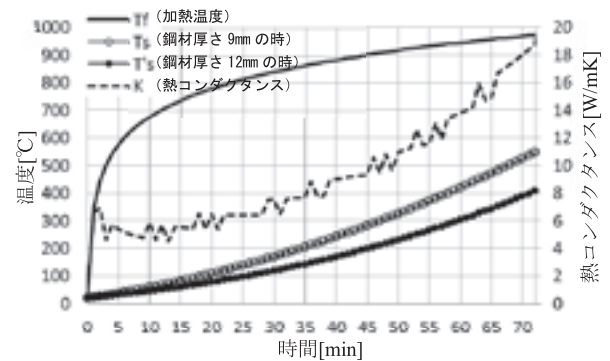


図-2 温度-時間-熱コンダクタンスの関係

4. 熱コンダクタンスを用いた計算例 (その1)

次に、鋼管柱の2時間耐火試験データから得られた熱コンダクタンスの値に基づき、耐火被覆材厚さ及び鋼材寸法を小さくして、1時間耐火試験の鋼材温度を計算した例を示します。

① 2時間耐火試験データの整理

3.1節で示した [Step1] ~ [Step3] を行い、時間ごとの熱コンダクタンスを算定します。

② 耐火被覆材の厚さの低減

熱コンダクタンスは被覆材厚さに反比例するとして、①で得られた熱コンダクタンス K を1時間耐火試験時の熱コンダクタンス K' に変換します。

③ 鋼材温度の予測

②で得られた熱コンダクタンスを用いて3.2節で示した [Step4] ~ [Step6] を行い、鋼材温度 T'_s を算定します。

以上より得られた、鋼材温度の計算結果 T'_s と実験結

果 T'_s (実験) の対応を図-3に示します。1時間耐火試験時の鋼材温度実験値と計算値が良く対応しています。

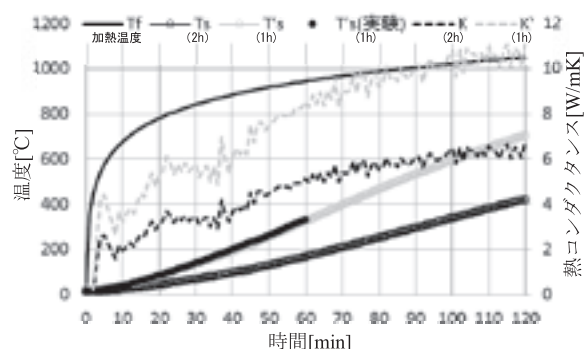


図-3 計算結果と実験結果の対応

5. 熱コンダクタンスを用いた計算例 (その2)

次に、耐火被覆材として耐火塗料を用いる場合について検討します。耐火塗料はわずか数ミリで、火災時に数十倍に発泡して断熱層を形成します。この断熱層の発泡性状は、温度上昇速度に影響されることが知られており、4章のように、熱コンダクタンスと加熱温度(時間)の関係を用いると適切に性能を評価することができません。そこで、熱コンダクタンスと鋼材温度の関係を用いて検討します。

①耐火試験データの整理

3.1節で示した [Step1] ~ [Step3] を行い、時間ごとの熱コンダクタンスを算定します。

②熱コンダクタンス-鋼材温度関係の数式化

図-4に示すように、熱コンダクタンスと鋼材温度の関係をグラフ化し、数式化します。ここでは、試験体2体の試験データに対して、熱コンダクタンスと鋼材温度の関係を150°Cまでは一定とし、以降280°Cまでは2次関数、280°C以降は1次関数で近似しています。試験データと数式モデルによる計算値との対応は図-5のようになります。

③鋼材温度の予測

②で得られた熱コンダクタンス-鋼材温度関係の数式モデルを用いて、3.2節で示した [Step4] ~ [Step6] を行い、鋼材温度 T'_s を算定します。ここでは、鋼材厚さを増加させた場合の結果を図-6に示します。このように鋼材厚さを増加させた場合の予測も可能です。

6. おわりに

耐火試験から得られたデータから、耐火被覆材の性能を「熱コンダクタンス」という指標を用いて評価する方法を紹介しました。鋼管柱のみならず、他の部材にも適用可能な方法であると考えられます。試験不合格時の仕様見直しの検討やコストダウン化の検討に、この情報を

役立てていただければ幸いです。

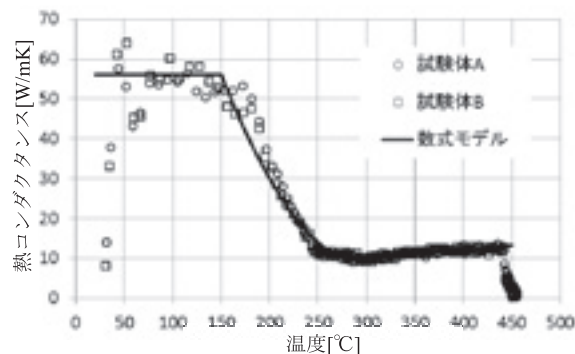


図-4 熱コンダクタンス-鋼材温度関係

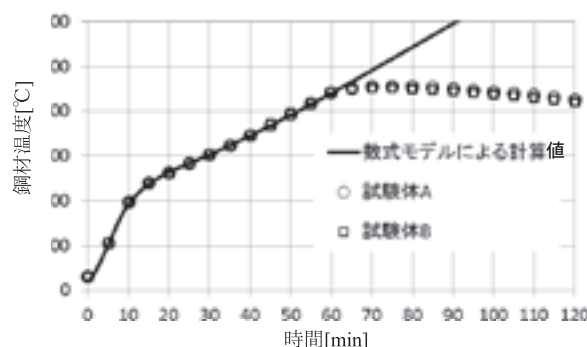


図-5 数式モデルの鋼材温度-時間関係

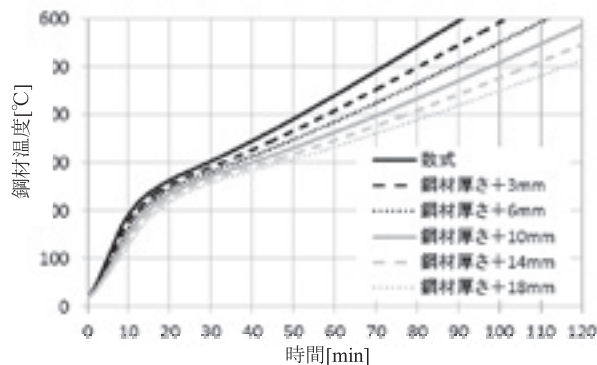


図-6 鋼材温度予測結果

問い合わせ先

建築確認評定センター 建築確認評定部 性能評定課
TEL : 06-6966-7600 FAX : 06-6966-7680
E-mail : seinou@gbrc.or.jp

【参考文献】

- 1) 国土交通省住宅局建築指導課・国土交通省建築研究所・日本建築主事会議・財団法人日本建築センター編集:2001年版耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説, 井上書院, 2001年3月
- 2) 日本建築学会:鋼構造耐火設計指針, 2008年3月
- 3) 吉中 宏 他:耐火塗料を施した鉄骨柱の温度上昇評価, 日本建築学会関東支部研究報告集, p.157-160, 1999年2月