

実大規模試験体の載荷加熱試験と中規模試験体の加熱試験を組み合わせた 耐火被覆鋼柱の耐火性能試験・評価方法(詳細)

1. 序文

建築物の主要構造部の耐火性能試験・評価法に関する国際規格である ISO834(Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part1～11*)シリーズに、耐火被覆鋼材の耐火性能を合理的に評価するための規格として、Part10、Part11 が発行された。これにより、国際的にも実大規模の部材の載荷加熱試験と中小規模の試験体の加熱試験を組み合わせて、耐火被覆された鋼部材の耐火性能を評価するための基本的な方法が整備されたことになる。

本試験・評価方法は、前述の規格の内容に基づき、日本国内の建築物の主要構造部に用いる鋼材(形状、規格など)に適用するために、平成 27・28 年度建築基準整備促進事業 F6**及び平成 29 年度一般社団法人建築性能基準推進協会 防耐火構造・材料部会 鋼部材評価法 WGにて、技術的内容を変更・修正したものである。

耐火構造の主要構造部の試験・評価方法として、実大規模試験体の載荷試験と中小規模試験体の加熱試験の組み合わせ(パッケージ型評価試験)を導入し、その結果に基づき、部材の耐火性能を鋼材の形状や耐火被覆の厚さに応じて工学的に性能評価することで、試験・評価方法を合理化したものである。

*関連国際規格

- ISO 834-1:1999 Fire-resistance tests -- Elements of building construction -- Part 1: General requirement 及び Amendment 1:2012
- ISO 834-7:2000 Fire-resistance tests -- Elements of building construction -- Part 7: Specific requirements for columns
- ISO 834-10:2014 Fire resistance tests -- Elements of building construction -- Part 10: Specific requirements to determine the contribution of applied fire protection materials to structural steel elements
- ISO 834-11:2014 Fire resistance tests -- Elements of building construction Part 11: Specific requirements for the assessment of fire protection to structural steel elements

** 平成 27・28 年度 建築基準整備促進事業 F6「防火被覆等の仕様にバリエーションを有する木・鉄骨系防耐火構造の壁および柱の合理的な性能評価に関する検討」

2. 用語及び定義

2. 1. 鋼材平均厚さ (Average thickness of the steel member)

鋼材(被覆材裏面)の加熱周長に対する鋼材の断面積の比(= A_s/H_s)として定義され、熱的な鋼材の平均的な厚さ(温度上昇のしにくさ)を表す。断面形状係数の逆数である。

2. 2. 実大試験体 (Full-scale specimen, or Long specimen)

試験機関が保有する試験炉に設置可能な最大長さの荷重加熱試験用の試験体。(5.2.2節参照)

2. 3. 荷重加熱試験 (Load-bearing fire test)

火災時における温度および荷重支持能力を把握するために実施する、試験体に長期許容応力度を作用させた状態で所定の加熱を加える試験。(5.3.2節参照)

2. 4. 非反応系材料 (Passive fire protection material)

加熱による物理形状の変化が起きず、材料の熱的特性によって断熱効果が得られる耐火被覆材料。

2. 5. 反応系材料 (Reactive fire protection material)

加熱により化学反応を起こし物理形状および熱的特性が変化することで断熱効果が得られる耐火被覆材料。

2. 6. 基準温度 (Reference temperature)

本評価方法において耐火時間を決定するための鋼材温度の基準(470°C)。ただし、加熱終了後の温度上昇性状を考慮して、放冷中に500°Cに達しないことが明らかな場合には、500°Cを上限に増加させることができる。

2. 7. 断面形状係数 (Section factor of the steel member)

鋼材の断面積の比に対する鋼材(被覆材裏面)の加熱周長(= H_s/A_s)として定義され、鋼材の温度上昇のしやすさを表す。鋼材平均厚さの逆数である。

2. 8. 中規模試験体 (Middle-scale specimen, or Short specimen)

試験体長さを2m以上とした、実大規模試験体よりも短い、加熱試験(熱容量試験)用の試験体。(5.2.1節参照)

2. 9. 基準温度到達時間 (Time to reach the reference temperature)

基準温度に到達する時間であり、本評価方法ではその時間が耐火時間として決定される。

2. 10. 加熱試験(熱容量試験) (Unloaded fire test)

火災時における鋼材温度を把握するために実施する、非荷重状態で所定の加熱を加える試験。試験体の熱容量をパラメータとする。(5.3.1節参照)

3. 記号

記号	単位	説明
A_i	m^2	被覆材断面積 (Cross sectional area of the protection material) 5.1.3 節に準じて求める。
A_s	m^2	鋼材断面積 (Cross sectional area of the steel member) 5.1.3 節に準じて求める。
C	—	熱容量比 (Heat capacity ratio) ($= \rho_i c_i / \rho_s c_s$) 鋼材の熱容量に対する被覆材の熱容量の比で定義される。
d_i	m	被覆材厚さ (Thickness of the protection material)
h	s^{-1}	部材温度上昇係数 (Steel temperature rise factor) 下式で定義された部材温度上昇のしやすさを表す指標であり、6.2 節(1)に準じて試験データから算定する。 $h = \frac{\Phi K_0 (H_s / A_s)}{\left(1 + \frac{\Phi R}{H_i / A_i}\right) \left(1 + \frac{\Phi H_s / A_s}{2 H_i / A_i} C\right)}$
H_i	m	被覆材表面の加熱周長 (Fire exposed outer perimeter of the protection material) 5.1.3 節に準じて求める。
H_s	m	鋼材(被覆材裏面)の加熱周長 (Fire exposed perimeter of the steel member, or Internal perimeter of the protection material) 5.1.3 節に準じて求める。
K_0	m/s	基本温度上昇速度 (Basic rate of temperature rise) 鋼材の熱容量に対する鋼材表面における総合熱伝達率の比で定義される。鋼材の断面形状に応じて耐火性能検証法に記載された値を用いることとする。
R	m^{-1}	熱抵抗係数 (Thermal resistance coefficient) 被覆材の熱伝導率に対する被覆材表面の総合熱伝達率の比として定義され、6.2 節(2)に準じて試験データから算定する。
t_z	s	温度上昇遅延時間 (Temperature rise delay time) 初期温度上昇の遅延と被覆材内部の含水蒸発による温度上昇遅延時間の和であり、6.2 節(1)に準じて試験データから算定する。
T_f	$^{\circ}C$	加熱温度 (Furnace temperature) 時刻 t における試験炉内雰囲気温度の平均値を用いる。
$T_s(t)$	$^{\circ}C$	鋼材平均温度 (Average steel temperature at time t) 時刻 t における試験体に設置した熱電対で測定された全鋼材温度の平均値を用いる。ただし、明らかな異常値がある場合はそれを除く。
Φ	—	周長比 (Perimeter ratio) ($= H_i / H_s$) 鋼材(被覆材裏面)の加熱周長に対する被覆材表面の加熱周長の比で定義される。

4. 適用範囲

4. 1. 防耐火構造の種類

耐火構造(1 時間・2 時間・3 時間)の主要構造部のうち、荷重支持部に鋼材を用いた柱を適用対象とする。

4. 2. 耐火被覆材の種類

加熱による物理形状の変化が起きず、材料の熱的特性によって断熱効果が得られる「非反応系材料」を適用対象とする。加熱により化学反応を起こし物理形状および熱的特性が変化することで断熱効果が得られる「反応系材料」は対象外とする。なお、耐火被覆の工法として、壁との合成耐火は適用外とする。

5. 耐火性能試験

5. 1. 試験体選定

試験体は、載荷加熱試験用の実大試験体と加熱試験(熱容量試験)用の中規模試験体を、必要な耐火被覆厚さが包含されるように選定する。選定方法の概略を表 1 に示す。

5. 1. 1. 鋼材

- ・ 載荷加熱試験用の試験体は、 $\square-300\sim 400\times 9$ を標準断面(②)として、全体座屈温度が極小となる幾何学的な細長比が 20~50 となるように、試験炉の条件に応じて設定する。
- ・ 中規模試験体の平均的な鋼材厚さ(断面形状係数 H_s/A_s の逆数)は、標準断面(②)を基準として、3 水準以上(①、②、③)設定する。
- ・ 鋼材の最小外形寸法が 300mm を下回る場合、載荷加熱試験体(③)を追加する。

5. 1. 2. 耐火被覆

- ・ 耐火被覆の材料、工法は同一のものとする。比重が異なる場合は最小のものを選定する。
- ・ 耐火被覆厚さ(A1~A4)は、鋼材厚さに応じて、2~3 水準以上を設定する。
- ・ 標準断面の載荷加熱試験体には、標準の厚さ(②-A1)、大の厚さ(②-A3)の耐火被覆を選定する。
- ・ 鋼材厚さ最小の載荷加熱試験体には、中の厚さ(③-A2)の耐火被覆を選定する。

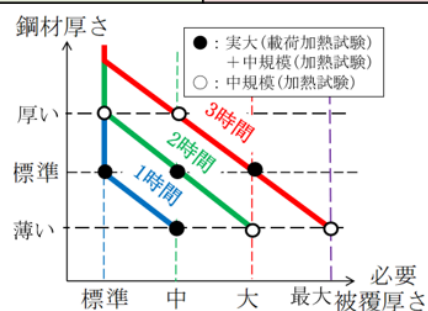
表 1 試験体選定方法の概略

鋼材平均厚さ $(H_s/A_s)^{-1}$ (断面形状係数の逆数)	耐火被覆厚さ			
	A1 標準 1x	A2 中 2x	A3 大 3~4x	A4 最大
① 厚い(2.0x) 例) □400×19	○	○	—	—
② 標準(1.0x) □300×9, □400×9 H300×300×10×15	●○H	●○	●○H	—
③ 薄い(0.5x) 例) □100×4.5 H100×100×6×8	—	●○H	○	○H

- : 鋼管柱 荷重加熱試験(2体)
- : 鋼管柱 加熱試験(熱容量試験)
- H : H形柱 加熱試験(熱容量試験)

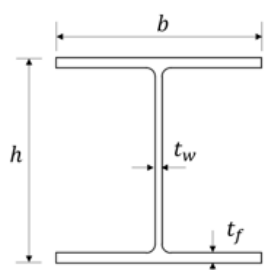
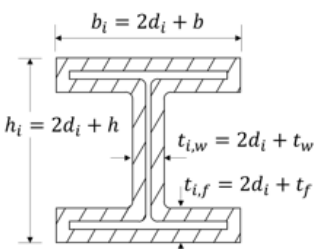
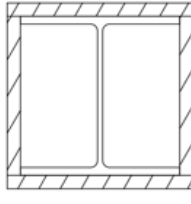
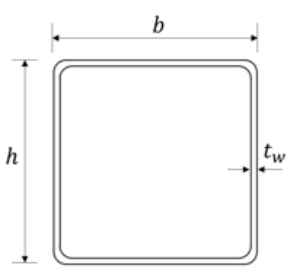
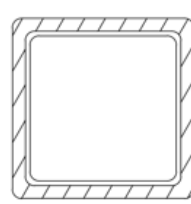
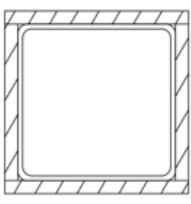
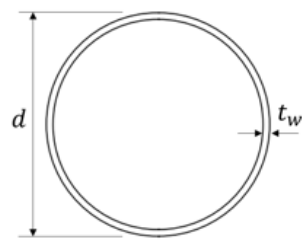
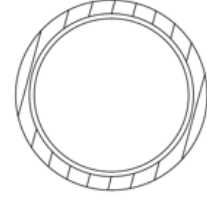
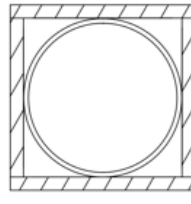
目標耐火時間

- 1時間耐火
- 2時間耐火
- 3時間耐火



5. 1. 3. 加熱周長と断面積

代表的な被覆方法・断面形状における加熱周長・断面積の計算式を図1に示す。

鋼材断面	被覆材直張り	被覆材箱張り
 $A_s = hb - (h - 2t_f)(b - t_w)$	 $H_s = 2h + 2b + 2(b - t_w)$ $H_i = 2h_i + 2b_i + 2(b_i - t_{i,w})$ $A_i = h_i b_i - (h_i - 2t_{i,f})(b_i - t_{i,w}) - A_s$	 $H_s = 2h + 2b$ $H_i = 2(2d_i + h) + 2(2d_i + b)$ $A_i = (2d_i + h)(2d_i + b) - hb$
 $A_s = hb - (h - 2t_w)(b - 2t_w)$	 $H_s = 2h + 2b$ $H_i = 2(h + 2d_i) + 2(b + 2d_i)$ $A_i = (h + 2d_i)(b + 2d_i) - hb$	 $H_s = 2h + 2b$ $H_i = 2(h + 2d_i) + 2(b + 2d_i)$ $A_i = (h + 2d_i)(b + 2d_i) - hb$
 $A_s = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 - \pi \left(\frac{d - 2t_w}{2}\right)^2$	 $H_i = \pi(2d_i + d)$ $H_s = \pi d$ $A_i = \pi \left(\frac{2d_i + d}{2}\right)^2 - \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$	 $H_s = 4d$ $H_i = 4(2d_i + d)$ $A_i = (2d_i + d)^2 - d^2$

ここで、 d_i ：被覆材厚さ、 A_s ：鋼材断面積、 A_i ：被覆材断面積、

H_s ：鋼材(被覆材裏面)の加熱周長、 H_i ：被覆材表面の加熱周長

図1 代表的な被覆方法・断面形状における加熱周長と断面積

5. 2. 試験体と鋼材温度測定位置

5. 2. 1. 中規模試験体

中規模試験体および鋼材温度測定位置を図2に示す。

- ・試験体高さは2m以上、有効加熱範囲は1.8m以上とする。
- ・鋼材には400N/mm²級の鋼種を用いる。
- ・各条件(断面寸法・被覆厚さ)につき1体とする。

- 鋼材温度測定位置は以下とする。
 - 角形断面、円形断面：熱電対は 1 断面 8 点
 - H 断面：熱電対は 1 断面 7 点
 - 測定断面の高さ：試験体上部から 200mm(A 断面)、試験体高さの 1/3(B 断面)、1/2 の位置(C 断面)の 3 断面で測定
- 目地が生じる耐火被覆材の場合、目地部が試験体の中央部(C 断面)となるように割り付ける。

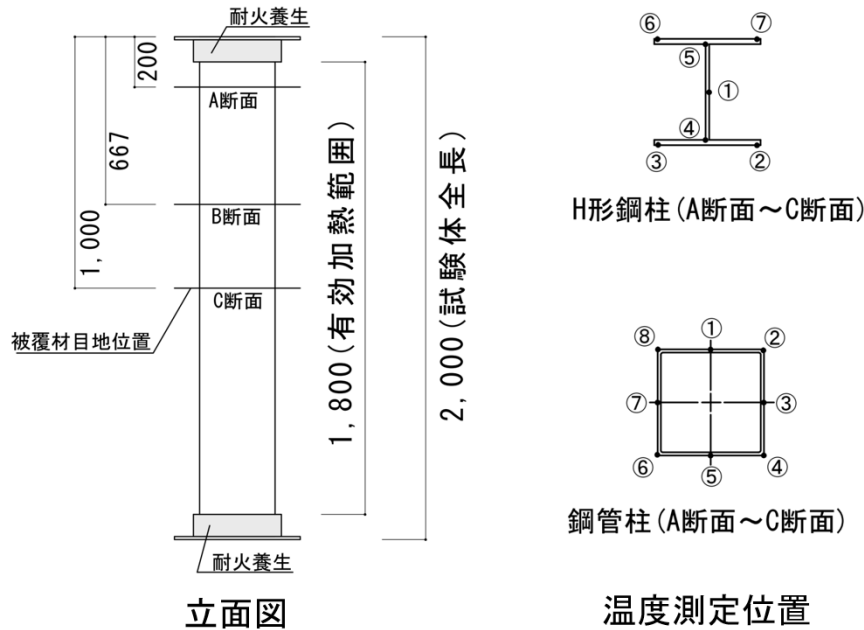


図2 中規模試験体および鋼材温度測定位置(例)

5. 2. 2. 実大試験体

実大試験体および鋼材温度測定位置を図3に示す。

- 試験体高さは有効加熱範囲 3m 以上となるように設定する。
- 鋼材には原則 490N/mm² 級の鋼種を用いる。
- 試験体数は各条件(断面寸法・被覆厚さ)につき 2 体とする。
- 鋼材温度測定位置は以下とする。
 - 角形断面、円形断面：熱電対は 1 断面 8 点
 - H 断面：熱電対は 1 断面 7 点
 - 測定断面の高さ：有効加熱範囲上端から 200mm(A 断面)、試験体上端から試験体高さの 1/4(B 断面)、2/4(C 断面)、3/4(D 断面)の 4 断面で測定
- 目地が生じる耐火被覆材の場合、目地部が試験体の中央部(C 断面)となるように割り付ける。

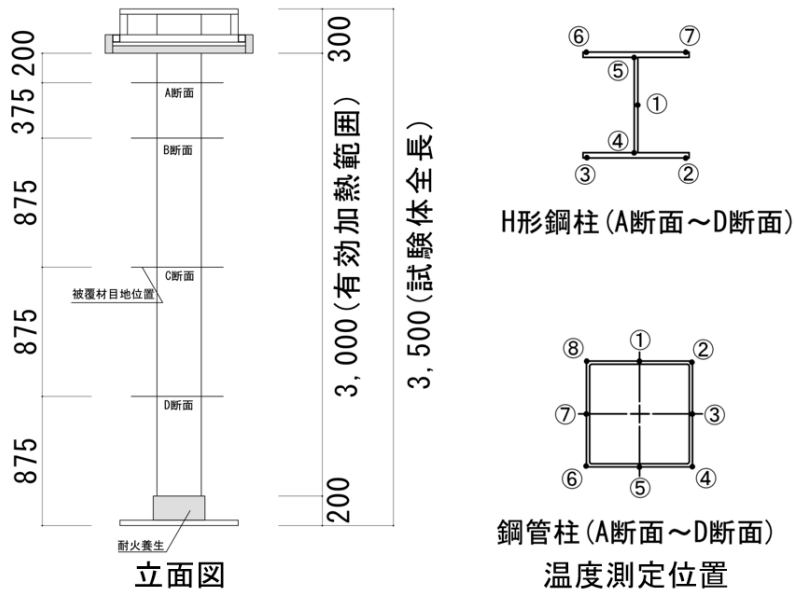


図3 実大試験体および鋼材温度測定位置(例)

5. 3. 試験方法

5. 3. 1. 中規模試験体の加熱試験

- ・温度上昇特性が同程度の試験体を、複数体炉内に配置して加熱する。設置例を図4に示す。
- ・全試験体の平均鋼材温度が550℃以上に達するまで加熱を継続する。

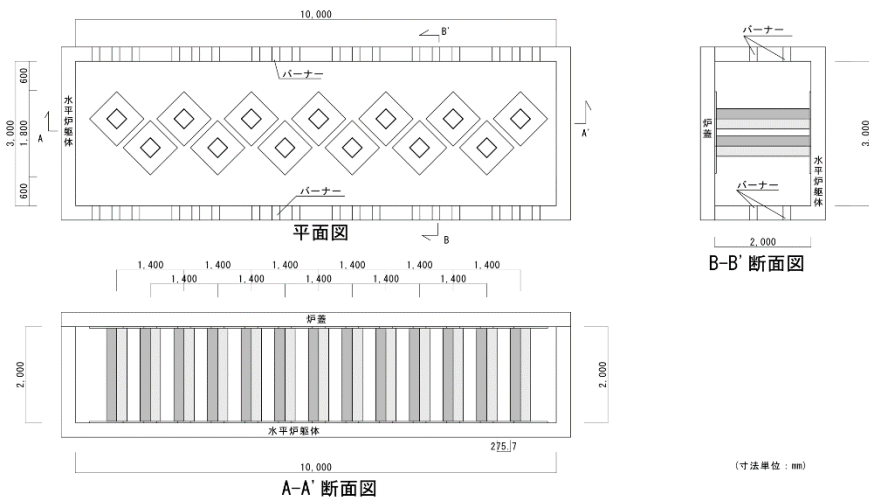


図4 中規模試験体の試験炉への設置例

5. 3. 2. 実大試験体の載荷加熱試験

- ・実大試験体の載荷加熱試験方法は、各評価機関の定める「防耐火性能試験・評価業務方法書」に準ずる。

6. 耐火性能の評価

6. 1. 評価のため諸条件

一連の耐火試験によって得られた加熱時間と鋼材温度の関係を整理し、耐火被覆厚さ・鋼材平均厚さと基準温度到達時間の関係を、耐火性能検証法による集中熱容量法を用いて、適合一覧表としてとりまとめる。

- ・平均温度：鋼材に設置した熱電対の平均温度とする。ただし、明らかに異常値であることが明らかな場合はそれを除く。
- ・基準温度到達時間：原則として、標準加熱曲線に沿った加熱時の平均温度が基準温度(470℃)に達する時間とする。ただし、加熱終了後の温度上昇性状を考慮して、放冷中に500℃に達しないことが明らかな場合には、500℃を上限に増加させることができる。
- ・放冷中の温度上昇特性は、冷却中の耐火被覆の健全性によることから、中規模試験体の温度についても確認すること。

6. 2. 試験データに基づく耐火被覆材の熱抵抗を用いた耐火性能評価方法

実大試験体と中規模試験体を組み合わせたパッケージ型評価試験のデータを用いた耐火性能評価フローを図5に示す。以下の(1)～(5)の項目においてそれぞれの詳細を示す。

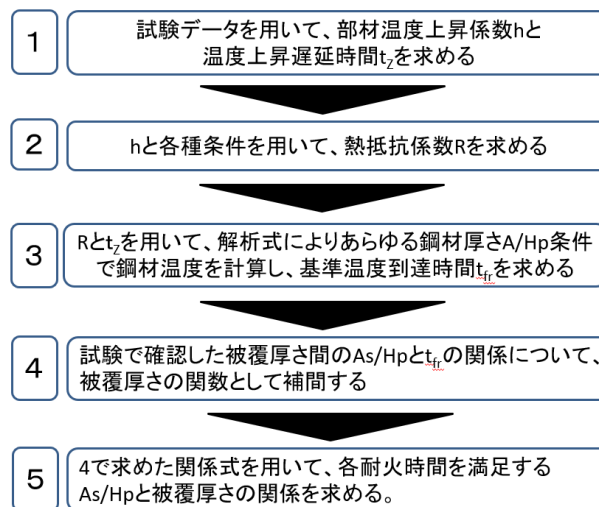


図5 耐火性能評価フロー

(1) 試験データを用いた部材温度上昇係数 h と温度上昇遅延時間 t_z の同定

得られた試験データ(鋼材平均温度の時間推移)を用いて、式(1)に基づき部材温度上昇係数 h と温度上昇遅延時間 t_z を試験体毎に同定する。(図6、7参照) なお、図6、7は150℃と550℃の2点で試験データと一致するように h と t_z を決定した場合の例である。

$$\frac{T_s(t) - T_0}{T_f - T_0} = 1 - e^{-h(t-t_z)} \Leftrightarrow \ln\left(1 - \frac{T_s(t) - T_0}{T_f - T_0}\right) = -h(t - t_z) \quad (1)$$

ここで、

- $T_s(t)$: 鋼材平均温度(℃)
 T_f : 加熱温度(℃)

T_0 : 初期温度(°C)

h : 部材温度上昇係数 $\left(= \frac{\Phi K_0 (H_s/A_s)}{\left(1 + \frac{\Phi R}{H_i/A_i}\right) \left(1 + \frac{\Phi H_s/A_s}{2 H_i/A_i} C\right)} \right)$

ここで、

K_0 : 基本温度上昇速度 (鋼材形状により決定される)

Φ : 周長比 (= H_i/H_s) (被覆材・鋼材寸法により決定される)

C : 熱容量比 (= $\rho_i c_i / \rho_s c_s$) (被覆材種類により決定される)

R : 熱抵抗係数 (= h_t / λ_i)

ここで、 h_t : 被覆材表面の総合熱伝達率、 λ_i : 被覆材の熱伝導率

t_Z : 温度上昇遅延時間 (= $t_0 + t_w$)

ここで、 t_0 : 温度上昇開始時間、 t_w : 水分蒸発による温度停滞時間

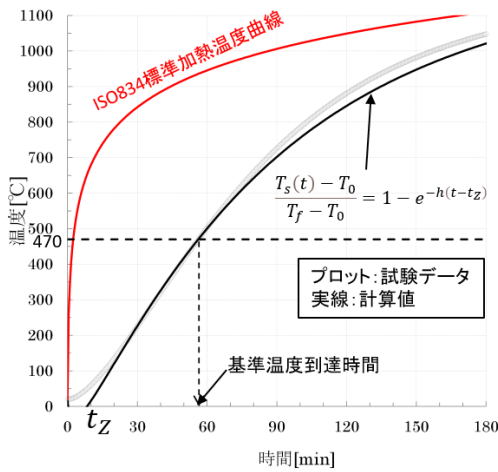


図6 鋼材平均温度の時間推移

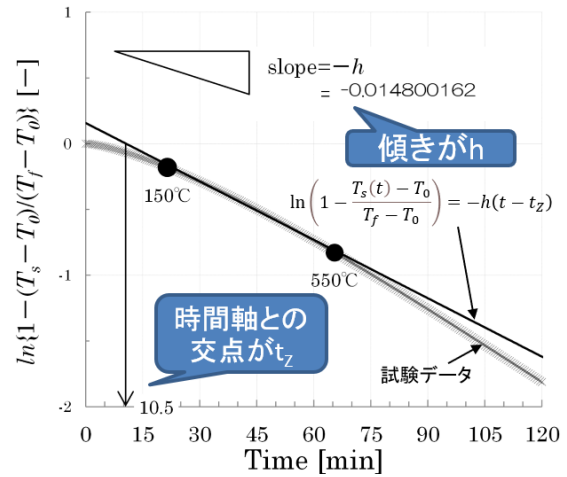


図7 hとt_Zの同定

(2) 熱抵抗係数Rの同定

部材温度上昇係数 h の定義式を変形した式(2)により、図8に示すように各試験体のプロットを求め、被覆厚さ毎に最小となる熱抵抗係数 R を求める。

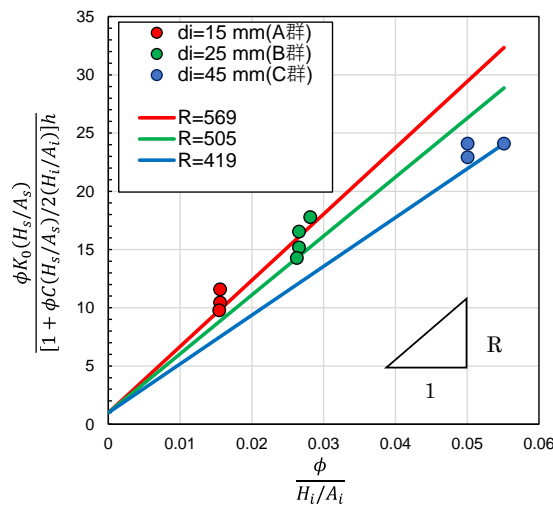


図8 熱抵抗係数Rの同定

(3) 被覆厚さ毎の“鋼材平均厚さと基準温度到達時間の関係”の計算

(1)(2)で求めた t_z と R を用いて、被覆厚さ毎の“鋼材平均厚さと基準温度到達時間の関係”を式(1)より求める。一例を図9に示す。実線は、各条件での計算値プロットに対する被覆厚さ毎の線形近似式である。このとき、必ず線形近似の結果が試験データよりも安全側となっていることを確認すること。

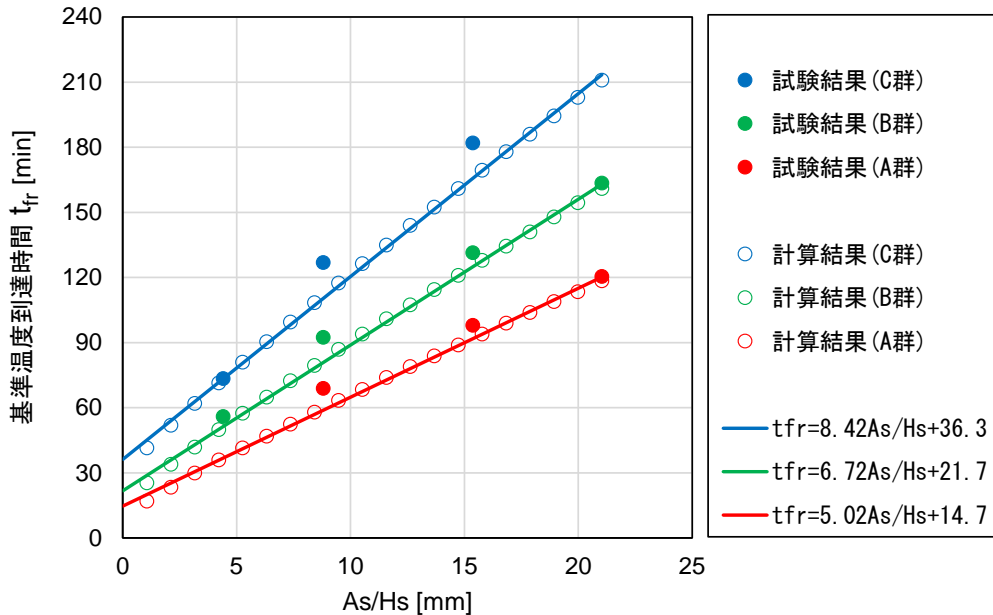


図9 被覆厚さ毎の“鋼材平均厚さと基準温度到達時間の関係”の計算結果一例

(4) 被覆厚さの関数とした“鋼材平均厚さと基準温度到達時間の関係”の補間式作成

式(3)に示す鋼材平均厚さと基準温度到達時間の関係を表す傾き S_{di} と切片 $t_{fr,t_{s0}}$ について、それぞれ平均被覆厚さ A_i/H_i の関数とした補間折線式を作成する。(図10参照)

$$t_{fr} = S_{di} \frac{1}{H_s/A_s} + t_{fr,t_{s0}} \quad (3)$$

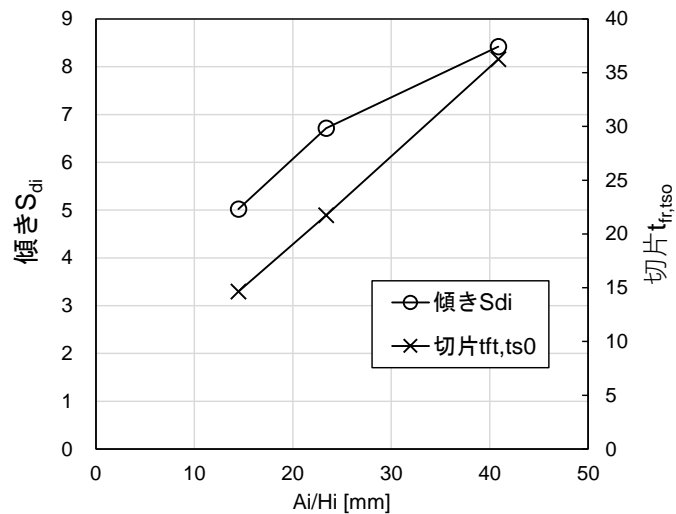


図10 被覆厚さを関数とした傾き S_{di} と切片 $t_{fr,t_{s0}}$ の補間折線

(5) 各耐火時間を満足する A_s/H_s と A_i/H_i の関係の整理

(4)で求めた関係式を用いて、各耐火時間を満足する A_s/H_s と A_i/H_i の関係(図11)を求め、表形式で整理する(表2)。

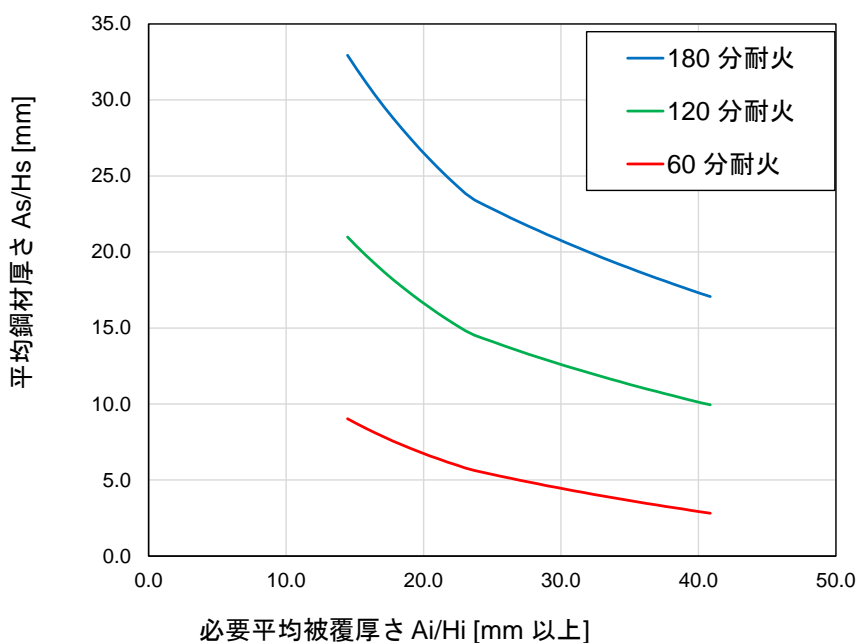


図11 各耐火時間を満足する A_s/H_s と A_i/H_i の関係グラフ

表2 各耐火時間を満足する A_s/H_s と A_i/H_i の関係一覧

60分耐火		120分耐火		180分耐火	
平均鋼材厚さ A_s/H_s [mm]	必要平均被覆厚さ A_i/H_i [mm以上]	平均鋼材厚さ A_s/H_s [mm]	必要平均被覆厚さ A_i/H_i [mm以上]	平均鋼材厚さ A_s/H_s [mm]	必要平均被覆厚さ A_i/H_i [mm以上]
9.0	14.5	21.0	14.5	32.9	14.5
8.4	15.8	19.8	15.8	31.2	15.8
7.8	17.1	18.7	17.1	29.6	17.1
7.3	18.4	17.7	18.4	28.1	18.4
6.8	19.8	16.8	19.8	26.8	19.8
6.4	21.1	16.0	21.1	25.5	21.1
6.0	22.4	15.2	22.4	24.4	22.4
5.6	23.7	14.5	23.7	23.4	23.7
5.4	25.0	14.1	25.0	22.8	25.0
5.1	26.4	13.7	26.4	22.2	26.4
4.9	27.7	13.3	27.7	21.7	27.7
4.6	29.0	12.9	29.0	21.2	29.0
4.4	30.3	12.5	30.3	20.6	30.3
4.2	31.6	12.2	31.6	20.1	31.6
4.0	33.0	11.8	33.0	19.7	33.0
3.8	34.3	11.5	34.3	19.2	34.3
3.6	35.6	11.1	35.6	18.7	35.6
3.4	36.9	10.8	36.9	18.3	36.9
3.2	38.2	10.5	38.2	17.9	38.2
3.0	39.5	10.2	39.5	17.5	39.5
2.8	40.9	9.9	40.9	17.1	40.9

注) 平均鋼材厚さが表の中間の値の場合は、その間の平均被覆厚さは厚い方の数値以上とする。

なお、同一の被覆材を用いた認定を既に取得している場合、認定取得者は表2の範囲もしくは既認定の範囲を使用することができるものとする。

以上