

木質系部材の耐火構造試験方法に関する研究 (その3) 放置中耐火炉内における熱収支特性の把握

木質系部材 耐火構造試験 耐火炉 放置
炉内熱収支モデル

正会員 ○ 関 悠平*1 正会員 長谷見雄二*2
正会員 稲葉さとみ*3 正会員 上川大輔*4
正会員 遊佐秀逸*5 正会員 須藤昌照*6
正会員 安井 昇*7

1. はじめに

前報(その1)¹⁾で報告した通り、木質系部材の耐火構造試験で、積載可燃物燃え尽き後の部材の自然消炎、自立性を確認するために、加熱後に一定時間行う放置では、加熱終了後の試験体の燃焼激化(実火災の再現性への疑問)や炉による試験体加熱条件の顕著な不一致という問題が確認されている。そこで、前報(その2)¹⁾で放置条件の標準化を検討する基礎として、炉内熱収支のモデル化に取り組み、一定の成果を得た。

本報では、このモデルをさらに精度を高いものとするべく改良した結果及び、その検証を目的に、実大壁炉を用いた加熱実験と炉の熱的特性の把握について述べる。

2. 壁炉放置中の炉内の熱的特性の実験的把握

実大壁炉の加熱実験は2005年9月に(財)ベターリビング 筑波建築試験センターで行った。

2.1 実験条件

(1) 試験体概要

試験体は炉内熱収支への影響を最小限にするため、図1のように、加熱による火災の発生や変性を起こさない無機材料(セラミックボード[上張り]+繊維混入ケイ酸カルシウム板[下張り])で製作した。

(2) 耐火炉概要

耐火炉の形状・寸法等は図1の通りで、炉壁は200mmのセラミックブロックからなる。(図中×印: 炉壁表面温度測定位置)

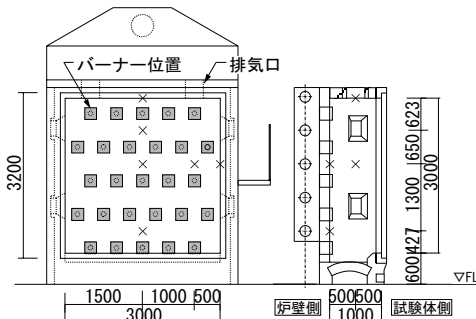


図1 実大壁炉概要図

(3) 加熱・放置条件

実験は性能評価機関の業務方法書²⁾に従い、IS0834標準加熱曲線に準拠して60分加熱した後、試験体を炉に設置した状態で、加熱時間の3倍時間放置した。また、炉内への空気供給量を変更した実験も行った(実験B、実験C)。なお、本炉の現行の放置中給気量は(実験A) 0.107m³/secである。

2.2 測定項目

試験体温度測定(K(CA)熱電対)、試験体表面熱流束測定(水冷式ガードン型熱流束計)、炉内空気温度・炉壁表面温度測定(シース(インコネル)熱電対)、炉内給気流量測定(複合ピトー管)

表1 実験条件一覧

実験	加熱時間 (放置時間)	放置方法	備考
実験A	60分 (180分)	炉内放置	現行給気量
実験B			放置中給気量: 0.167m ³ /sec
実験C			放置中給気量: 0.250m ³ /sec

2.3 実験結果及び考察

実験の測定結果は図2、図3のようになった。なお、京都大学 生存圏研究所内小型炉(試験体寸法: 900×915mm、耐火炉寸法: 1960×1370mm 奥行き200mm、炉壁材料: 20mmセラミックブランケット+105mm耐火レンガ、以降「京大小型炉」)の結果¹⁾も示す。

これらより、放置中の試験体加熱条件が、炉の形状・規模、給気量に影響されることが確認された。本実験では無機材料試験体としたが、表面が木材のように可燃性材料の場合には、この差が試験体燃焼性状の差を引き起こす可能性があると考えられる。

本実験より、炉の形状に起因する放置中の試験体加熱条件の差を、換気量を調整することで制御できる可能を確認できた。ただし、可燃性材料では、給気量を増加させることで燃焼が助長される場合も考えられる。

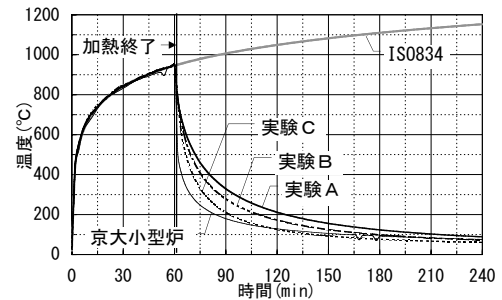


図2 炉内平均温度比較

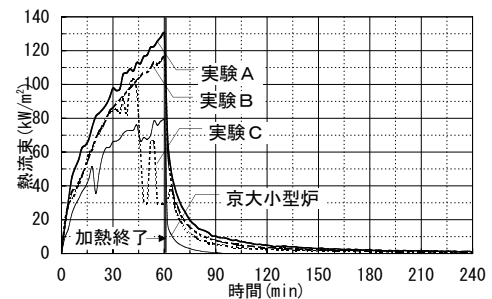


図3 試験体表面 入射熱比較

3. 炉内熱収支モデルの構築

本モデルは、試験体表面など、図4に示す6つの要素における熱移動を定式化し、放置中耐火炉内の熱収支をモデル化するものである。そこで、最も単純な場合で、耐火炉ごとの熱収支特性を把握できるものとして、無機材料試験体を想定した炉内熱収支モデルを構成していく。

モデルの基本構成は前報(その2)とほぼ同様であるため、本報ではモデルの要点のみをまとめる。(試験体及び炉壁を総称して「壁体」と呼ぶこととする。)

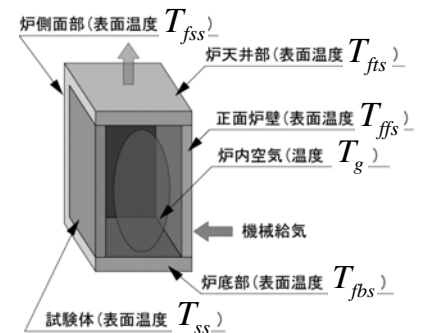


図4 熱収支モデルの構成

3.1 熱収支モデルの諸設定

モデルは壁体表面と炉内空気における熱収支式から構成されるが、これらは温度一様であるとし、また炉内空気は灰色ガスと仮定する。初期条件は加熱実験の放置開始時の実測値とした。また、壁体内部温度は、加熱中の表面温度実測値を境界条件とし、加熱終了まで非定常計算することで放置開始時の温度を算出し、初期条件とした。

3.2 壁体表面における熱収支

壁体表面における熱収支は、図5に示す3つの熱移動を考慮した。

(1) 対流熱伝達

炉内空気と壁体間の対流熱伝達は自然対流熱伝達とする。

(2) 熱伝導

非定常熱伝導方程式を1次元の差分法で解いて壁体内部温度を算出し、壁体内部への入射熱量を導く。また、熱伝導率は温度依存性を考慮する。

(3) 輻射熱伝達

輻射エネルギーの炉外への損失は無いものと仮定し、各壁体表面において反射・吸収の繰り返しを考慮することで、全てのエネルギーが壁体表面及び炉内空気へ吸収されるものとする。

3.3 炉内空気における熱収支

炉内空気は灰色ガス、圧力一定、非圧縮と仮定し、一層ゾーンモデルの考え方³⁾を適用して熱収支を検討した。

3.4 炉内熱収支モデル

以上より、以下のような熱収支モデルを構築した。壁体表面に関しては、試験体、炉壁各面とも同様の形式となるため、試験体のみを記述した。なお、モデルの詳細は文献4)にて報告している。

・壁体表面における熱収支式(下式1は試験体)

$$\rho_{ss} c_{ss} \Delta x \frac{dT_{ss}}{dt} = \left[A' q_{ss(1)} + B' q_{fs(1)} + C' q_{fs(1)} + D' q_{fs(1)} + E' q_{fs(1)} \right] - \left[-\epsilon_{ss} \sigma T_{ss}^4 + h_c (T_g - T_{ss}) + k_{ss} (dT_{ss}/dx) \right] \quad (1)$$

(A'~E'は壁体表面における無限反射・吸収を考慮した係数)

・炉内空気における熱収支式

$$\rho_g c_p V \frac{dT_g}{dt} = \dot{Q}_{net} + c_p (T_0 - T_g) (\rho_0 G - \rho_g G') \quad (2)$$

$$\left(\text{ただし、} \dot{Q}_{net} = \sum_i A_i h_c (T_i - T_g) + \sum_i A_i \epsilon_i \epsilon_g \sigma (T_i^4 - T_g^4) \right)$$

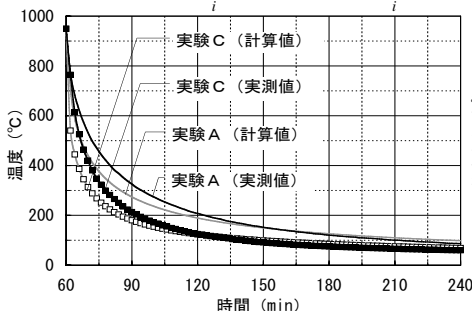


図7 炉内温度の計算値と実測値比較

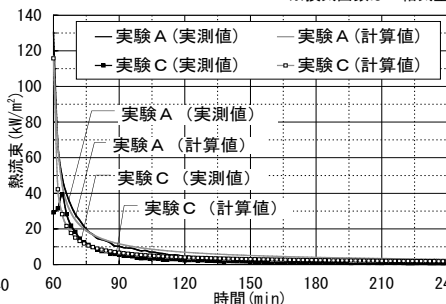


図8 試験体入射熱の計算値と実測値比較

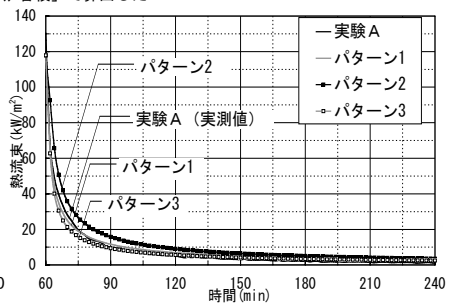


図9 放置条件と試験体入射熱の関係

4. 炉内熱収支モデルの妥当性検討

炉内熱収支モデルで放置中炉内性状を計算し、これを前述の実験と比較・検討した。炉内空気温度、試験体への入射熱の計算値と実験値との比較をそれぞれ図7、図8に示す。これより、図7で放置初期に炉内温度を低めに計算していることを除き、放置中炉内の熱的特性をほぼ十分に把握できていると言える。

5. 炉内熱収支モデルによる放置条件の検討

集成材パネルを用いた筆者らの過去の研究¹⁾では、奥行きが異なる2つの炉で試験体燃焼性状が異なっていた。これより、異なる放置条件での試験体加熱性状をモデルにより計算した(表2)。初期条件は実験Aの壁体内部・表面温度を用いた。

結果を図9に示すが、これより放置条件により試験体加熱性状に差が生じることをモデルによる計算からも確認できた。なお、同一給気回数の場合、炉の容積が大きい方が試験体入射熱流束は小さい。

6. まとめ

本報では、実大加熱炉の熱収支特性を実験とモデルを用いた解析から検討し、以上のようなまとめを得た。

- ・熱収支モデルにより炉内熱収支性状をほぼ再現できた
- ・放置条件の違い(炉の形状、給気量等)により試験体加熱性状に顕著な差が生じることを実験、モデルの両面から確認した
- ・今後は実際の火災区画を想定したモデリングを行い、炉内・区画内の部材加熱条件の比較から、放置方法の検討を行う

【記号一覧】

ρ_s :セラミックボード(試験体)密度(=250m³/kg)、 ρ_p :セラミックブロック(炉壁)密度(=160m³/kg)、 ρ_a :空気密度[m³/kg]、 ρ_o :外気密度[m³/kg]、 c_{ss} :セラミックボード密度(=1.15kJ/kg/K)、 c_p :セラミックブロック比熱(=0.97kJ/kg/K)、 c_g :空気比熱(=1.007kJ/kg/K)、 ϵ_s :セラミックボード放射率(=0.75)、 ϵ_p :セラミックブロック放射率(=0.55)、 ϵ_g :炉内空気放射率(=0.10)、 h_c :対流熱伝達率(=0.02kW/m²/K)、 q_{fs} :壁体iへの一次入射放射熱[kW/m²]、 k :熱伝導率[kW/m/K]、 σ :ステファン・ボルツマン定数(=5.67×10⁻⁸ kW/m²/K⁴)、 G :放置中炉内給気量[m³/sec]、 G' :放置中排気量[m³/sec]、 Q_{net} :熱交換による壁体から炉内空気への熱量[kW]、 T_o :外気温度[K]、 V :耐火炉容積(=9m³)

【参考文献】

- 1) 関悠平、稲葉さとみ、長谷見雄二 他:木質系部材の耐火構造試験方法に関する研究(その1)(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、2005
- 2) (財)ベターリビング:防耐火性能試験・評価業務方法書、2004
- 3) 田中孝義:建築火災安全工学入門、日本建築センター、1993
- 4) 関悠平、稲葉さとみ、長谷見雄二 他:木質系耐火構造部材の耐火試験に関する研究(その1)、日本建築学会関東支部研究報告集、2005

【謝辞】

本研究の一部は、(社)日本ツーバイフォー建築協会の「第2回 坪井記念研究助成」により行われました。記して深く謝意を表します。

表2 想定放置条件一覧

	炉寸法	放置中給気量
実験A(実測値)	3000mm×3000mm	0.107m ³ /sec(換気回数0.012回/sec)
パターン1	奥行き1000mm	0.107m ³ /sec(換気回数0.012回/sec)
パターン2	3000mm×3000mm	0.107m ³ /sec(換気回数0.006回/sec)
パターン3	奥行き2000mm	0.213m ³ /sec(換気回数0.012回/sec)

*換気回数は「給気量/炉容積」で算出した

*1 株式会社 日建設計(実験当時 早稲田大学大学院) 工修
 *2 早稲田大学理工学術院 教授 工博
 *3 早稲田大学大学院
 *4 早稲田大学理工学術院 助手 博士(工学)
 *5 財団法人 ベターリビング 筑波建築試験センター 工博
 *6 財団法人 ベターリビング 筑波建築試験センター
 *7 早稲田大学理工総研客員研究員 博士(工学)

*1 Nikken Sekkei Corp., M.Eng
 *2 Prof., Department of Architecture, Waseda Univ., Dr.Eng
 *3 Graduate School of Waseda Univ.
 *4 Research Associate, Waseda Univ., Dr.Eng
 *5 Tsukuba Building Test Lab., The Center for Better Living, Dr.Eng
 *6 Tsukuba Building Test Laboratory, The Center for Better Living
 *7 Visiting Researcher, Rise Waseda Univ., Dr.Eng