

吸水性樹脂を保水材に用いた耐火被覆材の耐火性能*

金 招 芬^{*1}, 浅 古 豊^{*2}
山 口 義 幸^{*2}, 原 田 稔^{*3}Fire Resistance Characteristics of Fire Protection Materials
of High Water Content using Super-Absorbent PolymerZhao-Fen JIN^{*4}, Yutaka ASAKO,
Yoshiyuki YAMAGUCHI and Minoru HARADA^{*4} Tsinghua University, Dept. of Thermal Engineering, Beijing, 10084, P. R. China

It is empirically well known that a moist fire protection material shows a good fire resistant characteristics. From this fact, a fire protection material is made of a mixture of cement mortar in which water storage materials such as silica gels or moist perlites are mixed. The latent heat of water in the fire protection material plays an important role in the resistance of temperature rise. In this study, the fire resistance tests for a fire protection material of high water content is conducted and the temperature response of the test material is obtained. The test material consists of the perlite mortar in which the gels which absorbed the aqueous solution of calcium chloride are mixed as the water storage material. The water content of the test materials were also measured. And also the numerical predictions for the fire resistance test were conducted and the results were compared with the experimentally obtained temperature responses.

Key Words: Fire Resistance, Fire Protection Material, High Water Content, Super-Absorbent Polymer, Calcium-Chloride Solution

1. 緒 言

耐火材はその水分量を高めると耐火性能が向上することが経験的に知られている。これは水の蒸発潜熱が熱の伝ばを阻止する働きをするためである。そのため、耐火金庫の壁や鉄骨構造物の耐火被覆に広く使われているセメント系耐火材には、その熱抵抗を大きくするためのパーライトあるいはロックウール等の断熱材と、水分量を高めるためのシリカゲルやゼオライトなどの保水材が混合、分散されている。

著者らは、耐火材の水分量を高めると耐火性能が向上するという経験的に知られている事実を理論的に確認するために、まず、耐火壁の火災時の温度応答を数値シミュレーションするためのモデルを提案し⁽¹⁾、さらに耐火壁の水分量を高めた場合のシミュレーションを行い、水分量を増やすと耐火時間が延び、耐火性能が向上することを理論面からも確認した⁽²⁾。しかしな

がら、保水材として用いられているシリカゲルやゼオライトの水分量は30 mass%以下で、それらを混合、分散させたセメント系耐火材の水分量は10 mass%程度である。

このような背景から、著者らは高吸水性樹脂に潮解性をもつ塩の水溶液(例えば塩化カルシウム)を吸水させたゲルを保水材として用いることを考案し、その保水材としての特性を調べた⁽³⁾。その結果、塩化カルシウム水溶液を吸水したゲルは周囲の蒸気圧とバランスする濃度になるまで蒸発あるいは空気中の水蒸気を吸収し、周囲の湿度によって水分量は変化するが、シリカゲルやゼオライトに比べ、水分量は多く、保水材として有望であることを明らかにした。

本報告では、高吸水性樹脂に塩化カルシウム水溶液を吸水させたゲルをパーライトモルタル中に混合した高含水耐火材の耐火試験結果について報告する。さらに耐火試験の数値シミュレーションを行い、実験結果と比較した結果についても報告する。なお、本研究で用いた高吸水性樹脂はアルコキシ・ポリアルキレングリコール系架橋重合体(日本触媒, CN 80-M)である。

おもな記号

A: 吸水倍率

* 原稿受付 1999年3月3日。

^{*1} 正員, 清华大学热能工程系(100084 中国北京市清华园)。^{*2} 正員, 東京都立大学工学部(☎192-0397 八王子市南大沢1-1)。^{*3} (株)熊平製作所開発本部(☎734-0003 広島市宇品東2-4-34)。

E-mail: jinzhf@tsinghua.edu.cn

C : 濃度
 C_p : 定圧比熱
 h : 熱伝達率
 K : 熱伝導率
 M : 質量
 t : 時間
 T : 温度
 V : 体積
 W : 水分の質量割合 $= M_w/M_{all}$
 ϵ : 放射率
 ρ : 密度
 $\Delta\gamma$: 吸着水と結晶水の蒸発潜熱
 subscript
 0 : 養生開始時の値
 all : 全成分
 c : セメント
 ca : 塩化カルシウム
 cp : セメントペースト
 eff : 有効値
 fw : 自由水
 gel : ゲル
 H : 加熱表面
 i : 初期値
 l : 飽和温度以下の領域
 p : パーライト
 pm : パーライトモルタル
 v : 飽和温度以上の領域
 w : 自由水, 吸着水, 結晶水すべての水
 ∞ : 周囲加熱雰囲気

2. 耐火試験

2.1 耐火材の配合および養生 耐火金庫の耐火材にはパーライトモルタルが広く用いられているので, 本研究ではパーライトモルタルをベースの耐火材に選んだ. 混合したゲルは 1 kg の吸水性樹脂 (CN 80-M) に 15 kg の 30 mass% の塩化カルシウム水溶液を吸水させたもの ($A=15$ kg/kg) である. このゲルの保水特性および熱特性については著者らの報告⁽³⁾を参照されたい. 試験を行った耐火材の配合を表 1 に示す. 用いたパーライトは C パーライトである. パーライトモルタル中にゲルを混合, 分散し, それを 210×210×60 mm の型枠に入れ, 相対湿度 80%, 温度 25°C の恒温恒湿槽 (島津理化, HT 30 W) 内に置き 21 日間養生した. 後述の耐火試験には 2 枚の試験体が必要なため, 同一形状の試験体を 2 枚製作したが表 1 に示すように, その質量は完全には同一ではない.

Table 1 Composition of test materials

	Test material		Perlite Mortar	
	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
Cement	1.128 kg	1.142 kg	2.287 kg	2.335 kg
Water	0.598 kg	0.605 kg	1.212 kg	1.238 kg
M_w/M_c	0.53	0.53	0.53	0.53
Perlite	0.147 kg	0.148 kg	0.297 kg	0.304 kg
V_p/V_c	1	1	1	1
Gel (30 mass %)	1.517 kg	1.535 kg	-	-
V_{gel}/V_{pm}	1	1	-	-
Initial mass	3.390 kg	3.430 kg	3.797 kg	3.876 kg
Initial density	1280 kg/m ³	1296 kg/m ³	1435 kg/m ³	1465 kg/m ³

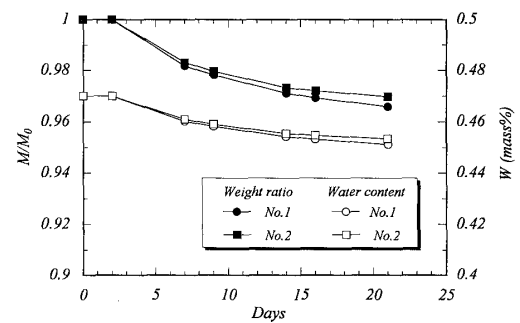


Fig. 1 Change in weight and water content of a test material in a curing process

養生開始 2 日後に型枠をはずし, 養生中の試験体の質量を電子てんびん (A&D EK-12 KA, 最小目盛 1 g) で測定し, その質量変化から試験体内の水分の質量割合を算出した. 比較のため, パーライト/セメント比, $V_p/V_c=1$ のパーライトモルタルの耐火試験も行った. その配合も表 1 に示す.

2.2 水分量 養生中の試験体内では, セメントは水と水和反応を起こし, けい酸カルシウム水和物および水酸化カルシウムへ変化する. すなわち, セメントと水とを混合したセメントペースト中の水の一部は養生中に水和物の結晶水あるいは水酸化カルシウムの水酸基へと変化する. また, 一部の水はそれら結晶の表面に吸着した吸着水となる. 残りの水は自由水として残るものと, 蒸発するものに分かれる. 一方, ゲルの中の水は周囲の蒸気圧とバランスする濃度になるまで蒸発あるいは水蒸気を吸収し質量が変化する.

養生期間中の試験体の質量変化および水分 (自由水, 吸着水および結晶水の和) の質量割合の変化を図 1 に示す. 図 1 の縦軸は養生開始時の試験体の質量で無次元化したものである. いずれの試験体とも 21 日間の養生後の質量は養生開始時の質量の 97% で, 水分の質量割合 W は 45 mass% であった. 図 1 には示していないが, 養生後のパーライトモルタルの W は 24.3 mass% であった.

試験体内の自由水, 吸着水および結晶水の割合を調べるため, その表面からサンプルをとり, 室温から

1270 Kまで、昇温速度 20 K/min で熱重量(TG)/示差熱(DTA)分析(セイコー電子 TG/DTA 300, 分解能 1 μ g, 0.1 μ V)を行った。図2に試験体 No. 2 の TG/DTA の結果を示す。図2中の実線が TG の、破線が DTA の結果である。DTA の結果を見ると、加熱開始から約 513 K (点 A) までの間に一つの大きな吸熱反応が見られる。これは試験体に含まれた自由水の蒸発によるものである。点 A' の TG の値から、その自由水の質量割合は 21.4 mass% であることがわかる。513 K から 913 K まで (点 A から点 B) の間にいくつの吸熱反応と質量の減少が見られるが、セメントモルタルでは 513 K 付近からセメント水和物中の結晶水の崩壊が始まり、また 773 K では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の脱水分解が顕著となるといわれている⁽⁴⁾。また、970 K 前後に見られる吸熱反応は CaCO_3 のガス分解(脱炭酸)によるものである。このことから、513 K から 913 K まで (点 A'-B' 間) の質量変化はゲル中の束縛水⁽³⁾ およびセメントペースト中の吸着水の蒸発、結晶水の崩壊、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の脱水によるものと考えられる。それらを個別には特定できないが、自由水以外の水の質量割合は点 A', B' の TG の値の差から 13.0 mass% であることがわかる。したがって、試験体に含まれる水のうち $21.4/(21.4+13.0)=62.2\%$ が自由水、 $13.0/(21.4+13.0)=37.8\%$ がその他の水となる。この割合はサンプルをとった試験体表面の値であるが、試験体

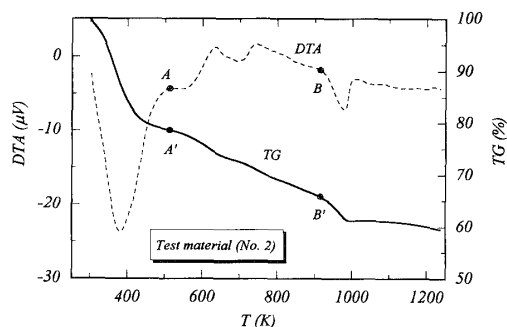


Fig. 2 Results of TG/DTA of a test material (No. 2)

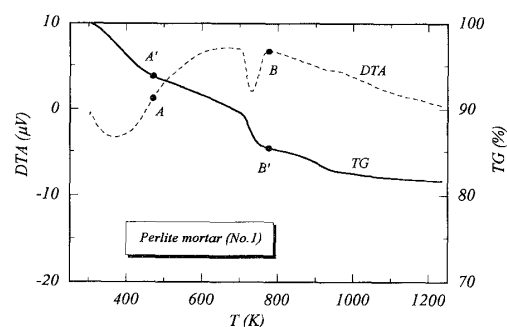


Fig. 3 Results of TG/DTA of a perlite mortar (No. 1)

内でこの値が一様であると考えれば、養生時の質量変化から求めた全水分の質量割合 W にこの値をかければ試験体の自由水の質量割合を求めることができる。このようにして求めた試験体 No. 1 の自由水の質量割合は 28.1 mass%, その他の水の質量割合は 17.1 mass%, No. 2 の自由水の質量割合は 28.2 mass%, その他の水の質量割合は 17.1 mass% であった。

比較のため、セメント/パーライト比が 1 のパーライトモルタルの TG/DTA の結果を図3に示す。自由水とその他の水の質量割合を同様の方法で推定したところ、自由水の質量割合は 10.2 mass%, その他の水の質量割合は 14.1 mass% であった。このことから、ゲルを混入することにより自由水の質量割合が約 18 ポイント高まることが判明した。

2・3 耐火試験装置 耐火試験装置の概略を図4に示す。210 mm×210 mm 厚さ 60 mm の板状の試験体 No. 1 と No. 2 を 8 mm の空げきをもたせておき、その周囲を厚さ 50 mm のけい酸カルシウム板(密度 150 kg/m³)で断熱している。8 mm の空げきにはセラミックファイバを詰め、空気が流動しないよう留意した。これらの試験体および断熱材を厚さ 1.0 mm のスチール製の箱に入れ、電気炉(ヤマトラボテック製, FE-100 K)内に設置し、JIS-S 1037⁽⁵⁾ の加熱曲線に沿って加熱した。

試験体に挟まれた 8 mm の空げきの中央位置に径 0.65 mm の K 熱電対を設置し、温度を測定した。炉内温度は構造体より 5 cm 離れた位置に設置した熱電対で測定した。

2・4 耐火試験結果 耐火試験後の試験体の写真を図5に示す。図5に示す面は前述の 8 mm の空げきに面していた面である。写真にある外側の大きな灰色のリングは脱炭酸によって変色した部分で、この部分は耐火試験中に 973 K 以上になったと考えられる。また、中心付近の黒色のリングは吸水性樹脂の炭化に

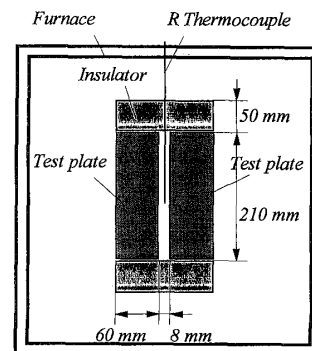


Fig. 4 Experimental setup for fire resistance test

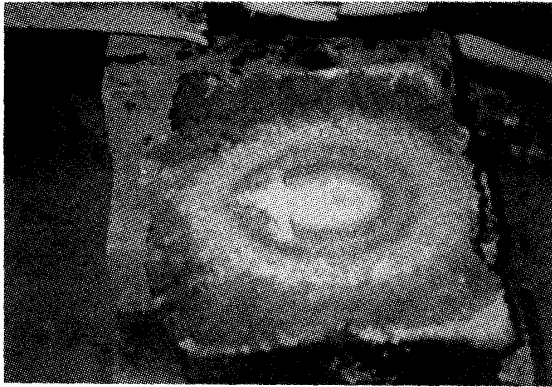


Fig. 5 A picture of the test material after the fire resistance test

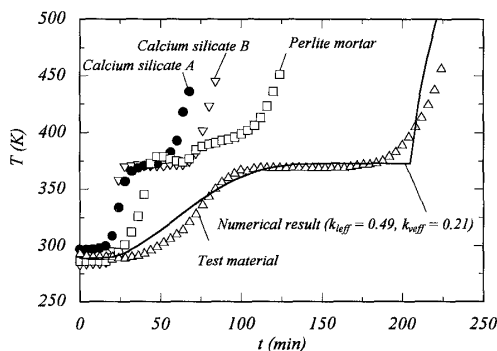


Fig. 6 Temperature responses at 8 mm gap

よるものと考えられる。これらのリングが同心状であることから、試験体の周囲に断熱の目的で設けたい酸カルシウム板からの熱侵入が認められる。本実験では完全な一次元性は確保できていない。

8 mm の空げきの温度応答を図 6 に示す。比較のため、著者らが行った 2 種類のけい酸カルシウム板(A および B)の耐火試験結果⁽¹⁾と、今回同一装置で行ったパーライトモルタルの耐火試験結果も図 6 に示す。ゲルを保水材に用いた本試験体の場合、8 mm の空げきが 373.15 K に達するのは加熱開始後およそ 100 min 後で、他の材料に比べ極めて長い。また、373.15 K に達した後も約 90 min 間 373.15 K を維持する。これも他の材料に比べ長い。温度の再上昇は加熱開始 185 min 後で、450 K {177°C} に到達するのは加熱開始 223 min 後であった。この結果から、本試験体は他の耐火材に比べ優れた耐火性能を有することが明らかになった。

3. 数値計算結果との比較

3・1 基礎式および境界条件 計算に用いたモデルは著者らが前報⁽¹⁾で提案したモデルで、試験体を多孔質体と考え、内部での自由水の蒸発と結晶水の崩壊

Table 2 Thermophysical properties used for computation

Temp. range	ρ_{eff} (kg/m ³)	$C_{p,\text{eff}}$ (J/kg·K)	K_{eff} (W/m·K)
~373.15K	1271	1879	0.49
373.15~913.15K	1089-0.4706T	908300+1056T	0.21
913.15K~	659.3	1056	0.21

を考慮した一次元モデルである。モデルについてはそこに詳細に書かれているので、ここでは簡単に説明する。基礎式は連続の式、運動の式、エネルギー式で、水の蒸発によって生じる蒸気の流れをダルシーモデルで近似した。基礎式は

$$\frac{d(\rho_v U)}{dX} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$0 = -\frac{dP}{dX} - \frac{\nu}{k} \rho_v U \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_{\text{eff}} E_{\text{eff}})}{\partial t} + \frac{\partial\left(\rho_v \frac{C_{p,v}}{C_{p,\text{eff}}} U E_{\text{eff}}\right)}{\partial X} \\ = \frac{\partial^2(\Gamma E_{\text{eff}})}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial X^2} \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに

$$\Gamma(E_{\text{eff}}) = \begin{cases} K_{v,\text{eff}}/C_{p,v,\text{eff}}(E_{\text{eff}} > 0) \\ 0(-\gamma_{\text{eff}} \leq E_{\text{eff}} \leq 0) \\ K_{l,\text{eff}}/C_{p,l,\text{eff}}(E_{\text{eff}} < -\gamma_{\text{eff}}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$S(E_{\text{eff}}) = \begin{cases} 0(E_{\text{eff}} > 0) \\ 0(-\gamma_{\text{eff}} \leq E_{\text{eff}} \leq 0) \\ K_{l,\text{eff}} \gamma_{\text{eff}}/C_{p,l,\text{eff}}(E_{\text{eff}} < -\gamma_{\text{eff}}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに E_{eff} は試験体の有効エンタルピーで、 K_{eff} 、 $C_{p,\text{eff}}$ はそれぞれ有効熱伝導率、有効比熱である。これらの値については後述する。なお、 γ_{eff} は自由水の蒸発潜熱の有効値である。

試験体ははじめ温度 T_i に保たれており、

$$t < 0: T = T_i, U = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

時刻 $t=0$ において加熱炉に面している面が加熱される。この面は対流および放射加熱され、8 mm の空げきに面した面(試験体の裏面)を断熱面と考えれば、境界条件は

加熱面:

$$q_H = h_H(T_\infty - T_H) + \varepsilon_H \sigma(T_\infty^4 - T_H^4) \quad \dots\dots\dots (7)$$

試験体裏面:

$$dT/dX = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 q_H は加熱面の熱流束、 T_∞ は加熱炉の雰囲気温度である。

3・2 試験体の物性値 計算に用いた物性値を表 2 に示す。著者らの前報⁽¹⁾のモデルでは 373.15 K 以下、373.15 K から結晶水の崩壊が終了する温度まで、

結晶水の崩壊終了温度以上の3温度域に分け、それぞれの温度域の物性値を計算に用いた。そこで、373.15 K以下の温度域の有効密度 ρ_{leff} は養生後の試験体の質量と体積から求めた2枚の平均値とした。TG/DTAの結果からすべての水は913.15 Kまでに蒸発し、それ以上の温度ではセメント、パーライトと塩化カルシウムが残ると考えられる。913.15 Kを結晶水の崩壊終了温度とし、913.15 K以上の温度域の有効密度をセメント、パーライトと塩化カルシウムの質量割合とから計算した。373.15 Kから913.15 Kの温度域の有効密度は温度に対し線形の関係にあるとした。

有効比熱については以下のように見積もった。373.15 K以下の温度域の有効比熱は成分の質量割合から

$$C_{p,\text{leff}} = C_{p,cp} \frac{M_{cp}}{M_{\text{all}}} + C_{p,p} \frac{M_p}{M_{\text{all}}} + C_{p,\text{gel}} \frac{M_{\text{gel}}}{M_{\text{all}}} \dots (9)$$

ここに $C_{p,cp}$, $C_{p,p}$, $C_{p,\text{gel}}$ は各成分の比熱で、それらの値には $C_{p,cp}=1100$, $C_{p,p}=1000$ and $C_{p,\text{gel}}=2790$ J/(kg·K)を用いた。養生後の試験体の質量割合を表3に示す。

913.15 K以上の温度域の有効比熱は同じ温度域の有効密度の算出と同様に、913.15 K以上の温度域ではセメント、パーライト、塩化カルシウムが残ると考え、次式から計算した。

$$C_{p,\text{eff}} = C_{p,c} \frac{M_c}{M_{\text{all}}} + C_{p,p} \frac{M_p}{M_{\text{all}}} + C_{p,\text{ca}} \frac{M_{\text{ca}}}{M_{\text{all}}} \dots (10)$$

ここに $C_{p,c}$, $C_{p,p}$, $C_{p,\text{ca}}$ はそれぞれ各成分の比熱で、それらの値には $C_{p,c}=1100$, $C_{p,p}=1000$, $C_{p,\text{ca}}=958$ J/(kg·K)を用いた。

標準圧力のもとでの373.15 Kにおける自由水の蒸発潜熱は2256.9 kJ/kgであるが、この値を束縛水、吸着水の蒸発時の潜熱量、結晶水および水酸化カルシウムの水酸基の離脱時の潜熱量に用いた。これらの水の見掛けの蒸発熱は

$$\Delta\gamma = 2256.9 \times \frac{M_w - M_{fw}}{M_{\text{all}}} \text{ [kJ/kg]} \dots (11)$$

束縛水および吸着水の蒸発、結晶水の崩壊、水酸化カルシウムの水酸基の離脱が373.15 Kから913.15 Kまで連続的に起こるものと仮定し、この温度域の有効比熱に見掛けの蒸発熱を含ませれば

$$C_{p,\text{eff}} = \frac{\{\Delta\gamma/(913.15-373.15)\} \rho_{\text{leff}}}{\rho_{\text{eff}}} + 1056 \quad (373.15 < T < 913.15) \dots (12)$$

京都電子製熱線プローブPD31を用い、非定常細線加熱法で298.15 Kおよび573.15~723.15 Kの試験体の有効熱伝導率を測定した。その結果、298.15 Kの有効熱伝導率は $K_{\text{eff}}=0.49$ W/(m·K)、573.15~723.15 Kの有効熱伝導率は $K_{\text{eff}}=0.20\sim0.22$ W/(m·K)であった。そこで、373.15 K以下の温度域の有効熱伝導率 K_{leff} に298.15 Kの値を、373.15 K以上の温度域の有効熱伝導率に673.15 Kの値を用い $K_{\text{veff}}=0.21$ W/(m·K)とした。

3.3 数値計算結果 加熱面の境界条件の熱伝達率および放射率には $h_H=40\sim50$ W/(m²·K)、 $\varepsilon_H=0.9$ が用いられることが多い⁽⁶⁾⁽⁷⁾。ここでは Huang ら⁽⁶⁾ がコンクリート板の火災時の温度応答を計算した際に用いた $h_H=50$ W/(m²·K)、 $\varepsilon_H=0.9$ を用いた。加熱面外側の雰囲気温度 T_∞ はJIS-S 1037で規定された加熱曲線の近似式、式(13)から計算した。

$$T_\infty = 1353 - 340e^{-0.8t/3600} - 130e^{-5t/3600} - 610e^{-19t/3600} \dots (13)$$

ここに、式中の t の単位はsである。

試験体の加熱開始時の温度は289.15 Kで、 $T_i=289.15$ Kとした。式(13)は初期温度が273.15 Kの場合を想定したものである。式(13)から計算される T_∞ が、この初期温度より低いときには $T_\infty=T_i$ とした。試験体裏面温度の計算結果を図6中に実線で示す。加熱開始初期に計算値と実験値との間に差異が見られるが、373.15 Kからの温度の再上昇を開始する時刻はほぼ一致した。

4. 配合と保水量の関係

耐火試験の結果から、耐火材の水分量を高めると耐火性能が向上することが明らかになった。試験を行った試験体のパーライト、セメント、ゲルの配合はパーライト/セメント比、 $V_p/V_c=1$ 、ゲル/パーライトモルタル比、 $V_{\text{gel}}/V_{pm}=1$ であった。これらの配合を変えると、水分量が変わるので、配合と水分量との関係を調べることにした。

4.1 試料の配合と養生条件 試料は耐火試験を行ったものと同様に $C=30$ mass%の塩化カルシウム水溶液を $A=15$ kg/kg 吸水した高吸水性樹脂(CN-80 M)をパーライトモルタル中に混合分散させたものである。フレッシュパーライトモルタルの配合とパーライトモルタルとゲルの混合比を表4に示す。パーライト/セメント比が異なる3種類のパーライトモルタ

Table 3 Mass fraction of test materials after curing process

	No. 1	No. 2
M_{cp}/M_{all}	0.492	0.494
M_p/M_{all}	0.045	0.044
$M_{\text{gel}}/M_{\text{all}}$	0.463	0.462

Table 4 Composition of test materials

No.	Composition of mortar		Volume ratio of gels and fresh perlite mortar (V_{gel}/V_{pm})
	Perlite/Cement ratio (V_p/V_c)	Water/Cement ratio (M_w/M_c)	
1	1	0.53	0.5
2	1	0.53	1
3	1	0.53	1.5
4	1	0.53	2
5	2	0.53	0.5
6	2	0.53	1
7	2	0.53	1.5
8	2	0.53	2
9	3	0.7	0.5
10	3	0.7	1
11	3	0.7	1.5
12	3	0.7	2

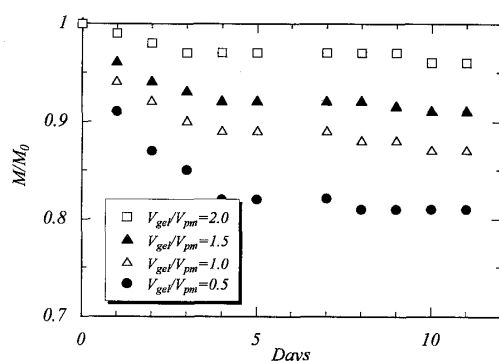
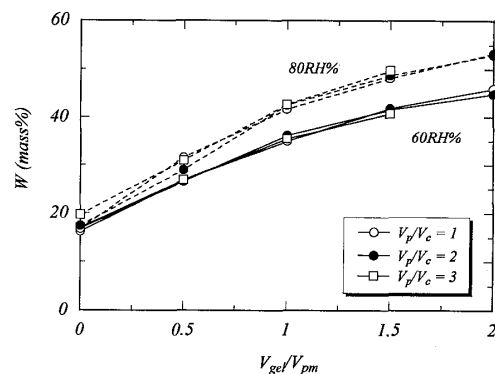


Fig. 7 Change in weight of test materials during a curing process

れを用意した。ゲルとパーライトモルタルの混合比を四とおり変えたすべての組合せについて、その水分量を調べた。

試料を直径 48.7 mm、深さ 14.7 mm のシャーレに入れ、温度 25°C、湿度 80% の恒温恒湿槽に 12 日間置き、その間の質量変化を測定し、水分量を算出した。その後、恒温恒湿槽の湿度を 60% に変え、相対湿度 60% の下での水分量を算出した。

4・2 保水量 試料 No. 1~4 の養生中の質量変化を図 7 に示す。試料の質量は養生開始時の質量で正規化してある。図 7 に示すように、養生開始直後に質量は急激に減少し、10 日経過後はほぼ一定となる。試料中の水分の質量割合を図 8 に示す。図 8 に示すように、ゲル/パーライトモルタル比 V_{gel}/V_{pm} が増加すると水分の質量割合も増加する。一方、パーライト/セメント比 V_p/V_c が変化しても水分の質量割合はほと


 Fig. 8 Effect of mixing ratio, V_{gel}/V_{pm} , on water content

んど変化せず、パーライト/セメント比が水分の質量割合に及ぼす影響は小さいことがわかる。

相対湿度が 60% と 80% の結果を比較すると、予想していたとおり、相対湿度 60% の下での水分量は相対湿度 80% の下でのそれより少ない。相対湿度の影響はゲル/パーライトモルタル比 V_{gel}/V_{pm} が高い試料に顕著に現れる。

5. ま と め

(1) パーライトモルタル中の自由水の質量割合は約 10 mass% であるが、ゲルを混合分散させた本試験体のそれは約 28 mass% で、ゲルを混合分散させることにより自由水の質量割合を約 18 ポイント高くできる。

(2) 本試験体の裏面が 450 K {177°C} に到達するまでの時間は 223 min であった。この時間は通常使われている耐火材のそれに比べかなり長い。

(3) 数値計算で予測した試験体裏面の温度応答は実験値とよく一致した。

文 献

- (1) 金招芬・ほか 3 名, 機論, **63**-609, B(1997), 1747-1753.
- (2) Jin, Z. F., ほか 2 名, Numer. Heat Transf., **33**-4(1998), 403-414.
- (3) 金招芬・ほか 3 名, 機論, **63**-613, B(1997), 3041-3047.
- (4) 小林一輔, コンクリート工学(第 3 版), 森北出版.
- (5) 日本工業規格, S 1037-1998.
- (6) Huang, C. L. D., ほか, Numer. Heat Transf., Part A, **19**(1991), 43-64.
- (7) 長谷見雄二・ほか 2 名, 日本建築学会構造系論文報告集, **446**, (1993), 137-145.