

論文

[1044] 軽量骨材コンクリートの表面結露

正会員 ○中村 静夫 (石川県工業試験場)

正会員 榑場 重正 (石川工業高等専門学校)

正会員 五十嵐心一 (金沢大学 工学部)

1. はじめに

結露を発生させる条件を作りだす建築物側の背景は、極めて複雑である。これは、多くの場合いくつかの原因が複合して結露発生条件となっていることによる。それ故結露対策にもさまざまな方法があり、吸湿材を用いるのも方法もある¹⁾。しかし、一定の負荷容量に対しては結露防止が可能であるが、能力向上のため吸湿能力を向上させると水分放出時に大きなエネルギーを必要とし、放出しなければ高含水状態の継続となり断熱性能が低下する。そこで、適度な吸水能力と断熱性を有する材料が要求される。その一つに軽量骨材コンクリート板があり²⁾、田淵らが寒冷地用断熱外壁材として利用研究³⁾を行っていたが、結露防止材としての検討例はない。

施工に際し表面結露発生までの時間予測が必要である。しかし、軽量骨材コンクリートの場合水蒸気が表面に凝縮しても内部に拡散するため直ちに水滴として表面に現われずその発生までの予測が困難である。そこで、施工基準の基礎資料として環境条件と表面結露発生までの定量的関係を求めた。さらに、結露発生機構を考察し数値解析による発生時間の推定も試みた。

2. 実験概要

2-1 供試体

供試体の示方配合を表1に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを(比重: 3.14)を用い軽量骨材としてパーライトを用いた。配合材料をミキサーで混練後、600x900x50mmの型に打設した。型の上面に約0.3MPaの加重を付加し、同時に下面を減圧することにより脱水を行なった。さらに、振動により締め固めた後、表面をこてで仕上げたものを供試体とした。供試体は5試料作成し、製作順にNO.1からNO.5とした。実験には飽和含水状態から調湿槽(293K, 90RH%)で乾燥させ、含水率が低下した供試体を使用した。

2-2 供試体物性

供試体の透湿率と水の拡散係数は、 $1.05 \times 10^{-12} \text{kg}/(\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$ 、 $3.75 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ であった。透湿率は、293Kの恒温槽内で供試体に湿度差を付加し水蒸気の透過量を計測することにより求めた。また、供試体内への水の拡散係数は乾燥した供試体の水中浸漬時の重量変化を基にし、3次元の物質収支式からパラメータフィッティングにより推定した。

軽量骨材コンクリートの含水率と熱伝導率との相関としては、西らの実用図⁴⁾があるが、数式として定量的関係が示されていない。そこで、供試体の含水率を変え熱線法により熱伝導率を計測した。その結果を図1に示す。熱線の密着性の差によりデータには計測誤差が見られるが、含水率とは比例関係を示した。

表1 示方配合

水セメント比		0.8
細骨材率	(%)	60
単位水量	(kg/m ³)	240
単位セメント量	(kg/m ³)	300
粒 径 別 骨 材 重 量 (kg/m ³)	~ 0.6mm	11.2
	0.6 ~ 1.2mm	15.7
	1.2 ~ 2.5mm	13.5
	2.5 ~ 5.0mm	4.5
	5.0 ~ 7.0mm	14.2
	7.0 ~ 15 mm	21.3

熱伝導率 k [$W/(m \cdot K)$] が容積含水率 C_v [%] のべき乗に比例すると仮定するとその相関式として次式が得られた。

$$k = 0.177 \times C_v^{0.28} \quad (1)$$

次に、温度依存性を求めるため熱流計法により乾燥時と飽和含水状態時の熱伝導率を計測した結果を図2に示す。乾燥状態では、温度依存性は認められなかった。また、飽和含水状態では、水の影響により温度上昇と共に数%増加する傾向が認められたが、含水率の影響と比較するとその変化量は少ないため、本実験では温度依存性は考慮しなかった。さらに、2つの熱流計を用いた熱伝導測定装置を用い、Laplace変換法⁵⁾により乾燥時の熱拡散率を求めた結果を比熱で示すと、供試体の試料番号に依存せず $1.07 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ であった。

2-3 結露実験の方法

結露発生実験に用いた装置の概略を図3に示す。各恒温恒湿装置の大きさは、 $1500 \times 2100 \times 3020 \text{ mm}$ と $2000 \times 2100 \times 3020 \text{ mm}$ であり、この二つの槽で供試体を挟み込む状態で固定し、一方を高温多湿に設定することにより結露を発生させた。実験開始時の供試体の含水率は、 $13 \sim 23 \text{ wt}\%$ であった。環境条件設定には、建築研究所の材料委員会が設定したグレーティングを参考にし、供試体に付加した温度差は、 1.5 から 4.5 K で恒温室の乾球温度は、 288 K から 298 K であった。また、湿度は、 60 から 90% までの4水準とした。

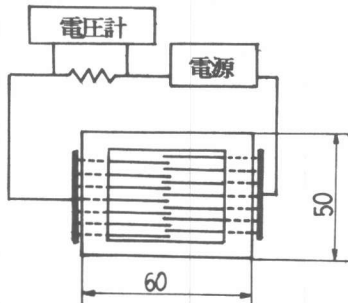


図4 結露検出システム

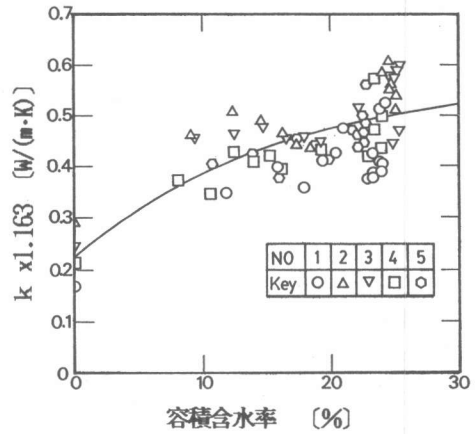


図1 容積含水率と熱伝導率との相関

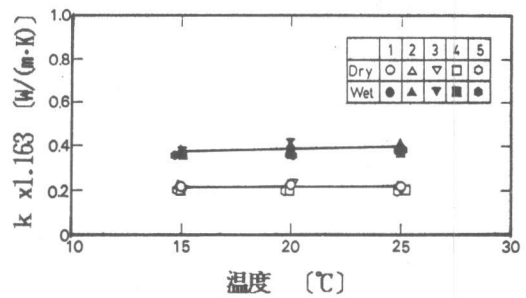


図2 温度と熱伝導率との相関

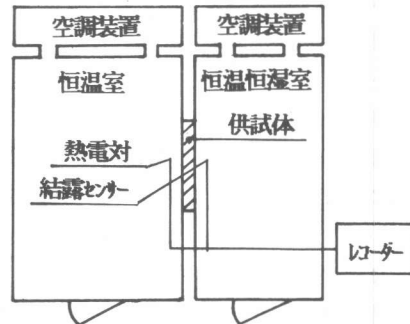


図3 実験装置概略

結露発生の判定は、試作した検出器を用いた。その検出システムを図4に示す。この検出器を供試体上に10ヶ所分散させ、電圧2.5Vを印可し電極間に流れる電流量を固定抵抗にかかる電圧変化として検出し結露判定を行なった。供試体の表面温度は、結露検出器と同一地点でT型熱電対を用いて計測した。

3. 結果と考察

3-1 供試体表面温度

表面結露発生時の供試体表面温度とその時の高温室側の露点との相関を図5に示す。供試体温度はすべて露点以下であった。これは、供試体表面では水蒸気の凝縮が発生しているが、供試体の吸水性により直ちに表面結露が発生していなかったことを示している。また、同一環境条件で実験を行なった場合でも供試体表面温度が異なっている、これは各供試体の初期含水率（熱伝導率）の相異が結露発生時まで継続されていると考えられる。つまり、表面結露発生までの間、水蒸気の凝縮は発生するがその凝縮量は少なく供試体全体の平均含水率の増加は小さい。よって、表面結露発生は、供試体表面近傍のみが飽和含水状態に達して発生すると推定できる。これは、実験前後の供試体重量増加が初期含水率のいかんにかかわらず1%以下であったことと一致する。

3-2 環境条件と表面結露発生時間

相対湿度と表面結露発生時間との相関を図6に示す。温度差が15K、相対湿度60%と70%の時供試体表面温度が露点以下で定常に達し結露発生は認められなかった。

定常状態の確認は、熱流計を用いて行なった。発生時間と相対湿度とは、反比例関係を示し、温度差が減少するほどその傾きは増大する傾向が認められる。

次に、高温室側乾球温度と供試体表面温度との差を高温室側温度差とし、発生時間との相関を図7に示す。高温室側温度差は、

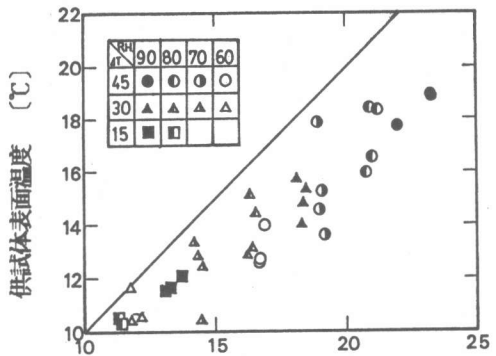


図5 露点と供試体表面温との相関

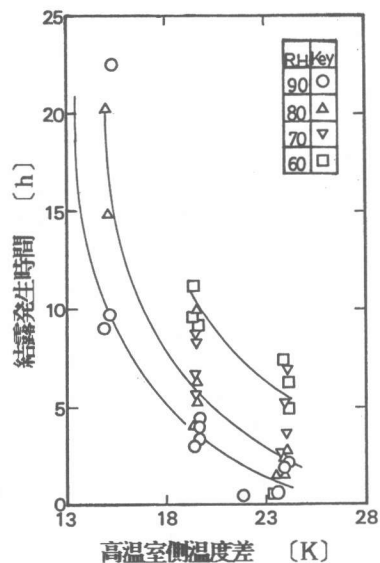
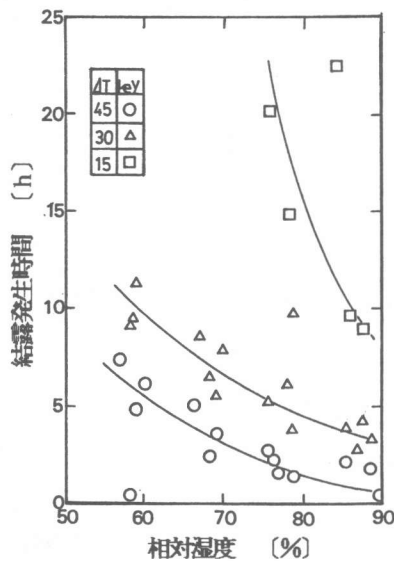


図6 相対湿度と結露発生時との相関 図7 高温室側温度と結露発生時との相関

15K, 20K, 25Kは それぞれの実験条件の温度差15K, 30K, 45Kに対応する。高温室側温度差は、壁近傍で発生する自然対流の大きさを示す、バルクの空気から供試体表面への境膜物質移動係数に影響を及ぼすので、発生時間とは定量的関係を示すと考えられる。しかし、相対湿度と同様に温度差の増加により発生時間が減少傾向を示すが明確な定量関係を得ることはできない。

3-3 結露発生時間の実験式

前節で示した様に表面結露発生時間は、各要因が相互に影響するため理論的に決定するのは困難である。そこで、次元解析により因子間の定量的関係を推定し発生時間の予測を試みた。結露発生時間は、供試体表面が飽和含水状態に達するまでの時間である。つまり、発生時間は、供試体表面への水分蓄積速度を求めることであり、この値は水蒸気凝縮速度と供試体内部への水の拡散速度との差となる。おのおのは、境膜物質移動係数と拡散係数に支配される。さらに、図8に示した熱と物質移動モデルから、境膜物質移動係数は、境膜熱伝達係数の関数であり、自然対流を考えた場合は、供試体熱伝導率の関数でもある。よって、発生までの時間 θ に影響を及ぼす因子として、供試体の長さ l 、熱伝導率 k 、水の拡散係数 D_t 、高温側と低温側熱伝達係数 h_H 、 h_L 、高温側湿度 A が考えられる。 Π の定理⁶⁾により各因子の相関は次式の様に表わされる。

$$\frac{\sqrt{\theta \cdot D_t}}{l} = C_1 \cdot \left(\frac{h_H \cdot l}{k}\right)^{C_2} \cdot \left(\frac{h_L \cdot l}{k}\right)^{C_3} \cdot A^{C_4} \quad (1)$$

ここで、 $(h \cdot l) / k$ は Bi 数を意味する。また、高温側及び低温側の熱伝達係数については、次式に示すNewellらの実験式⁷⁾を用いて求めた。

$$Nu = 0.0547 \times Gr^{0.397} \quad (2)$$

但し、 Nu 、 Gr は、ヌッセルト数、グラッフォフ数を意味する 実験結果より C_1 から C_4 を求めると次式が得られた。

$$\frac{\sqrt{\theta \cdot D_t}}{l} = 0.87 \times 10^{-15} \cdot Bi_H^{-0.42} \cdot Bi_L^{-0.87} \cdot A^{-1.4} \quad (3)$$

この実験式の相関性を図9に示す。相関係数が0.93、相対平均誤差が2.1%であることから実験式の妥当性が得られ、発生までの時間予測が実験範囲内で可能となった。

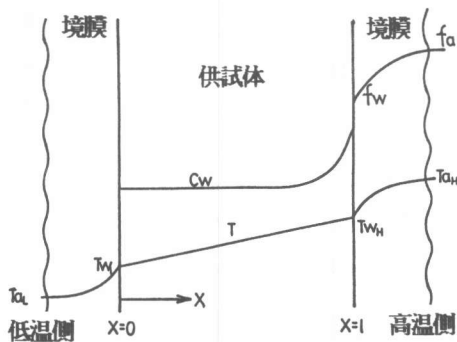


図8 熱・物質移動モデル

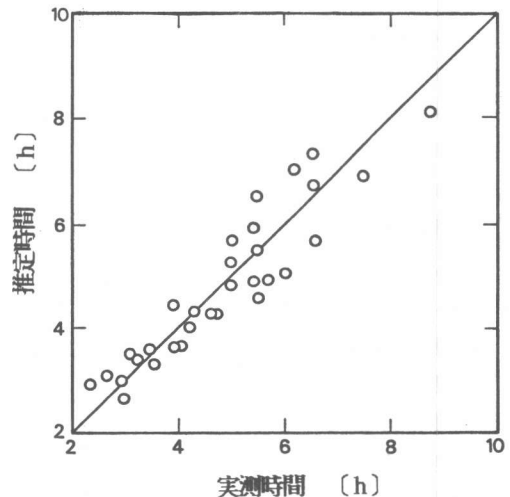


図9 推定時間と実測時間との相関

3-4 数値解析

供試体内部での結露発生がないと仮定したが、この妥当性を得るには供試体内部の温度と含水率分布を計測する必要がある。しかし、その計測は困難である。そこで、前節で示した熱と物質移動モデルを用い各収支式を作成し、各分布の状態を求めた。さらに、結露発生時間を計算し実際の結露時間と比較した。各収支式は次式で示される。

$$\text{(熱)} \quad \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4)$$

$$\text{(物質)} \quad \frac{\partial C_w}{\partial t} = D_v \cdot \frac{\partial^2 C_w}{\partial x^2} \quad (5)$$

ただし、 T は供試体温度、 t は時間、 x は供試体の厚み方向の位置を示す。ここで、 C_w は吸水比率を意味し、供試体の飽和吸水重量 W_M 、乾燥重量 W_D 、実験時の重量 W とした時、次式で定義する。

$$C_w = \frac{W - W_D}{W_M - W_D} \times 100 \quad (6)$$

初期条件及び境界条件を(7)～(12)式に示す。

$$\text{(初期条件)} \quad T = T_i \quad (0 < x < 1) \quad (7)$$

$$C_w = C_{wi} \quad (0 < x < 1) \quad (8)$$

$$\text{(境界条件)} \quad k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = h_L \cdot (T_{wL} - T_{aL}) \quad \text{at } x = 0 \quad (9)$$

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = h_H \cdot (T_{aH} - T_{wH}) \quad \text{at } x = 1 \quad (10)$$

$$\frac{\partial C_w}{\partial x} = 0 \quad \text{at } x = 0 \quad (11)$$

$$D_v \cdot \frac{\partial C_w}{\partial x} = k_p \cdot (f_a - f_w) \quad \text{at } x = 1 \quad (12)$$

ここで、 T_a 、 T_w は空気のパルク温度、供試体壁温度を示し、添え字のL、Hは低温側、高温側を示す。 f_a 、 f_w は空気のパルク及び壁近傍での水蒸気分圧を示す。

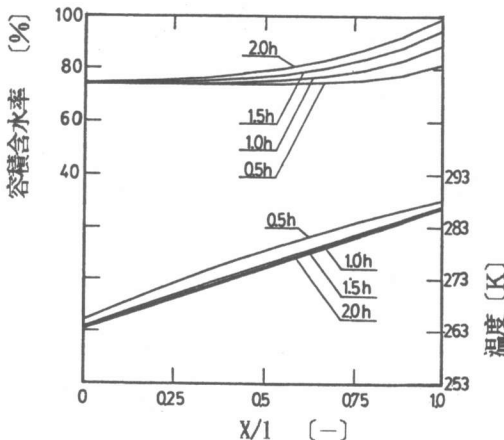


図10 数値解析結果

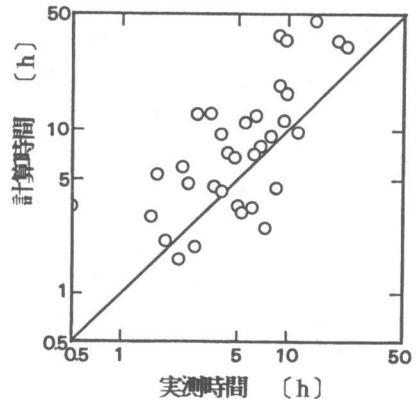


図11 計算時間と実測時間との相関

熱伝達係数 h は (4) 式より求め、物質移動係数 k_p は次式より求めた。

$$k_p = \frac{1.0334 \times 10^4}{760 \times R_G \times T_{AV} \times C_{p_a} \times \rho_a} \times \left(\frac{D_a}{\alpha_a} \right)^{0.67} \times h_H \quad (13)$$

ここで、 R_G はガス定数、 T_{AV} 、 C_{p_a} 、 ρ_a 、 D_a 、 α_a は空気の温度、比熱、密度、水蒸気の拡散係数、熱拡散率を示す。

熱伝導率は、含水率の関数であり解析解を得るのは困難である。そこで、(4)～(12)式を差分化⁸⁾し数値計算を行なった。 $x=0$ で $C_w=100$ となった時点で結露発生時間とした。温度差 4.5°C 、相対湿度 70% 、供試体初期含水比率 66% の場合について計算した結果を図 10 に示す。高温側の供試体表面近傍のみで含水比率が大きく増加していること、また、温度変化は直線的に変化していることより、熱伝導率の変化は小さいと考えられる。これは、3-1 節で考察した結果と一致する。

次に数値計算によって得られた結果と実測した発生時間との相関を図 11 に示す。計算値は、概ね実測値より大きくなった。これは、乾燥時からの重量変化を基に拡散係数を推定したためその値が大きく評価されていることによる。しかし、傾き 4.5 度の線上に均等に分散しており、得られた値もオーダー的な一致を見た。このことから、透湿率が小さく、吸水性のある材料についても表面結露発生までの時間推定がほぼ可能となった。

4. おわりに

軽量骨材コンクリートの結露発生実験を行なって次の結果を得た。

- (1) 軽量骨材コンクリートを供試体として水中浸漬により飽和容積含水率を求めた結果 23% であった。また、供試体内への水の拡散係数は、 $3.75 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ であった。
- (2) 供試体の熱伝導率は、常温域では温度依存性を示さなかった。しかし、含水率に対しては容積含水率の 0.28 乗に比例した。
- (3) 表面結露発生時の供試体表面温度は、露点以下であった。
- (4) 環境と表面結露発生までの時間との相関を求める実験式を作成した。実測値とよい相関を示す実験式が得られ、表面結露発生までの時間予測が可能となった。
- (5) 表面結露発生モデルを検討し、その数値解析を試み、結露発生までの時間予測を行なった結果、実測値とはオーダー的な一致を見た。これにより他の材料の結露発生時間をオーダー的に予測することが可能となった。

[参考文献]

- 1) 建設省住宅局：住宅・建築省エネルギーフォーラム、P1～P27、(1986)
- 2) G.B.Welch et.al.：建築技術、NO.164、P105～P108、(1965)
- 3) 田淵ら：寒研調査研究報告書、P37～P43、(1958)
- 4) 軽量骨材コンクリートハンドブック編集委員会編：軽量骨材コンクリートハンドブック、日刊工業新聞社、(1969)
- 5) 飯田ら：日本機械学会論文集 (B編)、vol.47、NO.415、P470～P474、(1981)
- 6) 齊藤ら：伝熱工学、産業図書、(1985)
- 7) R.B.Bird et al.：Transport Phenomena, John Wiley Sons, Inc., (1960)
- 8) 化学工学協会編：化学工学プログラミング演習、培風館、(1976)