

強度の異なるコンクリートの熱・湿気物性 その2 水分伝導率の推定

Relationship between Heat and Moisture Properties of Concrete and Strength Part2. Estimation of Moisture Conductivity

恩村 定幸*

要 旨

強度の異なるコンクリートの熱水分移動に関して、これまでの測定^{1),2)}によって、熱伝導率、湿気伝導率、透水性係数および平衡含水率が得られている。これらの物性値を用いて、コンクリート壁体内部の熱水分移動の様相を解析するのに必要な水分伝導率の推定を行った。湿気伝導率の測定における水分流の実測値と解析結果とを比較することで、妥当な推定値が得られた。

キーワード：コンクリート／水分化学ポテンシャル／水分伝導率／熱水分同時移動

1. はじめに

コンクリート壁体内部における熱水分移動の様相を明らかにすることは、鉄筋コンクリート造建物の防露設計を的確に行う上で重要である。

通常の建物におけるコンクリート壁体内部における熱水分移動は、凍結融解現象がない場合、熱水分同時移動方程式を用いて解析することができる³⁾。この基礎方程式を解くには、水分移動に関する物性値、すなわち水分化学ポテンシャル勾配および温度勾配に関する気相および液相水分伝導率が必要である。しかし、コンクリートの場合、測定の困難さから不飽和から飽和領域まで適応できるそれら水分移動に関する物性値が求められていない。本報では、既報で示した熱伝導率、平衡含水率、湿気伝導率、透水性係数の測定結果を用いて水分移動に関する物性値の推定を行った。

2. 推定方法

水分化学ポテンシャル勾配および温度勾配に関する気相および液相水分伝導率は以下の関係にある。

$$\lambda'_{\mu} = \lambda'_{\mu g} + \lambda'_{\mu l} \quad (1)$$

$$\lambda'_{T} = \lambda'_{T g} + \lambda'_{T l} \quad (2)$$

水蒸気圧は、水分化学ポテンシャルと温度との一意の関数として与えられる。

$$p_v = f(\mu, T) \quad (3)$$

したがって、

$$\nabla p_v = \frac{\partial f}{\partial \mu} \nabla \mu + \frac{\partial f}{\partial T} \nabla T \quad (4)$$

一方、液相水分の移動がほとんどない場合、気相水分流は以下の式で表現できる。

$$J = J_{lw} = -\lambda' \nabla p_v \quad (5)$$

よって、(4)式と(5)式より、

$$\begin{aligned} J_{lw} &= -\lambda' \frac{\partial f}{\partial \mu} \nabla \mu - \lambda' \frac{\partial f}{\partial T} \nabla T \\ &= -\lambda' \frac{\partial p_v}{\partial \mu} \nabla \mu - \lambda' \frac{\partial p_v}{\partial T} \nabla T \end{aligned} \quad (6)$$

一方、移動ポテンシャルに温度と水分化学ポテンシャルを用い、気相水分流を表現すると、

$$J_{lw} = -\lambda'_{\mu g} \nabla \mu - \lambda'_{T g} \nabla T \quad (7)$$

よって、(6)式と(7)式の関係から、

$$\lambda'_{\mu g} = \lambda' \frac{\partial p_v}{\partial \mu} \quad (8)$$

$$\lambda'_{T g} = \lambda' \frac{\partial p_v}{\partial T} \quad (9)$$

相対湿度と水蒸気圧との関係 $Rh = p_v / p_{vs}$ および水分化学ポテンシャルの定義式 $\mu = R_v T \ln(Rh)$ より、

$$\begin{aligned} \lambda'_{\mu g} &= \lambda' \frac{\partial p_v}{\partial \mu} = \lambda' \frac{\partial}{\partial \mu} (Rh \cdot p_{vs}) \\ &= \lambda' \left(Rh \frac{\partial p_{vs}}{\partial \mu} + p_{vs} \frac{\partial Rh}{\partial \mu} \right) \\ &= \lambda' \frac{p_{vs}}{R_v T} e^{\frac{\mu}{R_v T}} = \lambda' \frac{p_{vs}}{R_v T} Rh \end{aligned} \quad (10)$$

*建築研究グループ

$$\begin{aligned}
\lambda'_{T_g} &= \lambda' \frac{\partial p_v}{\partial T} = \lambda' \frac{\partial}{\partial T} (Rh \cdot p_v s) \\
&= \lambda' \left(Rh \frac{\partial p_v s}{\partial T} + p_v s \frac{\partial Rh}{\partial T} \right) \\
&= \lambda' Rh \left(\frac{\partial p_v s}{\partial T} - p_v s \frac{\mu}{R_v T^2} \right) \\
&= \lambda' \frac{p_v s}{R_v T} Rh \left(\frac{R_v T \frac{\partial p_v s}{\partial T}}{p_v s} - \frac{\mu}{T} \right) \\
&= \lambda'_{\mu g} \left(\frac{R_v T \frac{\partial p_v s}{\partial T}}{p_v s} - \frac{\mu}{T} \right) \quad (11)
\end{aligned}$$

液相水分の移動がダルシー則に従うとすると $\lambda'_{T_f} = 0$ となる。したがって、(2)式より、

$$\lambda'_T = \lambda'_{T_g} \quad (12)$$

以上から、湿気伝導率が分かれば (10)式、(11)式、(12)式より、水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率と温度勾配に関する気相水分伝導率が定まる。

この湿気伝導率は気相水分のみの湿気伝導率であり、すでに測定されている液相水分移動の影響のある湿気伝導率とは異なる。本報では、前者を「純粋湿気伝導率」、後者を「見かけの湿気伝導率」と称して区別する。純粋湿気伝導率は含水率の増加とともに減少し、飽和状態では0になると考えられる。よって、次式のように直線で近似する。

$$\lambda' = C_1(\Phi_0 - \psi) / \Phi_0 \quad (13)$$

この純粋湿気伝導率の近似については、含水率に対応する減少傾向をどのような関数で表現するかという点で議論の余地があるが、本報では不確かさが最も少ない直線を用いることにした。

湿気伝導率の測定（高湿度域の実験は除く）では、試験片内の相対湿度は0.11RHから0.95RHの間で変化する。その湿度域における平衡含水率関係を(14)式のように直線で近似する。

$$\psi = C_2 Rh + C_3 \quad (14)$$

(13)式と(14)式より、

$$\lambda' = C_1(\Phi_0 - C_2 Rh - C_3) / \Phi_0 \quad (15)$$

これを(10)式に代入して、

$$\lambda'_{\mu g} = \frac{C_1(\Phi_0 - C_2 Rh - C_3)}{\Phi_0} \cdot \frac{p_v s}{R_v T} Rh \quad (16)$$

液相水分伝導率は(1)式と(16)式から、

$$\lambda'_{\mu f} = \lambda'_{\mu} - \frac{C_1(\Phi_0 - Rh C_2 - C_3)}{\Phi_0} \cdot \frac{p_v s}{R_v T} Rh \quad (17)$$

湿気伝導率の測定では、ビーカー内外の相対湿度の平均、0.33RH、0.44RH、0.65RH、0.75RHの実験ごとに、ビーカー内外の湿湿度と定常時の水分流が得られている。したがって、湿気伝達層に湿気伝達率を与え、液相水分の移動がほとんどない場合を想定すると、試験片内部の水分分布が容易に算出でき、試験片中央における水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率についてもおよそその値を求めることができる。この値は、液相水分移動の影響がある実状とは異なるが、本測定での0.11RH～0.95RHのように液相水分移動の影響が小さいと考えられる湿度域では実状に近いと推察される。そこで、この水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率のおおよその値を液相水分伝導率の推定に利用する。

すなわち、

$$\begin{aligned}
\lambda'_{\mu f} \Big|_{Rh=0.33} &= \lambda'_{\mu} \Big|_{Rh=0.33} - \frac{C_1(\Phi_0 - 0.33C_2 - C_3)}{\Phi_0} \cdot \frac{0.33p_v s}{R_v T} \quad (18)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\lambda'_{\mu f} \Big|_{Rh=0.44} &= \lambda'_{\mu} \Big|_{Rh=0.44} - \frac{C_1(\Phi_0 - 0.44C_2 - C_3)}{\Phi_0} \cdot \frac{0.44p_v s}{R_v T} \quad (19)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\lambda'_{\mu f} \Big|_{Rh=0.65} &= \lambda'_{\mu} \Big|_{Rh=0.65} - \frac{C_1(\Phi_0 - 0.65C_2 - C_3)}{\Phi_0} \cdot \frac{0.65p_v s}{R_v T} \quad (20)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\lambda'_{\mu f} \Big|_{Rh=0.75} &= \lambda'_{\mu} \Big|_{Rh=0.75} - \frac{C_1(\Phi_0 - 0.75C_2 - C_3)}{\Phi_0} \cdot \frac{0.75p_v s}{R_v T} \quad (21)
\end{aligned}$$

(18)式から(21)式で得られる値を用いて指数関数で表現した液相水分伝導率の近似式を求める。0.33RH以下の低湿度域および0.75RH以上の湿度域については、近似式を外挿した。

$Rh \leq 0.44$ [(18)式と(19)式より]

$$\begin{aligned}
\lambda'_{\mu f} &= \frac{\lambda'_{\mu f} \Big|_{Rh=0.33}}{e^{B_1 R_v T \ln(0.33)}} e^{B_1 \mu} \\
B_1 &= \left[\frac{\ln(\lambda'_{\mu f} \Big|_{Rh=0.44}) - \ln(\lambda'_{\mu f} \Big|_{Rh=0.33})}{R_v T (\ln(0.44) - \ln(0.33))} \right] \quad (22)
\end{aligned}$$

0.44 < Rh ≤ 0.65 [(19)式と(20)式より]

$$\lambda'_{\mu\ell} = \frac{\lambda'_{\mu\ell}|_{Rh=0.44}}{e^{B_2 R_v T \ln(0.44)}} e^{B_2 \mu}$$

$$B_2 = \left[\frac{\ln(\lambda'_{\mu\ell}|_{Rh=0.65}) - \ln(\lambda'_{\mu\ell}|_{Rh=0.44})}{R_v T (\ln(0.65) - \ln(0.44))} \right] \quad (23)$$

0.65 < Rh [(20)式と(21)式より]

$$\lambda'_{\mu\ell} = \frac{\lambda'_{\mu\ell}|_{Rh=0.65}}{e^{B_3 R_v T \ln(0.65)}} e^{B_3 \mu}$$

$$B_3 = \left[\frac{\ln(\lambda'_{\mu\ell}|_{Rh=0.75}) - \ln(\lambda'_{\mu\ell}|_{Rh=0.65})}{R_v T (\ln(0.75) - \ln(0.65))} \right] \quad (24)$$

飽和近傍では液水の影響が非常に大きい。そこで、ある相対湿度を境に、それ未満では(24)式を用い、それ以上では下式を用いる。

$$\lambda'_{\mu\ell} = B_4 e^{B_5 \mu} \quad (25)$$

飽和時 (Rh = 1.0) の等温場における液相水分流はダルシー則より、

$$J_{2w} = -\rho_w K \nabla \Psi \quad (26)$$

水分化学ポテンシャルと水頭高さの関係、 $\mu = g \nabla \Psi$ (g は重力 [9.8m/s²]) から、

$$J_{2w} = \frac{-\rho_w K}{g} \nabla \mu \quad (27)$$

一方、移動ポテンシャルに水分化学ポテンシャルを用い、液相水分流を表現すると、

$$J_{2w} = -\lambda'_{\mu\ell} \nabla \mu \quad (28)$$

よって、(27)式と(28)式から、

$$\lambda'_{\mu\ell} = \rho_w K / g \quad (29)$$

この関係を(25)式に用いると、

$$B_4 e^{B_5 R_v T \ln(1.0)} = \rho_w K / g$$

$$B_4 = \rho_w K / g \quad (30)$$

すなわち、透水係数の実測値を用いると、 B_4 が計算できる。また、(24)式と(25)式の連続性より、ある相対湿度 C_4 RH では、

$$\lambda'_{\mu\ell} = \frac{\lambda'_{\mu\ell}|_{Rh=0.65}}{e^{B_3 R_v T \ln(0.65)}} e^{B_3 R_v T \ln(C_4)} = \frac{\rho_w K}{g} e^{B_5 R_v T \ln(C_4)}$$

$$B_3 = \left[\frac{\ln(\lambda'_{\mu\ell}|_{Rh=0.75}) - \ln(\lambda'_{\mu\ell}|_{Rh=0.65})}{R_v T (\ln(0.75) - \ln(0.65))} \right] \quad (31)$$

よって、

$$B_5 = B_3 + \ln \left[\frac{g \lambda'_{\mu\ell}|_{Rh=0.65}}{\rho_w K e^{B_3 R_v T \ln(0.65)}} / R_v T \ln(C_4) \right]$$

$$B_3 = \left[\frac{\ln(\lambda'_{\mu\ell}|_{Rh=0.75}) - \ln(\lambda'_{\mu\ell}|_{Rh=0.65})}{R_v T (\ln(0.75) - \ln(0.65))} \right] \quad (32)$$

C_2 と C_3 は平衡含水率の実測値を近似することで得られる。 $B_1 \sim B_3$ は C_1 が決まれば湿気伝導率測定の実測値を用いて算出できる。 B_4 は透水係数の実測値から求め、 B_5 は C_4 が決まれば B_3 を用いて算出できる。

C_1 と C_4 については、これらをパラメータにした数値解析による湿気伝導率測定の再現によって決定する。

3. 推定値の算定とその妥当性の検証

既報で述べた湿気伝導率測定の再現を数値解析によって行う。前章で示したようにパラメータとなる純粋湿気伝導率の近似式の係数 C_1 および液相水分の影響が急激に大きくなると推測される相対湿度のポイント C_4 を変化させ、水分流の実測値と計算値との比較から最適値を決定する。この最適値によって信頼度の高い水分化学ポテンシャル勾配および温度勾配に関する気相および液相水分伝導率の推定値が算定される。

3.1 基礎方程式

基礎方程式には熱水分同時移動方程式を用いる。解析モデルを図-1に示す。基礎式と境界条件を(33)式～(38)式に示す。計算は前進型有限差分法で行い、(39)式によって得られる試験片上面より流入する水分流から(40)式を用いて重量変化を算出し、実測値と比較する。位置刻みは試験片厚さを10分割した幅とし、時間刻みは0.1sとした。初期条件は、実測されていないのでピーカー内外における空気の温湿度の平均値を用いた。

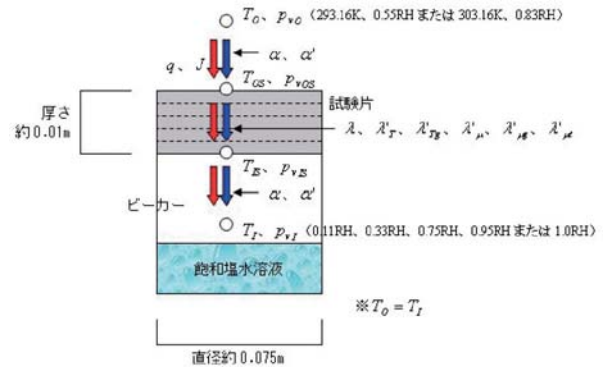


図-1 解析モデル

【基礎式】

水分収支

$$\rho_w \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda'_{\mu} \left(\frac{\partial \mu}{\partial x} - g \right) + \lambda'_{\tau} \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (33)$$

熱収支

$$\begin{aligned} c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[(\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial x} + r\lambda'_{\mu g} \left(\frac{\partial \mu}{\partial x} - g \right) \right] \end{aligned} \quad (34)$$

【境界条件】

水分

(上部)

$$\alpha'(p_{vo} - p_{vos}) = -\lambda'_{\mu} \left(\frac{\partial \mu}{\partial x} - g \right) - \lambda'_{\tau} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (35)$$

(下部)

$$-\lambda'_{\mu} \left(\frac{\partial \mu}{\partial x} - g \right) - \lambda'_{\tau} \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha'(p_{vis} - p_{vi}) \quad (36)$$

熱

(上部)

$$\begin{aligned} \alpha(T_o - T_{os}) + r\alpha'(p_{vo} - p_{vos}) \\ = -(\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial x} - r\lambda'_{\mu g} \left(\frac{\partial \mu}{\partial x} - g \right) \end{aligned} \quad (37)$$

(下部)

$$\begin{aligned} -(\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial x} - r\lambda'_{\mu g} \left(\frac{\partial \mu}{\partial x} - g \right) \\ = \alpha(T_{is} - T_i) + r\alpha'(p_{vis} - p_{vi}) \end{aligned} \quad (38)$$

【水分流】

$$J = \alpha'(p_{vo} - p_{vos}) \quad (39)$$

【重量変化】

$$W_v = \sum J \times A \times 3600 \times 1000 \quad (40)$$

3.2 計算に用いた数値

平衡含水率は、設定相対湿度0.33RH、0.75RH、0.85RH、0.93RHの測定結果を用いて直線で近似した。ただし、相対湿度が0.1RH以下は相対湿度0RHで平衡含水率が0m³/m³になるように直線で近似し、高湿度域は0.98RHを境に飽和近傍で急激に平衡含水率が高くなるように双曲線を用いて近似した。(41)式と図-2に近似式を示す。

FC27 :

$$\begin{aligned} 0.1 \leq Rh & \quad \psi = 0.2473Rh \\ 0.1 < Rh \leq 0.98 & \quad \psi = 0.0563Rh + 0.0191 \\ 0.98 < Rh & \quad \psi = \frac{-1.4757897 \times 10^{-5}}{Rh - 1.0003} \\ & \quad + 7.354701 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

FC33 :

$$\begin{aligned} 0.1 \leq Rh & \quad \psi = 0.1003Rh \\ 0.1 < Rh \leq 0.759 & \quad \psi = 0.0625Rh + 0.0038 \\ 0.759 < Rh \leq 0.98 & \quad \psi = 0.1496Rh - 0.0623 \\ 0.98 < Rh & \quad \psi = \frac{-1.4769923 \times 10^{-5}}{Rh - 1.0003} \\ & \quad + 8.352692 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

FC40 :

$$\begin{aligned} 0.1 \leq Rh & \quad \psi = 0.1116Rh \\ 0.1 < Rh \leq 0.759 & \quad \psi = 0.0586Rh + 0.0057 \\ 0.759 < Rh \leq 0.98 & \quad \psi = 0.1827Rh - 0.0885 \\ 0.98 < Rh & \quad \psi = \frac{-1.3757235 \times 10^{-5}}{Rh - 1.0003} \\ & \quad + 8.986255 \times 10^{-2} \end{aligned} \quad (41)$$

熱伝導率は測定結果を最小二乗法で直線近似したものを用いた。(42)式と図-3に近似式を示す。熱容量には水分の影響を、相変化熱には温度効果を考慮した既存の式((43)式と(44)式)を用いた。コンクリートの比熱 c_c には837.21J/kgKを、比重量 ρ_c には平衡含水率の測定に用いた試験片の絶乾密度の測定結果の平均値、2163.0 kg/m³を用いた。

$$FC27 : \lambda = 3.1948\psi + 1.3533$$

$$FC33 : \lambda = 2.5322\psi + 1.2828$$

$$FC40 : \lambda = 2.6214\psi + 1.3091 \quad (42)$$

$$c\rho = 4186.05\rho_w\psi + c_c\rho_c \quad (43)$$

$$r = 4186.05\{597.5 - 0.599(T - 293.16)\} \quad (44)$$

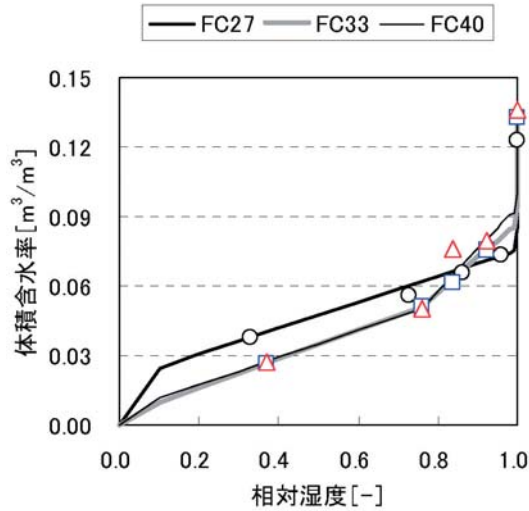
飽和水蒸気圧には、Goff-Gratchの実験式を用いた。計算に用いたその他の数値を以下に示す。

$$\alpha = 9.0 \text{ W/m}^2\text{K、}$$

$$\alpha' = 3.5 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{sPa、}$$

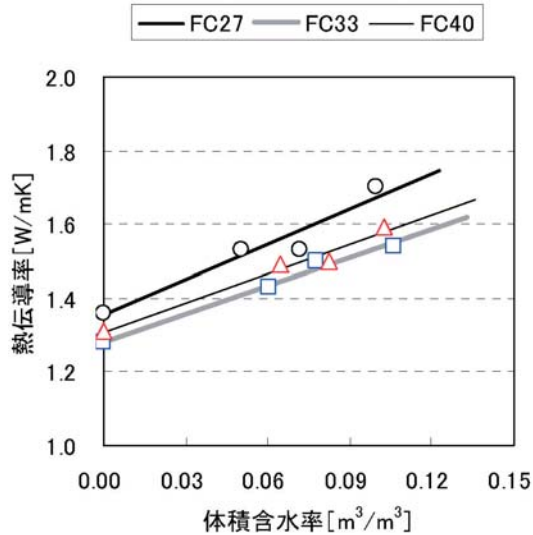
$$\rho_w = 1000.0 \text{ kg/m}^3、$$

$$R_v = R/M_v = 8316.96/18.016 = 461.643 \text{ Pam}^3/\text{kgK}$$



図－２ 計算に用いた平衡含水率の近似

※直線が近似式を、シンボル○がFC27、□がFC33、△がFC40の実測値を表す。



図－３ 計算に用いた熱伝導率の近似

※直線が近似式を、シンボル○がFC27、□がFC33、△がFC40の実測値を表す。

表－１ 強度とパラメータ

強度	パラメータ	
	C_1	C_4
FC27	7×10^{-13}	0.99432
FC33	6×10^{-13}	0.99475
FC40	6×10^{-13}	0.99584

3.3 計算結果と考察

平衡含水率測定における試験片の飽水時の体積含水率の測定結果の平均値を空隙率と見なし、パラメータ C_1 および C_4 に表－１に示す値を用いたとき、純粋湿気伝導率は(45)式のようなになる。また、水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率は(46)式のようなになる。なお、FC40の試験片平均相対湿度0.65RHにおける値は、他の数値と傾向がやや異なっていたので、コンクリートが有する特性（ばらつき）と判断して近似には考慮していない。

$$\text{FC27} : \lambda' = 7 \times 10^{-13} (0.12274 - \psi) / 0.12274$$

$$\text{FC33} : \lambda' = 6 \times 10^{-13} (0.13276 - \psi) / 0.13276$$

$$\text{FC40} : \lambda' = 6 \times 10^{-13} (0.13572 - \psi) / 0.13572 \quad (45)$$

FC27 :

$$Rh \leq 0.44$$

$$\lambda'_{\mu\ell} = 8.39852 \times 10^{-14} e^{2.49771 \times 10^{-5} \mu}$$

$$0.44 < Rh \leq 0.65$$

$$\lambda'_{\mu\ell} = 3.15743 \times 10^{-14} e^{1.61722 \times 10^{-5} \mu}$$

$$0.65 < Rh \leq 0.99432$$

$$\lambda'_{\mu\ell} = 2.45413 \times 10^{-14} e^{1.18499 \times 10^{-5} \mu}$$

$$0.99432 < Rh$$

$$\lambda'_{\mu\ell} = 3.11224 \times 10^{-9} e^{1.52545 \times 10^{-2} \mu}$$

FC33 :

$$Rh \leq 0.44$$

$$\lambda'_{\mu\ell} = 6.54231 \times 10^{-14} e^{2.80435 \times 10^{-5} \mu}$$

$$0.44 < Rh \leq 0.65$$

$$\lambda'_{\mu\ell} = 3.7648 \times 10^{-14} e^{2.30698 \times 10^{-5} \mu}$$

$$0.65 < Rh \leq 0.99475$$

$$\lambda'_{\mu\ell} = 2.70843 \times 10^{-14} e^{1.72421 \times 10^{-5} \mu}$$

$$0.99475 < Rh$$

$$\lambda'_{\mu\ell} = 2.38776 \times 10^{-9} e^{1.60017 \times 10^{-2} \mu}$$

FC40 :

$$Rh \leq 0.44$$

$$\lambda'_{\mu\ell} = 2.05015 \times 10^{-14} e^{2.40409 \times 10^{-5} \mu}$$

$$0.44 < Rh \leq 0.99584$$

$$\lambda'_{\mu\ell} = 2.65377 \times 10^{-14} e^{2.63636 \times 10^{-5} \mu}$$

$$0.99584 < Rh$$

$$\lambda'_{\mu\ell} = 1.66327 \times 10^{-9} e^{1.96051 \times 10^{-2} \mu} \quad (46)$$

これらの近似値を用いて得られた試験片の重量変化の計算値を実測値と比較したものを図-4に示す。実測値(○、●、△、□、▲)は、記録のある実験開始から20日経過した後より図示している。また、見かけの湿気伝導率の実測値と計算値との比較を図-5に示す。なお、コンクリートが有する特性(ばらつき)と判断して近似に考慮しなかったFC40の試験片平均相対湿度0.65RHにおける値は削除している。

すべての強度における水分流の実測値と計算値との最大誤差は、周辺雰囲気温度が293.16Kの場合は、FC33の平均試験片相対湿度0.915RHの実験における $0.098 \times 10^{-7} \text{kg/m}^2\text{s}$ であり、303.16Kの場合もFC33の0.75RHの実験における $0.505 \times 10^{-7} \text{kg/m}^2\text{s}$ である。実測値に対する計算値の倍率は0.92倍から1.36倍の間におさまっている。見かけの湿気伝導率の実測値と計算値との最大誤差は、周辺雰囲気温度が293.16Kの場合は、FC33の0.75RHの実験における $0.058 \times 10^{-12} \text{kg/msPa}$ であり、303.16Kの場合はFC27の0.75RHの実験における $0.293 \times 10^{-12} \text{kg/msPa}$ である。実測値に対する計算値の倍率は0.93倍から1.34倍の間におさまっている。周辺空気温度が高くなることで、実測値と計算値との差はやや大きくなるが、比較的良好な一致といえる。

周辺雰囲気温度が高くなることで、実測値と計算値との差はやや大きくなる傾向は中湿度域で顕著であることから、純粋湿気伝導率の近似において、中湿度域での値が大きく減少しない他の関数を用いて近似すれば、この差を小さくすることができると考えられる。しかし、その場合、低湿度域での誤差が逆に大きくなってしまふ。したがって、この傾向は近似による誤差ではなくコンクリートが有する特性(ばらつき)と考える方が妥当と思われる。

以上から、強度の異なるコンクリートについて、比較的信頼度の高い水分伝導率の推定が行えたと考える。同定した物性値を図-6に示す。

4. まとめ

強度の異なるコンクリートについて、壁体内の熱水分の移動性状を把握する際に用いられる熱水分同時移動方程式を解くのに必要な水分化学ポテンシャル勾配および温度勾配に関する気相および液相水分伝導率を、既報で示した熱伝導率、平衡含水率、湿気伝導率、透水係数の実測値を用いて推定した。推定した物性値を用いて既報で示した湿気伝導率測定を解析的に再現した結果、水分流および見かけの湿気伝導率は周辺雰囲気温度を変えた

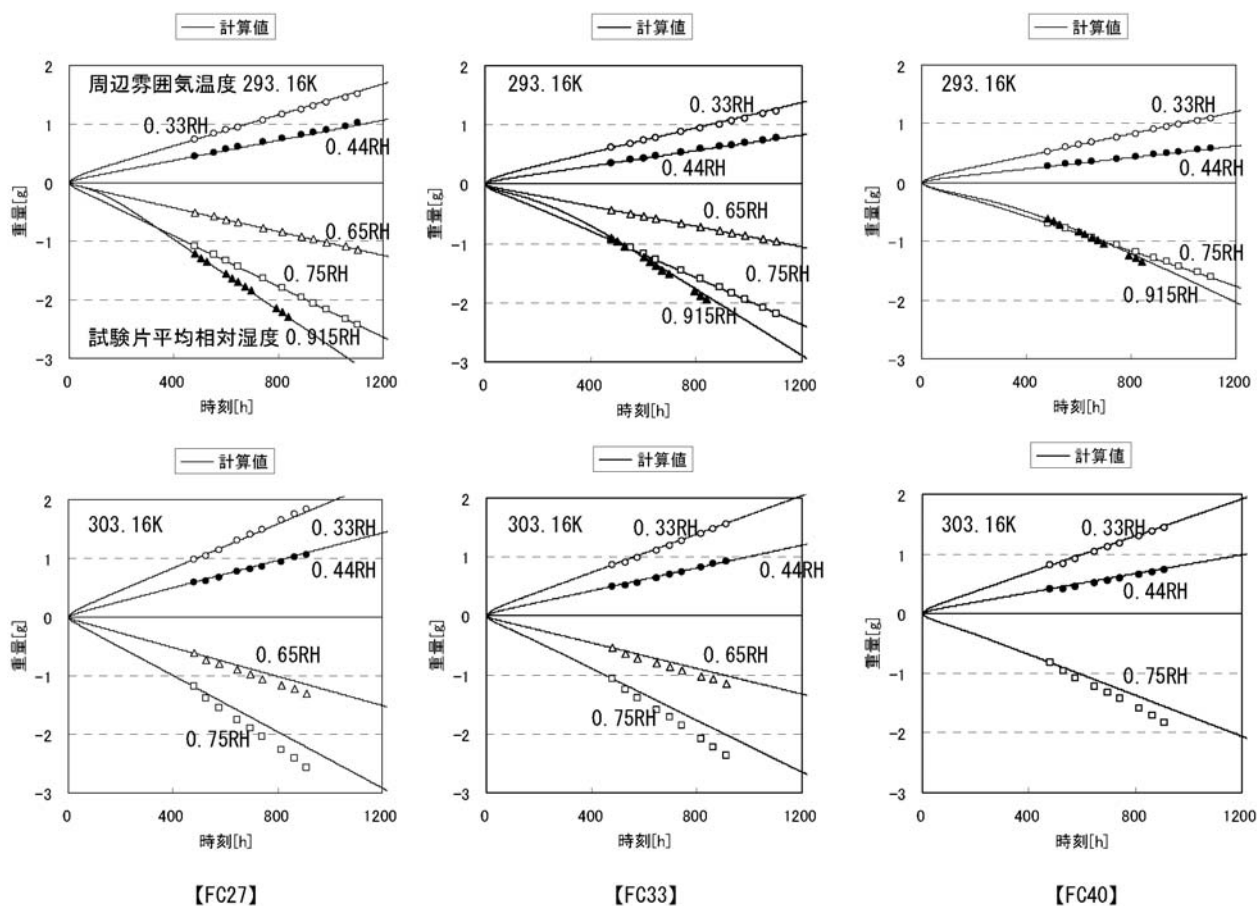
場合をも含めて、計算値は実測値と良く一致した。よって、本報の解析結果から比較的信頼度の高い物性値の同定が行えたと考える。なお、推定したコンクリートの水分伝導率は、コンクリート強度の違いによって若干の差異が見られるが、その大きさが壁体内の熱水分移動にどのように、また、どの程度影響するのかを検討する必要があると考えられる。

[記号]

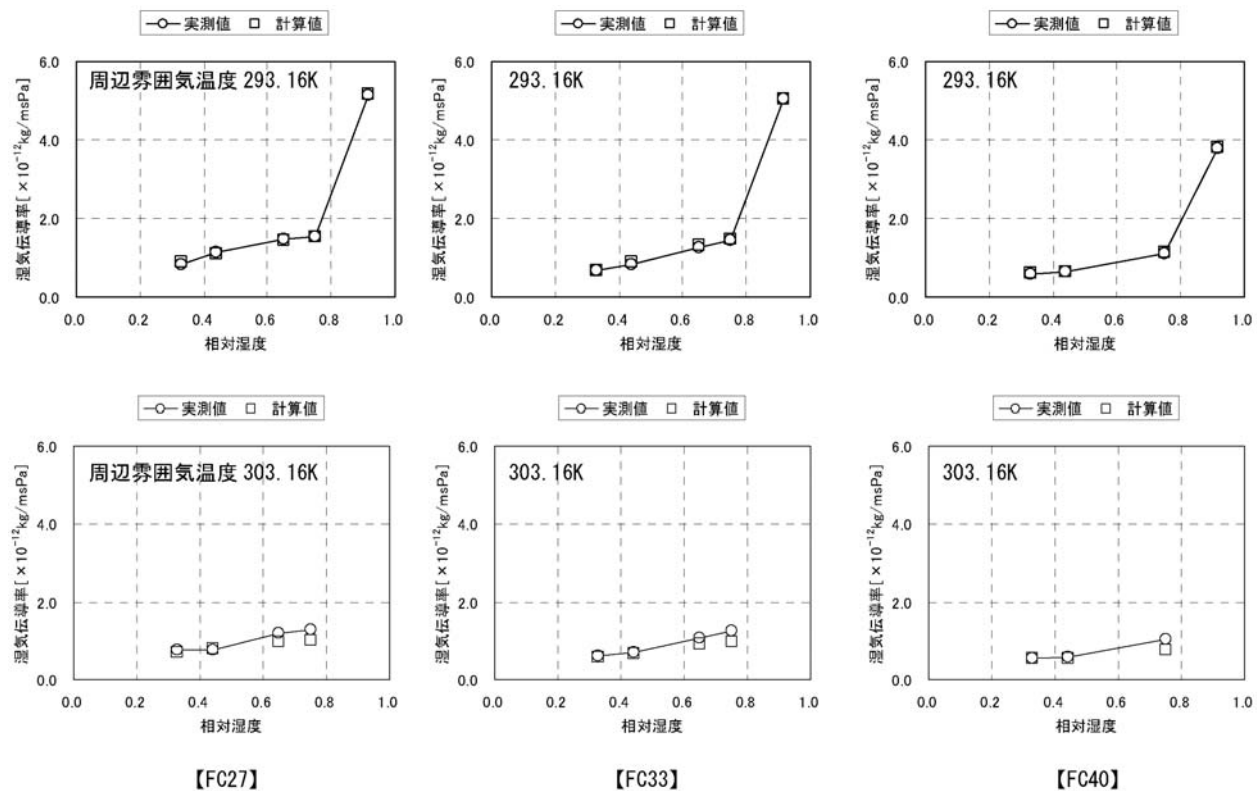
A : 試験片の面積 $[\text{m}^2]$ 、 $B_1 \sim B_5$: 定数、 $C_1 \sim C_4$: 定数 (C_1 と C_4 は解析におけるパラメータ)、 c_c : コンクリートの定圧比熱 $[\text{J/kgK}]$ 、 g : 重力 $[\text{m/s}^2]$ 、 J : 水分流 $[\text{kg/m}^2\text{s}]$ 、 J_{1w} : 気相水分流 $[\text{kg/m}^2\text{s}]$ 、 J_{2w} : 液相水分流 $[\text{kg/m}^2\text{s}]$ 、 K : 透水係数 $[\text{m/s}]$ 、 p_v : 水蒸気圧 $[\text{Pa}]$ 、 p_{vs} : 飽和水蒸気圧 $[\text{Pa}]$ 、 q : 熱流 $[\text{W/m}^2]$ 、 Rh : 相対湿度 $[-]$ 、 R_v : ($= R/M_v$) 水蒸気の理想気体定数 $[\text{Pam}^3/\text{kgK}]$ 、 r : 相変化熱 $[\text{J/kg}]$ 、 T : 温度 $[\text{K}]$ 、 t : 時間 $[\text{s}]$ 、 W_v : 重量変化 $[\text{g/h}]$ 、 x : 位置 $[\text{m}]$ 、 α : 総合熱伝達率 $[\text{W/m}^2\text{K}]$ 、 α' : 湿気伝達率 $[\text{kg/m}^2\text{sPa}]$ 、 λ : 熱伝導率 $[\text{W/mK}]$ 、 λ' : 湿気伝導率 $[\text{kg/msPa}]$ 、 λ'_T : 温度勾配に関する水分伝導率 $[\text{kg/msK}]$ 、 λ'_{Tg} : 温度勾配に関する気相水分伝導率 $[\text{kg/msK}]$ 、 λ'_{Te} : 温度勾配に関する液相水分伝導率 $[\text{kg/msK}]$ 、 λ'_{μ} : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率 $[\text{kg/ms(J/kg)}]$ 、 $\lambda'_{\mu g}$: 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率 $[\text{kg/ms(J/kg)}]$ 、 $\lambda'_{\mu e}$: 水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率 $[\text{kg/ms(J/kg)}]$ 、 μ : 水分化学ポテンシャル $[\text{J/kg}]$ 、 ρ_c : コンクリートの比重 $[\text{kg/m}^3]$ 、 ρ_w : 水の比重 $[\text{kg/m}^3]$ 、 ψ : 体積含水率 $[\text{m}^3/\text{m}^3]$ 、 Φ_0 : 空隙率 $[-]$ 、 Ψ : 水頭高さ $[\text{m}]$
添え字) I : ビーカー内空気、 IS : ビーカー内空気側表面、 O : ビーカー外空気、 OS : ビーカー外空気側表面

[謝 辞]

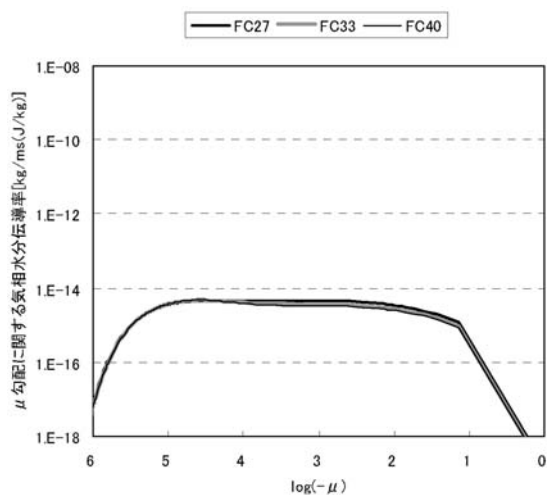
本研究は京都大学、日本建築総合試験所との共同研究であり、関係者各位に感謝いたします。また、本研究を行うにあたり、京都大学銚井修一教授にご指導いただきました。ここに感謝の意を表します。



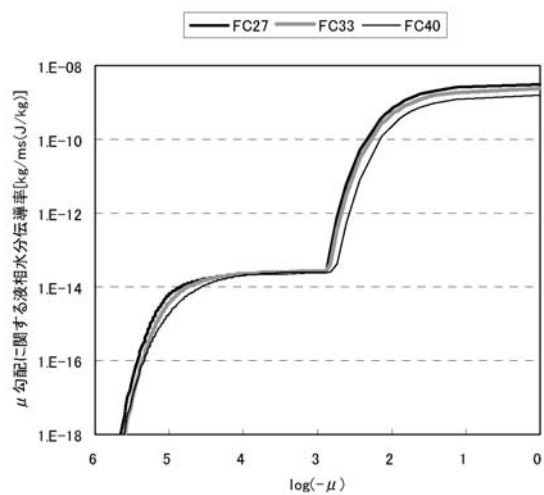
図－4 重量変化の実測値と計算値との比較



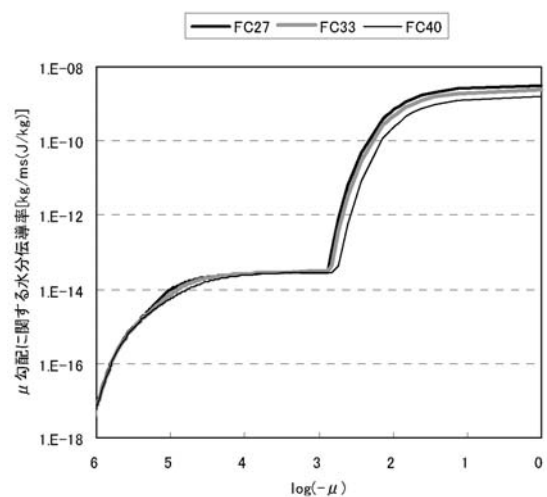
図－5 見かけの湿気伝達率の実測値と計算値との比較



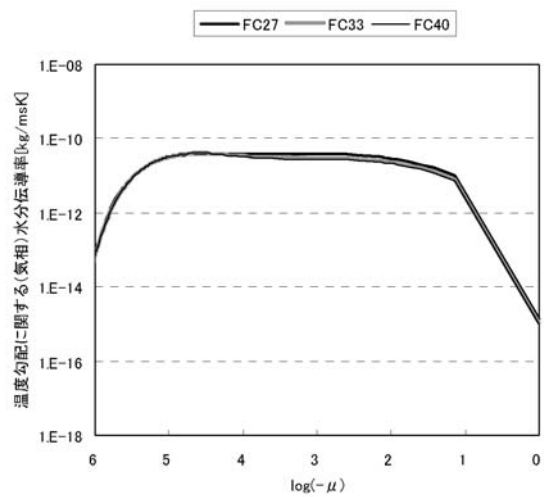
【 μ 勾配に関する気相水分伝導率】



【 μ 勾配に関する液相水分伝導率】



【 μ 勾配に関する水分伝導率】



【温度勾配に関する(気相)水分伝導率】

図-6 同定した強度の異なるコンクリートの水分伝達率

[参考文献]

- 1) 恩村：強度の異なるコンクリートの熱・湿気物性、
浅沼組技術研究所報、No.16、pp.29～36、2004
- 2) 恩村、立松、山崎：鉄筋コンクリート壁の異なる位置における熱・湿気物性、浅沼組技術研究所報、
No.17、pp.35～42、2005
- 3) 松本、他：新建築学体系10環境物理、彰国社、1984