

実建物における外壁コンクリート内部の含水率変動に関する数値解析 (その2. 液水移動および壁体表層と内部での湿気伝導率の不均一性の影響)

A Numerical Analysis of Moisture Content Variation in the External Concrete Wall of Actual Building

(Part2 Influences of Liquid Movement and Non-uniform Moisture Conductivity through Wall)

恩村 定幸*

要 旨

前報¹⁾では、実建物のコンクリート外壁で測定した壁体内部の温・湿度の実測値を用いて、蒸気拡散支配の場合の熱水分同時移動方程式による数値解析を行った。本報では、前報の知見を基に、蒸気拡散だけではなく液水の移動をも考慮した熱水分同時移動方程式による数値解析を、壁体の表層部と中央部とで湿気伝導率を変えて行った。その結果、計算値と実測値との間に概ね良好な一致を得ることができた。さらに、より確かな結果を得るためには、数値計算上の仮定、あるいは実測が困難な各種水分伝導率等の物性値の推定方法の検証、および計算結果に大きく影響する湿気伝導率等の物性値の適正な測定が重要であることがわかった。

キーワード：コンクリート外壁／含水率変動／液水移動／熱水分同時移動方程式／数値解析／結露検討

1. はじめに

前報では、実建物のコンクリート外壁について、コンクリート打設後から数年間（1990年～1992年）に亘って測定された壁体内部の温湿度変動の実測値^{2),3)}を用いて、蒸気拡散支配の場合の熱水分同時移動方程式による数値解析を行った。対象建物では、水を多用する外装タイルの施工が内装の現場発泡ウレタン吹付け施工と同時に終わったことから、壁体内に多くの水分が閉じ込められた状況が考えられた。そこで、湿気伝導率に大きな値を用いることによって、近似的に液水移動を考慮して計算を行った。その結果、計算値と実測値との間に比較的良好な一致が得られた。

鉄筋コンクリート建造物の防露設計を的確に行う上で、

外壁コンクリート内部の含水率分布やその経時変動等を明らかにすることは重要である。そこで、本報では前報の結果を基に、蒸気拡散だけではなく液水の移動をも考慮した熱水分同時移動方程式による数値解析を行ったので、その結果について報告する。

2. 数値解析

基礎式には、温度と水分化学ポテンシャルを移動ポテンシャルとした熱水分の収支式を用いた⁴⁾。

【水分収支式】

$$\rho_w \left(\frac{\partial \psi}{\partial \mu} \right) \frac{\partial \mu}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda'_\mu \frac{\partial \mu}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda'_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

【熱収支式】

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left((\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2)$$

2.1 解析モデルと境界条件

解析モデルを図-1に、境界条件を以下に示す。

・外気側表面

$$-\lambda'_\mu \frac{\partial \mu}{\partial x} - \lambda'_T \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha'_o (P_{vo} - P_v) \quad (3)$$

$$-r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial x} - (\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha'_o (T_o - T) + r\alpha'_o (P_{vo} - P_v) \quad (4)$$

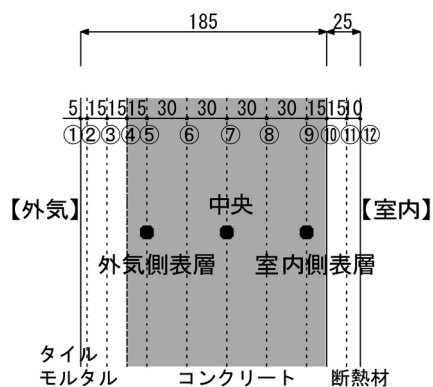


図-1 解析モデル (単位mm)

*建築研究グループ

・室内側表面

$$-\lambda'_{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial x} - \lambda'_T \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha'_I (P_v - P_{vI}) \quad (5)$$

$$-r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial x} - (\lambda' + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha'_I (T - T_I) + r\alpha'_I (P_v - P_{vI}) \quad (6)$$

・異種材料境界

$${}_AT = {}_BT, \quad {}_A\mu = {}_B\mu \quad (7)$$

$$-{}_A\lambda'_{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial x} - {}_A\lambda'_T \frac{\partial T}{\partial x} = -{}_B\lambda'_{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial x} - {}_B\lambda'_T \frac{\partial T}{\partial x} \quad (8)$$

$$-r{}_A\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial x} - ({}_A\lambda' + r{}_A\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial x} = -r{}_B\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial x} - ({}_B\lambda' + r{}_B\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial x} \quad (9)$$

2.2 外界条件

外気温と相対湿度には、建物が位置する川崎市に近い横浜管区气象台の実測データ^{5), 6)}を用いた。室温は、一部欠測があるため、得られている実測値を次式に示すような正弦曲線で近似した。室内相対湿度については、外気の絶対湿度から室内の絶対湿度を推定し、その値と前述の設定室温から算出した。ただし、室内、外気とも実測値がある期間については実測値をそのまま用いた。

$$T_I = 290.16 + 11 \sin\left\{\frac{2\pi}{365}(D - 140)\right\} + \sin\left\{2\pi\left(h - \frac{3}{8}\right)\right\} / 2 \quad (10)$$

2.3 初期条件

コンクリート打設直後の水和反応を伴う乾燥過程や、仕上げ工事を行うまでの様々な外界条件の設定が困難なため、計算はコンクリート打設から40日後の1990年12月20日から開始した。温度の初期条件には壁体内温度の実測値を直線内挿した値を用いた。水分に関する初期条件には施工状況（この頃、外気側表面にタイル張り、室内側表面に現場発泡ウレタン吹付けをほぼ同時に行っている。つまり、コンクリート壁体内部に多くの水分が閉じ込められたと推測される）を考慮して、コンクリート外気側表層の相対湿度を100%、室内側表層の相対湿度を70%とし、その間は直線近似した。なお、断熱材内部については、施工の際に水分を用いないことから、相対湿度50%における値を初期条件とした。

2.4 計算方法

解析は以下の条件で行った。

- ・外気側のタイルとモルタルはコンクリートとみなす。
- ・外気側表面のタイルは非透湿材なので、目地部分（面積比14%）で湿気伝達となされるものとする。
- ・室内側のプラスターボードと空気層は、水分移動への

影響が小さいと考え計算対象に含めない。

計算は前進型有限差分法で行い、壁体は11個の要素に不等分割した（図-1参照）。時間刻みは1sである。コンクリート壁体内部の温度と水分化学ポテンシャルの計算結果から相対湿度を算出し、平衡含水率関係より体積含水率を求め、その結果と実測値とを比較した。

2.5 計算に用いた数値

(1) 水分移動に関する物性値

水分移動に関する未知の物性値は、湿気伝導率と透水係数 K を用いて以下の方法により推定した⁷⁾。

①湿気伝導率 λ' を温度および水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率（ λ'_{Tg} 、 $\lambda'_{\mu g}$ ）に分離する。

$$J_{Iw} = -\lambda' \nabla P_v = -\lambda'_{\mu g} \nabla \mu - \lambda'_{Tg} \nabla T$$

$$\text{ここで、} \lambda'_{\mu g} = \lambda' \frac{\partial P_v}{\partial \mu}, \quad \lambda'_{Tg} = \lambda' \frac{\partial P_v}{\partial T} \quad (11)$$

$$Rh = P_v / P_{vs}, \quad \mu = R_v T \ln(Rh) \text{ より、}$$

$$\lambda'_{\mu g} = \frac{\lambda' P_{vs}}{R_v T} e^{\frac{\mu}{R_v T}} \quad (12)$$

$$\lambda'_{Tg} = \lambda' e^{\frac{\mu}{R_v T}} \left(\frac{\partial P_{vs}}{\partial T} - P_{vs} \frac{\mu}{R_v T^2} \right) \quad (13)$$

②温度勾配に関する気相水分伝導率 λ'_{Tg} は、気相水分の移動が相対湿度95%まで支配的であると仮定し、相対湿度95%までは(12)式を用い、それ以降は、0に近づくように近似した数式を用いる。（なお、温度補正については293.16K（20℃）の値を基準とした。）

③水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率 $\lambda'_{\mu g}$ は、(12)式、(13)式より導出される下式を用いて算出した。

$$\lambda'_{\mu g} = \lambda'_{Tg} \left(1 / \left(\frac{R_v T}{P_{vs}} \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} - \frac{\mu}{T} \right) \right) \quad (14)$$

④水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率については、(15)式のように透水係数を飽和時の水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率に換算し、③で求めた $\lambda'_{\mu g}$ と(16)式の関係より λ'_{μ} の近似式を作成する。なお、温度補正については、密度および粘性の変化が小さいと考えて無視した。

$$\lambda'_{\mu l} = K \rho_w / g \quad (15)$$

$$\lambda'_{\mu} = \lambda'_{\mu g} + \lambda'_{\mu l} \quad (16)$$

⑤温度勾配に関する液相水分伝導率 λ'_{Tl} は、ダルシー則に従うとして0とする（ $\lambda'_T = \lambda'_{Tg}$ ）。

コンクリートの湿気伝導率 λ' に 2.9×10^{-12} kg/msPa、透水係数 K に 1×10^{-10} m/sを用いたときの各種水分伝導率を図-2に、断熱材の湿気伝導率 λ' に 5.2×10^{-12} kg/msPa、透水係数 K に 1×10^{-11} m/sを用いたときの各種水分伝導率を図-3に示す。

(2) その他の数値

コンクリートの熱伝導率と熱容量には、下式に示すように含水率の影響を考慮した。

$${}_c\lambda = 1.31 + 0.01 {}_c\psi\rho_w \quad (17)$$

$${}_c c\rho = 4.12 \times 10^3 {}_c\psi\rho_w + 1.96 \times 10^6 \quad (18)$$

平衡含水率関係には、前報と同様に、コンクリートについては実測値を、断熱材については文献⁸⁾に記載された値による近似式を用いた(図-2、図-3参照)。

【平衡含水率関係】

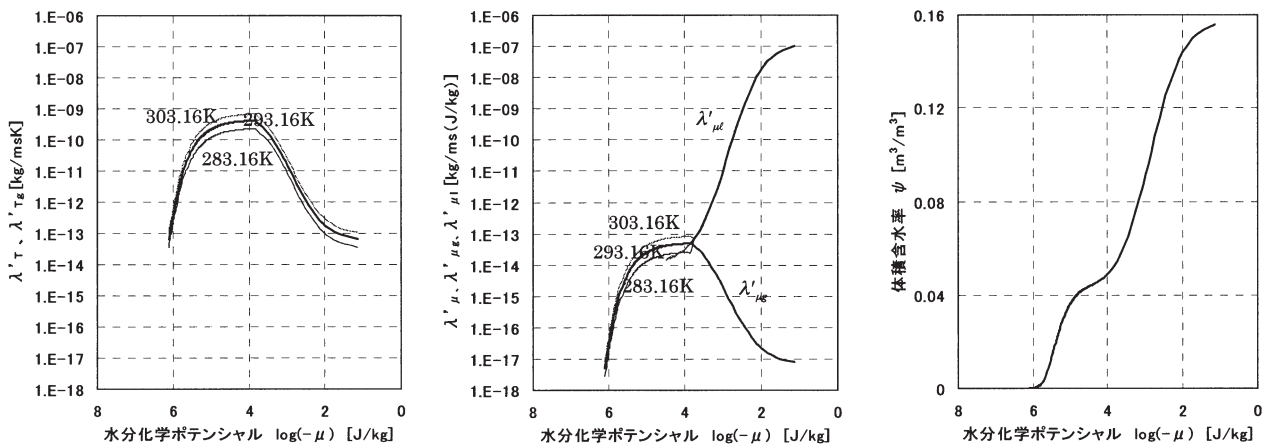
$$RH < 0.816 : {}_c\psi = -\frac{0.0251134}{RH + 0.386548} + 0.0649683 \quad (19)$$

$$RH \geq 0.816 : {}_c\psi = -\frac{0.00062292}{RH - 1.00533} + 0.0407947 \quad (20)$$

$$RH < 0.723 : {}_s\psi = \frac{-1.70885 \times 10^{-3}}{RH + 4.64703} + 3.677 \times 10^{-4} \quad (21)$$

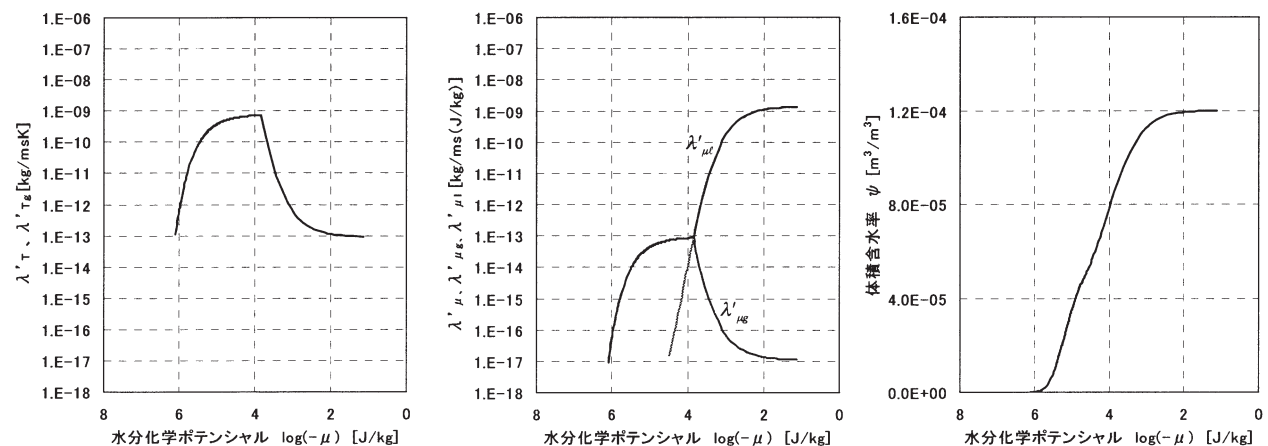
$$RH \geq 0.723 : {}_s\psi = \frac{-7.747 \times 10^{-6}}{RH - 1.08427} + 2.8066 \times 10^{-5} \quad (22)$$

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(定数)は最後に[記号]にて示す(なお、前述したように、外気側湿気伝達率には伝達面積比を乗じている)。



【温度勾配に関する水分伝導率】 【水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率】 【平衡含水率関係】

図-2 計算に用いたコンクリートの水分伝導率と平衡含水率関係



【温度勾配に関する水分伝導率】 【水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率】 【平衡含水率関係】

図-3 計算に用いた断熱材の水分伝導率と平衡含水率関係 (293.16K)

3. 計算結果

図-4(1)は、コンクリート内部（外気側表層、中央、室内側表層：図-1参照）における相対湿度の計算値と実測値とを、図-4(2)は、体積含水率の計算値と実測値とを比較したものである。

壁体の中央では計算値と実測値とが比較的良く一致しているが、外気側および室内側表層では計算値の方が実測値よりも高く、経時変動も小さい。表層の実測値では、コンクリート打設より約10ヵ月経過したあたりから低含水状態となり、外界の影響も顕著である。

このことから、表層部では中央よりも水分が流れやすいのではないかと推察し、次に示すようにコンクリートの湿気伝導率を表層と内部で変えて計算を行った。

- ①から⑤： $\lambda' = 6 \times 10^{-12}$ （水分が流れやすい）
- ⑥と⑧： $\lambda' = 3 \times 10^{-12}$
- ⑦： $\lambda' = 6 \times 10^{-13}$ （水分が流れにくい）
- ⑨と⑩： $\lambda' = 6 \times 10^{-12}$ （水分が流れやすい）

その結果を図-5(1)と図-5(2)に示す。表層部分で水分が流れやすいとしたため、外気側表層については比較的良好な結果が得られた。室内側表層についてはやや実測値に近づいてはいるが、大きな変化は見られない。これは、断熱材の湿気抵抗が影響していると考えられ、今後、検討および検証を行う必要がある。

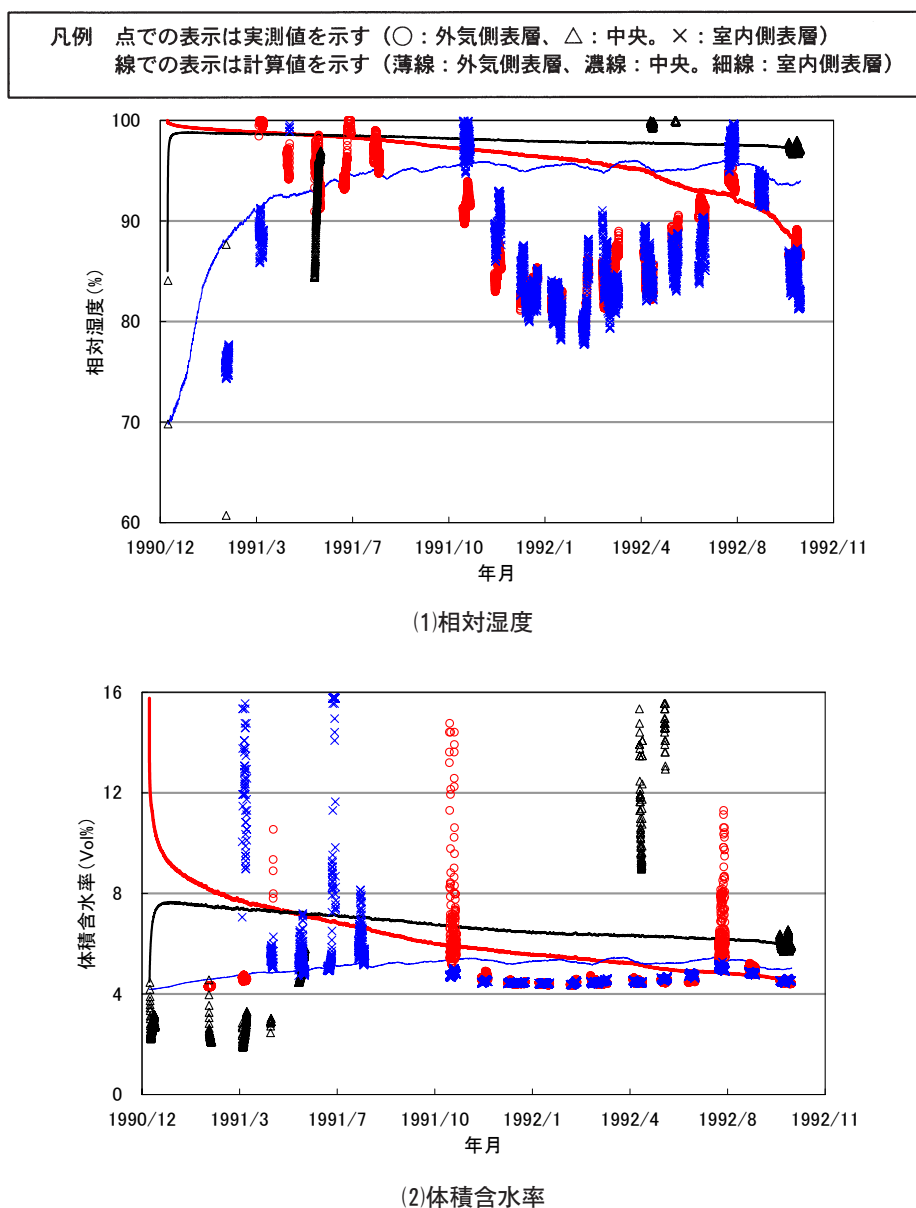


図-4 計算値と実測値との比較（湿気伝導率一定の場合）

種々の仮定の下で物性値の推定や計算を行っていることを考慮すると、全般的にまずまず満足できる結果が得られたと考える。ただし、より一般性のある結果を得るためには、物性値の実測や種々の仮定に関して、今後、詳細な検討を進めるべきである。

4. まとめ

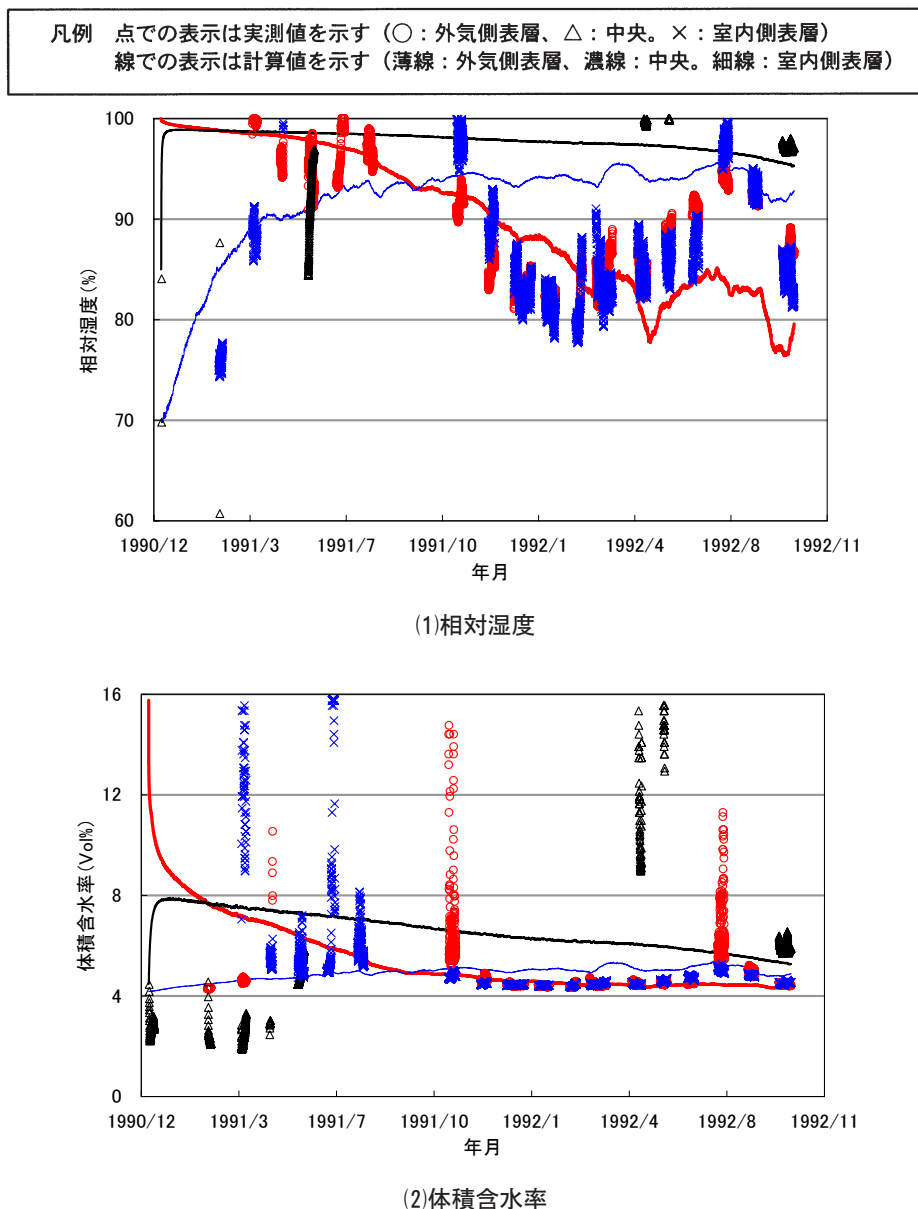
コンクリート打設後から数年間に亘って測定された実際の建物における外壁コンクリート内部の温湿度変動の実測値を用いて、液水移動を考慮した熱水分同時移動方程式による数値解析を、壁体の表層部と中央部とで湿気伝導率を変えて行った。その結果、実測値と計算値との間における経時変動や数値は、ほぼ満足する一致を得る

ことができ、鉄筋コンクリート造建物における詳細な結露検討が可能となった。しかし、より一般性の有る結果を得るためには、以下に示す2つの仮定について精査する必要がある。

①気相水分流が支配的である領域を相対湿度95%以下と仮定したこと

②表層と内部とで湿気伝導率の大きさが異なると仮定したこと

また、本報では計算結果に大きな影響を及ぼす各種水分伝導率を湿気伝導率や透水係数、および平衡含水率関係より推定したが、計算結果の信頼性を向上させるためには、これら湿気伝導率等の物性値の適正な測定も重要と考える。



図－5 計算値と実測値との比較（場所で湿気伝導率を変えた場合）

[謝 辞]

本研究を行うにあたり、大阪産業大学教授（神戸大学名誉教授）松本衛先生と京都大学教授銚井修一先生にご指導いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

[記 号]

T : 温度[K]
 T_o : 外気温[K]
 T_l : 室温[K]
 Rh : 相対湿度
 μ : 水分化学ポテンシャル[J/kg]
 ψ : 体積含水率[m³/m³]
 J_{lw} : 気相水分流[kg/m²s]
 λ : 熱伝導率[W/mK]
 λ' : 湿気伝導率[kg/mhPa]
 λ'_{μ} : μ 勾配に関する水分伝導率[kg/mh(J/kg)]
 λ'_{rg} : μ 勾配に関する気相水分伝導率[kg/mh(J/kg)]
 $\lambda'_{\mu l}$: μ 勾配に関する液相水分伝導率[kg/mh(J/kg)]
 λ'_T : T 勾配に関する水分伝導率[kg/mhK]
 λ'_{Tg} : T 勾配に関する気相水分伝導率[kg/mhK]
 λ'_{Tl} : T 勾配に関する液相水分伝導率[kg/mhK]
 $c\rho$: 熱容量[J/m³K]
 (c : 比熱[J/kgK]、 ρ : 比重量[kg/m³])
 α_o : 外気側総合熱伝達率[23.2W/m²K]
 α_l : 室内側総合熱伝達率[7.54W/m²K]
 α'_o : 外気側湿気伝達率[1.75×10⁻⁸kg/m²hPa]
 α'_l : 室内側湿気伝達率[1.25×10⁻⁸kg/m²hPa]
 K : 透水係数[m/s]
 g : 重力加速度[9.8m/s²]
 P_v : 水蒸気圧[Pa]
 P_{vs} : 飽和水蒸気圧[Pa]
 P_{vo} : 外気の水蒸気圧[Pa]
 P_{vl} : 室内空気の水蒸気圧[Pa]
 R : 気体定数[Pam³/kmolK]
 M_v : 水蒸気の分子量[kg/kmol]
 ρ_w : 水の比重量[1000kg/m³]
 r : 蒸発潜熱[2.47×106J/kg]
 D : 1月1日を1とした日数
 h : 0時を0、翌日の0時を1とした時刻
 x : 位置[m]
 t : 時間[s]
 $R_v = R/M_v = 461.64$

$$_s\lambda = 0.029$$

$$_sc\rho = 5.02 \times 10^4$$

[左下添字]

c : コンクリート

s : 断熱材

A : A材料

B : B材料

[参考文献]

- 1) 恩村：実際の建物におけるコンクリート外壁内の含水率変動に関する数値解析、浅沼組技術研究所報 No14.2002、pp.23～30
- 2) 谷沢、松本、椎名：R C造集合住宅外壁の含水率変動に関する長期測定調査（その1）、日本建築学会大会学術講演梗概集D環境工学、1991、pp.807～808
- 3) 谷沢、松本、椎名：R C造集合住宅外壁の含水率変動に関する長期測定調査（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集D環境工学、1992、pp.949～950
- 4) 松本、他：新建築学体系10環境物理、彰国社
- 5) 地上気象観測原簿過去データ（1989年4月～1991年）：気象庁監修、(財)気象業務支援センター
- 6) 地上気象観測原簿過去データ（1992年～1994年）：気象庁監修、(財)気象業務支援センター
- 7) 小椋：地下構造物の熱・湿気性状に関する研究、2000.8（博士論文）
- 8) M.K.Kumaran：建築材料の熱・空気・湿気物性値、日本建築学会編・訳、丸善