

実建物におけるコンクリート外壁内部の含水率変動に関する数値解析

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

恩村 定幸*

要 旨

実際の建物におけるコンクリート外壁とそのコンクリート外壁を模した試験体について、壁体内部の含水率変動の長期測定を行い、それらの測定結果を用いて、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。その結果、施工過程において水分が壁体内部に閉じ込められる状況となりやすい実際の建物のコンクリート外壁については、コンクリートの湿気伝導率を見かけ上大きくして液水の移動を考慮することで、計算結果と測定結果との間に良好な一致が得られた。コンクリート外壁を模した試験体については、そのような数値上の操作を必要とせずに良好な結果が得られた。以上から、コンクリート壁体内部の含水率分布や変動は蒸気拡散支配の場合の方程式による数値解析によって概略再現することができるが、実際の建物のように的確な結露検討等を必要とする場合は、蒸気拡散だけではなく液水の移動も考慮することが望ましいことがわかった。

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

1. はじめに

外壁コンクリート内部の含水率分布や経時変動等を明らかにすることは、鉄筋コンクリート建造物の防露設計を的確に行う上で重要である。また、その情報は、コンクリート壁体の内部と表面との含水率の差が原因となって発生する構造体表面の乾燥クラックや、壁体表層の含水率が影響する表面仕上げ材の剥離やふくれ、壁体が放出する水分量やアンモニア濃度の抑制などを検討する上でも重要である。したがって、コンクリート壁体内部の含水率変動に関する研究報告がこれまで多数なされているが^{1)~16)}、実際の建物から得られた測定結果を用いて数値解析を行った例はない。

そこで、竣工直後から数年間に亘って行った実際の建物のコンクリート外壁と、それを模したコンクリート試験体における壁体内部の含水率変動に関する測定結果^{6), 7), 15), 16)}を用いた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。本報告では、その結果について報告する。

2. 測定実験の概要

2.1 建物概要

構造：鉄筋コンクリート造（図－1 参照）

階数：地上4階建

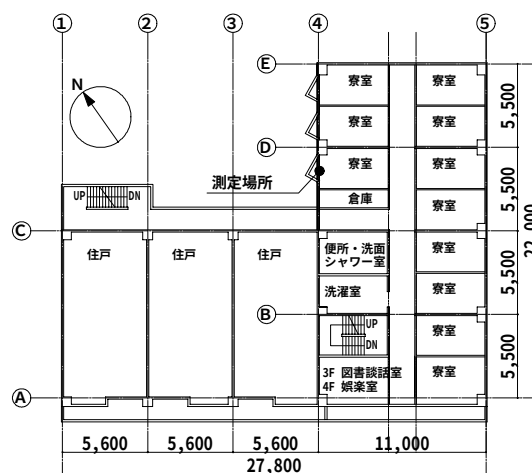
場所：神奈川県川崎市

用途：社宅兼独身寮（集合住宅）

2.2 測定概要

(1) 実建物のコンクリート外壁内部における温・湿度変動の長期測定（測定A）

北側に面した2階の寮室において、雨がかかりにくい出窓下のコンクリート外壁内に温・湿度センサーを埋設し、壁体内部の温度と相対湿度を、室内外の気温と相対湿度とともに測定した（図－2 参照）。測定は、1990年12月から1992年10月にかけて、1ヶ月に約10日間程度、パソコン制御の自動計測によって30分毎に行った。測定部位のコンクリート打設は1990年11月である。コンクリートの調査及び測定に用いた温・湿度センサーの仕様を各々表－1、表－2に示す。



図－1 建物の平面図

*建築工法・材料研究室

(2) 同調合のコンクリート試験体における体積含水率変動の長期測定（測定B）

2階部分のコンクリート打設時に、同じコンクリートを用いて、後日、分割が容易に行える試験体を28体作製し、建物の1階ピロティに全面が外気にさらされる状態で保管した。試験体の形状及び製作手順を図-3に示す。

測定対象のコンクリート試験片は、所定の日数（コン

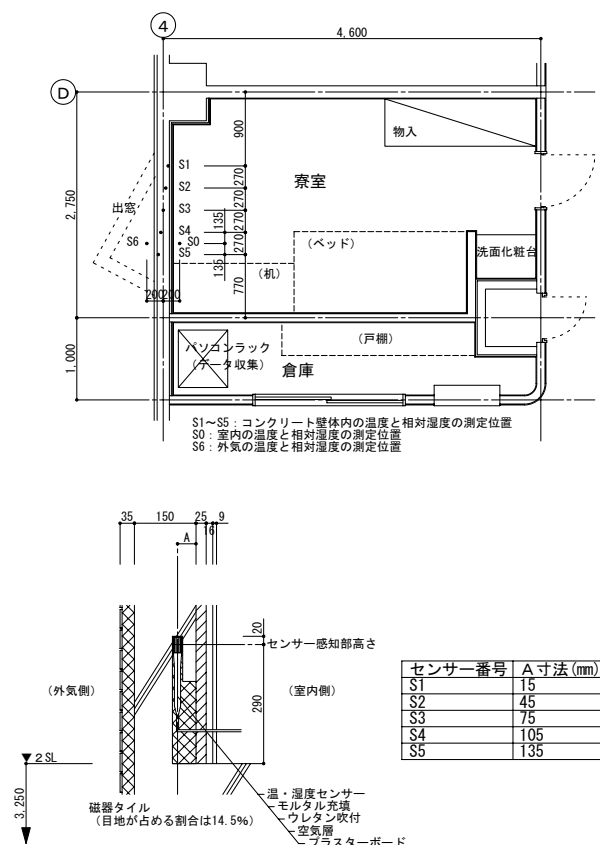


図-2 測定Aにおける温・湿度の測定位置

表-1 コンクリートの調合

品物区分	骨材種類	呼び強度	スランプ	粗骨材最大寸法	セメント種類
標準	普通	24	18	20	N

単位量 (kg/m³)					W/C (%)	細骨材率 (%)
C	W	細骨材	粗骨材	混和剤		
310	172	853	963	0.775	55.5	47.5

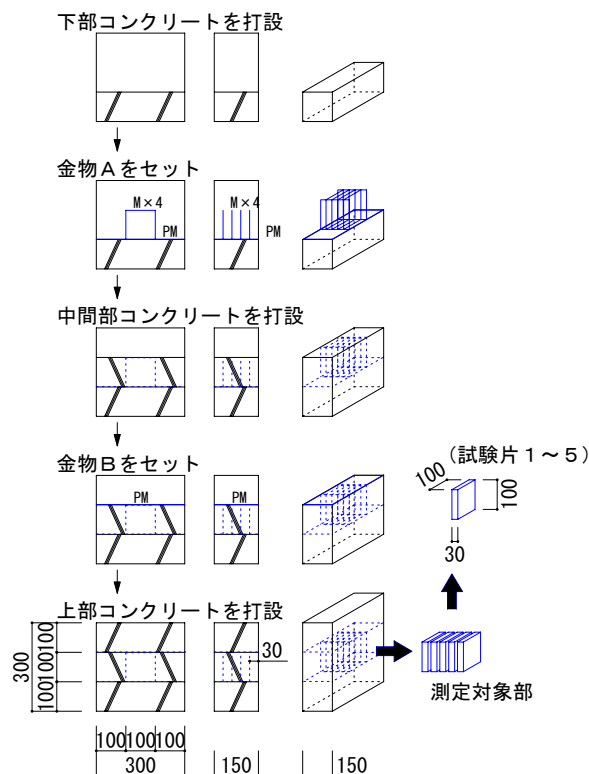
表-2 温・湿度センサーの仕様

	温度	相対湿度
測定範囲	-10~60℃	0~100%
測定精度	±1℃	±3% (15~85%)、 ±5% (0~15%、85~100%)
受感部	白金薄膜抵抗体	静電容量式ポリマフィルム

クリート打設からの経過日数、44日、73日、101日、…、1122日)に達した試験体を分割したもので、各試験片の体積含水率は、常温重量と110℃の乾燥炉内で30時間以上乾燥した後の乾燥重量の測定結果とJIS A 1110「骨材の比重測定法」に準じた方法で求めた容積の測定結果から算出した。

(3) コンクリートの平衡含水率関係の算定（測定C）

後日、2階部分のコンクリートと同じ調合のコンクリートを用いて、直径75mm、厚さ25mmの円盤形の試験体を48体作製し、図-4に示すような4種類の塩類飽和水溶液が入った密閉されたデシケータ内に所定の期間（2、4、6、8週）放置した。その後、デシケータ内の相対湿度を測定し、試験体の体積含水率を前述と同様の方法で求め、それらの測定結果からコンクリートの平衡含水率関係を求めた。



PM：パンチングメタル、開口φ5@8

M：メッシュ#18、100×100

これらの金網類によって、後日、試験体が容易に分割できる。

図-3 測定Bにおける試験体の形状と製作手順

2.3 測定結果

測定A及び測定Bの結果の詳細は文献^(6), 7), 15), 16)に記載されており、後述する数値解析でも図示するので、ここでは割愛する。図-5は測定Cの結果であり、この測定結果からコンクリートの平衡含水率関係を後述する(3)、

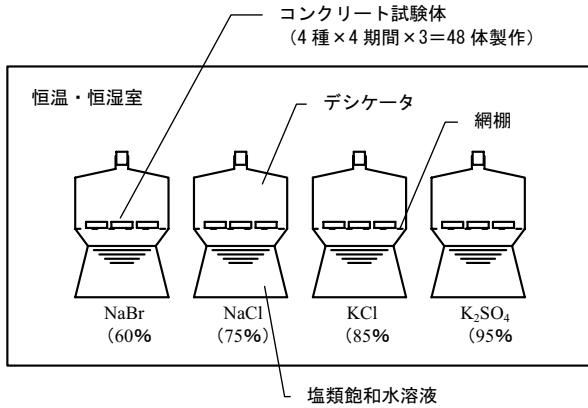


図-4 平衡含水率関係測定装置（測定C）

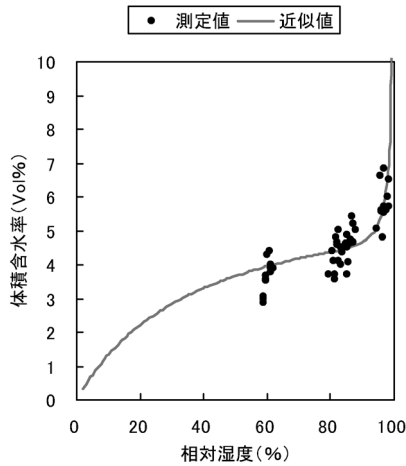


図-5 コンクリートの平衡含水率関係（測定Cの結果と近似値）

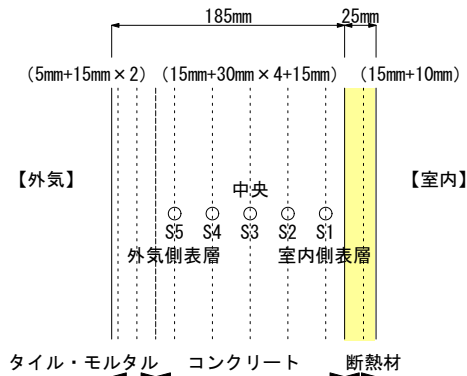


図-6 計算Aの解析モデル

(4)式のように近似した。

3. 数値解析

2章で示した各測定（測定A、測定B及び測定C）の結果を用いて、以下に示す蒸気拡散支配の場合の熱水分同時移動方程式¹⁷⁾による数値解析を行った。

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D' \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + D_T' \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D_X \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (2)$$

ここで、

$$D' = \frac{a'}{1-wb}, \quad D_T' = \frac{aw}{1-wb}, \quad D_X = \frac{a'b}{1-wb}, \quad D = \frac{a}{1-wb},$$

$$a = \frac{\lambda}{c\rho + r\nu}, \quad b = \frac{r\kappa}{c\rho + r\nu}, \quad a' = \frac{\lambda'}{\phi\gamma + \kappa}, \quad w = \frac{\nu}{\phi\gamma + \kappa},$$

$$\kappa = \rho_w \frac{\partial \psi}{\partial X}, \quad \nu = -\rho_w \frac{\partial \psi}{\partial \theta}, \quad RH = X / X_s.$$

なお、コンクリートの体積含水率は平衡含水率関係（測定Cの結果）を用いて、文献¹⁸⁾に基づいて以下のよう相対湿度の関数として近似した。

$$RH < 0.8159 : \Psi_c = -\frac{0.0251134}{RH + 0.386548} + 0.0649683 \quad (3)$$

$$RH \geq 0.8159 : \Psi_c = -\frac{0.00062292}{RH - 1.00533} + 0.0407947 \quad (4)$$

解析は、測定A及び測定Bについて行い、以後、測定Aの結果を用いた解析を計算A、測定Bの結果を用いた解析を計算Bと称す。

3.1 計算Aの概要と計算結果

(1) 解析モデルと境界条件

解析モデルを図-6に示す。室内側の空気層とプラスチックボードは、湿気移動への影響が小さいので、計算対象に含めていない。境界条件を以下に示す。

・外気側表面

$$-\lambda'_c \frac{\partial X_c}{\partial x} = \alpha'_o (X_o - X_c) \quad (5)$$

$$-\lambda_c \frac{\partial \theta_c}{\partial x} = \alpha_o (\theta_o - \theta_c) + r\alpha_o (X_o - X_c) \quad (6)$$

・コンクリートと断熱材との境界

$$X_c = X_s \quad (7)$$

$$\theta_c = \theta_s \quad (8)$$

$$-\lambda'_c \frac{\partial X_c}{\partial x} = -\lambda'_s \frac{\partial X_s}{\partial x} \quad (9)$$

$$-\lambda_c \frac{\partial \theta_c}{\partial x} = -\lambda_c \frac{\partial \theta_s}{\partial x} \quad (10)$$

・室内側表面

$$-\lambda'_s \frac{\partial X_s}{\partial x} = \alpha'_i (X_s - X_i) \quad (11)$$

$$-\lambda'_s \frac{\partial \theta_s}{\partial x} = \alpha_i (\theta_s - \theta_i) + r \alpha_i (X_s - X_i) \quad (12)$$

なお、吹き付けウレタンの体積含水率は、文献¹⁸⁾の平衡含水率関係のデータを用いて、コンクリートの場合と同様に次式のように相対湿度の関数として近似した。

$RH < 0.7227$:

$$\Psi_s = \frac{-1.70885 \times 10^{-3}}{RH + 4.64703} + 3.6773 \times 10^{-4} \quad (13)$$

$RH \geq 0.7227$:

$$\Psi_s = \frac{-7.747 \times 10^{-6}}{RH - 1.08427} + 2.80657 \times 10^{-5} \quad (14)$$

(2) 外気温、外気絶対湿度、室温及び室内絶対湿度

外気温と外気相対湿度は建物が位置する川崎市に近い横浜管区気象台の実測データを用い、外気絶対湿度はそれらのデータから算出した。室温については、測定結果を基に式(15)に示すような正弦曲線で近似し、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た後、設定した室温（式(15)）から逆算した。ただし、室内又は外気とも測定結果があるものについては測定結果をそのまま用いた。

$$\theta_i = 17 + 11 \sin \left\{ \frac{2\pi}{365} (D - 140) \right\} + 0.5 \sin \left\{ 2\pi \left(h - \frac{9}{24} \right) \right\} \quad (15)$$

(3) 初期条件

コンクリート打設直後における水和反応時の乾燥過程や仕上げ工事を行うまでの環境が激しく変化する期間については、外界条件の設定が難しいので、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。温度の初期条件に関しては、コンクリート壁体内部の測定結果を直線内挿した値を用いた。絶対湿度に関しては、相対湿度の測定が不十分なことから相対湿度100%における値を初期条件として与えた。

(4) 計算方法と計算に用いた数値

計算は前進型有限差分法で行い、解析モデルは図-6に示すように11個の要素に不等分割した。時間刻みは、10sである。解析では、コンクリート壁体内部の温度と絶対湿度の計算結果から相対湿度を算出し、さらに平衡含水率関係より体積含水率を求め、それらを測定結果と比較する。飽和絶対湿度は計算の簡素化のために、式(16)のような温度の4次曲線に近似した関数を用いて算出した。また、外気側の湿気伝達率は、タイルの非透湿性を考慮して、通常用いられる値よりも小さな値（目地部分

で湿気伝達するものとして通常用いられる値に目地の面積比0.14を乗じている）を用いた。計算に用いた数値は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \lambda_c &= 1.86 \text{ W/mK}, \lambda_s = 0.029 \text{ W/mK}, \lambda'_c = 3.0 \times 10^{-13} \text{ kg/msPa}, \\ \lambda'_s &= 4.26 \times 10^{-12} \text{ kg/msPa}, \phi_c = 0.16, \phi_s = 1.2 \times 10^{-4}, \\ c_c &= 837.21 \text{ J/kgK}, c_s = 1255.82 \text{ J/kgK}, \rho_c = 2230 \text{ kg/m}^3, \\ \rho_s &= 40 \text{ kg/m}^3, \gamma = 1.2 \text{ kg/m}^3, r = 2.47 \times 10^6 \text{ J/kg}, \\ \rho_w &= 1000 \text{ kg/m}^3, \alpha_o = 23.2 \text{ W/m}^2\text{K}, \alpha_i = 7.56 \text{ W/m}^2\text{K}, \\ \alpha'_o &= 1.54 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2\text{sPa}, \alpha'_i = 1.14 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2\text{sPa} \end{aligned}$$

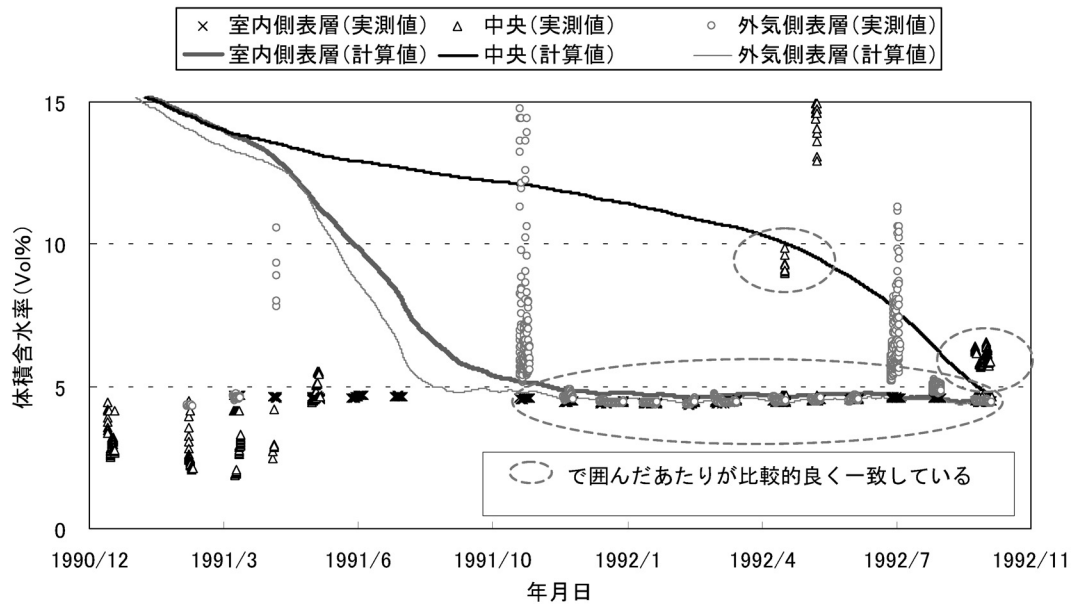
$$\begin{aligned} X_s &= 6.1727 \times 10^{-9} \theta^4 - 5.7485 \times 10^{-9} \theta^3 \\ &+ 1.1964 \times 10^{-5} \theta^2 + 2.5778 \times 10^{-4} \theta + 3.8028 \times 10^{-3} \quad (16) \end{aligned}$$

(5) 計算結果

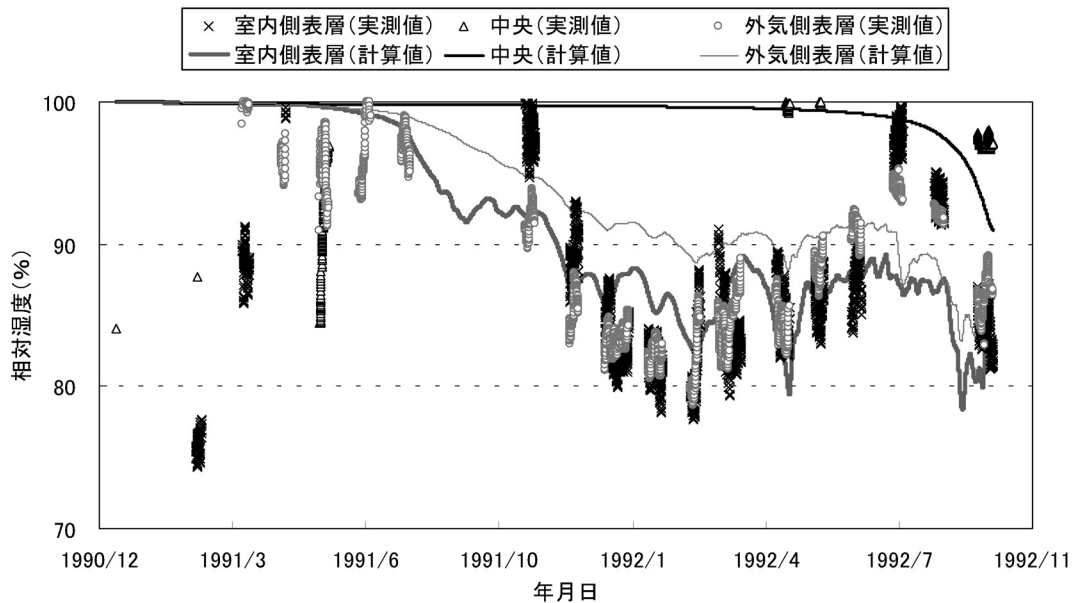
体積含水率の計算結果と測定結果を比較したところ、計算結果では、コンクリート壁体の中央部は比較的早い段階（半年程度）で5Vol%程度の低含水状態になるのに対し、測定結果では長期（2年以上）に亘って10Vol%程度の高含水状態が保持されており、良好な一致が得られなかった。

そこで、測定を開始した頃に行われた外壁のタイル工事及び室内側の断熱工事によって、水分が壁体に供給されたと同時にその水分が壁体内部に閉じ込められたと想定できることから、壁体内部の液水の移動を考慮し、コンクリートの湿気伝達率を見かけ上大きくして（通常用いられる値の50倍： $1.5 \times 10^{-11} \text{ kg/msPa}$ ）再度計算を行った。

図-7は、体積含水率の計算結果と測定結果とを比較したもので、図-8は、相対湿度の計算結果と測定結果とを比較したものである。センサーの感度及び測定誤差、雨がかりや人の出入りなどによる外界条件の変化、さらには、物性値のばらつき等を考え合わせると、比較的良好的な結果が得られたといえる。なお、コンクリート壁体内部の温度変動については、計算結果と実測値との間に大きな差は見られなかった。



図－7 計算Aの結果と測定Aの結果との比較
(体積含水率)



図－8 計算Aの結果と測定Aの結果との比較
(相対湿度)

3.2 計算Bの概要と計算結果

(1) 解析モデルと境界条件

解析モデルを図－9に示す。試験体は材厚方向の中央で対称形となっているので、表面から試験体中央までを解析の対象とした。境界条件を以下に示す。

・外気側表面

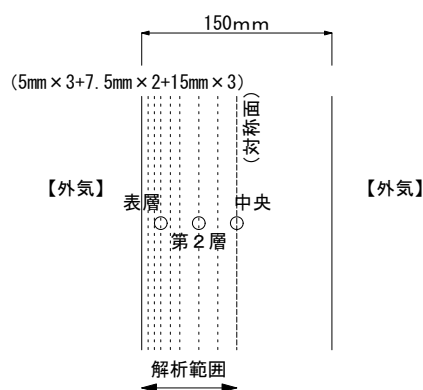
$$-\lambda'_c \frac{\partial X_c}{\partial x} = \alpha'_o (X_o - X_c) \quad (17)$$

$$-\lambda_c \frac{\partial \theta_c}{\partial x} = \alpha_o (\theta_o - \theta_c) + r \alpha'_o (X_o - X_c) \quad (18)$$

・コンクリート試験壁体中央 (対称面)

$$-\lambda'_c \frac{\partial X_c}{\partial x} = 0 \quad (19)$$

$$-\lambda_c \frac{\partial \theta_c}{\partial x} = 0 \quad (20)$$



図－9 計算Bの解析モデル

(2) 外気温と外気絶対湿度

計算Aと同様に、外気温と外気相対湿度は試験体を養生していた川崎市に近い横浜管区気象台の実測データを用い、外気絶対湿度はそれらのデータから算出した。

(3) 初期条件

計算Aと同様に、計算はコンクリート打設から約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外気温の実測データを用い、絶対湿度に関しては、体積含水率の測定結果から算出した値を初期条件として与えた。

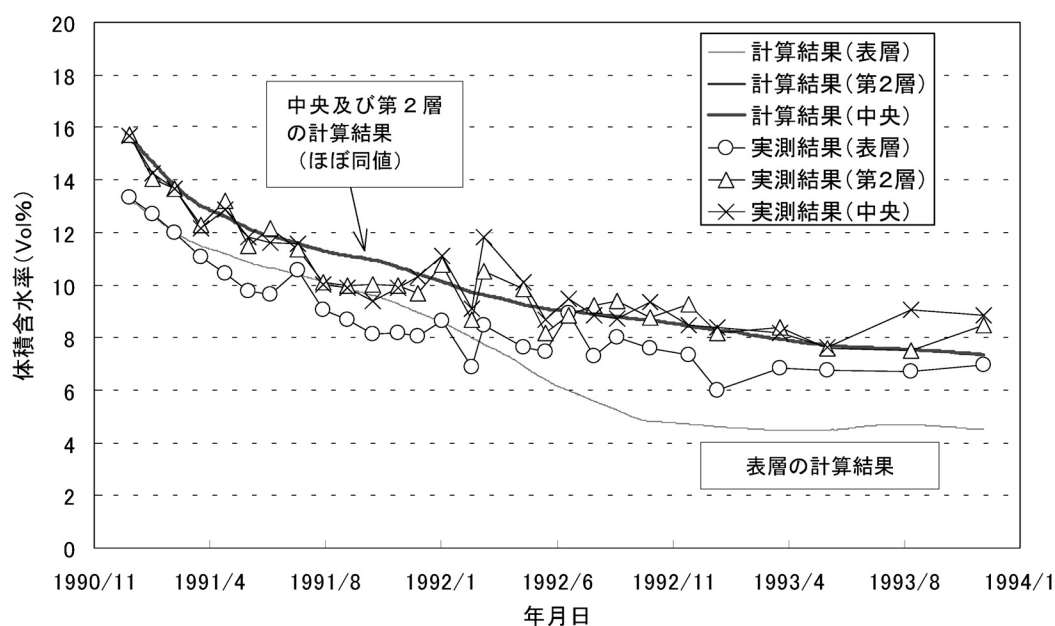
(4) 計算方法と計算に用いた数値

計算は前進型有限差分法で行い、解析モデルは図－9に示すように8個の要素に不等分割した。時間刻みは、10sである。解析では、コンクリート試験体内部の温度と絶対湿度の計算結果から相対湿度を算出し、さらに平衡含水率関係より体積含水率を求め、それと測定結果とを比較する。飽和絶対湿度は計算Aと同様に、式(16)より算出した。計算に用いた数値は以下の通りである。なお、熱伝達率及び湿気伝達率については、試験体の保管場所が1階ピロティであったことを考慮して、室内側で通常用いられる値を使用した。

$$\begin{aligned} \lambda_c &= 1.86 \text{ W/mK}, \lambda'_c = 3.0 \times 10^{-13} \text{ kg/msPa}, c_c = 837.21 \text{ J/kgK}, \\ \rho_c &= 2230 \text{ kg/m}^3, \phi_c = 0.16, \gamma = 1.2 \text{ kg/m}^3, \rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3, \\ r &= 2.47 \times 10^6 \text{ J/kg}, \alpha_o = 7.56 \text{ W/m}^2\text{K}, \\ \alpha'_o &= 1.14 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2\text{sPa} \end{aligned}$$

(5) 計算結果

計算結果を図－10に示す。コンクリート試験体内部の体積含水率の計算結果は、測定結果と同様に時間が経つにつれて小さくなり、その変化の様相も類似している。表層での数値に若干の差が見られるが、概ね良好な一致と考える。なお、本計算ではコンクリートの湿気伝達率には通常用いられる値 ($3.0 \times 10^{-13} \text{ kg/msPa}$) を用いている。



図－10 計算Bの結果と測定Bの結果との比較

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コンクリート壁体内部の温・湿度及びそのコンクリート外壁を模した試験体内部の体積含水率の測定結果を用いて、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。その結果、施工過程において水分が壁体内部に閉じ込められる状況となりやすい実際の建物のコンクリート外壁については、コンクリートの湿気伝導率を見かけ上大きくして液水の移動を考慮することで、計算結果と測定結果との間に良好な一致が得られた。コンクリート外壁を模した試験体については、そのような数値上の操作を必要とせずに良好な結果が得られた。以上から、コンクリート壁体内部の含水率分布や変動は蒸気拡散支配の場合の方程式による数値解析によって概略再現することができるが、実際の建物のように的確な結露検討等を必要とする場合は、蒸気拡散だけではなく液水の移動も考慮することが望ましいといえる。

[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鉾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]

θ : 温度 (°C)
 θ_o : 外気温 (K)
 θ_i : 室温 (K)
 X : 絶対湿度 (kg/kg)
 X_o : 外気絶対湿度 (kg/kg)
 X_i : 室内絶対湿度 (kg/kg)
 X_s : 飽和絶対湿度 (kg/kg)
 RH : 相対湿度
 λ : 熱伝導率 (W/mK)
 λ' : 湿気伝導率 (kg/msPa)
 c : 比熱 (J/kgK)
 ρ : 比重 (kg/m³)
 ϕ : 空隙率
 γ : 空気の比重 (kg/m³)
 r : 相変化熱 (J/kg)
 ρ_w : 水の比重 (kg/m³)
 Ψ : 体積含水率 (m³/m³、Vol%)
 α_o : 外気側総合熱伝達率 (W/m²K)
 α'_o : 外気側湿気伝達率 (kg/m²sPa)

α_i : 室内側総合熱伝達率 (W/m²K)

α'_i : 室内側湿気伝達率 (kg/m²sPa)

π : 円周率 (3.14159)

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

t : 時間 (s)

x : 位置 (m)

([添字] c : コンクリート、 s : 吹き付けウレタン)

[参考文献]

- 1) 椎名國雄：構造体コンクリートの部材中心部小空間における湿度の長期変化、第42回セメント技術大会、1988.5
- 2) 橋田浩・田中亨二・小池迪夫：打設直後からの乾燥途中におけるコンクリートの含水状態、仕上げ材下地としてのコンクリートの含水状態の検討・その1、日本建築学会構造系論文報告集第412号、pp.1～8、1990.6
- 3) 橋田浩・田中亨二・小池迪夫：打設直後からの乾燥途中におけるコンクリートの含水状態、仕上げ材下地としてのコンクリートの含水状態の検討・その2、日本建築学会構造系論文報告集第419号、pp.21～29、1991.1
- 4) 高木典久・松本衛：壁体の含水率変動に関する研究－コンクリート壁初期含水の影響－、日本建築学会大会学術講演梗概集計画系、1989.10
- 5) 谷沢晋・松本衛：RC集合住宅の内断熱壁体の各部の温・湿度変動の長期測定調査－コンクリート初期含水の影響－、日本建築学会大会学術講演梗概集計画系、pp.1397～1398、1989.10
- 6) 谷沢晋・松本衛・椎名國雄：RC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、pp.807～808、1991
- 7) 谷沢晋・松本衛・椎名國雄：RC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、pp.949～950、1990
- 8) 荒井良延・河合達司・寒河江昭夫・武廣絵里子・権藤尚・平井祥絵：美術館の温湿度・空気質環境計画に関する研究（その1）コンクリートの湿気・アルカリの放出特性、日本建築学会大会学術講演梗概集D-2環境工学Ⅱ、pp.301～302、1995.8
- 9) 寒河江昭夫・荒井良延・権藤尚・太田雅子：コンク

リート構造体の乾燥特性と室内環境、日本建築学会
大会学術講演梗概集D-2 環境工学Ⅱ、pp.251～252、
1996.9

10) 荒井良延・寒河江昭夫・佐武護・笠井浩・沓掛文夫：
コンクリート構造体の乾燥特性に関する研究その1
含水率測定法の検討と現場への適用、日本建築学会
大会学術講演梗概集D-2 環境工学Ⅱ、pp.289～290、
2001.9

11) 岸本嘉彦・銚井修一：コンクリート壁体の熱水分移
動に及ぼすひび割れの影響、日本建築学会大会学術
講演梗概集D-2 環境工学Ⅱ、pp.311～312、1999.9

12) 岸本嘉彦・銚井修一：コンクリート壁体への水分及
び拡散物質の流入に及ぼす表面ひび割れの影響、日
本建築学会大会学術講演梗概集D-2 環境工学Ⅱ、pp.
355～356、2000.9

13) 松本衛・小椋大輔：自然状態下における地下構造物
とその周囲地盤の熱・湿気性状の解析、日本建築学
会計画系論文報告集第474号、pp.27～36、1995.8

14) 中嶋大輔・小椋大輔・松下敬幸：地下空間の結露問
題に関する研究ーコンクリート施工時の高含水状態
の影響ー、日本建築学会大会学術講演梗概集D-2 環
境工学Ⅱ、pp.331～332、2001.9

15) 谷沢晋：鉄筋コンクリート造集合住宅の外壁におけ
る含水率変動に関する長期測定調査（その1）、浅沼
組技術研究所報No3、pp.29～36、1991

16) 谷沢晋：鉄筋コンクリート造集合住宅の外壁におけ
る含水率変動に関する長期測定調査（その2）、浅沼
組技術研究所報No4、pp.79～84、1992

17) 松本衛他：新建築学体系10環境物理、彰国社

18) 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