# 5. タイル張り仕上げをしたコンクリート壁体への水分浸透 -その3 振動および加熱が水分移動に関する物性値に及ぼす影響-

Water Penetration to the Concrete Wall with Tiling Finish - Part3 Influence of Vibration and Heating on Water Transport Properties -

恩村 定幸\*1

## 要 旨

本研究の目的は、一般的なタイル張り仕上げが施された鉄筋コンクリート造建物の外壁を対象に、水分移動の 挙動を把握すると同時に、その水分移動の挙動を解析によって予測する手法の精度を向上させることである。 既報<sup>1)~4)</sup>では以下のことを報告している。

- ・ 一般的に用いられている圧縮強度の異なる 3 種類のコンクリート(Fc27、Fc33、Fc40)の熱湿気物性(湿 気伝導率、平衡含水率、透水係数および熱伝導率)の測定結果
- タイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体への水分浸透および壁体内での水分移動の挙動を知るため に行った吸水実験の結果
- ・ 熱湿気物性値の測定結果を用いた水分移動に関する物性値の推定方法

強度の違いおよび物性値のばらつきを考慮した2次元非定常計算および計算結果と吸水実験結果との比較

前報<sup>4)</sup>の解析では3体の試験体のうち、最も吸水量の少なかった試験体については計算結果と実験結果とが良好 な一致を示した。しかし、吸水量の多かった試験体については一致しなかった。そこで、本報では、その原因と して、試験体作製時の切断による振動および試験体を乾燥させたときの加熱を取り上げ、それらが水分移動に関 する物性値に及ぼす影響を簡易な実験と解析によって検討した。

キーワード:タイル/コンクリート壁体/水分浸透/水分移動に関する物性値/振動/加熱/浮き

### 1. はじめに

一般的なタイル張り仕上げが施されたコンクリート壁 体への水分浸透の様相を把握するために、3 体の試験体 (試験体A、B、C、大きさは約 200×100×25mm)を用 いて吸水実験(写真-1)を行った。その結果、図-1 に 示すように吸水量は試験体ごとに大きく異なった<sup>3)</sup>。

この吸水実験について、熱水分同時移動方程式を用い た2次元非定常解析を行った結果、最も吸水量が少なか った試験体Bについては、強度の違いや物性値のばらつ きを考慮することでほぼ実験を再現することができた<sup>4)</sup>。 しかし、試験体Bよりも吸水量の多い試験体AとCにつ いては、実験結果と解析結果が一致せず、何らかの要因 で水分移動に関する物性値が変化した可能性が高いと推 定された。

吸水実験中は、試験体にひび割れが生じたり、タイル に剥がれが生じたりしていないか等の確認を目視によっ て行った。しかし、水分移動に関する物性値に大きく影 響するようなコンクリート内部の空隙構造の変化は、目 視では確認できなかった。

実験中、コンクリート内部の空隙構造に変化を及ぼす 可能性のある要因としては、試験体作製にともなう切断 時の振動と吸水開始前に行った乾燥時の加熱(105℃で4 日間乾燥)が考えられた。そこで、これら振動および加 熱がコンクリート内部の空隙構造へ及ぼす影響の有無を 検討するために、簡易な実験と解析を行った。



写真-1 吸水実験

<sup>\*1</sup> 技術研究所環境・生産研究グループ



図-1 吸水実験の結果(吸水量)



図-2 コンクリート試験体の切断位置、 順序、切断回数



図-3 切断前のコンクリート試験体と切断後の 各試験体の単位目地面積当たりの吸水量の比較

実験による検討

### 2.1 切断時の振動による影響

試験体A、B、Cと同時に同条件で作製されたタイル 張りコンクリート試験体のうちの1体を用いて、最初に タイル面から吸水させて重量変化を測定した。その後、 図-2に示すように吸水実験の試験体と同様の位置およ び順序でコンクリート試験体を切断して8個の試験体に 分割した。各試験体の側面を断湿した後、タイル面から 吸水させて重量変化を測定した。

切断時に水を使用しているので初期の含水量が異なり、 切断前後の吸水量を直接比較することができない。そこ で、切断前のコンクリート試験体と切断後の各試験体の 単位目地面積(1cm<sup>2</sup>)当たりの吸水量を比較した(目地 からの吸水量が全吸水量の大部分を占めるため)。その結 果を図-3に示す。

ほとんどすべての試験体において切断後の試験体の吸 水速度は切断前のコンクリート試験体の吸水速度よりも 小さくなった。切断後のある試験体の吸水速度が切断前 のコンクリート試験体のそれよりも大きく増加したなら ば、切断時の振動による影響が考えられる。また、切断 回数と吸水量との間には特定の傾向(例えば、切断回数 が多い、すなわち多くの振動を受けるほど吸水速度が大 きいなど)も見られない(凡例の()内数字が切断回数 を表し、白色シンボルの試験体が切断回数が少なく、黒 色シンボルの試験体が切断回数が多い)。

これらのことから、今回の吸水実験では切断時の振動 の影響は、非常に小さかったと考えられる。

### 2.2 乾燥時の加熱による影響

前節の実験に用いたコンクリート試験体とは別の試験 体を用いて、最初にタイル面から吸水させて重量変化を 測定した(「吸水1」と称す)。その後、吸水実験のとき と同様に105℃で4日間乾燥し、さらにタイル面から吸水 させて重量変化を測定した(「吸水2」と称す)。

コンクリート試験体の重量変化を図-4に示す。乾燥前 後の吸水開始時の含水量が異なるものの「吸水1」に比 べて加熱乾燥後の「吸水2」での吸水速度の増加はかな り急激であり、これは加熱の影響によるものと考えられ る。

図-5 は加熱乾燥後の吸水速度「吸水2」を吸水実験結 果と比較したものである(単位目地面積当たりで比較)。 「吸水2」は吸水実験における試験体Aの吸水速度ほど 大きくないが、試験体BやCの吸水速度よりも大きい。 このことより、吸水実験に用いたコンクリート試験体、 特に吸水量が多かった試験体Aは加熱の影響を受け、コ ンクリート内部の空隙構造が変化したと考えられる。試験体Cについても少なからず加熱の影響を受けた可能性が高いと思われる。

そこで、別のコンクリート試験体を用いて、105℃乾燥 中におけるタイルの浮きの発生状況を打診法によって調 査した。その結果を図-6に示す。

乾燥時間の経過とともに端部のタイルから順次浮きが 生じる傾向が見られる。浮きは乾燥1日後から確認され、 乾燥6日後にはすべてのタイルに浮きが確認された。た だし、乾燥4日後(吸水実験と同じ条件)の結果に注目 すると、2枚のタイルについては浮きが確認されていない。 なお、乾燥8日後にはタイルの接着強度は手で剥がれる ほどまで低下した。剥離面は張り付けモルタルとコンク リートとの界面であった(**写真-2**)。

このことから、吸水実験で用いたコンクリート試験体の 一部には、加熱によるタイルの浮きが生じていたおそれ があると考えられる。特に吸水量の大きい試験体Aはタ イルの一部が浮いていた可能性が高いと思われる。







図-5 吸水実験結果との比較



※色付き部が「浮き」が生じたタイルを示す 図ー6 タイルの「浮き」に関する実験結果



写真-2 タイルの剥離状況

# 3. 解析による検討

## 3.1 解析方法と条件

前章の実験結果を受け、加熱の影響によって水分伝導 率が大きく変化したという前提で、熱水分同時移動方程 式を用いた 2 次元の解析によって水分移動に関する物性 値(水分伝導率: $\lambda'_{T}$ 、 $\lambda'_{T_8}$ 、 $\lambda'_{\mu}$ 、 $\lambda'_{\mu}$ )の検討を行っ た。また、浮きについては境界条件に検討を加えた。解 析方法と条件は前報<sup>4)</sup>と同様なので、ここでは概略を示 す。

(1) 解析対象、基礎式と境界条件

解析対象は側面が断湿された198×98mmの大きさのコ ンクリート試験体で、鉛直方向と水平方向の2次元の系 を対象とする。張り付けモルタルや目地モルタルとの界 面を除くタイル部分は、水分を通さないので解析対象に は含めない。水分は目地モルタルの下面から吸水される。

図-7に解析条件の概要を示す。

基礎式には、気相水分(水蒸気)と液相水分(液水) の同時移動を考慮した熱水分同時移動方程式を用いる<sup>5)</sup>。

(3)~(10)式に境界条件を示す。第1種境界条件として 与える温度は周辺空気の温度とした。水分の第1種境界 条件は-10 J/kg とした。

【基礎式】  

$$\rho_{w} \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \left( \lambda'_{\mu} \left( \nabla \mu - F_{w} \right) \right) + \nabla \left( \lambda'_{\tau} \nabla T \right) \quad (1)$$

$$c \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left( r \lambda'_{\mu g} \left( \nabla \mu - F_{w} \right) \right)$$

$$+ \nabla \left( \left( \lambda + r \lambda'_{\tau g} \right) \nabla T \right) \quad (2)$$

【境界条件】

- i ) 熱、水分とも第3種境界条件(試験体上面) 水分:  $J = \alpha'_{\mu} (\mu - \mu_{out}) + \alpha'_{T} (T - T_{out})$  (3) 熱 :  $q = \alpha (T - T_{out}) + r \alpha'_{\mu} (\mu - \mu_{out})$  $+ r \alpha'_{T} (T - T_{out})$  (4)
- ii)熱が第3種境界条件、水分が断湿条件(試験体側面) 水分: J=0
  (5)
  熱: q = α(T - T<sub>out</sub>)
  (6)
  iii)熱が第1種境界条件、水分が断湿条件(タイル面) 水分: J=0
  (7)
  熱: T = T<sub>out</sub>
  (8)
  iv)熱、水分とも第1種境界条件(目地モルタル下面) 水分: μ = -10
  (9)
- 熱 :  $T = T_{out}$  (10)

(2) 初期条件と計算に用いた数値

温度の初期条件には周辺空気の温度を与えた。相対湿 度の初期条件は1%とした。

熱伝導率 *λ* と平衡含水率関係は実測値<sup>1),4)</sup>より算定した((11)式と図-8)。

コンクリートの熱容量 *c p* には水分の影響を、相変化熱 *r* には温度依存性を考慮した既存の式を用いた((12)式 と(13)式)。

| $\lambda = 3.1948\psi + 1.3533$            | (11) |
|--|------|
| $c\rho = c_c \rho_c + c_w \rho_w \psi$     | (12) |
| $r = 4186.05\{597.5 - 0.599(T - 273.16)\}$ | (13) |

コンクリートの比熱 $c_c$ には文献値(837.2 J/kgK)<sup>6)</sup>を、 密度 $\rho_c$ には平衡含水率測定の際に実測した値を用いた<sup>4)</sup>。

水分伝達率 $\alpha'_{\mu}$ および $\alpha'_{\tau}$ は、下向き湿流の場合の湿気 伝達率 $\alpha'$ の文献値(2.92×10<sup>-8</sup>kg/m2sPa)<sup>7)</sup>を用いて下式 より算定した。

$$\alpha'_{\mu} = \alpha' \frac{P_{\nu s}}{R_{\nu} T} Rh \tag{14}$$

$$\boldsymbol{\alpha'}_{T} = \boldsymbol{\alpha'}_{\mu} \left( \frac{R_{\nu}T}{p_{\nu s}} \cdot \frac{\partial p_{\nu s}}{\partial T} - \frac{\mu}{T} \right)$$
(15)



図-7 解析条件の概要



図-8 計算に用いた平衡含水率関係

飽和水蒸気圧  $p_{vs}$  の算定は Goff-Gratch の実験式 5を用いた。

$$\log_{10} p_{vs} = 2.78614 + 10.79574 \left( 1 - \frac{273.16}{T} \right) - 5.028 \log_{10} \left( \frac{T}{273.16} \right) + 1.50475 \times 10^{-4} \left[ 1 - 10^{-8.2969 \left( \frac{T}{273.16} - 1 \right)} \right] + 0.42873 \times 10^{-3} \left[ 10^{4.76955 \left( 1 - \frac{273.16}{T} \right)} - 1 \right]$$
(16)

なお、張り付けモルタルおよび目地モルタルの物性に ついては、コンクリートと大きな差異はないと考え、コ ンクリートと同じ値を用いた。

(3) 計算方法

数値計算には、位置については差分法を用いた。ここ で、含水率の変動がかなり大きい吸水面付近での鉛直方 向の位置刻みを特に小さくしている。時間については時 間微分項を差分しない方法、すなわち、隣接する差分点 の状態量を定数とした常微分方程式の解を用いて計算を 行った<sup>8</sup>。

### 3.2 計算結果

試行錯誤の結果、試験体AとCについて、それぞれ図 −9 および図−10 に示す値を水分伝導率に用いたとき、 実験結果と計算結果との間に比較的良好な一致が見られ た(図−11 および図−12)。

以上の結果より、吸水実験に用いた試験体AとCは、 加熱の影響を受けて内部の空隙構造に変化が生じ、さら に試験体Aについては一部でタイルに浮きが生じていた と考えられる(浮きを考慮に入れないと計算結果は実験 結果と一致しない)。

タイルが張られたコンクリート壁体は、日射や天空放 射によって加熱と冷却が繰り返され、その際の熱応力に よって特に応力が大きくかかる部分や強度の弱い部分で タイルの浮きが生じ始める。同時に、外表面に近いコン



図-9 計算に用いた水分伝導率(試験体A) ※この図では「浮き」を考慮して第1種境界条件の範囲を広げている(点線の円の部分)



図-10 計算に用いた水分伝導率(試験体C)

リート内部では微少クラックが生じるなど、空隙構造が 変化する。これら、浮きやクラックに雨水などの水分が 浸透すると、乾燥時に働く収縮力が熱応力に加わり、さ らに劣化が進行する。これら熱水分の影響が繰り返され、 やがてはタイルの剥離に至ると考えられる<sup>90</sup>。したがっ て、吸水実験における試験体AとCの結果は極端な加熱 の影響によるが、一部で空隙構造が変化した壁体、さら に一部のタイルに浮きが生じた壁体における水分移動の 様相を見かけ上再現したものと言える。

加熱の影響が小さかったと考えられる試験体Bの実験 結果との比較から、劣化した壁体にはかなり多くの水分 が浸透していくことが推察できる。したがって、水分の 浸透と劣化の進行との関係が明確ではないが、劣化の可 能性のあるコンクリート壁体の含水率変動等を解析する 場合は、水分伝導率の変化を視野に入れて検討すること が望ましいと考える。



図-11 実験結果と計算結果との比較(試験体A)



図-12 実験結果と計算結果との比較(試験体C)

なお、各試験体における加熱の影響度の違いは、材料 特性のばらつきと施工のばらつきが相互に関係して生じ たと考えられる。

#### 4. まとめ

吸水実験での試験体作製時の振動や乾燥時の加熱が水 分移動に関する物性値に及ぼす影響を、簡易な実験と解 析により検討し、以下のことが分かった。

- 吸水量の多かった試験体AとCでは、加熱による 影響を受け水分伝導率が大きく変化した。さらに、 試験体Aでは一部のタイルに浮きが生じていた可 能性が高い。
- 2) 今回の吸水実験では振動による影響は非常に小さ かったと考えられる。

なお、吸水量の少なかった試験体Bは、前報<sup>4</sup>の結果 から加熱による影響がほとんど無かったと考える。

また、試験体AとCの吸水実験の結果は、劣化した壁 体における水分移動の様相を見かけ上再現したものと言 え、そのような壁体にはかなり多くの水分が浸透してい くことが明確となった。したがって、建造後、長い年月 が経過したタイル張り仕上げのコンクリート壁体は、劣 化によって多くの水分が浸透し、移動しやすい状態にな っている場合があるので、熱水分移動の検討を行う際に はその点(水分伝導率の取り扱いや境界条件の設定など) に注意が必要である。

[謝 辞]

本報は、筆者が京都大学大学院工学研究科博士後期課 程(平成18年4月~平成21年3月)に在学していた 間の研究成果(博士論文)の一部を抜粋・整理したもの である。

本研究に際し、ご指導いただいた京都大学大学院工学 研究科の鉾井修一教授と小椋大輔助教をはじめ、ご援 助・ご協力いただいた全ての方々に心から感謝の意を表 します。

# [記号] $c\rho := c_c \rho_c + c_w \rho_w \psi$ $c_c : コンクリートの比熱 [J/kgK]$ $c_w : 水の比熱 [4186.05J/kgK]$ $F_w : 水分 1kg に作用する外力=重力 [9.8m/s<sup>2</sup>、J/mkg]$ J : 水分流 [kg/m<sup>2</sup>s] $p_{vs} : 飽和水蒸気圧 [Pa]$ q : 熱流 [W/m<sup>2</sup>] Rh : 相対湿度 [-] $R_v : 水蒸気の理想気体定数 [461.643Pam<sup>3</sup>/kgK]$ r : 相変化熱 (気相から液相) [J/kg]T : 温度 [K]

t :時間 [s]

- $\alpha$  :総合熱伝達率  $[W/m^2K]$
- $\alpha': 湿気伝達率 [kg/m<sup>2</sup>sPa]$
- $\alpha'_{\tau}$ :温度勾配に関する水分伝達率 [kg/m<sup>2</sup>sK]
- α'<sub>μ</sub>: μ 勾配に関する水分伝達率 [kg/m<sup>2</sup>s(J/kg)]
- λ:熱伝導率 [W/mK]
- λ'<sub>r</sub>:温度勾配に関する水分伝導率 [kg/msK]
- λ'<sub>re</sub>:温度勾配に関する気相水分伝導率 [kg/msK]
- λ'<sub>μ</sub>: μ 勾配に関する水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]
- $\lambda'_{w}$ :  $\mu$  勾配に関する気相水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]
- μ : 水分化学ポテンシャル [J/kg]
- $\rho_c$ : コンクリートの密度 [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_w$ :水の密度 [1000.0kg/m<sup>3</sup>]
- ψ:体積含水率 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>、Vol%]
- ▼:空間勾配を表す微分演算子
- 添え字) out:周辺空気

[参考文献]

- 恩村定幸:「強度の異なるコンクリートの熱・湿気物 性」、淺沼組技術研究所報、No.16、pp.29~36、2004.
- 2) 恩村定幸:「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」、淺沼組技術研究所
   報、No.18、pp.31~38、2006.
- 恩村定幸:「タイル張り仕上げをしたコンクリート壁 体への水分浸透(その1 吸水実験の概要と結果)」、 淺沼組技術研究報告、No.20、pp.13~22、2008.
- 恩村定幸:「タイル張り仕上げをしたコンクリート壁 体への水分浸透(その2 強度の違いと物性値のば らつきを考慮した解析)」、淺沼組技術研究報告、 No.21、5-1~5-7、2009.
- 5) 松本衛:「新建築学大系10環境物理3湿気」、彰国社、 pp.114~117、1984.
- 6) 日本建築学会編:「建築設計資料集成1環境」、丸善、 1978.
- 7) 渡辺要:「建築計画原論Ⅲ」、丸善、1978.
- 中沢康明:建築の熱的設計に関する基礎的研究、博 士論文、京都大学、1977.
- 「外壁仕上げ剥落防止対策の現状と提案」、日本仕上 学会編、1991.
- 10)恩村定幸:「タイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体における熱水分移動に関する基礎研究」、京都大学博士論文、2009.