

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2 強度の違いと物性値のばらつきを考慮した解析

Water Penetration to the Concrete Wall with Tiling Finish Part2. An Analysis Considering Variability of Strength and Hygrothermal Properties

恩村 定幸*

要 旨

既報^{1), 2)}で示した吸水実験について、コンクリート強度の違いや水分移動に関する物性値のばらつきを考慮した解析を行った。その結果、以下に示す知見が得られた。

- ・タイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体の水分の移動性状に関しては、本報で提案した計算方法によって、従来の方法よりも安全側の予測が行える。
- ・平衡含水率関係の傾きの違いは含水率の分布性状に大きく影響する。
- ・水分伝導率の大きさの違いは水分の移動速度に直接影響する。

キーワード：コンクリート／水分移動性状／強度／平衡含水率／水分伝導率／ばらつき

1. はじめに

筆者は、これまで様々な測定を行い、コンクリートの熱水分移動に関する各物性値と強度・温度・含水率との関係、および、各物性値の測定結果のばらつき度合いや傾向を明らかにしている³⁾。また、タイル張り仕上げのあるコンクリート壁体への水分浸透の様相も、位置によって大きく異なることを吸水実験によって示した^{1), 2)}。

この吸水実験の結果は、前述の物性値と強度との関係や測定結果のばらつき（不均一性によるコンクリートが有する物性値のばらつき）が大きく影響したと考えられる。そこで、本報では、強度の違いや物性値のばらつきを考慮した解析を既報^{1), 2)}で示した吸水実験について行ったので、その結果を報告する。

2. 解析方法と条件

2.1 解析対象

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（張り付けモルタルと目地モルタルを含む）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（写真-1）。



写真-1 吸水実験の状況

2.2 基礎式と境界条件

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⁴⁾。これを適切な境界条件の下で解き、水分化学ポテンシャルと温度の経時変化を得る。得られた水分化学ポテンシャルより平衡含水率関係を用いて含水率を算定する。

$$\rho_w \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla(\lambda'_{\mu} (\nabla \mu - F_w)) + \nabla(\lambda'_T \nabla T) \quad (1)$$

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(r\lambda'_{\mu g} (\nabla \mu - F_w)) + \nabla((\lambda + r\lambda'_{Tg}) \nabla T) \quad (2)$$

* 技術研究所環境・生産研究グループ

図-1に解析条件の概要を示す。周辺空気の温度および相対湿度は一定とし、吸水実験時の測定結果の平均値である16.9℃と43.1%を用いた。

以下に境界条件を示す。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種境界条件には、水と接しているため、本来ならば水分化学ポテンシャルとして0 J/kgを与えるべきであるが、解析の都合上、ここでは-10 J/kgとした。この数値の妥当性については、1次元の系における吸水過程の解析によって問題がないことを確認している。

i) 熱、水分とも第3種境界条件 (試験体上面)

$$\text{水分: } J = \alpha'_\mu (\mu - \mu_{out}) + \alpha'_T (T - T_{out}) \quad (3)$$

$$\text{熱: } q = \alpha(T - T_{out}) + r\alpha'_\mu (\mu - \mu_{out}) + r\alpha'_T (T - T_{out}) \quad (4)$$

ii) 熱が第3種境界条件、水分が断湿条件 (試験体側面)

$$\text{水分: } J = 0 \quad (5)$$

$$\text{熱: } q = \alpha(T - T_{out}) \quad (6)$$

iii) 熱が第1種境界条件、水分が断湿条件 (タイル面)

$$\text{水分: } J = 0 \quad (7)$$

$$\text{熱: } T = T_{out} \quad (8)$$

iv) 熱、水分とも第1種境界条件 (目地モルタル下面)

$$\text{水分: } \mu = -10 \quad (9)$$

$$\text{熱: } T = T_{out} \quad (10)$$

2.3 初期条件

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、105℃の乾燥炉に4日間設置して乾燥した後なので、0%に近い値とすべきである。ここでは1%とした。この数値の妥当性については、1次元の系における吸水過程の解析によって問題がないことを確認している。

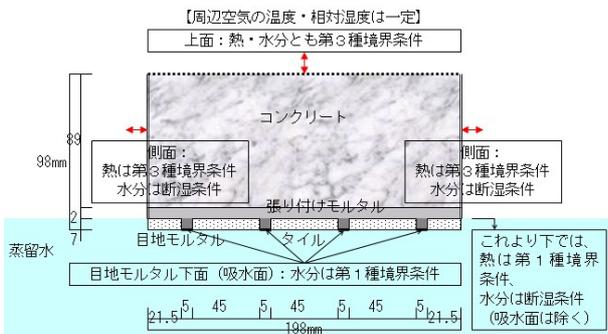


図-1 解析条件の概要

2.4 計算方法

数値計算には、位置については差分法を用いた。位置刻みは水平方向が0.5~2.0mm、鉛直方向が0.1~2.0mmの不等分割とした。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。このように、位置刻みが小さい場合、前進型有限差分法による計算では時間刻みを極めて小さくする必要があり、膨大な計算時間が必要となる。そこで、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⁵⁾。

なお、位置刻みの妥当性については、1次元の系における吸水過程の解析によって問題がないことを確認している。

2.5 計算に用いた数値

(1) 水分伝導率

水分伝導率については、材齢4週の圧縮強度が38.6N/mm²のコンクリートにおける熱湿気物性の測定結果を用いて既に推定している⁶⁾。しかし、吸水実験に用いたコンクリートの材齢4週の圧縮強度は27.9N/mm²と低かった^{1), 2)}。したがって、これまでの研究成果(強度が低いほど水分伝導率は大きい)³⁾から水分伝導率は既報⁶⁾の値よりも大きいと考えられる。また、湿気伝導率と透水係数のばらつきは、それぞれ平均の0.7~1.3倍、0.5~1.5倍という測定結果を得ている³⁾。そこで、これらの情報を基に水分伝導率を改めて推定し直した。

図-2は、強度と水セメント比との関係を示したもので、両者は比例関係にある。この関係から、吸水実験に用いたコンクリートの水セメント比は69.4%であったとした。

図-3は、水セメント比と透水係数との関係を示したもので、物性値のばらつきを考慮して近似推定すると、吸水実験に用いたコンクリートの透水係数の値として、最大で16.2×10⁻¹¹m/s、最小で2.0×10⁻¹¹m/sが算出される。

同様に、強度との関係を用いて、液相水分の移動を含む湿気伝導率、および既報⁶⁾において定義した気相水分の移動のみの湿気伝導率を推定した(図-4と図-5)。特に前者については、物性値のばらつきを考慮して最大と最小を算定した。

以上の数値を用いて、既報⁶⁾と同様の方法によって吸水実験に用いたコンクリートの水分伝導率の最大と最小を推定した。結果を図-6に示す。

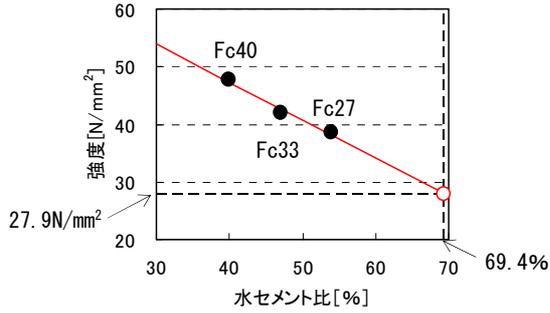


図-2 強度と水セメント比との関係

※Fc27は設計基準強度が27N/mm²であることを意味する。ただし、4週強度は38.6N/mm²であった (Fc33、Fc40も同様)。

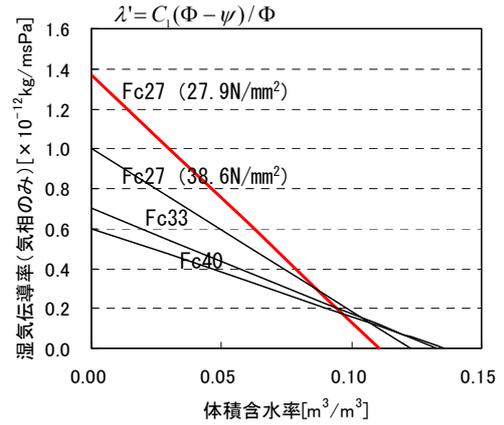


図-5 湿気伝導率（気相のみ）の推定

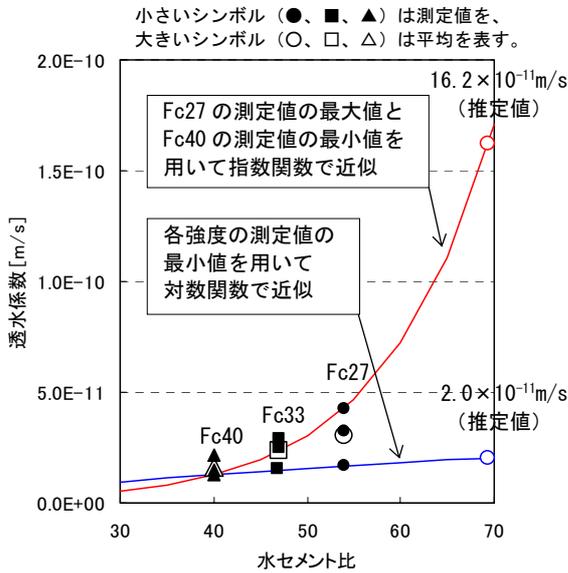


図-3 水セメント比と透水係数との関係

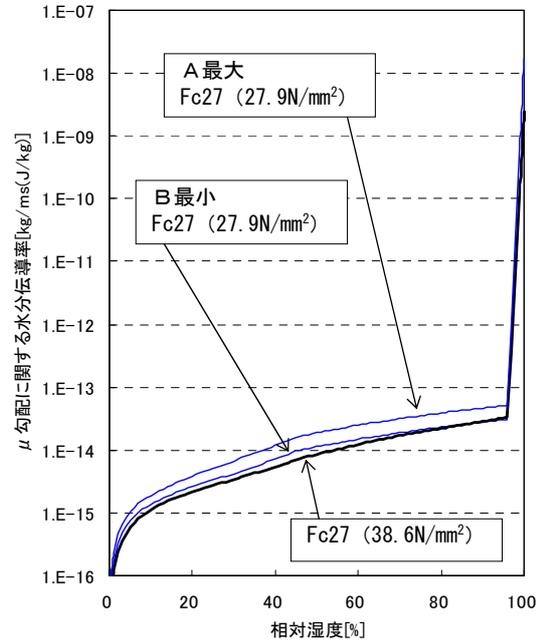


図-6 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率の推定

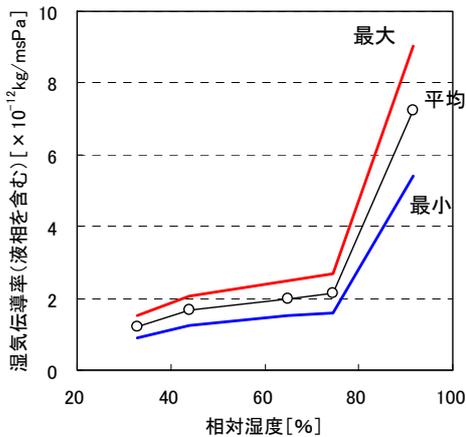


図-4 湿気伝導率（液相を含む）の推定

(2) 平衡含水率関係と熱伝導率

平衡含水率と強度との間には明確な相関が見られなかった³⁾、物性値のばらつきのみを考慮する。本報では、図-7に示すように相対湿度 32.8%と 95.8%における測定結果の平均に対するばらつき(平均に対して0.8~1.2倍)³⁾を用いて、平衡含水率関係において、最も傾きが急になる場合と緩くなる場合の2種類を考えた。

熱伝導率と強度との間にも明確な相関が見られなかった³⁾。また、等温下の実験であるため、周辺空気や試験体の温度変動は小さく、そのような状況では熱伝導率のばらつきが水分移動の様相に与える影響はそれほど大きいものではない。そこで、熱伝導率についてはばらつきを考慮せず、図-8に示すように測定結果(平均値)³⁾の近似直線を用いた。

(3) その他

コンクリートの熱容量には水分の影響を、相変化熱には温度依存性を考慮した既存の式を用いた((11)式と(12)式)。

$$c\rho = c_c\rho_c + c_w\rho_w\psi \quad (11)$$

$$r = 4186.05\{597.5 - 0.599(T - 273.16)\} \quad (12)$$

ここで、コンクリートの比熱には文献値(837.2 J/kgK)⁷⁾を、密度には平衡含水率測定の際に実測した全試験片の乾燥時密度の平均値(2163.0 kg/m³)³⁾を用いた。

水分伝達率は、下向き湿流の場合の湿気伝達率の文献値(2.92×10⁻⁸kg/m²sPa)⁸⁾を用いて下式より算定した。

$$\alpha'_\mu = \alpha' \frac{p_{vS}}{R_v T} Rh \quad (13)$$

$$\alpha'_T = \alpha'_\mu \left(\frac{R_v T}{p_{vS}} \cdot \frac{\partial p_{vS}}{\partial T} - \frac{\mu}{T} \right) \quad (14)$$

飽和水蒸気圧の算定は Goff-Gratch の実験式⁴⁾を用いた。

$$\begin{aligned} \log_{10} p_{vS} = & 2.78614 + 10.79574 \left(1 - \frac{273.16}{T} \right) \\ & - 5.028 \log_{10} \left(\frac{T}{273.16} \right) \\ & + 1.50475 \times 10^{-4} \left[1 - 10^{-8.2969 \left(\frac{T}{273.16} - 1 \right)} \right] \\ & + 0.42873 \times 10^{-3} \left[10^{4.76955 \left(1 - \frac{273.16}{T} \right)} - 1 \right] \quad (15) \end{aligned}$$

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。

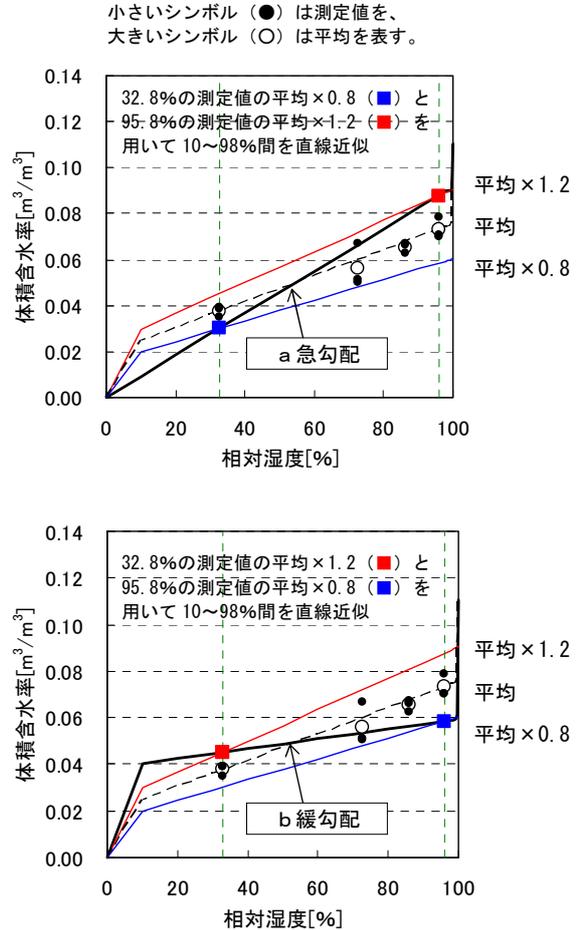


図-7 計算に用いる平衡含水率関係

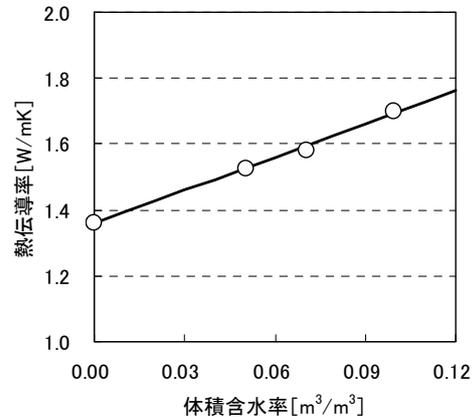


図-8 計算に用いる熱伝導率

3. 計算結果と考察

水分伝導率の最大・最小と平衡含水率関係における傾きの緩・急の組み合わせより、表-1に示す計算条件を設定した。各条件での含水率を計算し、既報^{1), 2)}で示した吸水実験に用いた3体の試験体(No1~No3)の中で最も吸水量の少なかった試験体No2における実験結果^{1), 2)}と比較した。

図-9に含水率の計算結果と実験結果との比較を示す。これは吸水開始から240時間(10日)後と480時間(20日)後の結果であり、含水率の変化が大きい目地の位置(①、③、⑤、⑦)における吸水面近傍を表示している。また、強度の違いや物性値のばらつきを考慮しない場合(図-6の太線で示した強度38.6N/mm²におけるコンクリートの水分伝導率と図-7の点線で示した平均の平衡含水率関係を使用)の計算結果もあわせて一点鎖線を用いて表示している。

強度の違いや物性値のばらつきを考慮しない場合(一点鎖線)でも計算結果は測定結果と比較的良く一致しているように見えるが、厳密には一致してないところがある(図-9中、矢印で強調)。ただ、強度の違いや物性値のばらつきを考慮すると、実験結果と違いが見られた測定結果は、ばらつきを考慮した計算結果が形成する領域内、すなわち予想される含水率分布内に含まれている。

したがって、試験体の水分伝導率および平衡含水率の値は、本報で推定した値の範囲内であった可能性が高い。また、強度の違いや物性値のばらつきを考慮することにより、含水率が取りうる範囲が求められるので、それを前提に壁体設計を行えば良い。

以上から、タイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体の水分移動性状の予測は解析によって十分に行え、強度の違いや物性値のばらつきを考慮することで、従来(水分移動として水蒸気の移動しか考慮しない計算や物性値に固定の値を用いた計算)よりも安全側の予測が行えると考える。

平衡含水率関係の傾きの違いの影響を見ると、傾きが緩やかな場合(図-7のb)、含水率分布に大きく変化する部分が見られるが(図-9中の破線)、傾きが急な場合は(図-7のa)、含水率は比較的なだらかな分布を示している(図-9中の実線)。この傾向は平衡含水率関係のグラフの形状に類似していることより、平衡含水率関係の傾きは含水率分布に大きく影響すると言える。

図-10は、吸水開始から120時間(5日)後と480時間(20日)後の含水率の平面分布を示したものである。水分移動が最も速い(含水率が早く上昇する)のは水分

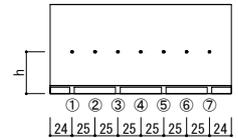
伝導率の大きいCal-1で、水分伝導率の小さいCal-4が最も遅い。この結果から、水分伝導率の大きさの違いが、水分の移動速度に直接影響していることが分かる。

なお、本報では一部の時間(吸水開始から240時間後と480時間後)における結果のみを表示して考察しているが、すべての時間(吸水開始から3時間後、6時間後、...480時間後まで)で同様な結果が得られている。また、ここでは周辺空気のと湿度を一定とした計算を行ったが、変動のある測定結果(温度変動は最大で±3℃、相対湿度変動は最大で±10%)を用いた計算も行っており、実験時における外界条件の変動が結果に与える影響は小さいことを確認している。

表-1 計算条件

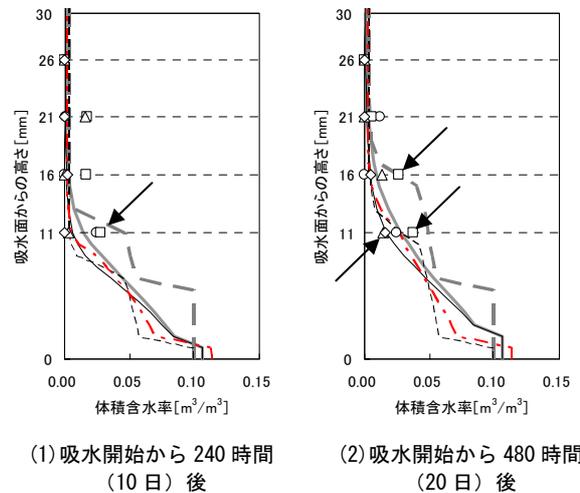
名称	水分伝導率	平衡含水率曲線
Cal-1	最大(図-6のA)	急勾配(図-7のa)
Cal-2	最大(図-6のA)	緩勾配(図-7のb)
Cal-3	最小(図-6のB)	急勾配(図-7のa)
Cal-4	最小(図-6のB)	緩勾配(図-7のb)

シンボル: 測定結果
 ○(目地①) □(目地③)
 △(目地⑤) ◇(目地⑦)



太い実線: Cal-1
 (水分伝導率: 大、平衡含水率関係: 急)
 太い破線: Cal-2
 (水分伝導率: 大、平衡含水率関係: 緩)
 細い実線: Cal-3
 (水分伝導率: 小、平衡含水率関係: 急)
 細い破線: Cal-4
 (水分伝導率: 小、平衡含水率関係: 緩)

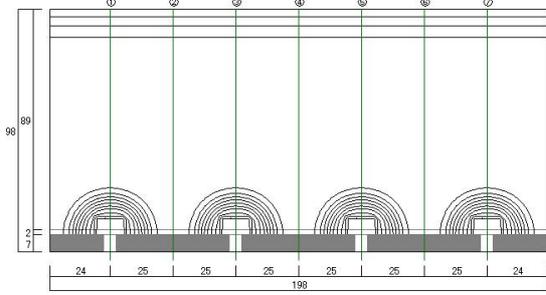
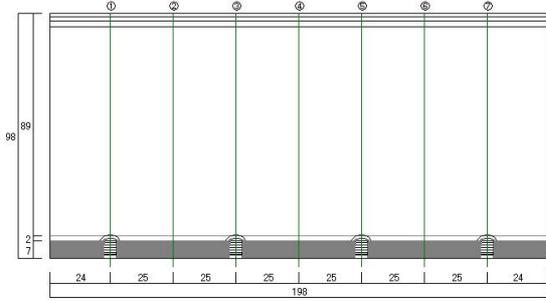
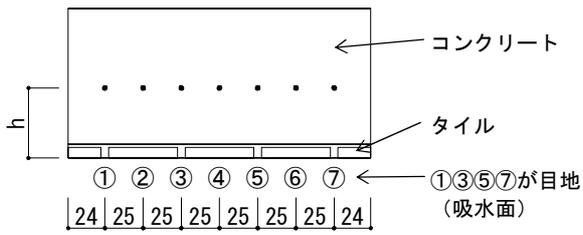
一点鎖線: 強度の違いや物性値のばらつきを考慮しない場合



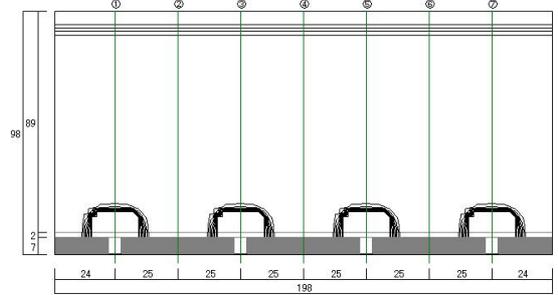
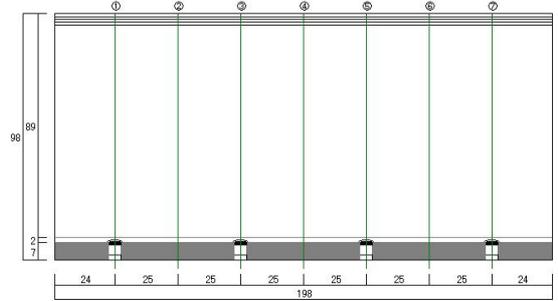
(1) 吸水開始から240時間(10日)後

(2) 吸水開始から480時間(20日)後

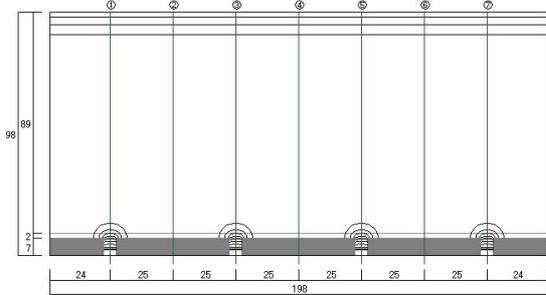
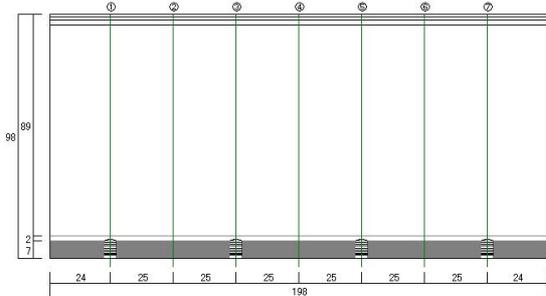
図-9 含水率の計算結果と実験結果との比較(鉛直分布)



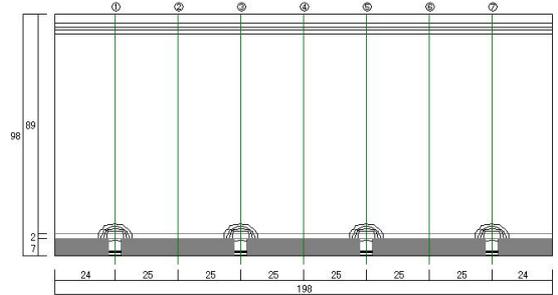
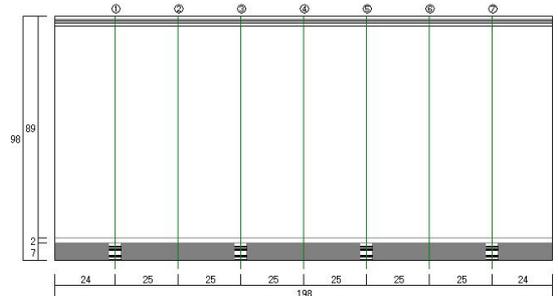
(1) Cal-1 (水分伝導率：大、平衡含水率関係：急)



(2) Cal-2 (水分伝導率：大、平衡含水率関係：緩)



(3) Cal-3 (水分伝導率：小、平衡含水率関係：急)



(4) Cal-4 (水分伝導率：小、平衡含水率関係：緩)

図-10 含水率の計算結果 (平面分布)

4. まとめ

既報^{1), 2)}の吸水実験に関して、強度の違いや物性値のばらつきを考慮した解析を行った。その結果より、以下のことが明確になった。

- (1) タイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体の水分移動性状は、強度の違いや物性値のばらつきを考慮することで、安全側の予測が行える。
- (2) 平衡含水率関係の傾きは含水率分布に大きく影響する。
- (3) 水分伝導率の大きさが水分の移動速度に直接影響する。

なお、本報では吸水量が最も小さかった試験体の実験結果に対する検討を行ったが、吸水量が多く含水率の上昇も速い他の2体の試験体(既報^{1), 2)}に示したNo1とNo3、諸元は3体とも同じ)に関する検討も既に行っており、その結果については次報にて報告する予定である。

[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銚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から感謝の意を表します。

[記号]

c_c : コンクリートの比熱 [J/kgK]
 c_w : 水の比熱 [4186.05J/kgK]
 C_1 : 定数 (パラメータ: 解析で求める)
 F_w : 水分1kgに作用する外力 [N/kg, J/mkg, m/s²]
 J : 水分流 [kg/m²s]
 p_{vs} : 飽和水蒸気圧 [Pa]
 q : 熱流 [W/m²]
 Rh : 相対湿度 [-]
 R_v : 水蒸気理想気体定数 [461.643Pam³/kgK]
 r : 相変化熱(気相から液相) [J/kg]
 T : 温度 [K]
 t : 時間 [s]
 α : 総合熱伝達率 [W/m²K]
 α' : 湿気伝達率 [kg/m²sPa]
 α'_T : 温度勾配に関する水分伝達率 [kg/m²sK]

α'_μ : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝達率 [kg/m²s(J/kg)]
 λ : 熱伝導率 [W/mK]
 λ' : 気相水分の湿気伝達率 [W/mK]
 λ'_T : 温度勾配に関する水分伝達率 [kg/msK]
 λ'_{Tg} : 温度勾配に関する気相水分伝達率 [kg/msK]
 λ'_μ : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝達率 [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達率 [kg/ms(J/kg)]
 μ : 水分化学ポテンシャル [J/kg]
 ρ_c : コンクリートの密度 [kg/m³]
 ρ_w : 水の密度 [1000.0kg/m³]
 ψ : 体積含水率 [m³/m³]
 Φ : 空隙率 [-]
 ∇ : 空間勾配を表す微分演算子
 添え字) *out* : 周辺空気

[参考文献]

- 1) 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、浅沼組技術研究報告、No.20、pp.13～21、2008.
- 2) 恩村定幸、銚井修一、小椋大輔：タイル張り仕上げのコンクリート壁体への水分浸透 その1 模型による吸水実験、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、2008.
- 3) 恩村定幸、他5名：強度の異なるコンクリートの熱湿気物性に関する研究 熱湿気物性の測定、日本建築学会環境系論文集、Vol.73、No.625、pp.299～306、2008.
- 4) 松本衛、他：「新建築学大系 10 環境物理 3 湿気」、彰国社、pp.114～117、1984.
- 5) 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.
- 6) 恩村定幸、他5名：強度の異なるコンクリートの熱・湿気物性に関する研究 その4 水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝達率の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2 環境工学II、pp.337～338、2006.
- 7) 日本建築学会編：「建築設計資料集 1 環境」、丸善、1978.
- 8) 渡辺要：「建築計画原論III」、丸善、1978.