論文　透湿度を利用した仕上材による水分蒸発抑制効果の解析的検討

中村　成春[*1]

要旨：本研究は，仕上材を対象としたカップ法などの透湿度試験から得られる，その試験環境条件と透湿度を，コンクリートの乾燥過程の水分移動解析モデルに対応させて，仕上材を施工することによる水分蒸発抑制効果を予測する解析手法を検討したものである。その結果，水分移動モデルにおける前養生の違いによる質量変化率の算定方法を具体的に示した。また，仕上材の透湿度試験による試験環境条件と透湿度を利用して水分溶解拡散係数を定義し，換算係数を介して，水分移動モデルの水分拡散係数に適用する手法を具体的に示した。さらに，換算係数が 0.0002 で，仕上材による水分蒸発抑制効果を予測することができた。

キーワード：拡散方程式，透湿度，仕上材，コンクリート，水分拡散係数，水分伝達率

1. はじめに

近年，水分蒸発量と収縮ひずみや中性化進行の指標となる中性化比率などの関係を実験的に求めて，その挙動を検討し，定性的ではあるが比例関係を見いだしている研究がいくつかある[1),2),3)]。仕上材による水分蒸発の抑制が，乾燥収縮や中性化進行の抑制に連動していることを示している。この仕上材による水分抑制効果を定量的に解析する手法があれば，その乾燥収縮や中性化進行の抑制技術を，さらに発展できることを意味している。

本研究は，仕上材を対象としたカップ法などの透湿度試験から得られる，その試験環境条件と透湿度を，コンクリートの乾燥過程の水分移動解析モデルに対応させて，仕上材を施工することによる水分蒸発抑制効果を予測する解析手法を検討したものである。

2. コンクリートの乾燥過程での水分移動モデルの概要

本研究のコンクリートの乾燥過程における水分移動モデルは，水和反応に伴う水分消費や自己乾燥は取り扱わず，相対含水率 R[%]を指標とし，水と水蒸気の区別がない秋田らの研究[4),5)]を基本とした式(1)～式(5)を適用する。なお，水分移動は熱移動と相互関係があるが，複雑化を避けるために，熱移動の影響を取り扱わない。

$$\frac{\partial R}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(D_R\frac{\partial R}{\partial x}\right) \tag{1}$$

$$D_R\frac{\partial R}{\partial n}=a_m\left(R(H_s)-R(H_o)\right) \tag{2}$$

$$\left.\begin{aligned}
&D_R=\frac{D_{R1}}{\left\{29\left(1-\frac{R}{100}\right)+1\right\}^{1.4}}\\
&\gamma\geq 30\%\,;\ D_{R1}=\frac{230}{\gamma}+0.25\gamma-14.7\\
&\gamma<30\%;\\
&\quad D_{R1}=\left(\frac{230}{30}+0.25\times 30-14.7\right)\Big/30\times\gamma
\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

$$a_m=0.06\gamma+2 \tag{4}$$

$$\left.\begin{aligned}
R&=a_1+a_2H+a_3\gamma+a_4H^2\\
&\quad+a_5H\gamma+a_6\gamma^2+a_7H^3\\
&\quad+a_8H^2\gamma+a_9H\gamma^2+a_{10}\gamma^3\\
H&=b_1+b_2R+b_3\gamma+b_4R^2\\
&\quad+b_5R\gamma+b_6\gamma^2+b_7R^3\\
&\quad+b_8R^2\gamma+b_9R\gamma^2+b_{10}\gamma^3\\
&\quad+b_{11}R^4+b_{12}R^3\gamma+b_{13}R^2\gamma^2\\
&\quad+b_{14}R\gamma^3+b_{15}\gamma^4\\
R&=100\%\Leftrightarrow H=100\%RH
\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

ここで，R : 相対含水率[%],
x : 表面から内部への距離[cm], t : 材齢[日],
D_R : 相対含水率Rに関する水分拡散係数[cm^2/日],
a_m : 表面係数（水分伝達率)[cm/日],
H_o : 周囲境界の雰囲気相対湿度[%RH],
H_s : 表面相対湿度[%RH],
$\partial R/\partial n$: 周囲境界に対する外向き法線方向nの微分係数,
$R(H)$: 相対湿度の相対含水率換算値,
D_{R1} : 相対含水率$R=100\%$の時の水分拡散係数[cm^2/日],
γ : 水セメント比W/C[%], $a_1=33.4$, $a_2=1.46$,
$a_1=33.4$, $a_2=1.46$, $a_3=-0.287$, $a_4=-0.0158$,
$a_5=-0.0145$, $a_6=0.000422$, $a_7=0.0000773$,
$a_8=0.000174$, $a_9=-0.00000422$, $a_{10}=0$,
$b_1=78.77$, $b_2=-4.164$, $b_3=-5.255$, $b_4=0.05688$,
$b_5=0.22077$, $b_6=0.0583$, $b_7=0.00009484$,
$b_8=-0.002487$, $b_9=-0.001363$, $b_{10}=-0.000195$,
$b_{11}=-0.000002271$, $b_{12}=0.000008069$, $b_{13}=0.000007944$,
$b_{14}=0.000001532$, $b_{15}=0.000000288$

秋田モデルの拡張として，式(3)中の D_{R1} が双曲線式であるが，W/C=30%で式の変曲点があり，W/C=30%未満の D_{R1} が評価できないため，W/C=0%で D_{R1}=0 の原点を通る直線式とした。また，相対湿度 H[%RH]から相対含水率 R[%]に変換する平衡含水率式(5)について，逆の R[%]から H[%RH]への変換式を関数化した。

*1 大阪工業大学　工学部建築学科准教授　博（工）　(正会員)

次に，相対含水率や蒸発水量や，前養生に応じた質量変化率に関する定義は，式(6)～式(8)に示す通りである。脱型後から乾燥開始までの前養生が水中養生の場合，周囲境界の雰囲気相対湿度 Ho の設定が，封かん養生と同じ 100%RH で，計算上，質量変化率=0wt%の増減がない状況になる。一方，水中前養生の質量変化率は，文献[6]に見られるように，W/C が異なっても材齢 2～3 日程度で質量変化率が約 1wt%程度増加し，その後材齢が変化してもほぼ一定の挙動になっている。このことを勘案して，水中前養生終了時の増加水量は，調合条件から計算できる試験体計量質量に対してその質量 1wt%分とした。

$$\left.\begin{aligned}
&\text{相対含水率}R[\%]\\
&\quad=\frac{\text{乾燥中の含水率}[wt\%]}{\text{乾燥開始時の含水率}[wt\%]}\times 100\\
&\text{乾燥中の含水率}\,[wt\%]\\
&\quad=\frac{\text{乾燥中の気乾質量}[g]-\text{絶乾質量}[g]}{\text{絶乾質量}[g]}\times 100\\
&\quad=\frac{\text{乾燥中の試験体内の水量}[g]}{\text{絶乾質量}[g]}\times 100\\
&\text{乾燥開始時の含水率}[wt\%]\\
&\quad=\frac{\text{乾燥開始時の質量}[g]-\text{絶乾質量}[g]}{\text{絶乾質量}[g]}\times 100\\
&\quad=\frac{\text{乾燥開始時の試験体内の水量}[g]}{\text{絶乾質量}[g]}\times 100\\
&\text{乾燥中の試験体内の水量}[g]\\
&\quad=\text{乾燥開始時の試験体内の水量}\times\frac{R[\%]}{100}\\
&\text{乾燥中の蒸発水量}[g]\\
&\quad=\text{乾燥開始時の試験体内の水量}[g]\\
&\qquad-\text{乾燥中の試験体内の水量}[g]\\
&\quad=\text{乾燥開始時の試験体内の水量}[g]\\
&\qquad\times\left(1-\frac{R[\%]}{100}\right)\\
&\text{乾燥中の質量変化率}[wt\%,\text{負が減少}]\\
&\quad=\frac{-\text{乾燥中の蒸発水量}[g]}{\text{乾燥開始時の試験体計量質量}[g]}\times 100
\end{aligned}\right\}\quad(6)$$

ここで，前養生期間では，乾燥中を前養生中に，乾燥開始時を打込み・脱型時に読み替え，打込み・脱型時の試験体内の水量[g]が練混ぜ水[g]に，打込み・脱型時の試験体計量質量[g]が調合条件のコンクリート単位容積質量$[g/cm^3]\times$試験体容積$[cm^3]$になる。

$$\left.\begin{aligned}
&\text{練混ぜ水}[g]=\text{単位水量}[kg/m^3]\times\frac{1000}{100^3}\\
&\quad\times\text{試験体容積}[cm^3]\\
&\text{水和反応による水分消費を無視して，}\\
&\text{乾燥開始までの前養生の違いによる}\\
&\text{乾燥開始時の試験体内の水量}[g]\\
&=\text{練混ぜ水}[g]\pm\text{前養生終了時の増減水量}[g]
\end{aligned}\right\}\quad(7)$$

ここで,±前養生終了時の増減水量[g]

$$=\begin{cases}\text{封かん前養生；}0g\\ \text{水中前養生；}+\text{水中前養生終了時の増加水量}[g]\\ \text{気中前養生；}-\text{気中前養生終了時の蒸発水量}[g]\end{cases}$$

$$\left.\begin{aligned}
&\text{水和反応による水分消費を無視して，}\\
&\text{乾燥開始までの前養生の違いによる}\\
&\text{乾燥開始時の試験体計量質量}[g]\\
&\quad=\text{調合条件のコンクリート単位容積}\\
&\qquad\text{質量}[kg/m^3]\times\frac{1000}{100^3}\times\text{試験体容積}[cm^3]\\
&\qquad\pm\text{前養生終了時の増減水量}[g]
\end{aligned}\right\}\quad(8)$$

ここで，脱型後から水中前養生の質量変化率が約1wt%一定の増加を仮定の場合；

$$\begin{aligned}
&+\text{水中前養生終了時の増加水量}[g]\\
&\quad=\text{調合条件のコンクリート単位容積}\\
&\qquad\text{質量}[kg/m^3]\times\frac{1000}{100^3}\times\text{試験体容積}[cm^3]\times\frac{1[wt\%]}{100}
\end{aligned}$$

3. 仕上材の透湿度を利用した水分移動解析手法の検討

水分が，かぶりコンクリートから仕上材を透過して外気に蒸発して乾燥していくことを考える。水分移動は，飽和状態から乾燥する乾燥過程下の液水と水蒸気を区別しない秋田モデルを適用しているため，かぶりコンクリートと接着している仕上材内の水分移動も液水と水蒸気を区別していない拡散モデル化になるが，主として水蒸気が拡散しているモデルと仮定する。

JIS Z 0208 の透湿度試験などで得られた透湿度は，水蒸気透過流束 J_{H2O}[mol/(cm^2・日)]と考えることで，Fick の拡散方程式(9)で表すことができる。仕上材が高分子膜では，仕上材内で水蒸気が溶解濃縮する場合もあることを勘案し，試験体表裏面際の水蒸気量 W の勾配 $\partial W/\partial x$ を考えた拡散方程式(9)の水分拡散係数は，水蒸気の溶解濃縮と脱離の状況をひとくくりにした水分溶解拡散係数 DP_{H2O}[cm^2/日]で定義することにする。

仕上材厚さ Δx[cm]がかなり薄いことを勘案し，表裏面部分の勾配 $\partial W/\partial x|_{x=0}$ や $\partial W/\partial x|_{x=\Delta x}$ を，Δx[cm]とその厚みの表裏面際の水蒸気量差（$W_{多量}-W_{少量}$）[mol/cm^3]で近似することで，式(10)より，仕上材の水分溶解拡散係数 DP_{H2O}[cm^2/日]と仕上材の表面係数となる水分伝達率 $a^{仕上}{}_m$[cm/日]が関係づけられる。また，気体の状態方程式 PV=nRT の n/V=P/(RT)で，水蒸気量 W[mol/cm^3]は式(11)の水蒸気分圧 p_{H2O}[Pa]で表すことができ，式(10)に代入整理した式(12)より，水蒸気透過係数 P_{H2O}[mol・cm/(cm^2・日・Pa)]が定義できる。

従って，水蒸気分圧 p_{H2O}[Pa]を，式(13)より，飽和水蒸気圧 PW[Pa]を介して透湿度試験の相対湿度 H[%RH]で表すことで式(14)となり，透湿度 J_{H2O} と試験条件の相対

湿度 H から，式(15)～式(17)より，DP_{H2O} や P_{H2O} や $a_m^{仕上}$ が評価できる。

$$\frac{\partial W}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}J_{H_2O}=\frac{\partial}{\partial x}\left(DP_{H_2O}\frac{\partial W}{\partial x}\right) \tag{9}$$

$$J_{H_2O}=DP_{H_2O}\cdot\frac{\left(W_{多量}-W_{少量}\right)}{\Delta x}=\alpha_m^{仕上}\cdot\left(W_{多量}-W_{少量}\right) \tag{10}$$

$$W[mol/cm^3]=\frac{p_{H_2O}[Pa]}{(8.31\times10^6)[Pa\cdot cm^3/(mol\cdot K)]\times(273.15+\theta[℃])} \tag{11}$$

$$J_{H_2O}=\frac{DP_{H_2O}}{(8.31\times10^6)\times(273.15+\theta)}\cdot\frac{(p_{H_2O高圧}-p_{H_2O低圧})}{\Delta x}=P_{H_2O}\cdot\frac{(p_{H_2O高圧}-p_{H_2O低圧})}{\Delta x} \tag{12}$$

$$p_{H_2O}[Pa]=\frac{H[\%RH]}{100}\times PW[Pa] \tag{13}$$

$$J_{H_2O}=\frac{DP_{H_2O}\times PW}{(8.31\times10^6)\times(273.15+\theta)\times100}\cdot\frac{(H_{高}-H_{低})}{\Delta x} \tag{14}$$

$$DP_{H_2O}=\frac{J_{H_2O}\times(8.31\times10^6)\times(273.15+\theta)\times100}{PW}\times\frac{\Delta x}{(H_{高}-H_{低})} \tag{15}$$

$$P_{H_2O}=\frac{DP_{H_2O}}{(8.31\times10^6)\times(273.15+\theta)}=\frac{J_{H_2O}\times100}{PW}\times\frac{\Delta x}{(H_{高}-H_{低})} \tag{16}$$

$$a_m^{仕上}=\frac{DP_{H_2O}}{\Delta x}=\frac{J_{H_2O}\times(8.31\times10^6)\times(273.15+\theta)\times100}{PW}\times\frac{1}{(H_{高}-H_{低})} \tag{17}$$

ここで，J_{H_2O}: 水蒸気透過流束$[mol/(cm^2\cdot 日)]$, Δx：仕上材厚さ$[cm]$, DP_{H_2O}: 仕上材の水分溶解拡散係数$[cm^2/日]$, W：水蒸気量$[mol/cm^3]$, p_{H_2O}: 水蒸気分圧$[Pa]$, P_{H_2O}: 水蒸気透過係数$[mol\cdot cm/(cm^2\cdot 日\cdot Pa)]$, $a_m^{仕上}$: 仕上材の水分伝達率（表面係数)$[cm/日]$, PW：飽和水蒸気圧$[Pa]$, H：相対湿度$[\%RH]$, θ：温度[℃]

秋田モデルの水分移動の拡散方程式は，相対含水率 R[%]が水分変数になるが，式(9)は水蒸気量 W[mol/cm^3]が水分変数になっている。水蒸気量 W[mol/cm^3]は，式(18)より，飽和水蒸気量 $W_{飽和}$[mol/cm^3]を介して相対湿度 H[%RH]で表すことができる。そこで，式(9)の右辺の単位時間あたりの水蒸気量勾配∂W／∂t は，単位時間あたりの相対湿度勾配∂H／∂t に変換でき，式(14)を左辺に代入することで，相対湿度 H を水分変数にした拡散方程式(19)で表すことができる。ここで，各種仕上材自体の平衡含水率曲線が不明であり，仕上材自体については，通常の使用での温湿度環境下を想定しており，相対含水率 R[%]=相対湿度 H[%RH]と仮定することで，相対含水率 R[%]が水分変数の拡散方程式(20)になる。

$$W[mol/cm^3]=\frac{H[\%RH]}{100}\times W_{飽和}[mol/cm^3] \tag{18}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t}=\frac{W_{飽和}}{100}\cdot\frac{\partial H}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{DP_{H_2O}\times PW}{(8.31\times10^6)\times(273.15+\theta)\times100}\cdot\frac{\partial H}{\partial x}\right) \tag{19}$$

仕上材では相対湿度$H[\%RH]$ = 相対含水率$R[\%]$の仮定，およびDP_{H_2O}をD_Rに換算する換算係数R_{H_2O}を適用して，

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial R}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{DP_{H_2O}\times R_{H_2O}}{(8.31\times10^6)\times(273.15+\theta)}\cdot\frac{PW}{W_{飽和}}\cdot\frac{\partial R}{\partial x}\right)\\&=\frac{\partial}{\partial x}\left(DP_{H_2O}\cdot R_{H_2O}\cdot\frac{\partial R}{\partial x}\right)\\&透湿度試験由来の DP_{H_2O}\times換算係数 R_{H_2O}\\&\quad\Leftrightarrow 秋田モデルの D_R\end{aligned}\right\} \tag{20}$$

ここで，DP_{H_2O}: 水分溶解拡散係数$[cm^2/日]$, D_R: 水分拡散係数$[cm^2/日]$, $W_{飽和}$: 飽和水蒸気量$[mol/cm^3]$, PW：飽和水蒸気圧$[Pa]$, R_{H_2O}: 換算係数

なお，仕上材が高分子膜でなく，溶解拡散モデルでないモルタルなどの場合，水分溶解拡散係数 DP_{H2O} は，秋田モデルの拡散方程式(1)中の水分拡散係数 D_R と同義になる。従って，モルタルやコンクリートを使用した透湿度試験由来の水分拡散係数 DP_{H2O} が式(15)より算出でき，秋田らの飽和からの乾燥過程下の実測の水分拡散係数 D_R と比較できることになる。

ここで，JIS Z 0208 のカップ法に準じた透湿度試験は，試験体表裏に相対湿度勾配をつくっての相対湿度差による強制的な水分駆動力を生じさせており，秋田らの試験体を静置しての飽和からの乾燥過程下と水分移動状態が異なるため，後述 4 章で示すように $DP_{H2O}\neq D_R$ になる。

従って，式(15)より評価される透湿度試験由来の水分溶解拡散係数 DP_{H2O} を，秋田モデルに帰着させるには，静置した飽和から乾燥過程下の水分拡散係数 D_R に換算する必要がある。本研究では，溶解拡散モデルでないモルタルと同様に，溶解拡散モデルの範疇にある高分子膜の仕上材についても，式(20)のように一律に換算係数 R_{H2O} を掛けることによって，秋田モデルの D_R と同等に換算した。これは，後述の仕上材有無の試験体による長さ変化試験での質量変化率の検討結果から判断した。

また，秋田モデルの水分伝達率となる表面係数 a_m[cm/日]は，コンクリートやモルタルが対象である。W/C の違いでコンクリート内部組織の空隙形成の違いを表現し，水分の出入り，すなわち水分伝達状況をモデル化している。従って，仕上材が空気側になる場合，水分伝達状況については，コンクリートを対象とした表面係数 a_m のままでは不合理である。

このため，仕上材について，透湿度試験などにおける透湿度 J_{H2O}[mol/(cm^2・日)]が既知の場合には，式(17)で仕

上材の水分伝達率となる表面係数 $a^{仕上}{}_m$[cm/日]が評価できる。この場合，透湿度試験由来の $a^{仕上}{}_m$ は，式(17)で水分溶解拡散係数 DP_{H2O} を介しており，秋田モデルの a_m と同等にするには，式(21)のように式(20)の換算係数 R_{H2O} が必要になる。

$$\text{透湿度試験由来の}a_m^{仕上}[cm/\text{日}]\times\text{換算係数}R_{H_2O}$$
$$\Leftrightarrow \text{秋田モデルの}a_m[cm/\text{日}] \tag{21}$$

なお，式(20)の飽和水蒸気圧 PW は式(22)で，容積絶対湿度となる飽和水蒸気量 $W_{飽和}$は飽和水蒸気圧 PW を介した気体状態方程式(23)から式(24)で求められる。このため，飽和水蒸気圧と飽和水蒸気量の比 PW／$W_{飽和}$は式(25)となり，式(20)の比例係数が換算整理できる。

$$\left.\begin{aligned} &PW[Pa]=Pc[Pa] \\ &\quad\times\exp\left(\frac{c_1\cdot z+c_2\cdot z^{1.5}+c_3\cdot z^3+c_4\cdot z^6}{1-z}\right) \\ &z=1-(273.15+\theta[℃])/Tc[K] \end{aligned}\right\} \tag{22}$$

気体状態方程式$PV=nRT$より$n/V=P/(RT)$で，

$$W_{飽和\rho}[g/cm^3]=\frac{H_2O\text{分子量}}{(8.31\times10^6)[Pa\cdot cm^3/(mol\cdot K)]}\times\frac{PW[Pa]}{(273.15+\theta[℃])} \tag{23}$$

なお，水蒸気密度$W_\rho[g/cm^3]$は上式(23)の$PW[Pa]$を水蒸気分圧$p_{H_2O}[Pa]$に置換することで求まる。

$$W_{飽和}[mol/cm^3]=W_{飽和\rho}[g/cm^3]／H_2O\text{分子量} \tag{24}$$

$$\therefore\frac{PW[Pa]}{W_{飽和}[mol/cm^3]}=(8.31\times10^6)[Pa\cdot cm^3/(mol\cdot K)]\times(273.15+\theta[℃]) \tag{25}$$

ここで，Pc：水蒸気臨界圧$22120000Pa$, θ：セ氏温度[℃], Tc：水蒸気臨界温度$647.3K$, $W_{飽和\rho}$: 飽和水蒸気密度（容積絶対湿度)$[g/cm^3]$, $c_1=-7.76451$, $c_2=1.45838$, $c_3=-2.7758$, $c_4=-1.23303$, H_2O分子量$=18$

以上より，空気，仕上材，かぶりコンクリートを連結した水分移動の拡散方程式が構成できた。

4. 仕上材における水分溶解拡散係数，水分伝達率及び換算係数の算定

モルタルやコンクリートを対象とした伊藤・前村ら [7] と恩村ら [8]の透湿度試験より，秋田モデルの水分拡散係数 D_R と水分溶解拡散係数 DP_{H2O} の比率 D_R／DP_{H2O}＝換算係数 R_{H2O} の検討を行った。**表－1** に伊藤・前村らの，また，**表－2** に恩村らの透湿度試験に関する換算係数 R_{H2O} の検討結果を示す。R_{H2O} の最小値は 0.0002 で，平均の R_{H2O} はそれぞれ 0.0011 と 0.0006 になった。秋田モデルの水分拡散係数 D_R とオーダーを合わせる換算対応の工学的判断から，R_{H2O} を最小値に基づく R_{H2O}=0.0002 程度と見積もることにした。

次に，換算係数 R_{H2O}=0.0002 を各種仕上材の DP_{H2O} および $a^{仕上}{}_m$ に適用する妥当性の検討を行った。**表－3** に各種仕上材による質量変化率の解析条件を，**図－1** に解析結果と引用文献の実験結果との比較を示す。

長谷川らは，文献 [1]で材齢 50 ヶ月までの質量変化率の実測結果を示している。質量変化率は，乾燥 3 日目の仕上施工直前で 0.8wt%減少だったのが長さ変化試験開始の乾燥 6 日目に 0.5～1.5wt%程度の増加に転じている。湿式の仕上施工に伴って質量変化率の基準がずれたり，仕上材が膨潤したと考えられる。このため，解析では，乾燥収縮ひずみの挙動を尊重し，水中前養生終了後の乾燥開始時からの質量変化率の経時変化を計算し，乾燥 3 日目の仕上施工から，仕上材厚み Δx を仮定して得た各種仕上材の DP_{H2O} と $a^{仕上}{}_m$，また R_{H2O}=0.0002 を適用することとした。文献 [1]の実験は水分蒸発について 2 次元であるが，本研究は 1 次元解析で対応した。**図－1** から仕上材なしの条件にて解析値が文献値より約 1wt%程度大きくなったが，R_{H2O}=0.0002 で，仕上材による水分蒸発抑制効果の挙動傾向は合致している。

また，今原・長谷川らの文献 [2]における仕上材を施工したコンクリートの質量変化率について上記と同様の検討をした。ここでは，打込み後から材齢 7 日まで 20℃水

表－1　伊藤・前村らの仕上材なしのコンクリートの透湿度試験に関する換算係数 R_{H20} の検討結果

伊藤・前村ら カップ法		試験体の初期状態	温度 θ [℃]	飽和水蒸気圧 PW [Pa]	カップ外相対湿度 H外 [%RH]	カップ内相対湿度 H内 [%RH]	試験体の厚さ Δx [cm]	文献中の気相水分マスフラックス密度=透湿度 $J_v=J_{H2O}$ [kg/(m²・sec)]	気相水分マスフラックス密度=透湿度 J_{H2O}（単位換算） [mol/(cm²・日)]	対流無し水分溶解拡散係数 DP_{H2O} [cm²/日]	対流無し水蒸気透過係数 P_{H2O} [mol/(cm・日・Pa)]	対流無し水分伝達率 $a^{仕上}{}_m$ [cm/日]	秋田モデル水分拡散係数 D_{R1} [cm²/日]	秋田モデル H外による相対含水率 R [%]	秋田モデル H外による水分拡散係数 D_R [cm²/日]	秋田モデル Δx内の平均水分拡散係数 $(D_{R1}+D_R)/2$ [cm²/日]	換算係数 R_{H2O}平均 0.0011 $R_{H2O}=(D_{R1}+D_R)/2／DP_{H2O}$
普通	C1-80W	湿潤	81.1	49542	8.3	100	1.99	8.374E-06	4.020E-03	518.6	1.761E-07	260.6	1.050	22.1	0.01258	0.5313	0.0010
コンクリート	C2-80W	湿潤	81.1	49542	8.3	100	2.16	6.371E-06	3.058E-03	428.2	1.454E-07	198.3	1.050	22.1	0.01258	0.5313	0.0012
W/C	C1-50W	湿潤	49.2	11869	8.9	100	1.99	1.375E-06	6.600E-04	325.5	1.215E-07	163.6	1.050	22.4	0.01265	0.5313	0.0016
=40%	C2-50W	湿潤	49.2	11869	8.9	100	2.16	1.514E-06	7.267E-04	389.1	1.452E-07	180.1	1.050	22.4	0.01265	0.5313	0.0014
	C1-80D	乾燥	79.7	46819	8.7	100	1.99	7.167E-06	3.440E-03	469.8	1.602E-07	236.1	1.050	22.3	0.01262	0.5313	0.0011
	C2-80D	乾燥	79.7	46819	8.7	100	2.16	6.233E-06	2.992E-03	443.5	1.512E-07	205.3	1.050	22.3	0.01262	0.5313	0.0012
豆砂利	PG1-80W	湿潤	81.1	49542	8.3	100	2.05	9.018E-06	4.329E-03	575.3	1.953E-07	280.6	1.050	22.1	0.01258	0.5313	0.0009
コンクリート	PG2-80W	湿潤	81.1	49542	8.3	100	1.36	8.935E-06	4.289E-03	378.1	1.284E-07	278.0	1.050	22.1	0.01258	0.5313	0.0014
W/C	PG1-50W	湿潤	49.2	11869	8.9	100	2.05	1.817E-06	8.722E-04	443.2	1.654E-07	216.2	1.050	22.4	0.01265	0.5313	0.0012
=40%	PG2-50W	湿潤	49.2	11869	8.9	100	1.36	1.774E-06	8.515E-04	287.0	1.071E-07	211.1	1.050	22.4	0.01265	0.5313	0.0019
モルタル	M1-80W	湿潤	81.1	49542	8.3	100	2.04	1.144E-05	5.491E-03	726.2	2.466E-07	356.0	1.050	22.1	0.01258	0.5313	0.0007
W/C	M2-80W	湿潤	81.1	49542	8.3	100	2.01	1.202E-05	5.770E-03	751.8	2.553E-07	374.0	1.050	22.1	0.01258	0.5313	0.0007
=40%	M1-50W	湿潤	49.2	11869	8.9	100	2.04	2.504E-06	1.202E-03	607.7	2.268E-07	297.9	1.050	22.4	0.01265	0.5313	0.0009
	M2-50W	湿潤	49.2	11869	8.9	100	2.01	2.552E-06	1.225E-03	610.3	2.277E-07	303.6	1.050	22.4	0.01265	0.5313	0.0009
	M1-80D	乾燥	79.7	46819	8.7	100	2.04	1.067E-05	5.122E-03	717.0	2.444E-07	351.5	1.050	22.3	0.01262	0.5313	0.0007
	M2-80D	乾燥	79.7	46819	8.7	100	2.01	1.249E-05	5.995E-03	827.0	2.819E-07	411.4	1.050	22.3	0.01262	0.5313	0.0006

表－2　恩村らの仕上材なしのコンクリートの透湿度試験に関する換算係数 R_{H2O} の検討結果

恩村らカップ法	温度 [℃]	カップ外相対湿度 H外 [%RH]	カップ内相対湿度 H内 [%RH]	試験体の厚さ Δx [cm]	文献中の湿気伝導率=水蒸気透過係数 λ'=P_{H2O} [kg/(m・sec・Pa)]	水蒸気透過係数 P_{H2O}（単位換算）[mol/(cm・日・Pa)]	水分溶解拡散係数 DP_{H2O} [cm²/日]	水分伝達率 $a^{仕上}_m$ [cm/日]	秋田モデル水分拡散係数 D_{R1} [cm²/日]	秋田モデルH外による相対含水率 R外 [%]	秋田モデルH外による水分拡散係数 D_R外 [cm²/日]	秋田モデルH内による相対含水率 R内 [%]	秋田モデルH内による水分拡散係数 D_R内 [cm²/日]	秋田モデルΔx内の平均水分拡散係数 (D_R外+D_R内)/2 [cm²/日]	換算係数 R_{H2O}平均 0.0006 R_{H2O}= (D_R外+D_R内)/2 ／DP_{H2O}
Fc27	20	55	11	1	8.90E−13	4.272E−08	104.1	104.1	3.059	46.0	0.05955	23.5	0.03751	0.04853	0.0005
W/C	20	55	33	1	1.25E−12	6.000E−08	146.2	146.2	3.059	46.0	0.05955	33.6	0.04534	0.05244	0.0004
=54%	20	55	75	1	1.50E−12	7.200E−08	175.4	175.4	3.059	46.0	0.05955	63.3	0.09833	0.07894	0.0005
	20	55	94	1	1.61E−12	7.728E−08	188.3	188.3	3.059	46.0	0.05955	88.6	0.39524	0.22739	0.0012
	20	83	100	1	5.44E−12	2.611E−07	636.1	636.1	3.059	72.7	0.14288	100.0	3.05926	1.60107	0.0025
	30	55	11	1	8.20E−13	3.936E−08	99.2	99.2	3.059	46.0	0.05955	23.5	0.03751	0.04853	0.0005
	30	55	32	1	8.10E−13	3.888E−08	97.9	97.9	3.059	46.0	0.05955	33.1	0.04492	0.05223	0.0005
	30	55	75	1	1.21E−12	5.808E−08	146.3	146.3	3.059	46.0	0.05955	63.3	0.09833	0.07894	0.0005
	30	55	92	1	1.32E−12	6.336E−08	159.6	159.6	3.059	46.0	0.05955	85.4	0.30164	0.18059	0.0011
Fc33	20	55	11	1	7.00E−13	3.360E−08	81.9	81.9	1.944	46.0	0.03783	23.5	0.02383	0.03083	0.0004
W/C	20	55	33	1	9.00E−13	4.320E−08	105.2	105.2	1.944	46.0	0.03783	33.6	0.02881	0.03332	0.0003
=47%	20	55	75	1	1.29E−12	6.192E−08	150.8	150.8	1.944	46.0	0.03783	63.3	0.06247	0.05015	0.0003
	20	55	94	1	1.49E−12	7.152E−08	174.2	174.2	1.944	46.0	0.03783	88.6	0.25111	0.14447	0.0008
	20	83	100	1	5.32E−12	2.554E−07	622.1	622.1	1.944	72.7	0.09077	100.0	1.94362	1.01719	0.0016
	30	55	11	1	6.50E−13	3.120E−08	78.6	78.6	1.944	46.0	0.03783	23.5	0.02383	0.03083	0.0004
	30	55	32	1	7.50E−13	3.600E−08	90.7	90.7	1.944	46.0	0.03783	33.1	0.02854	0.03318	0.0004
	30	55	75	1	1.07E−12	5.136E−08	129.4	129.4	1.944	46.0	0.03783	63.3	0.06247	0.05015	0.0004
	30	55	92	1	1.28E−12	6.144E−08	154.8	154.8	1.944	46.0	0.03783	85.4	0.19164	0.11473	0.0007
Fc40	20	55	11	1	6.20E−13	2.976E−08	72.5	72.5	1.050	46.0	0.02044	23.5	0.01287	0.01666	0.0002
W/C	20	55	33	1	6.80E−13	3.264E−08	79.5	79.5	1.050	46.0	0.02044	33.6	0.01556	0.01800	0.0002
=40%	20	55	75	1	1.17E−12	5.616E−08	136.8	136.8	1.050	46.0	0.02044	63.3	0.03375	0.02709	0.0002
	20	55	94	1	1.16E−12	5.568E−08	135.6	135.6	1.050	46.0	0.02044	88.6	0.13565	0.07805	0.0006
	20	83	100	1	3.94E−12	1.891E−07	460.7	460.7	1.050	72.7	0.04904	100.0	1.05000	0.54952	0.0012
	30	55	11	1	5.70E−13	2.736E−08	68.9	68.9	1.050	46.0	0.02044	23.5	0.01287	0.01666	0.0002
	30	55	32	1	5.90E−13	2.832E−08	71.3	71.3	1.050	46.0	0.02044	33.1	0.01542	0.01793	0.0003
	30	55	75	1	1.00E−12	4.800E−08	120.9	120.9	1.050	46.0	0.02044	63.3	0.03375	0.02709	0.0002
	30	55	92	1	1.04E−12	4.992E−08	125.8	125.8	1.050	46.0	0.02044	85.4	0.10353	0.06198	0.0005

表－3　各種仕上材を施工したコンクリートの質量変化率の解析条件

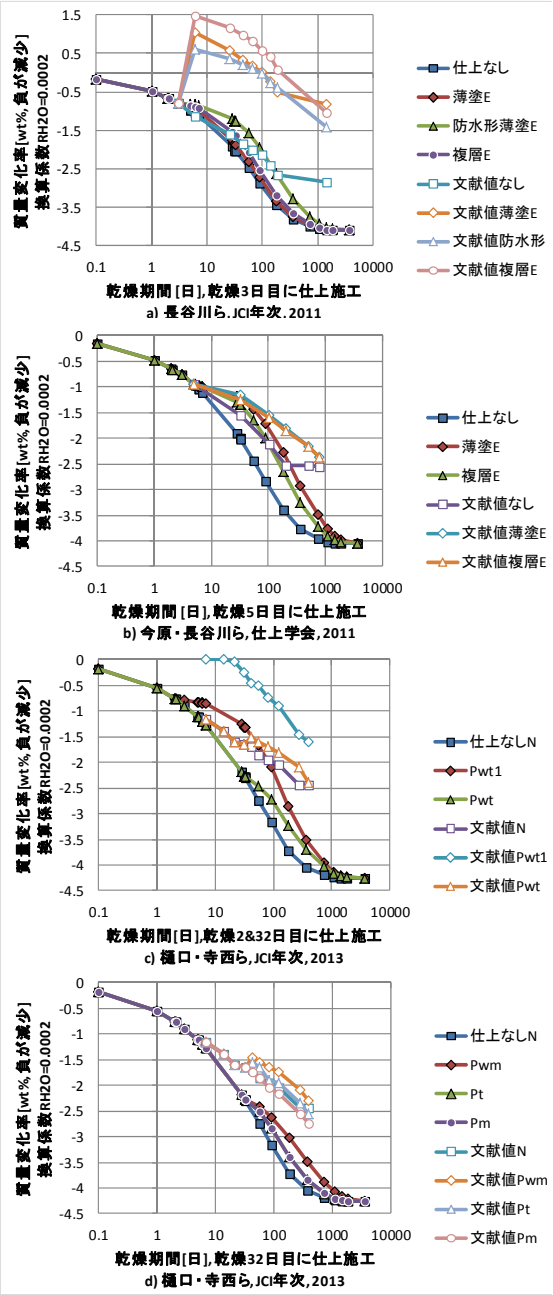
カップ法, カップ外20℃60%RH, カップ内20℃			長谷川ら, JCI年次, 2011			今原ら,仕上学会, 2011		樋口・寺西ら, JCI年次, 2013				
仕上げなしのコンクリートの調合			W/C=50%,W=185kg/m³			W/C=50%,W=185kg/m³		W/C=55%,W=185kg/m³				
仕上材の種類			薄塗E	防水形薄塗E	複層E	薄塗E	複層E	防水形薄塗E, Pwt1	防水形薄塗E, Pwt	防水形複層E, Pwm	薄塗E Pt	複層E Pm
仕上材の構成			主材	下塗＋主材	下塗＋主材＋上塗	下塗＋主材	下塗＋主材＋上塗	下塗＋主材	下塗＋主材	下塗＋主材＋上塗	上塗	下塗＋主材＋上塗
透湿度		[g/(m²・24hr)]	188.0	29.0	81.0	16.9	28.4	45.7	45.7	28.6	79.4	73.2
H_2O透過流束	J_{H2O}	[mol/(cm²・日)]	0.001044	0.000161	0.000450	0.000094	0.000158	0.000254	0.000254	0.000159	0.000441	0.000407
20℃飽和水蒸気圧	PW	[Pa]	2340.62	2340.62	2340.62	2340.62	2340.62	2340.62	2340.62	2340.62	2340.62	2340.62
仮定の仕上材厚さ	Δx	[cm]	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.1
カップ内の相対湿度		[%RH]	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0
カップ内外の相対湿度差		[%RH]	40	40	40	40	40	60	60	60	60	60
水分溶解拡散係数	DP_{H2O}	[cm²/日]	135.9	41.9	117.1	24.4	41.1	44.1	44.1	27.6	38.3	70.6
水蒸気透過係数	P_{H2O}	[mol・cm/(cm²・日・Pa)]	5.58E−08	1.72E−08	4.81E−08	1.00E−08	1.69E−08	1.81E−08	1.81E−08	1.13E−08	1.57E−08	2.90E−08
水分伝達率	$a^{仕上}_m$	[cm/日]	2718.9	419.4	1171.4	244.4	410.7	440.6	440.6	275.7	765.5	705.8
乾燥開始から仕上施工日			3日目	3日目	3日目	5日目	5日目	2日目	32日目	32日目	32日目	32日目

中前養生後に乾燥を開始し，乾燥開始後の 5 日目で仕上施工で，各種仕上材の仕上材厚み Δx を仮定して得た各種仕上材の DP_{H2O}, $a^{仕上}_m$, R_{H2O}=0.0002 を適用した。図－1 より，R_{H2O}=0.0002 の仕上材なしの条件では，解析値が文献値より約 1.5wt%程度大きくなったが，仕上材の水分蒸発抑制効果の挙動傾向は合致している。

さらに，樋口・寺西らは，文献 [3]で，ASTM C355-64 に準拠して，仕上材の透湿度を測定するとともに，同一仕上材で施工時期を変えた供試体での長さ変化試験の質量変化率を実測している。透湿度試験の環境条件の詳細が不明であり，JIS Z 0208 と同じカップ内に塩化カルシウムを設置しカップ内相対湿度 0%RH で，カップ外の室温 20℃相対湿度 60%RH と仮定し，また，仕上材厚み Δx を仮定して仕上材の DP_{H2O}, $a^{仕上}_m$ を求め，R_{H2O}=0.0002 として質量変化率の解析に適用した。

質量変化率は，仕上材が防水形外装薄塗材 E の Pwt について，打込み後から材齢 1 日で脱型して材齢 7 日まで 20℃水中前養生後に乾燥を開始し，乾燥 2 日目の材齢 9 日に仕上施工が完了した仕上材齢 1 週条件と，乾燥 32 日目の材齢39 日に仕上施工が完了した仕上材齢5週条件が，仕上材なしの条件 N とともに，乾燥期間約 1 年まで示されている。仕上材齢 5 週条件における仕上材なしの条件にて解析値が文献値より約 1.5wt%程度大きくなったが，R_{H2O}=0.0002 で，仕上材なしに対して仕上材による水分蒸発抑制効果の相対的な挙動傾向は合致している。

解析における長期乾燥期間後の水分蒸発量の定常値がいずれの文献値よりも 1～1.5wt%程度大きくなった理由は，文献 [4]の秋田モデルの平衡含水率曲線式(5)が，各



図－1　各種仕上材を施工したコンクリートの質量変化率の解析結果と引用文献の実験結果との比較

文献の実験で使用されたコンクリートの品質と合っていないためである。

秋田らは，文献[4]以外に，文献[5]に W/C=53%のモルタルの平衡含水率曲線式を提案している。これら文献の平衡含水率曲線式を比較すると，文献の W/C=53%の近似曲線式が，式(5)の W/C=30%の結果とほぼ同じである。すなわち，単位水量を実験条件と同じにして，W/C=50～55%の実験条件を W/C=30%で解析すると，解析における長期乾燥期間後の水分蒸発量の定常値は，各実験結果とほぼ同じ質量変化率の挙動になる。

ここでは，透湿度試験からの換算係数 R_{H2O} の適用妥当性を検討することが主目的であり，極薄い仕上材の相対含水率と相対湿度を同一とした仮定条件において，換算係数 R_{H2O}= 0.0002 を適用する妥当性は示されたものと考える。

5. まとめ

(1) 水分移動モデルにおける前養生の違いによる質量変化率の算定方法を具体的に示した。

(2) 仕上材の透湿度試験の環境条件と透湿度を利用して水分溶解拡散係数を定義し，換算係数を介して，水分移動モデルに適用する手法を具体的に示した。

(3) 換算係数が 0.0002 で，仕上材による水分蒸発抑制効果を予測することができた。

(4) 今後の課題として，コンクリート自体の平衡含水率曲線式の精度向上が必要である。

謝辞　本研究の一部は，H25～H27 年度科研費（基盤研究(C)代表中村成春，課題番号 25420597）によりました。

参考文献

1) 長谷川拓哉,千部修：乾燥開始後 50 ヶ月のデータに基づく仕上塗材・表面改質材を施工したコンクリートの乾燥収縮性状，コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.449-454, 2011

2) 今原恵治,千歩修,長谷川拓哉：各種仕上材が乾燥・吸水過程におけるコンクリート中の水分移動性状に及ぼす影響, 日本建築仕上学会 2011 年大会学術講演会研究発表論文集, pp.77-80, 2011.10

3) 樋口優香,寺西浩司,堀淳一：仕上げ方法がコンクリートの乾燥収縮および中性化に及ぼす影響,コンクリート工学年次論文集,Vol.35, No.1, pp.469-474, 2013

4) 秋田宏，藤原忠司，尾坂芳夫：乾燥を受けるコンクリート中の水分移動を解析する手法，土木学会論文集, No.490／V-23, pp.101-110, 1994.6

5) 秋田宏，藤原忠司，尾坂芳夫：モルタルの乾燥・吸湿・吸水過程における水分移動，土木学会論文集, No.420／V-13, pp.61-69, 1990.8

6) 望月昭宏，澤本武博，飛内圭之，辻正哲，樋口正典：コンクリートの配合および初期の水中養生期間が強度特性に及ぼす影響，ものつくり大学紀要，No.3, pp.62-67, 2012

7) 伊藤洋,前村辰二,坂口雄彦：水蒸気拡散法によるコンクリートの透水性評価試験について,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.14, No.1, pp.733-738, 1992

8) 恩村定幸，鉾井修一，松下敬幸，小椋大輔，小南和也，安井義貴：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, 2008.3