

論文 コンクリートの湿気移動解析に用いる各特性に関する検討

溝渕 利明*1・掛 来実*2・中村 秀明*3・長田 直之*4

要旨：乾燥収縮によるひび割れを抑制するためには、あらかじめ対象とするコンクリート構造物の乾燥に伴う収縮量を予測するための湿気移動解析を行う必要がある。しかしながら、湿気移動解析に用いている湿気容量などの各係数は数十年以上前の既往の研究を基に算定したものである。そこで、本研究では湿気移動解析に用いる諸特性を算定するために、温湿度測定用供試体を作製し、測定結果を基に湿気移動解析に用いる各係数の最適化を行った。その結果、湿気容量、透湿率および蒸発率に関する係数の見直しを行うことができた。また、相対湿度と乾燥収縮ひずみとの関係について限定的ではあるが推定式の提案を行った。

キーワード：乾燥収縮, 湿気移動, 透湿率, 湿気容量, 蒸発率

1. はじめに

コンクリートの体積変化に伴う収縮には、自己収縮、温度変化に伴う収縮、乾燥収縮などがある。これらのうち、乾燥収縮はコンクリートに内在している水分が時間経過とともに移動し、コンクリート表面から逸散することによる体積変化によって生じる現象である。乾燥収縮は、同一構造物であっても部材厚、周辺環境(気温、日射、風通し)などによって乾燥速度が異なることから、収縮自体一様ではない。乾燥収縮が進行すれば、内部と外部の乾燥の違いによってひび割れが生じることとなる。また、比較的薄い部材では乾燥収縮が周囲の部材などによって拘束された場合部材を貫通するようなひび割れの生じる場合がある¹⁾。

乾燥収縮によるひび割れを抑制するためには、あらかじめ対象とするコンクリート構造物の乾燥に伴う収縮量を予測する必要がある。日本コンクリート工学会マスコンクリートソフト作成委員会(以後マスコンソフト委員会と称する)では、コンクリート内部の乾燥収縮量の予測のために湿気移動解析を行える解析ソフトを提供している²⁾。湿気移動解析は、乾燥収縮を考慮する際に部材内の湿度分布が必要となるために行うものである。コンクリート中の水分の移動は、正確には湿度勾配および温度勾配によって生じることから、温度と水分を連成して解く必要がある³⁾。コンクリートのような多孔質物体中の水・熱連成移動の研究は、土壌の分野では古くから実績があり⁴⁾、コンクリートの分野でも、水分の移動に温度勾配の影響をモデル化した研究などがある⁵⁾。解析では、潜熱のモデル化や水と熱の移動の相互依存性を考慮した水・熱連成移動解析を行っていく必要がある⁶⁾。しかしながら、両者を連成して解くのは非常に複雑なため、マ

スコンソフト委員会の解析ソフトでは、温度解析結果を基に水分の移動を湿度勾配だけで簡易的に求める方法を用いている。ただし、湿気移動解析に用いている湿気容量や透湿率などの各係数は約 60 年前の既往の研究⁷⁾を基に算定しており、現在使用している材料、配合などと必ずしも適合しているとは言い難い。

そこで、本研究では湿気移動解析に用いる諸特性を算定するために、温湿度測定用供試体を作製し、温湿度計を埋め込んで約半年間計測を行い、取得したデータを基に多変数を一度に最適化することが可能な PSO (Particle Swarm Optimization) を用いて⁸⁾、湿気容量、透湿率および蒸発率に関する係数の最適化を行った。また、ひずみの測定及び長さ変化試験も併せて行った。

本報文は、湿気移動解析における諸特性の最適化した結果および相対湿度とひずみとの関係について検討した結果についてとりまとめたものである。

2. 検討の概要

本検討では、温湿度測定用の大型供試体(Φ450mm×高さ 450mm)にコンクリート表面からの距離を変化させて湿度センサを埋め込み、計測期間 1 年の予定で湿度測定を行うとともに、供試体中央部に近い位置にひずみ計を設置し、乾燥収縮に伴うひずみの測定を行った。各測定位置での湿度測定結果を元に、湿気移動解析に用いる各係数の同定を行った。さらに、ひずみの測定結果を元に相対湿度との関係式の検討を行った。

2.1 大型供試体による温湿度測定

温湿度測定用大型供試体は、鍵本らの論文⁹⁾を参考に、**図-1**に示すように供試体高さの中央(底面から 225mm の位置)において、コンクリート表面から 20mm, 30mm,

*1 法政大学 デザイン工部都市環境デザイン工学科教授 博士(工学) (正会員)

*2 法政大学 デザイン工部都市環境デザイン工学科

*3 山口大学大学院 創成科学研究科 工学系学域 知能情報工学分野教授 博士(工学) (正会員)

*4 ㈱開発設計コンサルタント 茅ヶ崎技術事業本部 設備保全技術部課長 (正会員)

40mm, 50mm, 100mm および 200mm の 6 箇所に温湿度計(高分子湿度センサ, 直径 6mm, 温度・湿度測定範囲: -10~80°C, 20%RH~95%RH)を設置した。また, 埋設型ひずみ計(標点距離: 50mm, 容量: 5000×10⁻⁶)を供試体側面から 150mm の位置に鉛直に設置した。各センサの設置状況の概要を図-2 に示す。供試体作製に用いたコンクリート配合を表-1 に示す。なお, 使用したセメントは高炉セメント B 種(密度: 3.04g/cm³, 比表面積: 3810cm²/g)であり, 骨材は粗骨材が笠間産砕石で最大粗骨材寸法 20mm, 表乾密度 2.66g/cm³, 吸水率 0.49%, 細骨材が安倍川産陸砂で表乾密度 2.56g/cm³, 吸水率 1.97%, 粗粒率 2.72 である。混和材は, AE 減水剤標準形および AE 剤を用いた。

供試体作製時のフレッシュコンクリートの試験結果は, スランプ 13.5cm, 空気量 4.2%であり, 所定の目標値を満足する結果であった。

湿度測定に際しては, 湿度センサの取付が測定結果に大きく影響を受けることから, 本検討では以下に示す方法で設置を行った。

アクリル円盤を供試体上面に取り付け, 次にアクリル円盤に従ってアクリルロッドを供試体上面に対して垂直に供試体の高さ方向 1/2 位置に設置した。なお, ロッドが抜けなくなることを防ぐために 1 時間に 1 回程度ロッドを回転させた。打込み後, 24 時間後にアクリルロッドを抜き, 温湿度計を設置した。その後, 温湿度計の上部を供試体上面までコンクリート配合から粗骨材を除いたモルタルを詰め, 硬化後エポキシ樹脂を上面に塗布し上面からの湿気移動を防ぐ処置(下面は塩ビ板を設置)を行い, 側面からのみ乾燥するようにした。打込み後 6 日で脱型を行い, 20°C, 60%RH の恒温恒湿室に供試体を設置し, 材齢 7 日から測定を開始した。計測間隔は, 1 時間ごとに行った。また, 供試体作製時に JIS A 1129 に準拠して長さ変化試験用供試体の作製および測定を行った。

2.2 PSO を用いた同定解析

湿気移動解析に用いる支配方程式および境界条件式を以下に示す。

$$\left(\frac{dq}{dP}\right)_p \frac{\partial P}{\partial t} = \lambda_p \nabla^2 P - \frac{dq_h}{dt} \quad (1)$$

$$-\lambda_p \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha_p (P - P_0) \quad (2)$$

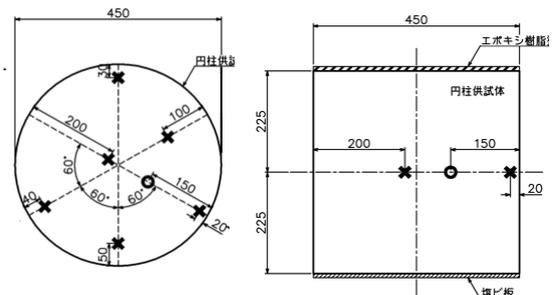


図-1 大型供試体の概要

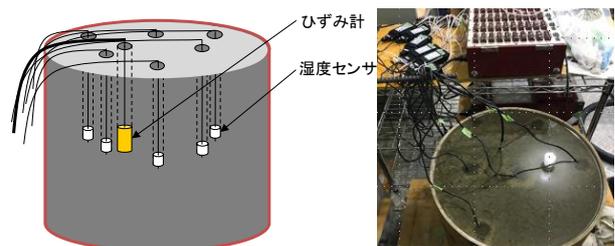


図-2 温湿度計の設置状況

ここで, $(dq/dP)_p$ は湿気容量 ($g/m^3 \cdot mmHg$), λ_p が透湿率 ($g/m \cdot hr \cdot mmHg$), P が蒸気圧 ($mmHg$), dq_h/dt が水和水による湿気密度変化 ($g/hr \cdot m^3$), α_p が蒸発率 ($g/m^2 \cdot hr \cdot mmHg$) で, コンクリート表面からの水分蒸発量, $(\partial p/\partial n)$ は対象とする方向の湿度勾配, p_0 はコンクリートの周囲の蒸気圧($mmHg$)である。なお, 湿気容量は一般に物体中の平衡含水率である湿気密度を相対湿度で除したものであり, 本解析ではコンクリート内部の湿気密度勾配を表したものとイえる。蒸発率の算出方法については, 堀部らによる既往の研究を参考とした¹⁰⁾。

式(1)は, 左辺が湿気密度勾配の時間変化量, つまりコンクリート内部の湿度変化量を表しており, 右辺は湿気移動量でコンクリート表面から水分が逸散することによる乾燥を表す第 1 項と自己乾燥などによる湿度損失を表す右辺第 2 項からなっており, 水の移動に関して保存則を表す式となっている。また, 式(1)は蒸気圧($mmHg$)を未知数とする式になっているが, 蒸気圧は一般的でなく扱いが難しいことから, 解析を行う際の入出力は相対湿度で行っている。相対湿度は, その時点での蒸気圧を飽和蒸気圧で除したもので, 通常%RH で表される。飽和蒸気

表-1 コンクリートの配合

スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)					
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE剤
12.0	4.5	55.0	46.0	166	302	819	994	3.02	0.01

圧は温度との関係で与えられ、温度が高くなるほど飽和蒸気圧は大きくなる。そこで、解析では周囲の相対湿度を入力し、温度との関係から蒸気圧を求めていく。また、蒸気圧も温度との関係で相対湿度として出力されることから、式(1)を解くためには外気温や温度解析の結果が必要となってくる。さらに、式(1)においては湿気容量、透湿率、蒸発率が求めようとする相対湿度の関数になるため、解析に際して予め準備しておく必要がある。

一方、上述した湿気容量および透湿率は研究事例がほとんどなく、西岡・原田らの研究成果を用いているものの、材齢初期に急激に乾燥する結果となり、解析値と計測値で大きく乖離する結果となっている。そこで、前述した大型供試体による湿度測定結果を基に湿気容量、透湿率および蒸発率を最適化手法のひとつである PSO を用いて見直すこととした。

PSO は、鳥などが群れて移動する動物の社会行動を工学的に応用した最適化手法である¹¹⁾。PSO では、探索点を粒子と呼び、すべての粒子は位置情報(座標値)と探索方向を決定するための速度をもっている。また、各粒子は探索過程における過去の最良位置の情報($pBest_i$)をもち、群全体としてすべての粒子の中での最良の位置情報($gBest$)を保持している。PSO による最適化では、現在の位置情報や $pBest_i$, $gBest$ を用いて、解空間を探索する。探索点(粒子)の更新方法は、簡単なベクトルの合成和で求めることができる^{8),12)}。

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + \frac{r_1c_1(pBest_i - x_i^k)}{\Delta t} + \frac{r_2c_2(gBest - x_i^k)}{\Delta t} \quad (3)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1}\Delta t \quad (4)$$

ここで、 x_i^k は探索点(粒子)の位置情報、 v_i^k は速度ベクトル、 k はステップ、 w は粒子の慣性、 c_1, c_2 は学習係数、 r_1, r_2 は $[0, 1]$ の一様乱数を示す。また、1 ステップあたりの移動時間 Δt は単位時間($\Delta t=1$)を考える。 x_i^{k+1} は粒子 i の前回の速度ベクトル(v_i^k)で、群全体の最良解への速度ベクトル($gBest - x_i^k$)とその粒子自身の最良解への速度ベクトル($pBest_i - x_i^k$)の線形結合によって求めることができる。

本検討で対象とした湿気容量、透湿率および蒸発率は、相対湿度 60%RH まで西岡・原田らの研究⁷⁾および森本らの研究¹³⁾によれば、ほとんど変化していないことから、本検討でも一定値とした。相対湿度 60%RH 以上は、各係数とも西岡・原田らの研究成果⁷⁾および森本らの研究成果¹³⁾を参考に表-2 に示す 2 次関数として同定することとした。

解析は、図-3 に示すように湿度計が設置されている供試体中央部分の平面の 1/4 をモデル化して行った。解析に用いたメッシュレイアウトを図-4 に示す。

温度解析において、断熱温度上昇式や熱定数などの設

表-2 湿気移動解析に用いる各係数

項目	相対湿度(%RH)	
	$0 \leq RH \leq 60$	$60 < RH \leq 100$
透湿率 (g/m ² ·h·mmHg)	c_1	$a_1(RH-60)^2 + b_1(RH-60) + c_1$
湿気容量 (g/m ³ ·mmHg)	c_2	$a_2(RH-60)^2 + b_2(RH-60) + c_2$
蒸発率 (g/m ² ·hr·mmHg)	c_3	$a_3(RH-60)^2 + b_3(RH-60) + c_3$

RH : 相対湿度 (%RH)

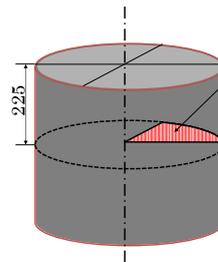


図-3 解析モデル

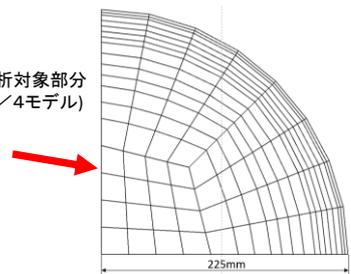


図-4 メッシュレイアウト

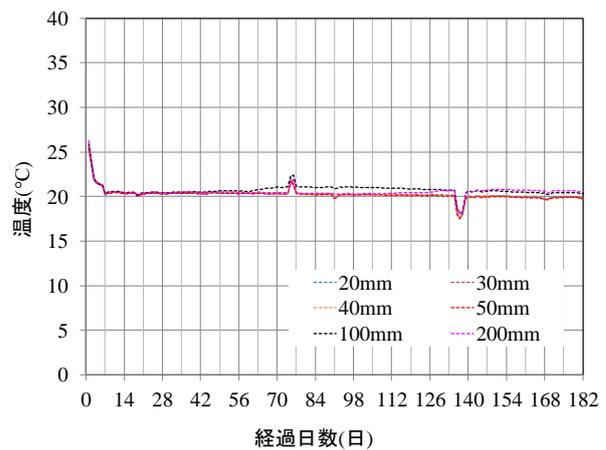


図-5 温度計測結果

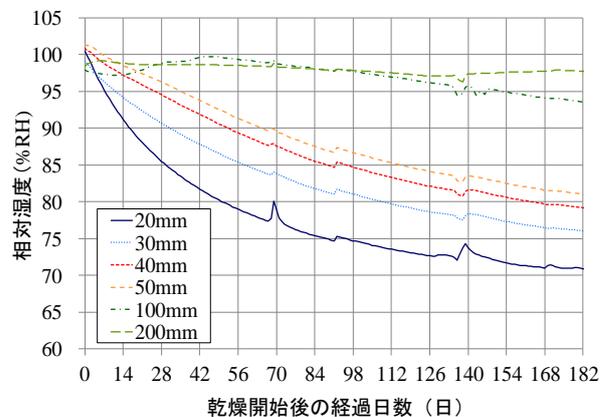


図-6 湿度測定結果

計用値は日本コンクリート工学会マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016¹⁴⁾に準拠して行った。また、打込み温度は供試体練上り時の 21.5℃とした。湿気移動解析は、材齢 6 日まで型枠があるとし、周囲の相対湿度は恒温恒湿室の湿度を用いた。

3. 検討結果および考察

3.1 大型供試体による測定結果

大型供試体による温度および湿度測定結果を図-5 および図-6 に示す。図-5 から、コンクリート打込み後セメントの水和発熱により約 5℃温度上昇し、経過日数 7 日で恒温恒湿室の周囲温度である 20℃とほぼ同様な温度となった。また、その後は室内温度とほぼ同じ温度で推移した。経過日数 76 日および 138 日で 2℃程度変化したのは、停電によって一時的に温湿度が制御できなかったことによるものである。

相対湿度は、図-6 に示すように表面からの距離に近いほど相対湿度の変化が大きく、乾燥開始から 182 日で表面から 20mm の位置で約 70%RH、50mm の位置で約 80%RH、200mm の位置で約 98%RH であった。また、乾燥開始から 3 日～6 日において、測定位置 40mm および 50mm において相対湿度 100%RH を若干超える結果となった。これは、湿度計周囲が結露(事前に行ったテストで確認)していたことが原因ではないかと思われる。

次に、大型供試体でのひずみ測定結果および長さ変化試験の結果を図-7 に示す。図-7 から、測定開始から 182 日において大型供試体でのひずみが 330×10^{-6} であるのに対して、長さ変化試験でのひずみが 650×10^{-6} であり、約 2 倍異なる結果となった。これは、体積表面積比 (V/S) が大型供試体と長さ変化試験の供試体で約 25 倍異なることによるものであるといえる。本検討でのひずみ測定結果と長さ変化試験の測定結果を元に、以下に示す関係式を試算した。試算した結果を図-8 に示す。

$$\epsilon_{sh}(t) = (a \cdot (\ln(\epsilon_t))^3 + b \cdot (\ln(\epsilon_t))^2 + c \cdot \ln(\epsilon_t) + d)^{-1} \quad (5)$$

ここで、 ϵ_t は長さ変化試験のひずみ、 $a \sim d$ は係数である。

本検討は、あくまでもあるひとつの条件での関係式であり、使用材料、配合、V/S などの形状、環境条件などによって各係数は変化すると予想されることから、これらの条件を考慮した係数を定めることができれば、JIS で定められた長さ変化試験結果から対象とする構造物の乾燥収縮ひずみを推定することも可能になるのではないかとと思われる。

3.2 PSO による同定結果

大型供試体による湿度測定結果を元に、PSO を用いて湿気容量、透湿率および蒸発率の同定を行った。同定した結果を表-3 および図-9～11 に示すとともに、湿度

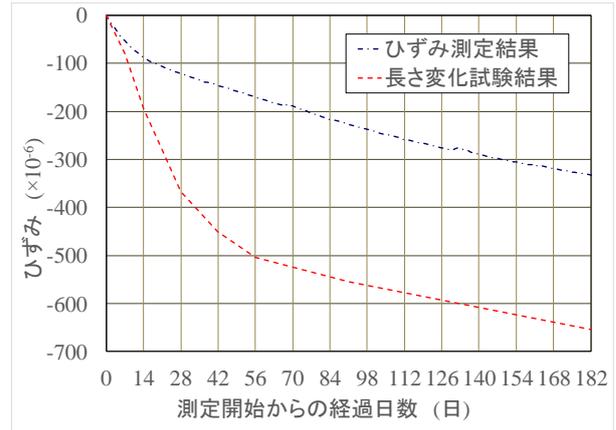


図-7 ひずみ測定結果

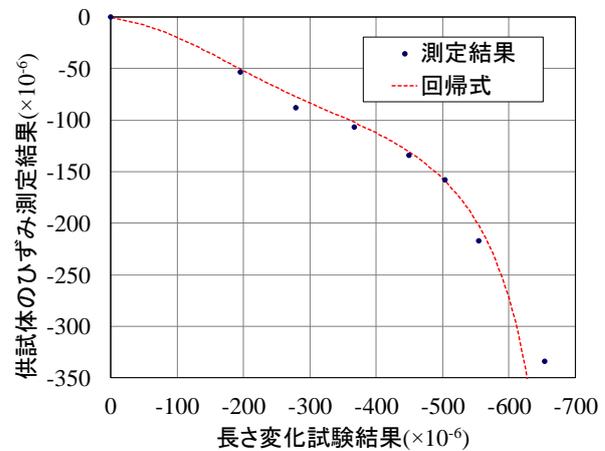


図-8 長さ変化試験結果とひずみとの関係

表-3 湿気移動解析での各係数の同定結果

係数	0% ≤ 相対湿度 ≤ 60%	0% ≤ 相対湿度 ≤ 60%
透湿率 (g/m ³ · hr · mmHg)	0.0025	0.0025
湿気容量 (g/m ³ · mmHg)	10389	-19968(RH-0.60)+10389
蒸発率 (g/m ³ · hr · mmHg)	0.3448	0.6102(RH-0.60) ² +0.3448

RH: 相対湿度(%)

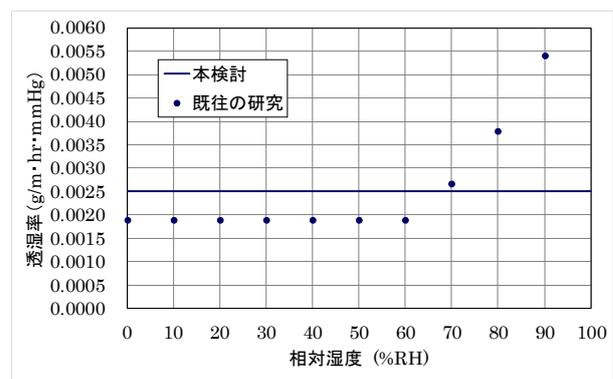


図-9 透湿率と相対湿度との関係

測定結果と同定結果を比較した結果を図-12に示す。

図-12から、同定した結果は各測定位置での計測結果とほぼ一致する結果となった。測定位置 100mm については、測定開始から 40 日程度まで測定値と同定結果に若干の差異があるものの、それ以降はほぼ一致する結果となった。測定位置 200mm については、同定結果がほぼ 100%RH であるのに対して、測定結果が 98%RH 前後で推移する結果となった。ただし、測定結果は測定開始時および 91 日後の相対湿度が 98.4%RH であり、ほとんど変化がないことから、両者はほぼ一致していると考えられる。透湿率の同定結果に関しては、図-9 に示すように既往の研究では相対湿度 60%RH 以上で増加する傾向にあるが、本検討で同定した結果では 1 次および 2 次の係数が非常に小さい結果であったことから、表-3 に示すように相対湿度に関わらず一定値とした。湿気容量に関しては、図-10 に示すように既往の研究では透湿率と同様に相対湿度 60%RH 以上で増加する傾向にあるが、本検討で同定した結果では相対湿度 60%RH 以上の範囲で 2 次の係数が非常に小さい値を示し、1 次の係数が負の値となったことから、相対湿度の増加に対して減少する結果となった。これは、コンクリート中の細孔構造が大きく変化しないにもかかわらず、西岡らの既往の研究のように相対湿度 60%RH 以上で透湿率が大きく増加するとは考えにくく、今回の同定結果のように透湿率が相対湿度の変化に関係なくほぼ一定であるという結果から、湿気容量（湿気密度変化率）が相対湿度 60%RH 以上で減少したものと推察される。また、相対湿度 60%RH 以下での湿気容量が既往の研究成果と大きく異なっているのは、蒸発率が既往の研究¹³⁾に比べて相対湿度 60%RH 以上の範囲で小さいために、コンクリート表面からの水分の逸散が小さく、湿気容量の値が大きくなったのではないかと推察される。蒸発率に関しては、図-11 に示すように既往の研究において相対湿度 60%RH 以上で増加する傾向にあり、本同定結果でも相対湿度 60%RH 以上の範囲で増加する結果となった。ただし、既往の研究のように上昇勾配は小さい結果となった。マスコンソフト委員会で提供している解析ソフトでは、材齢初期の表面部付近の湿度変化が大きく、コンクリート表面部で非常に大きな応力が生じる解析結果となっていた。本検討の同定結果を用いれば、コンクリート表面部近い箇所においても図-12 に示すように測定値と解析値の挙動がよく一致しており、これまでのような過大な応力が生じるような結果にはならないものと思われる。この点については、今後実構造物を想定したモデルで検証を行っていく予定である。

3.3 乾燥収縮ひずみの推定値との比較

大型供試体でのひずみの測定結果とマスコンソフト

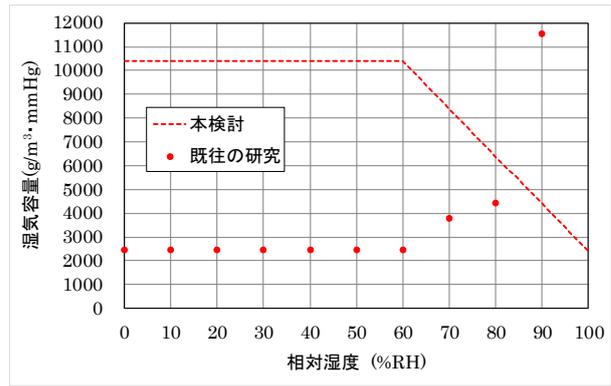


図-10 湿気容量と相対湿度との関係

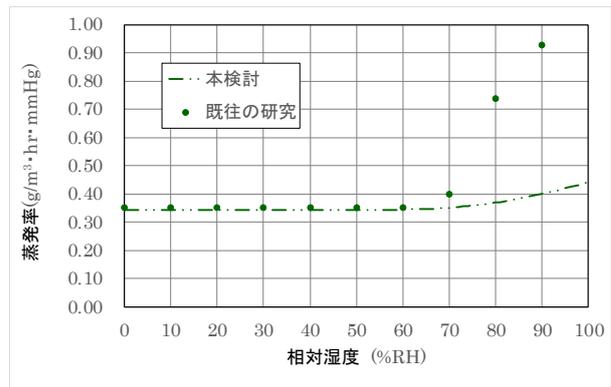


図-11 蒸発率と相対湿度との関係

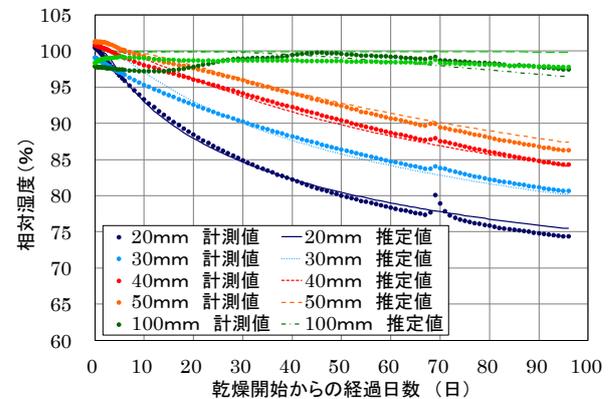


図-12 湿度履歴(同定結果)

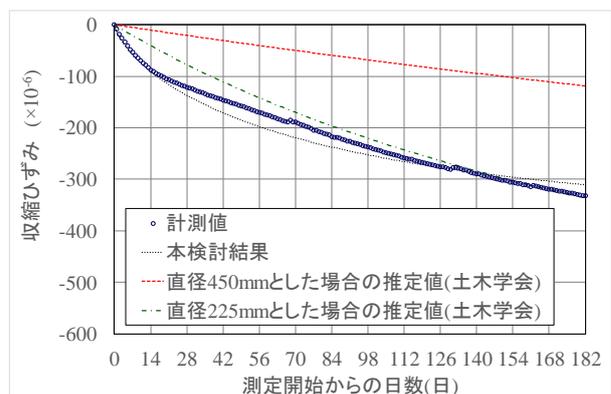


図-13 収縮ひずみ履歴の比較

委員会での解析ソフトに今回の各係数の同定結果を反映させた大型供試体の3次元モデルによる解析結果と比較した結果を図-13に示す。また、土木学会コンクリート標準示方書設計編¹⁵⁾に示されている収縮ひずみの算定式も図-13に示す。

図-13から、測定結果と本解析結果の挙動は概ね一致する結果となった。一方、土木学会コンクリート標準示方書での直径450mmの場合でのひずみの推定値は、測定結果に比べて1/3程度のひずみとなっており、測定値に比べて危険側の推定となった。また、土木学会コンクリート標準示方書で直径を半分にした225mmの場合での推定値と比較した場合、計測開始から70日以降で測定値とはほぼ一致する結果となった。以上の点から、土木学会コンクリート標準示方書で示されているひずみの推定式が危険側の評価をしている可能性があると推察される。

4. まとめ

本検討は、大型供試体での相対湿度測定結果から湿気移動解析に用いる各係数の見直しを行った。また、供試体に埋設したひずみ計と長さ変化試験の結果から両者の関係式の試算を行った。さらに、土木学会コンクリート標準示方書に示されている収縮ひずみの推定式と湿気移動解析に用いる各係数の見直しを行った値を用いて解析した結果との比較を行った。その結果、既往の研究から湿気移動に用いていた各係数の見直しを行い、実際の挙動に近い湿度変化を算定できる可能性を見出したと思われる。ただし、本検討で算定した係数は、限られた条件での結果であることから、今後使用材料、配合、V/Sなどを变化させた条件で比較検討を行い、各係数のさらなる見直しを行っていく予定である。さらに、土木学会コンクリート標準示方書での収縮ひずみの推定式が危険側の評価をしている可能性があることから、上記に示した各種条件での乾燥収縮ひずみの測定を行い、乾燥収縮ひずみの推定精度の向上を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 今本啓一、閑田徹志、溝渕利明著、十河茂幸、河野広隆編著：コンクリートの初期ひび割れ対策、セメントジャーナル社、2012
- 2) 日本コンクリート工学会マスコンクリートソフト作成委員会：<http://www.jci-net.or.jp/~masscon/>

(2004.10)

- 3) 中村秀明：コンクリートの収縮ひび割れ対策，コンクリート工学，Vol.50, No.2, pp.207-212, 2012
- 4) 坂井勝，取出伸夫：J.R. Philip and D. A. De Vries 著「温度勾配下における多孔質体中の水分移動について」，土壤の物理性，No.103, pp.105-112, 2006
- 5) 石田哲也，前川宏一，岸利治，磐田吾郎，楠原千佳子：温湿度履歴に関するセメント硬化体中の水分平衡・移動モデルの高度化，土木学会論文集，No.795/V-68, pp.39-54, 2005.8
- 6) 丸山一平，野口貴文，佐藤良一：水熱連成移動解析にもとづく高強度マスコンクリート中の温度及び湿度分布の予測，日本建築学会構造系論文集，日本建築学会，No.609, pp.1-8, 2006
- 7) 西岡栄香，原田有：コンクリートの透湿率および湿気拡散率について，セメント技術年報 XV, pp.274-278, 1961
- 8) 中村秀明，王桂萱，江本久雄，宮本文穂：Particle Swarm Optimization によるマスコンクリートの熱伝導逆解析，土木学会論文集 E, Vol.62, No.1, pp.107-118, 2006.2
- 9) 鍵本広之，安田幸弘，木下茂，川村満紀：大型コンクリート円柱における ASR 表面ひび割れの発生メカニズム，コンクリート工学論文集，第 25 巻, pp.201-211, 2014
- 10) 堀部 謙，森川 友博，中村 恭香，森本 博昭：コンクリート中の水分移動解析手法について，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, pp.603-608, 2004
- 11) J. Kennedy, R. C. Eberhart: Particle swarm optimization, Proceeding of IEEE International conference on neural networks (ICNN'95), Vol. IV, pp.1942-1948, 1995
- 12) 河村 圭，江本 久雄，別府 万寿博，宮本 文穂：Particle Swarm Optimization を用いた RC はりの損傷同定に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.1, pp.2033-2038, 2006
- 13) 中村恭香，堀部謙，川上寛正，森本博昭：コンクリート中の湿気移動解析に関する研究，土木学会第 59 回年次学術講演会，pp.567-568, 2004.9
- 14) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016, 2016
- 15) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書 設計編，2017