

論文 粒子群最適化による湿気移動解析のための特性値の同定

松浦 好宏*1・中村 秀明*2

要旨: マスコンクリートの温度ひび割れ解析において乾燥収縮を考慮する場合、部材内の湿度分布を把握する必要があり、湿気移動解析が不可欠である。湿気移動解析では、透湿率、湿気容量、蒸発率などの湿気移動特性値が必要となるが、これらに関する研究は限られている。

著者らは過去の研究において、有限要素法を用いた湿気移動解析と粒子群最適化を組み合わせることで、実験供試体の相対湿度測定結果から湿気移動特性値を逆解析により同定した。本研究では、湿気移動特性値と相対湿度の関係を考慮した再同定を行い、新たな提案値を示した。

キーワード: マスコンクリート, 乾燥収縮, 湿気移動解析, 粒子群最適化, 透湿率, 湿気容量, 蒸発率

1. はじめに

コンクリート構造物に発生するひび割れを正確に予測するためには、温度だけでなく、乾燥収縮や自己収縮、クリープなどの影響を考慮する必要がある。このうち、乾燥収縮を有限要素法などの数値解析で予測する際には、コンクリート部材内の湿度分布を把握する必要があり、そのため湿気移動解析が不可欠である。

コンクリート中の水分移動は、湿度勾配と温度勾配によって生じるとされており、温度と水分を連成して解く必要がある。こ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、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石田ら¹⁾の研究がある。しかし、石田らの研究では、水分移動が温度に与える影響が考慮されていない。丸山ら²⁾は、潜熱をモデル化し、水と熱の移動の相互依存性を考慮した水・熱連成移動解析手法を提案している。一方、森本ら^{3),4)}は両者を連成して解くのは非常に煩雑であるため、温度解析結果をもとに、水分移動を蒸気圧勾配のみにより簡易的に求める手法を提案している。この簡易手法では、コンクリート中の水分移動を計算する際、温度解析における熱伝導率に相当する透湿率、熱容量に相当する湿気容量、熱伝達係数に相当する蒸発率が必要である。

これらの水分移動に関する特性値（湿気移動特性値）は、相対湿度（蒸気圧）に依存するため研究例は限られている。透湿率と湿気容量に関しては、西岡ら⁵⁾の研究結果が、蒸発率に関しては森本⁴⁾らの研究結果があり、いずれも相対湿度の関数として示されている。また、実際のコンクリート中の相対湿度測定結果から逆解析により求められた研究としては、溝渕と著者ら⁶⁾の成果がある。従来の逆解析では、湿気移動特性値が相互に関連しているため、特定のパラメータを固定して湿気移動特性

値の同定を行っていた。この方法では、相対湿度の測定結果を再現できるものの、実際の湿気移動特性値と相対湿度との関係（相対湿度が大きくなるほど特性値も大きくなる）とは異なる結果となっていた。

そこで、本研究では、実際の湿気移動特性値と相対湿度との関係を考慮した再同定を行い、新たな提案値を示した。さらに、この提案値を用いて湿気移動解析を実施し、計測値との整合性を確認した。

2. 湿気移動解析

コンクリートの乾燥収縮は、コンクリート内部の水分（湿気）の移動によって水分が部材外部に逸散し、含水量が変化することで発生する。本研究では森本ら^{3),4)}の研究結果をもとに、コンクリート内部の蒸気圧を未知量とする2次元非線形支配方程式にもとづいて、コンクリート内部の湿気移動解析を実施した。3次元でも湿気移動解析は可能であるが、本研究は湿気移動特性値の同定を目的としているため、2次元で実施した。

2.1 湿気移動解析の支配方程式

コンクリート中の湿気移動の2次元非線形支配方程式は、以下で表される。

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

ここに、 $(dq/dP)_p$: 湿気容量 [g/(m³·mmHg)], λ_p : 透湿率 [g/(m·h·mmHg)], P : 蒸気圧 [mmHg], dq_h/dt : 水による湿気密度変化 [g/(h·m³)]である。

式(1)の左辺は湿気容量項であり、内部湿気量の時間的変化を表している。右辺第1項は湿気移動項であり、湿気移動により外部から流入する湿気量を表している。第2項は湿気損失項であり、水による湿気損失を表している。つまり、この式は、以下の湿気収支を表している。

*1 株式会社宇部情報システム NEXT ビジネスデザイン部 (学生会員)

*2 山口大学大学院創成科学研究科電気電子情報系専攻教授 博士(工学) (正会員)

(内部湿気量) = (湿気移動) - (湿気損失)

式(1)は、領域内の任意の点において、任意の時刻に成立すべき方程式であり、これを具体的に解くためには、境界条件が必要である。解析において一般的に考慮される主な境界条件として、湿気固定境界と湿気伝達境界が挙げられる。

このうち、湿気固定境界については、応力解析における変位固定境界や温度解析における温度固定境界と同様に扱うことができる。一方、湿気伝達境界については、これまでにいくつかの形式が提案されているが、最も一般的に採用されているのは以下のとおりである。

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

ここに、 α : 蒸発率 [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg})$], P_0 : 周囲の蒸気圧 [mmHg]である。

湿気移動解析では、支配方程式である式(1)を境界条件として与えられる式(2)のもとで解くことになる。

なお、この湿気移動則は、式(1)に示すように相対湿度 $RH[\%]$ ではなく、蒸気圧 $P[\text{mmHg}]$ で定義されており、コンクリートのように常に温度変化が生じる場合には、温度上昇による湿気移動の促進現象を評価することが可能である。相対湿度への変換は、式(3)に示すように、温度ごとの飽和蒸気圧を Tetens 式により求め、そのときの蒸気圧から相対湿度 $RH[\%]$ を算出する。

$$RH = \frac{e}{e^*} \times 100 \quad (3)$$

$$e^* = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5T_c}{237.3+T_c}} \quad (4)$$

ここに、 e は蒸気圧 [hPa], e^* は飽和蒸気圧 [hPa], T_c は摂氏温度 [$^{\circ}\text{C}$]である。

さらに、 $1013.25\text{Pa} = 760\text{mmHg}$ の関係を用いると温度 $T_c [^{\circ}\text{C}]$, 蒸気圧 $x [\text{mmHg}]$ のときの相対湿度 $RH [\%]$ は、次式で計算できる。

$$RH = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5T_c}{237.3+T_c}} \times \frac{760}{1013.25} \times x \times 100 \quad (5)$$

2.2 湿気移動解析における特性値

湿気移動解析を行うためには、湿気移動に関わる特性値を適切に設定する必要がある。湿気移動に関する特性値としては、透湿率 [$\text{g}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg})$], 湿気容量 [$\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{mmHg})$], さらに境界面における蒸発率 [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg})$]が挙げられる。

透湿率は、材料中の湿気(水蒸気)が、蒸気圧の勾配に比例して移動するモデルに基づき、この比例係数を透湿率として定義している。湿気容量は、材料が吸収・保持できる水分量を表し、蒸発率は、水分が気化し

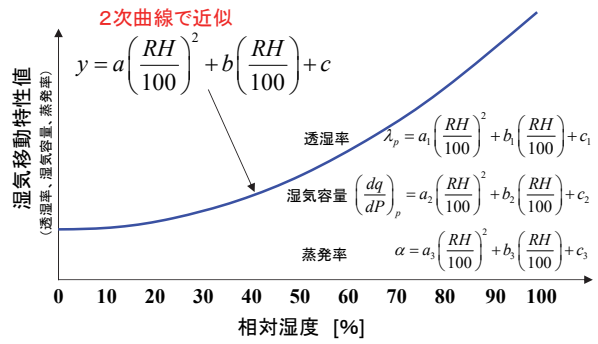


図-1 湿気移動特性値の2次関数による表現

て空気中に移動する速度を表している。これらはいずれも、相対湿度の関数になる。そこで本研究では、図-1に示すように、各湿気移動特性値を2次関数で表現した。セメントペーストの吸着等温線は湿度に対して非線形な変化を示し、低・中・高湿度域で異なる挙動をするため、全湿度域を2次関数で表現するのは難しい。しかし、通常環境におけるコンクリートでは、低湿度域(0~30%RH)になりにくい⁷⁾ため、中高湿度域(50~100%RH)に限定すれば2次関数での近似が可能と考えられる。ただし、極端に乾燥した環境では低湿度域に達する可能性があるため、適用には注意が必要である。

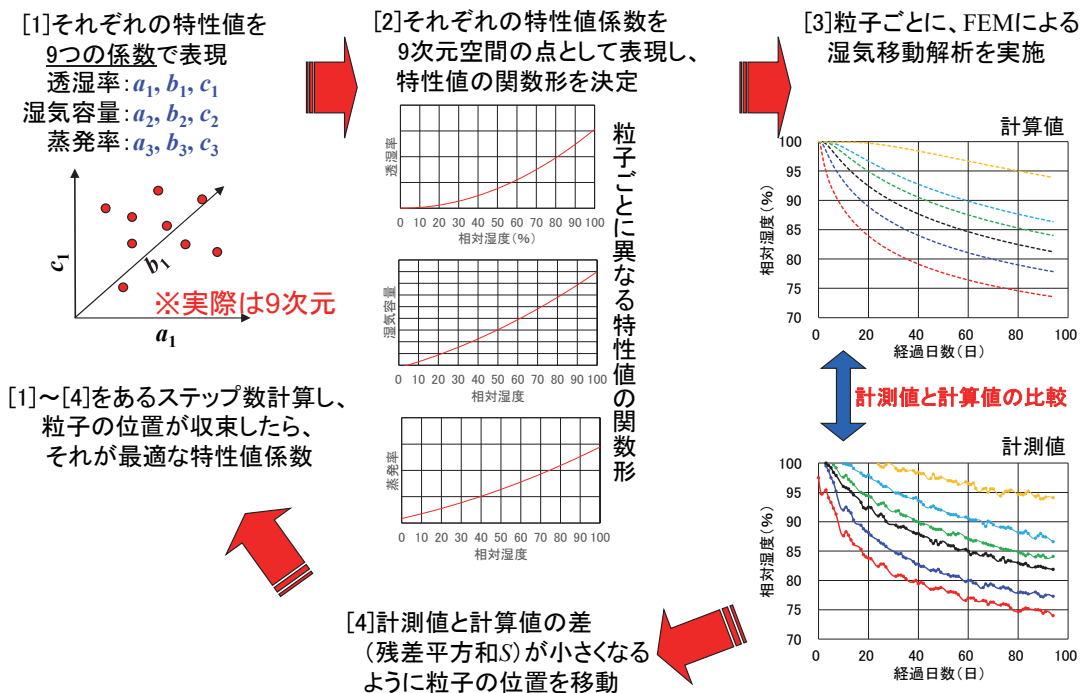
3. 粒子群最適化による湿気移動特性値の同定

3.1 概要

粒子群最適化^{8),9)} (Particle Swarm Optimization: PSO) は、鳥の群れや魚の群泳など、群れを成して移動する生物の行動パターンを最適化に応用したものである。粒子群最適化は連続量の最適化に適しており、微分などの複雑な計算を必要とせず、評価値が得られる問題であれば幅広く適用可能な汎用性の高い最適化手法である。本研究では、事例は少ないものの、過去に実施されたコンクリート中の湿度測定結果をもとに、粒子群最適化を用いた逆解析を行い、湿気移動特性値の同定を行った。

粒子群最適化による湿気移動特性値の同定は、以下の手順で実施する(図-2参照)。

- [1] それぞれの湿気移動特性値(透湿率, 湿気容量, 蒸発率)を9つの係数($a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$)で表現する。
- [2] それぞれの湿気移動特性値係数を9次元空間の点として表現し、湿気移動特性値ごとの関数形を決定する。
- [3] 粒子ごとに異なる湿気移動特性値の関数形が決まるので、この湿気移動特性値を用いて湿気移動解析を行う。
- [4] 計測値と計算値との比較を行い、以下の式で残差平方和 S を計算し、その値が小さくなるように粒子を



$$S = \sum_{istep=1}^{nstep} \sum_{ipoint=1}^{npoint} (RH_{measure} - RH_{calculation})^2 \rightarrow \min$$

図-2 粒子群最適化による湿気移動特性値の同定プロセス

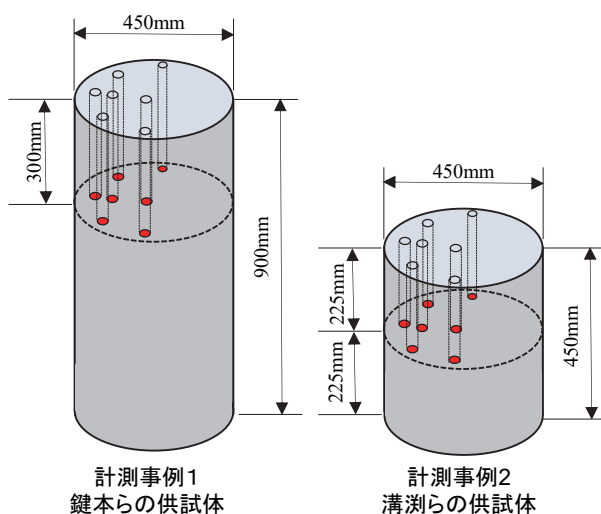


図-3 大型供試体による湿度計測

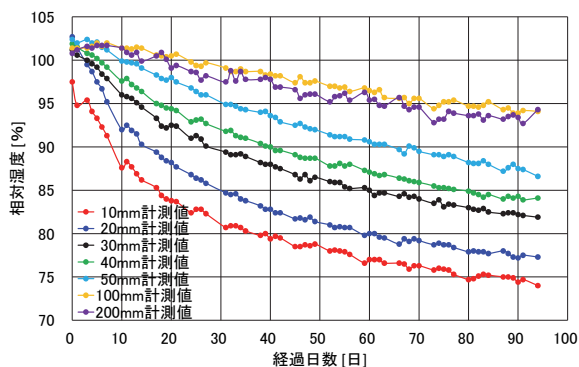


図-4 計測事例1の湿度計測値

移動させる。移動先は、粒子群最適化のアルゴリズムにより決定される。

$$S = \sum_{istep=1}^{nstep} \sum_{ipoint=1}^{npoint} (RH_{measure} - RH_{calculation})^2 \quad (6)$$

ここに、 $RH_{measure}$ は相対湿度の計測値、 $RH_{calculation}$ は相対湿度の計算値である。また、 $nstep$ は有限要素解析における計算ステップ数で、 $npoint$ は湿度が計測されている観測点数である。

[1]から[4]の手順を粒子群最適化の最大イタレーション数(本研究では100回)まで計算し、粒子の位置が収束したら、その粒子の座標が最適な湿気移動特性値係数となる。粒子群最適化による同定の詳細については、文献10)を参照されたい。

3.2 同定に用いた湿度計測事例

コンクリート内部の水分(相対湿度)を正確に測定することは比較的困難である¹¹⁾。特に相対湿度95%以上の場合、精度が低下する可能性がある。

本研究では、比較的大型の供試体を用いてコンクリート内部の相対湿度を測定した計測事例をもとに粒子群最適化による逆解析により湿気移動特性値の同定を行った。

(1) 計測事例1: 鍵本らによる計測

鍵本ら¹²⁾は、図-3に示すような直径450mm、高さ900mmの大型円柱供試体を作成し、側面のみから乾燥する状態で、側面から深さ10mm、20mm、30mm、40mm、

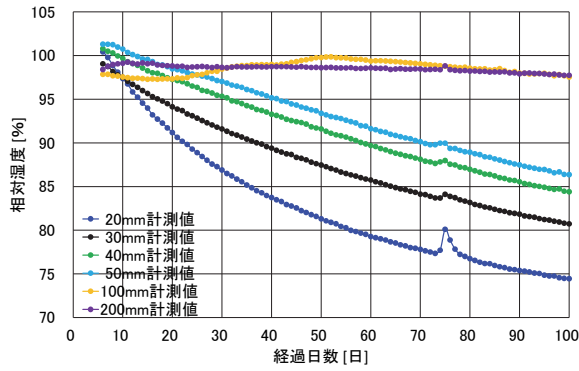


図-5 計測事例1の湿度計測値

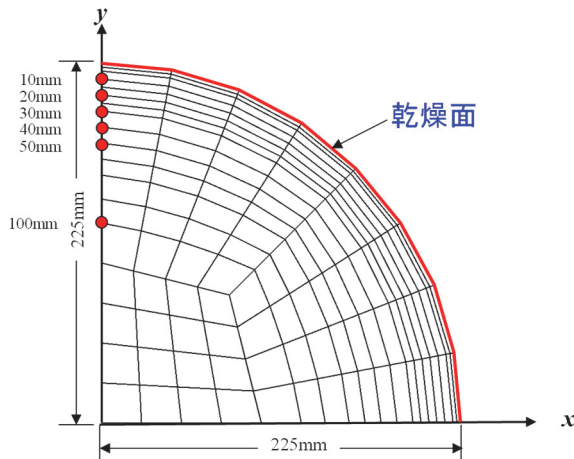


図-6 湿気移動解析に用いる有限要素メッシュ

50mm, 100mm, 200mm の位置における相対湿度を温湿度計（高分子温湿度センサー，直径：6mm，温度・湿度測定範囲：-10～+80℃，20%～95%RH）で測定している。測定時の試験室内温度は 34.5℃で，湿度は 60%である。その測定結果を図-4 に示す。なお，深さ 200mm の計測データは，中心部に近いにもかかわらず深さ 100mm よりも乾燥しており，通常の湿度分布とは異なる傾向を示している。また，湿度センサの測定範囲が 20%～95%RH であることを踏まえ，このデータの信頼性が低いと判断し，同定には使用しなかった。

(2) 計測事例 2：溝漉りによる計測

溝漉り⁹⁾は，鍵本らの計測と同様の方法で，図-3 に示すような直径 450mm，高さ 450mm の大型円柱供試体を作成し，側面のみから乾燥する状態で，側面から深さ 20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 100mm および 200mm の位置における相対湿度を温湿度計（高分子温湿度センサー，直径：6mm，温度・湿度測定範囲：-10～+80℃，20%～95%RH）で測定している。供試体は打込み後 6 日で脱型を行い，材齢 7 日から計測を開始している。測定時の試験室内温度は 20℃で，湿度は 60%である。その測定結果を図-5 に示す。なお，使用した温湿度計の湿度計測の適用範囲は 20%～95%RH であり，深さ 100mm および

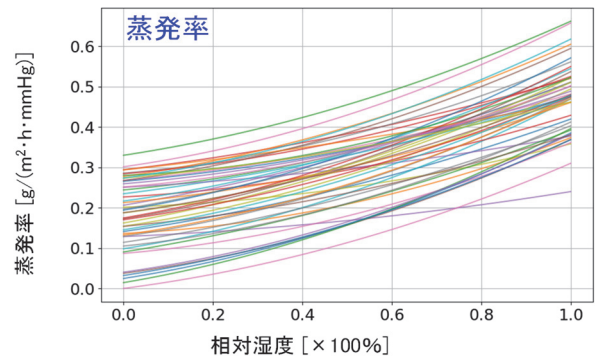
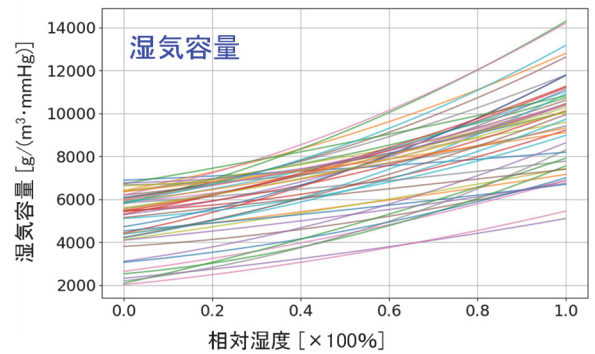
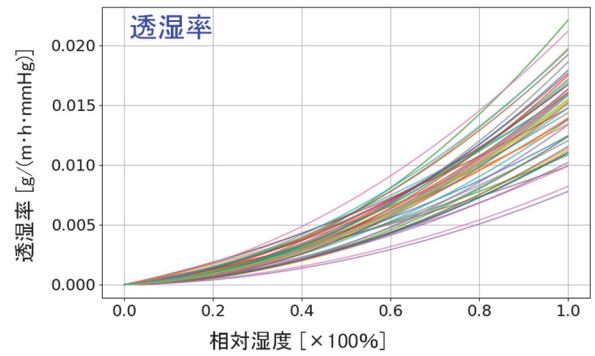


図-7 計測事例1の50回の試行での同定結果

200mm の計測データは乾燥が進んでいないため，同定には使用しなかった。

3.3 湿気移動特性値の同定

粒子群最適化では，粒子の 9 次元の座標がそれぞれの湿気移動特性値の係数 ($a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$) を表しており，これをもとに 2 次関数として透湿率，湿気容量，蒸発率の各湿気移動特性値が定義される。その後，有限要素法による湿気移動解析が実施される。湿度計測では，円柱の側面のみから乾燥する条件であるため，2 次元の 1/4 断面を用いてモデル化を行った。図-6 に解析における有限要素メッシュを示す。粒子群最適化では，1 回の試行で，「解析ステップ数×粒子数」の有限要素解析が必要であり，本研究では 100 ステップ 50 粒子で実行した。

表-1 粒子群最適化による同定値

		2次関数の係数		
		係数 a	係数 b	係数 c
事例1	透湿率	0.0162	0.0017	0.0
	湿気容量	3703.7	3351.8	4730.8
	蒸発率	0.1995	0.1773	0.1942
事例2	透湿率	0.0106	0.0002	0.0
	湿気容量	2630.8	2850.2	5822.3
	蒸発率	0.3749	0.3530	0.3838

表-2 湿気移動特性の提案値

	2次関数の係数		
	係数 a	係数 b	係数 c
透湿率	0.013	0.001	0.0
湿気容量	3200	3000	5300
蒸発率	0.5	0.1	0.3

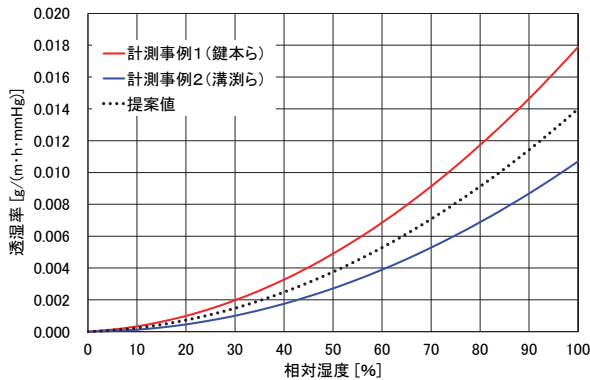


図-8 透湿率の関数形

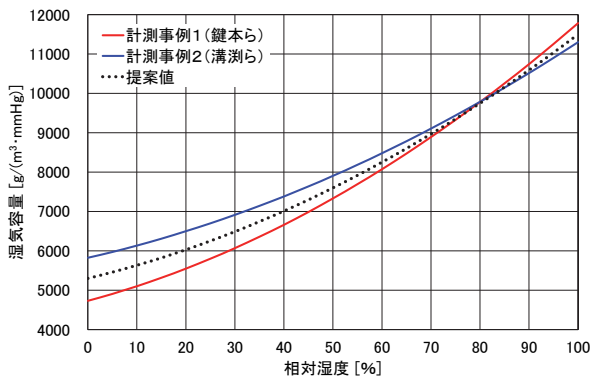


図-9 湿気容量の関数形

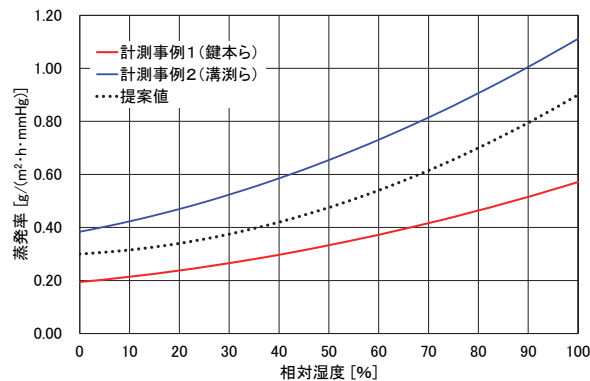


図-10 蒸発率の関数形

湿気移動特性値は、透湿率、湿気容量、蒸発率が相互に関連するため、その最適な組合せが無数に存在する。

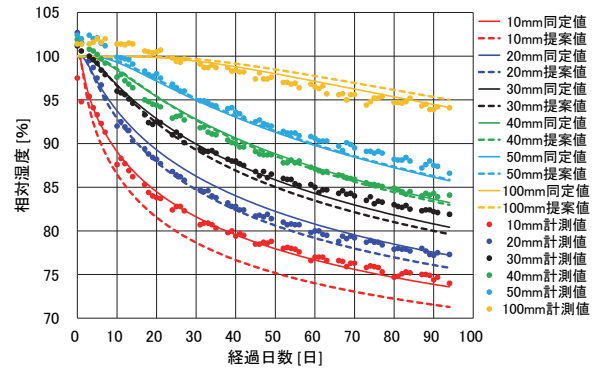


図-11 計測事例1の同定値と提案値による相対湿度

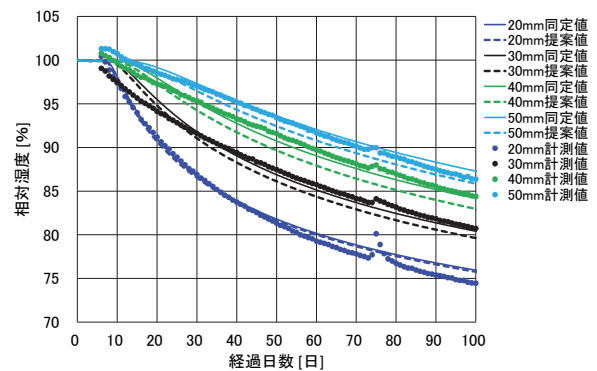


図-12 計測事例2の同定値と提案値による相対湿度

図-7は、計測事例1で50回の試行を行った結果を示しているが、透湿率、湿気容量、蒸発率の異なる組合せにより計測値にフィットする湿気移動特性値が無数に得られることが確認された。これらの組合せは、どれを用いても計測事例1の結果を再現できるものの、他の計測事例には適用できない可能性がある(汎化性能が低い)。そこで本研究では、計測事例1および計測事例2に対してそれぞれ50回の試行を行い、両事例の試行結果から、最も類似度の高い湿気移動特性値の組合せを選定し、これを同定値とした。この探索では、透湿率、湿気容量、蒸発率のスケールの違いを補正するため、各値の変動範囲(最大値-最小値)で正規化を行い、比較可能な値に統一した。正規化後の値をもとに、透湿率、湿気容量、蒸発率それぞれの二乗誤差を計算し、その合計(残差平方和)が最小となる組合せを選定することで、最も類似度の高い湿気移動特性値の組合せを選定した。

採用した同定結果を表-1に示し、それに基づく関数

形を図-8、図-9、図-10に示す。図中の赤線は計測事例1の同定値による関数形、青線は計測事例2の同定値による関数形である。関数形の値そのものには若干の違いが見られるもの、その形状は非常に類似している。また、黒点線は両者のほぼ中央の関数形であり、表-2に示す本研究での提案値による関数形である。なお、計測事例1および計測事例2は雰囲気温度が異なるものの、本研究で用いている湿気移動則は、式(1)に示すように相対湿度 RH [%]ではなく、蒸気圧 P [mmHg]で定義されている。このため、コンクリートのように温度変化が常に生じる材料においても、温度上昇による湿気移動の促進現象や雰囲気温度の違いを考慮することが可能である。したがって、本研究では異なる雰囲気温度の影響を適切に考慮した上で、計測事例1と計測事例2の湿気移動特性値を同列に比較できるものと判断した。

図-11および図-12には同定値および提案値を用いた計測事例ごとの相対湿度の計算結果を示す。図中の丸印は計測値であり、実線は同定値を用いた相対湿度の計算結果、点線は提案値を用いた相対湿度の計算結果である。

当然ではあるが、同定値を用いた計算結果は、計測値に非常に近い値となっている。一方、提案値を用いた計算結果は、計測事例1の10mmの位置の相対湿度が計測値より大きくなっているものの、その差は3%程度にとどまり、実用上問題ないと思われる。

4. まとめ

本研究では大型円柱供試体を用いた湿度計測結果に基づき、実際の湿気移動特性値と相対湿度との関係を考慮した湿気移動特性値の同定を行った。本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 粒子群最適化を用いることで、中高湿度域（50～100%RH）に限定されるものの、2次関数を用いて実際の湿気移動特性値と相対湿度の関係を考慮した湿気移動特性値の同定が可能であることを示した。
- (2) 同定された湿気移動特性値は、透湿率、湿気容量、蒸発率の組合せにより計測値に適合する湿気移動特性値が無数に存在することを示し、複数の計測事例をもとに、湿気移動特性値を求める手法を示した。
- (3) 提案した湿気移動特性値を用いた相対湿度の計算結果は、計測事例1および2の計測値と比較的良好一致し、計測値の再現が可能であることを確認した。

今後の課題として、本研究は2例に限られたコンクリート内部の湿度計測結果をもとにした同定である点が挙げられる。セメントの種類、水セメント比、骨材の種類によって湿気移動特性値が異なる可能性があるため、さ

らなる汎化性能の向上には、湿度計測事例の拡充が望まれる。また、本研究では多数の試行を行っており、計算量が大きいため今後は最適化手法の改良を行うなど、計算量の削減についても検討する。

参考文献

- 1) 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
- 2) 丸山一平, 野口貴文, 佐藤良一: 水熱連成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, 第609号, pp.1-8, 2006
- 3) 籠橋忍, 小澤満津雄, 森本博昭: コンクリートの湿気移動解析に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.655-660, 2000.6
- 4) 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, 2004.6
- 5) 西岡栄香, 原田有: 多孔質物質中の透湿率および湿気拡散について, セメント技術年報, XV, pp.274-278, 1961.
- 6) 溝渕利明, 掛来実, 中村秀明, 長田直之: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.299-304, 2020.6
- 7) 椎名国雄: コンクリートの内部湿度と変形, コンクリート・ジャーナル, vol.7, No.6, pp.1-11, 1969.
- 8) Kennedy, J., Eberhart, R. and Shi, Y.: *Swarm Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
- 9) Kennedy, J. and Eberhart, R.: Particle Swarm Optimization, *Proc. The 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*, vol. IV, pp.1942-1948, 1995.
- 10) 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 62(1), pp.107-118, 2006.2.
- 11) 谷口 円, 桂 修: 湿度センサーを利用したコンクリート含水状態の視覚化, コンクリート工学, 53巻5号, pp.406-410, 2015.
- 12) 鍵本広之, 川村満紀: 大型コンクリート円柱内部における湿度およびひずみの測定による ASR 表面ひび割れ発生過程の解明, コンクリート年次論文報告集, Vol.31, No.1, pp.1225-1230, 2009