

論文 コンクリートの湿気拡散係数に関する検討

後藤 壮*1・三谷 裕二*2・多田 真人*1・丸山 一平*3

要旨: 本検討では、直径 100mm、厚さ 10mm のコンクリート円盤を配列してコンクリート部材を模擬した小型供試体を用いてコンクリート内部の相対湿度を測定し、そのデータに Boltzmann-Matano 法を適用することで湿気拡散係数を算出する手法を提示した。また、算出した湿気拡散係数を用いた湿気解析でコンクリート壁部材を模擬した試験体内部の相対湿度を推定し、実験値と比較・評価した。その結果、本手法より定めた湿気拡散係数を用いた湿気解析により、乾燥面からの距離によらず、コンクリート部材内部の相対湿度変化を概ね良く推定できることを明らかにした。

キーワード: 相対湿度, 拡散係数, ボルツマン変換, 湿気移動

1. はじめに

コンクリート構造物の長寿命・高耐久化の観点から、収縮ひび割れに対する関心は益々高まっており、構造物の設計・計画段階において、より合理的なひび割れ制御対策を講じることが求められている。

1981年に発足した日本コンクリート工学協会「マスコンクリートの温度応力研究委員会」をはじめ、各機関による長年の研究成果と数値解析技術の普及・進歩が相まって、コンクリート構造物内部の温度分布やそれともなう生じる温度応力については、精度良く推定できるようになった¹⁾。最近では、温度分布のみならず、コンクリート中の湿気移動に基づいて相対湿度分布を予測し、相対湿度の変化による乾燥収縮ひずみを考慮する応力解析技術の検討²⁾、および解析ソフトの開発が行われている³⁾。当該技術を用いることにより、新設のコンクリート部材が既設の部材に拘束されて生じる応力だけではなく、コンクリート部材の内部(中心部)と表層部における乾燥収縮ひずみの差により生じる内部拘束応力の影響を加味した解析ができることから、より実際のなひび割れリスクの評価、その結果に基づく効果的な対策の検討が可能になると考えられる。

コンクリート中の湿気移動現象に関しては、含水率もしくは相対湿度を水分移動の駆動力とした非線形の拡散方程式から、水分拡散係数(透湿率)などの物性値を検討した事例がいくつか報告されているものの^{4),5)}、コンクリート内部における相対湿度の変化・分布に関する実験データは少ないのが実状である⁶⁾。とりわけ、コンクリートの使用材料や配(調)合が湿気移動特性に及ぼす影響に関する知見は十分に整備されておらず^{7),8)}、湿気移動解析の精度を高めるうえでの課題となっている。

そこで本検討では、コンクリート円盤を用いた小型供

表-1 使用材料

材料	記号	物理特性
セメント	NC	普通ポルトランドセメント 密度: 3.16g/cm ³ , 比表面積: 3220cm ² /g
細骨材	S	静岡県掛川市産山砂 表乾密度: 2.58g/cm ³ , 吸水率: 1.85%
粗骨材	G	茨城県桜川市産砕石(砕石 2005) 表乾密度: 2.64g/cm ³ , 吸水率: 0.58%
混和剤	AD	AE 減水剤/リグニンスルホン酸系
	AE	空気量調整剤

試体を用いてコンクリート内部の相対湿度変化を実験的に把握するとともに、そのデータに Boltzmann-Matano 法⁹⁾を適用して湿気拡散係数を推定する手法について検討した。さらに、その湿気拡散係数を導入した3次元有限要素法(以下、3D-FEM)湿気解析によりコンクリート壁部材を模擬した試験体内部の相対湿度を算出し、計算値と実測値を比較することにより、提示した湿気拡散係数および湿気解析の精度を評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配(調)合

表-1にコンクリートの使用材料を示す。セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材および粗骨材にはそれぞれ山砂と砂岩砕石を使用した。コンクリートの配(調)合は、単位水量 169kg/m³、水セメント比 50%、細骨材率 45.0%とし、AE 減水剤の使用量は一定(単位セメント量×0.25%)とした。フレッシュコンクリートの目標値は、スランプが 15±2.5cm、空気量が 4.5±1.5%とし、これらの範囲内となるよう、空気量調整剤の添加量を調整した。なお、コンクリートの練混ぜから打設・成型までの作業

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 修士(工学) (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 博士(工学) (正会員)

*3 東京大学 大学院工学系研究科 教授 博士(工学) (正会員)

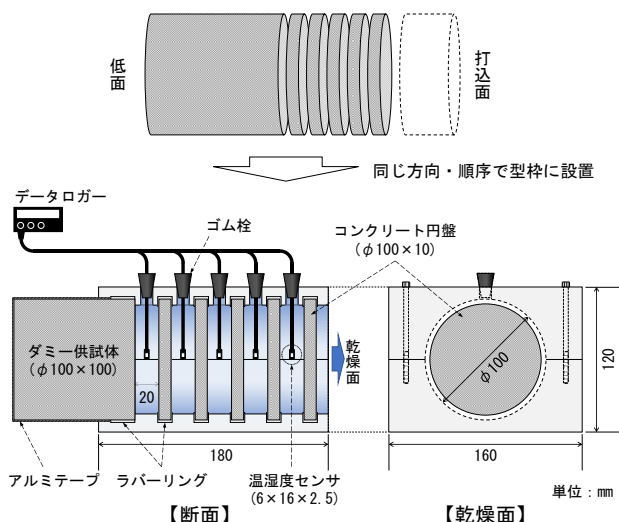


図-1 内部湿度の測定法(円盤法)

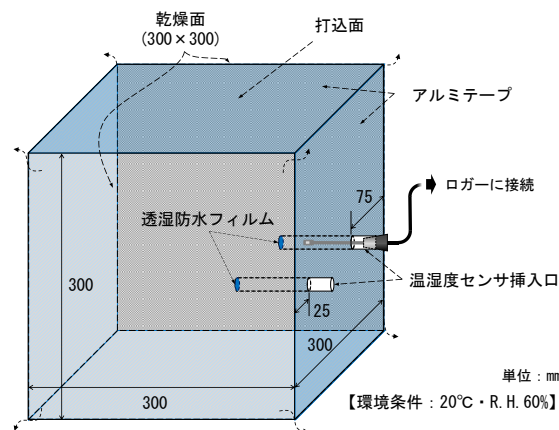


図-2 模擬試験体の概要

は 20°C・R.H.80%に管理された恒温恒湿室にて実施した。

2.2 湿度移動速度の測定法

図-1 に、コンクリート内部における相対湿度の移動速度を測定する方法の概要を示す。本実験では、コンクリート内部の湿度移動速度を取得する手法として、コンクリート円盤を使用する方法(以下、円盤法)を用いることとした。

湿度移動測定に供する小型供試体は、材齢7日まで封緘養生を施したコンクリート円柱供試体(φ100×200mm)の中央部より、それぞれ厚さ 10±0.5mm, 100±1mm となるように湿式ダイヤモンドカッターでコンクリート円盤およびダミー供試体を作成した後、連続した5枚の円盤とφ100×100mmのダミー供試体を切り出した時と同じ方向、順序となるように専用のアクリル製型枠に設置した。

本手法は、過去に著者らが提示した方法⁷⁾を改良したものである。すなわち、乾燥面からの距離 50mm 以上の部分にダミー供試体を設置することにより、連続するコンクリート内部からの水分供給をより実際に近い形に模擬した。

コンクリート内部における相対湿度の測定は、静電容量型の小型温湿度センサ(寸法：6×16×2.5mm, 精度：±1.5%, 分解能：0.01%)を所定の材齢で挿入して行った。測定中はセンサ挿入口からの湿気移動・漏洩を防止するため、隙間をゴム栓で塞いだ。相対湿度の読み値は、センサ挿入後の出力値が安定した時点(湿度変化が1分当たり±0.05%以下となった時点)の値とした。試験体は型枠に入った状態で、20°C・R.H.43%(K₂CO₃を用いた飽和塩)に調湿されたデシケータ内で保管した。

2.3 模擬試験体の内部湿度

本研究では、円盤法の実験結果より導出した湿気拡散係数を用いた湿気移動解析を行い、コンクリート部材内

部の相対湿度を予測し、その精度を検証することとした。検証用として、厚さ 300mm のコンクリート壁部材を模擬した試験体を作製し、内部の相対湿度を測定した。

図-2 に検証用に作製したコンクリート模擬試験体の概要を示す。試験体の寸法は 300×300×300mm とし、打込面を除く2側面を乾燥面とした(V/S=150mm)。使用したコンクリートの配(調)合、使用材料は円盤法で使用するものと同じとし、打設後、材齢7日まで20°C環境にて封緘養生を施した。コンクリート内部の相対湿度測定は、過去に報告されている方法^{10)~13)}(以下、埋設法)を用いることとした。相対湿度の測定方法が相対湿度の計測値に及ぼす影響は、同一材料を使用した場合、埋設法と円盤法の実測値の差は、乾燥面からの距離、乾燥期間によらず±5%の範囲内であることから⁷⁾、本検討でのデータ取得方法として問題ないものと判断した。

相対湿度の測定は、乾燥面からの距離が25mmと75mmとなるように設置したプラスチック製パイプ(φ10×100mm)内部の湿度を静電容量型の温湿度センサを用いて取得した。コンクリートに埋設したパイプの先端には防水透湿フィルムを取り付け、パイプ内部にコンクリートや水が浸入しないよう処理した。また、パイプの埋設深さは封緘面から垂直方向に50mm以上確保することとした。

3. 円盤法によるコンクリート内部湿度の測定結果

図-3 に円盤法で測定したコンクリート内部の乾燥期間91日までの相対湿度変化を示す。乾燥開始時の相対湿度は約100%であり、乾燥下における相対湿度の低下が認められた。乾燥面から10mmにおける相対湿度は、乾燥期間7日で92%、28日で80%、91日で70%であったのに対して、40mmおよび50mmにおける相対湿度は、91日においても90%程度以上を保持しており、乾燥面か

らの距離が短いほど、相対湿度は低い結果であった。

4. 見かけの湿気拡散係数の推定方法

4.1 拡散方程式

本検討では、既往の研究^{14)~16)}を参考に、コンクリート中の相対湿度を水分移動の駆動力とした一次元の非線形拡散方程式は(1)式により、湿気拡散係数を推定した。

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \text{div}(D \text{grad } U) \quad (1)$$

ここで、 U は相対湿度(%), t は乾燥期間(day), D は拡散係数(cm^2/day)である。

本検討で行った円盤法を一方向の湿気移動と仮定し、(2)式に示す変数 λ を用いてボルツマン変換⁹⁾を行うことにより、拡散係数 D_U は(3)式で表すことができる。

$$\lambda = \frac{x}{\sqrt{t}} \quad (2)$$

$$D_U = \frac{1}{2} \int_U^{U_0} \lambda dU / \frac{dU}{d\lambda} \quad (3)$$

ここで、 λ はボルツマン変数($\text{cm}/\text{day}^{1/2}$), x は乾燥面からの距離(cm), t は乾燥期間(day)である。

なお、乾燥開始時点における相対湿度から、 U_0 は100%とした。(1)~(3)式を用いることにより、任意の相対湿度 U における湿気拡散係数 D_U を求めた。

4.2 ボルツマン変数と相対湿度の関係

コンクリート中の水分移動現象が一次元の拡散現象とみなせる場合、コンクリートの含水率とボルツマン変数の関係は、任意の関数(曲線)で表現することができる。阪田ら¹⁴⁾、秋田ら¹⁵⁾は、乾燥を受けるコンクリートの含水率を水分移動の駆動力として、ボルツマン変換に基づいた水分拡散係数の導出を行い、その手段が有効であることを示している。また、大野らの研究⁷⁾によると、水分移動の駆動力となるポテンシャルを相対湿度とした場合においても、ボルツマン変数との関係は朴ら¹⁶⁾の提案する(4)式を適用することで、任意の相対湿度における湿気拡散係数を算出することができることから、本検討においてもこれと同一の式を適用することで湿気拡散係数を算出した。

$$U = U_0 \cdot \left\{ 1 - \frac{a}{(\lambda + b)^2} \right\} \quad (4)$$

ここで、 a , b は曲線の形状によって決まる定数である。

円盤法により求まる相対湿度とボルツマン変数の関係式がある曲線で示される場合、(4)式を(3)式に代入することで、任意の相対湿度における湿気拡散係数が算出できる。本検討では、工学的実用性を意図して、水和の進行等の影響を含んだ見かけの湿気拡散係数 D_U を推定し

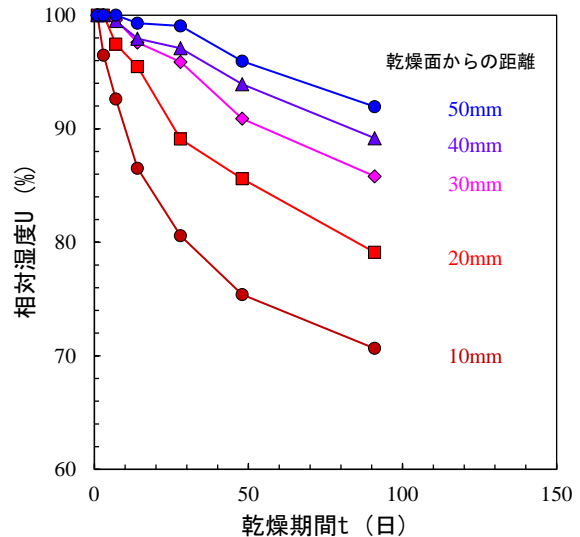


図-3 コンクリート内部の相対湿度

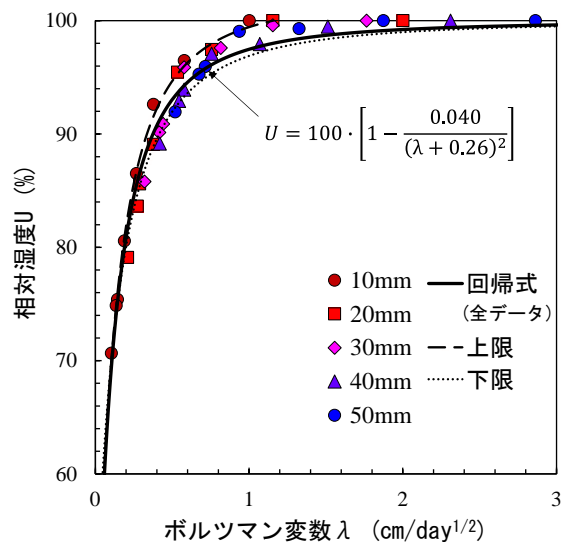


図-4 相対湿度とボルツマン変数 λ の関係

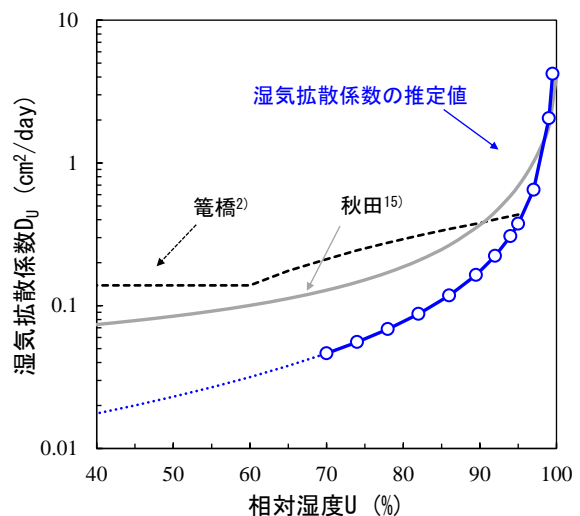


図-5 見かけの湿気拡散係数

た。

図-4 に円盤法で取得したコンクリート内部の相対湿度とボルツマン変数の関係を示す。同図には、(4)式を用いて実験データを最小二乗回帰した曲線を併記している。ボルツマン変数と相対湿度の関係は、含水率や相対含水率を駆動力とした研究^{14)~16)}と同様に、相対湿度を変数とした場合においても概ね1つの曲線で表現できる結果であったが、 $\lambda = 0.5 \sim 1.0$ の範囲においてはばらつきがみられた。そこで、ボルツマン変数のばらつきを考慮し、湿気移動解析では図に併記した上限および下限の回帰式より算出した拡散係数についても検討した。

4.3 見かけの拡散係数の算出

図-5 に円盤法で測定した相対湿度データを基に算出した見かけの湿気拡散係数を示す。図中には、籠橋ら²⁾、秋田ら¹⁵⁾によって示された水分(湿気)拡散係数を併記している。ここで、秋田らの湿気拡散係数は、湿気拡散の駆動力を相対含水率としていることから、既往の研究¹⁷⁾を基に20℃下における相対湿度の関数となるよう変換した値としている。なお、湿気拡散係数の算出には、乾燥面からの距離10~50mmにおける乾燥期間1~91日までのデータを用いているため、R.H.70%程度以下の湿気拡散係数は外挿によって求めた値である。

(1)~(4)式より算出した見かけの湿気拡散係数は、相対湿度90, 80, 70, 60%でそれぞれ0.17, 0.08, 0.05, 0.03cm²/day程度であり、相対湿度が低くなるにしたがって小さくなった。また、相対湿度の変化に対する湿気拡散係数の減少量は、相対湿度80%以上の高湿度域で顕著に大きい傾向が認められた。

籠橋らおよび秋田らによって示された値と比較すると、本検討で得られた湿気拡散係数は相対湿度に対する変化量が総じて大きい結果であった。また、いずれの相対湿度においても、本検討で得られた湿気拡散係数の方が低い値を示した。なお、乾燥開始時(U_0)の拡散係数は4.0~5.0cm²/dayと秋田らによって示された値と同程度であった。

5. 湿気移動解析による検証

5.1 解析の概要

湿気移動解析の支配方程式および境界条件式には、既往の研究¹³⁾を参考に次式を用いた。

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D_U \cdot \nabla^2 U \quad (5)$$

$$-\frac{\partial U}{\partial n} = D_U \frac{(U - U_a)}{h} \quad (6)$$

ここで、 h は仮想厚さ(cm)、 U と U_a はそれぞれコンクリート内部と周囲の相対湿度(%)である。

仮想厚さについては、境界面と空気との遷移区間を

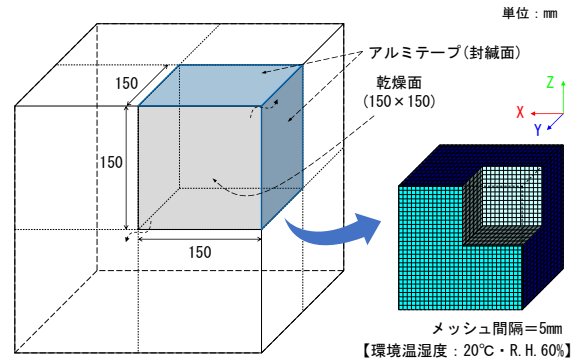


図-6 解析モデルの概要

表-2 解析条件

湿気移動に関する物性値	数値
コンクリートの初期相対湿度	100%
周囲の温度	20.0℃
周囲の相対湿度	60.0%
解析期間	730日

仮想的にコンクリートの厚さに換算した値であり^{5),18),19)}、本検討では丸山ら¹⁹⁾の提示した値を参考に0.3cmとした。

図-6 に湿気移動解析における解析モデルの概要、表-2 に解析条件を示す。周囲の温度は20℃、相対湿度は60%とした。また、解析期間は乾燥開始から730日間とした。

5.2 解析結果および考察

図-7 に、模擬試験体内部における相対湿度の測定値と本検討で定めた湿気拡散係数を用いた湿気解析による計算値の関係を示す。

模擬試験体の内部相対湿度を測定した結果を見ると、乾燥開始から時間の経過にともなって緩やかに低下する傾向があり、乾燥期間200日程度までにおける湿度低下の速度は、乾燥面からの距離が短いほど顕著に大きかった。一方で、乾燥期間約280日および約690日における内部相対湿度は、25mmで73.9%および69.6%、75mmで80.5%および75.5%であり、200日以降の湿度低下の速度は乾燥面からの距離によらずほぼ同程度であった。また、コンクリート内部湿度の低下速度は長期的に緩やかとなり、乾燥の影響を受けやすい25mmの位置であっても、乾燥開始から約2年経過した時点の相対湿度はR.H.70%を超えていた。これは、乾燥面からの距離が25mmの位置であっても、厚さ300mm程度のコンクリート壁部材の内部相対湿度が外気の相対湿度と同程度になるまでには長期間を要することを示唆している。

湿気解析による計算値と実測値を比較すると、乾燥面

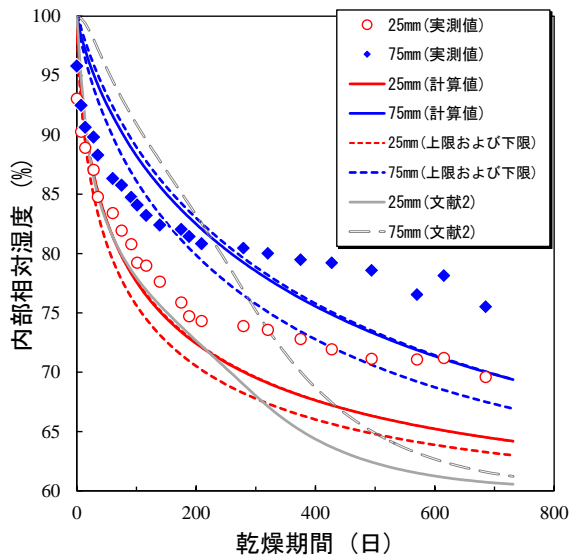


図-7 湿気移動解析結果

からの距離 25mm, 75mm のいずれについても、乾燥開始から約 1 年までの相対湿度の挙動が概ね良く対応する結果であった。図中には、過去に笹橋ら²⁾の提示した湿気移動特性値を用いた湿気解析の結果を併記しているが、乾燥面からの距離 25mm, 75mm における相対湿度は、乾燥期間 400 日程度までに急激に低下し、乾燥期間約 2 年で外気の相対湿度 60% 付近にまで低下する挙動となっている。これは、相対湿度に対する湿気拡散係数の変化量が小さく、特に相対湿度 80% 程度以下の湿気拡散係数が大きいことによるものと考えられる。また、図-4 で算出した上限および下限の回帰式を用いた計算結果も併記しており、乾燥面からの距離 75mm においては、回帰式の算出に全データを用いた計算値 (図-7 青色の実線) と比較して下限の計算値を用いた方が乾燥開始から 200 日程度までの実測値に対応する結果であった。一方、乾燥面からの距離や乾燥期間によらず、上限および下限の相対湿度は全データを用いた計算値 $\pm 5\%$ の範囲内であった。

本検討より得た湿気拡散係数を用いた湿気解析の計算値は、乾燥期間 200 日程度以降における相対湿度を実測値より過小に評価している傾向が認められる。これについては、湿気拡散係数を算出する上で適用したデータが R.H.70~100% 程度の範囲であったため、R.H.70% 付近以下の湿気拡散係数が大きく推定されたこと、および実測値における乾燥期間 200 日以降の湿度低下速度が緩やかになり、計算値との差が大きくなったことが影響したと考えられる。相対湿度の低下速度が緩やかになった要因としては、材齢とともにコンクリート内部の空隙構造が緻密化したことや C-S-H のコロイド的性質により水分移動にともなって空隙構造が変化したことが挙げられる。

以上から、湿気拡散係数の時間依存性を考慮することにより、乾燥期間 200 日以降の相対湿度をより精度良く予測できる可能性が示唆された。今後は、より低い湿度の乾燥条件下における相対湿度データの取得や時間依存性を有した湿気拡散係数の評価が必要である。

6. まとめ

本検討では、コンクリート円盤を用いた小型供試体を用いて乾燥下におけるコンクリート内部の相対湿度を測定し、その結果を基に見かけの湿気拡散係数を推定する手法を提示した。さらに、算出した湿気拡散係数を導入した 3D-FEM 湿気移動解析により、コンクリート壁部材を模擬した試験体内部の相対湿度を推定し、測定値と比較することにより、同湿気移動解析の精度を検証した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 円盤法および模擬試験体で測定した乾燥下におけるコンクリート内部の相対湿度は、表層部から顕著な湿度低下が生じ、いずれの材齢においても乾燥面からの距離が短いほど相対湿度が低くなった。
- (2) 円盤法で取得した相対湿度データに Boltzmann-Matano 法を適用することにより、相対湿度に応じた見かけの湿気拡散係数を算出できることを確認した。
- (3) 湿気拡散係数は、相対湿度が低くなると曲線的に小さくなり、相対湿度 80% 程度より高い範囲において、相対湿度に対する湿気拡散係数の低減量が大きかった。
- (4) 算出した湿気拡散係数を用いた湿気解析により、模擬試験体内部の相対湿度を推定した結果、乾燥面からの距離にかかわらず、計算値と実測値は概ね良く対応していた。

参考文献

- 1) 石川雅美, 石川靖晃, 中村秀明, 溝渕利明: コンクリートの初期応力解析の最新機能と解析事例, コンクリート工学, Vol.56, No.5, pp.373-378, 2018.5
- 2) 笹橋忍, 伊藤佑樹, 森本博昭: コンクリートの乾燥収縮によるひずみと応力の解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.441-446, 2002.7
- 3) (公社)日本コンクリート工学会: JCMAC Version4.3 マニュアル, 2017.12
- 4) 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
- 5) Bazant, Z.P. and Najjar, L.J.: Nonlinear water Diffusion in Nonsaturated Concrete, *Materiaux et Constructions*, Vol.5, No.25, pp.3-20, 1972.1

- 6) 佐藤晴香, 寺西浩司, 加藤領一: 外部環境がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響(その2. 計測結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.221-222, 2017
- 7) 大野拓也, 三谷裕二, 丸山一平: コンクリート内部の湿気移動速度に及ぼすセメント種類の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.419-424, 2019.7
- 8) 木下竜一, 伊藤始, 岡田敏美, 高畑依里: 湿度勾配を与えたコンクリートの含水率測定に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.779-784, 2011.7
- 9) Chujiro Matano : On the Relation between the Diffusion-Coefficients and Concentrations of Solid Metals, Japanese Journal of Physics, Vol.8, pp.109-113, 1933
- 10) Jose Luis Granja, Miguel Azenha, Christoph de Sousa, Rui Faria, Joaquim Barros : Hygrometric assessment of internal relative humidity in concrete : Practical Application Issues, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.12 (8), pp.250-265, 2014.8
- 11) 橋田浩, 田中亨二, 小池迪夫: 打設直後からの乾燥途中におけるコンクリートの含水状態/仕上げ材下地としてのコンクリートの含水状態の検討その 1, 日本建築学会構造系論文報告集, Vol.412, pp.1-8, 1990.4
- 12) 伊代田岳史, 松崎晋一郎, 井ノ口公寛, 歌川紀之: 養生とその後の環境による内部湿度の相違が乾燥収縮に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.425-430, 2010.7
- 13) 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, 2000.7
- 14) 阪田憲次, 蔵本修: 乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究, 土木学会論文報告集, Vol.316, pp.145-152, 1981.12
- 15) 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, Vol.420, V-13, pp.61-69, 1990.8
- 16) 朴同天, 兼松学, 野口貴文: 断面修復材として用いられたポリマーセメントモルタルの乾燥と拘束応力発生に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.18, No.2, pp.71-81, 2007.5
- 17) 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, Vol.23, pp.101-110, 1994.5
- 18) 下村匠, 福留和人, 前川宏一: 微視的機構モデルによるコンクリートの乾燥収縮挙動の解析, 土木学会論文集, Vol.514, V-27, pp.41-53, 1995.5
- 19) 丸山一平, 五十嵐豪, 岸直哉: セメント硬化体中の水分移動に関する基礎研究, 日本建築学会構造系論文報告集, Vol.668, pp.1737-1744, 2011.10