

論文 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

大野 拓也*1・三谷 裕二*2・丸山 一平*3

要旨: コンクリート構造物の収縮ひび割れを精度良く予測するためには、コンクリート内部の湿気移動現象を把握することが重要である。本検討では直径 10cm, 厚さ 1cm に切り出した円盤状の供試体を用いて、種々のセメントにおけるコンクリート内部の相対湿度を測定し、その結果に拡散方程式ならびにボルツマン変換を適用して見かけの拡散係数を推定した。その結果、普通セメントの見かけの拡散係数と比較して高炉セメント B 種は大きく、中庸熱セメント, 低熱セメントは小さい結果であった。また、深さと乾燥期間別に見かけの拡散係数を比較した結果、乾燥面から深いほど、乾燥期間が短いほど相対湿度 80%以上で大きくなる傾向であった。

キーワード: 相対湿度, 湿気移動, セメント種類, ボルツマン変換, 見かけの拡散係数

1. はじめに

コンクリート構造物の長寿命化の観点から、収縮ひび割れへの関心は益々高まっており、合理的に防止・低減するための対策方法が求められている。

近年では、数値解析技術の進歩に伴い、コンクリート部材内の温度分布のみならず、相対湿度分布を推定する検討が行われている^{1),2)}。これにより、コンクリート部材の収縮が周囲の既設部材や内部鉄筋など拘束されることで生じる外部拘束応力だけでなく、部材の表層部と内部における乾燥収縮ひずみの差によって生じる内部拘束応力を併せた形の応力分布を計算でき、収縮ひび割れの発生をより高い精度で予測できるようになると考えられる。

コンクリートの乾燥過程における相対湿度分布の予測については、水分移動の駆動力に含水率、相対湿度などを用い、非線形の拡散方程式を適用した研究^{3)~6)}が行われてきた。一方で、コンクリートの材料や配(調)合が湿気(水分)移動特性に及ぼす影響については、水セメント比や収縮低減剤の使用有無により、湿気移動の速度(拡散係数)が変化することがこれまで報告されているもの^{7),8)}、知見が少ないのが実状である。

本研究では、セメント種類がコンクリート内部の湿気移動特性に及ぼす影響を評価することを目的に、種々のセメントを用いたコンクリート内部の相対湿度を小型供試体により測定し、その結果に拡散方程式ならびにボルツマン変換を適用して見かけの拡散係数を推定した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配(調)合

表-1に使用材料を示す。セメントには、普通ポルトランドセメント, 中庸熱ポルトランドセメント, 低熱ポル

表-1 使用材料

材料	記号	物理的性質など
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
	MC	中庸熱ポルトランドセメント/ 密度:3.21g/cm ³ , 比表面積:3230cm ² /g
	LC	低熱ポルトランドセメント/ 密度:3.22g/cm ³ , 比表面積:3650cm ² /g
	BB	高炉セメント B 種/ 密度:3.04g/cm ³ , 比表面積:3770cm 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

トランドセメント, 高炉セメントB種を用いた。表-2にコンクリートの配(調)合を示す。水セメント比は50%, 細骨材率は45%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。コンクリートのスランプおよび空気量がそれぞれ15±2.5cm, 4.5±1.5%の範囲内になるように単位水量および空気量調整剤の添加量を変化させた。なお、高炉セメントB種, 中庸熱セメント, 低熱セメントの単位水量は、普通セメントよりそれぞれ1kg/m³, 1kg/m³, 5kg/m³少なかった。

2.2 作製供試体および測定方法

図-1にコンクリート内部の相対湿度変化を測定する方法を示す。本試験では、あらかじめ切断した円盤状の小型供試体を、乾燥面以外の内部が密閉された型枠に設置し、乾燥面から深さ 1cm~5cm までの相対湿度分布を模擬できる方法(以下、円盤法)を用いた。

コンクリートの練混ぜは、20℃・R.H.80%の室内で行

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 工修 (正会員)

*2 TAIHEIYO SINGAPORE PTE. LTD. 工修 (正会員)

*3 名古屋大学 大学院環境学研究科 教授・博士(工学) (正会員)

表-2 コンクリートの配(調)合

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
			W	NC	MC	LC	BB	S	G
N	50	45.0	169	338	-	-	-	788	984
M			168	-	336	-	-	792	989
L			164	-	-	328	-	800	999
BB			168	-	-	-	336	785	980

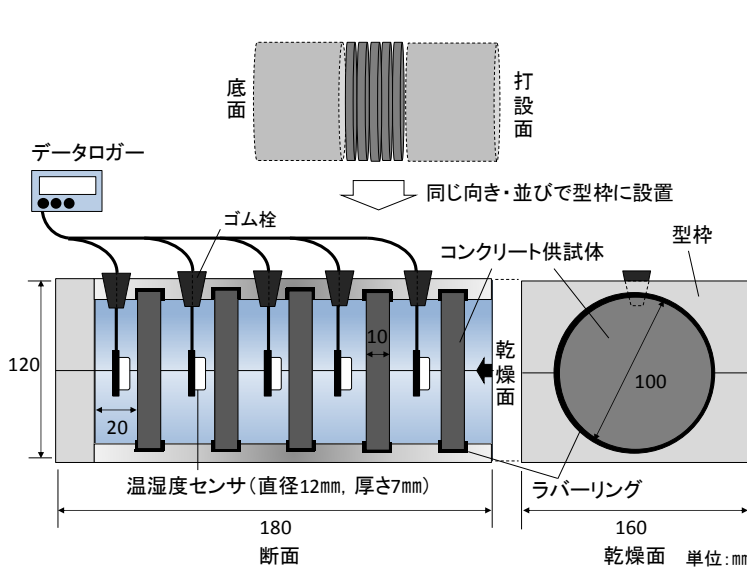


図-1 内部湿度の測定方法(円盤法)

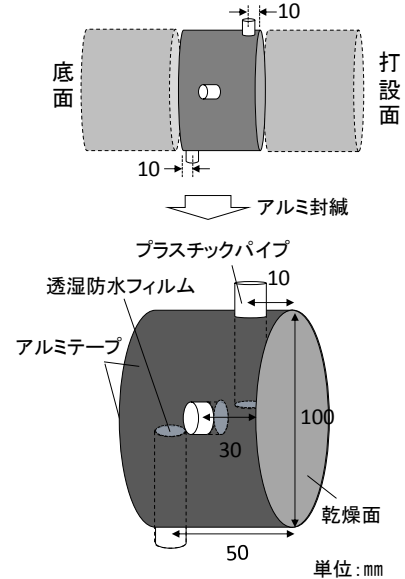


図-2 内部の湿度測定方法(埋設法)

い、φ100×200mmの円柱供試体を作製後、20℃環境下で封緘養生した。7日後、湿式のダイヤモンドカッターを用いて厚さ10±0.5mmの精度で円柱供試体の中央部付近より5枚切り出し、直ちに表面の水分を拭き取った。その後、すべての円盤供試体の側面にラバーリングを取り付け、5枚の円盤供試体が20mmの等間隔で設置できるように円周状に溝を切った円筒状の亚克力製の型枠に切り出した時と同じ向き・並びで保管した。亚克力製の型枠は、1つの端面のみを乾燥面とした。相対湿度は、円盤供試体間の空間(乾燥面から深さ1, 2, 3, 4, 5cmの位置)の相対湿度を計測できるように型枠にあらかじめ直径15mm程度の測定孔を開けておき、そこから静電容量型の温湿度センサ(寸法:直径12mm, 厚さ7mm, 精度:0.01%, 誤差:±1.8%)を所定の材齢で挿入して計測し、計測中は隙間をゴム栓で塞いだ。なお、計測後に湿度センサが結露や水の影響によって精度が低下してないことを、臭化ナトリウム飽和塩水溶液(20℃, 59.1±0.5%)を用いた密閉容器内で確認した。円盤供試体は、型枠に入った状態で、20±1℃・R.H.60±5%の室内に乾燥期間364日まで保管した。また本検討では、過去に報告されている測定方法^{9)~11)}(以下、埋設法)による評価も比較用として併せて実施した。

図-2に埋設法の概要を示す。φ100×200mm円柱供試体の中央部付近の側面に直径15mm程度のプラスチック

製のパイプを20mm間隔で3本、90°ずらした状態で型枠に埋設した。コンクリートに埋まるパイプ先端部には、コンクリートおよび水が浸入せず水蒸気だけが透過するように市販の透湿防水フィルムを取り付け、パイプの反対側はゴム栓で塞いだ。7日間の封緘養生後、湿式のダイヤモンドカッターを用いて底面側と打設面側のコンクリートをパイプの中心から10mm外側の位置で切り落とし、一面乾燥となるように、側面と底面側をアルミ箔粘着テープで封緘した。作製した供試体は、円盤法と同室内に乾燥期間364日まで保管し、3本のパイプ(乾燥面から深さ1, 3, 5cmの位置)に円盤法と同型の湿度センサを所定の材齢で挿入し、円盤法と同様の手順で測定した。なお、円盤法および埋設法に用いた円柱供試体は、同一バッチのコンクリートから作製し、切り出し位置および乾燥位置を統一した。

3. 実験結果

3.1 コンクリート内部の相対湿度

図-3に円盤法で測定したコンクリート内部の相対湿度変化をセメント種類別に示す。なお、相対湿度の読み値は、センサを挿入し、出力値が安定した時点(湿度変化が1分あたり±0.05%以下となった時点)の値とし、出力値が安定するまでの時間はいずれの水準でもセンサを挿入してから概ね15分程度であった。

コンクリート内部の相対湿度は、セメント種類にかかわらず乾燥開始から緩やかに低下する挙動を示し、乾燥面からの深さが浅いほど相対湿度は低くなった。ただし、深さ 1cm の相対湿度が深さ 2cm～5cm より顕著に低いものの、深さ 3cm～5cm の相対湿度には大きな差が見られなかった。

乾燥開始時の相対湿度は、いずれの深さにおいても 94%～97%程度 の値を示した。これは、打込みから硬化開始までのコンクリートの空隙内部は水分が飽和した状態であり、相対湿度はほぼ 100%であるものの、7日間の封緘養生中の水和反応によって不飽和の空隙が生成されたことで相対湿度の低下が生じたためと考えられる。このような自己乾燥による内部相対湿度の低下は、既往の研究¹²⁾においても報告されており、本実験においても同様の現象が生じたものと推察される。

図-4 に、乾燥面からの距離(深さ)と相対湿度の関係について、乾燥期間 14 日, 91 日, 364 日の結果を示す。乾燥の進行速度はセメント種類で異なり、BB の相対湿度は N, M, L と比較して総じて低く、その傾向は乾燥期間 14 日, 91 日で顕著であった。これについては、コンクリートの湿気移動による乾燥に加えて、スラグの水和反応によって水が消費され、自己乾燥が生じたことで相対湿度の低下が促進されたものと推察され、既往の研究⁹⁾とも対応していた。一方、低発熱系セメントの M や L の乾燥期間 14 日, 91 日における相対湿度は、N より総じて高い結果であった。これは、M, L の水和の進行度が N と比較して遅いことから、空隙内部に自由水が多く存在し、乾燥の進行が遅くなったためと考えられる。

乾燥期間で比較すると、いずれのセメントにおいても乾燥期間 14 日では、深さ 1cm と深さ 2cm～5cm の相対湿度差が大きいですが、時間の経過に伴って湿気移動および内部の乾燥が進行することによって深さに応じた湿度勾配が認められた。また、乾燥期間 364 日時点において、深さ 1cm の相対湿度は外環境の相対湿度 60%とほぼ同等になっているものの、深さ 2cm～5cm では 60%に達しておらず、湿気移動が長期的に継続する結果であった。

3.2 埋設法との比較

図-5 に、円盤法と埋設法で計測した深さ 1cm, 5cm における相対湿度の関係を示す。測定方法による差は小さく、概ね±5%程度の範囲に収まっていたが、円盤法の方が総じて高い傾向であった。この原因については明確ではないが、埋設法の測定値はパイプ径 15mm の区間の平均値と考えられることから、乾燥面に近い部分の影響を受けた可能性があること、円盤法と比較して密閉度が劣ることなどが考えられる。また、過去の研究において、藤原¹³⁾はコンクリートの含水率分布を明らかにするため、あらかじめ切断した供試体を組み合わせる方法と、

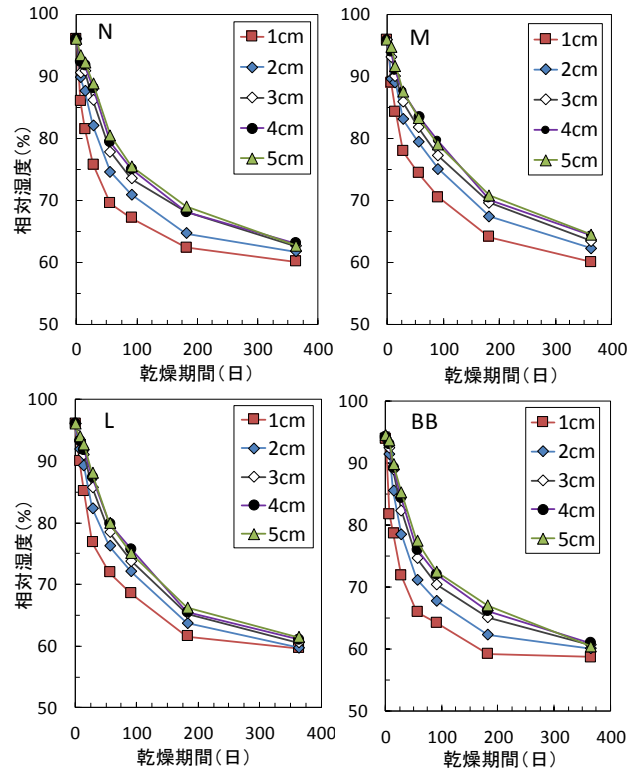


図-3 コンクリート内部の相対湿度変化(円盤法)

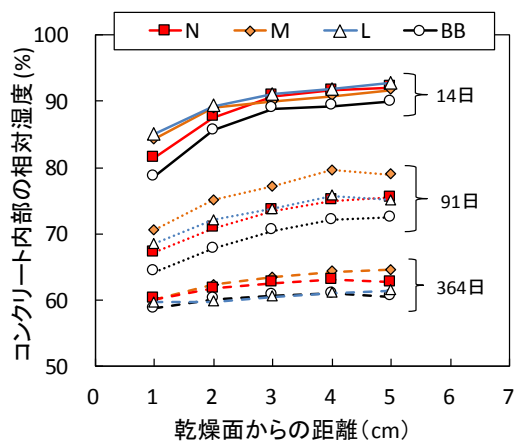


図-4 コンクリート内部の相対湿度分布(円盤法)

所定の材齢で割裂する方法を比較しており、あらかじめ切断した供試体の方が、各要素の不連続性によって乾燥の進行が遅くなる傾向があると報告している。今後、測定方法が及ぼす具体的な影響については、詳細に検討する必要がある。

なお、既往の研究¹⁰⁾において、コンクリート中に含まれる水分量は、湿度センサを挿入する測定孔中の飽和水蒸気量に対して十分に多く、わずかな水分の蒸発で平衡状態に達するため、測定孔の径・長さが相対湿度の測定値に及ぼす影響はほぼ無視できると報告されており、円盤法と埋設法で測定空間の容積が異なることによる測定値の差は小さいと考えられる。

4. 見かけの拡散係数の推定と考察

4.1 拡散方程式

コンクリートの水分移動現象については、非線形の拡散現象と捉えた上で、ボルツマン変換⁴⁾を用いた拡散係数の検討^{4)~6)}が行われてきた。これらの研究では、水分移動の駆動力を含水率や相対含水率として検討されていたが、本検討では相対湿度を駆動力とし、既往の研究と同様の手法により拡散係数を推定・評価した。一次元の非線形拡散方程式は(1)式で表される。

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

ここで、U：相対湿度(%), t：乾燥期間(day), D：拡散係数(cm²/day)である。本検討で設定した一方向の湿気移動の場合、(2)式に示す変数λを用いてボルツマン変換を行うと、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：ボルツマン変数(cm/day^{1/2}), x：乾燥面からの距離(cm), t：乾燥期間(day)である。ただし、U₀=100%である。これらの式によって任意の相対湿度に対する拡散係数を求めることができる。そのためには、相対湿度をボルツマン変数の関数として表現する必要がある。

4.2 ボルツマン変数と相対湿度の関係

図-6に、N, M, L, BBのコンクリートのボルツマン変数と円盤法で得られた相対湿度の関係を示す。なお、同図には朴ら⁸⁾が提案する(4)式を用いて乾燥期間364日までの結果を最小二乗回帰した曲線を併記している。

$$U = 100 \left\{ 1 - \frac{a}{(\lambda + b)^2} \right\} \quad (4)$$

ここで、a, b：曲線の形状によって決まる定数である。この式を(3)式に代入することで拡散係数が算出できる。いずれの水準においても、ボルツマン変数と相対湿度にばらつきがあるものの、概ね一義的な相関があることが確認できた。含水率や相対含水率を水分移動の駆動力としてボルツマン変換を行った既往の研究^{4)~6)}と比較してばらつきが若干大きい傾向があったが、これは水和の進行に伴う水和生成物や空隙構造の変化および自己乾燥が相対湿度に及ぼす影響が含水率に及ぼす影響度より大きいことが一因と考えられる。水和の進行と乾燥を同時に受ける条件下で含水率と相対湿度の分布を比較した既往の研究¹¹⁾では、含水率と相対湿度の低下速度は異なっており、両者の関係について仮想湿度領域を設けた等温脱着曲線などを用いて評価している。本検討におけるばらつきについても、同様の方法などにより、詳細なメカニズムの検討が必要である。

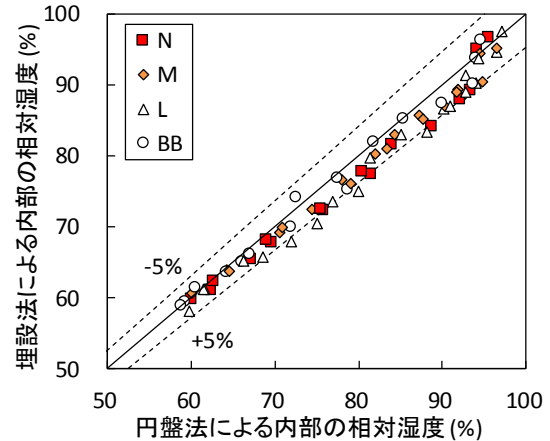


図-5 計測方法の比較

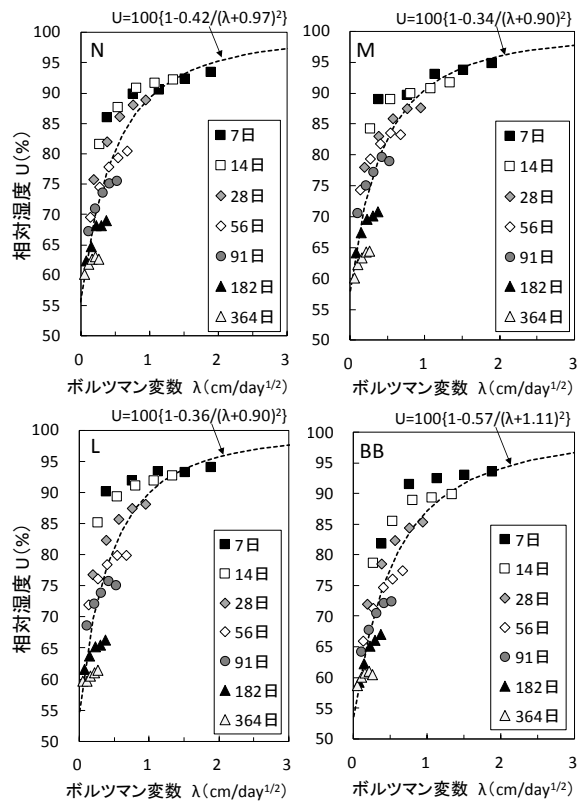


図-6 ボルツマン変数と相対湿度の関係

4.3 見かけの拡散係数の推定

以下では工学的実用性を意図して、前述のボルツマン変数と相対湿度の関係の回帰曲線を用い、水和の進行による湿度変化などの影響を含んだ見かけの拡散係数を推定・評価した。

図-7に、セメント種類別の見かけの拡散係数を示す。なお、見かけの拡散係数の推定には深さ1cm~5cm、乾燥期間364日までの測定データを用いた。

見かけの拡散係数は、いずれのセメントにおいても相対湿度が80%以上で顕著に大きくなる傾向を示し、70%~80%以下になるとほぼ一定値になる傾向が認められた。この傾向は、相対含水率を湿気移動の駆動力として、拡

散係数を評価した既往の研究⁴⁾と対応していた。セメント種類で比較すると、BB、N、L・Mの順に見かけの拡散係数は大きくなる結果であった。このことから、BBの湿気移動速度は、他のセメントと比較して総じて速い傾向にあり、乾燥しやすい可能性が示唆された。なお、本検討における乾燥開始時の見かけの拡散係数は、3～6cm²/dayであり、含水率や相対含水率を駆動力とした既往の研究結果^{4),7)}の拡散係数(0.5～5cm²/day)と比較して、概ね近い値であった。

図-8に、NおよびMについて、乾燥面からの深さ別(1cm, 3cm, 5cm)に推定した見かけの拡散係数を示す。いずれのセメントも深さ5cm, 3cm, 1cmの順に見かけの拡散係数は大きくなる傾向が認められた。これは、コンクリートの内部に行くほど、乾燥による湿気移動だけでなく、水和の進行によって生じる内部の自己乾燥が相対湿度の低下に影響したためと考えられる。また、表層に近い部分は乾燥の影響を大きく受けるものの、内部の水分が表層へ移動する乾燥過程で水分が供給されることによって、相対湿度が比較的緩やかに低下したことが要因として挙げられる。これらについては、相対湿度と水和率や結合水量に関する水和生成物の分析を行うなど詳細な考察が必要である。また、湿気移動を検討する対象を薄い壁部材とする場合には深さ1cm未満の極表層部分、マスコンクリートとする場合には深さ10cm以上の内部の見かけの拡散係数についても明らかにする必要があると思われる。

図-9、図-10は、NおよびMについて、乾燥期間28日、91日、182日、364日までの測定データを基に推定した見かけの拡散係数を示したものである。乾燥期間が短いほど見かけの拡散係数は相対湿度80%以上で総じて大きくなる傾向が認められた。これについては、脱型直後の乾燥によって生じた大きな湿度勾配の影響や乾燥を開始した材齢7日時点における水饱和度が低く、内部空隙が十分に緻密化されていないことによって、水分の逸散量が多くなり、見かけの拡散係数が大きくなった可能性が考えられる。また乾燥期間が長くなるほど、時間の経過に伴う内部からの湿気移動によって湿度勾配が小さくなり、見かけの拡散係数が小さくなったものと推察される。

ただし、乾燥期間と見かけの拡散係数の関係はセメント種類によって異なり、Nでは乾燥期間91日、182日、364日の見かけの拡散係数に大きな差はなかったが、Mの見かけの拡散係数は、乾燥期間28日、91日、182日、364日の順で明確に小さくなる結果であった。これにはセメントの水和速度が起因しており、Nは乾燥期間91日程度までで水和の進行が概ね収まるのに対し、低発熱系セメントのMは長期的に水和が進行するために、内部の空隙構造などが安定するまでに期間を要するものと考え

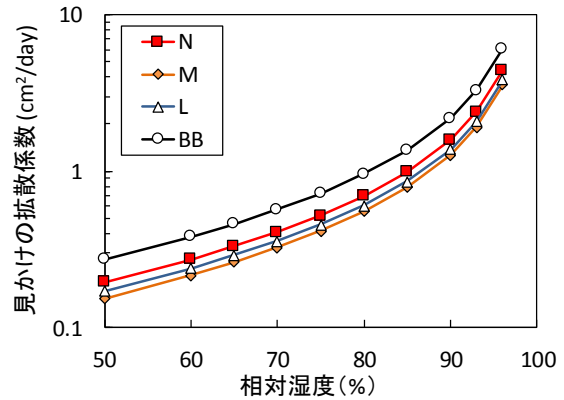


図-7 見かけの拡散係数(セメント種類)

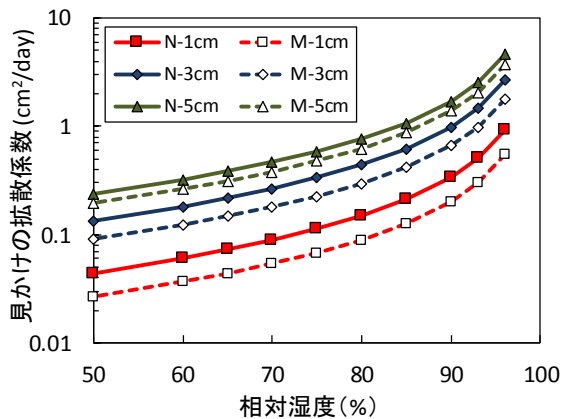


図-8 見かけの拡散係数(深さ)

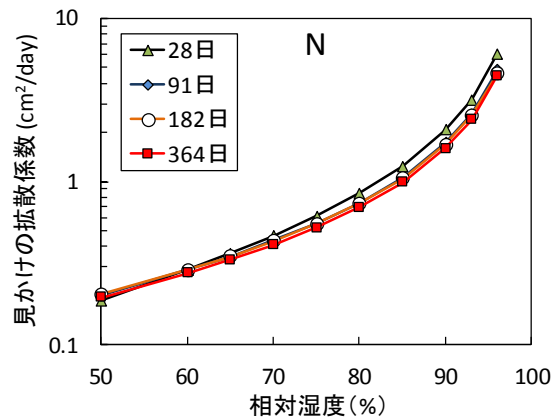


図-9 普通セメントの見かけの拡散係数(乾燥期間)

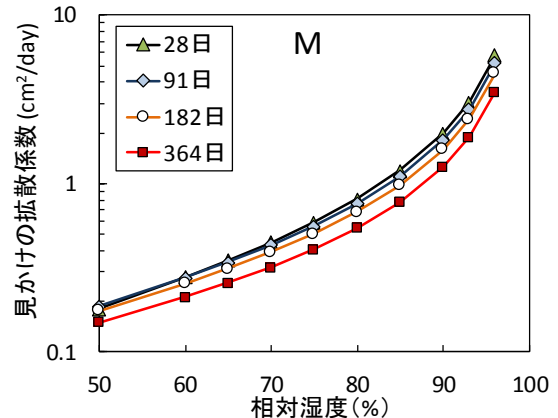


図-10 中庸熱セメントの見かけの拡散係数(乾燥期間)

られる。水和の進行が見かけの拡散係数に及ぼす影響については、乾燥開始材齢が変化した場合なども含め、今後より詳細に検討したい。

5. まとめ

本研究では、直径 10cm、厚さ 1cm に切り出した円盤状の供試体を用いてコンクリート表層から深さ 1cm～5cm の内部を模擬し、乾燥過程におけるコンクリート内部の相対湿度に及ぼすセメント種類の影響を実験的に把握した。また、測定結果に拡散方程式ならびにボルツマン変換を適用し、見かけの拡散係数を推定した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 20°C・R.H.60%の環境下におけるコンクリート内部の相対湿度は、乾燥面に近いほど低くなった。また、深さ 1cm の相対湿度が深さ 2cm～5cm より明らかに低くなるものの、深さ 3cm～5cm の相対湿度には大差がなかった。
- (2) コンクリート内部の湿気移動速度について、ボルツマン変換により推定した見かけの拡散係数は、セメント種類にかかわらず、相対湿度 80%以上で顕著に増加する傾向であった。また、普通セメントの見かけの拡散係数と比較して、高炉セメント B 種では大きく、中庸熱セメント、低熱セメントでは小さい結果であった。
- (3) 乾燥期間が見かけの拡散係数に及ぼす影響は、乾燥期間が短いほど相対湿度 80%以上の条件下で顕著に大きくなった。また乾燥面から深いほど、見かけの拡散係数は大きくなる傾向であった。
- (4) 今回実施した円盤法によるコンクリート内部の相対湿度の測定値は、コンクリートに埋め込んだパイプ内の相対湿度を測定した場合(埋設法)と比較して、若干高い傾向であったが、その差は概ね 5%程度であった。

参考文献

- 1) 籠橋忍, 伊藤佑樹, 堀部謙, 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
- 2) 日本コンクリート工学会: コンクリートの収縮特性評価およびひび割れへの影響に関する調査委員会報告書, pp.127-132, 2012.8

- 3) 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
- 4) 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, 第 316 号, pp.145-152, 1981.12
- 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, 第 420 号/V-13, pp.61-69, 1990.8
- 6) 朴同天, 兼松学, 野口貴文: 断面補修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, 第 18 巻, 第 2 号, pp.71-81, 2007.5
- 7) 藤原忠司, 石田宏, 佐藤嘉一郎, 小西俊之: コンクリート中の水分移動に及ぼす環境条件および配合の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.223-228, 1989.7
- 8) 寺本篤史, 森元悠太, 大久保孝昭: 湿度分布を有するコンクリート内部の水分移動に及ぼす収縮低減剤の影響, 土木学会第 73 回年次学術講演会講演概要集, V-593, pp.1185-1186, 2018.8
- 9) 伊代田岳史, 松崎晋一朗, 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
- 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, pp.250-265, 2014.8
- 11) 橋田浩, 田中享二, 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, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 412 号, pp.1-8, 1990.4
- 12) Mateusz Wyrzykowski, Pietro Lura: Effect of relative humidity decrease due to self-desiccation on the hydration kinetics of cement, *Cement and Concrete Research*, Vol.85, pp.75-81, 2016.4
- 13) 藤原忠司, 佐藤嘉一郎, 小西俊之: 乾湿に伴うコンクリート内部での水分移動について, セメント技術年報, Vol.42, pp.427-430, 1988.5
- 14) Chujiro Matano: On the Relation between the Diffusion-Coefficients and Concentrations of Solid Metals, *Japanese Journal of Physics*, Vol.8, pp.109-113, 1933.1