

論文 膨張材・収縮低減剤を用いたコンクリート内部の水分移動特性および収縮特性に関する検討

大野 拓也*1・三谷 裕二*2・丸山 一平*3

要旨：本研究では、厚さ 10mm の円盤状のコンクリート供試体を重ね合わせた小型試験体を用いて、乾燥過程における各深さの含水率および乾燥収縮ひずみを測定し、膨張材および収縮低減剤がコンクリートの水分移動特性や乾燥収縮特性に及ぼす影響を評価した。その結果、普通コンクリートと膨張材コンクリートの含水率に基づく拡散係数は同程度であるのに対して、収縮低減剤コンクリートは小さくなることが明らかとなった。また、乾燥面から深さ 1cm 程度より内部における含水率と乾燥収縮ひずみの関係は、いずれのコンクリートも概ね一義的に表現できる傾向が認められた。

キーワード：含水率, 水分移動, 乾燥収縮, 収縮低減剤, 膨張材, 拡散係数

1. はじめに

コンクリート構造物の高耐久化志向の高まりやセメント、混和材、骨材などコンクリート材料および配(調)合の多様化の観点から、収縮ひび割れ制御への要求が益々高まっている。

近年では、数値解析技術の進歩と相まって、コンクリート部材内の温度分布だけでなく、含水率分布、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に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での応力分布を計算できるようにするため、収縮ひび割れの発生をより高い精度で予測できることが期待されている。

乾燥過程におけるコンクリート内部の含水率や相対湿度の分布予測については、それらを水分移動の駆動力とした非線形拡散方程式を適用した研究^{3)~6)}が行われてきた。一方、材料面からのひび割れ対策としては膨張材、収縮低減剤、低収縮型セメントなどが用いられており、それらの使用によってコンクリート内部の水分移動特性は変化すると考えられるが、その点に関する知見は少なく、また、コンクリート内部の水分状態と乾燥収縮ひずみの関係を検討した事例もほとんどないのが実状である。

本研究では、普通セメントを用いたコンクリート(普通コンクリート)、普通コンクリートに膨張材あるいは収縮低減剤を用いたコンクリートについて、直径 100mm、厚さ 10mm の円盤供試体を組み合わせた小型試験体を用いて、乾燥過程におけるコンクリート内部の含水率および

表-1 使用材料

材料	記号	物理的性質など
セメント	C	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
膨張材	EX	低添加型石灰系膨張材/ 密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3450cm ² /g
収縮低減剤	SR	低級アルコールアルキレンオキシド付加物
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	茨城県桜川市産碎石(碎石 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

表-2 コンクリートの配(調)合

記号	W/B* (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
			W	C	EX	SR	S	G
N	50	45	169	338	-	-	788	984
NEX			169	318	20	-	788	984
NSR			163	338	-	6	788	984

*B=C+EX

乾燥収縮ひずみを測定し、水分移動特性および乾燥収縮特性に及ぼす膨張材および収縮低減剤の影響を検討した。また、得られた結果に拡散方程式および Boltzmann-Matano 法⁷⁾を用いて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を用い、膨張材には低添加型石灰系膨張材、収縮低減剤には低級アルコール系の収縮低減剤を用いた。

*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 大学院環境学研究所 教授・博士(工学) (正会員)

表-2にコンクリートの配(調)合を示す。水結合材比は50%、細骨材率は45%とし、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート(N)、Nのセメントに膨張材20kg/m³を内割置換したコンクリート(NEX)、Nの単位水量の一部に収縮低減剤6kg/m³を内割置換したコンクリート(NSR)の3水準で行った。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空気量調整剤の添加量を変化させた。

2.2 作製試験体および乾燥収縮ひずみの測定方法

図-1に作製試験体の概要を示す。本試験では、あらかじめ10mmの厚さに切断した円盤状の小型供試体を5枚重ね合わせ状態で一面乾燥し、所定の乾燥期間での各円盤供試体の質量および直径方向の長さを測定することで乾燥面から深さ5cmまでの含水率分布および乾燥収縮ひずみ分布を取得した。なお、試験体は各水準で2体作製し、含水率や乾燥収縮ひずみは2体の平均値を用いた。

コンクリートの練混ぜは、20℃・80% R.H.の室内で行い、φ100×200mmの円柱供試体を作製後、20℃環境下で封緘養生した。材齢7日において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枚切り出した。なお、切断時間を極力短くすること、および切断後は直ちに表面の水分を拭き取ることで、湿式カッターによる供試体が吸水する影響をできる限り排除した。各円盤供試体は質量を測定した後、図-2のように4台のレーザー変位計が設置された長さ変化測定装置⁸⁾を用い、最初の測定時に円盤供試体をピンに押し当てた状態で照射位置に印を付けて測定点を決め、基長を測定した。質量および長さを測定した後、5枚の円盤供試体を重ね合わせた状態で一面乾燥となるように、側面と一端面をポリ塩化ビニリデン製のラップで巻いた上からアルミ箔粘着テープで封緘した。重ね合わせた試験体は、20℃、60±5% R.H.の室内で保管し、乾燥期間7、14、28、56、91、182日でアルミ箔粘着テープ、ラップを剥がして各円盤供試体を取り出し、質量および長さを測定後、直ちに同様の工程で一面乾燥の状態に戻した。円盤供試体の長さには直交する2本の直径方向の長さの平均値を用い、乾燥開始以降の長さ変化率を乾燥収縮ひずみとした。なお、円盤供試体の長さ変化率は直径100mm、厚さ10mmのインバー鋼(熱膨張率:0.5×10⁻⁶/℃)との長さの差より算出した。乾燥期間182日の測定が終了した後、105℃の乾燥炉に24時間保管し、絶乾質量を求めた。なお、各乾燥期間での円盤供試体取り出しから再び一面乾燥に戻すまでの測定過程において、測定以外の時間に円盤供試体が気中に曝されないようにアルミ製の封緘容器に保管して行った。

コンクリート内部の含水率分布を計測する方法とし

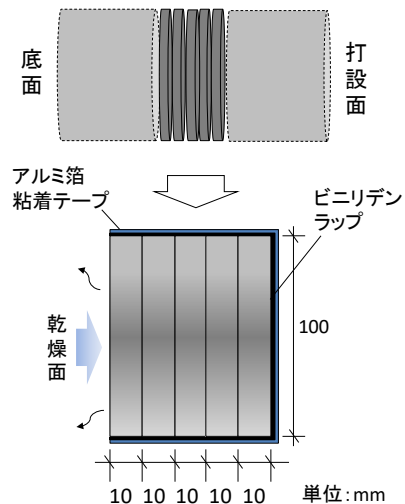


図-1 作製試験体の概要

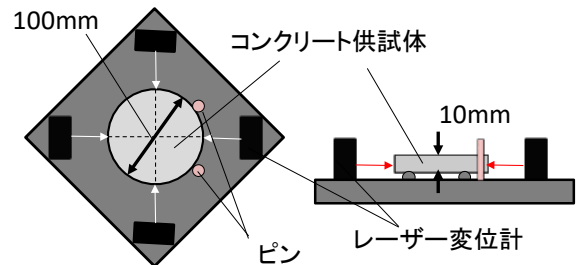


図-2 乾燥収縮ひずみの測定方法⁸⁾

て、藤原ら⁹⁾は1)あらかじめ切断する方法、2)割裂による方法について比較しており、1)あらかじめ切断する方法は、水分移動による乾燥の進行が遅くなると報告している一方で、乾燥面からの距離と含水率の分布は最も滑らかであり、2)割裂による方法と同様の傾向を示していると報告している。さらにコンクリートの場合、粗骨材の影響で厚さ10mmに割裂するのが困難である点や測定材齢分の供試体を作製することによる個体差の影響も含まれてくることから、本研究においては、1)あらかじめ切断する方法にて評価することとした。

3. 実験結果

3.1 含水率

図-3に各円盤供試体の含水率と乾燥期間の関係を示す。コンクリートの含水率 $w_{i,t}$ は(1)式より算出した。

$$w_{i,t} = \frac{m_{i,t} - m_{i,105}}{\rho \cdot V_i} \quad (1)$$

ここで、 $w_{i,t}$:各円盤供試体の含水率(g/g)、 $m_{i,t}$:乾燥期間t日での質量(g)、 $m_{i,105}$:絶乾質量(g)、 ρ :水の密度(g/cm³)、 V_i :円盤供試体の体積(cm³)である。

コンクリート内部の含水率は、時間の経過に伴って緩やかに低下する傾向を示し、乾燥面からの深さ0~1cmは乾燥直後から急激に低くなった。5枚の円盤供試体の

乾燥開始時の初期含水率(w_0)の平均値は、NSRがNおよびNEXより1%程度低かった。これについては、収縮低減剤を単位水量の一部として使用したことによってNSRの単位水量が見かけ上少なくなった影響や収縮低減剤の使用によって水和生成物表面の親水性、BET比表面積を低下させ、水の吸着サイトを低減させた可能性¹⁰⁾が考えられる。なお、いずれのコンクリートも乾燥期間182日時点で深さ1cmより内部は平衡に達しておらず、長期的に質量が減少する傾向が認められた。

図-4に各円盤供試体の乾燥期間7, 28, 91, 182日時点における相対含水比(初期含水率に対する乾燥期間7, 28, 91, 182日の含水率の比(w/w_0))と乾燥面からの深さの関係を示す。乾燥期間で比較すると、いずれのコンクリートでも乾燥期間7, 28日の比較的早期では乾燥面付近の勾配が大きくなったが、時間の経過に伴って水分移動が進行することにより、徐々に勾配が緩やかになる傾向を示した。膨張材および収縮低減剤を使用した影響を見ると、NEXの相対含水比は、乾燥期間や乾燥面からの深さにかかわらず、Nと同程度であった。NSRについては、深さ2cmより内部において、Nより総じて高くなり、その傾向は乾燥面から深いほど顕著であった。これについては、セメント硬化体中に存在する水の表面張力が低下したことや収縮低減剤が水和生成物表面に存在することで水分移動・吸着を阻害した可能性が考えられる^{10), 11)}。

3.2 乾燥収縮ひずみ

図-5に各円盤供試体の乾燥収縮ひずみと乾燥期間の関係を示す。乾燥収縮ひずみはいずれの水準も含水率と同様に乾燥面に近いほど大きくなる傾向を示した。図中には、本研究と同一配(調)合のコンクリートのR.H.60%環境下における乾燥収縮ひずみ(乾燥開始材齢7日まで封緘養生)を100×100×400mm供試体で測定した結果を点線で併記している。いずれの水準も、乾燥面からの深さ0~2cmのひずみに近い挙動となる傾向を示した。乾燥期間182日における5枚の円盤供試体の乾燥収縮ひず

みの平均値と100×100×400mm供試体の結果を比較すると、5枚の平均値は100×100×400mm供試体より5~10%程度小さくなる傾向を示した。これについては、今回作製した試験体の体積表面積比が100×100×400mm供試体より約2倍大きく、乾燥の進行速度が遅くなったためと考えられるが、同一のV/Sであっても円柱供試体の乾燥収縮ひずみは角柱供試体より大きくなることが報告されており¹²⁾、これらが複合的に生じたものと推察される。乾燥期間182日時点での5枚の平均ひずみは、N, NEX, NSRでそれぞれ -650×10^{-6} , -580×10^{-6} , -520×10^{-6} であり、NEX, NSRの乾燥収縮ひずみはNよりそれぞれ

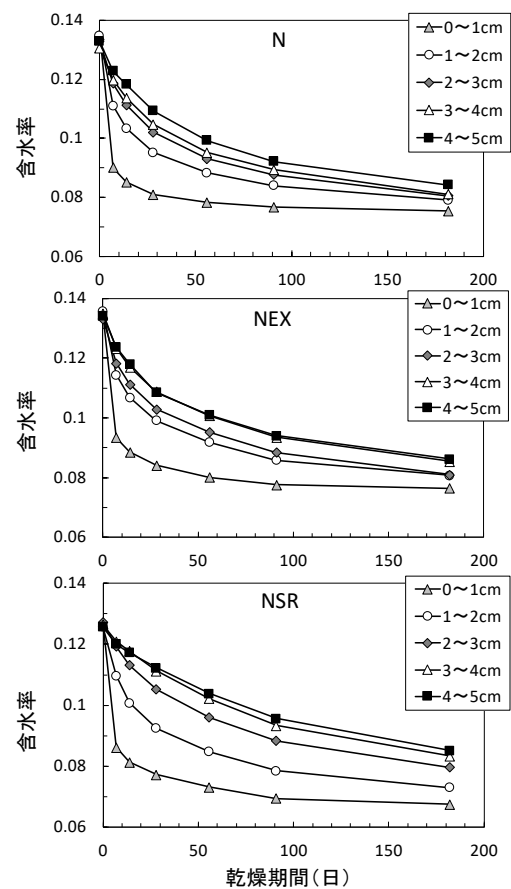


図-3 含水率の経時変化

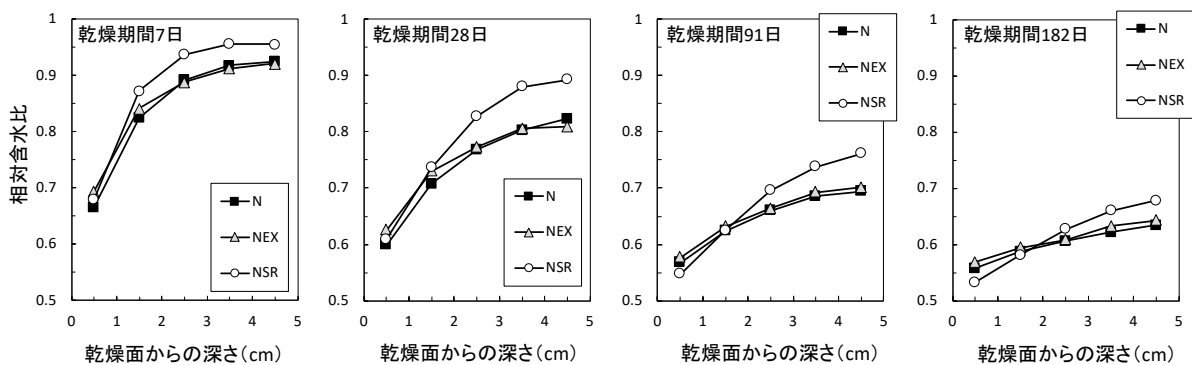


図-4 相対含水比(w/w_0)の分布

10%, 20%程度小さかった。既往の研究でも無拘束試験体で測定した膨張材コンクリートの乾燥収縮ひずみは、普通コンクリートより小さいことが報告されている¹³⁾。

図-6 に乾燥面からの深さと乾燥収縮ひずみの関係について、乾燥期間7, 28, 91, 182日の結果を示す。乾燥期間7日ではいずれのコンクリートも乾燥面からの深さ0~2cmで収縮し、これより内部ではほとんど収縮していなかったが、乾燥期間28日以降では、乾燥の進行に伴って内部の収縮が進行し、乾燥面からの深さに対してほぼ直線となっていた。乾燥面からの深さに対する乾燥収縮ひずみの変化量をNと比較すると、NEXは乾燥期間7日では小さいものの、乾燥期間28日以降ではほぼ同等であった。一方、NSRは乾燥期間7, 28日では小さいが、乾燥期間91, 182日は若干大きくなる傾向が認められた。

3.3 含水率と乾燥収縮ひずみの関係

図-7 に含水率と乾燥収縮ひずみの関係を示す。いずれのコンクリートも含水率が低いほど乾燥収縮ひずみが増大し、深さ1cmより内部において概ね同一曲線上にプロットされ、一義的な関係にある傾向が認められた。深さ0~1cmについては、総じて深さ1~5cmより下側にプロットされ、同一含水率での乾燥収縮ひずみは明確に小さくなっていた。これについては、乾燥の影響によって表層と内部の水和反応の程度が異なり、乾燥収縮が作用する水和物の比表面積・量、空隙構造が異なったためと推察され、深さ0~1cmは乾燥の影響をより受け易いと考えられる。NSRについては深さ1~2cmにおいても僅か

に乾燥収縮ひずみが小さくなっており、これは乾燥開始材齢7日の水和の進行速度がNおよびNEXより遅かったためと推察され、今後は乾燥開始材齢を変化させた場

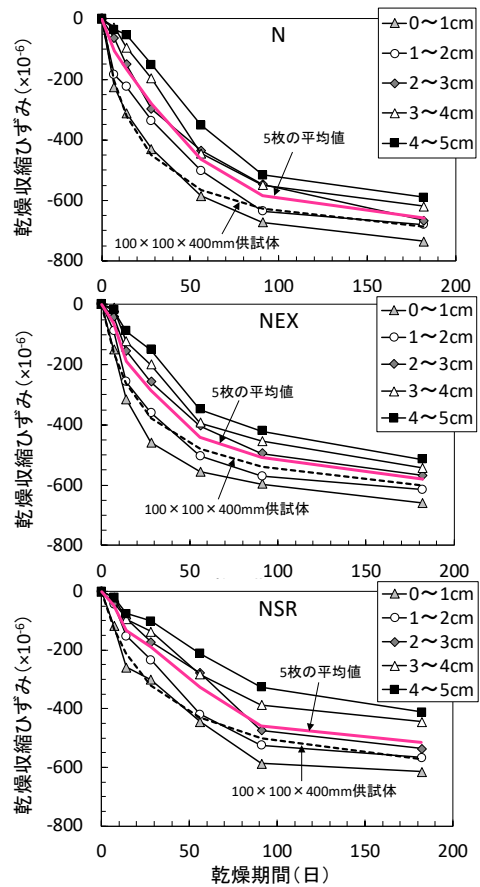


図-5 乾燥収縮ひずみの経時変化

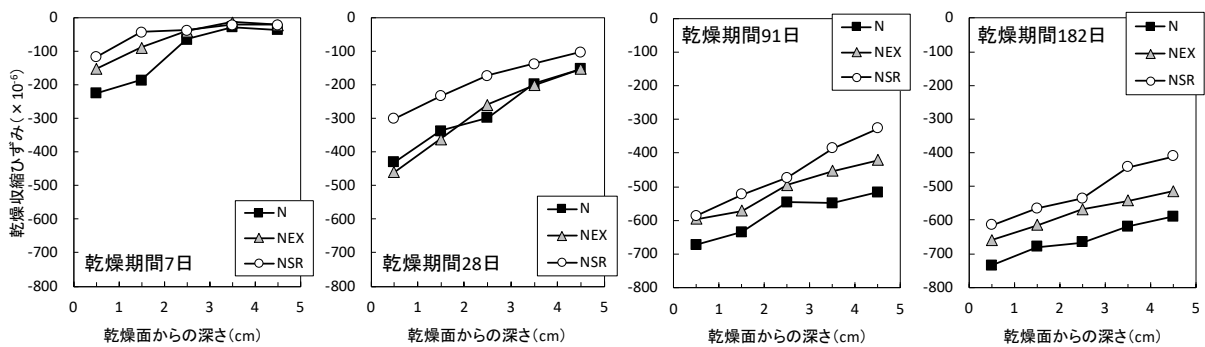


図-6 乾燥収縮ひずみの分布

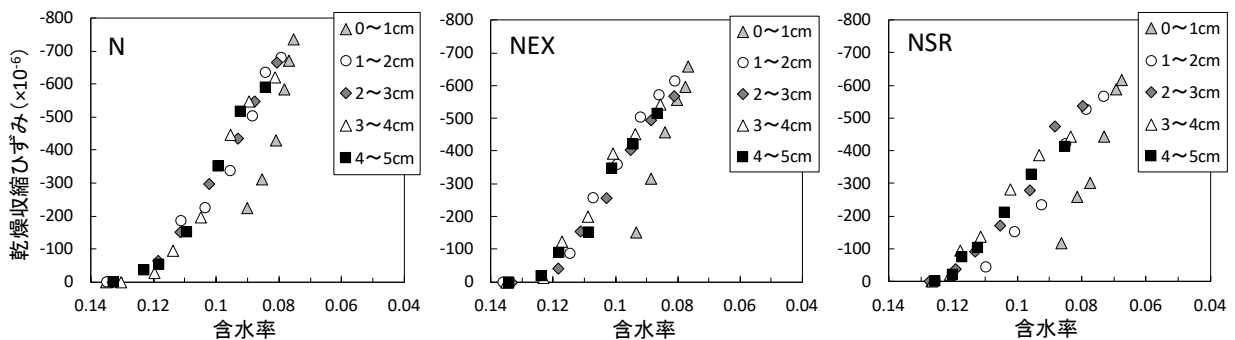


図-7 含水率と乾燥収縮ひずみの関係

合についても検討していきたい。

含水率と乾燥収縮ひずみの関係を N, NEX, NSR で比較すると、N および NEX の傾きはほぼ同程度であるのに対し、NSR は N より小さく、その傾向は乾燥期間が長くなるほど顕著であった。これについては、乾燥による水分逸散が進行した長期において、自由水中の収縮低減剤の濃度が高まることで収縮低減剤の効果が大きくなった可能性等が考えられる¹⁴⁾。

4. 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、非定常法の質量法に基づく Boltzmann-Matano 法⁷⁾を用いた拡散係数の検討^{4)~6)}が行われてきた。本研究では含水率を駆動力とし、同様の手法により拡散係数を推定・評価した。次元の非線形拡散方程式は(2)式で表される。

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (2)$$

ここで、 w : 含水率(g/g), t : 乾燥期間(day), D : 拡散係数(cm²/day) である。本研究で設定した一方向の水分移動の場合、含水率は、(3)式に示す変数 λ を用いて、ボルツマン変換を行うと、(2)式より拡散係数 $D(w)$ は、(4)式で表される。

$$\lambda = x/\sqrt{t} \quad (3)$$

$$D(w) = \frac{1}{2} \int_w^{w_0} \lambda dU / \frac{\partial w}{\partial \lambda} \quad (4)$$

ここで、 λ : ボルツマン変数(cm/day^{0.5}), x : 乾燥面からの距離(cm), t : 乾燥期間(day), w_0 : 初期含水率(g/g), である。(4)式によって拡散係数を算出するためには、実験で得られた λ と w の関係を積分可能な回帰式で表現し、(4)式に代入する必要がある。本研究では、朴ら¹⁵⁾が提案する(5)式を回帰式に用いることとした。

$$w = w_0 \left\{ 1 - \frac{a}{(\lambda + b)^2} \right\} \quad (5)$$

ここで、 a, b : 曲線の形状によって決まる定数である。

4.2 ボルツマン変数と含水率の関係

図-8 に、N, NEX, NSR のボルツマン変数と含水率の関係を示す。同図には乾燥期間 182 日までの結果を用いて(5)式で最小二乗回帰した曲線を併記している。いずれの水準においても、ボルツマン変数と含水率は高い相関があり、(5)式で表現できるものと考えられる。

4.3 拡散係数の推定

図-9 に、前述の回帰式を用いて推定した N, NEX, NSR の拡散係数を示す。拡散係数はいずれのコンクリートにおいても含水率が高いほど大きくなる傾向を示した。本研究の乾燥開始付近の拡散係数は、3~10cm²/day であ

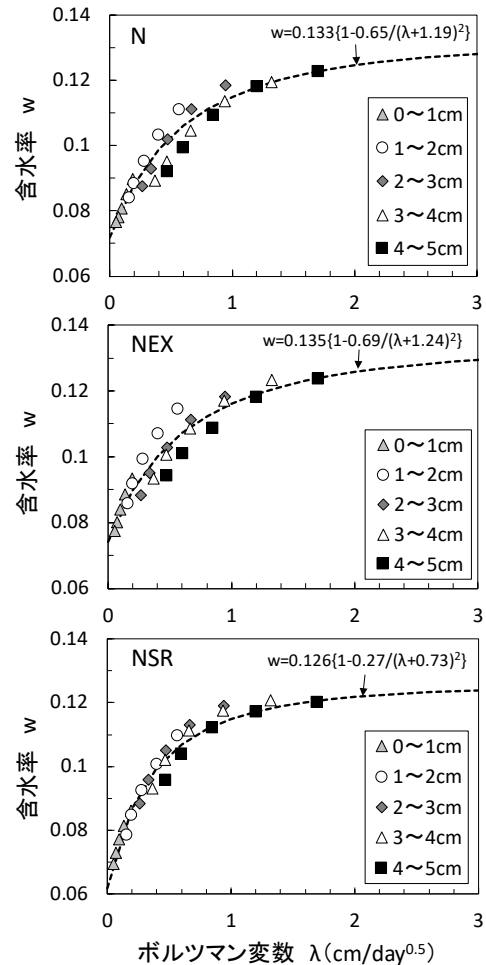


図-8 ボルツマン変数と含水率の関係

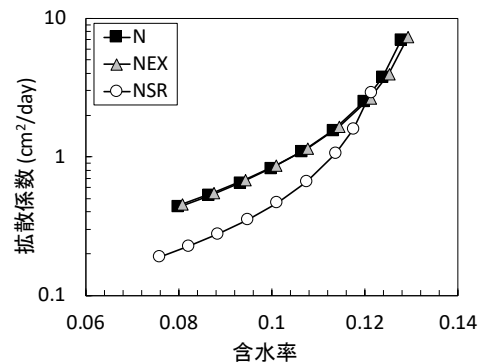


図-9 拡散係数の比較

り、コンクリートに関する既往の検討結果^{4), 6)}の拡散係数(0.5~5cm²/day)と比較すると、概ね近い値になっていた。各水準間で拡散係数を比較すると、NEX は N と同程度、NSR は明確に小さくなっており、NSR の水分移動速度は N より遅い傾向にあり、乾燥しにくい傾向が認められた。既往の研究においても収縮低減剤を用いたコンクリートおよびセメントペーストの拡散係数は、未使用のものより小さくなることが報告されており¹⁶⁾、本研究結果と対応していた。なお、本研究において N, NEX の拡散係数は大差なかったが、膨張材コンクリートの細孔

径・量は拘束条件によって変化することが報告されていることから¹⁷⁾、今後は拘束の影響についても検討する必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究では、厚さ 10mm の円盤供試体を用いて、乾燥過程におけるコンクリート内部の含水率分布および乾燥収縮ひずみ分布を測定することにより、水分移動特性および乾燥収縮ひずみに及ぼす膨張材、収縮低減剤の影響を実験的に把握した。また、得られた結果に拡散方程式および Boltzmann-Matano 法を用いて拡散係数を推定した。得られた知見を以下に示す。

- (1) コンクリートの含水率は、乾燥面に近いほど低くなった。初期含水率に対する含水率の比(相対含水比)は、乾燥面からの深さや乾燥期間によらず、膨張材コンクリートが普通コンクリートと同程度であり、収縮低減剤コンクリートは深さ 2cm より内部において普通コンクリートより高かった。
- (2) 含水率を基に水分拡散係数を推定した結果、普通コンクリートの拡散係数と比較して、膨張材コンクリートは同程度、収縮低減剤コンクリートは小さい結果であった。
- (3) 乾燥収縮ひずみは、乾燥面に近いほど大きく、乾燥面からの深さに対する乾燥収縮ひずみの変化量を比較すると、収縮低減剤コンクリートは乾燥期間 28 日までの比較的早期において普通コンクリートや膨張コンクリートより小さいが、長期的には普通コンクリートよりわずかに大きくなった。
- (4) 乾燥開始材齢 7 日のコンクリートにおける含水率と乾燥収縮ひずみの関係は、いずれのコンクリートも乾燥面から深さ 1cm 程度より内部において概ね一義的に表現できることが認められた。

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
- 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
- 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
- 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

- 5) 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, 第 668 号, pp.1737-1744, 2011
- 6) 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) Matano: *Japanese Journal of Physics*, Vol.8, pp.109-113, 1932
- 8) 大野拓也, 三谷裕二, 丸山一平: 相対湿度および乾燥開始材齢がコンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.453-458, 2018
- 9) 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
- 10) 丸山一平, 岸直哉: 収縮低減剤の作用機構, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 645 号, pp.1895-1903, 2009
- 11) 後藤孝治, 酒井公式, 佐藤健: セメント硬化体の乾燥収縮を低減する有機質混和剤, セメント・コンクリート, No.442, pp.9-15, 1984
- 12) Hamza Samouh, Emmanuel Roziere, Ahmed Loukili: Shape effect on drying behavior of cement-based materials: Mechanisms and numerical analysis, *Cement and Concrete Research*, Vol.110, pp.42-51, 2018
- 13) 三谷裕二, 石井祐輔, 谷村充, 丸山一平: 膨張コンクリートによるひび割れ低減効果の定量評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.430-435, 2012
- 14) 佐久田昌治, 大野定俊, 斎藤俊夫, 嵩英雄: コンクリート乾燥収縮低減剤の実用化に関する研究 (その 2. 収縮低減剤の作用機構に関する一考察), 日本建築学会学術講演梗概集(関東), 第 59 巻, pp.489-490, 1984
- 15) 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
- 16) Gaurav Sant, et al.: Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on Moisture Absorption in Cementitious Materials at Early Ages, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.22, No.3, pp.277-286, 2010
- 17) 佐久間隆司, 辻幸和, 佐竹伸也: 膨張コンクリートの内的拘束膨張ひずみと組織構造, セメント・コンクリート論文集, No. 60, pp.257-263, 2006