

不飽和コンクリートの吸水過程に及ぼす 水セメント比の影響

柳 博文¹・福原輝幸²・松岡 茂³

¹正会員 鉄建建設(株) 技術研究所 土木技術開発G (〒286-0825成田市新泉9-1)

²正会員 工博 福井大学教授 工学部建築建設工学科(〒910-8507福井市文京3-9-1)

³正会員 工博 鉄建建設(株) 技術研究所 土木技術開発G (〒286-0825成田市新泉9-1)

コンクリートの耐久性を議論する上で、外的環境条件に呼応した熱・水分移動の予測は重要である。コンクリート母材中の水分移動は、一般的に不飽和状態で起こり、水分移動量はダルシー則に従うとされている。ダルシー則そのものは単純な拡散方程式ではあるが、式に含まれるパラメータは含水量に依存し非線形性が強いために、水分移動に関する予測は未だ不十分と考えられる。そこで本研究では、等温吸湿実験および毛管浸透実験を行い、水セメント比の違いによる吸水過程硬化コンクリートの水分特性曲線および水分分布を把握し、非定常法により不飽和透水係数および水分拡散係数と飽和度の関係を求めた。さらに、FEMによる不飽和浸透解析を行い、既往の研究結果と比較することでその妥当性を検証した。

Key Words : *unsaturated infiltration, moisture diffusivity, humidity, moisture transfer, capillary infiltration, water-cement ratio*

1. はじめに

21世紀の環境社会を見据えた時、土木資材の有効・再利用およびエネルギー節約はコンクリートに関しても適応されるべきである。コンクリートの廃棄物量抑制および長寿命化のためには、暴露されるコンクリートの外部環境条件とコンクリート内部の含水状態の関係を把握することが不可欠である。品質劣化をもたらすコンクリートの乾燥収縮、凍結融解、中性化、塩害などは物理的に観ると、不飽和多孔媒体中の質量移動に帰着するものである。この場合、基礎式の構築よりはむしろ、式に含まれる係数の非線形性が解析の制約を生み、結果に大きな影響を及ぼす。また、水分計測の困難さも解析の妥当性評価を難しくする一要因である。

最近では、福原、佐藤¹⁾によりコンクリート覆工の蒸発・乾燥を対象として、水蒸気移動を考慮した不飽和浸透解析がなされた。下村・前川ら²⁾は、コンクリートの細孔構造をモデル化し、乾燥収縮と水分逸散の解析を行い、液状水拡散係数や水蒸気拡散係数の含水率の依存性および乾燥収縮と水分移動の関係を議論した。しかしながら、コンクリート中の不飽和水分移動に関する物性値は、データが少ない

ためになお不明な点が多い。秋田ら^{3),4)}や藤原ら⁵⁾も乾燥、吸湿過程の実験から水分拡散係数と含水率の関係を求め、非線形水分拡散方程式の数値解析を行った。阪田・蔵本⁶⁾は、乾燥過程において水分逸散とひずみの関係について言及し、ひずみの生成機構および解析手法を報告した。また、外国においては、Lars Olof Nilsson⁷⁾やPhilajavaara⁸⁾が、乾燥過程の水分挙動から、水分拡散係数が含水率に依存して変化することを指摘し、相対湿度で介して間接的に水分移動を評価した。橋田・小池ら^{9),10)}もコンクリート打設直後の乾燥過程について、実験により水分拡散係数が相対湿度の関数で表されることを示した。

コンクリート中の水分移動は、乾燥蒸発(排水過程)および吸水(浸潤過程)が原因となって生じるが、前者に比べると後者の実験や解析例は少ない。今後、共同溝、地下鉄などのような地下水中に建設される地下構造物については、コンクリートの水分浸透は重要な問題になると考えられる¹¹⁾。秋田ら^{4),12)}は、乾燥過程、吸湿過程とも同一の手法で解析することができるが、吸水過程では毛管水移動が卓越するため異なる解析の取り扱いが必要であることを指摘している。例えば、乾燥・吸湿過程では、含水率100%における水分伝導率は定数として与えている

表-1 配合表

| W/C (%) | s/a (%) | Air (%) | 単位体積重量(kg/m ³) | | | |
|---------|---------|---------|----------------------------|-----|-----|------|
| | | | W | C | S | G |
| 30 | 45 | 4.5±1 | 165 | 550 | 728 | 901 |
| 50 | 45 | 4.5±1 | 165 | 330 | 811 | 1003 |
| 70 | 45 | 4.5±1 | 165 | 236 | 845 | 1047 |

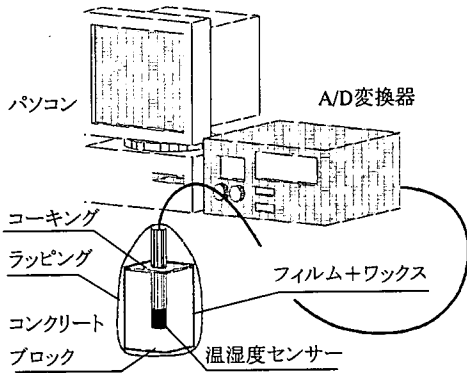


図-1 等温吸湿実験装置の概要

が、吸水過程では、水分伝導率の時間依存性を指摘している。つまり、吸水過程では吸水面からメニスカスまでの距離に応じて水分伝導率が変化することを示唆し、さらに細孔径分布を考慮した毛管作用に基づく浸透解析にも言及している。また、解析上重要となる相対含水率（飽和度）と相対湿度の関係についての資料が十分でないことや配合等の検討の必要性が指摘されている。筆者ら¹³⁾も以前、吸水過程の実験・解析を行ったが、それらは単一配合の供試体を対象としたものに限られていた。

そこで、本研究では、硬化コンクリートの不飽和特性（不飽和透水係数および毛管水頭と飽和度の関係）をより明確にして実験的な方法論の妥当性と解析手法の信頼性の検証を行うために、今回水セメント比の差異による相対湿度、水分分布および浸透量の実験データを増やし、その違いを調べた。その結果を基に、非定常法により不飽和透水係数および水分拡散係数と飽和度の関係を求め、この理論モデルの妥当性を示すとともに、他の実験結果への適応を試み、その汎用性の高さを検証した。

2. 実験方法

(1) 等温吸湿実験

筆者らは、すでに飽和度 S_r と毛管水頭 ψ との関係（水分特性曲線）を明らかにする目的で等温吸湿実験を行っている¹³⁾。本実験では、供試体の空隙率

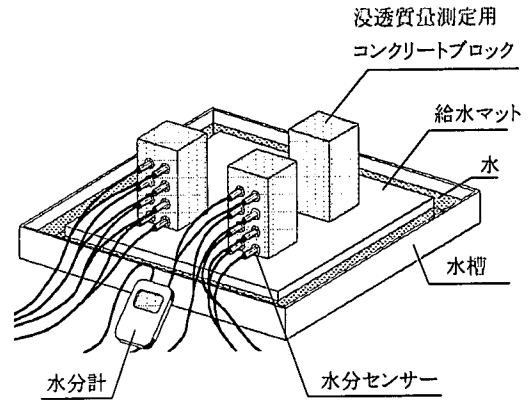


図-2 毛管浸透実験概要

（供試体に含まれる最大吸水量）を事前に求めた後、吸水過程の中で供試体の目標飽和度 S_r （目標供試体質量）まで吸水させ、各 S_r に対する供試体内の相対湿度 $RH (=P_v/P_{vs}, P_v$: 蒸気圧, P_{vs} : 温度 T における飽和蒸気圧) および温度 T を測定する。これらの測定値および3. (1)に記述するのケルビンの関係（式(1)）を用いて、水分特性曲線を明らかにする。

コンクリート配合表を表-1に示す。最大骨材寸法は20mmである。今回作成するコンクリート供試体は、単位水量を同一にして、水セメント比（W/C）を変えたものである。供試体は、100×100×400mmのコンクリート角柱から40×40×50mmに整形したものを多数作製する。供試体の中心に、深さ45mmの穴（φ14mm）を明け、温湿度センサー（株）ヴァイサラ製、RH精度±1~2%、温度精度±0.2℃）を挿入する。供試体の性質はできるだけ同じであることが必要なので、空隙率が同じになるような供試体を抽出する。空隙率は供試体を水槽内で約2ヶ月以上寝かせた後、温度105℃で炉乾燥させ、質量が一定になった時点での減質量から決定される。本実験におけるW/Cの平均空隙率は、W/C=30,50,70%に対してそれぞれ12.1, 13.3, 14.1%である。

図-1は実験装置の概要を表したものである。供試体を気密性の高いフィルム（ポリ塩化ビニリデン）で包み、その上からさらにワックス（蝋）を塗布して測定中の水分の乾燥を防止する。実験は、相対湿度 $RH=50\%$ 、温度 $T=25^\circ\text{C}$ の恒温恒湿室内で供試体が熱・水分的に平衡状態になるまで行われる。

(2) 毛管浸透実験

毛管浸透実験では、毛管浸透圧による供試体の増質量および飽和度 S_r の鉛直方向（浸透高さ z ）分布 $S_r(z)$ （以下、水分分布と呼称）の経時変化を測定する^{13),14),15)}。

コンクリートの配合は、等温吸湿実験と同様に

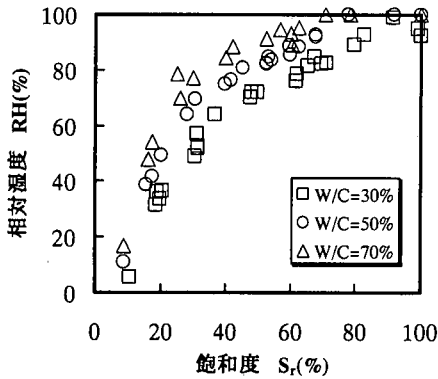


図-3 各W/Cにおける飽和度と相対湿度の関係

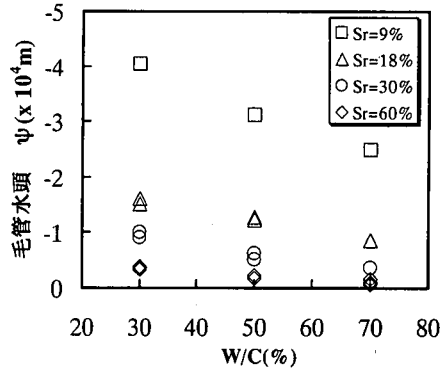


図-5 W/Cと毛管水頭の関係

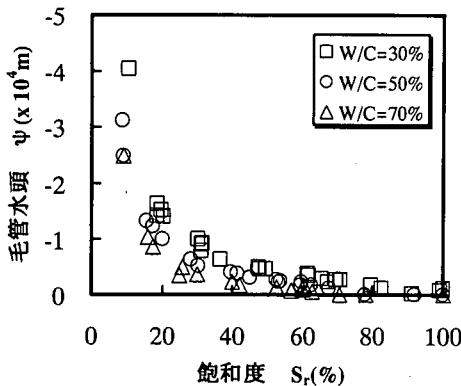


図-4 水分特性曲線

表-1に従う。角柱供試体の寸法は、 $60 \times 60 \times 100$ mmとし、実験は初期飽和度がほぼ同じである3つの角柱供試体を用いて、恒温恒湿室($T=25^\circ\text{C}$: $\text{RH}=50\%$)内で行われる。等温吸湿実験同様、3つの供試体の性質はできるだけ同じになるような供試体を選び、平均空隙率も等温吸湿実験の場合と同じにする。

実験装置の概要を図-2に示す。越川・萩原¹⁶⁾と同様に水槽の中に台を置いて吸水マットを敷き、その上に供試体を設置する。なお、水面は供試体底面に一致するように調整される。飽和度 S_r は、電気抵抗式水分計(ケット製 probe $\phi 7 \times 76$ mm)を用いて、前回筆者らが行ったと同じ方法¹³⁾で、水分センサーの平均出力とコンクリートサンプルの平均飽和度との間の較正曲線を基に決定される。また、水分分布を詳細に求めるため、および多数のprobeによる水分浸透の障害を避けるために2つの供試体が同時に使用される。測定高さは、1つは底面から8, 25, 45, 65mmとし、一方は15, 35, 55, 75mmとする。計測は浸透の進行に応じて30分から72時間の間隔で測定される。

3. 実験結果および解析

(1) 水分特性曲線

等温吸湿実験は任意の飽和度 S_r に対する相対湿度RHを求めるために行われ、供試体が熱・水分的に平衡状態になったところで両者の値を測定する。平衡状態に達するまでの時間は、W/Cや S_r によって違いはあるが3~4ヶ月程度である。毛管水頭 ψ を直接測定することはできないので、ここではRHと温度 T の測定値を式(1)のケルビンの関係に代入して、 ψ が決定される¹³⁾。

$$\psi = R_v T \ln(\text{RH}) / g \quad (1)$$

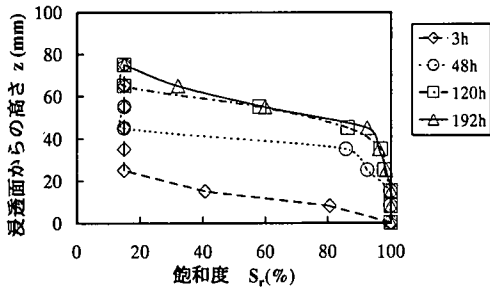
ここで、 R_v : 水蒸気のガス定数、 T : 温度(K)、 g : 重力加速度である。

図-3にW/Cの違いにおける飽和度 S_r と相対湿度RHの関係を示す。今回行われた実験の S_r の範囲においては、同じ S_r に対してW/Cが大きいほどRHは大きい。また、すべてのW/Cに対してRHは S_r の増加と共に上に凸のような分布形状で増大する。 S_r の増大に伴うRHの増加率は、 $S_r \leq 20\%$ の乾燥状態で特に大きく、それ以後緩やかな増加傾向にある。本実験によると、 $\text{RH}=100\%$ に達する S_r 値 S_{rs} はW/C=30%で $S_{rs} \approx 100\%$ 、W/C=50%で $S_{rs} \approx 80\%$ 、W/C=70%で $S_{rs} \approx 70\%$ であり、W/Cが大きいほど S_{rs} は小さくなるような傾向にある。

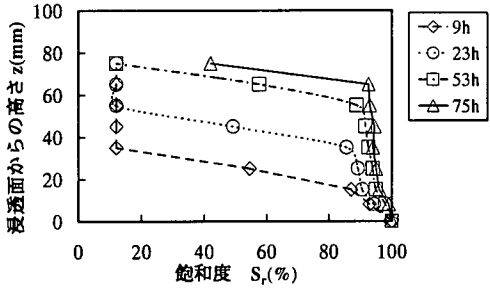
図-4は式(1)によって計算された水分特性曲線を示したものである。まず、毛管水頭の絶対値 $|\psi|$ と S_r の関係をみると、W/Cに関係なく $|\psi|$ は乾燥状態から $S_r \approx 20\%$ まで、 S_r の増加に伴って急激に減少する。特に、この傾向はW/Cが小さいほど明瞭となる。その後、 S_r の増大に伴う $|\psi|$ の減少は鈍化する。

次に、図-5に S_r をパラメータとしたときの ψ とW/Cの関係を示す。同図より、

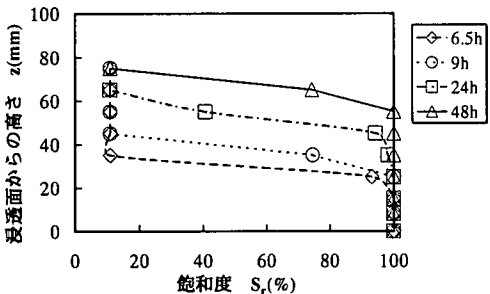
(i) 同じ S_r でもW/Cが小さいほど $|\psi|$ は大きい、



(a) W/C=30%



(b) W/C=50%



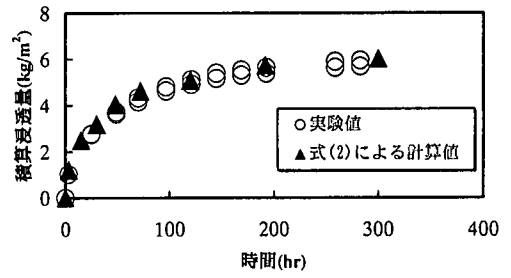
(c) W/C=70%

図-6 水分分布の経時変化

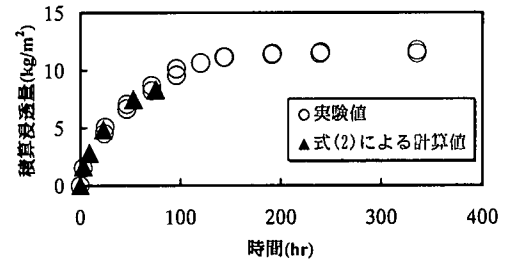
(ii) W/Cの違いによる ψ の変化量は S_r が小さいほど大きい、ことが判る。例えば、 $S_r=9\%$ 付近では、W/C=30%と70%の ψ の差は $1.5 \times 10^4 \text{ m}$ 、 $S_r=60\%$ 付近でも $2.8 \times 10^3 \text{ m}$ となっており、コンクリートの水分特性曲線へ及ぼすW/C（配合）の影響は大きい。

(2) 水分分布の経時変化および浸透特性

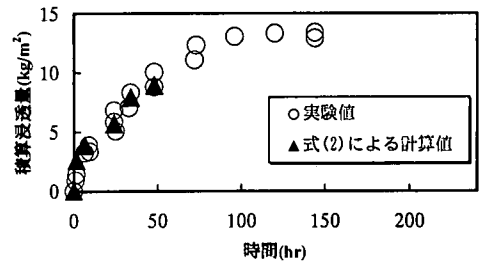
図-6(a), (b), (c)に各W/Cの水分分布の経時変化を示す。実験開始直前の S_r は、W/C=30%で15%、W/C=50%で12%、W/C=70%で11%であり、一樣な分布である。浸透の定性的挙動は、W/Cに関係なく類似しており、どの経過時間においても飽和度はある高さで急激に変化することが特徴的である。この結果はまた、目視による浸透前線の明瞭さからも支持される。浸透によって S_r が増大し始める時間は、底面から離れるにつれて遅くなるが、W/Cが大きいほどその浸透は速い。W/C=50および70%では、2



(a) W/C=30%



(b) W/C=50%



(c) W/C=70%

図-7 積算浸透量の経時変化

～3日後には計測範囲外($z=75 \text{ mm}$)まで浸透が進行している。それに対し、W/C=30%では8日目以降、浸透高さが65mm付近に留まり、上方への浸透は極めて遅くなる。

図-7(a), (b), (c)にそれぞれのW/Cにおける単位断面積当たりの積算浸透量 $Q(t)$ の経時変化を示す。 $Q(t)$ は任意の経過時間 t の水分分布 $S_r(z, t)$ および初期のそれ $S_r(z, 0)$ の積分値を用いて、次式で計算される。

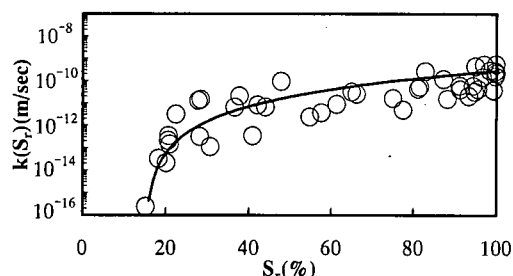
$$Q(t) = \rho \varepsilon \int_0^h \{S_r(z, t) - S_r(z, 0)\} dz \quad (2)$$

ここで、 ρ : 水の密度、 ε : 空隙率、 h : 供試体高さである。

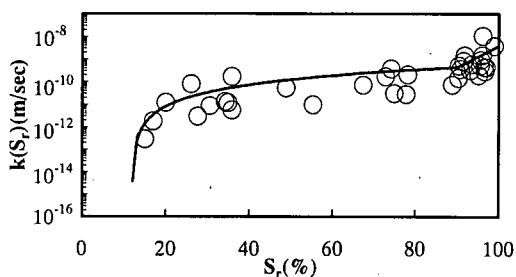
時間の経過につれて $Q(t)$ の時間増加率は減少し、最終的な $Q(t)$ はW/Cの増加とともに大きくなる。式(2)で求められた計算値(▲)と供試体の質量増分から求められた実験値(○)は良い一致が認められ、図-6に示される水分分布の信頼性は高いことが推察される。

表-2 $k(S_r)$ のパラメータ

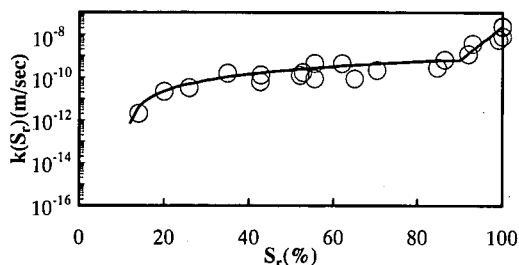
| W/C (%) | $k(S_n)$ (m/sec) | m | n | S_{rc} (%) | S_n (%) |
|---------|------------------------|------|------|--------------|-----------|
| 30 | 1.82×10^{-10} | 3.00 | 0.21 | 15 | 90 |
| 50 | 4.22×10^{-10} | 1.75 | 0.21 | 12 | 90 |
| 70 | 6.49×10^{-10} | 1.55 | 0.35 | 11 | 90 |



(a) W/C=30%



(b) W/C=50%



(c) W/C=70%

図-8 不飽和透水係数

(3) 非定常法による水分拡散係数と不飽和透水係数の決定

任意の飽和度に対する不飽和透水係数 $k(S_r)$ は、筆者らが提案した非定常法¹³⁾により算出される。その基礎となる水分移動方程式は、不飽和浸透におけるダルシー則を用いた質量保存則である。すなわち、Richards¹⁷⁾の式、

$$\epsilon \frac{\partial S_r}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(S_r) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \quad (3)$$

または、Klute¹⁸⁾の水分拡散方程式より、

$$\frac{\partial S_r}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(S_r) \frac{\partial S_r}{\partial z} \right) \quad (4)$$

水分拡散係数 $D(S_r)$ は、 $k(S_r)$ と水分特性曲線 (ψ と S_r の関係) から以下のように求められる¹³⁾。

$$D(S_r) = \frac{1}{\epsilon} k(S_r) \frac{\partial \psi}{\partial S_r} \quad (5)$$

ただし、高含水域のRH=100%における湿度センサーの出力は十分な精度が保証できないことを考慮して^{19),20)}、ここでは、W/C=50および70%については、 $S_r=100\%$ で $\psi=0$ となるように ψ と S_r の関係を近似して $\partial \psi / \partial S_r$ が求められる。

非定常法により、算出した不飽和透水係数 k と飽和度 S_r の関係 $k(S_r)$ を示したものが図-8(a), (b), (c)である。 $k(S_r)$ はW/C=30%で、 $10^{-16} \sim 10^{-9}$ m/sec、W/C=50および70%で $10^{-12} \sim 10^{-7}$ m/secの範囲で変化し、同じ S_r ではW/Cが大きいほど $k(S_r)$ は大きい。 $20\% \leq S_r \leq 90\%$ では、 $k(S_r)$ の傾きは緩やかである。 S_r が90%から100%に向かうにつれて、W/C=50および70%の場合は、 $k(S_r)$ が急激に増大する。それに対しW/C=30%では、高含水域での $k(S_r)$ の急増は認め難い。一方、 $S_r \leq 20\%$ の低含水域では、すべてのW/Cに対して $k(S_r)$ は S_r の減少とともに急減する。なお、 $k(S_r)$ の下限値については、今後検討する必要がある。図中の実線は、各W/Cにおける $k(S_r)$ を関数式で示したものである。前述したように、W/C=50および70%では、 $S_r=90\%$ 付近で $k(S_r)$ の分布形状が変化するために、ここでは $k(S_r)$ の折れ曲がり点の S_r を S_{rc} と表し、 $S_{rc}=90\%$ とする。

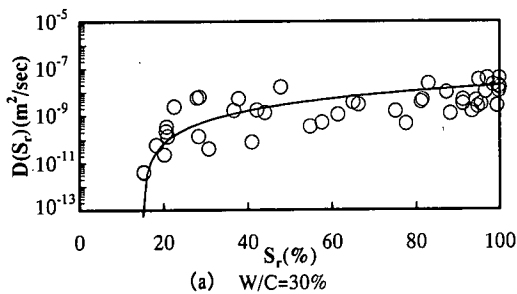
以下に、式(6)を用いて $k(S_r)$ を表す。

$$k(S_r) = k(S_n) \left(\frac{S_r - S_{rc}}{S_n - S_{rc}} \right)^m \quad (S_{rc} \leq S_r \leq S_n) \quad (6)$$

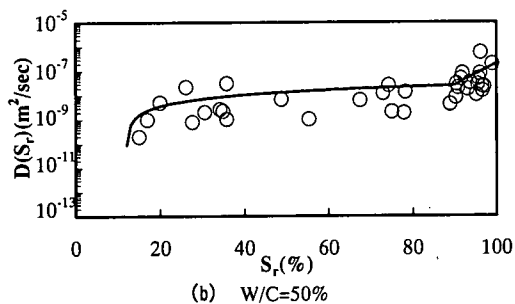
$$k(S_r) = k(S_n) \cdot e^{-n(S_r - S_n)} \quad (S_n \leq S_r \leq 100)$$

ここで、 $k(S_r)$ ：不飽和透水係数、 S_{rc} ：下限の飽和度、 m および n ：定数である。実験より決定された式(6)のパラメータの値を各W/Cごとに表-2に示す。

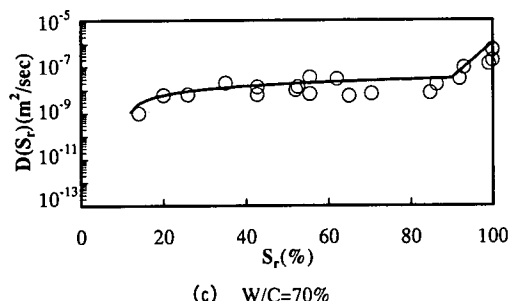
次に、不飽和透水係数 $k(S_r)$ と水分特性曲線を用いて式(5)より算出したW/C=30、50および70%における $D(S_r)$ を図-9(a), (b), (c)に示す。 $D(S_r)$ はW/C=30%で、 $10^{-12} \sim 10^{-7}$ m²/sec、W/C=50および70%で $10^{-10} \sim 10^{-6}$ m²/secの範囲で変化し、同じ S_r ではW/Cが大きいほど $D(S_r)$ は大きい。 $20 \leq S_r \leq 90\%$ では、 $D(S_r)$ の傾きは緩やかである。 $S_r \geq 90\%$ の高含水域に向かうにつれて、W/C=50および70%の場合は、 $D(S_r)$ が急激に増大する。この傾向は秋田ら



(a) W/C=30%



(b) W/C=50%



(c) W/C=70%

図-9 水分拡散係数

表-3 $D(S_r)$ のパラメータ

| W/C (%) | $D(S_n)$ (m^2/sec) | m' | n' | S_{rc} (%) |
|---------|------------------------|------|-------|--------------|
| 30 | 1.43×10^{-8} | 2.00 | 0.025 | 15 |
| 50 | 2.49×10^{-8} | 0.85 | 0.208 | 12 |
| 70 | 3.04×10^{-8} | 0.80 | 0.350 | 11 |

の結果⁴⁾と同様である。W/C=30%では、このような $D(S_r)$ の急激な増加は見られない。次に、 $S_r \leq 20\%$ の $D(S_r)$ に注目すると、 $k(S_r)$ と同様に、すべてのW/Cに対して S_r の減少と共に $D(S_r)$ も急減する。図中の実線は、解析に用いた $D(S_r)$ である。前述した $k(S_r)$ と同様に、 $D(S_r)$ は折れ曲がり点 S_n を境に以下の式で表すことにする。

$$D(S_r) = D(S_n) \left(\frac{S_r - S_{rc}}{S_n - S_{rc}} \right)^{m'} \quad (S_{rc} \leq S_r \leq S_n) \quad (7)$$

$$D(S_r) = D(S_n) \cdot e^{-n'(S_r - S_n)} \quad (S_n \leq S_r \leq 100)$$

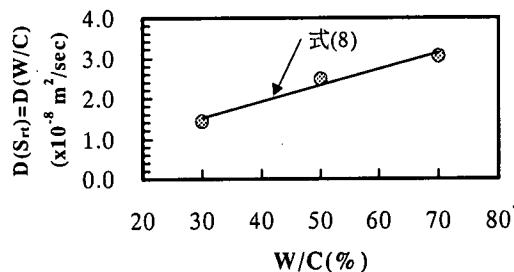


図-10 $D(S_n)$ とW/Cの関係

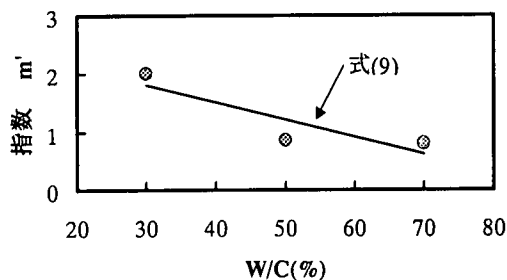


図-11 指数 m' とW/Cの関係

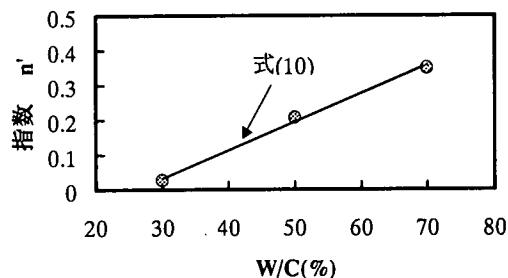


図-12 指数 n' とW/Cの関係

ここで、 m' および n' ：定数である。式(7)中の各定数は、それぞれのW/C(%)に対して表-3のように与えられる。

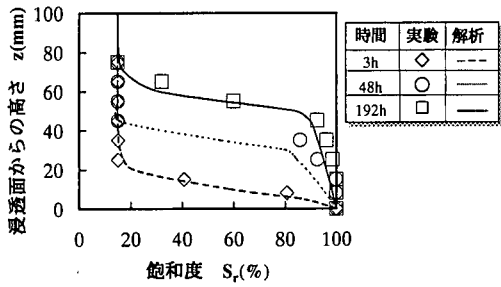
各定数の性質を吟味するために、図-10に $D(S_n=90\%)$ とW/C(%)の関係、図-11に指数 m' とW/C(%)の関係、図-12に指数 n' とW/C(%)の関係をそれぞれ示す。同図より以下の関係を得る。

$$\begin{aligned} D(S_n = 90) &= D(W/C) \\ &= 4.00 \times 10^{-10} \times (W/C) + 3.16 \times 10^{-9} \quad (8) \\ &\quad (m^2/sec) \end{aligned}$$

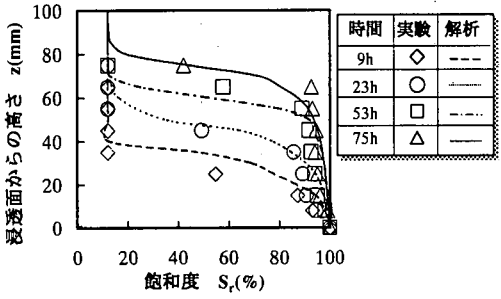
$$m' = -0.03 \times (W/C) + 2.72 \quad (9)$$

$$n' = 0.0081 \times (W/C) - 0.22 \quad (10)$$

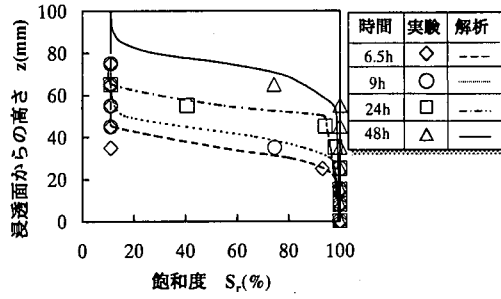
上式を式(7)に代入することにより、任意のW/C(%)に対する水分拡散係数 $D(S_r)$ が推定可能となる。



(a) W/C=30%

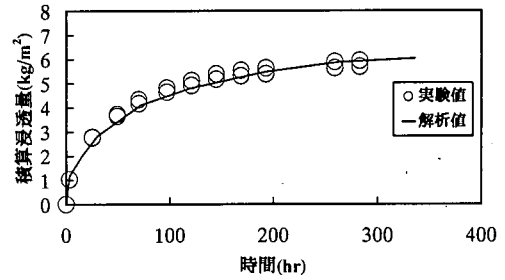


(b) W/C=50%

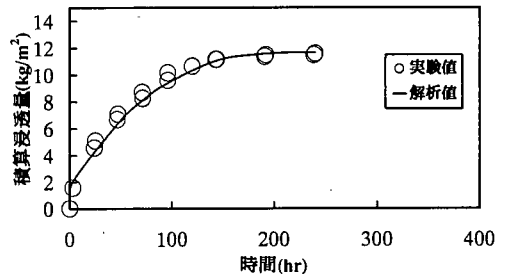


(c) W/C=70%

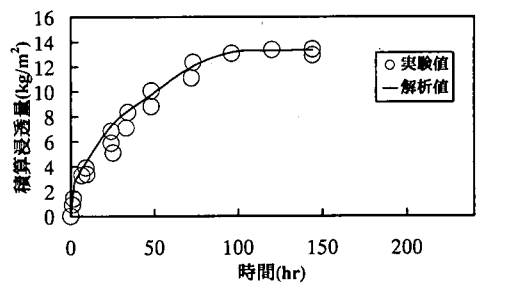
図-13 解析による水分分布と実験値の比較



(a) W/C=30%



(b) W/C=50%



(c) W/C=70%

図-14 解析による積算浸透量と実験値の比較

4. 理論および実験結果の考察

(1) 実験結果と解析結果の比較

それぞれのW/Cにおける水分分布の経時変化に関して、解析結果（線）と実験結果（マーカー）を比較したものが図-13である。(a)はW/C=30%、(b)はW/C=50%、(c)はW/C=70%である。底面（浸透面）から75mm以上のデータはないので、実験値との比較は出来ないが、各W/Cの解析結果と実験結果は概ね良く一致している。

図-14(a), (b), (c)に水分分布を積分して得られる単位断面積当たりの積算浸透量と実験値の比較を示す。計算結果は、すべてのW/Cにおいて初期の急激な浸透量の増加とその後の緩やかな浸透量の増加傾向を良好に再現している。

特に、W/C=50および70%の最終水分状態は、後に示す図-15からわかるように飽和状態に漸近し

ており、浸透量の時間増分がかなり小さくなっている。この傾向も計算結果は良好に再現している。

(2) 浸透高さに関する考察

次に浸透体積を供試体底面（浸透面）内の空隙面積（ ϵA_b ）で除した値、すなわち、

$$H = \frac{A_b \int_0^h S_r(z) dz}{\epsilon A_b} = \frac{\int_0^h S_r(z) dz}{\epsilon} \quad (10)$$

を見かけ浸透高さHと称してその性質を調べるために、Hの経時変化に関する実験値と計算値の比較を図-15に示す。ここで、 A_b ：供試体浸透断面積、 ϵ ：空隙率である。さらに、同図にはHを供試体高さで除した供試体飽和度 S_r も併示される。計算結果と実験値は良好に一致し、HはW/Cが小さいほど時間的増加が小さくなる。計算結果に基づけば、W/C=70%では90mmから、W/C=50%につい

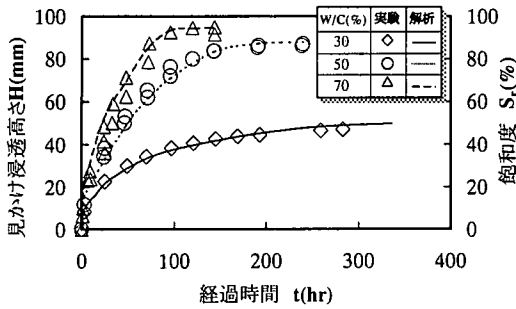


図-15 見かけ浸透深さHの経時変化

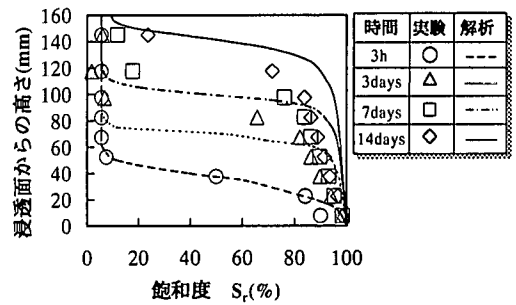


図-16 解析結果の検証

ては80mmから、およびW/C=30%については40mmから浸透が鈍化することがわかる。この浸透高さの違いは、不飽和特性の違いに起因する。コンクリート構造物の建設に際して、耐久性の点から観れば、コンクリート配合、特にW/Cは重要になることが知れる。

(3) 本モデルによる既往の研究結果への適応

3. (3) で求めた水分拡散係数を用いて、秋田らによる吸水過程の実験結果⁴⁾の再現を試みた。秋田らの実験は、40mm×40mm×160mmのモルタル供試体(早強ポルトランドセメント, W/C=53%, s/a=53%, 材齢7日)を用いて、恒温恒湿室内の温度を20℃に設定し、吸水面の対面をRH=60%の環境にして行っている。今回筆者らが行った実験では、コンクリート(普通ポルトランドセメント, W/C=50%, s/a=45%, 材齢3ヶ月以上)供試体を用いて、温度を25℃とし、吸水面以外は防水した点で実験条件が異なっているが、数少ない実験例であることと定性的な傾向を観るということから、今回のモデルへの適応性を検討する。

図-16に実験と解析結果の水分分布の比較を示す。底面付近では計算値が過大に評価される傾向にあるが、浸透前線(S_r が急激に変化する)の高さは概ね一致している。水分分布の差異は温度の違いやコンクリートとモルタルという材料の不飽和特性の違いおよび供試体上面からの蒸発による影響と考えられるが、定性的には、実験における水分分布の傾向を本モデルによる不飽和浸透解析で概ね良く再現できていると思われる。

5. おわりに

本研究では、W/Cの違いによる吸水過程の不飽和コンクリートの水分特性曲線および水分分布を

把握するため、等温吸湿実験、毛管浸透実験を行うとともにコンクリートの不飽和浸透モデル中のパラメータ(水分特性曲線、不飽和透水係数、水分拡散係数)について検討を行った。

以下に本研究で得られた結論を列挙する。

- (1) W/Cの違いによる毛管水頭 ψ と飽和度 S_r の関係(水分特性曲線)を得ることができた。
- (2) 毛管浸透実験に基づいて、非定常法により不飽和透水係数 k および水分拡散係数 D と飽和度 S_r の関係、すなわち $k(S_r)$ および $D(S_r)$ が明らかとなった。
- (3) (2)で求められたパラメータを用いた不飽和浸透解析により、浸透量と水分分布の経時変化が良好に再現され、 $k(S_r)$ と $D(S_r)$ の信頼性を得ることができた。
- (4) その結果、 $k(S_r)$ と $D(S_r)$ はW/Cに大きく依存し、式(6)および式(7)によって両者を系統的に求めることができる。

今後、コンクリートに作用する水圧や温度、湿度といった環境の違いで吸水時の水分分布がどのように変わるか検討する必要がある。

参考文献

- 1) 福原輝幸, 佐藤邦明: 地下空間の換気による覆工の蒸発・乾燥過程と湧水メカニズム, 地下空間シンポジウム, pp.219-226, 1992.
- 2) 下村匠, 前川宏一: 微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, 土木学会論文集, Vol.520/V-28, pp.35-45, 1995.
- 3) 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, Vol.490/V-23, pp.101-110, 1994.
- 4) 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.
- 5) 藤原忠司, 佐藤嘉一郎, 小西俊之: 乾湿の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.
- 6) 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.
 - 7) Lars Olof Nilsson : Hygroscopic moisture in concrete drying, measurements and related material properties, *Report TVBM 1003 Lund Sweden*, 1980.
 - 8) Philajavaara, S.E.: Estimation of drying of concrete at different relative humidities and temperatures of ambient air with special discussion about fundamental features of drying and shrinkage, *International Symposium on Fundamental Research on Creep and Shrinkage of Concrete*, Lausanne, pp.1-32, 1980.
 - 9) 橋田浩, 田中亨二, 小池道夫: 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.
 - 10) 橋田浩, 田中亨二, 小池道夫: 不等質な仕上げ層を施工した後の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419号, pp.21-29, 1991.
 - 11) 藤井義久: 地下空間環境に及ぼす多孔質体内の熱物質移動現象, 伝熱研究, Vol.30, No.140, pp.33-38, 1997.
 - 12) 秋田宏, 藤原忠司, 平井和喜: 毛管作用に基づいたモルタル中の水分移動解析, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.624-629, 1997.
 - 13) 福原輝幸, 松岡茂, 柳博文: コンクリートの毛管浸透と非定常法による不飽和透水係数の算定, 土木学会論文集, Vol.564/V-35, pp.89-96, 1997.
 - 14) 市村徹也, 福原輝幸, 久野幸男: コンクリートの不飽和浸透特性—毛管浸透試験—, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第5部, pp.1056-1057, 1994.
 - 15) 市村徹也, 福原輝幸, 田中彰: コンクリートの不飽和浸透特性 その2—毛管浸透試験, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第5部, pp.2-3, 1995.
 - 16) 越川茂雄, 荻原能男: コンクリートの毛管浸透試験方法に関する研究, 土木学会論文集, Vol.426/V-14, pp.183-191, 1991.
 - 17) Richards, L.A.: Capillary conduction of liquids through porous mediums, *Physics*, 1, pp.318-333, 1931.
 - 18) Klute, A. : A numerical method for solving the flow equation for water in unsaturated materials, *Soil Sci.*, 73, pp.105-116, 1952.
 - 19) 湯浅昇, 笠井芳夫: 非破壊による構造体コンクリートの水分測定法, コンクリート工学, Vol.32, No.9, pp.49-55, 1994.
 - 20) 鎌田英治, 田畑雅幸, 中野陽一郎: コンクリート内部の含水量の測定, セメント技術年報, XXX, pp.288-292, 1976.

(2000. 9. 1 受付)

EFFECTS OF THE WATER-CEMENT RATIO ON MOISTURE ABSORPTION IN UNSATURATED CONCRETES

Hirofumi YANAGI, Teruyuki FUKUHARA and Shigeru MATSUOKA

For discussing the durability of concrete, heat and moisture transfer in different ambient conditions is one of the key themes. Moisture transfer is generally regarded as an unsaturated infiltration and to follow to Darcy law. It has not yet been satisfied to estimate moisture transfer, because parameters in equation of Darcy law are nonlinear. So, through isothermal moisture absorption test and capillary infiltration test, the authors determined the water retention property of concrete as a function of the water-cement ratio, and obtained a relation of moisture diffusivity coefficient, unsaturated hydraulic conductivity and degree of saturation by the unsteady method. In addition, by conducting unsaturated infiltration analysis and comparing its results with experimental results, the effectiveness of the analytical technique was verified.