

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

福原輝幸¹・松岡 茂²・柳 博文³

¹正会員 工博 福井大学教授 工学部環境設計工学科 (〒910福井市文京3-9-1)

²正会員 鉄建建設(株)技術研究所 土木構造研究室長 (〒286成田市新泉9-1)

³正会員 鉄建建設(株)技術研究所 土木構造研究室 (〒286成田市新泉9-1)

地下空間におけるコンクリート構造物は、ひび割れや母材の多孔性のために、地下水等の影響を受けて漏水・結露を引き起こす恐れがある。コンクリート中の水分移動は、主にひび割れ漏水とコンクリート母材の多孔性に起因する水分浸透に分類される。このうち、コンクリート母材中の水分浸透の形態は、一般的に不飽和浸透(毛管浸透)に帰着するが、その挙動は今なお明確ではない。そこで、コンクリートの保水性や透水性の特性を知るために、等温吸湿実験、および毛管浸透実験を行った。その結果、不飽和浸透特性を精度良く知ることが出来たので、得られたデータから不飽和透水係数を求める方法をここに提案する。さらに、FEMによる不飽和浸透解析を行い、本法により算出される不飽和透水係数の妥当性が検証される。

Key Words : *unsaturated hydraulic conductivity, moisture diffusivity, moisture content, moisture movement, capillary infiltration, humidity*

1. はじめに

コンクリートの水分移動に関する研究は、コンクリートの品質管理や地下コンクリート構造物の熱・水分環境の観点¹⁾から、最近活発に行われ始めている。外国においては既に、Lars-Olof Nilsson²⁾やPhilajavaara³⁾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ている。ただし、水分移動は相対湿度分布から間接的に評価されている。同様な評価を、我が国では橋田ら⁴⁾や秋田ら⁵⁾も行っている。阪田⁶⁾は一次元非線形水分拡散方程式を解いて、水分拡散係数と含水率の関係を求めている。最近では、福原・佐藤⁷⁾によりコンクリート覆工の蒸発・乾燥シミュレーションの中で不飽和浸透解析がなされている。また、下村・前川⁸⁾は空隙の微細構造モデルを用いて、液状水分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ている。しかしながら水分移動に関連する物性値は、データが少ないためになお不明な点が多い。

実験的に観ると、透水試験は高圧下で行われるために、水密性の点で技術的な難しさがあるだけでなく、試験結果の解釈にも理論的にいくつかの問題点がある。

例えば、浸透深さ透水法では水分拡散係数が求められるが、この値の持つ意味が明確でない。その理由の一つは、水分移動の駆動力が外圧(コンクリート表面に作用する大気圧以上の圧力(正の圧力))と毛管圧(負の圧力)との和による圧力勾配によって生じているにも関わらず、透水係数を外圧勾配だけで求めている点である。また、得られた値は浸透水塊の代表値であるために、コンクリートが透水し易いかどうかの基準にはなるものの、水分移動解析への適用には限界がある。これと同じことは、越川・萩原⁹⁾の毛管浸透試験から得られる透水係数についても言える。すなわち、こうした一つの代表的な透水係数によって、不飽和域において毛管力の影響を大きく受けるようなコンクリート中の水分浸透あるいは蒸発に伴う水分減少の挙動を計算により再現することは難しい。従って、不飽和浸透をダルシー則で表現しようとするれば、不飽和透水係数を知ることが肝要となる。

そこで、本研究では、毛管力のみによって水分が不飽和コンクリート中を移動する現象に基づいて、コンクリートの不飽和透水係数を求めるための方法を提案し、不飽和浸透解析の結果および不飽和透水係数の妥当性について検討を行う。

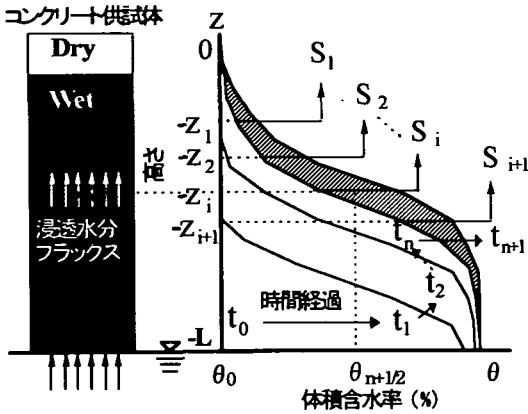


図-1 コンクリート底面からの毛管浸透による水分分布の模式図

2. コンクリート中の不飽和浸透モデル

(1) 圧力水頭の算定

コンクリート空隙中の水蒸気を完全ガスとして、液状水を非圧縮性に見なし、両者の平衡状態を考える場合、1モル当たりのギブスの自由エネルギーである化学ポテンシャルを液状水と水蒸気について考えればよい¹⁰⁾。

$$\mu_l = \mu_{l0} + (P_l - P_0) / \rho_l \quad (1)$$

$$\mu_v = \mu_{l0} + R_v T \ln(P_v / P_{vs}) \quad (2)$$

ここで、 μ_l : 液状水の化学ポテンシャル、 μ_v : 水蒸気の化学ポテンシャル、 μ_{l0} : 大気圧、基準温度において、平らな液面を持つ液状水(純水)の化学ポテンシャル、 P_l : 液状水の圧力、 P_0 : 大気圧、 ρ_l : 液状水の密度、 R_v : 水蒸気的气体定数、 T : 温度、 P_v : 蒸気圧、 P_{vs} : 温度 T における飽和蒸気圧、である。式(1)、(2)の右辺第2項は、空気-液状水界面の曲率に起因する液状水および水蒸気の化学ポテンシャルの変化をそれぞれ表す。

水蒸気と液状水が互いに相平衡の状態にあるとき、両者の化学ポテンシャルは等しい($\mu_l = \mu_v$)から、式(1)と(2)より、

$$\psi = (P_l - P_0) / \rho_l g = R_v T \ln(P_v / P_{vs}) / g \quad (3)$$

を得る。ここで、 g : 重力加速度、 ψ : 圧力水頭(<0)であり、相対湿度 $RH (= P_v / P_{vs})$ を用いて式(3)を変形すると、マトリックスポテンシャル水頭 ψ と RH の関係が式(4)のように求まる。

$$\psi = R_v T \ln(RH) / g \quad (4)$$

式(4)は表面張力がマトリックスポテンシャル(ここでは便宜上、毛管力と表現する)に等しいとして、ケルビンの方程式を変形したものである。相対湿度 RH と

体積含水率 θ の関係は実験的 (3. (1) で説明) に求まることから、式(4)は ψ と θ の関係を表していることにもなる。

(2) 非定常法による不飽和透水係数の算定

不飽和(毛管)浸透によるコンクリート中の水分分布の概要を図-1に示す。図-1はコンクリートの底面 $z=L$ (この面は常に水面に一致) を横切り、毛管浸透によって侵入する水分によって形成される体積含水率 θ の鉛直 (z) 分布の経時変化を模式的に示したものである。時間 t_0 は初期を表し、 $t_1, t_2, \dots, t_n, t_{n+1}$ の順に時間は進行する。 $z=0$ は時間 t_{n+1} における $\theta(z)$ が初期体積含水率 θ_0 と交差する高さを表す。不飽和透水係数 k は図-1に従って、非定常法により算出される。

その基礎となる水分移動方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \quad (5)$$

図-1に示すような体積含水率 θ の鉛直分布、 $\theta(z)$ に従って式(5)を z について積分すると

$$\int_{-z_i}^0 \frac{\partial \theta}{\partial t} dz = \int_{-z_i}^0 \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) dz \quad (6)$$

となる。式(6)を離散化すると、次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{S_i}{\Delta t} &= \left[-k(\theta)_{z=-z_i} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right]_{z=-z_i}^{t_n+t_{n+1}} \\ &\quad + k(\theta)_{z=0} \frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z=0}^{t_n+t_{n+1}} \\ &= k(\theta)_{z=0} \frac{t_n+t_{n+1}}{2} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z=0}^{t_n} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z=0}^{t_{n+1}} \right) / 2 \\ &\quad - k(\theta)_{z=-z_i} \frac{t_n+t_{n+1}}{2} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z=-z_i}^{t_n} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z=-z_i}^{t_{n+1}} \right) / 2 \quad (7) \end{aligned}$$

ここに、 S_i は図-1に示すように、時間 $t=t_n$ から $t=t_{n+1}$ の時間間隔 (Δt) の間に、 z_i を横切って浸透した水分フラックスにより増加した $z=0$ から $z=-z_i$ までの区間水分量を表す。すなわち、

$$S_i = \left[\int_{-z_i}^0 \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right) dz \right]_{t_n}^{t_{n+1}} \quad (8)$$

ここで、斜線部の上端 $z=0$ を横切る水分フラックス(式(7)の2行目右辺第2項)は無視できるとすれば、式(7)は、

$$\frac{S_i}{\Delta t} = -k(\theta)_{z=-z_i} \frac{t_n+t_{n+1}}{2} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z=-z_i}^{t_n} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z=-z_i}^{t_{n+1}} \right) / 2 \quad (9)$$

として与えられる。よって、時間 $t=(t_n+t_{n+1})/2$ において、高さ $z=-z_i$ での θ (図中、 $\theta_{n+1/2}$) に対する不飽和透水係数 $k(\theta)_{z=-z_i}^{t_n+t_{n+1}}$ は、

表-1 コンクリート配合表

G _{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位体積重量 (kgf/m ³)						
					W	C	S	G ₁₅	G ₂₀	A _{d-1}	A _{d-2}
20	8±2.5	1.5±1	41	45	165	375	796	504	504	28	3.22

A_{d-1} : 膨張材, A_{d-2} : 減水剤

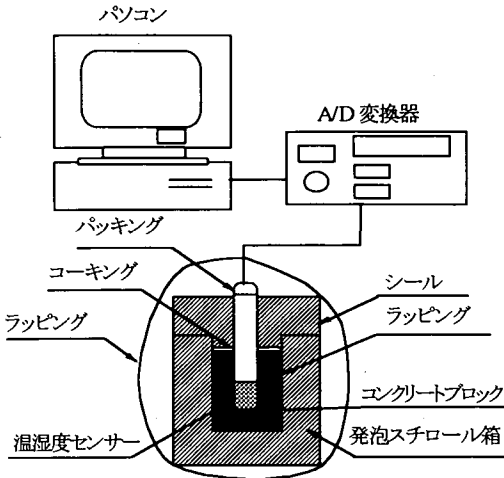


図-2 等温吸湿実験装置

$$k(\theta) \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = - \frac{2S_i}{\left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z=-z_i}^{t_n} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z=-z_i}^{t_{n+1}} \right) \cdot \Delta t} \quad (10)$$

より得られる。このようにして、任意の高さ、任意の時間すなわち任意の体積含水率 θ に対する不飽和透水係数が計算できる。

ただし、実験からは図-1に示すような $\theta(z)$ が求められるので、式(10)中の $\partial \psi / \partial z$ はこの $\theta(z)$ を基に、式(11)より求められる。

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (11)$$

ただし、式(11)の $\partial \psi / \partial z$ と $\partial \theta / \partial z$ の関係を結びつける $\partial \psi / \partial \theta$ は、4. (1)で示すような水分保水曲線(ψ と θ の関係)が分かれば容易に求められる。

3. 実験装置および実験方法

(1) 等温吸湿実験

筆者らは、すでに体積含水率と毛管水頭との関係を明らかにする目的で等温吸湿実験を行っている¹¹⁾。本実験では、湿潤過程の中で、供試体の目標体積含水率 θ を設定し、各 θ に対して供試体内の相対湿度RHおよび温度 T を測定する。これらの測定値および2. (1)で述べたケルビンの関係を用いて、体積含水率 θ と毛管水

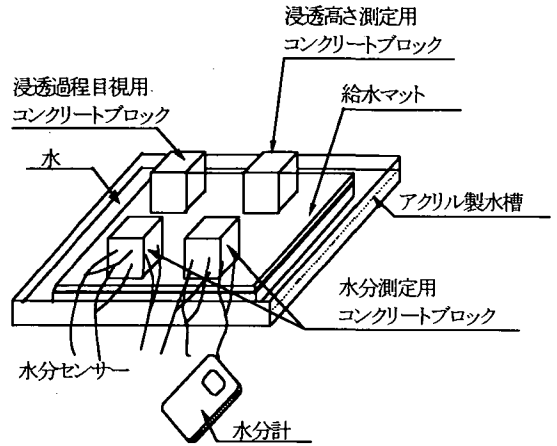


図-3 毛管浸透実験装置

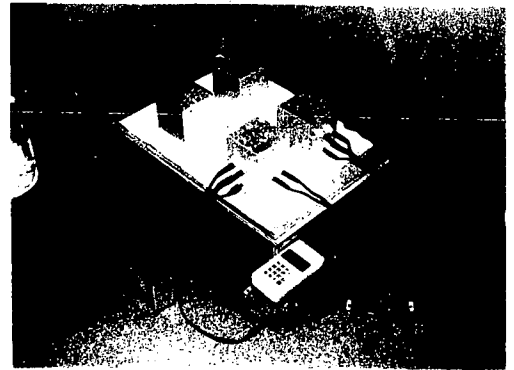


写真-1 毛管浸透実験概観

頭 ψ の関係を明らかにする。

コンクリート配合表を表-1に示す。コンクリートの設計基準強度は350kgf/cm²とする。供試体は、0.10×0.10×0.40mのコンクリート角柱ブロックを0.04×0.04×0.06mにカットして製作される。供試体の中心に、深さ0.045mの穴(φ13mm)をあけ、温湿度センサー(株)ヴァイサラ製)を挿入する。

図-2に実験装置の概要を示す。供試体を図のように発砲スチロールの箱の中にセットし、測定中の乾燥を防止する。供試体の相対湿度RHと温度 T の測定は、RH=50%、 $T=25^{\circ}\text{C}$ の恒温恒湿室で供試体が熱・水分的に平衡状態になるまで行われる。

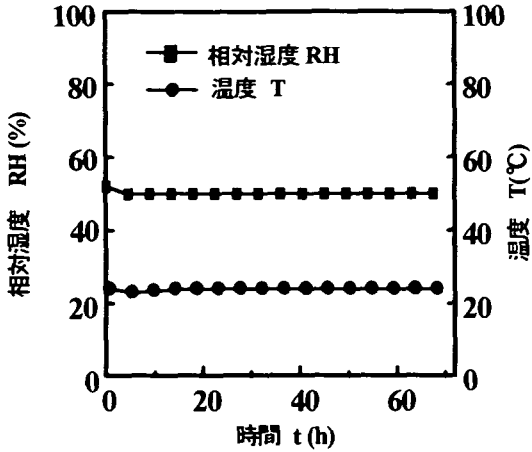


図-4 相対湿度と温度の平衡過程

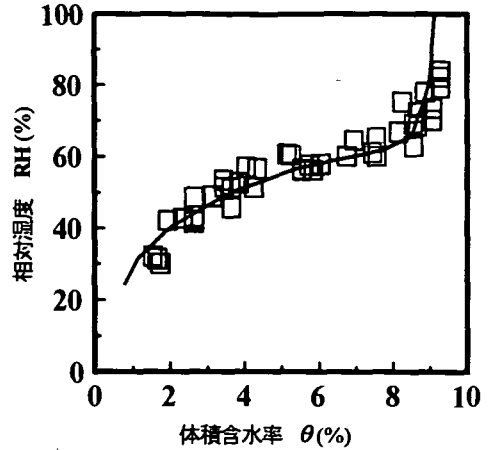


図-5 相対湿度と体積含水率の関係

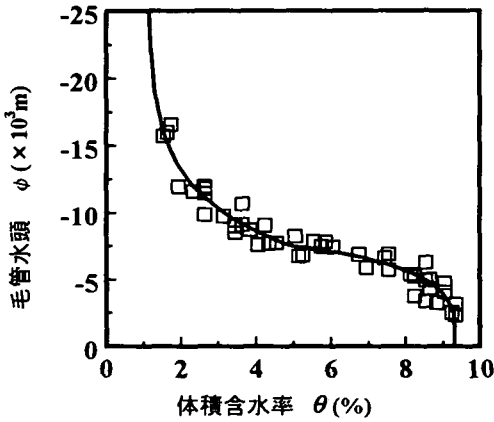


図-6 水分保水曲線

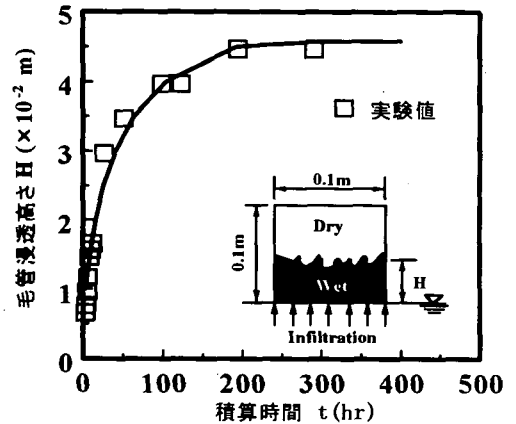


図-7 毛管浸透高さの経時変化

(2) 毛管浸透実験

この実験では、毛管浸透圧による供試体の浸透高さ、重量および体積含水率の経時変化を測定する^{12), 13)}。

コンクリートの配合は等温吸湿実験と同様に表-1に従う。角柱供試体の寸法は、 $0.1 \times 0.1 \times 0.1\text{m}$ とし、実験は絶乾状態に近い4つの角柱供試体を用いて、恒温恒湿室 ($RH=50\%$: $T=25^\circ\text{C}$) 内で行われる。その際、4つの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、吸水量の経時変化および空隙率が同じになるような供試体を選ぶ。空隙率はコンクリートブロックを水槽で約2ヶ月間寝かせた後、温度 105°C で炉乾燥させ、重量が一定になった時点での減重量から決定される。

実験装置の概要を図-3と写真-1に示す。越川・萩原⁹⁾と同様にアクリル製水槽の中に棚を設け、その上に供試体を立てる。なお、水面を供試体底面に一致するように調整する。体積含水率 θ は、独自にキャリブ

レーションを行った電気抵抗式水分計 (ケット製 probe $\phi 7 \times 76\text{mm}$) により測定され、 θ の鉛直分布を詳細に求めるために2つの供試体を使用する。

キャリブレーションの方法は、以下の通りである。本実験と同じ電極間隔とコンクリートを使用し、気乾状態からコンクリートブロックを水に漬けて、種々の含水状態を作る。水から取り出したコンクリートブロックは蒸発しないようにビニールで厳重に覆われ、3~4ヶ月間に渡り、恒温恒湿室 (本実験と同じ部屋) に放置した後、実験に使用する。1つの含水状態に対して10個のコンクリートサンプルを用意し、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体積含水率を基に較正曲線を作る。水分センサーからの出力は体積含水率にして約1%から飽和状態 (約9%) の範囲で得られる。体積含水率1%以下での出力にはばらつきが大きく、精度は信頼できないと考える。なお、コン

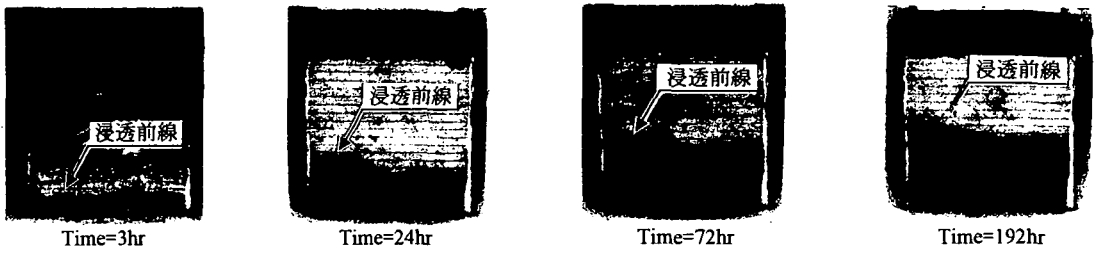


写真-2 毛管浸透プロセス

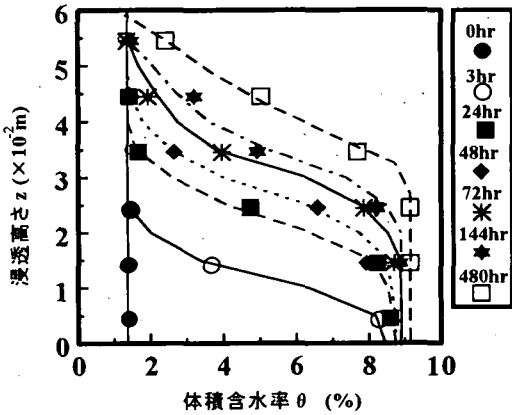


図-8 体積含水率分布の経時変化

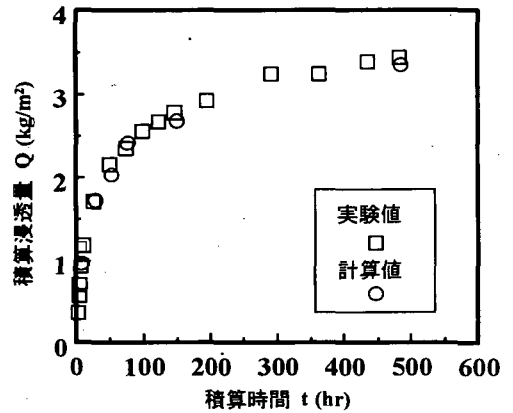


図-9 積算浸透量 (単位面積当たり) の経時変化

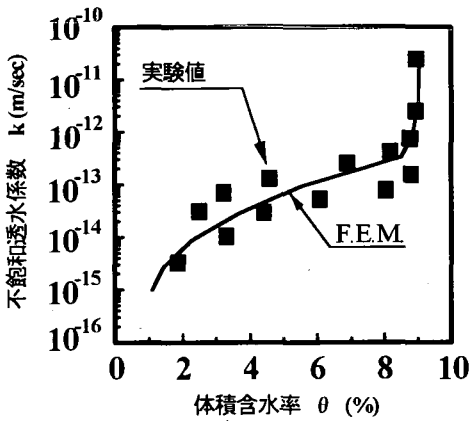


図-10 透水係数と体積含水率の関係

クリートの含水量は炉乾燥法で求められる。測定高さは、一つは底面から0.5、2.5、4.5cmとし、一方は1.5、3.5、5.5cmとする。体積含水率は浸透の進行に応じて30分から24時間の間隔で測定される。

4. 実験結果および考察

(1) 等温吸湿実験

図-4に相対湿度RHと温度Tの経時変化を表す。RHおよびTは時間的にほぼ一定である。実験中、図-4の

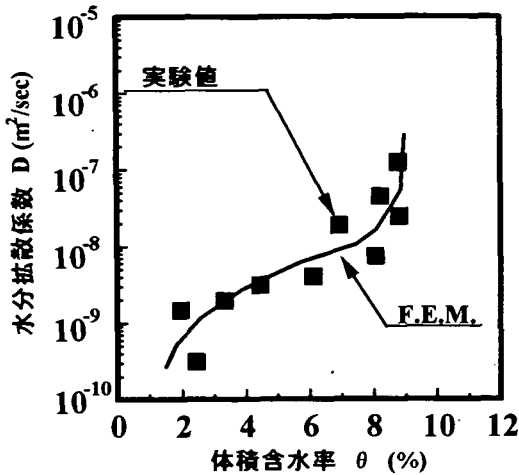
ような結果がモニターで観察できるので、供試体が熱・水分的に平衡状態に達したかどうかは容易に確認できる。

図-5は、実験で得られた体積含水率 θ と相対湿度RHの関係を示す。RHは θ の増加と共に増大する。このRHの増加率 $dRH/d\theta$ は $\theta \leq 3\%$ の乾燥状態では大きく、 $3\% \leq \theta \leq 8\%$ の不飽和含水状態では小さい。しかしながら、 $\theta \geq 8\%$ の潤湿状態になると再びRHは θ と共に急激に増大する。

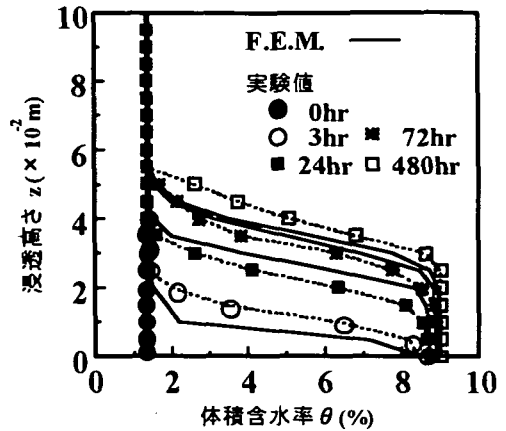
式(4)の相対湿度RHと毛管水頭 ψ の関係および図-5の相対湿度RHと体積含水率 θ の関係より、体積含水率 θ と毛管水頭 ψ の関係(水分保水曲線)は図-6のようになる。乾燥状態から θ の増加に伴って毛管水頭の絶対値 $|\psi|$ は減少する。この $|\psi|$ の減少は図-5からも予想できるように、見かけ上乾燥した状態から潤湿が始まる含水状態($\theta \approx 2\%$ 前後)、および不飽和から飽和状態へ移行する過程($\theta \geq 8\%$)で著しい。なお、図-5および図-6中の実線は、不飽和浸透解析に用いた $RH \sim \theta$ 、 $\psi \sim \theta$ である。

(2) 毛管浸透実験

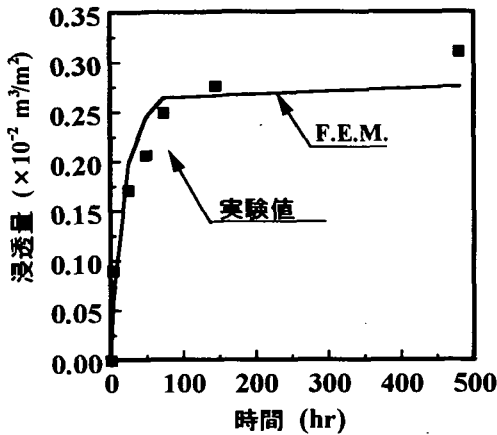
図-7は目視観察による浸透高さH(底面から浸透前線までの平均距離)の経時変化を、写真-2は毛管浸透過程の状況をそれぞれ示す。浸透前線は吸水直後急激に上昇するが、時間tの経過と共に浸透前線の上



図一十一 水分拡散係数と体積含水率の関係



図一十二 水分分布に関する計算値と実験値の比較



図一十三 浸透量に関する計算値と実験値の比較

昇は鈍化する。

図-8に体積含水率 θ の鉛直分布 $\theta(z)$ の経時変化を示す。初期の θ は1.4%である。浸透によって θ 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、浸水開始後3時間で $z=1\text{cm}$ (底面から上方1cm) までの部分は飽和に近い状態まで湿潤する。24時間以降、底部付近は飽和状態になるが、毛管浸透は上方へ進行し、時間の経過と共に明確なS字型を呈するようになる。

図-9は単位底面積当りの浸透量 Q の経時変化を示す。浸透量 Q は図-8の $\theta(z)$ を積分して求めた計算値(○印)と供試体の重量増分から求めた実験値(□印)である。 Q は、図-7の H の経時変化からも推測されるように最初急激に増加し、その後 Q の増加率は時間と共に小さくなる。この両者の値を比較すると、かなり良い一致が認められる。これより、図-8の水分分布 $\theta(z)$ の経時変化の妥当性および信頼性が示されたと考えられる。

(3) 不飽和浸透解析

図-6の水分保水曲線および式(9)を用いて、不飽和透水係数 k と体積含水率 θ の関係を求めたものが図-10である。不飽和透水係数 k は非線形的に体積含水率 θ に依存している。透水係数は m/s 単位で 10^{-15} から 10^{-11} の範囲に渡り変化する。この変化の様子は次のようである。体積含水率 $\theta \leq 3\%$ では、 θ の増加と共に、不飽和透水係数 k は急激に増加する。その後、 k は体積含水率 θ が約8%に至るまでは緩やかに増加し、不飽和から飽和に至る(体積含水率 θ が約8%から9%に増加する)につれて、再び θ の増加が著しくなる。データのばらつきは体積含水率の鉛直勾配に含まれる誤差および供試体の局所的な不均一性に起因するものと考えられる。図中の実線は、浸透解析に用いた $k(\theta)$ である。ただし、 $1\% \leq \theta < 2\%$ の $k(\theta)$ は外挿によって決定されたものである。

式(5)をKluteの水分拡散方程式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (12)$$

で表すとき、式(11)の関係を用いて、水分拡散係数 $D(\theta)$ と不飽和透水係数 $k(\theta)$ の関係は

$$D(\theta) = k(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad (13)$$

と表される。そこで、水分拡散係数 $D(\theta)$ と体積含水率 θ の関係を示したものが図-11である。 $\theta \leq 3\%$ において、 $D(\theta)$ は θ に比例して急増する。その後、 $\theta \approx 8\%$ までの $D(\theta)$ の増加は小さいが、不飽和から飽和に至る含水状態($8\% \leq \theta \leq 9\%$)では、 θ が増加するにつれて $D(\theta)$ は急激に増加する。このように、 $D(\theta)$ は $10^{-10}(\text{m}^2/\text{s})$ から $10^{-7}(\text{m}^2/\text{s})$ の範囲で変化する。

水分拡散係数分布 $D(\theta)$ の形状は、下村・前川によるもの⁹⁾と定性的には類似している。ただし、水分拡散係数は液状水拡散係数と水蒸気拡散係数が重

畳された状態で評価されるものとする。

こうして得られた不飽和透水係数 k と水分拡散係数 $D(\theta)$ の算定法(非定常法)の信頼性を検討する目的で、FEMによる一次元の不飽和浸透解析を行う。本解析では、境界条件である供試体の底面の体積含水率は測定値を使用する。なお、計算におけるコンクリートの水分拡散係数は図-11中の実線を採用している。ただし、 $1\% \leq \theta < 2\%$ の $D(\theta)$ は外挿によって決定されたものである。

解析結果と実験結果の体積含水率 θ の鉛直分布の経時変化を示したものが図-12である。浸透過程において、実験結果と解析結果には若干の差異は認められるが、概ね両者の一致は良いと考える。両結果の違いの原因としては、(i) 上述したように不飽和透水係数や水分保水曲線に含まれる誤差、(ii) 供試体のカットに伴う空隙の崩壊、などが推察される。

図-13は解析による積算浸透量と実験値の比較を示す。解析結果は、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よく再現している。

5. おわりに

本研究では、コンクリート中の不飽和浸透過程を実験的、理論的に示し、不飽和透水係数の妥当性を検討した。

以下に、本研究で得られた結論を列挙する。

- (1) コンクリートの含水率の変化に伴う毛管力の変化(水分保水曲線)は、土壌のそれと類似した分布を示す。
- (2) 毛管浸透実験は毛管水頭勾配のみに起因する水分移動を対象とするために、コンクリートの不飽和浸透過程(浸透に伴う水分分布の経時変化)が得られれば、不飽和透水係数を求めるのに有効である。
- (3) 非定常法による不飽和透水係数の算定は簡便であり、不飽和浸透解析は実験で得られたコンクリートの毛管浸透過程を良好に再現することができた。これより、非定常法の有効性と不飽和透水係数の値の信頼性が確認された。

最後に、等温吸湿実験の結果に関して、フィンランドのTechnical Research Center (VTT)のLiisa Raautiainen女史と有効な議論を交わすことができた。さらに、本研究をまとめる上で筆者らがカナダのNational Research Council Canadaを訪れた際、Dr. Laurel Goodrich氏および彼のメンバーより貴重なコメントを頂いた。また、(株)ホクコンの田中、市村の両氏からは快くデータを提供して頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 伊藤洋, 坂口雄彦, 西山勝栄, 福原輝幸: 地下空間内外環境に関わるコンクリートの透水性評価について, 都市地下空間利用における大深度地盤に関するシンポジウム, pp. 221-226, 1993.
- 2) Lars Olof Nilsson: Hygroscopic moisture in concrete drying, measurements and related material properties, Report TVBM 1003 Lund Sweden, 1980.
- 3) S.E. Philajavaara: 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.
- 4) 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.
- 5) 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, 第490号/V-23, pp. 101-110, 1994.
- 6) 阪田憲司: 硬化コンクリート中の水分の移動, コンクリート工学年次学術論文集, Vol. 32, No. 9, pp. 16-19, 1994.
- 7) 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.
- 8) 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, No. 520/V-28, pp. 35-45, 1995.
- 9) 越川茂雄, 萩原能男: 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.
- 10) 例えば, Thierry Duforestel: "Heat and Moisture Transfer / Modeling and coefficient's measurement", France-Japan Workshop on Mass and Energy Simultaneous Transfer, Tsukuba, pp. 1-20, 1992.
- 11) 田中彰, 福原輝幸, 指岡貴洋: コンクリートの毛管力に関する一考察, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第5部, pp. 1058-1059, 1994.
- 12) 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-I, 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.
- 13) 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.

(1996. 2. 9受付)

**CAPILLARY INFILTRATION AND ESTIMATION OF UNSATURATED
HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF CONCRETE
BY THE UNSTEADY METHOD**

Teruyuki FUKUHARA, Shigeru MATUOKA and Hirofumi YANAGI

Though the water movement in the concrete matrix in general can be regarded as an unsaturated infiltration, its behavior has not yet been clearly known. The authors conduct the isothermal moisture absorption test and the capillary infiltration test to investigate the moisture retention and hydraulic conductivity of concrete. The change of these two parameters with the volumetric moisture content can be obtained through the present experience. Comparing experimental with numerical moisture content profile, accompanied with capillary infiltration, it is confirmed that the unsteady method proposed here is effective and reliable to determine the unsaturated hydraulic conductivity of concrete.