

V-275 非定常法によるコンクリートの不飽和透水係数の算定

鉄建建設技術研究所 柳 博文
 福井大学工学部 福原輝幸
 鉄建建設技術研究所 松岡 茂

1. はじめに

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中の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（Photo.1を参照）。実際に、コンクリート母材全域にわたって飽和浸透するような現象よりも、飽和－不飽和域の両方を有しながら浸透する飽和－不飽和浸透が一般的である。

そこで、筆者らは過去に、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^{1), 2), 3)}。今回は、これらの実験データから不飽和透水係数を求める方法をここに提案し（非定常法）、得られた結果を紹介する。

2. 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と浸透過程の経時変化をFig.1とPhoto.1に示す。不飽和透水係数はFig.1の結果に基づき、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。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \quad (1)$$

Fig.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(1)を積分すると

$$\int_{-z_i}^0 \frac{\partial \theta}{\partial t} dz = \int_{-z_i}^0 \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) dz \quad (2)$$

となる。ここに $z=0$ は、時間 $t=t_{n+1}$ における $\theta(z)$ が初期体積含水率 θ_0 の鉛直分布と交わる高さを表す。式(2)を離散化すると、次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{S_i}{\Delta t} &= \left[-k(\theta)_{z=-z_i} \frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z=-z_i} + k(\theta)_{z=0} \frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z=0} \right] \frac{t_n + t_{n+1}}{2} \\ &= k(\theta)_{z=0} \frac{t_n + t_{n+1}}{2} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z=0}^{t_n} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z=0}^{t_{n+1}} \right) / 2 - k(\theta)_{z=-z_i} \frac{t_n + t_{n+1}}{2} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z=-z_i}^{t_n} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z=-z_i}^{t_{n+1}} \right) / 2 \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 S_i はFig.1に示すように、時間 $t=t_n$ から $t=t_{n+1}$ の時間(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 $z=-z_i$ の区間水分量を表す。

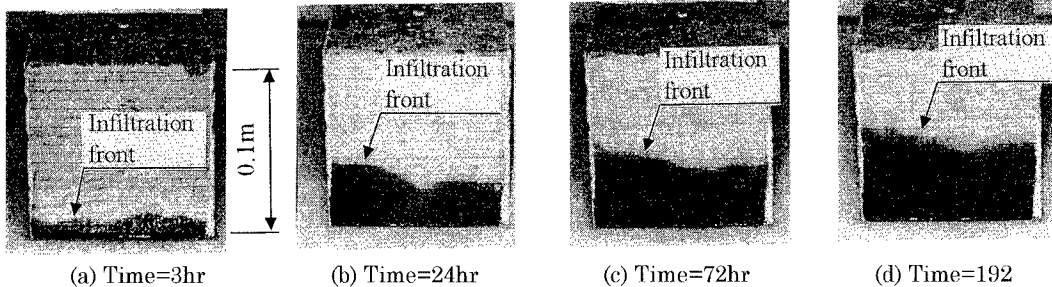


Photo.1 Infiltration process due to capillary pressure

ここで、斜線部の上端 $z=0$ を横切る水分フラックス(式(3)の1行目右辺第2項)は無視できるとすれば、式(3)は、

$$\frac{S_i}{\Delta t} = -k(\theta) \frac{t_n + t_{n+1}}{2} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \right)_{z=-z_i} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \bigg|_{z=-z_i} \bigg|_{t_n}^{t_{n+1}} \bigg/ 2 \quad (4)$$

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 に対する不飽和透水係数 $k(\theta)$ は、

$$k(\theta) \bigg|_{z=-z_i} = - \frac{2S_i}{\left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \bigg|_{z=-z_i} \bigg|_{t_n}^{t_{n+1}} \right) \cdot \Delta t} \quad (5)$$

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Fig.1に示すような $\theta(z)$ が求められるので、式(5)中の $\partial \psi / \partial z$ はこの $\theta(z)$ を基に、式(6)より求められる。

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (6)$$

ただし、式(6)の $\partial \psi / \partial z$ と $\partial \theta / \partial z$ の関係を結びつける $\partial \psi / \partial \theta$ は、水分保水曲線(ψ と θ の関係)^{2),3)}が分かれば容易に求められる。

Fig.2に示すような水分保水曲線^{2),3)}および式(5)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Fig.3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^{-11} から 10^{-15} 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。飽和から不飽和に至る体積含水率 θ が9%から8%に減少するにつれて、不飽和透水係数は急激に減少する。その後、 k は体積含水率 θ が3%に至るまでは緩やかに減少し、 $\theta \leq 3\%$ で再び k の減少が著しくなる。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。

4. 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、不飽和透水係数の算定を行った。

その結果、浸透過程の不飽和透水係数は体積含水率の減少に伴って、 10^{-11} から 10^{-15} の範囲に渡り非線形的に変化することがわかった。

【参考文献】

- 1) 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. 9
- 2) 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. 9
- 3) 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. 9

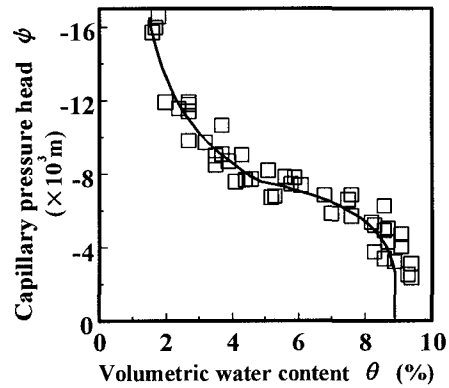


Fig.2 Moisture retention curve^{2),3)}

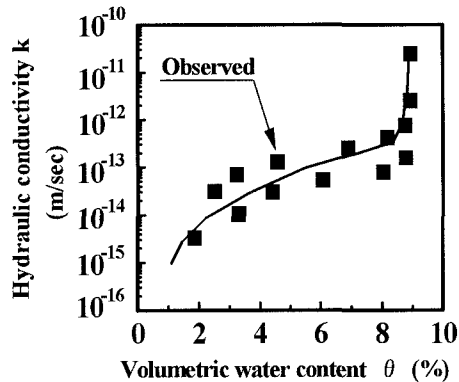


Fig.3 Relation between hydraulic conductivity and volumetric water content