

山梨大学 正会員 藤原 能男
同 〇 伊藤 強

1. はじめに

コンクリートなどの多孔材料中を流れる毛管浸透流については従来透水係数とキャピラリー定数をその流れを定める物性値としていた。ところが、キャピラリー定数はその多孔材料の有効径、流体との接触角、流体の密度、表面張力などに関係しているためその物理的意味が明確でない。特にコンクリートの場合には材料の有効径、流体との接触角をどのように採用すべきが不明である。

多孔材料中の毛管浸透流に関係する力は重力、圧力差（圧力こう配）という一般的な力の他に次の二つの力を材料および流体の物性に関係する力として特に考える必要がある。その一つは毛管現象によって流体を流そうとする力（毛管力）、もう一つは流体が材料中を流れる場合に生ずる抵抗力である。毛管力に関係する物性値としてキャピラリー定数を、抵抗力に関係する物性値として浸透係数（透水係数）を用いているのが一般である。

しかし筆者等はキャピラリー定数は前述のように物理的に不明確であるから、これのかわりに最終浸透高を用いることを提案し、浸透係数は平均浸透速度と同一であることを示す。

2. 毛管浸透流モデルと基礎方程式

多孔材料中の毛管浸透流の単純モデルは図-1に示す鉛直上向に立てた毛細管内の流れである。このモデルに作用する力は、表-1の文字記号を用いて、重力が $-\rho g(\pi/4)d^2 z$ 、表面張力が $\pi d T \cos \alpha$ 、抵抗力が $-T_0 \pi d (z + z_0)$ である。

一方、一般に流れは層流であるから $T_0 = (8\mu/d) u_m$ である。これらの力のつり合い方程式（運動方程式）をつくらば次式になる。

$$A (dz/dt) + (gz - B)/(z + z_0) = 0 \quad (1)$$

3. 最終浸透高 ZE, 代表浸透時間 t_0 , 平均浸透速度 V_0

図-1のモデルにおいて、水柱が最高に上昇して安定した高さを最終浸透高 ZE とすると $ZE = B/g$ 。また、 $z_0 = 0$ として、 $z = ZE/2$ における水柱の上昇速度を V_0 とすると、式(1)より $V_0 = (dz/dt)_{z=ZE/2} = g/A$ となり、これを平均浸透速度 V_0 とする。次に最終浸透高 ZE を平均浸透速度 V_0 で上昇する時間 t_0 は $t_0 = ZE/V_0 = AB/g^2$ となりこれを代表浸透時間と呼ぶことにする。

4. 基礎方程式の無次元化とその解

基礎方程式を無次元浸透長さ $\xi = z/ZE$, 無次元浸透時間 $\theta = t/t_0$ を用いて無次元化すると $d\xi/d\theta + (\xi - 1)/(\xi + \xi_0) = 0$ (2)

となり、初期条件 $\theta = 0$ のとき $\xi = 0$ を満足する解として

$$\theta = -\{\xi + (\xi_0 + 1) \ln |1 - \xi|\} \quad (3)$$

が得られる。 $\xi_0 = 0$ の場合には管の向きによって次のような解が得られる。

$$\text{鉛直上向き管の場合の } \theta \text{ を } \theta_1 \text{ として } \theta_1 = -\{\xi + \ln |1 - \xi|\} \quad (4)$$

$$\text{水平管の場合の } \theta \text{ を } \theta_2 \text{ として } \theta_2 = \xi^2/2 \quad (5)$$

$$\text{鉛直下向き管の場合の } \theta \text{ を } \theta_3 \text{ として } \theta_3 = \xi - \ln(1 + \xi) \quad (6)$$

図-1に示す単純モデルにおいて基礎方程式(2), およびそれらの解である式(4), (5), (6)に示されるように、この現象に関係する物性量としては最終浸透高 ZE,

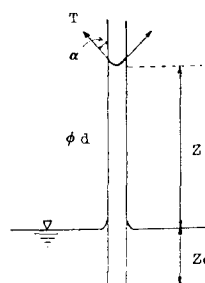


図-1 毛管流単純モデル

表-1 使用文字記号の説明

T	表面張力
α	接 触 角
d	管 内 径
z	毛管上昇高
z_0	水中に入った管の長さ
ρ	水の密度
g	重力の加速度
τ_0	管壁に働く摩擦抵抗力
μ	水の粘性係数
u_m	$u_m = \frac{dz}{dt}$
A	$A = 32\mu/(\rho d^2)$
B	$B = 4T \cos \alpha / (\rho d)$
ZE	毛細管における最終浸透高
ZE _P	多孔材料における最終浸透高
dp	多孔材料の有効径

代表浸透時間 t_0 の2量しかない。したがって多孔材料中の毛管流を支配する物性量のうち特に重要なものは最終浸透高 ZE と代表浸透時間 t_0 (または平均浸透速度 V_0) の2個であると言える。

図-2は鉛直上向き浸透、水平浸透、鉛直下向き浸透について無次元浸透長さ ξ と無次元浸透時間 θ の関係を図示したものである。浸透の向きによって浸透長に相当の差が生じてくる。

5. 最終浸透高 ZE とキャピラリー定数 K_c の関係

コンクリートなどの多孔材料中の毛管浸透流は管径一様な管路内の毛管浸透流と異なるため、一般にキャピラリー定数 K_c を用いて修正している。多孔材料における最終浸透高を ZE とすると $ZE = K_c \cdot T \cos \theta / (\rho g d p) \cdots (7)$ 一方円管における最終浸透高は $ZE = 4 \cdot T \cos \theta / (\rho g d) \cdots (8)$ である。両者においては接触角 θ などに当然差があるが、これらを同一とみなして、両式の比をとると、

$$ZE = (K_c/4) \cdot (d/d_p) \cdot ZE \cdots (9)$$

となる。すなわち、多孔材料の有効径 d_p と同一の管径の円管内の最終浸透高 ZE の $K_c/4$ 倍だけ多孔材料の最終

浸透高 ZE の方が大きいことを意味している。ここで、 ZE は実験により定めることができ、 K_c は多孔材料の有効径 d_p 、接触角 θ 、表面張力 T が定まらないと求まらない。

6. 平均浸透速度 V_0 と透水係数 k の関係

先に定義した平均浸透速度 V_0 は $V_0 = q/A = \rho g d^2 / (32 \mu)$ である。一方円管内の層流における平均流速は $u_m = (\rho g d^2 / (32 \mu)) dA/dx$ (Poiseuilleの法則)、またDarcyの法則より $u_m = k dA/dx$ であるから $k = \rho g d^2 / (32 \mu)$ となり、平均浸透速度 V_0 と透水係数 k とは全く同じものである。ただし dA/dx はエネルギーこう配である。

7. まとめ

- (1). 最終浸透高 ZE とキャピラリー定数 K_c は毛管流を流動させる力と両者は独立でない。
- (2). 平均浸透速度 V_0 と透水係数 k は同一のもので毛管流の流動抵抗に関係する量である。
- (3). 毛管浸透流を表わす物性値としては最終浸透高 ZE と透水係数 k が基本であり、これらの値を実験的に定める方法を確立する必要がある。

8. 謝辞

本研究に御協力頂きました堺毅日大教授、村田二郎都立大教授の両博士に深甚なる謝意を表す。

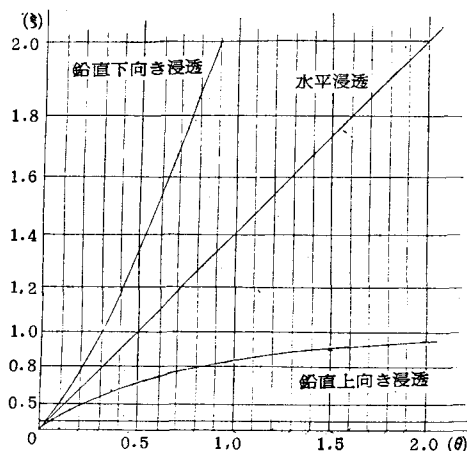


図-2 無次元浸透長さ ξ と無次元浸透時間 θ の関係

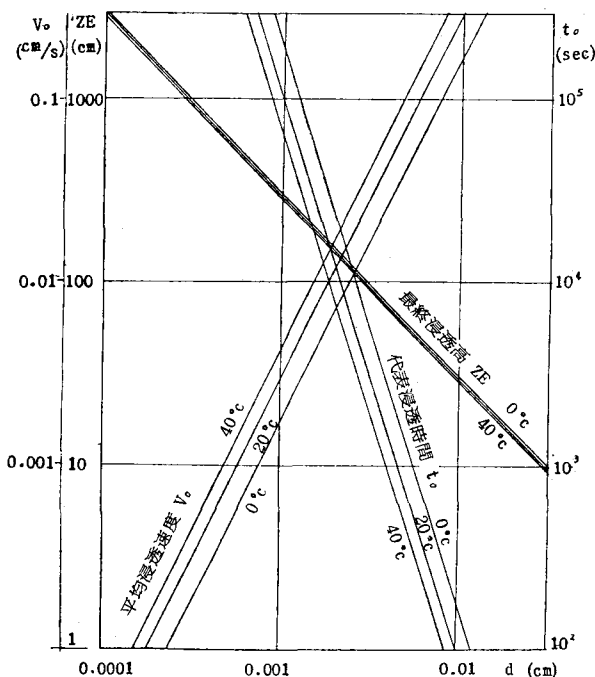


図-3 最終浸透高 ZE 、代表浸透時間 t_0 、平均浸透速度 V_0 、と管径 d 、水温の関係