

## 不飽和透水係数と比電気伝導度の相似性について

名古屋大学工学部 正員 松林宇一郎

1. まえがき：不飽和多孔質媒体の透水係数と比電気伝導度は、幾何学的に同一の不飽和水網上の、水分子と電子の運ばれ易さを意味しており、両者は互いに相似性をもっていると推測される。したがって、両者の関係を明かにすることにより、不飽和浸透メカニズムをより詳しく理解できるであろう。そこで、本研究では、まず、両プロセスの簡単なモデル化を行い、理論的説明を試みた。一方、ガラスビーズおよび砂を用いた不飽和透水実験を行い、同時に比電気伝導度を計測して両者の間の相似性を検討した。

### 2. 浸透過程と導電過程の理論的考察

不飽和浸透流の構造について、ここでは、毛管束モデルを基礎として考察する。このモデルでは、毛管吸引圧にに応じて(1)式で決まる径 $r$ より小さい空隙は水で満たされ、大きい空隙は空となっていると考える。ある $r$ を半径とする空隙の面積率を $f(r)$ とすると、 $f$ は水分特性曲線から $d\theta = f(r)dr$ として与えられる。半径 $r \sim r+dr$ の空隙を流れる流量 $dq$ は、流れを層流としてよいからHagen-Poiseuille型の(2)式で与えられる。ただし、 $lw$ はポテンシャル勾配、 $C_w(\theta)$ は各水分状態 $\theta$ での水脈の形状が円でないことや屈曲度等を考慮した補正係数である。ある含水率 $\theta$ でのDarcy流速は(3)式、透水係数 $K$ は(4)式となるが、(4)式を、一般化Kozeny式(5)式と比較することにより、 $C_w(\theta)$ を求めることが出来る。

一方、比電気伝導度についても同様に考えると、 $r \sim r+dr$ の電流密度 $di$ は(6)式、或る $\theta$ での電流密度は(7)式、比電気伝導度 $EC$ は(8)式となる。ここで、 $C$ は溶液の比電気伝導度、 $I_e$ は電位勾配、 $C_e$ は水脈の形状の効果をあらわす。なお、実験結果から $C_w(\theta)$ は $\theta$ のべき乗の関数形(9)式となることが分かっている。いま、 $C_w = C_e$ と仮定すると $EC$ は(10)式で表されることになる。

### 2. 実験および結果

本研究では、図1の2種の実験装置により $K$ と $EC$ を求め、含水率 $\theta$ （実験後カラムを解体して測定）を媒介として考察した。実験1は均等粒径（平均粒径0.25, 0.5, 0.75mm, 0.25mmと0.5mmのガラスビーズを体積で半々に混合したもの）のガラスビーズを用いた実験であり、実験2は粒径の分布する海砂（平均粒径0.43mm）を用い、電極の配置を工夫して縦・横方向の比電気伝導度 $ECL$ と $ECT$ を求める実験である。降雨は比電気伝導度1500~2000 $\mu S/cm$ の食塩水を注射針を付けた降雨発生器により定量ポンプで一定強度にコントロールして与えた。カラム内の流れ及び水分分布が一様になるよう下端において吸引圧を与えた。比電気伝導度は実験1では6ヶ所に電極（直径2.1mm, 長さ10cm, 間隔1.1cmで水平に平行に設置したもの）を取り付けて計測した。実験2は上下、左右の2組の電極を用いた。実験はほぼ定温条件で行い、内部の流れが定常となったことを確認したうえで計測を行った。溶液の電気伝導度は1800 $\mu S/cm$ に補正した。なお、 $K$ と $EC$ は共に $\theta$ のべき乗の形に整理できるため $\theta=0.15$ における $K$ と $EC$ によって(11)式で無次元化して比較する。実験1の $\theta$ に対する $Kr$ を図2に、 $ECr$ の変化を図3に示す。

### 3. 結果に対する考察

図2, 3からガラスビーズの不飽和浸透流の $Kr$ - $\theta$ 、 $ECr$ - $\theta$ 関係はともにべき乗型の関係(12)(13)式で表わせることがわかる。 $Kr$ のべき指数 $\alpha$ は平均 $\alpha=3.6$ であった。一方、 $ECr$ については、パーコレーション理論において、導電体と絶縁体の粒子が $p:1-p$ の割合で

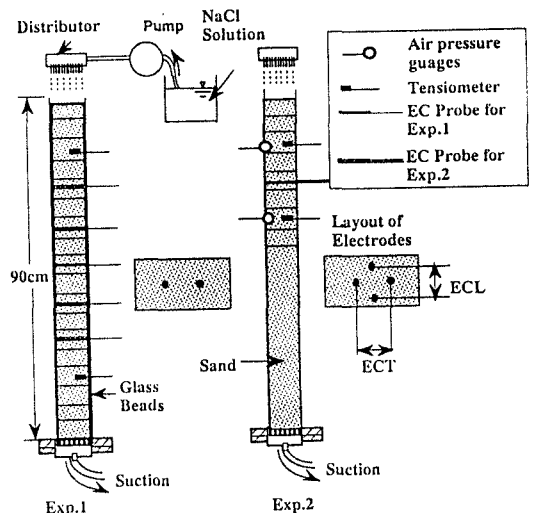


Fig. 1 Experimental setups

$$r = \frac{2\sigma}{\rho g \psi} \dots (1)$$

$$dq = C_w(\theta) k f(r) r^4 I_w dr \dots (2)$$

$$k = \pi g / 8 \nu$$

$$Q = \int_0^{\theta} C_w(\theta) k f(r) r^4 I_w dr \dots (3)$$

$$K = \int_0^{\theta} C_w(\theta) k f(r) r^4 dr \dots (4)$$

$$K = K_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\alpha \dots (5)$$

$$di = C C_e(\theta) f(r) I_e dr \dots (6)$$

$$i = \int_0^{\theta} C C_e(\theta) f(r) I_e dr \dots (7)$$

$$EC = \int_0^{\theta} C C_e(\theta) f(r) dr \dots (8)$$

$$C_w = C_0 \theta^\gamma \dots (9)$$

$$EC = \frac{C C_0}{(\gamma + 1)} \theta^{(\gamma + 1)} \dots (10)$$

$$K_r = K/K_0, K_0 = K(\theta_0)$$

$$EC_r = EC/EC_0, EC_0 = EC(\theta_0)$$

$$\theta_0 = 0.15 \dots (11)$$

$$K_r = (\theta/\theta_0)^\alpha \dots (12)$$

$$EC_r = (\theta/\theta_0)^\beta \dots (13)$$

混ざっているとき伝導度が(13)式で表されることが理論的に確かめられており、ここでの現象はpを飽和度とした場合に相当していると考えられる。

図4に本実験で得られた、べき指数 $\alpha, \beta, \gamma$ を整理して示した。 $\alpha$ と $\gamma$ はほぼ一定の値(平均値は  $\alpha=3.6$ ,  $\gamma=2.2$ )をとる。一方、 $\beta$ は(10)式から $\beta=\gamma+1$ となるはずであるが、実際には平均粒径によって大きく変化している。この理由については、今のところはっきりとは言えない。また図4で粒径が分布する場合には平均粒径は同一でも指数 $\alpha, \beta$ ともに均等粒径の場合と比べて小さな値を取る傾向がある。パーコレーション理論では場の次元が増加すると指数が増えることが示されており、粒径分布の相連により流路のフラクタル次元が変わるのではないかと考えられる。

場の異方性について、実験2では $\theta$ を測定しなかったのでK-ECL, K-ECTを比較して異方性を検討した。その結果は縦方向電気伝導度ECLの方が約1割程度大きくなっていた。(平均的にECL/ECT=1.07)不飽和浸透流では水脈のつながり方が流れ方向に強いことは十分推測でき、このためECL > ECTとなったと考えられる。

#### 4. まとめ

単粒構造の多孔質体を対象としてKとECを計測し、両者の関係を調べた。結果は、以下の通りである。

- (1) K, ECおよび補正係数 $C_w$ とも $\theta$ に関してべき乗の形をとる。K,  $C_w$ の指数 $\alpha, \gamma$ はほぼ一定で $\alpha=3.6, \gamma=2.2$ である。しかし、ECの指数 $\beta$ は平均粒径とともに減少した。
- (2) 均一粒径と比較すると、粒径が分布する方がK, ECとも指数は小さくなる。
- (3) 流れ方向のECの方が直角方向のECより約1割程度大きくなる。

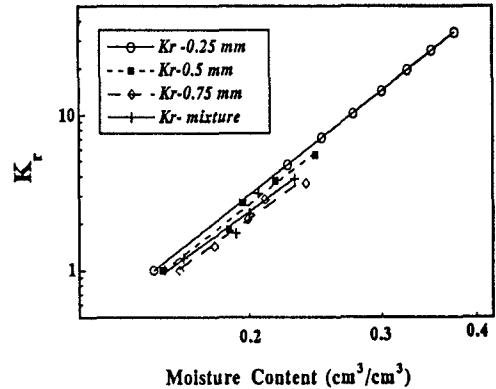


Fig. 2 Kr- $\theta$  relationships

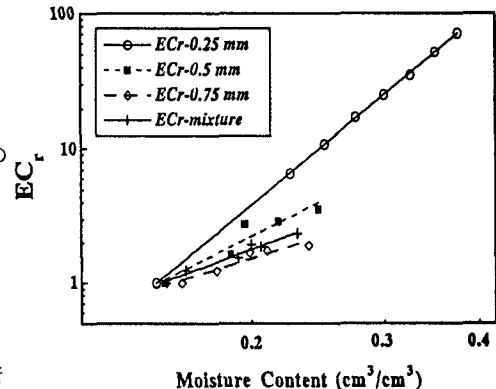


Fig. 3 ECr- $\theta$  relationships

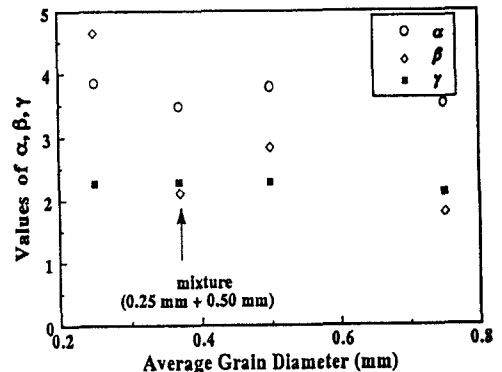


Fig. 4  $\alpha, \beta, \gamma$  for various grainsizes