

III-511

分配係数からみた不飽和帯中の水分移動特性

岐阜大学工学部 正会員 佐藤 健
 岐阜大学工学部 学生員 ○棚橋秀行

1. はじめに

地盤内の汚染物質の挙動解明のために、カラム試験がよく行われている。堀内・井上¹⁾は、通気法による不飽和カラム試験結果をVAN GENUCHTEN²⁾の提案したモデルによって解析し、分配係数が飽和度(体積含水率)に対して下に凸になるという報告を行った(図-1)。これに対して従来の研究のほとんどでは、飽和度による分配係数の変化はないとされており、本研究の実験(図-2)においても分配係数は変化せず、飽和の流れと同じ値となった。本研究はこの点について検討するため、通気法による実験と、VAN GENUCHTENらの提案したモデルによる解析を行ったものである。

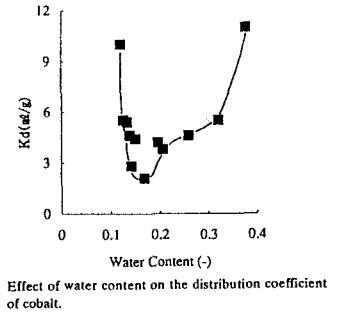


図-1 含水率～分配係数の関係(堀内・井上) 細砂・コバルト系、空気吸引による不飽和カラム試験の破過曲線の解析結果より

2. VAN GENUCHTENらのモデル

堀内・井上はVAN GENUCHTENらのモデルを多成分流れモデルと呼んでいるが、原文にはモデルに対する名称は明記されていない。多成分流れモデルという呼び方は、汚染物質が複数存在する流れ場のモデルともうけることができるので、まぎらわしい。VAN GENUCHTENらのモデルは間隙の水分を可動水、不動水と区分するのをはじめ、土粒子がそれぞれの水に接している部分も区分する考え方のものであり、むしろ領域区分流れモデルと呼ぶべきものであろう。(1)(2)式がVAN GENUCHTENらのモデルの基本式である。

$$\begin{aligned}
 (\theta_m + f\rho K) \frac{\partial C_m}{\partial t} + [\theta_{im} + (1-f)\rho K] \frac{\partial C_{im}}{\partial t} & \quad (1) \\
 = \theta_m D \frac{\partial^2 C_m}{\partial z^2} - \theta_m v_m \frac{\partial C_m}{\partial z}
 \end{aligned}$$

$$[\theta_{im} + (1-f)\rho K] \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \alpha (C_m - C_{im}) \quad (2)$$

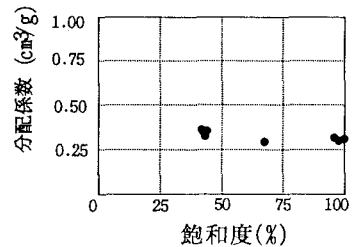


図-2 飽和度～分配係数の関係 豊浦砂・NH₄⁺系、吸引しない不飽和カラム試験後の土試料の脱離実験より

ここで、m:moble, im:immobile, C:液相濃度、θ:体積含水率、
 v_m:可動水の平均実流速(=q/θ_m)、α:物質移動係数、ρ:土の見かけ密度、f:可動水に接している部分の土の体積分率、K:分配係数、t:時間、z:距離である。VAN GENUCHTENらはこの式を4つの無次元量、

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha L}{v_m \theta_m}, \quad \beta = \frac{\theta_m + \rho f K}{\theta + \rho K}, \quad P = \frac{v_m L}{D}, \quad R = 1 + \frac{\rho K}{\theta} \quad (\text{遅れ係数})$$

で表現し、解析解を求めている。これらの未知数はカラム試験から得られた破過曲線とのfittingによってしか求められない。このモデルの特徴は、カラム試験の際に現れる破過曲線のtailingを可動水と不動水の間物質移動に要する時間から説明しようとしている点である。tailingは飽和カラム試験でも現れ、不飽和に限った現象ではない。本来、tailingは吸着反応に比べて脱着反応の速度が遅いことに起因している。すなわちVAN GENUCHTENらのモデルは、反応速度の代わりに可動水と不動水の間物質移動でtailingを説明しようとしている点に特徴がある。堀内・井上はこの式を応用して水分領域を3つまで考え、吸着反応として瞬時平衡と、反応速度を考慮したものの2つを併用している。

3. 実験結果から求めた分配係数

通気法による不飽和カラム試験を行った。土試料は豊浦砂(粒径110~450 μ m)、汚染水としてNH₄⁺水(NH₄Cl、100ppm)を用いた。実験の詳細については、文献3)を参照されたい。この実験方法はカラム内飽和度を一定にするためのものであったが、本研究では一定にはならなかった。試験後の異なる飽和度の各位置より試料を採取し、脱離実験してみたが、NH₄⁺吸着量の試料でも同じであった(図-3)。以上のことから、飽和度によって分配係数が影響されないという事実が確認された。残る疑問は解析によって分配係数が変化しに過ぎないのではないかという点である。そこで本研究でも解析を行ってみた。

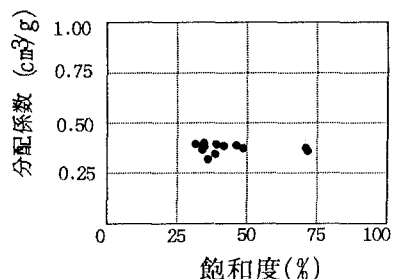


図-3 飽和度~分配係数の関係
豊浦砂・NH₄⁺系、吸引した不飽和カラム試験後の土試料の脱離実験より

4. 解析から求めた分配係数

解析を行うのにあたってまず問題となったのは飽和度をいくらにするのか、という点であった。ここではカラム内の水分分布状態に関わらず、カラム全体としてどれだけの水分が存在したかによって平均飽和度を計算した。3.の実験によって得られた破過曲線と(1)(2)式の解析解から修正Marquardt法によって分配係数を算出した。その結果を図-4に示す。分配係数の値に違いがみられない。不飽和帯では実流速 v_m は飽和度に依存し、飽和度を正確に把握しないと実験で得られた破過曲線とのズレが生ずる。このずれている破過曲線を遅れ係数Rで補正しようとするのであるから、遅れ係数の値も変化する。遅れ係数Rは $R=1+\frac{\rho K}{\theta}$ と表され、体積含水率 θ と分配係数Kの関数

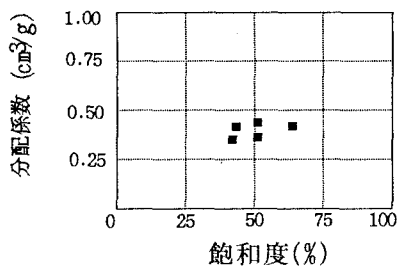


図-4 飽和度~分配係数の関係
豊浦砂・NH₄⁺系、吸引した不飽和カラム試験後の破過曲線の解析結果より

であるため、分配係数が変化することになる。つまり、実験カラム内を均一な飽和度であると仮定して解析を行った誤差の蓄積は分配係数にしわ寄せされてくるはずであるが、その影響は実験の測定誤差範囲の程度でしかなく、分配係数が飽和度によらずほぼ一定値をとることが図-4から確認できた。

5. おわりに

本研究では、実験を通じて飽和度によって分配係数が変化しないことを確認した。堀内・井上らがこれと異なる結果となった原因は解析にあるのではないかと考え、解析も行ってみたが、ここでも分配係数は飽和度によらずほぼ一定値になった。カラム試験(吸引・非吸引)の結果は、流出濃度が原水濃度と等しくなった後、素早く土試料を採取して飽和度の測定を行い、脱離実験により吸着量を測定したものである。各飽和度での分配係数が同じということから、不飽和帯中の水分移動は土粒子表面を満遍無く濡らしながら行われ、濡れている部分と乾いた部分が固定的に存在するのではない事が類推された。また、こうした水分移動は空気の流れがある場合でも成立していることがわかった。

【参考文献】

- 1) 堀内将人・井上頼輝・松下直幹・吉田卓司：不飽和土壌の収脱着反応特性への含水率の影響に関する実験的検討，土木学会論文集，No.452/II-20，pp.1~20 (1992)
- 2) M. Th. Van Genuchten and P. J. Wierenga：Mass transfer studies in sorbing porous media, I. Analytical solutions, Soil Sci. Soc. Am. Proc, 40, pp. 473~480 (1976)
- 3) 佐藤・棚橋・小島・湯浅：砂カラムを用いた不飽和帯における吸着現象の実験，土質工学研究発表会(平成5年)