

通気帯における LNAPL 原液浸透挙動の数値解析

熊本大学工学部 学生会員 ○三上 和昭

熊本大学大学院 正会員 椋木 俊文

熊本大学大学院 学生会員 植田 貴俊

1. はじめに

低比重非水溶性流体：LNAPL (Light-Non- Aqueous-Phase-Liquid) による土壌地下水汚染は、工学的には多孔体中での多相流として扱われる。効率的な調査や浄化対策の策定には、多相流数値解析によるシミュレーションが有用である。しかし、実務での利用にはいくつか障害があり¹⁾、次のような問題が挙げられる。1) 不飽和浸透パラメータを求める実験には、時間と費用がかかるため、実際には推定値を用いた解析を行うことが多い。2) 不均質な地盤、地下水位の変動、降雨、微生物の影響などが考えられ、それら全てを考慮した解析は困難である。3) 数学モデル、数値解法自体が発展途上である。以上より、本報では LNAPL 原液浸透挙動における不飽和浸透パラメータの感度解析を行った。推定値を用いた場合の解析結果の精度や不飽和浸透モデルの改善に利用できると考えている。

2. 解析方法

2-1. 数学モデル

2 相流における不飽和浸透特性を記述する方法は、相対透過係数(k_r)、飽和度(S)と毛管圧力(P)の関係で表わされる k - S - P 関係が挙げられる。本解析では、次式で表わされる一般的な Mualem²⁾—van Genuchten³⁾モデルを利用した。

$$h_c = \frac{1}{\alpha_x} \left(S_e^{-\frac{1}{m}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1a)$$

$$k_r = S_e^{\zeta} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right] \quad (1b)$$

ここで、 h_c は毛管圧力水頭(L), S_e は有効飽和度であり、 $S_e = (S_w - S_{wr}) / (1 - S_{wr} - S_{Nr})$ によって定義される。 S_{wr} は水の残留飽和度、 S_{Nr} は LNAPL の残留飽和度である。 α_x [1/L], n [-]は van Genuchten のフィッティングパラメータ (VG パラメータ)であり、 $m = 1 - 1/n$ として計算される。排水過程の S - P 曲線に対しては $x = d$ 、浸潤過程に対しては $x = i$ とし、 $\alpha_i = 2\alpha_d$ の関係を用いた。不飽和浸透パラメータの感度解析は、この VG パ

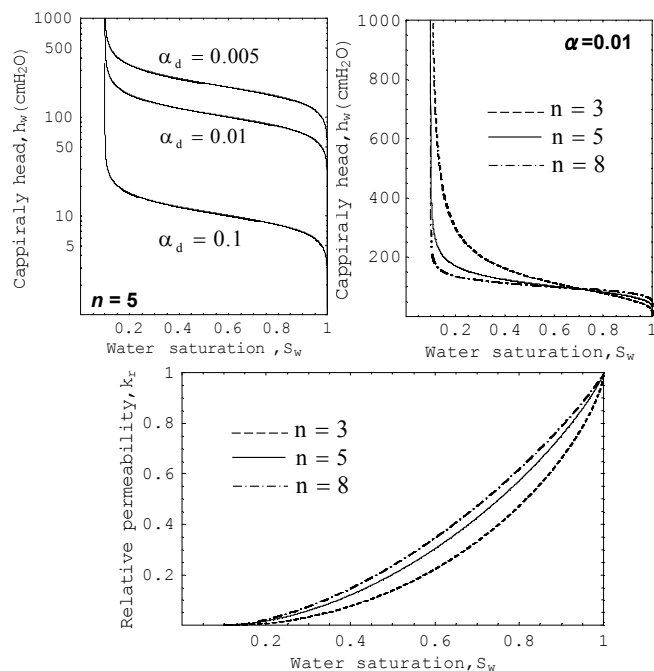


図 1. VG パラメータと k - S - P 曲線

表 1. 解析パラメータ

Field properties		
間隙率 ε	0.40	
透水係数 K (cm/s)	0.001	
Fluid properties		
	Air	Benzen
密度(g/cm ³)	0.001204	0.878
粘度(poise)	0.0002	0.0065
k - S - P model fitting parameter		
表面張力 $\sigma_{GW}, \sigma_{GN}, \sigma_{NW}$ (10 ⁻³ N/m)	72.75, 27.9, 28.88	
残留飽和度 S_{Ar}, S_{Nr} (-)	0.10, 0.10	
α_d (cm), α_i (cm), n (-)	0.01, 0.02, 5	
ζ_N, ζ_A (-)	0.5, 0.5	

ラメータを変化させることで行った。VG パラメータの k - S - P 関係への影響を図 1 に示す。 k_r は相対透過係数であり、 ζ は不飽和浸透パラメータである。 ζ の値は幾つか提案されている⁴⁾が、ここでは $\zeta = 1/2$ を採用した。解析コードには USEPA から配布されている NAPL: Simulator⁴⁾を利用した。

2-2. 解析条件

基本となる解析パラメータを表 1 に示す。LNAPL としては Benzen を想定した。VG パラメータが変化した場合、定常状態の水飽和度分布も変化するため、地盤

は絶乾状態とし、空気-LNAPL 2 相流として解析した。解析手順は 2 つのステップに分けられる。Step1 では上面中央より、0.5mH₂O の一定水頭で 1.5 日間 LNAPL を注入する (LNAPL 注入過程)。Step2 では LNAPL 注入を停止し、10 日間放置する (拡散過程)。解析領域は 10m × 10m の 2 次元鉛直断面とした。

3. 解析結果

3-1. VG パラメータ α の感度解析

図 2(a1-a3)に α 値を変化させた場合の LNAPL 注入停止直後の LNAPL 飽和度分布を示す。 α 値が小さくなるほど注入量が増加している。一般に α 値はその地盤の侵入圧の逆数を示し、 α 値が小さい地盤ほど大きな毛管圧力を持つ。そのため、 α 値が小さい解析では、より強い毛管圧力が働き、注入量が増加したと考えられる。また、 α 値は拡散過程には目立った影響を与えなかった。

次に、実地盤スケールと模型スケールにおける α 値の影響を調べるために、注入幅、注入時間、LNAPL の水頭を 1/10 にした 1m×1m の解析を行った。結果を LNAPL 飽和度分布として図 2(b1-b3)に示す。模型スケールでは α 値の影響が非常に大きく、 $\alpha=0.1$ と $\alpha=0.005$ では注入量は約 3 倍、浸透幅は約 2 倍になっている。一方、実地盤スケール(図 2a)ではそれほど大きな変化は見られなかった。また、 α 値が小さくなるほど、2 つのスケールの飽和度分布は異なる傾向にある。これは、スケールを 1/10 にした場合でも、間隙の大きさは変化していないためである。そのため、間隙の大きさに依存する毛管圧力も 2 つのスケールで変化せず、模型スケールにおいて相対的に毛管圧力を過大に評価していることになる。ゆえに、毛管圧力が大きくなる α 値が小さい解析において、より大きな違いがみられたと考えられる。したがって、不飽和浸透では実地盤スケールと模型スケールで、単純な相似則は成立せず、注意が必要となる。

3-2. VG パラメータ n の感度解析

VG パラメータの n 値についての LNAPL 注入過程、拡散過程の感度解析を行った。拡散過程の解析結果を LNAPL 飽和度分布で図 3 に示す。 n 値は注入過程には大きな影響を与えなかったが、拡散過程では n 値が大きくなるほど、浸透速度が大きくなった。 $n=3$ に比べ $n=8$ では 10 日後の浸透深さが約 2 倍となった。 n 値は、物理的には多孔体の均一性を表わすといわれ⁵⁾、解析上では S-P 曲線、S-k 曲線の傾きを変化させる(図 1)。 α 値

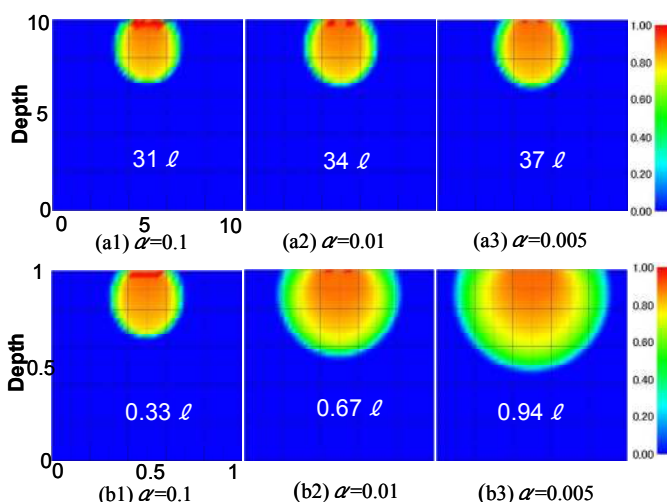


図 2. VG パラメータ α の感度解析結果 (単位: m)
(上段: 10m×10m, 下段: 1m×1m)

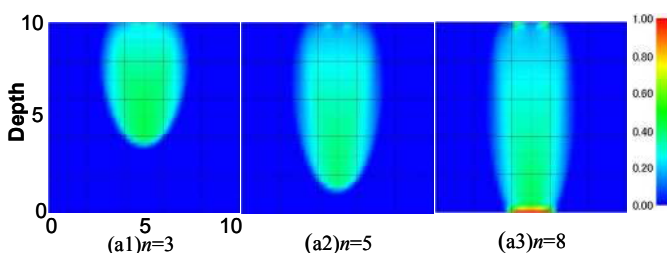


図 3. VG パラメータ n の感度解析結果 (単位: m)

は拡散過程に影響を与えなかったことから、 n 値の変化による S-k 曲線の傾きの変化によって、拡散過程における浸透速度が変化したと考えられる。

4. まとめ

LNAPL 原液浸透挙動における VG パラメータの影響を、空気-LNAPL 2 相流において評価し、 α 値は注入量、浸透幅に、 n 値は浸透速度に影響することが明らかになった。しかし、均質地盤においては、透過係数などと比べ影響は限定的である。今後は、それぞれの相の残留飽和度を変化させた場合や不均質地盤における k-S-P 関係の影響を評価していく予定である。

<参考文献>

- 1) 地盤工学会編：続・土壌地下水汚染の調査・予測・対策，丸善出版，pp. 31-52, 2008.
- 2) Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12, 513-522.
- 3) Van Genuchten, M. T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- 4) Guarnaccia, J., Pinder, G. and Fishman, M., 1997. NAPL: Simulator Documentation, EPA/600/R-97/102. *National Risk Management Research Laboratory, USEPA*, Ada, OK 748
- 5) 藤縄克之，日比義彦，藤原幸彦，多孔体中における水-疎水性液体-気体の等温多相流れに関する研究の進歩，農業土木学会論文集，214, pp. 149-158, 2001 年 8 月