# 非平衡吸着式による VOC 洗浄の数値解析

株式会社大林組 正会員 〇三好 悟 株式会社大林組 正会員 久保 博

### 1. 目的

揚注水井を用いた水循環によって汚染土壌を原位置浄化する、通水洗浄と呼ばれる工法がある。通水洗浄の 過程では、土壌間隙に存在する汚染物質が地下水中を移行して回収されることと、固相から液相への平衡移動 によって土壌自体に含有される汚染物質が回収されることが期待される。

施工効果予測のために、通水洗浄による土壌汚染浄化の過程をシミュレートする必要がある。通常、汚染物 質移行の数値解析には移流拡散式が用いられ、さらに固相吸着を考慮に入れる場合は、線形ないし非線形の瞬 時平衡式を上記式に連立させる。しかしながら、汚染物質の種類や汚染の形態によって、通水洗浄過程をこれ らの数式で表現することが難しい場合がある(Bahr and Rubin 1987, Bahr 1989 など)。例えば、ベンゼンの ような疎水性の有機物による土壌汚染には土中に含まれる有機物が関与していると考えられ、その通水洗浄で は長期間にわたって徐々に汚染濃度の低下が認められる例がある。そのような過程を瞬時平衡式を用いた物質 移行解析によって模擬するのは難しい。

ここでは、ベンゼン汚染土通水洗浄の時間的効果を表現するために可逆非平衡の吸着式を導入し、それを用いた数値解析結果と別に行う室内実験の結果を比較し、この数式の適用を評価する。

20\*

1

~\*)

### 2. 非平衡吸着式

非平衡吸着は式(1)のように表される(例えば、Zheng and Bennett 2002)。これと式(2)の移流拡散方程式を連立し、液 相濃度 **C**の時間変化を求める。

式(1)における物質移動定数 $\beta$ をパラメータとして数値解 析を実施する。得られた結果と室内実験結果のフィッティン グにより $\beta$ を定める。

### 3. 方法

### 3-1 室内実験

図1に示すカラム装置を用いて室内実験を 行った。この装置に、作成した模擬ベンゼン 汚染土もしくは実際の汚染現場から採取さ れたベンゼン汚染土を充填し、ポンプを用い て一定流量で水を透過させた。この実験の諸 元および計測量を表1に示す。

カラムを透過した水を一定の時間間隔で 一定量採取しそのベンゼン濃度を記録した。

#### 3-2 数値解析

い
諸
ごで
ごで
こ。
タンク
図 1 カラム実験装置

シリンジ

	表1 カ	ラム実験諸元	i
諸元	単位	模擬 汚染土	実汚染土
直径	[cm]	5.0	5.0
高さ	[cm]	5.0	5.0
湿潤密度	$[g/cm^3]$	1.69	1.51
含水比	[-]	0.14	0.34
分配係数	[L/kg]	0.52	14.9
透水係数	[cm/s]	2. $0 \times 10^{-3}$	3.0×10 <sup>-4</sup>
流量	$[cm^3/s]$	0.6	0.2

上の実験を模した鉛直1次元の数値解析を

実施した。縦分散度は Gelhar et. al. 1992 に基づき試験スケールの 1/10 とし、その他の諸定数は表1 に準じて入力した。フィッティングは、室内実験と数値解析の結果における最終濃度の比較によって行った。

キーワード 土壌汚染 洗浄 VOC ベンゼン 数値解析 移流拡散 吸着 非平衡吸着式 カラム実験
連絡先 〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4丁目-640 (株)大林組 技術研究所 TEL 0424-95-1060

-511-

$\rho_s \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial t} = \beta \left( \mathbf{C} - \frac{\mathbf{C}}{Kd} \right)  (1)$
$\frac{\partial \mathbf{C}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mathbf{D}_{ij} \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial (v_i \mathbf{C})}{\partial x_i} - \frac{\rho_s}{n} \frac{\partial \mathbf{C}^*}{\partial t}  (2)$
ρs:固相のかさ密度、 <b>C</b> *:固相濃度、 <b>C</b> :液相濃度、 β:物質移動定数、Kd:平衡分配係数、 <b>D</b> :分散係数、 <b>v</b> :流速、n:有効間隙率

#### 7-256

## 4. 結果

室内実験および数値解析の結果を図2および図3 に示す。縦軸を透過液のベンゼン濃度の常用対数、 横軸を経過時間とし、実験結果を四角で、数値解析 結果を三角で表した。

模擬汚染土の室内実験では、透過液の対数ベンゼ ン濃度は 1mg/L 程度まで直線的に減少し、その後緩 慢に勾配変化しながら減少する。それに対して数値 解析では、2mg/L 程度まで直線的に減少して明確な 折れ点を示し、緩い勾配の直線的な減少が続く。

実汚染土では、1mg/L 程度まで、室内実験では緩 慢な勾配変化を示すのに対して数値解析では直線的 に減少する。しかし、その後は両者がほぼ重なって 直線的に減少していくことがわかる。

方法の項で述べたようにβを定めた結果、模擬汚 染土 1.0×10<sup>-5</sup>[1/sec]、実汚染土 3.5×10<sup>-5</sup>[1/sec]と なった。

## 5. 考察

以上の結果から、採用した非平衡吸着式は、通水 洗浄の過程を模擬しうると考えられる。

2 つの室内実験の結果から通水洗浄の過程は大き く分けて、(1)初期間隙中の汚染物質の移流が支配的 で、濃度減少が速い期間、(2)固相からの溶出速度が 支配的で濃度減少が遅い期間の、2 つの期間からな ると考えられる。室内実験結果に明確な折れ点が観 測されないのは、(1)と(2)の状態遷移が緩やかに起





図3 実汚染土の室内実験および数値解析結果

こるためであると考えられる。すなわち、これらのベンゼン汚染土では、固相からのベンゼンの溶出しやすさ が一定でなく、溶出の進展に伴って徐々に溶出しにくいものへ遷移していくことが考えられる。

それに対して今回採用した非平衡吸着式では、固相から液相への溶出しやすさを一定の物質移動定数を用いた数式として表現しているため、濃度変化のプロット上(1)から(2)への明確な折れ点を生じている。

また、非平衡吸着式を用いた数値解析によって、2種類の土のうち実汚染土のほうがよりよく模擬されている。このことは、模擬汚染土と比べて実汚染土の溶出形態のほうが単調であった可能性を示唆している。

今後は同様の室内実験を多く実施してデータを蓄積し、数式の改良を進める所存である。

## 参考文献

- Bahr, J. M. and J. Rubin, 1987, Direct comparison of kinetic and local equilibrium formulations for solute transport affected by surface reactions, Water Resour. Res., 23(3), pp438-452
- Bahr, J. M., 1989, Analysis of nonequilibrium desorption of volatile organics during field test of aquifer decomposition, J. Contam. Hydrol., 4, pp205-222
- Gelhar, L. W. et. al., 1992, A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, Water Resour. Res., 28(7), pp1955-1974
- Zheng, C. and Bennet, G. D., 2002, Applied Contaminant Transport Modeling Second Edition, Wiley-Interscience