

◆ 環境影響評価特集 ◆

地盤汚染の影響予測に用いる実用的な数値解析手法の検討

小橋秀俊* 三木博史** 古田光弘*** 小畠敏子****

1. はじめに

今後の建設事業は工場や事業所等の跡地で実施されるものも多くなり、用地内で重金属類や有機系化合物などの土壤汚染や地下水汚染に、遭遇するケースが増加すると予想される。

こうした問題に対応するため、建設省土木研究所では(財)土木研究センター及び民間21社との間で、官民連携共同研究「地盤環境の性状保全型建設技術の開発」(平成9~11年度)を実施し、影響予測及び影響防止対策技術の開発を行っている。

本報告ではその成果の一部として、数値解析等の影響予測技術の現状と課題、建設実務に使える数値解析手法の検討状況を紹介する。

2. 影響予測技術の現状と課題

2.1 地盤汚染に関するアセス法の動向

新しい環境影響評価法のもとで、平成11年6月より「土壤汚染」が標準外項目に加わることとなった。本項目では、過去に行われていた汚染物質の浸透・投棄等は事業者の責任ではないが、二次的な掘削では事業者側にも責任があるとの立場を取っている。以下のような地域に事業計画がかかり、掘削を行うと考えられる場合は項目の追加を行う。

- (1) 自治体等により過去に土壤汚染を生じた地歴が把握されている土地
- (2) 「農用地の土壤の汚染防止等に係る法律」に係る農用地土壤汚染対策地域の指定地
- (3) 鉱山等、土壤汚染物質の採取が行われている又は、過去に行われていた土地
- (4) 処分場等、土壤汚染物質の廃棄が行われている又は、過去に行われていた土地
- (5) その他、汚染の疑いが極めて高いと思われる土地

環境影響評価の予測技術では、事業が具体化する前の段階で、既存資料や補足的に行う現地調査等の限られた情報から、汚染範囲の予測、複数の保全対策案の比較や効果の評価といったことが要求される。

2.2 建設事業における影響予測技術の重要性

建設事業においては、構造物等の詳細設計の段
Study of practical simulation method for the prediction of ground contamination impact

階や掘削等の工事実施の段階で、用地内の土壤や地下水汚染が顕在化し、対応策に苦慮する場合がある。現在のところ、恒久対策の基本は浄化や封じ込めと考えられているが、地盤条件、技術の熟度、コストや工期等の問題から容易に実行できない場合が多い。そのため、暫定対策技術として影響予測技術やモニタリング技術で対策効果や保証期間を確認しつつ、汚染経路を遮断したり拡散を防止することが不可欠となっている。冒頭に述べた官民連携共同研究はこうした観点からの研究である。

2.3 数値解析技術の現状と課題

広域汚染に結びつき易いと言われている、水溶性の地下水汚染の数値解析技術は、以下のようないくつかの課題を抱えており、今後、実用化に向けた研究の必要がある。

- (1) 国内の水溶性汚染の移流分散数値解析プログラムとしては、有限要素系と差分系の10数コードがあり、平面二次元と最近は三次元プログラムも公開され始めている。プログラムでは移流分散方程式が基礎式となっており、移流項(地下水実流速 V_n による移行)、分散項(縦分散長 α_L : 流速方向への汚染物質の分布の大きさを表す指標、横分散長 α_T : 深度や平面内直角方向の分布の大きさをあらわす指標)、遅延項(遅延係数 R_d : 地盤への吸脱着による流速移行に対する時間的な遅れの倍率)の3項から構成されている¹⁾。
- (2) しかしながら、諸定数が解析結果に与える影響や感度が十分把握されておらず、環境影響評価などでは既存資料から、どの程度の精度で概算値を設定するのか判断が難しい。
- (3) 縦分散長は、移行スケールの増大に応じて大きくなるとの指摘があり、実測推定値と移行距離との関係を示した文献も存在する²⁾。特にこうした知見は、室内試験の実施が難しいアセス段階では、有力な手段となりうる。また、帶水層の規模に対する汚染源の大きさや形状によって、解析プログラムの次元や、縦横分散比の設定をどうするかも重要な課題である。大型土槽実験や土柱カラム試験などで、これらの知見や疑問点の検証が望まれる。
- (4) 遅延係数については、アセスや対策設計では

簡便な吸着試験法が望まれるため、バッチ試験などの搅乱土を用いた方法で、推定入力出来る方法を検討する必要がある。また、遅延係数は物質濃度の依存性があると言われており、そうした配慮をせずに数値解析に使用して問題がないのか、確認が必要である。うち、本報文では(2),(3)の課題に取り組んだ。

3. 入力定数の感度解析³⁾

平面二次元の有限要素系コード:Dtransu-2D-ELを用いて、大型実験土槽(7m×4mの平面)を想定した定数感度解析を行い、汚染物質の到達形状に支配的な影響をもつ入力条件を明らかにすることとした。感度解析ではまず、一定濃度の非吸着性物質を連続注入した場合を想定し、地下水の実流速 V_n 、汚染物質の縦分散長 α_L 、縦横分散比 α_T/α_L の3条件を、表-1の36ケースで変化させた。分散長の設定あたっては、2.3(3)で述べた知見から、移行距離0.5m, 5m, 100m程度に対応

する1cm, 10cm, 100cmとした。うち1ケース(Case3-1-1)については、遅延係数 R_d を2.5, 5.0, 10.0, 20.0, 40.0と変化させ、吸着性の程度による到達範囲の変化や、物質の到達距離と地下水移行距離との関係を検討した。吸着性が低く移動性が高いクロム等の重金属では、文献値に土質や測定法等による変域(10~50程度)がみられるため、この点を考慮した設定値幅とした。比較は注入開始から20日後の到達形状で行った。地盤による吸着性がない場合($R_d = 1$)の解析結果を図-1に、吸着性がある場合($R_d > 1$)の解析結果を図-2に示しており、以下のようなことがわかった。

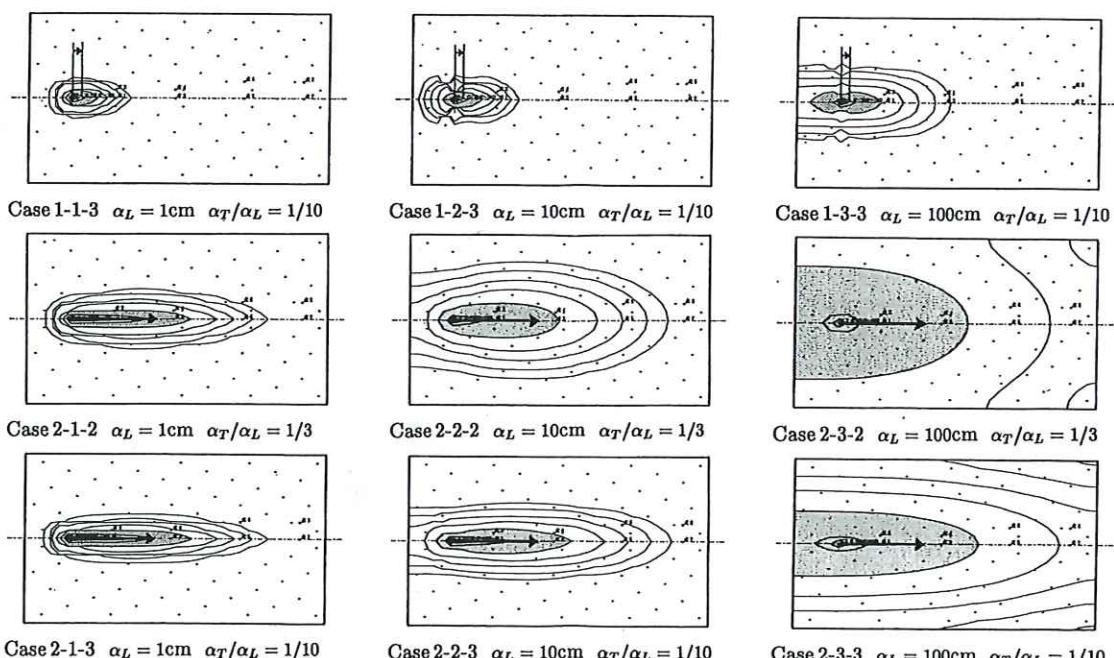
(1) 非吸着性物質の場合は分散現象のため、低濃度の到達前線が地下水の数倍~10倍程度前方を移行する。実流速 V_n と同じレベルで挙動するのは、比濃度10%以上の前線であり、2%以下の低濃度前線の挙動は、縦分散長 α_L に大きく支配されている。流速が10倍になっても、低濃度前線の

表-1 汚染到達状況の定数感度解析ケース

分散長	縦分散長 : $\alpha_L = 1\text{cm}$				縦分散長 : $\alpha_L = 10\text{cm}$				縦分散長 : $\alpha_L = 100\text{cm}$			
	縦横比 1/1	縦横比 1/3	縦横比 1/10	縦横比 1/30	縦横比 1/1	縦横比 1/3	縦横比 1/10	縦横比 1/30	縦横比 1/1	縦横比 1/3	縦横比 1/10	縦横比 1/30
実流速												
実流速 : V_n 1cm/日	Case 1-1-1	Case 1-1-2	Case 1-1-3	Case 1-1-4	Case 1-2-1	Case 1-2-2	Case 1-2-3	Case 1-2-4	Case 1-3-1	Case 1-3-2	Case 1-3-3	Case 1-3-1
実流速 : V_n 10cm/日	Case 2-1-1	Case 2-1-2	Case 2-1-3	Case 2-1-4	Case 2-2-1	Case 2-2-2	Case 2-2-3	Case 2-2-4	Case 2-3-1	Case 2-3-2	Case 2-3-3	Case 2-3-1
実流速 : V_n 1cm/日	Case 3-1-1	Case 3-1-2	Case 3-1-3	Case 3-1-4	Case 3-2-1	Case 3-2-2	Case 3-2-3	Case 3-2-4	Case 3-3-1	Case 3-3-2	Case 3-3-3	Case 3-3-1

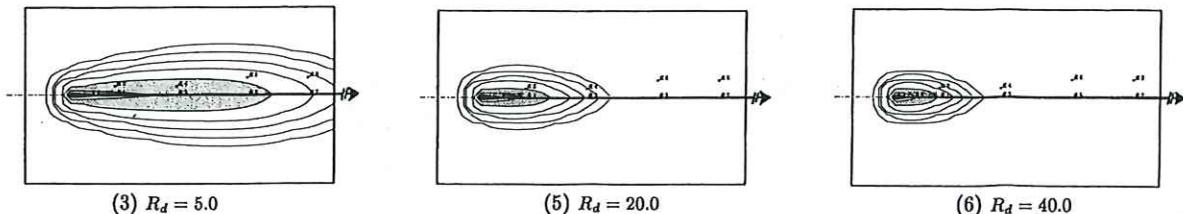
<比較条件> 注入開始20日後の汚染到達形状にて比較を行う

<遅延係数に対する検討> 遅延係数 R_d を2.5, 5.0, 10.0, 20.0, 40.0と変化させた



凡例 濃度比等高線は注入点近傍より75, 50, 10, 2, 0.5, 0.1, 0.02%、網掛け部は10%以上の領域 地下水流到達距離

図-1 流速、分散長を変化させた場合の汚染形状(非吸着性、注入開始20日後、7m×4mの平面)

図-2 遅延係数を変化させた場合の汚染形状 (吸着性、 $V_n = 1.0\text{m}$ 、注入開始 20 日後、 $7\text{m} \times 4\text{m}$ の平面)

移行距離は 5 倍程度に過ぎないものもみられる。

(2) 縦分散長 α_L を 1 衝大きくするだけで、到達前線の形状が一変してしまう場合もある。縦分散長は移行距離のスケールに伴って増大するとの知見があり (例えば 10m で 30cm、100m で 300cm のレベル)、移行距離に対応した縦分散長 α_L の入力は重要である。また、実流速 V_n は移行距離を推測するうえで必須である。

(3) 縦横分散比 α_T/α_L は通常は $1/10 \sim 1/30$ 程度と言われているが、 $1/3$ 、 $1/30$ とすることでの到達幅の変化よりも、過大な縦分散長 α_L が入力されて、大きな横分散長 α_T が設定される影響の方に注意すべきである。

(4) 遅延効果により、吸着性物質では到達前線が地下水の移行よりも遅れ、解析上は実流速 V_n が $1/R_d$ の場合の到達形状にはほぼ一致する。したがって、到達範囲が大きい場合には、遅延係数 R_d の決定法による到達形状の変動に注意が必要である。

4. 大型土槽実験による分散長の検討 4)

図-3 のような大型土槽 (長さ $7\text{m} \times$ 幅 $4\text{m} \times$ 深さ

2m) に、透水係数が $2 \times 10^{-2}\text{cm/s}$ 程度の砂地盤を作製し、実流速 $0.6\text{m}/\text{日}$ の流れの場を形成した。そして、注入点 (直径 5cm の球形) から調整塩水 ($10,000\text{ppm}$ をアルコールで密度調整したもので非吸着とみなせる) を連続注入のうえ、○印の測定点で採水し、電気伝導度計を用いて濃度時刻歴を測定した。さらに、平面二次元プログラムと軸対称二次元プログラムの 2 種類で、縦分散長 α_L と縦横

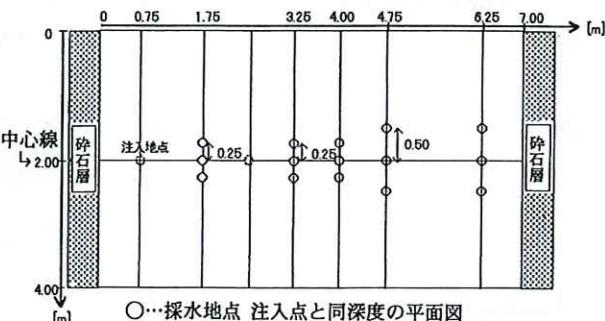


図-3 大型土槽実験の平面図 (注入点と同深度)

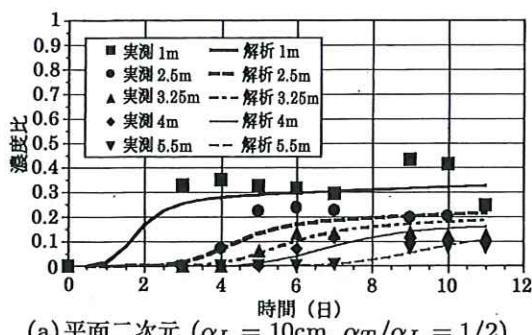
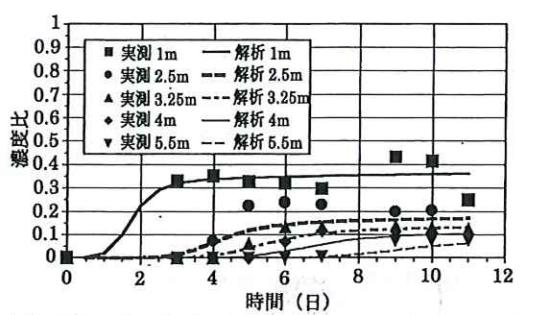
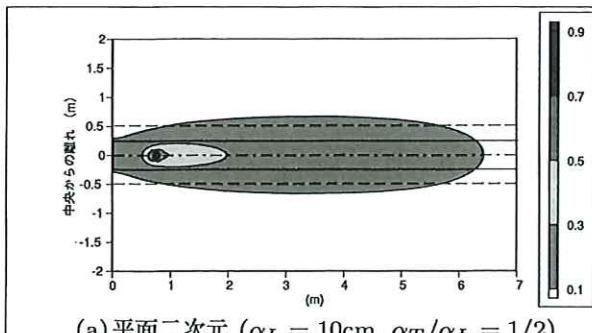
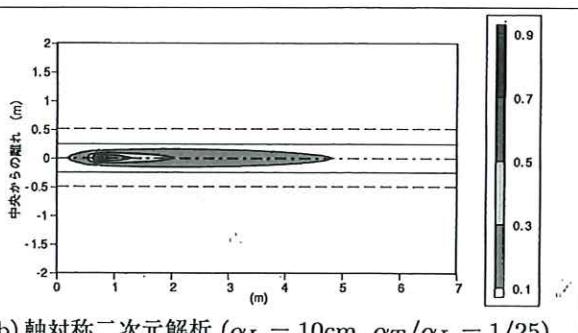
(a) 平面二次元 ($\alpha_L = 10\text{cm}$, $\alpha_T/\alpha_L = 1/2$)(b) 軸対称二次元解析 ($\alpha_L = 10\text{cm}$, $\alpha_T/\alpha_L = 1/25$)

図-4 中心線上測点の濃度時刻歴と解析プログラムにおける再現状況

(a) 平面二次元 ($\alpha_L = 10\text{cm}$, $\alpha_T/\alpha_L = 1/2$)(b) 軸対称二次元解析 ($\alpha_L = 10\text{cm}$, $\alpha_T/\alpha_L = 1/25$)図-5 解析プログラムより得られた汚染拡散状況の平面図 ($V_n = 0.6\text{m}$ 、注入開始より 11 日目)

分散長比 α_T/α_L の組み合わせを変えつつ測定現象の再現性を検討し、以下のような結果を得た。

(1) 図-4(a),(b) 中のプロットは、中心線上で注入点と同深度の実測濃度(比濃度)を示したものである。これらの上下及び側方の点で 1,000ppm(比濃度 0.1)程度の濃度上昇はみられず、比濃度 0.1 以上の塩水の広がりは左右上下各 25cm 以内の、直線的でシャープな移行形態となっている。

(2) この現象を平面二次元移流分散解析で再現しようとしたところ、図-4(a)の曲線に示すように、 $\alpha_L = 10\text{cm}$ 、 $\alpha_T/\alpha_L = 1/2$ により、汚染源中央線上の濃度変化をほぼ再現できた。しかしながら、図-5(a)のように比濃度 0.1 以上の平面的な濃度分布が両側各 25cm 以上まで達しており、うまく再現出来なかった。

(3) 一方、軸対称二次元移流分散解析では、既存文献の移行規模(5m)から推定される、縦分散長値($\alpha_L = 10\text{cm}$)と縦横分散長比 $\alpha_T/\alpha_L = 1/25$ 程度とすることで、図-4(b)のように中央線上の濃度時刻歴を再現できた。また、図-5(b)のように、比濃度 0.1 の広がりも両側各 25cm 以内に収まり、実測結果との対応が図れた。

(4) 今回のような点汚染源のケースでは、汚染物質が円錐状に深度方向の広がりを有する形状となるため、同一平面内の平板状の分布のみを仮定した平面二次元の使用は難しく、深度方向の分布も仮定できる軸対称二次元プログラムによる必要がある。

5.まとめ

地盤汚染の影響予測に数値解析手法を適用する場合に、予測結果を大きく左右する要因を明らかにするため、官民連携共同研究では入力定数の感度解析、大型土槽実験による分散長の検討を行い、以下のような知見を得た。

(1) 定数感度解析の結果、低濃度前線は縦分散長に大きく支配されて挙動するため、適切な縦分散長値の入力に注意を払う必要がある。また、縦横分散長比そのものが平面的な到達形状に与える影

響は少なく、縦分散長値の入力による変動の方が大きいことがわかった。

(2) 汚染物質の移動距離の増加に伴って縦分散長が大きくなるとの知見について、大型土槽実験で確認を行い、文献値(移行距離 5m に対する 10cm)の使用が可能であることがわかった。文献値の使用は実務上極めて有益と思われ、今後、他の汚染物質に対する適用可能性も検討したい。

(3) (2) は汚染源から予測地点までの距離を把握し、距離に対応した縦分散長を入力する必要性を示唆している。所定期間後の汚染範囲を予測する場合には、実流速から移行距離を推測し、縦分散長を決定する必要がある。

(4) 文献などにみられる遅延係数値の幅が、到達時間や距離の予測に大きな影響を及ぼす場合が懸念されるため、今後、解析精度を確保できるよう試験法や決定法を検討する必要がある。

(5) 帯水層の厚さと汚染源の分布状況に応じて、プログラムの次元を選定する必要がある。点源と見なせるケースでは、深度方向も考慮出来る軸対称二次元などを使用する必要があることがわかった。また、通常言われている 1/10~1/30 程度の縦横分散比が実際に適用出来る。

共同研究では、有機塩素化合物や重金属についても、大型土槽実験等を行っている。今後、これらの成果についてもとりまとめを行い、数値解析プログラムの実用化を図ってゆきたい。

参考文献

- 西垣誠、菱谷智幸：土壤・地下水汚染の予測技術、基礎工, 1999 年 1 月号, pp.40-42
- 上田年比古監訳、W. キンツエルバッハ著：パソコンによる地下水解析、森北出版, pp.169-171
- 三木博史、小橋秀俊、平山光信、斎藤泰久他：実務適用のための汚染物質の挙動に関するパラメータースタディー、第 3 回環境地盤工学会シンポジウム論文集, 1999 年 11 月, pp.205-210
- 小橋秀俊、平山光信、菱谷智幸、斎藤泰久他：大型土槽実験に基づく汚染物質挙動の数値シミュレーションについて、第 3 回環境地盤工学会シンポジウム論文集, 1999 年 11 月, pp.211-214

小橋秀俊*



建設省土木研究所材料施工部土質研究室主任
研究員
Hidetoshi KOHASHI

三木博史**



同 土質研究室長、工博
Dr. Hiroshi MIKI

古田光弘***



同 土質研究室研究員
Mitsuhiro FURUTA

小畠敏子****



同 土質研究室
Toshiko OBATA