



Title	水溶性汚染物質による地盤汚染問題のシミュレーション
Author(s)	李, 徳建; LI, Dejian; 三田地, 利之 他
Relation	委員会主催シンポジウム No.133
Citation	第6回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 115-118
Issue Date	2005-05
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/778
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	conference paper
File Information	JGS-E6200501127.pdf



水溶性汚染物質による地盤汚染問題のシミュレーション

李 徳建¹・三田地利之¹・福田文彦¹・大河原正文²・工藤 豊¹

¹北海道大学大学院工学研究科・²岩手大学工学部

1. はじめに

近年、土壌・地下水汚染の浄化対策を講じる上で、数値解析による汚染物質の挙動をシミュレーションすることと、解析結果の実地盤への適用が重要になってきている。また、汚染物質挙動の予測手法の確立のためには解析結果の妥当性の検証が欠かせない。本研究では、廃棄物の処分場や投棄現場における地盤汚染の拡大予測法の確立を目指し、数値解析による拡散シミュレーションと解析結果の妥当性を検証するための方法として遠心模型実験方法について検討した。すなわち数値解析では水溶性汚染物質による地盤汚染の速度や拡散範囲のシミュレーション解析を実施するとともに、汚染拡大防止対策の有効性を検討するために止水壁、防水シートなどを設置したときの汚染状況をシミュレートした。また、遠心模型実験では、水溶性汚染物質の移流分散現象を確認するための方法について検討した。遠心模型実験は、模型地盤中の水の移動時間を大幅に短縮できるなど時間短縮に威力を発揮する¹⁾。長期間にわたる地盤汚染現象を室内実験により検証することは時間がかかるため一般に困難である。遠心模型実験により長期間にわたる水溶性汚染物質の地盤中を移動・拡散する現象を再現することで、数値解析結果の検証が可能であると考えている。

2. 浸透実験とそのシミュレーション解析

予圧密された NSF 粘土試料を用いて、重力場および遠心力場における浸透試験を行った。

重力場における浸透試験：着色水(液体染料で着色した水)を用いて地盤内の水の浸透状況が観察できるか否かについて検討するため、重力場(1G 場)における浸透試験を行った。実験では粉末状で市販されている NSF 粘土(New Snow Fine の略。土粒子の密度： $\rho_s=2.78\text{g/cm}^3$ 、液性限界： $w_L=55\%$ 、塑性限界： $w_p=19\%$ 、粘土分：99%)に蒸留水を加え、含水比を液性限界の 2 倍程度になるように十分攪拌した後、スラリー状態にある NSF 試料を 80mm のアクリルセル内で鉛直応力 50kPa で 7 日間予圧密し、次に試料をセル内に入れたまま、試料上面から送水圧 98kPa で染料で着色した水を注入し、試料下面については大気圧に解放した状態として着色水の浸透状況を観察した。写真 1 は着色水を注入後、24 時間経過した時の浸透状況である。着色水が鉛直方向に約 50mm 浸透した(着色部分の浸透範囲)。

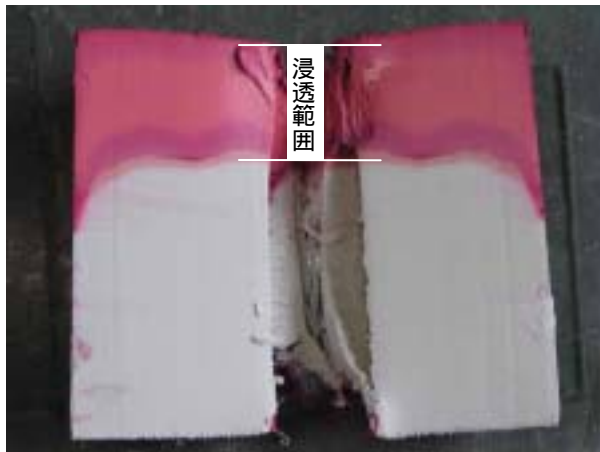


写真 1 浸透状況 (重力場, 98kPa, 24 時間)

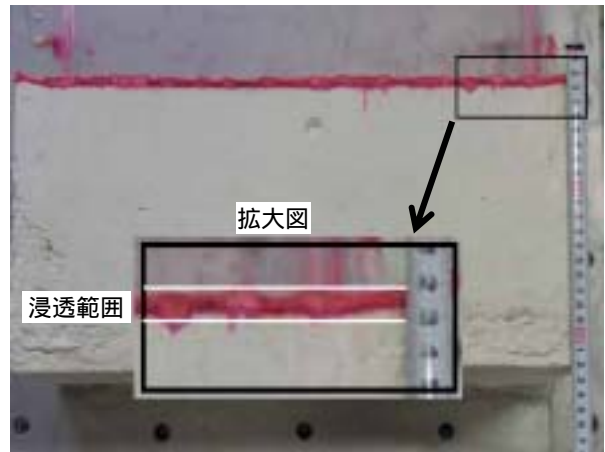


写真 2 浸透状況 (遠心力場, 50G, 8 時間)

遠心力場における浸透試験：着色水を用いることにより地盤内の水の浸透状況を調べられることが確認できたことから、当研究室の遠心模型実験装置²⁾を用い、遠心力場における水の浸透に関する実験を行った。装置の最大積載質量 150kg、有効回転半径 1.5m、最大回転半径($R=1.5\text{m}$)における遠心加速度 150G である。模型土槽の寸法は 450W×200D×400Hmm

Simulation for ground pollution by water-soluble contaminant

Dejian Li¹, Toshiyuki Mitachi¹, Fumihiko Fukuda¹, Masafumi Okawara², Yutaka Kudo¹ (¹Graduate School of Engineering, Hokkaido University, ²Iwate University)

KEY WORDS: Ground pollution, Simulation, Centrifuge, Contaminant

である。装置には CCD カメラと DVD レコーダーが装備されている。

実験は模型土槽に鉛直応力 50kPa で 10 日間予圧密した NSF 粘土試料を入れ、試料上面に水深が 45mm(50G 場では水深 2.25m に相当)となるよう着色水を入れ、試料下面を排水状態として実施した。粉末状長石の締め固め試料を用いて別途実施した実験結果²⁾を参考に、透水に関する相似則の成立範囲内の遠心加速度 50G の下で 8 時間にわたり遠心力場における透水試験を行った。実験開始後、加速度の増加にともない試料に圧密が生じた。写真 2 は実験終了後の浸透状況であり、浸透深さは 7~11mm(平均 9mm)程度である。

NSF 粘土試料における浸透状況(写真 1, 写真 2)から分かるように、重力場に用いた円筒状の予圧密セルの壁面部を除いて、浸透状況を示す着色水は重力場および遠心力場の両ケースにおいてほぼ均等に排水境界面方向へ浸透した。このように、着色水を使って模型地盤試料内での水の浸透状況を確認することが可能で、今後は水溶性汚染物質の地盤中の移流分散状態への適用性についての検証が必要である。

遠心力場における浸透試験結果のシミュレーション：飽和・不飽和浸透流 移流分散解析プログラム Dtransu-2D・EL³⁾を用いて、有限要素法解析を行った。解析条件を表 1 に示す。パラメトリックスタディを行い実験結果を再現できる透水係数を求めたところ、 $k=1.02 \times 10^{-4}$ m/day(1.18×10^{-6} cm/sec)であった⁴⁾。

3. A 廃棄物投棄現場における地盤汚染問題のシミュレーション

実務への適用性を検討するために、A 廃棄物投棄現場を例に解析モデルを作成した。現場の表層付近には廃棄物を含まない埋土と廃棄物で広く覆われている。廃棄物層は、パーク(wa(b)), 焼却灰(wa(a)), RDF(wa(r)), 汚泥(wa(o)), 廃棄物と土質の混合土(wa(m))の 5 種類に分類できる。地質は、火山性の降下火砕物と凝灰岩基質の基盤層に大別される。降下火砕物はローム優勢層(降下火砕物 1: af1)と主にパミス, スコリア, 軽石等の粗粒物層(降下火砕物 2: af2)に分類される。下位のローム優勢層においては粗粒分が主体の部分もあるが、分類上は af1(p)である。解析モデルを図-1 に、解析に用いた材料定数を表 2 に示す(パラメータの詳細は文献⁵⁾を参照されたい)。

表 1 遠心力場における土槽浸透実験の解析条件

圧力水頭	上面	m	0.253
	底部	m	0
飽和・不飽和解析			飽和解析
試料の間隙率			0.57
試料の透水係数 k		m/day	パラメトリックスタディ

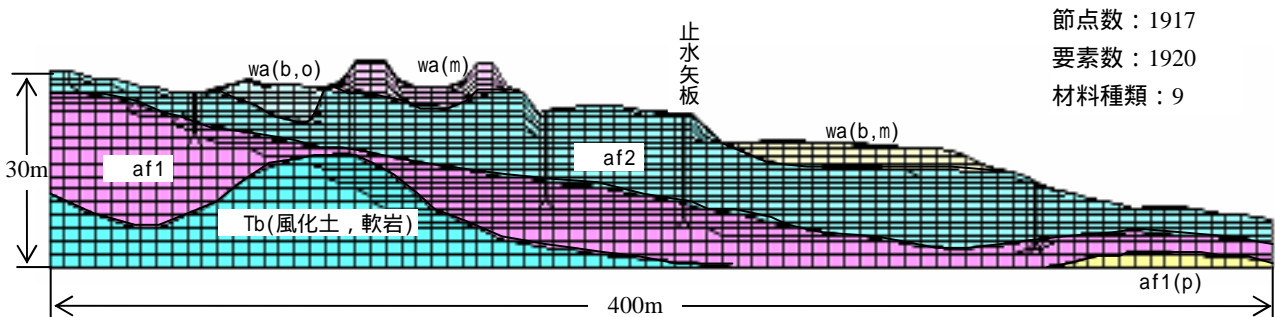


図-1 A 廃棄物投棄現場の解析モデル

表 2 モデル解析に用いた材料定数

土質名 (材料名)	No.	材料 1							材料 2	
		廃棄物 1 wa(b,o)	廃棄物 2 wa(m)	廃棄物 3 wa(b,m)	パミス af2	ローム af1	パミス af1(p)	風化土・軟岩 Tb	防水シート 1	防水シート 2
透水係数 $k_1=k_3$	m/day	8.6	0.086	8.6	0.536	0.605	0.536	0.507	0.00001	0.00001
有効間隙比		0.302	0.285	0.302	0.330	0.214	0.209	0.083	0.00001	0.00001
比貯留係数 S_s	1/m	9.4×10^{-4}	1.2×10^{-3}	9.4×10^{-4}	7×10^{-4}	1.2×10^{-3}	7×10^{-4}	1.9×10^{-2}	1×10^{-5}	1×10^{-5}
透水係数の傾き		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
縦分散長 A_L	m	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
横分散長 A_T	m	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
分子拡散係数 × 屈曲率	m ² /day	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
遅延係数 R_d	m/day	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
減衰係数	1/day	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

説明：防水シート，止水矢板の設置の有無により材料のパラメータを設定できるためにそれぞれの材料 1 と 2 を設定した。

透水係数 k は、主に現場透水試験の平均 k 値を採用した。試験を実施していない地質については、粒度試験の D_{20} を用いて、“クレージャー(Creager)による D_{20} と透水係数⁶⁾”より決定した。土質材料の鉛直方向と水平方向に同じ透水性を持つとみなし、透水係数の傾き 0、また透水係数 $k_1=k_3$ に設定した。縦分散長 $A_L=0.1$ 、横分散長 A_T は縦分散長の 1/10(0.01)の値を用いた。降雨条件は年平均降水量 1200mm の内地下浸透量約 550mm とした場合(無対策時)とキャッピング後の地下浸透量を 120mm とした場合(防水シートを被せる)の 2 種類設定した。解析対象とした廃棄物における水溶性汚染物質の濃度が、投棄エリア全域に均一分布している最も厳しい条件を設定し、その値を 1 に固定した。

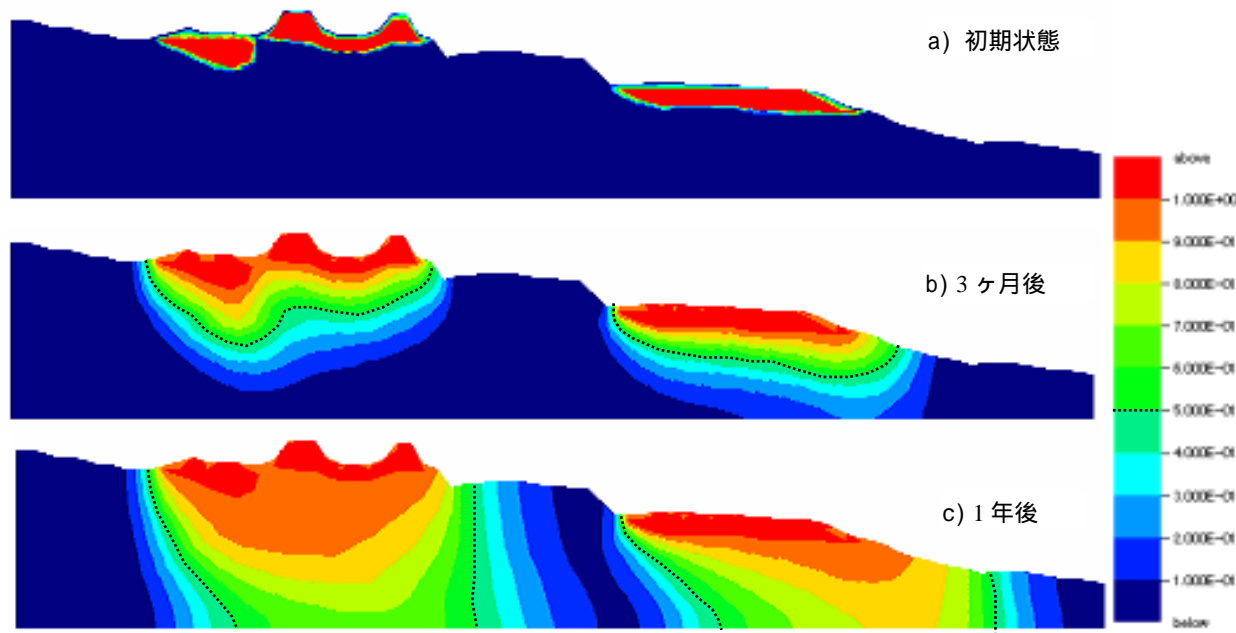


図-2 無対策時の水溶性汚染物質の拡散状況(濃度コンター)

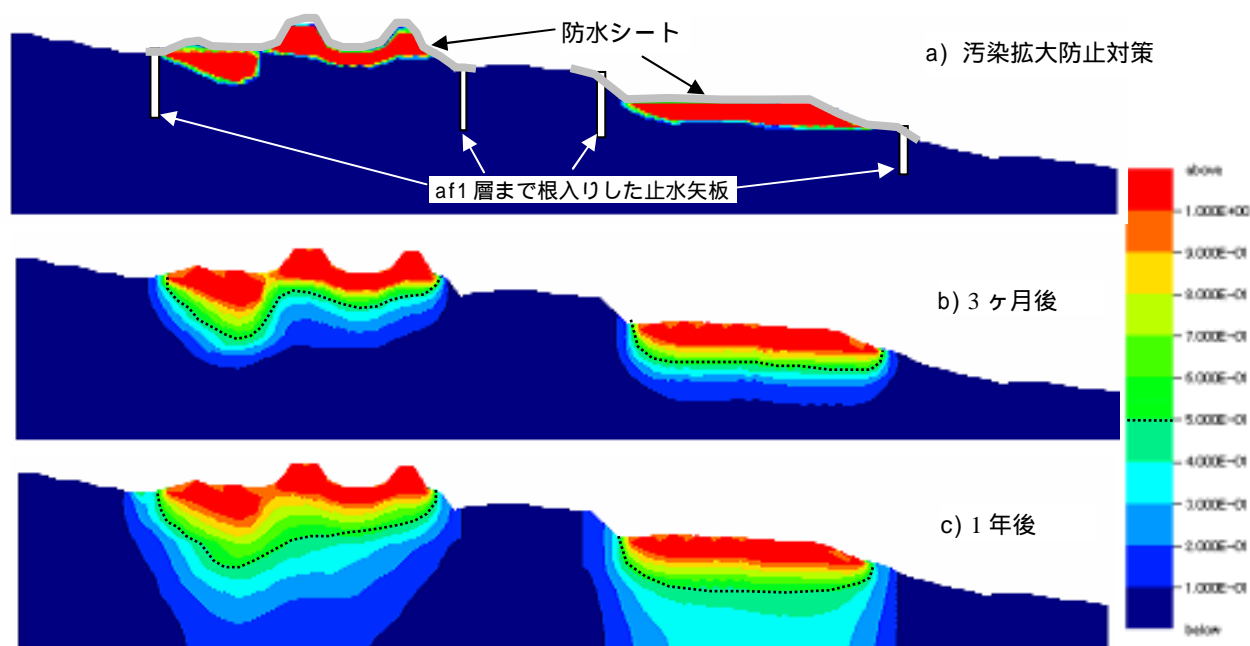


図-3 防水対策による拡散拡大防止効果(濃度コンター)

地盤汚染の拡大防止対策として、一般的には汚染された地盤内の地下水の移動を止めるのが有効な対策と考えられている。実務上は、地表面に防水シートを被せて、降雨、地表水の汚染地盤への浸透を防ぐことになる。また、鉛直方向に不透水層(あるいは難透水層)まで根入りした止水矢板や止水壁などを構築することにより、地下水の汚染地盤への流入と汚染された地下水の汚染地盤からの流出を防ぐことが可能である。

図-2 に無対策時の水溶性汚染物質の地盤における拡散状況のシミュレーション結果(濃度コンター図)を示す。図中には濃度 0.5(相対値)の境界線を点線で示した。初期状態(計算開始時間)から、一年間を経過した時点で水溶性汚染物質は相当広い範囲(縦方向は解析モデルの境界を超え、横方向は下流方向へ約 60m)まで広がった。

図-3 には、地表面に露出している廃棄物の上に防水シートをキャッピングし、さらに廃棄物の周りに止水矢板を設置することを想定し、汚染物質の拡散防止対策を実施した場合のシミュレーション結果(濃度コンター図)を示した。無対策時の結果(図-2)と比べると、汚染物質の拡散範囲、とりわけ濃度 0.5 以上の領域ははるかに小さい。また、横方向の拡散はほとんど見られない。

4. まとめ

本研究では、水溶性汚染物質による地盤汚染の予測法の確立を目指し、遠心模型実験および数値解析による拡散シミュレーションを行った。得られた成果を以下に示す。

NSF 粘土試料を用いた重力場および遠心力場(50G)における浸透実験より、染料インクを入れた着色水を使うことで水の浸透状況を把握できることを確認した。

A 廃棄物投棄現場を例に地下水移流による水溶性汚染物質の拡散シミュレーションを行い、汚染物質の拡大防止対策の有効性について検討した。その結果、地表面に露出している廃棄物の上に防水シートをキャッピングし、さらに廃棄物の周りに止水矢板を設置することで、無対策時に比べると、汚染物質の拡散範囲、とりわけ濃度 0.5 以上の領域が大幅に小さくなり、横方向の拡散はほとんど生じないことが判明した。

さらに高精度で地盤汚染問題のシミュレーションを行うために、以下の研究を行う予定である。

原地盤から採取された土試料(再構成試料および乱さない試料)を用いての室内浸透実験(重力場および遠心力場)による検証。

透水係数などの各解析用のパラメータ(入力値)の解析結果に及ぼす影響の詳細検討。

遠心実験による解析パラメータの決定法(とりわけ透水係数の決定法)の確立および実地盤汚染問題への適用。

謝辞：本研究で行った浸透実験は北海道大学地盤物性学分野の大学院生中村晃輔・阿部篤史・笠間太樹の協力によって実施した。ここに記して感謝の意を表します。

引用・参考文献

- 1) 岡村未対・竹村次郎・上野勝利：遠心模型実験 実験技術と実務への適用 2. 遠心模型の相似則，実験技術 利点と限界，土と基礎，Vol.52，No.10，pp.38-39，2004。
- 2) 中村晃輔・三田地利之・大河原正文・工藤 豊：遠心力場における模型地盤の劣化促進方法に関する研究-地すべり実験と変水位透水試験 第 43 回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp.139-142，平成 16 年(2004)9 月。
- 3) 菱谷智幸：移流分散解析入門 8. オイラリアン・ラグランジアン法による移流分散解析，土と基礎，Vol.51，No.3，pp.49-53，2003。コードは岡山大学・西垣誠教授，三菱マテリアル株式会社，株式会社ダイヤコンサルタント三者共同で開発したものである(著作権登録番号 P 第 4135 号-1)。
- 4) 李 徳建・三田地利之・福田文彦・工藤 豊・中村晃輔・阿部篤史・大河原正文：数値解析および遠心浸透実験による汚染地下水の浸透シミュレーション，平成 16 年度土木学会北海道支部論文報告集第 61 号。(投稿中)。
- 5) 土壌・地下水汚染の調査・予測・対策編集委員会編集：土壌・地下水汚染の調査・予測・対策 地盤工学会 pp.100-110，2002。
- 6) 根切り工事と地下水編集委員会編集：根切り工事と地下水 調査・設計から施工まで - ，土質工学会，1991。