# 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

Numerical simulation and centrifugal model test on the infiltration of polluted ground water

北海道大学大学院工学研究科	OE	員	李	徳建	(Dejian LI)
同	フュ		三田均	也利之	(Toshiyuki MITACHI)
"	ΤĒ	員	福田	文彦	(Fumihiko FUKUDA)
11	Æ	員	工藤	豊	(Yutaka KUDO)
11			中村	晃輔	(Kosuke NAKAMURA)
11			阿部	篤史	(Atsushi ABE)
岩手大学工学部	正	員	大河	原正文	(Masafumi OKAWARA)

## 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.本研究では,水溶性汚染物質による地盤汚染の拡大 予測法の確立を目指し,室内で重力場(1G場)および遠心 力場における浸透実験を行い,また,数値解析による実 験結果のシミュレーションをした上で,数値解析用パラ メータとりわけ透水係数および有効間隙率の決定法につ いて検討した.遠心模型実験は,間隙水の透水時間を大 幅に短縮できるなど時間短縮に威力を発揮する<sup>1)</sup>.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下水移流による 分散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. 実験

水溶性汚染物質の地盤における拡散状況を観察するため,予圧密された NSF 粘土試料を用いて,重力場(1G場) および遠心力場における浸透試験を行った.



写真1 浸透状況(重力場, 98kPa, 24 時間)

**重力場における浸透試験**:染料によって着色した水を 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,重力場における浸透試験を行った.実 験ではスラリー状態にあるNSF 試料を φ80mmのアクリ ルセル内で鉛直応力 50 k Pa 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を示 すもので,円筒状供試体を2つに割ったものである.着 色水が鉛直方向に約50mm 浸透した(着色部分の浸透範 囲).

遠心力場における浸透試験:着色水により地盤内の浸透状況が観察可能なことが確認できたので、遠心模型実験装置<sup>2)</sup>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=1.5m)における最大遠心加速度 150G である.模型土槽の寸法は 450W×200D×400Hmm 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.



写真2 浸透状況(遠心力場, 50G, 8時間)

模型土槽に鉛直応力 50kPa で 10 日間予圧密した NSF 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<sup>2)</sup>を参考に,透水に関する相似則の成立 する範囲内の遠心加速度である 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が圧密した. 写真2 は実験 終了後の浸透状況であり,浸透深さは 7~11mm 程度(平 均値 9mm)である.ただし,浸透実験中に供試体の圧密 が同時に生じているので,試験後の含水比の測定値から 間隙率を算出(n=0.57)し,これを用いて浸透範囲を補正 すると,浸透深さ 14.3mm となる.

以上の実験結果より,浸透速度と動水勾配から求めら れる重力場および遠心力場における透水係数はそれぞれ  $\overline{k} = 10.3 \times 10^{-6}$  cm/sec および  $\overline{k}_{50G} = 4.6 \times 10^{-4}$  cm/sec であり, 遠心場における透水係数を重力場における透水係数に換 算すれば  $\overline{k}_{1G} = 9.2 \times 10^{-6}$  cm/sec になる ( $\overline{k}_{1G} = \overline{k}_{50G}/50$ ) ことか ら,重力場での実験値よりやや小さい.この透水係数の 違いは、予圧密条件の違いおよび圧密を考慮した浸透範 囲の補正量の誤差によるものと考えられる.

#### 3. 浸透実験のシミュレーション

汚染物質が地下水中に溶け込み,地下水とともに汚染 が移動・拡大する現象を定量的に検討する場合,移流分 散解析によって地下水流動場を把握することが非常に重 要となる.また,ダルシー則による流速は水量に対する 見かけの流速であり,移流分散解析では,有効間隙率を 用いて地盤中の地下水の移動速度である間隙内流速に変 換する必要がある<sup>3)</sup>.有効間隙率は間隙率に対して数分

<b>表1</b> 解析用のパラメータ						
			重力場(1G)	遠心力場(50G)		
圧力水頭	上面	m	10	0.253		
	底部	m	0	0		
飽和·不飽和解析			飽和解析	飽和解析		
透水係数 (k <sub>50</sub> =50k <sub>1</sub> ) cm/sec		$k = 1.18 \times 10^{-6}$	$k_{50} = 59 \times 10^{-6}$			
		ciii/sec	<i>k</i> −1.18∧10	$(k_1=1.18\times 10^{-6})$		
有効間隙率 $\theta$			0.12	0.12		
比貯留係数 S <sub>s</sub> :0, 透水係数の傾き:0,						
縦分散長 A <sub>L</sub> :0.1 cm, 横分散長 A <sub>T</sub> :0.01cm,						
遅延係数 $R_d$ :1, 减衰係数 $\lambda$ :0 sec <sup>-1</sup> .						
分子拡散係数×屈曲率:0 cm <sup>2</sup> /sec,						

の1~数10分の1程 度の値をとされてい る<sup>4)</sup>が,この値を直 接的に決めることが できないので, 前述 の 2 つの実験(重力 場・遠心力場)結果の 浸透範囲を再現でき る θ の値を FEM 解 析によって逆算して みる. その手順は以 下のようである. 解 析に必要なパラメー タは表1に示すよう であるが、このうち 透水係数は前述の k および *k*<sub>1G</sub> の平均値



図-1 重力場における浸透実験 のシミュレーション



図-2 遠心力場における浸透実験のシミュレーション

 $(\bar{k}_{ave} = 9.8 \times 10^{-6} \text{ cm /sec})$ に有効間隙率を乗じた値 $(k = \bar{k}_{ave} \cdot \theta)$ を用いることになる.前述のように、 $\theta$ を事前に決めることが出来ないので、繰返し計算によって後述のように実験結果の浸透範囲を再現できる $\theta$ を算出した結果が表1に示されている $(\theta = 0.12)$ .

解析には、飽和・不飽和浸透流—移流分散解析プログ ラム Dtransu-2D・EL<sup>5)</sup>を用いて、有限要素法解析を行っ た.重力場および遠心力場における数値解析の結果をそ れぞれ図-1 および図-2 に示す.浸透範囲を再現できる有 効間隙率の値は前述のように θ=0.12 であり、間隙率 n の 5 分の 1 程度であった.

## 4. まとめ

- (1) 重力場および遠心力場における浸透実験から算出した透水係数はほぼ等しい.遠心場におけるその値は重力場におけるその値よりやや小さかったが、 予圧密の違いや遠心実験中に生じる圧密を考慮した浸透範囲の補正量の誤差によるものと考えられる.
- (2) 数値解析によって、重力場および遠心力場の実験 結果を再現できる θ を求めたところ、θ=0.12 となった.
- (3) 以上の結果を受けて、今後は実地盤から採取された試料を用い、重力場および遠心場における浸透実験から得られる透水係数と有効間隙率を求め、実地盤汚染問題のシミュレーションへの適用を検討する予定である.

### 参考文献

- 岡村未対・竹村次郎・上野勝利:遠心模型実験一実験技術 と実務への適用-2.遠心模型の相似則,実験技術一利点と 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一地すべり 実験と変水位透水試験一第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 2.地盤内の物質移動の支配方 程式(その1). 土と基礎, Vol.50, No.9, pp.61-64, 2002.
- 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.102, 2002.
- 5) 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).