野外トレーサ試験による堆積岩の分散係数と有効間隙率の測定

井伊博行*・石川 泰**・杉原弘造***・樋田吉造****

Dispersion coefficient and effective porosity of a sedimentary rock by a field tracer test

Ii Hiroyuki*, Ishikawa Yasushi**,
Sugihara Kozo***, Utsugida Yoshizo****

Abstract

This paper presents the numerical analysis results of a field tracer test. The objective of this test was to measure the dispersivity and the effective porosity of a permeable sedimentary layer. The tracer test was performed using two vertical bore holes 90 meters in depth and located 7 meters apart. The sedimentary layer, composed of sandstone, conglomerate, and weathered granite, was 10 meters thick and started 80 meters below the surface. One bore hole was used to inject groundwater with tracer and the other to recover to recirculate groundwater. We used a tracer solution containing Br^- . Before the tracer was injected, groundwater was circulated through the sedimentary layer between the two bore holes to establish a steady state of groundwater flow. The circulation flow rate and Br^- concentration initially injected were determined by using Gelhar's analytical solution so that the detectable tracer concentration (several ppm) could be recovered within one month. When the groundwater level at the recovery hole became stable, the tracer was injected into the injection hole and the concentration of Br^- was analyzed at the recovery hole. The circulation flow rate was $7800\text{cm}^3/\text{min}$. The initially injected Br^- tracer concentration was 8300 ppm. Thirty eight hours later, the concentration of Br^- at the recovery hole reached a maximum level of 10 ppm.

The convection-dispersion equation was used for the tracer test's numerical analysis. This differential equation was transformed by F. E. M. Half of the horizontal section of the analytical region was used for numerical analysis and meshes like a semi-circle were used for the circulation-line above

* 清水建設(株)技術研究所 Research Institute, Shimizu Corporation

** 動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所 Chubu Works, Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation
現在同和工営(株)、Dowa Engineering

*** 動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所 Chubu Works, Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation

**** 清水建設(株)原子力本部 Nuclear Power Division, Shimizu Corporation

the surface between the two bore holes. A dispersion coefficient depends upon flow velocity, dispersivity, and diffusion. Initially, the flow velocity distribution and the permeability of layer were analyzed using F. E. M. as a seepage problem. The analyzed permeability of the layer was $2.2 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$.

According to the F. E. M. analysis result, using the breakthrough curve of Br^- at the recovery hole and the matching technique, the effective porosity was determined to be 7% and the dispersivity 3.5 meters. The effective porosity was determined to be 4.5% and the dispersivity 3.5 meters by Gelhar's analytical solution. The 7% or 4.5% effective porosity value was smaller than the 30% porosity value with the boring core samples. This suggests that the measurement of effective porosity using a field tracer test is important in evaluating groundwater flow velocity and mass transport. The relationship between the dispersivity 3.5 meters and the distance 7 meters agreed well with those of Leonhart (1985).

key words: Tracer, Field test, Effective porosity, Dispersivity, Finite element method, Groundwater flow, Mass transport, Injection hole, Recovery hole

トレーサ、野外試験、有効間隙率、分散長、有限要素法、地下水流動、物質移行、注入孔、揚水孔

1. はじめに

地層中の地下水の実流速分布を知ることは、様々の分野で重要である。地層中の地下水の実流速分布は、地層の有効間隙率、透水係数、地下水位によって変化するが、これらの値が判れば解析によって推定することができる。トレーサ試験は実流速を直接得る方法のひとつである (Freeze and Cherry, 1979)。Leonhart (1985) は野外での 2 つのボーリング孔を用いたトレーサ試験を行い、玄武岩溶岩の分散係数を Gelhar (Gelhar, 1982) によって導かれた二次元の解析解で求めると同時に、これまでの野外でのトレーサ試験によって得られた岩石の分散係数についてまとめている。このように分散係数についてのデータは蓄積されつつある。しかし、実流速を求める上で重要な有効間隙率についてのデータは少ない。そこで、本研究では、2 本のボーリング孔を用いて堆積岩の有効間隙率と分散係数を野外トレーサ試験により同時に測定し、求められた有効間隙率はボーリングコアを用いて測定された間隙率と比較し、また、分散係数は Leonhart (1985) の結果と比較した。解析には二次元の有限要素法 (FEM) による解析と Gelhar (Gelhar, 1982) による二次元の解析解を併用した。なお、トレーサ試験実施前に、Gelhar (Gelhar, 1982) による二次元の解析解を用いることによって、揚水量、トレーサの投入量等の試

験条件を設定した。

2. 地形・地質概要

トレーサ試験場は岐阜県東濃地方で、図-1 に示すように試験場付近の地表環境は、左右を山に挟まれた谷間の小規模な平坦地で、概ね北から南へ流れている川が、試験場を迂回している。

この地域は地表面下 85m まで新第三紀の堆積岩が見られ、その下位に基盤の花崗岩が分布する。図-2 および 3 に示すように、揚水孔、注入孔の間では、地層の水平方向の変化は少なく、地表面下約 80~90m では基盤の花崗岩の風化部と堆積岩下部のれき岩・砂岩層等の粗粒堆積物が卓越しており、下位に基盤の花崗岩、上位に難透水性の砂岩・シルト岩層が分布することから、この付近が透水ゾーンを形成しているものと考え、トレーサ試験の区間とした。

図-2 の揚水孔の深度 78~88m までの範囲におけるボーリングコア 10 サンプルについて重量法によって求めた間隙率と室内での透水試験結果を表-1 に示す。堆積岩における間隙率は 30% 前後で、一部に 5% 前後の低い値が見られるが、それは花崗岩とその礫と考えられる。透水係数は、 $3 \times 10^{-8} \sim 3 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ で、マサ化した花崗岩では大きな値を示す。

図-1 トレーサー試験場(図中●はボーリング孔)

地表面下

図-2 A1-1孔(揚水孔)の地質柱状図

①〜⑩物性試験用サンプル採取位置

地表面下

図-3 A1-2孔(注水孔)の地質柱状図

表－１ 揚水孔のボーリングコア物性試験

N o	採取深度(m)	間隙率(%)	透水係数(cm/sec)	岩石名
1	78.10～ 78.20	24.8	2.6×10^{-7}	砂岩と細礫岩
2	79.55～ 79.65	27.9	2.4×10^{-7}	砂岩
3	80.45～ 80.55	27.3	9.4×10^{-8}	中～細礫岩
4	81.20～ 81.30	26.8	1.2×10^{-7}	巨礫岩
5	82.70～ 82.80	31.1	3.7×10^{-8}	砂岩と細礫岩
6	83.30～ 83.40	27.6	-----	砂岩と細礫岩
7	84.10～ 84.20	5.5	2.7×10^{-8}	大～中礫岩
8	85.00～ 85.10	47.3	-----	大～中礫岩
9	86.30～ 86.40	30.8	-----	大～中礫岩
10	87.20～ 87.30	5.8	2.9×10^{-8}	花コウ岩(マサ化)

３．予測解析

トレーサ試験を行う前に、解析の容易な Gelhar (Gelhar, 1982)による解析解(解析領域内に揚水孔と注入孔の２孔が存在し、揚水孔から汲み上げた地下水を注入孔に注水する方法で循環しながら、かつ注入孔からトレーサを入れた時の揚水孔でのトレーサ濃度変化を求める水平二次元の解析解)を用いて、試験条件を設定するための解析を行った。これは水平二次元での均質媒体中に、トレーサを瞬時的(パルス)に注入した場合の解析解であり、分散は流線方向のみ考慮されている。野外におけるトレーサ試験では繰返して試験を行うことや長期間試験を続けることが困難である。そのため、予測解析ではトレーサの揚水孔への到達時間を所定の期間(ここでは１ヶ月)以内になるように、かつ使用トレーサ(Br^-)のピーク濃度がトレーサの検出限界を十分超えるぐらいになるように、トレーサ投入量、注入・揚水量等の試験条件を設定する必要がある。ここでは表－２に示すように、有効間隙率をボーリングコアの間隙率を考慮して、最大30%まで想定し、分散長を孔間

表－２ 二次元の解析解による解析条件

孔間距離	7.0m
注水量・揚水量	2000、4000、8000 or $7800\text{cm}^3/\text{min}$
透水層の厚さ	10m
トレーサ量(NaBr)	1 or 1920g
有効間隙率	最大30%
分散長	0.07～7.0m

距離の0.01から0.2倍とし、流量をポンプの性能から最大 $8000\text{cm}^3/\text{min}$ まで検討した。その予測解析結果を表－３に示す。この結果から、ピーク濃度が最小でも十分トレーサが検出可能となるように、注入・揚水量を $8000\text{cm}^3/\text{min}$ 、トレーサ投入量をNaBrで 2000g ($0.0014 \times 2000 \times 79.9/102.9 = 2.2\text{ppm}$)とした。

なお、Gelharの解析解は以下のように示される。

表-3 トレーサ量が1gの時の揚水孔におけるトレーサのピーク濃度と到達時間

注入・揚水量		2000cm ³ /min		4000cm ³ /min		8000cm ³ /min	
分散長 (m)	有効間隙 率(%)	到達時間 (day)	濃度 (ppm)	到達時間 (day)	濃度 (ppm)	到達時間 (day)	濃度 (ppm)
1.4	30	95.9	0.0014	47.9	0.0014	24.0	0.0014
	10	32.0	0.0042	16.0	0.0042	8.0	0.0042
	5	16.0	0.0084	8.0	0.0084	4.0	0.0084
0.7	30	66.4	0.0018	33.2	0.0018	16.6	0.0018
	10	22.1	0.0054	11.1	0.0054	5.5	0.0054
	5	11.1	0.0108	5.5	0.0108	2.8	0.0108
0.07	30	58.7	0.0038	29.4	0.0038	14.7	0.0038
	10	19.6	0.0114	9.8	0.0114	4.9	0.0114
	5	9.8	0.0228	4.9	0.0228	2.4	0.0228

$$C_w = \frac{Q}{M} \int_{\hat{\phi}=0}^1 \frac{Q \exp[-(a-T)^2/4eb]}{\epsilon h L^2 (4 \pi e b)^{\frac{1}{2}}} d\hat{\phi}$$

$$T = \frac{Q t}{\epsilon h L^2} \quad e = \frac{\alpha}{L}$$

$$a(\varphi) = \pi (\sin \phi - \phi \cos \phi) / \sin^3 \phi \quad : \quad \phi = \pi \varphi$$

$$\begin{aligned} b(\gamma, \phi) = & \pi^2 [(\gamma + \phi)/2 + (\sin \gamma \cos \gamma)/2 \\ & + (\sin \phi \cos \phi)/2 \\ & - 2 \cos \phi (\sin \gamma + \sin \phi) \\ & + (\gamma + \phi) \cos^2 \phi] / 2 \sin^5 \phi \end{aligned} \quad (1)$$

C_w : 揚水孔での濃度	ε : 有効間隙率
Q : 注入・揚水量	h : 層厚
M : トレーサー量	γ : 時間 t におけるパ ルス的位置
φ : 流れ関数 $\dot{\varphi} = 2h \varphi / Q$	L : 2 孔間の距離
α : 分散長	t : 時間

4. トレーサ試験

4. 1 試験方法

図-4に示すようにトレーサ試験は7m離れた2本のボーリング孔(孔径146mm)を用い、一方のボーリング孔(注入孔)に注水を行い、他方のボーリング孔(揚水孔)から揚水を行って、強制的に定常的な循環する流れを発生させた。その上で、トレーサを注入孔から短時間に注入し、揚水した地下水中のトレーサ濃度を測定する方式でトレーサ試験を行った。試験区間は図-2に示したように周囲よりも透

水性が大きいと考えられる地表面下約80～90mの層厚10mの区間である。地表面下80mの深度までケーシングが設置しており、そのケーシングより下部の試験区間の10mは、水の出入りができるようにストレーナが備えられ、また、上部とはパッカーで縁切りされている。この注入孔ではパッカーにより加圧した水の注入が可能であるが、揚水孔はパッカーが設置されておらず水位は自由に変動する。試験区間下部は未風化の花崗岩で難透水層と考えている。

試験は、トレーサ注入前(地下水の循環が平衡になり安定する)、トレーサ注入時(注入孔にトレーサを注入する)、サンプリング時(揚水孔から地下水をサンプリングする)の3つに分けることができる。

1) トレーサ注入前

図-4に示すように揚水孔の孔底にあるポンプによって、揚水孔から汲み上げられた地下水を、直接注入孔に送水した。その時の地上部における流量は $7800\text{cm}^3/\text{min}$ (設定値は $8000\text{cm}^3/\text{min}$)、送水圧は $7.7\text{kg}/\text{cm}^2$ でほぼ一定となった。

2) トレーサ注入時

トレーサ水溶液としては、前もって汲み上げた地下水にトレーサ(NaBr)を溶解させ、 Br^- を8300ppm含む水溶液を 180000cm^3 作製(NaBrで1920g)した。図-5に示すようにトレーサ注入時は、揚水孔からの水を注入せずに、このトレーサ水溶液のみを注入した。このため、注入する溶液は揚水孔から送水する水と混合しないので、一定濃度の溶液を注入することが可能となる。また、トレーサの注入量、揚水孔からの揚水量は、トレーサ注入前の流量 $7800\text{cm}^3/\text{min}$ になるように調節し、注入時間は約23分間で

図-4 試験装置の概要(トレーサ注入前)

図-5 試験装置の概要(トレーサ注入中)

あった。

3) サンプリング時

図-6に示すようにサンプリング時は、トレーサ注入前と同じように、揚水孔から揚水した地下水を直接、注入孔に送水した。その時の流量は、トレーサ注入前と同じ7800cm³/minになるように調節した。なお、この期間は揚水孔から揚水した地下水の一部を一定間隔でサンプリングした。地下水中のBr⁻濃度の測定はイオンクロマトグラフ法で行った。

4. 2 試験結果

図-7にトレーサ注入後に揚水した地下水のBr⁻濃度の経時変化を示す。Br⁻濃度のピーク時は注入から38時間(2290分)後で、その濃度は約10ppmであり、予想より早い時期にトレーサが到達し、トレーサの濃度は十分検出できる範囲であった。バックグラウンドとしてのBr⁻は0.002ppm以下であった。また、ピーク時以降の濃度の降下曲線は立上がり時に比べて非常に緩いが、これは、揚水孔から揚水されたBr⁻を含む地下水を再び注入孔に注入しているためと考えられる。

また、図-8に揚水孔の水位の経時変化を示す。

水位は循環開始後2日程で平衡状態に達し、トレーサ注入時はすでに地下水の流れは安定していたものと考えられる。

循環前の注入孔と揚水孔及び周辺のボーリング孔の水位は地表面下約21mで、ほぼ一定で卓越した流れはなかった。

5. 二次元の有限要素法による解析

二次元の有限要素法(FEM)による解析では、まず、浸透流解析を行い水平二次元場での地下水の流速分布を計算し、次に、その流速分布を用いて同じく水平二次元場での物質移行解析を行った。

5. 1 浸透流解析

1) 解析方法

まず、水平二次元場Vでの定常浸透流方程式は、一般に次式のように表される。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad \text{in } V \quad (2)$$

図-6 試験装置の概要(サンプリング時)

図-7 揚水孔における実測 Br^- 濃度変化と二次元解析結果

図-8 A1-1孔(揚水孔)の孔内水位変化

一方、境界条件は、水頭固定境界 S_1 及び強制流量境界 S_2 において次のように表される。

$$\left. \begin{array}{ll} \phi = \phi_0 & \text{on } S_1 \\ q = q_0 & \text{on } S_2 \end{array} \right\} \quad (3)$$

ϕ : 全水頭 ϕ_0 : 境界における全水頭

q : 流量 q_0 : 境界における流量

x, y : 座標

浸透流解析は(2)式と(3)式にFEMを適用して導いた代数方程式を基にコンピュータを用いて実行した。

2) 解析条件

図-9に解析モデルを示す。解析領域は注入孔と揚水孔を結ぶ線を対称軸とした半分の領域のみを考えた。また、地下水の循環を表現するため、半円形の水路(循環路)を設けたが、浸透流解析ではこの部分は解析領域に含まれていない。この浸透流解析の

図-9 解析モデル(平面図)

解析条件を表-4に示す。対象した地層の厚さは10m、注入孔の注入量は実測値の半分の $3900\text{cm}^3/\text{min}$ (1/2の領域のため)、揚水孔の地下水位は自然水位(GL-21m)よりも15m小さい値を観測結果に基づき入力した。注入孔の地下水位は地上での注入圧力が $7.7\text{kg}/\text{cm}^2$ であることから、自然水位に比べて98m(77+21m)上位にあり、解析によって得られる注入孔の水頭値が試験時の水頭値に一致するように透水係数を変数として計算した。なお、地層の透水係数は、石川・杉原(1991)の水理評価によってこの付近では $5.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4}\text{cm}/\text{sec}$ が求められている。これらの条件によって水平二次元場での地下水のポテンシャル分布(流速分布)を求めた。

3)解析結果

解析の結果、図-10のポテンシャル分布を得た。透水係数が $2.2 \times 10^{-5}\text{cm}/\text{sec}$ の時に注入孔の水頭値が試験時の水頭値98mに一致した。この透水係数は表-1に示すボーリングコアから求められた透水係数よりも大きい。

5. 2 物質移行解析

1)解析方法

物質移行解析で用いる水平二次元移流・分散方程式は、次式のように表される。

表-4 二次元の浸透流解析の条件

層厚	10m
透水係数	$5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}\text{cm}/\text{sec}$
境界条件	不透水境界(注入孔、揚水孔を除く)
注入孔	流量境界： $3900\text{cm}^3/\text{min}$ (1/2の領域)
揚水孔	水頭境界：-15m(自然水位と比較して)

注：循環路は解析領域に含まれない。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - V_x \frac{\partial C}{\partial x} - V_y \frac{\partial C}{\partial y}$$

$$V_x = v_x / \epsilon, \quad V_y = v_y / \epsilon \quad (4)$$

ここに、 ϵ ：有効間隙率、 h ：層厚、

C ：溶液中のトレーサ濃度

D ：分散係数、

V_x, V_y ：X、Y方向の実流速

v_x, v_y ：浸透流解析から求められたX、Y方向のダルシー流速

図-10 ポテンシャル分布

ここで、分散係数は流線方向とそれに直交する方向では、次のように設定される。

$$D_1 = \alpha |V| + D_m, \quad D_2 = D_m$$

ここに、
 D_1 : 流線方向の分散係数、
 D_2 : 流線と直交する方向の分散係数
 $|V|$: $\sqrt{V_x^2 + V_y^2}$ 、 α : 分散長
 D_m : 分子拡散係数

また、本来テンソル量である分散係数 D_{ij} と D_1 、 D_2 との関係を示すと以下の通りとなる。

$$\begin{pmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_1 & 0 \\ 0 & D_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} D_1 \cos^2 \theta + D_2 \sin^2 \theta & D_1 \sin \theta - D_2 \sin \theta \cos \theta \\ D_1 \sin \theta \cos \theta - D_2 \sin \theta \cos \theta & D_1 \sin^2 \theta + D_2 \cos^2 \theta \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここで、 $\theta = \arctan(V_y / V_x)$ である。(6)式の関係を用いて(4)式を修正すると流速依存の異方分散係数を持つ二次元移流・分散方程式が次式のように導かれる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{xx} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_{xy} \frac{\partial^2 C}{\partial x \partial y} + D_{yx} \frac{\partial^2 C}{\partial y \partial x} + D_{yy} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - V_x \frac{\partial C}{\partial x} - V_y \frac{\partial C}{\partial y} \quad \text{in } V \quad (7)$$

一方、境界条件は、濃度固定境界 S_1 および強制物質流入境界 S_2 において次のように表される。

$$\begin{cases} C = C_0 & \text{on } S_1 \\ f = f_0 & \text{on } S_2 \end{cases} \quad (8)$$

ここに、 f : 物質流入量

f_0 : 境界における物質流入量

C_0 : 境界における濃度

物質移行解析は(7)式と(8)式にFEMを適用して導いた代数方程式を基にコンピュータを用いて実行した(樋田他、1984、樋田、1986)。

2) 解析条件

表-5に解析条件を示す。解析モデルは図-9の浸透流解析で用いたモデルで循環路は解析領域に含まれている。循環路での流速は、循環路幅を10cmとすると、注入量から0.39cm/minと計算され、それ以外の流速は浸透流解析の結果を用いた。トレー

表－5 二次元の物質移行解析の条件

初期濃度(注入孔)	1700ppm(112.8分間)
透水係数	$2.2 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$
流速分布	浸透流解析結果を利用
有効間隙率	最大30%
分散長	0.014～7.0m
層厚	10m
境界条件	不透水境界

注：循環路は解析領域に含まれる。循環路(幅10cm)の流速は、 $3900 \text{cm}^3/\text{min} \div (10 \text{cm} \times 1000 \text{cm}) = 0.39 \text{cm/min} = 0.0065 \text{cm/sec}$

サ試験では Br^- 8300ppm の水溶液 180000cm^3 を注入量 $7800 \text{cm}^3/\text{min}$ の割合で注入したが、注入前にすでに孔内には循環水 700000cm^3 が滞留している。注入孔での濃度の設定方法は、混合の全く起こらないピストン流モデル、完全混合モデルなどがあるが、ここでは孔内の濃度変化を構造上把握することができなかったため、便宜的に両モデルの中間的かつ簡易な方法として、注入したトレーサ量が一致するようにトレーサ投入濃度が 1700ppm ($180000 \text{cm}^3 \times 8300 \text{ppm} / (700000 + 180000) \text{cm}^3$) の一定濃度で、 112.8 分間 ($(700000 + 180000) \text{cm}^3 / 7800 \text{cm}^3/\text{min}$) 維持されたと仮定した。

対象とした地層の層厚は、ストレーナ区間の10mとし、この区間で地層は均質で、透水係数、有効間隙率は一様であるとした。また、分子拡散係数を $1 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{h}$ ($2.8 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{sec}$) とした。

3) 解析結果及び考察

図－7 に揚水孔での実測 Br^- 濃度と二次元のFEMによる解析解および Gelhar による解析解の結果を示す。表－2 に示す条件(注水量・揚水量： $7800 \text{cm}^3/\text{min}$ 、トレーサ量：1920g)で、Gelhar による二次元の解析解により、0.1ppm から最大濃度までの範囲で実測値とよく一致したパラメータ値は、分散長3.5m、有効間隙率4.5%であった。この

値を参考にして二次元のFEMによる解析を行い、分散長3.5m、有効間隙率7% (正確には有効間隙率7～10%) を得た。このように両解析によって得られた地層の有効間隙率は7%と4.5%と違い(初期濃度の設定条件の違いなどが考えられる)があるものの、重量法によりボーリングコアから得られた間隙率30%とは大きく異なっていることが判る。この違いは本トレーサ試験における物質移動を考える上で、有効間隙率を間隙率で代用することができないことを示している。

トレーサ試験によって得られた地層の有効間隙率とボーリングコアから得られた間隙率が一致しない原因は、

- 1) 岩相の違いによる透水性の不均質性があり、選択的に透水性の大きい岩相の部分に水が流れるため、全体としての間隙率が小さくなる。
- 2) 亀裂の存在により、1)と同様に選択的な流れが起こる。
- 3) ボーリングコアから得られた間隙率の有効間隙率と一致しないようなミクロなレベルでの選択的な流れがある(井伊他, 1990a、井伊他, 1990b)。
- 4) 帯水層の層厚が設定した厚さ10mよりも薄い。等が考えられる。

1)、2)に関連した帯水層の不均質性については、石川・杉原(1991)の水理評価によれば、注入孔と揚水孔近傍の透水係数は、 $2 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ でほぼ一致しており、この2孔間では透水性は均質と考えられる。ただし、FEMの解析領域まで範囲を広げると透水係数は $5.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ の範囲で変動し、周辺の影響を重視すると不均質性を考慮する必要があるものと考えられる。今後は、地層の不透水性(水みちの存在)をチェックするために揚水孔と注入孔を入れ換えたトレーサ試験(不可逆性のチェック)や周辺のボーリング孔を用いたトレーサ試験(透水性の影響)が必要であると考えられる。

両解析によって得られた分散長は孔間距離の1/2の3.5mで一致した。図－11に示すように、ここで得られた分散長は Leonhart(1985)が示した堆積岩の経験的な距離と分散長との関係とも一致しており、分散長は距離から推定することが可能であると考えられる。

図－12、13、14、15、16にトレーサ注水2、4、12、36、100時間後の濃度分布を示す。注入直後の2時

間後では、トレーサは注入孔周辺に同心円状に広がっていることが判る。その後、トレーサのピーク濃度の位置は注入孔の周辺に2ヶ所見られ、2つのピークの濃度は時間と共に低下するが、その位置の動きは小さいこともわかる。

図-11 分散長と距離との関係
△本測定値
○堆積岩(Leonhart, 1985より)

6. まとめ

野外トレーサ試験により、地層の透水係数、分散長、有効間隙率を求めた。地層の透水係数は $2.2 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ でボーリングコアから求められた透水係数に比べて大きい値であった。有効間隙率についてはGelharの二次元の解析解(Gelhar, 1982)およびFEM解析によって得られた値は、供試体から得られた値の約1/4以下となった。このことは、今回の試験からは物質移行の解析を行う上で有効間隙率を供試体サイズで測定した間隙率で代用することはできず、有効間隙率を測定することが重要であることを意味している。有効間隙率と間隙率が一致しない理由は、特定することはできなかったが、選択的な流れが原因の一つと考えられる。分散長はLeonhart(1985)が示した堆積岩の経験的な距離と分散長との関係と一致した。

7. 謝辞

本研究を進めるにあたり、千葉大学理学部地学科新藤静夫教授、佐倉保夫助教授、清水建設株式会社技術研究所 大塚義之部長には有益な助言をしていただき、謹んで感謝の意を表します。

図-12 トレーサ注入後2時間後の濃度分布、拡大図
($\alpha = 3.5 \text{ m}$ $\epsilon = 7\%$ 、単位は ppm)

図-13 トレーサ注入後4時間後の濃度分布、拡大図
($\alpha=3.5\text{m}$ $\epsilon=7\%$ 、単位は ppm)

図-14 トレーサ注入後12時間後の濃度分布
($\alpha=3.5\text{m}$ $\epsilon=7\%$ 、単位は ppm)

図-15 トレーサ注入後36時間後の濃度分布
($\alpha=3.5\text{m}$ $\epsilon=7\%$ 、単位は ppm)

図-16 トレーサ注入後100時間後の濃度分布
($\alpha=3.5\text{m}$ $\epsilon=7\%$ 、単位は ppm)

参 考 文 献

- 井伊博行、堀江芳博、大塚義之、杉山博道(1990a)：ペントナイト中での有効間隙率測定の検討、日本原子力学会、平成2年年会講演要旨集、2、186。
- 井伊博行、堀江芳博、大塚義之、杉山博道(1990b)：ペントナイトの間隙率と有効間隙率の比較、土木学会、平成2年年次講演会講演要旨集、2、974～975。
- 石川泰、杉原弘造(1991)：インプレス：リーチング操業評価に係わるデータの取得、その1、水理特性の把握、動燃技報、78、59～66。
- 樋田吉造、田中慎一、石井卓(1984)：有限要素法による核種移行問題の解法、第6回岩の力学国内シンポジウム、349～354。

樋田吉造(1986)：有限要素法による核種移行計算、日本原子力学会、昭和61年年会講演要旨集、30。

Freeze, R. A. and Cherry, J. A. (1979): Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, Groundwater, 426～430.

Leonhart, L. S., Jackson, R. L., Graham, D. L., Gelhar, L. W., Thompson, G. M., Kanehiro, B. Y. and Wilson, C. R (1985) : Analysis and Interpretation of a Recirculating Tracer Experiment Performed on a Deep Basalt Flow Top, Bulletin of the Association of Engineering Geologists, Vol. XXII, 3, 259～274.

Lynn W. Gelhar (1982) : Analysis of Two-well Tracer Tests with a Pulse Input, RHO-BW-CR-131P.

(受付：1991年9月17日、受理：1993年2月25日)