

1. はじめに 廃棄物の処分は最終的には埋立によらざるを得ないが、廃棄物埋立地は環境汚染の可能性があるのであるために、その用地の選択が困難になってきている。これを解決するには、廃棄物埋立地が周辺環境に及ぼす影響を十分に解明し、かつ、その防止対策を確立しなければならない。廃棄物埋立地が環境に及ぼす影響因子としては、発生ガス、臭気および浸出污水が考えられる主なものである。このうち、周辺環境に及ぼす影響の一番大きなものは、浸出污水によるものである。この污水が表流水に混入することにより、公共水域を汚染することには言うに及ばず、農作物ことに稲作に大きな被害を与えている。また、地中に浸透すると地中汚染と地下水汚染につながる。ことに、地下水を水道水源にしている都市では由々しき問題である。現在、この問題の重大さが認識され地下水に混入した浸出污水が地中をどのように移動していくかの研究はかなり進んでいる。実際の埋立地では埋立廃棄物と地下水脈との間には、不飽和浸透層が存在することが多い。したがって、この不飽和層内における汚染物質の挙動をとらえる事がまず第一の問題である。しかし、現在では汚染物質がこの不飽和浸透層内をどのように浸透拡散していくかについては、いまだ不明な点が多い。この未知な点を解明することにより地下水汚染をいかに防止するか有効な手段を見つけ出すことができる。そこで、以下の各項に従い検討を行う。

1. 汚染物質移動のメカニズム
2. 不飽和層および飽和層内における物質移動の基礎方程式
3. 汚染物質移動の数値計算
4. 環境汚染防止対策への応用と課題

2. 汚染物質移動のメカニズム 埋立廃棄物から出ていく汚染物質は発生ガスなどのガスを除けば、自ら移動することはない。重金属、有機物などは降水が廃棄物中を通過する際、水中に溶解しこの水の流れとともに移動する。

このメカニズムは次のように説明できる。埋立地に降った水は一部表面流出、蒸発も考えられるが、ほとんどは廃棄物層へ浸透していく。この水が廃棄物中を流下する際に、廃棄物中の溶解性の汚染物質を溶解含有して廃棄物層底部に達する。これがいわゆる浸出污水と呼ばれるものである。この浸出污水はさらに土壤中を浸透していき地下水に達する。この間は土壤空隙が水で満たされていない不飽和浸透層である。浸出污水が不飽和浸透層を流下する間は地下水などによって希釈されることはないが、汚染物質中の土壤吸着を受け易い物質は吸着されて、その濃度は低くなる。一方、浸出污水とともに地下水位まで達した汚染物質は地下水に混入し希釈拡散されながら、地下水の流れによって地中を移動していく。これを図示すると図1のようになる。

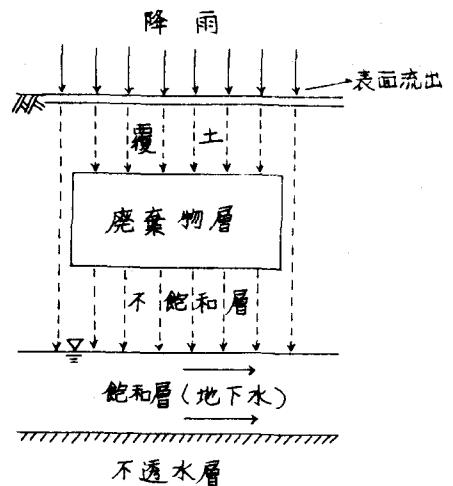


図1. 汚染物質移動メカニズム

3. 不飽和層および飽和層内における物質移動の基礎方程式^(1,7) 埋立場とその周辺における汚染物質移動のメカニズムは上述のとおりである。汚染の強さと広がり把握するには、不飽和層および飽和層内における水と汚染物質の移動を記述する方程式を解かなければならない。そこで本節では、浸透拡散現象の定式化について述べる。

3-1 不飽和浸透方程式 3次元(x,y,z: zは重力方向, cm)の有界領域Ωを浸透問題の対象領域とする。
 仮定: (1) 浸透水の流れと土の変形との相互作用は無視できる。(2) 浸透流は連続的で、非圧縮性かつ等温的である。
 (3) Darcyの法則が適用できる (4) 土の物理特性における履歴は無視する (5) 水の湧源や取水口が領域の内部に存在しない のもとで Darcyの流量 $q = (q_x, q_y, q_z)$ (cm/min) は

$$q_x = -D_x(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \dots\dots (1a) \quad , \quad q_y = -D_y(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} \dots\dots (1b) \quad , \quad q_z = -D_z(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) \dots\dots (1c)$$

で与えられる。ここに、 θ : 体積含水率 (cm³/cm³)、 (D_x, D_y, D_z) : 水分拡散係数 (cm²/min)、 K : 透水係数 (cm/min) を表す。時間変数を t (min) とおくと連続の式は θ について

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \text{div } q = 0 \quad \dots\dots (2)$$

と書かれる。Ωの境界 $\Gamma = \Gamma_1^0 + \Gamma_2^0 + \Gamma_3^0$ 上で次の3種類の境界条件、(i) $\Gamma_1^0(t)$ 上で $\theta = \theta_b(t)$ 、(ii) $\Gamma_2^0(t)$ 上で余法線 l_0 方向の傾き $\frac{\partial \theta}{\partial l_0} = 0$ (iii) $\Gamma_3^0(t)$ 上で外向法線 n 方向の流速 $q_n = q_b(t)$ と $t=0$ での初期条件 $\theta = \theta_i$ を考える。

3-2 拡散方程式 次に3-1と同じ領域Ωと座標系 ($t-x-y-z$) に対して、仮定: (6) 拡散物質は一成分とする。(7) Fickの法則が適用できる。(8) 土粒子への吸着相と浸透流相との間の吸着平衡は瞬間的に達成される。(9) 領域内での物質の生成、消費がない、のもとで Fickの物質流量 $J = (J_x, J_y, J_z)$ (mg/cm²/min) は、

$$J_x = -D_x(v_x) \frac{\partial C}{\partial x} + v_x C \quad \dots\dots (3a) \quad , \quad J_y = -D_y(v_y) \frac{\partial C}{\partial y} + v_y C \quad \dots\dots (3b) \quad , \quad J_z = -D_z(v_z) \frac{\partial C}{\partial z} + v_z C \quad \dots\dots (3c)$$

で与えられる。ここに C : 浸透水における汚染物質の濃度 (mg/cm³)、 $(\hat{D}_x, \hat{D}_y, \hat{D}_z)$: 溶質の拡散係数 (cm²/min) であって、間隙水の流速 (v_x, v_y, v_z) (cm/min) に依存し、流速は $v_x = q_x/\theta, v_y = q_y/\theta$ で定義される。

今、単位体積の上粒子に吸着する溶質の吸着等温線を $S = S(C)$ (mg/cm³) と表わすとき、 C についての物質収支は

$$\frac{\partial}{\partial t} (S + \theta C) + \text{div } J = 0 \quad \dots\dots (4)$$

と書かれる。3種類の境界条件; (iv) $\Gamma_1^c(t)$ 上で $C = C_b(t)$ 、(v) $\Gamma_2^c(t)$ 上で $\frac{\partial C}{\partial l_c} = 0$ (vi) $\Gamma_3^c(t)$ 上で $J_n = J_b(t)$ と $t=0$ における初期条件 $C = C_i$ を考える。

3-3 変分原理と有限要素法による近似 境界 Γ^0, Γ^c 上で $\delta \theta = 0, \delta C = 0$ とするよう連続変分 $\delta \theta, \delta C$ に対し、式(2)、(4)を境界条件を考慮に入れて部分積分すると

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \theta}{\partial t} \delta \theta d\Omega = \int_{\Omega} q_j \frac{\partial \delta \theta}{\partial x_j} d\Omega - \int_{\Gamma_2^0} K_{jn} \delta \theta d\Gamma - \int_{\Gamma_3^0} q_B \delta \theta d\Gamma \quad \dots\dots (5)$$

$$\int_{\Omega} \left(\frac{dS}{dC} + \theta \right) \frac{\partial C}{\partial t} \delta C d\Omega + \int_{\Omega} \frac{\partial \theta}{\partial t} C \delta C d\Omega = \int_{\Omega} \theta J_j \frac{\partial \delta C}{\partial x_j} d\Omega - \int_{\Gamma_2^c} \theta v_j n_j C \delta C d\Gamma - \int_{\Gamma_3^c} \theta J_B \delta C d\Gamma \quad \dots\dots (6)$$

を得る。ただし、 $j=1, 2, 3$ はそれぞれ x, y, z 成分を表わし添字 j についての総和をとるものと規約する。次に基礎領域Ωを有限要素 e に分割し、各 e 上で、 $\theta = [N(x, y, z)] \{ \theta \}_e, C = [N] \{ C \}_e$ と補間すると

$$[M] \frac{d}{dt} \{ \theta \}_e + [H(\theta)] \{ \theta \}_e = \{ k(\theta) \}_e - \{ b(\theta) \}_e - \{ f \}_e \quad \dots\dots (7)$$

$$[\hat{M}(C, \theta)] \frac{d}{dt} \{ C \}_e + [G(\frac{\partial \theta}{\partial t})] \{ C \}_e + [\hat{H}(\theta, v)] \{ C \}_e$$

$$= [L(\theta, v)]\{C\}_e - \{\hat{b}(C, \theta, v)\}_e - \{\hat{f}(\theta)\}_e \quad \dots\dots(8)$$

なる式を得る。次いで、式(7)、(8)を時間変数 t に関し陰的な予測子修正子法を使って離散化する。今、式(7)についてのみ結果を示すと 時間間隔 $[t_k, t_{k+1})$ ($k=0, 1, 2, \dots$) に対して

$$[M] \frac{\{\theta^{k+1/2}\} - \{\theta^k\}}{\Delta t/2} + [H(\theta^k)]\{\theta^{k+1/2}\} = \{k(\theta^k)\} - \{b(\theta^k)\} - \{f^{k+1/2}\} \quad \dots\dots(9a)$$

$$[M] \frac{\{\theta^{k+1}\} - \{\theta^k\}}{\Delta t} + [H(\theta^{k+1/2})]\{\theta^{k+1}\} = \{k(\theta^{k+1/2})\} - \{b(\theta^{k+1/2})\} - \{f^{k+1}\} \quad \dots\dots(9b)$$

となり、初期値 $\{\theta^0\}$ から始めて逐次に $t = t_k$ における $\{\theta^k\}$ が計算される。

4. 汚染物質移動の数値計算 上の解法を理立場とその周辺の汚染解析に適用するとき、どのようなモデルを設けるかということが問題になる。理立場の地形、地層の種類、地層の分布、地層と廃棄物層の浸透特性や汚染特性などをどの程度まで忠実に考慮してモデルが可能か、ということについて予め検討しなければならないが、現時点では計算に必要な諸データに関する資料が不足しているので、まだ本格的な数値解析のためのモデルを設定することは困難である。この種の問題を解決するには模型実験と現場測定および数値実験による成果が統合されなければならないだろう。

そこで本節では、一連の研究の第一段階として模型実験ができる程度の簡単なモデルで数値計算を行ない本解析プログラムの妥当性を調べることにする。

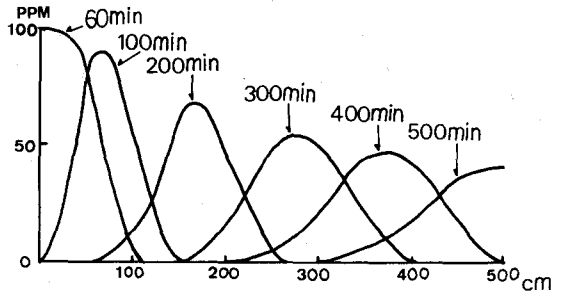


図2 飽和層の濃度

4-1 飽和層の汚染(一次元解析) 地下水層の汚染を調べる場合、廃棄物下層の不飽和層を無視して、廃棄物層の汚染物質を直接飽和層へ供給するモデルが考えられる。図2は、時間の経過とともに汚染物質が希釈拡散されていくようすを示している。ただし、初期濃度 $C=0$ 、境界条件は上流で $C=100 \text{ ppm}$ ($0 \leq t \leq 60 \text{ min}$)、 $J=0$ ($60 < t$)、下流 500 cm で $\partial C / \partial x = 0$ 、拡散係数は $D = 1.44 \sqrt{V} + 2.16 \text{ cm}^2/\text{min}$ 、流速は $1 \text{ cm}/\text{min}$ である。

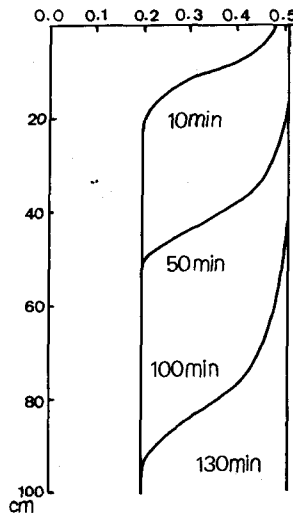


図3(a) 不飽和層の濃度

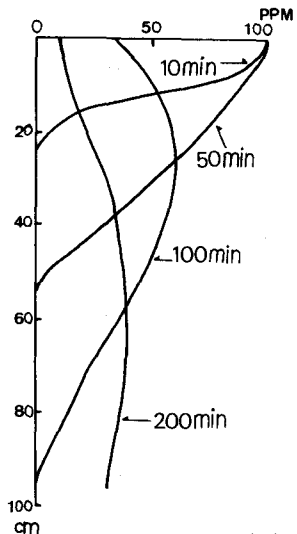


図3(b) 不飽和層の濃度

4-2 不飽和-飽和層の汚染(一次元解析) 廃棄物層下の不飽和層の影響を考慮して地下水層の汚染が進行するようすを調べる。不飽和層の浸透と汚染の基礎方程式は、共に高濃度の非線形性を示す。したがって、解の発散を防ぐには時間刻みを十分に小さくしなければならない。このため計算時間が長くなり、長期予測は困難となる。このこと

は、定常な浸透流を想定するか、浸透パターンを何らかの方法によって与えることで緩和される。雨量強度の時間的变化率に比べれば、覆土層底面の含水率の変化はかなり平滑化され、水分が廃棄物層を通過し、その下の土層に達する段階では、さらに平滑化が進み、ここでの浸透流は短期的には定常状態、長期的にはあるパターンで変化していると考えられる。しかし、このことを定量的にとらえることは困難であるから、とりあえず3-1で飽和層に入力した汚染物質を不飽和層に入力し非定常の浸透状態を設定する。

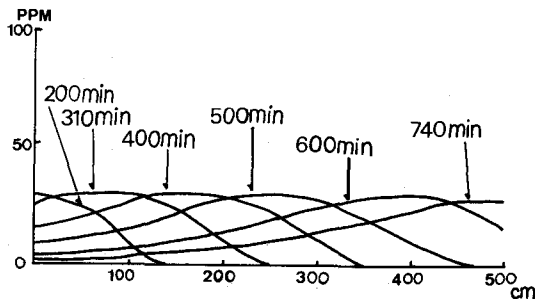


図4 飽和層の濃度

不飽和層の深さを100cm、初期含水率を $0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 、初期濃度を0ppmとする。境界条件は、上端で

$$C = 100 \text{ ppm} \quad (0 \leq t \leq 60 \text{ min}), \quad J_B = 0, \quad (60 < t)$$

$$g_B = 1 \text{ cm/min}, \quad (0 < t) \quad \text{下端で} \quad \partial \theta / \partial n = 0, \quad \partial C / \partial n = 0 \text{ である。}$$

$$D(\theta) = 3.33 \times 10^5 \text{ Exp}(29.34 \theta) \text{ cm}^2/\text{min}, \quad K(\theta) = 3.33 \times 10^{-13} \text{ Exp}(54.11 \theta) \text{ cm/min}, \quad S = 0.22 C$$

$$\hat{D} = 0.0980 + 0.0575 \log |V|, \quad |V| < 1 \text{ のとき } \hat{D} = 0.0980$$

この例題での汚染物質は、不飽和層から地下水層に3-1の飽和解析に比べて比較的時間をかけて徐々に供給されるので、地下水の汚染希釈は認められない。短期間に集中的に供給した3-1の場合と比べて、下流500cmのところで、わずかに濃度が10ppm低下しているにすぎない。

4-3 二次元解析 浸透と汚染の経路が二次元的に広がっている場合、有限要素法は差分法に比べて次の点で秀れている。

- (i) 複雑な解析領域も容易に要素分割によってカバーできる。
- (ii) 種々の境界条件を考慮しやすい。
- (iii) 土層の種類、分布形状を考慮しやすい。

計算例としては、埋立場周辺の汚染解析に与える意味で、図5に示す形状の不飽和浸透と汚染拡散をとりあげる。土層は、3-2の不飽和層と同じ特性をもつ均一な層とする。境界条件は、CD上で $\theta = 0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $C = 50 \text{ ppm}$, AF, BC, DE上で $\partial \theta / \partial x = 0$, $\partial C / \partial x = 0$, AB, EF上で $g_B = 0$, $J_B = 0$ 初期条件は $\theta = 0.2$, $C = 0$ である。図5で破線は差分解、一点破線はCrank Nicolson法による有限要素解を示している。

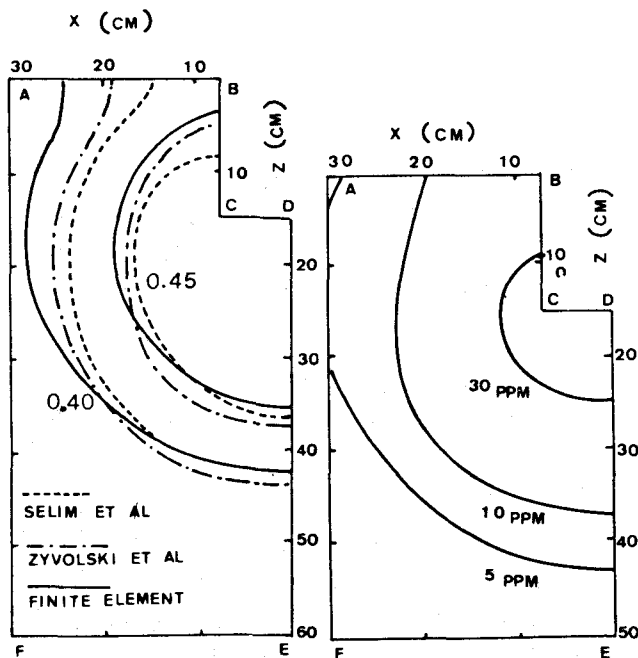


図5(a) 等含水率曲線

図5(b) 等濃度曲線

4-4 三次元解析 図6は上の二次元問題を三次元問題へ拡張したもので

ある。上図と下図のABCDEFは同じ平面を示す。境界条件は、JIDC上で $\theta = 0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $C = 50 \text{ ppm}$, BGJC, AKNF, DIHLM E上で $\partial \theta / \partial x = 0$, $\partial C / \partial x = 0$, GHIJ, ABCDEF, KLMN上で $\partial \theta / \partial y = 0$, $\partial C / \partial y = 0$, KLHGBA, NMEF上で $g_B = 0$, $J_B = 0$ とする。この場合、連立方程式(9)の

解法として、共役傾斜法が有効であることが確認された。要素分割は節点数77、要素数7と粗いが、ABCD EF平面における結果は、二次元解析結果(節点数50、要素数73)と比較して妥当なものである。

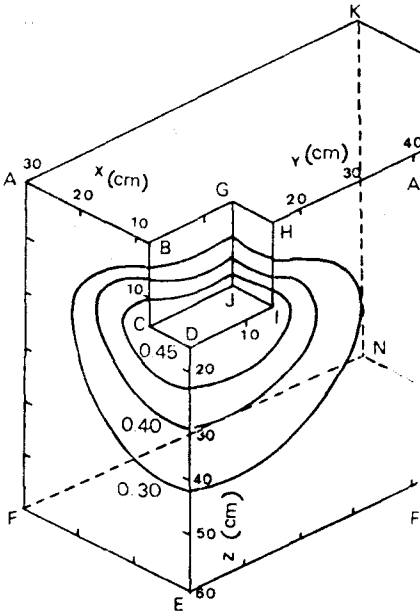


図 6(a) 等含水率曲線

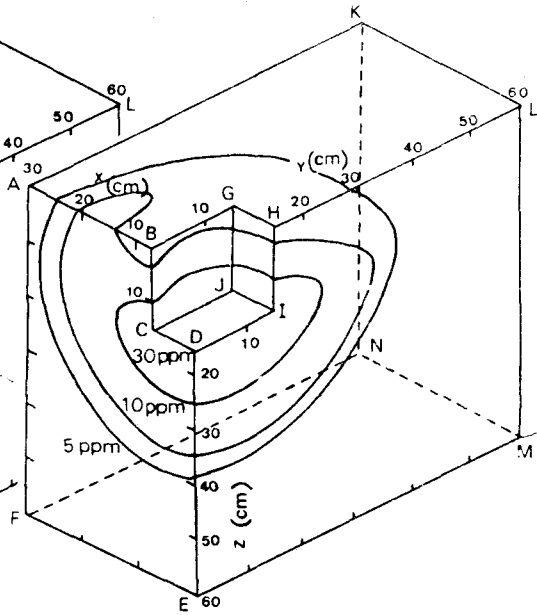
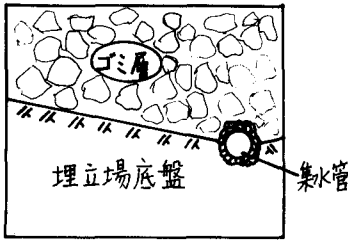


図 6(b) 等濃度曲線

5. 環境汚染防止対策への応用と課題 以上において、不飽和および飽和層内における浸透水と汚染物質の移動についての基礎方程式を考察し、その計算例を示した。この解析法の応用例として、既存の廃棄物埋立場から周辺環境に広がる汚染を防止する対策としての覆土工の役割の評価と、新しく開発する埋立場の底部に遮水工を施し、地下水汚染を防止するための工法の評価等が考えられる。そこで、今回は埋立場底部における汚水の移動を把握するために、埋立場底部をモデル化し、二層地盤の不飽和浸透としてとらえ解析を行った。

5-1 汚水の浸透防止対策について 上部を良透水性の層下部を難透水性の層となるように施工された場合、難透水層によって下方への浸透は抵抗を受けるであろう。この良透水性層-難透水性層の組合せを図7に示すような汚水浸透防止を目的とした工法に対して適用する場合、良透水性の廃棄物層から下部の難透水性不飽和層へ浸透しようとする汚水は、傾斜した廃棄物層底部に沿って斜め下方に移動し有孔管に集まると期待される。

傾斜した二層の不飽和浸透解析例(有孔管がない場合) 図8



↓ モデル化

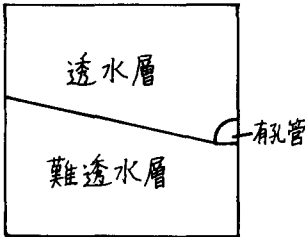
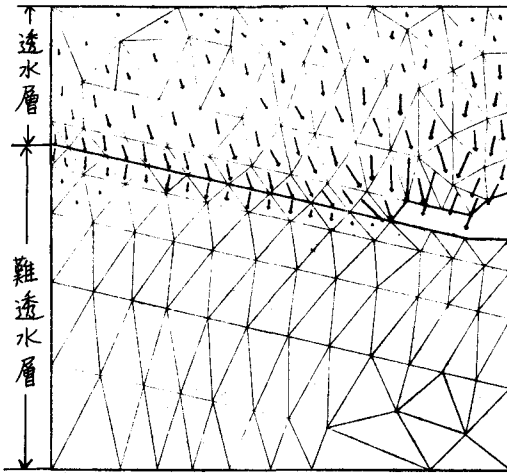


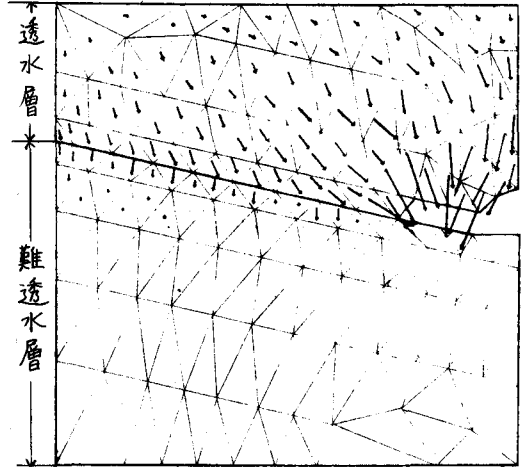
図 7 埋立場底部のモデル化

は、基礎方程式(9)を用い、境界条件として、 $q=1\text{cm/min}$ ($0 \leq t \leq 10$) $q=0$ ($10 < t$)、FG上で $\frac{\partial \theta}{\partial z}=0$ 、AHGおよびBCDEF上で $q_B=0$ 、初期条件として $\theta=0.2\text{cm}^3/\text{cm}^3$ のもとに計算した例を示す。上層ABCDHの水分拡散係数と透水係数は前節4-2と同じ値であり、下層DEFGHの各係数は上層の $\frac{1}{10}$ の値とした。図8の矢線は各要素内のDarcyの流束を表わし、浸透水は二層境界傾斜面HDに沿ってわずかに流下するが、全体としては下層へ浸透しているようすがわかる。

傾斜した二層の不飽和浸透解析例(有孔管がある場合) 図9はDC上の境界条件を $\frac{\partial \theta}{\partial n}=0$ と変化させ、他は4-1節と同じ条件のもとに計算した結果を示す。有孔管CDEによる水抜きを式 $\frac{\partial \theta}{\partial n}=0$ でモデル化した。図9においては4-1節の場合と比較して傾斜面と有孔管周辺における浸透水が管の方向に向って流下する傾向が強められ、下層への地下浸透が弱められるようすが観察される。



図(8)有孔管がない場合のDarcy流束



図(9)有孔管がある場合のDarcy流束

5-2 汚水の進行防止対策について 上部を難透水性の層、下部を良透水性の層となるように施工された場合、難透水層自身は水の透過を遮る以外に、下部の良透水層に含まれている浸透水の移動をおさえ、水分の保持に役立つであろう。難透水性上層を覆土とする工法に対して適用する場合、すでに下部の良透水性の廃棄物層間隙にある汚水は、覆土の効果によって、下層への移動が妨げられ、廃棄物層中に長く保存されることが期待できる。

5-3 汚染防止対策への課題 上記の例は埋立場における浸透水の移動を計算した例にすぎないが、種々の境界条件と土特性のもとにパラメトリックな解析を行なうことにより、5-1, 5-2 節に提案した工法に対して、覆土層の厚さや勾配と廃水管による集水量との相関、廃棄物層底面の勾配と有孔管による排水量との相関、二層間の拡散係数や透水係数の比の大小による浸透水の移動量の変化等を把握する必要がある。このことは、遮水を目的とした廃棄物埋立場の設計評価のための指針となるであろう。

現在、本法を実証するために種々の土特性の測定とモデル実験を継続中である。廃棄物埋立による土壌、地下汚染防止に関する研究において、今後検討すべき課題は多い。

- 1) 赤井浩一他, 土木学会論文報告集, No. 264 (1977) 2) ELZEFTAWY, A. et al, SOIL SCIENCE, Vol. 122, No. 5 (1976) 3) 花嶋正孝他, 福岡大学工学集報, (1978) 4) RUBIN, J, SOIL Sci. Soc. AMER. Proc. Vol. 32, No. 5 (1968) 5) SELIM, H. M. et al., SOIL Sci. Soc. AMER. Proc. Vol. 37, No. 4 (1973) 6) SELIM, H. M. et al. SOIL SCIENCE, Vol. 121, No. 3 (1976) 7) ZYVOLOSKI, G. et al. SOIL SCIENCE, Vol. 122, No. 2 (1976)