

福岡大学	黒木 健実
〃	大西 和栄
〃	花嶋 正孝
〃	山崎 惟義
〃	松藤 康司

1. はじめに

廃棄物の量は、最近増加する一方で、その処理を海面埋立に依存する割合が高くなっている。それにともない環境汚染の可能性も増大しており、緊急に解決しなければならない埋立技術上の問題が生じている。そこで、はじめに海面埋立の現状をふりかえり、環境汚染に対処する著者らの考え方を要約する。次に防止対策の指針をえるうえで必要と思われる解析理論と数値計算方法およびモデル実験について述べる。

2. 海面埋立の現状¹⁾

近年、我国においては、人口の集中化、産業の過密高度化、過疎地域の偏在化が極端なため、太平洋ベルト地帯の東西延長線に位置する大都市のほとんどは、埋立場を内陸部より臨海部にもとめている。

これらの埋立場には、港湾や海岸道路の汀線沿いの比較的小規模な埋立から大規模な土地造成の埋立まで種々の様式があるが、海岸線域の埋立から漸次沖合方向への埋立が一般的傾向である。

元来、海面埋立は、都市環境整備の目的で土地造成として行われ、埋立材料としては、しゅんせつ土砂や建設残土が主体であった。しかし、廃棄物の量が増えその処理処分が、都市問題の中で緊急な課題として提起されてからは、埋立材料中に占める廃棄物、特にゴミの比重も増えてきている。

こうした中で、経済的な事情もあって、汚染防止対策を含む埋立技術が十分に検討されないまま、海面埋立が行われている例も多いようである。

3. 海面埋立の課題

廃棄物の海面埋立で重要なことは、汚染の拡がりを防止するために、周辺水域と埋立地を効率よく遮断することであろう。

その意味で、締切構造物は、海面埋立における最も重要な施設として位置づけられ、単に、構造物として安全であるだけでなく、廃棄物を埋立材料として使用する特殊性から、安定的な貯留、環境の保全等の多角的な機能を持つ必要がある。

現在、締切り構造物は、力学的条件の他、環境保全条件として、汚濁物質が締切り構造物を浸透、越流して、地下水や周辺水域を汚染することのないように、止水性が要求されており、締切部とその周辺における汚濁物質の浸透拡散の定量的把握は、海面埋立に技術性と経済性を持たせる意味で重要な課題である。

4. 基本的な考え方

海面埋立の締切り構造物は、一般に、鋼矢板による締切りか、堤防による締切りである。これらの締切り構造物周辺の状況を模式的に示したものが、図1、2である。

ここで汚染物質の移動拡散と関連する因子を列記すると

①潮流

②透水路での汚染物質の吸脱着

③締切構造物形式

④ヘドロ等による透水層の目づまり

⑤その他(雨水、埋立厚さ、廃棄物の性情)

等が考えられる。

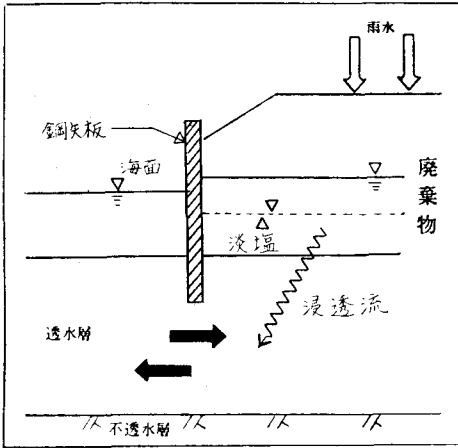


図1 鋼矢板締切り

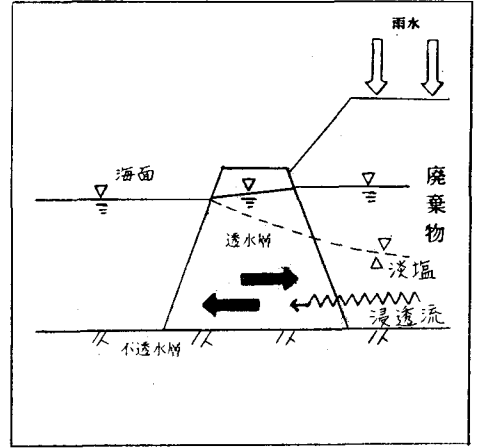


図2 堤防締切り

これらの因子と汚染物質の挙動との関連を明らかにするにはシミュレーション用のいろいろなモデルが必要になる。

図3は、潮汐による水位変動だけの影響を調べるためのいわば基準となるモデルである。これに対して図4は、根入深さの効果を、図5は、透水層の目詰り効果を調べるためのモデルである。図3、4、5は、いずれも鋼矢板締切りの場合であり、同様のことを図2の透水堤についても考えなければならない。

これらのモデルを用いて数値実験を行えば、海面埋立における汚染物質の移動メカニズムの解明に寄与できるであろう。また、この段階で汚染防止を考慮した海面埋立構造は、どうあるべきかの指針を与えることができると期待される。

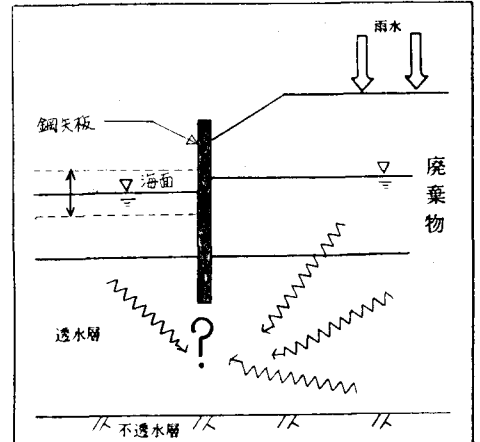


図3 潮汐

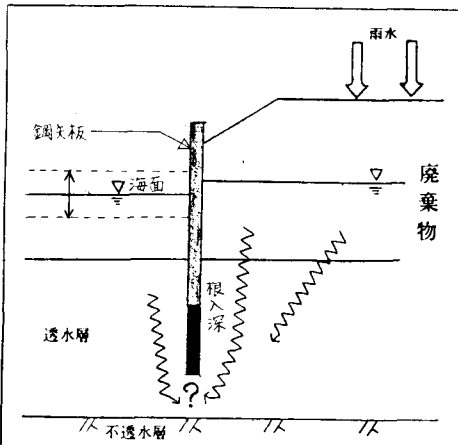


図4 根入り深さ

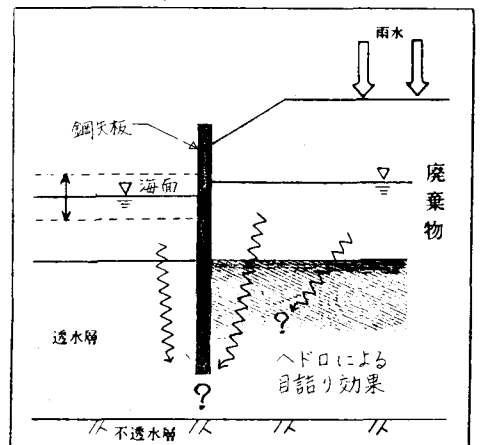


図5 廃棄物層下の目詰り

5. 理論式²⁾

5.1 浸透

以上に述べた問題に対処するには、水の動きと水を媒体とする物質の動きをとらえなければならぬ。この場合、水は、浸出汚水、海水、地下水などに分類される。一方の物質には、廃棄物層から浸出するいろいろな汚染物質がある。理論式を導く際必要となる土中の浸透特性、物質の移流拡散特性については、次のような仮定をもつ。

1) 海水、浸出汚水、地下水あるいはそれらの混合された水を通す土の透水性は、同じ土層では、等しく、流速は、Darcy 則に従う。

2) 物質の拡散は、濃度勾配に比例し、flux は、拡散項と移流項の和として表わされる。

土中水の状態は、含水率 θ 、圧力 P 、密度 ρ 、流速 v で表される。座標系を図6のようにとったとき水の flux を q とおけば、これらの変数の間には、次の関係が成り立つと考えられる。

$$\begin{aligned} v_x &= -K_x \frac{1}{\rho g} \frac{\partial P}{\partial x} & v_y &= -K_y \left(\frac{1}{\rho g} \frac{\partial P}{\partial y} + 1 \right) \text{ cm/min} \\ q_x &= \rho v_x & q_y &= \rho v_y \quad g/\text{cm}^2/\text{cm}^3 \\ \theta &= \theta(P) \text{ cm}^3/\text{cm}^3 & K_x(P), K_y(P) &= \text{透水係数 cm/min} \end{aligned}$$

ここで水の保存式を立てれば

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \theta) + \frac{\partial}{\partial x}(q_x) + \frac{\partial}{\partial y}(q_y) = 0 \quad (1)$$

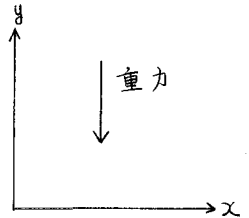


図6 座標系

浸透解析では、含水率 θ を変数とする場合と、圧力 P を変数とする場合が考えられるが、飽和領域と不飽和領域が存在するときは、後者の方が有用である。式(1)を圧力 P を未知数とする式に書き換えると

$$\rho \frac{d\theta}{dP} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) = 0 \quad (2)$$

ただし $\theta \partial \rho / \partial t$ は、無視する。

5.2 拡散

水中の物質の濃度を $C \mu\text{g}/\text{cm}^3$ とすれば、土中水の密度 ρ は、ある基準量 ρ_0 と濃度 C の関数となる。すなわち

$$\rho = \rho(\rho_0, C) \quad g/\text{cm}^3 \quad (3)$$

通常の汚染解析では、 ρ と C は、独立変数とみなされるが、海水が地下水層へ浸入するような場合は、式(3)を考慮しなければならない。

いずれの場合も物質の flux J_x, J_y は、次のように表わされるものとする。

$$J_x = -D_x \frac{\partial C}{\partial x} + C \frac{v_x}{\theta}, \quad J_y = -D_y \frac{\partial C}{\partial y} + C \frac{v_y}{\theta} \quad \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{min} \quad (4)$$

ここに $D_x, D_y \text{ cm}^2/\text{min}$ は、拡散係数である。

式(4)と水中の物質が土粒子へ吸脱着される量 $S = S(C) \mu\text{g}/\text{cm}^3$ を考慮して、物質の保存式を立てれば次式がえられる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta C + S) + \frac{\partial}{\partial x}(\theta J_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\theta J_y) = 0 \quad (5)$$

汚染物質の濃度は、はじめに式(2)を、次に式(5)を解けば求められる。これに対して密度流の解析では、 P と C は、独立ではなくなるので、式(2), (3), (5)を連立して解かなければならぬ。

6. 計算方法²⁾

支配方程式 (2) と (5) に対する境界条件は、次のように書ける。

式 (2) に対する境界 $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2$ Γ_1 上で $P = P_B$, Γ_2 上で $\theta = \theta_B$

式 (5) に対する境界 $\Gamma = \Gamma_1' + \Gamma_2'$ Γ_1' 上で $C = C_B$, Γ_2' 上で $J = J_B$

ここに P_B, θ_B, C_B, J_B は、既知量

Γ_1 上で $\delta P = 0$, Γ_1' 上で $\delta C = 0$ となる変分量を使って、式 (2) および式 (5) と等価な変分表示式を求めれば、次式がえられる。

$$\int_V p \frac{d\theta}{dp} \frac{\partial p}{\partial t} \delta p dV + \int_{\Gamma_2} \theta_B \delta p d\Gamma - \int_V \left(\theta_x \frac{\partial \delta p}{\partial x} + \theta_y \frac{\partial \delta p}{\partial y} \right) dV = 0 \quad (6)$$

$$\int_V \left(\frac{dS}{dC} + \theta \right) \frac{\partial C}{\partial t} \delta C dV + \int_V \theta C \delta C dV + \int_{\Gamma_2'} J_B \delta C d\Gamma - \int_V \left(\theta J_x \frac{\partial \delta C}{\partial x} + \theta J_y \frac{\partial \delta C}{\partial y} \right) dV = 0 \quad (7)$$

上式を有限要素法により近似するために、 p と C を各三角形要素 e 上で

$$p = Np, \quad C = Nc$$

と一次の shape function で補間して整理すれば、式 (6), (7) は、それぞれ次のように変形される。

$$\left(p \frac{d\theta}{dp} \right) M \frac{dp}{dt} + R + (HP + K) = 0 \quad (8)$$

$$\left(\frac{dS}{dC} + \theta \right) M \frac{dc}{dt} + \frac{\partial \theta}{\partial t} MC + F + (GC + LC) = 0 \quad (9)$$

ただし () 内の関数は、要素 e 内の平均値を意味する

時間方向の離散化を行うために、 n step 目の時刻を t_n , $n+1$ step 目の時刻を t_{n+1} とおき、時間間隔を $\Delta t = t_{n+1} - t_n$, $P(t_n) = P_n$, $C(t_n) = C_n$ と表わすとき、例えば、Crank-Nicolson法を利用すれば、式 (8), (9) は、それぞれ

$$\left(p \frac{d\theta}{dp} \right)_{n+1/2} M \frac{P_{n+1} - P_n}{\Delta t} + R_{n+1/2} + H_{n+1/2} \frac{P_{n+1} + P_n}{2} + K_{n+1/2} = 0 \quad (10)$$

$$\left(\frac{dS}{dC} + \theta \right)_{n+1/2} M \frac{C_{n+1} - C_n}{\Delta t} + \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_{n+1/2} M + G_{n+1/2} \left\{ \frac{C_{n+1} - C_n}{2} + F + L_{n+1/2} C_{n+1/2} = 0 \quad (11) \right.$$

と書ける。

これらの2式は、非線形であるので、逐次近似法によって解かれる。その際、収束条件が問題となるが、それは、次のように考える。逐次近似法の出発値を $P_{n+1}^{(0)}$, n 近似値を $P_{n+1}^{(k)}$ と表わし、Euclid norm で評価して、

$\|P_{n+1}^{(1)} - P_{n+1}^{(0)}\|_2 > \varepsilon$ ならば Δt を半分にする。 $\|P_{n+1}^{(1)} - P_{n+1}^{(0)}\|_2 < \varepsilon$ ならば Δt を2倍にする。

$\|P_{n+1}^{(k+1)} - P_{n+1}^{(k)}\|_2 < 10^{-7}$ ならば 収束したとみなす。ある k に対して $\|P_{n+1}^{(k+1)} - P_{n+1}^{(k)}\|_2 \geq \|P_{n+1}^{(k)} - P_{n+1}^{(k-1)}\|_2$ であって、

かつ $\|P_{n+1}^{(k)} - P_{n+1}^{(k-1)}\|_2 \geq 0.1$ ならば 収束は望めないとする。しかし $\|P_{n+1}^{(k)} - P_{n+1}^{(k-1)}\|_2 < 0.1$ ならば 精度を犠牲にして収束したとみなす。さらに $\Delta t < 10^{-7}$ としても、上記条件の意味で収束しない場合に計算は、打ち切られる。

方程式は、無次元化して解かれるが、収束判定の条件とパラメータの選び方は、難かしく、研究の余地がある。

上式から作成されるプログラムの種類は、

- 1) 飽和・不飽和浸透流
- 2) 飽和・不飽和浸透流、汚染物質移流拡散
- 3) 密度流

7. 数値計算

6で述べた計算方法によると飽和領域と不飽和領域あるいは密度差による領域の区別を必要がない。要素分割を変えないで、水の動きや物質の動きを追跡できるという利点がある。

ここでは、飽和不飽和浸透解析プログラムと飽和不飽和浸透拡散プログラムによる数値計算例を示す。

図7は、飽和不飽和浸透流の計算例で、乾いた砂でつくられた長方形の領域の両側面に静水圧をかけたとき、水が浸透し、最終的には、自由表面がえられるようすを示している。

ここに、砂の浸透特性は、

$$K(h) = 0.0645 (1 - e^{-0.00415(h+76.29)}) \text{ cm/min}$$

$$\theta(h) = 0.395 / (1 - e^{-0.0212(h+89.3)}) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

ただし、 h は、圧力水頭で、 $h \geq 0$ のとき

K = 飽和透水係数、 θ = 飽和含水率

初期値は、 -10 cm の圧力とした。要素数は、

73で、節点数は、50である。

境界条件は、底面と木につかっていない表面で流速 $=0$ とした。

図8、9は、根入深さが汚染物質の拡散に与える影響を調べるための計算例である。ただし、水位は、一定に保ち、拡散現象だけ非定常とした。なお海水だけの領域への汚染物質の移動はないとした。濃度の初期値は、零で、ゴミ層底面に5000 PPMを与えた。拡散係数は、

$$D = 14.0 \text{ cm}^2/\text{min}$$

図8は、要素数 68、節点数 47、一方図9は要素数は、94、節点数は 61の場合であるが、根入の影響が認められる。

計算は、収束条件パラメータ ε_0 、 ε を次のようにとって行われた。

$$\varepsilon_0 = \varepsilon = 0.1$$

最初に与えた無次元の時間中は、0.02であった。計算の初期段階では、時間中は、 0.78×10^{-6} まで小さくなるが、その後、時間中は、徐々に増加し、くり返し回数も2~3で収束値がえられた。

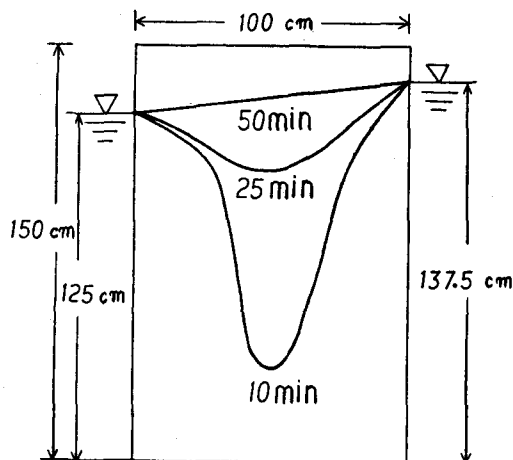


図7 浸潤線の時間的变化

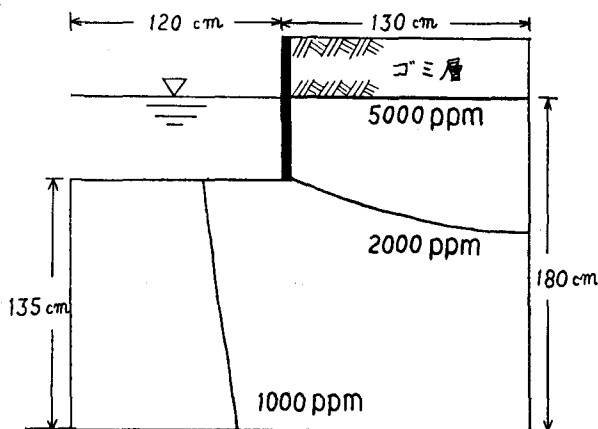


図8 汚染濃度分布(約1日後)

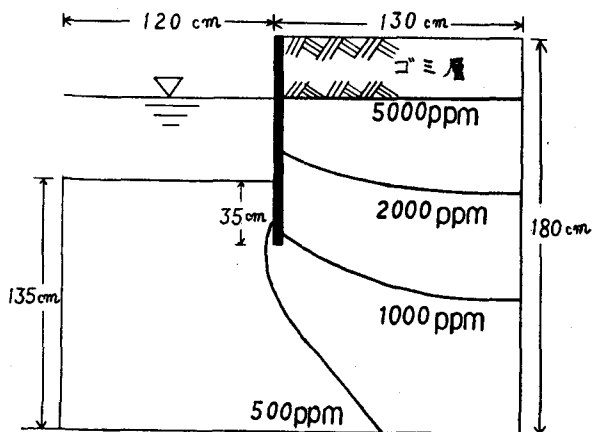


図9 汚染濃度分布(約1日後)

8. 実験

実験は、次の3つの目的で行う。

- 1) 数値計算の精度の検討
- 2) 数値計算が困難な現象の観測
- 3) 透水係数、拡散係数、吸脱着など数値計算に必要な諸係数の測定

現在、着手している実験は、図1に模式的に示した鋼矢板締切りにおける水と汚染物質の動きを把握するための実験で、図10がその装置である。ただし、本実験は、数値計算をサポートするためのもので、相似率は、考えていない。

まず、海面部に図(11)に示す水位変動を与え、図10に示した各圧力測定点の圧力の時間的変動を各1周期について測定した。各点の圧力変動の例を図12 および図13に示した。海面部下にあるNO.6点の圧力は、ほとんど、水面変動と等しく、埋立部奥にあるNO.37点の圧力変動は、水面変動に比較して、遅れがみられる。

本実験は、飽和不飽和浸透モデルとしてとらえなければならないので透水層の不飽和パラメーター、すなわち PF-水分曲線および不飽和透水係数の測定を行った。

不飽和パラメーターは、ほぼ次式で表わされる様な結果がえられた。

$$K(h) = 15.5 / \{1 + \exp[-6.77 \times 10^{-2}(h+36.4)]\}$$

$$\theta(h) = 0.42 / \{1 + \exp[-0.42(h+32.0)]\}$$

ただし $K(h)$: 透水係数 (cm/hr), $\theta(h)$: 含水率 (cm³/cm³)

h : 吸引圧水頭 (cm)

9. おわりに

廃棄物海面埋立における汚染防止策策定の基本姿勢と解析手法および実験方法について概要を述べた。

また、数値計算と実験とを比較、検討するまでには、至っていないが、今後本報告に沿って研究を進めていく方針である。

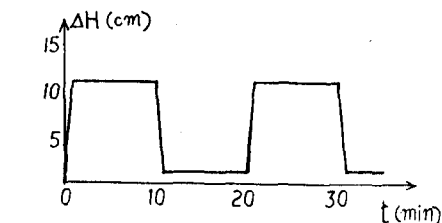
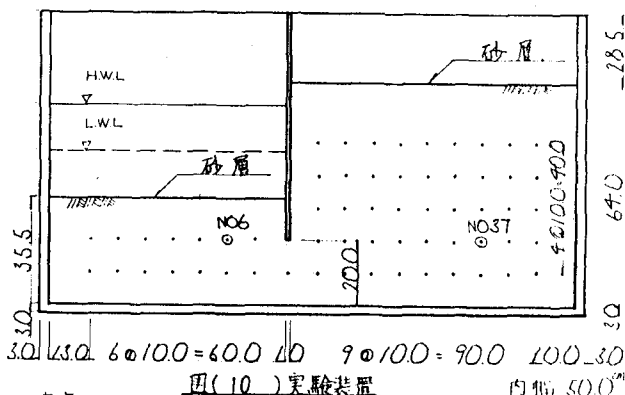


図11 水位変動

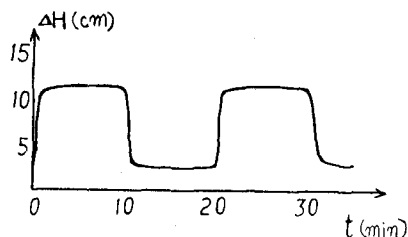


図12 圧力変動 NO.6

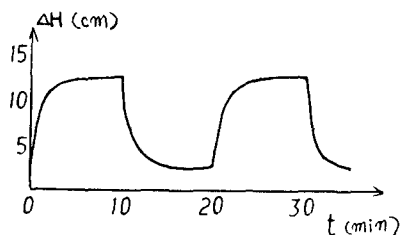


図13 圧力変動 NO.37

参考文献

- 1) 都市ごみ処理ガイドブック P725~728 環境技術研究会 理工新社 昭和54年
- 2) G.F. Pinder and W.G. Gray: FINITE ELEMENT SIMULATION IN SURFACE AND SUBSURFACE HYDROLOGY, ACADEMIC PRESS 1977