

大阪大学大学院 正会員 阿部 信晴
大阪大学大学院 学生員 ○八杉 信
大阪大学工学部 学生員 山本 直子

1. まえがき

廃棄物処分場は、廃棄物処理法によると、遮断型、安定型、管理型の3種類の最終処分場に区分されている。この中で管理型最終処分場は、排水基準に満たない浸出水が発生するため、これを処理する施設と浸出水の外部への漏出を防ぐための遮水シートや粘土ライナーが設置されている。しかし、処分場周辺の地下環境汚染が社会問題として取り上げられることも少なくない。本報告では提案する粘土の化学弾粘塑性モデルおよび物質移行連成圧密解析法により粘土ライナーを想定した粘土層の非定常一次元移流拡散解析を行い、汚染物質の移流拡散過程と粘土ライナーの浸透圧密挙動について検討している。

2. 汚染物質移流拡散解析

解析概要 平成 10 年 6 月に「一般廃棄物および産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準」が改正され、遮水工の断面構造が示された。粘土層の場合、層厚 5m 以上、透水係数 10^{-5}cm/s 以下であることが必要とされている。そこで層厚 5m の粘土ライナーについて、表 1 に示すように汚染物質の浸透時間に与える透水係数、拡散係数、浸出水水位、遅延係数の影響また汚染物質による粘土ライナーの透水性劣化の影響について解析している。

化学弾粘塑性モデル 提案モデルは、間隙水中に単一の水溶性化学物質のみが存在し、その影響は濃度によって記述できるものとしてモデル化されている。本モデルでは、力学弾性ひずみと化学可逆ひずみの和で表される弾性ひずみおよびひずみ関数 f (塑性ひずみ)はそれぞれ(1), (2) 式で表される。また流動関数 F を(3) 式によって与えることにより、流動曲面理論に基づき応力速度-ひずみ速度関係が求められる。

$$e_z^r = m_e e_z^e + c_h e_z^r = \frac{\kappa}{1+e_o} \ln\left(\frac{p}{p_o}\right) + \frac{\beta}{1+e_o} [1 - \exp[-\xi(c-c_o)]] \quad (1)$$

$$f = e_z^p = m_e e_z^p + c_h e_z^r = \frac{\lambda - \kappa}{1+e_o} \ln\left(\frac{p}{p_o}\right) + \frac{\alpha}{1+e_o} (c - c_o) \quad (2)$$

$$F = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left[1 - \exp\left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{e}_{z,t}^v\right) \right] \exp\left(\frac{f - h_o}{\mu}\right) + \delta \exp\left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{e}_{z,t}^v\right) \right] - \varepsilon^v = 0 \quad (3)$$

土・水・汚染物質連成圧密有限要素法 応力・浸透・物質移行連成問題の支配方程式は次のように表される。

応力のつり合い方程式 $\frac{\partial(\dot{\sigma}_z + \dot{u})}{\partial z} + \rho \dot{C}_z = 0 \quad (5)$

間隙水の連続方程式 $-\frac{1}{\gamma_w} \left[k_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + \dot{e}_z = 0 \quad (6)$

移流拡散方程式 $R \dot{C} + v_z \frac{\partial C}{\partial z} - D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = 0 \quad R = 1 + \frac{\rho_s K}{n} \quad (7)$

これらの支配方程式を離散化し物質移行連成有限要素解析を行った。

解析結果 解析条件を、解析ケース表(表 1)に示す。図 2,3,4 はケース B における濃度分布、鉛直ひずみ、間隙水圧経時変化を示している。汚染物質は上面より浸透し、時間とともにライナー内の濃度が上昇する。そして最終的にはライナー全体が飽和濃度に達し定常状態となる。粘土ライナーの変形挙動については、時

表-1 解析ケース表

解析ケース	水頭差 h (m)	透水係数 ko (cm/min)	遅延係数 R	拡散係数 D (cm²/min)	濃度による 透水性の変化
A-H100	1	6.0×10^{-4}	1	6.0×10^{-4}	変化なし
A-H 70	0.7	6.0×10^{-4}	1	6.0×10^{-4}	〃
A-H 50	0.5	6.0×10^{-4}	1	6.0×10^{-4}	〃
A-H 30	0.3	6.0×10^{-4}	1	6.0×10^{-4}	〃
A-H 10	0.1	6.0×10^{-4}	1	6.0×10^{-4}	〃
A-H 5	0.05	6.0×10^{-4}	1	6.0×10^{-4}	〃
A-H 0	0	6.0×10^{-4}	1	6.0×10^{-4}	〃
B	0.3	6.0×10^{-4}	2	6.0×10^{-4}	〃
B-K1	0.3	6.0×10^{-3}	2	6.0×10^{-4}	〃
B-K2	0.3	6.0×10^{-5}	2	6.0×10^{-4}	〃
B-D1	0.3	6.0×10^{-4}	2	6.0×10^{-3}	〃
B-D2	0.3	6.0×10^{-4}	2	6.0×10^{-5}	〃
B-R1	0.3	6.0×10^{-4}	3	6.0×10^{-4}	〃
B-CK1	0.3	6.0×10^{-4}	2	6.0×10^{-4}	濃度依存性
B-CK2	0.3	6.0×10^{-4}	2	6.0×10^{-4}	〃

表-2 解析パラメータ(ケース B)

圧縮指数 λ	0.3
膨潤指数 κ	0.03
初期間隙比 e_o	1.0
二次圧縮係数 μ	1.0×10^{-3}
基準ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{cr}^v$ (1/min)	1.0×10^{-5}
内部拘束ひずみ速度 δ	1.0×10^{-6}
基準透水係数 k_o (cm/min)	6.0×10^{-4}
透水性変化指数 C_k	0.8
土粒子密度 ρ_s (kg/cm³)	8.25×10^{-4}
化学透水性変化係数 C_p	0.0
基準間隙比 e_r	1.0
初期履歴変数 h_o	0.0
化学圧縮係数 α	0.05
化学膨潤係数 β	0.005
化学弾性ひずみパラメータ ξ	4.0
分配係数 K	6.06×10^2
拡散係数 D (cm²/min)	6.0×10^{-4}

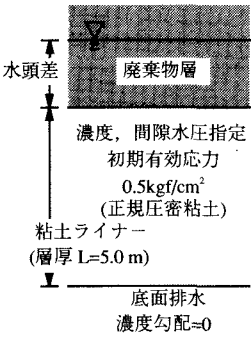


図-1 解析概要図

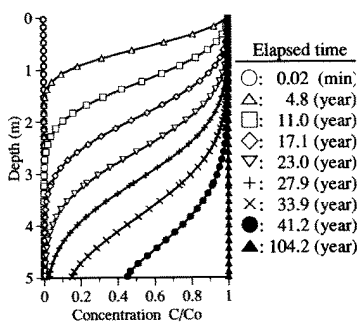


図-2 濃度分布経時変化(ケース B)

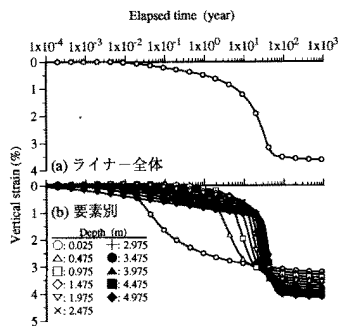


図-3 鉛直ひずみ経時変化(ケース B)

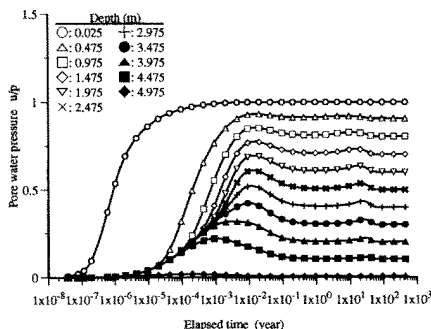


図-4 間隙水圧経時変化(ケース B)

間とともに、粘塑性ひずみの発生によって沈下し、その後汚染物質の浸透による濃度上昇に伴って圧縮ひずみが発生するためさらに沈下が引き起される。間隙水圧は廃棄物層内の浸出水の水位まで上昇し、その後汚染物質による粘土骨格の収縮でわずかに上昇する。この汚染物質によって発生した間隙水圧は排水により消散する。次に汚染物質の浸透時間に影響を及ぼす要因について検討するために表 1 に示す解析について各要因ごとに整理を行った。図 5 は水位（浸出水）－浸透時間関係を、図 6 は浸出水水位が底面濃度経時変化に与える影響を示している。底面濃度が上昇し始める時間（1%時間）を浸透時間とすると、水位が増加するほど浸透時間は急激に短縮される。

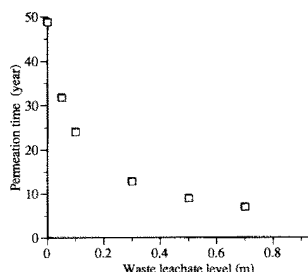


図-5 浸出水水位-浸透時間関係

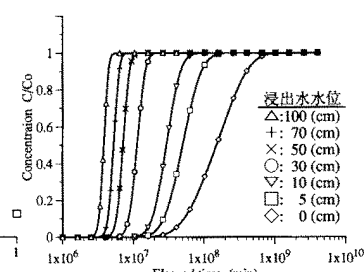


図-6 底面濃度経時変化(その 1)

図 7, 8, 9 は透水係数、拡散係数、遅延係数が底面濃度経時変化に与える影響を示している。これらによると、透水係数、拡散係数が増加するほど、また遅延係数が減少するほど、汚染物質の浸透時間が早まることがわかる。図 10 は汚染物質の濃度上昇によって、粘土の透水係数が増大する（飽和濃度で 100 倍）と仮定したケース（B-CK1）での濃度分布経時変化を示している。透水係数が変化しないケース（図 2）と比較すると、濃度分布は類似の形状を示すものの、浸透時間は約 1 / 5 となり大幅に短縮されることがわかる。

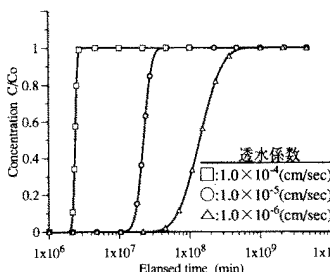


図-7 底面濃度経時変化(その 2)

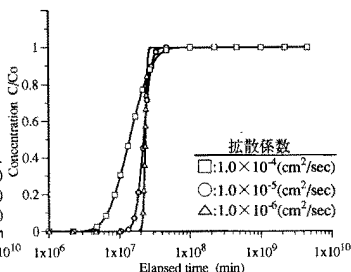


図-8 底面濃度経時変化(その 2)

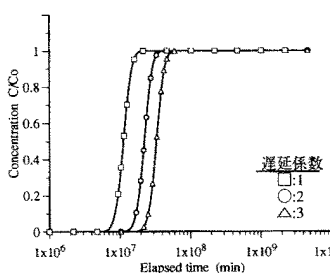


図-9 底面濃度経時変化(その 4)

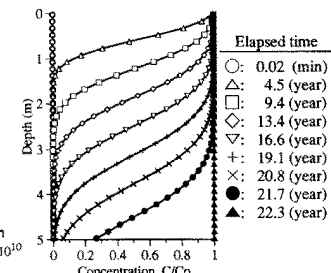


図-10 濃度分布経時変化(ケース B-CK1)

3. まとめ

現行の基準では粘土の透水係数のみについて言及しているが、粘土層内の汚染物質の移流拡散挙動は、浸出水の水位、粘土の拡散係数、遅延係数の影響を受ける。特に浸出水の水位の影響が大きく、水位管理の重要性が示された。浸透する汚染物質の種類によっては、粘土の透水性が増大しライナーとしての遮水性が劣化するとの報告もあるためそれを評価することが必要である。