

大阪大学大学院 正 会 員 阿部 信晴
 大阪大学大学院 学生会員 八杉 信
 大阪大学工学部 山本 直子

1. まえがき

地盤環境問題が注目されるようになり、力学的負荷とともに熱的、化学的負荷などのいわゆる環境負荷を受ける粘土地盤の浸透・変形・強度挙動を適切に予測することの必要性が高まっている。例えば、廃棄物最終処分場では、汚染物質の外部への漏出を防ぐために遮水シートや粘土ライナーが設置されるが、処分場周辺の地下環境問題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と物質移行連成圧密解析法を用いて、廃棄物処分場を想定した粘土地盤での浸出水の浸透解析を行い、汚染物質の移流拡散過程と粘土地盤の圧密変形挙動について検討している。

2. 粘土の化学弾粘塑性モデル

提案する化学弾粘塑性モデルは、時間依存性挙動および汚染物質が力学挙動に与える影響を考慮することができる。本モデルは流動曲面履歴変数モデルに化学物質によって生じる可逆ひずみおよび不可逆ひずみを導入したものである。これらの化学ひずみは濃度変化量によって評価でき、応力状態には依存しない等方ひずみであると仮定している。以下に提案モデルの概要を示す。

- 1) 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評価される。
- 2) 力学弾性ひずみは化学物質濃度に、化学可逆ひずみは有効応力に依存しないとし、弾性体積ひずみ v^e はそれぞれの和として次式で与える。

$$v^e = v_{me}^e + v_{ch}^e = \frac{\kappa}{1+e_0} \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) + \frac{\beta}{1+e_0} [1 - \exp[-\xi(c-c_0)]] \quad (1)$$

- 3) ひずみ関数 f (塑性体積ひずみ) は力学塑性ひずみと化学不可逆ひずみの和とし、次式で与える。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1+e_0} \left[\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) + \frac{\alpha_a}{\alpha_a - 1} \ln\left(\frac{M_a + (\alpha_a - 1)\eta}{M_a + (\alpha_a - 1)\eta_0}\right) \right] + \frac{\alpha}{1+e_0} (c - c_0), \quad \eta \geq \eta_0 \quad (2)$$

$$= \frac{\lambda - \kappa}{1+e_0} \left[\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) + \frac{\alpha_p}{1 - \alpha_p} \ln\left(\frac{M_p + (1 - \alpha_p)\eta_0}{M_p + (1 - \alpha_p)\eta}\right) \right] + \frac{\alpha}{1+e_0} (c - c_0), \quad \eta < \eta_0 \quad (3)$$

- 4) 化学弾粘塑性モデルの流動関数 F および履歴変数 h はそれぞれ次式で与える。

$$F = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left[1 - \exp\left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_r^* t\right) \right] \exp\left(\frac{f - h_0}{\mu}\right) + \delta \exp\left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_r^* t\right) \right] - v^{vp} = 0 \quad (4)$$

$$h = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left[1 - \left[1 - \delta \exp\left(-\frac{f - h_0}{\mu}\right) \right] \exp\left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_r^* t\right) \right] \right] + H_{ch}(c, t) \quad (5)$$

$H_{ch}(c, t)$ は化学影響関数であり、ひずみに依らない化学物質の影響を表す。

- 5) 流動曲面理論から応力速度-ひずみ速度関係は次のように求められる。

$$\dot{\sigma}_{ij} = \left[\frac{D_{ijmn}}{H + \frac{\partial F}{\partial \sigma_{qr}} D_{qrst} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{st}}} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{mn}} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{op}} D_{opkl} \right] \left[\dot{\epsilon}_{kl} - \left(\varphi \delta_{kl} + \frac{\partial F}{\partial c} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{kl}} \right) \dot{c} - \frac{\partial F}{\partial t} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{kl}} \right] \quad (6)$$

$$H = - \left[\frac{\partial F}{\partial \epsilon_{kl}^{vp}} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{kl}} + \frac{\partial F}{\partial v^{vp}} \frac{\partial F}{\partial p} \right] \quad (7), \quad \varphi = \frac{1}{3} \frac{\partial v_{ch}^e}{\partial c} = - \frac{\beta \xi}{3(1+e_0)} \exp[-\xi(c-c_0)] \quad (8)$$

表 1 解析パラメータ

圧縮指数 λ	0.2
膨潤指数 κ	0.026
ボアソン比 ν	0.33
初期間隙比 e_0	1.44
二次圧縮係数 μ	2.3×10^{-3}
基準ひずみ速度 $\dot{v}_r^*$ (1/day)	1.0×10^{-4}
内部拘束ひずみ速度 δ	1.0×10^{-5}
基準透水係数(水平方向) k_{x0} (cm/day)	8.6×10^{-3}
基準透水係数(鉛直方向) k_{y0} (cm/day)	8.6×10^{-3}
透水性変化指数(水平方向) $C_{\kappa x}$	0.8
透水性変化指数(鉛直方向) $C_{\kappa y}$	0.8
初期履歴変数 h_0	0.001
土粒子密度 ρ_s (kg/cm ³)	2.67×10^{-3}
化学透水性変化係数 C_p	9.0
化学圧縮係数 α	0.054
化学膨潤係数 β	0.0
化学弾性ひずみパラメータ ξ	4.0
分配係数 K	0.0
拡散係数(水平方向) D_x (cm ² /day)	1.44×10^{-1}
拡散係数(鉛直方向) D_y (cm ² /day)	1.44×10^{-1}

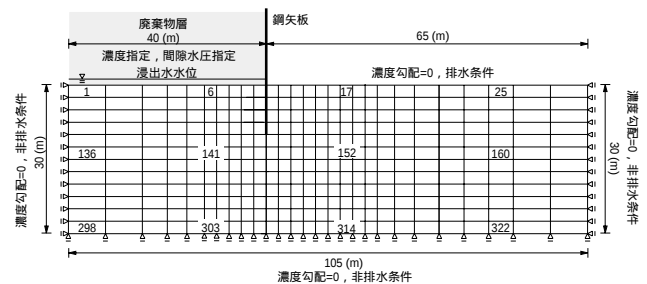


図 1 解析概要図

キーワード：化学弾粘塑性モデル，物質移行連成圧密解析，環境負荷，粘土地盤，汚染物質

連絡先：吹田市山田丘 2-1，TEL：06-6879-7624，FAX：06-6879-7629

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（平面ひずみ問題）は次のように表される。

$$\text{平衡方程式} \quad \frac{\partial(\dot{\sigma}_x + \dot{u})}{\partial x} + \frac{\partial \dot{\tau}_{xy}}{\partial y} + \rho \dot{G}_x = 0, \quad \frac{\partial \dot{\tau}_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(\dot{\sigma}_y + \dot{u})}{\partial y} + \rho \dot{G}_y = 0 \quad (9)$$

$$\text{間隙水の連続方程式} \quad -\frac{1}{\gamma_w} \left[k_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + \dot{\epsilon}_v = 0 \quad (10)$$

$$\text{移流拡散方程式} \quad R\dot{c} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} - \left[D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right] = 0 \quad (11), \quad R = 1 + \frac{\rho_s K}{n} \quad (12)$$

平衡方程式は仮想仕事の原理，連続式・移流拡散式は差分近似によって離散化し，物質移行連成有限要素解析を行った。

4. 廃棄物処分場を想定した粘土地盤の物質移行連成圧密解析

解析概要 異方応力状態（ $\sigma_v = 1.6 \text{ kgf/cm}^2$ ， $K_0 = 0.5$ ）にある正規圧密飽和粘土地盤において，図1に示すように鋼矢板（根入れ深さ 10 m）で締切られた廃棄物処分場を想定し，浸出水の浸透に伴う粘土地盤の圧密変形挙動について検討している。解析では浸出水水位を 20cm としている。解析に用いたパラメータは表1に示す通りである。

解析結果 図2は粘土地盤内の濃度分布経時変化を示している。図中の直線は鋼矢板を表している。汚染物質は移流・拡散によって粘土地盤内へと徐々に漏出し始める（図2-(a)）。漏出した汚染物質はやがて矢板下端を通過して（図2-(b)）処分場外へと広がっていく（図2-(c)，(d)，(e)）。図3は地盤内各要素の鉛直ひずみ経時変化を示している。粘土地盤ではまずクリープひずみが発生し，その後汚染物質の濃度が上昇するにともない化学

ひずみが発生する。図4は地表面沈下の様子を示したものである。汚染物質によって圧縮性の化学ひずみが生じるために，処分場直下の地盤で沈下量が大きくなる。図5は各要素の間隙水圧経時変化を示している。透水性が小さいため，クリープによって正の間隙水圧が発生するが，これはやがて消散する。図6は有効応力経路を示している。有効応力経路は間隙水圧の発生・消散に伴い K_0 線に沿って左下へ移動した後に再び K_0 線に沿って右上へと移動する。そして汚染物質による等方ひずみの発生により有効応力経路は K_0 線から外れていく。

5. まとめ

化学弾粘塑性モデルを用いた物質移行連成圧密解析（平面ひずみ問題）

により汚染物質の移流拡散過程とそれによって引き起こされる圧密現象の解析を行った。浸出水水位が低いと汚染物質の浸透に長い時間を要し，水位が高いと浸透時間が極めて短くなることが分かっている。

参考文献

- 1) 阿部，富江（1998）：化学弾粘塑性モデルを用いた粘土の浸透圧密解析，土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集，3-A，pp.428-429

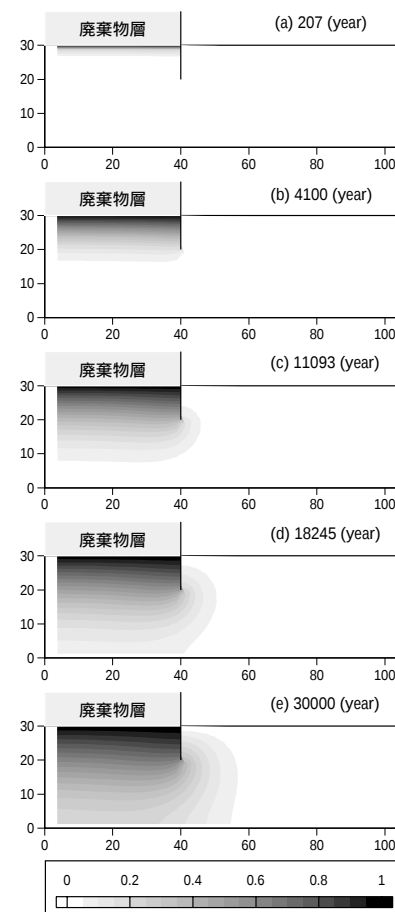


図2 濃度分布経時変化

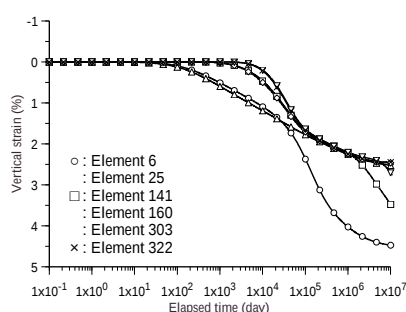


図3 鉛直ひずみ経時変化

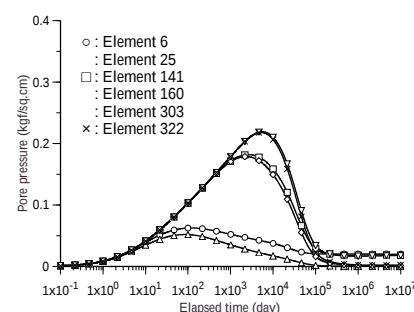


図5 間隙水圧経時変化

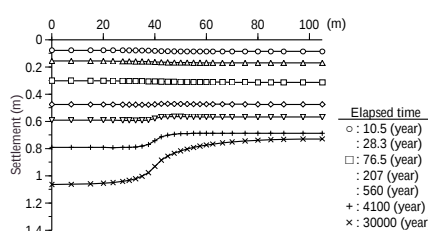


図4 地表面沈下経時変化

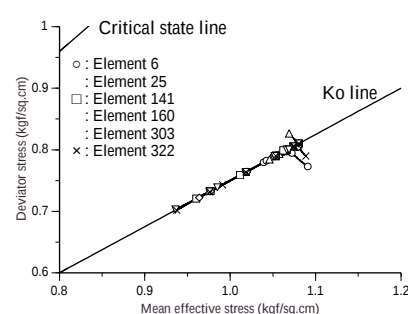


図6 有効応力経路