

大阪大学工学部 正 会 員 阿 部 信 晴

大阪大学工学部 学生会員 ○ 富 江 洋

1. まえがき

地下水・土壌の汚染は我々の生活環境に重大な影響を与える地盤環境問題であり、各方面で積極的な取り組みがなされている。一方、地盤中を浸透・拡散する汚染物質によって地盤が劣化し、沈下や地盤の不安定化が生じることが指摘されている。たとえば、不透水性の粘土は廃棄物最終処分場のライナー（粘土ライナー）として用いられているが、浸透する汚染物質によって透水性が増大することが知られている。汚染物質が粘土の圧密挙動に与える影響を明らかにするための基礎的研究として、本報告では粘土の化学弾粘塑性モデル（chemo-elasto-viscoplastic model）を用いた物質移行連成一次元圧密解析を行っている。

2. 粘土の化学弾粘塑性圧密モデル

提案する化学弾粘塑性モデルは親水性有機物質を対象としており、その概要は次のとおりである。

1) 化学的負荷（濃度変化）によって化学ひずみが生じ、粘土のひずみは有効応力の変化による力学ひずみと化学ひずみで構成される。力学ひずみは濃度に、化学ひずみは有効応力に依存しないものと仮定する。提案モデルの弾性ひずみと塑性ひずみはそれぞれ次式で与えられる。

$$\varepsilon_z^e = m_e \varepsilon_z^e + c_h \varepsilon_z^e = \frac{\kappa}{1+e_0} \ln \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{z0}} \right) + \frac{C_{ce}}{1+e_0} \left[1 - \exp \{ A(c-c_0) \} \right] \quad (1)$$

$$\varepsilon_z^p = m_e \varepsilon_z^p + c_h \varepsilon_z^p = \frac{\lambda - \kappa}{1+e_0} \ln \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{z0}} \right) + \frac{C_{cp}}{1+e_0} (c - c_0) \quad (2)$$

ここに、 σ_z 、 σ_{z0} は鉛直有効応力および初期鉛直有効応力、 c 、 c_0 は濃度および初期濃度である。化学弾性ひずみ（膨張ひずみ）、化学塑性ひずみ（圧縮ひずみ）と濃度の関係を図-1に示す。

2) 化学弾粘塑性圧密モデルの流動関数 F 、塑性ひずみ関数 f 、履歴変数 h はそれぞれ次式で表される。

$$F = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\varepsilon}_z^p t \right) \right\} \exp \left(\frac{f-h}{\mu} \right) + \delta \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\varepsilon}_z^p t \right) \right] - \varepsilon_z^p = 0 \quad (3)$$

$$f = \varepsilon_z^p = \frac{\lambda - \kappa}{1+e_0} \ln \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{z0}} \right) + \frac{C_{cp}}{1+e_0} (c - c_0) \quad (4)$$

$$h = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{f+h}{\mu} \right) \right\} \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\varepsilon}_z^p t \right) \right\} \right] \quad (5)$$

ここに、 ε_z^p は粘塑性鉛直ひずみ、 t は時間変数、 μ 、 $\dot{\varepsilon}_z^p$ 、 δ は粘性パラメータである。粘性パラメータは溶質濃度に依存すると考えられるが、ここでは一定と仮定している。

3) 応力速度-ひずみ速度関係は次式で与えられる。

$$\dot{\sigma}_z = \left[\frac{\kappa}{1+e_0} \frac{1}{\sigma_z} + \frac{\partial F}{\partial \sigma_z} \right]^{-1} \left[\dot{\varepsilon}_z - \left(\beta + \frac{\partial F}{\partial c} \right) \dot{c} - \frac{\partial F}{\partial t} \right] \quad (6)$$

$$= D^{cep} (\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_z^{ch} - \dot{\varepsilon}_z^{cr})$$

$$\beta = \frac{-AC_{ce}}{1+e_0} \exp \{ A(c-c_0) \} \quad (7)$$

ここに、 D^{cep} は化学弾粘塑性剛性係数、 $\dot{\varepsilon}_z^{ch}$ は化学ひずみ速度、 $\dot{\varepsilon}_z^{cr}$ はクリープひずみ速度である。

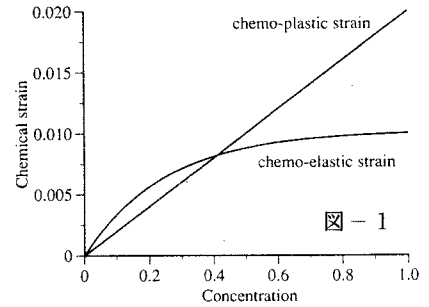


図-1

表-1

圧縮指数 λ	0.1
膨潤指数 κ	0.01
二次圧縮係数 μ	0.003
基準ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{zr}^v$ (1/min)	5.0×10^{-5}
内部拘束ひずみ速度 δ	1.0×10^{-5}
初期間隙比 e_0	1.7
初期履歴変数 h_0	0.01 ~ 0.05
基準透水係数 k_{z0} (cm/min)	1.4×10^{-5}
透水性変化指数 C_k	1.0
化学圧縮係数 C_{cp}	0.054
化学膨張係数 C_{ce}	-0.0275
拡散係数 D (cm^2/min)	0.001
飽和濃度 $\bar{c}$	0.7
化学弾性ひずみパラメータ A	4.0
化学透水性変化係数 B	9.0

3. 物質移行連成一次元圧密解析法

解析は有限要素法による物質移行連成一次元圧密解析法により行っている。応力・浸透・物質移行連成問題（一次元問題）に対する支配方程式は次のように表される。

$$\text{応力のつり合い方程式} \quad \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

$$\text{間隙水の連続式} \quad -\frac{1}{\rho_w} \left(k_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \dot{\epsilon}_z = 0 \quad (9)$$

$$\text{移流拡散方程式} \quad \left(1 + \frac{\rho_s K}{n} \right) \dot{c} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} - D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = 0 \quad (10)$$

σ_z は鉛直有効応力、 u は間隙水圧、 ϵ_z は鉛直ひずみ、 c は濃度、 v_z は間隙水の流速、 k_z は透水係数、 ρ_s は土粒子の密度、 K は分配係数、 n は間隙率、 D は分散係数である。

支配方程式を仮想仕事の原理と差分法により離散化し、節点変位増分 Δd 、要素の間隙水圧 u と濃度 c を逐次求める。透水係数は次式で与えている。 c_r は基準濃度である。

$$k_z(e, c) = k_s 10^{\left(\frac{e - e_c}{C_1} \right)} \left[1 + B(c - c_r) \right] \quad (11)$$

4. 数値解析例

親水性有機物質（濃度 70%）を一定の水頭差（10cm）で粘土（厚さ 10cm）内に浸透させる浸透圧密の解析を行った。用いた解析パラメータは表-1に示す。図-2は粘土の沈下曲線を示している。初期履歴変数 h_0 が小さいものは正規圧密状態、大きなものは過圧密状態に対応している。化学物質の浸透により正規圧密粘土は圧縮挙動を示し、過圧密粘土は化学粘塑性の圧縮ひずみが発生しないため膨潤挙動を示す。透水性の変化を考慮する場合は圧密途中の沈下・膨潤速度は大きくなるが、二次圧密領域では変化を考慮しない場合と一致することがわかる。図-3は粘土内部での濃度-時間関係を示したものであり、図-4は粘土内部の濃度分布の経時変化を示している。透水性の劣化（透水性の増大）は化学物質の移流拡散速度はもちろん、濃度分布パターンにも影響する。

5. まとめ

汚染物質が粘土の圧密挙動に与える影響を明らかにするため、流動曲面履歴変数モデルを拡張することにより粘土の化学弾粘塑性一次元圧密モデルを提案し、応力・浸透・物質移行連成問題（一次元問題）の解析を行った。汚染物質が粘土の変形・強度特性に与える影響については不明な点が少なくないが、透水特性の濃度依存性（透水性の劣化）の重要性はこの解析結果からも指摘することができる。

参考文献

- 1) Hueckel, T(1997) : Int. Jour. For Numerical and Analytical Methods in Geomech. Vol.21, pp43-72.

