

III-A215 化学弾粘塑性モデルを用いた粘土の浸透圧密解析

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

地盤・地下水の汚染は生活環境に重大な影響を与える地盤環境問題であるが、地盤中を浸透する汚染物質は一方では地盤の変形・強度・透水特性を劣化させ、地盤沈下や地盤の不安定化を生じさせる。本報告では物質移行連成一次元圧密解析法により粘土の化学弾粘塑性モデル（chemo-elasto-viscoplastic model）を用いた浸透圧密解析を行い、間隙水中の化学物質が粘土の圧密挙動に与える影響を考察している。

2. 粘土の化学弾粘塑性圧密モデル

化学弾粘塑性モデルでは間隙水に含まれる化学物質が粘土の力学挙動に与える影響と粘土の時間依存性が考慮されているが、化学依存性については間隙水中に単一の化学物質のみが存在し、その影響は濃度によって評価できるものと仮定している。間隙水中の化学物質の濃度変化により可逆性の膨張ひずみと非可逆性の圧縮ひずみが発生する。そして、これら化学ひずみは有効応力に依存しない。提案モデルでは弾性ひずみと塑性ひずみを、力学ひずみと化学ひずみの和としてそれぞれ次式で与える。

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

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

σ_z 、 σ_{z0} は鉛直有効応力およびその初期値、 c 、 c_0 は濃度および初期濃度である。 λ 、 κ は圧縮指数および膨潤指数である。 C_{ce} 、 C_{cp} は化学膨張係数および化学圧縮係数、 A は化学弾性ひずみパラメータである。次式のクリープ特性式(3式)と基準ひずみ関数 f から、流動関数 F 、履歴変数 h はそれぞれ以下のように求められる。

$$\frac{\varepsilon_z^v + h_0}{\mu} = -\ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_z^v}{\dot{\varepsilon}_z^v} + \delta \right) \quad (3)$$

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

$$F = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\varepsilon}_z^v \right) \right\} \exp \left(\frac{f - h}{\mu} \right) + \delta \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\varepsilon}_z^v \right) \right] - \varepsilon_z^p = 0 \quad (5)$$

$$h = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \left\{ 1 - \delta \exp \left(-\frac{f + h_0}{\mu} \right) \right\} \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\varepsilon}_z^v \right) \right\} \right] + H_h \quad (6)$$

ε_z^v 、 ε_z^p は粘性および粘塑性鉛直ひずみ、 t は時間である。 μ 、 $\dot{\varepsilon}_z^v$ 、 δ は粘性パラメータ、 H_h は化学影響関数である。

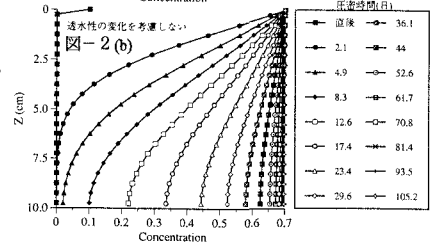
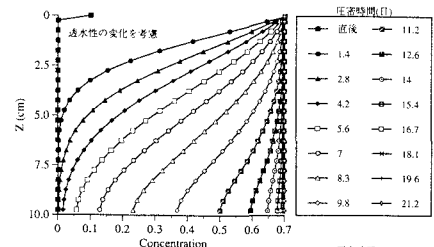
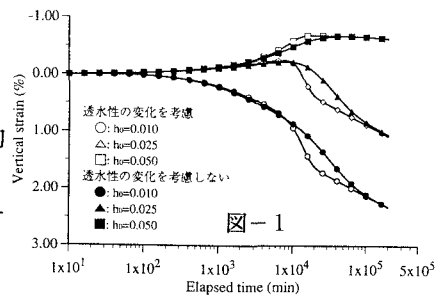
応力速度-ひずみ速度関係は次式で与えられる。

$$\dot{\sigma}_z = \left[\alpha + \frac{\partial F}{\partial \sigma_z} \right]^{-1} \left[\dot{\varepsilon}_z - \left(\beta + \frac{\partial F}{\partial c} \right) \dot{c} - \frac{\partial F}{\partial t} \right] \quad (7)$$

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

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 $\dot{\varepsilon}_{zp}^v$ (1/min)	5.0×10^{-5}
内部拘束ひずみ速度 $\dot{\delta}$	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 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



キーワード：化学効果，時間依存性，粘土，化学弾粘塑性モデル，物質移行連成圧密解析

連絡先：吹田市山田丘2-1，TEL 06-879-7624，FAX 060879-7629

$$\alpha = \frac{\kappa}{1 + e_0 \sigma_z} \quad (8) \quad \beta = \frac{-AC_{\alpha}}{1 + e_0} \exp[A(c - c_0)] \quad (9)$$

D^{chep} は化学弾粘塑性構成マトリックス、 $\dot{\epsilon}_z^{ch}$ は化学ひずみ速度、 $\dot{\epsilon}_z^{\sigma}$ はクリープひずみ速度である。

3. 物質移行連成一次元圧密解析法

応力・浸透・物質移行連成問題に対する支配方程式は応力のつり合い式、間隙水の連続式、化学物質の移流拡散式である。

$$\frac{\partial \dot{\sigma}_z}{\partial z} + \frac{\partial \dot{u}}{\partial z} = 0 \quad (10) \quad -\frac{1}{\gamma_w} \left(k_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \dot{\epsilon}_z = 0 \quad (11)$$

$$\left(1 + \frac{\rho_s K}{n} \right) \dot{c} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} - D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = 0 \quad (12)$$

σ_z は鉛直有効応力、 u は間隙水圧、 ϵ_z は鉛直ひずみ（体積ひずみ）、 c は濃度、 v_z は間隙水の流速、 γ_w は間隙水の単位体積重量、 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、要素間隙水圧と要素濃度を逐次求めている。また、濃度による密度変化は小さいのでこれを無視している。

化学物質による透水性の劣化（透水性の増大）を考慮するため透水係数を次式で評価している。

$$k_z = k_{z0} 10^{\left(\frac{c - c_0}{C_z} \right) [1 + B(c - c_0)]} \quad (13)$$

k_{z0} は基準透水係数、 C_z は透水性変化指数、 B は化学透水性変化係数、 c_0 は基準濃度である。

4. 浸透圧密解析例

提案する化学弾粘塑性圧密モデルと物質移行連成圧密解析法を用いて化学物質（濃度70%）を一定の水頭差（10cm）で粘土供試体（厚さ10cm）の上面から下面に浸透させる一次元圧密解析を行った。用いた解析パラメータを表-1に示す。図-1は沈下曲線である。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、過圧密粘土は膨潤挙動を示す。化学物質による透水性の劣化を考慮すると圧密途中の沈下・膨潤速度は大きくなるが、二次圧密領域での沈下は劣化を考慮しないケースと一致する。図-2、3は正規圧密粘土（ $h_0 = 0.01$ ）の供試体内部の濃度分布の経時変化および濃度-時間関係である。透水性が劣化すると供試体全体が飽和濃度に達するのに要する時間は約1/5になる。図-4、5は供試体内部の間隙水流速と有効応力の経時変化である。粘土全体の透水性が劣化すると間隙水の透水速度が大きくなり、有効応力も一時的に減少する。透水性の劣化は浸透圧密挙動に大きく影響することが分かる。

参考文献

- 1) Hueckel, T.(1997): Chemo-plasticity of clay subjected to stress and flow of a single contaminant, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.21, pp.43-72.

