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	学生会員	加藤智章

## 1.まえがき

表面活性の大きな土粒子から構成される粘土が化学(汚染)物質と相互作用するとき,種々の作用が粘土の性質, 強度特性・変形特性・透水特性などを変化させることはよく知られている。石灰などを用いた安定処理工法や軟弱 粘土地盤改良工法あるいは流動化処理はこのような効果を利用したものである。また,地盤中を浸透する化学(汚 染)物質は地盤・地下水を汚染して生活環境に重大な影響を与えると同時に,地盤沈下や地盤の不安定化を引き起 こす。したがって,化学(汚染)物質と粘土の相互作用を明らかにすることはきわめて重要である。本報告では化 学弾粘塑性モデルを用いて粘土の化学圧密挙動の解析を行い,間隙水中の化学(汚染)物質の濃度が変化した時, 粘土にどのような変形が生じるかについて検討したものである。

2.化学弾粘塑性モデル

化学弾粘塑性モデル (chemo-elasto-viscoplastic model) は流動曲面履歴変数モデルに化学物質による粘土の体積変 化特性を導入したものであり、その概要は次のとおりである。

(1)間隙水中に単一の親水性化学物質のみが存在し,その影響は濃度変化量によって評価できるものと仮定する。 (2)全ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{ij}$ は、可逆力学(弾性)ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{ij}^{e}$ 、可逆化学ひずみ速度  $_{ci}\dot{\epsilon}_{ij}^{r}$ と粘塑性ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{ij}^{rr}$ の和として与えられる。

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{e} + {}_{ch}\dot{\varepsilon}_{ij}^{r} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = C_{ijkl}\dot{\sigma}_{kl} - \psi_{ij}\dot{c} + \Lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ii}} \qquad (1)$$

可逆化学ひずみは間隙流体の物理化学的作用から生じる可逆的粘土 構造の変化に起因するひずみである。ここでは粘土構造の綿毛化・ 分散化などによる等方膨張ひずみ (Hueckel, T: 1995, 1997)として, 可逆化学ひずみ関数 $\psi_{ii}$ を次式で与える。

$$\psi_{ij} = \frac{\beta \xi}{3(1+e_o)} \exp\left[-\xi(c-c_o)\right] \delta_{ij} \qquad (2$$

(3)ひずみ関数 f (塑性体積ひずみ)を力学塑性体積ひずみ
 (modified Cam-clay model)と化学塑性体積ひずみの和とし,次式
 で与える。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_o} \left[ \ln\left(\frac{p}{p_o}\right) + \ln\left(\frac{M^2 + \eta^2}{M^2 + \eta_o^2}\right) \right] + \frac{\alpha}{1 + e_o} (c - c_o)$$
(3)

Hueckel (1997) は化学塑性体積ひずみを間隙水中の化学物質の濃 度増加による吸着水の体積減少(個液相間の質量変換)に起因する ものとし,ひずみ軟化による不可逆ひずみとして評価している。こ のため,降伏関数を縮小させるために(4)式の化学軟化関数*S*(*c*) を導入しているが,これは(3)式のひずみ関数と等価である。

$$p_{y} = p_{yo} \exp\left[\left(\frac{1+e_{o}}{\lambda-\kappa}\right)v^{p}\right]S(c) = p_{yo} \exp\left[\left(\frac{1+e_{o}}{\lambda-\kappa}\right)v^{p}\right]\exp\left[-a(c-c_{o})\right]$$
(4)  
すなわち (3) 式から次の化学軟化関数が導かれる。

$$S(c) = \exp\left[-\left(\frac{\alpha}{\lambda - \kappa}\right)(c - c_o)\right]$$
 (5)

同様に,(6)式のひずみ関数から(7)式の化学軟化関数が導かれる。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_o} \left[ \ln\left(\frac{p}{p_o}\right) + \ln\left(\frac{M^2 + \eta^2}{M^2 + \eta_o^2}\right) \right] + \frac{\alpha}{1 + e_o} \ln\left(\frac{c}{c_o}\right) (6), \quad S(c) = \left(\frac{c}{c_o}\right)^{-\left(\frac{\lambda - \kappa}{\lambda - \kappa}\right)} (7)$$
(4) 流動関数 F と履歴関数 h はそれぞれ以下のように与えられる。  

$$F = \mu \ln\left[\frac{1}{\delta} \left[ \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\delta}{\mu}\dot{v}_r^\nu t\right) \right\} \exp\left(\frac{f - h_o}{\mu}\right) + \delta \exp\left(-\frac{\delta}{\mu}\dot{v}_r^\nu t\right) \right] \right] - \nu^{\nu p} = 0 \quad (8)$$

$$h = \mu \ln\left[\frac{1}{\delta} \left[ 1 - \left[ 1 - \delta \exp\left(-\frac{f + h_o}{\mu}\right) \right] \exp\left(-\frac{\delta}{\mu}\dot{v}_r^\nu t\right) \right] \right] + H_{ch}(c, t) \quad (9)$$

キーワード:粘土,化学(汚染)物質,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:06-6879-7624,FAX:06-6879-7629



1x10<sup>0</sup> 1x10<sup>1</sup> 1x10<sup>2</sup> 1x10<sup>3</sup> 1x10<sup>4</sup> 1x10<sup>5</sup> 1x10<sup>6</sup> Elapsed time (min)

図2 濃度経時変化

1x10<sup>-1</sup>



## 3.物質移行連成圧密解析

浸透圧密試験の解析

図 1 は Fam and Santamarina (1997)による圧密試験(カオリン粘土,供試体 高さ 6cm,上面排水・下面非排水)と一時圧密終了後供試体中に KCI 溶液(4.0 M)を浸透させる浸透圧密試験の沈下曲線(間隙比 - 時間関係)を示したも のである。KCI の浸透によりカオリン粘土に化学圧縮ひずみが生じることが わかる。図中の解析結果は化学弾粘塑性モデルによるものであり,化学膨潤 係数 ξ=0 として推定したパラメータを表1に示している。図2,3は,供試 体内部における濃度と間隙水圧の経時変化(解析結果)を示したものである。 *鉛直遮水壁を有する廃棄物処分場の物質移行連成圧密解析* 

図4は海面埋め立て方式の管理型廃棄物処分場を想定した解析モデルであ り,処分場下部は層厚 30mの K。圧密された正規圧密粘土層である。そして、

汚染物質の流出を防止するために 80m の間隔で鉛直遮水壁(鋼矢板)が設置されている。負荷条件として汚染物質の飽和濃度と浸透水圧(浸出水水位と平均海水面との差)を廃棄物層底部で与えている。 濃度および排水に関する境界条件は図4に示す通りである。解析パラメータについて,弾粘塑性パラメータは有明粘土のものを用い,基準透水係数 $k_o$ =1×10<sup>5</sup>(cm/sec),化学圧縮係数 $\alpha$ =0.054,化学膨潤係数 $\beta$ =0.0とし,拡散係数としては1.67×10<sup>6</sup>(cm<sup>2</sup>/sec)という一般的な値を用いている。また化学物質によって粘土の透水性が劣化するので、飽和濃度に達したときに透水係数

chkmax が初期透水係数の10倍(ケース1), 30倍(ケース2)になるとして透水性の化 学物質依存性の影響を考慮している。図5 は汚染物質の地盤内濃度分布の経時変化を 示したものである。透水係数が大きくなる と移流現象が支配的となり,汚染物質は遮 水壁の下端を回り込むようにして処分場外 へ流出するようになる。図6は地盤面沈下 形状の経時変化を示したものである。拡散 が支配的な場合は汚染物質が深さ方向にほ ぼ一様に広がって行くため化学的負荷によ り地盤は一様に沈下するが,移流が支配的 になると汚染物質が遮水壁を回り込むよう になっていくため,遮水壁周りが大きく 沈下する。

## 4.まとめ

提案する粘土の化学弾粘塑性モデルを用 いて浸透圧密試験の解析,鉛直遮水壁を有 する廃棄物処分場の物質移行連成圧密解析 を行い,化学(汚染)物質によって粘土地 盤が沈下し,また地盤の透水性が劣化すれ ば汚染物質の移流拡散過程に影響すること を示した。

## 参考文献

1) Huckel,T.(1995) : Strain and contamination history dependence in chemo-plasticity of clays subjected to environmental load, Numerical Models in Geomechanics, pp.329-336.

2) Huckel,T.(1997) : Chemo-plasticity of clays subjected to stress and flow of a single contaminant, Int. Jour. for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol.21, pp.43-72.

3) Fam, M. and Santamarina, J. C.(1997) : A study of consolidation using mechanical and electromagnetic waves, Geotechnique 47, No.2, pp.203-219..

表1 解析パラメ	トータ
圧縮指数	0.142
膨潤指数	0.017
初期間隙比 $e_0$	1.04
二次圧縮係数 μ	1.7 × 10 <sup>-3</sup>
基準ひずみ速度 $\dot{arepsilon_{a^{\prime}}}$ (1/min)	8.0 × 10⁻⁴
内部拘束ひずみ速度	1.0 × 10⁵
基準透水係数 k <sub>0</sub> (cm/sec)	1.67 × 10 <sup>-7</sup>
透水性変化指数 C <sub>k</sub>	0.8
化学透水性变化係数 Cp	0.0
初期履歴変数 h。	0.001
化学圧縮係数	0.10
化学膨潤係数	0.0
化学弾性ひずみパラメータ	4.0
分配係数 K	0.0
拡散係数 D (cm²/sec)	5.0 × 10 <sup>-6</sup>
加加目目的实际。	0 510



表2 解析ケース

解析ケース	透水係数 (cm/sec)	浸出水水位 (m)	遅延係数	拡散係数 (cm <sup>2</sup> /sec)	遮水壁根入長 (m)	透水性の劣化 <sub>chkmax</sub> /ko
ケース1	$1.0 \times 10^{-5}$	2	1	$1.67 \times 10^{-6}$	20	10
ケース 2	$1.0 \times 10^{-5}$	2	1	$1.67 \times 10^{-6}$	20	30

