

粘土の化学弾粘塑性モデルを用いた化学浸透圧密解析

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 ○望戸健雄

1. まえがき

粘土が間隙水中の化学物質と相互作用するとき、粘土の強度・変形・透水特性が変化す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地盤改良工法はこのような効果を利用したものである。また、地盤中に浸透する化学（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）物質の地盤中における化学物質の移流拡散解析において粘土と化学物質の相互作用を考慮することは重要である。本報告では、化学弾粘塑性モデルを用いて粘土の化学浸透圧密挙動の解析を行い、間隙水中の化学（汚染）物質の濃度が変化するとき、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. 粘土の化学弾粘塑性モデル

化学弾粘塑性モデル(chemo-elasto-viscoplastic model)は弾粘塑性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、その影響は濃度によって評価できると仮定する。

2) 化学的負荷によって可逆ひずみ v_{ch}^r と非可逆ひずみ v_{ch}^{ir} が生じる。これらの化学ひずみは有効応力に依存しないものとする。また、力学ひずみは化学物質濃度に依存しないものと仮定する。

3) 可逆化学ひずみ v_{ch}^r は粘土構造の綿毛化等によって生じる膨張ひずみとし、全可逆ひずみ v^r を弾性ひずみ v_{me}^e と可逆化学ひずみ v_{ch}^r の和で与える。

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

ここに、 κ ：再圧縮指数（膨潤指数）、 β ：化学膨潤係数、 ξ ：化学ひずみパラメータ、 c ：化学物質濃度、 c_0 ：初期濃度、 c_s ：飽和濃度

4) 化学物質の濃度変化によって生じる非可逆化学ひずみ v_{ch}^{ir} を線形則により評価する。塑性ひずみ v_{me}^p を修正カムクレイモデルによって表現するとき、全非可逆ひずみ v^{ir} （ひずみ関数 f ）は塑性ひずみ v_{me}^p と非可逆化学ひずみ v_{ch}^{ir} の和として、次式で与えられる。

$$f = v^p = v_{me}^p + v_{ch}^{ir} = \frac{\lambda - \kappa}{1+e_0} \left[\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) + \ln\left(\frac{M^2 + \eta^2}{M^2}\right) \right] + \frac{\alpha}{1+e_0} \left(\frac{c-c_0}{c_s} \right) \quad (2)$$

ここに、 λ ：圧縮指数、 α ：化学圧縮係数

5) クリープポテンシャルモデルのクリープひずみ速度は、硬化関数 $\hat{f}(\sigma_{ij}, c, v^c)$ を用いて次式で与えられる。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^c = \hat{f}(\sigma_{ij}, c, v^c) \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} = \left[\frac{v_r}{\mu} \left\langle \exp\left(\frac{f - v^c - h_0}{\mu}\right) - \delta \right\rangle \left[\frac{\partial g}{\partial p} \right]^{-1} \right] \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3)$$

ここに、 $\dot{\varepsilon}_{ij}^c$ ：クリープひずみ速度、 f ：ひずみ関数、 g ：クリープポテンシャル関数、 μ 、 v_r 、 δ ：クリープパラメータ、 h_0 ：履歴パラメータ

(2)式のひずみ関数を(3)式に代入することにより、以下のクリープポテンシャルモデルが導かれる。

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{ij}^c &= \frac{v_r}{\mu} \left[\exp\left(\frac{\alpha}{\mu(1+e_0)} \left(\frac{c-c_0}{c_s} \right)\right) \left\langle \exp\left(\frac{\bar{f} - v^c - h_0}{\mu}\right) - \delta \left[\exp\left[-\left(\frac{\alpha}{\mu(1+e_0)} \left(\frac{c-c_0}{c_s} \right)\right)\right] \right] \right\rangle \right] P_{ij} \\ &= \frac{v_r}{\mu} \left\langle \exp\left(\frac{\bar{f} - v^c - h_0}{\mu}\right) - \delta \right\rangle \bar{P}_{ij} \quad (4) \end{aligned}$$

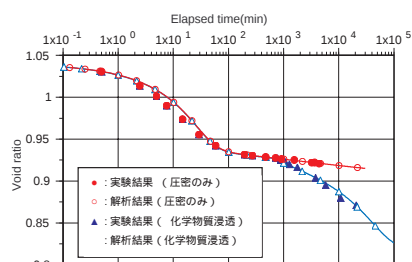


図-1 沈下曲線（間隙比 - 時間関係）

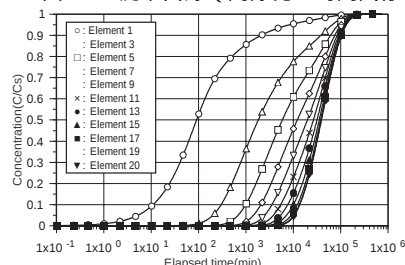


図-2 供試体内濃度の経時変化

表-1 解析パラメータ

圧縮指数 λ	0.142
膨潤指数 κ	0.017
初期間隙比 e_0	1.04
二次圧縮係数 μ	1.7×10^{-3}
基準ひずみ速度 (1/min) $\dot{\varepsilon}_0$	8.0×10^{-4}
内部拘束ひずみ速度 δ	1.0×10^{-5}
基準透水係数 k_0 (cm/sec)	1.67×10^{-7}
透水性変化係数 C_v	0.8
初期履歴変数 h_0	0.001
化学透水性変化係数 C_p	0.0
化学圧縮係数 α	0.1
化学膨潤係数 β	0.0
可逆化学ひずみパラメータ ξ	4.0
分配係数 K	0.0
拡散係数 D (cm ² /sec)	5.0×10^{-8}
初期間隙率 n	0.510

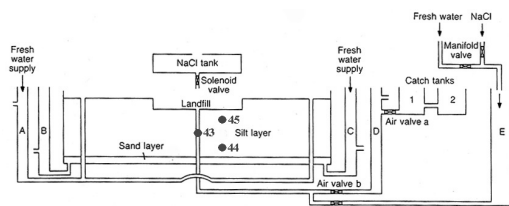


図-3 遠心荷重模型実験装置の概要

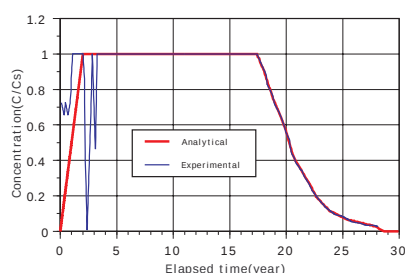


図-4 廃棄物層の汚染物質濃度

キーワード：化学弾粘塑性モデル，物質移行連成圧密解析，化学ひずみ

連絡先：〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 (TEL) 06-6897-7626 (FAX) 06-6879-7626

$$\text{ここに, } \bar{w}_r^c = w_r^c \left[\exp \left(\frac{\alpha}{\mu(1+e_o)} \right) \left(\frac{c-c_o}{c_s} \right) \right] \quad (5), \quad \bar{\delta} = \delta \left[\exp \left(- \left(\frac{\alpha}{\mu(1+e_o)} \right) \left(\frac{c-c_o}{c_s} \right) \right) \right] \quad (6)$$

$$\bar{P}_{ij} = \left[\frac{\partial \bar{f}}{\partial p} \right]^{-1} \frac{\partial \bar{f}}{\partial \sigma_{ij}} \quad (7), \quad \bar{f} = \frac{\lambda - \kappa}{1+e_o} \left[\ln \left(\frac{p}{p_o} \right) + \ln \left(\frac{M^2 + \eta^2}{M^2} \right) \right] \quad (8)$$

6) 粘性体積ひずみ v^v に関するクリープ特性式(9)式から, 流動曲面履歴変数モデルの流動関数 F , 履歴変数 h が以下のように導かれる。

$$\frac{v^v + h_o}{\mu} = -\ln \left(\frac{w_r^v}{w_r^c} + \delta \right) \quad (9)$$

$$F = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{\delta}{\mu} w_r^v t \right) \right\} \exp \left(\frac{f - h_o}{\mu} \right) + \delta \exp \left(- \frac{\delta}{\mu} w_r^v t \right) \right] - v^{vp} = 0 \quad (10)$$

$$h = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \left[1 - \delta \exp \left(\frac{-f + h_o}{\mu} \right) \right] \exp \left(- \frac{\delta}{\mu} w_r^v t \right) \right\} \right] + H_{ch} \quad (11)$$

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

3. 物質移行連成圧密有限要素解析法

解析法は, 応力の平衡方程式, 間隙水の質量保存則および化学物質の移流拡散方程式を支配方程式とする物質移行連成圧密解析法である。解析法の詳細については文献(阿部・加藤, 2000)を参照されたい。

4. 物質移行連成圧密解析

1) 浸透圧密試験 (Fam and Santamarina, 1997)

図-1は圧密試験(カオリン粘土, 供試体高さ6cm, 上面排水・下面非排水)と一次圧密終了後に供試体上面から塩化カリウム(KCl, 4.0mol)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。図-2は浸透圧密試験における供試体内濃度の経時変化(解析結果)を示している。KClの浸透によりカオリン粘土に圧縮ひずみが生じることがわかる。図中の解析結果は提案する化学弾粘塑性モデル(流動曲面履歴変数モデル)を用いた一次元圧密解析によるものであり, 化学膨潤係数 $\xi = 0$ として推定したパラメータを用いている(表-1)。化学圧縮係数 α が0.1とき, 沈下について解析結果は実験結果とよい一致を示した。

2) 遠心載荷模型実験 (Hensley and Schofield, 1991)

図-3は廃棄物処分場における汚染物質の拡散を模擬した遠心載荷模型実験装置の概要を示したものである。地盤材料としてシルト質粘土, 汚染物質として塩化ナトリウムが用いられており, 実験の相似率 n は100である。図-4は廃棄物層での汚染物質濃度の測定結果であり, 一次元物質移行連成圧密解析の濃度境界条件として用いられている。図-5は地盤内濃度の経時挙動について解析結果と実験結果を比較したものであるが, 両者はよく対応している。図-6~8は地盤内での濃度とひずみの経時変化, 地盤表面の沈下-時間関係を示したものである。これらは化学圧縮係数 α を0.05と仮定した解析結果であるが, 濃度の増加と共にかなりの圧縮ひずみが発生することが示されている。

5. まとめ

化学物質が粘土の圧密挙動に与える影響を解析するために弾粘塑性モデルを拡張することにより化学弾粘塑性モデルを提案し, 化学浸透圧密の解析を行った。解析結果は化学物質の浸透過程と圧縮ひずみの発生を的確に表現しており, その妥当性が示された。

参考文献

- 1) Fam, M. and Santamarina, J.C. (1997): A study of consolidation using mechanical and electromagnetic wave, *Geotechnique* 47, No.2, pp.203-219.
- 2) Hensley, P.J. and Schofield, A.N. (1991): Accelerated physical modeling of hazardous-waste transport, *Geotechnique* 41, No.3, pp.447-465.
- 3) 阿部信晴・加藤智章(2000): 廃棄物処分場の汚染物質による地下水・土壌汚染の物質移行連成圧密有限要素解析, 地下水地盤環境に関するシンポジウム2000 発表論文集, pp.59-72.

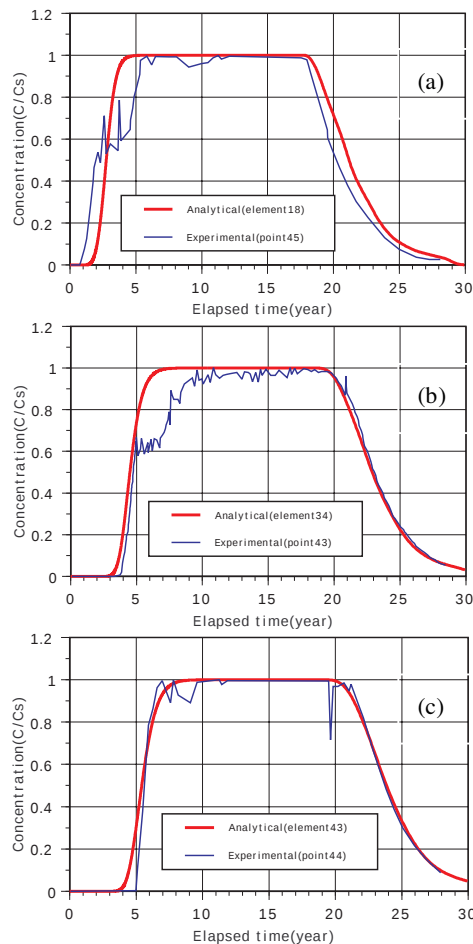


図-5 地盤内濃度の経時変化

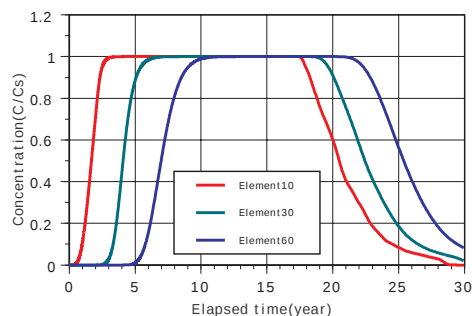


図-6 要素別濃度経時変化

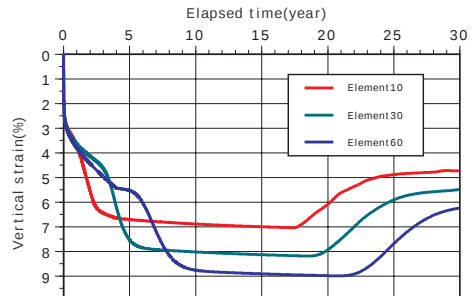


図-7 濃度とひずみ経時変化

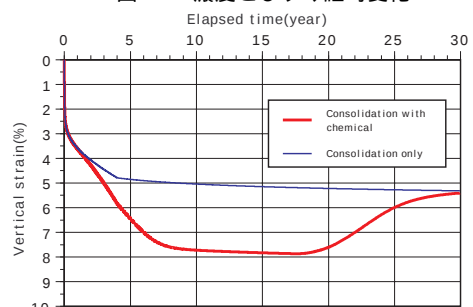


図-8 地盤表面の沈下-時間関係