

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 ○ 富 江 洋

1. まえがき 化学物質が粘土の変形挙動・強度特性に影響することはよく知られている。本報告では化学物質が地盤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、化学物質によって引き起こされる粘土の圧密を化学弾粘塑性モデル (chemo-elasto-viscoplastic model) を用いた物質移行連成圧密解析により検討している。

2. 粘土の化学弾粘塑性モデル 粘土の化学弾粘塑性モデルは、化学物質が力学挙動に与える影響と時間依存性を考慮することができる。モデルの概要は以下のとおりである。

1) 間隙水中に単一の親水性有機物質のみが存在し、その影響は濃度によって評価できる。

2) 化学物質の濃度変化により化学弾性ひずみ(可逆化学ひずみ)と化学塑性ひずみが生じる、これらの化学ひずみは等方ひずみであり、有効応力に依存しない。

3) 化学弾性ひずみ(可逆化学ひずみ)は粘土構造の綿毛化によって生じる膨張ひずみ(Hueckel, T.:1995, 1997)であり、次式で与える。

$$v_{ch} = -\frac{\beta}{1+e_0} [1 - \exp[-\xi(c-c_0)]] \quad (1)$$

4) 基準ひずみ関数(塑性体積ひずみ)は力学塑性体積ひずみ(modified Cam clay model)と化学塑性ひずみの和とし、次式で与える。

$$f = v_{me}^p + v_{ch}^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left[\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) + \ln\left(\frac{M^2 + \eta^2}{M^2 + \eta_0^2}\right) \right] + \frac{\alpha}{1 + e_0} (c - c_0) \quad (2)$$

5) 化学弾粘塑性モデルの流動関数、履歴関数としてそれぞれ次式を仮定する。

$$F = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left[1 - \exp\left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_r^p t\right) \right] \exp\left(\frac{f - h_0}{\mu}\right) + \delta \exp\left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_r^p t\right) \right] - \dot{v}^p = 0 \quad (3)$$

$$h = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left[1 - \left[1 - \delta \exp\left(-\frac{f + h_0}{\mu}\right) \right] \exp\left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_r^p t\right) \right] \right] + H_{ch}(c, t) \quad (4)$$

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

6) 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。

$$\dot{\sigma}_y = \left[D_{y\mu} - \frac{D_{y\mu} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{\mu\mu}} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{\mu\mu}} D_{y\mu}}{H + \frac{\partial F}{\partial \sigma_{\mu\mu}} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{\mu\mu}} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{\mu\mu}}} \right] \dot{\sigma}_\mu - \left(\frac{1}{3} \phi \delta_\mu + \frac{\partial F}{\partial c} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{\mu\mu}} \right) \dot{c} - \frac{\partial F}{\partial t} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{\mu\mu}} \quad (5)$$

$$H = - \left[\frac{\partial F}{\partial \sigma_{\mu\mu}} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{\mu\mu}} + \frac{\partial F}{\partial v^p} \frac{\partial F}{\partial p} \right] \quad (6), \quad \phi = \frac{\partial v_{ch}^p}{\partial c} = -\frac{\alpha \xi}{1 + e_0} \exp[-\xi(c-c_0)] \quad (7)$$

3. 物質移行連成圧密解析法 応力・浸透・物質輸送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。

Nobuharu ABE, Hiroshi TOMIE / Osaka University

表-1 解析パラメータ

compression index λ	0.2
swelling index κ	0.026
gradient of critical state line	1.2
coefficient of secondary compression μ	2.26×10^{-3}
reference strain rate $\dot{v}_r^p$ (1/min)	7.0×10^{-5}
internal restraint strain rate δ	1.0×10^{-5}
initial void ratio e_0	1.31
initial value of history variable h_0	0.001
reference coefficient of permeability k_{r0} (cm/min)	1.61×10^{-6}
reference coefficient of permeability $k_{r\infty}$ (cm/min)	1.61×10^{-6}
permeability change index C_1	0.8
coefficient of chemical permeability change A	9.0
coefficient of chemo-plastic compression α	5.40×10^{-2}
coefficient of chemo-elastic expansion β	2.75×10^{-2}
chemo-elastic strain parameter ξ	4.0
density of soil ρ (kg/cm ³)	2.67×10^{-3}
coefficient of diffusion D_1 (cm ² /min)	0.001
coefficient of diffusion D_2 (cm ² /min)	0.001
distribution coefficient K	0.0

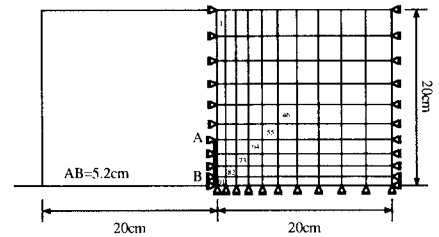


図-1 要素分割図

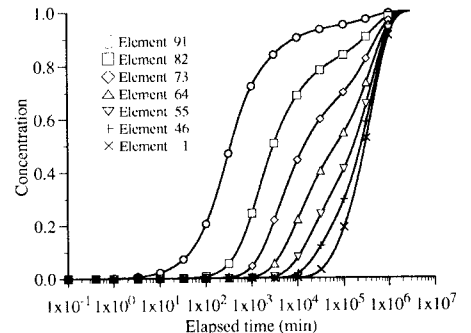


図-2 粘土内濃度の経時変化

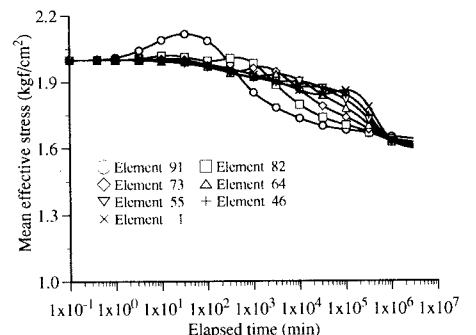


図-4 平均有効応力経時変化

$$\text{平衡方程式} \quad \frac{\partial(\dot{\sigma}_x + \dot{u})}{\partial x} + \frac{\partial \dot{\tau}_{xy}}{\partial y} + \rho \dot{G}_x = 0 \quad (8), \quad \frac{\partial \dot{\tau}_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(\dot{\sigma}_y + \dot{u})}{\partial y} + \rho \dot{G}_y = 0 \quad (9)$$

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

$$\text{移流拡散式} \quad \left(1 + \frac{\rho K}{n} \right) \dot{c} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} - \left[D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right] = 0 \quad (11)$$

平衡方程式は仮想仕事の原理によって、連続式・移流拡散式は差分近似より離散化している。

4. 化学物質による圧密(chemo-consolidation)の解析 等方圧密された正規圧密粘土(圧密圧力 2kgf/cm²)の平面ひずみモデル(幅 40cm, 厚さ 20 cm)の化学圧密解析を行う。図-1に示すように荷重は載荷せず, 粘土モデル中央下部 AB に化学物質が存在するものとする。化学境界条件は AB を濃度一定境界, その他を FLUX=0 境界としている。また, 排水境界条件は上面のみを排水とし, その他を比排水としている。AB では瞬時に初期濃度(c=0)から飽和濃度(c=1)まで上昇させている。用いた解析パラメータは表-1に示す通りである。図-1に示す粘土内の7要素の濃度の経時変化を示したものが図-2である。粘土内の化学物質の移流拡散速度は拡散係数に依存するが, この解析ケースではABの長さが比較的小さいため, 粘土全体が飽和濃度に達するのに長時間を要することが分かる。図-3は粘土内部の濃度分布を示したものである。ABを中心とする楕円状に化学物質が拡散していくことが分かる。図-4, 図-5はそれぞれ粘土内の各要素の平均有効応力, 過剰間隙水圧の経時変化を示したものである。これらの図から明らかのように, 濃度一定境界 AB に近い要素では濃度変化により粘土はまず膨張する。このため負の過剰間隙水圧が発生するが, 時間遅れを伴う圧縮の粘塑性化学ひずみによって間隙水圧は正圧に変化する。この挙動は化学弾性ひずみを粘土の綿毛化による膨張ひずみ, また非可逆化学ひずみを粘塑性ひずみと仮定したモデル特性の帰結である。図-6は有効応力経路を示している。化学物質の濃度変化により粘土の平均有効応力は減少し, せん断力が増加することが分かる。図-7は粘土モデルの表面沈下-時間関係である。濃度が分布するにも係わらず, 小さいがほぼ一様な沈下が発生することが分かる。

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により化学物質によって引き起こされる圧密現象の解析を行った。解析結果はモデル特性を反映したもとなっている。粘土を対象とした化学物質の浸透拡散実験は数多く実施されているが, 粘土の力学的な応答変化まで測定したものは極めて少ない。このため, 化学物質が粘土の力学挙動に与える影響については未だ不明な点が少なくなく, 今後の実験的な研究が不可欠である。このような実験の結果を解釈するために, また化学物質依存性モデルの開発のためにも提案した物質移行連成圧密解析法は有用である。

参考文献

- 1)Hueckel,T.(1995):Strain and contamination history dependence in chemo-plasticity of clays subjected to environmental load, Numerical Models in Geomechanics,pp329-336.
- 2)Hueckel,T.(1997):Chemo-plasticity of clays subjected to stress and flow of a single contaminant, Int. J. for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol.21, pp43-72.
- 3)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

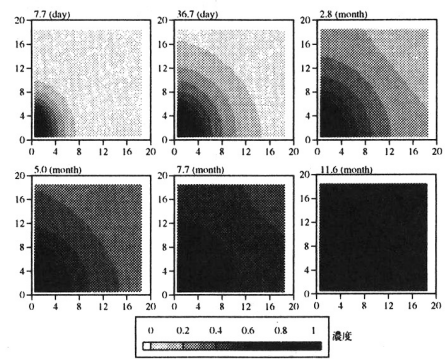


図-3 粘土内濃度分布

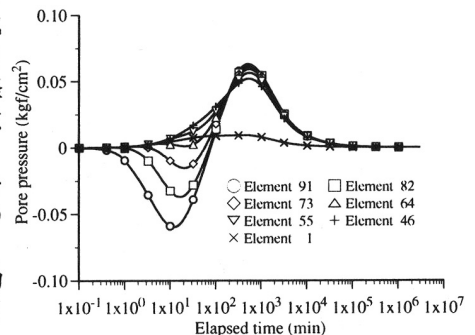


図-5 間隙水圧経時変化

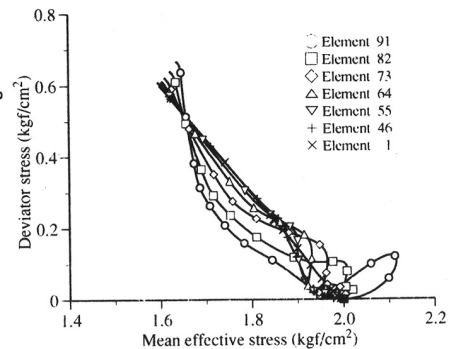


図-6 有効応力経路

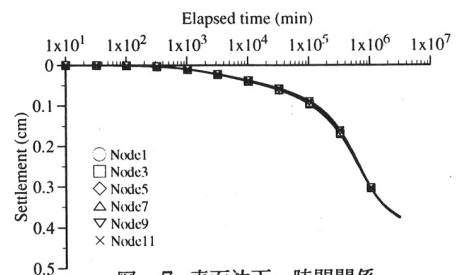


図-7 表面沈下-時間関係