



層間水の脱水による土粒子密度変化を考慮した連続条件式

前川, 慎太郎
岩木, 友哉
飯塚, 敦
橘, 伸也

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 24:34-43

(Issue Date)

2020-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81013254>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81013254>



層間水の脱水による土粒子密度変化を考慮した 連続条件式

Continuity condition considering the change in particle density
due to dehydration of interlayer water

前川慎太郎¹⁾
Shintaro Maekawa
岩木 友哉²⁾
Tomoya Iwaki
飯塚 敦³⁾
Atsushi Iizuka
橘 伸也⁴⁾
Shinya Tachibana

概要:津波地震は海溝近くのプレート境界浅部で生じる地殻変動によって発生することが分かってきた。そのためデコルマ帯浅部での力学特性を理解することは、津波地震の発生メカニズムの解明につながると考えられる。本研究では既往の研究で得られた採掘データ、粘土鉱物の実験事実などを基にスメクタイトのイライト化に着目した。特に変質に伴う「脱水」が水圧の変化など様々な影響を与えていると考え、「脱水」に着目した変質モデルの提案を行った。モデルの提案にあたり、本来土質力学において変化しないとされている土粒子の密度が脱水によって変化するため連続条件式の見直しを行った。同時に空隙比と体積ひずみが一意的に定まらない事を考慮した構成式を有限要素法解析コードに組み込み解析を行うことで、脱水により生じる地盤内の応答について検討する。

キーワード: スメクタイト, イライト, 変質

1. スメクタイトとイライト

図1に示すように、モンモリロナイト、バイデライト、サポナイトのような粘土鉱物を総称してスメクタイトと呼ぶ¹⁾。スメクタイトはMg-(OH)またはAl-(OH)八面体シートが2枚のSi-O四面体シートを挟みこんだ基本構造(TOT構造)をしており、八面体シート中のAl³⁺や四面体シート中のSi⁴⁺が一部価数の小さいイオンに置換している²⁾。そのため、スメクタイトは層全体に負電荷をもっており、中和するために層間に陽イオンを取り込む特性がある。また層間陽イオンは水分子を引き付けることで、構造中に層間水として水分子を取り込むことができる。このように層間に水分子が入ることで、粘土鉱物の結晶構造において底面間隔が広がる性質(膨潤性)をもつ。

イライトはスメクタイトに陽イオンであるカリウムイオンやアルミニウムイオンが取り込まれることで層間に存在する水(層間水)が脱水し変質することがわかっている。このイライトはスメクタイトとは異なり層間水を有していないため膨潤性を示さない。

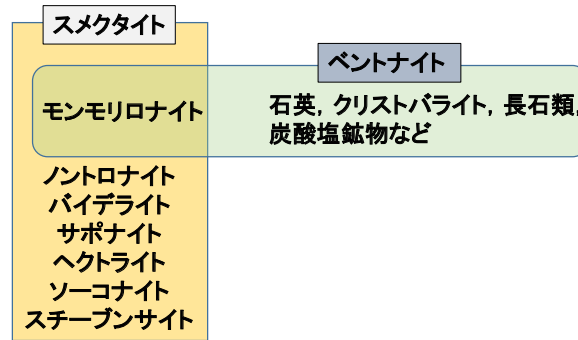


図1 スメクタイトとベントナイトの相関図

2. 鉱物の変質を考慮したモデルの提案

粘土鉱物には、「吸着水」、「層間水」、「自由水」が存在するといわれている³⁾。吸着水と層間水は同じものとして書かれていることも多いが、図2のように粘土鉱物中の土粒子に存在する層に付着する水を「吸着水」、層と層を分子結合によって結びつけている水を「層間水」、粘土鉱物内を自由に移動することができる水を「自由水」と定義する。

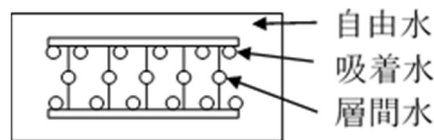


図2 粘土鉱物内の水についてのイメージ図

図3のようにスメクタイトからイライトへ変質する際、この層間水が K^+ に置換されることで変質が行われる。問題を簡単にするために自由水と吸着水は変質に関わらないものとし、この2つの水を合わせて液相であるとする。 K^+ に置換され脱水された層間水は液相内に相変化する。

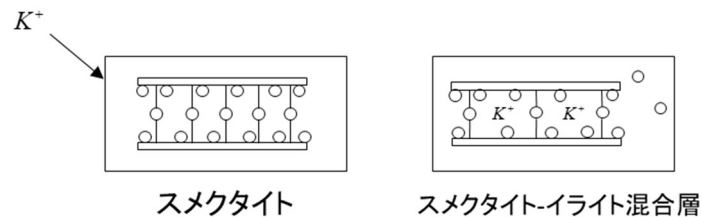


図3 粘土鉱物の変質についてのイメージ図

以上を踏まえて、新しい鉱物変質モデルを提案する。

図4にスメクタイトからイライトへの変質モデルを示す。層間水は固相内に存在するものと考え、固相を層間水と真の固相の2つに分割した。初期状態での層間水と真の固体を合わせたものをスメクタイト、この層間水が液相に相変化することを脱水反応であるとし、層間水が初期状態より少なくなっている状態をスメクタイト-イライト混合層、層間水が完全になくなった状態をイライトであるとした。液相・層間水・真の固体の質量及び体積はそれぞれ $(m_w, V_w), (m_{s,f}, V_{s,f}), (m_{s,s}, V_{s,s})$ とし、初期状態の液相・層間水・真の固体の質量及び体積をそれぞれ $(m_{w0}, V_{w0}), (m_{s,f0}, V_{s,f0}), (m_{s,s0}, V_{s,s0})$ とする。ここで、間隙比-体積ひずみの関係及び質量保存則について考える。

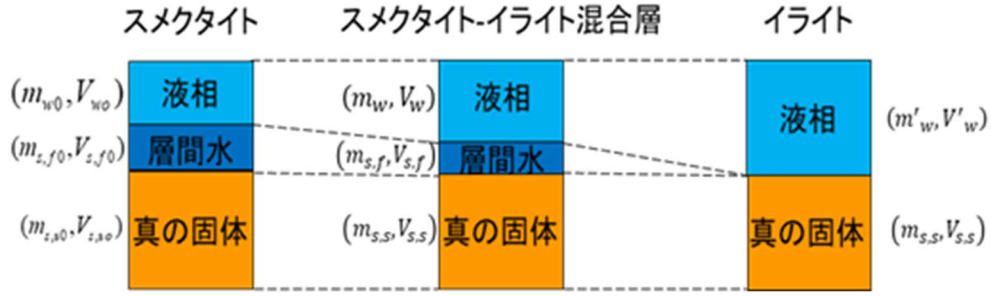


図4 スメクタイトとイライトの変質モデル

(1) 間隙比-体積ひずみの関係

変質を考慮したモデルにおける間隙比-体積ひずみの関係を式(1)及び図5に示す. 今回のモデルでは間隙比と体積ひずみは一意的に決まらず β によって変化することがわかる. ここで β_0 は初期の β であり, 式(3)で示すようにスメクタイト・イライト・層間水の密度から定めることができる. ただし $\rho_{sme}, \rho_{ill}, \rho_{s,f}$: スメクタイト, イライト, 層間水の密度であり, β は真の固体と層間水の体積比である.

$$\varepsilon_v = 1 - \frac{V}{V_0} = 1 - \frac{1+e}{1+e_0} \frac{1+\beta}{1+\beta_0} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{V_{s,f}}{V_{s,s}} \quad (2)$$

$$\beta_0 = \frac{\rho_{ill} - \rho_{sme}}{\rho_{sme} - \rho_{s,f}} \quad (3)$$

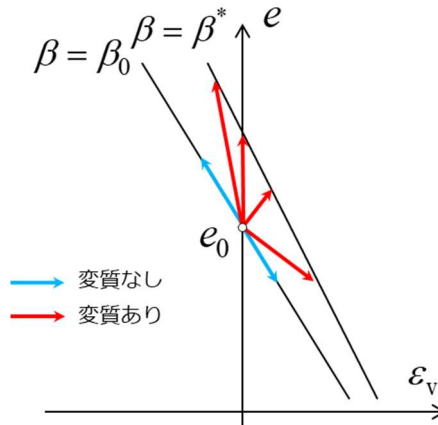


図5 変質を考慮した間隙比-体積ひずみの関係

(2) 質量保存則及び固体-液体における連続条件式について

式(4)に従来使用されていた連続条件式を示す. 各相の質量変化がないことから式は成立していると考えられていたが, 実際には式(5)のように全体として質量保存則が成立する必要がある. 従来の解き方では各相の質量が保存する特定の場合のみ成立する式であった. そこで各層に質量変化が生じて成立する解き方について考える.

$$\dot{m}_s = 0, \dot{m}_w = 0 \quad \frac{\dot{m}_s}{\rho_s} + \frac{\dot{m}_w}{\rho_w} = 0 \quad (4)$$

$$\dot{m}_s + \dot{m}_w = 0 \quad (5)$$

固相・液相の実質部分の密度を ρ_s, ρ_w ，固相と液相から成る混合体の単位体積当りの密度（部分密度）を $\bar{\rho}_s, \bar{\rho}_w$ とすると，土粒子，間隙水の質量の時間変化率 $\dot{m}_s, \dot{m}_w$ は，

$$\dot{m}_s = \frac{D}{Dt} \int \bar{\rho}_s dV \quad (6)$$

$$\dot{m}_w = \frac{D}{Dt} \int \bar{\rho}_w dV \quad (7)$$

となる．また上式は局所表示として以下のように記述できる．

$$\dot{\bar{\rho}}_s + \bar{\rho}_s \text{div} \mathbf{v}_s = 0 \quad (8)$$

$$\dot{\bar{\rho}}_w + \bar{\rho}_w \text{div} \mathbf{v}_w = 0 \quad (9)$$

ここで， $\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_w$ は，各相での土粒子，間隙水の速度ベクトルである．式(8)に $\dot{\bar{\rho}}_s = -\dot{n}\rho_s$ ， $\bar{\rho}_s = (1-n)\rho_s$ を，式(9)に $\dot{\bar{\rho}}_w = -\dot{n}S_r\rho_w + n\dot{S}_r\rho_w + nS_r\dot{\rho}_w$ ， $\bar{\rho}_w = nS_r\rho_w$ を代入すると以下の式(10)が得られる．

$$\dot{n}\left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_w}\right) + \frac{(1-n)}{\rho_w} \dot{\rho}_s + \left\{(1-n)\frac{\rho_s}{\rho_w} + n\right\} \text{div} \mathbf{v}_s + \rho_w \text{div} \tilde{\mathbf{v}}_w = 0 \quad (10)$$

間隙率の物質時間微分 $\dot{n}$ を消去するために体積変化率を用いた式(11)及び間隙率-間隙比の関係式(12)を用いる．

$$\text{div} \mathbf{v}_s = \frac{\dot{J}}{J} = \frac{\dot{e}}{1+e} + \frac{\dot{\beta}}{1+\beta} \quad (11)$$

$$\dot{n} = \frac{\dot{e}}{(1+e)^2} \quad (12)$$

式(10)に式(11)及び式(12)を代入することで，式(13)に示される固体-液体における連続条件式が得られる．

$$\frac{1}{(1+e)(1+\beta)} \left(\frac{\rho_{s,f}}{\rho_w} - 1 \right) \dot{\beta} - \dot{\varepsilon}_v + \text{div} \dot{\mathbf{v}}_w = 0 \quad (13)$$

3. 変質を考慮した構成モデル

構成モデルとして弾性モデルを使用した．**図 5** で示すように間隙比-体積ひずみが β によって変化するため一意的に決まらない．そこで，これらを考慮して変質による応力-ひずみ関係は**図 6** のような挙動を示すと考えた．**図 6** に以上の事を考慮した弾性モデルを示している．左側の図には間隙比-体積ひずみ関係を示しており，右側の図には間隙比-応力関係を示している．間隙比-応力関係については弾性モデルを使用している．

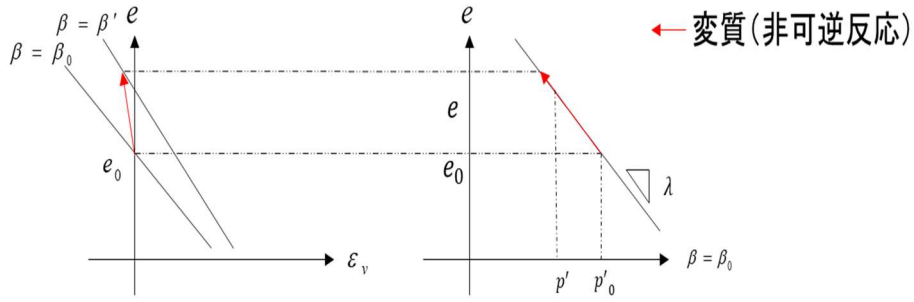


図 6 変質を考慮した弾性モデル

式(14)に提案した変質モデルにより求まる間隙比-体積ひずみ関係を，式(15)に間隙比-平均有効応力関係を示す．

$$\varepsilon_v = 1 - \frac{1+\beta}{1+\beta_0} \frac{1+e}{1+e_0} \quad (14)$$

$$e = e_0 - \lambda \ln \frac{p'}{p'_0} \quad (15)$$

式(14)及び式(15)を連立することで式(16)に示すような応力-ひずみ関係を求めることができる．

$$\dot{p}' = \frac{(1+e_0)(1+\beta_0)}{1+\beta} \frac{p'}{\lambda} \dot{\varepsilon}_v + \frac{1+e}{1+\beta} \frac{p'}{\lambda} \dot{\beta} \quad (16)$$

連続条件式及び間隙比-体積ひずみの関係及び体積ひずみ-応力関係を有限要素法解析コードに組み込み解析を行うことで変質による他の地盤に与える影響を検討する．

4. 変質による脱水を伴う有限要素シミュレーション

(1) シミュレーション概要

地盤内のある領域に変質が生じるとき，他の領域にどのような影響を与えるのかを知るために多要素での有限要素シミュレーションを行った．図 7 及び図 8 に解析メッシュを，表 1 に使用した解析パラメータを示す．1 要素あたりのサイズを $1 \times 1 \text{ m}$ とし，ケース 1 では 3 m 長，ケース 2 では 10 m 長を想定した．変質部及び変質部以外がどのようなになっているのか比較するために図中の右端の要素へ変質要素とする．

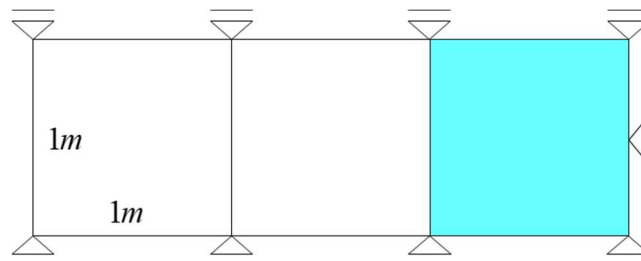


図 7 3 要素の解析メッシュ

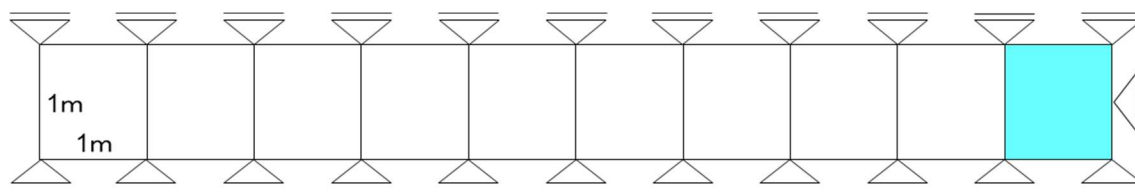


図 8 10 要素の解析メッシュ

表 1 解析に使用したパラメータ

初期間隙 e_i	膨潤指数 λ	ポアソン比 ν	透水係数 k (cm/s)
0.43	0.14	0.326	1.0×10^{-4}

層間水は自由水の水分子より密な構造であると推測し、層間水の密度 $\rho_{s,f}$ は 1.0, 1.5, 1.8 (g/cm³) とする。境界条件は以下の通りである。

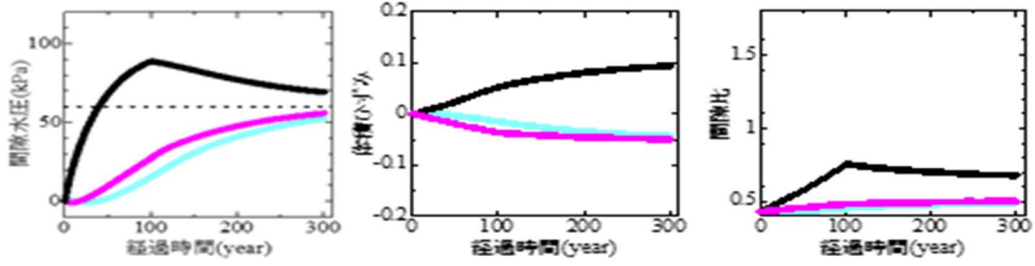
- ・変位境界：解析メッシュ上端面及び下端面において鉛直固定
解析メッシュ右端面のみ鉛直、水平固定
- ・水理境界：解析領域全面非排水
- ・変質条件：3 要素および 10 要素ともに一番右側の要素のみ変質，100 年で変質終了

(2) 解析結果

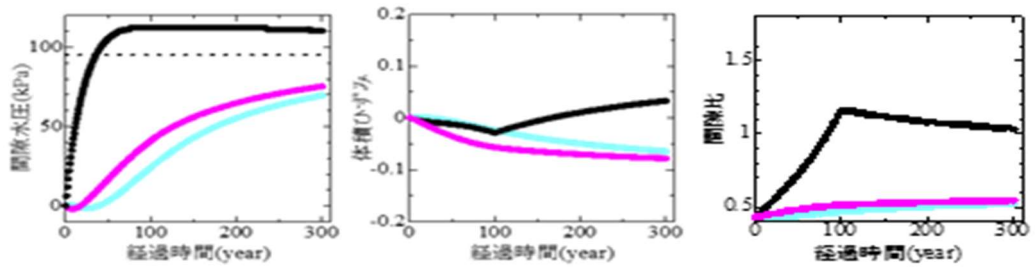
図 9 に 3 要素モデルでの間隙水圧，体積ひずみ，間隙比の経時変化を示す。(a)～(c)の順に層間水密度が $\rho_{s,f} = 1.0, 1.5, 1.8$ (g/cm³) のケースを示している。また，3 要素の左から数えて要素 1，2，3 の応答を水色，桃色，黒色で表示している。

間隙水圧を見ると，層間水の脱水による間隙比増加を伴う間隙水圧の上昇が見られる。それにより要素 1，2 と要素 3 との間に動水勾配が生じ，水の移動が促される。また，変質終了後は間隙水圧が各要素で収束していく様子が見られる。収束値は層間水の密度によって異なり，密度が高いほど間隙水圧の収束値も高くなることがわかる。

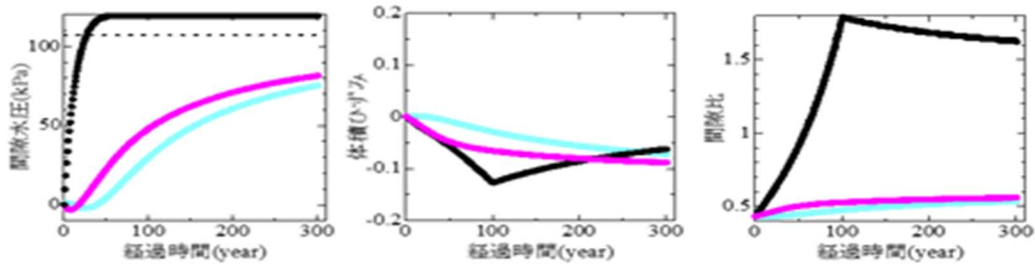
次に体積ひずみを見ると，層間水密度が低い場合 ($\rho_{s,f} = 1.0$ g/cm³) において，要素 3 が常に体積圧縮していることがわかる。一方で，層間水密度が高い場合 ($\rho_{s,f} = 1.5, 1.8$ g/cm³) では変質終了時まで体積膨張し，その後一転して体積圧縮が見られる。層間水密度が低い場合では層間水と自由水の密度が同じため，変質により脱水した層間水が要素 1，2 へと移動するため変質要素である要素 3 が体積圧縮したと考えられる。一方で，層間水密度が高い場合は，高密度状態にあった層間水が脱水し，低密度な自由水に変化することによって，まずは変質要素の体積膨張が生じる。同時に変質要素では，未変質の要素よりも高い過剰間隙水圧が発生することになり，地盤中の自由水の移動が促されることになる。自由水は変質要素から未変質要素（図 7 の右から左）へと流れることになり，この移動が長期的には変質要素に体積圧縮が生じる原因となる。この応答は，過剰間隙水圧の勾配が消滅するまで継続するが，その速度は地盤の透水係数に影響を受けるものと推察される。



(a) $\rho_{s,f} = 1.0 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ の場合



(b) $\rho_{s,f} = 1.5 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ の場合

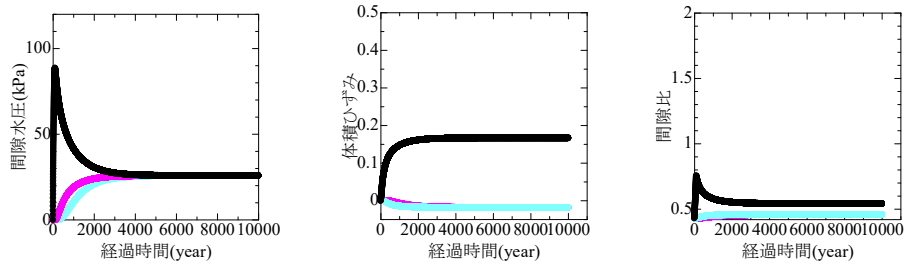


(c) $\rho_{s,f} = 1.8 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ の場合

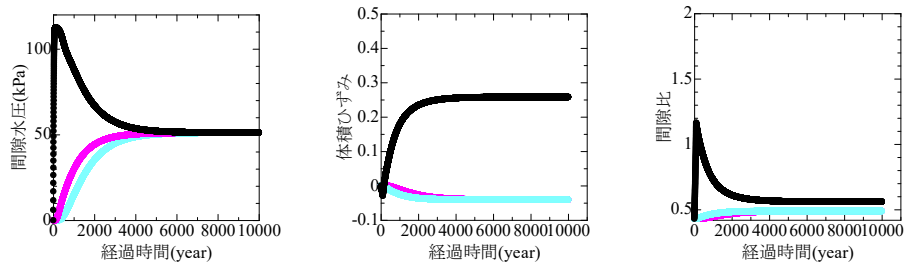
図 9 3 要素モデルの間隙水圧，体積ひずみ，間隙比の経時変化

図 10 に 10 要素モデルでの間隙水圧，体積ひずみ，間隙比の経時変化を示す．(a)～(c)の順に層間水密度が $\rho_{s,f} = 1.0, 1.5, 1.8 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ のケースを示している．また，3 要素の左から数えて要素 1, 5, 10 の応答を水色，桃色，黒色で表示している．

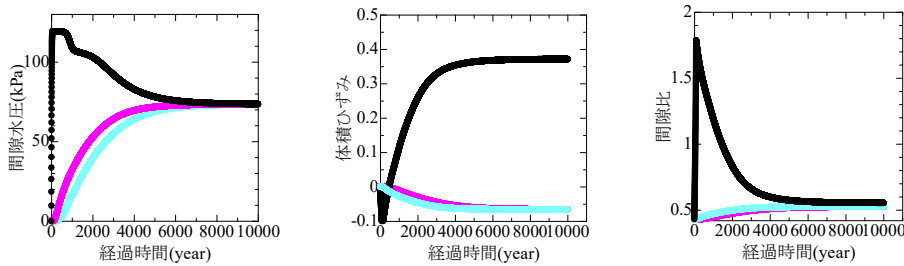
間隙水圧を見てみると，3 要素時と比べてみると各密度において間隙水圧の収束値は小さくなっていることがわかる．これは水の移動が要素数の増加とともに 1 つの要素に集約される水の量が減少したからであると考えられる．また，体積ひずみを見てみると 3 要素の時と同様に密度が大きくなるほど水の移動量が多くなり，変質部以外の体積ひずみは大きくなる．



(a) $\rho_{s,f} = 1.0 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ の場合



(b) $\rho_{s,f} = 1.5 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ の場合



(c) $\rho_{s,f} = 1.8 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ の場合

図 10 10 要素モデルの間隙水圧，体積ひずみ，間隙比の経時変化

5. 結論

本研究では，固相と液相の間に質量交換が生じる場合の連続条件式を定式化し，土粒子の変質による脱水を表現するモデルを提案した．モデルを用いた数値シミュレーションにより，土粒子から層間水が脱水することによって促される間隙水圧上昇と地盤中の水の移動を確認することができた．層間水から自由水に脱水した水の流れと地盤に生じる体積変化の応答は，層間水の密度に大きく依存することが分かった．また，簡単に地盤モデルであるが，非排水境界で囲まれる領域（長さ）に対する変質領域の割合によって，動水勾配が消滅した後の残留間隙水圧の値が異なることが分かった．本研究では，変質の最も重要な要素として脱水について考えてきたが，この脱水は化学変化によって生じるためイオンと密接な関係にあることがわかっている．イオンとの関係性を考慮していく必要がある．また，海底地盤であるデコルマ帯における変質領域と変質条件を考慮した解析を実施することを今後の課題とする．

参考文献

- (1) 株式会社ホーゲン, <http://www.hojun.co.jp>
- (2) 稲垣香那, 駒城素子: スメクタイトの構造と特性, *Journal of Human Environmental Engineering* Vol. 7, No. 2, 2005.
- (3) 加藤忠蔵: 粘土鉱物の吸着水・層間水・構造水の状態, *粘土科学*, 第 29 巻, 第 3 号 118-128, 1989.

筆者: 1) 前川慎太郎, 工学研究科市民工学専攻, 学生 2) 岩木友哉, 工学部市民工学科, 学生;
3) 飯塚敦, 都市安全研究センター, 教授; 4) 橘伸也, 都市安全研究センター, 講師

Continuity condition considering the change in particle density due to dehydration of interlayer water

Shintaro Maekawa
Tomoya Iwaki
Atsushi Iizuka
Shinya Tachibana

Abstract

This paper formulates a continuity condition where the mass exchange between solid and liquid phases mainly due to the dehydration of the interlayer water, while the alteration of clay mineral occurs, is taken into consideration. The formulated model accounts for a change in the water density from a state at which the water is interlayered with a relatively higher density to a state where it behaves as a free water after dehydration. As results of finite element simulation where the formulated model is incorporated, it is found that the increase in pore water pressure and the water migration are promoted in the ground due to the dehydration. Moreover, it is found that the response of volume change in the ground after the dehydration is affected by the density of interlayer water.

©2020 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.