

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01427

研究課題名（和文）海溝沈み込みプレート表層デコルマ帯の固着域生成とすべりの地盤力学的解釈

研究課題名（英文）Geomechanical interpretation of the generation of sticking zones and slip in the decolma zone of the trench-subducting plate

研究代表者

飯塚 敦 (Iizuka, Atsushi)

神戸大学・都市安全研究センター・名誉教授

研究者番号：40184361

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,300,000円

研究成果の概要（和文）：本課題は、海洋プレート表層部のデコルマ帯の海溝部滑り込み時の変質に伴う力学特性変化を非線形弾塑性理論によって解釈し、プレート境界断層の固着域の生成やゆっくり滑りのメカニズムを土・水連成境界値問題として説明する本研究では、デコルマ帯のス멕タイト鉱物のイライト化への変質に伴う力学特性変化の弾塑性構成理論化、ス멕タイト鉱物のイライト化への変質過程で生じる鉱物内からの脱水の場の支配方程式への考慮、非線形弾塑性構成理論と間隙水の生成と移動との連成場としての初期値境界値問題の構成とその解析を実施した。ス멕タイトの変質を考慮した力学モデルを構築している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題は、海洋プレート表層部のデコルマ帯の海溝部滑り込み時の変質に伴う力学特性変化を非線形弾塑性理論によって解釈し、プレート境界断層の固着域の生成やゆっくり滑りのメカニズムを土・水連成境界値問題として説明することにより、地震学への地盤力学の積極的な貢献を果たそうとしている。スロースリップ現象自体は揺れを発生させることはないが、断層試料を用いた室内試験結果から、スロースリップ現象が生じていた領域が地震時に高速で滑ることで地震を巨大化させる可能性が考えられており、発生メカニズムの解明が急がれている。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we use nonlinear elastoplastic theory to interpret the mechanical property changes associated with the alteration of the decolma zone at the oceanic plate surface during trench slip and to explain the generation of a sticking zone and the mechanism of slow slip of a plate boundary fault as a soil-water coupled boundary value problem. The following three issues are considered in this study: (1) elasto-plastic constitutive theory of mechanical property changes associated with the alteration of smectite minerals to illite in the Decolma zone, (2) consideration of the dehydration field from within smectite minerals during their alteration to illite as a governing equation, (3) nonlinear elastoplastic constitutive theory and the initial value boundary value problem as a coupled field between pore water generation and movement, and the analysis of this problem.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤力学 デコルマ帯 弾塑性材料 鉱物変質 境界値問題

### 1. 研究開始当初の背景

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、デコルマ帯と呼ばれるプレート境界浅部が大きく滑ることで巨大津波が発生した。地震発生前には、デコルマ帯でスロースリップ現象と呼ばれる通常の地震に比べ、遅い断層滑り速度でひずみを開放する現象が観測されていた。スロースリップ現象自体は揺れを発生させることはないが、スロースリップ現象が生じていた領域が地震時に高速で滑ることで地震を巨大化させる可能性が考えられており、発生メカニズムの解明が急がれている。スロースリップ現象発生の要因に「水」が大きく関係していることが考えられており、デコルマ帯には、スメクタイトと呼ばれる、変質時に大量の水を発生させる鉱物が多く存在している。本研究では、デコルマ帯で生じる滑り現象をスメクタイトの変質に伴って発生する水が原因と仮定し、スメクタイトの変質を考慮した力学モデルを構築した。

### 2. 研究の目的

海洋プレート表層部のデコルマ帯の海溝部滑り込み時の変質に伴う力学特性変化を非線形弾塑性理論によって解釈し、プレート境界断層の固着域の生成やゆっくり滑りのメカニズムを土・水連成境界値問題として説明する本研究では、①デコルマ帯のスメクタイト鉱物のイライト化への変質に伴う力学特性変化の弾塑性構成理論化、②スメクタイト鉱物のイライト化への変質過程で生じる鉱物内からの脱水の場の支配方程式への考慮、③非線形弾塑性構成理論と間隙水の生成と移動との連成場としての初期値境界値問題の構成とその解析を実施した。

### 3. 研究の方法

スメクタイトが有する層間水に注目し、スメクタイトがイライトに変質する過程での層間水の脱水を考慮した力学応答モデルを考える。図-1にこのモデルの構成要素の相図を示す。この要素は、土粒子からなる固体部分と間隙水からなる液体部分に分けることができ、土粒子間の空隙が間隙水で満たされた飽和状態であると仮定している。また、簡単のため、変質前にはスメクタイト単体からなるとしている。スメクタイトは鉱物結晶の層間に層間水を含んでいるため、土粒子からなる固体部分をさらに分割して、層間水部と鉱物結晶部としている。変質によって層間水の脱水が生じれば、固体部分の層間水が液体部分に移動するため、固体部分の体積は自ずと減少し、同時に土粒子の密度も変化することになる。

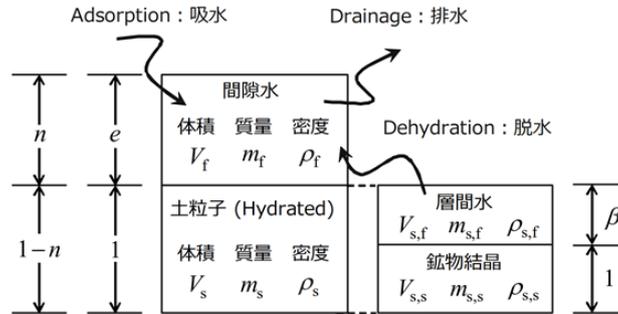


図-1 相図と層間水比  $\beta$  の定義

固体部分の体積  $V_{s,s}$  は、鉱物結晶が占める体積  $V_{s,s}$  と層間水が占める体積  $V_{s,f}$  に分けられる。このとき層間水の体積割合を表す指標として層間水比  $\beta$  を  $\beta = V_{s,f} / V_{s,s}$  と定義する。よって、層間水の脱水により固体部分の体積  $V_s$  が変化するとき、要素の体積ひずみ  $\varepsilon_v$  は  $\beta$  を用いて、

$$\varepsilon_v = 1 - \frac{V}{V_i} = 1 - \frac{1+e}{1+e_i} \frac{V_s}{V_{s,i}} = 1 - \frac{1+e}{1+e_i} \frac{1+\beta}{1+\beta_i}$$

と記述できる。 $e$  は空隙比、下添え字の  $i$  は各変数の初期値であることを表す。

$\beta$  に線形関係  $\rho_{s,f} = a\beta + b$  を仮定し、質量保存則を用いると、

$$\frac{1}{(1+e)(1+\beta)} \frac{(2a\beta + b - \rho_f)}{\rho_f} \dot{\beta} + n \frac{\dot{\rho}_f}{\rho_f} + \text{div} \mathbf{v}_s + \text{div} \tilde{\mathbf{v}}_f = 0$$

なる連続式を得る。ここで  $\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_f, n$  はそれぞれ固相の速度、液相の速度、空隙率であり、 $\tilde{\mathbf{v}}_f = n(\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_s)$  である。また以下の解析では  $\rho_{s,f} = -0.39\beta + 1.50$  を用いている。

よって、静的/飽和土/土水連成問題における速度系の支配方程式は以下ようになる。支配方程式 (圧縮を正)

つり合い式:  $\nabla \cdot \dot{\boldsymbol{\sigma}} - \dot{\rho} \mathbf{b} = 0$

有効応力式:  $\dot{\boldsymbol{\sigma}}' = \dot{\boldsymbol{\sigma}} - \dot{p}_w \mathbf{1}$

構成式： $\dot{\boldsymbol{\sigma}}' = \mathbf{C}^{ep} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$

適合条件式： $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = -\frac{1}{2}(\nabla \otimes \dot{\mathbf{u}} + \dot{\mathbf{u}} \otimes \nabla)$

連続式：
$$\frac{1}{(1+e)(1+\beta)} \frac{(2a\beta+b-\rho_f)}{\rho_f} \dot{\beta} + n \frac{\dot{\rho}_f}{\rho_f} + \text{div} \mathbf{v}_s + \text{div} \tilde{\mathbf{v}}_f = 0$$

ダルシー則：
$$\tilde{\mathbf{v}}_f = -\mathbf{K}_w \nabla h, h = \frac{p_w}{\gamma_w} + \Omega$$

ここに、 $\rho$ :全領域の密度、 $\boldsymbol{\sigma}$ :全応力テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}'$ :有効応力テンソル、 $\mathbf{b}$ :単位質量あたりの物体力ベクトル、 $\mathbf{C}^{ep}$ :弾塑性性剛性テンソル、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ :ひずみテンソル、 $\mathbf{u}$ :変位ベクトル、 $\mathbf{K}_w$ :飽和透水係数テンソル、 $p_w$ :間隙水圧、 $h$ :全水頭、 $\gamma_w$ :間隙水の単位体積重量、 $\Omega$ :位置水頭である。本研究では、つり合い式と連続式の弱形式を、有限要素法（ガラーキン法）を用いて空間離散化し、同時に、時間 $t=t$ から $t=t+\Delta t$ 間で時間離散化することによって、変位境界増分と応力境界増分の境界条件の下で、初期値境界値問題として解いている。

#### 4. 研究成果

飽和土材料の弾塑性構成モデルのひとつである Cam-clay モデルを念頭に、塑性体積ひずみを硬化/軟化パラメータに持つ弾塑性構成モデルを考える。

まず、モンモリロナイトの含有率が異なる飽和ベントナイト試料に関する圧密試験結果から、変質の前後で圧縮指数及び膨潤指数は一定であると仮定する。そうすると、変質を考慮した体積変化（間隙比変化）は図-2 のようにモデル化できる。

変質が起こらない場合、間隙比と体積ひずみは線形関係にある。そのため、載荷・除荷に関わらず、間隙比変化が生じれば左図の  $e-\varepsilon_v$  平面における等  $\beta$  線上を移動することになる。初期点を図中の点  $O$  にとると、変質が起こらない場合の載荷による圧縮経路は経路 A となり、除荷による膨潤経路は経路 B となる。初期点  $O$  が正規圧密状態にあるとすれば、対応する右図のようになる。経路 A は正規圧密線上を辿る弾塑性応答を、経路 B は膨潤線上を辿る弾性応答を与える。有効応力一定で変質が生じるプロセスについて考える。本研究では、体積ひずみ及び平均有効応力が変化せず間隙比のみが上昇する、経路 I を辿るものと仮定した。次に、一般に応力変化を伴う変質のプロセスでは、経路 III を辿るものと考えられるが、経路依存性がないものとする、体積の変化は、経路 I と経路 II の和と考えることができる。変質過程における間隙比  $e$  は体積ひずみ  $\varepsilon_v$  と層間水比  $\beta$  を用いて、

$$de = -\frac{(1+e_0)(1+\beta_i)}{(1+\beta)} d\varepsilon_v - \frac{(1+e_0)(1+\beta_i)}{(1+\beta)^2} (1-\varepsilon_v) d\beta$$

と表せるが、体積変化を伴わない経路 I ( $\dot{\varepsilon}_v = 0$ ) と膨潤線に沿った経路 II (弾性) の和である、

$$de = -\frac{(1+e_0)(1+\beta_i)}{(1+\beta)^2} d\beta - \kappa \frac{dp'}{p'}$$

と連立させれば、 $\kappa \ln \frac{p'}{p'_0} = \frac{(1+e_0)(1+\beta_i)}{(1+\beta)} \varepsilon_v$  を得る。従って、

$$\text{体積ひずみ} \quad \varepsilon_v = \frac{1+\beta}{1+\beta_i} \frac{\lambda}{1+e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} = \frac{\tilde{\lambda}}{1+e_0} \ln \frac{p'}{p'_0}$$

$$\text{弾性体積ひずみ} \quad \varepsilon_v^e = \frac{1+\beta}{1+\beta_i} \frac{\kappa}{1+e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} = \frac{\tilde{\kappa}}{1+e_0} \ln \frac{p'}{p'_0}$$

$$\text{塑性体積ひずみ} \quad \varepsilon_v^p = \frac{1+\beta}{1+\beta_i} \frac{\lambda-\kappa}{1+e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} = \frac{\tilde{\lambda}-\tilde{\kappa}}{1+e_0} \ln \frac{p'}{p'_0}$$

とまとめることができる。 $\tilde{\lambda} = \frac{1+\beta}{1+\beta_i} \lambda, \tilde{\kappa} = \frac{1+\beta}{1+\beta_i} \kappa$  であり、 $\lambda, \kappa$  は圧縮指数と膨潤指数である。

よって、塑性体積ひずみを硬化/軟化パラメータとする降伏関数が、

$$f = \frac{\tilde{\lambda}-\tilde{\kappa}}{1+e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} + D\eta - \varepsilon_v^p = 0$$

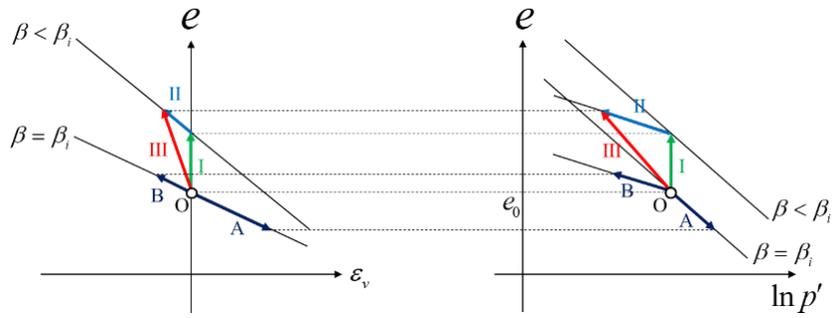


図-2 スメクタイトのイライト化による間隙比及び体積変化のモデル化

と記述でき、弾塑性構成モデルが定式化される。ここで  $D, \eta$  は Cam-clay 系の構成モデルで用いられているダイレタンシー係数とせん断応力比である。

提案モデルを用いた解析結果の一例を示す。初期に正規状態ある要素に、せん断履歴を与え、その後に変質が進行するとどうなるのか。図-3 にその結果を示す。層間水比の初期値とし、せん断強度の 40% のせん断履歴を与えた。変質過程では、間隙水圧の増加によって平均有効応力が減少するが、弾性状態を維持したまま応力点は限界状態線をまたぎ、DRY 側へ移動した後、再降伏し、弾塑性状態に至る。また、再降伏後は限界状態線に向かう軟化挙動を示すことが確認できる。なお、滑らかな弾塑性移行を実現させるために、下負荷面を導入している。図-4 はデコルマ帯を大陸プレートと海洋プレートで挟み込んだ構造を模擬して、デコルマ帯のせん断（ずれ変位は）と共に変質が生じた場合の過剰間隙水圧の発生を示したものである。せん断によって、デコルマ帯を中心に過剰間隙水圧が上昇し、上下のプレートに伝播していることが確認でき、その値は約 1200kPa であった。変質過程終了時には、デコルマ帯では、変質による層間水の脱水によって過剰間隙水圧がさらに上昇し、その値は約 28000kPa に達する。

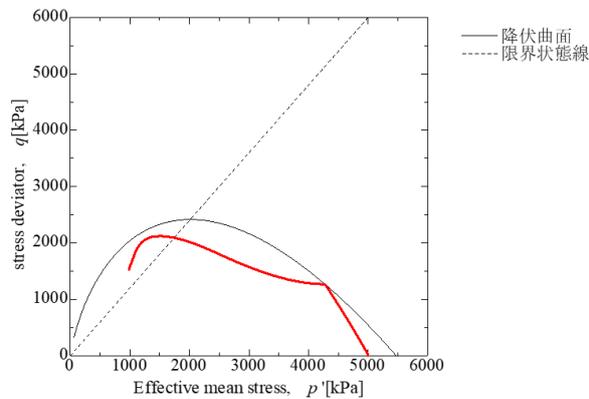
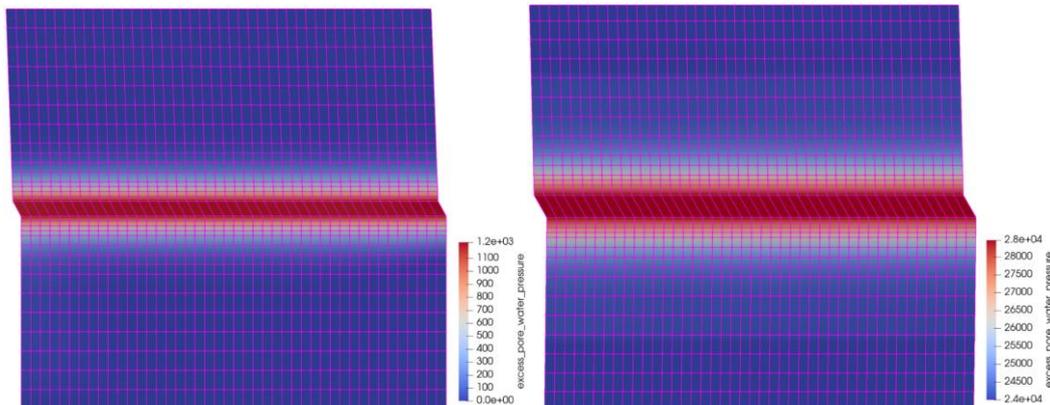


図-3 有効応力変化



(a) プレート沈み込み過程終了時

(b) 変質過程終了時

図-4 過剰間隙水圧の発生分布

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 塚田健人, 橋伸也, 竹山智英, 飯塚敦	4. 巻 Vol. 27
2. 論文標題 再冠水過程におけるベントナイト緩衝材の不均一分布と表面に発生する摩擦の関係	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 神戸大学都市安全研究センター研究報告	6. 最初と最後の頁 22-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 S. Tachibana, D. Hayashi, T. Ishii, T. Takeyama and A. Iizuka	4. 巻 22-92
2. 論文標題 Numerical study on the axial and radial swelling behaviors of unsaturated compacted bentonite	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE,	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21660/2022.92.1673	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ito, S., Tachibana, S., Takeyama, T. and Iizuka, A.	4. 巻 62-4
2. 論文標題 A constitutive model for swelling properties of unsaturated bentonite buffer materials during saturation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 101161
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2022.101161	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 有井拓也, 橋伸也, 竹山智英, 飯塚敦	4. 巻 26
2. 論文標題 液状水と水蒸気の流れを考慮した不飽和土の連続条件式の定式化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 都市安全研究センター研究報告	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 有井拓也, 太田有祐, 橘伸也, 竹山智英, 飯塚敦	4. 巻 9
2. 論文標題 温度勾配による不飽和ペントナイト中の水分移動シミュレーション	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Kansai Geo-Symposium論文集	6. 最初と最後の頁 218-222
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 住田 一晃, 橘 伸也, 飯塚 敦, 太田 秀樹
2. 発表標題 含水状態の違いによる土の降伏応力増大機構の定量化
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会 (福岡)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋 亮太, 橘 伸也, 飯塚 敦, 杉山 友理
2. 発表標題 デコルマ帯での間隙水圧上昇に伴う滑り現象の力学解析
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会 (福岡)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 有井拓也, 橘伸也, 竹山智英, 飯塚敦
2. 発表標題 水蒸気移動を考慮した連続条件式に関する問題点
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Ito, S. Tachibana, A. Iizuka, Y. Watanabe, Y. Yamamoto
2. 発表標題 Numerical simulation of swelling pressure test on different types of unsaturated bentonite
3. 学会等名 Clay Conference 2022, Nancy France (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S.Tachibana, S. Ito, T. Ishii, K. Ishii, A. Iizuka,
2. 発表標題 Swelling and homogenization of unsaturated bentonite specimen with an initial axial gap: Numerical investigation
3. 学会等名 Clay Conference 2022, Nancy France (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	橘 伸也 (Tachibana Shinya) (90432567)	神戸大学・工学研究科・教授  (14501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------