



粘土鉱物の変質に起因する間隙水圧の上昇とスロースリップ

酒井, 貴寛

土居, 優斗

橘, 伸也

竹山, 智英

飯塚, 敦

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 25:51-61

(Issue Date)

2021-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCDOI)

<https://doi.org/10.24546/81013284>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81013284>



粘土鉱物の変質に起因する間隙水圧の上昇と スロースリップ

Interpretation of pore-water pressure change induced by mineral alteration
and the resulting slow slip

酒井 貴寛¹⁾

Takahiro Sakai

土居 優斗²⁾

Yuto Doi

橋 伸也³⁾

Shinya Tachibana

竹山 智英⁴⁾

Tomohide Takeyama

飯塚 敦⁵⁾

Atsushi Iizuka

概要：近年、南海トラフといったプレート沈み込み帯において、津波を伴う地震は海溝近くのプレート境界浅部デコルマ帯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。デコルマ帯で発生しているスロースリップについての解明が急がれている。スロースリップの原因として間隙水の役割が重要視されており、沈み込み帯に豊富に存在する粘土鉱物スマクタイトのイライト化変質に伴う脱水反応が要因の一つであると考えられる。スマクタイトは層構造に層間水を有するため、層間水の脱水を考慮した変質モデルを提案する。連続条件式を導出し有限要素解析コードに組み込み、解析を行うことでスロースリップを解析的に表現する。

キーワード：スマクタイト、イライト、変質、デコルマ帯、層間水

1. デコルマ帯

2011年3月に甚大な被害をもたらした東北地方太平洋沖地震や、近年発生が懸念されている南

海トラフ地震など、プレート境界地震は巨大な津波を伴う危険性があることが知られている。南海トラフ地方で発生する地震は、約100年から150年の周期で発生すると言われており、東海地震が最後に発生してからすでに約160年経過しており、プレート境界地震の発生メカニズムの解明は重要な課題である。

図1に沈み込み帯の断面図を示す。プレート境界において、大陸プレートと海洋プレートが固着している領域がありアスペリティと呼ばれている。海洋プレートが大陸プレートの下へ沈み込み、アスペリティにひずみが蓄積し、固着の強度の限界に達すると固着が剥がれ、地震性滑りを生じる。デコルマ帯とは、プレート境界沈み込み帯浅部におけるせん断断層帯である。

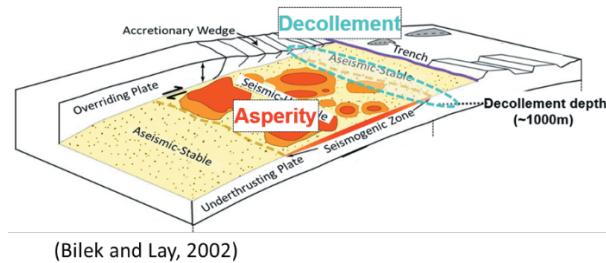


図1 沈み込み帯の断面図

2. スロースリップ

近年の地震・地殻変動観測網の充実により、今までの観測では捉えることのできなかった新たな振動・変動現象が観測されており、長期間かけてゆっくりと生じる地震動を伴わない地殻変動をスロースリップと呼ぶ。巨大津波発生の原因となった海底地殻変動領域や、過去の地震発生時に生じた滑り分布が、デコルマ帯でスロースリップが観測されている領域に一致することがわかっている¹⁾。デコルマ帯においてスロースリップが生じる原因として、デコルマ帯内部及び境界部の間隙水の役割が重要視されている²⁾。水の供給源として、沈み込みに伴う堆積物の圧密やセメントーション、スメクタイト-イライト相転移や、石英-クリストバライト相転移等が考えられている³⁾¹⁾⁴⁾。デコルマ帯のプレート沈み込み境界水平方向には粘土鉱物スメクタイトが豊富に存在する。スメクタイトとは、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の総称であり、沈み込みに伴う温度・圧力の上昇に加え、カリウムイオンなどの影響を受け、イライトへと変質する。図2にスメクタイト及びイライトの構造図を示す。スメクタイトは層構造中に層間水を有し、イライトへと変質する際層間水の脱水が生じる。図3は、沈み込み帯における水の移流を表した図である。海溝からの距離、温度帯の情報からデコルマ帯が位置する領域において、スメクタイトのイライト化変質によって脱水が生じていることが確認できる。そのため、変質による層間水の脱水が、デコルマ帯において異常な過剰間隙水圧が観測されている原因であると考えられる。

スメクタイトのイライト化変質及び変質に伴う層間水の脱水を考慮したモデルを提案し、有限要素解析手法であるFEMに組み込みシミュレーションを行うことによって、スロースリップを解析的に説明することが本研究の目的となっている。

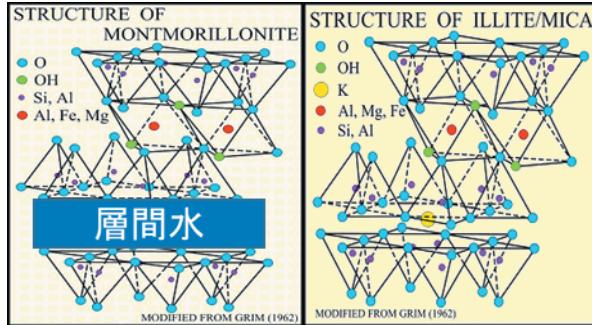


図2 スメクタイト及びイライトの構造図⁵⁾

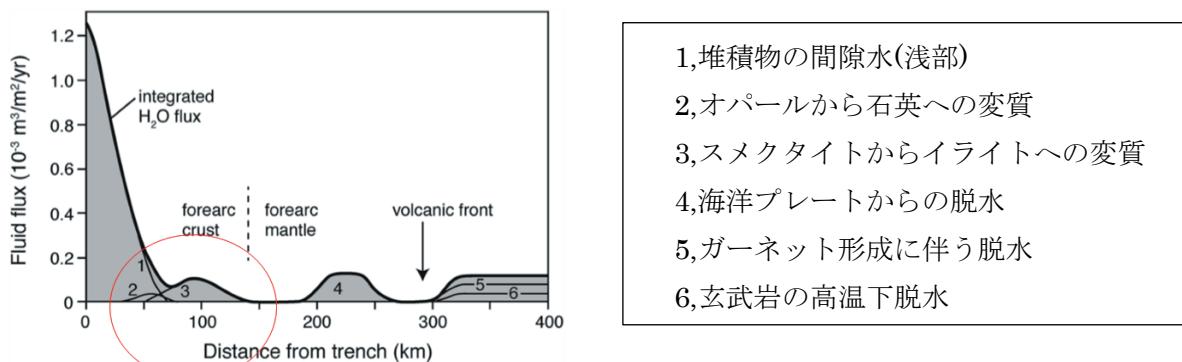


図3 沈み込み帯における水の移流⁶⁾

3. 変質モデル

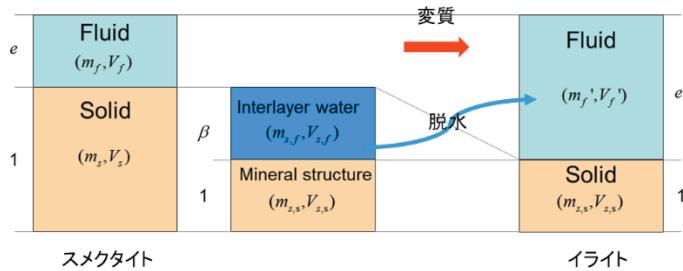


図4 変質モデル

図4にスメクタイトのイライト化変質のモデルを図示する。スメクタイト・イライトを土粒子（固相）、間隙水（液相）の二相からなる混合材料であることを表している。デコルマ帯は深海に存在するため、溶存気体は無く飽和状態としている。層間水はスメクタイトの鉱物結晶を形成していることから、固相を層間水と鉱物構造を受け持つ相の二つに分けて考え、固相から液相への相変化によって脱水を表現する。

変質モデルにおいて物理量を次に定義する。液相・層間水・真の固体の質量及び体積はそれぞれ $(m_f, V_f), (m_{s,f}, V_{s,f}), (m_{s,s}, V_{s,s})$ 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 $(m_{f0}, V_{f0}), (m_{s,f0}, V_{s,f0}), (m_{s,s0}, V_{s,s0})$ とする。全体の体積は、 $V = V_f + V_{s,f} + V_{s,s}$ 、初期状態における全体の体積は $V_0 = V_{f0} + V_{s,f0} + V_{s,s0}$ と表せる。質量保存則は以下の通りである。

$$(\dot{m}_s =) \bar{\rho}_s + \bar{\rho}_s \operatorname{div} \mathbf{v}_s \neq 0 \quad (1)$$

$$(\dot{m}_f =) \dot{\bar{\rho}}_f + \bar{\rho}_f \operatorname{div} \mathbf{v}_f \neq 0 \quad (2)$$

$$\dot{m}_s + \dot{m}_f = 0 \quad (3)$$

式(1)及び式(2), 式(3)を連立させることで固相と液相の連続条件式の導出を行う.

$$\dot{\bar{\rho}}_s + \bar{\rho}_s \operatorname{div} \mathbf{v}_s + \dot{\bar{\rho}}_f + \bar{\rho}_f \operatorname{div} \mathbf{v}_f = 0 \quad (4)$$

式(4)に $\dot{\bar{\rho}}_s = -\dot{n}\rho_s + (1-n)\dot{\rho}_s$, $\bar{\rho}_s = (1-n)\rho_s$, $\dot{\bar{\rho}}_f = -\dot{n}\rho_f$, $\bar{\rho}_f = n\rho_f$ を代入すると,

$$\dot{n}(\rho_f - \rho_s) + (1-n)\dot{\rho}_s + (1-n)\rho_s \operatorname{div} \mathbf{v}_s + n\rho_f \operatorname{div} \mathbf{v}_f = 0 \quad (5)$$

また、間隙流体の相対速度ベクトルは

$$\tilde{\mathbf{v}}_f = n(\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_s)$$

$$\mathbf{v}_f = \frac{1}{n}(\tilde{\mathbf{v}}_f + \mathbf{v}_s)$$

と表せ、これを式(5)に代入すると,

$$\dot{n}(\rho_f - \rho_s) + (1-n)\dot{\rho}_s + \{(1-n)\rho_s + n\rho_f\} \operatorname{div} \mathbf{v}_s + \rho_f \operatorname{div} \tilde{\mathbf{v}}_f = 0 \quad (6)$$

$\operatorname{div} \mathbf{v}_s$ の定義は,

$$\operatorname{div} \mathbf{v}_s = \frac{\dot{J}}{J} \quad (7)$$

(J :元の体積における現在の体積) である. よって,

$$J = \frac{V}{V_0}$$

ここに、今回考えたモデルをもとに現在の体積を代入すると,

$$J = \frac{1+\beta}{1+\beta_0} \frac{1+e}{1+e_0} \quad (8)$$

$$\dot{J} = \frac{\dot{\beta}}{1+\beta_0} \frac{1+e}{1+e_0} + \frac{1+\beta}{1+\beta_0} \frac{\dot{e}}{1+e_0} \quad (9)$$

式(8)及び式(9)を式(7)に代入すると,

$$\operatorname{div} \mathbf{v}_s = \frac{\dot{\beta}}{1+\beta} + \frac{\dot{e}}{1+e} \quad (10)$$

また、間隙比と間隙率の関係は,

$$n = \frac{e}{1+e}$$

$$\dot{e} = \frac{\dot{n}}{(1-n)^2} \quad (11)$$

式(10)及び式(11)を式(6)に代入すると,

$$\frac{\dot{\beta}}{(1+e)(1+\beta)}\left(\frac{\rho_s}{\rho_f}-1\right)+\frac{1-n}{\rho_f}\dot{\rho}_s-\dot{\varepsilon}_v+\operatorname{div} \tilde{\nu}_f=0$$

さらに, 層間水の密度 $\rho_{s,f}$ を用いて表すと,

$$\frac{\dot{\beta}}{(1+e)(1+\beta)}\left(\frac{\rho_{s,f}}{\rho_f}-1\right)-\dot{\varepsilon}_v+\operatorname{div} \tilde{\nu}_f=0 \quad (12)$$

が得られる. 変質を考慮しない場合, $\dot{\beta}=0$ となるため, 既存の固相と液相の連続条件式に帰結する. これを有限要素解析コードに組み込み, 解析を行うことでスロースリップを解析的に表現する.

4. 変質シミュレーション

この章においては, 1要素の変質シミュレーションを行い変質作用による力学挙動について検討する. 2次元平面ひずみ/等方条件にて, 要素に対し一様に変質を作成させる. 100年で変質完了とする. デコルマ帯を構成するスマクタイトの透水性は比較的小小さく, この場合非排水条件下でスマクタイトが変質すると考えられる. したがって, 変質が排水状態で生じる場合と非排水状態で生じる場合についてシミュレーションし比較を行う.

以下にシミュレーション結果を示す. 図5に, 変質に伴う過剰間隙水圧変化及び間隙水圧変化を示す. 図5より, 排水状態では過剰間隙水圧が発生せず, 非排水条件下においては過剰間隙水圧が生じていることがわかる. 図6より, 排水状態では過剰間隙水圧が発生しないため平均有効応力は一定であり, 非排水条件下では過剰間隙水圧の発生に伴い有効応力が減少していることがわかる. デコルマ帯の透水性は比較的小さいことが分かっていることから, デコルマ帯において, 非排水状態で変質が生じている可能性が高いと言える. また観測データから, デコルマ帯で異常な過剰間隙水圧が計測されている^{7), 8), 9)}. 本研究で提案したモデルでは, 非排水状態で変質が生じると過剰間隙水圧が発生した. これらのことから, 非排水条件下での変質応答が, 観測事実に一致する傾向を得ることができたといえる.

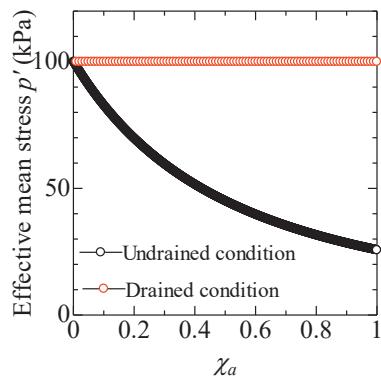


図5 過剰間隙水圧変化

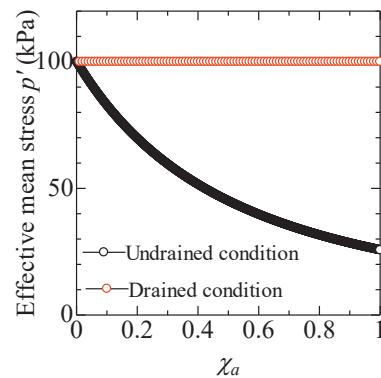


図6 平均有効応力変化

図 7 に、変質に伴う体積ひずみ変化及び間隙率変化を示す。図 7 より、非排水条件のみ体積膨張を生じることがわかる。変質に伴う脱水反応により自由水となった層間水は、密度低下を起こし体積膨張する。排水条件下では、排水作用によって過剰間隙水圧が発生せず体積が一定に保たれている。非排水条件下では、土粒子外部への排水が許されないため体積膨張を引き起こす。この体積膨張は、粘土鉱物が排水条件下で外部から吸水することによって体積膨張する応答とは異なり、非排水条件下で変質によって生じた水が排水できないことにより体積膨張が生じる応答を示している。

図 8 に、間隙率変化を示す。排水・非排水条件共に間隙率が上昇している。層間水が脱水することで、鉱物結晶における層間距離が小さくなり固相体積が減少し、相対的に間隙比が増加している。非排水条件の方が間隙率増加が大きいのは、膨張した間隙水が排水できずに体積膨張する効果によるものである。

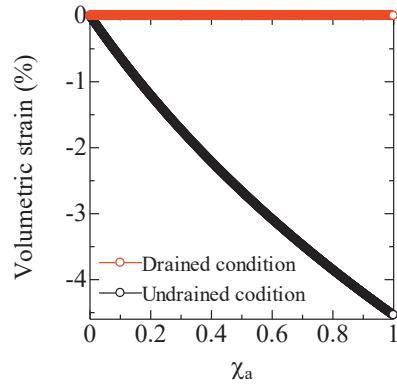


図 7 体積ひずみ変化

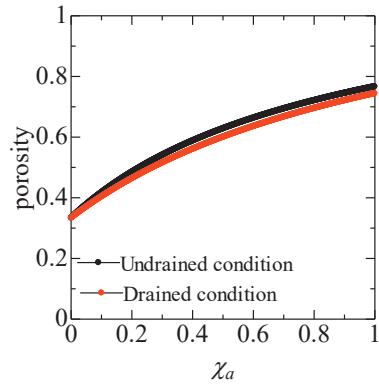


図 8 間隙率変化

ODP の掘削で得られた間隙率分布をまとめたデータを図 9 に示す^{10), 11), 12)}。色付きの部分はデコルマ帯を示す。これらのデータから、デコルマ帯で急激に間隙率が大きくなっていることが分かる。実測データと同様、デコルマ帯における急激な間隙率変化が生じる結果を得ることができた。

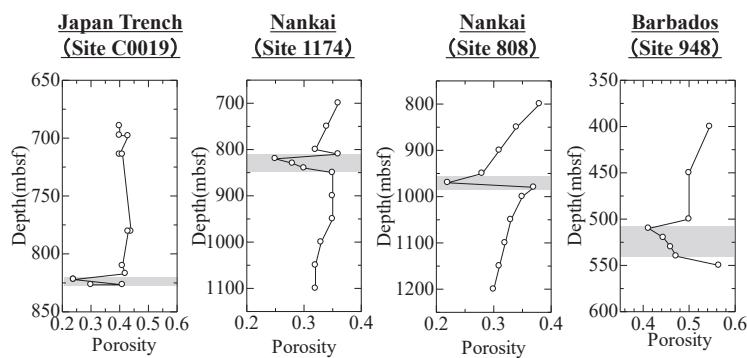


図 9 間隙率実測データ

5. 1要素によるスロースリップシミュレーション

デコルマ帯では、プレートの沈み込みによるせん断作用を受けながら同時に変質が生じているが、この現象を実験で再現することが難しい。今回は、沈み込みによるせん断がある程度進行した状態において変質が生じる場合について2次元平面ひずみ条件でシミュレーションを行う。まず、100kPaで等方圧密された正規圧密粘土に対し、所定のせん断応力まで非排水せん断を行う。これは、変質が起こるまでにデコルマ帯が沈み込みによりどの程度せん断作用を受けているかを表す。その後、せん断応力一定で変質することによる応答を確認する。図10に変位境界を示し、表1に材料定数を示す。 λ は圧縮指数、 κ は膨潤指数、Mは限界応力比、 e_i は初期間隙比、 ν はポアソン比 ρ_{sme} 、 ρ_{ill} はそれぞれスメクタイト、イライトの土粒子密度（単位は(g/cm³））、 $\rho_{s,f}$ は層間水の密度（単位は(g/cm³））、 β_0 は β の初期値である。

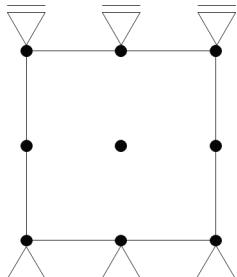


図 10 変位境界

表 1 材料定数

λ	κ	M	e_i	ν	u_0
0.14	0.05	1.2	0.5	0.33	0.1

ρ_{sme}	ρ_{ill}	$\rho_{s,f}$	β_0
2.35	2.75	1.35	0.4

シミュレーション結果として、図11に平均有効応力経路、図12にせん断応力ーせん断ひずみ関係を示す。点aから点bは非排水せん断過程を示し、点bから点eは変質過程を示している。点aから点bまでの非排水せん断過程では、せん断応力が増加するのに伴いせん断ひずみが生じている。点bからスメクタイトのイライト化変質に伴い過剰間隙水圧が発生することにより弾性膨潤し、点c以降せん断応力一定でせん断ひずみが生じている。沈み込みによるせん断が進行し、そこでスメクタイトのイライト化変質が生じると水圧が上昇し有効応力が低下することで、せん断変形が進行することが結果に示された。せん断応力が増加していないにもかかわらず、変質作用によりせん断変形が生じた。これが研究目的としていたスロースリップ現象であると考えられる。

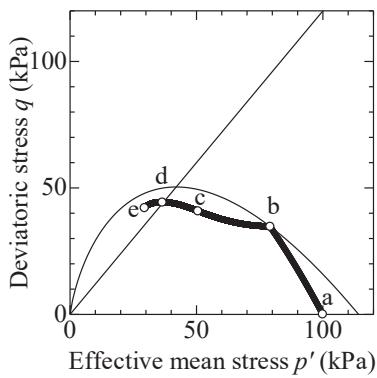


図 11 平均有効応力経路

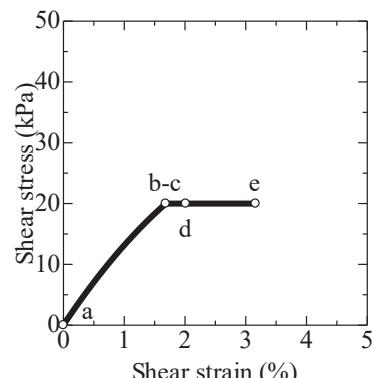


図 12 せん断応力ーせん断ひずみ関係

6. 多要素によるスロースリップシミュレーション

デコルマ帯全体が沈み込みによりせん断作用を受け、部分的に変質が生じるケースについて検討する。手順としては、まず模擬デコルマ帯 100 要素（一辺 1m の要素 100 個）を想定し、全体を一様に所定のせん断応力まで非排水せん断する。その後 100 要素のうち要素 1 から要素 50 までの 50 要素に対し変質を作成させている。図 13 に変質時の変位境界を、表 2 に材料定数を示す。

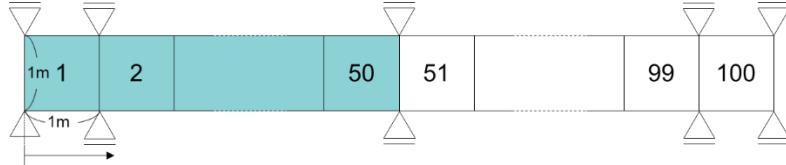


図 13 変質時の変位境界（青塗：変質要素）

表 2 材料定数

λ	κ	M	e_i	ν	u_0	$k(\text{m/year})$
0.14	0.05	1.2	0.5	0.33	0.1	0.365

ρ_{sme}	ρ_{ill}	$\rho_{s,f}$	β_0
2.35	2.75	1.35	0.4

図 14 に時間一過剰間隙水圧関係を、図 15 に変質終了時の過剰間隙水圧分布を、図 16 に変質終了時のせん断ひずみ分布を示す。図 14 は、変質開始時から変質終了時の 100 年間を示している。要素 1 から要素 50 まで変質しており、要素 51 とは変質箇所に隣接した変質していない要素である。要素 1 は変質により過剰間隙水圧が上昇しており、要素 51 は変質していないにもかかわらず過剰間隙水圧が増加している。これは、要素 1 から要素 50 までの変質箇所で生じた水圧が要素 51 へと消散しているからである。図 15 は、変質終了時の過剰間隙水圧の分布であり、要素 1 から 50 で変質により過剰間隙水圧が増加しており、消散することによりデコルマ帯要素が全体的に水圧増加していることがわかる。図 16 は変質終了時のせん断ひずみの分布を表している。なお、破線は変質開始直前の非排水せん断によって生じたせん断ひずみ分布である。この結果より、水圧の消散により広く水圧が上昇することにより変質していない領域においても有効応力が減少しせん断ひずみが発生している。

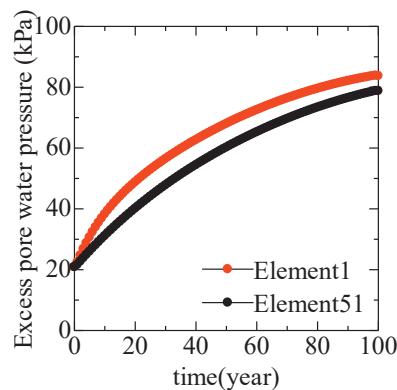


図 14 時間一過剰間隙水圧

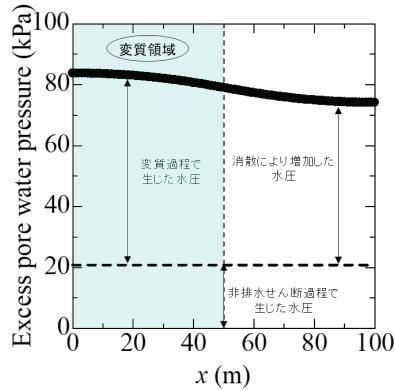


図 15 過剰間隙水圧分布

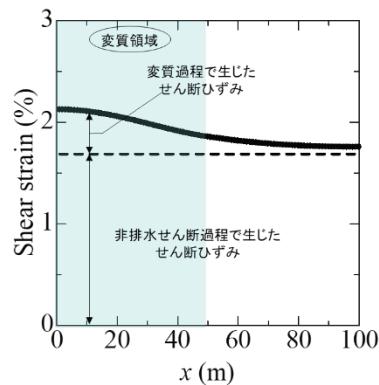


図 16 せん断ひずみ分布

7. 結論

デコルマ帯ではプレートの沈み込みによりせん断よりせん断作用を受けその中で変質が生じているが、そのような条件下で実験が行われていないのも事実である。せん断が作用した状況下で変質による水圧上昇が起こる現象において、橋口により提案された下負荷面モデル（1989）を用いて数値シミュレーションを行った。これにより、変質による過剰間隙水圧の発生によってせん断が進行するというスロースリップの発生機構を示した。

さらに、多要素でのスロースリップシミュレーションとして、せん断作用を受けたデコルマ帶において部分的に変質が生じた場合、水圧が消散することによって変質が生じていない領域においても、水圧上昇が起こり有効応力の低下を誘発せん断が進行する結果が得られた。これにより、局所的に変質が生じたとき発生した水圧が消散することで広範囲でスロースリップが発生する可能性があることがいえる。

参考文献

- 1) M.Chlieh, P.A. Morhes, J.M. Nocquet, P.Jarrin, P.Charvis, D. Cisneros, Y. Font,J.Y. Collot,J.C. Villegas-Lanza, F. Rolandone,M Vallee, M. Regnier, M. Segovia, X. Martin, H, Yepes; Distribution of discrete seismic asperities and aseismic slip along the Ecuadorian megathrust, Earth and Planetary Science Letters, Vol.400,292-301,2014.
- 2) Moore, G. F., Mikada, H., Moore, J. C., Becker, K. and Taira, A., Legs 190/196 synthesis: Deformation and fluid flow processes in the Nankai trough accretionary prism. in Mikada, H., Moore, G.F., Taira, A., Becker, K., Moore, J.C. and Klaus, A. (Eds.), Proc. ODP, Sci. Results., 190/196(Online). <http://www-odp.tamu.edu/publications/190196SR/synth/synth.html>, 2005.
- 3) Brown, K.M., Saffer, D.M. and Bekins, B.A., Smectite diagenesis, pore-water freshening, and fluid flow at the toe of the Nankai wedge. Earth Planet. Sci. Lett., 194, 97-109, 2001.
- 4) Henry, P. and Bourlange, S., Smectite and fluid budget at Nankai ODP sites derived from cation exchange capacity. Earth Planet. Sci. Lett., 219, 129-145, 2004.
- 5) Montmorillonite Mineral Data (webmineral.com)
- 6) Roy D. Hydman, Simon M. Peacock : Serpentization of the forearc mantle, Earth and Planetary

Science Letters 212,417-432,2003

- 7) Moore, J.C. and Tobin, H.J., Estimated fluid pressures of the Barbados accretionary prism and adjacent sediments. Proc. ODP, Sci. Results, 156,229-238,1997
- 8) Gamage, K., Screamton, E.; Characterization of excess pore water pressure at the toe of the Nankai accretionary complex, Ocean Drilling Program sites 1173, 1174, and 808: Results of one-dimensional modeling, Journal of geophysical research, Vol.111, B04103, 2006. doi:10.1029/2004JB003572
- 9) Harold J. Tobin and Demian M. Saffer, Elevated fluid pressure and extreme mechanical weakness of a plate boundary thrust, Nankai trough subduction zone, Geology, 37, 679-682, 2009. doi:10.1130/G25752A.1.
- 10) Elizabeth Screamton, Gainesville, Laramie, Pierre Henry, France Sabine Hunze.: Prostity loss within the underthrust sediments of the Nankai accretionary complex, Geology, 30, 19-22, 2002
- 11) Pierre Henry, J. Casey Moore, Hitoshi Mikadac, Adam Klausd.: Fracture porosity in the decollement zone of Nankai accretionary wedge using Logging While Drilling resistivity data Sylvain Bourlangea, Earth and Planetary Science Letters 209, 103-112,2003.
- 12) Tanikawa. W, Hirose. T, Mukoyoshi. H, Tadai. O, Weiren Lin, Fluid transport properties in sediments and their role in large slip near the surface of the plate boundary in the Japan trench, Earth and Planetary Science Letters, 382,150-160,2013

筆者：1) 酒井貴寛、工学研究科市民工学専攻、学生；2) 土居優斗、工学部市民工学科、学生；
3) 橘伸也、都市安全研究センター、准教授；4) 竹山智英、工学研究科、准教授；5) 飯塚敦、都市安全研究センター、准教授

Interpretation of pore-water pressure change induced by mineral alteration and the resulting slow slip

Takahiro Sakai

Yuto Doi

Shinya Tachibana

Tomohide Takeyama

Atsushi Iizuka

Abstract

Understanding the mechanism of slow slip occurring at plate boundaries is a subject of growing interest. The occurrence of slow slip is associated with an increase in pore water pressure, which is thought to be due to the dehydration of interlayer water trapped between the crystalline layers of clay minerals. In this study, the continuity condition is derived from the mass conservation law, which takes into account the dehydration phenomenon when smectite, which is abundant in marine sediments, is altered into illite. Then, the continuity condition is applied to the coupled soil/water elasto-plastic finite element analysis method to simulate the generation of pore water pressure and subsequent shear deformation due to the alteration of clay minerals.

©2021 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.