

プレート沈み込み運動と地震力の複合作用に起因するプレート境界断層の力学挙動
 Mechanical behavior of décollement zone at plate boundary
 when subjected to combination of plate tectonics and earthquake force

栗本悠平¹, 小枝幸真¹, 王乾¹, 張鋒²

1 名古屋工業大学大学院・工学研究科・創成シミュレーション工学専攻

2 名古屋工業大学大学院・工学研究科・E-mail : cho.ho@nitech.ac.jp

概 要

沈み込み帯におけるプレート境界断層形成時の力学挙動を理解することは、海溝型地震発生帯の形成メカニズムを解明する大きな手がかりになる。しかしながら、巨大地震に関する研究は地質記録等からの類推によるものがほとんどであり、プレート境界断層材料を用いた力学試験やその形成メカニズムに関する研究は数少ない。本研究ではこの未解決の問題であるデコルマ形成要因として、プレート境界特有の地震等により発生する「平均応力と偏差応力が共に変化する動的外力」が鍵を握ると考えた。本稿では有限変形 FEM 解析を用いた数値実験により、地震等の動的外力とプレートの沈み込みに伴うせん断変形がデコルマ形成に与える影響を解析的に検証し、特に動的外力を受けるプレート境界断層の体積変化や粒子配列に着目した。その結果、動的外力が海底岩盤に作用すると、プレート境界断層は粒子配列を維持したまま大圧縮挙動を示すことが明らかとなった。

キーワード：デコルマ、数値実験、せん断変形、繰返し載荷

1. はじめに

プレート境界である南海トラフでは近い将来、高確率で巨大地震が発生すると予測されており、その発生メカニズムの解明や対策が切望されている。しかしながら、これまでの巨大地震に関する研究は遠方観測データや遠い過去の地質記録からの類推によるものがほとんどであり、プレート境界断層材料を用いた力学試験やその形成メカニズムに関する研究は数少なく、室内要素試験や数値実験等の基礎的な研究が求められる。

近年ではプレート境界断層の掘削を目指した国際深海掘削計画 (Ocean Drilling Program; ODP) や統合国際深海掘削計画 (Integrated Ocean Drilling Program; IODP) の策定に始まり、日・米・欧が参加する国際海洋掘削計画第 190 次航海では室戸岬沖の南海トラフにおいて深海掘削調査が実施されている。深海掘削調査で採取された室戸岬沖の南海トラフ試料より、将来的にプレート境界断層になるとされるデコルマ相当層準 (以下、プロトデコルマ) では自生鉱物粒子に起因する粒子間セメンテーションが存在し、低密度状態であることが確認されている。また、プレート境界断層に相当するデコルマではある深度で異常とも言える体積圧縮を生じ、高密度状態であることが確認されている (Morgan and Karig, 1995; Ujiie et al., 2003)。これはプロトデコルマで形成されていた粒子間セメンテーションが

数十万年を経てデコルマへ変化する過程で崩壊し、高密度状態に移行したことを意味する。一方、採取されたデコルマのコア試料を観察すると、デコルマは数 mm 数 cm 程度の角礫で形成されており、その角礫内部における粒子配列はランダムな状態を維持していることが明らかにされている (Ujiie et al., 2003)。これはデコルマを形成する角礫内部において、せん断変形を受けた形跡が認められないことを意味する。

地盤工学において、粒子間を繋ぐ役割を果たすセメンテーションや土粒子の嵩張り (カードハウス構造) により形成される構造などの崩壊はせん断変形に起因するとされる。しかしながら、デコルマを形成する角礫内部ではランダム組織を維持したままセメンテーションが崩壊することで高密度化し、従来の地盤工学で認識されてきた「せん断変形による高密度化」と矛盾している。そこで、著者らは地震動に起因する低周波流圧変動がデコルマ層準において発生していること (Davis et al., 2006)、高位な構造を有する砂は小さな振動により大圧縮するという実験事実 (Asaoka, 2002) に着目し、従来の認識とは大きく異なる仮説を立てた。すなわち、デコルマではせん断変形が支配的でなく、ランダム組織を維持したままセメンテーションを崩壊させるのは地震による疎密波やプレート境界断層内部の局所的な材料破壊、流圧変動等の「平均応力と偏差応力が共に変化する動的外力」に起因すると仮定した。

本研究ではこの仮説を検証するために、プレート境界断層の海洋堆積物を用いた室内要素試験を実施し、動的外力を受ける巨視的変形特性と微視的内部組織の変化を評価する。ただし、海洋プレートが大陸プレートに沈み込む過程で生成されたデコルマは完全に境界値問題であり、その形成メカニズムを室内要素試験のみで議論することは充分ではない。そこで、本稿では回転硬化型弾塑性構成式 Cyclic mobility model (Zhang et al., 2007) に基づく土・水連成有限変形静的・動的 FEM 解析プログラム「DBLEAVES」(Ye et al., 2007) を用いた数値実験により、地震等の動的外力とプレートの沈み込み運動に伴うせん断変形がデコルマの形成に与える影響を解析的に検証し、特に動的外力を受けるプロトデコルマの体積変化や粒子配列に着目した結果を報告する。

2. 数値実験によるデコルマ形成メカニズムの検証

2.1 地震等の動的外力を受けるプレート境界断層の力学挙動

地盤工学や地震学で海底岩盤の動的力学特性を議論する場合は、一度の地震動のみを考慮し、均質な弾性材料として取り扱うことがほとんどである。しかしながら、未固結シルト岩に動的载荷が繰返し作用した場合、大きな塑性変位が発生する試験結果 (Kurimoto et al., 2015) が得られている。加えて、プレート境界断層においてプレートの沈み込みに伴う材料破壊や破壊に伴うすべり挙動が繰返し発生している事実を踏まえると、海底岩盤を弾塑性材料としてモデル化することが適切である。そこで、本数値実験ではこれらの材料特性を考慮した上で、地震等の動的外力が海底岩盤の力学挙動に及ぼす影響を数値実験により検証する。なかでも、プレート境界断層の体積変化や構造、粒子の配列を意味する異方性の変化を観察する。

2.1.1 解析メッシュおよび境界条件

解析メッシュは南海トラフ付近の沈み込み特徴である沈み込み角度 2~5 度、デコルマ層厚約 32.6 m を再現するために、プレート境界断層の沈み込み角度は 2 度とし、プレート境界断層の層厚を 40 m とした。図 1 に 16226 節点および 15972 要素から構成される横幅 6060 m、深さ 2000 m の簡易的な二次元海底岩盤の解析メッシュを示す。なお、プレート境界断層の深度はプロトデコルマとデコルマの存在が確認されているそれぞれの深度約 400 m と約 800 m を参考に 390 m~640 m としている。初期応力は自重応力場として与えた。

海底岩盤に与える動的外力は、地震等による衝撃が遠方より伝播してきたことを想定し、解析メッシュの左側面に位置する深度 1000 m の節点に振動荷重として x 方向に入力する。振動荷重は振動地点に位置する要素の平均有効応力 5.69 MPa を考慮し、図 2 に示す周期 1 Hz の最大値 5 MPa を有する \sin 波とした。また、振動地点の節点とその周辺 320 m (赤線で表示) を構成する節点を水平方向に等変位

境界とすることで、実際に観測される地震や海底岩盤における材料破壊を再現する。なお、動的解析においては初期剛性比例型の Rayleigh 減衰を使用し、減衰定数は通常のコンクリート部材や軟岩を参考に 0.05 と仮定した。

境界条件は解析メッシュ下端面を鉛直・水平方向固定とし、両側面は鉛直方向自由、水平方向固定とした。水理境界については、解析メッシュ下端面および両側面を非排水境界とし、地下水位は GL と同じであると仮定した。

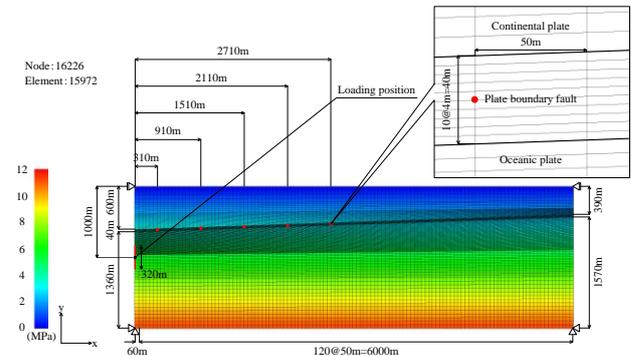


図 1 解析メッシュおよび平均有効応力分布

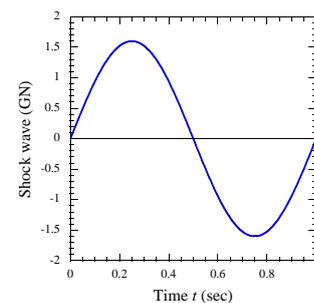


図 2 動的外力を再現した振動荷重

2.1.2 材料パラメータ

材料パラメータは大陸プレート、プレート境界断層、海洋プレートの海洋堆積物を用いた室内要素試験を基に設定すべきである。しかしながら、海洋堆積物のサンプル試験は非常に貴重である上に個数も限られるため、物理特性や力学特性等の試験結果を入手することが困難である。そこで、本研究では地質学や地震学、地球物理学においては地球内部の物質を一般的に弾性体と仮定していることを参考に、大陸プレートと海洋プレートを弾性材料と見なした。一方、プレート境界断層はプロトデコルマのようなランダムな粒子配列である上に、若干の過圧密かつ高位な構造・セメンテーションを有する軟岩と想定し、その材料パラメータは多孔質凝灰岩である堆積軟岩の田下石や未固結シルト岩を用いた室内要素試験 (Xiong et al., 2014; Kurimoto et al., 2015) を基に設定した。なお、海底岩盤に対して地震等を再現した動的外力を直接与えると材料が破壊し、動的外力によるエネルギーが伝播しないため、解析メッシュの左側面に位置する幅 60 m の要素を弾性材料である硬岩とした。

大陸プレートおよびプレート境界断層、海洋プレートの材料パラメータとプロトデコルマの排水三軸圧縮試験と平面ひずみ試験の要素シミュレーション結果を表1、図3に示す。材料パラメータの物理的意味などは参考文献(Zhang et al., 2007)を参照されたい。図3より、自然界のデコルマで観察される粒子間セメンテーションの喪失に伴う軟化挙動中の塑性圧縮挙動を定性的に表現していることが分かる。

表1 材料パラメータ

	Continental plate, Oceanic plate	Soft rock	Loading position
Compression index λ	-	0.11	-
Swelling index κ	-	0.0076	-
Critical state stress ratio R_f	-	3.9	-
Void ratio N ($p=98\text{kPa}$ on N.C.L.)	0.70	0.70	0.70
Poisson's ratio ν	0.20	0.20	0.20
Young's modulus E (kPa)	9.0E+5	-	1.935E+7
Degradation parameter of overconsolidation state m	-	0.10	-
Degradation parameter of structure a	-	0.25	-
Evolution parameter of anisotropy b_r	-	0.0010	-
Initial degree of overconsolidation OCR ($1/R_0$)	-	5.0	-
Initial degree of structure R_0^*	-	0.010	-
Initial anisotropy ζ_0	-	0.0	-
Permeability k (m/sec)	1.0E-9	1.0E-9	1.0E-9
Wet unit weight γ (kN/m ³)	21.07	21.07	21.07

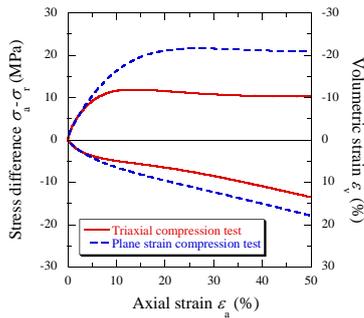


図3 要素シミュレーション結果 (拘束圧 5 MPa)

2.1.3 解析ケース

本解析では海底岩盤に対して大地震による数百年に一度の振動荷重 (延長 1 秒) とその後の圧密沈下の 1 サイクルを合計 100 サイクル (二百年周期) とする。そして、複数回の動的外力がプレート境界断層の力学挙動に与える影響、特にデコルマで観察される体積ひずみ 30% 程度の大圧縮が発生し得るかを検証する。本数値実験では図1に示すプレート境界断層の x 方向に沿い 310 m, 910 m, 1510 m, 2110 m, 2710 m に位置する節点と要素に着目する。なお、地震等による動的外力の影響のみを把握するために、プレートの沈み込み運動により発生するせん断変形は再現していない。

2.1.4 解析結果および考察

振動荷重を二百年に一度与えるサイクルを合計百回繰返した際の 60 秒後と二万年後における各要素の力学挙動を図4と図5にそれぞれ示す。図4に示す各方向の応答加

速度に着目すると、最大で約 7.0 m/sec^2 (700 Gal) の加速度を観測していることがわかる。これは実際の地震動においても観測される値であり、本数値実験で設定した地震動による振動荷重の値は根拠のあるものと言える。過剰間隙水圧に関しては最大で約 3.7 MPa まで上昇し、それに伴い各方向の応力や平均応力は大幅に減少している。これらの結果より、海底岩盤を全て均質な弾性材料として扱う地盤工学や地震学の認識が必ずしも正しいわけではなく、海底岩盤をモデル化する際は適切な弾塑性材料として取り扱う必要があると考える。

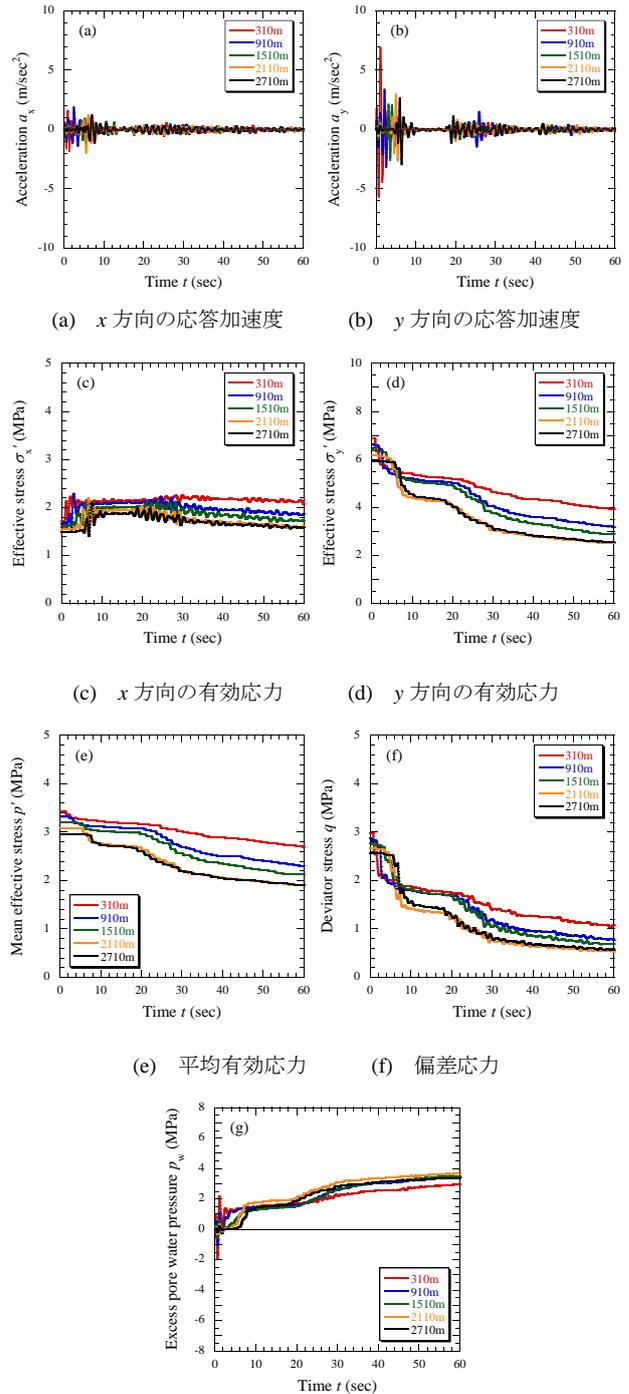


図4 プレート境界断層の力学挙動 (60 秒後)

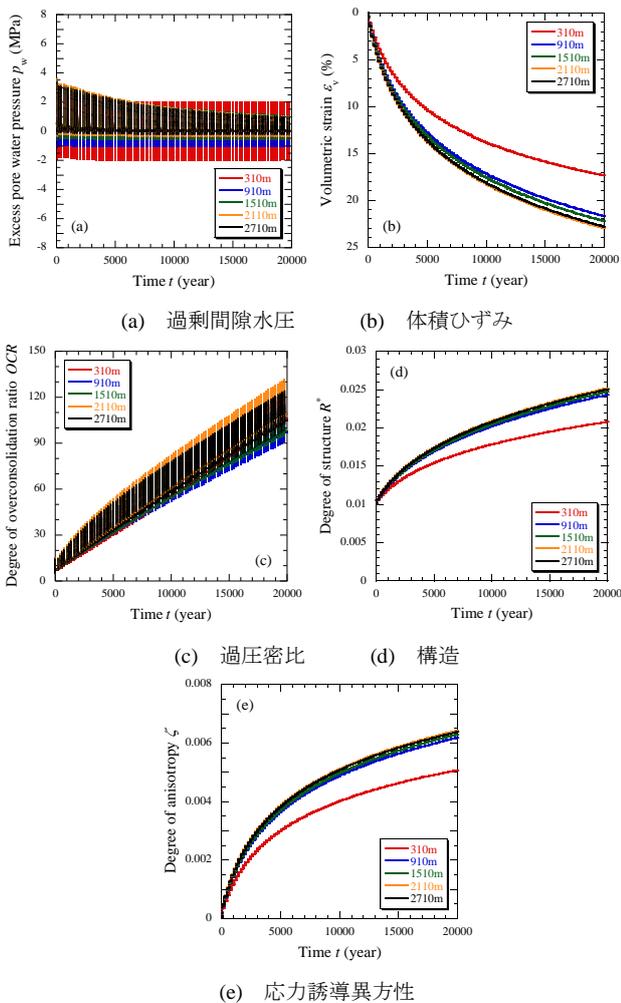


図5 プレート境界断層の力学挙動 (二万年後)

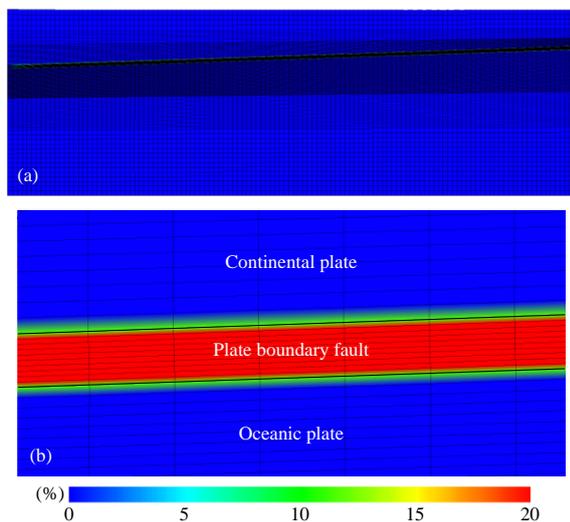


図6 体積ひずみ分布 (二万年後); (a) 全体, (b) 拡大

一方、図5に示す各要素の力学挙動より、過剰間隙水圧の変動幅は振動荷重を受ける度に小さくなる傾向にあると言える。また、図6に示す海底岩盤の体積ひずみ分布を観察すると、合計百回の振動荷重を受けると最大で20%以上発生しており、プロトデコルマに複数回の動的外力が作用すると自然界のデコルマで観察される30%を超える体

積圧縮挙動を示す可能性は充分にある。

ここで、図5に示す各要素の過圧密比と構造、異方性の経年変化に着目すると、体積ひずみの増加に伴い過圧密比は上昇するが、構造は最大で0.024程度であり顕著な構造喪失(構造が完全に喪失した場合は $R^*=1.0$ となる(Asaoka et al., 2002))は見られない。すなわち、プレート境界断層の体積ひずみは20%以上発生しているにもかかわらず、内部の構造・粒子配列はランダムな状態を維持したままである。言い換えれば、地震等の動的外力に起因する振動荷重がデコルマの形成要因である可能性が示唆された。ただし、これらの結果は表1の材料パラメータや構造と応力誘導異方性の発展則に依存するため、プロトデコルマの力学挙動を定量的に評価する際は海洋堆積物を用いた室内要素試験より同定した材料パラメータで検証する必要がある。

2.2 せん断変形を受けるプレート境界断層の力学挙動

前節2.1では地震等の動的外力が海底岩盤、特にプロトデコルマの力学挙動に及ぼす影響を検証し、「平均応力と偏差応力が共に変化する動的外力」がデコルマの形成要因である可能性が示唆された。ただし、南海トラフで観測される沈み込み速度は年間約4 cmとされ、海洋プレートの沈み込み過程を再現しなければプレート境界断層の力学挙動を緻密に評価しているとは言い難い。そこで、プレートの沈み込み運動を数値実験で再現し、せん断変形がデコルマの形成に及ぼす影響を把握する。

2.2.1 解析条件

解析メッシュおよび材料パラメータ、水理境界は前節2.1と同様とする。ただし、前節2.1において解析メッシュの左側面に設定した硬岩は、大陸プレートと海洋プレートと同様の弾性材料に変更した。なお、初期応力は自重応力場として与えた。

境界条件は大陸プレートを水平方向固定、海洋プレートを鉛直方向固定かつ両側面をともに等変位境界とする。また、プレートの沈み込み過程を忠実に再現するために、図7に示すように南海トラフ付近で観測される年間4 cmのプレート移動量(赤線で表示)を海洋プレートに対して千年間与え、海洋プレート内部に対しても等間隔で強制的に作用させる。

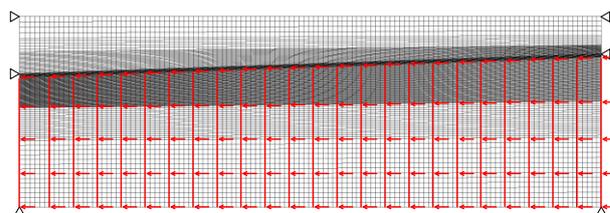


図7 南海トラフの沈み込み運動を再現した境界条件

2.2.2 解析結果および考察

海洋プレートに年間4 cmのプレート移動量を千年間(強制変位40 mのせん断変形)与えた場合の大陸プレー

トとプレート境界断層、海洋プレートの偏差ひずみテンソルの第2不変量（以下、偏差ひずみ）および体積ひずみ分布を図8と図9にそれぞれ示す。これらの結果より、プレート境界断層と大陸プレートが接する境界付近において局所的にせん断帯が発生していることが分かる。せん断帯では250%以上の偏差ひずみが発生しており、せん断帯以外のプレート境界断層ではほとんど発生していない。前節2.1と時間スケールが異なる理由は、せん断ひずみが局所的に250%以上も発生し、解析プログラムの性能を超えたためである。

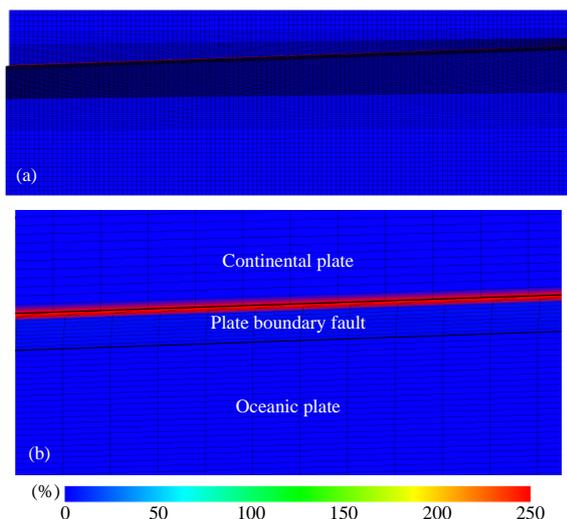


図8 偏差ひずみ分布（千年後）；(a) 全体、(b) 拡大

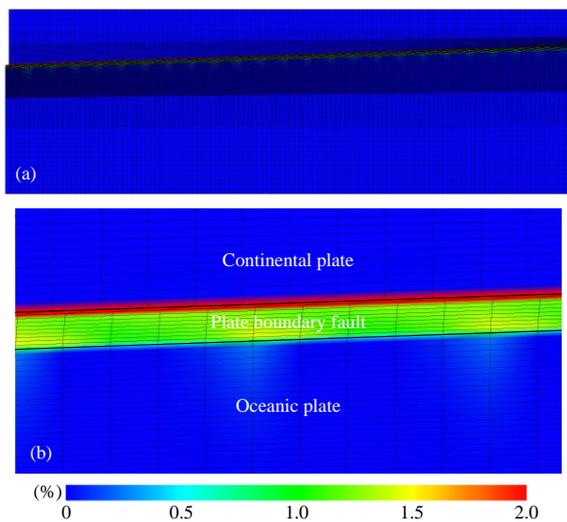


図9 体積ひずみ分布（千年後）；(a) 全体、(b) 拡大

ここで、図10に示すプレート境界断層におけるせん断帯とその外部要素の力学挙動に着目すると、せん断帯では構造の喪失に伴う大きな体積圧縮を示している。一方、せん断帯外部においては、せん断変形により発生した体積ひずみも数%程度である上に、構造は喪失することなく異方性の発達も非常に小さい。すなわち、せん断帯がひとたび発生すると、その後のせん断変形はせん断帯領域でほとんどまかなわれる（変形の局所化；localization）と言え、

せん断帯外部におけるプレート境界断層は高位な構造・セメンテーションを維持したままである。言い換えれば、プレートの沈み込み過程で発生するせん断変形はランダム組織かつ高密度状態のデコルマの特異性に寄与することはなく、デコルマの形成要因から排除できる。

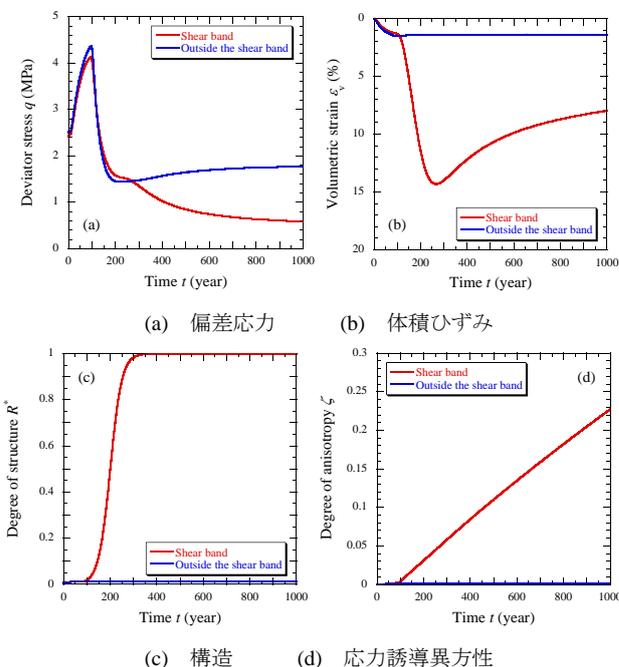


図10 プレート境界断層におけるせん断帯内外部の力学挙動（千年後）

2.3 地震動とプレートの沈み込み運動を複合的に受けるプレート境界断層の力学挙動

前節2.1および2.2では動的外力と静的なせん断変形が海底岩盤に与える影響をそれぞれ個別に検証した。本節では地震等の動的外力とプレート沈み込み運動を同時に作用させ、プレート境界断層付近の実現象をより具体的に再現し、数値実験により海底岩盤の力学挙動を把握する。本数値実験では特に、外力が複合的に作用する場合においても、連続的な静的せん断変形と断続的に繰り返す動的外力がデコルマ形成の要因になり得るかを検証する。

2.3.1 解析条件

解析メッシュと水理境界はこれまでと同様とする。ただし、材料パラメータは前節2.1に従い、解析メッシュの左側面に位置する幅60mの要素は硬岩とする。動的外力とせん断変形を载荷する際の境界条件は前節2.1および2.2と同様である。

本数値実験では海底岩盤に対して振動荷重（延長1秒）を作用させ、その後はプレートの沈み込み過程を再現し二百年に亘るせん断変形を与える。なお、解析スパンは前節2.2と同様に解析プログラムの都合上、千二百年とする。

2.3.2 解析結果および考察

地震による振動荷重を二百年に一度与え、その後はプレ

ートの沈み込み過程を再現したサイクルを合計六回繰返した際の千二百年後における各要素の力学挙動を図 11 に示す。着目した要素は前節 2.1 と同様である。また、大陸プレートとプレート境界断層、海洋プレートの偏差ひずみ分布を図 12 に示す。過剰間隙水圧は振動荷重が作用する度に急激に上昇するが、せん断過程において消散することがわかる。一方、平均有効応力は過剰間隙水圧の消散に伴い回復し、上昇する傾向にある。なお、平均有効応力と偏差応力は振動荷重を受ける度にパルス的な応答を示しているが、例えば図 13 に示す平均有効応力の拡大図から分かるように単なる時間スケールの問題であり、境界条件や解析プログラムの問題ではない。

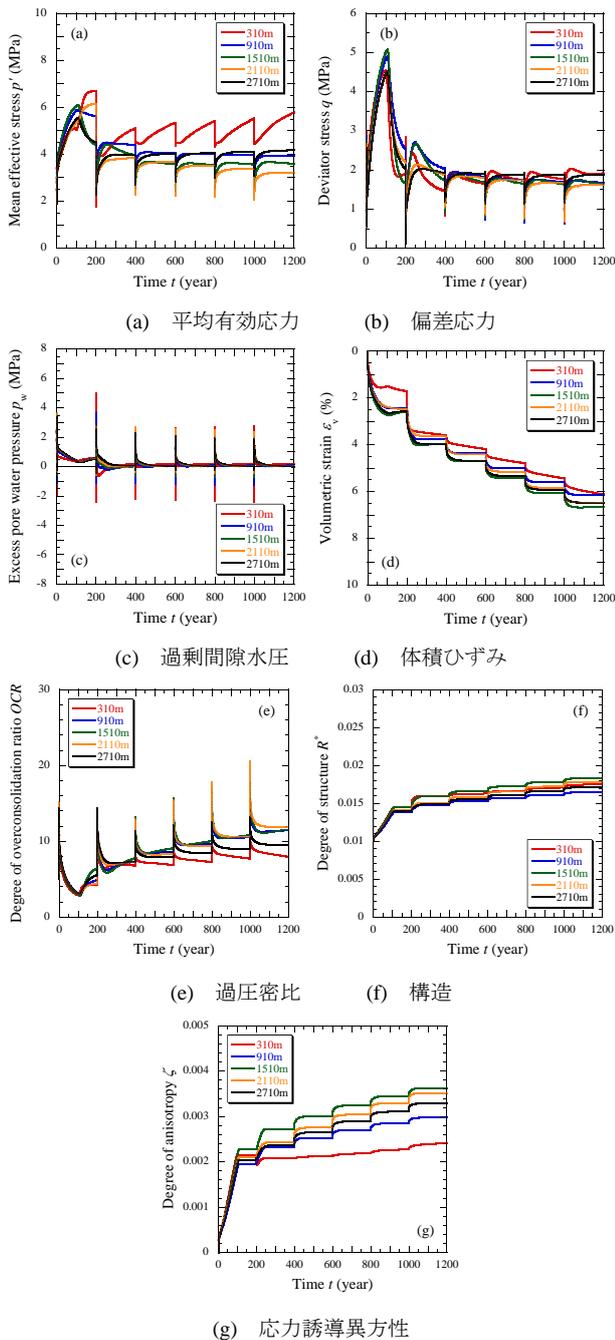


図 11 プレート境界断層の力学挙動 (千二百年後)

ここで、プレート境界断層で発生した体積ひずみに着目すると、プレートの沈み込み過程においても若干の体積圧縮挙動を示すことが分かる。一方、この間における構造と応力誘導異方性にほとんど変化は見られない。これは、プレート境界断層の上部で発生したせん断帯 (図 12) が、せん断変形をほとんど受け持ったためである。すなわち、プレート沈み込み過程で発生する体積ひずみの大部分は、動的外力に起因して発生した過剰間隙水圧の消散 (圧密) が寄与していると言える。言い換えれば、動的外力とせん断変形が同時に作用する場合においても、せん断帯が形成されると、その後のせん断変形はプレート境界断層の大圧縮に寄与しないと言える。また、千二百年で発生した体積ひずみは既に 6%にも達しているが、内部組織の変化を示す指標である構造や応力誘導異方性に顕著な喪失と発展は見られない。したがって、複数回の動的外力が海底岩盤に作用する場合、前節 2.1 と同様に内部組織を維持したまま、30%を超える体積ひずみが発生する可能性は高い。

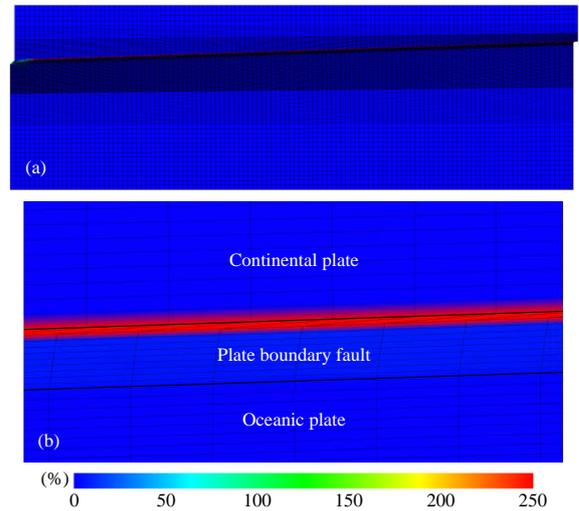


図 12 偏差ひずみ分布 (千二百年後); (a) 全体, (b) 拡大

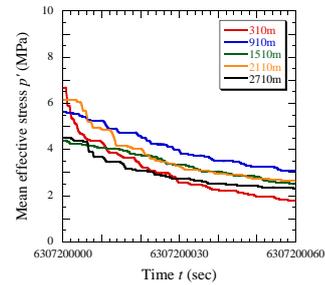


図 13 平均有効応力の拡大図 (二百年付近)

3. 結論

本稿では回転硬化型弾塑性構成式 Cyclic mobility model に基づく土・水連成有限変形静的・動的 FEM 解析プログラム「DBLEAVES」を用いた数値実験により、地震等による動的外力とプレートの沈み込み運動に伴うせん断変形がデコルマ形成に及ぼす影響を検証した。

- 1) プレート境界断層をプロトデコルマのような弾塑性材料とみなし、動的外力を再現した振動荷重を二百年に一度与えるサイクルを合計百回繰返した場合、プレート境界断層において体積ひずみが 20%以上発生するにも関わらず、その構造と異方性に顕著な変化は見られなかった。
- 2) プレーートの沈み込み過程で発生するせん断変形を海底岩盤に与えると、大陸プレートと接触するプレート境界断層の最上部で局所的にせん断帯が形成されることが判明した。さらに、せん断帯外部の材料はせん断変形による影響をほとんど受けないため、構造と異方性の喪失・発展も小さく、体積ひずみは 1%程度しか生じないことがわかった。
- 3) 動的外力とせん断変形を同時に再現した場合においても、上述した力学挙動と同様の傾向を示すことが判明した。これらの結果より、プレートの沈み込み運動で発生するせん断変形は、ランダム組織かつ高密度状態であるデコルマの形成要因から排除できる。すなわち、著者らが提案する「平均応力と偏差応力が共に変化する動的外力」がデコルマの形成要因である可能性は充分にあると言える。ただし、本数値実験は仮想的なパラメータを用いている上に、プレート境界断層の材料特性である不飽和の影響や温度・化学特性を考慮していない。今後は海洋堆積物試料を用いた室内要素試験より同定した材料パラメータと、不飽和材料の影響や地盤材料の温度・化学特性を考慮できる構成式を用いた数値実験を実施し、室内要素試験と数値実験の両面からより具体的にデコルマ形成メカニズムを検証する。

参 考 文 献

- 1) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, Vol. 42, No. 5, pp. 47-57, 2002.
- 2) Davis, E. E., Becker, K., Wang, K., Obara, K., Ito, Y. and Kinoshita, M.: A discrete episode of seismic and aseismic deformation of the Nankai trough subduction zone accretionary prism and incoming Philippine Sea plate, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 242, No. 1-2, pp. 73-84, 2006.
- 3) Kurimoto, Y., Yamamoto, Y., Sakaguchi, H., Zhang, F. and Saeda, Y.: Mechanical properties of soft sedimentary rock under K_0 and isotropic cyclic loading conditions, *Proceedings of the 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015.
- 4) Morgan, J. K. and Karig, D. E.: Décollement processes at the Nankai accretionary margin, southeast Japan: Propagation, deformation, and dewatering, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, No. B8, pp. 15221-15231, 1995.
- 5) Ujiie, K., Hisamitsu, T. and Taira, A.: Deformation and fluid pressure variation during initiation and evolution of the plate boundary décollement zone in the Nankai accretionary prism, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, No. B8, pp. 2398-8-14, 2003.
- 6) Xiong, Y., Zhang, S., Ye, G. and Zhang, F.: Modification of thermo-elasto-viscoplastic model for soft rock and its application to THM analysis of heating tests, *Soils and Foundations*, Vol. 54, No. 2, pp. 176-196, 2014.
- 7) Ye, B., Ye, G., Zhang, F. and Yashima, A.: Experiment and numerical simulation of repeated liquefaction-consolidation of sand, *Soils and Foundations*, Vol. 47, No. 3, pp. 547-558, 2007.
- 8) Zhang, F., Ye, B., Noda, T., Nakano, M. and Nakai, K.: Explanation of cyclic mobility of soils: Approach by stress-induced anisotropy, *Soils and Foundations*, Vol. 47, No. 4, pp. 635-648, 2007.