

K_0 および等方応力条件下で繰返し载荷を受ける堆積軟岩の力学特性

Mechanical properties of soft sedimentary rock under K_0 and isotropic cyclic loading condition

栗本悠平¹, 小枝幸真¹, 山本由弦², 阪口秀², 氏家恒太郎³, 張鋒⁴

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 海洋研究開発機構

3 筑波大学・生命環境科学研究科・地球進化科学専攻

4 名古屋工業大学・高度防災工学センター・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（デコルマ）形成時の力学特性を理解することは、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、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からデコルマへの変性過程における材料の力学特性やその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などの基礎的な研究が求められる。そこで、本研究ではデコルマ形成メカニズムを検討する初期段階として、境界断層を形成する岩盤の基礎的な力学特性を把握するために、房総半島の海溝斜面被覆層から採取した未固結シルト岩を用いて K_0 および等方応力条件下での静的载荷試験と動的载荷試験を実施し、試料の力学特性と試験前後における内部組織を観察した。その結果、未固結シルト岩は動的载荷を受けると塑性変形を生じるにも関わらず、その内部組織には変化がないことを確認した。

キーワード：デコルマ，繰返し载荷，帯磁率異方性

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が望まれている。しかし、これまでの巨大地震に関する研究は、遠方観測データや非常に古い地質記録等からの類推によるものがほとんどでありマグニチュード 8 クラスの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などの基礎的な研究が求められる。

このような背景のもと、近年ではプレート境界断層の掘削を目指した国際海洋掘削計画が実施されている。ODP (Ocean Drilling Program) 第 190 次航海では、図 1 に示す室戸岬沖の南海トラフにおいて掘削調査が実施された。図 2 に示す試料より、将来的にプレート境界断層になると考えられる Site1173 のデコルマ相当層準（以下、プロトデコルマ）では自生鉱物粒子による粒子間セメンテーションが存在し、低密度な状態であることが確認されている。また、Site1174 のプレート境界断層に相当するデコルマ内部では、異常とも言える体積変化を生じ、高密度な状態であることがわかっている^{1),2)}。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の月日を経てデコルマへ変化する過程で崩壊し、高密度な状態に移行し

たことを意味している。一方、採取されたデコルマのコア試料を観察すると、図 3 に示すように数 mm～数 cm 程度の角礫から形成されており、その角礫内部においてはランダム組織を保持していることが確認されている。これは、デコルマを形成する角礫内部においてはせん断を受けた形跡が認められないことを意味している。

地盤工学においては、セメンテーションや構造の崩壊は一般的にはせん断に起因するとされている。しかし、デコルマを形成する角礫内部はランダム組織を保持したままセメンテーションが崩壊して高密度な状態であり、この一般認識と矛盾している。一方、既往の研究から低周波数を持つ地震によりデコルマ層準において瞬間的な流圧変動が発生している³⁾こと、緩い砂は小さな振動により大圧縮する⁴⁾ことがわかっている。そこで、著者らは従来の認識とは大きく異なるデコルマ形成メカニズムの仮説を立てた。すなわち、ランダム組織を保持したままセメンテーションや構造が崩壊する原因は、静的なせん断圧縮だけでなく、図 4 に示すようなプレート境界で頻発する地震やプレート境界断層内部の局所的な材料破壊、流圧の変動等により発生する「平均応力と偏差応力が共に変化する動的外力」にあると仮定した。なお、デコルマの異常とも言える高密度化が静的なせん断圧縮に起因する可能性は、既に数値実験により検証⁵⁾されており、否定されている。

本稿では、デコルマ形成メカニズムを検討する初期段階として境界断層を形成する岩盤の静的、および動的挙動などの基礎的な力学特性を把握するために、予備試験として房総半島の海溝斜面被覆層から採取した未固結シルト岩を用いて K_0 および等方応力条件下での静的载荷試験と地震等による動的外力を想定した動的载荷試験を実施し、試験前後における試料の力学特性と内部構造・組織を観察した結果を報告する。

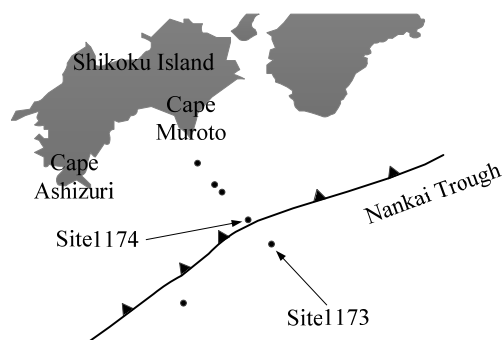


図1 ODP Leg190の掘削地点（黒丸）

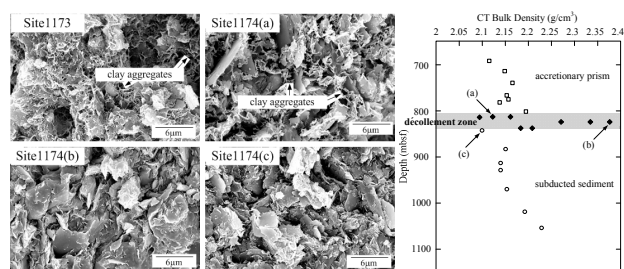


図2 Site1173 および Site1174 の内部組織（SEM）と密度分布²⁾

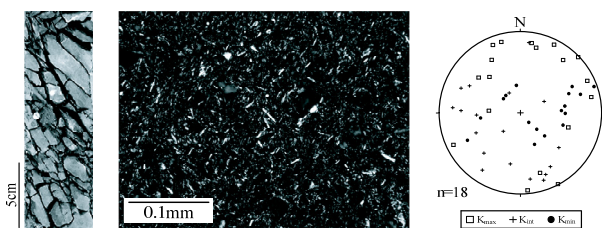


図3 Site1174 の断層角礫および内部組織（AMS）²⁾

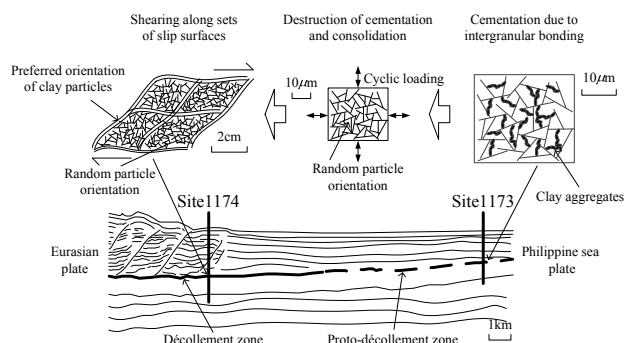


図4 南海トラフの断面および海底堆積物内部構造の概略図
(文献2)に加筆)

2. 試験概要

本研究では「デコルマは動的外力により形成される」という仮説を検証するために、プロトデコルマとデコルマの原位置応力状態を再現可能、すなわち、最大 20MPa の高圧下で最大 10Hz という高周波数の異方・等方動的荷重を載荷できる 2 種類 (K_0 載荷仕様と等方応力載荷仕様) の試験装置⁶⁾を開発した。なお、上記試験装置を用いた室内要素試験はあくまでも試料の変形や体積変化などの巨視的特性を把握するものであり、試料内部の微視的構造・組織や各種物理特性の変化を評価することは困難である。そこで、磁場を与えて粒子の配列方向を測定する帯磁率異方性 (AMS) 測定^{6),7)}に着目し、載荷前後における試料内部の組織変化を観察することで微視的变化を評価できる環境を整えた。

2.1 試験試料

本試験では房総半島に露出し、約 300 万年前に海溝斜面に堆積した被覆層から採取した未固結シルト岩を使用する。試験試料に房総半島の未固結シルト岩を使用する理由は、房総半島が南海トラフと同様にプレート沈み込み境界であることに加え、南海トラフ試料と同程度に圧密されており、物性が近いためである。なお、コアリングは地層面と直交方向に行い、その後は図5に示すように直径 25mm × 高さ 20mm に端面整形した。整形後は試料の状態を保つために真空パック状態で冷蔵保管した。

表1に K_0 および等方応力条件下での静的・動的载荷試験に用いた未固結シルト岩の物性値を示す。これより、同じサンプル箇所から採取された未固結シルト岩であるにもかかわらず、実施する試験により物性値が異なることがわかる。この要因としては、採取した時期が異なること、たとえ同じサンプルブロックから整形した場合でも箇所により堆積期間が数万年と異なるためである。これは、後述する帯磁率異方性の初期値にも影響を与えている。ただし、本試験の目的は載荷による試料の変形特性と内部構造・組織の変化を試験前後で連続的に把握することにあり、初期物性値の違いは問題ないと考えられる。

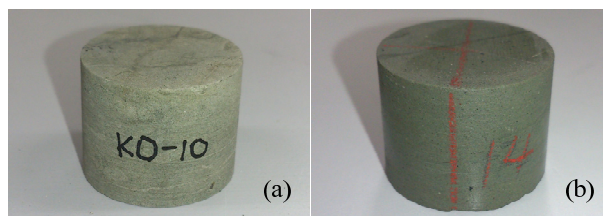


図5 未固結シルト岩；(a) K_0 条件, (b)等方応力条件

表1 未固結シルト岩の物理特性

	Unit	K_0 condition	Isotropic condition
Soil particle density ρ_s	g/cm ³	2.64	2.66
Dry unit weight γ_d	kN/m ³	14.4	11.9
Void ratio e	-	0.80	1.20
Moisture content w	%	25.9	43.2
Degree of saturation S_r	%	85.7	96.2

3. 静的載荷試験（予備試験）

3.1 試験条件

動的載荷試験に先立ち静的載荷試験を実施し、 K_0 状態と等方応力状態で圧密降伏応力 p_c と静的荷重が未固結シルト岩の内部構造・組織に与える影響を把握する。 K_0 条件下では、ひずみ速度 0.01%/min で最大鉛直応力 20MPa の定ひずみ圧密試験、等方応力条件下では表 2 に示す試験条件で段階圧密試験を実施する。なお、両試験では不飽和状態の未固結シルト岩を用いる。

表 2 静的載荷試験（段階圧密試験）条件

Loading condition: 60 minutes/stage	
Loading: 0.2 → 0.4 → 0.8 → 1.6 → 3.2 → 6.4 → 12.8 → 16	
Unloading: 12.8 → 6.4 → 3.2 → 1.6 → 0.8 → 0.4 → 0.2 → 0.1	
Unit: MPa	

3.2 試験結果および考察

図 6 に各応力条件下で得られた未固結シルト岩の圧密曲線を示す。図 6(b) に示す段階圧密試験結果より、0.2～0.8MPa の低拘束圧下における間隙比が大きく変化していることがわかる。この原因は、試料の力学特性やばらつきでなく、試料寸法が直径 25mm×高さ 20mm である場合は試験装置の都合上、低拘束圧下で左右変位計が大きく変動するためであると考えられる。以上の結果より、本試験で用いる未固結シルト岩の圧密降伏応力は K_0 状態では 5～6MPa、等方応力状態では 4～6MPa と推定される。なお、静的載荷による試料の内部構造・組織の変化に関しては 4 章で述べる。

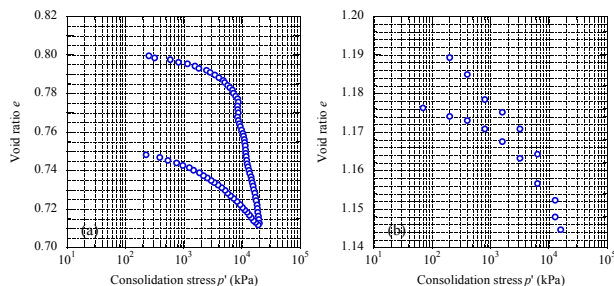


図 6 e - $\log p'$ 関係；(a)定ひずみ圧密試験，(b)段階圧密試験

4. 動的載荷試験および帯磁率異方性（AMS）測定

4.1 試験条件

動的荷重を受ける未固結シルト岩の力学特性と内部構造・組織の変化を把握するために、 K_0 動的載荷試験と等方動的載荷試験の 2 種類を実施する。ここで、 K_0 動的載荷試験とは実地盤の応力状態である K_0 条件下で試料に繰返し荷重を作用させる試験である。試験は圧密応力までは上端排水とし、動的載荷中は非排水条件で実施した。一方、等方動的載荷試験とは等方応力という特殊な応力条件下で試料に繰返し荷重を作用させる試験であり、水を媒体として等方応力状態を再現する。試験は圧密応力まで両端排水

とし、動的載荷中は K_0 動的載荷試験と同様に非排水条件で実施した。なお、両試験には静的載荷試験と同様に不飽和状態の試料を用いている。この理由としては、作用させる荷重を確実に有効応力として与えるためである。表 3 に静的載荷試験から得られた圧密降伏応力を基に設定した K_0 および等方動的載荷試験の試験条件を示す。なお、 K_0 および等方動的載荷試験は同条件で実施した。

本試験における応力経路を図 7 に示す。これより、設定荷重を精度良く制御していることが確認できる。また、圧密応力まで載荷後は約 1 時間荷重を保持し、動的載荷を加える。これは、変位が定常化しない状態で動的載荷を与えると、変位量が静的載荷、動的載荷のどちらにより発生したのか区別しにくいためである。

表 3 K_0 および等方動的載荷試験条件

Case	Consolidation stress (MPa)	Stress amplitude (MPa)	Frequency (Hz)	Number of vibration (times)
A	5	1	0.5	1000
B		4		
C	10	1		

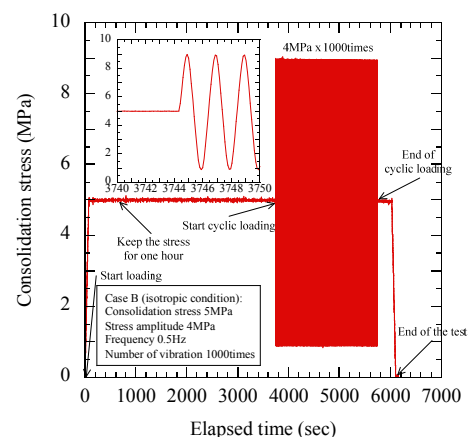


図 7 等方動的載荷試験の応力経路（代表例 CaseB）

4.2 試験結果および考察

図 8 に K_0 および等方動的載荷試験における鉛直変位～振動回数関係を示す。グラフの縦軸は振動開始直前の変位を 0mm としたときの鉛直変位の値である。図 8(a) に示す K_0 動的載荷試験における Case A と Case B の応力振幅の違いに着目すると、応力振幅が大きいほど動的載荷中の変位の増減幅が大きく、載荷後の塑性変形量も大きく発生することがわかる。さらに、Case A と比較して応力振幅が大きい Case B に着目すると、振動回数が 670 回を過ぎた辺りから急激に変位増加していることが確認できる。これは、 K_0 条件下で応力振幅が大きな動的荷重を作用させたことにより、金属の疲労破壊に似た現象が発生したためと考えられる。この現象は同条件下で複数回確認しているが、今後も継続的に試験を実施し、再現性を確認する必要がある。また、 K_0 条件下での Case A と Case C の初期圧密応力の違いに着目すると、圧密応力が大きいほど動的載荷中の変位増減幅は小さいが、載荷後の塑性変形量は大きいことが分

かる。この要因としては、Case Cでは二次圧密により振動開始直前も変位が一定になることはなく、動的载荷中もその影響を強く受けたためであると考えられる。

次に、図 8(b)に示す等方動的载荷試験における Case A と Case B の応力振幅の違いに着目すると、応力振幅が大きいほど振動中の変位の増減幅は大きく、動的载荷後の塑性変形量も大きいことがわかる。ただし、 K_0 動的载荷試験と異なり、急激に変位が増加する疲労破壊現象は確認されなかった。これは、等方応力条件下で繰返し荷重を作用させたためで、せん断応力が発生しないことが原因と考えられる。また、Case A と Case C の初期圧密応力の違いに着目すると、圧密応力が大きいほど振動中の変位の増減幅が小さく、振動後の塑性変形量も小さいことがわかる。

図 9 に静的・動的载荷試験前後における試料の内部組織を磁率異方性 (AMS) 測定により検討した結果を示す。これより、荷重载荷前の試料は堆積過程の影響を受け、面構造が既に発達しているが、応力条件下によらず静的・動的荷重は未固結シルト岩の AMS 変化に寄与していないと言える。

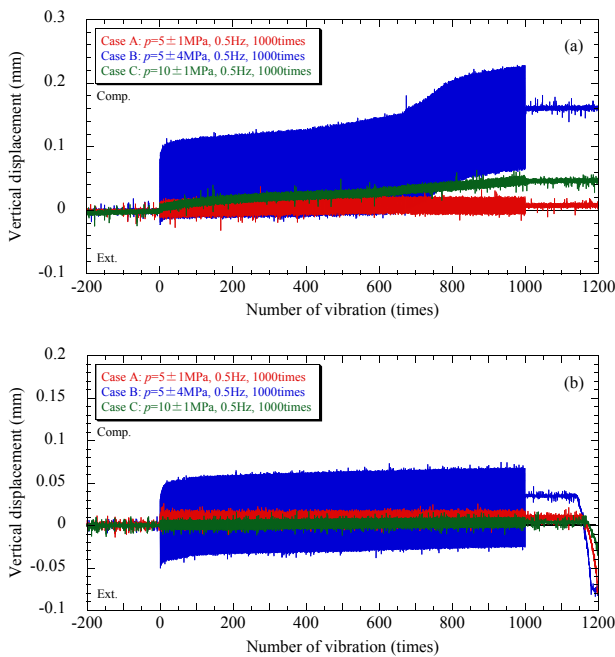


図 8 動的载荷試験結果 (鉛直変位～振動回数関係) ; (a) K_0 条件, (b)等方応力条件

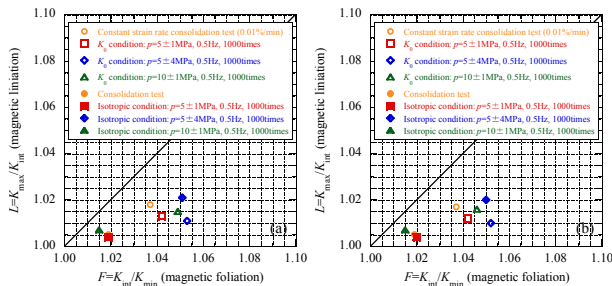


図 9 帯磁率異方性測定結果 ; (a)試験前, (b)試験後

5. まとめ

本研究で提案するデコルマ形成メカニズムの仮説を検証するために、その初期段階として未固結シルト岩を用いた予備試験を実施した。その結果、全試験ケースにおいて動的载荷を受けると塑性変形するにも関わらず、内部組織の状態を表す指標の一つである AMS に変化は見られなかった。さらに、 K_0 条件下における動的载荷試験では、動的载荷中に金属の疲労破壊に似た現象が発生し、急激な変位増大が見られた。これは、内部組織を保持したまま急激な密度増加を意味し、自然のデコルマから類推される力学特性と全く同じである。言い換えれば、堆積物試料が地震等の動的外力を受ける場合は内部組織を保持したまま大圧縮するという自然のデコルマと同様の現象を見出した。よって、本研究で提案する試験装置、および試験方法により、デコルマの形成メカニズムを解明する糸口を見つける可能性が示された。ただし、今回は試料が初期に有する異方性が大きく、動的载荷過程で発生した変位量が極めて小さいために、AMS に変化が生じなかった可能性も考えられる。今後は異方性を有していない再構成の藤森粘土を作製し、圧密量および初期異方性をコントロールした試料を用いて载荷試験を実施し、仮説の検証を継続する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.2398-1-14, 2003.
- 3) 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.
- 4) Asaoka, A.: Consolidation of clay and compaction of sand -An elasto-plastic description-, Keynote lecture, 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Leung et al, Singapore, Vol.2, pp.1157-1195, 2003.
- 5) Kurimoto, Y., Yamamoto, Y., Sakaguchi, H. and Zhang, F.: Numerical experiments on the influence by shear deformation to the formation of décollement zone, 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, Sendai, Japan, pp.150-153, 2014.
- 6) 栗本悠平, 小枝幸真, 張鋒, 阪口秀, 氏家恒太郎, 山本由弦: 動的繰返し荷重による堆積軟岩の帯磁率異方性発達の実験検証, 第 25 回中部地盤工学シンポジウム, pp.91-94, 2013.
- 7) Nakai, M.: Anisotropy of magnetic susceptibility (Explanation of geologic term), *Earth Science (Chikyū Kagaku)*, Vol.54, pp.279-280, 2000.