

# 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

## Experimental study on development of AMS in soft sedimentary rock subjected to cyclic loading

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

1 名古屋工業大学・大学院・創成シミュレーション工学専攻

2 名古屋工業大学・高度防災工学センター・E-mail : cho.ho@nitech.ac.jp

3 海洋研究開発機構

4 筑波大学・生命環境科学研究科・地球進化科学専攻

### 概 要

地盤材料の力学挙動について、せん断を中心に議論されることがほとんどであるが、せん断だけでは解釈できない現象も報告されており、室内試験による更なる基礎的な研究が求められる。また、圧密沈下や圧密降伏応力を求める場合は一方向の静的荷重（圧密試験や三軸試験）が主流であり、液状化試験以外においては一方向の動的繰返し荷重による地盤材料の力学挙動を調べる研究は極めて稀である。本稿では、実地盤における  $K_0$  状態（供試体の半径方向に変位が生じないような応力状態）での動的繰返し荷重を可能とした  $K_0$  動的繰返し荷重装置の概要と、房総半島で採取したシルト岩を用いた静的荷重試験（定ひずみ圧密試験）、および  $K_0$  状態での動的繰返し荷重試験の結果を報告する。また、試験後に静的荷重と  $K_0$  動的繰返し荷重を受けた供試体の帯磁率異方性を測定した結果、堆積軟岩に動的繰返し荷重を作用させると初期異方性（堆積・圧密過程により発達）が更に発達する傾向を確認した。

キーワード：動的繰返し荷重，帯磁率異方性，堆積軟岩

## 1. はじめに

我が国の地盤は四つのプレート境界上に位置し、その地層条件から度重なる巨大地震の来襲に見舞われている。一般的に地震活動はプレート運動に伴う岩石破壊が影響しており、プレートが沈み込む際に発生する堆積物などの変形・破壊過程の解明が求められている。

プレート境界である南海トラフでは近い将来、高い確率で巨大地震が発生すると予測されており、日・米・欧が参加する国際深海掘削計画（Integrated Ocean Drilling Program）第190次航海による深海掘削が実施されている。Fig.1に示す掘削地点の中でも、Site1173とSite1174はフィリピン海プレート（海洋プレート）がユーラシアプレート（大陸プレート）の下に沈み込む直前と直後の地点であることから、海洋型地震発生地帯の形成メカニズムを解明する上で重要な地点であると考えられている。

これまでの海洋掘削調査により、プレート境界に相当する巨大水平断層（デコルマ）ではある深度で低間隙な構造体（高密度状態）が確認されており、一方で将来的にプレート境界になると考えられるデコルマ相当層準（プロトデコルマ）では、高間隙な構造体（低密度状態）が確認され

ている。これは、プロトデコルマでは粒子間セメンテーションが存在するものの、デコルマへ変化する過程でこの粒子間セメンテーションが崩壊し、低間隙化することを意味している。また、採取された試料を観察すると、Fig.2に示すようにデコルマは数mm～数cm程度の角礫によって形成されており、その角礫内部においてはランダムファブリックを維持していることが確認されている<sup>1)</sup>。これは、デコルマ内部においてはせん断の形跡が認められないことを意味する。

著者らは、上述した従来の認識とは矛盾するデコルマの特異性（せん断変形に起因すると考えられてきたセメンテーションの崩壊とせん断変形を否定するランダムファブリックの保持）に着目し、デコルマ内部ではせん断変形が支配的でなく、ランダムファブリックを保持したままセメンテーションを崩壊させるのは「地震による疎密波等の動的外力」という従来の認識とは大きく異なる大胆な仮説を立てた。この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し、せん断荷重だけでなく高周波・高圧で動的繰返し荷重も載荷できる二種類（等方載荷仕様と  $K_0$  載荷仕様）の試験装置を（独）海洋研究開発機構（JAMSTEC）と共同で開発した。

これらの試験装置を用いて、地球深部探査船「ちきゅう」号により採集されたプロトデコルマ・デコルマ試料に種々の荷重を与え、荷重による両試料の内部構造の変化を世界で初めて評価し、デコルマ形成のメカニズム解明を試みる。

本稿では、実地盤に近い応力状態を再現した  $K_0$  動的繰返し荷重装置を用いて、未固結シルト岩を対象に静的荷重と動的荷重（地震による疎密波を想定）を載荷させ、載荷後における供試体の巨視的・微視的挙動について述べる。

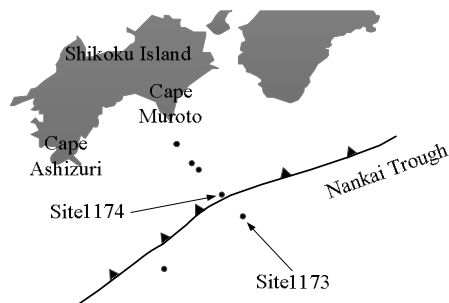


Fig.1 ODP Leg190の掘削地点（黒丸）

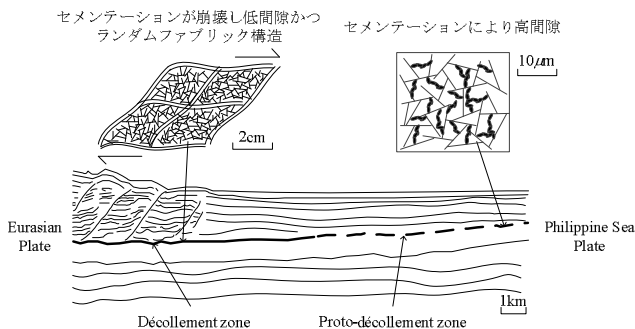


Fig.2 岩石内部構造の概略図

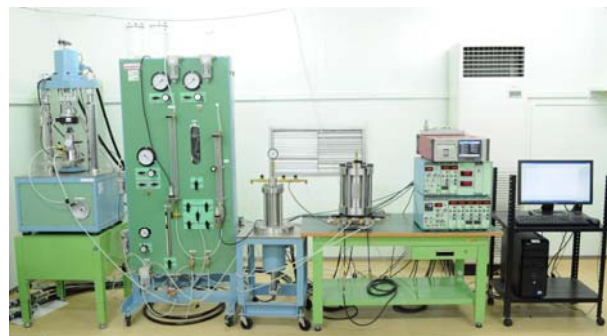
## 2. 試験概要

2012年に名古屋工業大学に導入された  $K_0$  状態での動的繰返し荷重を可能とした  $K_0$  動的繰返し荷重装置の概要と、房総半島で採取したシルト岩を用いた動的繰返し荷重試験について説明する。なお、等方動的繰返し荷重が可能な試験装置の概要、および試験結果については西村らの別報<sup>2)3)</sup>を参照にされたい。

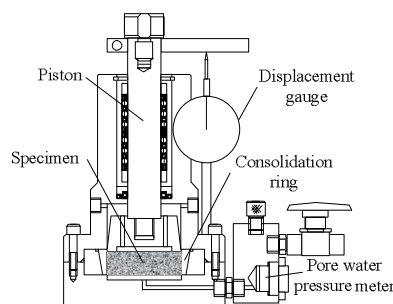
### 2.1 $K_0$ 動的繰返し荷重試験

$K_0$  動的繰返し荷重試験とは、試料に  $K_0$  状態での動的繰返し荷重を作用させる試験である。Fig.3に  $K_0$  動的繰返し荷重装置の概要図を示す。本試験装置は、圧密リングにより  $K_0$  状態における動的繰返し荷重が可能である。さらに、圧密リングと供試体側面間に発生する摩擦力の影響を無くすために、供試体と圧密リングの側面間にグリースを挟んだ二枚のテフロンシートを設置し、厳密な  $K_0$  状態を再現している。また、供試体の上下に設置されたポーラスストーンにより、供試体の上下端からの排水が可能である。さらに、圧密時においては段階的な荷重（段階圧密試験）のみならず、一定のひずみ速度による荷重（定ひずみ）が

可能であり、予備圧密と動的繰返し荷重を連続的に実施することが可能である。Table1に  $K_0$  動的繰返し荷重装置の性能を示す。



(a) 動的繰返し荷重装置全体図



(b)  $K_0$  動的繰返し荷重装置詳細図

Fig.3  $K_0$  動的繰返し荷重装置

Table1  $K_0$  動的繰返し荷重装置の性能

	Unit	Value
Vertical load	kN	50
Vertical displacement	mm	5
Pore water pressure	MPa	1
Displacement volume	ml	5
Load amplitude	kN	25
Frequency	Hz	5
Rate of loading	mm/min	0.0001~0.1

### 2.2 試験条件

試験に用いたシルト岩は、房総半島に露出した被覆層（約300万年前に海溝斜面に堆積）から採取されたものであり、試料採取後にFig.4に示すように直径50mm×高さ20mmに整形を行った。Table2に  $K_0$  動的繰返し荷重試験に用いたシルト岩の物性値を示す。圧密降伏応力  $p_c$  を求めるための定ひずみ圧密試験（ひずみ速度0.002%/min）は飽和・排水条件下で、 $K_0$  動的繰返し荷重試験は不飽和・非排水条件下（設定拘束圧までは上端排水）で実施した。動的繰返し荷重試験に不飽和試料を用いた理由は、作用させる荷重を確実に有効応力として与える（間隙水圧を発生させない）ためである。Fig.5に定ひずみ圧密試験から得た  $e$ - $\log \sigma_v$  関係を示す。Fig.5より、シルト岩の圧密降伏応力は  $p_c=10\sim 15\text{MPa}$  であることを確認したため、この結果をもとに  $K_0$  動的繰返し荷重試験の試験条件を設定した。Table3に  $K_0$  動的繰返し荷重試験の試験条件を示す。



Fig.4 シルト岩 (左：房総半島に露出した被覆層, 右：整形後)

Table2 シルト岩物性値

	Unit	Value
Soil particle density $\rho_s$	$\text{g/cm}^3$	2.66
Dry unit weight $\gamma_d$	$\text{kN/m}^3$	14.8
Void ratio $e$	-	0.76
Moisture content $\omega$	%	27.4
Degree of saturation $S_r$	%	96.4

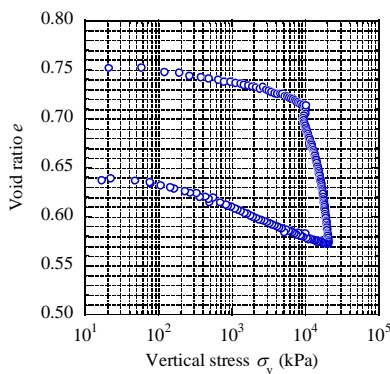


Fig.5  $e$ - $\log \sigma_v$  関係

Table3 試験条件

Case	Vertical stress (MPa)	Stress amplitude (MPa)	Frequency (Hz)	Number of vibration
A	10	3	5	100
B	15	3	0.5	100
C	15	3	5	100
D	15	6	5	100

### 2.3 帯磁率異方性

帯磁率とは、外部から与えた磁場に対して獲得した磁場強度であり、外部から与える磁場方向により帯磁率が異なる性質を帯磁率異方性 (AMS: Anisotropy of Magnetic Susceptibility) <sup>4)</sup> という。帯磁率異方性は、岩石に含まれる磁性鉱物粒子の形状や寸法、配列などにより生じると考えられ、堆積過程や様々な応力履歴を受けた地盤材料の内部組織の議論などに応用される。AMS 測定で用いられる代表パラメータを以下に示す。

$$F = \frac{K_{int}}{K_{min}} \quad (1)$$

$$L = \frac{K_{max}}{K_{int}} \quad (2)$$

式(1), (2)の  $K_{max}$ ,  $K_{int}$ ,  $K_{min}$  は、多方向から帯磁率を求めることにより得た最大帯磁率方向  $K_{max}$ , 中間帯磁率方向

$K_{int}$ , 最小帯磁率方向  $K_{min}$  ( $K_{max}$ ,  $K_{int}$ ,  $K_{min}$  は互いに直交) である。これらを用いて帯磁率の異方性度合いを  $F$ ,  $L$  で表す。 $F$ ,  $L$  以外にも異方性を表す数多くのパラメータが存在するが、本稿では帯磁率異方性を議論する上で代表的な  $F$ ,  $L$  を採用している。 $F$ ,  $L$  の大きさは、Fig.6 に示す近似楕円体の形状を表し、 $F$  が大きいほど扁平型、 $L$  が大きいほど伸長型となる。近似楕円体の形状が扁平型の場合は面構造、伸長型の場合は線構造が発達していると考えられる。

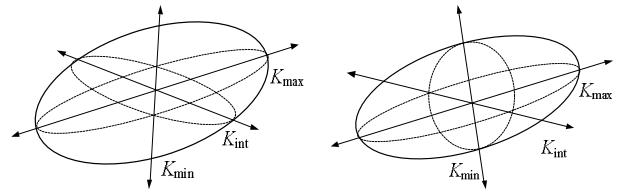


Fig.6 近似楕円体の形状 (左：扁平型, 右：伸長型)

## 3. 試験結果

### 3.1 $K_0$ 動的繰返し载荷試験結果

Fig.7 に Case C の拘束圧～振動回数関係を示す。Fig.7 より、新しく開発された  $K_0$  動的繰返し载荷装置は精度良く実験できる状況にあることが確認できる。

Fig.8(a)～(c)に  $K_0$  動的繰返し载荷試験における変位～振動回数関係を示す。Fig.8 における縦軸の Displacement (mm)は振動開始直前の変位を 0mm としたときの変位の値であり、圧縮側を正としている。Fig.8(a)より、拘束圧が大きいと振動中の変形量が小さく、振動後の塑性変形量 (残留変位) も小さくなっていることが確認できる。また、Fig.8(b)より、応力振幅が大きいと振動中の変形量は大きく、振動後の塑性変形量も大きいことが確認できる。さらに、Fig.8(c)より、振動数が少ないと十分に応力振幅分の荷重が供試体に伝わると考えられるため、振動荷重による塑性変形量が大きく発生することが確認できる。これは地盤材料の粘性による速度効果の影響であると考えられる。

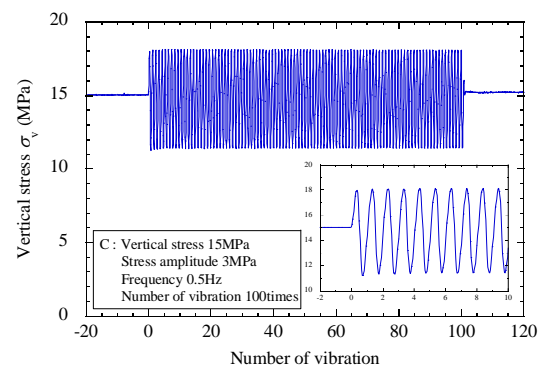
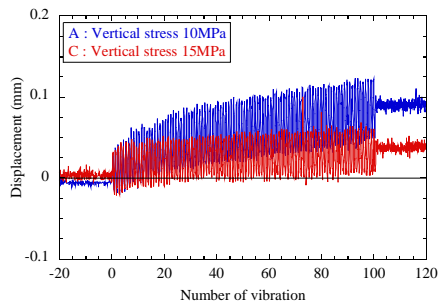
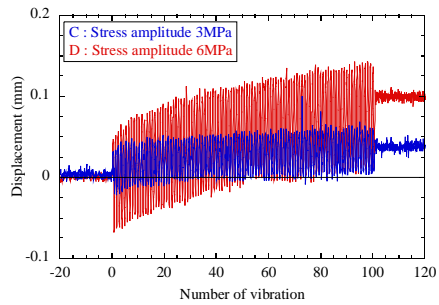


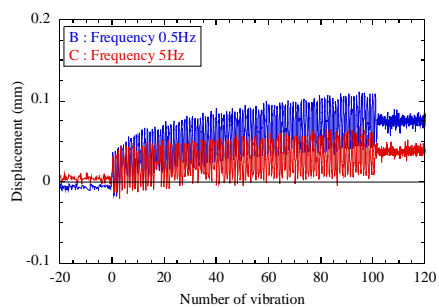
Fig.7 拘束圧～振動回数関係 (Case C)



(a) 拘束圧 (Case A, C) の比較



(b) 応力振幅 (Case C, D) の比較



(c) 振動数 (Case B, C) の比較

Fig.8  $K_0$ 動的繰返し载荷試験結果

### 3.2 帯磁率異方性測定結果

Fig.9に $K_0$ 動的繰返し载荷試験後の試料における帯磁率異方性(AMS)測定の結果を示す。Fig.9より、 $K_0$ 状態において静的载荷(最大21MPa,軸ひずみ10%程度)では面構造の顕著な発達を確認されないが、動的载荷では面構造が発達( $L, F$ 軸の45度線から離れるほど帯磁率異方性が強い)していることが確認できる。すなわち、帯磁率異方性の発達には静的载荷よりも、動的繰返し载荷による影響の方が大きいと考えられる。また、同じ応力振幅の条件下で、拘束圧が小さいと面構造が発達していることを確認できる。振動数に関しては、振動数の違いによる明確な面構造の発達の違いは確認されない。さらに、応力振幅に関しては応力振幅が小さいと面構造が発達している傾向を確認できる。ただし、供試体によっては静的载荷を受けた供試体と比較して面構造の発達が顕著に見られない結果(本稿には掲載していないが)も得られたため、今後追加実験を実施し、検証していく必要がある。

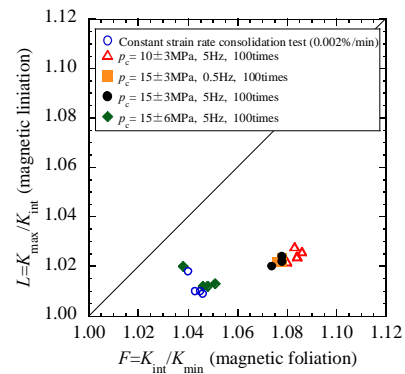


Fig.9 帯磁率異方性(AMS)測定結果

## 4. まとめ

未固結シルト岩を用いた予備試験より、岩石に動的繰返し荷重を作用させると、初期に有する堆積・圧密過程による異方性がより発達する傾向が確認され、静的载荷に比べ動的繰返し载荷が岩石の異方的力学挙動に与える影響は大きいことが示唆された。さらに、荷重条件(拘束圧・応力振幅・振動数)が帯磁率異方性の発達に与える影響も確認された。よって、本稿で提案した仮説を検証する目的で開発された試験装置、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は充分にある。一方、プレート境界付近で採取した試料を用いた種々の実験、例えば、岩石の帯磁率異方性に影響する動的繰返し荷重の拘束圧・応力振幅・振動数の定性的・定量的評価などはまだ行っていない。そこで今後は、個々の供試体に対する初期の帯磁率異方性(AMS)測定を実施した上で、拘束圧・応力振幅・振動数の影響を検証する。そして、既にIODPの承認を得て入手している貴重な試料に静的荷重や動的繰返し荷重を与え、岩石内部組織の異方性の発達に寄与する要因、およびセメンテーション崩壊のメカニズムやデコルマ形成メカニズムの解明を試みる。

### 参考文献

- 1) K. Ujiie, T. Hisamitsu and A. Taira: Deformation and fluid pressure variation during initiation and evolution of the plate boundary decollement zone in the Nankai accretionary prism, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 108, NO. B8, 2398, doi:10.1029/2002JB002314, 2003.
- 2) 西村友宏, 栗本悠平, 張鋒, 阪口秀, 氏家恒太郎, 山本由弦: 動的繰返し等方荷重による地盤材料の異方性発達の実験検証, 第24回中部地盤工学シンポジウム, 名古屋市, 地盤工学会中部支部, 2012.
- 3) 西村友宏, 栗本悠平, 張鋒, 阪口秀, 氏家恒太郎, 山本由弦: 動的繰返し等方荷重による地盤材料の異方性発達の実験検証, 第13回岩の力学国内シンポジウム, 那覇市, 岩の力学連合会, 2013.
- 4) Mutsumi Nakai: Anisotropy of magnetic susceptibility, Earth Science (Chikyu Kagaku) vol.54, pp.279-280, 2000.