

底泥のレオロジー特性に関する実験的研究

Huynh Ngoc Trien*・磯部雅彦**・小林智尚***・渡辺 晃****

1. 緒 言

底泥の移動現象を理解し定量的予測手法を確立するためには、底泥の力学的性質、すなわちレオロジー特性を明らかにすることが不可欠である。最近の研究では、底泥をビンガム流体あるいは粘弾性体と考える立場が主流となっている(鶴谷ら, 1986; Otsubo・Muraoka, 1988; Locat・Demers, 1988)。しかし、これらの研究で用いられている回転粘度計では、一方向のみの回転が与えられるだけであり、波作用下での往復運動とは異なる。

Maa (1986) や青木ら (1989) は往復運動に対する底泥のレオロジー特性を調べているが、底泥が粘弾性体であるという仮定のもとで解析を進めている。また、土質力学の分野における研究では、含水比が小さく(100%以下)、至も小さい(1%以下)場合が対象となっていて、海岸における状況とは異なっている(Yamamoto・Schuckman, 1982)。

本研究においては、カオリナイトを対象として、中高含水比の試料に海岸で生じるようなせん断変形を与えた場合、試料の力学的挙動を調べることを目的とする。このため、任意の動的せん断変形が与えられるような回転せん断試験機を開発し使用した。

2. 実験方法

(1) 底泥用動的回転せん断試験機

a) 原理

本研究で対象とするような高含水比においては試料が自立しないため、土質力学で用いられるような試験機を用いることができない。そこで新たに図-1に示するような底泥用動的回転せん断試験機を開発した。これは、大小の円筒の間に試料を満たし、いずれかの円筒をステッピングモーターによって任意の回転運動に制御した場合に、生じるせん断応力を測定するというものであり、以下の構造と原理から成り立っている。

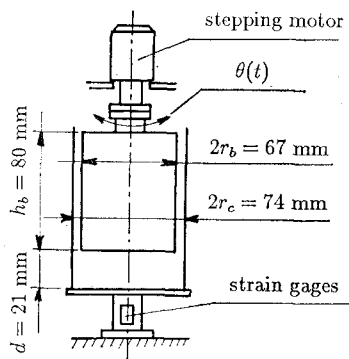


図-1 底泥用動的回転せん断試験機の概略図

1) 回転粘度計と同様な中心軸の一致する内外2つの円筒があり、内側の円筒を回転運動させる。2つの円筒間の空隙は、空隙に満たされた試料のせん断歪が一樣になるように3.5 mmと狭く取ってある。また、底面の影響を抑えるために、内側円筒の高さ h_b を半径 r_b に比べて大きめに取り、内側円筒の下のすき間 d を円筒側面のすき間 $r_c - r_b$ よりも大きく取ってある。

2) 円筒の運動はパーソナルコンピューターによって制御されたステッピングモーターによって与えられる。したがって、作成する信号により、波のみ、流れのみ、波と流れなどの状況下を含む任意のせん断歪運動が再現される。また、実際の円筒の運動を確認するため、回転変位も同時に実測されるようになっている。

3) せん断歪にともなうせん断応力は、円筒の支持軸に貼られたトルク測定用の歪ゲージによって測定する。内外の円筒のトルクのうち、内側の円筒にはステッピングモーターの振動が伝わるために精度が悪くなるので、外側円筒のトルクのみを測定した。

b) キャリブレーション

キャリブレーションは静的、動的の両方で行った。図-2は等間隔で段階的にトルクを増減させた場合の、トルクと歪アンブからの出力との関係を示すものである。若干のヒステリシスが見られるものの、後の議論に必要な精度内では直線的であるといつてよい。また、パネに

* 学生員 工修 東京大学大学院工学系研究科

** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 東京大学助手 工学部土木工学科

**** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

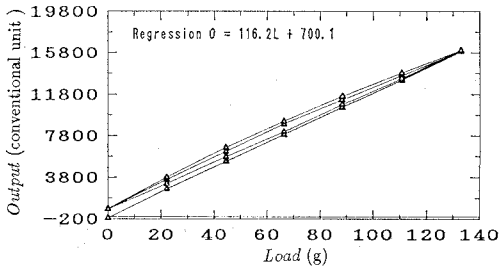


図-2 静的キャリブレーション結果

支えられたおもりを単振動させて動的に荷重をかけた場合の、おもりの位置と歪アンプからの出力との関係もほぼ線形であった。したがって、本実験においては静的載荷試験から得られたキャリブレーションカーブを用いてトルクを算定しさらにそれからせん断応力を計算した。

c) 底面の影響の評価

底面におけるせん断応力が側面におけるせん断応力に比べて無視できることを確認するため、試料の充填深さ h を変化させた実験を行った。一定歪速度の場合と正弦振動の場合について、外挿により底面におけるせん断力の寄与分を充填深さに換算すると、それぞれ 1.5 mm 分、および 2.6 mm 分となった。この値は本実験における充填深さ 70~80 mm 対して小さいので無視した。

(2) 実験条件

a) 内側円筒の運動制御

波のみ、および波・流れ共存場での底泥の挙動、また、提案されているレオロジーモデルの検証を念頭において、以下のような内側円筒の回転の制御を行った。

1) パターン S: 波運動を念頭においた正弦振動であり、円筒の回転振幅 θ は 0.5, 1.0 および 5.0° の 3 通りで、周期 T は 1~20 s である。なお、ソフトウェアの問題から一部のケースでは図-3 のように正弦波形からずれる部分があった。

2) パターン A: 歪速度が一定速さで増減する場合、すなわち歪加速度が一定の場合であり、主にビンガム性流体あるいは粘弾性体の仮定の適否を調べるためのものである。パターン A1 では、正の速度部分だけの繰り返しであり、パターン A2 (図-4) では正負を含む繰り返

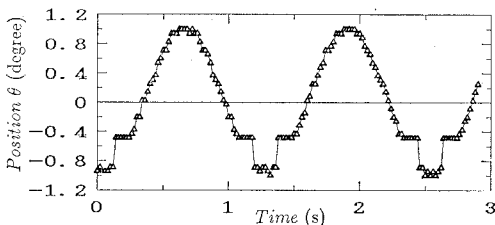


図-3 パターン S の内側円筒の動き: 正弦振動

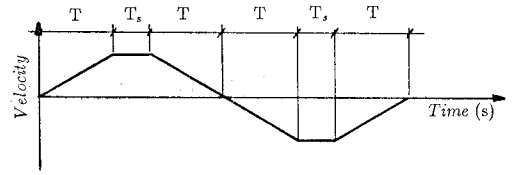


図-4 パターン A2 の内側円筒の動き: 一定加速度

しである。歪速度を変化させる時間 T は 10~50 s、一定値に保つ時間 T_s は 10~20 s であり、加速度 a は $0.05 \sim 1.0^\circ/s^2$ である。

3) パターン V: 両方向交互の一定速さでの回転であり、図-4 の縦軸を変位に変えた運動となり、弾性体としての挙動を調べるためのものである。これについても、変位量が正のみの範囲で変化するパターン V1 と、変位量が正負を繰り返すパターン V2 がある。一定速度の時間 T は 100~500 s、停止時間 T_s は 10~200 s であり回転速度 v は $0.01 \sim 0.2^\circ/s$ である。

4) パターン C および CW: 波・流れ共存場を念頭においた歪変化パターンで、正弦振動と、一定歪速度 (パターン C) あるいは一定歪 (パターン CW) を重ね合わせたものである。振動成分の振幅は $1 \sim 2^\circ$ 、周期は 1~20 s であり、回転速度は $0.5 \sim 2^\circ/s$ である。

b) 試料の種類

試料としては市販のカオリナイトと水道水を混合したものを用いた。含水比 w は 126, 145, 201, および 259% の 4 種類である。試料を外側円筒に入れてから、内側円筒を挿入した。別途行った含水比 200% のケースでは 40 時間以上放置して圧密が起こるようにしたが、他のケースでは試料充填後数時間で実験を開始した。同一の含水比に対する実験は前節で説明した順番に連続的に行ったので、攪乱状態はパターンごとに異なる。

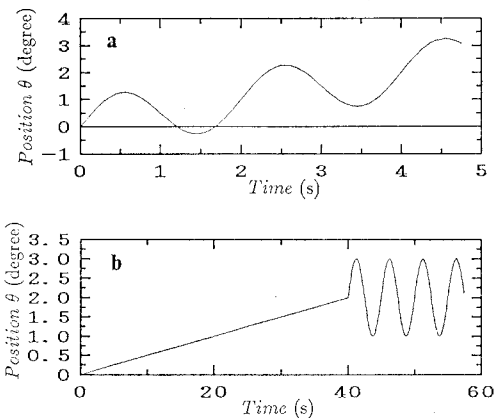


図-5 パターン C および CW の内側円筒の動き; a: 正弦運動+一定歪速度, b: 正弦運動+一定歪

以上、円筒の運動と試料の含水比との組合せにより、実験ケースは合計 100 ケースを越えた。

3. 実験結果

a) 正弦振動の場合

図-6 は、40時間放置して圧密した含水比 200% の試料に対する、始めの数周期間の回転角とせん断応力との関係を示している。図から明らかなように、繰り返しとともに応力は極端に低下する。これも重要な性質であるが、以後はある程度一定値に達した後の結果を示す。

図-7 は、含水比 126% の試料に対して周期を $T=1.25$ s に固定し、回転振幅 $\hat{\theta}$ を 0.5, 1 および 2° とした場合の回転角一せん断応力関係およびせん断歪速度一せん断応力関係を示す。また、図-8 および 9 は、異なる含水比の試料に対して振幅を 1° に保って、周期を変化させた場合の歪速度応力関係図である。これらの図において、試料がもし粘性流体（で円筒間隔が狭い）

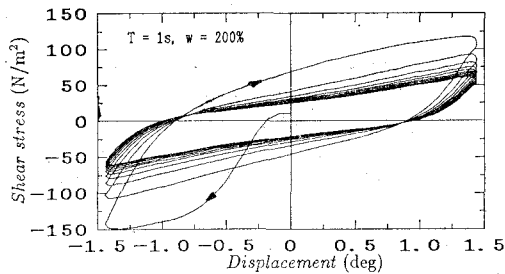


図-6 正弦振動に対する過渡的応答 (パターン S, $\hat{\theta}=1.44^\circ$, $T=1$ s, $w=200\%$)

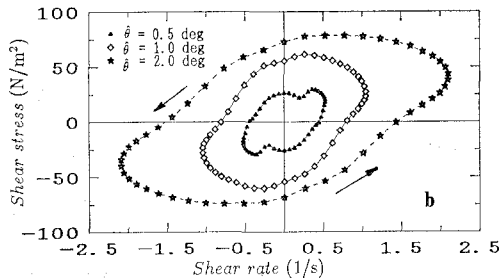
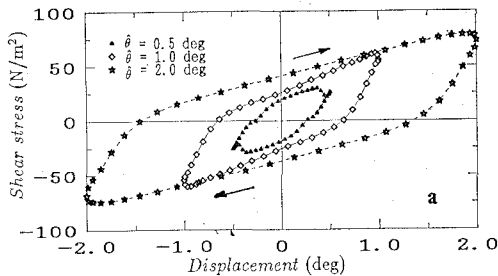


図-7 回転角一応力関係(a), および歪速度一応力関係(b) (パターン S, $T=1.25$ s, $w=126\%$)

なら原点を通る直線となり、もし弾性体なら縦軸と横軸を主軸とする楕円となり、さらに、粘弾性体なら主軸の傾いた楕円となる。また、ビンガム流体ならば、折れ線となる。実験結果はこれらのいずれにも正確にはあてはまらない。大まかにみると、含水比が小さいか周期が長い場合には軌跡は平行四辺形に近く、含水比が大きく周期が短い場合には楕円に近くなる。

b) 一定速度変化の場合

正のみの速度変化を繰り返すパターン A1 について、歪速度一応力関係の一例を 図-10 に示す。この場合始めの 1~2 サイクルは強いヒステリシスを示すものの、その後は縦軸の正の値を通る直線上を往復するようになる。これは従来からの実験でもみられ、ビンガム性流体の仮定と一致する。ところが、正負の速度範囲で繰り返

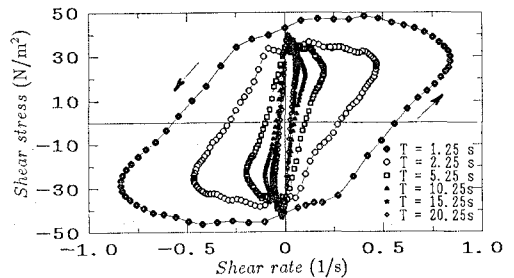


図-8 歪速度一応力関係 (パターン S, $\hat{\theta}=1^\circ$, $w=145\%$)

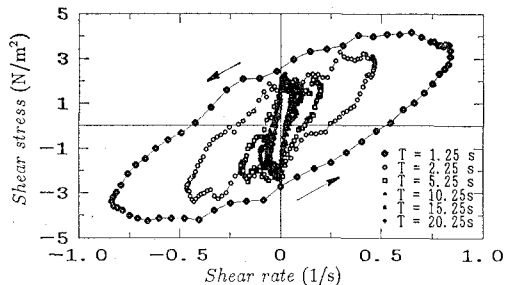


図-9 歪速度一応力関係 (パターン S, $\hat{\theta}=1^\circ$, $w=259\%$)

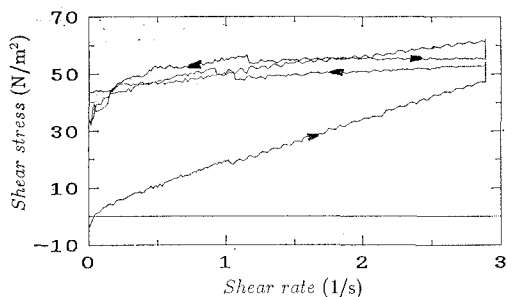


図-10 歪速度一応力関係 (パターン A1, $a=0.5^\circ/s^2$, $T=20.25$ s, $w=145\%$)

すパターン A2 では、図-11 に示すように、応答が周期的になってからもヒステリシスを示す。すなわち、ビンガム性流体のように、速度の符号（円筒の運動方向）が変化した瞬間に、せん断応力が同じ絶対値で逆符号の値まで変化するのではなく、変化は速いものの逆側に達するまである程度の時間を要することがわかる。

c) 一定速度の場合

一定速度で円筒を往復させるパターン V の結果の一例を図-12 に示す。この場合、せん断歪の最大値は 20% に達し、弾性体としての挙動からはほど遠い。むしろ、パターン A の結果と似ている。静止状態から歪を増した場合は、始めはせん断力が急激に増加し、その後増加率が急激に低下して、最後にはせん断力が増加しなくなる。

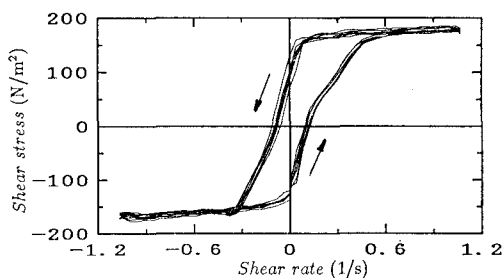


図-11 歪速度—応力関係 (パターン A2, $a=0.5^\circ/s^2$, $T=10.25$ s, $w=145\%$)

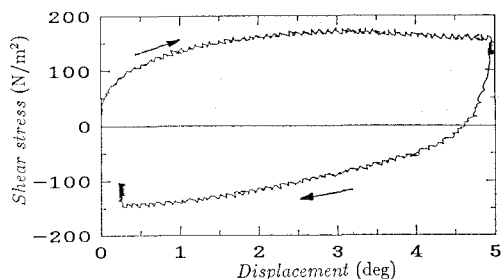


図-12 変位—応力関係 (パターン V1, $v=0.014^\circ/s$, $T=360$ s, $w=126\%$)

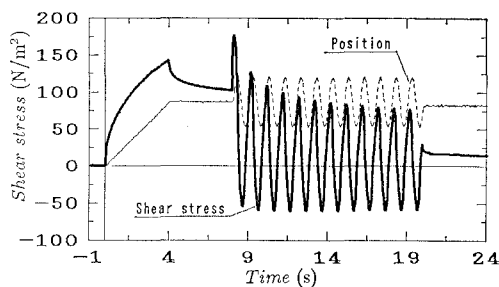


図-13 歪速度—応力関係 (パターン CW, $\theta=2^\circ$, $\hat{\theta}=1^\circ$, $T=1.25$ s, $w=126\%$)

そして、回転方向が変わるとその逆が起こる。

d) 複合運動の場合

上述に関連して、図-13 に示すパターン CW のように初期歪を与えた後に正弦振動を加えた場合、数周期の後に初期歪の影響は消え、せん断応力はほぼ 0 点を中心に変化するようになる。

パターン C のように一定速度の回転（流れ成分）と正弦振動（波成分）を加えた場合は、両者の相対的大きさによって結果が非常に異なる。まず、流れ成分が小さい場合は、図-14 のようにパターン S の正弦振動とほぼ同じ結果を得る。振動成分によって回転方向が変化する範

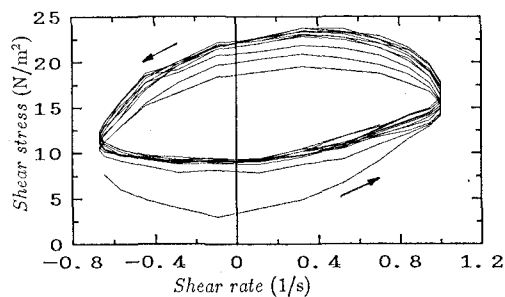


図-14 歪速度—応力関係 (パターン C, 定常速度成分が振動成分より相当に小さい場合, $v=1^\circ/s$, $\theta=1^\circ$, $T=1.25$ s, $w=259\%$, 縦軸の絶対 0 は不明)

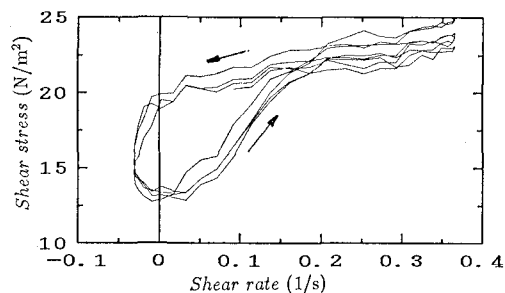


図-15 歪速度—応力関係 (パターン C, 定常速度成分が振動成分よりやや小さい場合, $v=1^\circ/s$, $\theta=1^\circ$, $T=5.25$ s, $w=259\%$, 縦軸の絶対 0 は不明)

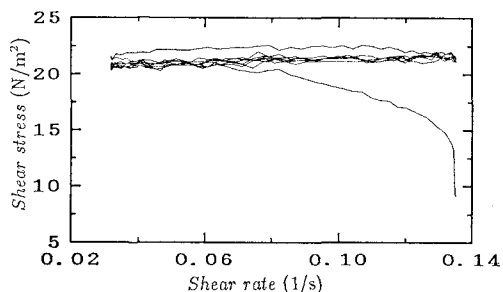


図-16 歪速度—応力関係 (パターン C, 定常速度成分が振動成分より大きい場合, $v=0.5^\circ/s$, $\theta=1^\circ$, $T=20.25$ s, $w=259\%$, 縦軸の絶対 0 は不明)

囲内で、流れ成分が若干大きくなると、図-15のように歪速度とせん断応力との関係の履歴が大きく変わってくるが、図-11の一部を取ったと考えると理解できよう。流れ成分をさらに大きくし、振動成分を加えても回転方向が変化しないようになると、図-16に示すように、せん断応力は振動成分によって多少変化するもののほぼ一定値を取るというよい。すなわち、図-11の右上の、せん断応力がわずかにしかせん断速度とともに増加しない部分に対応している。

4. 考 察

実験結果はパターンによって相当異なっているように見える。しかし、ヒステリシスが存在することは共通した特徴である。これが波エネルギーの減衰と関係することは確実であるが、定量的評価を行うには、今後波と底泥との相互作用を取り入れた解析を行う必要がある。

レオロジー特性に関して、せん断歪の最大値が比較的大きくなるパターンA、V、Cについては、ある程度統一的な捉え方ができそうである。すなわち、まず、パターンAに対する図-11が基準となる。パターンVについては、パターンAと比較して速度の変化を不連続的に急激に行ったものであると解釈すれば、せん断応力が歪速度の方向が変わったところで急激に変化し、その後はほぼ一定となることが理解できる。また、パターンCおよびCWについては、パターンAの一部であると考えれば、せん断応力の変化が理解できる。

このような挙動を示す機構としてはカオリナイト粒子の配列の変化が考えられる。初めに左右対称に配列していた粒子が、初期の小さなせん断歪によって、歪に抵抗する方向に接触点を多く持つ配列に変化する。この段階まではせん断応力が急激に変化してある一定値に至る。その後さらにせん断歪が増加すると、たとえば上層の粒子が下層の粒子を飛び越えて大せん断変形を実現することになる。このときにはもはや粒子の配列は全体として定常的なパターンになっているので、せん断応力は増加しない。そして、逆向きのせん断運動が起こり始めると、その方向のせん断運動に対応した粒子の配列になるまで、せん断応力が変化するというものである。

正弦振動を与えるパターンSについては、歪・歪速度とせん断応力との関係が他のパターンと異なっている。これは、せん断歪の最大値が比較的小さなことや、時間スケールが比較的小さいことと関係していると考えられる。しかし、含水比が201%以下の試料については図-11におけるパターンAの結果のうち、ヒステリシスが起る部分のみの範囲の挙動と似ていると言える。含水比259%の試料については、粘性流体としての性質が徐々に強くなり、また、境界層厚が円筒間距離に比べ

て薄いので、速度とせん断力との位相差により歪速度応力関係図が楕円となるのであろう。

5. 結 語

本研究においては、底泥のレオロジー特性を実験的に把握するため、ステッピングモーターをパーソナルコンピュータによって制御することにより、任意のせん断歪の時間変化を与えられるような底泥用動的回転せん断試験機を開発・試作し、試用した。

まず、キャリブレーションについては、静的および動的のいずれに対してもほぼ線形的な関係が得られた。次に、代表的な4種類のせん断歪の時系列パターンを選び、126%から259%までの含水比のカオリナイトを用いて実験を行った。まず、歪の最大値が大きくなる場合には、パターンAに対する図-11に示すような、ヒステリシスを含むせん断歪速度-せん断応力関係が特徴的である。このヒステリシスについては波の減衰などと関係する重要な要素であると考えられる。パターンVやCについてはそれと類似したものまたはその一部として理解される。歪の最大値がそれほど小さくなく、正弦振動するパターンSについては、粘性流体としての挙動に近づく傾向がみられた。

せん断歪・歪速度とせん断応力との関係について、実験結果を説明する試みを行ったが、今のところ推測の域を出ない。今後、さらに目標を明確にした実験条件を設定し、データの蓄積を行うとともに、考察を進めることによって、カオリナイトのレオロジー特性を明らかにする必要がある。さらに、カオリナイト以外の物質についても取り扱わなければならない。

謝辞：本研究には文部省科学研究費一般研究(C)（代表者東京大学磯部雅彦）による研究補助をうけたことをここに記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 青木 徹・柴山知也・佐藤慎司(1989)：正弦振動型同心二重円筒を用いた底泥の粘弾性係数の測定例，第44回年講概要集，2，pp. 800~801。
- 鶴谷広一・中野 晋・高濱 潤(1986)：回転粘度計による底泥の流動特性の検討，港研資料，No. 566，29 p。
- Locat, J., and D. Demers (1988)：Viscosity, yield stress, remolded strength and liquidity index relationship for sensitive clays, *Canad. Geotech. J.*, No. 25, pp. 799~806。
- Maa, P. Y. (1986)：Waves over mud: Modelling erosion, *Third International Symposium on River Sedimentation*, pp. 588~601。
- Otsubo, K., and K. Muraoka (1988)：Critical shear stress of cohesive bottom sediments, *J. Hydraulic Engineering*, Vol. 114, No. 10, pp. 1241~1256。
- Yamamoto, T., and B. Schuckman (1982)：Experiments and theory of wave-soil interaction, *J. Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 110, No. 1, pp. 95~112。