

平成 25 年度研究実施

(一財)港湾空港総合技術センター研究開発助成

助成番号 : 平成 25 年 1 月 22 日付 第 12-6 号

研究開発項目 : (一般) ⑥建設副産物リサイクルに関するもの

高含水比の地盤材料の 力学特性の解明

平成 26 年 4 月 30 日

北海道大学大学院 工学研究院
環境フィールド工学部門 地盤物性研究室

田中 洋行

目 次

1. はじめに	1
2. 既往の研究	1
2.1 粘度計	1
2.2 考えられる原因（粘度計の特殊性）	4
3. 用いた試験と試験装置.....	5
3.1 用いた試料	5
3.2 セン断試験による試験.....	5
3.3 回転粘度計による試験.....	6
4. セン断試験による結果.....	7
4.1 ベーンブレードを用いたセン断試験.....	7
4.2 円柱における材質の違いが強度に与える影響.....	7
4.3 形状が強度に与える影響.....	8
4.4 回転速度の影響.....	10
4.5 拘束条件が強度に与える影響.....	11
5. 回転粘度計による結果.....	12
6. まとめ	17
7. 参考文献	17

1. はじめに

コンテナ輸送における熾烈なコスト競争に生き残るためには、コンテナ船の大型化は避けられず、世界中で大水深の岸壁を有するコンテナターミナル基地の建設が進んでいる。我が国においても、ロジステック基地としての世界的なハブ港湾の地位を守るべく、ハイパー中枢港湾として京浜および阪神地区を選出し、日本における国際ハブ港湾としての機能を満足すべく、重点的に予算を投資している。また、我が国の地形は急峻であり、港湾は河口に位置していることが多い。したがって河川から運ばれる土砂によって航路の埋没を防ぐためには、定期的に航路浚渫を行う必要がある。このような港湾施設の大水深化、あるいは航路の水深を維持管理するために、毎年大量の土砂が発生し、その処分が社会的な大きな問題となっている。航路浚渫土は一般に含水比が高く、地盤工学の見地からみると、建設材料に適しているとは言えない。浚渫土砂を有効に活用するためには、その力学特性を適切に把握する必要がある。このような社会的背景のもと、本研究は高含水比の粘性土の力学特性を明らかにすることを目的とする。なお、本研究の成果は、最近問題となっている豪雨によって発生した土石流の到達範囲の予測にも有効である。さらに、海上で生産された原油やガスは、海底パイプラインによって運ばれるが、その時に大きな問題となっている海上地滑りの予測にも、本研究の成果は生かされる。

2. 既往の研究

2.1 粘度計

高含水比状態の土砂の力学特性は、もともと水理学の分野でその研究が進んでいる。水で代表される液体は Newton 流体と呼ばれ、せん断速度に比例して粘性が増加する性質を有する。したがって、水理学の分野では、川底や海底から舞い上がった土粒子が水に多く含まれることによって、流体の粘性がどのように増加するかが興味の対象であった。一方、地盤の分野では、土要素を固体と考えるのが一般であり、あるせん断力の範囲では、応力に応じてひずみが生じる弾性体と考える。しかしながら、ある応力に達すると土要素は降伏し、ひずみを増加させても応力が増加しない、いわゆる塑性体として取り扱ってきた。この材料を地盤の分野では弾塑性体と呼び、Cam clay に代表される土の基本的構成式を組み立て、数値解析によって変形を予測手法が使われている。その一方で、降伏応力（しばしば単純に強度と呼ばれることが多いが）は破壊する速度が大きければ、増加することも知られている。これをひずみ速度効果と呼んでおり、この効果を考慮したモデルを粘弾塑性モデルと言う場合が多い。

このように、土を始め多くの物質はせん断速度に対して、その抵抗力は変化する。この特性を物理の世界ではレオロジーと呼んでおり、図 1 に示すように種々のモデルで近似している。すでに述べたように、水のような Newton 流体は、ひずみ速度に比例してせん断抵抗が増大する。一方、多くの物質は Bingham モデルで代表されるように、せん断速度に

比例して抵抗が増加するわけではなく、せん断速度がゼロでも降伏値を有し、その後はひずみ速度によって抵抗値が増加する。この傾きを粘性と呼んでいる。このように、ひずみ速度に対して抵抗が線形的に増加しない物質のレオロジー特性を把握するためには、複数のひずみ速度の下で抵抗力を測定する必要がある。この測定に用いられている代表的な装置が回転粘度計で、一般に **Viscometer** と呼ばれている (図 2)。

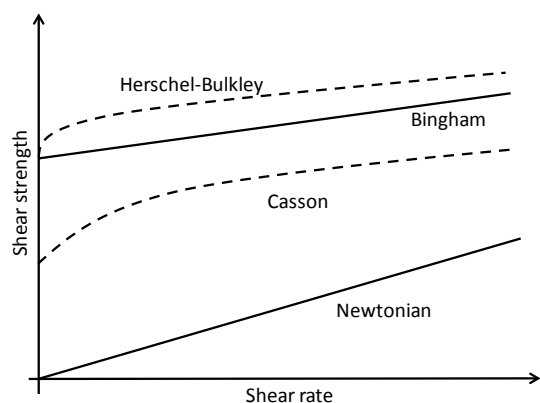


図 1 種々の物質のレオロジー特性

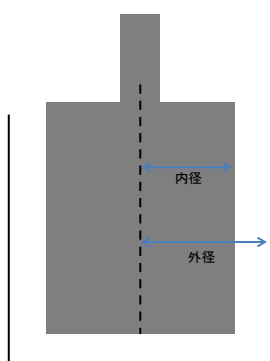


図 2 回転粘度計の断面図

回転粘度計は、食料品や石油製品などの材料分野の産業で広く使われており、日本工業規格 (JIS) やアメリカの ASTM によって試験方法が基準化されている。回転粘度計には、外側が回転するものもあるが、通常は内側の円筒が回転する。また、世界的に Brookfield 社製の機械が使われており本研究においても、この社の機械を用いた。

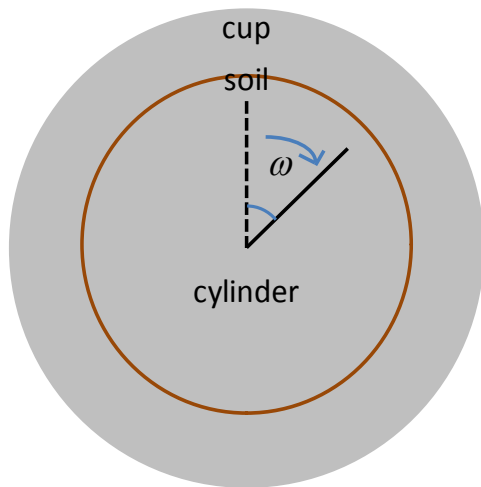


図 3 回転粘度計の平面図

図 3 は回転粘度計を上から見た図である。供試体となる土試料は内側の円柱と外側の円筒状の容器との間にセットする。内側の円柱が回転すると、それに伴い土試料も変形する。回転粘度計における結果の解釈で一番重要な前提条件は、内側の円柱の境界は円柱の回転とともに変形し、外側の容器との境界の土試料は動かないと仮定している。つまり、円柱および容器の内壁との間には滑りが生じていないと仮定している。このような仮定を設けると、土試料のせん断速度($D=\gamma$)は(1)式で表わすことができる。

$$D = \gamma = \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{2\pi n}{60} \cdot \frac{1 + \delta^2}{\delta^2 - 1} \quad (1)$$

ここに、 h は図 2 に示す外径と内径の差、 x は移動距離 ($=\omega r$: r は内側の円筒の半径)、 t は時間、 n は回転速度(RPM)、 δ は容器の半径と内側にある円柱の半径比である。

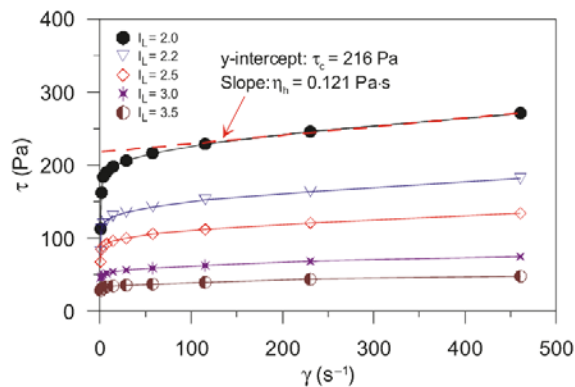


図 4 回転粘度計から求めたせん断速度と τ の関係

図4は、本研究で回転粘度計から求めたせん断速度と τ との関係である。図に示すように、この関係はBinghamモデルで良く近似でき、点線で示すせん断速度がゼロに相当するせん断降伏値 (τ_y) とせん断速度に対する τ の勾配、すなわち粘性 (η) によってレオロジー特性を表すことができる。土の分野ではViscometerによる試験は一般的ではないので、 τ_y や η を土で通常用いられている試験、例えばベーン試験で得られる値と結び付けておくと、実務的には非常に便利である。実際に、Jeongら¹⁾、布谷ら²⁾は、簡易な試験から求められる測定値と、 τ_y や η と関連付けている。その一例を図5に示す。

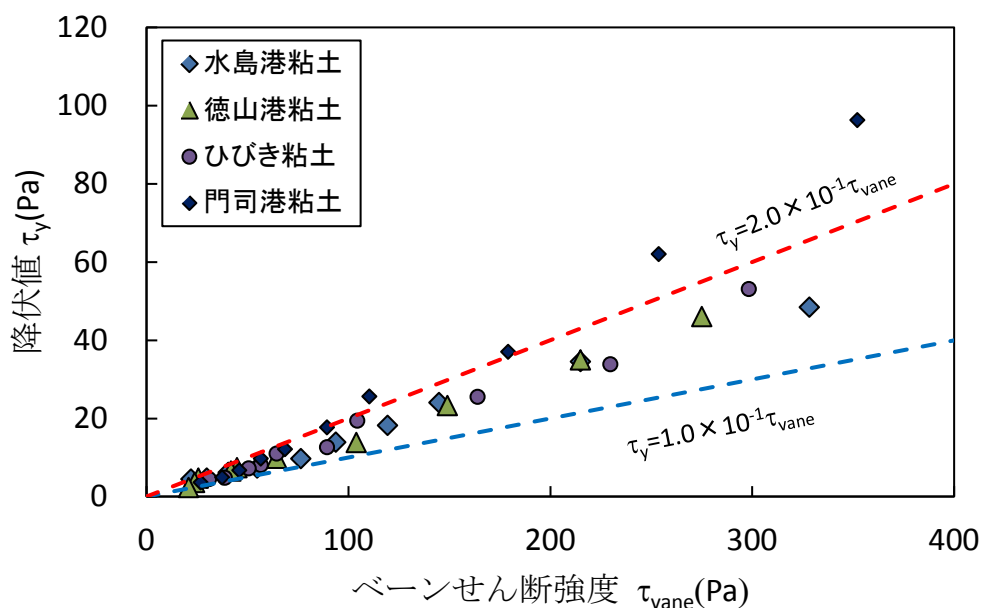


図5 τ_y とベーンせん断試験から求めたせん断強度 (τ_{vane}) の関係²⁾

図5は、 τ_y をベーン試験から求められた τ_{vane} と比較した例である。図に示すように、 τ_y は τ_{vane} の0.1から0.2倍と非常に小さな値である。この原因が何であるかを探るのが本研究の目的である。

2.2 考えられる原因 (粘度計の特殊性)

なぜ、 τ_y が τ_{vane} と比べて小さくなったのであろうか？1)Viscometerでは回転体が円柱であるのに対して、ベーンせん断では十字状のベーンブレードを用いるので、破壊メカニズムが異なる。2)対象とした粘性土が高含水比、すなわち通常の土と比べ液体のような性質を持っている。3)通常の地盤の場合のひずみレベルは、残留状態といっても、せいぜい数10%であるのに対し、少なくとも回転粘度計で生じるひずみは、(1)式に従うとすると、3ケタ以上大きい。4)同様に通常の土におけるひずみ速度は早くても数十%/minであるのに対し、回転粘度計においては(1)式に従うとなると、かなり早い速度における土の挙動となる。上記の疑問を解決するために、まずは、通常のベーン試験機を用いて、高含水比の土のレオ

ロジー特性を明らかにしてみる。

3. 用いた試験と試験装置

3.1 用いた試料

本研究では市販されている笠岡粘土を用いた。笠岡粘土の物理特性を表 1 に示す。また、笠岡粘土の塑性図を図 5 に示す。図 5 より笠岡粘土は高液性限界粘土(CH)に分類されることが分かる。本研究では、試料を所定の含水比に調整した後、よく攪拌した後に直ぐに実験を行なった。したがって、本研究で得られる強度は自重圧密やシキソトロピーの影響がない練り返し強度に対応すると考えられる。また、本研究では高含水比状態の粘土を研究対象とするため、(2)式で表される正規化含水比が 1.0 を超えるような含水比で実験を行った。

$$\text{正規化含水比} = \frac{w}{w_L} \cdots (2)$$

ここで、 w は試験時の含水比、 w_L は液性限界である。

表 1 笠岡粘土の物理特性

液性限界 w_L (%)	62	塑性限界 w_P (%)	28	塑性指数 I_p	34
----------------	----	----------------	----	------------	----

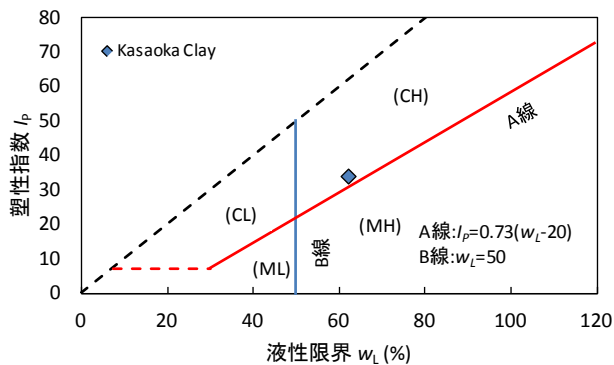


図 6 塑性図

3.2 セン断試験による試験

本研究では、図 7 に示す装置を用いてせん断試験を行った。ロッドの先端にベーンブレードまたは円柱を取り付けて試料に挿入し、回転速度を $6^\circ/\text{min}$ とした。ベーンブレード及び円柱の寸法は全て幅 $B=80(\text{mm})$ 、高さ $H=40(\text{mm})$ である。またベーンブレードの厚さは $0.95(\text{mm})$ である。せん断強度 τ は、測定したトルク M より (3)式を用いて算出した。

$$\tau = \frac{M}{\pi \left(\frac{B^2 H}{2} + \frac{B^3}{6} \right)} \cdot \cdot \cdot (3)$$

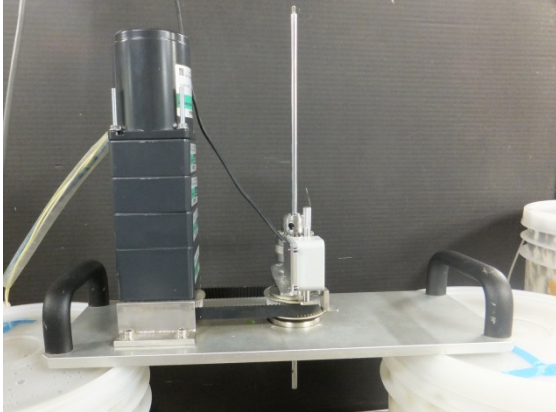


図 7 セン断試験機

3.3 回転粘度計による試験

本研究では、図 8 に示す回転粘度計を用いて実験を行った。使用した回転粘度計は Brookfield Digital Viscometer Model HB DV-Ⅱ Pro である。回転粘度計においてもベーンブレードと円柱を用いて実験を行った。ベーンブレード及び円柱の寸法は全て幅 $B=21.7(\text{mm})$ 、高さ $H=43.3(\text{mm})$ である。またベーンブレードの厚さは $0.9(\text{mm})$ である。せん断試験の場合と同様に、測定したトルクからせん断強度を算出する。



図 8 回転粘度計

本研究で用いた回転粘度計は回転速度を自由に変化させることができる。また、回転粘度計を用いて測定される流動曲線は両対数軸であることから、本研究では表 2 に示す回転

速度を用いた。また、各回転速度でのホールド時間を 10 秒とし、5 秒後と 10 秒後にデータを記録した。

表 2 回転速度

使用した回転速度(RPM)					
200	120	40	5	0.6	0.07
190	110	30	4	0.5	0.06
180	100	20	3	0.4	0.05
170	90	10	2	0.3	0.04
160	80	9	1	0.2	0.03
150	70	8	0.9	0.1	0.02
140	60	7	0.8	0.09	0.01
130	50	6	0.7	0.08	

4. セン断試験による結果

4.1 ベーンブレードを用いたせん断試験

ベーンブレードの直径に対して十分大きな径の容器に試料を充填し、せん断試験を行った。回転速度 $6^{\circ}/\text{min}$ で回転させた試験結果の一例を図 9 に示す。図から、回転開始から徐々に強度が増加し、回転角が約 30° でピーク強度となり、その後はほぼ一定値になってことがわかる。

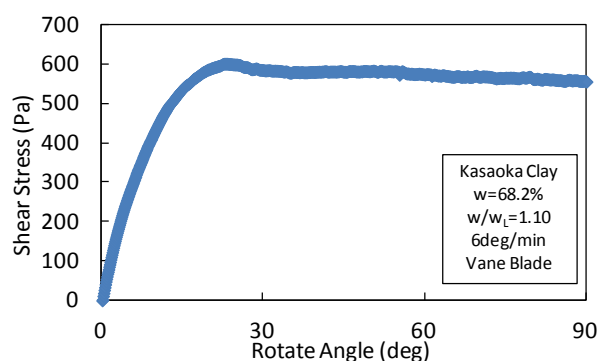


図 9 ベーンブレードによる試験結果

4.2 円柱における材質の違いが強度に与える影響

円柱の材質の違いが強度に与える影響を調べるために、ステンレス、アルミ、アクリル製の三種類の異なる円柱を用いてせん断試験を行なった (図 10 参照)。試験結果の一例を図 11 に示す。図から、ステンレス、アルミ、アクリルと異なる材質の円柱を用いても最大せん断強度、およびせん断強度と回転角度の関係に明瞭な違いは認められない。つまり、円柱における材質の違いは強度に影響を与えないことが分かる。このため、以下の試験において円柱を回転体とする試験は、全てステンレス製の円柱を用いた。

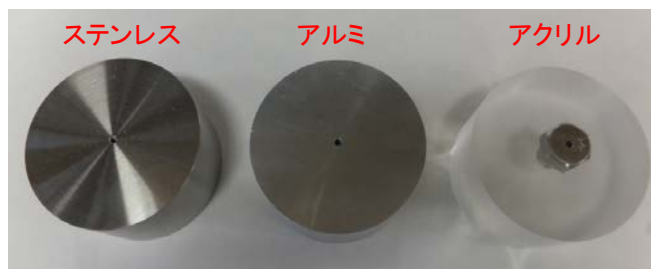


図 10 試験に用いた円柱

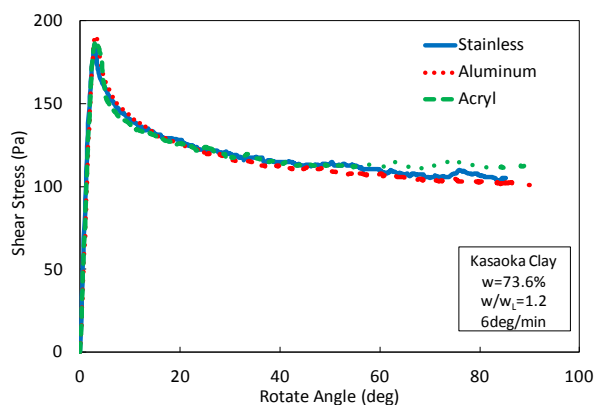


図 11 材質の違いによる回転角度とせん断応力の関係

4.3 形状が強度に与える影響

回転体の形状の違いが強度に与える影響を調べるためにベーンブレードと円柱による強度の比較を行なった。図 12 にベーンブレードと円柱で得られた代表的な試験結果を示す。図から、ベーンブレードを用いた場合には、回転角の増加とともに徐々に強度が増加し、回転角度が約 30° 付近でピークを示しその後一定値に収束している。一方、円柱を用いた場合には、回転開始後、非常に小さな回転角でピークとなり、せん断応力はその後減少する。

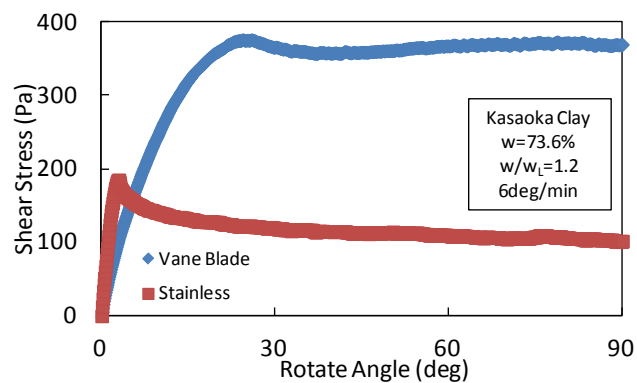


図 12 円柱とベーンブレードを回転体とした場合の比較

回転体によるせん断面の発達の違いを明らかにするために、ベーンブレードあるいは円柱を途中まで地盤に挿入し、さらにチョークの粉を地表面に散布し、回転によって地盤がどのように変化するのかを観察した。図 13 にベーンブレードを、図 14 に円柱を回転させた場合のせん断の様子を示す。ベーンブレードを用いた場合では、せん断開始後徐々にせん断面が現れていることが分かる。また、せん断面の試料だけではなく、ベーンの羽の間にある試料も動いていることが分かる。一方、円柱を用いた場合では、円柱周辺の地盤の動きは認めることができず、円柱と試料とが滑っていることが分かる。このために、図 12 に示すように、両者の間には測定された強度に大きな違いが生じたことがわかる。



図 13 ベーンブレードを用いた場合のせん断面の様子



図 14 円柱を回転させた場合の地盤の様子

図 15 にベーンブレードと円柱で得られたピーク強度の比($\tau_c/\tau_{\text{vane}}$)と含水比の関係を示す。

ここで含水比は液性限界(w_L)で正規化した正規化含水比(w/w_L)としている。図より含水比の低下によって、両者の比は減少する傾向が認められるが、おおよそ 0.5, つまり回転体を円柱とした場合には、ベーンブレードで得られた強度の 50%程度しか発揮しないことが分かる。

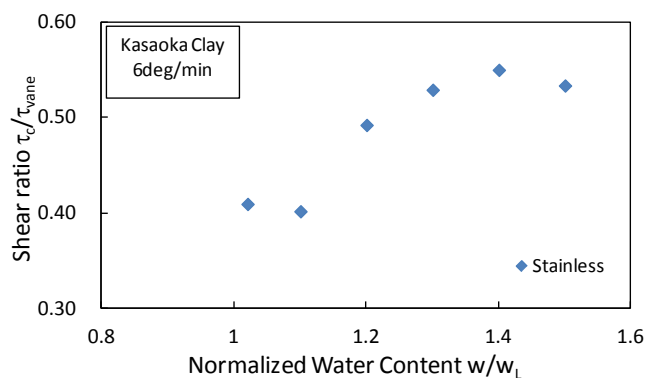


図 15 円柱とベーンブレードで得られた強度比

4.4 回転速度の影響

回転速度の影響が円柱の場合とベーンブレードの場合と比べて、どのように異なるかを検討した。回転速度は $6^\circ/\text{min}$ と $60^\circ/\text{min}$ とした。図 16 にベーンブレードの場合を、図 17 に円柱を用いた場合を示す。一般に回転速度を速くした場合には、強度が大きくなると多くの研究が報告している。しかしながら、ベーンを用いた場合には、 w/w_L が 1.0 を超えると、速度が大きいほど強度が減少する結果が得られた。一方、円柱の場合は、いずれの含水比の場合でも、強度は回転速度が大きいほど、大きくなっている。

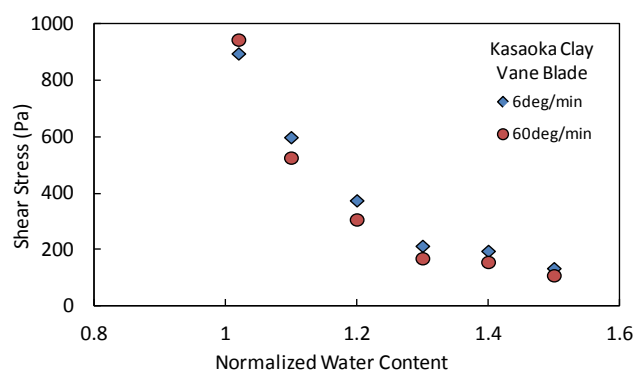


図 16 ベーンブレードを用いた場合の回転速度の影響

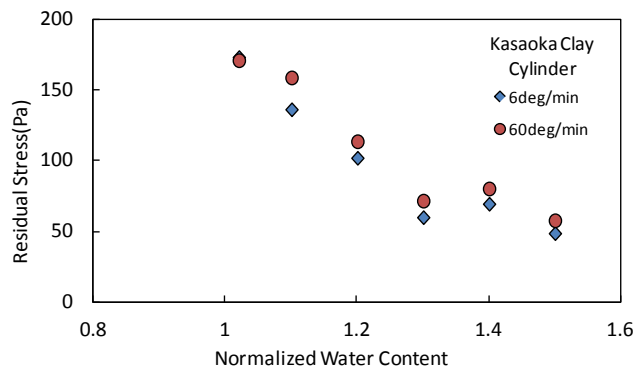


図 17 円柱を用いた場合の回転速度の影響

4.5 拘束条件が強度に与える影響

通常ベーン試験で用いる試料容器は、ベーンブレードの寸法より十分大きなものを用いる。一方、回転粘度計では、試料容器と挿入する円柱の径の差が非常に小さいので、容器の内側の拘束を受けた状態で回転抵抗が計測されている。この拘束条件の違いが測定される強度に与える影響を調べるために、図 18 に示す内径が $\phi=88\text{mm}$ の容器の中に試料を入れて、せん断試験を行った。ベーンブレードと円柱の直径はともに $B=80\text{mm}$ であるので、図 3 に示した h は 4mm となる。図 19 にベーンブレード、図 20 に円柱を回転させた場合の結果を示す。ベーンを用いて拘束がある場合、試料が容器の内側で滑ることが予想される。この理由は、ベーンブレードを回転させた時に得られる強度よりも円柱を回転させた時に得られる強度の方が小さいため、容器内側の壁面と試料とが滑ることが予想されるからである。このように考えると、直径 $B=88\text{mm}$ の円柱を回転させた場合と同じになり、直径を $B=80\text{mm}$ とした場合の約 0.79 倍の抵抗値が計算される。しかしながら、試料が滑るのでベーン強度の 0.5 倍のせん断強度しか得られないとすると、最終的に拘束のない状態のベーン強度に対して約 0.4 倍 ($=0.79 \times 0.5$) の値が得られるはずである。しかしながら、図 19、図 20 に示すように、ベーンブレード、円柱とも境界の有無による強度の違いはほとんどない結果が得られた。

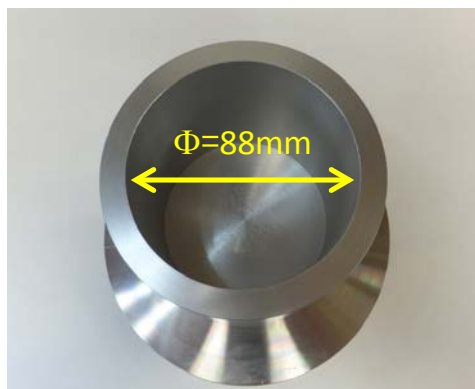


図 18 拘束条件を与えるための容器

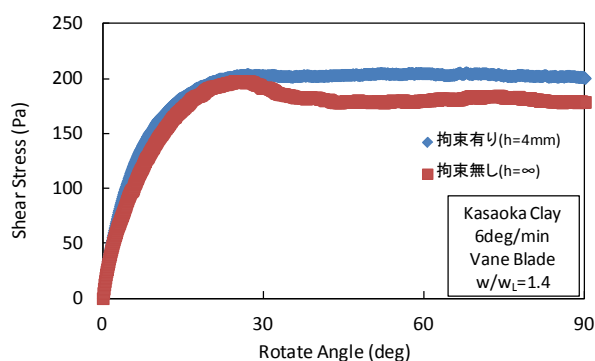


図 19 ベーンブレードの場合の拘束の影響

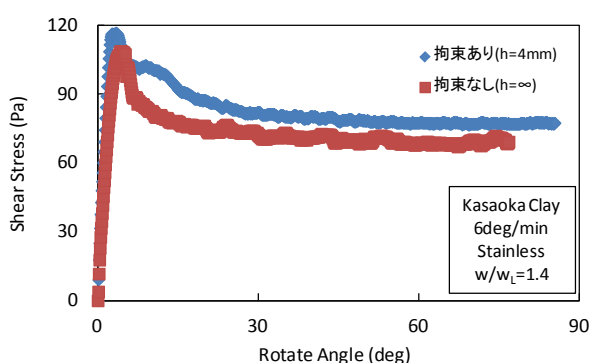


図 20 円柱の場合の拘束の影響

5. 回転粘度計による結果

回転粘度計において回転体の形状の違いが強度に与える影響を調べるために、ベーンブレードと円柱を用いて回転速度を一定にして試験を行なった。ベーンブレード及び円柱の寸法は直径 $B=21.7(\text{mm})$ 、高さ $H=43.3(\text{mm})$ である。試験は、容器の拘束の影響がないように、試料を十分大きな容器に入れて実験を行なった。図 21 にベーンブレードを用いた時の試験結果を示す。回転速度が 0.05rpm と 0.2rpm の結果であるが、これを角度に変換すると、それぞれ $18^\circ/\text{min}$ 、 $72^\circ/\text{min}$ に対応している。4 章で示したせん断試験でベーンブレードを用いた場合と同様に、回転開始後徐々に強度が増加し回転角度が約 30° 付近でピーク強度が得られている。その後の挙動は不安定になっているが、この原因については後述する。図 22 に円柱を用いた時の試験結果を示す。図より、円柱を用いた場合は約 15° 付近でピークとなっている。この結果は、せん断試験で円柱を用いた場合には図 12 に示したように、おおよそ $0\sim 5^\circ$ の間でピーク強度となっている結果より多少値が異なるが、ベーンブレードを用いた時より早くピーク強度が現れるという傾向は同じである。

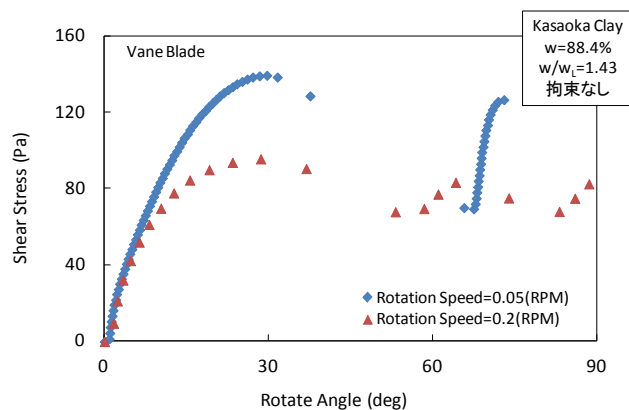


図 21 ベーンブレードを用いた場合

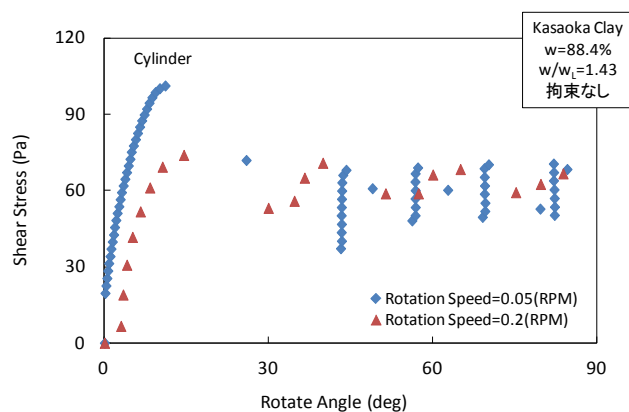


図 22 円柱を用いた場合

ベーンブレード、円柱ともピーク強度を示した後に回転角度とせん断応力の関係が不安定となる理由は、本研究で用いた回転粘度計の構造にある（図 23）。回転体であるスピンドルに回転力を与えるステッピングモータはスプリングによって結合されている。スピンドルが試料との摩擦によってトルクが発生すると、スプリングが変形し、図に示す針が動く。この動きをデジタル信号にしてトルクを計算している。トルクを精度よく測定するために、ばねは非常に柔らかく、トルクが規定の容量の 100%ほど発揮すると、ばねは約 70° ねじれる。したがって、図 21 および図 22 に示す回転角度は、このばねのねじりを補正して計算している。しかしながら、ばねが非常に柔らかいため、ピーク後の挙動は非常に不安定で、時々急に強度が低下してグラフが不連続となっている。また、円柱を用いた場合に、ピーク強度となる回転角度がせん断試験と比べて大きいのも、ばねのねじりの影響を十分に補正していないためと考えられる。このことから、本研究で用いた回転粘度計から得られた結果には、非常に遅い回転速度の場合には、注意を払う必要がある。

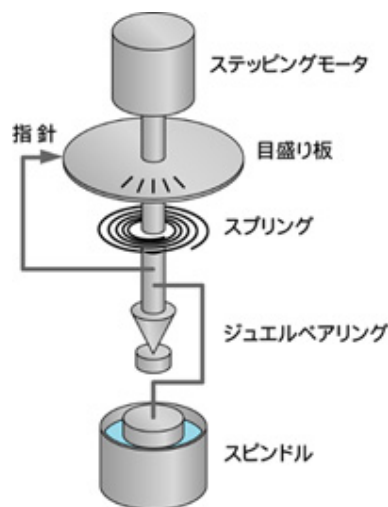


図 23 回転粘度計におけるトルクを計測する機構

せん断試験は回転速度が一定で試験を行うのに対して、回転粘度計による試験では回転速度を変化させて実験を行うのが普通である。そこで、回転粘度計で回転速度を変化させた時に回転体の形状や拘束条件が強度に与える影響を調べた。さらに、せん断試験と同様に拘束による影響を調べるために、図 24 に示す直径 24.2mm の容器を用いて行なった。回転粘度計ではベーンブレード、円柱ともに直径 $B=21.7\text{mm}$ であるので図 3 に示した h は 1.25mm となる。せん断試験の場合は、直径 80mm の回転体に対して h が 4mm であるので、その比 (h/D) は 0.05 となり、回転粘度計の場合は 0.058 で、ほぼ同様な条件となっている。図 25 に条件を変化させた回転粘度計の結果を示す。図より、速度を一定としたせん断試験の結果と同様に回転粘度計における試験でも拘束条件の有無はベーンブレードを用いた場合も円柱を用いた場合も速度に影響を与えていないことが分かる。



図 24 回転粘度計で用いた容器

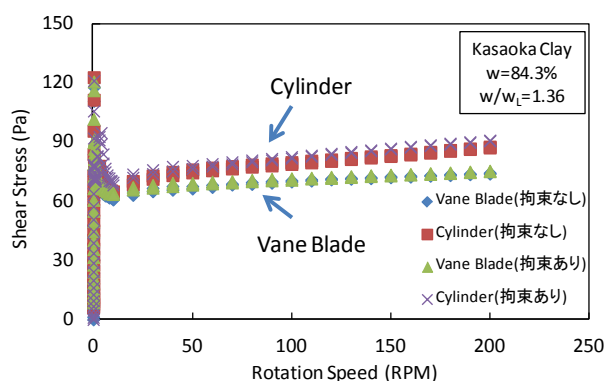


図 25 回転粘度計で得られた回転速度とせん断強度の関係

図 25 に示した重要な結果は、回転粘度計においてはベーンブレードを用いた時と円柱を用いた時の強度にほとんど差がなく、むしろ回転速度の非常に大きい領域では円柱を用いた場合の強度の方が大きくなっていることである。図 15 に示した結果によれば、円柱を用いた場合の強度はベーンブレードを用いた時の強度のおおよそ 50%程度になるはずである。この相違の原因について考察してみる。

第一の原因は各回転速度段階の測定時間が短いことである。図 9 に示したように、ベーンブレードに対しては、最大せん断強度を得るためには約 30° の回転角度が必要となる。すでに述べたように、回転粘度計による試験では段階的に回転速度を上昇させるが、各段階における一定速度の時間はいずれも 10 秒間であり、回転速度が遅い場合には、ピーク強度に至る前に次の段階の回転速度に移行する。例えば、0.02rpm の回転速度で試験を行った場合には、10 秒後の回転角度は 0.72° であり、その 10 倍速い 0.2rpm でも 7.2° で、決められた測定時間内にピーク強度には至らない。さらに図 23 に示したように、ばねのねじりを考慮すると、実際に回転する角度はさらに小さくなる。

もう一つの原因は、回転速度の影響がベーンブレードと円柱とでは異なることである。すでに示したように（図 16 と図 17）、回転速度の上昇の影響が回転体によって異なることである。少なくとも、せん断試験において $6^\circ/\text{min}$ (0.017rpm) から $60^\circ/\text{min}$ (0.17rpm) に回転速度を増加させると、ベーンブレードの場合には強度が減少し、円柱の場合には増加した。図 26 から図 29 に回転粘度計において回転速度を一定にした結果を示す。すでに述べたように、0.2rpm では、回転粘度計の機構上、測定値の信頼性は低い（特にベーンブレードの場合）、ベーンブレードの強度の方が大きく計測されているが、その差は図 15 から想定される値より小さい。回転速度が 2 から 20rpm になると図 27 と 28 に示すように、両者の挙動はほぼ同じになり、さらに図 29 に示す 200rpm になると、円柱の方が強度が大きくなり完全に逆転する。したがって、せん断試験すなわち回転速度が遅い場合には、ベーンブレードの方が大きな強度が計測されるが、速度が大きくなると、逆の結果が得られることになる。ベーンブレードの場合に回転速度の上昇によって抵抗が減少する原因は、

現段階では明確には言えないが、図 13 に示すようにベーンブレードの先端付近の地盤の挙動は非常に複雑であり、その複雑さは回転速度が大きくなると顕著となり、また土の挙動が液体に近い状態では、レイノルズ数も大きくなり乱流が発生し、特異な挙動が発生する回転速度帯が生じると推測される。一方、円柱の場合には形状がシンプルなので、200rpm 程度の速度までは、表面付近でも乱流が生ぜず、層流の安定な状態にあるので、回転速度の上昇にしたがって抵抗が増加するものと思われる。

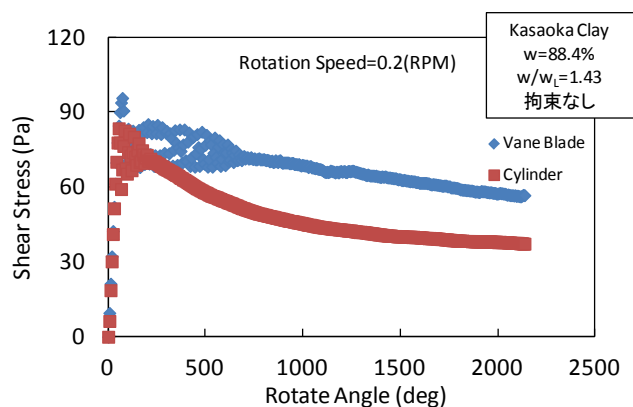


図 26 0.2rpm の場合の比較

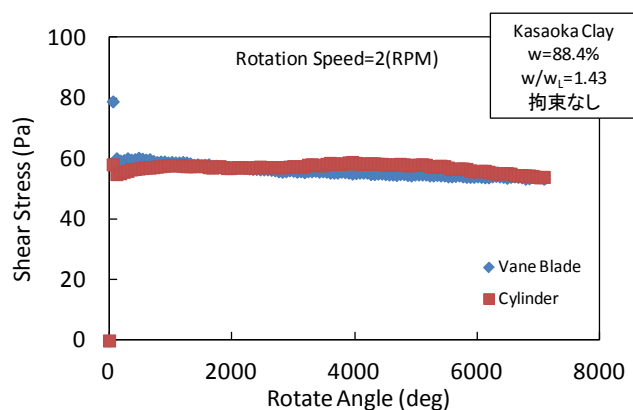


図 27 2rpm の場合の比較

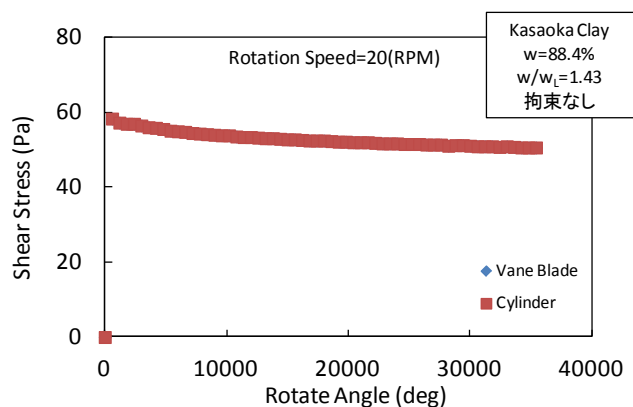


図 28 20rpm の場合の比較

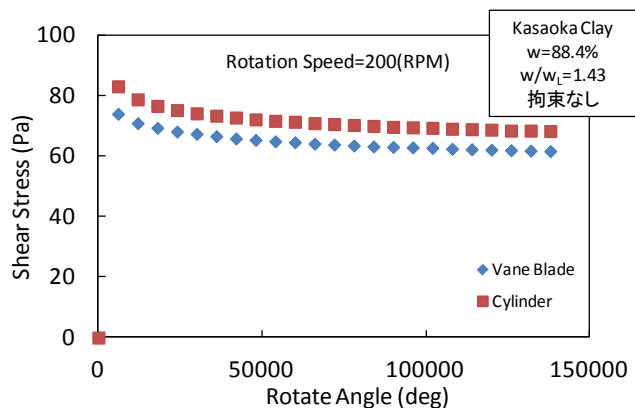


図 29 200rpm の場合の比較

6. まとめ

高含水比の粘性土のレオロジー特性を計測するのに用いられている **Viscometer** における土の挙動を、種々の角度から考察を加えてみた。ベーン試験における $6^\circ/\text{min}$ の回転速度では、回転体が円柱である場合には、土試料との間に滑りが生じて、ベーン試験の値よりかなり小さくなる。しかしながら、回転速度を大きくすると、ベーンより円柱の方が抵抗力が大きくなる。また、円柱を用いて容器の隙間を変化させても、得られる値は殆ど変化しない。これらのことから、**Viscometer** で仮定されている内側の回転体と土試料は共に移動し、また外側の固定と状態となっている容器の内側の土試料の変位は生じでなく、その間の変位は直線的に変化しているとの前提は、どもあやしいことがわかった。しかしながら、**Viscometer** は種々の材料のレオロジー特性を測定する分野で広く使われていることを考えると、回転速度（ずり速度）が大きな範囲では、上で述べた大前提が満足しているかもしれない。さらなる研究が必要である。

7. 参考文献

- 1) Jeong S. W., Leroueil S., and Locat J.: Applicability of power law describing the rheology of soils of different origins and characteristics, Can. Geotech. J., Vol.46, pp.1011-1023, 2009.
- 2) 布谷信貴, 土田孝, 安部太紀: 練り返しを受けた高含水比状態の粘土の力学特性, 第 47 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 273-274, 2012.