

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 655 June 1989

ベーン試験とスランプ試験による軟らかい粘土の流動
限界の検討—回転粘度計との比較—

鶴 谷 広 一
江 口 秀 二
鷹 濱 潤

運輸省港湾技術研究所



Experiments on Yield Stress of Soft Muds with Vane and Slump Tests

Hiroichi TSURUYA*

Shuji EGUCHI**

Jun TAKAHAMA**

Synopsis

A yield stress of soft muds is an important rheological property which represents the critical stress for the initiation of mud movement. It has been mainly measured by a coaxial-type rotary visco-meter. Since measurement with this visco-meter is so complicated, more general and simple methods are required.

Vane tests and slump tests, which are commonly used in the field, were adapted in this study. Three kinds of soft muds, kaolinite, bentonite and Kumamoto mud, were used in this experiment. Flow curves and yield stresses of these soft muds were investigated with the rotary visco-meter. Vane tests were conducted to obtain the relationship between the shear strength and the yield stress. The relationship between the slump value and the yield stress was obtained by slump tests. Main results are as follows.

(1) Flow curves for different water content are classified in three types. Two kinds of the yield stress, τ_{y1} and τ_{y2} , are defined.

(2) The stress-strain curves in vane tests are classified in two types. The first type has the maximum shear strength τ_p in a small strain range and the constant strength τ_r in a large strain range, whereas the second type has only τ_r . The yield stress is estimated from τ_r by deducting the viscous resistance in it.

(3) A single relationship between the non-dimensional slump value and yield stress is obtained for the different kinds of soft muds. A slump-stress curve which is obtained by a simple assumption agrees well with this relationship.

Key Words : Soft Muds, Yield Stress, Rotary Visco-meter, Flow Curve, Vane Test, Slump Test

* Chief of Hydrodynamics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division.

** Member of Hydrodynamics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division.

ベーン試験とスランプ試験による軟らかい粘土の流動限界の 検討 — 回転粘度計との比較 —

鶴谷 広一 *

江口 秀二 **

鷹濱 潤 **

要 旨

底泥の流動現象を考える上で重要である流動限界値（降伏値）について検討した。底泥の降伏値は現在回転粘度計によって求められている。しかし、より一般的かつ簡便な方法で降伏値を求めることが望まれていることから、ベーン試験、スランプ試験を選び実験を行った。底泥として、カオリナイト、ベントナイト、熊本現地泥を用いた。実験結果を回転粘度計で得られた降伏値と比較することにより、両試験法による降伏値の推定法の検討を行った。本研究の主な結論は次のとおりである。

- 1) ベーン試験では、ベーンせん断強度に含まれる粘性の影響を考慮することにより、ベーンせん断強度（残留強度）から降伏値を推定することができる。
- 2) スランプ試験では、簡単な応力計算により得られる変形後の粘土内の最大せん断応力とスランプ値の関係を用いることにより、スランプ値から降伏値を推定することができる。

キーワード：底泥、降伏値、回転粘度計、流動曲線、ベーン試験、スランプ試験

1. まえがき

シルテーション (Siltation) とは、河川によって運ばれ海域に堆積した粘土やシルトなどの微細な粒子が、潮流や波により再び巻き上げられまたは流動して、航路や泊地に埋没する現象である。この微細な粒子は、帯電しているために海水の作用によって凝集沈殿し、堆積後圧密して密度や粘着力が変化するなど砂にはない複雑な性質を持っており、このことはシルテーションのメカニズムや防止方法の解明を非常に困難にしている。しかし、わが国においても熊本港の建設が進む中でシルテーションの問題がクローズアップされ、その解明が急がれている。

本研究では、底泥の流動現象を考える上で重要である流動限界値について検討した。流動限界値は、流動に対する底泥の抵抗力で、通常降伏値と呼ばれている。底泥に作用する外力が降伏値以上になると底泥は流動し始めることから、この降伏値を求めることが流動現象を解明

する上での第一段階となる。

降伏値を求めるには、主として回転粘度計が用いられる^{1),2)}。回転粘度計は流体の流動曲線を精度よく測定するには適しているが、試験をするにはある程度の経験が必要であり、また機械も高価であることなどから一般的な方法とは言い難い。しかし、現在のところ回転粘度計に代わって降伏値を求める適当な方法がないため、回転粘度計に頼らざるを得ない。

一方、この降伏値は単に流動限界を表すだけではなく、底泥の巻き上げ現象を説明する際に用いられる巻き上げ限界値などを無次元化する場合にも用いられている³⁾。このように降伏値はシルテーションの研究では非常に重要なパラメータであり、これをより簡便に、かつ一般的な方法で求めることが望まれている。

そこで本研究では、まず粘土が流体として流動する場合の一般的特性を知るために、回転粘度計を用いた実験を行い、粘土の流動曲線を調べた。そして、これから粘土の降伏値を求めた。次に、降伏値を測定する一般的な

* 海洋水理部 水理研究室長

** 海洋水理部 水理研究室

方法としてペーンせん断試験，スランプ試験を選び，回転粘度計で用いたものと同じ試料で実験を行った。そして，各試験で得られた結果と回転粘度計で得られた降伏値を比較することにより，各試験での降伏値の推定法について検討した。

2. 回転粘度計

流体のレオロジー的挙動は，流体内の速度勾配であるずり速度 D とせん断応力 τ の関係で決まり，この関係を図化したものが流動曲線である。レオロジー的挙動の相違による流体の分類を表-1に示す⁹⁾。この中で時間依存性のない流体の流動曲線を図-1に示す。純粘性流

表-1 流体の分類

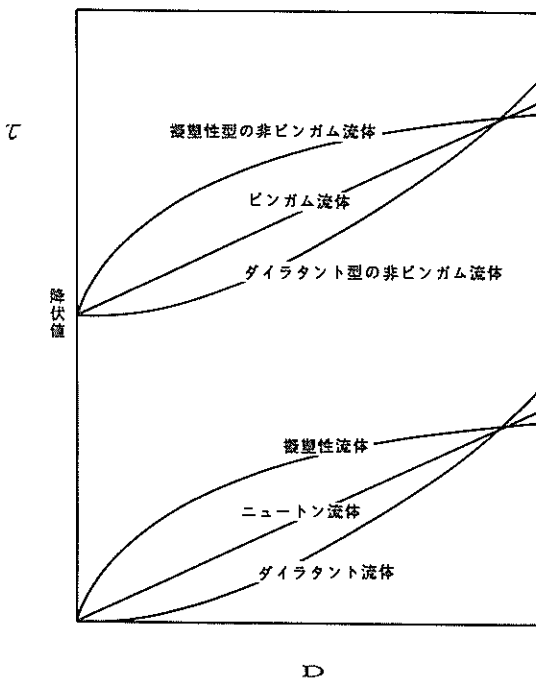
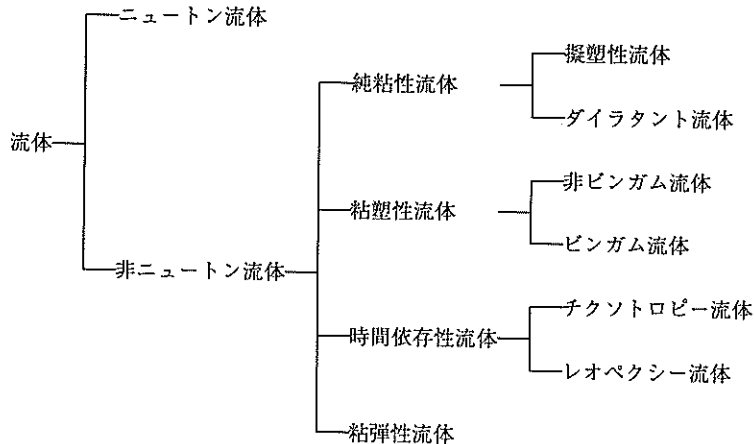


図-1 流体の流動曲線

体のうち，ずり速度が大きくなると流動しやすくなる流体を擬塑性流体，流動しにくくなる流体をダイラタント流体と呼んでいる。前者の流体の挙動はせん断速度流動化 (shear-thinning)，後者のそれはせん断速度粘稠化 (shear-thickening) とよばれている。粘塑性流体とは，流体内部のせん断応力が降伏値 τ_y 以下では流動を起さず， τ_y 以上になると粘性流動を生じる流体で，単に塑性流体とも呼ばれている。粘塑性流体はビンガム流体と非ビンガム流体に分けられる。非ビンガム流体は，ずり速度が大きくなると流動しやすくなるか，流動しにくくなるかによってさらに二つに分けられる。本研究では便宜上，擬塑性流体に似ている前者を擬塑性型の非ビンガム流体，ダイラタント流体に似ている後者をダイラタント型の非ビンガム流体と呼ぶことにする。

回転粘度計は，このような流体の流動曲線を求めるために用いられる装置である。大坪¹⁾、鶴谷・中野・鷹濱²⁾ (以下前報とする) は，サーレ型2重円筒式回転粘度計を用いて，カオリナイトや現地泥などの流動特性を調べている。

大坪は，試料としてカオリナイト，ベントナイト，モンモリロナイト，霞ヶ浦現地泥などを用い，ずり速度が

0 から150s⁻¹および0 から346s⁻¹での流動曲線の形態から粘土を二つのグループに分類した。各グループの特徴を表-2に示す。

前報では、カオリナイト、ベントナイト、熊本現地泥、タイ国泥を用いて、ずり速度が10s⁻¹までの流動曲線を求めた。特にずり速度が0付近の流動特性を明らかにするために、最小ずり速度を0.0167s⁻¹とした。その結果

得られた各粘土の流動曲線の特徴を表-3に示す。

本研究で行った回転粘度計の実験では、含水比の変化によって粘土の流動曲線がどのように変化するかを調べることに重点を置いた。流動曲線が前に示した4種の流体のどれに該当するかを調べる際には実験値を普通座標に描き、また降伏値を求める際には実験値を両対数座標に描いた。

表-2 流動曲線による粘土の分類

カオリナイト系粘土グループ	ベントナイト系粘土グループ
<ul style="list-style-type: none"> ・カオリナイト主成分粘土 モンモリロナイト 現地泥 ・降伏値が存在 ・あるずり速度で急激に折れ曲がる流動曲線 	<ul style="list-style-type: none"> ・ベントナイト主成分粘土 ・降伏値なし ・べき乗則の流動曲線

表-3 各粘土の流動曲線

ずり速度(s ⁻¹) 粘土の種類	D < 1	D > 1
カオリナイト	ビンガム流体	べき乗則流体
ベントナイト+水 低含水比 高含水比	ビンガム流体 べき乗則流体	べき乗則流体 べき乗則流体
ベントナイト+塩水 熊本泥 タイ国泥	ビンガム流体	せん断応力一定

2. 1 試験方法

回転粘度計は、図-2のように内筒と外筒からなるサーレ型二重円筒式の装置である。内筒と外筒の間に粘土を充填し、モーターで内筒を回転させると、内筒と外筒の間には流れが生じる。外筒の近傍では粘土の速度は0であり、内筒の近傍では内筒の回転速度と同じ速度で粘土は流動する。その結果、外筒と内筒の間には速度勾配(ずり速度)が生じる。内筒の回転速度を変化させることにより、ずり速度を変えることができる。外筒と内筒の半径比を δ とすると、内筒と外筒の間で生じる流れ

の平均流速勾配(ずり速度)は次式で表される。

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

ここに、 n は1分間当りの内筒の回転数 (rpm) である。

図-3はずり速度の時間変化曲線である。ずり速度を0から最大ずり速度 D_{max} まで T_2 秒かけて上昇させ、 T_3 秒間 D_{max} を保ったのち T_2 秒かけて0まで下降させる。この操作を3回繰り返す。前報と同様に D_{max} は10s⁻¹、 T_1 、 T_2 、 T_3 はそれぞれ2秒、300秒、2秒とした。

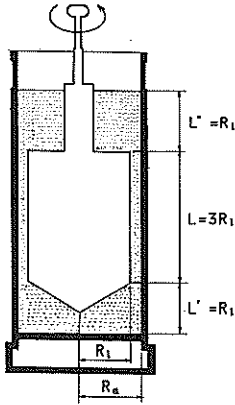


図-2 回転粘度計の測定部断面図

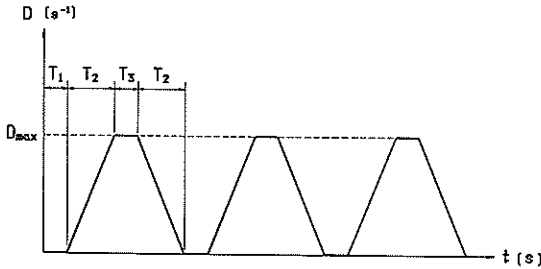


図-3 ずり速度の時間変化曲線

内筒を回転させると内筒は粘土から抵抗をうける。この抵抗力が粘土内のせん断応力に対応することから、せん断応力は内筒を回転させるのに必要なトルクから求められる。

流動曲線において、ずり速度が0でのせん断応力を降伏値と呼んでいる。回転粘度計のずり速度の分解能は 0.0167s^{-1} であることから、厳密にずり速度が0でのせん断応力を求めることはできない。そこで流動曲線を両対数紙に表してずり速度が 0.01s^{-1} での値を外挿し、この値を降伏値 τ_y とした。

用いた粘土は、カオリナイト、ベントナイト、熊本泥である。含水比の調整はカオリナイトは水道水で、ベントナイトは水道水と塩水（比重1.03）で、熊本泥は塩水でそれぞれ行った。

2.2 流動曲線

図-4 (a), (b)～図-7 (a), (b) はそれぞれカオリナイト+水、ベントナイト+水、ベントナイト+塩水、熊本泥+塩水の流動曲線をいくつかの含水比について普通座標で表したものである。各図の (a) は含水比が低い場合の流動曲線、(b) は含水比が高い場合の流動曲線であ

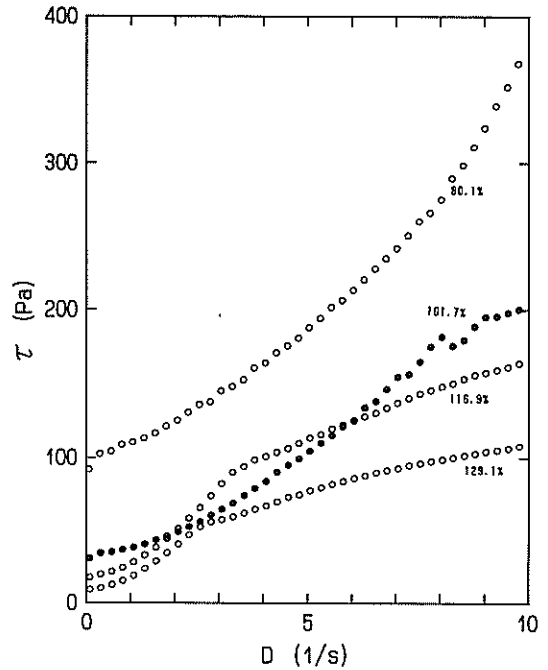


図-4 (a) 低含水比カオリナイトの流動曲線

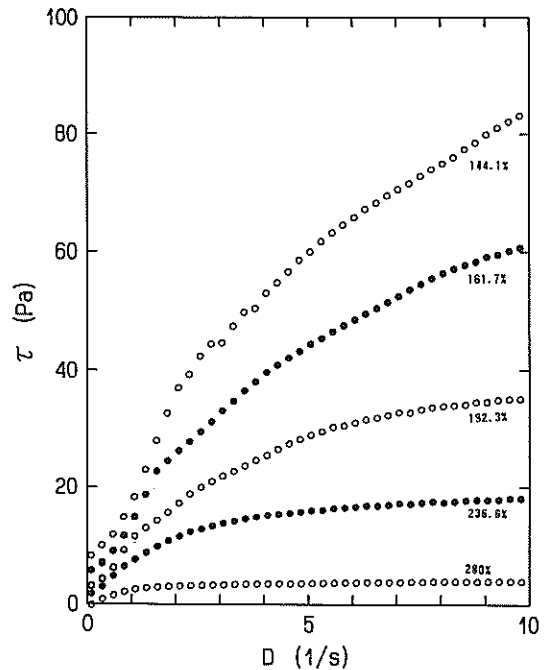


図-4 (b) 高含水比カオリナイトの流動曲線

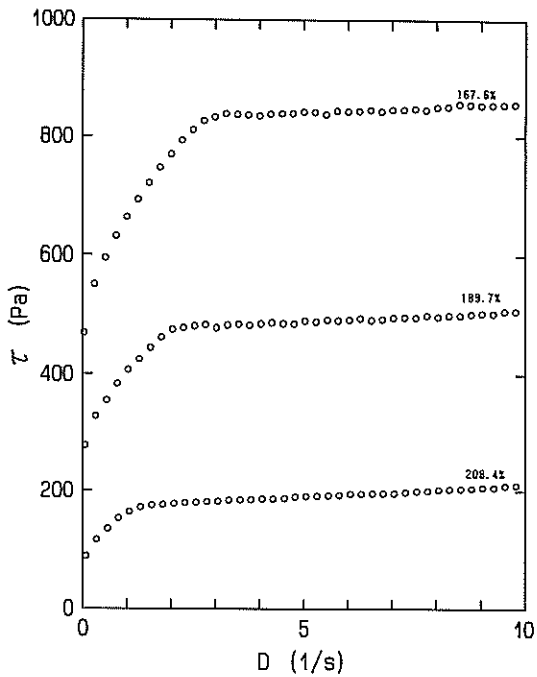


図-5 (a) 低含水比ベントナイトの流動曲線
(水で混合)

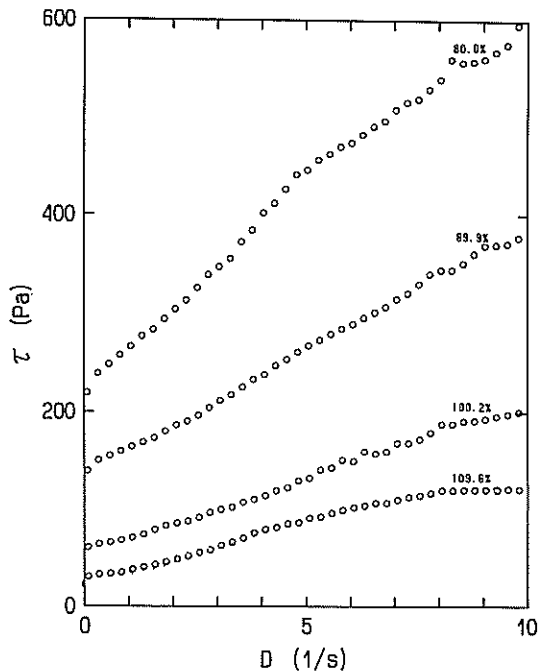


図-6 (a) 低含水比ベントナイトの流動曲線
(塩水で混合)

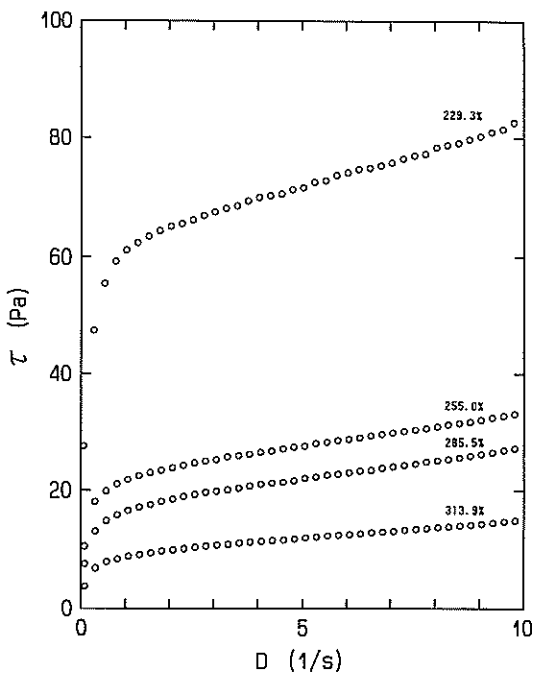


図-5 (b) 高含水比ベントナイトの流動曲線
(水で混合)

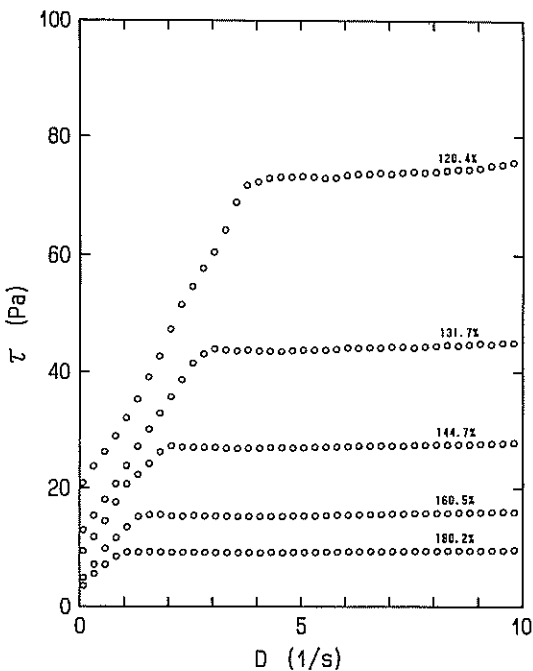


図-6 (b) 高含水比ベントナイトの流動曲線
(塩水で混合)

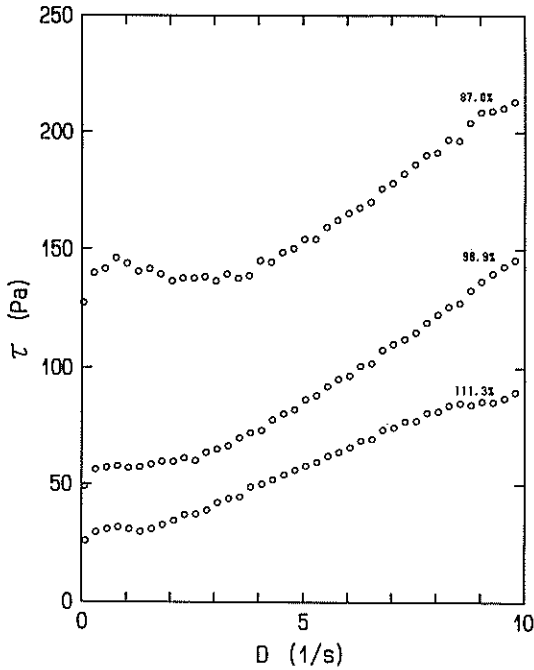


図-7 (a) 低含水比熊本泥の流動曲線

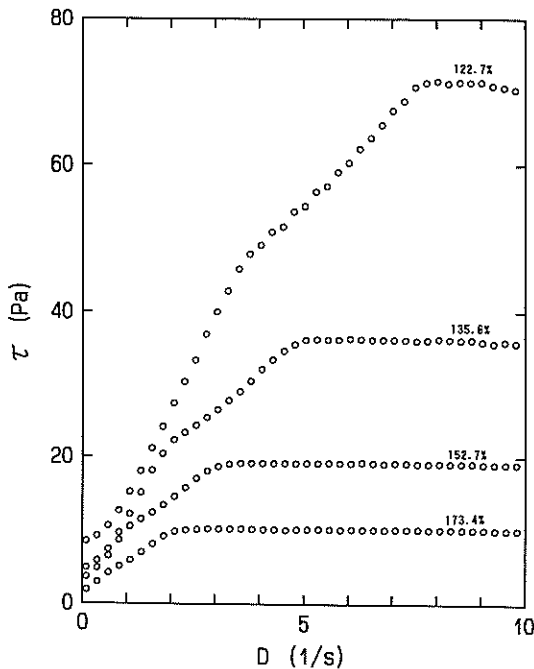


図-7 (b) 高含水比熊本泥の流動曲線

る。

前報では、特にずり速度が 1 s^{-1} 以下の流動特性に着目したが、ここではより広範囲のずり速度に着目して、 10 s^{-1} までの流動曲線について検討する。各粘土とも含水比が異なると流動曲線の形態は異なっている。これらの流動曲線を図-1と照らし合わせ、含水比の変化にともなう流動曲線の変化の形態を大きく三つに分類し、模式図に示すと図-8(a)~(c)のようになる。

タイプAはカオリナイトにみられる変化の形態である。低い含水比の範囲では流動曲線は大きな降伏値を持ち、ダイラタント型の非ビンガム流体またはビンガム流体で表される。含水比が高くなると降伏値は減少し、流動曲線には変曲点が現れてダイラタント型から擬塑性型の非ビンガム流体に変わる。そして最終的には擬塑性流体となる。

タイプBはベントナイト+塩水と熊本泥にみられる変化の形態である。含水比が低い範囲では、タイプAと同様にダイラタント型の非ビンガム流体またはビンガム流体である。含水比が高くなると流動曲線は変曲点を持ち、最終的にはずり速度の小さい領域で降伏値の小さいビンガム流体または擬塑性流体に、ずり速度が大きい領域ではせん断応力が変化しない特殊な流動曲線になる。これは、Saint-Venant の特別なケースである⁵⁾。

タイプCは、ベントナイト+水にみられる関係である。全ての含水比について、ずり速度の小さい領域では擬塑性型の非ビンガム流体、ずり速度の大きい領域ではビンガム流体となる。

以上をまとめると次のようになる。ベントナイト+水を除き、含水比の低い粘土は流動開始時は流動しやすく、ずり速度が大きくなるにしたがって流動しにくくなる。一方、含水比の高い粘土およびベントナイト+水は、流動開始時は流動しにくく、ずり速度が大きくなるにしたがって流動しやすくなる。特にベントナイト+塩水と熊本泥では、粘土内の応力がある応力に達すると無限に流動することとなり、これは粘土の破壊を意味する。

図-9(a)~(d)は、図-4~図-7に示した流動曲線を両対数座標で表したものである。

2. 3 降伏値と粘土の強度

回転粘度計で得られる降伏値は、流動に対する粘土の抵抗力を表している。したがって、降伏値を粘土の強度と考えることができる。

粘土の強度は乱された場合と乱されない場合とは異なる。降伏値が乱された粘土の強度を表しているのか乱されない粘土の強度を表しているのかは、粘土が回転粘度計実験の最中にどのような操作を受けたかによる。所

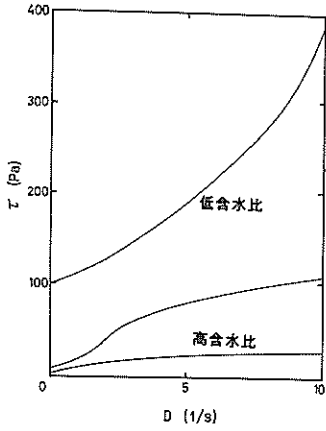


図-8 (a) 流動曲線の変化の形態：タイプA

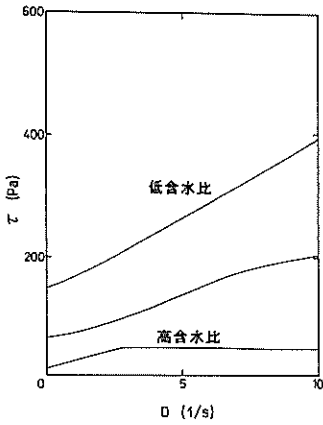


図-8 (b) 流動曲線の変化の形態：タイプB

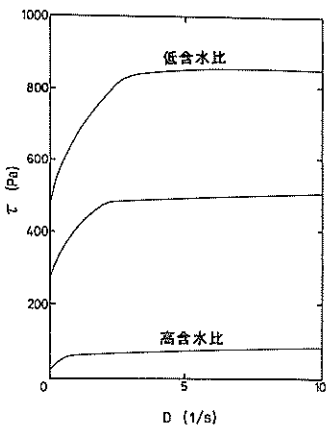


図-8 (c) 流動曲線の変化の形態：タイプC

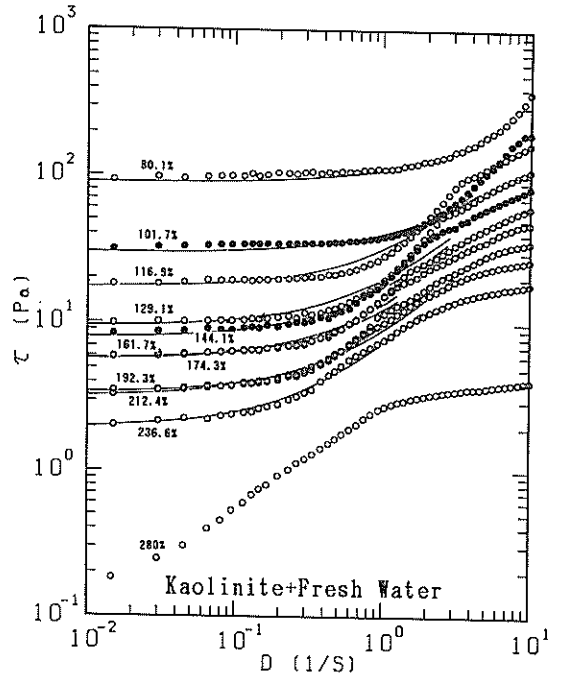


図-9 (a) カオリナイトの流動曲線

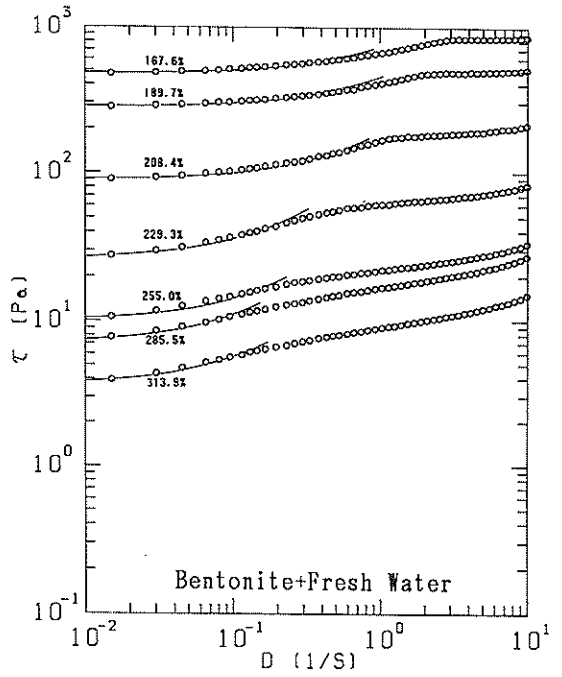


図-9 (b) ベントナイトの流動曲線（水で混合）

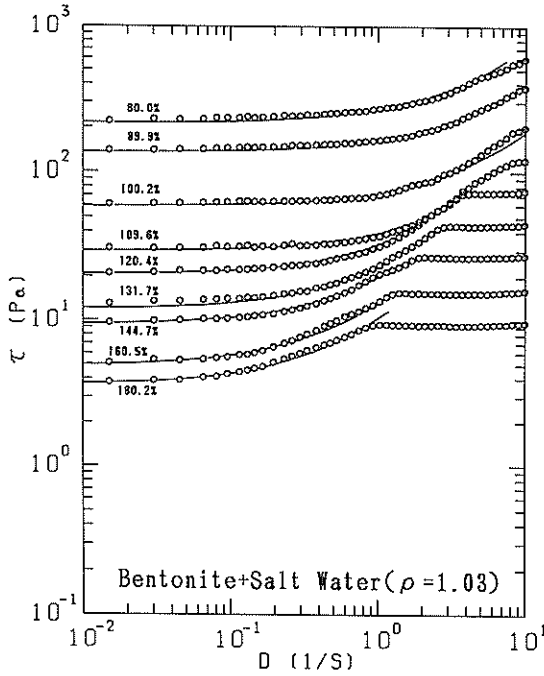


図-9(c) ベントナイトの流動曲線 (塩水で混合)

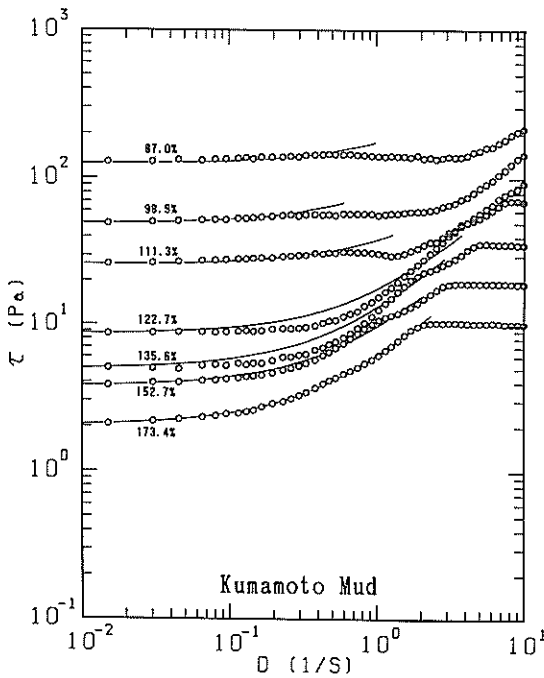


図-9(d) 熊本泥の流動曲線

定の含水比の粘土を作製するために、粘土は水または塩水と混合・かくはんされる。この時点で粘土は乱された状態となる。乱された粘土は回転粘度計に挿入された後、実験を開始するまでに5分間ほど放置される。粘土のチクトロピー性から、乱された構造は放置時間内にある程度回復していると考えられる。したがって1回目の操作で得られる降伏値は、どちらかといえば乱されない粘土の強度に対応しているであろう。この降伏値を τ_{y1} とする。1回目の操作で粘土はずり速度の上昇、下降作用を受け再び乱される。1回目の操作が終了してから2回目の操作に移るまでの時間(T_1)はわずかに2秒と短く、乱された粘土は構造を回復できない。よって、2回目、3回目の操作で得られた降伏値は、乱された粘土の強度に対応する。この降伏値を τ_{y2} とする。前報では、1回目のサイクルの流動曲線は2、3回目のものと異なり、また2、3回目の流動曲線はどの粘土でもほとんど一致することから τ_{y2} のほうを粘土の降伏値としている。

τ_{y1} が構造の回復した乱されない粘土の強度であることを確かめるために、回転粘度計に挿入後5分間放置した粘土と30分間放置した粘土を用いて τ_{y1} と τ_{y2} の比較を行った。その結果を図-10に示す。用いた粘土はカオリナイトである。5分間放置した場合は、 τ_{y1} は τ_{y2} のほぼ2倍である。30分間放置した場合は、含水比の低い粘土で τ_{y1} は τ_{y2} の2倍であるが、含水比が高くなると3倍から4倍となっている。これは30分間放置したことにより粘土が圧密されて含水比が低くなったためと考えられる。圧密の影響が小さい含水比の低い粘土か

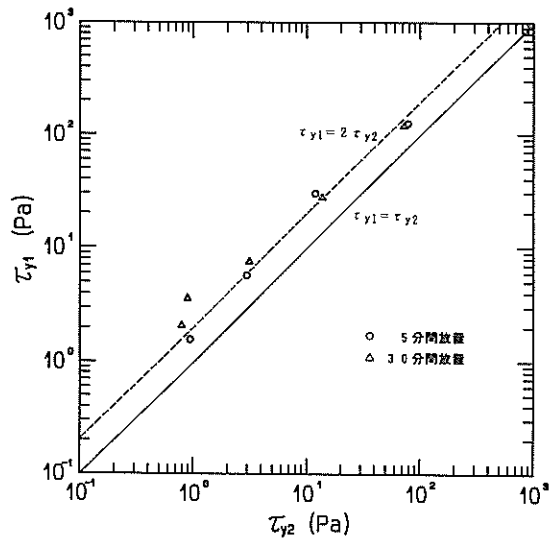


図-10 τ_{y1} と τ_{y2} の比較

判断すれば、5分間放置後と30分間放置後では τ_{y1} と τ_{y2} の関係が変わらないことから、 τ_{y1} はかくはんにより乱された構造が回復した後の乱されない粘土の強度を表すと言える。また、カオリナイトでは乱されない強度は乱された強度の約2倍である。

3. ベーン試験

前章で述べたように、底泥の流動限界値である降伏値は粘土のせん断強度を表す。粘土のせん断強度を測定する方法はいくつかあるが、その中でベーン試験は、軟弱な粘性土の非排水せん断強さを現位置で測定できる試験であり、広く一般的に用いられている⁶⁾。

本章では、前章の回転粘度計で得られた降伏値とベーンせん断強度の比較を行い、両試験方法で得られるせん断強度の関係を考察した。

3.1 試験方法

試験方法は、図-11に示すベーンと呼ばれる4枚翼十字型の羽根を粘土内に挿入し、これを一定の角速度で回転させる。ベーン試験で粘土のせん断強度を求める際には、ベーンの回転面が破壊面(すべり面)となることを仮定している。回転面に一様にせん断応力が作用し、これがベーンの回転に対する抵抗力となることから、せん断応力は次式で表される。

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

ここに、

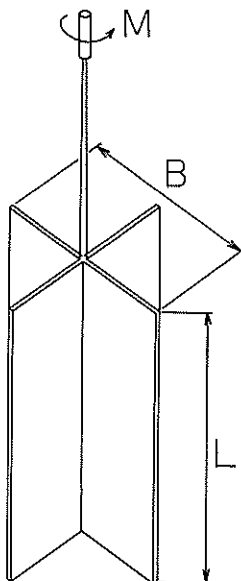


図-11 ベーンの形状

τ : せん断応力

M : 回転モーメント

B : ベーンの幅(直径)

L : ベーンの高さ

である。

この実験で用いたベーンせん断試験機は、回転粘度計の内筒をベーンに置き換えたものである。ベーンをゆっくりと等速度で回転させ、1回転(360度)するまでの回転角と粘土内の応力の関係を調べた。ベーンの制御は基本的に回転粘度計の制御と同じであり、図-3における T_1 、 T_2 を2秒とし、 T_3 はベーンが一回転するのに必要な時間とした。ベーンの回転速度は0.1、0.2、0.3、0.4、0.6、0.8度/sで、ベーンとして次の4種類の大きさのものを用いた。

1. $B=2\text{cm}$ $L=4\text{cm}$
2. $B=3\text{cm}$ $L=6\text{cm}$
3. $B=2\text{cm}$ $L=8\text{cm}$
4. $B=3\text{cm}$ $L=8\text{cm}$

このうち、 $L=2B$ のものを標準型と呼んでいる。各粘土の強度を求める実験では、回転速度を0.1度/s、ベーンの大きさを $B=2\text{cm}$ 、 $L=4\text{cm}$ とし、ベーンの回転速度と大きさを変える実験では、含水比100%のカオリナイトを用いた。

3.2 応力-歪曲線と流動曲線

(1) 応力-歪曲線

ベーンの回転角とせん断応力の関係は粘土の応力-歪曲線を表す。各粘土で得られた応力-歪曲線の特徴を以下に示す。

a) カオリナイト+水(図-12(a))

回転角 θ が大きくなるにしたがって、せん断応力 τ は急激に増大し θ が5度から10度付近で最大値となる。その後、 θ の増加にともない τ はゆるやかに減少し、一定値に漸近していく。ここで τ の最大値を最大せん断強度 τ_p 、 τ がほぼ一定値となった $\theta=360$ 度での値を残留強度 τ_r と呼ぶ。 τ_p 、 τ_r ともに含水比が高くなると小さくなる。含水比が80%から240%の範囲では τ_p は τ_r の2倍から4倍である。しかし含水比が280%になると τ_p と τ_r はほぼ等しくなる。

b) ベントナイト+塩水(図-12(b))

カオリナイト+水と同様に θ が10度~20度付近で τ は最大となる。

含水比が80~180%の範囲では τ_p は τ_r の3倍から6倍である。

c) ベントナイト+水(図-12(c))

含水比167.6%を除いて τ はピークをもたず、回転角

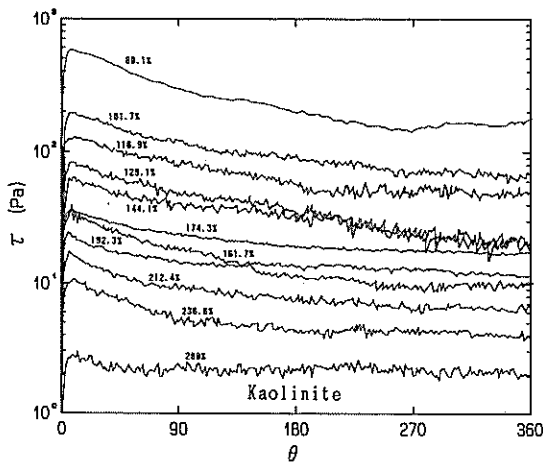


図-12(a) カオリナイトの応力-歪曲線

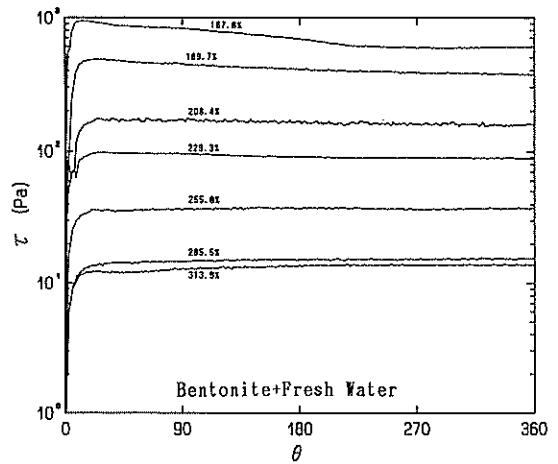


図-12(c) ベントナイトの応力-歪曲線 (水で混合)

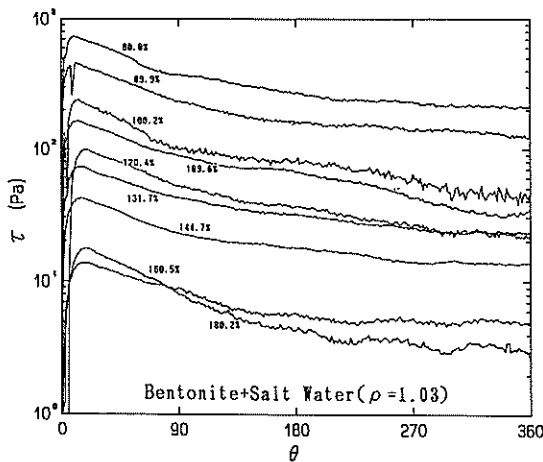


図-12(b) ベントナイトの応力-歪曲線 (塩水で混合)

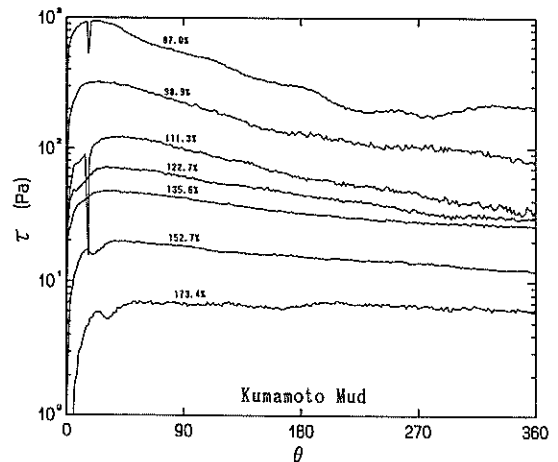


図-12(d) 熊本泥の応力-歪曲線

が20度付近を越えると τ は一定値となる。

d) 熊本泥 (図-12(d))

回転角が20度から30度付近で τ は最大となる。含水比が87%では τ_p は τ_r の5倍程度であるが、含水比が高くなるにつれて τ_p と τ_r の比は小さくなり、含水比が173.4%では τ_p と τ_r はほぼ等しくなる。

このように、ペーン試験で得られる応力-歪曲線は、ピークを持つ場合と持たない場合がある。この応力-歪曲線と2.で得られた両対数表示した流動曲線(図-8)を比較すると、ピークを持つ粘土の流動曲線は必ず速度が0付近で傾きがないのに対し、ピークを持たない粘土の流動曲線は必ず速度が0付近で傾きを持っている。つまり応力-歪曲線がピークを持つかどうかは、必ず速度

が0付近の流動曲線の形態と関係している。

この関係は次のように説明できる。2.2で示した各粘土の流動曲線は次式で表される。

$$\tau = \tau_y + \mu D^n \quad (3)$$

ここで右辺第一項 τ_y は粘土の内部構造による抵抗力、第二項 μD^n は粘土の流動に対する粘性抵抗力である。

(3)式を対数表示すれば

$$\log \tau = \log (\tau_y + \mu D^n) \quad (4)$$

となる。内部構造による抵抗力が粘性抵抗に比べて支配的な場合に(4)式は

$$\log \tau = \log \tau_y \quad (\tau_y \gg \mu D^n) \quad (5)$$

と表され、抵抗力は必ず速度に無関係となるため流動曲線は傾きを持たない。このような固体的な粘土の抵抗力

は粘土内の歪に依存する。ペーン試験ではペーンの回転により粘土内に歪が生じる。抵抗力はこの歪が大きくなると増加し、歪がある大きさに達すると最大になる。このときの抵抗力が最大せん断強度 τ_p である。さらに歪が大きくなると粘土の内部構造は乱されるため抵抗力は著しく低下する。したがって、流動曲線が $D=0$ 付近で傾きを持たない固体的な粘土では、応力-歪曲線はピークを持つ。最大せん断強度 τ_p は、粘土内部の構造が乱される前の抵抗力であることから、乱されない粘土の強度に対応する。一方、残留強度 τ_r は内部構造が破壊されたあとの抵抗力であることから、乱された粘土の強度に対応する。

含水比が高くなると、固体的な性質は弱まり、粘土は流体的な性質を示しはじめる。流体の外力に対する抵抗は粘性抵抗である。(4)式において、粘性抵抗が支配的になると

$$\begin{aligned} \log \tau &= \log \mu D^n \\ &= \log \mu + n \log D \quad (\tau_y < \mu D^n) \quad (6) \end{aligned}$$

となり、流動曲線は n の傾きを持つ直線で表される。このように流体的な粘土の抵抗力は歪に依存せず、ずり速度に依存する。ペーン試験ではペーンの回転速度は一定であるから、回転面付近で生じる粘土内のずり速度も一定であると考えられる。したがって、流動曲線が $D=0$ 付近で傾きを持つ流体的な粘土では、抵抗力は回転角によらず一定となり応力-歪曲線はピークを持たない。

(2) ペーンの回転速度と大きさの影響

図-13 は最大せん断強度 τ_p と回転速度 ω の関係を示す。どの大きさのペーンを用いても、回転速度が大きくなると最大せん断強度は増加することがわかる。また、大きいペーンを用いると最大せん断強度は若干大きくなっている。図-14 は、残留強度と回転速度の関係を示す。最大せん断強度の場合と同様に回転速度、ペーンの大きさが大きくなると残留強度は増加する。また増加の程度は最大せん断強度の場合よりも大きい。

このように、最大せん断強度、残留強度はともにペーンの回転速度によって異なる。この結果から、ペーン試験で測定された強度には歪だけではなくずり速度に依存する要因、つまり粘性抵抗も含まれていることが予測される。

(3) ペーンせん断強度と降伏値

(1) 応力-歪曲線の項で、最大せん断強度 τ_p と残留強度 τ_r を定義し、それぞれが乱されない粘土の強度、乱された粘土の強度であることを示した。2. で定義した二つの降伏値 τ_{y1} 、 τ_{y2} はそれぞれ乱されない粘土の強度、乱された粘土の強度に対応することを示した。こ

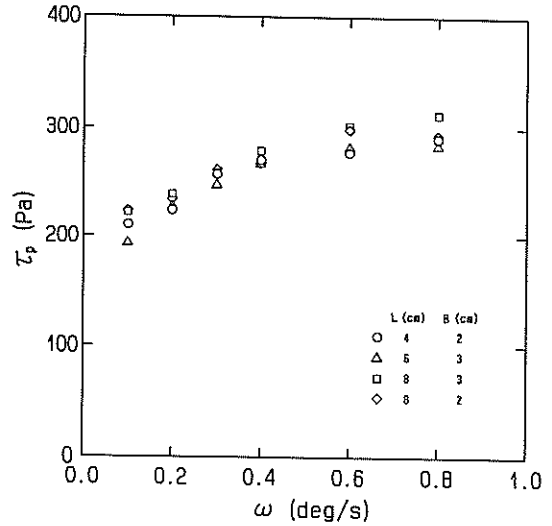


図-13 最大せん断強度と回転速度の関係

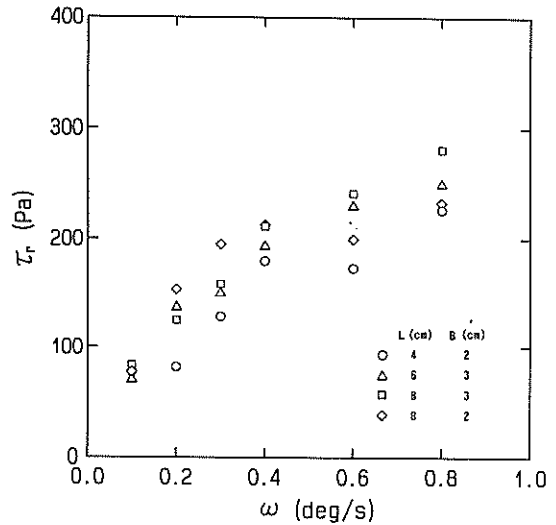


図-14 残留強度と回転速度の関係

こで、回転粘度計で得られた強度とペーンせん断強度の比較を行う。

図-15 は、乱された粘土の強度に対応する τ_{y2} と τ_r を比較したものである。図中の実線は $\tau_r = \tau_{y2}$ を表し、点線は $\tau_r = 5\tau_{y2}$ を表す。 τ_{y2} が大きい領域では両者はほぼ一致するが、 τ_{y2} が小さい領域では τ_r は τ_{y2} よりもかなり大きくなっている。(3)式に示したように、粘土の抵抗力は降伏値と粘性抵抗の和で表されることから、

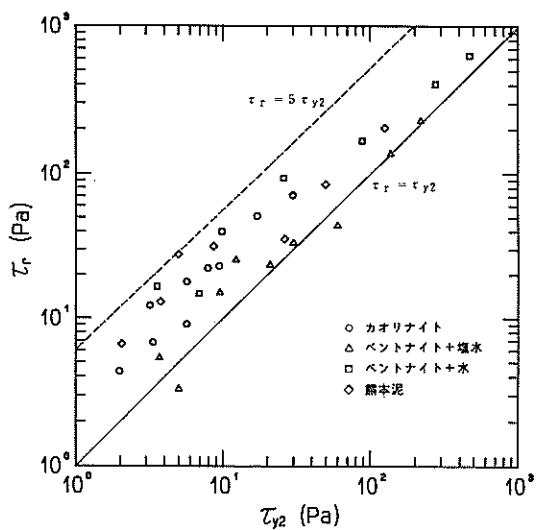


図-15 τ_{y2} と τ_r の比較

ベーンセン断試験で得られた強度が回転粘度計で得られた強度（降伏値）よりも大きくなる理由は、ベーンセン断試験で得られた強度には粘性抵抗が含まれているからであると考えられる。この粘性抵抗の大きさがわかれば、残留強度 τ_r から降伏値を推定することができる。粘性抵抗の大きさを知るにはベーンセン断試験で実際に生じているずり速度を測定すれば良いのだが、破壊面付近での流動状態がわからないので測定は不可能である。そこで、次のようにして粘性抵抗を推定し残留強度 τ_r の補正を試みた。

(1) で述べたように、図-9において粘性抵抗が無視できる場合には流動曲線は傾きを持たず、粘性抵抗が生じると曲線は傾きを持つ。よって流動曲線が傾きを持つところでは、強度に粘性抵抗が含まれている。この点を考慮して各粘土の流動曲線を見ると、降伏値の大きい固体的な粘土では粘性抵抗が含まれるのは $D > 1s^{-1}$ であるのに対し、降伏値の小さい流体的な粘土では $D < 1s^{-1}$ で既に粘性抵抗が強度に含まれている。したがってペー

表-4 各粘土の含水比と β の関係

カオリナイト

含水比(%)	β
80.1	0.77
101.7	0.77
116.9	0.67
129.1	0.53
144.1	0.45
161.7	0.41
174.3	0.42
192.3	0.31
212.4	0.36
236.6	0.27

ベントナイト+水

含水比(%)	β
167.6	0.75
189.7	0.72
208.4	0.56
229.3	0.45
255.0	0.48
285.7	0.45
313.9	0.36

熊本泥

含水比(%)	β
87.0	0.91
98.9	0.91
111.3	0.91
122.7	0.58
135.6	0.40
152.7	0.34
173.4	0.34

ベントナイト+塩水

含水比(%)	β
80.0	0.91
89.9	0.91
100.2	0.91
109.6	0.77
120.4	0.76
131.7	0.59
144.7	0.45
160.5	0.36
181.2	0.40

ンせん断試験で $D=1s^{-1}$ 程度のずり速度が生じているならば、降伏値の大きい粘土では $\tau_r = \tau_{y2}$ 、小さい粘土では $\tau_r > \tau_{y2}$ となり得る。そこでベーンせん断試験でのずり速度を $D=1s^{-1}$ とし、図-8 から各粘土の各含水比に対する $D=1s^{-1}$ でのせん断強度 τ_{D1} を求める。 τ_{D1} は降伏値 τ_{y2} に粘性抵抗を加えた全抵抗力である。 τ_{y2} を τ_{D1} で割りこの値を β とする。

$$\beta = \tau_{y2} / \tau_{D1} \quad (7)$$

β は $D=1s^{-1}$ での全抵抗力に対する降伏値の割合を表す。

残留強度 τ_r が $D=1s^{-1}$ での全抵抗力を表しているとすれば、 τ_r に β を掛けた値は τ_r から推定される降伏値 τ_{ry} となる。

$$\tau_{ry} = \beta \times \tau_r \quad (8)$$

表-4 は、各粘土の各含水比に対する β の値を示す。 β は含水比の低い粘土では大きく、含水比が高くなるにしたがって小さくなる。図-16 は回転粘度計で得られた降伏値 τ_{y2} と残留強度 τ_r から推定した降伏値 τ_{ry} を比較したものである。異なる含水比でも同一の降伏値が得られるなどの実験上のデータのばらつきを考えれば、 τ_y と τ_{ry} はよく一致している。このことから、ベーンせん断試験では回転速度が $0.1^\circ/s$ の場合には $D=1s^{-1}$ 程度のずり速度が生じており、このずり速度による粘性抵抗を考慮することにより残留強度から降伏値を推定することが可能であると言える。

回転粘度計とベーン試験で得られた結果を付表-1 に

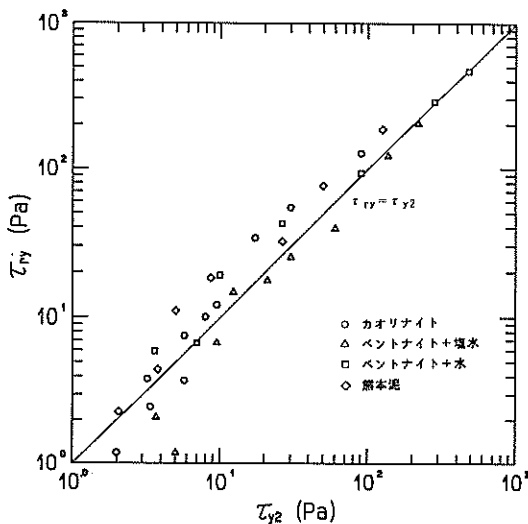


図-16 τ_{y2} と τ_{ry} の比較

まとめて示す。

4. スランプ試験

コンクリートの分野では、フレッシュコンクリートの流動性（コンシステンシー）を、スランプ試験やフロー試験で調べている。しかし、試験で得られた値がフレッシュコンクリートの流動特性の何を表しているのかが明かではなかった。近年、スランプ値やフロー値をレオロジー的視点から見直し、レオロジー定数とフレッシュコンクリートの性質を関係づける研究が行われている⁷⁾。回転粘度計^{8),9)}、球引き上げ粘度計¹⁰⁾、平行板プラストメータ¹¹⁾ などによる試験の結果、フレッシュコンクリートはビンガム流体に近い性質を示すこと、降伏値とスランプ値はかなり良い相関を持つことなどが明らかになっている。

海田ら¹²⁾ は、スランプ試験を粘土に適用した。彼らはスランプ値と粘土の含水比の関係を利用し、粘土の含水比の調節にスランプ値を用いた。また、粘土の巻き上げの形態をスランプ値で整理した。

本章では、フレッシュコンクリートに対して行われた試みと同様に、粘土の降伏値とスランプ値の関係を調べた。また、変形した粘土内部の応力と降伏値を比較し、降伏値を推定する方法について考察した。

4.1 実験方法と結果

(1) 空中スランプと水中スランプ

実験に用いたスランプコーンの形状は図-17に示すように高さ10cm、内径が上端で9cm、下端で10cmである。コーンの中に粘土を入れ、コーンを静かに抜きとったときの粘土の沈下量をスランプ値 s とした。図-18 は、各粘土の含水比とスランプ値を初期高さ（コーンの高さ） H で割った無次元スランプ値の関係を示す。スランプ試験が行える含水比の範囲は、カオリナイト+水で80%~280%、ベントナイト+塩水で80%~150%、ベントナイト+水で180%~260%、熊本泥+塩水で80%~220%である。このように粘土によって含水比の範囲は

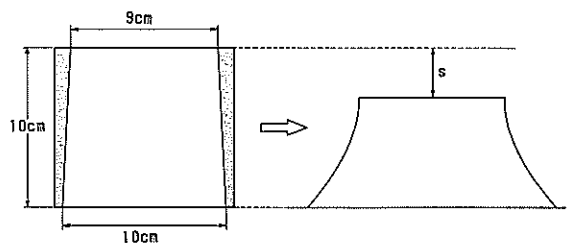


図-17 スランプコーンの形状

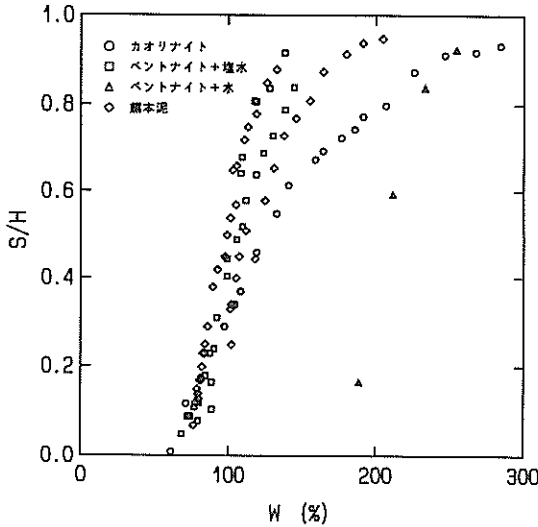


図-18 各粘土の含水比とスランプ値の関係

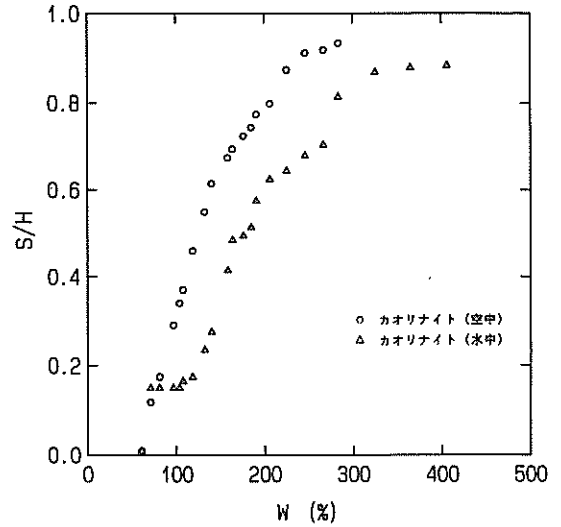


図-19 空中スランプと水中スランプ (カオリナイト)

異なっている。

スランプ試験の一つの問題点は、形を保てないほどの高含水比の粘土には適用できないことである。この問題を解決する方法として水中でスランプ試験を行う方法がある。スランプ試験による粘土の変形は自重による。水中スランプ試験は、水中の浮力を利用することにより自重を軽くして、高含水比の粘土に対しても適用可能とする方法である。図-19は、カオリナイトの空中スランプと水中スランプを比較したものである。水中スランプ試験を行うことにより、スランプ試験が可能な含水比の上限は280%から400%にまで上昇することがわかる。

(2) 降伏値とスランプ値

図-20は、各粘土のスランプ値 s と回転粘度計から求めた降伏値 τ_{y2} の関係を示す。ここで降伏値は ρgH で、スランプ値は H でそれぞれ無次元化している。 ρ は各粘土の各含水比に対する密度で次式で表される。

$$\rho = \frac{1 + \frac{w}{100}}{\frac{w}{100 \rho_w} + \frac{1}{\rho_s}} \quad (9)$$

ここで w は粘土の含水比、 ρ_w 、 ρ_s はそれぞれ水、土粒子の密度である。この無次元化により、カオリナイト、ベントナイト+塩水、熊本泥は同一に扱うことができる。これは、粘土の種類が異なってもスランプ値が等しければ降伏値は等しいことを示している。しかし、ベントナイト+水では、同じスランプ値に対する降伏値が他の三種の粘土の降伏値よりも大きくなっている。この理由は

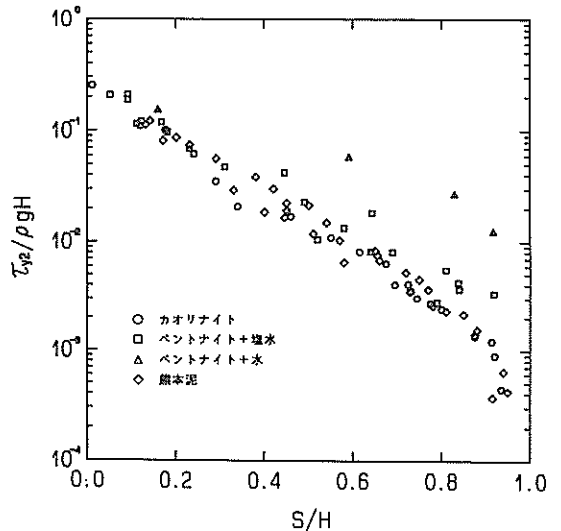


図-20 各粘土のスランプ値と降伏値 τ_{y2} の関係

次のように説明できる。(3)式に示したように粘土の抵抗力は降伏値 τ_y と粘性抵抗 μD^n の和で表される。降伏値 τ_y はずり速度が0での粘土の抵抗力であるが、本研究では $D=0.01s^{-1}$ での粘土の抵抗力 τ_{y2} を降伏値 τ_y としている。3.2で述べたように、図-8の流動曲線が $D=0.01s^{-1}$ 付近で傾きを持たない場合には、 $D=0.01s^{-1}$ での粘性抵抗が降伏値 τ_y に対して無視でき、 $\tau_{y2} = \tau_y$ となる。一方、 $D=0.01s^{-1}$ で曲線が既に傾きを持つ場合には、 $D=0.01s^{-1}$ での粘性抵抗が無視できず、 τ_{y2} には粘性抵抗が含まれるために $\tau_{y2} > \tau_y$ となる。カオリ

ナイト、ベントナイト+塩水、熊本泥では、スランプ試験が可能な含水比の範囲内で、流動曲線は $D=0.01s^{-1}$ で傾きを持たない。よって $\tau_{y2}=\tau_y$ と考えてよい。しかしベントナイト+水の流動曲線は、スランプ試験が可能な含水比 $w=180\% \sim 260\%$ の範囲内でも、含水比が200%以上になると $D=0.01s^{-1}$ で傾きを持つ。したがってベントナイト+水では τ_{y2} が τ_y よりも大きくなり、図-20のような結果となる。

図-21は、カオリナイトの空中スランプ値、水中スランプ値と降伏値の関係を表す。ここで水中スランプに対する降伏値は水中重量で無次元化している。やはり両者は同一に扱うことができる。

このように、降伏値を粘土の重量で無次元化することにより、降伏値とスランプ値の間には粘土の種類によらない一定の関係が得られる。

4.2 内部応力の算定

スランプ試験では、粘土に作用する外力は重力すなわち自重である。自重によって粘土内に生じた最大せん断応力が降伏値以上になると、粘土は流動し変形する。変形によって、粘土内の応力状態は変化し、最大せん断応力が降伏値より小さくなると変形は終了する。したがって変形後の最大せん断応力は、粘土内のどの位置でも降伏値であると考えてよく、変形後の応力状態がわかれば降伏値を推定できる。

変形後の粘土内部の応力状態は次のようにして求めた。図-22に示すように、変形後の粘土の底面中央から水平方向にX軸、鉛直上向きにZ軸をとる。Z=zで

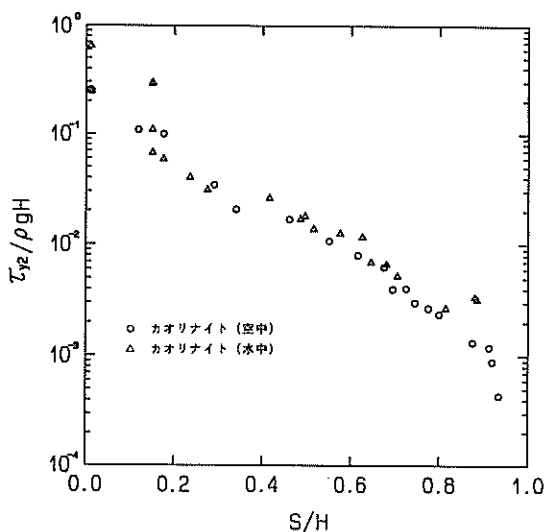


図-21 空中スランプ値、水中スランプ値と降伏値 (カオリナイト)

水平に切った面(z面)の直径を $a(z)$ とし、変形後の粘土の高さを h とする。応力計算を簡単にするために、z面に作用する直応力 σ_z は面内で一様と仮定する。よって、 σ_z はz面より上にある粘土の重量をz面の面積で割った値となる。

$$\sigma_z = \frac{\rho g \int_z^h \frac{\pi a(z)^2}{4} dz}{\frac{\pi a(z)^2}{4}} \quad (10)$$

z面上に微小エレメントを考えると、上の仮定から σ_z 、 σ_x が直応力となる。

したがって、このエレメント内の最大せん断応力 τ_{max} は

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} (\sigma_z - \sigma_x) \quad (11)$$

となる。ここで σ_x は、 σ_z の一次関数で表すことができる。

$$\sigma_x = k \sigma_z \quad (12)$$

kは物質によって異なる定数で、流体の場合は1、土では静止土圧係数で0.5である。本研究で用いた粘土のkの値はわからないことから、これを変数として応力計算を行った。(11)、(12)式より τ_{max} も σ_z の一次関数で表される。

$$\tau_{max} = a \sigma_z \quad (13)$$

$$a = \frac{1}{2} (1 - k) \quad (14)$$

変形後の最大せん断応力 τ_{max} は降伏値に等しく一定であることから、直応力 σ_z も一定値 σ_c となる。

$$\sigma_z = \text{const.} = \sigma_c \quad (15)$$

(10)式と(15)式から、変形後直応力が一定となるような粘土の形状を求めることができる。

$$a(z) = C \exp \left\{ \frac{\rho g}{2 \sigma_c} (h - z) \right\} \quad (16)$$

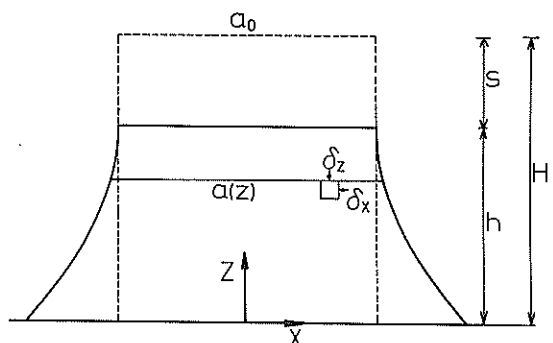


図-22 内部応力の計算方法

粘土の上端面では自重の影響は0であるから変形は生じない。よって上端面での直径はコーンの内径 a_0 と等しい。これを(16)式に代入すれば次式を得る。

$$a(z) = a_0 \exp\left\{\frac{\rho g}{2\sigma_c}(h-z)\right\} \quad (17)$$

これより変形後の粘土の体積は次のようになる。

$$V = \int_0^h \frac{\pi a(z)^2}{4} dz \quad (18)$$

$$= \frac{\pi a_0^2 \sigma_c}{4 \rho g} \left\{ \exp\left(\frac{\rho g h}{\sigma_c}\right) - 1 \right\}$$

また変形前の体積は

$$V = \frac{\pi a_0^2 H}{4} \quad (19)$$

である。変形前と変形後の体積は等しいことから次式を得る。

$$\frac{\rho g H}{\sigma_c} = \exp\left(\frac{\rho g h}{\sigma_c}\right) - 1 \quad (20)$$

ここで、スランプ値 s は $s = H - h$ であるから、これを上式に代入すると

$$\exp\left(1 - \frac{s}{H}\right) = \left(\frac{\rho g H}{\sigma_c} + 1\right) \frac{\sigma_c}{\rho g H} \quad (21)$$

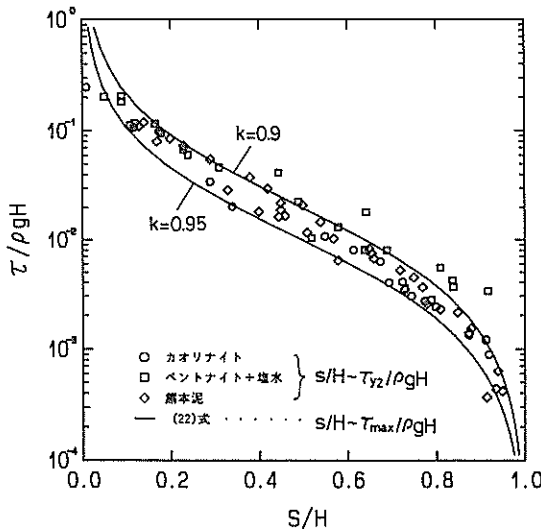


図-23 実験値と計算結果の比較

となる。

一方(13)、(15)式より $\tau_{\max} = \alpha \sigma_c$ であり、これを(21)式に代入すると

$$\exp\left(-\frac{s}{H}\right) = \frac{1}{2.72} \left(\frac{\alpha \rho g H}{\tau_{\max}} + 1\right) \frac{\tau_{\max}}{\alpha \rho g H} \quad (22)$$

となる。

ここで $\tau_{\max} / \rho g H$ は応力の無次元量、 s / H はスランプ値の無次元量である。

図-23は図-20に(22)式の計算結果を加え、実験結果と計算結果を比較したものである。ただし、 τ_{y2} が実際の降伏値よりも大きいと考えられるベントナイト+水のデータは除いた。(12)式で $k=0.9\sim 0.95$ とすれば、(22)式による τ_{\max} は実験から得られる降伏値 τ_{y2} とよく一致していることがわかる。したがって、(22)式を用いることにより、スランプ試験から降伏値を推定することができる。

5. 結論

本研究で得られた結果は以下のとおりである。

(1) 回転粘度計による試験

a) 回転粘度計で得られる流動曲線は、粘土の種類や含水比によって異なる。含水比の変化による流動曲線の変化の形態を大きく3つに分類した。

b) 流動曲線を求めるには、ずり速度の上昇、下降の操作を3回繰り返すが、1回目の操作で得られる降伏値 τ_{y1} は、2回目、3回目で得られる降伏値 τ_{y2} の約2倍の大きさであった。

(2) ベーンせん断試験

a) ベーン試験で得られる応力-歪曲線は、粘土の種類や含水比の違いにより、ピークを持つ場合と持たない場合に分かれた。応力-歪曲線と流動曲線と比較した結果、ずり速度が0付近の抵抗力として、内部構造による抵抗が支配的である場合には応力-歪曲線はピークを持ち、粘性抵抗が支配的な場合にはピークを持たないことが明らかになった。

b) ベーンせん断試験で生じる粘性抵抗を考慮し、残留強度 τ_r から推定した降伏値 τ_{ry} は τ_{y2} とよく一致した。

(3) スランプ試験

a) 無次元化した降伏値とスランプ値の間には、粘土の種類にかかわらず一定の関係があることがわかった。

b) 変形後の粘土内の最大せん断応力とスランプ値

の関係式を求めた。最大せん断応力と降伏値は等しいことより、この関係式を用いてスランプ値から降伏値が求められることを示した。

6. あとがき

粘土の降伏値は、底泥の流動限界を決定する重要なパラメータである。著者らが降伏値を求めるために行った回転粘度計による試験は、制御系が複雑でまた試験機も高価であるため、一般的な試験法としては普及していない。そこで、今回はより簡単でどこでも行えるスランプ試験と、軟弱な粘土のせん断強度を原位置で測定できるベーンせん断試験を取り上げて、回転粘度計で得られる流動曲線と降伏値との関係について検討した。両試験で得られた実験結果が、流動曲線のずり速度が0付近での挙動と密接な関係があることを明らかにしたことは、本研究の大きな成果であると考えている。

粘土の流動現象を解明するためには、流動限界だけでなく、流動を開始した後の流動状態をも明らかにする必要があるので、今後は粘土の流動状態を決定するパラメータである塑性粘度についても検討すべきである。

シルテーションの研究では、今回取り上げた流動現象のほかに、潮流や波による底泥の巻き上げ現象、また巻き上げられた浮遊粒子によって形成される高含水比の粘土層 (fluid mud) の輸送形態など解決すべき問題はまだまだ山積している。これらの問題は早急に解決されることが望まれており、シルテーションの研究はこれからますます盛んになるであろう。

最後に善 功 企土質部 土質研究室長および土田 孝 土質部主任研究官にはベーン試験について有益な助言をうけた。ここに記して感謝します。

(1989年3月31日 受付)

参 考 文 献

- 1) 大坪国順：底泥の再浮上機構に関する基礎的研究，京都大学学位論文，138p., 1984.
- 2) 鶴谷広一・中野 晋・鷹濱 潤：回転粘度計による底泥の流動特性の検討，港湾技研資料，No. 566, 29p., 1986.
- 3) 鶴谷広一・江口秀二・鷹濱 潤：流れと波による底泥の巻き上げに関する実験的研究，第35回海岸工学講演会論文集，pp. 357~361, 1988.
- 4) 日本流体力学会編：流体力学ハンドブック，丸善，890p., 1987.
- 5) Streeter, V.L. : Handbook of Fluid Dynamics, McGRAW-HILL Book Company, Inc., 1961.

- 6) 土質工学会，ベーンによる原位置せん断試験方法研究委員会：ベーン試験に関するシンポジウム発表論文集，1980.
- 7) 谷川恭雄・森博嗣：フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価法—スランプ値から何がわかるか—，コンクリート工学，Vol. 25, No. 5, pp. 4~16, May, 1987.
- 8) 村田二郎・菊川浩治・杉山秋博：回転粘度計におけるフレッシュコンクリートの流動解析，セメント技術年報，Vol. 29, pp. 204~206, 1975.
- 9) 長滝重義・米倉亜州夫：回転粘度計によるモルタルの流動性解析の1考察，セメント技術年報，Vol. 29, pp. 207~212, 1975.
- 10) 水口裕之・藤崎茂・大城豊治：フレッシュコンクリートの塑性粘度及び降伏値の測定，セメント技術年報，Vol. 28, pp. 154~158, 1974.
- 11) 荒木謙一・水口裕之・藤崎茂：フレッシュコンクリートの配合とレオロジー定数との関係，セメント技術年報，Vol. 29, pp. 200~203, 1975.
- 12) 海田輝之・楠田哲也・二渡 了・粟谷陽一：柔らかい底泥の巻き上げ過程に関する研究，土木学会論文集，第393号/II-9, pp. 33~42, 1988.

主要記号一覧表

$a(z)$: 変形後の粘土の直径 (cm)
a_0	: スランプコーン上端での直径 (cm)
B	: ベーンの幅 (cm)
D	: ずり速度 (s^{-1})
D_{max}	: 最大ずり速度 (s^{-1})
g	: 重力加速度 (m/s^2)
H	: スランプコーンの高さ (cm)
h	: 変形した粘土の高さ (cm)
k	: σ_x と σ_z の比
L	: ベーンの高さ (cm)
n	: 内筒の回転数 (r.p.m)
R_a	: 回転粘度計の外筒の半径 (cm)
R_i	: 回転粘度計の内筒の半径 (cm)
s	: スランプ値 (cm)
T_1	: ずり速度制御時間 (s)
T_2	: ずり速度制御時間 (s)
T_3	: ずり速度制御時間 (s)
V	: 粘土の体積 (cm^3)
w	: 含水比 (%)
X	: 水平座標
Z	: 鉛直座標
α	: τ_{max} と σ_z の比
β	: τ_{yz} と τ_{D1} の比

δ	: 外筒と内筒の半径比 (= R_a / R_i)
θ	: ベーンの回転角(度)
ρ	: 粘土の密度 (kg/m^3)
ρ_s	: 土粒子の密度 (kg/m^3)
ρ_w	: 水の密度 (kg/m^3)
σ_x	: X方向の直応力 (Pa)
σ_z	: Z方向の直応力 (Pa)
σ_c	: σ_z の一定値 (Pa)
τ	: せん断応力 (Pa)
τ_y	: 降伏値 (Pa)
τ_{y1}	: 1 サイクル目の降伏値 (Pa)
τ_{y2}	: 2, 3 サイクル目の降伏値の平均値 (Pa)
τ_p	: 最大せん断強度 (Pa)
τ_r	: 残留強度 (Pa)
τ_{ry}	: 残留強度から推定した降伏値 (Pa)
$\tau_{D=1}$: $D = 1$ でのせん断応力 (Pa)
τ_{\max}	: 最大せん断応力 (Pa)
ω	: ベーンの回転速度 (度/s)

付表-1 測定結果表

底泥の種類	w (%)	τ_{v2} (Pa)	τ_p (Pa)	τ_r (Pa)
カオリナイト	80.1	90.0	620.0	168.0
	101.7	30.0	205.0	71.0
	116.9	17.3	134.7	51.7
	129.1	9.54	89.7	23.3
	144.1	8.00	66.3	22.5
	161.7	5.75	38.7	9.2
	174.3	5.75	38.2	18.3
	192.3	3.23	25.3	12.4
	212.4	3.39	17.7	6.9
	236.6	2.00	10.8	4.4
ベントナイト + 塩水	80.0	218.8	783.3	226.7
	89.9	137.0	496.7	136.6
	100.2	60.0	255.0	44.0
	109.6	30.0	176.7	33.3
	120.4	20.9	105.1	23.3
	131.7	12.3	78.3	25.3
	144.7	9.54	45.2	15.0
	160.5	5.01	19.0	3.3
	181.2	3.71	14.7	5.3
	ベントナイト + 水	167.6	478.6	1020.0
189.7		281.8	519.3	406.7
208.4		90.0	186.7	170.0
229.3		26.3	105.3	95.0
255.0		10.0	38.7	40.6
285.7		7.0	13.3	15.0
313.9		3.63	16.0	16.8
熊本泥	87.0	125.9	1010.0	206.7
	98.9	50.0	346.7	85.3
	111.3	26.4	130.0	36.0
	122.7	8.7	76.0	31.9
	135.6	5.0	50.0	28.0
	152.7	3.8	21.2	13.1
	173.4	2.06	7.5	6.7

港湾技研資料 No. 655

1989・6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.