

流れによる粘性土床の流動とそのモデル化

Characteristics of Mud Flow Caused by
Water Flow and Its Hydraulic Modelling

神田 徹*・神吉和夫**・宮本正文***・渡邊武志****

By Tohru KANDA, Kazuo KANKI, Masafumi MIYAMOTO and Takeshi WATANABE

Experiments concerning physical properties of the mud enable us to treat the mud as a Bingham fluid, and also show that the yield shear stress and viscosity of mud are related to the water content. We make a hydraulic model of mud flow under the flowing water based on the governing equations for Bingham fluid, which takes into account the space- and time-distribution of water contents of the mud. Using this model, we analyze the velocity profile of mud flow and investigate the influence of shear stress acting on the mud surface and water content of the mud on the flowing-layer depth and mud velocity.

Keywords: Mud, Bingham fluid, Yield shear stress

1. まえがき

河川感潮部や浅い湾に堆積している底泥、いわゆるヘドロは流れや波によって容易に巻上げられ、シルテーションや水域の富栄養化を招いている。底泥の巻上げ・輸送等の現象は底泥自体の物性に強く支配されるので、まずその物性解明が重要であり、さらにこの物性が底泥の流動にどのように関係するかを明らかにしなければならない。これらの課題に関して従来、実験的研究および理論的研究が報告されているが^{1)~6)}、底泥の種類によって物性が異なり、またそれによって水理特性に大きな差異が生じるので、底泥の挙動解明のためにはより多くの知見が必要である。本研究は、ほぼBingham流体として取り扱うことのできるカオリナイトを底泥材として用い、一方向流れの下での底泥表層付近の現象を実験および数値シミュレーションによって基礎的に検討する。降伏せん断応力や塑性粘度に関係する底泥内含水比の鉛直分布および時間的変化を実験的に調べ、その特性をもとに静止領域を考慮に入れた底泥の流動モデルを作成する。このモデルを用いて底泥の流速分布等を求め、実験値との比較を行う。

* 正会員 工博 神戸大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 神戸大学助手 工学部土木工学科
(〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

*** 正会員 工修 西日本旅客鉄道株式会社
(〒530 大阪市北区大深町1-1)

**** 学生会員 神戸大学大学院工学研究科

2. 粘性土の流動特性

カオリナイトの流動曲線（せん断応力～ずり速度（ du/dy ）関係）を図-1に示す。測定は回転粘度計を用い、ずり速度を $10^{-2} \sim 10^1$ (1/s)で変化させた。ずり速度の小さい領域では流動曲線があるせん断応力に漸近することから、カオリナイトはビンガム流体として扱え、せん断応力は次式で表される。

$$\tau = \tau_y + \mu_B \cdot du/dy \quad (1)$$

降伏せん断応力 τ_y と含水比 W の関係を図-2に示す。降伏せん断応力としては、流動曲線においてずり速度が 10^{-2} (1/s)での τ の値を用いた。図中の回帰直線より、降伏せん断応力は式(2)で与えられる。

$$\tau_y = 8.43 \times 10^{10} W^{-4.37} \quad (\text{N/m}^2) \quad (2)$$

塑性粘度 μ_B と W の関係を図-3に示す。塑性粘度は各流動曲線において、ずり速度が $10^{-2} \sim 10^1$ (1/s)の値から最小自乗法により求めた。図の回帰直線より、塑性粘度は式(3)で与えられる。

$$\mu_B = 9.48 \times 10^{20} W^{-8.11} \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (3)$$

以上のように、粘性土の物性値である降伏せん断応力と塑性粘度は含水比と密接な関係がある。Bingham流体の流動を特徴づけるのが τ_y と μ_B であるから、底泥の流動現象を解明する上で泥層内の含水比に注目することが重要である。

3. 流れによる粘性土床の流動に関する実験

底泥上を一方向に流れる水流によって、底泥表層部にどのような現象が生じるかを調べるために、水理模型実験を行った。図-4に示すように、予め初期含水比 W_0 (%)に調節してあるカオリナイトを敷いて通水し、含水比 W の鉛直分布、底泥流速 u 、流動化層厚 δ (後述)を測定した。なお、底泥流速の測定にはサーマル式微流速計を用いた。

3.1 含水比の鉛直分布

水流のない場合（静水中）と15分間通水した後（通水後）の含水比の鉛直分布を図-5に示す。通水後の含水比は、泥表面に近い部分では静水中の含水比より高く、泥表面から0.5cm以上深い部分では、静水中とほぼ等しい含水比分布を示す。0.5cmよりも深い部分で初期含水比よりも含水比が低下するのはカオリナイト粒子の沈降・圧密の影響であり、泥表面付近の含水比が上昇するのは通水による影響と考えられる。

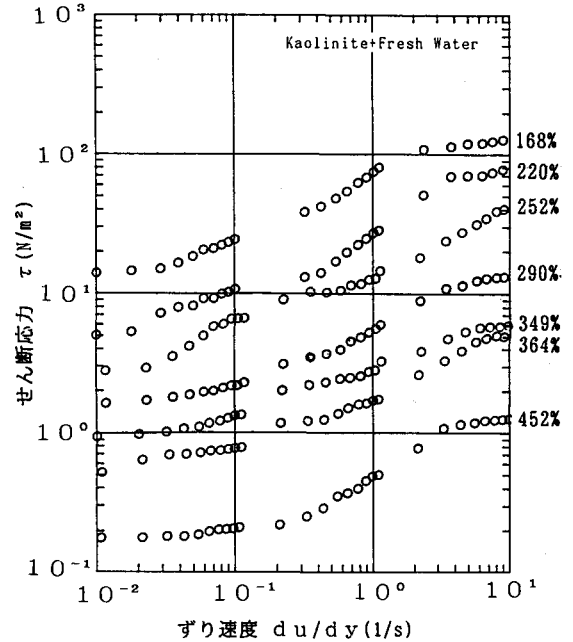


図-1 カオリナイトの流動曲線

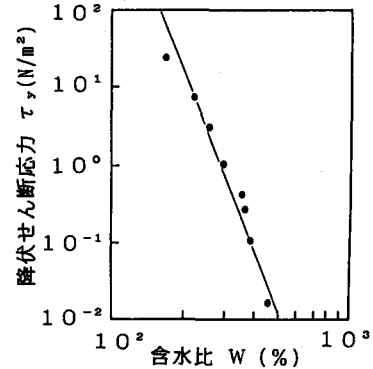


図-2 降伏せん断応力と含水比の関係

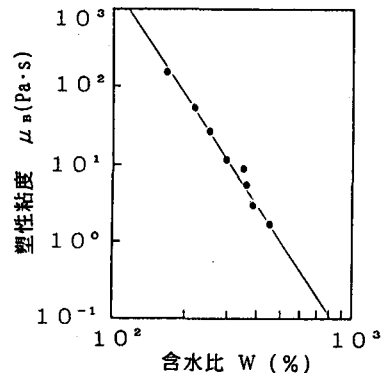


図-3 塑性粘度と含水比の関係

含水比の経時変化を図-6に示す。図において ΔW は（通水後の含水比－静水中の含水比）である。表層部（0～0.5cm）は通水直後から含水比が上昇して約30分後には流失する。（0.5～1.0cm）の部分は30～45分の時間に含水比の上昇が見られるが、これは流失した表層部に代ってこの部分が新たな泥表面になって含水比が上昇したことを示す。このように含水比が上昇して流失するという現象が、順次深い部分に及んでいくのが図からわかる。

3. 2 底泥の流速

底泥の流速分布を図-7に示す。泥表面せん断応力が大きいほど底泥流速 u は大きく、また流動化層厚 δ_m （せん断応力が底泥の降伏値を越える時に流動化する底泥の厚さ）も大きい。

泥表面流速 u_1 ～泥表面せん断応力 τ_o 関係を図-8に示す。プロットは含水比ごとに比例関係があり、含水比が大きい順に左上から右下へと並ぶ。

$\delta_m \sim \tau_o$ 関係を図-9に示す。図-8と同様、含水比ごとに比例関係があり、含水比が大きい順に左上から右下へと並ぶ。以上のことから、同じ大きさの泥表面せん断応力が作用する場合には、含水比が大きいほど泥表面流速や流動化層厚が大きくなる。つまり、流動化しやすい。

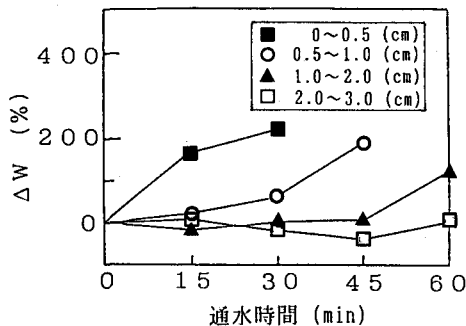


図-6 深さ別の ΔW の経時変化

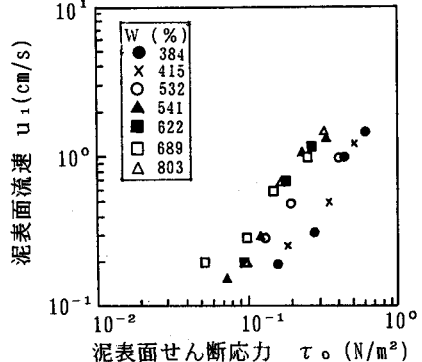


図-8 $u_1 \sim \tau_o$ 関係

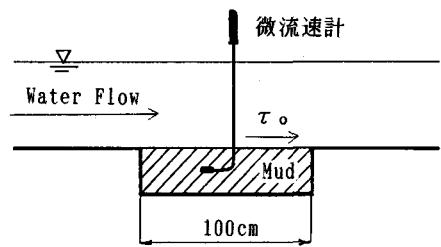


図-4 実験の模式図

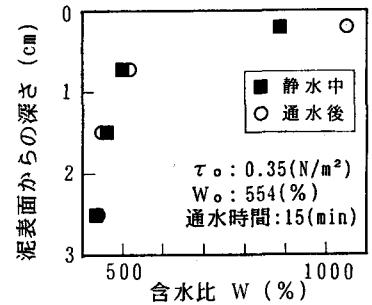


図-5 含水比の鉛直分布

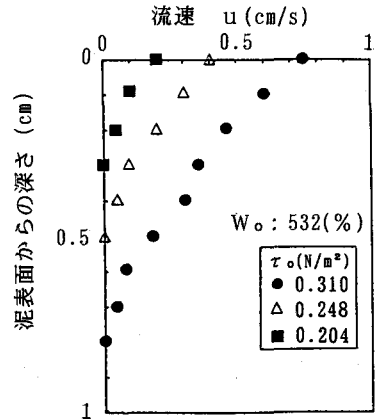


図-7 底泥の流速分布

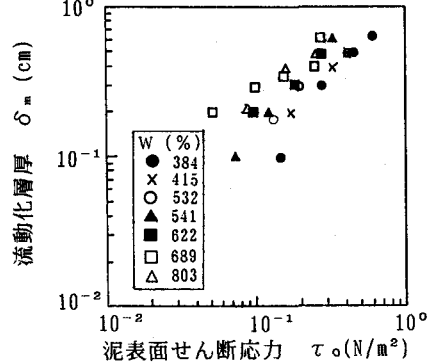


図-9 $\delta_m \sim \tau_o$ 関係

4. 底泥の流動モデル

4. 1 基礎方程式

(1) 底泥上の水流の流速分布

底泥上の流速分布を、粘性底層外と粘性底層内について、それぞれ式(4)、(5)のように仮定する。

$$\frac{U}{u_*} = \frac{u_{oq}}{u_*} + 5.5 + 5.75 \log_{10} \frac{u_* y}{\nu_o} \quad (4)$$

$$\frac{u_o}{u_*} = \frac{u_{1u}}{u_*} + \frac{u_* y}{\nu_o} \quad (5)$$

ここに、 U :粘性底層外($y \geq \delta_L$)の流速
 u_o :粘性底層内($y \leq \delta_L$)の流速
 $u_{oq} = u_{1u}$:泥表面($y=0$)の流速
 δ_L :粘性底層厚、 u_* :摩擦速度
 ν_o :水の動粘性係数

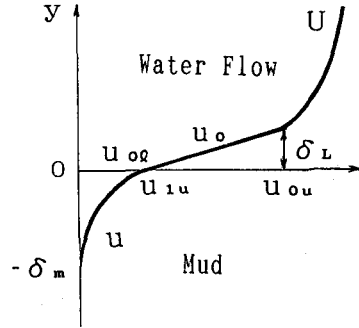


図-10 泥表面付近の流速分布

(2) 底泥の流動の基礎式

泥のx軸方向の運動方程式は式(6)で表される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} (\tau_y + \mu_B \frac{\partial u}{\partial y}) \quad (6)$$

ここに、 μ_B :底泥の塑性粘度 τ_y :底泥の降伏せん断応力

4. 2 計算方法

図-11 に示すように、底泥を泥表面から各層の厚さが ΔH の泥層に分割する。図において、 μ_o は水の粘性係数、 τ_o は泥表面せん断応力、また W_i 、 μ_{B1} 、 τ_{y1} は第 i 層 ($i=1,2,\dots,n$) の諸量を示す。

含水比 W の鉛直分布は図-11 右図に示すようであり、 W_s 、 W_* はそれぞれ $y=0$ 、 $y=-\infty$ での含水比である。

また、底泥の粘度 μ_B 、降伏せん断応力 τ_y は、含水比の関数であるとし、2. で得られた関係式を用いた。

式(6)から、泥第 i 層の運動方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_i} \frac{\partial p_i}{\partial x} + \frac{1}{\rho_i} \frac{\partial}{\partial y} (\tau_{yi} + \mu_{B1} \frac{\partial u_i}{\partial y}) \quad (7)$$

ここに、 u_i :第 i 層内の流速

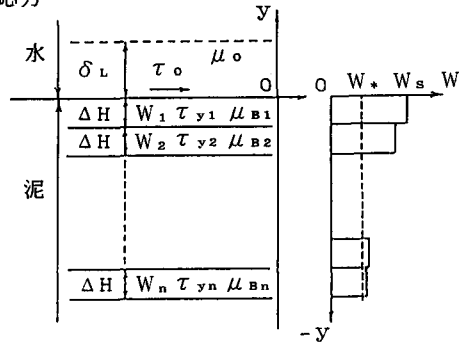


図-11 モデルの説明図

4. 3 泥表面および泥層内境界の条件

① $y = \delta_L$ で $u_{ou} = \tau_o \delta_L / \mu_o$ 、② 泥表面で $u_{oq} = u_{1u}$ 、 $\tau_o = \tau_1$ 、③ 泥第 i 層～第 $(i+1)$ 層界面で $u_{i2} = u_{i+1,1}$ ($i=1,2,\dots,n$)。ここに、 u_{1u} 、 u_{i2} はそれぞれ泥第 i 層の層上端、層下端の流速を示す。④ $y = -\delta_m = -n \Delta H$ で $u_{n2} = 0$ 。 δ_m は流動化層厚で、これより深い部分 ($y < -\delta_m$) では泥は静止している。

計算手順のフローチャートを図-12 に示す。まず、水層・泥層のデータを与える。次に、初期値としてずり速度 D_o 、 D_1 を与えると対応する粘度が定まり、基礎式は境界条件の下で解け、 u_o 、 u_i が求められる。

u_o 、 u_i から求められる各層のずり速度 du_o/dy 、 du_i/dy が先に与えた D_o 、 D_1 と異なれば、 $D_o \leftarrow$

du_o/dy , $D_i \leftarrow du_i/dy$ として再び計算を行い、ずり速度が収束するまで計算を繰り返す。以上の計算を泥第1層: ($n=1$)からはじめ、 $\tau_n < \tau_{y,n+1}$ ($\tau_{y,n+1}$: 泥第 $n+1$ 層の降伏せん断応力)となるまで繰り返す。その結果 $u_o, u_i (i=1, 2, \dots, n)$ および δ_m が求められる。さらに、 Δt 時間後の泥表面条件を与え、上述と同じ計算を繰り返す。

5. 計算結果

上述の計算法によって、底泥流速、流動化層厚に及ぼす泥表面せん断応力 τ_o 、含水比 W の影響を調べた。ただし、流れは定常で、含水比の時間変化が無い場合を対象とする。ずり速度 du/dy および底泥流速 u の分布を図-13に示す。 τ_o が大きいほど $du/dy, u$, 流動化層厚 δ_m は大きくなる。

τ_o を一定とし、 W の鉛直分布を変えた場合の塑性粘度 μ_B と u の分布を図-14に示す。 $W_{s*} (= W_s - W_*)$ が小さいほど μ_B の深さ方向の増加量は小さく、その結果 u は大きくなる。これは、浸透性の強い泥ほど u が大きくなり、また、同じ泥でも、前述の実験結果が示すように通水時間が長くなれば、下層まで浸透が及び u が各層にわたって大きくなることを意味する。

W_{s*} を一定(50%)とし、表面含水比 W_s を変化させた場合の τ_o と泥層内平均流速 u_{av} 関係を図-15に示す。ただし、 $\delta_m \leq 5\text{cm}$ での計算結果である。図において各曲線の下端では流動化層厚は $1(\Delta H=0.02\text{cm})$ であり、第2層以下では底泥は静止している。すなわち、計算ではこの点より大きな τ_o が作用すれば流動が始まると考えてよい。図中の破線は各含水比において等しい流動化層厚を与える τ_o を結んだものである。 W_s が大きいほど小さな τ_o で底泥の流動が始まり、一定の τ_o に対する δ_m は W_s が大きいほど大きな値をとる。また、一定の u_{av} に対する τ_o は W_s が大きいほど小さくなる。

底泥流速について計算値と実験値の比較を図-16に示す。泥表面付近の流速はほぼ等しいが、それより深くなるにつれ実験値が小さくなる。また、流動化層厚も実験値の方が小さい。この原因としては、計算のために与えた含水比の鉛直方向分布が実際の含水比分布と異なっていることが考えられる。

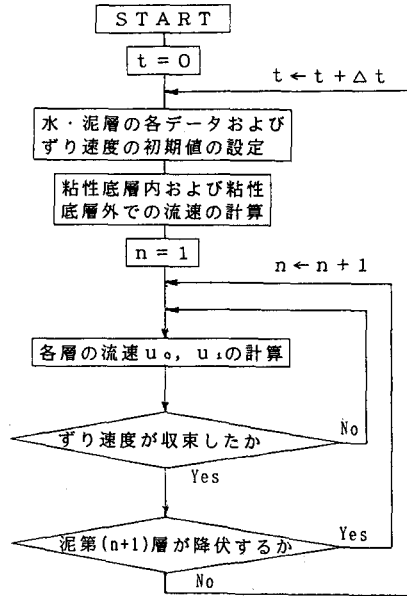


図-12 計算手順のフローチャート

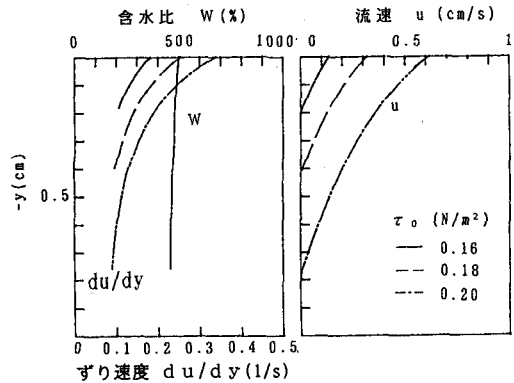


図-13 $du/dy, u$ の分布

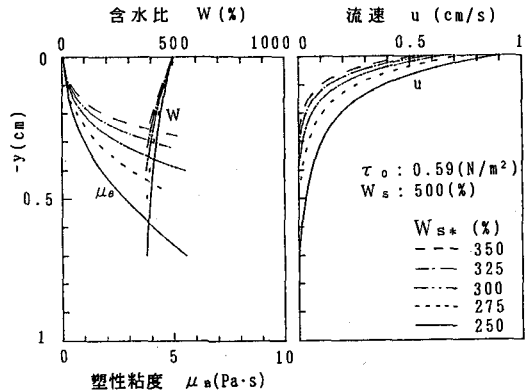


図-14 μ_B, u の分布

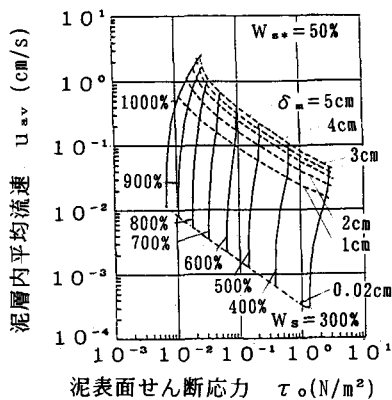


図-15 $\tau_o \sim U_{av}$ 関係

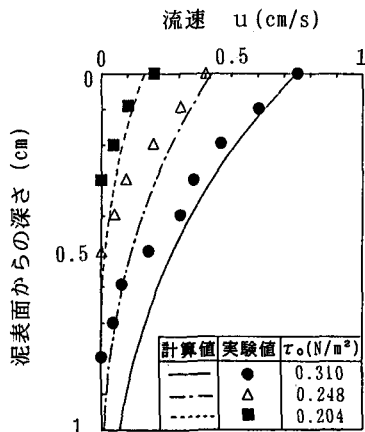


図-16 実験値と理論値との比較

6. 結論

- (1) カオリナイトの流動特性を調べた結果、カオリナイトが降伏せん断応力を持つビンガム流体として扱えることを確認し、降伏値、塑性粘度と含水比の関係を明らかにした。
- (2) 水流による底泥の含水比の上昇は、泥表面付近で顕著である。その結果、泥表面は流失して新たな泥表面が現れ、順次泥の流失が下層に及んでいく。
- (3) 底泥流速の測定により、静止領域の存在を確認した。また、含水比、泥表面せん断応力と流動化層厚、底泥流速の関係から、泥表面せん断応力や含水比が大きいくほど底泥は流動しやすいことを確認した。
- (4) 底泥をBingham流体として流動モデルを作成し、底泥流速を求めた。計算結果は、実験で得た泥表面付近の流速分布をかなりよく再現し、実験で認められた静止領域(従来の研究では考慮されていない)が計算により求められた。
- (5) 計算によっても実験結果と同様に、泥表面せん断応力や含水比が大きいくほど底泥は流動しやすいことが明らかになった。しかし、流動モデルによる現象再現の精度を上げるためには、含水比の鉛直分布の与え方が重要である。

謝辞

流動曲線の作成にあたりご協力頂いた大阪大学工学部(産業機械工学科)中村喜代次教授、千葉訓次助教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) 大坪国順・村岡浩爾：底泥の物性および限界掃流力に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第375号，pp.43～52，1986。
- 2) 海田輝之・楠田哲也・二渡 了・栗谷陽一：柔らかい底泥の巻き上げ過程に関する研究，土木学会論文報告集，第393号，pp.33～42，1988。
- 3) 五明美智男・矢内栄二・小島 洋・大槻 忠・糸洵長敬：進行波存在下における底泥の挙動および波高減衰に関する実験的研究，第32回海岸工学講演会論文集，pp.263～267，1985。
- 4) 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.556，pp.1～29，1986。
- 5) 中野 晋・鶴谷広一・鷹濱 潤：波と底泥の相互干渉による波高減衰と底泥の流動について，港湾技研報告，第26巻，第2号，1987。
- 6) 柴山知也・佐藤慎司・平出和也・青木 徹：波による底質の質量輸送速度，第35回海岸工学講演会論文集，pp.347～351，1988。