

高含水比底泥の安定限界と移動限界掃流力

徳島大学工学部 正会員 中野 晋
香川県庁 正会員○藤平 依彦
飛島建設 片山 剣緑

1. はじめに 流れによる底泥の舞上がり量を考える上でその移動限界を知ることが基礎であり、これまでも大坪¹⁾の精力的な研究などによりかなりの段階まで明らかにされている。しかしその物理メカニズムが解明されたわけではなく、さらに改良の余地が残されている。本研究では底泥の移動限界を評価する手がかりを得るためにJeffreys²⁾の風波発生理論を水-底泥境界面に応用して底泥表層部の安定性を検討した。

2. 高含水比底泥の移動限界に関する理論的検討 Jeffreysは風波の発生を解明するために、水面の波の峰の風上と風下側での圧力差を考え、この圧力差のために波が発生すると仮説を立て検討した。底泥表層からの巻き上げが流れのもつ乱れのために発生した微小な底泥表面の攪乱の発生・崩壊過程であると考えれば、Jeffreysと同様な取扱いが可能と考えられる。Jeffreysは一様な流れに向かってその方向と α なる傾きをなすように置かれた平板を考え、風波の発生する最小の流速 U_c を以下の式で与えた。

$$U_c = 3 \left(\frac{\mu_2 g}{s \rho_1} \right)^{1/3} \quad (1)$$

これを底泥の場合に適用すると、上式の各項は次のようになる。 U_c は底泥表層に作用する代表流速、 s は遮蔽係数、 ρ_1 は水の密度、 μ_2 は底泥の粘性係数である。底泥は非ニュートン流体であり、一般に流動曲線は図-1のような特性を示す。つまり流動曲線は $\tau = \tau_y + f(D)$ で表される。ここで τ_y は降伏値、 D はずり速度である。また D は表層の流動層の厚さを h_s とすると $D = U_c / h_s$ で表される。移動限界となる実験結果を参考に仮に $U_c = 10 \text{ cm/s}$ 、 $h_s = 0.05 \text{ cm}$ とすると $D = 200 (1/\text{s})$ となるが、この程度ずり速度 D が大きい領域では D に対する τ の変化は小さく、概ね $\tau = N_d \tau_y$ (鶴谷ら³⁾の測定では10倍程度)で近似できる。これより見かけの粘性係数は

$$\mu_2 = \frac{\tau}{D} = N_d \frac{\tau_y}{D} \quad (2)$$

で表される。これらを式(1)に代入すると、

$$U_c = 3 \left(\frac{N_d h_s g}{s \rho_1 U_c} \tau_y \right)^{1/3} \quad (3)$$

である。これより流動層が安定である限界せん断応力 τ_{sc} は

$$\tau_{sc} = \rho_1 U_{*c}^2 = \rho_1 \frac{\sqrt{3}}{\phi^2} \left(\frac{N_d g h_s}{s \rho_1} \tau_y \right)^{1/2} \quad (4)$$

で表される。ここで ϕ は U_c と U_{*c} の比で、流速分布に対数分布則を用いると、

$$U_c / U_{*c} = \kappa^{-1} \ln z_c^+ + A_s \quad (5)$$

である。ここで z_c^+ は流動層に作用する流速を代表する無次元高さを表す。また移動限界せん断応力 τ_{sc} が流動層の安定限界せん断応力 τ_{sc} と比例していると考えれば、

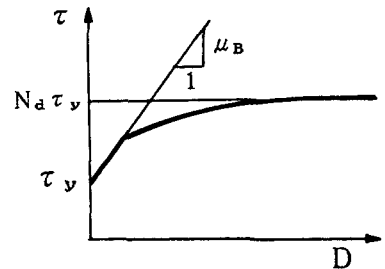


図-1 底泥の流動曲線の概略図

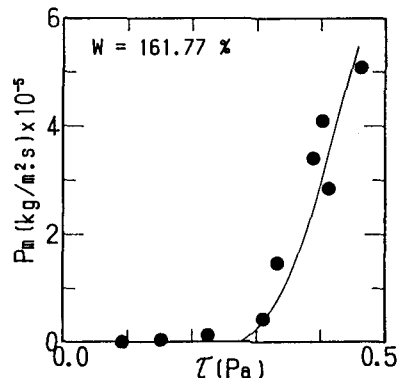


図-2 移動限界掃流力の評価方法

$$\tau_c = A \tau_{sc} = \frac{A}{\phi^2} \sqrt{\frac{3N_d h_s \rho_1 g}{s}} \tau_y^{1/2} \quad (6)$$

で移動限界せん断応力が評価される。ここで A は比例定数である。大坪¹⁾によると詳細な実験からカオリナイトなどの降伏値をもつ第一底泥グループでは、流送限界 τ_{c1} が $\tau_{c1} = 2.72 \tau_y^{0.56}$ で表されることを報告している。また Migniot⁴⁾ も種々の底泥を用い、移動限界掃流力が高含水比底泥の場合には降伏値 τ_y の $1/2$ 乗に比例することを報告しており、 τ_c が τ_y の $1/2$ 乗に比例する式(6)の傾向とはほぼ一致する。

3. 高含水比底泥の移動限界に関する実験 実験水槽は全長3.92m、幅0.25m、高さ0.1mの透明塩化ビニール製の循環式長方形断面管水路を使用した。この水路の下流端25cmから3mにわたり、アクリル板で3cm底上げし、この区間の水深を7cmとした。また水槽の中央部に長さ100cm×幅25cm×高さ3cmの底泥床敷設区間を設けた。上流端から下流25cm、上蓋から3cm下の高さにはSS測定用の採水コックを設けてある。底泥にはカオリナイト(ASP600、比重2.67)を用いた。せん断力は底泥床上の区間1mの差圧を測定することにより求めた。移動限界せん断力 τ_c の測定は村上ら⁵⁾によって行われた方法を用い、図-2に示すように飛び出し率が急増する領域の外挿として移動限界せん断力を求めた。

4. 測定結果と考察 式(6)中には未知のパラメータとして、安定限界と移動限界の比を表すパラメータ A のほか、底泥の移動に関係深い代表流速の高さ z^* 、流動層の厚さ h_s 、遮蔽係数 s などがある。そこで、それぞれについてどの程度であるかを以下で検討する。

まず安定限界と移動限界はほぼ同オーダーで1~3程度であると思われる。また乱れ強度は $z^* = 20$ 前後で最大となることが知られているが、底泥の巻き上げに大きな影響を及ぼす bursting 現象の際にはその近傍からの強い乱れが下降し、巻き上げの要因となると考えられる。したがって、安定限界に関与する z^* として20程度が適当であると考えられる。また舞い上がりが始まる直前に表層を丁寧に観察するとケースによっては非常に薄い流動層が発生することが確認された。これは底泥粒子が数層程度流送され始めており、その厚さは0.1~1mm程度と見受けられた。また遮蔽係数は Jeffreys によると $s = 0.269$ である。図-3は本実験結果を大坪¹⁾、村上ら⁵⁾、海田ら³⁾の実験結果とともに示したもので、図には $h_s = 0.05$ cm, $A = 1.0$, $z^* = 20$, $s = 0.269$, $N_d = 5$ 及び10とした計算曲線も示されている。なお底泥の降伏値 τ_y は鶴谷ら³⁾の回転粘度計による測定結果を用いた。図よりいずれの実験結果も式(6)で示されるような傾向を示すことや計算曲線が概ね実験結果を定量的にも説明できることがわかる。研究者によって移動限界の値が多少異なる原因は使用したカオリナイトが異なること(大坪)や円形タンクによる測定であること(村上)など測定方法に違いがあったためではないかと思われる。

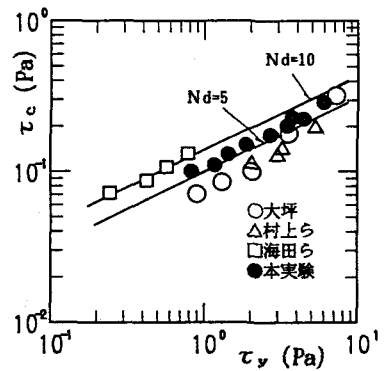


図-3 降伏値と移動限界掃流力

図-3は本実験結果を大坪¹⁾、村上ら⁵⁾、海田ら³⁾の実験結果とともに示したもので、図には $h_s = 0.05$ cm, $A = 1.0$, $z^* = 20$, $s = 0.269$, $N_d = 5$ 及び10とした計算曲線も示されている。なお底泥の降伏値 τ_y は鶴谷ら³⁾の回転粘度計による測定結果を用いた。図よりいずれの実験結果も式(6)で示されるような傾向を示すことや計算曲線が概ね実験結果を定量的にも説明できることがわかる。研究者によって移動限界の値が多少異なる原因は使用したカオリナイトが異なること(大坪)や円形タンクによる測定であること(村上)など測定方法に違いがあったためではないかと思われる。

5. おわりに Jeffreysの風波発生理論を水-底泥境界面に応用して底泥表面に発生する流動層の安定限界式を求め、これから高含水比底泥の移動限界を表す式(6)を求めた。この結果、移動限界せん断応力が底泥の降伏値の $1/2$ 乗に比例することが明らかになった。

謝辞 本研究の一部は科学研究費(試験研究(A)代表 京都大学 中川博次)の補助の下に実施された。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 大坪: 京都大学学位論文, 1984
- 2) Jeffreys: 例えば, ラム流体力学3, 今井功・橋本英典, 東京図書
- 3) 鶴谷ら: 港研資料, 566, 1-29, 1986.
- 4) Migniot: La Houille Blanche, 23, (7), 592-620, 1968
- 5) 村上ら: 港研報告, 28, (1), 43-76, 1989.
- 5) 海田ら: 土木学会論文集, 393, 33-42, 1988.