

II-494

Jeffreys 理論の底泥の移動限界・2層界面波の発生限界への適用

徳島大学工学部 正 員 〇中野 晋
香川県庁 正 員 藤平 依彦

1. はじめに 風波の発生, 流れによる底泥の舞上がり, 淡塩2層境界面での内部波の発生はいずれも境界面を挟んだ流速の急変に起因するせん断不安定に基づいている. 空気-水, 水-底泥, 淡水-塩水と構成流体は異なっているが, 共通した概念で説明できると考えられる. 本研究では風波の発生理論として知られる Jeffreys¹⁾の理論による底泥の移動限界・界面波の発生限界の説明を検討したものである.

2. Jeffreys理論の適用 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上側での圧力差を考え, この圧力差により波に加えられる仕事と水中でのエネルギー逸散量との関係から風波の発生する最小風速 U_c を次式で与えた.

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

ここで μ_2 は水の粘性係数, ρ_1 は空気密度, s は遮蔽係数である.

1) 底泥の移動限界 これを水-底泥に適用すると U_c は底泥表層に作用する代表流速, μ_2 は底泥の粘性係数, ρ_1 は水の密度である. カオリナイトを用いた実験時の観察によると底泥が移動を始める前後には表面に非常に薄い流動層が形成され, この後, 本格的な巻き上げが始まることが確認された. そこで流動層の安定性が底泥の巻き上げ

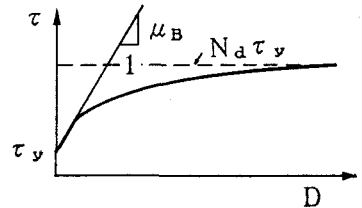


図-1 底泥の流動曲線の概略図

に関係すると考えれば, 次のように代表的粘性係数が評価される. 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 $\tau = \tau_y + f(D)$ で表される. ここで τ_y は降伏値, D はざり速度である. 流動層内の平均的な D は $U_c \approx 10 \text{ cm/s}$, 流動層の厚さ $h_s \approx 0.05 \text{ cm}$ とすると, $D = 200 \text{ s}^{-1}$ 程度と大きな値となるが, 大きなざり速度領域では τ の変化は小さく, 概ね $\tau = N_d \tau_y$ で近似される. また鶴谷ら²⁾の測定から判断して $N_d = 10$ 程度である. これより流動層の代表粘性係数 μ_2 は $\mu_2 = \tau / D = N_d \tau_y / D$ で表される. これを式(1)に代入して変形すると, 流動層が安定である限界せん断応力 τ_{sc} は式(2)で与えられる. ここで ϕ は U_c と U_{*c} の比で, 流速分布に滑面对数分布則を用いると, 式(3)のようである.

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

$$\phi = \frac{U_c}{U_{*c}} = \frac{1}{\kappa} \ln z_c^+ + A_s \quad (3)$$

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. また移動限界掃流力 τ_c 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, $\tau_c = A \tau_{sc}$ で移動限界掃流力が評価できる. 大坪³⁾の第一底泥グループについての流送限界や Migniot⁴⁾の実験でも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, 式(2)の傾向とはほぼ一致する.

2) 界面波の発生限界 式(1)を2層界面に適用する. この場合には重力加速度 g を εg ($\varepsilon = \Delta \rho / \rho_1$; $\Delta \rho$ は密度差)で置き換えて変形すると,

$$U_{ci}^3 / \varepsilon g \nu_2 = (27/s)(\rho_2/\rho_1) \approx 27/s \quad (4)$$

が求められる. なおこの式の左辺は岩崎数 $\mathcal{N}$ に対応する. 著者の1人ら⁵⁾によると界面付近の平均流速 U' ($=U - U_i$, U_i は界面流速)は界面摩擦速度 U_{*i} を用いて

$$U' / U_{*i} = \kappa^{-1} \ln z_i^+ + \delta_s \quad (5)$$

で表される. ここで z_i^+ は $U_{*i} z_i / \nu_0$ (z_i : 界面からの距離, ν_0 : 有効動粘性係数), δ_s は流速分布が対数則に従い始める下限値でほぼ4である. $\phi_i (=U'_c / U_{*i})$ を用いると式(6)は

$$K_c (=U_{*i}^3 / \varepsilon g \nu_2) = 27/s \phi_i^3 \quad (6)$$

であり, $K_c = \text{const}$ で界面波の発生を記述できることがわかる。

3. 実験結果との比較

1) 底泥の移動限界 実験⁸⁾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にて行われた。中央部に長さ100cm×幅25cm×高さ3cmの底泥床敷設区間を設け, 底面せん断力を段階的に変化させて飛び出し率をSS測定から求めた。底泥にはカオリナイト(ASP600, 比重2.67)を用いた。移動限界の定義は村上⁷⁾と同様, 飛び出し率とせん断応力の関係図から飛び出し率が0になる τ を外挿して τ_c を求めた。

巻き上げに寄与する代表流速には乱れ強度が $z^+ = 20$ 前後で最大となること, bursting現象の際にはその近傍から強い乱れが下降し, 巻き上げの要因となることを考慮すると $z^+ = 20$ 付近の平均流速が考えられる。流動層の厚さは底泥粒子の粒径とも関係するが, 0.1~1mm程度と推定される。図-2は本実験結果を大坪³⁾, 村上⁷⁾, 海田⁸⁾の実験結果とともに示したもので, 図には $h_0 = 0.05\text{cm}$, $A = 1.0$, $z^+ = 20$, $s = 0.269$, $N_d = 5$ 及び10とした計算値も示している。なお底泥の降伏値 τ_c は鶴谷²⁾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(2)で示されるような傾向を示すことや計算値が概ね実験結果を定量的にも説明できることがわかる。

2) 界面波の発生限界 図-3は淡塩下層2層流実験⁵⁾で内部波高計により測定された界面波高の無次元量と式(6)の K との関係である。図から K が0.1前後で界面波高が急増していることから界面波がこれを境に発生していることがわかる。界面波の発生が少なく, 界面がシャープな場合には界面付近の乱流特性は通常の壁面境界層とほぼ同じ特性を持っているため, 乱れは平均流速が対数則に従い始める付近で最大となる。したがって界面安定に最も寄与する乱れは z^+ が5~20の位置のものであろう。界面安定限界状態での代表流速 U_c を $z^+ = 5, 10, 20$ の流速と仮定すると, それぞれ $K_c = 0.19, 0.11, 0.066$ となる。特に $z^+ = 10$ の場合には図-3の結果とほぼ一致しており, Jeffreys理論が界面波の安定限界を説明する上でも有効であることを表している。

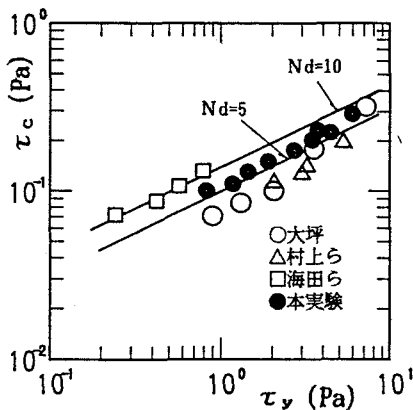


図-2 底泥の移動限界と降伏値の関係

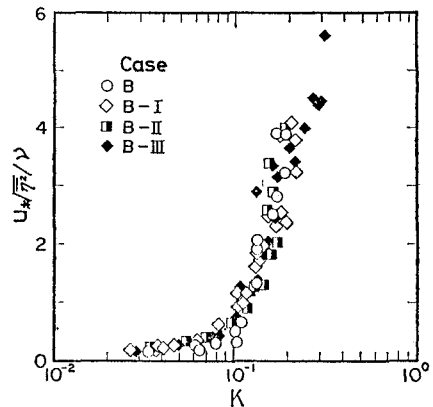


図-3 界面波高と K の関係

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)たとえば首藤:海の波の水理, 100-102, 技報堂, 1981. 2)鶴谷ら:港研資料, 566, 1-29, 1986. 3)大坪:京都大学学位論文, 1984. 4)Migniot: La Houille Blanche, 23, (7), 592-620, 1968. 5)中野ら:港研報告, 24-2, 239-273, 1985. 6)中野ら:43回中四支部概要集, 1991 7)村上ら:港研報告, 28, (1), 43-76, 1989. 8)海田ら:土木学会論文集, 393, 33-42, 1988.