

関西大学工学部 正員 山岡 一三
 関西大学工学部 正員 西形 達明

1. まえがき

一般に河川等に堆積した底泥の物理的性質は多種多様で、その巻き上げ侵食に関する取り扱いも単一土粒子の物理性質を考慮するものから、連続体としての性質を考慮するものなどかなり幅の広いものになる。中でも都市河川等に堆積した底泥は高含水比でかつ微細な粒子から成る場合が多く、これらの流水による破壊（巻き上げ）現象は底泥を一樣な連続体として取りえる方が妥当であると考えられる。そこで本研究においては底泥と流水を密度流の2層流問題として取りえて実験結果を整理し、次に底泥面が破壊されるときに界面波の発生が見られることから、この破壊限界に対して内部波の安定性問題の立場から考察を行うものである。

2. 実験的考察

実験は長さ5m、幅20cmの水路の中央部に移動床を設け、底泥の破壊限界流速の測定を行った。なお底泥試料としてはカオリン系の白色粘土（土粒子比重：2.68，平均粒径：8μ，LL=44.5% PL=25.6%，含水比400%～700%）が用いられている。底泥の巻き上げ現象としては、流速限界と破壊限界の2種類が存在するが、その内の破壊限界（ τ_c ）と底泥のせん断降伏値（ τ_0 ）（回転粘度計によつて測定）との関係を示したのが図-1（黒丸）である。従来からの実験結果においてよく見られるように、底泥の破壊限界値はそのせん断降伏値の値も大きく下回っていることが分かる。これは破壊限界掃流力が単に摩擦速度から求められていることに起因するものと考えられる。すなわち高含水比底泥の巻き上げ現象については2層密度流における界面現象と同様な抵抗則を考慮する必要があると思われる。そこで内部波による造波抵抗（ $f_{iw} = 8\pi^2 / R F a \cdot (a/\lambda)$ ， a ：波高， λ ：波長， Fa ：密度フルード数， R ：レイノルズ数）と混合による抵抗（ $f_{im} = 2E$ ， E ：連行係数）の2つを考慮に入れて破壊限界を求めたものが図中の白丸である。ただし a/λ の値は実験より近似的に1/10とした。これにより底泥の破壊限界とせん断降伏値がほぼ等しくなってくるのがわかる。

次に底泥面の破壊時に生じる界面波を次式の安定限界で示される、ケルビン・ホルムヘルツ型の問題として整理したものが図-2である。

$$U^2 \leq \frac{\Delta \rho \cdot g (A_1 + A_2)}{k A_1 A_2} \quad (1)$$

上式中、 $A_1 = \rho_1 \coth k h_1$ ， $A_2 = \rho_2 \coth k h_2$ ， k ：波数であり、 ρ_1 ， ρ_2 および h_1 ， h_2 は流水と底泥の密度と深さである。また図中の直線は(1)式で与えられる安定限界を示しており、同時に実験値（数字は含水比）がプロットされている。これより実験結果は(1)式から見るとはるかに大きい安定性を示しているが、これは(1)式の安定

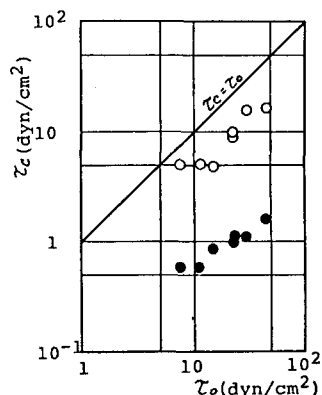


図-1

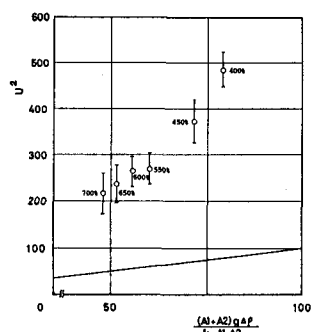


図-2

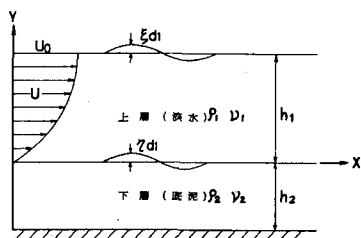


図-3

限界には粘性の考慮がなされていないことが第1の理由と考えられる。そこで次に粘性を考慮した河で内部波の安定性を考えることにする。

3. 内部波の安定性問題による考察

流れのモデルは図-3に示す通りであり、流水の流速分布は今回便宜上の方物線 ($U = ay + by^2$) と仮定されている。また図中の ν_1 は水と底泥の動粘性係数である。このようなモデルの流れの安定性に対しては、各層において次のような Orr-Sommerfeldt の方程式が適用される。

$$\text{上部の流水層: } \phi_1'''' - 2\phi_1''\phi_1'' + \phi_1''^2\phi_1'' = i\phi_1 R \left\{ (U-c)(\phi_1'' - \phi_1''^2\phi_1'') - U''\phi_1' \right\} \quad (2)$$

$$\text{底泥層: } \phi_2'''' - 2\phi_2''\phi_2'' + \phi_2''^2\phi_2'' = -i\phi_2 R \cdot C (\phi_2'' - \phi_2''^2\phi_2'') \quad (3)$$

ただし上式中、 C は内部波の波速、 ϕ は振幅関数である。

(2), (3) 式に対して自由表面、底泥面(界面)および底面における境界条件を与えることにより、波速 C に関する固有値問題となる。その結果、底泥表面に発生する内部波の安定条件は次のように求められる。

$$J = \frac{1}{H_4} \left\{ I_1 - I_2 + 2H_1 \left(3 + \frac{b}{C_{10}} \right) + \frac{2b}{C_{10}} H_2 + 2m H_3 \left(1 + \frac{b}{C_{10}} \right) \right\} \leq 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで } I_1 &= \frac{1}{30} (a \cdot B_2 - b \cdot B_1) \left(10 + \frac{b}{C_{10}} \right), \quad I_2 = \frac{1}{6} (B_2 C_{10} + b) \left(6 + \frac{b}{C_{10}} \right), \\ H_1 &= -\frac{1}{6} \{ a B_2 - b B_1 - 2(C_{10} B_2 + b) + C_{10} (B_1 + 2B_2) + R_i (1 + B_1 + B_2) \}, \\ H_2 &= \frac{R_i^2}{\pi} H_1 - \frac{R_i^2}{6\pi C} \left\{ C^2 \left(\frac{2r}{\pi} - B_1 \right) - aC - R_i \right\}, \\ H_3 &= \frac{2R_i}{\pi} H_1 - \frac{R_i}{3\pi C} \left\{ C^2 \left(\frac{2r}{\pi} - B_1 \right) - aC - R_i \right\} + \frac{1}{4\pi} rC \\ H_4 &= \frac{2b}{C_{10}^2 C^2} \left\{ C^2 (1 + B_1 + B_2) - C_{10} (C_{10} + a + b) \right\} \end{aligned}$$

である。ただし $B_1 = \frac{2r}{\pi} - \frac{a}{C}$, $B_2 = \frac{r}{\pi} - \frac{b}{C}$, C_{10} : 表面流速と波速の相対速度, R_i : リチャードソン数, $\pi = r_2/r_1$, $m = \nu_2/\nu_1$, $r = r_2/r_1$ である。計算結果の一例として $r_2/r_1 = 1.1$ の場合について (4) 式の J の値と上層水のレイノルズ数との関係を示したのが図-4, 5である。これらの図より明らかに底泥の粘性が大きくなると安定度が高くなることが分かる。また両図を比べると、粘性の小さい底泥ほど水深の影響が大きく受け、水深が小さくなると不安定な状態になることが分かる。しかし底泥の粘性が十分大きくなると水深の影響をほとんど受けないうのである。

次に (4) 式を式中のリチャードソン数について解くと、式の詳細については紙面の都合上省略するが次式のような安定条件式が得られる。

$$R_i \geq H \quad (5)$$

上式の安定限界とともに実験結果を図-6に示す。なお図中の数字は底泥の含水比を表わしている。これより、本実験結果は安定限界におけるリチャードソン数は2.3付近に集まっているようではあるが、(5)式によってかなり底泥面の破壊現象を表現できるものと思われる。

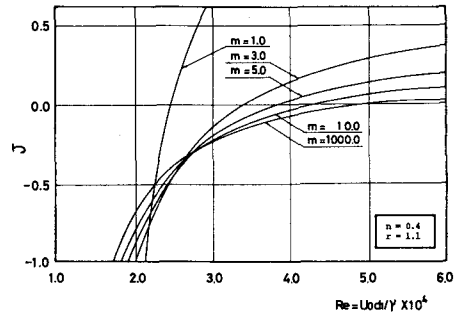


図-4

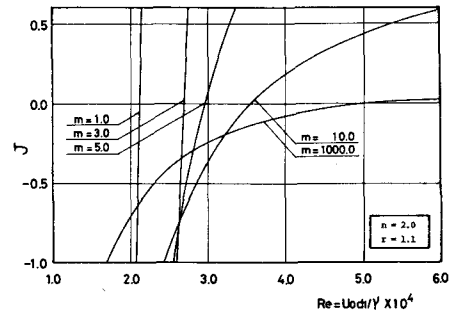


図-5

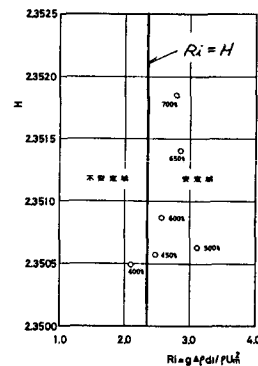


図-6