

ベントナイト河床波の特性について

東北大学大学院 学生員 ○金山 勉
東北大学工学部 正 員 斎藤伸夫

1. はじめに

湖沼、貯水池などの停滞水域における粘着性堆積物、いわゆる底泥は一般には非常に軟弱な状態で存在しているが、圧密を受けた堆積層の深層あるいは一時的に空中に露出するような部分にはかなり硬いものが存在する。

このような硬い底泥(バーン断強度で1,000~6,000 N/m²程度)を想定した洗掘実験を行うにあたり、粘着力の要因を分離するため、まず有機物を含まない低含水比の粘土試料を用いた。土粒子のまわりの電気二重層が薄く、延性に乏しいカオリナイトの場合は、微小剥離塊の飛び出し、およびこれに引き続く大規模な試料面の破壊に特徴づけられる脆性的な洗掘形態を示した。これに対して、電気二重層が厚く延性に富んだNa-ベントナイトではウロコ状の河床波を伴う洗掘形態が観察された。このベントナイト河床波は流れに対して非常に鋭敏な応答を示す(写真-1)。試料は全て浮遊状態で流送され、砂連などとは、その発生要因、平衡状態における水流との共存機構ともに異なるようである。本報ではベントナイト河床波の流れに対する応答を示す実験結果の一例を示し、これを説明するモデルを提案する。

2. ベントナイト河床波の特性

ベントナイト河床波の波高・波長は流れによって変化することが、写真-1、図-1、および図-2からわかる。河床波のスケールはここで用いたパラメータ $gI_e/\nu u_m$ の値が大きくなるほど小さくなる。このパラメータ $gI_e/\nu u_m$ は乱流渦の粘性によるエネルギー散逸を等価な波動粘性流

$$u(y) = u_a e^{i\ell y} \quad (1)$$

におおきかえた場合の波数の2乗 ℓ^2 を表すものである。すなわち(1)式のような層流においてエネルギー散逸率の断面平均値 E_m は

$$E_m = \frac{\nu}{\pi} \int_0^{\pi} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 dy = -\nu \ell^2 \cdot \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u^2 dy \quad (2)$$

となる。右辺の $-\nu \ell^2$ にかかる成分は乱れエネルギーに相当するものであり、これは平均流速の2乗 u_m^2 に比例するとし、等流状態の仮定より、 E_m は平均流のパワー $gI_e u_m$ に等しいとすれば、結局

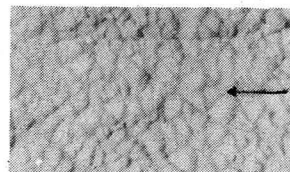
$$\ell^2 \propto gI_e/\nu u_m \quad (3)$$

となる。ここで、 I_e は動水勾配である。このパラメータを用いて実験結果を整理したところ、良好な相関が得られた。

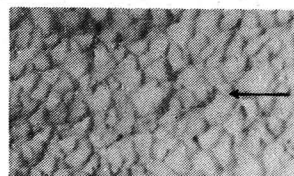
図-3、図-4は、それぞれ河床波の平均波高 H および平均波長 L を代表長として選んだ局所的レイノルズ数の検討を試みたものであるが、このように定義したレイノルズ数は一部の低速流の領域を除いてほぼ一定値とみてよい。

この結果もベントナイト河床波の特徴のひとつである。

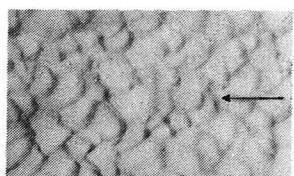
なお、図中の黒丸は、実験に用いた長方形断面管路の



$gI_e/\nu u_m = 105$



$gI_e/\nu u_m = 83$



$gI_e/\nu u_m = 51$

写真-1

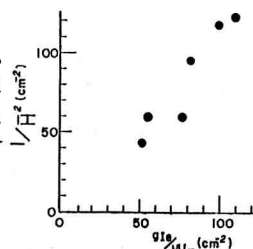


図-1 $1/\lambda^2 \sim gI_e/\nu u_m$

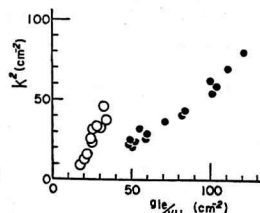


図-2 $(2\pi/L)^2 \sim gI_e/\nu u_m$

高さが2cmであることを意味し、白丸は6cmのものである。両者とも水路幅は4cmで共通である。

3. 流れと河床波の干渉モデル

3-1 流水から河床波への干渉

洗掘が進み、河床全面が低下してゆく中で(実験では試料をジャッキ・アップすることによって河床の平均高は水路底と同じに保たれる)、波状底面がその形を維持するのは、波峰の直下流に間欠的に発生し放出される渦によって生じる洗掘の速さが、河床面の平均的な洗掘速度に等しいということによると思われる。

したがって、そのような洗掘速度を生む渦のスケールが河床波のスケールを規定していると考えられる。2.での説明からパラメーター gIe/U_m の値が大きくなるほどこのような渦のスケールが小さくなることがわかる。

3-2 河床波から流水への干渉

河床波が形成された状態では、これによって与えられる攪乱が流水の乱流状態に大きく影響を及ぼすと考えられる。ここでは河床波によって与えられる攪乱を評価するため、以下のようにモデル化する。

まず、渦動粘性モデルの適用できるマクロな流れのうち、恒流成分 U_m を差し引いたものが次の式

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \nu_T \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \quad (4) \quad \nu_T = C_\mu \frac{K^2}{\epsilon} \propto \frac{U_m^4}{gIe U_m} = \frac{U_m^3}{gIe} \quad (C_\mu: \text{定数}) \quad (5)$$

で記述できるとする。河床波の存在下では完全に発達した乱流が全断面に及んでいると考え、渦動粘性係数 ν_T は断面内で一定であると仮定する。エネルギー散逸率 ϵ として平均流のパワー $gIe U_m$ を用い、乱れエネルギー K は平均流速 U_m の2乗に比例するとし、 K - ϵ モデル的に(5)式のように仮定した。

河床波からの攪乱の発生は(4)式に対する底面 $y=0$ での境界条件として定式化する。すなわち、波峰からの渦の放出を一樣流中におかれた波高の2倍の径を有する円柱からの渦の放出に代えて、次の境界条件

$$U(x, 0) = f(x) \quad \text{at } y=0 \quad (6) \quad \text{ただし, } f(x) = f(x + \frac{2\pi}{\omega}), \quad \frac{\omega}{2\pi} = \frac{U_m S}{2H} \quad (7)$$

を設定する。ここで、 S ; ストロークル数、 H ; 波高である。この境界条件の下で(4)の解は

$$U(x, y) = \sum C_n \exp\left\{-\frac{\sqrt{n\omega}}{2\nu_T}(H+i)y + in\omega t\right\} \quad (8) \quad \text{ただし, } \sum C_n e^{in\omega t} = f(x) \quad (9)$$

となる。簡単のため、第1モード($n=1$)のみを考えると、 y 方向の波数の2乗 $k_y^2 (= \frac{\omega}{2\nu_T})$ は(5),(7)式より $gIe S \pi / 2 H U_m$ に比例定数をかけたものとなる。これが、流水のエネルギー散逸を規定する波数の2乗、 gIe/U_m と少なくとも比例関係にあるとすれば、波高を用いた局所的レイノルズ数、 $U_m H / \nu$ が一定値を示すということが説明できる。また、河床波の周期性・波状性を評価するため、(7)式において $\omega/2\pi$ を U_m/L とすれば全く同様にして、波長を代表的長さとして選んだ局所的レイノルズ数 $U_m L / \nu$ が一定値をとることが説明される。

4. おわりに

粘性土堆積物の擬似物質として一つの典型と考えられる低含水比ベントナイトの洗掘が、流水の乱流状態に大きく影響されるものであるらしいことが指摘された。また、もう一つの典型であるカオリナイトの低含水比試料は脆性的な洗掘形態を示すことも既に確認されており、これらの典型的擬似物質の中間に位置すると考えられる実在底泥の洗掘を取扱う際に、この結果が有意義な情報を与えることを期待する。

<参考文献>

- 1) 金山, 酒井, 菅藤: 低含水比粘性土の洗掘形態及び洗掘開始条件, 第38回年講, P.547~548
- 2) 金山, 菅藤: 低含水比ベントナイトの河床波を伴う洗掘について, 第29回水講, P.449~454

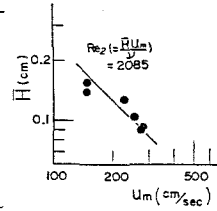


図-3 $H \sim U_m$

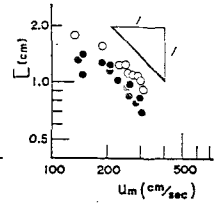


図-4 $L \sim U_m$