

II-263 底面上の平板前面部における土砂輸送

アイ・エヌ・エー新土木研究所
東京大学大学院土木工学科正 員
学生員田中規夫
金子哲也

1. はじめに

堰や床止めなどの横断工作物下流部における給砂量の減少を評価するという観点、また、浮遊砂のコントロールに構造物を役立てようという観点からは、物体前面部に落とされる砂の量を算定し、下流に対して流砂量を変化させる効果を検討することが重要となるであろう。本研究では、このような開水路上の2次元的な物体による浮遊砂量の変化ならびに物体前面部における洗掘限界を粒子の運動方程式をもとに求める方法を示す(詳細についてはTanaka(1991)を参照されたい。)

2. 解析手法

(1) 解析の概要: 物体前面部には、図1に示すような渦が生じる。上流から流されてきた土砂は、ある限界高さ h_0 より上のものは、物体を飛び越えて流下する(これより下のものが渦領域に沈降する量 Q_{in} を与える)。また、渦領域内部では、渦による掃流力により持ち上げられた砂粒子が堰を越えて流下する領域が存在する(ここで、洗掘領域の堰に近い側を l_a 、遠い側を l_b とする)。これが、渦領域からの飛び出し量 Q_{out} を与える。従って、 $Q_{in} > Q_{out}$ のとき堆積傾向にあり、 $Q_{in} < Q_{out}$ のとき洗掘が生じる。

単位時間、単位幅当り渦領域に沈降する量は次式で与えられる。

$$Q_{in} = \int_0^{h_0} u(y)c(y)dy$$

また、渦領域からの飛び出し量は、板を飛び越えるもののみを考え、次式のように与える(v_p を洗掘領域内では一定とする)。

$$Q_{out} = \int_{l_b}^{l_a} K_0 \bar{v}_p dx = K_0(l_b - l_a) \bar{v}_p$$

ここで、芦田・道上(1970)により、 $v_p = 0.75u_*$ 、 $K_0 = 0.025$ で与えられる。従って、各粒径、流速における h_0 、 l_a 、 l_b を求めれば、板を越える浮遊砂量あるいは洗掘限界を知ることが出来る。

(2) 砂粒子の運動方程式: Tchenの運動方程式をベクトル形で示すと以下ようになる(Asaeda et al. (1989))

$$\frac{\pi}{6} d^3 \rho_p \frac{dV}{dt} = F_D + F_L + 1/2 \frac{\pi}{6} d^3 \rho_f \left(\frac{dW}{dt} - \frac{dV}{dt} \right) + F + \frac{\pi}{4} C_L w^2 d^2 A$$

ここに、 V 、 W : 粒子および流体の速度、 d : 粒径、 ρ_p 、 ρ_f : 粒子および流体の密度、 A : V に垂直な単位ベクトルである。

ここで、上式をベクトル形のまま変形し、整理すると

$$\frac{dV}{dt} = (A_1 + A_1' |W - V|)(W - V) + B_1 F_L + C_1 F + D_1 A$$

ここで $A_1 = \frac{18\mu}{d^2(\rho_p + \frac{1}{2}\rho_f)}$, $A_1' = \frac{3\rho_f}{2d(\rho_p + \frac{1}{2}\rho_f)}$,

$$B_1 = \frac{9}{\pi d^3(\rho_p + \frac{1}{2}\rho_f)}$$
 , $C_1 = \frac{6}{\pi d^3(\rho_p + \frac{1}{2}\rho_f)}$, $D_1 = \frac{3C_L}{2d(\rho_p + \frac{1}{2}\rho_f)} w^2$

(但し、Rubeyによる抵抗則を用いた。)

(3) 揚圧力並びに揚力項のモデル化: ここで、 D_1 において、乱れ速度 $w'^2 = u'^2 + v'^2$ は、Ikeda(1971)の式を用いる。また、揚力係数 C_L については、Bagnold(1974)の実験値より $C_L = 12.69 \exp(-3.78 \frac{\hat{y}}{d})$ と与える。また、底面上の粒子に作用する

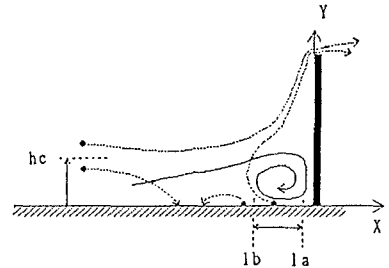


図-1 概念図

表-1 実験条件

	U	H	R	ie	u*	Ca	Z
RUN1	7.58	15.0	7.0	00017	1.20	0.00069	1.714
RUN2	14.95	15.0	7.0	00027	1.51	0.00132	1.420
RUN3	19.11	15.0	7.0	00045	1.95	0.00222	1.086
RUN4	25.07	15.0	7.0	00060	2.25	0.00284	0.941

圧力勾配による力 $F_L=(L, D)$ は、Ikeda(1971)による式を用いる。また、芦田、藤田(1986)の実験より粒子が粒径の0.5倍程度浮上すると、揚圧力は減少し、平均的には、0とおけるから、 $F_L=(L, D)=0$ ($R>d$) とする。

(4) 流れ場： 解析にはKiya and Arie(1972)の底面上の垂直平板周りの流れの解析解を使用する（接近流速分布 $u=U_0+Ky$ 、実験値より $K=1.227/0.713*U_0/R$ とする。但し、 U_0 :定数、 R :平板高さ）。また、渦領域からの飛び出しを評価する際には、 $\delta_s=0.38\left(\frac{U_1}{\nu}\right)^{-1/5}s^{4/5}$ で表される境界層厚さ内では対数則がなり成り立つものとし（ U_1 は平板前面部のよどみ点高さにおける流速、 s はよどみ点からの距離）、境界層厚さの点で流速が連続する条件により、摩擦速度 u_* を求めた。

3. 実験装置および実験方法

実験には、全長20m、幅40cm、高さ50cmの水路を使用した。実験は、まず上流から10mの地点に高さ8cmの堰を設け、その上流側の水路床上に石炭粉（平均粒径0.18mm、比重1.48、限界摩擦速度0.91cm/s、沈降速度0.85cm/s）を厚さ1cm程度に平坦に敷き詰めた。実験は下流側を堰あげた状態で行い、物体の上流、下流1mの地点で水深 H を計測し、エネルギー勾配 ie 、摩擦速度 u_* を求めた（実験条件、表1）。なお、流速と濃度の測定には、プロベラ式流速計、光学式濁度計を使用した。浮遊砂量は濃度分布と速度分布を掛け合わせて求めた。

4. 実験ケースの流況ならびに洗掘限界とシミュレーションの比較

RUN1は板の前面部に生じる渦が弱く、渦領域内部での粒子の移動がほとんど確認されず、やや、堆積傾向を示す。RUN2の場合は平板近傍から舞い上がった砂が渦領域内部に堆積する。通水60分後の河床形状を示すと、図2のようになり、 $x/R=-0.2\sim 0$ の部分がやや洗掘されているが、 $x/R=-1.5\sim -0.3$ の部分は堆積しており、渦領域全体としてはほぼ洗掘限界に近いものと思われる。RUN3は渦の中心付近から舞い上がった砂が板を越えて流下するのが確認される。RUN4は激しく局所洗掘の起こる場合である。図3は流入土砂量と流出土砂量の差 $\Delta Q=Q_{in}-Q_{out}$ を流速の変化に対して示したものである。ここで、点線は解析により求めた値を示す。実験値と解析値は良好な一致を示すことが分かる。従って、解析により求める $1a$ 、 $1b$ 、 h_0 を用いて、 Q_{in} と Q_{out} を評価してやれば、板による浮遊砂量の変化や洗掘限界流速を求めることが可能と思われる。

5. まとめ

底面上の平板前面部における砂の動きをシミュレートするモデルを構築することにより、物体を越える限界高さや渦領域から飛び出す領域を評価することが可能となった。これにより、渦領域への飛び込み量や渦領域からの飛び出し量を評価することができ、堰前面部の堆積量や飛び出し量、洗掘限界、洗掘領域を求めたところ実験結果と良好な一致が見られた。

謝辞：東京大学土木工学科玉井信行教授に御指導頂いた。記して謝意を表します。

参考文献 (1)Asaeda, T., Nakai, M., Manandar, S. K. and Tamai, N.:1989, J. Hydr. Eng., ASCE, vol. 115, No. 3, pp. 327-339. (2)芦田、道上：1970, 京大防災研年報13B, pp. 233-242. (3)芦田、藤田：1986, 土木学会論文集第375号, pp. 79-88. (4)Bagnold, R. A.:1974, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 340, pp. 147-171. (5)Ikeda, S.:1971, Proc. ASCE, No. 185, pp. 61-69. (6)Kiya, M. and Arie, M.:1972, J. Fluid Mech. Vol. 56, Part 2, pp. 201-219. (7)Tanaka, N.:1991, Doctor thesis submitted to the Univ. of Tokyo, 136p.

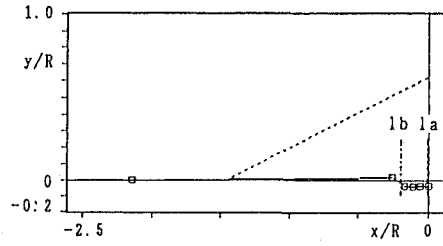


図-2 河床形状と計算結果の比較

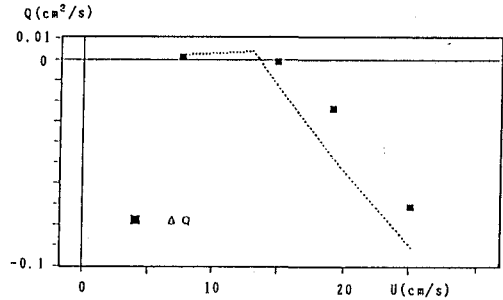


図-3 土砂収支