

II-143

管路における土砂輸送機構

京都大学防災研究所 正 員 江 頭 進 治

京都大学防災研究所 正 員 芦 田 和 男

京都大学大学院 学 中 島 智 彦

1.はじめに ダム堆砂の排除の問題など、土砂の管路輸送に対する関心が高まっている。土砂の輸送機構については、Durandの研究をはじめとして古くから行なわれており、土木学会でも委員会報告にまとめられている。これらによれば、土砂輸送形態は、大まかには(1)掃流、(2)集合流動(plug flow、shear flow)、(3)浮遊のように分類される。ところが、これら流砂形態の形成領域や工学的に重要な撓動層を伴う流れ(集合流動)の解明が殆どなされていない。本研究では、流砂形態の発生領域および各流砂形態におけるエネルギー損失、流量、流砂濃度について検討する。

2.掃流形態 管路の断面を図-1のように分割し、管壁および砂面領域にそれぞれ滑面および粗面の対数則を適用する。さらに、掃流砂量式に芦田・道上式を用い、これらの式に含まれる長さおよび速度をそれぞれ管径 D 、および $\sqrt{gD}$ で基準化すれば、連続式、抵抗則および流砂量式はそれぞれ次のように与えられる。

$$Q/\sqrt{gD^5} = v_b' R_b' f_b(\theta) + v_w' R_w' f_w(\theta) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$v_b' = \sqrt{R_b' i_e} \{A_r - 1/\kappa + 1/\kappa \cdot \text{LN}(R_b'/k_s')\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$v_w' = \sqrt{R_w' i_e} \{A_s - 1/\kappa + 1/\kappa \cdot \text{LN}[(\sqrt{gD}/v) \sqrt{i_e} R_w'^{3/2}]\} \quad \dots\dots (3)$$

$$q_b = 17 \tau_*'^{3/2} (1 - \tau_{*c}/\tau_*) (1 - u_{*c}/u_*) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $v_b' = v_b/\sqrt{gD}$ 、 $v_w' = v_w/\sqrt{gD}$ 、 $R_b' = R_b/D$ ($R_b = A_b/s_b$)、 $R_w' = R_w/D$ ($R_w = A_w/s_w$) などである。 $f_b(\theta) = s_b/D$ 、 $f_w(\theta) = s_w/D$ であり、これらは θ (図-1 参) のみの関数である。ここで断面分割の近似として次式を採用する。

$$v_b' = v_w' = v' \quad (v' = Q/A/\sqrt{gD}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

以上より、 θ 、 R_b' 、 R_w' 、 v' 、 i_e 、 q_b の 6 個の未知量に対して独立な式は、(1)~(4)であるので、これらのうち 2 つが与えられると、他の 4 つが定まる。

3.集合流動形態 この形態は、砂礫層の粒子が一体となって流動するものであって、従来撓動流と呼ばれている。この流れは、図-2 に示すように外力と内力の分布に対応して、plug flow、局所的な plug flow、および shear flow に分類できる。砂礫層の流動は、開水路の土石流に類似しており、ここでは、江頭・芦田らの土石流の流動式を適用してそれを表現してみよう。砂礫層の流れの場合を図-3 のように単純化すると、水平管における応力のつり合いは次式ようになる。

$$\varnothing^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 + \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c g \mu_k (R_d - z) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} (R_d - z) + \frac{f}{8} (v_d - v)^2 \frac{s_b}{s_d} \quad (6)$$

ここに、 $\varnothing$: 粒子間隙における乱れの混合距離、 c : 砂礫層の体積濃度、 μ_k : 砂礫間の内部動摩擦係数、 v : 砂礫層上方の水流の平均流速、 v_d : 砂礫層の平均流速、他は慣用記号である。上式に対し、

$$\varnothing = (k_p/k_v)^{1/3} \{ (1-c)/c \}^{1/3} d \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\partial p / \partial x = - \rho g i_e \quad \dots\dots\dots (8)$$

を適用し、 $v_d \ll v$ として砂礫層の平均流速を求めると、shear flow のとき次式を得る。 図-2

$$v_d' = \frac{2}{3} K \cdot \frac{D}{d} R_d'^{3/2} \left\{ \left(\frac{k_v}{k_p} \right)^{1/3} \left(\frac{c}{1-c} \right)^{1/3} \right\} \cdot \left[\frac{2}{5} K \cdot \left\{ \left(\frac{K+1}{K} \right)^{5/2} - 1 \right\} - 1 \right] \cdot [1 + f_b(\theta)/f_d(\theta) \cdot R_b'] i_e - (\sigma/\rho - 1) c \mu_k \quad \dots\dots\dots (9)$$

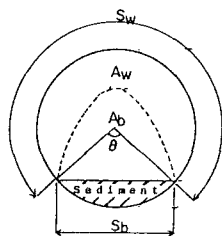


図-1

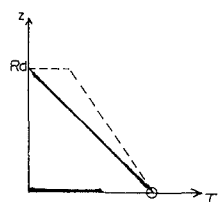
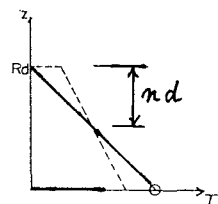
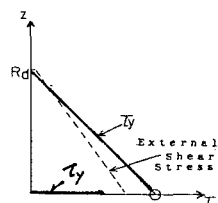


図-2

ここに、 $v_d' = v_d / \sqrt{gD}$ 、 $f_d(\theta) = A_d / D^2$ 、 $(k_v / k_p)^{1/3} = 2$ 、

$$K = \frac{\{1 + f_b(\theta) / f_d(\theta) \cdot R_b'\} i_e - (\sigma / \rho - 1) c \mu_k}{(\sigma / \rho - 1) c \mu_k - i_e} \quad \text{である。}$$

plug flowの場合には、式(9)において $\mu_k \rightarrow \mu_{kb}$ （管壁と砂粒子の動摩擦係数）とし、さらに $\frac{Q}{D^3 g D}$ の項を $\{[(d/D) R_d' / K + 1]^{3/2} - 1\}$ に入れ替えたものになる。

上の議論より、輸送土砂濃度 c_v （排出濃度）は次式で与えられる。

$$c_v = \frac{Q_s}{Q_w + Q_s} = \frac{c}{1 + (v' / v_d') \{f_b(\theta) / f_d(\theta) - 1\}} \quad (10)$$

4. 流砂形態の発生領域 掃流限界は、砂礫の無次元限界掃流力を τ_{*c} とすれば、次式で与えられる。

$$i_e = (\sigma / \rho - 1) (d/D) \tau_{*c} / R_b' \quad \cdots \cdots (11)$$

集合流動の発生限界、すなわち plug flow、shear flow および中間的な局所的 plug flow の発生は、式(6)と図-2から容易に求められる。これらのうち、掃流から plug flow への遷移条件は次式で与えられる。

$$i_e = (\sigma / \rho - 1) c \mu_{sb} / \{f_b(\theta) / f_d(\theta) + 1\} \quad \cdots \cdots (12)$$

μ_{sb} は砂粒子と管壁との静摩擦係数。plug flow から shear flow への遷移条件は、式(12)の μ_{sb} の代わりに μ_s （粒子間の静摩擦係数）を用いて与えられ、局所的 plug flow は、shear flow の限界として $3d$ 程度の層厚を仮定して決定できる。一方、shear flow から plug flow への遷移条件は式(12)において μ_k を使い、plug flow から掃流への遷移は μ_{kb} （管壁と砂粒子の動摩擦係数）を用いて与えられる。

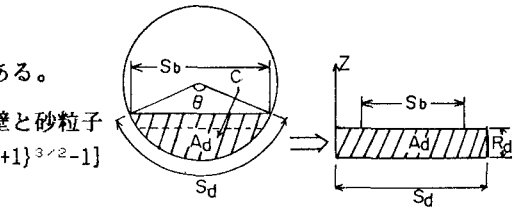


図-3

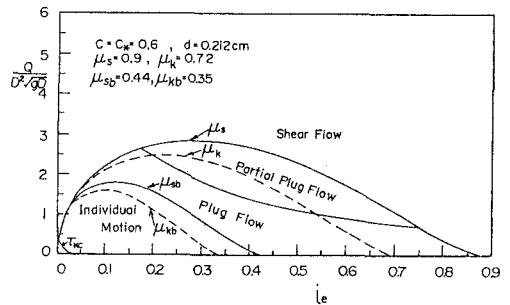


図-4

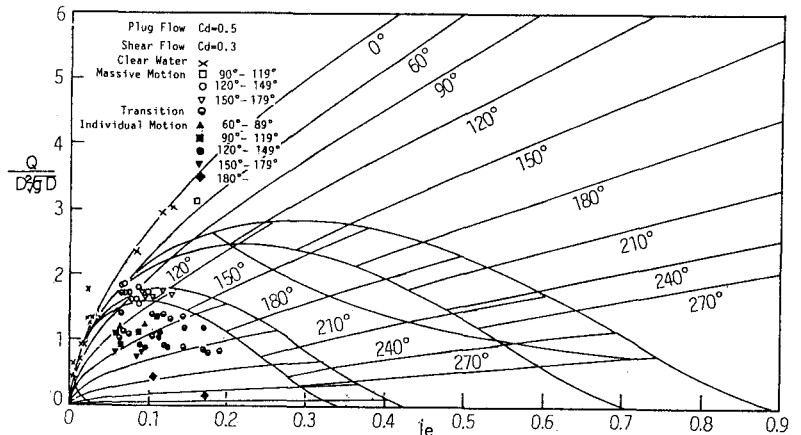


図-5

図-4は、 $c=0.6$ 、 $\mu_s=0.9$ 、 $\mu_k=0.72$ 、 $\mu_{sb}=0.44$ 、 $\mu_{kb}=0.35$ 、 $\tau_{*c}=0.05$ として求められる流砂形態の発生領域を無次元流量とエネルギー勾配の平面上に示したものである。もちろん、発生領域は流砂濃度 c_v と無次元流量の平面上でも表示できる。

5. 適用性 粒径 $d=0.212\text{cm}$ 、 $\sigma/\rho=2.65$ の一様砂を用い、アクリル製水平管路で実験を行ない、種々の条件下でエネルギー勾配、流砂量、流量、 θ などを測定した。それらの結果を図-5に示す。図中には2.および3.の理論を用いて算定される結果ならびに流砂形態の発生領域も示されている。細部には改良の余地はあるものの、流砂形態の発生領域、 $Q \sim i_e$ 、 $c_v \sim Q$ の関係は、概ね妥当である。

6. あとがき 本研究によって、土砂輸送現象の評価法に関する見通しが得られたものとする。今後、集合流動形態における c の評価法や浮遊砂を対象とした研究を進めたい。

参考文献 1) 水理委員会：水工学における固液混相流、土木学会論文集、351号／II-2、1984、PP.51-53。
2) 江頭・芦田・佐々木：土石流の流動形態、32回水講、1988、PP.485-490。