

管路における土砂輸送に関する基礎的研究

京都大学防災研究所 正員 芦田和男
 大成建設 正員 萩田英俊
 京都大学大学院 学生員 小川義忠

まえがき 本研究においては、管路における土砂輸送に関して、heterogeneous及び堆積限界以下の領域に属する流れの土砂移動の形態を観察し、流速分布、濃度分布、土砂輸送量及び抵抗特性を統一的に把握し、内部機構について理論的及び実験的考察を行っている。

1. 実験装置及び使用材料 水路は内径4inchの内管よりなる循環式水路で、測定区間(6m)には、土砂移動観察の為、透明アクリライト製管を使用し、他の部分は不透明硬質塩化ビニル管を使用している。測定区間内には静水頭測定の為、1m間隔に6個の静圧タップを取りつけてあり、また、上下方向に移動可能な動圧管、採水管を設置し、流速分布、濃度分布を測定した。なお、流量測定にはベンチュリー管を使用した。実験材料は、比重2.6, d_{50} : 0.75mm, 0.42mmの二種の川砂である。

2. 土砂の輸送形態の領域区分 管内流送土砂の移動形態を、管路底部の堆積の有無で大別し、さらに細分化すると、(1)堆積のない場合: homogeneous flow, heterogeneous flow (2)堆積のある場合: moving bed, flat bed, dune bedのように分類することが出来る。これは、同一濃度においては平均流速の増大とともに、同一流速においては濃度の減少とともに、flat bed \rightarrow moving bed \rightarrow heterogeneous flowと変化することがわかり、その他、各移動形態について興味ある結果を得ているが、幾何の都合上割愛する。

3. 流速分布及び濃度分布に関する理論的考察及び実験結果 本研究の対象としている流れの場合においては、流速分布及び濃度分布を全断面にわたって一様に論じることは出来ない。ここでは、全断面を三領域に分割し、upper region, lower region, bottom regionと名づけ、添字 a, b, δ で表わす。三領域における流速分布、濃度分布、剪断力分布を模式的に示したのが Fig. 1 である。図中、A: 面積, K: Karman 定数, c : 体積濃度, u : 流速, δ : bottom region 厚, τ_a : 上部管壁における剪断力, τ_b : 堆積層上面における剪断力である。また、記号 $\bar{\quad}$ は平均を意味している。

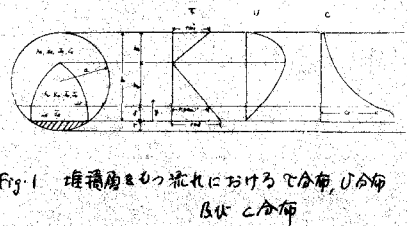


Fig. 1 堆積層を有する流れにおける流速分布、濃度分布

(1) 流速分布 最大流速点より上層においては浮遊砂量もほとんどなく、実験値から、内管滑面における対数則の適用が妥当であると思われる。下層においても対数則の適用が可能と思われるが、対数分布公式における定数が負値をとるという実験結果を得ており、管路底部においては、むしろ集合運搬の形式で流送されている高濃度土砂層の存在を考慮することが適切と思われる。上記の三領域の分割が妥当なものであると考える。底部傾

成では、粒子間衝突状態があり、土砂粒子の衝突により剪断力が伝達されていると思われる。この領域における流速分布について、流動層全体にわたって濃度と速度の関連をもち、ほぼ一定の大きさをもちと思われる混合距離 l_0 を考慮することにする。なお、 l_0 と \bar{c}_0 の関係を実験より求めたものが Fig. 2 である。

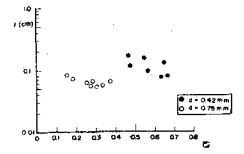


Fig. 2, bottom regionにおける混合距離 l_0 と平均濃度 \bar{c}_0 の関係

(2) 濃度分布 upper region においては、浮遊砂濃度の存在はほとんど認められない。lower region において Rouse の指数分布式を用い実験値を検討したところ、指数分布の適用は可能であるが、この式より求められた Karman 定数の値は流速分布式より求めた値に比して大きな値を示すことがわかった。この点に関しては、沈降速度の変化等今後一考の余地を残している。bottom region においては、剪断力は、粒子間の衝突に起因するものに比して、流体により受けもたれる部分は無視出来るものと考えられる。このように、高濃度でしかも集合運動形式で流送されている領域の濃度分布は明らかでなく、平均濃度をもちこの領域の濃度分布を評価することにする。断面内における未知量としては、 $[K_b, \bar{c}_0, \bar{u}_b, \bar{c}_0, \bar{u}_0, \delta, \gamma, Q]$ 、既知量として $[Q_s, D, d, \omega_s, I, \rho]$ が考えられるが、上記のことより $K_b = 0.4$, $\bar{c}_0 = 0$ となり、未知数の決定条件としては次の条件式が考えられる。

$$Q_s = A_b \bar{c}_0 \bar{u}_b + A_0 \bar{c}_0 \bar{u}_0 \quad (1) \quad \frac{u_t}{u_{*t}} = 5.5 + 5.75 \log \frac{(h-\delta) u_{*t}}{\nu} \quad (2)$$

$$\frac{u_b}{\beta u_{*b}} = A_1 + \frac{2.3}{K_b} \log \left(\frac{\gamma + d - \delta}{d} \right) \quad (3) \quad \frac{u_0}{u_{*0}} = \frac{\delta}{l_0} \quad (4) \quad l_0 \sim f(\bar{c}_0) \quad (5)$$

$$\frac{1}{K_b} = \frac{1}{0.4} + \frac{4.0(\rho/\rho_s - 1) g \omega_s \bar{c}_0 (h_b - d)}{(\beta u_{*b})^3 (2.3 \log h_b/d - 1)} \quad (6) \quad \bar{c}_0 = \frac{u_{*b}^2}{\delta(\rho/\rho_s - 1) g \tan \phi} \quad (7)$$

$$\frac{C}{C_0} = \left(\frac{h_e - \delta}{\gamma - \delta} \cdot \frac{\delta}{h_e - \delta} \right)^Z \quad \left(Z = \frac{\omega_s}{K_b(\beta u_{*b})} \right) \quad (8) \quad Q = A_t \bar{u}_t + A_b(1 - \bar{c}_0) \bar{u}_b + A_0(1 - \bar{c}_0) \bar{u}_0 \quad (9)$$

ここに、 u_{*t} : 摩擦速度、 d : 粒径、 ω_s : 沈降速度、 $h_e = h_b + \delta$ 、 ϕ : 砂粒の水中初摩擦角である。いま、堆積層厚 Γ が既知とすると、Johnson の補正により u_{*t} , u_{*b} , A_t , $A_b + A_0$ 、剪断力の自乗分布の仮定より h_e , $h_b + \delta$ 、流速分布式 (2), (3), (4) の各境界条件より A_1 , δ 、また $\gamma = \delta$ における体積濃度 C_0 の値を定めることにより K_b , \bar{c}_0 、以上すべての量が Γ の関数形で求められる。この諸量を流砂の連続式 (1) に代入することにより Γ が決定される。このように、粒子衝突の効果の卓越する限界濃度、つまり、lower region と bottom region の境界を定める濃度 C_0 を決定すれば、すべての水理量が明らかになる。以上、断面を流れの特性の相異により三領域に分割、定義し、各領域での流速分布、濃度分布についての考えを示し、さらに断面内の水理量を統一的にとりこき、流速分布、濃度分布の算定法を提案したが、この手法により管路における土砂輸送の問題における流量と流砂量の関係が理論的に決定されるであろう。