

水面及び堆積層を伴う円管内流れと掃流砂

金沢大学工学部 正員 辻本 哲郎
金沢大学工学部 ○福村 宗宏

1. まえがき

とくに都市行において地下暗渠による雨水排除が考えられるようになってきたが、管路を開水路状態で流れる状態の流れや、土砂などの堆積層を伴う場合について、抵抗則も従来の方法では充分精度がよいとはいえないし流速分布など流れの詳細な構造は議論しえない。また堆積層のフラッシュなどを考えるとき、堆積層の掃流を論ずるに充分な流れの情報が得られないことが問題となっている。著者ら¹⁾は、代数応力モデルを用いて堆積層を伴う円管流れの解析を提案、掃流砂量の合理的推定法を提案した。そこでは理論は、水面を伴わない状態での抵抗則、掃流砂量についての実験値²⁾によって検証されたが、今回とくに水面を伴う場合についても流速分布を測定し、水面での境界条件についての検討と解析結果と実験値の比較を行なう。

2. 水面及び堆積層を伴う円管流れの数値解析

流れの計算には放物型流れの近似を施した運動方程式と k 及び ϵ 方程式を基礎式とし、乱流クロージャーモデルとしてはLaunder-Yingモデル³⁾を用いる。基礎式はスタッガード格子上で離散化し、図1に示す断面を想定して、流れの計算を行なった。堆積層表面には堆積層に応じた粗度を与え、管壁は滑面と仮定して壁法則(対数則)で境界条件を与えた。一方、水面についてはこれまでの実験結果⁴⁾より、水面での摩擦の存在を想定し、次のような壁法則を仮定した。 $u/u_* = (1/\kappa) \ln(\xi_0 u_* y/\nu)$ ここに u_* :摩擦速度、 ν :動粘性係数、 κ :Karman定数、また ξ_0 は数値パラメータで、値が9.0のとき滑面条件と一致する。また ξ_0 の値を大きくしていくと、粘性底層を考えずに計算の第1格子点境界条件を与えることは見かけ上水面でスリップ速度を与えていることに相当する。本研究ではこれを未定定数とし、実験結果より定めた後、その値の特性を検討する。また上・下流には周期境界条件を課し、等流解を得るようにしている。流量と堆積層厚及び堆積層表面の相当砂粗度を与えて計算を行ない、断面内の乱流統計量とともに、エネルギー勾配($I_e = -dP/dx/\rho g$, P :圧力、 ρ :流体密度)が求められる。なおLaunder-Yingモデル³⁾の数値パラメータについては2次流の強さにかかわるパラメータも含め、標準値を用いた。

3. 堆積層を伴う円管内流れの流速測定と水面境界条件の検討

実験は長さ12m、幅0.4mの変角分配水路に、内径 D の塩化ビニール管(一部透明アクリル樹脂製)を設置して行なった。堆積層モデルとして管底から h_d の高さに木製で砂粒(粒径0.91mmのはほぼ均一砂)を接着材で固定した固定粗面を木材で設置した。流速分布の測定は、主流方向を直径3mmの小型プロベラ流速計、2次流成分は小型電磁流速計で行なった(いずれも20Hzサンプリング)。

図2は断面中心線に沿う主流速分布である。破線で示す通常に用いられる水面の境界条件(対称条件)の結果では水面で最大流速をとるところが実験結果では最大流速点はかなり降下している。図の一点鎖線は水面を滑面と仮定した計算結果であるが、このときほど最大流速の下降はないし何よりもこのときの計算では水面近傍流速が小さくなり過ぎてしまう。試行錯誤によって適当な ξ_0 の値を定めて計算した結果が図中の実線で実験で得られた流速分布をうまく再現している。図3はこのようにして計算された断面内主流速分布(コンター表示)を実験結果と比較したもので、両者は良く一致している。

パラメータ ξ_0 の値の特性を知る(予測計算のため)ため、 ξ_0 と水理パラメータのいくつかの間の関係を調べると、図4に示すようであり、次のような式でパラメータ ξ_0 を決めれば、流れの構造、抵抗則などをこれによって予測することができるものと思われる。 $\xi_0 = \ln^{-1} \{-21.9(h/H)^2 + 19.6(h/H) + 2.68\}$ 。このようにして決められた ξ_0 の値を

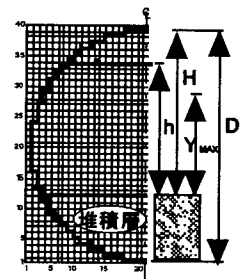


図1 計算格子

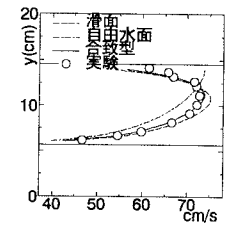


図2 中心軸主流速分布

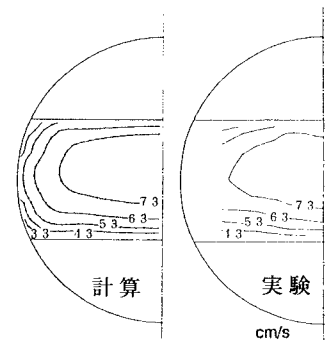


図3 主流速コンター

用いて計算すると、中心軸での主流速分布（図4）のみならずエネルギー勾配についても従来の水面条件や滑面条件での計算値より精度が向上している（図5）。今回の実験による検討は h_w/D が1通りの実験から決めら

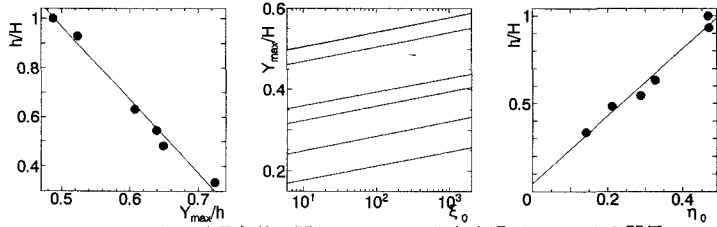


図4 水面境界条件に関わるパラメータと水理パラメータの関係

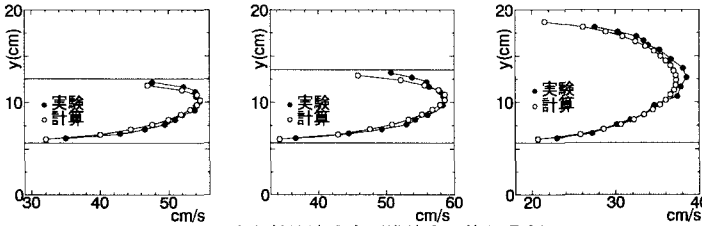


図5 中心軸流速分布（堆積層を伴う場合）

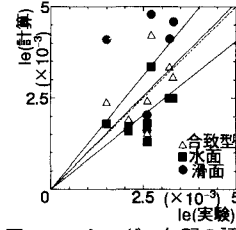


図6 エネルギー勾配の評価

れており、普遍性に欠ける面があるので、本手法を堆積層を伴わないケース⁴⁾での流速分布測定例に適用してみた。その結果図7（中心線流速分布）に示すように適用性が認められた。

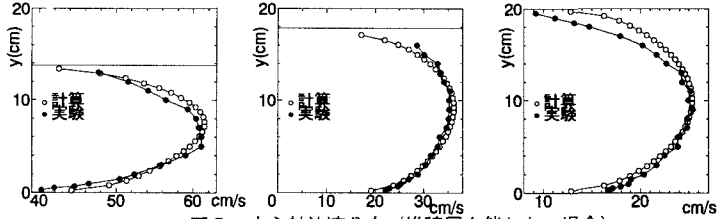


図7 中心軸流速分布（堆積層を伴わない場合）

4. 堆積層上の掃流砂量

本研究で採用している数値解析では断面内での流れの構造が計算され、堆積層上面でのReynolds応力 $(-uv)$ の外挿値として堆積層上面の掃流力分布 $\tau_b(z)$ が求められる $(\tau_w = \tau_r / (\sigma - \rho)gd)$ ：無次元掃流力， z ：管の断面の直径の一端から中心方向に向かって測られる横断方向座標， σ, ρ ：砂，流体の密度， d ：砂の粒径）。掃流砂量（全幅） Q_s は次式のようにスイス公式をもとに算定される。

$$q_B(z) = 8(\tau_w - \tau_{*c})^{3/2} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho} - 1} g d^3 ; \quad Q_s = 2 \int_{(D-B)/2}^{D/2} q_B(z) dz$$

満管の場合について上式を計算した掃流砂量と流量の関係についての計算結果は前報に示した。これを芦田²⁾の実験結果と比較したものを図8に再録する。

なお、堆積層上面にかかるせん断応力の総和 F_D が、堆積層上の重量が管壁となす摩擦力 F_R の総和を上回ると、堆積層自身が不安定になって全層で管壁に沿って滑ることが予想される。 F_D, F_R はそれぞれ次式で与えられる。

$$F_D = 2 \int_{(D-B)/2}^{D/2} \tau_b(z) dz ; \quad F_R = \mu_0 \left(\frac{D}{2} \right)^2 \{ (1 - \lambda)(\sigma - \rho) \} g \int_{-\theta_0}^{\theta_0} (\cos \theta - \cos \theta_0) d\theta$$

ただし μ_0 ：堆積層と管壁との摩擦係数， λ ：砂の空隙率である。この限界流量 Q_c を図8に示し、掃流砂量予測の適用限界とした。図8と比較すると求められた掃流砂量限界は実験値上限と対応しており、上記のモデル化の妥当なことが伺える。

5. あとがき

本研究では管内開水路流で期待される水面での摩擦を滑面壁法則の定数の補正によって試み、堆積層及び水面を持つ円管内開水路流の流れの構造と掃流砂量の評価を行なったものである。本論文ではLaunder-Yingモデル³⁾の2次流の強さに関わるパラメータは変更していないが、これを大きくすることによる最大流速点降下については触れていない（それだけでは実験結果の傾向が説明できない）。

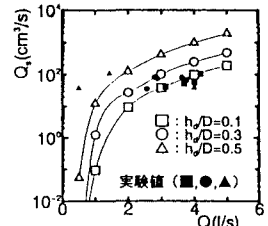


図8 掃流砂量

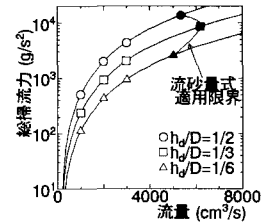


図9 掃流砂量評価の適用限界

参考文献：1）辻本・蔵重・北村・岡田，水工学論文集，第38巻，pp.653-658, 1994，2）芦田・江頭・中島：京大防災研年報，第31号B-2，pp.489-505, 1988，3）Launder & Ying：Proc. Inst. Mech. Eng., Vol.187, 1973，4）Tsujiimoto, Okada & Motohashi：KHL-Commun., Kanazawa Univ., No.3, pp.61-76, 1993。