II-254 開水路の縦分散に対する人工粗度の影響について

京都大学 大学院 学生員 山本 久五
京都大学 防災研究所 正 員 村本 嘉雄

はしがき

河川模型に適用する人工粗度については従来より主に抵抗特性の面から検討がなされている。本研究では，桟型粗度を対象として縦分散に及ぼす影響を実験的に検討するとともに，粗度係数および分散係数に関する相似律から河川模型への適用性について若干の考察を行う。

1. 実験の概要 ：実験には，長さ150m，幅60cm，勾配1/500の長方形断面水路を用い，人工粗度として高さ$k=2$cm，厚さ3mmの等辺山型鋼を粗度間隔$S=10, 20, 40, 80, 160$cmの5段階に変えて全長に設置した。滑面および粗面の各ケースについて，流量$Q=8, 13, 18, 22$ l/sの4段階に変化させ，流速ならびに塩水の縦分散測定を行った。流速分布は粗度上と中間の3断面で精測し，濃度測定は塩水投入点（水路上流端より10m）から5~130mの12断面について水路中央の1/2水深点で行い，粗面の若干のケースについては水路断面内の多点測定との比較を行った。

2. 人工粗度の抵抗と流速分布 ：いずれの粗度間隔の場合も，平均流速および流速の鉛直分布に関してほぼ対数則がなりたち，$U/U_*=6.0+2.5\ln h/k_s$ (1)，$U/U_*=6.0+2.5\ln R/k_s$ (2)（h：水深，R：底面に関する径深）から求めた相対粗度高k_s/kと粗度間隔s/kとの関係を示すと図-1のようになる。図-1には足立による実験式[1]およびk≒2.5cmの山型鋼を用いたEl-Hadi-Davarの実験結果[2]を示してある。k_s/kの値はそれぞれの実験で異なるが$s/k=10$付近で最大となる点は共通している。一方，縦分散係数を推定する場合に用いられる流速分布の偏差の二乗平均値と平均流速との比$\sqrt{\overline{u'^2}}/U$のs/kによる変化が図-2に示されており，$s/k=5$~40では$\sqrt{\overline{u'^2}}/U$≒0.3~0.4に増加することがわかる。

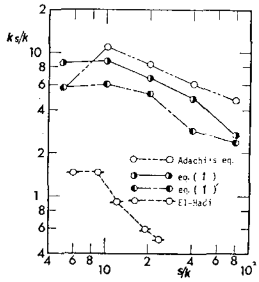

図-1. k_s/kとs/kの関係

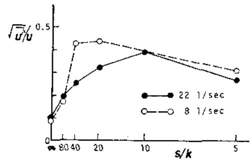

図-2. $\sqrt{\overline{u'^2}}/U$とs/kの関係

3. 濃度分布 ：規格化した塩分濃度$f(t:x)$の累加分布について，滑面および粗面の一例を示すと図-3(a)(b)のようであって滑面では濃度の低減部で尾を引き，粗面ではGauss分布に近い。表-1に$Q=22$ l/sで$x=80$mにおけるfの尖度と歪度のs/kによる変化が示してある。$s/k=10$の場合に最もGauss分布に近く，滑面に近づくほど濃度分布が歪んでいるのがわかる。また，ピーク濃度の低減特性は図-4に示すように滑面では$f\propto t_p^{-0.92}$に対して，粗面では粗度間隔が小さいほど$f\propto t_p^{-0.5}$の関係に近

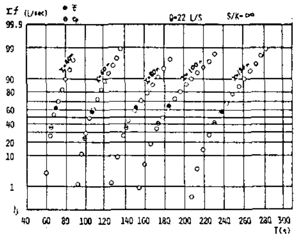

図-3(a) 塩分濃度の累加分布(滑面)

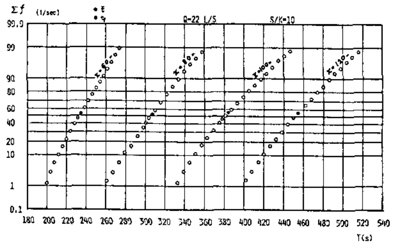

図-3(b) 塩分濃度の累加分布（粗面）

s/k	Flatness	Skewness
5	3.49	0.531
10	3.01	0.222
20	3.48	0.384
40	3.52	0.568
80	5.21	0.965

表-1. 尖度と歪度

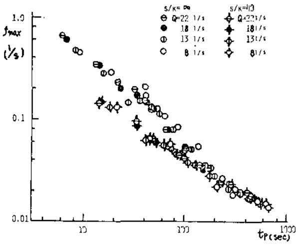

図-4. f_{max}とt_pの関係

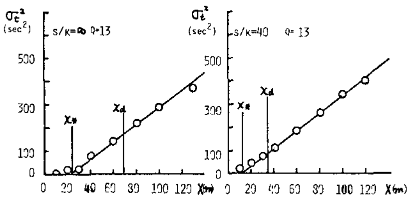

図-5. (a)(滑面) (b)(粗面)
σ_t^2の流下方向変化

づき，指数は-0.71～-0.58の範囲であった。このように粗面では滑面に比してGauss分布に早く漸近する。

4．移流域の長さと分散係数　：移流域の長さとしては図-5(a)(b)に示すように分散σ_t^2の流下方向変化からx_xおよびx_dを求め，これを移流速度で割ったt_xおよびt_dについてFischerの定義による *Lagrangian time scale* $t_L=l^2/14.8\varepsilon_y=0.30l^2/RU_*$ ($l=B/2$) (3) と比較した。

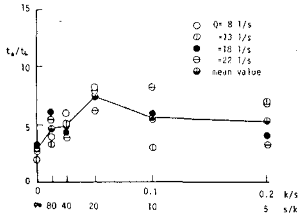

図-6. t_x/t_LとS/kの関係.

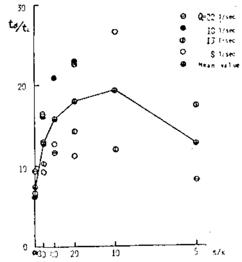

図-7. t_d/t_LとS/kの関係.

t_x/t_Lおよびt_d/t_LとS/kの関係をそれぞれ図-6および図-7に示す。滑面では$t_x/t_L=2.1\sim3.3$（平均値2.8），$t_d/t_L=6.2\sim9.4$（平均値7.4）であり，粗面では$t_x/t_L=3.0\sim8.2$（平均値5.6），$t_d/t_L=8.2\sim27$（平均値16）であって，粗面では滑面よりt_x/t_Lおよびt_d/t_Lが増加し，$S/k=10\sim20$付近で最大となっている。なお，x_xおよびx_dの値は，滑面で$x_x=22\sim43m$，$x_d=56\sim72m$，粗面で$x_x=6\sim20m$，$x_d=15\sim54m$であって，粗面では移流域の長さが小さくなっているが，分散域に達するには$x_d=15m$ ($x_d/B=25$) 以上の距離が必要であって，従来の実験の多くは移流域で行われていると考えられる。

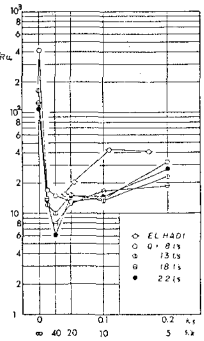

図-8. D/RU_*とS/kの関係.

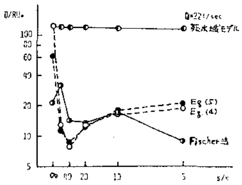

図-9. D/RU_*とS/kの関係.

つぎに，分散係数をモーメント法およびピーク濃度の低減の関係から求め，Fischerおよび死水域モデルによる推定値と比較した結果について述べる。図-8は分散係数Dを図-5(a)(b)の$x>x_d$の領域について$D=\frac{U^3}{2}\frac{d\sigma_t^2}{dx}$ (4) の関係から求め，D/RU_*のS/kによる変化を検討したもので，*El-Hadi* らが*Routing* 法で求めたものを比較のため示してある。どちらも同じような傾向をもち，今回の実験では$S/k=40$で最小の値をとった。ピーク濃度の低減は遅れ時間t_xを考えるといづれのケースも$f_p\propto(t_p-t_x)^{-0.5}$となり，$D=U^3/4\pi f_p^2(t_p-t_x)$ (5) の関係から分散係数が求まる。以上の各方法で求めたD/RU_*を図-9に示す。Fischerの方法は死水域モデルより実測値に近い値を与えている。一方，$D=\overline{u'^2}t_L$ と(3)式より$\varepsilon_y=kRU_*$の定数kを求めると，滑面では$k=0.14$，粗面では$k=0.16\sim0.34$となり，本実験では粗度による貯留および$\overline{u'^2}$の増大効果よりもε_yの増大効果が大きいために分散係数が減少していると考えられる。

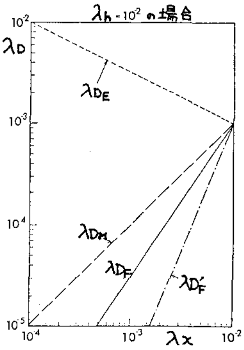

図-10. λ_Dとλ_xの関係.

5．縦分散の相似律と河川模型への適用性　：分散係数の相似律についてFischer-Holley[3]，玉井[4]の研究を参考にして括めると次のようになる。i)モーメント法：$\lambda_{D_M}=\lambda_x\lambda_h^{1/2}$　ii)Elder表示：$\lambda_{D_E}=\lambda_x^{-1/2}\lambda_h^2$　iii)Fischer表示：$\lambda_{D_F}=\lambda_x^{5/2}\lambda_h^{-1}$，流速分布に対数則を用いると$\lambda_{D_F'}=\lambda_x^{3/2}$（λはサフィックスで表した物理量の縮尺比），また歪のない模型（$\lambda_x=\lambda_h=\lambda_L$）では，$\lambda_{D_M}=\lambda_{D_E}=\lambda_{D_F}=\lambda_{D_F'}=\lambda_L^{3/2}$となる。一例として$\lambda_h=10^{-2}$の場合の$\lambda_D$と$\lambda_x$の関係を図-10に示す。一方，Manningの粗度係数の縮尺比は歪模型$\lambda_n=\lambda_x^{-1/2}\lambda_h^{2/3}$，歪なし模型で$\lambda_n=\lambda_L^{1/6}$であり$\lambda_D=\lambda_n^9$となる。したがって，$\lambda_x<\lambda_h^{4/3}$のとき$\lambda_n>1$，$\lambda_D<1$とする必要が生ずるが本実験の粗度特性はこの条件に適応する可能性を示している。なお，本実験水路を歪なし模型（$\lambda_L=10^{-2}$）と考えて，n，Dの実験値を実河川（B=60m）に換算すると$n=0.0259\sim0.0926$（m-sec単位），$D=2.6\times10^5\sim2.3\times10^6$（cm²/sec）となる。

今後，底面および側壁粗度によるε_y，x_d，Dの変化を明らかにするとともに，スケールの異る水路における分散実験から相似律を検討するつもりである。

参考文献）

1)足立昭平：土木学会論文集，104 (1964)，2) El-Hadi et all：Proc ASCE vol.102，HY4 (1976)
3) Fischer-Holley：Water Resour. Res. Vol.7, NO.1 (1971)，4)玉井信行：第18回水理講演会論文集 (1974).