移動床水路における流水抵抗の予測手法について

佐賀大学理工学部　学正員　○大熊信之
同　　上　　正　員　　渡辺訓甫

1．はじめに

移動床水路における流れ解析の基本的な課題は、底質と流量とを与えて水深を予測するということである。そのためには、与えられた条件で形成される河床波の形状を予測し、それに対する抵抗、すなわち相当粗度あるいはマニングの粗度係数などを知る必要がある。渡辺らは[1]、Nagy ら[2]の流水抵抗予測式を用いた移動床流れのシミュレート手法を提案している。本文は、その手法に基づいてプログラムを作成し、実験水路でのデータを用いて計算した結果について述べたものである。

2．低水流領域の抵抗則

Nagy ら[2]は、相当砂粒粗度k_sを河床波のスケールと関連づけて、次式

$$\frac{k_s}{H}=\frac{1}{3}\left(\frac{H}{L}\right)^{-0.3}\exp\left[\kappa\left\{8.5-0.8\left(\frac{H}{h}\right)^{0.25}\left(\frac{H}{L}\right)^{-0.125}\left(\frac{u_m}{u_*}\right)\right\}\right] \qquad (1)$$

を提案している。ここに、h：水深、u_m：平均流速、u_*：摩擦速度、κ：カルマン定数、H：波高、L：波長である。従って、流量Qと河床勾配Sを条件として与え、摩擦係数fの値を仮定すれば、水深h、平均流速u_m、摩擦速度u_*を求めることができる。河床波のスケールが水理量と底質との関数で与えられれば、式（1）より相当粗度が求まり、fの新値が得られることになる。この繰り返し計算により、与えられた条件に対する摩擦係数が決定される。式（1）の適合性については、低水流領域における河床波のスケール（波長、波高、波形勾配）に対しては渡辺ら[3]、Nagy ら[4]の式を用いて検証を行い、既往の多くの実験水路、河川における実測の水理量から得られた摩擦係数と比較して良好な結果が得られることを確認している[2]。

3．流れの解析手法

以上の手法を応用すれば、例えば粗度係数が未知であっても、移動床水路の抵抗を予測して流れの計算が可能である。ただし、上記の計算法は等流状態を対象としているので、若干計算手順を変更する必要がある。ここでは、抵抗則にマニング式を適用した１次元漸変流の差分式

$$Y_2=Y_1+\frac{\alpha Q^2}{2g}\left(\frac{1}{A_1^2}-\frac{1}{A_2^2}\right)+\frac{\Delta x}{2}\left(\frac{n_1^2}{A_1^2R_1^{4/3}}+\frac{n_2^2}{A_2^2R_2^{4/3}}\right)Q^2 \qquad (2)$$

による流れの解析手法について説明する。ここに、Y：水位、Q：流量、A：流水断面積、R：径深、n：マニングの粗度係数、α：エネルギー補正係数で、添字１，２はΔx離れた２断面の諸量を表す。

与える条件は、流量Q、底質（粒径d、水中比重s）、水路の条件（底勾配S、断面形状）、及び境界条件（下流端水位）である。まず、第２断面の水位水深h_2、粗度係数n_2を仮定すると、そこでの水理諸量が

$$f=\frac{8gn^2}{R^{1/3}},\quad u_m=\frac{Q}{A},\quad u_*=\frac{u_m}{\sqrt{8/f}},\quad S_e=\frac{u_*^2}{gR} \qquad (3)$$

により計算される。次いで流砂量、河床波のスケールが求められ、式（1）により相当粗度が得られるので、次式

$$\frac{u_m}{u_*}=\sqrt{\frac{8}{f}}=8.5-\frac{1}{\kappa}+\frac{1}{\kappa}\ln\frac{h}{k_s} \qquad (4)$$

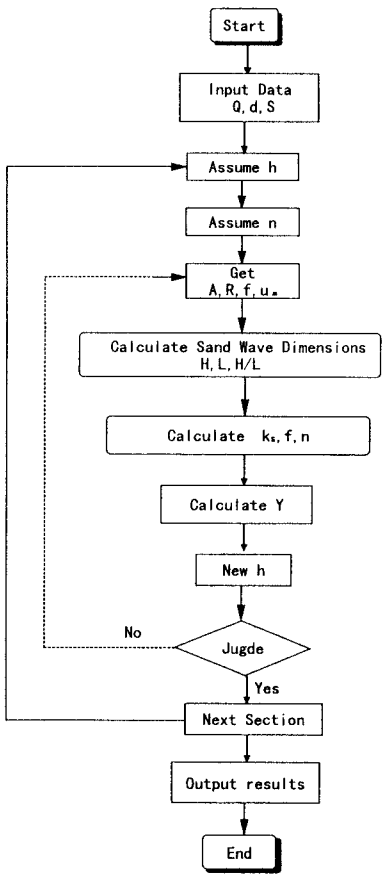
によりfが、従って第２断面の粗度係数n_2が求まり、式（2）によりY_2、すなわちh_2の新値が得られる。以上の繰り返し計算を行い、水深の値が与えられた精度以内に収まれば次断面の計算に移る。ただし、第１断面の粗度係数のみは境界条件の水深に対して式（1）、（3）、（4）による繰り返し計算を行って決定される。なお、流砂量の計算にはスイス公式を用い、限界掃流力および有効掃流力にはそれぞれ岩垣公式、

篠原・椿の式を用いた。計算のフローチャートを図－１に示す。

４．計算結果と考察

図－２は、 Guy らの移動床水路実験データ d =0.19mm、Q =0.386m³/sec、S =0.66×10⁻³ を用い、低下背水と堰上げ背水状態を想定して、下流端境界条件 h_b =0.34m (Case 1) 、0.40m (Case 2)の２ケースについて計算した結果を示したものである。図中、Ψ_e、Φ_B はそれぞれ有効掃流力、掃流砂量の無次元表示である。河床波スケールの計算式には浮流砂の影響も加味されているが、ここでは κ =0.4 とした。また、水深・水路幅比は比較的大きいので側壁による抵抗補正は行わなかった。なお、繰り返し計算による水深の精度は 0.1mm、Δx は 5m とした。実線は左軸、破線は右軸の量を、太線は Case 1、細線は Case 2 の場合である。

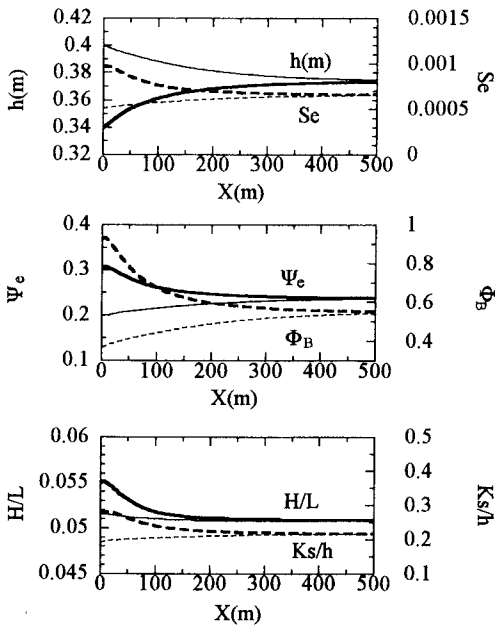
低下背水状態 (Case 1) では、下流側でエネルギー勾配が大きく、掃流力、流砂量が増大しており、それに伴って河床波の波形勾配、抵抗ともに大きくなっている。堰上げ背水状態(Case 2)では、堰上げ部でエネルギー勾配、掃流力、流砂量ともに減少し、波形勾配は若干増大しているものの抵抗は減少している。また、両ケースとも上流側で同値の等流を実現しているなど、定性的には合理的な結果が得られており、本手法の流れ解析への適合性が確認された。



図－１　フローチャート

５．おわりに

提案したシミュレート手法により粗度係数が未知である移動床水路の流れ解析が可能であることが示された。得られた結果はある時刻の流れの状態をシミュレートしたものであり、今後河床変動計算も行う予定である。



図－２　計算結果

参考文献

1) Watanabe, Nagy, Hirano: Routing of Flow and Bed Configuration in Alluvial Channels: Proc. of IAHR, 1995.
2) Nagy, Watanabe, Hirano: Flow Resistance in Alluvial Channels:水工学論文集、Vol. 39、1995.
3) Watanabe, Hirano, Nagy: On the Dominant Length of Sand Waves in the Lower Flow Regime, 九大紀要, 1993.
4) Nagy: Steepness of Sand Waves, Proc. of IAHR, 1993.