

II-253 砂州と河道湾曲の共鳴による河床形態の実験と解析

北海道開発局開発土木研究所 正 員 鳥谷部寿人・渡邊 康玄
北海道大学工学部 正 員 清水 康行・長谷川和義
学生員 中村 健作

1. まえがき

河道内災害の要因は様々であるが、河床洗掘は、最も重要な要因の一つであると思われる。すなわち、河岸近傍に発生した場合、河岸浸食による堤防への危険度の増加あるいは水位流向に影響を与え構造物や河岸保護工への被害を助長する。河川計画策定においては従来経験に頼る部分が大きなウェイトを占めてきた。河川計画で特に段階施工計画を立案する上で合理的かつ簡単に河床洗掘深を算定する手法の開発が急がれている。そこで本研究では共鳴現象を取り入れた簡易算定法についての検討を行った。

2. 河道および河床形状を規定するパラメータ

河床形状は主に河道の平面形状と河床に発生する中規模河床形態によって決定される。河道および河床形状を規定するパラメータとして、無次元蛇行波数 $\lambda = 2\pi\tilde{B}/\tilde{L}$ 、無次元河道曲率 $\nu = \tilde{B}/\tilde{R}_0$ 、川幅水深比 $\beta = \tilde{B}/\tilde{D}_0$ 、粒径水深比 $d_s = \tilde{d}_s/\tilde{D}_0$ 、無次元掃流力 $\tau_* = \tilde{D}_0 I_w / \rho_s \tilde{d}_s$ 、フルード数 $Fr = \tilde{V}/\sqrt{\tilde{g}\tilde{D}_0}$ がある。ここで $\tilde{B}$ は河幅の1/2、 $\tilde{L}$ は蛇行長、 $\tilde{R}_0$ は流路中心軸に沿った最小曲率半径、 $\tilde{D}_0$ は平均水深、 $\tilde{d}_s$ は河床材料平均粒径、 $\tilde{V}$ は平均流速、 $\tilde{g}$ は重力加速度、 I_w は水面勾配、 ρ_s は土粒子の水中比重である。なお、上記の諸量において $\tilde{}$ は次元量を、その他は無次元量を表す。

3. 共鳴条件下での河床洗掘

3-1 最大河床洗掘深と平面形状

著者らは砂州と湾曲の相互効果に着目し、共鳴現象を含む系統的な蛇行水路移動床水理模型実験を行った¹⁾。実験は $\nu = 0.05, 0.10$ 、 $\lambda = 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.5$ 、 $\beta = 5, 10, 15, 20$ の場合について行われており d_s 、 τ_* 、 Fr についてはオーダー的に大きくつれない範囲の条件に設定し行った。以上の条件を基に結果を踏まえて整理すると系統的蛇行水路実験から、以下のことがわかった。1) 砂州の移動・停止に関して、水路蛇行角のみでは決定されず、砂州波長と蛇行波長との関係についても考慮する必要がある。2) 砂州と水路蛇行が共存し、これらが共鳴する条件下では極めて大きな洗掘を受ける。3) 無次元最大洗掘深は川幅水深比 β の増加と共に大きくなる傾向を示し、ある特定の無次元蛇行波数 λ で最大値を示す。4) 無次元曲率 ν が同じ場合、無次元蛇行波数 λ の増加と共に河床形状は、水路蛇行形状による影響よりも砂州による影響が支配的になっていく。

3-2 粒径水深比の影響

砂州波高を精度よく次元解析的に解いたものに池田の(1)式がある²⁾。このことから、無次元砂州波高と粒径水深比との関係を(1)式を用いて検討することにする。(1)式より、粒径水深比 d_s と無次元砂州波高 H_b との間には図-1に示すような関係がある。(1)式より、他の水理量が同じで粒径水深比 d_s のみが変化した場合の砂州波高の変化は、(2)式で表される。

$$H_b = \left(\frac{2\beta}{d_s}\right)^{-0.45} 9.34 \exp\left(2.53 \operatorname{erf} \frac{\log_{10}(2\beta) - 1.22}{0.594}\right) \quad (1)$$

ここで、 H_{b1}, H_{b2} はそれぞれ粒径水深比が d_{s1}, d_{s2} の時の無次元砂州波高 H_b である。いま、無次元最大洗掘深 η_{max} を考えると、無次元砂州波高 H_b と無次元最大洗掘深 η_{max} の関係を考える。無次元最大洗掘深 η_{max} と無次元砂州波高 H_b の間には、(3)式で示される関係があり、その相関係数は0.968となっている。(2)式に(3)式の関係代入すると、(2)式の無次元砂州波高 H_b を無次元最大洗掘深 η_{max} に置き換えた(4)式が得られる。

$$\frac{H_{b1}}{H_{b2}} = \left(\frac{d_{s2}}{d_{s1}}\right)^{-0.45} \quad (2) \quad H_b = 1.30 \eta_{max} \quad (3) \quad \frac{\eta_{max1}}{\eta_{max2}} = \left(\frac{d_{s2}}{d_{s1}}\right)^{-0.45} \quad (4)$$

ここで η_{max1}, η_{max2} はそれぞれ粒径水深比が d_{s1}, d_{s2} の場合の無次元最大洗掘深である。(4)式によると、粒径水深比 d_s が1オーダー($d_{s2}/d_{s1} = 0.1$)変化すると、無次元最大洗掘深は3倍程度($\eta_{max1}/\eta_{max2} = 2.8$)変化することになる。すなわち、河川データのように粒径水深比 d_s の出現する範囲が広い場合には粒径水深比 d_s の影響についても考慮する必要があると判断される。

3-3 準3次元河床変動計算による最大河床洗掘深

清水ら³⁾は準3次元河床変動計算を実施し、蛇行水路実験を精度よく再現することに成功している。そこで、この3次元河床変動計算を用い(4)式により簡単に任意の d_s に対する無次元最大洗掘深 η_{max} が得られることから、 d_s を一定値にした検討を行った。図-2は横軸に無次元蛇行波長 λ をとり、縦軸に無次元位相差 δ をとったものである。なお、河幅水深比 β および無次元曲率 ν をパラメータとして表している。蛇行水路移動床水理模型実験により明らかにされたように計算でも λ が大きくなるほど δ は曲頂凹岸部下流へ移動した。また、 ν の値によって位相差が変化するが、どの ν についても傾向は同じであった。図-3は横軸に無次元蛇行波数 λ をとり、縦軸に無次元最大洗掘深 η_{max} をとったものである。なお、河幅水深比 β および無次元曲率 ν をパラメータとして表している。粒径水深比 d_s を一定にした結果、蛇行水路移動床水理模型実験により明らかになった砂州と河道平面形状との共鳴現象の効果がより明確に表現することができた。また、 ν が大きくなるにつれて無次元最大洗掘深 η_{max} の値が全体的に大きくなる傾向が表れた。

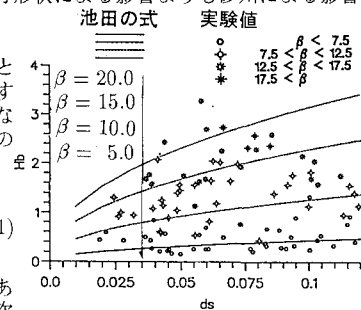
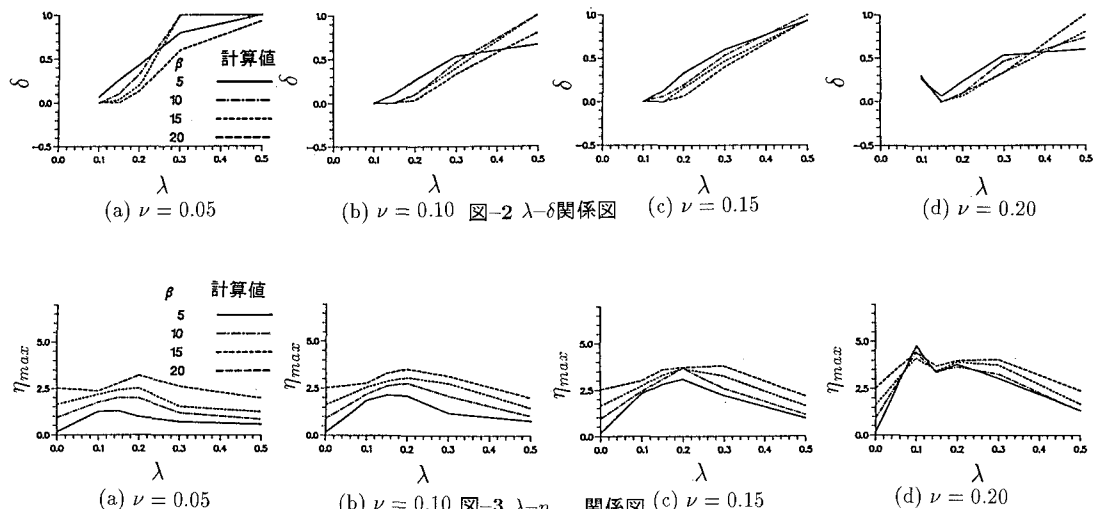


図-1 d_s-H_b 関係図



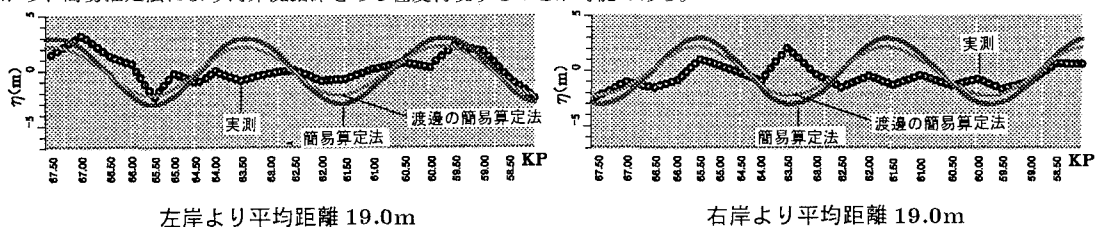
4. 河床洗掘深の再現

河床形状をモデル的に表現するために、従来から(5)式などの関数を用いられてきた。ただし $\bar{\eta}$ は平均河床面からの河床洗掘深（深掘れ側を正とする）であり、 $\bar{\alpha}$ は振幅、 $\bar{s}$ 、および $\bar{n}$ はそれぞれ平均河床面を上流中心線に沿い、下流側を正にとった流下方向軸、およびこれに直交して左岸向きを正にとった横断方向軸である。石狩川の KP58.1～KP67.7 において、河床洗掘深を前節までの結果を利用して求め、その再現性について見てみることにする。 $\nu = 0.088$ 、 $\beta = 10.22$ 、 $\lambda = 0.16$ であることから、 δ および η はそれぞれ図-2(b)、図-3(b)を用い、 $\delta = 0.07$ 、 $\eta_{max} = 2.64$ となる。図-3(b)は、 $d_s = 0.05$ の時の最大河床洗掘深であり、式(4)を用いて $d_s = 0.00053$ の時の最大河床洗掘深を求めると $\eta_{max} = 0.34$ となる。したがって、この区間における河床洗掘深は(6)式で表されることになる。

$$\bar{\eta} = \bar{\alpha} \cos \left(\frac{2\pi}{L} \bar{s} - \frac{2\pi}{L} \bar{\delta} \right) \sin \left(\frac{\pi}{2B} \bar{n} \right) \quad (5) \quad \bar{\eta} = \eta_{max} \bar{D}_0 \cos \left(\frac{2\pi}{L} \bar{s} - \pi \delta \right) \sin \left(\frac{\pi}{2B} \bar{n} \right) \quad (6)$$

治水上也最も重要である河岸近傍の河床洗掘深は、(6)式を用いて図-4で表される。ここでは視覚に訴えるため $\bar{\eta}$ の符号を逆にしてある。すなわち、符号の正が堆積を、符号の負が洗掘を表す。また参考として渡邊⁴⁾の簡易算定結果についても併記した。検討区間は、 $\lambda = 0.16$ 、 $\nu = 0.088$ 、 $\beta = 10.22$ であり、図-3から共鳴現象が発生する条件であると判断される。簡易算定手法の結果と渡邊の方法で求めた値との差が共鳴現象によるものであると思われる。

河岸近傍の縦断面図を見ると実測による洗掘の規模に対しては安全側になっている。これにより河岸保護工などを設計する際の根入れの深さを決めることができる。しかし堆積の傾向は実測に対して過大に計算されており一致していない。また、KP64.5からKP65.5にかけて左岸に低水護岸が施工されているため河道曲率だけで河床洗掘が発生していないため、再現性が悪くなっている。さらに、KP63.5の左岸凸岸付近から美瑛川が合流しているため計算では堆積傾向を示しているが、現況では洗掘されている。以上の不一致の他、簡易推定法は河床形状を(1,1)の波で仮定している。しかしながら、簡易推定法により河床洗掘深をある程度再現することが可能である。



5. おわりに

蛇行水路移動床水理模型実験結果より蛇行河道に砂州が発生する条件において、水路蛇行波長と砂州波長が一致する場合に、両者の相互作用により非線形効果、すなわち共鳴現象が働いていることが確認された。また、粒径水深比を固定した計算結果により共鳴現象がより明確に再現された。その結果簡易算定法で河床洗掘深ある程度の再現が可能になった。

《参考文献》

- 1) 鳥谷部寿人、渡辺康玄、清水康行；蛇行水路移動床水理模型実験、第36回北海道開発局技術研究発表会講演概要集(3)、1993。
- 2) 池田駿介；単列交互砂州の波長と波高、第27回水理講演会論文集、1983。
- 3) 清水康行；第4回護岸保護工・根固工・ガイドライン検討委員会資料、1993.12。
- 4) 渡辺康玄、長谷川和義、北條紘次；河川データによる河床洗掘の水理要因に関する検討、水工学論文集第34巻、1990。