

蛇行流路における砂州の形状および移動特性

Geometric and Migration Characteristics of Sand Bars in Meandering Channel

清水 康行*・藤田 睦博**・平野 道夫***

by Yasuyuki SHIMIZU, Mutsuhiro FUZITA and Michio HIRANO

A numerical model is proposed to investigate the finite amplitude bed topography and migration characteristics in meandering channel. Migration characteristics of bar in meandering channel is investigated. The effects of geometric and hydraulic factors for finite amplitude bed topography are investigated using the proposed numerical model. By the results of the numerical experiment, a series of figures are presented, which show the effects of each parameter to the finite amplitude bed topography. A practical formula is proposed to estimate the finite amplitude bar height.

Keywords: bar migration, bar height, numerical model.

1. はじめに

与えられた平面形状および水理条件における安定河床形状を予測することは河川工学における重要な課題であり、古くから多くの研究が行われている。本研究で対象とするのは様々な規模の安定河床問題のうち、そのスケールが水深や流路幅、蛇行波長などで表現される中規模河床形態に関するものである。この問題は、河川計画における合理的な川幅の選択や河岸保護工などの河川管理施設の設計など応用分野も広く、実用上極めて重要な課題でもある。著者ら^{1,2)}はこれまでに準3次元(水深方向に積分された3次元の運動方程式および連続式)の流れの方程式と掃流砂量式および流砂の連続式を組み合わせた数値計算モデルの開発を行い自由砂州と固定砂州が共存するような条件においても、河床形状の予測が妥当に行われることを示すとともに、自由砂州と固定砂州の共鳴現象などを含む様々な特性を明らかにしてきた。しかしながら今までの研究は比較的限られた流路平面形状や水理条件を対象したものであり、実河川での様々な水理条件や流路平面形状の下での河床形状の特性を網羅するには至っていない。

本研究においては、特に流路の平面形状に着目し、より一般的な流路平面形状における砂州特性を検討するために、広範囲の無次元蛇行波数および曲率半径の組み合わせによる河床変動計算を実施し、最大砂州波高や平面形状の違いによる砂州の移動特性などについて検討を行う。さらに、一連の計算結果を総合化することにより、簡易な最大砂州波高式の提案を行う。

2. 検討手法

本研究で用いられる計算方法は、清水ら²⁾によって提案され様々な実験結果により検証されてきた、準3次元の流れの計算と河床変動の計算手法を組み合わせたものである。本研究においても流路の平面形状は次式の sing-generated curve で表すものとする。

$$\varphi = \varphi_0 \sin \left(\frac{2\pi}{L} s \right) \quad (1)$$

ここで、 s は流路中心に沿った無次元座標軸 ($=\tilde{s}/\tilde{B}$)、 φ は流路谷軸と s 軸のなす角度、 L は流路に沿う蛇行波長 ($=\tilde{L}/\tilde{B}$)、 φ_0 は $\tilde{s} = 0$ における φ (で偏倚振幅)、 $\tilde{B}$ は $1/2$ 流路幅である。

流路の形状および水理条件を、無次元蛇行波数 λ 、無次元河道曲率 ν 、無次元流路幅(半河幅・平均水深比) β 、無次元粒径(粒径・平均水深比) d_s 、平均無次元掃流力 τ_{*0} 、平均フルード数 F_r の6つの無次元パラメータで表す。

$$\lambda = 2\pi \frac{\tilde{B}}{\tilde{L}} \quad \nu = \frac{\tilde{B}}{\tilde{R}_0} \quad \beta = \frac{\tilde{B}}{\tilde{D}_0} \quad d_s = \frac{\tilde{d}_s}{\tilde{D}_0} \quad \tau_{*0} = \frac{\tilde{D}_0 S_f}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \tilde{d}_s} \quad F_r = \frac{\tilde{U}_0}{\sqrt{\tilde{g} \tilde{D}_0}} \quad (2)$$

ここで $\tilde{R}_0$ は流路中心軸の最小曲率半径(曲頂部における曲率半径)、 $\tilde{D}_0$ は平均水深、 $\tilde{d}_s$ は河床材料平均粒径、 $\tilde{U}_0$ は平均流速、 $\tilde{g}$ は重力加速度、 S_f は水路縦断方向の平均勾配、 ρ_s は土粒子の密度、 ρ は水の密度であ

* 正会員 工博 北海道大学工学部助教授 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

** 正会員 工博 北海道大学工学部教授 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

*** 正会員 北海道開発局河川計画課長 (〒060 札幌市北区北8条西2丁目札幌第一合同庁舎)

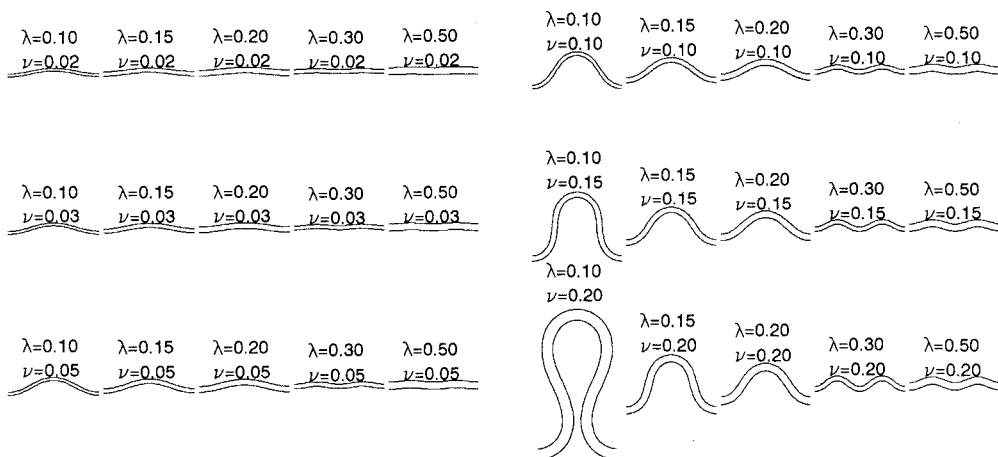


図-1 λ と ν の組合せによる平面形

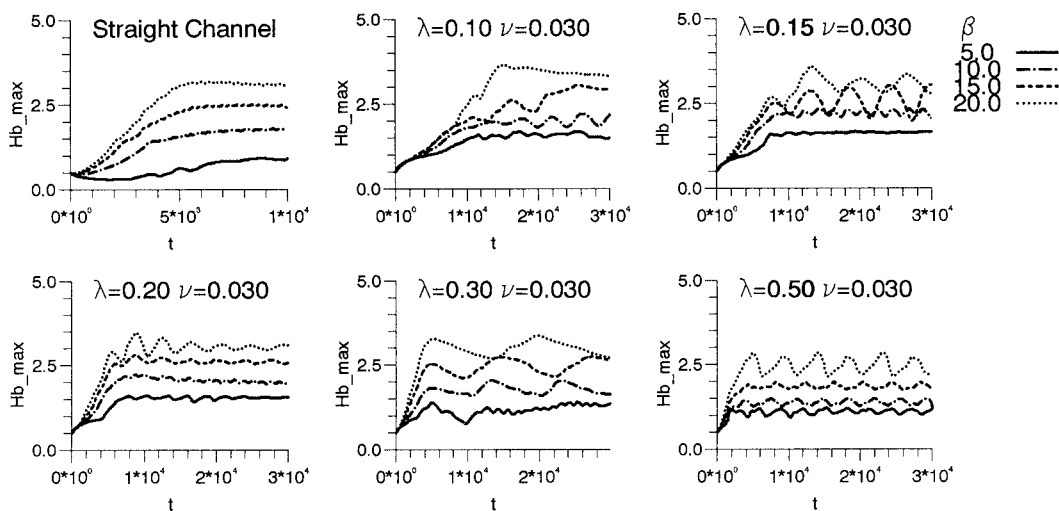


図-2 最大砂州波高の時間変化 ($\nu = 0.03$, $\lambda = 0.1 \sim 0.5$, $\beta = 5 \sim 20$)

る。式(2)に示した6つのパラメータの内 λ と ν は流路の平面形を、 β は横断形を、 d_s は粒径を介して河床抵抗を、 τ_{*0} は流砂量を、また F_r は流れの状態を表すパラメータである。この6つのパラメータを用いて様々な流路形状と水理条件の組み合わせを表現することが可能となる。 λ および ν を用いて式(1)中の L および φ_0 は次式で表される。

$$L = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \varphi_0 = \frac{\nu L}{2\pi} \quad (3)$$

λ と ν の組み合わせにより図-1に示すような様々な流路平面形状を表現することができる。

平面形状の違いによる河床形状および砂州の移動特性を把握するために、ここでは式(1)の6つのパラメータのうち平面形状を決定する λ よび ν と自由砂州の発生、形状を支配する β を様々な変化させた場合の検討を行なう。 λ および ν に関しては図-1に示したそれぞれ5および6通りとし、 β については5, 10, 15, 20の4通りとする。したがって検討ケースは $5 \times 6 \times 4 = 120$ ケースとなる。他のパラメータについてはひとまず $d_s = 0.05$, $\tau_{*0} = 0.08$, $F_r = 0.83$ で一定とし、 λ , ν および β の違いによる効果を調べることとする。なお、ここで用いた水理条件での交互砂州の発生条件は黒木・岸³⁾の領域区分図によると $\beta = 5$ の場合が砂州非発生であり $\beta = 10, 15, 20$ の場合が交互砂州の発生領域に分類される。

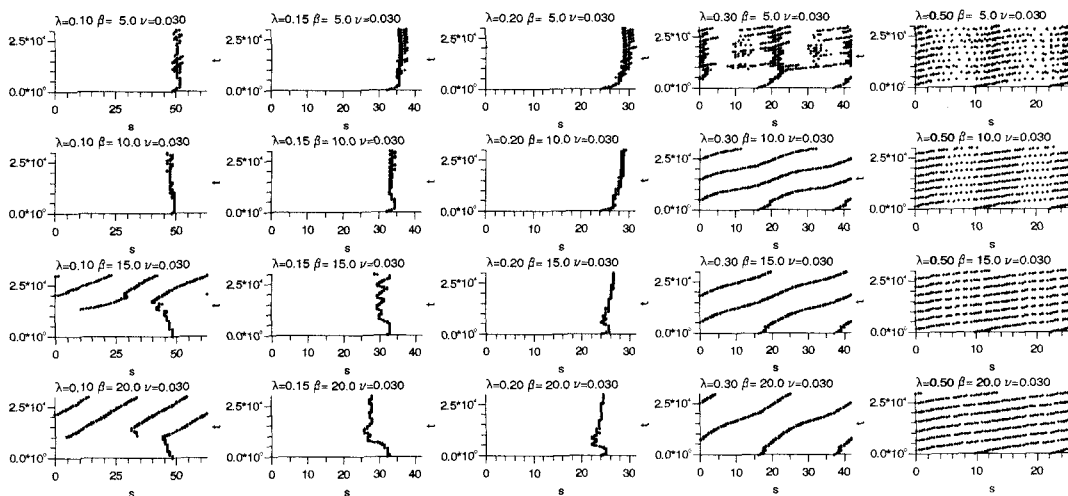


図-3 深掘れ位置の走時線 ($\nu = 0.03$, $\lambda = 0.1 \sim 0.5$, $\beta = 5 \sim 20$)

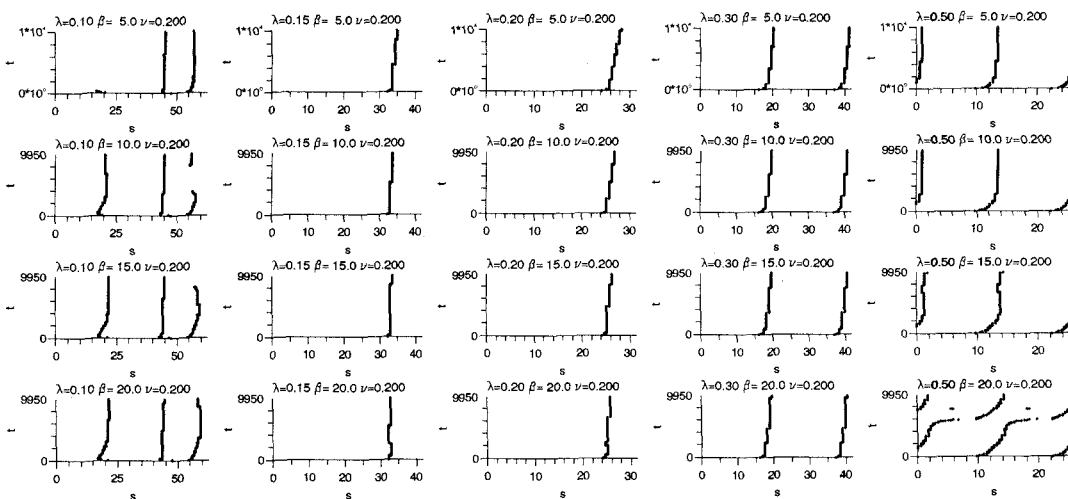


図-4 深掘れ位置の走時線 ($\nu = 0.2$, $\lambda = 0.1 \sim 0.5$, $\beta = 5 \sim 20$)

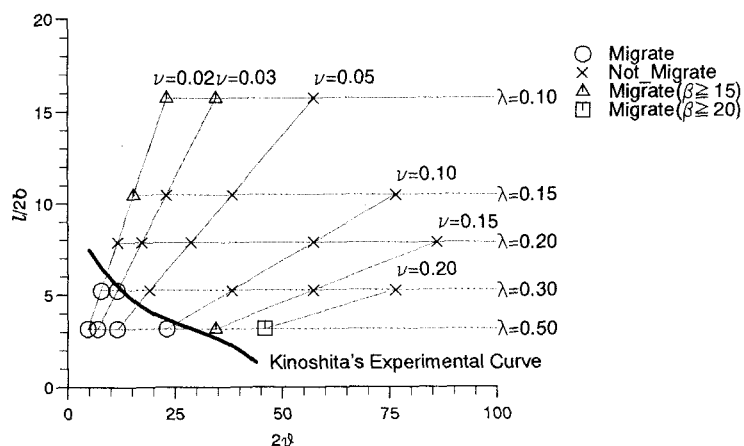


図-5 砂州の移動限界

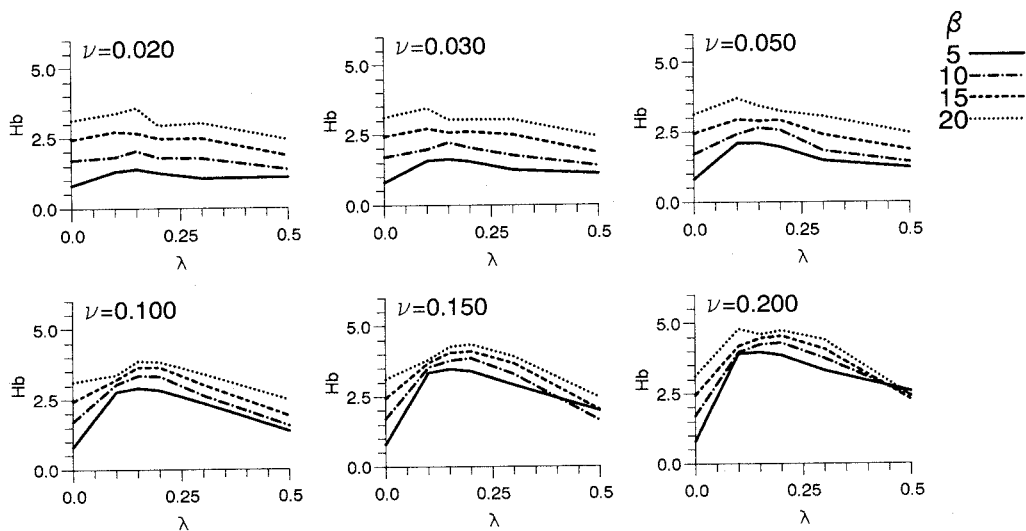


図-6 蛇行水路の無次元砂州波高 H_b に対する ν , λ および β の関係

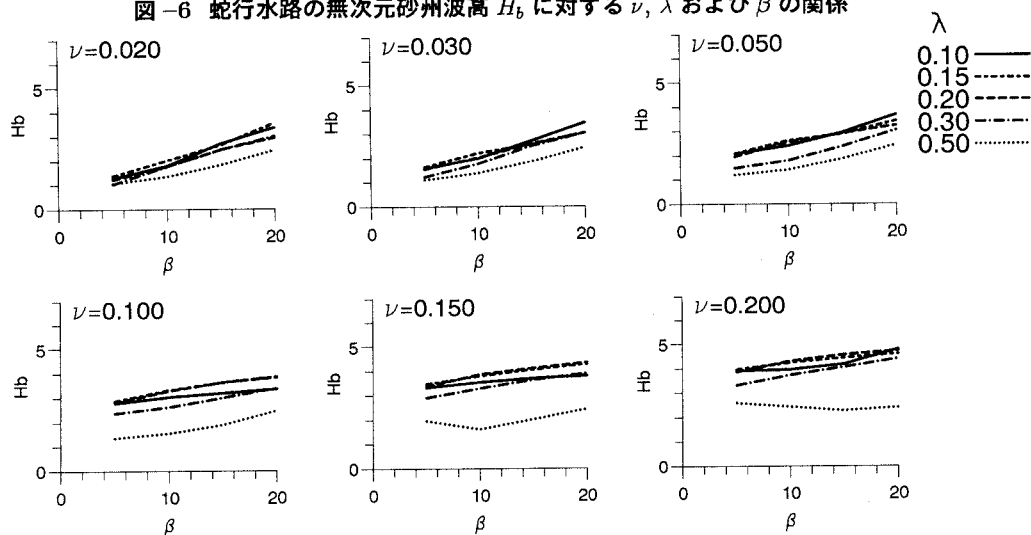
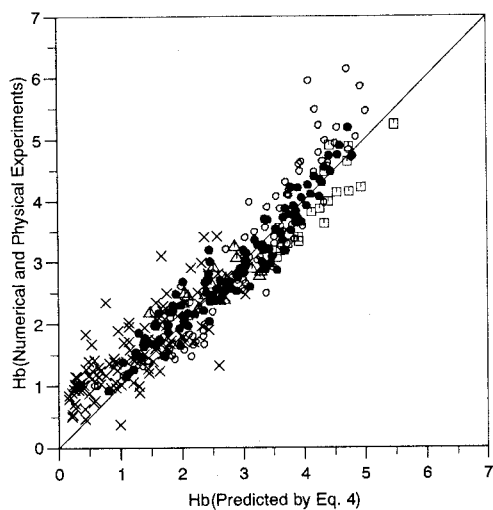


図-7 蛇行水路の無次元砂州波高 H_b に対する ν , λ および β の関係



- Numerical Calculation
- Toyabe et al. (1993)
- △ Nino and Garcia (1992)
- Colombini et al. (1990)
- × JSCE Hydraulic Committee (1982)

図-8 無次元砂州波高予測式による砂州波高の計算結果

3. 砂州の移動特性の検討

前記の条件で河床変動計算をそれぞれ安定に達するまで行なった。パラメータの組み合わせによって、計算開始直後にほぼ安定な河床形状に達するものと、周期的な変動を繰り返すものが見られた。例として、 $\nu = 0.03$ の場合の無次元砂州波高 H_b の時間変化を λ の値別に図-2 に示す。ここで、無次元砂州波高とは検討対象の水路中での最大河床高と最少河床高との差を平均水深で無次元化したものであり、図-2 の横軸の t は $t = \tilde{t} \cdot \tilde{U}_0 / \tilde{B}$ ($\tilde{t}$ は時間) で表わされる無次元時間である。

図-2 によるといずれの λ の場合も無次元砂州波高は β が大きいほど大きくなる傾向が見られ、 $\lambda = 0.2$ の場合にはほぼ一定値で安定するが、それ以外の場合は波高の発達後に周期的な変動傾向が見られる。変動の見られる場合の変動周期は β が小さい程短くなっている。これと砂州の移動特性との関連性を調べるために、それぞれの計算結果における深掘れ位置の時間変化を示したのが図-3 である。図-3 の横軸は無次元座標軸 s であり、図中に示されている走時線は各ケースの左岸に沿った深掘れ位置である。図-3 によると、 $\lambda = 0.15$ および 0.20 の場合には砂州の移動は完全に停止しており $\lambda = 0.30$ および 0.50 の場合および $\lambda = 0.1$ で $\beta = 15$ および 20 の場合には移動傾向が見られる。移動する場合の移動速度は砂州の移動しない $\lambda = 0.15$ および 0.20 から離れるほど速くなる傾向が見られる。図-3 に示した $\nu = 0.03$ の例は蛇行流路の湾曲部の曲率が非常に緩やかな場合であるが、 λ が $0.15 \sim 0.2$ の場合には自由砂州の砂州波長が流路の蛇行波長の中に納まるような形で砂州の移動が停止していると考えられる。また、 $\lambda = 0.1$ の場合には β が大きくなり自由砂州の影響が強くなると、砂州の移動が発生する。

流路の蛇行曲率の大きい $\nu = 0.2$ の場合の深掘れ位置の走時線を図-4 に示す。この場合には、流路曲率の影響が強いためほぼ総ての場合において砂州の移動は停止している。唯一 $\lambda = 0.5$ で $\beta = 20$ の場合にのみ移動する傾向が見られる。これは $\nu = 0.2$ の場合、流路の曲率が大きいので砂州の移動は生じにくい、 $\lambda = 0.5$ で流路の蛇行波長が短い場合で、 β が大きく自由砂州の影響が大きい場合にのみ砂州が流路の蛇行をすり抜けて移動するためである。また、 $\lambda = 0.1$ の場合、砂州の移動は見られないが図示した s の範囲 (1 蛇行波長) 内に 2 箇所以上の深掘れが見られる。これは、流路の蛇行波長が長いので 1 つの波長内に複数の自由砂州が形成されているためである。

木下・三輪⁴⁾ は蛇行角と蛇行波長の関係に着目し、砂州の移動・停止の限界を現す限界条件を実験的に求めている。そこで、本研究において行った一連の計算結果を図-5 に示す木下・三輪の図上にプロットしてみる。ここで、図-5 の縦軸および横軸はそれぞれ $l/2b$ (l は蛇行波長、 b は水路幅) および 2θ (θ は蛇行角度) であり、本研究で用いている無次元パラメータで表わすと、それぞれ $\pi/2\lambda$ および $2\nu/\lambda$ となる。

図-5 に示した記号の内、○印は β の値にかかわらず砂州の移動が認められたものであり、×印は β の値にかかわらず砂州の移動が停止しているものである。また、△印および□印はそれぞれ β が 15 以上および 20 以上で砂州の移動が認められたものである。数値計算結果はほぼ木下・三輪による移動限界線と一致する傾向が見られるが、移動限界線境界近傍では、 β の値が大きい (自由砂州の影響が強くなる) 場合にのみ移動する。また、移動限界線より大きく離れた条件 ($\lambda = 0.10$ で $\nu = 0.02, 0.03$ など) でも、△印の砂州移動が見られる。これは、 λ が小さくても ν が小さいと砂州の移動が流路の蛇行湾曲部をすり抜けて移動する場合に相当する。

4. 無次元砂州波高

河床形態の内、河川の管理や計画などの実務上もっとも重要な要因の一つに最大砂州波高の予測という問題が挙げられる。一連の数値計算結果から無次元砂州波高 H_b の計算結果と ν 、 λ および β のパラメータとの関係を調べる。ここで、図-2 に示した様に無次元砂州波高が時間的に変動する場合においては、その最大値を用いることとする。

図-6 は ν の値別に λ と H_b の関係を示したものである。図-6 の $\lambda = 0$ の位置には比較のために行った直線水路の計算結果も併せて示した (直線水路は本来 $\lambda = \infty$ であるが、ここでは便宜的に $\lambda = 0$ の位置にプロットしてある)。いずれの図も λ が $0.1 \sim 0.2$ の範囲でピークが見られ、このピークは ν の値が大きいほど大きい。 λ が $0.1 \sim 0.2$ でピーク生ずるのは自由砂州と固定砂州が共鳴状態にあると考えられるが、この共鳴現象は ν の値が小さい場合にはあまり顕著ではなく、 ν の増加に伴って顕著になる。一方、 β が大きくなるほど H_b が大きくなる傾向が見られるが、この傾向は ν が小さいほど顕著であり ν が大きくなるに従って少なくなる。これは β の増加に伴い自由砂州の発達が促されるが ν が大きくなると流路の湾曲による固定砂州の影響が強まり自由砂州の影響が抑制されるためである。従って、 ν と λ の組み合わせによる平面形状

の最大砂州波高に対する影響は、基本的には ν の増加に伴う曲率の増加とこれによる固定砂州波高の増加という現象に、 λ と β の組み合わせによる自由砂州の発達移動という現象が非線形的に複合された形で現れているようである。

図-7は同じ計算結果を β を横軸にとって表わしたものである。どの ν においても H_b は β の増加に伴って直線的に増加する傾向が見られるが、増加の割合は ν が小さいほど、すなわち流路の曲率が小さいほど大きい。このことから、 β の H_b に対する影響はほぼ線形的に現れるが、その影響すなわち自由砂州の発達は ν と λ の組み合わせによる平面形状の影響により抑制されると考えられる。

5. 砂州最大波高の予測式

前述のとおり、蛇行水路の最大砂州波高は流路平面形と、自由砂州の相互の影響を非線形的に受ける。このため、最大砂州波高の予測は本研究で行ったような両者の効果を取り入れた流れと河床形状の空間的、時間的な発達過程を計算した結果として可能となるものである。しかしながら実用的には流路形状や水理条件などのパラメータと最大砂州波高の関係式が与えられたほうがより便利である。前記の計算結果によると H_b に対して β および ν はほぼ線形的に作用しているので、 λ の値毎に H_b に関する β と ν の最適一次近似式を作成し、得られた近似式の係数を λ の多項式で近似することにより H_b の予測式を作成する。さらに本研究では平面形状(λ と β)および横断形状(β)に関するパラメータの影響について述べたが、この他に(2)式で示したパラメータの内、河床材料粒径と平均水深の比 d_s も H_b の決定に対して重要なパラメータとなっていることが確かめられているため²⁾、 d_s の効果も考慮した式とする。なお、実際にはパラメータとして λ の代わりに $1/\lambda$ を用いることにより $1/\lambda = 0$ である直線流路の場合もカバーできる形の式となるため $1/\lambda$ を用いた式とした。

$$H_b = \{1.0 + 0.1\Omega + (-18.4 + 15.6\Omega - 2.5\Omega^2 + 0.12\Omega^3)\nu + (0.1 - 0.004\Omega)\beta\}(0.3 + 19.0d_s - 88.1d_s^2) \quad (4)$$

ここで、 $\Omega = 1/\lambda$ である。図-8に本研究で行った一連の数値計算結果による無次元砂州波高と式(4)による計算結果を比較して●で示す。さらに図-8には移動床蛇行水路実験結果として鳥谷部ら⁵⁾によるものを○で、Nino and Garcia⁶⁾によるものを△で、Colombiniら⁷⁾によるものを□で、また直線水路移動床水路実験結果として土木学会水理委員会によりとりまとめられたもの⁸⁾を×で、いずれも式(4)による予測結果と比較して示す。鳥谷部ら⁵⁾による実験結果(○)のうち H_b の大きい数点が予測式と大きく異なる傾向が見られるが、これらの結果は β が20以上の複列砂州状態のものであり、水路中に浮州の現れているものである。図-8によると式(4)の予測式は、数値計算結果および様々な条件の下の実験結果と良く一致しており、簡易な式で最大砂州波高が予測可能となった。

6. おわりに

蛇行水路における流路の平面形状の違いによる、砂州の移動形態および安定形状を検討するために、広範囲のパラメータの組み合わせによる河床変動計算を実施した。この結果、砂州の移動特性や形状に関する様々な現象が明らかになった。また、数値計算結果より直線流路も含む広範囲な蛇行形状に適用可能な砂州波高の簡易予測式を提案し、既往の模型実験と比較して検証を行った。平面形や河幅水深比などによる固定砂州や自由砂州の非線形的な相互干渉の結果による砂州波高を、複雑な計算無しに簡易な予測式で推定可能であることが示された。なお、本研究は(財)河川防災研究センターの補助を受けて行われたものである。

参考文献

- 1) 清水康行・Marco Tubino・渡邊康玄：自由砂州と固定砂州の共鳴条件における河床変動計算，水工学論文集，第36巻，pp.15-22，1992.
- 2) 清水康行・渡邊康玄・鳥谷部寿人：直線および蛇行河川の安定河床形状に関する研究，土木学会論文集（投稿中）.
- 3) 黒木幹男・岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，土木学会論文集，第342号，pp. 87-96，1984.
- 4) 木下良作・三輪式：砂礫堆が安定する河道の平面形状，土木学会第29回年次学術講演会，pp.(II)266-268，1974.
- 5) 鳥谷部寿人・渡邊康玄・清水康行・長谷川和義・中村健作：共振深掘れの発生条件に関する移動床蛇行水路実験，土木学会北海道支部論文報告集，第49号，pp.445-450，1993.
- 6) Yarko NINO and Marcelo GARCIA: Sediment Bars in Straight and Meandering Channels, Experimental Study on the Resonance Phenomenon, Civil Engineering Studies, Hydraulic Engineering Series No. 42, University of Illinois at Urbana-Champaign, pp.1-118, 1992.
- 7) Marco COLOMBINI, Mrco Tubino and Peter WHITING: Topographic Expression of Bars in Meandering Channels, Third International Workshop on Gravel-Bed Rivers, Florence, 24-28 September, 1990.
- 8) 土木学会水理委員会：洪水流の三次元流況と流路形態，pp.1-86，1982.