

II-45

蛇行水路における交互砂州の発達に関する研究

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. 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、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に必要な事項であることから、河川工学における重要な課題のひとつであり、古くから多くの研究が行われている。

本研究では、河道形状に大きく影響を与える平面形状および交互砂州発生条件に関するパラメータを変化させて行った水路実験データを基に、各パラメータと安定河床形状との関係について調べ、その結果について検討を行ったものである。砂州波高については昨年度に報告¹⁾しているため、今年度は砂州波長と位相差について述べることにする。

2. 実験条件

本研究において、考慮した条件は、河道の形状と砂州の存在である。G.Seminara²⁾、G.Parker³⁾の理論的研究成果により、水路の蛇行周波数がある特定の値において自由砂州と固定砂州が共振的に発達する事が指摘されている。本研究ではこれらの水路形状を含め、図-1に示すように様々な蛇行水路実験を行った。実験条件設定に当たって考慮したパラメータは(1)式に示す無次元蛇行波数 λ_m 、無次元曲率 ν 、川幅水深比 β の3つである。 λ_m 、 ν は河道の平面形状を表すパラメータであり、 β は交互砂州の発生に関するパラメータである。ここで \bar{L}_m ; 蛇行波長、 \bar{R}_0 ; 最小曲率半径、 \bar{B} ; 1/2水路幅、 \bar{D}_0 ; 平均水深である。

$$\lambda_m = 2\pi \frac{\bar{B}}{\bar{L}_m} \quad \nu = \frac{\bar{B}}{\bar{R}_0} \quad \beta = \frac{\bar{B}}{\bar{D}_0} \quad (1)$$

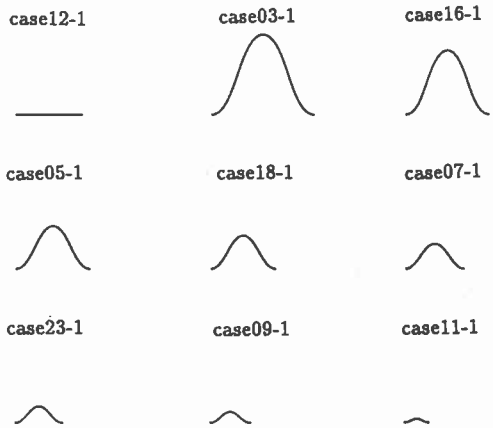


図-1 蛇行形状シリーズ2 ($\nu=0.10$)

典型的な交互砂州形状を得るため、黒木・岸⁴⁾、木下・三輪⁵⁾による領域区分図を参考に水理条件を定め、上記のパラメータの値を決定することとした。実験は、3シリーズ行った。すなわち、シリーズ1として $\nu=0.05$ に固定した実験($\lambda_m=0.1 \sim 0.5, \beta=5 \sim 20$)、シリーズ2として $\nu=0.10$ に固定した実験($\lambda_m=0.1 \sim 0.5, \beta=5 \sim 20$)、シリーズ3として $\lambda_m=0.20$ に固定した実験($\nu=0.03 \sim 0.15, \beta=5 \sim 20$)。シリーズ1,2により λ_m, β の影響、シリーズ3により ν, β の影響が把握できる。表-1に各実験の諸元をまとめて示す。

3. 共振条件下での無次元砂州波数

蛇行形状によって砂州波長がどのように発達するかを見るため無次元砂州波数 $\lambda_b (=2\pi\bar{B}/\bar{l}_b)$ について各パラメータとの相互関係を調べる。ここで、 \bar{l}_b は砂州波長である。図-2は横軸に無次元蛇行波数 λ_m 、縦軸に無次元砂州波長 λ_b をとり、 β ごとに場合分けをしたものである。実験データが45度線上にある場合は砂州波長と蛇行波長が一致している事を示す。交互砂州が発生しない条件である $\beta=5$ では $\nu=0.10, \nu=0.05$ のいずれの場合もほぼ砂州波長は水路蛇行波長に依存していることがわかる。一方、交互砂州発生条件($\beta=10, 15, 20$ のケース)の場合、無次元蛇行波数 λ_m がある値の範囲にある場合に無次元砂州波数 λ_b は λ_m と一致し、その

Study on Development of The Alternate Bar in Meandering Water Channel
 by Toshihito TOYABE, Yasuharu WATANABE, Yasuyuki SHIMIZU, Kazuyoshi HASEGAWA and Kensaku NAKAMURA

表-1 各実験の諸元

シリーズ1							シリーズ2							シリーズ3						
Case	λ_m	β	ν	λ_b	H_b	δ	Case	λ_m	β	ν	λ_b	H_b	δ	Case	λ_m	β	ν	λ_b	H_b	δ
case12-1	.000	5.1	.000	.000	.570	.000	case12-1	.000	5.1	.000	.000	.570	.000	case12-1	.000	5.1	.000	.000	.570	.000
case02-5	.100	4.8	.050	.108	1.941	-.040	case03-1	.100	4.8	.084	.000	2.345	-.040	case19-1	.200	4.9	.030	.198	1.438	.400
case15-1	.125	4.9	.050	.126	1.792	.000	case16-1	.125	4.2	.100	.152	1.829	.150	case06-5	.200	4.5	.050	.205	1.836	.320
case04-1	.150	4.5	.050	.383	2.148	.200	case05-1	.150	4.5	.100	.000	2.115	.267	case20-1	.200	4.6	.075	.207	2.359	.167
case17-1	.175	5.0	.050	.181	2.032	.200	case18-1	.175	4.4	.100	.192	2.351	.133	case07-1	.200	4.5	.100	.211	2.177	.320
case06-5	.200	4.5	.050	.205	1.836	.320	case07-1	.200	4.5	.100	.211	2.177	.320	case21-1	.200	3.9	.150	.244	2.371	.333
case22-1	.250	4.5	.050	.256	1.883	.300	case23-1	.250	4.3	.100	.265	2.222	.200	case12-2	.000	9.5	.000	.337	1.686	.000
case08-1	.300	5.1	.050	.300	1.725	-.400	case09-1	.300	4.6	.100	.308	2.179	.333	case19-2	.200	9.4	.030	.202	2.052	.300
case10-1	.500	5.0	.050	.507	1.038	-.200	case11-1	.500	5.1	.100	.486	1.353	-.400	case06-6	.200	9.5	.050	.203	2.346	.280
case12-2	.000	9.5	.000	.337	1.686	.000	case12-2	.000	9.5	.000	.337	1.686	.000	case20-2	.200	8.8	.075	.212	3.036	.250
case02-6	.100	9.7	.050	.247	2.995	-.120	case03-2	.100	11.4	.084	.374	3.838	-.040	case07-2	.200	10.9	.100	.211	3.518	.120
case15-2	.125	10.2	.050	.136	2.909	.100	case16-2	.125	9.4	.100	.302	3.489	.000	case21-2	.200	8.5	.150	.238	3.722	.000
case04-2	.150	11.7	.050	.153	3.033	.067	case05-2	.150	11.8	.100	.000	3.981	.067	case12-3	.000	13.3	.000	.371	2.798	.000
case17-2	.175	10.0	.050	.182	2.778	.200	case18-2	.175	9.6	.100	.199	3.106	.000	case19-3	.200	13.6	.030	.205	3.666	.200
case06-6	.200	9.5	.050	.203	2.346	.280	case07-2	.200	10.9	.100	.211	3.518	.120	case06-7	.200	14.2	.050	.202	3.358	.160
case22-2	.250	9.0	.050	.254	2.122	.400	case23-2	.250	9.7	.100	.265	3.236	.200	case20-3	.200	13.0	.075	.210	3.887	.083
case08-2	.300	10.6	.050	.304	1.979	.467	case09-2	.300	10.7	.100	.310	3.276	.467	case07-3	.200	17.0	.100	.224	4.850	.080
case10-2	.500	10.2	.050	.299	2.493	-.400	case11-2	.500	11.0	.100	.501	3.006	-.400	case21-3	.200	13.4	.150	.237	4.309	.000
case12-3	.000	13.3	.000	.371	2.798	.000	case12-3	.000	13.3	.000	.371	2.798	.000	case12-4	.000	16.7	.000	.421	3.511	.000
case02-7	.100	12.2	.050	.360	2.723	.160	case03-3	.100	17.1	.084	.491	4.386	-.320	case19-4	.200	17.0	.030	.390	3.391	.000
case15-3	.125	14.1	.050	.140	3.188	.150	case16-3	.125	14.1	.100	.314	4.332	-.050	case06-8	.200	18.5	.050	.203	3.931	.120
case04-3	.150	15.8	.050	.300	3.603	-.133	case05-3	.150	17.3	.100	.341	4.739	-.067	case20-4	.200	17.2	.075	.205	3.920	.000
case17-3	.175	14.3	.050	.175	3.808	-.067	case18-3	.175	13.8	.100	.393	3.731	-.067	case07-4	.200	22.9	.100	.000	4.712	.000
case06-7	.200	14.2	.050	.202	3.358	.160	case07-3	.200	17.7	.100	.224	4.850	.080	case21-4	.200	16.5	.150	.239	4.190	-.083
case22-3	.250	13.1	.050	.254	3.617	.300	case23-3	.250	14.0	.100	.262	3.735	.100							
case08-3	.300	16.8	.050	.302	3.105	-.400	case09-3	.300	17.5	.100	.310	4.783	.400							
case10-3	.500	15.9	.050	.355	3.039	-.200	case11-3	.500	18.1	.100	.308	3.543	.200							
case12-4	.000	16.7	.000	.421	3.511	.000	case12-4	.000	16.7	.000	.421	3.511	.000							
case02-8	.100	18.8	.050	.360	4.165	-.440	case03-4	.100	22.1	.084	.211	5.016	-.280							
case15-4	.125	17.6	.050	.281	3.756	.200	case16-4	.125	19.1	.100	.323	4.356	.050							
case04-4	.150	20.4	.050	.362	4.252	.067	case05-4	.150	23.0	.100	.000	4.086	.000							
case17-4	.175	17.7	.050	.357	3.701	-.200	case18-4	.175	18.8	.100	.507	4.245	-.067							
case06-8	.200	18.5	.050	.203	3.931	.120	case07-4	.200	22.9	.100	.000	4.712	.000							
case22-4	.250	16.9	.050	.258	3.763	.300	case23-4	.250	17.6	.100	.262	4.512	.100							
case08-4	.300	22.8	.050	.282	4.554	.400	case09-4	.300	22.9	.100	.306	4.942	.333							
case10-4	.500	22.0	.050	.393	3.952	.400	case11-4	.500	37.3	.100	.000	7.742	-.200							

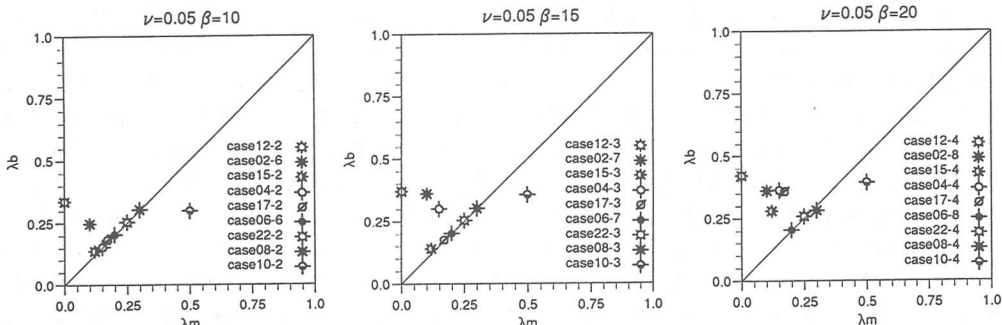


図-2 無次元蛇行波数 λ_m と無次元砂州波数 λ_b との関係(シリーズ1)

範囲よりも無次元蛇行波数 λ_m が大きい場合あるいは小さい場合には、直線実験での無次元砂州波数 λ_b に近い値となる。すなわち交互砂州は、形成し得る波長の範囲を持っており、蛇行波長がある範囲に入っている場合は蛇行形状によって強制的に波長が決定されるが、蛇行波長がある範囲よりも長くなると交互砂州はそれ以上伸びることができず、またある範囲よりも短い場合、それ以上短くなることができずに交互砂州自身の波長で発達する。弯曲河道における砂州波長に対し、蛇行形状と交互砂州のどちらが支配的になっているか

を調べることとする。横軸に無次元蛇行波数 λ_m を、縦軸には(2)式で表される無次元砂州波数の寄与度 Cr をとって図化したものが図-3である。なお、シリーズ1とシリーズ2では同様の傾向を示したため、ここではシリーズ1のみを示す。ここで λ_{bs} は、同じ川幅水深比の直線水路において発生した無次元砂州波数である。

$$Cr = \frac{\lambda_b - \lambda_{bs}}{\lambda_m - \lambda_{bs}} \quad (2)$$

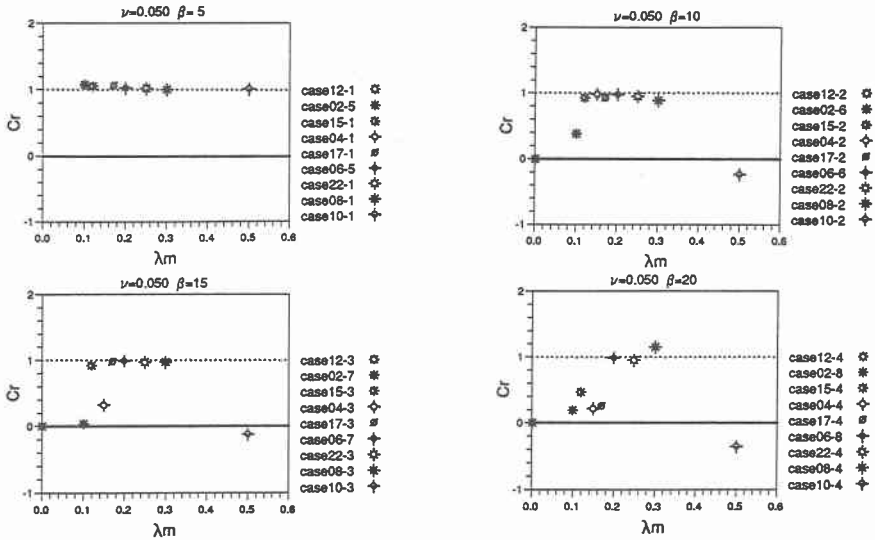


図-3 無次元蛇行波数 λ_m と寄与度 Cr との関係(シリーズ1)

Cr が0に近づくと砂州の影響が強くなり、1に近づくと弯曲の影響が強くなることを示している。非砂州領域実験の場合、すべての実験の無次元砂州波長 λ_m が寄与度 $Cr=1$ 付近にあり、砂州波長は弯曲のみに支配されている。一方、砂州領域実験の場合について寄与度 Cr を比べると、シリーズ1では $\beta=10$ の条件で case02-6($\lambda_m=0.10$)、 $\beta=15$ の条件で case02-7($\lambda_m=0.10$)、case04-3($\lambda_m=0.15$)、 $\beta=20$ の条件で case02-8($\lambda_m=0.10$)、case15-4($\lambda_m=0.12$)、case04-4($\lambda_m=0.15$)、case17-4($\lambda_m=0.17$)、シリーズ2では $\beta=10$ の条件で case16-2($\lambda_m=0.12$)、 $\beta=15$ の条件で case16-3($\lambda_m=0.12$)、case05-3($\lambda_m=0.15$)、case18-3($\lambda_m=0.17$)、 $\beta=20$ の条件で case03-4($\lambda_m=0.10$)、case16-4($\lambda_m=0.12$)が0に近づいており蛇行波長の長い実験において交互砂州の影響が支配的であるといえる。次に曲率が河床形状に与える影響について見るため横軸に無次元曲率 ν 、縦軸に寄与度 Cr をとったものが図-4である。シリーズ3では $\beta=5, 10, 15, 20$ において無次元砂州波数 λ_b は無次元曲率 ν の変化に関係なく寄与度 $Cr=1$ 付近にあり弯曲の影響が支配的であることを示している。これらの実験は砂州波長が蛇行波長に一致した場合であり、このような条件では無次元曲率 ν は無次元砂州波数 λ_b に無関係であることが示されている。また case04-1、case05-2、case05-4、case07-4、case11-3、case11-4、case19-4のように寄与度が0以下、または1以上になった実験は一蛇行波長に1対を超える交互砂州が発生したり、交互砂州が発達せずに複列砂州になったりするような実験であった。また図-3の結果をもとに蛇行の影響の強いものと砂州の影響の強いものとに場合分けをしたものが図-5(1)である。この図において○は砂州の影響が強いものを表し、×は弯曲の影響が強いことを表している。また砂州が成長、消滅を繰り返し砂州波長が一定でなかったり、複列砂州になった実験については△印をつけた。図-5(1)に示されるように砂州の影響が卓越する場合と蛇行の影響が卓越する場合とが λ_m と β によって明確に分離することができる。更に図-4の結果をもとにして無次元曲率 ν を指標にとり、蛇行の影響が支配的なものと砂州の影響が支配的なものとに場合分けをしたものが図-5(2)である。 $\lambda_m=0.20$ の場合ほとんど弯曲の影響が支配的であるが、 ν が小さい条件では川幅水深比 β が大きくなると砂州の影響が支配するものと思われる。

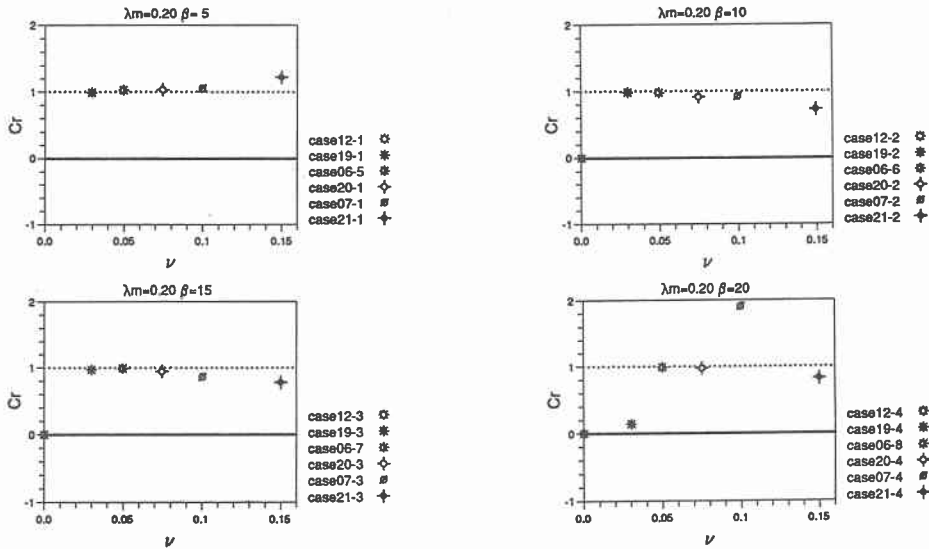


図-4 無次元蛇行波数 ν と寄与度 Cr との関係 (シリーズ3)

- 砂州の影響大
- × 湾曲の影響大
- △ 複列 or 一蛇行に一对を超える交互砂州

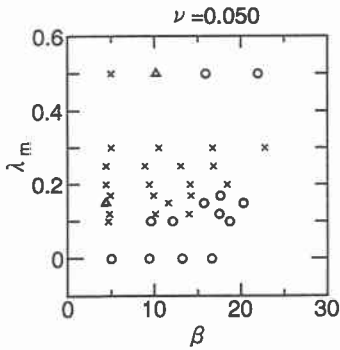


図-5 (1) 湾曲と砂州の影響力の強さ (シリーズ1)

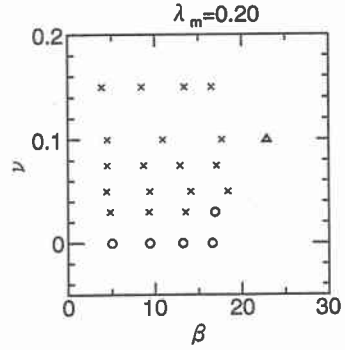


図-5 (2) 湾曲と砂州の影響力の強さ (シリーズ3)

4. 共振条件下での無次元位相差

最大河床洗掘深の位置と蛇行水路の平面形との関係について蛇行水路半波長を単位として、水路の曲頂凹岸を0とし、最大洗掘深の位置が上流の場合を負、下流の場合を正とした無次元位相差 $\delta(=2\tilde{\delta}/L_m)$ について各パラメータとの相互関係について調べた。最大洗掘深起生位置が水路曲頂凹岸部の時、無次元位相差が0であり凸岸部の時、無次元位相差が ± 1 である。まず、蛇行波長が無次元位相差に与える影響について調べた。図-6は横軸に無次元蛇行波数 λ_m 、縦軸に無次元位相差 δ をとったものである。交互砂州発生条件において無次元蛇行波数 λ_m が増加すると最大洗掘深の位置は曲頂を挟んで上流から下流へ移動する傾向が伺える。G.Parkerら³⁾は蛇行水路に対する線形化方程式を導き、これを曲がりの効果の部分と砂州の効果の部分に分割して扱っている。そこで湾曲が砂州波長に対する強制項に相当するものと考え共振条件を導き出している。(3)式はParkerらによる共振波数であり、長谷川ら⁶⁾はこの波数をもとに共振現象を述べている。ここで P ; 河床摩擦係数とせん断力の変化率にかかる係数、 M_1 ; 流砂量のせん断力に関する変化率にかかる係

数、 $\Gamma=1/(\beta^2 \cdot c)((1+\alpha_*\mu)/(f_*\mu))\sqrt{\tau_{*c}/\tau_*}$ 、 c ；河床摩擦係数、 τ_* ；無次元掃流力、 τ_{*c} ；限界無次元掃流力、 $\mu=0.43$ 、 $\alpha_*=0.85$ 、 $f_*=1.19$ である。

$$\lambda_{res} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{2P\Gamma}{M_1 + 1}} \cdot c \cdot \beta \quad (3)$$

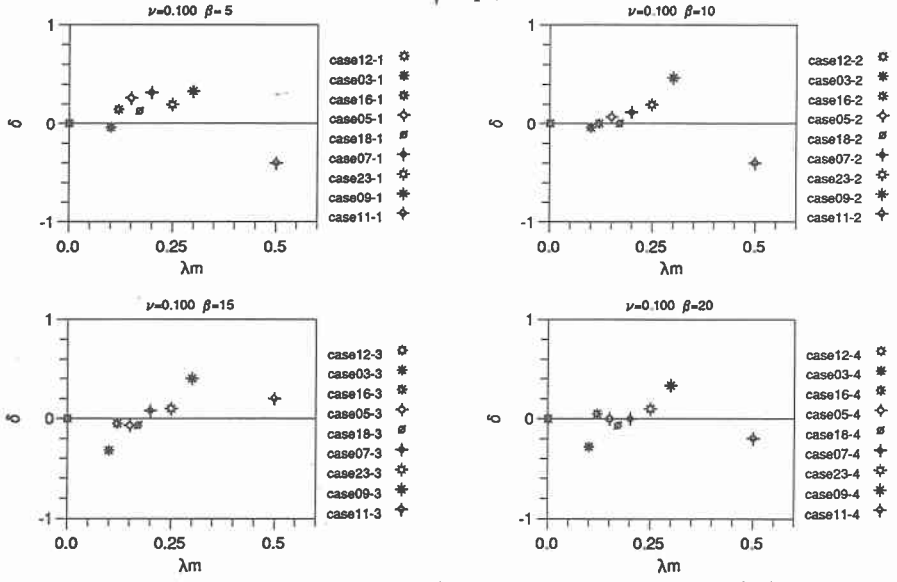


図-6 無次元蛇行波数 λ_m と無次元位相差 δ との関係(シリーズ2)

この共振条件を用いて弯曲と交互砂州が最大洗掘深の位相差に与える影響について調べたのが図-7である。横軸には λ_m/λ_{res} 、縦軸には位相差 δ をとっている。すなわち、 λ_m/λ_{res} が1になると蛇行水路波長がParkerの共振波長に一致することを示している。特に交互砂州発生条件では λ_m/λ_{res} が1に近づくと $\delta=0$ となり最大洗掘深は蛇行水路の曲頂付近に現れる。次に無次元曲率が無次元位相差に与える影響について調べた。

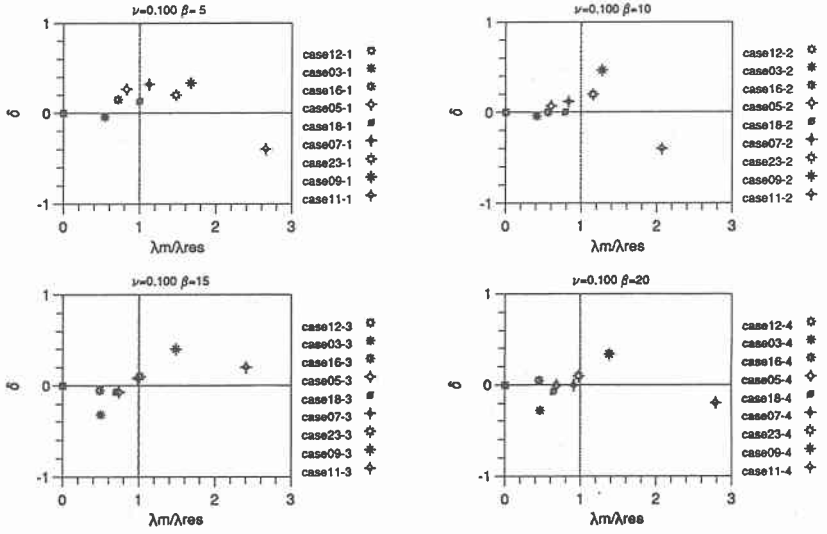


図-7 共振波数 λ_{res} と無次元位相差 δ との関係(シリーズ2)

図-8は横軸に無次元曲率 ν 、縦軸に無次元位相差をとったものである。非砂州領域($\beta=5$)の場合、最大洗掘深の位相差は無次元曲率の値に無関係にほぼ一定であり、洗掘位置は曲頂より下流側に出現する。砂州発生領域では無次元曲率が大きくなると $\delta=0$ に近づく傾向にある。また、 β が大きくなるにつれ、無次元位相差は全体的に $\delta=0$ に近づく傾向にある。また無次元砂州波高 H_b も大きくなるのが昨年¹⁾に報告されている。すなわち交互砂州の影響が河道弯曲の影響に比べて相対的に大きくなるにつれて最大洗掘深の位相差が小さくなるのがわかる。 $\lambda=0.20 \beta=5$

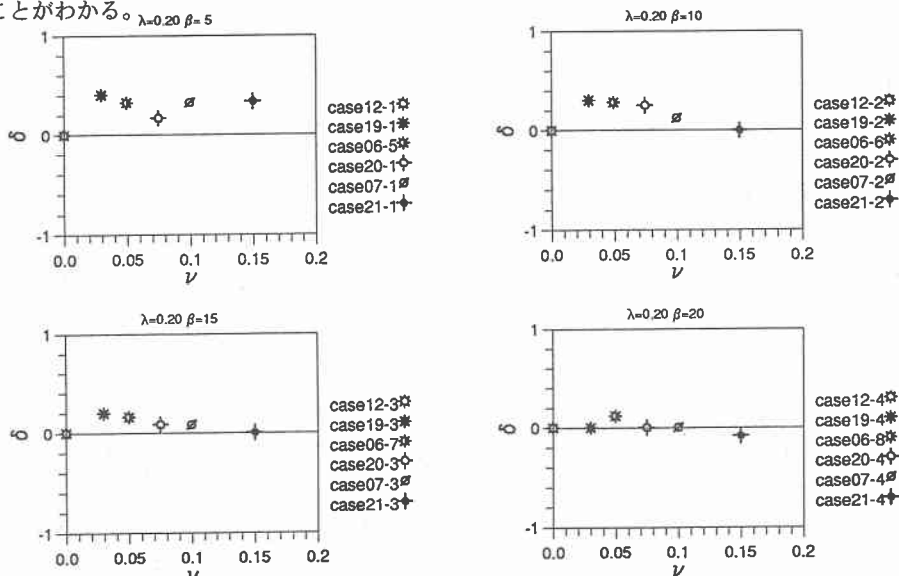


図-8 無次元曲率 ν と無次元位相差 δ との関係(シリーズ3)

5. おわりに

河道形状に大きく影響を与える平面形状および交互砂州発生条件に関するパラメータを変化させて行った水路実験データを基に、各パラメータと安定河床形状との関係について調べた結果、以下の事項が明らかとなった。

- 1) 交互砂州は形成し得る波長の範囲を持っており、蛇行波長がある範囲に入っている場合は蛇行形状によって強制的に波長が決定されるが、蛇行波長がある範囲外では交互砂州は固有の波長になる。
- 2) 河道弯曲が砂州波長に与える影響は平面形状を表す支配パラメータ λ_m と ν によって整理できる。
- 3) 交互砂州発生条件では λ_m/λ_{res} が1に近づくと $\delta=0$ となり最大洗掘深は蛇行水路の曲頂付近に現れる。

《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) Blondeaux, P. and G. Seminara; A unified bar-bend theory of river meanders, J. Fluid Mech., 157, 1985.
- 3) Parker, G. and H. Johannesson; Observation on several recent theories of resonance and overdeepening, River Meandering, AGU Monograph No. 12, 1989.
- 4) 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, 1984.
- 5) 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, 1974.
- 6) 長谷川和義, 中村健作, 清水康行, 渡辺康玄, 鳥谷部寿人; 砂州と強制蛇行洗掘が共存する河床地形の干渉過程に着目した波数解析, 土木学会北海道支部論文報告集 第50号, 1994.