

緩和曲線を挿入した河道湾曲部の流れと河床変動特性に関する実験的研究

Experimental study on flows and bed change characteristics in curved open channels

北見工業大学大学院 ○学生員 中本篤嗣 (Atsushi Nakamoto)
 北見工業大学工学部 正会員 内島邦秀 (Kunihide Uchijima)
 北見工業大学工学部 正会員 早川 博 (Hiroshi Hayakawa)

1. はじめに

河道湾曲部では、外岸側に流れが集中することによって、河岸が不安定になり、崩壊や浸食が起きやすくなるため、治水上の弱点部となる。このため、湾曲部の水理機構について従来より様々な視点から研究が行われてきた¹⁾⁴⁾。しかしながら、著者らが知る限り、基礎実験における湾曲部平面形状は単曲線を対象とするものに限られている。

本研究では、道路の平面線形に採用されているクロソイド曲線を挿入した河道湾曲部と、単曲線のみを用いた湾曲部における流れと河床変動特性を比較・検討し、河道湾曲部に敷設される護岸工設計のための基礎的知見を得ることを目的としている。

2. 実験水路

本研究では、湾曲部固定床上の流れ場の測定、数値シミュレーション及び移動床実験水路として、湾曲部の平面形状のみが異なる湾曲角 180 度の 3 種類の U 字型水路が用いられた(図 2~4)。湾曲部始点、終点からそれぞれ上・下流側に 4m 程度の平行な直線水路を接続した。水路幅 $B=30\text{cm}$ で、直線水路中心軸の平行間隔は 70.6cm である。

湾曲部の平面形状として、単曲線のみのも(曲率半径 $R=35.3\text{cm}$ 、全曲線長 $L=110.9\text{cm}$)、60 度の単曲線にクロソイド曲線を接続したクロソイド対称基本型(クロソイド曲線長 62.8cm 、クロソイドのパラメーター $A=43.4\text{cm}$ 、単曲線長 31.4cm 単曲線部分の曲率半径 $R=30\text{cm}$ 、全曲線長 $L=157.0\text{cm}$)及びクロソイド曲線のみクロソイド対称凸型($L=161.1\text{cm}$ 、 $A=45.4\text{cm}$)が用いられた。

前述のように上・下流側直線水路の平行間隔を同一としたため、3 種類の湾曲部の全曲線長が異なる。そのため縦断位置を x/L (ここで、 x は湾曲部始点からの距離)として河床形状、洗掘深等を比較した。3 種類の水路における、曲率($1/R$)を比較したものを図・1 に示す。

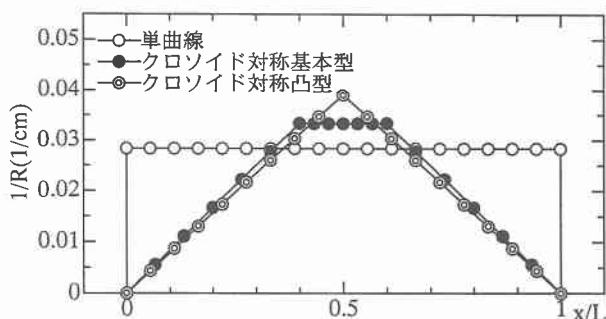


図-1 曲率の比較

3. 固定床流れの解析

本章では、清水¹⁾と同様に簡略化された 3 次元の運動方程式と連続の式を差分法を用いて数値計算し、3 種類の湾曲水路における固定床での流況特性を明らかにする。

(1) 流れの解析

解析方法を簡潔に述べると、水路の座標軸は流下方向に s 軸を、 n 軸は s 軸と直交し左岸から右岸に向かう方向にとり、 z 軸は河床から鉛直上向きに定義する。この場合、簡略化された 3 次元定常流の運動方程式および連続式は式(1)~(4)のとおりである。

$$u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{uv}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + 2 \frac{\partial}{\partial s} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial n} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad \dots (1)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} + w \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{u^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial s} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial n} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial n} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad \dots (2)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = -g \quad \dots (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial (rv)}{\partial n} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots (4)$$

ここで、 u, v, w はそれぞれ s, n, z 方向の流速成分、 p は圧力、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 ε は渦動粘性係数である。運動方程式の簡略化ならびに数値計算手法は、清水の手法¹⁾に則して行った。

本解析では、3 種類の水路を水平固定床で設定し、上流端から一定流量($Q=5.39 \text{ l/s}$)を供給する不等流条件で行う。境界条件として、直線である上流端は $v=w=0$ とし、流れは等流状態 $u=u_0$ とする。下流端は、湾曲部から十分離れた直線部に設けることにより、流路横断方向に水平な一定水位 H_0 を与え、側壁および河床はせん断力による摩擦を考慮した。また、流量は流路内のどの断面においても一定の流量であることが必要なので、数値計算は式(5)で表される条件を満たすまで、収束計算を繰り返した。

$$Q = \int_n \int_z u dz dn = \int_n h u dn \quad \dots (5)$$

(2) 実験結果との比較

はじめに、流速の計算値との比較に用いた実測値は、PIV(Particle Image Velocimetry)と呼ばれる非接触多点同時計測が可能な光学流速計を用いて計測した。実験では河床から1cm間隔で水面付近まで測定し、図-2に示す実測値と計算値の比較は水深平均流速を算出して行った。湾曲部の内岸側で若干差がみられるものの、3種類の水路すべてにおいて、計算結果は概ね良好に実験値を再現していると言える。最大流速に着目すると、単曲線の水路では、湾曲部の始点から内岸側に発生し、終点で急激に外岸に移行している。一方クロソイド曲線を挿入した2種類の水路では、湾曲部の始点では中央付近に発生し、徐々に内岸側へ移行し、終点に近づくにしたがって中央付近、終点で外岸に移行するスムーズな流れになっている。この現象は対称凸型で、より顕著に現れている。

次に2次流強度は移動床における洗掘と密接に関係するものと考えられるため、数値計算の結果を用いて、3種類の湾曲部における2次流強度の平面分布特性を比較する。2次流強度の算定には式(6)を用いた²⁾。

$$I = \frac{\frac{1}{h} \int_0^h |v| dz}{\bar{u}} \quad \dots (6)$$

ここで、 h は水深、 $\bar{u}$ は水深平均流速、 v は横断方向流速である。

2次流強度の平面分布図を図-3に示す。単曲線の水路では、曲率が不連続に変化する湾曲部の始・終点部分において2次流強度が最大になっているのに対し、クロソイド曲線を挿入した2種類の水路では、始点から曲率が增大するにつれて徐々にその強度を増大させ、頂点を過ぎた外岸付近で最大になり、その後は逆に減少していく。したがって、移動床河床ではこの2次流が大きくなる部分で河床の洗掘が進行するものと予想できる。

4. 移動床実験

(1) 実験方法

実験は前述の3種類の湾曲水路を用いて行った。移動床材料には、ほぼ均一な平均粒径 $d=0.75(\text{mm})$ の東北硅砂を使用し、勾配が水平になるように厚さ10cmに敷き均し、これを初期河床面とした。流量 Q は河床波の発生しない $Q=5.39(\text{l/s})$ とし、3章の固定床実験と同様に不等流実験を行った。水面勾配は止水直前に湾曲部始・終点からそれぞれ2.6m上・下流位置で水位を測定して求めた。

河床形状は、ポイントゲージまたは河床形状測定器を用いて測定した。河床測定は、直線部では上流側を50cm間隔6測線、下流側を10cm間隔26測線、湾曲部では単曲線及びクロソイド対称凸型で、水路の全長を18等分した19測線、クロソイド対称基本型ではクロソイド部分と単曲線部分とに分け、それぞれ7、4、7等分した19測線に対して、横断方向1cm間隔(29測点)で行った。

経時変化を見る実験では、止水後の再通水による河床形の極端な変動を避けるため、すべて初期河床面から所要時間まで再通水を繰り返し行った。実験条件を表-1に示す。

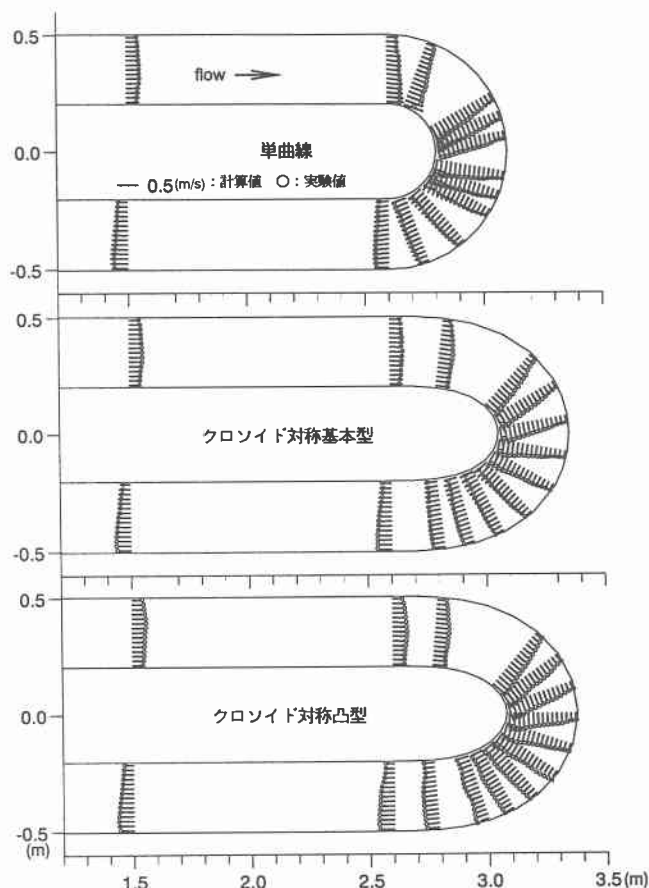


図-2 水深平均流速の比較

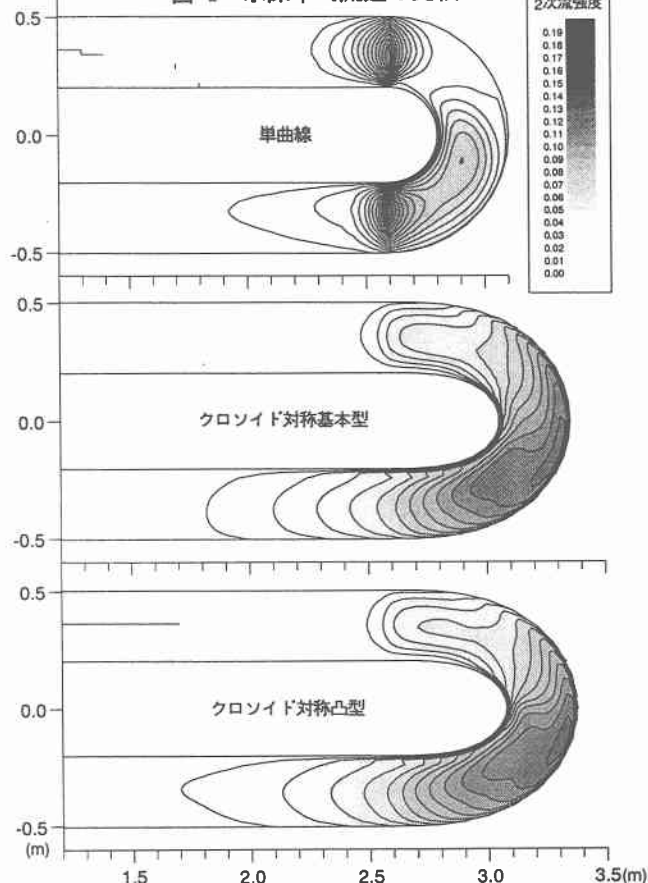


図-3 2次流強度の平面分布

表-1 実験条件

RUN	流量 Q(l/s)	水路湾曲部 (湾曲部全長:L)	粒径 d(mm)	通水時間 t(min)	平均水深 h(cm)	水面勾配 I	フルード数 Fr
1	5.39	単曲線	0.75	7.5	5.88 ~ 4.01	0.00296	0.403 ~ 0.715
				15	5.69 ~ 4.23	0.00231	0.423 ~ 0.660
				30	5.46 ~ 4.55	0.00144	0.450 ~ 0.591
				45	5.38 ~ 4.16	0.00193	0.460 ~ 0.676
				60	5.39 ~ 4.11	0.00203	0.459 ~ 0.689
2		対称基本型	0.75	7.5	5.90 ~ 4.10	0.00266	0.400 ~ 0.691
				15	5.47 ~ 3.86	0.00238	0.449 ~ 0.757
				30	5.47 ~ 4.20	0.00188	0.449 ~ 0.667
				45	5.44 ~ 4.04	0.00207	0.452 ~ 0.707
				60	5.35 ~ 4.15	0.00177	0.464 ~ 0.679
3		対称凸型	0.75	7.5	6.03 ~ 4.39	0.00241	0.388 ~ 0.624
				15	5.73 ~ 4.20	0.00225	0.418 ~ 0.667
				30	5.75 ~ 4.57	0.00173	0.416 ~ 0.587
				45	5.88 ~ 4.32	0.00229	0.403 ~ 0.639
				60	5.72 ~ 4.35	0.00201	0.420 ~ 0.633

(2) 実験結果と考察

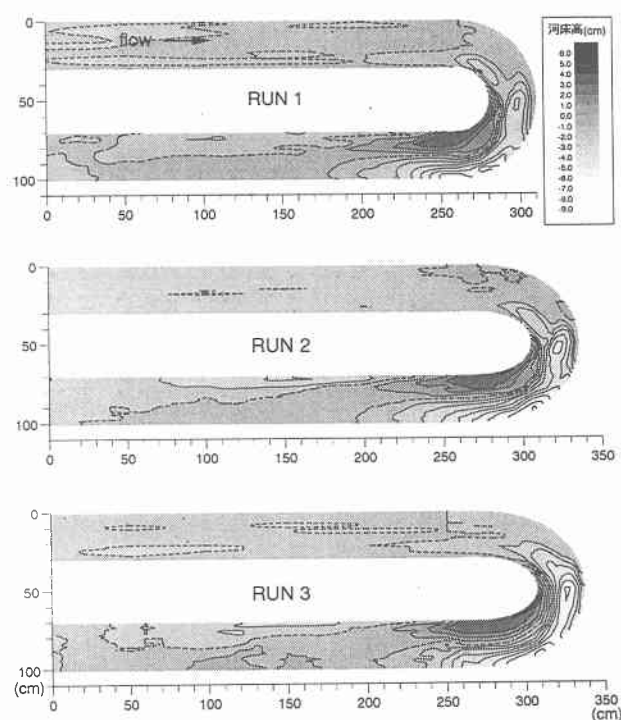
図-4 は初期河床面(破線)を基準とした RUN1~3 の通水時間 $t=60\text{min}$ における河床コンター図である。この図における湾曲部の始・終点は図の寸法横軸 260cm に位置する。RUN1 に注目すると、まず湾曲部前半の内岸沿いに洗掘が見られ、流下するにしたがって、中央、外岸沿いへと移行していき、湾曲部終点左岸付近で最大洗掘が見られる。RUN2 では、RUN1 よりも下流側で内岸沿いが洗掘し、流下と共に中央、外岸沿いへと移行しているが、RUN1 に比べて湾曲部頂点付近より下流での洗掘深は大きくなっている。しかしながら、最大洗掘は湾曲部終点から 2~3 割上流に見られ、湾曲部終点での洗掘深は小さくなっている。また、RUN3 は RUN2 とほぼ同様の結果になったが、湾曲部前半の内岸沿いの洗掘が見られなくなり、湾曲部頂点付近から外岸沿いの洗掘が始まっている。

次に、3 章の数値計算結果から得られた 2 次流強度分布(図-3)と図-4 の比較を行う。RUN1(単曲線)に注目すると、湾曲部始点では洗掘深に対して大きめの 2 次流強度を示しているものの、湾曲部頂点付近及び終点で 2 次流強度が大きくなっていて、深掘れの発生位置と概ね一致している。また RUN2(クロソイド対称基本型)、RUN3(クロソイド対称凸型)では、湾曲部頂点付近に見られる河道中央の深掘れから外岸に発生する最大洗掘付近の間で 2 次流強度が大きくなっていて、概ね一致している。このことより、固定床流れの 3 次元数値解析から最大洗掘の縦断位置を予測できることが明らかになった。

図-5 は横断測線における最大洗掘($t=30\text{min}, 60\text{min}$)をプロットした、いわゆる谷線縦断形状を示したものである。湾曲部の平面形状によってその縦断位置は多少異なるが洗掘の発生位置は(1)内岸沿い($x/L=0 \sim x/L=0.4$ 付近)、(2)転向部($x/L=0.4 \sim x/L=0.6$ 付近)、そして(3)外岸沿い($x/L=0.6$ 付近 $\sim x/L=1$)の 3 種類に分類できる。(1)に注目すると、RUN1 の洗掘深が最も大きく、RUN2, RUN3 では曲率が連続的に変化するため一様に増大しているのが特徴的である。(2)、(3)では、RUN2, RUN3 の洗掘深が RUN1 のそれを大きく上回っている。また、(2)に発生する洗掘はどの RUN でもほぼ同位置に発生しているのに対し、(3)に発生する最大洗掘は RUN1 $\rightarrow$ RUN2 $\rightarrow$ RUN3 の順に終点から上流に

発生している。そのため、湾曲部終点及びその下流側直線部での洗掘深はクロソイド曲線を挿入することによって小さくなる。これらの事から、クロソイド曲線を挿入することによって最大洗掘深は大きくなるものの、湾曲部全長に対する洗掘は狭い範囲で発生している事が分かる。

図-6 は湾曲部の影響によって横断方向に生じる水位の高低差を縦断プロットしたものである。まず固定床に注目すると、RUN1 では $x/L=0 \sim 0.1$ にかけて急激に増大し、その下流ではほぼ一定の水位差を示し、 $x/L=0.9 \sim 1$ で急激に減少している。RUN2, RUN3 では、始点から曲率が最大になる区間まで徐々に増加し、その後終点に向かって徐々に減少している。このように横断方向の水位差は図-1 に示した曲率の図と似たような様相を呈しており、曲率の影響を強く受けることが明らかになった。また移動床では RUN1 は $x/L=0.2$ まで徐々に増加し、その下流ではほぼ一定の水位差を示し、 $x/L=0.5$ 付近から更に増加している。

図-4 河床コンター図(RUN1~3, $t=60\text{min}$)

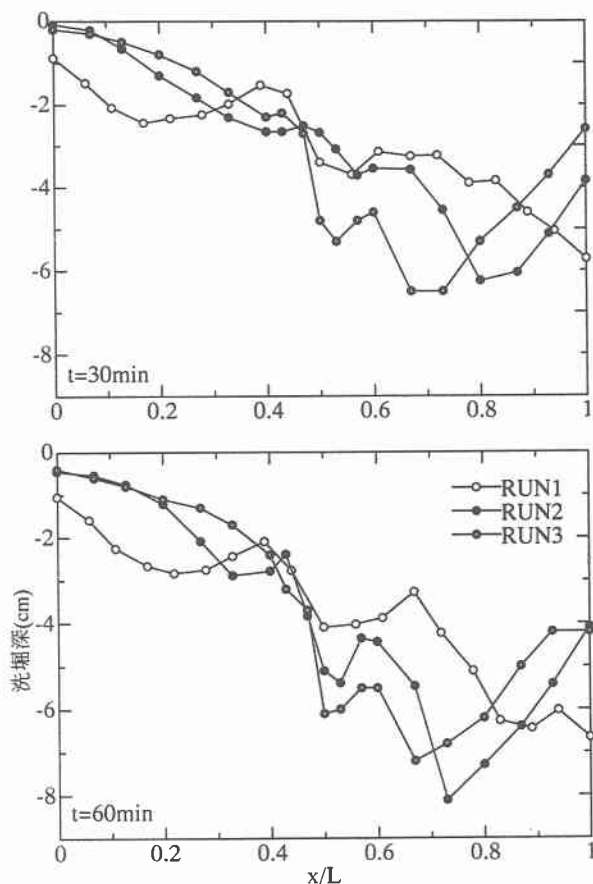


図-5 谷線縦断面図($t=15\text{min}$, 60min)

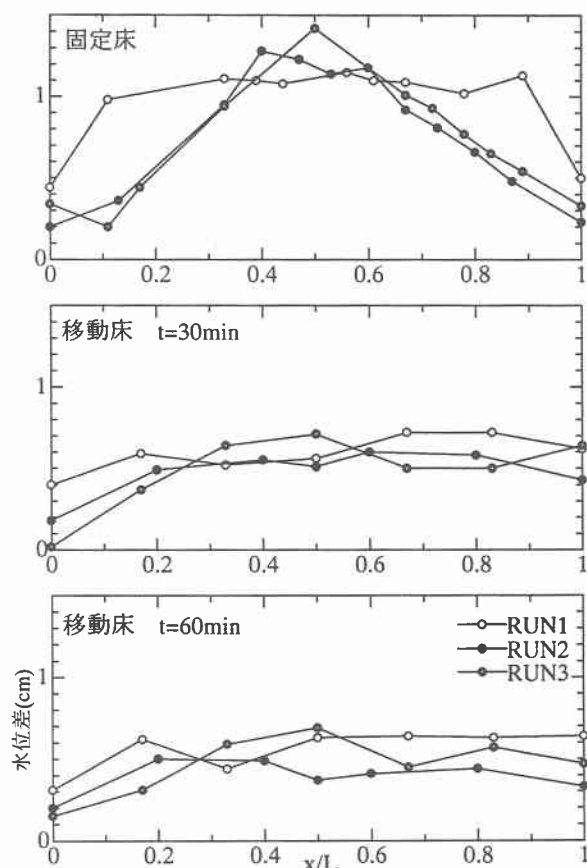


図-6 水位差の比較

RUN2 は $x/L=0.2$ まで徐々に増加し、その後ほぼ一定の水位差を示し、RUN1 と比較すると $x/L=0.3\sim 0.4$ を除いて下回っている。RUN3 は始点から $x/L=0.2$ 付近まで他の RUN よりも小さな水位差を示しているものの、曲率が最大となる頂点付近では他の RUN より大きくなる。

本実験における曲率半径・川幅比 R/B は $0.8\sim 1.2$ 程度(基本型、凸型では湾曲部頂点付近)である。実河川においては $R/B=1.5\sim 3.0$ となる頻度が高く^{3), 4)}、2次流強度の影響を受けやすい条件で実験を進めたため、今後は R/B が大きい場合についても検討する必要がある。また一般に道路に用いられるクロソイド曲線の使用範囲は $R/3\leq A\leq R$ が望ましく³⁾湾曲角は 60 度以下になるため、今後は湾曲角が 60 度以下の水路についても検討する必要がある。

5. まとめ

本研究では湾曲部にクロソイド曲線を挿入し、曲率を連続的に変化させることによって起こる流れや河床形状の特性を検討し、次の事項が明らかになった。

- 1) 固定床における水深平均の最大流速発生位置は、単曲線水路では湾曲部終点付近で急激に内岸から外岸に移行しているのに対し、クロソイド曲線を挿入した水路では内岸から中央を経て外岸にスムーズに移行していく。
- 2) 固定床における2次流強度の平面分布は、単曲線水路では湾曲部の始・終点で最大となるのに対し、クロソイド曲線を挿入した水路では湾曲部頂点を過ぎた外岸側で最大となり、移動床実験での深掘れ位置と概ね一致する。
- 3) 最大洗掘深は、単曲線と比較するとクロソイド曲線を挿入することによって大きくなってしまった。しかし、洗掘は湾曲部全長に対して狭い範囲で発生し、湾曲部終点及び下流側直線部の洗掘深は単曲線よりも小さくなる。
- 4) 湾曲によって横断方向に発生する水位差は、曲率の影響を強く受け、固定床で顕著に表れている。移動床では、クロソイド対称基本型で特に小さな値になる。

今後は R/B 、及び湾曲角を変化させて解析及び実験を進めていきたい。

参考文献

- 1) 清水康行：沖積河川における流れと河床変動の予測手法に関する研究，北海道開発局開発土木研究所報告，第93号，pp. 1-196, 1991.
- 2) 山田正・池永均・内島邦秀・竹野顕・志村光一：河川湾曲部における二次流の分布に関する現地観測，第4回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集，pp. 29-34, 1998.
- 3) 村本嘉雄・吉村知司：湾曲水路の河床変動に関する研究(2)，京都大学防災研究所年報，第12号B，pp. 1-15, 1969.
- 4) 阿部宗平・天田高白：湾曲部における局所洗掘制御に関する実験的研究，砂防学会誌，Vol. 53, No. 2, pp. 13-21, 2000.
- 5) 佐藤信武：実用クロソイド曲線の設計と計算例，現代社，1967.