

クロソイドを挿入した河道湾曲部の流れと河床形状に関する実験的研究

A Study On Flows and Bed Topographies in Curved Open Channels Consisting of Simple Circular and Clothoid

北見工業大学大学院 ○学生員 出口淳之介 (Junnosuke Deguchi)
 北見工業大学大学院 学生員 中村卓矢 (Takuya Nakamura)
 北見工業大学工学部 正 員 内島邦秀 (Kunihide Uchijima)
 北見工業大学工学部 正 員 早川 博 (Hiroshi Hayakawa)

1. はじめに

本研究の目的は、河道湾曲部の平面形状にクロソイドを挿入した場合の流れ特性及び河床形状の変動特性を単曲線のみの湾曲部特性と比較して明らかにし、河道湾曲部外岸に敷設される護岸設計に関わる新たな指針を得ることである。過去2年間では、基礎的研究として交角（蛇行角）を180度に固定し、湾曲部平面形状が単曲線、クロソイド対称基本型及び対称凸型の3ケースについて検討した結果、湾曲部固定床上流れの3次元数値解析から求まる2次流強度の最大位置が最大洗掘位置に一致することを明らかにした。¹⁾

本研究では、交角を実際河川で頻度の高い60度に設定し、これに伴う一般の道路線形に採用されている $R/3 \leq A \leq R$ （ R ：曲率半径、 A ：クロソイドパラメータ）の条件を満たす A を定めて、クロソイドを挿入した湾曲部として対称基本型、非対称基本型2種類の3ケース及び単曲線のみの計4ケースについて移動床実験を行い、湾曲部河床変動特性を比較して外岸側洗掘を軽減する平面形状について検討した。

2. 実験概要

実験に用いた水路は、水路幅（ B ）=30cm、交角60度、単曲線の曲率半径（ R ）=90cmの、単曲線のみの、クロソイド対称基本型（クロソイドパラメータ $A=82.2$ cm）、非対称基本型（ $A=75.2$ cmと53.2cm）2種類の4ケースの湾曲水路（木製の塗装仕上げ）で、湾曲水路の上・下流に長さ3.6m（湾曲部を交換できる構造としたため長くなる場合もある）の直線水路が接続している。4ケースの湾曲部の全曲線長（ L ）が異なるため、以下では湾曲部の流れ方向位置を x/L （ x は湾曲部始点からの距離）で表示し、河床形状、洗掘深等を比較検討する。図-1は4ケースの湾曲部水路の曲率を比較したものである。

実験の移動床材料としてほぼ均一な平均粒径（ d ）=0.75mmの東北珪砂を用い、厚さ12cmに敷き均して水平な初期河床面とした。流量（ Q ）は上流側直線水路に砂州が発生しない流量とし、水平床実験、勾配（ $1=1/350$ ）を付けた実験の2つを行った。通水時間（ t ）は、 $Q=5.39$ （ l/sec ）で単曲線の湾曲部河床が平衡に達した $t=60min$ までとしている。

表-1 湾曲部水路平面形状（水路中心軸、単位：cm）

	上流側クロソイド長(M)	単曲線長	下流側クロソイド長	湾曲部全長(L)
単曲線	0.0	94.3	0.0	94.3
クロソイド対称基本型	75.0	19.2	75.0	169.3
クロソイド非対称基本型(a)	31.4	47.1	62.8	141.3
クロソイド非対称基本型(b)	62.8	47.1	31.4	141.3

水面勾配は止水直前に水路下流端・上流端からそれぞれ2m上・下流位置で水位を測定して求めた。実験条件を表-2に示す。

河床形状の測定にはポイントゲージまたは河床形状測定器を用い、上流直線水路部で50cm間隔の5測線、下流直線水路部で10cm間隔の25測線、湾曲部では、12等分した13測線に対して、横断方向1cm間隔で河床横断形状を測定した。各通水時間における測定では、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、全て初期平坦河床面から所要通水時間まで再通水を繰り返して実験を行った。また、最大洗掘箇所の横断河床形の経事変化は河床形状測定器を用いて通水中に測定している。

3. 実験結果と考察

(1) 最大洗掘発生位置での横断河床変化

図-2に最大洗掘位置での横断河床形の経時変化を示す。最大洗掘位置は、前述のとおり2次流強度の大きいところで、単曲線と対称基本型においては水平床実験、勾配を付けた実験に関わらずそれぞれ湾曲部終点、終点より水路幅程度上流側にあり、非対称基本型の2ケースについても対称基本型と同様な結果が得られた。

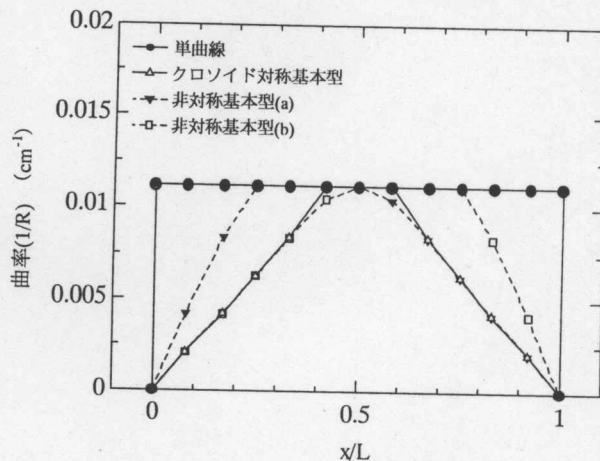


図-1 曲率図

表-2 実験条件

流量 Q(l/s)	水路湾曲部	通水時間 t(min)	平均水深 h(cm)	水面勾配 I	フルード数 Fr
5.39	単曲線	15	4.19 ~ 5.58	0.00359	0.435 ~ 0.669
		30	4.24 ~ 5.28	0.00320	0.473 ~ 0.657
		45	4.44 ~ 5.82	0.00369	0.409 ~ 0.613
		60	4.13 ~ 5.63	0.00296	0.430 ~ 0.684
	対称基本型	15	4.00 ~ 5.85	0.00423	0.406 ~ 0.717
		30	4.41 ~ 5.42	0.00341	0.455 ~ 0.620
		45	4.46 ~ 5.36	0.00321	0.462 ~ 0.609
		60	3.89 ~ 4.96	0.00337	0.520 ~ 0.748
	非対称基本型(a)	15	4.00 ~ 5.53	0.00337	0.441 ~ 0.717
		30	3.75 ~ 5.03	0.00276	0.509 ~ 0.790
		45	3.86 ~ 5.14	0.00281	0.493 ~ 0.757
		60	4.17 ~ 5.30	0.00290	0.470 ~ 0.674
	非対称基本型(b)	15	4.26 ~ 5.29	0.00225	0.472 ~ 0.653
		30	4.20 ~ 5.30	0.00249	0.470 ~ 0.667
		45	4.27 ~ 5.19	0.00283	0.485 ~ 0.650
		60	4.52 ~ 5.10	0.00170	0.498 ~ 0.597
5.39 (I=1/350)	単曲線	15	3.76 ~ 4.36	0.00447	0.630 ~ 0.787
		30	3.68 ~ 3.86	0.00414	0.756 ~ 0.813
		45	3.71 ~ 4.07	0.00427	0.699 ~ 0.803
		60	4.10 ~ 4.38	0.00385	0.626 ~ 0.691
	対称基本型	15	4.04 ~ 4.17	0.00378	0.674 ~ 0.707
		30	4.22 ~ 4.30	0.00394	0.644 ~ 0.662
		45	3.82 ~ 3.95	0.00443	0.731 ~ 0.769
		60	3.57 ~ 4.13	0.00357	0.684 ~ 0.851
	非対称基本型(a)	15	4.33 ~ 5.41	0.00369	0.456 ~ 0.637
		30	4.22 ~ 5.49	0.00402	0.446 ~ 0.661
		45	4.89 ~ 6.44	0.00409	0.351 ~ 0.531
		60	4.47 ~ 5.99	0.00422	0.391 ~ 0.607
	非対称基本型(b)	15	3.88 ~ 5.17	0.00459	0.488 ~ 0.751
		30	4.39 ~ 5.69	0.00402	0.423 ~ 0.624
		45	4.81 ~ 6.15	0.00397	0.376 ~ 0.544
		60	4.47 ~ 5.82	0.00426	0.409 ~ 0.607

しかし、4 ケースの湾曲水路とも水平床実験、勾配を付けた実験において $t=15\text{min}$ から $t=60\text{min}$ に至ってもその位置は変化しないことが分かった。同図より水平床実験では、非対称基本型 (b) と対称基本型を除き、 $t=45\text{min}$ で河床はほぼ平衡に達している。また、勾配を付けた実験において単曲線では $t=45\text{min}$ で河床はほぼ平衡に達しているが、クロソイドを挿入した3 ケースは、河道中央部付近で洗掘されているのが見て取れる。この理由として、河床に勾配を付けることにより、水平床実験の時よりも左岸と右岸での流速の差から大きな渦が発生し、この渦が河道中央部付近で洗掘する原因であると考えられる。

(2) 外岸沿い縦断河床変化

図-3 は外岸沿いの縦断河床の経時変化であり、代表例として単曲線とクロソイド非対称基本型 (b) について示している。水平床実験、勾配を付けた実験に関して単曲線と対称基本型の外岸では、最大洗掘箇所はそれぞれ $x/L=1.0, 0.75$ の位置を保持して洗掘が進行している。非対称基本型 (a), (b) では、 $x/L=0.9$ から $x/L=0.75 \sim 0.8$ へと上流に移行する。なお、内岸の堆砂は $t=15\text{min}$ 以降ほぼ平衡状態で、クロソイド挿入3 ケースでは2 次流の抑制により、堆砂量は単曲線の場合より小さい。

(3) 洗掘速度

前節までの各実験条件に対する湾曲部の平面形状、河床の縦横断形状の特性から洗掘速度の相違を表示したのが図-4 である。同図より、水平床実験において $t=15\text{min}$ に至るまでの洗掘速度 (図の勾

配) は、対称基本型→非対称型 (b) →非対称型 (a) →単曲線の順に大きくなっており、 $t=15\text{min}$ 以降は、対称基本型と単曲線、非対称型同士がそれぞれほぼ同じ速度で洗掘が進行することを示している。上記の順位は表-1 から明らかなように、上流側クロソイド長の大きい順位に一致している。この理由は通水初期において流れは湾曲部の平面形状に強く支配されることから、曲率が連続的に変化するクロソイドにおいて、上流側クロソイド長が大きいほど2 次流強度が抑えられ、洗掘の進行を阻止すると考えられる。また $t=15\text{min}$ 以降では、流れは平面形状と相俟って進行した洗掘箇所の河床形状にも支配され、対称基本型と単曲線、非対称型同士でほぼ一定の洗掘速度を有するものと思われる。また、勾配を付けた実験においては4 ケースの湾曲水路ともに $t=15\text{min}$ で急激に洗掘速度が増加しているが、 $t=15\text{min}$ 以降一定の洗掘速度で進行し $t=60\text{min}$ でほぼ最大洗掘深が等しくなっている。この理由として開始 $t=15\text{min}$ に注目してみると、勾配を付けることによって流速が大きくなり、クロソイドを挿入した湾曲部平面形状であっても2 次流強度を水平床実験よりも抑止できなくなり、このような結果になったと考えられる。

図-5 は、水平床実験における最大洗掘深 η を上流側直線水路の水位測定箇所の平均水深 h で無次元化した η/h と M/B (上流側クロソイド長・水路幅比) の関係を $t=60\text{min}$ のデータで示している。同図より、 η/h の M/B に対する変化は上・下限値も平均値とほぼ同じであり、湾曲部内の上流側クロソイド長を水路幅の2 倍以上に設定すれば、単曲線形状の場合に生じる最大洗掘深を2 割程度軽減できると考えられる。

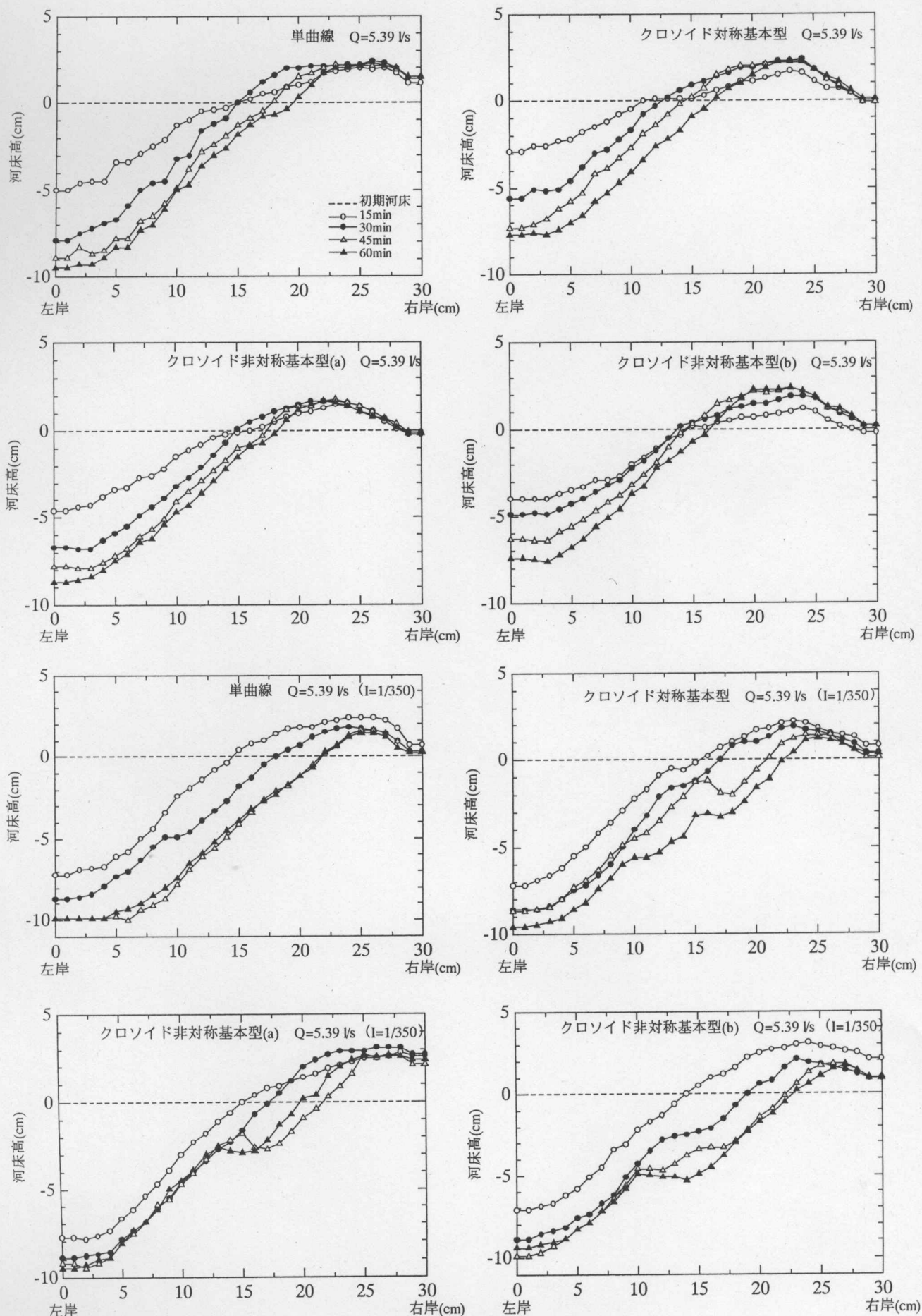


図-2 最大洗掘位置における横断河床変化

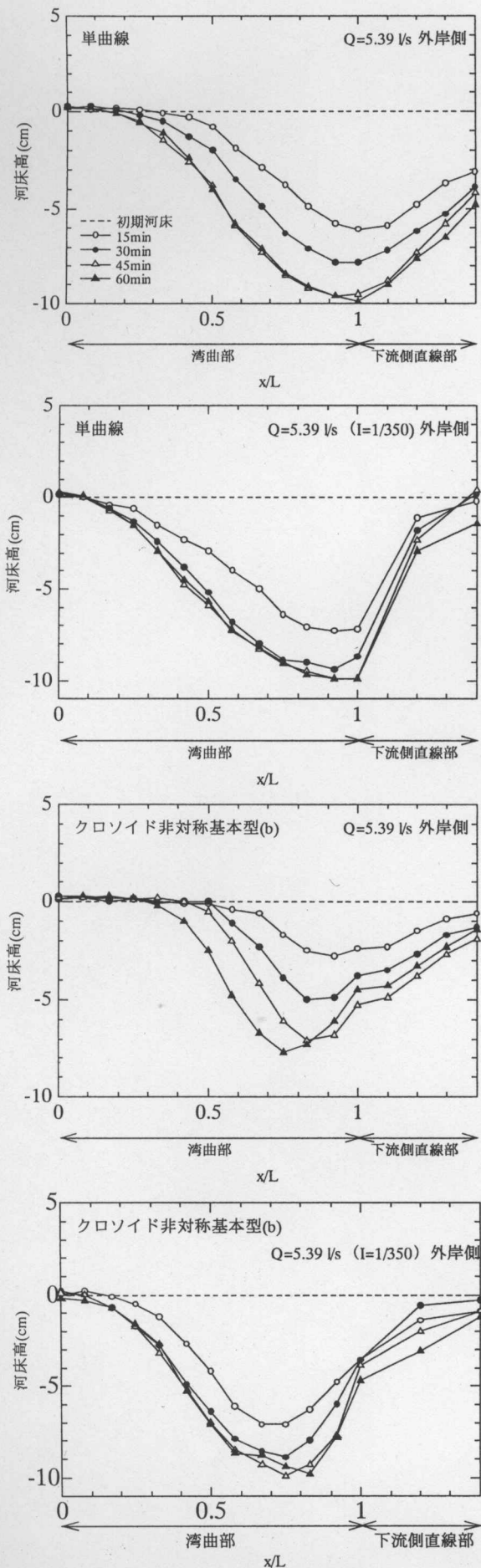


図-3 外岸沿いの縦断河床変化

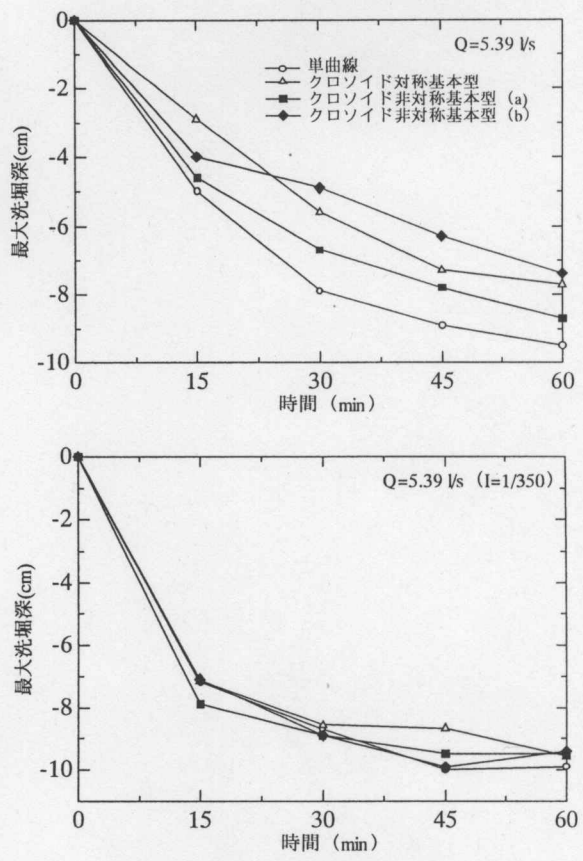


図-4 最大洗掘深の経時変化

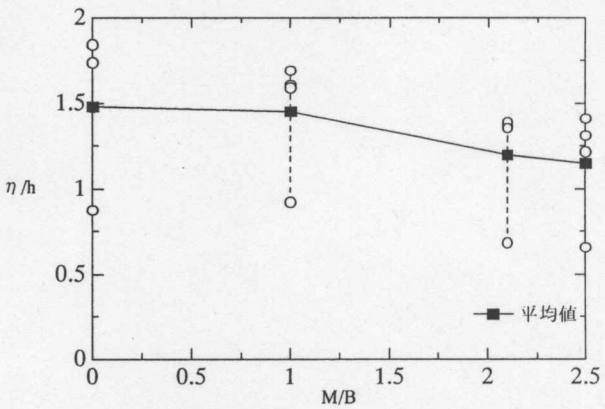


図-5 η/h と M/B の関係

4. おわりに

本研究では交角（蛇行角）60度の河道湾曲部平面形状が単曲線、クロソイド対称基本型、クロソイド非対称基本型2種類の4ケースについて実験を行い、河床縦横断形状を詳細に測定して外岸側洗掘を軽減する平面形状について検討した。その結果、湾曲部内の上流側クロソイド長を水路幅の2倍以上に設定すれば、単曲線形状で生じる洗掘深を2割程度軽減できることを明らかにした。

謝辞：本研究は、（財）北海道河川防災研究センターの平成14年度研究助成を受けて行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 中本・内島・早川：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，土木学会北海道支部論文報告集，第58号，pp.438-441，2002