

II-24 移流制御による水制の開発

北海道大学工学部 正員 長谷川 和義
同 上 学生員 小関 展弘

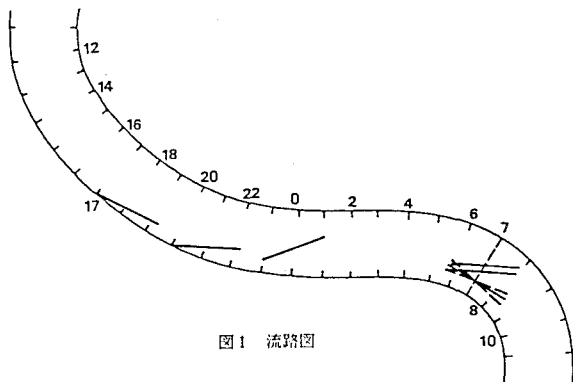
1. はじめに

河岸決壊や護岸破壊の多くは、水衝部である弯曲の外岸部に集中している。一般に、蛇行弯曲部の入口においては、内岸側の流速が速く、この流れが流路を横切る様に直進（移流）して外岸に衝たり、河床深掘れや側岸浸食をひき起こす。この後、流れは外岸にそうようになり、外岸側流速が速くなる。一方、弯曲部においては横断面内にらせん状の2次流が発生し、外岸部が深く内岸部の浅い傾斜横断面を形成する。河床の深掘れは、この2次流の作用に深くかかわっている。しかし、側岸浸食におよぼす2次流の直接的な効果は相対的に小さくはなく¹⁾むしろ横断面の傾斜による主流流速の“よびこみ”によって、間接的にうながす。側岸浸食は、側岸における流れのせん断力、近似的には流速によってひき起こされる。側岸浸食防止の観点からは、側岸流速の絶対値を小さくすることが重要になる。これに対して河床の深掘れは掃流砂の出入りの差が問題であり、主流の距離に関する微分量と2次流の絶対値を小さくすることが、その防止上肝要となる。このように、側岸浸食の最大点と河床深掘れの最大点とは密接に関連するが、その原因も場所も異なる。最近、河岸決壊防止のために流れをコントロールする方法が各種提案されてきている。なかでも、Odgaard²⁾によって提唱されたIowa Vaneが有名であり実際に使われている。これは、2次流の直接的な遮断を意図したもので深掘れ防止に効果がある。しかし、本邦河川のように急勾配で交互砂州の発達している河川においては、河床深掘れに関しても側岸浸食に関しても主流の制御が重要であり、その流速の空間変化率と偏倚流速の最小化がはかられるべきであろう。

本研究は、流速分布の変化が最も激しい弯曲入口から弯曲頂点にかけての流れを、弯曲入口内岸部に簡単な水制を置いてコントロール（移流制御）した場合、その効果がいかように現れるかを実験的に明らかにしようとしたものである。

2. 実験装置、実験装置

今回の実験に使用した流路は、自然河川の迂曲部の形状を参考にしてつくられたもので図-1の形状を有する。同水路は幅22cm、高さ20cmの矩形断面を有し、波長4.32m、全長13.4mでアクリルによって出来ている。これに珪砂をしきつめ、通水し流速を測るとともに平衡状態に至った後に河床形状を測定する。河床形状の測定は、本研究室で開発した形状読み取り装置を使用し、流路中央線にそって9cm間隔の断面毎に測定した。水制を設置した実験において、それらの設置物のために連続的に測定が不可能な断面においては、水制の左右で分けて測定し、事後に合成した。測定範囲は、明瞭な底面形状を示した変曲点から変曲点までの半波長区間（24断面）にとることとし、また高さの読み取り値に対しては装置の傾斜を補正するようにした。流速は、河床形状の測定範囲内で、水制が含まれていない断面（16断面）につき横断方向に2cm間隔で表面流速のみを3mm径のプロベラ式流速計で測定した。なお、深掘れが最大の断面では2次流を見る目的で、深掘れの1/10程度（RunG9では9mm、RunG13、RunME13では8mm）の間隔で、水深方向にも測定した。通水条件は、交互砂州の発生、非発生が流況を大きく変化させるという過去の経験を参考にして、RunG9、RunG13の二



種類を選んだ。すなわち、RunG9は過年度実施した³⁾砂州発生実験RunME9（水制なし）と同一の勾配、流量並びに河床砂粒径を与えている。RunG13は、非砂州をねらった水制実験であるが、対応する全域水制なし実験は実施せず、かわりにG13の下流部水制なし蛇行区間をME13と呼称することにし、比較を行った。これらの実験条件を表-1に掲げる。RunG9、G13ともに水制による抵抗増加のためME9、ME13と同一水理にはなっていない。

表1 迂曲実験の諸元

	ME-9	G-9	ME-13	G-13
水路幅 B(cm)	22	22	22	22
流量 Q(cm ³ /s)	927.50	927.50	1538.79	1538.79
勾配 I	1/100	1/100	1/310	1/310
平均流速 U ₀ (cm/s)	30.55	26.35	26.00	25.91
フルード数 Fr	0.831	0.665	0.506	0.504
無次元掃流力 τ^*	0.092	0.107	0.074	0.074
摩擦係数 f	0.029	0.047	0.025	0.025
川幅水深比 B/H ₀	15.94	13.75	8.18	8.15
B/H ₀ ・I	0.159	0.138	0.026	0.026
無次元波長 $2\pi H_0/L$	0.020	0.023	0.039	0.039
流路蛇行長 L(cm)	432	432	432	432
平均水深 H ₀ (cm)	1.38	1.60	2.69	2.70

3. 予備実験

本実験を行うにあたって、移流部で流れを一樣化させるために水制をどのように設置すべきであるかを考察するべく、予備実験を行った。今回の予備実験は、RunME9を参考に流量927.5cm³/S、勾配1/100の条件下で行い、河床は中央粒径0.94mm、均等係数1.167、比重2.595の珪砂を敷きつめ移動床とした。水制機構の評価を①横断方向流速分布の一樣化の達成、②深掘れの減少に置くことにして、以下を実施した。水制を設置する場合に、考慮すべき要素としては次のようなものがある。(1)水制形状、(2)設置面の平均河床からの高さ、(3)設置位置、(4)設置角度、(5)本数である。

〔1〕これらの内、(1)については長さ22cm（水路幅程度）、高さ8cmの矩形断面の板とすることにし合板によって製作した。

〔2〕続いて(2)の条件を決めるために、彎曲部直前の内側の速い流れを抑制しうる断面7の位置に着目し、その内岸側壁から5.5cmの地点を中心として、流路に平行に水制を固定し、平均河床面から天端までの高さを0cm、0.5cm、1cmと変えて流れの様子を観測した（写真1）。

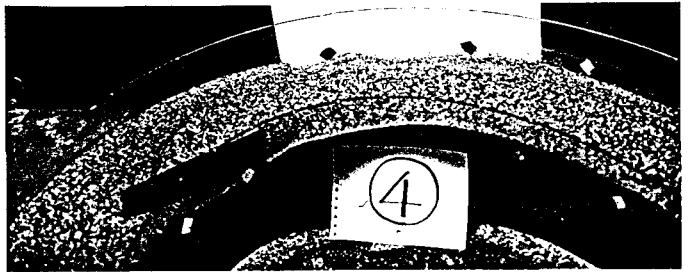


写真1 水制を含む河床

その結果、0cmの場合は水制が埋っ

てしまい役に立たなかった。0.5cmの場合は上流側の半分程度にしか機能せず、残りの部分は砂が堆積した。流れに及ぼす影響もあまり大きくなく、深掘れの位置、大きさともに水制の無い場合との差異は明瞭でない。高さが1cmの場合には水制全体が機能した。また、深掘れの大きさは、ほとんど変化しなかったが、位置がほぼ2断面（18cm）ほど下流に移動した。そこで以後の予備実験では高さを1cmに固定した。

〔3〕次に水制長の中央を中心にして、流路壁に対して右回りに10°（上流向きはね出し）、左回りに10°（下流向きはね出し）それぞれ回転させて設置し通水した。どちらの場合にも、主な流れは水制により2つに分岐した。すなわち、前者の場合には水制よりも外側の流れのほうが強くそのため深掘れが断面10付近に生じた。水制なしの場合と比較すると、深掘れ位置の下流で一度浅くなり、水制の内側を通る流れと合流する付近でもう一度深くなっている。後者では水制の内側の流れがかなり強く、外側の流れの影響はほとんど見られなかった。その結果として深掘れ位置が下流側に移動したが、深掘れの大きさや深掘れが上流側で急斜面になっている点などには変化は見られなかった。そこで、水制の中心を内岸側壁から8cm、11cm離れた位置に置き、流路側壁に対して左回りに30°程度回転させて設置した。この場合でも流況、深掘れの大きさや位置は水制の無い場合に比して差異がほとんど見られなかった。以上、断面7に水制の中心を

定めて内岸側壁からの距離と角度を変数として考えた場合、内側から5.5cmの距離で、流路壁に対して左回りに10°程度（下流向きはね出し）という条件が一番効果がある。

〔4〕通常の弯曲流れでは入口部内岸側に速い流れがあつまる。したがって、これを強制的に外側に寄せるように水制を設置すれば結果的に両者が合成されて横断方向の流速分布の一樣化が達成されるであろう。この考えに立って水制をより上流側に移動させるとともに、水制本数を増やす実験を続けた。1基から始めて2基まで、場所の違いを組み合わせると合計23種の実験をおこなった。その結果、断面20と0の位置に水制を設置して行われた実験が流れを弯曲部直前で一樣化させるという目的にかなっているほか、深掘れも小さいことが明らかになった。したがって、基本的な設置位置としてこの場合の位置を採用することにした。しかしながら断面20に設置した水制付近での掘れが水制の付け根で5.2cmと著しく深いので、これを緩和するために断面17に10°程度の角度で水制をもう一基設置することにした。こうすると、各水制付近の掘れがかなり緩和された。以上の結果、本実験では図-1のような位置に設置高さ1cm(RunG-9)および2cm(RunG13)の水制を設置し、流速分布の一樣化（移流制御）のもたらす効果を明かにすることにした。

4. 移流制御実験の結果

4-1) Run G9

図-7(a)、図-2は、比較対象となる水制なし実験RunME9の河床コンターと表面流速図である。ME9はC型接続の砂州をともなった砂州実験であり、非砂州実験に比しても特に弯曲部入口部（断面3-7）における内岸側への流れの偏りが大きい。これに対し図-7(b)、図-3は、RunG9の河床コンターと表面流速を描いたものであるが、断面3-7の流速分布は、十分に一樣化している。今問題にするのは水制のどのような働きによってこの分布が得られたかではなく、一樣化された流速分布が下流側弯曲部にいかなる影響を及ぼすかである。水制による局所的な掘れを除いて図-7(a)、7(b)の二つのコンターを比較すると、RunG9で範囲の狭い深掘れが二箇所生じていることが分かる。

ME9と比較すべきは上流側の掘れ（断面8-9）であり、これらはいずれも主流の衝突部に生じている。ベクトル図から明らかに主流流速分布が一樣化している分だけG9の水衝程度は弱く、掘れの深さと範囲がちいさくなっている（写真2）。この分だけ移流制御の効果が現れているものといえる。しかし、下流側に同程度の深掘れが生じている。これは、凸岸部における固定砂州の形成と密接に関係し

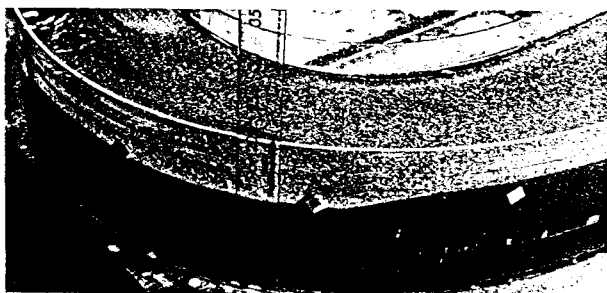


写真2 RunG9 河床形状

ており、同砂州が水面に浮き出た結果、凹岸への流れの集中が生じたことによっている。ME9では深掘れのすぐ下流に非常に波長の短い不安定な交互砂州が発生し、これが凸岸側に流れを寄せる働きをして固定砂州が浮き出たのを妨げている。砂州の働きが結果的に外岸側への流量集中を避けているということが出来る。水制による流速分布の一樣化は、水衝部の衝突深掘れを緩和するものの、深掘れの結果生ずる局所流送土砂量を減じて下流における交互砂州の形成を弱め、第2の掘れを生ぜしめたものと評価できる。

次に、2次流の観点から現象を見る。図-9(a),(c)に示されるように、C型接続であるME9の2次流はあまり強くない。図-9(b),(c)に見られるようにG9では、さらに回転流が弱まっており、この流れによる洗掘は小さいものと判断される。

4-2) Run G13

図-8(a)はME13、すなわちG13の水制なし部分の河床コンター図である。流速測定を行わなかったので流況は明確でないが、基本的にはME9などと同様の現象が生じている。弯曲入口部で大きな内岸側への流速偏

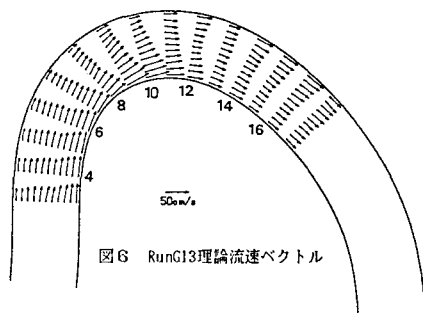
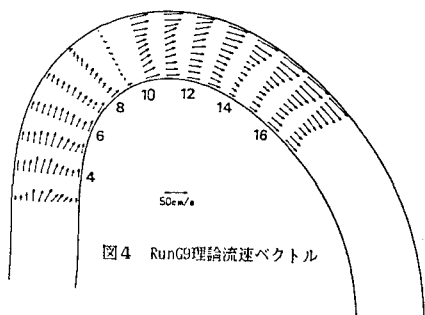
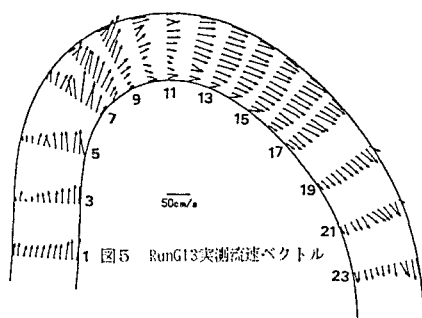
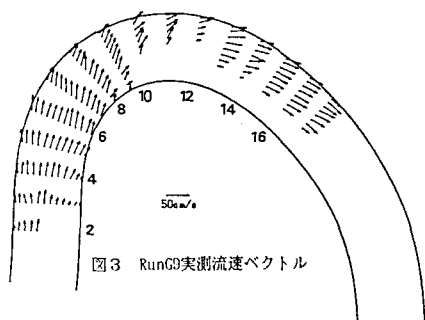
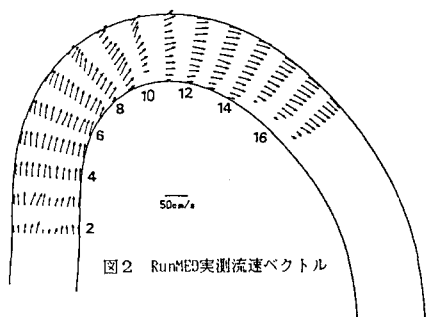
倚が起こり、側壁に沿って深い溝を形成している。この主流部が直進して外岸に衝たり深掘れを成長させるのであるが、ME9などに比すると掘れの範囲が広く最深位置が下流側にずれている（写真3.4）。2で述べたようにこの実験は非砂州条件を満たすように水理量を選んでいるが、ME13のこのような形態は砂州のB型接続とみなすことができる。図-8(b)、図-5はRunG13の河床コンター図と表面流速図である。水制の設置によって弯曲流入部における流速分布の一樣化がはかられていることは明かである。その結果、水衝の度合が弱まり、深掘れ範囲が減少していることはG9の場合と同じである。コンター図では掘れの深さが変わらないように見えるが写真-4に示すようにG13にはリップルが発生しており、それによる影響を除いて考えると全体として1cmほど掘れの量が小さい。G13部分では砂州の成長がみられず、非砂州条件が満たされ

ているのでME13との直接比較に困難をとまなうが、移流の制御によって洗掘の軽減がはかられたことは明らかであろう。

図-9(e),(f)は、深掘れ部における横断面内2次流を比較したものである。ME13の2次流はそれほど強くなく、洗掘の主因とは言い難いが、G13ではそれがさらに弱まっている。

5. 2次元浅水流モデルの適用性

長谷川⁴⁾による2次元浅水流の計算法は、運動量方程式の移流項の一部が省略されているほか線形近似解であるため、特に移流の発達する断面8-11で不一致が



大きい³⁾⁵⁾。しかし、逆に移流の変化を減じた水制下流の流況には適合しやすくなる可能性がある。これを見たのが図-4、6である。ただし水制部分は描いていない。RunG9につき実測値と計算値を比較すると上流から断面7までの区間、および14以降の区間は良い一致をみせている。しかし、8-13断面での違いは大きい。RunG13においても同様に、断面7-12における移流区間で不一致が大きくこのモデルがこのままでは使用し難いことを示している。原因の基本は上述のとおりであるが、水制を含めた非常に複雑な地形をそのまま計算に入れたことによる誤差の拡大も考えられる。

6. まとめ

弯曲入口部における内岸偏倚流れの外岸への直進（移流）を水制によって制御し、流速分布を一様化させることによって外岸部深掘れを制御する実験をおこない、次の結果を得た。

- 1) 入口部流速分布を一様化するとそうでない場合に比して水衝りが弱まり河床深掘れの範囲が狭まるとともに深さが減少し、なめらかな勾配をもつようになる。

図7 河床コンター図

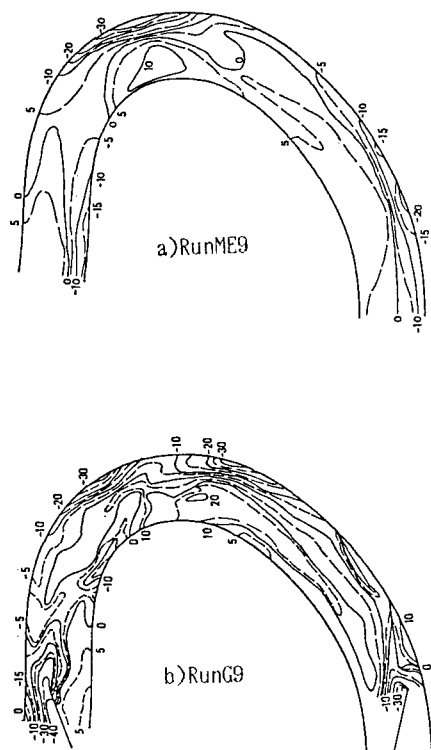
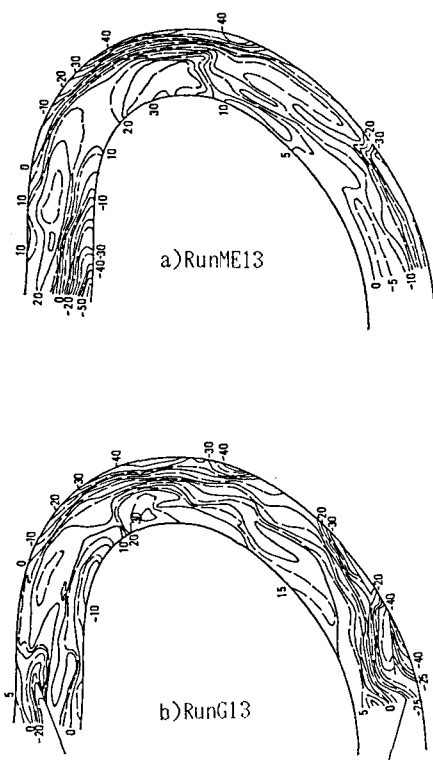


図8 河床コンター図



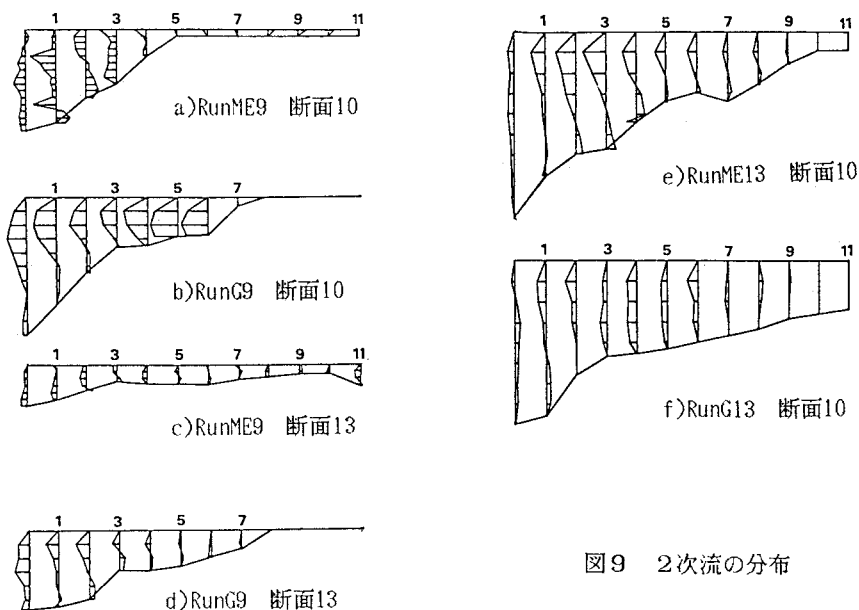


図9 2次流の分布

- 2) この傾向は、砂州をともなう場合にも非砂州の場合にも共通しているが、前者の場合には、深掘れ下流にもう一つの掘れが発生した。
- 3) 流速分布の一樣化は2次流の現象にも効果がある。
- 4) 2次流浅水流モデルは、移流部分で実際からはずれ、大まかな計算以外には適用が難しい。

参考文献

- 1) Hasegawa, K.: Universal Erosion Coefficient of Meander Banks, Journ. of ASCE, 1987, (in submitting)
- 2) Odgaard, A. T. and C. E. Mosconi : Streambank Protection by submerged Vanes, Journ. of Hy. Eng. Vol. 113, No. 4, April, 1987
- 3) 長谷川・山岡・納谷・森田：迂曲流路に見られる砂州の接続形態と流れ，土木学会北海道支部論文集，第39号，1984, 2
- 4) 長谷川和義：蛇曲流路における流れと平衡底面形状に関する研究，土木学会論文集，No. 338, 1983, 10
- 5) 長谷川・山岡・渡辺・笹島：迂曲流路内の砂州上の流れに関する実験と理論，土木学会北海道支部論文報告集，第38号，1983, 2