

II-17 射流蛇行流の衝撃波の減衰に関する研究

北海道大学工学部 正 員 森 明 巨
同 上 正 員 岸 力
同 上 定 木 紳
同 上 ○平 井 康 幸

はじめに

山地河川の河床変動調査（白水川昭和60年出水）から、蛇行部において1つの特徴的な現象を見いだした（内岸の洗掘、外岸の堆積）¹⁾。流れは射流と考えられたので衝撃波の影響を調べる必要があった。Lenou²⁾の一樣弯曲流の理論を蛇行流に拡張した。理論値と実測値の縦断変化を比較すると図-1に示す様に蛇行部入口で発生した衝撃波は比較的短い流下距離で減衰し、周期成分に一致することがわかった。図中の実線は理論値、●印は実測値、点線は流路形状に対応した周期成分である。図-2は蛇行部入口付近の水位変化（実測値）を鳥観図的に示したものである。図中の点線は入口左右岸から発生するマッハ波である。これより下流の水位変化は、負のものははっきりしない。正のものは顕著で衝撃波を形成する。この衝撃波は左岸で反射後急減する。本研究はこの様な蛇行水路における正、負の衝撃波の減衰機構を調べたものである。

1. 衝撃波の変形と二次流の分布

図-3は実験に用いた水路の平面図である。水路幅12cm、蛇行長120cm、蛇行角 28° のsine-generated-curveで上流に直線部がある。側壁はアクリル、水路床は耐水ベニヤで平坦床である。

実験条件は、流量 $=1.1851/\text{sec}$ 、平均水深 $h_a=1.54\text{cm}$ 、水路勾配 $I=0.0142$ 、 $F=1.65$ である。

座標系は (s, n) 座標を用い、蛇行部入口を $s=0$ にとる。

図-4は、水位縦断変化の実測値と理論値の比較である。図中の点線は蛇行部入口から発生するマッハ波である。実測値はこれより上流で擾乱が生じている。これは、側壁付近の流速が流路中央に比べて小さいためと思われる。

左岸から発生する負の衝撃波は、A点（左岸の $s=8\text{cm}$ ）より上流では理論値とよく一致している。しかし、これより下流では理論値の様な水位の低下がない。

右岸では、蛇行部入口の直下流で水位が急上昇し、これより下流では徐々に上昇する。B点（右岸の $s=9\text{cm}$ ）から下降に転ずる。B点の F は約1.1である。この様

図-1

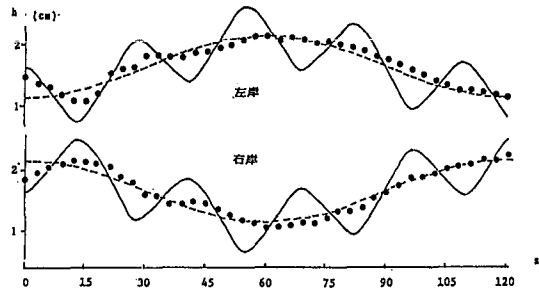


図-2

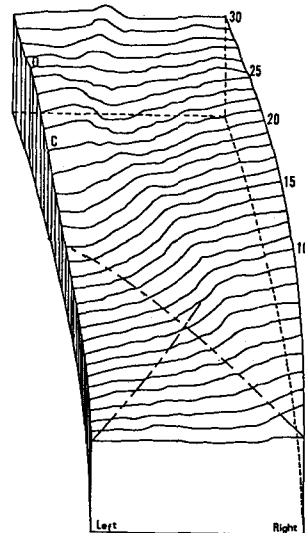


图 - 3

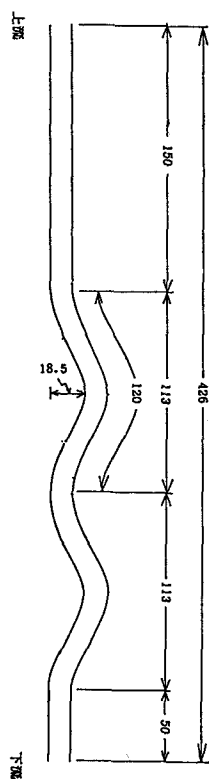


图 - 4

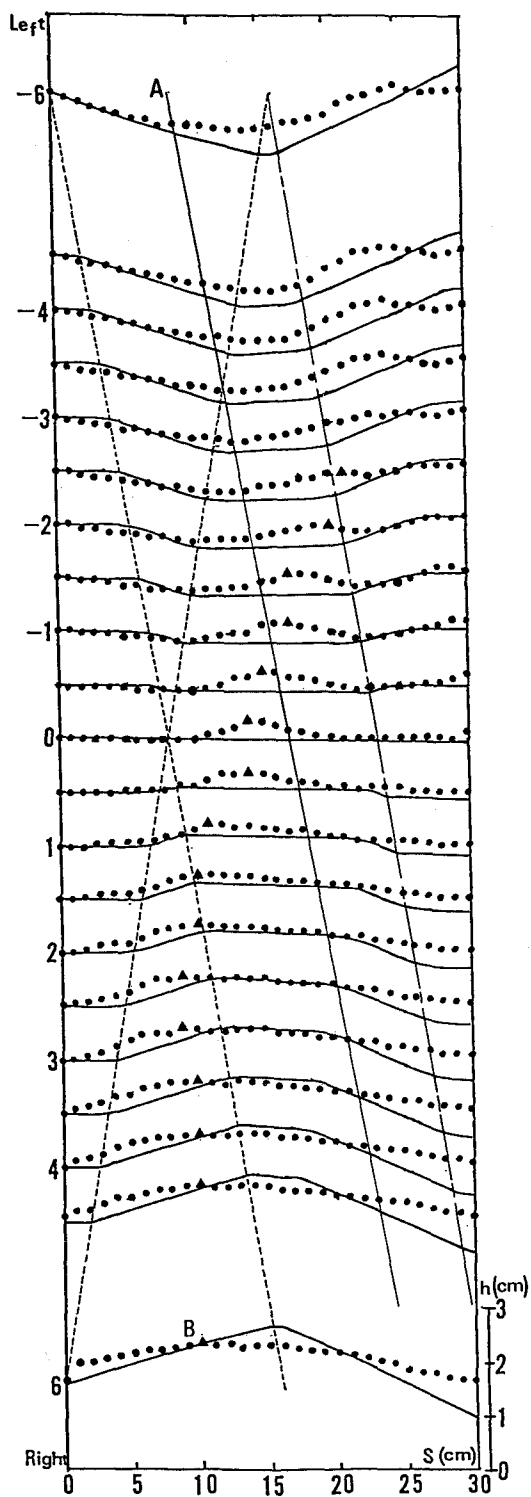


图-5

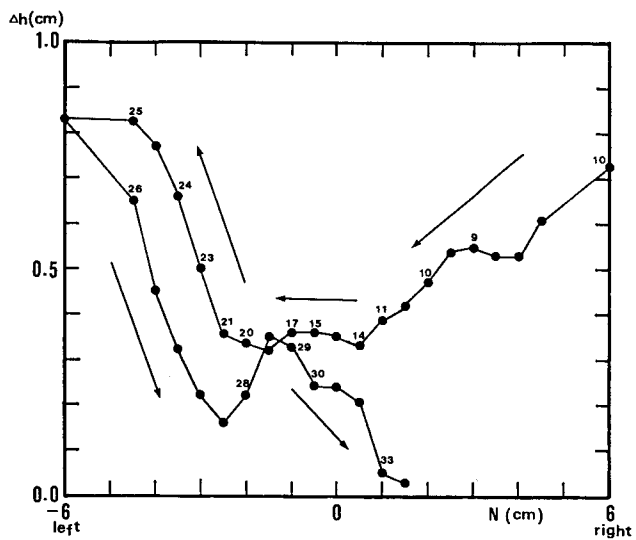


图-6

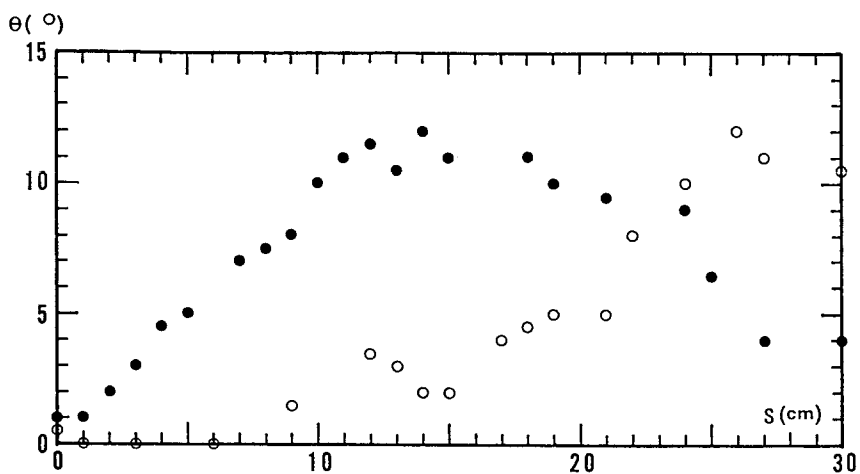


图-7

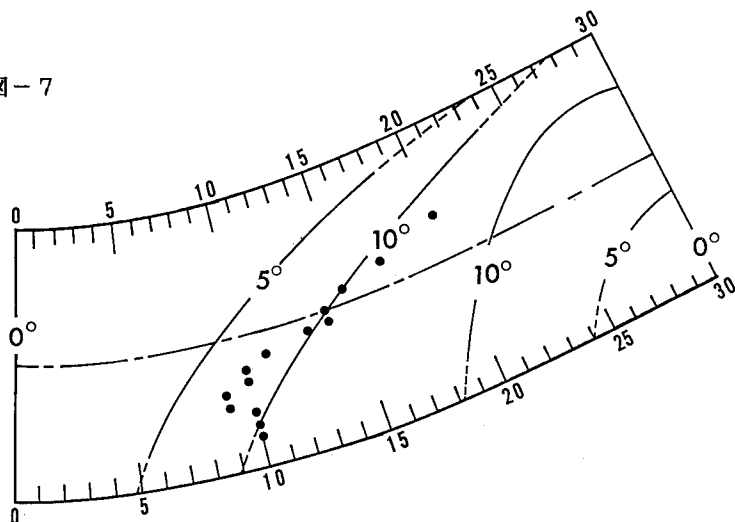
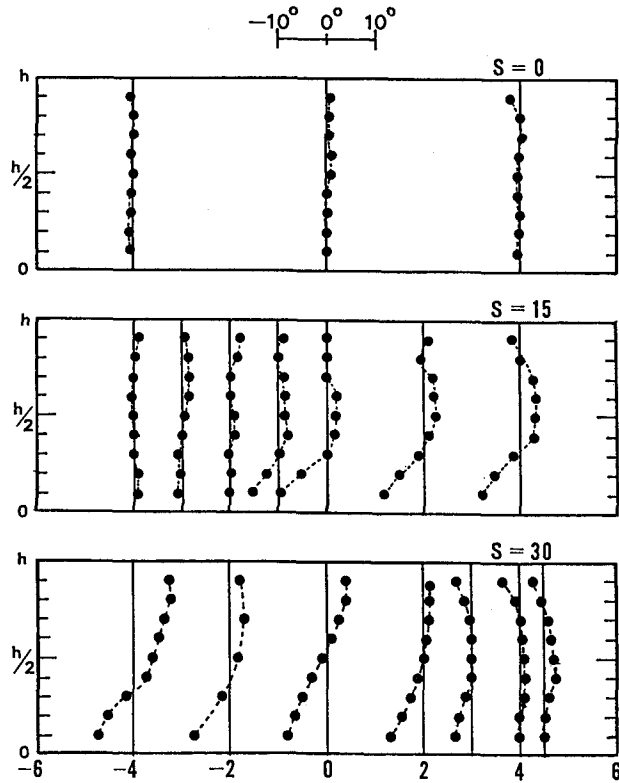


図-8



にして形成された正の衝撃波はカマボコ型をしており、左岸に向かい、C-D間で反射する。

図-5はこの衝撃波による水深増加 Δh のプロットである。 Δh は図-4中に印で示したある n における正の衝撃波の最大水深と同じ n の次の水深との差で与えた。 $n > 0$ では蛇行部入口の水深、 $n < 0$ では正のマッハ波通過点の水深、左岸で反射後は正のマッハ波の反射波の通過点の水深（近似的に負のマッハ波と平行な直線とした、図-4中の一点鎖線、）。図中の矢印は衝撃波の伝播方向であり、数字は最大水深点の s の値である（矢印の方向に s が同じ場合は省略）。

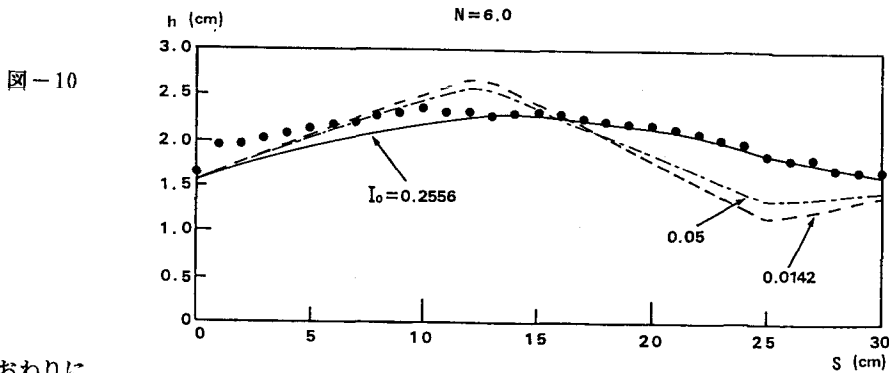
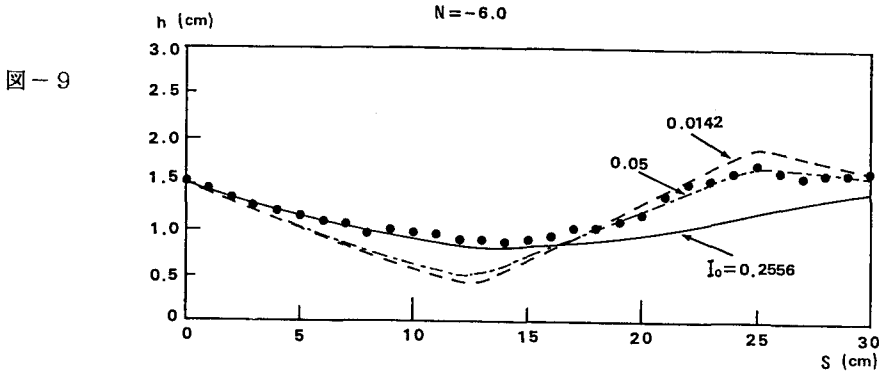
反射前の Δh は、 $n > 0$ では右岸から流路中央に向かうとともに減少する。これは左岸からの負の衝撃波の作用である。負の衝撃波による水位低下が下流程大きいためである。 $-2 < n < 0$ では $n = 0$ にA点の衝撃波が伝わるため（図-4参照、この経路は $s = 0$ からでる負のマッハ波に平行な曲線で近似できる、細い実線）負の衝撃波による水位低下が一定（約5mm）となり Δh は一定となる。 $n < -2$ は左岸に向かう正の衝撃波とこれの反射波との干渉域である。重複波を形成し、 Δh は大きい、反射後 Δh は急減し、蛇行部入口で発生した衝撃波は $s = 45\text{cm}$ でほぼ消滅する。

ラセン流の強度を二次流の偏角の最大と最小の差（ $=\Theta$ ）で表わす。左右岸から1.5cmの Θ を図-6に示した（○は左岸側、●は右岸側）。右岸側では二次流は蛇行部入口から一様に発達し、 $s = 14\text{cm}$ でピークに達する。左岸側は $s = 6\text{cm}$ より上流では二次流は見られず、これより下流で一様に発達し、 $s = 28\text{cm}$ でピークに達する。図-7は二次流強度のコンター図である。図中の●印は、反射点上流の正の衝撃波による最大水深

これを逆変換して ξ を求める。

図-9は、理論値と実測値(●)の比較である。理論値の I_0 は図中に示す通りである。図からわかる様に、実際の水路勾配より約20倍大きい $I_0=0.25$ のときに、理論値は実測値の水位低減率を良く表している。これは u 、 ξ などの摂動量が大きくなり、線形計算では摩擦効果が充分評価されなかったためと思われる。

図-10は、右岸の ξ の同様の比較である。この場合も I_0 が大きい方が実測値に近い。



おわりに

ラセン流と底面摩擦が衝撃波の減衰に大きな影響を与えることがわかった。

ラセン流の発生域は、図-7によれば側壁付近である。側壁の極く近傍は境界層が発達し⁴⁾、流れは楕円型になる。従って、深さ方向の主流速分布に対応した遠心力によるラセン流の発達が考えられる。この場合、境界層の発達減速域である外岸側の方が加速域である内岸側より早いと考えられる。従って、図-7のラセン流強度の分布が考えられる。

Lenou の理論は B/R (B : 水路幅) が充分小さい場合の解である。本実験では $B/R=0.31$ である。この値はかならずしも充分小さくなく、摂動量の大きな変化に伴って摩擦効果が強まり、負の衝撃波の発達を抑制したと考えられる。

参考文献

- 1) 森、岸、戸嶋、定木：高速蛇行流の研究、土木学会北海道支部論文集、43号、1987年
- 2) Lenou: Supercritical flow in bends of trapezoidal section, Proc. ASCE, vol. 105, EM1, 1981
- 3) Ippen: Mechanics of supercritical flow, Proc. asce, vol. No. 9, 1949
- 4) 嶋：幅の拡がる水路に関する実験、土木学会誌、37巻2号、1952年
- 5) 細田、余越：高速弯曲流に関する二、三の検討、土木学会論文集、587号/II-8、1987年

点である。この点より 下流でラセン流の強度が最大になる。

図-8は $s = 0, 15, 30 \text{ cm}$ における二次流の流向分布である。ラセン流が発達する外岸側では二重構造のラセン流が見られる。

2. 衝撃波の減衰と二次流

衝撃波面に直交する方向の流速成分が大きいほど衝撃波による水位変化が大きい。従って、水深方向に流向が異なると、衝撃波通過時の圧力の変化が水深方向で異なることになる。この圧力の変化に応じて流速の分布形も変化する。これらの作用は衝撃波の減衰につながるものと考えられる。

衝撃波の減衰が生ずる $s < 40 \text{ cm}$ では、ラセン流の回転方向は時計まわりが卓越する(図-8)。従って、ラセン流による正の衝撃波に対する圧力増加は、反射前では水面付近が大きく、反射後では河床付近が大きい。このことと衝撃波の減衰率を比べると、反射後における衝撃波面と二次流分布の関係が、衝撃波をより強く減衰させるパターンと考えられる。

負の衝撃波は右岸へ向い、次いで反射して左岸に向かう。この経路ではラセン流の強度が大きく、この過程で負の衝撃波はほぼ消滅するものと思われる。

3. A点下流の衝撃波の減衰

A点付近では二次流は微小であるから、前節の様な二次流による減衰は考えられない。

左岸に沿っての弯曲角を θ と書くと、水深変化は²⁾、

$$dh/d\theta = h F^2 (1/F^2 - 1)$$

A点では $dh/d\theta \approx 0$ 、 $h \neq 0$ であるから 流速 $\rightarrow 0$ となる。しかし、剥離の発生は考えずらい⁴⁾。実際、剥離は確認できなかった(ただし、左岸の $s = 14 \text{ cm}$ 前後では壁面に付着した微小な水泡が、反射域の水面変動に対応して上下流に 1 cm 前後振動しているのが観察された)。

本研究では低面摩擦の効果を調べる。水路床は滑面であるが、A点より下流では水深が非常に小さく、流速は大きい。細田、余越⁵⁾は、特性曲線法による数値解析で、低面摩擦が衝撃波に有意な減衰を与えることを示している。

摩擦を考慮した無次元線形化方程式は、

$$F^2 u_s = -\xi_s - \gamma (n_* \exp(i m s_*) + 2u - \xi)$$

$$F^2 v_s - F^2 \exp(i m s_*) = -\xi_s - \gamma v$$

$$u_s + \xi_s + v_n = 0$$

ここに、 u, v : 無次元摂動流速の s, n 成分、 ξ : 無次元の摂動水位、 $\gamma = I_0 R / h_0$ 、 I_0 : 平均河床勾配、 R : 流路の最小曲率半径、 h_0 : 平均水深、添字 s, n は、これらによる偏微分を表す。

前報¹⁾と同様にLaplace変換理論を利用して解く。水位の Laplace変換 $\hat{\xi}$ は

$$\hat{\xi} = \left(\frac{F^2}{\alpha - i m} - \frac{\beta}{C^2} \right) \frac{\sinh(C n_*)}{C \cosh(C n_b)} + \frac{\beta}{C^2} n_*$$

$$C^2 = \frac{\alpha(\alpha F^2 + \gamma)[\alpha(F^2 - 1) + 3\gamma]}{\alpha F^2 + 2\gamma}$$

$$\beta = \frac{\alpha \gamma (\alpha F^2 + \gamma)}{(\alpha - i m)(\alpha F^2 + 2\gamma)}$$