

縦筋河床の形成領域と横断形状について

九州大学 工学部 正 員 大本照憲

九州大学 工学部 正 員 平野宗夫

九州大学 工学部 学生員○澤田誠一

1. はじめに

長方形直線開水路流れにおいては、一般に二次流(Prandtlの第二種二次流)が存在し、流れは三次元的様相を呈する。河床が粗面の場合には、この二次流は水深スケールの直径を有する並列した縦渦群として比較的安定した形態を取り¹⁾、移動床流れにおいては Sand Ribbons と呼ばれる縦筋が主流と平行に規則的に形成され、縦渦と縦筋とは相互作用のかなり強いことが示唆されている²⁾。実際河川では自由水面の流況等により古くからその存在は認められ³⁾、実験水路においても観察されてはいるが⁴⁾、その形成領域について十分な検討はなされていない。本研究では、縦筋河床の形成領域について実験的検討がなされ、さらにその横断形状に関する理論解と実験値との比較検討が行われている。

2. 実験装置および方法

実験に使用した水路は、長さ 10 m、幅 30 cm、深さ 30 cm のアクリル樹脂製可変勾配水路で、測定部の長さは 8 m である。河床材料は、中央粒径 d_{50} および幾何標準偏差 $\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$ が、各々、2.85mmと1.23 1.90mmと1.17, 0.94mmと1.26, 0.57mmと1.47 および 0.29mmと1.17 の 5 種類の均一に近い砂である。実験は、河床材料を測定長全域に亘って厚さ 3cm で均一に敷き均し、所定の勾配、流量に設定し、下流端の堰の高さを調整してほぼ等流と見なせる状態から開始した。水位および水深は、ポイントゲージを用いて、水路中心線に沿って 1m 間隔で計測した。また、縦筋の横断形状は、縦筋が平衡状態に達したと見なされる時点で、超音波測深器を用いて測定した。

3. 実験結果とその考察

(1) 縦筋河床の形成領域

図-1 は、目視観察を通して主に縦筋河床と認められるものを中心に、無次元掃流力 $\tau_* = u_*^2 / \rho g d$ と砂粒レイノルズ数 $Re_* = u_* d / \nu$ に対してプロットしたものである。

Valin⁵⁾ は、砂澱と砂堆とを区分する無次元量として u_* / s

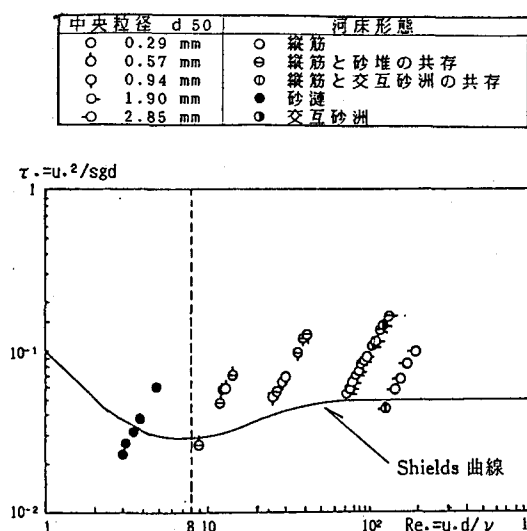


図-1 τ_* と Re_* との関係図における
縦筋の形成領域

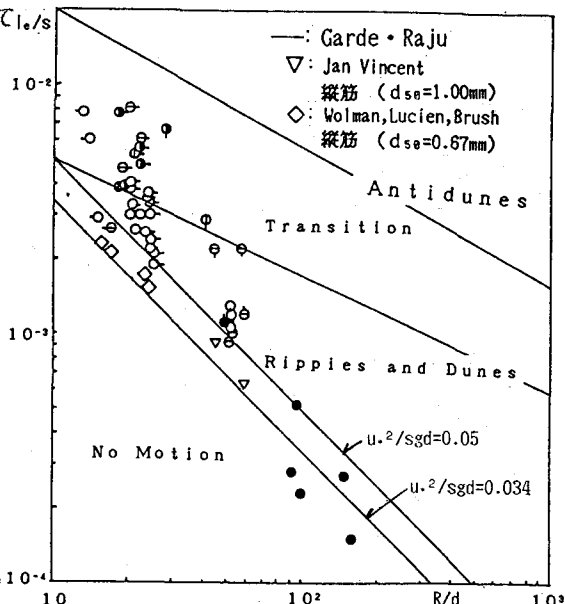


図-2 小規模河床形態の領域区分

砂粒レイノルズ数を上げ、 $Re_s \leq 8$ では砂漣以外の河床波は発生しないことを指摘している。砂粒レイノルズ数 $Re_s \leq 8$ および無次元掃流力 $\tau_* > \tau_{*c}$ から砂漣のみが形成される粒径は $d < 0.49\text{mm}$ であり、河床材料として $d_{50} = 0.29\text{mm}$ を用いた実験では河床には砂漣のみが発生し縦筋は観察されなかった。また、縦筋が明瞭に現れるのは掃流力が限界掃流力よりわずかに越えた所に当たり、掃流力の増加とともに縦筋は砂堆と共存していることが分かる。

図-2 は、同一の実験結果を GARDE+RAJU による領域区分図⁶⁾ にプロットしたものである。縦筋の発生は丁度、過去の実験データの欠落部分に当たる所で現れており、水深/粒径比 H/d が 70 以下程度で限界掃流力より僅かに大きい場合に起こるようである。図-1および 図-2から縦筋が発達する時の掃流力の範囲は下限に限界掃流力を持ち、上限には砂堆が発達する時の掃流力を持つ事が推察される。

(2) 縦筋の横断形状

平坦な初期河床から縦筋河床に遷移する過程において、縦渦と縦筋は相互に作用を及ぼし、縦渦は強くなり安定化すると共に縦筋は発達する関係にある。縦渦によって誘起された横断方向の壁面せん断応力と重力の横断方向成分がバランスして縦筋河床は平衡状態に達する。

平坦な初期河床から縦筋が発生・発達し、平衡に近い状態では、安定した縦渦は掃流力を Sand Trough で大きく、Sand Ridge では小さくさせる。その結果、掃流砂量は幅方向に大きく変化し、掃流砂の殆んどは Sand Trough で流送され、Sand Ridge 近傍では河床材料は停止していることが観察された。また、縦筋が最も明瞭に現れるのは、河床材料が限界掃流状態の近傍においてである。従って、以下では、縦筋の横断形状は、静的平衡河床を対象として検討を進める。また、掃流力は主流に平行であると考え、縦筋上の掃流力の算定に Vertical Depth Method を適用すれば、 $\tau_{cr\theta} = \rho \cdot g \cdot l_e \cdot dA/ds$ で表される。ところで、横断方向に Z 軸をとると、 $dA = H \cdot dz$, $ds = dz/\cos\theta$ であるから、 $\tau_{cr\theta} = \rho \cdot g \cdot l_e \cdot H \cdot \cos\theta$ となる。上式と横断勾配 θ 上の限界掃流力に関する式 $\tau_{cr\theta}/\tau_{cr0} = \cos\theta \{ \tan^2\phi - \tan^2\theta \}^{1/2}/\tan\phi$ とを連立させれば、次式のように水深に関する一階の微分方程式が得られる。

$$dH/dz = \{ 1 - (\rho \cdot g \cdot l_e / \tau_{cr0})^2 \cdot H^2 \}^{1/2} \cdot \tan\phi$$
 ところで、 $\tau_{cr0} = \rho \cdot g \cdot H_{max} \cdot l_e$ であることから

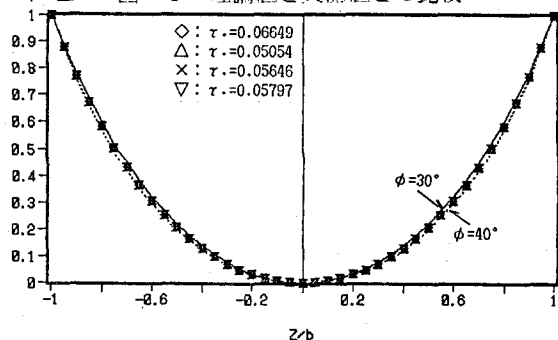
$$dH/dz = \{ 1 - (H/H_{max})^2 \}^{1/2} \cdot \tan\phi$$
 である。境界条件に $z=0$ で $H=H_{max}$ を用いて左式を積分すれば、水深の横断分布は、 $H = H_{max} \cdot \{ 1 - \cos(\tan\phi \cdot z/H_{max}) \}$ によって与えられる。従って、河床の横断形状は $Y = H_{max} - H = H_{max} \{ 1 - \cos(\tan\phi \cdot z/H_{max}) \}$ によって表される。

また、上式より縦筋の波高 Δ は

$$\Delta = H_{max} \{ 1 - \cos(\tan\phi \cdot b/H_{max}) \} \text{ となる。}$$

図-3は、 Y を Δ で無次元化して示したものである。図より明かなように、理論値と実測値とは、ほぼ値の一致していることがわかる。

図-3 理論値と実測値との比較



<参考文献>

- (1) 平野宗夫, 大本照憲, 松枝修治: 流速変動と浮流砂濃度に関する実験的研究, 第30回, 水理講演会論文集, 1986.
- (2) 木下良作: 石狩川河動変遷調査(本編, 参考編), 科学技術庁資源局資料, No.36, 1961
- (3) Karcz, S.: Harrow Marks, Current-Aligned Sedimentary Structures, J.Geology, vol.75, 1967.
- (4) 芦田和男, 奈良井修二: 河床形態の変動特性に関する研究, 京大防災研年報, 第20号, B-2, 1977.
- (5) Yalin, M.S.: Harrow Marks, Current-Aligned Sedimentary Structures, J.Geology, vol.75, 1967.
- (6) 水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会: 移動床流れにおける河床形態と粗度, 土木学会論文報告集, 第210号, 1973.