

堰を越える流れの流砂の機構に関する基礎研究

On the Mechanism of Sediment Transportation through the Barrage

日本大学工学部 正員 長 林 久 夫
日本大学工学部 正員 木 村 喜代治
日立コントロールシステムズ 針ヶ谷 彰 浩

1. はじめに

河道に設置された構造物への堆砂または排砂に関する研究は古くから行われ、堆砂面の高さ、堆積長等多くの研究成果が得られている。^①しかし構造物を越えて流出する流砂現象の物理機構に関しての報告はあまり多くなく、近年の計測器の発展と併せて、検討の余地の残る所である。またこの現象は現在再び注目されている構造物周辺の局所洗掘現象とも関連し、今日的な課題を有していると思われる。

流量と流砂量が一定の動的安定勾配にある砂防ダムや堰では、越流部の形状や流量、流砂量などによって堆砂面形状が決定される。一般にその堆砂面形状は図-1に示すように構造物の背後に洗掘部（深掘れ）があり、それより上部へは砂の安息角程度の勾配で堆積斜面が続き、さらに等流状態で上流に至る。洪水時の洗掘部の規模は構造物の設計と密接に関連した問題である。またこれらの構造物を越流して流出する流砂の機構は可視化観測により、非定常な3次元性の強い巻き上げ渦状の運動を含めた渦構造に起因していることが分かった。安定河道のような定常的なものが、このような非定常的な渦運動を有する構造に規定されることは現象的にも興味ある問題である。

本研究では構造物背後の土砂の堆砂面形状と洗掘部の渦構造とが土砂輸送の動的安定勾配に密接に関係するものと考えて、長方形の越流部（切り欠き）を有する堰を用いて堆砂面形状と渦構造に関する実験的な検討を行った。また明瞭な渦構造がある場合の乱流構造についての検討も行った。

2. 実験装置および方法

測定に用いた水路は幅 0.3m、長さ 4m、アクリル製の長方形開水路である。水路勾配は水平である。図-1の実験概略図に示すように、座標系は越流部の上端部を $y = 0$ として上向きに y を正とした。また堰から上流に向かって x 、側壁から横断方向を z 軸とした。

実験は移動床実験と固定床実験からなる。移動床実験では表-1に示す水理量において堆砂面形状の測定と流れの可視化による渦構造の検討を行った。堆砂面形状の形成はまず、平均粒径 0.86mm で1.2mm 篩を通過し 0.6mm篩に留まる砂を切り欠き高さまで敷き均らした後、所定の流量と流砂量が長時間通水して形成した。堆砂面が十分に安定した後ポイントゲージにより堆砂面形状の測定を行った。

流れの可視化はアルミ粉懸濁法とスライドプロジェクターにより任意の平面と側面の流れの構造の写真撮影を行った。

固定床実験は $Q=3\ell/s$ 、 $Q_s=0.64\text{cm}^3/s$ の堆砂面形状をセメントと樹脂系コーティング剤より固定床化して行った。測定は主流平均流速をピトー管で計測し、正逆流の判定と逆流域の計測をプロベラ流速計により行った。また乱流計測はX型プローブを用いた熱線流速計で $x-y$ 面のみの測定を行った。

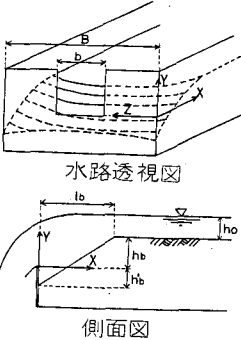


図-1 実験装置概略図

Q (ℓ/s)	Q_s (cm^3/s)	b (cm)	I	I_s
1.5	0.32	6.0	0.00415	0.00376
1.5	0.32	10.0	0.00402	0.00278
1.5	0.32	15.0	0.00397	0.00380
1.5	0.84	6.0	0.00581	0.00741
1.5	0.84	10.0	0.00606	0.00565
1.5	0.84	15.0	0.00667	0.00725
3.0	0.64	6.0	0.00217	0.00182
3.0	0.64	10.0	0.00315	0.00562
3.0	0.64	15.0	0.00302	0.00333
3.0	1.68	6.0	0.00467	0.00617
3.0	1.68	10.0	0.00463	0.00562
3.0	1.68	15.0	0.00526	0.00524

表-1 測定水理量一覧

3. 堆砂面形状と渦構造

3-1. 堆砂面形状 ②,③

堆砂面の形状は木村に従い、越流部で限界水深をとり、有効水頭が $E = h_b + h_o + h_a$ として考えられるので、越流部の流量 Q は

$$Q = C v_c A_c = C \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} g^{1/2} E^{3/2}$$

$$= C \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} g^{1/2} b (h_b + h_o + h_a)^{3/2} \quad (1)$$

比エネルギーと h_{cd} との関係は

$h_{cd} = (2/3)E$ で $\alpha = 1$, h_a を等流部の速度水頭とすると

$$\frac{E}{h_{cd}} = \frac{1}{(Q^2/gb^2)^{1/3} C^{2/3} (2/3) b^{2/3} g^{1/3}}$$

$$= \frac{3}{2} C^{-2/3} \quad (2)$$

式 (2) に E を代入して式 (3) を得る。

$$\frac{h_b}{h_{cd}} = \frac{3}{2} C^{-2/3} - \frac{h_o}{h_{cd}} \left(1 + \frac{h_a}{h_o}\right) \quad (3)$$

右辺第2項は、等流部のフルード数を用いて

$$\frac{h_o}{h_{cd}} = \left(\frac{b}{B}\right)^{2/3} (F_r)^{-2/3} \quad (4)$$

$$\frac{h_a}{h_o} = \frac{1}{2} \left(\frac{v^2}{g h_o}\right) = \frac{1}{2} F_r^2 \quad (5)$$

これより式を整理すると式 (6) を得る。

$$\frac{h_b}{h_{cd}} = \frac{2}{3} C^{-2/3} - \left(\frac{b}{B}\right)^{2/3} (F_r)^{-2/3} \left(1 + \frac{1}{2} F_r^2\right) \quad (6)$$

図-2 に式 (8) の関係を示す。図中の白丸は幅30cm, 長さ12mの水路の結果を示す。白で縦棒は幅0.91m, 高さ0.45m, 長さ4.5mの水路で平均粒径0.84mmの砂を用いたものである。③ 黒丸は表-1による。図中の実線は式 (6) の係数をほぼ1.1としたものである。これよりフルード数の変化

ここで

h_b : 堰より上部の堆砂面高

h'_b : 堰より下部の堆砂面高

h_{cd} : 堰上の限界水深

ℓ_d : 堰板より段丘肩部までの距離

F_r : 等流部のフルード数

b : 切り欠き幅

B : 水路幅

h_o : 等流部の水深

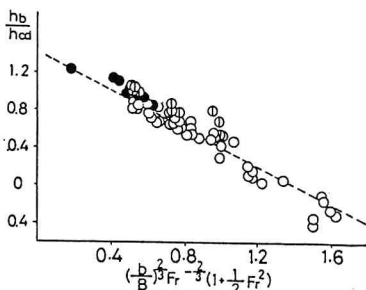


図-2 堆砂面高さの検討

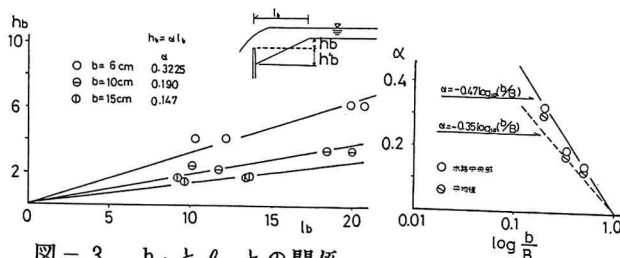


図-3 h_b と ℓ_b との関係

図-4

α と (b/B) の検討

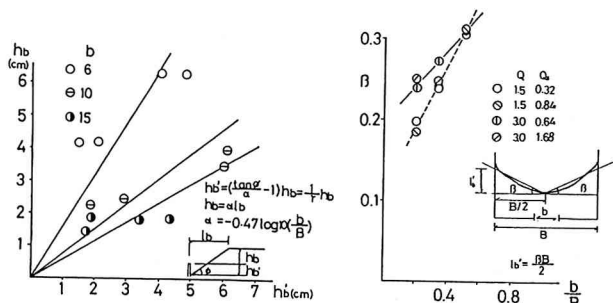


図-5 h_b と h'_b との関係

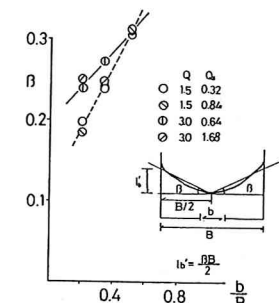


図-6 堆積面の三次元性

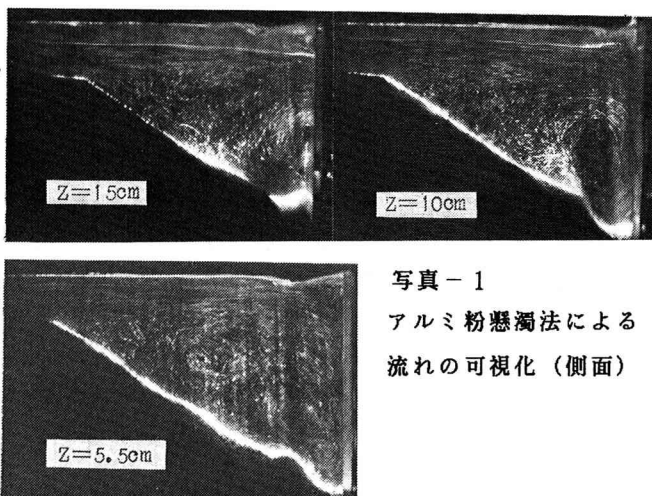


写真-1

アルミ粉懸濁法による
流れの可視化 (側面)

が小さい場合には堰の絞り b/B が大きく影響することが分かった。

図-3は堰中央部での h_b と l_b の関係を示す。これより式(7)を得る。式(7)の α と b/B の関係を図-4にしめす。白丸は水路中央部、白丸に斜線は l_b の平均値を示す。しかし、図-6での堆砂面の3次元性を考慮すると水路中央の式(8)を用いた方が良い。図-5は h_b と h_b' の関係を示したもので、式(7)、(8)より式(9)を得る。

$$h_b = \alpha l_b \quad (7)$$

$$\alpha = 0.47 \log_{10} (b/B) \quad (8)$$

$$h_b' = \left(\frac{\tan \Phi}{\alpha} - 1 \right) h_b \quad (9)$$

図-5の図中の実線は式(9)によるものでは実測値の関係を示す。

3-2. 可視化による渦構造の検討

写真-1, 2はスリット光源により撮影された渦構造の一例を示す。写真-1は $x-y$ 面を写真-2は $x-z$ 面を示す。これらの写真において細い流線はアルミ粉の粒子を、太く光っているのは砂粒子が巻き上げられている様子を示している。図-7は可視化と目視観測による流れの模式図である。図-7aの側面図には、いずれの場合にも水路横断

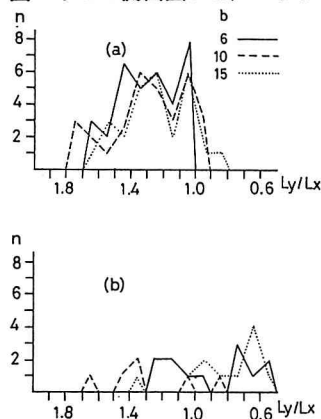


図-8 渦径の検討

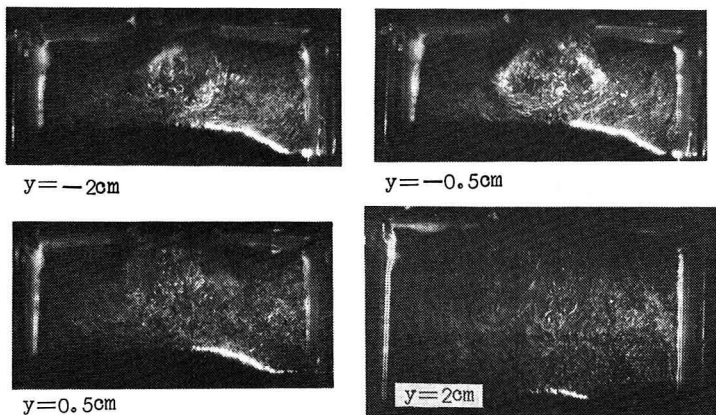


写真-2 アルミ粉懸濁法による流れの可視化(平面)

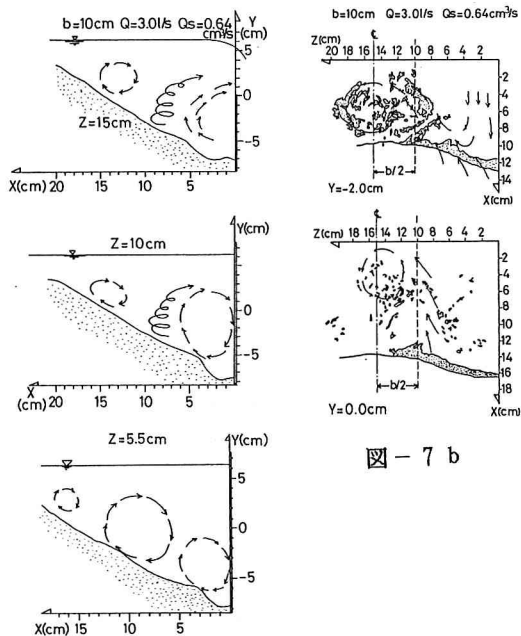


図-7 b

図-7 a 図-7 流れの模式図

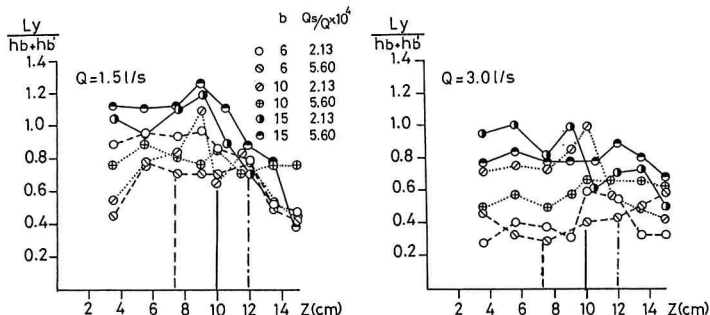


図-9 渦径の縦スケールと堆積面高さ

方向（ z 方向）に軸を有する渦構造が見られる。また水路中央部には切り欠き面下方に強い渦が存在し、その後方には3次元性の強い巻き上げ渦上の構造が存在する。この両者によって砂が排出される。越流部の境界にあたる $z = 10\text{cm}$ では、切り欠きや下方に見られた渦が成長して、その径はほぼ $h_b + h_b'$ のオーダを有するようになる。 $z = 5.5\text{cm}$ の袖部では堰近くに2つの渦構造が見られ、これらの渦が砂を上流、水路中央部へと輸送している。図-7 bの平面図においては、 $y = 0\text{cm}$ 、の越流部と $y = -2\text{cm}$ の切り欠き下部の状況を示す。図においてハッチおよび島状の模様は砂粒子が巻き上げられた状態を示す。 $y = -2\text{cm}$ 側壁付近の隅角部に上流へ向かう流線が見られる。また側壁から中央に向かう流れが見られ、この中央付近に平面的な渦構造が存在する。写真ではこの平面渦が $y = 2.0\text{cm}$ 付近まで見られる。この平面渦の回転方向は非周期的に変化するので、中心に向かう流れの競合によって起こるものと思える。また中心に向かう流れは側面写真の渦構造を考慮すると、螺旋状に連続した渦構造であると推察される。 $y = 0\text{cm}$ の図で明かなように、この流跡線に沿って多くの砂粒が観測される。

図-8 は写真観測によって得られた渦の縦径 L_y と横径 L_x の h と発生個数の関係を示している。図-8 a は切り欠き近傍に生じた渦を、図-8 b は図-7 a のより堆砂面側に生じたものを示す。これより堰近くは $L_y/L_x = 1.3$ 程度の縦長のものが多く、堆砂面側ではバラツキはあるものの主流によって伸ばされた横長のものが多い。

図-9 は砂粒の移動を支配すると思われる、螺旋流を形成している渦の縦径と $(h_b + h_b')$ との比を側壁面近傍より水路中央部まで示している。それぞれの切り欠き幅に相当する地点を破線で示す。渦の横断方向変化を流量別に見ると、流量の少ないもののほうが越流部と袖部での渦径の変化が大きいことが分かる。袖部での渦径はほぼ同一オーダでありあまり変化がない。また渦径 L_y の変化は、切り欠き幅 b に従っている。

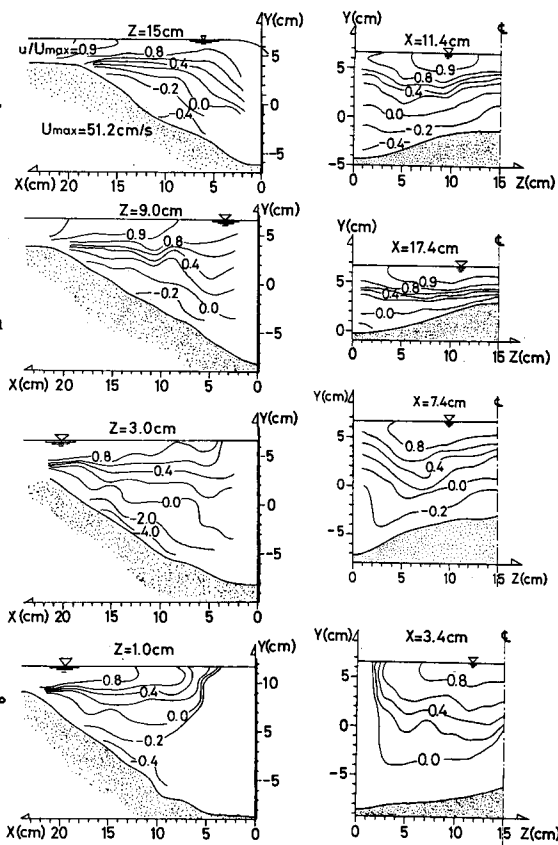


図-10 平均流速の等分布曲線図

4. 流速分布特性及び乱流構造

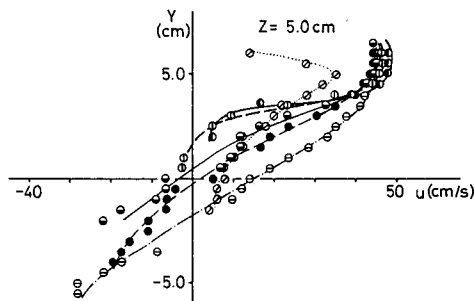
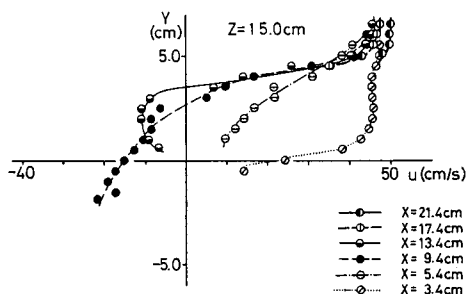


図-11 主流平均流速分布

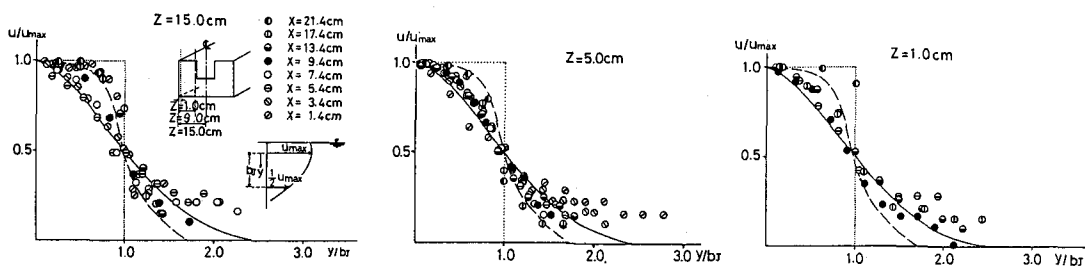


図-12 主流流速の噴流分布との比較

4-1. 平均流速分布特性

平均流速の等流速分布曲線を図-10に示す。図-10aはx-y平面を図-10bはx-z平面を示す。流れの可視化写真及び図-7から分かるように、堆砂面近傍には砂移動を支配する渦構造があり流速ゼロの点はプロベラ流速計から得られている。負の流速は逆流を示す。

図-11の流速の鉛直分布を見ると、水路中央部の測線では $y > 4\text{ cm}$ では等流部の流れを維持し、 y の低下に伴い急激に流速が減少する。 x が5.4 cm以内の堰近くでは切り欠きの効果により $y < 4\text{ cm}$ 以下の流れが加速されている。また袖部近くのごく切り欠き付近の流れにおいては水路中央向きの流れによって主流流速は減速される。

主流の流れは剪断流であり二次元噴流との比較は必ずしも適切ではないが、図-12にその比較を示す。図中に示すように、流速が最大流速の半になるまでの距離を b_j として示している。破線は遷移領域を示し、実線は乱流域である。

水路中央部では、 y/b_j が1.5以下において噴流状の流れと仮定出来よう。しかし切り欠き近傍の測線においては堰の絞りの効果が見られ全体の流速は増加して噴流の分布とは異なってくる。また y/b_j が1.5以上の底面側でも噴流の分布よりも大きく流速が増加していることが分かる。

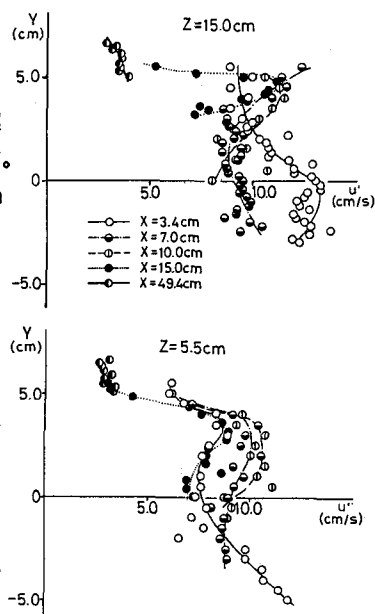


図-13

主流乱流強度分布の検討

4-2. 乱流特性

主流乱流強度の鉛直分布を図-13に示す。乱流強度は図-11に見られるように急激な流速減少によるシュアーの効果により生成され、その強度は等流部に比べて約3倍である。

水路中央部の測線では平均流速分布と同様に $x = 7\text{ cm}$ の測線の底面近くにおいて、しだいに強度が増大してくる。また $x = 3.4\text{ cm}$ の測線においては底面側の強度がより増大しており、流出による乱れの生成が大きいことを示唆する。また主流乱流強度の横断方向変化を図-14に示す。 $x = 7\text{ cm}$ の断面では、 z が7~8 cmの地点で切り欠きより下部の強度が増加している。これを図-7bとあわせて考えると3次元性の強い渦と螺旋渦とが競合して流れが急激に加速される。 $x = 3.4\text{ cm}$ の測線において底面側の水路中央部で強度が著しく大きく、図-13と同様に流出の効果が大きいことが分かる。

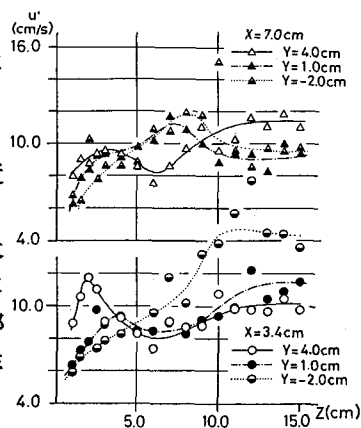


図-14 主流乱流強度の横断方向変化

鉛直方向の乱流強度 v' の分布を図-15に示す。水路中央部では等流部に近い $x=15.0\text{cm}$ の測線の水面近くにピークを持ち、流下するにつれて下部の領域が増加してくる。また $x=3.4\text{cm}$ の流出口付近では水深全体に渡りほぼ均一の強度を有するようになる。袖部の $z=5.5\text{cm}$ 付近では底面近くに乱流強度の増大が見られる。

レイノルズ応力分布を示したのが図-16である。この図においても主流乱流強度と同様に、等流部の速度欠損による乱れの発生と堰の絞り、もしくは放流部による流速増大に伴う乱れの生成が見られる。特に堰近くの強度は大きく、流出に伴う渦の効果が顕著である。

図-17, 18, 19はそれぞれ主流乱流強度 u' とレイノルズ応力の等強度線図そして二次元流速ベクトル図を示す。ベクトル図から渦構造が明らかとなり、またこの図と主流乱流強度及びレイノルズ応力分布と渦構造との相関が明瞭となる。

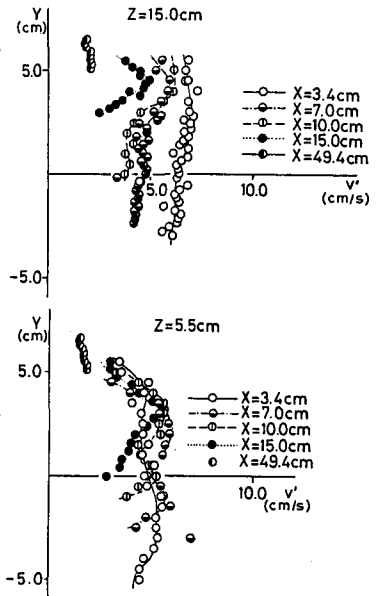


図-15
鉛直方向乱流強度分布の検討

5. おわりに

河道に設置された構造物からの流砂現象を乱流構造の面から検討を行い、流粒子を流出させる支配的な渦構造を確認した。今後はこれらの流れのモデル化と洗掘過程の機構の検討を行って行きたい。

<参考文献>

- ①河村 三郎：土木学会論文集, No.80, April, 1962, p7~15
- ②木村 喜代治：土木学会年次講演会, 昭和42年5月
- ③木村 喜代治：土木学会年次講演会, 昭和45年11月

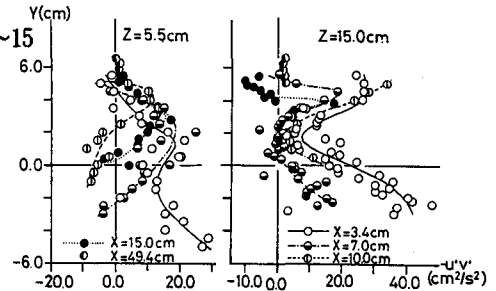


図-16 レイノルズ応力分の検討

図-17

図-18

主流乱流強度の等強度線図

レイノルズ応力の等強度線図

図-19 二次元流速ベクトル図

