

波状路床上の流れにおける乱れ特性について (2)

上 野 鉄 男

ON THE TURBULENCE CHARACTERISTICS IN FREE SURFACE SHEAR FLOWS OVER WAVY BEDS (2)

By Tetsuo UENO

Synopsis

A goal of this study is to disclose the structure of the flow over a wavy bed. Two kinds of artificial wavy beds are used. One is a triangular wavy bed, which has a similar geometry to dune-type sand waves, and the other a ridge-type, in which various ratios of distance to height are used. The distributions of mean velocity and turbulent velocity are measured using a hot-film flowmeter, and the behavior of the flow in the rear wake region are measured visually. On the basis of these measurements, the structure of the flow over wavy beds is explained fairly well.

1. 緒 言

移動床流れにおいては、流水と流砂の相互作用の結果として水理条件と河床砂礫の特性に応じて各種の河床形態が形成される。河床形態は移動床の抵抗や流砂量と密接な関係を持っており、移動床流れの実態を解明することは極めて重要な意義を持つものであるが、現在まで非常に多くの実験的、解析的研究が重ねられてきたにもかかわらず、適確な結論が得られているとは言い難い。その理由としては、現象そのものが非常に複雑であることが第一に挙げられるが、河床波上の流れそのものについての知識が、河床形態や流砂に関する知識と比較して、きわめて貧弱であることが大きい。

本研究は、移動床流れにおける乱れの果たす役割を明らかにするための基礎的な知識を得ることを目的とするものであって、固定された波状路床上における流れの構造を実験的に検討しようとするものである。前報¹⁾においては、①三角形の波状路床を用いた場合、流水中の乱れのスペクトルはエネルギーが全体的に大きくなることを除いては平坦路床の場合と顕著な差異は認められず、路床面近傍で乱れ速度を大きくするのは峰の後部に形成される死水域から間欠的に剝離する流れであり、この流れは特定の周期を持つものではないこと、②棧を用いて路床の棧間隔 s と棧高さ k の比を変化させた実験において、 $s/k=40$ の場合には流水中の乱れは上流側で発生した乱れの影響をほとんど受けず、それぞれの棧の一区間で乱れは発生と減衰を繰り返しており、一方、 $s/k=10$ の場合には乱れは上流側で発生して運ばれてきた乱れの影響を強く受けて、平坦路床上の流れにおける乱れとほぼ同様のスペクトル構造を持つということ、などが概略的に明らかにされた。

本報告は、上述の路床状態のもとで流れの構造をさらに詳細に検討したものであり、平均速度および乱れ速度の分布がホットフィルム流速計による計測から明らかにされると同時に、流向や砂粒の動きおよび染料による流れの観察によって死水域近傍の流況が調べられている。

2. 実験装置および方法

実験は既報¹⁾の長さ 13 m, 幅 40 cm, 高さ 20 cm, 路床勾配 1/500 の透明アクリライト樹脂製の直線水路で行なわれ、路床には波長 20 cm, 波高 1 cm の dune 形状を代表したブリキ製の三角波が水路下流端から35枚

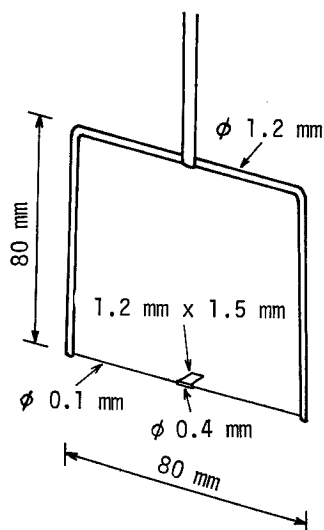


Fig. 1 The equipment to measure flow directions.

敷きつめられている。また、波状路床の波長波高比の変化に応じて、波状路床上の流れの構造がどのように変化するかを実験的に明らかにするために、高さが 6 mm の直角二等辺三角形の金属製の棧が用いられている。

平均速度および乱れ速度はファイバー型のホットフィルム流速計によって計測され、流速計からの出力はペン書きレコーダーに記録された。乱れ速度の記録に際しては、流速に対する出力変動の time constant を 3 秒とした R.M.S. メーターからの出力が用いられたが、このときの計測継続時間は約 30 秒であった。流速計の検定は浮子による表面流速の測定結果と比較検討することによって行なわれた。とくに、実験中の温度変化の影響による誤差を小さくするために、各温度ごとの流速に対する出力電圧の検定曲線を作り、計測中の温度と対応させてグラフから流速を読み取るという方法で、注意深い処理がなされている。

流向の計測には Fig. 1 に示すような装置が用いられた。受感部は外径 0.4 mm の注射針を長さ 1.5 mm に切断した部分に、長さ 1.5 mm、幅 1.2 mm のトレーシングペーパーをのり付けしたのによって構成され、これに長さ約 8 cm、直径 0.1 mm の

ステンレス線が通されている。この流れに与える影響は小さく、流れに対する応答も良好である。計測は受感部の動きを肉眼で観察することによって行なわれたが、この方法では誤差が含まれ易く、流向の変化の性質を取り出すこともできないため、今後改良がなされねばならない。さらに、染料と砂粒の動きを観察することにより、死水域近傍の流況が把握された。

3. 波状路床上の流れの構造

実験においては、三角波状路床上における流れが平衡状態に達する計測区間での平均水深 H を 4 cm となるように流量を 3.6 l/sec とした。このときの水路中心線上における平均速度 U_m は 24.3 cm/sec であり、これを用いた場合、 $Re = U_m H / \nu = 7.5 \times 10^3$, $Fr = U_m / (gH)^{1/2} = 0.39$ であった。また、計測中に水温 T は 9.1°C ~ 9.3°C の範囲で変化した。

Fig. 2 に水路中心線上の 1 波長間における平均速度の分布を示すが、速度の方向性は流速計のプロープの構造から把握することはできない。図において、峰点の直下流で等速度線は密になっており、速度勾配が大きいことがわかる。

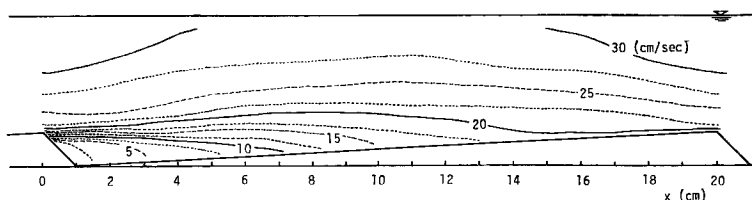


Fig. 2 The distribution of mean velocity.

Fig. 3 は乱れ速度の計測結果を示したものである。乱れ速度が大きい範囲は波状路床の峰の後部から下流へ若干上向きに伸びており、これは路床形状によって発生する乱れの伝播する主な経路を示すものと考えられ

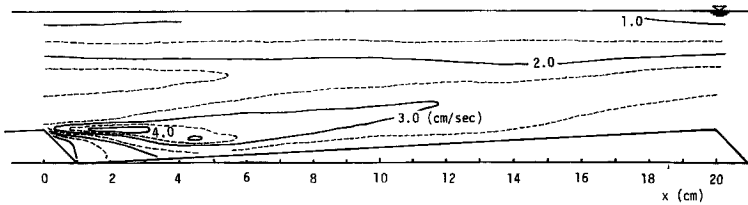


Fig. 3 The distribution of turbulent velocity.

る。流速計のプロブの構造から速度の方向性が把握されないことによって、正逆両方向の流れが生じる部分において乱れ速度は過小に評価されることに注意する必要があるが、ここではあまり問題とはならないものと考えられる。

Fig. 4 は死水域近傍の流向および流況を示したものである。図において、矢印(→)は平均的に生じる流向、扇形は流向の生じる範囲を示している。流向および砂粒の動きの観察結果から、峰の下流約 4~5 cm の位置が reattachment point となっていることがわかった。観察によると、reatachment point 近傍では砂粒は上方に巻き上げられている。さらに、染料を用いた観察から図に示すような流況が把握されたが、これは流

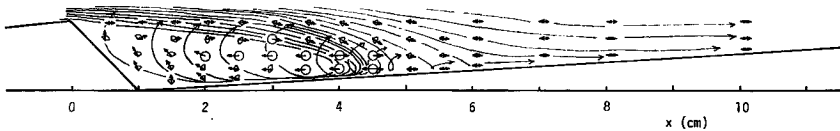


Fig. 4 The flow directions and the flow pattern in the rear wake region.

向の計測結果とよく一致している。なお、図に示した流況は平均的なものであり、流況そのものも時間的に変化する。また、図においては平均的に表わした流線が交わるように描かれているが、逆流する過程で流線は横方向にずれるので、実際には流線が交わることはない。これらの詳細については今後さらに詳しい検討が必要であるが、観察の結果からつぎのようなことが推測できる。流況の変化の過程において、Fig. 5 に示すような 2 つの代表的な流れの状態が考えられる。(a) は峰点付近の主流が下向きになる状態であって、この状態においては強い渦流が発生し、これによってひきおこされる速度変動は非常に大きいものとなる。(b) は峰点付近の主流が上向きになる状態であって、渦流は弱くなる。(a) の状態と (b) の状態とは交互に繰り返され、この変化の過程で複雑な流れの状態が発生し、これに伴って reattachment point の位置そのものも上下流に移動するようである。さらに、このような変化の繰り返しの周期について考えると、これは路床波の幾何学的スケールによって関係づけられると同時に、上流の路床波によって発生し、流下してきた乱れの影響を受けるために複雑な特性を持つことになる。

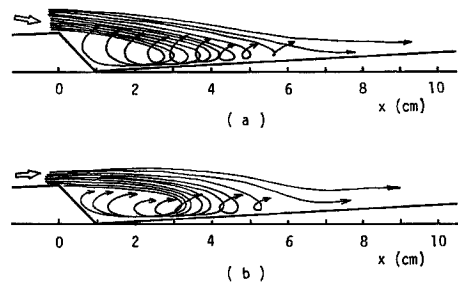


Fig. 5 Two flow patterns in the rear wake region.

波状路床上の流れの構造は以上のように考えられるが、この中で死水域で形成される渦が非常に重要な役割を果たすことがわかる。この渦と主流との間に間欠的な交換が発生し、これが Fig. 3 に示される乱れの間を形成することになる。また、このようにして発生し、伝播される乱れの周波数特性にランダムな性質が含まれ、既報¹⁾で示したようなスペクトル特性を持つことは乱れの発生の過程から考えて容易に理解されよう。

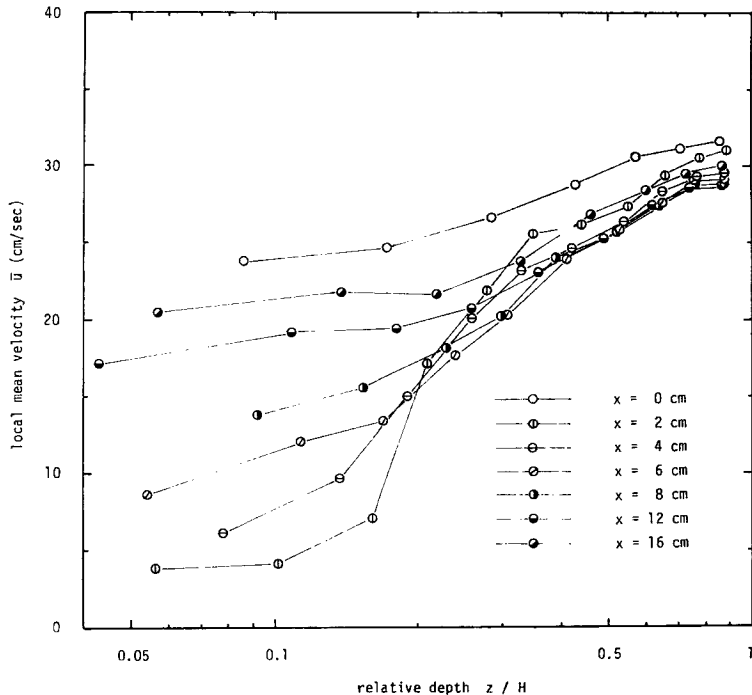


Fig. 6 The distributions of local mean velocity.

つぎに、以上のような特性を持つ波状路床上の流れが平坦路床上の流れや他の水理条件のもとでの波状路床上の流れとどのような点で類似しており、また異なっているかを検討する。**Fig. 6** は平均速度の鉛直分布への対数則の適用性について検討したものであり、 x 方向の異なる各測線における分布が示されている。図において、 $0.3 \leq z/H \leq 0.7$ の範囲で、 x 方向のいずれの位置においても、平均速度分布の勾配はほぼ等しい一定値となり、この値を用いて計算した摩擦速度 U_f は 3.5 cm/sec である。なお、この場合の水路中心線上の平均速度を用いたフルード数は 0.39 である。既報¹⁾ の同様の波状路床上における実験においてはフルード数が 0.33 の場合、路床の影響が強く及ぶ範囲は $z/H \leq 0.35$ であり、 $z/H \geq 0.35$ では速度勾配が一定となり、この値を用いて計算した摩擦速度は 1.6 cm/sec であった。また、平坦路床上の流れにおいては、フルード数が 0.40 の場合、速度勾配より求めた摩擦速度は 1.2 cm/sec であった。以上より、波状路床上の流れにおいてはフルード数が大きくなるほど路床の影響は上方まで及び、大きな摩擦速度をもつ流れとなる。平坦路床上の流れにおいては、フルード数が大きくても波状路床上の場合の摩擦速度よりはるかに小さな摩擦速度しか持たないことがわかる。

流れ方向の乱れ速度 u' は、レイノルズ数の十分大きな 2 次元開水路流れの場合、**Fig. 7** の実線の関係によって表示されるが²⁾、本実験における計測結果は全体としてこの直線よりも下方にプロットされている。図において、 $0.3 \leq z/H \leq 0.7$ では $u'/u_f(\bar{u}/u_f)^{1/3}$ の分布は x 方向のいずれの位置においても、図の実線と同じ $1/3$ の傾きをもち、結果のパラッキも小さい。図における実線と $0.3 \leq z/H \leq 0.7$ における計測結果との差は約 20% である。このような差が生じた原因としては、①乱れ計測の方法と精度上の問題(とくに、time constant を 3 秒とした出力変動の R.M.S. を乱れ速度の計測に用いたこと)、②波状路床上の流れの特性を表わしている、などが考えられるが、正確にはより詳細な検討が必要である。

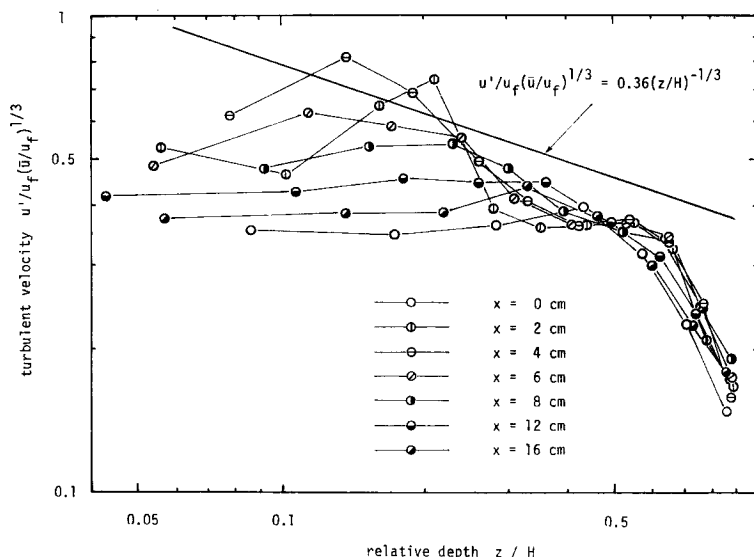


Fig. 7 The turbulent velocity in form of universal function.

4. 棧型路床上の流れの構造

本実験においては棧間隔を適当に変えることによって、棧間隔 s と棧高さ k の比が 5, 10, 20, 40, 80, ∞ の場合について計測が行なわれている。流れの状態として、水深を棧高さの 4～5 倍にするため、流量を s/k のいずれの状態に対しても同一の 1.09 l/sec としたが、このときの水深は 2.4～2.7 cm であった。

Fig. 8, Fig. 9 および Fig. 10 は $s/k=5, 20$ および ∞ の場合の平均速度および乱れ速度の分布を示したものである。ここで、 $s/k=\infty$ というのは棧が唯一つだけの場合であり、流れを等流の状態に保つために水路下流端において若干のせき上げがなされている。図において、 $s/k=20$ の場合の平均速度および乱れ速度の分布は、棧型路床の基本的効果を表わすものと考えられる $s/k=\infty$ の場合のそれらの分布とほとんど変わらず、さらに三角波を用いた波状路床上の流れでの Fig. 2 および Fig. 3 の計測結果ともほぼ同じ傾向を示している。これに対して、 $s/k=5$ の場合は平均速度および乱れ速度の分布は $s/k=20$ の場合に比較してかなりの差異を示している。足立³⁾によると長方形断面の棧を用いた場合の棧粗度要素をもつ流れにおいて、 s/k が 8 以下の場合には溝型粗度として取り扱い、棧型粗度と溝型粗度の間には本質的な相違点が存在することが指摘されている。すなわち、それは溝型粗度においては水路壁面凸部の後流の発達が溝幅に抑制されるということである。Fig. 8 においてはこの指摘の正しいことがうかがえるが、流れの構造をさらに詳しく検討するために各種の s/k に対する死水域近傍の流況を調べた。

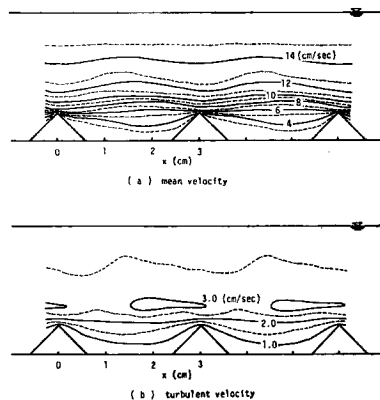
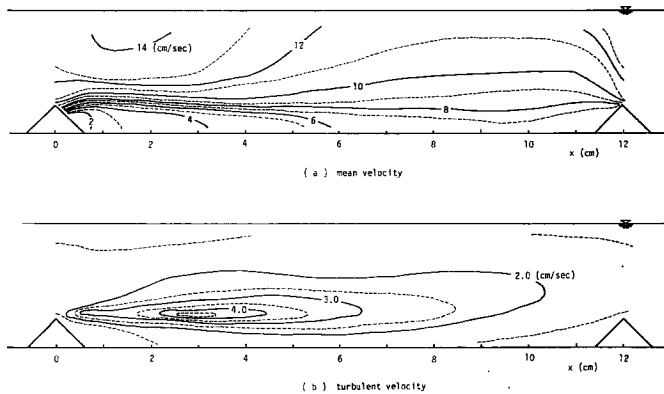
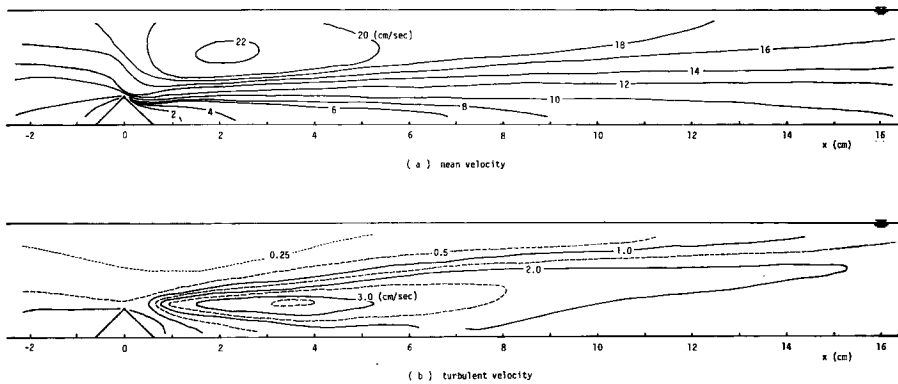
Fig. 8 The distributions of mean velocity and turbulent velocity ($s/k=5$).

Fig. 11 は $s/k=5, 10$ および 20 の場合についての死水域近傍における流向および流況を示したものである。

Fig. 9 The distributions of mean velocity and turbulent velocity ($s/k=20$).Fig. 10 The distributions of mean velocity and turbulent velocity ($s/k=\infty$).

$s/k=5$ の場合には、死水域における渦は明らかに下流側の棧によって影響を受けていることがわかる。また、死水域内の渦と主流との間の交換はあまり激しいものではないことがうかがえる。 $s/k=10$ および20の場合、流況から判断すると、死水域内の渦が下流側の棧によって受ける影響は認められない。また、棧間隔が大きい $s/k=20$ の場合には、棧から reattachment point までの距離は $s/k=10$ の場合よりも大きくなっている。これは、対象とする区間よりも上流で発生した乱れの影響が $s/k=10$ の場合の方が大きく、これが死水域での渦の形成に影響を与えた結果であると考えられる。この点をさらに詳しく検討するために、各種の s/k に対する棧型路床において、平坦路床から棧型路床への遷移領域における死水域近傍の流況を調べた。

Fig. 12 は $s/k=5, 10$ および20の場合の遷移領域における流向および流況を示したものである。 s/k がいずれの値をとる場合にも共通して言えることは、第1番目の棧の後の流れにおける reattachment point の位置は

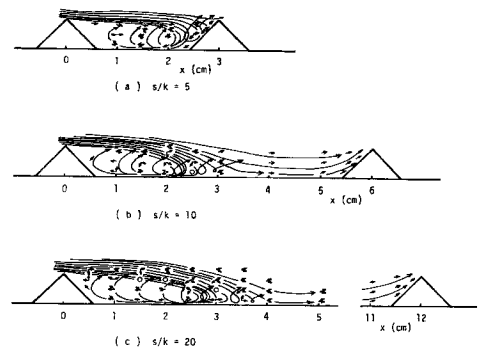


Fig. 11 The flow directions and the flow pattern in the rear wake region.

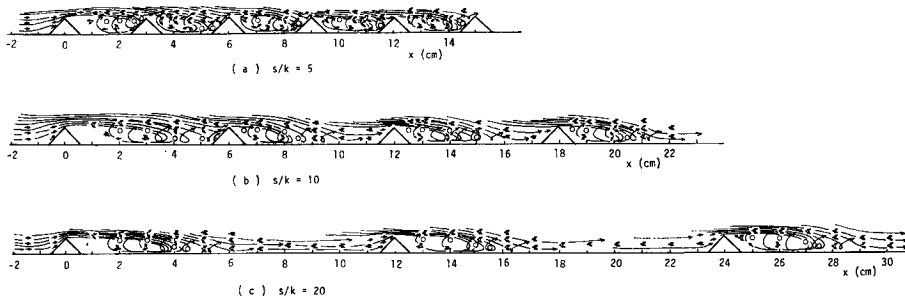


Fig. 12 The flow directions and the flow pattern in the transitional region.

棧から遠く、2番目の棧以後の後流における reattachment point の位置は比較的棧に近いということである。なお、遷移領域における流況そのものは、 s/k のいずれの場合にも、reatachment point の位置が変化することを除いては、第1番目の棧の後流以下、順次比較しても大差はないようである。とり立てて特徴を挙げるとすれば、第1番目の棧の後流においては、棧の直下流の部分において流速が非常に小さく、本流向計測装置によってその流向が把握し難い程度であった。

上述の reattachment point の位置の差異について、これらをさらに詳しく検討するために Table 1 を作成した。この表においては、前述の $s/k=5, 10$ および20の場合の結果に、さらに、 $s/k=40$ および80の場合の結果も加わっており、その値は棧頂から reattachment point までの距離を示したものである。また、表における x は第1番目の棧頂からの距離を示す。この表において、上流で発生した乱れが流下して棧頂で大きな乱れ速度を持つような場合に、棧から reattachment point までの距離が小さくなり、逆に、棧頂での乱れ速度が小さい場合にはその距離が大きくなると考えると、表の数値を合理的に説明することができる。例えば、 $s/k=10$ の場合には、第1番目の棧頂では乱れ速度が小さいので、棧から reattachment point までの距離は大きくなり、

Table 1 The distance from ridge top to reattachment point.

x/s s/k	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	(n-1)~n
5	2.95cm	2.50cm	2.80cm	2.65cm	2.75cm	2.70cm
10	4.40	2.70	3.00	2.75	2.85	2.75
20	4.45	3.50	3.55			3.40
40	4.10	3.70	3.80			3.70
80	3.90	3.80				3.80

ここで発生した乱れは流下に伴う減衰があまり大きくならないうちに第2番目の棧に到達するので、第2番目の棧の下流においては棧から reattachment point までの距離は小さくなる。このため、ここで発生した乱れが第3番目の棧に到達するまでの距離はやや大きくなり、この間の流下に伴う乱れの減衰は大きくなるために、第3番目の棧の下流では棧から reattachment point までの距離はやや大きくなる。以下、同様にして平衡状態まで達するが、ここでは上流で発生した乱れが重なり合って流下して来るため、乱れ速度も大きくなり、棧から reattachment point までの距離は若干小さくなる。他の s/k の値をもつ路床状態に対してもほぼ同様であるが、 s/k が大きくなるにつれて、棧から reattachment point までの距離は大きくなる。 $s/k=40$ の場合と $s/k=80$ の場合では流況および棧から reattachment point までの距離はあまり変わらず、 s/k の変化が流れに与

える影響が大きいのは $s/k \leq 40$ であることがわかる。

以上の検討からつぎのように考えられる。棧の後流の特性は上流から流下してきた流れの性質によって大きな影響を受ける。上流から流下して来る流れの性質は流下に伴う乱れの減衰の程度に深い関係を持つから、棧の間隔に大きく支配される。しかし、棧の間隔が $s/k \geq 40$ になると棧の間隔による効果は小さくなる。また、 $s/k=5$ の場合には足立³⁾の指摘するような溝型粗度の特性が表われ、上の説明が直接は当てはまらなくなる。

5. 結 語

以上、三角波および棧を用いた路床形態のもとでの流れの構造を明らかにするために、ホットフィルム流速計による乱れ計測結果および流向検出装置や染料による死水域近傍の流況を調べた結果について述べたが、要約するとつぎのようである。

1. 固定された波状路床上の流れにおける平均速度、乱れ速度の分布および死水域近傍の流況が明らかにされた。その結果、波状路床上の流れの構造を決定するのは死水域近傍で発生する死水域内の渦と主流との間の間欠的な交換であり、死水域での渦の性質は波状路床の幾何学的スケールと上流で発生し、流下してきた乱れの性質によって決まることがわかった。

2. 波状路床上の流れにおいては、フルード数が大きくなるほど路床の影響は上方まで及び、摩擦速度も大きくなる。平坦路床上の流れにおいては同じフルード数の場合にも波状路床上の流れの摩擦速度よりはるかに小さな摩擦速度しか生じない。流れ方向の乱れ速度についても、波状路床上の流れでは乱れの発生機構そのものが異なるように、平坦路床上の流れと異なる性質を持つようである。

3. 棧型路床上の流れについて、棧間隔を変化させた場合、棧の後流の特性は上流から流下してきた流れの性質によって大きな影響を受け、上流から流下してくる流れの性質は棧の間隔に支配される。棧の間隔が $s/k \geq 40$ になると棧の間隔の変化による効果は小さくなり、 $s/k=5$ の場合には特殊な流れが生じる。また、 $s/k=20$ の場合には、前述の三角波状路床上の流れの構造と同じ傾向を示す。

以上は波状路床上の流れの構造を明らかにするための基礎的研究であって、今後より詳細な研究を進めるとともに、路床形態および流れにおける3次元性の効果なども考慮して、移動床流れにおける乱れ特性の解明へと発展させていきたい。

最後に、本研究を進めるに当たり、終始熱心な御指導をいただいた今本博健助教授に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 今本博健・上野鉄男：波状路床上の流れにおける乱れ特性について，京都大学防災研究所年報，第16号 B，昭48.4，pp. 521-531.
- 2) 今本博健：開水路流れにおける乱れの基本的特性について，土木学会論文報告集，No. 197，1972. 1，pp. 83-91.
- 3) 足立昭平：人工粗度の実験的研究，土木学会論文報告集，No. 104，1964. 4，pp. 33-44.