32 可視化手法による河床波付近の流れの構造に関する一研究

東北大学工学部 岩 崎 敏 夫
東北大学大学院 松 本 朗[○]

Study on the Flow Structure over the Sand Waves by Visualization Technique

Toshio IWASAKI*, Akira MATSUMOTO*

It is well known that sand waves on the movable bed affect on various phenomena remarkably. Therefore, up to now, mechanism of sand waves have been investigated from many kinds of standpoints. Especially, since formation and development of sand waves are largely depend on the turbulent structure of flow, visualization technique will be powerful for the investigation on their mechanism.

In this paper, we investigated the flow structure over the sand wave model by means of hydrogen bubble method as the basic study of the mechanism of sand waves. Main results obtained through experiments are as follows. 1) Typical flow patterns in the wake region are visualized. By which, formation, development and decay processes of the wake vortex are analyzed. 2) Flow patterns on the reattachment point are also obtained. Where, ejection- or sweep-like motion are observed. 3) Very high values are obtained for the streamwise and normal turbulent intensities and also for Reynolds stresses at the reattachment point.

1. 緒 言

移動床上に発生した河床波が流砂量、流水抵抗など種々の水理特性に大きく影響することを考慮すれば、その発生、発達機構を明らかにすることは基礎的に重要である。従来さまざまな方法で研究がなされているが河床波の特性を流れの持つ乱流構造に求める場合、可視化手法は有益なものとなるであろう。工学的な観点から、最終的には流れの構造と河床波の特性との相互関係を明らかにすることが要請されるが、今回はその前段階として河床波模型上の流れを水素気泡法により可視化し流れのパターンを定性的に分類するとともに、若干の定量的解析を加え考察した。

2. 実験方法及び実験条件

実験に使用した水路は上流の長さ4 mの幅の変化する導流水路と、これに続く長さ11 m、幅41 cmの実験水路とで構成されており、写真の撮影は実験水路の上流端から7 mの部分で行った。河床波の波長、波高はそれぞれおよそ12 cm、1 cmであり、砂粒レイノルズ数も合わせて考えると砂連領域に属する。ここでは発生初期のものを対象とし、石膏で型取りモルタルを流し込むことにより模型を作製し

*Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Tohoku University;
Sendai, Miyagi, 980, Japan

た。実験条件を Table 1 に示す。CASE 1, 2 ではクレスト後流域, 再付着点付近について定性的考察も, CASE 3, 4 ではクレスト頂上, 再付着点付近について定量的考察を加えた。木素気泡発生装置の陰極には直径50 μ mの白金線を, 陽極には銅板を用い, 100Hz, 500Vのパルス電圧を印加した。使用したカメラは長尺フィルム用ストリークカメラ(菅原研究所 C-1000S)であり, 光源にはストロボスリット光源(菅原研究所 S-3AA)を用いた。紋り及び露光時間はそれぞれCASE 1, 2 がF2.5 (105mm), 40 μ sec, CASE 3, 4 がF1.4 (50mm), 30 μ secである。現像においてはISO1600あるいは3200まで増感した。撮影時間間隔はCASE 1, 2 が0.1秒, CASE 3, 4 が0.05秒であり, 定量的な評価のために用いたサンプル数は, CASE 3 が200枚, CASE 4 が153枚である。定量的な解析に当っては流速計等の計測器は一切用いず写真の読み取りのみによった。

3. 実験結果及び考察

(1) CASE 1, 2 について

CASE 1, クレスト後流域の流れを Fig. 1, 2 に示す。Fig. 1 は後流渦の成長過程, Fig. 2 はその崩壊, 拡散過程でありいずれも時間間隔0.1秒の連続写真である。右下に白く見えるのが河床波の下流側斜面であり, 主流は右から左へ流れている。Aでは渦の発生は見られないが, 底面付近の逆流域の存在は確認できる。Bは渦が発生し成長を始める段階である。Cは前後の写真から判断して後流渦が最大に発達した状態であると思われる。渦の木深方向のスケールは河床波高と同程度になっており, これはアルミ粉をトレーサーとして可視化した結果と一致するものである。またタイムラインの間隔から判断すると, 逆流域

CASE	D	I $\times 10^4$	R	U _m	U _*	Fr	Re
1	7.82	3.3	5.66	26.3	1.35	0.30	20500
2	7.35	3.3	5.41	28.1	1.75	0.33	20700
3	8.52	5.2	6.02	24.5	1.75	0.27	15500
4	8.45	3.1	5.98	24.8	1.35	0.27	15500

Table 1 Experimental condition (unit: cgs)
D: depth, I: energy gradient, R: hydraulic radius, U_m: mean flow velocity, U_{*}: shear velocity, Fr: Froude number, Re: Reynolds number

A

B

C

Fig. 1 Development process of vortex (CASE 1)

の流速は主流の流速と比較すると小さいことがわかる。Dでは最大に成長した後流渦の上部が主流にぶつかり連行される様子が現われている。引き込まれながらも渦度は保持したままであり、主流部分にもその影響が現われている。Eでは後流渦の崩壊とその拡散によって乱れの卓越した領域が形成されているのがわかる。Fは乱れが移流してしまった後の状態である。主流部分の流速分布は非常に整っており、安定した状態であると思われる。ここに示した一連の写真は典型的なプロセスをよく表わしているものであるが、これらが規則正しく繰り返されているわけではなかった。

CASE 2, 再付着点付近の流況を示したのがFig. 3である。撮影した数十枚の写真から代表的な3つの流れのパターンを見出し次の様に分類した。すなわちHではほぼ対数分布則に従うような整ったタイムラインが見られ、安定した状態である。Iではタイムラインが複雑に混み合い非常に乱れた流況となっている。また、底面付近には低速流域の存在が確認できる。Jでは底面付近においてタイムラインが下流に張り出し、斜面にぶつかっているのが特徴と言える。I, Jは乱流境界層中に見られる ejection, sweep⁽²⁾に現象的には一致した運動であると見なせる。

この様に後流域と再付着点付近に存在する代表的な流れのパターンを確認した後に、2本の白金線を用い後流渦と再付着点付近の乱れとの関係を可視化し、Fig. 4の様に予想した。すなわち、①渦の強さはあまり強くなく主流は安定している。②渦の成長と共に再付着点付近に低速流域が形成され、渦のスケールが最大になる頃に再付着点付近では ejection に対応した流れになる。③渦の崩壊、移流と

D

E

F

G

Fig.2 Decay process of vortex (CASE 1)

共に高速流体が侵入し、底面近くにまでその影響を及ぼす。Sweepに対応した流れである。

(2) CASE 3,4について

キンク型に加工した白金線からブロック状の水素気泡塊を発生させ、流下方向及び鉛直方向の流速を目視により読み取り解析した。この方法によって算定した流速は、厳密にはオイルー流速ともラグランジェ流速とも異なるが、瞬間的な流速ベクトルを示すものであると考えられる。

Fig. 5に平均流速分布を示す。このグラフよりCASE 3,4共にほぼ対数分布に近い形になっていることがわかる。しかしながら断面平均流速がほぼ等しいにもかかわらず、分布形に差異が見られ特に底面付近において著しい。これはクレスト頂上では主流が支配的であるのに対して、再付着点は一種のよどみ点になっているのが原因であろう。

次に底面付近に着目し流速変動のヒストグラムを作製した。CASE 3は $y = 0.11\text{ cm}$ でありFig. 6に、CASE 4は $y = 0.20\text{ cm}$ であり、Fig. 7に示した。2組のヒストグラムを見るとわずかなではあるがVの分布形状に差が見られる。クレスト頂上ではVの値が0の近傍に集中しているのに対して再付着点付近では分布の幅が広がっており、このことはフラットネスファクターの値に表現されている。再付着点付近でのVの変動が大きいのは、定性的な可視化観察の結果とも一致する。

Fig. 8は流下方向及び鉛直方向の乱流強度と、レイノルズ⁽³⁾応力の相対水深との関係である。実線はGrassが平滑な水平床水路での実験で得た結果である。乱流強度、レイノルズ⁽³⁾応力共にCASE 4の方が大きな値をとっている。特にレイノルズ⁽³⁾応力を比較すると差が顕著であるが、CASE 4が再付着点付近でのデータであることを考えれば妥当な結果であると言えよう。

最後に、大規模な乱流構造について検討するために、Grassの条件付抽出平均法⁽⁴⁾を用いて解析を行った。これは y を指定し200枚の写真を20枚(1秒間に相当

H

I

J

Fig.3 Flow patterns on the reattachment point (CASE2)

する) ずつ10個の群に分類し各群ごとに20枚を比較し, 指定した Y に U_{max} が現われる時の $U(y)$, $V(y)$ 及び U_{min} が現われる時の $U(y)$, $V(y)$ を選び出しそれぞれについて10個のアンサンブル平均をとるというものである。結果をFig. 9, 10に示す。指定した Y の位置は二点鎖線で示されている。CASE 3ではB, C, Dの底面近くでは U のピークと V の最小値及び U の最小値と V のピークがほぼ一致しているのがわかる。E, F, Gでもその様な傾向は残っているが, 次第に相関関係が小さくなっており, それ以上の水深の位置ではほとんど関連性が認められなかった。すなわち, 底面から離れるのに従い壁面乱流の大規模な構造特性が薄れていくのがわかる。CASE 4の再付着点付近についても同様のことが言えるが, Fig. 4の流れのパターンに見られるように, 形状による影響が大きく含まれるものと考えられる。

4. 結 言

以上, 得られた結果を要約すると次の通りである。

- (1) 河床波模型クレスト直下において, 後流渦の発生, 成長, 崩壊の典型的プロセスを可視化観察より得た。それらにより, 最大に成長した段階での渦のスケールは河床波高と同程度になる事を確認した。崩壊においては渦度を保ったまま主流へ連行され乱れへ発展するものと思われる。
- (2) 再付着点付近において, 乱流境界層内の運動に見られる ejection と sweep に対応する流れのパターンがあることを見い出した。また, 後流渦の成長と ejection, 後流渦の崩壊と sweep との対応が考えられる。

Fig. 4 Flow patterns

Fig. 5 Mean velocity profiles

Fig. 6 Histogram of velocity (CASE 3)

Fig. 7 Histogram of velocity (CASE 4)

Fig.8 Relationship between turbulent intensities and Reynolds stress versus relative depth

(3) 再付着点付近において
流下方向, 鉛直方向の乱
流強度及びレイノルズ応
力は大きな値を示すこ
とがわかった。

今後, 流れのパラメーターを
変化させて実験を続ける予定である。

Fig.9 Conditionally averaged instantaneous u, v velocity profiles (CASE 3)

Fig.10 Conditionally averaged instantaneous u, v velocity profiles (CASE 4)

最後に本研究を行うに当り多大な協力を得た, 東北大学文部技官佐藤弘氏, 同
佐藤栄司氏, 当時学部学生菅原秀明氏に感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 田中博通, 岩崎敏夫; 可視化手法を用いた砂漣モデル上の流況と再付着点
に関する実験的研究, 第37回土木学会年次学術講演会講演概要集
- 2) Kim H.T., S.J.Kline, W.C.Reynolds; The production of turbulence near a smooth wall in a
turbulent boundary layer, J.Fluid Mech., vol.50, part1, [97], pp.133-160
- 3), 4) Grass A.J.; Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries,
J.Fluid Mech., vol.50, part2, [97], pp.233-255