

沙波附近紊流拟序结构特性初步研究

毛 野¹, 张志军¹, 袁新明², 刘 超²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098 2. 扬州大学水利与建筑工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要 在底部为定床沙波的循环水槽中采用流场综合分析法将流动显示与计算机图像处理相结合进行系统实验研究, 重点研究了紊流猝发形态和特性. 分析表明: 沙波床面对明渠紊流拟序结构的特性有重要影响. 水流在沙波坡顶分离, 沙波周围高于沙波顶部的流区为自由紊流区, 低于沙波顶部的流区为沙波紊流区. 在自由紊流区典型的剪切混合层也有显著的以喷射和清扫为主要特征的猝发现象. 在沙波紊流区的沙波迎水坡面上水流分离, 在背水坡附近产生漩涡. 自由紊流区与沙波紊流区之间的紊流拟序结构不同, 它们相互作用的结果产生了特有的泡漩现象. 沙波紊流区和自由紊流区的紊流拟序结构和它们的相互作用对可冲积河流的水流与泥沙运动有决定性作用.

关键词 沙波 明渠紊流 猝发现象 拟序结构 泡漩 漩涡

中图分类号 TV143+.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2002)05-0056-06

猝发现象是紊流拟序结构的重要组成部分. 试验表明^[1,2], 当流速大到一定程度时, 猝发现象必然发生. 沙波是天然河流常见床面形态. 沙纹和沙垄二者形状相似, 沙垄尺度大于沙纹. 为了深入研究冲积河流的水流和泥沙运动, 有必要深入研究床面形态为沙波的明渠水流中的猝发现象. 但至今对沙波附近紊流拟序结构的特性了解有限^[3~5].

1 试验安排

1.1 试验装置

有机玻璃循环水槽壁面光滑, 试验段长 130 cm, 宽 14.5 cm, 高 12 cm, 进口处最大水深为 10.5 cm. 试验段上游有水流整流器, 试验段下游变频调速电机转动轴流泵浆叶使水流循环如图 1 所示. 采用美国 TSI 公司制造的 PIV 粒子图像速度场仪和河海大学制造的氢气泡流场显示仪, 拍摄流场图像后进行计算和分析.

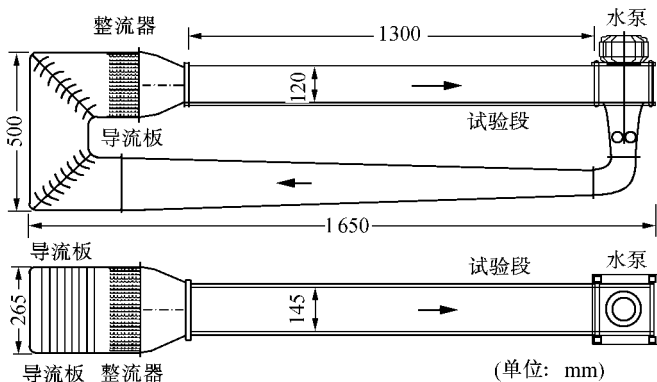


图 1 循环试验水槽示意图

Fig.1 Sketch of circulation

1.2 试验方案

沙纹和沙垄概化模型均为三角形,“沙纹单元”高度 h 为 5 mm,而“沙垄单元”高度 h 为 10 mm. 三角形底边长为波长 λ ,等于 40 mm 每组沙波取 5 个单元,模型长度计 20 cm. 迎水坡较缓,顶点投影将底边分为 3:1 两部分(图 2). 在试验段进口以下 95 cm 处进行测试,调整电机频率控制流速,以避免较大水面波动. 取水槽的中心纵断面距床面 25 mm 的点平均流速为断面平均流速 V . 表 1 为实验编号与参数,以 V 和水力半径 R 计算的雷诺数 Re 变化范围为 5 630 ~ 8 940.

表 1 系列试验编号与参数

Table 1 Main parameters in serial experiments

编号	模拟床面形态	电机频率/Hz	雷诺数 Re	佛汝德数 Fr
BRF10	沙纹	10	5 810	0.150
BRF12	沙纹	12	7 450	0.196
BRF14	沙纹	14	8 940	0.240
BDF10	沙垄	10	5 630	0.149
BDF12	沙垄	12	7 160	0.194
BDF14	沙垄	14	8 650	0.240

2 研究方法

从流场分析角度出发,采用流场综合分析法,以 PIV 粒子图像速度场仪为基础将流动显示与计算机图像处理相结合,综合分析系列照片和流速矢量场图以后重点进行局部分析计算. 分别将铂金细丝设置在沙波波峰顶部和底部重复试验以比较分析.

采用 PIV 粒子图像速度场仪的脉冲频闪片状激光照射流场并连续拍照,用相关分析法分析照片计算流场的流速矢量场图. TSI 公司的 PIV 仪控制激光片光源的厚度约为 1 mm,可有效地减少片光源厚度内的图像重叠现象. 机携照相机的最大有效采集范围为 80 mm × 80 mm,采集速度为 15 张/s,可连续采集 1 000 张有时间标记的照片. 氢气泡流场显示仪产生直径仅 0.1 mm 的氢气泡,氢气泡“云团”可很好地显示流场运动状态,故拍摄的系列照片可用于直观分析和相关分析计算. 由相关分析得出的流速矢量场图精度较高.

3 成果分析

3.1 流态分区

前人研究^[6]表明,水流在沙波顶部 A 点分离后在沙波下游背水坡形成分离漩涡,在下一个沙波的迎水坡面上 B 点会产生二次分离,分离区长度 L 与沙波波长 λ 之比 L/λ 随水流的佛汝德数 Fr 增大而减小,当 $Fr > 0.2$ 时 $L/\lambda \approx 0.32$. 通常认为分离漩涡以及 B 点的二次分离均为比较稳定的水流现象.

对系列照片的分析表明,沙波附近的流区可大致分为沙波紊流区和自由紊流区上下两部分(参见图 2 (a)). 顶部 A 点以上流区为自由紊流区, A 点以下流区为水流沙波紊流区. 二者流态不同,并无明确界线,其交界处正是关注重点.

3.2 自由紊流区分析

3.2.1 剪切混合层的发展

沿着沙波表面流动的水流受底部影响在近底处形成边界层,流动为边界层紊流. 水流越过顶点后沙波表面对水流运动的直接影响不复存在,流动成为自由紊流. 作为底部初始流速为零的剪切混合层流动,其横向流速远小于纵向流速,由于没有边界层的约束而很不稳定.

3.2.2 自由紊流的猝发现象

除了壁面紊流或边界层紊流有紊动猝发现象^[1~5],沙波系列试验表明,在沙波的自由紊流区也会发生紊动猝发现象. 图 3(a)显示了试验中所发生的“喷射”;图 3(b)表明随后开始了的“清扫”. 图 4(a)显示了试验中所发生的“喷射”,图 4(b)则为“清扫”. 由对应的流速矢量场分析图可见,喷射处的流速矢明显地不同于剪切混合层.

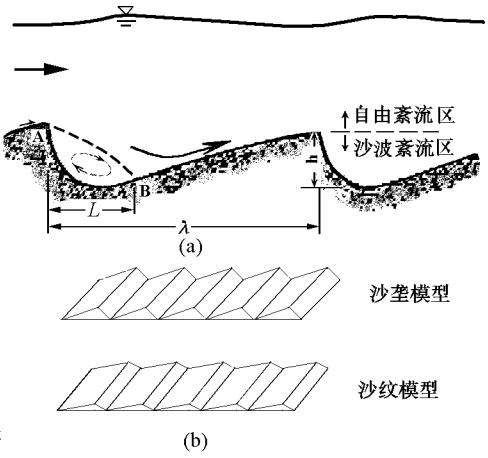


图 2 沙波流态和沙垄、沙纹模型
Fig.2 Flow pattern near sand waves and models of dunes and ripples

3.2.3 剪切混合层与猝发现象之间的转化

剪切混合层可以转化为猝发现象.图 5 是 BDF10 试验的连续照片,照片间隔 1/15 s.由照片可见沙波顶部下游确有剪切混合层,剪切混合层失稳演变成马蹄涡,然后马蹄涡的抬升变成“猝发”;“清扫”后沙波顶部下游又出现了剪切混合层.

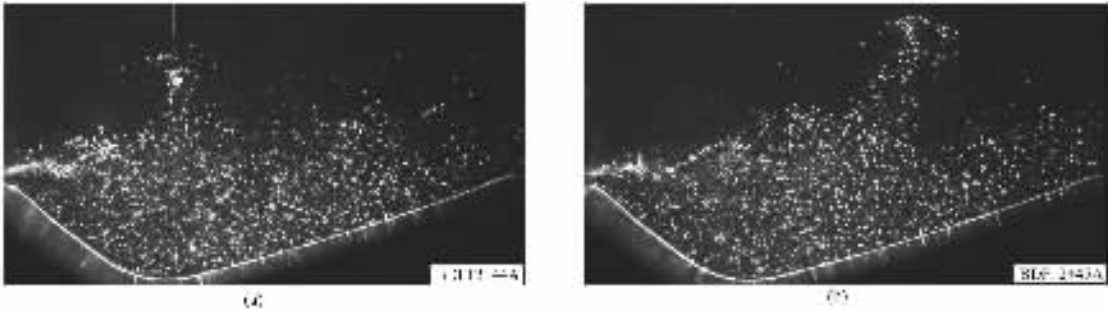


图 3 BDF12 + 44A,45A 喷射与清扫
Fig.3 Ejection and sweeping for BDF12 + 44A,45A

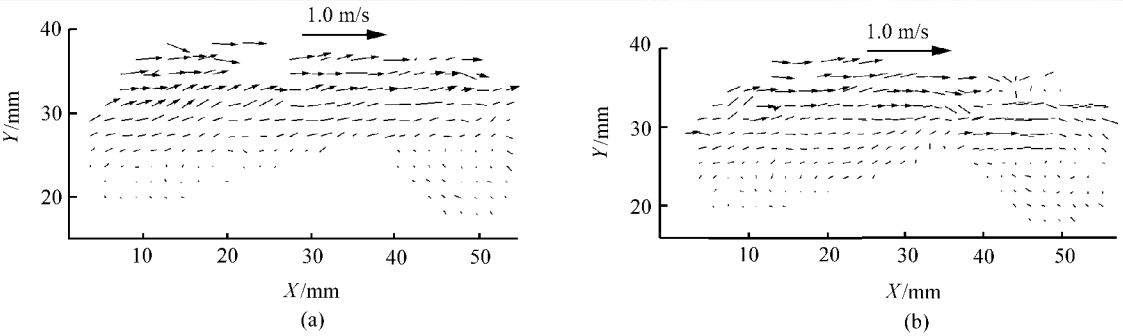


图 4 BDF14 + 45A,46A 喷射与清扫流速矢量场分析

Fig.4 Ejection and sweeping-induced flow velocity field for BDF14 + 45A,46A

3.3 沙波紊流区分析

3.3.1 分离涡的变化

沙波背水面附近顺时针方向的分离涡对沙波紊流区的流态影响很大,分离涡的强度和尺度呈周期性变化.对 BDF10 系列的统计分析知变化的平均周期为 0.46 s,在 2/3 周期里分离涡较强,在其他时间分离涡弱至可略.图 5 为典型周期,图 5(b),(c),(e)明显地有分离涡,其水平尺度为 $\lambda/2$,垂向尺度为 h .图 5(a),(d)几乎没有分离涡,它们与明显有分离涡的图相间说明了沙波紊流区水流变化非常剧烈.矢量分析还表明,谷底朝背水坡的流速很小,若沙波为可冲刷表面则逆主流方向的泥沙运动较弱.

3.3.2 水流二次分离

二次分离点的位置随着分离涡变化.图 6 为图 5 的二次分离点相对位置分析结果,可见 L/λ 大致稳定在 0.7~0.85 之间.对二次分离点附近流态的分析表明,常与分离涡相伴的现象是分离点下游水流沿着迎水坡面流动(图 7(a)),水流推动泥沙沿坡面向顶部运移.由于水流二次分离现象不断变化,沿坡面向顶部运移的泥沙运动呈间歇变化状态.图 7(b)表明,分离涡的膨胀隆起使迎水坡面水流不断减少.

3.3.3 泡漩的产生与特征

由图 7(c)可见,当分离涡再次收缩时有射流从二次分离点附近直射水面,形成泡漩. 由矢量分析结果可见二次分离点、分离涡以及泡漩射流矢量图(8(a)). 图 8(b)为流速等值线,清楚地显示了泡漩特征,长箭头为泡漩射线路径. 由图 9 可见,边界上二次分离点附近流体向外不断加速,在很短距离之内喷射流体即获得较大增长. 由于位置抬升和流速加大,相应地流体压强降低. 虽然目前尚难直接计算沿泡漩射线的流体压强,但据试验观测^[4],泡漩可以将泥沙等散粒体由河底喷射到河流表面. 可见,泡漩射流通道可以形成负压,使泥沙悬浮运动.

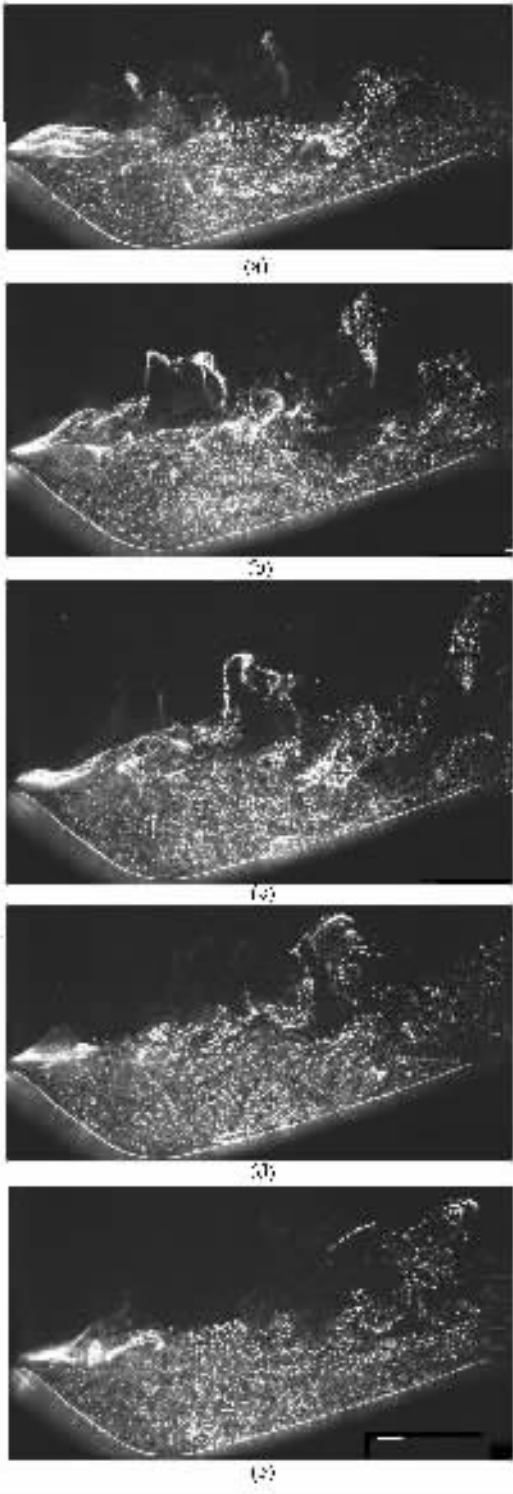


图 5 BDF10 + 01A ~ 05A 冲波附近流态的变化
Fig.5 Variation of flow pattern
near sand waves for BDF10 + 01A ~ 05A

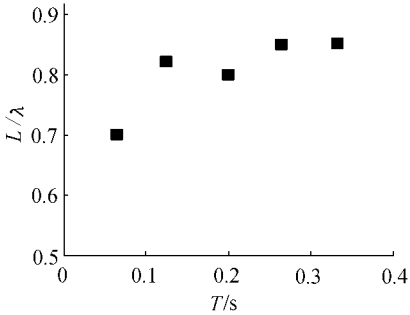


图 6 二次分离点相对位置示意图
Fig.6 Relative position of
the second separation point

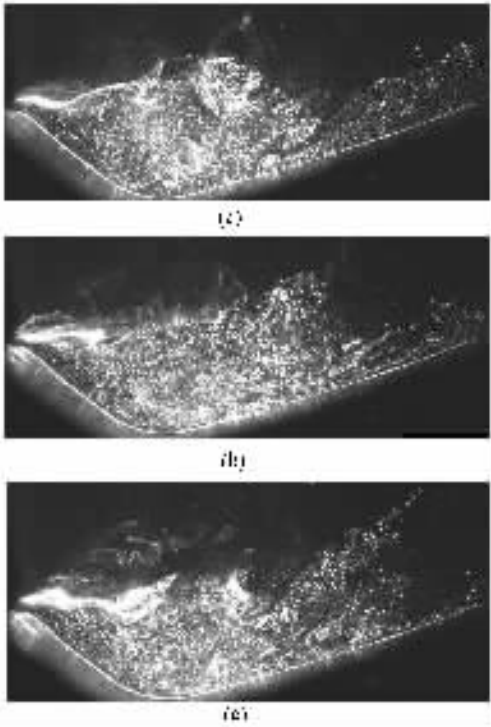


图 7 水流分离与泡漩的产生
Fig.7 Flow separation and Kolk-boil generation

3.4 沙波紊流区与自由紊流区的相互作用

试验证明,自由紊流区与沙波紊流区二者拟序结构相互影响与作用,结果如下:

a. 在基本不受干扰的情况下剪切混合层本身自主发展. 图 10(a) 显示了上无猝发喷射且下无分离涡的情况下剪切混合层的发展情况.

b. 没有分离涡或分离涡较弱时剪切混合层演变成猝发喷射(图 3(a),图 5(a),图 5(e)).

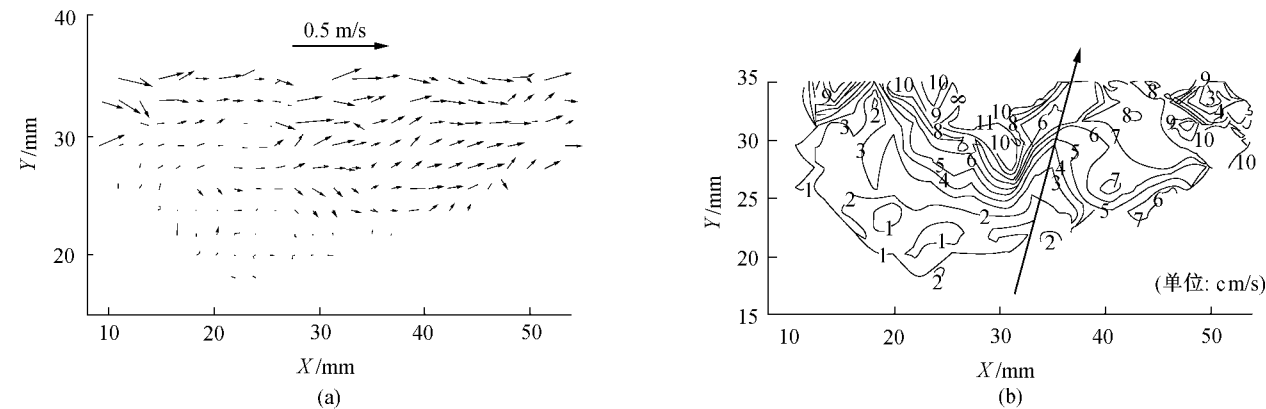


图 8 BDF10 + 33 流速矢量场及流速等值线

Fig.8 Velocity vector field and velocity contour for BDF10 + 33

c. 在剪切混合层未演变成猝发喷射的情况下,如果沙波紊流区内的分离涡强劲,则剪切混合层与分离涡相切后在二次分离点形成贯通射向水面的泡漩(图 8(c)).

d. 猝发喷射与泡漩共生. 由图 10 可见剪切混合层先演变成猝发喷射,但是分离涡的强劲发育很快导致了泡漩的产生.

4 结 语

在循环水槽内,利用 PIV 粒子图像速度场仪将流动显示与计算机图像处理相结合研究了沙波床面对明渠紊流拟序结构特性的影响. 分析表明,沙波床面对明渠紊流拟序结构特性有重要影响,周围沙波水流可分为沙波紊流区和自由紊流区,二者的紊流拟序结构特性不同. 系列照片显示,当床面为沙波时,自由紊流区水流仍然有以喷射和清扫为主要特征的猝发过程. 沙波紊流区和自由紊流区之间的拟序结构的相互作用可产生泡漩水流现象.

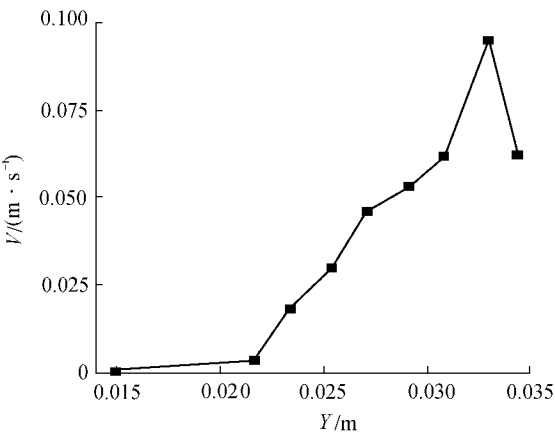


图 9 BDF + 33 泡漩射线流速分布

Fig.9 Velocity distribution along Kolk-boil ejection for BDF + 33

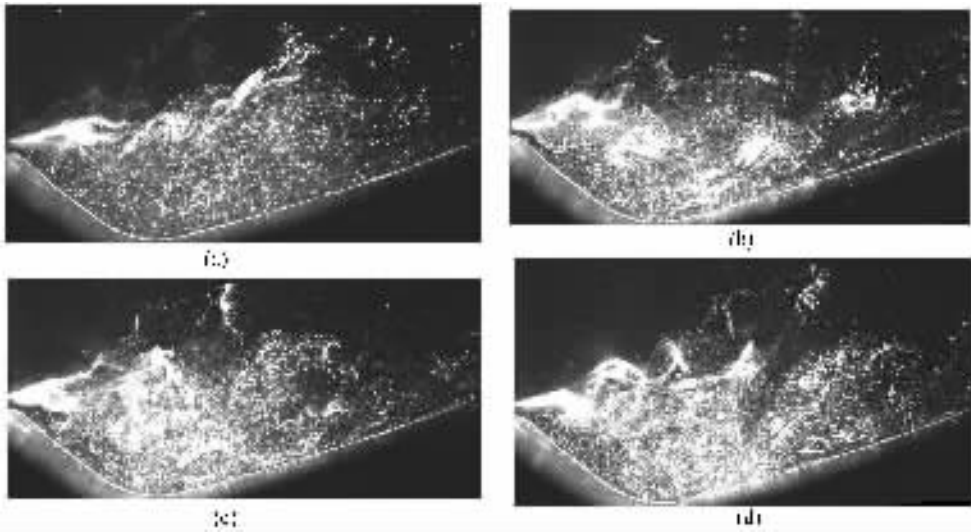


图 10 剪切混合、猝发喷射与泡漩

Fig.10 Development of free shear mixing layer, bursting ejection, and Kolk-boils

参考文献：

- [1] Kline S J, Reynolds W C, Schraub F A, et al. The structure of turbulent boundary layers[J]. J Fluid Mech, 1967, 30 : 741 ~ 773.
- [2] 毛野,张志军,徐锡荣. 明渠紊流拟序结构及其与泥沙运动相互作用的研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版),1999,27(4) : 24 ~ 29.
- [3] Muller A, Gyr A. On the vortex formation in the mixing layer behind dunes[J]. J of Hydraulic Research, 1986, 24 : 359 ~ 375.
- [4] Nezu I, Nakagawa H. Turbulence in open-channel flow[M]. Amsterdam : Balkema A A, 1993. 262.
- [5] Clifford N J, French J R, Hardisty J. Turbulence : perspective on flow and sediment transport[M]. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 1993. 360.
- [6] Yalin M S. Mechanics of sediment transport[M]. 2nd edition. Oxford : Pergamon Press, 1977. 220.

Characteristics of turbulent coherent structures over sastrugi in open channels

MAO Ye¹, ZHANG Zhi-jun¹, YUAN Xin-ming², LIU Chao²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;

2. College of Hydraulic and Civil Engineering, Yangzhou Univ., Yangzhou 225009, China)

Abstract : Based on the synthetic analysis method of flow fields and the combination of flow visualization with computer-based image analysis, a series of experimental study is carried out in a circular open flume to simulate dunes and ripples under the variation of flow velocity, with the focus placed on the effects of the bed form of the open flume on the patterns and characteristics of turbulent bursting. It is demonstrated that the bed form of the open flume has significant effects on the characteristics of turbulent coherent structures. Owing to the flow separation at the crest of sand waves, the flow field can be divided into a free turbulent area above the crest and a trough turbulent area below the crest. In the free turbulent area, there are not only shear mixing layers, but also a typical turbulent bursting phenomenon characterized by ejection and sweeping. In the trough turbulent area, the flow may be separated at the upstream slope, and vortexes may occur near the downstream slope. The turbulent coherent structures in the free turbulent area and the trough turbulent area are quite different, and their interaction may result in the so-called special Kolk-boil phenomenon. The analysis of the experimental results shows that the turbulent coherent structures in the free turbulent area and the trough turbulent area and their interaction play an important role in turbulent flow and sediment movement in alluvial rivers.

Key words : sand wave ; turbulent flow in open channel ; bursting phenomenon ; coherent structure ; Kolk-boil ; vortex