

不同绕流结构体对河道水流的影响

张 婧¹,王 东²,何岸霞¹,周珏西¹,杨 阳³

(1. 西华大学能源与动力工程学院,四川 成都 610039;
2. 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院,四川 成都 610041;
3. 交通运输部天津水运工程科学研究所工程泥沙交通运输行业重点实验室,天津 300456)

摘要:分别采用一维方形丁坝、二维梯形丁坝和三维堆积体概化模型,在同一水流条件下进行水槽试验,研究不同维度绕流结构体对河道水面线和三维时均流速的影响。试验结果表明:①在进占宽度比完全相同的情况下,梯形丁坝由于存在第一回流区,导致实际阻流面积最大,对上游阻流最强烈,方形丁坝次之,堆积体最小;②当阻流面积比(阻流流量比)相同时,方形丁坝在断面束窄河段的纵向流速加速能力比梯形丁坝强,水流横向偏转的幅度也更大,但梯形丁坝垂向流速比方形丁坝更大一些;③当沿水流方向长度相同时,堆积体由于最大截面面积较小,纵向、横向和垂向流速均小于丁坝。由此可见,常用于区分绕流结构体阻流特性的指标,如进占宽度比、阻流面积比和阻流流量比等,并不能全面表达结构体对流场的影响。

关键词:堆积体;丁坝;绕流流场;水面线;三维流速

中图分类号:TV853 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)06-0026-06

Influence of different structures on channel flows//ZHANG Jing¹, WANG Dong², HE Anxia¹, ZHOU Juexi¹, YANG Yang³(1. School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. Sichuan Provincial Transport Department Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Chengdu 610041, China; 3. Key Laboratory of Engineering Sediment, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: 1D rectangle spur dike, 2D trapezoid spur dike and 3D deposit body model were used to investigate the influence of structures with different dimensions on water surface profiles and 3D time-mean velocities under the same flow condition by flume experiments. The experimental results show that, ① for the same occupied width ratio of the structures, the actual flow resistance area induced by the trapezoid dike is the largest and it has the most intensive resistance impact on the upstream flow due to the existence of the first recirculation zone. The rectangle spur dike and deposit body have a medium and least flow resistance impact, respectively. ② With the same flow resistance area ratio(flow resistance discharge ratio), the rectangle dike has a better ability to accelerate the flow along the channel near the narrowed cross section and detour the flow to the bank than the trapezoid dike, but the flow around the trapezoid dike has a higher vertical velocity. ③ When the length of the structures keeps the same along the flow direction, the longitudinal, horizontal and vertical velocities around the deposit body are lower than that around the rectangle dike due to its smaller maximum cross-sectional area. As a result, the factors commonly applied to evaluate flow resistance characteristics, such as the occupied width ratio, the flow resistance area ratio and the flow resistance discharge ratio, cannot entirely represent the influence of the structures on river flows.

Key words: deposit body; spur dike; flow field around a body; water surface profile; 3D flow velocity

2008 年汶川地震过后,震区河流泥沙补给增加,沿河两岸堆积体林立。2010 年清平、映秀、洪口等地泥石流均表明,在今后一段时间内,地震造成的松散堆积体在适宜的触发条件下,仍将造成大量的泥沙侧向汇入河道形成堆积体^[1],危及河道行洪及沿河居民生命财产安全。

目前国内外关于堆积体的研究主要集中在成因和稳定性问题上^[2-3],少量学者开展了关于其与河道

水流相互作用的研究。郭志学等^[4]研究了大型堆积体在不同比降河道上引起的水位和水面附加比降的变化,发现急、缓流条件下堆积体阻水特性在物理机制上有差异。郭志学等^[5]和刘家富等^[6]分别分析了堆积体影响下陡坡和缓坡河道上水流流速的二维分布特性。张婧等^[7]研究了堆积体对陡、缓坡河道流速横向分布不均匀性的影响,结果表明缓坡河道受到的影响比陡坡河道更为明显。苏杨中等^[8]

基金项目:国家自然科学基金青年基金(51409224, 51509118)

作者简介:张婧(1986—),女,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: phyllis_zj@yeah.net

通过水槽试验得出堆积体引起河道上游的壅水高度经验公式,并发现堆积体阻水率越大,上游的相对壅水高度越大,且水面附加比降最大值越靠近下游。

丁坝作为常用的河道整治结构物对流场及河床演变有显著的影响^[9-10],其绕流研究一直是比较经典的工程问题,从时均流场^[11]到紊动特性^[12]都有许多成果。丁坝、桥台在河道中引起的绕流^[13-14]及局部冲刷^[15-16]的现象与堆积体有一定的相似性。但前者一般相对河道尺度较小,宽长比较大;后者形态上具有三维特性,对水流的束窄作用自下而上逐渐减弱,且相对河道尺度变化范围大,体型较大者甚至可以截断河流^[17]。在堆积体试验研究中,运用丁坝、桥台等建立的最大冲深公式计算堆积体河道的冲坑时,由于水流结构差异和公式适用范围的限制,计算结果普遍产生较大误差^[18]。

本文通过将丁坝和堆积体多种概化模型在同一水流条件下进行水槽试验,分析不同形态、尺度的结构物对河道流场产生的不同影响,从而探讨丁坝与堆积体对流场影响的异同,为堆积体河道河床演变的研究打下基础。

1 试验概况

1.1 试验布置

试验在四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室泥沙实验厅进行。试验水槽由两侧钢化玻璃壁及底部光滑水泥板组成,底部宽 0.5 m,高度 0.42 m。试验段长 16 m,进出口段的长度各为 1 m,水槽底部坡降为 0.1%,试验采用的流量为 31.9 L/s。由循环供水系统提供试验用水,阀门控制来水量的大小,薄壁堰出口设有静水池,静水池上设有压水排,使水流平顺。水槽出口处设有尾水挡板,通过调整挡板的坡度来控制水深。

试验测量断面及测线布置如图 1 所示,从上游到下游一共布置了 19 个测量断面。每个断面的横向上布置了 4~7 条测线,水位采用武汉大学水沙科学实验室研发的 LH-1 自动水位仪进行测量,流速采用激光测速仪 PIV 测量。

xOy 平面坐标如图 1 所示,坐标原点在 9 号断面与水槽左侧壁的交点处。定义纵向流速 u 与水流一致时为正;横向流速 v 指向结构物一侧时为正;垂

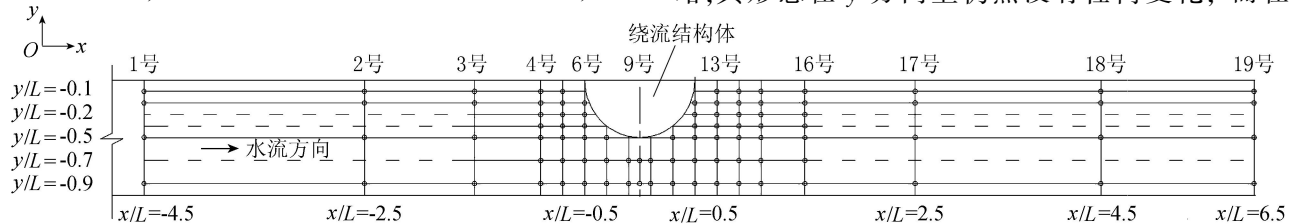


图 1 试验测量布置示意图

向(z 方向)流速 w 指向床面时为正。文中流速均采用相对流速,如纵向相对流速表示为 u/u_0 , u_0 为无任何绕流结构体时均匀流流速。以无量纲参数 x/L 表示断面相对位置, y/L 表示测点相对位置,其中 L 为绕流结构体沿水流方向的长度, $L=50\text{ cm}$ 。

1.2 绕流结构模型

本次试验共采用 3 种形态的概化模型作为水槽试验的绕流结构体,分别是方形丁坝、梯形丁坝和堆积体(见图 2)。如图 2(a)和图 2(b)所示,该种形态的方形丁坝是以往丁坝研究中采用较多的概化模型。丁坝沿程方向的尺寸远小于沿横向上的尺寸,在概化时,甚至用薄壁板替代,因此认为此类丁坝在 x 方向的尺寸可被忽略。同时,丁坝形态在 y, z 方向上没有任何变化,因此直立方形丁坝可被看作是一维的绕流结构体。

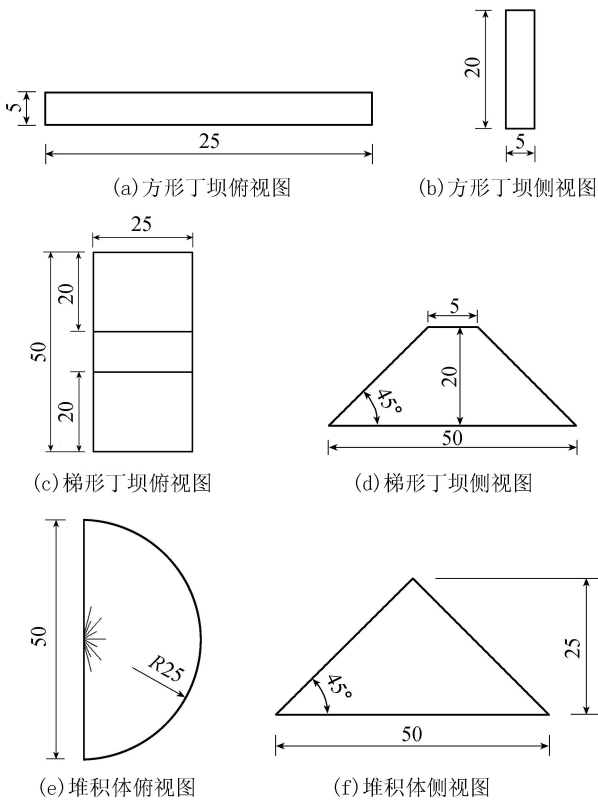


图 2 绕流结构模型(单位:cm)

如图 2(c)和图 2(d)所示,梯形丁坝上下游采用坡面,沿程宽度不变,且底部沿水流方向长度为 50 cm。此时,丁坝沿程(x 方向)上的长度不能被忽略,其形态在 y 方向上仍然没有任何变化,而在

z 方向有变化,因此梯形丁坝可被看作是二维的绕流结构体。

天然形成的堆积体可概化成如图 2(e) 和图 2(f) 所示的半圆锥体,平面形态为直径 50 cm 的半圆,立视图为等腰直角三角形。可以发现,堆积体形态在 x 、 y 和 z 三个方向上都有变化,因此可被看作是三维的绕流结构体。

2 试验结果分析

描述绕流结构体阻流特性的常用指标有进占宽度比、阻流面积比和阻流流量比。如图 3 所示, ACE 为绕流结构体; H_0 为无结构体时河道的正常水深; 结构体进占宽度比指 CE 段长度与 CF 段长度之比; 阻流面积比是 $BCED$ 区域的面积与正常水深以下过流面积之比; 阻流流量比是无结构体时,通过 $BCED$ 区域面积的流量与断面总流量之比。

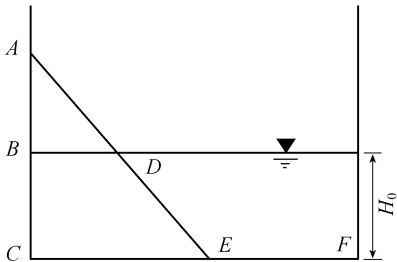


图 3 最大压缩断面示意图

如表 1 所示,从尺寸上看,如果在纵向上无限压缩,梯形丁坝就成为了方形丁坝;而堆积体的不同在于最大截面面积较小。另外,从形态上看,堆积体在上下游的边界都是圆弧,边界是逐渐变化的。对比三者可以发现,梯形丁坝与方形丁坝、堆积体都能进行结构上的过渡变化,因此下文以梯形丁坝的试验为基本参照,分析不同结构体对附近流场的影响。

表 1 不同绕流结构体几何指标值

结构体	进占宽度比	最大截面面积/cm ²	长度/cm
梯形丁坝	0.5	500.0	50
方形丁坝	0.5	500.0	5
堆积体	0.5	312.5	50

2.1 水面线分析

图 4 为当 $|y/L| = 0.5$ 时,不同绕流结构体影响下,相对水位 z/H_0 在沿程上的分布曲线。从图 4 可以看出,结构体的存在使上游水位抬升,在最大截面下游出现水跃现象,并在一定距离之后恢复到天然水位。如图 5(a) 所示,梯形丁坝上游及阻流段的相对水深等值线大致与水流方向垂直,说明水位横比降不大。

如图 4 所示,相比较梯形丁坝,方形丁坝顺水流方向的尺度大大减少,上游的壅水作用减弱,下游的水跃段距离明显缩减,但是水跌的纵向比降更加陡

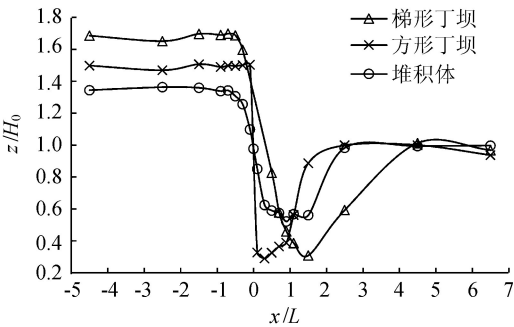


图 4 不同绕流结构体影响下水位沿程变化曲线($|y/L| = 0.5$)

峭,这是因为下游发生水跃的起始点向上游移动,图 5(b) 中密集的等值线带体现了这一变化。从图 5(b) 可见,方形丁坝附近跌水水流的等值线密集带在水槽右侧偏向下游,说明存在较明显的水流横向比降。纵向和横向比降相叠合形成倾斜水面。

相比较梯形丁坝,堆积体的最大截面面积减小,同时上下游边界变化更接近流线形态。从图 4 可以发现,与梯形丁坝相比,尽管沿水流方向尺度相同,但堆积体上游的壅水作用大幅降低(甚至低于方形丁坝),但水跌时的水面纵向比降相当。从图 5(c) 可见,堆积体附近的水深等值线也在水槽右侧偏向下游,说明同样存在由纵、横向水面比降形成的倾斜水面。

总的来说,从水位上来看,梯形丁坝的阻流作用最强,方形丁坝次之,堆积体最小。但是方形丁坝在沿水流方向的单位距离内水位变化最大,也就是说水跌和水跃现象最剧烈。

2.2 三维流速分析

2.2.1 纵向流速沿程变化

图 6 为 $|y/L| = 0.7$ 时,不同绕流结构体影响下纵向相对流速 u/u_0 在近底床面上 ($z = 0.5$ cm) 沿程分布曲线。在试验过程中发现,梯形丁坝存在两个回流区:第一回流区在 $x/L = -0.05 \sim 0.5$ 范围内,第二回流区在丁坝下游 $x/L > 0.5$ 处。第一回流区紧贴丁坝侧面,进一步缩减了主流流动的面积,实际上变相增大了阻流的截面面积,因此在图 4 水位沿程曲线上表现为对上游的壅水更强烈。然而,第一回流区的存在也加剧了高低速水流之间的剪切应力,一部分动能以热能形式被消耗。因此,梯形丁坝的主流纵向流速与其他两种结构体相比相差不大。结合图 7 横向流速的沿程分布曲线可以看出图 6 中纵向流速减小的位置,恰好横向流速增加,说明此处纵向流速的减小是水流偏转导致的纵向分量减小。

相比较梯形丁坝,方形丁坝纵向流速沿程分布曲线的斜率更大,即纵向流速在单位距离里增加的速度更多,说明水流势能转换为动能的效率更高,这与梯形丁坝第一回流区对水流的能量消耗有关。

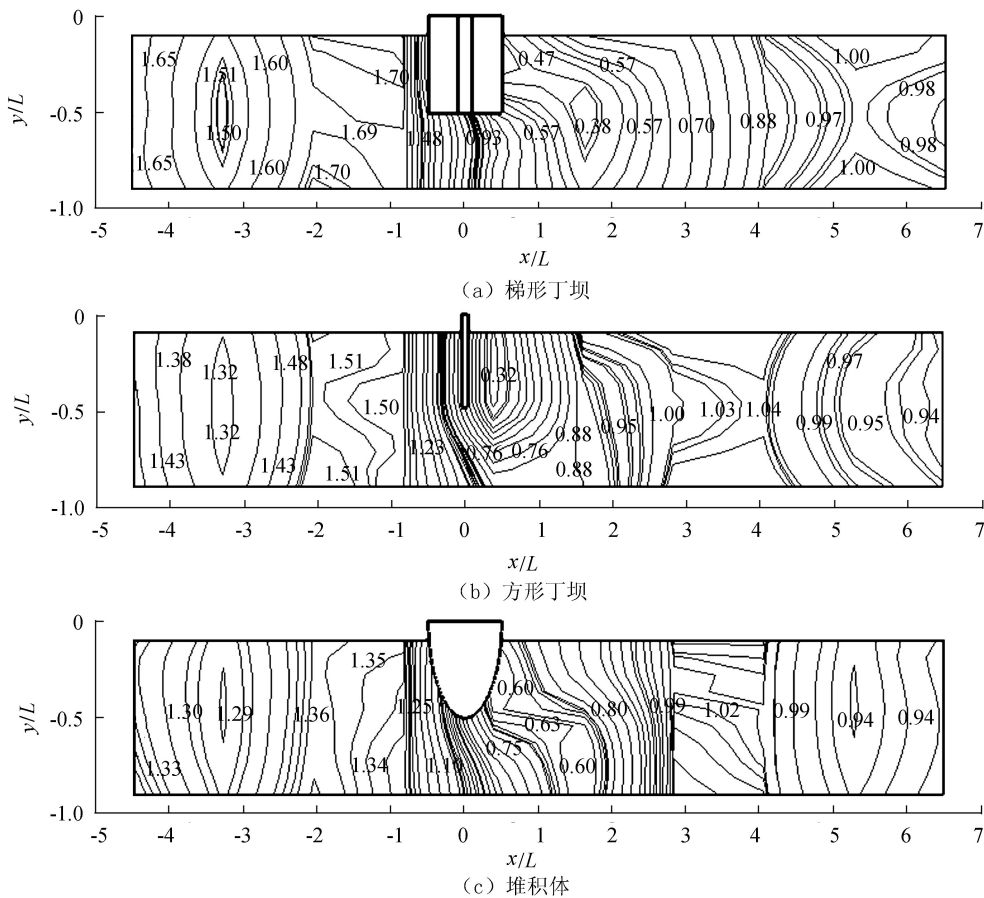


图5 不同绕流结构体影响下相对水深等值线分布

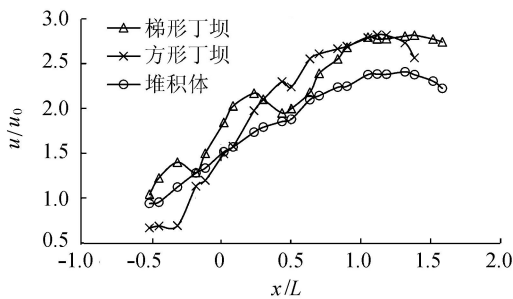


图6 不同绕流结构体影响下纵向相对流速沿程分布曲线 ($|y/L| = 0.7, z = 0.5 \text{ cm}$)

对于堆积体,从图6可以看出水流从进入堆积体段开始加速,直至过水断面面积恢复后,由于水流惯性继续加速至最大值,在开始水跃后,流速回落。相比较梯形丁坝,堆积体由于最大截面面积较小,对水流的束窄作用不够强烈,纵向流速整体低于梯形丁坝,同时沿程分布曲线的斜率更小,即水流的纵向流速在单位距离增加的速度更小。

从纵向流速的沿程分布来说,方形丁坝的加速作用最强,梯形丁坝由于存在第一回流区而次之,堆积体最小。但从能量损失来说,正是由于梯形丁坝侧面的回流区导致实际阻流面积更大,产生的局部阻力是最大的。

2.2.2 横向流速沿程变化

图7为 $|y/L| = 0.7$ 时,不同绕流结构体影响

下横向相对流速 v/u_0 在近底床面上($z = 0.5 \text{ cm}$)沿程分布曲线。梯形丁坝横向流速沿程曲线呈现“W”形态,说明存在两次向右岸的水流强烈偏转。在上游渐变段的过渡后,水流向右岸的横向速度逐渐增加,第一次偏转的峰值出现在最大截面的位置,这是由于边界变化导致的。由于 $x/L > 0.05$ 时,丁坝阻流面积开始逐渐减小,第一回流区的低速水流形成扩散带,且扩散带宽度沿程有一定增长,当宽度超过回流区的最大宽度时,对右侧的主流再次产生挤压,形成向右岸的横向流速峰值。当 $x/L = 0.5$ 时,过水面积完全恢复,右侧主流也逐渐向左岸扩散,因此横向速度沿程不断增加。

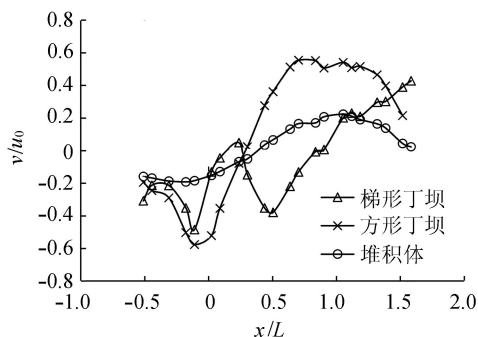


图7 不同绕流结构体影响下横向相对流速沿程分布曲线 ($|y/L| = 0.7, z = 0.5 \text{ cm}$)

相比较梯形丁坝,纵向长度可被忽略的方形丁坝仅存在一个下游的回流区,同样也是在最大截面的位置流速达到偏转峰值,但是由于没有上游的截面渐变段,横向速度要更大一些。当 $x/L=0.05$ 时,过水面积就完全恢复,主流在惯性作用下继续收缩达到最小宽度后开始向左岸扩散,横向速度大于零并逐渐增大。偏转达到最大之后,随着主流扩散越充分,横向速度逐渐减小。

相比较丁坝,堆积体不仅最大截面面积减小,同时上下游边界是渐变的,因此其水流上下游偏转的幅度较小,即横向速度较小。堆积体指向右岸的横向速度峰值同样发生在最大截面处,随着过水面积的恢复,水流逐渐向左岸偏转,并达到速度峰值,随后逐渐恢复到天然情况。

从横向速度的沿程分布来看,方形丁坝发生的水流横向偏转幅度最大,梯形丁坝次之,堆积体最小。但是,梯形丁坝由于形态的特殊性,附近流场水流发生多次来回偏转,水流紊动强烈。

2.2.3 垂向流速沿程变化

图8为 $|y/L|=0.7$ 时,不同绕流结构体影响下垂向相对流速 w/u_0 在 $z/H_0=0.28$ 流层高度上的沿程分布曲线。在 $x/L=-0.5\sim 0.3$ 范围内,不同结构体形成的绕流水流的垂向流速背离床面,垂直向上,说明在该流层上水流有离开床面向上层流动的现象。垂向流速沿程不断增大,并且分布曲线的斜率不断增加,形成向上凸型曲线。3种结构体相比较,梯形丁坝垂向流速沿程增长的曲线斜率最大,达到的峰值也远远超过方形丁坝和堆积体,方形丁坝次之,堆积体最小。

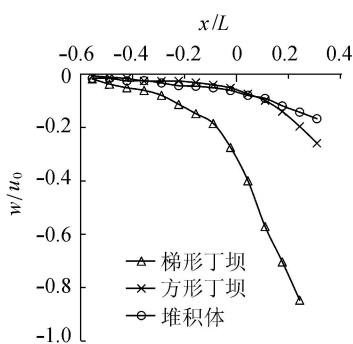


图8 不同绕流结构体影响下垂向相对流速沿程分布曲线 ($z/H_0=0.28$, $|y/L|=0.7$)

3 结论

本文根据绕流结构体的尺寸变化,定义不同维度的结构体,并通过对一维方形丁坝、二维梯形丁坝和三维堆积体进行同一水流条件下的水槽试验,分析了不同维度结构体对河道水面线和三维时均流场

的影响。结果表明:梯形丁坝相比较方形丁坝加长了沿水流方向的尺度,不仅增加了水跃的距离,而且改变了水流流态,出现两个回流区,且在结构体侧面的水流出现多次横向折返,也加剧了流层之间水流的掺混,使得局部阻力增加。堆积体相比较梯形丁坝在垂向上沿水深的形态尺度变化,对水流的阻流影响明显下降,上游壅水作用降低,流速变化幅度减小,且沿程变化率降低。这是因为堆积体的阻流面积减小,形态也更接近流线。

以往通常采用进占宽度比、阻流面积比和阻流流量比等指标来区分结构体对流场的阻流作用,然而本文发现,在结构体形态不相同,以上指标均不能全面表达结构体对流场的影响。因此,仍有必要对三维形态的堆积体作用下流场开展研究。从水位和三维流速的沿程分布来看,方形丁坝和堆积体所遵循的变化规律一致。但是,考虑到在过去的研究^[19]中发现,堆积体由于形态的三维特点,在不同高度的水流流层存在上下反向流动的水体。因此,还需要进一步详细开展堆积体与丁坝之间绕流流场的比较研究。

参考文献:

- [1] 谢洪, 钟敦伦, 矫震, 等. 2008年汶川地震重灾区的泥石流[J]. 山地学报, 2009, 27(4): 501-509. (XIE Hong, ZHONG Dunlun, JIAO Zhen, et al. Debris flow in Wenchuan quakehit area in 2008[J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(4): 501-509. (in Chinese))
- [2] 胥勤勉, 杨达源, 葛兆帅, 等. 金沙江金坪子堆积体成因的初步研究[J]. 山地学报, 2006, 24(4): 403-409. (XU Qinqian, YANG Dayuan, GE Zhaoshuai, et al. The preliminary study on the origin of the diamicton in Jinpingzi in Jinsha River[J]. Journal of Mountain Science, 2006, 24(4): 403-409. (in Chinese))
- [3] 向先超, 涂鹏飞. 三峡库区某沟内人工弃土堆积体稳定性研究[J]. 中国水土保持, 2009, 30(11): 35-36. (XIANG Xianchao, TU Pengfei. Study on the stability of the deposits caused by discarded soil in Three Gorges reservoir[J]. Journal of Water and Soil Conservation of China, 2009, 30(11): 35-36. (in Chinese))
- [4] 郭志学, 苏杨中, 彭清娥, 等. 堆积体对不同比降河流壅水影响研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(5): 13-18. (GUO Zhixue, SU Yangzhong, PENG Qing'e, et al. Study on the influence of water block caused by congeries at the bank of river with different stream gradient[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(5): 13-18. (in Chinese))
- [5] 郭志学, 彭清娥, 汤雷, 等. 堆积体作用下陡坡河道流速沿程及横向分布规律[J]. 水利水运工程学报, 2011, 33(4): 27-31. (GUO Zhixue, PENG Qing'e, TANG Lei, et al. Streamwise and lateral velocity distribution of steep river under the action of deposit body[J]. Hydro-Science and Engineering, 2011, 33(4): 27-31. (in Chinese))

- Chinese))
- [6] 刘家富, 彭清娥, 郭志学, 等. 堆积体对河道流速分布的影响研究[J]. 水利水电技术, 2011, 42(11): 38-41. (LIU Jiafu, PENG Qing'e, GUO Zhixue, et al. Study on impact from deposit on distribution of channel flow velocity [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(11): 38-41. (in Chinese))
- [7] 张婧, 王东, 施浩然, 等. 堆积体对明渠河道流速断面分布影响试验研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(2): 68-72. (ZHANG Jing, WANG Dong, SHI Haoran, et al. Experimental study on the influence of the deposit on the lateral velocity distribution[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(2): 68-72. (in Chinese))
- [8] 苏杨中, 郭志学, 彭清娥, 等. 堆积体作用下的河道壅水计算[J]. 人民黄河, 2012, 34(8): 12-14. (SU Yangzhong, GUO Zhixue, PENG Qing'e, et al. Calculation of backwater effect caused by accumulation body[J]. Yellow River, 2012, 34(8): 12-14.
- [9] 田世民, 张防修, 刘香君, 等. 对口丁坝两岸整治对黄河下游河道冲淤的影响[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(6): 9-13. (TIAN Shimin, ZHANG Fangxiu, LIU Xiangjun, et al. Impacts of counterpart spur dikes on river channel erosion and deposition in Lower Yellow River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(6): 9-13. (in Chinese))
- [10] 张凯, 侍克斌, 李玉建, 等. 水力插板透水丁坝坝头冲刷坑深度模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(6): 90-94. (ZHANG Kai, SHI Kebin, LI Yujian, et al. Model test of scour depth at jetty head of hydraulic flashboard permeable spur dike[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(6): 90-94. (in Chinese))
- [11] 程年生, 李昌华. 有边坡丁坝回流试验研究[J]. 水利水运科学研究, 1991, 13(2): 123-132. (CHENG Niansheng, LI Changhua. Experimental study on flow around a spur-dike with side-slope[J]. Journal of Hydro-Science Research, 1991, 13(2): 123-132. (in Chinese))
- [12] DUAN J G. Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 135(10): 803-811.
- [13] SARKAR A, RATHA D. Flow around submerged structures subjected to shallow submergence over plane bed[J]. Journal of Fluids and Structures, 2014, 44: 166-181.
- [14] KUHNLE R A, ALONSO C V. Flow near a model spur dike with a fixed scoured bed[J]. International Journal of Sediment Research, 2013, 28(3): 349-357.
- [15] DEY S, BARBHUIYA A K. Clear-water scour at abutments in thinly armored beds [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(7): 622-634.
- [16] GHODSIAN M, VAGHEFI M. Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T-shape spur dike in a 90° bend[J]. International Journal of Sediment Research, 2009, 24(2): 145-158.
- [17] 陈春光, 姚令侃, 刘翠容, 等. 泥石流堵河条件的研究[J]. 水利学报, 2013, 44(6): 648-656. (CHEN Chunguang, YAO Lingkan, LIU Cuirong, et al. Study on conditions of river-blocking due to debris flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(6): 648-656. (in Chinese))
- [18] 钱撼, 郭志学, 苏杨中. 堆积体作用下的河道最大冲刷深度[J]. 泥沙研究, 2013, 38(3): 65-70. (QIAN Han, GUO Zhixue, SU Yangzhong. Maximum scour depth under action of deposit body[J]. Journal of Sediment Research, 2013, 38(3): 65-70. (in Chinese))
- [19] 何岸霞, 周珏西, 张婧, 等. 堆积体对上游附近河道三维流速分布影响的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(8): 64-67. (HE Anxia, ZHOU Juexi, ZHANG Jing, et al. Experimental study on the influence of the deposit for the 3D velocity near the upstream of the flow[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(8): 64-67. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-10-10 编辑: 雷燕)

(上接第 25 页)

- [7] 钮新强. 洞庭湖综合治理方案探讨[J]. 水力发电学报, 2016, 35(1): 1-7. (NIU Xinqiang. Integrated management strategies for Dongting Lake [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(1): 1-7. (in Chinese))
- [8] 杨树清. “先污染、后治理”是湖泊污染治理失败的根本原因[EB/OL]. [2005-08-30]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200508-186>. (YANG Shuqing. Strategy of “Remediation Follows Pollution” Causes Pollution out of Control in Lakes [EB/OL]. [2005-08-30]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200508-186>. (in Chinese))
- [9] 杨树清. 根除长江中下游洪灾的关键在于“变湖为库”[EB/OL]. [2005-09-01]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200509-6>. (YANG Shuqing. Transformation of lakes into reservoirs can greatly mitigate the flood disasters in middle and lower reaches of Yangtze River [EB/OL]. [2005-09-01]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200509-6>. (in Chinese))
- [10] YANG S Q, LIU P W. Strategy of water pollution prevention in Taihu Lake and its effects analysis [J]. Journal of Great Lakes Research, 2010, 36(1): 150-158.
- [11] 薛云, 赵运林, 张维, 等. 基于 MODIS 数据的 2000—2013 年洞庭湖水华暴发时空分布特征[J]. 湿地科学, 2015, 13(4): 387-392. (XUE Yun, ZHAO Yunlin, ZHANG Wei, et al. Characteristics of spatial and temporal distribution of water blooms outbreak in Dongting Lake based on MODIS data [J]. Wetland Science, 2015, 13(4): 387-392. (in Chinese))
- [12] 刘虎英. 桥群河段船舶通航安全数值模拟分析[J]. 交通科学与工程, 2017, 33(2): 51-57. (LIU Huiying. Numerical simulation analysis of navigation safety in bridge group [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2017, 33(2): 51-57. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-11-13 编辑: 雷燕)