

浮帘群水流阻力特性试验研究

冯缤予, 喻国良

(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要:为探明含浮帘群水流的阻力特性和各阻力参数计算方法, 对不同间距、不同高度浮帘群在不同恒定均匀明渠流中的阻力特性开展了 92 组水槽试验。通过拟合水面线获得水力坡降, 探讨浮帘拖曳力系数、曼宁糙率和达西韦斯巴赫阻力系数的变化规律。研究表明: 浮帘群布置存在临界间距, 此时浮帘间的相互干扰作用几乎消失; 浮帘群消能增阻作用明显, 其拖曳力系数在不同水流条件下变化较小, 取值介于 1.60~2.05 之间; 曼宁糙率主要与浮帘相对高度及浮帘分布密度有关, 并获得了曼宁糙率的修正计算方法; 达西韦斯巴赫阻力系数可由浮帘相对高度、浮帘分布密度及浮帘雷诺数组成的拟合公式获得。

关键词:浮帘群; 阻力特性; 拖曳力系数; 曼宁糙率; 达西韦斯巴赫阻力系数

中图分类号:TV131.2⁺2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2017)01-0027-06

Experimental study on flow resistance of suspended flexible curtain group//FENG Binyu, YU Guoliang(*School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

Abstract: To explore resistance characteristics and calculation methods of resistance parameters in uniform steady open channel flow with a suspended flexible curtain group (SFCG), 92 sets of flume experiments were carried out with different curtain spacing, curtain heights, and flow conditions. The hydraulic gradients along the flume were obtained through curve fittings of water surfaces, and the drag coefficient Manning roughness and Darcy-Weisbach friction factor were studied. It is shown that the mutual interference among the SFCG would almost disappear under the critical curtain spacing. The SFCG significantly exhausts flow energy and increases resistance, and the drag coefficient hardly changes in different turbulent flow conditions with the range from 1.60 to 2.05. The Manning roughness is mainly related to the relative height and arrangement density of SFCG, and a modified calculation method for Manning roughness is proposed. In addition, the Darcy-Weisbach friction factor can be obtained from a fitting formula depending on relative height, distribution density of SFCG, and Reynolds number.

Key words: suspended flexible curtain group; resistance characteristics; drag coefficient; Manning roughness; Darcy-Weisbach friction factor

冲刷往往带来水资源的污染, 也常常造成工程建筑物的病害甚至毁坏, 如何防止冲刷是水利工程建设与维护需要关注的问题。促淤对加速中低滩涂围垦, 保护海岸、河流港工建筑物以及海底管道, 维护河岸海岸与生态环境具有举足轻重的工程意义。防冲促淤方式可以归纳为: 传统的修建堤坝, 如丁坝、顺坝、海堤、离岸堤等; 种植大米草和互花米草等水生植物^[1]; 铺设人工水草垫^[2]; 放置新型促淤结构物^[3-6], 如四面体透水框架群、透水三角网、导流截沙薄板、空心圆台插板组合体等以及设置促淤浮帘^[7]。促淤浮帘是最新提出的一种新型底泥截留的促淤防冲装置, 其帘体下端固定于床面并与其保

持一定距离, 上端自由悬浮在水中, 随水流向下游倾斜一定角度, 帘后产生一个低流速的横轴回流涡体, 来沙落入该低速区淤积下来从而达到防冲促淤的效果。喻国良等^[5-9]对单个浮帘进行了大量的理论和试验研究, 利用简化 PIV 法得到单个浮帘后方流场分布, 通过水槽试验分析了浮帘倾斜角度的影响因素, 采用测力设备揭示了浮帘绕流阻力的变化规律。已有研究表明: 柔性促淤浮帘促淤效果良好, 且滞洪较小, 易拆装。

浮帘大量地安装在水流底部, 帘体表面与水流之间存在摩擦阻力, 帘后的横轴回流涡体还会对水流产生形态阻力。但浮帘群在水流中引起的阻力有

待深化研究,为探究其特性和变化规律,工程中常用谢才系数、曼宁糙率、达西韦斯巴赫阻力系数等参数来计算水流阻力。另外,淹没植物阻力的计算方法可为浮帘群阻力提供参考,吴福生^[10]在恒定均匀流条件下通过水槽试验提出了植物拖曳力系数和当量曼宁糙率公式,考虑的主要因素有水深、植物密度等;Stone 等^[11]在恒定均匀流条件下得到淹没和未淹没圆柱钢棒的拖曳力系数,建议平均取值为1.05;倪汉根等^[12]采用实测水面线计算底面等效切应力,进而确定等效曼宁糙率;唐洪武等^[13]从等效水力参数概念出发推导出等效综合曼宁糙率系数和等效植物附加糙率系数的计算公式;拾兵等^[14]从植物迎流面的力矩分析出发得到曼宁糙率计算公式;Petryk 等^[15]从重力与阻力平衡出发提出了确定河道糙率的植被-密度方法;Järvelä^[16]探讨了不同植物组合下阻力系数随水流条件和植物布置形式的变化规律。本文通过理论分析和92组定床试验,从拖曳力系数、曼宁糙率和达西韦斯巴赫阻力系数三方面探讨浮帘群间距、浮帘高度等对水流阻力的影响,提出含浮帘群水流的阻力计算方法。

1 试验设计

1.1 试验装置

试验在上海交通大学一复式水槽中进行,如图1所示(图中箭头表示水流方向)。水槽分为上下两层,浮帘群安装在上层试验区。试验区水槽长12 m,宽1 m,高0.5 m,由潜水泵实现水流在水槽内的循环。上层试验区的水流为明渠恒定均匀流。

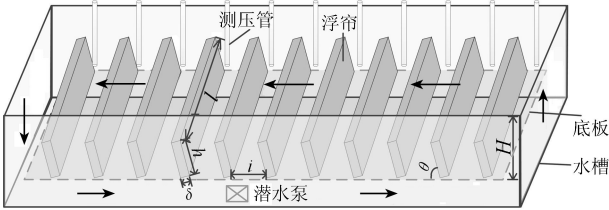


图1 水槽示意图

流速由Flow-Tracker ADV流速仪测量,水力坡降由沿程均匀布置的11根玻璃管中的水面线点拟合求得,浮帘倾角可从水槽透明玻璃段从侧壁直接观测获得。

1.2 试验工况

所用浮帘由聚苯乙烯板制成,密度约为50 kg/m³,长0.97 m,厚0.01 m。测量4种不同高度浮帘在不同间距、不同来流水深条件下的浮帘群阻力特性,如表1所示,总计92组工况。试验流量Q=0.057 m³/s,断面平均流速u=0.1~0.3 m/s,试验观测水力坡降S及浮帘倾角θ。

表1 试验工况设计

试验组次	浮帘高度 h/m	浮帘间距 i/m	水深 H/m
A	0.10	0.2,0.3,0.4,0.5	0.45,0.40,0.35,0.30,0.25,0.20
B	0.15	0.2,0.3,0.4,0.5	0.45,0.42,0.40,0.35,0.30,0.25
C	0.20	0.3,0.4,0.5,0.6	0.45,0.42,0.40,0.38,0.35,0.30
D	0.25	0.3,0.4,0.5,0.6	0.45,0.42,0.40,0.38,0.35

2 理论分析

对于含浮帘的水流阻力,分别用拖曳力系数C_D、曼宁糙率n和达西韦斯巴赫阻力系数f这3个不同参数来衡量。对于含浮帘的明渠均匀流,单个浮帘拖曳力系数C_D可以通过受力平衡分析获得:

F_b + F_c = F (1)

F_b + 1/2 λρC_Du_δ²A_{ec} = ρgS(BHL - λV_{ec}) (2)

其中 A_{ec} = A sinθ = lh sinθ V_{ec} = lhδ
式中:F_b为床面阻力,由于在定床试验中水槽床面为亚克力板,产生的阻力相对较小^[11-12],本文床面阻力F_b可忽略不计;F_c为浮帘群阻力;F为总阻力;λ为浮帘个数;ρ为水的密度;u_δ为浮帘处流速;A_{ec}为浮帘在水流方向的有效投影面积;B、H、L分别为水槽宽度、水深和浮帘安装段所占水槽长度;V_{ec}为单个浮帘排水体积;A为浮帘面积;h、l、δ分别为浮帘高度、长度和厚度。

对于含浮帘的水流,鉴于其与含水草的水流阻力成因有些类似,仿照Petryk等^[15]提出的采用植被-密度方法确定明渠糙率的思路,用浮帘群分布密度来反映其曼宁糙率值,即

n = n_b √ [1 + C_D / (2g) * (Σ A_i / BL) * (1.49 / n_b)² R^{4/3}] (3)

式中:n_b为无浮帘时曼宁糙率;g为重力加速度;R

为水力半径;Σ A_i / BL为浮帘分布密度。

对于含浮帘的水流,达西韦斯巴赫阻力系数f采用下式计算:

f = 8gRS / u² (4)

3 试验结果

由于浮帘群中不同位置的浮帘受到的拖曳力不同,产生的倾角也有一定差异。为简化问题,笔者将

所有浮帘受力视为相同,并用中部浮帘试验数据代入公式(2)(3)(4)进行计算。实测得到水面坡降取值范围为 $2.924\times10^{-4}\sim72.625\times10^{-4}$,浮帘倾角在 $59^{\circ}\sim90^{\circ}$ 之间,水槽无浮帘时曼宁糙率为0.0084,水温为 20°C ,水流运动黏滞系数 $\nu=1.01\times10^{-6}$ 。

3.1 浮帘的拖曳力系数

按浮帘高度分为4组,计算得到92组工况的拖曳力系数。 C_D 随 H 的变化如图2所示,浮帘群中单个浮帘的拖曳力系数并不随水深和流速的变化而产生明显变化,只随浮帘间距和浮帘高度的变化而发生微小改变。

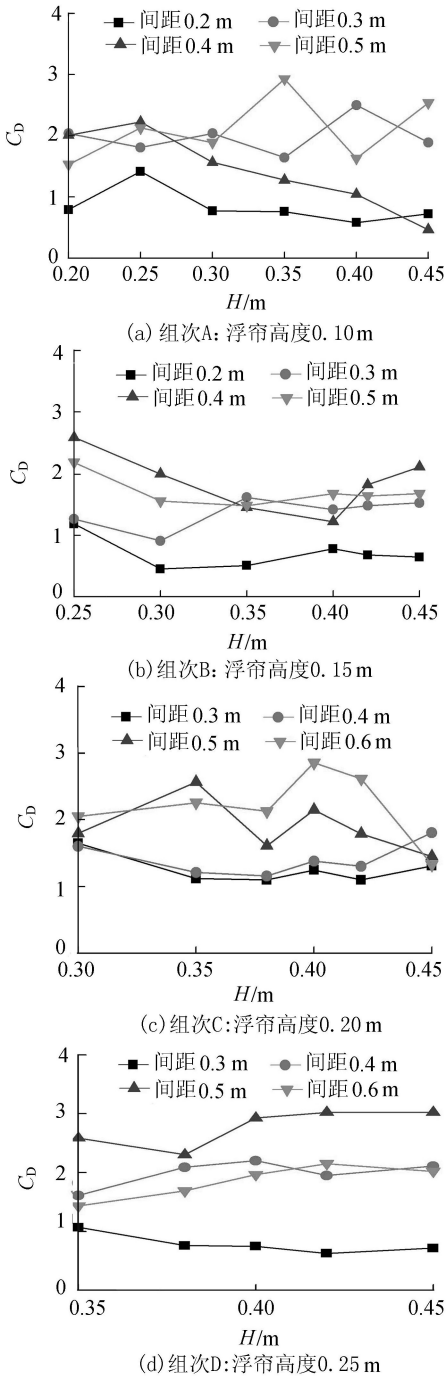


图2 不同浮帘高度下浮帘拖曳力系数

将所得的浮帘拖曳力系数与已有的圆球、圆盘拖曳力系数绘于同一图中,如图3所示,可见在大雷诺数水流条件下浮帘的拖曳力系数主要集中在 $1.5\sim2$ 之间,远大于圆球的拖曳力系数,也高于圆盘的拖曳力系数。而圆盘试验表明,在雷诺数从约 $4000\sim1\times10^6$ 的范围内,垂直于水流方向的圆盘拖曳力系数约为 $1.17^{[17]}$,而垂直于水流方向的长高比较大的平板拖曳力系数约为 $2.05^{[18]}$,本文中的浮帘类似于长高比较大的平板,故水流中浮帘的拖曳力系数 C_D 可取为 $1.60\sim2.05$ 。

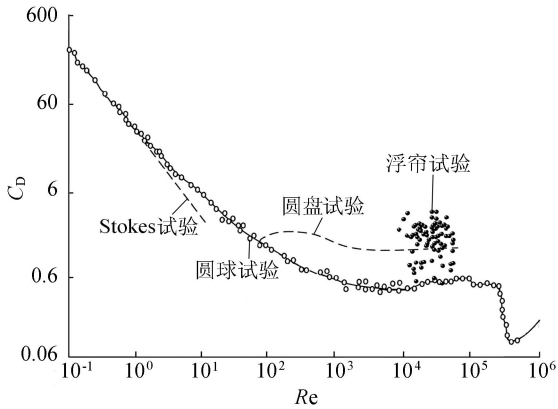
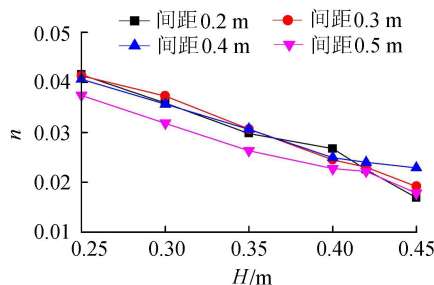


图3 C_D - Re 曲线

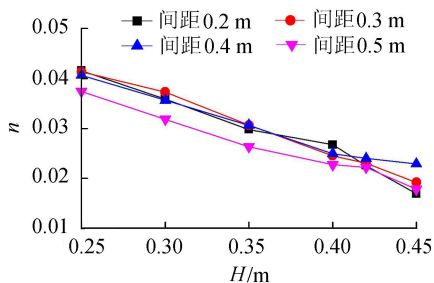
3.2 曼宁糙率

不同浮帘高度下曼宁糙率 n 的变化如图4所示,图4表明:对于同一高度的浮帘,曼宁糙率随着水深的增加而减小;相同水深条件下,曼宁糙率通常随浮帘间距的减小而增大,但并不严格遵循此规律。这是由于如果浮帘间距过小,浮帘间相互干扰作用会造成浮帘后回流区漩涡发展不完全,紊动强度变小,回流区漩涡造成的能量扩散也随之变小;当浮帘间距过大时,浮帘间相互干扰作用消失,每个浮帘帘后回流区漩涡虽然都能得到充分发展,但固定长度的水槽内可安放的浮帘数目会相应减少,整个浮帘群对水流的总体阻力也随之减小。由此可见,浮帘间存在一个临界间距,当浮帘布置间距取该临界间距时曼宁糙率将达到最大,此时浮帘表面摩擦和帘后回流区漩涡紊动共同作用造成的能量耗散最大。图4同时表明,曼宁糙率随着浮帘高度的增加而明显增大;浮帘高度是床面粗糙度的一种表现形式,相同条件下,0.25m高的浮帘群曼宁糙率显著高于0.1m高的浮帘群曼宁糙率。由此可见,含浮帘群水流的曼宁糙率主要由浮帘高度和浮帘分布密度决定。

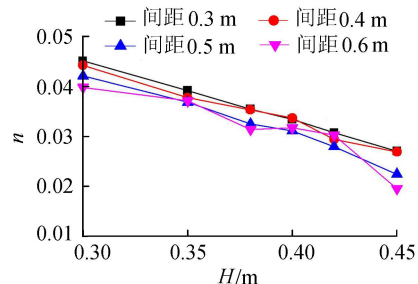
浮帘分布密度 e 是同时表征浮帘有效高度与浮帘间距的参数($e=\lambda A_{ec}/BL$)。图5为曼宁糙率实测值与浮帘分布密度的关系。从图5可以看出,曼宁糙率与浮帘分布密度成正相关,但同时存在与浮帘



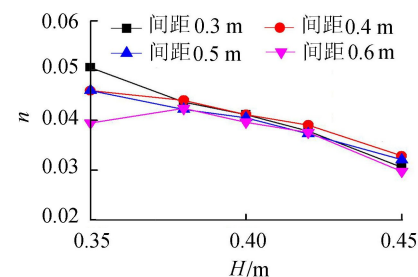
(a) 组次A: 浮帘高度0.10 m



(b) 组次B: 浮帘高度0.15 m



(c) 组次C: 浮帘高度0.20 m



(d) 组次D: 浮帘高度0.25 m

图4 不同浮帘高度下水流曼宁糙率

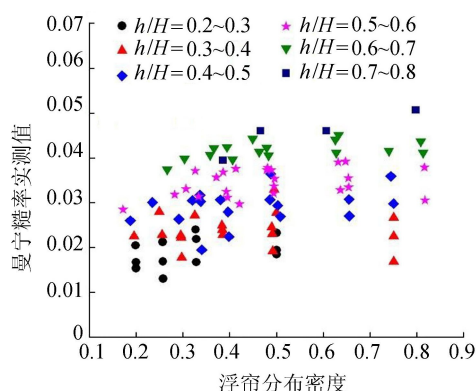


图5 曼宁糙率实测值与浮帘分布密度的关系

相对高度 h/H 有关的离散度。将曼宁糙率实测值与 Petryk 公式(公式(3))计算值绘制成图 6, 可见 Petryk 公式仅适用于浮帘间距较大、互不干扰的情

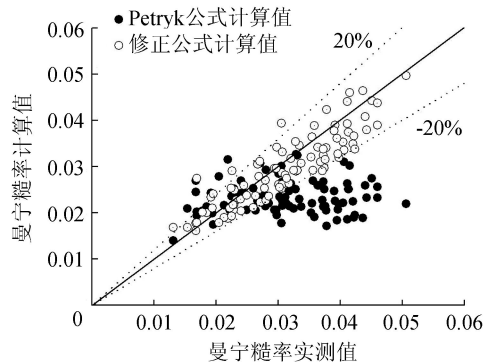


图6 曼宁糙率计算值与实测值的关系

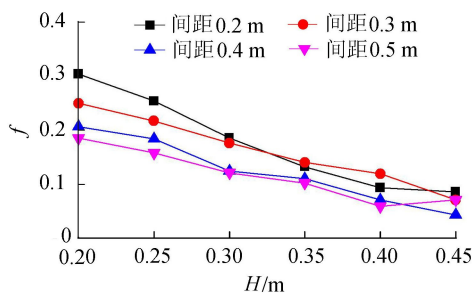
况;而对于浮帘较密的情况,其计算精度较差,需对公式(3)加以修正。将浮帘相对高度 h/H 引入公式(3)中,并取 C_D 平均值为 1.6,可得含浮帘时曼宁糙率计算公式(5),其拟合度为 0.791。图 6 反映修正公式(5)比原公式(3)能更准确地估算实际的曼宁糙率。

$$n = 1.580n_b \sqrt{1 + \frac{1.6e}{2g} \left(\frac{1.49}{n_b} \right)^2 R^{\frac{4}{3}} \left(\frac{h}{H} \right)^{1.534}} \quad (5)$$

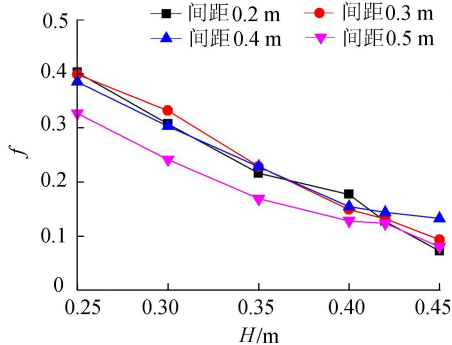
3.3 达西韦斯巴赫阻力系数

图 7 为不同浮帘高度下的达西韦斯巴赫阻力系数 f ,由图 7 可知, f 随着 H 的增加显著减小。这是因为试验中流量一定,水深越小时流速越大,水流紊动更强,漩涡耗能越多;且水深越大,浮帘相对高度 h/H 越小,浮帘对水流的影响范围越小,上层水流几乎不受浮帘影响而保持原有流态;对于浮帘相对高度较大的工况,回流区产生的漩涡可以影响到上层水流,水流之间能量交换和耗能也随之增加。与曼宁糙率类似,相同高度的浮帘在同等水流条件下,阻力系数由浮帘个数和回流区漩涡大小共同决定,最大值在两者共同效用发挥到最大时取得,而非由单一因素控制。

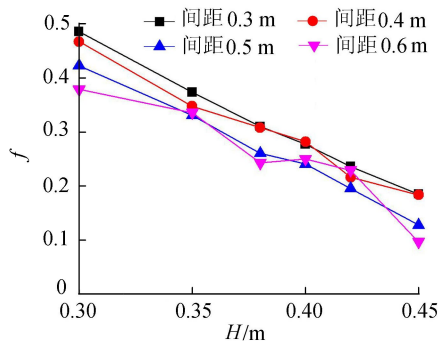
在水流条件和浮帘间距相同时, f 随浮帘高度增大而增大,主要有以下 3 个原因:①浮帘高度越大,表面摩擦造成的能量损失越大;②较高的浮帘在水体中占有更大的面积,从而减小水流过流面积,当流量固定不变时,过流面积小将增大水流流速,从而在一定程度上增加耗能;③水流绕过浮帘上方形成主回流漩涡区(图 8),浮帘下方与床面间空隙处的射流在帘后形成次回流漩涡区,当浮帘高度较小时,旋转方向相反的主、次回流区在垂直方向影响范围重合,帘后漩涡的大小受到限制,而浮帘高度的增加可以使主、次回流区各自独立形成完整的涡体,分别耗散能量。因此,当水深固定时存在最佳浮帘高度,此时主、次回流区效应都已发挥到最大,如继续增加浮帘高度,阻力将不再明显加大,浮帘材料增阻效率反而降低。



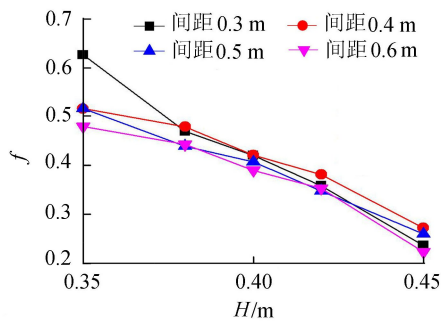
(a) 组次A: 浮帘高度0.10 m



(b) 组次B: 浮帘高度0.15 m



(c) 组次C: 浮帘高度0.20 m



(d) 组次D: 浮帘高度0.25 m

图7 不同浮帘高度下达西韦斯巴赫阻力系数

达西韦斯巴赫阻力系数实测值与浮帘水流雷诺数 Re_c ($Re_c = u_\delta h / \nu$) 的变化关系如图9所示。试验中断面平均流速越大,浮帘雷诺数越大,即 f 与断面平均流速具有相同的变化趋势。在工程设计中明渠水流通常被看作是位于阻力平方区的紊流,此时 f 与断面平均流速的平方成正比。本试验中,水流处于阻力平方区,故 f 随平均流速的增大而增大。

综上可知,达西韦斯巴赫阻力系数 f 主要取决于浮帘相对高度 h/H 、浮帘分布密度 e 以及浮帘水流雷诺数 Re_c ,用 Origin 软件进行数据拟合,得到 f

的拟合公式(6),拟合度为 0.920。将 f 的计算值与实测值进行比较,图10表明公式(6)精度较高。

$$f = 0.864 \left(\frac{h}{H} \right)^{1.758} (-0.827e^2 + 1.216e + 0.515) (\lg Re_c)^{0.121} \quad (6)$$

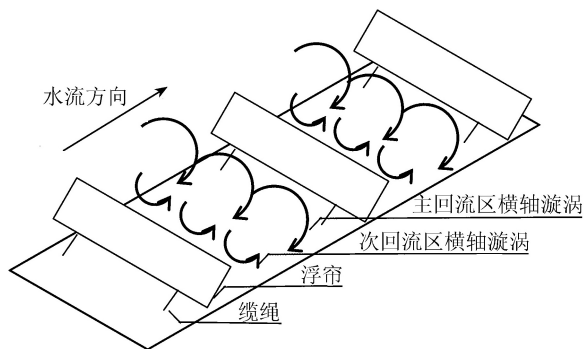


图8 浮帘群漩涡示意图

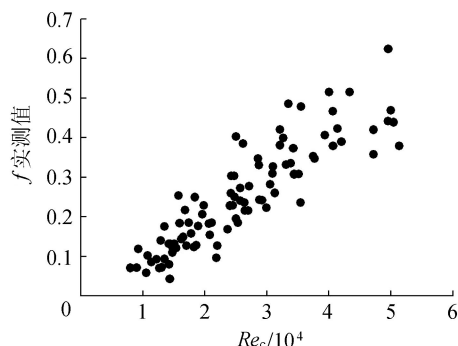


图9 达西韦斯巴赫阻力系数随浮帘水流雷诺数趋势变化

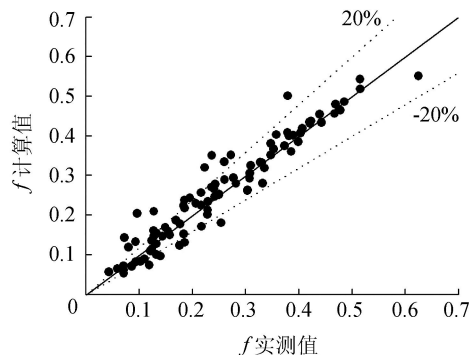


图10 达西韦斯巴赫阻力系数计算值与实测值的关系

4 结论

a. 浮帘群中浮帘的拖曳力系数为介于 1.60 ~ 2.05 之间的常数,不随水流条件的变化而发生明显变化。

b. 浮帘群之间存在不相互干扰的临界间距,此时帘后回流区漩涡发展充分,且浮帘群整体消能作用最大。

c. 含浮帘群明渠水流的绝大部分阻力由浮帘群产生,可采用公式(5)估算曼宁糙率。

d. 含浮帘明渠水流处于阻力平方区,达西韦斯

巴赫阻力系数 f 由浮帘相对高度 h/H 、浮帘分布密度 e 以及浮帘水流雷诺数共同决定,可由公式(6)计算达西韦斯巴赫阻力系数。

参考文献:

- [1] 仲维畅. 大米草和互花米草种植功效的利弊[J]. 科技导报, 2006, 24(10): 72-78. (ZHONG Weichang. Benefits and detriments of planting effects of spartina anglica C E hubbard and spartina alterniflora loisel [J]. Science & Technology Review, 2006, 24(10): 72-78. (in Chinese))
- [2] 庄丽华, 阎军, 范奉鑫, 等. 茂名 30 万吨级单点码头输油海管悬空段人工海草试验研究[J]. 海洋工程, 2010, 28(2): 76-81. (ZHUANG Lihua, YAN Jun, FAN Fengxin, et al. Study of artificial seaweeds in hanging segment of submarine pipelines in Maoming single point mooring dock for 30×10^4 t oil unloading [J]. The Ocean Engineering, 2010, 28(2): 76-81. (in Chinese))
- [3] 唐洪武, 李福田, 肖洋, 等. 四面体框架群护岸型式防冲促淤效果试验研究[J]. 水运工程, 2002(9): 25-28. (TANG Hongwu, LI Futian, XIAO Yang, et al. Experimental study on effect of scour prevention and sedimentation promotion of bank protection of tetrahedron penetrating frame groups [J]. Port & Waterway Engineering, 2002(9): 25-28. (in Chinese))
- [4] 张为, 李义天, 王秀英, 等. 透水结构促淤试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2005, 37(6): 31-37. (ZHANG Wei, LI Yitian, WANG Xiuying, et al. Experimental study on deposition promotion of permeable structure [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2005, 37(6): 31-37. (in Chinese))
- [5] 喻国良, TAN S K. 底部薄板附近的水流及泥沙运动特性[J]. 水道港口, 2006, 27(3): 137-141. (YU Guoliang, TAN S K. Flow and sediment motion around submerged vanes [J]. Journal of Waterway & Harbor, 2006, 27(3): 137-141. (in Chinese))
- [6] 王嘉仪, 张林波. 一种新型护岸构筑物的设计研究[C]//中国水利学会. 中国水利学会 2013 学术年会论文集: S5 河口治理与保护. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 1927-1932.
- [7] 陈琴琴, 李艳红, 喻国良. 利用简化 PIV 方法测量水底浮帘后方流场[J]. 海岸工程, 2008, 27(1): 56-60. (CHEN Qinqin, LI Yanhong, YU Guoliang. Measurement of current field in the lee of underwater floating curtain by using simplified particle image velocimetry (PIV) [J]. Coastal Engineering, 2008, 27(1): 56-60. (in

Chinese))

- [8] 李艳红, 喻国良. 柔性透水促淤浮帘倾斜角度试验研究[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(2): 169-172. (LI Yanhong, YU Guoliang. Experimental study on the obliquity angle of suspended-flexible-curtain for sediment deposition [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(2): 169-172. (in Chinese))
- [9] 斯锋, 喻国良. 促淤浮帘绕流阻力特性及其计算[J]. 水利水电技术, 2013, 44(6): 130-134. (SI Feng, YU Guoliang. Drag force characteristics of suspended flexible curtain for sedimentation enhancement and its calculation [J]. Water Resources & Hydropower Engineering, 2013, 44(6): 130-134. (in Chinese))
- [10] 吴福生. 含植物明渠水动力特性研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2009.
- [11] STONE B M, SHEN H T. Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 128(5): 500-506.
- [12] 倪汉根, 顾峰峰. 湿地非淹没芦苇水流阻力的试验研究[J]. 水动力学研究与进展, 2005, 20(2): 167-173. (NI Hangen, GU Fengfeng. Roughness coefficient of non-submerged reed [J]. Journal of Hydrodynamics, 2005, 20(2): 167-173. (in Chinese))
- [13] 唐洪武, 闫静, 肖洋, 等. 含植物河道曼宁阻力系数的研究[J]. 水利学报, 2007, 38(11): 1347-1353. (TANG Hongwu, YAN Jing, XIAO Yang, et al. Manning's roughness coefficient of vegetated channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(11): 1347-1353. (in Chinese))
- [14] 拾兵, 王川源, 尹则高, 等. 淹没植物对河道糙率的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(2): 295-298. (SHI Bing, WANG Chuanyuan, YIN Zegao, et al. Effect of vegetation submerged in river on the roughness coefficient [J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(2): 295-298. (in Chinese))
- [15] PETRYK S, BOSMAJIAN G. Analysis of flow through vegetation [J]. Journal of the Hydraulics Division, 2014, 101(7): 871-884.
- [16] JÄRVELÄ J. Flow resistance of flexible and stiff vegetation: a flume study with natural plants [J]. Journal of Hydrology, 2002, 269(2): 44-54.
- [17] 普朗特. 流体力学概论[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 200-203.
- [18] EVETT J B, LIU C. Fundamentals of fluid mechanics [M]. New York: McGraw-Hill, 1987: 381-390.

(收稿日期: 2015-11-26 编辑: 骆超)