

· 港口 ·

新型透空式块体促淤堤断面阻力特性试验*



朱亮, 谢云飞

(江苏航运职业技术学院, 江苏南通 226010)

摘要: 针对一种空心四面块体促淤堤断面开展阻力特性的试验研究, 并与传统抛石加护面块体促淤堤试验结果进行了对比。结果表明: 1) 当水流雷诺数较小、可以形成促淤堤的非淹没状态时, 在同一水流雷诺数条件下, 空心四面块体促淤堤断面阻力系数可以用2段折线表达, 折线的拐点基本对应于促淤堤的临界淹没状态, 随着水流雷诺数增大, 2段折线的斜率逐渐趋同; 2) 当水流雷诺数较大、无法形成促淤堤的非淹没状态时, 在同一水流雷诺数条件下, 空心四面块体促淤堤断面阻力系数可以用单一直线表达; 3) 提出可用于计算空心四面块体促淤堤断面阻力系数的方法, 该方法也适应于一般透水堤。

关键词: 空心四面块体; 促淤堤; 阻力特性; 临界淹没状态; 计算公式

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0055-07

Experimental study on resistance characteristics of novel porous block siltation promotion embankment

ZHU Liang, XIE Yun-fei

(Jiangsu Shipping College, Nantong 226010, China)

Abstract: An experimental study on the resistance characteristics of a hollow tetrahedron siltation promotion embankment is carried out, and the experimental results are compared with those of experiment on traditional siltation promotion embankment which is composed of riprap and armor block. The results show that: Firstly, when flow Reynolds number is small enough to bring about the non-submerged state of siltation promotion embankment, the resistance coefficient can be described using two broken lines under the same flow Reynolds number, the turning points of which are in accordance with the critical submerged criterion. With the increase of flow Reynolds number, the slopes of two broken lines get closer. Secondly, when the flow Reynolds number is too large to reach the non-submerged state, the resistance coefficient can be described using the single line alone under the same flow Reynolds number. Thirdly, the method of calculating the resistance coefficient is proposed which is also suitable for the normal permeable embankment.

Keywords: hollow tetrahedron; siltation promotion embankment; resistance characteristic; critical submerged state; calculation formula

在岸滩防护方面, 透空式结构的使用非常普遍^[1-2], 许多学者针对透空结构的水动力特性开展了相关研究。马爱兴等^[3]、徐锡荣等^[4]和况宏伟等^[5]对不同透水框架结构的水动力特性开展了相关试验研究, 认为透水框架通过改变防护区周围

水流流场结构、遏制大漩涡的形成, 减少了流速和水流对河床的剪切力, 达到防冲促淤的目的。Yang等^[6]采用PIV测量透水框架周围的流场结构, 分析不同透水框架布置形式下流速、紊动强度、减速率的变化规律; 应翰海等^[7]开展了新型透水

收稿日期: 2022-04-12

*基金项目: 南通市科技计划项目(MSZ21008); 南通市科技计划项目(MSZ21096)

作者简介: 朱亮(1984—), 男, 硕士, 讲师, 从事水利水运教学和研究工作。

框架研究, 结果表明扭双工字形透水框架具有较好的整体稳定性, 可有效减缓流速, 消能促淤效果明显。

近年来, 在河口海岸促淤工程中, 透空式结构逐渐被用于建设促淤堤, 与传统的抛石加护面块体促淤堤相比, 透空式促淤堤地基适用性更好, 不需要护角, 施工方便, 并可兼顾生态需求。目前针对透空式促淤堤阻力特性的研究成果较少, 且涉水建筑物阻力特性研究历来都是复杂且重要的问题, 特别是在潮汐河口其阻力特性更为复杂。

本文以长江口某促淤工程为依托, 选择一种推荐的空心四面块体促淤堤断面^[8-9]开展试验, 揭示其断面阻力变化特性, 为该类型促淤堤的进一步研究及应用提供技术支撑。

1 试验方法

试验在长 80 m、宽 1.0 m、深 1.2 m 的水槽中进行, 最大设计流量为 0.45 m³/s, 模型几何比尺为 1:20。流量采用潜水泵-电磁流量计闭环控制, 水位采用尾门控制。

研究采用的空心四面块体为钢筋混凝土结构, 单块质量为 3 t。块体边长为 2 000 mm, 壁厚为 300 mm, 头部削脚边长为 300 mm, 各侧面法向开孔正三角形边长为 1 050 mm, 底面法向开孔正三角形边长为 1 498 mm, 见图 1。

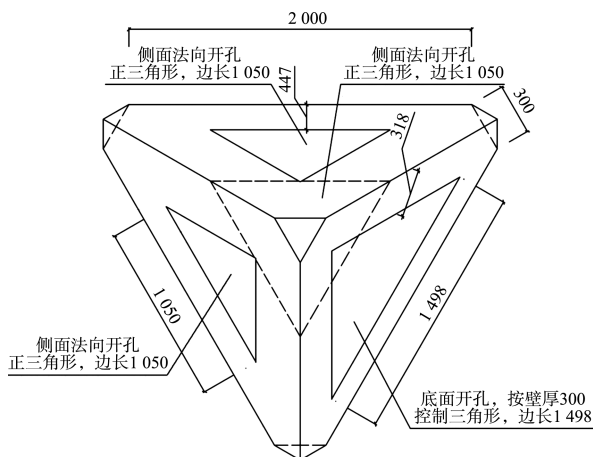


图 1 空心四面块体结构 (单位: mm)

空心四面块体促淤堤断面设计高度为 6.2 m, 堤顶宽度为 6.8 m, 外海侧坡度为 1:2, 围堤内侧

坡度为 1:1.5。根据多次摆放试验确定每百米断面的促淤堤块体数量为 3 210, 孔隙率为 66%, 断面形态见图 2。



图 2 空心四面块体促淤堤断面

透水式促淤堤断面引起的阻力系数属于局部阻力系数。水流流过促淤堤有 2 条途径: 一是从堤顶以上越过; 二是从促淤堤内部孔隙穿过。对于从堤顶以上越过的水流, 其主流在堤后与边界分离, 在分离区产生漩滚, 在漩滚区内部紊动加剧, 同时主流与漩滚区之间不断有质量和能量的交换, 并通过质点与质点间的摩擦和剧烈碰撞消耗大量机械能; 对于从促淤堤内部孔隙穿过的水流(非渗流范畴), 由于孔隙较小、不规则且曲折多变, 水流在堤身内部易产生显著的机械能损耗。因此, 透水式促淤堤阻力特性较一般非透水堤更为复杂。

图 3 为阻力特性模型试验, 上游断面 1-1 距堤轴线约 60 m; 下游断面 2-2 距堤轴线约 400 m, 超出堤前最大水深约 30 倍。试验中确保 2 个断面均为渐变流断面。所有阻力特性试验均为恒定流试验。

断面 1-1、2-2 的能量方程为:

$$Z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \xi \frac{v_1^2}{2g} \quad (1)$$

式中: Z_1 为断面 1-1 位置水头(m); Z_2 为断面 2-2 位置水头(m); α_1 、 α_2 为动能校正系数, 取 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$; v_1 、 v_2 分别为断面 1-1 和 2-2 的平均流速(m/s); ξ 为促淤堤所引起的阻力系数。

由式(1)可得 ξ 的表达式:

$$\xi = \frac{2g}{v_1^2} (Z_1 - Z_2) + 1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \quad (2)$$

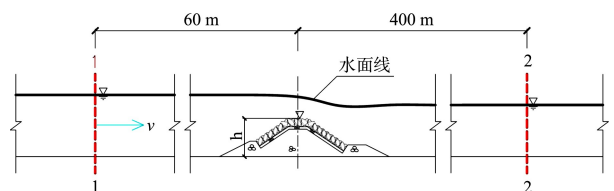


图 3 阻力特性模型试验

文中雷诺数 Re 表达式为:

$$Re = \frac{v_1 h_1}{\nu} \quad (3)$$

式中: v_1 为断面 1-1 的平均流速(m/s); h_1 为断面 1-1 水深(m); ν 为运动黏度(m^2/s)。

2 新型透空式块体促淤堤试验结果

在 10 种不同流量条件下(Re 分别为 1.093×10^6 、 1.639×10^6 、 3.278×10^6 、 4.371×10^6 、 5.464×10^6 、 10.927×10^6 、 16.391×10^6 、 21.309×10^6 、 27.319×10^6 、 32.782×10^6)，通过调整尾门高度共开展了 87 组恒定流试验。在不同水流雷诺数条件下，空心四面块体促淤堤断面的阻力系数 ξ 与参数 $h_1 h^{-2}(Z_1 - Z_2)$ (h 为堤身高度)的关系见图 4。

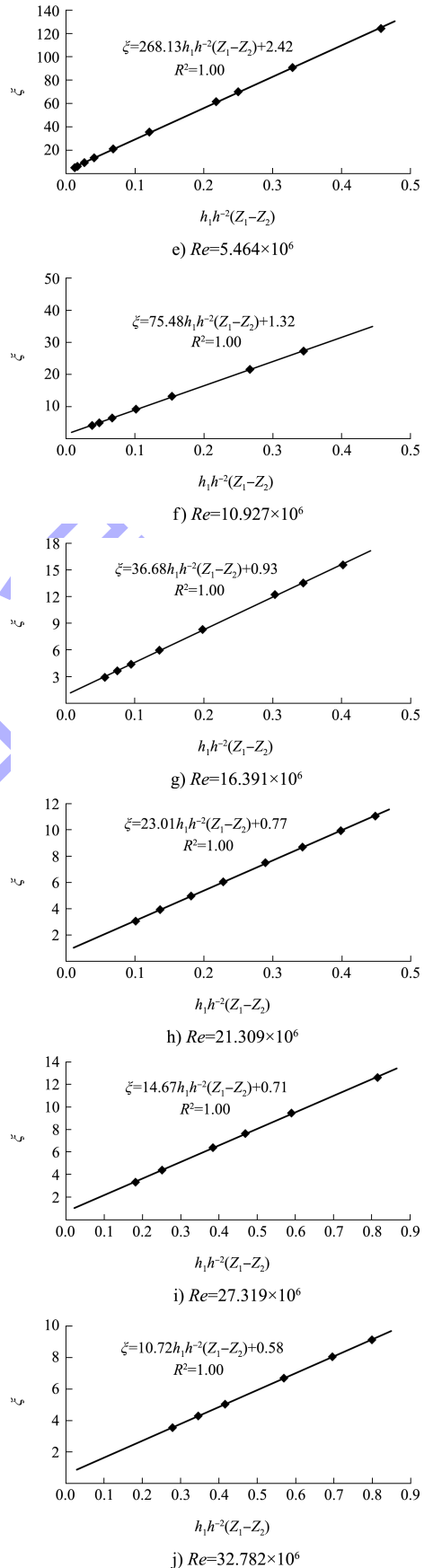
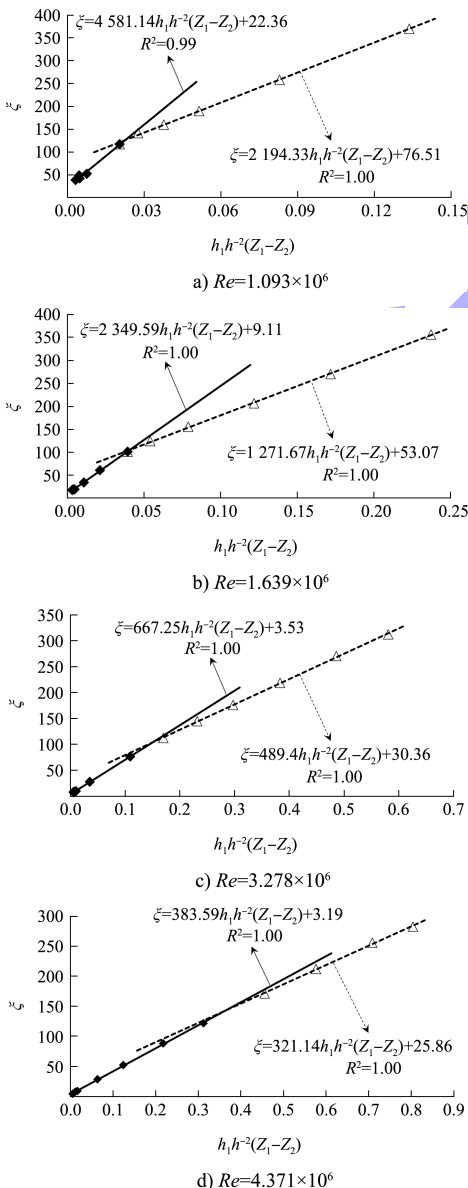


图 4 新型透空式块体促淤堤阻力系数 ξ 与 $h_1 h^{-2}(Z_1 - Z_2)$ 的关系

由图4可见:

1) 当水流雷诺数较小时, 可以形成促淤堤的非淹没状态, 在同一水流雷诺数条件下, 空心四面块体促淤堤断面阻力系数 ξ 与参数 $h_1 h^{-2} (Z_1 - Z_2)$ 的关系为2段折线, 折线的拐点基本对应于促淤堤的临界淹没状态, 此时 h_1/h 约等于 1.05。非淹没状态时的阻力系数 ξ 较淹没状态大。随着水流雷诺数增大, 2段折线的斜率逐渐趋同。

2) 当水流雷诺数较大时, 无法形成促淤堤的非淹没状态, 在同一水流雷诺数条件下, 空心四面块体促淤堤断面阻力系数 ξ 与参数 $h_1 h^{-2} (Z_1 - Z_2)$ 的关系为单一线性关系。

3) 当 $h_1/h > 1.05$, 即促淤堤处于淹没状态时, 随着水流雷诺数的增加, 空心四面块体促淤堤断面阻力系数 ξ 与参数 $h_1 h^{-2} (Z_1 - Z_2)$ 所呈线性关系的斜率逐渐减小; 同样当 $h_1/h \leq 1.05$, 即促淤堤处于非淹没状态时, 随着水流雷诺数的增加, 空心四面块体促淤堤断面阻力系数 ξ 与参数 $h_1 h^{-2} (Z_1 - Z_2)$ 所呈线性关系的斜率亦逐渐减小。

基于以上分析, 空心四面块体促淤堤断面阻力系数可用下式表达:

$$\xi = a \cdot \frac{h_1}{h} \cdot \frac{Z_1 - Z_2}{h} + b \tag{4}$$

式中, 参数 a 、 b 不仅与 Re 有关, 也与空心四面块体促淤堤的淹没状态有关。

当空心四面块体促淤堤处于淹没状态, 即 $h_1/h > 1.05$ 时, 参数 a 、 b 与 Re 的拟合关系见图5, 并可用式(5)表达。

$$\begin{cases} a = 5721.87 \cdot (Re \cdot 10^{-6} + 0.03)^{-1.80} \\ b = 7.35 \cdot (Re \cdot 10^{-6} - 0.87)^{-0.74} \end{cases} \tag{5}$$

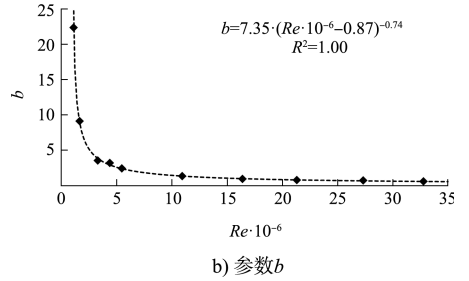
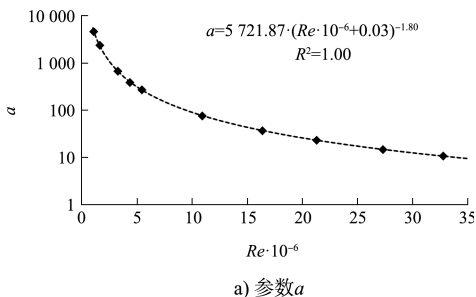


图5 参数与 Re 的关系 ($h_1 h^{-1} > 1.05$)

当空心四面块体促淤堤处于非淹没状态, 即 $h_1/h \leq 1.05$ 时, 参数 a 、 b 与 Re 的拟合关系见图6, 并可用式(6)表达。

$$\begin{cases} a = 2494.87 \cdot (Re \cdot 10^{-6})^{-1.38} \\ b = 80.11 \cdot (Re \cdot 10^{-6})^{-0.79} \end{cases} \tag{6}$$

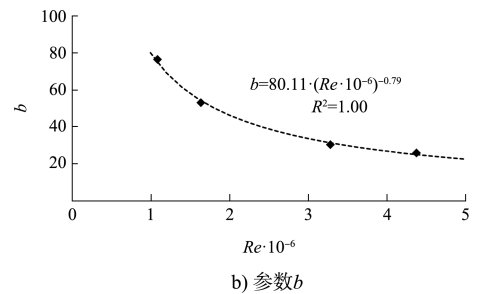
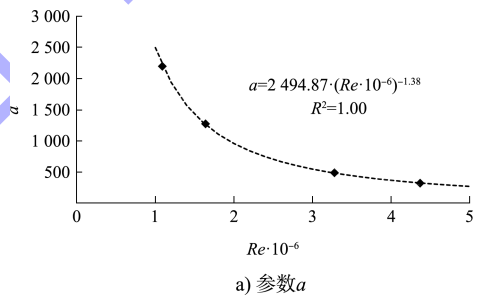


图6 参数与 Re 的关系 ($h_1 h^{-1} \leq 1.05$)

根据式(4)~(8)对空心四面块体促淤堤断面试验工况(共87组)对应的阻力系数进行计算, 计算值 ξ_c 与试验值 ξ_t 对比见图7, 二者吻合良好, 说明采用公式计算空心四面块体促淤堤断面阻力系数是可行的。

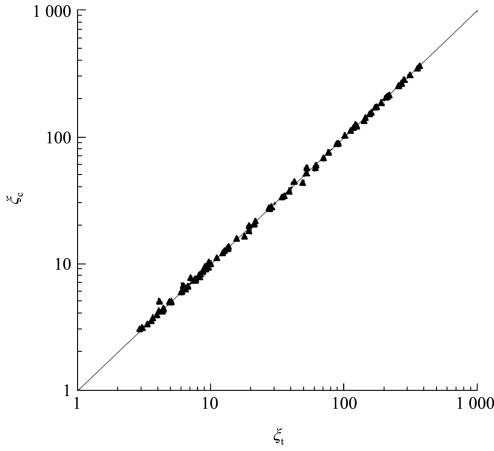


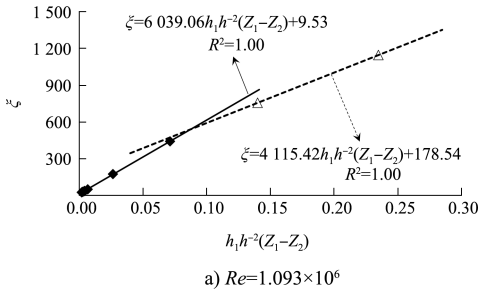
图 7 空心四面块体促淤堤断面阻力系数试验及计算值比较

3 新型透空式块体促淤堤与传统促淤堤阻力特性比较

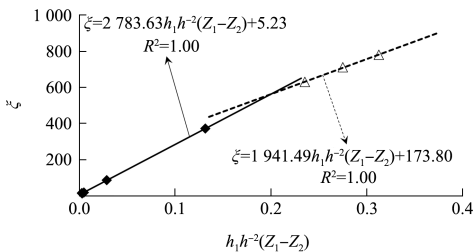
为更好地了解空心四面块体促淤堤阻力特性,对传统的抛石加护面块体促淤堤(图 8)也开展了试验,该促淤堤堤身高度同样为 6.2 m,堤顶宽度为 3.1 m(基本满足堤顶安放 3 个扭王字块体的要求),内外侧坡度均为 1:1.5,孔隙率约为 52%。试验结果见图 9。



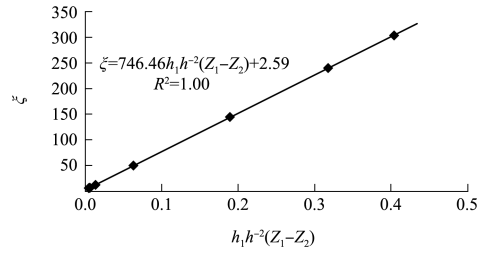
图 8 抛石加护面块体促淤堤



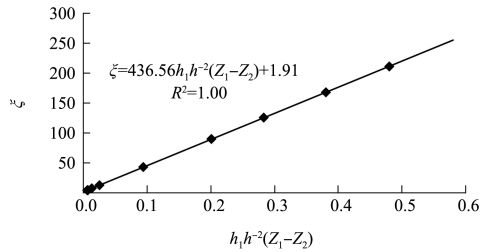
a) $Re=1.093 \times 10^6$



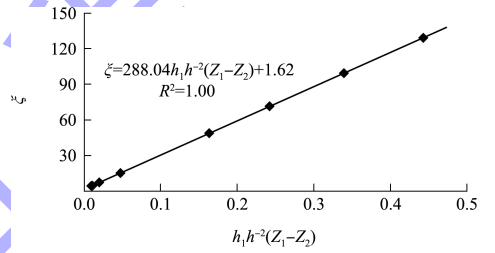
b) $Re=1.693 \times 10^6$



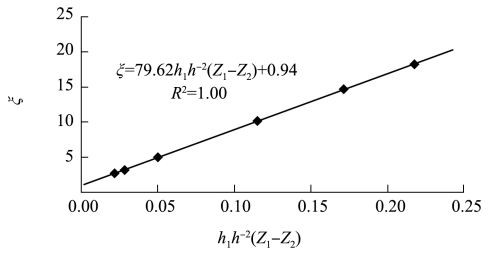
c) $Re=3.278 \times 10^6$



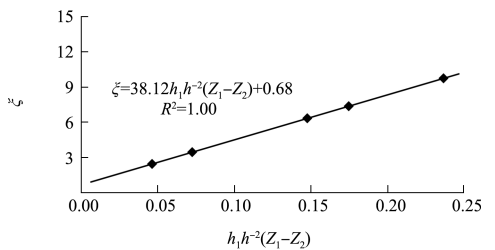
d) $Re=4.371 \times 10^6$



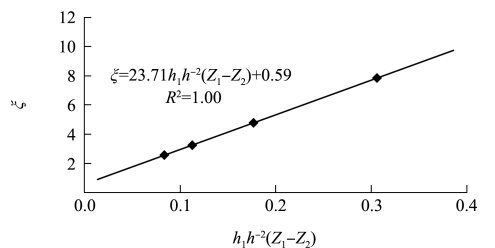
e) $Re=5.464 \times 10^6$



f) $Re=10.927 \times 10^6$



g) $Re=16.391 \times 10^6$



h) $Re=21.309 \times 10^6$

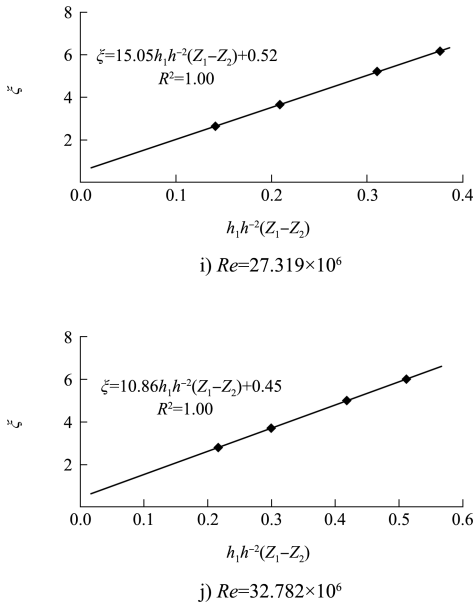


图9 抛石加护面块体促淤堤阻力系数 ξ 与 $h_1 h^{-2} (Z_1 - Z_2)$ 的关系

试验结果表明，空心四面块体促淤堤与传统促淤堤阻力特性既有相同规律，但也存在着显著差异，见图10。

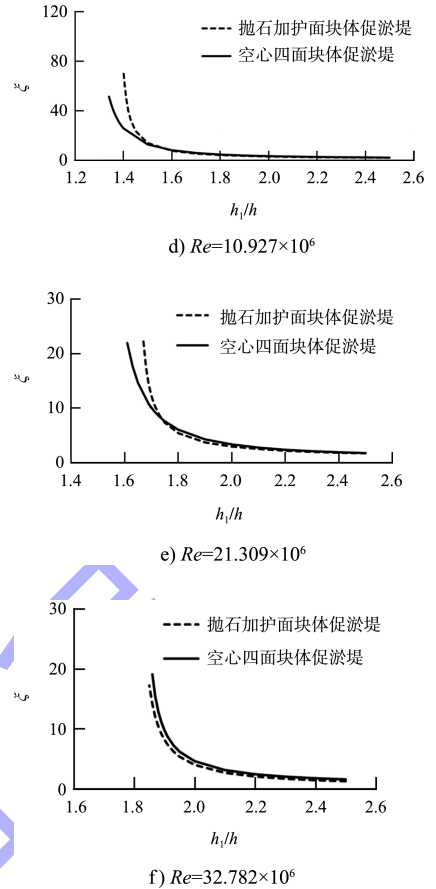
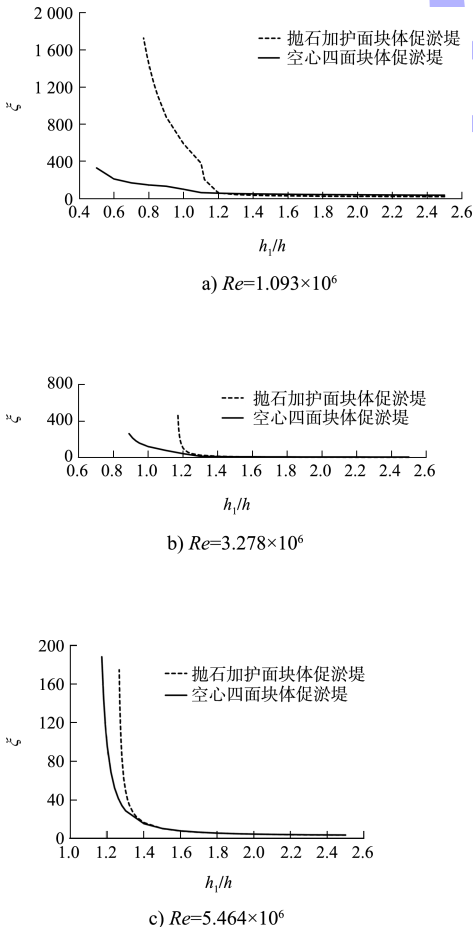


图10 空心四面块体促淤堤与抛石加护面块体促淤堤阻力特性比较

由图10可以得出：

1)在同一水流雷诺数条件下，2种堤型断面的阻力系数 ξ 随相对水深 h_1/h 的增加均呈减小趋势，存在某一临界相对水深值 h_{1c}/h ，当 h_1/h 大于该值时，阻力系数 ξ 随 h_1/h 的增加而缓慢减小；当 h_1/h 小于该值时，阻力系数 ξ 随 h_1/h 的减小而迅速增加，2种堤型断面的临界相对水深值基本相同。

2)仅在水流雷诺数较小时，2种促淤堤才会出现相对水深 h_1/h 小于1的情况(促淤堤出水)，但2种堤型出现相对水深 h_1/h 小于1的临界水流雷诺数不同，其中空心四面块体促淤堤由于堤身孔隙大，透水效果好，其临界水流雷诺数较大；抛石加护面块体促淤堤透水效果相对较差，其临界水流雷诺数最小。

3)在促淤堤出水情况下，空心四面块体促淤堤断面的阻力系数明显小，例如当 $Re = 1.093 \times 10^6$

且 $h_1/h=0.8$ 时,空心四面块体促淤堤和抛石加护面块体促淤堤断面阻力系数分别约为 145 和 1 453,抛石加护面块体促淤堤断面阻力系数约是空心四面块体促淤堤的 10 倍。

4)对于传统抛石加护面块体促淤堤,当雷诺数较小时(形成非淹没状态),在同一水流雷诺数条件下,堤坝所引起的阻力系数 ξ 与参数 $h_1 h^{-2}(Z_1-Z_2)$ 的关系为 2 段折线,且均为线性增加关系,折线的拐点基本对应于堤坝的临界淹没状态;当水流雷诺数较大时(无法形成非淹没状态),在同一水流雷诺数条件下,堤坝所引起的阻力系数 ξ 与参数 $h_1 h^{-2}(Z_1-Z_2)$ 呈线性增加关系。因此,空心四面块体促淤堤与传统抛石加护面块体促淤堤阻力系数可以统一采用式(4)表达,但参数 a 、 b 具体表达是有区别的。说明 2 种促淤堤具有共同特征,即都是透水堤,因此一般透水堤均可采用式(4)表达。

4 结论

1)当水流雷诺数较小时,可以形成促淤堤的非淹没状态,在同一水流雷诺数条件下,空心四面块体促淤堤断面阻力系数 ξ 与参数 $h_1 h^{-2}(Z_1-Z_2)$ 的关系为 2 段折线,折线的拐点基本对应于促淤堤的临界淹没状态,随着水流雷诺数增大,2 段折线的斜率逐渐趋同。

2)当水流雷诺数较大时,无法形成促淤堤的非淹没状态,在同一水流雷诺数条件下,空心四面块体促淤堤断面阻力系数 ξ 与参数 $h_1 h^{-2}(Z_1-Z_2)$ 的关

系为单一线性关系。

3)根据基本试验数据拟合提出空心四面块体促淤堤断面阻力系数的计算公式。

4)空心四面块体促淤堤与传统促淤堤阻力特性既有相同规律,也存在着显著差异,差异主要反映在相对水深较小时临界水流雷诺数不同。

参考文献:

- [1] 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(6):31-37.
- [2] 郑英,吴伶,赵德玉,等.四面六边透水框架护滩结构效果水槽试验研究[J].水运工程,2012(11):127-132.
- [3] 马爱兴,曹民雄,谭伦武,等.扭双工字型透水框架防冲机理试验研究[J].水利水运工程学报,2014(1):8-16.
- [4] 徐锡荣,刘刚,徐松年,等.透水框架四面体防洪护岸试验研究[J].水利水电科技进展,2007,27(5):65-68.
- [5] 况宏伟,谷祖鹏,雷国平,等.透水框架护岸模型试验[J].水运工程,2016(3):112-119.
- [6] YANG Z, BAI F, HU Z. PIV experiments of flow around the tetrahedron frame under two different arrangements [J]. Journal of basic science&engineering, 2014, 22(5): 877-886.
- [7] 应翰海,谭志国,陈飞.扭双工字透水框架在长江南京以下 12.5m 深水航道一期工程中的应用[J].水运工程,2017(3):1-4.
- [8] 刘猛.新型空心块体促淤堤断面波浪特性试验研究[J].水运工程,2015(11):1-7.
- [9] 刘猛,李寒,何萍.空心四面块体促淤堤近底水动力特性试验研究[J].水运工程,2016(4):88-93.

(本文编辑 王传瑜)

· 消 息 ·

广州港南沙港区近洋码头工程(一期)通过竣工验收

近日,一航局参建的广州港南沙港区近洋码头工程(一期)通过竣工验收,标志着全国最大的汽车物流枢纽岛正式投用。该项目总用地面积 82.5 万 m^2 ,分两期建设。其中,一期工程建成 2 个汽车滚装泊位以及 1 个驳船泊位,配套 30 万 m^2 道路堆场,可靠泊目前全球最大的滚装船。项目投产后,广州港南沙汽车口岸将成为中国内地最大的汽车物流枢纽岛,形成集汽车滚装物流、展销和综合服务为一体的国际汽车物流产业园。