

水槽混合石料群抛试验

李小超¹,常留红¹,李 凌²,宋俊强²,张 鹏¹

(1. 长沙理工大学水利工程学院,长沙 410004; 2. 中交天津航道局有限公司,天津 300461)

摘要:为研究混合石料群抛入水后的漂移与扩散情况,在试验室水槽内开展了不同水深、不同流速、不同质量组成的混合石料群抛试验。将单颗粒抛石漂移距离公式计算结果与混合石料群抛平均漂移距离进行比较,结果表明:当水深在 15 m 以内时,具有平均质量的单颗粒块石漂移距离与群抛试验平均漂移距离较为接近;当水深为 30 m 时,具有混合石料平均质量的单颗粒块石漂移距离明显大于群抛试验平均漂移距离;群抛与单抛漂移距离的偏差随流速的增大而增大。同时通过量纲分析得到了混合石料群抛水下分布面积计算公式,并将计算结果与实验室试验数据和现场观测数据进行比较,吻合较好。

关键词:混合石料;抛石;漂移距离;分布面积;水槽试验

中图分类号:U617 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2017)06-0076-05

Experimental study on rock group ripraps in a water flume//LI Xiaochao¹, CHANG Liuhong¹, LI Ling², SONG Junqiang², ZHANG Peng¹ (1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China; 2. CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: Determination of the drift distance of a riprap is critical for water riprap works. Most of researchers have focused on the drift distance of a single particle rock so far, and a systematic study on the drift distance of a rock group was rarely carried out. It remains to be verified whether the drift distance of a rock with an average mass can represent that of a rock group. In this paper, a series of experiments have been conducted to investigate the drift and diffusion of a rock group with different mass combinations under different water depths and flow velocities. Comparisons between the calculated drift distance of the rock with an average mass using the formula for a single particle rock and the average drift distance of the rock group from the experiments were carried out. The results show that the drift distance of the rock with an average mass is close with that of the rock group if the water depth is less than 15m while the drift distance of the rock with an average mass is greater than that of the rock group if the water depth is around 30m. Furthermore, a formula for calculating the distribution area of a rock group riprap was derived through dimensional analysis. Reasonable agreement of the calculated results between the model experiment and field observations verified the reliability of the calculating formula.

Key words: rock group; riprap; drift distance; distribution area; waterflume experimental

在河道治理、护岸、潜丁坝、桥墩防冲等工程中经常会进行水上抛石施工。水上抛投的块石自水面落入水中后,在水流的作用下块石经过一段距离后着落于河底。块石自水面入水点至河床着落点产生的水平距离称为抛石漂移距离。要使块石抛投落至设计范围内,就必须根据落距确定施工定位船位置^[1]。施工定位是通过确定施工船舶在水上的准确位置,将块石抛入水下设计抛区,使施工最大限度地实现设计意图,达到最好效果。施工定位的准确性直接关系到施工质量和工程效益的发挥。施工定

位程序中最重要的一步是抛石漂移距离和抛石提前量的计算和确定。抛石位移直接影响到抛石质量,目前在实际施工过程中主要采用两种方法确定抛石漂移距离,其一是施工前进行抛投试验,实测不同粒径、不同质量的块石,在不同的水位和不同的流速下的水平落距,最后采用具有平均质量的单颗粒块石的漂移距离进行定位船定位;其二是采用经验公式对不同粒径、不同质量的块石,在不同的水位和不同的流速下的漂移距离进行计算,进而确定施工船舶在水上的位置。

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0402108);国家自然科学基金(51309038)

作者简介:李小超(1981—),讲师,博士,主要从事水流与结构物相互作用研究。E-mail:36633593@qq.com

通信作者:常留红(1979—),讲师,博士,主要从事航道整治技术研究。E-mail:1273601@qq.com

抛石漂移距离是一个多因素影响的复杂问题,一直为国内外学者所关注,很多学者^[2-10]针对单颗粒抛石漂移距离进行了研究。然而,实际抛石施工中多采用网兜、液压反铲式挖掘机和抓斗等方式进行机械抛填,更大型的抛投机械还有底开驳船、侧抛船等船舶直接抛投,如三峡工程大江截流水下平抛垫底施工^[11]等,即实际工程中抛石为混合石料群抛,而非单颗粒抛石。一些学者对混合石料群抛开展了模型试验和数值模拟研究,如韩海骞等^[12]开展了船抛混合石料试验研究,陈凯华等^[13]对水下抛石基床动态形成过程开展了数值模拟研究。目前对于混合石料群抛的研究还非常少,采用具有平均质量的单颗粒块石漂移距离来代表混合石料群抛的漂移距离是否合理仍然有待检验。本文以长江南京以下12.5 m 深水航道二期工程口岸直水道整治工程Ⅱ标段为依托工程,对混合石料群抛的分选和漂移情况进行研究。本标段抛石工程大、级配种类多、工期紧、任务重、环境因素复杂。石料主要包括堤心石、护面块石、护脚块石、基床抛石、护肩块石、压排石、护岸抛石、连锁块搭接片石等,不同的级配、容重等致使块石抛投准确性降低,有必要开展不同水深、不同流速、不同石料规格抛石的漂移距离试验,结合现场施工测量数据,建立多因素综合影响的漂移距离计算公式,指导精准抛投施工,有效提升水下抛石质量和降低施工成本。

1 试验方法

本标段石料规格主要为:压排石 1 ~ 50 kg、堤心石 1 ~ 200 kg、护面石 200 ~ 300 kg、护脚石 100 ~ 200 kg、护脚石 200 ~ 300 kg、护肩块石 200 ~ 300 kg。工程抛石施工采用网兜定点抛石、定位驳定位靠泊抛石和抓斗定点抛石的方法进行施工,块石的抛投分别采用网兜、铲头和抓斗进行,每个网兜容量约为2.0 m³,铲斗容量为1 m³,每个抓斗容量约为5 m³。试验几何比尺取为1 : 30,根据试验比尺推算出每次试验抛投块石的总体积。试验前,根据石料规格选取块石,用量筒量取一次抛投块石的总体积,然后称量块石的总质量,数块石的个数,最后得到块石平均质量,见表1。试验时,对同一总体积块石(同一

块石抛投方法)抛投5次,测量每次抛投后的块石分布面积和平均漂移距离。

根据施工区域水文条件,分别选取水深为30 m、15 m、10 m,水面流速为1.0 m/s、1.5 m/s、2.0 m/s 进行模型试验。水槽垂向流速分布测量结果分析表明,试验流速垂向分布服从n=1/12的指数分布。

2 试验结果分析

抛石下沉过程中,分选不太明显;落至水底后,并不是像单颗粒块石那样,重量轻的漂移距离远,重的漂移距离近,而是大小块石夹杂在一起,散落于水底,较少出现堆积,除了10 m 水深下少数几次抛投出现了堆积现象外,其他抛投均未出现堆积。原因大致有:①虽然大块石沉速大,但群抛石料下落时大小块石夹杂在一起,相互碰撞,大块石的落势受到阻滞,而小块石则有加速下沉的趋势;②即使部分小块石下沉较慢,但由于石料大小夹杂,漂移距离相差不大,沉底后可从先下落的大块石缝中落下。

群抛石料水下分布形状不规则,有近似椭圆形分布的,有近似扇形分布的,也有近似矩形分布的。在水流方向石料的扩散带宽(最近漂移距离至最远漂移距离的范围)主要受一次抛投总体积和石料平均质量的影响,抛投总体积越大扩散带宽越大,平均质量越大扩散带宽越大,水深和流速的影响并不明显。石料的扩散带宽主要集中在10 m 以内。

在进行混合石料群抛试验前,对单颗粒块石在水中的受力和运动状况进行了分析,考虑流速垂向分布和块石变加速运动影响的单颗粒块石漂移距离计算公式^[14]为

$$S = \sqrt{\frac{6\rho\eta_y}{\pi(\rho_s - \rho)g}} \frac{Hu_m}{(n + 1)} D^{-\frac{1}{2}} - \frac{(\pi\rho_s + 6\beta\rho)}{6\rho\eta_x} D \ln \left(\sqrt{\frac{6\rho\eta_y}{\pi(\rho_s - \rho)g}} \frac{6\rho Hu_m \eta_x}{(\pi\rho_s + 6\beta\rho)} D^{-\frac{3}{2}} + 1 \right) \tag{1}$$

其中 $D = \left(\frac{6m}{\pi\rho_s} \right)^{\frac{1}{3}}$

式中:g 为重力加速度;ρ 为水的密度;ρ_s 为块石的密度;H 为水深;u_m 为水面流速;n 为流速分布指数;η_x、η_y 分别为纵向与垂向阻力系数;β 为附加质量系

表 1 抛石试验方案

块石质 量/kg	铲斗抛投 1.0 m ³			网兜抛投 2.0 m ³			抓斗抛投 5.0 m ³		
	总质量/kg	块石个数	平均质量/kg	总质量/kg	块石个数	平均质量/kg	总质量/kg	块石个数	平均质量/kg
1 ~ 50	1323.0	36	36.75	2465.1	75	32.86	6625.8	200	33.12
1 ~ 200	1355.4	15	90.36	2767.5	34	81.39	7711.2	79	97.61
100 ~ 200	1517.4	10	151.74	2554.2	18	141.90	6785.1	46	147.50
200 ~ 300	1436.4	6	239.40	2551.5	11	231.95	6939.0	29	239.27

数; D 为等容粒径; m 为块石质量。 η_x 、 η_y 、 β 的取值分别为 $\eta_x=6.17$ 、 $\eta_y=0.66$ 和 $\beta=0.21$ 。式(1)的计算结果与单颗粒抛石试验结果吻合较好,详细的理论推导过程和单颗粒抛石试验结果见文献[14]。

图1为群抛石料的平均漂移距离(最远漂移距离与最近漂移距离的平均值)与具有群抛石料的平均质量的单颗粒块石漂移距离式(1)计算值的比较,结果表明,群抛石料平均漂移距离随平均质量(粒径)的增加而减小,这与单颗粒块石漂移距离的变化规律一致。水深为10 m和15 m时,具有群抛石料平均质量的单颗粒块石漂移距离与群抛试验平均漂移距离接近;水深为30 m时,具有群抛石料平均质量的单颗粒块石漂移距离明显大于群抛试验平均漂移距离,差距随流速的增大而增大,流速分别为1.0 m/s、1.5 m/s、2.0 m/s时的差距分别约为2.35 m、4.35 m和7.10 m。因此,采用具有平均质量的单颗粒块石进行试抛,进而根据其漂移距离进行定位船定位,对于水深在15 m以内时是合适的,但对于30 m的大水深,群抛石料中各块石之间的相互作用对群抛平均漂移距离的影响变得重要,采用试抛或式(1)计算的漂移距离偏差较大,实际施工中应予以重视。

由于下落过程中块石之间相互碰撞或挤压以及水流紊动等原因,块石下落时除沿水流方向产生漂移外,还存在垂直于水流方向的横向位移,即横向漂移距离。试验表明,横向扩散范围关于中心线基本对称。横向扩散带宽随块石的质量(粒径)范围、一次抛投块石总体积、水深和流速的变化而变化。分

析可知,块石的质量范围和流速对横向扩散带宽的影响较小,横向扩散带宽主要受一次抛投块石总体积和水深的影响,随一次抛投块石总体积和水深的增加而增大。表2为不同块石石料在不同水深下采用不同抛投方法时的横向扩散带宽。

表2 横向扩散带宽

单颗粒块石质量/kg	水深/m	抛石方法	一次抛投总体积/m ³	横向扩散带宽/m
1~50	≤15	铲斗	1	5.3~7.8
1~200	≤15	铲斗	1	4.2~6.0
100~200	≤15	铲斗	1	4.6~6.0
200~300	≤15	铲斗	1	4.2~5.0
1~50	≤15	网兜	2	6.0~7.8
1~200	≤15	网兜	2	6.5~8.7
100~200	≤15	网兜	2	5.8~7.9
200~300	≤15	网兜	2	5.0~7.6
1~50	≤15	抓斗	5	8.0~9.0
1~200	≤15	抓斗	5	7.2~9.0
100~200	≤15	抓斗	5	7.6~9.0
200~300	≤15	抓斗	5	7.0~9.0
1~50	30	铲斗	1	8.0~10.0
1~200	30	铲斗	1	7.5~10.0
100~200	30	铲斗	1	5.0~8.0
200~300	30	铲斗	1	7.5~9.0
1~50	30	网兜	2	9.0~10.0
1~200	30	网兜	2	8.0~9.0
100~200	30	网兜	2	8.0~10.0
200~300	30	网兜	2	7.2~7.6
1~50	30	抓斗	5	11.2~11.6
1~200	30	抓斗	5	12.0~13.8
100~200	30	抓斗	5	11.0~12.0
200~300	30	抓斗	5	8.0~9.5

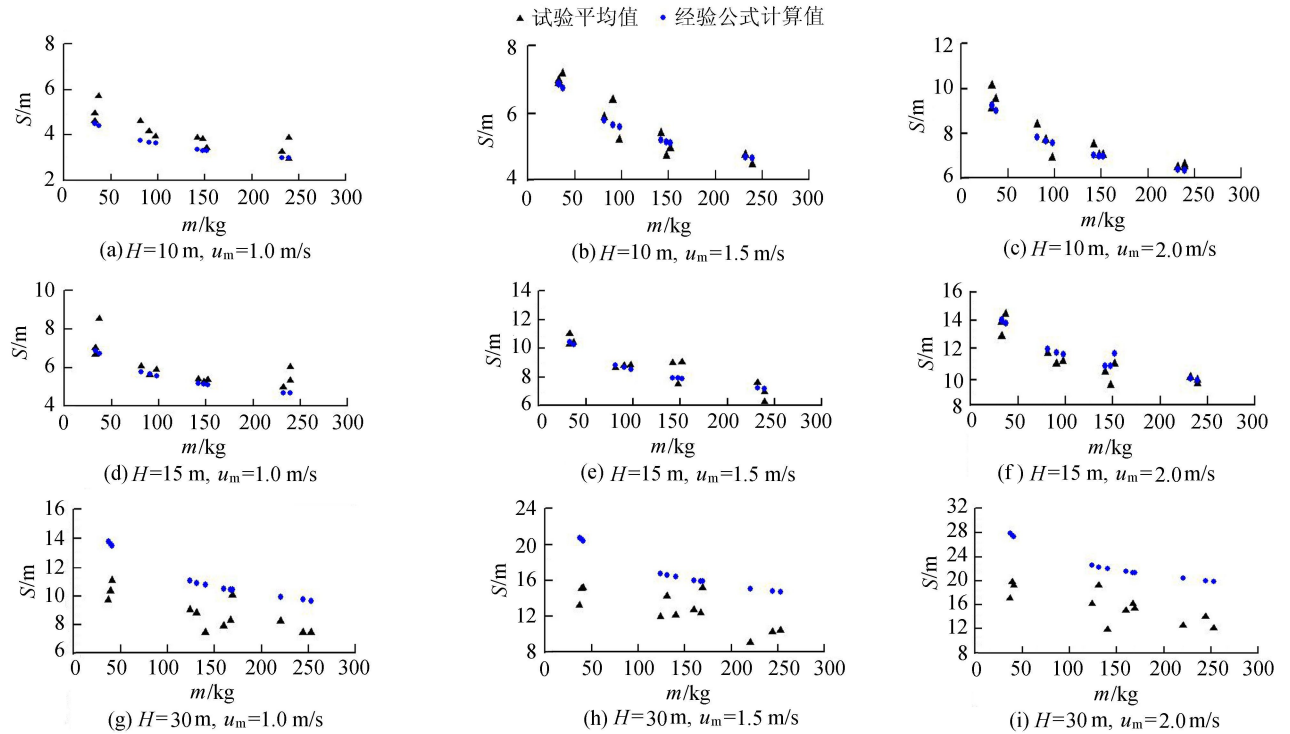


图1 石料群抛平均漂移距离与单颗粒漂移距离经验公式计算值的比较

石料水下分布面积主要依赖于一次抛投块石总体积和石料平均质量(粒径)。在相同水深和流速下,石料水下分布面积随一次抛投块石总体积的增大而增大,随平均质量(粒径)的增大而减小。主要原因在于,由于同一时间内进入水体的石料增多,其互相碰撞、互相制约等的影响更加显著,故水下分布范围也就更大一些。水深和流速对石料水下分布面积的影响居次要地位,从整体上看,石料水下分布面积随水深和流速的增大而增大。

3 石料水下分布面积计算公式

群抛混合石料的水下分布面积主要取决于一次抛投块石的总体积、块石的几何尺度、上游来流条件、水流的运动特征等,通过初步分析,得出:

$$f(A,V,H,U,D_m,g,\rho,\mu)=0 \tag{2}$$

式中: A 为石料水下分布面积; V 为一次抛投的块石总体积; U 为平均水流流速, $U=\frac{u_m}{n+1}$; D_m 为一次抛投块石的平均粒径; μ 为水流的动力黏性系数。

选取 H 、 U 、 μ 为基本变量,用它们去表示其他的变量,根据量纲和谐原则得到:

$$f\left(\frac{A}{H^2},\frac{V}{H^3},\frac{D_m}{H},\frac{\rho U H}{\mu},\frac{g H}{U^2}\right)=0 \tag{3}$$

式中 $\frac{\rho U H}{\mu}$ 为水流雷诺数(用 Re 表示),由于 U 、 H 在其他项中已有考虑,且 Re 的变化对石料的水下分布影响甚小,实际块石下沉过程水流是紊流而非层流,故可忽略雷诺数变化的影响;根据任何一项均可以被该项的任何次幂代替的原则,无量纲数 $\frac{g H}{U^2}$ 是弗劳德数的倒数的平方,为简化计算,可由 $Fr=\frac{U}{\sqrt{g H}}$ 代替,

考虑到 $U=\frac{u_m}{n+1}$,有 $Fr=\frac{u_m}{(n+1)\sqrt{g H}}=\frac{Fr_m}{n+1}$,而 $Fr_m=\frac{u_m}{\sqrt{g H}}$,于是有

$$f\left(\frac{A}{H^2},\frac{V}{H^3},\frac{D_m}{H},\frac{Fr_m}{n+1}\right)=0 \tag{4}$$

假设水下石料分布面积公式为

$$\frac{A}{H^2}=\alpha_0\left(\frac{V}{H^3}\right)^{\alpha_1}\left(\frac{D_m}{H}\right)^{\alpha_2}\left(\frac{Fr_m}{n+1}\right)^{\alpha_3} \tag{5}$$

式中 α_0 、 α_1 、 α_2 、 α_3 为系数。取对数得

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{A}{H^2}\right) &= \ln(\alpha_0) + \alpha_1 \ln\left(\frac{V}{H^3}\right) + \\ &\alpha_2 \ln\left(\frac{D_m}{H}\right) + \alpha_3 \ln\left(\frac{Fr_m}{n+1}\right) \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \text{令 } Y &= \ln\left(\frac{A}{H^2}\right), a_0 = \ln\alpha_0, a_1 = \alpha_1, a_2 = \alpha_2, a_3 = \alpha_3, X_1 = \\ &\ln\left(\frac{V}{H^3}\right), X_2 = \ln\left(\frac{D_m}{H}\right), X_3 = \ln\left(\frac{Fr_m}{n+1}\right), \text{则有} \end{aligned}$$

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 \tag{7}$$

由实测数据计算 Y, X_1, X_2, X_3 数据系列,然后运用多元回归计算其系数,得 $a_0 = 0.2864, a_1 = 0.9363, a_2 = -1.0668, a_3 = 0.0229$ 。

因此可得群抛石料水下分布面积的经验公式为

$$\frac{A}{H^2} = e^{0.2864} \left(\frac{V}{H^3}\right)^{0.9363} \left(\frac{D_m}{H}\right)^{-1.0668} \left(\frac{Fr_m}{n+1}\right)^{0.0229} \tag{8}$$

从而得到

$$A = 1.3317 V^{0.9363} D_m^{-1.0668} \left(\frac{Fr_m}{n+1}\right)^{0.0229} H^{0.2580} \tag{9}$$

根据试验条件,由式(9)计算群抛石料水下分布面积,将其与试验值点绘在同一张图上(图2)。可以看出,两者吻合较好,因此式(9)可以较好地代表群抛石料的水下分布面积。

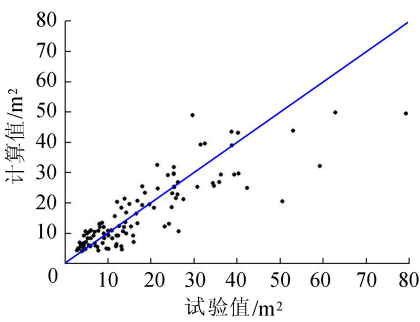


图2 群抛石料水下分布面积的对比

4 现场观测对比

在长江口岸直河段护岸工程施工水域选取一块未进行任何施工过的区域进行混合石料群抛试验,测试不同水流条件下群抛混合石料的漂移距离及扩散范围。试验前首先采用水下声纳进行初始河床地形测量,然后进行水深和流速大小及流向的测量,水深和流速大小测量3次,取平均值。抛投石料前记录好抛投点坐标,混合石料群抛试验采用网兜进行,每个网兜抛石体积约为1.7 m³,考虑到每个网兜的抛石量较小,抛投石料后水下地形变化不明显,试验在同一抛投点抛投5个网兜,抛投完5网兜后,再采用水下声纳对抛投区域的水下地形进行测量,将抛后水下地形与抛前水下地形进行比较,地形发生了变化的区域即为石料水下分布区域。

工程现场测得 $H = 14.5\text{ m}$, $u_m = 0.92\text{ m/s}$,石料的水下分布见图3,图中水流方向基本与图中斜对

角线平行,抛点坐标为(0, 0)。分析可知,分布面积约为 30.375 m²,平均漂移距离约为 7.7 m。取一次抛投块石总体积为 1.7 m³,取平均厚度 0.15 m 作为平均粒径,则采用群抛水下分布面积计算公式(9)计算得到的石料水下分布面积为 31.08 m²,由单颗粒抛石漂移距离计算公式(1)计算得到的平均漂移距离为 8.65 m。由此可见,经验公式与现场试验结果在石料水下分布面积、平均漂移距离等方面基本吻合,试验成果可以供工程施工参考。

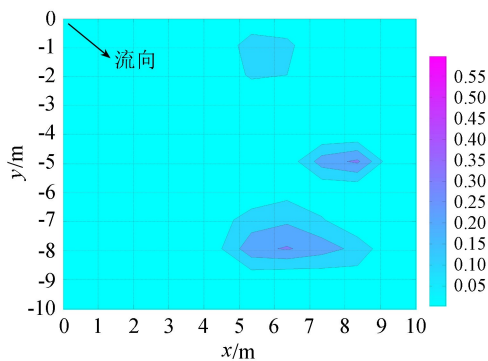


图3 $H=15.46\text{ m}$, $u_m=0.86\text{ m/s}$ 时
石料的水下分布(单位:m)

5 结 论

a. 群抛混合石料下沉过程中,分选不太明显,落至水底后,大小块石夹杂在一起,散落于水底,较少出现堆积现象。群抛石料水下分布形状较为不规则,石料水下分布面积主要依赖于一次抛投块石总体积和石料平均质量(粒径),水深和流速对石料水下分布面积的影响居次要地位。石料水下分布面积随一次抛投块石总体积的增大而增大,随平均质量(粒径)的增加而减小。通过与水槽试验结果和现场观察结果的比较,由量纲分析得到的石料水下分布面积计算公式能够较好地计算群抛石料的水下分布面积。

b. 群抛石料在水流方向的扩散带宽主要受一次抛投总体积和石料质量分布的影响,主要集中在 10 m 以内。平均漂移距离随平均质量(粒径)的增加而减小。当水深在 15 m 以内时,具有混合石料平均质量的单颗粒块石漂移距离与群抛试验平均漂移距离接近;当水深为 30 m 时,群抛石料中各块石之间的相互作用对群抛平均漂移距离的影响变得重要,使其与单颗粒块石漂移距离偏差较大,且偏差值随流速的增大而增大,实际施工中应予以重视。

c. 群抛石料横向扩散范围关于中心线基本对称。横向扩散带宽主要受一次抛投块石总体积和水深的影响,随一次抛投块石总体积和水深的增加而增大。石料的平均质量(粒径)和流速对横向扩散

带宽的影响较小。

参考文献:

- [1] 窦臻,张增发,杭建国. 平顺抛石护岸工程施工定位技术浅析[J]. 陕西水利, 2010(6): 67-69. (DOU Zhen, ZHANG Zengfa, HANG Jianguo. Analysis of positioning technology for smooth riprap revetment project [J]. Shanxi Water Resources, 2010(6): 67-69. (in Chinese))
- [2] 梁润. 河道截流的抛石抗冲稳定流速及稳定移距[J]. 武汉水利水电学院学报, 1978, 11(1): 41-50. (LIANG Run. Stable velocity and drift distance of riprap in river closure project [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1978, 11(1): 41-50. (in Chinese))
- [3] 潘庆荣,余文畴,曾静贤. 抛石护岸工程的试验研究[J]. 泥沙研究, 1981, 6(1): 75-84. (PAN Qingshen, YU Wenchou, ZENG Jingxian. An experimental study on riprap revetment engineering [J]. Journal of Sediment Research, 1981, 6(1): 75-84. (in Chinese))
- [4] 谢鉴衡. 河流泥沙工程学(上册)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982.
- [5] 余文畴. 抛石落距试验研究[J]. 水利工程管理技术, 1992(5): 22-24. (YU Wenchou. An experimental study on drift distance of riprap [J]. Water Conservancy Construction and Management, 1992(5): 22-24. (in Chinese))
- [6] 詹义正. 球体在动水中的移距公式及其应用[J]. 泥沙研究, 1992, 17(4): 85-91. (ZHANG Yizheng. Formulas and applications of drift distance for hydrodynamic riprap [J]. Journal of Sediment Research, 1992, 17(4): 85-91. (in Chinese))
- [7] 詹义正,寇树萍. 球体的移距及稳定移距公式[J]. 武汉水利电力大学学报, 1996, 29(2): 85-90. (ZHANG Yizheng, KOU Shuping. Equations of sphere's falling distance [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering, 1996, 29(2): 85-90. (in Chinese))
- [8] 韩海骞,杨永楚. 动水抛石漂移距离的计算[J]. 浙江水利科技, 2001(3): 6-7. (HAN Haiqian, YANG Yongchu. Calculation of drift distance for hydrodynamic riprap [J]. Zhejiang Hydropower, 2001(3): 6-7. (in Chinese))
- [9] GUO J. Motion of spheres falling through fluids [J]. Journal of Hydraulic Research, 2011, 49(1): 32-41.
- [10] 齐梅兰,魏金,刘春光. 墩周绕流对抛石落距的影响[J]. 水利学报, 2013, 44(2): 232-237. (QI Meilan, WEI Jin, LIU Chunguang. Flow-affected riprap transport distance around circular pier in the deposition process [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(2): 232-237. (in Chinese))

(下转第 94 页)

on the transport timescale in a river-influenced macro-tidal estuary[J]. *Journal of Coastal Research*, 2016 (Sup75): 193-197.

[35] MERCIER C, DELHEZ E J M. Diagnosis of the sediment transport in the Belgian Coastal Zone [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 74(4): 670-683.

[36] GONG Wenping, SHEN Jian. A model diagnostic study of age of river-borne sediment transport in the tidal York River estuary[J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2010, 10(1/2): 177-196.

[37] DELHEZ E J M, WOLK F. Diagnosis of the transport of adsorbed material in the Scheldt estuary: a proof of concept [J]. *Journal of Marine Systems*, 2013, 128: 17-26.

[38] 马俊超, 李琼芳, 陆国宾, 等. 三峡-葛洲坝梯级水库不同蓄水阶段对其下游泥沙特性的影响分析[J]. *水资源保护*, 2016, 32(1): 75-78. (MA Junchao, LI Qiongfang, LU Guobin, et al. Analysis of impacts of different impound phases of Three Gorges-Gezhouba cascade reservoirs on sediment regime in downstream [J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(1): 75-78. (in Chinese))

[39] 王鹏, 李琼琼, 蔡赟杰. 太湖沉积物再悬浮对双酚 A 吸附性能的影响[J]. *水资源保护*, 2015, 31(5): 35-41. (WANG Peng, LI Qiongfong, CAI Yunjie. Effect of sediment resuspension on BPA adsorption in Taihu Lake [J]. *Water Resources Protection*, 2015, 31(5): 35-41. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-12-14 编辑: 熊水斌)

(上接第 24 页)

[8] ROWLAND J C, LEPPER K, DIETRICH W E, et al. Tie channel sedimentation rates, oxbow formation age and channel migration rate from optically stimulated luminescence (OSL) analysis of floodplain deposits[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 39(9): 1161-1179.

[9] BABKA B, FUTÓ I, SZABÓ S. Clustering oxbow lakes in the Upper-Tisza Region on the basis of stable isotope measurements[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 410(1/2): 105-113.

[10] GALBARCZYK-GASIOROWSKA L, GASIOROWSKI M, SZEROCZYŃSKA K. Reconstruction of human influence during the last two centuries on two small oxbow lakes near Warsaw (Poland) [J]. *Hydrobiologia*, 2009, 208(1): 173-183.

[11] TOONEN W H J, KLEINHANS M G, COHEN K M. Sedimentary architecture of abandoned channel fills [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(4): 459-472.

[12] 赵资乐. 黄河上游黑河、白河流域水沙规律[J]. *甘肃水利水电技术*, 2005, 41(4): 336-338. (ZHAO Zile. Water and sediment regulation of Black River and White River basin in the upper reaches of the Yellow River [J]. *Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology*, 2005, 41(4): 336-338. (in Chinese))

[13] 李志威, 王兆印, 李艳富, 等. 黄河源区典型弯曲河流的几何形态特征[J]. *泥沙研究*, 2012(4): 11-17. (LI Zhiwei, WANG Zhaoyin, LI Yanfu, et al. Planform geometry characteristics of typical meandering rivers in Yellow River Source [J]. *Journal of Sediment Research*, 2012(4): 11-17. (in Chinese))

[14] ISHII Y, HORI K. Formation and infilling of oxbow lakes in the Ishikari lowland, northern Japan [J]. *Quaternary International*, 2015, 397: 136-146.

[15] DIERAS P L, CONSTANTINE J A, HALES T C, et al. The role of oxbow lakes in the off-channel storage of bed material along the Ain River, France [J]. *Geomorphology*, 2013, 188: 110-119.

(收稿日期: 2016-12-07 编辑: 郑孝宇)

(上接第 80 页)

[11] 杨文俊, 朱红兵, 柏林, 等. 三峡工程大江截流平抛垫底砂砾石料漂移特性研究[J]. *长江科学院院报*, 1997, 14(4): 36-40. (YANG Wenjun, ZHU Hongbing, BO Lin, et al. Investigation on drift characteristics of sand gravel materials in forming closure gap's bedding course for TGP [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1997, 14(4): 36-40. (in Chinese))

[12] 韩海骞, 杨永楚, 王卫标, 等. 钱塘江河口闻家堰段护底抛石研究[J]. *泥沙研究*, 2002, 27(2): 29-35. (HAN Haiqian, YANG Yongchu, WANG Weibiao, et al. The research for protecting the riverbed of Wenjiayan on Qiantang River by rock riprap [J]. *Journal of Sediment Research*, 2002, 27(2): 29-35. (in Chinese))

[13] 陈凯华, 石崇, 梁邦炎, 等. 水下抛石基床动态形成过程数值模拟研究[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(31): 314-319. (CHEN Kaihua, SHI Chong, LIANG Bangyan, et al. Numerical simulation research of the falling process for the underwater riprap [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(31): 314-319. (in Chinese))

[14] 李小超, 常留红, 宋俊强, 等. 复杂水流条件下抛石漂移距离的试验研究[J]. *水运工程*, 2017(6): 1-8. (LI Xiaochao, CHANG Liuhong, SONG Junqiang, et al. Experimental study on drift distance of riprap on the condition of complex water flow [J]. *Port and Waterway Engineering*, 2017(6): 1-8, (in Chinese))

(收稿日期: 2016-12-28 编辑: 郑孝宇)