文章编号: 1000-8608(2018)04-0379-06

截流钢筋石笼起动流速计算方法研究

汪 淼*[1,2], 周宜红[1], 杨忠勇[1], 刘 潋[1], 汪庆元[3], 张淑梅[3]

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;
2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;
3. 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 以工程截流中的单体钢筋石笼作为研究对象,深入探讨了其起动机理. 通过对单体钢筋石笼受力分析,推导出其起动流速计算公式,分析了公式中拖曳力系数 C_D、上举力系数 C_L 的影响因素. 通过水槽模型试验,研究了不同摩擦因数条件下多种尺寸的正六面体钢筋石笼、条形六面体钢筋石笼、扁形六面体钢筋石笼起动流速变化规律;定量地分析了 C_D 和 C_L 与钢筋石笼扁度系数 λ 以及沙粒雷诺数 Re^* 的相关关系,绘制了 (λ, Re^*, C_D) 与 (λ, Re^*, C_L) 的分布云图. 经验证表明,起动流速计算公式和 C_D、C_L 分布云图二者结合的钢筋石笼起动流速计算方法的计算值与试验值基本一致,较好地反映了钢筋石笼的起动情况.

关键词: 钢筋石笼;起动流速;拖曳力系数;上举力系数;水槽模型试验

中图分类号: TV131.61 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201804007

0 引 言

截流是标志着水利水电工程进入主体工程施工的重要节点,也是工程建设中至关重要的环节之一,它的成败直接影响着工程的工期和造价. 在戗堤合龙时,如何减少抛投料的损失、增加其有效性,是整个截流过程的核心. 在一些大型工程截流中,钢筋石笼常常替代了混凝土抛投块体. 钢筋石笼制作简单、取材方便,降低了工程成本,同时有着较好的稳定性及透水性,减小了截流难度,发挥了巨大作用.

对于钢筋石笼的研究,离不开探讨其起动流速. 20 世纪 30 年代,伊兹巴斯通过模型试验,从截流块体起动流速的角度出发,得到了截流块体起动流速经验公式[1-3]为 $v = K\sqrt{2g\dfrac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}D}$,其中 K、γ_s、γ、D 分别表示块体的稳定系数、块体容重、水容重以及块体的化引直径.

该公式中的稳定系数 K,因包含了拖曳力系数 C_D、上举力系数 C_L、摩擦因数 f 等对块体起动能力有重要影响的因素,导致其取值范围较大、计算结果有一定偏差.

针对上述问题,汪定扬等[4-5]对 K 进行了分解,并引入相对粗糙度的概念(基面糙度与块体化引直径的比值),得出块体的起动流速公式为 $v = \left(\dfrac{H}{D}\right)^{\alpha}\left[A + B\left(\dfrac{\Delta}{D}\right)^{n}\right]\sqrt{2g\dfrac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}D}$,其中 Δ/D 为相对粗糙度,H 为水深,α、A、B、n 是由试验确定的待定参数.

由于上述两个公式是针对所有截流块体而言,采用化引直径 D 替代钢筋石笼的尺寸不尽合理. 因此,李学海等[6-7]在研究钢筋石笼的起动机理中,引入了扁度系数 λ 对化引直径 D 进行修正,并通过一系列相关试验,拟合出了钢筋石笼起动流速公式 $v = \left[0.65 + 0.80\left(\dfrac{\Delta}{D}\right)^{1/2}\right]\lambda^{1/3} \times \sqrt{2g\dfrac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}D}$,$\lambda = \dfrac{\sqrt{ab}}{c}$,其中 a、b、c 分别为钢筋石笼的长轴、中轴、短轴.

李学海对于该问题的相关研究重在试验数据的拟合,解决了公式中待定参数的取值问题,而随后叶恩立等[8-9]对于钢筋石笼起动规律的研究则

收稿日期: 2017-12-19; **修回日期:** 2018-06-05.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51509143).
作者简介: 汪 淼*(1990-),男,博士生,E-mail: wang.miao@whu.edu.cn.

重在理论分析.叶恩立认为汪定扬、李学海所提出的公式没能很好地处理块体底部摩擦力问题，对于底部摩擦因数 $f=0$ 或者 f 非常小的情况下，$v=0$ 或趋近于 0 不能较好地从公式中反映.因此，叶恩立对钢筋石笼进行受力分析，并结合试验，得出了钢筋石笼起动流速简化计算公式 $v=\sqrt{\frac{cf}{C_D}}\sqrt{2g(\gamma_s-\gamma)}$，其中 c 为钢筋石笼沿水流方向长度.

叶恩立所提出的公式较好地解决了采用化引直径 D 替代钢筋石笼几何尺度以及底部摩擦力的相关问题，但该公式忽略了上举力系数 C_L 对起动流速的影响.对于计算底面积相对较大的钢筋石笼而言，其所受上举力较大，忽略 C_L 会对起动流速的计算造成一定偏差.

针对上述分析，本文从单个截流钢筋石笼的起动机理着手，推导其起动流速计算公式；通过水槽模型试验，得出 (λ, Re^*, C_D) 与 (λ, Re^*, C_L) 分布云图，提出起动流速计算公式和 C_D、C_L 分布云图二者结合的钢筋石笼起动流速计算方法.

1 理论分析

以水体中的单体钢筋石笼为例，其受力如图 1 所示. F_d 为迎水面推力，F_l 为上举力，F_z 为摩擦阻力，G 为钢筋石笼有效重力.

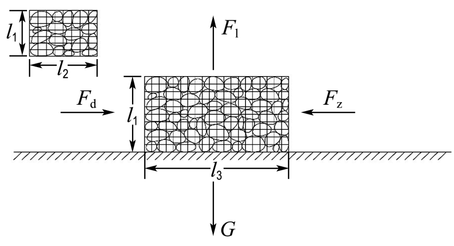


图 1 钢筋石笼受力分析

Fig.1 Force analysis of a rock-filled steel cage

其中，各个力的表达式如下：

$$F_d=C_DA_d\gamma\frac{v_d^2}{2g} \tag{1}$$

$$F_l=C_LA_l\gamma\frac{v_d^2}{2g} \tag{2}$$

$$F_z=f(G-F_l) \tag{3}$$

$$G=(\gamma_s-\gamma)V_s \tag{4}$$

$$V_s=l_1l_2l_3(1-n) \tag{5}$$

式中：v_d 为钢筋石笼高度内的平均流速，A_d 为钢筋石笼迎水面面积，A_l 为钢筋石笼底面面积，V_s 为钢筋石笼体积，n 为钢筋石笼空隙率.

钢筋石笼起动临界条件为 $F_d=F_z$，即

$$v_d=\sqrt{\frac{(1-n)fl_1l_3}{l_1C_D+fl_3C_L}}\sqrt{2g\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma}} \tag{6}$$

由此可知，计算出钢筋石笼起动流速的关键在于能否确定 C_D、C_L 的取值.

研究表明[10-14]，对于六面体钢筋石笼而言，C_D、C_L 的取值与钢筋石笼的形状及沙粒雷诺数相关.钢筋石笼的形状采用扁度系数 $\lambda=\sqrt{ab}/c$ 表示[6-7]；沙粒雷诺数 $Re^*=v_dD/\nu$，其中 D 为钢筋石笼特征尺度(本文中 $D=\sqrt[3]{6abc/\pi}$，表示等效粒径)，ν 为水的黏性系数(文中取 10 ℃条件下水的黏性系数 $\nu=0.013\ 1\times10^{-4}\ \mathrm{m^2/s}$)[15].由此，$C_D$、$C_L$ 可表示为 λ 与 Re^* 的函数，即 $C_D\sim f_1(\lambda, Re^*)$，$C_L\sim f_2(\lambda, Re^*)$.当 λ 与 Re^* 取值一定时，C_D 与 C_L 为定值.由式(6)得出

$$l_1C_D+fl_3C_L=\frac{2g(1-n)fl_1l_3(\gamma_s-\gamma)}{\gamma v_d^2} \tag{7}$$

为获取 C_D、C_L 与 λ 和 Re^* 的定量关系，文中采用不同尺寸、不同扁度系数的单体钢筋石笼，在 3 种摩擦因数的基面上进行钢筋石笼起动流速试验，并根据相关数据绘制出 $(\lambda, Re^*, l_1C_D+fl_3C_L)$ 分布云图.通过 3 幅云图对应的方程求解两个未知数 C_D、C_L，即采用最小二乘法求出最优解，由此绘制 (λ, Re^*, C_D) 与 (λ, Re^*, C_L) 的分布云图.

2 模型试验及分析

模型试验按 1∶50 的比尺在有机玻璃水槽中进行.水槽长 10 m、宽 0.50 m、深 0.75 m.试验基面分为有机玻璃基面($f=0.28$)、光滑水泥板基面($f=0.48$)、粗糙水泥板基面($f=0.69$).下列试验成果数值均为原型值.

2.1 试验钢筋石笼规格

查阅实际工程中钢筋石笼规格及相关试验研究[6-7]，本文试验块体选用六面体钢筋石笼，分为正六面体钢筋石笼、条形六面体钢筋石笼和扁形六面体钢筋石笼.所有钢筋石笼的容重均为 19.60 kN/m³.正六面体钢筋石笼选用不同体积的试验块体，规格如表 1 所示.

试验采用的条形、扁形六面体钢筋石笼与原型边长为 2 m 的正六面体钢筋石笼同体积，并以此为参照对象进行尺寸变换，分为两种情况：

(1)对于条形六面体钢筋石笼，保持中轴不变，改变长轴与短轴尺寸.(2)对于扁形六面体钢筋石笼，使长轴与中轴同步变化，保持其所在面为正方形，改变短轴尺寸.条形和扁形六面体钢筋石笼规格如表 2、3 所示.

表 1　正六面体钢筋石笼规格

Tab.1　Sizes of regular hexahedron rock-filled steel cages

编号	边长/m	体积/m³	质量/t
Z1	1.00	1.00	2.00
Z2	1.25	1.95	3.91
Z3	1.50	3.38	6.75
Z4	1.75	5.36	10.72
Z5	2.00	8.00	16.00
Z6	2.25	11.39	22.78
Z7	2.50	15.63	31.25

表 2　条形六面体钢筋石笼规格

Tab.2　Sizes of bar hexahedron rock-filled steel cages

编号	边长/m			体积/m³	质量/t
	长轴	中轴	短轴		
T1	2.00	2.00	2.00	8.00	16.00
T2	2.25	2.00	1.78	8.00	16.00
T3	2.50	2.00	1.60	8.00	16.00
T4	2.75	2.00	1.45	8.00	16.00
T5	3.00	2.00	1.33	8.00	16.00

表 3　扁形六面体钢筋石笼规格

Tab.3　Sizes of flat hexahedron rock-filled steel cages

编号	边长/m			体积/m³	质量/t
	长轴	中轴	短轴		
B1	2.00	2.00	2.00	8.00	16.00
B2	2.25	2.25	1.58	8.00	16.00
B3	2.50	2.50	1.28	8.00	16.00
B4	2.75	2.75	1.06	8.00	16.00
B5	3.00	3.00	0.89	8.00	16.00

2.2　试验程序

将试验块体放置于水槽中的试验基面，保持来流量不变，通过尾门调节下游水位，直至试验块体开始滑动，且滑动一段又能停止下来，测量钢筋石笼高度内的流速.

试验中对于条形六面体钢筋石笼而言，在水流的作用下，钢筋石笼总是以相对稳定的形式保持自身的稳定.因此，本试验中所有条形六面体钢筋石笼摆放方式均为中轴 b 与短轴 c 所在面为迎水面，长轴 a 沿水流方向，短轴 c 垂直于试验基面的方式摆放.

2.3　试验成果及分析

在 3 种不同摩擦因数条件下，经过多次试验，对钢筋石笼所在高度内的流速取平均值，并进行相关试验数据处理.不同规格的单体钢筋石笼起动流速变化规律见图 2～4.

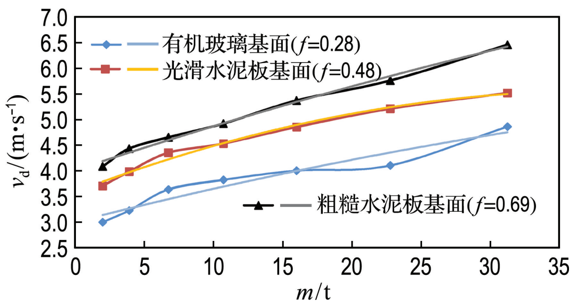


图 2　正六面体钢筋石笼起动流速随质量的变化规律

Fig.2　Relationships between incipient velocities and mass of regular hexahedron rock-filled steel cages

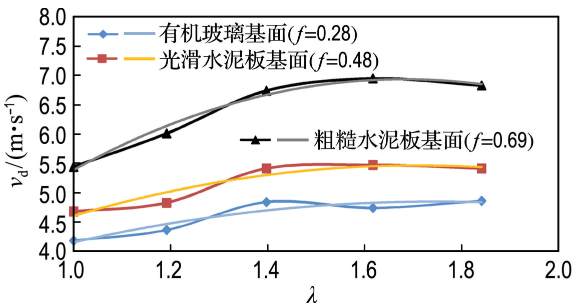


图 3　条形六面体钢筋石笼起动流速随扁度系数的变化规律

Fig.3　Relationships between incipient velocities and flattening coefficients of bar hexahedron rock-filled steel cages

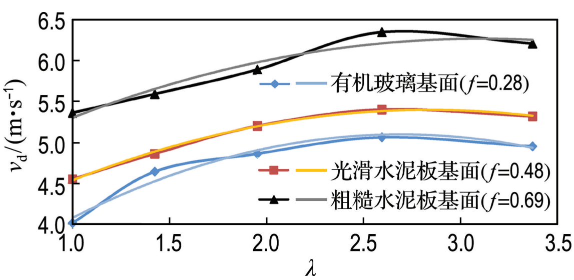


图 4　扁形六面体钢筋石笼起动流速随扁度系数的变化规律

Fig.4　Relationships between incipient velocities and flattening coefficients of flat hexahedron rock-filled steel cages

根据图 2～4 中的变化规律，试验结果表明：(1)在同一摩擦因数条件下，正六面体钢筋石笼的起动流速随着质量的增加而增大；条形六面体钢筋石笼在一定扁度系数 λ 范围内，随着扁度系数的增加，起动流速增大并趋于稳定；扁形六面体钢筋石笼随着扁度系数 λ 的增加，起动流速增大，超过一定扁度系数后，起动流速减小. 应当注意，扁形六面体钢筋石笼 B3、B5 之间存在最优扁度系数 λ_0 可使同容重、同体积的钢筋石笼起动流速达到最大. 由于本试验所采用模型比尺为 1∶50，B3、B4、B5 试验块体各边长尺寸已相差甚微，通过制作更多尺寸的钢筋石笼并结合试验验证找出最优扁度系数 λ_0 较为困难，但可知对于扁形六面体钢筋石笼而言，λ_0 取值范围为 $1.95<\lambda_0<3.37$.(2)在同一摩擦因数条件下，同容重、同体积的条形、扁形六面体钢筋石笼的起动流速比正六面体钢筋石笼起动流速大.(3)底面摩擦因数越大，钢筋石笼的起动流速越大；摩擦因数的改变对钢筋石笼的起动流速有着显著影响，如 $f=0.48$ 条件下的 16 t 钢筋石笼起动流速与 $f=0.28$ 条件下的 31.25 t 钢筋石笼起动流速相当.

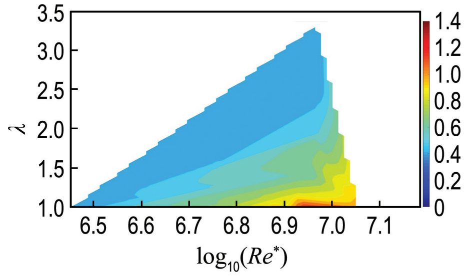
通过对相关数据进行处理，可绘制出 3 种摩擦因数 $f=0.28$、$f=0.48$、$f=0.69$ 条件下(λ，Re^*，$l_1C_D+fl_3C_L$)的分布云图，如图 5 所示.

在计算 C_D、C_L 时，一般采用任意两种摩擦因数条件下的(λ，Re^*，$l_1C_D+fl_3C_L$)分布云图，可对 C_D 和 C_L 进行求解，但是为排除两组试验所产生的偶然误差，选用 3 种摩擦因数的试验数据，能够对所计算的 C_D、C_L 取值进行拟合，所得出的值将更加准确.

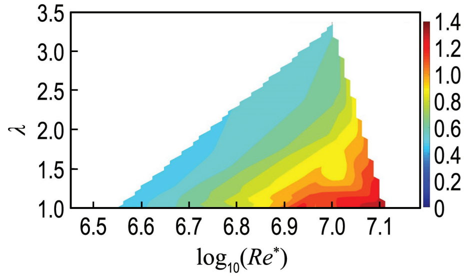
计算 C_D 和 C_L 所采用的数学方法主要为插值法和最小二乘法.

通过程序编写与计算，利用图 5 对 C_D 与 C_L 进行求解，绘制出(λ，Re^*，C_D)与(λ，Re^*，C_L)的分布云图，如图 6、7 所示.

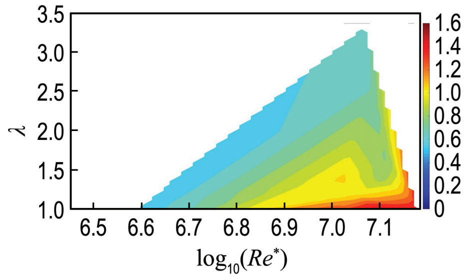
由图 6、7 可知，拖曳力系数 C_D 与上举力系数 C_L 的取值均在 0.2～0.6，符合取值范围要求. C_D 的取值变化较小，一般在 0.2～0.4. 随着扁度系数 λ 的增加，C_D 的取值呈现下降趋势；部分超过 0.4 的取值主要集中在扁度系数 $\lambda=1$、沙粒雷诺数 $Re^*=10^{6.94}$ 附近. C_D 的分布规律也反映出正六面体钢筋石笼所受拖曳力的影响相较于条形、扁形六面体钢筋石笼更为明显，不利于钢筋石笼在水体中的稳定.



(a) 有机玻璃基面($f=0.28$)



(b) 光滑水泥板基面($f=0.48$)



(c) 粗糙水泥板基面($f=0.69$)

图 5　(λ，Re^*，$l_1C_D+fl_3C_L$)分布

Fig. 5　Distribution of (λ, Re^*, $l_1C_D+fl_3C_L$)

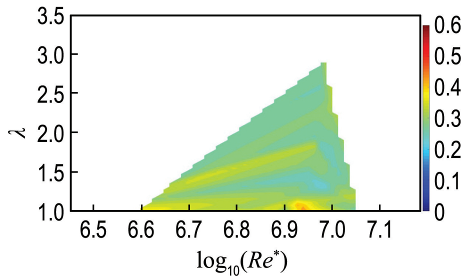


图 6　(λ，Re^*，C_D)分布

Fig. 6　Distribution of (λ, Re^*, C_D)

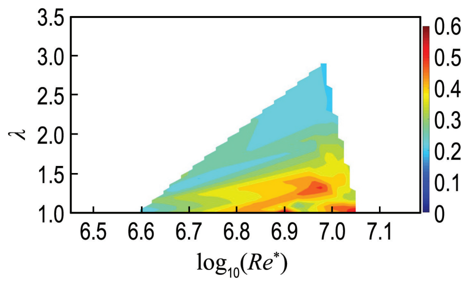


图 7　(λ，Re^*，C_L)分布

Fig. 7　Distribution of (λ, Re^*, C_L)

C_L 的取值变化较大，一般在 0.2～0.5. 在扁度系数 λ 一定时，随着沙粒雷诺数 Re^* 的增加，C_L 的取值呈现上升趋势. 在 Re^* 一定时，随着 λ 的增加，且在 1.0～1.5，C_L 的取值基本保持不变；随着 λ 继续增加，C_L 的取值呈现下降趋势. 结合前文分析可知，当钢筋石笼 λ 较小时，上举力 F_1 受上举力系数 C_L 影响相对明显；而当钢筋石笼 λ 较大时，F_1 受钢筋石笼底面面积影响较大.

3　计算方法精度验证

起动流速计算公式和 C_D、C_L 分布云图二者结合的钢筋石笼起动流速计算方法，具体运用步骤为对于扁度系数为 λ_1 的钢筋石笼，先假定某一起动流速 v_1，根据 $Re^*=v_dD/\nu$ 和 $D=\sqrt[3]{6abc/\pi}$ 可计算出相应取值 Re_1^*，再由 λ_1、Re_1^* 的值分别在图 6、7 找到对应的 C_D、C_L 值，并将其他相关已知量代入式(6)，得出 v_{d1}，若 $v_1\neq v_{d1}$，继续假定 v_2 进行试算，直到得出 $v_n=v_{dn}$，试算结束，v_n 即为钢筋石笼的起动流速.

为验证钢筋石笼起动流速计算公式及(λ，Re^*，C_D)、(λ，Re^*，C_L)分布云图的精度，采用另一组规格的钢筋石笼在水槽中进行试验. 试验基面选取有机玻璃基面($f=0.28$)，并将计算值与试验值进行对比，对该起动流速计算方法进行精度验证.

验证所用钢筋石笼规格仍选取原型边长为 2 m的正六面体钢筋石笼规格作基准，进行等体积的尺寸变换，保持中轴与短轴同步变化，改变长轴尺寸. 验证所采用的钢筋石笼规格如表 4 所示.

表 4　计算方法精度验证所用钢筋石笼规格

Tab. 4　Sizes of rock-filled steel cages for accuracy validation of calculation method

编号	边长/m			体积/m³	质量/t
	长轴	中轴	短轴		
Y1	2.22	1.90	1.90	8.00	16.00
Y2	2.47	1.80	1.80	8.00	16.00
Y3	2.77	1.70	1.70	8.00	16.00
Y4	3.13	1.60	1.60	8.00	16.00
Y5	3.56	1.50	1.50	8.00	16.00

根据式(6)及图 6、7，得出该组钢筋石笼起动流速计算值 v_d，绘制 v_d 与对应扁度系数 λ 的关系曲线，同时绘制试验值曲线，如图 8 所示.

由图 8 可看出，验证所采用钢筋石笼的起动流速计算值与试验值基本吻合.

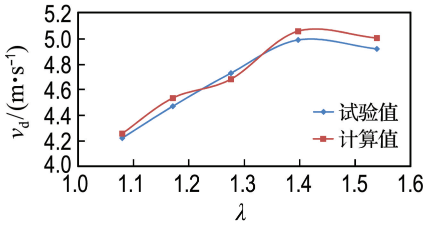


图 8　不同规格钢筋石笼起动流速计算值与试验值对比

Fig. 8　Comparison between incipient velocities of calculation and test for different sizes of rock-filled steel cages

4　结　论

(1)适当增加钢筋石笼扁度系数有利于钢筋石笼在水体中的稳定，但过度增加其扁度系数将导致钢筋石笼过于扁平，不利于稳定.

(2)底面摩擦因数越大，钢筋石笼的起动流速越大；且摩擦因数的改变对钢筋石笼的起动流速有着显著影响.

(3)拖曳力系数 C_D 的取值一般在 0.2～0.4，上举力系数 C_L 的取值一般在 0.2～0.5.

参考文献：

[1]　肖焕雄. 施工水力学[M]. 北京：水利电力出版社，1992.
XIAO Huanxiong. **Hydraulics in Construction** [M]. Beijing: China Waterpower Press, 1992. (in Chinese)

[2]　肖焕雄，周克己. 对截流理论与实践中几个问题的初步讨论[J]. 水力发电学报，1984(2)：90-100.
XIAO Huanxiong, ZHOU Keji. Preliminary discussion on several problems of the theory and practice of river closure [J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 1984(2): 90-100. (in Chinese)

[3]　饶冠生，李学海，韩继斌. 实用施工水力学[M]. 武汉：长江出版社，2007.
RAO Guansheng, LI Xuehai, HAN Jibin. **Practical Hydraulics in Construction** [M]. Wuhan: Changjiang Press, 2007. (in Chinese)

[4]　汪定扬. 立堵截流实用水力学计算[J]. 水利学报，1983(9)：11-19.
WANG Dingyang. Practical hydraulic calculation in end-dump river closure [J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1983(9): 11-19. (in Chinese)

[5]　黄国兵，李学海，程子兵，等. 截流块体稳定影响因

素及实用计算公式[J]. 长江科学院院报，2013，**30**(8)：25-30，36.
HUANG Guobing，LI Xuehai，CHENG Zibing，*et al*. Stability analysis of block for river closure and practical formula [J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**，2013，**30**(8)：25-30，36. (in Chinese)

[6] 李学海. 深厚覆盖层河床截流若干关键技术问题研究[D]. 武汉：武汉大学，2010.
LI Xuehai. Several key technology study for deep-thick covering layer riverbed closure [D]. Wuhan：Wuhan University，2010. (in Chinese)

[7] 李学海，程子兵，汪世鹏，等. 截流钢筋笼的稳定性及其计算方法[J]. 长江科学院院报，2013，**30**(8)：31-36.
LI Xuehai，CHENG Zibing，WANG Shipeng，*et al*. Computational method for the stability of steel reinforcement cage applied in river closure [J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**，2013，**30**(8)：31-36. (in Chinese)

[8] 叶恩立，周宜红，肖焕雄，等. 钢筋石笼起动流速试验与流场结构数模分析[J]. 天津大学学报，2014，**47**(2)：108-115.
YE Enli，ZHOU Yihong，XIAO Huanxiong，*et al*. Critical velocity test and flow-field-structure numerical analysis of rock-filled steel cage under water [J]. **Journal of Tianjin University**，2014，**47**(2)：108-115. (in Chinese)

[9] 叶恩立. 导截流工程中的几个随机性问题的研究[D]. 武汉：武汉大学，2014.
YE Enli. Study on several stochastic problems in the diversion and closure construction [D]. Wuhan：Wuhan University，2014. (in Chinese)

[10] 钱　宁，万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京：科学出版社，1983.
QIAN Ning，WAN Zhaohui. **Mechanics of Sediment Transport** [M]. Beijing：Science Press，1983. (in Chinese)

[11] 韩其为. 泥沙起动规律及起动流速[J]. 泥沙研究，1982(2)：11-26.
HAN Qiwei. Characteristics of incipient sediment motion and incipient velocity [J]. **Journal of Sediment Research**，1982(2)：11-26. (in Chinese)

[12] GERHART P M. **Fundamentals of Fluid Mechanics** [M]. Boston：Addison-Wesley Publishing Company，1992.

[13] ANDERSON JR J D. **Computational Fluid Dynamics：the Basics with Applications** [M]. New York：MacGraw Hill，Inc.，1995.

[14] KUNDU P K，COHEN I M，DOWLING D R. **Fluid Mechanics** [M]. 5th ed. Amsterdam：Elsevier，2011.

[15] 吴持恭. 水力学[M]. 4版. 北京：高等教育出版社，2008.
WU Chigong. **Hydraulics** [M]. 4th ed. Beijing：Higher Education Press，2008. (in Chinese)

Research on calculation method of incipient velocity for rock-filled steel cage in river closure

WANG Miao*[1,2]，ZHOU Yihong[1]，YANG Zhongyong[1]，LIU Lian[1]，WANG Qingyuan[3]，ZHANG Shumei[3]

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering，Three Gorges University，Yichang 443002，China；
2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science，Wuhan University，Wuhan 430072，China；
3. Changjiang Institute of Survey，Planning，Design and Research，Wuhan 430010，China)

Abstract：The incipient motion mechanism of rock-filled steel cage in river closure is studied. The calculation formula of incipient velocity is deduced through the force analysis of a rock-filled steel cage，of which drag coefficient C_D and lift coefficient C_L are analyzed. The flume model test is conducted to study the variation of different sizes (regular hexahedron shape，bar hexahedron shape，flat hexahedron shape) rock-filled steel cages' incipient velocities under different frictional coefficients. And the relationships of C_D，C_L with the flattening coefficient λ and particle Reynolds number Re^* are also quantitatively analyzed，drawn as cloud pictures of distribution of (λ，Re^*，C_D) and (λ，Re^*，C_L). It is testified that the calculation method of incipient velocity for rock-filled steel cage，combining the calculation formula with cloud pictures of C_D，C_L，reflects the incipient case of rock-filled steel cage well through test validation.

Key words：rock-filled steel cage；incipient velocity；drag coefficient；lift coefficient；flume model test