

水下夯锤绕流阻力系数变化规律的数值模拟

黄建生¹, 梁邦炎¹, 王小平²

(1. 中交第四航务工程局有限公司, 广东 广州 510290; 2. 中交四航局港湾工程设计院有限公司, 广东 广州 510231)

摘要: 基于 LS-DYNA 流固耦合数值模拟方法, 针对多个工程常用锤型进行数值模拟对比, 分析了水下夯锤绕流阻力系数变化规律。结果表明: 夯锤底面静压强一定时, 夯锤质量越大, 其绕流阻力系数越小; 夯锤在水中下落的过程中, 速度随着落距的增加而增大, 但增长的幅度逐渐减小并趋于稳定; 夯锤的能量利用率随着落距的增加而减小, 其中夯锤底面静压强一定时, 夯锤质量越小能量耗散率越大。

关键词: 夯锤; 水下运动; 绕流阻力系数; 能量耗散率

中图分类号: TV131.2+2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2017)04-0014-05

Numerical simulation of change in flow resistance coefficient of underwater hammer//HUANG Jiansheng¹, LIANG Bangyan¹, WANG Xiaoping² (1. CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China; 2. Harbor Engineering Design Institute of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510231, China)

Abstract: Change in the flow resistance coefficient of underwater hammers was analyzed through comparison of common types of hammers in multiple projects based on the LS-DYNA fluid-structure coupling numerical simulation method. The results show that, when the hydrostatic pressure on the bottom surface of the hammer is a fixed value, the flow resistance coefficient decreases with the increase of the hammer mass. The hammer fall velocity in the water increases with the drop distance, but the growth rate gradually decreases and tends toward a stable value. The energy usage ratio of the hammer decreases with the increase of the drop distance. When the hydrostatic pressure on the bottom surface is a fixed value, the energy dissipation rate increases with the decrease of the hammer mass.

Key words: hammer; underwater movement; flow resistance coefficient; energy dissipation rate

随着我国海洋经济的快速发展, 沿海地区以及各海岛上港口护岸工程建设也得到快速发展。重力式码头水下抛石基床的密实施工中, 最常采用的两种方法为爆夯法^[1]和重锤夯实法^[2]。爆夯法施工速度快, 然而对周边环境产生的地震效应明显, 因此会受周边环境的制约^[3]; 重锤夯实法施工的优点在于施工机动灵活, 产生的地震效应对周边建筑物影响小, 施工对环境产生的干扰小, 缺点在于施工成本高、施工速度慢^[4]。为提高工程效益, 探求夯锤在水下的绕流阻力系数就十分重要, 通过研究水下夯锤绕流阻力系数的变化规律来合理地选取锤型, 对提高工程效益有一定的帮助。

目前, 国外多采用静压密实方法来测得基床的承载能力, 其优点是所得数据可靠, 缺点是时间长, 经济成本高^[5]。国内对抛石基床多采用重锤夯实法密实水下基床, 在水下施工条件下不同重锤几何

外形与吨位夯实效果差别较大, 如何考虑重锤在水下运动过程中的阻力, 是重锤选型过程中必需考虑的因素^[6]。

本文采用 LS-DYNA 流固耦合数值模拟方法, 针对多个工程常用锤型进行数值模拟对比, 分析了绕流阻力系数变化规律, 再结合缩比尺室内试验分析绕流阻力系数与夯锤底面静压强的关系, 得出夯锤水下运动过程中绕流阻力对有效夯击能的影响规律, 可为水下夯锤锤型的选择提供依据。

1 夯锤水下运动规律

夯锤在水中自由下落过程中, 受浮力与绕流阻力的影响, 存在极限运动速度, 有效夯击能随落距的增加而减小, 这一过程与夯锤形状、流体性质、流体雷诺数、相对粗糙程度等因素有关。为了分析夯锤在水中自由下落时的运动规律, 如图 1 所示, 设夯锤

作者简介: 黄建生(1960—), 男, 高级工程师, 主要从事港口工程施工技术管理工作。E-mail: hjiansheng@ccc4.com

通信作者: 梁邦炎(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事水工结构研究。E-mail: 81519381@qq.com

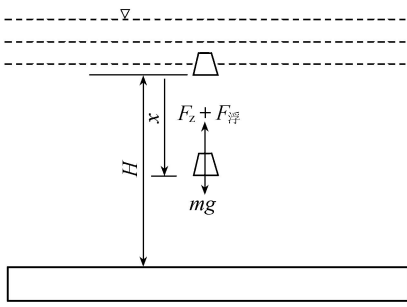


图1 夯锤水中受力示意图

在水中基础上方 H 处由静止开始下落,当下落距离为 x 时,作用在夯锤上的力分别为自重 mg 、浮力 $F_{\text{浮}}$ 和水体阻力 F_z 。夯锤在三力作用下作加速或匀速运动,夯锤运动方程可表示为

$$mg - \rho_w g V - F_z = ma \quad (1)$$

其中

$$F_z = \frac{1}{2} C_f \omega \rho_w v^2 \quad (2)$$

式中: m 为夯锤质量; V 为夯锤体积; F_z 为运动水体对静止夯锤的绕流阻力; C_f 为绕流阻力系数; v 为夯锤与水体间相对速度; ω 为夯锤垂直于运动方向的投影面积; ρ_w 为水的密度; g 为重力加速度。

根据位移 x 、速度 v 、加速度 a 的物理意义,式(1)可进一步整理为

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{C_f \omega \rho_w}{2m} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = \left(1 - \frac{\rho_w V}{\rho_{\text{锤}} V} \right) g = \eta g \quad (3)$$

式中 η 为质量系数。

研究表明,绕流阻力系数与锤形、流速、流体雷诺数等因素有关^[6-9],为简化问题,假设绕流系数为常数,而圆台夯锤的 C_f 一般介于 1.2 ~ 1.6 之间^[10],如果取为定值,则式(3)为二阶常系数微分方程。

令初始条件 $x=0, v=\frac{dx}{dt}=0$, 可解得

$$v = \frac{\sqrt{1 - \exp(-2\eta g k^3 x)}}{\sqrt{C_f \omega \rho_w / 2mg\eta}} \quad (4)$$

式中 k 为阻力系数。当 $x \rightarrow \infty$ 时,可得极限速度 $v_1 = 1/k = \sqrt{2m\eta g / C_f \omega \rho_w}$; 当 $x=H$ 时的速度 v_H 为夯锤夯击速度。

定义夯击能利用率 λ 为

$$\lambda = \frac{v_H^2}{2gH} = \frac{J'}{J} \quad (5)$$

式中: J' 为有效夯击能; J 为重力势能或不考虑阻力、浮力达到的最大动能。

因此,在一定落距 H 下通过绕流阻力系数、夯锤底面积、夯锤质量,即可方便地计算出有效夯击能。但是绕流系数与夯锤形状、水体与夯锤间的相对速度、雷诺数等因素密切相关,在夯锤下落过程中并非定值,常规方法只能借助经验对绕流阻力系数

取值。本文采用流体力学分析方法^[11-13]通过数值模拟进行不同锤型的运动规律对比分析。

2 数值模型参数

由理论分析可知,夯锤在水中自由下落时,受重力、浮力与绕流阻力的共同作用而作加速运动,且存在一定的极限速度。当水下情况较复杂时,可借助流固耦合法对不同工况下的夯锤运动规律进行数值模拟研究。

流固耦合控制方程遵循最基本的守恒原则,在流固耦合交界面处,满足流体与固体应力 τ 、位移 d 、热流量 q 、温度 T 等变量的相等或守恒,即满足:

$$\begin{cases} \tau_f = \tau_s \\ d_f = d_s \\ q_f = q_s \\ T_f = T_s \end{cases} \quad (6)$$

式中下标 f, s 分别表示流体和固体。

三维模型的固体部分先建立面,由面拉伸成体,然后进行泄水孔的切割;流体部分先建立一个矩形面,再由面拉伸成正方体,然后对流体边界进行约束,施加无反射边界条件,以此来模拟无限区域的水体^[14]。

数值模拟所涉及的力学模型及参数如下:

a. 夯锤选用 Johnson-Cook 塑性模型,该模型的 Gruneisen 状态方程参数包括:密度 $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E = 210 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.28$, 冲击波波速-波后质点粒子速度曲线的截距 $C = 4.57$, 曲线的斜率系数 $S_1 = 1.49, S_2 = 0, S_3 = 0$, 温度常数为 1.93。

b. 水体采用 Null 材料模型,该模型的 Gruneisen 状态方程参数包括:密度 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E = 2.895 \times 10^{-6} \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.28$, 黏滞系数 $\nu_c = 1.01 \times 10^{-6} \text{ kPa} \cdot \text{s}$, 冲击波波速-波后质点粒子速度曲线的截距 $C = 1.647$, 曲线的斜率系数 $S_1 = 1.921, S_2 = -0.096, S_3 = 0$, 温度常数为 0.35。

3 工程常用锤型数值模拟

工程中常用的锤型^[15]均设置倒角及泄水孔,为了对不同倾角、尺寸的夯锤水下运动规律进行对比,基于工程实践中采用的夯锤尺寸,设计 6 种锤型,参数如表 1 所示,计算模型如图 2 所示。

采用上述 6 种锤型进行三维模型试验,夯锤在水中落距为 10 m,由于实际工况可以是无限水域,为了保证数值模拟与实际工况相符,在模拟夯锤运动时,对水域的边界进行了无反射条件边界设置,保证夯锤在下落过程中,计算水域的宽度对夯锤下落

表 1 6 种锤型的参数取值

锤型编号	上底面半径/m	下底面半径/m	高/m	倒角半径/m	泄水孔直径/m	体积/ m^3	密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	质量/t
1号	0.4235	0.6	1.0	0.1	0.10	0.78810	7850	6.2
2号	0.4590	0.6	0.8	0.1	0.10	0.67729	7850	5.3
3号	0.4990	0.6	0.6	0.1	0.10	0.53552	7850	4.2
4号	0.3850	0.6	0.8	0.1	0.10	0.58107	7850	4.6
5号	0.3090	0.6	0.8	0.1	0.10	0.49546	7850	3.9
6号	0.5500	0.9	1.2	0.1	0.15	2.01060	7850	16.2

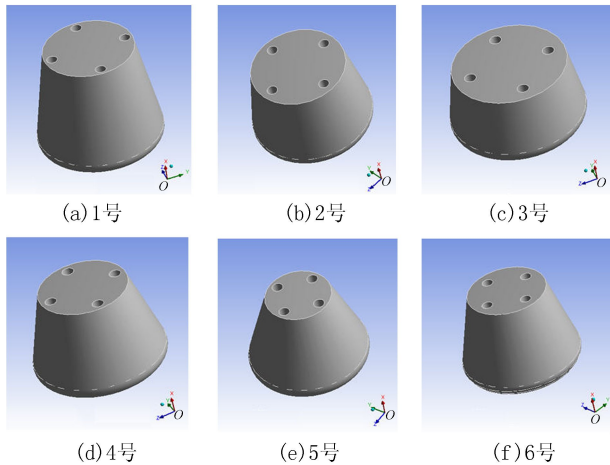


图 2 6 种锤型的计算模型

过程可视作无影响^[12]。

为尽量减少网格划分以节约计算时间,同时保证能清晰观察到受夯锤影响水域内的流场情况,结合无条件反射边界设置,多次调试发现水域宽度取 5 m 即可满足要求,故本文数值模拟时水域宽度取为 5 m。

图 3 为 6 号锤型下落过程速度云图,可以看出夯锤在下落过程中速度不断增大并趋于一个定值。

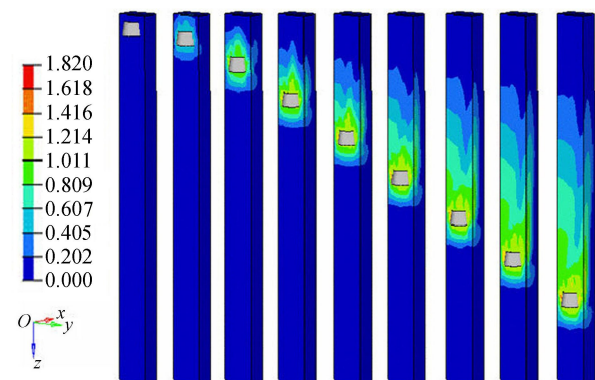


图 3 6 号锤型下落过程速度云图(单位:m/s)

图 4~6 分别为 6 种锤型速度、有效夯击能、夯击能利用率与落距的关系,图 7 为绕流阻力系数 C_f 与夯锤底面静压强(锤重力与底面积之比)关系。

由图 4 可知,夯锤下落过程中速度逐步增大并逐渐趋于稳定。由图 5、图 6 可知,相同质量夯锤随着落距增加,有效夯击能增大,但夯击能利用率逐渐降低。因此在相同锤质量下,仅通过增大落距,并不

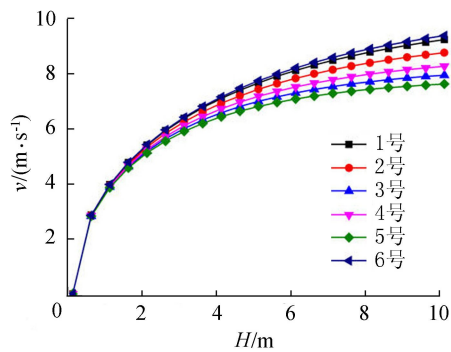


图 4 6 种锤型速度与落距关系

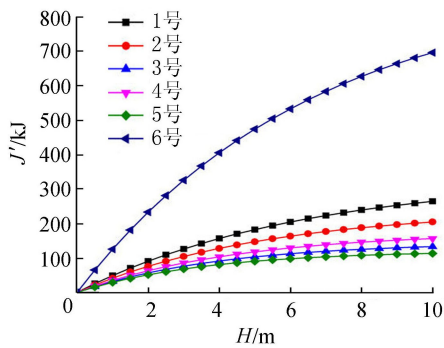


图 5 6 种锤型有效夯击能与落距关系

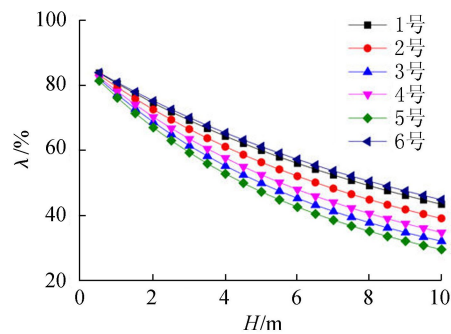


图 6 6 种锤型夯击能利用率与落距关系

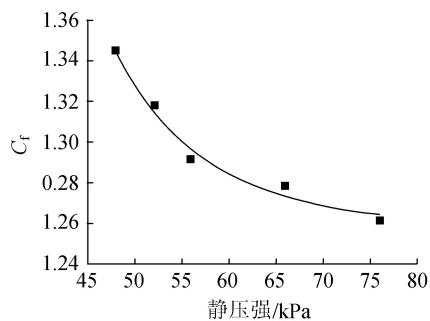


图 7 绕流阻力系数与夯锤底面静压强关系

能提高夯击能利用率,但在相同底面积、落距等条件下,夯锤质量越大则夯击能利用率越高。由于相同质量夯锤随着落距增加,有效夯击能增大,则由图 7 可知,随着夯锤底面静压强的增大,绕流阻力系数 C_f 呈减小后逐渐稳定的趋势,有效夯击能相应增加。

前 5 个锤型在 4 m 落距工况下,1 号锤型的 C_f 值最小,为 1.255,但其夯击能利用率最高,为

63.2%。6号锤型的夯击能利用率为65.5%，略高于1号锤型，但由于质量是1号锤型的3倍左右，其有效夯击能为405 kJ，远高于的1号锤型的153 kJ。对所计算的6种锤型相应 C_f 值与夯锤质量 m 之间关系进行拟合，可得

$$C_f = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + (m/x_0)^p} \quad (7)$$

各参数取值为： $A_1 = 3.25051$ ， $A_2 = 1.16776$ ， $x_0 = 0.86503$ ， $p = 1.6318$ 。根据拟合公式计算得到相关实际工程中1~6号锤型的 C_f 值分别为1.252~1.255、1.273~1.276、1.322~1.324、1.289~1.292、1.356~1.359和1.185~1.191。

4 夯锤缩比尺对比

表2为缩比尺室内试验标准、5倍、10倍和15倍锤型参数(均为三轴同时放大相同倍数,包括泄水孔)。

表2 标准、5倍、10倍和15倍锤型的参数取值

锤型	上底面半径/m	下底面半径/m	下底面高/m	倒角半径/m	泄水孔直径/m	体积/ m^3	密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	质量/t
标准锤	0.04	0.055	0.08	0.075	0.010	5.36×10^{-5}	7850	0.42
5倍锤	0.20	0.275	0.40	0.100	0.050	0.327	7850	2.56
10倍锤	0.40	0.550	0.80	0.150	0.100	0.524	7850	4.10
15倍锤	0.60	0.825	1.20	0.225	0.150	1.770	7850	13.90

缩比尺数值模拟采用的标准、5倍、10倍和15倍锤的计算模型如图8所示,在相同条件下计算模拟所得的速度与落距关系如图9所示,夯击能利用率与落距关系如图10所示。

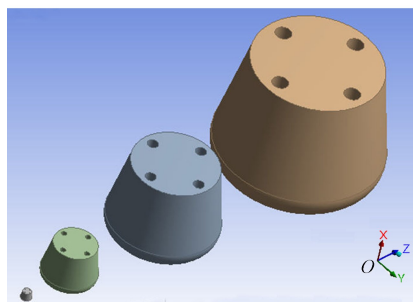


图8 夯锤缩比尺计算模型

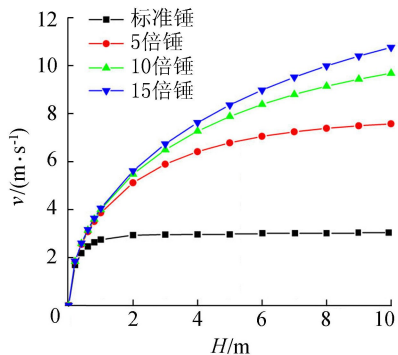


图9 缩比尺锤速度与落距关系

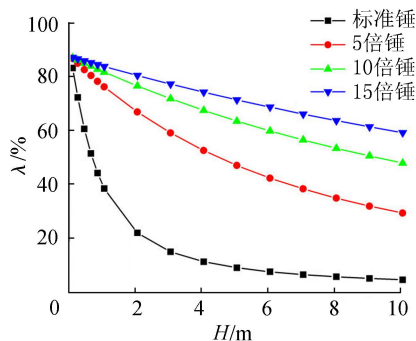


图10 缩比尺锤夯击能利用率与落距关系

由图9和图10可见:夯锤落距相同时,随着夯锤质量的增大,速度相应增大,质量越小,能量耗散越快。如标准锤在下落1m左右时速度就接近稳定(与室内试验结果几乎一致),夯击能量利用率就下降到一半,可见质量对夯锤下落的影响非常明显。

标准锤运动规律试验与数值计算结果对比如图11所示,可见数值模拟结果与室内试验结果相差很小,总体速度稍大。

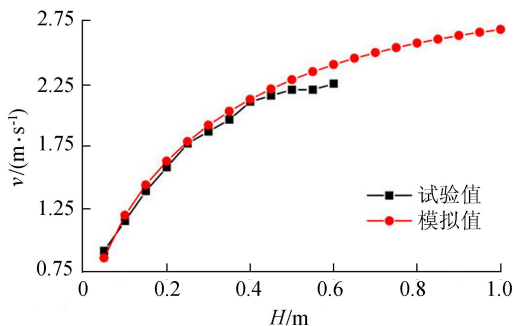


图11 标准锤室内试验与数值模拟速度与落距关系

数值模拟得到 $C_f = 1.492$,与室内试验值(1.5)较为接近,说明数值模拟所得到的结果具有一定的合理性。通过缩比尺数值计算得到标准、5倍、10倍和15倍锤的 C_f 取值范围分别为1.491~1.495、1.474~1.481、1.401~1.412和1.321~1.334,说明夯锤静压强一定时, C_f 不是定值,随着夯锤质量的增大, C_f 呈下降趋势,夯锤质量在 C_f 的取值过程中有重要影响。

5 结论

a. 相同质量夯锤随着落距增加,夯击能增大,夯击能利用率逐渐降低,但夯击速度逐渐趋于稳定。因此在相同夯锤质量条件下,仅通过增大落距并不能提高夯击能利用率,但在相同底面积、落距等条件下,夯锤质量越大则夯击能利用率越高。

b. 随着夯锤底面静压强的增大,夯锤绕流阻力系数 C_f 呈逐渐减小的趋势,最后趋于稳定。相同质量夯锤随着落距增加,夯击能增大;随着夯锤质量的增大,相应的有效夯击能相应增大。

c. 缩比尺数值模拟结果表明,落距相同时,随着夯锤质量的增大,速度相应增大。夯锤底面静压强一定时,夯锤质量越小能量耗散越快,但 C_r 仍为不确定值,随着夯锤质量的增大 C_r 呈下降趋势。

参考文献:

[1] 李俊如,高建光,贺涛,等. 广西钦州港二期码头抛石基床的水下爆夯[J]. 岩土力学,2004,24(6):917-921. (LI Junru, GAO Jianguang, HE Tao, et al. Strengthening foundation by underwater explosive ramming for second phase dock of Qingzhou Harbor in Guangxi Region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 24(6): 917-921. (in Chinese))

[2] 冯世晖,庞善喜. 重力式码头基础施工过程控制[J]. 水运科学研究,2007(2):21-24. (FENG Shihui, PANG Shanxi. Process control on foundation construction for gravity wharf[J]. Research on Waterborne Transportation, 2007(2):21-24. (in Chinese))

[3] 蔡劼刚. 用爆破夯实法处理水下抛石基床[J]. 港口工程,1990(5):26-28. (CAI Jigang. Rubble mound foundation with blasting tamping[J]. Port Engineering, 1990(5):26-28. (in Chinese))

[4] 李良英. 大质量夯锤在嵩屿码头水下基床夯实中的应用[J]. 港工技术,2009,46(5):46-49. (LI Liangying. High quality application of tamping hammer in Songyu Wharf in underwater bed compaction [J]. Harbor Engineering Technolog, 2009, 46(5): 46-49. (in Chinese))

[5] 董新春,叶锋,邱青长,等. 重力式码头抛石基床重锤夯实施工效率改进研究[J]. 水运工程,2013(3):199-203. (TONG Xinchun, YE Feng, QIU Qingchang, et al. Method for improving the efficiency of heavy tamping compaction of gravity wharf's rubble bed[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(3):203-199. (in Chinese))

[6] 滕丽娟,张志伟,武燕蕾. 湍流模型下双柱绕流升阻力系数数值模拟[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2009,26(2):51-54. (TENG Lijuan, ZHANG Zhiwei, WU Yanlei. Simulation of drag and lift coefficients on two cylinders in flow field with turbulence model[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Nature Science of Edition), 2009, 26(2):51-54. (in Chinese))

[7] 金大桥,王聪,魏英杰,等. 水下圆柱体带气泡轴向绕流研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2010,26(5):586-591. (JIN Daqiao, WANG Cong, WEI Yingjie, et al. Axial cavitating flow study of underwater circular cylinder [J]. Journal of Harbin University Commerce (Nature Science of Edition), 2010, 26(5): 586-591. (in Chinese))

[8] 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,2014,31(14):314-319. (CHEN Kaihua, SHI Chong, LIANG Bangyan, et al. Numerical simulation research of the falling process for

the underwater ripraps [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 31(14): 314-319. (in Chinese))

[9] ZHU L, WANG J, CHENG N S, et al. Settling distance and incipient motion of sandbags in open channel flows [J]. American Society of Civil Engineers, 2014, 130(2): 98-103.

[10] 王德利. 不同夯锤的水下夯实效果及夯锤阻力理论在水下夯实中的运用探讨[J]. 水运工程,1990(3):51-53. (WANG Deili. Different rammer underwater compaction effect and tamper resistance theory in the application of underwater ramming [J]. Port & Waterway Engineering, 1990(3):51-53. (in Chinese))

[11] 韩世娜. 空心块体水流拖曳力的试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.

[12] 陈玉璞. 流体力学 [M] 北京: 清华大学出版社, 2013:201-207.

[13] COLEMAN S E, MELVILLE B W, GORE L. Fluvial entrainment of protruding fractured rock [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 129(11): 872-884.

[14] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39:201-225.

[15] 谢立全, 戚健文, 盛旭圆, 等. 水下抛石基床重锤夯实及夯锤工作性能数值分析 [C] // 夏才初. 和谐地球上的水工岩石力学: 第三届全国水工岩石力学学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 2010:504-508.

(收稿日期:2016-08-15 编辑:熊水斌)

(上接第13页)

[17] SUNDARAY S K, PANDA U C, NAYAK B B, et al. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of the Mahanadi river-estuarine system (India): a case study [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2006, 28(4):317-330.

[18] 余辉, 燕姝雯, 徐军. 汤浦水库及入库支流水质时空变化特征与影响因素分析 [J]. 水生态学杂志, 2013, 34(5): 9-15. (YU Hui, YAN Shuwen, XU Jun. Characteristics and influencing factors analysis of spatio-temporal variations of water quality in Tangpu Reservoir and its tributaries [J]. Journal of Hydroecology, 2013, 34(5):9-15. (in Chinese))

[19] JOHNSON H O, GUPTA S C, VECCHIA A V, et al. Assessment of water quality trends in the Minnesota River using non-parametric and parametric methods [J]. Journal of Environmental Quality, 2009, 38(3): 1018-1030.

[20] PALMA P, ALVARENGA P, PALMA V L, et al. Assessment of anthropogenic sources of water pollution using multivariate statistical techniques: a case study of the Alqueva's Reservoir, Portugal [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 165(1/2/3/4): 539-552.

(收稿日期:2017-01-05 编辑:熊水斌)