

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.05.007

刘珮勋, 兰雁, 陈宇豪, 等. 坝垛工程根石走失数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2017(5): 45-50. (LIU Peixun, LAN Yan, CHEN Yuhao, et al. Numerical simulation of root stones lost in dam buttress project[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(5): 45-50. (in Chinese))

坝垛工程根石走失数值模拟

刘珮勋¹, 兰 雁², 陈宇豪¹, 姚 池¹

(1. 南昌大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘要: 为研究水流作用下坝垛根石的走失, 基于 Flow-3D 软件中 GMO 模型和 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型建立了根石走失特性研究的数值模型。进行了水流作用于立方块体的数值水槽试验, 将水流对立方块体作用力的数值模拟值与公式计算值进行对比, 发现两者基本一致, 说明数值模型可用。随后对某一实际坝垛工程进行了根石走失的数值模拟计算, 计算结果表明: 坝垛周围根石走失最严重的区域为坝前头, 上跨角次之, 坝前头处根石起动的最早, 拖曳力上升最快, 走失的距离最远; 上跨角靠近坝前头处的部分根石走失时间早, 程度严重, 靠近迎水面处根石走失时间较晚, 在水流流速进一步加大时逐渐走失; 迎水面与下跨角处的根石受水流作用力较小, 基本无走失现象。根石走失后并未随水流持续运动, 大部分根石散落在坝档间。

关 键 词: 坝垛; 根石; Flow-3D; GMO 模型; 拖曳力

中图分类号: TV861

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2017)05-0045-06

河道整治工程主要包括险工、控导及护滩工程等, 其建筑物形式为丁坝、垛、护岸, 一般简称坝垛, 坝垛由土坝基、护坡和护根三部分组成。护根亦称根石, 它是坝垛工程的基础, 护根的稳定状况对工程的稳定起着决定性作用。黄河河道整治工程中险工坝岸常用散抛石护根, 以维护坝、垛与河岸的安全, 坝岸工程稳定与否直接影响到堤防安全, 而坝岸根石的稳定与完整程度又直接决定坝岸工程的稳定程度, 因此, 研究险工坝岸根石走失规律、预测根石走失情况, 对于黄河堤防工程设计与防汛抢险具有重要的现实意义。

目前针对根石走失的研究还较少, 根石走失分析类似于块体在水流作用下运动, 水下运动块体的分析常采用 Evett 等^[1]提出的水流作用力公式, 将淹没在水流中块体所受水流作用力分解为水平推移力和垂直水流方向的上举力; 庞启秀等^[2]通过变坡水槽试验测定不同流速强度下不同尺寸块体所受的拖曳力和上举力, 提出了含有形状影响的拖曳力计算公式; 缙元有^[3]利用 Evett 的水流作用公式, 考虑黄河河道整治工程冲刷坑坡度、水流含沙量、冲刷流速和河床条件等因素, 推导出不同含沙量、水深及流速条件下根石起动尺寸, 与实测结果基本相同; 胡宝琳等^[4]运用 PFC2D 软件建立了抛石潜堤模型, 模拟分析了抛石潜堤的破坏过程, 并总结了抛石重量和堤顶宽度等对堤岸失稳的影响; 姚仕明等^[5]对护岸抛石开展了水槽试验, 解释了抛石护岸工程破坏的原因和形式, 并对实际工程中抛石方法做了总结。以上公式推导和物理模型试验方法可得出护岸局部块体的运动及防护措施效果。数值模拟作为一种新的研究手段已越来越多地应用于水利科研中, 但目前关于根石走失的数值模拟研究很少, 将数值模拟计算结果与实测数据相互对比验证是确定工程安全的最可靠方法, 因此有必要建立相关的数值模型对根石走失进行细观模拟。

根石稳定性分析是典型的非连续介质滑移及稳定平衡过程, 这一过程适合采用离散单元方法进行模拟, 并且还需考虑水流边界对根石走失的影响, 基于此本文选用 Flow-3D 软件对根石走失过程的数值模拟进行

收稿日期: 2017-01-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51509104); 江西省自然科学基金青年项目(20161BAB216116)

作者简介: 刘珮勋(1991—), 女, 江西新余人, 硕士研究生, 主要从事水利工程相关数值模拟研究。

E-mail: m18720092016@163.com 通信作者: 姚 池(E-mail: chi.yao@ncu.edu.cn)

初探,为根石走失的数值模拟研究提供技术参考。

1 Flow-3D 介绍及数值模型建立

Flow-3D 是近年来应用较多的计算流体动力学软件,软件中 GMO(通用运动物体)模型可计算物体在水流作用下的运动,物体在运动过程中可拥有 6 个自由度,物体运动的形式有指定运动与流固耦合运动,流固耦合运动为运动物体与水流相互影响、相互作用,其中物体在运动过程中的相互碰撞也被充分考虑,适用于根石走失的数值模拟。基于 N-S 水流控制方程,采用软件中的 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型^[6],该紊流模型经许多学者验证对复杂水流形态模拟精准^[7],在块体绕流上应用性也很强^[8]。水流液面的描述采用 VOF 法^[9],对水流作用下运动的根石采用 GMO 模型计算,软件独特的 FAVOR 技术^[10]可对运动的根石进行准确描述,基于上述方法建立根石走失的数值计算模型。

2 数值模型算例验证

根石在水流作用下受到的力有拖曳力、上举力、漩涡力及脉动压力等,其中,水流拖曳力对根石整体的影响较大,本次针对块体在水中的拖曳力进行分析。

2.1 数值模型的建立

图 1 为数值试验模型布置,水流冲击置于水槽中部的 5 cm 立方块体,水槽尺寸为 2.0 m×0.5 m×0.3 m,采用 200 000 个结构化矩形网格对计算区域进行划分,并对块体区域局部加密。水槽中初始水深为 0.15 m,入口边界处设定水深为 0.15 m 的水流,水流流速工况见表 1;出口处设定自由出流边界;侧边和底面均设定为固壁边界;计算区域上方为 1 个标准大气压。

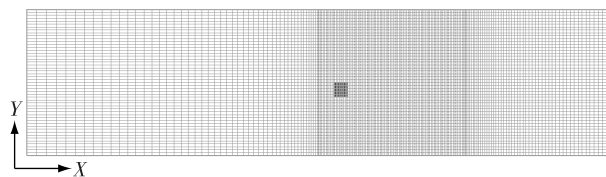


图 1 数值模型试验布置

Fig. 1 Layout of numerical model test

表 1 数值模拟计算工况与拖曳力

Tab. 1 Test conditions of numerical simulation and drag force

水深/m	块体尺寸	平均流速/(m·s ⁻¹)	拖曳力 F_D /N	
			公式计算值	数值模拟值
0.15	0.05m×0.05m×0.05m	0.10	0.013 1	0.013 3
		0.15	0.029 5	0.028 4
		0.20	0.052 5	0.051 5
		0.25	0.082 0	0.075 6

2.2 拖曳力结果对比分析

对拖曳力的计算采用 Evett^[1]提出的公式:

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho A u^2 \quad (1)$$

式中: F_D 为块体在水中的拖曳力; C_D 为块体拖曳力系数; ρ 为流体密度; A 为块体的迎流面积; u 为水流作用的垂线平均流速。根据 Evett^[1]给出的结论,块体形状雷诺数 $Re > 1\,000$ 时,当宽高比为 1 时, C_D 取 1.05。

数值模型可直接输出作用于物体上的拖曳力,表 1 给出了不同流速下拖曳力 F_D 的公式计算值与数值模拟值,图 2 为拟合曲线,由表 1 与图 2 可以看出,拖曳力的公

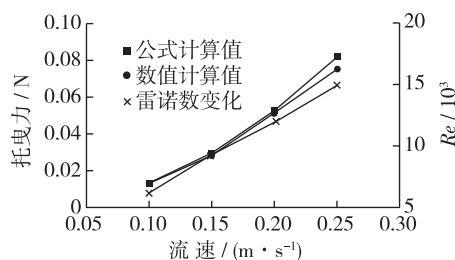


图 2 拖曳力拟合曲线和 Re 变化

Fig. 2 Drag force fitting curves and Reynolds number

式计算值与数值模拟值整体拟合效果较好,随着水流流速的增大,拖曳力的公式计算值略微大于数值模拟值,根据 Krueger 等^[11]进行的拖曳力测量试验,结果显示物体的拖曳力系数 C_D 随着块体形状雷诺数的增大逐渐减小,如图 2 所示,块体形状雷诺数随着水流流速逐渐增大而增大,因而流速逐渐变大后拖曳力的数值计算值会略小于采用固定 C_D 的公式计算值。拖曳力的公式计算值与数值模拟值对比整体接近,说明数值模型计算水流拖曳力准确度高。

3 工程实例分析

舜帝控导下沿工程位于黄河永济段,工程含 13 个坝垛,全长 1 000 m,设计坝顶高程 342.40~342.10 m,平均坝高 3.90 m,设计按 2020 年设计洪水流量 4 000 m³/s 设防,其主要作用为约束主流摆动范围、护滩保堤,下游坝垛均为险工,散抛根石设计,平面布置及横断面如图 3;工程采用坝、垛结合的平面型式,共设 12 个垛坝,坝垛间距 80 m,迎水面与连坝轴线交角 30°,背水面与连坝轴线交角 60°,垛头采用半径 15 m 的圆弧衔接,连坝土体顶宽 10 m,坝及连坝迎水面采用块石全裹护。

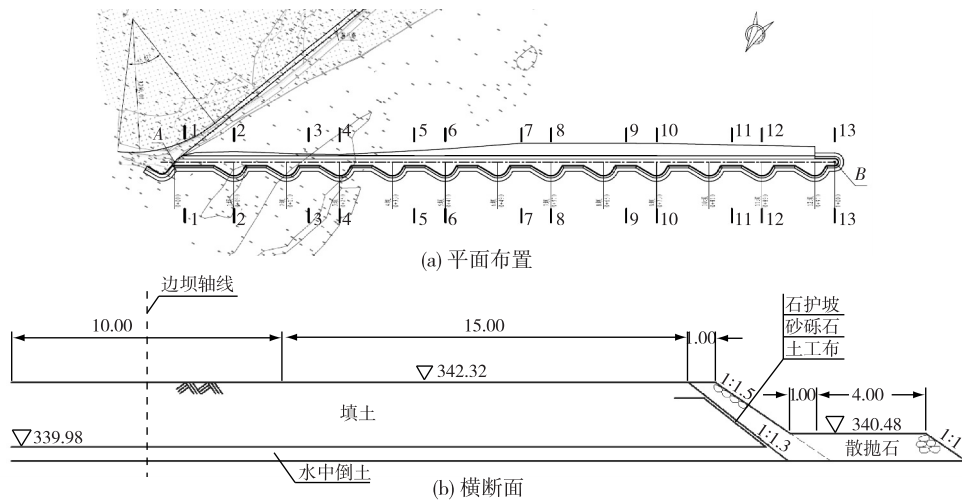


图 3 坝垛平面布置及断面(单位:m)

Fig. 3 Layout of dam buttress and cross section (unit: m)

3.1 实际工程数值模型的建立

实际工程中坝垛段较多,且形状基本一致,选取 2 个坝垛段进行分析,如图 4 所示,按照比例 1:1 建立数值模型并导入软件中,本次研究为单排散抛根石的走失,根石的布置围绕坝垛均匀排列,坝垛周围分为迎水面、上跨角、坝前头和下跨角区域,对 4 个区域的根石采用不同颜色标记,迎水面采用黑色,上跨角为红色,坝前头为蓝色,下跨角为粉色,以便对走失后的根石进行观察,并在 4 个区域的中部设定监测点如图 4,监测计算过程中水流流速变化。根石尺寸为边长 50 cm 的立方体石块,密度为 2 600 kg/m³,每个块体均设置为有 6 个自由度的碰撞物体,由于石块碰撞之间含有水体,取碰撞恢复系数为 0.1,摩擦系数参考抛石基底与粉砂地基土取 0.4^[12]。计算河道宽 30 m,长 182 m,网格划分采用 3 个连接式网格块,如图 5 所示,网格块 1 和网格块 3 采用 0.50 m×0.50 m×0.50 m 的网格,网格块 2 采用 0.25 m×0.25 m×0.25 m 的网格,总网格数约为 40 万个。

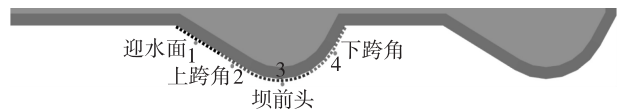


图 4 坝垛根石布置

Fig. 4 Layout of dam buttress root stone

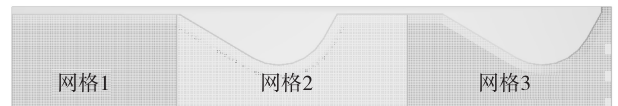


图 5 网格划分

Fig. 5 Diagram of mesh division

根据工程施工水位 339.98 m 和设计水位 341.32 m, 取相对水位高度计算。设定计算区域初始水位 0.5 m, 入口边界水深在 180 s 内由 0.5 m 逐渐上升至 1.84 m 随后保持在 1.84 m; 出口处设定相应的尾墩控制出流量; 侧边和底面均设定为固壁边界; 计算区域上方设定一个标准大气压。计算时间为 300 s。

3.2 根石走失分析

图 6 给出了计算结果中不同时间点的根石走失情况, 图 7 给出了监测点流速变化。由图 6 和 7 可知, 70 s 时各处水流流速较小, 坝前头根石有微小移动, 其余区域根石静止无变化; 120 s 时由于上游边界处的水位加高, 经过坝前头的水流流速增大, 部分根石出现明显移动, 其中坝前头中部根石开始脱离坝身; 150 s 时坝前头根石出现大位移, 水流流速在 2.0 m/s 左右时根石起动并顺着挑流主流向下游滚动, 迎水面与上跨角处部分根石也出现小位移并相互碰撞; 180 s 时坝前头根石在水流作用下基本全部走失, 大部分走失根石堆积在坝前头与下跨角连接处区域, 少数根石走失较远, 上跨角处靠近坝前头的根石开始沿着坝身移动; 240 s 时由于坝前头处根石走失严重, 上跨角根石在移动过程中没有根石的阻挡作用, 且坝前头水流流速较大, 最高达 3.6 m/s, 因此经过坝前头处根石的运动速度较快, 部分根石走失严重; 300 s 计算结束, 此时坝前头处无根石, 走失的根石大部分堆积在坝垛档间, 坝前头与上跨角的部分根石走失较远, 迎水面与下跨角处的部分根石有较小位移, 但在整个过程中并未脱离坝身, 受水流影响较小。

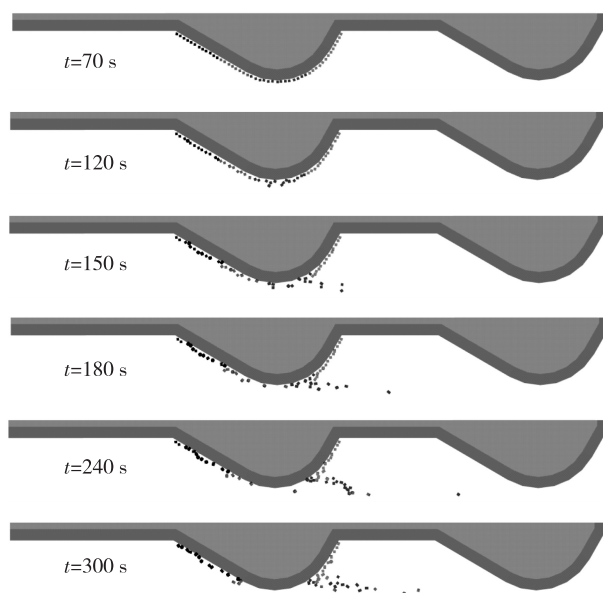


图 6 不同时间点根石走失情况

Fig. 6 Root stone movement at different time points

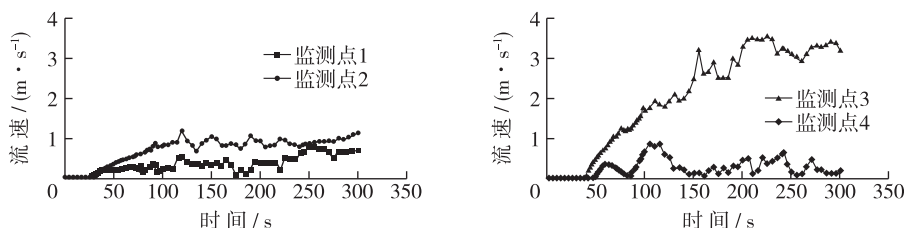


图 7 监测点流速

Fig. 7 Velocity of monitoring points

3.3 水流拖曳力分析

图 8 给出了计算过程中不同区域位置中间根石的拖曳力值变化, 可见, 迎水面与下跨角两处水流对根石的拖曳力最小, 结合图 7 可知两处的水流流速最小, 并且根石并无较大位移, 因此拖曳力的大小随着水流流速的变化趋势改变; 上跨角处中间根石在前期拖曳力大小变化与水流流速变化规律相似, 结合图 6 根石走失情况可知, 240 s 后该处根石开始沿坝身走失, 经过坝前头时水流流速突然增大, 根石快速移动并伴有滚动现象, 水流对根石的拖曳力大小变化较大, 经过坝前头后拖曳力下降; 坝前头中部根石在整个计算过程中所受拖曳力较大, 由于该处水流流速最早达到根石的起动力速, 因而前期拖曳力上升最快, 180 s 后该处根石已脱离坝身进入坝档间, 后期所受拖曳力较为平稳。

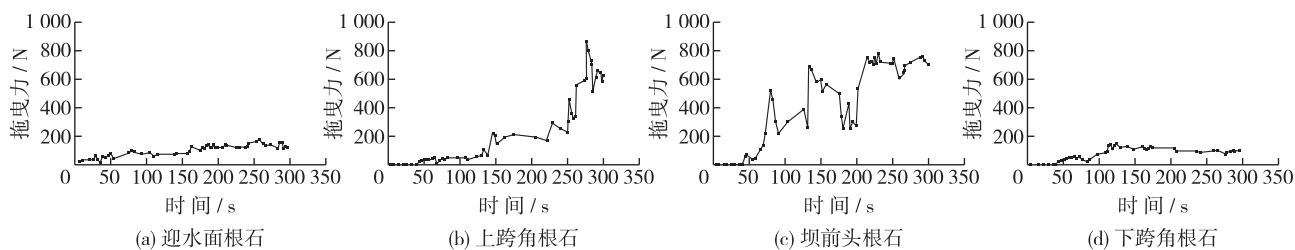


图8 拖曳力值对比

Fig. 8 Diagram of drag force comparison

4 结 语

本文基于 Flow-3D 软件建立了根石走失特性研究的数值模型,对实际工程坝垛进行数学建模并计算,计算结果中对根石走失情况与根石拖曳力进行分析,得到以下结论:

(1)数值模拟结果中根石的走失规律与实际工程相似,该数值模型可定性分析根石走失的运动规律,定量分析根石走失过程中所受拖曳力的变化。

(2)整个计算过程中坝前头处流速最大,上跨角处流速次之,此两处水流对护岸根石影响较大,其中坝前头处根石起动的流速为 2.0 m/s 左右,洪水时该处流速最大可达 3.6 m/s 左右。迎水面与下跨角处流速较小,水流对该两处的根石影响小。

(3)数值模拟结果显示上跨角与坝前头处少部分根石走失较远,大部分走失的根石集中在坝档间,迎水面与下跨角处根石基本无走失现象。

(4)洪水作用下边长为 50 cm 的正方块体在坝前头与上跨角处走失严重,不能很好地起到保护作用,实际工程中在该两处应采用质量更大的块体护根。

参 考 文 献:

- [1] EVETT J B, LIU C. Fundamentals of fluid mechanics[M]. New York: McGraw-Hill, 1987: 381-390.
- [2] 庞启秀,徐金环,辛海霞.块体形状对水流拖曳力的影响[J].水道港口,2006,27(1):5-8,22.(PANG Qixiu, XU Jinhuan, XIN Haixia. Effect of square-section cylinder shape on the drag force[J]. Journal of Waterway and Harbour, 2006, 27(1): 5-8, 22. (in Chinese))
- [3] 缙元有.河道整治工程根石走失的力学分析研究[J].人民黄河,2000,22(4):4-5.(GOU Yuanyou. Mechanics analysis research of root stone in river regulation project[J]. Yellow River, 2000, 22(4): 4-5. (in Chinese))
- [4] 胡宝琳,姚文娟,熊胜,等.波浪作用下抛石潜堤的动态稳定数值模拟[J].工程力学,2014,31(2):139-145.(HU Baolin, YAO Wenjuan, XIONG Sheng, et al. Numerical simulation of dynamic stability for riprap breakwater under wave loads [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(2): 139-145. (in Chinese))
- [5] 姚仕明,卢金友.抛石护岸工程试验研究[J].长江科学院院报,2006,23(1):16-19.(YAO Shiming, LU Jinyou. Experimental study on riprap protection of slope[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23(1): 16-19. (in Chinese))
- [6] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization-group analysis of turbulence[J]. Physical Review Letters, 1998, 30(1): 275-310.
- [7] 王月华,包中进,王斌.基于 Flow-3D 软件的消能池三维水流数值模拟[J].武汉大学学报(工学版),2012,45(4):454-457,476.(WANG Yuehua, BAO Zhongjin, WANG Bin. Three-dimensional numerical simulation of flow in stilling basin on Flow-3D[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(4): 454-457, 476. (in Chinese))
- [8] 吉鸿敏,张新燕,朱德兰.单圆柱桥墩冲刷的三维数值模拟[J].中国农村水利水电,2015(11):152-155.(JI Hongmin, ZHANG Xinyan, ZHU Delan. A numerical simulation of Three-dimensional flow around a circular cylinder using Flow-3D software [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(11): 152-155. (in Chinese))

- [9] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundary[J]. Journal of Computational Physics, 2010, 39(81): 201-225.
- [10] HIRT C W, SICILIAN J M. A porosity technique for the definition of obstacles in rectangular cell meshes[C]//Proceedings of Fourth International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, 1985: 450-468.
- [11] KRUEGER B, WIRTZ S, SCHERER V. Measurement of drag coefficients of non-spherical particles with a camera-based method[J]. Powder Technology, 2015, 278: 157-170.
- [12] CJJ 56—2012 市政工程勘察规范[S]. (CJJ 56—2012 Code for geotechnical investigation of municipal engineering projects [S]. (in Chinese))

Numerical simulation of root stones lost in dam buttress project

LIU Peixun¹, LAN Yan², CHEN Yuhao¹, YAO Chi¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In order to study the loss of root stones under the action of water flow in dam buttress, based on the Flow-3D software, a mathematical model for studying the loss characteristics of root stones is established by using the GMO model and the RNG $k-\varepsilon$ model. The numerical flume test of water flow acting on the cubic block is carried out. The water forces acting on cubic block simulated by the numerical model and calculated by the formula are basically the same, which indicates that the numerical model is reasonable. Then this numerical simulation method of root stones lost is applied to an actual dam buttress project. The result shows that the most serious area of root stones lost around the dam buttress is the front head of the dam, and followed by the upper cross corner area. It can be found that the movement of root stones in the front head of the dam is the earliest, the rising rate of water drag force is the fastest and the distance of movement is the farthest. The movement of root stones in the upper cross corner area near the front head of the dam is early and the loss of root stones is serious, while the movement of root stones in upper cross corner area near the upstream face area is later and these stones move to downstream gradually as the water flow velocity increases. Root stones in the upstream face area and down cross corner area are less affected by water flow, with basically no root stones lost. The root stones lost don't continue to move with the water flow, and most of them scatter in the dam crotch.

Key words: dam buttress; root stones; Flow-3D; GMO model; drag force