水动力模拟在渣场河道行洪分析中的应用

郭梦京[1], 李 婧[2], 周孝德[1], 张乃畅[2], 岳增璧[2]

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;
2. 中国水电顾问集团 西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710065)

摘 要: 梯级开发水电站渣场设置的合理性是水土保持方案关注的重点。设置在河道两侧的渣场会束窄河道,对河道行洪等一系列问题产生影响。针对渣场设置是否会对河道行洪产生影响的问题,提出了河道水流的数值模拟计算方法。利用 MIKE 21 水动力模块对河道水流进行二维模拟,得到修建渣场前后河道水位及流场的变化。该方法的运用解决了编制水保方案时缺乏水文资料的水力计算问题,实现了计算的便捷化和合理化;同时还为渣场水土保持工程措施的设计提供了有力的依据。

关键词: 渣场; 河道行洪; 数值模拟; 能量方程; 水力计算

文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2013)02-0156-04 **中图分类号**: S157, TV131.4

Application of Hydrodynamic Simulation to Flood Discharge Analysis of Rivers with Spoil Dumps

GUO Meng-jing[1], LI Jing[2], ZHOU Xiao-de[1], ZHANG Nai-chang[2], YUE Zeng-bi[2]

(1. *Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi* 710048, *China*; 2. *Northwest Hydro Consulting Engineers, CHECC, Xi'an, Shaanxi* 710065, *China*)

Abstract: Spoil dump is an important problem in soil and water conservation schemes for hydropower cascade development. Improper setting of spoil dumps can easily narrow the river channel and influence river flood discharge. Aiming at this question, a new calculating method based on numerical simulation of river flow was proposed. Using the hydrodynamics module in MIKE 21 model, changes of water level and flow field were obtained by two-dimensional simulation before and after the existence of spoil dumps. This method solved the hydraulic calculation problem in soil and water conservation schemes, especially in areas lacking hydrological data and engineering experience. It also provided technological evidence for soil and water conservation engineering measure design on spoil dumps.

Keywords: spoil dumps; river flood discharge; numerical simulation; energy equation; hydraulic calculation

水电站建设水土流失主要产生于施工过程中的弃土弃渣,要达到有效控制水土流失的目的,必须布置专门的堆放场地,并修建拦渣工程。随着水电站梯级开发的不断深入,水库电站的特殊性以及工程所在河段地形条件的限制性,弃渣场大多布置于河道两侧。施工期弃渣场可能会受到设防洪水的冲刷影响,其水土保持防护措施设计是编制水土保持方案的重要内容[1-2],同时还要考虑堆渣体的稳定性[3-5],这两方面内容都受到了研究学者的关注。而对于弃渣场修建后,对河道行洪是否会造成影响[6-7]也需要在水土保持方案中明确,对该方面的深入研究相对较少,本研究基于河道水面变化的连续性,综合考虑渣场所在位置河段的水力条件变化,以期能更合理地分析渣场束窄河道后对行洪的影响。

1 渣场概况

渣场位于坝址上游库区,库底型渣场,渣场位置如图1 所示。为了避免工程建设期间,河道洪水对堆渣体坡脚的冲刷,加强渣体的稳定性,修建水土保持工程措施。堆渣及其防护措施的修建占用了原河道行洪断面,造成河道断面束窄。渣场布设在支沟口,由于沟道不是常年流水,计算忽略沟道来水的影响。渣场堆渣高程为 1 900.80 m,挡墙顶高程为 1 835.00 m,一级马道高程为 1 850.00 m,向上每

收稿日期:2012-02-03 **修回日期**:2012-05-03
资助项目:国家重点基础科学研究发展计划(973)项目"西北旱区山洪致灾机理及防治研究"(2012CB723201)
作者简介:郭梦京(1986—),男(汉族),山西省运城市人,博士,主要从事水环境数值模拟及环境保护研究。E-mail:lijing8615@163.com。

20 m布设一阶马道。渣场的修建改变了河道原有地形,计算条件下将渣场布设在原河道地形上,并将渣场挡墙、马道的高程赋值给相应的地形线,得到渣场的计算地形。

模型初始条件的变量包括流量、流速、水位,计算区域内流量和水位为计算相应的初值,流速为零。模型计算时上游进口边界采用流量条件,下游出口边界采用水位条件,河床糙率取值为 0.025。

本次计算中,假定渣场修建后的 3# 断面水位未受到影响。由于渣场修建束窄河道,会造成上游壅水,影响下游河道水流流态,渣场下缘距 3# 断面约 634 m,大流量条件下渣场对该断面水位的影响较小,且保证与下文能量方程计算结果的对比性,不计该断面水位的变幅。初始条件的进口流量采用 20 年一遇洪峰流量 $Q=5\ 990\ m^3/s$,出口水位采用 3# 断面水位 $Z=1\ 860.90$ m。计算在相同条件下,渣场修建后的河道水位变幅。

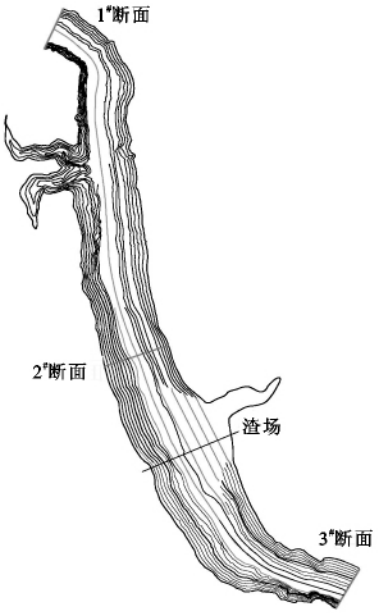


图 1　研究区渣场、河道地形示意图

2　行洪分析方法

目前在水保方案的渣场河道行洪分析中,利用曼宁公式计算渣场过水断面被束窄前后的水位,以对比渣场的修建是否会对河道行洪产生影响。采用这种计算方法,对比的仅仅是独立的断面,渣场的修建会造成原河道束窄,过水断面面积减小,导致相同的过流量水位壅高,这个孤立的断面只是面积减小,造成相同高程下的过水量减小,忽略了河道上下游之间的水力关系,不能够真实反映渣场修建河道断面束窄后对水流流态造成的影响。

吴持恭[8]给出了河道水面曲线的计算方法,该方法依据上下游断面的能量守恒构建水深沿流程变化的微分方程,认为计算河段内的一切可变水流要素均呈线性变化,将微分方程改写为差分方程,得到试算法推求河道水面曲线公式:

$$Z_u+(\alpha+\zeta)\frac{Q}{2gA_u^2}-\frac{\Delta s}{2}\frac{Q}{K_u^2}=Z_d+(\alpha+\zeta)\frac{Q}{2gA_d^2}+\frac{\Delta s}{2}\frac{Q}{K_d^2}$$

$$K=\frac{1}{n}\times A\times R^{\frac{2}{3}}$$

式中:Z_u——上游水位(m);Z_d——下游水位(m);A_u,A_d——上、下游断面面积(m^2);K_u,K_d——上、下游流量模数;Q——流量(m^3/s);Δs——断面间距(m);R——水力半径(m);α——动能修正系数;ζ——局部损失系数。

在该计算方法中,考虑了河道上下游水流间的关系,逐断面递推,计算精度取决于计算流段划分的长短。公式中涉及到的动能修正系数反映了断面流态的复杂程度,确定该值需要考虑的因素较多,有采用经验公式[9-10]以及针对不同问题新方法[11]等;局部损失系数也多由经验或是试验方法参考取值[12-13]。以上分析表明,系数确定方法的多样性和经验性会造成计算成果的不确定性。因此,先后有众多学者从不同角度深入探讨了河道水面线的推求方法[14-16]。本研究在已有研究的基础上,利用 MIKE 21 计算软件,对修建渣场河道水流流态进行模拟。MIKE 21 水动力模块(hydrodynamics, HD)模拟由于各种作用力的作用而产生的水位及水流变化,包括了广泛的水力现象,可用于任何忽略分层的二维自由表面流的模拟[17]。采用平面二维非恒定流数学模型,构建三角形网格河道地形,有限元求解方法。计算方程为:

水量平衡方程:$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial q}{\partial y}=\frac{\partial d}{\partial t}$

x 方向运动方程:$\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{p^2}{h}+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{pq}{h}\right)\right]-gh\frac{\partial \xi}{\partial x}=-\frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2h^2}+\frac{1}{\rho_w}\left[\frac{\partial}{\partial x}(h\tau_{xx})\frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{xy})\right]+\Omega_p$

y 方向运动方程:$\frac{\partial q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q^2}{h}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{pq}{h}\right)\right.=-gh\frac{\partial \xi}{\partial y}-\frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2h^2}+\frac{1}{\rho_w}\left[\frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{yy})\frac{\partial}{\partial x}(h\tau_{xy})\right]+\Omega_q$

$(\Omega=2\omega\sin\varphi)$

式中:h——水深;d——河床高程;ξ——水位;p,q——x,y 方向上的垂线单宽平均流量分量;C——谢才摩阻数;g——重力加速度;τ_{xx},τ_{yy},τ_{xy}——有效底面剪切应力分量;ρ_w——水密度;Ω——科氏力参数;ω——地球自转角速度;φ——计算水域所在的纬度。

3 计算成果

3.1 模型计算成果

通过模型计算修建渣场前后的河道水位图可以清晰地显示河道水流流态的变化。修建渣场后改变了河道的原有地形，阻挡了水流向沟道方向流动。除修建渣场部分外，其河道过水断面水位都在 1 863 m 以下，说明渣场修建对束窄河道段造成的水位壅高是有限的，不会影响洪峰流量条件下的河道断面的行洪能力，河道束窄没有对水位造成明显的影响。在相同断面条件下，过流能力是一定的，由液体运动的流束理论可知，未造成过流断面面积的增大，其流速会有所增大。由模型计算河道的流场图(图 2)可以看出，原河道地形在未修建渣场前沟道中还有一定的流速，修建渣场后即不存在这部分流速，并且对比修建渣场前后的水面宽度有明显减小，河道中水流流速也有所增大，特别是在渣场防护挡墙的外侧，河道流速明显增大，从 0.6～0.8 m/s 增大到 1.2～1.4 m/s。渣场的修建将河道顺直，原有流速集中增大区域也在顺直的河道中消失，有效减小了水流对河道的冲刷，同时也避免了河道洪水对挡墙墙脚的冲刷，保证了挡墙的稳定性。

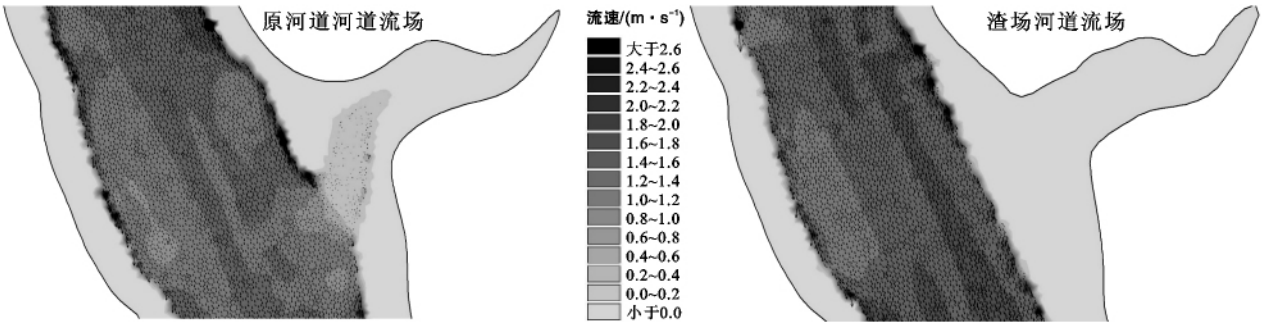


图 2 原河道与渣场河道流场图

3.2 计算成果验证

为了对模型计算成果的合理性进行验证，采用河道水面曲线试算法对该计算河道的水面线进行推算。为保证与模型计算的一致性，糙率取值为 0.025；动能修正系数 α 取值为 1，局部损失系数 ζ 取值为 0，即未考虑河道的损失。同样分为原河道地形和渣场河道地形，并在渣场位置增加一个渣场断面，以便于更加清晰的对比出修建渣场前后水位变幅。根据已知的 3# 断面水位，推算渣场断面、2# 断面和 1# 断面水位，断面地形采用剖面软件从地形图上获得，并根据已知的断面深泓点高程增加河道深泓点地形。计算结果详见表 1。将模型计算的 1# 断面、2# 断面、渣场断面、3# 断面的原河道地形和渣场河道地形水位也列于表 1 中。

从表 1 可以看出，在这段约 3 km 长的河道内，给定一致的初始条件(3# 断面初始计算水位 $Z=1\,860.90$ m，$Q_{5\%}=5\,990$ m^3/s)由能量方程和模型计算出来的水位结果不尽相同，但其差值很小。同一断面，模型计算结果比能量方程计算结果偏大；考虑到在整个迭代计算过程中，模型根据初始水位，不断的迭代试算整个河道地形进而得到的计算结果，计算成果具有一致性；能量方程仅是从这几个断面出发，从下游向上游推算，其结果仅是这几个断面的水位，断面与断面间河道的变化并未考虑其中。两种计算方法下的渣场断面，渣场修建后的水位都低于渣场修建前的水位；由于所选取的断面是布设水土保持措施的典型断面，该断面位置的选择接近渣场下游，渣场的修建造成河道束窄，壅水多发生在渣场位置的上游，单从渣场河道地形来看，2# 断面水位都有所上升，同时 2# 断面正位于渣场断面的上游，说明渣场修建束窄河道断面，对河道过水还是有一定的影响。

表 1 河道各断面水位计算结果对比

河道断面	能量方程计算结果/m		模型计算结果/m	
	原河道地形水位	渣场河道地形水位	原河道地形水位	渣场河道地形水位
1# 断面	1 860.899	1 860.899	1 861.08	1 861.11
2# 断面	1 860.935	1 860.936	1 860.98	1 860.98
渣场断面	1 860.939	1 860.930	1 860.99	1 860.97
3# 断面	1 860.900	1 860.900	1 860.90	1 860.90

将能量方程计算结果和模型计算成果进行对比，尽管水位不完全相同，整体来说是相近的。采用能量方程对模型计算结果进行验证，模型计算结果是可以接受的，说明该模型计算的结果是可信的。

4 结 论

采用 MIKE 21 软件计算河道水位的方法是可行的，由于 MIKE 21 水动力计算模块具有模拟水流在

x 方向的运动的功能，恰好满足了河道沿岸渣场束窄河道，改变水流在 x 方向流态的条件，更好地模拟了河道被束窄后河道洪水的水流流态。

对于河道水面线而言，模型计算可以得到整个河道的水位变化，而能量方程只能够得到某几个断面的水位，特别是在编制水土保持方案水文水情资料缺乏的条件下，适用性较模型差。对于所需要的渣场修建前后河道水位变幅，模型计算能够完整地反映出修建渣场位置河道的水位和水流流态变化，不仅得到了河道束窄段水面线的波动，更可以清晰地看出河道流场变化，对选择和设计渣场的防护措施具有积极的促进作用。

[参 考 文 献]

[1] 操昌碧. 水库型弃渣场水土保持工程措施的设计[J]. 水电站设计，2009，25(3)：46-51.

[2] 周天佑. 河谷类弃渣场防护设计中的几个问题[J]. 四川水利，2010(6)：59-61.

[3] 王峥，林锋，赵如雄. 强度折减法在锦屏水电站对外专用公路 13# 渣场边坡稳定性分析中的应用[J]. 甘肃水利水电技术，2010，46(2)：16-18.

[4] 罗雷，何丙辉. 弃渣场堆渣及挡渣墙稳定性分析[J]. 水土保持应用技术，2006(5)：35-37.

[5] 陈永亮，蔡德志. 影响弃渣场稳定的因素及针对性治理措施探讨[J]. 西部探矿工程，2009(12)：32-34.

[6] 徐永年，田卫宾. 开发建设项目弃渣场设计及防洪问题[J]. 中国水土保持，2003(2)：23-24.

[7] 庄佳，赖冠文，张小峰，等. 弃渣场与大桥工程对防洪影响的计算与分析[J]. 中国农村水利水电，2008(1)：78-81.

[8] 吴持恭. 水力学[M]. 北京：高等教育出版社，2003.

[9] 《山区航道整治》三结合组. 山区航道整治[M]. 北京：人民交通出版社，1974.

[10] 交通部水运规划设计院，交通部天津水运工程研究所. 航道整治水力计算[M]. 辽宁 沈阳：长江航道局出版社，1992.

[11] 王志力，耿艳芬，金生. 山区性河流水面线计算改进[J]. 大连理工大学学报，2005，45(3)：433-437.

[12] 黄辉. 河道一维水力计算参数的研究[D]. 四川 成都：四川大学，2004.

[13] 刘默，韩程起. 用能量方程计算河道水面线方法讨论[J]. 黑龙江水利科技，2005，33(3)：10-11.

[14] 杨星，李朝方，刘志龙. 桥梁桩群存在条件下的河道水面线计算方法研究[J]. 华中师范大学学报：自然科学版，2011，45(1)：59-62.

[15] 万五一，江春波，李玉柱. 变步长法在天然河道水面线计算中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报，2007，39(4)：647-649.

[16] 邢贞相，付强，孙兵. 实码加速遗传算法在天然河道水面线计算中的应用[J]. 灌溉排水学报，2003，22(5)：60-63.

[17] 孙德强，胡方，姜国徽. MIKE 21 模型在白浪河治理工程中的应用[J]. 山东水利，2009(6)：25-28.

(上接第 155 页)

[16] Peichl M, Arain M A. Allometry and partitioning of above-and belowground tree biomass in an age-sequence of white pine forests[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 253(1/3):68-80.

[17] 魏艳敏. 荒漠环境规模化人工杨树林生物量和碳储量研究[D]. 新疆 乌鲁木齐：新疆大学，2010.

[18] 汪金松，张春雨，范秀华，等. 臭冷杉生物量分配格局及异速生长模型[J]. 生态学报，2011，31(14)：3918-3927.

[19] Bond L B, Wang C, Gower S T. Aboveground and belowground biomass and sapwood area allometric equations for six boreal tree species of Northern Manitoba [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2002, 32(8):1441-1450.

[20] Pastor J, Aber J D, Melillo J M. Biomass prediction using generalized allometric regressions for some northeast tree species[J]. Forest Ecology and Management, 1984, 7(4):265-274.