

基于 FLUENT 的河道冲刷水力特性研究

姚 巍

中国水利水电第十四工程局有限公司 云南 昆明 650041

【摘要】：溢洪道水流对河道的冲刷严重危及堤防稳定与防洪安全，因此研究结合神仙岭排洪渠明河段工程，通过数值模拟与现场检测探究河道水力特性。基于雷诺方程与有限体积法构建河道水流三维模型，运用 Fluent 软件对爱联河道水力特性开展数值模拟。结果表明：不同水位下沿程流速基本处于稳定范围；河道压力整体变化不大，其中直立挡墙处压力随水位下降而上升；直立挡墙处剪应力随水位降低而增大，但变化幅度小，远小于混凝土抗剪强度，基本满足工程安全要求；出口右侧局部区域（桩号 129 至 141 段）流速偏大，存在冲刷风险，需在该部位采用砼护底以保障安全；无冲刷河段建议增设无衬砌、无硬化边坡与河底，借生物措施改善黑臭水体。实测表明，这些措施成效良好，为同类河道治理积累宝贵经验。

【关键词】：FLUENT；数值模拟；水力特性；剪应力；冲刷

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.072

1 研究背景

大坝建成后虽可产生多方面的综合效益，但同时会显著改变下游河道的水流条件^[1]。在泥沙含量较高的河流中，这种变化容易引发河道冲刷，进而导致河岸塌陷和河床下切，对河道工程及水利建筑物的结构安全构成威胁^[2]。其中河道冲刷作用是影响岸坡稳定性的关键要素。目前不少学者已针对河道岸坡冲刷机理展开较为深入的研究^[3]，如王浩^[4]等基于单次洪峰过程，探讨其对边坡冲刷量的作用，构建了适用于不同河道形态的冲刷量计算公式；董炳江等^[5]提出，三峡水库下游河道冲刷强度主因在于洪水历时与来水泥沙含量的协同作用；岳志春等^[6]依据水力学与泥沙动力学原理，认为流量规模是主导河道冲淤演变的核心因子；王蕊^[7]运用河道冲刷二维数学模型解析物理模型试验，推得河道中部冲刷深度普遍高于两岸的结论；王功成等^[8]依托府谷县皇甫川堤防工程实例，解析不同断面冲刷结果及相应渗流稳定性。

在坝下游河道发生冲刷的过程中，其河道形态结构会随之发生相应调整。封光寅等^[9]认为，丹江口水库清水下泄所引发的冲刷、下切以及崩岸等造床过程，使下游河槽形态发生了一系列显著变化；谈广鸣等^[10]以中游河段为研究对象，分析了皇庄至泽口区段频繁出现的搬弯切滩现象及其成因，认为水库运行不仅引起下游河道的纵向冲淤变形，还导致了明显的横向变形；张俊勇等^[11]对丹江口水库运行后汉江下游出现的搬弯切滩现象进行了分析，指出该现象实质上是河道向更优弯道结构演化调整的过程，而水流条件的改变是推动该演化的重要驱动因素。河道水流冲刷能力与其水力特性联系紧密。为保障工程设施运行安全与结构稳定，本文基于流体力学计算软件 FLUENT，选取爱联河流域为研究对象，针对不同水位工况下河道水流对河床及直立挡墙的冲刷作用开展数值模拟分析，结

合现场实测结果进行对比验证，以进一步论证工程设计的科学性与合理性。在模拟与验证的基础上，本研究对原有工程设计进行了优化，在保障结构安全的前提下，有效缩短了河道硬化处理长度，降低了建设成本，并改善了河道整体生态环境。

2 研究区域概况

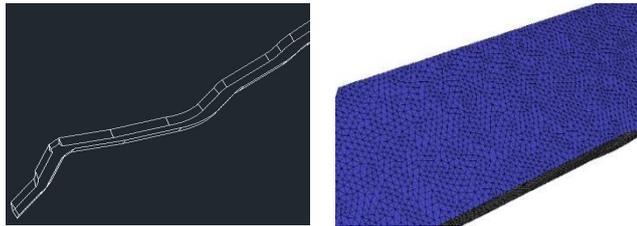
神仙岭排洪渠属龙岗河二级支流，地处龙城街道龙岗体育中心周边，源头来自神仙岭水库溢洪道。水流自西北向东南总体行进，先经龙岗体育中心，再穿越盐龙大道，最终于下游汇入爱联河，全长约 0.9 km。该渠明渠段水体浑浊，长约 183 m，河道宽 4~5 m；明渠末端连 3 m×3 m 箱涵，且在自行车赛场路附近与爱联河暗涵段相接。此明渠段挡墙以天然岸坡与浆砌石挡墙为主要形式。其防洪标准为 50 年一遇——对应 50 年一遇洪峰流量 18.3 m³/s，枯水期 5 年一遇洪峰流量 8.2 m³/s。爱联河流域消除黑臭及河流水质保障工程主要包含两项：水环境治理工程与水安全保障工程。

为更好地实施流域内水环境治理工程，保证 2019 年河流断面水质达标以及黑臭水体治理达标，消除河道防洪安全隐患迫在眉睫。通过本项目的实施，打通严重阻水河段，扩建关键行泄通道，进一步提高城市防洪排涝安全，可为龙岗区治水提质工作提供基础安全保障。爱联河流域水安全保障工程中，河道岸坡预制混凝土框格梁施工、河道冲刷下切抑制综合治理方案是爱联河流域水安全保障工程的关键环节，上述环节是保障工程优质、安全、高效施工的重要保障。鉴于上述工程实际情况，开展涵盖河道岸坡预制混凝土框格梁施工关键技术、河道冲刷下切抑制综合治理关键技术在内的爱联河水安全保障工程施工关键技术研究，最终形成爱联河流域河流水质保障工程施工综合技术研究具有重要意义。

3 河道模型

3.1 模型建立

设计河道流域如下图所示。基于爱联河河道三维模型的成果,通过数据传递,将三维模型直接应用于流体力学计算软件,即将三维设计模型导入 FLUENT 中进行水力学有限元数值仿真计算。爱联河河道 CAD 三维模型如图 1 所示。



(a) 河道三维模型图 (b) 有限网格图

图 1 河道三维模型

利用软件 ICEMCFD 进行网格划分,ICEM 能够为后期 FLUENT 模拟提供足够优化的网格。采用四面体非结构化网格,单元数为 3720262,节点数为 668426。采用 FLUENT 大型有限元仿真软件,基于压力与绝对速度条件对瞬时流态开展数值仿真计算,当河道水流进入洪峰工况时,相关工程资料显示此时流量为 18.3 m³/s。物理模型选取 Realizable 的 k-ε 模型,速度场和压力场均采用经典的 SIMPLEC 算法。河道与大气相连,设置速度进口,速度出口等边界条件。通过对河道直立挡墙所承受的压力和流速及残差曲线进行监控,实现水流对河道及直立挡墙的仿真模拟。

入口边界:将区域左侧定义为速度入口,其速度分别取 1.109 m/s、1.34 m/s、1.64 m/s、2.0 m/s、2.57 m/s。

出口边界:区域右侧边界设置为自由出流 outflow。

壁面边界:(wall)壁面无滑移。

3.2 控制方程

FLUENT 所采用的方程式主要包括流体力学三大基本方程:连续方程、动量方程、能量方程。

(1) 连续方程式 (Continuity Equation) :

$$\text{不可压缩流: } \nabla \cdot U = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = \frac{RSOR}{\rho} \quad (1)$$

密度变化或者可压缩流 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u\rho) + \frac{\partial}{\partial y}(v\rho) + \frac{\partial}{\partial z}(\omega\rho) = RSOR + RDIF \quad (2)$$

式中: *RSOR* 为质量源; *RDIF* 为质量扩散

(2) 动量方程式 (Momentum Equations) :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left\{ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x - \frac{1}{\rho} \Delta \tau_x - Ku - \frac{RSOR}{\rho} u - F_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \left\{ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y - \frac{1}{\rho} \Delta \tau_y - Kv - \frac{RSOR}{\rho} v - F_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \left\{ u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z - \frac{1}{\rho} \Delta \tau_z - K\omega - \frac{RSOR}{\rho} \omega - F_z$$

式中: *U* (*u, v, w*) 为流速; *P* 为压力; *G* 为重力加速度和非惯性体加速度; τ 为粘性应力张量; *K* 为阻力 (多孔挡板、障碍、糊状区) *RSOR* 为在零速度场加速度引起的质量喷射; *F* 为其他力。

(3) 能量方程式 (Thermal Energy Transport Equation) :

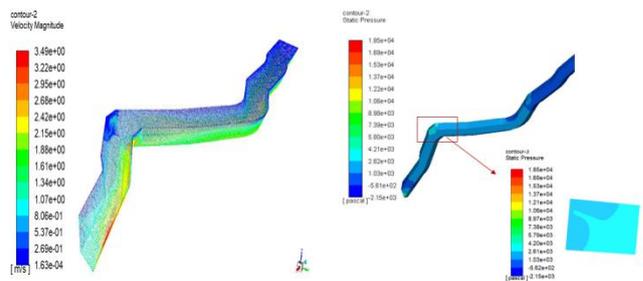
$$\frac{\partial(\rho I)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u\rho I) + \frac{\partial}{\partial y}(v\rho I) + \frac{\partial}{\partial z}(\omega\rho I) = PdivU + \nabla \cdot (K\nabla T) + h(T_{wall} - T) + RISOR + RIDIF$$

$$I = \int_T C(T)dT + (1 - f_s)L \quad (4)$$

式中: *f_s* 为固体体积分数; *L* 为潜热; *k* 为导热系数; *C*(*T*) 为比热; *h* 为流体传热系数; *T_{wall}* 为墙壁温度; *RISOR* 为能量源; *RIDIF* 为湍流扩散。

4 模拟结果

针对洪峰流量 (18.3 m³/s) 条件下的河道安全性进行了分析,由于过流面积尚不明确,分别在水位为 3 m、2.58 m、2.19 m、1.85 m、1.5 m 的情况下进行了数值模拟计算。为考察入口流速对流场的影响,以水位为 3 m 的工况为例,其速度云图、压力云图以及直立挡墙处的剪应力云图如图 3 所示。



(a) 河道水流的速度云图 (b) 河道及直立挡墙处的压力云

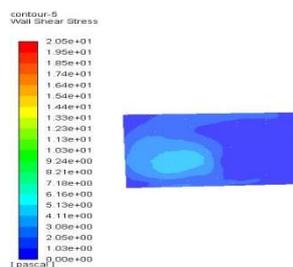


图 (c) 直立挡墙处的剪应力云图

图 3 H=3m 时河道水流的云图

图 3 (a) 展示河道水位 3 m 时的流速云图。入口右侧近岸位置流速达 3.35 m/s,存在冲刷风险,需在此处布设砼护底;直立挡墙处流速仅 0.349 m/s,显著低于入口处流速。

图3(b)为河道水位为3m时的压力云图。由图可知,河道压力值整体变化较小,沿程分布相对稳定。

图3(c)是河道水位为3m时的压力云图,可以看出直立挡墙的左侧的最大剪应力为61.6 Pa,而直立挡墙处的混凝土为C25,由规范可知,最大抗剪强度为1.8 MPa。此时直立挡墙处的剪应力远远小于1.8 MPa,满足工程稳定要求。

各工况下,数值模拟的结果如下表1所示。

表1 不同水位下数值模拟结果

工况	水位 (m)	入口速度 (m/s)	靠近河道入口右侧速度 (m/s)	挡墙位置的流速 (m/s)挡墙处的剪应力 (Pa)
工况一	3	1.109	3.35	0.349 61.6
工况二	2.58	1.34	3.59	0.35 69.1
工况三	2.19	1.64	3.77	0.25 46.5
工况四	1.85	2.0	4.49	0.30 11.2
工况五	1.5	3.07	3.45	0.35 9.4

从整个流域范围分析,挡土墙位置的流速相对较小,表明直立挡墙所受水流作用较弱,能满足直立挡墙的安全稳定需求,而在靠近入口右侧的局部区域,水流流速偏大,可能存在发生冲刷的情况。直立挡墙所采用的混凝土等级为C25,根据相关规范,其最大抗剪强度为1.8 MPa。在不同流速工况下,直立挡墙所产生的最大剪应力均明显小于1.8 MPa,能够满足工程稳定性的要求。

5 结论

伴随着国民经济快速的发展,人民生活水平不断的提高,

河道的设计理念已经发生了变化,防洪已经不仅仅具有保护人民生命财产安全的功能,建设生态、景观、可持续发展的河道已经成为新的设计理念,“以人为本,人水和谐”,充分利用深圳龙岗区得天独厚的水资源,为龙岗区市民提供一个绿草、碧水、蓝天的生态景观河道,让龙岗的山更青,水更绿,人民更加幸福。

本文以爱联河流域消黑臭及河流水质保障工程项目为依托工程,针对河道冲刷下切抑制综合治理关键技术展开了研究。基于大型流体力学计算软件FLUENT,针对爱联河流域不同水位下水流对河道及直立挡土墙的冲刷,进行了水力学的数值模拟分析,并与现场的实际情况进行对比,验证了工程方案的合理性为了验证施工方案的合理性,分析结果如下:(1)流速云图分析显示,全流域河道沿程流速无明显突变,整体维持在相对稳定区间;直立挡墙位置流速较小,表明其所受水流作用较弱,能满足工程安全要求,而入口右侧局部区域(桩号129至141段)流速较大,存在冲刷风险,故该部位需采用砼护底,其余下切不明显河段以普通抛石护底。(2)压力云图结果显示,不同水位下河道压力整体变化幅度较小。水位降低时,流速相应增大,直立挡墙承受压力随之增大。(3)直立挡墙剪应力分布图表明,随水位降低剪应力值呈增大态势,但变化幅度小且显著低于混凝土抗剪强度,当河道进入洪峰流量工况,不同水位下水流对直立挡墙的剪切作用均较弱,基本符合工程要求。(4)对于无冲刷的河道建议增加无衬砌、无硬化的边坡和河底,利用生物改善黑臭水体。

通过这一研究,进一步优化了设计方案,减少了投资,减少了河道硬化长度,美化了河道环境,为类似河道的治理提供了宝贵的经验。

参考文献:

- [1] A.H.阿辛顿,郭欣,付湘宁.大坝下游河道冲刷及水温变化对生态的影响[J].水利水电快报,2015,36(12):10-12.
- [2] 水库下游河床冲刷下切问题的探讨[J].周志德.泥沙研究.2003(05).
- [3] 曾强.河道治理工程中河道冲刷研究[J].水利技术监督,2020,(02):197-199.
- [4] 王浩,岳建伟,潘登.单洪峰作用过程河道岸坡冲刷量估算方法[J].水电能学,2019,37(09):88-91.
- [5] 董炳江,许全喜,袁晶,朱玲玲.近年来三峡水库坝下游河道强烈冲刷机理分析[J].泥沙研究,2019,44(05):42-47.
- [6] 岳志春,苑希民,田福昌,张红武.黄河宁蒙河段近期水沙特性及冲淤过程研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2019,52(08):810-821.
- [7] 王功成,尚艳娥.府谷县皇甫川堤防冲刷及渗流稳定性分析[J].陕西水利,2019,(05):141-142+145.
- [8] 王蕊.二维河道冲刷数学模型在河道冲刷物理模型试验中的应用研究[J].水利技术监督,2017,25(03):86-88+153.
- [9] 封光寅,李光辉,周晓英,丹江口水利枢纽下游河道重建平衡过程分析[J].人民长江,2006,37(12):99-101.
- [10] 谈广鸣,宁磊,李付军.汉江皇庄至泽河口段撇弯切滩演变研究[J].泥沙研究,1996,(2):113-117.
- [11] 张俊勇,陈立,刘林,等.汉江中下游河道最佳弯道形态[J].武汉大学学报(工学版),2007,40(1):37-41.