

张风辉,张闽雄,黄圣冬,等.陡坡排水管道防洪模拟及潮位效应耦合分析[J].人民珠江,2026,47(3):78-87.

陡坡排水管道防洪模拟及潮位效应耦合分析

张风辉^{1,2},张闽雄³,黄圣冬³,张挺^{4*},杨丁颖⁴,陈志锋⁴

(1.福州市水利投资建设集团有限公司,福建 福州 350007;2.福州市水利水电勘测设计有限公司,福建 福州 350007;
3.福州市闽江下游防洪工程建设有限公司,福建 福州 350007;4.福州大学土木工程学院,福建 福州 350116)

摘要:暴雨条件下,城市排水管网在管道坡度与排水口潮位双重因素影响下可能发生倒灌现象,严重危害管道安全及城市排洪能力。为研究排水管网内部水流变化机制,构建了一种基于圣维南方程的数学模型并用于模拟坡度与潮位耦合作用下分支管网内部的水流变化过程。进一步构建福州市江北城区“高水高排”工程水动力耦合模型,分析暴雨条件下该工程在不同工况下的排洪能力。结果表明:所构建的数值模型能够用于模拟坡度-潮位耦合作用下的排水管网内部水流变化过程,同时上述工程在 50 年一遇暴雨条件下能满足城市排洪要求。研究可为排洪工程规划设计和城市排洪系统优化提供技术参考。

关键词:潮水顶托;坡度;排水管网;极端降水事件;“高水高排”

中图分类号:TV672+.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(2026)03-0078-10

近年来,随着城市化快速推进以及温室效应的加剧,气候系统发生显著变化,导致近十年极端强降水事件频率较 20 世纪增加 30%~50%,城市排洪系统面临严峻挑战^[1-3]。福建地区受亚热带季风输送充沛水汽、山地地形抬升作用、台风活动频繁以及气候变暖加剧等因素影响,暴雨频发。暴雨期间,城市排水管道排水口水位因地表径流量激增和下游水体顶托作用急剧上升,破坏了管道内正常的水流压力梯度,导致管道内水流速度降低,排水效率显著下降,严重时甚至引发倒灌现象^[4-5]。这种水力条件的剧变会进一步触发多重次生灾害,危害管道正常运行^[6-7],因此研究城市排洪管道在暴雨和潮位耦合作用下的水动力双向耦合机制,精确模拟管道内部压力及水位变化过程,对于解决沿海城市“暴雨-潮位”双重胁迫下的排水瓶颈问题具有重要参考价值。

近年来,国内外众多研究者对管道排水口潮位

顶托与管道坡度对管道排洪的影响进行了大量研究。罗鸣等^[8]设置 3 种不同的出流边界条件,分析管道相对排水能力变化,得出管道完全淹没出流时,排水能力随水位的升高而不断减小,减小程度与管道末端水位动态顶托管道水流有关的结论。朱悦茹^[9]基于 OpenFOAM 开发二维、三维数值模型,研究顶托作用下雨水管道-河道交汇处的水动力作用过程,探究顶托对管道排水能力的影响。研究发现在降雨中期下游水位上升导致顶托作用增强,在管道形成满管后排水量显著降低。同玉等^[10]采用 GPU (Graphics Processing Unit) 加速技术并耦合 SWMM (Storm Water Management Model) 管网系统的二维城市雨洪过程模型,模拟不同重现期管网淤积系数、主干管坡度等情况下管网排水效果。结果表明坡度增大对管网排水性能有一定提升作用,相比于主干管坡度 1‰ 的管网,3‰ 的管段相对超载时间占比减少 10%。在实际工程应用中,城市排洪管道

基金项目:福建省水利科技重大项目(MSK202333)

收稿日期:2025-06-23 **修回日期:**2025-09-01 **网络首发日期:**2025-09-12

作者简介:张风辉(1989—),男,硕士,高级工程师,主要从事水工结构工程方向的研究。

通信作者:张挺(1977—),男,教授,主要从事水利水电工程方向的研究。

联系作者:致信 rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

的排水能力受坡度和管道末端潮位的共同影响。尤其在山区小流域地区“高水高排”工程中,其排洪管道受地形限制,部分管段坡度变化剧烈,显著影响管道的排洪能力与安全运行。同时,暴雨期间,该类工程排洪管道下游河道因强降雨和流域汇流导致水位急剧上升,对排水口形成顶托,阻碍水流输送^[11-12]。因此,为精准评估沿海城市管网排洪效能,需综合考量暴雨、坡度与下游水位的动态耦合作用。

基于此,本文构建了坡度与潮位耦合作用的水动力模型,验证该模型对短历时高强度入流下排洪管道瞬态水动力响应的模拟能力。以福州市江北城区“高水高排”工程为例,在暴雨重现期为50年一遇的条件下,模拟获得了该工程管道内水位的变化趋势、动水压强分布及流速、流量等水力参数。该研究成果可为沿海城市排洪系统韧性提升及排洪瓶颈段识别提供多尺度优化决策的科学参考。

1 模型构建

为系统评估强降水对城区管网排洪效能的综合影响,本研究以福州市江北城区为分析对象。该区域地形起伏显著,且暴雨期间排水管网受闽江洪水顶托作用影响显著。为准确模拟暴雨条件下该地区“高水高排”工程排水管道的排洪过程,分析系统运行状态,本文基于圣维南(Saint Venant)方程组构建数学模型,用于模拟该工程排水管道在极端降水情景下的瞬态水力学响应特征。

1.1 研究区域概况

本研究选取福州市江北城区作为研究区域,该区域位于闽江下游北岸(地理中心坐标:北纬 $26^{\circ}05'$,东经 $119^{\circ}18'$)。整体地势自西北向东南呈阶梯状下降,海拔高程由北部的丘陵山地(坡度达10%~25%)逐渐过渡至南部的沿江平原地带(坡度小于3%)。地貌格局表现为三面受山体环绕,东南侧毗邻闽江,形成“簸箕状”地形单元。

1.2 计算原理

压力流态的封闭式排水系统水力模拟通常采用圣维南方程组来描述^[13-15]。本文采用圣维南方程

组+Preissmann 狭缝法对封闭式排水系统内部满流与不满流过渡进行水力模拟,通过空间中心差分计算下一时刻水力参数,在管道节点处采用基于流量守恒的显式欧拉离散格式计算水力参数。

1.2.1 管道水流控制方程

管道水流控制方程包括动量方程和连续方程。

动量方程:

$$g \cdot A \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + g \cdot A \cdot S_f = 0 \quad (1)$$

连续方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; A 为过水断面面积, m^2 ; t 为时间, s ; x 为距离, m ; g 为重力加速度, $9.8 m/s^2$ 。

当管道水流为不满流时,总水头 $H = z + h$,其中 z 为管底高程, h 为实际水深;当管道水流为满流时,采用Preissmann 狭缝法假设管道顶部有一个非常窄的无限长的缝隙,该缝隙不改变过水断面面积以及水力半径,将满流等效为水面宽度极小的不满流,因此可以采用上述动量方程与连续方程,总水头 $H = z + h + p/\rho g$, $p/\rho g$ 表示狭缝中的水深。

S_f 为摩阻坡度,由曼宁公式求得,见式(3):

$$S_f = \frac{K}{g \cdot A \cdot R^{4/3}} \cdot Q \cdot |V| \quad (3)$$

式中: $K = g \cdot n^2$, n 为管道曼宁系数; R 为管道过水断面水力半径, m ; V 为流速,绝对值表示摩擦阻力方向和水流方向相反, m/s 。

管道曼宁系数的计算见式(4):

$$n = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{v} \quad (4)$$

式中: R 为水力半径, m ; S 为坡度, m/m ; v 为平均流速, m/s 。

将圆形断面管道 $Q^2/A = v^2 A$ 等式分别代入式(1)、(2)中联立可得:

$$g \cdot A \cdot \frac{\partial H}{\partial x} - 2v \cdot \frac{\partial A}{\partial t} - v^2 \cdot \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + g \cdot A \cdot S_f = 0 \quad (5)$$

利用空间中心差分格式将式(5)进行差分,求得各时段内每个管道的流量和每个节点的水头。

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{1}{1 + (K \cdot \Delta t / \bar{R}^{4/3}) |\bar{V}|} \left[Q_t + 2\bar{V} \cdot \Delta A + V^2 \frac{A_2 - A_1}{L} \Delta t - g \bar{A} \frac{H_2 - H_1}{L} \Delta t \right] \quad (6)$$

式中： \bar{V} 、 \bar{A} 、 \bar{R} 分别为 t 时刻管道末端的加权平均值。下标1和2分别表示管道或渠道的上、下节点； L 为管道长度，m。管道段进出口水头损失，可以从 H_2 和 H_1 中减去。

1.2.2 管道岔口节点流量守恒方程

管道岔口节点流量守恒关系式：

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \sum Q_i \quad (7)$$

式中： H 为岔口节点水头，m； Q_i 为岔口节点进出口净流量， m^3/s 。式(7)的有限差分格式为：

$$H_{t+\Delta t} = H_t + \sum Q_i \cdot \Delta t \quad (8)$$

联立式(6)、(8)可依次求得 Δt 时段内各管道段流量和每个岔口节点水头。

2 模型验证

2.1 大坡度水力模拟

在坡度影响下，陡坡段易形成涌浪和滚水坡，影响模型计算精度与稳定性。为验证模型在坡度影响下的准确性，选用2段串联管道进行计算：第一段坡度为10%，第二段坡度为5%，粗糙系数均为0.05，模型示例见图1，上游J1节点入流模拟过程线见图2，下游设置为自由出流边界。设置2种情景：情景1管径为5.0 m；情景2管径为2.5 m。

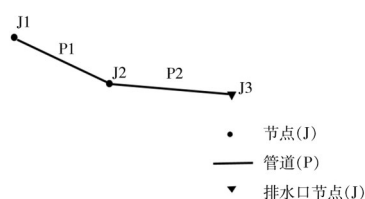


图1 大坡度模拟实例

Fig. 1 Simulation of steep slope

模拟结果见图3、4，由图3可知，情景1中该串联管道上游节点J1与中游节点J2及排水口J3的总入流量全程保持一致，表明5.0 m管径下管道处于明流状态。由图4可知，当管道直径为2.5 m时，在

第12 min节点J1、J2、J3的总入流量出现差异，J3的总入流量小于J1、J2，并保持在 $16 m^3/s$ 持续11 min，分析可知，12~23 min内J3节点出现满流现象导致管道上下游节点入流量产生差异。

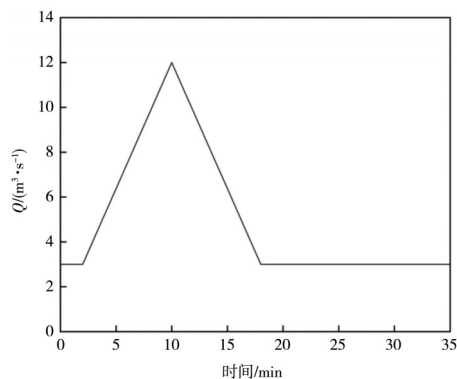


图2 大坡度模拟上游入流过程

Fig. 2 Large-slope simulation of upstream inflow process

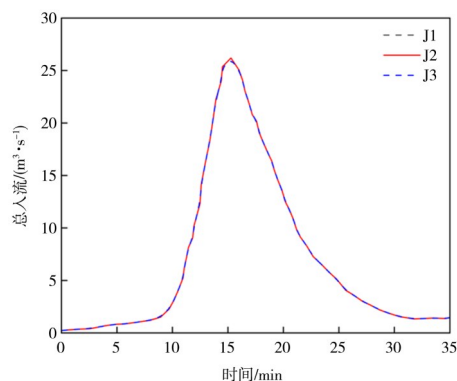


图3 情景1条件下节点流量过程

Fig. 3 Node traffic process under scenario 1

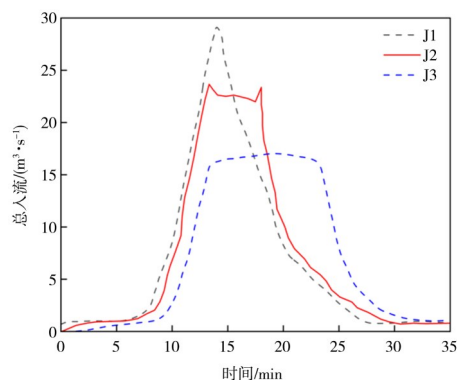


图4 情景2条件下节点流量过程

Fig. 4 Node traffic process under scenario 2

2 种工况模拟均未出现数值震荡,且成功复现了明流与满流状态的水力特征,证明该模型适用于高坡度排水管道的水力计算。

2.2 坡度-潮水顶托耦合水力模拟

为验证模型对受潮水顶托影响的大坡度管道内部流态变化的模拟能力,设计示例测试其处理出口为回水边界的能力(图 5)。管道具体特征参数见表 1,各节点的模拟入流过程线见图 6,下游模拟潮位边界见图 7。

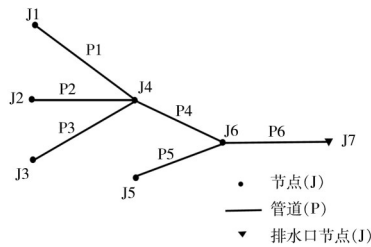


图 5 示例

Fig. 5 Example

表 1 管道特征参数

Tab. 1 Pipeline feature parameters

管道段	管道段长度/m	管道坡度 ($\times 10^{-4}$)	管径/m	曼宁系数	初始流动条件	
					流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	水深/m
P1	600	5	1.524	0.013 8	3.0	0.60
P2	600	5	1.524	0.020 7	2.0	0.60
P3	600	5	1.524	0.020 7	2.0	0.60
P4	600	1	2.438	0.014 1	3.0	0.60
P5	600	5	1.524	0.013 8	7.0	0.60
P6	600	1	3.048	0.012 5	10.0	0.60

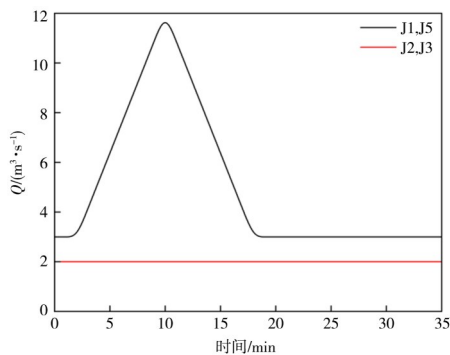


图 6 上游入流过程线

Fig. 6 Upstream inflow process line

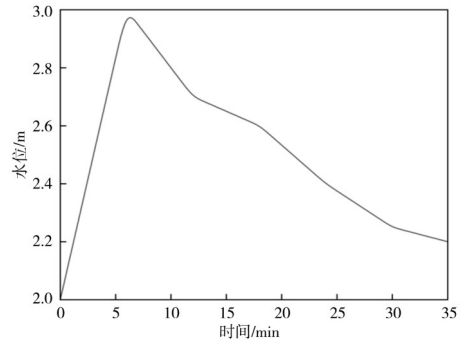


图 7 下游潮位边界

Fig. 7 Downstream tide level boundary

运用本文构建的模型对该示例进行计算,结果见图 8、9。分析图 8、9 可知,模拟初期因下游高潮位顶托,管道 P6 出现显著回水现象,并同步影响管道 P3、P5 的流量过程;随着下游潮位的下降,P5 流量恢复速率快于 P3;在下游潮位回升与上游流量增长的共同作用下,管道 P3 和 P5 的过流流量呈现波动特征。该现象准确反映了实际管道水流动态,证明模型可有效模拟排水管道回水效应。

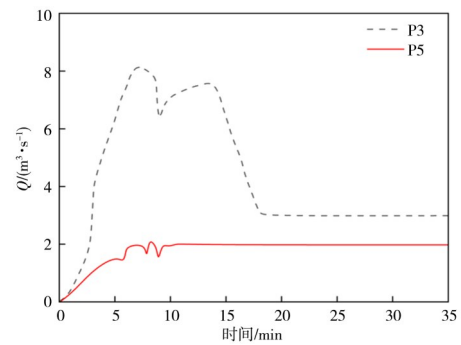


图 8 P3、P5 流量变化过程

Fig. 8 P3 and P5 flow change process

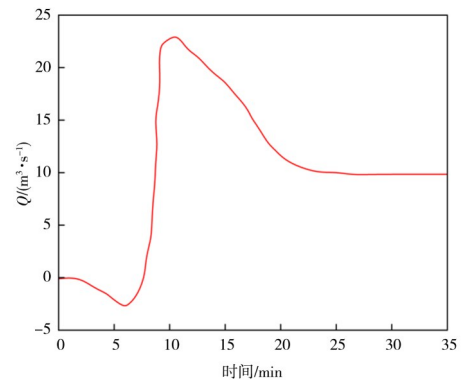


图 9 P6 流量变化过程

Fig. 9 P6 flow change process

3 实例分析

极端暴雨期间,福州市山区陡坡加速地表径流汇入城市排水管网;同时闽江受潮水顶托水位暴涨,淹没沿江排水口,加重城市排洪负担。江北城区的“高水高排”工程充分利用地理特征,通过排洪管道将北部山洪拦截导向城区外围,最终排入闽江,显著缓解江北城区内涝压力。

本文基于福州市“高水高排”工程数据,构建图10。该工程由1条主管及3条支管构成,共包含28个节点、1个孔口、1个蓄水设施以及1个排水口。实例具体参数设置见表2、3。其中P1为园山支管,P5、P6为斗顶支管,P17为过溪支管。主管道分为5个部分,分别为园山—斗顶(J2—J7)、斗顶—八一水

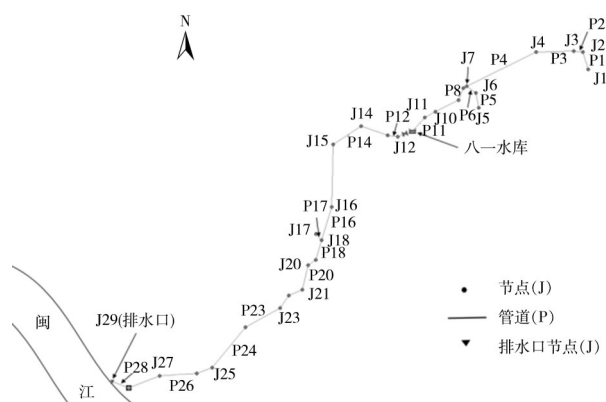


图10 工程案例模型

Fig. 10 Engineering case model

库(J7—水库)、八一水库—过溪(水库—J18)、过溪—五矿泵站(J18—J28)、五矿泵站—浦口排水口(J28—J29)。

表2 主管及支管参数

Tab. 2 Main and branch pipe parameters

管道	长度/m	直径/m	粗糙系数	坡度/%	管道类型	管道	长度/m	直径/m	粗糙系数	坡度/%	管道类型
P1	261.86	3.5	0.014 0	0.36	支管	P15	1 086.76	6.0	0.020 4	0.01	主管
P2	96.21	5.0	0.021 6	0.82	主管	P16	583.59	6.0	0.020 4	0.02	主管
P3	653.33	5.0	0.021 6	0	主管	P17	109.42	3.5	0.014 0	2.35	支管
P4	1 401.74	5.0	0.021 6	0	主管	P18	371.19	6.0	0.019 9	0	主管
P5	272.20	5.0	0.140 0	0.12	支管	P19	161.29	6.0	0.019 9	0.01	主管
P6	194.21	3.5	0.140 0	0.24	支管	P20	433.29	6.0	0.019 9	0.01	主管
P7	63.76	5.0	0.017 5	1.58	主管	P21	250.54	6.0	0.019 9	0.02	主管
P8	124.03	5.0	0.017 5	1.45	主管	P22	654.38	6.0	0.019 9	0.02	主管
P9	226.90	5.0	0.017 5	1.32	主管	P23	687.37	6.0	0.019 9	0.03	主管
P10	132.02	5.0	0.017 5	1.21	主管	P24	904.60	6.0	0.019 9	0.03	主管
P11	163.63	5.0	0.017 5	0	主管	P25	294.00	6.0	0.019 9	0.03	主管
P12	176.41	6.0	0.020 4	0.01	主管	P26	640.74	6.0	0.019 9	0.04	主管
P13	486.67	6.0	0.020 4	0.01	主管	P27	571.16	6.0	0.019 9	0.04	主管
P14	576.67	6.0	0.020 4	0.01	主管	P28	489.79	7.0	0.019 9	0.02	主管

3.1 边界条件设置

支管入流设计洪水采用水文比拟法,以赤桥水

文站为设计参证站并考虑水库的调蓄进行推算。具体计算入流过程结果见图11。

表 3 节点参数
Tab. 3 Node parameters

节点	高程	连接管道	节点	高程	连接管道
J1	36.90	P1	J16	-6.31	P15,P16
J2	35.71	P1,P2	J17	-3.86	P17
J3	34.90	P2,P3	J18	-6.43	P16,P17,P18
J4	34.90	P3,P4	J19	-6.43	P18,P19
J5	35.71	P5	J20	-6.45	P19,P20
J6	35.37	P5,P6	J21	-6.52	P20,P21
J7	34.90	P4,P6,P7	J22	-6.58	P21,P22
J8	33.90	P7,P8	J23	-6.71	P22,P23
J9	32.10	P8,P9	J24	-6.97	P23,P24
J10	29.10	P9,P10	J25	-7.31	P24,P25
J11	27.50	P10,P11	J26	-7.42	P25,P26
J12	-6.00	P12	J27	-7.67	P26,P27
J13	-6.02	P12,P13	J28	-7.88	P27,P28
J14	-6.09	P13,P14	J29 (排水口)	-8.00	P28
J15	-6.16	P14,P15			

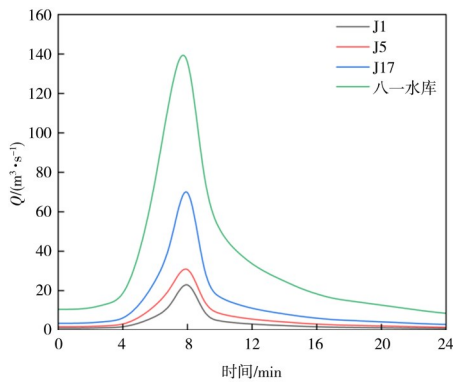


图 11 50 年一遇暴雨条件下各支管入流过程
Fig. 11 Inflow process of each branch pipe under a rainstorm once in 50 years

工程计算表明,浦口排水口 5 年一遇潮位为 9.95 m;50 年一遇潮位为 11.69 m。因闽江流速远小于管道流速,浦口排水口边界条件采用总水头控制。

考虑工程区域的水库调蓄作用,八一水库排洪期水库水位以正常高水位 48.2 m 作为起调水位。水库设计拦蓄 20 年一遇及以下量级洪水;超 20 年

一遇洪水经主管道下泄。计算可知,八一水库 50 年一遇洪水工况下,八一水库一过溪一浦口管道下泄流量 80.0 m³/s。

应用上述水动力模型,计算“高水高排”工程各分支节点和管道的水力参数,其中支管汇流过程为 50 年一遇、八一水库为正常设计库水位,浦口排水口潮位为 50 年一遇和 5 年一遇 2 种工况。

3.2 结果分析

3.2.1 分支节点水力计算分析

在 2 种工况下,模型计算所得各分支节点动水压强及总水头分布见图 12、13。由图可知,2 种工况下各分支节点动水压强均为正值,八一水库下游节点(过溪与五矿泵站)测压管水头高于上游节点(园山与斗顶),分析其原因为:水流在输送过程中,上游至下游的位置水头差在克服摩擦损失后,其能量主要通过八一水库处的高程落差转化为动水压强与速度水头。同时,各分支节点总水头由于沿程摩擦损失以及局部管径变化导致的局部损失表现出从上游至下游沿程下降的变化。对比图 12、13 结果可知,2 种工况的潮位差异并未影响管道内部的流态特征。这是由于 2 种工况的潮位设置均高于排水口高程,导致管道末端均为淹没出流。

2 种工况洪峰期(8:00)各分支节点的总水头分布见图 14。可见,洪峰期 2 种工况的各分支节点总水头从园山至闽江浦口沿水流方向递减,模拟结果表明,山洪能够通过管道系统稳定、高效地排入闽江浦口河段。

3.2.2 水库水位计算分析

在 2 种工况下,模型计算所得八一水库水位变化过程见图 15。工况 1 情景下,八一水库库水位受入库流量与泄流量的共同作用,在洪峰(8:00)过后水位持续上升。洪峰后一段时间内,入库流量大于泄洪流量,直到 9:00 库水位达到最大值 46.94 m(低于起调库水位 48.2 m),保证水库运行安全。在工况 2 情景下,八一水库库水位因入库流量持续小于水库泄流量,水位呈单调下降趋势。因此,在第二种工况下,无需开闸泄洪即可保障生态补水需求。

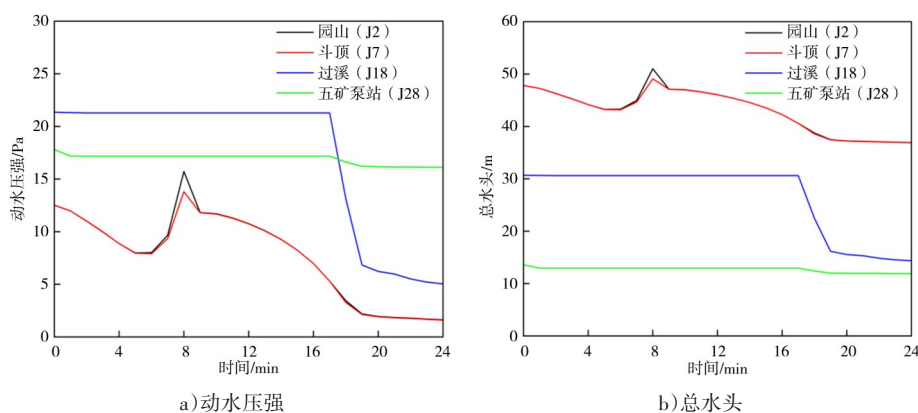


图 12 工况 1 的动水压强和总水头变化过程

Fig. 12 Variation of dynamic water pressure and total head change in case 1

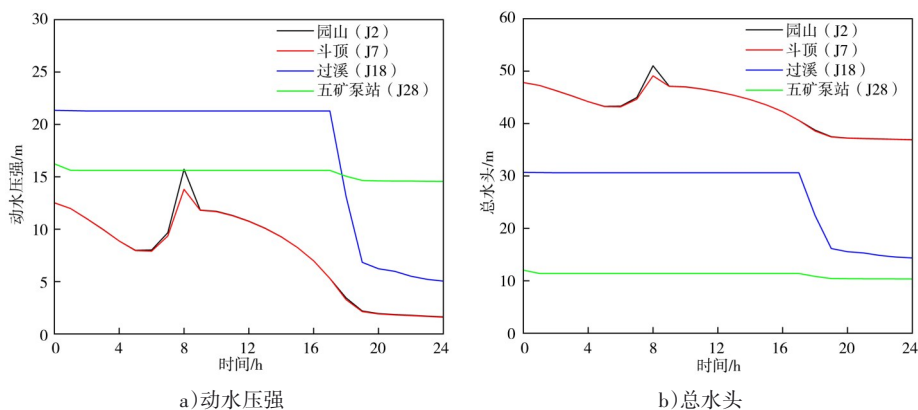


图 13 工况 2 的动水压强和总水头变化过程

Fig. 13 Variation of dynamic water pressure and total head change in case 2

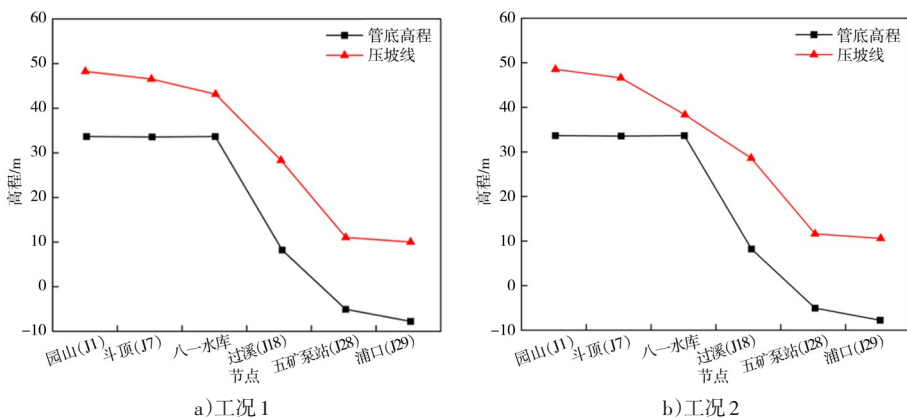


图 14 2 种工况下管道在洪峰期总水头分布

Fig. 14 Total head distribution of pipeline during peak flood period under two working conditions

3.2.3 主管道流量流速计算分析

图 16、17 为在 2 种工况下,模型计算所得的排洪工程中的园山—斗顶、斗顶—八一水库、八一水库—过溪、过溪—五矿泵站、五矿泵站—浦口五部分首段管道的流量和流速等水力参数特征。从图

16、17 可知,2 种工况下,受沿途支管汇流的影响,主管道内的流量沿程逐渐增加,过溪—五矿泵站 (P18) 与五矿泵站—浦口排水口 (P28) 之间无支管汇流且距离相对较近,流量基本一致。该工程主管道段的流速受管道内流量的增大以及管道高程的

减小,表现出沿程逐渐增大的趋势,而工程末端五矿泵站-浦口排水口(P28)管道受末端潮位顶托作用,水流阻力增大,导致流速降低。同时,该工程各

管道段的流速值均小于 5 m/s,处于中低速排水范围,有利于降低管道冲刷风险与系统能耗。

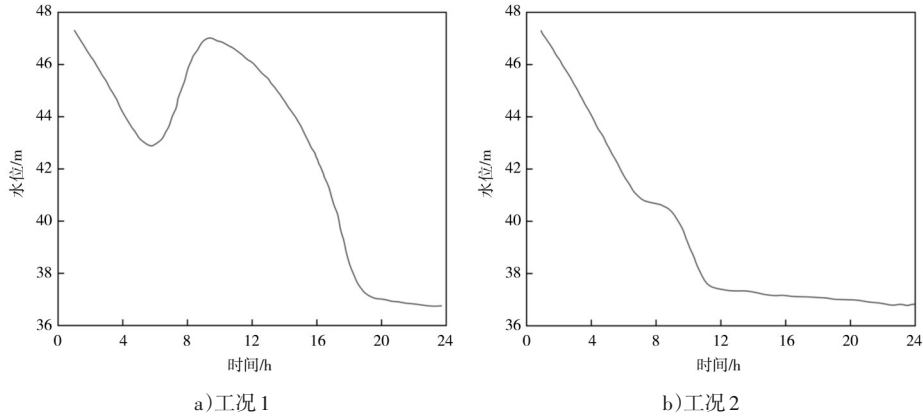


图 15 2种工况下水库水位变化

Fig. 15 Changes in reservoir water level under two working conditions

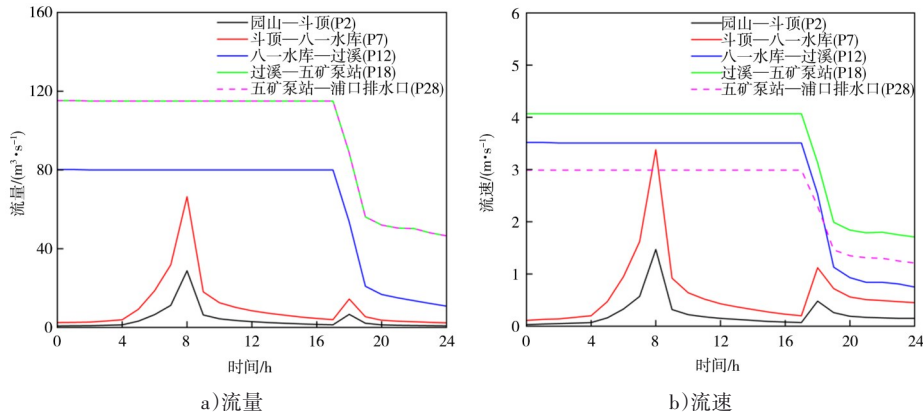


图 16 工况 1 情景的流量和流速

Fig. 16 Flow rate and velocity for case 1

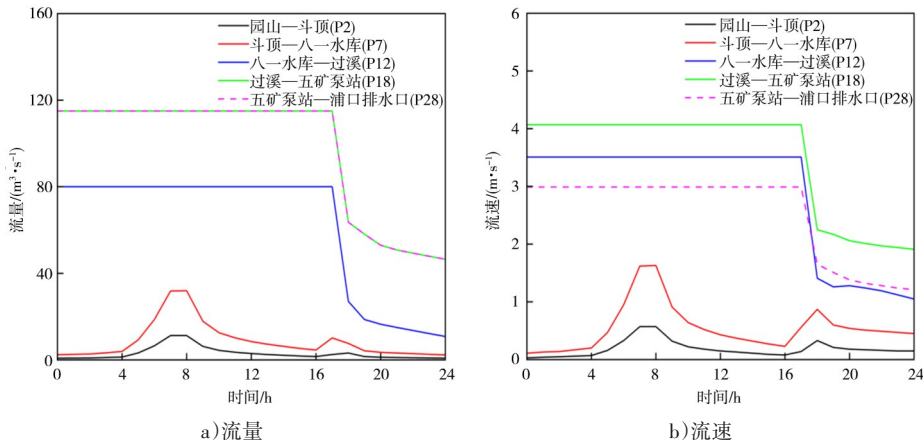


图 17 工况 2 情景的流量和流速

Fig. 17 Flow rate and velocity for case 2

4 结论

针对暴雨条件下,排洪管道潮位-坡度耦合情况下的水力模拟问题,本研究构建了一种基于圣维南方程的数学模型,并构建潮位-坡度耦合的模型用于验证该数学模型模拟能力,在此基础上,将该数学模型运用于福州市江北城区“高水高排”工程水力模拟中,所得结论如下。

a)在排水口潮位为50年一遇与5年一遇2种工况下,各分支节点的动水压强均为正值,洪峰期总水头线自园山至闽江浦口逐渐递减,符合有压管网排水的力学基本分布规律。这表明该工程在暴雨天气下能够满足城市排洪需求。

b)在排水口潮位为50年一遇工况下,八一水库水位始终小于起调库水位,保证水库安全。在排水口潮位为5年一遇工况下,八一水库水位呈下降趋势,无需开闸泄洪。

c)2种工况下主管道各部分的水流速度一般小于5.0 m/s,属于中低速排水,有利于排洪管道的安全和正常运行。管道内流速分布总体符合排洪安全的要求。

d)本文构建的数学模型能够有效处理陡坡管道中复杂流态稳定性问题,并整合坡度驱动的惯性力效应与潮位顶托边界约束,实现了对管道倒灌、回水等双向水力耦合过程的模拟。

参考文献:

- [1] 李佳,黄领梅,申奥,等. 海河流域极端降水时空演变特征及未来趋势分析[J]. 人民珠江,2025,46(9):84-94.
LI J, HUANG L M, SHEN A, et al. Characteristics of spatial and temporal evolution of extreme precipitation in Haihe River Basin and analysis of future trends [J]. Pearl River, 2025, 46(9): 84-94. (in Chinese)
- [2] 李欣,郑广芬,纳丽,等. 宁夏近50年极端强降水事件的时空变化分析[J]. 安徽农业科学,2013,41(8):3533-3535,3578.
LI X, ZHENG G F, NA L, et al. Analysis on spatial and temporal changes of extreme precipitation events in Ningxia in recent 50 Years [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(8): 3533-3535, 3578. (in Chinese)
- [3] 王蕾,张百超,石英,等. IPCC AR6报告关于气候变化影响和
- 风险主要结论的解读[J]. 气候变化研究进展,2022,18(4): 389-394.
WANG L, ZHANG B C, SHI Y, et al. Interpretation of the IPCC AR6 on the impacts and risks of climate change [J]. Climate Change Research, 2022, 18(4): 389-394. (in Chinese)
- [4] MYHRE G, ALTERSKJÆR K, STJERN C W, et al. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1). DOI: 10.1038/s41598-019-52277-4.
- [5] 苗小波. 沿海城市降雨径流控制与潮汐顶托影响研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2018.
MIAO X B. Study on rainfall runoff control and impact of tidal backwater in coastal cities [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [6] 苗小波,吕谋,梁风超,等. 潮水顶托对雨水管网的影响分析[J]. 水电能源科学,2018,36(6):84-87.
MIAO X B, LYU M, LIANG F C, et al. Impact analysis of tidal backwater on rainwater pipe network [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(6): 84-87. (in Chinese)
- [7] 杨克非. 长江水位顶托影响下汉江下游水动力减弱效应及其对水华影响研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2023.
YANG K F. Study on the effect of Yangtze River jacking on hydrodynamic weakening to Lower Han River and its effect to the water bloom [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2023. (in Chinese)
- [8] 罗鸣,叶兴成,王以超,等. 河道边界水位对管道排水能力的影响分析[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(3):169-174.
LUO M, YE X C, WANG Y C, et al. Impact analysis of river boundary water level on drainage capacity of pipeline [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(3): 169-174. (in Chinese)
- [9] 朱悦娟. 顶托作用下雨水管道与河道的水动力相互作用机制研究[D]. 杭州:浙江大学,2023.
ZHU Y R. Research on mechanism of hydrodynamic interaction between stormwater pipes and river under the effect of backwater [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023. (in Chinese)
- [10] 同玉,姚瑶,王添,等. 片区尺度下管网淤积和坡度变化对排水效果影响研究[J]. 给水排水,2025,61(4):131-138.
TONG Y, YAO Y, WANG T, et al. Influence of pipe network siltation and slope change on drainage effect at the area scale [J]. Water & Wastewater Engineering, 2025, 61(4): 131-138. (in Chinese)
- [11] 鲁志伟. 沿海城市暴雨-高潮位复合致涝区划与防灾韧性研究[D]. 天津:天津大学,2023.

- LU Z W. Risk factor zoning of waterlogging in coastal cities caused by compound of rainstorms and high tides [D]. Tianjin: Tianjin University, 2023. (in Chinese)
- [12] 汪旦初,梁启振. 滨海城市暴雨潮位联合作用下内涝风险评估实例探析[J]. 红水河,2022,41(5):61-66.
- WANG D C, LIANG Q Z. Case study on waterlogging risk assessment under combined action of rainstorm and tide level in coastal cities [J]. Hongshui River, 2022, 41(5): 61-66. (in Chinese)
- [13] 范玉燕,汪诚文,喻海军. SWMM模型河道及明满流模拟能力分析研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(1):1-6.
- FAN Y Y, WANG C W, YU H J. Research on simulation ability to deal with the rivers and the free-surface-pressure flow of SWMM [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(1): 1-6. (in Chinese)
- [14] PACHALY R L, VASCONCELOS J G, ALLASIA D G. Surge predictions in a large stormwater tunnel system using SWMM [J]. Urban Water Journal, 2021, 18(8): 577-584.
- [15] SALEH F, DUCHARNE A, FLIPO N, et al. Impact of river bed morphology on discharge and water levels simulated by a 1D Saint-Venant hydraulic model at regional scale [J]. Journal of Hydrology, 2013, 476: 169-177.

Simulation of Flood Control of Steep Slope Drainage Pipes and Coupling Analysis of Tide Level Effect

ZHANG Fenghui^{1,2}, ZHANG Minxiong³, HUANG Shengdong³, ZHANG Ting^{4*}, YANG Dingying⁴, CHEN Zhifeng⁴

(1. Fuzhou Water Resources Investment and Construction Group Co., Ltd., Fuzhou 350007, China; 2. Fujian Provincial Investigation, Design & Research Institute of Water Conservancy & Hydropower Co., Ltd., Fuzhou 350007, China; 3. Fuzhou Minjiang Lower Reaches Flood Control Engineering Construction Company, Fuzhou 350007, China; 4. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Under the condition of rainstorms, the operation safety of the urban drainage pipe network system is faced with severe challenges. Especially, under the coupling influence of pipe slope and external tide level of the drainage outlet, backflow are very easy to occur, which poses a threat to the safety of the pipeline structure and significantly weakens the overall drainage capacity of the city. To investigate the complex dynamic response mechanism of water flow inside the drainage network, this paper established a mathematical model based on the one-dimensional Saint Venant equation system. The model could accurately simulate the water flow process inside the branch pipe network under the combined action of simulated slope and tide level, including the spatiotemporal variation characteristics of flow rate, flow velocity, and water level. On this basis, based on the actual project of "high water and high drainage" in Jiangbei urban area of Fuzhou City, a complete hydrodynamic coupling model was constructed to quantitatively analyze the flood drainage efficiency and operation status of the project system under different tide level conditions and rainfall intensity combination conditions under the set rainstorm scenario, so as to assess its ability to cope with extreme rainstorm flood risk. The results show that the numerical model built in this paper successfully reproduces the hydraulic characteristics of open flow and full flow and the backwater effect of the pipeline in the large-slope hydraulic simulation and slope-based backwater effect of tide coupled hydraulic simulation, and the simulation results do not show numerical oscillation, indicating that the model can be used to simulate the internal flow change process of the drainage network under the slope tide level coupling effect. At the same time, the dynamic water pressure and total head of each main branch junction node decrease along the way under the 50-year return period rainstorm condition of the above project. Bayi Reservoir can play a safety regulation role during the rainstorm, and the flow velocity and flow in the main pipe section meet the safety requirements for flood drainage. This study conducts a panoramic simulation diagnosis of the system through a model, which can accurately identify weak links and redundant capacity in the network, thereby tapping into the potential of existing facilities. The related results can provide a scientific basis for the planning and design of flood discharge projects and direct technical reference for the fine management and optimized operation of existing urban flood discharge systems.

Keywords: backwater effect of tide; slope; drainage pipeline network; extreme precipitation event; "high water and high drainage"

(责任编辑:向 飞)