

城市坡地小汇水区暴雨设计及参数敏感性研究

樊波

(浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 随着城市化进程持续推进,坡地小汇水区域逐步纳入城市建设范围。暴雨设计洪水是城镇防洪工程建设及运行管理的重要依据。以浙江某市坡地小汇水区为研究对象,阐述了推理公式法、室外排水公式法和经验公式法等方法的原理,采用Sobol方法分析了流域、暴雨和产汇流参数敏感性,研究各类计算方法的原理差异、适用条件和误差来源,开展了不同重现期城市坡地小汇水区设计洪峰流量计算。研究表明:部分暴雨和产汇流参数估计误差是设计洪峰流量主要的计算误差来源。采用推理公式法得到的结果作为设计依据,能够满足城市防洪安全需求,对于2、5、10、15、25、50 a洪水重现期,对应的区域整体防洪设计洪峰流量分别为40.1、45.0、48.7、50.6、54.0、57.3 m³/s,研究成果可为完善城市综合防洪体系提供技术支撑。

关键词: 城市坡地;小汇水区域;暴雨设计洪水;推理公式法;参数敏感性分析

中图分类号: P333.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)05-0156-05

Study on Rainstorm Design and Parameter Sensitivity in Small Catchment Area of Urban Slope Land

FAN Bo

(Zhejiang Suzhi Institute Technology Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: As urbanization process continues to advance, the small catchment areas of slope land are gradually incorporated into urban construction range. The design flood of rainstorm is a crucial basis for the construction and operational management of town flood control projects. Taking a small catchment area of the slope land in a city in Zhejiang as a study object, the basic principles of the rational formula method, the outdoor drainage formula method and the empirical formula method are set forth. The Sobol method is used to analyze the sensitivity of watershed, rainstorm and runoff parameters. The principles, differences, applicable conditions, and error sources of various computational methods are studied. The design peak flow calculations are conducted for small catchment areas of urban slope land with different return periods. The results indicate that estimation errors of some rainstorm and runoff parameters are the main sources of calculation errors for design peak flow rates. Using the results obtained by the rational formula method as the design basis can meet the urban flood control safety requirements. For flood return periods of 2, 5, 10, 15, 25 and 50 years, the corresponding regional overall flood control design peak flow rates are 40.1, 45.0, 48.7, 50.6, 54.0 and 57.3 m³/s respectively. The research findings can provide the technical support for improving the comprehensive urban flood control system.

Keywords: urban slope land; small catchment area; design flood of rainstorm; rational formula method; parameter sensitivity analysis

0 引言

随着城市化进程持续推进,坡地、丘陵等小汇水区域逐步纳入城市建设范围^[1-2]。针对城镇坡地小汇水区的实际情况,考虑复杂下垫面条件及地形地貌特征,需统筹各类防洪工程和非工程措施,对现有的防洪工程进行除险加固,建设一批防洪排涝工程,

进一步完善城市综合防洪体系,确保重要城市、重要经济区、重要基础设施防洪安全^[3]。

暴雨设计洪水是城镇防洪工程建设及运行管理的重要依据,有必要从多专业多角度统筹分析和综合比选^[4-5]。暴雨设计洪水的计算方法包括综合单位线推求^[6]、推理公式推求^[7]、地区经验公式推求^[8]、室外排水公式推求^[9]、水文比拟法推求^[7]、水动力数值模拟推求^[10]等。针对雨洪实测资料稀缺的小汇水区域,目前市政行业可采用室外排水公式法^[10]确定暴雨设计洪峰流量;水利行业可采用推理

收稿日期: 2024-11-25

作者简介: 樊波(1981—),男,工学学士,高级工程师,从事轨道交通及市政给排水设计工作。

公式法^[12],公路交通行业可采用经验公式法^[10]。这些方法在推导原理、适用条件等方面存在显著差异,计算结果可能会有很大的不同^[8,13]。在实际城市设计洪水计算中,需根据现场实际情况综合考虑,选用多种计算方法和途径计算分析设计雨洪流量,综合对比分析不同方法所得结果,结合工程实际情况优选最能符合城市汇水区域的计算方法结果^[14]。

现以城镇坡地小汇水区为研究对象,选用普遍应用于水利、公路交通和市政行业的多种设计洪水计算方法,综合对比分析不同方法所得的设计洪峰流量,选用 Sobol 方法分析了不同设计洪水计算方法的参数敏感性,研究计算方法误差来源和适用条件,为健全完善城市综合防洪体系提供技术支撑。

1 研究方法

1.1 推理公式法

推理公式法是坡地丘陵地区常用的设计洪水计算方法,假定流域降雨过程与损失过程的差值即为产流过程,基于流域线性汇流原理,用于推导流域出口断面处的设计洪峰流量^[8]。水利科学研究院水文研究所^[10]推荐的计算公式如式(1)至(3)所示:

$$Q_p = 0.278 \psi F S_p / \tau^{n_i} \quad (1)$$

$$\psi = 1 - \frac{\mu}{S_p} \tau^{n_i} \quad (2)$$

$$\tau = 0.278 L / (m J^{1/3} Q_p^{1/4}) \quad (3)$$

式中: Q_p 为设计洪峰流量, m^3/s ; S_p 为设计暴雨雨力, mm/h ; τ 为汇流历时, h ; m 为汇流参数; J 为主河槽平均比降; L 为主河道长度, m ; ψ 为综合径流系数; n_i 为暴雨递减指数,反映地区暴雨集中程度与持续时间关系; F 为汇流面积, km^2 ; μ 为流域平均损失率。本文研究主要通过《浙江水利年鉴》^[15]和《给水排水设计手册第7册城镇防洪》^[11]确定研究区域暴雨参数和产汇流参数,可通过《浙江水利年鉴》的“浙江省短历时暴雨地区等值线图”,查找该区域多年平均最大 24 h 雨量、最大 24 h 雨量的变差系数等参数,并结合《给水排水设计手册第7册城镇防洪》^[11]皮尔逊曲线确定暴雨雨力 S_p 。本文其他参数确定过程不再赘述。

1.2 室外排水公式法

室外排水公式法作为推理公式法最原本形式,在市政部门确定雨水管渠设计流量时最为常用,故单独提出分析。该方法假定降雨强度随降雨历时增加而减少,并认为汇水面积与降雨历时成正比;暴雨和洪水具有相同频率,以暴雨的设计频率作为洪峰

流量的设计频率;暴雨强度、损失强度以及净雨强度在时间和空间上均匀分布,《室外排水设计标准(GB 50014—2021)》^[12]推荐的计算公式如式(4)和(5)所示:

$$Q_s = q \psi F / 1000 \quad (4)$$

$$q = \frac{167 A_1 (1 + C \lg P)}{(\tau + b)^n} \quad (5)$$

式中: Q_s 为雨水设计流量, m^3/s ; q 为设计暴雨强度, $\text{L}/\text{hm}^2 \cdot \text{s}$; ψ 为综合径流系数; F 为汇水面积, hm^2 ; P 为设计重现期, a ; τ 为汇流历时, min ; A_1 , C , b , n 为统计参数,根据统计方法进行计算确定。

1.3 经验公式法

经验公式法是根据一个地区内的小流域实测和暴雨洪水资料,直接建立主要影响因素与洪峰流量的经验相关方程,当汇水面积小于 10 km^2 时,公路科学研究所^[10]推荐的经验公式如式(6)所示:

$$Q_s = K F^{n_a} \quad (6)$$

式中: Q_s 为暴雨设计流量, m^3/s ; K 为径流模数,按不同重现期取值; n_a 为面积参数,按不同地区取值。

1.4 敏感性分析方法

该研究选用的推理公式法、经验公式法以及室外排水公式法的参数较多,为研究各类方法误差来源,采用 Sobol 法分析各类方法的参数敏感性。Sobol 法是一种常用的全局敏感性分析方法,基于方差分解,用于定性评估模型输出不确定性与各个输入参数之间的关系。该方法能够有效地评估每个输入参数对模型输出的贡献程^[16-17]。Sobol 方法具有简单、有效、计算量相对较小的特点,广泛用于初步筛选敏感参数,总效应敏感性指数的计算公式如式(7)和(8)所示:

$$S_{\bar{n}} = 1 - \frac{V_{-i}}{V(Y)} \quad (7)$$

$$V(Y) = \sum_{i=1} V_i + \sum_{i < j} V_{ij} + \dots + V_{1,2,\dots,m} \quad (8)$$

式中: V 为参数的方差项; V_{-i} 为不含第 i 个参数作用的方差项; $V(Y)$ 为模型输出 Y 的总方差, $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m)$ 。 $S_{\bar{n}}$ 为总效应敏感性指数,表示参数 X_i 及其与其他参数的交互作用对输出方差的总贡献。当 $S_{\bar{n}}$ 较大时,说明参数 X_i 及其交互作用对模型输出有显著影响。

2 城市坡地小汇水区暴雨计算实例

2.1 研究区域概况

本文研究区域位于浙江省某市郊区。由于城市

化发展需求被纳入建设范围,包含综合物流区、延伸产业区等区域,流域面积 F 为 5.3 km^2 ,排水泄洪沟道长度 L 为 3 km ,沟道平均坡降 J 为 0.005 ;原状地貌为低山丘陵,上覆林地、草地,随地形分布有水库、坑塘,多处山头最高约 171 m ,场地最低约 111 m ,高差约 60 m ,场地平整之后标高在 $120\sim150\text{ m}$ 之间,整体东南高,西北低。研究区域四周为高速公路封闭环绕,高速公路标高在 $110\sim135\text{ m}$ 之间,场地西北高速公路外侧为农田,标高约 110 m ,再外侧为南溪。南溪属于附近较大水系,为该小汇水区域最终排水泄洪水系,地块内现状水库、天然坑塘、河沟等水系沟通连接后,将雨水蓄、滞、排,通过天然河道及高速公路下方预留排水箱涵排入南溪。

2.2 敏感性及其计算误差分析

选用Sobol方法分析了推理公式法、室外排水法和经验公式法方法的参数敏感性,研究计算方法误差来源和适用条件,Sobol方法的样本数量定为 $1\ 000$,计算各模型参数的总效应敏感度指标。该研究利用自然断点法^[17]进行敏感性数据分级。自然断点法通过识别数据中的自然分布和断点来划分等级,敏感性数据分为高度敏感、中度(比较)敏感和低度敏感。该研究重点分析与设计洪峰流量直接相关的各类参数,待分析的敏感参数如表1所列,总效应敏感度计算结果如图1所示。

表 1 基于 Sobol 方法的待分析参数表	
方法	待分析参数
推理公式法	流域面积 F 、暴雨参数(S_p, m_i)和产汇流参数(τ, ψ)
室外排水法	流域参数(F)、暴雨参数(A_1, C, b, n)和产汇流参数(τ, ψ)
经验公式法	径流模数 K 、流域面积 F 和面积参数 n_a

敏感性分析结果如图1所示,当总效应敏感度 $S_{Ti}>0.39$ 时,该参数高度敏感;当总效应敏感度: $0.08<S_{Ti}\leq0.39$ 时,参数比较敏感;当总效应敏感度 $S_{Ti}\leq0.08$ 时,参数低度敏感。本文推理公式法计算结果对暴雨雨力 S_p 、流域面积 F 和综合径流系数 ψ 高度敏感,对汇流时间 τ 和暴雨递减指数 n_i 比较敏感;室外排水法计算结果对暴雨参数 A_1, n 高度敏感,对汇流时间 τ 、流域面积 F 和综合径流系数 ψ 比较敏感,暴雨参数的敏感度明显大于流域参数和产汇流参数;经验公式法计算结果对径流模数 K 高度敏感,对流域面积 F 和面积参数 n 比较敏感。综上所述,该研究小汇水区设计洪水计算参数敏感度的高低与公式的形式和参数的取值范围密切相关,如果参数以乘法形式组合且变化范围较大,如设计暴雨雨力 S_p 等,这意味着

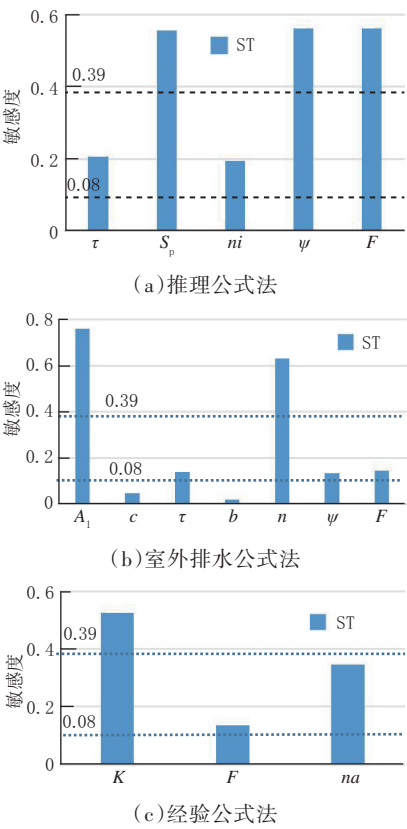


图 1 基于 Sobol 法的参数的总效应敏感度

在实际计算中,这些参数的波动可能导致洪水流量的显著变化;如果参数以非线性形式(如平方、立方或小于1等)出现时,敏感性分析需要综合考虑参数的形式、取值范围及其与其他参数的交互作用,从而获得更准确的敏感性评估。

在推理公式法计算过程中,流域参数根据DEM数据结合GIS水文分析确定;流域面积 $F(5.3\text{ km}^2)$ 较小,可假定雨量时空分布均匀,不考虑点面雨量折减转换关系,以流域中心点雨量代表面雨量,利用短历时暴雨地区等值线图并结合皮尔逊曲线确定暴雨雨力 S_p ;流域参数和暴雨雨力参数具有较高的精度。根据地区下垫面和地形资料,在一定范围内利用图解法确定 τ, ψ, n 参数;根据曲线图查值过程中,受限于资料曲线图形的限制,部分取值不够精确,具有较强的主观性,属于推理公式法的主要误差来源。

在室外排水公式计算过程中,选取综合径流系数 ψ 易受主观因素影响; A_1, C, b, n 等地区参数根据统计方法进行计算确定,需重点关注 A_1, C, b, n 等地区参数的适用性及合理性,需全面分析计算区域的下垫面情况。园区有多处产业园及市政标准道路,本文根据下垫面资料将研究区域划分为多个排水子区域,各个子区域的面积小于 2 km^2 ,满足室外排水公式的适用范围;划分排水子区域可能导致计算误差,

在一定程度上影响区域整体设计洪峰流量计算的准确性。

经验公式法计算过程较简单,能够快速匡算出排水规模,在很多情况下使用较为便捷,但径流模数和面积参数的选取主观性较大,计算精度低于推理公式法和室外排水公式法,更适用于在经验、既有资料基础之上的模糊试算计算。

2.3 设计洪水计算结果及分析

研究区域无长序列实测水文资料,原状地貌和水系改变较大,原有雨水路径和规模需要重新规划,设计市政雨水系统时需考虑片区防洪需求,排水系统工程规模主要受洪峰流量控制。该研究选取水利行业常用的推理公式法、市政行业常用的室外排水公式法和公路行业常用的经验公式法,计算城市坡地小汇水区域的暴雨设计洪峰流量,对于室外排水公式法,综合径流系数取 0.50,汇流历时 τ 取 10 min, A_1, C, b, n 参数分别取 1.85、0.919、11.924 和 0.805;推理公式法和经验公式法的主要计算参数如表 2 所列。

表 2 推理公式法和经验公式法的计算参数表

重现期 P/a	推理公式法					经验公式法	
	S_p	μ	n_i	ψ	τ	K	n_a
2	67.06	11.02	0.55	0.69	2.78	11.0	0.75
5	75.92	12.48	0.55	0.69	2.81	15.0	0.75
10	82.52	13.56	0.55	0.69	2.82	18.0	0.75
15	85.93	14.12	0.55	0.69	2.83	19.5	0.75
25	92.06	15.13	0.55	0.69	2.84	22.0	0.75
50	97.97	16.1	0.55	0.69	2.86	26.4	0.75

计算结果如图 2 所示,室外排水法计算结果明显高于其他两种方法对应结果,且重现期越小差距越大。推理公式法在较小重现期时($P \leq 2$ a),计算流量高于经验公式法,但在较大重现期时($P \geq 5$ a),计算流量低于经验公式法,且重现期越大差距越大。冯耀龙等^[18]研究指出市政排水重现期与水利防洪重现期存在差别,市政排水重现期和水利排涝重现期存在转换关系,市政排水重现期 1、2、3、5、10 a 分别相当于水利排涝重现期 10 a、15~20 a、20~28 a、30~40 a、45~70 a,其研究成果验证了相同设计重现期条件下室外排水流量计算结果明显高于推理公式法及经验公式法。

综合考虑汇水范围、计算精度及适用条件等因素,针对本文所述研究区域,在计算区域整体防洪设计洪峰流量时,推荐选取推理公式法;在计算局部小

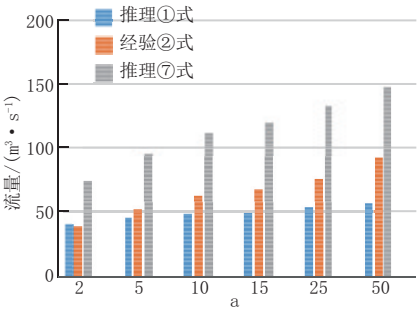


图 2 三种计算公式不同设计重现期下的暴雨流量及比较图

汇水区暴雨流量,或者分析道路、场地、建筑屋面雨水排放时,推荐选取室外排水公式法,推荐应用于城镇小汇水区域雨水系统设计;在计算公路工程中涵洞、排水边沟的设计洪峰流量,或者开展经验性模糊试算时,推荐选用经验公式法。

综上所述,通过分析推理公式法误差来源及研究区域下垫面及地形地貌资料,拟定合理暴雨及产汇流参数,计算区域整体防洪设计洪峰流量,推理公式法可取得较为精确的结果。园区原是丘陵地带,场地整平后仍远高于周边地块,泄洪设计主要考虑山洪的有组织排放,防止对周边城建设施的破坏,综合分析确定雨量并采用推理公式法计算设计洪水,确定泄洪构筑物规模。

3 结 语

综合考虑汇水范围、计算精度及适用条件等因素,针对本文所述研究区域,本文选取水利行业常用的推理公式法、市政行业常用的室外排水公式法和公路行业常用的经验公式法,采用 Sobol 法分析了流域、暴雨和产汇流参数敏感性,研究各类计算方法的原理差异、误差来源和适用条件,开展了不同重现期的城市坡地小汇水区设计洪峰流量计算,主要研究结论如下。

(1)综合径流系数 ψ 、汇流时间 τ 等部分暴雨和产汇流参数存在估计偏差,导致了计算结果误差,需全面分析计算区域的下垫面情况,重点关注地区统计参数的适用性及合理性。采用推理公式法得到的结果作为设计依据,能够满足城市防洪安全需求,对于 2、5、10、15、25、50 a 洪水重现期,对应的区域整体防洪设计洪峰流量分别为 40.1、45.0、48.7、50.6、54.0、57.3 m^3/s ,研究成果可为完善城市综合防洪体系提供技术支撑。

(2)各公式在汇水范围、暴雨分析、产汇流计算等方面存在较大的区别,分别适用不同区域或工程

项目类型。在计算区域整体防洪设计洪峰流量时,推荐选取推理公式法;在分析局部小汇水区道路、场地、建筑屋面雨水排放时,推荐选取室外排水公式法,推荐应用于城镇小汇水区域雨水系统设计;在计算公路工程中涵洞、排水边沟的设计洪峰流量,或者开展经验性模糊试算时,推荐选用经验公式法。工程设计人员应根据项目实际情况谨慎选取相应暴雨设计洪水计算公式。本文仅选取3种较常用方法重点比较,存在一定偶然性和误差,后期可扩大比选范围,以使设计方案更加符合实际情况。

参考文献:

- [1] 李满刚.城市小汇水区域设计洪水计算方法应用研究[J].水利规划与设计,2012,(2):11-14.
- [2] 张秀贤.城区排涝排水综合设计降雨探析[J].水利规划与设计,2017(1):49-52.
- [3] 宋晓猛,徐楠涛,张建云,等.中国城市洪涝问题:现状、成因与挑战[J/OL].水科学进展,2024,35(3):357-373.
- [4] 陈阳.福州市城区水系水动力模拟与调控[D].郑州:华北水利水电大学,2020.
- [5] 董建武.城市暴雨洪涝水动力数值模拟的研究与应用[D].大连:大连理工大学,2018.
- [6] 管一,龙岩,康爱卿,等.基于综合单位线法推求水库设计洪水分析[J].海河水利,2023(8):43-46.

- [7] 刘春果,喻海军,吴滨滨,等.推理公式法在复杂丘陵地貌设计洪水计算中的适用性分析[J].水电能源科学,2023,41(3):57-60.
- [8] 黄国如,李立成,黄纪萍.城镇小流域设计洪峰流量计算方法研究[J].水资源与水工程学报,2014,25(4):35-38.
- [9] 黄日增.城市小流域洪峰流量计算方法的研究[J].给水排水,2009,35(11):39-42.
- [10] 马超,陈姿帆,夏金金,等.基于PCSWMM的海口主城区内涝成因和措施研究[J].中国给水排水,2023,39(3):109-115.
- [11] 中国市政工程东北设计研究总院.给水排水设计手册第7册 城镇防洪[M].第3版.北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [12] 上海市住房和城乡建设管理委员会.室外排水设计标准 GB 50014—2021[S].北京:中国计划出版社,2021.
- [13] 李满刚.城市洪水计算方法探讨[J].水利与建筑工程学报,2011,9(6):141-144.
- [14] 张小潭,孙秋戎.基于推理公式原理的小流域洪水计算方法异同分析[J].水利技术监督,2019(3):185-188.
- [15] 浙江省水利厅.浙江水利年鉴 2022[M].北京:中国水利水电出版社,2022.
- [16] 刘松,余敦先,张利平,等.基于Morris和Sobol的水文模型参数敏感性分析[J].长江流域资源与环境,2019,28(6):1296-1303.
- [17] 朱双.流域中长期水文预报与水资源承载力评价方法研究[D].武汉:华中科技大学,2017.
- [18] Chen Z, Hermes J, Liu J, et al. How to integrate the soundscape resource into landscape planning A perspective from ecosystem services[J]. Ecological Indicators, 2022(141): 109156.
- [19] 冯耀龙,马姗姗,肖静.水利排涝与市政排水重现期的转换关系[J].南水北调与水利科技,2015,13(4):614-617.

(上接第151页)

参考文献:

- [1] 汤泳,游孟陶.化子闸泵站机组选型分析[J].城市道桥与防洪,2019(2):132-134.
- [2] 刘健峰,陆伟刚,周秉南,等.全贯流泵装置外特性试验研究——以龙昆沟北雨水排涝泵站为例[J].中国农村水利水电,2022(8):182-188.
- [3] 袁芳,刘兴华.大流量、低扬程泵站机组选型设计研究[J].地下水,2020,42(6):247-250.
- [4] 于建忠,陈晔,朱颖,等.最高扬程与平均扬程相差较大的特低扬程泵站选型研究[J].水利水电技术,2018,49(5):68-76.

- [5] 焦海峰,陈正国,王文,等.全贯流泵在停机过渡过程中的水力特性研究[J].农业机械学报,2023,54(9):236-245.
- [6] 张仁田.南水北调工程中大型泵站泵型选择的若干问题[J].水力发电学报,2003(4):119-127.
- [7] 杜选震,储训,杨淮,等.南水北调东线工程大型泵站设计研究[J].水利水电科技进展,2003,23(5):38-40.
- [8] 陆伟刚,严登丰,甄峰.水泵及泵装置效率换算方法[J].排灌机械工程学报,2012,30(6):677-682.
- [9] 蒋频辉.友谊电排站改扩建工程泵型方案比选[J].黑龙江水利科技,2020,48(8):102-103.