

海绵型公园雨水控制分析计算方法

——以成都市活水公园为例

王燕秋¹, 黄晓荣^{1,2}, 郭碧莹¹, 高蔺云¹, 奚圆圆¹

(1. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 海绵城市建设中, 为了实现对雨水控制的定量计算, 若采用模型模拟需要详实的数据基础, 推广起来存在诸多问题。本文以径流系数为主要分析手段, 运用较为简便的方法对成都市活水公园进行海绵型公园改造前后的雨水控制各项指标做了定量计算, 利用芝加哥雨型进行雨量分配, 对改造前后公园外排水流量进行对比分析, 结果表明进行海绵型公园改造后, 5年一遇降雨外排水流量削峰率达74%, 峰现时间延后25min。外排水流量径流系数为0.278, 年径流总量控制率大于85%。对3年和5年重现期的雨水控制效果均较好。此计算方法可用于面积不大的海绵城市试点区域或海绵型公园的雨水控制计算, 所需数据量小, 操作性强, 具有可重复性和实用价值。可对海绵城市建设中的雨水控制指标计算提供一定参考。

关键词: 海绵城市; 径流系数; 雨水控制; 雨水控制指标; 芝加哥雨型

中图分类号: TV213.9; TU992

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)05-0049-05

Analysis and calculation of stormwater control in sponge city park: A case study of Chengdu living water park

WANG Yanqiu¹, HUANG Xiaorong^{1,2}, GUO Biying¹, GAO Linyun¹, XI Yuanyuan¹

(1. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to achieve the quantitative calculation of stormwater control in the construction of Sponge city, it would require a large number of data base with model simulation, which is hard for extension. This paper takes runoff coefficient as the main analysis means, using a simple method to calculate the stormwater control indicators of Chengdu living water park before and after the transformation to sponge park. The rain type of Chicago was used to distribute the rainfall that occurs every five years. Through analysis and comparison of discharge in the park that before and after the transformation, it shows that the effluent water flow peak clipping rate was 74%, and the peak delayed 25 min after transformation. The runoff coefficient is 0.278, and the volume capture ratio of annual rainfall is more than 85%. The control of stormwater is efficient for the rainfall that occurs every five years and every three years. This calculation method of stormwater control can be used in small type pilot area or sponge city park, which requires small amount of data has high maneuverability, repeatability and high application value. It can provide certain reference for the calculation of stormwater control indicators in the construction of Sponge city.

Key words: Sponge city; runoff coefficient; stormwater control; stormwater control indicators; the rain type of Chicago

1 研究背景

近年, 随着社会的快速发展和快速城镇化, 我国面

临着严峻的水环境问题, 城市内涝频发, 雨岛效应明显, 河流生态环境无法保障。“海绵城市”利用其“小雨不积水, 大雨不内涝, 水体不黑臭, 热岛有缓解”的设计目标,

收稿日期: 2017-05-23; 修回日期: 2017-06-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579161); 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB452701)

作者简介: 王燕秋(1993-), 女, 四川自贡人, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源方面研究。

通讯作者: 黄晓荣(1971-), 男, 重庆人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事水文学及水资源方面研究。

让城市在应对自然灾害,适应环境变化等方面具有良好的弹性,可以有效保护和改善城市生态环境^[1-3]。

海绵城市建设的主要内容包括城市规划设计与管理技术及雨水控制分析计算。国际上较先进的规划设计与管理技术有美国的低影响开发技术(LID)^[4]、英国的可持续发展排水系统(SUDS)^[5]、澳大利亚的水敏感性城市设计(WSUD)^[6]等。而针对雨水控制分析计算,有模型仿真模拟法和手算法两种方法,目前国内主要采用城市雨洪径流模型进行模拟计算^[7],以SWMM模型^[8]和MIKE模型^[9]为主,其中城市暴雨雨型主要采用芝加哥雨型^[10],然而模型模拟对城市管网等资料的要求较高,很多城市无法提供详实的资料,实际操作存在诸多困难。手算法则是以径流系数为主要手段,采用恒定均匀流计算的简便计算方法,操作性强,在汇水面积小于2 km²的区域精度较高,且基于以下假设:降雨在整个汇水面积上的分布是均匀的;降雨强度在选定的降雨时段内均匀不变;汇水面积随集流时间增长的速度为常数^[11]。本文将芝加哥雨型利用到手算法中对成都市活水公园进行雨水控制分析。

2 项目概况

活水公园建成于1998年,坐落于成都市府河边,是世界上第一座城市的综合性环境教育公园,1998年曾荣获联合国人居奖,共占地26 000 m²,图1为活水公园俯瞰图。

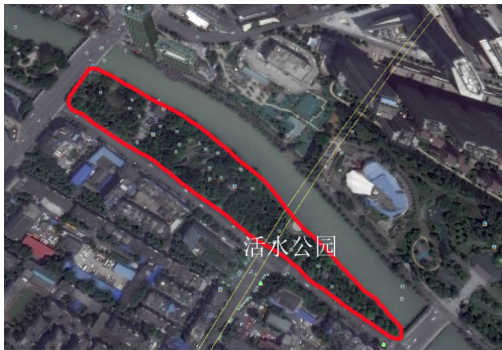


图1 活水公园俯瞰图

活水公园将保护生态环境的教育功能融入在景观中,其市政水净化工程也是很好的环境教育范本,运行近20年来,在展现其独特魅力的同时,公园设

施也逐步老化,部分设施破损,地面积水。因此,响应国家建设海绵城市的政策背景,对公园进行修缮,将活水公园建设为海绵型公园,同时也是成都市海绵城市建设的重要展示性公园。

本次改造工程从渗、蓄、用、排、调节等各方面着手,通过对公园进行渗透铺装,增加植草沟、绿色屋顶、蓄水池、集水沟、雨水湿地等措施进行改造,并设置水量及水质在线监测系统,对活水公园的水环境进行实时监控。改造后降雨入渗汇流过程见图2。公园改造平面效果图见图3,其中水量监测系统安装在公园出水口处,可实时监控外排水流量。

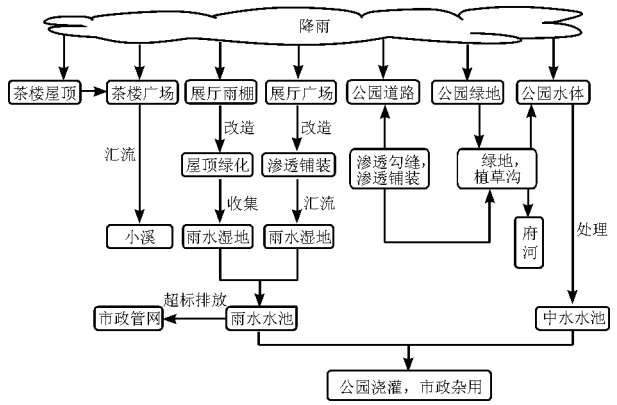


图2 降雨入渗汇流过程图

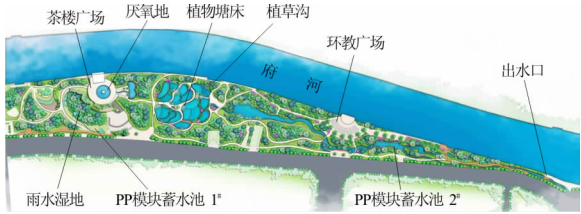


图3 活水公园改造平面效果图

3 控制指标计算

3.1 相关基础数据

统计活水公园内各类用地面积及雨水利用工程概况见表1和表2。

表1 用地面积统计表 m²

总用地面积	硬化屋面面积	绿化屋面面积	实土区绿地面积	地面广场面积	水域面积
26 000	391	21	17 133	5 650	2 805

表2 蓄水空间、渗透铺装和硬化面积统计表

PP模块蓄水池总容积 V/m ³	其他蓄水/m ³	植草沟/m ³ (下凹200 mm)	透水铺装所占比例/%	透水铺装面积/m ²	硬化面积/m ²
122	238.75	18.4	90	5 085	956

由表2可知总蓄水空间为:

$$V = 122 + 18.4 + 238.75 = 379.15 \text{ m}^3$$

利用以上基础数据计算在5 a一遇重现期下,活水公园改造项目的雨水控制各项指标削减情况。

3.2 雨量综合径流系数分析

雨量综合系数 Ψ 是指设定时间内降雨产生的径流总量与总雨量之比,一般由不同下垫面的径流系数加权平均得到,公式如下:

$$\Psi_1 = \frac{17133 \times 0.15 + 5650 \times 0.5 + 391 \times 0.8 + 2805 \times 1}{26000} = 0.327$$

改造后实际雨量综合径流系数为:

$$\Psi_2 = \frac{21 \times 0.3 + 17133 \times 0.15 + 5085 \times 0.4 + 565 \times 0.5 + 391 \times 0.8 + 2805 \times 1}{26000} = 0.308$$

3.3 芝加哥雨型2 h雨量分配计算

采用芝加哥雨型进行雨量分配。芝加哥雨型又称 Keifer & Chu 雨型,是以暴雨公式为基础设计典型降雨过程,采用一定重现期下不同降雨历时的最大暴雨强度复合而成,在国内的研究中,一般只用于分配小于2 h的降雨时段^[12]。通过引入雨峰位置系数 r (介于0~1) 来描述暴雨峰值发生的时刻,将降雨历时时间序列分为峰前和峰后两个部分,令峰前历时为 t_b ,峰后历时为 t_a ^[13]。取一定重现期下暴雨强度公式为:

$$i = \frac{167A(1 + C \lg T)}{(t + b)^n} \quad (2)$$

式中: i 为设计暴雨强度, mm/min; T 为设计暴雨重现期, a; t 为降雨历时, min; A, C, b, n 为经验参数,根据统计方法计算确定。

则雨峰前后瞬时降雨强度可由下式计算:

$$i(t_a) = \frac{A \left[\frac{(1-n)t_a}{1-r} + b \right]}{\left[\frac{t_a}{1-r} + b \right]^{n+1}} \quad (3)$$

$$i(t_b) = \frac{A \left[\frac{(1-n)t_b}{r} + b \right]}{\left[\frac{t_b}{r} + b \right]^{n+1}} \quad (4)$$

利用邵尧明等^[14]的研究成果,成都市暴雨公式如下:

$$i = \frac{(122.3291 + 109.1556 \lg T)}{(t + 43.6693)^{1.1607}} \quad (5)$$

得到各参数值为: $A = 0.7325, C = 0.8923, b = 43.6693, n = 1.1607$, 雨峰位置系数 r 取值0.25, 由

$$\Psi = \frac{A_1 \times \Psi_1 + A_2 \times \Psi_2 + \cdots + A_n \times \Psi_n}{A} \quad (1)$$

式中: Ψ_i 为不同下垫面种类的径流系数,可由《雨水控制与利用工程设计规范》(DB11/685-2013)查得; A_i 为不同下垫面种类所占面积, m^2 ; A 为计算区域的总用地面积, m^2 。

根据公式(1)计算出活水公园改造前雨量综合径流系数:

式(6)和式(7)生成成都市5年一遇120 min降雨历时的芝加哥雨型,得到5 min雨量分配表见表3。

表3 5 min雨量分配表

降雨历时/ min	降雨厚度/ mm	降雨历时/ min	降雨厚度/ mm
5	0.6251	65	2.0173
10	0.9372	70	1.7013
15	1.7378	75	1.4467
20	3.7000	80	1.2385
25	9.4928	85	1.0668
30	9.6750	90	0.9234
35	7.2701	95	0.8031
40	5.6173	100	0.7010
45	4.4383	105	0.6140
50	3.5707	110	0.5394
55	2.9163	115	0.4749
60	2.4119	120	0.4190

由表3可知,成都市5年一遇120 min历时总降雨厚度为64.3379 mm。

根据3.2节中计算出的改造前后的雨量综合径流系数 Ψ_1 和 Ψ_2 , 利用表3中各降雨历时的降雨厚度即可算出改造前雨水外排流量及改造后径流流量,见表4中的第3列和第5列。结合3.1节中所计算出的总蓄水空间,当改造后累积径流量大于总蓄水空间379.15 m^3 时,即第55 min时产生外排水量。得到改造后实际外排水流量见降雨数据统计表(表4)。

表 4 降雨数据统计表

历时/ min	各时段降雨 厚度/mm	改造前外排水 流量/(L · s ⁻¹)	改造前累计 外排水量/m ³	改造后径流 流量/(L · s ⁻¹)	改造后累计 径流量/m ³	改造后实际外 排水流量/(L · s ⁻¹)	改造后实际累计 外排水量/m ³
5	0.6251	17.72	5.31	16.69	5.01	0	0
10	0.9372	26.56	13.28	25.02	12.51	0	0
15	1.7378	49.25	28.06	46.39	26.43	0	0
20	3.7000	104.86	59.51	98.77	56.06	0	0
25	9.4928	269.03	140.22	253.39	132.08	0	0
30	9.6750	274.19	222.48	258.26	209.55	0	0
35	7.2701	206.03	284.29	194.06	267.77	0	0
40	5.6173	159.19	332.05	149.94	312.75	0	0
45	4.4383	125.78	369.78	118.47	348.30	0	0
50	3.5707	101.19	400.14	95.31	376.89	0	0
55	2.9163	82.65	424.94	77.85	400.24	70.32	21.09
60	2.4119	68.35	445.44	64.38	419.56	64.38	40.41
65	2.0173	57.17	462.59	53.85	435.71	53.85	56.56
70	1.7013	48.21	477.06	45.41	449.34	45.41	70.19
75	1.4467	41.00	489.36	38.62	460.92	38.62	81.77
80	1.2385	35.10	499.89	33.06	470.84	33.06	91.69
85	1.0668	30.23	508.96	28.48	479.38	28.48	100.23
90	0.9234	26.17	516.81	24.65	486.78	24.65	107.63
95	0.8031	22.76	523.63	21.44	493.21	21.44	114.06
100	0.701	19.87	529.59	18.71	498.82	18.71	119.67
105	0.614	17.40	534.81	16.39	503.74	16.39	124.59
110	0.5394	15.29	539.40	14.40	508.06	14.40	128.91
115	0.4749	13.46	543.44	12.68	511.86	12.68	132.71
120	0.419	11.87	547.00	11.18	515.22	11.18	136.07

3.4 峰值流量、峰现时间比较

根据表 4 绘制出改造前后区域内外排水流量的变化曲线图,即 5 a 一遇外排水流量曲线图见图 4。

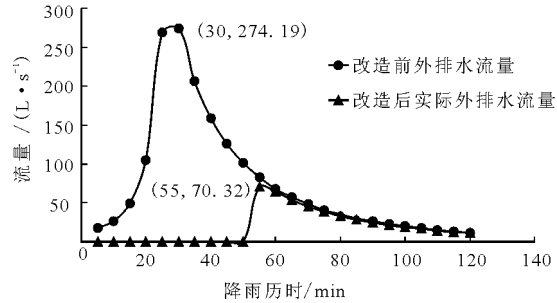


图 4 5 a 一遇外排水流量曲线图

改造后外排水流量最大时即为外排水峰值流量,为 $Q_{\max 1}=70.32 \text{ L/s}$,出现在第 55 min,改造前外排水峰值流量为 $Q_{\max 2}=274.19 \text{ L/s}$,出现在第 30 min。削峰率为 $(Q_{\max 2}-Q_{\max 1})/Q_{\max 2}=(274.19-70.32)/274.19=74\%$,峰现时间延后 25 min。

3.5 外排水流量径流系数分析

流量径流系数指一定时间内汇水面积实际径流量与理论径流量的比值,是海绵城市建设雨水控制

分析中的一个重要指标,分为瞬时流量径流系数与峰流量径流系数。这里用峰流量径流系数表示,根据公式 $W=10 \Psi h F^{[15]}$,得外排水流量径流系数为:

$$\begin{aligned}\Psi &= \frac{W}{10 h F} = \frac{Q_{\max 1} \cdot t}{10 H_{55} \cdot F} \\ &= \frac{70.32 \times 5 \times 60}{10 \times 2.9163 \times 26000} = 0.278\end{aligned}$$

式中: H_{55} 为第 55 min 时的 5 min 降雨厚度。

3.6 年径流总量控制率分析

根据《海绵城市建设技术指南》划定的分区,成都市属于Ⅱ级区,年径流总量控制率应控制在 80%~85%。利用中国气象科学数据共享服务网提供的成都市近 30 年的降雨资料,通过水文统计方法计算,得成都市年径流总量控制率为 85% 所对应的降雨量为 40.7 mm。要实现年径流总量控制率为 85% 的目标,即控制 40.7 mm 的降雨无外排。

公园内设计降雨控制量 $V_{\text{控}}=40.7/1000 \times 26000=1058.2 \text{ m}^3$,已算出公园综合径流系数为 $\Psi_2=0.308$,则入渗实现的降雨控制量为 $V_2=V_{\text{控}}(1-$

$\Psi_2) = 1058.2 \times (1 - 0.308) = 732.27 \text{ m}^3$ 。

根据 3.1 节中的计算结果,总蓄水空间为 $V = 379.15 \text{ m}^3$,于是项目总控制雨水量为 $V_{\text{总}} = 732.27 + 379.15 = 1111.42 \text{ m}^3$,设计降雨厚度为:

$$H = \frac{V_{\text{总}}}{F} = \frac{1111.42 \times 1000}{26000} = 42.75 \text{ mm} > 40.7 \text{ mm}$$

可知改造后活水公园 5 a 一遇降雨的年径流总量控制率大于 85%。

3.7 3 a 一遇雨水外排情况

运用同样方法分析重现期为 3 a 时雨水外排情况,得到 3 a 一遇外排水流量曲线图见图 5。雨水控制效果见表 5。

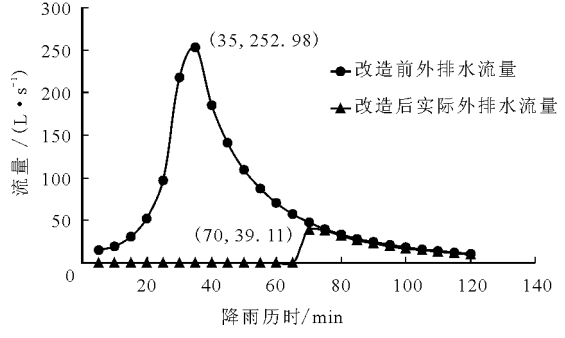


图 5 3 a 一遇外排水流量曲线图

表 5 雨水控制效果表

控制指标	3 a 一遇	5 a 一遇
外排水峰值流量/(L · s ⁻¹)	39.11	70.32
削峰率/%	85	74
峰值延后时间/min	35	25
外排水总量/m ³	73.17	136.07
外排水流量径流系数	0.268	0.278

4 结 论

(1)以径流系数作为主要手段,利用芝加哥雨型进行雨量分配,将活水公园改造前后 5 a 一遇降雨的雨水径流控制情况进行比较计算。得出结论:活水公园进行海绵型公园改造后,外排水流量削峰率达 74%,峰现时间延后 25 min。外排水流量径流系数为 0.278,年径流总量控制率大于 85%,采用同样方法对 3 年一遇降雨进行分析,其雨水控制效果仍较好,改造后活水公园的雨水控制能力明显提高。

(2)相比较于软件模拟方法,本文所用方法所需数据量小,计算简便,且对于面积不大的区域计算结果误差较小,可重复性强,可为海绵城市建设中的

试点区域或海绵型公园建设中的径流控制总量计算提供参考。

致谢:感谢设计单位泛华建设有限公司提供的基础数据资料!

参考文献:

[1] 栾勇,刘家宏.海绵城市建设中相关支撑技术简介[J].中国水利水电科学研究院学报,2016,14(5):374-378.

[2] 魏婷.应对不同降雨的海绵城市规划方法探讨——以成都市双流县城市拓展区控制性详细规划为例[J].城市规划,2016,40(3):83-88.

[3] 吴丹洁,詹圣泽,李友华,等.中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J].中国软科学,2016(1):79-97.

[4] 刘昌明,张永勇,王中根,等.维护良性水循环的城镇化 LID 模式:海绵城市规划方法与技术初步探讨[J].自然资源学报,2016,31(5):719-731.

[5] Woods-Ballard B, Kellagher R, Martin P, et al. The SuDs Manual[M]. The SUDS manual. 2007.

[6] Coombes P J, Argue J R, Kuczera G. Figtree place: a case study in water sensitive urban development (WSUD)[J]. Urban Water, 2000, 1(4): 335-343.

[7] 刘家宏,陈根发,王海潮,等.暴雨径流管理模型理论及其应用[M].北京:科学出版社,2015.

[8] Rossman L A. Storm water management model user's manual[M]. USA: US Environmental Protection Agency, 2007.

[9] Dai Zhijun, Li Changsheng, Trettin C, et al. Bicriteria evaluation of MIKE SHE model for a forested watershed on South Carolina coastal plain[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2010, 7(1): 1033-1046.

[10] 张大伟,赵冬泉,陈吉宁,等.芝加哥降雨过程线模型在排水系统模拟中的应用[J].给水排水,2008,34(S1): 354-357.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB50014-2006 室外排水设计规范(2014 年版)[M].北京:中国计划出版社,2014.

[12] 赵刘伟,朱钢,陆柯,等.基于成都市中心城区海绵城市建设的设计暴雨雨型研究[J].城市道桥与防洪,2016(8):140-143.

[13] 庄智福,王珂清,杨杰,等.镇江市新一代暴雨强度公式研制及雨型设计[J].气象科学,2015,35(4):506-513.

[14] 邵尧明,邵丹娜.中国城市新一代暴雨强度公式[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.

[15] 唐宁远,车伍,潘国庆.城市雨洪控制利用的雨水径流系数分析[J].中国给水排水,2009,25(22):4-8.