

城市雨水管理

基于水文方法的暴雨调节塘规模计算

朱一文¹, 王文亮²

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044)

摘要: 合理法(推理公式法)作为国内外流行的水文计算方法被广泛使用,为此,结合案例介绍了基于合理法的设计降雨过程线和径流过程线推求方法,并在此基础上给出了规划阶段暴雨调节塘规模的计算方法,该方法的关键在于径流系数、集水时间、规划径流排放峰值流量限值的合理确定,后续可基于实测数据对方法的可靠性进行验证。该方法有利于合理法的进一步推广应用,可为排水防涝、海绵城市专项规划中暴雨调节塘规模的合理确定提供借鉴。

关键词: 水文法; 调节塘; 调蓄规模设计

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)07-0114-05

Calculation of Stormwater Detention Basin Volume Based on Hydrological Method

ZHU Yi-wen¹, WANG Wen-liang²

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Advanced Innovation Center of Future Urban Design, Beijing 100044, China)

Abstract: Rational method is widely used as one of the most popular hydrological calculation methods. A deducing method of the hyetograph and hydrograph was introduced with a case based on rational method, and a calculation method of stormwater detention basin volume in urban planning stage was proposed. The key of the method depended on the reasonable determination of runoff coefficient, concentration time and the discharge limit value of the planned runoff peak flow rate, and the reliability of the method could be verified based on the measured data. The method is conducive to further promotion and application of the rational method, and can provide a reference for the reasonable determination of stormwater detention basin volume in drainage and flood mitigation planning and sponge city planning.

Key words: hydrological method; detention basin; design of detention volume

径流储存、调蓄设施包括调节和滞蓄设施,以及具有调节和滞蓄综合功能的调蓄设施。其中,调节塘作为重要的地上生态型调节设施,主要功能为调

控径流洪峰,在规划阶段,规划方案需要确定调节塘的布局、规模及其允许排放的峰值流量,并通过流域整体效果的数值模拟分析确定最佳方案^[1]。由于

规划阶段一般不会涉及调节塘进出水构筑物的详细设计,无需根据出水构筑物尺寸、下游尾水水位等结合水力计算确定调蓄规模,因此,规划阶段调节塘规模主要通过水文计算确定。笔者基于合理法(推理公式法)推求小流域径流过程线,并基于水量平衡原理给出了调节塘规模的计算方法,以期为规划阶段调节塘规模的确定提供借鉴。

1 调节塘的类型和布局

调节塘可布局在源头地块、街区公园、下游滨河公园,或结合河道洪泛区设置;可源头分散布置、下游集中布置,也可源头、末端结合进行布置,形成“源头-子排水分区-流域/排水分区”三级规划布置形式^[1],如图1所示。

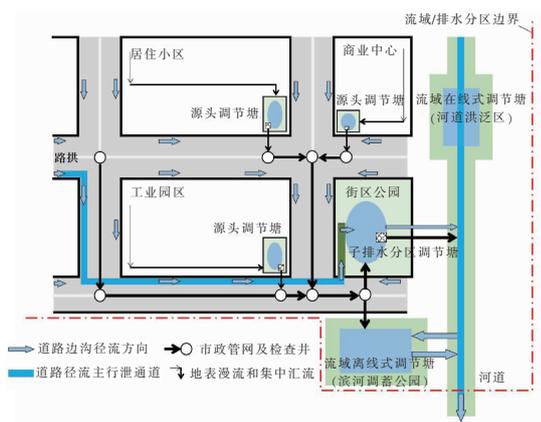


图1 城市“源头-子排水分区-流域/排水分区”三级调节塘规划布置示意

Fig.1 Configuration for on-site, subcatchment and catchment detention basin

根据与周边管网和大排水系统的衔接关系,调节塘可分为离线式、在线式两种类型,如图2所示。

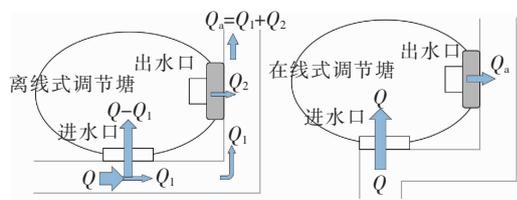


图2 离线式和在线式调节塘

Fig.2 Off-line and on-line detention basin

2 基于水文的规模设计方法

2.1 设计暴雨与设计径流过程线

调节塘的设计标准可根据管渠排水设计标准及内涝防治设计标准确定,根据相关规范,设计重现期标准分别为2~10年和20~100年,兼顾径流总量

标准时,可根据年径流总量控制率及对应的设计降雨量标准和设计排空时间确定底部滞蓄容积。当调节塘的三级调蓄容积和形态确定后,即可进一步确定相应的三级调蓄水位和占地面积^[1],见图3,本研究仅讨论2~100年设计标准下调节容积的确定。

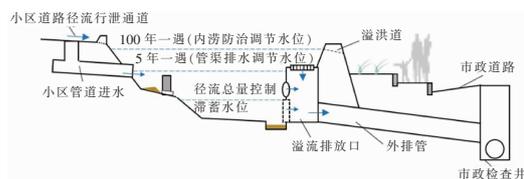


图3 调节塘设计标准

Fig.3 Layout of detention basin at different return periods

对于源头地块和街区尺度内的调节塘,其汇水面积一般较小,当汇水面积 $<2\text{ km}^2$ 时,可采用合理法计算调节塘规模,当流域汇水面积 $>2\text{ km}^2$ 时,应采用非线性水库或单位线法进行产汇流计算^[2]。

《城镇雨水调蓄工程技术规范》(GB 51174—2017)指出,计算峰值调节设施规模时,宜采用3~24 h较长设计降雨历时进行试算复核,并采用适合当地的设计雨型^[2]。对于设计降雨历时,实际上,当采用合理法进行城市小流域径流量计算时,设计降雨历时不应小于其上游流域的集水时间,若小于集水时间,将无法获取全流域参与汇流时形成的最大径流峰值流量,导致规模计算偏小;而对于城市小流域,集水时间一般较短,例如,当边沟或管渠集中汇流的设计流速为 1 m/s 、集水时间为 1 h 时,汇流路径长为 3.6 km ,对于宽为 1 km 的矩形流域,其面积已达到 3.6 km^2 ,超出了合理法的适用范围,因此,城市小流域调节塘的设计降雨历时取 2 h 即可满足要求。对于设计雨型,从技术经济角度考虑,城市排水防涝工程一般以最不利条件进行设计,即调控最大峰值流量,因此,设计暴雨一般采用单峰雨型作为“设计雨型”,双峰雨型或更复杂的雨型则更适宜作为“校核雨型”或“预报雨型”,用于评估复杂降雨情景下工程设施的径流控制效果。美国丹佛的暴雨设计标准规定,小流域调节塘的设计暴雨采用设计降雨历时为 2 h 的单峰雨型^[1]。

综上,本研究采用的设计暴雨是降雨历时为 2 h 的单峰雨型,设计降雨过程线可根据暴雨强度公式,采用“交替区块法”获得^[3],以北京为例,100年一遇、历时 2 h 、最小时间段为 5 min 、雨峰位于第6时间段(30 min)时的设计降雨过程线如图4所示。

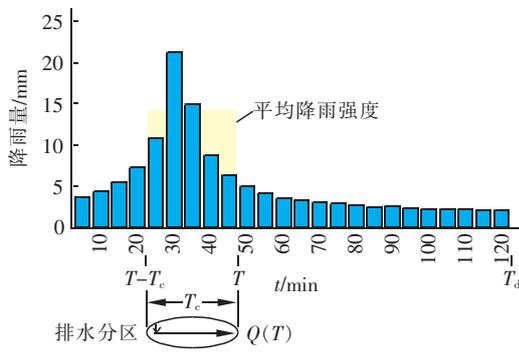


图4 基于合理法设计降雨过程线计算径流过程线示意

Fig.4 Rational hydrograph by rational hyetograph

设计降雨过程线确定后,需计算调节塘的入流和出流流量过程线,由于我国规范中并没有给出计算方法^[2],本研究参照美国丹佛方法,基于合理法推求流域在调节塘进水口处的径流过程线,见图4,该方法符合合理法的径流汇流计算原理,且经过实测数据验证,可供我国借鉴采用,推求过程如下^[4]:

当设计降雨历时 ≤ 集水时间时,流域按照“面积-时间”线性关系参与下游进水口径流过程,各时刻的设计降雨强度为前降雨历时内的平均降雨强度,如式(1)~(3)所示。

$$A_e = A \frac{T}{T_c} \quad 0 \leq T \leq T_c \quad (1)$$

$$Q(T) = 0.167\varphi A_e I(T) = 0.167\varphi A \frac{T}{T_c} I(T) \quad (2)$$

$$0 \leq T \leq T_c \quad (2)$$

$$I(T) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{t=T} \Delta P(t) \quad 0 \leq T \leq T_c \quad (3)$$

式中: A_e 为 T 时刻调节塘进水径流量服务的汇水面积, hm^2 ; A 为流域面积, hm^2 ; T 为时间, min ; T_c 为集水时间, min ; $Q(T)$ 为 T 时刻调节塘的进水径流量, m^3/s ; φ 为径流系数; $I(T)$ 为 T 时刻 $0 \sim T$ 时段内的平均降雨强度, mm/min ; $\Delta P(t)$ 为 Δt 时段内的降雨增量。

当设计降雨历时 > 集水时间时,全流域参与下游进水口径流过程,各时刻的设计降雨强度为前集水时间 T_c 内的平均降雨强度,见式(4)和式(5)。

$$I(T) = \frac{1}{T_c} \sum_{t=T-T_c}^{t=T} \Delta P(t) \quad T_c < T \leq T_d \quad (4)$$

$$Q(T) = 0.167\varphi A I(T) \quad T_c < T \leq T_d \quad (5)$$

当设计降雨停止时,径流量按“流量-时间”线性关系减小,如式(6)和式(7)所示。

$$Q(T) = 0.167Q(T_d) \left(1 - \frac{T - T_d}{T_c}\right)$$

$$T_d < T \leq (T_d + T_c) \quad (6)$$

$$Q(T_d) = 0.167\varphi A I(T_d) \quad (7)$$

式中: T_d 为设计降雨历时, 120 min ; $Q(T_d)$ 为降雨结束时刻的径流量, m^3/s ; $I(T_d)$ 为 $T_d - T_c$ 时段内的平均降雨强度,按式(4)计算, mm/min 。

2.2 规模计算

当入流径流过程线确定后,可对调节塘出流过程线进行简化,其中,对于参与调蓄量计算的出流流量的上升段,出流量按“流量-时间”线性关系增加至允许排放的峰值流量 Q_a ,对应的峰现时间为 T_p ,见图5,调蓄量按式(8)~(10)计算^[5]。允许排放的峰值流量可根据流域开发前的外排峰值流量取值,也可按下游既有排水防涝系统的接纳能力取值。

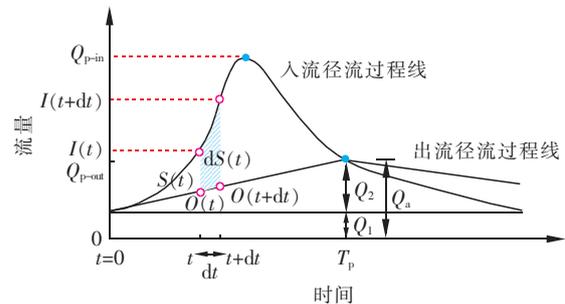


图5 基于径流过程线计算调节塘规模

Fig.5 Detention volume by hydrograph method

$$O(T) = Q_1 + \frac{Q_a - Q_1}{T_p} T \quad 0 \leq T \leq T_p \quad (8)$$

$$S(T) = \sum_{t=0}^{t=T} [I(t) - O(t)] \Delta t \quad 0 \leq T \leq T_p \quad (9)$$

$$S_m = S(T_p) \quad (10)$$

式中: $O(T)$ 为 T 时刻的出流量, m^3/s ; Q_1 为排水防涝设施的排水能力, m^3/s ; Q_a 为允许排放的峰值流量, m^3/s ; T_p 为出流峰值的峰现时间, min ; $S(T)$ 为 T 时刻的累计调蓄量, m^3 ; $I(t)$ 为 t 时刻的进水径流量, m^3/s ; S_m 为最大调蓄量, m^3 ; $S(T_p)$ 为 T_p 时刻的累计调蓄量, m^3 。

3 设计案例

以北京某面积为 45 hm^2 的城市小流域为例,集水时间为 25 min ,径流系数为 0.65 , 100 年一遇设计降雨过程线如图4所示,下游允许排放的峰值流量 $Q_a = 3 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,计算在线式调节塘 ($Q_1 = 0$) 的调蓄容积,计算过程如表1所示,计算入流和出流过程线

如图6所示,可知调节塘出流峰值的峰现时间 $T_p = 80 \text{ min}$, 调节塘容积为 $22\,492.40 \text{ m}^3$ 。

表1 调节塘规模计算示意

Tab. 1 Detention volume for detention basin

时间/ min	降雨量/ mm	平均降雨强度 $I(T)/$ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	径流量 $Q(T)/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	调节塘出流量 $O(T)/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	时段调蓄量 $dS(t)/\text{m}^3$	累计调蓄量 $S(T)/\text{m}^3$
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	3.84	0.77	0.75	0.19	168.67	168.67
10	4.53	0.84	1.63	0.38	377.96	546.63
15	5.58	0.93	2.73	0.56	648.78	1 195.41
20	7.36	1.07	4.16	0.75	1 023.76	2 219.17
25	10.98	1.29	6.31	0.94	1 610.94	3 830.11
30	21.29	1.99	9.72	1.13	2 577.83	6 407.94
35	15.10	2.41	11.78	1.31	3 141.06	9 549.00
40	8.80	2.54	12.41	1.50	3 273.40	12 822.40
45	6.34	2.50	12.21	1.69	3 157.41	15 979.80
50	4.99	2.26	11.04	1.88	2 750.52	18 730.33
55	4.15	1.58	7.69	2.06	1 689.55	20 419.88
60	3.57	1.11	5.44	2.25	957.67	21 377.55
65	3.35	0.90	4.38	2.44	581.84	21 959.39
70	3.15	0.77	3.75	2.63	338.68	22 298.06
75	2.98	0.69	3.36	2.81	164.15	22 462.21
80	2.83	0.63	3.10	3.00	30.19	22 492.40
85	2.69	0.60	2.93	0.00	0.00	22 492.40
90	2.57	0.57	2.78	0.00	0.00	22 492.40
95	2.46	0.54	2.64	0.00	0.00	22 492.40
100	2.36	0.52	2.52	0.00	0.00	22 492.40
105	2.27	0.49	2.42	0.00	0.00	22 492.40
110	2.19	0.47	2.32	0.00	0.00	22 492.40
115	2.12	0.46	2.23	0.00	0.00	22 492.40
120	2.05	0.44	2.15	0.00	0.00	22 492.40
125	0.00	0.00	1.72	0.00	0.00	22 492.40
130	0.00	0.00	1.29	0.00	0.00	22 492.40
135	0.00	0.00	0.86	0.00	0.00	22 492.40
140	0.00	0.00	0.43	0.00	0.00	22 492.40
145	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22 942.40

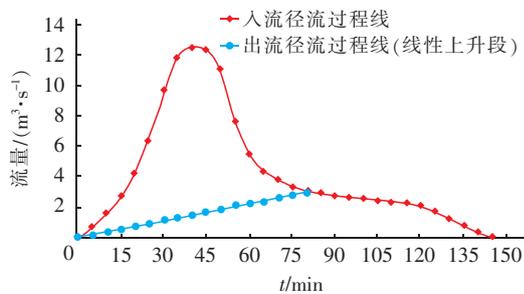


图6 基于径流过程线计算的调节塘规模

Fig. 6 Detention volume by hydrograph method

4 结论与建议

① 城市规划阶段调节塘规模的确定主要根据水文方法进行确定,设计阶段需结合水力计算进行综合确定。水文计算的关键问题之一是确定流域允许排放的峰值流量,城市排水防涝规划、海绵城市建设专项规划应明确流域内及下游主要排水通道的设计流量,并以此作为各排水分区、地块径流量排放的限制条件。

② 推求小流域设计径流过程线时,宜采用2 h
(下转第122页)