

小区雨水利用工程费用模型与优化设计

李俊奇 余 苹 车 伍 李 健

(北京建筑工程学院城市建设工程系, 北京 100044)

摘要 通过对一系列调蓄、渗透、净化等雨水处理构筑物进行成本分析,选取设计中关键参数,推算出其中具有代表性构筑物的费用模型。并将费用模型应用于实际工程,计算出雨水利用工程的最佳经济规模。这些费用模型在北京地区具有一定的代表性、通用性,主要适用于小区雨水利用工程的设计优化。同时,模型的推导方法对其他地区的雨水利用设计具有借鉴意义。

关键词 雨水利用 费用模型 优化设计 小区

Engineering cost model and optimal design of rainwater utilization in residential quarter

Li Jun-qi, Yu Ping, Che Wu, Li Jian

(Department of Urban Construction and Engineering, Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: The cost analysis of rainwater utilization was done through series of rainwater disposal processes like storage, regulation, percolation and treatment. By this way an engineering cost model for main structures of rainwater utilization has been established to deduce the key design parameters and to decide the best economical capacity of rainwater project. This model is convenient and suitable for optimal design for residential quarters in Beijing and around. However, the principles for quantitative calculation of rainwater shall be helpful for other places.

Keywords: Rainwater utilization; Engineering cost model; Optimal design; Residential quarter

1 目标构想

雨水作为城市水源之一,在缺水问题日益严重的今天,越来越被人们所重视。雨水利用工程的“回用、减污、削洪”三重效果使之与其它节水方式相比,具有一定的优势。2003年3月,北京市规划委员会与水利局联合发出《关于加强建设工程用地内雨水资源利用的暂行规定》,要求建设中水利用设施的新改扩建工程,必须同时考虑建设雨水利用设施,规定以建设工程硬化后不增加建设区域内雨水径流量和外排水总量为标准,在规划市区、城镇地区等修建专用的雨水利用储水设施的单位和个人,可以申请减免防洪费。可以说,这些文件的出台大大推动了雨水利用工程的发展。

雨水利用的技术随着工程实践的增加日渐成熟,但是,在雨水利用工程中如何体现限额设计和最经济规模的思想;如何确定最佳雨水利用方案,无论是工程前期论证、中期设计建造和后期评价方面,都需要相应的费用模型进行测算,并以此为基准进行方案优化和评估。因此,如果有一套较为完善的小区雨水利用构筑物费用模型,必将有利于小区雨水利用工程的优化设计。

2 雨水工程单项构筑物费用模型

2.1 雨水构筑物的选择

在雨水利用工程单项构筑物的选择上要考虑小区环境状况、构筑物实际效果、景观要求等情况,尽量与小区整体规划和景观设计相结合,如果能利用

已有或拟建设施,可以节约大量工程投资。例如一般的新建小区,根据建设部文件的要求,要求绿化率达到 30%,而一些绿地设计稍加改变,将上凸形改成下凹形就能成为一个集截流、截污和渗透功能为一体的雨水利用设施。再比如起景观作用的水体,作为雨水构筑物可以兼起到雨水贮存和调蓄的作用。考虑到上述情况,在调蓄、净化和渗透方面选取了以下构筑物:

(1) 调蓄构筑物:地下储存池、低势绿地(兼作渗透、净化设施)、滞留塘。

(2) 渗透构筑物:渗沟、渗管、渗井。

(3) 净化构筑物:土壤滤池。

其他的如弃流和动力设施,由于所占投资比例较小,在投资估算和概算阶段可以选取构筑物工程造价的百分数来计算。但遇特殊设施或构筑物则应根据具体情况另行考虑。

2.2 费用构成

在本研究中费用主要考虑工程的投资费用,并根据《北京市建设工程间接费及其他费用定额》计取各项费用,是包括直接费(含文明施工及环保费)、企业经营费、利润、税金、劳保统筹的工程总造价,也是各项构筑物的完全单价。根据工程设计和实践经验,雨水构筑物的运行管理费用较低,而且随处理水量的变化而变化,可以根据实际情况另行分析。此外,由于实际设计时,雨水工程的占地费已经含在主体工程造中,此处不再考虑。

2.3 费用模型分析

费用模型应该具备以下特点:

(1) 适应性。模型是针对一定条件下建立起来的,一定要根据所选项目的特点、所在地,结合相应的定额、标准来建立。

(2) 通用性。通用性要求尽量减少模型推导的假设条件,使得模型可以在大部分情况下可以应用。

(3) 简便性。模型应用简便,模型参数选取合理。

(4) 可组合性。考虑到工程具体实施的内外环境均有不同,如果不同构筑物模型可以分阶段按照不同目的进行组合,则模型的适应性、通用性和简便性都能得到提高。

由于缺乏系统的雨水构筑物费用数据库,因此,

采用典型设计法,部分构筑物如储存池和渗水井等采用现有标准图集。首先需要拟定典型的工艺流程、结构形式和设计原则,按不同规模进行系列设计,再依据概算定额、取费标准求出构筑物的工程造价。然后,找出对费用起支配作用的参数与工程造价之间的函数关系。本文依据的定额为 1996 年北京市建设工程概算定额,并根据价差系数和市场价格等换算至 2004 年北京市工程造价水平。

2.3.1 调蓄构筑物

(1) 地下储存池。采用国家建筑标准设计 96S811~96S820(圆形),96S823~96S833(矩形)。结构型式为现浇钢筋混凝土,有效水深为 3.5~4 m,矩形水池长宽比为 1:1,边长为 3.9~15.9 m;圆形水池直径范围为 4.5~18.7 m。混凝土强度等级为 C25,抗渗等级 P6,覆土为 1 m。地下储存池的费用大小主要取决于储存池的有效容积 V ,因此将有效容积 V 取定为模型参数,通过计算得出以下拟合公式:

$$\text{圆形: } C_Y = 3\,081.5 V_Y^{0.749\,0} \quad (R^2 = 0.993\,9) \quad (1)$$

$$\text{矩形: } C_J = 3\,338.9 V_J^{0.732\,6} \quad (R^2 = 0.994\,4) \quad (2)$$

式中 C_Y, C_J ——地下储存池的工程造价,元;

V_Y, V_J ——地下储存池的有效容积, m^3 ,取值范围为 50~1 000 m^3 ;

R^2 ——拟合度。

从储存池的费用模型中可以看出圆形和矩形储存池造价相差不大,随着体积的增大,工程费用呈指数形式上升。设计时主要根据现场位置等情况选择储存池的形状。

(2) 低势绿地。低势绿地兼有调蓄、渗透和净化三种功效。主要设计参数包括面积和下凹深度。根据测算得出低势绿地造价为

$$C_d = (42.764 + 68.567 H_d) A_d \quad (3)$$

式中 C_d ——低势绿地工程造价,元;

H_d ——低势绿地的平均下凹深度, m,取值范围 0.05~0.25 m;

A_d ——低势绿地的面积, m^2 。

为了与其他构筑物参数保持一致,低势绿地造价公式还可根据下凹深度和体积进行变化,即:

$$C_d = 42.764 V_d / H_d + 68.567 V_d \quad (4)$$

式中 V_d ——低势绿地的有效容积, m^3 。

(3) 非渗透雨水加膜塘。塘的典型设计断面自下而上依次为素土夯实、1 mm 厚 LDPE 防渗膜、200 g/ m^2 土工布、300 mm 厚细砂和种植土,边坡(垂直:水平)为 1:4。若设计中已确定塘深,加膜塘的费用模型见表 1。

表 1 不同塘深加膜塘的费用模型

加膜塘深度/mm	费用模型(造价—体积)	拟合度 R^2
500	$C_T = 292.8 V_T^{0.9084}$	0.999 4
700	$C_T = 389.97 V_T^{0.8646}$	0.998 7
1 000	$C_T = 625.04 V_T^{0.7871}$	0.998 3
2 000	$C_T = 1 476.7 V_T^{0.7072}$	0.999 4
3 000	$C_T = 2 896.7 V_T^{0.6618}$	0.999 7

为方便使用,将表 1 中的费用模型进行再次拟合,则加膜塘的费用模型可以用式(5)表示:

$$C_T = 0.092 7 H_T^{1.2824} V_T^{2.7595 H_T^{-0.179}} \quad (5)$$

式中 C_T ——塘的工程造价,元;

H_T ——塘的平均有效水深, mm, 500 ~ 3 000 mm;

V_T ——塘的有效容积, m^3 , 取值范围为 50 ~ 5 000 m^3 。

(4) 调蓄构筑物适用条件。虽然地下储存池、塘和低势绿地均可作为调蓄构筑物,它们适用条件却是不同的。

地下储存池的位置一般设置在雨水干管(渠)或有大流量交汇处,或靠近用水量较大的地方,尽量使整个系统布局合理,减少管(渠)系的工程量。通常用于小区用地紧张的情况,管理较为困难。

加膜塘要求居住小区有较多场地。塘的调蓄容积较其他构筑物大,自净和生态效果较好,但设计和管理时要特别注意水质的问题。另外,塘的设计在美学上要求应与周围的景色相融合,满足景观园林设计原则。

绿地作为一种天然的调蓄、渗透、净化设施,在

住区具有普遍性,因此在雨水利用方面起着重要的作用。它具有透水性好、节省投资、便于雨水引入等优点,并且对雨水中的一些污染物具有较强的截留和净化作用,造价低、管理方便。但径流雨水水质不好时易对植物造成损害。

在构筑物具体设计时,要根据它们不同的适用特点和功能以及工程的环境,利用模型给出的数据选择造价较低、效果好的构筑物。

2.3.2 渗透构筑物

(1) 渗井。渗井采用的构造形式为采用《建筑设备施工安装通用图集》排水工程部分(91SB4)。

覆土深 1 m 时:

$$C_{S1} = 2.822 6 D - 214.54 \quad (R^2 = 0.991 9) \quad (6)$$

覆土深 1.5 m 时:

$$C_{S2} = 3.186 9 D - 85.2 \quad (R^2 = 0.993 3) \quad (7)$$

式中 C_{S1} 、 C_{S2} ——单座渗井的造价,元;

D ——渗井内径, mm, 取值范围为 700 ~ 5 000 mm。

(2) 渗沟。采用的构造形式见图 1,所进行的工程实践中主要是采用这种形式,必要时可作部分改动,对造价影响不大。其中:中心渠断面尺寸 $W_1 \times H_1$ 为 300 mm $\times$ 300 mm;渠外断面尺寸 $W_2 \times H_2$ 为 400 mm $\times$ 350 mm;渗透沟断面尺寸 $W \times H$ 为 1 000 mm $\times$ 800 mm;槽深(含 100 mm 基础垫层和透水砖)为 1 050 mm。

根据测算,渗沟费用模型为:

$$C_{S3} = 774.64 L \quad (8)$$

式中 C_{S3} ——渗沟的造价,元;

L ——渗沟沟长, m。

(3) 渗管。采用的构造形式见图 2。

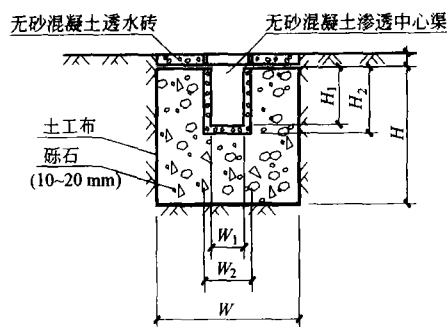


图 1 渗沟的设计断面

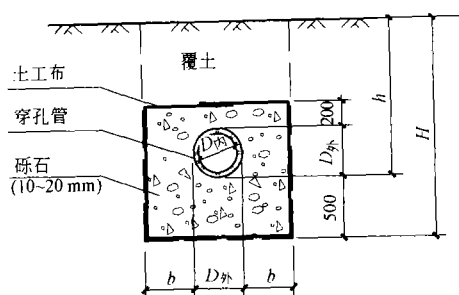


图2 渗管的典型设计断面

根据测算,渗管费用模型为:

$$C_{S4} = 4.269 2 D^{0.875 8} L \quad (R^2 = 0.991 9) \quad (9)$$

式中 C_{S4} ——渗管的造价,元;

L ——渗管管长,m;

D ——中心管内径,mm,取值范围 300 ~ 1 000 mm。

(4) 渗透构筑物适用条件。渗井、渗管、渗沟虽然同为渗透构筑物,也是有各自不同的适用条件。渗透管(沟)是在传统雨水排放的基础上,将雨水管或明渠改为渗透管(穿孔管)或渗透沟,周围回填砾石,雨水通过埋设于地下的多孔管材向四周土壤层渗透,渗透管(沟)的主要优点是占地面积少,便于在城区及生活小区设置。具体实施时是否采用渗管或渗沟,应参照施工地点的原有设计、地面坡度、与环境协调等因素而定。渗透井的主要优点是占地面积和所需地下空间小;便于集中控制管理,它可以与雨水管系、渗透池、渗透管(沟)等结合使用。

2.3.3 净化构筑物

雨水净化构筑物有多种类型,其中有些属于传统构筑物或设备,如压力滤池等,可以参考已有污水或中水处理的相关资料计算。本文仅给出近年使用较为普遍的土壤滤池的费用模型。

土壤滤池的典型设计见图3。滤池设计的主要参数为滤层厚及滤池面积,通过测算可知:

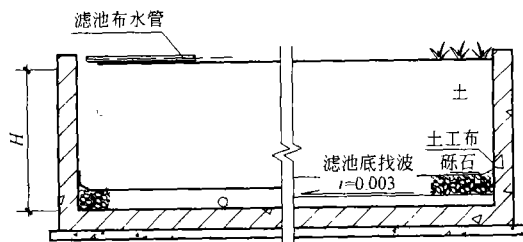


图3 土壤滤池典型设计

$$C_L = 1 957.8 H_L A_L^{0.768 9} \quad (R^2 = 0.991) \quad (10)$$

式中 C_L ——土壤滤池的造价,元;

H_L ——滤层厚度,m,取值范围为 1.2 ~ 1.6 m,

A_L ——滤池面积 m^2 ,取值范围为 1 ~ 2 500 m^2 。

当土壤渗透系数和滤池工作周期确定后,还可将费用模型换算为造价与滤层厚度和过滤水量之间的关系式。例如:若土壤渗透系数 $K = 1 \times 10^{-5}$ m/s,工作周期 T 为 24 h,(垂直土壤滤池水力坡降 J 取 1),则式(10)可以换算为:

$$C_L = 2 190.7 H_{LY} V_{LY}^{0.768 9} \quad (11)$$

式中 V_{LY} ——一次过滤水量, m^3 。

3 组合方案的选择

由于最终回用的目的决定了所要达到的水质标准不同,因此雨水利用的目的不同,所选用的处理构筑物相应的就会发生变化。小区内有大型的景观水体,则要满足《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2002)要求;若用于喷洒绿地,要满足《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002)要求;如果进行地下水回灌,则要满足相应的地下水回灌的水质标准。

在北京地区,当小区内无水体,雨水收集净化后主要用于喷洒道路、浇灌绿地时,近年常用的雨水工程工艺流程为:截污设施→储存设施→净化设施(压力滤池或人工土壤滤池等)→清水池(地下储存池)。面积较大的小区雨水利用设施较为复杂,而且常常建有大型的景观水体。此时需要注意,雨水工程的重点不仅是回用问题,还包括通过实施雨水净化保障水体水质的问题。部分雨水净化设施同样可以用于对中水的进一步净化,如土壤滤池等。由于具体情况多种多样,所以组合方案可以参照小区实际规划考虑雨水回用和水质保障。

4 实例分析

某学校主要占地指标如下:总用地面积 14.2 hm^2 ;其中,建筑占地 2.5 hm^2 ;道路占地 1.8 hm^2 ;运动场占地 3.3 hm^2 ;绿地面积 5.2 hm^2 ;未来发展用地 1.4 hm^2 (未来发展用地也按建筑占地计算)。统计结果如下:建筑占地 27.5%,道路、

运动场占地 35.9%,绿地占地 36.6%。综合径流系数为: $\Psi = 0.63$ 。

拟采用地下储存池(矩形)、土壤滤池、清水池进行雨水的收集、处理和回用。清水池的构造形式和结构与地下储存池相同,则可直接选用地下贮存池的费用模型。

根据上述组合方案,可以得出组合构筑物的费用模型。

$$\text{地下储存池: } C_J = 3\,338.9 V_J^{0.732\,6}$$

$$\text{清水池: } C_Q = 3\,338.9 V_Q^{0.732\,6}$$

土壤滤池(滤层厚度 H_L 为 1.6 m,渗透系数 $K = 1 \times 10^{-5}$ m/s,工作周期 T 为 24 h): $C_L = 1\,957.8 H_L A_L^{0.768\,9} = 2\,190.7 H_L V_{LY}^{0.768\,9} = 3\,505.1 \times V_{LY}^{0.768\,9}$ 。

学校平均日回用水量为 133.9 m^3 ,根据学校用水量情况和实际运行情况等,确定地下储存池出水两次处理利用完毕,则 $V_Q = 0.5 V_J$, $V_{LY} = 0.5 V_J$ 。

因此,此雨水利用工程的总造价为:

$$\begin{aligned} C_{\text{总}} &= 333\,890 V_J^{0.732\,6} + 3\,505.1 (0.5 V_J)^{0.768\,9} + \\ &\quad 3\,338.9 (0.5 V_J)^{0.732\,6} \\ &= 5\,348.3 V_J^{0.732\,6} + 2\,507.0 \times V_J^{0.768\,9} \end{aligned}$$

根据北京市多年平均降雨规律分析得出:初期雨水弃流折减系数按 0.87 计,季节折减系数按 0.85 计,寿命期内小区可利用雨水总径流量为 $889\,231 \text{ m}^3$;构筑物寿命期按 30 年计,得出的单位水量平均成本和边际成本曲线(成本中不含运行成本)交点中的最低点(见图 4),由于本例中总费用函数关系较为复杂,图 4 中平均成本和边际成本曲线出现多个交点,取交点中最低点,得出寿命期内最佳可收集水量为 $306\,066 \text{ m}^3$,相应的年均可收集利用雨水量为 $10\,202 \text{ m}^3$,通过对雨水储存池容积、多年平均日降雨量、满蓄次数等关系的分析可以计算出经济投资规模即储存池容积 V_J 为 200 m^3 ,此时雨水利用率为 $306\,066/889\,231 = 34.4\%$;附属设施(水泵、弃流、截污等)按 20% 计,按静态计算,单位雨水投资成本为 $1.9 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。由于本例中未充分利用原有的雨水管道排水系统及绿地,仅靠新建雨水构筑物达到雨水回用的目的,投资成本高,雨水利用

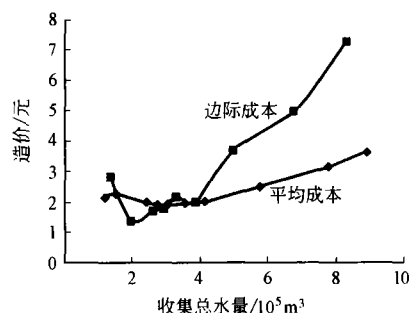


图 4 平均成本与边际成本曲线

率低(此处未考虑运行成本和其他收益)。

5 结语

通过对单个构筑物进行费用模拟,可以很方便对组合方案进行以费用为导向的设计优化,这种优化不但可以测算出小区进行雨水利用的最佳规模,而且对多方案决策也非常有用,同时也可以将此作为评价雨水利用工程的重要方法。由于雨水利用工程在小区内的应用才刚刚开始,所以缺乏雨水利用构筑物的费用数据,实际工程的情况是千变万化的,如果能够建立起相关的数据库,对于雨水利用的设计优化、费用预测将会更加准确。

由于运行成本和工程直接效益与产水量相关,因此,在实际计算时可以将运行成本和效益计算的公式一并纳入成为总费用—效益模型进行经济规模的测算。

参考文献

- 1 北京市规划委员会、北京市水利局. 关于加强建设工程用地内雨水资源利用的暂行规定. 2003 年 3 月
- 2 李俊奇,余苹,车伍,等. 城市雨水集蓄利用工程经济规模研究. 中国给水排水, 2005, 21(3): 49~52

©E-mail:jqli6711@vip.163.com

收稿日期:2004-11-27

* 本期责任编辑:张 彬 *