

广州深隧技术专栏

深层隧道排水系统规划设计中降雨点面关系研究

李文涛, 王广华, 周建华, 陈贻龙, 谭锦欣, 张小潭
(广州市市政工程设计研究总院, 广东 广州 510060)

摘要: 为给深层排水隧道等大口径排水系统规划和工程设计提供计算支撑,基于深隧服务范围内的七个雨量站的分钟降雨资料,采用垂直平分法(泰森多边形法),对降雨点面折减系数进行推求,并结合国内外相关研究成果对点面折减系数进行分析,得出了满足广州市中心城区深隧规划设计需要的降雨点面关系函数曲线,该研究思路及方法也可为其他城市降雨点面关系研究提供借鉴和参考。

关键词: 深层隧道; 计算降雨; 点面关系; 泰森多边形

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)02-0001-04

Study on Relationship between Point Rainfall and Areal Rainfall in Planning and Design of Deep Tunnel Drainage System

LI Wen-tao, WANG Guang-hua, ZHOU Jian-hua, CHEN Yi-long, TAN Jin-xin,
ZHANG Xiao-tan

(Guangzhou Municipal Engineering Design and Research Institute, Guangzhou 510060, China)

Abstract: Based on the minute rainfall data of seven rainfall stations within deep tunnel service scope, the areal reduction factor was deduced using the Thiessen polygon method and was analyzed combined with the relevant research results at home and abroad. The function curve of the relationship between point rainfall and areal rainfall which meets the need of the deep tunnel planning and design in the center of Guangzhou City was obtained. The research approach can provide reference for other cities to study the relationship between point rainfall and areal rainfall.

Key words: deep tunnel; calculated rainfall; relationship between point rainfall and areal rainfall; Thiessen polygon

为构建高标准排水防涝体系,提高城市排涝标准和削减雨天溢流污染,广州市于2012年开始编制《广州市中心城区深层隧道排水系统规划》,规划面积为318 km²,规划深隧一主七副和一座综合污水处理厂,深隧系统横跨东濠涌等七大排水系统。由于城市的热岛效应,城市降雨分布不均,在深隧规划

设计计算时需考虑降雨的空间分布不均匀性影响,工程上一般使用点面关系曲线对点雨量进行修正。为给深隧等大口径排水系统规划和设计提供计算支撑,开展了广州市中心城区降雨点面关系研究。

1 常用研究方法

降雨点面关系曲线(depth-area curve)简称“点

面关系”,是根据点雨量与面平均雨量的关系绘制成的曲线。工程上常应用暴雨点面关系曲线将设计点雨量换算成流域设计面雨量。常用的研究方法包括:算术平均法、垂直平分法、等雨量线法和 GIS 网格插值法等。

① 算术平均法。将流域内各雨量站同一时段的降雨量进行算术平均,适用于流域地形变化不大、雨量站分布较均匀的情况。

② 垂直平分法(泰森多边形法)^[1]。假设流域上各点的降雨量以其最近的雨量站为代表。可以采用一定方法推求流域内部分距各雨量站最近点的面积。点雨量通过泰森多边形转化为面雨量,与面积和雨量站点在面积中的分布有关。

③ 等雨量线法^[2]。根据流域及附近的雨量站观测的同一时段的雨量值,参考地形的影响,选择几场大暴雨资料,绘成等雨量线图,量算各等雨量线所围面积 F 及其相应的面平均雨量 X ,最后点绘成暴雨中心点面关系曲线。

④ GIS 网格插值法。利用 GIS 技术将区域网格化,由实测降雨数据插值求出网格点的雨量值,从而计算区域的面降雨量。这类方法主要包括逐步订

正格点法、距离平方倒数法、克里金(Kriging)法、趋势面法、多元二次回归法以及神经网络技术等,这类方法比传统方法精度高,但计算过程较为复杂。

2 国内外研究概况

刘金涛等在研究山区降水空间分布时,采用了克里金法、泰森法、距离平方反比法、线性回归法,并采用交叉验证法对各方法的插值精度进行对比分析,指出通过克里金方法和融合地形信息的人工神经网络模型插值得到的面雨量精度最高^[3]。

林炳干及裴晓芳等分别利用测雨雷达并结合地面降水资料对面雨量进行了研究^[4]。其中,林炳干等将变分校准法用于雷达—雨量计系统,联合探测降水,使降水误差在 9% 以下;裴晓芳等使用主特征提取方法对天气雷达定量估测降水的 $Z-I$ 关系法、最优插值法和变分校准法三种模式结果进行集成分析,获得降水分布的共同特征,参照雨量计资料估算出雷达覆盖范围内的降水强度分布。

美国丹佛市在排水手册中规定,在进行排水系统设计时,需根据流域面积大小及降雨历时不同,进行不同程度的点面降雨关系修正(见表 1),以保证规划设计的合理性。

表 1 丹佛市设计暴雨点面关系修正系数

Tab. 1 Correction coefficients of design rainfall point surface relationship in Denver City

| 降雨历时/ min | 2年、5年和10年一遇设计降雨面积/平方英里 | | | | 20年、50年、100年和500年一遇设计降雨面积/平方英里 | | | |
|--------------|------------------------|-------|-------|-------|--------------------------------|-------|-------|-------|
| | 10~20 | 20~30 | 30~50 | 50~75 | 10~20 | 20~30 | 30~50 | 50~75 |
| 5 | 1.00 | 1.00 | 1.10 | 1.10 | 1.00 | 1.00 | 1.05 | 1.10 |
| 10 | 1.00 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.00 | 1.00 | 1.05 | 1.10 |
| 15 | 1.00 | 1.00 | 1.05 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.05 | 1.10 |
| 20 | 0.90 | 0.81 | 0.74 | 0.62 | 1.00 | 1.00 | 1.05 | 1.00 |
| 25 | 0.90 | 0.81 | 0.74 | 0.62 | 0.90 | 0.81 | 0.74 | 0.60 |
| 30 | 0.90 | 0.81 | 0.74 | 0.62 | 0.90 | 0.81 | 0.74 | 0.60 |
| 35 | 1.00 | 1.00 | 1.05 | 1.00 | 0.90 | 0.81 | 0.74 | 0.70 |
| 40 | 1.00 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.00 | 1.00 | 1.05 | 1.00 |
| 45 | 1.00 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.00 | 1.00 | 1.05 | 1.10 |
| 50 | 1.00 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.00 | 1.00 | 1.05 | 1.10 |
| 55 | 1.00 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.00 | 1.00 | 1.05 | 1.10 |
| 60 | 1.00 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.00 | 1.00 | 1.05 | 1.10 |
| 65~120 | 1.00 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.00 | 1.00 | 1.05 | 1.10 |
| 125~180 | 1.00 | 1.15 | 1.20 | 1.40 | 1.00 | 1.15 | 1.20 | 1.40 |
| 185~360 | N/A | 1.15 | 1.20 | 1.20 | N/A | 1.15 | 1.20 | 1.20 |

注: 1平方英里 = 2.59 km²。

3 降雨点面关系计算

3.1 基础资料分析

广州市中心城区深层隧道排水系统横跨越秀

区、荔湾区、天河区、白云区、黄埔区等五区,规划服务面积为 318 km²。根据广东省气象局提供的广州市中心气象站 1961 年—2012 年共计 52 年的自记

雨量资料,7个自动站2007年—2012年共计6年的自记雨量资料基本数据翔实可靠,具备进行点面关系分析的前提条件。

3.2 点面关系计算

点面折减系数(α)定义为:

$$\alpha = \frac{H_A}{H_0} \quad (1)$$

式中 α ——点面折减系数

H_0 ——点雨量,mm

H_A ——面雨量,mm

3.2.1 面雨量

基于雨量站分布特点及降雨数据实际情况,采用垂直平分法(泰森多边形法)计算面雨量。主要计算步骤:深隧服务范围内有7个雨量站,在雨量站分布图上绘制各站点的连线,对各连线作垂直平分线,构成包围各站的多边形(即泰森多边形),计算各多边形的面积 A_n ,各站点多边形面积 A_n 之和等于深隧总服务面积 A 。 A_n/A 即为各站点代表面积的权重 P_n 。由各站的雨量 H_n 和权重 P_n 计算区域面平均雨量 H_A 。深隧服务范围内泰森多边形划分见图1。

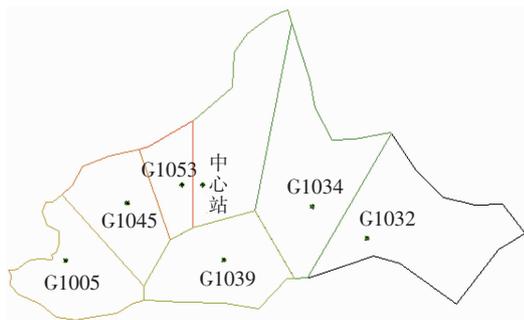


图1 深隧服务范围内泰森多边形划分

Fig.1 Thiessen polygons division within deep tunnel service scope

3.2.2 点雨量

按年最大值选样方法统计得出各雨量站的 H_1 、 H_3 、 H_6 、 H_{12} 及 H_{24} 降雨量,然后由大到小排列各站的点雨量系列,再将同频率雨量按算术平均法平均,得到计算区平均点雨量系列。点雨量系列统计以后,即可按单站雨量适线原则进行频率适线,得出该计算区域点雨量系列。

3.2.3 点面折减系数

① 从划分面积中的中心站块面积出发,寻找与其相邻的面积。即从面积编号为 A_1 的开始,与

A_1 直接相邻的面积有 A_2 、 A_3 和 A_6 。

② 以 A_1 为出发点的组合有 $[A_1, A_2]$ 、 $[A_1, A_3]$ 、 $[A_1, A_6]$ 、 $[A_1, A_2, A_3]$ 、 $[A_1, A_2, A_6]$ 、 $[A_1, A_3, A_6]$ 、 $[A_1, A_2, A_3, A_6]$ 。

③ 在第二步的结果上,分别以 A_2 、 A_3 、 A_6 为出发点,寻找与之相邻的面积,并且依此类推。重复步骤①、②,寻遍所有以 A_1 为出发点的面积组合。在寻找过程中,对有重复的组合进行删除。

④ 将所有得到的组合按面积进行分类,本研究中按每 50 km^2 划分面积,即 $(50 \sim 100)$ 、 $(100 \sim 150)$ 、 \dots 、 $(400 \sim 450)$ 。

⑤ 对各个分类里的面积组合按泰森法求解点面折减系数,对同一分类的各折减系数取平均值,求得最终点面折减系数。

4 结果分析及公式推求

4.1 结果分析

根据上述方法分别计算1、3、6、12和24h的点面折减系数(见图2)。由图2可以看出,同一历时, α 值随着面积的增加而减小;同一面积, α 值随着时间的增加而呈增加趋势。当面积 $>200 \text{ km}^2$ 以后, α 值变化幅度较小。

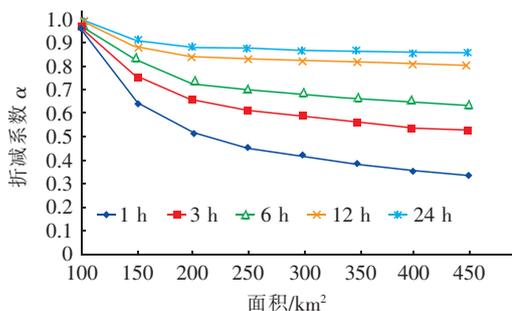


图2 降雨点面折减关系

Fig.2 The reduction relationship graph of rainfall point surface

4.2 公式推求

广州与香港降雨特征类似,参照香港的经验,深隧服务范围内降雨点面折减系数 α 的公式为:

$$\alpha = m / (A + n)^k \quad (2)$$

现已知 A 和 α (见图2),求参数 m 、 n 、 k 。

公式变形得:

$$\ln m = \ln \alpha + k \cdot \ln (A + n) \quad (3)$$

令 $x = \ln \alpha$ 、 $y = \ln (A + n)$ 、 $b = \ln m$,在给定 n 不同的值时可拟合得到线性方程:

$$y = -1/k \times x + b/k \quad (4)$$

根据拟合直线点的分布,可得最终拟合直线方程:

$$y = -3.023x + 4.551 \quad (5)$$

将式(5)中参数代入式(2),可得: $m = 4.506, n = 29.69, k = 0.331$ 。当 $\alpha = 1$ 时,算得 $A = 65 \text{ km}^2$ 。

由此可得,当设计汇水流域范围面积 $< 65 \text{ km}^2$ 时可以不进行点面关系修正。当设计汇水流域范围面积 $> 65 \text{ km}^2$ 时,可参考以下公式法进行修正:

$$\alpha = \frac{4.506}{(A + 29.69)^{0.331}} \quad (6)$$

式中 A ——流域面积, km^2

α ——暴雨点面折减系数

降雨点面折减系数见表2。

表2 降雨点面折减系数

Tab.2 The reduction factors of rainfall point surface

| 面积/ km^2 | 点面折减系数 |
|-------------------|--------|
| 65 | 1.000 |
| 75 | 0.966 |
| 100 | 0.900 |
| 150 | 0.808 |
| 200 | 0.745 |
| 250 | 0.698 |
| 300 | 0.661 |
| 350 | 0.631 |
| 400 | 0.606 |
| 450 | 0.584 |

4.3 实例校核

广园路分洪隧道是广州市中心城区规划深隧中的重要一条,通过深隧调蓄削峰、蓄满转输的方式,提高沿线过广园路、广深铁路渠箱的排水标准至10年一遇,有效减小下游河涌的排涝压力,近远期分阶段提高河涌排涝标准,最终实现50年一遇排涝标准。深隧服务范围横跨猎德涌、车陂涌、深涌(广园路以北)流域,总面积约 137 km^2 ,处于丘陵平原结合带,存在明显的降雨空间分布不均匀性。

以2016年5月10日6:45—9:45降雨计算为例(沙河涌上游雨量站,位于工程服务范围的西侧,3h降雨量为98mm,最大1h降雨量为78.5mm,重现期介于5年一遇和10年一遇之间),降雨点面折减系数取0.81。从5月10日汇景路渠箱降雨点面折减前后降雨过程中的流量过程线可知,洪峰流

量从 $6.25 \text{ m}^3/\text{s}$ 减至 $4.64 \text{ m}^3/\text{s}$,折减率约25.8%。因此,规划设计中合理的降雨点面折减系数的取用,对于准确计算合理的工程规模至关重要。

5 结论

基于深隧服务范围内的7个雨量站的分钟级降雨资料,采用垂直平分法(泰森多边形法),对点面折减系数进行推求,并结合国内外相关研究成果对深隧服务范围内降雨点面折减系数进行分析。由于自动雨量站的降雨资料有限(仅6年),在应用点面折减系数成果时,仍需要考虑和实际资料的对比。今后随着降雨资料的积累,还需要对点面关系函数进一步修正。通过实例验证,该成果基本满足深隧等大口径排水系统规划和工程设计的需要,也可为其他城市降雨点面关系研究提供借鉴和参考。

参考文献:

- [1] 马春青,陈向喜,江伟伟. 泰森多边形计算面雨量的简易方法[J]. 山东水利,2012,(5):70-71.
- [2] 张渭军,王文科,孔金玲,等. 等雨量线的自动绘制方法[J]. 水土保持通报,2005,(5):54-57.
- [3] 刘金涛,张佳宝. 山区降水空间分布的插值分析[J]. 灌溉排水学报,2006,(2):34-37.
- [4] 林炳干,张培昌,顾松山. 天气雷达测定区域降水量方法的改进与比较[J]. 南京气象学院学报,1997,(3):334-337.



作者简介:李文涛(1984-),男,安徽明光人,工学硕士,高级工程师,研究方向为海绵城市、排水防涝、深层排水隧道、水力模型等。

E-mail:823924548@qq.com

收稿日期:2016-11-12