

平原城市自排区排涝模数计算方法研究

于畅¹, 郝曼秋¹, 高成¹, 王友贞², 于凤存²

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 安徽省淮委水利科学研究所, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: 针对平原城市自排区的排涝特点,通过分析几种排涝计算方法的原理及计算结果,提出了适用于平原城市自排区排涝模数计算的一维非恒定流法。以安徽省宿州市主城区为例,分别采用平均排除法、割平头法和非恒定流法计算其排涝模数。结果表明:非恒定流法更适用于平原自排区排涝模数的计算,为城市排涝提供了依据。

关键词: 排涝模数; 非恒定流法; 城市排涝; 平原城市

中图分类号: P333.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)06-0184-03

Research on calculation method of drainage modulus in plain city

YU Chang¹, HAO Manqiu¹, GAO Cheng¹, WANG Youzhen², YU Fengcun²

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Anhui and Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Bengbu 233000, China)

Abstract: Aiming to the characteristics of drainage in the plain city, the paper put forward 1-D unsteady flow method by analyzing the principles and results of other methods. Taking the main city of Suzhou in Anhui province for example, the paper used three methods including the average elimination, cutting flat-head law and unsteady flow method to calculate the drainage modulus. The result indicated that the unsteady flow method is more applicable in calculation of drainage modules of plain city and can provide a basis for urban waterlogging.

Key words: drainage modulus; unsteady flow; urban waterlogging; plain city

洪涝灾害是威胁人类生命和财产安全的重要灾害之一。随着近代工程技术水平的提高以及对防洪安全问题的重视,由洪水造成的损失逐年减少,由城市内涝造成的损失却逐渐突显。城镇化进程的加剧引起水面率下降以及排水管网等基础设施的建设与城镇化进程不相匹配等是引发城市内涝的主要原因。此外,国内外的研究揭示,由于城市化过程中土地利用的变化,人类社会生产、生活的影响,城市上空的对流层会受到强烈扰动,与周围乡村相比,城市突发性暴雨具有显著增加的趋势,尤其是在发展迅速的大城市,短历时高强度的暴雨发生频次明显增多^[1-5]。因此,找到适用于城市地区排涝模数计算的方法十分必要。

目前,对于城镇地区排涝的研究主要集中在产汇流计算,研究结果已经比较成熟^[6]。而对于排涝模数计算的研究尚浅,尤其是针对平原城市自排区

的特殊性,需要进一步探讨能够准确计算平原城市自排区排涝系数的新方法。

1 平原城市特点

平原城市具有地势平坦,市内河流河道比降较小的特点。市内河流横断面更接近于梯形,在暴雨过程中水位上涨,水面率相应增大,现有的排涝模数计算方法中所采的水面率偏小。此外,在排涝过程中,河道的槽蓄作用明显,对排涝模数的计算产生影响。平均排除法和割平头法均未将以上两个重要影响因子考虑在内,因此,提出非稳定流法作为平原城市自排区的排涝模数计算方法。

2 计算方法

2.1 平均排除法

即将相应设计标准的暴雨总量在规定的排涝天

收稿日期:2014-06-14; 修回日期:2014-07-23

基金项目:国家自然科学基金青年项目(41301016); 国家博士后基金项目(2012M520988); 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金项目(IWHR-SKL-201210)

作者简介:于畅(1993-),女,辽宁阜新人,本科,研究方向:资源环境与城乡规划管理。

通讯作者:高成(1983-),男,安徽宿州人,博士后,副教授,主要从事城市防洪排涝方面的研究。

数内均匀排除。在不超过作物允许耐淹历时的条件下,可以允许地表径流在短时间内漫出沟槽。这种方法适用于给水面积较小的平原区的圩区排涝设计^[7]。

计算自流排涝模数,用公式(1)和(2)计算。

$$Q = (R - k\Delta h)F/n$$
 (1)

$$M = Q/F$$
 (2)

式中: Q 为流量, m^3/s ; R 为最大的暴雨相应的净雨深, mm ; k 为水面率; Δh 为排涝区内河道滞蓄深度, m ; F 为流域面积, km^2 ; n 为计算时长, h ; M 为排涝模数, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 。

2.2 割平头法

在城市排涝计算中,排涝模数计算公式为:

$$M = \sum_{i=1}^n R_i - k\Delta h/(3.6\ n)$$
 (3)

式中: R_i 为区内第 i 时段河道入流量,此处仅以管道排水能力上限为控制,计算得到的河道净雨入流过程, mm ; M 为排涝区排涝模数, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$; k 为水面率; Δh 为排涝区内河道预降水深, m ; $\sum_{i=1}^n R_i$ 为 n 时段内的河道入流总量,亦为最大 $n\ \text{h}$ 的河道入流量, mm 。

可采用表解法和图解法处理公式(3)中排涝模数 M 与 n 的非线性关系。当 $n = 1, 2, 3, \dots, 24$ 时,可得到一系列 M_n 值;对排涝计算而言,排涝应将涝水尽快排除出去,故 $M = \max(M_n)$,以满足不同时段的排涝要求^[8]。

2.3 非恒定流法

采用圣维南方程组对明渠一维非恒定流进行计算。

$$B_T \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$
 (4)

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{|Q|Q}{K^2} = 0$$
 (5)

式中: B_T 为当量河宽, m ; Z 为断面水位, m ; Q 为流量, m^3/s ; q 为河道旁侧入流, m^2/s ; K 为流量模数, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 。

辅之以节点方程(6)和水闸出流方程(7)、(8),采用 Preissmann 隐式差分格式进行离散,通过追赶迭代计算得到各河道断面的水位和流量。

节点可以具有调蓄功能,其连续方程形式为:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\sum Q_i}{S_i}$$
 (6)

式中: S_i 为 t 时刻节点水面积, km^2 ; H 为节点水头, m ; $\sum Q_i$ 为节点流量和, m^3/s 。

自由出流:

$$Q = mB \sqrt{2g} (Z_u - Z_d)^{3/2}$$
 (7)

淹没出流:

$$Q = \varphi B \sqrt{2g} H_s \sqrt{Z_u - Z_d}$$
 (8)

式中: m 为自由出流系数; φ 为淹没出流系数; B 为闸孔宽度, m ; H_s 为闸上水深, m ; Z_u 为闸上游水位, m ; Z_d 为闸下游水位, m 。

该方法的边界条件有 3 种,其一为净雨输入边界,即河网入流边界,绿地等河道两侧面积上非通过管道汇流,以坡面汇流后的过程直接进入河道,可考虑作为均匀入流。其二为流量边界,即连接各节点外河的上边界入流条件,以及进入河网的管网汇流过程。其三为下游水位边界。

3 应用实例

3.1 研究区概况

宿州市位于安徽省淮北平原东北部,地势平坦,属河流冲积地貌,由西北向东南缓倾,水资源丰富^[9]。

城区及周边地区分布的主要河流有东西向的新汴河、沱河、三八河、小黄沟、北沱河等,南北向的主要有新北沱河、运粮河、大陈沟、铁路运河等,另有环城河环绕市中心老城区。本次选择的研究区为宿州市主城区沱河以南、京沪铁路以西的地区,研究区涝水主要通过邱沟、宿蒙河、西牛沟、大陈沟和运粮河南排浍河。

3.2 计算结果

3.2.1 平均排除法结果 根据净雨时程分配的计算成果,20 年一遇最大 24 h 净雨量为 152.7 mm,最大 1 h 净雨量 25.1 mm,最大 6 h 净雨量 90.2 mm。宿州市城区水面率经计算为 4%,沟河滞蓄深度取 0.7 m,按最大 6 h 净雨量 6 h 平均排除,经计算排涝模数为 $2.88\ \text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,相关参数见表 1。

表 1 分时段排涝模数计算成果

最大 6 h 净雨/mm	水面率/%	滞蓄 深度/m	滞蓄水量/ 万 m^3	需排出水量/ 万 m^3	排涝模数/ $[\text{m}^3 \cdot (\text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2})]$
90.2	4	0.7	198.80	441.62	2.88

3.2.2 割平头法结果 采用表解法处理公式(3)中排涝模数 M 与 n 的非线性关系。计算该城区 $k = 4\%$ 、 $\Delta h = 0.7\text{ m}$ 时的排涝模数,给 n 赋一系列值($n = 1, 2, 3, \dots, 24$),求得相应的 M_n , 见表 2。

根据割平头法,由表 2 知 $n = 9\text{ h}$ 时, $\max(M_n) = 3.03\text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,此即所求排涝模数 M 。

3.2.3 非恒定流法结果 由宿州市主城区汇流计算结果可知,主城区涝水主要通过邱沟、宿蒙河、西牛沟、大陈沟和运粮河南排洩河。将简化后河网的各项参数带入公式(4)、(5),辅之以节点方程(6)和水闸出流方程(7)、(8),采用 Preissmann 隐式差分格式进行离散,通过追赶迭代计算得到各河道断面的水位和流量。得出此 5 条河道外排涝水的最大排涝流量为 $201.52\text{ m}^3/\text{s}$ 。该研究区域面积为 71 km^2 ,根据排涝模数计算公式:

$$M = Q/A$$

(7)

据此可计算得到城区排涝模数为 $2.84\text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 。

表 2 宿州市主城区排涝模数表解法计算

时段 n/h	河道入流/ mm	$\sum_{i=1}^n R_i/mm$	排涝模数 $M_n/[\text{m}^3 \cdot (\text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2})]$
1	0.3	25.1	-0.81
2	1.1	37.8	1.36
3	0.1	51	2.13
4	0	61.2	2.31
5	0	77	2.72
6	0	90.2	2.88
7	0	100.4	2.87
8	0	113.6	2.97
9	0.2	126.3	3.03
10	13.2	135.6	2.99
11	23.6	137.8	2.77
12	14.2	141.6	2.63
13	7.1	145.4	2.51
14	7.0	149.2	2.40
15	25.1	151.0	2.28
16	9.7	151.2	2.14
17	13.7	151.2	2.01
18	12.7	151.2	1.90
19	9.3	151.2	1.80
20	2.2	151.2	1.71
21	3.8	151.2	1.63
22	3.8	151.3	1.56
23	3.8	152.4	1.50
24	1.8	152.7	1.44

3.3 结果与分析

3.3.1 非恒定流法结果与平均排除法结果比较分析 根据平均排除法,宿州市最大 6 h 净雨量 6 h 平均排除时的排涝模数为 $2.88\text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,非恒定流法结果小于其成果,偏小 1.4%。究其原因,分析如下。

(1)不考虑闸门影响。本次研究中闸门调度方式不知,均按照不设闸处理,排涝河道通畅,造成涝水及时外排,排涝模数较小。

(2)河道槽蓄作用。河道除了具有蓄水调蓄外,还有一定的槽蓄作用。在涝水外排过程中,槽蓄作用明显。平均排除法忽略了河槽调蓄作用,即以河道入流过程同时作为河网出流过程计算,直接导致了排涝模数计算值过大。如果考虑河槽调蓄作用,在河槽调蓄作用之后,河网出流过程洪峰坦化,排涝模数应比其结果偏小。

(3)水面率较大。本次研究中采用常水位时的水面率为 4%,但在实际情况下,由于河道均为梯形断面,随着水位上涨,河道水面率随之增大,其调蓄作用也增大。而在平均排除法中,采用的水面率为定值,即看作为矩形河道。

3.3.2 非恒定流法结果与割平头法结果比较分析

根据表解法的计算结果,宿州市主城区排涝模数为 $3.03\text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,而非恒定流法结果为 $2.84\text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,较之降低 6.3%。其原因同样是因为河道槽蓄作用以及河道梯形断面随着水位升高后的水面率变化影响。

综上,非恒定流法将平原城市自排区的水面率变化以及河道槽蓄作用等因素均考虑在内,计算结果更接近实际。

4 结 语

通过本文的分析研究,得出城镇化进程的加剧使城市地区水面率迅速减小,水面率直接影响排涝模数的计算。此外,排涝模数与河道的槽蓄作用有关。平均排除法和割平头法未充分考虑这两个影响因子,导致计算结果偏大。非恒定流法充分考虑了暴雨过程中水面率的变化以及河道的调蓄作用,更符合平原城市自排区的排涝模式,因此,该方法更适用于平原城市自排区排涝模数的计算。

参考文献:

[1] IPCC. Climate Change 2007: the physical science basis, summary for policymakers[C]//. Contribution of Working

4 结 语

通过东庄水利枢纽初设方案的整体水工模型试验和表孔宽尾墩三维水流的数值模拟,得出表孔的泄流能力、水面线、水舌挑距和纵向扩散长度、以及水垫塘的时均冲击动压,试验值和计算值基本吻合,结果表明:

(1) 2[#]表孔受宽尾墩的影响,在高水位时泄流能力试验值低于设计值;而 1[#]、3[#]表孔在高水位时泄流能力试验值依然大于设计值,能够满足表孔的泄流能力的设计要求,3 个表孔泄流能力结果对比表明 2[#]表孔出口俯角偏小,高水位时堰的过流能力已经受到一定的影响。

(2) 试验和计算工况内宽尾墩流道水面线在始折点前段与平尾墩降水曲线不同,在始折点至出口段水深比平尾墩水位有所增加,水流垂向扩散效果不太明显,2[#]表孔在校核水位时出口水深超过边墙高度。

(3) 表孔设置宽尾墩后,随着倾角 α 的增大,出口高程减小,水舌外缘挑距变化不大,但内缘挑距减小,水流纵向长度增加水舌内缘挑距有所减小。与平尾墩相比,水舌内缘挑距减小,外缘挑距增大,纵向长度增大,但增加的并不太多,水舌的横向扩散依然较大。

(4) $\Delta P_{\max}$ 在校核水位工况下最大,初设方案宽尾墩体型与深孔联合泄洪时水垫塘最大时均冲击动压分别为 $4.3 \times 9.81 \text{ kPa}$,符合 $\Delta P_{\max} \leq 15 \times 9.81 \text{ kPa}$ 的防护标准。

(5) 表孔水舌未能在纵向充分拉开,表深孔水舌在空中发生不完全碰撞,表明初设方案表孔宽尾

墩体型几何参数不太合理(收缩比偏大、墩尾折角偏小),无法获得较好的水流纵向扩散以及为深孔水舌出流让出通道并获得表深孔无碰撞消能的效果。

参考文献:

- [1] 童显武,李桂芬等. 高水头泄水建筑物收缩式消能工[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [2] 苏 玮. 二滩拱坝表孔、中孔初期运行情况及评价[J]. 水电站设计,2001,17(3):18-19.
- [3] 林秉南,龚振瀛,刘树坤. 收缩式消能工和宽尾墩[A]. 林秉南论文选集[C]. 北京:中国水利水电出版社,2001,1.
- [4] 刘沛清,许唯临. 高拱坝挑跌流非碰撞水垫塘消能形式研究[J]. 水利学报,2010,41(7):841-848.
- [5] 李福田. 宽尾墩技术在高拱坝消能中的应用[D]. 北京:北京航空航天大学,2005.
- [6] 朱新元. 高拱坝表孔宽尾墩-深孔窄缝挑坎联合消能试验研究[D]. 成都:四川大学,2004.
- [7] 李乃稳,许唯临,周茂林,等. 高拱坝坝身表孔和深孔水流无碰撞泄洪消能试验研究[J]. 水利学报,2008,39(8):927-933.
- [8] 倪汉根. 高效消能工[M]. 大连:大连理工大学出版社,2000.
- [9] 李福田,刘沛清,许唯临,等. 高拱坝表孔宽尾墩对泄洪能力影响的试验研究[J]. 水利学报,2003,34(11):43-47.
- [10] 李乃稳,许唯临,田 忠,等. 高拱坝表孔宽尾墩体型优化试验研究[J]. 水利发电学报,2009,28(3):132-138.
- [11] 杨 敏,崔广涛. 水垫塘底板稳定性控制指标的探讨[J]. 水利学报,2003,34(8):6-10.

(上接第 186 页)

Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press,2007.

- [2] Ntelekos A A, Smith J A, Krajewski W F. Climatological analyses of thunderstorms and flash floods in the Baltimore metropolitan region [J]. Journal of Hydrometeorology, 2007,8(1):88-101.
- [3] 张 丽,宋士强,张艳红. 平原地区城市产汇流计算方法的改进及验证[J]. 人民黄河,2008,30(2):33-34+54.
- [4] 闫江鸿,赵元忠,郑 勇,等. 黄土高原城市产流与降雨关系的研究[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(2):79-82.
- [5] 柏绍光,黄 英,方绍东,等. 昆明城市河道产汇流特性分

析[J]. 水资源研究,2007,28(2):4-6.

- [6] Lhomme J, Bourrier C, Perrin J L. Applying a GIS-based geomorphological routing model in urban catchments [J]. Journal of Hydrology, 2004,299(3-4):203-216.
- [7] 周建康,朱春龙,罗国平. 平原圩区设计排涝流量与水面率的关系研究[J]. 灌溉排水学报,2004,23(4):64-66+70.
- [8] 高 成,刘 俊,崔 韩,等. 城镇圩区排涝模数计算方法及其与河道调蓄库容关系研究[J]. 灾害学,2008,23(3):7-9.
- [9] 范 瑱,高 成,于凤存,等. 基于蓄水曲线的平原城市排涝模数计算方法及影响因素研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(2):102-106.