

文章编号:1001-4179(2015)18-0015-05

城市市政排水与区域排涝水动力耦合模型研究

张 晓 波, 盛 海 峰

(浙江省水利水电勘测设计院, 浙江 杭州 310002)

摘要:针对有些城市(特别是沿海地区城市)遇到暴雨容易出现内涝的问题,经分析,主要是没有将城市排涝与城市的自然地理位置及其周边江河洪水的特性结合考虑,城市排水设计方法上的滞后性是城市内涝的原因之一。为解决这一问题,应用圣维南方程组,对明渠、雨水管道及田面汇流等多个排水系统的关键组成部分进行表达,通过彼此之间的联接关系,建立了城市市政排水与区域排涝的水动力耦合模型。实例应用表明,该模型能客观反映承泄区河道水位顶托及长历时暴雨对城市排水的影响,可广泛应用于城市排水的规划设计工作中。

关 键 词:市政排水; 区域排涝; 水动力耦合模型; 城市内涝

中图法分类号: TV122

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.18.004

1 问题的提出

城市内涝是指由于强降水或连续性降水超过城市排水能力致使城市内产生积水灾害的现象。近年来,北京、南京、武汉、郑州、南昌、杭州等城市频繁发生内涝,交通中断、出行不便、财产损失,各种问题逐步显现。据住房和城乡建设部2010年对351个城市进行的专项调研结果显示,2008~2010年,全国62%的城市发生过城市内涝,内涝灾害超过3次以上的城市有137个。发生内涝的城市中,最大积水深度超过50 cm的占74.6%,积水深度超过15 cm(可能淹没小轿车排气管的水深)的多达90%,发生内涝的城市中积水时间超过半小时的城市占到78.9%,其中57个城市的最长积水时间超过12 h^[1]。

关于城市内涝,已有众多学者提出城市化进程加快导致下渗地面、调蓄空间减少,市政雨水管道设计标准偏低等等原因,但均为定性而论,缺乏定量的分析数据支撑。长期以来,由于管理体制上的原因,城建部门负责城市建成区的排水规划,水利部门负责区域的防洪排涝规划,人为地将市政排水与区域排涝截然分开,相应地造成城市排水与区域排涝在设计标准、方法、规

划措施等方面不能衔接,往往造成城市排水机制上的混乱。事实上,城市排涝应该根据城市的自然地理位置以及江河洪水的特性,在流域骨干防洪排涝工程体系的框架下,进行城市市政排水与区域排涝的联合计算。尤其是位于沿海地区的城市市政排水往往受排水区域外围骨干河道水位的影响,而骨干河道排水又受到河口外江洪(潮)水的制约,城区内涝与外江洪(潮)水位的遭遇情况对城市排涝能力产生较大影响。因此有必要建立城市市政排水与区域排涝水动力耦合模型,为城市排涝提供规划设计的有力工具。

2 基本思路

2.1 城市排水系统

在城市排水系统(见图1)中,城市地面被建筑物和道路分割为一个个集水区或汇水区。集水区是城市流域降雨产汇流的基本单元。每个集水区至少有1个受水口。受水口一般位于集水区地面高程的最低处,它既是集水区降雨产流量的汇集点,又同时是出口处。受水口接受的由集水区形成的降雨径流经竖井流入地下管网。根据受水口位置高程,集水区形成的降雨径流可以进入其中自排,也可以通过水泵机排。一个城

收稿日期:2015-07-13

基金项目:水利部公益性行业科研专项经费项目(201101055)“钱塘江河口地区城市排涝关键技术及应用研究”

作者简介:张晓波,男,高级工程师,主要从事水利水电规划设计工作。E-mail:xiaobohu@126.com

市常常布设多个地下管网,这些相对独立的地下管网通过串、并联构成了城市整体或局部的地下管网。一个个地下管网又以多个出水口与城市的排洪河网相连接。按照地下管网出口高程与河网水位的关系,城市降雨径流进入排洪河网也有自排和通过水泵机排两种形式。这样就构成了一个对城市经济社会正常有序运行起重要保障作用的城市排水系统。由此可见,城市的排水系统一般由集水区、受水口、地下管网、排洪河网、泵站等组成^[2]。

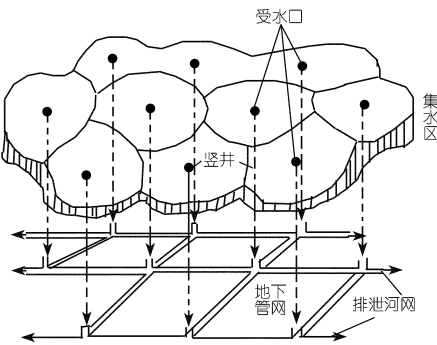


图 1 城市排水系统示意

根据《室外排水设计规范》^[3] (GB50014 - 2006) 和《给排水设计手册(第五册)——城镇排水》^[4] 的市政排水设计方法:一般是先确定雨水管渠系统的设计流向和划定雨水管渠系统的汇水面积,然后根据选定设计参数(设计降雨的重现期、暴雨强度公式、地面集水时间、径流系数等)进行水力计算,确定雨水管渠的设计断面、水力坡度、设计高程等详细数据。工程实践中,经常假定管口无压自由出流,水力坡度等同于管道埋设的物理坡度。

实际上,在我国沿海平原地区,由于地势低平,城市雨水管出口低于排洪河道水位是一种常态^[5] (见图 2)。如图 2 所示,淹没出流下的雨水管水力坡降实际远小于管道物理坡降,这实际造成了雨水管道的实际排水能力远低于设计标准。在一场长历时的暴雨中,河道水位的影响作用更为突出。在我国沿海平原地区,由于地势较低,且受外海、外江影响,要求排洪河道水位远低于雨水管出口高程显然是不现实的;在此情形下,迫切需建立市政管道与区域河道的水动力耦合模型,以此指导城市排水系统的规划设计。

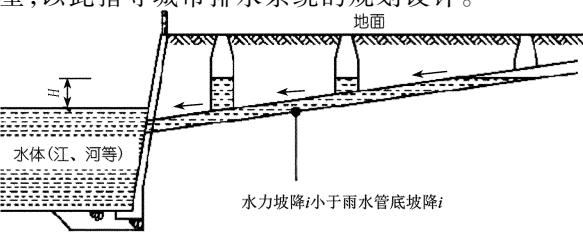


图 2 淹没状态下的雨水管出流

2.2 区域排涝系统

在区域排涝系统(见图 3)中,洪涝水量包括城建成区管网排水、山区洪水(集中入流)、广大的农田涝水(通过田间渠道、小河道排出)、局部低洼圩区电排涝水等组成,区域排涝设施包括排洪河道、排洪水闸、泵站等。因此,城市市政排水系统只是区域排涝系统中的一小部分。

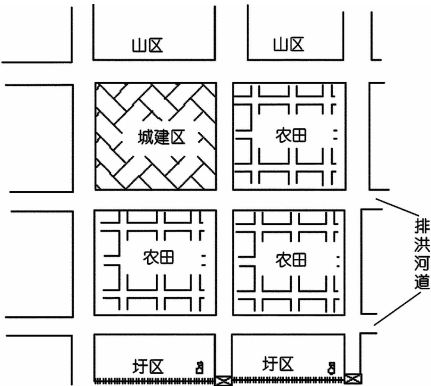


图 3 区域排涝系统

在浙江省沿海平原中,已广泛应用平原河网的非恒定流理论解决防洪排涝的规划设计问题。其中,对于“高水高排”的山区洪水,采用集中入流方式;农田排水,考虑田间径流及田面调蓄的“概化单元”方式;低洼圩区,采用电排泵站方式;对于城市建成区,采用径流系数法折算,全部汇入河道。这种按照不同产流地类开发的河网非恒定流模型已在浙江省杭嘉湖平原、萧绍宁平原、温黄平原和温台沿海平原的设计实践中得以检验。应当说,对于区域排涝而言,城建区考虑其汇流速度较快,采用径流系数法折算的方法全部汇入河道是合适的。但区域排涝系统关注骨干排涝河道及外排能力,不能反映由骨干河道水位涨落影响的城建区内部排水状况。

2.3 耦合原理

通过对城市排水系统和区域排涝系统的上述分析,构建城市排水模型的基本思路为:① 建立或者利用已有的大范围区域排涝模型,计算求得城建区外排边界水位过程;② 对小范围城建区内部的雨水管道、雨水井、城区排水河道、闸、泵、局部农田等,建立排水耦合模型,采用步骤①的边界水位。按照这个工作步骤,城市排水模型可完全反映区域排涝河道的水位影响。

3 建立排水耦合模型

城区涝水一般通过雨水管道或沟渠排入城区河道,且城区范围内往往有一定比例的农田或者可调蓄低地存在,其产生涝水也汇入排涝河道。市政排水和

区域排涝水动力耦合模型的关键在于:利用排涝河道是雨水管道和田间径流的承泄区这一原理,将河道水位与管道水头、概化田面水位联系起来。

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \alpha Q u}{\partial x} + gA \frac{Q|Q|}{K^2} + gA \frac{\partial Z}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)为圣维南方程组的表达形式。其中, Z 、 Q 代表河段断面的水位、流量; A 为当前水位下过水面积; K 为断面的流量模数。

无论是明渠河道还是雨水管道,其水流运动原理均为非恒定流,遵循圣维南方程组的表达方式,只是水力要素表达形式不同。为简化计算,明渠河道、雨水管道和田面径流应用圣维南方程组时分别以 L 、 X 、 Y 标示。

3.1 明渠河道

3.1.1 水力要素

对于实测河道断面,可通过简单编程,判别河床深泓点与当前水位的高程大小,从而确定过水断面的湿周、过水面积等(见图4)。

$$\begin{cases} B_L = B_{L1} + B_{L2} + \dots + B_{Ln} \\ A_L = A_{L1} + A_{L2} + \dots + A_{Ln} \\ L_L = L_{L1} + L_{L2} + \dots + L_{Ln} \\ R_L = R_{L1} + R_{L2} + \dots + R_{Ln} \end{cases} \quad (2)$$

式中, A_L 为河道过水面积; B_L 为水面宽; L_L 为湿周; R_L 为水力半径。

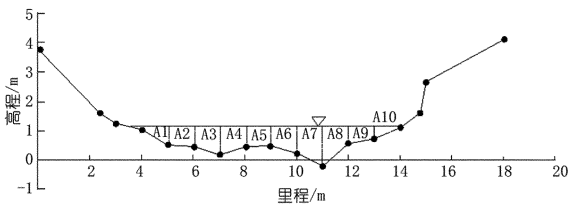


图4 河道断面示意

3.1.2 源汇项

对某一明渠河段,源汇项为

$$q_L = q_X + q_Y + q_Z \quad (3)$$

式中, q_L 为汇入河段的净流量; q_X 为雨水管汇入(或倒灌)河道流量; q_Y 为农田产流通过小河道、田间径流汇入明渠河段的流量; q_Z 代表已知的直接汇入河段的流量(如山区集中洪水、或泵排流量等)。

3.2 雨水管道

3.2.1 无压状态下的水力要素

无压状态下,雨水管道内的水面为自由水面,其运

动规律同明渠非恒定流,只不过由于其圆形的过水断面(见图5),其水力要素可直接计算^[6]如下。

$$\begin{cases} Z_X = Z_d + D_X [1 - \cos(\varphi/2)]/2 \\ B_X = D_X \sin(\varphi/2) \\ A_X = D_X^2 (\varphi - \sin\varphi)/8 \\ R_X = D_X (1 - \sin\varphi/\varphi)/4 \end{cases} \quad (4)$$

式中, Z_X 为管中水位; Z_d 为管底高程; D_X 为管径; B_X 为水面宽; A_X 为管道过水面积; R_X 为水力半径。

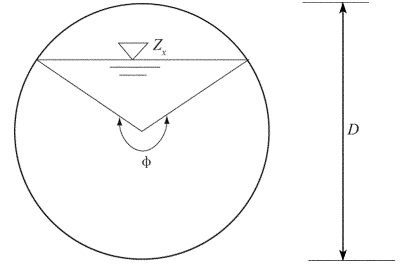


图5 管道断面示意

3.2.2 有压状态下的水力要素

排水管网在管道充满成为有压流状态时,管壁顶部要承受水流压力,在雨水井位置溢流至井内或溢出至地面。雨水管道在有压流时,为仍保持明渠圣维南方程的表达形式,仅将水力要素加以形式改变,该模型引进了“明满交替流”的窄缝方法^[7](见图6)。即假设在雨水管顶部开一条很窄的缝隙,缝隙顶部无限高,该缝隙既不增加管道的过水面积也不增加水力半径,仅仅是通过改变管道水面宽 B 为窄缝宽度,以窄缝中水面高度反映测压管水头。

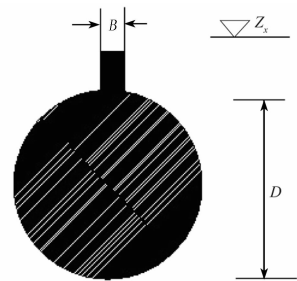


图6 管道窄缝原理

当计算的 $Z_X > (Z_d + D_X)$ 时,说明排水管出现压力流,相应水力要素可表示为

$$\begin{cases} B_X = B_0 \\ A_X = \pi D_X^2/4 \\ R_X = D_X/4 \end{cases} \quad (5)$$

式中, B_0 为窄缝宽度,根据杨开林《明渠结合有压管调水系统的水力瞬变计算》^[8]分析,在 $B_0 < 0.05 D_X$ 范围内取值时,对模拟结果影响不大。管渠排水耦合模型应记录雨水井的地面高程 Z_0 ,当 $Z_X > Z_0$ (Z_0 为地面高程)时,表明在雨水井、检查井等开口处有溢流产

生。

3.2.3 源汇项

雨水管道的源汇项包括汇入雨水井的城市净雨、从管段末端汇到河道的出流量。

$$q_x = \varphi PF - \mu A_x \sqrt{2g(Z_x - Z_L)} \quad (6)$$

式中, φPF 为汇入雨水管的净雨流量, 其中 φ 为径流系数, P 为降雨量, F 为雨水井汇水面积; $\mu A_x \sqrt{2g(Z_x - Z_L)}$ 为管道末端排入河道的出流流量, 其中 μ 为管道出流系数, A_x 为管道出流面积, Z_x 为雨水管道上游水头, Z_L 为雨水管道下游水头(即承泄区河道水位)。可见雨水管道排水能力与河道水位密切相关, 河道水位高, 即降低雨水管道出流能力。

3.3 田面汇流

对区域河道排水而言, 河道汇集的涝水不仅仅是城市雨水管道的出流, 还有未经地面硬化的农田涝水, 由田间径流直接汇入, 需建立区域汇流模型反映实际情况。以一场洪水过程分析: 洪水初期河道水位低, 汇水区块内洪水由田间径流汇入河道, 洪水沿河道传播, 河道内水流归槽; 中期, 当洪水来量大于河道槽蓄量与排泄量之和时, 洪水会漫过河道堤岸侵入汇水区块内部; 洪峰过后, 河道水位回降, 汇水区块内的滞蓄水量回归河道^[9]。

汇水区块具有两个特性, 即区域内小河道及水面既具有调蓄滞洪作用, 又具有输水汇流的作用。因此, 概化单元可以抽象为概化湖泊和概化输水河道的综合(见图 7)。概化湖泊记录汇水区块的面积、水面率等信息, 反映汇水区块的调蓄作用; 概化输水河道反映汇水区块与骨干河段之间的连接河道, 体现输水能力^[10]。概化单元应用圣维南方程组简化如下。

$$\begin{cases} \frac{\partial V_Y}{\partial t} = \varphi PS_Y + q_Y \\ \frac{\partial Z_{L,Y}}{\partial L_{L,Y}} = -S_f = -\frac{q_Y |q_Y|}{A_Y^2 C_Y^2 R_Y} \end{cases} \quad (7)$$

式中, V_Y 为概化单元容积; $Z_{L,Y}$ 为概化单元中心水位,

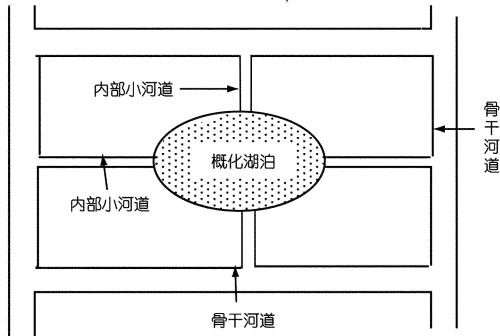


图 7 概化单位示意

存在 $V_Y \sim Z_Y$ 关系; P 为降雨量; φ 为径流系数; S_Y 为概化单元面积; q_Y 为概化单元与骨干河段的交换水量; $L_{L,Y}$ 为概化单元中心到骨干河段的距离; A_Y 、 C_Y 、 R_Y 为概化单元内具有输水功能的概化小河道的水力要素。同城建区管网排水一样, 田面概化单元的排水流量也以集中入流的方式汇入河道, 其流量大小同样受河道水位的影响。

3.4 建立耦合模型

前面已述, 明渠河道、雨水管道均以圣维南方程组式(1)表达, 田面径流以简化的圣维南方程组式(7)表达。明渠河道与雨水管出流、田面径流以式(3)、式(6)和式(7)联立表示。可见, 联立方程将明渠河道、雨水管道出水口以及概化田面(概湖)的水位、流量联系在一起, 反映了河道水位、管道出流、田面调蓄和汇流之间的相互影响。圣维南方程组采用离散后的四点隐式差分格式的三级解法, 不再赘述。

4 实例应用

4.1 研究区域概况

绍兴滨海新城是浙江省 14 个产业集聚区之一, 其中滨海新城位于上虞市境内的部分称为江滨区。江滨区位于虞北平原, 虞北平原位于上虞市北部, 西临曹娥江, 北临杭州湾, 南接丰惠区, 东接余姚, 面积达 480 km²。虞北平原河网根据灌溉河网水级分为上河区和中河区, 其中中河区只有 34 km², 与余姚相接, 其余均属于上河区, 面积为 446 km²。虞北平原骨干排水河道包括虞甬运河、百崧河、七六丘中心河、崧沥河、盖谢河、东进新闸排水河、盖沥河, 以及向北排水干河沥北河、崧北河、盖北河等。

上河区涝水除西大堤 1 号闸排向曹娥江外, 2 号闸、东进闸(4 号闸)均排向杭州湾; 中河区涝水通过与余姚交界的长坝闸、牟山闸等闸堰排往姚江水系。

4.2 模型概化

该研究区范围 35.5 km², 应当建立管网与排水河道耦合的水力模型(位置见图 8)。鉴于规划区处于虞北平原, 虞北平原范围达 480 km², 统一建立雨水管网和河道的水力模型显然不现实。故本次建立两套水力模型: ① 虞北平原的河道水力模型, 称为“河网模型”, 规划区产流直接排入河道反映其水量; ② 规划区管网模型, 即建立规划区管网与河道耦合的水力模型, 其河道边界从“河网模型”提取。

区域概化河网模型中概化骨干排水河道 108 条, 计算河道断面 199 个, 河汉 45 个, 闸汉 15 个, 边界 15 个。排水河道之间的调蓄水域(包括毛细河道、湖泊、

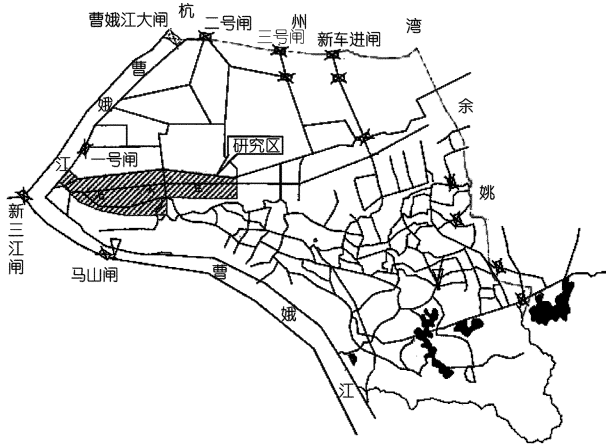


图 8 研究区位置示意

田面) 概化为湖泊, 共计 46 个, 概化单元和排水河道之间根据实际情况, 采用河道或排水闸、堰形式连接; 概化湖泊与湖泊之间也根据实际情况, 采用河道或堰的形式连接。研究区概化管网模型共概化 3 242 个雨水节点、2 804 段雨水管线, 3 191 个子集水区、约 22 条河道及支流。

4.3 算例分析

研究区雨水管设计排涝标准为 5 a 一遇。市政排水部门对该区域雨水管道的设计依旧沿用老的计算方法, 不考虑承泄区水位的影响, 以管底坡降代替水力坡降。本次算例建立管渠排水耦合模型, 以不同的降水遭遇情况分析排水管道设计的局限性。

方案 1: 雨水管承泄最大 1 h 雨量 ($P = 20\%$), 假设承泄区河道水位维持常水位 2.8 m。

方案 2: 雨水管承泄最大 1 h 雨量 ($P = 20\%$), 假设承泄区河道水位上涨至于 3.3 m。

方案 3: 雨水管承泄最大 24 h 雨量 ($P = 5\%$), 但最大 1 h 雨量设计频率 $P = 20\%$ 。

选取研究区域中某一管段的沿程水面线, 见图 9 ~ 11。由图 9 看出, 在承泄区河道水位为 2.8 m 时, 雨水管道处于无压状态, 排洪可以达到设计标准要求; 由图 10 看出, 考虑承泄区河道水位上涨至 3.3 m, 雨水管道水头显然提高, 但排洪仍满足设计标准要求; 由图 11 看出, 考虑一场长历时暴雨, 最大 1 h 雨量仍为 5 a 一遇, 但最大 24 h 雨量达 20 a 一遇, 显然, 由于承泄区河道水位长时间处于高水位, 雨水管道水头达 5.5 m

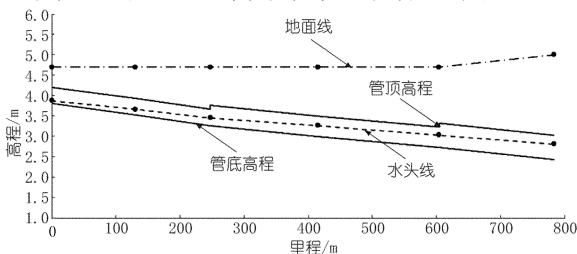


图 9 方案 1 雨水管沿程水位线

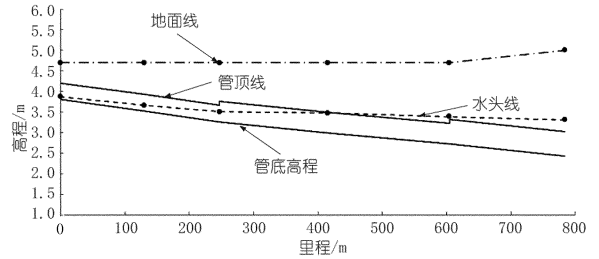


图 10 方案 2 雨水管沿程水位线

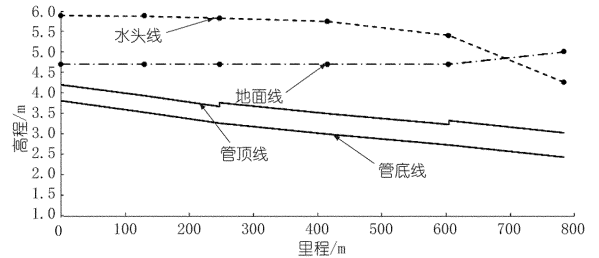


图 11 方案 3 雨水管沿程水位线

以上, 远远超过 4.7 m 的地面高程, 造成漫溢, 在这种情况下, 雨水管显然达不到 5 a 一遇的设计标准。

5 结语

本文探讨了市政排水管网和区域排涝系统建立耦合模型的方法, 并从实例验证了沿海平原承泄区水位对雨水管排水的顶托影响。事实上, 市政排水管网在形成网状的排水结构后, 并不能按照原先设计的单一排水流量、规模运行, 尤其在承压状态下, 管网内部雨水相互作用, 流向、流量均发生时刻改变, 是典型的非恒定流态, 需要用管渠排水的耦合模型才能解决, 城市排水的规划设计也需采用城市管道排水与区域排涝的水动力耦合模型作为分析工具。

参考文献:

- [1] 叶斌, 盛代林, 门小瑜. 城市内涝的成因及其对策[J]. 水利经济, 2010, (4): 62-65.
- [2] 芮孝芳, 蒋成煜. 中国城市排水之问[J]. 水利水电科技进展, 2013, (9): 1-5.
- [3] GB50014-2006 室外排水设计规范[S].
- [4] 张中和. 给水排水设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [5] 张雨飞, 何亦森, 邱敏毅. 低地坪高潮位地区的雨水管道淹没出流计算[J]. 给水排水, 2011, (4): 107-109.
- [6] 周玉文. 城市雨水管网水力学计算方法研究[J]. 沈阳建筑工程学院学报, 1994, (4): 125-130.
- [7] 耿艳芬. 城市雨洪的水动力耦合模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [8] 杨开林. 明渠结合有压管调水系统的水力瞬变计算[J]. 水利水电技术, 2002, (4): 5-8.

约364.6亿 m³)。因此,研究长江上中游干支流洪水遭遇规律,进而拟定水库群联合调度方式,充分发挥水库群综合效益势在必行。

参考文献:

[1] 赵英林.洞庭湖洪水地区组成及遭遇分析[J].武汉水利电力大学学报,1997,30(1):36-39.

[2] 郭家力,郭生练,徐高洪,等.鄱阳湖流域洪水遭遇规律和危险度初步研究[J].水文,2011,31(2):1-5.

[3] 熊莹.长江上游干支流洪水组成与遭遇研究[J].人民长江,2012,43(10):42-45.

[4] 戴明龙,沈燕舟.长江上游与洞庭湖洪水遭遇规律研究[J].水资源与水工程学报,2010,21(6):117-120.

[5] 戴明龙,叶莉莉,刘圆圆.长江上游洪水与汉江洪水遭遇规律研究[J].人民长江,2012,43(1):48-51.

(编辑:常汉生)

Analysis on flood encountering law of middle Jinsha River and mid – lower Yangtze River

ZHENG Jing¹,ZHOU Pengfei²,XU Yinshan¹

(1. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 2. Bureau of Comprehensive Development, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: According to the Flood Control Planning of Yangtze River Basin and Comprehensive Planning of Yangtze River Basin, the flood control capacity of 6 reservoirs built and being – built on middle Jinsha River will be 1.778 billion m³, so as to cooperate the flood control for mid – lower Yangtze River with Three Gorges Reservoir. The flood encountering law of middle Jinsha River and middle Yangtze River are analyzed in detail based on the flood quantity and flood routing process of Panzhihua Hydrological Station on Jinsha River and Luoshan, Chenglingji and Yichang hydrological stations on middle Yangtze River, with consideration of the flood propagation time and interval flood incoming process. The analysis results can provide technical support for the operation programme of the reservoirs on the middle Jinsha River, in order to give full play to the flood control benefits of the reservoir group.

Key words: flood encountering law; middle Jinsha River; mid – lower Yangtze River



(上接第 19 页)

[9] 黄昉.漫垸网河平面准二维与网河一维非恒定流“混合模型”的研究[J].浙江水利科技,2003,(1):17-19.

[10] 张晓波.平原河网地区的汇流模型研究[J].水电能源科学,

2011,(6):18-20.

(编辑:徐诗银)

A coupled hydraulic model for urban drainage and regional waterlogging release

ZHANG Xiaobo,SHENG Haifeng

(Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydro – electric Power, Hangzhou 310002, China)

Abstract: Some cities, especially the costal cities, are prone to waterlogging when the storm occurs. The analysis shows that the geographical location of the city and the flood characteristics of the surrounding rivers are not comprehensively considered with the urban waterlogging release, so the backward design method of urban drainage is one of the main causes of the waterlogging. To solve the problem, Saint Venant equations are used to express the key components of various water release system such as the open channel, rain pipe and field confluence, and through the connection relation among these components, a coupled hydraulic model for the urban drainage and regional waterlogging release is established. The practical application shows that the model can reflect the influence of river backwater and long – term storm on the urban drainage, which can be widely used in the urban drainage planning and design work.

Key words: urban drainage; regional waterlogging release; coupled hydraulic model; urban waterlogging