

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.01.019

# 基于 SWMM 耦合模型的道路行泄通道设计方法与应用

徐 雷<sup>1,2</sup>, 吴正松<sup>1,2</sup>, 邵知宇<sup>1,2</sup>, 李 霜<sup>1,2</sup>, 柴宏祥<sup>1,2</sup>, 龚华凤<sup>3</sup>

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 环境与生态  
学院, 重庆 400044; 3. 林同棧国际工程咨询 <中国> 有限公司, 重庆 400045)

**摘 要:** 针对现有道路行泄通道的设计方法仅适用于道路单独排水、忽略道路明渠流与管道压力流之间水动力相互作用的问题,提出了一种基于 SWMM 构建道路明渠流与管道压力流耦合的水力排涝模型,来进行道路行泄通道设计以应对极端降雨事件的方法。并以某山地城市为例,构建 SWMM 雨水管道水力模型,进行 50 年一遇降雨情景下的内涝模拟,获得易涝点分布。在此基础上,根据内涝区域的竖向分析和水文分析,结合管道排水能力,设置道路行泄通道系统,构建水力耦合排涝模型。并利用耦合排涝模型优化行泄通道设计参数,对比不同方案下情景模拟结果,获得符合实际情况的行泄通道,最终确定行泄通道设计方案。案例分析表明,基于水力耦合排涝模型的道路行泄通道设计方法,考虑了道路明渠流与管道压力流之间水动力相互作用以及流量交换,反映了极端暴雨条件下道路与管道联合排涝系统的实际运行状态,使得行泄通道的设计更为系统、合理。

**关键词:** 城市内涝; 管道排水; 大排水系统; 道路行泄通道; SWMM

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)01-0114-07

## Design Method and Application of Roadway Drainage Path Based on Coupled Hydraulic SWMM Model

XU Lei<sup>1,2</sup>, WU Zheng-song<sup>1,2</sup>, SHAO Zhi-yu<sup>1,2</sup>, LI Shuang<sup>1,2</sup>, CHAI Hong-xiang<sup>1,2</sup>,  
GONG Hua-feng<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. T. Y. Lin International Engineering Consulting <China> Co. Ltd., Chongqing 400045, China)

**Abstract:** The existing design method of roadway drainage path is only applicable to separate drainage of road and neglects hydrodynamic interaction between open channel flow in the roadway and pressure flow in the underground drainage pipes. Therefore, a hydraulic drainage model of roadway open channel flow coupled with pipe pressure flow based on SWMM was proposed to design the roadway drainage path to cope with extreme rainfall events. In a case study in a mountain city, a hydraulic model of stormwater pipeline based on SWMM was constructed to simulate waterlogging in a 50-year rainfall scenario, and the distribution of waterlogging prone points was identified. On this basis, according to the vertical analysis and hydrologic analysis of waterlogging area and combined with the drainage capacity of

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404704)

通信作者: 邵知宇 E-mail: shaozhiyu@cqu.edu.cn

the pipeline, the roadway drainage path system was set up to build the hydraulic coupled drainage model. The coupled drainage model was then used to optimize the design parameters of the drainage path, and the simulation results under different scenarios were compared to obtain the drainage path in line with the actual situation. Finally, a design scheme of the drainage path was determined. The case study indicated that the design of the roadway drainage path based on the coupled hydraulic model considered hydrodynamic interaction between open channel flow and pipeline pressure flow and their flow exchange, reflected the actual running state of the combined drainage system of road and pipeline under the condition of extreme heavy rain, which made the design more systematic and reasonable.

**Key words:** urban waterlogging; pipe drainage; major drainage system; roadway drainage path; SWMM

城市内涝原因复杂,单靠雨水管网提标改造来实现内涝防治,不仅不一定能够消除内涝,还会面临巨额建设资金投入、大面积开挖影响交通等问题<sup>[1]</sup>。借鉴国外治理内涝经验<sup>[2-3]</sup>,我国学者提出构建以道路为主的大排水行泄通道<sup>[4-6]</sup>,利用道路本身过水断面大的特点,通过道路平面和竖向系统化设计,有组织地短时排放超标雨水。与此同时,行业内新编的相关规范都提出了构建道路大排水系统的相关要求。《城乡建设用地竖向规划规范》(CJJ 83—2016)提出城乡建设用地竖向规划应符合低影响开发及城市排水防涝的要求,有条件时可利用道路作为临时行洪通道。《城镇内涝防治技术规范》(GB 51222—2017)明确提出将道路作为安全行泄通道来输送超标雨水。

目前,国内开展的道路大排水行泄通道的研究主要集中在计算道路排水能力、水深和流速,调整道路横纵断面参数,保障道路行泄通道设计的有效性和安全性<sup>[7-8]</sup>。但是,现有设计方法在计算过程中忽略了道路明渠流与管道压力流之间的流量分配以及动量守恒,仅适用于道路及管道单独自由排水的情况。由于在强降雨时期,来自不同汇水区域的流量过程线交织叠加,道路和管道的流量波动较大,而且受瓶颈段洪水顶托影响,水力状态以及边界条件瞬时变化。在道路与管道联合排涝的情况下,道路行泄及管道排水联动并相互约束。因此,在道路行泄通道的设计过程中,应考虑道路与管道耦合的影响。道路与管道的流量计算需要同时满足道路及管道的连续性方程和动量方程,耦合系统的水力计算非常困难。

目前,国内开展了系列利用SWMM进行水力模拟的研究。范玉燕等人<sup>[9]</sup>分析验证了SWMM具备

模拟明渠流和压力流共存或交替出现的能力,表明SWMM可以用于模拟明渠流与压力流间的流量交换及动量守恒。王兆斌等人<sup>[10]</sup>利用SWMM构建双排水模型对下穿隧道进行内涝分析,模拟结果与实际情况吻合,体现了SWMM能够反映道路与管道排水的联动并相互约束关系。因此,可以利用SWMM模型进行道路大排水设计,但目前还缺少这方面的研究。鉴于此,笔者提出了一种基于SWMM构建道路明渠流和管道压力流耦合的水力排涝模型来设计道路行泄通道的方法;并以某山地城市为例,构建SWMM雨水管网模型进行50年一遇降雨情景下的内涝模拟,获得易涝点分布;在此基础上,根据内涝区域竖向分析和水文分析,结合管道排水能力,规划行泄通道布局,构建水力耦合排涝模型;通过计算优化道路参数,进行不同道路改造方案下的情景模拟,最终确定行泄通道的设计方案。

## 1 道路与管道耦合的水力排涝模型

在道路大排水系统实际工作时,道路行泄和管道排水是一个整体,雨水处于不断交换的状态<sup>[11]</sup>,如图1所示。

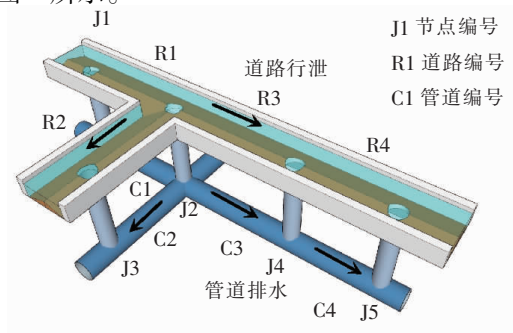


图1 道路与管道联合排涝系统示意

Fig.1 Schematic diagram of drainage system coupled with road and pipe

### 1.1 道路与管道控制方程

在排涝过程中,道路行泄和管道排水受断面形状、水力坡度、下游壅水顶托等影响,流速和水深随时间空间发生变化,显示出高度非恒定特性。该系统流场服从圣维南方程组[见式(1)和式(2)]。采用SWMM模型的动力波算法求解该方程组,可以用来进行管道及道路(管渠)的水流模拟计算。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (\frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (2)$$

式中: $x$ 为距离,m; $t$ 为时间,s; $A$ 为过流断面, $\text{m}^2$ ; $Q$ 为流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $H$ 为管渠水位( $Z+Y$ ),m; $Z$ 为管渠内底标高,m; $Y$ 为管渠水深,m; $S_f$ 为摩擦坡度(单位长度水头损失); $g$ 为重力加速度, $\text{m}/\text{s}^2$ 。

通过连续性方程(1),将动量方程(2)转化为计算管段的动量方程(3)进行离散。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 2U \frac{\partial A}{\partial t} + U^2 \frac{\partial A}{\partial x} - gA \frac{\partial H}{\partial x} - gAS_f \quad (3)$$

式中: $U$ 为流速, $U=Q/A$ , $\text{m}/\text{s}$ 。

### 1.2 道路与管道耦合计算

虽然方程(3)可以用来描述管渠的流动特性,但还需要结合节点流量守恒才能实现道路与管道的水力耦合计算。节点连续性方程可表达为水位变化与容积的关系:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\sum Q}{A_{\text{SN}} + \sum A_{\text{SL}}} \quad (4)$$

式中: $\sum Q$ 为节点处组合的净流量(进流量减去出流量),即包括所有连接到节点的管渠流量以及任何外部进流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $H$ 为节点处的水位,m; $A_{\text{SN}}$ 为节点的蓄水表面积, $\text{m}^2$ ; $\sum A_{\text{SL}}$ 为连接管段贡献的表面积, $\text{m}^2$ 。

当节点水位超过所连接最高管渠的内顶时,节点发生超载,此时方程(4)变为 $\sum Q=0$ ,其仅包含了流量关系,不能同时计算出水位。为了强化节点超载时的连续性条件,方程(4)更新为:

$$\Delta H = \frac{-\sum Q}{\sum \partial Q / \partial H} \quad (5)$$

在每个时间步长内,利用动力波算法循环迭代求解方程(3)和(4)或(3)和(5),直到收敛或达到最大试算次数,获得道路流量、管道流量和节点水位。耦合计算考虑了检查井节点溢流过程中流量及

动量的动态平衡,当道路上下游节点溢流时,水位差增大即管道排水的压力差增大,增强下游管道排水能力,从而导致溢流水量减少。

### 1.3 道路行泄约束条件

由于道路行泄存在风险,尤其是在汇水面积和道路坡度较大的情况下,容易形成马路洪水,导致行人失稳及汽车翻转。因此,道路行泄通道的设计不仅要满足排水功能,还需保证行泄安全和布局合理。目前,国内外通常要求道路行泄满足一定的水深和流速来保证道路排水安全<sup>[12]</sup>。《城镇内涝防治技术规范》(GB 51222—2017)要求道路中一条车道积水深度不超过0.15 m。《城乡建设用地竖向规划规范》(CJJ 83—2016)要求道路排水的路边径流深度不应大于0.20 m。王耀堂<sup>[13]</sup>研究发现人在正常站立时不同坡度下的临界失稳流速×水深在0.33~0.46  $\text{m}^2/\text{s}$ 之间。本研究根据实际情况,将道路存在内涝的判定标准设置如下:①道路的所有车道积水深度均超过0.15 m或路边径流深度大于0.20 m;②流速×水深(行泄风险值)超过0.33  $\text{m}^2/\text{s}$ (行泄风险极限值);③积水时间超过40 min。

### 1.4 道路行泄通道设计流程

道路行泄通道设计技术路线如图2所示。

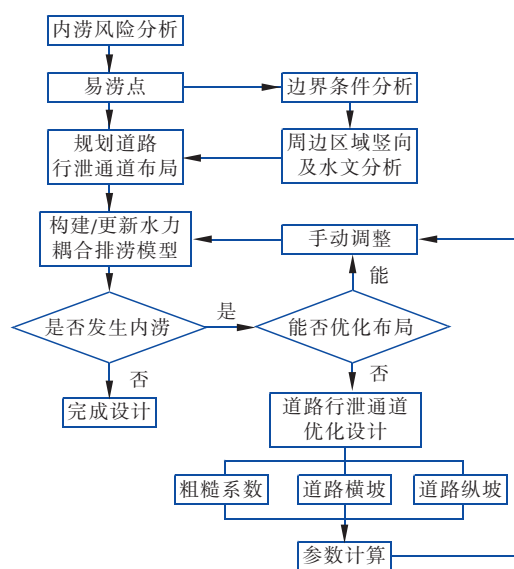


图2 道路行泄通道设计技术路线

Fig. 2 Schematics of roadway drainage path design

① 根据内涝防治要求,对研究区域进行内涝风险分析,结合模型运算和实际调研,得到区域内的易涝点。

② 对易涝点进行边界条件分析,得到内涝时



管网及道路出流状态。然后对其周边区域进行水文和竖向分析,确定地表径流方向,结合雨水管道排水能力,规划道路行泄通道布局。

③ 构建(或更新)水力耦合排涝模型,模拟行泄通道排水工况。

④ 校核行泄通道的排水能力和行泄风险值是否满足要求。若满足要求,完成设计,到步骤⑤。若不满足要求,判断能否通过优化布局来消除内涝,若能,回到步骤③并调整模型中道路布局;若不能,则根据现在的道路行泄通道布局进行道路参数优化设计。通过经济成本和可实现性等方面的比选,在道路参数粗糙系数、横坡和纵坡中选择出合理的优化方案,并结合耦合排涝模型进行参数计算后,循环至步骤③调整模型中道路参数。

⑤ 完成设计。

## 2 案例应用

### 2.1 管网概化

研究区域位于某山地城市,占地面积约为283 hm<sup>2</sup>,排放河道的50年一遇水位为199.6~236.5 m。根据管网、地形等资料,对研究区域进行概化,构建雨水管道水力模型,划分汇水区域126个、雨水管线132条、检查井节点132个、排水口7个(如图3所示)。



图3 雨水管网平面概化示意

Fig.3 Layout of stormwater sewer system

### 2.2 模型主要参数

#### ① 降雨数据输入

当地暴雨强度公式如下:

$$q = \frac{1178.521(1 + 0.633 \lg P)}{(t + 8.534)^{0.551}} \quad (6)$$

式中: $q$ 为暴雨强度, L/(s·hm<sup>2</sup>); $P$ 为设计重现期,年; $t$ 为降雨历时,min。

根据该地内涝防治要求及降雨特点,设置降雨重现期为50年、降雨历时为2 h、雨峰系数为0.4,利用芝加哥雨型生成降雨时间序列。

#### ② 水文模型设置

采用SWMM的水文模块进行汇水区流量计算,选择Horton下渗模型。根据土地利用数据及土壤类型加权后对汇水区的产流参数进行设置。

## 2.3 道路行泄通道设计计算

### 2.3.1 区域排涝条件分析

在50年一遇降雨模拟情景下,运行雨水管道水力模型,对比模拟结果中的节点水位和地表高程,得知区域内有多个节点溢流(如图4所示,其中在51 min时数量最多),即区域内可能会有多个内涝点。根据模拟结果统计节点溢流情况,并结合实际情况,通过判断溢流点积水时间是否超过40 min,或者溢流流量是否超过道路在研究区域内的最不利纵向排水(最窄道路为双向两车道,最小纵坡为0.3%,最大横坡为2%)和安全排水条件下的最大行泄流量(0.81 m<sup>3</sup>/s),识别出易涝点,如表1所示。

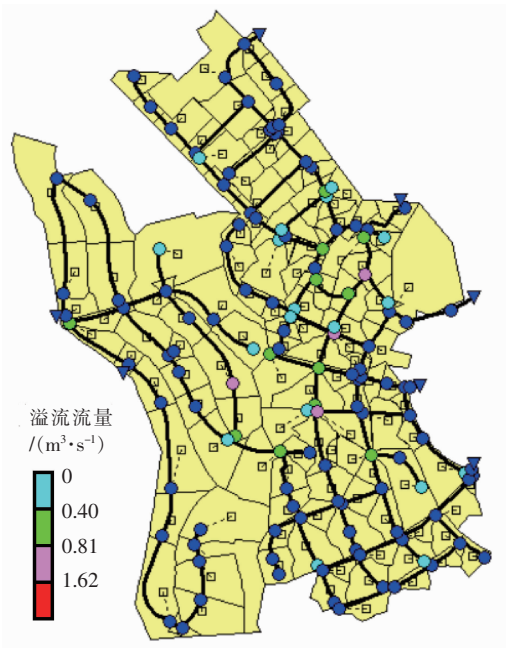


图4 51 min时溢流点分布示意

Fig.4 Distribution map of overflow nodes at 51 min

表1 易涝点信息

Tab.1 Information of waterlogging nodes

节点编号	溢流时长/h	最大溢流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	峰值溢流量 出现时间
Y87	0.18	1.53	00:51
Y24	1.38	1.00	00:51
Y77	0.53	0.93	00:50
Y83	0.15	0.87	00:51

### 2.3.2 行泄通道规划布局及参数设计计算

在本案例中,以设计一条包含易涝点 Y77 的行泄通道为例介绍剩下的步骤(图 5 中绿色区域为一个排水区域,包含所有流向同一个排口的雨水管道所服务的区域)。图 5 中,连接 Y77 和 Y91 为管道 1、连接 Y91 和 Y101 为管道 2、连接 Y101 和 Y102 为管道 3,竖向对应道路 1、道路 2、道路 3;道路 1、2 为单向四车道,道路 3 出现车道增减,按照排水最不利时的单向三车道设计;将相同编号的路段和管段称为一个系统,如道路 1 和管道 1 称为系统 1。

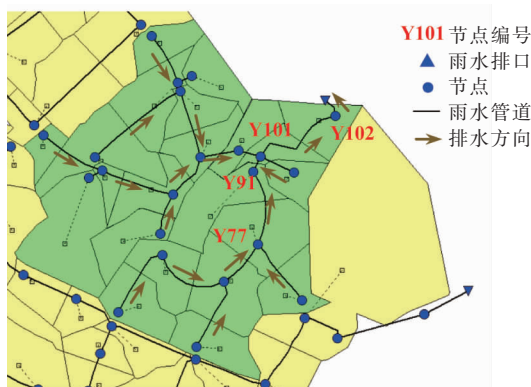


图5 包含 Y77 的行泄通道所在排水区域

Fig.5 Drainage area where roadway overflow path containing Y77 is located

① 边界条件分析。由于易涝点所在排水分区排放河道的 50 年一遇水位低于管网排口,即道路和管道排水边界条件为自由出流,无需考虑河网顶托。

② 规划行泄通道布局。根据在 Y77 周边地形、用地类型、节点溢流情况、节点出流、管段的排水能力和入流雨水峰值流量,规划 Y77 到 Y91 之间的道路为行泄通道。然后依次对行泄通道下游节点进行类似分析,最终将 Y77 到 Y102 之间的道路规划为行泄通道。

③ 构建(或更新)水力耦合排涝模型。在模型中,添加(或更新)行泄通道及行泄通道所服务溢

流点的溢流路线上道路的实际信息(调整后的参数),构建耦合排涝模型,并根据实际断面信息概化道路断面(如图 6 所示,单位为 m)。

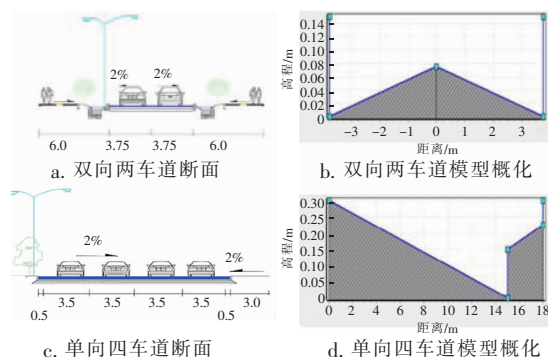


图6 典型道路断面概化示意

Fig.6 Schematics of typical roadway cross section generalization

④ 模拟行泄通道排水工况,判断行泄通道是否发生内涝。运行耦合排涝模型,校核行泄通道参数是否满足行泄要求,满足即完成设计,输出道路参数;否则,即转到步骤⑤。此时,模拟得到道路 1 和道路 2 发生内涝。

⑤ 判断能否优化行泄通道布局。此时,依据实际地形和道路信息,分析得到行泄通道布局合理,不能通过优化布局消除内涝。

⑥ 分析道路内涝原因。道路内涝有两种原因:a. 道路自身排水能力弱,且小于  $Q_{RH}^i$  (表示第  $i$  条道路的入流流量峰值  $Q_{RH}$ );b. 下游道路排水能力弱,积水顶托本段道路泄流。根据表 2 所示(系统 1 在 54 min 时道路水深达到峰值),道路 2 的水深为 0.26 m,对道路 1 行泄影响大。且通过明渠流公式计算道路 1,在自由出流和安全行泄条件下的排水能力大于  $Q_{RH}^1 = 1.38 \text{ m}^3/\text{s}$ ,则道路 1 发生内涝的原因为后者。同时道路 3 的水深为 0.12 m,显然,道路 2 发生内涝的原因为前者。综上,先优化设计道路 2 的参数,后校核道路 1 的行泄能力。此时,模型计算得到道路 2 的  $Q_{RH}^2 = 2.02 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

表2 系统在 54 min 时的排水情况

Tab.2 Drainage of systems at 54 min

项 目	系统 1	系统 2	系统 3
道路排水流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	1.36	1.97	0.59
管道排水流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.70	0.50	4.37
道路水深/m	0.23	0.26	0.12

⑦ 选择道路优化方法。考虑到道路粗糙系数

的不稳定及道路行车安全,最不利时调整道路的粗糙系数;对调整道路横坡进行分析,初步估算道路在最小横坡1%、安全排水及其他条件不变的情况下最大排水能力为 $1.53 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $< 2.02 \text{ m}^3/\text{s}$ );对调整道路纵坡进行分析,在最优纵坡(道路在安全排水条件下的最大排水能力对应的纵坡)及其他条件不变的情况下,最大排水能力为 $1.75 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $< 2.02 \text{ m}^3/\text{s}$ );对同时调整道路横坡和纵坡进行分析,在横坡为1%和最优纵坡及其他条件不变的情况下,最大排水能力为 $3.30 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $> 2.02 \text{ m}^3/\text{s}$ )。综上,选择同时调整横坡和纵坡来增强道路2的排水能力。

⑧ 计算满足排涝和安全行泄要求下的道路横坡和纵坡。为了保证低重现期时道路正常排水,结合周边相连道路信息,需要将道路2的横坡下调至1.5%。在道路最大水深为0.20 m及行泄风险极限值为 $0.33 \text{ m}^2/\text{s}$ 条件下,求解明渠流公式得到在道路自由出流下并且符合要求的道路2纵坡范围为0.91%~1.63%,因此道路2的纵坡取0.91%。

⑨ 选择调整道路2坡度的方式,并进行调整。在模型中,调整坡度的方法有下列3种:仅提高Y91的地面高度;仅降低Y101的地面高度;同时提高Y91的地面高度和降低Y101的地面高度。根据模型模拟结果,此时道路1的水深大于0.20 m。提高Y91处的道路标高,会导致道路1坡度变缓而降低其排水能力,使得道路1的水深增加,甚至影响上游道路的积水情况。为保证Y91上游道路的排水能力,则选择降低Y101处的路面标高和校核Y101下游的行泄参数。结合步骤⑦计算Y101地面下调高度,并循环至步骤③手动更新耦合排涝模型中的道

路参数。

通过耦合排涝模型动态设计行泄通道,有效避免了由于道路参数的调整导致道路和管道间的流量交换变化,出现道路参数设计不合理的情况。

最终,通过将道路2和道路3的横坡下调至1.5%、Y101节点处道路路面标高下调0.25 m以及Y102节点道路路面标高上调1.08 m,消除了道路2的内涝且不造成道路3内涝。此时道路2的纵坡变为0.93%,道路3的纵坡变为1.24%。

### 2.3.3 优化设计结果校核

根据2.3.2节的优化设计结果,运行模型得到道路行泄水深曲线如图7所示,以及峰值流量下行泄通道的行泄参数如表3所示。从图7可得,在整个降雨过程中,调整后的道路1、道路2和道路3均未出现水深超过0.20 m的情况;根据表3,行泄通道的行泄风险值 $\leq 0.33 \text{ m}^2/\text{s}$ 、积水时间 $\leq 40 \text{ min}$ ;并且,校核得到行泄通道所服务溢流点的溢流路线上的道路也未发生内涝。综上,包含易涝点Y77的行泄通道设计成功。

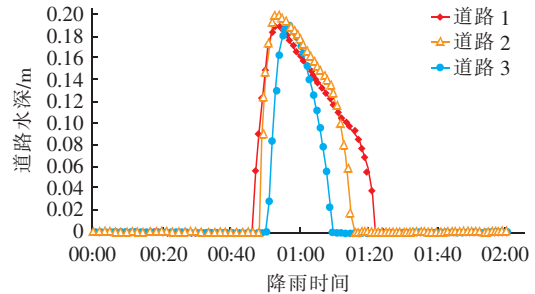


图7 道路水深曲线

Fig. 7 Water depth curve of road

表3 峰值流量下道路的行泄参数

Tab. 3 Road drainage parameters at peak flow

项目	最大行泄流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	流速 $v$ / ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	水深 $h$ /m	行泄风险值 $h \times v$ / ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	积水时间/min	是否满足要求
道路1	1.37	1.49	0.19 ( $\leq 0.20$ )	0.28 ( $\leq 0.33$ )	35 ( $\leq 40$ )	满足
道路2	1.94	1.44	0.20 ( $\leq 0.20$ )	0.29 ( $\leq 0.33$ )	27 ( $\leq 40$ )	满足
道路3	2.10	1.73	0.19 ( $\leq 0.20$ )	0.33 ( $\leq 0.33$ )	19 ( $\leq 40$ )	满足

对于研究区域内其他易涝点,利用相同的方法进行行泄通道设计,最终消除易涝点内涝。最后,在耦合排涝模型中添加所有道路信息,并且校核是否出现新的内涝道路。如果有,则需针对内涝道路设计行泄通道;如果没有,则完成整个研究区域的道路行泄通道设计。需要注意的是,每个排水区域的行

泄通道设计完成后,都需要重新运行模型进行校核,避免不同排水区域由于道路连接而导致的区域间发生流量交换对行泄通道设计造成的误差。

## 3 结论

① 基于耦合排涝模型设计道路行泄通道,充分考虑了道路明渠流与管道压力流之间水动力相互



作用以及流量交换,反映了存在真实状态下的管道压力流排水能力随压力差增大而增大的特性,使得道路行泄通道设计更加符合实际情况。

② 在行泄通道参数设计时,基于耦合排涝模型循环设计计算可以有效避免出现道路和管道流量分配及水力边界条件随着道路参数的调整而变化,使得道路入流峰值不恒定,造成道路参数设计计算不合理的问题。

#### 参考文献:

- [1] 车伍,葛裕坤,唐磊,等. 我国城市排水(雨水)防涝综合规划剖析[J]. 中国给水排水,2016,32(10):15-21.  
CHE Wu, GE Yukun, TANG Lei, *et al.* Analysis of integrated plan for urban drainage (stormwater) and flood control[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(10):15-21 (in Chinese).
- [2] DJORDJEVIC S, PRODANOVIC D, MAKSIMOVIC C. An approach to simulation of dual drainage[J]. Water Science & Technology, 1999, 39(9):95-103.
- [3] NANIA L S, ARTURO S L, GARCIA M H. Hydrologic-hydraulic model for simulating dual drainage and flooding in urban areas: application to a catchment in the metropolitan area of Chicago[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 20(5):04014071.
- [4] 李俊奇,王文亮. 基于多目标的城市雨水系统构建与展望[J]. 给水排水,2015,41(4):1-3,37.  
LI Junqi, WANG Wenliang. Establishment and perspective of multi-objective urban stormwater management system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(4):1-3, 37 (in Chinese).
- [5] 车伍,杨正,赵杨,等. 中国城市内涝防治与大小排水系统分析[J]. 中国给水排水,2013,29(16):13-19.  
CHE Wu, YANG Zheng, ZHAO Yang, *et al.* Analysis of urban flooding control and major and minor drainage systems in China [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(16):13-19 (in Chinese).
- [6] 周玉文. 城市排水(雨水)防涝工程的系统架构[J]. 给水排水,2015,41(12):1-5.  
ZHOU Yuwen. System architecture of waterlogging prevention on water drainage (rainwater) system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(12):1-5 (in Chinese).
- [7] 李俊奇,王耀堂,王文亮,等. 城市道路用于大排水系统的规划设计方法与案例[J]. 给水排水,2017,43(4):18-24.  
LI Junqi, WANG Yaotang, WANG Wenliang, *et al.* Urban roads for major drainage system planning-design methods and cases [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(4):18-24 (in Chinese).
- [8] 娄富豪. 模型技术在排水防涝双排水系统设计计算中的应用研究[D]. 北京:北京工业大学,2017.  
LOU Fuhao. Application of Model Technology in Design and Calculation of Dual Drainage System [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017 (in Chinese).
- [9] 范玉燕,汪诚文,喻海军. SWMM 模型河道及明满流模拟能力分析研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(1):1-6.  
FAN Yuyan, WANG Chengwen, YU Haijun. Research on simulation ability to deal with the rivers and the free-surface-pressure flow of SWMM [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(1):1-6 (in Chinese).
- [10] 王兆斌,王彬,吕梅,等. 利用双排水系统理论对城市下穿隧道进行雨水内涝模拟分析[J]. 水利水电技术,2016,47(4):127-130.  
WANG Zhaobin, WANG Bin, LÜ Mei, *et al.* Dual-drainage system theory-based simulation analysis on rainfall-waterlogging from urban underpass tunnel [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(4):127-130 (in Chinese).
- [11] SCHMITT T, THOMAS M, ETTRICH N. Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems [J]. Journal of Hydrology, 2004, 299(3/4):300-311.
- [12] DIGMAN C, BALMFORTH D, KELLAGHER R, *et al.* Designing for Exceedance in Urban Drainage: Good Practice [M]. London: Construction Industry Research & Information Association, 2006.
- [13] 王耀堂. 道路用于城市大排水系统规划设计方法与案例研究[D]. 北京:北京建筑大学,2017.  
WANG Yaotang. Planning-design Methods and Case Study on Major Drainage System Using Urban Roads [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017 (in Chinese).

作者简介:徐雷(1995-),男,贵州黔西人,硕士研究生,从事城市排水防涝模型研究。

E-mail: a1031820641@qq.com

收稿日期:2019-05-25

修回日期:2020-05-27

(编辑:刘贵春)