

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.01.007

内涝过程中超载节点水流结构及水头损失分析

耿艳芬,朱保航,钟颖萌

(东南大学交通学院,江苏南京 211189)

摘要:为探究处于内涝过程超载状态节点的水流结构及水头损失,基于室内管道节点模型进行了 87 组不同边界条件的三维构造模型模拟,完成了室内试验与数值模拟的对比验证;采用定性定量分析、数据相关性拟合和 π 理论研究了孔径比(节点直径 Φ_m 和管道直径 Φ_p 的比值)、管道坡度、承压水头对节点内水流结构和水头损失的影响。研究表明:节点出口处的水量交互是产生水头损失的主要原因;局部水头损失系数 K 随孔径比的增大而增大,随超载水深、承压水头的增大而减小;通过 π 理论提出 $K=f(Re)$ 的求解思路是可行的;两种孔径比节点的 K 值对坡度变化的响应不同,管道坡度的设计需要考虑节点孔径比的影响。研究成果补充了雨洪耦合模型中的节点水流结构,可为一维管网在节点处的水头损失计算提供经验数值和参考。

关键词:管网节点;水流结构;局部水头损失;经验公式

中图分类号:TU992

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2023)01-0052-09

Analysis of flow structure and head loss at surcharged nodes in surcharging process

GENG Yanfen, ZHU Baohang, ZHONG Yingmeng

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: To explore the flow structure and head loss at surcharged nodes in the surcharging process, this paper simulated 87 cases with different boundary conditions using three-dimensional structural model based on the experimental pipeline node model. Comparison validation between the indoor experiment and the numerical simulation was completed. Qualitative and quantitative analysis, data correlation fitting and π theory were used to study the effect of diameter ratio (the ratio of node diameter Φ_m to pipe diameter Φ_p), pipe slope and confined pressure head on the flow structure and local head loss. The results show that the water flow interaction at the node-outlet is the main cause of head loss. The local head loss coefficient K is positively correlated with the diameter ratio, but negatively correlated with surcharging depth and confined pressure head. It is feasible to propose $K=f(Re)$ relation formula by π theory. In addition, the value of K with two diameter ratios has different responses to the pipeline slope change, therefore, the effect of diameter ratio should be considered in the design of pipeline slope. The research results supplement the flow structure in the storm flood model, and can provide empirical values and law reference for the calculation of head loss of one-dimensional pipe network at the nodes.

Key words: nodes of network; flow structure; local head loss; empirical formula

管网节点是城市一维管网模型管道衔接的关键环节,是城市雨洪耦合模型进行一维、二维耦合的关键通道^[1]。内涝过程中,节点往往处于超载状态,其内部的水流呈现复杂性、高度紊流性和多相性的特点^[2]。水力影响因素作为城市管网状态评价的重要指标^[3],其引起的局部水头损失对于城市管网排水效率的影响不可忽略^[4-6],也是城市雨洪耦合模型精度的重要影响因素^[7-8]。国内外有关学者对于管道节点内的水流特性^[9-10]、水头损失^[11-12]和节点溢流^[13]等问题密切关注。三维构造模型可以精细化模拟超载节点的水气掺混、紊动耗散等复杂的动力过程,在形象地反映局部复杂流态方面具有显著的优势^[14]。相关文献^[15-17]表明,

基金项目:国家自然科学基金(51979040);江苏省研究生科研与实践创新计划(SJCX20_0048);中央高校基本科研业务费专项(3221002123D)

作者简介:耿艳芬(1978—),女,副教授,博士,主要从事水环境与水动力学研究。E-mail:yfeng@seu.edu.cn

引用本文:耿艳芬,朱保航,钟颖萌.内涝过程中超载节点水流结构及水头损失分析[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):52-60.
GENG Yanfen, ZHU Baohang, ZHONG Yingmeng. Analysis of flow structure and head loss at surcharged nodes in surcharging process [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(1): 52-60.

三维构造模型已经广泛应用于节点几何构型、水流流态特性和水头损失等方面的研究。

节点局部水头损失的研究涉及形状、孔径比(节点直径 Φ_m 和管道直径 Φ_p 的比值, Φ_m/Φ_p)、淤泥池高度、落水高度等结构因素和上游流量、承压水头等边界因素的影响^[18-20]。Lee 等^[21]在不同流量和承压水头条件下对圆形和方形节点的水头损失进行了评估。Jo 等^[22]在控制管道进口流量的情况下分析了多种节点结构的水头损失系数。Gaetano 等^[23]改变了流量和落水高度,对螺旋跌水井的水头耗散效率进行了研究。在以往的研究中,多关注中、大孔径比^[12]($\Phi_m/\Phi_p \geq 4.5$)的节点结构,对于小孔径比($\Phi_m/\Phi_p \leq 3.0$)研究较少;管道坡度通常为平坡,坡度设计不合理会导致排水系统能力不足^[24]。对于小孔径比节点,通过组合孔径比、上游流量和承压水头等多个因素可以有效探索其水力行为和混合过程^[25]。学者们多使用传统的局部水头损失探索局部水头损失系数与边界条件、结构因素之间的函数关系^[12],以评估节点排水效率。

本文研究了小孔径比节点的水流结构及水头损失,分析水头损失的具体原因,损失系数与孔径比、承压水头、坡度等因素的关系,探索节点水头损失系数与边界因素、结构因素的函数关系,为提高城市雨洪耦合模型的模拟精度、现实场景下雨水管道的排水能力提供经验数值和理论支撑。

1 研究方法

在一定的边界条件下,城市排水系统中的流动为典型的互不相溶的气液两相流流动,具有较清晰的自由液面。多相流模型可以模拟两相流流动,通过求解体积分数的连续方程跟踪所有相界面:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \mathbf{v}_q) = \frac{1}{\rho_q} [S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp})] \quad (1)$$

式中: α_q 为 q 相的体积分数; \mathbf{v}_q 为 q 相的速度, m/s; ρ_q 为 q 相的密度, kg/m³; s_{α_q} 为质量源项,默认值为零; \dot{m}_{pq} 为从 p 相到 q 相的转换质量, kg; \dot{m}_{qp} 为从 q 相到 p 相的转换质量, kg。

模型中各相的体积分数具有如下关系:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2)$$

采用隐式离散格式求解,计算耗时较短,而且能够获得较为清晰的相界面。离散方程为

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q^{n+1} \mathbf{U}_f^{n+1} \alpha_{q,f}^{n+1}) = [S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp})] V \quad (3)$$

式中: V 为单元体积; \mathbf{U}_f 为通过单元界面的体积通量,根据法向速度计算。

模型在整个计算域内求解单一动量方程,所有相公用速度场。动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (4)$$

式中: \mathbf{v} 为各相共用的速度场, m/s; \mathbf{g} 为重力加速度, m/s²; \mathbf{F} 为体力, N。

各相能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\mathbf{v} (\rho E + \rho)) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_p \sum_q h_{j,q} J_{j,q} + (\boldsymbol{\tau}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{v})) + S_h \quad (5)$$

式中: k_{eff} 为有效导热系数; $h_{j,q}$ 为 q 相中物质 j 的焓; $J_{j,q}$ 为 q 相中物质 j 的扩散通量; $k_{\text{eff}} \nabla T$ 、 $\sum_p \sum_q h_{j,q} J_{j,q}$ 、 $\boldsymbol{\tau}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{v}$ 分别为由传导、物质扩散和黏性耗散引起的能量传递; S_h 为热源源项,本文不考虑温度变化。

模型将能量 E 视为质量平均变量:

$$E = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q} \quad (6)$$

式中 E_q 为按单相比热和共用温度计算的每一项能量。 ρ 和 k_{eff} 由各相共用。

国内外主要通过水头损失与速度水头的比值确定^[12]水头损失系数:

$$\Delta H = K \frac{u^2}{2g} \quad (7)$$

式中: ΔH 为局部水头损失; u 为管道主流速, m/s ; K 为水头损失系数。

定义节点内自由水位和管道顶部之间的距离为节点淹没水深 s , s/Φ_m 为节点超载率,见图1。

2 模型建立与验证

城市管道节点试验模型如图2所示,模型比例尺为1:5。管道长为4000 mm,直径为160 mm。节点M1和M2的直径均为《国家建筑标准设计图集·排水检查井》^[26]中城市常用尺寸,M1为140 mm, $\Phi_m/\Phi_p=0.88$;M2为250 mm, $\Phi_m/\Phi_p=1.56$ 。节点深度均为360 mm,底部根据GB 50014—2006《室外排水设计规范》设置淤泥池,深度为80 mm。管道初始坡度设置为0。沿管道长度方向设置测压管,记为C1~C7,依次分布在距离入口1000 mm、1850 mm、2150 mm、2500 mm、2850 mm、3150 mm和3500 mm的位置。模型的上游通过阀门和电磁流量计控制流量;下游通过尾门和测压管调整承压水头。

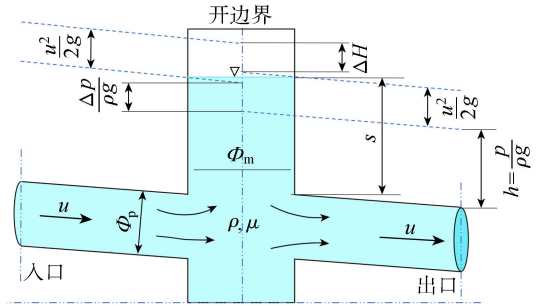


图1 超载节点内的水头损失示意图
Fig. 1 Schematic diagram of head loss in a surcharged node

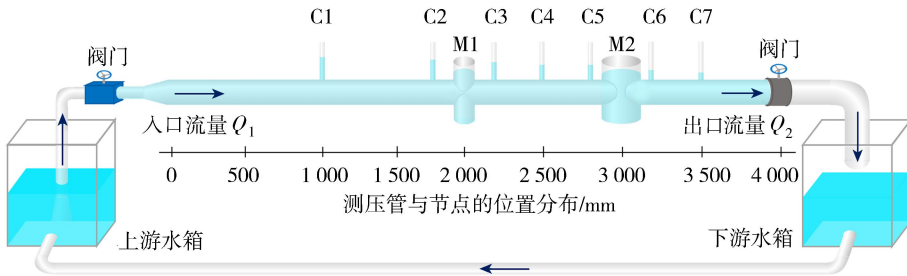


图2 城市管道节点试验模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experiment model for pipe nodes in urban area

通过组合上游流量和下游承压水头,研究节点M1和M2的水力特性和水头损失。根据管径与最小坡度的经验关系($i=3.876\Phi_p^{-1.304}$, Φ_p/mm)设计坡度 $i=0,0.06\%,0.12\%$,其中0为以往研究中常见管道坡度;0.06%为 $\Phi_p=800$ mm(对应文中1:5模型的160 mm)时的最小坡度;采用0.12%作为坡度因素对比,研究节点M1和M2的水头损失对不同坡度的响应,如表1所示。

表1 节点结构参数与边界条件变量

Table 1 Structural factors and boundary condition variables of nodes

研究目的	Φ_m/Φ_p		$i/\%$	上游流量/ ($L \cdot s^{-1}$)	承压水头/ mm	模拟组数
	M1	M2				
局部水头损失研究	0.88	1.56	0	6,8,10,15,20,25,30	20,40,60,80,100,120	42
	0.88	1.56	0	6,8,10,15,20	40,60,80	15
坡度变化响应研究	0.88	1.56	0.06	6,8,10,15,20	40,60,80	15
	0.88	1.56	0.12	6,8,10,15,20	40,60,80	15

通过多组工况对测压管C1-7、C2-3、C5-6之间的水头损失及损失系数进行模型验证,如图3所示。最大相对误差绝对值为10.60%,最小为1.69%。考虑到室内试验在边界条件控制方面存在系统误差,在测量时因水头波动存在偶然误差,认为所构建的模型具有良好的可靠度和精确性。

3 模型局部水头分析

3.1 节点局部流场与水头损失

以流量10 L/s、15 L/s和20 L/s,水头80 mm,坡度0为例绘制速度场和流场云图,见图4。根据淹没射流理论,进入节点的淹没射流分为水流扩散区和核心流速区,理论上扩散区边界以1:5的趋势进行扩大,核心流速区边界以1:6.2的趋势进行缩小^[11],如图5所示。水流扩散区内流速减小,受节点直径限制,节点M1的水流扩散区较小,水流流速减小不明显;超载部分和淤泥池内的水体主要为涡流,与管道内水流之间的水

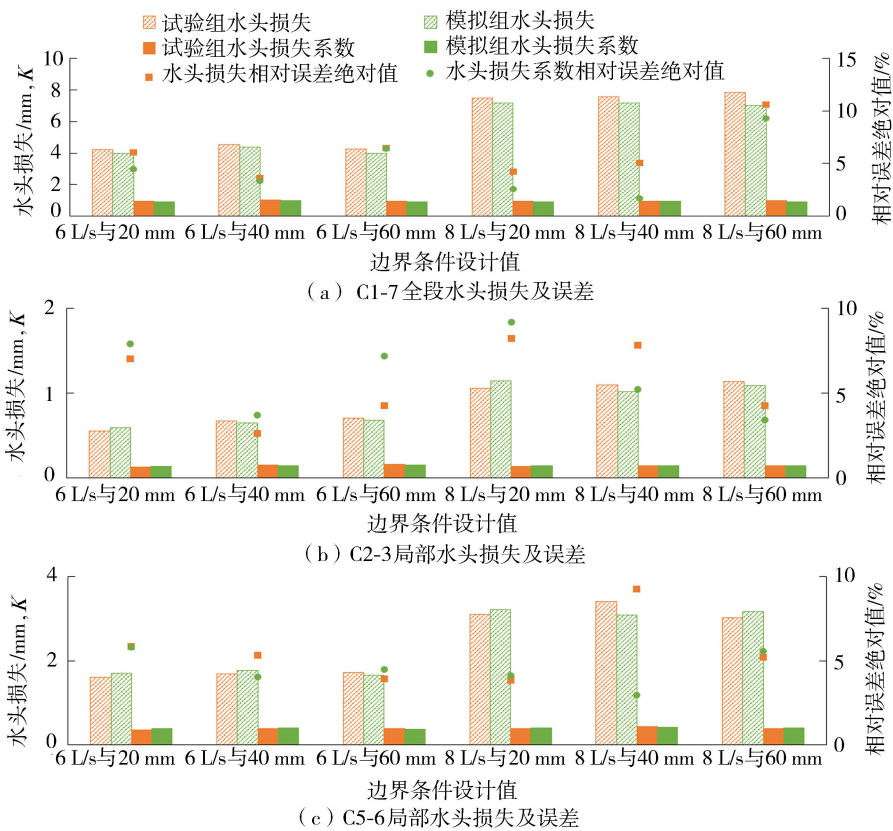


图 3 模拟与试验测量的结果对比

Fig. 3 Results comparison between simulation and experimental measurement

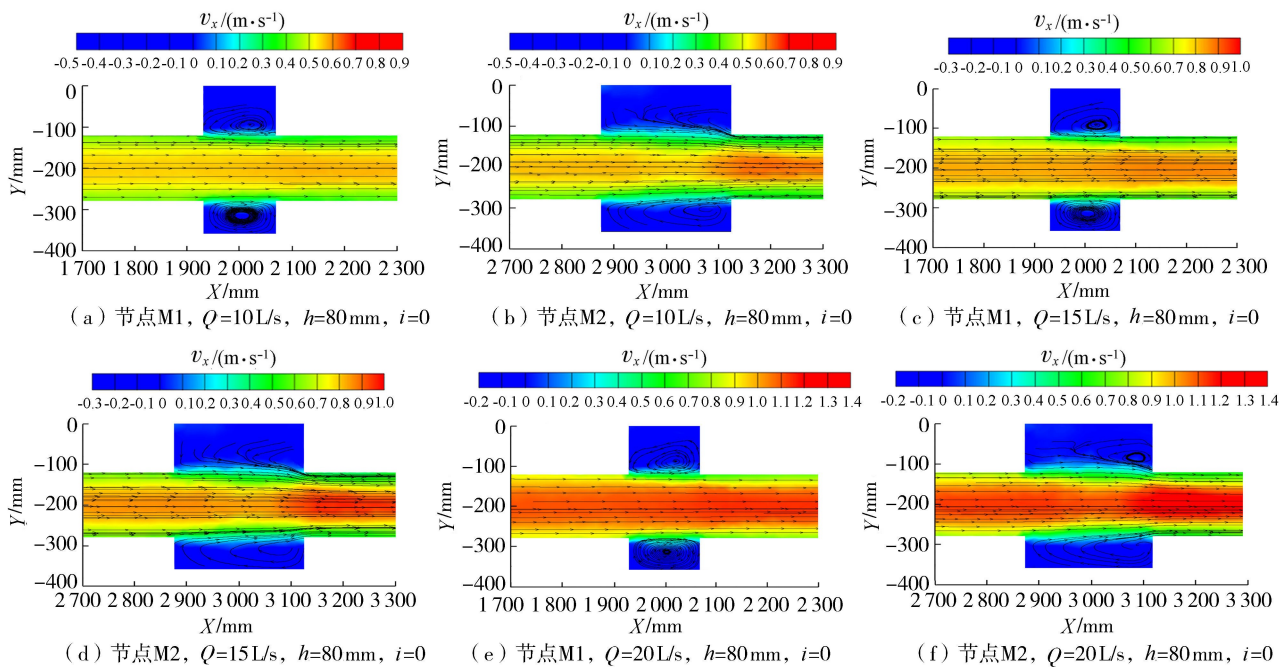


图 4 XOY 面 (Z=500 mm) 局部流线图与 X 方向速度云图

Fig. 4 Local streamlines and X velocity contours on the XOY plane (Z=500 mm)

量交换较少;在节点 M2 内,可明显观察到节点内水流流速减小,水流在流出节点时,受到超载部分和淤泥池内水体流动的影响,中心流速明显增大;超载部分和淤泥池内的水体形成涡流,并参与管道内水流的水量交互,将损失更多的能量,水头损失系数更大,排水效率较低。

当节点 $\Phi_m/\Phi_p < 3.00$ 时,水头损失系数随 Φ_m/Φ_p 的增大而增大,不受 s/Φ_m 的影响^[11]。绘制节点 M1

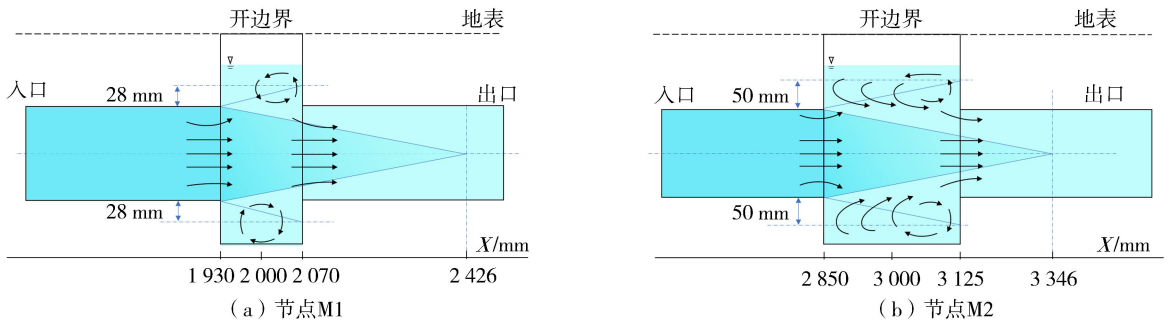


图 5 流场分析示意图

Fig. 5 Flow field analysis diagram

和 M2 的 $K_{C_{2-3}}$ 、 $K_{C_{5-6}}$ 与 s/Φ_m 之间的关系图,如图 6 所示。 $K_{C_{2-3}}$ 的最大值为 0.160,最小值为 0.097; $K_{C_{5-6}}$ 的最大值为 0.430,最小值为 0.329;符合 K 随 Φ_m/Φ_p 的增大而增大的规律,节点 M1 具有更高的排水效率。当 $s/\Phi_m \geq 0.2$ 时, $K_{C_{2-3}}$ 、 $K_{C_{5-6}}$ 会受 s/Φ_m 的微弱影响,呈现负相关关系。结合流场分析认为,随着淹没水深的增大,超载部分水体能够更充分地发展为涡流,减少与管道内水流的相互作用,从而减小水头损失。

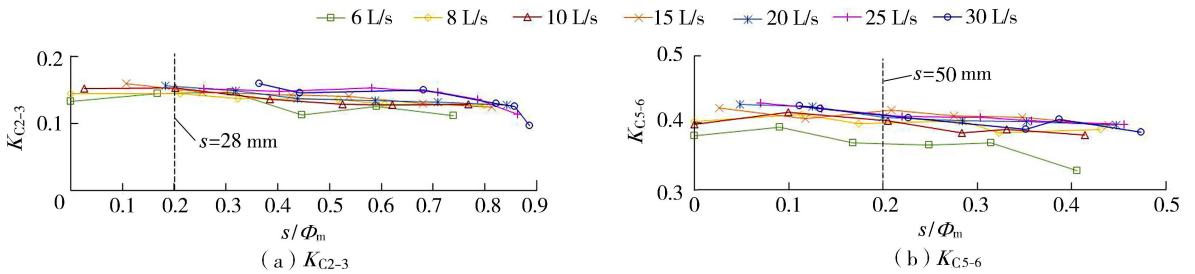


图 6 K 和 s/Φ_m 的关系

Fig. 6 Relationship between K and s/Φ_m

根据式(7),对不同承压水头 h 下 $K_{C_{2-3}}$ 和 $K_{C_{5-6}}$ 进行流量脱敏拟合,如图 7 所示,决定系数 R^2 可作为可靠性的判断指标^[11]。 $K_{C_{2-3}}$ 和 $K_{C_{5-6}}$ 均表现为随着 h 的增大而减小, $K_{C_{2-3}}$ 的值介于 0.120~0.155, $K_{C_{5-6}}$ 介于 0.370~0.420。由于模型最大可允许淹没深度为 120 mm,图 7(f)中 $K_{C_{2-3}}$ 出现的异常数据为节点溢流情况下的结果。在超载非溢流情况下,对 $h=120$ mm 的 $K_{C_{2-3}}$ 进行拟合,可得到 $K_{C_{2-3}}=0.12$ 。

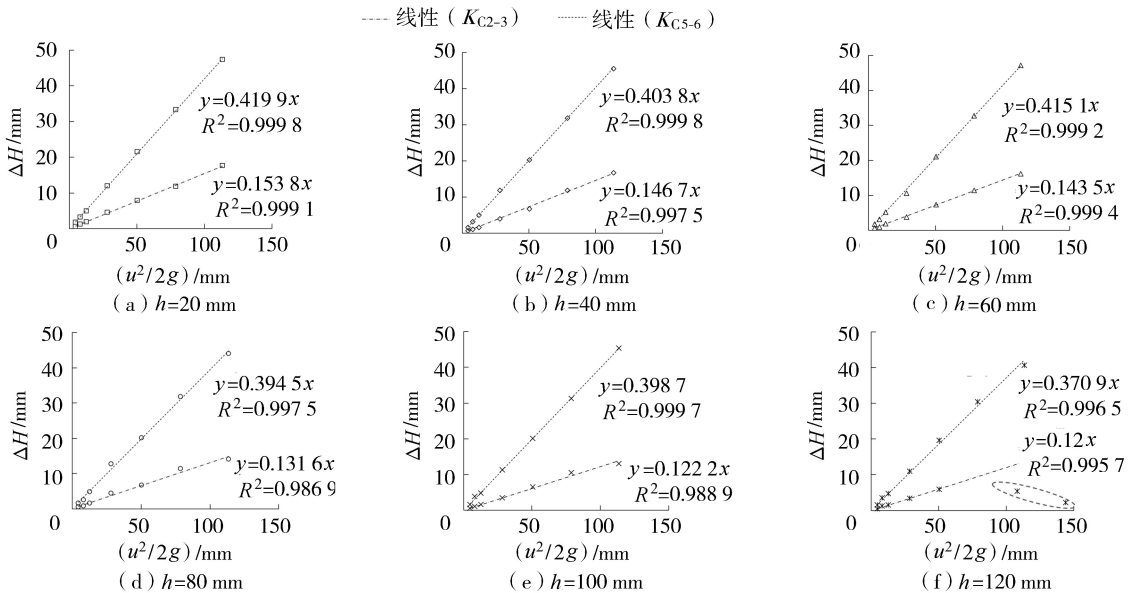


图 7 不同承压水头下 $K_{C_{2-3}}$ 和 $K_{C_{5-6}}$ 的拟合结果

Fig. 7 Fitting results of $K_{C_{2-3}}$ and $K_{C_{5-6}}$ under different confined pressure heads

3.2 量纲分析法探索 $K=f(Re)$

对于如图 1 所示的节点结构,其局部水头损失 ΔH 主要为压损 Δp ,与 u 、 Φ_p 、 Φ_m 、水的密度 ρ 、水的动力黏度 μ 、下游承压 p (Pa) 等因素相关。将各影响因素表示为一般的函数表达式:

$$f(u, \Phi_p, \Phi_m, \rho, \mu, p, \Delta p) = 0 \quad (8)$$

根据 π 理论,可进一步得到 p 的函数表达式为

$$\frac{\Delta p}{u^2 \rho} = f_1\left(\frac{\rho u d}{\mu}, \frac{\Phi_m}{\Phi_p}, \frac{p}{u^2 \rho}\right) \quad (9)$$

$$\frac{\Delta p}{\rho g} = f_2\left(\frac{\rho u d}{\mu}, \frac{p}{u^2 \rho}\right) \frac{\Phi_m}{\Phi_p} \frac{u^2}{2g} \quad (10)$$

将雷诺数 $Re = \frac{\rho u d}{\mu}$ 代入可得

$$\frac{\Delta p}{\rho g} = f_2\left(Re, \frac{p}{u^2 \rho}\right) \frac{\Phi_m}{\Phi_p} \frac{u^2}{2g} \quad (11)$$

对比式(7)的形式,可推出 K 为

$$K = f_2\left(Re, \frac{p}{u^2 \rho}\right) \frac{\Phi_m}{\Phi_p} \quad (12)$$

其中

$$\frac{p}{u^2 \rho} = \frac{\rho d^2}{\mu^2} p Re^{-2}$$

令 $A = \frac{\rho d^2}{\mu^2} p = \frac{\rho^2 d^2 g}{\mu^2} h$, A 值可根据下游承压水头计算获得,进一步可得

$$K = f_2(Re, A Re^{-2}) \frac{\Phi_m}{\Phi_p} \quad (13)$$

$$\frac{K}{Re} \frac{\Phi_m}{\Phi_p} = f_3(A Re^{-3}) \quad (14)$$

函数关系 f_3 可由试验和模拟确定。

对于节点 M1 和 M2,在多种承压水头下计算 A 与 $K=f(Re)$ 关系式,函数关系 f_3 如图 8 所示; $K=f(Re)$ 如表 2 所示; K 的计算值与模拟结果比较如图 9 所示。图 9(b) 圈内所示的数据误差超过 10%, 主要原因为本文将模型下游的出口承压水头作为节点下游的承压水头代入计算,造成节点 M2 在 $h=20$ mm 时计算值误差较大,在其他情况下误差均在 $\pm 10\%$ 范围内。结果表明, K_{C2-3} 和 K_{C5-6} 的计算值与模拟结果吻合良好。 $K=f(Re)$ 关系式可用于针对不同上游流量和下游承压条件下估算超载节点 M1 和 M2 的 K 值。

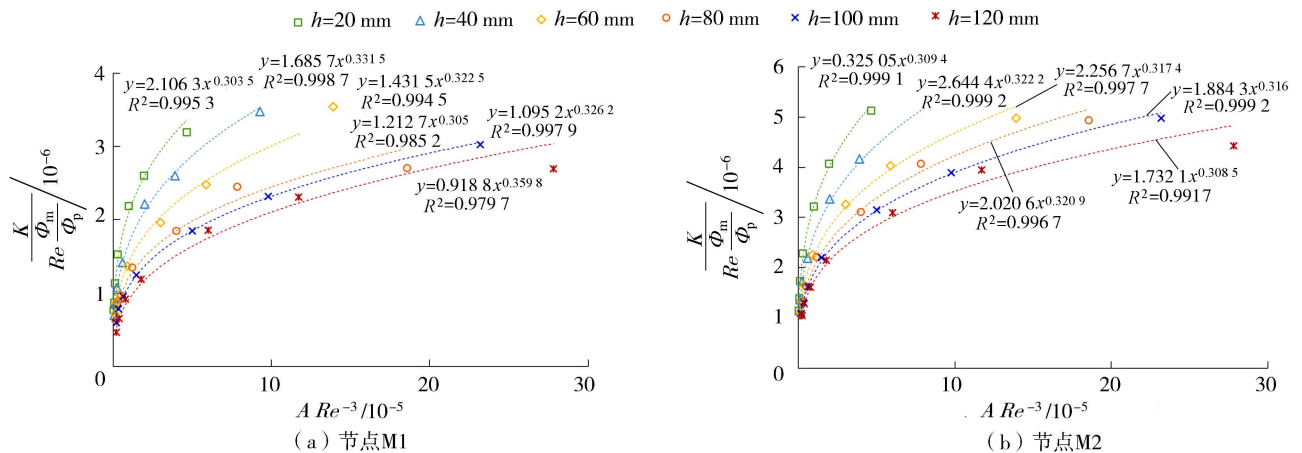


图 8 函数关系拟合结果
Fig. 8 Fitting results of function relation

表 2 节点 M1 和 M2 的 A 值与 $K=f(Re)$ 关系式
Table 2 A values and $K=f(Re)$ formula of node M1 and M2

Φ_m/Φ_p	h/mm	A	$K=f(Re)$
0.88	20	4.97×10^9	$K=0.0537Re^{0.0895}$
	40	9.95×10^9	$K=0.1443Re^{0.0055}$
	60	1.49×10^{10}	$K=0.1003Re^{0.0325}$
	80	1.99×10^{10}	$K=0.0484Re^{0.085}$
	100	2.49×10^{10}	$K=0.1076Re^{0.0214}$
	120	2.98×10^{10}	$K=0.3083Re^{-0.0794}$
1.56	20	4.97×10^9	$K=0.1563Re^{0.0718}$
	40	9.95×10^9	$K=0.2601Re^{0.0334}$
	60	1.49×10^{10}	$K=0.2383Re^{0.0478}$
	80	1.99×10^{10}	$K=0.2522Re^{0.0373}$
	100	2.49×10^{10}	$K=0.2108Re^{0.0520}$
	120	2.98×10^{10}	$K=0.1597Re^{0.0745}$

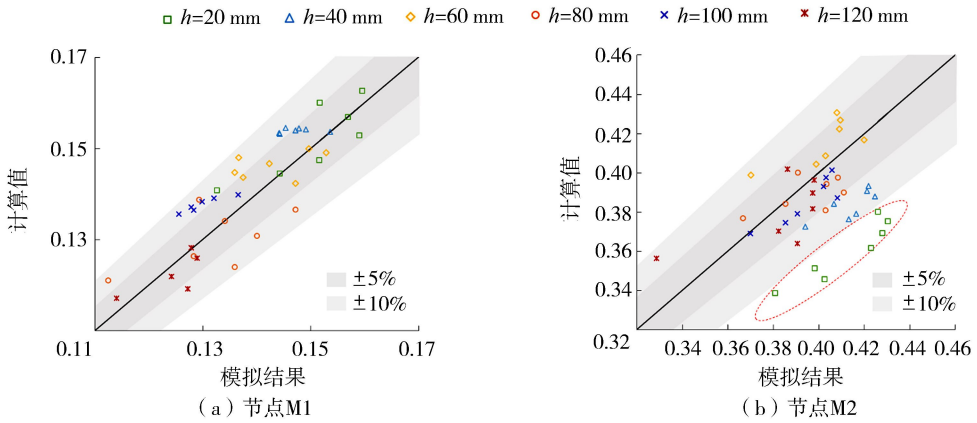


图 9 K 计算值与模拟结果比较

Fig. 9 Comparison between calculated K values and simulation results

3.3 坡度对节点水头损失的影响

对 3 种坡度下的 45 组模拟进行流量和承压水头的脱敏拟合,得到 K_{C2-3}^* 和 K_{C5-6}^* ,如图 10 所示。在 $i=0$ 、0.06%、0.12% 条件下, K_{C2-3}^* 分别为 0.140、0.174、0.151; K_{C5-6}^* 分别为 0.410、0.429、0.436。M1 在 $i=0$ 时水头损失较小,排水效率更好,其次是 $i=0.12\%$,在 $i=0.06\%$ 时效率较差;节点 M2 在 $i=0$ 时水头损失较小,排水效率更好, i 为 0.06% 和 0.12% 时的排水效率依次降低。

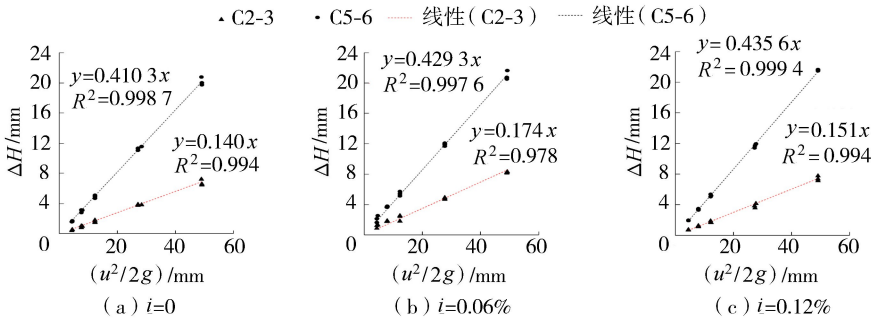


图 10 K_{C2-3}^* 和 K_{C5-6}^* 的拟合结果

Fig. 10 Fitting results of K_{C2-3}^* and K_{C5-6}^*

以 $Q=20L/s, h=60mm$ 为例绘制速度场和流场云图,如图 11 所示。推断 K_{C2-3}^* 和 K_{C5-6}^* 出现差异的原因主要为:对于节点 M1, $i=0$ 时超载部分的涡流明显,水量交互较少,水头损失较小,管道内水流主流速较大,导致 K_{C2-3}^* 较小; $i=0.06\%$ 和 $i=0.12\%$ 时超载部分与管道内水流的水量交互较多,水头损失较大;但 $i=0.12\%$ 时,管道内水流的主流速与 $i=0.06\%$ 时相比较,因此计算获得的 K_{C2-3}^* 较小。对于节点 M2,随着坡度 0、

0.06%、0.12% 依次增大,节点内水量交互现象越明显,造成的水头损失也越大,在主流速接近的情况下, K_{C5-6}^* 依次增大。

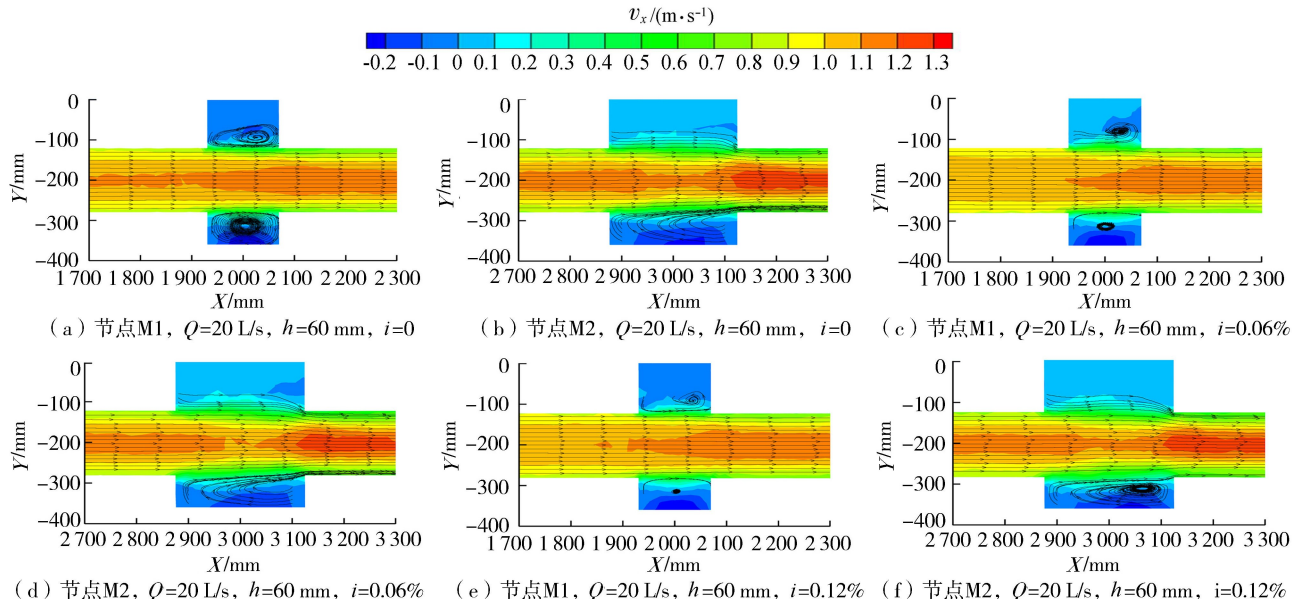


图 11 XOY 面 ($Z=500$ mm) 局部流线与 X 方向速度云图

Fig. 11 Local streamlines and X velocity contours on the XOY plane ($Z=500$ mm)

4 结 论

- 节点造成水头损失的主要原因为超载部分和淤泥池内水体与管道内水流在节点出口处的水量交互。
- 当 $s/\Phi_m \geq 0.2$ 时, K_{C2-3} 、 K_{C5-6} 与 s 呈负相关关系。 K_{C2-3} 介于 0.120 ~ 0.155, K_{C5-6} 介于 0.370 ~ 0.420, 且 K_{C2-3} 和 K_{C5-6} 表现为随承压水头的增大而减小, 承压水头的增大有助于提高节点处的排水效率。
- 通过 π 理论提出关系式 $K=f(Re)$ 的求解思路, 可用于针对不同上游流量 Q 和下游承压水头 h 条件下估算节点 K 值, 为城市雨洪耦合模型考虑节点水头损失提供理论基础。
- 在 $i=0, 0.06\%, 0.12\%$ 条件下, K_{C2-3}^* 分别为 0.140、0.174、0.151; K_{C5-6}^* 分别为 0.410、0.429、0.436。在实际施工中除考虑规范要求 and 地形因素外, 管道坡度的设计还需根据节点 Φ_m/Φ_p 的不同具体分析。

参考文献:

- [1] 傅春, 付耀宗, 肖存艳, 等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 33-39. (FU Chun, FU Yaorong, XIAO Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD Model in Yingtan City[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 33-39. (in Chinese))
- [2] BEG M N A, CARVALHO R F D, LEANDRO J. Comparison of flow hydraulics in different manhole types[C] //37th IAHR World Congress. Beijing: IAHR, 2017; 10. 5281/zenodo. 3246831.
- [3] 丁相毅, 石小林, 凌敏华, 等. 基于因子分析的供水管网健康状态评价指标遴选[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 67-73. (DING Xiangyi, SHI Xiaolin, LING Minhua, et al. Selection of evaluation indicators for water supply network health status based on factor analysis[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 67-73. (in Chinese))
- [4] 鲜志斌, 王庆国, 王兆斌, 等. 雨水管网中局部水头损失对设计排水能力的影响[J]. 水电能源科学, 2015, 33(10): 97-99. (XIAN Zhibin, WANG Qingguo, WANG Zhaobin, et al. Impact of local head loss in rainwater pipe network on design drainage capacity[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(10): 97-99. (in Chinese))
- [5] GEBREEGZIABHER M, DEMISSIE Y. Modeling urban flood inundation and recession impacted by presence of manholes[J]. Water, 2020, 12(4): 1160.
- [6] 褚俊英, 王浩, 邵煜, 等. 供水管网优化维护的理论与技术框架分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 67-72. (CHU Junying, WANG Hao, SHAO Yu, et al. Analysis on theory and technical framework of optimal maintenance of water supply network[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 67-72. (in Chinese))
- [7] KIM C R, KIM J S, YOON S E. Applicability analysis of head loss coefficients at surcharge manholes for inundation analysis in

- urban area[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering Research*,2018,38(3):395-406.
- [8] 郝晓丽,穆杰,喻海军,等. 城市洪涝试验研究进展[J]. *水利水电科技进展*,2021,41(1):80-86. (HAO Xiaoli, MU Jie, YU Haijun, et al. Advances in experimental research of urban flooding[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021,41(1):80-86. (in Chinese))
- [9] FERESHTEHPOUR M, CHAMANI M R. Flow characteristics of a drop manhole with an internal hanging baffle wall in a storm drainage system: numerical and experimental modeling[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*,2020,146(8):10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001490
- [10] 刘妍,夏军强,ZHANG Hao,等. 排水系统中雨水检查井局部水头损失分析[J]. *水力发电学报*,2022,41(2):43-54. (LIU Yan, XIA Junqiang, ZHANG Hao, et al. Analysis of minor head losses in manhole of drainage system[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*,2022,41(2):43-54. (in Chinese))
- [11] BEG M N A, CARVALHO R F D, LEANDRO J. Effect of manhole molds and inlet alignment on the hydraulics of circular manhole at changing surcharge[J]. *Urban Water Journal*,2019,16(1-2):33-44.
- [12] RUBINATO M, MARTINS R, SHUCKSMITH J D. Quantification of energy losses at a surcharging manhole[J]. *Urban Water Journal*,2018,15(3):234-241.
- [13] CARVALHO R F, LOPES P, LEANDRO J, et al. Numerical research of flows into gullies with different outlet locations[J]. *Water*,2019;11(4):794.
- [14] 王希晨,张健,许听雨,等. 大流量进水工况下主隧系统水气运动特性[J]. *水利水电科技进展*,2021,41(5):15-21. (WANG Xichen, ZHANG Jian, XU Tingyu, et al. Characteristics of air-water movement in a main tunnel system under large inflow condition[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2021,41(5):15-21. (in Chinese))
- [15] HELMI A M, ESSAWY H T, WAGDY A. Three-dimensional numerical study of stacked drop manholes[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*,2019,145(9):10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001414.
- [16] MOTLAGH Y Y, NAZEMI A H, SADRADDINI A A, et al. Numerical investigation of the effects of combining sewer junction characteristics on the hydraulic parameters of flow in fully surcharged condition[J]. *Water and Environment Journal*,2013,27(3):10.1111/j.1747-6593.2012.00347.x.
- [17] 黄静之,周建旭,刘跃飞,等. 底部设置隔壁式岔管的调压室水力特性三维数值分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2021,49(2):176-181. (HUANG Jingzhi, ZHOU Jianxu, LIU Yuefei, et al. 3D numerical analysis of hydraulic characteristics for surge chamber with partition-type bifurcated pipe in bottom[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*,2021,49(2):176-181. (in Chinese))
- [18] WANG K H, CLEVELAND T G, TOWSLEY C, et al. Head loss at manholes in surcharged sewer systems[J]. *Journal of the American Water Resources Association*,1998,34(6):1391-1400.
- [19] MERLEIN J. Flow in submerged sewers with manholes[J]. *Urban Water*,2000,2(3):251-255
- [20] CARVALHO R F, LEANDRO J. Hydraulic characteristics of a drop square manhole with a downstream control gate[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*,2012,138(6):569-576.
- [21] LEE S S, NAKAGAWA H, KAWAIKE K, et al. Study on development of sewer pipe analysis model considering manhole head losses[J]. *Journal of Japan Society of Civil Engineers; Ser B1*,2015,70(4):I_97-I_102. DOI:10.2208/jscejhe.70.I_97
- [22] JO J B, KIM J S, YOON S E. Experimental estimation of the head loss coefficient at surcharged four-way junction manholes[J]. *Urban Water Journal*,2018,15(8):780-789.
- [23] GAETANO C, PASQUALE C, DIEGO V, et al. Energy head dissipation and flow pressures in Vortex drop shafts[J]. *Water*,2021,13(2):165.
- [24] 栾震宇,金秋,赵思远,等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城市内涝模拟[J]. *水资源保护*,2021,37(2):81-88. (LUAN Zhenyu, JIN Qiu, ZHAO Siyuan, et al. Simulation of urban waterlogging based on MIKE FLOOD coupling model[J]. *Water Resources Protection*,2021,37(2):81-88. (in Chinese))
- [25] STOVIN V, BENNETT P, GUYMER I. Absence of a hydraulic threshold in small-diameter surcharged manholes[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2013,139(9):984-994.
- [26] 中国建筑标准设计研究院. 国家建筑标准设计图集·排水检查井[M]. 北京:中国计划出版社,2006.