

DOI: 10.11779/CJGE201810015

# 隧道岩溶管道型突涌水动态演化特征及涌水量综合预测

王健华<sup>1</sup>, 李术才<sup>2</sup>, 李利平<sup>2, 3</sup>, 许振浩<sup>2</sup>

(1. 东南大学交通学院岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061;

3. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 建立了隧道岩溶管道型突涌水模型, 进行了突涌水过程中动态演化特征分析, 结果表明揭露岩溶管道型突涌水的动态演化无明显的时间效应, 但空间特征呈现阶段演化的规律, 突涌水区域可分为三种典型流速演化区域: 管道内部的近似高速稳定区, 隧道与岩溶管道临界面附近的流速升高区以及隧道内部灾害水体的衰减-低速稳定区。基于管道内部区域流速动态衰减规律, 提出了基于数值分析法和极限(离散)解析法的涌水量综合预测方法, 形成揭露岩溶管道型突涌水的涌水量预测体系, 并设计了相应的模型试验, 进行了涌水量的实时监测, 监测结果验证了涌水量综合预测方法的合理性。

**关键词:** 岩溶管道型突涌水; 阶段演化; 极限(离散)解析法; 模型试验

中图分类号: TU46; U45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)10-1880-09

**作者简介:** 王健华(1991-), 男, 博士研究生, 主要从事地下工程灾害控制研究。E-mail: wjh871554917@163.com。

## Dynamic evolution characteristics and prediction of water inflow of karst piping-type water inrush of tunnels

WANG Jian-hua<sup>1</sup>, LI Shu-cai<sup>2</sup>, LI Li-ping<sup>2, 3</sup>, XU Zhen-hao<sup>2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Transportation College, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Research Center of

Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water

Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** A model for karst piping-type water inrush at tunnel site is established, and the dynamic evolution characteristics of water inrush are analyzed. The results show that there is no obvious time effect for the dynamic evolution of karst piping-type water inrush, but the spatial features have the property of phase evolution. The water inrush area can be divided into three typical flow velocity evolution areas: approximate high-velocity stability zone inside the karst pipeline, velocity rising zone near the critical plane and attenuation-low velocity stability zone in the tunnel. Based on the dynamic attenuation law of flow velocity in the inner area of pipeline, the method of limit analysis combined with numerical methods to predict water inflow is put forward, and a prediction system for water inflow is formed. The corresponding model test is designed, and the real-time monitoring of water inflow is carried out. The rationality of the comprehensive prediction method for water inflow is verified.

**Key words:** karst piping-type water inrush; phase evolution; limit analysis; model test

## 0 引言

强富水、高承压环境造成的突涌水灾害威胁日趋严重, 已给岩溶区隧道安全建设带来巨大挑战<sup>[1]</sup>。隧道突涌水由灾害源、突水通道与隔水结构3部分组成<sup>[2]</sup>。灾害源是发生突涌水灾害的首要条件, 突水通道是发生突涌水灾害的必要条件, 突水通道的岩体在突水前决定着突水发生, 突水后突水通道又直接控制着实际涌水量。岩溶管道型突涌水灾害源主要包括充水溶洞或地下暗河, 隧道开挖扰动改变了隧址区水文地质环境, 隧道附近水力梯度加大, 充水溶洞或地下暗河内的灾害水体通过突水通道流入隧道, 诱发了突涌水灾

害, 阻碍了隧道施工。因此, 开展岩溶管道型突涌水过程演化机制和涌水量预测研究具有重大理论意义和实际价值。

岩溶管道内部灾害水体不断向隧道流入过程中, 水位降低的速率会逐渐降低, 降落漏斗的扩展也逐步变得缓慢, 形成了先瞬态后近似稳态的趋势, 因此灾

**基金项目:** 国家自然科学基金面上基金项目(51479106, 51679131); 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金项目(2016491311)

**收稿日期:** 2017-08-03

**\*通讯作者** (E-mail: yuliyangfan@163.com)

害水体的流动属于非稳定流动。分析灾害水体的流态演化特征时, 需建立灾害水体随时间演化模型<sup>[3]</sup>, 现阶段一般利用 Brinkman 快速流研究灾害水体在岩溶管道的流态, 但 Brinkman 快速流能否精确描述其流动还有待进一步验证。同时, Brinkman 快速流不包括时间因素项, 无法描述灾害水体随时间的动态演化规律<sup>[4-6]</sup>。为此, 本文建立 Darcy 流及非 Darcy 流统一型偏微分方程 (PDE) 作为数值模拟的非稳定控制方程, 耦合隧道区域灾害水体紊流模型分析其时间效应及空间特征。

现阶段研究大多数无法准确判断涌水量达到稳定状态前各时间节点涌水量。基于突涌水过程演化机理分析突涌水全过程瞬时涌水量, 提高涌水量预测精度, 可实现突涌水灾害及时治理的目的。隧道涌水量预测一般使用经验解析公式、工程类比法及非线性理论<sup>[7-9]</sup>, 根据隧道修建全长进行总涌水量分析, 然后平均到单位长度隧道; 同时现有涌水量计算一般只能计算最大及稳定两个时间点 (段) 的涌水量。据我国部分铁路隧道预测涌水量与实际涌水量的统计, 预测值与实测值相差 20% 的仅占统计总数的 15%, 误差超过 50% 的占 75% 以上, 部分隧道的预测误差高达数十倍。本文建立了揭露岩溶管道型突涌水数值模型, 分析了隧道突涌水全过程涌水量随时间动态变化规律, 研究了揭露岩溶管道型突涌水涌水量预测方法, 有针对性地指导实际工程治理。

## 1 揭露岩溶管道型突涌水数值分析

### 1.1 数值模型建立

图1所示为岩溶管道突涌水概念模型。岩溶管道上部存在地下暗河, 隧道掘进过程中揭露岩溶管道诱发突涌水, 灾害水体通过暗河不断向岩溶管道补给流入隧道。假设各岩体介质为连续介质, 建立基于非达西流的岩溶管道内部灾害水体运动非稳定微分方程, 分析揭露岩溶管道型突涌水的动态演化全过程。

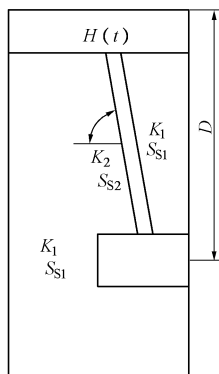


图 1 突涌水数值模型

Fig. 1 Numerical model for water inrush

针对岩溶管道突涌水隧址区的发育特点, 拟采用等效连续介质渗流数值模拟方法, 将空隙中水流等效平均到整个岩体中, 利用连续介质理论来分析<sup>[10-11]</sup>。根据连续性原理, 补给含水层灾害水体运动控制方程如下:

$$\frac{\partial \left( K_1 \frac{\partial H_1}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( K_1 \frac{\partial H_1}{\partial z} \right)}{\partial z} = S_{s1} \frac{\partial H_1}{\partial t} \quad (1)$$

岩溶管道渗透系数较大, 其内部灾害水体往往处于非达西状态。根据文献[11]可知, 非达西渗流中认为渗透系数是一个与水力梯度有关的量而非常数。

Wu的研究表明<sup>[12-13]</sup>, 采用Forchheimer二次型关系描述高速非线性流更为合理。从工程实用角度来看, Forchheimer方程形式简单、参数较少。同时能够综合体现岩体介质中的达西渗流与非达西渗流的特性。因此成为目前工程上应用最为广泛的非达西流渗流计算公式。具体表达式如下:

$$J = \frac{\mu}{\rho g k} v + \frac{\beta}{g} v^2 \quad (2)$$

式中,  $\mu$  为灾害水体的动力黏滞系数 ( $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ),  $k$  为岩体介质的渗透率 ( $\text{m}^2$ ),  $\rho$  为液体的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $\beta$  为非达西流影响系数 ( $\text{m}^{-1}$ ),  $g$  为重力加速度 ( $\text{m}/\text{s}^2$ )。

将岩体介质中的达西-非达西流本构方程表达为  $v = K(J)J$  的统一形式, 式 (2) 可转换为

$$v = \left\{ -\frac{\mu}{2k\rho\beta} + \left[ \left( \frac{\mu}{2k\rho\beta} \right)^2 + \frac{g}{\beta} J \right]^{\frac{1}{2}} \right\} J^{-1} * J \quad (3)$$

王媛等<sup>[11, 14]</sup>基于单裂隙高流速非达西流试验, 确定出渗透率  $k$  与非达西流影响系数  $\beta$  的指数型函数关系式如下:

$$\beta = 0.0003k^{-0.6134} \quad (4)$$

同时将式 (4) 成功应用于深埋隧道断层破碎带型突涌水涌水量预测。

根据式 (3), (4) 可以推导求得岩溶管道内部灾害水体的非达西非稳定流PDE控制方程如下:

$$\frac{\partial \left( K_{xx}(J) \frac{\partial H}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( K_{zz}(J) \frac{\partial H}{\partial z} \right)}{\partial z} = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (5)$$

$$K(J) = J^{-1} \left\{ -\frac{\mu}{2k\rho\beta} + \left[ \left( \frac{\mu}{2k\rho\beta} \right)^2 + \frac{g}{\beta} J \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (6)$$

假设补给含水层以达西型PDE作为控制方程, 岩溶管道以非达西型PDE作为控制方程, 隧道区域灾害水体以Navier-Stokes紊流方程描述, 耦合求解模型各区域的控制方程。以水头  $H$  为自变量, 边界条件一般包括Neumann边界条件即通量边界条件 (速度边界条

件)以及Direchlet边界条件即水头(压力)边界条件和混合边界条件。该模型中补给含水层以及岩溶管道为潜水含水层,初始水头都与暗河水头相同。岩溶管道与补给含水层的交界面以及岩溶管道与隧道临界面都满足通量连续、(水头)压力连续原理。补给含水层以及岩溶管道的上边界与暗河接触边界,接触边界水头的数值由岩溶暗河系统控制,岩溶暗河系统认为是定水头系统。定水头边界系统即认为暗河系统的水头 $H(t)$ 保持不变<sup>[15]</sup>,因而暗河与补给含水层以及岩溶管道的接触边界水头为固定值。模型左边界、右边界及其余交代边界为隔水边界。

基于以上假设与原理建立如图1所示模型。其中,岩溶管道宽度 $B=3.5$  m,倾角 $\theta=80^\circ$ ,渗透系数 $K_1=3.11 \times 10^{-5}$  m/s,比储水系数 $S_{S1}=1 \times 10^{-4}$  1/m,补给含水层渗透系数 $K_2=1 \times 10^{-6}$  m/s,  $S_{S2}=1 \times 10^{-4}$  1/m,暗河为静水头水头 $H=10$  m,地下水位距隧道等价圆心的距离 $D=58$  m。取岩溶管道流入隧道的临界面的最大点速度作为研究模型灾害水体的流速。

## 1.2 定水头边界

假设暗河属于静水系统,认为暗河水头保持不变,即暗河与下面含水层及岩溶管道的接触边界保持恒定水头或压力。图2显示了100 h内岩溶管道型突涌水的瞬时流速演化规律,其存在最大流速与稳定流速。流速变化幅度较小,约在0.02 m/s左右。根据文献[16]可知,断层破碎带型突涌水及岩溶管道型突涌水,这两种突涌水类型流速演化规律近似,但揭露断层破碎带型突涌水流速变化幅度更大,具有更加明显的水力特性。从渗流角度认为岩溶管道可近似为小型的断层破碎带。

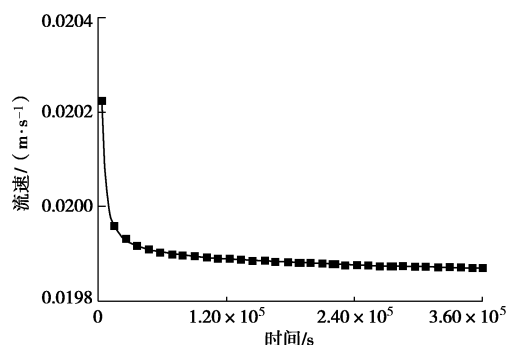


图2 定水头边界下的流速动态演化曲线

Fig. 2 Dynamic evolution curves of flow velocity under constant water head boundary

## 1.3 补给含水层尺寸效应

假设岩溶管道上部的地下暗河是突涌水灾害主要补给水源;岩溶管道周围的补给含水层是突涌水灾害的次要补给水源。在灾害水体通过岩溶管道不断向隧

道流入的过程中,暗河及周围含水层内的灾害水体不断向岩溶管道(突水通道)补给。地质勘探过程中暗河的几何位置可通过地球物理探测方法确定,但补给含水层具体区域长度则可能不够精确。针对此问题,本节重点研究周围补给含水层的尺寸对岩溶管道型突涌水模型的流速(流量)预测的影响。

保证不同补给含水层突涌水模型隧道渗出边界条件相同,同时保持不同模型具有相同的边界条件(模型变动产生的边界条件无水量交换),需重点进行扩大与减小含水层尺寸对流速(涌水量)影响规律的研究。图3建立了多种尺寸的周围补给含水层与同一尺寸岩溶管道及隧道的组合模型。具体包括无含水层(只考虑暗河和岩溶管道的组合)、含水层长度减小15 m、原模型、含水层长度增加15 m及含水层长度增加30 m 5种工况。

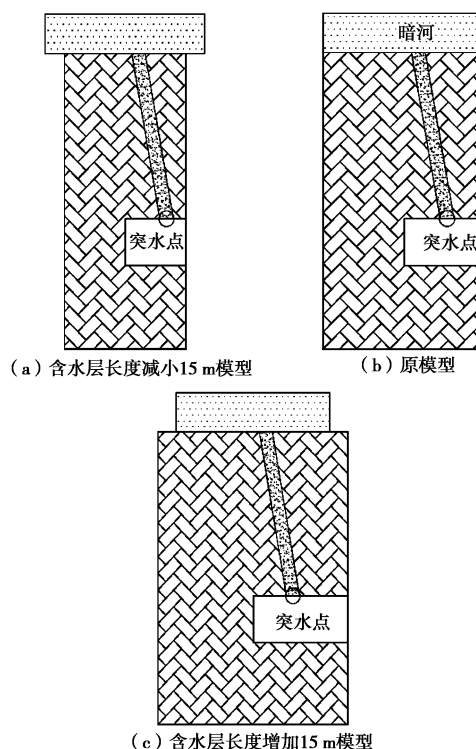


图3 不同尺寸补给含水层模型(未列出所有模型)

Fig. 3 Models for recharge aquifers with different sizes

图4给出了5种工况下的流速动态演化曲线。从图中可以看出含水层存在上限临界尺寸,此时周围含水层与暗河具有相同区域长度。当含水层长度小于临界尺寸,即图中考虑了无含水层(只考虑暗河和岩溶管道的组合)、含水层长度减小15 m、原模型的3种工况,随着含水层长度的增大,稳定阶段的流速也随之增大。当含水层长度大于或等于临界尺寸,即图中考虑了含水层长度增加15 m,含水层长度增加30 m两种工况,原模型的稳定阶段流速均大于这4种工况下的相应值。

为保证灾害水体的稳定流速在最大值范围内, 可通过建立周围含水层与暗河具有相同区域长度的数值分析模型进行相应分析。

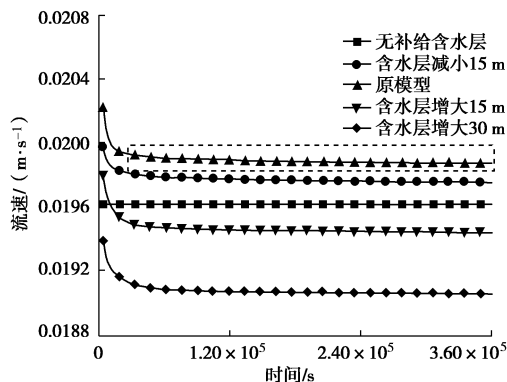


图 4 不同尺寸补给含水层的流速动态演化曲线

Fig. 4 Dynamic evolution curves of flow velocity of recharge aquifers with different sizes

## 2 定水头边界条件下动态演化规律

灾害水体流动过程中, 经历补给含水层 Darcy 流, 岩溶管道非 Darcy 流及隧道内 Navier-Stokes 紊流 3 种流态, 通过补给含水层、岩溶管道及已开挖段隧道连续耦合, 建立突水流体流动数值模型。针对岩溶管道及隧道中某一渗流路径  $A-B-C-D$ , 如图 5 所示, 分析揭露岩溶管道突涌水动态演化特征。

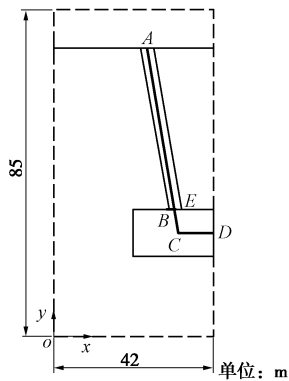


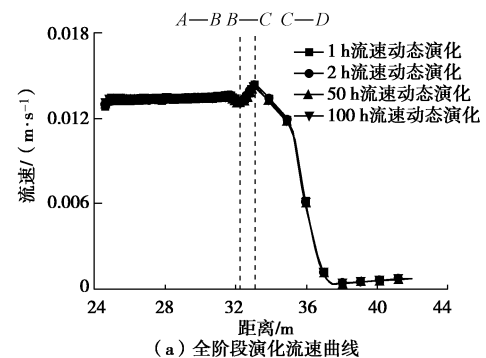
图 5 突涌水模型主要渗流路径

Fig. 5 Main path of water inrush model

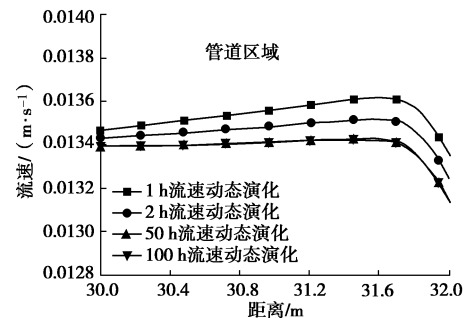
图 6 显示出了渗流路径上的流速演化规律曲线。流速沿岩溶管道与隧道的主要路径是连续变化的, 整体变化可分为 3 个阶段: 在非达西区域岩溶管道 ( $A-B$  段), 同一位置的流速随时间推移不断降低, 最后趋于稳定, 总体处于高速稳定区。从图 7 给出的岩溶管道内  $x, y$  方向流速动态演化曲线可知岩溶管道内  $x$  方向流速随时间变化不明显,  $y$  方向流速变化相对较明显, 且都不符合 Darcy 流。 $x, y$  方向距离为  $A-B$

在两个方向的投影距离。临近岩溶管道与隧道临界面附近, 由于拐角作用, 流速不断降低。沿流速方向相应的压力随水平距离变大而降低, 且随时间变化不显著。岩溶管道与隧道的临界面附近 ( $B-C$  段), 由于非渗流重力作用, 流速出现“阶跃式”变化, 流速出现瞬间增大的现象。隧道已开挖段的水平路径 ( $C-D$  段), 因该路径是中线高度方向上的水平渗流路径, 灾害水体流经该路径较少, 初始逐渐降低, 隧道出口附近流速处于较低的水平上, 水力特征趋向于稳定型。同时  $B-C$  段及  $C-D$  段中灾害水体基本处于无压稳定状态。总体来说, 揭露岩溶管道型流速演化曲线吻合较好, 岩溶管道型突水通道空间尺寸较小, 流速、压力等水力特性相较于断层破碎带型变化幅度不明显<sup>[16]</sup>, 时间效应不显著。但揭露岩溶管道型突涌水主要路径上的流速随渗流路径具有阶段演化特征。

综上研究可知,  $A-B$  段为流速处于高速稳定区, 是影响流速的主要阶段。如图 6 (b) 所示,  $B-E$  阶段的流速变化具有时间效应。因而, 需结合  $A-B$ 、 $B-E$  段的流速动态演化规律, 进行岩溶管道型突涌水的涌水量动态预测。同时, 根据式 (5)、(6) 及文献 [17] 指出灾害水体流速的主要影响因素包括渗透系数、管道宽度、管道倾角、比储水系数。为了准确预测涌水量, 有必要对其影响因素进行进一步讨论, 得到影响突涌水量的主要影响因素, 为实际工程涌水量动态预测提供一定的理论指导。



(a) 全阶段演化流速曲线



(b) 临界面流速演化曲线

图 6 流速阶段演化曲线

Fig. 6 Dynamic phase evolution curves of flow velocity

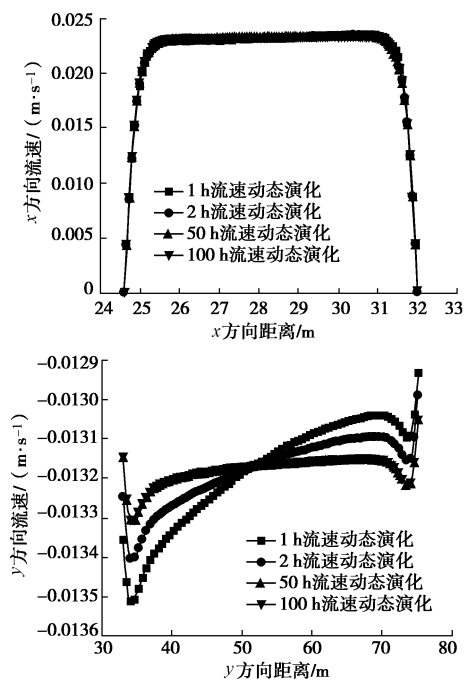
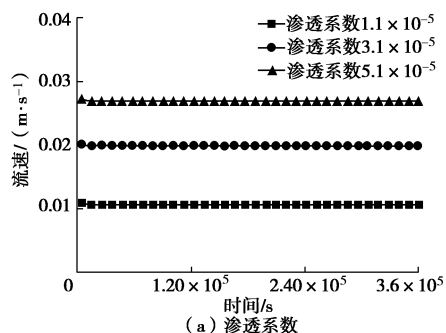
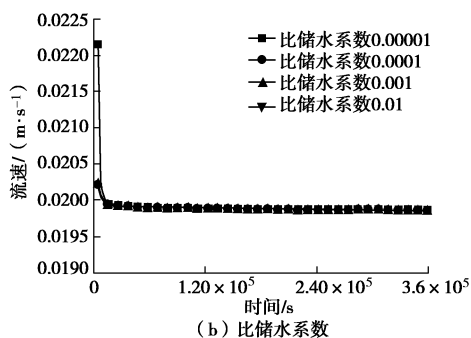
图7 岩溶管道内  $x$ ,  $y$  方向流速动态演化曲线

Fig. 7 Dynamic evolution velocity curves in  $x$  and  $y$  directions in karst pipeline

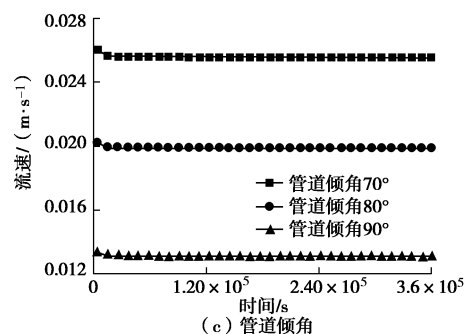
图8给出了不同影响因素下的流速动态演化曲线。渗透系数对流速的影响十分显著, 渗透系数与流速成正比, 渗透系数越大, 最大流速与稳定流速越大。工程中应结合地球物理物探手段确定富水岩溶管道的大体方位, 同时结合示踪试验、抽压水试验, 重点准确测定岩溶管道的渗透系数大小。岩溶管道倾角与岩溶管道宽度是重要影响因素, 工程中需做好地球物理探测工作, 准确探测岩溶管道的尺寸特征, 指导现场安全施工。岩溶管道的比储水系数对于流速的影响不是十分明显, 在工程范围内, 是突涌水流速(涌水量)预测的次要影响因素。



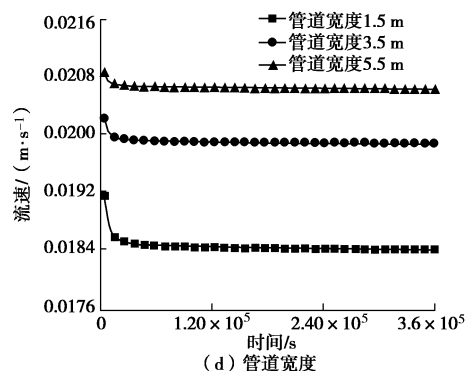
(a) 渗透系数



(b) 比储水系数



(c) 管道倾角



(d) 管道宽度

图8 不同影响因素下的流速动态演化曲线

Fig. 8 Dynamic evolution curves of flow velocity under different influence factors

### 3 岩溶管道型涌水量预测方法对比

#### 3.1 突涌水涌水量模型试验平台搭建

本次试验研究含暗河隧道开挖过程中充填型岩溶管道受施工扰动和地下水渗流作用, 岩溶管道充填物内部裂隙形成、扩展, 导水通道延伸、贯通, 直至失稳突水全过程, 主要进行了全过程涌水量监测分析。

模型相似材料<sup>[18-19]</sup>具体相似比尺如下: ①几何相似比尺  $C_L = 35$ ; ②重度相似比尺  $C_\gamma$ , 围岩和岩溶管道充填物  $C_\gamma = 1$ ; ③应力和弹性模量相似比尺  $C_\sigma = C_E = C_\gamma C_L$ ; ④应变、内摩擦角及泊松比等无量纲量相似比尺  $C_\varepsilon = C_\varphi = C_\mu = 1$ ; 围岩  $C_\sigma = C_E = 35$ , 岩溶管道充填物  $C_\sigma = C_E$ ; ⑤渗透系数相似比尺  $C_K = \sqrt{C_L} / C_\gamma$ ; ⑥时间相似比尺  $C_t = \sqrt{C_L}$ ; ⑦渗(涌)水量相似比尺  $C_q = C_k C_L^2$ 。

模型填筑高度为 220 cm, 高出隧道拱顶 120 cm, 模型整体尺寸如图9所示。岩溶管道通过PVC管预制, 如图10(a)所示, 布置在距离开挖洞口 300 cm 的位置, 管道等效直径为 10 cm, 倾角为 80°, 管道形状如图10(b)所示。岩溶管道内填筑充填相似材料过程中, 在管道不同高度埋设渗压传感器, 监测突涌水前以及突涌水过程中渗压的变化趋势, 如图10(c)所示。在管道内部安装水泵加压管道, 同时对管道附近进行水泥封压, 防治因管道密封问题造成水泵无法保压, 如图10(d)、11(e)所示。进行系统密封后,

施加初始水头, 使得补给含水层和岩溶管道处于饱和和水状态。开挖过程中, 开启水压加载系统, 在岩溶管道接触边界施加初始水压 0.1 MPa, 并保持稳定水压, 如图 10 (f)、(g) 所示, 实现恒定水头暗河系统, 形成岩溶管道内的水压和围岩渗流场, 但补给含水层与岩溶管道的灾害水体交换形式未具体考虑, 后期需进一步改进试验装置。

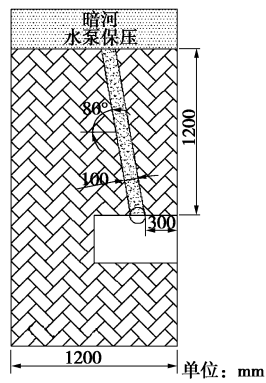


图 9 模型试验尺寸  
Fig. 9 Sizes of model tests

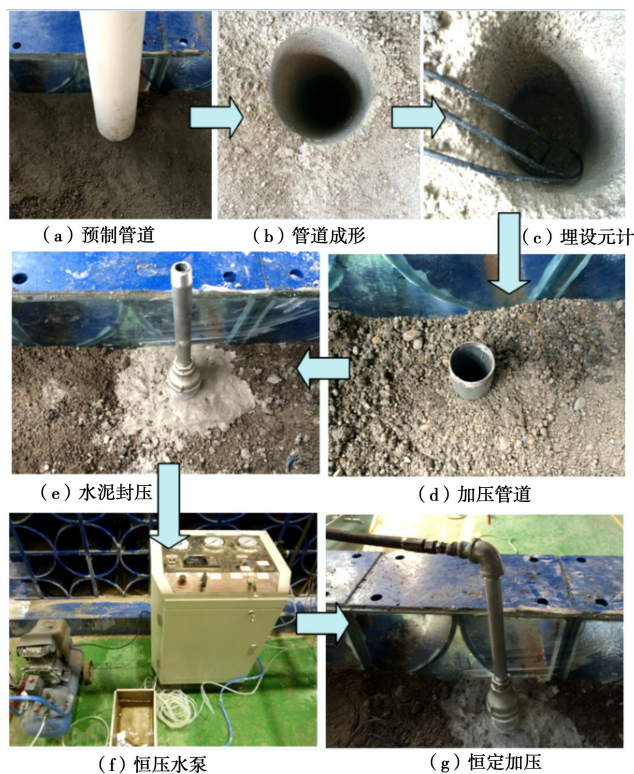


图 10 岩溶管道制作及施压步骤  
Fig. 10 Making and pressing steps of karst pipeline

本次揭露岩溶管道型突涌水模型试验, 重点通过灾害水体收集系统, 进行渗(涌)水量的监测, 如图 11 所示。当隧道掘进过程中, 直接揭露岩溶管道, 隧道在突水点区域发生突涌水, 流入隧道的灾害水体通过洞口集水箱收集, 通过排水管将集水箱中的灾害水

体排入烧杯(量程 5 L)进行收集, 并每隔 10 min 读取一次收集水量。



图 11 灾害水体收集系统  
Fig. 11 Disaster water collection system

3.2 数值分析方法预测涌水量理论基础

基于第2节中建立的模型对突涌水流速进行分析, 提取二维突涌水模型中岩溶管道与隧道接触临界线(面)上的各点流速, 组成流速集, 如图12 (a) 所示。每条竖直线为每一个瞬时对应临界线(面)上的速度分布, 最高点处为该对应瞬时点的最大流速, 最低点处为该对应瞬时点的最小流速。在流速集数据中提取某个瞬时点平均流速(最大流速与最小流速的算术平均), 作为该瞬时点平均流速, 乘以岩溶管道截面积作为模型的数值瞬时涌水量, 如图12 (b) 所示。

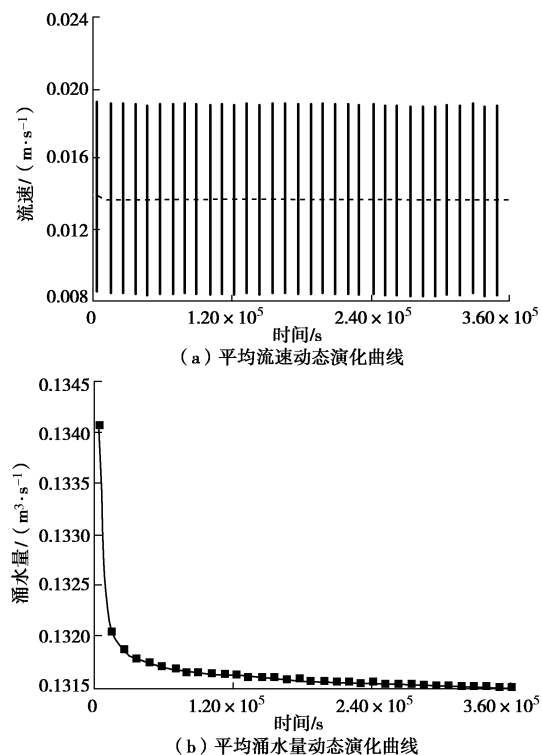


图 12 平均流速以及涌水量动态演化曲线  
Fig. 12 Dynamic evolution curves of mean velocity and water inflow

### 3.3 极限解析法预测涌水量理论基础

岩溶管道型突涌水与断层破碎带型涌突水的流速（涌水量）演化特征较为相似，但岩溶管道型突涌水的流速变化幅度较小，断层破碎带相比较岩溶管道具有更明显的水力特性，动态演化规律也更明显<sup>[16]</sup>。岩溶管道型突涌水模型作为断层破碎带型涌突水模型的“缩小版”，岩溶管道作为优势突水通道可近似为“缩小版”的断层破碎带，将岩溶管道与隧道接触区域的隧道划分为若干隧道单元，间接扩大岩溶管道的相对尺寸，如图13所示。每个隧道单元作为微型独立隧道独立分析其涌水量，然后隧道单元涌水量之和即为隧道总涌水量。

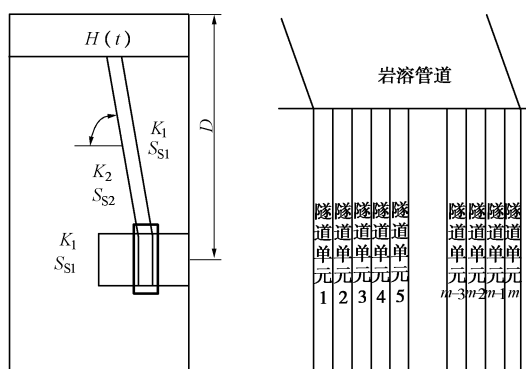


图 13 涌水量预测参数及隧道单元剖分示意图

Fig. 13 Prediction parameters of water inflow and division of tunnel elements

文献[17]提出了隧道施工过程中揭露断层破碎带型涌突水的解析公式。该公式中认为富水断层破碎带具有自由地下水位线。但若假定揭露岩溶管道型突涌水中岩溶管道与暗河的接触边界为定水头边界时，涌水量大小有所增大。但实际暗河与岩溶管道的接触边界为变水头边界，变水头边界模型与定水头边界模型相比，流速（涌水量）有很大程度的降低。偏于安全考虑灾害治理，文献[17]提出的公式进行揭露岩溶管道突涌水涌水量解析预测具有一定的可能性。

根据上述隧道离散化思想，提出离散化揭露岩溶管道型突涌水的涌水量解析预测公式如下：

$$Q(t_i) = \sum_{k=1}^m Q_k(t_i) \quad (7)$$

式中， $Q(t_i)$ 为 $t_i$ 时刻流入隧道的总涌水量， $m$ 为隧道离散为隧道单元的个数， $k$ 为第 $k$ 个隧道单元， $Q_k(t_i)$ 是 $t_i$ 时刻流入第 $k$ 个隧道单元的涌水量，

$$Q_k(t_i) = Q_k(t_{i-1}) +$$

$$\frac{D - \sum_{j=1}^{i-1} [Q_k(t_j) - Q_k(t_{j-1})] F_k(P, r_0, t_i - t_{j-1})}{F_k(P, r_0, t_i - t_{i-1})} \quad (8)$$

式中， $Q_k(t_i)$ 是 $t_i$ 时刻流入第 $k$ 个隧道单元的涌水量， $m$ 为隧道离散为隧道单元的个数， $k$ 为第 $k$ 个隧道单元， $F(P, r_0, t)$ 是包含各影响因素的函数，其中 $P$ 包含相关水文地质参数，例如岩溶管道渗透系数 $K$ ，比储水系数 $S_s$ ，岩溶管道宽度 $B$ ，岩溶管道倾角 $\theta$ 以及暗河地下水位线至隧道横断面中心的距离 $D$ 等， $r_0$ 为隧道等价圆半径， $t$ 为流速（涌水量）演化所经历的时间。

假设流入各个隧道单元的平均涌水量相等，式(7)可近似表达为

$$Q(t_i) = m Q_k(t_i) \quad (9)$$

因接触面流速存在差异，该假设求得总涌水量为最大涌水量。式(9)中， $Q(t_i)$ 是 $t_i$ 时刻流入隧道的总涌水量， $m$ 为隧道离散为隧道单元的个数， $k$ 为第 $k$ 个隧道单元。

针对第 $k$ 个隧道单元的涌水量进行预测时，影响因素函数 $F$ 的计算公式为

$$F_k(P, r_0, t_i - t_j) = \frac{1}{2\pi K} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (\operatorname{erfc}(u_n)/r_n) + \frac{1}{2\pi K} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (\operatorname{erfc}(u'_n)/r'_n) \quad (10)$$

式中， $u_n = r_n / (4\lambda \Delta t_{ij})^{1/2}$ ，其中 $r_n = 2nB/k$ ，当 $n=0$ 时， $r_n = B/k$ ， $B$ 为岩溶管道宽度， $u'_n = r'_n / (4\lambda \Delta t_{ij})^{1/2}$ ， $r'_n = ((2nB/k \cos \theta + 2D)^2 + (2nB/k \sin \theta)^2)^{1/2}$ ， $\lambda = K/S_s$ ， $\lambda$ 反映灾害水体在岩溶管道内部的扩散能力， $K$ 为岩溶管道的渗透系数， $S_s$ 为岩溶管道的比储水系数， $\operatorname{erfc}$ 为误差补偿函数。与数值模型相关参数保持一致，认为岩溶管道的宽度 $B=3.5$  m，倾角 $\theta=80^\circ$ ，岩溶管道的渗透系数 $K=3.11 \times 10^{-5}$  m/s，比储水系数为次要影响因素，认为 $S_s=1 \times 10^{-4}$  1/m，暗河地下水位距隧道等价圆心的距离 $D=58$  m左右。下面结合数值分析方法和模型试验监测数据验证极限解析方法的适用性，为岩溶管道型涌水量预测提供新的思路。

### 3.4 不同预测方法结果对比

综合运用极限解析法和数值平均涌水量法进行揭露岩溶管道型突涌水涌水量的预测，预测结果如图14所示。图中的散点为突涌水模型试验过程中平均瞬时涌水量的监测数据。从图中看出，极限解析法预测的涌水量与数值分析法预测的平均涌水量比较接近，预测的瞬时涌水量大约为 $0.13 \text{ m}^3/\text{s}$ ，极限解析涌水量稍大于数值平均涌水量。同时，绝大部分散点分布在两种预测方法预测的涌水量曲线附近，表明数值分析法和极限解析法预测平均突涌水量的合理性。但试验监测数据存在一定误差的主要原因：①模型试验设计过于理想化；②灾害水体收集过程中存在部分水量损失。相比较现阶段实际工程涌水量预测精度，数值分析和极限解析形成的预测方法精度已有显著提高。工程现

场可通过极限解析法确定涌水量的大体区间, 然后根据监测数据以及数值法求解的平均涌水量确定揭露岩溶管道型突涌水的涌水量。

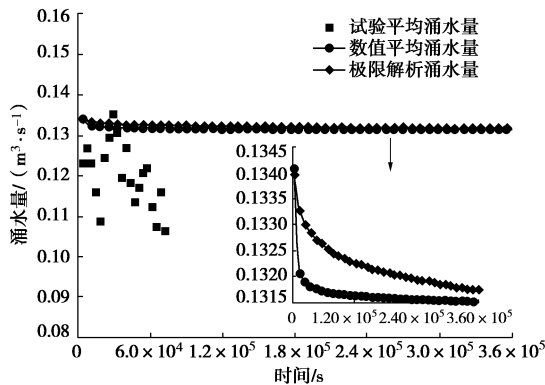


图 14 不同预测方法的涌水量动态演化曲线

Fig. 14 Dynamic evolution curves of water inflow using different forecasting methods

## 4 结 论

本文针对隧道岩溶管道型突涌水过程的动态演化特征及其涌水量预测的技术难题展开研究。

(1) 建立了揭露岩溶管道型突涌水数值分析模型, 对水头边界、补给含水层尺寸效应进行了讨论, 提出定水头边界条件界定安全状态能够更加偏于安全的指导现场治理。另外, 为保证灾害水体的稳定流速在最大值范围内, 应建立周围含水层与暗河具有相同区域长度的数值模型进行相应分析。

(2) 揭露岩溶管道型突涌水具有明显的阶段演化的性质。突涌水区域可分为 3 种典型流速演化区域: 管道内部的近似高速稳定区, 隧道与岩溶管道临界界面附近的流速升高区及隧道内部灾害水体的衰减-低速稳定区, 且管道内部的近似高速稳定区是流速(涌水量)预测的主要阶段。

(3) 对揭露岩溶管道型突涌水的流速影响因素进行了讨论, 表明渗透系数是影响其最为显著的因素, 为实际工程实践提供一定的理论指导。

(4) 提出了极限解析法及基于数值分析法的涌水量预测方法; 设计了该突涌水类型的模型试验, 通过监测数据对比了不同涌水量预测方法的差异, 说明了预测方法的合理性。

## 参考文献:

[1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945 - 1956. (QIAN Qi-hu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics

and Engineering, 2012, 31(10): 1945 - 1956. (in Chinese))

- [2] 石少帅. 深长隧道充填型致灾构造渗透失稳突涌水机理与风险控制及工程应用[D]. 济南: 山东大学, 2014. (SHI Shao-shuai. Study on seepage failure mechanism and risk control of water inrush induced by filled disaster structure in deep-long tunnel and engineering applications[D]. Jinan: Shandong University, 2014. (in Chinese))
- [3] 薛禹群. 关于稳定井流模型和Dupuit公式的讨论[J]. 水利学报, 2011, 42(10): 1252 - 1256. (XUE Yu-qun. A discussion on steady well flow model and Dupuit formula[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(10): 1252 - 1256. (in Chinese))
- [4] 杨天鸿, 陈仕阔, 朱万成, 等. 矿井岩体破坏突水机制及非线性渗流模型初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1411 - 1416. (YANG Tian-hong, CHEN Shi-kuo, ZHU Wan-cheng, et al. Water inrush mechanism in mines and nonlinear flow model for fractured rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1411 - 1416. (in Chinese))
- [5] 李利平. 高风险岩溶隧道突水灾变演化机理及其应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2009. (LI Li-ping. Study on catastrophe evolution mechanism of karst water inrush and its engineering application of high risk karst tunnel[D]. Jinan: Shandong University, 2009. (in Chinese))
- [6] 陈国庆, 李天斌, 范占锋, 等. 基于不同渗流方程的岩溶隧道涌突水过程模拟[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(4): 8 - 13. (CHEN Guo-qing, LI Tian-bin, FAN Zhan-feng, et al. A study of the process simulation of water burst in a karst tunnel based on different seepage equations[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(4): 8 - 13. (in Chinese))
- [7] 王建秀, 朱合华, 叶为民. 隧道涌水量的预测及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1150 - 1152. (WANG Jian-xiu, ZHU He-hua, YE Wei-min. Forward and inverse of water inflow into tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1150 - 1152. (in Chinese))
- [8] 王者超, 李术才, 梁建毅, 等. 地下水封石油洞库渗水量预测与统计[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1490 - 1497. (WANG Zhe-chao, LI Shu-cai, LI Li-ping, et al. Prediction and measurement of groundwater flow rate of underground crude oil storage caverns[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1490 - 1497. (in Chinese))
- [9] EL TANI M. Circular tunnel in a semi-infinite aquifer[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003, 18(1):

49 - 55.

- [10] 倪绍虎, 何世海, 汪小刚, 等. 裂隙岩体水力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(3): 488 - 498. (NI Shao-hu, HE Shi-hai, WANG Xiao-gang, et al. Hydraulic properties of fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(3): 488 - 498. (in Chinese))
- [11] 王媛, 秦峰, 夏志皓. 深埋隧道涌水预测非达西模型及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(9): 1862 - 1868. (WANG Yuan, QIN Feng, XIA Zhi-hao, et al. Non-darcy flow model and numerical simulation for predicting water inflow in deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(9): 1862 - 1868. (in Chinese))
- [12] WU Y S. Non-Darcy flow behavior near high-flux injection wells in porous and fractured formations[J]. Development in Water Science, 2005, **52**: 221 - 233.
- [13] WU Y S. Numerical simulation of single-phase and multiphase non-Darcy flow in porous and fractured reservoirs[J]. Transport in Porous Media, 2002, **49**(2): 209 - 240.
- [14] 王媛, 顾智刚, 倪小东, 等. 光滑裂隙高流速非达西渗流运动规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(7): 1404 - 1408. (WANG Yuan, GU Zhi-gang, NI Xiao-dong, et al. Experimental study of non-darcy water flow through a single smooth fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(7): 1404 - 1408. (in Chinese))
- [15] 仵彦卿. 岩土水力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (WU Yan-qing. Geohydraulics[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [16] 王健华. 隧道突涌水动态演化特征分析及区域涌水量预测方法[D]. 济南: 山东大学, 2016. (WANG Jian-hua. Study on flow dynamic evolution characteristics and regional water inflow prediction method of tunnel water inrush[D]. Jinan: Shandong University, 2016. (in Chinese))
- [17] HWANG Jin-hung, LU Chih-chieh. A semi-analytical method for analyzing the tunnel water inflow[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, **22**(1): 39 - 46.
- [18] 李树忱, 冯现大, 李术才, 等. 新型固流耦合相似材料的研制及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(2): 281 - 288. (LI Shu-chen, FENG Xian-da, LI Shu-cai, et al. Research and development of a new similar material for solid-fluid coupling and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(2): 281 - 288. (in Chinese))
- [19] 周毅, 李术才, 李利平, 等. 地下工程流-固耦合试验新技术及其在充填型岩溶管道突水模型试验中的应用[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(7): 1232 - 1240. (ZHOU Yi, LI Shu-cai, LI Li-ping, et al. New technology for fluid-solid coupling tests of underground engineering and its application in experimental simulation of water inrush in filled-type karst conduit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(7): 1232 - 1240. (in Chinese))