

DOI: 10.11779/CJGE201805007

岩溶隧道承压隐伏溶洞突水模型试验与数值分析

潘东东¹, 李术才¹, 许振浩^{*1}, 李利平¹, 路为^{1, 2}, 林鹏¹, 黄鑫¹, 孙尚渠¹, 高成路¹

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 2. 交通部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 为研究不同充填水压条件下隐伏溶洞对隧道围岩稳定性的影响, 进而揭示溶洞突水致灾机理, 利用自主研发的大型三维流固耦合模型试验系统, 针对强充填滞后型溶洞突水孕灾模式开展了试验研究, 揭示了承压溶洞突水过程位移、应力及渗压的变化规律, 综合模型试验与数值计算各自的优势, 开展了不同充填水压下(0.4~1.1 MPa)隧道开挖过程流固耦合数值模拟, 对模型试验结果进行补充验证。研究结果表明: 溶洞影响范围主要集中于一倍洞径范围内, 受溶洞影响普通围岩的应力水平及应力释放量均高于隔水岩体, 孔隙水压力消散速度较大, 位移变化相对平稳; 在隧道开挖阶段, 随着溶洞充填水压增大, 隔水岩体应力释放率越低, 渗透压力整体升高, 上升梯度逐渐减小, 当溶洞水压高于0.8 MPa时, 位移出现明显异常; 模型试验水压加载阶段真实再现了隔水岩体破裂突涌水过程, 研究结果对于岩溶隧道施工过程突水灾害防控具有指导意义。

关键词: 强充填溶洞; 流固耦合; 模型试验; 多元信息; 数值分析

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)05-0828-09

作者简介: 潘东东(1989-), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 主要从事隧道及地下工程突涌水灾变机制的理论及试验研究。E-mail: pdyyantu@163.com.

Model tests and numerical analysis for water inrush caused by karst caves filled with confined water in tunnels

PAN Dong-dong¹, LI Shu-cai¹, XU Zhen-hao¹, LI Li-ping¹, LU Wei^{1, 2}, LIN Peng¹, HUANG Xin¹, SUN Shang-qu¹, GAO Cheng-lu¹

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: To study the stability of the surrounding rock of concealed karst caves under different filling water pressures and to reveal the water inrush mechanism, a self-developed new type of model test system is applied to the solid-fluid coupling model tests on lagging water-inrush of karst cave, and the variation of the multi-field information such as displacement, stress and seepage pressure is effectively revealed. The advantages of numerical analysis are used to carry out fluid-solid coupling numerical simulation of tunnel excavation process under different filling water pressures (0.4 to 1.1 MPa). Based on the results of model tests and numerical simulations, the karst cave has impact on the surrounding rock within the scope of one time the cave diameter. The stress level, stress release rate and dissipation rate of pore water pressure of the ordinary surrounding rock are higher than those of water-resisting rock mass. Among them, the displacement exhibits an obvious stable stage. In the course of excavation, the rate of stress relieving gradually decreases when the filling pressure increases. Moreover, the osmotic pressure increases as a whole, but the gradient decreases. Nevertheless, after the karst water pressure reaches 0.8 MPa, obvious change starts to appear. The process of water inrush is truly reproduced at the hydraulic loading stage. The test results are used to guide the design and construction of the similar projects.

Key words: filled karst cave; fluid-solid coupling; model test; multiple information; numerical analysis

0 引言

随着中国基础建设中心逐渐向地质环境极端复杂的西部山区转移, 公路、铁路隧道修建过程面临着诸多挑战, 其中地质勘测难度大、施工风险高、生态环境保护问题日益突出。而鄂西山区在建或即将修建的隧道工程大多属于高风险岩溶隧道, 具有埋深大、洞

线长、岩溶强发育以及水压高等特点。因此, 岩溶突

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51509147); 国家重点基础研究发展计划("973"计划)项目(2013CB036000); 山东大学基本科研业务费资助项目(2017JC002)

收稿日期: 2017-03-02

*通讯作者(E-mail: zhenhao_xu@sdu.edu.cn)

涌水地质灾害逐渐成为制约中国隧道建设规模和发展的瓶颈问题^[1-2]。

针对岩溶突水问题, 研究初期国内外学者主要采用经验分析和工程类比法对含隐伏溶洞隧道围岩的稳定性进行分析, 受主观因素影响分析结果存在较大误差, 对于实际指导隧道施工还有待进一步研究。近年来, 很多学者在揭示充填型溶洞对隧道施工过程影响规律方面做了大量研究。孙谋等^[3]针对高风险岩溶隧道掌子面突水灾变机制进行了研究, 采用数值手段揭示了施工条件对掌子面前方隔水岩体发生断裂突水的演化规律。莫阳春^[4]就隧道底部存在充水溶洞问题, 设计了大型物理模型试验分析了隧道二次衬砌的内力分布特征, 揭示了水压、溶腔和隧道间距的变化对二衬内力的影响规律。王克忠等^[5]通过研制三维物理模型试验系统对锦屏二级水电站引水隧洞开展研究, 研究结果对深埋长大引水隧洞的防渗施工设计提供了理论指导。王经明等^[6]针对承压水沿煤层底板的递进导升式突水机制开展了物理模型试验研究, 揭示了此类地质灾害的致灾机理。周辉等^[7]研制了可以用于盐岩裂隙渗流-溶解耦合作用的试验系统, 并在特定条件下取得了较好的试验效果。刘爱华等^[8]将研制的流固耦合物理模型试验系统应用在深部能源开采诱发承压含水层突水的研究领域, 揭示了深部岩体的渐进式破坏规律。张金才等^[9]利用理论推导的方法对地下工程岩体应力与渗流的耦合分析进行了详细研究, 并将研究成果应用在地下能源开采造成多孔介质岩体渗透性的变化上。张志强等^[10]利用碎屑流发生模拟试验系统, 针对其灾变过程、发生条件开展了不同工况下的试验研究, 揭示了其致灾机理。黄明利等^[11]采用RFPA探讨了在施工扰动作用下岩溶隧道的突水致灾机制。李术才等^[12-13]分别针对深部能源开采诱发突水、岩溶隧道施工诱发裂隙型突水以及充填型岩溶管道突水等灾变过程开展了一系列试验研究, 系统揭示了不同突水灾害类型的致灾机理。

承压隐伏溶洞突水灾害是在地下洞室开挖过程中, 因灾害源赋存状态不明确, 受开挖扰动影响, 隔水岩体内部裂隙萌生扩展, 溶洞中承压水沿导水构造击穿受扰动岩体后压力急剧释放过程, 目前对该类型突水机理研究尚不深入。受地质条件影响, 岩溶发育地区地下水呈现不同空间分布状态, 将决定其不同的致灾特性。因此, 开展不同水压条件下隐伏溶洞对隧道围岩稳定性影响研究对揭示溶洞突水致灾机理具有重要意义。

1 充水溶洞灾变特征及工程背景

溶洞突水是地下工程建设过程的一大顽疾, 突涌

水灾害往往是多种因素共同作用的结果, 究其最根本原因在于灾害源的复杂性。一般而言溶洞突水灾害源多为地下结构中的溶腔、固相充填物(泥沙、块石等)及腔内承压水体, 通常伴随断层破碎带、层间错动带或者不整合接触等地质构造, 其中固相充填物多因溶腔、岩溶管道等垮塌, 泥沙、碎屑岩体在地下水搬运作用下输送至溶洞内部, 与无充填溶洞相比具有极大的不确定性。

通常突水突泥灾害由水源补给通道、灾害源与隔水岩体组成, 如图1所示, 其灾变演化过程异常复杂, 是含水构造、水动力系统以及隧道围岩力学平衡状态因隧道开挖扰动被打破的动力破坏过程, 存储在承压水体中的能量急剧释放, 固相充填物以多相流的形式瞬时向开挖临空面涌出, 对隧道安全施工构成极大威胁。通常情况下, 充水溶洞等不良地质体在不受任何人为因素干扰下, 其周边岩体维持相对稳定状态, 其灾害源对隧道施工没有任何危险性, 然而一旦隧道开挖稳定状态发生急剧变化, 该突水灾害源就演变为突水涌泥致灾构造^[14]。

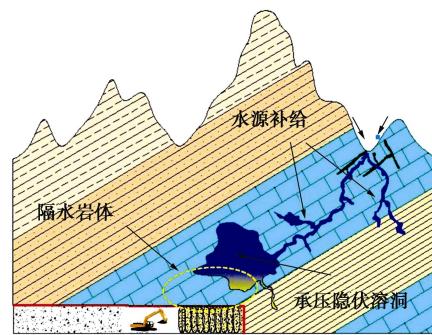


图1 充水溶洞与隧道空间位置示意图

Fig. 1 Positional relationship between karst cave and tunnel

本研究依托利川至万州高速公路齐岳山隧道, 隧道左幅起讫桩号ZK18+888—ZK22+268, 长3380 m, 最大埋深670 m; 右幅起讫桩号YK18+910—YK22+292, 长3282 m, 最大埋深543 m, 如图2所示。隧道净空10.5 m×5.0 m。隧址区岩溶强烈发育, 以岩溶管道和地下暗河为主, 地表表层岩溶(岩溶洼地、槽谷、溶沟、溶槽、溶蚀裂隙)作用十分强烈, 隧道处于岩溶地下水季节变动带, 其中隧道里程桩号YK19+920—YK20+245段枯水期地下水水位可能略高于隧道底板标高, 平水期地下水水位明显高于隧道标高, 雨季水位较高、水量及其丰富, 突水突泥灾害频发。根据钻孔水位观测资料确定该段隧道围岩的地下水水压力为0~0.4 MPa。极端暴雨条件下考虑到地下水来不及排泄, 会导致暗河管道中地下水瞬间快速抬升, 根据该类岩溶区地下水变幅经验值, 其水

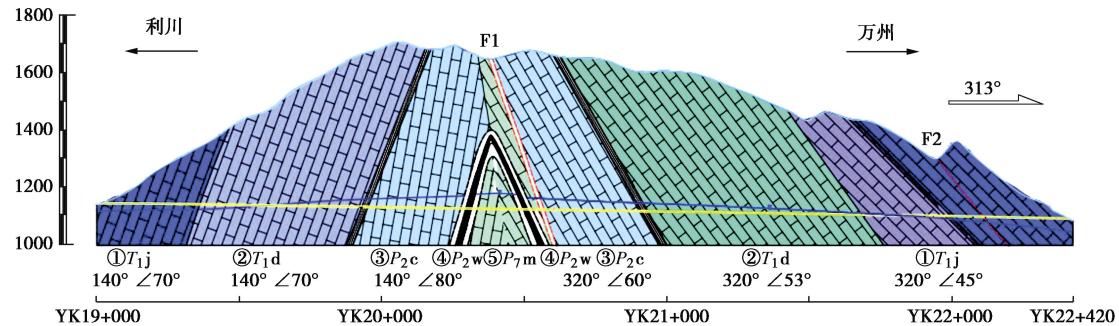
图 2 齐岳山隧道地质纵剖面图^[15]Fig. 2 Longitudinal geological profile of Qiyueshan tunnel^[15]

表 1 原型与相似材料参数

Table 1 Parameters of rock and similar materials

材料	密度/(g·cm ⁻³)	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	渗透系数/(cm·s ⁻¹)	黏聚力/MPa
原岩	2.60	27~38	3~6	5.32×10^{-6} ~ 7.26×10^{-5}	0.8~1.2
理想相似材料	2.60	0.68~0.95	0.075~0.15	8.42×10^{-7} ~ 1.15×10^{-5}	0.02~0.03
实际相似材料	2.53	0.87	0.13	3.16×10^{-6}	0.023

位可抬升约 90 m, 故极端最大水压力按 0.5~1.1 MPa 计。

2 承压型隐伏溶洞模型试验

承压充水溶洞的致灾过程异常复杂, 主要表现在地质赋存环境的复杂性与隧道开挖扰动的不确定性两方面。隧道开挖过程中, 原岩应力重分布, 渗流场也随之发生显著变化, 隔水岩体以及普通围岩产生较大位移, 为揭示承压溶洞突水过程应力、渗压及位移的变化规律开展以下模型试验研究。

2.1 模型试验设计思路

研究表明^[6]对于隧道侧部充水溶洞保持洞径比不变的情况下, 溶洞与隧道间距大于 1 倍隧道洞径时, 隧道围岩的稳定性受溶洞影响较小; 当间距减小到 0.4 倍洞径时, 溶洞严重削弱了隧道周边围岩的整体稳定性, 突水涌泥灾害发生可能性大大提高。综合考虑, 选取洞径比为 1 进行试验研究, 隔水岩体厚度为 0.5 倍隧道洞径, 溶洞设置在隧道径向斜上方 60° 拱肩位置, 如图 3 所示。

(1) 本试验利用自主研发的组合式大型三维流固耦合试验系统进行试验研究, 有效实现水压、地应力加载, 利用承压溶洞制备新工艺(后文中详细叙述)实现了岩溶隧道区溶洞赋存环境的模拟。

(2) 利用人工钻凿掘进方式模拟隧道开挖, 通过多元信息监测系统实时监测围岩应力场、渗流场、位移场的变化, 揭示隧道开挖对围岩的扰动影响。

(3) 为模拟丰水期承压溶洞水压升高, 利用高精度水压加载系统实现隧道开挖完成后的水压加载, 直至隔水岩体破裂突水, 研究隔水岩体在施工扰动与承压岩溶水双重作用下的突水机制。

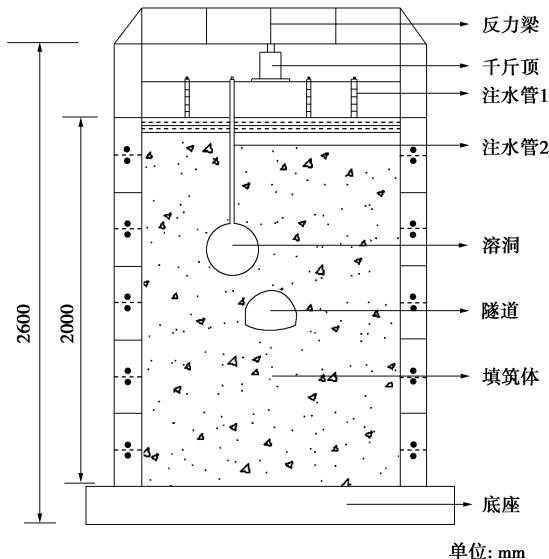


图 3 模型试验设计方案

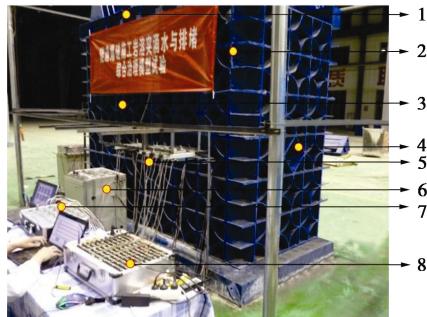
Fig. 3 Design of model tests

2.2 模拟参数及相似原理

根据相似材料基本原理^[16]配置相应的流固耦合相似材料, 隧址区围岩为各向同性介质材料, 根据相似理论的对应关系, 模型试验选取几何相似比尺 $C_L = 35$, 重度相似比尺 $C_\gamma = 1$, 应力弹性模量相似比尺 $C_E = C_\gamma C_L = 35$, 渗透系数相似比尺 $C_K = \sqrt{C_\gamma} / C_L = 35$ 。经过一系列相似材料配比试验研究, 选用砂、铁粉、碳酸钙, 水泥作为骨料, 硅油、氯化石蜡作为调节剂, 以此模拟实际工程中的Ⅳ级围岩, 围岩最终力学参数如表 1 所示。

2.3 试验装置设计

流固耦合模型试验系统共分为试验系统台架、多元信息监测系统、水压加载系统和地应力加载系统, 试验系统部分装置如图 3, 4 所示。



1-反力梁; 2-试验台架; 3-钢化玻璃; 4-隧道入口; 5-多点位移计;
6-水压加载装置; 7-位移采集器; 8-应变箱

图4 三维流固耦合模型试验系统

Fig. 4 3D visual solid-fluid coupling test system

为满足试验要求根据几何相似比尺, 试验系统台架内腔尺寸设计为 $2800\text{ mm} \times 1200\text{ mm} \times 2400\text{ mm}$ (长×宽×高)。为提高试验系统的可视性, 高强钢架结构内部覆钢化玻璃, 其上预留隧道进口、监测元件导线引出口等。信息监测系统由多元电阻式监测元件、多点位移监测装置及数据采集装置组成, 能够实现试验过程位移、应力、应变及渗流场信息的实时采集, 试验过程采用防水措施以及监测元件成活检验机制提高了监测精确度。

液压地应力加载系统由液压站、控制柜、油泵、液压千斤顶、反力梁、加载板等装置组成, 限于模型试验尺寸限制, 对于实际工况 400 m 埋深, 相似材料只能模拟 50 m 填筑高度, 利用液压地应力加载系统实现剩余地应力的加载。对于水压加载系统利用两套自主研发的高精度稳压泵送装置, 主要由气泵、储水箱、数字显示控制柜组成, 在地下水位控制与溶洞水压模拟方面取得了较好的试验效果。

2.4 试验实施

(1) 模型体填筑与试验系统调试

流固耦合模型试验采用传统分层填筑法进行填筑, 按照配比原则配置相似材料, 具体包括配料称量、搅拌均匀以及分层填铺, 相似材料填铺过程进行层与层之间拉毛处理。承压溶洞的制备采用新型溶洞生成方法, 主要包括球囊固定溶洞位置、夯实填筑体、预留转相接口、高温加热钢管以及提取球囊残留物, 最终完成溶洞制备。

待完成承压溶洞制备, 相似材料填筑到设计标高后, 为达到较好的水压加载效果填筑体顶部施做透水层, 上部增设储水装置和加载板, 封顶后安装液压加载系统, 静置填筑体 48 h, 用高强度螺栓固定反力梁, 按照物理模型试验几何相似比, 逐级加载到初始地应力 260 kPa, 稳压 24 h 待变形稳定, 进行顶部密封处理, 完成模型体填筑。试验过程部分步骤如图 5 所示。

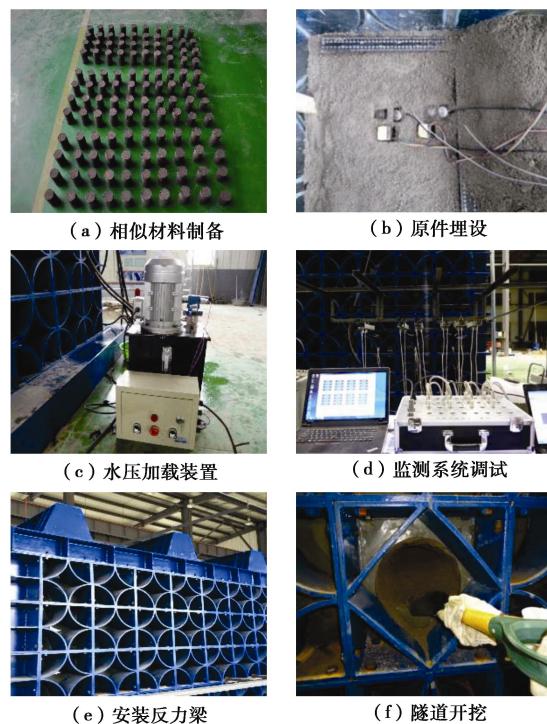


图5 试验过程照片

Fig. 5 Photos of test process

(2) 监测方案

本试验共设计 I, II 两个监测断面, I 为隐伏溶洞影响区域内的普通围岩监测断面, II 为隔水岩体重点监测断面。测线 1, 2, 3 分别在 0.5 倍、1 倍、2 倍洞径轮廓线处实现多元信息的监测; 测线 A 实现对隔水岩体开挖过程以及水压加载阶段的重点监测, 具体监测方案如图 6 所示。

(3) 试验过程

按照初始地应力场对模型体施加 260 kPa 后养护 48 h 即可进行水压加载, 本次试验模拟实际工况 0.7 MPa 溶洞水压力, 同时满足围岩初始渗流场, 严格按照物理模型试验几何相似比, 利用水压加载系统分 4 次逐级加载至 20 kPa, 每次加载保持充足的稳压时间, 形成满足试验要求的初始地下渗流场及承压溶洞初始水压。

隧道开挖前进行试验系统调试, 隧道开挖采用上下台阶法, 开挖长度为 72 cm, 循环进尺为 6 cm, 共 24 个开挖步, 上台阶高度为 14.1 cm, 下台阶高度为 10.7 cm, 台阶长度为 6 cm。

在初始渗流场环境下隧道开挖完成以后, 为模拟隧址区丰水期溶洞水压升高, 即可进入溶洞水压加载阶段, 按照 10 kPa 梯度变化进行水压加载, 加载过程密切关注监测数据以及隧道内涌水量的变化, 实时进行图像采集, 待每一级水压稳定后进行下一级水压加载, 要求每一级水压加载时间控制在 20~30 min, 水压加载过程按照模型试验几何相似比 1:35, 当加载

至 50 kPa, 隔水岩体破裂失稳, 围岩破碎体与承压溶洞一起涌出; 恒压一段时间, 突出水体逐渐由浑浊变清澈, 关闭水压加载装置。限于文章篇幅模型试验的具体过程描述将在后文中详细叙述, 试验过程围岩线状渗水与最终突水如图 7, 8 所示。

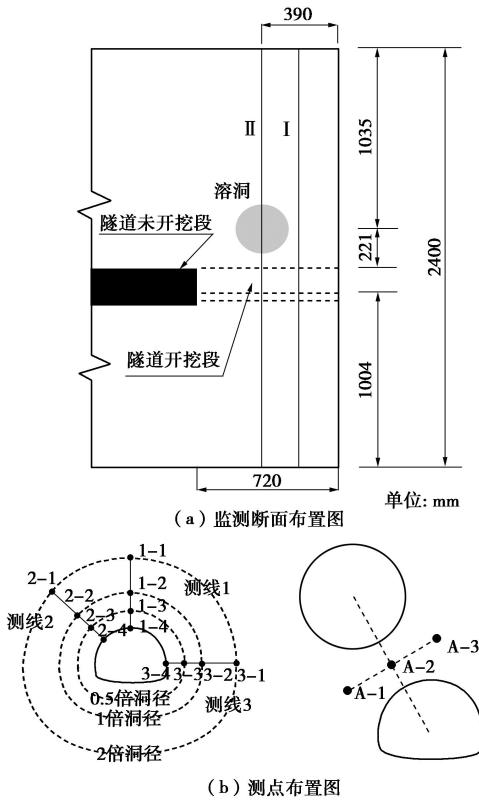


图 6 监测方案

Fig. 6 Monitoring schemes



图 7 隧道开挖图

Fig. 7 Excavation in tunnel



图 8 模型试验突水情形

Fig. 8 Circumstance of water inrush in model tests

3 数值理论模型及计算参数

物理模型试验真实再现了溶洞水压升高隔水岩体破裂突水过程, 由于模型试验所能模拟实际工况数量有限, 充分发挥数值计算与模型试验各自优势, 开展了多种工况下隧道开挖过程流固耦合数值模拟, 以便对试验结果进行补充验证, 进一步完善突涌水致灾机理。

3.1 流固耦合计算基本原理

为模拟多孔介质材料中流体的流动, 渗流方程以达西定律为依据, 流固耦合过程遵循 Biot 固结理论, 通过孔隙水压力的改变引起岩土材料物理场的变化^[17], 利用有限差分方法求解以下主要方程:

在流体密度作常数简化情况下, 对于各向同性、均质岩土材料描述流体的运动方程如下:

$$q_i = -k(p - \rho_f x_f g_j) \quad , \quad (1)$$

式中, k 为岩土介质的渗透系数, ρ_f 为流体密度, g_j 为重力加速度的 3 个分量 ($j=1, 2, 3$)。

对于小变形岩土工程材料, 流体质点平衡方程为

$$-q_{i,i} + q_v = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad . \quad (2)$$

式中 $q_{i,i}$ 为渗流速度 (m/s); q_v 为单位体积内流体源产生流体的强度 (1/sec), ζ 为单位体积内流体的体积变化量,

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{M} \frac{\partial P}{\partial t} + \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \beta \frac{\partial T}{\partial t} \quad , \quad (3)$$

其中, M 为 Biot 模量 (N/m²), P 为孔隙水压力, ε 为体积应变。利用动量平衡的形式可表述为

$$\sigma_{ij,j} + \rho g_i = \rho \frac{dv_i}{dt} \quad , \quad (4)$$

其中, ρ 为体积密度 ($\rho = (1-n)\rho_s + ns\rho_w$), ρ_s 和 ρ_w 分别为固体和流体的密度。

对于线弹性岩土工程材料的本构模型, 体积应变的改变引起流体孔隙压力的变化, 孔隙水压力的变化也会导致体积应变的发生, 其有效应力和应变的关系式如下:

$$\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^0 + \alpha(p - p^0)\delta_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \left(K - \frac{2}{3}G\right)\varepsilon_{kk} \quad , \quad (5)$$

式中, σ_{ij}^0 为初始应力, p^0 为初始孔隙水压力, K , G 分别为材料的体积模量和材料的剪切模量, ε_{ij} 为应变张量。

描述岩土材料应变速率与速度梯度之间关系的相容方程表述为

$$\xi_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad , \quad (6)$$

式中, v_i 为速度张量, ξ_{ij} 为应变速率。

在流固耦合计算过程默认边界为不透水边界, 透水边界的外法线流速分量表述如下:

$$q_n = h(p - p_e) \quad (7)$$

式中, h 为渗漏系数 ($\text{m}^3/\text{N}\cdot\text{s}$), p 为边界面处的孔隙水压力, p_e 为渗流出口处的孔隙水压力。

3.2 计算方案选择

数值计算模型如图 9 所示, 长度为 56 m, 宽度为 60 m, 高度为 80 m, 溶洞发育尺寸为 1 倍隧道半径即 5.6 m, 设置在沿模型长度方向的中间位置, 位于隧道径向斜上方 60° , 隔水岩体厚度为 5.6 m。

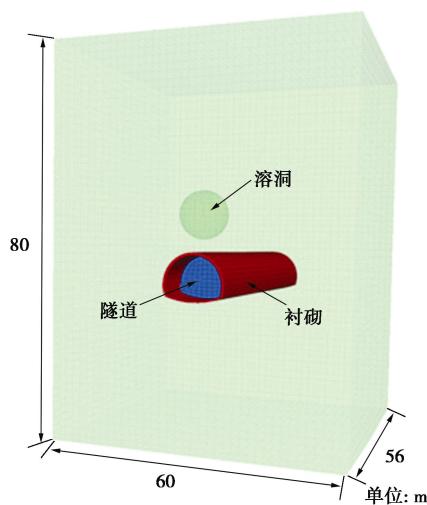


图 9 三维数值计算模型

Fig. 9 3D numerical model of tunnel

围岩条件为 IV 级围岩, 对于力学计算屈服条件采用 Mohr-Coulomb 准则, 按照上覆自重应力对模型上表面施加地应力边界条件, 由于数值模型提供了 41.94 m 的隧道埋深应力条件, 还需施加 9.309 MPa 的初始地应力, 在模型剩余 5 个表面设置法向约束。在渗流模式下, 模型上表面设置为透水边界, 隧道开挖过程洞壁与掌子面的孔隙水压力固定为 0, 依据文章第 2 节隧址区钻孔水位观测资料以及实际开挖揭露情况, 分别设置溶洞压力为 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.1 MPa。计算工况具体设计如表 2 所示, 相关指标: Biot 系数=1, 孔隙率=0.3, 迁移系数 $k_m=3.22 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 流体体积模量= $2 \times 10^9 \text{ Pa}$, Biot 模量 $M=8.0 \times 10^9 \text{ Pa}$ 。

表 2 模型计算工况表

Table 2 Indices for numerical calculation

影响水平	围岩级别 S	隧道埋深 h/m	溶洞大小 R/m	溶洞水压 P/MPa
1				0.4
2				0.6
3	IV	400	5.6	0.8
4				1.0
5				1.1

4 模型试验及数值模拟结果分析

4.1 模型试验与数值计算结果对比分析

在隧道开挖阶段, 如图 10, 11 所示, 模型试验与数值计算在关键点处位移、渗透压力变化规律基本一致, 模型试验监测数据高于数值计算结果。就位移变化而言, 拱顶位移较两侧拱腰收敛值大, 普通围岩位移持续增大, 含溶洞一侧位移变化量明显高于无溶洞一侧; 随着掌子面逐渐靠近监测断面, 位移出现陡升, 但隔水岩体 (II-A-1) 区域位移增加速度明显高于普通围岩 (I-3-3), 该现象在数值计算结果中也有体现, 远离测断面 3~4 个开挖步后普通围岩位移达到相对稳定状态, 隔水岩体区域位移始终保持缓慢增长趋势。

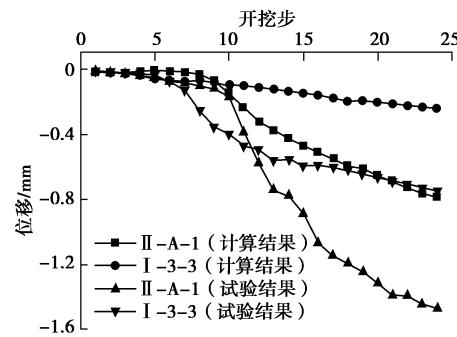


图 10 开挖过程位移变化曲线

Fig. 10 Curves of displacement in excavation process

同位移变化相比, 渗透压力的变化具有明显的压力陡降和压力平稳阶段, 普通围岩受承压溶洞影响较小, 因此渗透降低幅度大且迅速; 隔水岩体区域受承压溶洞赋存影响, 随着隧道开挖渗透压缓慢减小, 待掌子面远离监测断面后, 渗透压力减小至初始压力的 36.7% 后达到稳定状态。通过模型试验与数值计算结果对比分析, 为下文多种工况下数值计算结果分析提供了依据。

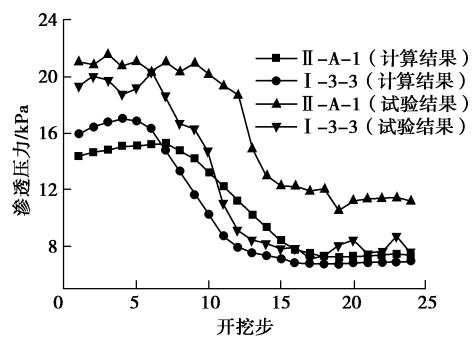


图 11 开挖过程渗透压力变化曲线

Fig. 11 Curves of seepage pressure in excavation process

4.2 突水过程模型试验结果分析

在水压加载阶段, 承压溶洞水压恒定 20 kPa 时,

围岩出现明显珠状渗水，此时隔水岩体在岩溶水渗透作用下开始软化；随着水压继续加载，呈现明显“阶梯状”上升趋势，此时隧道内渗水量逐渐增大。

当水头压力加载至 40 kPa，隧道侧壁隔水岩体区域开始脱落，沿隧道围岩裂缝呈间歇式不断有泥水混合物流出，隔水岩体位移明显增大，普通围岩（I—2—3）位移几乎没有明显变化。水头压力继续提升至 45 kPa，流体状态由泥水混合物逐渐转为清水，水流趋于稳定、流速变大；受隔水岩体裂隙扩展影响，普通围岩（I—2—2）的渗透压力始终低于 II—A—2 监测区域，当加载至 50 kPa，隔水岩体破裂失稳，围岩破碎体与承压溶洞水一起喷涌而出；继续水压加载 3 min，突出水体逐渐由浑浊变清澈，关闭水压加载装置。水压加载阶段围岩位移、渗透压力变化如图 12 所示。

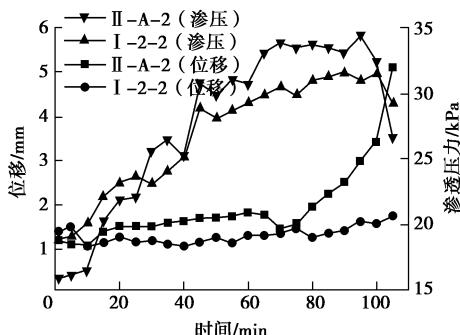


图 12 水压加载阶段监测数据变化曲线

Fig. 12 Curves of monitoring data in water-loading process

4.3 多种工况下数值计算结果分析

对于隧道施工过程滞后型突水，通常更加关注隧道开挖过程对围岩稳定性的影响，本节通过数值计算方法与模型试验结果相互印证研究了不同充填水压条件下隧道围岩位移场、应力场及渗流场的变化规律。代表性的选取隔水岩体部分进行重点研究，其他方面的分析在后文中详细论述。

(1) 位移变化特征

在隔水岩体重点监测区域，通过对数值计算与模型试验结果对比分析，位移变化达到稳定状态时间均远远迟于应力和渗压，分析原因主要是隐伏溶洞内承压水对隔水岩体的作用伴随整个隧道开挖过程，施工扰动影响致使隔水岩体内部裂隙不断萌生，渗透侵蚀作用逐渐突出，渗流路径伴随裂隙的萌生不断调整，位移持续增加。

如图 13 所示，当溶洞水压低于 0.8 MPa 时，位移方向保持不变，位移逐渐增大；当溶洞水压高于 0.8 MPa 时，在隧道开挖初期，位移延相反方向增大后减小，待掌子面通过监测断面后，又反向增加。因此受溶洞水压影响，总位移方向不断变化，在实际工程中对于强充填滞后型溶洞突水，围岩通常表现出明显的

临灾特征。

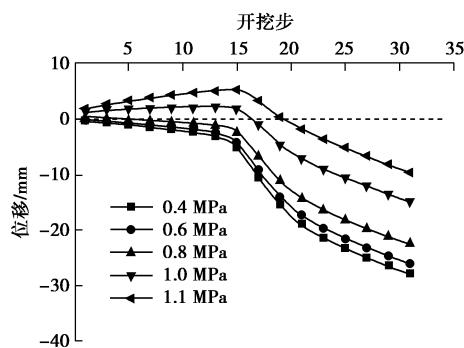


图 13 关键点的竖向位移随开挖步变化曲线

Fig. 13 Curves of displacement at key points with excavation steps

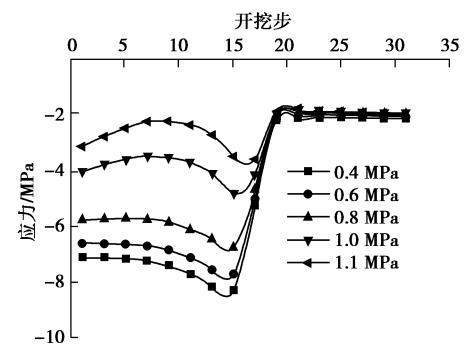


图 14 关键点应力随开挖步变化曲线

Fig. 14 Curves of stress at key points with excavation steps

(2) 应力变化特征

由于溶洞的存在，在隧道开挖之前为围岩应力的释放提供了部分空间，因此隔水岩体区域整体应力水平较低。受隧道开挖卸荷作用影响，拱顶、拱底位置均出现拉应力，监测点应力随着开挖先保持稳定不变或小幅度增大，当掌子面通过监测断面后，应力急剧释放而陡降，最后保持稳定不变，应力变化趋势基本与模型试验结果一致，由于模型试验充分考虑了隧道开挖以及渗透压力对隔水岩体的弱化作用，其应力释放速率相比数值结果较小，达到应力稳定所需时间更长。如图 14 所示，随着溶洞充填水压逐渐升高，隔水岩体区域应力逐渐减小，最终稳定状态下的应力水平基本一致，由此可见溶洞水压越高应力释放率越低。

(3) 渗压变化特征

固定地下水位的影响，当溶洞水压稳定在 0.6 MPa 以下时，如图 15 所示，孔隙水压力整体呈降水漏斗分布形态，随着溶洞水压升高，降水漏斗向无溶洞一侧偏移，并且范围逐渐扩展；当水压升高至 1.0 MPa 时，含隐伏溶洞一侧渗压几乎完全由溶洞水压控制。如图 16 所示，在掌子面开挖到距离溶洞中心截面 4 个开挖进尺时，渗透压力开始出现明显减小，可见溶洞对隧道围岩渗流场影响区域集中在洞周一倍洞径范围内。就渗压整体变化趋势而言，随溶洞水压升高，隔水岩体渗压整体升高，上升梯度逐渐减小，渗压减小速率越大。

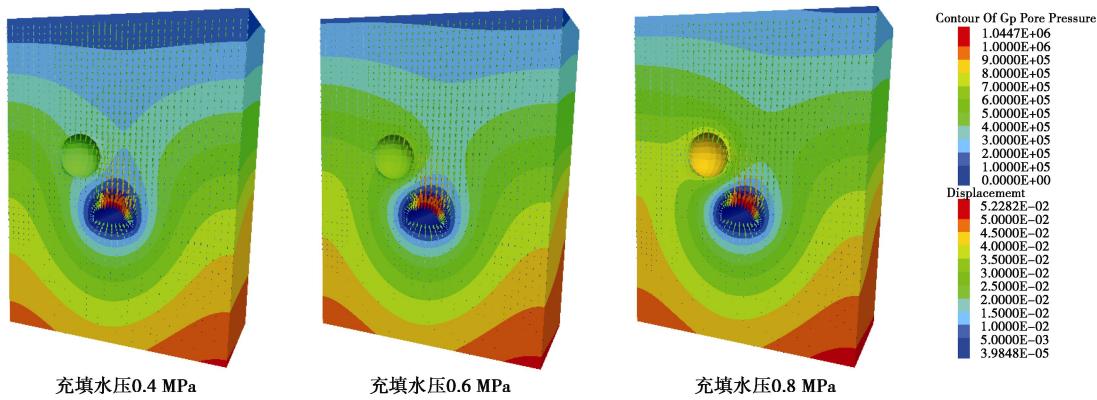


图 15 不同充填水压条件下孔隙水压力云图与速度矢量图

Fig. 15 Contours and velocity vectors of pore water pressure under different water pressures

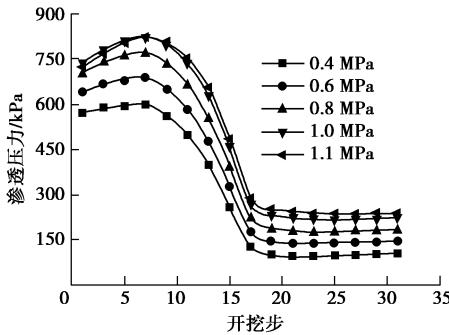


图 16 关键点的渗透压力随开挖步变化曲线

Fig. 16 Curves of seepage pressure at key points with excavation

5 结论与展望

本研究针对强充填滞后型溶洞突水模式开展了大型三维流固耦合模型试验, 同时在不同充填水压条件下, 对隧道开挖阶段进行数值模拟研究, 取得的结论如下:

(1) 隧道开挖扰动对隔水岩体裂隙的萌生扩展作用最为明显, 溶洞水压升高是导水通道形成的主要原因, 持续的渗流-应力耦合作用最终导致隔水岩体破裂失稳。通过对隧道围岩位移场、应力场和渗流场的监测分析, 在关键点处模型试验与数值计算变化规律基本一致, 为两者联合揭示强充填滞后型溶洞突水致灾机理提供新思路。

(2) 溶洞影响范围主要集中在一倍洞径范围内, 受赋存溶洞影响, 隔水岩体区域应力水平低于普通围岩, 在隧道开挖阶段, 普通围岩的应力释放过程比隔水岩体略长, 其应力释放量较大, 孔隙水压力消散速度较大, 监测数据几乎同时趋于稳定。在水压加载阶段, 围岩渗透压力呈现明显“阶梯状”上升趋势, 位移呈现显著差异, 隔水岩体区域在经历“线状渗水-泥水混合物-清水”后破裂失稳突水, 对实际工程溶洞突水防治具有重要意义。

(3) 随着溶洞充填水压增大 (0.4~1.1 MPa),

不同工况下的隧道围岩应力和渗压变化规律基本一致, 位移变化差异明显。隔水岩体区域应力逐渐减小, 减小梯度呈增大趋势, 最终稳定状态下的应力水平基本相同, 充填水压越高应力释放率越低。隔水岩体渗透压力整体升高, 上升梯度却逐渐减小, 当充填水压超过 0.8 MPa, 隔水岩体渗透压变化无明显差异。当溶洞水压低于 0.8 MPa 时, 位移逐渐增大, 方向保持不变, 当溶洞水压高于 0.8 MPa 时, 在隧道开挖初期, 位移延相反方向增大后减小, 待掌子面通过监测断面后, 又反向增加。

(4) 对于隧道施工过程强充填滞后型溶洞突水, 其隔水岩体的渗透压力以及位移变化信息在突水前具有相对明显的前兆特征, 后期研究可重点考虑获取不同地应力、溶洞大小以及围岩类型等因素作用下溶洞突水的监测信息, 为突水前兆多元信息演化规律及实时监测理论提供科学依据。

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 counter measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945 – 1956. (in Chinese))
- [2] 李利平. 高风险岩溶隧道突水灾变演化机制及其应用研究 [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]. Ji'nan: Shandong University, 2009. (in Chinese))
- [3] 孙谋, 刘维宁. 高风险岩溶隧道掌子面突水机制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1175 – 1180. (SUN Mou, LIU Wei-ning. Research on water inrush mechanism induced by karst tunnel face with high risk[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1175 – 1180. (in Chinese))

- [4] 莫阳春. 高水压充填型岩溶隧道稳定性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009. (MO Yang-chun. Stability research on high water pressure filled karst caves tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [5] 王克忠, 李仲奎. 深埋长大引水隧洞三维物理模型渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 725 - 731. (WANG Ke-zhong, LI Zhong-kui. Study of 3D physical model test of seepage of deep-buried long and large diversion tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 725 - 731. (in Chinese))
- [6] 王经明. 承压水沿煤层底板递进导升突水机制的模拟与观测[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 546 - 549. (WANG Jing-ming. In-situ measurement and physical analogue on water inrush from coal floor induced by progressive intrusion of artesian water into protective aquiclude[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5): 546 - 549. (in Chinese))
- [7] 周辉, 汤艳春, 胡大伟, 等. 盐岩裂隙渗流-溶解耦合模型及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 946 - 950. (ZHOU Hui, TANG Yan-chun, HU Da-wei, et al. Study on coupled penetratingdissolving model and experiment for salt rock cracks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 946 - 950. (in Chinese))
- [8] 刘爱华, 彭述权, 李夕兵, 等. 深部开采承压突水机制相似物理模型试验系统研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1335 - 1341. (LIU Ai-hua, PENG Shu-quan, LI Xi-bing, et al. Development and application of similar physical model experiment system for water inrush mechanism in deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1335 - 1341. (in Chinese))
- [9] 张金才, 王建学. 岩体应力与渗流的耦合及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 1981 - 1989. (ZHANG Jin-cai, WANG Jian-xue. Coupled behavior of stress and permeability and its engineering applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 1981 - 1989. (in Chinese))
- [10] 张志强, 阚呈, 孙飞, 等. 碎屑流地层隧道发生灾变的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2451 - 2457. (ZHANG Zhi-qiang, KAN Cheng, SUN Fei, et al. Experimental study of catastrophic behavior for natm tunnel in debris flow strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2451 - 2457. (in Chinese))
- Chinese))
- [11] 黄明利, 王飞, 路威, 等. 隧道开挖诱发富水有压溶洞破裂突水过程数值模拟[J]. 中国工程科学, 2009, 11(12): 93 - 96. (HUANG Ming-li, WANG Fei, LU Wei, et al. Numerical study on the process of water inrush in karst caves with hydraulic pressure caused by tunnel excavation[J]. Engineering Sciences, 2009, 11(12): 93 - 96. (in Chinese))
- [12] 李术才, 李利平, 李树忱, 等. 地下工程突涌水物理模拟试验系统的研制及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(3): 299 - 304. (LI Shu-cai, LI Li-ping, LI Shu-cheng, et al. Development and application of similar physical model test system for water inrush of underground engineering[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2010, 27(3): 299 - 304. (in Chinese))
- [13] 李术才, 周毅, 李利平, 等. 地下工程流-固耦合模型试验新型相似材料的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1128 - 1137. (LI Shu-cai, ZHOU Yi, LI Li-ping, et al. Research of a new similar material for underground engineering fluid-solid coupling model test and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1128 - 1137. (in Chinese))
- [14] 石少帅. 深长隧道充填型致灾构造渗透失稳突涌水机制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 application[D]. Jinan: Shandong University, 2014. (in Chinese))
- [15] 李术才. 隧道突水突泥灾害源超前地质预报理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (LI Shu-cai. The theory and method of geological prediction for the disaster source of water and mud inrush in tunnels[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))
- [16] 胡耀青, 赵阳升, 杨栋. 三维固流耦合相似模拟理论与方法[J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2007, 26(2): 204 - 206. (HU Yao-qing, ZHAO Yang-sheng, YANG Dong. 3D solid-liquid coupling experiment study of deformation destruction of coal[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2007, 26(2): 204 - 206. (in Chinese))
- [17] Itasca Consulting Group Inc. FLAC^{3D} user manuals (version3.0)[R]. Minnesota: Itasca Consulting Group, Inc, 2005.