第42卷 第2期	中	国	岩	溶	Vol. 42 No. 2
2023 年 4 月	CARSOL	OGI	CA	SINICA	Apr. 2023

孟杰,林志斌,林培忠.应力-渗流-损伤耦合作用下管道型岩溶隧道突水灾变规律研究[J].中国岩溶,2023,42(2):351-360. DOI:10.11932/karst20230206

# 应力-渗流-损伤耦合作用下管道型岩溶隧道 突水灾变规律研究

孟 杰<sup>1</sup>,林志斌<sup>2</sup>,林培忠<sup>3</sup>

(1. 江苏建筑职业技术学院, 江苏 徐州 221008; 2. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454150;
 3. 河南省自然资源监测与国土整治院, 河南 郑州 450002)

摘 要:为研究管道型岩溶隧道的突水灾变规律,以毕节市大寨隧道为工程背景,考虑围岩的应力-渗流-损伤耦合作用,采用FLAC 3D 对管道型岩溶隧道掘进过程中围岩位移、塑性区、渗透系数以及 涌水量变化规律展开数值模拟研究,在此基础上了对比分析了无岩溶管道以及不同岩溶水压对隧道 突水灾变特征的影响。数值模拟结果表明:(1)隧道掌子面距岩溶管道4m以上时,隧道围岩稳定性 良好,而隧道开挖一旦全部揭露岩溶管道,则管道内充填岩体会逐渐塑性屈服并发生整体滑移失稳, 导致隧道出现突水突泥事故,这与实际工程状况保持一致。(2)管道型岩溶隧道掘进过程中的涌水 量大致呈"S型曲线"变化,表现出很强的突发性和较大的体量性;(3)溶洞承压水通过岩溶管道向 隧道内发生突水存在一个启动压力,只有超过这个启动压力,隧道才会发生突水突泥事故,且其突水 量与岩溶水压呈现出明显的指数递增关系。

关键词:岩溶管道;突水灾变;位移;塑性区;渗透系数;涌水量

中图分类号: U456 文献标识码: A 文章编号: 1001-4810 (2023) 02-0351-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引 言

我国西南岩溶区面积广阔,近年来随着西部大 开发战略的不断实施,在岩溶地区修建隧道的工程 实例显著增加<sup>[1-2]</sup>。其中,岩溶管道是一种在地表降 雨以及地下水溶蚀作用下形成的充填致灾构造,一 般补给水源充足、规模较小,前期地质勘察不易被发 现<sup>[3-4]</sup>。然而,当隧道开挖时,一旦揭露岩溶管道,在 地下水压以及施工扰动应力综合作用下,岩溶管道 内充填介质将被损伤破坏,导致其抗滑力下降而渗 透性变强,极易引发突水突泥事故<sup>[5-6]</sup>。

针对管道型岩溶隧道的突水灾害问题: CHU

Vietthuc<sup>[7]</sup>、王健华<sup>[8]</sup>、周毅<sup>[9]</sup>以及周宗青<sup>[10]</sup>等考虑隧 道开挖扰动影响,通过理论分析、物理模型试验以及 数值模拟方法研究了管道型岩溶隧道的突水灾变演 化过程及致灾机理;李利平<sup>[11]</sup>、谭信荣<sup>[12]</sup>、黄震<sup>[13]</sup>以 及王青松<sup>[14]</sup>等考虑岩溶管道的不同赋存形态,通过 建立岩溶管道突水地质模型,研究了岩溶管道发育 位置、尺寸大小以及含水体水位对岩溶隧道开挖安 全性的影响。这些研究成果极大保障了管道型岩溶 隧道的开挖安全,然而,它们却很少考虑围岩以及管 道充填介质在损伤破坏后的力学以及渗透性质突变 情况,这与实际管道型岩溶隧道复杂的突水灾害演 化过程不符。

收稿日期:2022-05-12

基金项目:国家自然科学基金项目(52178388);安全学科"双一流"创建工程项目(AQ20230734)

第一作者简介: 孟杰(1987-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 施工技术、造价预算。E-mail: mj.1002@163.com。

通信作者:林志斌(1988-),男,博士,副教授,研究方向:隧道围岩稳定控制与突水灾害防治。E-mail: linzhibin@hpu.edu.cn。

因此,本文以毕节市大寨隧道为例,考虑围岩应 力-渗流-损伤耦合作用,对管道型岩溶隧道掘进过 程中围岩的位移、塑性区、渗透系数以及涌水量变 化情况展开数值模拟研究,在此基础上了对比分析 了无岩溶管道以及不同岩溶水压对隧道突水灾变规 律的影响,研究结果对于指导实际相关工程施工与 设计具有重要的参考价值。

### 1 工程概况

贵州省毕节市大寨隧道左洞开挖跨度 12.3 m、 高度 9.0 m,其 ZK+825~ZK+850 段埋深约 200 m、发 育有 1个半径约 5.0 m的充水溶洞,洞内水压约 1.2 MPa,围岩以强、中风化的灰岩为主,节理裂隙发 育,属于IV级围岩。并且在溶洞与隧道之间还发育 形成了一段长度约 12.0 m、直径从 1.0 m 变化至 5.0 m 的圆台形岩溶管道,管道内充填介质主要为块碎石 夹黏土,如图 1 所示。当隧道开挖至此处揭露岩溶 管道时,极易引发岩溶突水突泥事故。





## 2 数值模拟方案设计

#### 2.1 数值模型建立

为研究掘进过程中管道型岩溶隧道的突水灾变 时空演化特征,采用 FLAC 3D 建立其开挖数值模拟 模型如图 2 所示。该模型长、宽、高分别为 60 m、40 m





以及 50 m, 共包含 291 150 个单元和 298 605 个节点。 模型边界条件设置为底面以及四周法向位移约束、 顶面施加应力约束 4.4 MPa、溶洞内施加定水压 1.2 MPa。模拟隧道掘进时,设置每次掘进进尺为 2.0 m, 临空面水压为 0;隧道支护结构为复合式衬砌, 采用 cable 单元模拟锚杆(弹性模量为 212 GPa、锚固 剂内聚力和内摩擦角分别为 5.0 MPa 和 34°),采用 shell 单元模拟喷射混凝土(弹性模量、泊松比、厚度 分别为 25 GPa、0.2 和 0.2 m)以及二次衬砌(弹性模 量、泊松比、厚度分别为 30 GPa、0.25 和 0.4 m)。

#### 2.2 应力-渗流-损伤耦合数学模型

对于采用摩尔-库伦准则描述的岩体类材料, 在施工扰动应力与渗流水压综合作用下,其会在 达到承载极限后同时出现塑性变形和损伤,因此, 可用等效塑性应变*ε*<sub>p</sub>来描述它的损伤情况<sup>[15-16]</sup>,如 式(1)所示。

$$\begin{cases} \bar{\varepsilon_p} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{p1} - \varepsilon_{p2})^2 - (\varepsilon_{p1} - \varepsilon_{p3})^2 - (\varepsilon_{p2} - \varepsilon_{p3})^2} \\ D = 1 - e^{-\alpha \varepsilon_p} \end{cases}$$
(1)

式中: $\varepsilon_{p1}$ 、 $\varepsilon_{p2}$ 和 $\varepsilon_{p3}$ 分别为岩体的3个主塑性应变;D为岩体的损伤变量值; $\alpha$ 为岩体的材料参数。

当岩体发生损伤时,其内摩擦角φ变化幅度很 小<sup>[17]</sup>,弹性模量*E*和内聚力*c*随损伤变量*D*的变化可以 简化为线性关系<sup>[18]</sup>,如式(2)所示;而其渗透率*k*则与 损伤变量*D*呈指数增长关系<sup>[19]</sup>,如式(3)所示。

$$\begin{cases} E = (1-D)E_0 + DE_r \\ c = (1-D)c_0 + Dc_r \end{cases}$$
(2)

 $k = k_0 e^{\beta D} \tag{3}$ 

式中, *E*<sub>0</sub>和*c*<sub>0</sub>为岩体初始弹性模量和内聚力; *E*<sub>r</sub>和*c*<sub>r</sub>为 岩体残余弹性模量和内聚力; *k*<sub>0</sub>为岩体初始渗透系数; β为岩体渗透率突变系数。

参考《公路隧道设计规范》<sup>[20]</sup> 给出的IV级围岩初 始参数以及不同体积应变下岩体的力学与渗透变化 演化规律<sup>[14,21]</sup>,取岩溶隧道周边不同岩体的力学和渗 透模型参数如表1所示。隧道掘进流固耦合计算过 程中,采用 FLAC 3D 自带的 fish 语言提取各单元主 塑性应变,并根据式 (1)~(3) 动态改变它们的力学以 及渗透参数值。

	表 1 岩溶隧道周边岩体的力学与渗透参数
Table 1	Mechanical and permeability parameters of rock mass around karst tunne

	-			P · · · · · · · ·							
岩体名称	初始弹性 模量/MPa	残余弹性 模量/MPa	泊松比	初始内 聚力/MPa	残余内 聚力/MPa	内摩擦 角/°	抗拉强 度/MPa	孔隙 率	初始渗透 系数/cm·s <sup>-1</sup>	α	β
Ⅳ级围岩	3 000	600	0.28	0.5	0.1	33	0.3	0.18	2.0×10 <sup>-7</sup>	200	5.0
管道充填物	400	40	0.35	0.2	0.02	22	0.05	0.36	5.0×10 <sup>-8</sup>	300	4.5

## 2.3 数值模拟方案设计

为进一步研究管道型岩溶隧道的突水灾变时空 演化特征,本文设计了以下几种不同计算方案:

(1)方案 1(实际工程条件):存在岩溶管道,溶洞 内水压为 1.2MPa;

(2)方案 2: 不存在岩溶管道, 溶洞内水压为 1.2 MPa;

(3)方案 3 至方案 6:存在岩溶管道,溶洞内水压 分别为 0、0.4 MPa、0.8 MPa 和 1.6 MPa。

## 3 数值计算结果分析

#### 3.1 管道型岩溶隧道突水灾变规律研究

3.1.1 围岩位移变化规律

方案 1 条件下,随着隧道掌子面与岩溶管道之 间距离 L 的变化(L<0代表掌子面位于岩溶管道后 方),隧道表面围岩的最大位移变化规律如图 3 所示。 L<-4 m 时,溶洞以及岩溶管道的存在对隧道掌子面 附近围岩应力影响可以忽略不计,此时,随着隧道向 前掘进,隧道表面围岩将因应力释放程度的增加而 增大并逐渐趋于稳定,最终隧道表面围岩在左墙、 右墙、底拱、顶拱以及掌子面的最大位移分别为 25.0 mm、24.5 mm、14.1 mm、18.2 mm 和 34.1 mm。当



#### 图 3 管道型隧道掘进过程中表面围岩最大位移变化曲线

Fig. 3 The maximum displacement curve of the surface surrounding rock during the tunneling process -4 m<L<2 m时,受溶洞水压以及岩溶管道不良构造的影响,岩溶管道周边岩体将会产生附加应力,导致隧道围岩越靠近岩溶管道,其左墙以及掌子面处的位移也最大;因此,隧道开挖一旦揭露岩溶管道,岩溶管道内充填软弱岩体将在附加应力影响下失去稳定而产生巨大位移,此时,隧道表面围岩在左墙以及掌子面的最大位移将达到 700 mm 以上。当 L>2 m时,随着隧道掌子面逐渐远离岩溶管道,岩溶管道对隧道掌子面附近围岩应力的影响越来越小,隧道表面围岩位移将逐渐恢复至 L<-4 m时的变化状态。

为进一步研究隧道掘进过程中岩溶管道的失稳 灾变情况,对剖面A处围岩位移变化规律进行分析, 如图 4 所示。L=-3.5 m时,隧道掘进开始对剖面 A 处围岩造成扰动影响,但此时影响十分有限,剖面A 处围岩在隧道中心处产生 8.0 mm 的最大位移,在岩 溶管道处则仅产生 4.0~5.6 mm 的位移。L=-1.5 m 时, 隧道掌子面已十分靠近岩溶管道,在施工扰动应力 影响下,剖面A处围岩在岩溶管道下方产生了60mm 的最大位移;由岩溶管道下方往上方溶洞,管道内部 充填岩体位移则由 60 mm 逐渐递减至 6.0 mm。 L=0.5 m时,隧道开挖揭露部分岩溶管道,隧道开挖 产生的高剪应力将导致性质软弱的管道内部充填岩 体严重破坏而在揭露处产生巨大的位移(达到 1000 mm 以上),但由于其在管道上方的位移依旧很 小,说明此时管道充填岩体仍保留有一定的阻水能 力但已处于局部失稳状态,致使隧道开挖出现突泥 现象。L=2.5 m时,隧道开挖将全部揭露岩溶管道, 在岩溶水压与隧道开挖高剪应力共同作用下,岩溶 管道内部充填软弱岩体将全部损伤破坏并均产生超 过 400 mm 的位移,说明其已发生整体滑移失稳现象, 阻水能力严重下降;此时隧道开挖必然产生突水突 泥事故。这与实际工程出现突水突泥的时间节点保 持一致[22],也间接验证了本文应力-渗流-损伤耦合 数学模型的合理性。

#### 3.1.2 围岩塑性区变化规律

方案1条件下,隧道掘进过程中剖面A处围岩 的塑性区变化如图5所示。L=-3.5m时,剖面A处 围岩首先在隧道掌子面正前方发生塑性屈服破坏。

而后随着隧道掌子面向剖面 A 逐渐靠近, 剖面 A 处的围岩屈服范围逐渐由中心往外侧扩展, 至 L= -1.5 m, 岩溶管道内部位于下方的充填岩体以及隧道





外侧靠近岩溶管道的岩体开始发生损伤破坏,此时 溶洞与隧道之间仍保留有较厚的隔水层,其向隧道 突水可能性较低。当L=0.5 m时,剖面 A 处位于开挖 轮廓内的岩体将被挖除并揭露部分岩溶管道,导致 剖面 A 处围岩不仅在隧道外侧产生了厚度大约 2.0 m 的塑性屈服圈,而且在岩溶管道内外侧的塑性屈服



图 5 管道型隧道掘进过程中剖面 A 处围岩塑性区变化图 Fig. 5 Diagram of plastic zone change of surrounding rock at section A during the tunneling process

区面积也大大增加;此时,岩溶管道内充填岩体仅顶 部约1m的区域未发生屈服破坏,造成溶洞与隧道 之间的有效隔水层厚度急剧降低,其向隧道内突水 的可能性大大升高。当L=2.5m时,剖面A处围岩在 远离岩溶管道一侧的屈服面积变化不大,但在岩溶 管道内部则会整体屈服而产生导水裂隙通道,导致 溶洞承压水通过岩溶管道向隧道突水,并在突水过 程中不断冲蚀管道充填岩体,进而造成严重突水突 泥事故。

#### 3.1.3 围岩渗透系数变化规律

图 6 给出了方案 1 条件下管道型隧道掘进过程 中剖面 *A* 处围岩的渗透系数变化图。由图可知, L=-3.5 m时,隧道的掘进开挖仅会造成剖面 A 处位 于隧道掌子面正前方的岩体渗透系数造成改变,而 对岩溶管道内部充填岩体的渗透系数影响则可以忽 略不计。当 L=-1.5 m 时,隧道的掘进开挖不仅使剖 面 A 处位于隧道掌子面正前方的岩体的渗透系数都 提高了10倍,而且还使岩溶管道位于下侧的充填岩 体渗透系数提高将近40倍,此时,溶洞与隧道之间 的岩体平均渗透系数将有所提高,造成隧道内涌水 量开始增大。当L=0.5 m时,由于隧道开挖通过剖 面 A,导致剖面 A 处位于隧道外侧 2 m 范围内的岩体 渗透系数大幅提高,尤其是隧道两侧靠近拱腰的岩 体;而且由于岩溶管道被部分揭露,在开挖扰动应力 与溶洞承压水共同作用下, 岩溶管道内部以及附近 岩体仅顶部小部分充填岩体渗透系数处于初始状态, 其余位置则因损伤屈服破坏而至少提高10倍,造成 溶洞与隧道之间的岩体平均渗透系数大大增加,隧 道内涌水量急剧增大。L=2.5 m时,岩溶管道被进一 步揭露将导致岩溶管道内部所有充填岩体发生屈服 破坏,其渗透系数会进一步提高,导致上方溶洞承压 水通过岩溶管道向隧道内突水,并在突水的过程中 将管道内已经屈服破坏的充填岩体冲入隧道内,造 成突水突泥。

#### 3.1.4 隧道内涌水量变化规律

方案1条件下,管道型隧道掘进过程中隧道内 涌水量变化曲线如图7所示。L<-3.5m时,溶洞以 及岩溶管道的存在对隧道涌水量影响很小,此时隧 道开挖涌水基本上为原岩初始裂隙水,保持在4.5m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> 左右;L=-1.5m时,溶洞与隧道之间的岩体平均渗 透系数略有增大,导致隧道内涌水量增加为5.9 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>;L=0.5m时,隧道开挖揭露部分岩溶管道,导 致岩溶管道绝大部分充填岩体渗透系数急剧增大,





Fig. 6 Diagram of permeability change of surrounding rock at section A during the tunneling process





溶洞内承压水通过岩溶管道向隧道内的涌水量急 剧增加,达到 256.0 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>; L>2.5 m时,隧道开挖揭 露全部岩溶管道,岩溶管道内所有充填岩体将在扰 动应力与溶洞承压水作用下被冲入隧道内,导致溶 洞承压水通过岩溶管道向隧道内的涌水量进一步 增大至 588.7 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>,比隧道通过岩溶管道前提高了 将近 100 多倍。由此可见,管道型岩溶隧道掘进过 程中,其涌水量大致呈"S型曲线"变化,表现出很 强的突发性和较大的体量性,极易导致机械设备损 毁和人员伤亡。

#### 3.2 无岩溶管道下隧道的突水灾变规律

不存在岩溶管道条件下(计算方案 2),隧道开挖 通过溶洞时剖面A处围岩的位移和渗透系数分布如 图 8 所示。可以看出,无岩溶管道时,由于溶洞距隧 道较远,两者相互扰动小,因此隧道开挖通过溶洞后, 剖面 A 处围岩位移和渗透系数分布表现出较好的对 称性,与无溶洞时差异不大。即,隧道围岩在拱顶处 出现最大位移 16.0 mm, 往溶洞方向则逐渐减小至 8.0 mm; 且渗透系数仅在隧道周边 2~3 m 范围内出 现提高区。因此,隧道开挖通过溶洞后,溶洞与隧道 之间仍保留有较厚的隔水层,溶洞承压水不会突向 隧道,这点由图9无岩溶管道下隧道涌水量从通过 溶洞前的 4.5 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> 变化至通过溶洞后的 5.0 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> 也可证明。与图 6 和图 7 对比可知, 岩溶管道的存 在相当于为溶洞提供了一个潜在导水通道,一旦隧 道揭露岩溶管道,则岩溶管道会在溶洞承压水与隧 道开挖扰动应力影响下损伤活化,为溶洞承压水突 向隧道提供了捷径。





Fig. 8 Distribution of displacement and permeability coefficient of surrounding rock at section *A* after tunnel excavation without karst pipeline



#### 3.3 不同岩溶水压下隧道的突水灾变规律

不同岩溶水压条件下(计算方案 3~6),隧道开挖 完全揭露岩溶管道后剖面 A 处围岩的位移和渗透系 数分布如图 10 和图 11 所示。结合图 4 和图 6 可知, 岩溶水压 p<0.4 MPa 时,隧道开挖完全揭露岩溶管道 仅会导致岩溶管道下部的充填岩体发生局部失稳破 坏,致使其位移以及渗透系数变大;而位于岩溶管道



图 10 不同岩溶水压条件下剖面处围岩在隧道开挖通过后的位移分布图

Fig. 10 Displacement distribution of surrounding rock after tunnel excavation under different karst water pressures



图 11 不 同岩溶水压条件下剖面处围岩在隧道开挖通过后的渗透系数分布图 Fig. 11 Distribution of permeability coefficient of surrounding rock at the profile after tunnel excavation under different karst water pressures

上方的充填岩体则处于稳定状态并具备很强的隔水 能力,溶洞不会向隧道内发生突水。当岩溶水压 p≥ 0.8 MPa时,隧道开挖完全揭露岩溶管道就会导致整 个岩溶管道内充填岩体发生塑性屈服破坏,导致渗 透系数急剧增大并出现整体滑移失稳现象,而且岩 溶水压越大,其滑动趋势愈明显。由此可见,溶洞承 压水通过岩溶管道向隧道内发生突水存在一个启动 压力(本工程约为 0.8 MPa),只有超过这个启动压力, 隧道掘进穿过岩溶管道才会发生突水突泥事故。

图 12 给出了不同岩溶水压条件下隧道掘进过 程中的涌水量变化曲线,由图可知,p<0.4 MPa时, 隧道掘进过程中,其涌水量可以忽略不计;而p>0.8 MPa,随着隧道的向前掘进,整个隧道涌水量就开 始呈现"S型曲线"变化特征,且岩溶水压越大,隧道 涌水量发生突变的时间节点就越靠前,其最终涌水 量也相对越大。例如,当p=0.8 MPa时,隧道只有在 完全揭露岩溶管道后才发生突水,其最大涌水量约 为 406.5 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>;当p=1.2 MPa时,隧道在部分揭露岩 溶管道时就发生突水,其最大涌水量约为 588.7 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>; 当p=1.6 MPa时,隧道掌子面靠近岩溶管道时就会发 生突水,其最大涌水量约为 1 111.5 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>。从涌水量



图 12 不同岩溶水压条件下隧道的涌水量变化曲线 Fig. 12 Variation curve of tunnel water inflow under different karst water pressures

大小上看(图 13),管道型岩溶隧道最大涌水量 Q 与 岩溶水压 p 呈现出明显的指数递增关系,因此,为保 证隧道掘进安全,在必要情况下应对岩溶管道上方 溶洞承压水进行泄压处理。

## 4 结 论

(1)数值计算结果表明,隧道掌子面距岩溶管道





4m以上时,隧道表面围岩在左墙、右墙、底拱、顶拱 以及掌子面的最大位移将分别稳定在 25.0 mm、24.5 mm、14.1 mm、18.2 mm 和 34.1 mm; 而隧道开挖一旦 全部揭露岩溶管道,则管道内充填岩体会逐渐塑性 屈服并发生整体滑移失稳,导致隧道出现突水突泥 事故,这与实际工程状况一致,说明本文建立的应力-渗流-损伤耦合数学模型是较为合理的。

(2)管道型岩溶隧道掘进过程中的涌水量大致 呈"S型曲线"变化,表现出很强的突发性和较大的 体量性:当隧道开挖揭露部分岩溶管道时,涌水量由 5.9 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>增加至 256.0 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>;而当隧道开挖揭露全 部岩溶管道时,涌水量则达到 588.7 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>。

(3)无岩溶管道条件下,当溶洞距隧道较远时, 隧道开挖通过溶洞不会产生很大位移,也不会出现 较大涌水量,说明岩溶管道的存在相当于为溶洞向 隧道内突水提供了一个潜在的导水优势通道。

(4)溶洞承压水通过岩溶管道向隧道内发生突 水存在一个启动压力,只有超过这个启动压力,隧道 掘进穿过岩溶管道才会发生突水突泥事故,且其突 水量与岩溶水压呈现出明显的指数递增关系。

#### 参考文献

- [1] 马国民,张秀丽,杨华清. 岩溶隧道突涌水机制及安全临界条件研究[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(2): 64-70.
   MA Guomin, ZHANG Xiuli, YANG Huaqing. Study on water inrush mechanism and safety critical conditions of karst tunnels[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(2): 64-70.
- [2] 武世燕. 岩溶区隧道隔水岩盘安全厚度预测[J]. 隧道建设(中 英文), 2021, 41(12): 2083-2092.

WU Shiyan. Prediction of safe thickness of water-insulating rock

disks in tunnels in karst areas[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(12): 2083-2092.

[3] 庄金波,杨翔. 圆梁山隧道岩溶管道群涌水处理技术[J]. 现代
 隧道技术, 2004(6): 32-36.

ZHUANG Jinbo, YANG Xiang. The technique of tackling largescale water-outburst from karst channels in Yuanliangshan Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2004(6): 32-36.

 [4] 徐立新. 铁路隧道岩溶管道改道引排施工技术[J]. 铁道建筑 技术, 2021(11): 158-160+169.
 XU Lixin. Construction technology of diversion and drainage of

karst pipeline in railway tunnel[J]. Railway Construction Technology, 2021(11): 158-160+169.

[5] 邹洋, 彭立敏, 张智勇, 雷明锋, 彭龙, 施成华. 基于突变理论的 岩溶隧道拱顶安全厚度分析与失稳预测[J]. 铁道科学与工程 学报, 2021, 18(10): 2651-2659.

> ZOU Yang, PENG Limin, ZHANG Zhiyong, LEI Mingfeng, PENG Long, SHI Chenghua. Safety thickness analysis and stability prediction of tunnel roof in karst region based on catastrophe theory[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(10): 2651-2659.

- [6] 焦友军, 潘晓东, 曾洁, 任坤. 岩溶管道结构影响泉流量变化的 数值模拟研究[J]. 中国岩溶, 2017, 36(5): 736-742.
   JIAO Youjun, PAN Xiaodong, ZENG Jie, REN Kun. Numerical modeling of the influence of karst-conduit structure on variation of spring flow[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(5): 736-742.
- [7] CHU Vietthuc. 公路隧道充填型岩溶管道突水灾变机理及演 化过程数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(12): 4173-4180.

CHU Vietthuc. Mechanism on water inrush disaster of filling karst piping and numerical analysis of evolutionary process in highway tunnel[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(12): 4173-4180.

 [8] 王健华,李术才,李利平,许振浩.隧道岩溶管道型突涌水动态 演化特征及涌水量综合预测[J].岩土工程学报,2018,40(10): 1880-1888.

WANG Jianhua, LI Shucai, LI Liping, XU Zhenhao. Dynamic evolution characteristics and prediction of water inflow of karst piping-type water inrush of tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(10): 1880-1888.

[9] 周毅,李术才,李利平,石少帅,张乾青,陈迪杨,宋曙光.隧道充填型岩溶管道渗透失稳突水机制三维流-固耦合模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(9):1739-1749.
ZHOU Yi, LI Shucai, LI Liping, SHI Shaoshuai, ZHANG Qianqing, CHEN Diyang, SONG Shuguang. 3D fluid-solid coupled model test on water-inrush in tunnel due to seepage from filled karst conduit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1739-1749.

[10] 周宗青.隧道充填型致灾构造突水突泥灾变演化机理及工程 应用[D].济南:山东大学, 2016: 79-168.

ZHOU Zongqing. Evolutionary mechanism of water inrush through filling structures in tunnels and engineering applications

359

[D]. Jinan: Shandong University, 2016: 79-168.

- [11] 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: 山东大学土建与水利学院, 2009: 79-86.
  LI Liping. Study on catastrophe evolution mechanism of karst water inrush and its engineering application of high risk karst tunnel[D]. Jinan: Shandong University. School of Civil Engineering, 2009: 79-86.
- [12] 谭信荣, 樊浩博, 宋玉香, 刘勇, 杨海宏. 管道型岩溶隧道衬砌 结构受力特征试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(6):1847-1856.

TAN Xinrong, FAN Haobo, SONG Yuxiang, LIU Yong, YANG Haihong. Experimental study on the mechanical characteristics of the lining structure of pipe-type karst tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(6): 1847-1856.

- [13] 黄震,李仕杰, 赵奎, 吴锐, 钟文. 隧道充填岩溶管道滑移失稳突水机 制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(5): 1119-1126.
  HUANG Zhen, LI Shijie, ZHAO Kui, WU Rui, ZHONG Wen.
  Water inrush mechanism for slip instability of filled karst conduit in tunnels[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(5): 1119-1126.
- [14] 王青松. 充填型岩溶管道致灾机理研究[J]. 铁道建筑技术, 2021(12): 1-4, 10.

WANG Qingsong. Study on mechanism of water inrush of filling karst piping[J]. Railway Construction Technology, 2021(12): 1-4, 10.

[15] 贾善坡, 陈卫忠, 于洪丹, 李香玲. 泥岩隧道施工过程中渗流场 与应力场全耦合损伤模型研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 19-26.

> JIA Shanpo, CHEN Weizhong, YU Hongdan, LI Xiangling. Research on seepage-stress coupling damage model of boom clay during tunneling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 19-26.

[16] 郑青青. 深埋岩溶隧道爆破开挖的围岩损伤机理与稳定性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019: 36-40.
 ZHENG Qingqing. Study on instability and water inrush mecha-

nism of surrounding rock caused by blasting excavation of deep buried high-risk karst tunnel[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology. 2019: 36-40.

- [17] 经纬, 薛维培, 姚直书. 巷道围岩塑性软化区岩石內摩擦角与 黏聚力变化规律[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2203-2210.
   JING Wei, XUE Weipei, YAO Zhishu. Variation of the internal friction angle and cohesion of the plastic softening zone rock in roadway surrounding rock[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2203-2210.
- [18] 牛传星,秦哲,冯佰研,付厚利.水岩作用下蚀变岩力学性质损 伤规律[J].长江科学院院报,2016,33(8):75-79.
   NIU Chuanxing, QIN Zhe, FENG Baiyan, FU Houli. Regularity of the damage of altered rock's mechanical properties under water-rock interaction[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(8): 75-79.
- [19] 张珂峰. 前伏溶洞巷道开挖突水数值模拟研究[J]. 现代隧道 技术, 2020, 57(3): 99-107.
   ZHANG Kefeng. Numerical simulation of water burst in roadway excavation with karst cave ahead[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(3): 99-107.
- [20] 中华人民共和国交通部. 公路隧道设计规范(JTG D70/2-2014)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
  Ministry of Communications of the People's Republic of China.
  Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [21] 吕涛. 基于流固耦合的岩溶管道对水工隧洞围岩影响的数值 分析研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.

LV Tao. Numerical simulation of the influence of karst pipeline on hydraulic tunnels surrounding rock based on the fluid-solid coupling[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011.

[22] 安文生. 管道型岩溶隧道突水涌泥致灾机理及处治技术研究—以大寨隧道为例[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.
 AN Wensheng. The research of the mechanism and the treatment of the water bursting and mud surging in the pipeline karst tunnel: Take Dazhai tunnel as an example[D]. Guiyang: Guizhou University, 2017.

## Research on the law of water inrush disasters in pipeline-type karst tunnels under the coupling effect of stress-seepage-damage

MENG Jie<sup>1</sup>, LIN Zhibin<sup>2</sup>, LIN Peizhong<sup>3</sup>

(1. Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454150, China; 3. Henan Natural Resources Monitoring and Land Consolidation Institute, Zhengzhou, Hehan 450002, China )

**Abstract** With the strategy of "advancing the development of China's western regions", the construction of tunnels in karst areas has increased significantly. Among these tunnels, the karst pipeline is a kind of structure prone to disasters caused by the filling which is developed under the action of surface rainfall and groundwater dissolution. Generally, this kind of structure is small with sufficient water supply, so it is not easy to be found in the early geological survey. Once the karst pipeline is exposed by tunnel excavation, under the combined action of groundwater

pressure and construction disturbance stress, the filling medium in the karst pipeline will be damaged, resulting in the decrease of its anti-sliding force and the increase of permeability. Consequently, it is easy to cause an accident of water and mud inrush. However, previous research rarely focuses on the sudden change of mechanical and permeability properties of surrounding rock and pipeline filling medium after the rock and medium have been damaged. This is inconsistent with the actual complex evolution process of water inrush disasters in pipeline-type karst tunnels.

Aiming at water inrush disasters in pipeline-type karst tunnels, some scholars take the influence of tunnel excavation disturbance into consideration, and study the evolution process and disaster mechanism of water inrush disasters in pipeline-type karst tunnels through theoretical analysis, physical model test and numerical simulation. Taking the different occurrence forms of karst pipelines into account, some other scholars analyze the influence of the location and size of karst pipeline development as well as the influence of the water level of water-bearing body on the safety of karst tunnel excavation by establishing a geological model of water inrush in karst pipelines. These research results greatly ensure the excavation safety of pipeline-type karst tunnels. However, they rarely focus on the mechanical and permeability properties of the surrounding rock and pipeline filling medium after they have been damaged.

In this study, we took Dazhai Tunnel in Bijie City as an example and took the stress-seepage-damage coupling effect of surrounding rock into consideration to explore the law of water inrush disasters in pipeline-type karst tunnels. Furthermore, using FLAC 3D, we studied the displacement of surrounding rock, the plastic zone, the permeability coefficient and the variation law of water inrush during the tunneling process of pipeline-type karst tunnels. On this basis, we conducted a comparative study of the effects of karst-free pipelines and different karst water pressures on the characteristics of water inrush disasters in tunnels.

The numerical simulation results show that: (1) When the tunnel face is more than 4 m away from the karst pipeline, the maximum displacement of surrounding rock on the left wall, right wall, bottom arch, top arch and tunnel face will be stabilized at 25.0 mm, 24.5 mm, 14.1 mm, 18.2 mm and 34.1 mm respectively. However, once the karst pipeline is completely exposed by tunnel excavation, the filling rock body inside the karst pipeline will be prone to plastic yielding, and thus cause the overall slipping and instability. This phenomenon will result in accidents of water and mud inrush in tunnels. The result is consistent with the actual engineering situation, indicating the rationality of the mathematical model established under the coupling of stress-seepage-damage in this study. (2) The amount of water inflow during the tunneling process of the pipeline-type karst tunnel roughly changes in an "s-shaped" curve, showing strong suddenness and a large volume. When some karst pipelines are exposed by tunnel excavation, water inflow increases from 5.9  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  to 256.0  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; when all karst pipelines are exposed by tunnel excavation, water inflow reaches 588.7  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . (3) If there are no karst pipelines, large displacement as well as large water inflow will not be generated by tunnel excavation through the karst cave when it is far away from the tunnel. This result indicates that the existence of karst pipelines provides a potential water-conducting channel for water inrush from karst cave to tunnel. (4) There is a starting pressure when a water inrush occurs from the karst pipeline to the tunnel. Only when the starting pressure is exceeded, will an accident of water and mud inrush occur in the tunnel, and the water inrush amount presents an obvious exponential increasing relationship with the karst water pressure.

Key words karst pipeline, water inrush disaster, displacement, plastic zone, permeability coefficient, water inflow

(编辑张玲杨杨)