

超大断面隧道临近溶洞围岩突水失稳破坏特征分析*

Analysis on the Failure Characteristics of Water Inrush and Instability of Surrounding Rock near Karst Cavern
in Super-large Section Tunnel

王亚奇

(河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 为了研究超大断面隧道临近溶洞掌子面开挖的围岩突水失稳破坏特征, 本文以武深高速李洞隧道为背景, 利用 FLAC 3D 数值模拟软件建立了数值计算模型, 分别分析了围岩应力、位移、塑性区和涌水量等关键因素随隧道开挖的变化规律, 研究了溶洞水压对隧道围岩稳定性的影响规律。研究表明: (1) 当掌子面距离前方岩溶隧道小于 6 m 时, 掌子面与溶洞之间的围岩应力最大值达到 6.32 MPa, 掌子面最大位移迅速增大至约 200 mm; (2) 当掌子面距离溶洞-18 m~-8 m 时, 隧道掌子面涌水量处于 200 m³/h 以下, 当掌子面距离溶洞-8 m~-2 m 时, 涌水量迅速增大至 7371 m³/h, 势必发生突水事故; (3) 隧道掌子面最大位移和涌水量均与溶洞水压呈指数式增长关系, 掌子面开挖遇前方有溶洞应采取疏水降压以及补强掌子面岩体的措施。

关键词: 超大断面隧道; 溶洞; 突水失稳; 破坏特征

中图分类号: U452.1 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2023) 06-0025-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.06.004

WANG Yaqi

(Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to study the large cross section tunnel near the cave of the water inrush of the surrounding rock excavation instability destruction features, Lidong tunnel of Wushen highway was taken as the background in this paper. Numerical model is established by numerical simulation software FLAC 3D, and the key factors the stress, the plastic zone, displacement and water inflow change rule of the surrounding rock with tunnel excavation was analyzed. The influence of water pressure on the stability of tunnel surrounding rock is studied. The results show that: (1) When the distance between face and karst tunnel is less than 6 m, the maximum stress of surrounding rock between face and karst tunnel reaches 6.32 MPa, and the maximum displacement of face increases rapidly to about 200 mm. (2) When the distance between the face of the tunnel and the cave is -18 m~-8 m, the water inflow of the tunnel face is less than 200 m³/h. When the distance between the face of the tunnel and the cave is -8 m~-2 m, the water inflow rapidly increases to 7371 m³/h, which is bound to cause water inrush accident. (3) Both the maximum displacement and water inflow of the tunnel face increase exponentially with the water pressure of the cave. When there is a cave in front of the tunnel face during excavation, measures should be taken to drain water and depressurize the rock mass of the tunnel face.

Keywords: super large section tunnel; karst cave; water inrush instability; failure characteristics

* 基金项目: 国家自然科学基金 (51608490)。

作者简介: 王亚奇 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 岩土工程勘察。

收稿日期: 2023-07-20

岩土力学

0 引言

突水是岩溶地区隧道施工的重要灾害类型之一，岩溶隧道突水类型通常可以划分为裂隙型、断层型和溶洞型^[1-3]。其中，溶洞型突水成因主要为厚层碳酸盐在地下水的反复作用下形成大型溶洞，溶洞具有蓄水性，可和其他地下暗河等相互连通提供补给，在岩溶隧道开挖过程中防突层一旦小于临界值，则会导致突水事故的发生^[4-5]。溶洞的位置、形状及其大小、充填状况、充填物质种类等都会对岩溶隧道溶洞型突水产生较大的影响^[6-7]。

在岩溶隧道溶洞型突水方面，大量学者开展了大量的研究工作。曹林卫等^[8]采用 RFPA 建立数值计算模型分析了不同厚度和类型岩溶隧道抗溶洞水压能力，提出了二次衬砌厚度对隧道抗水压能力具有显著影响。曾斌等^[9]针对金华山隧道的溶洞岩溶涌突水问题开展了水文地质条件调查，分析了金华山隧道在周边溶洞影响的涌突水可能性。郑宗利等^[10]基于理论分析和工程实际，建立了溶洞侵入及未侵入隧道两类情况下的突涌水预警体系，确定了突涌水的主要影响因素。舒恒等^[11]开展了超大直径盾构隧道岩溶发育区施工的注浆范围研究，提出了以最小安全距离主要因素为分段计算准则的地表注浆加固范围确定方法。在上述研究的基础上，本文利用 FLAC 3D 软件建立了武深高速李洞隧道开挖突水失稳破坏机理的数值计算模型，分析了隧道开挖过程中围岩应力、塑性区、位移和涌水量的变化规律，研究了溶洞水压对隧道围岩稳定性的影响规律。本文的研究成果可为超大断面隧道施工溶洞型突水灾害防控提供理论基础。

1 工程概况

武深高速李洞隧道位于粤桂湘赣交界处，设计为双向六车道，洞宽 17.12 m、洞高 11.31 m，属于特大断面隧道。其里程 YK342+256 处围岩级别为 IV 级，埋深约 180 m，在掌子面中心处存在 1 个直径为 3 m 的承压型溶洞，如图 1 所示。隧道穿

越该溶洞段时采用三台阶法施工，每个台阶开挖爆破进尺为 2 m，高度约 3.5 m，开挖之后采用 20 cm 厚喷射混凝土以及 60 cm 厚二次现浇混凝土支护。

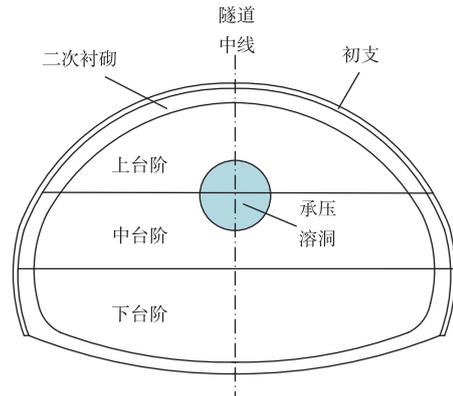


图 1 李洞隧道 YK342+256 处断面示意图
Fig. 1 Schematic diagram of section YK342+256 of Lidong tunnel

2 数值模拟方案

2.1 模型建立

由于隧道的开挖影响范围一般不超过其跨度的 3 倍，为此，采用 FLAC 3D 建立李洞隧道穿越溶洞段的开挖数值模拟模型如图 2 所示。模型在横向、竖向以及纵向的范围取值分别为 60 m、50 m 以及 30 m，共包含 122732 个节点和 118020 个单元，分成围岩、溶洞以及隧道内三台阶开挖岩体。模型力学边界定义为顶面施加竖向压力 3.2 MPa，四周及底面法向位移约束；渗透边界定

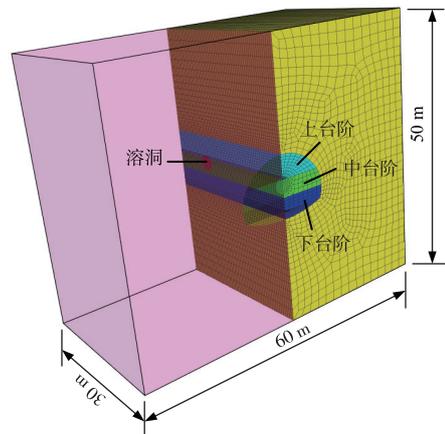


图 2 隧道穿越溶洞段数值模拟模型
Fig. 2 Numerical simulation model of tunnel crossing cavern section

义为各面不透水，溶洞内施加定水压 1.0 MPa。模拟隧道开挖时，设置隧道开挖进尺为 2 m，按上、中、下分 3 次开挖，开挖后设置隧道临空面水压为 0，并选择 shell 结构单元来模拟喷射混凝土及二次衬砌，其中，喷射混凝土的弹模和泊松比选择为 25 GPa 和 0.2，二次衬砌的弹模和泊松比选择为 31.5 GPa 和 0.25。

2.2 围岩力学与渗透参数选择

由于岩体在达到承载极限后，其强度会发生下降，而摩尔-库仑模型却无法适应岩体的这种力学变化特征，为此本文采用应变软化模型来模拟隧道围岩，此外，考虑岩体渗透率会因屈服破坏而升高，计算过程中将发生屈服的岩体渗透率提高 20 倍。根据《公路隧道设计规范》以及现场测试结果，设置 IV 级围岩的力学和渗透参数如表 1 所示（表中 γ_p 为剪应变）。

3 数值计算结果分析

3.1 隧道围岩应力

随着隧道向溶洞开挖前进，掌子面前方岩体的竖向应力变化曲线如图 3 所示。随着隧道向前掘进，掌子面后方岩体失去支撑，掌子面前方岩体应力增大，且越靠近掌子面，其值增大越明显，当超过岩体的承载极限后，岩体将发生破坏，导致其承载力下降而竖向应力降低。因此，不同掌子面与溶洞间距 L （掌子面位于溶洞后方为负，位于溶洞前方为正）条件下，岩体在隧道掌子面前方 5 m 为竖向应力降低区（即此区域内岩体发生屈服破坏），在掌子面前方 5 m~11 m 为竖向应力升高区，在掌子面前方 11 m 以上则为原岩应力区。但有一点需要说明的是，由于溶洞内部为承压水体，因此，掌子面前方岩体会在溶洞内部出

现应力降低区，而在其两侧 1m 范围内则会出现一定的集中现象。随着掌子面向溶洞靠近（ $L < -6$ m），掌子面与溶洞之间的应力集中最大值将由 5.69 MPa 逐渐增长至 6.32 MPa，直至掌子面与溶洞之间的岩体全部发生塑性屈服（ $L > -6$ m）。

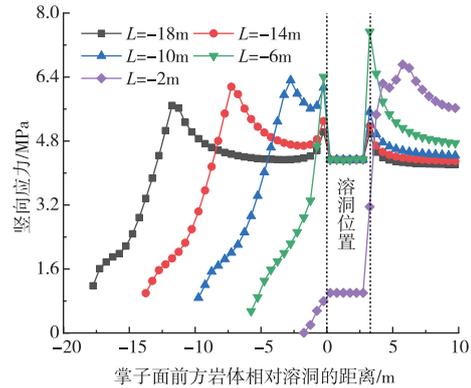


图 3 隧道开挖过程中掌子面前方岩体的竖向应力变化曲线
Fig. 3 Vertical stress variation curves of rock mass in front of face during tunnel excavation

3.2 隧道围岩塑性区

隧道开挖过程中掌子面前方岩体的塑性区变化如图 4 所示。由图可知，当 $L = -18$ m 时，隧道前方岩体塑性区大致呈半圆形分布：其破坏范围由掌子面处往远方逐渐减小，当超过掌子面 6 m 后就基本为 0。当 $L = -12$ m 时，隧道前方岩体塑性区形状和大小与 $L = -18$ m 时基本一致，此时，隧道掌子面与溶洞间仍保持有较厚的隔水保护层，隧道内涌水量相对较小。当 $L = -6$ m 时，隧道前方岩体塑性区将与溶洞贯通并向溶洞上下两侧扩展，此时，溶洞内高压水将通过掌子面前方岩体因屈服产生的导水裂隙带向隧道内突水，隧道内涌水量将开始急剧增大，如超过隧道内设计排水量，则会发生突水事故，导致机械被毁或人员伤亡。

表 1 IV 级围岩的力学和渗透参数
Table 1 Mechanical and permeability parameters of grade IV surrounding rock

弹性模量 /MPa	泊松比	内聚力/MPa			内摩擦角/°			抗拉强度 /MPa	渗透系数/(cm/s)		孔隙率
		$\gamma_p = 0$	$\gamma_p = 1\%$	$\gamma_p = 2\%$	$\gamma_p = 0$	$\gamma_p = 1\%$	$\gamma_p = 2\%$		屈服前	屈服后	
3.0	0.3	0.5	0.3	0.1	30	27.5	25	0.15	2.0×10^{-6}	4.0×10^{-5}	0.1

岩土力学

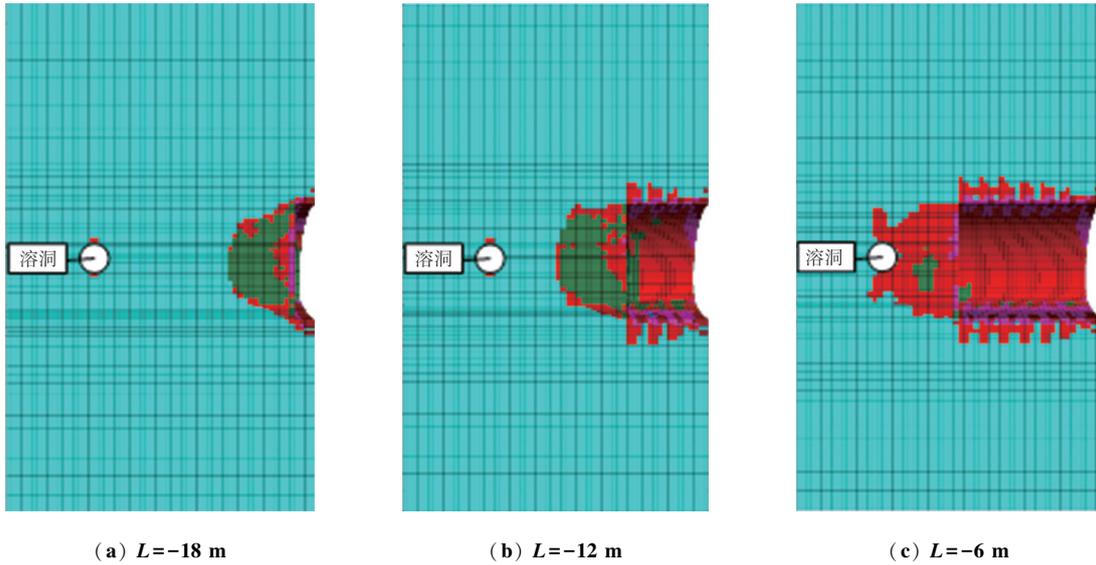
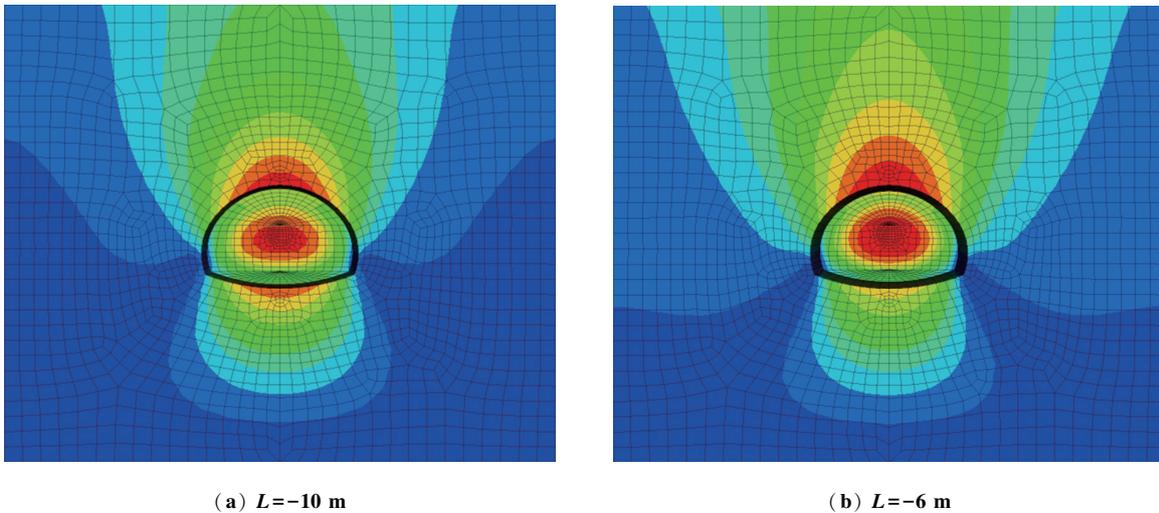


图 4 隧道开挖过程中掌子面前方岩体的塑性区变化图
 Fig. 4 Plastic zone variation diagrams of rock mass in front of face during tunnel excavation

3.3 隧道围岩位移

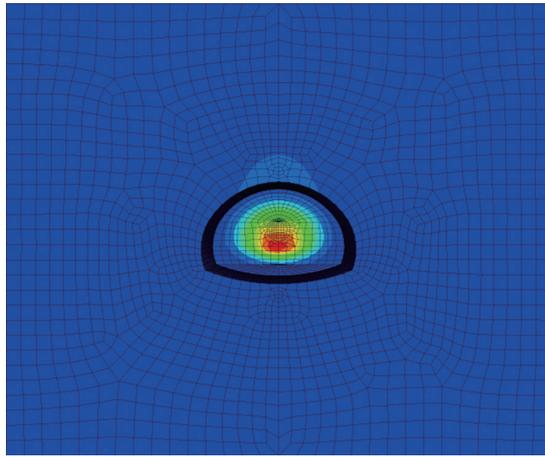
随着隧道掌子面逐渐向溶洞靠近，隧道围岩总位移分布如图 5 所示。当 $L = -10\text{ m}$ 时，隧道围岩最大位移约 16 mm ，主要出现在拱顶、掌子面中心以及隧道拱底的位置。由隧道拱顶或拱底往深处，围岩位移逐渐减小，但往拱顶上方减小的速率要明显小于拱底下方；隧道两侧围岩位移则相对较小，说明隧道开挖后两侧收敛变形较小，能够保持自身良好的稳定性。当 $L = -6\text{ m}$ 时，隧道拱底最大位移依旧保持为 16 mm 不变，但隧道拱顶以及掌子面中心岩体最大位移则增长至 20 mm ，对

比图 4 (c) 可知，虽然此时隧道涌水量已经开始急剧变大，但掌子面前方岩体仍具有一定的承载能力，因此不会发生坍塌事故。当 $L = -2\text{ m}$ 时，隧道拱顶以及拱底最大位移变化不大，但隧道掌子面最大位移则增长至 200 mm ，说明此时在开挖扰动与溶洞承压水共同作用下隧道掌子面岩体已经产生了极大的变形，极易发生塌方事故。因此，为保证隧道的开挖安全，应在掌子面与溶洞间距大于 6 m 时，对掌子面前方岩体采取疏水降压措施。



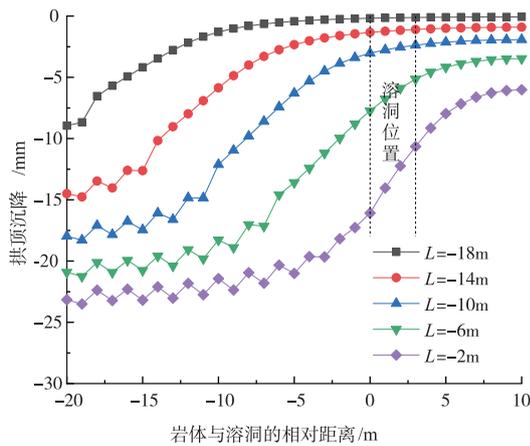
(a) $L = -10\text{ m}$

(b) $L = -6\text{ m}$

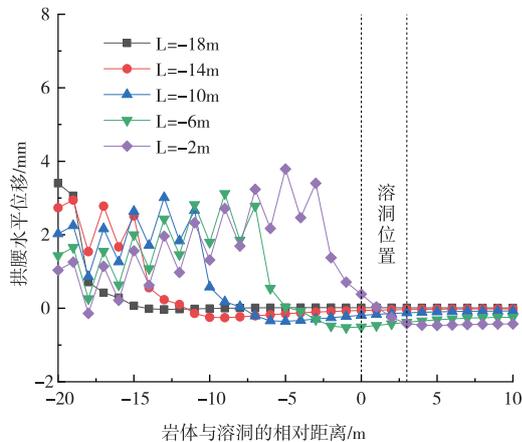


(c) $L=-2\text{ m}$

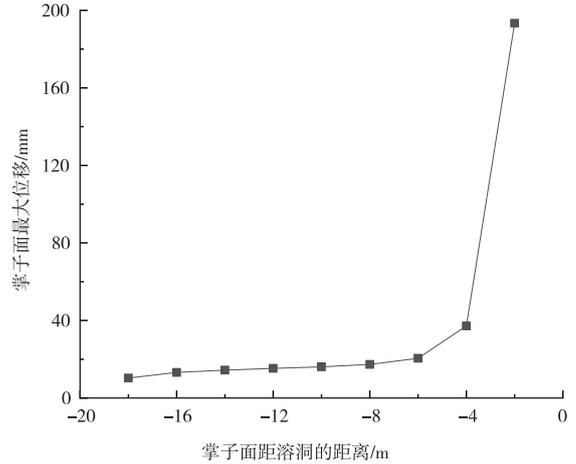
图 5 隧道开挖过程中围岩总位移分布图
Fig. 5 Total displacement distribution diagrams of surrounding rock during tunnel excavation



(a) 拱顶沉降



(b) 拱腰水平位移



(c) 掌子面最大位移

图 6 隧道开挖过程中表面岩体的位移变化曲线
Fig. 6 Displacement curves of surface rock mass during tunnel excavation

隧道开挖过程中表面岩体的位移分布曲线如图 6 所示。可以看出，不同开挖进尺下隧道拱顶沉降以及拱腰水平位移沿着隧道开挖方向均大致呈“S”型曲线分布：掌子面后方 3 m 以上为围岩位移稳定区，其值在各处大体相等，但会随隧道向前开挖而不断增大并最终保持稳定（拱顶沉降稳定值约 23 mm，拱腰水平位移稳定值约为 4 mm）；掌子面后方 3 m 至掌子面前方 12 m 为围岩位移变化区（即隧道开挖扰动区），其值由后方往前方从稳定值逐渐减小为 0；掌子面前方 12 m 以上为围岩无位移区，其值因距掌子面较远而未受开挖影响，基本保持为 0。掌子面最大位移则随着隧道向溶洞的靠近而不断增大，但其在掌子面距溶洞大于 6 m 时增长相对十分缓慢，而在掌子面距溶洞小于 6 m 时则出现突变式增长，导致掌子面最终因变形过大而失稳坍塌。由此可见，掌子面前方溶洞的存在对隧道拱顶底以及两侧位移影响不大，但会对掌子面岩体位移产生极大的影响，故在此情况下，应重视并加强对隧道掌子面岩体位移的监测，保证隧道的开挖安全。

3.4 隧道涌水量

隧道内涌水量随隧道开挖的变化曲线如图 7 所示。当 $L < -18\text{ m}$ 时，溶洞的存在基本对隧道涌水量变化无任何影响，此时，隧道涌水量基本为 0；当 $-18\text{ m} < L < -8\text{ m}$ 时，由于溶洞的存在，隧道

岩土力学

内涌水量增大,但仍处于 $200 \text{ m}^3/\text{h}$ 以下,无突水危险性,但随着隧道开挖防突层厚度逐渐减小;当 $L > -8 \text{ m}$ 时,隧道掌子面与溶洞间将产生导水裂隙,且随着隧道向前开挖,导水路径将逐渐变宽变短,导致隧道内涌水量迅速增大,由 $L = -8 \text{ m}$ 时的 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 增加至 $L = -2 \text{ m}$ 时的 $7371 \text{ m}^3/\text{h}$,这势必导致隧道发生突水事故,给工程带来极大风险。

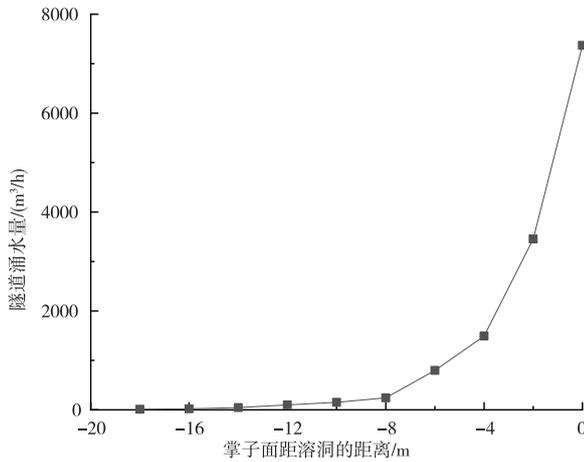


图7 隧道开挖过程中涌水量的变化曲线
Fig. 7 Variation curve of water inflow during tunnel excavation

4 溶洞水压对隧道围岩稳定性的影响分析

考虑隧道开挖期间,受降雨补给的影响,溶洞内的水压会发生变化,本文分别设置了溶洞水压 p 为 0 、 0.5 MPa 、 1.0 MPa 以及 1.5 MPa 四种模拟条件用于分析溶洞水压对隧道围岩稳定性的影响规律,隧道掌子面最大位移和涌水量的变化曲线如图8和图9所示。可以看出, $p = 0$ 时,隧道掌子面最大位移和涌水量不会发生突变; $p = 0.5 \text{ MPa}$ 时,隧道掌子面最大位移和涌水量在 $L = -4 \text{ m}$ 时发生突变; $p = 1.0 \text{ MPa}$ 时,隧道掌子面最大位移和涌水量在 $L = -6 \text{ m}$ 时发生突变; $p = 1.5 \text{ MPa}$ 时,隧道掌子面最大位移和涌水量在 $L = -8 \text{ m}$ 时发生突变。可见,溶洞水压越大,随着隧道向溶洞的靠近,隧道掌子面最大位移和涌水量发生突变的时刻就越靠前。此外,当隧道距溶洞很近时 ($L > -10 \text{ m}$),同一进尺下,隧道掌子面最大位移和涌水量均与溶洞水压呈指数式增长关系。因此,为保证隧道在岩溶地段的开挖安全,建议

对隧道掌子面前方进行超前钻孔,遇前方有溶洞则尽可能采取疏水降压以及补强掌子面岩体的措施。

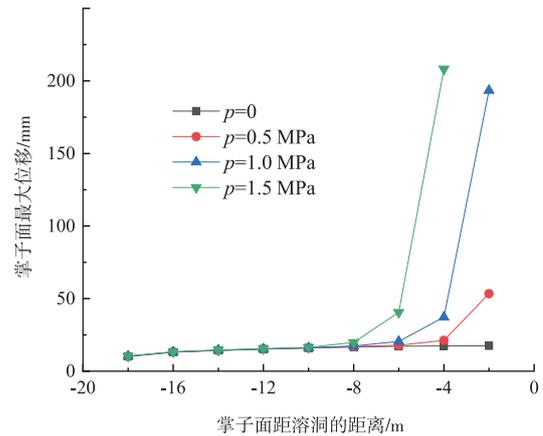


图8 不同水压条件下掌子面最大位移的变化曲线
Fig. 8 Maximum displacement curves of tunnel face under different water pressure conditions

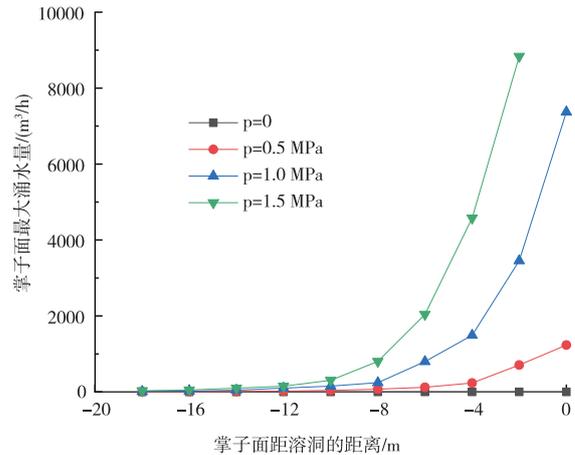


图9 不同水压条件下隧道内涌水量的变化曲线
Fig. 9 Variation curves of water inflow in tunnel under different water pressure conditions

5 结论

(1) 当掌子面距离前方岩溶隧道小于 6 m 时,掌子面前方围岩最大应力达到 6.32 MPa ,掌子面前方围岩塑性区将与溶洞贯通,高压水将通过掌子面前方岩体因屈服产生的导水裂隙带向隧道内突水。

(2) 掌子面的最大位移随距溶洞距离的变化曲线呈现出“L”型,当距离大于 6 m 时,最大位

(下转第 140 页)

研究与应用

- [7] 陈荣. 基于 WEBGIS 技术的地质滑坡测量实时监测系统设
计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (11): 75-78, 83.
- [8] 姜丙波, 柳忠伟, 彭云, 等. 无人机机载激光雷达在抽水
蓄能电站大比例尺地形图测绘中的应用 [J]. 测绘通报,
2021 (S01): 248-251.
- [9] 张欢, 巨能攀, 陆渊, 等. 基于无人机的滑坡地形快速重
建与稳定性分析 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48 (6):
171-179.
- [10] 丁涛, 付贵, 刘超, 等. 消费级无人机在 1: 500 地形图测
绘中的应用 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版,
2021, 44 (6): 840-844.
- [11] 庄钰莹, 熊峰, 吕洋, 等. 基于 GIS 的城市建筑群动力响
应分析模型建模方法研究 [J]. 世界地震工程, 2021, 37
(4): 137-147.
- [12] 林国涛, 孙增奎, 肖斌, 等. 综合无人机, GIS, BIM 技术
的道路设计研究 [J]. 公路, 2021, 66 (3): 23-26.
- [13] 刘超, 雷启云, 余思汗, 等. 基于无人机摄影测量技术
的地震地表破裂带定量参数提取——以 1709 年中卫南 M7
(1/2) 地震为例 [J]. 地震学报, 2021, 43 (1): 113-
123.
- [14] 乔天荣, 马培果, 许连峰, 等. 基于无人机倾斜摄影测量
的关键技术及应用分析 [J]. 矿产勘查, 2020, 11 (12):
2698-2704.
- [15] 陶彭君、熊忠招、龚元夫, 等. 基于 GIS 技术的地名信息
采集系统设计 [J]. 地理空间信息, 2020, 18 (11):
74-76, 79.

(上接第 30 页)

移变化趋势较缓, 处于 25 mm 以下, 当距离小于
6 m, 最大位移快速增大至约 200 mm。

(3) 当掌子面距离溶洞 -18 m ~ -8 m 时, 隧
道掌子面涌水量处于 200 m³/h 以下, 当掌子面距
离溶洞 -8 m ~ -2 m 时, 涌水量迅速增大至
7371 m³/h, 势必发生突水事故。

(4) 隧道掌子面最大位移和涌水量均与溶洞
水压呈指数式增长关系。掌子面开挖遇前方有溶
洞应采取疏水降压以及补强掌子面岩体的措施。

参 考 文 献

- [1] 冯雪冬, 周小龙, 胡亚晴. 岩溶地区隧道突涌水机理的研
究进展 [J]. 武汉工程大学学报, 2022, 44 (3): 250-
259+354.
- [2] 路啸. 运营期隧道渗漏病害无损检测及治理研究 [J].
粘接, 2021, 48 (10): 189-192.
- [3] 蒋雅君, 陶磊, 刘世军, 等. 岩溶隧道衬砌施工缝疏水涂
层长期工作性能研究 [J]. 中国公路学报, 2022, 35 (4):
186-194.
- [4] 张鹏, 潘晓东, 任坤, 等. 岩溶地深埋特长隧道岩溶水
流特征及涌水评估 [J]. 公路, 2022, 67 (2): 337-345.
- [5] 杨坤, 肖维民, 王丽君, 等. 上伏落水洞岩溶隧道围岩力
学响应数值分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17
(S2): 637-644.
- [6] 何松霖. 基于流固耦合的隧道围岩稳定性分析 [J]. 粉煤
灰综合利用, 2020, 34 (5): 6-10.
- [7] 金美海, 刘新荣, 钟祖良. 岩溶隧道拱顶局部水压作用下
衬砌受力特征研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17
(4): 1099-1105+1131.
- [8] 曹林卫, 黄明利, 杨泽, 等. 隧道与溶洞间复合围岩抗水
压能力数值模拟 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (8):
3349-3357.
- [9] 曾斌, 陈植华, 邵长杰, 等. 基于地下水流系统理论的岩
溶隧道涌突水来源及路径分析 [J]. 地质科技通报, 2022,
41 (1): 99-108.
- [10] 郑宗利, 关惠军, 苟想伟, 等. 岩溶隧道突涌水预警体系
的建立 [J]. 灾害学, 2022, 37 (1): 41-46.
- [11] 舒恒, 彭雨杨, 宋明, 等. 超大直径盾构隧道穿越岩溶发
育区地表注浆合理加固范围 [J]. 科学技术与工程,
2021, 21 (25): 10948-10955.