

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230223003

## 深埋岩溶隧道掌子面突水灾害可靠性上限分析\*

源小梦<sup>1</sup>, 张佳华<sup>1,2</sup>

(1. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 4112011;  
2. 湖南科技大学公共安全与应急管理研究院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 旨在研究高地应力、高压富水条件下深埋岩溶隧道掌子面突水灾害的可靠性问题。基于已有研究成果, 考虑高地应力以及高压富水地质条件, 采用极限分析上限法构建了以剪切破坏为主的深埋岩溶隧道掌子面三维防突机制。根据虚功率原理建立突水破坏过程中的能量方程, 利用Hoek-Brown强度准则求解了高地应力以及高压富水条件下防止掌子面突水所需要的支护力上限解。在极限破坏状态下, 根据掌子面上施加的支护力与突水破坏时的围岩压力构建极限状态方程, 建立了深埋岩溶隧道掌子面防突可靠度模型, 并采用响应面法计算了掌子面发生突水灾害的失效概率。分析了水平地应力、溶腔水压力、岩体强度参数以及隧道洞径对支护力、潜在破坏长度的影响规律, 给出了满足不同容许失效概率下深埋岩溶隧道预防突水灾害所需要的最小支护力以及在有限支护效应下能抵抗的最大破坏长度。将研究成果应用于实际工程案例中, 与已有研究、现场结果相比较, 验证了本文计算结果的有效性, 可为今后类似深埋岩溶隧道的防突问题提供理论指导和参考。

**关键词:** 高地应力; 高压富水; 三维防突可靠度模型; 支护力; 破坏长度

**中图分类号:** U458 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0301-12

## Reliability Analysis of Water Inrush Disaster Prevention at Faces in Deeply Buried Karst Tunnels Based on Upper Bound Theory

YUAN Xiaomeng<sup>1</sup>, ZHANG Jiahua<sup>1,2</sup>

(1. School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Institute of Public Safety and Emergency Management, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** The study aims to analyze the reliability of water inrush disaster prevention at faces in deeply buried karst tunnels under high ground stress, high-pressure and water-rich conditions. Built upon existing research and the geological environment, a 3D outburst prevention mechanism for the tunnel faces, primarily based on shear failure, was constructed using the upper bound analysis method. An energy equation for the water inrush failure process was established based on the principle of virtual work rate. The Hoek-Brown strength criterion was used to determine the upper limit solution for the support pressure required to prevent water inrush in tunnel faces under high ground stress, high-pres-

\* 收稿日期:2023-02-23;修回日期:2023-04-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51804113,52074116)、湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(23B0476)资助

作者简介:源小梦(1998—),女,硕士研究生。主要从事地下工程防灾减灾研究。E-mail: 21020101030@mail.hnust.edu.cn

通讯作者:张佳华(1983—),男,副教授,硕导,博士(后)。主要从事隧道等地下工程稳定性研究。

E-mail: 1010090@hnust.edu.cn

sure, and water-rich conditions. Under the state of extreme failure, a limit state equation was established based on the support pressure applied to the tunnel faces and the surrounding rock pressure at the time of water inrush failure. A reliability model for outburst prevention at the faces of deeply buried karst tunnels was established. To determine the likelihood of water inrush disasters at tunnel faces, the response surface method (RSM) was applied. The effects of horizontal ground stress, water pressure in dissolution cavities, rock mass strength parameters, and tunnel diameter on support pressure and potential failure length were analyzed. The minimum support pressure required to prevent water inrush disasters in deeply buried karst tunnels under different allowable failure probabilities and the maximum damage length that could be resisted under limited support effectiveness was provided. Applied to practical engineering cases and compared with existing studies and field results, the findings confirm the effectiveness of the calculated results, offering theoretical guidance for preventing outburst problems in similar deeply buried karst tunnels in the future.

**Keywords:** high ground stress; high-pressure and water-rich; 3D outburst prevention reliability model; support pressure; failure length

## 0 引言

随着我国“一带一路”倡议的落实,青藏、川藏等铁路的兴建,深埋高地应力、高压富水隧道与日俱增。深埋隧道在高地应力影响下,再加上溶蚀裂隙、岩溶管道、宽张裂隙带等隐蔽导水通道以及地下水溶蚀、冲蚀、补给等作用极易诱发大型突涌水灾害。也正因为如此,深埋隧道在穿越断层破碎带、岩溶及全风化岩层等不良地质区域时,极易发生突水突泥等重大突发性工程灾害事故,造成巨大的人员伤亡和经济财产损失<sup>[1-2]</sup>。如:1979年湖南京广铁路衡广复线南岭隧道发生3次突水灾害,总涌水量达16 885 m<sup>3</sup>/d;1981年广东京广铁路衡广复线大瑶山隧道穿越9#断层时发生突水灾害,突水量达到3×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d;2007年湖北宜万铁路高阳寨隧道发生突水灾害,共造成31人死亡,1人失踪,1人受伤;2010年广东南广铁路白云隧道发生突水灾害共6人死亡,4人受伤;2012年甘肃兰渝铁路古子山隧道发生突水灾害共造成2人死亡,直接经济损失约200万元;2018年贵州贵南高铁朝阳隧道发生突水灾害共造成3人死亡;2019年云南安石隧道发生突水灾害造成12人死亡、10人受伤,直接经济损失2 525.01万元;2022年云南鹤剑隧道突水灾害造成4人死亡、6人受伤<sup>[3-5]</sup>。由此可见,深埋隧道突水灾害其隐蔽性极强、危害性极大,已成为隧道向深部发展的瓶颈问题之一,深埋岩溶隧道的防突问题亟

待解决<sup>[6-8]</sup>。

近年来,一些学者针对岩溶隧道的稳定性问题进行了研究,取得了一系列有价值的成果。吴祖松等<sup>[9]</sup>基于统一强度理论结合弹性薄板弯曲推导出防突岩盘在简支和固支条件下的安全厚度解析解。李术才等<sup>[10-11]</sup>基于属性数学理论建立了隐伏溶洞与隧道岩层间安全厚度风险评估的属性识别模型,和对岩溶隧道掌子面与高压含水层之间裂隙岩体的防突最小安全厚度的研究,推导了合理反映爆破开挖扰动与水压作用下裂纹岩体最小安全厚度计算公式。夏沅谱等<sup>[12]</sup>基于Mohr-Coulomb破坏准则构建了隔水岩层剪切破坏力学分析模型,并得到相应的隔水岩层安全厚度的计算公式。翟友成等<sup>[13]</sup>建立了掌子面岩溶突水剪切破坏模式下的剪切面向应力计算方法。张玉伟等<sup>[14]</sup>建立了防突层的简化力学模型,并考虑水压力和侧压力的共同影响,采用结构力学方法和变分原理推导了防突层最小安全厚度。J.Q.Guo等<sup>[15]</sup>基于极限分析的上限定理和Hoek-Brown破坏准则,得到了抗水岩体临界安全厚度的计算方法。L.W.Zhang等<sup>[16]</sup>建立了三维充水溶洞和隧道模型,研究了溶洞形状对隧道围岩稳定性和最小安全厚度的影响。M.Pesendorfer等<sup>[17]</sup>由观测结果分析出深埋岩溶隧道瞬态水压力变化规律。潘东东等<sup>[18]</sup>采用模型试验研究了不同水压条件下隐伏溶洞对隧道围岩稳定性,揭示了承压溶洞突水过程位移、应力及渗压的变化规律。郭佳奇等<sup>[19]</sup>研究了岩溶隧道掌子面防突岩体断续裂隙的

压剪起裂及分支裂纹扩展规律,推导了断续节理岩体突水破坏的临界水压力。李浪等<sup>[20]</sup>建立抗突体最小安全厚度的力学模型,采用相似模型试验,直观展现岩溶水压、防突岩盘厚度对突水灾害的影响规律。杨子汉等<sup>[21]</sup>采用极限分析原理,并结合Mohr-Coulomb准则、Hoek-Brown准则分别求解岩盘的预留安全厚度,并且通过对比表明基于Hoek-Brown准则计算的结果更加精确。上述学者对深埋岩溶隧道突水灾害进行了研究,取得了丰硕的成果,但并未考虑高地应力对深埋隧道的影响,也没有引入可靠度理论来分析岩溶隧道发生突水灾害的概率。

高压富水溶腔一般赋存在深埋隧道中,而深埋隧道中的高地应力非常显著,其影响不容忽视<sup>[22]</sup>。针对深埋隧道中高地应力这一重要的力学特征,本文在杨子汉等<sup>[21]</sup>研究基础上,考虑深埋隧道中高地应力、高压富水地质环境,采用极限分析上限法和响应面法来研究深埋岩溶隧道掌子面的防突问题,为类似深埋岩溶隧道的支护设计提供理论指导和参考。

## 1 Hoek-Brown强度准则

根据大量的岩体试验,E.Hoek和E.T.Brown<sup>[23]</sup>共同提出了表征岩体破坏力学特性的Hoek-Brown强度准则,该准则被广泛应用于岩土工程中,其表达式为:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

式中, $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 分别为最大和最小主应力, $\sigma_{ci}$ 为岩石单轴抗压强度; $m_b$ 、 $s$ 、 $a$ 为经验参数,可由地质强度指标 $I_{GS}$ 、岩体常数 $m_i$ 以及扰动因子 $D$ 确定,其关系式为:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{I_{GS} - 100}{28 - 14D}\right) \quad (2)$$

$$s = \exp\left(\frac{I_{GS} - 100}{9 - 3D}\right) \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-I_{GS}/15} - e^{-20/3} \right) \quad (4)$$

E.Hoek等<sup>[24]</sup>采用等面积思想将Hoek-Brown强度准则参数转换为Mohr-Coulomb强度准则参数,表达式为:

$$c_i = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma_{3n}](s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}} \quad (5)$$

$$\varphi_i = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}} \right] \quad (6)$$

式中, $\sigma_{3n} = \sigma_{3max}/\sigma_{ci}$

对于隧道,最大围压上限 $\sigma_{3max}$ 与岩体单轴抗压强度 $\sigma_{cm}$ 的关系为:

$$\frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{cm}} = 0.47 \left( \frac{\sigma_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94} \quad (7)$$

岩体单轴抗压强度 $\sigma_{cm}$ 与完整岩石单轴抗压强度 $\sigma_{ci}$ 之间的关系有:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)](m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (8)$$

## 2 深埋岩溶隧道掌子面防突三维力学模型

深埋隧道掌子面的防突模式可大致分为6种,即:完整型防突模式、裂隙型防突模式、岩层型防突模式、土石型防突模式、支护型防突模式、复合型防突模式<sup>[25]</sup>。由于完整型防突模式其力学特性相对比较容易开展研究,因此该防突模式目前研究略多,而其他防突模式研究非常少。针对完整型防突模式,杨子汉等<sup>[21]</sup>采用极限分析上限法研究了深埋岩溶隧道的防突问题。然而,在分析溶腔水压力作用时,杨子汉等<sup>[21]</sup>只考虑了水压力在溶腔面(图1中 $A'B'$ 面)上的影响,而忽视了水压力在潜在破裂面(图1中三维圆台 $AA'B'B$ 侧面,其中也包括 $AA'$ 和 $B'B$ )上的影响,这势必会影响到计算结果的精度。此外,高压富水溶腔一般赋存在深埋隧道中,而深埋隧道中的高地应力非常显著,其影响不容忽视<sup>[25]</sup>。关于深埋隧道中的高地应力这一重要的力学特征杨子汉等<sup>[21]</sup>并没有考虑。因此,本文在已有研究成果文献[21,26]的基础上,考虑深埋隧道中的高地应力、潜在破裂面以及溶腔面上的水压力与施加在掌子面上的支护力等影响,采用极限分析上限法构建了以剪切破坏为主的深埋岩溶隧道掌子

面三维防突机制,如图1所示,隧道洞径为 $d$ ,圆 $AB$ 为开挖方向上的掌子面,支护力 $q$ 均布施加在掌子面 $AB$ 上;三维圆台 $AA'B'B$ 为潜在破坏体,其长度为 $L$ ,在高地应力以及正前方高压富水溶腔中水压力的作用下, $AA'B'B$ 发生剪切破坏,以速度 $v$ 向洞内作水平滑动,贯穿后的破裂面为三维圆台 $AA'B'B$ 的侧面(其中 $AA'$ 和 $B'B$ 为纵断面上的破裂面); $\sigma_H$ 和 $\sigma_V$ 为破坏体 $AA'B'B$ 所受到的水平地应力与竖直地应力; $p$ 为作用在溶腔面与潜在破裂面上的水压力。此外,为了便于计算,假定三维圆台 $AA'B'B$ 所在圆锥体的顶点为 $O$ 点,根据相关联流动法则,破裂面(包括 $AA'$ 和 $B'B$ )与圆锥体中心线的夹角均为 $\varphi_1$ ;溶腔面 $A'B'$ 上水压力的作用半径为 $R$ 。

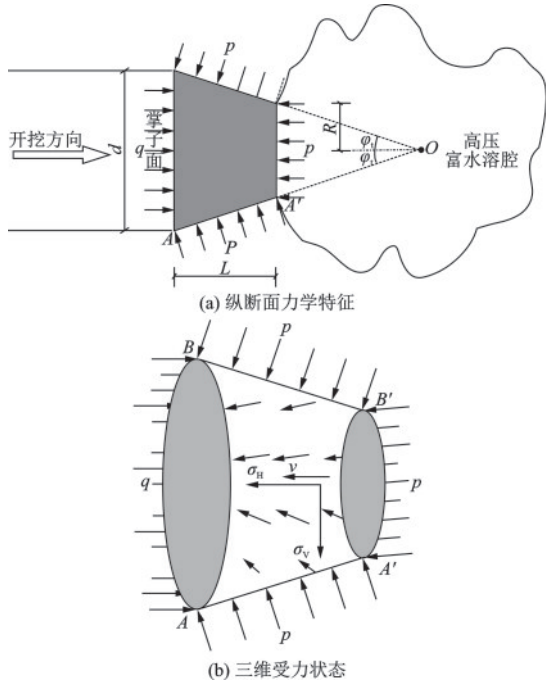


图1 深埋岩溶隧道掌子面防突三维力学模型

Fig.1 Three-dimensional mechanical model for outburst prevention at the faces of deeply buried karst tunnels

### 3 计算与求解

#### 3.1 假设条件

本文研究深埋岩溶隧道掌子面的防突问题时,作了如下假设:(1)岩体 $AA'B'B$ 发生剪切破坏时服从Hoek-Brown强度准则和相关联流动法则;(2)岩体 $AA'B'B$ 在剪切破坏时体积不发生变化,能量在其侧面上发生耗散;(3)高压富水溶腔中水压力不

变,即作用在溶腔面与潜在破裂面上的水压力均为 $p$ 。

#### 3.2 解析解

分析图1中三维圆台破坏体 $AA'B'B$ 的受力状态,在外力(即地应力、溶腔水压力、支护力、岩体自重应力)的作用下,破坏体 $AA'B'B$ 发生剪切破坏,在剪切破坏过程中,外力产生的能量沿破裂面耗散。接下来根据极限分析原理计算外力功率与内能耗散率。

由图1几何关系可得:

$$R = d/2 - L \tan \varphi_1 \quad (9)$$

(1) 地应力功率

地应力包括竖直地应力与水平地应力。作用在破坏体 $AA'B'B$ 上的竖直地应力 $\sigma_V$ 与其速度 $v$ 相互垂直,所以竖直地应力功率为0。此外,根据最不利原则,作用在破坏体 $AA'B'B$ 上的水平地应力 $\sigma_H$ 应与其速度 $v$ 平行,因此,水平地应力功率为破坏体 $AA'B'B$ 侧面积上所受到的水平地应力与速度 $v$ 的乘积,具体表达式分别为:

$$\dot{W}_{\sigma_V} = \int_{S_{AA'B'B}} \sigma_V v \cos(\pi/2) dS = 0 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\sigma_H} &= \int_{S_{AA'B'B}} \sigma_H v dS = \sigma_H v \pi (d/2 + R) L / \cos \varphi_1 = \\ &= \sigma_H v L \pi (d - L \tan \varphi_1) / \cos \varphi_1 \end{aligned} \quad (11)$$

地应力功率为:

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\sigma} &= \dot{W}_{\sigma_V} + \dot{W}_{\sigma_H} = \\ &= \int_{S_{AA'B'B}} \sigma_V v \cos(\pi/2) dS + \int_{S_{AA'B'B}} \sigma_H v dS = \\ &= \sigma_H v L \pi (d - L \tan \varphi_1) / \cos \varphi_1 \end{aligned} \quad (12)$$

(2) 溶腔水压力功率

溶腔水压力 $p$ 除了作用在溶腔面 $A'B'$ 面上,还作用在 $AA'B'B$ 破裂面(即三维圆台侧面)上。

首先,溶腔水压力在溶腔面 $A'B'$ 面上所做的功率为溶腔水压力 $p$ 与 $A'B'$ 面积以及速度 $v$ 的乘积,其表达式为:

$$\dot{W}_{p_1} = \int_{S_{A'B'}} p v dS = p v \pi \left( \frac{1}{4} d^2 - d L \tan \varphi_1 + L^2 \tan^2 \varphi_1 \right) \quad (13)$$

其次,溶腔水压力在 $AA'B'B$ 破裂面(即三维圆台侧面)上做的功率等于溶腔水压力 $p$ 与 $AA'B'B$ 侧面积以及速度 $v$ 的乘积,具体表达式为:

$$\dot{W}_{p_2} = \int_{S_{AA'B'B}} p v \sin \varphi_1 dS = p v \pi (d L \tan \varphi_1 - L^2 \tan^2 \varphi_1) \quad (14)$$

故溶腔水压力功率为:

$$\dot{W}_p = \dot{W}_{p_1} + \dot{W}_{p_2} = \int_{S_{AA'B'B}} p v dS + \int_{S_{AA'B'B}} p v \sin \varphi_i dS = \frac{1}{4} p v \pi d^2 \quad (15)$$

(3) 支护力功率

支护力  $q$  在掌子面  $AB$  上所做的功率等于掌子面上的支护力与速度  $v$  的乘积, 表达式为:

$$\dot{W}_q = - \int_{S_{AB}} q v dS = - \frac{1}{4} \pi d^2 q v \quad (16)$$

(4) 岩体重力功率

由于破坏体  $AA'B'B$  的重力方向与其速度  $v$  方向垂直, 因此岩体重力功率为 0, 具体表达式为:

$$\dot{W}_\gamma = \int_{V_{AA'B'B}} \gamma v \cos(\pi/2) dV = 0 \quad (17)$$

(5) 内能耗散率

破坏体  $AA'B'B$  在向洞内滑动的过程中, 能量耗散在破裂面上, 即三维圆台  $AA'B'B$  的侧面上, 因此, 内能耗散率为等效黏聚力  $c_i$  与  $AA'B'B$  侧面积以及速度  $v$  的乘积, 具体表达式为:

$$\dot{D} = \int_{S_{AA'B'B}} c_i v \cos \varphi_i dS = c_i v L \pi (d - L \tan \varphi_i) \quad (18)$$

(6) 突出压力与潜在破坏长度

在极限破坏状态下, 隧道掌子面预防突水灾害所需要的支护力  $q$  等于掌子面突水时的突出压力  $q_s$ 。根据虚功率原理, 外力做的功率等于内能耗损率, 联立式(10)~(18)可求得支护力  $q$  (突出压力  $q_s$ ) 的解析解, 其表达式为:

$$q_s = q = (d - L \tan \varphi_i) (\sigma_H / \cos \varphi_i - c_i) 4L / d^2 + p \quad (19)$$

式中, 若支护力  $q$  已知, 亦可反解求得潜在破坏长度  $L$ 。

(7) 失效概率与可靠指标

在开挖过程中发现隧道掌子面前方有富水溶洞, 为了防止发生突水灾害, 对掌子面采取预支护措施, 假定施加在掌子面上的支护力为均布荷载  $q$ , 由式(19)求得极限破坏状态下的突出压力为  $q_s$ , 那么, 根据隧道掌子面上的支护力  $q$  与突出压力  $q_s$  来构建其极限状态方程, 其表达式为:

$$g(X) = q - q_s = q - \frac{4L}{d^2} (d - L \tan \varphi_i) (\sigma_H / \cos \varphi_i - c_i) - p = 0 \quad (20)$$

深埋岩溶隧道掌子面防突可靠度模型为:

$$R_s = P \{ g(X) = q - (d - L \tan \varphi_i) (\sigma_H / \cos \varphi_i - c_i) 4L / d^2 - p > 0 \} \quad (21)$$

深埋岩溶隧道掌子面发生突水灾害的失效概率为:

$$P_f = 1 - R_s = 1 - P \{ g(X) = q - (d - L \tan \varphi_i) (\sigma_H / \cos \varphi_i - c_i) 4L / d^2 - p > 0 \} \quad (22)$$

其可靠指标为:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) = -\Phi^{-1}(1 - P \{ g(X) = q - (d - L \tan \varphi_i) (\sigma_H / \cos \varphi_i - c_i) 4L / d^2 - p > 0 \}) \quad (23)$$

由于式(21)~(23)中含有等效黏聚力  $c_i$  和等效内摩擦角  $\varphi_i$ , 需引入式(1)~(8)计算, 因此其可靠度模型结构比较复杂, 本文采用响应面法进行计算来求解深埋岩溶隧道掌子面的失效概率和可靠指标。

## 4 结果分析

### 4.1 上限解分析

#### 4.1.1 支护力

由图2(a)和(b)可得, 随着地质强度指标  $I_{GS}$ 、岩体常数  $m_i$ 、岩石单轴抗压强度  $\sigma_{ci}$  增大或者扰动因子  $D$  减小, 防止掌子面发生突水灾害所需要的支护力  $q$  呈减小的趋势。这表明在围岩较差的区段, 施工时应加强对隧道掌子面的支护力度, 且应避免施工产生较大扰动而造成掌子面发生突水灾害。由图2(c)和(d)可知, 随着潜在破坏长度  $L$ 、溶腔水压力  $p$ 、水平地应力  $\sigma_H$  增大, 支护力  $q$  呈增大的趋势, 这是由于这3个参数增大直接导致掌子面前方三维圆台破坏体上所承受的总溶腔水压力或总水平地应力增大, 故防止掌子面发生突水灾害而所需要的支护力也随之增大。以图2(d)中  $p=1$  MPa 和  $\sigma_H=0.6$  MPa 得到的支护力  $q=1334.89$  kPa 为例进行对比分析, 在其他参数不变的情况下, 当水平地应力  $\sigma_H$  依次增大到 0.8、1.2、1.4 MPa 时, 其对应的支护力  $q$  分别为 1491.54、1648.18、1804.83、1961.47 kPa, 其相对差值分别为 11.7%、23.5%、35.2%、46.9%。同样, 以图2(d)中  $\sigma_H=1$  MPa 和  $p=0.6$  MPa 得到的支护力  $q=1248.18$  kPa 为例进行对比分析, 在其他参数不变的情况下, 当溶腔水压力  $p$  依次增大到 0.8、1.2、1.4 MPa 时, 其对应的支护力  $q$  分别为 1448.18、1648.18、1848.18、2048.18 kPa, 其相对差值分别为 16.0%、32.0%、48.1%、64.1%。由此可

见,水平地应力和溶腔水压力对支护力有显著影响,建议在深埋岩溶隧道开挖过程中,应对地应力进行实时量测,以及对溶腔水压力进行及时预测,加强支护,防止因支护不及时或支护力度不足而导致掌子面发生突水灾害。

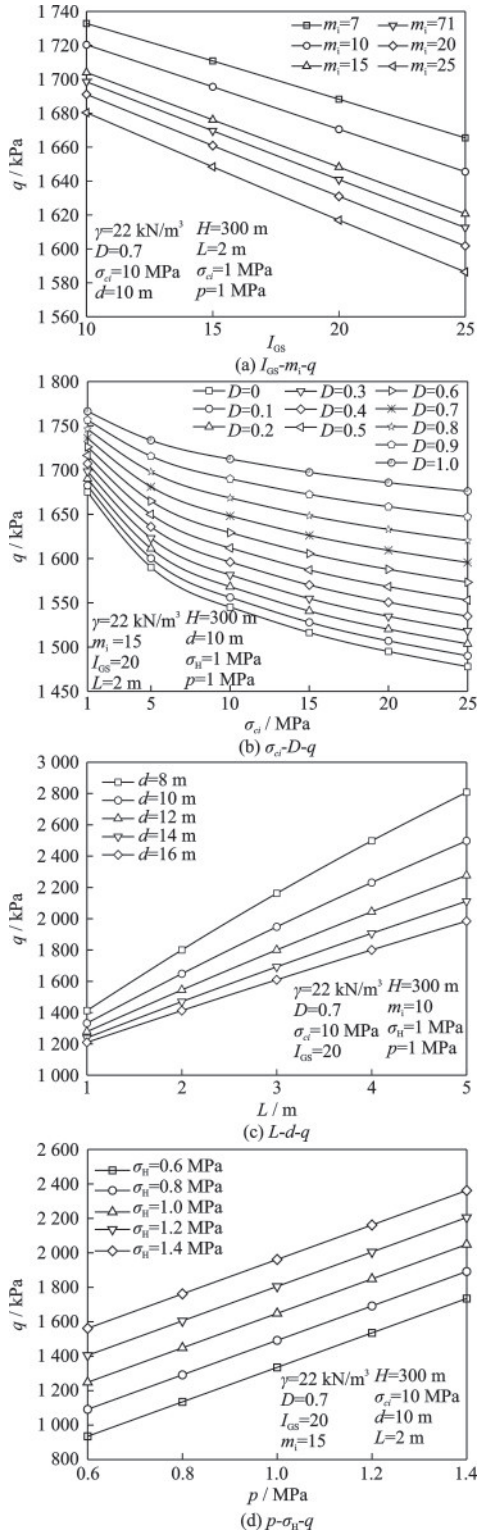


图2 各参数对支护力的影响

Fig.2 Effects of various parameters on support pressure

#### 4.1.2 破坏长度

由图3(a)和(b)可得,在支护力不变的前提下,随着地质强度指标  $I_{GS}$ 、岩体常数  $m_i$ 、岩石单轴抗压强度  $\sigma_{ci}$  增大或者扰动因子  $D$  减小,支护效应抵抗潜

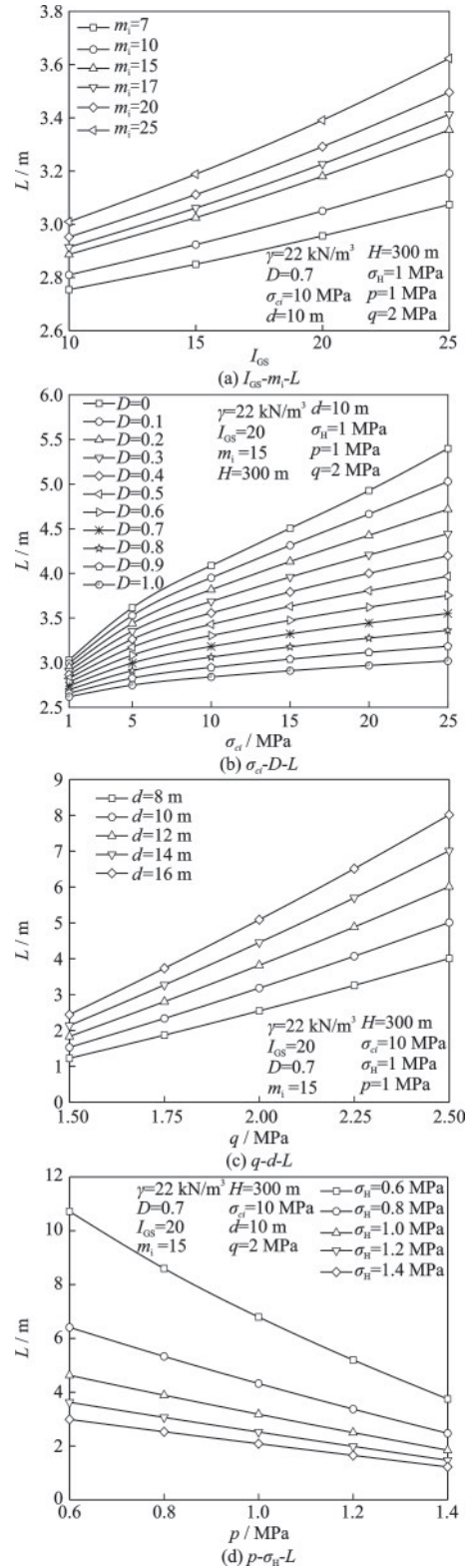


图3 各参数对破坏长度的影响

Fig.3 Effects of various parameters on failure length

在破坏体的长度 $L$ 呈增大的趋势。这表明在有限的支护条件下,围岩越好且扰动越小,能抵抗破坏体的长度越长。由图3(c)可知,随着支护力 $q$ 、隧道洞径 $d$ 增大,支护效应能抵抗破坏体的长度 $L$ 呈增大趋势。以图3(c)中 $d=12\text{ m}$ 和 $q=1.5\text{ MPa}$ 得到的破坏长度 $L=1.83\text{ m}$ 为例进行分析,在其他参数一定的情况下,当支护力 $q$ 依次增大到1.75、2、2.25、2.5 MPa时,支护效应能抵抗破坏体的长度 $L$ 分别为2.80、3.82、4.88、6.01 m,其相对差值分别为53.0%、108.7%、166.7%、228.4%。由图3(d)可知,随着水平地应力 $\sigma_H$ 、溶腔水压力 $p$ 增大,支护效应能抵抗破坏体的长度 $L$ 减小,且水平地应力 $\sigma_H$ 越大,减小的趋势越平缓。以图3(d)中 $\sigma_H=1\text{ MPa}$ 和 $p=0.6\text{ MPa}$ 得到的破坏长度 $L=4.63\text{ m}$ 为例进行对比分析,在其他参数一定的情况下,当溶腔水压力 $p$ 依次增大到0.8、1.0、1.2、1.4 MPa时,支护效应能抵抗破坏体的长度 $L$ 相应减小为3.89、3.18、2.50、1.84 m,其相对差值分别为19.0%、45.6%、85.2%、151.6%。同样,以图3(d)中 $p=1\text{ MPa}$ 和 $\sigma_H=0.6\text{ MPa}$ 得到的破坏长度 $L=6.79\text{ m}$ 为例进行对比分析,在其他参数一定的情况下,当水平地应力 $\sigma_H$ 依次增大到0.8、1.0、1.2、1.4 MPa时,支护效应能抵抗破坏体的长度 $L$ 相应减小为4.32、3.18、2.52、2.08 m,其相对差值分别为57.2%、113.5%、169.4%、226.4%。由此可见,支护力、溶腔水压力、水平地应力显著影响着深埋岩溶隧道掌子面前方的破坏体长度。

## 4.2 可靠性分析

### 4.2.1 最小支护力

考虑岩体参数以及荷载的离散性,基于已有研究成果<sup>[27-28]</sup>,假定其统计特征见表1,其余参数值为:隧道埋深 $H=300\text{ m}$ ,洞径 $d=10\text{ m}$ ,扰动因子 $D=0.7$ ,破坏长度 $L=2\text{ m}$ 。由图4可知,当各主要参数

表1 随机变量的统计特征 I<sup>[27-28]</sup>

随机变量	均值	标准差	变异系数/%	分布类型
$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	22	1.1	5	正态分布
$I_{GS}$	20	2.0	10	正态分布
$m_i$	15	1.875	12.5	正态分布
$\sigma_{ci}/\text{MPa}$	10	2.5	25	正态分布
$p/\text{MPa}$	1	0.15	15	正态分布
$\sigma_H/\text{MPa}$	1	0.15	15	正态分布
$q/\text{MPa}$	—	—	15	正态分布

一定时,失效概率 $P_f$ 随着支护力 $q$ 的增大呈明显减小的趋势。在图4中引入容许失效概率 $[P_f]$ ,可以得到不同失效概率下防止掌子面发生突水灾害所需要的最小支护力(表2)。结合图4和表2可以发现,当失效概率 $P_f$ 一定时,在各主要影响参数中,水平地应力 $\sigma_H$ 和溶腔水压力 $p$ 对支护力的影响最为显著。

此外,对比是否考虑岩体参数、荷载离散性两种情况,可以发现,当考虑参数离散性时,所求得的支护力可以明显降低掌子面发生突水灾害的风险,而且可以有效地反映掌子面的实际工作状态。如果不考虑参数离散性,则会严重低估深埋岩溶隧道

表2 满足不同容许失效概率深埋岩溶隧道防突所需要的最小支护力

Table 2 Minimum support pressure required for deeply buried karst tunnels in outburst prevention under different allowable failure probabilities

单位:MPa

参数	均值	容许失效概率 $[P_f]$			
		0.1	0.01	0.001	0.000 1
$I_{GS}$	10	2.2	2.8	3.4	4.1
	15	2.2	2.8	3.4	4.1
	20	2.2	2.7	3.3	4.0
	25	2.1	2.7	3.3	4.0
$m_i$	7	2.2	2.8	3.4	4.1
	10	2.2	2.8	3.4	4.1
	15	2.2	2.7	3.3	4.0
	17	2.2	2.7	3.3	4.0
	20	2.2	2.7	3.3	4.0
	25	2.1	2.7	3.3	4.0
$\sigma_{ci}/\text{MPa}$	1	2.3	2.9	3.5	4.2
	5	2.2	2.8	3.4	4.1
	10	2.2	2.7	3.3	4.0
	15	2.1	2.7	3.3	4.0
	20	2.1	2.7	3.3	3.9
	25	2.1	2.7	3.2	3.9
$\sigma_H/\text{MPa}$	0.6	1.8	2.2	2.7	3.3
	0.8	2.0	2.5	3.0	3.7
	1.0	2.2	2.7	3.3	4.0
	1.2	2.4	3.0	3.6	4.4
$p/\text{MPa}$	1.4	2.6	3.2	3.9	4.8
	0.6	1.7	2.1	2.5	3.1
	0.8	1.9	2.4	2.9	3.5
	1.0	2.2	2.7	3.3	4.0
$p/\text{MPa}$	1.2	2.4	3.1	3.7	4.5
	1.4	2.7	3.4	4.1	5.0

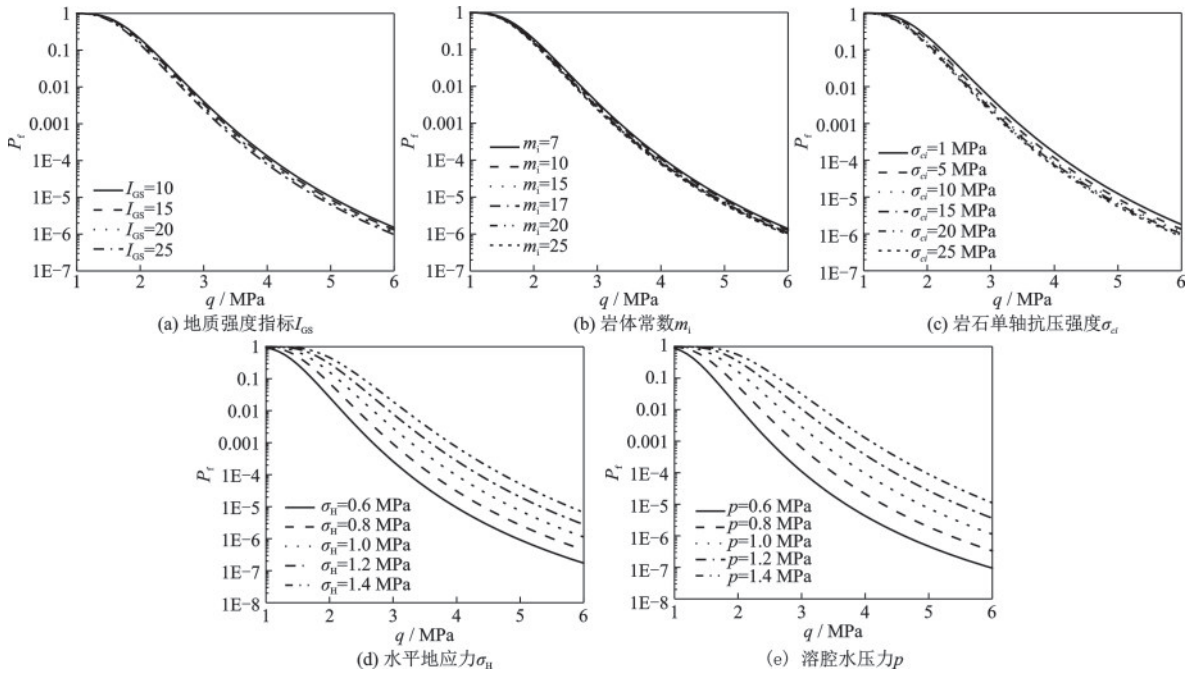


图4 在不同参数下支护力对失效概率的影响

Fig.4 Influence of support pressure on failure probabilities under different parameters

掌子面失效的概率,进而威胁隧道施工安全。表2的相关计算结果也可为深埋岩溶隧道防突设计提供参考。

#### 4.2.2 最大破坏长度

考虑岩体参数以及荷载的离散性,基于已有研究成果<sup>[27-28]</sup>,假定其统计特征(表3),其余参数值为:隧道埋深 $H=300$  m,洞径 $d=10$  m,扰动因子 $D=0.7$ 。

由图5可知,在支护作用下,潜在破坏体的长度 $L$ 增大,深埋岩溶隧道掌子面诱发突水灾害的概率 $P_f$ 增大。在图5中引入容许失效概率 $[P_f]$ ,可以得到满足不同容许失效概率下支护作用能抵抗的最大破坏长度(表4)。结合图5和表4可以发现,当容许失效概率一定时,各主要参数对最大破坏长度的敏感性依次为:水平地应力 $\sigma_H$ 、支护力 $q$ 的影响最为明

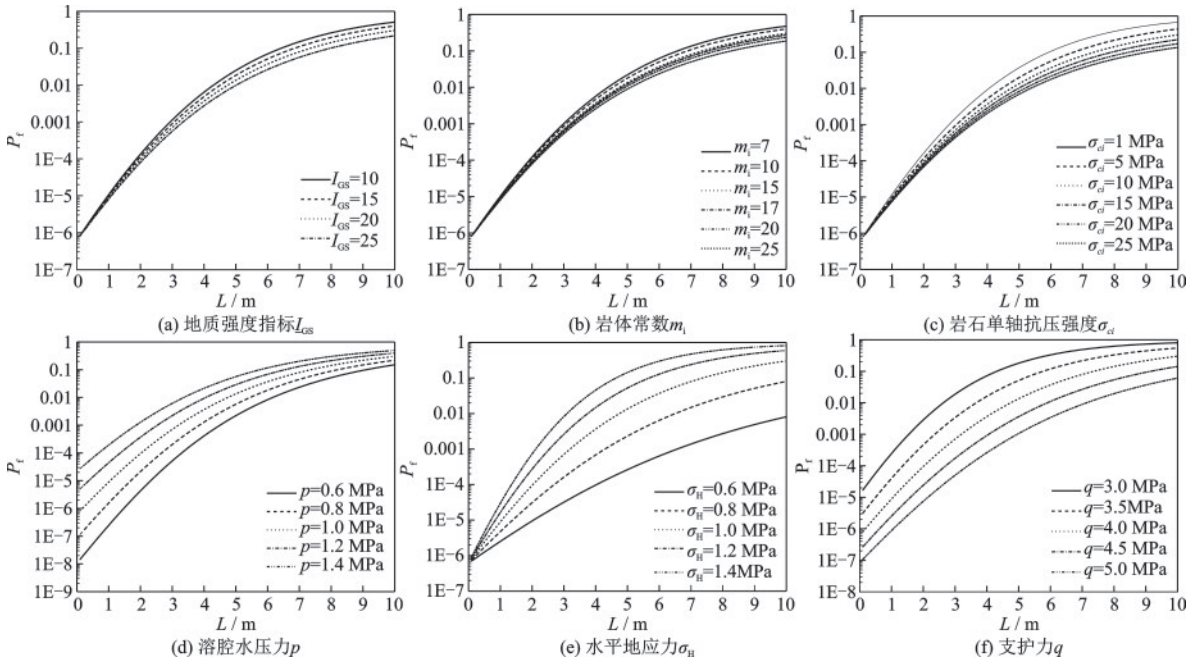


图5 支护作用下潜在破坏长度对诱发突水概率影响

Fig.5 Influence of potential failure length on the probabilities of induced water inrush under support

表3 随机变量的统计特征 II<sup>[27-28]</sup>Table 3 Statistical characteristics II of random variables<sup>[27-28]</sup>

随机变量	均值	标准差	变异系数/%	分布类型
$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	22	1.1	5	正态分布
$I_{\text{GS}}$	20	2.0	10	正态分布
$m_i$	15	1.875	12.5	正态分布
$\sigma_{ci}/\text{MPa}$	10	2.5	25	正态分布
$p/\text{MPa}$	1	0.15	15	正态分布
$\sigma_{Hi}/\text{MPa}$	1	0.15	15	正态分布
$q/\text{MPa}$	4	0.6	15	正态分布

显,溶腔水压力 $p$ 的影响次之,H-B准则参数的影响最小。同时,表4中的相关计算结果可以为深埋岩溶隧道掌子面突水灾害预测提供参考。

## 5 成果应用

宜万线云雾山隧道、野三关隧道、马鹿箐隧道地质情况非常复杂,岩溶强烈发育,地下水丰富,暗河、溶洞甚多,高地应力、高压富水、软岩等不良地质一度成为施工难题,且多次发生特大突水事故,造成了严重的人员伤亡与巨大的经济损失。基于这3个深埋岩溶隧道工程案例<sup>[29-31]</sup>,采用本文防突模型和方法进行计算,结果见表5,本文计算结果与郭佳奇<sup>[26]</sup>、杨子汉等<sup>[21]</sup>均比较接近,也满足现场的实际要求,从而验证了本文计算结果的有效性。

表4 不同容许失效概率下支护作用抵抗最大破坏长度

Table 4 Maximum failure length resisted by support under different allowable failure probabilities

单位:m

参数	均值	容许失效概率 $[P_f]$			
		0.1	0.01	0.001	0.000 1
$I_{\text{GS}}$	10	6.4	4.3	2.9	1.8
	15	6.8	4.5	3.0	1.9
	20	7.3	4.7	3.1	2.0
	25	7.9	5.0	3.3	2.1
$m_i$	7	6.5	4.3	2.9	1.9
	10	6.8	4.5	3.0	1.9
	15	7.3	4.7	3.1	2.0
	17	7.5	4.8	3.2	2.0
	20	7.8	4.9	3.2	2.0
$\sigma_{ci}/\text{MPa}$	25	8.2	5.1	3.3	2.1
	1	5.9	4.0	2.8	1.8
	5	6.7	4.4	3.0	1.9
	10	7.3	4.7	3.1	2.0
	15	7.9	4.9	3.3	2.0
$p$	20	8.4	5.1	3.4	2.1
	25	9.0	5.3	3.5	2.1
	0.6	9.1	6.1	4.5	3.2
	0.8	8.2	5.4	3.8	2.6
	1.0	7.3	4.7	3.1	2.0
$\sigma_{Hi}/\text{MPa}$	1.2	6.5	4.0	2.5	1.3
	1.4	5.7	3.3	1.8	0.6
	0.6	—	—	6.5	4.0
	0.8	—	6.5	4.2	2.6
$q/\text{MPa}$	1.0	7.3	4.7	3.1	2.0
	1.2	5.6	3.7	2.5	1.6
	1.4	4.6	3.0	2.1	1.3
	3.0	4.3	2.6	1.5	0.6
$\sigma_{Hi}/\text{MPa}$	3.5	5.7	3.6	2.3	1.3
	4.0	7.3	4.7	3.1	2.0
	4.5	9.1	5.9	4.0	2.7
	5.0	—	7.1	4.9	3.4

表5 计算结果对比

Table 5 Comparison of calculated results

工程案例	最大埋深 H/m	$\sigma_H$ / MPa	断面/ m <sup>2</sup>	溶腔水 压力/ MPa	计算参数						计算结果/m			
					围岩 等级	$\gamma$ / (kN·m <sup>-3</sup> )	$I_{Gs}$	$m_i$	$\sigma_{ci}$ / MPa	支护力 q/MPa	郭佳奇 <sup>[26]</sup>	杨子汉 等 <sup>[21]</sup>	现场	本文
云雾山隧道+“526溶腔”	800	7.6	9.8×7	0.8	Ⅲ	26.5	60	9	67.34	8	3.69	3.62	2.5~4.5	3.64
野三关隧道+“602溶腔”	684	7.2	7.3×6.55	1.0	Ⅱ	26	60	12	64.04	8	2.98	2.76	2.4~3.0	2.69
马鹿箐隧道+“978溶腔”	660	9.1	5×5.75	1.0	Ⅲ	25.5	70	10	72.94	8	—	1.41	约1.5	1.41

## 6 结论

(1) 基于上限分析给出了不同参数对支护力和破坏长度的影响规律。其中,水平地应力和溶腔水压力对支护力和破坏长度有显著影响。建议在深埋岩溶隧道开挖过程中,对地应力进行实时量测,及时预测溶腔水压力,加强支护,防止因支护不及时或支护力度不足而导致掌子面发生突水灾害。

(2) 基于可靠度理论分析了不同参数对失效概率的影响规律,获得了防止掌子面发生突水灾害所需的合理支护力、以及在支护作用下能抵抗的破坏体长度。当失效概率一定时,在各主要影响参数中,水平地应力和溶腔水压力对支护力的影响最为显著;而各主要参数对最大破坏长度的敏感性依次为:水平地应力、支护力的影响最为明显,溶腔水压力的影响次之,H-B准则参数的影响最小。且当不考虑参数的离散性时,会严重低估深埋岩溶隧道掌子面失效的概率。建议在分析深埋岩溶隧道安全性时考虑参数的离散性,准确求解掌子面发生突水灾害风险的概率,进而保障隧道施工安全。

## 参考文献:

- [1] 张向礼,范飞,李佳兴,等.高原不良地质铁路隧道水害动态控制技术[J].中国安全科学学报,2020,30(增1):84-91.  
Zhang X L, Fan F, Li J X, et al. Dynamic control technology of water disaster in railway tunnel with bad geology in plateau[J]. China Safety Science Journal, 2020,

30(Sup1): 84-91. (in Chinese)

- [2] 杨子汉,李永鑫,许敬叔,等.圆形隧道环向存在隐伏充填溶腔时防突岩墙的上限稳定性分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(5):122-131.  
Yang Z H, Li Y X, Xu J S, et al. Upper bound stability analysis for confining rocks considering the circular existence of filled karst cave around tunnels[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(5): 122-131. (in Chinese)
- [3] 王梦恕.对岩溶地区隧道施工水文地质超前预报的意见[J].铁道勘察,2004,30(1):7-9,18.  
Wang M S. Hydrogeological and geological forecast of tunnel construction in the karst district[J]. Railroad Survey, 2004, 30(1): 7-9, 18. (in Chinese)
- [4] 李术才,薛翊国,张庆松,等.高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(7):1297-1307.  
Li S C, Xue Y G, Zhang Q S, et al. Research on key technology of integrated prediction and early warning of geological hazards in tunnel construction in high-risk karst areas[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1297-1307. (in Chinese)
- [5] 李明达,张昱,周晶.岩溶位置及组合效应对隧道的地震响应分析[J].防灾减灾工程学报,2022,42(3):472-479.  
Li M D, Zhang Y, Zhou J. Seismic response analysis of tunnel under Karst cave locations and combinatorial effect[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(3): 472-479. (in Chinese)
- [6] 王遇国.岩溶隧道突水灾害与防治研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2010.  
Wang Y G. Research on water Inrush disaster and pre-

- vention of karst tunnel[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2010. (in Chinese)
- [7] 王国斌. 沪蓉西高速公路乌池坝岩溶隧道涌水成灾机理研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.  
Wang G B. Disaster mechanism of gushing water in Wuchiba karst tunnel on Shanghai-Chengdu West expressway[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2012. (in Chinese)
- [8] 张旭东, 汪海滨, 封明君, 等. 释能降压工法在高压富水岩溶隧道风险规避中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增1): 2782-2791.  
Zhang X D, Wang H B, Feng M J, et al. Study of the application of energy releasing and pressure reducing aim to evade risk in water-enriched high hydraulic pressure latent karst tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (Sup1): 2782-2791. (in Chinese)
- [9] 吴祖松, 李松, 涂义亮, 等. 统一强度理论下掌子面防突安全厚度理论研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(6): 1705-1710, 1721.  
Wu Z S, Li S, Tu Y L, et al. Study on safety thickness theory of palm surface outburst prevention based on unified strength theory[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16 (6): 1705-1710, 1721. (in Chinese)
- [10] 李术才, 袁永才, 李利平, 等. 钻爆施工条件下岩溶隧道掌子面突水机制及最小安全厚度研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 313-320.  
Li S C, Yuan Y C, Li L P, et al. Water inrush mechanism and minimum safe thickness of rock wall of karst tunnel face under blast excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37 (2): 313-320. (in Chinese)
- [11] Huang X, Li S C, Xu Z H, et al. An attribute recognition model for safe thickness assessment between concealed karst cave and tunnel [J]. Journal of Central South University, 2019, 26(4): 955-969.
- [12] 夏沅谱, 董鑫, 熊自明, 等. 基于剪切破坏的深长隧道掌子面隔水岩层安全厚度的研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(5): 57-66.  
Xia Y P, Dong X, Xiong Z M, et al. A study of the safety thickness of water-resisting rock strata in a deep-buried and long tunnel based on shear failure[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(5): 57-66. (in Chinese)
- [13] 翟友成, 曹文贵, 罗忠涛, 等. 隧道掌子面防突水安全厚度的区间非概率可靠性分析方法[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(6): 81-87.  
Zhai Y C, Cao W G, Luo Z T, et al. Calculation of the safety thickness of tunnel's dike for preventing water bursting based on the interval non-probabilistic reliability analysis method [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43 (6): 81-87. (in Chinese)
- [14] 张玉伟, 王琪, 李又云, 等. 压力溶腔对岩溶隧道施工安全影响的数值分析[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 150-156.  
Zhang Y W, Wang Q, Li Y Y, et al. Numerical analysis on impact of pressure cavity on karst tunnel construction safety[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 150-156. (in Chinese)
- [15] Guo J Q, Wu W L, Liu X L, et al. Theoretical analysis on safety thickness of the water-resistant rock mass of Karst tunnel face taking into account seepage effect [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40(2): 697-709.
- [16] Zhang L W, Fu H, Wu J, et al. Effects of Karst cave shape on the stability and minimum safety thickness of tunnel surrounding rock [J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(9): 1-15.
- [17] Pesendorfer M, Loew S. Subsurface exploration and transient pressure testing from a deep tunnel in fractured and karstified limestones (Lotschberg Base Tunnel, Switzerland) [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2010, 47(1): 121-137.
- [18] 潘东东, 李术才, 许振浩, 等. 岩溶隧道承压隐伏溶洞突水模型试验与数值分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(5): 828-836.  
Pan D D, Li S C, Xu Z H, et al. Model tests and numerical analysis for water inrush caused by karst caves, filled with confined water in tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40 (5): 828-836. (in Chinese)
- [19] 郭佳奇, 陈建勋, 陈帆, 等. 岩溶隧道断续节理掌子面突水判据及灾变过程[J]. 中国公路学报, 2018, 31(10): 118-129.  
Guo J Q, Chen J X, Chen F, et al. Water inrush criterion and catastrophe process of a Karst tunnel face with non-persistent Joints[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(10): 118-129. (in Chinese)
- [20] 李浪, 陈显波, 程金星, 等. 深长隧道突涌水灾害防突岩盘模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增2): 3278-3285.  
Li L, Chen X B, Cheng J X, et al. Model test to investigate waterproof-resistant slab for water inrush geohazards in deep buried and long tunnels[J]. Chinese Jour-

- nal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39 (Sup2): 3278-3285. (in Chinese)
- [21] 杨子汉, 杨小礼, 许敬叔, 等. 基于上限原理的两种岩溶隧道岩墙厚度计算方法[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 801-809.  
Yang Z H, Yang X L, Xu J S, et al. Two methods for rock wall thickness calculation in karst tunnels based on upper bound theorem [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(3): 801-809. (in Chinese)
- [22] 谢和平, 张茹, 任利, 等. 复杂艰险山区深埋隧道围岩灾变分析与思考[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(2): 1-20.  
Xie H P, Zhang R, Ren L, et al. Analysis and thoughts on surrounding rock mass catastrophe of deep-buried tunnels in extremely complex high mountain areas [J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(2): 1-20. (in Chinese)
- [23] Brown E T, Hoek E. Underground excavation in rock [M]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980.
- [24] Hoek E, Carranza-Torres C, Corkum B. Hoek-Brown failure criterion—2002 edition [J]. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, 2002, 1: 267-273.
- [25] 刘希亮, 武文龙, 郭佳奇. 隧道防突水岩体的破坏模式、特征及预警判识[J]. 工业建筑, 2020, 50(1): 109-117, 183.  
Liu X L, Wu W L, Guo J Q. Failure modes, characteristics and early warning identification of rock mass resisting water gushing-out in tunnel [J]. Industrial Construction, 2020, 50(1): 109-117, 183. (in Chinese)
- [26] 郭佳奇. 岩溶隧道防突厚度及突水机制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.  
Guo J Q. Study on against-inrush thickness and water burst mechanism of karst tunnel [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [27] 孙明社, 郭小红, 王梦恕, 等. 基于二次正交试验的隧道非概率可靠度方法研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增2): 105-111.  
Sun M S, Guo X H, Wang M S, et al. Study on non-probabilistic reliability of tunnel based on quadratic orthogonal test [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(Sup2): 105-111. (in Chinese)
- [28] Zhang D B, Sun W C, Wang C Y, et al. Reliability analysis of seismic stability of shield tunnel face under multiple correlated failure modes [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(8): 3172-3185.
- [29] 苏昭. 深埋特长的云雾山隧道涌水影响因素及涌水量预测[J]. 水电能源科学, 2019, 37(12): 58-61.  
Sun Z. Prediction of gushing water and influencing factors in deep buried super long tunnel for Yunwushan [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(12): 58-61. (in Chinese)
- [30] 苗德海. 宜万铁路野三关隧道响水坪地下暗河发育特征及方案研究[J]. 铁道标准设计, 2012, 56(8): 75-79.  
Miao D H. Study on development characteristics and treatment scheme of Xiangshuiping underground river of Yesanguan tunnel in Yichang-Wanzhou Railway [J]. Railway Standard Design, 2012, 56(8): 75-79. (in Chinese)
- [31] 杨兵. 宜万铁路马鹿箐隧道岩溶灾害的工程处治技术[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(3): 581-586.  
Yang B. Treatment techniques for karst disaster of Maluqing tunnel on Yichang-Wanzhou Railway [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(3): 581-586. (in Chinese)

(本文编辑:池营营)