

王万锋, 杨永泰, 陆钰铨, 等. 喀斯特地貌区隧道与隐伏充填溶洞临界安全距离分析[J]. 中国岩溶, 2023, 42(6): 1282-1293.

DOI: 10.11932/karst20230610

喀斯特地貌区隧道与隐伏充填溶洞临界安全距离分析

王万锋¹, 杨永泰², 陆钰铨³, 赵楚军¹, 崔鹏杰¹, 邱军领²

(1. 中铁建云南投资有限公司, 云南昆明 650000; 2. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064;

3. 浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江杭州 310030)

摘要: 当隧道施工穿越喀斯特地貌发育区时, 隧道应与溶洞保持一定的距离, 确保隧道围岩及支护的稳定性。为探究隧道与岩溶的临界安全距离, 综合采用理论计算与数值试验方法, 基于强度理论, 建立不同部位充填溶洞(顶部、底部、侧部)临界安全距离的计算模型, 推导出隧道与环向不同位置溶洞临界安全距离计算公式; 采用FLAC 3D软件建立环向不同位置溶洞与隧道间的临界安全距离数值模型, 基于正交试验设计方法, 分析了围岩级别、溶洞水压、溶洞尺寸对临界安全距离的影响规律和显著性。结果表明: 隧道与环向不同部位溶洞间的临界安全距离均随围岩级别、溶洞水压及溶洞尺寸的增大而增大, 综合影响程度从大到小可排序为围岩级别>溶洞水压>溶洞尺寸; 结合试验结果的非线性多元回归分析建立了临界安全距离预测公式; 最后将研究成果应用于阳宗隧道项目来验证临界安全距离预测模型的合理性及适用性。

关键词: 岩溶隧道; 临界安全距离; 强度理论; 数值模拟; 正交试验; 回归分析

中图分类号: U452.11 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2023)06-1282-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

溶洞作为岩溶隧道中最常见的不良地质体, 特别是在云、贵、桂和川、湘、鄂地区的岩溶地层中, 通常发育着大量的溶洞群, 我国交通建设迅猛发展, 必将要在岩溶发育地区修建隧道^[1-2]。已有实践表明, 在富水岩溶发育地区修建隧道, 随着隧道掘进不断接近致灾性岩溶, 可能发生围岩失稳, 结构破坏, 甚至突泥突水灾害^[3-5], 因此为了保证隧道围岩与结构的稳定, 预防岩溶灾害的发生, 有必要对岩溶与隧道的临界安全距离进行研究。

岩溶形态千奇百怪, 复杂多变^[6], 按充填特征可分为充填型溶洞、半充填型溶洞和无充填型溶洞^[7],

充填物也是多种多样的, 常见的有水、黏土、淤泥、块石等充填物。关于隧道与溶洞临界安全距离问题, 大量学者通过实际工程经验对比^[8]、理论研究^[9-10]、数值模拟^[11-12]等方法开展了相应的研究, 赖金星等^[13]通过数值模拟研究了不同位置溶洞对隧道结构的影响; 郭佳奇^[14-15]采用强度理论与Schwarz交替法研究了溶洞尺寸对防突岩层最小厚度的影响, 并基于塑性区贯通理论建立了防突岩层最小厚度的力学预测模型。陈禹成等^[16]通过数值模拟分析了不同位置的隐伏溶洞对隧道围岩应力场、位移场的影响; 师海等^[17]应用突变理论建立了岩溶隧道开挖时掌子面与隐伏溶洞安全距离的非线性-尖点突变模型, 有效的预测了实际工程中的安全距离; 刘扬等^[18]通过数值

资助项目: 中国铁建昆仑投资集团有限公司科技研究开发计划项目(KLTZ-KX01-2020-009)

第一作者简介: 王万锋(1973—), 男, 高级工程师, 主要从事岩土与隧道工程方向研究。E-mail: 188358056@qq.com。

通信作者: 邱军领(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事隧道及地下工程方面的研究。E-mail: 870133597@qq.com。

收稿日期: 2022-12-26

模拟和回归分析相结合的分析方法,探讨了影响安全厚度的因素,并建立了下伏溶洞与隧道安全距离的预测模型;张桥等^[12]依托小三峡岩溶隧道,通过有限元方法分析了充水溶洞位于隧道周边时围岩位移和塑性区的变化规律,并通过围岩位移和塑性区变化计算得到隧道围岩最小防突厚度。综上所述,岩溶与隧道的安全距离已有大量的研究,但是当下的研究多数针对无充填型溶洞在水压的作用下对隧道的影 响,对于充填型和半充填型溶洞的研究较少,本文将考虑岩溶充填物对隧道的影 响,进而探究隧道与岩溶的临界安全距离。

鉴于此,以福宜高速阳宗隧道为例,首先基于强度理论推出了溶洞位于隧道不同部位时的临界安全距离预测公式,对影响因素进行正交分析,然后采用FLAC 3D 软件建立相应的数值模型,得到不同部位溶洞与隧道间的临界安全距离,并通过线性回归法建立临界安全距离预测公式,最后将研究成果应用于阳宗隧道工程中以验证临界安全距离预测模型的合理性及适用性,以期类似工程提供参考和借鉴。

1 基于强度理论的力学模型

郭佳奇等^[14]将溶洞与隧道之间的岩墙合理简化为弹性梁板进行分析,从结构力学角度推导当充水溶洞分别位于隧道顶部、侧部及底部时隔水岩层的最小安全厚度计算公式。本文在其基础上进一步考虑了溶洞充填物的作用对最小安全距离公式进行了优化,使该公式更具有适应性。

在分析过程中作出如下假设:

(1)溶洞与隧道间的隔水岩层完整性好,无任何明显的裂缝、节理,将其视为均质连续、各向同性的弹性体,能承受拉压应力;

(2)当溶洞位于隧道顶部或底部时,水平面上溶洞垂直于隧道纵向的长度大于隧道跨度,当溶洞位于隧道侧部时,横断面上溶洞在重力方向的长度大于隧道高度;

(3)忽略隧道与溶洞间隔水岩层的拱形效应,将其简化为平整的弹性梁;

(4)将岩溶水压力对隔水岩层的影响简化为均布荷载作用在梁上;

(5)计算过程中,只考虑围岩的自重应力,不考虑结构应力。

当溶洞为充填型溶洞时,考虑了内部充填物的自重及孔隙水压力的同时,考虑了溶洞上方围岩压力 q 对隔水岩层的影响;当溶腔内为水体、淤泥、泥沙等不具备传递应力的充填物时不考虑溶洞上方围岩压力的作用;当溶腔内为块石等能够传递应力的充填物时,该压力通过溶洞内部充填物传递到溶洞与隧道之间的岩层,地下洞室上方围岩压力计算公式如下:

$$q = 0.45 \times 2^{A-1} \gamma \omega \quad (1)$$

$$\omega = 1 + i(L_1 - 5) \quad (2)$$

式中: q 为围岩压力换算的等效分布压力, kPa; γ 为溶洞上方岩层的重度, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$; A 为围岩级别; L_1 水平面上溶洞垂直于隧道纵向的长度, m; ω 为跨度系数,当 $L_1 < 5$ 时, i 取 0.2, 当 $5 < L_1 < 14$ 时, i 取 0.1。

1.1 溶洞位于隧道顶部

当充水溶洞位于隧道顶部时,将隧道顶部的隔水岩层简化为两端固支梁力学模型(图 1)。岩梁上作用的荷载主要有:沿梁长均匀分布的岩层自重荷载 γh 、均布岩溶水压力 p 以及溶洞上方的围岩压力 q 。

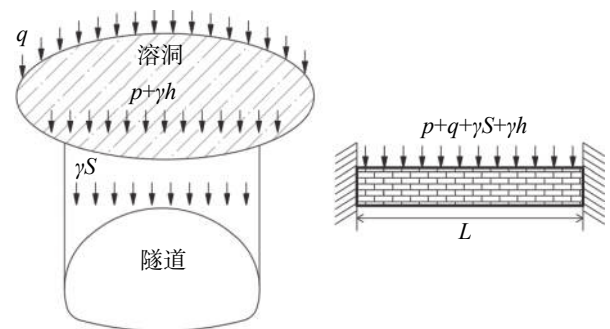


图 1 溶洞位于隧道顶部时的简化模型

Fig. 1 Simplified model of karst cave at the top of tunnel

根据结构力学理论,对于两端固支梁在受均布荷载作用时,梁的最大弯矩计算公式(3)与最大剪力计算公式(4)分别为:

$$M = \frac{1}{12} q l^2 \quad (3)$$

$$Q = \frac{1}{2} q l \quad (4)$$

因此,同时受三种荷载作用时,梁的最大弯矩计算公式(5)与最大剪力计算公式(6)分别为:

$$M = \frac{1}{12} (p + \gamma S + q + \gamma_1 h) B L^2 \quad (5)$$

$$Q = \frac{1}{2} (p + \gamma S + q) B L \quad (6)$$

式中: M 为岩梁上弯矩最大值, $\text{kN}\cdot\text{m}$; Q 为岩梁上剪力最大值, kN ; p 为均布溶洞水压力, kPa ; S 为岩梁的厚度, 即隧道与溶洞间的临界安全距离, m ; B 为岩梁的宽度, 即溶洞在水平面上沿隧道纵向的长度, m ; L 为岩梁的长度, 即隧道的跨度, m ; γ_1 为充填物容重, $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$; h 为充填物高度, m ; q 为溶洞上方围岩压力, 当溶洞为充填溶洞时, 按式(1)进行计算, 当溶洞为半充填型或零充填型溶洞时, 因为溶腔为稳定结构, 因此只考虑内部充填物的自重, 此时, $q = 0$ 。

对于矩形截面梁, 其抗弯强度验算公式(7)与抗剪强度验算公式(8)分别为:

$$\frac{6M}{BS^2} \leq [\sigma] \quad (7)$$

$$\frac{3Q}{2BS} \leq [\tau] \quad (8)$$

式中: $[\sigma]$ 为岩层的抗弯强度, kPa ; $[\tau]$ 为岩层的抗剪强度, kPa 。

分别将式(5)与式(6)代入式(7)与式(8)可计算出岩梁的安全厚度:

$$S_1 \geq \frac{\gamma L^2 + \sqrt{\gamma^2 L^4 + 8[\sigma](p+q+\gamma_1 h)L^2}}{4[\sigma]} \quad (9)$$

$$S_2 \geq \frac{3L(p+q+\gamma_1 h)}{4[\tau] - 3\gamma L} \quad (10)$$

考虑到在实际的隧道工程施工中, 隧道开挖扰动引起的应力重分布、爆破振动导致的岩体损伤、岩溶水溶蚀及高压水引起岩体裂隙的拓展发育以及地下水对岩体强度的弱化作用等都会对临界安全距离产生影响, 因此应对在简化条件下计算得出的安全厚度采用安全系数 n ($1.2 < n < 1.5$)加以修正, 分别得到式(11)与式(12):

$$S_1 \geq n \frac{\gamma L^2 + \sqrt{\gamma^2 L^4 + 8[\sigma](p+q+\gamma_1 h)L^2}}{4[\sigma]} \quad (11)$$

$$S_2 \geq n \frac{3L(p+q+\gamma_1 h)}{4[\tau] - 3\gamma L} \quad (12)$$

取式(11)和式(12)的计算值 S_1 和 S_2 中的较大值作为隧道与顶部溶洞间的临界安全距离。

1.2 溶洞位于隧道底部

当充水溶洞位于隧道底部时, 同样将隧道下方的岩层简化成固支梁(图2)。因为隧道是一个整体刚性结构, 隧道结构上方受到的围岩压力同样会通过隧道结构传递到岩梁之上, 岩梁所受的荷载有: 岩层均布自重荷载 γh 、均布溶洞水压力 p 以及隧道结

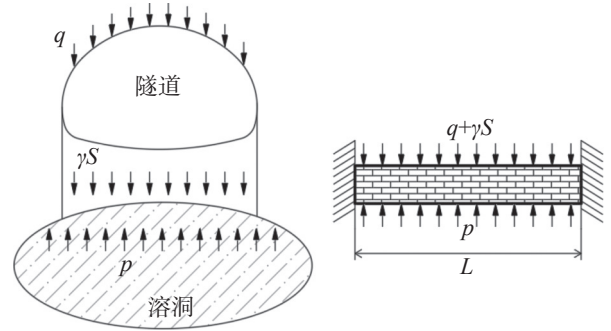


图2 溶洞位于隧道底部时的简化模型

Fig. 2 Simplified model of karst cave at the bottom of tunnel

构上方围岩压力 q 。隧道底部的岩梁以抵抗水压力的突出作用为主, 当溶洞为充填型溶洞且充填物为承压型充填物时, 隧道底部的岩梁以抵抗水压力的突出作用为主; 当溶洞内为非承压型充填物时或者为半充填溶洞时, 其最大弯矩计算公式(13)与最大剪力计算公式(14)分别为:

$$M = \frac{1}{12}(p - \gamma S - q)BL^2 \quad (13)$$

$$Q = \frac{1}{2}(p - \gamma S - q)BL \quad (14)$$

根据抗弯强度验算以及抗剪强度验算可分别得出岩层的安全厚度:

$$S_1 \geq n \frac{-\gamma L^2 + \sqrt{\gamma^2 L^4 + 8[\sigma](p-q)L^2}}{4[\sigma]} \quad (15)$$

$$S_2 \geq n \frac{3L(p-q)}{4[\tau] + 3\gamma L} \quad (16)$$

取式(15)和式(16)的计算值 S_1 和 S_2 中的较大值作为隧道与底部溶洞间的临界安全距离。

1.3 溶洞位于隧道侧部

当充水溶洞位于隧道侧部时, 同样将岩体简化为固支梁(图3)。岩梁主要受到溶洞水压力荷载 p 以及溶洞水平地应力 q_1 的作用。岩梁的最大弯矩计算公式(17)与最大剪力计算公式(18)分别为:

$$M = \frac{1}{12}(p + q_1)BH^2 + \frac{1}{20}\rho g BH^3 \quad (17)$$

$$Q = \frac{1}{2}(p + q_1)BH + \frac{7}{20}\rho g BH^2 \quad (18)$$

$$q_1 = \lambda q \quad (19)$$

式中: H 为岩梁的长度, 即隧道的高度, m ; ρ 为岩溶水密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; g 为重力加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; q_1 为溶洞水平方向围岩压力, kPa ; λ 为侧压力系数。

根据抗弯强度验算以及抗剪强度验算可分别得

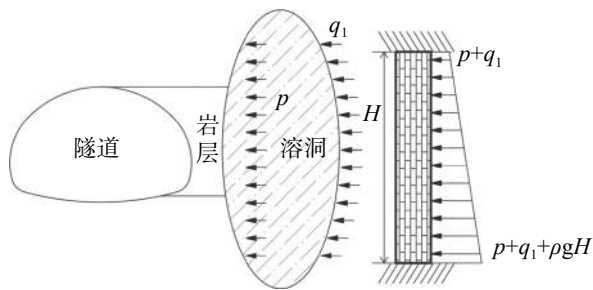


图 3 溶洞位于隧道侧部时的简化模型

Fig. 3 Simplified model of karst cave at the side of tunnel

出岩层的安全厚度:

$$S_1 \geq n \sqrt{\frac{5(p+q_1)H^2 + 3\rho gH^3}{10[\sigma]}} \quad (20)$$

$$S_2 \geq n \frac{30H(p+q_1) + 21\rho gH^2}{40[\tau]} \quad (21)$$

取式(20)和式(21)的计算值 S_1 和 S_2 中的较大值作为隧道与侧部溶洞间的临界安全距离。

2 基于正交试验安全距离预测模型

前文基于强度理论推导了临界安全距离的计算公式,为确定安全距离提供了理论基础,但没有考虑隧道的开挖效果以及支护的过程,也无法反映围岩的位移、应力及塑性区的变化情况,从而难以得出具有普适性的表达关系式,因此需要借助数值模拟手段加以补充。基于正交试验设计方法构建临界安全距离与各影响因素间的关系。建立数值计算模型,然后研究临界安全距离的评判依据,最后通过分析多个工况的数值计算结果来建立临界安全距离的预测模型。

2.1 数值计算模型

2.1.1 模型概况

阳宗隧道位于云南省昆明市呈贡区阳宗镇附近,为分离式双向六车道高速公路隧道。左线隧道全长 7 708 m,最大埋深 572.62 m,隧址区岩性较复杂,岩溶强发育,岩体结构破碎,属于蓄水条件较好的聚水构造带,对隧道围岩涌水影响较大。本文以单线隧道为例,建立隧道顶部、底部、侧部隐伏充填溶洞 FLAC 3D 模型,对充填溶洞与隧道间的临界安全距离进行研究,按实际工程情况,隧道开挖跨度为 15.5 m,开挖高度为 9.8 m,溶洞简化为一圆柱体,隧道埋

深设定为 200 m,为消除边界效应,模型的长度取 110 m,宽度取 120 m,由于不考虑隧道的开挖方向对计算结果的影响,取模型的轴向长度为 1 m。隧道与顶部隐伏溶洞的整体模型如图 4 所示。

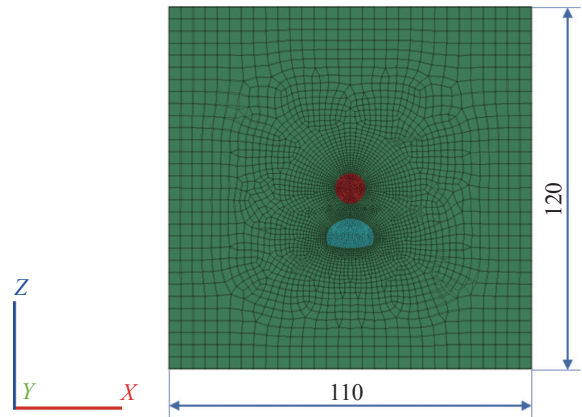


图 4 隧道顶部溶洞计算模型

Fig. 4 Calculation model of karst cave at the top of tunnel

岩体假定为均匀的各向同性体,采用摩尔库伦本构模型,围岩的各参数特性依据正交试验表中的不同工况进行赋值,溶洞水压根据设计不同工况在溶洞内进行环向加载,溶洞内充填物参数如表 1 所示。模型上部为自由边界,模型左、右、前、后侧施加位移边界约束,底部施加位移边界约束。本次试验中隧道埋深设为 200 m,由于模型尺寸有限,根据隧道埋深在模型顶面施加剩余岩层产生的自重应力,同时施加水平应力于左右边界(侧压力系数设为 0.8),在溶洞的环向施加线性荷载来模拟水压力。

表 1 溶洞充填物物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of cave filling

参数	重度 γ	粘聚力 c	摩擦角 φ	弹性模量 E	泊松比 μ
	$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	kPa	$^\circ$	MPa	
溶洞充填物	18	1.0	26	7	0.26

2.1.2 施工步骤模拟

计算时首先进行初始应力场模拟,同时施加溶洞水压,再进行地应力平衡及位移清零,然后采用全断面开挖法开挖隧道,最后进行计算直至达到精度要求。

2.1.3 围岩稳定性判据

采用 FLAC 3D 软件进行数值计算,能同时考虑

剪切破坏和拉伸破坏以及两者的复合破坏,并且显示正在发生和之前发生的破坏区域,能方便地观察破坏区域范围及大小,首先利用塑性区判据来初步确定溶洞与隧道间的临界安全距离,在计算完成后观察围岩的塑性区范围,围岩的塑性区是否将溶洞与隧道相连来判断岩体的状态。当围岩的塑性区未将隧道与溶洞相连(图 5a),表明在该距离下围岩呈安全状态,而塑性区将隧道与溶洞相连时(图 5c),则

该距离下的围岩已失稳,由此采用二分法不断改变模型中溶洞与隧道的间距,最终可找到塑性区刚好贯通的临界距离,然后观察该距离下的位移矢量图及应力分布图,若位移速度矢量图出现了与破坏机制相一致的运动,应力集中在隧道与充填溶洞相连的岩层之上,则可以初步判断,即此时为隧道与充填溶洞的临界安全距离。

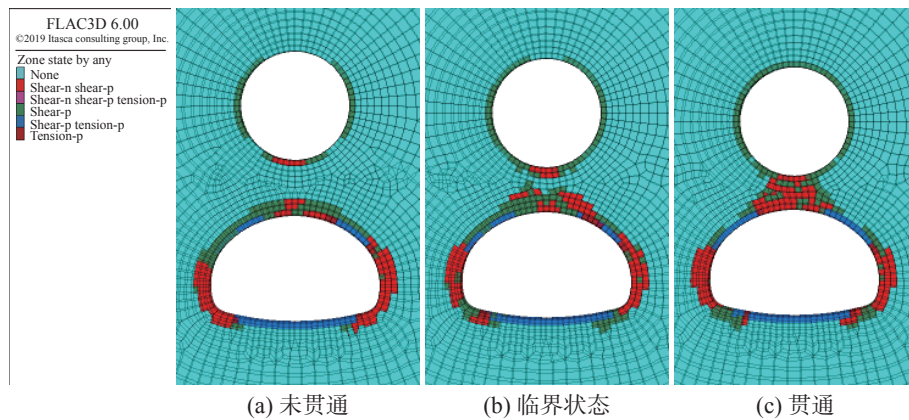


图 5 溶洞与隧道间塑性区分布图

Fig. 5 Distribution of plastic zone between karst cave and tunnel

2.2 正交试验设计

本文结合岩溶隧道建设的实际工况,选取围岩条件(容重、粘聚力、摩擦角、弹性模量及泊松比这 5 项物理力学参数)、溶洞直径、溶洞水压这 3 个因素作为主要影响因素采用数值模拟正交试验方法进行研究。不同围岩级别的各因子取值如表 2 所示,各影响因素的具体水平值如表 3 所示。

根据 3 个因素及各对应的 4 个水平,设计了 $L_{16}(4^4)$ 正交试验(表 4),正交表的前三列为三个影响因素,第四列当作空列用于误差分析。

2.3 正交试验结果分析

对表 4 中的 48 组试验进行建模计算,为减少工

表 3 围岩级别的各因子取值范围

Table 3 Value range of each factor of surrounding rock level

围岩级别	重度 γ	粘聚力 c	摩擦角 φ	弹性模量 E	泊松比 μ
	$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	MPa	$^\circ$	GPa	
III 1	24	1.0	41	9	0.26
III 2	23	0.8	39	7	0.28
IV 1	22	0.6	37	5	0.30
IV 2	21	0.4	35	3	0.32

作量,首先根据基于强度理论得出的临界安全距离公式进行计算,得出合理的距离范围,然后通过反复调整间距大小,找到塑性区贯通的临界安全距离,结合该距离下的的位移矢量图与应力分布图,进一步判断临界安全距离的准确性,如图 6、图 7、图 8 所示,可以看出,在塑性区刚好贯通的时候,此时,应力主要集中在隧道拱顶和拱底的位置,中间岩层的应力较为集中,同时从位移矢量图中可以看出,位移的方向与岩层破坏的方向相一致,因此最终确定出隧道与充填溶洞的临界安全距离。参考以上方法,进行后续试验,试验结果中溶洞位于隧道顶部、底部以及侧部的临界安全距离记为 S_t , S_b 和 S_s ,得到的结果如表 4,再对试验结果进行极差分析、方差分析以及回

表 2 各影响因素的水平值

Table 2 Level value of each influence factor

水平取值	围岩级别A	溶洞直径D	水压P
		m	MPa
1	III 1	5	0.8
2	III 2	10	1.2
3	IV 1	15	1.6
4	IV 2	20	2.0

表 4 $L_{16}(4^4)$ 正交试验方案及结果
Table 4 Scheme and results of $L_{16}(4^4)$ orthogonal test

编号	围岩级别A	溶洞水压P MPa	溶洞直径D m	误差项e	临界安全距离		
					S/m	S_b /m	S_s /m
1	Ⅲ1	0.8	5	1	1.1	1.1	1.0
2	Ⅲ1	1.2	10	2	1.5	2.2	1.3
3	Ⅲ1	1.6	15	3	1.9	3.5	1.4
4	Ⅲ1	2.0	20	4	2.5	4.8	1.6
5	Ⅲ2	0.8	10	3	1.9	1.9	1.4
6	Ⅲ2	1.2	5	4	1.7	1.9	1.4
7	Ⅲ2	1.6	20	1	2.6	4.4	1.8
8	Ⅲ2	2.0	15	2	3.3	5.2	2.0
9	Ⅳ1	0.8	15	4	2.9	2.8	2.2
10	Ⅳ1	1.2	20	3	2.9	4.0	2.3
11	Ⅳ1	1.6	5	2	2.7	3.4	2.1
12	Ⅳ1	2.0	10	1	4.0	5.6	2.4
13	Ⅳ2	0.8	20	2	4.3	4.1	3.1
14	Ⅳ2	1.2	15	1	4.2	5.2	3.0
15	Ⅳ2	1.6	10	4	4.8	6.0	3.0
16	Ⅳ2	2.0	5	3	5.1	5.8	3.2

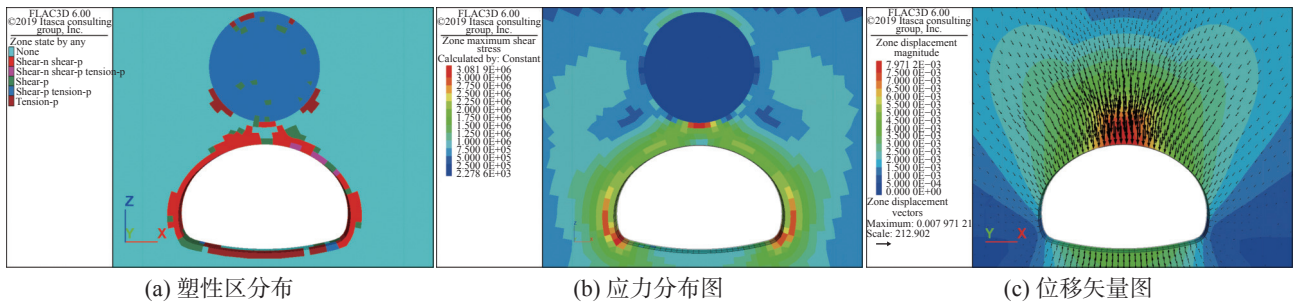


图 6 溶洞位于隧道顶部临界安全距离分析

Fig. 6 Analysis of critical safety distance of karst cave at the top of tunnel

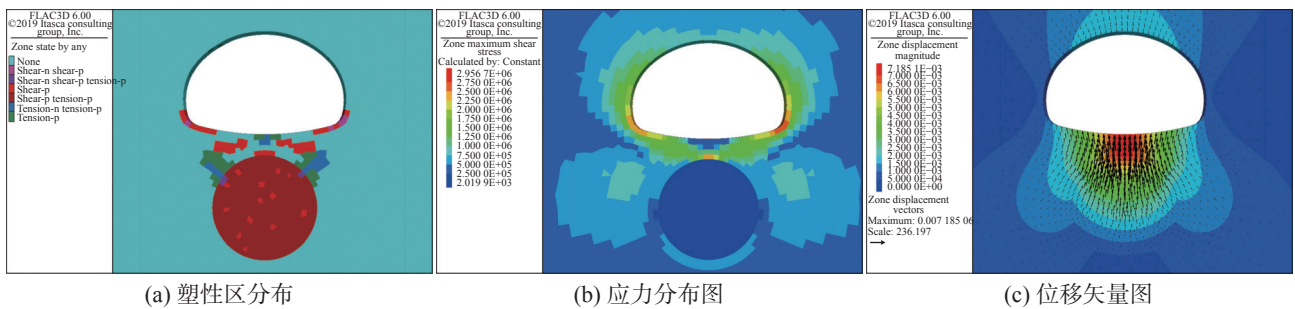


图 7 溶洞位于隧道底部临界安全距离分析

Fig. 7 Analysis of critical safety distance of karst cave at the bottom of tunnel

归分析。

2.3.1 极差分析

通过不同正交实验方案计算得出的临界安全距

离值用极差分析后得出的结果(表 5)。其中 K_n 为各因素在水平为 n 时的试验结果之和, k_n 为各因素在水平 n 上的平均值。本正交试验中各因素有四个水平, 因此 $k_n = K_n/4$ 。

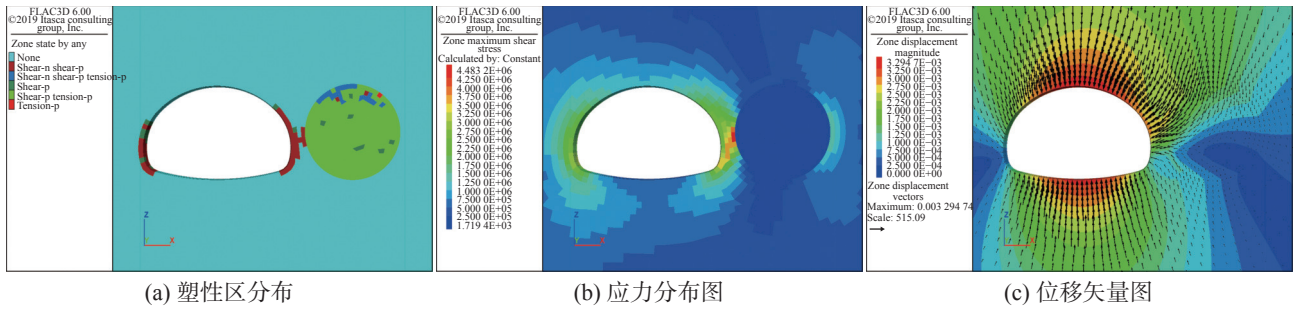


图 8 溶洞位于隧道侧部临界安全距离分析

Fig. 8 Analysis of critical safety distance of karst cave at the side of tunnel

表 5 临界安全距离极差表

Table 5 Range table of critical safety distance

影响因素	S_r/m				S_p/m				S_d/m			
	围岩 级别A	溶洞 水压P	溶洞 直径D	误差列	围岩 级别A	溶洞 水压P	溶洞 直径D	误差列	围岩 级别A	溶洞 水压P	溶洞 直径D	误差列
K_1	7.00	10.20	10.60	11.90	11.60	9.90	12.20	16.30	5.30	7.70	7.70	8.20
K_2	9.50	10.30	12.20	11.80	13.40	13.30	15.70	14.90	6.60	8.00	8.10	8.50
K_3	12.50	120	12.30	11.80	15.80	17.30	16.70	15.20	9.00	8.30	8.60	8.30
K_4	18.40	14.90	12.30	11.90	21.10	21.40	17.30	15.50	12.30	9.20	8.80	8.20
k_1	1.75	2.55	2.65	2.98	2.90	2.48	3.05	4.08	1.33	1.93	1.93	2.05
k_2	2.38	2.58	3.05	2.95	3.35	3.33	3.93	3.73	1.65	2.00	2.03	2.13
k_3	3.13	3.00	3.08	2.95	3.95	4.33	4.18	3.80	2.25	2.08	2.15	2.08
k_4	4.60	3.73	3.08	2.98	5.28	5.35	4.33	3.88	3.08	2.30	2.20	2.05
极差R	11.4	4.7	1.7	0.1	9.5	11.5	5.1	1.4	7.0	1.5	1.1	0.3

由此从极差表中能得出各因子对隧道与不同位置溶洞安全距离的影响程度如下：

当溶洞位于隧道顶部时，各因子影响程度从大到小可列为 $A > P > D$ 。

当溶洞位于隧道底部时，各因子影响程度从大到小排序为 $P > A > D$ 。

当溶洞位于隧道侧部时，各因子影响程度从大到小排序为 $A > P > D$ 。

为更直观地分析各因素对临界安全距离的影响程度及趋势，将极差分析结果(表5)按不同位置分别绘制成图9、图10、图11。可以看出，溶洞位于隧道的顶部、底部和侧部时，隧道开挖引起的围岩应力重分布规律是相类似的。围岩级别与临界安全距离呈正相关，该因素反映围岩的综合物理力学特性，围岩越差，对应的粘聚力及摩擦角越小，在隧道开挖后势必会需要更大范围的塑性区，因此安全距离更大。溶洞与隧道间的安全距离随着水压的增加呈逐渐增长的趋势，而且溶洞水压越大，溶洞周边的围岩所受

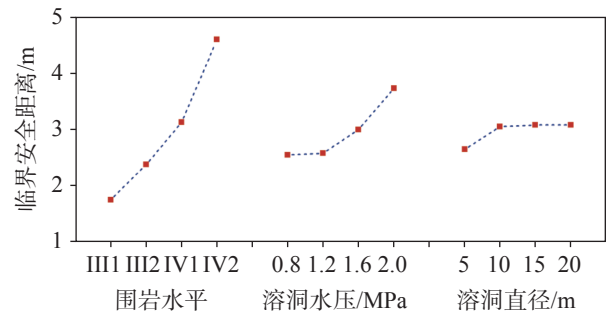


图 9 临界安全距离变化曲线(溶洞位于隧道顶部)

Fig. 9 Change curve of critical safety distance (The karst cave is located at the top of tunnel.)

应力越大，更容易造成溶洞与隧道间围岩塑性区的贯通，但在数值模拟中未考虑裂隙的存在以及水的渗流。临界安全距离随着溶洞尺寸的增大而逐渐增长，但增大的趋势不断减小，可能的原因是在一定的溶洞尺寸范围内，溶洞尺寸的扩大会使得应力集中的范围增加，导致隧道开挖引起溶洞周边的应力释放增大，从而增大了塑性区范围，所需的安全距离也

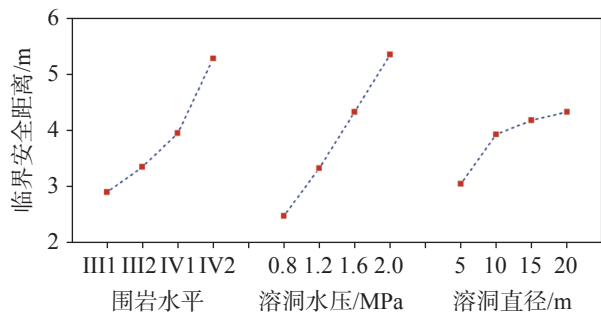


图 10 临界安全距离变化曲线(溶洞位于隧道底部)

Fig. 10 Change curve of critical safety distance (The karst cave is located at the bottom of tunnel.)

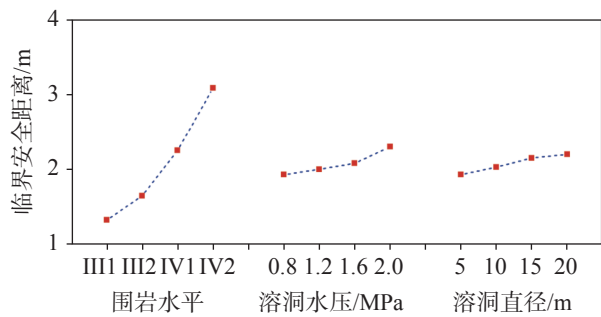


图 11 临界安全距离变化曲线(溶洞位于隧道侧部)

Fig. 11 Change curve of critical safety distance (The karst cave is located at the side of tunnel.)

随之增大。

2.3.2 方差分析

上述的极差分析法虽能通过极差值来判断出各因素对临界安全距离的影响程度,但无法给出一个客观标准来精确地判断各因素对临界安全距离的影响是否显著。因此采用方差分析法来分析试验计算结果,分别计算各影响因素的离差平方、自由度、均

方离差,通过构造函数来检验各影响因素对安全距离有无显著作用。

方差分析结果见表 6,其结论与实际工程情况基本吻合。从表中可以看出,由于三个影响因素的均方离差值都大于误差项的均方离差值,因此围岩级别 A、溶洞直径 D 以及溶洞水压 P 均不被列为误差项。F 分布表中 $F_{0.05}(3, 3)=9.28$, $F_{0.01}(3, 3)=29.46$ 。给定显著水平 $\alpha=0.01$,当岩溶位于隧道顶部时, $F_A > F_P > F_D > F_{0.01}$,由此可得出围岩级别、溶洞水压以及溶洞直径对临界安全距离都有显著影响;当岩溶位于隧道底部时, $F_A > F_P > F_{0.01} > F_D$,由此可得围岩级别 A 和溶洞水压 P 对临界安全距离的影响显著,溶洞直径 D 对临界安全距离有一定影响;当岩溶位于隧道顶部时, $F_A > F_{0.01} > F_P > F_D$,由此可得围岩级别 A 对临界安全距离的影响显著,溶洞水压 P 和溶洞直径 D 对临界安全距离有一定影响。

2.4 临界安全距离回归分析

根据前面计算所得的临界安全距离,基于各因素的显著性,分别对各影响因子进行一元回归分析,将围岩级别 A、溶洞水压 P 以及溶洞直径 D 作为自变量,临界安全距离 S 作为因变量,采用基本的线性方程如幂函数、对数函数、指数函数等分别进行相关性分析,选取相关系数最大所对应的函数从而建立溶洞位于隧道顶部时各影响因子与临界安全距离 S 之间的预测模型。

临界安全距离 S 与围岩级别 A 的关系:

$$S(A) = 1.216e^{0.329A} \quad (22)$$

该方程的相关系数 $R = 0.991$ 。

临界安全距离 S 与溶洞水压 P 的关系:

表 6 临界安全距离方差表

Table 6 Variance table of critical safety distance

影响 因素	S_1/m				S_2/m				S_3/m			
	围岩 级别A	溶洞 水压P	溶洞 直径D	误差 列	围岩 级别A	溶洞 水压P	溶洞 直径D	误差 列	围岩 级别A	溶洞 水压P	溶洞 直径D	误差 列
SS	18.092	3.612	0.552	0.003	12.767	18.567	3.902	0.272	7.095	0.315	0.185	0.015
df	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
MS	6.031	1.204	0.174	0.001	4.256	6.187	1.301	0.091	2.365	0.105	0.062	0.005
F	6.031	1.204	174	-	46.77	67.99	14.3	-	473	21	12.4	-
显著性	显著	显著	显著	-	显著	显著	有影响	-	显著	有影响	有影响	-

注: $F_{0.05}(3, 3)=9.28$, $F_{0.01}(3, 3)=29.46$, 其中: SS-离差平方和, df-自由度, MS-均方离差。

Note: $F_{0.05}(3, 3)=9.28$, $F_{0.01}(3, 3)=29.46$; SS: Sum of Squares, df: degree of freedom, MS: mean square deviation.

$$S(P) = 1.094P^2 - 2.073P + 3.504 \quad (23)$$

该方程的相关系数 $R = 0.999$ 。

临界安全距离 S 与溶洞直径 D 的关系:

$$S(D) = 0.318 \ln D + 2.201 \quad (24)$$

该方程的相关系数 $R = 0.937$ 。

基于上述得到的一元回归方程, 进行多元回归, 从而得到溶洞位于隧道顶部时的安全距离预测模型。假定 S 与方程 $S(A)$ 、 $S(P)$ 、 $S(D)$ 存在线性关系, 如式(25)所示。

$$S_t = aS(A) + bS(P) + cS(D) + d \quad (25)$$

式中: S_t 为溶洞位于隧道顶部时的临界安全距离; a 、 b 、 c 、 d 为待定系数。通过试验数据(见表4)对式(25)进行求解, 可得出顶部溶洞情况下隧道的安全距离预测公式:

$$S_t = 1.208e^{0.329A} + 1.091P^2 - 2.068P + 0.314 \ln D - 0.193 \quad (26)$$

由于数值模拟中假定岩体为单一均质, 且未考虑岩体裂隙、水的渗流及溶蚀等影响, 而实际的工程地质往往要更加复杂, 因此考虑一定的安全系数 N , 从而得到临界安全距离的最终表达式:

$$S_t = N(1.208e^{0.329A} + 1.091P^2 - 2.068P + 0.314 \ln D - 0.193) \quad (27)$$

式中: N 为安全系数, 取值范围 1.2~1.5; A 为围岩级别, 取值范围 1~4, 具体参数值见表3; P 为溶洞水压, 取值范围 0.8~2.0 MPa; D 为溶洞直径, 取值范围 5~20 m。

同理, 建立溶洞位于隧道底部及侧部时隧道与溶洞安全距离预测模型分别如下:

$$S_b = N(2.192e^{0.209A} + 2.406P + 0.93 \ln D - 5.533) \quad (28)$$

式中: S_b 为溶洞位于隧道底部时的临界安全距离;

建立溶洞位于隧道侧部时隧道与溶洞安全距离预测模型为:

$$S_s = N(0.939e^{0.293A} + 0.237P^2 - 0.363P + 0.204 \ln D - 0.478) \quad (29)$$

式中: S_s 为溶洞位于隧道侧部时的临界安全距离。

3 模型可靠性验证

依托福宜高速阳宗隧道实际工程背景, 其开挖跨度 L 为 15.5 m, 在 ZK49+450~ZK49+480 段有一溶洞位于拟开挖隧道的顶部, 溶洞直径近似为 $D = 8$ m, 根据水位线高度计算得出溶洞内的水压为 $p =$

0.5 MPa, 强降雨期水压最大可达 1.0 MPa。该段隧道埋深约为 180 m, 洞身围岩以灰岩为主, 围岩等级为 IV 级, 对应围岩级别为 $A = 3$, 侧压力系数为 0.8。钻孔得到的灰岩试样通过室内试验得出的物理力学参数见表7所示。溶洞上方的围岩压力计算可得 $q = 81.18$ kPa, 安全修正系数取 $N = 1.3$ 。

表7 岩溶区灰岩物理力学参数指标

Table 7 Physical and mechanical parameters of limestone in the karst area

岩性参数	重度	抗压强度	抗弯强度	抗剪强度
	$\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	MPa	MPa	MPa
灰岩	22	28	4.2	2.52

3.1 基于强度理论的临界安全距离预测

溶洞位于隧道顶部, 将上述相关参数代入式(11), 可求得基于抗弯强度计算得到临界安全距离为:

$$S_1 = n \frac{\gamma L^2 + \sqrt{\gamma^2 L^4 + 8[\sigma](p+q+\gamma_1 h)L^2}}{4[\sigma]} = 6.34 \text{ m}$$

将上述相关参数代入式(12), 可求得基于抗剪强度计算得到临界安全距离为:

$$S_2 \geq n \frac{3L(p+q+\gamma_1 h)}{4[\tau] - 3\gamma L} = 4.84 \text{ m}$$

3.2 基于数值试验的临界安全距离预测

将上述相关参数代入回归公式(27), 可求得临界安全距离为:

$$S = N(1.208e^{0.329A} + 1.091P^2 - 2.068P + 0.314 \ln D - 0.193) = 3.82 \text{ m}$$

在设计中, 当水压小于 0.5 MPa 时, 预留的完整岩盘厚度应大于 3 m; 当水压在 0.5~1.0 MPa 时, 预留的完整岩盘厚度应大于 5 m; 当水压在 1~2 MPa 时, 预留的完整岩盘应大于 10 m。因此, 基于强度理论预测出的安全距离较为保守, 基于数值试验预测的结果与设计所选择的预留距离较接近。

根据勘察资料, 隧道与该溶洞的实际距离为 7.8 m, 大于临界安全距离, 在隧道开挖过程当中, 初支完成后出现小范围的渗水, 水流清澈, 如图12所示。隧道拱顶最大沉降量为 21.4 mm, 处于安全范围以内, 最终该段隧道施工顺利完成, 溶洞没有对隧道造成灾害性的影响, 说明安全距离预测模型计算结果正确可靠, 对于实际的富水岩溶隧道工程中安全距离的选择具有一定的参考价值。



图 12 隧道初支渗漏水

Fig. 12 Water leakage from the initial support of the tunnel

4 结论

(1)将溶洞与隧道间的隔水岩层简化为弹性梁板,基于强度理论分别推出了隧道与顶部、底部、侧部溶洞的临界安全距离公式。

(2)采用 FLAC 3D 软件模拟了溶洞在隧道不同部位开挖时的情况,采用正交试验法针对溶洞分别位于隧道顶部、底部及侧部的情况得到了不同因素不同水平下的临界安全距离,并进行了影响程度分析。结果表明,隧道与环向不同方位溶洞间的临界安全距离均随围岩级别、溶洞水压及溶洞尺寸的增大而增大,其综合影响程度从大到小可排序为围岩级别>溶洞水压>溶洞尺寸。

(3)利用正交试验得出的结果,采用回归分析建立了隧道与环向不同方位溶洞间的安全距离预测公式。

(4)将通过强度理论及数值试验研究得出的临界安全距离预测模型应用于实际工程案例进行了检验,结果表明基于强度理论预测出的安全距离较为保守,基于数值试验预测的结果与设计所选择的预留距离较接近,预测结果对于实际的富水岩溶隧道工程具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 王泽峰,钟世航. 陆地声纳法在探测岩溶区高铁隧道基底隐患中的应用[J]. 中国岩溶, 2019, 38(4): 573-577.
WANG Zefeng, ZHONG Shihang. Application of the landsonar to detecting hidden hazards of tunnel base on high-speed railway

in karst areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38 (4): 573-577.

[2] 陈洪松,岳跃民,王克林. 西南喀斯特地区石漠化综合治理: 成效、问题与对策[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 37-42.
CHEN Hongsong, YUE Yuemin, WANG Kelin. Comprehensive control on rocky desertification in karst regions of Southwestern China: Achievements, problems, and countermeasures[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37 (1): 37-42.

[3] 吕玉香,蒋勇军,王正雄,胡伟. 西南岩溶槽谷区隧道建设的水文生态环境效应研究进展[J]. 生态学报, 2020, 40(6): 1851-1864.
LV Yuxiang, JIANG Yongjun, WANG Zhengxiong, HU Wei. Review on the hydrology and the ecological and environmental effects of tunnel construction in the karst valley of Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40 (6): 1851-1864.

[4] 周毅,李术才,李利平,张乾青,石少帅,宋曙光,王康,陈迪杨,孙尚渠. 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 Shucai, LI Liping, ZHANG Qianqing, SHI Shaoshuai, SONG Shuguang, WANG Kang, CHEN Diyang, SUN Shangqu. 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.

[5] 李术才,潘东东,许振浩,李利平,林鹏,袁永才,高成路,路为. 承压型隐伏溶洞突水灾变演化过程模型试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3164-3173. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2808.
LI Shucai, PAN Dongdong, XU Zhenhao, LI Liping, LIN Peng, YUAN Yongcai, GAO Chenglu, LU Wei. A model test on catastrophic evolution process of water inrush of a concealed karst cave filled with confined water[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39 (9): 3164-3173. DOI:10.16285/j.rsm. 2016.2808.

[6] 李术才,许振浩,黄鑫,林鹏,赵晓成,张庆松,杨磊,张霄,孙怀凤,潘东东. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1041-1069. DOI:10.13722/j. cnki. jrme.2017.1332.
LI Shucai, XU Zhenhao, HUANG Xin, LIN Peng, ZHAO Xiaocheng, ZHANG Qingsong, YANG Lei, ZHANG Xiao, SUN Huai Feng, PAN Dongdong. Classification, geological identification, hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37 (5): 1041-1069. DOI:10.13722/j. cnki. jrme. 2017.1332.

[7] 李俊杰. 广清高速路段岩溶发育特征及分类研究[J]. 土工基础, 2018, 32(3): 289-292.
LI Junjie. Characteristics of karstic rock cavity along the Guangzhou-Qingyuan expressway alignment[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2018, 32 (3): 289-292.

[8] 刘超群,彭红君. 隧道掌子面与溶洞安全距离分析[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(3): 109-113. DOI:10.13807/j.cnki.mtt.2012.03.017.

- LIU Chaoqun, PENG Hongjun. Analysis of the safe distance between a tunnel face and karst cave[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2012, 49 (3): 109-113. DOI:10.13807/j.cnki.mtt.2012.03.017.
- [9] 储汉东. 岩溶隧道突水机理及防突层安全厚度研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- CHU Handong. Study on mechanism of water inrush and safety thickness of against-inrush layer in karst tunnel[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.
- [10] 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. DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20201075.
- 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. DOI:10.19713/j.cnki. 43-1423/u.T20201075.
- [11] 孙周. 基于强度理论的隐伏溶洞与隧道安全距离预测模型研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
- SUN Zhou. Research on safety distance prediction model of hidden caverns and tunnel based on strength theory[D]. Changsha: Changsha University of technology, 2018.
- [12] 张桥. 小三峡岩溶隧道围岩防突层安全厚度有限元分析[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(4): 614-621.
- ZHANG Qiao. Finite element analysis on safety thickness of the inrush prevention layer in rock beds of the small Three Gorges karst tunnel[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39 (4): 614-621.
- [13] 赖金星, 汪珂, 邱军领. 溶洞位置对隧道结构影响的数值模拟研究[J]. *公路*, 2015, 60(8): 275-281.
- LAI Jinxing, WANG Ke, QIU Junling. Numerical simulation and research on the influence of different positions of concealed karst caves in tunnel structure[J]. *Highway*, 2015, 60 (8): 275-281.
- [14] 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 Jiaqi. Study on against-inrush thickness and waterburst mechanism of karst tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [15] 郭佳奇, 乔春生, 曹茜. 侧部高压富水溶腔与隧道间岩柱安全厚度的研究[J]. *现代隧道技术*, 2010, 47(6): 10-16. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2010.06.003.
- GUO Jiaqi, QIAO Chunsheng, CAO Xi. Research on safe thickness of rock pillar between the tunnel and adjacent karst cave with pressurised water[J]. *Modern Tunnel Technology*, 2010, 47 (6): 10-16. DOI:10.13807/j.cnki. mtt. 2010.06.003.
- [16] 陈禹成, 王朝阳, 郭明, 林鹏. 隐伏溶洞对隧道围岩稳定性影响规律及处治技术[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2020, 50(5): 33-43.
- CHEN Yucheng, WANG Chaoyang, GUO Ming, LIN Peng. Influence of concealed karst cave on surrounding rock stability and its treatment technology[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2020, 50 (5): 33-43.
- [17] 师海, 白明洲, 许兆义, 田岗. 基于突变理论的岩溶隧道与隐伏溶洞安全距离分析[J]. *现代隧道技术*, 2016, 53(4): 61-69. DOI:10.13807/j.cnki.mtt.2016.04.009.
- SHI Hai, BAI Mingzhou, XU Zhaoyi, TIAN Gang. Analysis of the safe distance between a karst tunnel and a concealed karst cave based on catastrophe theory[J]. *Modern Tunnel Technology*, 2016, 53 (4): 61-69. DOI:10.13807/j.cnki. mtt. 2016.04.009.
- [18] 刘扬, 林国庆, 苏秀婷, 陈健, 郑煜茜, 刘涛. 大直径盾构隧道与下伏溶洞安全距离[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(29): 12727-12734.
- LIU Yang, LIN Guoqing, SU Xiuting, CHEN Jian, ZHENG Yuqian, LIU Tao. Safety distance between large diameter shield tunnel and underlying karst cave[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21 (29): 12727-12734.

Analysis of critical safety distance between tunnel and concealing filled karst cave in the karst area

WANG Wanfeng¹, YANG Yongtai², LU Yuquan³, ZHAO Chujun¹, CUI Pengjie¹, QIU Junling²

(1. China Railway Construction Yunnan Investment Co. Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 3. Zhejiang Institute of Communications Co., LTD, Hangzhou, Zhejiang 310030, China)

Abstract If the tunnel construction work is done in the karst area, the tunnel shall keep a certain distance from the karst cave to ensure the stability of the surrounding rock and support. If the distance between the tunnel and the filled karst cave with high water pressure is short, it is easy to cause the instability and damage of tunnel face or the circumferential surrounding rock, thus resulting in karst water inrush, mud inrush, collapse and other disasters. Especially, the karst cave concealing around the tunnel is often difficult to be accurately predicted. Therefore, the study of the critical safety distance between the karst cave and the tunnel plays a vital role in the evaluation and prevention of disasters caused by concealing filled karst cave. Studies on the critical safety distance between tunnel and karst cave can be divided into qualitative research, semi-quantitative research and quantitative research. Qualitative research, such

as judging the influence degree of karst cave on tunnel through numerical analysis, is generally conducted to comprehensively analyze the factors affecting the stability of structure for water burst prevention and obtain the empirical critical safety value. Semi-quantitative research mainly focuses on theoretical calculation, which can be roughly sub-divided into three types: simplified beam slab model based on strength theory, catastrophe theory model and the model of crack tension-compression shear based on fracture mechanics. Mainly focusing on numerical simulation, quantitative research is conducted to set up multiple groups of numerical tests for calculation, and to obtain the calculation model of safety distance through linear regression.

The safety distance between the tunnel and the filled karst cave can be explored by theoretical calculation and numerical simulation test. Based on the bending and shear strength theory, the mechanical calculation models of the filled karst cave at the top, bottom and side of the tunnel are established by using the fixed beam model at both ends. Meanwhile, the self-weight of the internal filler and the pore water pressure are taken into account. Given the influence of the surrounding rock pressure above the karst cave on the waterproof rock stratum, the critical safety distance between the tunnel and the karst cave can be explored, and the calculation formula of the distance in different circumferential positions can be deduced. However, this formula does not consider the excavation effect of the tunnel and the process of support, nor can it reflect the changes of the displacement, stress and plastic zone of the surrounding rock. Therefore, it is difficult to obtain a universal formula to express relationship. It is necessary to supplement the predicted safety distance with the help of numerical simulation.

In this study, the numerical model of the critical safety distance between the filled karst cave and the tunnel at different circumferential positions was established by FLAC 3D software. Based on the method of orthogonal experimental design (a total of 48 numerical test schemes), the stability of surrounding rock has been evaluated by the distribution range of plastic zone of surrounding rock caused by tunnel excavation. If the plastic zone connects the tunnel with the karst cave, the distance between these two indicates that the surrounding rock is unstable, and thereby the critical safety distance can be calculated. The results of critical safety distance under different working conditions were also analyzed by range analysis and variance analysis. Besides, the law and significance of three influencing factors—the level of surrounding rock, the water pressure in karst cave and the karst cave size—on the critical safety distance were explored. Through the nonlinear multiple regression analysis of the orthogonal test results, the prediction formula of the critical safety distance between the filled karst cave and the tunnel at different circumferential positions was established respectively. The results show that the critical safety distance increases with the increase of surrounding rock level, pressure of karst cave water and the karst cave size. The comprehensive influence degree of the three factors can be ranked from the strongest to the weakest as follows: the surrounding rock level, the pressure of karst cave water and karst cave size. Finally, the research results were applied to Yangzong tunnel project to verify the rationality and applicability of the prediction model of critical safety distance. The results show that the safety distance predicted based on the strength theory is relatively conservative, and the predicted results based on the numerical test are close to the reserved distance. The predicted results have a certain reference for the project of karst tunnel with water abundance.

Key words karst tunnel, critical safety distance, strength theory, numerical simulation, orthogonal test, regression analysis

(编辑 杨杨)