

隧底溶洞对结构稳定影响的正交试验

赖金星¹, 汪珂¹, 郭春霞², 刘邦哲²

(1. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064; 2. 西安建筑科技大学理学院, 陕西西安 710055)

摘要:依据正交试验原理,采用弹塑性有限元方法,运用 MIDAS NX 有限元软件,系统分析了溶洞大小、距离对隧道结构位移和轴力的影响,计算得出不同径跨比情况下位移和轴力随溶洞上壁距隧道底板的垂直距离变化规律和函数关系,从而确定各径跨比条件下隧底溶洞的非安全距离,并绘制隧道非安全距离包络图。结果表明:隧道各部位位移受径跨比影响显著;在径跨比一定的情况下,随着溶洞上壁距隧道底板垂直距离的增加,位移变化趋势符合对数函数规律;仰拱中心轴力受隧底溶洞影响较大且随垂直距离呈对数变化趋势;根据隧道结构竖向位移得出的隧底溶洞非安全距离较大,根据水平位移和轴力得出的非安全距离较小,出于安全考虑,应将竖向位移得出的隧底溶洞非安全距离作为溶洞处置的主要依据。

关键词:隧道;溶洞;正交试验;数值分析;位移;轴力;非安全距离;包络图

中图分类号:P642;U451 **文献标志码:**A

Effects of Bottom Karst Caves on Tunnel Structure Stability Using Orthogonal Test

LAI Jin-xing¹, WANG Ke¹, GUO Chun-xia², LIU Bang-zhe²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: Based on orthogonal test and elastic plastic finite element method, the effect of the size and distance of karst cave on displacement and axial force of tunnel structure were discussed with MIDAS NX finite element software; the changes and function relationships of displacement and axial force to vertical distance from the top of karst cave to the bottom of tunnel under the conditions of different span ratios were calculated; non-safety distances of karst cave beneath the tunnel under the conditions of different span ratios were calculated; non-safety distance envelope diagrams of tunnel were drawn. The results show that the displacements of different parts of tunnel are significantly influenced by span ratios; when the span ratio is certain, the changes of displacement to the increase of vertical distance from the top of karst cave to the bottom of tunnel are logarithmic function; axial force of inverted arch center is significantly influenced by karst cave beneath the tunnel, and is logarithmic function of vertical distance; non-safety distance calculated by the vertical displacement of tunnel structure is large, while non-safety distance calculated by the horizontal displacement and axial force is small, so that the former should be taken as the main basis for the karst cave treatment because of the safety.

Key words: tunnel; karst cave; orthogonal test; displacement; stress; non-safety distance; envelope diagram

收稿日期:2014-11-06

基金项目:陕西省教育厅专项基金项目(11JK0533);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2010JM7021)

作者简介:赖金星(1973-),男,广东龙川人,副教授,工学博士,E-mail:373159626@qq.com.

0 引言

中国岩溶地区分布广泛,碳酸盐类岩石在各省区均有分布,西南以桂、黔和滇东地区分布较为集中,湘西、鄂西、川东、鲁、晋等地分布面积也较广^[1]。有关隧道穿越溶洞的问题,已有较多文献进行了介绍^[2-3]。目前,国内外关于隧道与溶洞之间安全距离的研究有 3 种分析方法:定性分析法、半定量评价法和定量评价法^[1]。定性分析法大多以某具体工程为背景,主要包括综合分析法^[4-5]、经验比拟法^[6-7],针对溶洞位置、溶洞跨度、围岩条件等不同情况对隧道与溶洞围岩的应力场、位移场、破坏区等进行定性的对比分析,得到溶洞对隧道围岩稳定性影响的一般规律;半定量评价法大都将隧道与溶洞间的岩柱简化为结构力学模型,采用顶板厚度跨比法、结构力学近似分析法^[8]、散体理论分析法、试验测试法^[9],得出溶洞距隧道的临界安全距离;定量评价法采用稳定系数法、普氏压力拱理论^[10]和数值模拟方法^[11-12],通过定性分析可以得到临界距离与各影响因素之间的关系,为半定量计算和定量计算提供理论依据。

上述方法或依据地质学机理定性评价溶洞对围岩稳定性的影响,或针对单一变量研究溶洞对围岩稳定性的影响。综合考虑溶洞大小、距离对隧道结构稳定性的影响,计算溶洞安全距离给出溶洞具体处置依据的研究尚有欠缺。本文依据正交试验原理,采用弹塑性有限元方法,分析不同大小和距离的隧底溶洞对隧道结构的稳定性影响;借助回归分析,研究溶洞大小和距离两种因素对隧道结构的影响规律,并求出各工况下隧底溶洞处置的非安全距离;在此基础上,绘出非安全距离包络图,以期对Ⅳ级岩溶隧底溶洞处置提供理论指导。

1 基于正交试验的有限元模拟方法

1.1 正交试验方案

岩溶对隧道结构的不利影响以溶洞周边围岩逐渐松动导致衬砌承载力的恶化为主,以岩溶水腐蚀隧道结构表面为辅^[13-22]。衬背溶洞可能导致邻近构筑物沉降、围岩应力异常、衬背围岩松动^[23]。因此,可暂不考虑岩溶水的复杂影响,将溶洞看作空洞进行分析。

采用正交试验表安排试验方案对隧底溶洞进行模拟^[24-29]。本次数值试验取溶洞半径 1~5 m,即Ⅰ、Ⅱ类较小溶洞^[30]。在溶洞洞径较小时,溶洞断

面一般为圆形或似圆形,故试验过程中将溶洞看作圆形洞穴^[31]。实际工程中,针对围岩位移的测量,常在初期支护施工后进行,故分析中提取初期支护施工后的结果更有工程意义。

综上所述,溶洞采用圆形空洞模拟,忽略岩溶水的影响,以初支位移值作为性能指标,选取溶洞直径(d)与隧道洞跨(D)的比值(即径跨比)作为因素 A,溶洞上壁距隧道底板的垂直距离(l)作为因素 B,共计 2 个影响因素。因素 A 选取 5 个水平,因素 B 选取 10 个水平,具体安排见表 1。

表 1 因素水平

Tab. 1 Factor Levels

因素水平	d/D	l/m
1	0.156 25	1
2	0.312 50	2
3	0.468 75	3
4	0.625 00	4
5	0.781 25	5
6		6
7		7
8		8
9		9
10		10

1.2 数值模拟方案

1.2.1 基本假定

为简化模型,初期支护不考虑锚杆作用,将钢格栅刚度折算给喷射混凝土,将初支简化成赋予属性的梁单元结构。所有材料满足均质、连续、各项同性条件。围岩满足莫尔-库伦屈服条件,考虑空间效应,对 50 种工况进行隧道全断面开挖计算,开挖时应力释放 70%;隧道初期支护采用弹性模型计算,初期支护施工后,应力释放 30%^[32]。

1.2.2 参数选取

围岩的物理力学参数取自规范 JTG D70—2004^[33]。初支型钢及锚杆模量的选取则采用均一化原理,即任一物理量对任一体积的积分等于该物理量对各体积的积分之和^[34]。

(1)初期支护弹性模量换算。初期支护中型钢拱架根据均一化原理,将钢架的弹性模量折算到喷射混凝土衬砌的弹性模量,以简化计算。折算后的喷混凝土弹性模量计算公式为

$$E = E_0 + \frac{S_g E_g}{S_c} \quad (1)$$

式中: E 为折算后的喷混凝土弹性模量; E_0 为喷射混凝土弹性模量; S_g 为钢拱架截面积; E_g 为型钢弹

性模量; S_c 为喷射混凝土建面积。

(2) 锚杆黏聚力等效换算以及锚杆的作用通过提高围岩黏聚力和内摩擦角来体现。由于摩擦因数变化不大, 仅考虑黏聚力(c)的改变^[35], 其计算公式为

$$c = c_0(1 + \frac{\eta T A_m}{9.8ab} \times 10^4) \quad (2)$$

式中: c_0 为未加锚杆时围岩的黏聚力; T 为锚杆最大抗剪强度; A_m 为锚杆的横截面积; a 和 b 分别为锚杆的纵向、横向间距; η 为经验系数, 可取值 2~5。

根据试验结果及均一化换算方法, 式(2)的计算参数见表 2。

表 2 模型物理力学参数

Tab. 2 Physical and Mechanical Parameters of Model

项目	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^\circ$)
围岩	19	0.35	800	500	45
初期支护	23	0.20	15 000		

围岩初始应力场仅考虑自重应力, 按隧道埋深 35 m 计算, 网格划分见图 1。隧道拱顶、拱腰、拱脚、边墙、边墙底和仰拱中心作为正交试验分析对象。隧道断面尺寸、初期支护的支护参数和监测位置见图 2。其中, R_1 、 R_2 、 R_3 为隧道半径。

2 结果分析

2.1 正交试验结果

统计数值模拟所得竖向位移和水平位移的部分试验结果列入表 3。

利用非重复试验的二元方差分析, 判断各因素影响程度。竖向位移: 拱顶 $F_B = 9.03$, $F_A = 156.43$; 拱腰 $F_B = 8.82$, $F_A = 152.53$; 拱脚 $F_B = 8.79$, $F_A = 145.27$; 边墙 $F_B = 8.87$, $F_A = 139.77$; 边墙底部 $F_B = 7.27$, $F_A = 127.27$; 仰拱中心 $F_B = 7.27$,

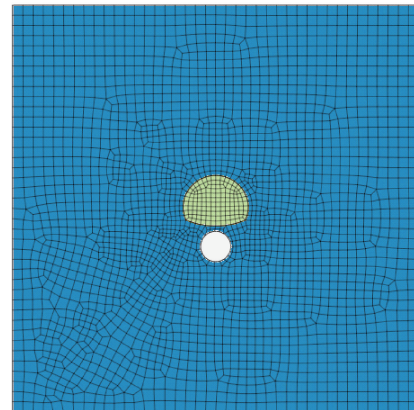


图 1 网格划分

Fig. 1 Mesh Generation

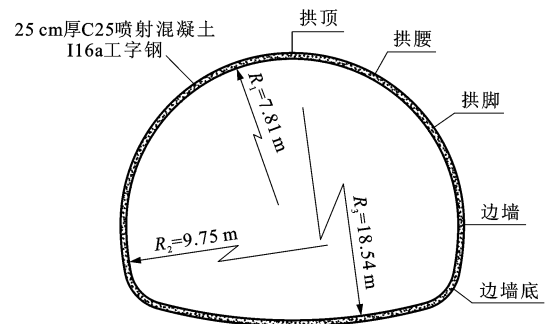


图 2 隧道监测点

Fig. 2 Monitoring Points of Tunnel

$F_A = 127.27$ 。水平位移: 拱腰 $F_B = 8.46$, $F_A = 31.77$; 拱脚 $F_B = 8.23$, $F_A = 34.89$; 边墙 $F_B = 8.52$, $F_A = 32.15$; 边墙底 $F_B = 9.44$, $F_A = 17.54$ 。其中, F_A 和 F_B 分别为因素 A、B 的 F 统计值。隧道各部位的 F_A 值均大于 $F(4, 36)$, F_B 值均大于 $F(9, 36)$, 说明因素 A、B 均对隧道结构位移有影响, 且因素 A 对位移的影响大于因素 B。

2.2 位移结果分析

取径跨比为研究项, 对隧道各部分在不同径跨比条件下, 位移随溶洞上壁距隧道底板垂直距离的

表 3 正交试验结果

Tab. 3 Results of Orthogonal Test

试验编号	d/D	l/m	竖向位移/m						水平位移/m			
			拱顶	拱腰	拱脚	边墙	边墙底	仰拱中心	拱腰	拱脚	边墙	边墙底
1	0.156 25	1	-1.047	-1.906	-3.688	-6.208	-9.306	-16.120	2.468	3.725	3.939	2.018
10	0.156 25	10	-0.990	-1.877	-3.622	-6.153	-9.276	-15.307	2.448	3.688	3.867	1.859
20	0.312 50	10	-1.170	-2.050	-3.781	-6.296	-9.385	-15.331	2.465	3.726	3.933	1.930
30	0.468 75	10	-1.428	-3.478	-4.004	-6.494	-9.530	-15.337	2.488	3.790	4.016	2.031
40	0.625 00	10	-1.746	-3.478	-4.272	-6.722	-9.695	-15.292	2.521	3.865	4.141	2.157
50	0.781 25	10	-2.097	-2.921	-4.553	-6.949	-9.839	-15.194	2.564	3.950	4.301	2.292

变化值进行回归分析,得出变化函数。

2.2.1 竖向位移

从图 3 可以看出:隧道各部位均发生沉降,且随着溶洞上壁距隧道底板垂直距离的增加,沉降值逐渐减小;隧道各部分沉降值均随径跨比增加。无溶洞($d/D=0$)情况下,隧道各部分沉降值最小;边墙

底部各径跨比条件下,沉降拟合曲线为直线,其余部分为对数曲线(表 3);当 $d/D=0.156\ 25$ 时,拱腰、拱脚、边墙、边墙底部沉降值拟合曲线为线性直线;拱顶、拱腰、仰拱中心竖向位移较大,拱脚、边墙、边墙底部竖向位移较小;隧道各部分竖向位移大部分符合对数函数曲线。其中, S_v 为竖向位移。

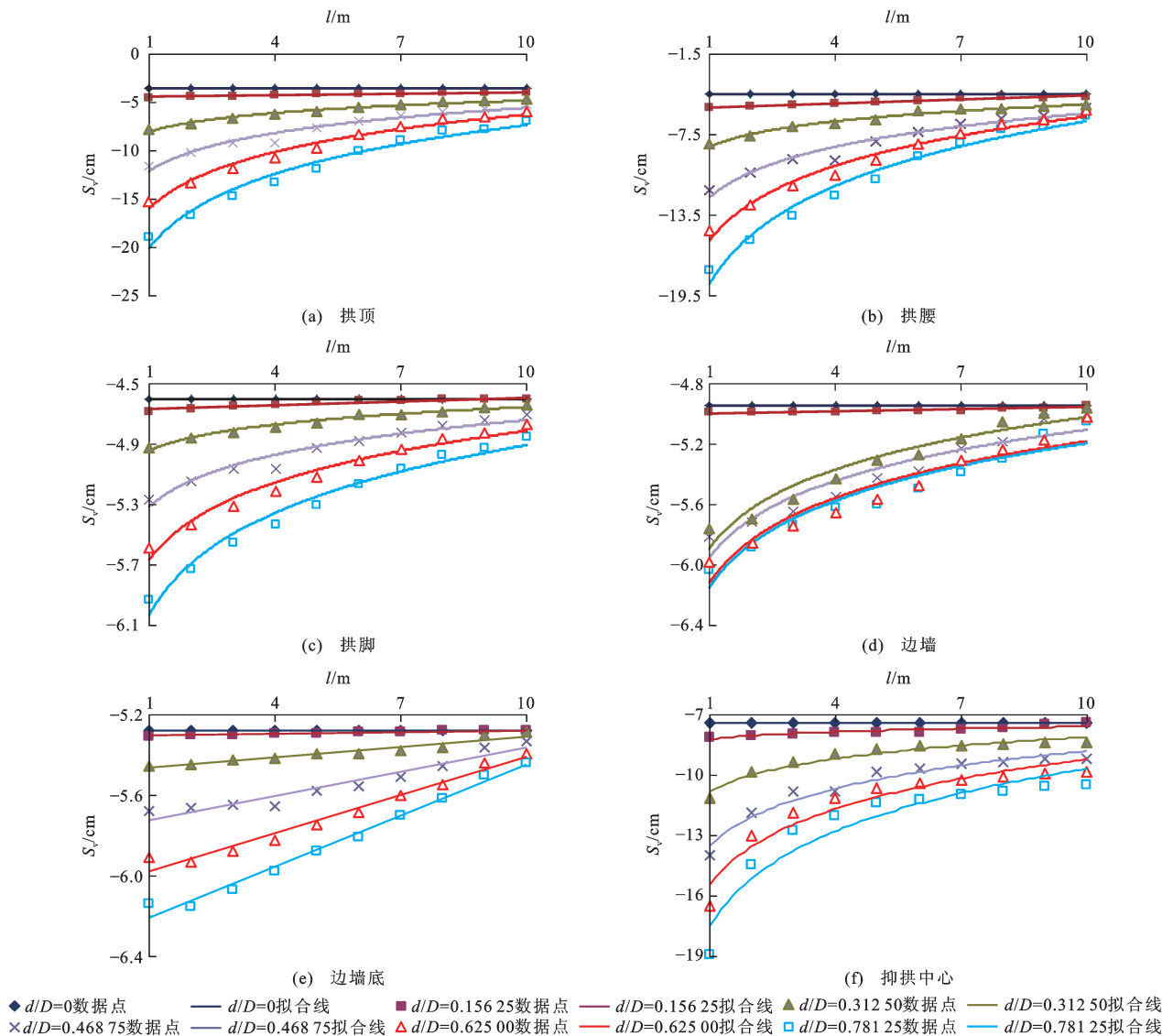


图 3 隧道各部分竖向位移与溶洞上壁距隧道底板的垂直距离关系

Fig. 3 Relationships Between Vertical Displacements of Different Parts of Tunnel and Vertical Distances from the Top of Karst Cave to the Bottom of Tunnel

2.2.2 水平位移

从图 4 可以看出:取临空面方向为正,拱腰、拱脚、边墙、边墙底部均向临空面发生位移,随着溶洞上壁距隧道底板的垂直距离增加,隧道各部分水平位移呈减小趋势;各部分水平位移均随着径跨比的增加而增加;无溶洞($d/D=0$)情况下,隧道各部分水平位移值最小;隧道各部分水平位移与垂直距离

的关系均符合对数函数曲线。其中, S_h 为水平位移。

2.3 轴力分析

隧道衬砌各部分轴力均为负值,表明衬砌轴向受压力。除仰拱中心外,边墙、拱腰、边墙底部、拱顶轴力值随着溶洞上壁距隧道底板垂直距离的增加基本无变化。当隧底无溶洞($d/D=0$)时,仰

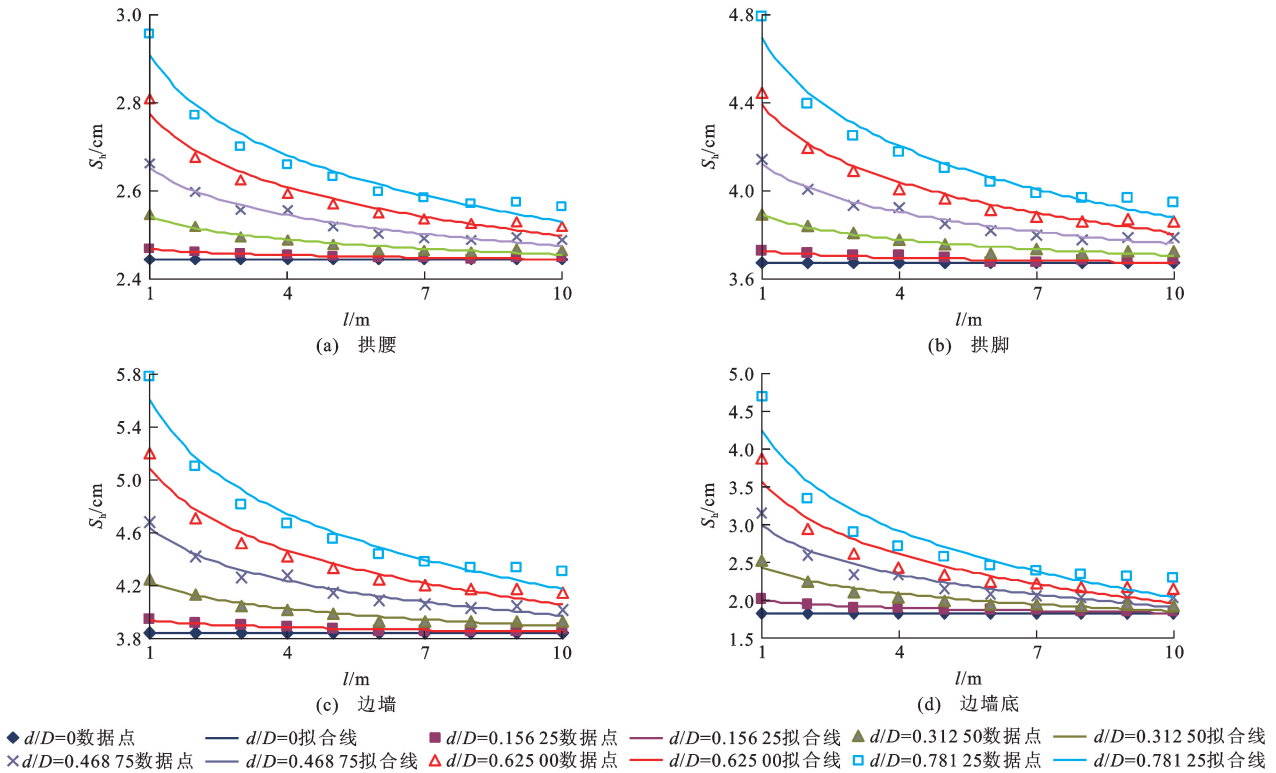


图4 隧道各部分水平位移与溶洞上壁距隧道底板的垂直距离关系

Fig. 4 Relationships Between Horizontal Displacements of Different Parts of Tunnel and Vertical Distances from the Top of Karst Cave to the Bottom of Tunnel

拱中心轴力值最小。仰拱中心轴力值与垂直距离的关系见图5。仰拱中心轴力值随着垂直距离的增加而减小,减小趋势符合对数函数。其中, F 为轴力。

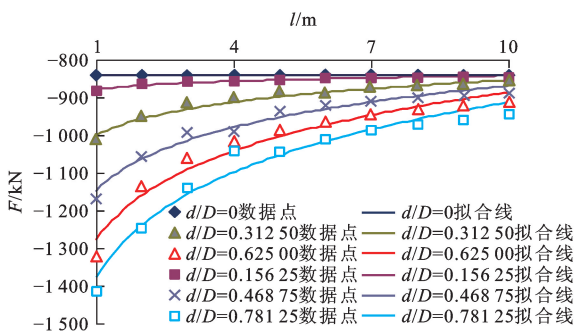


图5 仰拱中心轴力与溶洞上壁距隧道底板的垂直距离关系

Fig. 5 Relationships Between Axial Forces of Inverted Arch Center and Vertical Distances from the Top of Karst Cave to the Bottom of Tunnel

2.4 非安全距离分析

由于未考虑岩溶水的影响,所以无溶洞工况下非安全距离值为接近最不利情况的非安全距离值,可以充分保证施工安全,且无溶洞工况下隧道结构位移、轴力值恰好满足规范所规定的形变值和容许

应力值,由此可见,无溶洞工况为安全工况^[33]。因此,将各工况下与无溶洞工况下隧道结构的位移、轴力相等时的溶洞上壁距隧道底板的垂直距离视为非安全距离。连接根据各指标所得的非安全距离,绘制与非安全距离相切的曲线,这些曲线称为各工况下隧道非安全距离包络图(图6)。非安全距离包络图提供了隧底溶洞处置与否的依据。隧底溶洞距离处在包络图内部时,隧道结构不安全,应采取必要的处置措施;隧底溶洞距离处在包络图外部时,可以忽略溶洞对隧道结构的影响。非安全距离包络图同

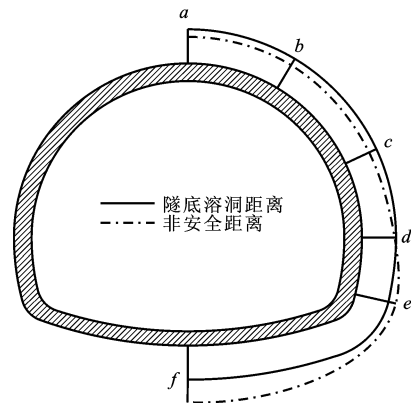


图6 非安全距离包络图

Fig. 6 Non-safety Distance Envelope Diagram

时也提供了隧底溶洞处置方法的指导。从图 6 可以看出,隧底溶洞距离在 a 、 b 、 c 、 d 等 4 部位超出了非安全距离包络图,在 e 和 f 部位则在非安全距离包络图以内。针对该工况的处置,应着重加固隧道结构 f 到 e 部位。

2.4.1 根据竖向位移所得的非安全距离

从图 7 可以看出,各部分非安全距离随径跨比变化趋势基本相似,非安全距离随径跨比增加,在 $d/D=0.78125$ 时,隧道各部分非安全距离(l_{sv})最大。仰拱中心非安全距离为各部分中最大值。 $d/D=0.15625$ 时, $l_{sv}=16.89\text{ m}$; $d/D=0.3125$ 时, $l_{sv}=18.62\text{ m}$; $d/D=0.46875$ 时, $l_{sv}=20.04\text{ m}$; $d/D=0.62500$ 时, $l_{sv}=22.18\text{ m}$; $d/D=0.78125$ 时, $l_{sv}=23.7219\text{ m}$ 。从图 8 可以看出,随着径跨比增加,非安全距离包络范围增加,即隧道各部分结构安全时,溶洞所处距离随径跨比增加。仰拱中心非安全距离包络图范围较大,表明仰拱中心结构安全时,溶洞所处的距离较远。

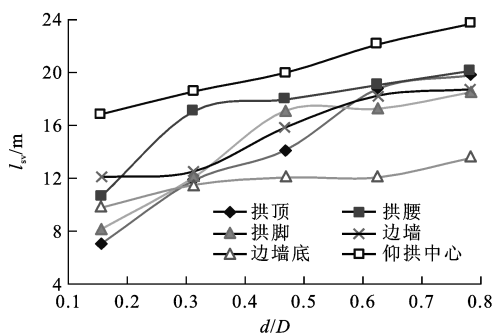


图 7 根据竖向位移所得的非安全距离
Fig. 7 Non-safety Distances Calculated by Vertical Displacement

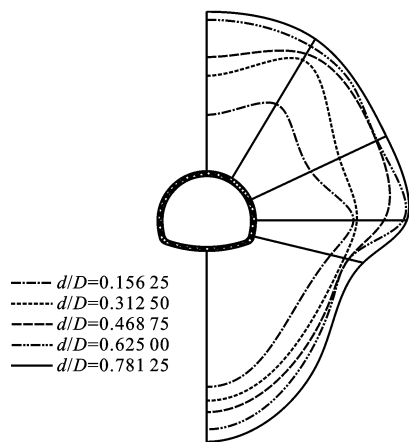


图 8 根据竖向位移所得的非安全距离包络图
Fig. 8 Non-safety Distance Envelope Diagram Calculated by Vertical Displacement

2.4.2 根据水平位移所得的非安全距离

从图 9 可以看出,边墙底非安全距离随径跨比变化微弱,最小值为 10.92 m ,最大值为 12.51 m 。其余各部分非安全距离随径跨比变化趋势基本相似,都随径跨比明显增加。在 $d/D=0.78125$ 时,隧道各部分非安全距离(l_{sh})最大。各工况中,拱脚所得非安全距离为各部分中最大值。 $d/D=0.15625$ 时, $l_{sh}=13.77\text{ m}$; $d/D=0.31250$ 时, $l_{sh}=15.80\text{ m}$; $d/D=0.46875$ 时, $l_{sh}=17.47\text{ m}$; $d/D=0.62500$ 时, $l_{sh}=17.49\text{ m}$; $d/D=0.78125$ 时, $l_{sh}=18.22\text{ m}$ 。从图 10 可以看出,随着径跨比的增加,非安全距离包络范围增加,即隧道各部分结构安全时,溶洞所处距离随径跨比增加。

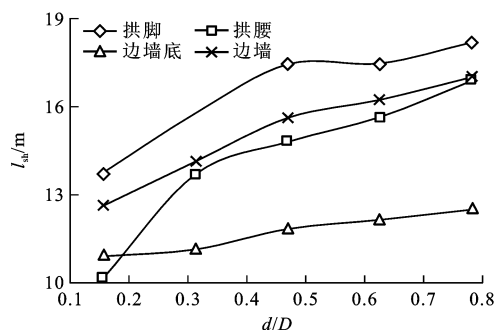


图 9 根据水平位移所得的非安全距离
Fig. 9 Non-safety Distances Calculated by Horizontal Displacement

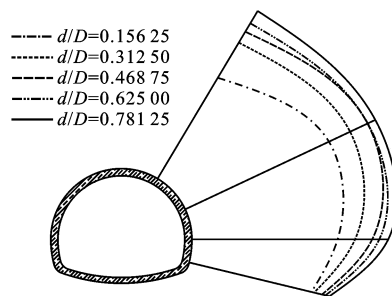


图 10 根据水平位移所得的非安全距离包络图
Fig. 10 Non-safety Distance Envelope Diagram Calculated by Horizontal Displacement

2.4.3 根据轴力所得的非安全距离

除仰拱中心外,其余部分轴力随溶洞上壁距隧道底板的垂直距离变化较小且变化规律不明显,因此,取仰拱中心轴力为评价指标,得出各径跨比条件下仰拱中心非安全距离(l_{sf})。从图 11 可以看出,仰拱中心非安全距离随径跨比增加,在 $d/D=0.78125\text{ m}$ 时,非安全距离值最大。当 $d/D=0.15625\text{ m}$ 时, $l_{sf}=10.34\text{ m}$; 当 $d/D=0.31250\text{ m}$ 时, $l_{sf}=12.13\text{ m}$; 当 $d/D=0.46875\text{ m}$ 时, $l_{sf}=12.54\text{ m}$; 当 $d/D=$

0.625 00 m 时, $l_{sf}=12.99$ m; 当 $d/D=0.781 25$ m 时, $l_{sf}=14.19$ m。从图 12 可以看出, 随着径跨比的增加, 非安全距离包络范围增加, 即仰拱中心结构安全时, 溶洞所处的距离较远。

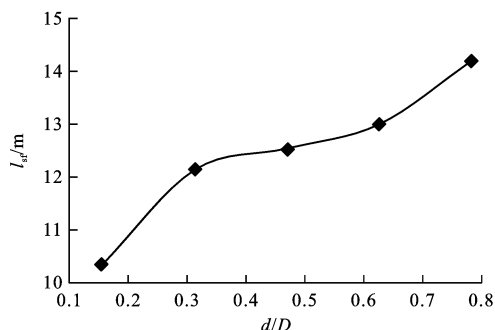


图 11 根据仰拱中心轴力所得的非安全距离

Fig. 11 Non-safety Distances Calculated by Axial Force of Inverted Arch Center

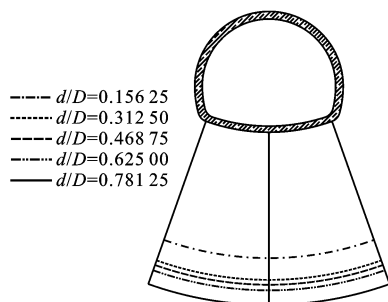


图 12 根据仰拱中心轴力所得的非安全距离包络图

Fig. 12 Non-safety Distance Envelope Diagram Calculated by Axial Force of Inverted Arch Center

3 结 语

(1) 溶洞径跨比、溶洞上壁距隧道底板的垂直距离均对隧道结构位移有显著影响, 且径跨比影响最为显著。在各径跨比条件下, 隧道各部分位移与轴力均有随溶洞上壁距隧道底板的垂直距离减小趋势, 且各部分位移变化趋势符合对数函数。

(2) 由于初期支护属于柔性支护, 溶洞出现在隧道底部时对仰拱受力影响较大而对其他部分影响较小, 所以当隧道下部出现溶洞时应注意对仰拱应力值的监测。隧道下部的溶洞对隧道结构的竖向位移影响较大, 施工应注意监测隧道结构的沉降。要加强拱顶、拱腰、仰拱中心竖向位移监测; 拱脚和边墙水平位移较大, 在施工过程中应注意拱脚和边墙收敛值的监测。

(3) 隧道仰拱中心竖向位移和轴力变化较大, 且在隧道施工和运营过程中由于衬砌自重和汽车对路面动荷载的作用使隧底溶洞和仰拱之间的薄弱区发

生脆性破坏, 出现仰拱断裂和隧道整体下沉现象, 因此, 针对隧底溶洞的处理应该尤为谨慎。

(4) 各工况下的溶洞非安全距离和非安全距离包络图表示隧底出现溶洞且隧道各部分处于非安全时, 溶洞所处的距离范围。根据非安全距离包络图可确定隧底溶洞的处置策略和方法。隧道结构竖向位移得出的隧底溶洞非安全距离较大, 水平位移和轴力得出的非安全距离较小; 出于安全考虑, 应将竖向位移得出的隧底溶洞非安全距离作为溶洞处置的主要依据。

(5) 本文仅以 IV 级围岩为对象, 且不考虑渗透影响, 研究了隧底溶洞对隧道结构的影响规律。其他级别围岩或考虑渗透耦合条件下, 溶洞对隧道的影响可以参考本文方法进行研究。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 徐正宣. 深圳地铁 3 号线工程岩溶洞穴勘察及病害处理技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
XU Zheng-xuan, Research on Karst Cave Investigation and Disaster Treatment Technology of the Shenzhen No. 3 Subway Engineering[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [2] 赖金星, 樊浩博, 申爱军. 基于流固耦合的富水软岩地层隧道排水方案研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 1-5.
LAI Jin-xing, FAN Hao-bo, SHEN Ai-jun. Study on the Drainage Scheme of Water-rich Soft Rock Tunnel Based on Solid-fluid Coupling[J]. South to North Water Transfers and Water Science and Technology, 2015, 13(2): 1-5.
- [3] 赖金星, 张 骞, 董自超. 梁家山隧道病害成因综合勘察分析与处治措施[J]. 工程勘察, 2010(7): 27-31.
LAI Jin-xing, ZHANG Qian, DONG Zi-chao. Comprehensive Survey Analysis and Treatment Measures for Engineering Disease of Liangjiashan Tunnel[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2010(7): 27-31.
- [4] 赵永骅. 覆盖型岩溶地面塌陷特征及稳定性分区评价[J]. 铁道工程学报, 1985(1): 96-100.
ZHAO Yong-hua. Collapse Characteristics and Stability Evaluation of Karst Ground[J]. Journal of Railway Engineering Society, 1985(1): 96-100.
- [5] 周建普, 李献民. 岩溶地基稳定性分析评价方法[J]. 矿冶工程, 2003, 23(1): 4-11.
ZHOU Jian-pu, LI Xian-min. Methods of Stability Analysis in Karst Foundation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2003, 23(1): 4-11.

- [6] 罗强,谭捍华,龙万学,等.岩溶地区公路桥基勘察与洞穴稳定性评价[J].公路交通科技,2006,23(2):111-114.
LUO Qiang, TAN Han-hua, LONG Wan-xue, et al. Survey of Highway Bridge Foundation and Stability Evaluation of Cave in Carst Region[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(2): 111-114.
- [7] 吴治生.岩溶塌陷地表稳定性分析及工程地质分区[J].铁道工程学报,2006(4):6-9.
WU Zhi-sheng. Analysis of Stability of Subsidence Surface in Karst Area and Zoning for Engineering Geology[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006(4): 6-9.
- [8] 蒋继昭.南(宁)柳(州)高速公路洛维大桥桩基岩溶问题[J].广西交通科技,1998,23(3):22-23.
JIANG Ji-zhao. Investigation of Karst Under Pile Foundation of Luwei Bridge in Nanning-Liuzhou Expressway[J]. Guangxi Science and Technology of Communication, 1998, 23(3): 22-23.
- [9] 胡宗汉.唐山市东矿区地面塌陷形成机制及其防治[J].水文地质工程地质,1991,18(4):34-36,42.
HU Zong-han. Formation Mechanism and Prevention of Surface Collapse of the Eastern Mining Area of Tangshan City, Hebei Province[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1991, 18(4): 34-36, 42.
- [10] 王滨,贺可强,孙建敏.岩溶塌陷临界土洞高度的确定:以唐山市体育场岩溶塌陷为例[J].工程地质学报,2005,13(3):320-324.
WANG Bin, HE Ke-qiang, SUN Jian-min. Determination of Critical Height of Soil Holes of Karst Collapse: Karst Collapse Case from Tangshan Palaestra[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(3): 320-324.
- [11] 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.
LIU Chao-qun, PENG Hong-jun. Analysis of the Safe Distance Between a Tunnel Face and Karst Cave[J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49(3): 109-113.
- [12] 赵明阶,敖建华,刘绪华,等.隧道底部溶洞对围岩变形特性的影响分析[J].重庆交通学院学报,2003,22(2):20-23,40.
ZHAO Ming-jie, AO Jian-hua, LIU Xu-hua, et al. Study on Deformation Character of the Surrounding Rock Masses Concerning the Influence of Karst Caves in the Bottom of Tunnel[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2003, 22(2): 20-23, 40.
- [13] MARTINI C D, READ R S, MARTINO J B. Observations of Brittle Failure Around a Circular Test Tunnel[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(7): 1065-1073.
- [14] TANG C M. Numerical Simulation of Progressive Rock Failure and Associated Seismicity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(2): 249-261.
- [15] 刘辉,李波,吴从师,等.岩溶隧道掘进爆破震动效应分析[J].长安大学学报:自然科学版,2010,30(4):56-59.
LIU Hui, LI Bo, WU Cong-shi, et al. Analysis on Effects of Vibration Resulted from Driving Blasting in Karst Tunnel[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(4): 56-59.
- [16] 程晔,曹文贵,赵明华.高速公路下伏岩溶顶板稳定性二级模糊综合评判[J].中国公路学报,2003,16(4):21-24.
CHENG Ye, CAO Wen-gui, ZHAO Ming-hua. Synthetic Judgment on the Two Stage Fuzzy of the Stability of Karst Top Slab Beneath Expressway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(4): 21-24.
- [17] 何翊武,傅鹤林,罗立峰,等.隧底岩溶洞对结构稳定影响的理论解[J].土木工程学报,2014,47(10):128-135.
HE Yi-wu, FU He-lin, LUO Li-feng, et al. Theoretical Solution of the Influence of Karst Cavern Beneath Tunnel on the Stability of Tunnel Structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(10): 128-135.
- [18] 卞晓琳,陈福全,苏峰,等.岩溶区深埋隧道围岩力学特性分析[J].中国铁道科学,2013,34(1):43-49.
BIAN Xiao-lin, CHEN Fu-quan, SU Feng, et al. Mechanical Characteristics Analysis of Surrounding Rock in Deep Buried Tunnel in Karst Regions[J]. China Railway Science, 2013, 34(1): 43-49.
- [19] 宋战平,杨腾添,张丹锋,等.溶洞对隧道(洞)稳定性影响的数值试验及现场监测分析[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2014,46(4):484-491.
SONG Zhan-ping, YANG Teng-tian, ZHANG Dan-feng, et al. Experiments and Field Monitoring and Analysis About the Impact of Existing Cave on the Stability of the Tunnel[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Sciences Edition, 2014, 46(4): 484-491.
- [20] 宋战平,袁驰宇,王立焘,等.洞侧既有隐伏溶洞对城门洞型水工隧洞稳定性的影响研究[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2013,45(4):499-507.
SONG Zhan-ping, YUAN Chi-yu, WANG Li-tao, et al. Research on the Influence of Side Existing Concealed Karst Caverns upon the Stability of the Popular Shape Type Water Construction Tunnel[J]. Journal of Xi'an

- University of Architecture and Technology; Natural Sciences Edition, 2013, 45(4): 499-507.
- [21] 李术才, 李树忱, 张庆松, 等. 岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 217-225.
LI Shu-cai, LI Shu-chen, ZHANG Qing-song, et al. Forecast of Karst-fractured Groundwater and Defective Geological Conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 217-225.
- [22] 史世雍, 梅世龙, 杨志刚. 隧道顶部溶洞对围岩稳定性的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(5): 698-702, 716.
SHI Shi-yong, MEI Shi-long, YANG Zhi-gang. Research on the Influence of Karst Cave in the Roof of Tunnel on Stability of Surrounding Rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(5): 698-702, 716.
- [23] WANG J F, HUANG H W, XIE X Y, et al. Void-induced Liner Deformation and Stress Redistribution [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 40: 263-276.
- [24] 郝拉娣, 张 娴, 刘 琳. 科技论文中正交试验结果分析方法的使用[J]. 编辑学报, 2007, 19(5): 340-341.
HAO La-di, ZHANG Xian, LIU Lin. Analysis Method of Results in Orthogonal Design in Scientific Papers[J]. Acta Editologica, 2007, 19(5): 340-341.
- [25] 沈宇鹏, 王辉煌, 荆 鹏, 等. 临近既有有线基坑支护影响因素的正交分析[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(2): 14-20.
SHEN Yu-peng, WANG Hui-huang, JING Peng, et al. Orthogonal Analysis of Influence Factors for Foundation Pit Support Approaching Existing Railway Line [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(2): 14-20.
- [26] 张旭辉, 龚晓南, 徐日庆. 边坡稳定影响因素敏感性的正交法计算分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 36-39.
ZHANG Xu-hui, GONG Xiao-nan, XU Ri-qing. Orthogonality Analysis Method of Sensibility on Factor of Slope Stability[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 36-39.
- [27] 何立平, 申爱琴, 谢 成, 等. 橡胶沥青结合料性能正交试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34(1): 7-12.
HE Li-ping, SHEN Ai-qin, XIE Cheng, et al. Orthogonal Test for Rubber Asphalt Properties[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(1): 7-12.
- [28] 贾 超, 张 凯, 张强勇, 等. 基于正交试验设计的层状盐岩地下储库群多因素优化研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1718-1726.
JIA Chao, ZHANG Kai, ZHANG Qiang-yong, et al. Research on Multi-factor Optimization of Underground Laminated Salt Rock Storage Group Based on Orthogonal Experimental Design[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1718-1726.
- [29] 程 红, 胡彦波. 科技文献中正交试验表的组合设计与编排[J]. 编辑学报, 2014, 26(2): 134-137.
CHENG Hong, HU Yan-bo. Combinational Design and Arrangement of Orthogonal-factor Tables in Published Sci-tech Literatures[J]. Acta Editologica, 2014, 26(2): 134-137.
- [30] 宋战平. 隐伏溶洞对隧道围岩-支护结构稳定性的影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
SONG Zhan-ping. Research on the Influence of Concealed Karst Caverns upon the Stability of Tunnels and Its Support Structure[J]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005.
- [31] 刘之葵, 梁金城, 朱寿增, 等. 岩溶区含溶洞岩石地基稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 629-633.
LIU Zhi-kui, LIANG Jin-cheng, ZHU Shou-zeng, et al. Stability Analysis of Rock Foundation with Cave in Karst Area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 629-633.
- [32] 李 围. 隧道及地下工程 ANSYS 实例分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
LI Wei. Analysis on Tunnel and Underground Engineering ANSYS Instance[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008.
- [33] JTG D70—2004, 公路隧道设计规范[S].
JTG D70—2004, Code for Design of Road Tunnel[S].
- [34] HILL R. Elastic Properties of Reinforced Solids; Some Theoretical Principles[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1963, 11(5): 357-372.
- [35] 李术才, 朱维申, 陈卫忠, 等. 弹塑性大位移有限元方法在软岩隧道变形预估系统研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 466-470.
LI Shu-cai, ZHU Wei-shen, CHEN Wei-zhong, et al. Application of Elasto-plastic Large Displacement Finite Element Method to the Study of Deformation Prediction of Soft Rock Tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 466-470.