



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.05.24

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 Yuwei, WANG Qi, LI Youyun, 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)

# 压力溶腔对岩溶隧道施工安全影响的数值分析

张玉伟<sup>1</sup>, 王琪<sup>2</sup>, 李又云<sup>1</sup>, 咎文博<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 西安 710064; 2. 河南省三门峡至浙川高速公路项目有限公司, 河南 三门峡 472200)

**摘要:** 岩溶地区富水压力溶腔的存在威胁着隧道施工安全。为分析压力溶腔存在对隧道施工安全的影响, 以溶腔位于隧道上方的不利工况为例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, 分析了防突层高跨比对最小安全厚度取值的影响。结合某岩溶隧道, 推算出防突层安全厚度为 7.29 m, 小于溶腔与隧道临空面的实际厚度, 判定该隧道施工是安全的。运用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 建立数值分析模型, 分析了压力溶腔存在对防突层竖向位移以及受力的影响, 进而判定防突层稳定性。结果表明: 当压力溶腔与隧道临空面实际岩层厚度大于防突层最小安全厚度时, 不会威胁隧道施工安全, 但溶腔存在时防突层竖向位移和竖向应力均有增大趋势, 考虑施工扰动因素建议施工中应加强溶腔处位移监测, 及时反馈信息, 确保施工安全。研究结果可为岩溶隧道施工提供借鉴。

**关键词:** 岩溶隧道; 压力溶腔; 防突层; 安全厚度; 施工安全; 数值分析

中图分类号: U455 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2016)05-0150-07

## Numerical analysis on impact of pressure cavity on karst tunnel construction safety

ZHANG Yuwei<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>2</sup>, LI Youyun<sup>1</sup>, ZAN Wenbo<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Sanxi Highway Limited Company, Sanmenxia 472200, China)

**Abstract:** The existence of pressure cavity with water threatens the tunnel construction safety in karst region. In order to analyze the influence of pressure cavity on tunnel construction, a simplified mechanical model was built based on the condition of the cavity located above the tunnel, considering water pressure and side pressure, the thickness of layer was calculated using structural mechanics method and variation principle, and the influence of depth span ratio was analyzed. Combined with the condition of a karst tunnel, the thickness of prevention layer was determined to be 7.29 m, less than the actual thickness between the cavity and the tunnel, therefore the tunnel construction was safe. FLAC<sup>3D</sup> was used to build numerical simulation model, to analyze the influence of pressure cavity on the vertical displacement and the stress of the prevention layer, and further to determine the stability of prevention layer. The results showed that when the actual thickness between pressure cavity and tunnel surface was greater than the minimum thickness of the protection layer, there was no threat to the tunnel construction, but the vertical displacement and vertical stress of the prevention layer showed an increasing trend in the presence of cavity, considering the construction disturbance factors, we suggest that cavity displacement monitoring should be strengthened in construction progress and information should be fed back timely to ensure construction safety. The conclusion can provide reference for karst tunnel construction.

**Key words:** karst tunnel; pressure cavity; prevention layer; safety thickness; construction safety; numerical analysis

收稿日期: 2015-08-16 修回日期: 2015-12-22 网络出版时间: 2016-08-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160819.0922.001.html>

基金项目: 西部交通科技项目(2011318797600)

Fund: Traffic Science and Technology Project in West China(2011318797600)

作者简介: 张玉伟(1989-), 男, 山东淄博人, 博士研究生, 主要从事隧道工程方面研究。E-mail: 1032659676@qq.com

岩溶地貌在我国分布广泛,面积约占国土总面积的 1/3 左右,其中以西南部云、贵、桂和川、鄂、湘等地区最为发育,大量隧道建设不可避免的要穿越岩溶区,岩溶对隧道的危害不容忽视<sup>[1,2]</sup>。岩溶危害主要是岩溶水、岩溶洞穴及其充填物等在隧道施工过程中造成的涌水突泥、大变形及坍塌、顶板溶洞充填物脱落冒顶及底板塌陷等<sup>[3]</sup>,如贵州省西山垭隧道在 2013 年 12 月 18 日凌晨 2 点隧道左洞掌子面桩号 ZK155+986 突然发生突水涌泥现象,涌泥长约 30.6 m,平均高度约 5.4 m,造成了重大经济损失,因此对岩溶隧道灾害研究具有重要意义。

莫阳春<sup>[4]</sup>等依据某岩溶隧道,利用 FLAC<sup>3D</sup>对隧道底部含有溶洞的围岩稳定性进行数值模拟研究;孙谋<sup>[5]</sup>等建立了掌子面失稳的折叠突变模型,推导了隧道掌子面发生破断的突水条件和最小安全厚度计算公式;臧守杰<sup>[6]</sup>等采用弹性理论建立了在岩体抗拉和抗剪强度准则基础上的岩溶隧道底板岩层的最小安全厚度的理论公式;闫长斌<sup>[7]</sup>等将洞室间的顶柱简化为两端固定梁力学模型,建立了动荷载诱发上下交叠型地下洞室间顶柱失稳的双尖点突变模型,根据失稳条件确定了顶柱的临界安全厚度;郭佳奇<sup>[8]</sup>等针对常见的中小尺度的侧部高压富水溶腔,以隧道周围的塑性区和溶洞周围的高渗透带的贯通与否作为中间岩柱稳定的判断标准,建立了中间岩柱安全厚度力学预测模型;干昆蓉<sup>[9]</sup>等分析了涌突水成因及施工中确定岩墙安全厚度应考虑的因素,并结合具体工程给出岩墙安全厚度合理取值范围;Pesendorfer<sup>[10]</sup>等分析了岩溶地区深埋隧道瞬态水压力变化规律,并分析了对施工安全的影响;李利平<sup>[11]</sup>等研究了裂隙水突出机制,分析了对岩溶隧道的不利影响,进一步研究了岩溶处治措施,并对注浆材料进行了深入研究<sup>[12]</sup>;张民庆<sup>[13]</sup>等统计圆梁山隧道深埋充填型溶洞的突水情况、涌出物介质,总结了岩溶的突水特征、岩溶类型和岩溶水动态特征;另外赵明阶<sup>[14,15]</sup>等采用模型试验和数值分析的方法对岩溶隧道全断面开挖进行了分析,得出了施工过程中围岩变形规律;王勇<sup>[16]</sup>等用支持向量机方法得出了能综合体现各影响因素的溶洞顶板安全厚度预测模型。可以看出,关于岩溶区隧道施工安全问题越来越受到重视,许多学者采用理论分析或数值模拟的方法进行了较多研究,但是,岩溶区地质复杂,溶腔中往往有水存在,如何合理考虑富水溶腔中水压力对施工的影响尚需进一步研究。

为分析富水压力溶腔对隧道施工安全的影响,并确定防突层最小安全厚度,本文以富水压力溶腔

位于隧道上方的不利工况建立防突层力学模型,并假设溶腔形状为长方体且溶腔中水压力均匀分布于溶腔底面,以结构力学思想将防突层简化为考虑侧压力的固定梁,并以固定端处围岩压力与侧压力系数确定侧压力的大小,采用结构力学方法和变分原理计算了防突层固定端和跨中的最小安全厚度,结合某岩溶隧道存在的溶腔,确定了防突层最小安全厚度并进行了施工安全分析,为进一步验证了计算模型方法的可靠性,采用数值模拟软件 FLAC<sup>3D</sup>,建立模型,分析溶腔存在条件下,防突层竖向位移及应力分布,验证了计算结果可靠性,同时考虑施工中扰动因素给出了施工中的注意事项及建议,可为岩溶隧道施工提供一定借鉴。

## 1 压力溶腔防突层安全厚度分析

### 1.1 简化计算模型

考虑到隧道周围地质条件的多样性,富水压力溶腔可能存在于隧道的任何位置,为了考虑重力和水压力耦合的影响,本文以溶腔位于隧道上方的不利工况为例进行分析,且为了便于分析得到完备的解析解作如下几点假设:(1)富水压力溶腔简化为规则的长方体,底面为长方形。(2)溶腔中水体均匀分布,即水压均匀作用于溶腔底面上。(3)防突层为弹性体,暂不考虑塑性区影响,简化模型见图 1。

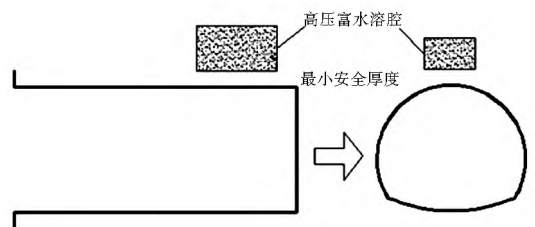


图 1 富水压力溶腔位置

Fig. 1 Position of water rich pressure cavity

当富水溶腔在隧道上方且简化为长方体时,溶腔防突层可简化为两端固定的梁,属于超静定结构。定义防突层厚度为  $D$ , 高压溶腔底面积为  $A \times B$ , 设其跨度  $S$ , 则  $S = \max\{A, B\}$ , 防突层围岩容重为  $\rho$ , 溶腔内水压力为  $q$  且分布均匀, 防突层岩石的极限抗拉强度为  $\sigma$ , 防突层受力状态为上方受溶腔水压力, 侧边固定端受侧压力  $Q$ , 实际中防突层两端还受到约束作用, 方向与水压力方向相反, 因此本模型中不予考虑是偏安全的。防突层在  $q$  和  $Q$  下挠度曲线为  $\omega$ , 防突层围岩弹性模量为  $E$ , 力学模型见图 2。由于防突层高跨比  $D/S$  的影响, 最大拉应力可出现固支端或者跨中位置, 现分别计算固定端和跨中位置的弯矩。

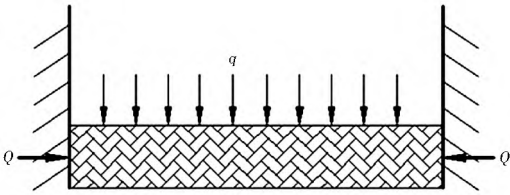


图 2 防突层受力状态

Fig. 2 The stress state of prevention layer

### 1.2 固定端最小安全厚度计算

在  $q$  和  $Q$  下防突层发生挠曲时,  $Q$  力的作用点在梁固定端处, 因此计算固支端最小安全厚度时, 可不考虑侧压力  $Q$  的影响, 只考虑水压力和防突层重力作用, 模型可进一步简化。

固定端弯矩为:

$$M_d = \frac{1}{12}(q + \rho D) S^2 \quad (1)$$

固定端最大拉应力:

$$\sigma_t = \frac{M_d}{I} \frac{1}{2} D = \frac{(q + \rho D) S^2}{2D^2} \quad (2)$$

防突层保持稳定条件:

$$\sigma_t < \alpha \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  为固定端或跨中最大拉力,  $\sigma_t$  为围岩极限抗拉强度。

由式(2)、(3)得:

$$D > \frac{\rho L^2}{4\alpha} + \frac{1}{4\alpha} \sqrt{\rho^2 S^4 + 8\alpha q S^2} \quad (4)$$

即固支端最小安全厚度为:

$$D = \frac{\rho L^2}{4\alpha} + \frac{1}{4\alpha} \sqrt{\rho^2 S^4 + 8\alpha q S^2} \quad (5)$$

### 1.3 跨中 最小安全厚度计算

在  $q$  和  $Q$  下防突层发生挠曲时,  $Q$  对跨中会有影响, 因此在计算防突层跨中 最小安全厚度时需考虑侧压力  $Q$  的影响。利用弹塑性力学中的变分原理计算防突层在竖向均布荷载  $q + \rho D$  和侧压力  $Q$  作用下的跨中弯矩, 不考虑防突层轴向压缩能, 只考虑其弯曲变形能。根据假设防突层固定端是固定约束, 其位移和转角均为 0, 因此有挠度表达式:

$$\omega = \frac{\delta}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi x}{S} \right) \quad (6)$$

由式(6)得:

$$\frac{d\omega}{dx} = \frac{\pi\delta}{S} \sin \frac{2\pi x}{S} \quad (7)$$

$$\frac{d^2\omega}{dx^2} = \frac{2\pi^2\delta}{S^2} \cos \frac{2\pi x}{S} \quad (8)$$

在均布压力  $q$  和侧压力外力  $Q$  作用下, 防突层发生挠曲, 其应变能为:

$$U = \frac{EI}{2} \int_0^L \left( \frac{d^2\omega}{dx^2} \right)^2 dx = \frac{EI\pi^4\delta^2}{S^3} \quad (9)$$

竖向荷载  $q + \rho D$  做功为:

$$W_q = (q + \rho D) \int_0^L \omega dx = \frac{1}{2}(q + \rho D) \delta S \quad (10)$$

侧压力  $Q$  做功为:

$$W_Q = \frac{Q}{2} \int_0^L \left( \frac{d\omega}{dx} \right)^2 dx = \frac{Q\pi^2\delta^2}{4S} \quad (11)$$

防突层发生挠曲的总能量为:

$$W = \frac{EI\pi^4\delta^2}{S^3} - \frac{1}{2}(q + \rho D) \delta S - \frac{Q\pi^2\delta^2}{4S} \quad (12)$$

由变分原理可知:

$$\frac{\partial W}{\partial \delta} = 0 \quad (13)$$

$$\delta = \frac{(q + \rho D)L^4}{4EI\pi^4 - Q\pi^2 D^2} = \delta_0 \left( \frac{1}{1 - Q/Q_c} \right) \quad (14)$$

其中:  $Q_c = \frac{4\pi^2 EI}{S^2}$ ;  $\delta_0 = \frac{(q + \rho D)S^4}{4\pi^4 EI}$

挠度与弯矩的关系:

$$M_x = -EI \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (15)$$

则跨中 ( $x = S/2$ ) 弯矩为:

$$M_z = EI \frac{2\pi^2\delta}{S^2} = \frac{2(q + \rho D)S^2 EI}{4EI\pi^2 - QS^2} \quad (16)$$

则防突层跨中截面最大拉应力:

$$\alpha = \frac{(q + \rho D)S^2 DE}{4EI\pi^2 - QS^2} \quad (17)$$

下面讨论防突层固支端侧压力  $Q$  大小, 侧压力由竖向围岩压力和侧压力系数  $\lambda$  决定, 围岩压力根据隧道埋深不同而不同。

当隧道浅埋时, 此时防突层固定端处产生的竖向围岩压力为:

$$q_1 = \rho h \quad (18)$$

其中  $h$  为浅埋隧道埋深。

当隧道深埋时, 围岩压力由松散荷载产生, 此时竖向力:

$$q_2 = 0.45 \times 2^{j-1} \rho w \quad (19)$$

式中:  $j$  为围岩级别;  $w$  为跨度影响系数,  $w = 1 + i(l_m - 5)$ ;  $l_m$  为毛洞跨度, 当毛洞跨度为 5~15m 时,  $i = 0.1$ 。

则防突层固定端侧压力 ( $\lambda$  为侧压力系数) 为:

$$Q = \lambda q_i D \quad (20)$$

联立式(17)(20)有:

$$\alpha = \frac{(q + \rho D)S^2 DE}{4EI\pi^2 - \lambda q_i D S^2} \quad (21)$$

由式(3)得:

$$D \geq \frac{3\rho S^2}{2\pi^2 \alpha} + \frac{\sqrt{9\rho^2 E^2 S^4 + 12EI\pi^2 \alpha (\lambda q_i \alpha + q ES^2)}}{2EI\pi^2 \alpha} \quad (22)$$

即防突层跨中 最小安全厚度为:

$$D_z \geq \frac{3\rho S^2}{2\pi^2 q} + \frac{\sqrt{9\rho^2 E^2 S^4 + 12E\pi^2 q(\lambda q_i \sigma_i + qES^2)}}{2E\pi^2 q} \quad (23)$$

### 1.4 防突层最小安全厚度确定

计算防突层安全厚度时以固支端和跨中两者较大值为准, 而两者的大小关系与防突层高跨比有关, 若跨中大于固定端时:

$$M_z \geq M_d \quad (24)$$

得到防突层高跨比与埋深、弹性模量等的关系式:

$$\frac{D}{S} \leq \frac{\sqrt{3\lambda q_i}}{\sqrt{(\pi^2 E - 6E)}} \quad (25)$$

即当防突层高跨比满足(25)时, 取跨中安全厚度, 反之取固定端安全厚度。

## 2 算例分析

### 2.1 工程概况

某隧道为贵州省道真至新寨高速公路和溪至流河渡段一座上下行分离隧道。左幅起讫里程桩号为 ZK155+211~ZK156+085, 长 874 m, 最大埋深 105 m, 右幅起讫里程桩号为 YK155+215~YK156+111, 长 896 m, 最大埋深 119 m。地层为第四系全新统残坡积(Q4e1+dl)粉质黏土、碎石、块石, 奥陶统湄潭组泥岩、泥灰岩、灰岩等。隧址不良地质现象主要为岩溶, 分布在进口段, 根据钻孔 CSK37 所揭示, 发育溶洞, 全充填碎石, 洞径 1.1 m。根据地质调绘, YK156+000 隧道上方发育含水溶洞, 经测定水压约为 0.22 MPa, 溶腔大致呈长方体, 沿隧道轴向长度约为 16 m, 防突层厚度约为 8~11 m 之间, 隧道掘进过程中可能产生涌突水现象。

### 2.2 最小安全厚度计算

隧道围岩岩体抗拉强度测得为 0.6 MPa, 围岩容重取 26 kN/m<sup>3</sup>, 围岩弹性模量取 1.26 GPa, 围岩侧压力系数为 λ=1.2, 溶腔跨度取 16 m, 溶腔中水压为 0.22 MPa, 溶洞分布在隧道洞口处理深较浅, 围岩压力计算时按浅埋隧道计算。计算参数见表 1。

表 1 计算参数  
Tab.1 Calculation parameters

q	ρ	h	λ	E	S	σ <sub>i</sub>
0.22	26	35	1.2	1.26	16	0.6

首先计算围岩压力, 结合侧压力系数进而确定防突层侧压力, 浅埋隧道围岩压力可由式(18)计算, 高跨比满足式(25), 进一步由式(23)得防突

层跨中最小安全厚度为 7.29 m, 实际中工程中防突层厚度为 8~11 m 之间, 因此判定该溶腔存在不会影响隧道施工过程中安全, 同时经过监测现场施工过程中并未发生涌水塌方现象, 说明了分析结果的可靠性。

## 3 数值模拟分析

为进一步验证计算结果的可靠性, 采用 FLAC<sup>3D</sup> 建立模型, 分析岩溶隧道施工中压力溶腔存在时对防突层竖向位移和应力的影响, 从而判定溶腔对隧道施工安全的影响程度, 结合分析结果给出几点措施。

### 3.1 模型建立

数值模型参数尽量与实体工程一致, 溶腔规模取与计算模型相一致。设定隧道解析区域范围: 向下取隧道的 2 倍高度约为 25 m, 左右两侧各取隧道的 4 倍跨径约为 50 m, 同时为了消除纵向边界的影响, 隧道轴线方向所取长度为 30 m。溶腔模型为长方体, 底面积为 16×5 m, 溶腔水压力为 0.22 MPa, 防突层厚度取为 8 m。溶洞模型通过开挖模型(Null 模型)模拟, 计算模型的边界条件为, 左右两侧边界约束 X 方向, 前后两侧约束 Y 方向, 底部边界约束 Z 方向<sup>[17]</sup>, 模型中, 溶腔内壁的水压力采用在溶腔内壁作用面应力的方式施加。

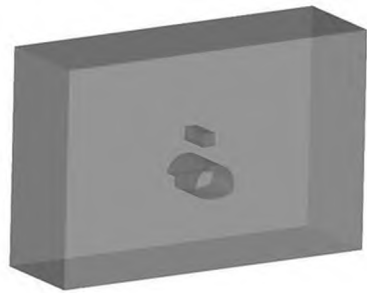


图 3 模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of model

### 3.2 参数选取

围岩及防突层材料模型采用摩尔-库伦(Mohr-Coulomb)理想弹塑性模型; 开挖区采用 FLAC<sup>3D</sup> 中的开挖模型(Null 模型)。复合式衬砌中的初期支护和二次衬砌均采用实体单元, 其本构模型均认为弹性模型, 岩体的初始地应力场只考虑自重应力作用, 同时考虑施作锚喷支护和预加固措施对围岩物理力学性质的改善, 模拟时适当地提高加固区围岩的相关参数<sup>[4]</sup>。计算所采用材料的参数均采用试验和现场实测围岩物理力学参数见表 2。在 FLAC<sup>3D</sup> 进行隧道围岩数值分析中岩体变形参数采

表 2 围岩与支护结构物理力学参数

Tab.2 Physical and mechanical parameters of surrounding rock and supporting structure

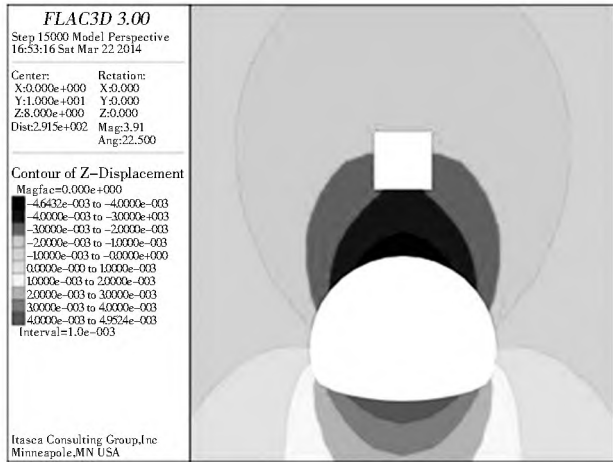
参数	弹性模量 $E$ / GPa	体积模量 $K$ / GPa	剪切模量 $G$ / GPa	泊松比 $\mu$	容重 $\gamma$ / (kN • m)	内摩擦角 $\Phi$ (°)	抗拉强度 / MPa	黏聚力 $c$ / MPa
围岩	1.26	2.00	0.43	0.40	20	29	0.8	0.35
初支	21	11.67	8.75	0.20	23	—	—	—
二衬	28	15.56	11.67	0.20	25	—	—	—

用的是体积模量  $K$  和剪切模量  $G$ 。因此, 必须将弹性模量  $E$  和泊松比  $\mu$  转换成体积模量  $K$  和剪切模

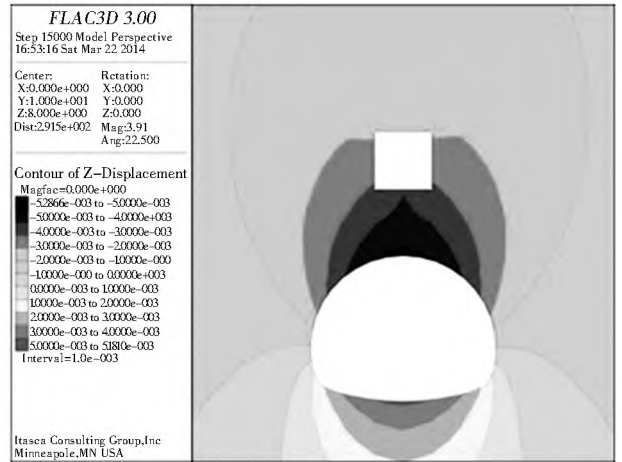
量  $G$ , 体积模量  $K = E/3(1 - 2\mu)$ , 剪切模量  $G = E/2(1 + \mu)$ 。

### 3.3 结果分析

溶腔端部断面和跨中断面的竖向位移受隧道开挖和溶腔水压的综合影响, 数值模拟过程如下: 在溶腔内壁施加面应力模拟水压力, 平衡之后, 再进行隧道开挖模拟研究隧道开挖和溶腔水压对各断面竖向位移的综合影响。图 4 给出溶腔端部断面和跨中断面的竖向位移图, 表 3 为隧道断面不同位置位移。



(a) 端部断面



(b) 跨中断面

图 4 竖向位移

Fig. 4 Vertical displacement diagram

表 3 不同位置最大竖向位移

Tab. 3 The maximum vertical displacement of different positions mm

位置	拱顶	拱肩	拱脚	仰拱
端部断面	-4.62	-3.21	1.35	4.17
跨中断面	-5.29	-4.16	2.11	4.99

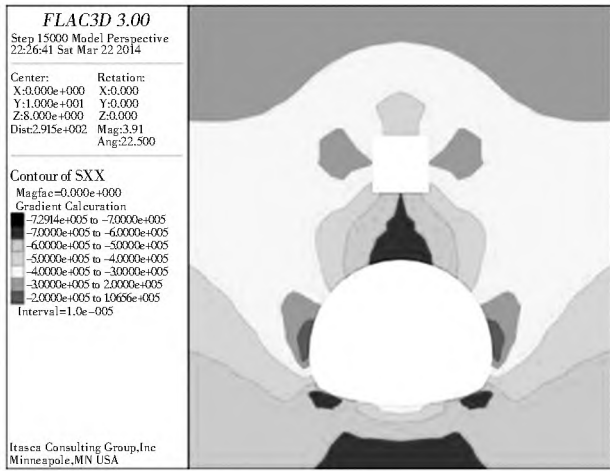
分析图 4 可知, 由于溶腔水压力存在隧道开挖时跨中断面处防突层最大竖向位移为 5.29 mm, 端部断面防突层最大竖向位移为 4.64 mm, 隧道端部断面位移较隧道中部断面位移小, 说明防突层厚度中间断面是最不利位置, 应以跨中防突层厚度作为最小防突层厚度的设计值, 结论与式(25) 计算模型得出的结论一致; 表 3 给出了隧道不同位置位移, 可看出, 拱顶处不论是端部断面还是中部断面, 拱顶和拱肩处有向下的竖向位移, 仰拱有向上的反向位移, 这是因为拱顶存在富水压力溶腔对隧道顶部产生了影响, 岩溶隧道溶腔处施工中应着重监测拱顶和仰拱处位移变化, 注意信息反馈, 确保施工安全。

上述分析知跨中断面为最不利断面, 给出跨中断面的应力图见图 5。

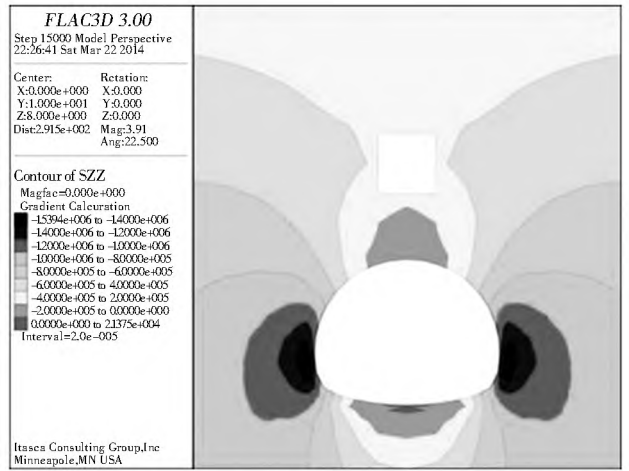
由图 5 可知, 跨中断面竖向应力和水平应力分

布不同, 富水溶腔的存在对竖向应力影响较大, 对水平应力影响相对较小。由竖向应力图可看出, 溶腔和隧道之间的防突层受力较大, 表明由于溶腔中水压存在增加了防突层的受力, 边墙等其余位置受力相对较小; 而水平应力图表明, 边墙受力较大, 拱顶和仰拱次之, 溶腔存在对水平应力影响较小, 这是因为水平应力主要是由于地应力作用引起的, 溶腔内作用的水压力认为是竖向作用于溶腔底部, 因此溶腔压力对防突层水平应力影响不大, 且水平应力小于抗拉强度, 可判定其安全性。

从图 4 和图 5 整体来看, 隧道施工中该溶腔能够保持稳定, 这是因为溶腔与隧道临空面岩层厚度大于防突层最小安全厚度, 因此是安全的, 模拟结果与计算模型分析结果相一致。但是由于富水压力溶腔存在, 隧道拱顶防突层竖向位移及竖向应力较大, 考虑到施工过程中对溶腔防突层的扰动以及开挖卸荷等对围岩力学性质的影响, 溶腔中水压力也可能受施工扰动发生变化等, 综合因素影响可能导致溶腔防突层不稳发生涌水灾害, 因此岩溶隧道施工中溶腔处应力弱爆破以减少扰动, 并且应加强溶腔处竖向位移的监测, 及时信息反馈, 确保施工安全。



(a) 竖向应力



(b) 水平应力

图5 跨中断面应力

Fig. 5 Stress diagram of middle section

### 4 结论

(1) 依据富水压力溶腔位于隧道上方的最不利工况建立了防突层简化力学模型,采用结构力学方法和变分原理推导了防突层固定端和跨中安全厚度公式。

(2) 防突层高跨比决定着其最小安全厚度取值,当高跨比小于临界高跨比时取固定端最小安全厚度,反之取跨中安全厚度。

(3) 结合某岩溶隧道得到防突层最小安全厚度为 7.29 m,该值小于富水压力溶腔与隧道间岩层实际厚度,判定施工过程是安全的,且该隧道溶腔处施工未发生涌水,初步验证了结论的可靠性。

(4) 通过有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 建立分析模型,分析了富水压力溶腔存在时隧道施工中位移和应力变化,溶腔防突层能够保持稳定,模拟结果与力学模型计算结果相吻合,进一步验证了结论的可靠性。

(5) 数值分析表明,防突层能保持稳定,但压力溶腔存在会对防突层竖向位移产生不利影响,且对竖向应力也有一定影响,考虑到施工中扰动因素建议加强溶腔位置的位移监测,及时信息反馈以确保施工安全。

#### 参考文献(References):

[1] 杨天鸿,唐春安,谭志宏等.岩体破坏突水模型研究现状及突水预测预报研究发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2):268-277. (YANG Tianhong, TANG Chun'an, TAN Zhihong, et al. State of the art of inrush models in rock mass failure and developing trend for prediction and forecast of groundwater inrush[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 268-277. (in Chinese))

[2] Meguid M A, Dang H K. The effect of erosion voids on existing

tunnel linings[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2009, 24(3): 278-286.

[3] 樊浩博,汪珂,郭而东.隧道溶洞的地质雷达探测及处理[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 181-184. (FAN Haobo, WANG Ke, GUO Erdong. Ground penetrating radar detection and governance of tunnel karst cave[J]. South to north Water Transfer and Water Science & Technology, 2015, 13(1): 181-184. (in Chinese))

[4] 莫阳春,周晓军.达成高速铁路岩溶隧道围岩稳定性研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(3): 52-57. (MO Yangchun, ZHOU Xiaojun. Stability analysis on the surrounding rock of a karst tunnel in Da Cheng high speed railway[J]. China Railway Science, 2008, 29(3): 52-57. (in Chinese))

[5] 孙谋,刘维宁.高风险岩溶隧道掌子面突水机制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1175-1180. (SU N Mou, LIU Weining. Research on water inrush mechanism induced by karst tunnel face with high risk[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1175-1180. (in Chinese))

[6] 臧守杰,蔡彦波,程建铝.喀斯特地区隧道施工中隧底岩层稳定性评价研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(3): 43-45. (ZANG Shoujie, QI Yanbo, CHEN Jianlu. Evaluation and research on stability of bottom rock layer in construction of tunnel in Karst Area[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2007, 5(3): 43-45. (in Chinese))

[7] 闫长斌,徐国元.基于突变理论深埋硬岩隧道的失稳分析[J]. 工程地质学报, 2006, 14(4): 508-512. (YAN Changbin, XU Guoyuan. Instability analysis of deep buried tunnels with catastrophe theory[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(4): 508-512. (in Chinese))

[8] 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. (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 Tunneling Technology, 2010, 47(6): 10-16. (in Chinese))

[9] 干昆蓉,杨毅,李建设.某隧道岩溶突水机理分析及安全岩墙厚

- 度的确定[J]. 隧道建设, 2007, 27(3): 13-16. (GAN Kur rong, YANG Yi, LI Jiang she. Analysis on karst water inflow mechanisms and determination of thickness of safe rock walls: case study on a tunnel[J]. Tunnel Construction, 2007, 27(3): 13-16. (in Chinese))
- [10] Pesendorfer M, Loew S. Subsurface Exploration and transient pressure testing form a deep tunnel in fractured and karstified limestones(Lotschberg Base Tunnel, Switzerland) [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2009, 47(1): 121-127.
- [11] 李利平, 李术才, 张庆松. 岩溶地区隧道裂隙水突出力学机制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 523-528. (LI Li ping, LI Shu cai, ZHANG Qing song. Study of mechanism of water inrush induced by hydraulic fracturing in karst tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 523-528. (in Chinese))
- [12] 李利平, 李术才, 崔金生. 岩溶突水治理浆材的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3642-3648. (LI Li ping, LI Shu cai, CUI Jin sheng. Experimental research on chemical grout for treating water inrush in rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3642-3648. (in Chinese))
- [13] 张民庆, 刘招伟. 圆梁山隧道岩溶突水特征分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 421-426. (ZHANG Min qing, LIU Zhao wei. The analysis of the features of karst water burst of the Yuanliangshan tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 421-426. (in Chinese))
- [14] 赵明阶, 徐容, 许锡宾. 岩溶区全断面开挖隧道围岩变形特性模拟[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 06: 710-715. (ZHAO Ming jie, XU Rong, XU Xi bin. Deformation modeling of surrounding rock during full face excavation of tunnel in karst regions [J]. Journal of Tongji University: National Science, 2004, 32(6): 710-715. (in Chinese))
- [15] 赵明阶, 刘绪华. 隧道顶部岩溶对围岩稳定性影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 445-449. (ZHAO Ming jie, LIU Xu hua. Numerical analysis of influence of karst caves in top of tunnel on stability of surrounding rock masses [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 445-449. (in Chinese))
- [16] 王勇, 乔春生, 孙彩虹等. 基于 SVM 的溶洞顶板安全厚度智能预测模型[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 1000-1004. (WANG Yong, QIAO Chun sheng, SUN Cai hong. Forecasting model of safe thickness for roof of karst cave tunnel based on support vector machines [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6): 1000-1004. (in Chinese))
- [17] 王琪. 近接溶洞对隧道围岩稳定性影响及防治措施研究[D]. 西安: 长安大学, 2014. (WANG Qi. The study on stability and control measures of tunnel surrounding rock by the nearby karst cave [D]. Xi'an: chang'an university, 2014. (in Chinese))

(上接第 149 页)

- [8] 陈铁林, 陈生水, 章为民, 等. 折减吸力在非饱和土土压力和膨胀量计算中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S2): 3341-3348. (CHEN Tie lin, CHEN Sheng shui, ZHANG Weimin, et al. Application of reduced suction to earth pressure calculation of unsaturated soils and swell increment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3341-3348. (in Chinese))
- [9] 姚攀峰, 张明, 张振刚, 等. 非饱和土土力学工程应用方法[J]. 工程地质学报, 2005, 13(3): 346-352. (YAO Pan feng, ZHANG Ming, ZHANG Zheng ang, QI Shi er gwen. Implementation method of the unsaturated soil mechanics in engineering [J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(3): 346-352. (in Chinese))
- [10] 姚攀峰, 张明, 刘晓春, 等. 北京地区非饱和土土压力初步研究[J]. 建筑结构, 2005, 35(5): 57-59. (YAO Pan feng, ZHANG Ming, LIU Xiao chun, et al. Research on unsaturated soils earth pressure in Beijing [J]. Building structure, 2005, 35(5): 57-59. (in Chinese))
- [11] 赵均海, 梁文彪, 张常光, 等. 非饱和土土库仑主动土压力统一解[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 609-614. (ZHAO Jun hai, LIANG Wen biao, ZHANG Chang guang, et al. Unified solution of Coulomb's active earth pressure for unsaturated soils. [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 609-614. (in Chinese))
- [12] 朱志铎, 刘松玉. 非饱和和膨胀土的主动土压力分析[J]. 公路交通科技, 2001, 18(5): 8-10. (ZHU Zhi duo, LIU Song yu. Analysis of active earth pressure of unsaturated expansive soil [J]. Journal of Highway and Transportation, 2001, 18(5): 8-10. (in Chinese))
- [13] 胡晓军. 基于库仑理论的非饱和膨胀土主动土压力计算[J]. 路基工程, 2006(4): 73-76. (HU Xiao jun. Active earth pressure calculation of unsaturated expansive soil based on Coulomb theory [J]. Subgrade engineering, 2006(4): 73-76. (in Chinese))
- [14] 韩华强, 陈生水, 郑澄锋. 非饱和和膨胀土强度及变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1872-1876. (HAN Hua qiang, CHEN Sheng shui, ZHENG Cheng feng. Experimental study on strength and deformation of unsaturated expansive soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1872-1876. (in Chinese))
- [15] 徐永福, 刘松玉. 非饱和土强度理论及其工程应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 1999: 11. (XU Yong fu, LIU Song yu. Strength theory of unsaturated soils and its engineering application [M]. Nanjing: Southeast University Press, 1999: 11. (in Chinese))