

# 顶部存在隐伏溶洞的深埋隧道安全系数研究

王作伟, 欧阳愨

(长沙市中等城乡建设职业技术学校, 湖南 长沙 410126)

**摘要:** 目前, 大多数岩溶隧道围岩稳定性研究是基于 Mohr—Coloumb 线性破坏准则进行的, 而 Mohr—Coloumb 破坏准则并不能较好地体现岩体的非线性破坏特征。文中利用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 模拟岩溶地区深埋隧道的开挖过程, 调用 Hoek—Brown 本构模型, 得到 Hoek—Brown 非线性破坏准则作用下岩溶隧道围岩安全系数的数值解, 并对不同参数作用下围岩安全系数的变化规律进行分析。结果表明, 顶部存在隐伏溶洞的深埋隧道围岩安全系数随隧道支护力、围岩抗压强度、地质强度指标  $GSI$  及  $m_i$  的增大而增大, 随溶腔压力的增大而减小。

**关键词:** 隧道; 隐伏溶洞; Hoek—Brown 非线性破坏准则; 安全系数; 数值模拟

中图分类号: U458

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)03-0144-05

山岭隧道大都采用钻爆法施工, 若溶洞距离隧道过近, 在爆破冲击波作用下溶洞与隧道之间的中夹岩层极易发生垮塌。因此, 围岩稳定性研究对于保障岩溶地区隧道施工安全意义重大。目前, 岩溶隧道围岩稳定性研究主要集中在数值分析和理论分析两方面。范占锋通过数值模拟对比分析了隧道正上方和侧上方存在溶洞对隧道围岩的影响, 得到了不同情况下岩墙安全厚度, 认为侧上方存在充水溶洞对围岩稳定性的影响更大。方建勤等利用有限元软件对比分析了隧道顶部有无溶洞对隧道围岩的影响, 认为若隧道顶部离溶洞较近, 则开挖可能造成隧道顶板断裂破坏。赵明阶等通过模型试验研究了不同大小溶洞对隧道围岩稳定性的影响, 得到了溶洞尺寸变化时围岩应力和变形的分布规律。吴贤国等基于模糊物元理论, 提出了评价岩溶隧道开挖中围岩稳定性的方法。郑颖人等基于有限元强度折减法对隧洞的拉裂破坏进行分析, 认为当隧洞拉裂破坏时安全系数等于折减系数。何新亮采用强度折减法与有限差分法, 结合摩尔—库仑本构模型, 通过对隧道围岩抗剪强度指标进行折减, 获得了极限状态下隧道围岩的安全系数。乔金丽等将强度折减法运用于盾构隧道开挖面稳定性分析, 定义了盾构隧道开挖面稳定安全系数的概念。

目前隧道围岩稳定性研究大都基于 Mohr—Coloumb 破坏准则, 但在深埋隧道的工程问题分析中采用 Hoek—Brown 破坏准则更适合。该文构建顶部存在隐伏溶洞的深埋隧道模型, 基于强度折减法和 Hoek—Brown 破坏准则, 计算岩溶隧道围岩

安全系数, 通过分析极限状态下隧道顶部围岩的最大剪切应变增量确定隧道开挖诱发顶部围岩塌落破坏的范围, 为岩溶隧道围岩稳定性评估提供参考。

## 1 顶部存在隐伏溶洞的深埋隧道围岩安全系数计算

### 1.1 基于强度折减法的安全系数计算

1980 年 Hoek、Brown 在理论和大量实验的基础上提出 Hoek—Brown 非线性破坏准则, 该准则能准确评估各种岩体的强度, 被广泛应用于各种岩质基础的稳定性研究。安全系数是一种可对岩土构筑物稳定性进行评估的有效指标, 在边坡稳定性研究中得到广泛应用。鉴于安全系数可对土工构筑物的稳定性进行量化, 隧道工程中也开始应用这一指标对围岩的稳定性进行评估。

但由于 Hoek—Brown 破坏准则中用于评估强度的参数较多, 目前对于采用哪些参数进行折减更能体现岩体破坏特征等问题尚有争议。因此, 在采用强度折减法计算 Hoek—Brown 破坏准则作用下围岩安全系数时, 先将 Hoek—Brown 破坏准则中的参数等效转换为 Mohr—Coloumb 准则中的粘聚力和内摩擦角, 再进行折减。参数等效转换过程如下:

(1) 利用 Hoek—Brown 破坏准则的参数求  $\sigma_c^{ucs}$  和  $N_{\varphi c}$ ,  $\sigma_3 \geq 0$  时按式(1)、式(2)计算,  $\sigma_3 < 0$  时按式(3)~(5)计算。

$$N_{\varphi c} = 1 + am_b \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{a-1} \quad (1)$$

$$\sigma_c^{\text{ucs}} = \sigma_3 (1 - N_{\sigma_c}) + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_1} + s \right)^a \quad (2)$$

$$N_{\sigma_c} = 1 + a m_b (s)^{a-1} \quad (3)$$

$$\sigma_c^{\text{ucs}} = \sigma_{ci} (s)^a \quad (4)$$

$$\tau = \sigma' \tan \varphi_c + c_c \quad (5)$$

式中:  $a$  为反映岩体特性的参数;  $m_b$  为无量纲的经验常数;  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  分别为岩体达到极限状态时的最大、最小有效主应力;  $\sigma_{ci}$  为岩体的单轴抗压强度。

(2) 由  $\sigma_c^{\text{ucs}}$ 、 $N_{\sigma_c}$  按下式计算粘聚力和内摩擦角:

$$c_c = \frac{\sigma_c^{\text{ucs}}}{2\sqrt{N_{\sigma_c}}} \quad (6)$$

$$\varphi_c = 2 \tan^{-1} \sqrt{N_{\sigma_c}} - 90^\circ \quad (7)$$

(3) 将 Hoek-Brown 破坏准则的参数等效转换为粘聚力和内摩擦角后, 根据强度折减法原理将等效粘聚力和内摩擦角进行折减直至计算收敛, 此时得到的折减系数即为隧道围岩的安全系数。

## 1.2 顶部存在隐伏溶洞的深埋隧道数值模型

### 1.2.1 构建模型

先采用 MIDAS GTS NX 软件建模并划分网格, 再将模型导入 FLAC<sup>3D</sup> 中进行后处理。模型的长、宽、纵深分别为 80、80 和 3 m。坐标原点位于隧道底部中心点, 埋深  $H$  为 60 m, 隧道半径  $d_1$  为 7.37 m, 溶洞半径  $d_2$  为 3 m, 溶洞中心到隧道底部间距  $h$  为 14 m, 隧道底部到模型底部为 20 m。为在保证计算精度的前提下提高计算效率, 溶洞与隧道之间的中夹岩层采用加密网格, 其他区域采用较稀疏的网格(见图 1)。

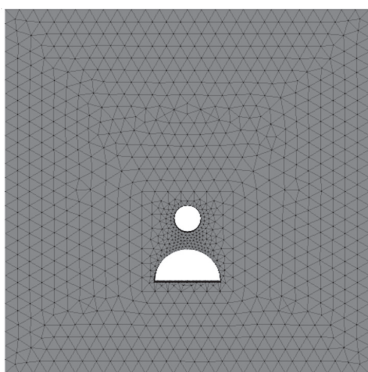


图 1 岩溶隧道整体模型

### 1.2.2 参数选取

模拟过程中调用软件中自带的 Hoek-Brown 破坏准则, 该准则的表达式如下:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (8)$$

$$m_b = m_i \exp \left( \frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (9)$$

$$s = \exp \left( \frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (10)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (11)$$

式中:  $m_i$  为反映岩体完整程度的参数;  $GSI$  为地质强度指标;  $D$  为扰动系数。

各参数的取值见表 1。

表 1 初始参数的取值

参数名称	参数值	参数名称	参数值
$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	22	$D$	0
$\sigma_{ci} / \text{MPa}$	3	$a$	0.5
$GSI$	50	$m_i$	3

### 1.3 数值计算过程

采用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 进行安全系数计算, 模型左右边界施加水平约束, 模型底部施加竖向约束, 前后边界施加轴向约束。计算中调用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 中的 Hoek-Brown 本构模型, 将 Hoek-Brown 破坏准则中的各参数赋值给模型, 在模型达到初始应力平衡状态后模拟隧道开挖; 在隧道和溶洞表面施加环向均布力模拟隧道支护力和溶洞溶腔压力, 最后利用 solve fos 命令求解围岩的安全系数。

## 2 数值模拟结果分析

在不改变其他初始参数的情况下, 计算单一参数变化下隧道围岩安全系数, 分析不同参数对围岩安全系数和隧道拱顶围岩剪切破坏范围的影响。

### 2.1 隧道支护力 $q$ 对安全系数的影响

初始参数如下: 隧道半径  $d_1 = 7.37$  m, 溶洞半径  $d_2 = 3$  m, 溶洞中心到隧道底部间距  $h = 14$  m, 扰动系数  $D = 0$ , 地质强度指标  $GSI = 50$ , Hoek-Brown 破坏准则参数  $m_i = 3$ , 围岩抗压强度  $\sigma_{ci} = 3$  MPa, 容重  $\gamma = 22$  kN/m<sup>3</sup>, 溶腔压力  $T = 100$  kPa。支护力  $q$  分别为 50、100、150、200、250、300 kPa 时隧道围岩安全系数的变化见图 2。在计算隧道围岩安全系数的过程中, 当计算收敛时, 分析围岩最大剪切应变增量可得到极限状态下由于隧道开挖诱发的围岩塌方破坏范围。图 3 为支护力  $q$  为 50、300 kPa 时隧道围岩的最大剪切应变增量云图。

从图 2、图 3 可看出: 在其他参数不变的情况

下,围岩安全系数随着支护力的增大而增大。隧道与溶洞之间的中夹岩层出现由较大剪切应变增量构成的剪切破坏带,表明围岩在该剪切破坏带所示范围内产生了剪切破坏;剪切破坏带可反映隧道顶部围岩的塌落破坏范围,顶部存在隐伏溶洞的深埋隧道在开挖扰动的影响下,拱顶围岩塌方范围随支护力的增大而减小。

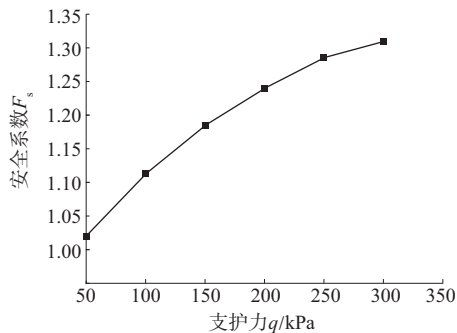


图2 不同支护力  $q$  作用下围岩安全系数

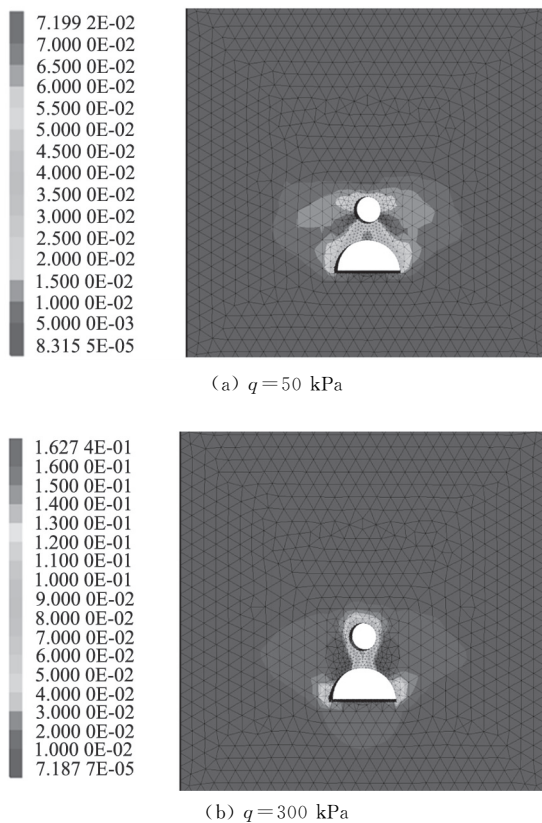


图3 支护力  $q$  为 50、300 kPa 时围岩的最大剪切应变增量云图

## 2.2 溶腔压力 $T$ 对安全系数的影响

初始参数如下:  $d_1 = 7.37 \text{ m}$ ,  $d_2 = 3 \text{ m}$ ,  $h = 14 \text{ m}$ ,  $D = 0$ ,  $GSI = 50$ ,  $m_i = 3$ ,  $\sigma_{ci} = 3 \text{ MPa}$ ,  $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$ ,  $q = 200 \text{ kPa}$ 。溶腔压力  $T$  分别为 100、300、500、

700、900 kPa 时隧道围岩的安全系数的变化见图 4,  $T$  为 100、900 kPa 时隧道围岩的最大剪切应变增量云图见图 5。

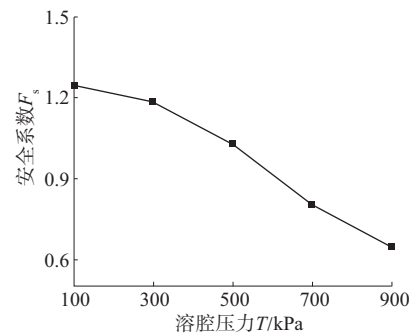


图4 不同溶腔压力  $T$  作用下围岩安全系数

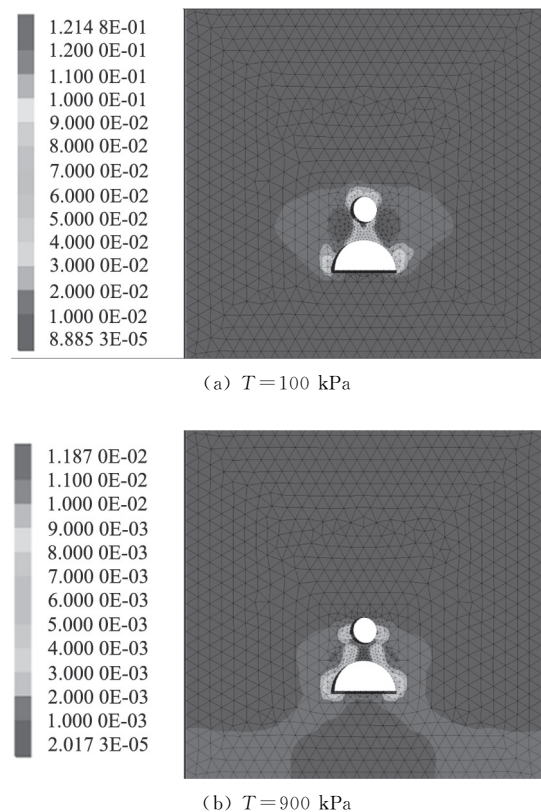


图5 溶腔压力  $T$  为 100、900 kPa 时围岩的最大剪切应变增量云图

从图 4、图 5 可看出:在其他参数不变的情况下,围岩安全系数随溶腔压力的增大而减小,拱顶围岩塌方范围随顶部溶洞溶腔压力的增大而增大。

## 2.3 $m_i$ 对安全系数的影响

初始参数如下:  $d_1 = 7.37 \text{ m}$ ,  $d_2 = 3 \text{ m}$ ,  $h = 14 \text{ m}$ ,  $\sigma_{ci} = 3 \text{ MPa}$ ,  $D = 0$ ,  $GSI = 50$ ,  $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$ ,  $q = 200 \text{ Pa}$ ,  $T = 100 \text{ Pa}$ 。  $m_i$  分别为 1、5、10、15、20 和 25 时隧道围岩安全系数的变化见图 6,  $m_i$  为 1、25 时隧



道围岩的最大剪切应变增量云图见图 7。

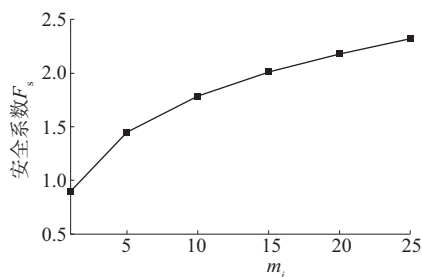


图 6 不同  $m_i$  作用下围岩安全系数

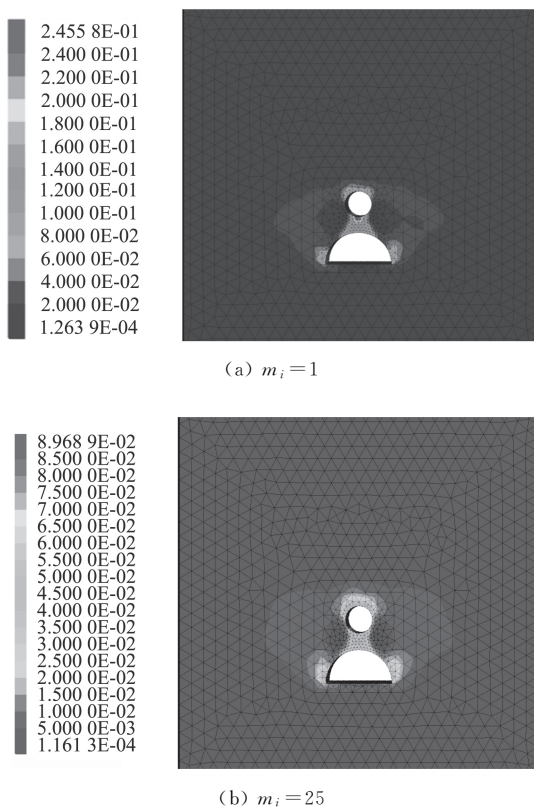


图 7  $m_i$  为 1 和 25 时围岩的最大剪切应变增量云图

从图 6、图 7 可看出:在其他参数不变的情况下,围岩安全系数随着  $m_i$  的增大而增大,隧道顶部围岩塌落破坏范围随  $m_i$  的增大而减小。

## 2.4 地质强度指标 $GSI$ 对安全系数的影响

初始参数如下: $d_1=7.37$  m,  $d_2=3$  m,  $h=14$  m,  $\sigma_{ci}=3$  MPa,  $D=0$ ,  $m_i=3$ ,  $\gamma=22$  kN/m<sup>3</sup>,  $T=100$  kPa,  $q=200$  kPa。  $GSI$  分别为 30、35、40、45 和 50 时围岩安全系数的变化见图 8,  $GSI$  为 30、50 时隧道围岩的最大剪切应变增量云图见图 9。

从图 8、图 9 可看出:在其他参数不变的情况下,围岩安全系数随着  $GSI$  的增大而增大,隧道顶部围岩塌落破坏范围随  $GSI$  的增大而减小。

## 2.5 围岩抗压强度 $\sigma_{ci}$ 对安全系数的影响

初始参数如下: $d_1=7.37$  m,  $d_2=3$  m,  $h=14$  m,  $D=0$ ,  $GSI=50$ ,  $m_i=3$ ,  $\gamma=22$  kN/m<sup>3</sup>,  $q=100$  kPa,  $T=200$  kPa。  $\sigma_{ci}$  分别为 1、2、3、4、5 MPa 时围岩安全系数的变化见图 10,  $\sigma_{ci}$  为 1、5 MPa 时隧道围岩的最大剪切应变增量云图见图 11。

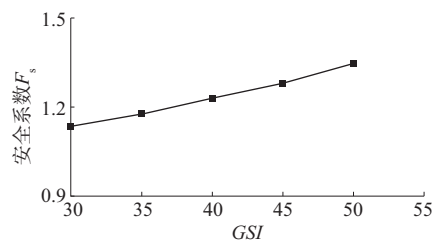


图 8 不同地质强度指标  $GSI$  作用下围岩安全系数

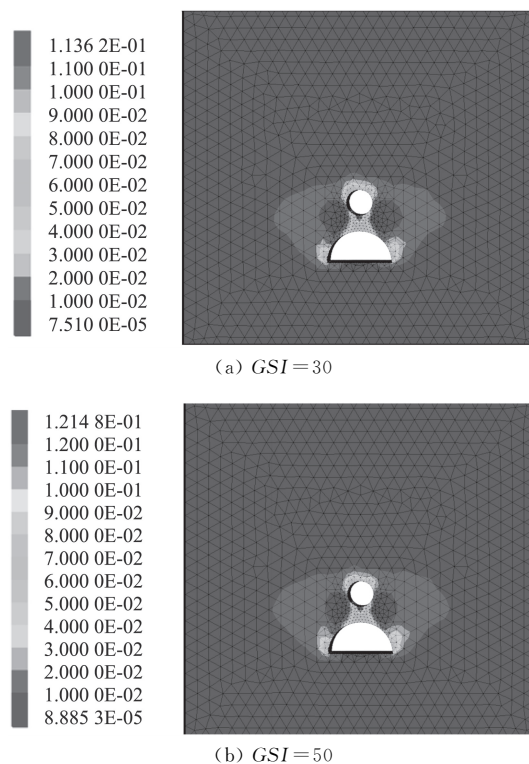


图 9 地质强度指标  $GSI$  为 30 和 50 时围岩的最大剪切应变增量云图

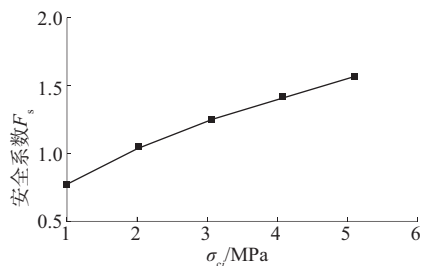


图 10 不同围岩抗压强度  $\sigma_{ci}$  作用下围岩安全系数

从图 10、图 11 可看出:在其他参数不变的情况

下,围岩安全系数随着 $\sigma_{ci}$ 的增大而增大,隧道顶部围岩塌落破坏范围随 $\sigma_{ci}$ 的增大而减小。

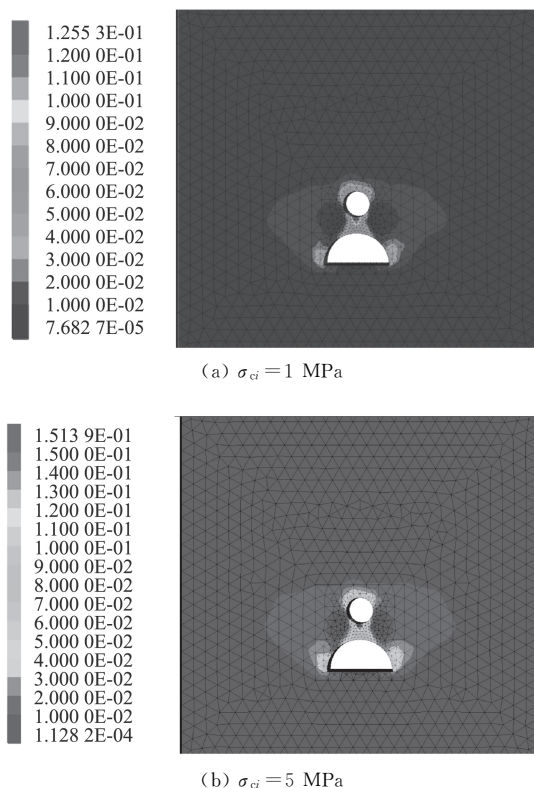


图 11 围岩抗压强度 $\sigma_{ci}$ 为 1、5 MPa 时围岩的最大剪切应变增量云图

### 3 结论

基于 Hoek-Brown 破坏准则和强度折减法,利用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup>模拟岩溶地区深埋隧道的开挖过程,计算顶部存在隐伏溶洞的深埋隧道围岩安全系数,通过对不同参数作用下安全系数的分析,得到以下结论:

(1) 岩溶隧道围岩的安全系数随岩体抗压强度 $\sigma_{ci}$ 、地质强度指标 GSI 和 $m_i$ 的增大而增大。GSI 和 $m_i$ 可有效反映岩体的节理发育情况和节理面粗糙程度,围岩完整性是影响岩溶地区隧道施工安全性的重要因素。

(2) 围岩的安全系数随着支护力 $q$ 的增大而增大,随着溶腔压力 $T$ 的增大而减小。顶部存在隐伏溶洞的深埋隧道开挖时,采用加强式衬砌结构,可有效防治隧道顶部围岩的塌方破坏。

(3) 在隧道开挖扰动的影响下,顶部溶洞与隧道之间的中夹岩层发生剪切破坏,剪切破坏范围随着围岩支护力 $q$ 的增大而减小,随着溶腔压力 $T$ 的

增大而增大。同一参数作用下破坏范围和安全系数的变化趋势相反,说明隐伏溶洞诱发隧道顶部围岩塌落破坏是造成隧道安全系数下降的主要原因。

### 参考文献:

- [1] 谭代明,漆泰岳,莫阳春.侧部岩溶隧道围岩稳定性数值分析与研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增刊 2).
- [2] 范占锋.隧道上部充水溶洞对围岩稳定性影响的数值模拟[J].公路交通科技,2014,31(5).
- [3] 方建勤,胡居义.岩溶地质对隧道施工稳定性的影响评价[J].矿业研究与开发,2010,30(1).
- [4] 赵明阶,敖建华,刘绪华,等.岩溶尺寸对隧道围岩稳定性影响的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(2).
- [5] 吴贤国,王洪涛,何云.基于模糊物元的岩溶隧道开挖稳定性评价[J].中国安全科学学报,2018,28(1).
- [6] 郑颖人,邱陈瑜,张红,等.关于土体隧洞围岩稳定性分析方法的探索[J].岩石力学与工程学报,2008,27(10).
- [7] 何新亮.基于强度折减法的隧道围岩自稳能力研究[D].长沙:湖南大学,2013.
- [8] 乔金丽,张义同,高健,等.强度折减法在盾构隧道开挖面稳定性分析中的应用[J].天津大学学报,2010,43(1).
- [9] 王读写.基于 Hoek-Brown 破坏准则的深埋隧道塌方上限分析与预警标准研究[D].长沙:中南大学,2013.
- [10] 孙超伟,柴军瑞,许增光,等.基于 Hoek-Brown 强度折减法的边坡稳定性图表法研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(4).
- [11] 孙潇吴,缪林昌,林海山.不同埋深盾构隧道开挖面稳定问题数值模拟[J].东南大学学报:自然科学版,2017,47(1).
- [12] 韩龙强,吴顺川,李志鹏.基于 Hoek-Brown 准则的非等比强度折减方法[J].岩土力学,2016,37(增刊 2).
- [13] 任俊,陈曦,王冬勇.基于 Hoek-Brown 准则的强度折减法及进展[J].防灾减灾工程学报,2016,36(4).
- [14] 刘佳祥,胡谋鹏,陈文备,等.广义 Hoek-Brown 准则在强度折减法中的应用实现[J].地下空间与工程学报,2016,12(增刊 1).
- [15] 杨小礼,王小明,睦志荣.基于 Hoek-Brown 屈服准则的隧道围岩稳定性分析[J].铁道科学与工程学报,2008,5(5).
- [16] 陈国庆,黄润秋,石豫川,等.基于动态和整体强度折减法的边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2014,33(2).
- [17] 翁敬良.基于改进广义 Hoek-Brown 准则岩质边坡稳定性分析强度折减法[D].长沙:湖南大学,2010.
- [18] 余永强,梁严午,褚怀保,等.MIDAS GTS NX 与 FLAC<sup>3D</sup>模型转换方法及应用[J].河南理工大学学报:自然科学版,2018,37(5).

收稿日期:2019-08-03