

文章编号: 1000-5013(2012)05-0557-04

# 隧道洞口土体塌方的可靠度分析

黄志波, 林从谋, 陈莹, 付旭, 邓成豪

(华侨大学 岩土工程研究所, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 在考虑土体抗剪强度参数变异性及相关性的基础上, 运用可靠度理论分析洞顶松散土体的塌方概率. 根据简化模型推导土体发生某种破坏时的安全余量, 计算土体发生塌方的概率值. 分析土体抗剪强度参数的变异性及相关性、初期支护对土体塌方概率的影响, 有利于对土体的认识和评价, 对可能采取的加固措施提供科学依据. 工程实例的计算结果表明, 可以通过增减初期支护的作用来调整塌方概率.

**关键词:** 隧道; 塌方; 可靠度理论; 力学模型; 抗剪强度

**中图分类号:** TU 443

**文献标志码:** A

山岭隧道进出洞口由于隧道与边坡的相互作用极易诱发塌方. 塌方不仅延误工期, 而且威胁施工人员生命安全, 如何预知隧道塌方一直是隧道工程的一个重点研究课题. 基于监控量测数据建立隧道变形预测模型来预测隧道塌方取得较多的研究成果<sup>[1-3]</sup>, 而采用可靠度理论分析并建立相应计算模型来预测隧道塌方的成果较少. 祁长青等<sup>[4]</sup>利用可靠度理论建立隧道围岩变形计算模型, 通过遗传算获得围岩的最终变形值. 李志华等<sup>[5-6]</sup>对隧道初期支护结构可靠度计算方法进行研究, 对深埋隧道空间结构体系可靠度进行分析. 苏永华等<sup>[7]</sup>提出锚喷支护隧道结构稳定可靠度的计算方法, 分析公路隧道结构的稳定可靠度. 本文在考虑土体抗剪强度参数变异性及相关性的基础上, 根据简化的计算模型, 采用可靠度理论计算洞顶松散土体塌方的概率值.

## 1 概率分析

### 1.1 模型简化及基本假设

对山岭隧道出洞口的工程地质模型进行简化, 建立力学模型, 如图 1 所示<sup>[8]</sup>, 并作如下 2 点假设.

1) 隧道出洞口所处坡体有两层不同的岩土层组成, 上层为松散破碎岩土体, 下层为相对完整的基岩层. 把岩土层看作松散体, 不考虑岩体结构面的影响.

2) 假设塌方发生时, 滑动面是铅直的, 即隧道开挖至松散破碎岩土层后, 在洞室顶部出现垂直滑动面 AD 与 BC 并延伸至地表.

### 1.2 安全余量的均值与标准差

在 ABCD 所包围的松散体中切取厚度为  $dz$  的薄层单元, 对其进行受力分析, 如图 2 所示. 由图 2 可知: 当滑面上的摩擦力与初期支护力的合力无法克服重力的影响时, 便发生塌方, 则土体发生破坏时的安全余量为

$$SM = R - S = \int_0^{z_1} dF + \int_0^{z_2} dF + T - \left( \int_0^{z_2} rs dz + \frac{1}{2} \int_{z_2}^{z_1} rs dz \right). \quad (1)$$

式(1)中:  $Z_1$  和  $Z_2$  分别为滑动面 BC 和 AD 的长度;  $dF$  为摩擦力;  $T$  为初期支护力;  $H, r, c, \varphi$  分别为松散土层的厚度、重度、粘聚力和内摩擦角;  $s$  为隧道进入松散层的水平距离.

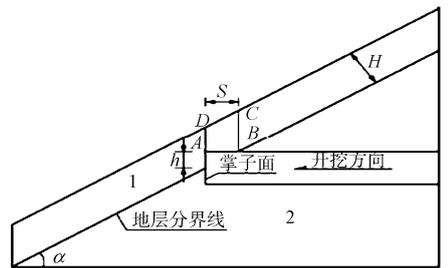


图 1 简化力学模型

Fig. 1 Simplified mechanical model

收稿日期: 2011-11-27

通信作者: 林从谋(1957-), 男, 教授, 主要从事隧道与岩土工程设计与施工技术的研究. E-mail: cmlin@hqu.edu.cn.

由库仑定律求得

$$dF = (\sigma_H \tan \varphi + c) dz = (\xi r z f + c) dz. \tag{2}$$

式(2)中:  $\sigma_H$  为水平主应力;  $\xi$  为侧压力系数;  $z$  为地下某点到地表的铅锤距离;  $f = \tan \varphi$ . 由几何关系可得  $z_1 = \frac{H}{\cos \alpha}$ ,  $z_2 = \frac{H}{\cos \alpha} - h$ ,  $h = \text{stan } \alpha$ . 其中:  $\alpha$  为边坡的坡脚;  $h$  为隧道进入松散层的高度.

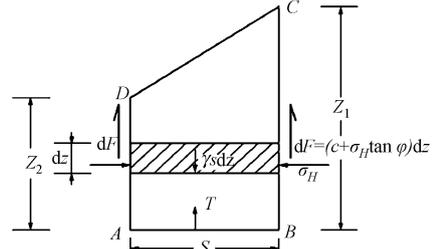


图2 单元受力分析  
Fig. 2 Force analysis of element

将式(2)和几何关系代入式(1), 经化简可得安全余量的均值( $\overline{SM}$ )和标准差( $\sigma_{SM}$ )计算式分别为

$$\overline{SM} = \frac{1}{2} \xi r \bar{f} \frac{H^2}{\cos^2 \alpha} + \frac{\bar{c}H}{\cos \alpha} + \frac{1}{2} \xi r \bar{f} \left( \frac{H}{\cos \alpha} - \text{stan } \alpha \right)^2 + \bar{c} \left( \frac{H}{\cos \alpha} - \text{stan } \alpha \right) + T - \frac{1}{2} r s \left( \frac{2H}{\cos \alpha} - \text{stan } \alpha \right), \tag{3}$$

$$\sigma_{SM} = \sqrt{\left( \frac{\partial SM}{\partial \varphi} \right)^2 \sigma_\varphi^2 + \left( \frac{\partial SM}{\partial c} \right)^2 \sigma_c^2 + \frac{\partial SM}{\partial \varphi} \frac{\partial SM}{\partial c} \text{cov}(c, \varphi)}. \tag{4}$$

式(4)中:  $\text{cov}(c, \varphi)$  为  $c$  和  $\varphi$  的协方差,  $\text{cov}(c, \varphi) = \rho_{c, \varphi} \sigma_c \sigma_\varphi$ ,  $\sigma_c$  和  $\sigma_\varphi$  分别为  $c$  和  $\varphi$  的标准差;  $\rho_{c, \varphi}$  为  $c$  和  $\varphi$  的相关系数.

### 1.3 概率模式

可靠指标( $\beta$ )和塌方概率( $p_f$ )的表达式分别为

$$\beta = \overline{SM} / \sigma_{SM}, \quad p_f = 1 - \varphi(\beta). \tag{5}$$

式(5)中:  $\varphi(\beta)$  为标准正态分布的累积函数.

### 1.4 内聚力和内摩擦角的概率特性

内聚力( $c$ )和内摩擦角( $\varphi$ )均为正态分布, 内聚力的变异系数为 0.19~0.49, 内摩擦角的变异系数为 0.06~0.46, 若考虑土性自相关性, 变异系数应小于以上统计值<sup>[9]</sup>. 土粘聚力和内摩擦角的互相关性, 土的内聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  呈负相关, 负相关系数通常为 -0.3~-0.7<sup>[9]</sup>.

## 2 算例

基于 Matlab 编制相应的计算机程序来计算洞顶松散土体塌方的概率, 采用可靠度理论, 计算马鞍山隧道出洞口塌方的概率. 根据工程地质勘察报告和现场勘测, 得到各项计算参数<sup>[8]</sup>: 坡角  $\alpha = 30^\circ$ , 上覆松散层厚度  $H = 10$  m, 粘聚力  $c = 20$  kPa(变异系数为 0.34), 内摩擦角  $\varphi = 26^\circ$ (变异系数为 0.26), 相关系数  $\rho_{c, \varphi}$  为 -0.5, 重度  $\gamma = 19$  kN · m<sup>-3</sup>, 侧压力系数  $\xi = 0.38$ , 初期支护力  $T = 0$ .

由于  $h = \text{stan } \alpha$ , 故  $0 \leq s \leq 20$ . 将各参数输入基于 Matlab 编制的计算机程序, 计算  $0 \leq s \leq 20$  范围内洞顶松散土体的塌方概率值, 结果如表 1 所示.

表1 塌方概率值  
Tab. 1 Probability values of collapse

$s/m$	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
$p/\%$	0	0	0.01	0.06	0.43	2.31	8.74	23.73	47.26	71.94	89.15	97.07	99.46	99.93	99.99	100.00

文献[1]的预测结果表明: 当隧道进入松散层的水平距离  $s = 4.05$  m(K97+584.05)时会发生塌方, 而实际塌方的位置为 K97+584.50. 由表 1 可知: 当  $s = 4$  m(K97+584.00)时, 塌方概率  $p$  为 47.26%; 而当  $s = 5$  m(K97+585.00)时, 塌方概率  $p$  为 89.15%, 此时出现塌方的可能性非常大.

## 3 影响参数灵敏度分析

### 3.1 塌方概率对 $c$ 和 $\varphi$ 值敏感度的影响

采用文献[8]中  $c$  和  $\varphi$  值作为它们的均值, 根据前人的研究成果确定  $c$  和  $\varphi$  各自的变异系数及它们的相关系数, 导致  $c$  和  $\varphi$  的概率参数可能与现场存在一定的偏差, 影响塌方概率计算的精确度, 为此需要研究塌方概率对  $c$  和  $\varphi$  值敏感度. 偏导值的大小反映了敏感性的大小. 将安全余量分别对变量  $c$  和  $\varphi$

求偏导, 如图 3 所示.

由图 3 可知: 土内摩擦角  $\varphi$  比粘聚力  $c$  对隧道出口洞顶松散土体的塌方概率  $p$  的影响大, 且  $\partial SM/\partial \varphi$  和  $\partial SM/\partial c$  的值均随隧道进入松散层的水平距离  $s$  的增大而减小. 可见随着隧道进入松散层的水平距离  $s$  的增大, 土内摩擦角  $\varphi$  和粘聚力  $c$  对隧道出口洞顶松散土体塌方的概率  $p$  的影响程度有降低的趋势.

另外, 考虑  $c$  和  $\varphi$  的相关系数 ( $\rho_{c,\varphi}$ ) 是否也将影响塌方概率计算的精确度.  $c$  和  $\varphi$  的相关系数  $\rho_{c,\varphi}$ ,  $s$  和  $P$  的关系, 如图 4 所示. 由图 4 可知: 考虑土体  $c$  和  $\varphi$  的相关系数时, 土体塌方的概率值比未考虑时小 2%~3%.

当  $c$  和  $\varphi$  的变异系数  $V_c$  和  $V_\varphi$  变化时, 塌方概率  $p$  发生相应变化. 当隧道进入松散层的水平距离  $s=4$  m 时,  $V_c, V_\varphi$  与塌方概率  $p$  之间的关系, 如图 5 所示. 由图 5 可知: 塌方概率  $p$  随  $V_c, V_\varphi$  的增大而增大, 且  $V_c$  和  $V_\varphi$  对塌方概率的影响程度相近.

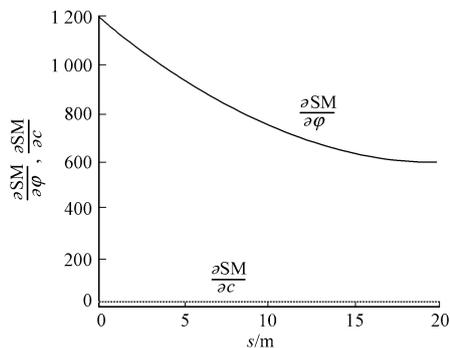


图 3 安全余量对参数的偏导值  
Fig. 3 Partial derivative of safety margins to parameters

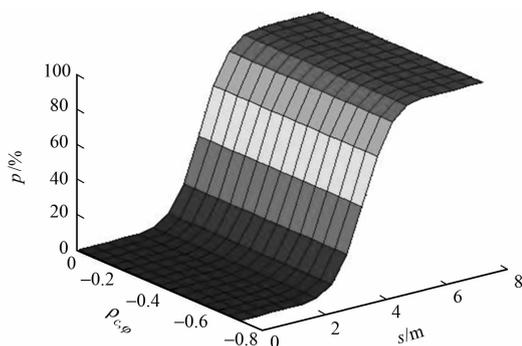


图 4  $\rho_{c,\varphi}$  与  $s$  和  $p$  的关系图

Fig. 4 Relationship among  $c$ ,  $\varphi$ 's and  $\rho_{c,\varphi}$

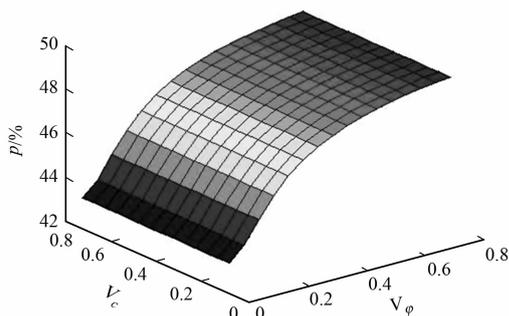


图 5  $V_c$  和  $V_\varphi$  及  $p$  的关系图

Fig. 5 Relationship of  $V_c, V_\varphi$  and  $p$

### 3.2 初期支护作用对塌方概率的影响

与文献[8]相同, 文中未考虑隧道已开挖断面的初期支撑作用, 即  $T=0$ , 导致当  $s \geq 5$  m 时, 塌方概率  $p$  接近 100%. 可见进行洞顶松散土体塌方的概率计算时初期支撑作用是不可忽略的, 这也符合实际情况. 假定隧道每次开挖深度为 2 m, 且开挖后及时进行初期支护, 初期支护力  $T=100 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ , 其他计算参数与上述相同, 重新计算  $0 \leq s \leq 20$  范围内洞顶松散土体的塌方概率, 其计算结果如图 6 所示.

由图 6 可知: 考虑初期支撑作用下, 当隧道进入松散层的水平距离  $s$ , 即在  $0 \leq s \leq 13.5$  范围内,  $p$  随着  $s$  的增加而增加, 且在  $s=13.5$  m 达到最大值 98.53%; 在  $13.5 < s \leq 20$  范围内,  $p$  随着  $s$  的增加而减小. 同时, 当  $s$  相同时, 考虑初期支撑作用情况下的塌方概率总体上明显小于未考虑初期支护作用情况下的, 故可以通过加强初期支持的支护作用来减小塌方概率.

为了解土体塌方概率对初期支护  $T$  的敏感度, 计算 SM 对  $T$  的偏导值, 结果如表 2 所示. 由表 2 可知:  $\partial SM/\partial T$  随着隧道进入松散层的水平距离  $s$  的增大而增大. 可见随着随隧道进入松散层的水平距离  $s$  的增大, 初期支护  $T$  对隧道出口洞顶松散土体塌方的概率  $p$  的影响程度有升高的趋势.

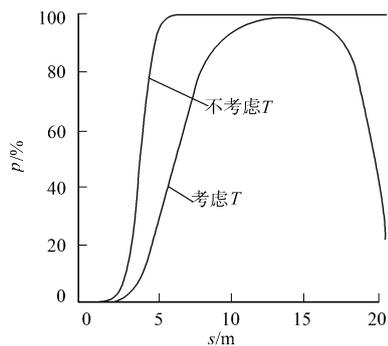


图 6 塌方概率曲线

Fig. 6 Curves of the collapse probability

表 2 SM 对  $T$  的偏导值

Tab. 2 Partial derivative value of SM to  $T$

S	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\partial SM/\partial T$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

## 4 结论

1) 洞顶松散土体塌方的概率计算能定量地给出土体塌方的概率,有利于对土体的认识和评价,对可能采取的加固措施提供科学依据.

2) 土的内摩擦角比粘聚力对洞顶松散土体的塌方概率  $p$  的影响大,且随着隧道进入顶部松散层的水平距离  $s$  的增大,对  $p$  的影响程度有降低的趋势;内摩擦角和粘聚力的变异系数对洞顶松散土体塌方概率的影响程度相近.可见,不同参数对土体塌方概率的影响不同,故对关键参数的取值要格外慎重.

3) 进行洞顶松散土体塌方概率计算时,应考虑考初期支护的作用.计算洞顶松散土体的塌方概率,可以预知某处的塌方概率,考虑是否通过增减初期支护的作用来调整塌方概率,以此来指导施工.

### 参考文献:

- [1] 吴益平,李亚伟.灰色-进化神经网络模型在深埋隧道围岩变形预测中的应用[J].岩土力学,2008,29(增刊1):263-266.
- [2] 赵洪波.支持向量机在隧道围岩变形预测中的应用[J].岩石力学与工程学报,2005,24(4):650-653.
- [3] 李元松,李新平,张成良.基于BP网络的隧道围岩位移预测方法[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增刊1):2969-2973.
- [4] 祁长青,许人平,吴继敏,等.基于遗传算法的隧道围岩变形稳定可靠性分[J].工程地质学报,2008,16(2):258-262.
- [5] 李志华,康海贵.隧道初期支护结构可靠度计算方法研究[J].武汉理工大学学报,2009,31(10):63-67.
- [6] 李志华,孙秀丽,华渊.深埋隧道空间结构体系可靠度分析[J].土木建筑与环境工程,2010,32(2):40-45.
- [7] 苏永华,李翔,徐能雄,等.锚喷衬砌隧道结构稳定可靠度计算[J].土木工程学报,2011,44(3):113-118.
- [8] 王迎超,尚岳全,徐兴华,等.隧道出洞口松散围岩塌方时空预测研究[J].岩土工程学报,2010,32(12):1868-1874.
- [9] 常方强.加筋土挡土墙的可靠性分析及决策研究[D].泉州:华侨大学,2006.

## Analysis of the Soil Collapse Reliability at the Tunnel Entrance

HUANG Zhi-bo, LIN Cong-mou, CHEN Ying,  
FU Xu, DENG Cheng-hao

(Research Institute of Geotechnical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Considering the parameters variability and correlation between shear strength parameters of soil, the collapse Reliability of soil at the top of tunnel was analyzed by the theory of reliability. According to the simplified model, the safety margin of soil was deduced, and the collapse Reliability of soil was calculated. It is beneficial to understand and evaluate the soil by analyzing the parameters' variability, correlation of shear strength of soil and the influence of initial support to soil collapse, which can provide scientific basis to consolidate support measures. According to the calculated result of actual engineering, increasing or decreasing the function of initial support can be used to adjust the probability of collapse.

**Keywords:** tunnel; collapse; reliability; mechanical model; shear strength

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)