

十白高速公路泰山沟隧道进口边坡稳定性 及其破坏概率分析

周大华¹, 罗红明², 邹从义¹, 潘欣¹, 胡明佳¹, 左光恒¹

(1. 湖北省十白高速公路建设指挥部, 湖北 十堰 442000; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 十堰至白河高速公路泰山沟隧道进口边坡的稳定性对公路建设和运营的安全尤为重要。本文在分析泰山沟隧道进口边坡的工程地质特征及其破坏模式的基础上, 采用概率分析方法对泰山沟隧道进口边坡的稳定性及其破坏概率进行了计算与分析。结果表明: 边坡稳定性计算显示泰山沟隧道进口边坡在正常工况下处于稳定状态, 具有一定的安全储备, 但在非正常工况 I 条件下处于基本稳定性状态, 在极不利工况条件下处于极限平衡状态; 边坡破坏概率计算显示泰山沟隧道进口边坡在正常工况条件下存在低危险性, 在非正常工况 I 条件下存在中等危险性, 在极不利工况条件下存在高危险性; 两种分析结果一致, 同时说明泰山沟进口边坡在非正常工况 I 条件下的安全储备不高, 需要对其进行加固处理, 以为公路安全运营提供保障。

关键词: 边坡; 破坏模式; 破坏概率; 稳定性评价; 泰山沟隧道

中图分类号: X93; U452.1⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1671-1556(2013)05-0113-05

Stability and Failure Probability Analysis of the Entrance Slope in Taishangou Tunnel

ZHOU Da-hua¹, LUO Hong-ming², ZOU Cong-yi¹, PAN Xin¹, HU Ming-jia¹, ZUO Guang-heng¹

(1. Hubei Province Shibai Expressway Construction Command, Shiyan 442000, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering,

Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China)

Abstract: The stability of the entrance slope in Taishangou Tunnel, which is in the road between Shiyan and Baihe, is an inevitable issue and it is important to carry out the stability evaluation of the slope. Based on the engineering geology characteristics and failure mode of the slope, this paper calculates the stability and failure probability of the slope by comprehensive analysis methods. The results show that the slope is stable under normal operating conditions, it is in a basically stable state under abnormal operating condition I, and it is in a critical state under extremely adverse operating conditions. Meanwhile the calculation results show that the slope is in a low-risk state under normal operating conditions, it is in a medium-risk state under abnormal operating condition I, and it is in a high-risk state under extremely adverse operating conditions. The two analytical results are consistent and they indicate that it is important to reinforce the slope under abnormal operating condition I so as to provide guarantee for highway safety operation.

Key words: slope; failure mode; failure probability; stability evaluation; Taishangou Tunnel

收稿日期: 2012-04-19 修回日期: 2013-08-12

基金项目: 湖北省交通科技项目《环境变化与工程活动条件下滑坡体演化特征及其防治技术研究》资助

作者简介: 周大华(1964—), 男, 高级工程师, 主要从事公路工程方面的研究。E-mail: 79549437@qq.com

0 引言

随着山区公路的日益增多,遇到的边坡稳定性问题也越来越突出,边坡稳定性分析已成为岩土工程中的重要研究课题。目前在岩土工程设计中常用的稳定性分析方法是数学-力学模型为基础发展起来的一种确定性计算分析方法,经过长期工程实践已证明是一种有效的分析方法。但在某些工程设计中,按此法计算是安全的,实际中却发生了破坏,其原因可能复杂多样,但其中很重要的一个因素就是从理论上忽视了计算参数的非确定性^[1]。

人们对地质体属性的了解是随机的,并且一个地质事件的发生又受制于诸多因素的影响,而这是概率问题,称为概率过程。边坡的破坏同样也受到地貌单元形状、坡高、坡型、坡体物质组成、滑动面形态及强度参数、地下水等多种因素的影响,因此在边坡稳定性评价过程中,往往要对以上诸多因素进行综合分析。由于各种参数的随机性及测试误差、地质体的不均匀性、外界因素的随机性以及这些因素对滑坡作用效果的模糊性,人们往往很难准确、客观地对各因素对滑坡的影响效果进行量化判断,因此在边坡的评价过程中引入了概率分析法^[2,3]。为此,本文采用概率分析法通过对十堰至白河高速公路(以下简称十白公路)泰山沟隧道进口边坡的稳定性及其破坏概率进行计算和分析,从而得到了该边坡在各种计算工况条件下的稳定性状态,以为隧道施工和长期运营安全提供指导。

2 边坡稳定性破坏概率分析方法

2.1 概率分析的原理

斜坡稳定性受斜坡体岩土性质、地质构造、岩体结构、地下水分布以及斜坡体外部形态等多种因素控制,其中许多控制因素在不同程度上具有不确定性。为了有效地解决这种不确定性,蒙特卡罗(Monte-Carlo)模拟试验计算方法被引入到斜坡稳定性评价中^[4]。

通常的边坡稳定性计算主要采用沿滑动面上的抗滑力(矩)与滑动力(矩)的比值来衡量,该比值被称之为稳定性系数 F_s 。当 F_s 大于 1 时,边坡体是稳定的;反之,边坡体不稳定。目前边坡稳定性系数的计算方法主要有比肖普法、简布法、推力传递法和圆弧法等^[1~7]。

但由于各种物理模型的不确定、计算参数的随

机性及测试误差、地质体的不均匀性、外界因素变化的随机性等特点,上述影响边坡稳定性系数的各参数从严格意义上来说均是随机变量,因而稳定性系数 F_s 也就成为一个具有一定破坏概率 P_f 的随机分布函数:

$$P_f = P(F_s < 1) = \int_0^1 f(F_s) dF_s \quad (1)$$

其中, $f(F_s)$ 为 F_s 的概率密度函数。

这种随机分布可用 Monte-Carlo 方法基于计算机模拟计算得到边坡的破坏概率^[8~11]:

$$P_f = N_1/N \quad (2)$$

式中: N 为模拟的总次数; N_1 为出现 $F_s \leq 1$ 的次数。

当模拟总次数足够多时,模拟结果就趋于稳定。

2.2 极限状态方程的建立

从滑坡的实际力学分析出发,在原有定值分析计算的基础上,将已经建立的边坡稳定性系数计算公式,根据荷载效应与抗力的关系进行适当的变换,建立基于各种分析方法的极限状态方程^[5]。

2.3 随机变量的选择

在影响边坡稳定的各岩土参数中,对可靠度分析成果影响最大的主要是土体的抗剪强度指标内聚力 c 和内摩擦角 ϕ ,而土体的重度 γ 因其变异系数较小,将其作为常量来处理不会带来过大的误差,因此选取 c 、 ϕ 作为随机变量。

2.4 随机变量的产生

在建立的概率模型中,可能遇到各种不同分布的随机变量,则要求产生对应于该随机变量(或分布)的随机数,称作对该随机变量进行模拟或抽样。通常,抽样方法很多,有反变换法、舍选法、复合法、变换法和查表法等。一般来说,计算机随机模拟是依据参数的分布类型,产生 $[0, 1]$ 区间的均匀分布随机数,再经变换来实现^[6,7]。

对于大多数服从正态分布的参数模拟,采用如下抽样与变换公式:

$$R = \sqrt{-2 \ln R_1} * \cos 2\pi R_2 \quad (3)$$

$$X = \sigma R + \mu \quad (4)$$

式中: R_1 、 R_2 为 $[0, 1]$ 区间的均匀分布随机数; R 为服从标准正态分布 $N(0, 1)$ 的随机变量; X 为服从均值为 μ 、方差为 σ 的正态分布随机变量。

3 泰山沟隧道进口边坡工程地质环境

3.1 边坡工程地质概况

十白公路泰山沟隧道隧址区属构造剥蚀低山-

丘陵地貌区, 隧道轴线经过地段地面高程约 270~390 m, 隧道进口位于斜坡地带, 地形坡度均较陡, 自然坡角约 25°~45°, 山坡上植被较发育。

隧址区位于秦岭褶皱系之东段, 南秦岭印支冒地槽褶皱带(南秦岭构造带)二级构造单元之武当山复背斜范围内, 可见明显的揉皱现象。该区主要出露中元古界武当山群(P_{t2}w_d)片岩, 片理产状 310°∠70°, 节理裂隙较发育, 在勘察范围内, 片岩分为强风化、弱风化和微风化, 其中强风化片岩厚度最大为 9 m, 平均为 6 m; 弱风化片岩厚度为 10~20 m, 厚度分布与地形相关; 微风化片岩厚度较大, 在勘探范围内未揭穿。

3.2 边坡变形迹象

由于隧道进出口位于斜坡地带, 地形坡度均较陡, 植被较发育, 出露基岩为中元古界武当山群片岩, 因此斜坡在自然状态下稳定性较好。根据产状分析, 片岩片理走向与隧道轴线呈大角度相交, 节理裂隙较发育, 开挖边、仰坡岩体受结构面组合作用在施工扰动、雨水冲刷下易局部垮塌。

拱顶仰坡采用 1:1 放坡, 隧道仰坡的防护面可见多处纵横裂缝, 上部截水沟附近开裂很严重, 表层滑动过, 滑向 120°, 与隧道轴线近于平行, 见图 1。另外, 左洞拱顶沿拱圈有开裂现象, 右洞隧道内未发现变形迹象。从上述开裂现象总体可见, 右洞地质条件相比左洞来说要稍好。



图 1 泰山沟隧道进口边坡左洞拱顶变形迹象
Fig. 1 Deformation features of the left vault on the entrance slope of Taishangou Tunnel

3.3 边坡变形特征及其形成机理

通过对泰山沟隧道进口边坡变形迹象进行分析, 可见边坡变形具有如下特征: ①边坡变形主要分布在泰山沟隧道进口段及仰坡, 仰坡以上坡度平缓地带和洞口以下前缘斜坡未发现明显的变形迹象; ②边坡变形裂缝主要集中在泰山沟隧道进口段左洞

顶排水沟附近, 裂缝延伸长度多在 3~5 m, 裂缝宽度多在 10~30 mm 之间, 均为拉应力作用形成; ③边坡变形裂缝具有明显的分区特征, 隧道埋深越浅的部位, 变形裂缝分布越密集, 离隧道洞门越远的部位, 变形裂缝分布越稀疏, 且这些拉裂缝受隧道开挖影响有明显的下沉、错落; ④边坡变形裂缝为一些断续的拉裂缝, 主要延伸方向大致与隧道进口方向垂直, 总体变形方向沿隧道轴向, 且小角度偏向隧道左洞。

产生上述边坡变形特征的机理是: 隧道开挖后, 在隧道洞口段形成高陡临空面, 加上隧道洞口进口段岩土体工程性质差、埋深浅, 隧道开挖后破坏了原边坡岩土体的力学平衡条件, 使得隧道洞口以上边坡发生了朝临空方向的位移(包括水平位移和垂直位移), 在平面上具有明显的方向性, 其中以水平位移为主; 此外, 隧道进口段以上边坡受施工扰动, 边坡的初始应力处于调整过程中, 从而导致隧道进口段以上边坡发生了时效变形。由此可见, 边坡的应力尚未释放完全, 存在潜在的破坏动力, 对边坡的稳定性有一定的影响。

4 泰山沟隧道进口边坡稳定性分析

4.1 计算模型

选择沿隧道轴线方向的左线剖面作为计算剖面来评价泰山沟隧道进口边坡的稳定性, 其计算剖面见图 2。

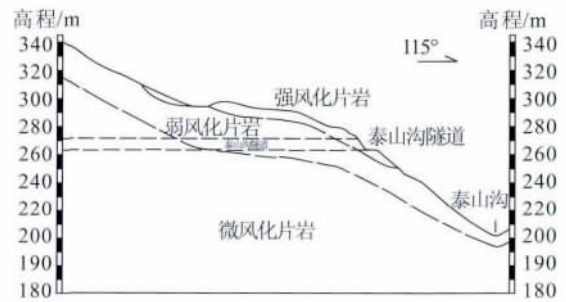


图 2 泰山沟隧道进口边坡工程地质剖面图
Fig. 2 Engineering geological profile of the entrance slope of Taishangou Tunnel

4.2 计算参数

边坡计算参数主要依据泰山沟隧道进口边坡勘察资料、现场直剪试验结果和岩体力学参数估算的成果, 并考虑岩体受到风化、地下水和爆破震动的影响, 经综合分析确定该边坡的稳定性计算参数如表 1 所示。

表 1 边坡稳定性计算参数

Table 1 Calculation parameters of slope stability

土层名称	容重 $\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)		抗剪强度指标			
			内聚力 $c/$ kPa		内摩擦角 $\phi/(\circ)$	
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和
强风化片岩	23.2	24.0	34	29	18	16
弱风化片岩	24.5	25.2	174	139	31	28
微风化片岩	26.4	26.8	258	210	35	32

4.3 计算工况

结合具体情况分析,将泰山沟隧道进口边坡稳定性计算工况分为两种:正常工况和非正常工况 I。其中,非正常工况 I 条件下,同时考虑了暴雨或连续降雨条件下地下水位的变化对斜坡稳定性的影响,其浸润线可能存在以下两种情况:①暴雨或连续降雨,岩土体饱和,其浸润线位于强风化层与弱风化层分界面;②强暴雨(极不利工况条件),岩土体完全饱和,浸润线位于强风层 1/2 平均厚度处。

4.4 边坡稳定性分析

根据泰山沟隧道进口边坡地质结构及其岩土体的地质特征,边坡主要沿强风化片岩发生圆弧滑移,因此拟采用 Janbu 法和 Bishop 法两种方法进行边坡稳定性及其破坏概率计算与分析^[8]。边坡稳定性计算采用 Geoslope 软件,通过全局搜索方式对边坡可能的滑移面进行搜索^[9],其搜索结果见图 3,并选择最小稳定性系数的滑移面对泰山沟隧道进口边坡进行稳定性评价,其稳定性计算结果见表 2。

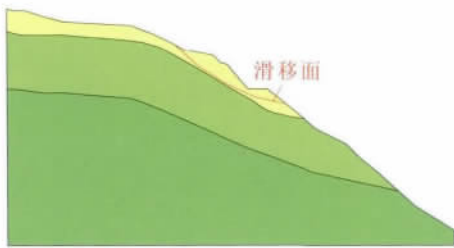


图 3 边坡滑移面搜索结果图

Fig. 3 Result figure of slip surface search for the slope

表 2 边坡稳定性计算结果

Table 2 Calculation results of stability

计算工况	降雨条件	计算方法	稳定性系数	破坏概率/%
正常工况	/	Janbu 法	1.342	21.05
		Bishop 法	1.368	17.65
非正常工况 I	①暴雨或连续降雨	Janbu 法	1.141	45.63
		Bishop 法	1.167	40.23
	②强暴雨	Janbu 法	1.016	68.65
		Bishop 法	1.029	66.14

由表 2 可见,分别采用两种方法计算得到的边坡稳定性系数很接近,同时在正常工况和非正常工况 I 条件下稳定性规律一致,说明了计算方法和计算结果是准确、可靠的。

泰山沟隧道进口边坡在正常工况条件下边坡的稳定性系数为 1.342,均大于表 3 所规定的边坡允许稳定性系数^[8],因此泰山沟隧道进口边坡在正常工况下处于稳定状态,稳定性较好,具有一定的安全储备;在非正常工况 I 条件下针对不同降雨强度引起的地下水位变化情况,分别计算了非正常工况 I 下两种地下水位高度时边坡的稳定性系数,计算结果显示在第一种情况下边坡的稳定性系数为 1.141,边坡处于稳定状态,在第二种情况下边坡的稳定性系数为 1.016,接近极限平衡状态。

表 3 边坡允许稳定性系数^[8]

Table 3 Allowable safety coefficients of the slope

公路等级	计算工况	允许稳定性系数
高速公路、一级公路	正常工况	1.20~1.30
	非正常工况 I	1.10~1.20

通过对降雨引起可能的两种工况进行对比,可以看出地下水位的变化对该边坡稳定性的影响显著,当地下水位在强降雨影响下逐步升高时,坡体内产生渗透压力,风化岩土体饱和后强度降低,造成边坡稳定性系数显著下降。

5 泰山沟隧道进口边坡破坏概率分析

在概率计算的过程中,考虑到残破层与基岩接触面的抗剪强度参数是随机分布^[10,11],为此对泰山沟隧道进口边坡进行破坏概率分析,具体参数见表 4。

表 4 抗剪强度参数均值与标准差

Table 4 Averages and variances of shear strength parameters

参数	$c/(\text{kPa})$		$\phi/(\circ)$	
	天然	饱和	天然	饱和
均值	30	29	18	16
标准差	6.56	2.89	7.85	3.03

边坡破坏概率是按照可靠度理论,考虑强度参数的变异性,得到稳定性系数的分布图,并取稳定性系数小于 1 的次数占总模拟次数的百分比作为边坡破坏概率。但考虑到坡体受到隧道开挖、爆破等不确定因素影响较大,在计算破坏概率时,适当提高稳定性系数控制标准对于工程来说是偏于安全的。因此,参照高速公路边坡稳定性系数控制标准,在正常工况条件下,泰山沟隧道进口边坡的破坏概率计算

取稳定性系数小于 1.2 的次数占总模拟次数的百分比;在非正常工况 I 条件下,其破坏概率取稳定性系数小于 1.1 的次数占总模拟次数的百分比。

根据以上原则,计算得到的泰山沟隧道进口边坡破坏概率见表 2,边坡稳定性程度分级标准见表 5^[4]。

由表 2 可以看出:泰山沟隧道进口边坡在正常工况条件下的破坏概率为 21.05%,在非正常工况 I 条件下的破坏概率为 45.63%,在极不利工况条件下的破坏概率为 68.65%。针对表 5 斜坡稳定性程度分级标准可得到:泰山沟隧道进口边坡在正常工况条件下处于低危险性;在非正常工况 I 条件下处于中等危险性;在极不利工况条件下处于高危险性。

表 5 斜坡稳定性程度分级表^[4]

Table 5 Grade table of slope stability degrees

破坏概率/%	危险程度
<5	安全
5~30	低危险性
30~60	中等危险性
60~90	高危险性
>90	不安全

6 结 论

通过对泰山沟隧道进口边坡的稳定性及其破坏概率进行计算与分析,得出如下结论:

(1) 边坡稳定性计算结果显示:泰山沟隧道进口边坡在正常工况下处于稳定状态,具有一定的安全储备;在非正常工况 I 条件下处于基本稳定状态;在极不利工况条件下处于极限平衡状态。

(2) 边坡破坏概率计算结果显示:泰山沟隧道进口边坡在正常工况条件下处于低危险性;在非正常工况 I 条件下处于中等危险性;在极不利工况条件下处于高危险性。

(3) 边坡稳定性和破坏概率计算结果同时表明:泰山沟隧道进口边坡在暴雨或连续降雨的工况条件下稳定程度低,极有可能发生失稳,对公路建设和运营带来极大的风险,因此建议对泰山沟隧道进口边坡进行加固处置,以确保公路在运营阶段长期处于安全状态。

参考文献:

- [1] 唐辉明. 工程地质学基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [2] 周春梅, 殷坤龙. 滑坡破坏概率分析及其在浙江张村滑坡中的应用[J]. 安全与环境工程, 2004, 11(2): 1-4.
- [3] 王磊, 邓清禄, 李德营, 等. 滑坡稳定性评价的概率分析法[J]. 安全与环境工程, 2007, 14(2): 1-3.
- [4] 罗文强, 黄润秋, 张倬元. 斜坡稳定性概率分析的理论与应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2003.
- [5] 肖莉丽, 殷坤龙, 翟月, 等. 渐进式滑坡破坏概率的分析及应用[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(5): 20-25.
- [6] 谭晓慧, 余兵, 王茂松等. 水库边坡稳定的可靠度分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3 427-3 430.
- [7] 谭晓慧. 多滑面边坡的可靠性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 822-825.
- [8] JTGD 30—2004, 公路路基设计规范[S].
- [9] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [10] 郑敏洲, 简文彬, 吴茂明. 花岗岩残积土边坡稳定性可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 2): 5 337-5 340.
- [11] 宋新龙, 王宇, 汪灿. 岩质边坡随机楔体稳定性分析的 Monte—Carlo 模拟[J]. 安全与环境工程, 2012, 19(1): 112-116.

(上接第 107 页)

十万人死亡率两项指标的研究可以得出:从 2005 年以来,我国安全生产的伤亡主体主要锁定在进入城市务工的农民工这一群体,这使得我国安全管理的对象发生了根本变化;从地理分布上看,我国的安全生产状况形势表现出明显的区域性,呈现出沿海地区好于中部地区、中部地区好于西部地区的整体安全生产形势;从产业结构上看,我国第三产业的比重虽然有所增加,但第二产业仍高达 50% 以上,对于我国正处在制造业高速发展的过程中,仍要面对安全生产问题的严峻挑战。

参考文献:

- [1] 段伟利, 陈国华. 安全生产与经济社会发展之关系的研究——以

- 广东省为例[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(12): 55-61.
- 段伟利, 陈国华. 安全生产与经济社会发展之关系的研究[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(12): 55-61.
- [2] 何学秋, 宋利, 聂百胜. 我国安全生产基本特征规律研究[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(1): 5-13.
- [3] 黄盛初, 周心权, 张斌川. 安全生产与经济社会发展多元回归分析[J]. 煤炭学报, 2005, 30(5): 580-584.
- [4] 姚有利. 安全生产与经济社会发展关系理论研究[J]. 安全与环境学报, 2009, 9(6): 159-163.
- [5] 林书成, 王斌, 张仕勇. 安全生产与经济协调度和协调发展度研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2008, 4(3): 4-8.
- [6] 牛文涛. 中国工业化阶段演进分析——基于 PGDP 指标[J]. 中国商界, 2008(9): 123-124.