

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.02.001

# 几种常用边坡稳定性分析方法的比较

祝方才, 刘佳鹏, 刘增杰

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 基于仿真软件 Geo-Slop, 应用 Morgenstern-Price 法、Spencer 法、Janbu 法和 Bishop 法, 分别对深圳外环高速公路某路堑边坡在天然状态和饱和状态下进行稳定性分析, 计算得到最危险滑裂面以及相应的边坡安全系数。同时, 根据现场调查, 基于不平衡推力法分析出边坡最可能的滑裂面, 并计算得到沿该滑裂面的安全稳定系数。通过数值分析和现场调查结果对比, 得出以下结论: 坡体在天然状态的安全系数大于 1.0, 接近 1.2, 边坡是稳定的, 而在饱和状态下其安全系数小于 1.0, 坡体不稳定; 数值计算分析得到的滑裂面位置与现场调查分析得出的滑裂面的位置一致, 证明了结果的可靠性; 最后, 考虑到该地区雨水多发, 坡体在饱和状态下安全系数小于 1.0, 建议及时对坡体进行支护, 防止边坡失稳。

**关键词:** Morgenstern-Price 法; Spencer 法; Janbu 法; Bishop 法; 不平衡推力法; 边坡稳定性

**中图分类号:** TU457

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2019)02-0001-05

**引文格式:** 祝方才, 刘佳鹏, 刘增杰. 几种常用边坡稳定性分析方法的比较 [J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(2): 1-5.

## Comparison of Several Common Methods of Slope Stability Analysis

ZHU Fangcai, LIU Jiapeng, LIU Zengjie

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Four methods including Morgenstern-Price method, Spencer method, Bishop method and Janbu method have been introduced for an analysis of the stability of a cutting slope at Shenzhen outer-ring highway under natural condition and saturated state by using a simulation software Geo-Slope, thus working out the safety factors for the most dangerous slip surface as well as its corresponding slope. Meanwhile, based on the field investigation and unbalanced thrust method, an analysis has been carried out, thus obtaining the stability factor for the most probable slip surface of slope. By comparing the results of numerical analysis and field investigation, the following conclusions are drawn: The slope is stable when its body safety factor in a natural state is greater than 1.0, approaching 1.2, while the slope is unstable when the safety factor of the slope is less than 1.0 under saturated condition. The position of slip surface obtained by numerical calculation and analysis is consistent with that obtained by field investigation and analysis, thus verifying the reliability of the results. Consequently, with such factors as the frequent rainwater in this area and a subsequent slope safety factor under saturation condition less than 1.0, it is suggested to support the slope in time to prevent the slope from losing stability.

**Keywords:** Morgenstern-Price method; Spencer method; Janbu method; Bishop method; imbalance thrust force method; slope stability

收稿日期: 2018-03-27

基金项目: 湖南省自然科学基金资助重点项目 (13JJ2033)

作者简介: 祝方才 (1972-), 男, 湖北公安人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事边坡与隧道的教学和研究,

E-mail: zhufangcai@163.com

## 0 引言

随着我国国民经济的迅猛发展,基础设施建设大力推进,建设过程中形成了大量边坡,边坡稳定性分析成为岩土工程中的一项重要研究课题。边坡稳定分析的方法有很多,主要包括强度折减法 and 极限平衡分析法。极限平衡分析法主要包括 Spencer 法、Janbu 法、Bishop 法及不平衡推力法,该方法计算简单,经过工程检验,因而至今仍然是应用最广的一种方法;强度折减法不用事先假定滑裂面的位置便能得出边坡的变形、安全系数及滑裂面等工程所需参数值,然而其缺少统一的边坡极限破坏判断标准,因而该方法在实际工程中应用较少<sup>[1]</sup>。

本文以某工程实际路堑边坡为研究背景,考虑到实际发生滑坡通常在降雨后土体达饱和状态,因此考虑了天然和饱和两种工况,分别采用工程上常用的几种边坡稳定方法,计算了边坡的安全稳定系数、滑裂面的位置及形状、剪出口的位置,同时讨论了上述几种边坡稳定分析方法的优缺点,为工程实际应用中选择边坡稳定评价方法提供参考,也为边坡是否需要支护和支护后的安全性评价提供可靠的选择依据。

## 1 几种极限平衡分析法及其不足

不平衡推力法<sup>[2-3]</sup>是针对滑裂面为折线的条件下提出的,它假定条间力的作用方向与上一条块的滑裂面方向平行。该方法是我国工程技术人员创造的一种实用滑坡稳定分析方法,由于计算简单,而且能够为滑坡治理提供设计推力和安全稳定系数,在我国水利部、铁路部门得到了广泛的应用,国家规范和行业规范都将其列为推荐方法使用。目前的一些研究表明,不平衡推力法的分析结果在某些情况下会产生较大误差,且计算结果偏于不安全。如果在这种情况下仍然采用不平衡推力法进行分析,将给工程带来隐患,危及国家财产和人民的生命安全。

Morgenstern-Price 法假定两相邻土条的法向条间力和切向条间力之间存在一对水平方向的坐标函数关系,使用条分法对滑动岩土体进行受力分析,针对的是人为假定的土体极限平衡条件,不能提供边坡位移信息,且需要事先假定若干个滑动面<sup>[4]</sup>。

Spencer 法<sup>[5]</sup>假定相邻土条之间的法向条间力和切向条间力之间有固定的常数关系,采用土条分析法对边坡进行稳定分析,该方法需要事先假定滑裂面来确定最危险滑裂面和最小安全系数。该方法虽然满足力矩平衡条件和竖直方向上力的平衡,但不满足水平方向上力的平衡;另一方面,当滑裂面顶部不存在

侧向力时,该方法计算出来的安全系数值的精度较低,会给工程带来安全隐患<sup>[6]</sup>。

Janbu 法<sup>[7]</sup>假定整个滑裂面的安全系数一致,滑裂面的位置已事先假定,土条上所有垂直荷载的合力作用线和滑裂面的交点与滑裂面的法向反力作用于同一点,可采用此方法求出一般情况下土坡稳定安全系数和滑裂面上的应力分布。Janbu 法最突出的缺点是不易收敛,特别是条数超过 20 时,几乎不能得到收敛的解答<sup>[8]</sup>。

Bishop 法<sup>[9]</sup>假定土坡稳定是一个平面应变问题,其根本原理是圆弧滑动面分析,且以库伦强度理论为基础。该方法首先假定稳定系数  $K$ , 然后反算稳定系数计算值  $F$ , 重复计算至  $K$  与  $F$  之间的相对误差在规定的范围内。Bishop 法的不足之处在于不考虑土条之间的作用力,与水平力间的夹角为 0, 忽略成对条间力产生的力矩,因而忽略了土体内部应力分布的真实情况<sup>[10]</sup>。

## 2 算例分析

### 2.1 工程概况

项目位于深圳国际低碳城的北侧山区,场地所在位置为丘陵地区,如图 1 所示。

根据现场岩性鉴定和勘察报告,结合



图 1 边坡全貌

Fig. 1 A physical picture of the slope

室内土工试验及现场标准贯入试验成果,地层岩性主要为燕山晚期花岗岩,其强度高,属坚硬岩,风化厚度不一,基岩局部裸露,局部见球状风化孤石出露,钻孔揭露局部有孤石发育。局部风化层较厚的岩石遇水易软化崩解,边坡开挖易发生崩塌、水土流失等不良地质现象。现状边坡路面设计标高 67.84~68.29 m,最大挖方高度为 29.46 m。设计分三级开挖,分级坡高 10 m,分级平台宽 2 m;边坡剖面如图 2 所示,本研究针对未支护开挖情况

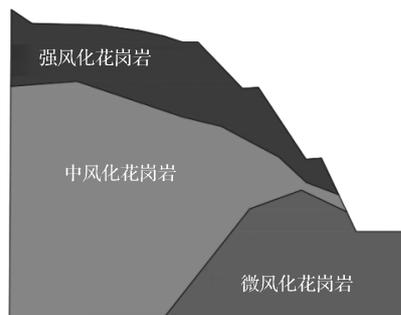


图 2 边坡剖面图

Fig. 2 A profile map of the slope

下边坡的安全稳定系数进行讨论。

2.2 两种方法的安全稳定性系数计算

本工程岩土层物理力学参数经现场岩性鉴定, 结合土工试验及标准贯入试验成果取值如表 1 所示。

表 1 模型参数选取表

Table 1 Model parameter selection table

名称	重度 / (kNm <sup>-3</sup> )		黏聚力 / kPa		内摩擦角 / (°)	
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和
粉质黏土	18	19	18	16	20	18
全风化花岗岩	20	21	25	22	23	20
强风化花岗岩	22	23	28	24	25	23
中风化花岗岩	23	24	20 000	10 000	35	30
微风化花岗岩	24	25	50 000	30 000	40	35

2.2.1 不平衡推力法稳定性计算

1) 沿不同风化界面的滑动破坏

根据边坡设计的开挖情况, 开挖范围主要位于全风化~强风化花岗岩体, 在坡脚部位达中风化和微风化岩面。通过现场勘察分析得出, 滑动面位于强风化和中风化交界面处。滑坡后缘可能依附于现场测量得到的一组陡立结构面 (128° ∠ 78.5°) 生成。边坡的破坏模式为开挖引起沿强风化和中风化的岩体交界面滑动。

2) 沿组合结构面的楔形滑动

根据地勘报告孔内摄像成果分析, 边坡体内存在多组优势结构面, 在这些优势结构面组合作用下, 可能形成沿组合结构面的楔形体滑动, 如图 3 所示。

从图 3 可以看出: B8 补 G4\_X1 与 B8 补 G4\_X3、B8 补 G4\_X3 与 B8 补 G4\_X5、B8 补 G4\_X1 与 B8 补 G4\_X5 组成的楔形体均处于滑动区, 对“左开挖面”为顺倾不利楔形体, 破坏模式为楔形滑动破坏。

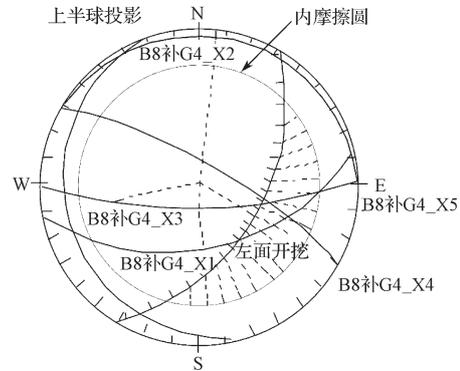


图 3 优势结构面组合作用形成的楔形滑动

Fig. 3 Wedge-shaped sliding caused by the combined action of dominant structure planes

通过上述分析, 推测该路堑边坡开挖后的破坏模式主要有两种: 第一种为沿不同风化界面的滑动破坏, 可能表现为滑动规模较大的整体性滑动; 第二种为沿组合结构面的楔形体滑动, 表现为开挖后局部的掉块、碎落等破坏。因此, 本研究对上述两个指定滑动面破坏计算采用不平衡推力法计算, 结果如表 2~3 所示。由表格计算可得边坡在天然和饱和状态下的安全稳定系数分别为 1.280 和 0.930。

表 2 沿第 1 层滑动面滑动 (天然状态) 的计算结果

Table 2 Calculation results of slide along the sliding surface of first slip layer (natural condition)

条块编号	条块面积 / m <sup>2</sup>	重度 / (kN·m <sup>-3</sup> )	条块重 / (kN·m <sup>-1</sup> )	滑面倾角 / (°)	滑面长度 / m	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	传递系数	剩余下滑力 / kN	稳定系数
1	9.83	23.00	217.36	79.00	10.36	25.00	28.00	0.00	30.08	1.280
2	68.05	23.00	1 497.10	31.00	7.24	25.00	28.00	0.27	591.04	
3	82.24	23.00	1 809.28	31.00	9.31	25.00	28.00	1.00	1 365.77	
4	40.98	23.00	901.56	31.00	6.54	25.00	28.00	1.00	1 751.81	

表 3 沿第 1 层滑动面滑动 (饱和状态) 的计算结果

Table 3 Calculation results of slide the sliding surface along the first layer (saturated condition)

条块编号	条块面积 / m <sup>2</sup>	重度 / (kN·m <sup>-3</sup> )	条块重 / (kN·m <sup>-1</sup> )	滑面倾角 / (°)	滑面长度 / m	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	传递系数	剩余下滑力 / kN	稳定系数
1	10.64	24.00	235.853	79.00	10.36	23.00	24.00	0.00	32.81	0.930
2	68.05	24.00	1 633.200	31.00	7.24	23.00	24.00	0.37	711.46	
3	82.24	24.00	1 973.700	31.00	9.31	23.00	24.00	1.00	1 556.62	
4	40.98	24.00	983.498	31.00	6.54	23.00	24.00	1.00	1 977.76	

2.2.2 边坡稳定性计算

应用边坡稳定性分析软件 Geo-Slop 分别采用内嵌 Morgenstern-Price 法、Spencer 法、Janbu 法、Bishop

法对边坡进行了数值模拟, 得到边坡在天然和暴雨两种工况下的边坡稳定安全系数、滑裂面的位置及形状、剪出口的位置, 计算结果如图 4 所示。

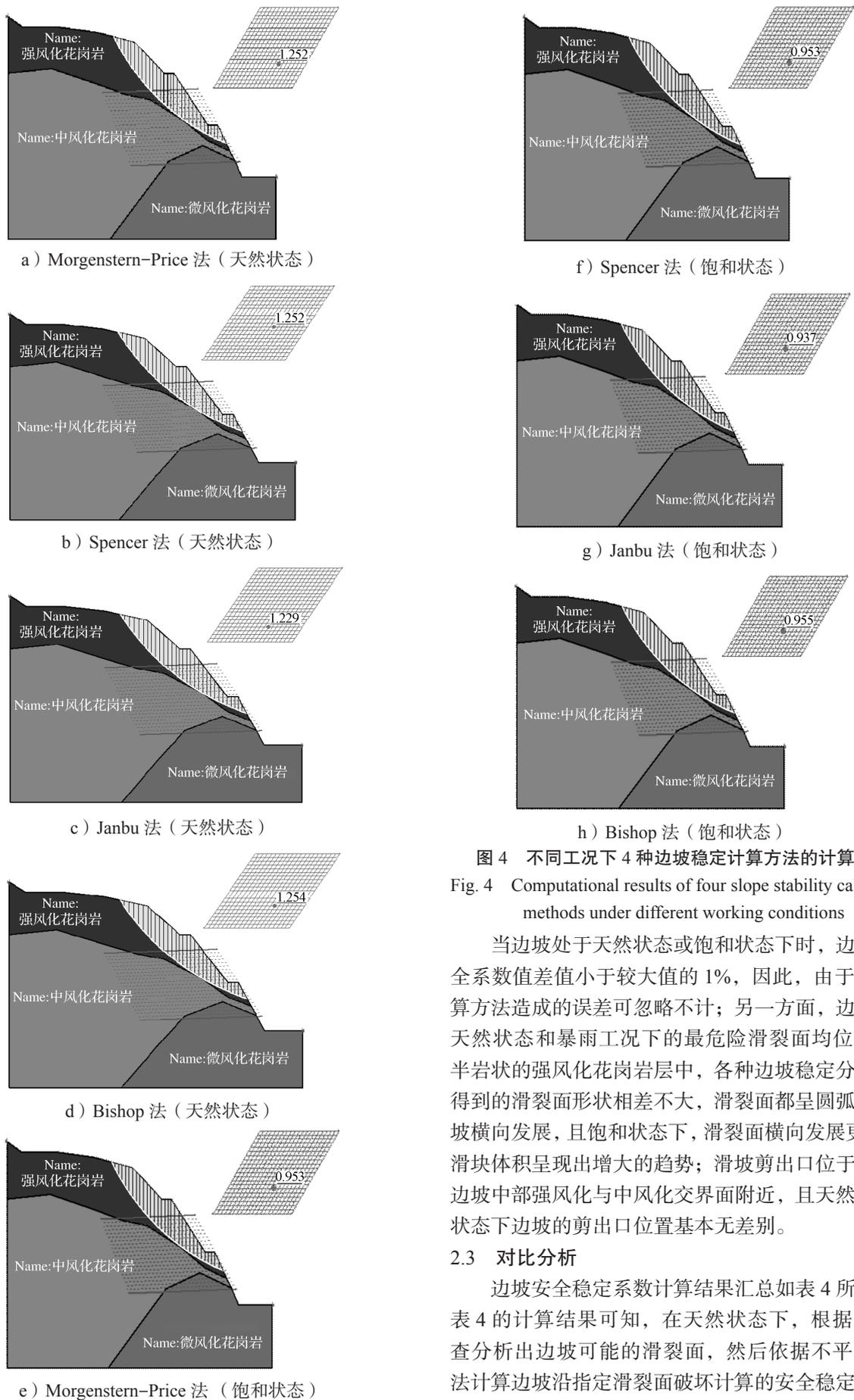


图 4 不同工况下 4 种边坡稳定计算方法的计算结果  
 Fig. 4 Computational results of four slope stability calculation methods under different working conditions

当边坡处于天然状态或饱和状态下时,边坡的安全系数值差值小于较大值的 1%,因此,由于选择计算方法造成的误差可忽略不计;另一方面,边坡处于天然状态和暴雨工况下的最危险滑裂面均位于半土半岩状的强风化花岗岩层中,各种边坡稳定分析方法得到的滑裂面形状相差不大,滑裂面都呈圆弧状沿边坡横向发展,且饱和状态下,滑裂面横向发展更明显,滑块体积呈现出增大的趋势;滑坡剪出口位于第一级边坡中部强风化与中风化交界面附近,且天然和饱和状态下边坡的剪出口位置基本无差别。

### 2.3 对比分析

边坡安全稳定系数计算结果汇总如表 4 所示。由表 4 的计算结果可知,在天然状态下,根据现场调查分析出边坡可能的滑裂面,然后依据不平衡推力法计算边坡沿指定滑裂面破坏计算的安全稳定系数为

1.280,按自动搜索最危险滑裂面的 Geo-Slope 软件分别按 Morgenstern-Price 法、Spencer 法、Janbu 法和 Bishop 法计算的边坡安全稳定系数为 1.252, 1.252, 1.229, 1.254, 较为接近,且本案例应用 Geo-Slope 软件搜索的滑裂面的位置及滑块剪出口的位置,和经过现场调查分析得到的可能的滑裂面及剪出口位置基本相同。

表 4 5 种计算方法稳定系数对比  
Table 4 Comparison of stability coefficients of five calculation methods

工况	不平衡 推力法	Morgenster- Price 法	Spencer 法	Janbu 法	Bishop 法
天然状态	1.280	1.252	1.252	1.229	1.254
饱和状态	0.930	0.953	0.953	0.937	0.955

考虑到暴雨天气下,雨水沿着边坡表面裂隙渗入坡体内部岩土体,边坡将达到饱和状态,因而本研究对边坡岩土体处于饱和状态下的采用不平衡推力法进行了计算,得出边坡沿指定的滑裂面破坏边坡稳定安全系数为 0.930,同时按自动搜索最危险滑裂面的 Geo-Slope 软件分别按照 Morgens-Price 法、Spencer 法、Janbu 法和 Bishop 法计算的边坡安全稳定系数分别为 0.953, 0.953, 0.937, 0.955,二者计算得出的结果较为接近,且边坡的安全系数均小于 1,因而该边坡在降雨的情况下随时可能出现滑坡的危险,建议相关部门立即对边坡进行整治。

### 3 结论

数值计算和现场调查结果表明:

1) 坡体在饱和状态下其安全系数接近 1.2,坡体是安全的,而坡体在饱和状态下的安全系数小于 1.0 时,坡体失稳;

2) 采用 Morgenstern-Price 法、Spencer 法、Janbu 法和 Bishop 法计算得出滑裂面的位置和现场调查定性分析得出的滑裂面位置基本吻合,从而证明了本研究计算结果的可靠性;

3) 考虑到该地区当前雨水多发,坡体在饱和状态下的安全系数值将小于 1,随时可能发生失稳破坏,因此建议及时对边坡进行支护,以防止滑坡带来的危害。

#### 参考文献:

[1] 王科,王常明,王彬,等.基于 Morgenstern-Price 法和强度折减法的边坡稳定分析[J].吉林大学学

报(地球科学版),2013,43(3):902-907.

WANG Ke, WANG Changming, WANG Bin, et al. Comparative Analysis on Slope Stability Based on Morgenstern-Price Method and Strength Reduction Method[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2013, 43(3): 902-907.

[2] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].北京:中国水利水电出版社,1994:320-324.

QIAN Jiahuan, YIN Zongze. Geotechnical Principle and Calculation[M]. Beijing: China Water Power Press, 1994: 320-324.

[3] 郑颖人,时卫民,杨明成.不平衡推力法与 Sarma 法的讨论[J].岩石力学与工程学报,2004,23(17):3030-3036.

ZHENG Yingren, SHI Weimin, YANG Mingcheng. Discussion on Imbalance Thrust Force Method and Sarma's Method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 3030-3036.

[4] MORGENSTERN N R, PRICE V E. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces[J]. Géotechnique, 1965, 15(1): 79-93.

[5] SPENCER E. A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces[J]. Géotechnique, 1967, 17(1): 11-26.

[6] 曾锦标.边坡稳定性分析中 Spencer 法的适用性探讨[J].山西建筑,2008,34(11):114-115.

ZENG Jinbiao. Spencer Method Adaptability Discussion in the Stability Analysis of Side Slope[J]. Shanxi Architecture, 2008, 34(11): 114-115.

[7] JANBU N. Application of Composite Slip Surfaces for Stability Analysis[J]. Proceedings of European Conference on Stability of Earth Slopes, 1954(3): 43-49.

[8] 朱大勇,李焯芬,黄茂松,等.对 3 种著名边坡稳定性计算方法的改进[J].岩石力学与工程学报,2005,24(2):183-194.

ZHU Dayong, LI Zhuofen, HUANG Maosong, et al. Modifications to Three Well-Known Methods of Slope Stability Analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 183-194.

[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,2003,80-81.

CHEN Zuyu. Stability Analysis of Soil Slope: Principle · Method · Procedure[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2003, 80-81.

[10] BISHOP A W. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes[J]. Géotechnique, 1955, 5(1): 7-17.

(责任编辑:申剑)