

文章编号: 1672 - 93 15(2006)02 - 0184 - 05

SLOPE/ W 程序在土质边坡稳定性分析中的应用

高 涛¹, 毛巨省¹, 罗建峰^{2,3}, 鄧 彬¹, 刘会林⁴

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054;
3. 靖远煤业集团有限责任公司, 甘肃 白银 730913; 4. 中铁 16 局集团有限责任公司, 北京 101100)

摘 要: 简述了 3 种基于极限平衡理论分析边坡稳定性分析的方法, 利用 SLOPE/ W 程序对延安西市路西沟凤凰山滑坡进行了稳定性分析。建立了各级滑坡的计算模型, 得出了分别采用 Bishop 法和 Janbu 法在未考虑地下水和考虑地下水的两种情况下各级边坡的安全系数。将 SLOPE/ W 程序分析结果和剩余下滑力法计算结果进行比较分析, 表明应用 SLOPE/ W 程序进行土质边坡稳定性分析有较大的工程意义。另外, SLOPE/ W 程序模拟结果表明, 水是影响边坡稳定的关键因素。

关键词: SLOPE/ W 程序; 土质边坡; 稳定性分析; 地下水

中图分类号: TU 441⁺. 35 **文献标识码:** A

Application of SLOPE/ W in the stability analysis of soil slope

GAO Tao¹, MAO Ju-xing¹, LUO Jian-feng^{2,3}, ZHI Bin¹, LIU Hui-lin⁴

(1. School of Architectural and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Jingyuan Mining Group Co. Ltd., Baiyin 730913, China; 4. China Railway 16 Bureau Group Co. Ltd., Beijing 101100, China)

Abstract: Three slope analysis methods using limit equilibrium theory are introduced, then combining with real project of Fenghuang Mountain slope at Xishi Road in Yan'an, the stability of the slope is analyzed with SLOPE/ W program. The analysis model is founded, and the safety factor of each step slope is calculated separately by means of Bishop and Janbu methods under the conditions without underground water and with underground water. The comparison between the computer stimulating results and the results calculated by means of surplus thrust force is made, which indicates that the stability analysis of soil slope with SLOPE/ W program is reliable and that water is a key factor to slope stability.

Key words: SLOPE/ W program; soil slope; stability analysis; underground water

0 引 言

滑坡是一种重要的地质灾害, 给人类的生命财产带来了严重威胁。滑坡可导致交通中断、河道堵塞、厂矿城镇掩埋或建设受阻等工程灾害。另外, 要开发我国丰富的水利水电资源, 攻克高边坡稳定难关是一个突出的问题^[1-2]。边坡稳定性定量分析是边坡加固治理研究的基础, 也是加固设计的依据, 任何经济、合理、有效的边坡加固治理措施都源自对边坡安全系数和临界滑动面位置的合理确定^[3]。为了得到临界滑动面和最小安全系数, 通常采用试算方法, 即根据岩土工程勘察报告提供的工程区域的地质情况, 假定若干可能的滑动面, 对每个可能

收稿日期: 2005 - 05 - 16

作者简介: 高 涛(1982 -), 男, 河南开封人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程的学习和研究工作。

的滑动面进行试算,确定最小安全系数对应的滑动面。文中利用 GEO - SLOPE 软件包中的 SLOPE/W 程序对一土质边坡的稳定性进行分析,并与工程上常用的剩余下滑力法计算结果进行了比较分析。

1 分析方法简介

利用极限平衡法对边坡的稳定性进行了分析。该方法的基本特点是,只考虑静力平衡条件和土的 Mohr - Coulomb 破坏准则,也就是说,通过分析土体的破坏那一刻的平衡来求得问题的解。极限平衡理论的主要思想是将滑动土体进行条分,由极限状态下土条所受力和力矩的平衡来分析边坡稳定性^[4]。它是目前应用最多的一种分析方法。文中所用极限平衡理论的方法有以下几种。

1) 简化毕肖普(Bishop)法^{[5]308}:该方法考虑了土条间的作用力,这是对传统的瑞典条分法的重要改进。该方法忽略各土条之间的切向条间力,认为条间力的合力是水平的,同时假设破坏面是圆弧面,且定义边坡安全系数为沿整个滑动面上的抗剪强度与实际产生的剪应力的比值。该方法的计算结果比较接近实际,常用于土质、软岩质及碎岩边坡的稳定性分析。

2) 简布(Janbu)法^{[5]312}:Janbu 提出了同时满足力和力矩平衡的“通用条分法”。这一方法区别于其他方法的一个重要方面,就是通过假定土条侧向力的作用点而不是作用方向来求解安全系数。采用非圆弧面,按条块滑动平衡确定条间力,按推力线确定法向力的作用点,简化计算条间切向力为零,然后再对稳定系数进行修正。

3) 剩余下滑力法^[6]:剩余下滑力是指滑坡体向下滑动的力与抵抗向下滑动力之差。剩余下滑力计算常用折线法,又称传递系数法。这种方法适用于斜坡土石体沿坚硬的土层或岩层层面滑落时,滑动面已知情况(滑动面由工程地质勘察确定)。计算时假定:滑动面为折线形;滑体作整体滑动,不考虑相互间的挤压和拉裂;滑坡推力方向平行于相应各段滑面的方向,作用点位于两段界面的中点;顺滑坡主轴取 1 m 宽的土截片作为计算的基本截面,不考虑截片两侧面的摩擦力;建立公式时,假设滑体处于平衡状态。计算简图如图 1 所示。

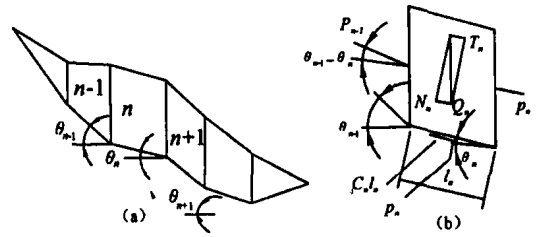


图 1 滑坡推力计算简图

Fig. 1 Calculation of slope thrust force
(a) 沿滑坡主轴方向纵剖面 (b) 第 n 段隔离体

按照以上假设,建立滑坡由上向下的剩余下滑力传递公式如下

$$P_n = P_{n-1}[\cos(\theta_{n-1} - \theta_n) - \sin(\theta_{n-1} - \theta_n)\tan \theta_n] + K_T Q_n \sin \theta_n - Q_n \cos \theta_n \tan \theta_n - c_n l_n$$

式中 θ_n 为第 n 段滑坡体沿滑面上的摩擦角, $(^\circ)$; K_T 为滑坡推力安全系数。

如果传到最后一段滑坡体的剩余推力不大于 0,说明整个斜坡是稳定的,此时对应的 K_T 即为滑坡的安全系数。

2 工程地质概况

凤凰山滑坡位于延安市中心西南约 1.5 km 处的西沟南侧,洞沟东侧。滑坡体东西长约 140 m,南北宽约 410 m,面积约为 0.06 km²。滑坡土体厚度约为 2.3 ~ 37.8 m,滑坡体积约为 50 万 m³。地面标高为 997.0 ~ 1 118.0 m,高差大约为 121 m。根据岩土工程勘察资料,滑坡区地层土主要由第四纪全新世近期人工填土、第四纪全新世坡、洪积黄土状土、滑坡堆积物,第四纪晚更新世风积黄土、残积古土壤,第四纪中更新世风积黄土、残积古土壤和侏罗纪砂页岩构成。地下水位标高为 1 032.20 ~ 1 043.64 m,局部地下水以下降泉形式缓慢渗出,冲沟中的地下水位埋深为 3.91 ~ 7.15 m,相应水位标高为 1 026.20 ~ 1 038.18 m,属上层滞水类型。主要由大气降水补给,水量不大,水位连续性差,以地表蒸发和下降泉形式排泄。

3 SLOPE/W 模型的建立与求解

3.1 SLOPE/W 程序简介

SLOPE/W 是一个功能强大的土质边坡稳定性分析程序。该程序应用极限平衡方法,能对复杂的土层和滑动面形状及多种孔隙水压力状况建立 2 - D 计算模型,对边坡进行稳定性分析。SLOPE/W 可以考虑地下水、土体裂缝、坡顶堆载等影响边坡稳定性的因素。用 SLOPE/W 进行边坡稳定性分析,首先根据岩土工程勘察资料

提供的剖面图,确定研究区域的几何尺寸,建立 2-D 几何模型。滑动面的定义有两种方法:第一种,根据工程地质条件和经验定出一系列可能的滑动面的切线及与之对应的滑动中心,程序采用“地毯式”的搜索方法得到临界滑动面组合。该分析方法的破坏滑动面均为圆弧形。第二种,根据岩土工程勘察资料,经过边坡软弱部位做出折线滑动面,并给定一个滑动中心。SLOPE/W 可以同时定义几个可能滑动面,来确定临界滑动面。

SLOPE/W 采用条分法,计算边坡的安全系数效率高,另外,该程序的可视图形化界面能够使我们直观的看到最危险滑动面、对应的滑动中心的位置和相应的安全系数。另外,对于稳定性不足的边坡,该程序提供了锚杆、挡土墙等支护方法,并可重新计算出经过治理以后边坡的安全系数,验证加固治理方案是否满足工程要求。

3.2 模型的建立

文中以图 2 所示边坡剖面为例,对该边坡的稳定性进行定量验算,与剩余下滑力法分析结果进行比较分析,说明 SLOPE/W 用于土质边坡稳定性分析的优越性。根据该工程岩土工程勘察资料,将边坡分为三级:第一级为古滑坡,第二级为次级古滑坡,第三级为正在发育的工程滑坡。其发展趋势表现为由下往上逐级牵引滑动。由于边坡坡顶有向背坡方向滑塌现象,所以在研究范围内不考虑土体的水平推力。

对于自由滑坡体,程序要求在对滑坡体进行分层(按一般由上向下依次分层)时,各层土服从 Mohr - Coulomb 破坏准则,最下土层的下部还应有一层力学模型为 Bedrock 的土层,即保证滑动面出现的可能范围,不可通过“基岩”。设土条 1 右侧为“基岩”,土体模型为 Bedrock。考虑到滑动面可能通过地平面以下的土体,将各土条长度延伸至地平面以下 10 m 处,满足分析要求。

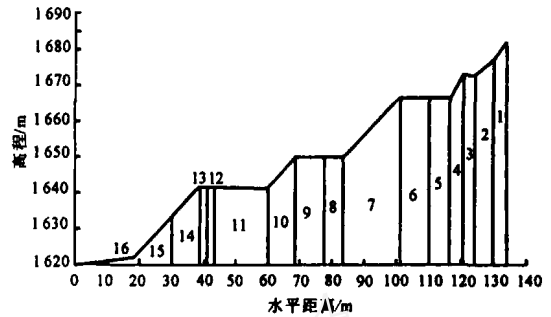


图 2 边坡剖面简图
Fig. 2 Typical section of slope

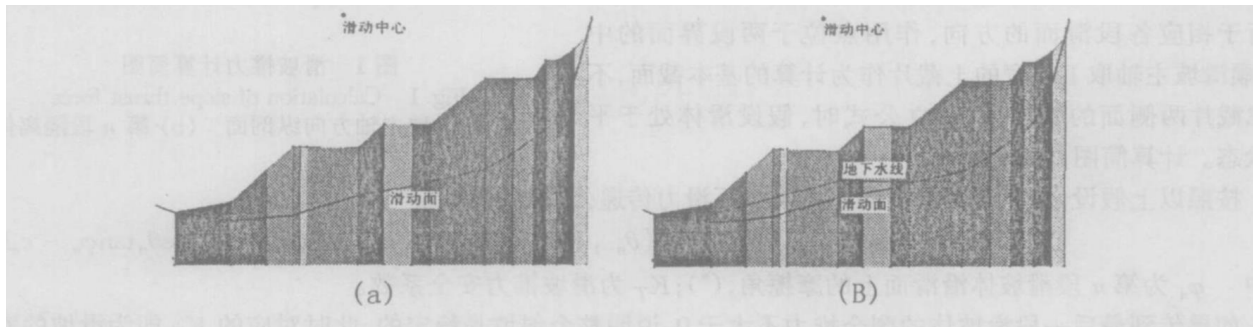


图 3 一级滑坡分析模型
Fig. 3 Analysis model of first step slope
(a) 未考虑地下水 (b) 考虑地下水

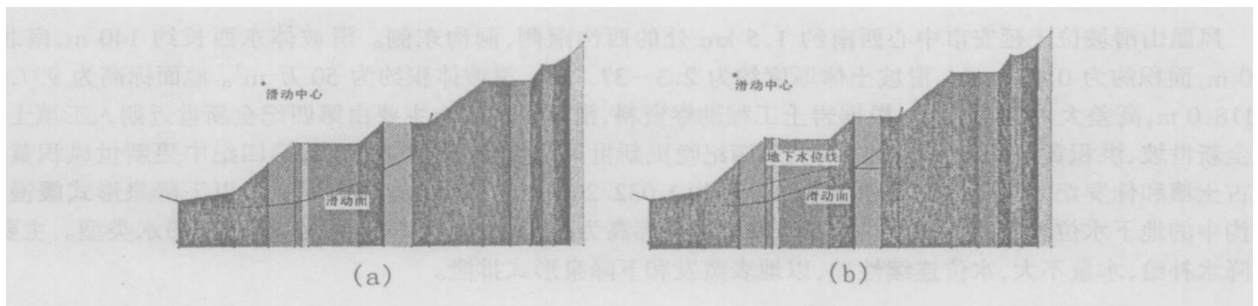


图 4 二级滑坡分析模型
Fig. 4 Analysis model of second step slope
(a) 未考虑地下水 (b) 考虑地下水

根据该工程岩土工程勘察资料提供的土体物理力学参数,将该边坡滑带土体划分为 16 块竖向土条,提供了各竖向土条的几何参数和物理力学参数,不能像一般作土层分析那样水平划分各土层,作者考虑到实际工程分

析的可行性与客观性,建立了 SLOPE/ W 计算模型。计算结果表明,这种建模方法是合理的。各级边坡稳定性分析模型如图 3 ~ 图 5 所示,模型中各土条编号如图 2 所示。

表 1 土体物理力学参数表
Tab.1 Physico - mechanical parameters of soils

土层编号	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	天然重度/ kN · m ⁻³	浮重度/ kN · m ⁻³
1 - 11	14.70	16.90	18.9	8.9
12 - 14	14.90	17.00	18.9	8.9
15 - 16	8.00	11.00	18.9	8.9

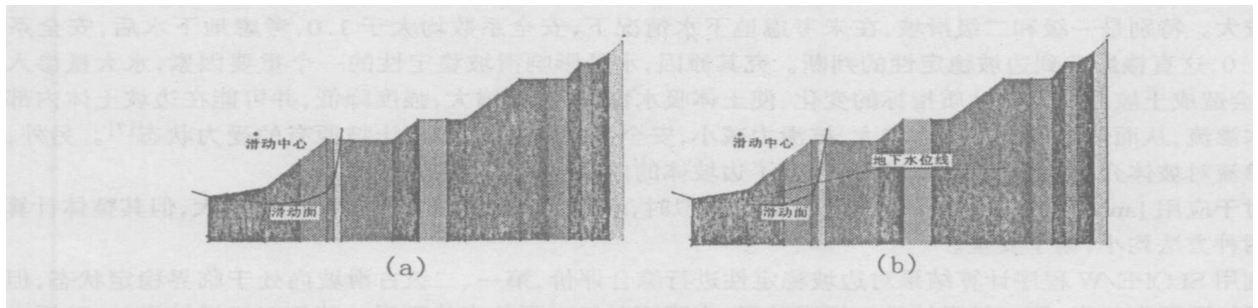


图 5 三级滑坡分析模型
Fig.5 Analysis model of third step slope
(a) 未考虑地下水 (b) 考虑地下水

3.3 模型的求解

模型求解时,分别选用 Bishop 法和 Janbu 法,在考虑地下水影响和未考虑地下水影响两种情况下,求得各级滑坡的安全系数。剩余下滑力法不能考虑地下水对边坡稳定性的影响,而 SLOPE/ W 程序能够方便地更换分析方法和考虑了地下水对边坡稳定性的影响。剩余下滑力法的计算结果未考虑地下水对边坡安全系数的影响,但实际上,地下水的存在对边坡的稳定性有很大影响。用 SLOPE/ W 进行边坡稳定性分析时,求出了未考虑地下水和考虑地下水影响两种情况下的边坡安全系数。考虑地下水影响的安全系数作为工程设计依据,更加可靠、安全。各级滑坡安全系数计算结果如图 6 所示。

剩余下滑力法及 SLOPE/ W 程序计算所得安全系数比较见表 2。

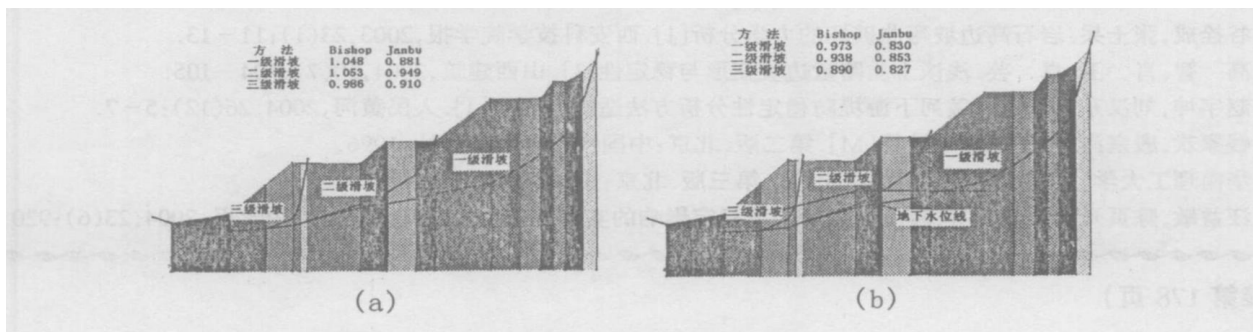


图 6 各级滑坡分析模型及安全系数
Fig.6 Calculated safety factor of each step slope
(a) 未考虑地下水 (b) 考虑地下水

表 2 两种方法计算所得安全系数比较表
Tab.2 Comparison of calculated results using different methods

滑坡分级	剩余下滑力法 未考虑地下水	SLOPE/ W 程序			
		Bishop 法		Janbu 法	
		未考虑地下水	考虑地下水	未考虑地下水	考虑地下水
一级滑坡	1.012	1.048	0.973	0.881	0.830
二级滑坡	1.012	1.053	0.938	0.949	0.853
三级滑坡	0.990	0.986	0.890	0.910	0.827

4 计算结果分析

在未考虑地下水影响的情况下,从表2计算结果分析可知,Bishop法的计算结果与剩余下滑力法计算结果差别不大,一级和二级滑坡的安全系数均稍大于1.0,尚处于临界稳定状态;三级滑坡的安全系数稍小于1.0,可能已经发生轻微滑动。造成两种方法计算结果差别的原因有以下几方面:第一,两种方法本身的假设条件不同;第二,剩余下滑力法计算过程中存在计算误差;第三,由于SLOPE/W程序在建立模型时滑动中心位置是根据工程经验确定的。

在考虑地下水的情况下,SLOPE/W程序计算机模拟,应用Bishop法的计算结果与不考虑地下水时的结果差别较大。特别是一级和二级滑坡,在未考虑地下水情况下,安全系数均大于1.0,考虑地下水后,安全系数均小于1.0,这直接影响到边坡稳定性的判断。究其原因,水是影响滑坡稳定性的一个重要因素,水大量渗入边坡土体,会造成土坡介质力学性质指标的变化,使土体吸水饱和,容重增大,强度降低,并可能在边坡土体内部产生地下水渗流,从而使边坡的下滑力增大,抗滑力减小,安全系数降低,改变了土坡原有的受力状态^[7]。另外,地下水的渗流对坡体介质的溶解溶蚀和冲蚀改变了边坡体的内部构造而导致边坡滑动。

对于应用Janbu法在SLOPE/W程序计算机模拟时,水对于滑坡的稳定性的影响仍较大,但其整体计算结果比前两种方法均小,偏于安全。

利用SLOPE/W程序计算结果对边坡稳定性进行综合评价,第一、二级古滑坡尚处于临界稳定状态,但已十分接近极限平衡状态;第三级滑坡处于蠕滑阶段,在降雨时极有可能突然下滑。若第三级滑坡滑动,随后必将牵引第二级、第一级滑坡滑动,因此,必须对该边坡采取必要的治理措施。该结论与现场监测结果完全吻合。这里对该边坡的加固治理方案不作讨论。

5 结论

建立分析模型时,以人为划分的竖向土条作为模型中的土层,符合工程实际;SLOPE/W程序模拟结果与剩余下滑力法计算结果接近,说明应用SLOPE/W程序进行土质边坡稳定性分析有较大的工程意义;考虑了地下水的影响,研究表明,地下水对土质边坡稳定性的影响是显著的;建议在边坡治理工程中重视边坡排水工作,使边坡土体处于自然干燥状态,有利于边坡的长期稳定。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 谷拴成,张士兵.岩石高边坡弯曲破坏的力学分析[J].西安科技学院学报,2003,23(1):11-13.
- [3] 高智,肖卫,卓芸.浅谈土质路堑边坡变形与稳定性[J].山西建筑,2004,30(7):104-105.
- [4] 赵宇坤,刘江东,李庆安.黄河下游堤防稳定性分析方法适应性研究[J].人民黄河,2004,26(12):5-7.
- [5] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].第二版.北京:中国水利水电出版社,1996.
- [6] 华南理工大学,东南大学.地基及基础[M].第三版.北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [7] 汪益敏,陈页开,韩大建,等.降雨入渗对边坡稳定影响的实例分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(6):920-924.

(上接第178页)

参考文献:

- [1] 国际岩石力学学会试验室和现场试验标准化委员会.岩石力学试验建议方法[M].上集.北京:煤炭工业出版社,1982.
- [2] Fairhurst C E, Hudson J A.单轴压缩试验测定完整岩石应力-应变全曲线 ISRM 建议方法草案[J].岩石力学与工程学报,2000,(6):802-808.
- [3] 朱建明,徐秉业.岩石类材料峰后滑移剪胀变形特征研究[J].力学与实践,2001,23(5):19-22.
- [4] 闫立宏,吴基文.煤岩单轴压缩试验研究[J].矿业安全与环保,2001,28(2):14-16.
- [5] 任建喜,葛修润.岩石破坏全过程的CT细观损伤演化机理动态分析[J].西安公路交通大学学报,2000,20(2):12-15.
- [6] 傅宇方,祁宏伟.岩石破裂过程中围压效应的数值试验研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2000,19(5):488.
- [7] 刘冬梅,谢锦平.岩石变形断裂过程的全息干涉法实测研究[J].岩石力学与工程学报,2001,20(A01):944-947.