

堆积层滑坡滑动面搜寻及稳定性评价^{*}

向先超,涂鹏飞

(三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室,湖北 宜昌 443002)

摘 要:堆积层滑坡坡体物质组成复杂、不均匀,结构杂乱,水库水位的变化,也将明显改变其岩土力学性质。该类滑坡在三峡库区乃至全世界都有广泛分布,为了提高其稳定性分析的精度,提出了优化技术结合地质勘察搜索最危险滑动面的方法。并结合三峡库区 - 岸坡工程实例,进行了多种工况条件下的稳定性分析,得到了各工况条件下的稳定安全系数。结果表明:该方法能较好地进行堆积层滑坡滑动面搜寻,为堆积层滑坡稳定性评价的可靠性提供保证。

关键词:滑坡侵蚀;堆积层边坡;稳定性分析;滑动面

中图分类号: P642. 22

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)04-0060-03

Searching for Slip Surface and Stability Analysis of Colluvial Slope

XIANG Xian-chao, TU Peng-fei

(Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, China Three Gorges University, Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: Colluvial landslide deposit material is much different from homogeneous and continuous soil. And the properties of reservoir bank will be changed greatly with water level changing. Colluvial landslides distribute in the world widely, especially in the Three Gorges Reservoir area. In order to make an accurate evaluation of the stability analysis, a geological exploration and optimization method is developed for searching for the critical slip surface. And the method is applied to a Three Gorges Reservoir bank slope stability analysis. The result showed the method could find out the critical slip surface exactly, then the stability of colluvial slope could be estimated correctly.

Key words: slip erosion; colluvial slope; stability analysis; slip surface

1 引言

三峡库区库岸滑坡表层存在大量的第四系松散堆积体,这些松散堆积体碎、砾石含量一般在 30% ~ 70% 之间,主要包括残坡积物、崩坡积物和冲洪积物,物质成份以土夹碎石或碎块石、碎石或碎块石夹土等土石混合物为主,物质结构杂乱无章、分选性差、粒间结合力差、透水性强。它既不同于一般的岩体,又不同于一般的土体,而是介于土体与岩体之间的一种特殊的地质体,工程中一般称为碎石土^[1-2],也有部分学者^[3-4]称其为“土石混合体”。堆积层滑坡分布广泛、暴发频率高。其滑坡堆积体自表层向深处,自后缘向

前缘具含泥量及密实度增加、空隙度及渗透性减小的趋势,滑面多为滑坡堆积体与基岩接触面^[5]。

随着水库的正常运行,水库水位的变化将成为诱发库岸滑坡滑动的主导因素。三峡水库蓄水后,库水位迅速抬高近百米,将打破长久以来大自然塑造的地质环境平衡。水库蓄水会使库区及其附近地区的地下水位大幅度提高,而水库的调节运行又会使地下水位产生显著的动态变化,导致岸坡中的地下水静、动水压力发生较大变化,从而加剧库岸地带地下水的活动^[6]。降雨与库水位变化的联合作用,将诱发更多的滑坡^[7-8]。

滑坡稳定性评价方法较多,除传统的极限平衡

* 收稿日期:2009-01-14

基金项目:湖北省自然科学基金计划项目(2008CDB052);湖北省教育厅自然科学基金项目(Q20081302);三峡库区地质灾害教育部重点实验室主任基金项目(2008ZRJ03)

作者简介:向先超(1976-),男,湖北利川人,副教授,从事岩土工程方面的研究工作。E-mail:xiangxc1224@yahoo.com.cn

方法外,有限元法等数值计算方法在岩土工程中也得到了极大的发展。但由于堆积层土体粒径范围宽、结构杂乱,与水之间相互作用机理复杂,目前的理论分析和数值模拟结果还很难真实、全面地反映降雨和库水变化诱发滑坡的机理。并且有限元等数值计算方法需要大量的参数,除重大项目外,一般工程难以满足要求,参数引起的误差要远远大于计算方法引起的误差。因此传统的极限平衡方法,在该类滑坡的稳定性分析中仍然得到了广泛应用。

2 堆积层滑坡滑动面搜寻方法

对于地层均一的土体滑坡来说,滑动面通常可用圆弧来表示,但是对于地层非均一的滑坡,圆弧滑动面往往不能反映实际情况。堆积层滑坡体物质组成复杂,不同于一般的土体,并且分布不均匀,滑动面的确定只能是基于对整个滑坡综合分析基础上确定。目前堆积层滑坡,有沿基岩顶面滑动的,也有沿不同年代或不同类型堆积面滑动的。一些学者对最危险滑动面的搜索方法进行了研究,提出了各种不同的方法,大致可以分为以下几类^[9]:变分法、固定模式搜索法、数学规划方法、随机搜索方法和人工智能方法。这些方法在对复杂条件下的滑坡进行分析时,都具有各自的优势和不足^[10]。

目前在堆积层滑坡稳定性评价和工程治理中,滑动面还是主要靠地质勘察确定。由于很多堆积层滑坡勘探孔数量布置有限,而且滑坡堆积体存在高度的不均匀性,也导致部分勘探孔资料不能很好地揭示滑动面位置,难以确定完整的滑动面。因此通过勘察资料常常只可预先确定滑动面可能经过的部分线段(如有明显的滑带、软弱夹层存在的地方,图1中实线段),然后再在其他难以确定的部分线段采用数学搜寻技术。安全系数可以表示为滑坡剖面中滑动面位置的函数,设滑动面上还有 n 个点的位置不确定,则 $k=f(x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_n)$, (x_i, y_i 为滑动面上第 i 点的坐标)。于是最危险滑动面的搜索就变成一个求解多变量有约束非线性最优化问题。结合地质勘察资料预先确定可能经过的部分滑动面,既可以使搜索结果更加合理,也可以减少计算量,提高搜索精度。

具体实现过程是:(1)绘制出滑坡外形和滑动面明显可能经过的线段;(2)在这些线段之间以一定的步长从横向和竖向两个方向进行搜索,确定出一系列可能的滑动面。每个滑动面与坡面线形成一个可能的滑动线,为每个可能滑动体进行条分,条分时遵

从以下条件:

在外形和滑动面转折点前后要分成不同的条块,在岩土力学性质有明显差异的地方要分成不同的条块。计算出每个可能滑动面极限平衡条件下的安全系数 k ,安全系数最小的滑动面即为最危险滑动面。以上的条分及计算过程比较繁杂,整个过程通过计算机编程实现。

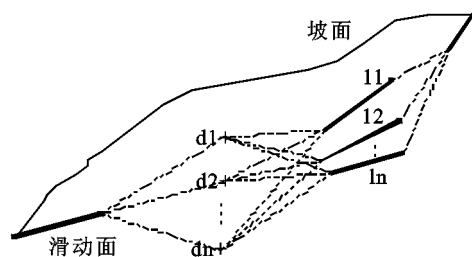


图1 滑动面搜索图

3 计算实例

下面以三峡库区某堆积层滑坡为例进行稳定性分析。

3.1 滑坡物质组成及结构特征

该滑坡主要由三叠系碳酸盐岩和细碎屑岩,第四系残坡积、崩坡积、冲洪积和滑坡堆积层组成。滑坡体成份复杂,总的趋势是上部主要以黏性土夹碎块石为特征,紫红色、黄褐色、土黄色,黏土呈可塑-硬塑状,碎块石以长石石英砂岩、泥质粉砂岩、泥岩为主,棱角状,表面多有风化现象,块径变化大,一般为3~20 cm,土石比8~2~6~4。下部以碎块石土夹黏性土为特征,紫红色、黄褐色,碎块石母岩成分以砂岩、泥岩为主,棱角状,表面多有风化现象,块径变化大,一般为10~40 cm,个别达100 cm以上;黏性土为硬塑-可塑状。土石比2~8~4~6。堆积层岩土体物理力学性质见表1。近东西向的向斜主导着本地区的构造格架,在褶皱的形成过程中,有着很好的协调应力和应变作用,因而区内次级褶皱不发育。断裂构造也不发育,但节理裂隙发育,主要受控于区域构造,劈理较发育,走向较稳定,与褶皱枢纽方向一致。该地区地震基本烈度属Ⅵ度区。地下水类型主要有孔隙水、岩溶裂隙水。

3.2 计算工况

滑坡变形的主要动力是滑体自重。此外还有其它因素所产生的附加力,如地表载荷、水的作用力、地震力等。水压力包括静水压力、动水压力和浮托力。浮力减重和动水压力是导致滑坡的主要作用之一。水位大幅度下降时,坡体中地下水水力坡度会增大。在较大的渗透作用下,会造成坡体中细颗粒

的冲移,从而引起滑坡地表变形或诱发滑坡产生。另外,水长期浸泡软化作用不可忽视。三峡库区位于Ⅱ类地区,不考虑地震荷载的影响。按以下 5 种情况进行稳定性分析。

表 1 滑坡土体物理力学性质指标

深度/ m	含水量 / %	湿密度 / (g · cm ⁻³)	干密度 d/ (g · cm ⁻³)	比重 G _s	液限 L/ %	塑限 P/ %	压缩模量 E _s / MPa	抗剪强度	
								内聚力 C/ kPa	内摩擦角 / (°)
0~6	15.8	2.22	1.92	2.71	24.6	13.5	10.1	25.6	16.8
6~13	14.9	2.34	2.04	2.72	26.8	13.9	12.1	33.3	14.8
13~19	15.5	2.21	1.91	2.71	25.3	14.2	7.1	40.0	16.0
19~27	31.2	1.91	1.96	2.75	44.7	22.4	5.2	33.0	22.0

- 工况 1:自重 + 地表载荷;
- 工况 2:自重 + 地表载荷 + 10 年一遇暴雨;
- 工况 3:自重 + 地表载荷 + 10 年一遇暴雨 + 175 m 水位;
- 工况 4:自重 + 地表载荷 + 10 年一遇暴雨 + 175 m 水位降至 145 m 水位;
- 工况 5:自重 + 地表载荷 + 10 年一遇暴雨 + 156 m 水位。

3.3 稳定性分析

根据勘查结果分析,初步确定滑动面为折线型,首先采用传递系数法进行最危险滑动面的搜寻。其计算剩余下滑力的步骤为沿滑面倾向方向作剖面,在滑面折线的转点将滑体分为 n 块,自上而下依次逐块计算各分块的剩余下滑力,进行下一块计算时,应将上一块剩余下滑力分解迭加于下一块上(上一块剩余下滑力小于 0 时不参与叠加),此时假定各块剩余下滑力的方向与该块沿滑面方向平行,最后一块的剩余下滑力为整个滑坡的下滑力。当最后一块剩余下滑力为正值时为不稳定;为负值时为稳定;为零时,为极限稳定。如图 2,图中各符号含义参见后面的剩余下滑力计算公式。

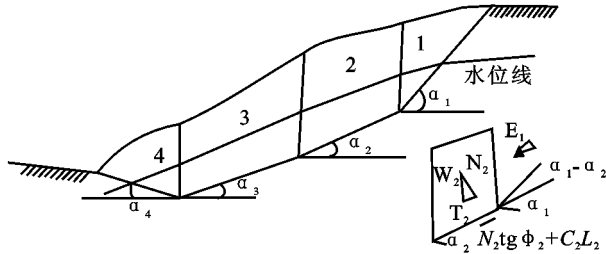


图 2 传递系数法计算图

$$E_n = W_n \sin \alpha_n + P_n \cos \alpha_n + E_{n-1} \cos(\alpha_{n-1} - \alpha_n) - [W_n \cos \alpha_n + E_{n-1} \sin(\alpha_{n-1} - \alpha_n) - D_n - P_n \sin \alpha_n] \tan \alpha_n - C_n L_n$$

式中: E_n, E_{n-1} ——第 $n, n-1$ 块剩余下滑力 (kN/ m); W_n ——第 n 块滑体重力 (kN/ m); α_n, α_{n-1} ——第 $n, n-1$ 块滑面倾角 (°); C_n, α_n ——第 n 块粘聚力 (kN/ m²) 和内摩擦角 (°); L_n ——第 n 块滑面长度

(m); D_n ——孔隙水压力 (kN/ m); P_n ——水平地震力 (kN/ m), $P_n = c K_z W_n$; c ——综合影响系数,采用 0.25; K_z ——水平地震系数。

编程实现前面的计算过程,工况 3 搜索得到的滑动面见图 3。

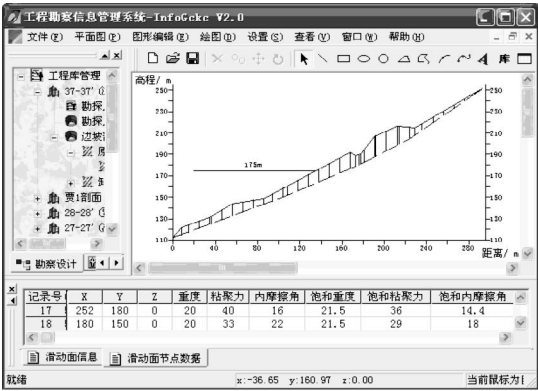


图 3 滑动面搜索结果计算机输出界面

计算结果表明:滑坡在工况 1 处于稳定状态,10 年一遇暴雨条件下,滑坡处于基本稳定状态,局部处于欠稳定状态;175 m 蓄水、175 m 水位降至 145 m 水位,滑坡体处于不稳定状态;156 m 蓄水会使滑坡体大部分处于不稳定状态。

表 2 几种工况下安全系数计算结果

	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
安全系数	1.29	1.12	0.83	0.81	0.96

4 结论

(1) 堆积层滑坡自身地质条件复杂,外部环境变化较大,因此潜在滑动面的确定是一个比较复杂的过程,首先根据实际地质条件确定滑动面可能经过的地段,然后在二维空间中展开搜索,并将其归结为一个求解多变量有约束非线性最优化问题,可以得到可靠的最危险滑动面。

(2) 由于滑动面搜索及稳定性评价过程比较复杂,计算量大,通过编程实现了整个稳定性评价过程。

(下转第 67 页)

由此说明,土壤流失方程在本地区实际应用中具有较高的适用性和可行性。

5 结 论

(1)以江苏省赣榆夹谷山水土保持试验站 9 a 的实测资料为依据,研究了 USLE 模型中各因子的取值方法,并进行土壤流失量的计算分析,可信度达 87 % 以上,因此,该模型具有较高的适用性和可靠性,可以在本地区进行应用。

(2)降雨侵蚀力是影响土壤侵蚀的关键因子,也是本文研究的重点,提出了本地区降雨侵蚀力的最佳组合及 R 值的简便算式。各地降雨特征和地理位置等因素不同, R 因子的取值亦不同。

(3)从土壤流失方程可以看出, R 、 K 是自然因子,人们几乎不能改变它们,而 LS 、 C 、 P 则是可以改变的,因此,可以通过坡改梯、增加植被、调整种植结构等工程和生物措施来减少土壤流失量。

(4)该试验研究成果已成功应用到赣榆县小流域的综合治理和水土保持规划中,取得了显著成效。

参考文献:

[1] 刘宝元,谢云,张科利.土壤侵蚀预报模型[M].北京:中国科学技术出版社,2001.
[2] 李纪人,黄诗峰,张行南.“3S”技术水利应用指南[M].北京:中国水利水电出版社,2002.
[3] 刘淼,胡远满.基于GIS、RS和RUSLE的林區土壤侵蚀量定量研究[J].水土保持研究,2004,11(3):21-24.
[4] Okan Fistikoglu,Nilgun B Harmancioglu. Integration of

GIS with USLE in Assessment of Soil Erosion[J]. Water Resources Management,2002,250(16):447-467.
[5] 马琨,马斌,何宪平.宁晋黄土高原坡面土壤侵蚀与影响因子研究[J].水土保持研究,2007,14(1):7-10.
[6] Wischmeier W H,Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning [M]. Washington:D C:U. S. Gov. Print Office,1978.
[7] Renard K G,Foster G R,Weesies G A,etal. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation [M]. Washington D C:U. S. Gov. Print Office,1997.
[8] Nuno de S L,Miguel de A C. A new procedure to estimate the RUSLE EI_{30} index based on monthly rainfall data and applied to the arveregion,Portugal[J]. Journal of Hydrology,2001,250(1):12-18.
[9] 贾志军.晋西黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力指标 R 值的确定[J].中国水土保持,1997(6):18-20.
[10] 黄炎和.闽东南降雨侵蚀力指标 R 值的研究[J].水土保持学报,1992,6(4):1-5.
[11] 刘运河.水土保持[M].哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1988:71-84.
[12] 高克昌,赵纯勇.重庆市主城区降雨侵蚀力的计算方法研究[J].中国水土保持,2002(6):22-24.
[13] 胡续礼,杨树江.几种降雨侵蚀力模型的比较研究[J].水土保持通报,2006,26(1):68-70.
[14] 赵文武,朱婧,郭雯雯.基于降雨量和降雨时间的月降雨侵蚀力简易算法[J].中国水土保持科学,2007,5(6):8-14.
[15] 刘和平,袁爱萍,路炳军,等.北京侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持研究,2007,14(1):215-217.

(上接第 62 页)

参考文献:

[1] 中华人民共和国建设部.岩土工程勘察规范(GB50021-2000)[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
[2] 《工程地质手册》编写委员会.工程地质手册[S].北京:中国建筑工业出版社,1992.
[3] 油新华.土石混合体随机结构模型及其应用研究[D].北京:北京交通大学,2001.
[4] Xiao Li, Qiulin Liao, Jianming He. In-situ Tests and Stochastic Structural Model of Rock and Soil Aggregate in the Three Gorges Reservoir Area [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004,41(3):494-499.

[5] 李正川,刘贵应.三峡库区堆积层滑坡特性及其稳定性分析评价[J].科技咨询导报,2007(25):59.
[6] 廖红建,高石夯,盛谦,等.渗透系数与库水位变化对边坡稳定性的影响[J].西安交通大学学报,2006,40(1):88-92.
[7] 王发读.浅层堆积物滑坡特征及其与降雨的关系初探[J].水文地质工程地质,1995(1):20-23.
[8] 林卫烈,杨舜成.滑坡与降雨量相关性研究[J].福建水土保持,2003,15(1):28-33.
[9] 夏元友,李梅.边坡稳定性评价方法研究及发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2002,21(7):1087-1091.
[10] 王成华,夏绪勇.边坡稳定分析中的临界滑动面搜索方法述评[J].四川建筑科学研究,2002,28(3):34-39.