



巢湖凤凰山滑坡形成机制和稳定性分析

Analysis of the stability of Mountain Phoenix landslide in Chaohu City

王国强 吴道祥 刘 洋 吴唱懂
(合肥工业大学 安徽 合肥 230009)

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)05-0645-04

作者简介: 王国强(1951-)男,安徽泾县人,教授,硕士,现从事工程地质和环境地质方面的教学和科研工作。

1 前 言*

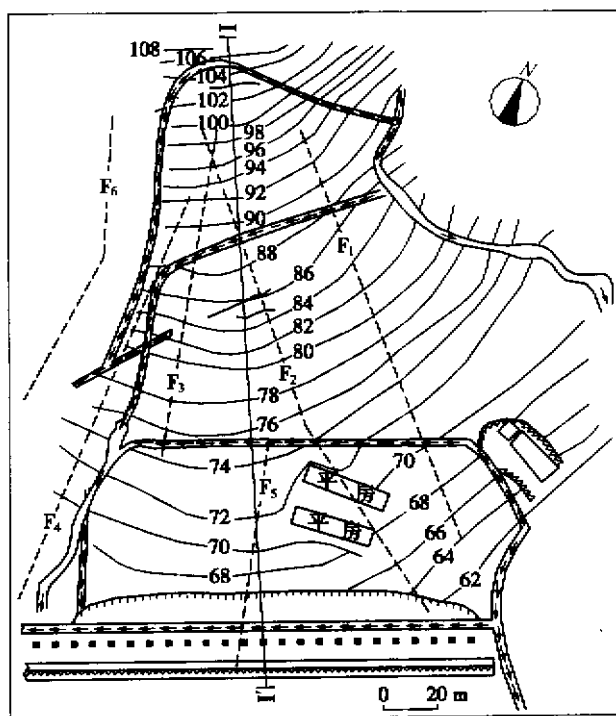
滑坡是山区和丘陵地区常见的地质灾害,其发育常常与区域岩土分布有关,如我国西北地区的黄土滑坡,西南地区和皖南山区的层状岩体或片状变质岩的滑坡,长江中下游地区的膨胀土滑坡以及华南地区风化岩体的滑坡^[1,2]。随着经济建设的发展和环境地质条件的恶化,近年来我国滑坡地质灾害越来越严重,滑坡地质灾害引起了人们的广泛重视。

地球内力造成地形起伏,而外力则对地形进行夷平,现代地形是地球内、外营力长期作用、塑造的结果。在自然条件下,组成斜坡的岩土体强度与重力及各种地质营力长期互相作用、互为消长,随着边坡岩土体的逐渐夷平、固结,边坡内部应力调整,岩土体强度提高和植被发育,边坡将向稳定方向发展;当边坡由于受雨雪和地下水的侵蚀、河(库)水的冲刷、风化以及地震、地应力等作用,使边坡岩土体强度降低,在重力作用下沿着斜坡产生滑动。

滑坡地质灾害与人类的工程实践和经济活动有着密切的关系,人类的工程实践和经济活动往往诱发和加剧滑坡的发生与发展。滑坡地质灾害给人们的生命财产造成严重的危害,破坏了人类赖以生存的生态地质环境,阻碍了区域经济的可持续发展。巢湖市凤凰山滑坡就是由于工程挖方而引起的大型工程滑坡。本文对该滑坡的形成条件、影响滑坡稳定性的因素、滑坡面和滑带土的性质进行了分析、评价,对边坡的稳定性进行了计算和论证,并根据滑坡的环境地质特点对滑坡的治理提出了支挡和排水的综合处理措施,指出人类的经济建设和工程活动应符合和顺应自然规律,要充分认识工程建设和地质环境的互馈作用,不能以破坏地质环境为代价。

2 滑坡及环境地质概况

滑坡位于巢湖市北郊凤凰山南坡由粉质黏土夹碎石组成的洪坡积裙尾部,见图 1。



图例说明:

- | | | |
|----------|-----------------------|--------|
| 78 地形等高线 | F ₄ 物探推测断层 | 剖面线及编号 |
| 陡坎 | C ₁ 下石炭统 | 地表排洪沟 |
| 抗滑桩孔 | 挡土墙 | 地表裂缝 |

图 1 凤凰山滑坡平面示意图

Fig. 1 Plan view of Mountain Phoenix landslide

1986 年兴建厂房时,挖方 6.5 万 m³,形成长 160 m,高 10 m 的近直立临空面,并修建了挡土墙。1987 年 9 月产生范围 245 m × 160 m,体积约 50 万 m³ 的滑坡体,使挡土墙出现 8 cm 宽的裂缝,随即在挡土墙后施工 6 根深 16 m,断面 1.5 m × 2.5 m 的抗滑桩,但是未能遏制挡土墙位移。至 1990 年,虽然已经施工 24 根抗滑桩,挡土墙仍然继续位移 6.3 ~ 14.6 cm,墙基础受挤压隆起,严重威胁厂区的安全。1991 年特大洪水未退之前,挡土墙严重变形、隆起,在滑坡体原主

* 基金项目 安徽省自然科学基金资助项目(00047102)

收稿日期 2002-01-25

表 1 滑坡区地层结构及岩土工程性质

Table 1 Stratification and engineering properties of rock and soil in landslide area

地 层	厚度 /m	容重 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙度	孔隙比 e	岩性及主要工程性质
① 含碎石粉质黏土	2 ~ 16	19.1	46.5	0.87	中密或可塑,湿,表部密实,压缩性、透水性较弱
② 坡积碎石土	0 ~ 3	19.5	44.0	0.79	中密—密实,饱和,透水性较强,洪坡积物含碎石
③ 风化残积碎石土	0 ~ 6	19.3	45.0	0.82	中密状态,饱和,透水性较强,残积土含风化碎石
④ 石灰岩及碎屑岩	厚层	25.4	3.2		厚层灰岩等,岩性致密,表面溶蚀,相对不透水层

滑线方向因有抗滑桩阻挡而使滑坡主滑线方向向北偏移,滑坡体处于极限平衡状态。笔者认为先前施工的抗滑桩对于阻止滑坡体滑动起了积极作用,否则在特大洪水的 1991 年滑坡体造成的危害将不堪设想。由于先前的治理没有进行勘测,对滑坡体的工程地质条件,如滑动范围,滑动面的位置、形状、空间展布特征,滑带土的性质,滑坡体的推力以及地表水和地下水的影 响等都不清楚的情况下,盲目采取被动的支挡措施是必然要失败的。

滑坡区地貌单元属沿江剥蚀丘陵地带,海拔 50 ~ 500 m,最大滑动面顶部标高 106 ~ 108 m,削坡开挖处的标高约 50 m,开挖陡坎高 10 m,原始地形坡度 10° ~ 15°,在陡坎后部有一个约 7 m,坡度为 40° 的陡坎。在滑坡中心线上,标高 105 ~ 106 m、85 ~ 86 m、67 ~ 68 m 处发育有楔形张裂缝。通过地面调查并结合钻孔和原位测试,发现滑坡体存在多个滑动面,最低滑动面埋深在 17 ~ 18 m 之间,是由于开挖坡脚引起的沿基岩面滑动的牵引式土体滑坡(见图 2)。

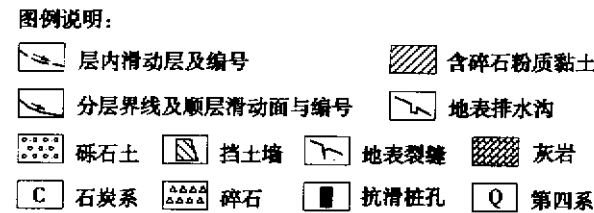
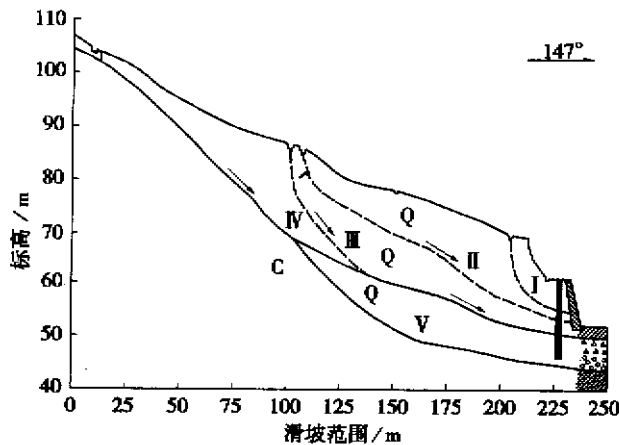


图 2 凤凰山滑坡剖面示意图

Fig.2 Section of Mountain Phoenix landslide

巢湖地区的年降水量在 900 ~ 1200 mm 之间,其中夏雨占 45%,并且多暴雨,是发生滑坡的高峰期。滑坡区地下水类型主要有第四系孔隙潜水和石灰岩中的岩溶裂隙水,滑坡体中地下水位埋深受地形控制,地下水位埋深 1 ~ 4 m,受大气降水和后缘石灰岩中的岩溶裂隙水补给。滑坡区地层结构及岩土工程性质见表 1。

3 滑坡原因分析

滑坡体下伏为石炭系灰岩和碎屑岩,岩性致密坚硬、强度高,透水性弱,岩体稳定性好。滑坡体为第四系残、坡积物,岩性由上至下依次是含碎石黏性土、坡积碎石土和风化残积土,其结构疏密不均,各层土体之间、残坡积层和基岩之间,以及在土体的垂直和水平方向之间的透水性都存在显著差别,地下水沿着各土层界面渗流形成地下水渗流通道,使渗流带土体软化,土体的抗剪强度降低,地下水的渗流带走土体中的细小颗粒,使土体结构疏松^[3]。特别是地下水长期沿着基岩相对不透水面渗透、侵蚀,在基岩相对不透水层与风化坡积层之间形成软弱带,而边坡滑动又使软弱带土体结构扰动和破碎,导致地下水侵蚀容易度的增加,侵蚀作用又加剧滑坡体的不稳定^[4,5]。风化和水的作用是长期、缓慢的变化过程,使土体抗剪强度降低,处于边缘稳定状态,边坡土体滑动是滑动带土体的抗滑力和土体下滑力长期作用的结果。

与地形斜坡倾向一致的软、硬相间的岩土组合体是滑坡产生的内在因素,而人为开挖斜坡是造成边坡失稳的直接外因,地下水的长期渗透、侵蚀作用和风化作用使边坡滑动带土体结构疏松、软化,强度降低,使边坡土体容重增大,抗剪强度降低,特别是土体的表观凝聚力丧失,导致边坡处于边缘稳定状态;而集中降雨、水位突然降低等对边坡滑动起重要的诱发作用^[6]。此外,植被对斜坡的防护作用也是极其重要的。植物根系对斜坡表层及浅部起稳固作用,使土壤黏结力增加,提高了土壤的抗剪强度,树根还能扎根于坚硬的岩土中,对上部土体起锚固和支撑作用,植被可以拦截雨水和蒸发地下水使土壤保持相对干燥而降低地下水压力,使斜坡稳定性增加,植被技术稳定斜坡的另一重要

作用是提高了环境的协调性,并且可提高网格或层状覆盖工程的稳定性。利用植物生长、代谢等生理机制,使植物修复技术在减少污染、生态恢复和环境保护方面具有良好的应用前景^[7~9]。当然,植被的根系对岩石裂缝的扩展、植被的重量和风对裸露植被的摇动力量等对斜坡的稳定性起相反作用。

滑坡的防治和滑坡诱发因素之间具有明显联系,为防止边坡失稳滑动,需调查研究滑坡的影响因素,进行边坡稳定性分析,采取切实可行的工程措施,综合治理,减少边坡不稳定因素,使滑坡向稳定方向发展。

4 滑坡稳定性分析

4.1 计算参数 c 和 φ 值的确定

滑动面抗剪强度参数的准确取值直接影响边坡计算、分析的可靠性。抗剪强度指标可以通过室内试验、野外原位试验或根据已知资料反算求得。室内试验可根据滑坡的具体地质条件,选择原状土或重塑土重复剪试验。对于已经滑动的边坡常常采用重塑土重复剪取得土的残余强度,在滑带土中取土样 4 组试验,其残余抗剪强度平均值黏聚力 $c = 3 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 9^\circ$ ^[10]。室内试验由于土样受取样、运输、试验等因素的影响,试验指标和实际值误差较大,因此,于清杨等提出了应用折减系数法对抗剪强度取值的方法^[11],认为长春市超固结黏土的抗剪强度指标用于边坡计算时的折减系数为 0.5 ~ 0.6 之间。根据地区大量的工程资料,提出符合实际的计算参数对于边坡分析和基坑围护都具有重要意义。在滑坡计算中也常采用反算法求土的抗剪强度指标。利用极限平衡原理,选择两个不同的滑动面来验算解方程反求 c 和 φ 值,对应图 2 中所示 5 个滑动面的抗剪强度指标见表 2。

表 2 各滑动面平均抗剪强度指标及稳定安全系数
Table 2 Parameters of average shear strength and safety factors

滑动面	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	稳定安全系数
I	13	8.5	0.982
II	12	15.0	1.016
III	11	21.0	1.040
IV	5	24.0	1.212
V	3	32.0	1.058

4.2 滑坡稳定性分析

采用毕肖普法对巢湖凤凰山滑坡中 I ~ V 五个滑动面进行稳定性计算分析,各滑动面的 c 和 φ 值见表 2,计算式如下:

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_{\theta_i}}(cb_i + W_i \tan \varphi)}{\sum W_i \sin \theta_i} \quad (1)$$

$$m_{\theta_i} = \cos \theta_i + \frac{\tan \varphi}{F_s} \sin \theta_i \quad (2)$$

式中 F_s 为土坡的稳定安全系数; c 为滑动面上土的平均黏聚力(kPa); b 为各分条宽度(m); W_i 为各分条土的重量(kN/m); φ 为滑动面上土的平均内摩擦角($^\circ$);计算中因 m_{θ_i} 中也有 F_s 这个因子,采用迭代法计算,最后计算结果见表 2。

从计算结果分析来看,一般情况下除了 IV 滑动面的稳定安全系数大于 1.1 而处于稳定状态以外,其他各滑动面的稳定安全系数均小于 1.1 而处于非稳定状态。而一旦因雨季的来临或洪水位的上升使滑坡体中地下水位上升,一方面会使各滑动面的抗剪强度指标降低,另一方面还会使土体因含水率的增大而容重随之增大。从毕肖普法的实质来看,也就是一方面使抗滑力矩减小而另一方面又使得滑动力矩增大,从而使滑坡的稳定安全系数减小,土坡将处于更加危险的状态。这也就是为什么该滑坡在雨季,特别是在 1991 年洪水期间加速滑动的原因。

从前文所述的对该滑坡的前期治理措施来看,因在治理前没有对滑坡的工程地质条件及其滑动破坏机制进行勘察分析,只是盲目采用施工抗滑桩的处理措施,抗滑桩桩长 16 m,而最低滑动面 V 的埋深在 17 ~ 18 m 之间。显而易见,抗滑桩只能对 I ~ IV 滑动面起抑制作用,而滑坡土体仍能沿滑动面 V 继续滑动,挡土墙也就继续位移,此时滑坡土体也将随之沿 I ~ IV 滑动面滑动,最终将导致挡土墙基础受损挤压破坏,使整个治理措施失败。

5 滑坡的综合治理

治理现有滑坡或预防即将发生的滑坡是一个降低滑动力或增加抗滑力的过程。治理措施可以分为 4 类(见表 3):①改变滑坡的几何形态;②排水;③拦挡构造;④斜坡内部加固。

在滑坡治理中这 4 类措施各有特点,需要根据滑坡的具体情况合理采用,而综合利用上述方法,采取综合治理才能取得满意的效果。排水是治理滑坡的主要措施,改变滑坡形态是第 2 种常用的方法,它们是 4 类处理方法中最经济的,而且不管采用哪种方法治理滑坡都需要涉及到排水和改变滑坡几何形态等综合治理措施。在高风险或狭窄场地的滑坡治理中常常采用拦挡构造措施,通过对滑坡的详细勘测、构筑物的合理设计和精心施工而达到治理目的,这是工程建设中常用的工程处理措施,但在许多大型滑坡的治理中,效果不明显且费用昂贵。近年来由于各种地基处理新技术的

表 3 滑坡治理措施简表
Table 3 Treatment of landslide

类 型	治 理 措 施	说 明
①改变斜坡几何形态	减小斜坡角度 ,清除驱动滑坡部位的物体(如适当削坡减小下滑力) ,增加物体保持滑坡体稳定(如平衡护道或充填增加抗滑力)	常用措施 ,注意削坡或充填位置
②排水系统	疏排地表水 ,垂直和水平疏排地下水(设滤层、钻孔、辐射孔、竖井、平洞和真空、虹吸、电渗排水) ,植被(水文作用)	主要措施 ,常用、有效 ,应注意系统维护
③拦挡构造	重力挡墙(木、金属筐墙、被动桩、墩、支架、混凝土桩) ,加筋土挡护结构(土工织物、金属及无机材料) ,岩面护坡、栅栏、台阶、护墙	适宜高风险或狭窄场地 ,重要工程措施
④斜坡内部加固	岩石或土锚杆、树根桩、锚固、灌浆、冷冻或加热处理、电渗加固、化学加固、砂石、水泥、石灰加固、植被(生物技术斜坡稳固法)	避免开挖或改变斜坡现状 ,环境效益好

发展和生物技术斜坡稳固法在滑坡治理中得到广泛的应用 ,通过对滑坡体内部的加固 ,使滑坡体抗滑力增加 ,自稳能力提高 ,取得良好的经济和环境效应。

基于上述思想 ,对凤凰山滑坡采用抗滑桩拦挡 ,设计桩长置于稳定岩层之下 ,并进行疏排地表水使之远离滑坡体 ,根据有利地形坡度条件在墙内设置粗粒碎石材料滤排地下水 ,适当改变滑坡体的坡形 ,实行封山育林、保护斜坡上的植被。通过综合治理 ,该滑坡体已处于稳定状态。

6 结 语

巢湖凤凰山滑坡是由于人为挖方、切坡诱发的工程滑坡。滑坡位于凤凰山南坡由粉质粘土夹碎石组成的洪积裙尾部 ,其下伏为石灰岩、碎屑岩和泥质岩等层状岩体组成 ,这种与地形斜坡倾向一致的软、硬相间的岩土组合体是滑坡产生的内在因素 ,而人为开挖斜坡是造成边坡失稳的直接外因 ,集中降雨对边坡滑动起重要的诱发作用。从滑坡治理来看可分两种情况 ,①针对滑坡原因采取措施 ,以制止滑坡或控制滑坡发展规律为主 ;②为针对滑坡危害采取措施 ,要经受住滑坡的作用或避免危害。两者均需对滑坡变形产生的基本条件 ,主要原因和变形过程分析清楚 ,然后才能针对滑坡原因采取整治措施。否则 ,盲目采取被动的支挡措施是要失败的。在治理方法上要采取综合治理才能取得满意的效果。滑坡治理总的原则是以预防为主 ,治理为辅 ,力求做到防患于未然。在工程建设中要重视对地质环境的研究 ,加强工程技术与工程地质的结合和联系 ,用可持续发展的理念来规范人们的经济建设和工程活动 ,使之符合和顺应自然规律 ,绝不能以破坏地质环境为代价 ,要从工程建设活动与地质环境的

互馈作用分析入手 ,探讨环境地质作用规律 ,对滑坡等地质灾害的发生、发展趋势进行预测 ,塑造人地和谐的人类生存环境。

参考文献 :

[1] 王国强 ,李瑛霞 ,吴道祥 ,等 . 安徽省地下水特征与水环境问题 [J]. 自然资源学报 ,2002 ,17(2) :234 - 239 .
[2] 王国强 . 安徽省江淮地区膨胀土的工程性质研究 [J]. 岩土工程学报 ,1999 ,21(1) :119 - 121 .
[3] 王国强 . 信江界牌枢纽工程基坑渗透稳定性评价 [J]. 岩石力学与工程学报 ,1999 ,18(2) :213 - 217 .
[4] 王国强 ,吴道祥 ,刘 洋 ,等 . 安徽省环境地质特征与地质灾害 [J]. 岩石力学与工程学报 (待刊) .
[5] Furuya G ,Sassa K ,Hiura H ,et al . Mechanism of creep movement caused by landslide activity and underground erosion in crystalline schis[J]. Southwestern Japan Engineery Geology ,1999 ,53 :311 - 325 .
[6] 王国强 ,李瑛霞 ,吴道祥 ,等 . 水位消涨对地基的侵蚀作用及实例分析 [J]. 岩石力学与工程学报 ,2002 ,21(8) :1276 - 1280 .
[7] Robinson B H ,Chiarucci A ,Brooks R R ,et al . The nickel hyper-accumulator plant alyssum bertolonni as a potential agent for phytoremediation and phytomining[J]. J Geochem Explor ,1997 ,59 :75 - 86 .
[8] 王国强 ,赵华宏 ,吴道祥 ,等 . 两淮矿区煤矸石的卫生填埋与生态恢复 [J]. 煤炭学报 ,2001 ,26(4) :428 - 431 .
[9] 汪意敏 ,汪良旗 . 路基边坡的植物防护方法 [J]. 煤田地质与勘探 ,2001 ,29(5) :37 - 39 .
[10] 陈志刚 . 土质边坡滑移面(带) 的确定及参数的选取 [J]. 安徽地质 ,2000 ,10(4) :286 - 289 .
[11] 于清扬 ,詹 军 ,于颖波 . 黏性土抗剪强度在基坑支护设计中的应用 [J]. 煤田地质与勘探 ,2001 ,29(4) :40 - 41 .