

⑤ 48-101

第31卷第2期
2000年4月中南工业大学学报
J. CENT. SOUTH UNIV. TECHNOL.Vol. 31 No. 2
April 2000

土体滑坡治理的合理设计与计算

戴自航, 彭振斌

TU753.8

(中南工业大学 资源环境与建筑工程学院, 湖南 长沙 410083)

[摘要] 针对我国滑坡治理设计现状, 提出了在设计及计算中应充分考虑的因素; 此外, 在对某滑坡实例治理成功的经验基础上, 讨论了抗滑桩的设计方法, 并编写了设计计算程序。结果表明: 在充分考虑有关因素的前提下, 能确保滑坡治理经济而有效, 从而提高了滑坡治理水平。

[关键词] 滑坡; 滑坡治理; 抗滑桩

[中图分类号] TU735.8

[文献标识码] A

[文章编号] 1005-9792(2000)02-0098-04

岩土工程, 稳定分析, 推力, 设计

滑坡治理是一个复杂的岩土工程问题。虽然到目前为止, 国内外在整治滑坡方面已取得了许多成功的经验, 在滑坡机理分析和治理设计方面不断取得进展, 但远未成熟, 存在的技术问题仍较多^[1]。在我国, 对大多数滑坡的治理是成功的, 只有少数由于设计错误和人为因素等原因而失败, 但这并不意味着我国滑坡治理水平就很高, 很多滑坡治理之所以成功, 是保守设计的结果, 安全储备太大, 而不是理性分析研究的结果。造成这种现象的原因是多方面的, 主要表现在:

a. 某些设计人员对滑坡机理认识不足, 凭经验或主观臆断确定治理方案, 缺乏充分的理论根据。

b. 一些施工单位为节省设计费用, 不委托设计部门进行治理方案设计, 而仅根据以往的所谓经验盲目确定治理方案, 或生搬硬套别人的成功经验。

c. 部分设计人员不清楚设计时, 对应需哪些基本资料, 应做哪些勘察和试验工作, 测试哪些水工和土工参数等缺乏专业性认识。

由于上述原因, 致使很多滑坡治理水平偏低。其结果要么是过于保守, 以经济为代价; 要么就是失败, 造成很大的经济损失, 甚至危及人民生命财产安全。因此, 要提高我国滑坡治理整体水平, 就应克服以上问题, 以理论指导实践, 减少主观性和盲目性, 使对滑坡的治理真正做到经济合理、安全可靠。

1 滑坡机理分析与治理设计时应充分考虑的因素

1.1 勘察和试验

对已滑边坡应在现场仔细勘察滑坡破坏状况,

测绘滑坡体的地形图, 用钻探法或物探法确定滑坡区域各土层分布情况、地层结构、滑动面位置及形状。采用钻探法时, 应根据滑坡大小, 沿滑动主轴断面布设2个以上探孔, 力争获取原状土样以进行水工、土工试验, 以了解地下水是否对混凝土有腐蚀性及各土层的物理力学性质; 对滑带土体, 则应采用重复剪切试验测定其残余抗剪强度指标 c_r (残余粘聚力) 和 φ_r (残余内摩擦角), 以供设计计算时参考。

1.2 滑坡稳定分析和滑坡推力计算

对已产生过滑坡的边坡, 其最危险滑动面已经形成, 其位置和形状理应通过钻探或物探法确定。在缺乏这方面的勘察资料时, 可按计算机程序用搜索法^[2]或最优化法^[3]搜索确定。滑坡体稳定分析方法目前仍以各种极限平衡条分法^[4]为主, 如 Fellenius 法、Bishop 法、Janbu 法、Morgenstern and Price 法等。大量计算结果表明, 在最危险滑动面处, 各种方法的计算结果差别不大, 但滑坡体安全系数 K_{min} 和滑坡推力大小, 随 c_r 特别是 φ_r 的变化, 反应很敏感, 对厚度较大的大、中型滑坡尤其如此。因此, c_r 和 φ_r 的准确与否, 对设计计算结果影响甚大。目前, 国内外在确定 c_r 和 φ_r 时, 仍以反算为主, 再据参考试验数据和经验选定^[1]。滑坡推力通常按分块传递系数法确定, 并根据计算结果, 分析判断牵引段、主滑段和抗滑段的位置, 为抗滑结构位置设计提供合理依据。

1.3 抗滑结构的设计位置及其所受外力

抗滑结构合理设计位置, 是主滑段与抗滑段的分界面处, 为准确计算抗滑结构的内力, 应充分考虑

[收稿日期] 1999-09-25

[基金项目] 国家教育部博士点基金资助项目(9453305)

[作者简介] 戴自航(1966-), 男, 中南工业大学博士研究生

各种外力荷载,包括设计位置处滑坡体的下滑力、土压力和各种附加荷载(如滑坡体后缘平台之上的动、静载——临时性堆载或重型车辆、房屋荷载,孔隙水压力、地震作用所产生的附加惯性力等)。

1.4 抗滑结构的内力计算

在通常情况下,抗滑结构(如抗滑桩)为超静定结构,主要承受横向荷载,内力计算较复杂,与结构物周围土体抗力关系密切,应提高确定土体抗力的准确度,以提高结构物内力计算精度。为使问题简化,在进行内力分析和计算时,一般将抗滑结构按其受力特点分滑动面上、下两部分分别进行考虑,滑动面以上按悬臂梁处理,滑动面以下按弹性地基梁处理^[5]。在内力计算中,应保证结构弯矩的计算精度。

2 实例

基于对上述因素的充分考虑,于 1998 年采用抗滑桩对某滑坡进行了成功的治理。关于该滑坡,原施工单位技术员作过初步治理方案设计,主体工程拟采用重力式抗滑挡墙,加上排水、护面,总预算费用约为 42 万元。笔者发现,其设计计算多处欠妥,故重新进行设计。经比较,对主体工程采用抗滑桩型式,总预算费用 30 万元^[6],实际治理费用 28 万元。可见,经济效益显著。

2.1 滑坡稳定性分析计算

本计算采用的强度指标为含碎石粘土的残余强度 φ_r 和 c_r 。因土工试验中未做该土层的重复剪切试验,即未实测 φ_r 和 c_r ,故根据粘性滑带土残余强度的试验分析结果^[7],残余内摩擦角 φ_r 按下列线性回归方程进行计算:

$$\lg \varphi_r = 2.4278 - 1.2279 \lg I_p - 0.1173 \lg I_L + 0.1165 \quad (1)$$

式中, I_p 为原状土的塑性指数(本例取 $I_p = 20$); I_L 为原状土的液性指数(本例取 $I_L = 0.24$)。综合考虑滑坡的破坏状况,可算得 $\varphi_r = 11^\circ$ (原状土 $\varphi = 14.5^\circ$);残余粘聚力可以 I_L 为引数,查取 $c_r - w_L$ 的关系曲线得到 $c_r = 25 \text{ kPa}$ (原状土 $c = 40 \text{ kPa}$)。

计算中考虑的附加荷载为该滑坡体后缘平台之上的学生宿舍楼的部分静载(根据基础的型式、埋深及此处滑动面深度,计算时取线荷载的 1/3)。因地下水位于滑动面以下,故不考虑孔隙水压力。根据钻探揭露和滑坡体破坏状况,滑动面接近圆弧,按 Fellenius 圆弧法(见图 1)计算滑坡体稳定安全系数(见表

1)。表 1 中: w_i 为第 i 条块重力; T_i 为第 i 条块重力的切向分力; F_i 为第 i 条块的摩擦阻力; L 为滑动圆弧总长。由于滑坡体稳定安全系数 $K_{\min} = 0.93$,故该滑坡仍处于潜在不稳定状态,需及时治理。

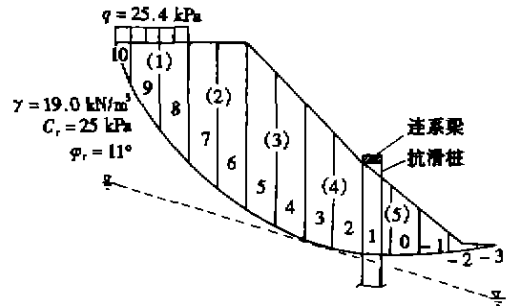


图 1 滑坡稳定分析及滑坡推力计算示意图

表 1 滑坡稳定分析计算结果

条块编号	w_i/kN	T_i/kN	F_i/kN
-3	3.80	-0.98	0.71
-2	22.80	-4.35	4.35
-1	91.20	-8.74	17.64
0	152.00	0	29.55
1	209.00	20.03	40.44
2	266.00	50.76	50.76
3	323.00	91.74	60.20
4	372.40	139.50	67.12
5	418.00	196.24	71.74
6	406.60	230.30	65.13
7	349.60	229.36	51.29
8	316.87	239.14	40.41
9	221.87	187.12	23.17
10	55.83	51.20	4.33

注:第 9、10 块附加荷载已计入 W_i 中;总粘聚力 $c_r \cdot L = 801.7$

kN ;安全系数 $K_{\min} = \frac{\sum F_i + c_r L}{\sum T_i} = 0.93$ 。

2.2 滑坡推力的计算

将滑动体分为 6 个块体(见图 1 中的圆括号序号),按分块传递系数法计算滑坡推力,公式为

$$E_n = E_{n-1} \psi_{(n-1,n)} + K \cdot W_n \cdot \sin \alpha_n - W_n \cdot \cos \alpha_n \cdot \tan \varphi_n - c_n L_n \quad (2)$$

其中: K 为安全系数; E_n 为第 n 块滑动体的剩余下滑力; W_n 为第 n 块滑动体的重力; α_n 为第 n 块滑动体的滑动面与水平面的夹角; c_n, φ_n 分别为第 n 块滑动体的滑动带上土的粘聚力和内摩擦角; L_n 为第 n 块滑动体的滑动带的长度。计算时考虑到该宿舍楼几百名学生的人生安全,取安全系数 $K = 1.25, c_n = c_r = 25 \text{ kPa}, \varphi_n = \varphi_r = 11^\circ, W_n$ 可由表 1 对应条块的土体重量相加得到。 α_n 可在图 1 上量取。计算结果见表 2。

表 2 滑坡推力计算结果表

分块编号	W_i/kN	$\alpha_i/(^\circ)$	L_i/m	E_{1i}/kN	E_{2i}/kN	E_i/kN
1	594.57	59	9.53	637.10	-297.70	339.30
2	756.20	40	5.13	607.60	-240.90	666.10
3	790.40	27	4.40	448.50	-246.80	821.60
4	589.00	17	4.03	215.30	-210.30	786.30
5	361.00	7	4.03	55.00	-170.40	632.40
6	117.80	-13	4.95	-33.10	-146.00	373.10

注:表中 $E_{1i} = KW_i \cdot \sin \alpha_i$; $E_{2i} = -c_i L_i - W_i \cos \alpha_i \cdot \tan \varphi_i$; $E_i = E_{1i-1} \psi_{(i-1,i)} + E_{1i} + E_{2i}$.

由表 2 可见,滑坡体总推力为 373.10 kN. 块体 1 虽出现裂隙,但并未完全贯通,应属牵引段;块体 2~4 由于自身下滑力 E_{1i} 均大于其阻滑力 E_{2i} ,应为主滑段;而块体 5 及块体 6 自身下滑力 E_{1i} 均小于其阻滑力 E_{2i} ,故应属抗滑段.

2.3 抗滑桩的设计及内力计算

由滑坡推力计算结果和分析可知,抗滑桩宜设在块体 4 和块体 5 的分界面处. 此位置的桩后滑坡推力为 786.3 kN/m,桩前剩余抗滑力为 413.2 kN/m. 根据此滑坡推力,设计选择桩径为 1.3 m 的圆截面钢筋混凝土抗滑桩,桩心距 2.3 m,桩长 14 m,锚固在滑动面以下 8 m,深入基岩 2 m 左右,依滑坡体影响范围共布桩 7 根.

按桩拱效应,每根桩上承受的滑坡推力 $E = 1808.5$ kN. 同时考虑桩土共同工作原理,计及桩间土体主动土压力的 70% 由土拱传递给桩^[1],则每根桩上承受的主动土压力 $E_a = 52.2$ kN. 由于设桩后,桩前滑动面以上土体不滑走,故应考虑计及部分被动土压力;又由于桩前土体呈三角楔体状,取被动土压力的 1/2 作为计算反力^[7-10]. 按桩的计算桩径可算得每根桩承受的被动土压力 $E_p = 916.8$ kN,最后可算得滑动面处桩截面所受水平推力 $H_0 = 943.9$ kN,弯矩 $M_0 = 3696.3$ kN·m.

在计算桩身内力时,滑动面以上按弹性支承的悬臂梁计算,电算结果如表 3 所示. 滑面以下,将桩视为 Winkler 弹性地基梁,其挠曲微分方程为

$$EI \frac{d^4 x}{dz^4} = -kb_0 x \quad (3)$$

式中: EI 为桩身抗弯刚度; b_0 为桩的计算宽度. 本例中,取 $b_0 = 0.9(d+1) = 2.07$ m. 土体抗力模数 k 按双参数法表达式确定^[3],即

$$k = mz^{1/n} \quad (4)$$

式中, m 和 $1/n$ 都是待定参数, $m > 0, 1/n \geq 0$.

定义桩的相对柔度系数(横向变形系数) α 为

$$\alpha = \left(\frac{mb_0}{EI} \right)^{1/4+1/n} \quad (5)$$

于是,可得到微分方程(3)的幂级数解析解^[4]. 将 $H_0 = 943.9$ kN, $M_0 = 3696.3$ kN·m, $b_0 = 2.07$ m, $EI = 3336723.82$ kN·m², $\alpha = 0.534$ m 输入电算程序,则可算得滑动面以下桩身内力,见表 4.

表 3 抗滑桩滑面以上桩身内力计算结果

桩截面深 z/m	侧壁应力 σ/MPa	弯矩 $M/(kN \cdot m)$	剪力 Q/kN	备注
0	231.9	0	0	桩顶面
1	194.9	142.7	277.4	
2	158.0	538.8	506.8	
3	121.0	1140.2	688.1	
4	84.1	1899.0	821.4	
5	47.1	2767.0	906.7	
6	10.2	3696.3	943.9	滑动面

表 4 抗滑桩滑面以下桩身内力计算结果

桩截面深 z/m	侧壁应力 σ/MPa	弯矩 $M/(kN \cdot m)$	剪力 Q/kN	备注
6	0	3696.3	943.9	滑动面
7	-428.2	4439.8	397.0	
8	-395.0	4376.7	-510.2	
9	-171.4	3528.2	-1108.5	
10	39.3	2321.6	-1231.3	
11	139.7	1176.5	-1024.3	
12	125.3	300.2	-733.5	
13	49.7	-327.4	-548.4	
14	0	-848	-510.6	桩底

根据表 3 和表 4,可绘出桩身截面内力图(见图 2). 可见,最大弯矩 $M_{\max} = 4526.3$ kN·m,位于滑动面以下 1.4 m 左右.

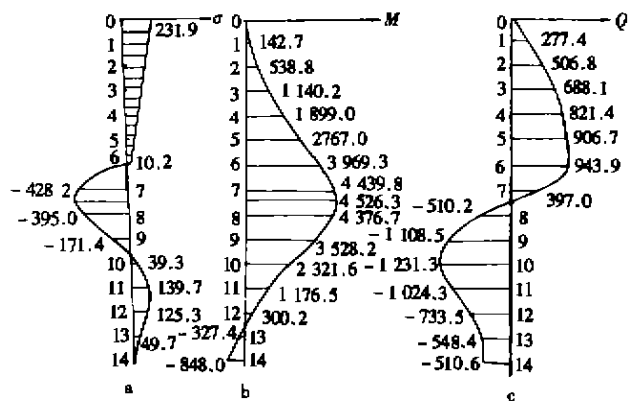


图 2 抗滑桩桩身截面内力图

2.4 抗滑桩的结构设计

钢筋混凝土抗滑桩结构设计中,桩身砼采用 C₂₅ 混凝土, $f_m = 13.5$ N/mm². 纵向受力钢筋采用 II 级热轧带肋钢筋, $f_y = 310$ N/mm². 按圆截面受弯构件配

筋^[10],混凝土保护层厚度 $\alpha_s = 50$ mm,钢筋面积计算公式为

$$A_s = [M - \frac{2}{3}f_{cm}A \frac{r}{\pi} \sin^3 \pi\alpha] / [f_y \frac{r_s}{\pi} (\sin\pi\alpha + \sin\pi\alpha_s)]$$

$$\alpha_s = 1.25 - 2\alpha \quad (6)$$

式中: A_s 为全部纵向钢筋的截面面积; M 为弯矩设计值; f_{cm} , f_y 分别为混凝土抗压强度和钢筋抗拉强度设计值; A 为抗滑桩截面面积; r , r_s 分别为桩截面半径和纵向钢筋所在圆周半径; α , α_s 分别为对应于受压区混凝土截面面积的圆心角与 2π 的比值和纵向受拉钢筋截面面积与全部纵向钢筋截面面积之比。

采用迭代法,经计算机程序计算,需配置 38 根直径为 32 mm 的纵筋,沿圆周均匀分布,通长配置,配筋率 $\rho_s = 2.3\%$ 。经验算,桩身能满足斜截面抗剪强度要求,故全桩按构造要求布置箍筋,采用 $\Phi 8 @ 200$ 螺旋箍,每隔 1.5 m 布置 1 根直径 16 mm 的焊接加强箍筋,以增强钢筋笼的整体刚度,便于钢筋笼吊放。

3 结 论

a. 在进行滑坡治理设计与计算时应充分考虑相关因素,实践证明,基于这些考虑,能经济而有效地治理滑坡,以提高滑坡治理水平。

b. 将滑带土的残余抗剪强度指标 c_r 和 φ_r 纳入滑坡稳定分析和滑坡推力计算,能提高计算结果的

可靠度。

c. 采用双参数法进行抗滑桩桩身内力计算,计算精度高于常规的单一参数法。

d. 治理后的滑坡变形监测结果表明,滑坡得到了有效控制,说明该滑坡的治理设计是成功的。

[参考文献]

- [1] 王恭先. 抗滑支挡建筑物的发展动向[A]. 滑坡文集编委会. 滑坡文集(第十三集)[C]. 北京:中国铁道出版社,1998. 60~64.
- [2] CHEN Zhu-yi. Random trial used in determining global minimum factors of safety of slopes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29: 225~233.
- [3] CHEN Zhu-yi. Experience with the search for minimum factor of safety of slopes[A]. In Proceedings of the 6th Australian-New Zealand conference on geomechanics[C]. New Zealand: Christchurch, 1992. 426~431.
- [4] 陈仲颐,周景星,王洪瑾. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社,1997.
- [5] 铁道部第二勘测设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京:中国铁道出版社,1983.
- [6] 隆 威,黄树华. 岩土工程预决算指南[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1997.
- [7] 李妥德,湛壮丽,张颖钧. 粘性滑带土的残余强度与界限含水量的关系[A]. 滑坡文集编委会. 滑坡文集(第三集)[C]. 北京:中国铁道出版社,1982. 106~108.
- [8] 徐凤鹤. 用桩拱墙整治滑坡[A]. 滑坡文集编委会. 滑坡文集(第三集)[C]. 北京:中国铁道出版社,1982. 136~142.
- [9] 吴恒立. 计算推力桩的综合刚度原理和双参数法[M]. 北京:人民交通出版社,1990.
- [10] 施岗青,傅德炫. 钢筋混凝土圆形环形截面构件程序设计和计算用表[M]. 北京:地震出版社,1992.

The reasonable design and calculation of curing earth slides

DAI Zi-hang, PENG Zhen-bing

(College of Resources, Environment and Civil Engineering, Central South University of Technology, Changsha 410083, China)

[Abstract] The paper puts forward a few of factors that should be taken into account thoughtfully in designing and calculating according to the present situation of earth slide cure in China. Meanwhile, the design and calculation method of slide-resistant piles is presented in detail based on the successful experience of curing a practical slide. The calculation method is programed. It proves that based on the premise of careful consideration of the factors mentioned in the paper, economical and effective slide cure can be ensured. Therefore the level of curing slides can be improved.

[Key words] slide; slide cure; slide-resistant piles