

黄土坡滑坡深层变形防治探讨

江鸿彬

(湖北省地质灾害防治中心)

摘 要 以库仑定律为基础,探讨岩土加固用于滑坡治理的设计方法。

关键词 岩土加固 加固率 抗剪强度

1 基本概况

黄土坡滑坡区位于长江南岸巴东县新城黄土坡小区,平面呈蝶状向北分布,为三峡库区滑坡之首。该滑坡是一个多期次形成的复合地质灾害体,以三道沟为界,西、东前缘临江分别为 (面积 $32.5 \times 10^4 \text{m}^2$, 体积 $2255.5 \times 10^4 \text{m}^3$, 平均厚 69.4m, 最厚 95.27m)、(面积 $32.6 \times 10^4 \text{m}^2$, 体积 $1992.2 \times 10^4 \text{m}^3$, 平均厚 61.11m, 最厚 91.84m) 号两个崩滑堆积体,分布高程在 250 ~ 260m 以下;其上由园艺场(园艺场滑坡分布于三道沟西侧,滑体面积为 $32.6 \times 10^4 \text{m}^2$, 体积 $1352.9 \times 10^4 \text{m}^3$, 其前缘超覆于 号临江崩滑堆积体之上,平均厚 41.5m, 最厚 86.64m)、变电站(变电站滑坡分布于三道沟以东,滑体面积 $38.1 \times 10^4 \text{m}^2$, 体积 $1333.5 \times 10^4 \text{m}^3$, 其前缘超覆于 号临江崩滑堆积体之上,平均厚 35m, 最厚 58m) 两个滑坡组成,分布高程在 180 ~ 600m。该滑坡区总面积 1.358km^2 , 体积 $6934.1 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

滑坡区滑体物质包括块石土、碎石土、碎裂岩及粉质粘土夹碎(块)石几个部分,呈紫红、黄褐、绿灰、灰黄、棕红色,表层大多为块石土或碎石土,一般紫红色碎石土容重值在 $20 \sim 23.5 \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 其他颜色碎石土容重值差异较大,一般在 $16.7 \sim 20.8 \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,孔隙比最小值为 0.481, 最大值达 1.041, 但大多数在 0.6 ~ 0.85, 属中密 - 稍密类。临江崩滑堆积体在空间上分布有多层不连续软弱夹层,其物质为粉质粘土夹碎石(或角砾、砾砂),属可塑 - 坚硬类土,直剪试验 φ 值为 $8^\circ \sim 15^\circ$, c 值为 $33 \sim 124 \text{kPa}$ 。园艺场滑坡滑带物质为粉质粘土夹角砾、碎石,为中 - 高塑性土,直剪试验 φ 值 15° , c 值 33kPa 。变电站滑坡上段滑带土以棕红色亚粘土为主,天然状态下的峰值抗剪强度:内摩擦角 φ 为 17.5° , 粘聚力 c 为 19.6kPa ;下段滑带土多为棕红色及灰黄色粉质粘土

夹角砾及碎块石,天然状态下的峰值抗剪强度:内摩擦角 φ 值 16.5° 。滑坡区下伏基岩为三叠系巴东组第二段(T_2b^2)紫红色泥岩夹粉砂岩,第三段下亚段(T_2b^{3-1})深灰色中厚层 ~ 厚层泥灰岩、灰岩夹钙质泥岩、灰黄色中厚层 ~ 厚层泥质灰岩与白云质灰岩互层,上亚段(T_2b^{3-2})浅灰绿色、黄绿浅灰色中厚层泥灰岩夹泥质白云岩。

该滑坡经采用 NACP 岩土边坡工程稳定性有限元计算程序,按理想塑性模型与 Mohr - coulomb 屈服准则,进行非线性弹 - 塑性二维有限元数值模拟分析计算。以及按弹塑性力学理论,采用美国 Itasca 顾问有限公司开发的 FLAC^{3D} 计算程序模拟分析计算,结果表明:黄土坡滑坡区目前在天然状态下处于基本稳定状态;在水库各阶段蓄水及运行条件下,水位以下部分坡体总位移量便达到 5.3m 和 10m 左右,最大剪应变增量集中带主要出露在:、号临江崩滑堆积体中部及近三道沟侧水下坡体,尤其是水库从 175m 水位下降到 145m 水位过程,临江崩滑堆积体与基岩接触带(古滑动带)是潜在失稳的控制性层位,处于库水位下的坡体将沿崩滑堆积体与基岩的接触带产生失稳破坏,破坏形式将以牵引式为主。之后,根据勘察进行的岩土物理力学试验数据、实测的地质剖面和水库各阶段不同工况,用传统的不平衡推力法对滑坡稳定性进行分析计算,结果表明:天然状态下,滑体安全系数为 $1.03 \sim 1.23$, 滑坡整体处于稳定状态。但在水库蓄水运行后,三道沟两侧一半滑体及临江崩滑堆积体不稳定,安全系数在 $0.81 \sim 1.06$ 间,尤以 135m、175m 蓄水叠加地震最低。

另据 2003 年 4 ~ 2004 年 4 月分布于滑坡区的 22 个地大形变、GPS 位移监测点,9 个深层钻孔倾斜仪监测孔,两处滑带平硐短基线监测,蓄水前,滑坡

(收稿日期) 2004 - 05 - 28

区滑体基本稳定,各监测的无大的变形迹象。6月蓄水后至9月, 号临江崩滑堆积体地表,以及 、

号临江崩滑堆积体 18.5~70m 深部多层软弱带位移量逐月增大,且呈现位移量由前至后逐渐减少的变形趋势。其中以 号临江崩滑堆积体三道沟西侧累计位移最大,地表达 31.38mm,深部达 9.18~17.25mm,崩滑堆积体与基岩间达 24mm。8月以后,月位移速率逐渐减缓。当 2003 年 11 月库水位抬升至 139m 后,崩滑堆积体与基岩间位移增至 2004 年 4 月 30 日的 41mm。 号临江崩滑堆积体和园艺场、变电站滑坡地表位移不十分明显。以上位移监测表明,水库蓄水对黄土坡滑坡区的影响十分明显,尤其是对临江崩滑堆积体的影响最为显著,而且这种表现与前述的滑坡区稳定性分析计算结果非常吻合。

该滑坡一旦产生大规模的滑移破坏,将直接危及到巴东县城 1.8 余万人的生命财产安全,崩滑体失稳滑动后,预计可能造成的直接经济损失为 11.2 亿元。该滑坡区治理工程目前分两步进行,第一步,以通过对崩滑堆积体前部水位变动带的防护,限制库岸再造向岸坡内发展,保护库岸稳定,并辅以滑坡区排水措施,提高坡体的整体稳定性。该工程已由中国地质环境监测院设计,主要采取以护坡桩支挡和格构锚杆护坡为主,同时辅以三道沟填筑工程、地表排水与监测工程等综合防治工程措施,并已实施。第二步,对滑坡区深部滑带进行治理,保证滑坡区整体稳定。由于该滑坡区滑体厚度巨大,且多为碎石(块石)土、碎(散)裂岩,滑体不均一,碎块石含量高、大,强度较高,采用目前较成熟抗滑支挡工程进行治理,因厚度大、挖攫困难、受地下水影响等特点,给滑坡的治理带来挑战。

2 设计基本原理

在斜坡及滑坡稳定性和推力计算时,常用《岩土工程勘察规范》和《建筑地基基础设计规范》推荐的不平衡推力传递系数法进行。其基本原理是通过对滑坡主滑方向纵剖面的条分,利用各条块下滑力、阻滑力的平衡及剩余下滑力的传递来计算滑坡稳定性和各条块的推力。因滑坡变形破坏均为在自重应力和附加应力(建筑荷载、动水压力、库水作用等)的作用下,以滑带(面)岩土体剪切破坏的形式表现,而各条块之间是连续的,即使存在转动或相对运动,也最终是以滑体、滑带(面)岩土体的剪切破坏为表现形式。所以在以上滑坡稳定性和推力计算时,未考虑各条块的转矩(弯矩)平衡,即条块的转动和倾覆变

形。由此,本文将以库仑定律为理论依据,以不平衡推力传递系数法为基础,阐述采用岩土加固进行滑坡治理的基本设计方法。此治理方法主要是通过人为岩土加固的方法,原位加固滑坡某个条块,使该条块及滑带(面)岩土体力学强度大幅提高,形成一岩土加固带,并以加固后的岩土体综合抗剪强度参与滑坡稳定性和推力计算,通过调整加固带宽度使滑坡在设计工况下,达到设计安全标准,整体稳定。

3 基本设计方法

(1) 加固带岩土力学性质的确定:经 Aboshi 等四人研究,加固带复合岩土体力学强度主要受被加固土体的不排水抗剪强度、加固体的抗剪强度和加固率的影响,具体见式 1:

$$S_{sp} = (1 - M) C_u + MS_p \cos \alpha \tag{1}$$

式中 S_{sp} 为加固带复合体的抗剪强度; M 为面积加固率; C_u 为被加固土体的不排水抗剪强度; S_p 为加固体的抗剪强度; α 为滑面与水平面之间的夹角。

其中 C_u 在滑坡勘察过程中已查明; S_p 根据国内外大量试验和工程实测,可采用类比或试验获取。在实际工程中,因工法和被加固岩土体不同,其固结体的力学强度也不尽相同,(表 1)。

表 1 岩土加固体力学强度统计表

工程名称	加固方法	固结体力学强度		备注
		c / kPa	$\varphi / (^\circ)$	
达成铁路金堂滑坡	高压旋喷	341	40.12	粘性土
《工程地质手册》	高压旋喷	700~1000	20~30	粘性土
《工程地质手册》	高压旋喷	400~500	30~40	砂类土
奉节库岸	高压旋喷	300~600	26.1~28.01	碎石土
链子崖危岩加固	现浇阻滑键	720	36.2	砼与灰岩接触面

在 C_u 和 S_p 已知的前提下,根据地区经验、类似工程或试验,可以确定一个能达到和可以实现的加固带复合体综合抗剪强度 S_{sp} 目标值(一般砂类土 c 取 250~350kPa, φ 取 25°~35°;粘性土取 300~400kPa, φ 取 20°~30°)。

(2) 加固带宽度计算:全面分析滑坡纵剖面,按前述规范推荐公式分别计算滑坡在天然状态和设计工况下的稳定性和滑坡推力,根据推力曲线选择适当的部位布设加固带条块,将确定的 S_{sp} 目标值带入该条块参与滑坡稳定性及推力计算,调整此条块宽度反复试算,直至满足设计工况下设计安全标准止,此时该条块的宽度即为需加固带的宽度。

(3) 加固率的计算:因滑体(带)土体、加固体、

加固带复合体的抗剪强度均已确定,所以根据(1)式加固率已经可以计算,然而(1)式中的加固率仅为二维平面概念。为了更加适应滑坡治理设计的需要,首先假定加固带在滑坡破坏时为水平剪切破坏($\alpha = 0^\circ$),于是将式(1)进一步概化为式(2),然后又根据库仑定律

$$\tau_{sp} = (1 - M) \tau_s + M \tau_p \quad (2)$$

($\tau = c + \sigma \tan \varphi$) 引入滑体深度值,将加固率的计算变为三维空间立体问题,详见式(3)。这样加固率就成为一个随滑体厚度不同而变化的一个量,且与滑体厚

$$M = (\tau_{sp} - \tau_p) / (\tau_p - \tau_s) = [(C_{sp} - C_s) + (Y_{sp} \tan \varphi_{sp} - Y_s \tan \varphi_s) h] / [(C_p - C_s) + (Y_p \tan \varphi_p - Y_s \tan \varphi_s) h] \quad (3)$$

度成正比,与加固体抗剪强度成反比。

(4) 布置及结构:在加固率、加固带宽度已知的情况下,也就知道对于不同厚度的滑体单位面积内需加固的面积,这样就可以在先设定加固桩(孔)径的前提下,计算出不同直径时的间距,最终根据实际确定最优布置。在确定加固桩(孔)的布置时,间距应尽量不小于2.5倍直径,且必须考虑滑坡体内地下水的排泄,不可因加固体的设置而使滑坡体内地下水流畅。因此,加固桩(孔)的布置平面上可考虑分段交错布置或呈多种异型组合形态,同时空间上亦可根据滑体厚度和稳定性不同而采用不同的带宽和桩长分段治理。

根据上述设计方法,充分考虑并结合前期治理工程,于、号临江崩滑堆积体前期防治工程后缘,美利金属回收公司平台至三道沟200m,以及三道沟至复合肥厂300m范围布设两个加固带,采用150mm直径注浆孔相间600mm直径加固桩进行加固,桩(孔)端伸入基岩5~8m,加固深约80m、70m,间距及排距3m,分10~18排呈梅花相间布置,2350个注浆孔布置于各排加固桩中间,与2350根加固桩一同呈梅花布置。由此构成了以注浆加固带和加固桩联合形成的加固体系。

以加固为目的的加固体、加固桩不同于依靠桩体刚度来抗滑的抗滑桩,其主要考虑的是加固带各截面的抗剪强度以及各桩体组合后所构成的整体加固效果,所以加固桩的结构设计不像钢筋混凝土抗滑桩,仅需根据不同材料配比和施工工艺,达到不同深度设计抗剪强度即可。设计时,可根据不同滑体深度段不同的加固率采用改变注浆压力、浆体配比、水泥标号和稠度等,以及改变不同深度的桩径、桩体

配筋率、数量等从深度上、平面上分段设计,构成空间立体最优布置,达到经济、安全、可行的要求。

4 施工及应用

为满足设计的各加固桩和加固带的抗剪强度,以及综合考虑施工环境条件和滑体、滑带(面)、滑床的物理特性,对不同的岩土体,可采用不同的工法进行施工。并先进行注浆加固,后施工加固桩,于各加固区注浆孔中均匀选择部分孔进行取芯勘探试验,以确定注浆技术参数。注浆加固施工完后,再通过加固桩施工检验注浆加固效果,并进一步达到预期加固设计参数。

岩土加固用于滑坡治理早有先例,1988年原四川省重庆市制药五厂发生大规模滑移变形,裂缝最宽50cm,长12~35m,最长达70m。该滑坡表层1~2.66m为粒径20~130mm的松散人工砾卵石填土,其下为0.15~2.19m厚残坡积粉质粘土,再向下为强风化泥岩,主要形成原因为表层土体力学强度低,透水性强,在大气降雨和工业废水作用下致使表层8~12m厚土体滑移。经论证分析,于滑体中部柠檬酸车间北、南段外墙布设203根 $\phi 300$ mm的钻孔灌注桩,桩间距1m,桩端伸入滑床2~3m。经施工期间监测资料反应,随着桩的施工,滑坡变形速度逐步减缓,最终稳定。另在达成铁路施工中,在治理金堂滑坡时,也采用了7排1.2m间距的旋喷桩加固了滑带土体,使其力学强度增加,滑坡稳定。意大利的Lizzi早在1983年就将密集的小直径钻孔灌注桩用于滑坡治理。

5 结 语

用岩土加固来改善滑体及滑带(面)岩土体力学性质,在滑坡治理上显得直接高效,尤其对黄土坡这样深大厚层滑坡的治理更加适应,另外其还具有施工机械化程度高,效率高,对滑坡的扰动小,可多段面同时施工,在治理整体稳定的同时,也将多层不连续软弱带潜在破坏面也一并治理等特点,并与前期治理工程构成一个完整的防治体系。由于目前在我国将岩土加固用于滑坡治理的实例还相对较少,可以类比和借鉴的经验还不太多,因此,在实际设计中,应尽可能结合一定的试验和地区经验,进行固结体和复合加固体的抗剪强度的合理取值设计。

作者通讯地址:湖北省宜昌市夜明珠马兰路7号湖北省地质灾害防治中心 邮编:443002