

金沙江乌东德水电站坝前高边坡工程适应性研究

崔杰, 王兰生, 王小群

(成都理工大学 环境与土木工程学院, 成都 610059)

摘要:金沙江下游乌东德水电站近坝址区下游存在一非基质结构岸坡, 由两段不同性质的深厚覆盖层构成。对似角砾状堆积体物质结构特征及成因机制进行研究, 确定了其滑坡成因的性质。对当多槽谷区深厚覆盖层堆积体分析, 认为属于早期冰川堆积及后期崩塌作用的复合堆积体, 斜坡覆盖层变形受控于斜坡中段的平卧支撑拱。通过稳定性计算分析认为, 整段斜坡的稳定性状况在现阶段不存在失稳条件。

关键词:角砾堆积体; 古滑坡; 变形机制; 稳定性分析

中图分类号:TV641

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2008)02-0084-04

Research of Engineering Adaptability with High Slope on the Left Bank in Wudongde Hydropower Station of Jinsha River

CUI Jie, WANG Lan-sheng, WANG Xiao-qun

(College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: There is a bank slope of non-matrix structure at some planning Hydroelectric Power Station downstream of the Jinsha River; the spread of the bank slope is extraordinary thick, which mainly composed with dolomitic brecciated accumulation body. Based on the study of the brecciated accumulation body's character of structure and genetic mechanism, character of the slope deformation cause is determined and the possible models of deformation and crack of the slope is analyzed. The results show that the ancient accumulation body's slope is stable in a long time run and there is no deformation indication and condition of destabilization of the whole slope.

Key words: brecciated accumulation body; ancient landslide; deformation mechanism; stability analysis

乌东德水电站是金沙江下游河段梯级开发的第一个梯级电站, 初步设计采用双曲拱坝坝型, 最大坝高约 240 m, 水库总库容 72.98 亿 m^3 , 调节库容 9.4 亿 m^3 , 电站装机容量 870 万 kW, 年发电量 394.6 亿 kW·h, 具有发电为主, 兼顾防洪和拦沙的综合功能。在近坝址区下游 900 m 的右岸存在一段覆盖层厚度巨大的非基质岸坡。由于靠近坝址, 存在自然边坡稳定性及拱坝泄洪造成雨雾边坡等重大工程地质问题, 因此有必要对该段岸坡工程适应性进行专题研究。边坡系统是一个开放的复杂动态系统, 其影响因素复杂多变。河谷强烈下切过程是斜坡变形破坏的活跃期, 保存了相应时期造成的如滑坡、崩塌等类型成因的大型岸坡复合堆积体^[1]。对生成年代久远的古堆积体, 其初期的堆积地貌特征及变形破坏迹象难以完好保留, 堆积体或各自成体系, 或相互组合成复合型堆积体, 对堆积体成因机制难以准确判定。对堆积体成因、稳定性现状及边坡变形发展趋势的分析和预测是水电工程建设必须解决的关键性问题之一。

1 地质背景

1.1 岸坡地貌特征及分区

研究区位于金沙江下游, 该区在区域地貌分区为云贵高

原滇中区禄劝高原峡谷小区, 山顶高原夷平面高程约 2 500 m, 河谷谷底高差在 1 000 m 以上, 呈中高山深切峡谷地貌特征^[2]。根据该斜坡区地貌形态及覆盖层发育分布特征, 总体可将该斜坡分为两个分区(图 1): 上游区段为金坪子平台区(I 区), 岸坡由巨厚的似角砾状堆积体构成, 斜坡整体地形呈阶状, 前缘向江心呈弧状突出, 在 1 070 m 高程发育一级平台, 面积为 0.52 km^2 , 平台后缘为基岩陡坡, 坡度在 35~50°, 向上直至分水岭; 下游区段为当多槽谷区(II 区), 整体呈近南东向展布, 长约 2.5 km, 平面展布呈上宽下窄的倒悬瓶状, 中后部最宽 1.5 km, 前缘狭长, 宽约 280 m。表部由厚度不均的崩坡积物质所覆盖, 斜坡上部呈宽缓圈椅状, 发育两个次级缓平台, 高程分别为 1 600, 1 800 m。以下对各分区的物质结构组成和成因机制进行论述。

1.2 地层岩性

斜坡区地层岩性由老至新出露为中元古界会理群落雪组灰岩(Pt_2l)、黑山组千枚岩(Pt_2sh)、震旦系下统澄江组石英砂岩(Z_1c)、震旦系上统观音崖组夹炭质页岩白云岩(Z_2g)和灯影组(Z_2d)厚层白云岩, 区内辉绿岩脉发育。该区域区域性断裂发育有近东西向延展的花山断层, 其产状为 170°

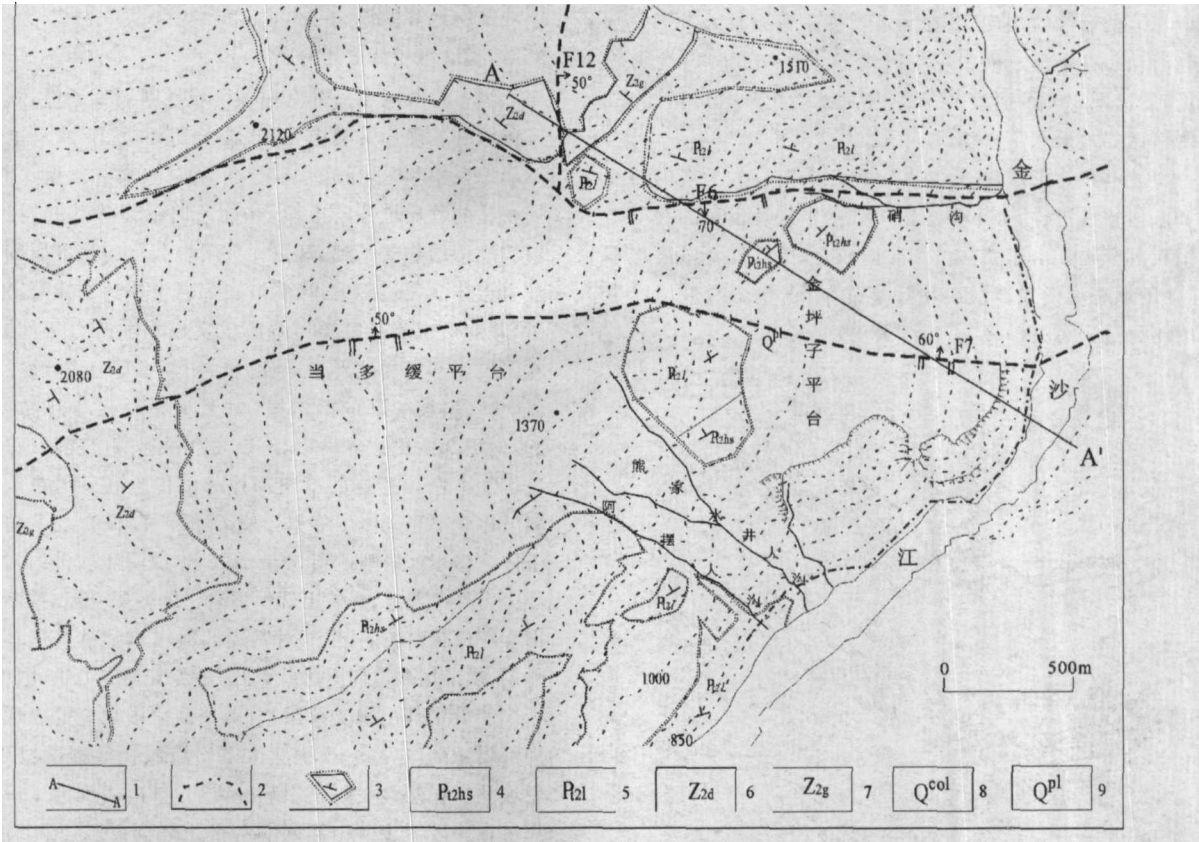
收稿日期: 2007-05-18

基金项目: 国家自然科学基金主任基金项目(40342012); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(2004616012)

作者简介: 崔杰(1977-), 男, 在读博士, 主要从事工程地质及地质灾害防治专业研究。E-mail: cuijie@cdu.edu.cn

∠65°,延伸长大于 3.2 km,具正断层性质;以及梁子断层,产状为 335°~350°∠65°~82°,延伸长度>1 km,将震旦系地层错断,错距约 200 m,具逆断层性质;此外还有南北向的红

沟断层(F12),其产状为 146°∠50°,断层带宽 2 m,为压性逆断层(图 1)。



1. 观音崖组;2. 灯影组;3. 落雪组;4. 黑山组;5. 剖面线;6. 基覆界线;7. 堆积体边界;8. 断层;9. 应力拱迹线

图 1 金坪子斜坡区堆积体平面分布

2 I 区堆积体结构及成因分析

2.1 堆积体物质结构特征

根据钻探及硃探揭示,该区岸坡主要由巨厚的似角砾状碎块石堆积体组成,空间展布于金坪子平台区及前缘岸坡。底部基覆面起伏,由后缘至中部变厚,并在中轴线位置厚度达到最大的 252.94 m,往下游方向迅速递减,纵向上整体呈不对称盆状,南北延伸长约 1.5 km,宽约 0.7 km,平面面积为 1.05 km²,堆积体整体体积约 0.64×10⁸ m³。

堆积体物质结构呈散体物质紧密堆积的似角砾状结构,碎块石颗粒间接触主要为面一面接触方式。物质组分均一,均为灰黑色白云质灰岩,其原位地层是震旦系上统灯影组中厚层白云质灰岩(Z_{2d})。堆积体表部碎屑物质呈钙质胶结,透水性较强,孔隙水得以渗入内部,造成表部固结较强,至堆积体内部,物质固结作用程度相对较低,以压实作用为主,透水性则降低至弱—微透水性,散体颗粒间密度较上部高。

2.2 成因机制分析

通过地表及勘探调查,其成因模式不同于边坡岩体在动力变质作用下的崩塌堆积模式^[3-4],而是控制性组合作用下边坡发生整体失稳的滑坡堆积模式。从现今岸坡物质组成结构分析(图 2a),斜坡失稳经历漫长的演化发展过程,其控制因素包括:(1)由于深切河谷以及河流凹岸的侧蚀作用,形成了高陡岸坡;(2)层状地层及软硬相间坡体结构的发育,成

为岸坡变形的有利条件;(3)高陡边坡主要受两组近平行的 NWW 向、一组近南北向的中高倾角断裂结构面控制(表 1),构成向河谷临空的不稳定岩体;(4)由于风化、卸荷、地应力、重力以及地下水的长期作用,逐渐改变了高陡岸坡的自适应平衡条件,最终导致岸坡失稳下滑。

表 1 控制滑坡主要边界结构面

产 状	力学性质	与滑坡关系	与河流关系
NE 80°~90°,SE,∠60°~70°	张扭	控制上游侧缘	倾向下游
NE 65°~80°,NW,∠82°	压扭	控制下游侧缘	倾向上游 倾河床
NE 10°~20°,SE,∠65°~70°	张扭	控制后缘	倾向河床 倾下游

2.3 滑坡物源区分析

从地形上看,斜坡区整体地形特征呈起伏的凹型坡,位于当多槽谷区的上游侧边界与金坪子斜坡交界位置存在由落雪组灰岩构成的基岩,地形特征表现为山脊,对两侧斜坡区的物质运动起阻隔作用,滑坡体无法越过突出山脊到达上游的金坪子斜坡区,因而排除滑坡区位于顺层向的当多槽谷区坡顶的可能性,由此判断该滑坡区是从金坪子平台后缘而来(图 1),因此滑坡类型属平推式的滑坡类型,其边坡破坏

失稳力学机制为蠕滑—拉裂破坏模式^[6]。

2.4 滑坡过程分析

在区域构造作用下,斜坡上部岩体变形呈累进式发展,形成贯通的后缘拉裂面,并在地震及冻融等激发因素下发生整体滑动。在下滑过程中发生解体,至河谷底部则转化为碎屑流,迅速堆积充填河道,并被压密而产生“夯实效应”,构成紧密挤压的角砾状堆积体。

滑坡堆积体形成后,造成了金沙江中游一次大规模的滑坡堰塞体堵江事件,上下游形成多处水平层理发育的堰塞湖相细粒沉积物。由于堵江持续时间较短,因此发育厚度均不大,伴随堰塞坝的快速溃决堵江事件结束,整个滑坡堵江事件的演化过程可见图 2。

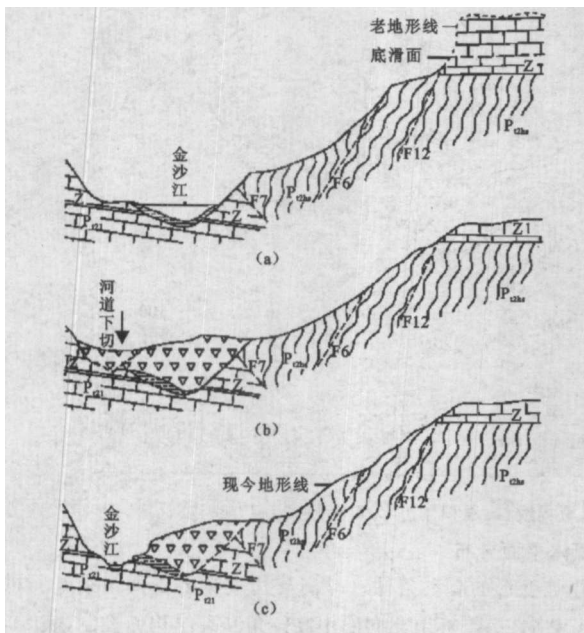


图 2 河谷地貌与滑坡堵江事件演化图

堆积体前缘底部与基岩接触面之间保留一套水平层理发育的砂卵石层,该层顶部高程为 836 m,此高程为金沙江二级阶地的高程范围^[5]。该滑坡部分覆盖于二级阶地上,判断滑坡发生的时间即是在二级阶地形成之后。

3 II 区边坡结构及成因分析

3.1 斜坡物质结构特征

该区斜坡形态为由后部宽缓向中部收敛,呈狭长的槽形地貌特征,两侧基岩边界和基底均由落雪组灰岩和黑山组千枚岩构成(图 1)。根据钻孔揭示,基覆面形态起伏,平均深度约 45 m,横向上呈槽状,最深位于沟槽中部。覆盖层物质结构为碎石土层,块石粒径可达 1 m 以上,细粒物质含量总体较低;向斜坡下部则逐渐过渡到含碎石土层,物质为分层明显的紫红色及黑色千枚岩与灰岩块碎屑物质。

该斜坡区岩土体变形特征具有明显差异。斜坡中部高程约 1 360 m 发育一条明显的横向陡坎,陡坎呈向坡下开口的弧形展布,陡坎长约 0.5 km,坎高 20~40 m,两端与外侧基岩接触。以此为界,斜坡区上段除后缘有基岩陡壁发生崩落外,表部岩土体无明显变形迹象。而由陡坎向斜坡前缘,该段斜坡岩土体的变形迹象明显。根据该段中部两个位移

监测点资料,蠕变速率为每年 35~49 mm,该带地下水丰富,有 3 处泉水出露,崩塌积土层中富含细粒物质,易于发生表部岩土体的塑性变形和土溜现象。此外,该段左侧边界发育顺坡向的地表裂缝。

3.2 斜坡堆积体成因分析

当多斜坡区中后部有两条区域性断裂带通过,斜坡后缘及侧缘基岩陡崖带裂隙发育,在长期卸荷、溶蚀及重力作用下崩塌现象频繁,后缘基岩壁逐渐发生崩离,崖壁不断后移,崩积物的物质堆积于上段,并逐渐向下部移动和发展,成为斜坡堆积的物质基础,这是促进斜坡演化的根本原因。在斜坡岩土体演化过程中,当斜坡表部岩土体达到极限平衡状态时,其变形主要受后缘物质加载及地下水动力条件的影响,在斜坡中部则受地形影响明显。斜坡区岩土变形特征迹象表明,在斜坡中部的凹槽段,由于基底面逐渐升高,地形凸起,向下部两侧边界缩窄,地表发育弧形横向陡坎地形,是斜坡区上下两段连接的枢纽部位。位移监测显示在该带之上斜坡体表部岩土体位移累计值近于零,而该带之下的斜坡岩土体位移累计量则达到 35 mm 以上,说明陡坎带的岩土体产生应力集中现象,并使上部斜坡岩土体变形受制,推断斜坡中部存在横跨斜坡的“拱”,对其上部斜坡岩土体变形具有约束作用,拱形呈顺坡向平卧状,即为平卧支撑应力拱(图 1)。

斜坡中部出现支撑拱,对斜坡演化影响主要表现为出现局部岩土体应力集中、拱座上下斜坡段变形程度呈现差异、斜坡整体稳定性受拱座影响等方面,具体表现为:(1)平卧支撑拱在斜坡岩土体中起限制上部土体向斜坡下方蠕变滑移的约束作用,通过拱座将拱体中部岩土体承担下滑推力传递到两侧拱座,使两侧拱座成为应力相对集中的部位;(2)右侧拱座上泉水带的出露与支撑拱岩土体产生的应力集中有关,由于土体紧密挤压,形成相对隔水带,阻断了地下水的径流通道,从而使地下水位抬高而出露地表;(3)下段斜坡堆积岩土体处于极限平衡状态,支撑拱承担了由后缘物质加载形成的下滑推力,并转移至两侧基岩拱座,平卧拱的存在造成斜坡下段岩土体变形具有由下而上的变形特征,即斜坡变形首先发生于斜坡前缘,并由前缘逐渐向后部发展,形成后退式或牵引式变形。

4 岸坡稳定性分析

4.1 金坪子平台区堆积体边坡稳定性分析

由前述分析,该滑坡堆积体由单次滑坡形成,其整体的物质组分和结构特征具有一致性,残余滑坡堆积体内部不存在由多次堆积形成的层面结构或者递进层序的软弱面,内部结构性质均一。堆积体结构特征和力学参数表明其内部结构较为紧密,在堆积体内岩体大剪试验结果为 $\varphi = 39^\circ$, $c = 0.48$ MPa。岸坡坡面坡度平均为 30° ,低于堆积体内摩擦角,因此堆积体内部结构的力学性质由下至上、由里至外测趋于增强,稳定性也趋于增强。此外,堆积体前缘的临江部位顺河呈带状发育观音岩组基岩,形成堆积体前部的基岩槛,使滑坡堆积体嵌入了似盆状的堆积空间。该基岩槛对堆积体前缘变形产生约束作用,并阻挡河流对岸坡的冲刷。

滑坡堆积体边坡地表水补给条件差,临空面排水空间

大,堆积体内部地下水的聚集能力有限,尚构不成稳定统一的潜水面和地下水饱和带,水文地质条件有利于坡体稳定。总体上堆积体的下部基覆面较为平整,底部结构密实,表部碎石因淋滤作用发生化学胶结作用,使它在天然状态下具有良好的抗风化侵蚀性。因此堆积体不具备古滑坡复发或者大规模的局部崩塌的条件,整体结构处于稳定状态。

4.2 当多槽谷区覆盖层边坡稳定性分析

据拱结构分析结果,认为支撑拱产生与破坏受多种因素制约,自然状态下斜坡整体稳定性既受支撑拱作用,同时与其斜坡整体结构和岩土体组成特征是紧密相关的。对自然条件下的斜坡岩土体稳定性状态运用极限平衡法进行分析,分别以基覆面和堆积体内贯通面作为潜在主滑面进行计算分析,对该斜坡段上、中、下 3 段的覆盖层进行天然状态及饱水状态下的斜坡稳定性计算,针对每一段堆积体斜坡分别进行了 Ordinary 方法、Bishop 方法和 Janbu 方法等 3 种极限平衡法进行计算分析,得到每种计算方法的最小稳定系数。确定岩土体天然状态及饱水状态下力学参数如表 2 所示。

表 2 当多槽谷上、中、下三段局部滑移的最小稳定系数

潜在滑移面	基覆界面			内部贯通面		
	Ordinary	Bishop	Janbu	Ordinary	Bishop	Janbu
极限平衡分析方法						
上段	天然状态	1.601	1.746	1.751	1.394	1.416
	饱水状态	0.915	1.093	0.966	0.821	0.874
中段	天然状态	1.965	2.175	1.933	1.110	1.123
	饱水状态	1.130	1.412	1.233	0.564	0.581
下段	天然状态	1.340	1.367	1.341	1.273	1.292
	饱水状态	0.775	0.813	0.784	0.720	0.749

(1)当基覆面作为潜在滑移控制面时,除下段得到的稳定系数处于极限平衡状态,上段和中段则均为稳定状态;在饱水状态下,只有中段得到的整体滑移稳定系数为稳定状态,其余则为接近极限平衡状态或失稳状态。(2)当覆盖层内连续面作为潜在滑面时,内部存在一系列可能滑移控制面,其计算结果得到的稳定状态较基覆面恶劣,局部滑移的最小稳定系数见表 3。除天然状态下采用瀑布沟参数得到的稳定系数为稳定状态及当多槽谷上段和下段采用黄腊石

参数在天然状态下为极限平衡外,其余均处于不稳定状态。

5 结 论

(1)该区深切河谷岸坡主要由两套不同性质的岸坡覆盖层构成。对上游段的金坪子平台区巨厚堆积体特征的分析,认为属于滑坡成因形成。从边坡结构类型与区域控制性结构面发育特征等情况判断,其滑坡物源区位于该区后缘基岩陡坡,其破坏力学机制方式为蠕滑—拉裂。

(2)对当多槽谷区表部覆盖层特征分析,认为主要由早期冰蚀堆积及后期崩塌堆积所复合形成,坡体通过缩窄的通道向下滑动,在通道上存在明显的平卧支撑拱,限制了堆积层的运动,整体上表现为类似于“挤牙膏式”的蠕动。

(3)对 I 区古滑坡堆积体的整体稳定性定性分析,认为堆积体不具备再次复发的条件或者发生大规模局部崩塌的条件,其整体稳定性良好,不需要进行大规模的工程治理。

(4)通过极限平衡法稳定性计算,认为当多上槽谷区堆积体整体是稳定的,其前缘局部有一些规模不大的滑坡与滑塌。只有在后缘发生突发性大量加载,通道平卧支撑拱拱座破坏,才有发生大规模滑动的可能。

参考文献:

[1] 伍法权. 岩质高陡边坡变形与稳定性评价工程地质工作方法[J]. 工程地质学报, 2004, 12(增 1): 199-211.
[2] 中国科学院地理研究所. 中国地貌划分[M]. 北京: 科学出版社, 1959: 24-56.
[3] 胡世起. 高边坡复合堆积体稳定性评价及基础处理[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 345-349.
[4] 陈喜昌, 黄金宝, 袁永旭. 落石堆积的结构特征与斜坡破坏型式之转换[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(1): 5-10.
[5] 石豫川, 冯文凯, 叶志平, 等. 金沙江上游某巨型复合型滑坡的基本特征及稳定性分析[J]. 地质灾害与环境, 2003, 14(4): 11-15.
[6] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 321-345.

(上接第 83 页)

[23] Powell M J D. The uniform convergence of thin plate spline interpolation in two dimensions[J]. Numerische Mathematik, 1994, 68(1): 107-128.
[24] Faul A C, Powell M J D. Proof of convergence of an iterative technique for thin plate spline interpolation in two dimensions[J]. Advances in Computational Mathematics, 1999, 11: 183-192.

[25] Xia Y, Winterhalter M, et al. Interpolation of daily global solar radiation with thin plate smoothing splines[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2000, 66: 109-115.
[26] 潘耀忠, 龚道溢, 等. 基于 DEM 的中国陆地多年平均温度插值方法[J]. 地理学报, 2004, 59(3): 366-374.
[27] Hutchinson M F, Gessler P E. Splines—more than just a smooth interpolator[J]. Geoderma, 1994, 62: 45-67.