

文章编号:0559-9350(2010)11-1310-08

金沙江虎跳峡上游大型古堰塞湖对河段水电开发的影响

王启国¹, 马贵生¹, 杨启贵²

(1.长江水利委员会 长江岩土工程总公司, 湖北 武汉 430010;

2.长江水利委员会 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010)

摘要:在金沙江虎跳峡上游河段进行坝址比选研究中,发现金江—其宗河段河床中分布一隐伏的大型古堰塞湖。大量的地表测绘、勘探、岩土测试等工作表明:当时堰塞湖属于过水湖,位于红岩—上江河段,由1个或多个巨型滑坡(或崩塌)堆积体组成,坝高不低于100m;河床湖相黏土最大厚度37.7m,土质软弱,透水性微弱,强度较低。本文探讨了堰塞湖所处的地质环境以及河床地质对虎跳峡河段水电开发的影响,为坝址选择和枢纽建筑物方案的布置提供依据。

关键词:工程地质;堰塞湖;湖相黏土;坝址比选;虎跳峡水电站

中图分类号: P642; TV221.2

文献标识码: A

1 研究背景

金沙江虎跳峡河段具备开发建设金沙江中游龙头水库的地形和地质条件,具有发电、供水、防洪等巨大开发效益。本河段规划比选的坝址较典型的从下游到上游依次有下峡口、上峡口、龙蟠、石鼓、红岩、上江、塔城和其宗8个坝址,前5个坝址为虎跳峡建高坝的比选方案,后3个坝址为替代虎跳峡高坝的比选方案,其中替代方案的优势是避免了对著名景观(虎跳峡大峡谷、长江第一弯)、宽谷河段居民及农田等巨大淹没损失,并基本可以发挥龙头水库的作用。

在进行替代虎跳峡高坝方案坝址比选研究时,发现在虎跳峡上游金江—其宗长约70km的河段河床中除分布漂石、砾卵石和砂砾石等常规粗粒土外,还普遍分布一隐伏的特殊层位——灰色、灰褐色、灰绿色低液限黏土层,厚度6.0~37.7m,空间分布较连续。经研究认为该黏土为古堰塞湖相地层,堰塞湖系崩塌、滑坡堵江形成的。此前对本堰塞湖的发现及认识,仅笔者在文献[1-2]里进行了概述,但是在堰塞坝位置、湖相沉积演化过程、湖相黏土工程特性以及在该层上修建高坝的筑坝技术等方面的认识上尚有欠缺。

本文基于野外地质测绘、钻探及岩土测试等大量的勘察工作,揭示金江—其宗河段河床厚层低液限黏土的空间分布、成因及工程特性,探讨堰塞湖地质环境及其湖相黏土对本河段水电开发的影响程度,以供对本河段水电开发方案坝址比选、金沙江河谷发育史及大江大河地质灾害形成演化过程等研究参考。

2 湖相黏土的空间分布与沉积特征

20世纪50年代相关单位就在虎跳峡河段开展了水电开发方案的研究,长时间的工作重点基本上

收稿日期:2009-08-19

基金项目:国家科技支撑计划项目(2009BAK56B03)

作者简介:王启国(1972-),男,湖北丹江口人,学士,工程师,主要从事水利水电工程地质勘察研究。

E-mail: cjjwqg001@163.com

一直放在虎跳峡大峡谷一带。20 世纪末大峡谷成了世界著名自然景观后, 才开始在上游河段比选新的坝址, 并选择性地开展了勘察研究工作, 如其宗坝址(其宗坝址上游 3km 处)、红岩、石鼓、龙蟠和上峡口等地进行了河床钻探工作, 发现本河段河床具深厚覆盖层特征, 最深达 250m, 位于红岩处金沙江河床中。同时揭露河床覆盖层的物质特征, 河床覆盖层主要由漂石、砾卵石、砂砾石以及崩滑加积的孤块石、碎块石土等组成。

为了加快虎跳峡水电站开发进度以及优化本河段开发方案, 2007 年底替代虎跳峡高坝方案的勘察设计全面展开, 在替代方案初拟的上江、塔城和其宗 3 个比选坝址河床勘探工作中, 首先揭露出湖相黏土的钻孔位于丽江市玉龙县塔城乡金沙江河漫滩上(塔城坝址), 随后迪庆藏族自治州香格里拉县上江乡福库村金沙江河漫滩上(上江坝址) 也钻探出了厚层黏土。2008 年初其宗坝址右岸河漫滩上同样钻探出了厚层黏土。

在之后的勘察研究工作中, 上江和塔城坝址河床漫滩上的钻孔多数发现了厚层湖相黏土, 其宗坝址仅在右岸河漫滩上揭露出了厚层湖相黏土。钻探结果揭示此段金沙江河床覆盖层厚度 100.0~206.2m, 黏土层位于河床覆盖层中部一中上部, 上部主要被金沙江现代冲积的漂石、砾卵石覆盖, 压覆厚度 35.9~66.3m; 下部分布砾卵石、漂石、碎块石和砂砾石等粗粒土。该黏土层厚度 6.0~37.7m, 平均厚度 20.9m, 呈灰色、灰褐色、灰绿色, 水平纹理明显, 为典型静水环境下的湖相地层。

上江、塔城和其宗 3 个坝址河床湖相黏土钻探揭露的基本特征分别如下。

(1) 上江坝址。河床部位共实施了 6 个钻孔, 均揭露出湖相地层, 厚度 9.3~24.0m, 埋深 49.7(最高顶面)~79.6m(最低底面, 以下同), 底部高程 1 797~1 815m, 顶部高程 1 813~1 822m。

湖相地层主要为低液限黏土, 局部夹厚度 0.5~2.1m 的粉土薄层或透镜体, 底部偶含砾石。黏土呈灰色、灰褐色, 少量灰绿色; 多呈可塑状, 少量硬可塑状; 水平纹理明显, 局部层面附粉砂薄膜; 零星见有黑色木块、枝叶等腐殖质, 味臭; 钻探过程中有缩孔现象。

据水文地质观测, 揭穿黏土层后发现其下部粗粒土中的地下水具承压性, 承压水头 60.4m, 由此判断上江坝址坝基黏土层分布连续稳定, 空间封闭, 客观上构成了完整的隔水层。

(2) 塔城坝址。河床部位共实施了 21 个钻孔, 其中 17 个钻孔揭露出湖相地层, 厚度 6.0~37.7m, 埋深 35.9~88.8m, 底部高程 1 811~1 823m, 顶部高程 1 836~1 845m。该湖相地层在空间分布上除在下游围堰处有缺口外整体上基本封闭。

湖相地层主要为低液限黏土, 在其顶底面局部夹厚度 1.0~1.5m 浅灰黄色砂质黏土透镜体。黏土呈灰色、灰褐色、浅褐色; 可塑状; 大多地带水平纹理清晰, 且层面附粉砂薄膜; 偶见黑色炭化木块; 岩芯味臭; 钻探过程中有缩孔现象。

(3) 其宗坝址。仅在坝线下游右岸 II 级阶地上揭露出该黏土层, 厚度 16.0m 左右, 埋深 41.0~57.0m, 底部高程 1 830m, 顶部高程 1 846m。黏土呈灰色、灰绿色, 可塑状, 局部夹粉细砂薄层或透镜体, 零星见黑色腐殖质, 有腥味。

3 个坝址河床湖相黏土的颜色、岩性、状态和味道等基本特征非常相似, 空间分布上有向上游逐渐抬升的趋势, 符合河流湖积相沉积规律, 因此判断这 3 个坝址的河床黏土同属一个层位。根据虎跳

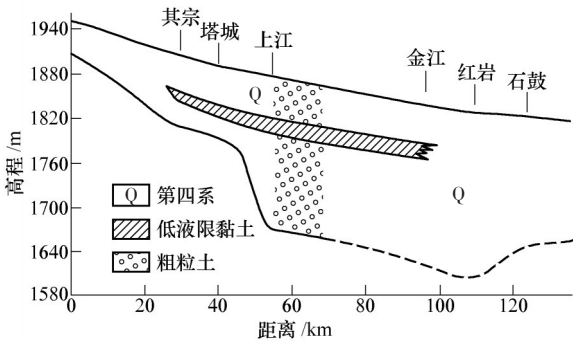


图 1 顺金沙江河床分布的湖相黏土

峡上游河段河床钻探揭露情况,绘制了湖相黏土顺金沙江河床分布如图1,图中上江—红岩河段河床是没有钻孔控制的。

3 堰塞湖成因机制及其演化过程

3.1 堰塞湖的认识 有关湖相黏土的成因,观点主要有两种:一种说法是该湖相黏土是石鼓古湖沉积的结果;另一种说法是龙蟠盆地沉积的结果。笔者认为这两种说法均依据不充分。

(1)关于石鼓古湖的讨论。赵希涛等^[3-4]在本河段进行第四纪科考工作中,发现在石鼓一大具河段金沙江沿岸有多处湖相沉积物露头,厚度数米至20余米,空间分布起伏大,连续性差。其成因分析为玉龙冰期冰川运动碎块石混合泥流堆积物充填了长达27km的金沙江河谷中的不少地段,石鼓谷地因此而堰塞成湖,形成石鼓古湖。石鼓古湖与本堰塞湖的区别在于:①物质上的差异。石鼓古湖沉积物为黏土、砂质黏土和粉砂等,黏土只是其中的一种成分,而本文论述的湖相沉积物主要为黏土,砂质黏土和粉砂只是少量夹层;②颜色上的差异。石鼓古湖沉积物呈灰黄色、褐黄色,少量灰色,而本文论述的湖相沉积物呈灰色、灰绿色,颜色上的明显差异也间接反映了这两个湖泊的沉积环境是显著不同的;③分布高程的差异。石鼓古湖湖相地层分布高程1 825~1 984m,本文论述的湖相地层分布高程1 797~1 846m,若属同一湖相地层,位于下游80余公里的石鼓古湖湖相地层分布高程应该低于本文论述的湖相地层分布高程,显然不是同一湖相地层。故而本文论述的湖相地层不是石鼓古湖沉积的结果。

(2)关于龙蟠盆地的讨论。虎跳峡河段受新构造垂直升降运动的影响形成了我国西南地区有名的古龙蟠断陷盆地,东侧的玉龙山在中更新世以来不断抬升,龙蟠盆地陆续接受沉积,河床最终形成了现今的深厚覆盖层^[1-2, 5-6]。对于本文论述的湖相黏土,部分学者认为是龙蟠盆地沉积的结果,原因是虎跳峡大峡谷地带在新构造运动时期地壳处于上升趋势,龙蟠盆地相对下降,因构造原因形成了龙蟠湖泊,河床黏土层是龙蟠古湖静水环境下的沉积结果。笔者比较认同龙蟠古湖是构造作用的产物,但不认可河床黏土层是龙蟠古湖沉积物,因为该黏土的沉积环境应为区域构造活动平稳的静水环境,构造活动稳定时期河床是不易形成湖泊的。再者,红岩及其以下河段在河床钻探工作中均未发现厚层黏土,仅在金江—其宗河段成层分布,故而与龙蟠古湖相沉积是向悖的。

笔者认为本文论述的湖相黏土是堰塞湖造成的,初步判断在红岩—上江河段堰塞坝的位置。目前钻探揭露湖相黏土的最大厚度37.7m,根据王勇等^[7]三峡库区大宁河中上游河段水库沉积速率调查结果,泥沙平均线性沉积速率为3.3cm/a;张永双等^[8]推测澜沧江德钦古水一带第四纪堰塞湖的沉积速率为0.25mm/a;王兰生等^[9]研究岷江叠溪古堰塞湖12ka沉积了厚度超过200m的湖相沉积物,平均沉积速率1.67cm/a。若按最大沉积速率计算,本文论述的堰塞湖持续时间达1.1ka;按最小沉积速率计算,堰塞湖持续时间达150.8ka。相差132倍。笔者认为张永双等推测的沉积速率依据不充分,并认为和青藏高原封闭的湖泊沉积速率相当是不合适的,澜沧江和金沙江一样,流量、流速大,有丰富的上游物质来源,和封闭的静水湖泊是完全不同的。王勇等研究的位置位于大宁河的中上游,叠溪古堰塞湖位于长江支流岷江上游,因此都存在上游物质来源,和本堰塞湖有相同之处,从某种程度上来说,本堰塞湖上游物质来源更加丰富,因为本堰塞湖处于金沙江干流中上游地带,和大宁河、岷江相比流域面积和水流量更大,据此初步推断本文论述的堰塞湖持续时间大约1ka。

3.2 堰塞坝的探讨 从金沙江的流量(塔城坝址处金沙江平均流量1 290 m³/s,多年平均径流量405亿m³)分析,本堰塞坝应该在不到1年时间内即蓄满了江水,因此本堰塞湖自始至终应该属于一个过水湖。根据湖相黏土的沉积厚度以及堰塞湖持续时间等方面初步估算,堰塞坝高度不低于100m,堰塞湖库容至少有100亿m³,这样才能保证堰塞湖表面过流,下面淤积湖相地层。

初步分析堰塞坝的位置在红岩—上江河段内,据地表调查,目前河岸尚未发现当年堰塞坝的残留物,而唯一具备堰塞坝的条件主要为本河段发育的滑坡(或崩塌)体。前期研究成果^[1, 10]表明,虎跳峡河段共发育19个特大型堆积体(图2),其中,13个滑坡体,6个崩滑体,总体积约9.9亿m³。其中

红岩—上江河段共发育6个特大型滑坡(或崩塌)体,④号和⑤崩滑体体积分别为1 200万 m³、1 500万 m³;⑬号~⑯号滑坡体体积为1 900~4 000万 m³,目前整体稳定性均较好。另外这6个崩滑体均有一个共同的特点,即前缘均被新近沉积的河床覆盖层压覆,间接也反映了这些崩滑体的历史之长,是否每个崩滑体都和堰塞坝的形成时间一致,尚需开展进一步的研究工作。

笔者认为,现今这6个崩滑体的规模均没有达到当时堰塞坝的规模,当时堵江堰塞坝规模庞大,体积至少有数亿立方米,甚至顺江发育2个或多个巨型堰塞坝,否则在金沙江干流上堰塞湖持续时间不可能有千年的历史,只不过堰塞坝溃坝后江水冲走了一半甚至更多的崩滑体物质,残留现今的崩滑体体积仅有数千万立方米(图2)。

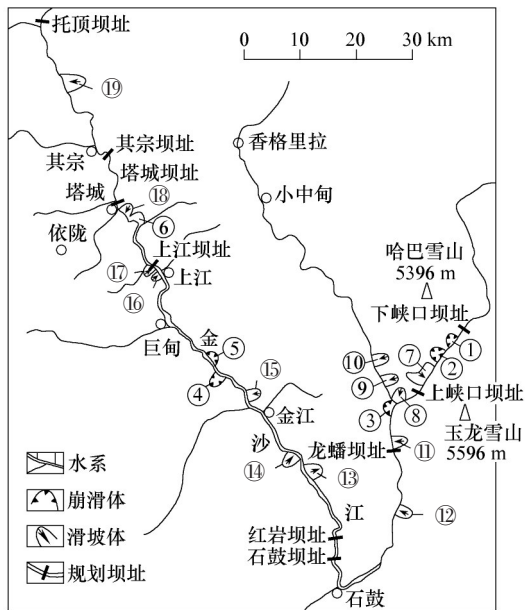


图2 虎跳峡河段特大型崩滑体分布位置

过水堰塞坝能长时间保持稳定。陈德基^[11]曾对岷江叠溪、湖北咸丰小南海等过水堰塞坝的稳定性进行了研究,结果和本堰塞坝比较,区别在于本堰塞湖位于金沙江干流上,堰塞坝形成之前河床无黏土铺盖,黏土层是在堰塞坝形成之后逐渐淤积的,因此对堰塞坝的规模、形态、物质组成和密实度等有着更高的要求。图3为滑坡堰塞坝堵江复原概化模型。

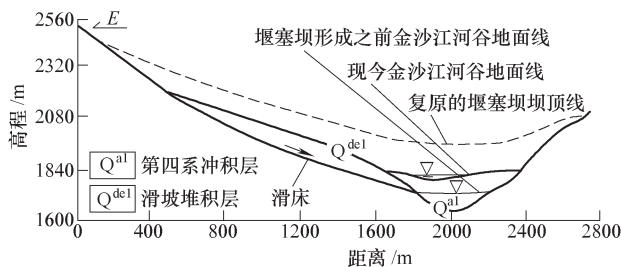


图3 滑坡堰塞坝堵江复原概化模型

结合汶川大地震堰塞湖工程实例^[12-14],笔者认为湖相黏土形成前后本堰塞坝之所以具有千年的整体稳定性能,主要是因为其具有以下工程地质特征:(1)当初堰塞坝规模庞大,由1个或多个巨型坝体组成,堵江长度较大;(2)有良好的天然溢洪道;(3)由滑坡或崩塌形成的坝体其块体较大、密实度较高,坝体抗冲刷能力较强、稳定性较好;(4)坝体形成之后库底及坝前逐渐淤积的黏土层对大坝稳定更加有利。

3.3 堰塞湖沉积演化过程

依据上述认识,本堰塞湖沉积演化过程(图4)为:(1)中更新世以来^[1-2, 5-6],虎跳峡河段受新构造垂直升降运动和河流冲积等影响,金沙江形成了如图4(a)的河谷纵断面;(2)晚更新世晚期(黏土层下部5m的砾卵石经ESR、热释光测龄,其形成时间距今51ka左右),红岩—上江河段的局部山体在自身重力作用下,经降雨、地震等因素诱发下形成了1处或多处滑坡(或崩塌)体,造成金沙江堵江并形成堰塞坝(图4(b));(3)堰塞坝形成之后,金沙江经历了一段构造运动相对稳定期,在过水湖流量相对稳定的情况下,堰塞湖开始淤积并逐渐形成了厚层黏土,根据ESR、热释光测龄,其形成时间距今38ka左右,为晚更新世(Q₃)晚期,堰塞湖运行时间持续千年之后挡水坝溃决^[13-14](图4(c));(4)溃坝后金沙江在河流冲积作用下在黏土层上部逐渐沉积了以漂石和砾卵石为主的现代冲积层,現今金沙江河谷纵断面如图4(d)。

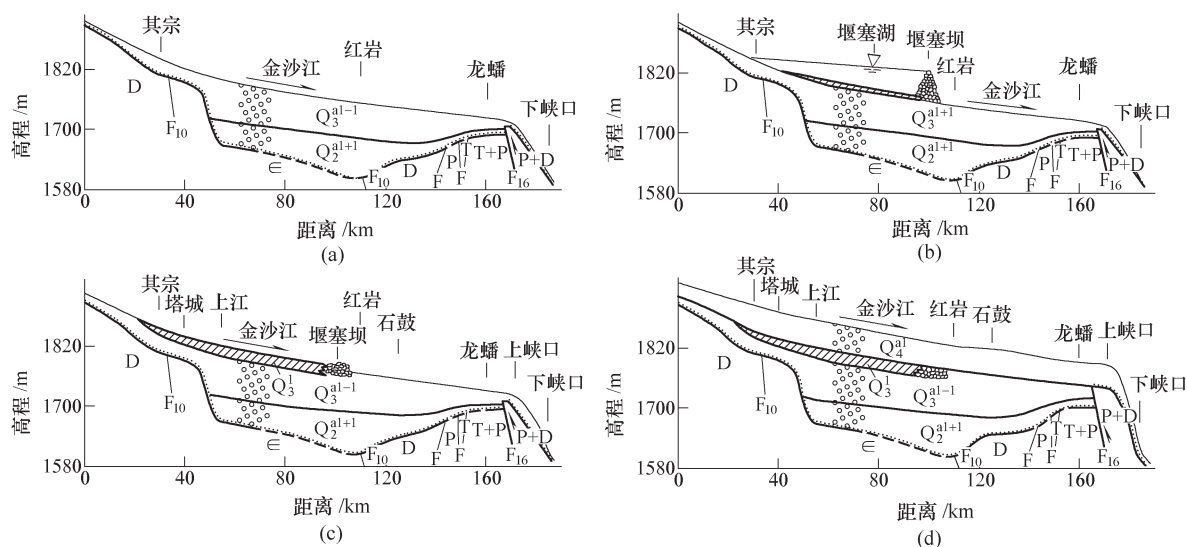


图4 虎跳峡上游堰塞湖沉积演化过程

4 堰塞湖对河段水电开发的影响

基于以上对堰塞湖形成的分析,根据试验结果并结合野外钻探情况,本河段湖相黏土具有以下物理力学性质(表1、表2):(1)灰色、灰褐色、灰绿色,室内试验定名主要为低液限黏土,土体以黏粒和粉粒居主,总体上土质均匀,具水平纹理,多呈可塑状。局部地带分布粉土、粉砂和砂质黏土等夹层,厚度0.5~2.1m,多不连续;(2)土体不具膨胀性,透水性微弱,为相对隔水层;(3)土体的孔隙比随压力的增加而逐渐减小(图5);土体具中等压缩性,其压缩模量则随压力的增加而逐渐增大

表1 湖相黏土颗粒分析和室内渗透试验结果

位置	颗粒组成 /%					室内渗透
	砂粒			砂粒	黏粒	系数 k
	> 0.5mm	0.5~0.25mm	0.25~0.075mm	0.075~0.005mm	<0.005mm	$/(cm/s)$
塔城	0~6.70	0~13.60	3.61~22.70	29.00~66.64	13.40~36.40	$7.92 \times 10^{-6} \sim 1.02 \times 10^{-5}$
上江	0~12.50	4.30~17.70	4.80~13.00	24.30~67.40	20.30~55.70	$5.97 \times 10^{-6} \sim 4.18 \times 10^{-5}$

表2 湖相黏土物理力学性质结果

位置	含水率 $w/\%$	重度 G_s	湿密度 $\rho/(g/cm^3)$	干密度 $\rho_d/(g/cm^3)$	孔隙比 e	饱和度 $S_r/\%$	饱和快剪		饱和固结快剪		自由 膨胀 率/ $\%$
							C_q/kPa	$\varphi_{q1}/^\circ$	C_{cq}/kPa	$\varphi_{cq1}/^\circ$	
塔城	17.60~29.10	2.67~2.75	1.91~2.11	1.52~1.96	0.52~0.79	91~100	17~27	17~23	19~30	20~26	
上江	17.40~37.50	2.67~2.72	1.84~2.08	1.34~1.75	0.55~0.87	81~99	15~35	13~21	16~36	19~25	-9~17

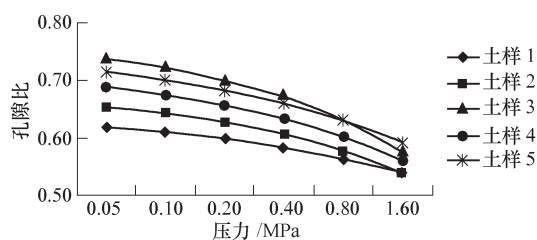


图5 湖相黏土孔隙比与压力之间关系曲线

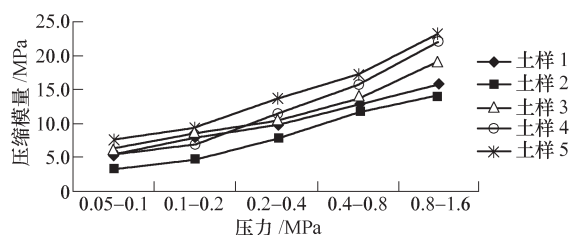


图6 湖相黏土压缩模量与压力之间关系曲线

(图6); (4)坝址间该土体物理力学性质较一致, 局部存在差异性, 这与土体的固结程度、土样均匀性和颗粒组成等有关; (5)该黏土经历了一段历史时期的固结, 强度和当初淤积时期相比已大大提高, 但是和河床覆盖层其它粗粒土(漂石、砾卵石、砂砾石等)相比, 强度较低, 为比选坝址坝基相对软弱带。

4.1 堰塞湖所处的地质环境对水电开发的影响 本堰塞湖是因山崩堰塞坝堵江而形成的, 间接地也反映了当时堰塞湖形成时期金沙江虎跳峡河段地质环境的恶劣和复杂。根据前期调查结果^[1, 10], 虎跳峡河段除发育19个特大型滑坡(或崩塌)体外, 还有数百处中小型堆积体, 主要为滑坡体、崩塌体、泥石流堆积体和冰川堆积体等。笔者认为这些地质灾害体自身地质条件较差, 其诱因除了降雨、融雪和河流下切等因素外, 还有一个重要的因素是地震。虎跳峡地区是我国地震灾害频繁的地区之一, 近场区到2007年共记录到破坏性地震128次, 其中震级6.0~6.9共20频次; 震级7.0~7.9共2频次, 地震诱发山体崩塌、滑坡及泥石流等已在汶川大地震中得到了验证。根据文献[15], 1996年丽江7级大地震(震中离虎跳峡峡谷25km)诱发大中型滑坡30处, 中小型崩塌420处, 主要集中在金沙江河岸地带。

本河段地质灾害环境的复杂性对虎跳峡水电站的开发建设不利影响较大, 笔者已在文献[1]中进行了初步论证。关于地震方面, 大坝建设需要做好抗震设计工作; 关于地质灾害方面, 稳定性差和局部不稳定的大型堆积体主要集中分布在虎跳峡大峡谷地带, 对上峡口、下峡口坝址影响较大, 龙蟠及其以上坝址仅在库尾分布一处稳定性差的大型滑坡(⑨下珠滑坡), 距其宗坝址最近, 约18 km。当然, 最终开发方案的大坝坝址确定后, 针对选定坝址尚需深入研究该工程场地的地震、滑坡、崩塌和泥石流等地质灾害, 以合理规避不利地质灾害或采取适宜的工程防治措施, 确保水电工程的安全运营。

4.2 湖相黏土层对水电开发的影响 替代虎跳峡高坝方案的上江、塔城和其宗3个比较坝址中河床均分布有厚层湖相黏土, 相应坝址的河床覆盖层最大厚度分别为206、100和100m, 均初拟布置心墙堆石坝。各坝址代表性的筑坝方案中, 上江坝址利用覆盖层筑坝方案坝高249m(正常蓄水位2100m); 塔城坝址挖除覆盖层筑坝方案坝高315m(正常蓄水位2100m); 其宗坝址挖除覆盖层筑坝方案坝高365m(正常蓄水位2150m)。

湖相黏土厚度较大, 土质软弱, 对大坝建基面的选择影响较大。对坝基黏土层的处理主要有利用或挖除两种方案, 不同的处理方案所引发的工程地质问题是有差异的, 采取的工程措施也是不同的。

4.2.1 利用黏土方案 利用黏土作为坝基持力层的优点是清基工程量小, 施工方便, 投资较少等, 但是黏土位于各坝址河床覆盖层中部, 厚度较大, 坝基主要存在防渗依托层的选择、沉降变形、抗滑稳定等工程地质问题(图7), 坝基处理存在安全风险, 筑坝技术须深入研究。

(1)防渗依托层的选择。上江坝址河床黏土层厚度9.3~24.0m, 空间分布连续, 较完整, 为相对隔水层, 但该黏土层厚薄不均, 薄弱处厚度仅9.3m, 大坝水头大, 库水渗透压力相应较大且具持久性, 因此该黏土层不宜作为坝基防渗依托层, 但可以考虑作为上下游围堰的防渗下限。塔城坝址河床黏土层厚度6.0~37.7m, 空间分布基本连续, 但是在下游围堰处有缺口, 因此不能作为坝(堰)基防渗依托层。其宗坝址仅在坝线下游右岸Ⅱ级阶地上分布厚度10.0~20.0m的黏土层, 不具备作为坝

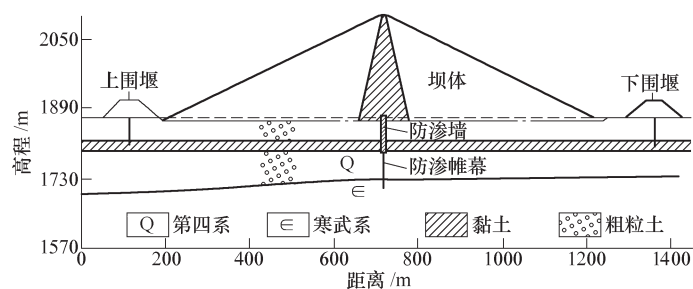


图7 坝基利用黏土层筑坝方案概化模型

(堰)基防渗依托条件。

(2)沉降变形。各坝址河床覆盖层除分布厚层黏土外，主要由漂石、砾卵石、碎块石和砂砾石等粗粒土组成，粗粒土强度较高，黏土强度相对较低，黏土是影响坝基沉降变形的关键层位。另外诸坝址上部粗粒土中局部分布细砂、粉土和砾砂等相对软弱夹层，厚度0.5~3.1m，也是影响坝基沉降变形的重要因素之一。因此诸坝址在沉降变形方面大坝应预留一定的坝高安全裕度，必要时对坝基采取适当的加固措施。

(3)抗滑稳定。浅层清基后黏土层上部的粗粒土(漂石、砾卵石等)厚度30~45m，其分布连续，厚度稳定，抗剪强度较高，多具强透水性，且堆石坝体在河床部位宽达1km余，因此大坝沿河床厚层黏土产生整体滑移失稳的可能性较小，但是需要核算内外坝坡沿河床黏土产生局部变形失稳的可能性。

4.2.2 清除黏土方案 根据目前设计方案，清除黏土方案又分对覆盖层全挖方案(图8)和仅清除黏土的局挖方案两种，这两种方案主要对坝基黏土进行大部分清除，基本消除黏土对大坝诸多不利影响，提高大坝安全运营水平。坝基黏土大部分清除并基坑形成后，其主要存在型式为基坑边坡夹层，其引发的主要工程地质问题是基坑边坡沿黏土层变形失稳问题，并由此带来深基坑整体或局部边坡稳定问题和基坑涌水涌砂问题等，建议对基坑进行边坡稳定性计算和渗流分析，以选择合适的开挖坡比及工程处理措施。同时上江坝址坝基黏土挖除后也将不具备作为围堰地基的防渗依托条件，需要对覆盖层进行防渗封闭处理。

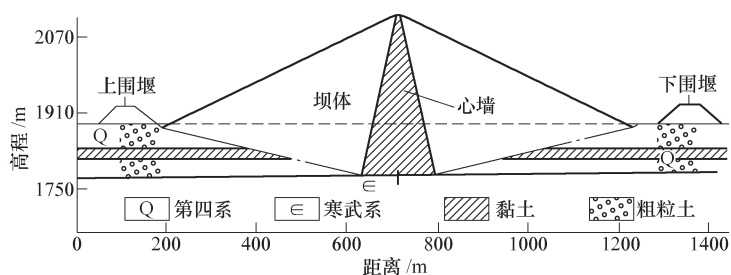


图8 坝基覆盖层全挖方案概化模型

4.2.3 对比选坝址的综合影响分析 替代虎跳峡高坝方案比选的诸坝址利用或清除河床黏土涉及的工程地质问题(沉降变形、抗滑稳定、基坑边坡稳定、基坑涌水涌砂问题等)比较类似，均应采取相应的工程处理措施。上江、塔城和其宗3个坝址坝轴线处河谷底宽分别为865、650和350m，河床黏土在各坝址坝基分布面积上：上江坝址>塔城坝址>其宗坝址，因此在坝基黏土处理技术难度、工程量、投资金额等方面上江坝址最大，其次为塔城坝址，其宗坝址最小。

5 结语

虎跳峡上游金沙江河谷中分布一隐伏的大型古堰塞湖,估算当初堰塞坝高度不低于100m,库容至少100亿 m^3 ,当时堰塞湖属于过水湖,持续时间大约1ka。经研究堰塞坝位于红岩—上江河段,由1个或多个巨型滑坡(或崩塌)堆积体组成,挡水坝具有千年的整体稳定性能。本堰塞湖的发育演化过程及其形成时期恶劣的地质环境,对认识金沙江河谷发育史以及大江大河的地质灾害发育特征具有一定的作用,同时,堰塞湖形成的河床地质组成对本河段水电开发中坝址和坝型的选择均有重大影响。在下阶段坝址选择优化中,对本河段的地震、滑坡、崩塌和泥石流等地质灾害尚需开展深入研究。堰塞坝千年淤积的湖相黏土分布在金江—其宗河段,整体分布比较连续,土质软弱,具有透水性微弱、强度较低等工程特性,该黏土分布在河床覆盖层中部,对替代虎跳峡高坝方案比选坝址的建基面选择影响较大,均需根据各坝址自身地质条件选择合适的建基面并采取适宜的工程处理措施。

致谢:感谢长江水利委员会孙云志教授级高级工程师对本文的大力支持!

参 考 文 献:

- [1] 王启国.金沙江虎跳峡河段水电开发重大工程地质问题研究[J].岩土工程学报,2009,31(8):1292-1298.
- [2] 王启国.金沙江虎跳峡河段河床深厚覆盖层成因及工程意义[J].岩石力学与工程学报,2009,28(7):1455-1466.
- [3] 赵希涛,曲永新,张永双,等.滇西北丽江地区石鼓古湖的发现及其在现代金沙江河谷发育中的意义[J].地质通报,2007,26(8):960-969.
- [4] 赵希涛,郑绵平,李道明.云南迪庆小中甸古湖的形成演化及其与石鼓古湖和金沙江河谷发育的关系[J].地质学报,2007,81(12):1645-1651.
- [5] 谭儒蛟,胡瑞林,徐文杰,等.金沙江龙蟠断陷盆地与河床深厚覆盖层的成因初判[J].工程地质学报,2008,16(1):1-5.
- [6] 赵希涛,张永双,曲永新,等.玉龙山西麓更新世冰川作用及其金沙江河谷发育的关系[J].第四纪研究,2007,27(1):35-44.
- [7] 王勇,李红春,罗尚德,等.从沉积物组成变化看三峡水库蓄水对大宁河沉积环境的影响[J].中国岩溶,2008,27(1):32-37.
- [8] 张永双,赵希涛.澜沧江云南德钦古水一带第四纪堰塞湖的沉积特征及其环境意义[J].地质学报,2008,82(2):262-268.
- [9] 王兰生,杨立铮,王小群,等.岷江叠溪古堰塞湖的发现[J].成都理工大学学报(自然科学版),2005,32(1):1-11.
- [10] 刘衡秋,胡瑞林.金沙江虎跳峡河段斜坡变形破坏特征及地质环境[J].水文地质工程地质,2007,34(2):96-100.
- [11] 陈德基.汶川大地震后水坝建设中若干问题的思考[J].工程地质学报,2009,17(3):289-295.
- [12] 陈晓清,崔鹏,程尊兰,等.5.12汶川地震堰塞湖危险性应急评估[J].地学前缘,2008,15(4):244-249.
- [13] 周家文,杨兴国,李洪涛,等.汶川大地震都江堰市白沙河堰塞湖工程地质力学分析[J].四川大学学报(工程科学版),2009,41(3):102-108,164.
- [14] 胡卸文,黄润秋,施裕兵,等.唐家山滑坡堵江机制及堰塞坝溃坝模式分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):181-189.
- [15] 唐川,黄楚兴,万晔.云南省丽江大地震及其诱发的崩塌滑坡灾害特征[J].自然灾害学报,1997,6(3):76-84.

(下转第1324页)

Impact of large-scale ancient landslide lake in Hutiao Gorge river section of Jinsha River on hydropower development

WANG Qi-guo¹, MA Gui-sheng¹, YANG Qi-gui²

(1. *Yangtze River Geotechnical Engineering Corporation, Wuhan 430010, China;*

2. *Changjiang Institute of Survey, planning, Design and Research, Wuhan 430010, China*)

Abstract: A massive hidden ancient landslide lake was found in the river bed of Jinjiang-Qizong reach in the Hutiao Gorge, Jinsha River, during the study on dam site selection for hydropower development. A lot of work including surface mapping, exploration, geotechnical testing and etc. showed that the overflow landslide dam, with height no less than 100m, is composed of several giant landslides. There is a lacustrine clay layer in the river bed with maximum thickness of 37.7m, the characteristics of which are soft, weak permeability and low intensity. In this paper, the complicated geological environment of forming the landslide lake and the effects of lacustrine clay to dam site selection, design and building are discussed.

Key words: ancient land slide lake; lacustrine clay; geological environment; impact; dam site selection; dam building

(责任编辑: 王冰伟)