

# 金沙江其宗河段河床深厚覆盖层特征及其工程效应研究

王运生<sup>1</sup>, 邓 茜<sup>1</sup>, 罗永红<sup>1</sup>, 王自高<sup>2</sup>, 高 建<sup>2</sup>, 吴俊峰<sup>1</sup>, 孙 刚<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;

2. 中国水电顾问集团昆明水电勘测设计研究院, 昆明 650051)

**摘要:**金沙江其宗河段发育 60~120m 的河床深厚覆盖层。深厚覆盖层纵向上可分为三大层:河床底部为卵(块)砾(碎)石层夹中细砂或粉质粘土,为冲积及冰水堆积成因( $^{al+fl}Q_3$ ),厚 11.1~33m;中部为细砂、粉细砂、粉质粘土层及卵(块)砾(碎)石层,该层为加积层,由冲积、泥石流堆积、洪积、崩坡积、堰塞多成因堆积组合而成( $^{al+pl+scf}Q_3$ ),厚 10.04~35m;中上部为漂(块)卵(碎)砾石夹砂层透镜体,冲积堆积形成( $^{al}Q_{3-4}$ ),厚 9.5~59m。河床覆盖层中的砂层透镜体分布范围广泛,埋藏深,最大埋深达 83.1m,最大厚度达到 29.4m,最小厚度仅 0.5m,一般厚度在 5m 以内。研究表明砂层不具有湖相堆积的特征,而是相对静水环境条件下及正常河流漫滩相等堆积形成。通过原位及室内取样试验表明,其宗河段河床覆盖层中粗粒土(漂(卵)碎块石等)强度相对较高,中下部细粒土工程性质具有超固结性,不具液化性,上部细砂层强度较低,地震工况下可能液化。该河段深厚覆盖层的工程效应主要有坝基地质条件差,仅适合堆石坝、坝基开挖方量大、砂层处理深度大、防渗处理难度较高等。

**关键词:**深厚覆盖层;发育特征;工程效应;金沙江

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2011)01-0040-06

金沙江其宗河段(其宗水电站上下坝址区河段)位于金沙江虎跳峡上游,为金沙江中游比选龙头水库。其宗水电站勘察资料表明,沿河段分布 60~120m 厚的深厚覆盖层,其成因类型复杂,包括冲积、冰水堆积、洪积、泥石流堆积、崩坡积等成因,同时覆盖层中砂层具分布广泛、埋深大、厚度差异大特点。通过对比其宗水电站坝址区与其下游塔城、上江等处河床深厚覆盖层,其组成特征存在明显差异<sup>[1-2]</sup>。与此同时,在深厚覆盖层上修建大坝,存在诸如坝基不均匀沉降、坝基渗漏、渗透变形、坝基抗滑稳定性、砂土液化等主要工程地质问题。全部挖除 100 余米的厚覆盖层无论从技术上还是从经济角度均难以接受或实施。因此,研究金沙江其宗河段河床深厚覆盖层特征及其工程效应,不仅对金沙江中上游河段水电建设具有重要的指导意义,而且可进一步丰富金沙江中上游河谷演化的新资

料。

## 1 金沙江其宗河段深厚覆盖层特征及其空间分布特征

### 1.1 深厚覆盖层组成特征

根据其宗水电站下坝址钻孔揭露,河床覆盖层从下至上可以分为三大层:

第①层:卵(块)砾(碎)石层夹中细砂或粉质粘土,分布于河床底部,钻孔揭示厚度 11.1~33m。卵(碎)砾石成分为变质砂岩、花岗岩、玄武岩及少量千枚岩等,卵砾石以圆一次圆为主,碎石成分为灰岩、千枚岩,呈次棱角状,颗粒构成基本骨架,充填砂或粘土。见于钻孔 zk204<sup>#</sup>、zk2<sup>#</sup>、zk222<sup>#</sup>、zk212<sup>#</sup>及 zk213<sup>#</sup>中。

第②层细砂、粉细砂,粉质粘土层及卵(块)砾(碎)石层,钻孔揭示厚度 10.04~35m。纵向上可以进一步分为 2 个亚层:

②-1 层:卵(块)砾(碎)石层夹细砂、粉质粘土,钻孔揭示厚度 9~19m。卵砾石成分以变质砂岩、花岗岩、辉绿岩为主,含少量结晶灰岩,圆一次圆状。碎石以灰绿色千枚岩及结晶灰岩为主,棱角状(多以“泥包砾”形式出现)。目前该层见于钻孔 zk214<sup>#</sup>、zk212<sup>#</sup>、zk204<sup>#</sup>、zk224<sup>#</sup>、zk222<sup>#</sup>中,覆于第①层之上。

②-2 层:粉细砂层、粉土、粉质粘土层,钻孔揭示

收稿日期: 2010-06-07; 修订日期: 2010-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(中国西部深切河谷谷底卸荷松弛带形成机理及其工程效应研究,40472143/D0214)

作者简介: 王运生(1960-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事工程地质等方面的教学与研究工作。

E-mail: wangys60@163.com

厚度 10.04 ~ 22.49m。在 204<sup>#</sup> 孔 59.0 ~ 65.20m、69.75 ~ 75.10m 段为粉砂,灰黄色,较密实,岩芯呈柱状;65.20 ~ 69.75m 为粉土,灰色、灰绿色,可塑状,岩芯呈柱状;75.10 ~ 84.10m 段为碎石、砾石质粉质粘土,黄色、褐黄色(75.10 ~ 77.40)、灰色、黄灰色(77.40m ~ 84.10m);86.30 ~ 94.0m 段为碎石、砾石质粉质粘土,灰色、浅灰色、灰绿色、灰黄色,可塑—硬塑状。目前该层见于钻孔 zk204<sup>#</sup>、zk212<sup>#</sup>、zk213<sup>#</sup>、zk215<sup>#</sup>、zk222<sup>#</sup> 及 zk2<sup>#</sup> 中,覆于第②-1 层之上(在 zk2<sup>#</sup> 中直接覆于第①层之上)。

第③层:漂(块)卵(碎)砾石夹砂层透镜体,分布于整个下坝址河床中浅部,钻孔揭示厚度 9.5 ~ 59m。纵向上可以进一步分为 2 个亚层:

③-1 层漂(块)卵(碎)砾石:位于河床表层,钻孔揭示厚度 9.5 ~ 79m。漂卵砾石由变质石英砂岩及少量的花岗岩、玄武岩、紫红色泥质砂岩、浅褐色杂砂岩及辉绿岩等组成。圆一次圆状,结构松散,以椭球体、肾状居多。

③-2 砂层及粉砂层,钻孔揭示厚度 0.5 ~ 29.4m 松散—稍密。

## 1.2 深厚覆盖层空间分布特征

根据其宗下坝址勘探钻孔及物探等勘察手段揭露资料,下坝址区河床存在一个 V 字形谷槽(图 1 黑实线),谷槽最深处高程约为 1771.9m。受河槽下切过程与岸坡崩塌等综合作用的结果,古河槽被动迁移或原河槽改道下切,形成古河槽与现今河道组合的空间地貌特征<sup>[3]</sup>。河床覆盖层沿 V 形古河槽覆盖层深厚,从已有钻孔资料结合地面调查及河流动力学特征分析,其宗水电站下坝区河床覆盖层各分层在空间展布上有如下特点:

(1)第①及第②层沿早期深切 V 字形谷底分布。从图 1 可以看出,第①层及第②层在其宗水电站下坝址分布于谷底靠右岸。第①层含碎石卵砾石层,底部宽 20 ~ 30m,向上宽度逐渐增大,其顶面宽度 60 ~ 90m。该层在河槽轴线厚度较大,达 30m,向左右两岸厚度变薄。空间上第①层顺河槽连续分布,在大理厂上游偏左岸分布,大理石厂下游偏右岸分布。

第②-1 层底面宽与第一层顶面宽基本一致,其顶面空间分布与右岸(凸岸)阶地及漫滩范围基本一致,顶面宽 120 ~ 150m。

第②-2 层其顶面空间分布与右岸(凸岸)阶地及漫滩、左岸上游围堰回水沱范围基本一致,呈大透镜状。

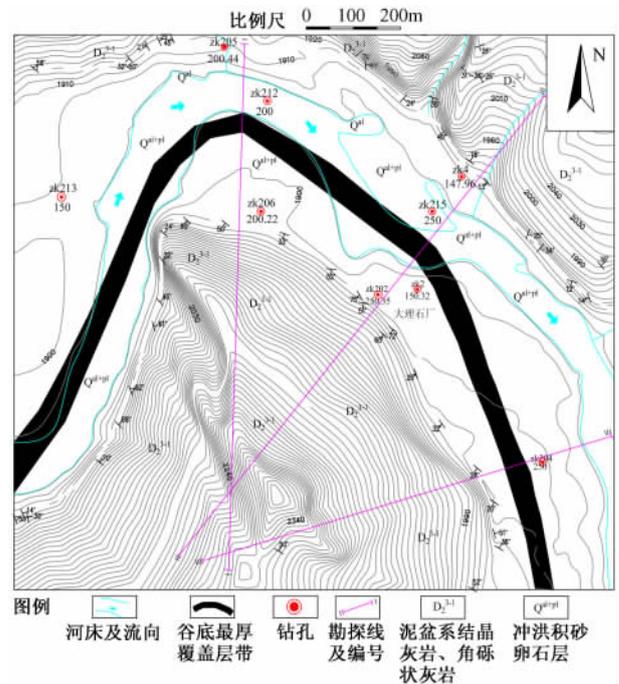


图 1 下坝址 V 字形谷槽分布位置图

(黑粗线为谷底最深位置)

Fig. 1 Distribution of V shaped valley at lower dam site  
(Black thick line shows the deepest location of the bottom)

(2)第③-1 层为正常河流相砂卵砾石层,横向分布上几乎占据整个谷底。③-2 层为漫滩或回水沱成因的砂层透镜体,分布集中在右岸 I 级及 II 级阶地顶部及大理石厂下游回水沱及上游围堰左岸回水沱。

据其宗水电站下坝址各勘探线钻孔揭露,覆盖层中砂层的分布范围较广,埋藏深,最大埋深达 83.1m;厚度差异较大,最大厚度达到 22.49m,最小厚度仅有 0.5m,但大部分砂层的厚度较小,在 5m 以内。

## 2 金沙江其宗河段深厚覆盖层成因分析

前人研究表明,滇西北地区受印度板块与欧亚板块碰撞的影响,经历了上新世末至早更新世时期的一级夷平面作用,第四纪早更新世至晚更新世快速隆升导致的断块差异升降、统一高原面解体,以及中晚期更新世间歇性快速下切三个大的演化阶段<sup>[4-5]</sup>。随着“三江”断裂带强烈的走滑复活,在金沙江流域发育了一系列断陷盆地或谷地,新构造运动导致一系列古湖被贯穿或外泄,形成现代的金沙江<sup>[6-8]</sup>。金沙江其宗段为高山峡谷地貌,同时其宗上游发育一级支流腊普河,上游固体物质较丰富。通过对其宗水电坝址区河段层状地貌的调研,该河段河谷 IV 级阶地与 III 级阶地卵砾石风化程度差异大,IV 级阶地的风化程度较 III 级

阶地要严重得多。从电镜扫描结果可以看出, I ~ II 级阶地及河漫滩石英颗粒形貌溶蚀相对较轻, IV 级阶地石英砂粒普遍都有明显的溶蚀及结晶现象, 表明谷底堆积物、III 级及其以上阶地或层状地貌中石英经历了较长时间的风化作用, 应为晚更新世或中更新世晚期的堆积; ESR 测年结果也有较大差别, IV 级阶地形成年代约距今 8 ~ 9 万年, III 级阶地形成距今仅 4 ~ 5 万年, 下坝址 III 勘线 zk204 钻孔 116 ~ 119m 距今为 4.9 ~ 5.2 万年, 对下坝址 zk204 钻孔下部炭化木的 <sup>14</sup>C 测年为 4.5 万年。由以上测年表明, 河谷基覆界面附近覆盖层测定年龄早于 III 级阶地, 而晚于 IV 级阶地, 由此说明其宗水电坝址河段河谷在 IV 级阶地形成后, 其一直下切至基覆界面, 回填加积至 III 级阶地的高度, 然后又重新下切, 形成现今 III 级、II 级及 I 级阶地地貌, 且河谷下切并未切穿回填加积层; 该河段在形成程式上与川西河谷在末次冰盛期堆积回填, 并在后期重新下切形成 II 级、I 级及正常河床相堆积<sup>[9]</sup>有较为明显的差异。

从下坝址 zk02、zk204 钻孔样测年与下坝址右岸 I 级、II 级、III 级阶地测年对比分析, 其宗坝段河床覆盖层形成具有不对称内叠阶地的特点<sup>[10]</sup>, 即在下坝址具有从右岸到左岸, 从谷底到河面, 河床覆盖层形成从晚更新世 → 全新世, 逐渐变新。通过对河床钻孔覆盖层组成鉴别, 其组成成分较复杂, 分别堆积了冰水河床相、洪积、泥石流堆积、崩积、漫滩堆积、河床相堆积等物质, 其古气候环境也经历了末次冰期副冰期、间冰段、冰盛期到冰后期不同气候环境。

下坝址 III 勘线钻孔揭露河床覆盖层组成成分特征及各层的叠置关系如图 2, 从下至上各层主要成因如下:

第①层含碎石卵砾石层, 碎石成分近源为主, 卵砾石为远源物质, 为晚更新世末次冰期第一副冰期冲积及冰水堆积, 其中在 zk212 孔深 73.15 ~ 74.4m、80.83 ~ 83.1m 分别夹 1.25m 粉细砂及 2.27m 黄褐色细砂层, 砂层成因应为漫滩相。

第②-1 层, 成因较复杂, 为末次冰期第一副冰期向间冰段过渡时期地表径流几乎稳定时期的产物, 有碎石层夹卵砾石、卵砾石夹碎石及砂层, 以洪积、泥石流堆积、重力堆积等近源物质加积较严重的时期, 在 III 勘线该层有冰期冰融泥石流堆积(成分以灰绿色千枚岩泥包砾), 向上游该层变为以河流相砂层为主(zk215), 砂层为下游泥石流淤塞导致上游壅水形成局部回水湾之产物。

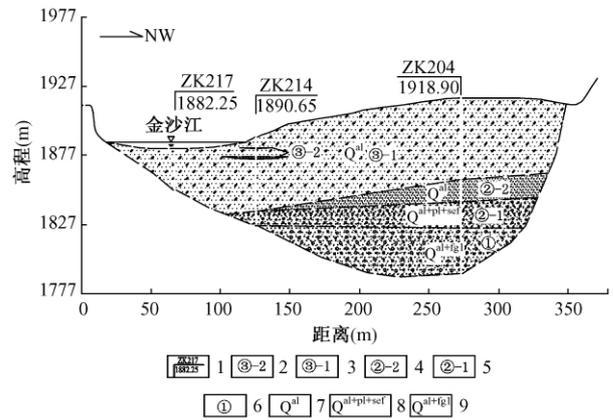


图 2 下坝址 III 勘线河床覆盖层横剖面

Fig. 2 Overburden profile of the III exploration line at lower dam site

- 1—钻孔编号及孔口高程; 2—粉砂、粉土、粉质粘土层; 3—卵砾石夹漂(块)石及砂; 4—细砂、粉砂、粉质粘土夹少量砾石; 5—块石、碎石夹粉土或粉质粘土; 6—卵(块)砾(碎)石夹中细砂; 7—冲积堆积; 8—冲积、洪积及泥石流堆积; 9—冰水及冲积堆积;

第②-2 层为粉细砂层, 厚度较大, 延伸具有一定规模, 因此该层形成环境为河流相对静水相砂层透镜体堆积, 是河流纵比降小于 1‰ 时, 水动力低, 在凸岸堆积的产物<sup>[11]</sup>。

第③层除靠近河流两岸有崩积外, 以较纯的卵砾石为主, 在回水沱等部位夹有较厚的砂层透镜体, 包括 II 级阶地、I 级阶地、漫滩及现代河床相堆积。

第①层和第②层伏于 II 级阶地之下, 结合区域测年资料, II 级阶地形成于晚更新世晚期—末期, 第①层的测年为 4.9 万年, 第②层测年为 4.5 ~ 1.5 万年, 均为晚更新世中晚期的产物, 第③层测年为 1 万年以来。这表明谷底形成时间较早, 在 III 级阶地形成前就已形成, 然后堆积回填再下切, 从来自 zk204 及 zk2 号钻孔孢粉分析结果可知, 为间冰段偏暖气候的堆积。结合第四纪古气候研究成果<sup>[12]</sup>, 中国西部末次冰期可以区分 3 个时段, 第一亚冰期为距今 7 ~ 4.5 万年, 距今 4.5 ~ 2.5 万年为末次冰期间冰段, 距今 2.5 ~ 1.5 万年为末次冰期冰盛期。也就是说坝区河床覆盖层主体应该是末次冰期间冰段干热河谷的产物。

覆盖层中的砂层按成因可分为 3 层, 并与它们的埋藏深度一一对应, 具体为:

第①层中的砂层透镜体, 冰期冲积形成 ( $Q_3^{al+fgl}$ )。该层埋藏最深, 具体可分为 2 个砂层透镜体。揭露钻孔及深度、厚度分别为: (1) zk212 的 73.15 ~ 74.4m, 厚 1.25m; (2) zk212 的 80.83 ~ 83.1m, 厚 2.27m。各透镜体的延伸较短, 分布不连续。

第②-2层砂层透镜体,河流相相对静水环境下堆积。该层埋深介于①层和③层之间,具体可分为5个砂层透镜体,有6个钻孔揭露到,揭露钻孔及深度、厚度分别为:(1)zk212的45.4~54.5m,厚9.1m;(2)zk215的42.66~65.15m,厚22.49m;(3)zk2的38.87~48.91m,厚10.04m;(4)zk204的59.0~75.0m,厚16m;(5)zk213的46.0~66.22m,厚20.22m;(6)zk222孔的50.8~55.0m,厚4.2m。其中除(2)和(4)外,其余砂层连续,延伸长度1km以上,为下坝址地区最大的砂层透镜体。

第③-2层砂层透镜体,正常河流冲积形成的漫滩相堆积和回水沱相堆积。该层埋深最浅,具体可分为7个透镜体,有9个钻孔揭露到,揭露钻孔及深度、厚度分别为:(1)zk212孔的9.7~39.0m,厚29.4m;(2)zk2孔的0~3.5m,厚3.5m;(3)zk2孔的8.5~10.5m,厚2m;(4)zk2孔的23.2~28.3m,厚5.1m;(5)zk202孔的0.9~8.6m,厚7.7m;(6)zk214孔的7.8~8.3m,厚0.5m;(7)zk214孔的14.16~16.0m,厚1.84m;(8)zk222孔的0.0~3.9m,厚3.9m;(9)zk224孔的14~17.1m,厚3.1m。各砂层透镜体的延伸长度较小,透镜体之间是独立不连续的。

引人瞩目的是下坝址河床覆盖层中的砂层在横向上并不连续。结合下游尾水出口部位zk216及zk218孔资料,在zk204孔钻遇到的②-2砂层向下游并不连续,表明②-2砂层并非湖相堆积,为相对静水环境的砂层透镜体。

在山区河流为何形成如此厚的砂层?根据景可等研究黄河中游纵比降分析得到,凡是纵比降大于1‰的河谷都是侵蚀性河谷,而纵比降小于1‰的多半是堆积性河道<sup>[11]</sup>。从其宗坝址—上峡谷口河段,现今河流纵比降略大于1‰,为侵蚀性河谷。根据金庄、红岩、松圆及上谷口坝址钻孔资料,加积层形成时期,该河段纵比降小于1‰,为堆积性河道,表明晚更新世晚期其宗—老村河段由于虎跳峡地方侵蚀基准面抬高转为堆积为主的河谷环境,在弯道河段,河流携带的粉细砂在单向环流作用下堆积在凸岸,或水平环流作用(图3~图4)下堆积在回水沱部位,这两种局部环境堆积的砂层不同于堰塞湖相堆积。首先,砂层在横向上分布不稳定,延伸一定距离后尖灭;其二,粘土含量相对较低,大多小于10%;其三,缺乏湖相堆积的纹层结构。钻孔编录及颗分显示,无论是加积期砂层透镜体还是第三层正常河流相堆积的砂层透镜体,均是弯道河段局部水环境差异形成的细砂层或粉细砂层透

体。

而老村—上峡谷口段加积层中砂层横向上分布稳定,揭示该段顺金沙江存在晚更新世晚期湖泊,老村以上河水注入下游湖泊。因此,晚更新世晚期湖积范围上至老村,老村上游侧为河流。



图3 大理石厂回水沱水平环流示意图  
Fig.3 The sketch map of the level of circulation at marble factory

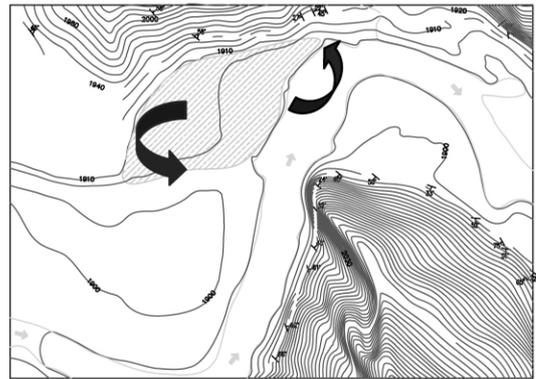


图4 上游围堰左岸回水沱水平环流示意图  
Fig.4 The sketch map of the level of circulation at left bank of the upstream cofferdam

总之,其宗水电站深厚覆盖层经历了晚更新世晚期冰期回填及冰后期侵蚀堆积作用。第①层为河流相卵砾石和近源冰水带来的碎石、块石的混合堆积;第②层为近源冰融泥石流、洪积、局部环流堆积和河流相卵砾石层混合组成。第③层为正常河流相卵砾石层夹砂层透镜体(漫滩相和回水沱堆积)。

### 3 工程效应研究

#### 3.1 覆盖层物理力学性质研究

为了研究其宗河段河床覆盖层发育的工程效应,工程勘察中主要采用了原位测试主要包括重型动力触

探试验、标准贯入试验、静力触探试验(CPT)、平板静载试验(PLT)、旁压试验(PMT)、十字板剪切试验(VST)、抽水试验、注水试验、波速试验,以及室内试验等手段,较为系统地掌握了各岩组的基本物理力学特性。

①层干密度  $2.14 \sim 2.22 \text{g/cm}^3$ ,孔隙比  $0.25 \sim 0.3$ ,承载力  $0.6 \sim 0.9 \text{MPa}$ ,压缩模量  $39.8 \text{MPa}$ ,剪切波速  $1.21 \sim 1.56 \text{km/s}$ ,渗透系数  $1.0 \times 10^{-1} \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 。承载力较高,强—中等透水性。

第②-1层干密度  $1.6 \sim 1.7 \text{g/cm}^3$ ,孔隙比  $0.7 \sim 0.8$ ,承载力  $0.436 \text{MPa}$ ,压缩模量  $28.3 \text{MPa}$ ,剪切波速  $0.82 \sim 1.58 \text{km/s}$ ,内聚力  $30 \sim 40 \text{kPa}$ ,内摩擦角  $25 \sim 30^\circ$ ,渗透系数  $1.0 \times 10^{-5} \sim 3.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 。承载力较高,弱透水性。

第②-2层干密度  $2.1 \sim 2.2 \text{g/cm}^3$ ,孔隙比  $0.25 \sim 0.3$ ,承载力  $0.3 \text{MPa}$ ,压缩模量  $13.5 \text{MPa}$ ,剪切波速  $0.71 \sim 0.99 \text{km/s}$ ,内聚力  $20 \sim 30 \text{kPa}$ ,内摩擦角  $20 \sim 25^\circ$ ,渗透系数  $2.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 。承载力较低,弱透水性。砂样测年表明形成晚更新世,据相关规范<sup>[13]</sup>,砂层不具液化效应。

第③-1层干密度  $2.10 \sim 2.15 \text{g/cm}^3$ ,孔隙比  $0.3 \sim 0.45$ ,承载力  $0.93 \text{MPa}$ ,压缩模量  $58 \text{MPa}$ ,内聚力为  $0$ ,内摩擦角  $30 \sim 35^\circ$ ,剪切波速  $0.73 \sim 1.22 \text{km/s}$ ,渗透系数  $2.0 \times 10^{-1} \sim 3.0 \times 10^0 \text{cm/s}$ 。该层承载力较高,多具有强透水性,局部具中等透水性,孔壁稳定性较差。

第③-2层干密度  $1.5 \sim 1.6 \text{g/cm}^3$ ,孔隙比  $0.45 \sim 0.7$ , $N_{63.5}$ 击数  $6.3$ ,承载力  $0.2 \text{MPa}$ ,压缩模量  $15.8 \text{MPa}$ ,剪切波速  $0.82 \sim 0.94 \text{km/s}$ ,内聚力  $15 \sim 20 \text{kPa}$ ,内摩擦角  $18 \sim 22^\circ$ ,渗透系数  $7.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 。承载力较低,弱透水性。

### 3.2 工程效应研究

深厚覆盖层的存在对于高坝来说可能面临诸如承载力偏小、砂土液化、不均匀沉降等工程地质问题。由于其宗河段深厚覆盖层厚度达  $120 \text{m}$  及其各分层空间分布的不均一性和力学性状的差异,其工程效应总结起来有以下几方面:

(1)坝型选择余地小。尽管选坝河段位于相对峡谷段,但该河段仅适合堆石坝。深厚覆盖层的发育由于深度太大,不可能全部挖除,因此对坝基条件要求较高的重力坝和拱坝均不适宜,只有对坝基条件要求较低的堆石坝可以适应。

(2)坝基开挖方量大。试验揭示,第③-2砂层透镜体工程性状差,承载力不满足设计要求;在地震工况

下可能液化,施工中必须挖除,挖除深度达  $30 \text{m}$ ,开挖方量预期在百万方。

(3)坝基处理深度大,难度较高。第②-2砂层虽判别为不液化层,但其工程性状较差,必须通过改良处理才能达到设计要求。处理深度达  $90 \text{m}$ ,不但处理技术难度高,而且成本也相当可观。

(4)坝基防渗难度较高。由于粉细砂层呈透镜状,不能很好地构成相对隔水层。试验揭示,卵砾石层具有强透水性, $250 \text{m}$ 的高坝具有高水头,坝基防渗要求高。坝基防渗处理要达到河床基覆界面并深入基岩(大于  $120 \text{m}$ ),目前还没有现成的工程经验作为参考,处理难度较大。

(5)堆石坝方案较上下游有优势。综合比较上下游坝址地质条件,由于其宗河段坝肩边坡条件好,坝基工程地质问题较明朗,作为堆石坝还是有较大的优越性。

## 4 结论

(1)其宗水电站下坝址河段河床及阶地分布覆盖层厚达  $60 \sim 120 \text{m}$ ,覆盖层深厚,成因复杂。

(2)根据覆盖层组成特征及成因,河床深厚覆盖层纵向上可分为三层,河床底部为河流相卵砾石和近源冰水带来的碎石、块石的混合堆积;中部为近源冰融泥石流、洪积、局部环流堆积和河流相卵砾石层混合组成。中上部为正常河流相卵砾石层夹砂层透镜体。

(3)通过对阶地及河床覆盖层系统测年对比研究,其宗河段河床覆盖层形成具有不对称内叠阶地的特点。

(4)河床覆盖层原位及室内取样试验表明,砂土、粉砂土透镜体工程性质较差,承载力较小,但中下部砂层不具有液化性,上部细砂层地震工况作用下可能液化。

(5)该河段深厚覆盖层的工程效应可以归结为坝型选择余地小、坝基开挖方量大、坝基处理深度大、防渗难度较高。

### 参考文献:

- [1] 王启国.金沙江中游上江坝址河床深厚覆盖层建高坝可行性探讨[J].工程地质学报,2009,17(6):745-751. [WANG Q G. Feasibility study on construction of highdam at middle reaches of Jinsha River with thick riverbed deposit [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(6): 745-751. (in

- Chinese) ]
- [ 2 ] 李建勇, 顾少娟, 韩旭. 金沙江塔城水电站河床深厚覆盖层的形成机制及空间分布特征的研究 [J]. 资源环境与工程, 2009, 23 (5): 683 - 686. [LI J Y, GU S J, HAN X. Research on Formation Mechanism and Space Distribution Characteristics of Deep Overburden Layer in River Bed of Tacheng Hydropower Station in Jinsha River [J]. Resources Environment & Engineering, 2009, 23 (5): 683 - 686. (in Chinese) ]
- [ 3 ] 葛兆帅, 刘庆友, 胥勤勉, 等. 金沙江下段河槽地貌特征与地貌过程 [J]. 第四纪研究, 2006, 26 (3): 421 - 428. [GE Z S, LIU Q Y, XU Q M, et al. The geomorphic evolution and characteristics of the river bed in the lower reaches of Jinsha Jiang River [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26 (3): 421 - 428. (in Chinese) ]
- [ 4 ] 杨宝嘉, 吕伟. 滇西北三江地区新构造运动特征 [J]. 成都大学学报: 自然科学版, 2006, 25 (3): 214 - 218. [YANG B J, LV W. Moving features of new tectonic movement in three river area of northwest Yunnan [J]. Journal of Chengdu University: Natural Science, 2006, 25 (3): 214 - 218. (in Chinese) ]
- [ 5 ] 范柱国, 李锋, 谈树成, 等. 丽江 - 大理地区新构造运动特征及环境效应 [J]. 大地构造与成矿学, 2002, 26 (3): 6 - 9. [FAN Z G, LI F, TAN S C, et al. The characteristics and environmental effects of neotectonic movement in the Lijiang-Dali region [J]. Geotectonic et Metallogenia, 2002, 26 (3): 6 - 9. (in Chinese) ]
- [ 6 ] 赵希涛, 张永双, 胡道功, 等. 云南丽江地区大具盆地早更新世金沙江砾石层的发现及其意义 [J]. 地质通报, 2006, 25 (12): 1381 - 1386. [ZHAO X T, ZHANG Y S, HU D G, et al. Discovery of early Pleistocene gravels of the Jinsha River in the Daju basin, Yunnan, China and its significance [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25 (12): 1381 - 1386. (in Chinese) ]
- [ 7 ] 赵希涛, 张永双, 曲永新, 等. 玉龙山西麓更新世冰川作用及其与金沙江河谷发育的关系 [J]. 第四纪研究, 2007, 27 (1): 35 - 44. [ZHAO X T, ZHANG Y S, QU Y X, et al. Pleistocene glaciations along the western foot of the Yulong mountains and their relationship with the formation and development of the Jinsha River [J]. Quaternary Sciences, 2007, 27 (1): 35 - 44. (in Chinese) ]
- [ 8 ] 杨达源, 韩志勇, 葛兆帅, 等. 金沙江石鼓 - 宜宾河段的贯通与深切地貌过程的研究 [J]. 第四纪研究, 2008, 28 (4): 564 - 568. [YANG D Y, HAN Z Y, GE Z S, et al. Geomorphic process of the formation and incision of the section from Shigu to Yibin of the Jinsha River [J]. Quaternary Sciences, 2008, 28 (4): 564 - 568. (in Chinese) ]
- [ 9 ] 王运生, 黄润秋, 段海澎, 等. 中国西部末次冰期一次强烈的侵蚀事件 [J]. 成都理工大学学报, 2006, 33 (1): 73 - 76. [WANG Y S, HUANG R Q, DUAN H P, et al. An intensive erosion event in the last glaciation in the west of China [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2006, 33 (1): 73 - 76. (in Chinese) ]
- [ 10 ] 罗永红, 王运生, 王自高, 等. 金沙江其宗河段河谷演化及其工程效应研究 [J]. 山地学报, 2010, 28 (2): 177 - 182. [LUO Y H, WANG Y S, WANG Z G, et al. Study on Qizong river section of Jinsha River evolution and its engineering characteristics [J]. Journal of mountain science, 2010, 28 (2): 177 - 182. (in Chinese) ]
- [ 11 ] 景可, 李凤新. 灾害类型及成因机制分析 [J]. 泥砂研究, 1999 (1): 12 - 16. [JING K, LI F X. Types and Mechanism for Formation of Sediment Disasters [J]. Journal of Sediment Research, 1999 (1): 12 - 16. (in Chinese) ]
- [ 12 ] 王靖泰, 汪品先. 中国东部晚更新世以来海面升降与气候变化的关系 [J]. 地理学报, 1980 (4): 299 - 312. [WANG J T, WANG P X. Relationship between sea-level changes and climatic fluctuations in east China since late pleistocene [J]. ACTA Geographica Sinica, 1980 (4): 299 - 312. (in Chinese) ]
- [ 13 ] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫局. GB50021 - 2001 岩土工程勘察规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. [Ministry of Construction P. R. China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB50021 - 2001 Code for investigation of geotechnical engineering [S]. Beijing: China Architecture & Building press, 2002. (in Chinese) ]

(下转第 64 页)

## Creep properties and empirical model of soft clay in Zhanjiang

HE Li-jun<sup>1</sup>, KONG Ling-wei<sup>1</sup>, ZHANG Xian-wei<sup>1</sup>, WANG Xiao-yan<sup>1</sup>, CAI Yu<sup>2</sup>

(1. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;*  
2. *CCCC-FHDI Engineering Co. Ltd., Guangzhou 510230, China*)

**Abstract:** Triaxial creep test with non-drainage of soft clay in Zhanjiang area was systematically carried out, the complete creep curves were achieved under different confining pressures and different stress states, both creep curves of staged loading and creep equal-time curves were established by linear Boltzmann overlapping principle as well as Coordinate Translation. Broken line form of creep equal-time curves showed specific creep properties of soft-soil in Zhanjiang, the stress-strain relationship of the empirical model in this paper was approximated by a linear function generally, and the strain-time relationship was represented by a hyperbolic function, while Mesri model is still applicable with low deviatoric stress. Analysis showed that this empirical creep equation was more suitable for simulating the test data comparing to Singh-Mitchell model and Mesri model, describing and predicting the creep properties of the soft clay in Zhanjiang comprehensively.

**Key words:** soft clay; creep test; creep equal-time curve; creep model

责任编辑:张明霞

(上接第 45 页)

## A study on the characteristics of deep overburden in Qizong segment of Jinsha River and its engineering effects

WANG Yun-sheng<sup>1</sup>, DENG Xi<sup>1</sup>, LUO Yong-hong<sup>1</sup>, WANG Zi-gao<sup>2</sup>, GAO Jian<sup>2</sup>, WU Jun-feng<sup>1</sup>, SUN Gang<sup>1</sup>

(1. *State Key Lab of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;* 2. *HydroChina Kunming Engineering Corporation, Kunming 650051, China*)

**Abstract:** Overburden of 60 ~ 120m deep is developed in the Qizong segment of Jinsha River. The deep overburden can be divided into three layers upward. Pebble and gravel intercalated with minor fine sand or silty clay with the thickness of 11.1 ~ 33m at the bottom of the riverbed; a layer of fine sand, silty clay, pebble and gravel which with the thickness of 10.04 ~ 35m in the middle of the riverbed; coarse lenses of the drift (blocks), pebble (broken) and gravel layer with the thickness of 9.5 ~ 59m in the upper part. Sand lens are widely distributed in the deep overburden. The maximum buried depth is 83.1m, the maximum thickness is 29.4m, and the minimum thickness is only 0.5m. The thickness of the sand lens is generally within 5m. Studies show that the sand lens is not formed by the accumulation of lacustrine, but is formed by accumulation of the relatively still water environment and the normal river floodplain. By indoor sampling tests, it shows that coarse-grained soil (boulder-pebbles accumulation, etc.) in the overburden of the river bed is relatively strong and hard, fine-grained soil in the lower place is excess consolidated, but non-liquefaction. Fine sand lens at the upper are relatively weak, so it is possible to be liquefied under an earthquake. The engineering effects can be concluded that because of the bad geological conditions it is only suitable for rock-fill dam, the excavated volume is huge, the sand layer treatment depth is large and impermeable treatment is quite difficult.

**Key words:** deep overburden; development characteristics; engineering effects; Jinsha River

责任编辑:张明霞