

# 银江水电站尾水渠粉细砂土质边坡支护方案研究

李 伟<sup>1</sup>, 徐孝刚<sup>1,2</sup>, 陈俊勇<sup>2</sup>

(1. 四川川投能源股份有限公司, 四川 成都 610044; 2. 攀枝花华润水电开发有限公司, 四川 攀枝花 617067)

**摘 要:** 鉴于银江水电站尾水渠边坡地质条件差且其距 G353 国道非常近, 导致边坡开挖范围受限, 加之其局部为粉细砂土质边坡, 电站运行后尾水渠边坡部分位于水下。受运行工况影响边坡水位上下浮动, 同时还需承受坡面鱼道建筑物的荷载, 工程集多种难点和复杂条件于一身。为了保证工程安全, 业主最终决定采用“混凝土面板+锚筋桩”的支护方案。目前该边坡已施工完成且经过约一年时间的安全监测, 监测数据表明, 边坡已收敛、无变形。证明所制定的边坡支护方案合理。阐述了对该边坡支护方案进行的研究过程, 旨在为类似工程建设时借鉴。

**关键词:** 银江水电站; 尾水渠; 粉细砂土质边坡; 支护方案

**中图分类号:** TV7; TV51; TV52; TV86

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1001-2184(2025)01-0007-03

**DOI:** 10.20196/j.cnki.scsfhd.20250103

## Study on the Support Scheme of Silty Sand Soil Slope in the Tailrace Channel of Yinjiang Hydropower Project

LI Wei<sup>1</sup>, XU Xiaogang<sup>1,2</sup>, CHEN Junyong<sup>1</sup>

(1. Sichuan Chuantou Energy Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610044;

2. Panzhihua China Resources Hydropower Development Co., Ltd., Panzhihua Sichuan 617067)

**Abstract:** Due to the poor geological conditions of the slope of the tailrace channel of Yinjiang Hydropower Project and its close proximity to G353 National Highway, the excavation range of the slope is limited, and the part of the slope is made of silty sandy soil. After the operation of the project, the tailrace channel slope is partially underwater. Affected by the operating conditions, the water level of the slope fluctuates, and it also needs to bear the load of the slope fishway, which sets a variety of difficulties and complex conditions in one. In order to ensure the safety of the project, it was finally decided to adopt the "concrete panel + anchor reinforcement pile" support scheme. At present, the construction of the slope has been completed, and after about a year of safety monitoring, the monitoring data show that the slope has converged without deformation, which proves that the slope support scheme is reasonable. This paper describes the research process of the slope support scheme, aiming to provide reference for similar projects.

**Key words:** Yinjiang Hydropower Project; Tailrace channel; Silty sandy soil slope; Support scheme

### 1 概 述

银江水电站是国家金沙江中游水电“一库十级”规划中的最末一级, 位于攀枝花市主城区。电站的开发方式为河床式, 开发任务为发电、兼顾改善城市水域景观和取水条件等; 大坝坝型为混凝土重力坝, 最大坝高 73 m。水库正常蓄水位高程为 998.50 m, 死水位高程为 998.00 m, 总库容为 5 900 万 m<sup>3</sup>, 调节库容为 180 万 m<sup>3</sup>, 装机容量为 39 万 kW, 工程等别为 II 等大(2)型。

### 2 尾水渠粉细砂土质边坡处理存在的技术难点

银江水电站的发电厂房为河床式, 布置于河

道偏左岸, 安装 6 台、单机容量为 65 MW 的灯泡贯流式水轮发电机组, 单机额定流量为 577 m<sup>3</sup>/s, 额定水头为 12.9 m, 运行水头为 6.0~19.2 m。电站厂房左侧毗邻鱼道坝段, 右侧与泄洪坝段相接, 主要建筑物包括安装场段、机组段、引水渠、尾水渠、拦沙坎、进厂交通桥、拦漂排墩等。其中机组坝段下游为尾水渠, 尾水渠与泄洪坝段之间设置厂坝导墙, 尾水渠与边坡间设置有鱼道结构。其尾水渠边坡具有地质条件差、开挖范围受限、运行期水位波动等多种难点和复杂条件。

#### 2.1 边坡地质条件差

银江水电站厂房尾水渠桩号 X0+108~X0

收稿日期: 2024-10-22

+260段的边坡坡长为152 m,边坡地质条件自上而下分为4层:第1层为人工堆积碎石夹土,厚度为4~10 m,分布在高程992.00 m以上,其结构松散;第2层为河床冲积细砂层,厚度为7~14 m,结构松散至稍密,分布在高程978.00~992.00 m;第3层为河床冲积卵石层,厚度为3~8 m,结构为中密至稍密,分布在高程970.00~978.00 m;第4层为河床冲积粉质黏土层,厚度为5~15 m,位于卵石层以下。

由于粉细砂土体偏松散,黏聚力小,内摩擦角大,易发生渗透破坏,且粉细砂的压缩模量会随着荷载的增加而增加<sup>[1]</sup>。通常,在边坡处理中若遇到粉细砂土质边坡,最简便的处理措施是直接将其挖除。但由于银江水电站的特殊性:该边坡上部为G353国道,受其限制不具备挖除条件,且其坡比也无法开挖太缓。

2.2 电站运行后尾水渠边坡的水位上下浮动

根据银江水电站水位流量关系图,电站发电运行后其尾水渠的水位在最小下泄流量时为高程979.28 m,在机组满发时为高程984.88 m,在设计洪水下泄流量时为高程1 000.38 m,在校核洪水下泄流量时为高程1 003.00 m。因此,该粉细砂土质边坡有时位于水下,有时位于水上,考虑到边坡处于饱水状态以及水位骤降等影响,边坡的稳定条件将进一步恶化<sup>[2]</sup>,可能会沿着土体内部向河床侧滑动失稳,存在边坡稳定问题,将危及G353国道的通行安全、鱼道构筑物的安全以及电站的运行安全。

2.3 边坡砂土存在饱和液化风险

根据《水工建筑物抗震设计标准》GB 51247—2018,设计烈度为Ⅵ度时,可不进行抗震计算;设计烈度为Ⅶ度及以上时,应计算地震作用力的影响;对于设计烈度为Ⅷ度及以上的Ⅰ级、Ⅱ级边坡,宜同时计入水平向和竖向地震作用。银江水电站工程场地的地震基本烈度为Ⅶ度,坝址处50 a超越概率为10%的基岩水平峰值加速度值为125 cm/s<sup>2</sup>。同时,根据《水力发电工程地质勘察规范》GB 50287—2016中的相关内容,判定该细砂层为液化土,地震时,饱和砂土液化将影响鱼道基础稳定<sup>[3]</sup>。因此,该边坡需要考虑地震作用力的影响。

3 尾水渠粉细砂土质边坡支护方案的重点考虑

因素

由于银江水电站尾水渠边坡局部为粉细砂土质边坡,其厚度较大、力学性质较差,且受周围国道、鱼道等构筑物结构布置约束导致其局部边坡较陡,在蓄水后局部边坡稳定性降低。为使尾水渠及鱼道长期稳定运行,在方案比选中,应重点考虑以下因素。

3.1 需要综合多种工况进行分析

根据《水电工程边坡设计规范》NB/T 10512—2021:“边坡工程应按持久工况、短暂工况及偶然工况”三种设计状况进行设计。持久状况应为边坡正常运用工况;短暂工况应包括水库水位骤降(坡内为饱和状态,坡外水位下降)、骤升或水库紧急放空等情况;偶然工况包括校核洪水位、遭遇地震等情况。因此,该尾水渠粉细砂土质边坡需要分别按照上述三种工况并考虑不同工况下的荷载组合分别进行计算,且最终采取的支护方式需要在各种工况下均满足相关规范要求。

3.2 需要防止边坡发生渗透破坏

若无防止边坡发生渗透破坏的措施,水流会通过空隙把粉细砂不断带走形成流土,其基础甚至会出现塌陷。因此,在施工期间,需要防止雨水冲刷、渗水等原因导致边坡垮塌。运行期更会因蓄水后尾水渠边坡水位上下浮动、边坡内的水位亦会随之上下浮动,因此,在边坡支护时必须设置排水孔以确保土体内部的水及时被排出,并应采取增加土工膜等防护措施以保证在渗流水通畅排走的同时防止被保护的土颗粒随水流流失,防止排水管被细土粒堵塞失效<sup>[4]</sup>。

3.3 支护及时性要求高

鉴于粉细砂处于湿润状态时的内摩擦角为38°左右且具有微黏性,在无压重、无渗流条件下的粉细砂层处于湿润状态时具有假黏聚力<sup>[5]</sup>,但其坡面会因失水干燥或雨水冲刷、风蚀等影响而导致其滑塌,若遇渗水或外力扰动等外部荷载的作用极易产生流滑。因此,开挖形成的粉细砂开挖面只宜短期暴露,对其必须尽快进行覆盖,以防止因风化或雨水等原因导致边坡失稳垮塌。

4 尾水渠粉细砂土质边坡支护方案之比选

为了确定合理的边坡支护方案,笔者在方案比选中对各种方案的支护效果、支护费用、支护进度等方面进行了综合分析比较。

4.1 方案一：“混凝土面板+锚筋桩”方案

该方案包含以下支护措施：(1)边坡开挖后及时素喷 5 cm 厚 C25 混凝土进行坡面封闭；(2)在坡面设置 40 cm 厚的 C25 混凝土面板，并设置了直径为 14 mm、间排距为 20 cm 的双层钢筋；(3)在混凝土面板上施工锚筋桩，锚筋桩由 3 根直径为 25 mm 的钢筋组成，长度按照伸入岩体 3 m 在钻进中确定。由于粉细砂层边坡易发生坍塌堵孔，该方案采用跟管钻进的方式，锚筋桩间在混凝土面板内设置暗梁连接；(4)为了加强排水，在面板上设置了 9 m 长的排水管，管内设 MY50 圆型塑料并外裹土工布，其间排距为 2.5 m；(5)为防止发生渗透破坏，将粉细砂围封在面板内，对面板结构缝设置橡胶止水，对面板施工缝底部设置土工布并沿缝的两侧 0.5 m 铺设，要求边坡下游末端面板与下游围堰防渗墙可靠衔接，形成封闭。

4.2 方案二：“混凝土面板+挡土墙”方案

坡面混凝土面板、排水管及土工布的布置与方案一相同。该方案取消了锚筋桩，在高程 969.00 m 坡脚处增加了衡重式挡墙。该挡墙基础需向下开挖至基岩，其挡墙顶部高程为 980.50 m。鱼道结构座落于挡墙顶部之上，挡墙与边坡之间采用石渣回填，回填后的表面使用贴坡混凝土封闭。

4.3 方案三：“混凝土面板+土锚钉+固结灌浆”方案

坡面混凝土面板、排水管及土工布的布置与方案一相同。将方案一中的锚筋桩修改为土锚钉+固结灌浆。但对于粉细砂边坡而言，由于普通水泥浆液中的颗粒粒径大，而粉细砂土层的渗透系数小、难以注入且浆液扩散半径小，对粉细砂土层进行注浆取得的效果不好。若采用化学注浆或超细水泥注浆又存在价格高、材料不宜采购等问题。

对三个方案进行综合比较后取得的结果为：

(1)支护效果方面：方案三因受固结灌浆效果影响且因灌浆填充水泥可能在运行期受边坡渗透影响而削弱其固结效果，存在安全风险；方案一、方案二均满足边坡支护的稳定性要求。

(2)支护费用方面：方案二“混凝土面板+挡土墙”比方案一“混凝土面板+锚筋桩”的费用高约 150 万元。

(3)支护进度方面：“混凝土面板+锚筋桩”方案的施工工期比“混凝土面板+挡土墙”方案少 1~2 个月。

经综合比较得知：方案一“混凝土面板+锚筋桩”为最合理的支护方案。

5 尾水渠粉细砂土质边坡支护方案的稳定性复核

根据《水电工程边坡设计规范》NB/T 10512—2021，作用在该边坡上的主要作用荷载包括岩土体自重、地下水、鱼道荷载、地震作用等，笔者考虑持久、短暂及偶然状况 3 种设计工况进行了复核，其中电站投产发电后的运行期工况为持久工况，其荷载为土体自重、坡面鱼道构筑物及高水位地下水荷载；而施工期及渗流期均为短暂工况，施工期荷载为土体自重，渗流期荷载为土体自重及地下水渗流荷载；地震工况为偶然工况，其荷载为土体自重、地下水荷载及坡面鱼道构筑物荷载。

笔者对上述工况采用理正岩土软件进行了复核计算，安全系数计算成果见表 1。计算成果表明：按照该支护方案，各工况的计算结果均满足相关规范要求。

表 1 安全系数计算成果表

| 边坡状态 | 工 况  | 稳定安全系数 | 安全系数规范值   |
|------|------|--------|-----------|
| 运行期  | 持久工况 | 1.35   | 1.15~1.25 |
| 施工期  | 短暂工况 | 1.41   | 1.05~1.15 |
| 渗流期  | 短暂工况 | 1.16   | 1.05~1.15 |
| 地震   | 偶然   | 1.19   | 1.05      |

6 银江水电站尾水渠粉细砂土质边坡支护效果评价

为分析与研判尾水渠结构及边坡的长期安全运行提供监测数据支撑，技术人员在尾水渠边坡表面设置了 2 个外观变形监测设施和 15 个锚杆应力计，对边坡表面的变形和支护措施受力情况进行监测。该段边坡按照上述方案进行支护后，监测仪器工作正常，按照相关规范、设计要求及时取得了监测成果。监测结果表明：锚杆应力计的当前值在 -12.96~11.63 MPa 之间，变幅在 11.24~33.02 MPa 之间，整体受力较小，边坡处于稳定状态。尾水渠边坡锚杆应力计特征值分布情况见图 1。

(下转第 15 页)

拆除覆土提供了新思路,使覆土不再全部依赖于表土剥离,因此而可以解决表土剥离作业繁琐、转运量大、堆存困难等多种问题。

参考文献:

[1] 阮光华. 混凝土骨料制备工程[M]. 北京:中国电力出版社, 2014.

[2] 康世荣,陈东山. 水利水电工程施工组织设计手册(结构设计)[M]. 北京:中国水利水电出版社,1994(2009 重印).

[3] 建设用砂:GB/T 14684-2022[S].

[4] 水处理剂 阳离子型聚丙烯酰胺的技术条件和试验方法: GB/T 31246-2014[S].

[5] 水工混凝土施工规范:DL/T 5144-2015[S].

作者简介:

罗文起(1975-),男,贵州六盘水人,副高级工程师,从事水利水电工程施工技术、安全生产及环保项目的技术与管理工  
作;

代瑞丹(1998-),男,贵州安龙人,助理工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工  
作. (编辑:李燕辉)

(上接第 9 页)

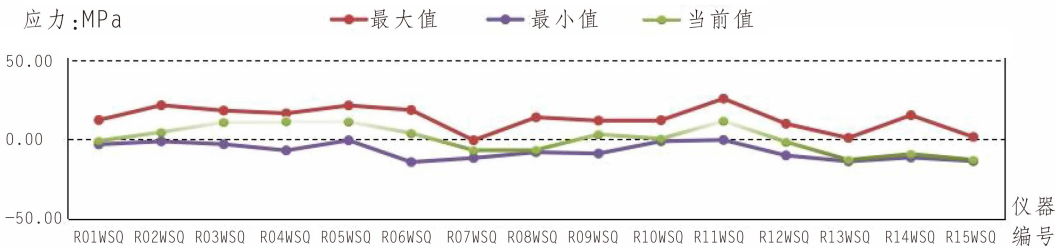


图 1 尾水渠边坡锚杆应力计特征值分布图

7 结 语

实践证明:银江水电站尾水渠粉细砂土质边坡采用的支护方案在技术上可行,经济上合理,其主要优点表现在:施工速度快、施工简便、支护效果好、经济性好等方面。银江水电站尾水渠粉细砂土质边坡集多种难点和复杂条件于一身,其采用的支护方案的成功应用是疑难边坡设计的典型案例,所取得的经验可供类似工程设计和研究借鉴。

参考文献:

[1] 张宇. 超期服役粉细砂基坑支护稳定性研究[D]. 西安理工大学,2021.

[2] 黄帅,张力方,吕悦军,等. 地下水位变化对砂质边坡地震稳定性的影响研究[J]. 防灾减灾工程学报,2015,35(5):599-603.

[3] 王志武. 砂土液化概念的再认识[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2023,53(12):138-145.

[4] 田建立. 粉细砂基础岸坡防护措施[J]. 河北水利,2020,32(11):22-23.

[5] 王秀红,程选勤. 浅谈粉细砂地层深基坑开挖的几点经验[J]. 科技创新导报,2015,12(9):222-224.

作者简介:

李 伟(1988-),男,四川盐源人,满族,副高级工程师,工程硕士,从事水利水电工程建设技术与管理工  
作;

徐孝刚(1964-),男,四川仁寿人,川投能源股份有限公司副总经理、攀枝花华润水电开发有限公司党总支书记、董事长,副  
高级工程师,从事水利水电工程建设技术与管理工  
作;

陈俊勇(1976-),男,湖北孝感人,征地移民部经理,工程师,从事  
水利水电工程移民安置规划及管理工作.

(编辑:李燕辉)