

某电站尾水渠边坡变形分析及水下加固设计

王海建, 李怡芬, 修翊飞

(中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东广州 510610)

摘要: 电站尾水渠边坡在暴雨及洪水冲刷过后局部发生较大变形, 本文根据水下摸查检测数据, 结合特殊运行工况下的数值模拟计算, 对边坡变形原因进行了分析研究。根据分析成果, 采取了水下封堵灌浆、加强边坡支护及排水等综合加固措施。加固施工不影响电站运行, 取得了较好的效果, 可为同类工程提供参考。

关键词: 尾水边坡加固; 变形分析; 水下封堵灌浆; 锚筋桩

中图分类号: 文献标识码: A

1 工程概况

某低水头径流式电站工程尾水渠左岸边坡分两段, 其中尾水渠斜坡段(0+059.65~0+117.49)边坡最高约30m, 共分为3级, 224.0m高程以下为半重力式挡土墙, 墙顶上部为斜坡, 分为2级, 坡度1:1.5~1:2.0, 马道高程234.0m; 尾水渠下游护坦段(0+117.49~0+142.51)边坡最高约20m, 斜坡式, 分为2级, 坡度1:1.5~1:2.0, 坡底高程224.0m。边坡原设计均采用C20钢筋混凝土护坡, 设排水孔及反滤土工布。

电站于2016年投入运行, 运行情况良好, 尾水渠左岸边坡运行无异常现象。在2018年7月份坝址发生暴雨及大洪水(“7.12”洪水), 部分边坡及234.0m高程马道出现变形, 现场检查发现边坡排水孔完全堵塞失效。考虑到电站处于运行发电高峰期, 流量较大, 尾水位一直保持在230m高程附近, 为安全考虑, 仅对水上上部采取临时封闭缝隙及疏通边坡排水孔等紧急措施, 汛期过后边坡变形趋于稳定。该边坡紧靠机组尾水出口, 一旦滑塌将严重影响机组运行安全, 因此, 需进一步查清水下变形情况, 研究加固修复措施, 保证电站运行安全及发电效益。

2 边坡变形分析

2.1 水下摸查情况

2019年1月枯水期电站尾水位约228m, 现场组织潜水员采用水下摄像机对水下边坡及坡脚挡墙部位进行了水下摄影及检查测量。根据摸查情况, 尾水渠斜坡段(0+059.65~0+117.49)边坡, 234.0m高程以上边坡未有明显变形, 234.0m高程马道与下部边坡的变形缝开裂约5~10cm, 234.0m高程马道变形较大, 变形缝开裂约5~10cm, 边坡护坡面板下部已淘刷形成空腔, 但基础挡墙基本未发生变形, 且该范围边坡坡脚与224.0m高程基础挡墙相接处224.0m高程也未发现较大变形, 说明该部分边坡基础的挡墙是稳定的, 因上部马道与边坡分缝变形错开, 导致渗水淘刷下部形成空隙。而尾水渠下游护坦段(0+117.49~0+142.51)边坡, 水上部分及马道变形约1cm~2cm, 边坡整体情况暂时稳定, 234.0m高程马道未有明显变形, 但234.0m高程以下的边坡, 发生坡脚变形较大, 有张开约10cm~20cm现象, 为本次水下检查发现的新状况(图1)。说明该部位在今年“7.12”洪水影响下, 边坡土体被淘刷带走, 引起坡脚发生变形, 危及整个边坡的安全。即两段边坡的结构不同, 其水下部分与水上部分也呈现不同的变形。分布情况见图2。

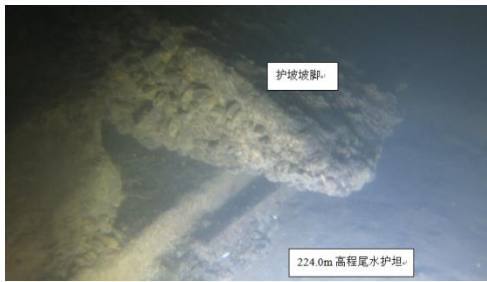


图1 边坡水下检查影像

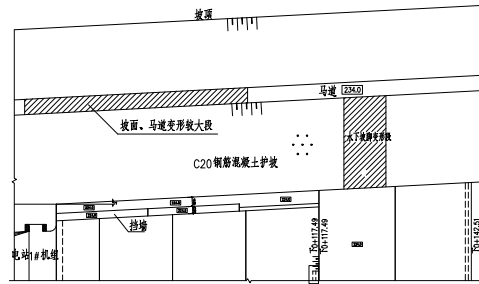


图2 边坡变形分部范围示意图

2.2 边坡稳定复核

电站自投入运行至“7.12”洪水期间，尾水渠左岸边坡已运行2年多，未出现明显变形。因此，立足边坡实际运行情况，重点复核尾水渠左岸边坡在暴雨后地下水位较高、边坡排水失效、同时遭遇水位骤降工况下的整体稳定。

1) 断面选取

分别针对两段边坡各取一个典型断面进行复核。

(1) 选取尾水渠斜坡段(0+059.65~0+117.49)最高边坡，计算简图见图3。

(2) 选取尾水渠下游护坦段(0+117.49~0+142.51)水下坡脚变形较大处的0+120断面，计算简图见图4。

2) 计算工况

(1) 边坡排水完全失效，极端工况下尾水位迅速降落至230.0m，坡内水位取洪水位238.5m（坡顶地面高程约240.0m，取比地面低约1.5m）；

(2) 边坡排水不及时，尾水位降落至正常水位230.0m，坡内水位取234.5m（略高于马道）。

3) 计算参数

根据《水利水电工程边坡设计规范》（SL386-2007），本工程边坡的级别为4级，边坡抗滑稳定安全系数基本组合（正常运用）为1.15~1.1，特殊组合（非常运用）为1.1~1.05。

边坡土体上层为砂卵砾石土，渗透系数约 $1 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ，边坡稳定分析时原状土取综合内摩擦角为 35° ，挡土墙后开挖回填的砂卵砾石土取 30° 。挡土墙基础为泥质粉砂岩、粉砂岩、粉细砂岩等。考虑到墙底基础岩土层变化不均，为安全计，地基均按照土层进行建模。

4) 计算方法

采用瑞典圆弧法，利用边坡分析软件进行抗滑稳定计算。

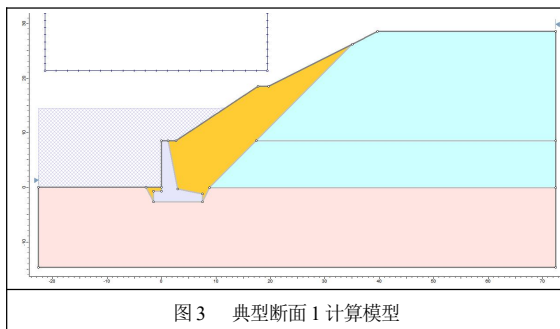


图3 典型断面1 计算模型

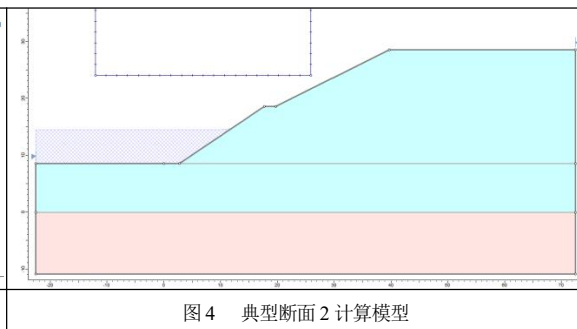


图4 典型断面2 计算模型

5) 计算结果

稳定计算结果见表1，计算结果图形见图5~10。

表 1 尾水边坡稳定计算结果表

断面	计算工况	水位	部位	抗滑稳定安全系数	规范允许值	备注
断面 1	骤降工况 1	238.5m~230m	224m 以上边坡	0.86	1.05	图 5
			挡墙底	1.31	1.05	图 6
	骤降工况 2	234.5m~230m	224m 以上边坡	1.17	1.05	图 7
			挡墙底	1.50	1.05	图 8
断面 2	骤降工况 1	238.5m~230m	边坡	0.92	1.05	图 9
	骤降工况 2	234.5m~230m	边坡	1.05	1.05	图 10

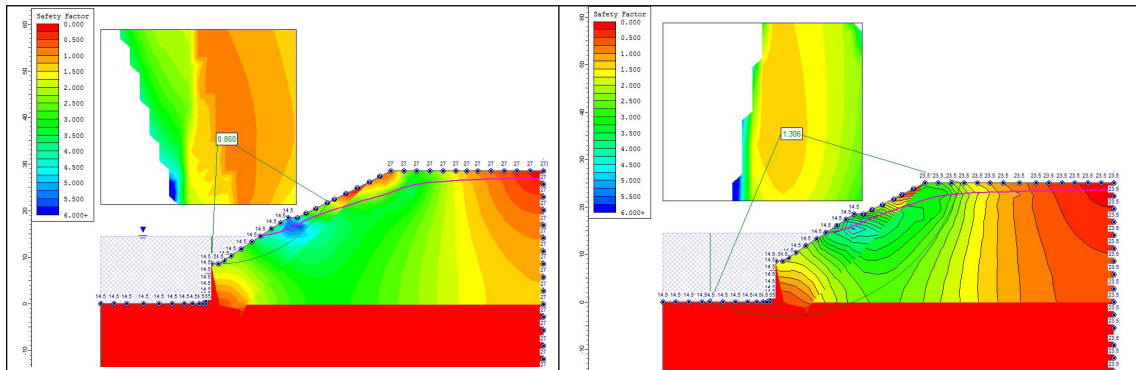


图 5 工况 1 (238.5m~230m) 234.0m 上部坡面最小安全系数 0.86

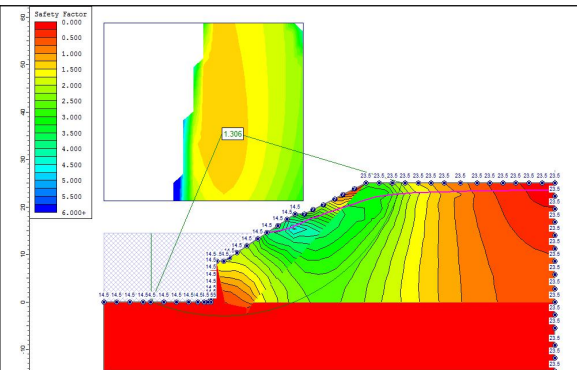


图 6 工况 1 (238.5m~230m) 墙底滑面最小安全系数 1.31

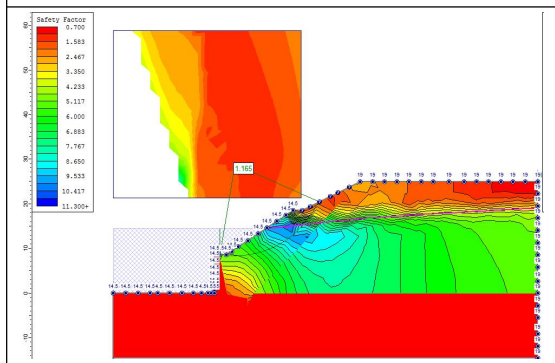


图 7 工况 2 (234.5m~230m) 上部坡面最小安全系数 1.17

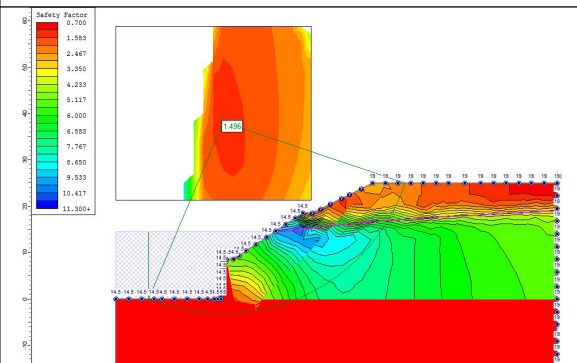


图 8 工况 2 (234.5m~230m) 墙底滑面最小安全系数 1.5

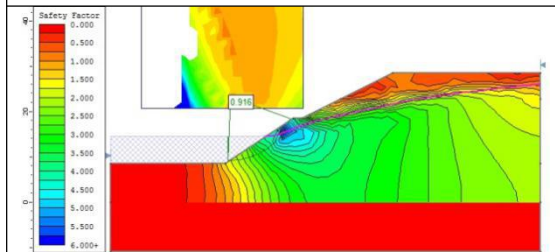


图 9 工况 1 (238.5m~230m) 安全系数 0.92

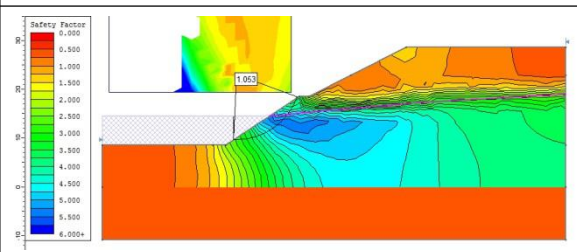


图 10 工况 2 (234.5m~230m) 安全系数 1.05

2.3 边坡变形分析

1) 结合施工过程中情况,尾水渠斜坡段挡墙后为开挖回填区,回填土压实不足,土体长期固结后本身发生一部分沉降变形,发展到一定程度后面板出现缝隙。而边坡排水措施现场检查几乎全部失效堵塞,持续暴雨后边坡内土体饱和后抗剪强度降低,边坡抗滑稳定安全系数降低,在洪水期进一步淘刷,导致边坡混凝土面板变形进一步发展。

2) 数值模拟计算结果表明,尾水渠左侧边坡在水位骤降工况时,若边坡土体内水位不高于234.5m,挡墙与边坡整体稳定安全系数均满足规范要求。但当遭遇暴雨坡内土体水位高于234.5m、排水失效、

水位骤降时，边坡稳定安全系数不满足规范要求，最危险滑面均发生在224.0m~234.0m范围内边坡，该高程为洪水期水位变动冲刷影响范围，这与现场情况基本一致。总体来说，上部边坡尤其是234.0m马道以下边坡在暴雨后地下水位较高、边坡体排水失效、同时遭遇水位骤降，这种极端工况下容易发生失稳变形现象。

3) 根据数值模拟分析成果，边坡最大承受约4.5~5m左右的水头差（即水位234.5m~230m），该条件下边坡稳定安全，超出该数值则易发生失稳。因此，加强边坡排水，洪水期边坡内水迅速排出是十分重要的。“7.12”洪水退水期间，因现场发生暴雨，边坡排水管失效，坡内水位过高，同时填土发生沉降，导致边坡沉陷、变形。计算结果基本与现场实际情况一致。

3 边坡加固处理设计

根据上述分析，电站尾水渠边坡变形原因主要有两个：一是边坡内回填土体压实度不足，经长期固结密实后产生局部沉降，导致边坡局部变形；二是暴雨导致边坡地下水位较高、同时遭遇洪水骤降情况，此时边坡排水不畅、内外侧水位差较大。因此，加强边坡排水降低地下水位十分关键。另外，边坡混凝土面板下局部开裂已形成空腔，需对开裂部位及空腔进行修补，同时对边坡进行加固支护。

本工程边坡变形部位大部分位于水下，目前对水下结构的加固修复已有较多技术，如水下不分散混凝土加固技术^[1]，水下膜袋混凝土护坡技术^[2]，以及水下灌注环氧粘结剂等对缺陷进行修补^[3]，或利用石笼沙袋等形成临时围堰对护坡进行修复^[4]。

结合变形原因、边坡运行情况、施工条件、投资等因素，初拟了膜袋混凝土密封坡面加锚筋桩方案、围堰干地施工方案、水下打桩护脚方案等三个方案进行综合比较。干地施工方案对电站影响较大，且投资较大，水下打桩护脚方案需租用大型船只用作水上打桩平台，而下游因其他工程影响了航道，船只进出难度较大。经研究分析，采用水下膜袋混凝土加岸上锚筋桩方案便于施工，且可以分期实施，最终推荐采用该方案。具体分期实施设计如下。

a) 尾水渠下游护坦段边坡（0+117.49~0+142.51）

鉴于现场施工条件较差，汛期即将到来，而膜袋混凝土浇筑工期较长，因此，该段边坡分期加固处理，先开展一期应急处理，避免汛期影响边坡安全，后续有条件再施工膜袋混凝土。

1) 一期应急处理措施

(1) 首先在水下对坡脚及坡面缝隙采用玻纤棉填缝+水玻璃密封，同时表面采用钻孔+安装膨胀螺丝+铺设橡胶止水带+铺设热镀锌钢板+固定螺丝+水玻璃密封。该项工作全部在水下完成。

(2) 密封完成后，对于坡面脱空区采用填充砂浆处理，注浆孔可结合现场脱空区进行布置，同一区域孔间距可采用2.5m，注浆施工时需密切

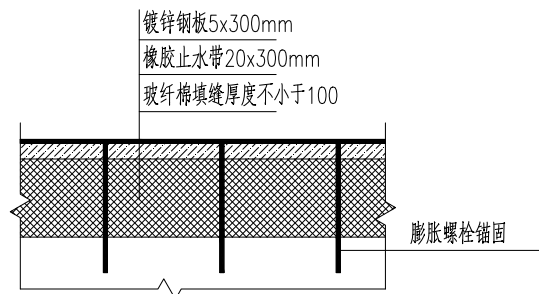
注意压力变化情况，当压力超过0.1MPa时，待砂浆凝固后可检查坡脚下部填充情况，若已密实则注浆施工完成，若仍有空隙则需调整注浆孔位置继续注浆。

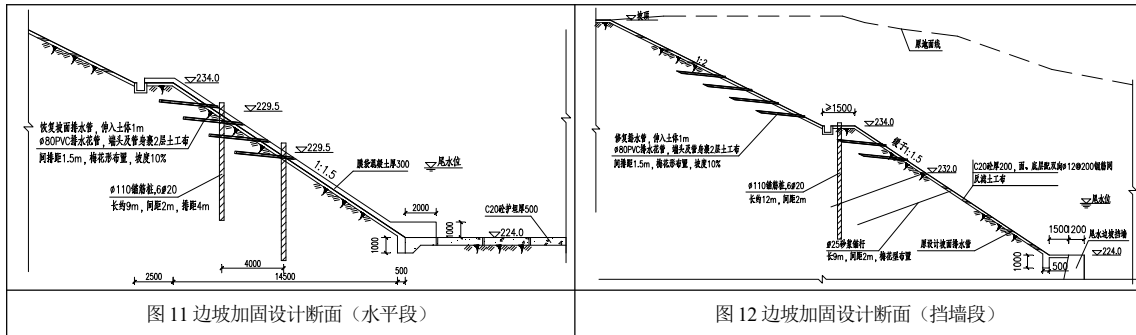
(3) 施工过程中密切注意边坡缝隙及坡脚是否有浆液渗出情况，注浆压力需缓慢增加，避免破坏边坡面板。

(4) 恢复边坡排水孔，成孔时采用套管，埋入PVC排水花管，管身包裹2层土工布。

2) 二期永久处理措施

针对坡面张开的情况采用膜袋混凝土保护坡面及坡脚，坡面上打锚筋桩固坡。施工顺序：膜袋混凝土→锚筋桩→坡面脱空区填充砂浆→坡面排水孔。坡面膜袋混凝土厚0.3m，向坡脚外延伸2m宽。锚筋桩钻孔直径110mm，套管采用钢花管，管壁上设置注浆孔。坡面脱空区填充砂浆，填充孔距可结合现场脱空区进行布置。坡面排水孔采用Φ80PVC排水花管。坡面加固设计方案见图11。





b) 尾水渠斜坡段边坡 (0+059.65~0+117.49)

该部位采用恢复坡面排水管、加设锚筋桩及边坡锚杆等措施进行处理,锚杆采用 $\Phi 25$ 全长粘结型砂浆锚杆。对于变形过大的空隙缺口,密封处理措施与尾水渠下游护坦段一致。考虑到边坡变形特点,该段锚筋桩布置在马道。具体参数与尾水渠下游护坦段一致。

4 结论

本电站尾水渠边坡下部常年位于水下,一旦滑塌破坏对电站运行安全影响较大,本文对边坡水下变形情况进行摸查,同时建立数值模型,对其特殊运行工况进行模拟计算,综合分析其变形原因,结合实施条件,最终采用水下膜袋混凝土、水上边坡锚筋桩以及充填灌浆、加强排水等综合措施,取得了较好的效果,可为同类工程提供参考。

参 考 文 献:

- [1] 仲伟秋,张庆亮,张寿维.水下不分散混凝土的发展与应用[J].建筑结构学报.2008(S1).
- [2] 水下膜袋混凝土护岸的应用[J].赵琴芳,齐建军,严辉,江越进.水利科技与经济.2004(02)
- [3] 环氧水下粘结剂的水下灌注施工工艺及应用[J].熊建波,岑文杰,彭良聪,王胜年.水运工程.2012(02).
- [4] 柴河水库058洪水尾水渠抢险技术措施及修复方案[J].王德君,宋建忠.吉林水利.2007(02).

Sliding Analysis and Underwater Reinforcement Design of a Power Station Tailrace Slope

Wang Haijian, Li Yifen, Xiu Chifei

(China Water Resources Pearl River Planning Surveying & Designing Co., Ltd, Guangzhou 510610, China;)

Abstract: After the heavy rain and flood, the slope of the power station tailrace has a large sliding deformation. In this paper, the reason of slope sliding is analyzed and studied according to the result of underwater detection through numerical value simulation. Based on the results of the analysis, the author has adopted the comprehensive reinforcement measures of underwater grouting and the anchor bolt and drainage. The reinforcement construction did not affect the operation of the power station and achieved good results. This method can be a reference for similar projects.

Key words: Tailrace slope reinforcement; Sliding deformation analysis; Underwater grouting ; The anchor bar pile

第一作者简介及详细通讯地址、电话、传真、手机号和电子邮件

作者简介：王海建（1984-），男，河南洛阳人，高级工程师，从事水利水电工程设计工作。**E_mail:hjwang05@sina.com**

通讯地址：广东省广州市天河区天寿路沾益直街**19**号珠江设计大厦**411**

手机：13480213694