

# 水利工程边坡稳定性设计与加固研究

郑爱民

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

**[摘要]** 本文选择新疆阿勒泰地区福海县境内运行 20 年的一处深挖方高边坡作为研究对象, 在该边坡由于马道开裂、局部塌陷、渗水等问题所造成的变形失稳进行分析的基础上, 结合现场踏勘、地质勘探、室内试验等相关资料, 详细阐述边坡的变形失稳原因及其诱因。结论认为, 导致该边坡变形的因素主要有特殊的地质构造、岩石遇水膨胀特性、不良的地下水环境以及开挖卸载共同作用的结果。通过对极限平衡法以及反演方法的应用求得边坡的安全系数以及滑动面抗剪强度指标: 内摩擦角  $\phi=14.57^\circ$ , 粘聚力  $c=6.83\text{kPa}$ 。在此基础上提出采用“排水井+抗滑桩”的组合型整体加固措施。

**[关键词]** 高边坡; 稳定性分析; 地下水; 反演分析; 排水措施

DOI: 10.64635/ja.2026.1143

中图分类号: TV223

文献标识码: A

## Study on Stability Design and Reinforcement of Slopes in Water Conservancy Projects

Zheng Aimin

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd., Urumqi 830000, Xinjiang, China

**Abstract:** This paper takes as the research object a deep-cut high slope that has been in operation for 20 years in Fuhai County, Altay Prefecture, Xinjiang. Based on an analysis of deformation and instability caused by problems such as cracking of berms, local collapse, and seepage, and in combination with field investigation, geological exploration, indoor testing, and other relevant data, the paper elaborates in detail on the causes and inducing factors of slope deformation and instability. The results indicate that the deformation of the slope is mainly the result of the combined effects of special geological structures, the water-induced swelling characteristics of rocks, an unfavorable groundwater environment, and excavation unloading. By applying the limit equilibrium method and inverse analysis, the safety factor of the slope and the shear strength parameters of the sliding surface were obtained, with an internal friction angle of  $\phi = 14.57^\circ$  and a cohesion of  $c = 6.83 \text{ kPa}$ . On this basis, a combined overall reinforcement measure consisting of “drainage wells + anti-slide piles” is proposed.

**Keywords:** high slope; stability analysis; groundwater; inverse analysis; drainage measures

### 引言

新疆阿勒泰地区福海县境内准噶尔盆地腹地一人工开挖边坡工程, 始建于 2005 年, 现在已经投入使用了 20 年左右的时间, 在 2025 年初的时候运维人员就发现了这个边坡三级马道的表面存在一些沿着马道方向走向的水平裂缝, 后来又逐渐蔓延到整个的多级马道还有坡面出现了纵向裂缝并且还有了一点小的滑坡现象, 对整个的边坡的安全性造成了很大的影响同时也对下面的输水渠的安全产生了影响, 还有就是对于坡顶的林管站的安全也带来了很大的危害, 为了弄清楚边坡变形的原因及治理措施, 在这个过程中进行了相关的调查, 勘察等工作以及结合实际的情况进行一系列的研究。

### 1 边坡稳定性影响因素分析

#### 1.1 地质构造与岩体特性

工程项目区位于准噶尔盆地中心地带, 在大地构造上处在阿尔泰山南缘以及天山北缘之间, 地貌形态上整体来看是北低南高、东高西低。裸露的基岩主要由第三纪古~始新统红砾山组以及始~渐新统乌伦古河组的泥钙质半胶结或中等胶结砂岩、泥岩构成。这类岩石胶结程度较差, 属于密度差异较大的软岩。根据地层构造特征, 其地层呈近似水平分布  $300^\circ \text{NE} \angle 1^\circ \sim 3^\circ$ , 层面不易觉察, 亦无层间位移现象, 砂岩和泥岩相间层间的接触界面为沙粒嵌入泥岩的状态, 该岩体内部并没有出现明显的层面或者影响岩体边坡稳定性的层面。虽然表面看来是一个很完整的

岩体结构,但实际上却存在隐蔽的薄弱环节。现场调查、工程物探表明,在变形区有发育的裂隙,证明该段围岩存在着结构面;另外边坡开挖露出的岩性主要是泥岩,这在遇水条件下极易崩解,饱和状态下它的抗剪强度大大下降,给边坡发生变形提供了条件。

### 1.2 地下水作用机制

地下水是造成此边坡变形的主要原因,在前期的地质资料中,在上世纪末即2001年间施工勘探期间便已经发现变形体位置处有上层滞水,深度为13.55~14.85m。而在2005年的施工过程中边坡顶部就已经出现间断性的条带状的渗溢带。此次的地质勘探又详细分析了地下水情况。通过对布置了三条高密度电法探测剖面以及对十五个钻孔的调查得知边坡及其周围区域地下水平均分布较广、埋藏深度浅并且含水层数量大等情况,如I-I剖面地下水埋深普遍在7~10m之间,局部最小值仅为1m,地下含水层厚度20~30m;而II-II剖面地下水位埋藏深度为3~6m,最深处可至55m。钻孔实测结果发现,一级马道地下水埋深只有1.6m,而二级马道为2.6~3.6m。地下水水面等高线图显示,水由管理站北东方向直线下垂至岸边,在一级马道处呈明流出露,与现场观测到的两片大面积明水一致<sup>[1]</sup>。地下水流量测算分析也得出结论,仅明流水每天约为23.44m<sup>3</sup>。也就是说,三级马道面之下以及以下的边坡大部分都是处于饱和的状态之中。地下水的侵入使岩土体重力增大了,同时地下水的流动性产生的动水压力,特别是在断裂带连通之后会加大变形的发生概率,另外,地下水对岩体持续的浸润软化使得岩体失去原有的抗剪强度,所以才会出现这种现象。

### 1.3 开挖卸荷与应力重分布

此段边坡开挖深度很大,最大开挖深度达47m,每隔8m设一级马道,总共有多个台阶。开挖时,边坡岩体原有的平衡被破坏了,引起了卸荷回弹现象。在这个巨大的边坡中,卸荷现象会使坡体内形成新的应力场,造成坡顶以及坡面附近区域产生拉应力带,形成卸荷裂缝。在现场观察到的第一级、第二级、第三级马道上存在的连续顺渠道方向的裂缝,长度18~65m之间,开度在1~20cm之间,就是卸荷作用与地下水相互影响的结果。开挖卸荷不但改变了应力状态,还给新裂隙出现以及旧裂缝的发展创造了条件,这些裂隙是地下水活动的路径之一,使边坡的整体强度进一步降低。经过开挖后20年的运营过程中,边坡不断承受着应力变化、饱受着地下水渗流的影响,变形量逐步增加,在后期形成马道裂缝以及局部滑坡。

## 2 边坡稳定性分析方法

### 2.1 极限平衡法

极限平衡法是一种传统的边坡稳定性分析方法,它的主要思路就是把滑动体分解成一个个的小条块,然后基于条块之间的相互影响来计算整个滑动面的整体抗滑力及下滑力之比值也就是稳定系数 $F_s$ ,在《水利水电工程边坡设计规范》(SL 386-2007)里面提出,该工程中的碎裂结构、散体结构的岩石边坡可使用摩根斯顿-普赖斯法或者不平衡推力传递法来进行抗滑稳定分析<sup>[2]</sup>。这两种方法能够较好的模拟非圆形的滑动面并且能够考虑到孔隙水的压力。本工程中,在变形容器检测的基础上,选取了4条横断面(见下图1)来进行计算,边坡属于二级建筑物的防洪标准要求,正常使用条件的可靠度指标容许值是1.25~1.20。

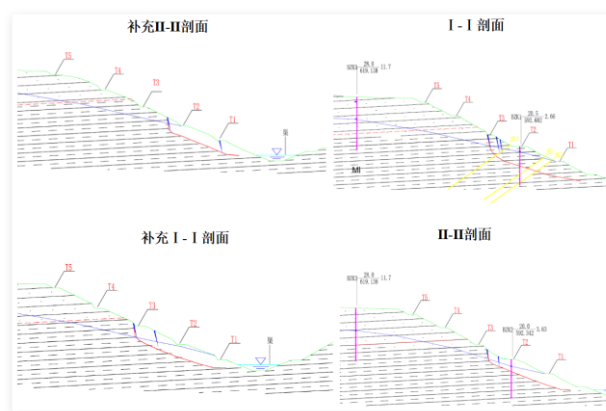


图1 高边坡变形体横剖面图

### 2.2 反演分析技术

岩土材料参数本身的波动性以及不确定性使得直接使用室内外试验的数据往往不能精确地代表实际的边坡条件。逆解分析法可以有效的找到合适的粘聚力与内摩擦角等抗剪强度指标。它基于假设一个具体的边坡达到了某种特定情况下的临界状态,在此基础上运用边坡力学模型以及现有的边坡形状特征还有地表水位以及变形状况就可以反推得到相应的岩土参数。本文在现场的基础上依据《建筑边坡工程鉴定与加固技术规范》(GB 50843-2013)标准对变形段落进行判定。结合着裂缝宽度大小以及裂隙发展状况和裂隙发展趋势,综合判断出此边坡处于弱变形到强的变形过程中的状态中,在此基础上把目前边坡的安全稳定系数初步确定为1.00。然后对所选择的四条剖面,在计算了孔隙水应力之后,取稳定系数 $F_s=1.0$ 为目标,推导出了边坡岩体饱和状态的抗剪强度指标,从而为将来进行加固设计提供参考。

### 2.3 安全系数评价标准

安全系数是用来评价边坡稳定性的一个量化参数。数值大小须根据边坡级别以及工程的重要性来选择。根据《水利水电工程边坡设计规范》(SL 386-2007)的规定,本文的研究变形边坡属于二级边坡,所以其抗滑稳定性安全系数在正常使用状态下应该是在 1.25~1.20 之间,在极限状态下应该是在 1.20~1.15 (条件 I) 或者是在 1.10~1.05 之间 (条件 II)。另外参照《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330-2013)对滑坡阶段的理解,如果稳定系数处于 1.05 到安全系数之间的为“基本稳定”,如果处在 1.00 到 1.05 之间的称为“欠稳定”。该项目边坡所发生的张拉裂隙、前沿凸起、地面湿地、涌水现象等都符合从基本稳定到欠稳定的特征描述。通过反分析所得初始的安全系数为 1.00,刚好处于欠稳定的状态,这样的定量化指标加定性的描述方式对选择参数是有保障效果的。

### 2.4 抗剪强度参数的确定

采用综合性的室内试验、反演计算及工程地质类比法,最后得到了边坡滑动面抗剪强度指标。室内试验表明,饱和状态下的膨胀性砂质泥岩的内摩擦角  $\varphi$  为  $10^\circ \sim 15^\circ$ ,粘聚力  $c$  为 5~10kPa,该数值区间过广,难以直接应用到设计当中,在对四次剖面进行反演计算的基础上进行比较得出的结果:边坡变形区岩体饱和状态下的综合内摩擦角  $\varphi$  是  $14.57^\circ$ 、粘聚力  $c$  为 6.83kPa。此组值既包含有室内试验结果的一般区间范围,此组值既包含有室内试验结果的一般区间范围,也反映了边坡当前所处的欠稳定状态下的力学反应,可作为加固设计依据。

## 3 边坡加固设计原则与常用措施

### 3.1 排水降压措施

由于地下水是引起边坡变形的最大原因,“治坡先治水”是本次工程治理的第一原则,依照相关标准规定应当首先采用加强地质体本身的加固固结手段,在众多防治措施当中,降低地下水压力是最主要的手段。经实地调查,管理区周围地下水位低于地表 8~10m 之间,等压线由管理区朝向边坡方向发展,所以三级马道面以下绝大部分边坡岩土体都是呈饱水状态,形成了一种弱面,所以在此设计了变形体边坡坡顶处增设排水竖井的方式以期切断左边浅层地下水以及管理站营区的地表渗漏水源。如图 2 所示,排水井的设计参数为井深 40m,间隔 10m,直径 0.8m。经多年的作用后,这几个排洪孔可长时间地减小边坡体内地下水位,减小地下水对岩土体的浸泡及软化,从根本上提高了边坡的稳定性,使变形体逐渐变干并趋于稳定。

### 3.2 抗滑桩加固设计

同时,在排水的基础上,为了直接对抗下滑力,提高边坡的阻滑作用,在项目中打算使用抗滑桩进行加固。根据规定的要求,抗滑桩应在边坡前端阻滑区或者主滑段最前端进行布置,排列的方向要垂直于边坡的主滑动方向,锚固部分需深入到潜在滑动面上方稳定的岩体中去<sup>[3]</sup>。综合边坡结构,底滑面坡率还有现场工况等实际情况,确定抗滑桩布置在了一级马道面上,如图 3 所示。根据反演得到的滑动面参数 ( $\varphi=14.57^\circ$ ,  $c=6.83\text{kPa}$ ),计算了四个典型断面为了使安全系数达到 1.25 所必须增加的抗滑力大小如表格 1 所示,各个断面需要增加的抗滑力分别有 490.4kN/m, 284.8kN/m, 241.6kN/m, 101.1kN/m。最后选取其中的最大抗滑力 490.4kN/m 进行设计,抗滑桩选用直径 1.5m 圆形桩,桩长 25m,在剖面 II 到补充剖面 II 及其两侧 14m 区间内布置,桩距为 5m,这样的布桩既可以有效的阻止滑坡的发生又能方便施工同时满足安全系数的要求。

表 1 高边坡变形体各剖面阻滑力计算统计表

序号	滑动面岩石内摩擦角 ( $\varphi$ )	滑动面岩石粘聚力 ( $c$ )	边坡加固抗滑力 (kN/m)	边坡计算安全系数K
剖面1-1	14.57	6.83	490.4	1.25
剖面2-2	14.57	6.83	284.8	1.25
补剖面1-1	14.57	6.83	241.6	1.25
补剖面2-2	14.57	6.83	101.1	1.25

### 3.3 坡形优化与支挡结构

尽管本文最后选择的是抗滑桩加固方案,但是根据规范的要求,坡型改进也是边坡加固的一种方法。比如减载、削头顶脚等办法就可以减少下滑力,增强边坡本身的稳定程度。而本文中的这个边坡已经有二十年历史了,并且在坡顶上还有管理站等建筑物,所以进行大规模的削坡是很困难的事情。而且,该边坡的底部是输水沟渠,空间较小,也就不采用削坡压脚方式了。但是在设计比选的时候也曾经尝试过其他的支挡结构,例如各种类型的挡土墙、土钉墙等等<sup>[4]</sup>。但是因为边坡的裂缝最长达到了 65m,最深处也有几十米,传统的挡土墙等浅层支挡结构并不能够提供足够的阻力。所以,从技术经济分析得出结论,抗滑桩具有较好的抗弯性能、良好的深层锚固作用是主要的加固手段,排水措施则起到基础性辅助的作用,“内排外固”从而构成了整体治理方案。

### 3.4 综合治理方案比选

该工程的最后治理办法是通过多次选择得到的结果,在开始的时候只选择了单独的一种排水方式或者一种抗滑桩的方式,但是后来仔细研究发现,单纯地排水并不能马上制止住边坡的继续变动,在汛期时尤为明显;纯粹的抗滑桩可以供给很大的抵抗力,可是它并没有根除地下水对于岩石的软化效应,长期下去很难维持,所以最后选择的是“排水孔+抗滑桩”综合防治方案。排水孔从根本上减少了地下水补给量,降低了岩石中的水份含量,降低了渗透水头,缓解了岩石的软化过程;抗滑桩提供了即时的力学支挡,使边坡稳定的安全系数达到了1.25的规定标准。另外,在治理好边坡的基础上还要强调应在考虑下游输水渠情况的前提下采取适当的防渗和加固措施,并建立健全的边坡监测体系,做好边坡变形、地下水等方面长年累月的观测记录,做到边坡实时动态的设计和信息的施工,达到边坡的长久稳固。

### 4 加固效果评价与长期监测

综合采用排水井及抗滑桩组合加固处理方法以后,边坡变形体状况有明显好转。经过加固以后,坡体内地下水受排水井的影响逐渐降低,使坡体饱和度、孔隙水压力减小,削弱了地下水对泥岩、砂岩的软化以及渗透压力的作用。而抗滑桩作为深部位阻滑体有效的阻止了滑体传递下来的下滑力,控制着滑体的继续移动。现场实测表明:坡体上的原有裂纹宽度停止扩展,在一些地方裂纹还有微缩现象发生;坡体变形趋于稳定,证明加固效果已遏制了变形的发展趋势。

随坡内排水井长时间工作,坡体内土体含水量也不断减少下去。土体含水量减少,代表着地基岩土体有效应力增大,抗剪强度参数得以恢复并增强<sup>[5]</sup>。从长远来说,也有利于边坡本身稳定性提升。抗滑桩受力状况也会随着坡体稳定性增高而趋于平稳,良性循环。所以,在长期稳态下,我们就可以说在目前加固措施基础上,这个变体是可以达到长期稳定的。如果要实现此目的就需要建立一套完整的监控体系,这个监控体系应具备坡顶及各级马道变形观测、深层测斜观测、地下水位观测、抗滑桩钢筋计应力

观测等等设施。基于以上的实时观测信息能够及时判断出边坡的现状以及是否存在潜在的风险隐患,提前发出警报,给整个项目的长久的安全稳定打下基础。

### 5 结束语

边坡失稳不是由于某一种原因引起的,而是在遇水软化泥岩、高水位、强腐蚀性强的上层滞水的水文地质状况、开挖卸载产生裂隙带的不良性工程影响、融雪水分渗入等一系列外在环境的影响下产生的结果。地下水是最主要的诱发因子,在渗透压力的作用下加剧变形,在长期浸泡作用下极大地降低了岩体抗剪强度。针对治理措施方面,本文提出了“治坡先治水”,“加强阻滑力”的综合措施相结合的思想方法。采取坡顶排水井进行持续抽排坡体内地下水的做法,使地下水位下降,使岩体力减小,从而从根本上优化了边坡的地质情况。与此同时,在一级马道上设置大直径抗滑桩以抵抗下滑力的作用使边坡的安全系数达到规范规定的1.25的要求。这样既保证了应急措施又考虑到了长远问题,实践证明这样做是可行的。该工程的探查与施工对以后同地质条件下的高边坡的稳定性分析及相关参数的确定、加固设计和长期观测都有一定的借鉴意义。提醒我们在工程建设过程中要注重地质勘查、精心计算分析、合理设计布署及实时监测等环节,这样才能保证工程的长期安全性和可靠性。

#### [参考文献]

- [1]张文涛.水利水电工程中高边坡的加固和治理研究[J].工程建设与设计,2025(18):20-22.
- [2]陈朱辉,董志勇.水利水电工程施工中的边坡开挖支护技术分析——以黄梅蔡山灌区水利工程为例[J].城市建设,2026(05):134-136.
- [3]张秋生.坝肩边坡桩-锚结构设计优化及造价分析[J].江西建材,2025(06):312-315.
- [4]李亚斐.水利工程施工高边坡稳定性控制技术[J].中国科技信息,2025(16):59-61.
- [5]钟林.泵站基坑开挖过程中边坡稳定性研究——以中山市东凤镇二圩东泵站重建工程为例[J].水上安全,2025(16):106-108.