

某水库工程枢纽区高边坡稳定性分析

田鹏程

(山东省水利勘测设计院有限公司, 山东 济南 250014)

【摘要】库岸边坡稳定性分析是枢纽区勘察的重要内容之一,事关施工期及运行期安全。通过赤平投影对该水库枢纽区边坡稳定性进行了定性分析,分析结果表明大坝趾板及溢洪道边坡均存在不同程度的失稳现象。针对性地对边坡采取挂网喷射混凝土措施处理后,采用理正岩土计算软件中的极限平衡法对支护后的边坡稳定性进行了定量计算,计算结果表明采取挂网喷射混凝土支护措施后,边坡处于稳定状态,进一步证实了支护的可靠性,同时也为类似工程的边坡稳定性分析及支护提供参考与借鉴。

【关键词】高边坡;稳定性分析;赤平投影

【中图分类号】TV697

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2025)-05-0022-04

Stability Analysis of High Slopes in the Hub Area of a Reservoir Project

TIAN Pengcheng

(Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy co., Ltd, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: The stability analysis of reservoir bank slopes is one of the important contents in the survey of hub areas, which is related to the safety during the construction and operation periods. The qualitative analysis of the slope stability in the reservoir hub area was carried out by stereographic projection, and the results showed that the slopes of the dam toe slab and spillway had different degrees of instability. After targeted treatment of the slopes with the measure of shotcrete with mesh, the limit equilibrium method in Lizeheng Geotechnical Calculation Software was used for quantitative calculation of the stability of the supported slopes. The calculation results indicated that the slopes were in a stable state after the shotcrete with mesh support measures were adopted, which further confirmed the reliability of the support and provided a reference for the stability analysis and support of similar engineering slopes.

Key words: High slope; Stability analysis; Stereographic projection

某水库为混凝土面板堆石坝,工程等别为IV等小(1)型,枢纽区边坡主要为大坝趾板开挖形成的临时和永久边坡及溢洪道开挖永久边坡。根据规范^[1]规定,大坝趾板及溢洪道开挖边坡为5级,大坝趾板开挖边坡抗滑稳定安全系数允许值正常运用条件下为1.10,非常运用条件下为1.05,溢洪道开挖边坡抗滑稳定安全系数允许值正常运用条件下为1.10,非常运用条件下为1.05。

1 趾板开挖边坡稳定性分析

1.1 基本地质条件

该水库左岸段趾地形较陡,地形坡度 $20^{\circ}\sim$

30° ,近河谷处边坡直立。左岸中山部地表残坡积碎石土覆盖,厚度 $0\sim 8$ m;下部基岩出露。基岩为夜郎组玉龙山段(T_1y^2)中厚层状灰岩,属坚硬岩类,岩层产状: $260^{\circ}\angle 5^{\circ}$ 。岩体强风化层厚(法向) $3\sim 5$ m,弱风化带岩体呈层状结构,弱风化层岩体裂隙弱发育,完整性较好。

河床卵砾石层厚 $0\sim 2.5$ m,下伏基岩类型同左岸段址。河床强风化带岩体厚度 $5\sim 7$ m,弱风化带岩体岩芯以长柱状、短柱状为主,岩体呈层状结构。

收稿日期:2025-03-14

作者简介:田鹏程(1992—),男,工程师

右岸趾板地形上缓下陡,地形坡度 15°~25°,局部陡坎发育。边坡中上部地表残坡积碎石土层覆盖,厚度 0~5.2 m,下伏基岩同左岸段址。岩层产状:260°~280°∠5°~85°。岩体强风化带法向厚度 10~17.1 m,因受构造作用岩体裂隙较发育。

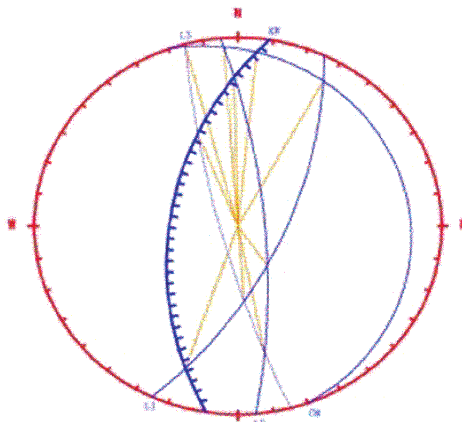
根据地形地质条件,覆盖层开挖边坡为 1:1.25,基岩开挖边坡为 1:0.75,开挖按分级设马道的方式进行,每 10 m 高度设置一马道,马道宽 2.0 m。

1.2 边坡稳定性分析

大坝趾板开挖后,河床段垂直挖深 5~7 m,左坝肩趾板一般垂直挖深 7~10 m,坝肩正面最大坡

高约 80 m,右坝肩趾板一般垂直挖深 6~10 m,坝肩正面最大坡高约 72 m。

1)左岸段趾板边坡稳定性分析。左岸段趾板开挖边坡,开挖高程为 1 403~1 483 m,设计开挖坡比为 1:0.75,坡角 53°,为逆向坡。将坝址区 3 组代表裂隙、岩层层面及设计开挖坡比放在赤平投影中,见图 1。通过赤平投影分析:左岸段开挖边坡为逆向坡,L2 组裂隙与岩层面交线位于开挖边坡坡外,倾角为 3°,小于开挖坡角,局部裂隙密集地带可构成坍塌失稳块体;L3 组裂隙与岩层面交线位于开挖边坡坡外,倾角为 1°,小



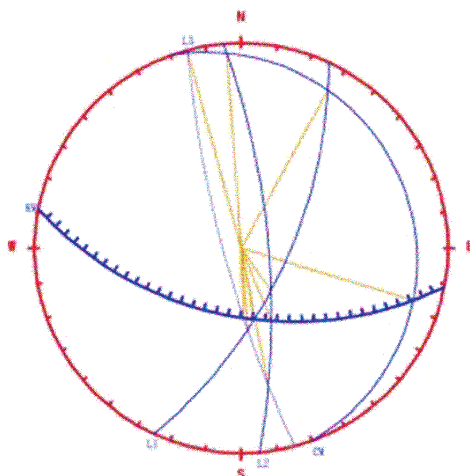
结构面名称	结构面产状	
KW 主要开挖边坡	99° ∠53°	
CM 岩层产状	245~260° ∠5~18°	
L1 组裂隙	290~300° ∠55~70°	
L2 组裂隙	255~275° ∠60~85°	
L3 组裂隙	60~90° ∠80~85°	
组合交线(平均值)	倾角(°)	倾向(°)
CM—L1	209	8
CM—L2	176	3
CM—L3	165	1
L1—L2	325	62
L1—L3	356	46
L2—L3	349	21

图 1 左岸段边坡赤平投影

于开挖坡角,局部裂隙密集地带可构成坍塌失稳块体。局部受裂隙切割、开挖松动、坝肩层面与裂隙组合形成较不稳定边坡,局部存在不稳定岩体。

2)河床段趾板上游侧边坡稳定性分析。河床段趾板上游侧开挖边坡,开挖高程为 1 403~1 410 m,设计开挖坡比为 1:0.75,坡角 53°,为斜

向坡。将坝址区 3 组代表裂隙、岩层层面及设计开挖坡比放在赤平投影中,见图 2。通过赤平投影分析得出:河床段趾板上游侧开挖边坡为斜向坡,L2 组裂隙与 L3 组裂隙交线位于开挖边坡坡外,倾角为 21°,小于开挖坡角,局部裂隙密集地带可构成坍塌失稳块体;L1 组裂隙与 L3 组裂隙交线位于开挖边坡坡外,倾角为 46°,小于开挖坡



结构面名称	结构面产状	
KW 主要开挖边坡	11° ∠53°	
CM 岩层产状	245~260° ∠5~18°	
L1 组裂隙	290~300° ∠55~70°	
L2 组裂隙	255~275° ∠60~85°	
L3 组裂隙	60~90° ∠80~85°	
组合交线(平均值)	倾角(°)	倾向(°)
CM—L1	209	8
CM—L2	176	3
CM—L3	165	1
L1—L2	325	62
L1—L3	356	46
L2—L3	349	21

图 2 河床段趾板边坡赤平投影

角,局部裂隙密集地带可构成坍塌失稳块体。局部受裂隙切割、开挖松动、坝肩层面与裂隙组合形成较不稳定边坡,局部存在不稳定岩体。

3)河床段趾板下游侧边坡稳定性分析。河床段趾板下游侧开挖边坡,开挖高程为 1 403~1 409 m,其余指标同河床段趾板上游。同理通过赤平投影分析如下:

河床段趾板上游侧开挖边坡为斜向坡,L1组裂隙与岩层面交线位于开挖边坡坡外,倾角为 8° ,小于开挖坡角,局部裂隙密集地带可构成坍塌失稳块体;L2组裂隙与岩层面交线位于开挖边坡坡外,倾角为 3° ,小于开挖坡角,局部裂隙密集地带可构成坍塌失稳块体;L3组裂隙与岩层面交线位于开挖边坡坡外,倾角为 1° ,小于开挖坡角,局部裂隙密集地带可构成坍塌失稳块体,局部受裂隙切割、开挖松动、坝肩层面与裂隙组合形成较不稳定边坡,局部存在不稳定岩体。

4)大坝右岸段趾板边坡稳定性评价。右岸段趾板开挖边坡,开挖高程为 1 403~1 475 m,设计开挖坡比为 1:0.75,坡角 53° ,为顺向坡。将坝址区 3 组代表裂隙、岩层层面及设计开挖坡比放在赤平投影中,同理通过赤平投影分析如下:

右岸段开挖边坡为顺向坡,岩层倾角小于开挖坡度,存在切脚现象,岩层倾角 5° ~ 18° ,总体较平缓,为不稳定边坡;L1组裂隙与岩层面交线位于开挖边坡坡外,倾角为 5° ,小于开挖坡角,局部裂隙密集地带可构成坍塌失稳块体;L2组裂隙与岩层面交线位于开挖边坡坡外,倾角为 1° ,小于开挖坡角,局部裂隙密集地带可构成坍塌失稳块体;L3组裂隙与岩层面交线位于开挖边坡坡外,倾角为 3° ,小于开挖坡角,局部裂隙密集地带可构成坍塌失稳块体;L2组裂隙与L3组裂隙交线位于开挖边坡坡外,倾角为 21° ,小于开挖坡角,局部裂隙密集地带可构成坍塌失稳块体。该侧开挖边坡的稳定问题将较为突出,除了存在楔形块体破坏外,还存在沿岩层面顺层滑移破坏模式。

1.3 边坡支护设计

开挖后对边坡进行挂网喷混凝土处理,并设梅花型布置的 $\Phi 25$ Ⅲ级水泥砂浆锚杆($L=4.5$ m,间排距 2 m),喷射混凝土设计强度等级为 C20,厚度为 10 cm,沿边坡纵向每隔 20 m 设置一竖向伸缩缝,缝宽 2 cm。

1.4 边坡稳定性计算

1)左岸段趾板边坡稳定性计算。左岸段最高开挖边坡为 40 m,边坡稳定分析根据《理正岩土计算 5.11》软件计算,计算结果如下:

岩体重量为 7 605.3 kN;水平外荷载、竖向外荷载均为 0;结构面上正压力为 6 295.8 kN;总下滑力为 4 296.4 kN;总抗滑力为 9 909.6kN;安全系数为 2.306。根据上述计算,边坡安全系数满足规范要求,总体边坡稳定性较好。

2)右岸段趾板边坡稳定性计算。右岸段最高开挖边坡为 53 m,边坡稳定分析根据《理正岩土计算 5.11》软件计算,计算结果如下:

岩体重量为 7 028.0 kN;水平外荷载、竖向外荷载均为 0;结构面上正压力为 5 531.1 kN;总下滑力为 4 393.8 kN;总抗滑力为 10 824.6 kN;安全系数为 2.464。根据上述计算,边坡安全系数满足规范要求,总体边坡稳定性较好。

2 溢洪道开挖边坡稳定性分析

2.1 基本地质条件

溢洪道基础下伏基岩为夜郎组玉龙山段(T_1y^2)中厚层状灰岩,属坚硬岩类,岩层产状为产状为 260° ~ 270° ∠ 45° ~ 75° ,岸坡第四系残破积覆盖层厚 2~5 m,局部基岩裸露,溢洪道开挖边坡为强溶蚀风化带岩质边坡和覆盖层土质边坡,其中顺河流方向,溢洪道左侧开挖边坡为逆向坡,右侧开挖边坡为顺向坡。

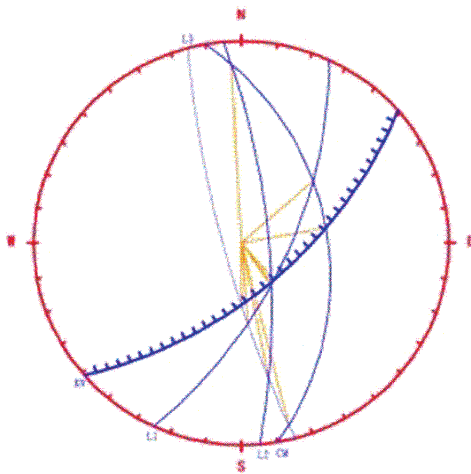
根据地形地质条件,覆盖层开挖边坡为 1:1.25,受地形条件影响,基岩开挖边坡为 1:0.5~1:0.75,开挖按分级设马道的方式进行,每 10 m 高度设置一条马道,马道宽 2.0 m。

2.2 边坡稳定性分析

溢洪道开挖后,形成外侧边坡及内侧边坡,其中外侧边坡高 25~42 m,内侧边坡高 5~15 m。

1)外侧边坡稳定性分析。溢洪道开挖后,外坡高 25~42 m,主要为强风化岩体开挖。设计开挖坡比为 1:0.5~0.75,坡角 53° ~ 63° ,以 1:0.5 坡比为主,为顺向坡。将溢洪道 3 组代表裂隙、岩层层面及设计开挖坡比放在赤平投影中,见图 3。

通过赤平投影分析如下:溢洪道外侧开挖边坡为顺向坡,岩层倾角小于开挖坡度,存在切脚现象,岩层倾角 45° ~ 75° ,沿岩层面存在顺层滑



结构面名称	结构面产状	
KW 主要开挖边坡	319° ∠63°	
CM 岩层产状	260~270° ∠45~75°	
L1 组裂隙	290~300° ∠55~70°	
L2 组裂隙	255~275° ∠60~85°	
L3 组裂隙	60~90° ∠80~85°	
组合交线(平均值)	倾角(°)	倾向(°)
CM—L1	228	40
CM—L2	177	7
CM—L3	346	4
L1—L2	325	62
L1—L3	356	46
L2—L3	349	21

图3 溢洪道外侧边坡赤平投影

动,其中岩层面为底滑面,L2组及L3组裂隙为拉裂面,L1组裂隙为侧滑面,为不稳定边坡;L3组裂隙与岩层面交线位于开挖边坡坡外,倾角为4°,小于开挖坡角,局部裂隙密集地带可构成坍塌失稳块体;L2组裂隙与L3组裂隙交线位于开挖边坡坡外,倾角为21°,小于开挖坡角,局部裂隙密集地带可构成坍塌失稳块体;L1组裂隙与L3组裂隙交线位于开挖边坡坡外,倾角为46°,小于开挖坡角,局部裂隙密集地带可构成坍塌失稳块体。该开挖边坡的稳定问题将较为突出,除了存在楔形块体破坏外,还存在沿岩层面顺层滑移破坏模式。

2)内侧边坡稳定分析。溢洪道开挖后,内坡高5~15 m,主要为强风化岩体开挖。设计开挖坡比为1:0.75,坡角53°,为逆向坡。将溢洪道3组代表裂隙、岩层层面及设计开挖坡比放在赤平投影中。同理通过赤平投影分析:溢洪道内侧开挖边坡为逆向坡,L2组裂隙与岩层面交线位于开挖边坡坡外,倾角为7°,小于开挖坡角,局部裂隙密集地带可构成坍塌失稳块体。局部受裂隙切割、开挖松动、坝肩层面与裂隙组合形成较不稳定边坡,局部存在不稳定岩体。

2.3 边坡支护设计

开挖后对边坡进行挂网喷混凝土处理,并设梅花型布置的Φ25Ⅲ级水泥砂浆锚杆(L=4.5 m,间排距2 m)和排水孔φ50(长3 m,间距2 m,仰角10°),喷射混凝土设计强度等级为C20,厚度为10 cm,沿边坡纵向每隔20 m设置一竖向伸缩缝,缝宽2 cm。由于溢洪道存在局部顺向坡,为防

止在开挖过程中,岩体滑落,对开挖后的边坡预留随机长锚杆,梅花型布置的Φ28Ⅲ级水泥砂浆锚杆(L=9 m,间排距3 m)。在开挖边坡开口线外侧5 m位置布置截水沟,避免山上来水冲刷开挖坡面,截水沟采用梯形截面,底宽0.4 m,顶宽0.6 m,高度为0.4 m,采用C15混凝土结构,厚度为0.1 mm,上游引水至库内,下游侧引水至河道;开挖边坡设有马道,在马道内布设排水沟,底宽0.3 m,顶宽0.525 m,高度为0.3 m,汇集开挖坡面雨水,采用C15混凝土结构,厚度为0.1 m,下游接截水沟。

2.4 边坡稳定性计算

溢洪道最高开挖边坡为41.8 m,边坡稳定分析根据《理正岩土计算5.11》软件计算,计算结果如下:岩体重量为2 450.9 kN;侧面裂隙水压力及底面裂隙水压力均为0;结构面上正压力为1 958.4 kN;总下滑力为1 656.4 kN;总抗滑力为6 367.2 kN;安全系数为3.844。根据上述计算,边坡安全系数满足规范要求,总体边坡稳定性较好。

综上,通过赤平投影对边坡稳定性进行定性分析说明,采用理正岩土软件对支护设计进行验算,既能确保工程安全,又能避免过度设计,造成资金浪费。

参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程边坡设计规范:SL 386—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑边坡工程技术规范:GB 50330—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.

(责任编辑 赵其芬)