



岩质高陡边坡动态设计在船闸改扩建工程中的应用*

段驰明¹, 凌 威², 李芃芃², 王 能², 周千凯¹

(1. 湖南省水运建设投资集团有限公司, 湖南 长沙 410011;

2. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200)

摘要: 针对船闸改扩建工程施工中面临的边坡开挖陡、地质条件差异大、坡体变形控制要求严的问题, 对邻近公路高陡边坡支护和稳定性进行研究。采用动态设计方法, 对边坡开挖中揭露的岩层产状、发育节理组合情况等地质条件实时判断, 结合边坡安全监测数据, 提出不同破坏模式下的支护方式。结果表明: 岩质高陡边坡动态设计在重要性特别高、范围广、地质和环境条件差异大的情况下具有针对性和适用性, 能够实现工程安全、工程投资、施工进度等目标的综合效益最大化, 相关经验和方法可为类似工程建设提供参考。

关键词: 高陡边坡; 动态设计; 边坡支护; 船闸工程

中图分类号: U641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)08-0216-10

Application of dynamic design of high and steep rock slope in ship lock reconstruction and expansion project

DUAN Chiming¹, LING Wei², LI Pengpeng², WANG Neng², ZHOU Qiankai¹

(1. Hunan Provincial Water Transportation Construction & Investment Group Co., Ltd., Changsha 410011, China;

2. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410200, China)

Abstract: In view of the problems of steep slope excavation, large different geological conditions and strict slope deformation control, the support and stability of high and steep slope of adjacent highway are studied. By using dynamic design method, the geological conditions such as rock formation and joint combination revealed in slope excavation are judged in real time. Combined with the safety monitoring data of slope, the support methods under different failure modes are proposed. The results show that the dynamic design of high and steep rock slope has pertinence and applicability in the case of high importance, wide range and large differences in geological and environmental conditions. It can maximize the comprehensive benefits of engineering safety, project investment and construction schedule. The relevant experience and methods can provide reference for similar projects.

Keywords: high and steep slope; dynamic design; slope support; ship lock project

随着水运建设事业持续发展, 航道级别、通航建筑物等级不断提升, 原有通航建筑物已无法满足现有船舶的通航需求, 须对原有通航建筑物进行改、扩建。受山区地形地貌及原枢纽布置的

影响, 船闸改扩建工程的施工场地受到严格制约, 深基坑、高边坡的开挖及支护问题已成为目前船闸改扩建工程中必须面对的难题。

为解决该难题已积累了大量经验: 三峡水利

收稿日期: 2024-11-09

*基金项目: 湖南省交通科技项目(202316)

作者简介: 段驰明(1990—), 男, 工程师, 从事港口与航道工程建设管理与技术研究工作。

枢纽双线五级船闸边坡开挖最大坡高 170 m, 针对船闸边坡各部位不同锚固需求, 研究出 1 000、3 000 kN 端头锚索, 3 000 kN 对穿锚索及 3 000 kN 闸首无粘结锚索等锚索结构^[1-4]。平陆运河分水岭段的马道枢纽上游引航道 2# 边坡最高达 188 m, 施工过程中按照“边坡总体坡形开挖基本自稳、浅表坡面防护、深层岩体锚固和强加排水”等原则进行开挖及支护加固, 在确保边坡稳定的同时节省了工程投资^[5-6]。在左江山秀船闸扩能工程中, 左岸山体开挖根据现场地质情况与计算结果自上而下分块进行, 并采取了液压破碎结合控制爆破法施工, 实现支护措施紧跟开挖进度^[7]。大源渡二线船闸深基坑边坡施工过程中加密了重要部位及关键施工阶段的监测频率, 及时分析深基坑开挖边坡稳定性变形趋势, 确保了基坑内作业人员的安全施工环境^[8-10]。

本文以湖南省在建的洪江枢纽船闸改扩建工程为依托, 为解决因施工场地受限而面临的深基坑、高边坡支护难题, 基坑开挖前根据地勘成果分析边坡主要破坏模式、计算边坡稳定性, 初步

拟定边坡支(防)护形式; 边坡开挖过程中实时判断地质条件, 结合现场安全监测、稳定性复核算, 确定相应的支护方式, 在保证边坡逐级稳定的前提下有效控制工程投资与建设周期, 实现船闸高陡边坡动态设计。

1 工程概况

洪江枢纽船闸改扩建工程是湖南省“十四五”水运建设重点项目之一, 该工程按 1 000 吨级标准改扩建洪江枢纽现有单线二级 300 吨级船闸。

已建洪江枢纽位于顺直微弯河道, 两岸山体雄厚。从左至右依次布置左岸重力坝、电站、泄水闸、单线二级船闸、右岸重力坝, 见图 1。电站左岸紧接连片高山, 山体内布置有坝体灌浆廊道, 基本无建设二线船闸位置。右岸第 1 级船闸左右两侧分别与泄水闸及右岸重力坝相连。船闸右侧为枢纽管理区及洪黔公路, 洪黔公路边线至现有船闸最小距离约 15 m, 右岸为嵩云山国家森林公园, 基本为岩质山体。因此右岸亦无新建二线船闸空间, 且施工场地十分狭窄。



图1 已建洪江枢纽

Fig1 The built Hongjiang Hub

经综合比选, 洪江枢纽船闸改扩建工程总平面布置方案^[11]为: 利用原船闸上闸首、一闸室和中闸首作为上游通航明渠, 拆除二闸室、下闸首等原结构后, 在原闸址新建 1 座单级船闸。将原上闸首口门宽度由 12 m 增至 16 m、一闸室口门宽度由 12 m 增至 16~23 m、中闸首口门宽度由 12 m

增至 23 m, 加固并改造原上游主辅导航墙、上闸首、一闸室、中闸首及右岸重力坝。船闸上、下游引航道均采用曲进不完全直出的进出闸方式, 引航道停泊段布置于岸侧, 停泊段与导航调顺段均呈折线形布置, 见图 2。

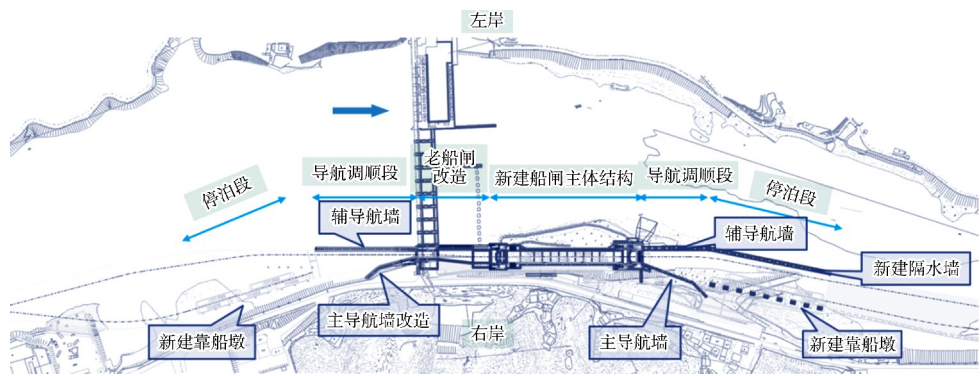


图 2 洪江船闸改扩建工程总平面布置

Fig. 2 General layout of Hongjiang Ship Lock renovation and expansion project

根据地质勘察成果，洪江枢纽船闸改扩建工程主体结构各区域岩层分布情况见表 1。

表 1 洪江船闸各区域岩层分布
Tab. 1 Rock strata distribution in each area of Hongjiang Ship Lock

序号	区域	主要岩性及说明
1	上闸首	板岩:灰绿色、蓝灰色,中厚层~巨厚层夹薄层状,板状构造,属较软岩~较硬岩;按风化程度差异可分为强、中风化
2	闸室	板岩:灰绿色、蓝灰色,中厚层~巨厚层夹薄层状,板状构造,属较软岩~较硬岩;按风化程度差异可分为强、中风化
3	下闸首	石英砂岩:灰色、浅灰色,硅质胶结,中厚层状构造,属较硬岩~坚硬岩,岩体完整;按风化程度差异可分为强、中风化

拟建工程位于肖家田背斜南东翼，为单斜构造，局部发育次级褶皱。分布地层古老，历经多

次构造运动，岩层扭曲，产状多变、断层、层间剪切带较为发育，构造形迹走向以 NE15°~25°为主，各岩性单元层岩层产状总体为：90°~120°（倾向）、∠20°~∠25°（倾角），局部岩层扭曲，倾角变陡为 35°~64°。

通过地勘探明工程区节理发育强烈，主要发育的节理面有 7 组，各组节理面均较平直、光滑，呈半闭合~闭合状，多为砂泥质及岩屑成分充填。

2 边坡开挖方案

洪江船闸主基坑开挖方案根据主体结构设计断面和地质勘察成果^[12]综合确定，根据边坡平面位置及开挖断面的不同，将主体基坑划分为若干块，见图 3。

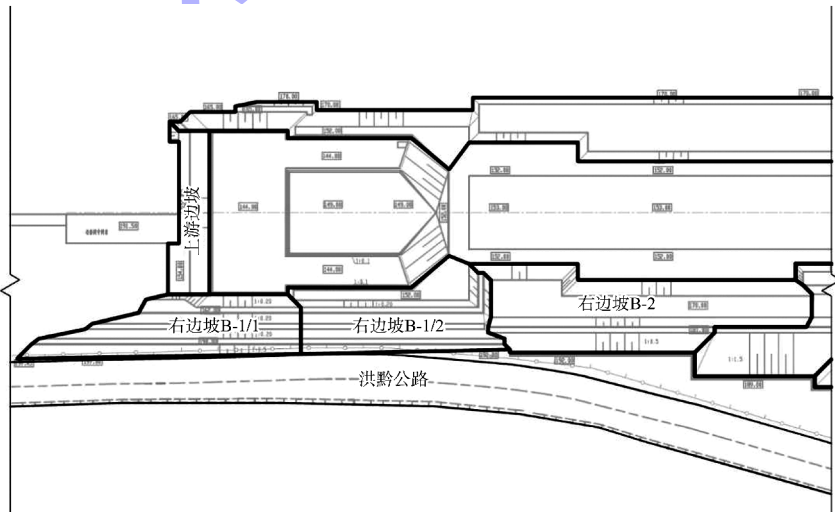


图 3 洪江船闸主基坑边坡开挖分块

Fig. 3 Slope excavation of main foundation pit of Hongjiang Ship Lock

其中, 上游边坡为新建船闸上闸首靠上游侧边坡, 坡面倾向下游, 坡高 10.8 m, 开挖坡比 1:0.5, 坡顶为原船闸中闸首结构。右边坡 B-1/1 为新建上闸首岸侧边坡, 右边坡 B-1/2 为新建闸室第 1、2 号结构段岸侧边坡, 右边坡 B-2 为新建闸室第 3~8 号结构段岸侧边坡。右边坡 B-1/1、B-1/2 及 B-2 紧邻洪黔公路, 施工场地受限, 最大开挖坡高约 53 m, 开挖坡比为 1:0.1~1:0.5, 为典型岩质高陡边坡,

见图 4。洪黔公路为国防公路, 且为连通洪江区与洪江市的唯一通道, 施工期间须正常通车, 若边坡失稳将对公众安全和公共利益造成重大影响。因此本边坡工程重要性级别为特别重要, 其中上游边坡、右边坡 B-1/1、B-1/2 及 B-2 为重点防护对象。根据 NB/T 10512—2021《水电工程边坡设计规范》^[13], 确定边坡类别和级别为 A 类 II 级。

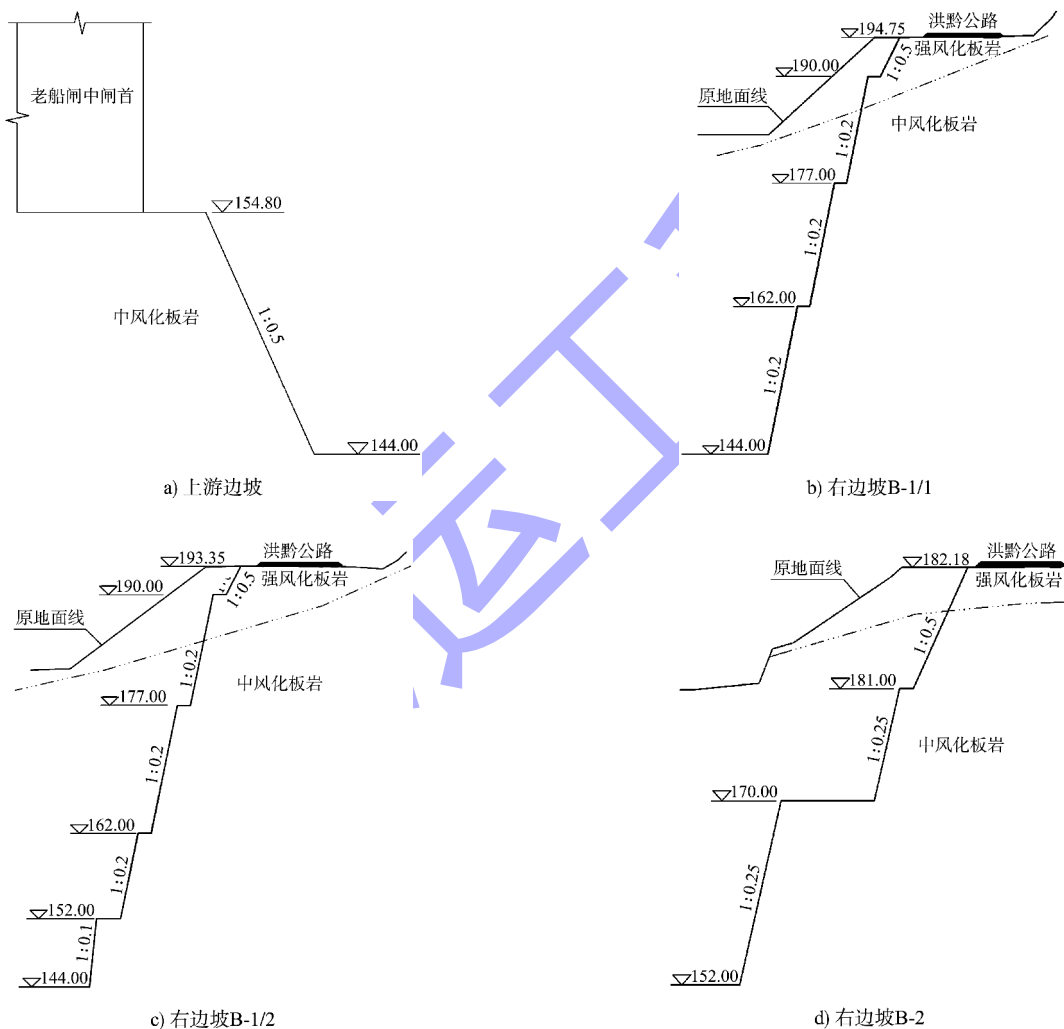


图 4 洪江船闸主基坑边坡开挖典型断面 (单位: m)

Fig. 4 Typical profile of excavation of main foundation pit slope of Hongjiang Ship Lock (unit: m)

3 动态设计方案

3.1 边坡破坏模式分析

根据地勘成果及边坡开挖方案, 初步分析船闸主体基坑边坡破坏模式有以下两类。

1) 同向顺层边坡: 主要为边坡岩层倾向外倾

面的顺向坡, 坡体结构为层状同向结构, 边坡失稳模式为沿层面或软弱夹层面的平面滑动, 当边坡位于河水水位高程以下时, 层间面连通性强, 在地下水的影响下, 软化、润滑于层面, 岩体抗剪强度急剧减弱, 岩体容易沿层面发生顺层滑动。根据

地勘成果,邻近洪黔公路处边坡(右边破 B-1)存在倾角为 64° 的顺层发育节理,若处理不当可能发生较大规模失稳,且施工期间要求保证公路正常通车,对坡体的变形控制亦更为严格。

2) 逆向边坡及横向斜交坡:岩体存在外倾结构面和组合结构面切割岩体形成的“楔形体”。主要破坏模式为沿外倾结构面发生掉块、崩塌及“楔形体”滑动,若下一级“楔形体”发生局部变形,则可能产生更大规模的“牵引式”失稳。

3.2 动态设计原则

设计前的地质勘察成果虽已基本探明区域岩层产状及主要发育节理面,但由于勘察工作本身具有一定局限性,且山区地质情况复杂多变,工程区节理发育强烈,分布具有随机性,边坡开挖前难以准确判断各组结构面、节理的位置和产状。此外,随基坑深度增加,向下延伸的节理面数量将逐渐减少。因此对于以“楔形体”滑动为主要破坏模式的边坡,若支护措施选取不合理,则坡体的稳定性难以保证,若对所有坡面均按最不利地质工况考虑采取支护措施,又不符合工程建设的安全性原则,且施工工期难以控制。

对此,本工程采取了动态设计原则:根据已有地勘成果,针对各边坡可能发生的破坏模式初步拟定支护方案,采取“分级开挖、计算复核、逐级支护”的施工顺序,边坡每开挖 $3\sim 5\text{ m}$,设计单位对边坡地质情况进行判断,并结合地勘成果、现场测量、稳定性复核算,确定最合适的支护形式,保证边坡逐级稳定。

3.3 动态设计方案

3.3.1 上游边坡

上游边坡为典型的顺向坡,由于坡顶受原船闸中闸首压载,随着边坡向下开挖,原中闸首基岩应力不断释放,坡体层面完全临空后易沿层面发生顺层滑移,存在整体失稳风险。设计方案拟对上游边坡采取预应力锚索+框格梁的支护措施,技术参数见表 2。预应力锚索框格梁体系通过锚索

的预应力将滑动体与稳定的基岩连接为一体,又通过坡面上的框格梁将各锚索有效地连成一个整体,形成一个由表及里的被覆式加固体系,从而达到防止边坡整体失稳的目的。

表 2 上游边坡支护措施
Tab. 2 Upstream slope support measures

支护范围	支护措施	主要技术参数
全坡面	预应力锚索	单根锚索长 12 m ,设计锚固力 800 kN ,按矩形布置,水平间距 3.5 m 、排距 3 m 、倾角 10°
	框格梁	采用 C30 钢筋混凝土,截面尺寸 $500\text{ mm}\times 500\text{ mm}$,中心线间距同锚索间距
	挂网喷射混凝土	采用 $\phi 10$ 钢筋网片,间距 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$,混凝土级别为 C20,厚度 100 mm
	坡面排水	PVC 排水管,倾角 10° 、孔深 5 m ,按间距 3.5 m 行列式布置

采用库伦 GEO5 软件岩质边坡稳定性分析模板对预应力锚索作用下的上游边坡进行稳定性分析计算。根据地勘成果,中风化岩重力密度取 27.5 kN/m^3 ;存在最不利层面的倾角为 50° ,倾向下游,中风化岩层面内摩擦角 $\varphi = 32.0^{\circ}$,黏聚力 $c = 100\text{ kPa}$ 。荷载考虑自重力及坡顶原中闸首压载,并根据地下水位线位置假定整个滑动面裂隙充满裂隙水,作用力垂直于滑动面。采用极限平衡法计算岩质边坡抗滑稳定系数,计算模型见图 5。经计算,上游边坡抗滑稳定系数为 1.31 ,大于规范允许值 1.25 。

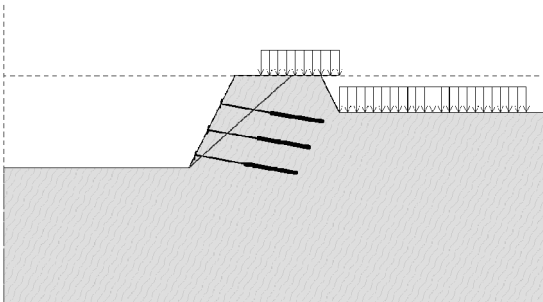


图 5 上游边坡稳定性分析计算模型
Fig. 5 Calculation model for stability analysis of upstream slope

根据现场开挖情况, 上游边坡以中风化板岩为主, 出露岩层面倾向坡外, 坡体结构为层状同向结构, 与地勘成果相符, 因此上游边坡可按原设计方案进行支护, 见图6。



a) 开挖面



b) 支护完成

图6 上游边坡开挖面及支护完成状态

Fig. 6 Excavation face and support completion status of upstream slope

3.3.2 右边坡 B-1/1、B-1/2

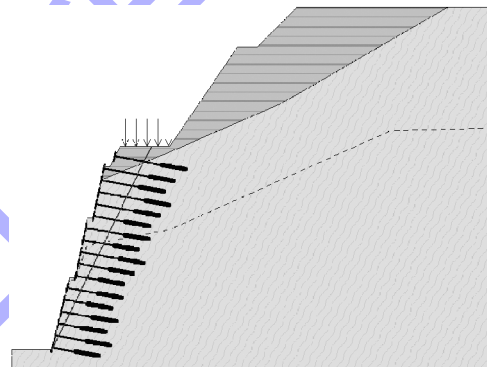
右边坡 B-1/1 和 B-1/2 节理发育强烈, 破坏形式主要为沿顺层节理面的折线滑动, 局部还可能发生“楔形体”滑动。考虑到边坡的重要程度, 设计方案对右边坡 B-1/1 和 B-1/2 拟采取预应力锚索框格梁体系进行支护, 各支护措施技术参数见表3。

稳定性计算时中风化岩参数同上游边坡, 强风化岩重力密度 27.0 kN/m^3 , 内摩擦角 $\varphi=20.0^\circ$, 黏聚力 $c=25 \text{ kPa}$; 存在最不利节理面的倾角为 63° , 倾向河侧; 节理面内摩擦角 $\varphi=26.0^\circ$, 黏聚力 $c=80 \text{ kPa}$ 。荷载考虑自重、交通荷载及孔隙水压力, 计算模型见图7。经计算, 右边坡 B-1/1、B-1/2 抗滑稳定系数分别为 1.33、1.40, 大于规范允许值 1.25。

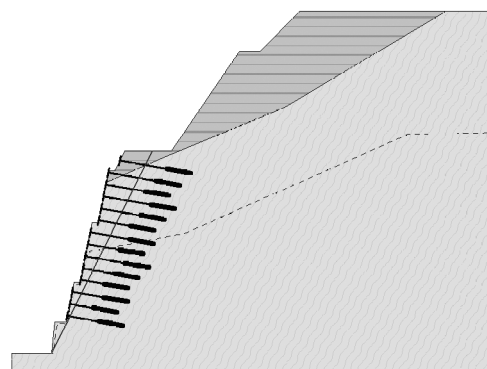
表3 右边坡 B-1/1、B-1/2 支护措施

Tab. 3 Support measures of right slope B-1/1, B-1/2

支护范围	支护措施	主要技术参数
全坡面	预应力锚索	单根锚索长 12~18 m, 设计锚固力 800 kN (B-1/2)、900 kN (B-1/1), 按矩形布置, 水平间距 3.5 m、排距 2~3 m、倾角 10°
	框格梁	采用 C30 钢筋混凝土, 截面尺寸 500 mm×500 mm, 中心线间距同锚索间距
	挂网喷射混凝土	采用 $\phi 10$ 钢筋网片, 间距 200 mm×200 mm, 混凝土级别为 C20, 厚度 100 mm
	坡面排水	PVC 排水管, 倾角 10° 、孔深 5 m, 按间距 3.5 m 行列式布置



a) 右边坡B-1/1



b) 右边坡B-1/2

图7 右边坡 B-1/1、B-1/2 稳定性分析计算模型

Fig. 7 Calculation model for stability analysis of right slope B-1/1, B-1/2

根据现场开挖情况, 右边坡 B-1/1、B-1/2 开挖面以强、中风化板岩为主, 强、中风化岩分界面与地勘成果基本吻合, 岩石完整性较差, 岩质较硬, 存在较密集的发育节理及断层。对全坡面

采用预应力锚索+框格梁的支护措施,见图 8,既能保证边坡整体不发生顺层滑动、控制坡体变形,又可避免局部外倾结构面和组合结构面切割岩体形成的“楔形体”破坏。



图 8 右边坡 B-1/1、B-1/2 开挖面及支护完成状态
Fig. 8 Excavation face and support completion status of right slope B-1/1 and B-1/2

3.3.3 右边坡 B-2

自右边坡 B-2 起,船闸岸侧边坡与洪黔公路间的距离逐渐增大,洪黔公路可视为一级马道作为上部山体边坡的缓冲,且闸室岸侧闸墙为下部衬砌式、上部重力式的混合式结构,因此在 170.00 m 高程形成宽 5.70~10.15 m 的马道,同样可作为 170.00 m 高程以上边坡的缓冲段。因此右边坡自 B-2 往下游,边坡的危险程度相较于 B-1/1、B-1/2 逐渐降低。

根据地勘成果,右边坡 B-2 在 170.00 m 高程以上存在较密集的发节理,破坏模式与 B-1/2、B-1/2 类似。170.00 m 高程以下,节理发育程度逐步降低,岩石完整性逐步提升,但无法排除局部发生“楔形体”滑动的可能。从工程经济性角度出发,设计方案拟对洪黔公路至 170.0 m 高程坡面采用预应力锚索框格梁体系进行支护。170.0 m 高程以下则视现场地质情况针对性地确定支护形式:对局部可能发生“楔形体”滑动区域,可现场测量其组合结构面产状后,计算其抗滑所需的锚固力,采取预应力锚索框格梁支护;若岩面完整无发育节理,则考虑随机锚杆和喷锚等表面防护措施,各支护措施技术参数见表 4。

表 4 右边坡 B-2 支护措施
Tab. 4 Support measures of right slope B-2

支护范围	支护措施	主要技术参数
170.0 m 高程以上	预应力锚索	单根锚索长 14~16 m,设计锚固力 800 kN,按矩形布置,水平间距 5 m、排距 4 m、倾角 10°
	框格梁	采用 C30 钢筋混凝土,截面尺寸 500 mm×500 mm,中心线间距同锚索间距
170.0 m 高程以下 (岩面完整)	随机锚杆	全长粘结型锚杆,单根长 6 m、 $\phi 28$ mm、倾角 10°
170.0 m 高程以下 (“楔形体”滑动)	预应力锚索	锚索数量、长度、锚固力及布置形式根据现场测量组合结构面后计算给出
	框格梁	采用 C30 钢筋混凝土,截面尺寸 500 mm×500 mm,中心线间距同锚索间距
全坡面	挂网喷射混凝土	采用 $\phi 10$ 钢筋网片,间距 200 mm×200 mm,混凝土级别为 C20,厚度 100 mm
	坡面排水	PVC 排水管,倾角 10°、孔深 5 m,按间距 3.5 m 行列式布置

稳定性计算时,强、中风化岩及节理面参数同上,洪黔公路以上山体顶部素填土重力密度 20.0 kN/m³,内摩擦角 $\varphi=32.0^\circ$,黏聚力 $c=0$ kPa。荷载考虑自重力、交通荷载及孔隙水压力,计算模型见图 9。经计算,右边坡 B-2 高程 170.0 m 以上坡面在最不利节理面(倾角 63°)工况下抗滑稳定系数为 1.52,大于规范允许值 1.25。

右边坡 B-2 按“开挖一级、支护一级”的动态设计原则完成 170.00 m 高程以上边坡的开挖及支护后,在开挖 170.00 m 以下边坡的过程中发现坡体内除存在两组明显的节理面外,其余坡面未见明显结构面。经现场勘测,两节理面产状分别为 355°∠54°(倾向、倾角)、45°∠52°,见图 10。通过赤平投影分析,见图 11,两结构面的组合交棱

线产状为 $24^{\circ} \angle 50^{\circ}$, 与边坡同向, 且倾角缓于坡角, 为不稳定的“楔形体”, 对边坡稳定性不利。

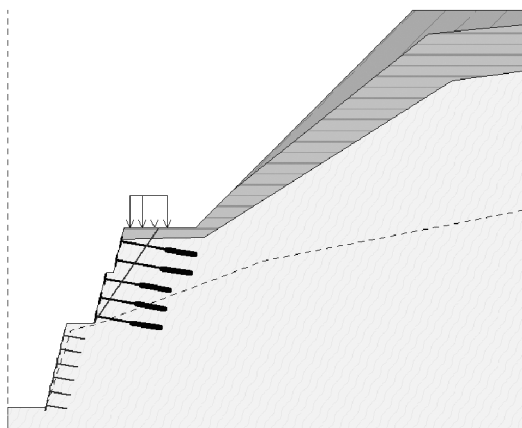


图 9 右边坡 B-2 稳定性分析计算模型
Fig. 9 Calculation model for stability analysis of right slope B-2

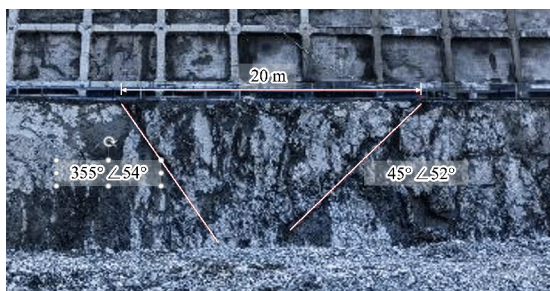


图 10 右边坡 B-2 的两组节理面
(在 170.00 m 高程马道下方)
Fig. 10 Two sets of joint surfaces on right slope B-2 (below 170.00 m elevation access road)

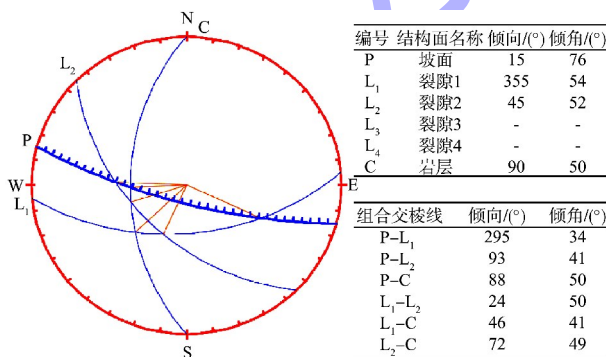


图 11 两组结构面的赤平投影 (北半球投影)
Fig. 11 Stereographic projection of two groups of structural planes (Northern Hemisphere projection)

采用库伦 GEO5 软件楔体滑动分析模板对“楔形体”的稳定性进行核算。经核算, 在不对“楔形体”施加主动锚固力的情况下, “楔形体”安全系数

为 0.98, 小于规范允许值 1.25。在两结构面各施加一个 1 000 kN 垂直结构面的锚固力的情况下, 该区域边坡安全系数可提高至 1.42, 满足规范要求。因此, 右边坡 B-2 高程 170.0 m 以下的支护措施可以确定为: 楔形体出露区域及附近一定范围内采取预应力锚索+框格梁支护, 锚索单根长 14 m, 设计锚固力 1 000 kN, 间距 4 m、排距 3 m, 锚索钻孔应尽量垂直结构面, 见图 12。对于其他岩面较完整的区域, 则采取随机锚杆+喷锚的防护措施。



图 12 右边坡 B-2 支护完成状态
Fig. 12 Ssupport completion status of right slope B-2

4 边坡支护效果分析

目前, 洪江枢纽船闸改扩建工程边坡开挖及支护工程已基本完成, 见图 13, 设计方案在重点防护的右边坡 B-1/1 至 B-2 布设 3 个监测断面, 共计 8 台 GNSS 自动位移监测仪器、24 个临时监测点, 用于监测施工期边坡水平及沉降位移情况。另布设 74 台锚索测力计监测预应力锚索的应力变化情况。



图 13 洪江船闸边坡支护完成状态
Fig. 13 Completion status of slope support of Hongjiang Ship Lock

通过分析锚索测力计及边坡位移监测的数据可知,虽然锚索应力、边坡位移历时曲线受施工天气和爆破振动影响,数值存在局部波动,但锚索应力始终未低于设计锚固力,各测点的位移值始终未超过设计预警值(20 mm),说明预应力锚索对锚固体形成了较好的锚固效果,且边坡岩体在表层及深层均未发生较大变形,边坡基本处于稳定状态。

2024 年 6 月 30 日,洪江枢纽下泄流量达到 9 000 m³/s,为确保工程安全度汛,启动围堰充水口对船闸主体基坑进行充水。随着洪峰过境,基坑排水后及时采集边坡位移及锚索应力,各项监测数据趋于稳定,度汛过程中未发生因边坡失稳而造成的安全事故,边坡动态设计成果通过了实践的考验。

5 结论

1) 船闸改扩建工程周边环境复杂、施工限制因素繁多,为确保边坡的安全稳定,开工前应对边坡划分重点防护区域,通过分析其边坡主要破坏模式、计算边坡稳定性,初步确定边坡支(防)护形式。边坡开挖过程中实时判断地质条件,结合现场测量、稳定性复核算,确定最合适的支护形式,保证边坡逐级稳定。

2) 当岩质边坡整体完整性较好,仅局部存在“楔形体”滑动区域时,可现场测量“楔形体”组合结构面产状,计算其抗滑所需的锚固力,在该区域针对性地提出支护措施,保证边坡安全稳定的同时节省工程投资。

3) “分级开挖,逐级支护”的处理原则能够在高陡边坡工程实施过程中控制坡体变形、保障边坡安全,此原则的贯彻十分必要。

参考文献:

[1] 高大水,曾勇.三峡永久船闸高边坡锚索预应力状态监测分析[J].岩石力学与工程学报,2001,20(5):

653-656.

GAO D S, ZENG Y. Monitoring analysis on prestress state of anchor cable of high slope of the TGP permanent shiplocks[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2001, 20(5): 653-656.

[2] 高大水.三峡船闸高边坡锚固及新型无粘结锚索开发[J].水力发电,2003,29(1):36-40.

GAO D S. The anchorage of the high side-slope of Three Gorges Ship Lock and the development of new non-bonded anchorage cable[J]. Water power, 2003, 29(1): 36-40.

[3] 高大水.国内岩土预应力锚固技术应用及锚固技术参数统计[J].长江科学院院报,2004,21(6):87-90.

GAO D S. Application of prestressed anchorage technology in rock-earth engineering and statistics of their technology parameters [J]. Journal of Yangtze River scientific research institute, 2004, 21(6): 87-90.

[4] 高大水.三峡永久船闸高边坡预应力锚固技术的研究与应用[J].水力发电学报,2009,28(6):93-99.

GAO D S. Research and application on prestressed anchorage techniques of high slopes for Three Gorges permanent shiplocks [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2009, 28(6): 93-99.

[5] 刘宁.平陆运河工程建设关键问题研究与思考[J].水运工程,2024(6):1-11.

LIU N. Research and contemplation on key issues in construction of Pinglu Canal Project[J]. Port & waterway engineering, 2024(6): 1-11.

[6] 宣俊旭.平陆运河高陡软岩边坡机械化防护施工关键工艺[J].西部交通科技,2024(4):1-3.

XUAN J X. The Key technology of mechanized protection of high and steep soft rock slope of Pinglu Canal [J]. Western China communications science & technology, 2024(4): 1-3.

[7] 魏晶,宋根才.左江山秀船闸扩能工程高边坡开挖施工技术[J].水运工程,2024(5):220-225,236.

WEI X, SONG G C. Construction technology for high slope excavation of Shanxiu Shiplock capacity expansion project in Zuojiang[J]. Port & waterway engineering, 2024(5): 220-225, 236.

- [8] 曹磊. 深基坑开挖边坡稳定性监测实施技术[J]. 水运工程, 2019(3): 130-132, 158.
- CAO L. Implementation technology of slope stability monitoring for deep foundation pit excavation[J]. Port & waterway engineering, 2019(3): 130-132, 158.
- [9] 陈明慧, 郭国国, 王定. 大源渡航电枢纽二线船闸工程安全监测应用[J]. 湖南交通科技, 2019, 45(1): 148-152.
- CHEN M H, GUO G G, WANG D. Application of safety monitoring of second-line shiplock engineering in Dayuandu Navigation-Hydropower Junction [J]. Hunan communication science and technology, 2019, 45(1): 148-152.
- [10] 周杰源, 雷路平, 熊浩奇. 低水头船闸安全监测设置方案研究[J]. 湖南交通科技, 2021, 47(1): 130-132.
- ZHOU J Y, LEI L P, XIONG H Q. Study on safety monitoring scheme of low head shiplock [J]. Hunan communication science and technology, 2021, 47(1): 130-132.
- [11] 湖南省交通规划勘察设计院有限公司. 沅水洪江至辰溪航道建设工程第二批施工图设计[R]. 长沙: 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 2023.
- Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd. Design of the second batch of construction drawings for the waterway construction project from Hongjiang to Chenxi in Yuanshui [R]. Changsha: Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., 2023.
- [12] 湖南省交通规划勘察设计院有限公司. 沅水洪江至辰溪航道建设工程岩土勘察报告[R]. 长沙: 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 2021.
- Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd. Geotechnical investigation report of waterway construction project from Hongjiang to Chenxi in Yuanshui [R]. Changsha: Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., 2021.
- [13] 水电工程边坡设计规范: NB/T 10512—2021[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
- Code for slope design of hydropower projects: NB/T 10512-2021 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2021.
- (本文编辑 赵娟)
- ~~~~~
- (上接第215页)
- [12] 杨爱武, 闫澍旺, 杜东菊. 结构性吹填软土蠕变模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3213-3218, 3224.
- YANG A W, YAN S W, DU D J. Study of creep model of structural soft dredger fill[J]. Rock and soil mechanics, 2012, 33(11): 3213-3218, 3224.
- [13] 张先伟, 王常明. 饱和软土的经验型蠕变模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(3): 791-796.
- ZHANG X W, WANG C M. Empirical creep model for saturated soft soil[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2011, 42(3): 791-796.
- [14] 朱鸿鹄, 陈晓平. 软土蠕变-固结的耦合效应研究评述[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2004(3): 315-321.
- ZHU H H, CHEN X P. Review of research on creep-consolidation coupling effects in soft soil[J]. Journal of Jinan University (natural science & medicine edition), 2004(3): 315-321.
- [15] 李惠, 陈金光, 乔卫国. 深圳湾海积软土的蠕变特性与本构模型研究[J]. 水运工程, 2011(10): 141-144.
- LI H, CHEN J G, QIAO W G. On creep behavior and model of marine clay in Shenzhen area [J]. Port & waterway engineering, 2011(10): 141-144.
- (本文编辑 王璁)