



复杂环境下改建船闸高陡边坡组合支护技术

易放辉¹, 黄圣平¹, 张聪², 邹开明³

(1. 湖南省港航水利集团有限公司, 湖南长沙 410011; 2. 中南林业科技大学, 湖南长沙 410004;
3. 湖南省水运建设投资集团有限公司, 湖南长沙 410011)

摘要:受制于地形地貌、地质条件、结构施工以及地基防渗等因素,我国中东部地区内河船闸施工条件复杂,而此复杂条件下改建船闸高陡边坡支护技术研究成果较少。依托湖南省首个在建27 m高水头差洪江枢纽改建船闸工程,针对复杂环境下船闸施工面临的高边坡施工稳定性难题,提出“框格梁+预应力锚索”组合支护技术,并通过坡面沉降变形、锚索内力现场测试手段分析高边坡安全稳定性,评价该防护技术应用效果。研究表明:现场采用该支护技术后,船闸高边坡坡面沉降变形日均最大值为0.34 mm/d,累计沉降最大值8.3 mm,远小于日均3 mm/d、累计沉降值20 mm的报警值;“框格梁+预应力锚索”组合支护结构主要承受拉力作用且数值较小,最大拉力小于1 000 kN的设计限值,船闸高边坡支护结构设计布局合理,抑制边坡楔形体滑移效果良好,高边坡处于安全稳定状态。研究成果可为类似工程提供借鉴。

关键词: 改建船闸; 高陡边坡; “框格梁+预应力锚索”组合支护; 边坡楔形体

中图分类号: U641; U418.5+2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)02-0225-07

Combined supporting technology for high and steep slope of modified ship lock under complex environment

YI Fanghui¹, HUANG Shengping¹, ZHANG Cong², ZOU Kaiming³

(1. Hunan Port Shipping & Water Resources Group Co., Ltd., Changsha 410011, China;

2. Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;

3. Hunan Provincial Water Transportation Construction & Investment Group Co., Ltd., Changsha 410011, China)

Abstract: The construction of China's inland river locks in the central and eastern regions is a complex process due to factors such as topography, geological conditions, structural construction, and foundation seepage control. However, there is limited research on high steep slope support technology for locks rebuilt under these complex conditions. This paper focuses on the reconstruction of the Hongjiang hub lock project in Hunan province, which has a 27 m high head difference. It proposes a combination of support technology, namely “frame lattice beam + prestressed anchor cable,” to address the stability issues faced during high slope construction in a complex environment. The safety and stability of the high slope are analyzed through the deformation of the slope surface settlement and on-site testing of the anchor cable's internal force. The effectiveness of the protection technology is evaluated. The research findings demonstrate that after the adoption of the support technology, the maximum daily settlement deformation of the high slope of the lock is 0.34 mm/d, and the maximum cumulative settlement is 8.3 mm, which is far less than the alarm value of 3 mm/d and 20 mm. The “frame lattice beam + prestressed anchor cable” combination primarily bears tensile force, which remains within the design limit of 1,000 kN. The support structure's design layout for the high slope of the lock is reasonable, effectively preventing slope wedge slippage and ensuring the high slope's safety and stability. The research results can provide reference for similar projects.

Keywords: renovation of ship lock; high and steep slope; “frame beam+prestressed anchor cable” combined support; slope wedge shape

收稿日期: 2024-04-23

作者简介: 易放辉 (1971—), 男, 高级工程师, 从事水利水运工程项目管理工作。

沅水洪江—辰溪航道建设工程是湖南省“十四五”水运规划建设重点项目，按1 000吨级标准改建洪江枢纽船闸。不同于国内在已有船闸旁新建的传统施工工法，洪江改建船闸是在已建低等级船闸原址上改扩建为1 000吨级标准船闸的难点工程，也是湖南省首个27 m水头差的高水头单级船闸。值得注意的是，洪江枢纽改建船闸右侧边坡高度达25.0~45.0 m，属于高陡边坡，这在以河船闸边坡低于15 m的中、小标准为主的中东部地区极为少见。因此，项目建设中如何结合地形地貌、地质条件、结构施工以及地基防渗等多因素综合确定有针对性的高边坡支护措施，降低工程危害和消除安全隐患成为亟待解决的问题。

目前，多级高边坡在水利、交通等领域较为常见，工程上常采用锚喷、土钉墙、挡土墙、抗滑桩等支护方法。学者们围绕上述方法开展了较为丰富的研究，并在诸多工程中得到成功应用。胡巧艺等^[1]、徐振^[2]介绍挂网喷射混凝土、灌注桩等边坡支护方式，并提出深基坑施工有效控制措施；张永安等^[3]、高大水等^[4]对高边坡锚索的受力规律及加固效果开展研究，取得诸多实际成果；黄秋香等^[5]、赵欢等^[6]、李京榜等^[7]采用施工监测手段对高边坡支护结构内力、位移等开展分析，为边坡动态设计与施工提供依据，保证了边坡的施工安全；郭冬生^[8]、高大水^[9]研究锚固快速施工技术，论证锚固支护施工措施对控制边坡塑性变形具有良好效果。此外，近些年随着支护技术的发展，以“框格梁+预应力锚索”组合的支护技术也在高边坡防护工程中得到推广应用，吴海燕^[10]、马林^[11]、张军辉等^[12]、赵常青等^[13]对该组合支护结构施工工艺及支护效应开展系统研究。然而，“框格梁+预应力锚索”这类成熟且实用的高边坡支护措施主要集中在水利枢纽、高速公路等工程领域，对于复杂环境下改建船闸高边坡施工的应用则较少。因此，依托洪江枢纽改建船闸右侧高陡边坡工程，开展复杂环境下改建船闸高陡边坡组合支护技术（“框格梁+预应力锚索”）研究具有重要的实用价值和研究意义。

本文以湖南省首个在建27 m高水头洪江枢纽改建船闸为背景，系统阐述船闸建设重难点和高边坡开挖施工方案，提出针对性高边坡支护加固措施，并通过位移变形、锚索内力监测数据对高边坡防滑加固效果进行分析评价，以期为类似施工作业面狭窄、地质条件复杂的改建船闸高陡边坡支护工程设计与施工研究提供借鉴。

1 工程概况

洪江枢纽改扩建船闸闸址位于沅水右岸，处于沅水中上游干流河段，改扩建船闸左侧靠枢纽闸坝，右侧紧邻高25.0~45.0 m的公路永久边坡，属典型的山区船闸类型，施工平面布置如图1所示。洪江船闸上游最高通航水位190.00 m，下游最低通航水位163.0 m，最大水位差为27.0 m，为目前湖南在建船闸中水位差最大的项目。拟建工程总体呈南北走向，地貌单元以剥蚀构造中低山及低山丘陵为主，地面高程一般为160~550 m，坡度15°~25°，河谷多呈U形，两岸为低山、丘陵，河流冲、洪积阶地广布，局部为峡谷。



图1 施工平面布置

Fig. 1 Construction layout

2 船闸建设重难点分析

拟建船闸等级为Ⅲ级，在旧船闸位置进行改扩建，船闸有效尺寸为215 m×23 m×4.0 m（长度×宽度×门槛水深）。建设重难点主要为：1）船闸所处沅水右岸左侧与泄水闸、副坝相连，右侧紧邻枢纽管理区和洪黔国防公路，施工作业场地空间十分狭窄。洪江枢纽改建船闸右侧边坡高度达

25.0~45.0 m, 属于高陡边坡, 施工支护难度大。
 2) 船闸区域 2 条断层破碎带 F_1 、 F_2 内岩体破碎, 裂隙间多为砂泥质成分充填, 且发育多组陡倾角节理, 形成大量楔形体或不稳定岩块, 对拟建船闸闸室(首)及右岸边坡施工产生不利安全隐患。
 3) 改建船闸边坡主要为弱风化板岩, 覆盖层较薄且施工期边坡高度超过 50 m, 加之改建船闸距洪黔公路边线最近处不足 1 m, 施工期边坡稳定问题尤为突出。

3 高边坡施工方案

3.1 开挖方案

研究对象为沅水右岸洪黔国防公路旁新建上闸首及附近闸室段开挖边坡。洪江枢纽改扩建船闸闸址原地地面线至建基面高度为 46 m, 属于超高边坡, 拟采用二氧化碳静态致裂爆破技术进行石方开挖。开挖的高边坡为顺层、不稳定坡体, 施工中自上而下按 3 m 层距进行分层开挖, 严格按“开挖一层、支护一层”的循环工序执行, 每层开挖完成后, 进行锚杆锚索边坡支护、排水沟施工, 再进行下一分层开挖。由于上闸首、闸室段岸侧边坡受紧邻公路及施工场地限制, 根据设计方案, 岩质边坡开挖坡比从下至上依次为 1:0.3、1:0.25、1:0.2, 各层间马道宽度均为 1.5 m, 边坡开挖见图 2。

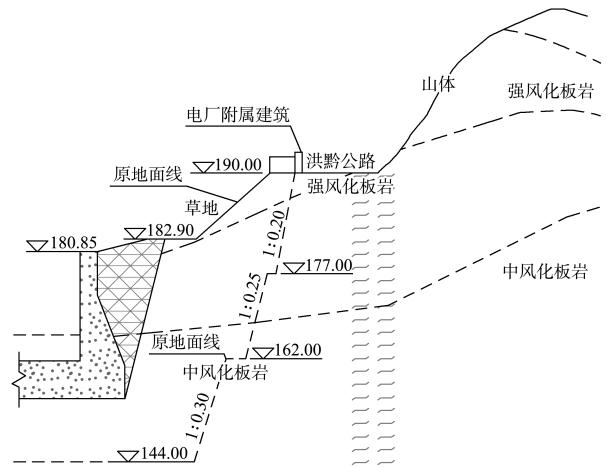


图 2 边坡开挖 (单位: m)

Fig. 2 Slope excavation (unit: m)

3.2 支护加固方案

由于边坡存在外倾结构面和不稳定的楔形体, 大面积开挖后会造局部掉块、崩塌、楔形体滑移。为确保船闸施工中高边坡安全稳定, 采用“框格梁+预应力锚索”组合支护措施。断面设计如图 3 所示上闸首和 1#、2# 闸室右侧边坡锚索按矩形布置。每根锚索采用 $7 \times 7 \phi 15.20$ mm 高强度低松弛预应力钢绞线, 抗拉强度设计值 $f_{py} = 1\ 320$ MPa, 抗拉强度标准值 $f_{ptk} = 1\ 860$ MPa, 横截面面积 $A_s = 140$ mm², 锚索倾角 10°, 锚固段长度为 6.0、3.5 m, 自由段长度为 6、8、10、12、20 m, 垂直方向交错布置, 设计张拉力 1 000 kN, 设计锚固力为 800 kN, 钢材强度利用系数为 0.49。

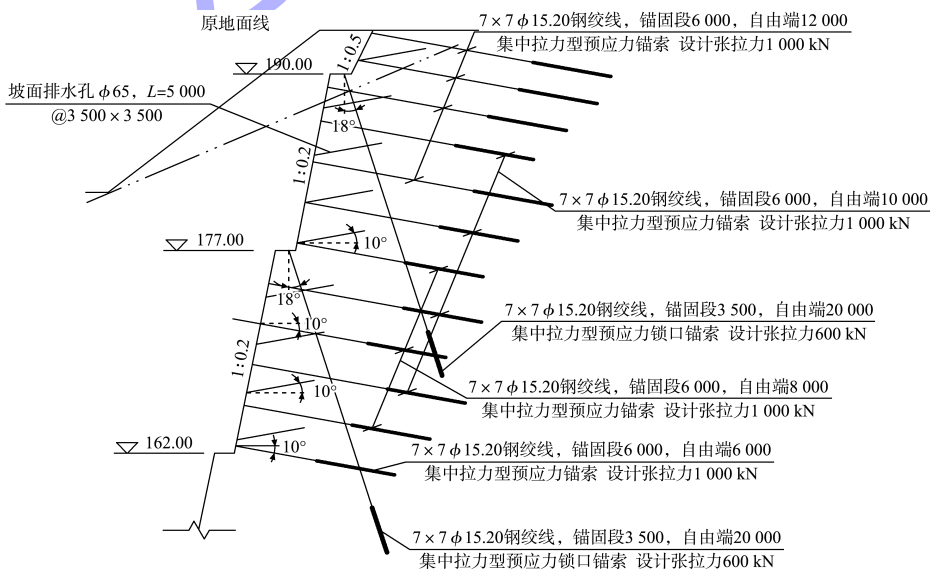


图 3 “框格梁+预应力锚索”组合支护断面 (高程: m; 尺寸: mm)

Fig. 3 Combined support section of “frame beam+prestressed anchor cable” (elevation: m; size: mm)

3.3 稳定性及破坏模式分析

3.3.1 边坡稳定性分析

洪江枢纽船闸改造工程主要分布在靠右岸水域，右岸公路侧现已存在高岩质边坡。该段边坡处于构造剥蚀残丘地貌单元，呈陡坡台阶状，左侧为河床、岸坡，右侧坡顶部为洪黔公路，公路高程 192.00~197.00 m，坡下为原船闸，基底面高程为 150.50~161.00 m，地势起伏较大，自然坡度约 30°，既有边坡现状稳定，基岩裸露。整个坡体走向顺河向，倾向河床。上闸首上游侧为顺层坡，为不稳定坡体，存在外倾结构面和不稳定的楔形体，大面积开挖后局部可能掉块、崩塌或楔形体滑移。

3.3.2 边坡破坏模式分析

边坡岩层倾向坡外，为顺向坡，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，且边坡位于河水位高程以下，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移。

3.4 稳定性计算

3.4.1 基本参数

基坑开挖后边坡土层主要为素填土、强风化板岩和中风化板岩。素填土密度 $\rho_1 = 2\ 000\ \text{kg/m}^3$ 。强风化岩密度 $\rho_2 = 2\ 700\ \text{kg/m}^3$ ，内摩擦角 $\varphi = 20.0^\circ$ ，黏聚力 $c = 25\ \text{kPa}$ ，锚固体极限黏结强度标准值为 400 kPa。中风化岩密度 $\rho_3 = 2\ 750\ \text{kg/m}^3$ ，锚固体极限黏结强度标准值为 1 000 kPa。右侧边坡面层 $\varphi = 32.0^\circ$ ， $c = 100\ \text{kPa}$ ；节理面 $\varphi = 26.0^\circ$ ， $c = 80\ \text{kPa}$ ；存在最不利节理面的倾角为 63° ，倾向船闸。上游边坡软弱夹层 $\varphi = 18.0^\circ$ ， $c = 35\ \text{kPa}$ ；存在最不利层面的倾角为 50° ，倾向下游。

3.4.2 计算荷载

在稳定性计算中，滑动体自重力按滑动面以内岩石重力取值；洪黔公路上大型车辆通过，交通荷载为 $40\ \text{kN/m}^2$ ，宽度为 8.0 m；根据地下水位线，假定整个滑动面裂隙充满裂隙水，作用力按

垂直于滑动面进行设置。

3.4.3 典型岩质边坡断面计算

右岸边坡顶为洪黔国防公路，公路右侧存在较高山体，当施工期基坑开挖成形时边坡稳定性处于最不利状态。根据边坡布置情况和地质情况，选取右岸公路旁上闸首边坡、第一闸室段边坡、上闸首上游边坡等具有代表性的典型断面进行边坡的稳定性计算，见图 4。

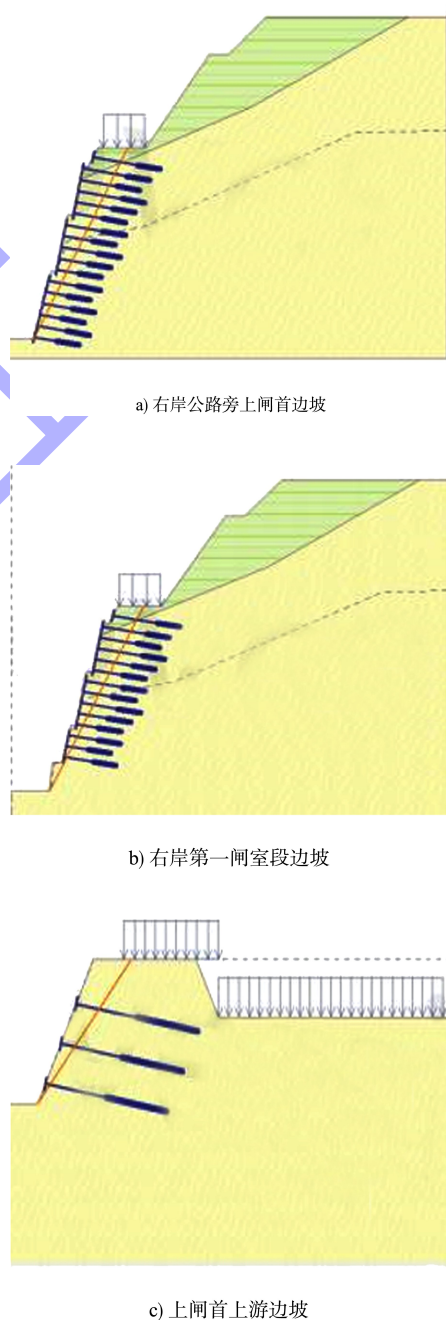


图 4 典型边坡计算断面

Fig. 4 Calculation sections of typical slopes

采用极限平衡法计算岩质边坡抗滑稳定系数, 并与《水电工程边坡设计规范》中 A 类 II 级边坡抗滑稳定安全系数允许值(应大于 1.25)进行对比, 计算结果见表 1。

表 1 边坡安全系数
Tab.1 Slope safety factor

断面部位	安全系数	
	计算值	允许值
右岸公路旁上闸首边坡	1.33	1.25
右岸第一闸室段边坡	1.40	1.25
上闸首上游边坡	1.31	1.25

由表 1 可知, 右岸公路旁上闸首边坡安全系数计算值为 1.33, 右岸第一闸室段边坡安全系数计算值为 1.40, 上闸首上游边坡安全系数计算值为 1.31, 均大于规范中安全系数允许值 1.25, 满足规范要求, 说明高边坡加固方案设计合理。

4 高边坡支护施工效果评价

4.1 变形监测分析

为确保船闸施工期间既有建筑、新建建筑结构稳定安全, 验证“框格梁+预应力锚索”组合支护结构对楔形体滑动控制效果, 爆破开挖中对船闸典型边坡段坡顶水平位移、沉降位移开展适时监测, 监测周期为每天 1 次, 遇冬雨季施工等特殊时段, 检测周期加密至每天 2 次。研究采用 2023-11-01—2023-11-30 右岸公路旁上闸首、第一闸室段 190m 高程处 12 个测点边坡变形数据开展分析, 变形监测结果见表 2。

由表 2 数据可知, 本期监测的沉降变形日均最大值为 0.34 mm/d, 远小于日均报警值 3 mm/d; 本期累计沉降最大值 8.3 mm, 远小于累计沉降值 20 mm 的报警值; 本期累计位移变形最大值 10.0 mm, 远小于累计位移变形量 30 mm 的报警值^[14]。由此可知, 洪江改扩建船闸施工组织设计、边坡爆破分层开挖、“框格梁+预应力锚索”组合支护结构对抑制楔形体滑块移动起到良好的效果, 高边坡在施工期处于比较安全合理的状态。

表 2 洪江改扩建船闸上闸首、闸室段边坡变形监测结果
Tab.2 Slope deformation monitoring results of upper lock head and lock chamber section of Hongjiang reconstruction and expansion ship lock

测点编号	日均值/ (mm·d ⁻¹)	累计沉降值/ mm	累计位移 变形值/mm	是否达到 预警值
1	0.10	2.6	4.5	否
2	0.15	3.2	4.8	否
3	0.16	4.6	5.3	否
4	0.13	2.8	4.3	否
5	0.19	4.5	6.1	否
6	0.20	4.0	6.6	否
7	0.22	5.8	7.4	否
8	0.24	6.8	7.4	否
9	0.34	8.2	10.0	否
10	0.30	8.3	9.0	否
11	0.24	7.5	7.8	否
12	0.23	6.7	8.6	否

4.2 锚索内力监测分析

施工期在各典型边坡断面上对“框格梁+预应力锚索”组合结构内力开展监测, 适时分析结构受力状态, 并根据锁定损失情况及时调整锚索布局, 以确保支护结构对楔形体边坡充分发挥防滑稳定功能。监测周期为前 10 d 每天监测 1 次; 11~30 d 每 3 d 监测 1 次; 30 d 之后每月监测 1 次。当遇冬雨季、临近边坡开挖、相邻锚索张拉、其他数据异常时加密监测频率。研究采用 2023-11-01—2023-11-30 右侧公路旁上闸首、第一闸室段 177~190 m 高程区间内 6 个监测点内力数据开展分析, 内力监测数据结果见表 3。

表 3 锚索结构内力监测结果
Tab.3 Internal force monitoring results of anchor cable structure

测点编号	最小值/kN	最大值/kN	是否达到预警值
1	875	910	否
2	810	835	否
3	816	832	否
4	814	828	否
5	805	810	否
6	730	775	是

从表 3 数据可知, 上闸首、闸室段 177~190 m 高程区间内 6 个测点整体受力理想, 5 个测点超过 800 kN 设计锚固力限值、小于 1 000 kN 设计张拉

力限值, 支护结构充分发挥张拉锚固作用。同时, 钢筋受力在正常弹性范围内, 6号测点监测最大值低于设计锚固值达到预警状态, 分析原因是现场施工安装误差和锁定损失过大导致, 但上闸首高陡边坡断面位移监测数据均在容许范围内, 边坡未产生失稳, 单个数据异常影响较小, 抑制楔形体滑动作用显著。后续施工及运营期将重点关注该测点的数值变化, 在考虑边坡变形稳定的前提下增加锚索监测点布局, 及时调整锚索位置, 逐步排除单一测点的监测异常, 以求反映整体锚索的真实应力状态。边坡支护施工效果如图5所示。



图5 “框格梁+预应力锚索”支护效果
Fig.5 Supporting effect of
“frame beam+prestressed anchor cable”

综上所述, 通过变形及锚索内力监测数据分析可知, “框格梁+预应力锚索”组合支护控制楔形体滑动作用显著, 开挖未对边坡整体沉降变形产生显著的影响, 边坡整体处于比较安全稳定的状态。

5 结论

1) 船闸多级高边坡开挖、支护施工中, 对边坡变形和结构内力开展及时监测, 可依据变形变化情况对楔形体滑动采用针对性施工加固, 确保边坡安全稳定。

2) 对多级高边坡坡面沉降变形监测分析, 变形日均最大值为0.34 mm/d, 累计沉降位移最大值8.3 mm, 远小于日均报警值3 mm/d、累计沉降值20 mm的报警值; 对支护结构内力监测分析, 支护结构主要承受拉力作用且数值较小, 最大拉力小于1 000 kN的设计限值, 钢筋受力在正常弹性

范围内。据此可知, 船闸高边坡支护结构设计布局合理, 边坡“框格梁+预应力锚索”组合支护对抑制边坡楔形体滑动效果良好。

3) 后续工程实践中应充分总结和吸收该支护技术的应用经验, 进一步做好锚索用量设计优化, 综合考虑支护效果和造价控制, 减少非必须成本投入, 以促进该支护技术在同类工程中的进一步科学广泛应用。

参考文献:

- [1] 胡巧艺, 周绍维. 北江某船闸工程深基坑边坡支护施工技术[J]. 工程技术研究, 2022, 7(16): 74-76.
HU Q Y, ZHOU S W. Research on construction technology of deep foundation pit of a ship lock project in Beijiang[J]. Engineering technology research, 2022, 7(16): : 74-76.
- [2] 徐振. 水运工程中船闸深基坑的施工技术[J]. 中国科技信息, 2021(16): 58-59.
XU Z. Construction technology of deep foundation pit of ship lock in waterway engineering[J]. China science and technology information, 2021(16): 58-59.
- [3] 张永安, 李峰, 蒋鸥. 泥岩高边坡锚索预应力变化规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1888-1892.
ZHANG Y A, LI F, JIANG O. Analysis of prestress variation of cable in mudstone high slope reinforcement [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2007, 26(9): 1888-1892.
- [4] 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.
- [5] 黄秋香, 汪家林, 邓建辉. 基于多点位移计监测成果的坡体变形特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 2667-2673.
HUANG Q X, WANG J L, DENG J H. Slope deformation character analysis based on monitoring results of multiple multi-point borehole extensometer[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2009, 28(1): 2667-2673.

- [6] 赵欢,李东升.某公路高边坡施工监测分析[J].公路工程,2014,39(5):63-67.
ZHAO H, LI D S. A highway high slope monitoring analysis of construction [J]. Highway engineering, 2014, 39(5): 63-67.
- [7] 李京榜,朱彦鹏,叶帅华,等.某二级高边坡健康监测试验研究与分析[J].岩土工程学报,2018,40(S1):129-134.
LI J B, ZHU Y P, YE S H, et al. Health monitoring tests on a secondary high slope [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2018, 40(S1): 129-134.
- [8] 郭冬生.三峡船闸高边坡锚固施工技术[J].人民长江,2008,39(7):6-7,82,89.
GUO D S. Construction technology of high sideslope anchoring of construction for TGP's shiplock [J]. Yangtze River, 2008, 39(7): 6-7, 82, 89.
- [9] 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 slope for Three Gorges permanent shiplocks [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2009, 28(6): 93-99.
- [10] 吴海燕.高速公路中锚杆框格梁高边坡防护施工技术应用分析[J].散装水泥,2024(2):56-58.
WU H Y. Application analysis of high slope protection construction technology of anchor frame beam in expressway [J]. Bulk cement, 2024(2): 56-58.
- [11] 马林.锚杆框格梁高边坡防护施工技术在高速公路中的应用[J].北方建筑,2023,8(2):23-26.
MA L. Application of high slope protection technology of anchor frame lattice beam in expressway [J]. Northern architecture, 2023, 8(2): 23-26.
- [12] 张军辉,周勤伟,黎峰等.框架梁锚固边坡支护结构研究进展综述[J].中外公路,2023,43(3):17-23.
ZHANG J H, ZHOU Q W, LI F, et al. Review on research progress of frame beam anchored slope support structure [J]. Sino-foreign highway, 2023, 43(3): 17-23.
- [13] 赵常青,樊占东,冉黎明,等.破碎岩土高边坡锚索锚杆框格梁支护施工工艺[J].公路,2023(5):50-53.
ZHAO C Q, FAN Z D, REN L M, et al. Construction technology of anchor cable anchor frame beam support for broken rock and soil high slope [J]. Highway, 2023(5): 50-53.
- [14] 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初步设计[R].长沙:湖南省交通规划勘察设计院有限公司,2022.
Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd. Preliminary design of Yuanshui Hongjiang Chenxi waterway construction project [R]. Changsha: Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., 2022.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第183页)

- [7] 俞聿修.随机波浪及其工程应用[M].大连:大连理工大学出版社,1992.
YU Y X. Random wave and its engineering application [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1992.
- [8] 季新然,邹丽,柳淑学,等.多向不规则波浪作用下群墩结构所受波浪力的实验研究[J].工程力学,2019,36(10):238-243.
JI X R, ZOU L, LIU S X, et al. Experimental study on the multidirectional wave force on an array of cylinders [J]. Engineering mechanics, 2019, 36(10): 238-243.
- [9] 王爱群,徐立论.小直径组合桩的波浪力实验分析[J].海洋湖沼通报,2002(1):9-17.
WANG A Q, XU L L. Wave forces on arrays of small diameter cylinders [J]. Transactions of oceanology and limnology, 2002(1): 9-17.
- [10] 张其一,刘道发,何城宽.波流耦合下桩周珊瑚砂冲刷机理研究[J].海洋通报,2022,41(5):582-587.
ZHANG Q Y, LIU D F, HE C K. Study on scour mechanism of coral sand around pile due to wave and current coupling action [J]. Marine science bulletin, 2022, 41(5): 582-587.
- [11] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司.高桩码头设计与施工规范:JTS 167-1—2010[S].北京:人民交通出版社,2010.
CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd. Design and construction code for open type wharf on piles: JTS 167-1-2010 [S]. Beijing: China Communications Press, 2010.

(本文编辑 王璁)