

DOI: 10.7672/sgjs2025110107

水下文物保护工程中抗滑桩施工技术研究*

牛文庆^{1,2,3,4,5}, 吴冠仲^{2,3,4,5}, 张小兵^{2,3,4,5}, 柳 杨^{2,3,4,5}

(1. 中国铁道科学研究院, 北京 100081; 2. 中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730030;
3. 甘肃中铁建设工程有限公司, 甘肃 兰州 730030; 4. 石窟寺文物保护工程技术集成与应用研究国家文物局
重点科研基地, 甘肃 兰州 730030; 5. 甘肃省岩土文物保护工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730030)

[摘要] 以皎平渡渡口及山洞遗址水下文物保护工程为背景, 探讨水下文物保护工程保护措施, 研究临江高水位抗滑桩施工技术 and 安全措施。研究结果表明, 皎平渡渡口及山洞遗址水下文物保护工程采用围堰式外支内撑结构的保护措施较适宜, 临江高水位水下抗滑桩开挖工程采用旋挖钻+人工+爆破的施工工艺较适宜, 可提高施工效率, 达到了工程预期效果。

[关键词] 文物保护; 抗滑桩; 监测; 安全措施; 施工技术

[中图分类号] TU753.3

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)11-0107-05

Technology of Anti-slide Pile in Underwater Cultural Relics Protection

NIU Wenqing^{1,2,3,4,5}, WU Guanzhong^{2,3,4,5}, ZHANG Xiaobing^{2,3,4,5}, LIU Yang^{2,3,4,5}

(1. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China;

2. Northwest Research Institute Co., Ltd. of China Railway Engineering Co., Lanzhou, Gansu 730030, China;

3. Gansu Construction Engineering Ltd. Co. of China Railway Engineering Co., Lanzhou, Gansu 730030, China;

4. Key Scientific Research Base of Research of Technology in Integrations and Application of Grottos Conservation,
State Administration for Cultural Heritage, Lanzhou, Gansu 730030, China;

5. Gansu Engineering Technical Research Centre in Geotechnical Cultural Relics Protection, Lanzhou, Gansu 730030, China)

Abstract: Based on an underwater cultural relics protection project of the Jiaopingdu Ferry and Cave Ruins, this paper discusses the protection measures of an underwater cultural relics protection project and studies the construction technology and safety measures of anti-slide piles with a high water level near the river. The research results indicate that the protection measures of cofferdam-type external support and internal support structure are more suitable for the underwater cultural relics protection project of the Jiaopingdu Ferry and Cave Ruins. The construction technology of rotary drilling, manual and blasting construction technology is more suitable for the excavation project of an underwater anti-slide pile with a high water level near the river, which can improve the construction efficiency and achieve the expected effect of the project.

Keywords: cultural relics protection; anti-slide pile; monitoring; security assurance; construction

0 引言

抗滑桩是岩土工程常见的边坡支挡结构, 因其支挡效果良好, 被广泛应用于工程建设中^[1]。黄之翀^[2]研究了山区铁路工程抗滑桩施工技术, 从质量、安全和技术等方面对抗滑桩施工工艺进行了研

究。程盛^[3]研究了水钻取芯法进行边坡大断面矩形抗滑桩施工工艺, 并提出了施工质量控制要点。曹树强等^[4]结合重庆地区抗滑桩施工项目, 研究了小截面矩形抗滑桩施工工艺。王龙飞等^[5]以山西煤矿某变电站滑坡治理项目为对象, 研究了抗滑桩开挖专用机械设备, 并将研发机械设备应用于抗滑桩施工中。毛群龙等^[6]结合边坡水毁治理项目研究了传统开挖式抗滑桩和非开挖式微型桩施工工艺, 并对比了二者的优劣。张镇平^[7]结合水电站工程研究了旋挖工艺在抗滑桩施工中的应用, 确保了

* 中铁西北科学研究院课题(2019XBK01, 2023XBK02); 中铁科学
研究院课题(2020-KJ001-Z001-A1, 2018-KJ018-Z014-XB)

[作者简介] 牛文庆, 博士研究生, 高级工程师, E-mail: niuwqing_1@163.com

[收稿日期] 2025-01-05

施工安全。上述学者主要针对抗滑桩施工工艺进行研究,并结合实际项目验证了各类施工工艺的合理性和优越性。但针对水下文物保护工程临江高水位水下抗滑桩施工技术 and 安全措施的研究较少。

本文以水下文物皎平渡渡口及山洞遗址保护工程为背景,研究了水下文物保护工程中临江高水位抗滑桩施工技术 and 安全保障措施。

1 工程概况

1.1 文物概况

皎平渡渡口及山洞遗址由 1 段穿洞和 8 个山洞组成。穿洞长 56m、宽 1.5m、高 1.6~1.8m,形如隧道,包括 2 段修复段及 1 段坍塌露天段。穿洞西南面分布有坐北向南的山洞 3 个,内部分布坐西向东的山洞 3 个,东北面分布坐南向北的山洞 5 个。

皎平渡渡口及山洞遗址位于金沙江新建乌东德水电站的上游,绝对高程为 875.000m,处于乌东德水电站水库淹没区正常蓄水位 975m 以下。乌东德水电站蓄水后,皎平渡渡口及山洞遗址将被淹没,淹没深度达 104m。皎平渡渡口及山洞遗址全貌如图 1 所示。

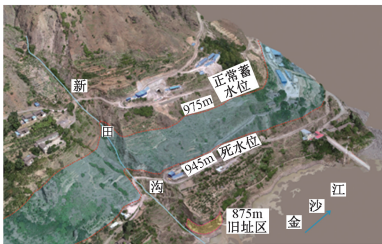


图 1 皎平渡遗址航拍

Fig.1 Aerial photo of Jiaopingdu Site

皎平渡渡口及山洞遗址区域属亚热带季风气候区,主要特点是日照时间长、蒸发量大、雨量集中、干湿季分明等。遗址处于金沙江 V 字形河谷陡崖岸坡。皎平渡遗址江边枯水期高程 870.000m,该区内江水流向呈 NE20°,江水流向于前部河口处发生明显转向,逐渐变为 N90°。江面平均宽度为 125m,最窄处为 74m。出露地层为第四系地层和中元古界前震旦系天宝山组地层。第四系地层较复杂,各种成因地层相互混杂,主要有崩坡积堆积物、夹冲洪积和泥石流堆积物。中元古界前震旦系天宝山组地层以板岩、千枚岩为主,岩层反倾坡内倾角为 49°。该遗址地质构造复杂,工程区内伴生断层发育,岩体内褶皱、柔褶现象明显,根据 GB 18306—2023《中国地震动参数区划图》,皎平渡渡口及山洞遗址位于青藏地震区鲜水河—滇东地震带内,为强烈的地震活动带,地震活动强度大、频率

高。设防水准为 50 年超越概率 10%,地震动峰值加速度为 0.10g,地震基本烈度为Ⅶ度,地震动反应谱特征周期为 0.45s。

1.2 工程保护措施

为了对皎平渡渡口及山洞遗址进行科学合理地保护,经国家文物局、四川省文物局等审批同意,拟对原址进行保护性加固和回填保护,同时在淹没线以上的区域选择科学、合理的地点对遗址进行复原展示。

皎平渡渡口及山洞遗址水下保护采用围堰式外支内撑结构。依次进行坡体结构稳定性加固、文物载体稳定性加固、文物本体稳定性加固,封护加固理念为多重防护、保护结构集成、安全度冗余设计,以改性岩土体物理力学参数为主,防水渗透为辅。采用抗滑桩对山洞遗址所在坡体中部进行支挡加固,保证坡体稳定性。坡体注浆加固及裂隙注浆充填,以改良坡体岩土物理力学参数,提高其稳定性。再次在山洞所在坡体的坡脚设置桩板墙,以抵抗库水压力,并对山洞所在坡体崖面封护隔离、延缓库水渗透。同时在山洞四周设置防渗帷幕,延缓库水进入山洞所在坡体的时间,保证山洞赋存载体有充足的时间进一步固化和胶结。此外,在坡体上表面设置钢筋混凝土防渗保护层,以减小库水在山洞所在坡体上表面的渗透速率、延缓渗透时间、减弱库水对坡体表面的冲刷和浸泡。同时在防渗保护层上设置锚杆,抵抗水库蓄水过程中库水对防渗保护层的浮托作用。防渗保护层与抗滑桩、桩板墙、防渗帷幕有效连接,构成围堰式外支结构。遗址本体内部采用内支撑结构进行保护,山洞支撑采用钢拱架支撑和碎块石土回填注浆措施。遗址本体支护构成内撑式结构,最终形成围堰式外支内撑结构,如图 2 所示。

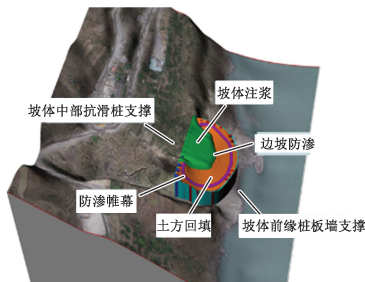


图 2 皎平渡遗址工程保护措施

Fig.2 Protection measures for Jiaopingdu Site

2 水下抗滑桩开挖施工技术

2.1 抗滑桩布置

皎平渡渡口及山洞遗址保护工程中,围堰式外

支结构共设置 A、B 型抗滑桩,桩身均采用 C50 混凝土浇筑,桩身均设置锁口、护壁和爬梯,锁口和护壁采用 C20 混凝土现浇。抗渗等级为 P12,防腐等级为高级。

A 型抗滑桩为山洞所在坡体坡脚设置的桩板墙,布设于山洞遗址赋存坡体北、东、南临空三面;抗滑桩在平面呈圆弧形布设,共 22 根,桩截面尺寸为 2m×3m,桩长 36m,桩间距 6m。B 型抗滑桩为坡体中部支挡加固抗滑桩,在平面呈单排布设,共 14 根,桩截面尺寸为 2m×3m,桩长 35m,桩间距 6m。抗滑桩布置如图 3 所示。

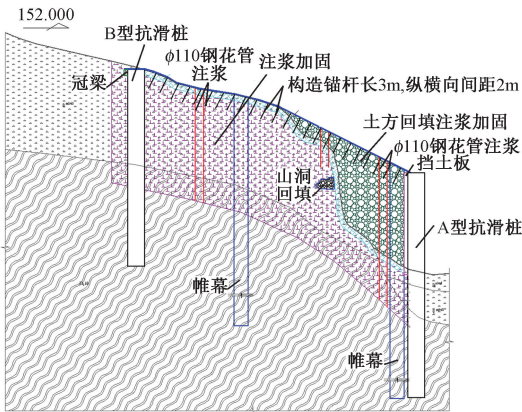


图 3 抗滑桩布置

Fig. 3 Layout profile of anti-slide piles

2.2 抗滑桩施工技术

较平渡渡口及山洞遗址水下文物保护工程中,抗滑桩施工工艺主要采用人工开挖、人工+爆破组合开挖和旋挖钻+人工+爆破组合开挖方式。人工开挖方式为抗滑桩施工过程中人工以风镐、风钻,先中间后周边开挖桩身,提升机吊运出渣,主要用于桩身堆积层土体的开挖。

抗滑桩施工过程中,遇坚硬岩层,采用人工+爆破的组合开挖方式,采用小药量控制爆破法开挖桩身,辅以提升机吊运出渣。桩身开挖断面尺寸 2.5m×3.5m,布置掏槽孔 8 个,均匀布置于截面中心,间距 0.5m,孔深 0.65m;掏槽孔中心布置空孔 1 个,空孔位于截面几何中心,孔深 0.7m;周边孔 20 个,均匀布置于截面边界,间距 0.5m,孔深 0.6m;辅助孔 4 个,均匀布置于掏槽孔两侧,孔深 0.6m,所有炮孔垂直布设,如图 4 所示。每炮开挖 0.4~0.6m,人工出渣。设计循环进尺 0.6m,炮眼利用率 85%。每次爆破 1 个循环,爆破完成后立即出渣,2 个爆破循环后浇筑护壁,往后如此循环。掏槽孔、辅助孔、周边孔均采用 φ32 二号岩石乳化炸药(长 0.2m, 200g/卷),掏槽孔单孔装药 0.1kg,总药量 0.8kg;辅助孔

单孔装药 0.1kg,总药量 0.4kg;周边孔单孔装药 0.09kg,总药量 1.8kg;空孔不装药。

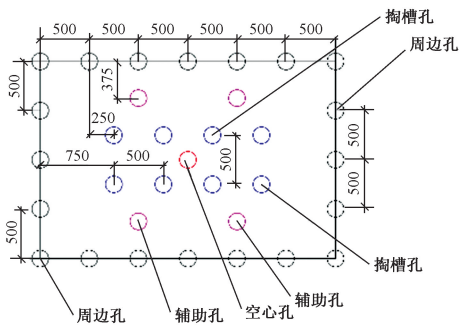


图 4 人工+爆破方式炮孔布置平面

Fig. 4 Layout of manual and blasting blastholes

较平渡渡口及山洞遗址水下文物保护工程中,抗滑桩施工期间正值金沙江汛期,临江侧 A 型抗滑桩桩顶标高均位于最高洪水位以下。为防止江水上涨灌入桩坑,同时为进一步提高抗滑桩施工效率,A 型抗滑桩采取旋挖钻+人工+爆破开挖的施工工艺,桩身开挖断面尺寸为 2.5m×3.5m,利用旋挖钻旋挖 φ180 钻孔,旋挖孔位于桩身断面几何中心,孔深 1.0m,旋挖孔钻设完成后,孔内安放水泵降水。旋挖孔周边人工手持风钻钻孔,以备爆破。旋挖孔周边布置掏槽孔 4 个,均匀分布于旋挖孔外围断面中心,间距 0.5m,深度 0.65m;布置周边孔 18 个,分布于桩身边界,间距 0.5~1m,孔深 0.6m;掏槽孔采用 φ32 二号岩石乳化炸药(长 0.2m, 200g/卷),单孔装药 0.1kg,辅助孔采用 φ32 二号岩石乳化炸药(长 0.2m, 200g/卷),单孔装药 0.1kg,所有炮孔垂直布置。钻孔完成后,人工装药、堵塞、非电毫秒雷管起爆。起爆前将旋挖孔内水泵吊出,起爆后利用旋挖钻在桩内进行提土吊渣,并进行下一循环旋挖钻孔及爆破。2 个循环后浇筑护壁,往后如此循环。爆破孔及旋挖孔布置如图 5 所示。

2.3 抗滑桩开挖施工技术效果评价

抗滑桩施工过程中,先后采用了人工、人工+爆破和旋挖钻+人工+爆破的施工工艺,对比 3 种工艺的开挖进度,桩井开挖以竖向 1m 为对比标准,3 种开挖方式开挖 1m 的时间对比如图 6 所示。

由图 6 可知,抗滑桩开挖施工过程中,金沙江水位上涨时,人工开挖和人工+爆破开挖方式均会延长工期,人工开挖方式在水位上涨时较水位不涨时工期延长 6d,人工+爆破开挖方式在水位上涨时较水位不涨时工期延长 5d;水位上涨时人工较人工+爆破的开挖方式工期延长 3d,水位不涨时人工较人工+爆破的开挖方式工期延长 2d。综合对比可知,

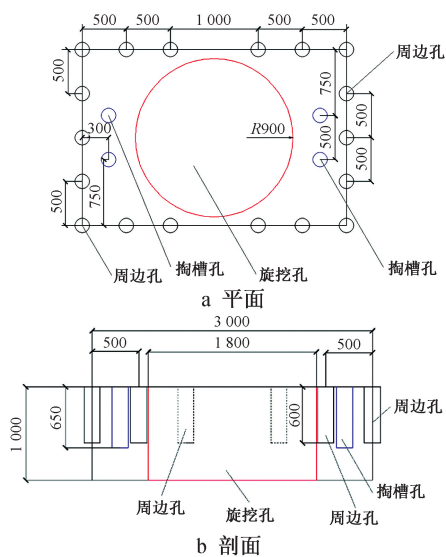


图 5 旋挖钻+人工+爆破炮孔布置

Fig. 5 Layout of rotary drilling, manual and blasting blastholes

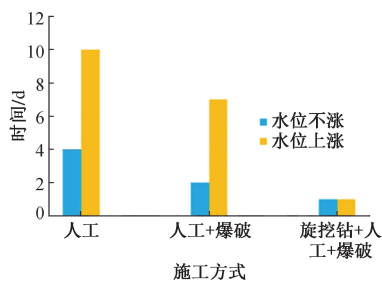


图 6 水下抗滑桩开挖方式工效对比

Fig. 6 Comparison of efficiency of excavation methods for underwater anti-slide piles

金沙江水位上涨时,抗滑桩施工效率降低。

在水位上涨和水位不涨时,旋挖钻+人工+爆破的开挖方式工期均为 1d,说明金沙江水位涨落与否对旋挖钻+人工+爆破的开挖方式没有影响。钻挖钻+人工+爆破的开挖方式能提高抗滑桩施工作业效率,该方法较人工开挖方式和人工+爆破开挖方式具有优越性,对水下文物保护工程中抗滑桩施工较适用,能够达到工程预期效果。

3 水下抗滑桩施工安全技术措施

3.1 止水帷幕设置

A 型抗滑桩 A6~A17 桩身岩层破碎,抗滑桩开挖至金沙江水位以下时,江水渗透严重,桩内降水无效,抗滑桩无法施工。为保障抗滑桩施工顺利进行,沿 A 型抗滑桩 A6~A17 设置 2 道高压旋喷桩止水帷幕。高压旋喷桩止水帷幕分为外围旋喷桩止水帷幕和桩井周边旋喷桩止水帷幕。外围旋喷桩止水帷幕沿金沙江江边布置,作为第 1 道江水渗透防护帷幕。旋喷桩钻孔孔径 110mm,间距 1m,帷幕

底标高与桩底标高相同,注入水和水泥为 1:1 的纯水泥浆;桩井周边旋喷桩止水帷幕钻孔孔径 110mm,间距 1m,帷幕底标高为-5.000m,注入水和水泥为 1:1 的纯水泥浆,布置在 A6~A17 抗滑桩左侧、右侧和外侧,作为第 2 道江水渗透防护帷幕。高压旋喷桩止水帷幕平面布置如图 7 所示。

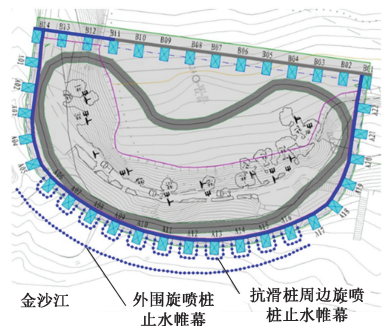


图 7 旋喷桩止水帷幕平面布置

Fig. 7 Layout of jet grouting pile stop-water curtain

2 道旋喷桩止水帷幕布设完成后,金沙江江水渗透速率减小,抗滑桩施工顺利进行,表明 2 道旋喷桩止水帷幕防渗效果较好,能作为水下文物保护工程中抗滑桩施工的重要安全保障措施。

3.2 爆破振动监测

抗滑桩施工过程中,为保证遗址及山洞的安全,研究爆破振动冲击波对皎平渡渡口山洞遗址的影响。采用 INV891-II 型振动传感器、INV3060s 型数据采集仪、DASP V10 型信号采集仪等进行监测。振动传感器分别埋设于遗址山洞内,爆破振动监测点最大振幅与距离关系曲线如图 8 所示。

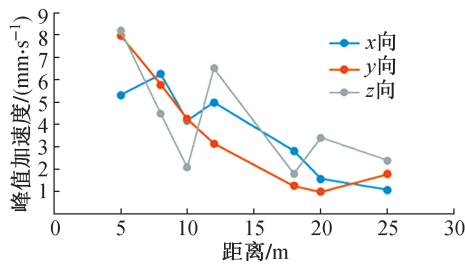


图 8 爆破振动监测点最大振幅与距离关系曲线

Fig. 8 Relationship curve between maximum amplitude and distance at blasting vibration monitoring points

由图 8 可知,x,y,z 向爆破振动冲击波峰值加速度分别为 6.27,7.99,8.22mm/s。本次抗滑桩桩井爆破开挖属于地下浅孔爆破,根据 GB 6722—2014《爆破安全规程》,爆破主振频率为 60~100Hz,土窑洞、土坯房、毛石房屋爆破振动峰值加速度为 9~15mm/s。本次抗滑桩桩井爆破开挖,各爆破监测点爆破振动冲击波峰值加速度均<9mm/s,表明本次抗

滑桩桩井爆破产生的爆破冲击波对山洞遗址的影响处于可控范围内,文物遗址本体处于安全状态。同时也表明爆破振动监测可为抗滑桩施工安全控制提供依据,可作为水下文物保护工程抗滑桩施工的安全保障措施。

3.3 有限空间气体监测

水下抗滑桩开挖属于有限空间作业,随着开挖深度的增加,氧气不足及各种有害气体等可能对桩内人员造成严重伤害,需进行桩内气体检测,检测指标包括氧气浓度值、易燃易爆物质浓度值、有毒气体浓度值等,检测无安全隐患后方可进行作业。皎平渡渡口及山洞遗址水下文物保护工程中,每根抗滑桩配备1台四合一气体检测仪,可对可燃气体甲烷、氧气、一氧化碳和硫化氢进行检测。

检测结果表明,整个桩井深度范围内各类气体含量保持稳定,其中氧气含量稳定保持在20%~22%,一氧化碳含量稳定保持在0~5ppm,硫化氢含量稳定保持在0~5ppm,易燃易爆物质含量稳定保持在0,均符合规范要求,说明施工过程中,整个桩井深度范围内各类气体含量均符合规范标准,抗滑桩开挖过程安全可控。

4 结语

1)皎平渡渡口及山洞遗址水下文物保护工程采用围堰式外支内撑结构的保护方案较为合适。

2)皎平渡渡口及山洞遗址水下文物保护工程中旋挖钻+人工+爆破的施工工艺,大幅提高了水下抗滑桩施工效率,快速完成了所有水下抗滑桩施工,达到了工程预期效果。

3)皎平渡渡口及山洞遗址临江侧水下抗滑桩施工过程中,外围注浆旋喷桩帷幕和抗滑桩周边注浆旋喷桩帷幕具有较好的防渗效果,减小了江水渗透速率,保障了抗滑桩施工安全。

参考文献:

[1] 杜华明,张建瑞. 抗滑桩施工方法的选择及适用范围[J]. 西部探矿工程,2018,30(4):1-3.
DU H M,ZHANG J R. Selection of anti-slide pile construction method and its scope of application[J]. West-China exploration engineering,2018,30(4):1-3.

[2] 黄之翀. 山区铁路工程路基抗滑桩施工技术[J]. 云南水力发电,2017,33(6):8-10.
HUANG Z C. Construction technology of anti-slide pile for subgrade of railway engineering in mountainous area[J]. Yunnan water power,2017,33(6):8-10.

[3] 程盛. 边坡矩形截面抗滑桩的施工技术与应用研究[J]. 公路,2018,63(9):76-79.
CHENG S. Study on construction technology and application of anti-slide pile with rectangular section on slope[J]. Highway, 2018,63(9):76-79.

[4] 曹树强,田原. 重庆大观园游客集散中心人工挖孔抗滑桩施工技术[J]. 施工技术,2019,48(S1):100-103.
CAO S Q,TIAN Y. Construction technology of manual digging anti-slide pile in Chongqing Daguan Garden Tourist Distribution Center[J]. Construction technology,2019,48(S1):100-103.

[5] 王龙飞,王海. 基于机械成孔的抗滑桩技术研究及应用[J]. 煤炭技术,2019,38(8):89-92.
WANG L F,WANG H. Research and application of anti-slide pile technology based on mechanical hole formation [J]. Coal technology,2019,38(8):89-92.

[6] 毛群龙,于岩. 传统开挖式抗滑桩与非开挖式微型桩优劣分析——以33省道边坡水毁治理项目为例[J]. 中国水运(下半月),2018(6):215-216.
MAO Q L,YU Y. Analysis on the advantages and disadvantages of traditional excavated anti-slide piles and non-excavated micro-piles—Taking the water damage control project of 33 provincial highway slope as an example [J]. China water transport, 2018 (6):215-216.

[7] 张镇平. 旋挖施工工艺在水电站抗滑桩施工中的运用分析[J]. 低碳世界,2020,10(7):44-45.
ZHANG Z P. Application and analysis of rotary excavation construction technology in anti-slide pile construction of hydropower station[J]. Low carbon world,2020,10(7):44-45.