

FRP材料在护坡工程中的应用研究

——基于铁甲水库山体护坡加固工程

刘祖瑞

辽宁承远水务科技有限公司

DOI:10.32629/hwr.v10i4.6981

[摘要] 纤维增强聚合物(FRP)作为一种高性能复合材料,因其高强度、轻质、耐腐蚀、耐疲劳等优异性能,在护坡工程中展现出广阔的应用前景。本文阐述了FRP材料的基本特性、在护坡工程中的主要应用形式(包括FRP锚杆、FRP铺板、FRP钢筋混凝土构件),对比分析了不同类型FRP材料的选型原则,并结合工程案例探究其应用效果。研究表明,FRP材料能够有效提高护坡工程的稳定性、耐久性和安全性,降低后期维护成本,符合绿色可持续发展的工程理念。同时,本文也探讨了FRP材料在推广应用中所面临的成本、规范、施工技术挑战,并提出了相应的发展建议。

[关键词] FRP材料; 护坡工程; 锚杆; 材料选型; 耐腐蚀; 边坡加固

中图分类号: U656.3 **文献标识码:** A

A Study on the Application of FRP Materials in Slope Protection Engineering

--Based on the Slope Reinforcement Project at Tiejia Reservoir
Zurui Liu

Liaoning Chengyuan Water Technology Co., Ltd.

[Abstract] Fibre-reinforced polymer (FRP), as a high-performance composite material, offers broad prospects for application in slope protection engineering due to its excellent properties, including high strength, light weight, corrosion resistance and fatigue resistance. This paper outlines the fundamental characteristics of FRP materials and their primary forms of application in slope protection engineering (including FRP anchors, FRP slabs and FRP-reinforced concrete components). It provides a comparative analysis of the selection principles for different types of FRP materials and examines their application effectiveness through engineering case studies. Research indicates that FRP materials can effectively enhance the stability, durability and safety of slope protection projects, whilst reducing long-term maintenance costs, thereby aligning with the engineering philosophy of green and sustainable development. Furthermore, this paper examines the challenges faced in the promotion and application of FRP materials, such as cost, standards and construction techniques, and proposes corresponding recommendations for future development.

[Key words] Frp Materials; Slope Protection Engineering; Anchor Bolts; Material Selection; Corrosion Resistance; Slope Reinforcement

引言

边坡稳定性问题是土木工程领域的重要研究课题。传统的护坡材料如钢筋、钢材在长期使用过程中易受腐蚀影响,导致结构性能退化,维护成本高昂。纤维增强聚合物(fiber reinforced polymer, FRP)材料作为一种新型复合材料,凭借其良好的力学性能和耐久性能,为护坡工程提供了新的解决方案。近年来,FRP材料在护坡工程领域得到了广泛应用。因此,本文基

于铁甲水库山体护坡加固工程,拟FRP材料在护坡工程中的应用加以研究,以便为工程实践提供参考。

1 工程概况

铁甲水库山体护坡加固工程位于辽宁省东港市铁甲水库库区附近。铁甲水库山体护坡(图1)为土石混合和强风化岩边坡,坡高7~10 m,坡度75°~85°,因长期受自然风化、雨水冲刷及人类活动影响,坡体表层出现多处裂缝、浮石及局部坍塌迹象,

对库区防洪墙和电站管理房及日常运行管理人员构成安全隐患。通过采用加筋型六边形双绞合钢丝网进行加固施工,可有效提高山体表层松散岩层的稳定性,遏制地质灾害发生,保障周边环境安全。然而,以钢丝绳锚杆为核心的锚固体系在长期服役过程中,受雨水渗透、土壤潮湿及地下水侵蚀等复杂环境因素影响,易发生电化学腐蚀,导致杆体截面削弱、力学性能退化,进而严重影响护坡加固工程结构的耐久性与服役寿命。而FRP锚杆的耐腐蚀性能、抗环境侵蚀能力及长期的力学稳定性,能够克服传统钢制锚杆在潮湿、酸碱等腐蚀性环境下的性能衰减缺陷,提升护坡加固工程的全生命周期安全性与可靠性。



图1 铁甲水库山体护坡

2 FRP材料类型及性能优势

2.1类型。FRP材料由纤维材料与基体材料(树脂)按一定比例复合而成,主要包括碳纤维增强聚合物(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)、玻璃纤维增强聚合物(glass fiber reinforced polymer, GFRP)、玄武岩纤维增强聚合物(basalt fiber reinforced polymer, BFRP)和芳纶纤维增强聚合物(aramid fiber reinforced polymer, AFRP)等类型。

表1 FRP材料类型对比

类型	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	主要特点	适用场景
CFRP	1 000~3 000	150~200	强度高、模量高、耐腐蚀性能优异,但成本较高	对强度要求较高、腐蚀环境严重的高端护坡工程
GFRP	300~500	20~40	价格相对较低,具有较好的力学性能和耐腐蚀性能,应用广泛	一般边坡防护工程
BFRP	400~700	30~50	以天然玄武岩为原料,具有良好的力学性能、耐高温性能和耐腐蚀性能,且环保无污染	对环保要求较高的边坡防护工程,以及高温、腐蚀等特殊环境下的护坡工程
AFRP	1 500~2 500	70~100	强度和模量较高,具有较好的抗冲击性能和韧性	对抗冲击性能和韧性要求较高的特殊工程

2.2性能优势。FRP材料在护坡工程中的应用主要得益于以下性能优势:①FRP材料的抗拉强度较高^[1],部分FRP材料的抗拉强度可达HRB400钢筋的1.5倍以上,能够有效承受拉应力,为护坡结构提供强大的支撑力。②FRP材料密度仅为钢材的1/4~1/5,在减轻结构自重的同时,降低了对边坡土体的压力,有利于边坡的稳定性。③FRP材料具有优异的耐腐蚀性能,能够抵御土壤中的酸碱、盐分等化学物质的侵蚀,以及水分、氧气等环境因素的影响,使用寿命长,减少了后期维护成本。④FRP材料在长期反复

荷载作用下,不易产生疲劳破坏,能够保持良好的力学性能,适用于承受动态荷载的护坡工程。因此,可以根据工程需求,灵活调整纤维的种类、含量、铺设方向等参数,定制出具有不同力学性能和形状的制品,满足多样化的护坡要求。

3 FRP材料选型

铁甲库区及周边发育强-中风化花岗岩地层,岩体节理裂隙发育,岩芯多呈柱状,内摩擦角约42°,黏聚力约51kPa;边坡坡度较陡,坡高约7~10m,为土石混合与强风化岩边坡。库区气候温湿多雨,冬季存在冻融循环,对护坡结构的耐久性提出更高要求。综合强度、弹性模量、成本与耐腐蚀性能,推荐采用GFRP筋材^[2](表面黏砂型)。CFRP/BFRP在极端腐蚀或更高强度需求时可考虑,但对本工程经济性一般;AFRP因成本过高暂不推荐。

4 铁甲水库FRP锚杆试验与承载性能

4.1试验锚杆。试验选用直径28mm的表面黏砂型GFRP筋材,其玻璃纤维与环氧树脂体积比为3:1,抗拉强度为675MPa,弹性模量为41GPa,抗剪强度为150MPa,抗拉承载力达416kN。作为对照组,采用直径28mm的HRB400钢筋锚杆,其抗拉强度为570MPa,抗拉承载力为351kN。试验采用分级加载制度,加载速率控制在0.2kN/s,同步记录各加载阶段的荷载-位移曲线,并观测锚杆的破坏形态。试验结果表明,GFRP锚杆的破坏特征主要表现为第二界面(杆体-砂浆)剪切滑移破坏,而钢筋锚杆则多发生杆体拉断破坏^[3],反映了两种材料在界面黏结机制上的差异。

表2 锚杆破坏荷载统计

锚杆类型	锚固长度(m)	破坏荷载范围(kN)	平均荷载(kN)	破坏形态
GFRP	4.5	381~394	383	剪切滑移/拉断
GFRP	6.5	387~412	399	剪切滑移/拉断
钢筋	4.5	320~331	325	拉断为主
钢筋	6.5	339~362	341	拉断为主

结果显示,在不同锚固长度条件下,GFRP锚杆的承载能力均显著优于钢筋锚杆。当锚固长度为4.5m时,GFRP锚杆的平均破坏荷载较钢筋锚杆提升约17.8%;当锚固长度增至6.5m时,其承载性能优势依然明显,较钢筋锚杆提升约17.0%。这一结果表明,随着锚固长度的增加,虽然两种材料的承载能力差异略有缩小,但GFRP锚杆在承载性能方面的优势始终保持在较高水平^[4],验证了其在铁甲水库边坡锚固工程中的技术有效性。

4.2模型拟合。为验证荷载-位移关系的数学表征效果,本研究分别采用双曲线模型、指数函数模型、幂函数模型以及指-幂函数模型对试验数据进行拟合分析。拟合结果表明,指-幂函数模型^[5]对铁甲水库工况下锚杆破坏荷载的预测精度最高,其曲线形态与实测数据最为吻合,拟合优度(R²)可达0.95,较其他三种模型具有更优的预测准确性和工程适用性^[6]。

指-幂函数模型表达式:

$$Q=Q_{MAX} \times \left[1 - \frac{1}{1 + ke^{as}/(1 + k(bs + 1)^c)} \right]$$

其中: Q 为承载力(kN), s 为滑移量(mm), a 、 b 、 c 、 k 为待拟合系数, Q_{max} 为实测极限承载力。

5 FRP材料在铁甲水库护坡工程中应用的设计与施工质量控制

5.1设计原则与参数。FRP材料在铁甲水库山体护坡加固工程中应用的设计需要遵循以下基本原则: 安全性原则—确保边坡在正常使用条件下满足抗滑稳定要求; 耐久性原则—应对库区潮湿、冻融循环等不利环境影响; 适用性原则—结合中风化花岗岩地层特点, 选择合理的锚固体系。根据铁甲水库边坡勘察成果, 护坡段地层以中风化花岗岩为主, 岩体节理裂隙较发育, 岩芯多呈短柱状。岩土物理学参数如下: 内摩擦角 $\phi \approx 42^\circ$, 黏聚力 $c \approx 51\text{kPa}$, 弹性模量约 5.0GPa 。

表3 锚固系统设计参数

项目	参数值	确定依据
GFRP锚杆直径	28mm	承载力计算与构造要求
锚固长度	6.5m	临界锚固长度
布置间距	1.5m×1.5m	稳定性计算结果
锚杆排数	7排	边坡高度(7-10m)
单根锚杆设计抗拔力	300kN	破坏荷载折减系数0.75

当锚固长度为4.5m时, GFRP锚杆平均破坏荷载达383kN; 当锚固长度增至6.5m时, 破坏荷载提升至399kN, 增幅约4.2%。考虑到边坡高度为7-10m, 设置7排锚杆, 总锚固长度满足稳定性计算要求。因此, 将6.5m确定为临界锚固长度, 既能充分发挥材料性能, 又可确保安全储备。

5.2施工工艺与质量控制。FRP材料在铁甲水库护坡工程施工中的应用需要遵循“先排水、后加固”的要求, 结合库区温湿多雨、冬季冻融的气候特点, 采用合理的施工工艺与质量控制措施, 确保“GFRP筋+喷射混凝土”复合护坡体系的施工质量与长期性能。

5.2.1施工工艺要点。根据中风化花岗岩地层特点, 采用潜孔钻机进行干钻成孔, 钻孔直径控制在100mm-110mm。钻孔角度根据设计要求确定为垂直坡面或仰角 $15^\circ-20^\circ$, 成孔深度应超过设计锚固长度10cm(即6.6m), 确保锚杆有效锚固长度达到6.5m。钻孔过程中遇到软弱夹层或破碎带时, 应进行套管护壁, 防止塌孔。GFRP锚杆采用 $\Phi 28\text{mm}$ 表面黏砂型筋材, 安装前应检查杆体表面是否完好、有无损伤。锚杆插入孔内后, 应在孔口设置定位支架, 确保杆体居中。锚杆外露端按设计要求预留10cm-15cm, 用于与喷射混凝土面层连接。采用M30水泥砂浆进行压力注浆, 水灰比控制在0.5, 灰砂比1:1。注浆压力控制0.5MPa-0.8MPa, 注浆应从孔底向上压浆, 待浆液从孔口溢出且浓度与注浆浆液一致时, 停止注浆并封堵孔口。注浆完成后, 对孔口附近进行二次补浆, 确保孔内饱满。注浆完成后进行挂网施工, 采用 $\Phi 6@150 \times 150\text{mm}$ 钢筋网, 与锚杆外露端绑扎或焊接连接。随后进行C30喷射混凝土施工, 喷射厚度10cm, 分两次喷射, 初喷厚度4cm, 复喷厚度6cm。喷射混凝土配合比(水泥:砂:石子:水)为1:2:2:0.45, 掺入适量减水剂与引气剂以改善抗冻性能。喷射混凝土完成后, 采用覆盖洒水养护, 养护时间不少于7天。坡面排水孔按 $2\text{m} \times 2\text{m}$ 间距布置, 孔径50mm, 内设透水管, 管外包裹土工布作为过滤层。坡脚设置纵向排水沟, 坡面设置横向排水盲沟, 形成完整排水系统。

5.2.2质量控制措施。铁甲水库地处辽东半岛, 冬季最低气温可达 -20°C 以下, 冻融循环对混凝土面层的影响显著。为此, 采取以下措施: 提高喷射混凝土抗冻标号至F200(200次冻融循环后强度损失 $\leq 25\%$)。混凝土中掺入引气剂, 含气量控制在4%-6%。适当增加混凝土中水泥用量, 水胶比控制在0.45以下。根据铁甲水库地区年降水量800mm-1000mm的气候特征, 设计完善的排水系统。排水孔间距加密至 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$, 孔径50mm, 内设PVC透水管, 外包土工布过滤层。在坡顶外侧设置截水沟, 断面尺寸为 $40\text{cm} \times 40\text{cm}$, 拦截坡顶径流。坡脚设置纵向排水沟, 断面尺寸为 $60\text{cm} \times 60\text{cm}$, 与库区排水系统连通。坡面设置水平排水盲沟, 间距3m, 采用碎石填充, 外包土工布。考虑到冬季施工对注浆与喷射混凝土质量的不利影响, 建议锚杆加固工程施工安排在4月-10月进行, 避开冬季低温期。若必须冬季施工, 应采取保温措施, 注浆材料掺加防冻剂, 喷射混凝土采用暖棚养。

6 结论与建议

6.1结论。(1)在铁甲水库中风化花岗岩边坡中, GFRP锚杆破坏荷载较钢筋提升约13%-18%, 且抗腐蚀性能更优, 适用于本工程边坡锚固。(2)GFRP锚杆更易发生杆体-砂浆界面剪切滑移破坏, 需通过合理锚固长度、砂浆强度与构造措施提升界面协同性能。(3)基于指-幂函数荷载-位移模型拟合精度高($R^2 \approx 0.95$), 可为铁甲水库工况下的承载力预测提供依据。(4)形成的“GFRP筋+喷射混凝土”复合护坡体系, 可有效满足铁甲水库护坡在强度、耐久性、排水与冻融防护等方面的需求。

6.2建议。(1)施工前开展工艺试验与首件验收, 固化钻孔角度、注浆压力与质量控制点。(2)建立基于指-幂函数模型的荷载-位移预警机制, 将锚杆相对滑移量、速率纳入监测指标体系。(3)在类似地质条件(中风化花岗岩、冻融环境)的边坡工程中, 可参考本工程参数与设计要点, 但需结合具体地层与荷载进行复核。(4)进一步开展FRP锚杆长期性能(蠕变、疲劳、冻融循环)跟踪监测, 积累全寿命数据以完善设计方法。

[参考文献]

- [1]邓新雨, 孙洪军. 玄武岩纤维增强锚杆在边坡工程中的研究现状及展望[J]. 材料科学, 2025, 15(6): 7.
- [2]陈昊. BFRP锚杆加固边坡的作用机理及设计方法研究[D]. 西南交通大学, 2022.
- [3]徐学勇, 徐东升, 刘涛, 等. 典型破坏模式下GFRP锚杆与土体界面拉拔试验研究[J]. 自然灾害学报, 2025, 34(6): 139-149.
- [4]李斌, 孙小红, 吴建生. GFRP锚杆扭矩力学性能试验研究[J]. 能源技术与管理, 2024(001): 049.
- [5]白晓宇, 刘雪颖. GFRP筋及钢筋抗浮锚杆承载特性现场试验及荷载-位移模型[J]. 复合材料学报, 2021, 38(12): 12.
- [6]汪丽娜, 孙慧, 刘军, 等. 引江济淮工程膨胀土渠坡失稳机理及加固效果分析[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(S01): 136-139.

作者简介:

刘祖瑞(1996--), 男, 汉族, 吉林长春人, 硕士, 助理工程师, 主要从事工作: 防洪调度、工程管理。