

BFRP锚杆黏结性能现场试验与荷载传递特性

朱耀璋¹, 韦洪^{2*}

1. 中铁十四局集团第三工程有限公司, 山东 济南 250000;
2. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083



摘要:为阐明玄武岩纤维增强聚合物(BFRP)锚杆在天然地层与循环拉拔作用下的黏结与荷载传递机制,通过布设不同锚固长度(2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 m)的BFRP锚杆并开展现场循环拉拔试验,测试得到不同拉拔荷载强度作用下锚杆的轴力、剪应力及荷载—位移曲线响应数据,系统解析了锚固长度对力学响应的影响。结果表明:当锚固长度小于或大于3.0 m(2.0, 2.5, 3.5, 4.0 m)时,BFRP锚杆的轴力分布分别表现出均一性和离散性特征。随着锚固深度的增加,可将剪应力划分为快速衰减阶段和缓慢衰减阶段,在一定范围内增加锚固长度有助于增大BFRP锚固系统的承载能力,但对剪应力的空间分布特征并没有直接影响。锚杆周围水泥浆的失效规律与第一界面和第二界面的力学机制密切相关,同时,水泥浆内部裂缝的分布特征受张拉应力场的显著影响。研究结论可为BFRP锚杆的理论分析和工程应用提供参考。

关键词:BFRP;现场拉拔测试;荷载传递特性;黏结性能;荷载—位移曲线

中图分类号:U21 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2026)01-0166-12 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2026.01.180

引用格式:朱耀璋,韦洪.BFRP锚杆黏结性能现场试验与荷载传递特性[J].黄金科学技术,2026,34(1):166-177.ZHU Yao-zhang, WEI Hong. Bonding Performance and Load Transfer Behavior of BFRP Anchors Based on Field Pull-out Tests[J]. Gold Science and Technology, 2026, 34(1): 166-177.

在全球气候变化和极端环境作用下,突发性强、破坏性大的地质灾害频发,对山区交通基础设施与人类活动安全构成严重威胁。在复杂地质条件下,如何实现灾害的有效防治,已成为当前岩土工程领域亟待攻克的关键技术难题(Zhang et al, 2018; Shugar et al, 2021; 王春红等, 2025)。在岩土工程加固实践中,传统钢筋锚杆因施工工艺成熟和成本适中,被广泛应用于边坡、滑坡及地下结构加固领域。然而,钢材存在耐久性差、易腐蚀且后期维护成本高等问题,在高湿、强腐蚀或高地应力等复杂环境中,其可靠性与稳定性面临挑战(Jiang et al, 2014; Fu et al, 2021; Wang et al, 2023; Liu et al, 2024)。部分工程实例已暴露出因钢筋腐蚀导致的

结构失效问题,引发行业广泛关注(陈昌富等, 2012; 李典庆等, 2013)。尽管已有研究提出了多种针对钢筋材料的抗腐蚀措施,但关于其综合效果和适用范围等问题目前仍存在争议(Hadjigeorgiou et al, 2019; Manquehual et al, 2021)。与此同时,资源与环境的双重压力正持续推动新型锚杆材料的研发进程。特别是由玄武岩纤维与高性能树脂复合而成的BFRP锚杆表现突出,其具备强度高、耐腐蚀性强、质量轻和施工便捷等优点,逐步成为钢筋锚杆的有力替代方案,并在超高层建筑、大跨度结构及高腐蚀环境中得到广泛应用(Dhand et al, 2015; Fiore et al, 2015; Fan et al, 2016; Monaldo et al, 2019; Dong et al, 2020; 张书博等, 2022)。在我国部

收稿日期:2025-05-30;修订日期:2025-08-15

基金项目:甘肃省青年科技基金项目“临近既有线重载列车荷载作用下大型转体桥梁动力响应规律及桩基变形损伤特性研究”(编号:23JR-RA1364)资助

作者简介:朱耀璋(1981—),男,甘肃会宁人,高级工程师,从事铁路、公路项目建设管理工作。E-mail:271218524@qq.com

*通信作者:韦洪(1997—),男,贵州遵义人,博士研究生,从事边坡工程灾变机理及防控研究工作。E-mail:1658408005@qq.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

分边坡、隧道及地下工程中, BFRP 材料已被逐步纳入支护体系, 并取得了良好的试验与应用效果(赵文等, 2016; 李慈航, 2021; 李达等, 2024)。

近年来, 学者们围绕 BFRP 材料在岩土工程中的应用开展了大量研究, 主要集中在 3 个方向: 一是探讨其在混凝土构件中的受力性能, 明确其增强混凝土结构承载力的能力(Tang et al, 2021; Tang et al, 2022); 二是评估其在高盐、高湿等强腐蚀环境下的耐久性, 以建立长期服役安全性的基础(Lu et al, 2021); 三是开展模型试验, 探索 BFRP 锚杆在加固降雨滑坡中的变形协调性与破坏模式(Tang et al, 2023; Wei et al, 2023)。这些研究表明, 与传统钢筋锚杆相比, BFRP 锚杆在力学性能和环境适应性方面表现出显著优势, 尤其在协同变形与延缓破坏方面更具潜力(杨昊天等, 2024)。然而, BFRP 锚杆与注浆体界面或注浆体与岩土体界面往往是锚固工程中的薄弱部位, 其黏结性能直接决定锚固体系的承载能力与变形特性。当前, 已有部分研究通过室内拉拔试验对界面黏结特性与本构关系进行探讨(Li et al, 2017; Wei et al, 2019; Godat et al, 2021; Dai et al, 2023; 张玉等, 2024), 但现有成果多基于室内理想条件得出, 受试件尺寸、加载方式和边界约束等因素限制, 难以揭示其在真实应力条件下的工作机制(袁鹏等, 2021; 孟凡俊等, 2023)。相比之下, 现场拉拔试验能够更真实地模拟天然地层中的锚固行为, 尤其适用于系统研究锚固长度、围压条件和界面退化等因素对锚杆性能的综合影响(冯君等, 2019a; 吴泽坤等, 2024)。然而, 当前采用现场拉拔试验方法研究 BFRP 锚杆黏结性能的研究仍十分有限, 相关试验数据和理论认知均有待补充和完善。

在工程实践中, 无论是新型锚杆还是既有锚杆, 当首次应用于特定地层时, 均需在正式施工前开展破坏性拉拔试验。该试验旨在获取锚杆张拉端的荷载—位移关系, 进而确定极限抗拔荷载(或极限抗拔承载力)标准值, 评估锚杆的实际工作性能, 并为后续设计优化与施工工艺改进提供依据(程良奎等, 2008)。鉴于此, 本文以正在建设的铁路边坡工程作为研究对象, 在支护施工前开展现场

循环拉拔试验。通过系统分析 BFRP 锚杆的黏结性能及其轴力、剪应力传递特性, 探讨锚固长度对轴力与剪应力分布规律的影响; 在此基础上, 结合荷载—位移曲线和宏观破坏现象, 揭示 BFRP 锚固系统的累积破坏机理与力学行为, 进一步推测锚杆周围水泥浆内部存在呈弧形分布的张拉应力场。研究成果可为类似工程的安全设计及 BFRP 锚杆的推广应用提供理论依据与工程参考。

1 拉拔试验设计

1.1 试验区概况

试验区位于甘肃省兰州市永登县, 为新建兰州—张掖铁路路基开挖形成的路堑边坡(图 1)。地表覆盖第四系黄土(Q_4^{pl}), 深部为第三系泥岩(N_2^{ms}), 地层岩性构造简单, 属于典型的黄土—泥岩二元结构边坡。

试验区黄土层厚度为 12~20 m, 以粉粒为主, 结构疏松, 其力学参数见表 1。下伏泥岩以黏土矿物为主, 呈层状构造。该区位于祁连隆起带构造单元内, 断裂发育程度低, 未发现不良地质现象。区域地表水不发育, 钻探深度范围内亦未揭露地下水。

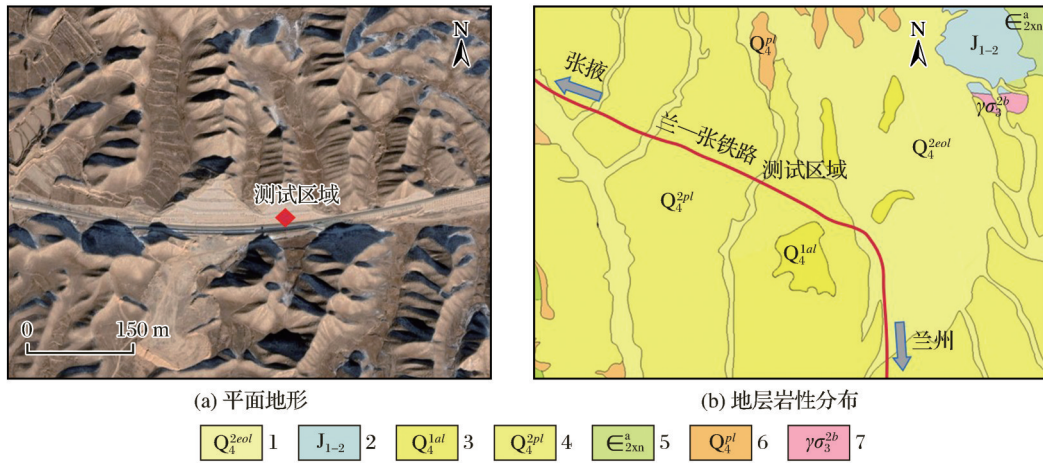
1.2 拉拔试验

(1) 材料性能

本次试验选用 5 根 BFRP 锚杆, 直径均为 32.0 mm, 长度依次为 2.8, 3.3, 3.8, 4.3, 4.8 m。鉴于 BFRP 锚杆抗剪性能较差, 在夹持力作用下易发生破坏, 试验在张拉端加设长度为 0.8 m、外径为 50.0 mm、壁厚为 5.0 mm 的钢套筒进行保护。钢套筒与锚杆间隙以环氧树脂与固化液(质量比约为 1:1)填充, 以提高连接强度与稳定性。BFRP 锚杆及环氧树脂的主要力学参数见表 2。

(2) 传感器布置

试验前将 5 根 BFRP 锚杆依次编号为 B1、B2、B3、B4 和 B5。为测试锚杆与注浆体界面的剪切力学特性, 在锚杆表面粘贴应变片(图 2), 该方法的有效性在前人研究中已得到验证(Zhu et al, 2022; Jo et al, 2024)。每根 BFRP 锚杆由外露段和锚固段组成, 外露段用于安装千斤顶、锚具、位移计和测力计等加载与监测装置。



1. 风成砂黄土; 2. 灰白色砾岩和黄色砂岩; 3. 冲洪积层: 砾石、砂和黏土质砂; 4. 洪积层: 砾石和砂粒; 5. 灰绿色浅变质砂岩; 6. 洪积层: 砾石和砂粒; 7. 加里东中期第二次侵入: 花岗闪长岩

图 1 试验区域概况

Fig. 1 Overview of the test area

表 1 试验区黄土的主要力学参数

Table 1 Main mechanical parameters of loess in test area

指标名称	数值	指标名称	数值
密度/(g·cm ⁻³)	1.62	压缩模量/MPa	2.69
含水率/%	16.7	内摩擦角/(°)	18.63
天然孔隙比	1.103	黏聚力/kPa	12.32

(3) 试验设计

试验锚杆钻孔布置于坡脚位置, 孔径为 110.0 mm, 与水平方向呈 15° 夹角。为避免群锚效应, 各钻孔的水平间距均大于 1.0 m。钻孔深度较设计锚固长度增加 0.5 m, 以确保锚杆全长有效黏结。锚杆安设后采用孔底返浆法注浆, 注浆材料为 42.5R 普通硅酸盐水泥, 水灰比控制在 0.45~0.50。注浆养护 28 d 后开展试验, 实测水泥浆抗压强度为 10.3 MPa, 弹性模量为 28 GPa。

根据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330-2013)(重庆市城乡建设委员会, 2013), 黄土与砂浆锚固体之间的最小粘结强度为 40 kPa。结合荷载传递公式 $P_{max} = \pi LR\tau$ (P_{max} 为极限拉拔荷载, τ 为界面的平均黏结强度, R 为钻孔直径, L 为锚固长度), 通过改变 L 的取值, 反算得到不同锚固长度对应的极限拉拔荷载, 结果见表 3。

基于表 3 数据, 并参照《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086-2015)(中华人民共和国国家标准编写组, 2015) 制定了本试验的加载制度。加载方式采用循环加载, 每级荷载保持观测 10 min, 荷载设计值见图 3。初始荷载及荷载梯度均为 10 kN; 第 1 循环的加卸载路径为 10→20→10 kN, 第 n 循环的加卸载路径为 10→20→...→2(n+1)→...→20→10 kN。

表 2 BFRP 锚杆及环氧树脂的主要力学参数

Table 2 Main mechanical parameters of BFRP anchor and epoxy resin

BFRP 锚杆参数	数值	环氧树脂参数	数值
直径/mm	32	黏结强度/MPa	>3.5
密度/(g·cm ⁻³)	2.05	25 °C 条件下的密度/(kg·L ⁻¹)	1.65
拉伸强度/MPa	834	25 °C 条件下养护 7 d 后的抗压强度/MPa	95
弹性模量/GPa	45	25 °C 条件下固化 7 d 后的拉伸和弯曲强度/MPa	30
断裂伸长率/%	1.89	25 °C 条件下的适用时间/min	60
剪切强度/MPa	255	剪切强度/MPa	20

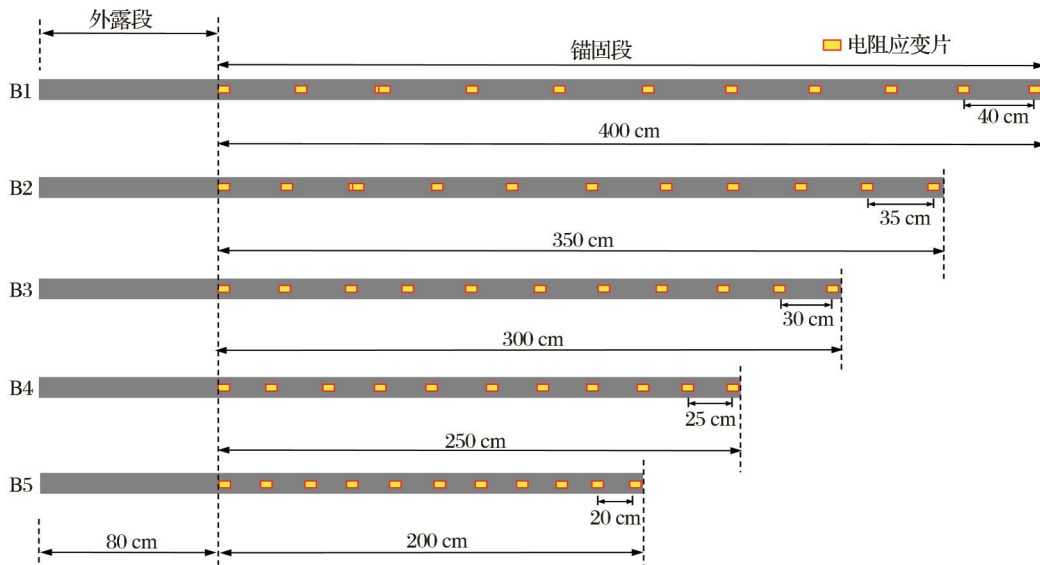


图2 应变片数量和布置位置

Fig. 2 Number and arrangement location of strain gauges

表3 不同锚固长度的极限拉拔荷载计算值

Table 3 Calculation values of ultimate pull-out load of different anchorage lengths

锚固长度/m	极限拉拔荷载计算值/kN
2.0	27.63
2.5	34.54
3.0	41.45
3.5	48.45
4.0	55.26

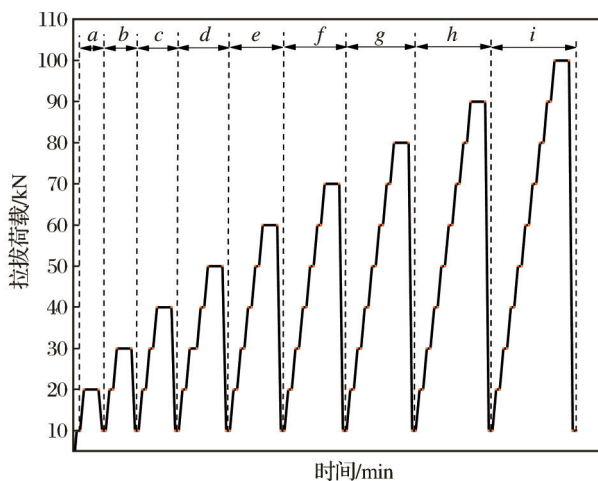


图3 拉拔荷载的加载等级与观测时间

Fig. 3 Loading level and observation time of pull-out load

注:图中字母a~i依次代表第1次至第9次循环

(4) 试验现场概况

试验现场概况如图4所示,所用设备包括成孔机械、注浆机械、加载系统、位移监测设备、拉拔荷载监测设备、应变数据采集系统及笔记本电脑等。钻孔采用风动锚杆钻机成孔;加载系统由手动式油压千斤顶(额定吨位65 t,行程18 cm)、ZB4-500型电动油泵、若干钢垫板、锚具及简易反力木板组成。加载与卸载速率分别控制在0.07 MPa/s和0.14 MPa/s。拉拔荷载与位移数据分别通过振弦式

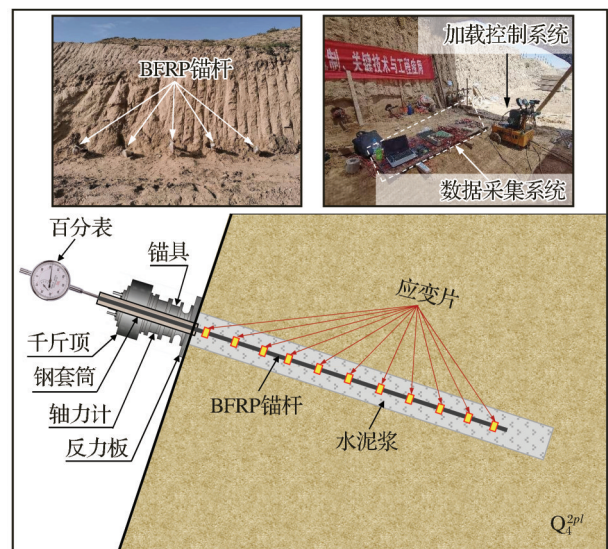


图4 试验现场概况

Fig. 4 Overview of the test site

锚索测力计和精度为0.01 mm的百分表采集。

2 测试结果

2.1 拉拔荷载—位移响应

选取B1、B2和B3锚杆的荷载—位移曲线(图5)进行分析。随着循环荷载的增加,各锚杆的轴向位移逐渐累积,且相邻循环的位移增量显著大于前一循环,尤其在最后2个循环中差异更为突出。此外,锚杆的最大位移点与最大循环荷载并不同步,即最大位移点存在一定的滞后现象,这是由于卸载

初期锚杆周围的水泥浆储存了部分能量,由此产生的扩容效应导致位移数据仍保持小幅增长趋势。

提取各循环的峰值位移与卸载后的残余位移绘制曲线,如图5(d)所示。结果表明,当拉拔荷载不超过15 kN时,B1、B2和B3锚杆的峰值位移与残余位移差异较小;当拉拔荷载超过15 kN时,位移大小依次为B3>B2>B1。由此可见,对于本试验所采用的BFRP锚杆,锚固系统的抗变形能力随锚固长度的增加而显著增强,即锚固效果随锚固长度的增加而提升。

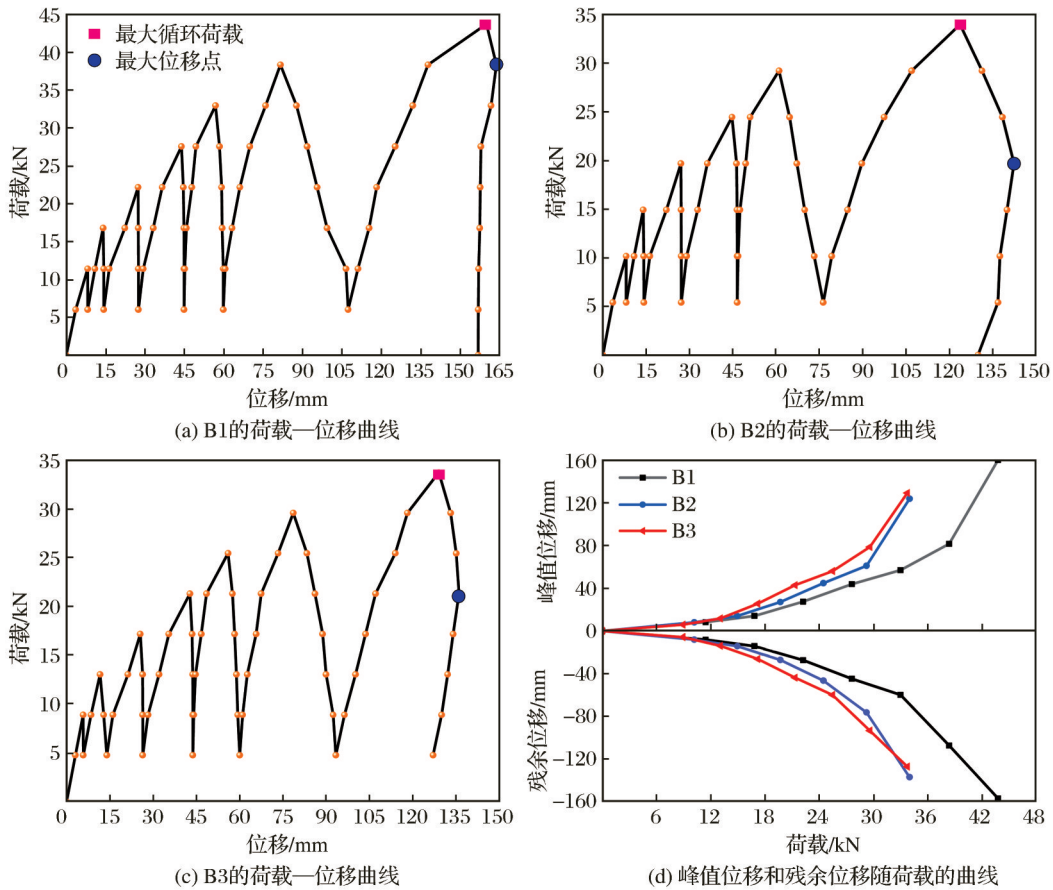


图5 荷载—位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves

2.2 轴力分布曲线

轴力是评估锚杆锚固效果的关键力学指标,对其分布规律进行分析,有助于揭示锚杆支护结构的受力特征。为定量研究BFRP锚杆沿锚固深度的轴力分布规律,本文参考Jo et al(2024)的研究方法,选取每个循环所记录的峰值应变数据,并采用

式(1)计算不同锚固深度的轴力数据,结果如图6所示。

$$P_i = \xi_i A_a E_a \quad (1)$$

式中: P_i 为第*i*应变测点处的锚杆轴力(kN); E_a 为BFRP锚杆的弹性模量(45 GPa); A_a 为BFRP锚杆的截面面积(0.0008 m²); ξ_i 为第*i*测点处的应变($\mu\epsilon$)。

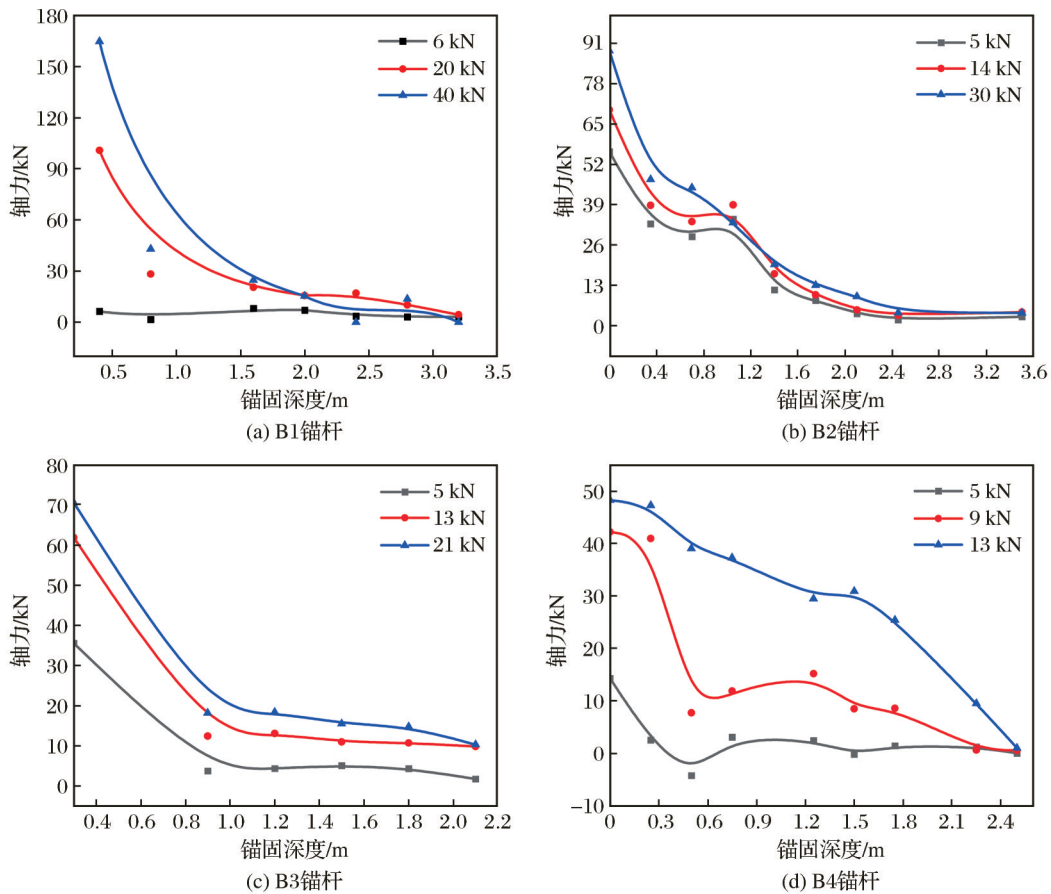


图6 BFRP锚杆的轴力分布曲线

Fig. 6 Axial force distribution curves of BFRP anchor rod

注:图中记录的点状数据是现场测量得到的;当拉拔荷载太大时,锚固系统产生拉拔破坏,造成应变片损坏,因此只利用有效数据进行绘图

由图6可见,BFRP锚杆的轴向力沿程分布不均,且随着循环荷载的增加逐渐向锚固段远端传递。当拉拔荷载 P_0 较小时,最大轴力出现在张拉端,并沿锚固深部逐步衰减至0,此阶段锚固界面处于弹性黏结状态。随着拉拔荷载 P_0 的进一步增大,轴力同步增加,锚固界面开始软化并进入弹塑性变形阶段。此外,当锚固深度大于3.0 m时,轴力分布规律趋于一致;而当锚固深度小于3.0 m时,轴力分布则呈明显离散特征,如图6(d)所示。结果表明,锚固深度对轴力分布具有显著影响,具体表现为短锚的分布均一性与长锚的分布离散性。

2.3 剪应力分布曲线

剪应力分布特征对锚固系统的承载性能具有决定性作用,而锚固深度对其剪切性能亦有显著影响。为了更有效地分析BFRP锚杆与水泥浆界面的黏结特性,将第 i 测点与第 $i+1$ 测点之间的锚固单元

作为研究对象。假设相邻2个测点之间的界面剪应力均匀分布,根据式(2)将锚杆轴力换算为该区段中点处的剪应力(李国维等,2007;冯君等,2019b),并绘制剪应力随锚固深度变化的分布曲线(图7)。

$$\tau_i = \frac{P_i - P_{i+1}}{\pi dl} \quad (2)$$

式中: τ_i 为第 i 测点与第 $i+1$ 测点之间中点处的平均剪应力(MPa); P_i 为第 i 测点处锚杆的轴力(kN); P_{i+1} 为第 $i+1$ 测点处锚杆的轴力(kN); d 为BFRP锚杆的直径(32 mm); l 为第 i 测点与第 $i+1$ 测点之间的距离。

由图7可知,剪应力的分布特征与轴力分布规律高度相似。以B1锚杆为例,当拉拔荷载 $P_0 \leq 33$ kN时,峰值剪应力出现在张拉端,并沿锚固深部逐渐衰减至0,此时剪应力分布较为均匀,锚固系统处于

弹性变形阶段。当 $P_0 > 33$ kN时,张拉端剪应力迅速升高,表明锚固界面开始软化并进入弹塑性变形阶段。随着 P_0 进一步增大(≥ 39 kN),剪应力水平持续向锚固深部传递,峰值仍集中在张拉端。根据剪应力—锚固深度曲线的衰减速率特征,可将循环拉拔作用下的剪应力变化划分为快速衰减阶段和缓慢衰减阶段。值得注意的是,B1和B2锚杆由快速衰减向缓慢衰减的过渡点分别位于距张拉端2.0 m和1.7 m处,最大衰减率分别为275.09%(拉拔荷载为44 kPa)和89.35%(拉拔荷载为30 kPa)。结果表

明,锚固深度对承载范围及衰减速率均有显著影响,且剪应力衰减率与荷载水平基本呈正相关关系。

通过对比图7(a)和图7(b)可知,B1锚杆的峰值剪应力高于B2锚杆,但二者的变化趋势基本一致。这主要归因于较大的锚固长度可扩大外部荷载的传递与响应范围,从而提升BFRP锚固系统的整体承载能力。因此,在一定范围内增加锚固长度,能够提高BFRP锚固系统的承载能力,但对剪应力的空间分布特征并没有直接影响。

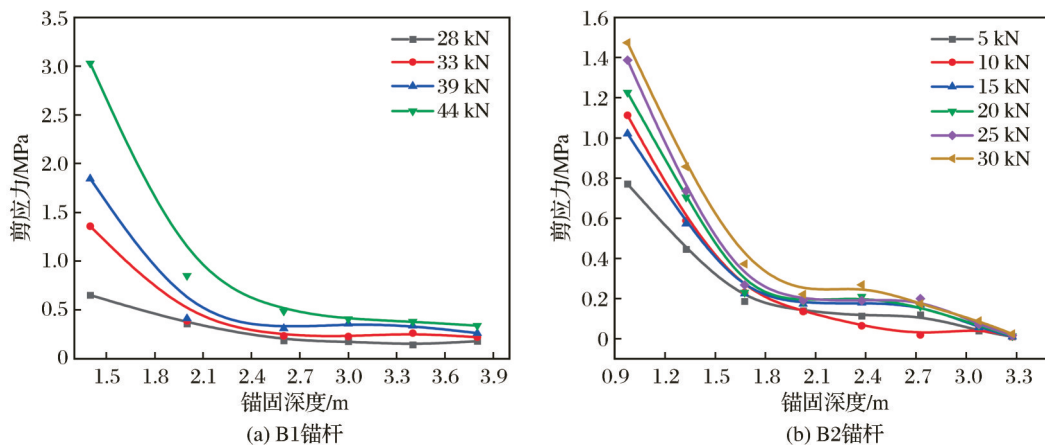


图7 剪应力分布曲线

Fig. 7 Distribution curves of shear stress

注:图中记录的点状数据是现场测量得到的;当拉拔荷载太大时,锚固系统产生拉拔破坏,造成应变片损坏,因此只利用有效数据进行绘图

3 讨论

3.1 BFRP锚固系统的荷载—位移曲线和累积破坏机理

现场试验结果表明,BFRP锚固系统的破坏并非瞬时发生,而是随着循环拉拔荷载的累积逐步发展,呈现明显的累积性破坏特征。基于实测数据,对其荷载—位移曲线及累积破坏机理进行分析,结果如图8(a)所示。不同锚固长度对应的荷载—位移曲线存在显著差异:在锚固长度较短的情况下(如B5,锚固长度为2.0 m),曲线呈单峰型,达到峰值荷载所需位移较小(75.67 mm),随后峰值荷载随位移的增加而逐步下降,最终导致锚杆整体拔出,表明锚固界面发生不稳定破坏。相比之下,较大锚固长度(如B1,锚固长度为4.0 m)的荷载—位移曲线有近似平行于位移轴的平缓段,达到峰值荷载所

需位移显著增加(160.0 mm),反映出拉拔荷载增长率逐渐降低,锚固界面进入稳定破坏阶段。

进一步分析BFRP锚固系统的累积破坏机理,如图8(b)所示。案例I对应OA阶段(弹性变形阶段),此阶段锚固系统整体完好,锚杆周围水泥浆仅出现少量细微裂缝,且水泥浆与锚杆之间保持良好黏结。此时,抵抗变形的主要作用力来源于锚杆—水泥浆界面的化学黏结力,尚未产生显著的斜向挤压力。

案例II对应AB阶段(弹塑性变形阶段),该阶段表现为黏结应力逐渐接近峰值前的滑移破坏过程。此时,锚杆发生滑移,表现在其表面沿张拉端方向移动约半个肋骨间距。同时,锚杆本体及锚杆—水泥浆界面均出现塑性变形,界面化学黏结力完全丧失,抵抗变形的主要作用力转为摩擦力与机械咬合力。在环向张力作用下,水泥浆产生反力 F ,

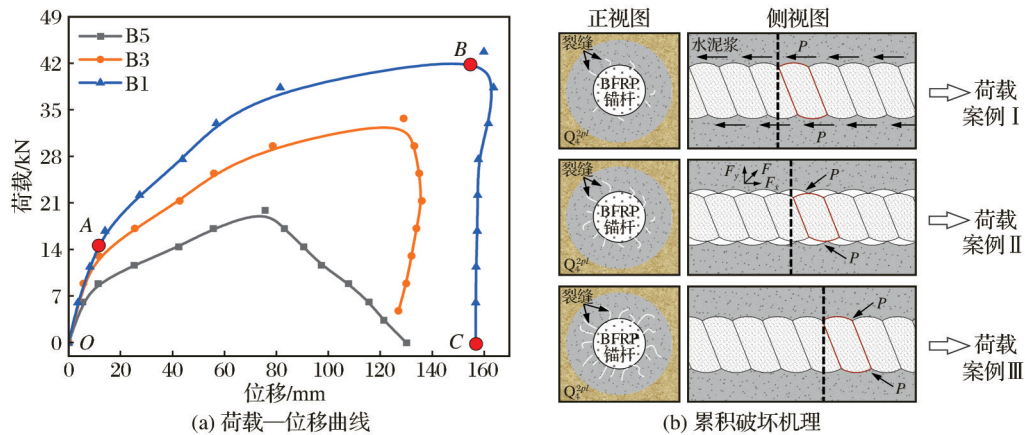


图8 BFRP锚固系统的荷载—位移曲线和累积破坏机理

Fig. 8 Load-displacement curves and cumulative failure mechanism of the BFRP anchorage system

进而诱发更大尺寸的裂缝扩展。

案例Ⅲ对应BC阶段(滑移破坏阶段),该阶段黏结应力由峰值逐渐衰减至残余水平,锚杆持续向张拉端移动,并与水泥浆产生相对位移,导致机械咬合力显著下降,黏结应力同步减小。此时,BFRP锚固系统出现大幅塑性变形,并逐步向锚固深部扩展,其主要特征为水泥浆内部产生大范围裂缝,最终导致BFRP锚固系统无法稳定地承担拉拔荷载而发生剪切破坏。

3.2 BFRP锚固系统破坏的力学机制

试验结束后,对BFRP锚固系统的破坏现象进行了分析,结果如图9所示。当锚固长度较大时,系统主要发生于锚杆与水泥浆之间的界面剪切破坏,宏观表现为锚杆孔口处水泥浆的开裂(如B1和B2锚杆所示)。而当锚固长度较小时,则以距水泥浆边界一定范围内土体的剪切破坏为主,表现为锚固系统整体被拔出(如B5锚杆所示)。结合试验现象,并参考白晓宇等(2024)的研究成果,对BFRP锚固系统的破坏规律和力学特性进行进一步探讨,结果如图9(b)所示。当黏结应力由峰值降至残余水平时,锚杆—水泥浆界面的机械咬合力迅速衰减,即与第3.1小节所述案例Ⅲ一致。值得注意的是,锚固体在此阶段常出现开裂或压碎现象,且水泥浆向土体内部发生弯曲。这一现象源于第一界面(锚杆—水泥浆)与第二界面(水泥浆—土体)力学机制的差异:一方面,在拉拔荷载作用下,第一界面率先产生力学响应并将应力传递至第二界面,导致其变形时间早于第二界面;另一方面,土体对水泥浆存

在黏结约束,使第二界面的剪切应力低于第一界面,因此第一界面的变形程度显著大于第二界面。

结合水泥浆的破坏特征进一步分析其内部应力场分布。如图9(b)所示,张拉裂缝与水泥浆的弯曲分布方向相互垂直。根据岩石张拉破坏的基本规律,裂缝的扩展方向通常与主张拉应力方向垂直。因此,在拉拔荷载作用下,水泥浆内部可能形成呈弧形分布的张拉应力场[图9(c)],该应力场是决定裂缝形态与类型的主要因素。需要指出的是,此处的张拉应力场为根据裂缝分布特征推测的虚拟应力场,但这一推测能够合理解释张拉裂缝与弯曲分布的水泥浆呈垂直关系的原因。

综上所述,锚固长度对BFRP锚固系统的破坏模式具有显著影响,锚杆周围水泥浆的失效规律与第一界面及第二界面的力学机制密切相关。此外,水泥浆内部裂缝的空间分布受张拉应力场显著控制。上述发现为深入解析BFRP锚固系统的变形特征与力学机制提供了重要依据。

4 结论

通过现场拉拔试验,系统研究了BFRP锚杆的黏结性能与荷载传递特性,得出如下主要结论:

(1)当锚固长度小于3.0 m时,BFRP锚杆的轴力分布较为均匀。当锚固长度大于3.0 m时,轴力分布离散性显著增强,且峰值位置向锚固深部移动。

(2)剪应力沿锚固深度可划分为快速衰减段和

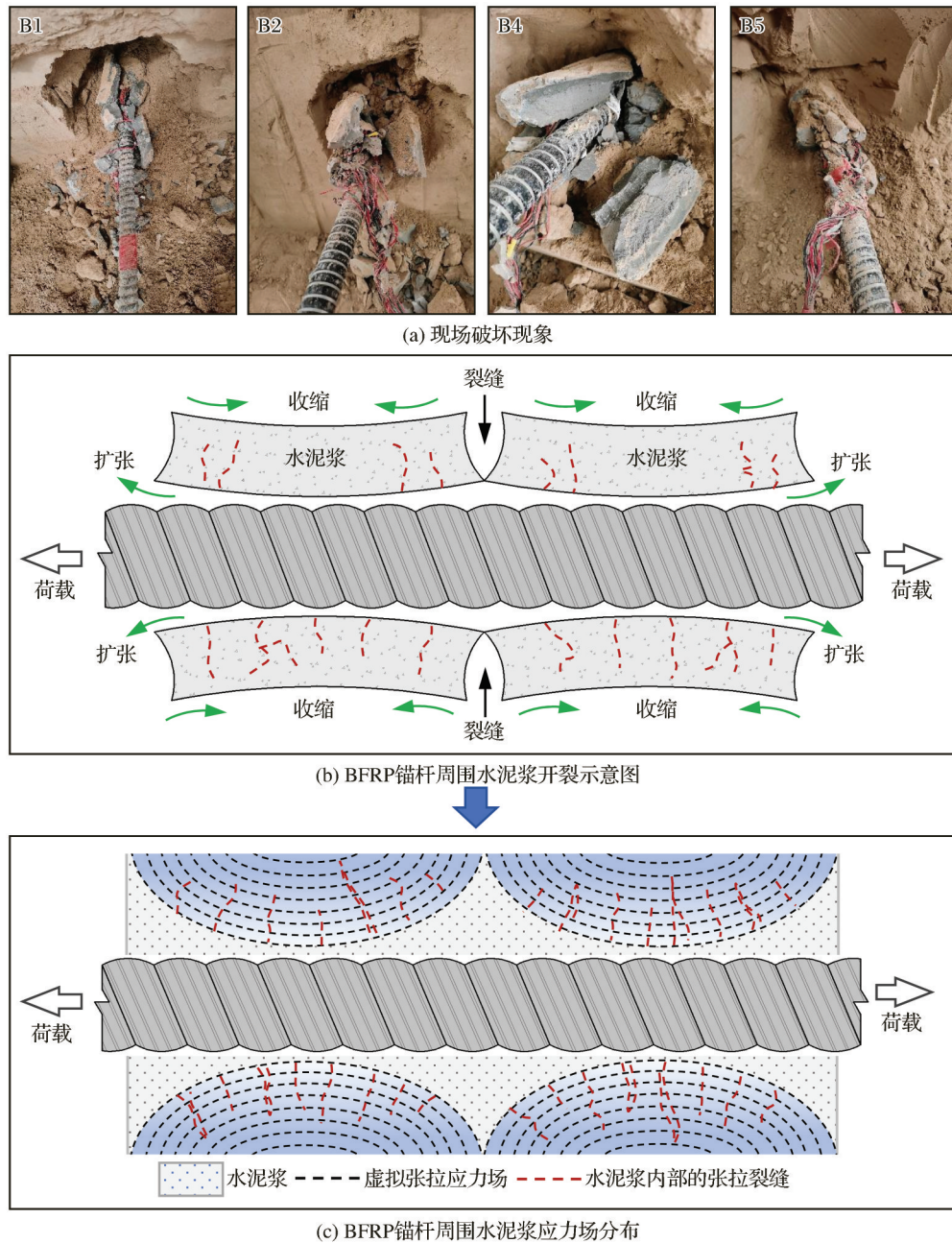


图9 BFRP锚固系统的力学机制(白晓宇等,2024)

Fig. 9 Mechanical mechanism of the BFRP anchoring system(Bai et al, 2024)

缓慢衰减段, B1和B2锚杆从张拉端至过渡点的最大衰减率分别为275.09%和89.35%。在一定范围内增加锚固长度可显著提高系统承载力,但对剪应力的空间分布特征影响不显著。

(3)不同锚固长度条件下,荷载—位移曲线的形态有所区别。短锚(锚固长度为2.0 m)呈单峰型,长锚(锚固长度为4.0 m)出现平缓段且曲线可

划分为弹性、弹塑性和滑移破坏3个阶段,短锚与长锚达到峰值荷载的位移分别为75.67 mm和160.00 mm。

(4)破坏模式受锚固长度显著控制,其中长锚以锚杆—水泥浆界面剪切破坏为主,短锚以水泥浆—土体整体拔出破坏为主。试验推测水泥浆内部存在弧形张拉应力场,其裂缝分布与受力方向相互垂直。

参考文献 (References):

- Dai J Y, Yin S P, Lin F J, et al, 2023. Study on bond performance between seawater sea-sand concrete and BFRP bars under chloride corrosion [J]. *Construction and Building Materials*, 371: 130718.
- Dhand V, Mittal M, Rhee Y R, et al, 2015. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 73: 166-180.
- Dong Z Q, Wu G, Zhu H, et al, 2020. Flexural behavior of seawater sea-sand coral concrete-UHPC composite beams reinforced with BFRP bars [J]. *Construction and Building Materials*, 265: 120279.
- Fan X C, Zhang M Z, 2016. Behaviour of inorganic polymer concrete columns reinforced with basalt FRP bars under eccentric compression: an experimental study [J]. *Composites Part B: Engineering*, 104: 44-56.
- Fiore V, Scalici T, Di Bella G, et al, 2015. A review on basalt fibre and its composites [J]. *Composites Part B*, 74: 74-94.
- Fu G Y, Deo R, Ji J, et al, 2021. Failure assessment of reinforced rock slopes subjected to bolt corrosion considering correlated multiple failure modes [J]. *Computers and Geotechnics*, 132: 104029.
- Godat A, Aldaweela S, Aljaberi H, et al, 2021. Bond strength of FRP bars in recycled-aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 267: 120919.
- Hadjigeorgiou J, Savguira Y, Thorpe S J, 2019. Comparative susceptibility to corrosion of coated expandable bolts [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52 (8): 2665-2680.
- Jiang S H, Li D Q, Zhang L M, et al, 2014. Time-dependent system reliability of anchored rock slopes considering rock bolt corrosion effect [J]. *Engineering Geology*, 175: 1-8.
- Jo B H, Shin G B, Chung C K, 2024. Load transfer behavior and interference effect of load distributive compression anchor in residual soil [J]. *Acta Geotechnica*, 19(6): 3883-3900.
- Li C C, Gao D Y, Wang Y L, et al, 2017. Effect of high temperature on the bond performance between basalt fibre reinforced polymer (BFRP) bars and concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 141: 44-51.
- Liu H T, Zhou G D, Han Z J, et al, 2024. Research on the influence of major ions in weakly alkaline mine water on anchor cable corrosion and protection technique [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 21: e03584.
- Lu Z Y, Li Y C, Xie J H, 2021. Durability of BFRP bars wrapped in seawater sea sand concrete [J]. *Composite Structures*, 255: 112935.
- Manquehual C J, Drevland Jakobsen P, Bruland A, 2021. Corrosion level of rock bolts exposed to aggressive environments in nordic road tunnels [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(11): 5903-5920.
- Monaldo E, Nerilli F, Vairo G, 2019. Basalt-based fiber-reinforced materials and structural applications in civil engineering [J]. *Composite Structures*, 214: 246-263.
- Shugar D H, Jacquemart M, Shean D, et al, 2021. A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya [J]. *Science*, 373: 300-306.
- Tang L, Wu H G, Wei H, et al, 2023. Application of a new basalt fiber-reinforced polymer anchorage structure in the tunnel-slope system under rainfall action [J]. *Journal of Mountain Science*, 20(2): 570-584.
- Tang Y, Sun Z Y, Wei Y, et al, 2022. Compressive behavior and design method of BFRP bars constrained with a BFRP spiral with different spacings in concrete members [J]. *Engineering Structures*, 268: 114757.
- Tang Z X, Zhou Y Z, Feng J, et al, 2021. Concrete protective arches reinforced with BFRP bars: construction and quasi-static structural performances [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 108: 103731.
- Wang X G, Sun X S, Wang Y J, et al, 2023. Service life prediction of prestressed anchor cable exposed to a dry-wet cycling corrosion environment [J]. *Construction and Building Materials*, 406: 133365.
- Wei H, Wu H G, Wu D Y, et al, 2023. Stress response characteristics of BFRP anchors on loess mudstone slope under rainfall conditions [J]. *Journal of Mountain Science*, 20(5): 1469-1482.
- Wei W, Liu F, Xiong Z, et al, 2019. Bond performance between fibre-reinforced polymer bars and concrete under pull-out tests [J]. *Construction and Building Materials*, 227: 116803.
- Zhang S A, Zhang L M, Li X Y, et al, 2018. Physical vulnerability models for assessing building damage by debris flows [J]. *Engineering Geology*, 247: 145-158.
- Zhu C X, Zhao W H, Liu X, 2022. Load transfer behavior and failure mechanism of bird's nest anchor cable anchoring structure [J]. *Applied Sciences*, 12(14): 6992.
- 白晓宇, 吴泽坤, 王凤姣, 等, 2024. BFRP 抗浮锚杆抗拔性能现场试验与荷载传递特性 [J]. *岩石力学与工程学报*, 43(6): 1335-1346. Bai Xiaoyu, Wu Zekun, Wang Fengjiao,

- et al, 2024. Load transfer behavior of BFRP anti-floating anchors based on field pull-out tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 43(6): 1335-1346.
- 陈昌富, 成晓炜, 2012. 双滑块边坡锚固系统时变可靠性分析 [J]. 岩土力学, 33(1): 197-203. Chen Changfu, Cheng Xiaowei, 2012. Time-varying reliability analysis of anchor system of rock slopes with double slide blocks [J]. Rock and Soil Mechanics, 33(1): 197-203.
- 程良奎, 李象范, 2008. 岩土锚固·土钉·喷射混凝土—原理、设计与应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社. Cheng Liangkui, Li Xiangfan, 2008. Geotechnical anchoring, soil nailing, and shotcrete: principles, design, and applications [M]. Beijing: China Architecture and Building Press.
- 冯君, 王洋, 吴红刚, 等, 2019a. 玄武岩纤维复合材料土层锚杆抗拔性能现场试验研究 [J]. 岩土力学, 40(07): 2563-2573. Feng Jun, Wang Yang, Wu Honggang, et al, 2019a. Field pullout tests of basalt fiber-reinforced polymer ground anchor [J]. Rock and Soil Mechanics, 40(7): 2563-2573.
- 冯君, 王洋, 张俞峰, 等, 2019b. 玄武岩纤维与钢筋锚杆锚固性能现场对比试验研究 [J]. 岩土力学, 40(11): 4185-4193. Feng Jun, Wang Yang, Zhang Yufeng, et al, 2019b. Experimental comparison of anchorage performance between basalt fiber and steel bars [J]. Rock and Soil Mechanics, 40(11): 4185-4193.
- 李慈航, 2021. 地震作用下 BFRP 锚固结构动力响应试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 41(6): 1212-1221. Li Cihang, 2021. Experimental investigation on dynamic response of BFRP anchorage structure under earthquake effect [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 41(6): 1212-1221.
- 李达, 常鑫泉, 刘霞, 等, 2024. BFRP 筋增强 RC 隧道衬砌抗弯性能有限元分析 [J]. 公路, 69(9): 407-415. Li Da, Chang Xinquan, Liu Xia, et al, 2024. Finite element analysis of flexural behavior of BFRP reinforced RC tunnel lining [J]. Highway, 69(9): 407-415.
- 李典庆, 蒋水华, 张利民, 等, 2013. 考虑锚杆腐蚀作用的岩质边坡系统可靠度分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 32(6): 1137-1144. Li Dianqing, Jiang Shuihua, Zhang Limin, et al, 2013. System reliability analysis of rock slopes considering rock bolt corrosion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 32(6): 1137-1144.
- 李国维, 高磊, 黄志怀, 等, 2007. 全长黏结玻璃纤维增强聚合物锚杆破坏机制拉拔模型试验 [J]. 岩石力学与工程学报, 26(8): 1653-1663. Li Guowei, Gao Lei, Huang Zhi-huai, et al, 2007. Pull-out model experiment on failure mechanism of full-length bonding glass fiber reinforced polymer rebar [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26(8): 1653-1663.
- 孟凡俊, 陈万祥, 孙航, 等, 2023. 带锚固端 BFRP 筋-混凝土的粘结性能试验与本构模型研究 [J]. 工程力学, 40(7): 171-184. Meng Fanjun, Chen Wanxiang, Sun Hang, et al, 2023. Bond-slip test and constitutive model between BFRP bar with anchorage and concrete [J]. Engineering Mechanics, 40(7): 171-184.
- 王春红, 刘霞, 胡爱国, 2025. 大沙窝滑坡—泥石流灾害链成灾机理及防治措施分析 [J]. 地质灾害与环境保护, 36(1): 1-5. Wang Chunhong, Liu Xia, Hu Aiguo, 2025. Analysis of disaster mechanism and prevention measures for the Dashawogou landslide-debris flow disaster chain [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 36(1): 1-5.
- 吴泽坤, 白晓宇, 孙滢, 等, 2024. 多循环荷载下 BFRP 抗浮锚杆锚固性能现场试验 [J]. 岩石力学与工程学报, 43(9): 2314-2328. Wu Zekun, Bai Xiaoyu, Sun Gan, et al, 2024. Field test of anchorage performance of BFRP anti-floating anchors under multiple cyclic loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 43(9): 2314-2328.
- 杨昊天, 吴红刚, 韦洪, 等, 2024. 降雨条件下三级桥基岸坡-BFRP 锚杆体系的协同变形机制研究 [J]. 岩土力学, 45(增1): 267-276. Yang Haotian, Wu Honggang, Wei Hong, et al, 2024. Coordinated deformation mechanism of three-tier bridge abutment slope-BFRP anchor system under rainfall conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 45(Suppl. 1): 267-276.
- 袁鹏, 陈万祥, 郭志昆, 等, 2021. 中低加载速率下 BFRP 筋-混凝土粘结性能研究 [J]. 工程力学, 38(5): 131-142. Yuan Peng, Chen Wanxiang, Guo Zhikun, et al, 2021. Study on bond behavior of BFRP bars and concrete under medium and low loading rates [J]. Engineering Mechanics, 38(5): 131-142.
- 张书博, 王长盛, 王刚, 等, 2022. BFRP 筋锚固节理岩体剪切行为试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 41(4): 712-724. Zhang Shubo, Wang Changsheng, Wang Gang, et al, 2022. Experimental study on the shear behaviors of bolted rock joints reinforced with BFRP bars [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 41(4): 712-724.
- 张玉, 刘晓敏, 石怡安, 等, 2024. 动静复合拉拔作用下锚杆结构的破坏机制研究 [J]. 黄金科学技术, 32(3): 481-490. Zhang Yu, Liu Xiaomin, Shi Yi'an, et al, 2024. Dam-

- age mechanism of anchor bolt structure under dynamic and static pull-out loads [J]. *Gold Science and Technology*, 32(3):481-490.
- 赵文, 王浩, 陈云, 等, 2016. BFRP 筋锚杆土质边坡支护应用研究 [J]. *工程地质学报*, 24(5):1008-1015. Zhao Wen, Wang Hao, Chen Yun, et al, 2016. Laboratory and field tests use of BFRP anchor bolt in supporting soil slope [J]. *Journal of Engineering Geology*, 24(5):1008-1015.
- 中华人民共和国国家标准编写组, 2015. 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范: GB 50086-2015 [S]. 北京: 中国计划出版社. National Standard Writing Group of the People's Republic of China, 2015. Technical code for engineering of ground anchorages and shotcrete support: GB 50086-2015 [S]. Beijing: China Planning Publishing House.
- 重庆市城乡建设委员会, 2013. 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. Chongqing Urban and Rural Construction Committee, 2013. Technical code for building slope engineering: GB 50330-2013 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press.

Bonding Performance and Load Transfer Behavior of BFRP Anchors Based on Field Pull-out Tests

ZHU Yaozhang¹, WEI Hong²

1. *China Railway 14th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Jinan 250000, Shandong, China;*

2. *School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China*

Abstract: In order to advance the engineering applicability of basalt fiber reinforced polymer (BFRP) anchors in complex geological settings, this study undertook field pull-out tests on a railway slope and conducted a systematic analysis of the bonding performance and load transfer characteristics of BFRP anchors under in-situ stress conditions. The investigation focused on axial force, shear stress, load-displacement curves, and macroscopic failure phenomena under varying pull-out loads to elucidate the influence of anchorage length on the mechanical response. The findings demonstrate that when the anchorage length is less than 3.0 meters, the axial force distribution remains relatively uniform. However, lengths exceeding 3.0 meters result in discrete distributions with a tendency to shift towards greater depths. The shear stress along the anchorage depth follows a biphasic pattern characterized by rapid attenuation followed by gradual attenuation. While increasing the anchorage length significantly enhances the load-bearing capacity, it does not alter the overall distribution trend of shear stress. The load-displacement curves of long anchors exhibit cumulative failure characteristics, which can be categorized into elastic, elastoplastic, and sliding failure stages. Post-test analyses indicate that the spatial distribution of cracks within the grout is influenced by a tensile stress field, which mirrors the deformation sequence and stress disparities between the two interfaces. These findings elucidate the load transfer mechanism and failure modes of BFRP anchoring systems, offering both theoretical support and empirical evidence for parameter design and practical engineering applications.

Key words: BFRP; field pull-out test; load transfer behavior; bond performance; load-displacement curves