

3.2DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1640

玄武岩纤维与钢筋锚杆锚固性能现场对比试验研究

冯 君¹, 王 洋², 张俞峰¹, 黄 林¹, 何长江¹, 吴红刚³

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096;

3. 中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 玄武岩纤维(BFRP)锚杆具有抗拉强度高、耐腐蚀性能好等优点,是岩土锚固结构中钢筋的良好替代品,近年颇受业界关注。通过在黄土地层中开展4组 $\phi 25$ mm BFRP锚杆和钢锚杆的现场拉拔试验,初步研究两种材质锚杆的破坏模式和锚固性能差异。研究结果表明:对于诸如 $\phi 25$ mm类较大直径土层锚杆,拉拔过程中锚固体系的灌浆体内外界面破坏迹象共存,但最终破坏模式受控于灌浆体与土层界面(第二界面),且BFRP锚杆与砂浆内界面(第一界面)破坏程度明显高于钢锚杆;两种材质锚杆的极限承载力相近,界面黏结强度均随锚固长度的增大而减小;受两种材质锚杆本身的加工工艺和材料力学性能影响,试验中钢锚杆与灌浆体的黏结性能优于BFRP锚杆;相同荷载水平,相同位置处,BFRP锚杆杆体轴力大于钢锚杆,轴力衰减速率略小于钢锚杆;峰值剪应力BFRP锚杆小于钢锚杆。

关 键 词: 黄土地层; BFRP锚杆; 现场拉拔试验; 极限承载力; 破坏模式

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2019)11-4185-09

Experimental comparison of anchorage performance between basalt fiber and steel bars

FENG Jun¹, WANG Yang², ZHANG Yu-feng¹, HUANG Lin¹, HE Chang-jiang¹, WU Hong-gang³

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

3. Northwest Research Institute Co., Ltd., of CREC, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Basalt fiber (BFRP) anchor has many advantages, such as high tensile strength, good corrosion resistance, etc. It is a good substitute for reinforcement in geotechnical anchorage structure, and has attracted much attention in recent years. Four groups of field pull-out tests were carried out in the loess stratum to study the failure modes and anchorage performance difference between the 25 mm diameter BFRP bolts and steel bolts. The results show that the failure signs on inner and outer surface of grouting coexist in the process of drawing for large diameter soil anchor. However, the ultimate failure mode is controlled by the interface between grouting and soil (the 2nd interface), and the damage degree of the interface between BFRP bolt and grouting (the 1st interface) is evidently higher than that of steel bolt. The ultimate bearing capacity of two bolts is similar, and the interfacial bond strength decreases with increasing anchorage length. The bond performance between the steel bolt and grouting is better than that of the BFRP bolt, which is mainly caused by the different processing technology and material mechanical properties between the two bolts. At the same load level and position, the axial force of BFRP bolt is larger than that of steel bolt, and the attenuation rate of axial force is slightly smaller than that of steel bolt; the peak shear stress of BFRP bolt is also smaller than that of steel bolt.

Keywords: losses; BFRP bolts; field pull-out tests; bearing capacity; failure mode

1 引 言

长期以来,采用钢锚杆的岩土锚固结构多存在因钢筋腐蚀引起的耐久性问题,腐蚀部位多出现在

钢筋锚固自由段和锚头等裸露部位,被动的采取防腐措施不但增加工程成本,而且难以从根本上解决问题^[1]。

20世纪90年代,新型FRP筋材(以开发较早

收稿日期: 2018-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51178402); 中国中铁股份公司科技开发计划(2015-重点-32, 中铁科研院(科研)字 2015-KJ037-G006-03)。This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51178402), the Technology Development Plan of China Railway Corporation (2015-key-32) and China Academy of Railway Sciences Corporation Limited (Scientific Research) (2015-KJ037-G006-03).

第一作者简介: 冯君,男,1977年生,博士,副教授,主要从事岩土力学方面的教学与研究工作。E-mail: fengjun4316@163.com

通讯作者: 王洋,男,1992年生,博士研究生,主要从事桩基础方面的研究工作。E-mail: wy_0127@163.com

的 GFRP 筋和 CFRP 筋为主) 以其轻质高强、耐腐蚀性能优越等特点, 开始在岩土锚固领域崭露头角, FRP 锚固技术迅速成为业界的研究热点。Benmokrane 等^[2]开展了 GFRP 锚杆与混凝土的黏结性能拉拔试验, 得出 GFRP 锚杆与混凝土的黏结强度和钢筋相仿, 但鉴于 GFRP 较小的弹性模量, 失效时与混凝土的黏结滑移相对较大。Zhu 等^[3]通过现场试验对 GFRP 锚杆加固边坡的实用性进行评估, 对比研究 GFRP 锚杆与钢筋锚杆的界面力学传递机制的不同, 并建立了双曲线形式的界面剪应力-剪应变关系模型。Cheng 等^[4]通过室内和现场试验对不同工况下的 GFRP 锚杆和 CFRP 锚杆锚固效果进行评估, 总结了 FRP 锚杆与钢筋锚杆锚固性能的优劣, 并认为 CFRP 筋作为岩土锚固材料性价比较低。

玄武岩纤维 (BFRP) 锚杆由于开发较晚, 研究相对滞后。顾兴宇等^[5]采用试验手段研究了 BFRP 筋的主要物理力学性能, 指出 BFRP 筋具有优良的抗拉强度, 但弹性模量偏低, 可通过增大玄武岩纤维含量或置入钢丝的方法增大弹性模量, 改善筋体延性; 吴刚^[6]、Wu^[7]、Dong^[8]等开展了一系列考虑不同环境下 BFRP 筋与混凝土的黏结性能试验, 并提出了考虑温度、潮湿环境等条件影响下的黏结强度退化预测模型; 赵文^[9]、高先建^[10]等通过 BFRP 锚杆加固土质边坡的现场试验初步验证了 BFRP 锚杆的可适性, 并对比钢筋锚杆的加固效果, 给出了 BFRP 锚杆加固土质边坡设计参数建议值。

近年来的研究成果表明^[11], 在结构加固领域 BFRP 筋略有取代 GFRP 筋的趋势, 原因在于 BFRP 更加突出的抗拉强度和耐腐蚀性能, 但介于筋体本身外包树脂类固有的脆性特征, 实用性锚具结构和连接件的研发便稍显困难; 且相比 GFRP 筋, 目前国内外缺乏对 BFRP 筋在实际工程应用中的长期性能评估监测, 距离形成较完善的国家规范和行业标准还有一定路程^[7], 这些都制约了 BFRP 筋材在土木工程中的推广和应用。

相对于结构加固工程, FRP 在岩土锚固领域的研究更加滞后, 目前国内外鲜有针对 BFRP 锚杆试验研究的相关报道, 尤其是现场试验, 冯君等^[12]通过开展 BFRP 锚杆加固黄土边坡的现场拉拔试验, 得出了拉拔体系的破坏模式, 初步研究了 BFRP 锚杆锚固特性, 证明了 BFRP 筋用作锚杆的可行性。如能进一步明确 BFRP 锚杆与传统钢筋锚杆的锚固差异, 将有助于进一步了解 BFRP 锚杆的工作性能, 明确在实际工程中的应用前景。为此本文开展了

BFRP 锚杆和钢筋锚杆在黄土边坡中的现场拉拔对比试验研究。采用传统应变片传感器监测杆体的轴力分布规律, 并通过对锚固结构的开挖剖析, 判定锚杆破坏模式, 分析两种材质锚固体系的受力特性和破坏机制, 研究成果可一定程度上促进 BFRP 岩土锚固技术的推广和应用。

2 试验方案及过程

2.1 场地简介

本次试验现场位于甘肃省兰州市榆中县定远镇。该场地地貌单元属山前冲洪积扇与阶地后缘交汇复合地貌, 场区较远处冲、洪沟较发育。场地地形起伏较小, 有三级耕地平台, 每级平台高 2.0 m 左右。区内地层较为简单, 土层主要成分为黄土状粉土, 系第四纪冲、洪积产物。黄褐色, 稍湿, 稍密, 土质较均匀, 虫孔、孔隙较发育, 无光泽反应, 摇振反应中等, 干强度低, 韧性低, 详细物理力学特性见表 1。除黄土状粉土之外, 场地土层中还掺有少量杂填土。锚杆钻孔开挖深度内无地下水影响, 土层湿陷性评价为 I 级: 非自重湿陷性。

表 1 黄土状粉土主要物理力学参数
Table 1 Main mechanical parameters of loess

密度 /(g/cm ³)	含水率 /%	天然孔隙比	压缩模量 /MPa	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /kPa
1.52	17.8	1.097	2.8	19.85	11.16

2.2 试验锚杆参数

本次试验为现场足尺拉拔破坏性试验, 试验锚杆共 4 组, 均在同一场区内进行, 其中 2 根 BFRP 锚杆, 2 根钢筋锚杆。BFRP 锚杆由浙江石金玄武岩有限公司提供, 锚杆主要力学参数见表 2, 相关设计指标见表 3。

表 2 试验锚杆力学性能参数
Table 2 Mechanical performance parameters of test bolt

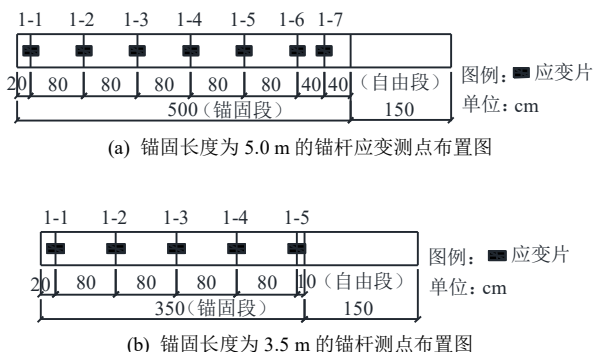
类别	密度 /(g/cm ³)	弹性模量 /GPa	抗拉强度 /MPa	极限应变 /%	泊松比
BFRP	1.90	42	800	2.00	—
钢筋	7.85	210	480	>10.0	0.3

表 3 试验锚杆设计参数
Table 3 Design parameters of test bolt

编号	直径 /mm	锚固长度 /m	自由端 /m	钻孔直径 /mm	倾斜角 /(°)
B-25-1	25	3.5	1.5	130	15
B-25-2	25	5.0	1.5	130	15
S-25-1	25	3.5	1.5	130	15
S-25-2	25	5.0	1.5	130	15

2.3 传感器布置

采用传统应变片传感器监测锚杆杆体轴力, 应变片型号为 BE120-5AA, 相应数据采用 DH3816N 静态应变测试系统进行采集, 应变片布置如图 1 所示。



(c) 黏贴应变片的锚杆

图 1 锚杆测点布置图

Fig.1 Layout of measuring points of bolts

2.4 试验准备

试验锚杆钻孔位于距坡顶 0.8 m 的坡面同一高度处, 孔径均为 130 mm, 钻孔方向倾斜向下, 与地平线呈 15° 夹角。试验钻孔间距为 1.2 m 左右, 以避免群锚效应影响。钻孔深度超出锚杆锚固长度 0.5 m 以保证全长灌浆, 这段灌浆体在本文中称为无筋锚固段。锚杆置入后采用孔底翻浆的注浆方式, 注入质量配比为水泥:砂:水 = 2.0:1.0:2.3 的水泥砂浆, 水泥为 42.5R 普通硅酸盐水泥, 砂为中砂。养护 28 d, 砂浆抗压强度测定为 11.5 MPa。

由于 BFRP 锚杆抗剪性能差, 难以承受传统锚具较大的夹持力, 本次试验采用钢套筒对杆体加以保护, 套筒长度为 0.5 m, 套筒与锚杆之间由环氧树脂和固化液按 4:1~5:1 质量比的均匀混合液进行填充, 混合液良好的黏结性能足以保证锚杆-钢套筒结构稳定性。

2.5 试验过程

试验的加载装置包括: 吨位为 100 t, 行程为 20 cm 的手动式油压穿心千斤顶、若干刚性垫板, 垫块、不同型号的锚具、前期浇筑的横截尺寸为 0.5 m×0.5 m 的混凝土反力墩等; 杆端位移采用精度

为 0.01 mm, 量程为 50 mm 的百分表进行测量; 荷载测量装置 50Φ60 振弦式锚索测力计及配套的数据采集仪。

本次试验采用逐级加载的方法, 通过手动式油压表控制每一级的加载量和加载速率, 保持每级加载 0.5 MPa, 加载时间控制在 6~8 s 之间, 直到油压无法施加, 锚固体系发生破坏为止。在此过程中要注意在每级荷载施加结束后, 应立即测读相应的杆端位移量, 并每隔 3 min 读取一次, 直到百分表位移稳定并读取相应位移量后再施加下一级荷载。现场加载图示见图 2。

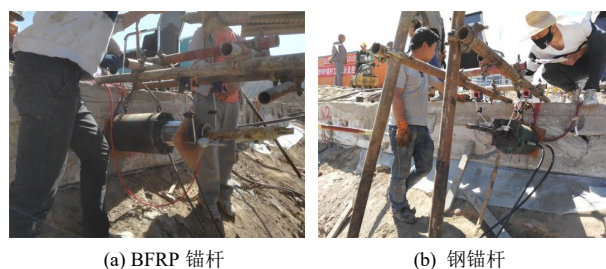


图 2 试验锚杆拉拔图示

Fig.2 Drawing of test bolts

3 试验结果与分析

3.1 拉拔荷载与 P-S 曲线

本文中临界松动荷载为锚固体系产生界面松动的临界荷载, 本次试验取拉拔过程中锚固段发出第 1 次声响时拉拔荷载与锚杆自由端位移相对前期发生较明显变化时拉拔荷载, 两者中的较小者。对于某些安全系数要求较高的特殊工程, 临界松动荷载可作为锚固体系抗拔性能的重要依据。

极限荷载为千斤顶可以施加的最大荷载。界面平均黏结强度由极限荷载经下式计算获得^[13]:

$$\tau = \frac{P_{\max}}{\pi La} \quad (1)$$

式中: $P_{\max}$ 为极限破坏荷载 (kN); τ 为界面平均黏结强度, 这里专指第二界面 (MPa); a 为钻孔直径, 取 130 mm; L 为界面黏结长度, 计算中不计无筋锚固段 (m)。

由表 4 可得, 两种材质锚杆的极限承载力相近, 且均随锚固长度的增大而增大, 但第二界面平均黏结强度均随锚固长度的增大呈减小趋势, 说明锚固长度达到某临界值, 锚固长度的增加对极限承载力的提高影响不大, 该值为锚固体系某一特定工况下的有效锚固长度。

图 3 给出了 4 组试验锚杆加载端 P-S 曲线, 从图中可得: 相同荷载下 BFRP 锚杆的位移量大于钢

筋锚杆,这主要由两种材料的弹性模量差异决定的;从趋势上看,钢筋锚杆斜率较大且变化率较小,在0~110 kN 荷载范围内表现的更为稳定。

表4 试验锚杆拉拔结果

Table 4 Pull-out test results of anchors

编号	直径 /mm	锚固长度 /m	临界松动荷载 /kN	极限荷载 /kN	第二界面 平均强度 /MPa
B-25-1	25	3.5	114.52	141.17	0.099
B-25-2	25	5.0	131.50	161.98	0.079
S-25-1	25	3.5	119.86	142.00	0.099
S-25-2	25	5.0	145.48	171.89	0.084

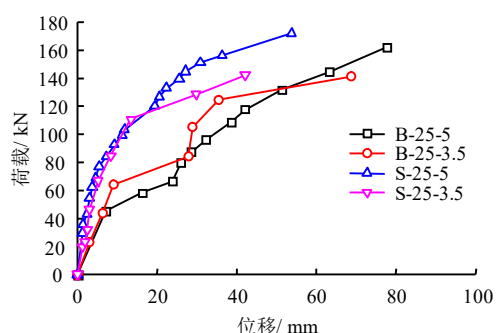


图3 荷载-位移(P-S)曲线

Fig.3 Load-displacement curves

3.2 锚杆破坏模式

本次试验在拉拔结束后,对锚杆进行逐个开挖,现场开挖图示见图4。

通过对图4所示4组 $\Phi 25$ mm试验锚杆的观察,可得出材质的不同并没有对锚固体体系的最终破坏形态产生本质影响,4根锚杆的最终破坏形式均为第二界面剪切破坏,即锚固体与土体之间的界面脱黏破坏。破坏的具体表现形式为

(1) 锚固尾端的无筋锚固段拉断或劈裂,见图4左幅。无筋锚固段没有锚杆内芯,抗拔性能较弱,随着锚固体轴向内力的不断增大,注浆体某一薄弱面达到极限抗拉强度而发生断裂。图中显示,断裂面多发生在锚杆尾部界面,该截面处结构组分发生转变,易存在结构性缺陷而引发应力集中。

(2) 第二界面土层侧壁有明显的滑移痕迹,见图4右幅。滑移量的大小与拉拔荷载、锚杆类型、锚固长度、注浆体形态、接触土层的种类以及力学性能有关。相同锚固长度,相近的极限破坏荷载下,BFRP 锚固体的滑移量大于钢筋锚杆,说明 BFRP 锚固体体系第二界面的应力水平相对钢锚杆更高、受荷深度更大;锚固长度增加,极限拉拔荷载增大,滑移量也略有增加;注浆体形态越规则,表面越圆



(a) 锚固长度为 3.5 m, BFRP 锚杆



(b) 锚固长度为 5.0 m, BFRP 锚杆



(c) 锚固长度为 3.5 m, 钢筋锚杆



(d) 锚固长度为 5.0 m, 钢筋锚杆

图4 试验锚杆第二界面破坏形态

Fig.4 Failure modes of the 2nd interface

滑,与土层之间的摩阻力越小,剪切滑移越明显;图4所示,开挖出的所有试验锚杆的灌浆体完整性较好,灌浆体表面因水泥砂浆的黏聚性而附有一层薄土,实际的剪切面并不是位于灌浆体与接触土层之间,而是位于接触土层内部,因此,土层的类型和力学性质将对剪切面滑移量起控制作用,如图4(a)、4(c)、4(d)中土层较为均一,滑移迹象明显,滑移量较大,而图4(b)中锚固后半段土层含有较多大小不一的砂石颗粒,土层中无明显滑移迹象,滑移量也相对较小。

整体而言,两种材质锚杆的第二界面没有显著的破坏差异,而对锚固体进行解剖后,发现锚固第一界面破坏差异较为明显,以锚固长度为5 m的两组锚杆为例,见图5。

图5(a)为BFRP锚杆锚固长度为2 m左右位置处锚固体剖析图(图中测尺起始于锚杆尾端);图5(b)为钢筋锚杆锚固前段0.4 m左右位置处剖析图。

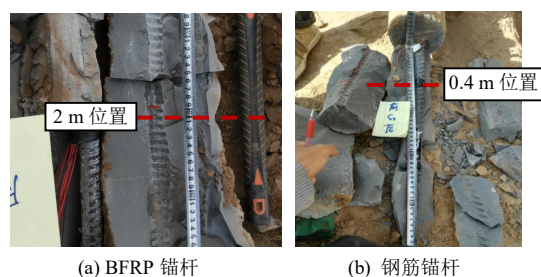


图 5 锚杆第一界面形态
Fig.5 Failure modes of the 1st interface

从锚杆的表面形态和灌浆体界面状态来看, 两者存在以下几点区别:

(1) 锚杆的表面形态方面, 锚固长度为 2 m 处的 BFRP 锚杆表面有明显的摩擦起毛现象, 横肋顶部呈现白色, 为表面树脂层磨损所致; 而钢筋锚杆只是在锚固前段 0.4 m 左右范围内存在螺纹顶部轻微磨光现象, 后段锚固体几乎看不到任何明显损伤迹象。

(2) 灌浆体界面状态方面, BFRP 锚杆相应位置处灌浆体的界面磨损较严重, 表面残留白色砂浆粉末; 而钢筋锚杆则几乎没有磨损迹象。

(3) 拉拔试验后, 钢筋锚杆锚固体的抗打击性能优于 BFRP 锚杆, 钢筋锚杆锚固体完整性更佳。

综上所述, 对于较大直径锚杆, 锚固体系的主要破坏形式以第二界面剪切破坏为主, 第一界面破坏伴随其中。对比得出, 钢筋锚杆的第一界面剪切迹象不明显, 该界面破坏几乎可以忽略; 而 BFRP 锚杆第一界面破坏较严重, 当加固岩体等力学性能较好的土层时, 有可能第一界面先于第二界面发生破坏。因此, BFRP 作为一种新型材料的锚杆, 与传统钢锚杆锚固体系存在明显差异的是锚杆与灌浆体之间的黏结界面, 因此对于第一界面的探讨具有实质性意义。

本次试验对锚固体的剖析结果表明: 相同外部条件, 钢锚杆与水泥砂浆的界面黏结性能优于 BFRP 锚杆; 另外, 与本次试验同时开展的 BFRP 锚杆与灌浆体界面的剪切破坏试验表明, BFRP 第一界面黏结强度大致介于 0.4~0.7 MPa, 相似条件下钢锚杆与灌浆体间的界面黏结强度约为 1.7~2.6 MPa^[14], 大于 BFRP 锚杆。因此, 数据与剖析结论相一致。

产生上述结论的原因主要是由两种材质锚杆本身的加工工艺和材料力学性能决定的。

(1) 加工工艺表现在: BFRP 锚杆为各向异性体, 表面由一层光滑的树脂层包裹, 降低了锚杆与砂浆体之间的表面摩擦力; 其次, 树脂层抗剪、抗压性能差, 极易因层面剪切或剪胀而剪碎失效。

两种锚杆表面的螺纹几何形态差异, 见图 6, 图中 h 表示横肋高度, d 为横肋的宽度。本文通过定义无量纲宽高比 ξ :

$$\xi = d / h \quad (2)$$

来评价锚杆螺纹肋与注浆体表面机械咬合力的优劣。已有研究成果表明, h 减小, 界面剪切刚度降低; 而 d 越大则意味着横肋间距越小, 当肋间距趋于无穷小时等效为光圆锚杆, 只是增大了锚杆直径, 却从某种程度上削弱了界面剪切强度, 因此 ξ 越小, 机械咬合效果越好。

本次试验所用钢筋锚杆: $h = 2.3 \text{ mm}$, $d = 1.5 \text{ mm}$; BFRP 锚杆: $h = 1.8 \text{ mm}$, $d = 10 \text{ mm}$ 。经计算得钢筋锚杆宽高比远小于 BFRP 锚杆, 钢筋锚杆与砂浆体之间机械咬合力大于 BFRP 锚杆。由于锚杆与注浆体的界面摩擦力和横肋与水泥砂浆的机械咬合力是黏结结合力的主要组成部分, 因此, 相同条件下 BFRP 锚杆与水泥砂浆之间的界面黏结强度小于钢锚杆。

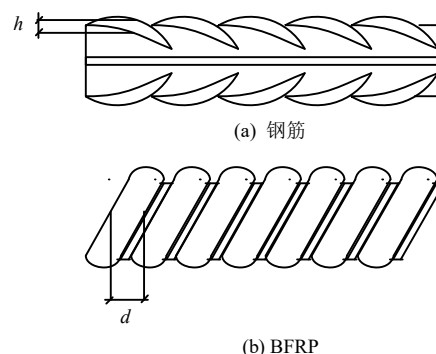


图 6 两种锚杆的示意图
Fig.6 Schematic diagram of two anchors

(2) 材料力学性能差异主要体现在两种锚杆弹性模量的不同, 由表 1 可知, BFRP 与钢筋弹模之比为 1:5。相同荷载下, 弹性模量越小, 锚杆的轴向应变越大, 锚杆与灌浆体之间的剪切-滑移效应越显著。

3.3 锚杆轴力分布

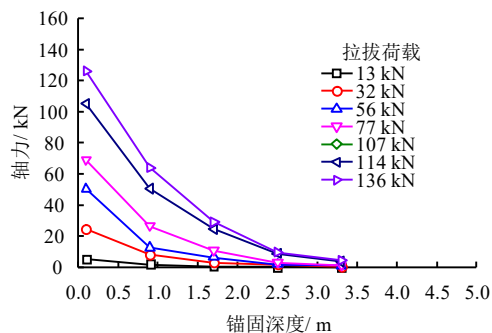
为对比新型 BFRP 锚杆与传统钢锚杆的力学传递机制的差异, 建立锚杆在拉拔荷载下的轴力分布曲线, 见图 7。为便于比较, 作图均采用同一比例。

对比分析可得:

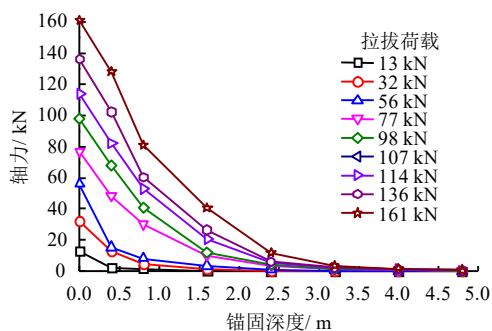
(1) BFRP 锚杆与钢筋锚杆的轴力分布形态相同。黄土地层中, 两种锚杆的杆体轴力均随锚固深度呈衰减趋势。

(2) 在相同的较低荷载水平下, 两种材质锚杆轴力分布范围均随锚固长度的增加而减小, 这可能

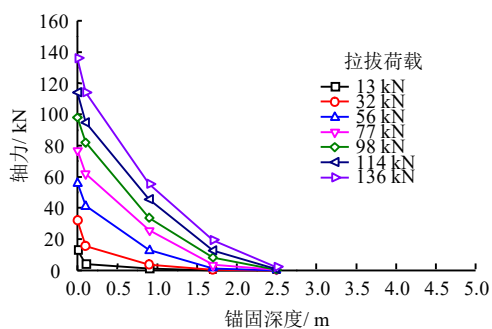
是锚固长度的增加增大了灌浆体整体约束能力, 荷载的界面传递在某种程度上受到抑制所致; 从减小程度上看, 钢锚杆比 BFRP 锚杆体现的更为明显, 表明灌浆体对钢锚杆的约束性更好; 随着荷载的增大, 这种抑制会逐步被打破, 界面应力逐步向锚固深部发展。



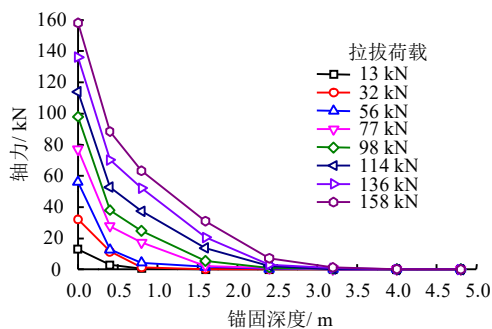
(a) 锚固长度为 3.5 m 的 BFRP



(b) 锚固长度为 5.0 m 的 BFRP



(c) 锚固长度为 3.5 m 的钢筋



(d) 锚固长度为 5.0 m 的钢筋

图 7 试验锚杆轴力分布图

Fig.7 Axial force distributions of anchors

(3) 沿锚固深度, BFRP 锚杆的轴力衰减速率小于钢筋锚杆; 相同荷载水平下, 相同位置处的 BFRP 锚杆杆体轴力大于钢筋锚杆。原因在于 BFRP 锚杆的弹性模量约为钢筋锚杆的 1/5, 相同的拉拔荷载下变形量相对较大, 加之 BFRP 锚杆抗剪性能差的缺陷以及两种锚杆表面螺纹宽高比引起的机械咬合力差异, 使得 BFRP 锚杆与水泥砂浆之间更易产生界面脱黏, 荷载进一步向锚固深部传递, 因此 BFRP 锚杆受荷载作用影响深度大于钢筋锚杆。图中显示, 黄土地层中 BFRP 锚杆的有效锚固长度约为 3 m, 荷载影响深度在 5 m 以上。钢筋锚杆的荷载传递深度约为 3.5 m 左右, 有效锚固长度为 2.5 m 左右。

3.4 界面剪应力分布

取锚杆相邻两测点 i 和 $i+1$ 之间的微元体为研究对象, 见图 8。假设两测点间的界面剪应力 τ_i 为均匀分布, 建立界面剪应力 τ_i 与两测点轴力 N_i 和 N_{i+1} 之间的平衡关系式:

$$\pi D \Delta L \tau_i = N_{i+1} - N_i \quad (3)$$

式中: D 为锚杆直径 (mm); ΔL 为测点 i 和 $i+1$ 之间的微元体轴向长度 (m)。

上式可变化为计算界面剪应力的差分公式:

$$\tau_i = \frac{N_{i+1} - N_i}{\pi D \Delta L} \quad (4)$$

依据上式计算锚杆与灌浆体的界面剪应力, 从而建立第一界面剪应力与锚固深度的关系曲线, 并采用统一比例作图。

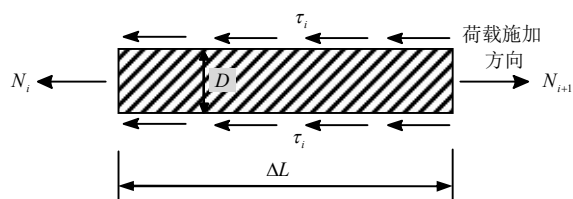


图 8 锚杆两测点间微元体平衡示意图

Fig.8 Schematic diagram of stress balance between two points of anchor

通过对比发现:

(1) 宏观上讲, 两种锚杆的界面剪应力分布形态存在较多共性。孔口处剪应力为 0, 随着深度的增加呈现先增大后减小的单峰曲线形式, 峰值剪应力均位于锚固前端 0.5 m 范围内。

(2) 细观分析, 相同荷载下相同位置处的钢筋锚杆剪应力水平大于 BFRP 锚杆; 钢筋锚杆的峰值剪应力也大于 BFRP 锚杆, 98 kN 的拉拔荷载作用

下, 锚固长度为 5.0 m 的 BFRP 锚杆峰值剪应力约为 1.0 MPa 左右, 而钢筋锚杆的峰值剪应力在 1.5 MPa 以上。这与上文中钢筋锚杆锚固体系的第一界面黏结强度大于 BFRP 锚杆的结论相一致。

综上所述, 在不考虑其长期力学行为及其腐蚀性环境作用时, 由于 BFRP 筋拉伸模量相对较小、易变形的特性, 锚固界面作为锚固体系的薄弱缺陷而存在, BFRP 筋作为一种新型锚杆与传统钢筋锚杆相比在锚固第一界面力学性能上存在一定不足。但是, 以玄武岩为材料的纤维筋锚杆与岩石性材料的变形协调性更好, 如能采取措施, 例如改进锚杆表面材质抗剪性能以及与水泥砂浆的黏聚性能, 来弥补第一界面的黏结缺陷, 并施加一定预应力以降低锚固体的变形量。那么在未来的工程界, 拥有良

好抗拉强度和耐腐蚀性能优势的 BFRP 筋锚杆可能在岩土锚固领域占据重要地位。

3.5 与前人研究的对比探讨

白晓宇等^[15]通过现场试验研究了中风化花岗岩中 $\phi 28$ mm GFRP 筋与钢筋两种不同材质抗浮锚杆的破坏模式、极限承载力、杆体轴力分布和界面剪应力分布规律; 李国维等^[16]基于引江济淮试验工程, 开展软岩条件下钢筋和 GFRP 筋锚杆承载性能对比试验; 本文的研究结论与上述前辈的研究存在诸多共性, 比如: 杆体轴力非线性、沿锚固深度衰减的分布形态; 锚固界面剪应力沿锚固深度非线性分布, 剪应力峰值点接近于锚固前端; 拉拔荷载越大, 剪应力越大等基本规律, 但在与钢筋锚杆的对比分析研究上存在些许不同, 具体表现见表 5。

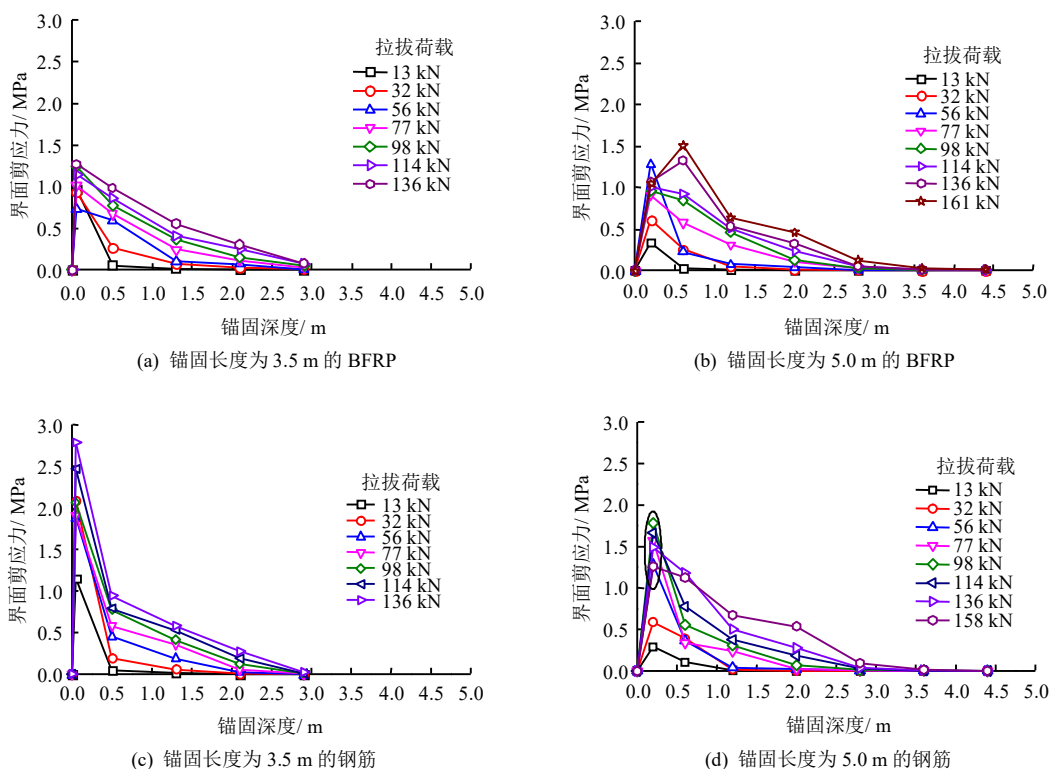


图 9 锚杆轴向剪应力分布图
Fig.9 Interface shear stress distributions of anchors

表 5 FRP 锚杆与钢筋锚杆对比
Table 5 Comparison between steel anchor and FRP anchor

文献来源	地质条件	锚杆类型	灌浆体等级	加载方式	破坏模式		
张明义	中风化花岗岩	φ28 mm 全螺纹 GFRP 筋与钢筋	M30 水泥砂浆	逐渐加载	GFRP: 锚固前端锚杆纤维片断裂, 杆体剪切破坏钢筋: 第二界面破坏		
李国维	河道软岩边坡	φ25.5 mm 全螺纹 GFRP 筋与φ26 mm 钢筋		循环加载	GFRP: 杆体劈裂, 拉断破坏钢筋: 杆体拔出破坏		
本文	黄土边坡	φ25 mm 全螺纹 BFRP 筋与钢筋	抗压强度为 11.5 MPa	逐级加载	均为第二界面破坏		
文献来源	极限抗拔力	相同荷载水平, 相同位置处杆体轴力	轴力衰减速率	峰值 剪应力	第一界面 黏结强度	第二界面 黏结强度	有效锚固长度
张明义	GFRP>钢筋	GFRP>钢筋	GFRP<钢筋	GFRP<钢筋		GFRP>钢筋	均在 2.5 m 左右
李国维	GFRP>钢筋	GFRP<钢筋	GFRP>钢筋	GFRP>钢筋	GFRP>钢筋		GFRP: 1.75 m 钢筋; 2.75 m
本文	BFRP 略小于钢筋	BFRP>钢筋	BFRP<钢筋	BFRP<钢筋	BFRP<钢筋		BFRP: 3.0 m 钢筋; 2.5 m

出现上述区别的原因是多方面,就锚固体系而言,它是一个涉及多介质、多界面的复杂耦合体,在耦合体中注浆体作为过渡层,对锚固界面的力间传递起至关重要的作用,因此,注浆体力学性能的差异有可能造成锚固体系破坏模式和荷载轴向分布的根本性变化;其次,锚杆所处的地层环境,包括埋深、土层性能等的不同都将造成锚固结构所受周围地应力的差异,从而影响锚固性能。

目前对于锚固体系界面力学行为的研究主要依靠对杆体轴力的监测,多假定锚固第一界面与第二界面同步受力,以此开展相关理论研究工作。显然这种做法无法全面、真实地反映锚固结构的力学传递机制,因此采取有效手段对锚固第二界面开展针对性研究同样具有较高的学术价值和工程价值。

4 结 论

(1) 相同锚固长度的 BFRP 锚杆与钢筋锚杆极限拉拔力相近,且均随锚固长度的增大而增大,但第二界面平均黏结强度均随锚固长度的增大呈减小趋势,说明有效锚固长度的客观存在性。

(2) 黄土地层,较大直径锚固体系的主要破坏形式为第二界面剪切破坏,第一界面破坏伴随其中。本文试验开挖剖析表明,钢筋锚杆的第一界面剪切迹象不明显,该界面破坏几乎可以忽略;而 BFRP 锚杆第一界面破坏较严重,当加固岩体等力学性能较好的土层时,有可能第一界面先于第二界面发生破坏。

(3) 受控于锚杆的加工工艺和原材料的力学性能, BFRP 锚杆第一界面剪切性能无法媲美钢筋锚杆;试验工况下, BFRP 第一界面黏结强度参考值为 0.4~0.7 MPa,钢锚杆与灌浆体间的界面黏结强度为 1.7~2.6 MPa。

(4) 相同的较低荷载水平下,两种材质锚杆轴力分布范围随锚固长度的增大而减小,这一现象钢锚杆体现得更为明显;沿锚固深度, BFRP 锚杆的轴力衰减速率比钢筋锚杆慢;相同荷载水平下,相同位置处的 BFRP 锚杆杆体轴力大于钢锚杆。

(5) 两种锚杆的界面剪应力分布形态服从随着深度的增加呈现先增大后减小的单峰曲线形式,峰值剪应力均位于锚固前端 0.5 m 范围内;相同荷载下,相同位置处的钢筋锚杆剪应力水平大于 BFRP 锚杆。

参 考 文 献

[1] 程良奎. 岩土锚固的现状与发展[J]. 土木工程报, 2001,

34(3): 7—13.

CHENG Liang-kui. Present status and development of ground anchorages[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(3): 7—13

[2] BENMOKRANE B, XU H, BELLAVANCE E. Bond strength of cement grouted glass fibre reinforced plastic (GFRP) anchor bolts[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1996, 33(5): 455—465.

[3] ZHU H H, YIN J H, YEUNG A T, et al. Field pullout testing and performance evaluation of GFRP soil nails[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(7): 633—642.

[4] CHENG Y M, AU S K, YEUNG ALBERT T. Laboratory and field evaluation of several types of soil nails for different geological conditions[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53: 634—645.

[5] 顾兴宇, 沈新, 陆家颖. 玄武岩纤维筋拉伸力学性能试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(6): 914—919.

GU Xing-yu, SHEN Xin, LU Jia-ying. Experimental investigation on tensile mechanical properties of BFRP bars[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2010, 45(6): 914—919.

[6] 吴刚, 朱莹, 董志强, 等. 碱性环境中 BFRP 筋耐腐蚀性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(8): 32—41.

WU Gang, ZHU Ying, DONG Zhi-qiang, et al. Experimental study on the corrosion resistance performance of BFRP bars in the alkaline environment[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(8): 32—41.

[7] WU G, DONG Z, WANG X, et al. Prediction of long-term performance and durability of BFRP bars under the combined effect of sustained load and corrosive solutions[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2015, 19(3): 04014058.

[8] DONG Z, WU G, ZHAO X L, et al. A refined prediction method for the long-term performance of BFRP bars serviced in field environments[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 155: 1072—1080.

[9] 赵文, 王浩, 陈云. BFRP 筋锚杆土质边坡支护应用研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(5): 1008—1015.

ZHAO Wen, WANG Hao, CHEN Yun. Laboratory and field tests BFRP anchor bolt in supporting soil slope[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(5): 1008—1015.

[10] 高先建, 谢强, 赵文, 等. 非预应力 BFRP 锚杆加固土

- 质边坡设计参数确定试验研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(7): 20—28, 36.
- GAO Xian-jian, XIE Qiang, ZHAO Wen, et al. Experimental study on determining design parameters of non-prestressed BFRP anchor for supporting soil slope[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2017, 34(7): 20—28, 36.
- [11] HASSAN M, BENMOKRANE B, ELSAFTY A, et al. Bond durability of basalt-fiber-reinforced-polymer (BFRP) bars embedded in concrete in aggressive environments[J]. **Composites Part B—Engineering**, 2016, 106: 262—272.
- [12] 冯君, 王洋, 吴红刚, 等. 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, 2019, 40(7): 2563—2573.
- FENG Jun, WANG Yang, WU Hong-gang, et al. Field pullout tests of basalt fiber-reinforced polymer ground anchor[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(7): 2563—2573.
- [13] 张明义, 寇海磊, 白晓宇, 等. 玻璃纤维增强聚合物抗浮锚杆抗拔性能试验研究与机制分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1069—1083.
- ZHANG Ming-yi, KOU Hai-lei, BAI Xiao-yu, et al. Experimental study and mechanism analysis of the anti-pulling behavior of glass fiber reinforced polymer anti-float anchor[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(4): 1069—1083.
- [14] 中冶集团建筑研究总院. CECS 22:2005 岩土锚杆(索)技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2005.
- Central Research Institute of Building and Construction. CECS 22:2005 Technical specifications for geotechnical bolts (sole)[S]. Beijing: China Planning Press, 2005.
- [15] 白晓宇, 张明义, 闫楠. 两种不同材质抗浮锚杆锚固性能的现场对比试验研究与机制分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(8): 38—46.
- BAI Xiao-yu, ZHANG Ming-yi, YAN Nan. Field contrast test and mechanism analysis on anchorage performance of anti-floating anchors with two different materials[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2015, 48(8): 38—46.
- [16] 李国维, 于威, 李峰, 等. 引江济淮软岩钢筋、GFRP筋锚杆承载差异试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 601—610.
- LI Guo-wei, YU Wei, LI Feng, et al. Experiment on the difference of load bearing of GFRP and steel bars in soft-rock slopes of water diversion from Yangtze to Huai[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(3): 601—610.
- 上接第 4184 页
- [13] ZIEGLER H, WEHRLI C. The derivation of constitutive relations from the free energy and the dissipation function[J]. **Advances in Applied Mechanics**, 1987, 25(3): 183—238.
- [14] ULM F J, COUSSY O. Mechanics and durability of solids, Vol 1[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2003.
- [15] 王秋生. 基于超塑性力学的软黏土本构理论研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2007.
- WANG Qiu-sheng. Research on soft clays' constitutive relations based on hyper-plasticity[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2007.
- [16] YAO Y P, HOU W, ZHOU A N. UH model: three-dimensional unified hardening model for over consolidated clays[J]. **Géotechnique**, 2009, 59(5): 451—469.
- [17] YAO Y P, GAO Z W, ZHAO J D, et al. Modified UH model: constitutive modeling of over consolidated clays based on a parabolic Hvorslev envelope[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2012, 138(7): 860—868.
- [18] 孙德安, 陈波, 周科. 重塑上海软土的压缩和剪切变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1389—1394.
- SUN De-an, CHEN Bo, ZHOU Ke. Experimental study of compression and shear deformation characteristics of remolded Shanghai clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(5): 1389—1394.
- [19] WROTH C P, LOUDON P A. The correlation of strains within a family of triaxial tests on over consolidated samples of kaolin[C]//Proceedings of the Geotechnical Conference. [S. l.]: [s. n.], 1967: 159—163.
- [20] PESTANA J M, WHITTLE A J, GENS A. Evaluation of a constitutive model for clays and sands: Part II — clay behavior[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2002, 26(11): 1123—1146.