

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.05.003

# 玄武岩纤维锚杆注浆液选型及性能试验研究

陈 垚<sup>1</sup>, 王重卿<sup>1</sup>, 王 浩<sup>2</sup>, 李流芳<sup>2</sup>, 陈灵祺<sup>2</sup>, 李 熙<sup>1</sup>, 江世雄<sup>1</sup>, 王 林<sup>1</sup>

(1. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007;

2. 福州大学 紫金地质与矿业学院, 福建 福州 350116)

**摘要:** 为评估不同注浆液对玄武岩纤维(BFRP)锚杆性能的影响并确定最佳的注浆液类型, 选取了4种注浆材料, 测试相同单轴抗压强度下注浆体的剪切性质, 同时通过拉拔试验测试BFRP锚杆-注浆体的黏结性能, 分析不同注浆液与BFRP锚杆的适配性。试验结果表明: 普通硅酸盐水泥、加固型水泥、超细水泥的黏聚力都在2 MPa以上, 碱激发剂水泥的黏聚力只有1.27 MPa, 但是碱激发剂水泥的内摩擦角可达到34.91°, 显著高于其他水泥; 在黏结强度上, 加固型水泥、碱激发剂水泥、超细水泥、普通硅酸盐水泥依次递减, 加固型水泥在黏结强度和稳定性上均明显优于其他水泥。加固型水泥相较于其他水泥更具有优势, 有助于玄武岩纤维锚固整体性能的提升。

**关键词:** 玄武岩纤维锚杆; 注浆液; 抗压强度; 剪切试验; 拉拔试验; 黏结性能

中图分类号: TU476

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)05-0017-07

## Experimental Study on Grouting Slurry Selection and Performance of Basalt Fiber Bolt

CHEN Yao<sup>1</sup>, WANG Zhongqing<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>2</sup>, LI Liufang<sup>2</sup>, CHEN Lingqi<sup>2</sup>,  
LI Xi<sup>1</sup>, JIANG Shixiong<sup>1</sup>, WANG Lin<sup>1</sup>

(1. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou, Fujian 350007, China;

2. Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

**Abstract:** In order to evaluate the influence of different grouting materials on the performance of basalt fiber(BFRP) bolt and determine the best grouting type, four kinds of grouting materials were selected to test the shear properties of grouting body under the same uniaxial compressive strength. At the same time, the bonding performance of BFRP bolt-grouting body was tested by pull-out test, and the adaptability of different grouting materials to BFRP bolt was analyzed. The test results show that the cohesion of ordinary Portland cement, reinforced cement and superfine cement is above 2 MPa, and the cohesion of alkali activator cement is only 1.27 MPa, but the internal friction angle of alkali activator cement can reach 34.91°, which is significantly higher than other cement. In terms of bond strength, reinforced cement, alkali activator cement, ultrafine cement, and ordinary Portland cement decreased in turn, and reinforced cement was significantly better than other cements in terms of bond strength and stability. Comprehensive analysis shows that the reinforced cement has more advantages than other cements, which is helpful to improve the overall performance of basalt fiber anchorage.

**Keywords:** basalt fiber anchor; grouting slurry; compressive strength; shear test; pull-out test; bonding properties

传统的金属锚杆存在因腐蚀而产生锈胀、强度不足、施工可靠性欠佳等问题<sup>[1-2]</sup>。高性能的纤维

增强复合材料(FRP)锚杆具有轻质、高强、耐腐蚀、绝缘性好等显著优势, 具有广阔的工程应用前

收稿日期: 2024-06-04

修稿日期: 2024-07-19

基金项目: 国网福建省电力有限公司项目“输电线路塔基裸土植被修复生境调控技术研究及生态基材研制”(SGFJDK00DYJS2310139)

作者简介: 陈 垚(1990—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电网建设水土保持与地质灾害防控研究工作。E-mail: chenyaoyao3715@163.com

通讯作者: 王 浩(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程与工程地质方面的研究工作。E-mail: h\_wang@126.com

景<sup>[3]</sup>。其中,玄武岩纤维(BFRP)锚杆是一种由玄武岩纤维与合成树脂等基体材料经特殊挤拉固化后形成的新型锚杆,相比于传统的钢锚杆具有比强度高、耐腐蚀性能好、整体协调性优等特点,在边坡支护领域具有广阔的发展和前景<sup>[4-6]</sup>。

目前关于 BFRP 锚杆的研究多集中在其材料性能和黏结强度,曹晓峰等<sup>[7]</sup>通过拉伸试验发现 BFRP 筋材的抗拉强度是普通钢筋的两倍以上,但是弹性模量要比钢筋小得多;罗金标等<sup>[8]</sup>研究单筋型、平行索型和绞索型 3 种预应力 BFRP 锚杆的锚固和拉拔性能,发现当以环氧树脂为黏结介质时,平行索型锚杆的强度高达 1 319 MPa;张书博等<sup>[9]</sup>采用室内直剪试验证明 BFRP 锚杆与钢筋锚杆相比弹性段剪切刚度更小,峰值剪切位移较大,最佳锚固角度在 70°以下;顾兴宇等<sup>[10]</sup>采用引伸计和光纤两种方法对玄武岩纤维筋的基本力学性能进行研究,结果表明 BFRP 筋的应力-应变曲线呈线性关系,掺入钢丝可以较大幅度地提升 BFRP 筋的抗拉弹性模量;张绍逸<sup>[11]</sup>通过黏结锚固性能试验发现在 C20~C50 范围内,BFRP 筋与混凝土的黏结强度约为 8.07 MPa~32.1 MPa;张天鹏<sup>[12]</sup>也用试验证明混凝土强度、黏结长度、黏结宽度是影响 BFRP-混凝土界面的重要因素,增加混凝土强度能明显增强界面的极限承载力;赵文等<sup>[13]</sup>通过拉伸试验、抗剪试验、水泥基黏结强度试验等一系列试验,证明 BFRP 筋抗拉性能优越,抗剪强度要小于普通钢筋,与水泥基材料黏结强度超过 4.5 MPa;唐林<sup>[14]</sup>通过对拉拔荷载作用下玄武岩纤维锚杆锚固体的典型破坏模式进行整理和分析,发现锚杆锚固系统失效存在 4 种破坏模式,以第一界面剪切破坏和第二界面剪切破坏发生的次数最多。当前研究结果表明,BFRP 锚杆在力学性能和黏结强度上都能满足岩土锚固的基本需求,但是 BFRP 锚杆杆体抗剪强度较弱,在横向剪切作用下易发生剪断,再加上其表面纤维纹理竖直较为光滑,太粗的注浆液颗粒无法与锚杆体表面很好地贴合,无法有效发挥锚固性能,给 BFRP 锚杆的推广和应用带来了阻碍。

鉴于上述情况,本文拟经过技术比选选取 4 种注浆液材料,研究相同抗压强度下不同类型注浆体的抗剪性能,同时探究 BFRP 锚杆与不同种类注浆液材料的黏结性能,分析 BFRP 锚杆-注浆体的破坏形式和破坏机理,以期选出具备一定抗剪强度、贴合锚杆杆体、黏结强度高的锚孔注浆液,为 BFRP 锚杆应用于不同注浆液材料提供相应的数据支撑,促进

BFRP 锚杆的技术应用。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验采用 12 mm 全螺纹 BFRP 锚杆,其抗拉强度约 700 MPa,密度 1.9 g/cm<sup>3</sup>~2.1 g/cm<sup>3</sup>,弹性模量为 50 GPa;试验使用的水泥基体材料分别为强度等级 42.5 的普通硅酸盐水泥、TGRM 加固型水泥(简称加固型水泥)、TGRM 超细型水泥(简称超细水泥)、碱激发剂水泥。

### 1.2 试验方法

试验方案设计如表 1 所示,将普通硅酸盐水泥、加固型水泥、超细水泥、碱激发剂水泥 4 种注浆液以不同的水胶比分别制作 3 组样品。每组样品是指单次水灰混合搅拌制作的一个 50 mm×50 mm×50 mm 方块试样和一个 100 mm×100 mm×100 mm 大方块试样。因选用水泥基强度为 42.5,制作试块间强度存在差别,所以当方块试样单轴抗压强度达到 40 MPa 左右时即视为满足条件,然后将满足条件的对应组大方块试样分别在 3 MPa、5 MPa、7 MPa 轴向压应力值下进行剪切强度测试。随后,依照规范《土木工程结构用玄武岩纤维复合材料》<sup>[15]</sup>(GB/T 26745—2021),将四种满足抗压条件的不同种类注浆液与 12 mm 的 BFRP 锚杆分别制作三个 150 mm×150 mm×150 mm 的 BFRP 锚杆-注浆体拉拔试样,设置锚固长度为 6 cm,通过 MTS 万能试验机按照 3 mm/min 的上升速率进行拉拔试验,获取黏结力与位移曲线。

表 1 试验方案设计

注浆液类型	水胶比	组数	锚杆直径/mm	锚固长度	试样规格	养护时间/d
普通硅酸盐水泥	0.30	3	12		抗压试样规格为 50 mm×50 mm×50 mm;剪切试样规格为 100 mm×100 mm×100 mm	28
加固型水泥	0.30	3	12	BFRP 锚杆锚入试块 5D	100 mm×100 mm×100 mm	
超细水泥	0.35	3	12	(锚杆直径)	150 mm×150 mm×150 mm	
碱激发剂水泥	0.35	3	12		150 mm	

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 注浆体抗压和抗剪性能

锚杆锚固体系通过自身与岩土体之间的相互作用,能够有效抑制周围地层的变形和移动<sup>[16]</sup>。注浆体作为玄武岩纤维锚杆锚固体系的重要组成部分,

不仅承担黏结锚杆与周围土体和作用,还要具备一定的抵抗剪切荷载能力,从而保证整个锚固体系的有效性和稳定性。因此,将注浆体的抗压和抗剪性能作为玄武岩纤维锚杆注浆液选型的重要标准。

2.1.1 单轴抗压试验

将普通硅酸盐水泥、加固型水泥、超细水泥、碱激发剂水泥分别以水胶比 0.30、0.30、0.35、0.35 制备方形抗压试块和大方形抗剪试块。三组普通硅酸盐水泥试块的抗压强度分别为 43.30 MPa、37.91 MPa、39.91 MPa,强度变化范围比较大,但又与目标值 40 MPa 接近,随后再以相同水胶比制作三组试样,强度分别为 39.56 MPa、41.39 MPa、41.36 MPa,最终选取强度最接近 40 MPa 的试样 1-3、试样 1-4、试样 1-6 所对应的大正方体试块进行抗剪强度测试。其他组水泥试样强度均与目标值 40 MPa 较为接近,组间误差较小,因此不再制备其他试样,选取的不同类型注浆体试块抗压强度汇总如表 2 所示。普通硅酸盐水泥、加固型水泥、超细水泥、碱激发剂水泥注浆体的单轴抗压强度平均值分别为 40.28 MPa、39.48 MPa、41.28 MPa、39.35 MPa,最大偏差

误差不超过 3.20%,均满足抗压强度达到 40 MPa 左右的要求。

表 2 试块抗压强度汇总

注浆液类型	试块单轴抗压强度/MPa			平均值 /MPa
	试块 1	试块 2	试块 3	
普通硅酸盐水泥	39.91	39.56	41.37	40.28
加固型水泥	41.72	38.90	37.82	39.48
超细水泥	41.20	43.38	39.26	41.28
碱激发剂水泥	38.50	40.94	38.62	39.35

不同注浆液类型压应力-轴向压位移曲线如图 1 所示,从图 1 可知,4 种注浆体试块的全应力-应变曲线基本可以划分为 4 个阶段:孔隙压密阶段、弹性变形至微弹性裂隙稳定发展阶段、非稳定破裂发展阶段、破裂后阶段。原点至节点 1 段为孔隙压密阶段,注浆体试块内部形成的微小孔隙在轴向压力作用下被逐渐压实,因此注浆体的应力-应变曲线前期呈现出明显的“上凹状”。该阶段普通硅酸盐水泥、加固型水泥、超细水泥、碱激发剂水泥的轴向位移值约为 0.22mm~0.51mm、0.17mm~0.24

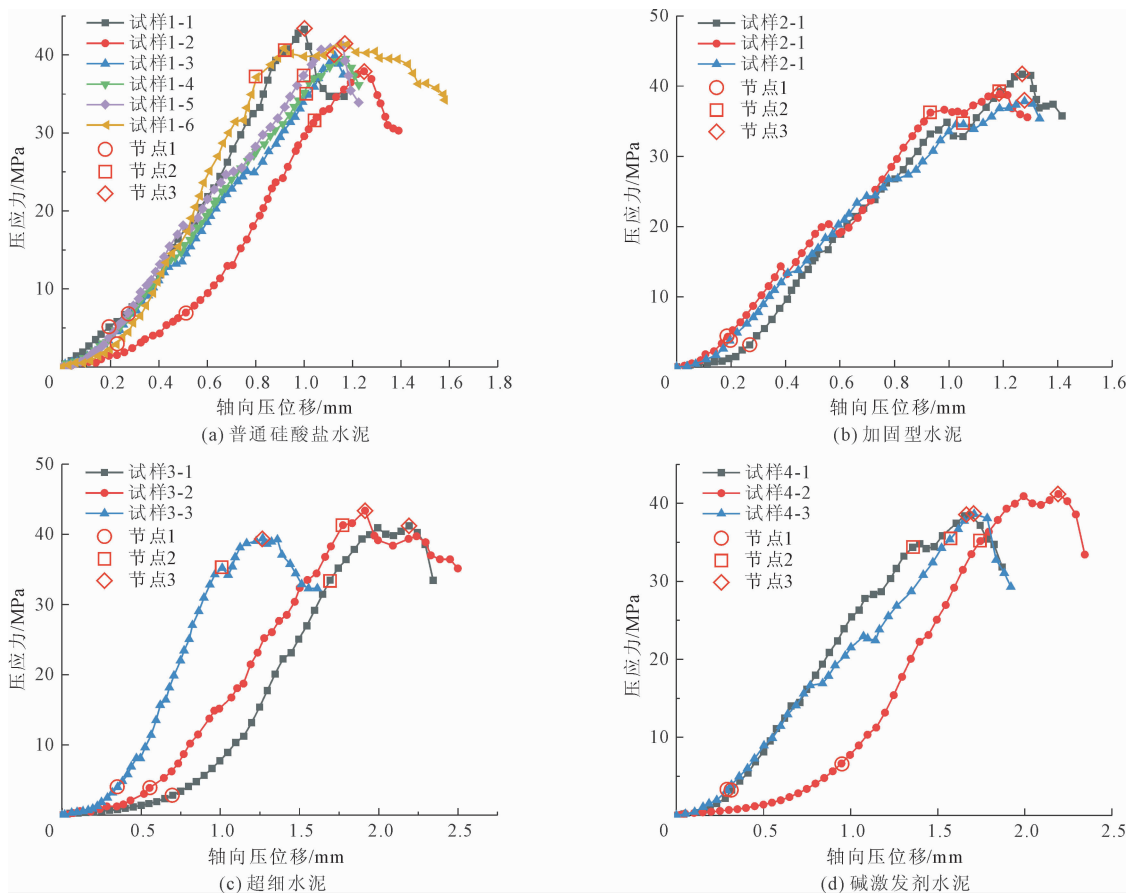


图 1 不同注浆液类型压应力-轴向压位移曲线

mm、0.35 mm~0.70 mm、0.29 mm~0.95 mm, 压应力值约为 2.90 MPa~6.97 MPa、2.40 MPa~3.35 MPa、2.83 MPa~3.96 MPa、3.18 MPa~6.63 MPa。节点 1 至节点 2 段为弹性变形至微弹性裂隙稳定发展阶段, 注浆体内部孔隙在轴向应力作用下基本压密闭合, 随着轴向压力增加并在试块内部扩散, 注浆体试块内部开始产生微小裂纹, 应力-应变曲线均呈线性特征, 斜率基本保持不变, 4 种注浆体均有明显的线性阶段。节点 2 至节点 3 段为非稳定破裂发展阶段, 随着轴向荷载持续增大, 注浆体试样超过自身的弹性极限进入弹塑性变形阶段, 此时注浆体内部初始产生的微裂隙持续扩展、延伸, 逐渐在试块表面形成不稳定裂纹, 并在该阶段后期出现压应力峰值点。达到峰值点时, 普通硅酸盐水泥、加固型水泥、超细水泥、碱激发剂水泥的位移平均值分别为 1.20 mm、1.24 mm、1.79 mm、1.86 mm, 说明不同注浆体的延展性依次有所增强。节点 3 之后段处于破裂后阶段, 试块已经达到失稳状态, 压应力值快速降低, 随着荷载的进一步作用导致注浆体内部不稳定裂纹扩展并相互贯通, 形成明显的宏观裂纹, 伴随少量注浆体块体脱落。

从曲线整体趋势上看, 加固型水泥的应力-应变曲线走向基本接近一致, 在强度和应力应变特征上都表现得十分稳定, 碱激发剂水泥相对加固型水泥性质稳定性略低, 但总体性质稳定, 超细水泥和普通硅酸盐水泥试验组间强度存在较大的偏差, 曲线离散性大, 抗压稳定性较差, 其中普通硅酸盐水泥的抗压强度变化范围更大。因此, 注浆体抗压稳定性排序依次为加固型水泥、碱激发剂水泥、超细水泥、普通硅酸盐水泥。

### 2.1.2 剪切试验

将满足抗压强度条件对应组的大方形试块进行剪切试验, 切向应力-切向位移曲线如图 2 所示。从总体变化趋势来看, 在轴向应力作用下, 剪切应力与位移之间呈明显线性增长, 达到峰值强度后剪切应力迅速下降, 最后残余部分强度。由于水泥基性质的差异, 不同注浆体的应力位移曲线特征有所区别。普通硅酸盐水泥在 3 MPa 压应力下, 存在切向应力缓慢增长阶段, 当位移达到 1.76 mm 后才有明显的增长; 在 5 MPa 和 7 MPa 轴向压应力下, 切向位移呈快速增长趋势, 达到峰值后下降。加固型水泥在不同压应力下的剪切曲线特征具有相似性, 3 MPa 和 5 MPa 压应力下注浆体在切向位移 0~1.54

mm 段的曲线较为接近, 说明在中低压下加固型水泥注浆体初期的剪切性质基本相同。而超细水泥与加固型水泥存在明显不同。在 3 MPa 和 7 MPa 的压应力下, 超细水泥的切向位移在 0~2.16 mm 范围内相似, 反映其在较高或较低压应力下的剪切初期特征基本一致。碱激发剂水泥在 5 MPa 和 7 MPa 压应力下的应力位移曲线接近一致, 这种相似性表明碱激发剂水泥在较高压应力水平下的剪切特性具有一致性。

因为净水泥注浆体是一种相对均匀的材料, 在受到外力作用时, 通常会出现相对单一的破坏模式, 如普通硅酸盐水泥和碱激发剂水泥的应力-位移曲线均为“单峰型”。图中加固型水泥和超细水泥的应力位移曲线呈“双峰型”或“多峰型”, 分析原因可能是在该类型水泥注浆体内同时出现剪切破坏和拉伸破坏两种破坏模式或更多种不同的破坏模式, 这些破坏模式在试验中交替出现, 并且它们对应的剪切强度值相近, 进而产生了“双峰型”或“多峰型”的剪切位移曲线。

不同预设轴压应力下各注浆液最大切向应力柱状图如图 3 所示, 从图 3 可以看出, 在 3 MPa 预设轴压应力值下, 最大剪切应力值分别为普通硅酸盐水泥 2.89 MPa、加固型水泥 3.55 MPa、超细水泥 2.95 MPa、碱激发剂水泥 3.10 MPa; 在 5 MPa 预设轴压应力值下, 最大剪切应力值分别为普通硅酸盐水泥 2.80 MPa、加固型水泥 3.98 MPa、超细水泥 3.62 MPa、碱激发剂水泥 5.27 MPa; 在 7 MPa 预设轴压应力值下, 最大剪切应力值分别为普通硅酸盐水泥 3.65 MPa、加固型水泥 4.55 MPa、超细水泥 3.94 MPa、碱激发剂水泥 5.90 MPa。可以发现, 普通硅酸盐水泥和超细水泥在不同预设轴压应力抗剪性能表现偏弱。加固型水泥和碱激发剂水泥在不同预设轴压应力下的抗剪性能强弱有所不同, 在预设轴压应力值较小(3 MPa) 情况下, 加固型水泥的最大切应力值大于碱激发剂水泥, 随着预设轴压应力值的增大, 碱激发剂水泥的最大切应力值超过加固型水泥, 且随着预设压应力值的增大, 碱激发剂水泥抗剪切应力有着显著的提升, 从 3 MPa 到 5 MPa 以及 5 MPa 到 7 MPa 的增幅分别为 70%、12%, 而加固型水泥相应的增幅分别为 12%、14%。由此可见, 轴压应力的增加对于碱激发剂水泥的抗剪性能提升显著, 间接说明碱激发剂水泥的内摩擦角高于加固型水泥。

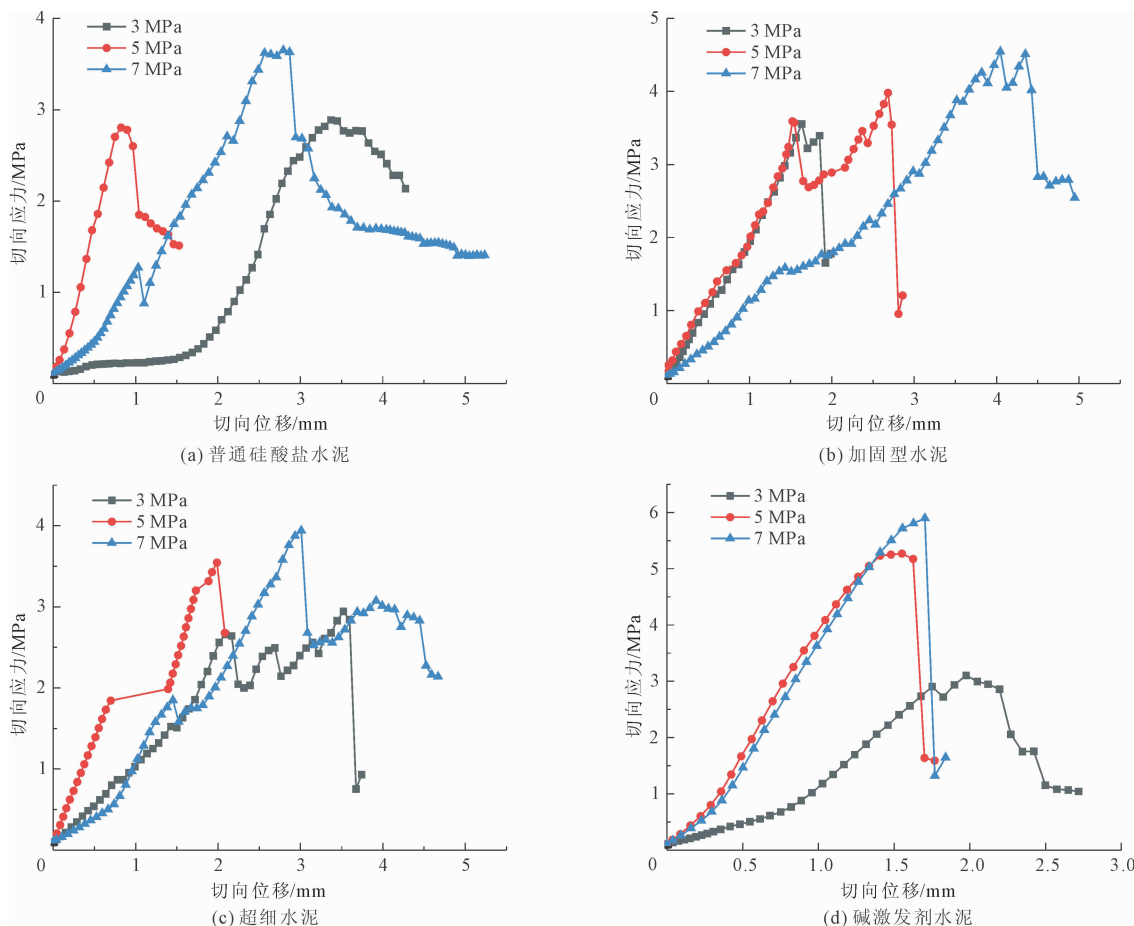


图 2 不同注浆液类型切向应力-切向位移曲线

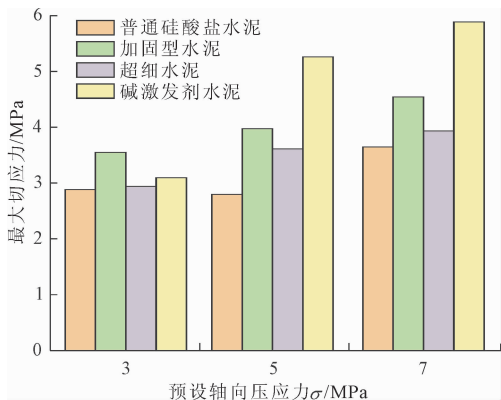


图 3 不同预设轴压应力下各注浆液最大切向应力柱状图

不同注浆液类型抗剪强度变化曲线如图 4 所示,由图 4 可知,普通硅酸盐水泥、加固型水泥、超细水泥的黏聚力均在 2 MPa 以上,其中加固型水泥黏聚力值最大为 2.79 MPa,普通硅酸盐水泥和超细水泥分别为 2.16 MPa、2.26 MPa,碱激发剂水泥的黏聚力最小只有 1.27 MPa,显著低于其他水泥。加固型水泥和超细水泥的内摩擦角分别为 13.94°、13.96°,两者十分接近,而普通硅酸盐水泥则只有 10.81°,碱激发剂水泥的内摩擦角显著大于其他三

者,达到 34.91°,是其他水泥的 2~3 倍。无论是在黏聚力及内摩擦角方面,普通硅酸盐水泥的数值都偏小,没有竞争优势,超细水泥和加固型水泥在抗剪性能方面表现接近,而碱激发剂水泥在黏聚力方面表现较差,但在内摩擦角方面拥有非常巨大的优势。综合而言,碱激发剂水泥有着极大的内摩擦角要强于加固型水泥,而加固型水泥则有着较强的黏聚力要优于碱激发剂水泥。

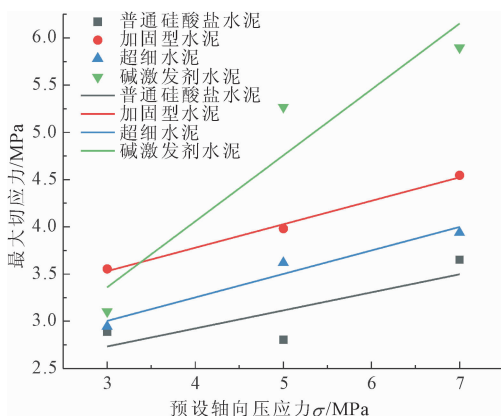


图 4 不同注浆液类型抗剪强度变化曲线

## 2.2 BFRP 锚杆-注浆体黏结性能

BFRP 锚杆体表面纹理与带肋钢筋相比较为光滑,太粗的注浆液颗粒无法与锚杆体表面很好地贴合,需要考虑锚杆表面与注浆体间的黏结接触关系,选取贴合 BFRP 锚杆体表面且黏结强度高的注浆液。按照抗压强度值最接近 40 MPa 的水胶比将 4 种类水泥与 12 mm 的 BFRP 锚杆制备 BFRP 锚杆-注浆体试样进行拉拔试验,如图 5 所示,并通过下式计算其黏结强度:

$$f_B = F / (C_b \times l) \quad (1)$$

式中: $f_B$  为黏结强度,MPa; $F$  为黏结力,N; $C_b$  为复合筋等效周长,mm; $l$  为锚固长度,mm。

FRP 锚杆与注浆体拉拔试验中常常出现 FRP 筋被拔出、FRP 筋被拉断、注浆体脆性崩裂 3 种破坏形式。试验中 BFRP 锚杆-注浆体拉拔后均为注浆体脆性破坏,与刘占占等<sup>[17]</sup>试验结果相似。纤维锚杆与注浆液材料的黏结力主要是由化学胶结力、摩擦力和机械咬合力三部分组成<sup>[18]</sup>。试块脆性破坏是由于 BFRP 锚杆在受到轴向拉力,纤维束表面纹理对水泥净浆产生斜向挤压力,其水平方向上分力使 BFRP 锚杆周围的水泥浆体轴向受拉力与剪力<sup>[19]</sup>,

径向上分力使水泥浆体内产生了环向拉力,进而导致水泥浆体内部产生径向微裂缝,随着荷载增加而扩大延伸,当达到极限荷载时,试块发生崩裂。



图 5 BFRP 锚杆-注浆体拉拔试样(左)、MTS 拉拔设备(中)、试样破坏图(右)

BFRP 锚杆与注浆体黏结力-位移曲线如图 6 所示,从图 6 可以看出,不同注浆液材料制成的 BFRP 锚杆-注浆体黏结力均随位移的增加而快速增大,达到峰值强度破坏后黏结力迅速下降甚至归零。从图 6(c)超细水泥注浆体的拉拔曲线中可以看出更为明显的阶段性规律,曲线中存在较为明显的三个节点,在节点 1 之前,试样处于较低荷载作用

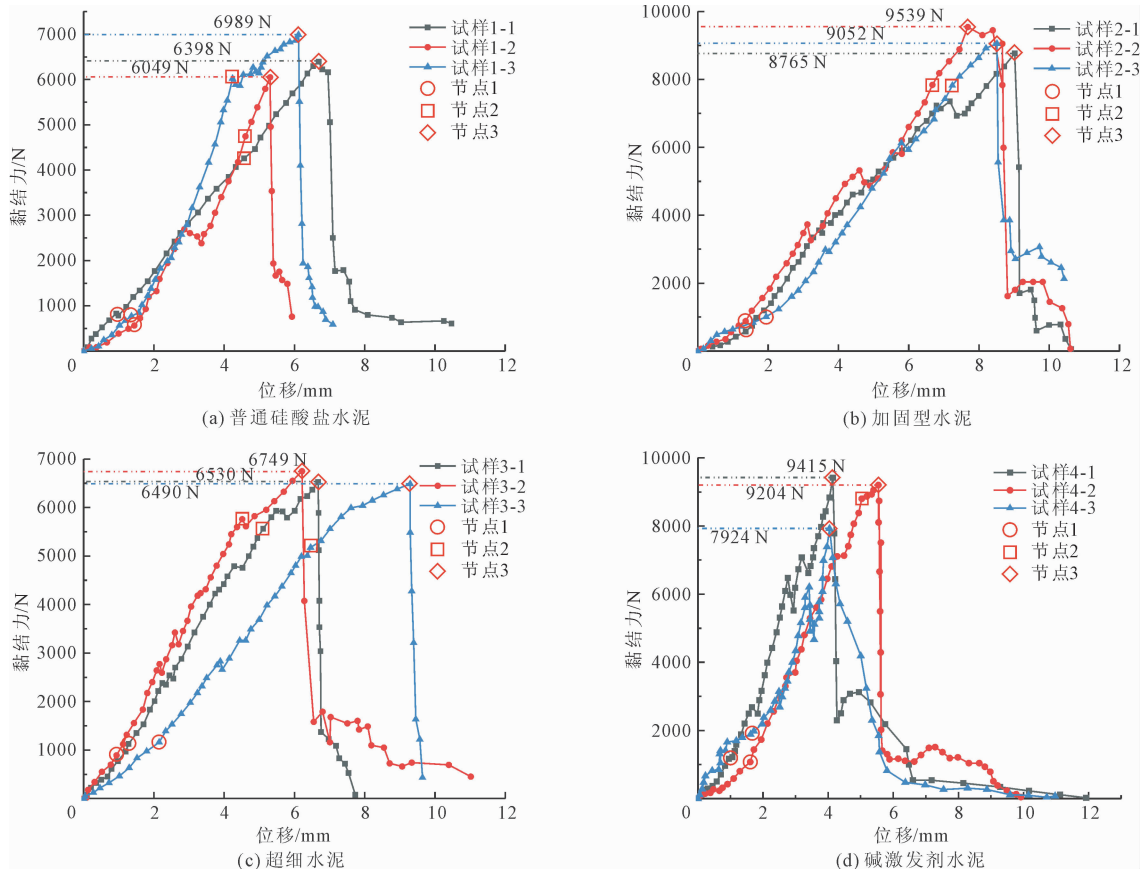


图 6 BFRP 锚杆与注浆体黏结力-位移曲线

下,黏结力与位移曲线的斜率较小,此时化学胶结力发挥主要作用,处于线弹性阶段;在节点1和节点2之间,随着滑移量不断增加,摩擦力和机械咬合力共同发挥作用,黏结力逐渐增大,曲线斜率变陡,黏结界面开始出现局部塑性损伤,处于弹塑性阶段;在节点2和节点3之间,位移快速增长,黏结力增大速率变小,整体斜率变缓,塑限变形进一步扩大直至达到强度峰值,此时注浆体进入完全塑性,处于塑性发展阶段;在节点3以后,黏结力呈现断崖式下跌,甚至归零,此时水泥注浆体崩碎成多块,BFRP锚杆与注浆体分离,杆体表面有所磨损,处于完全破坏阶段。可见,BFRP锚杆-注浆体在拉拔过程中先后经历线弹性阶段、弹塑性阶段、塑性发展阶段、完全破坏阶段4个过程,与冯君等<sup>[4]</sup>现场拉拔试验结果具有一致性。

注浆液黏结强度如表3所示,由表3可知,普通硅酸盐水泥黏结强度为2.86 MPa、加固型水泥黏结强度为4.03 MPa、超细水泥黏结强度为2.91 MPa、碱激发剂水泥黏结强度为3.91 MPa。由此可见,普通硅酸盐水泥的黏结性能表现最差,分析原因可能是由于普通硅酸盐水泥颗粒较粗,无法很好地贴合玄武岩纤维锚杆较光滑的纤维表面导致黏结效果较差;超细水泥的黏结强度与普通硅酸盐水泥相近,主要是由于超细水泥颗粒小且表面光滑,导致与BFRP锚杆的黏结面积减小,从而降低了黏结强度;加固型水泥和碱激发剂水泥的黏结强度表现较为出色,加固型水泥黏结强度要比碱激发剂水泥高3.07%,且标准差仅为0.144,因此加固型水泥的黏结强度和稳定性都要优于碱激发剂水泥。综合来看,BFRP锚杆-注浆体黏结性能排名依次为加固型水泥、碱激发剂水泥、超细水泥、普通硅酸盐水泥。

表3 注浆液黏结强度

注浆液类型	试样黏结强度/MPa			平均值/MPa	标准差
	试样1	试样2	试样3		
普通硅酸盐水泥	2.83	2.67	3.09	2.86	0.173
加固型水泥	3.87	4.22	4.00	4.03	0.144
超细水泥	2.89	2.98	2.87	2.91	0.048
碱激发剂水泥	4.16	4.07	3.50	3.91	0.292

### 3 结论

本次研究通过测试相同抗压强度条件下不同注浆液的抗剪强度,并通过拉拔试验系统地研究了BFRP锚杆-注浆体的黏结性能,得到以下结论:

(1) 注浆液的强度主要由胶粘材料强度及水胶

比决定,胶粘材料强度由胶粘材料种类决定,相同水胶比条件下加固型水泥在强度和应力应变特征上都十分稳定,抗压稳定性最好。

(2) 普通硅酸盐水泥、加固型水泥、超细水泥的黏聚力均在2 MPa以上,其中加固型水泥黏聚力值最大为2.79 MPa,碱激发剂水泥的黏聚力最小仅有1.27 MPa,但碱激发剂水泥的内摩擦角达到34.91°,约为其他水泥的2~3倍。

(3) 在水泥净浆中,BFRP锚杆-注浆体先后经历线弹性阶段、弹塑性阶段、塑性发展阶段、完全破坏阶段4个过程,破坏形式均为试块脆性崩坏,BFRP锚杆表面有所磨损,水泥注浆体碎裂成多个部分。

(4) 在相同抗压强度条件下,加固型水泥相较于其他水泥,在剪切性能、黏结强度和稳定性上更具有优势,与玄武岩纤维锚杆间更具有适配性,两者配合能够发挥更优越的锚固性能。

### 参考文献:

- [1] 赵健,冀文政,张文巾,等. 现场早期砂浆锚杆腐蚀现状的取样研究[J]. 地下空间与工程学报,2005(S1):179-184.
- [2] 韩军,张明,张怀东,等. 大变形巷道螺纹钢锚杆优化设计及应用研究[J]. 中国矿业大学学报,2019,48(4):727-734.
- [3] 王洋,冯君,李珈瑶,等. FRP锚杆在岩土锚固中的研究进展[J]. 工程地质学报,2018,26(3):776-784.
- [4] 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.
- [5] 霍宝荣,张向东. BFRP筋的力学性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2011,27(4):626-630.
- [6] Baena M, Torres L, Turon A, et al. Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test[J]. Composites Part B: Engineering, 2009, 40(8):784-797.
- [7] 曹晓峰,赵文,谢强,等. BFRP筋材基本力学性能试验研究[J]. 公路工程,2016,41(5):215-217.
- [8] 罗金标,彭哲琦,汪昕,等. 新型玄武岩纤维复合材料(BFRP)锚杆力学性能研究[J]. 复合材料科学与工程,2022(12):79-86.
- [9] 张书博,王长盛,王刚,等. 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,2022,41(4):712-724.
- [10] 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.

(下转第52页)

## 5 结 论

对该工程基坑围护结构进行数值模拟和变形监测,分析了基坑开挖过程中部分监测项目的变化规律,主要得到如下结论:

(1) 监测结果表明两种支护方案深层水平位移最大值相差比较大,水平位移的差异必然导致两种支护方案在其结合处位置附近产生不协调变形。两种支护方案桩顶水平位移都明显增加,桩锚支护坡顶水平位移大于双排桩支护坡顶水平位移,桩顶水平位移的最大差异为 3 mm。

(2) 从基坑开挖数值模拟与监测数据对比分析可知,两种数据趋势一致,模拟数据大体大于监测数据。支护结构桩顶水平位移随着基坑的开挖逐渐增大。开挖较浅时,与双排桩支护结构相比,桩锚支护桩顶水平位移略大,但随着开挖的进行同一深度处桩锚支护处桩顶水平位移大于双排桩支护处桩顶水平位移,深层水平位移与桩顶水平位移趋势大体相同。在开挖初期两种支护方式水平应力差距不大,但随着开挖的进行,双排桩支护处水平应力大于双排桩锚支护处水平应力。

### 参考文献:

- [1] 建筑基坑支护技术规程:JGJ 120—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012:9-10.
- [2] 汪 钰. 单双排桩联合支护稳定性分析及影响因素研究[D]. 合肥:安徽建筑大学,2023:67-68.

- [3] 李 锐. 联合支护结构基坑安全性分析研究[D]. 成都:成都理工大学,2015:68-69.
- [4] 徐煜航. 深基坑桩锚与土钉联合支护的三维有限元模拟[J]. 能源与环保,2020,42(1):103-108.
- [5] 刘庆林,谢章绍,王增辉. 大面积不规则形状深基坑支护设计研究[J]. 人民珠江,2023,44(S2):482-487.
- [6] 丁龙翔. 基坑支护结构稳定性优化设计与分析[J]. 土工基础,2024,38(1):6-10.
- [7] 王振峰. 深基坑土钉墙与桩锚联合支护结构数值模拟与优化[J]. 广东建材,2024,40(2):117-119.
- [8] 刁志刚,夏文韬. 二元地层超深基坑桩锚撑组合支护轴力报警与变形协调分析[J]. 现代隧道技术,2020,57(S1):864-876.
- [9] 毛 可. 桩锚撑复合支护结构在基坑工程中的变形特性研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2024:72.
- [10] 魏焕卫,仇清辉,陈朝伟,等. 考虑变形协调的锚杆复合土钉墙变形计算方法[J]. 山东建筑大学学报,2022,37(3):1-9.
- [11] 张啸天. 深基坑土钉墙与桩锚联合支护结构研究与优化[D]. 长春:吉林建筑大学,2023:87-88.
- [12] 吴修明. 填土基坑中土钉墙与桩锚联合支护结构工作性状研究[D]. 济南:济南大学,2021:65-66.
- [13] 焦广莹. 日照某深基坑锚索与微型钢管桩联合支护变形稳定分析[D]. 青岛:山东科技大学,2019:70.
- [14] 王帅栋. 深基坑土钉墙-桩锚复合结构工作性能分析[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019:64-65.
- [15] 董建华,庄 超. 深基坑框架预应力锚杆微型钢管桩联合支护结构力学特性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(3):619-633.

(上接第 23 页)

- [11] 张绍逸. 玄武岩纤维筋与混凝土黏结锚固性能试验研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2013.
- [12] 张天鹏. BFRP-混凝土界面黏结性能研究[D]. 长春:吉林建筑大学,2019.
- [13] 赵 文,王 浩,陈 云,等. 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.
- [14] 唐 林. 全黏结玄武岩纤维增强聚合物锚杆应力分布特征研究[D]. 贵阳:贵州大学,2023.
- [15] 土木工程结构用玄武岩纤维复合材料:GB/T 26745—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.
- [16] 刘文娟. 注浆锚杆对围岩加固作用机理及应用案例[J]. 科学技术与工程,2017,17(20):270-276.
- [17] 刘占占,李小刚,刘肖凡,等. GFRP 锚杆在不同水泥基材料中黏结性能的试验分析[J]. 江苏建筑职业技术学院学报,2022,22(4):22-25.
- [18] 胡金星. GFRP 锚杆锚固性能研究与分析[D]. 长沙:中南大学,2012.
- [19] Zhao Dongping, Wen Sixun, Wang Luwei, et al. Structural parameters and critical anchorage length of tunnel system bolts made of basalt fibre[J]. Construction and Building Materials, 2021,310.