

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.04.002

BFRP 锚杆公路岩质边坡加固工程应用研究

黄代茂¹, 汪小静², 赵文²

(1. 广东嘉应环城高速公路有限公司, 广东 广州 510000; 2. 西南交通大学)

摘要:玄武岩纤维复合筋(BFRP)筋材具有极好的工程性能,特别是在抗拉构件中,完全可以替代钢筋。该文依托广东东环高速公路 K13+785~K14+060 段边坡 BFRP 锚杆加固工程,采用数值分析方法,研究了 BFRP 锚杆设计参数,提出 BFRP 锚杆岩质边坡加固设计方法、施工工艺及检测方法。边坡变形监测表明:采用 BFRP 筋材锚杆加固岩质边坡是可行的。

关键词: BFRP 锚杆; 设计方法; 施工工艺; 岩质边坡

岩质边坡加固工程锚杆一般选用钢筋锚杆,然而,钢筋锚杆锚固结构不可避免存在钢筋腐蚀的耐久性问题。虽然钢筋锚杆防腐技术有所发展,但锚杆的防腐技术没有根本解决。近年来,新型 FRP(Fiber reinforced polymer)筋材锚杆(如 BFRP、GFRP、CFRP)以轻质高强、耐腐蚀等优越性能,逐渐应用在工程建设中,特别是玄武岩纤维复合筋(简称 BFRP),在公路路面工程中应用广泛。

然而利用 BFRP 筋材作为工程锚杆,目前应用实例不多。郭成鹏等(2012 年)研究了 BFRP 筋作为锚杆在岩土工程中的适宜性;赵文等(2016 年)研究了 BFRP 锚杆在土质边坡加固工程中的应用;高先建等(2017 年)研究了 BFRP 锚杆土质边坡加固设计参数;冯君等(2019 年)研究了 BFRP 土层锚杆抗拔性能;王安福等研究了 BFRP 锚杆公路边坡工程的初步应用。目前 BFRP 筋材作为工程锚杆进行了一些探索性试验研究,而将 BFRP 筋材作为工程锚杆规模应用却很少。

该文结合 BFRP 力学性能参数,采用数值分析方法,对 BFRP 锚杆支护参数进行优化设计。将 BFRP 锚杆应用于实际岩质边坡加固工程,提出 BFRP 锚杆岩质边坡加固设计方法、施工工艺及检测方法。

1 BFRP 锚杆的主要工程性能

BFRP 是一种新型非金属复合材料,具有极好的工程性能,由于工程锚杆一般采用 $\phi 12\text{ mm}$ 以上 BFRP 筋材,该文对 $\phi 14\text{ mm}$ 、 $\phi 16\text{ mm}$ BFRP 筋进行拉拔试验和与水泥基类黏结性能试验,结果如表 1 所示。

表 1 BFRP 筋材主要工程性能

BFRP 筋		抗拉强	M30 砂浆黏	C25 混凝土黏
		度/MPa	结强度/MPa	结强度/MPa
$\phi 14\text{ mm}$	14-1	912.54	5.02	7.23
	14-2	923.97	5.23	8.16
	14-3	931.32	5.41	7.56
	14-4	924.57	5.18	7.48
	14-5	925.61	5.16	8.01
	14-6	933.13	5.72	7.64
	平均值	925.19	5.29	7.68
$\phi 16\text{ mm}$	16-1	889.65	5.21	7.18
	16-2	896.31	5.14	7.45
	16-3	937.75	5.45	7.36
	16-4	918.25	4.98	8.05
	16-5	927.78	5.36	7.89
	16-6	918.91	5.16	7.65
	平均值	914.78	5.22	7.60

BFRP 筋材密度为 $1.9\sim 2.1\text{ g/cm}^3$,弹性模量为 $(46.3\sim 54.3)\times 10^3\text{ MPa}$,酸碱强度保留率为 $92.6\%\sim 96.0\%$,抗剪强度为 $150\sim 180\text{ MPa}$,蠕变松弛率为 4.43% 。与钢筋相比,具有强度高、质量轻等优点,且施工方便,综合经济性明显优于传统钢筋锚杆。

2 公路边坡 BFRP 锚杆的加固设计

2.1 边坡概况

广东省梅州东环高速公路 K13+785~K14+060

收稿日期:2020-05-05(修改稿)

作者简介:黄代茂,男,大学本科,工程师。E-mail:1056478954@qq.com

路堑右侧边坡,最大坡高为 59 m。线路走向为 NW274°,边坡倾向为 184°。边坡主要由第四系坡残积粉质黏土和碎石、前泥盆系上统砂岩、碎裂岩及其风化层组成,岩土力学指标如表 2 所示。

表 2 岩土力学指标

岩土类型	天然工况			暴雨工况		
	重度/ (kN·m ⁻³)	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/(°)	重度/ (kN·m ⁻³)	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/(°)
粉质黏土	18	16	19	19.0	15	16.0
全风化岩	20	25	25	21.0	22	23.0
强风化岩	22	30	30	22.5	27	28.5

根据拟定坡形坡率,1~3 级边坡坡高均为 10 m,其中 1 级边坡坡率为 1:0.75;2 级为 1:1.00;3 级为 1:1.25。4 级边坡受地形影响坡高不等,但坡率为 1:1.50,各级边坡平台宽 2 m。

采用 FLAC 软件对开挖边坡稳定性进行分析,以 K13+880 右侧剖面为代表剖面,分析模型如图 1 所示。经验算,边坡开挖前稳定系数为 1.77,开挖后稳定系数为 1.08,边坡安全储备不足,需要进行加固处理。

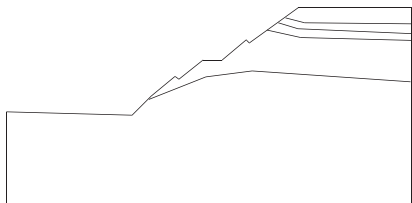


图 1 分析模型

2.2 锚固设计

锚固设计基本过程参照 JTG D30—2015《公路路基设计规范》,BFRP 锚杆长度取决于两个方面:① 锚杆与注浆体之间的黏结能力;② 注浆体与岩土层之间的黏结能力。

为使注浆体不会从岩土层中拔出,则岩土层与注浆体间黏结长度 L 应满足下式:

$$L \geq \frac{K \cdot N_t}{\pi \cdot d \cdot f_{rb}} \quad (1)$$

式中: K 为安全系数; N_t 为锚杆轴向拉力设计值(kN); d 为锚孔直径(m); f_{rb} 为岩土层与注浆体之间的黏结强度(kPa)。

为使锚杆不会从注浆体中拔出,则锚杆与注浆体

之间黏结长度 L 应满足下式:

$$L \geq \frac{K \cdot N_t}{n \cdot \pi \cdot d_s \cdot \beta \cdot f_b} \quad (2)$$

式中: n 为锚杆根数; d_s 为锚杆直径; β 为考虑成束筋材系数; f_b 为注浆体与锚杆体间的黏结强度(kPa),对于 M30 砂浆,取 4 000 kPa。

按安全系数 1.30 求得边坡稳定需要锚固力为 400 kN/m。取锚杆水平间距为 3 m,则每 3 m 边坡所需要的锚固力为 1 200 kN,各排锚杆锚固力设计值如表 3 所示。BFRP 锚杆沿坡面水平间距取 3~4 m,锚固体直径设计为 100 mm,注浆材料选用 M30 砂浆。

表 3 BFRP 锚杆锚固力设计取值

边坡级	每级边坡锚固力 设计值/kN	单根锚杆锚固力 设计值 N_t /kN
1 级	400	100
2 级	400	100
3 级	400	100

根据锚固力设计值,取单根 $\phi 16$ mm BFRP 筋材作为锚杆,单根 $\phi 16$ mm BFRP 极限承载力为 160 kN,满足 100 kN 设计锚固力要求。根据式(1)~(2)计算得 1~3 级边坡锚杆锚固段长度分别为 1.91、2.55、2.55 m。锚固段长度不宜小于 2 m,也不宜大于 10 m,综合取锚杆锚固段长度为 3 m。自由段长度主要根据被加固边坡潜在滑面的产状、深度和锚杆设计位置来确定。根据边坡锚杆布设剖面,1、2、3 级边坡锚杆所对应的滑面深度为 5.5、7.0、8.5 m,则 1、2、3 级边坡锚杆长度分别为 8.5、10.5、11.5 m。

边坡加固设计措施如下:1~3 级边坡均采用锚杆格梁加固,锚杆采用 $\phi 16$ mm BFRP 锚杆,1 级边坡锚杆长 8.5 m,间距为 3 m×3 m;2 级边坡锚杆长 10 m,间距为 3 m×4 m;3 级边坡锚杆长 11.5 m,间距为 3 m×4 m;4 级边坡采用 6 cm 客土喷播防护;5 级边坡采用人字形骨架三维网植草防护;6 级边坡采用三维网植草防护。

采用数值方法对加固边坡稳定性进行分析表明,采用上述加固措施后,边坡稳定性系数为 1.28,满足规范要求,计算锚杆拉拔力(图 2)低于设计抗拔力。

3 边坡 BFRP 锚杆施工工艺

BFRP 锚杆根据设计规格由厂家生产和裁剪,在钢筋加工场进行统一制作,制作完成后运送至现场进

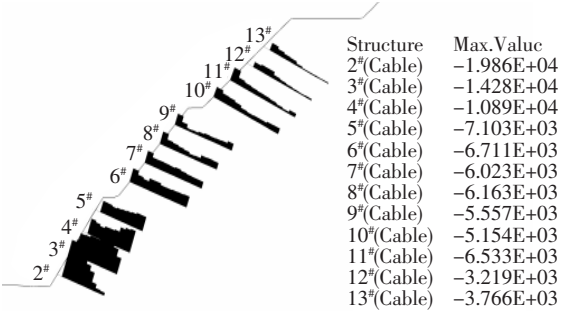


图2 代表性剖面锚杆计算轴力(单位:N)

行安装。

3.1 BFRP 锚杆构造设计

FBRP 锚杆不同于钢制锚杆,锚头不能焊接,需采

用特制锚具将锚杆与格梁连接。BFRP 锚杆构造如图3、4所示。

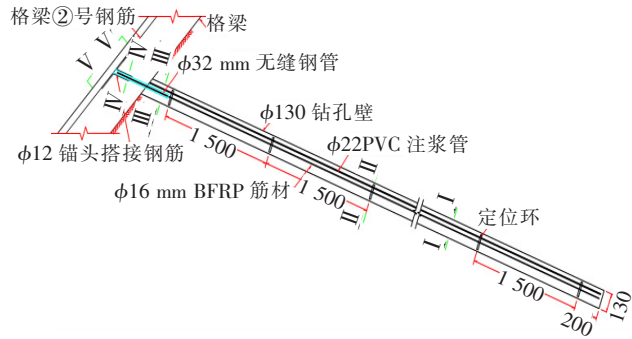


图3 BFRP 构造图(单位:mm)

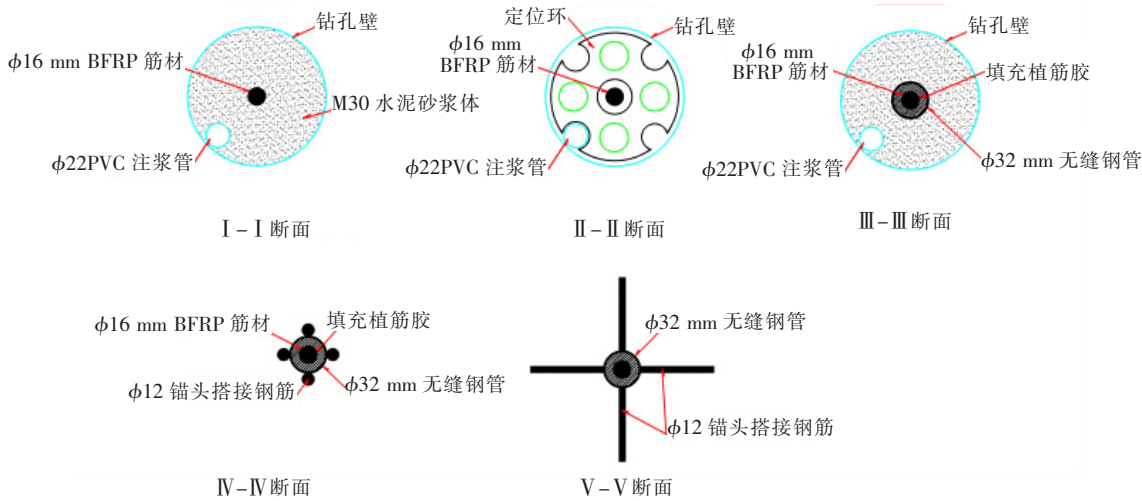


图4 BFRP 构造细节

锚具钢套管采用 $\phi 25\text{ mm}$ 无缝钢管,壁厚 3.2 mm ,单根长 40 cm 。采用植筋胶作为 BFRP 锚杆与钢管黏结材料。

3.2 BFRP 锚杆制作工艺

BFRP 锚杆制作工艺:锚具制作→锚杆上涂植筋胶→锚具中填充植筋胶→锚具与锚杆连接→锚具头填充植筋胶并封锚头→锚杆成型。

制作锚具时要求钢管与钢筋双面焊,焊缝饱满,保证焊接质量;因植筋胶凝固速度快,锚杆体涂抹植筋胶和锚具填充植筋胶速度要快,填充后立即进行连接,不能超过 20 min ;锚杆体涂植筋胶应均匀,锚具填充植筋胶要饱满,保证两者连接牢固;连接好后不能拖拽锚杆,达到 24 h 以上方可运至现场施工。

3.3 BFRP 锚杆施工工艺

BFRP 锚杆施工与普通锚杆施工主要步骤类似,包括:测量放线→钻孔至设计深度→清孔→BFRP 锚

杆安装→注浆→养护→裸露 BFRP 筋材保护→格梁施工→BFRP 锚杆锚头钢筋与格梁钢筋绑扎→格梁浇筑混凝土。

- (1) 为使锚杆置于钻孔中心,在锚杆上每隔 1500 mm 设置一个定位环。
- (2) 使用前检查锚杆有无油污、缺裂等情况。
- (3) 钻孔完毕后立即安装成品 BFRP 锚杆以防塌孔。
- (4) 检查注浆管无破裂和堵塞,接口牢固,防止注浆压力加大时开裂跑浆。
- (5) 注浆体采用 M30 水泥砂浆,注浆时采用孔底反浆法,注浆过程中严禁上拔绑定的注浆管。
- (6) 在注浆过程中看见孔口出浆时封闭孔口。
- (7) 注浆后自然养护不少于 7 d ,在注浆体硬化之前,不得扰动 BFRP 锚杆。待强度达到设计强度的 70% 时方可进行张拉检测。

(8) 锚头钢筋与格梁钢筋采用双面焊接,以保证焊缝饱满,锚头外 BFRP 筋预留长度 20~30 cm,浇筑于格梁之中,可提高锚固效果。

4 BFRP 锚杆加固边坡变形监测

为了验证 BFRP 锚杆加固边坡的有效性,对边坡在开挖及加固过程中的变形进行监测,监测点布置如图 5 所示,其中 6 个坡面位移监测点,位于 1~5 级边坡坡顶平台上,1 个深层位移监测点位于 K13+860 断面 4 级边坡坡顶平台上。

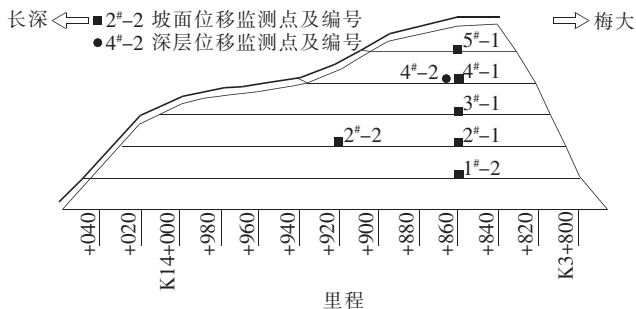


图 5 监测点布置图

施工过程中边坡变形如图 6 所示。边坡于 2018 年 7 月开始施工,由上至下开挖,并依次施工加固措施。从图 6 可以看出:在开挖 6~3 级边坡过程中,边坡变形不大,最大约为 20 mm;开挖 1、2 级边坡后,边坡产生了一定的变形,变形增量约为 60 mm,这是因为 1、2 级边坡较陡,导致变形量稍大。监测结果显示地表位移速率较小,且趋于稳定,现场巡查堑顶周边、截水沟、坡面、平台等部位未发现坍塌、开裂,表明该坡体处于稳定状态。

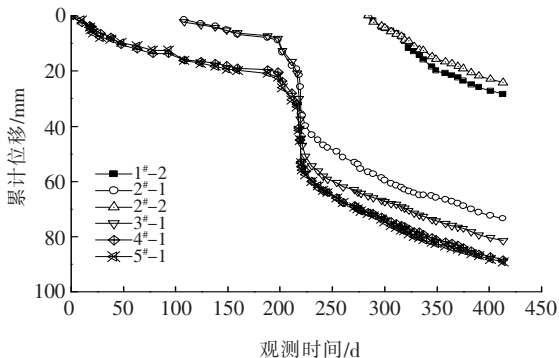


图 6 边坡坡面变形曲线

图 7 为 K13+840 处 4 级平台的深层水平位移曲线。监测历时近 1 年,于 2019 年 9 月 28 日结束监测。从图 7 可以看出:4 级平台坡顶在近 1 年的周期

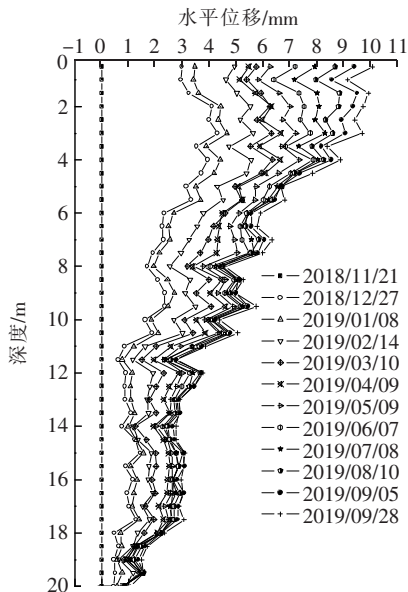


图 7 边坡深层水平位移曲线

内,最大水平变形约为 11 mm,且随深度的增加逐渐减小。整体上看,边坡水平变形不大,边坡整体稳定,也说明了 1~3 级边坡采用 BFRP 锚杆加固,部分区段 2 级边坡采用锚索加固的措施是有效的。

5 结论

通过试验研究了 BFRP 锚杆加固公路岩质边坡的可行性及适用性,得到如下结论:

(1) 提出了 BFRP 锚杆设计方法。BFRP 锚杆设计时,抗拉强度标准值为 700 MPa,与砂浆的黏结强度标准值为 4 000 kPa。

(2) BFRP 锚杆锚具黏结采用高强度植筋胶,并注胶饱满。BFRP 锚杆锚头钢筋与格梁钢筋双面焊接,并预留 20~30 cm 筋材浇筑于格梁,以提高锚固效果。

(3) BFRP 锚杆加固岩质边坡变形监测结果表明,BFRP 锚杆达到了加固边坡的目的,变形速率较小,且边坡趋于稳定,BFRP 筋材作为锚杆加固边坡是适宜的。

(4) 在同等拉拔力要求下,BFRP 筋材相比普通钢筋,具有高强、轻质、耐腐蚀、与注浆体黏结性能良好等优势。且 BFRP 锚杆经济优势明显,施工方便,建议扩大范围推广应用。

参考文献:

- [1] 程良奎. 岩土锚固的现状与发展[J]. 土木工程学报, 2001(3).
- [2] 赵文, 杨国梁, 赵明. BFRP 筋材与水泥基材料粘结性能及

危岩带下深基坑开挖关键技术及仿真分析

胡风明¹, 宋健¹, 闫磊², 曲振宇¹, 赵甜甜¹

(1. 中交一公局重庆万州高速公路有限公司, 重庆市 404100; 2. 重庆三峡学院 土木工程学院)

摘要:针对危岩带下深基坑开挖易发生安全事故的问题,以一在建悬索桥锚碇深基坑为研究对象,探讨该基坑的开挖关键技术,采用有限元软件对危岩带下深基坑坑底位移、锚杆、锚索的受力情况、护壁墙受力、位移情况及边坡稳定系数等进行仿真研究。结果表明:采用边坡分级分区开挖的施工方案进行基坑开挖,各项验算指标均满足开挖需求,取得了良好的施工控制效果,可保证该项目的顺利实施。

关键词:危岩带; 深基坑; 关键技术; 仿真分析

1 前言

随着城市化建设进程的稳步推进,越来越多的基坑开挖项目出现,且规模越来越大,在面积和深度上不断有新的增长。伴随着基坑用途的改变,其周边环境也日趋复杂,这就要求在基坑施工过程中,提前对基坑开挖后的位移、支护结构的受力情况以及基坑开挖的稳定性等开展研究。陈涛等对软土地区深基坑开挖过程中不同工况下支护桩深层水平位移、支护桩竖向位移等现场监测数据进行了研究,结果表明:基坑开挖施工对支护桩及周边环境具有显著的时空效应影响;周冠南等依托宁波地铁1号线东门口站深基坑工程,结合现场监测数据,对逆作开挖基坑的时空效应进行了研究;章新等以南京某基坑工程为例,采用数值模拟方法对基坑围护结构变形进行计算,并与现场监测数据进行对比,总结了开口环形基坑围护结构变形的规律;

曹一龙等分析深基坑施工监测数据,并与数值模拟结果进行对比,结果表明,遵循时空效应原理,加快施工速度、减少基坑暴露时间是控制基坑变形的重要措施。

该文以重庆三峡库区腹地某红层泥岩地区悬索桥深基坑工程为背景,对其开挖施工过程中深基坑坑底位移、锚杆、锚索的受力情况,护壁墙受力、位移情况及边坡稳定系数等进行仿真分析,总结其变形规律。

2 工程背景

2.1 工程概况

拟建工程为悬索桥锚碇基坑,一侧紧邻高陡边坡,另一侧毗邻长江。高峰岸(北岸)锚碇区位于斜坡中部地带,地面高程为210~250 m,基坑底面设计高程为198 m(锚块底面)。锚碇基坑开挖占地面积为5 958 m²,基坑底面面积为1 026 m²,边坡面积为5 633 m²,锚碇基坑开挖总方量为110 400 m³。锚碇基坑基底位于中

- *****
- 极限拉拔力试验研究[J]. 四川建筑科学研究,2017(1).
- [3] 张丽娟,丁燕飞,明恩农,等. 玄武岩纤维筋连续配筋混凝土路面冲断破坏力学分析[J]. 中外公路,2018(3).
- [4] 郭成鹏,林学军,李涛,等. 玄武岩纤维筋用作锚杆的适宜性研究[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版),2012(4).
- [5] 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,2006(5).
- [6] 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(7).
- [7] 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(7).
- [8] 王安福,赵文,李勇,等. 公路岩质边坡 BFRP 锚杆(索)支护设计及应用研究[J]. 湖南交通科技,2017(3).
- [9] JTG D30-2015 公路路基设计规范[S].

收稿日期:2020-03-18

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(编号:2019M663442);重庆市科委、教委研究项目(编号:cstc2018jscx-msybX0167, KJQN201801223, KJQN201901219)

作者简介:胡风明,男,高级工程师.