

膨胀土基坑中玄武岩筋材锚固特性现场试验

李 翠

(江苏联合职业技术学院 南京分院,江苏 南京 210000)

摘要:玄武岩纤维复合筋因其强度高、耐久性好等特点,被广泛应用于锚固工程。为此,本文以膨胀性黏土地场为例,通过开挖3面边坡分别进行玄武岩筋材锚杆支护、钢筋锚杆支护和无支护,探讨不同支护结构在膨胀土边坡场地中的支护效果。研究结果表明:钢筋锚杆和玄武岩筋材锚杆受力较小,边坡加固后变形小,边坡整体稳定。当开挖坡脚并浸水后,锚杆受力突增,当继续进行坡顶浸水之后,锚杆受力明显增加且变化速率大。本文研究成果可在锚杆(索)、支护桩等边坡工程中采用玄武岩纤维复合筋替代现有钢筋提供设计依据。

关键词:玄武岩筋材; 膨胀土基坑; 锚固特性; 现场试验

中图分类号:TU94⁺2

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)07-0010-06

doi:10.13402/j.gcjs.2024.07.085

Field test on anchorage characteristics of basalt reinforcement in expansive soil foundation pit

LI Cui

(Nanjing Branch of Jiangsu Union Technical Institute, Nanjing 210000, Jiangsu, China)

Abstract: Basalt fiber composite reinforcement is widely used in anchoring engineering due to its high strength and good durability. Therefore, the expansive clay site is taken as an example, while anchor bolt support of basalt reinforcement, steel anchor bolt support of basalt reinforcement and unsupported basalt reinforcement are carried out respectively by excavating three slopes, and the support effects of different supporting structures in expansive soil slope site are discussed. The results show that the reinforcement anchor bolt and basalt reinforcement anchor bolt are under less stress, the deformation of the slope after reinforcement is small, and the overall stability of the slope is stable. When the foot of the slope is excavated and immersed in water, the force of the anchor bolt increases suddenly, and when the top of the slope is continued to be immersed in water, the force of the anchor bolt increases significantly and the rate of change is large. The research results can provide a design basis for the use of basalt fiber composite reinforcement to replace the existing reinforcement in slope engineering such as anchor bolt(cables) and supporting piles.

Key words: basalt reinforcement; expansive soil foundation pit; anchoring characteristics; field trials

钢筋是一种在土木工程中使用较为广泛的建筑材料,但钢铁产业碳排放总量巨大,行业“双碳”提质需求压力艰巨。玄武岩纤维复合筋(basalt fiber reinforced plastics, BFRP)具有高强、轻质、耐酸碱腐蚀等优异的物理化学性质^[1],被视为土木工程中钢筋的良好替代品而逐渐用于工程建设。采用BFRP筋替换钢筋用于岩土锚固工程当中,可有效

解决钢筋锚杆在长期使用过程中出现的支护措施耐久性和强度安全性等问题。目前,我国已制定并发布了多部与玄武岩纤维(或筋材)相关工程技术标准,如《水泥混凝土和砂浆用短切玄武岩纤维》(GB/T 23265—2023)、《公路工程玄武岩纤维及其制品》(JT/T 776—2010)、《结构加固修复用玄武岩纤维复合材料》(GB/T 26745—2011)、《结构加

收稿日期:2023-12-29

作者简介:李 翠(1989—),女,讲师,从事建筑施工技术工作。

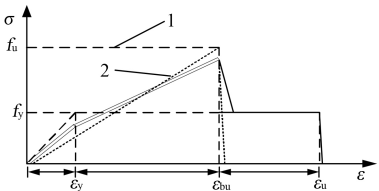
固用玄武岩纤维片材》(JG/T 365—2012)。学者也对 BFRP 筋材物理力学特征和工程特性进行了试验研究,如:李东东^[2]研究发现,BFRP 筋与混凝土等胶结材料能够较好地结合且可重复发挥各自的优势,进而用于混凝土工程加固项目中;王钧等^[3]开展了玄武岩纤维混凝土与钢筋黏结锚固性能试验与分析,发现混凝土强度的提高有利于改善玄武岩纤维混凝土与钢筋黏结锚固性能;王梦尧^[4]对改性后的强耐腐蚀性能的玄武岩纤维筋在道路、桥梁中的应用效果进行原位测试,认为其可在此类工程领域进行大力推广和应用。目前,玄武岩纤维及其筋材在边坡及基坑工程中的应用较为罕见,且未有工程实测数据支撑证明其工程实用效果。

本文以膨胀土深基坑为例,在地质条件相同的同一场地内进行无支护边坡、玄武岩筋材锚杆支护边坡和钢筋锚杆支护边坡的对比试验,分析不同支护方式下边坡变形、锚杆内力变化情况;同时,采用泡水、开挖坡脚等人工诱导的方式进行边坡破坏,以深入研究玄武岩筋材锚固边坡变形破坏模式,为类似工程提供借鉴与参考。

1 玄武岩纤维筋材锚杆特性

玄武岩纤维复合筋是以玄武岩纤维为增强材料、合成树脂为基体材料,经拉挤工艺和特殊的表面处理形成的一种新型非金属复合材料^[5-6],其具体物理力学参数如表 1 所示。与钢筋相比,BFRP 筋材比重约为普通钢筋的 1/4、拉伸强度高约为普通钢筋的 3~4 倍,屈服强度高,绝缘、耐腐蚀、耐候性等性能良好,在工程实施中可降低工程造价 20% 左右。BFRP 筋理论应力应变曲线如图 1 所示,

其中: f_u 为屈服强度, MPa; f_y 为抗拉强度, MPa; ε_y 为抗拉强度对应的应变, MPa; ε_{bu} 为屈服强度对应的应变, MPa; ε 为破坏时对应的应变, MPa。



1—普通钢筋; 2—BFRP 筋。

图 1 玄武岩纤维复合筋理论应力应变曲线

2 工程概况

某深基坑开挖工程基坑主体周长为 489.5 m,最大开挖深度为 16.5 m。场地地形有一定起伏,最大高差为 8.68 m。试验场地地形平坦,有稀疏的杂草覆盖。场地内地层组成较为简单,前期钻探揭露深度范围为 0~14 m,岩土主要由第四系全新统人工填土(Q_4^{ml}),和其下的第四系中下更新统冰水沉积层弱膨胀性黏土(Q_{2-1}^{fgl})构成,其中人工填土又分为新近填土(Q_4^{ml-1})和老填土(Q_4^{ml-2})。试验场地岩土组成简单,但工程地质性质较差。岩土体物理力学参数如表 2 所示。

3 试验方案与边坡设计

3.1 试验方案

为对比玄武岩筋材锚杆的支护效果,在地质条件相同的同一场地内进行无支护边坡、玄武岩筋材锚杆支护边坡和钢筋锚杆支护边坡的对比试验。玄武岩筋材锚杆支护边坡与钢筋锚杆支护边坡设计方案基本一致,开挖边坡总高度为 9 m,分三级开挖。

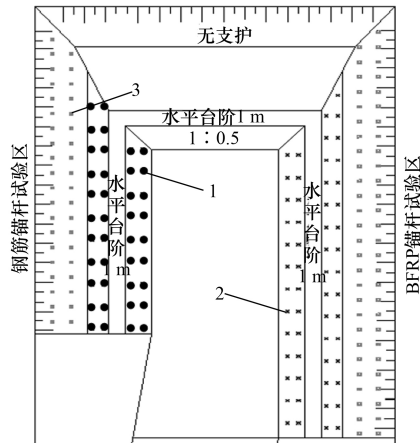
表 1 玄武岩纤维复合筋物理力学参数

钢材类型	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	抗拉强度/MPa	弹性模量/ 10^3 MPa	热膨胀系数/ $10^{-6} \text{ } ^\circ C$	耐酸碱性能(强度保留率)/%	抗冻融性能(强度保留率)/%	抗剪强度/MPa	弯曲性能	蠕变松弛率/%
BFRP 筋材	1.9~2.1	891.1~1 139.4	46.3~54.3	9~12	92.6~96.0	97.2	159~189	45.4~51.4	4.43
普通钢筋	7.9	475.0	200.0	12	—	—	—	—	—

表 2 场地岩土体物理力学参数

岩土类型	重度/($kN \cdot m^{-3}$)	黏聚力/kPa	饱和黏聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)	饱和内摩擦角/($^\circ$)
新近填土	16	3	2.0	9.0	7.5
老填土	18	11	8.0	12.0	8.5
黏土	19	42	25.5	12.5	9.5

第三级边坡坡高为 3.2 m, 以强度较低的松散新近填土为主, 设计坡率为 1:1, 采用插入式土钉支护; 第二级边坡坡高为 2.6 m, 主要为老填土夹淤泥, 土层工程性质较差, 设计坡率为 1:0.5, 采用锚杆支护, 坡脚设宽度为 1 m 平台; 第一级边坡坡高为 3.2 m, 主要为黏土, 具有弱膨胀性, 设计坡率为 1:0.5, 采用锚杆支护。坡顶、坡底分别设置截水沟和排水沟, 坡面上装有排水孔, 坡底挖一个 4 m × 4 m 的集水池, 设计方案示意如图 2 所示。



1—玄武岩筋材锚杆; 2—钢筋锚杆。

图 2 试验边坡示意

3.2 边坡支护设计

第三级边坡土体为新近填土, 土质不均匀, 固结度低, 工程性质较差, 参照《建筑基坑支护技术规程》(GJ 120—2012) 进行设计, 设计的土钉为直径 30 mm、长约 6 m 的直接击入式钢管, 土钉水平间距为 1.0 m, 垂直间距为 1.5 m。

相对第三级边坡, 第二级和第一级边坡土质工程性质稍好, 因此采用锚杆支护方案。根据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013), 边坡安全系数取 1.20, 计算得出边坡总下滑力和抗滑力分别为 445.4、405.3 kN/m, 进而得出边坡锚固力为 160 kN。

(1) 钢筋锚杆: 水平和竖向间距均为 1.5 m, 打设 4 排锚杆, 长度分别为 12 m (第一、二排) 和 9 m (第三、四排), 打设角度为 15°。杆体采用 HRB335 钢筋, 杆体直径为 25 mm, 锚固体直径为 100 mm, 全长注浆。按照每延米边坡所需锚固力为 160 kN 计算, 间距为 1.5 m 锚杆单列所需锚固力为 240 kN。锚杆锚固力的设计值如表 3 所示。

计算得到锚杆的横截面积为 138.01 mm², 直径为 13.26 mm, 因此选用直径为 14 mm 的玄武岩筋材作为锚杆进行试验。

表 3 锚杆锚固力设计值 kN

锚杆排数	1	2	3	4
锚固力	70	70	60	60

(2) 玄武岩筋材锚杆: 取玄武岩筋材锚杆与水泥砂浆的黏结强度为 4.0 MPa。锚固段灌浆体与地层间黏结强度标准值取 70 kPa, 影响系数取 1.0 ~ 1.3, 计算出各排锚杆锚固段的长度如表 4 所示。锚杆自由段长度穿过潜在滑裂面不小于 1.5 m, 且不应小于 5.0 m。

表 4 试验边坡玄武岩筋材锚杆锚固段长度 m

锚杆排数	1	2	3	4
锚固长度	3.8	3.8	3.2	3.2

3.3 监测方案

(1) 地表位移监测: 玄武岩筋材锚杆试验区设置 8 个观测剖面, 钢筋锚杆试验区设置 3 个观测剖面, 无支护边坡设置 3 个观测剖面, 具体如图 3 所示。其中 $a_1 \sim a_3$ 、 $b_1 \sim b_8$ 、 $c_1 \sim c_3$ 为监测剖面; 数字为地表位移监测点序号。

(2) 钢筋应力计: 试验主要针对玄武岩筋材锚杆开展, 因此玄武岩筋材锚杆布置 11 根测试锚杆, 钢筋锚杆试验区布置两根测试锚杆, 单根锚杆中安装 3 个钢筋计, 监测锚杆元件安装施工如图 4 所示。其中 CX1 ~ CX12、数字为钢筋应力计序号。

4 试验结果

4.1 边坡变形监测结果分析

4.1.1 钢筋锚杆工况

以钢筋锚杆边坡 $a_1 - a_1$ 剖面监测结果为例, 对钢筋锚杆边坡变形监测结果进行分析。 $a_1 - a_1$ 剖面竖向变形和水平变形随时间变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知: 自开挖第二层边坡开始, $a_1 - a_1$ 剖面上各监测点的变形速率增大, 向基坑内的水平位移增加约 10 mm, 进行支护之后的变形速率明显减小且较稳定。开挖第三层基坑边坡时, 各监测点发生了明显的朝基坑内的位移, 位移达 35 ~ 40 mm, 进行锚杆支护后的边坡变形速率明显减小, 之后边坡地表变形较稳定, 基本没有较大的增长, 最终最大

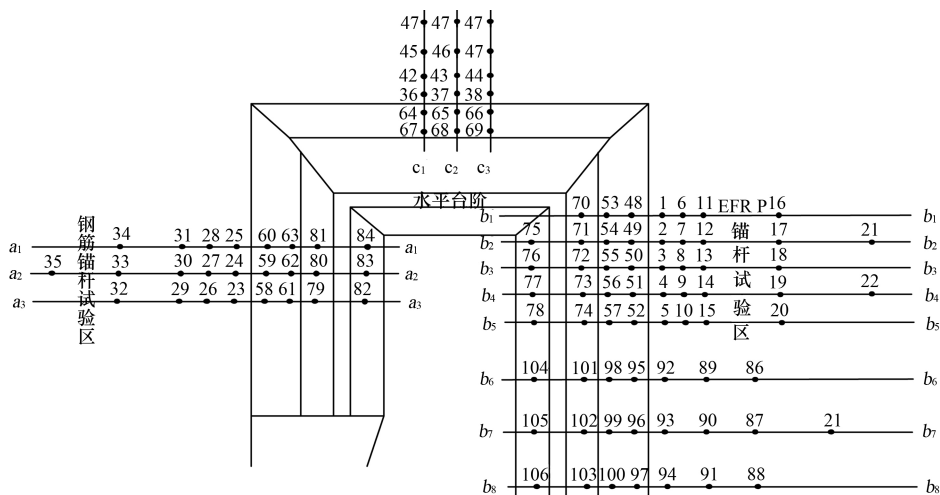
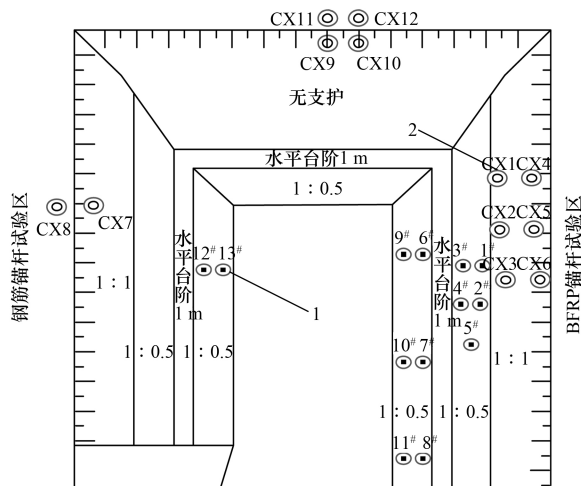


图 3 监测点地表位移布置



1—应力监测筋；2—测斜管。

图 4 监测点钢筋应力计平面

水平变形约为 37 ~ 43 mm。竖直方向变形与水平方向变形类似，最终竖向位移约为 37 ~ 48 mm。

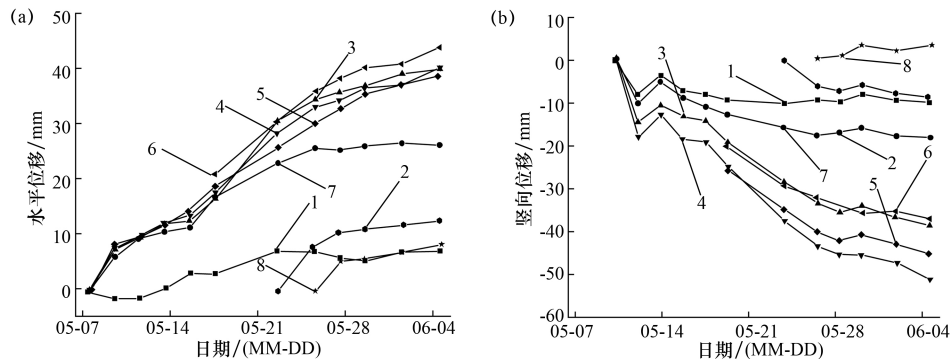
4.1.2 玄武岩筋材锚杆工况

以边坡 $b_1 \sim b_1$ 剖面监测结果为例，对玄武岩

筋材锚杆边坡变形监测结果进行分析。 $b_1 \sim b_1$ 剖面竖向变形和水平变形随时间变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知：自开挖第二层边坡开始， $b_1 \sim b_1$ 剖面上各监测点的变形速率增大，向基坑内的水平位移增加约 3 ~ 4 mm，进行支护之后的变形速率明显减小且较稳定。开挖第三层基坑边坡时，水平位移增加至约 10 mm，进行锚杆支护后的边坡的变形速率明显减小，之后边坡地表变形较稳定，基本没有较大的增长，最终最大水平变形约为 12 mm。竖直方向变形与水平方向变形类似，最终竖向位移约为 18 mm。

4.1.3 无支护边坡工况

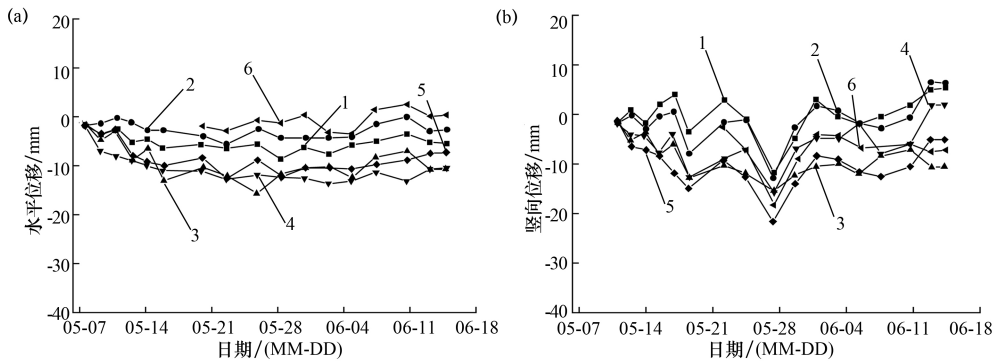
无支护边坡 $c_1 \sim c_1$ 剖面水平与竖直方向变形曲线如图 7 所示。由图 7 可知：当边坡第三层开挖完成后，边坡随即进入加速变形阶段，直至整体破坏。根据现场施工和天气情况可知，边坡第三层开挖后，因降雨影响导致边坡的变形速率加



(a) 水平位移；(b) 竖向位移

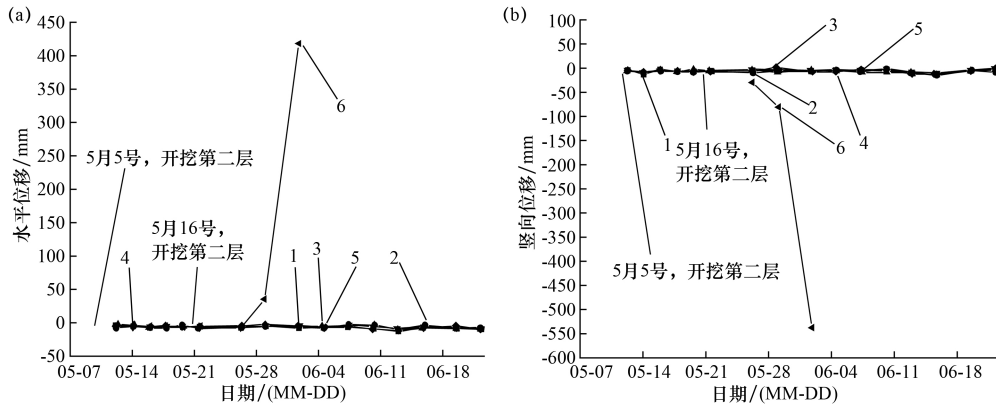
监测点序号：1—34；2—31；3—28；4—25；5—60；6—63；7—81；8—84。

图 5 钢筋锚杆试验边坡



(a) 水平位移; (b) 竖向位移
监测点序号: 1—16; 2—11; 3—6; 4—1; 5—53; 6—70。

图6 钢筋锚杆试验边坡



(a) 水平位移; (b) 竖向位移
监测点序号: 1—45; 2—42; 3—39; 4—36; 5—64; 6—67。

图7 钢筋锚杆试验边坡

大,并随着变形增速的增加使得边坡出现拉裂缝而发生破坏。

4.2 锚杆轴力监测结果分析

4.2.1 钢筋锚杆工况

以钢筋锚杆试验边坡中12[#]7 m长锚杆和13[#]9 m长锚杆轴力监测结果为例进行分析。12[#]、13[#]锚杆不同位置处轴力变化如图8所示。由图8可知:在整个锚杆施工阶段,杆件所受的拉力呈持续增加趋势;施工结束后,锚杆受力则逐渐趋于稳定。最终测得锚杆最大拉力范围为29~38 kN,且均位于距离边坡5 m位置,推测潜在滑动面位置在锚杆5 m处附近。

4.2.2 玄武岩筋材锚杆工况

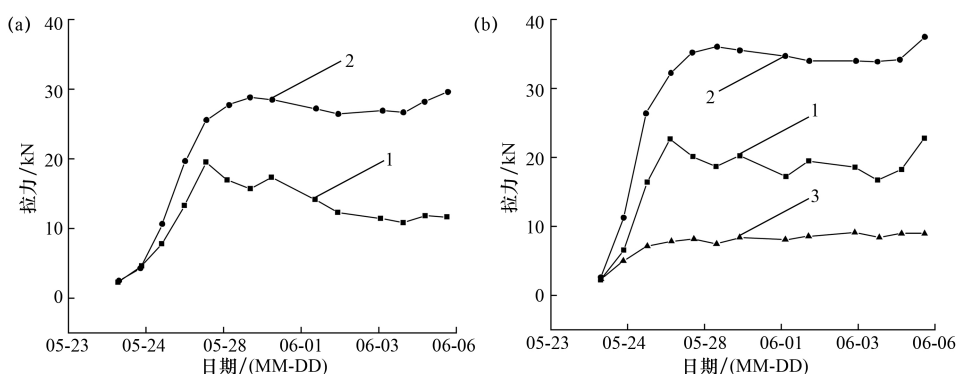
以玄武岩筋材锚杆试验边坡中4[#]、5[#]锚杆轴力监测结果为例进行分析。4[#]、5[#]锚杆不同位置处轴力变化如图9所示。由图9可知:在整个锚杆施工阶段,杆件所受的拉力呈持续增加趋势;施

工结束后,锚杆受力逐渐趋于稳定。最终测得锚杆最大拉力分别为15 kN(4[#])、14 kN(5[#]),均位于距离边坡4 m位置,其最大拉力远小于玄武岩筋材的强度值。

4.3 破坏模式分析

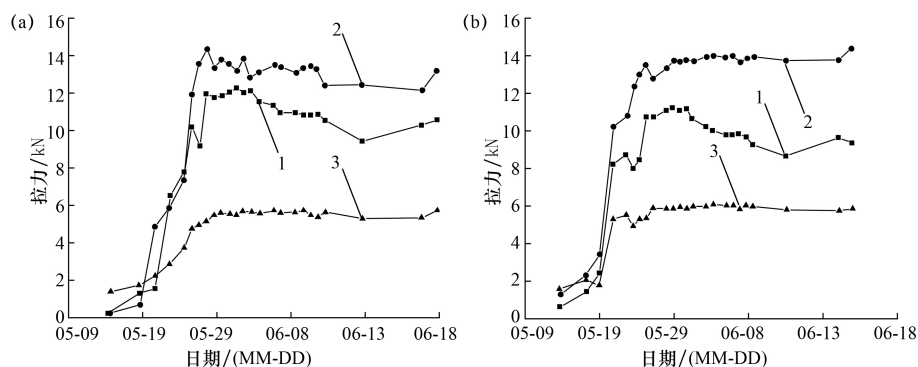
在钢筋加固边坡和玄武岩筋材加固边坡坡脚开挖深度为1.5 m、宽度为1 m的沟槽,顺坡脚全段开挖。开挖后再坡脚注水,浸泡1~2周,在此期间观测边坡浸水后变形特征;若边坡变形趋势不显著,进一步在坡顶位置开挖1 m×1 m的水槽,注水观测边坡变形及支护结构受力情况。

同样以4[#]、5[#]玄武岩筋材锚杆为例进行破坏过程中玄武岩筋材锚杆受力特性分析,结果如图10所示。由图10可知:开挖坡脚并浸水后,锚杆受力突增;当继续进行坡顶浸水之后,锚杆受力明显增加且变化速率大,其中5[#]锚杆拉力最大达25 kN。整个锚杆受力特性与钢筋锚杆基本一致。

锚杆编号: (a) 12[#]; (b) 13[#]

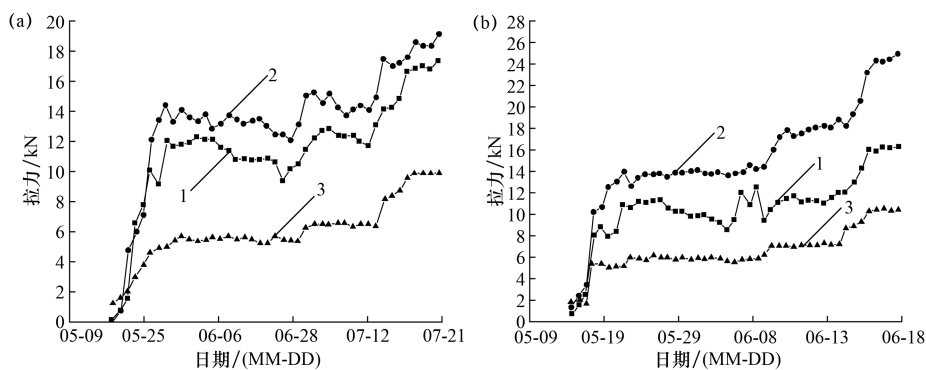
距杆端距离/m: 1—2; 2—5; 3—8。

图 8 钢筋锚杆试验边坡监测筋受力变化

锚杆编号: (a) 4[#]; (b) 5[#]

距杆端距离/m: 1—0; 2—4; 3—8。

图 9 玄武岩筋材锚杆试验边坡监测筋受力变化



锚杆编号: (a) 4 号; (b) 5 号

距杆端距离/m: 1—0; 2—4; 3—8。

图 10 玄武岩筋材锚杆轴力随时间变化曲线

5 结 论

玄武岩纤维复合材料因其绿色环保、价格低廉的优势逐渐应用于岩土工程领域。本文以膨胀土地为例,对无支护边坡、玄武岩筋材锚杆支护边坡和钢筋锚杆支护边坡的支护效果进行原位

试验,结果如下。

(1) 筋材受力监测表明,钢筋锚杆和玄武岩筋材锚杆受力均较小,边坡变形小,边坡整体稳定。

(2) 玄武岩筋材锚杆支护边坡和钢筋锚杆支护边坡对比得出6束 $\varnothing 14$ mm玄武岩纤维复合筋

(下转第 55 页)

根据《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019),C30 混凝土的碳排放因子为 295 kg CO₂ e/m³,估算每种桩型减少的碳排放量,结果如表 5 所示。由表 5 可知:两种桩型减少碳排放量共计 1.04 万吨。通过持力层的优化,减少桩的长度,不仅缩短了施工周期,节约了工程造价,同时也减少 CO₂ 的排放,符合绿色建筑的要求。

表 5 不同桩型减少的碳排放量

桩径/mm	混凝土方量/m ³	碳排放量/t
800	21 056	6 212
1 000	14 196	4 188

3 结 语

高层结构在我国城市建筑中占比较大,且单体碳排放强度高。工程设计、施工时应根据项目特点,合理选择结构体系、结构材料、基础形式等,以达到碳减排的目的。灌注桩后注浆技术在卵石层中对提高单桩承载能力效果较为明显,能够达到缩短桩长,减少造价,缩短施工工期,减

少碳排放的目的,具有良好的经济价值与社会环境效益。

参考文献:

[1] 中国建筑节能协会. 中国建筑能耗研究报告(2020 年)[EB/OL]. (2020-11-1) [2021-01-04]. <https://www.cabee.org/site/content/24020.html>.

[2] 朱王科,张凯峰,童小根,等. “双碳”目标下建材行业减排路径[J]. 商品混凝土,2023(3):31-37.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于做好《建筑业 10 项新技术(2017 版)》推广应用的通 知 [EB/OL]. (2017-10-25) [2017-11-14]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengce-filelib/201711/20171114_233938.html.

[4] 邓顺勇,毛宗原. 后注浆处理人工挖孔桩端下软弱夹层工程实例[J]. 工程建设,2022,54(8):67-72.

[5] 于志强,王锡朝,张庆海. 钻孔桩桩底灌浆压密机理及设计原则[J]. 石家庄铁道学院学报,1999,12(2):27-30.

(上接第 15 页)

材与 4 束 $\varnothing 15.2$ mm 钢筋锚索能达到相近的支护效果。

(3) 开挖坡脚并浸水后,锚杆受力突增;当继续进行坡顶浸水之后,锚杆受力明显增加且变化速率大。整个锚杆受力特性与钢筋锚杆基本一致。

参考文献:

[1] 王海刚,白晓宇,张明义,等. 玄武岩纤维增强聚合物锚杆在岩土锚固中的研究进展[J]. 复合材料科学与工程,2020(8):113-122.

[2] 李东东. 玄武岩纤维复合筋(BFRP)与再生混凝土粘结性能试验研究[D]. 太原:太原理工大学,2020.

[3] 王钧,郭大鹏,马跃. 玄武岩纤维混凝土与钢筋粘结锚固性能试验与分析[J]. 建筑科学与工程学报,2015,32(1):81-88.

[4] 王梦尧. 短切玄武岩纤维表面改性及其对水泥基材料性能的影响[D]. 北京:北京建筑大学,2020.

[5] 杜志刚,陶亚文,高富强,等. 玄武岩纤维筋的力学特性与破坏模式试验研究[J]. 矿产勘查,2023,14(2):304-309.

[6] 华云涛,尹世平,王璐晨. 玄武岩纤维筋海水海砂混凝土染承载性能及使用性能影响因素研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(2):166-177.