

文章编号:1673-9469(2026)03-0029-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.03.004

滨海深基坑碳纤维锚索支护变形特性现场试验

宋春豪¹,刘作岩²,白晓宇^{1*},闫楠¹,张启军³,秘金卫⁴

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 青岛中建联合集团有限公司, 山东 青岛 266100;
3. 青岛业高建设工程有限公司, 山东 青岛 266042; 4. 中建八局第二建设有限公司, 山东 济南 250014)

摘要: 为了研究碳纤维锚索应用于滨海深基坑支护工程的可行性, 依托烟台市某滨海深基坑工程, 开展深基坑灌注桩+预应力碳纤维锚索支护工程现场试验。开发预应力碳纤维锚索成套化施工工艺, 揭示碳纤维锚索随基坑开挖过程的预应力损失规律, 明确深基坑的变形特性。研究结果表明, 所提出的预应力碳纤维锚索成套化施工工艺在滨海深基坑支护工程中成功应用, 具有较强的适用性。

关键词: 深基坑; 碳纤维锚索; 现场试验; 锚索轴力; 基坑变形

中图分类号: TU745.5

文献标识码: A

Field Test of Deformation Characteristics for Carbon Fiber Anchor Cable Support in Coastal Deep Foundation Pit

SONG Chunhao¹, LIU Zuoyan², BAI Xiaoyu^{1*}, YAN Nan¹, ZHANG Qijun³, BI Jinwei⁴

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China;
2. Qingdao Zhongjian Combination Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266100, China; 3. Qingdao Yegao Construction Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266042, China; 4. The Second Construction Limited Company of China Construction Eighth Engineering Division, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: To thoroughly investigate the feasibility of carbon fiber anchor cable support in coastal deep excavations, a field test was conducted on cast-in-place pile + prestressed carbon fiber anchor cable support based on a deep excavation project in Yantai City. This study analyzed the prestress loss laws and deformation patterns of the deep foundation pit during excavation under the action of prestressed carbon fiber anchor cables using a complete set of construction techniques. The study results show that the prestressed carbon fiber anchor cable has been successfully applied in coastal deep foundation pit support projects.

Key words: deep foundation pit; carbon fiber anchor cable; field test; anchor cable shaft force; foundation pit deformation

随着城市化进程的加快, 土地资源紧张, 基础设施建设逐渐向地下深空间发展。在沿海区域, 基坑工程需要考虑海水对基坑支护结构的潜在影响^[1-4]。海水中含有大量的盐分和其他化学物质, 加速了对金属支护材料的腐蚀, 使其耐久性和承载能力降低^[5-8]。因此, 研究非金属材料支护结构势在必行^[9-11]。碳纤维锚索是一种由碳纤维增

强聚合物制成的非金属复合锚索材料, 其对环境的侵蚀抵抗力良好, 同时具有优异的抗疲劳性能。与传统锚索相比, 碳纤维锚索轻质高强、耐久性佳。

部分学者对碳纤维材料支护结构的抗腐蚀性开展了重点研究, 并取得诸多成果。朱街禄等^[12]通过试验研究说明碳纤维锚杆的抗酸、抗碱、抗盐性能都较好。王自柯等^[13]通过试验得出, 与

收稿日期: 2024-11-13 修回日期: 2025-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52478348); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2024ME224); 青岛市自然科学基金原创探索项目(24-4-4-zjj-180-jch); 山东省泰山学者工程项目(tsqn202306234); 山东省住房城乡建设科技计划项目(2024KYKF-FZJZ047)

第一作者: 宋春豪(1999—), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 研究方向: 地基与基础工程。

* 通信作者: 白晓宇(1984—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 教授, 研究方向: 地基基础及城市地下工程。

玄武岩纤维和玻璃纤维相比,碳纤维筋材的耐久性更优。部分学者通过普通钢绞线锚索与碳纤维锚索在深基坑支护工程中的应用对比,分析碳纤维锚索在实际应用中的可行性。郝增明等^[14]开展了杂填土地层深基坑微型桩-锚-撑原位试验,研究表明,开挖面以上桩身弯矩均呈正“S”型分布,锚索轴力沿埋深方向呈减小趋势。曹程明等^[15]通过建立有限元模型对基坑的水平位移等进行数值模拟,并将模拟结果与基坑现场监测数据进行对比分析。这种方法有助于解释不同地层条件对深基坑支护结构的影响,并为工程设计提供重要的参考信息。韩健勇等^[16]针对某深基坑工程项目,通过现场监测对开挖过程中的基坑变形特性和锚索内力变化进行分析,确保施工安全并优化支护设计,通过对这些数据的分析总结出了支护结构变形和锚索受力的规律。逢铁铮等^[17]通过在基坑施工过程中监测锚索轴力、水平位移和竖向位移等数据,分析了基坑稳定性及其对周围环境的影响。秘金卫^[18]对烟台市桩锚支护体系深基坑工程中碳纤维锚索的使用区域进行了预应力锚索的轴力、基坑变形、周围建筑沉降的实时监测,分析了基坑开挖施工对基坑及毗邻建筑物的影响规律,结果表明碳纤维锚索区域基坑的变形规律满足规范要求。

综上,目前对碳纤维锚索性能的研究主要集中在室内试验和数值模拟测试方面,这些研究主要关注碳纤维材料的力学性能,缺少对碳纤维锚索在基坑工程中的推广应用研究。本文依托烟台市某深基坑工程,将碳纤维锚索应用于基坑支护工程,开发了预应力碳纤维锚索成套化施工工艺流程,对预应力碳纤维锚索的轴力以及基坑变形进行现场实测与分析,探讨在滨海深基坑支护结构中使用碳纤维锚索支护的可行性,明确基坑

支护结构的变形特性。研究结果可为碳纤维锚索在滨海深基坑工程中的推广应用提供借鉴与参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

本文依托烟台市某基坑支护工程,其东侧为华庭路,南侧靠近观海路,西侧与北侧为多层建筑物,基坑深度为 10.1~11.1 m,基坑周长约为 800 m。施工场地较为平整,场地表层覆盖 20 cm 左右的混凝土。野外钻探以及试验所得岩土层物理力学参数如表 1 所示。试验基坑采用碳纤维锚索,支护效果如图 1 所示。



图 1 基坑支护照片

Fig. 1 Photo of foundation pit support

1.2 碳纤维锚索设置

碳纤维锚索采用 5~7 mm 碳纤维筋和环氧树脂基体复合形成螺纹筋形式,筋材力学性能参数如表 2 所示。3 道锚索的水平间距为 1 500 mm,第一道与第二道锚索的竖向间距为 1 200 mm,第二道与第三道锚索的竖向间距为 3 000 mm,试验所选碳纤维锚索的设计参数如表 3 所示,基坑支护剖面如图 2 所示。

表 1 岩土层物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of geotechnical layers

序号	岩土层名称	揭露层厚 /m	内摩擦角 /($^{\circ}$)	天然密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	浮力密度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 /kPa
①	素填土	1.80~7.80	10.0	1.90	16.0	6.0	5.0
②	淤泥质粉砂	0.90~2.90	8.0	2.10	19.3	9.3	3.0
②-1	淤泥质粉质黏土	0.90~4.20	6.8	1.80	18.0	8.0	11.2
③	粉质黏土	0.90~8.10	13.0	1.75	19.6	9.6	32.7
④	中粗砂	1.00~5.00	30.0	2.50	20.0	10.0	5.0
④-1	中粗砂	0.90~7.30	30.0	2.50	20.0	10.0	5.0

表 2 碳纤维筋材力学性能参数
Tab. 2 Mechanical property parameters of carbon fiber reinforcement

碳纤维筋材直径 d/mm	抗拉强度标准值/MPa	弹性模量/GPa	极限应变/%
$d \leq 10$	$\geq 1\ 800$	≥ 140	≥ 1.5
$10 < d \leq 13$	$\geq 1\ 300$	≥ 130	≥ 1.0
$d > 13$	$\geq 1\ 100$	≥ 120	≥ 0.9

2 碳纤维锚索施工

2.1 碳纤维锚索成孔及安装

碳纤维锚索采用钢套管钻进的方法进行成孔施工,选用直径为 160 mm、壁厚约为 10 mm 的钢管作为钢套管,钢套管可在钻孔过程中起到支护

的作用,且对后续碳纤维锚索的安装起到保护作用。钻进过程中注意控制孔深,在第一节钢套管的前端套上钻头,前一节钢套管钻进后,在其尾部螺旋接口处旋紧下一节钢套管继续钻至设计深度,将碳纤维锚索顺入钢套管,进行注浆、补浆工作,而后将钢套管依次旋出。锚索钻孔完毕后进行清孔,采用高压风清孔,碳纤维锚索施工工艺流程如图 3 所示。

碳纤维锚索吊装过程中需控制碳纤维锚索弯曲半径不小于 25 倍拉索外径,以免碳纤维锚索因过度弯折而发生损坏。碳纤维锚索的安装应满足工程对锚索的安装顺序和锚索预拉力要求,严格控制锚索的入孔深度,以防影响碳纤维锚索的锚固。6 根碳纤维杆组成 1 根碳纤维锚索,碳纤维锚索实物照片如图 4 所示。

表 3 预应力碳纤维锚索设计参数

Tab. 3 Design parameters of prestressed carbon fiber anchor cable

锚索层号	总长/m	自由段长度/m	锚固段长度/m	锚孔直径/m	锚索倾角/(°)	锁定值/kN
1	32.0	10.0	22.0	0.15	25	120
2	30.0	6.0	24.0	0.15	25	170
3	25.0	5.0	20.0	0.15	25	150

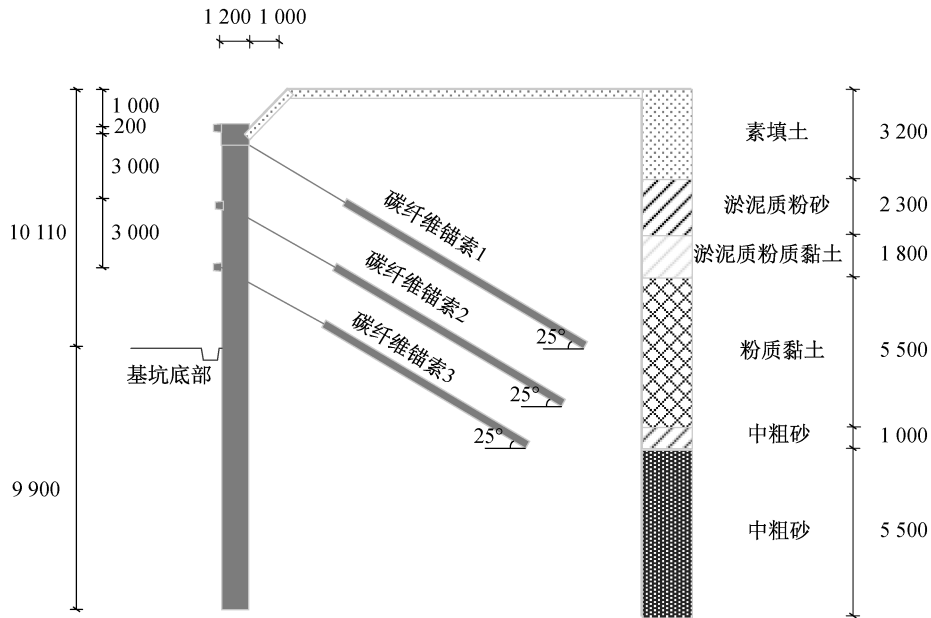


图 2 基坑支护剖面图(单位: mm)

Fig. 2 Foundation pit support section (unit: mm)

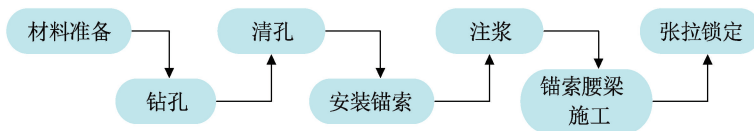


图 3 碳纤维锚索施工工艺流程

Fig. 3 Carbon fiber anchor cable construction process



图4 碳纤维锚索实物照片

Fig. 4 Actual photos of carbon fiber anchor cable

2.2 锚索注浆及张拉

锚索入孔深度不得小于设计长度的95%,注浆采用压灌机进行。锚索的注浆材料采用425#早强型普通硅酸盐水泥,水灰比为0.50~0.55。先进行注浆,待浆液注满后安装碳纤维锚索。碳纤维锚索采用高强螺母和钢套筒锚具进行锚固,使用千斤顶顶推螺纹式钢套筒调节锚头的张拉预应力,使用螺母锁定螺纹式钢套筒锁定张拉预应力。锚头由碳纤维锚索和带底座的螺纹式钢套筒组成。螺纹式钢套筒通过内部填充SHB-环氧建筑植筋胶与碳纤维锚索连接。注浆后若孔内浆液下降应及时补充浆液。预应力锚索施工完成后若强度达到设计强度的80%以上,可进行下层土方的开挖。碳纤维锚索锚固现场如图5所示。

当浆体强度达到设计强度的75%以上后方可进行碳纤维锚索张拉作业。碳纤维锚索张拉需使用油压千斤顶,操作步骤如下:在张拉端按顺序安

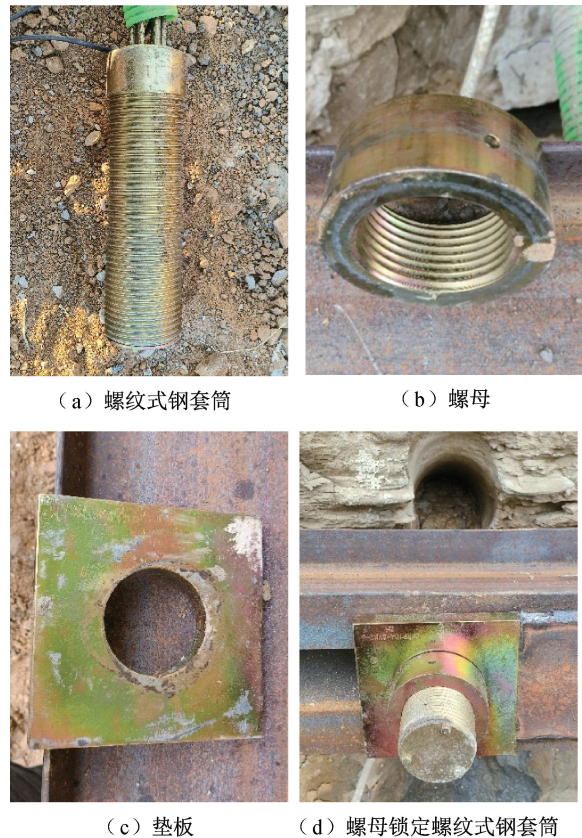


图5 碳纤维锚索现场锚固

Fig. 5 On-site anchoring of carbon fiber anchor cable

装垫板、螺母、螺纹式钢套筒以及千斤顶,千斤顶设置在螺纹式钢套筒周侧,用于抵接螺纹式钢套筒端部周侧的钢螺栓,确保油压千斤顶能够固定住锚索,以便进行张拉作业。然后将油液压千斤顶与锚索的张拉端相连。张拉锁定荷载为140 kN,按它的40%、30%、30%分3级张拉。通过油压千斤顶控制油压大小,并准确读取和控制张拉过程中的压力,以确保达到设计要求的张拉力。油压达到设计张拉值后需保持几分钟,确保预应力在锚索中均匀分布并稳定下来。待压力稳定后,按设计值锁定。为减小放置碳纤维锚索时的阻力,在固定端端头部套接半圆形锚杯。图6为碳纤维锚索端头部位照片,图7为碳纤维锚索现场施工图。

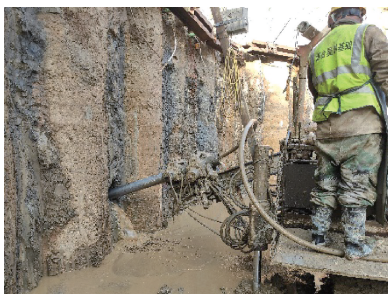
2.3 腰梁施工

腰梁选用20b双工字钢组合腰梁。锚索养护期间进行腰梁预制,预制时每段长度为6~12 m。工字钢之间应采用缀板焊接为整体构件,焊缝连接应采用贴角焊。双工字钢之间的净间距应保证锚杆杆体平直穿过。提前准备安装施工时所需的楔形垫块、钢垫板和专用锚具。待锚索注浆体强



图 6 碳纤维锚索端头部位照片

Fig. 6 Photo of the end of carbon fiber anchor cable



(a) 钻孔



(b) 安装锚索并注浆



(c) 安装张拉设备



(d) 张拉并锁定碳纤维锚索

图 7 碳纤维锚索现场施工过程

Fig. 7 On-site construction process of carbon fiber anchor cable

度达到 15 MPa 后安装腰梁。将锚索从腰梁间隙穿出,用楔形垫块支撑腰梁底部,再将锚索与锁具连接,在锚具与腰梁之间垫上钢板,准备完成后进行锚索张拉。

3 监测结果及分析

3.1 锚索轴力

本次试验共选取 2 根碳纤维锚索进行研究,所选取的 2 根碳纤维锚索分别位于基坑的中心位置和拐角位置。在组成碳纤维锚索的 6 根碳纤维筋材中,随机选择其中 1 根,在自由段中间位置布置监测点,使用锚索测力计进行监测。所选取的 2 个锚索监测点 DY1、DY2 位置如图 8 所示,图中 HV1—HV6 为基坑水平和竖向位移监测点,ST1—ST5 为基坑土体深层水平位移监测点。自锚索张拉日开始监测,其中 DY2 比 DY1 晚一天开始监测。得到的 DY1 与 DY2 锚索轴力随时间的变化规律曲线如图 9 所示。

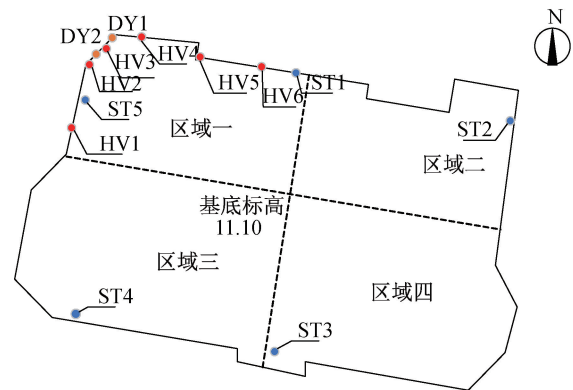


图 8 监测点平面布置图

Fig. 8 Floor plan of monitoring points

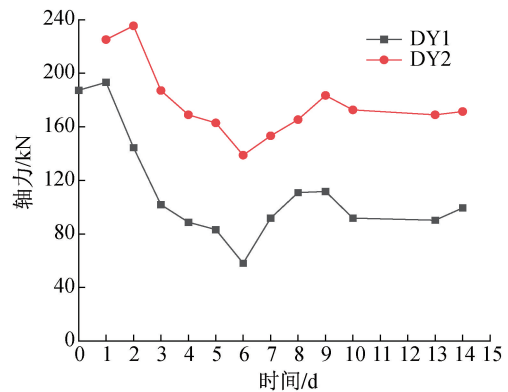


图 9 锚索轴力随时间变化规律

Fig. 9 Variation of anchor cable shaft force with time

由图 9 可以看出,在监测初期锚索 DY1 轴力呈上升趋势,在监测的第 2 天轴力达到 193.24 kN

后开始快速下降,在监测的第6天轴力达到最小值 58.14 kN 后开始出现回升趋势,第10天后锚索轴力基本维持稳定。

对锚索 DY1 轴力随时间的变化规律进行分析,发现其轴力随时间变化的曲线主要分为4个阶段:(1)小幅上升阶段。由于施工时当地气温较低且有降雪,浆体和土体的黏结强度受到一定影响,导致在监测初期锚索轴力出现小幅上升。(2)快速下降阶段。受锚固夹具回缩、腰梁变形的影响,锚索轴力在一段时间内快速下降。(3)回升阶段。碳纤维材料表现出弹性恢复,导致出现轴力回升现象。(4)基本稳定阶段。在张拉之前,基坑基本上已开挖到底,预应力不再发生很大的波动,所以锚索轴力较快达到稳定状态。这与李浩等^[19]的锚索轴力现场监测结果相似。在监测的第14天,锚索 DY1 的轴力值为 99.45 kN,损失率达到 46.91%,分析损失率较大的原因为,锚索 DY1 所处位置为基坑的拐角处,锚索中的应力较为集中,且锚索 DY1 与拐角处土体的摩擦造成锚索张力分布不均,导致预应力损失较大。

锚索 DY2 轴力曲线整体趋势与锚索 DY1 相似,在初期轴力上升达到 235.34 kN 后开始下降,在监测的第5天轴力达到最小值 138.81 kN 后开始回升,最终趋于稳定。轴力值在监测的第14天为 171.39 kN,损失率为 23.87%,低于 DY1 的损失率。碳纤维锚索在平稳状态下的平均预应力损失率约为 35.39%。

3.2 基坑水平位移和竖向位移

为研究碳纤维锚索设置区域的基坑变化规律,选取编号为 HV1—HV6 共6个与碳纤维锚索设置位置相近的监测点进行基坑水平位移和竖向位移监测,监测结果如图10、图11所示。

由图10可以看出,监测点 HV1—HV6 的水平位移随着基坑开挖逐渐增加,但在第23天监测点 HV1、HV2 的水平位移达到 2.2、2.8 mm 后位移曲线突然下降。经过对施工现场观察推测其原因为,开挖基坑的土体堆在监测点 HV1、HV2 区域,在此区域开挖时土体被移走,由于上部荷载被卸载,受外部土压力作用此区域出现向基坑内侧的位移。在第37天时,监测点 HV1、HV2 的水平位移恢复缓慢上升趋势。所有监测点的位移方向均一致,随着基坑开挖完毕,位移速率逐渐减小,位移曲线逐渐平缓。最终,最大水平位移为 6.70 mm,满足规范要求。

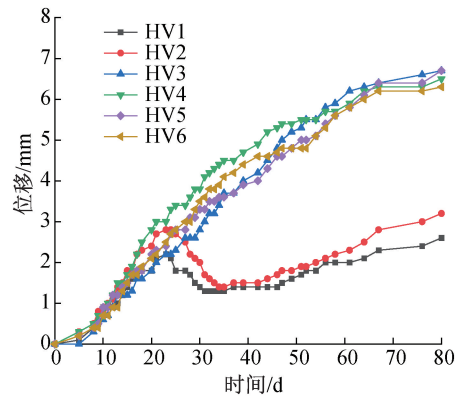


图10 基坑水平位移随时间变化

Fig. 10 Variation of horizontal displacement in foundation pit with time

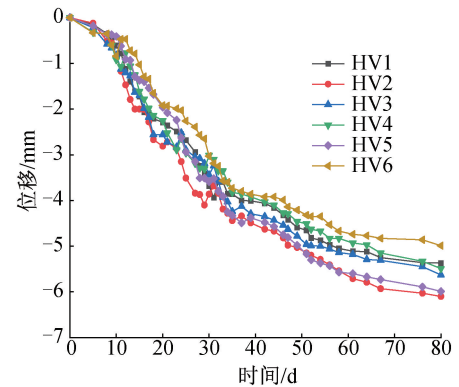


图11 基坑竖向位移随时间变化

Fig. 11 Variation of vertical displacement in foundation pit with time

由图11可以看出,监测点 HV1—HV6 竖向位移变化速率相近。由于基坑开挖施工,初期基坑沉降速率较大,随着碳纤维锚索开始施工,基坑的沉降速率得到控制,监测点沉降速率逐渐缓和,基坑沉降曲线逐渐平缓。最终,最大沉降量为 6.10 mm,满足规范要求。

3.3 土体深层水平位移

针对基坑周边环境,在基坑四周布置深层水平位移监测点,由于基坑南侧为医院,上部荷载大、各种管线复杂,选取 ST1—ST5 共5个深基坑土体深层水平位移监测点进行分析,监测周期为 80 d。监测结果如图12所示。

由图12可以看出,监测点 ST1、ST3、ST4、ST5 的深层土体位移规律相似,都呈现出中间高两头低的趋势,监测点 ST3、ST4、ST5 在基坑中层位置深度 3.0 至 5.0 m 附近基坑位移为正值,即基坑向外侧位移,在两头位置基坑位移均为负值,即基坑向内侧位移。经观察发现,监测点 ST3、ST4、ST5

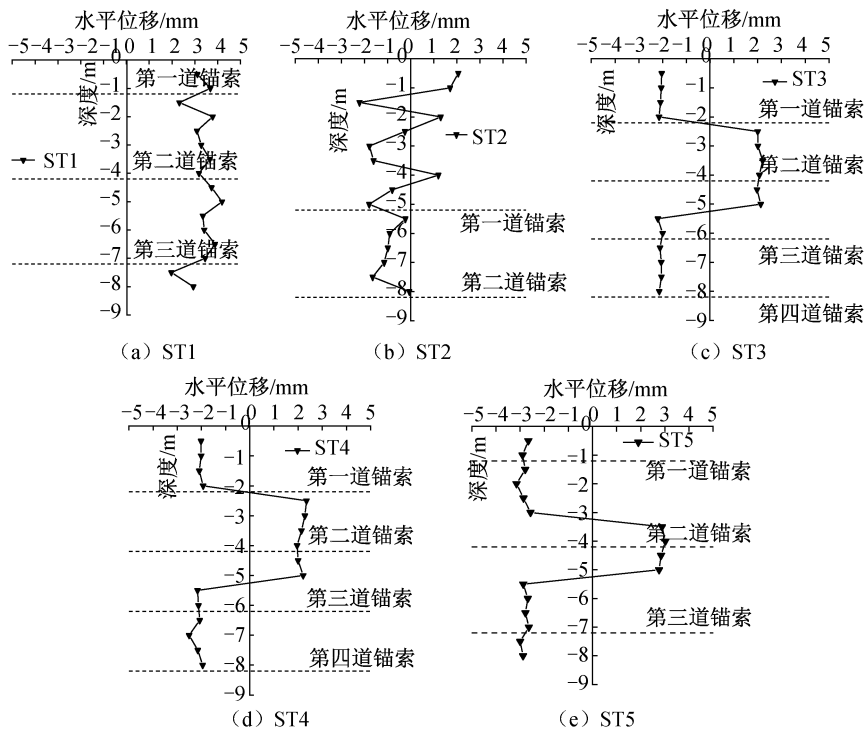


图 12 土体深层水平位移随深度变化

Fig. 12 Variation of horizontal displacement in deep soil with time

的曲线在施加锚索后均呈现出向基坑外侧位移的趋势。经分析可知,施加支护锚索可减小基坑开挖所引起的向基坑内侧的位移。其中监测点 ST1 的水平位移始终为正值,这是因为 ST1 处主要为平地,在 1.2 m 深度处布置了第一道锚索,所以 ST1 处基坑始终向外侧位移。监测点 ST1 的最大位移为 4.19 mm,发生在 5.0 m 深度处,位移方向为向基坑外侧。监测点 ST3 的最大位移为 2.21 mm,发生在 3.5 m 深度处,位移方向为向基坑外侧。监测点 ST4 的最大位移为 2.51 mm,发生在 7.0 m 深度处,位移方向为向基坑外侧。监测点 ST5 的最大位移为 3.15 mm,发生在 2.0 m 深度处,位移方向为向基坑内侧。

由于监测点 ST2 处于基坑阳角处这一特殊位置,周围存在建筑物且在高于 5.00 m 的位置有一个汽车坡道,该坡道两侧采用 1:2 的坡度进行放坡处理,因此监测点 ST2 的大部分位置都出现了向基坑内侧的位移,但监测点 ST2 土体深层水平位移曲线整体出现多次位移方向的反转,推测反转为随着上层锚索施工,支护作用使得土体位移减小。在距离基坑 5.20 m 的位置施加第一道锚索,在距离基坑 8.20 m 的位置施加第二道锚索,施加锚索的位置与其他区域相比,出现了明显的向基坑外侧位移的趋势,说明施加锚索有助于减少基坑的

整体位移。监测点 ST2 的最大位移为 2.22 mm,发生在 1.5 m 深度处,位移方向为向基坑内侧。

3.4 案例对比分析

为了验证本文所研究的碳纤维锚索支护变形特性的科学性和准确性,选取具有代表性的类似工程基坑案例进行对比分析。

案例一^[20]:青岛市海天中心某深基坑支护工程,基坑深度为 24~29 m、基坑周长约为 760 m,与本文所述基坑工程概况相似。基坑支护采用桩锚支护体系,监测结果显示,锚索轴力的平均损失率约为 15.08%,基坑最大水平和竖向沉降分别为 12.30 和 11.01 mm,该案例验证了在滨海基坑支护工程中使用锚索支护可有效控制基坑变形。

案例二^[21]:青岛市崂山区某基坑支护工程,其周边环境复杂,基坑开挖深度为 4.60~29.20 m、基坑周长约为 510 m,基坑最大水平位移为 19.98 mm、最大竖向位移为 12.11 mm,该案例验证了在滨海基坑支护工程中使用锚索支护具有安全适用性。

4 结论

1) 将碳纤维锚索成功应用于基坑支护工程,提出了预应力碳纤维锚索成套化施工工艺,在碳纤维锚索钻孔施工时采用钢套管钻进、碳纤维锚

索采用高强螺母和钢套筒锚具锚固是可行的。

2)通过对锚索轴力监测结果进行分析,揭示了碳纤维锚索随基坑开挖过程的预应力损失规律,达到平稳状态后平均预应力损失率约为35.39%,锚索所处位置为基坑拐角处,锚索中的应力集中,锚索与土体摩擦造成锚索张力分布不均,这是导致预应力损失率较大的主要原因。

3)基坑最大水平位移为6.70 mm,最大竖向位移为6.10 mm,基坑土体深层水平位移最大值为4.19 mm,均满足现行规范和设计要求,说明在滨海深基坑支护工程中使用碳纤维锚索可有效控制基坑变形。

参考文献:

- [1] 叶帅华,李德鹏.复杂环境下深大基坑开挖监测与数值模拟分析[J].土木工程学报,2019,52(S2):117-126.
YE S H, LI D P. Monitoring and simulation analysis of deep and large foundation pit excavation in complex environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(S2):117-126.
- [2] KARATAŞ M A, GÖKKAYA H. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials [J]. Defence Technology, 2018, 14 (4): 318-326.
- [3] 万雪林,张鹏.长短组合双排桩基坑支护体系分析及应用[J].河北工程大学学报(自然科学版),2023,40(1):9-14.
WAN X L, ZHANG P. Analysis and application of double row pile pit support system with different lengths [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2023, 40(1):9-14.
- [4] 李杨,徐建泽.基于改进证据理论的深基坑施工风险评价[J].华北理工大学学报(自然科学版),2022,44(2):68-73.
LI Y, XU J Z. Risk assessment of deep foundation pit construction based on improved evidence theory [J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 44(2):68-73.
- [5] REN L, ZHU B L, LI J, et al. A novel model for detecting prestress by external anchor head section of prestressed anchor cables[J]. Ocean Engineering, 2024, 311:118978.
- [6] BENMOKRANE B, ZHANG B R, CHENNOUF A, et al. Evaluation of aramid and carbon fibre reinforced polymer composite tendons for prestressed ground anchors [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, 27 (5): 1031-1045.
- [7] 夏伟,陆松,白二雷,等.碳纳米管-碳纤维复合改性混凝土力学性能研究[J].材料导报,2023,37(16):110-118.
XIA W, LU S, BAI E L, et al. Research on mechanical properties of carbon nanotubes-carbon fiber composite modified concrete[J]. Materials Reports, 2023, 37(16): 110-118.
- [8] 韩建强,李秋绪.槽钢连接件对型钢混凝土锚固性能的影响[J].华北理工大学学报(自然科学版),2022,44(1):62-67.
HAN J Q, LI Q X. Influence of channel steel connector on anchorage performance of shaped steel concrete [J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 44(1):62-67.
- [9] MOTWANI P, PEROGAMVROS N, TAYLOR S, et al. Performance of industrial wedge-anchors for pre-stressing BFRP bars: experimental and numerical studies [J]. Composite Structures, 2020, 251:112592.
- [10] 叶帅华,丁盛环,龚晓南,等.兰州某地铁车站深基坑监测与数值模拟分析[J].岩土工程学报,2018,40(S1):177-182.
YE S H, DING S H, GONG X N, et al. Monitoring and numerical simulation of deep foundation pit of a subway station in Lanzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S1):177-182.
- [11] HAO Z M, YAN N, BAI X Y, et al. Mechanical characteristics and application of CFRP cable anchor support structures in coastal area [J]. Ocean Engineering, 2024, 299:117366.
- [12] 朱街禄,杨文瑞.酸性腐蚀环境下CFRP锚杆的耐久性试验研究[J].新型建筑材料,2016,43(8):58-61+69.
ZHU J L, YANG W R. Experimental investigation on durability of CFRP anchor in acid corrosion environment [J]. New Building Materials, 2016, 43(8):58-61+69.
- [13] 王自柯,段建新,赵军,等.FRP筋在不同腐蚀环境下的层间剪切性能劣化试验[J].复合材料学报,2024,41(4):2031-2042.
WANG Z K, DUAN J X, ZHAO J, et al. Experimental study on the degradation of interlaminar shear performance of FRP bars in different corrosive environments [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(4): 2031-2042.
- [14] 郝增明,闫楠,白晓宇,等.杂填土地层深基坑微型桩-锚-撑组合支护体系受力特性原位试验[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(2):755-773.
HAO Z M, YAN N, BAI X Y, et al. In-situ test on force characteristics of miniature pile-anchorsupport combination support system for deep foundation pits in miscellaneous

- soil strata [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(2): 755-773.
- [15] 曹程明, 时轶磊, 龙照, 等. 桩锚支护上土下岩地层深基坑沉降与变形分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(10): 4120-4126.
- CAO C M, SHI Y L, LONG Z, et al. Settlement and deformation analysis of deep foundation with pile anchor support in upper soil and lower rock strata [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(10): 4120-4126.
- [16] 韩健勇, 赵文, 贾鹏蛟, 等. 桩锚支护结构深基坑受力变形及稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S2): 907-914.
- HAN J Y, ZHAO W, JIA P J, et al. Analysis on stress, deformation and stability of deep excavation supported by anchored pile [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(S2): 907-914.
- [17] 逢铁铮, 方勇生, 覃卫民. 厦门梧村隧道明挖深基坑施工监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 2751-2757.
- PANG T Z, FANG Y S, QIN W M. Analysis of excavation monitoring for deep foundation pit in Xiamen Wucun tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1): 2751-2757.
- [18] 秘金卫. 临海深基坑碳纤维锚索与灌注桩支护结构受力及变形特性研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2023.
- BI J W. Study on stress and deformation characteristics of carbon fiber anchor cable and cast-in-place pile supporting structure in deep foundation pit near sea [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2023.
- [19] 李浩, 宋园园, 周军, 等. 深基坑桩锚支护结构受力与变形特性现场试验[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(1): 264-270.
- LI H, SONG Y Y, ZHOU J, et al. Field test of pile-anchor retaining structure mechanical and deformation characteristics in deep foundation pit [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(1): 264-270.
- [20] 刘小良, 秘金卫, 陈佑童, 等. 土岩组合深基坑围护结构受力与变形特性分析——以青岛海天中心深基坑为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(6): 2549-2557.
- LIU X L, BI J W, CHEN Y T, et al. Analysis of force and deformation characteristics of retaining structure of soil-rock combination deep foundation pit: take Qingdao Haitian Center deep foundation pit as an example [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(6): 2549-2557.
- [21] 郝增明, 闫楠, 刘作岩, 等. 硬岩地层超深基坑桩锚支护体系受力与变形特性实测分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(15): 6398-6404.
- HAO Z M, YAN N, LIU Z Y, et al. Analysis of force and deformation characteristics of pile-anchor support system for ultra-deep foundation in hard rock strata [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(15): 6398-6404.

(责任编辑 唐彦彦)