

深基坑通长型 GFRP 筋杆体施工关键技术与性能研究

Study on Construction Key Technology and Performance of GFRP Bar Body in Deep Foundation Pit

潘 潇

(北京市市政四建设工程有限责任公司, 北京 100028)

摘要: 为了提升深基坑工程中通长型玻璃纤维筋 (Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP) 杆体在复杂应力影响下的施工应用效果, 研究深基坑通长型 GFRP 筋杆体施工关键技术与性能。通长型 GFRP 筋杆体的锚固端部采用新型夹片, 在锚固体上增加承压板。计算 GFRP 筋的正截面偏心受压承载力, 得到当前支护区域所需要的通长型 GFRP 筋的数量和规格, 保证支护效果。结果表明: 在拉力约为 1000 kN 时直径 32 mm 筋杆体爆裂。基坑 6m 处基坑墙体发生约为 15 mm 的最大位移。通过应力云图像和载荷 - 位移数据确定最佳夹片硬度为 GFRP 硬度的 80%, 锚具最佳厚度为 6 cm。研究的施工技术具有良好的支护施工应用效果。

关键词: 深基坑; 玻璃钢筋杆体; 通长型; 锚固支护; 连接器

中图分类号: TU47 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 01-0069-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.014

PAN Xiao

(Beijing No. 4 Municipal Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: In order to improve the construction application effect of full-length glass fiber reinforced plastic (GFRP) bars in deep foundation pit engineering under complex stress influence, the key construction technologies and performance of full-length GFRP bars in deep foundation pit engineering are studied. The anchoring end of the full-length GFRP reinforcement rod adopts a new type of clip, and a pressure plate is added to the anchoring body. Calculate the eccentric compressive bearing capacity of GFRP reinforcement in the normal section, obtain the quantity and specifications of full-length GFRP reinforcement required for the current support area, and ensure the support effect. The results indicate that the 32 mm diameter reinforcement rod burst when subjected to a tensile force of approximately 1000 kN. The maximum displacement of the foundation pit wall at 6m is about 15mm. The optimal clamp hardness is determined to be 80% of GFRP hardness and the optimal anchor thickness is 6 cm based on stress cloud images and load displacement data. The construction technology studied has good application effects in supporting construction.

Key words: deep foundation pit; glass fiber reinforced plastic; full-length; anchor support; coupler

0 引言

深基坑开挖后, 坑壁土体失去了原有的支撑, 在自身重力和周边土体压力作用下, 有变形坍塌的风险。合理的支护措施能够提供足够的支撑力, 平衡土体压力, 维护基坑的安全性和稳定性^[1-3]。玻璃纤维筋 (GFRP) 是一种纤维增强复合材料, 具有强

岩土力学

大的抗腐蚀能力和极高的强度,在深基坑施工中可以有效防止因地下水腐蚀导致的支护失效问题^[4-6]。

为了提升深基坑 GFRP 筋杆体的施工应用效果,一些学者进行了研究。Li 等^[7]通过室内拔出试验研究了钢筋直径、锚固长度和砂浆强度对 GFRP 钢筋黏结性能的影响,得到 GFRP 棒材与砂浆的极限黏结强度与 GFRP 棒材直径呈负相关,与砂浆强度呈正相关。此外,锚固长度的增加导致黏结强度降低。其次,采用逆分析方法,利用有限差分软件 FLAC 3D 对锚杆黏结性能的力学参数进行分析得到 GFRP 的施工模拟性能情况。李恒等^[8]通过 Abaqus 软件对 GFRP 进行有限元分析,在分析时,对 GFRP 筋和周围土体的实际结构进行一定的简化和假设可能与实际情况存在差异;白玉书等^[9]选择三种不同直径的 GFRP 筋进行倒置植入砂岩顶板,同时不断加载拉拔,在杆体与浆体之间布置传感器检测试件的应变获取 GFRP 的性能数据;白晓宇等^[10]通过在 GFRP 筋完成锚固后设置光纤传感器获取 GFRP 的杆体与浆体、浆体与岩石两个界面的黏结特性;黄健等^[11]对新型 GFRP-钢复合筋进行拉伸性能测试,分析了复合筋的破坏过程和力学性能指标,同时构建了新型 GFRP-钢复合筋的应力-应变关系理论模型,并将其与试验结果进行对比分析;周欣竹等^[12]构建了荷载-变形曲线,分析了有效高度与冲切承载力之间的定量关系,应用于水利工程和港口工程中;余晓雅等^[13]设计一种基于改进极限学习机的基坑底面下沉风险监测方法,通过引入松弛参数与抗弯刚度软化指数,构建基坑底面下沉模型和风险评估体系,划分风险监测临界值,完成基坑底面下沉风险监测训练;李文超等^[14]探究了玻璃纤维增强复合材料(GFRP)筋在模拟和真实混凝土环境中性能衰退的规律及机理;潘锐等^[15]为明确破碎岩体注浆锚索锚固性能及参数选取,开展不同水灰比、岩体粒径等因素影响下对比试验,以及注浆锚索支护参数现场测试,提出拉压比、注浆锚固率等评价指标。

现有研究对通长型筋杆体在深基坑中的应用性能研究较少,因此提出深基坑通长型 GFRP 筋杆体施工关键技术与性能研究。运用新型夹片并增设承压板于锚固体,通过计算 GFRP 筋在正截面偏心受压下的承载力,确定了支护区域所需通长型 GFRP 筋的数

量与规格,以分析该支护结构的应用效果。

1 GFRP 筋杆体施工关键技术与性能

1.1 工程概况

北岗子站为 12 号线的中间站,车站位于东坝组团地区。施工地区长度 300.6 m,站台宽度为 14 m,车站底板埋深约 16.69 m,顶板覆土约 3.3 m。勘察土层主要分为三大类,根据现场勘察及查阅相关资料,地层参数见表 1。

表 1 地层参数

Table 1 Stratigraphic parameters

地质年代	土层名称	平均厚度 h/m	重度/ (kN/m ³)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	极限摩阻 力标准值 /kPa
人工填土层	① ₂ 填土	2.5	12.0	5	10	10
	① ₃ 粉质黏土	4.3	17.5	25	15	50
冲洪积层	④ ₂ 粉质黏土	4.8	19.7	25	16	45
	⑥ ₅ 砂质粉土	6.6	19.0	16	24	65
冲洪积层	⑦ ₃ 粉质黏土	12.0	18.9	30	15	75
	⑥ ₄ 粉质黏土	11.0	20.3	15	27	65
	⑦ ₂ 中砂	10.0	20.5	0	30	60

1.2 基坑支护方案

(1) 支护方案:为了实现对基坑的支护保护,防止基坑变形、坍塌,制定 GFRP 筋杆体施工流程:施工准备→钻孔与清孔→初次灌浆→GFRP 筋杆体安装→二次高压灌浆→安装锚垫板制作→张拉锚定→封锚。在施工过程中 GFRP 筋杆体安装,是深基坑支护的核心。

在进行基坑锚固任务前需要确定 GFRP 筋杆体的规格和使用数量,规划基坑支护方案,并对 GFRP 筋杆体进行检查。

GFRP 筋杆体截面附加偏心距为:

$$e_a = \max\left(\frac{h}{30}, \frac{a+b}{30}\right) \quad (1)$$

式中: h 为截面高度; a 为轴向压力距离; b 为轴向拉力距离。

轴向压力对截面重心的偏心距为:

$$e_0 = \frac{M}{N} \quad (2)$$

式中: N 为截面轴力; M 为 GFRP 筋最大弯矩。

初始偏心距为:

$$e_i = e_a + e_0 \quad (3)$$

偏心距增大系数 η 为:

$$\eta = 1 + \left(\frac{L_0}{h} \right)^2 \zeta_1 \zeta_2 \cdot \frac{h_0}{1400e_i} \quad (4)$$

式中: L_0 为 GFRP 筋长度; 配筋率 ζ_1 、 ζ_2 均取值为 1; h_0 为混凝土保护层厚度。

若纵向筋的截面积为 A_s , 则非对称配筋大、小偏心受压判别式为:

$$N\eta e_i \leq 2\alpha f_c E_s \frac{[\sin(\pi\alpha)]^3}{3\pi} + f_y A_s r_s \frac{\sin(\pi\alpha) + \sin(\pi\alpha_1)}{2\pi} \quad (5)$$

偏心受压构件的承载力计算公式为:

$$N \leq \alpha f_c \frac{1 - \sin(\pi\alpha)}{2\pi\alpha} + (\alpha - \alpha_1) f_y A_s \quad (6)$$

式中: α 为截面弯矩, $\alpha_1 = 1.5 - 2\alpha$; r_s 为纵筋半径; f_c 为混凝土强度; f_y 为抗拉强度; E_s 为弹性模量。计算其承载力, 可确定构件在偏心受压状态下能承受的最大荷载。

(2) 支护方案规划: 根据基坑土层的剖面图, 确定 GFRP 土钉墙标高、土钉位置等参数。核实基坑下方存在的光纤、构筑物等影响基坑开挖的物体, 并采用分层开挖的原则进行土方开挖作业。基坑开挖过程中, 工人对边坡进行修正, 且每层基坑深度应小于土钉墙 300 mm。

(3) 支护材料检查: GFRP 筋杆体表面质地均匀, 无气包、裂纹; 杆体螺纹牙距整齐; 杆体直径统一。

不同直径的 GFRP 筋杆体性能应符合最低力学性能要求, 性能见表 2。

表 2 GFRP 筋杆体力学性能

Table 2 Mechanical properties of GFRP reinforcement rod body						
杆体直径 /mm	抗拉强度	抗拉强度	抗拉强度	抗剪强度	抗扭矩	弹性 模量
	平均值 /MPa	标准值 /MPa	设计值 /MPa	平均值 /MPa	平均值 /(N·m)	
25	≥800	570	425	≥130	≥120	≥40
28	≥750	535	400	≥130	≥130	≥40
30	≥750	535	400	≥130	≥180	≥40
32	≥700	500	400	≥110	≥230	≥40
36	≥700	500	400	≥110	≥300	≥40

注浆强度应大于砂浆强度等级 M15 以及 GFRP 筋杆体与注浆黏结强度应大于 1.5 MPa。

1.3 筋杆体安装

采用螺旋钻机干成孔方式钻孔, 清理钻孔安装 GFRP 筋杆体并及时注浆。在锚固体处增加承压板,

GFRP 筋锚入承压板和锚固体结合。当 GFRP 筋长度不足时, 采用套筒黏合方式连接 GFRP 筋, 在锚固端使用经改良的锚具夹片, 锚定 GFRP 筋进行张拉。通长型 GFRP 筋杆体结构如图 1 所示。

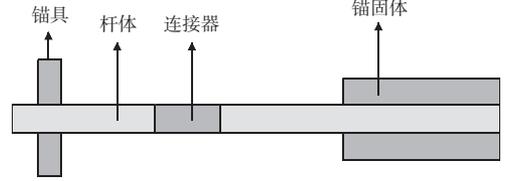


图 1 通长型 GFRP 筋杆体结构

Fig. 1 Structure of full-length GFRP reinforcement rod

1.4 喷射混凝土和封锚

喷射混凝土的材料主要包括粗砂、碎石以及水泥, 在混凝土喷射时按照由上至下的顺序喷射, 混凝土喷射厚度约为 50 mm, 喷射混凝土完成后进行喷水养护。

注浆凝固前将 GFRP 筋杆体进行锚头连接, 通过安装扭矩螺母将螺母与托盘紧密接触, 扭矩螺母的拧紧力大于 40 N·m。

2 试验分析

针对当前工程的深基坑采用 32 mm 直径的 GFRP 筋, 为了研究通长型锚杆杆体性能, 进行静载锚固破坏试验。使用连接器连接后增加荷载直至 GFRP 筋破坏, GFRP 筋双螺母连接器试件破坏形态如图 2 所示。



(a) 水平

(b) 垂直

图 2 GFRP 筋双螺母连接器试件破坏形态

Fig. 2 Failure mode of GFRP reinforcement double nut connector test piece

当 GFRP 筋受到拉力破坏后连接器部位 GFRP 筋并未滑脱, 说明了双螺母连接具有极强的锚固能力, 可以有效保证深基坑中锚固的强度。根据锚固效率系数计算公式, 经实测的 6 组试件效率系数分别为

岩土力学

108%、104%、111%、98%、115%、106%，均满足规范锚固效率要求。分别选择硬度为 GFRP 硬度 70%、80% 和 120% 的三种夹片进行拉伸测试，测试结果如图 3 所示。

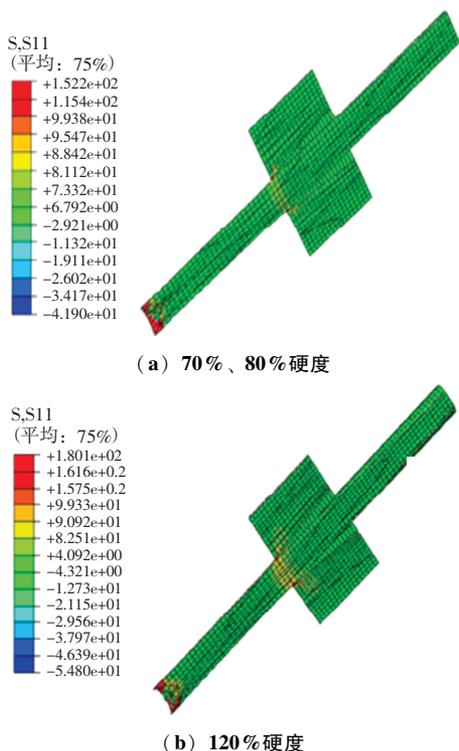


图 3 不同材质夹片的应力云

Fig. 3 Stress of clips made of different materials

当夹片硬度为 GFRP 筋的 70% 和 80% 时，夹片应力为 146 MPa，两者相差不大，对 GFRP 筋未造成损伤；GFRP 筋局部发生损坏，随着荷载增大对 GFRP 筋可能会发生剪切破坏。故确定夹片选择硬度为 GFRP 筋硬度 80% 的夹片。

在确定了夹片的硬度后也需要确定锚具的厚度。双绞线锚具的厚度分别为 6、9、12 cm，不同锚具厚度在拉伸测试中的位移如图 4 所示。

从荷载位移曲线可以看出，锚具位移随着荷载的增大逐渐增大，表现为明显的线性变化。加载结束时，锚具的应变位移较小。相同负荷下 12 cm 厚度锚具的位移最小，9 cm 厚度的位移最大。通过试验分析 6 cm 厚度锚具材料发挥更加充分，而 9、12 cm 厚度锚具则存在一定程度上的材料浪费，从经济角度考虑选用 6 cm 作为锚具厚度。

在该工程中进行 GFRP 筋锚固，锚固规划如下：主体结构轨排井基坑共设置 12 幅地连墙，其中第 1、

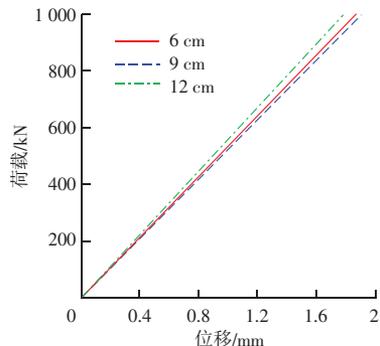


图 4 不同锚具厚度受拉位移情况

Fig. 4 Tensile displacement of different anchor thicknesses

6、7 地连墙幅宽为 4 500 mm，其余地连墙幅宽为 6 000 mm。基坑置 4 道锚索，每道锚索水平间距为 1.5 m，水平倾角均为 15°，钻孔直径为 200 mm。根据轨排井锚索设计最大抗拔力标准值为 742.28 kN，采用 2 根直径 32 mm 的 GFRP 筋代替钢绞线锚索。根据设计要求及工程施工实际需求，确定目标为：钢套筒连接后单根抗拔力大于 371.14 kN。在完成 GFRP 筋锚固后，张拉力均达到了设计要求，经过近一个月的数据监测的轨排井锚索轴力数据如图 5 所示。

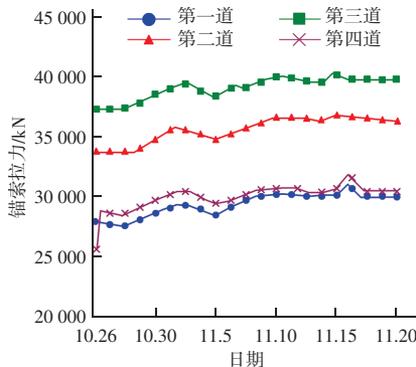


图 5 不同轨排井锚索拉力

Fig. 5 Anchor cable tension of different track gauge wells

自 2023 年 10 月 26 日，4 道锚索的拉力表现出了不同的变化趋势。其中，除了第四道锚索在锚固后的首日出现了明显的拉力突变之外，其他 3 道锚索的拉力整体上保持了相对稳定的状态。随着时间的推移，尽管每道锚索的拉力都有所增加，但这种增幅非常微小，远未达到影响锚固效果的程度。因此，可以认为这些锚索依然能够提供所需的锚固力，从而确保基坑内土体的稳定性，防止基坑发生不安全的变形或破坏。这充分证明了 GFRP 筋杆体施工关键技术工程应用中的可靠性与有效性。

在支护完成后墙体水平位移监测数据如图 6 所示。

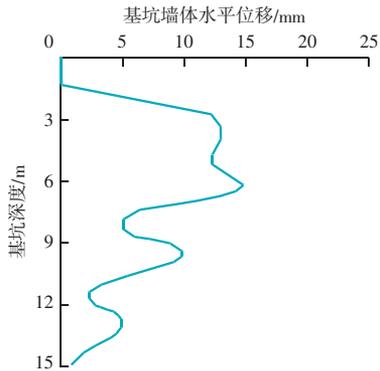


图 6 GFRP 筋锚固基坑墙体水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of GFRP reinforcement anchored foundation pit wall

深基坑墙体位移主要发生在墙体的中部，在基坑的上下两端基本未发生位移。这是因为在基坑上端土体未受压力，因此基本不会发生位移，而基坑下端地面有深层土体提供支撑可以保持土体的稳定因此位移的距离较小，只有基坑中层直接承受上层土体的压力且没有牢固的基础因此发生位移的距离较大。基坑墙体最大位移发生在基坑 6 m 处，约为 15 mm，处于安全范围内。

3 结论

通过研究通长型 GFRP 筋杆体对深基坑支护的关键技术，应用通长型 GFRP 筋具有强大的抗拉性能，可以维护深基坑的稳定性，具体如下：

(1) 采用双螺母连接具有极强的锚固能力，可以有效保证深基坑中锚固的强度。

(2) 选择硬度为 80% 的夹片，不会对 GFRP 筋造成损伤，并确保 GFRP 筋锚杆在使用过程中不会发生松动或脱落。

(3) 选取四道锚索验证，拉力微增，锚索依然能够有效地提供所需的锚固力，从而确保基坑内土体的稳定性，防止基坑发生不安全的变形或破坏。

(4) 基坑墙体最大位移发生在在基坑 6 m 处，最大位移约为 15 mm，小于安全施工标准，支护措施能有效保障基坑土体稳定。

综上所述，应用通长型 GFRP 筋杆体能够提高结构稳定性、简化施工流程、增强耐久性，为实施工

程的安全性和稳定性提供有力支持。

参 考 文 献

- [1] 朱殷航, 徐中华, 王卫东, 等. 软土地层超深基坑支护结构变形特性三维分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19 (2): 767-777.
- [2] 黄生根, 张义, 霍昊, 等. 软土地区深基坑支护工程格构柱变形规律研究 [J]. 岩土力学, 2023, 44 (1): 533-538.
- [3] 谢全敏, 丁猛威, 谭斌, 等. 基于直觉模糊-VIKOR 理论的深基坑支护方案优化方法及应用 [J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45 (1): 71-79.
- [4] 李涛, 任东伟, 刘学成, 等. 考虑深基坑支护结构变形的邻近管线变形解析方法 [J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52 (1): 86-97.
- [5] 欧阳煜, 高云飞, 任凯凯. 弹性环梁支撑下圆形深基坑支护结构变形解析解 [J]. 上海大学学报 (自然科学版), 2024, 30 (1): 128-139.
- [6] 刘根. 复杂地质条件下深基坑支护结构动态可靠度研究 [J]. 建筑技术, 2023, 54 (11): 1297-1301.
- [7] LI H, FU J, CHEN B, et al. Mechanical properties of GFRP bolts and its application in tunnel face reinforcement [J]. Materials (1996-1944), 2023, 16 (6): 1-20.
- [8] 李恒, 康海波, 秘金卫, 等. 玻璃纤维增强聚合物腰梁受力性能试验与有限元模拟 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (14): 6148-6157.
- [9] 白玉书, 裴强强, 刘鸿, 等. 砂岩石窟顶板微小型锚杆倒置锚固方法与性能研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42 (12): 3031-3042.
- [10] 白晓宇, 井德胜, 王海刚, 等. GFRP 抗浮锚杆界面黏结性能现场试验 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41 (4): 748-763.
- [11] 黄健, 阎亮, 熊哲, 等. 新型 GFRP-钢复合筋材料拉伸性能测试 [J]. 工业建筑, 2024, 54 (4): 219-227.
- [12] 周欣竹, 陈浩, 吴熙, 等. 有效高度对 GFRP 筋混凝土板冲切性能的影响 [J]. 浙江工业大学学报, 2023, 51 (5): 473-480.
- [13] 余晓雅, 张海清. 建筑地基深基坑开挖面下沉监测模型仿真 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (5): 252-256.
- [14] 李文超, 周广发, 温福胜, 等. 混凝土环境中 GFRP 筋性能衰退的规律及机理 [J]. 建筑材料学报, 2023, 26 (2): 156-162.
- [15] 潘锐, 王雷, 王风云, 等. 破碎围岩下注浆锚索锚固性能及参数试验研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39 (6): 1108-1115.