

文章编号:1007-9629(2026)01-0140-07

## BFRP 抗浮锚杆蠕变特性的现场试验

白晓宇, 郑海龙, 崔维久, 孙 淦, 闫 楠\*

(青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266520)

**摘要:**以青岛某实际工程为依托,将玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)抗浮锚杆应用于滨海地下结构的抗浮工程,并对 BFRP 抗浮锚杆开展现场蠕变性能试验;通过实时测试锚筋、锚固体位移,明确了 BFRP 抗浮锚杆荷载-位移的演化特征,揭示了 BFRP 抗浮锚杆锚筋内力的时空分布规律。结果表明:BFRP 抗浮锚杆锚筋位移受荷载水平和加载时间的影响,锚筋和锚固体位移随加载时间增加均表现出初始蠕变、稳态蠕变两个阶段;在最大荷载水平下,锚筋轴力沿深度呈非线性分布,并随着深度的增加逐渐衰减,最深处轴力趋于零,在相同深度处,轴力随着加载时间的增加逐渐减小;锚筋-锚固体界面剪应力随深度增加呈现先增大后减小的分布特性,峰值出现在距孔口约 0.75 m 处,随加载时间增加峰值降低,剪应力衰减集中在 0.7~1.7 m 范围内。

**关键词:**BFRP 抗浮锚杆;蠕变;内力;割线刚度;现场试验

中图分类号:TU473

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2026.01.015

### Field Test on Creep Characteristics of BFRP Anti-floating Anchor

BAI Xiaoyu, ZHENG Hailong, CUI Weijiu, SUN Gan, YAN Nan\*

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong)

**Abstract:** Based on an actual project in Qingdao, basalt fiber reinforced polymer (BFRP) anti-floating anchors were applied to the anti-floating project of coastal underground structures, and on-site creep performance tests on the BFRP anti-floating anchors were carried out. Through real-time testing of anchor bar and anchor soil displacement, the evolution characteristics of load-displacement of BFRP anti-floating anchor bar were clarified, and the spatial and temporal distribution law of the internal force of anchor bar of BFRP anti-floating anchor bar was revealed. The results show that the displacement of anchor bar in BFRP anti-floating anchor bar is affected by the load level and loading time, and the displacement of anchor bar and anchor soil grows with the increase of loading time showing two stages of initial creep and steady state creep. At the maximum load level, the axial force of the anchor bar shows a non-linear distribution along the depth, which decays gradually with the increase of depth, and tends to zero at the deepest point. At the same depth, the axial force decreases gradually with loading time. The interfacial shear stress between the anchor bar and anchor soil first increases and then decreases with the increase of depth, and the peak stress appears at approximately 0.75 m from the orifice. The peak stress decreases with the increase of loading time, and the shear stress attenuation is concentrated in the range of 0.7-1.7 m.

**Key words:** BFRP anti-floating anchor; creep; internal force; cutting line stiffness; field test

随着中国城市基础建设的不断发展,地上空间 逐渐饱和,地下空间开发成为新趋势。基础抗浮问

收稿日期:2025-04-08;修订日期:2025-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52478348);山东省泰山学者项目(tsqn202306234);青岛市自然科学基金资助项目(24-4-4-zrjj-180-jch);山东省自然科学基金资助项目(ZR2025MS792)

第一作者:白晓宇(1984—),男,内蒙古呼和浩特人,青岛理工大学教授,博士生导师,博士。E-mail:baixiaoyu538@163.com

通讯作者:闫楠(1982—),女,山东潍坊人,青岛理工大学副教授,硕士生导师,博士。E-mail:yannan0527@163.com

题日益突出,要求抗浮技术具备更高的安全性、可靠性、施工便利性及耐久性<sup>[1]</sup>。抗浮锚杆具有地层适应性强、布置灵活、工期短和造价低等优点,已广泛应用于国内外工程中<sup>[2-4]</sup>。

抗浮锚杆按照材料可分为钢筋抗浮锚杆和纤维增强复合材料(FRP)抗浮锚杆。近年来,FRP锚杆凭借其抗拉强度高、耐腐蚀强和环保无污染等特性<sup>[5]</sup>,在岩土锚固工程领域展现出广阔应用前景。其中,玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)筋凭借其优异的力学和耐腐蚀性能,成为该领域的研究热点。现有研究多集中于BFRP锚筋的基本力学特性和短期承载性能<sup>[6-9]</sup>,但针对长期荷载下的蠕变性能研究仍较为不足。白晓宇等<sup>[10]</sup>发现玻璃纤维增强复合材料(GFRP)锚杆的蠕变行为受材料性质、加载方式及环境条件的影响,提出了适用于GFRP抗浮锚杆的蠕变模型。此外,还有学者通过建立耦合模型<sup>[11]</sup>、理论模型<sup>[12]</sup>以及研发新型锚具<sup>[13]</sup>来分析蠕变效应。

基于此,本文依托青岛某实际工程,对3根BFRP抗浮锚杆在长期荷载作用下的承载特性进行现场试验研究,探讨其在不同长期荷载水平下的位

移特性,揭示了BFRP抗浮锚杆的蠕变发展规律及机制,为工程实践中的设计优化与施工应用提供理论支持和参考依据。

## 1 试验

### 1.1 工程地质条件

试验场地位于山东省青岛市,试验区域内的抗浮锚杆均置于全风化片麻岩层中,层厚为0.80~2.80 m,地层标高介于63.99~67.93 m之间,埋深为2.30~4.40 m,岩体表现为砂土状和碎屑状,裂隙发育明显。场区地下水稳定水位的埋深为6.50~9.70 m,平均埋深为8.31 m,相应的绝对标高在60.46~61.43 m之间,平均标高为60.98 m。场区地下水水位受季节性降水和地表水体影响变化。

### 1.2 锚杆参数

锚杆布设间距为1 000 mm,锚孔直径为150 mm,锚固体采用M30水泥浆注浆。BFRP抗浮锚杆力学参数见表1。制备3根锚杆,分别记为B-1、B-2、B-3。锚杆总长度为4 000 mm,锚固体段的长度为3 000 mm,荷载端长度为1 000 mm,锚筋直径 $d$ 为25 mm。

表1 BFRP抗浮锚杆力学参数

Table 1 Mechanical parameters of BFRP anti-floating anchor

Density/( $g \cdot cm^{-3}$ )	Elastic modulus/GPa	Tension strength/MPa	Stress relaxation rate/%	Eigenvalue of load-bearing capacity/kN
1.8-2.6	$\geq 40$	$\geq 800$	1.7-3.8	240

### 1.3 试验装置与传感器布置

现场拉拔试验采用自制的拉拔装置<sup>[14]</sup>,用两组百分表监测锚固体与锚筋位移,百分表位移以地面为基准,分别架设在锚筋和锚固体的两侧,并读取每组百分表位移的平均值作为其位移值。为研究荷载和加载时间作用下锚筋的内力变化,试验前在每根锚筋表面按500 mm间距布置了6个应变传感器(见图1,图中第1个界面为锚筋-锚固体界面,第2个界

面为锚固体-岩土体界面),实时监测其应变数据。

### 1.4 加载过程

加载过程严格按照JGJ 120—2012《建筑基坑支护技术规程》相关规定进行,蠕变试验的加载分级和锚筋位移观测时间按规范进行,且在试验过程中保持荷载恒定。记录加载时间 $t$ 为1、5、10、15、30、45、60、90、120 min的蠕变量。BFRP抗浮锚杆抗拔承载力 $N_{ka}=200$  kN,分级加载 $0.50 N_{ka}$ 、 $0.75 N_{ka}$ 、 $1.00 N_{ka}$ 、 $1.20 N_{ka}$ 、 $1.50 N_{ka}$ ,即施加荷载顺序为0、100、150、200、240、300 kN。每级荷载施加完毕后,迅速记录锚筋和锚固体位移。

## 2 结果与分析

### 2.1 试验现象分析

BFRP抗浮锚杆蠕变试验结果见表2。由表2可见,BFRP抗浮锚杆的承载性能满足抗浮锚杆的设计要求,锚筋最大位移在20.13~22.00 mm,其平均位移为20.81 mm,锚固体平均位移为4.46 mm。

在蠕变试验中,随着荷载的增加,BFRP抗浮锚杆的位移表现出明显的时间依赖性;加载初期,锚筋

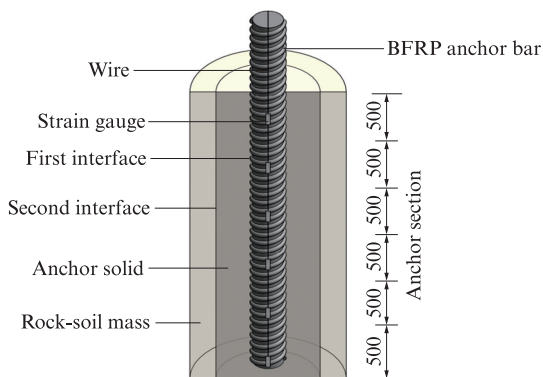


图1 应变传感器布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of strain gauge arrangement (size: mm)

表2 BFRP抗浮锚杆蠕变试验结果  
Table 2 Creep test results of BFRP anti-floating anchors

Anchor	Maximum load capacity/kN	Maximum anchor bar displacement/mm	Maximum anchor solid displacement/mm
B-1	300	22.00	4.73
B-2	300	20.30	4.28
B-3	300	20.13	4.36

与锚固体接触面未出现明显滑移或破坏;当荷载达到100 kN时,锚筋发出轻微的断裂声,随加载时间推移断裂声消失,锚筋位移缓慢增加并趋于稳定,此时锚固体位移较小;当荷载增至240 kN时,锚筋断裂声明显,位移变化速率加快,锚固体顶面出现隆起和裂纹;当加载至最大荷载300 kN时,锚筋表面出现裂纹,随着加载时间的增加裂纹逐渐扩展,最终锚筋外部的纤维丝表现出不同程度的断裂,同时锚固体顶面裂纹随时间增加不断扩展。由此可见,BFRP抗浮锚杆在长期荷载作用下,承载力不断下降。

## 2.2 蠕变性能分析

抗浮锚杆的蠕变分为初始蠕变、稳态蠕变和加速蠕变3个阶段<sup>[15]</sup>。BFRP抗浮锚杆的荷载-位移曲线见图2。由图2可见:(1)对锚筋来说,锚筋的蠕变

受荷载影响显著。在前4级荷载下,施加荷载后锚筋位移迅速增长并趋于稳定,在加载约20 min后保持不变,表明锚筋经历了初始蠕变阶段。分析位移迅速增加是因为初始蠕变阶段锚筋与锚固体黏结力的主导作用<sup>[16]</sup>,随着荷载增加锚筋-锚固体界面发生破坏,引起锚筋位移增大,但荷载并未达到破坏荷载,位移最终趋于稳定。当荷载增加至300 kN,锚筋位移随加载时间不断增加,在0~20 min位移迅速增大,20 min后趋于稳定,位移随加载时间增加呈线性增大,表明锚筋发生了初始蠕变、稳态蠕变。(2)对锚固体来说,加载初期,传递至锚固体-岩土界面的荷载较小,锚固体位移变化不明显。在100、150 kN荷载作用下,锚固体位移在10 min时达到最大值后趋于稳定,表现出初始蠕变特征。在200、240、300 kN荷载作用下,锚固体的位移随加载时间增加,0~15 min内位移增长速率不断减小;15 min后速率趋于稳定,进入稳态蠕变阶段。综上,锚筋和锚固体位移随加载时间增加均表现出初始蠕变、稳态蠕变两个阶段。在较低荷载下锚固体位移迅速稳定;在较高荷载下锚固体的蠕变变形随加载时间增加持续累积,蠕变变形受加载时间和荷载水平的双重影响。

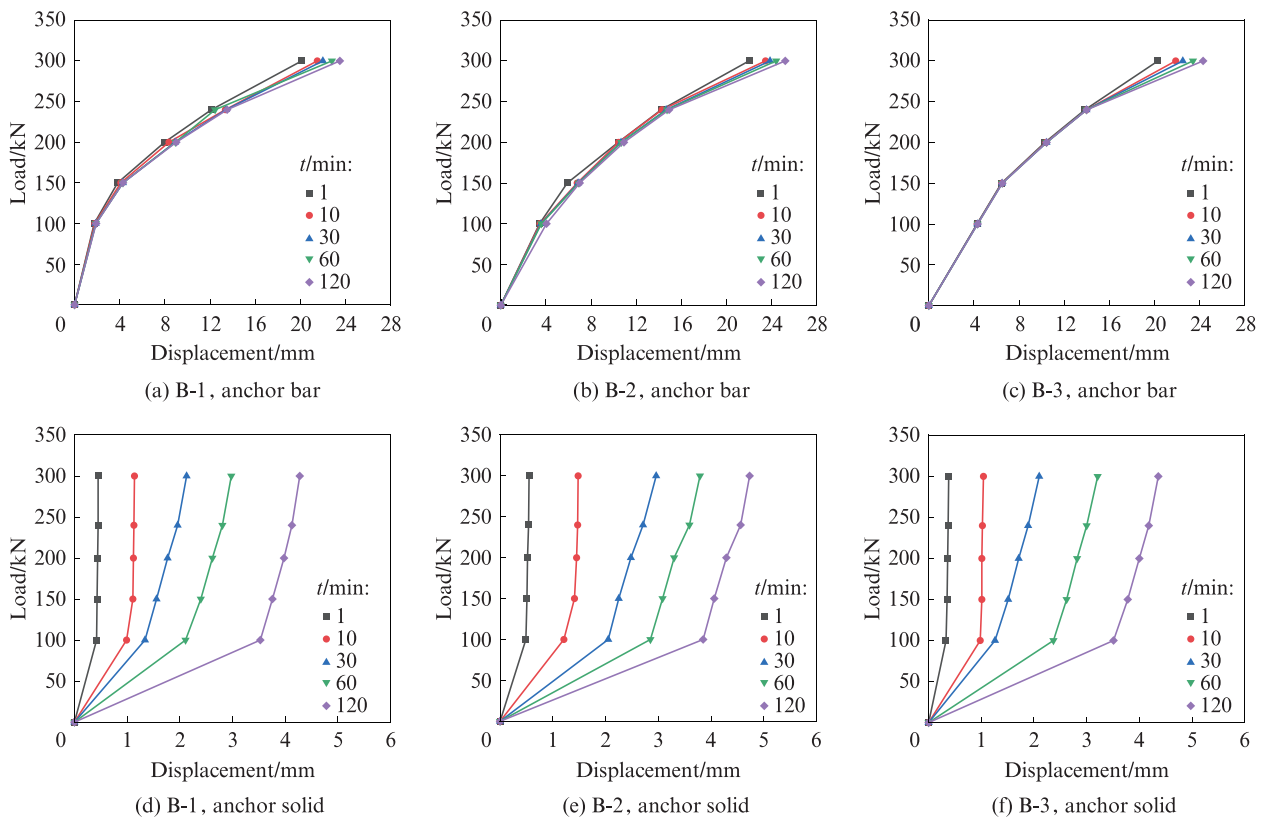


图2 BFRP抗浮锚杆荷载-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curves of BFRP anti-floating anchors

由图2还可见:当荷载为150 kN时,锚筋位移随加载时间变化较小;当荷载超过150 kN后,荷载-位移曲线的斜率增大,位移增长速率显著提高,说明在高荷载水平下,BFRP抗浮锚杆的位移响应更加敏感。这是因为在长期荷载下,BFRP抗浮锚杆的锚筋变形损伤不明显,位移增长主要由时间损伤效应<sup>[17]</sup>引起,锚筋与锚固体之间的损伤随加载时间增加并趋于稳定。当荷载不超过240 kN时,不同加载时间下B-3锚杆锚筋的荷载-位移曲线基本重合,位移变化不显著;当荷载超过240 kN时,不同加载时间下B-3锚杆锚筋的荷载-位移曲线发散,且随加载时间增加锚筋位移增大,表现出明显的蠕变现象,进一步证明荷载水平和加载时间对BFRP抗浮锚杆蠕变行为影响显著。

基于图2的荷载-位移曲线,采用割线刚度法<sup>[18]</sup>重点研究了100~300 kN曲线段的抗拔刚度 $K_s$ 。通过对抗拔刚度数据进行回归拟合,得到了抗拔刚度的拟合曲线,结果见图3。由图3可见:在锚杆蠕变过程中,抗拔刚度随着加载时间的增加逐渐减小;BFRP抗浮锚杆的抗拔刚度在1~10 min发生了明显的衰减,这主要与锚杆开始承载时的较大变形有关,导致抗拔刚度迅速下降;随着加载时间的增加,抗拔刚度衰减速率减缓,最终进入稳定阶段;拟合模型能够准确预测不同荷载作用下锚杆抗拔刚度的变化趋势,随着加载时间的增加,抗拔刚度逐渐趋于稳定,这一趋势在不同的锚杆之间存在一定差异,B-1锚杆的抗拔刚度变化较为显著,而B-2和B-3锚杆的抗拔刚度变化则相对平缓。

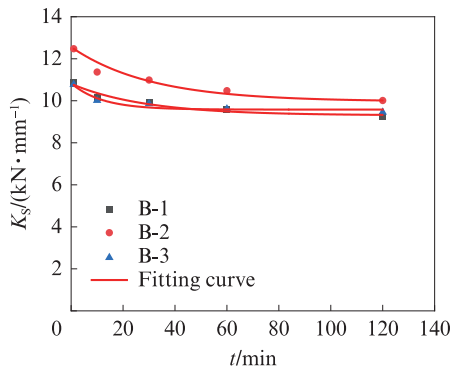


图3 抗拔刚度的拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of pullout stiffness

拟合得到抗拔刚度的回归方程为:

$$K_s(t) = A \exp\left(-\frac{t}{B}\right) + C \quad (1)$$

式中: $A$ 、 $B$ 、 $C$ 均为力学参数。

$A$ 值和 $C$ 值越大, $K_s(t)$ 变化范围越大; $B$ 值越大,

曲线变化速率越快;当 $t$ 趋向于无穷大时, $K_s(t)$ 趋向于常数值 $C$ 。力学参数回归方程系数见表3。由表3可见,B-1锚杆的 $C$ 值较大,而B-2和B-3锚杆的 $C$ 值较为接近。这是由于施工过程中的局部土层和混凝土养护差异等偶然因素,对试验结果产生了不稳定影响。

表3 力学参数回归方程系数

Table 3 Coefficients of regression equation and mechanical parameters

Anchor	$A/(\text{mm} \cdot \text{kN}^{-1})$	$B/\text{min}^{-1}$	$C/(\text{mm} \cdot \text{kN}^{-1})$	Correlation coefficient
B-1	2.28	26.83	10.1	0.950 67
B-2	1.50	28.84	9.30	0.945 90
B-3	1.25	11.86	9.58	0.942 95

## 2.3 内力时空分布规律

### 2.3.1 轴力的时空分布规律

BFRP抗浮锚杆轴力随深度的变化曲线见图4。由图4可见,轴力沿深度呈非线性分布,主要集中在1.50 m范围内,且随深度增加逐渐衰减,在锚杆末端趋于零。基于此,可将锚杆划分为3段区域:(1)浅层区域(0~0.50 m)。荷载传递的初始作用区,轴力呈线性衰减;在相同深度处,轴力随加载时间增加逐渐变小。(2)中层区域(0.50~1.50 m)。轴力释放的核心区,尤其在0.50~1.00 m深度范围表现出显著的轴力衰减特征;在相同深度(1.00 m)下,随着加载时间的增加,轴力衰减,轴力在前30 min内衰减较大,30~120 min轴力衰减幅度降低。(3)深层区域(大于1.50 m)。轴力较小且随加载时间增加保持相对稳定。结合图2和试验现象,在长期荷载作用下,锚筋变形和位移特性均呈现时间依赖性和非线性特征,尤其在中层区域,长期荷载作用导致锚筋-锚固体界面不断受到荷载作用,逐步产生微裂纹扩展和界面滑移等损伤<sup>[19]</sup>,导致中层区域轴力衰减幅度最大。综上,BFRP抗浮锚杆的轴力随深度表现为分层特性:浅层为初始衰减区;中层为主要衰减区,是承受荷载的关键区域;深层为平稳传递区。

### 2.3.2 锚筋-锚固体界面剪应力的时空分布规律

在300 kN荷载下,取抗浮锚杆两测点之间锚筋为研究对象,锚筋上测点 $i$ 处的轴力 $F_i$ ,下一个点 $i+1$ 处轴力为 $F_{i+1}$ ,将两测点中点处的剪应力近似认为两点之间锚筋-锚固体界面的剪应力 $\tau_i$ ,计算式为:

$$\tau_i = \frac{F_i - F_{i+1}}{\pi d \Delta L} \quad (2)$$

式中: $\Delta L$ 为点 $i$ 到点 $i+1$ 之间的距离。

BFRP抗浮锚杆的锚筋-锚固体界面剪应力随深度的变化曲线见图5。由图5可见:(1)随着深度的增加,BFRP抗浮锚杆的剪应力总体表现为先增大后减小的趋势,剪应力峰值在距离孔口约0.75 m处。(2)在0.25 m深度处,剪应力随加载时间增加而增大。结合试验现象综合分析,这是由于孔口处锚筋与锚固体发生了相对滑移,导致锚筋-锚固体界面逐渐破坏,同时锚固体在较大荷载下产生裂缝,以及锚筋纤维丝的断裂共同引起黏结性能下降,进而导致孔口处剪应力向深处传递,从而使

0.25 m处剪应力增大。(3)在0~0.75 m范围内,剪应力随深度增加不断增大,在0.75 m处剪应力达到峰值。值得注意的是,剪应力峰值随加载时间增加而减小,且在0~30 min衰减幅度大于30~120 min,分析原因是在0~30 min锚筋经历了初始蠕变阶段,变形较为显著,30~120 min经历稳态蠕变阶段,变形速率减缓,从而导致剪应力的衰减幅度减小。(4)剪应力的主要衰减区在0.70~1.70 m范围内,最大剪应力约为6.0 MPa,深度超过1.75 m后剪应力趋于零。

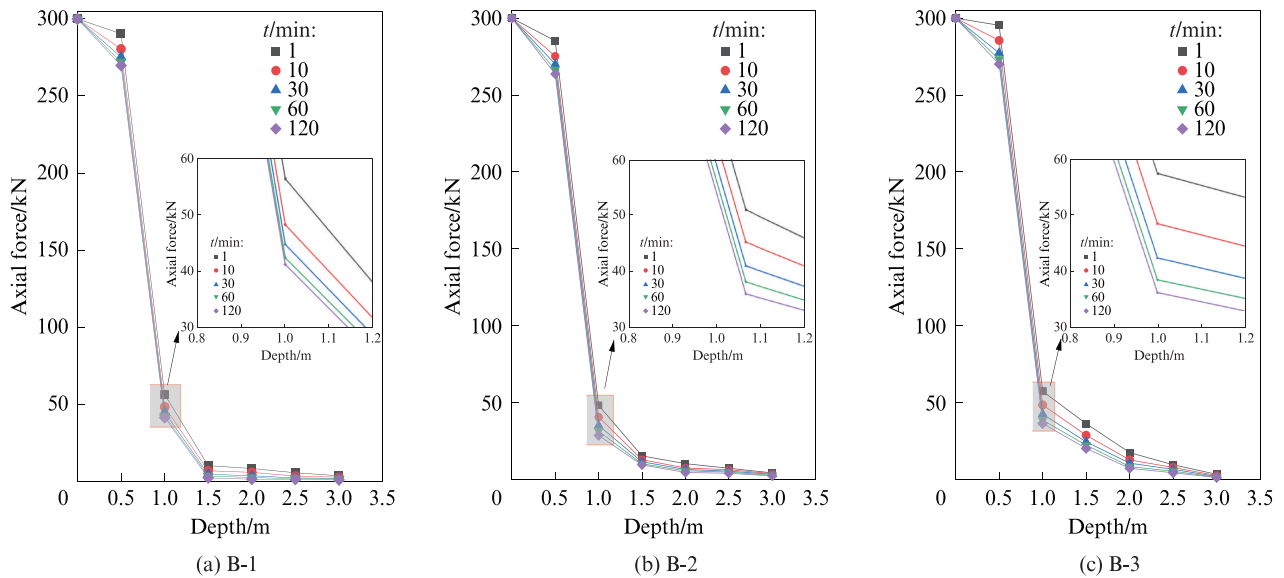


图4 BFRP抗浮锚杆轴力随深度的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of axial force of BFRP anti-floating anchors with depth

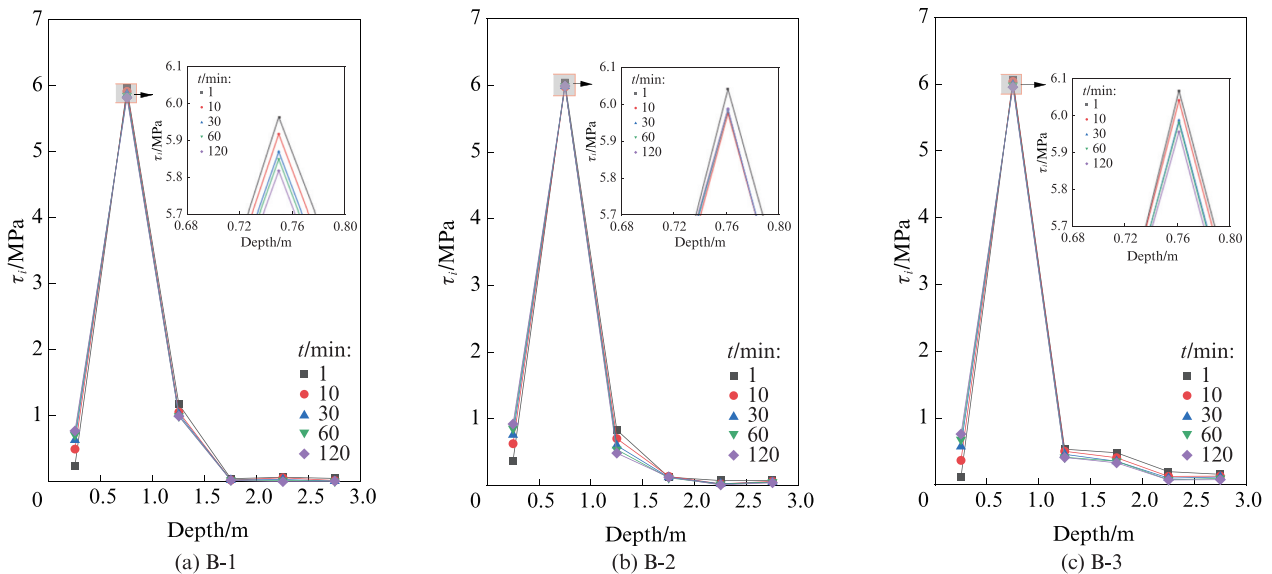


图5 BFRP抗浮锚杆的锚筋-锚固体界面剪应力随深度变化曲线

Fig. 5 Variation curves of shear stress of anchor bar-anchor solid interface of BFRP anti-floating anchors with depth

综上,BFRP抗浮锚杆的承载性能完全满足工程使用要求。针对锚筋位移偏大的现象,可在工程实

践中采用施加预紧力的方法解决这一问题,通过提前施加预紧力可有效控制锚筋位移。从内力分布特

征来看,锚筋轴力主要集中于距孔口0~1.50 m的浅层锚固区域,建议施工过程中严格控制浅层锚固体的施工质量,重点关注锚固体强度与密实程度,从而确保抗浮锚杆体系的整体锚固性能。

### 3 结论

(1)在初始荷载下,锚筋-锚固体界面未出现明显滑移,位移增速逐渐降低并趋于稳定。当荷载增至240 kN时,锚筋断裂声明显,位移变化速率加快,锚固体顶面出现隆起和裂纹。当荷载达到峰值后,锚筋裂纹逐渐发展,外部纤维筋断裂加深,锚固体破坏范围扩大。

(2)玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)抗浮锚杆锚筋的位移特性受荷载水平和加载时间影响。在低荷载下,位移变化较小,蠕变特征不明显;当荷载超过240 kN时,蠕变特征显著。锚筋和锚固体位移随加载时间增加均表现出初始蠕变、稳定蠕变两个阶段。通过计算不同时刻的抗拔刚度发现,抗拔刚度随加载时间增加逐渐趋于稳定。

(3)轴力沿深度呈非线性分布,并随加载时间增加而减小。轴力主要集中在1.5 m深度内,随着深度的增加逐渐衰减,0.5~1.5 m衰减最大。浅层为荷载传递初始区,中层为轴力释放核心区,深层为平稳传递区。

(4)BFRP抗浮锚杆在300 kN下剪应力呈现先增大后减小的趋势,最大剪应力约为6.0 MPa。剪应力峰值出现在距离孔口约0.75 m处,剪应力峰值随加载时间增加衰减,0~30 min衰减显著,30~120 min衰减幅度减缓。剪应力衰减集中在0.70~1.70 m深度。

#### 参考文献:

- [1] 王卫东,高文生,龚维明,等.基础工程技术的发展与创新[J].土木工程学报,2025,58(2):97-117.  
WANG Weidong, GAO Wensheng, GONG Weiming, et al. Development and innovation of technologies in foundation engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2025, 58(2): 97-117. (in Chinese)
- [2] LIU Y G, XIA K, WANG B T, et al. Experimental investigation on the anchorage performance of a tension-compression-dispersed composite anti-floating anchor[J]. Applied Sciences, 2023, 13(21):12016.
- [3] 吴泽坤,白晓宇,孙淦,等.多循环荷载下BFRP抗浮锚杆锚固性能现场试验[J].岩石力学与工程学报,2024,43(9):2314-2328.  
WU Zekun, BAI Xiaoyu, SUN Gan, et al. Field test of anchorage performance of BFRP anti-floating anchors under multiple cyclic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(9):2314-2328. (in Chinese)
- [4] 江佳斐,吕佳豪,薛伟辰. FRP 筋锚强度保留率分布模型与可靠性分析[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(6):496-502.  
JIANG Jiafei, LÜ Jiahao, XUE Weichen. Strength retention rate distribution model and reliability analysis of FRP stirrups[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(6):496-502. (in Chinese)
- [5] BAI X Y, ZHAO X M, YAN N, et al. Field test of GFRP bar anti-floating anchor slurry-rock interface bonding performance[J]. Composite Structures, 2024, 331:117893.
- [6] 张书博,王长盛,王刚,等. BFRP 筋锚固节理岩体剪切行为为试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(4):712-724.  
ZHANG Shubo, WANG Changsheng, WANG Gang, et al. Experimental study on the shear behaviors of bolted rock joints reinforced with BFRP bars [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(4):712-724. (in Chinese)
- [7] 蔡启明,陆春华,延永东,等. BFRP 和 GFRP 筋剪切性能的温度效应[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(4):395-400.  
CAI Qiming, LU Chunhua, YAN Yongdong, et al. Temperature effect on shear properties of BFRP and GFRP bar[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(4):395-400. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] 黄镜淳,朱大勇,高鹏,等. BFRP 加固高轴压比低强混凝土圆柱抗震性能研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6):1366-1373.  
HUANG Jingting, ZHU Dayong, GAO Peng, et al. Seismic performance of BFRP-reinforced low-strength concrete circular columns with high axial compression ratio[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6):1366-1373. (in Chinese)
- [10] 白晓宇,郑晨,张明义,等. 大直径 GFRP 抗浮锚杆蠕变试验及蠕变模型[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(7):1304-1311.  
BAI Xiaoyu, ZHENG Chen, ZHANG Mingyi, et al. Creep tests and standard linear solid model for large-diameter glass fiber-reinforced polymer anti-floating anchors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(7):1304-1311. (in Chinese)
- [11] 宋洋,李永启. 锚杆松弛与岩体蠕变耦合预应力损失模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(4):1091-1098.  
SONG Yang, LI Yongqi. Study on the model of prestress loss coupled with cable relaxation and rock creep[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(4):1091-1098. (in Chinese)
- [12] YANG W D, WANG X P, LIU N, et al. An analytical solution for the time-dependent anchoring force in prestressed cables due to rock creep[J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2023, 27(2):367-399.
- [13] WANG J W, XIA H B, HUA J. Study of a new type of large-diameter multi-disc soil anchor and its bearing characteristics and creep property[J]. Applied Sciences, 2024, 14(20):9585.
- [14] 白晓宇,张明义,朱磊,等. 全长黏结 GFRP 抗浮锚杆界面剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(6):1407-1418.

- BAI Xiaoyu, ZHANG Mingyi, ZHU Lei, et al. Experimental study on shear characteristics of interface of full-bonding glass fiber reinforced polymer anti-floating anchors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(6):1407-1418. (in Chinese)
- [15] YU H C, WANG Z R, FENG W K, et al. Experimental study on the effect of anchors on the creep mechanical properties and acoustic emission characteristics of fractured sandstone under uniaxial compression [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 126:103995.
- [16] 宋泽鹏, 陆春华, 宣广宇, 等. 螺纹GFRP筋与混凝土黏结性能试验与理论计算[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4):887-894. SONG Zepeng, LU Chunhua, XUAN Guangyu, et al. Experimental and theoretical calculation of bonding performance between threaded GFRP bars and concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4):887-894. (in Chinese)
- [17] 蒋金洋, 郑皓睿, 孙国文, 等. 硫酸盐侵蚀混凝土的数值模拟[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(10):1047-1053.
- JIANG Jinyang, ZHENG Haorui, SUN Guowen, et al. Numerical simulation of sulfate attack in concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(10):1047-1053. (in Chinese)
- [18] 冯治斌. 基于切线刚度正比阻尼模型的单自由度体系震后残余位移研究[D]. 大连:大连理工大学, 2021.
- FENG Zhibin. Study on post-earthquake residual displacements of SDOF systems with tangent-stiffness proportional damping model[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [19] 吴仪, 党发宁, NIMBALKAR Sanjay, 等. 不同循环模式下透水混凝土性能演变规律及损伤机制[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(1):9-18.
- WU Yi, DANG Faning, NIMBALKAR Sanjay, et al. Property evolution law and damage mechanism of pervious concrete under different cycle modes[J]. Journal of Building Materials, 2025, 28(1):9-18. (in Chinese)