

压力型抗浮锚杆承载性能现场试验研究

白晓宇¹, 郑海龙¹, 孙淦¹, 吕承禄², 闫楠^{1*}

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 青岛施运机械施工有限责任公司, 山东 青岛 266042)

摘要: 为深入研究压力型预应力混凝土用螺纹钢(PSB)抗浮锚杆的承载性能和位移规律,以青岛某实际抗浮工程为例,针对3根压力型PSB抗浮锚杆开展现场试验研究。通过实时监测锚筋与灌浆体的位移变化,系统分析了荷载-位移演化规律,揭示了PSB抗浮锚杆的黏结应力分布特性。试验结果表明,锚筋与灌浆体位移随荷载增长呈线性增加趋势,受荷载水平影响显著;当荷载达到最大荷载的60%时,位移曲线出现骤升,进入加速增长阶段;灌浆体位移曲线整体呈线性增长,未出现突变点或双折线特征,锚筋与灌浆体的相对位移随着荷载增加而增大。该试验条件下,压力型PSB抗浮锚杆锚筋-灌浆体界面展现出的平均黏结应力为0.73 MPa,而灌浆体-岩土体界面的平均黏结应力则相对较低,为0.104 MPa。灌浆体-岩土体界面黏结应力与锚固长度和锚孔直径有关,锚固长度和锚孔直径过大反而会降低锚筋-灌浆体界面的黏结应力。

关键词: 压力型PSB抗浮锚杆;时间-位移曲线;黏结应力;现场试验

中图分类号:TU473

文献标识码:A

Field Experimental Study on the Load-Carrying Performance of Pressure-Type Anti-floating Anchors

BAI Xiaoyu¹, ZHENG Hailong¹, SUN Gan¹, LYU Chenglu², YAN Nan^{1*}

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China;

2. Qingdao Shiyun Construction Machinery Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266042, China)

Abstract: In order to deeply study the bearing performance and displacement law of pressure-type screw-thread steel bars for the prestressing of concrete (PSB) anti-floating anchors, this study took an actual anti-floating project in Qingdao as the background, and carried out field experimental study on three pressure-type PSB anti-floating anchors. The load-displacement evolution law was systematically analyzed by monitoring the displacement changes of anchor bars and grout body in real time, and the bond stress distribution characteristics of PSB anti-floating anchors were revealed. The test results show that the displacement of the anchor bar and grout body increases linearly with the load growth, which is significantly affected by the load level; when the load reaches 60% of the maximum load, the displacement curve rises abruptly and enters an accelerated growth stage; the overall growth of the grout body-displacement curve is linear, with no abrupt change point or bilinear characteristics. The relative displacement between anchor bars and grout body increases with the increase of load. Under the experimental conditions, the average bond stress of the pressure-type PSB anti-floating anchor bar-grout body interface is 0.73 MPa, while the average bond stress of the grout body-rock and soil mass interface is relatively low, which is 0.104 MPa. The bond stress at the interface between the grout body and the rock and soil mass is related to the anchoring length and the anchor hole diameter, and the excessive

收稿日期:2025-06-03

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面上项目(ZR2025MS792);山东省泰山学者项目(tsqn202306234);青岛市自然科学基金原创探索项目(24-4-4-zrj-180-jch)

第一作者:白晓宇(1984—),男,内蒙古呼和浩特人,博士,教授,研究方向为滨海岩土与基础工程。

* 通信作者:闫楠(1982—),女,山东潍坊人,博士,副教授,研究方向为地基处理与环境岩土工程。

anchoring length and the anchor hole diameter will reduce the bond stress at the interface between the anchor bar and the grout body.

Key words: pressure-type PSB anti-floating anchors; time-displacement curves; bond stress; field test

随着我国城市化进程的加快,地下空间的开发深度也逐渐增大^[1-2]。在基础埋深日渐增大的现状下,对抗浮锚杆承载力的要求逐渐提高,传统的单筋钢筋抗浮锚杆已无法满足工程需求^[3-5]。而压力型抗浮锚杆,在基础底板施工前,给抗浮锚杆锚筋施加预应力,可在极大程度上控制基础上浮。预应力混凝土用螺纹钢筋(Prestressing Scres-thread Steel Bars, PSB)经热轧工艺后不存在屈服现象,抗拉强度较高,是压力型抗浮锚杆中锚筋材料的首选。压力型 PSB 抗浮锚杆作为一种新型的抗浮锚杆形式,近年来逐渐受到学者们的关注^[6-7]。区别于一般的预应力抗浮锚杆,PSB 锚筋作为压力型抗浮锚杆的主要承力构件,具有极高的抗拉强度和良好的抗剪性能^[8],在深基坑工程和地下结构中具有广阔的应用前景^[9]。

目前国内外学者对压力型抗浮锚杆开展了大量研究。研究表明,与传统抗浮锚杆相比,在相同地质条件下,压力型抗浮锚杆可提供更高的拉拔能力,提高幅度可达传统抗浮锚杆的 1.8~2.5 倍^[10-11]。郝建斌等^[12]研究发现,土层类型、荷载级配及施加方式显著影响锚杆受力分布和承载力,并特别关注了压力型锚杆在分级荷载作用下的荷载传递过程及其稳定性变化,揭示了土层与锚杆之间的相互作用机制。耿冬青等^[13]提出了一种新型压力分散型锚杆设计方案,结合数值模拟和现场试验,发现该方案能更好地分散土体的浮力,增强基础的稳定性,并进一步讨论了锚杆布置、数量和锚固深度对抗浮力效果的影响。刘超等^[14]提出了压力型锚杆临界锚固长度的解析解,建立了压力型锚杆在不同土层条件下的临界锚固长度计算模型,并给出了相应的解析解。罗东林等^[15]将 PSB 精轧螺纹钢筋抗浮锚杆应用于工程实例,节约了钢筋用量,提高了单根锚杆承载力,解决了泥

岩地区基岩裂隙水丰富情况下采用普通锚杆容易失效的问题。渠红霞^[16]对压力型锚杆进行了室内锚固系统拉拔蠕变试验,发现试件的破坏形式与灌浆体的长度、强度等级密切相关。

压力型 PSB 抗浮锚杆与传统钢筋抗浮锚杆的结构形式存在本质上的区别,现有研究主要集中在拉力型 PSB 抗浮锚杆的承载性能方面,但针对压力型 PSB 抗浮锚杆的现场试验研究较少,其承载性能和荷载位移规律等问题亟待解决。鉴于此,本文通过现场试验结合理论分析,对压力型 PSB 抗浮锚杆受力机理、承载能力及荷载位移规律进行了深入探讨,旨在更好地推动压力型 PSB 抗浮锚杆的应用。

1 现场试验

1.1 工程地质条件

该试验场地位于山东省青岛市,场区地貌类型主要为剥蚀堆积缓坡,地形起伏较大,呈西高东低趋势,钻孔孔口标高 19.68~32.05 m,地面最大高差 12.37 m。枯水期稳定水位埋深为 6.00~15.00 m,稳定水位标高为 13.18~17.63 m;丰水期稳定水位埋深为 6.20~15.30 m,稳定水位标高为 13.73~17.59 m。试验锚杆均位于强风化花岗片麻岩和中风化花岗片麻岩中;土层参数如表 1 所示。

1.2 试验方案

结合地层水文条件和建筑的抗浮承载力要求,本试验采用 3 根直径为 36 mm 的压力型 PSB 抗浮锚杆,编号分别为 PSB36-10.5-1、PSB36-10.5-2、PSB36-10.5-3;它们的锚杆总长度均为 10.5 m,锚固段长度均为 10 m,自由段长度均为 0.5 m;PSB 锚筋抗拉强度为 1 330 MPa,屈服强度为 1 200 MPa,

表 1 岩土层力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of rock and soil layers

岩层	重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	承载力 特征值 f_{ak}/kPa	压缩 模量 E_s/MPa	变形 模量 E_0/MPa	弹性 模量 E/MPa	粘聚力 c/kPa	内摩 擦角 $\varphi/(\text{°})$
全风化花岗片麻岩	20	300	—	20	—	—	35
强风化花岗片麻岩	21	500	—	35	—	—	45
中风化花岗片麻岩	23	2 000	—	—	2 000	—	55

弹性模量为 210 GPa,承载力特征值为 490 kN,锚筋外部涂抹防腐涂料并包裹聚氯乙烯材料,其中锚杆杆体直径、锚固长度均与工程锚杆的设计参数相同。

1.3 现场试验过程

1.3.1 锚孔施工

对试验场地进行平整处理并铺设混凝土垫层后,使用全站仪对施工区域进行标高测量,以确定锚孔的精确位置。然后,采用潜孔钻机进行钻孔作业,钻孔直径为 250 mm,锚孔深度比锚筋长度略深,并预留 500 mm 的额外深度,以防止后期孔壁坍塌,确保锚孔深度足够。

1.3.2 灌注水泥浆

试验采用硅酸盐 M52.5 水泥浆以底部注浆方式,将注浆管放入锚孔注浆,直至孔口溢出水泥浆停止注浆,试验采用先注浆后放置锚筋的方式,这样可以有效保证注浆充分和保护锚筋。采用与现场相同批次 M52.5 的混凝土制作试块进行抗压强度试验,结果表明混凝土强度达标。

1.3.3 锚杆放置

在 PSB 锚筋表面安装对中器,保证锚筋始终处于锚孔中间位置,避免锚杆倾斜;在距离锚杆锚固端头 500 mm 处安装固定装置,避免锚筋下方沉底;锚筋放置完成后进行补浆。

1.3.4 试验加载

试验采用由课题组自制的拉拔装置^[17],装置如图 1 所示,试验装置由下往上依次安装,首先摆

放支墩,摆放时以锚杆为中心对称摆放,然后安装位移百分表、反力梁、荷载传感器,放置钢垫板、安装穿心千斤顶、钢垫板、预应力螺母。加载装置依次安装完成后,进行预加载,调试设备使其满足加载要求,调试完成后校准百分表和测力计。本试验采用电动液压穿心千斤顶来施加拉拔力,并通过荷载传感器实时监测筋体所承受的拉拔荷载,以便精确控制荷载并方便数据采集。为减小试验中的误差,安装了四个百分表,分成两组,每组分别测量锚头和灌浆体的位移,并取每组百分表的平均值。

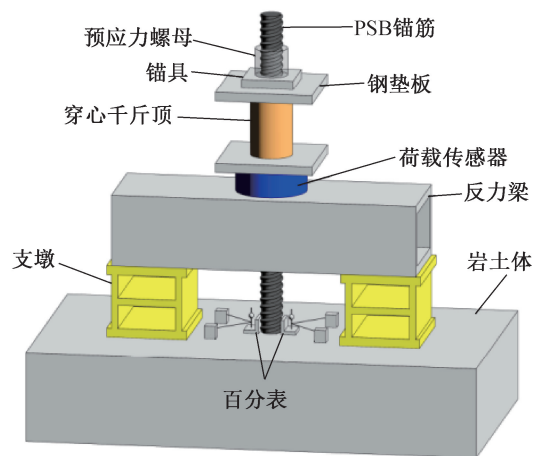
本试验采用单调加载方式,加载过程严格按照《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)^[18]和《建筑工程抗浮技术标准》(JGJ 476—2019)^[19]等相关技术标准进行。试验的初始荷载为 100 kN,逐级增加荷载,通过电动油压表控制加载匀速进行。荷载施加顺序为 0→100→200→300 kN……,以此类推,直到压力型 PSB 抗浮锚杆发生破坏时停止加载。每次荷载施加后,记录锚筋和灌浆体的位移变化,每级荷载持续 15 min。现场试验过程见图 2。

2 荷载-位移关系分析

3 根锚杆的试验结果如表 2 所示。由表 2 可知,锚杆 PSB36-10.5-1—3 受限加载装置未达到破坏状态,但锚杆 PSB36-10.5-1—3 终止荷载皆达到锚筋承载力特征值(490 kN)的 1.5 倍以上。



(a) 实物图



(b) 设计图

图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of the test setup



图2 现场试验过程
Fig. 2 Field test process

2.1 荷载-锚筋位移分析

图3为压力型PSB抗浮锚杆锚筋的 $Q-s$ 曲线,全面反映了锚杆的荷载传递机制,并为分析锚筋-灌浆体与灌浆体-岩土体界面黏结应力的变化规律提供了重要依据。由图3可以看出,荷载与位移之间存在明显的正相关关系。具体来说,随着荷载的增加,位移逐渐增大。在较低荷载(小于300 kN)下,PSB抗浮锚杆锚筋的位移增量较小,曲线呈现良好的线性增长特征,表明锚筋此时处于弹性变形阶段;但随着荷载的进一步增大,特别是超过500 kN后,其位移增量明显增大,表明锚筋从弹性变形阶段进入塑性变形阶段。分析原因为当初施加荷载较小时,锚筋与灌浆体之间存在一定的黏结力,主要是机械咬合力和摩擦力,还有较小的化学胶结力,此时黏结力可以抵抗上拔荷载,但随着荷载增加,化学胶结力和摩擦力无法继续承受大部分荷载,锚筋与灌浆体之间的机械咬合力开始发挥作用,承载能力逐步提升,锚筋位移呈线性增加;然而,当荷载增至500 kN时,机械咬合力逐渐失效,锚筋与灌浆体之间开始出现黏结失效,此时锚筋位移表现为加速增长。结合PSB的承载力

表2 试验结果统计

Tab. 2 Statistics of test results

锚杆编号	锚固长度/m	试验最终加载量/kN	锚筋位移/mm	灌浆体位移/mm	试验现象
PSB36-10.5-1	10.0	823	26.18	12.37	锚具损坏
PSB36-10.5-2	10.0	825	27.65	12.47	锚具损坏
PSB36-10.5-3	10.0	830	28.03	13.58	锚具损坏

特征值为490 kN可知,PSB在较高荷载下的位移表现更为敏感。荷载与位移的关系不仅受荷载大小的影响,而且与锚杆的设计和承载力密切相关。

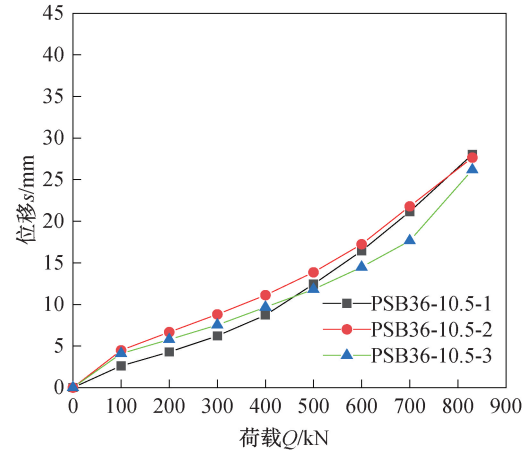


图3 压力型PSB抗浮锚杆锚筋 $Q-s$ 曲线
Fig. 3 $Q-s$ curves of anchor bar of pressure-type PSB anti-floating anchor

2.2 荷载-灌浆体位移分析

压力型PSB抗浮锚杆灌浆体 $Q-s$ 曲线见图4。由图4可见,灌浆体位移随荷载增加呈平稳增长趋势,曲线未出现明显突变点。这表明灌浆体顶面在加载过程中未发生突然破坏,反映出材料具有

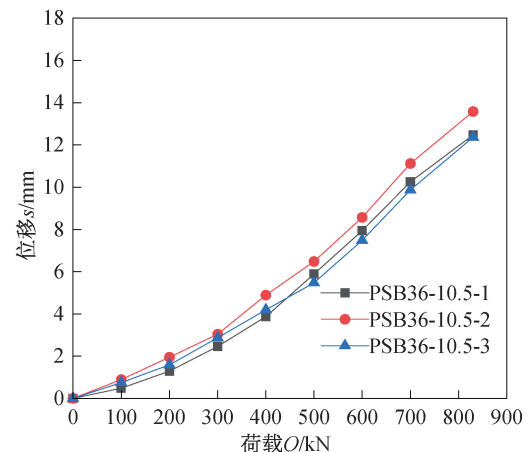


图4 压力型PSB抗浮锚杆灌浆体 $Q-s$ 曲线
Fig. 4 $Q-s$ curves of pressure-type PSB anti-floating anchor grout body

较好的延性和均匀变形能力。其破坏模式呈现渐进式发展特征,而非突发性失效。这一规律与张永兴等^[20]关于压力型锚杆锚固段荷载-位移曲线的研究结果基本一致,两者均表现为近似线性的增长趋势。

由图 4 还可以发现,在低荷载情况下位移小,初始刚度较大,且在荷载增加至 500 kN 后才出现明显的非线性变形,荷载为 800 kN 时位移才达 13.58 mm,灌浆体位移较小,表明其极限承载力较高。当荷载达到约 500 kN 时,灌浆体开始进入位移加速增长阶段,在这一阶段,灌浆体与周围岩土体的接触界面出现局部滑移或轻微破坏,且随着荷载的继续增大,破坏程度逐步加剧,分析原因为荷载通过锚杆底部承载体传递至周围的土体或岩体,在荷载施加的初期,底部承载体承受了大部分荷载,灌浆体与土体之间的黏结力在这一阶段的作用较为有限。随着荷载逐步增加,锚杆底部对灌浆体施加向上的压力,灌浆体与岩土体界面的黏结力承受主要荷载;当荷载达到一定临界值时,土体与灌浆体界面产生的剪应力逐渐增大,进而导致灌浆体位移增大;进一步分析表明,在锚杆受拉拔荷载作用时,锚筋承担的荷载传递到灌浆体,再通过灌浆体与岩土体的界面传递到周围岩土层,由于第二界面的剪应力通常低于第一界面,灌浆体的滑移量普遍小于锚筋的滑移量,这与试验中观察到的锚筋位移大于灌浆体位移的现象一致。

2.3 锚筋-灌浆体相对位移分析

锚筋与灌浆体的相对位移是荷载作用下锚筋与灌浆体位移的差值。由于锚筋和灌浆体具有不同的刚度和材料特性,因此在荷载作用下,它们会产生不同的变形。通过对相对位移变化的研究,可以深入了解锚筋与灌浆体之间的力学行为,从而优化锚杆的设计。锚筋与灌浆体之间的相对位移变化通常取决于两者的界面特性,包括界面黏结、摩擦力等。如果界面黏结较弱,相对位移较大,锚筋与灌浆体之间的滑移现象可能更为显著,从而影响锚杆的整体承载力。锚筋与灌浆体相对位移的计算公式如式(1)所示。

$$s_{\text{相对位移}} = s_{\text{锚筋}} - s_{\text{灌浆体}} \quad (1)$$

式中: $s_{\text{相对位移}}$ 为锚筋与灌浆体的相对位移,mm; $s_{\text{锚筋}}$ 为拉拔试验中锚筋的位移量,mm; $s_{\text{灌浆体}}$ 为拉拔试验中灌浆体的位移量,mm。

本次试验中压力型 PSB 锚筋-灌浆体相对位移变化如图 5 所示。

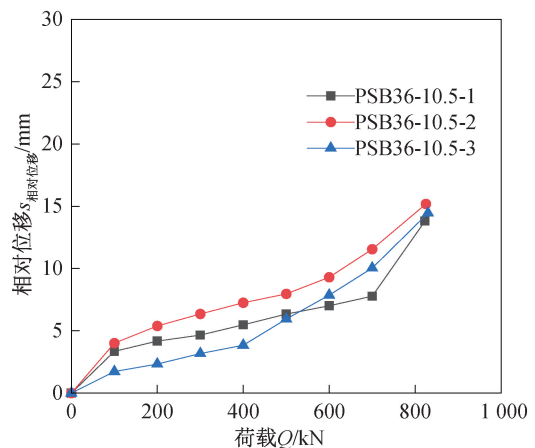


图 5 压力型 PSB 抗浮锚杆锚筋-灌浆体相对位移

Fig. 5 Relative displacement of anchor bar-grout body for pressure-type PSB anti-floating anchor bar

通过图 5 相对位移曲线可以看出,试验中锚筋与灌浆体位移差值随着荷载增加而增大,根据其变化趋势大致分为三个阶段。在前期荷载较低时,锚筋与灌浆体的相对位移增幅较小,锚杆 PSB36-10.5-1—3 在前期荷载下,相对位移曲线呈平滑状,这一阶段,锚筋与灌浆体相对位移平滑上升,这时锚筋与灌浆体的接触面积小于灌浆体与岩土体的接触面积,灌浆体-岩土体界面承受的剪应力小于锚筋-灌浆体界面,导致灌浆体位移量小于锚筋位移量;随着荷载进一步增加,荷载通过锚筋传递到底部承载体,承载体将荷载传递至灌浆体-岩土体界面。锚杆 PSB36-10.5-1—3 的拉拔荷载达到 500 kN 时,锚筋与灌浆体的相对位移增长幅度增加;荷载继续增大后,锚筋与灌浆体的相对位移曲线再次进入上升阶段,上升坡度明显增大,且在此阶段,位移增幅加速,说明此时锚筋-灌浆体界面不再承受荷载,此时荷载主要由灌浆体-岩土体界面承担,导致两者之间相对位移增速加快。锚筋与灌浆体之间的相对位移特性受荷载和界面黏结强度的综合作用影响,且随着荷载的增大,锚筋-灌浆体界面黏结力丧失,灌浆体-岩土体界面荷载位移增长速度逐渐加快,最终进入加速增长阶段。试验结果表明,锚筋与灌浆体之间的相对位移特性是荷载水平与界面黏结性能共同作用的结果。随着荷载增大,锚筋-灌浆体界面的黏结退化过程可分为完整的“黏结—滑移—脱黏”三阶段,此后由灌浆体-岩土体界面承担荷载。这一演变过程直接影响了整个锚杆系统的荷载传递机制和变形特性。

3 讨论

在压力型 PSB 抗浮锚杆研究中,灌浆体-岩土体界面的黏结应力是影响锚杆承载力和稳定性的关键参数之一。灌浆体-岩土体界面的黏结性能直接决定了荷载传递效率和锚杆抗拔能力。灌浆体-岩土体的黏结应力与其接触面积、锚孔直径和灌浆体质量密切相关。压力型 PSB 锚筋-灌浆体和灌浆体-岩土体界面平均黏结强度公式分别如式(2)和式(3)所示。压力型 PSB 抗浮锚杆锚筋-灌浆体界面黏结应力和灌浆体-岩土体界面黏结应力如图 6 所示。

$$\tau_{\alpha} = \frac{T_u}{\pi dl} \quad (2)$$

$$\tau_{\beta} = \frac{T_u}{\pi D l} \quad (3)$$

式中: τ_{α} 为锚筋-灌浆体界面广义平均黏结应力, MPa; τ_{β} 为灌浆体-岩土体界面广义平均黏结应力, MPa; T_u 为压力型 PSB 锚杆最大加载值, kN; d 为压力型 PSB 锚杆直径, mm; D 为压力型 PSB 锚杆灌浆体直径, mm,本试验中 3 根锚杆的锚孔直径为 250 mm; l 为灌浆体与岩体黏结长度, mm。

锚杆的锚筋-灌浆体界面平均黏结应力为 0.73 MPa,灌浆体-岩土体界面平均黏结应力为 0.104 MPa,锚筋-灌浆体界面大于灌浆体-岩土体界面黏结应力,造成这种差异的主要原因有两点:锚筋直径远小于锚孔直径,导致依据公式计算的灌浆体-岩土体界面黏结应力偏小;锚筋表面的螺纹结构能与灌浆体形成更有效的机械咬合作用,显著增强了锚筋-灌浆体界面的摩擦力和抗剪能

力,相比之下,灌浆体-岩土体界面则主要依赖材料间的分子吸附力和表面粗糙度提供的摩擦力,导致其黏结应力偏小。此外,锚筋的长度会影响其与灌浆体之间的接触面积,进而影响黏结应力。实际工程中需注意过长的锚固深度可能导致黏结应力降低。这与渠红霞^[16]的研究结论一致,即灌浆体-岩土体界面黏结应力的大小与锚固长度密切相关。因此,过长的锚固长度可能会引发不必要的黏结应力损失,在实际工程中应予以重视。

根据式(2)和式(3)综合分析,压力型 PSB 抗浮锚杆的界面黏结应力与锚杆直径、锚杆长度以及锚孔直径密切相关。锚杆直径增大通常会增加黏结面积,从而提高荷载传递能力,但锚杆直径和孔径过大并不一定能提升黏结应力,因为锚杆存在临界锚固长度^[21],超过临界锚固长度会导致黏结应力降低。合理的锚固长度能够提高锚杆的稳定性,过长的锚杆长度会降低界面黏结应力。因此,在设计压力型 PSB 抗浮锚杆时,应综合考虑锚杆直径、锚固长度和锚孔直径,以确保黏结应力和承载性能最优。

4 结论

本文对 3 根压力型 PSB 抗浮锚杆展开现场试验,研究了压力型 PSB 抗浮锚杆的荷载位移特性和黏结应力分布,得到如下结论:

1)压力型 PSB 抗浮锚杆锚筋-位移曲线呈线性增长,锚筋处于弹性变形阶段;荷载加载至最大加载值的 60%时,位移曲线骤升,位移加速增长,锚筋开始进入塑性变形阶段;灌浆体位移曲线随荷载增加未出现明显的突变点或双折线形式,总体呈线性增长。

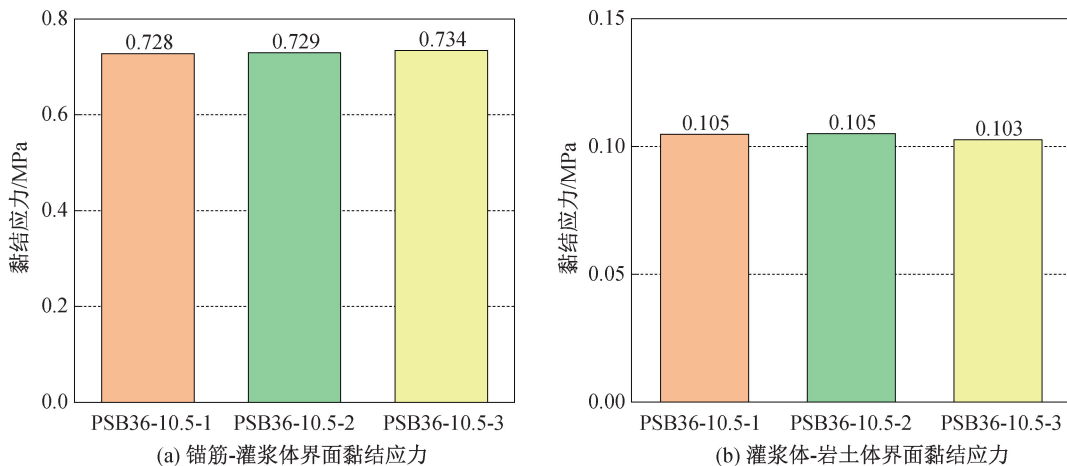


图 6 界面平均黏结应力

Fig. 6 Average bond stress at the interface

2) 灌浆体位移均小于锚筋位移, 锚筋与灌浆体的相对位移随着荷载增加而增大, 荷载-位移曲线变化趋势可分为完整的“黏结—滑移—脱黏”三个阶段, 锚筋与灌浆体之间的相对位移特性是荷载水平与界面黏结性能共同作用的结果。

3) 锚杆的锚筋-灌浆体界面的平均黏结应力为 0.73 MPa, 灌浆体-岩土体界面平均黏结应力为 0.104 MPa; 灌浆体-岩土体界面黏结应力与锚固长度和锚孔直径有关, 锚筋-灌浆体界面的黏结应力随锚筋直径和锚孔直径的增加反而降低, 合理的锚固长度对抗浮锚杆在工程中的应用至关重要。

参考文献:

- [1] 赵立财. 隧道围岩中注浆锚杆的应力分布及影响因素研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2021, 38(3):63-68.
ZHAO L C. Study on stress distribution and influencing factors of grouting anchor in tunnel surrounding rock[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2021, 38(3):63-68.
- [2] ZHANG W, HUANG Z, ZHANG J B, et al. Multifactor uncertainty analysis of construction risk for deep foundation pits[J]. Applied Sciences, 2022, 12(16):8122.
- [3] 白晓宇, 吴泽坤, 王凤姣, 等. BFRP 抗浮锚杆抗拔性能现场试验与荷载传递特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(6):1335-1346.
BAI X Y, WU Z K, WANG F J, et al. Load transfer behavior of BFRP anti-floating anchors based on field pullout tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(6):1335-1346.
- [4] 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.
- [5] YANG M, WU J, LU Q Q, et al. Optimization of uplift piles for a base plate considering local anti-floating stability[J]. Applied Sciences, 2024, 14(12):5000.
- [6] 任东兴, 赵勇, 薛鹏, 等. PSB 精轧螺纹钢扩大头抗浮锚杆抗拔试验及数值模拟分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2022, 33(3):78-84.
REN D X, ZHAO Y, XUE P, et al. Field test and numerical simulation analysis of stress characteristics of prestressed anti-floating anchor of PSB screw-thread steel bars[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2022, 33(3):78-84.
- [7] 滕延京, 王卫东, 康景文, 等. 基础工程技术的新进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(4):1-21.
TENG Y J, WANG W D, KANG J W, et al. The new development of the technology of building foundation engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(4):1-21.
- [8] DU H L, CHEN Z Y, WANG X Y, et al. Development of a Cr-Ni-Mo alloyed stress corrosion-resistant anchor bolt steel[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2024, 71(1):1-11.
- [9] 寇海磊, 荆皓, 徐客, 等. 基于分段式模型考虑界面损伤的 GFRP 锚杆-砂浆粘结性能数值模拟[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2021, 38(3):30-36+54.
KOU H L, JING H, XU K, et al. Numerical simulation of bonding performance of GFRP anchor-mortar considering interface damage based on piecewise model[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2021, 38(3):30-36+54.
- [10] LIU H X, YANG Y C, XU H. Loading rate effect on the pullout capacity of OMNI-Max anchors in clay coupled with multiple factors[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2024, 146:012101.
- [11] 戴国鸿, 李敏子, 朱效民, 等. 一种大直径压力型抗浮锚杆底板加固技术[J]. 建筑施工, 2023, 45(10):1956-1958+1962.
DAI G H, LI M Z, ZHU X M, et al. Reinforcement technology for bottom plate of large-diameter pressure type anti-floating anchor rod[J]. Building Construction, 2023, 45(10):1956-1958+1962.
- [12] 郝建斌, 门玉明, 汪班桥. 分级荷载下压力型土层锚杆承载特性试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(10):104-109.
HAO J B, MEN Y M, WANG B Q. Experimental investigation into load bearing features of compression-type soil anchors under step-loading[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(10):104-109.
- [13] 耿冬青, 程学军, 宋福渊, 等. 压力分散型锚杆在某基础抗浮工程中的应用[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(1):119-124.
GENG D Q, CHENG X J, SONG F Y, et al. The application of dispersed pressure anchor in a permanent anti-floating project[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(1):119-124.
- [14] 刘超, 涂兵雄, 廖小平, 等. 压力型锚杆临界锚固长度的解析解[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2019, 40(6):716-723.
LIU C, TU B X, LIAO X P, et al. Theoretical solution of critical anchorage length of pressure type anchor[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2019, 40(6):716-723.
- [15] 罗东林, 李欣洵, 廖宏业, 等. PSB 精轧螺纹钢预应力

- 扩大头抗浮锚杆的工程应用研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(14): 146-150+123.
- LUO D L, LI X W, LIAO H Y, et al. Engineering application of the prestressed anti-floating anchor with enlarged head project of PSB finishing rolling rebar[J]. Building Structure, 2022, 52(14): 146-150+123.
- [16] 渠红霞. 压力型锚杆锚固段流变特性试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2015, 32(3): 34-37.
- QU H X. Test research on mechanical behavior of pressure-type anchors[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2015, 32(3): 34-37.
- [17] 张明义, 寇海磊, 白晓宇, 等. 玻璃纤维增强聚合物抗浮锚杆抗拔性能试验研究与机制分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1069-1076+1083.
- ZHANG M Y, KOU H L, BAI X Y, et al. Experimental study and mechanism analysis of the anti-pulling behavior of glass fiber reinforced polymer anti-float anchor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1069-1076+1083.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations: JGJ 120—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程抗浮技术标准: JGJ 476—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for building engineering against uplift: JGJ 476—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [20] 张永兴, 卢黎, 饶泉宇, 等. 压力型锚杆力学性能模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2045-2050.
- ZHANG Y X, LU L, RAO X Y, et al. Model test research on mechanical behavior of compression type rock bolt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2045-2050.
- [21] 孙克国, 许炜萍, 黄谦, 等. 预应力锚杆拉拔力学特性及临界锚固长度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(3): 653-669.
- SUN K G, XU W P, HUANG Q, et al. Study on pull-out mechanical characteristics and critical anchorage length of prestressed anchor bolts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(3): 653-669.
- (责任编辑 王利君)
-
- (上接第8页)
- [10] 肖娴, 李颖. 包裹式加筋土挡墙动力仿真分析[J]. 中外公路, 2014, 34(4): 49-52.
- XIAO X, LI Y. Dynamic simulation analysis of wrapped reinforced earth retaining wall[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(4): 49-52.
- [11] 宋海波, 曲翔宇, 刘正华. 加筋土防护屏障的设计方法与应用[C]//《工业建筑》2016年增刊II. 中国航天建设集团有限公司, 2016: 530-533.
- SONG H B, QU X Y, LIU Z H. The design of protective barrier with reinforced soil and its application[C]//Industrial Construction (Supplement II). China Aerospace Construction Group Co., Ltd., 2016: 530-533.
- [12] 王可强, 苏经宇, 王志涛. 爆炸冲击波在建筑群中传播规律的数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2007(10): 121-127+176.
- WANG K Q, SU J Y, WANG Z T. Numerical simulation of propagation rules of blast shock wave in building cluster[J]. China Safety Science Journal, 2007(10): 121-127+176.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 烟花爆竹工程设计安全标准: GB 50161—2022[S]. 北京: 中国计划出版社, 2022.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Safety code for design of engineering of fireworks and firecracker: GB 50161—2022[S]. Beijing: China Planning Press, 2022.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用爆炸物品工程设计安全标准: GB 50089—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Safety standard for design of engineering of civil explosive materials: GB 50089—2018[S]. Beijing: China Planning Press, 2018.
- (责任编辑 王利君)