

抗浮锚杆技术介绍及工程特性研究

陆振华

(浙江耀华建设集团有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 近年来工程抗浮事故频发, 抗浮锚杆在结构设计中常被用作抵抗地下水浮力的处理手段之一。然而, 目前对抗浮锚杆的抗拔承载性能的研究仍存在不足, 缺乏对锚杆的杆体受力理论、荷载传递机理和长期承载特性的研究。本文详细介绍了不同类型的抗浮锚杆以及抗浮锚杆的施工过程, 并基于某实际工程项目开展了抗浮锚杆的现场静载试验。通过现场试验对抗浮锚杆的抗拔承载特性、抗拔承载力理论计算公式和长期承载特性进行了分析和研究, 并将抗浮锚杆的抗拔性能和传统静压桩基的抗拔性能进行了对比分析。研究结果表明: 双折线模型理论计算公式可以较好地模拟实测的抗浮锚杆抗拔荷载-位移曲线, 能够为后续抗浮锚杆工程的设计提供理论参考; 抗浮锚杆相比于传统静压桩基具有较好的抗拔承载性能, 抗浮锚杆是一种安全可靠的地下工程抗浮设计的选择; 采用抗浮锚杆的地下室长期监测数据显示, 地下室最大累计上浮位移基本在 1.1 mm 以下, 说明抗浮锚杆的长期承载特性较好。

关键词: 抗浮锚杆; 抗拔试验; 抗拔承载力; 计算方法; 长期承载特性

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)02-0185-08

Introduction of anti-floating anchor technology and study on its engineering characteristics

LU Zhen-hua

(Zhejiang Yaohua Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: In recent years, a significant number of accidents induced by anti-floating have been reported, leading to the widespread adoption of anti-floating anchors as a means to counteract groundwater buoyancy in design practices. However, the analysis on the pull-out bearing capacity of anti-floating anchors was relatively limited, with a notable absence of research on the load transfer mechanisms and the long-term bearing capacity of such anchors. This work presented various types of anti-floating anchors and elucidated their installation procedures. Field tests on anti-floating anchors were conducted based on an engineering project. The pull-out bearing capacity, its theoretical calculation formula, and long-term bearing capacity of anti-floating anchors were comprehensively studied and analyzed, with a comparative assessment against traditional jacked piles. The results show that the theoretical bilinear model for the pull-out bearing capacity of anti-floating anchors can replicate the load-displacement response observed in field tests effectively, thus furnishing valuable theoretical insights for subsequent anti-floating anchor projects. Notably, the pull-out bearing capacity of anti-floating anchors outperforms that of traditional jacked piles, rendering them a secure and dependable option in anti-floating design for underground engineering. Long-term monitoring data reveal the maximum cumulative uplift displacement of the basement to be essentially less than 1.1 mm, attesting to the enduring efficacy of anti-floating anchors.

Key words: anti-floating anchor; pull-out test; pull-out bearing capacity; calculation method; long-term bearing capacity

0 引言

滨海地区一般地下水位较高,当结构荷载、覆土等不能抵抗地下水浮力时,地下建筑物的抗浮问题随之而来。地下水浮力的存在会导致地下室底板不同程度的隆起,造成一定程度的破坏,严重时还会引起建筑物整体不均匀浮起,甚至发生倾斜^[1-2]。在2020年南昌某项目中,由于后浇带封闭后顶板未及时覆土,基坑坑壁与地下室外墙间的回填土以及底板下填土形成了渗流通道,地表积水渗入地下室底板下导致了地下室上浮破坏,结构发生一定倾斜。因此,工程的抗浮设计是否正确合理,直接关系到工程的安全可靠和工程的造价,应引起从业人员的高度重视。

抗浮锚杆^[3-5]是一种埋入岩土体深处的受拉杆件,其通过高压注浆固定在基础以下岩土中,然后锚固在基础内。抗浮锚杆的作用机理为在地下水浮力作用下对地下室提供抗拔力。由于抗浮锚杆对场地土层适应性强、造价低廉、施工便捷,在滨海地区地下室抗浮设计中得到了广泛的推广应用。

一些学者和工程技术人员已针对抗浮锚杆进行了一些研究^[3-24]。在抗拔试验方面,贾金青等^[3]结合大连某大型地下工程项目设计抗拔试验,测试了抗浮锚杆在岩土中的剪应力分布规律,得出了抗浮锚杆的抗拔力。付文光等^[4]研究了锚杆的抗浮稳定性验算公式及有锚杆参与工作时地下建(构)筑物抗浮体系的稳定性验算公式,并结合工程案例进行了验算。马骥等^[5]通过分析承压型预应力抗浮锚杆在施工、使用阶段的应力变化,结合相关规范要求与工程实例,对承压型预应力抗浮锚杆的设计原则、设计方法进行探讨,提出了锚杆顶部开裂控制计算的相关原则与验算方法,对承压型预应力抗浮锚杆设计中存在的配筋量与开裂控制、施工阶段荷载效应、锚固体强度的确定等问题进行了讨论。白晓宇等^[6-8]、匡政等^[9]、张明义等^[10]和BAI等^[11]针对全长黏结螺纹玻璃纤维增强聚合物(GFRP)抗浮锚杆进行了大量研究。通过拉拔蠕变试验研究了GFRP抗浮锚杆抗拔的蠕变力学模型,并结合蠕变力学模型推导出GFRP抗浮锚杆的长期抗拔力;同时,通过现场抗拉破坏性试验,研究了GFRP抗浮锚杆的多界面剪切特性及其锚固机理与破坏机制。柳建国等^[12]结合北京某工程对压力分散型抗浮锚杆试验、设计、施工及检测方面的技术难点进行了研究探讨。陈崇茵等^[13]运用力学原理分析锚杆轴力与锚侧摩阻力、锚-土变形之间的相互关系,并通过试验验证,获得了抗浮锚

杆摩阻力和剪切位移沿锚固长度的分布规律,证实了锚土界面处变形为土层抗浮锚杆变形的主要部分。王贤能等^[14]结合抗浮锚杆试验实例,分析了《土层锚杆设计与施工规范》(CECS22:90)中破坏标准应用于抗浮锚杆的不足之处,并提出了一些修改建议。

徐向速^[15]依托实际工程,对抗浮锚杆的使用进行了分析和讨论,给出了抗浮锚杆竖向位移控制的建议。曾国机等^[16-17]对常用的几种抗浮技术措施应用情况进行了分析,通过现场试验、有限元模拟等方法,研究了抗浮锚杆的受力机理及破坏现象。陈飞铭^[18]、王浩^[19]对抗浮锚杆类型、作用机理、设计计算等进行了系统介绍。李胜旺^[20]结合实际工况,对锚杆施工工艺、施工技术重难点进行了介绍。马占峰^[21]通过现场测试和数值分析,对某地下室拉力型抗浮锚杆的位移和内力进行了研究,得出了拉力型抗浮锚杆的荷载传递规律。周宗道^[22]结合深圳某大厦地下室工程项目,对锚杆施工进行了介绍。

由上述文献分析可知,目前关于抗浮锚杆的研究工作大多局限于材料本身力学性能的现场试验及数值模拟研究,对抗浮锚杆的抗拔承载性能分析仍有所欠缺,缺乏锚杆、荷载传递机理和长期承载特性等方面的相关研究。本文首先对抗浮锚杆技术进行了介绍,并开展了抗浮锚杆的现场抗拔试验,随后通过解析方法对抗浮锚杆的极限承载力进行了计算,并将抗浮锚杆的抗拔承载性能与传统静压桩的抗拔性能进行了对比分析。最后通过采用抗浮锚杆的地下室底板的长期沉降监测,分析了抗浮锚杆的长期承载特性。

1 抗浮锚杆技术介绍

地下工程的抗浮问题可用压重法、抗浮桩或抗浮锚杆来解决。抗浮锚杆常用类型有普通拉力型、普通压力型、压力分散型、非预应力型、扩体型五类。其中普通拉力型抗浮锚杆是一种用拉力传递土体荷载的锚杆,其优点在于锚杆具有较大的伸缩性、锚抗力不受锚体接收的压力大小影响、适用范围宽,特别适用于含水层下砂层等不稳定地质条件。一般在沉降性地基中,采用拉力锚杆与压力锚杆的组合加固,就可以达到更好的效果。与普通拉力型抗浮锚杆不同,普通压力型抗浮锚杆的锚抗力需要通过压缩土体传递到锚体。其主要特点是抗力大、稳定性好,尤其适用于较为坚硬的基岩土层中;其缺点在于,在含水层下砂层等不稳定地质条件

下,压力型抗浮锚杆所传递的锚抗力容易发生变形,导致其抗浮能力减弱。

压力分散型锚杆的荷载传递机理与普通压力型预应力锚杆类似,不同之处在于压力分散型锚杆的锚固段内设置多个承载体,使筋体传递来的拉力能够分散地作用在各个承载体上,保证锚固段注浆体处于受压状态,且应力分布更加均匀,其主要用于软岩土层或腐蚀性较高的地层,单位长度锚固段承载力高,且端变量小。

非预应力型锚杆是指在使用过程中不施加预应力的锚杆,它是以静态自重或短期外荷载引起的与土体之间的摩擦力来增加杆件的刚度,并使其具有一定的承载能力,其主要用于减少土体位移、增强结构刚度以及加强地基稳定的场合,如支持挤压隧道、稳定土体、修复裂缝等项目。

扩体型锚杆是在锚杆的底端或锚固长度内的

不同位置钻孔时分别进行机械或水力等方法扩孔,灌浆后形成洋葱头状的锚杆体,通过扩大部分,可有效提高锚杆体的抗拔能力,主要适用于普通拉力型端杆不能满足设计要求的软弱土层。

2 地下室抗拔锚杆现场试验

2.1 工程概况和地质条件

本试验依托杭州市余杭区某工程项目,该工程总用地面积 9 433 m²,总建筑面积 76 880 m²,其中地上建筑面积 56 598 m²,地下建筑面积 20 282 m²。两幢主楼,高 20~24 层,框剪结构,单柱荷载最大约 30 000 kN,主楼的裙房为两层。此外,地下室底板位于④粉质黏土层。表 1 为场地土层分布及桩基承载力计算参数建议值(q_{sia} 为桩侧摩阻力特征值; q_{pa} 为桩端阻力特征值)。

表 1 场地土层分布及桩基承载力计算参数建议值

Table 1 Soil profiles and recommended values for bearing capacity of pile

土层编号	土层名称	土层厚度/m	桩基承载力参数建议值				抗拔系数
			预制桩		钻孔灌注桩		
			q_{pa}/kPa	q_{sia}/kPa	q_{pa}/kPa	q_{sia}/kPa	
①	杂填土	0.8	—	—	—	—	—
②	粉质黏土	3.0	—	17	—	16	0.70
③	淤泥质黏土	0.5	—	7	—	6	0.70
④	粉质黏土	6.9	—	30	—	28	0.70
⑤	黏土	5.2	—	17	—	16	0.70
⑥	粉质黏土	6.8	—	34	—	32	0.68
⑦	粉质黏土	0.5	—	20	—	18	0.65
⑧ ₁	含粉质黏土粉砂	2.3	1 400	34	—	32	0.66
⑧ ₂	圆砾	7.6	4 200	50	1 800	45	0.65
⑨ ₁	全风化粉砂岩	2.1	1 300	32	650	30	0.70
⑨ ₂	强风化粉砂岩	1.6	4 500	60	1 800	50	0.65
⑨ ₃	中风化粉砂岩	8.7	—	—	2 800	65	0.68

2.2 试验抗浮锚杆的力学参数

试验抗浮锚杆采用 PSB930 预应力螺纹钢筋,即锚杆内部为 1 根直径为 36 mm 的钢筋,外涂环氧涂层,环氧涂层厚度 $\mu \geq 250 \mu m$ 。屈服强度标准值为 930 MPa,物理力学参数见表 2。抗浮锚杆的抗拔承载力设计值为 500 kN。钻孔直径为 150 mm,高压旋喷扩大头直径为 500 mm,囊袋外水泥浆的水灰比为 1.0,囊袋内水泥浆的水灰比为 0.45,水泥浆的弹性模量为 2×10^4 MPa。试验抗浮锚杆的总长度为 17.5 m。处于土层编号④~⑤中的锚杆抗拔力可忽略,视为自由段。锚杆自由段总长为 7.9 m,其中伸

出地面长度为 3.0 m。锚杆的实际锚固段长度为 6.6 m,锚固段所在土层编号为⑥粉质黏土。

表 2 抗浮锚杆物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of anti-floating anchor

预应力螺纹 钢筋类型	弹性模量 E/MPa	抗拉强度/ MPa	横截面积/ mm^2
PSB930	2×10^5	930	1 018

2.3 试验加载装置及方案

现场试验中共开展了 3 组抗拔试验。3 组试验所

采用的抗浮锚杆、加载装置及方案均相同。试验加载装置由穿心式千斤顶、工具锚、垫座、主梁、反力支座、基准桩、基准梁和位移计等组成。试验的加载装置如图1所示,其中穿心式千斤顶的加载吨位为200t。位移计量程为30mm,其精度为0.01mm。试验加载方案参照《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)^[25],采用单循环加载法,共分为7级,分别取承载力设计值的10%、20%、40%、60%、80%、90%和100%,具体抗浮锚杆分级加载数值如表3所示。

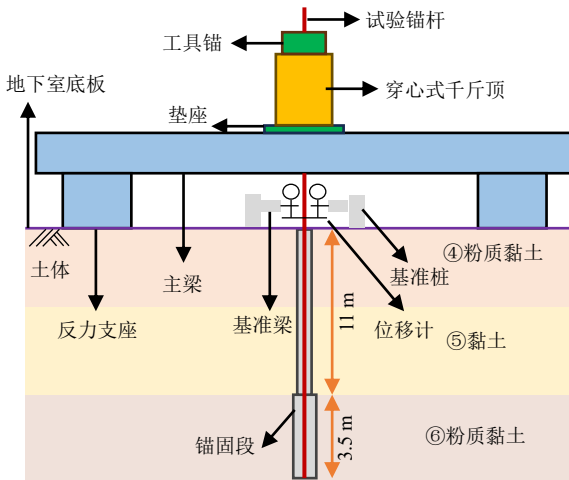


图1 抗浮锚杆试验加载装置图

Fig. 1 Anti-floating anchor test loading system

表3 抗浮锚杆分级加载数值表

Table 3 Scheme of step loading of anti-floating anchor

锚杆编号	试验施加荷载比例及数值/kN						
	10%	20%	40%	60%	80%	90%	100%
1~3号	50	100	200	300	400	450	500

正式加载前,应测读锚杆位移基准值3次,当每隔5min的读数相同时,方可作为锚杆位移的基准值。每级荷载下读数不得少于3次。当观测时间内锚杆位移增量不大于1.0mm时,可视为位移收敛,否则,观测时间应延长至60min,并应每隔10min测量锚杆位移1次,位移增量小于2.0mm时,可视为位移收敛,否则视为不收敛。位移收敛后,方可施加下一级荷载。

3 试验结果及长期承载特性

3.1 抗浮锚杆的抗拔承载力

图2为抗浮锚杆的荷载-位移(Q-S)曲线。可以将该曲线按斜率分为两段,在0~400kN加载区间,锚杆位移从0发展到4.5mm左右,3根锚杆的总位移分别为4.14mm、4.28mm和3.96mm。在该

加载区间范围内,3条曲线各点的斜率均较大。当荷载大于400kN时,曲线各点的斜率变小,并呈近似线性变化。各锚杆的Q-S曲线较为相似,均呈现出单调上升的趋势。最大加载(500kN)条件下,总位移量为6.56~7.60mm,最大塑性位移量为2.60~3.46mm,约占总位移量的38%~46%。这表明锚杆的抗拉拔性能还未能充分发挥,锚杆仍具有较大的承载潜力,满足锚杆的抗拔承载力设计要求。同时,还反映出抗浮锚杆的抗拔性能较好,证明了其应用在地下空间工程抗浮设计中的合理性和可靠性。

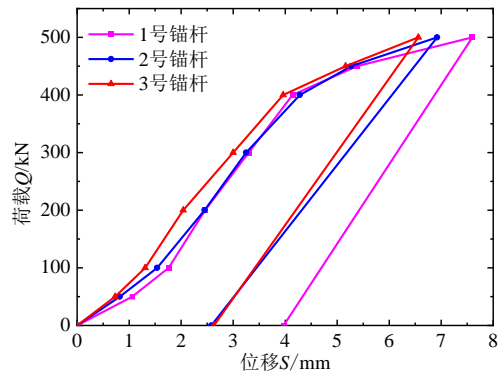


图2 抗浮锚杆Q-S曲线

Fig. 2 Q-S curves of the anti-floating anchors

3.2 抗浮锚杆的解析解和实测值对比

采用双折线荷载传递函数^[26]计算锚杆抗拔力,锚固层界面双折线模型如图3所示。该模型可较好地反映锚杆张拉过程中锚固层界面的弹性和塑性阶段。图中,p为锚杆拉拔力,u为锚固层界面位移, λ_1 和 λ_2 分别为锚固层界面弹性极限位移 u_1 前后对应的摩擦系数。可通过实际工程中锚杆力-位移曲线拟合获得 λ_1 、 λ_2 和 u_1 。

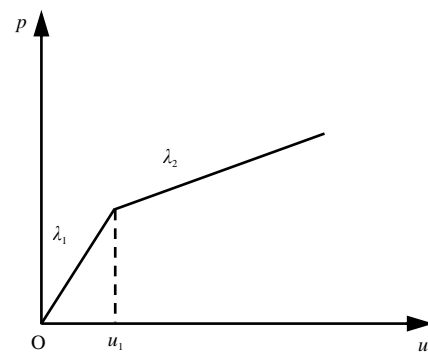


图3 锚固层界面双折线模型

Fig. 3 Bilinear interface model for the anchored portion

当锚固层界面处于弹性阶段时,抗浮锚杆的p-u关系式为:

$$k_1 = \sqrt{\frac{\lambda_1}{EA}} \quad (1)$$

$$u = \frac{p}{EAk_1 \tanh(k_1 l_a)} + \frac{pl_f}{E_s A_s} \quad (2)$$

式 (1) ~ (2) 中: E 和 A 分别为锚固体的综合弹性模量和综合面积; l_a 为锚固段长度; l_f 为自由段长度; E_s 为钢筋 (钢束) 弹性模量; A_s 为钢筋 (钢束) 截面积。

锚固层界面处于部分塑性阶段时, $p-u$ 关系式为:

$$\alpha = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (3)$$

$$k_2 = \sqrt{\frac{\lambda_2}{EA}} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{m}{k_2 EA} \quad (5)$$

$$u = \alpha \text{ch}[k_2(l_a - l_c)]u_1 + \beta \text{sh}[k_2(l_a - l_c)]u_1 - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 1\right)u_1 + \frac{pl_f}{E_s A_s} \quad (6)$$

式 (3) ~ (6) 中: m 为弹性阶段 p/u 值; l_c 为弹性段长度。

根据图 3, 荷载 400 kN 为抗浮锚杆弹性和弹塑性段的分界点。该荷载下对应的位移为弹性极限位移 u_1 。把抗浮锚杆的物理参数代入式 (1) ~ (6) 中, 可得其解析解。抗浮锚杆的解析解和实测值对比如图 4 所示。从图 4 中可以看到, 解析解和实测数据的拟合效果较好, 这表明双折线模型能较好地描述抗浮锚杆的 $Q-S$ 曲线。该模型可为后续抗浮锚杆的参数分析提供理论基础。

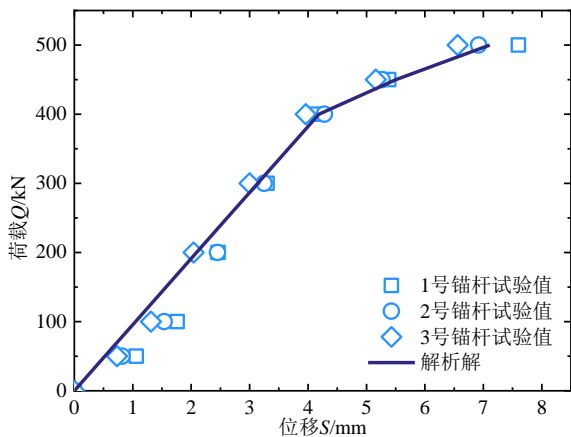


图 4 抗浮锚杆的解析解和实测值对比

Fig. 4 Comparison of analytical solutions and measured values of anti-floating anchor

3.3 抗浮锚杆和传统桩基的对比

基于现场抗拔试验数据, 与传统的锚杆静压桩 (300 mm×300 mm 预制短桩) 和锚杆静压钢管桩 (直径 325 mm) 的抗浮性能进行了对比。传统桩的入土长度以及桩基持力层均与抗浮锚杆一致, 即传统桩入土深度均为 14.5 m, 持力层为⑥粉质黏土。传统桩的抗拔承载力根据表 1 所示的土层性质进行计算。表 4 为抗浮锚杆和传统静压桩抗拔性能对比。

表 4 抗浮锚杆和传统静压桩抗拔性能对比

Table 4 Comparison of uplift resistance performance between anti-floating anchors and traditional jacked piles

类型	入土深度/m	自由段长度/m	锚固长度/m	抗拔承载力/kN
抗浮锚杆	14.5	7.9	6.6	500
锚杆静压桩	14.5	—	14.5	318
锚杆静压钢管桩	14.5	—	14.5	270

从表 4 中可看出, 根据表 1 中给出的参数计算所得的传统锚杆静压桩和钢管桩的抗拔承载力分别为 318 kN 和 270 kN, 小于抗浮锚杆的抗拔承载力 (500 kN)。锚杆静压桩和钢管桩的锚固长度均为 14.5 m, 约是抗浮锚杆锚固段长度 (6.6 m) 的 2.2 倍。综合抗拔承载力和锚固段长度, 可以认为抗浮锚杆具有较好的抗浮性能, 特别是对于已建结构的抗浮加固, 相比于传统桩基, 抗浮锚杆是安全可靠的选择。

3.4 抗浮锚杆长期承载特性

采用抗浮锚杆加固地下室工程项目, 随后对其进行了沉降监测, 共布置 9 个监测点, 如图 5 所示。监测时长为 2021 年 4 月 14 日至 2022 年 1 月 12 日, 约 268 d。图 6 为监测过程中各监测点的沉降变化。

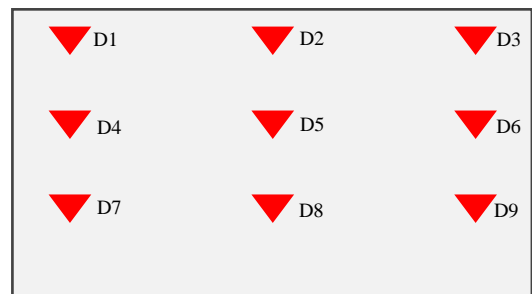


图 5 沉降测点布置

Fig. 5 Settlement measuring points layout

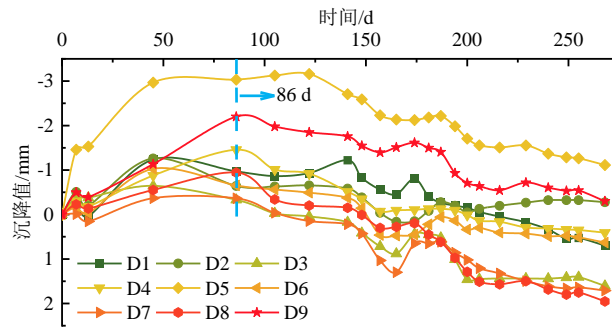


图6 各监测点的沉降变化

Fig. 6 Settlement changes at different monitoring points

从图6中可看出,检测时间在86d之前的各监测点呈现出上浮的变化趋势,从86d以后监测点大都表现出缓慢下降的趋势。这表明抗浮锚杆可以有效地抵抗地下水浮力,且随着降雨量的减少,地下水位出现下降,地下水浮力也随之减小,地下室底板出现了沉降现象。此外,随着时间的增加,下降趋势越来越缓慢。根据各监测点的监测数据,计算了各测点沉降速率,如表5所示。测点速率的变化范围为0.0010~0.0072 mm/d,可见该地下室经过加固后,其安全性明显改善。此外,在监测期间,地下室最大累计上浮位移基本在1.1 mm以下,这表明抗浮锚杆的抗浮性能较好。同时,验证了抗浮锚杆用于解决大型地下工程抗浮问题的合理性和可靠性。

表5 各测点的沉降速率

Table 5 Rates of settlement at different measuring points

测点	累计沉降/mm	变化速率/(mm/d)
1	0.67	0.002 5
2	-0.28	0.001 0
3	1.64	0.006 1
4	0.38	0.001 4
5	-1.10	0.004 1
6	0.62	0.002 3
7	1.71	0.006 4
8	1.94	0.007 2
9	-0.33	0.001 2

4 结 论

介绍了抗浮锚杆技术,结合实际工程项目开展了抗拔锚杆现场试验,并通过理论方法计算了极限抗拔承载力,同时与传统静压桩的抗拔性能进行了对比,最后分析了抗浮锚杆的长期承载特性,结论

如下:

(1) 抗浮锚杆的 $Q-S$ 曲线呈现出单调上升的趋势。最大加载(500 kN)条件下,塑性位移量约占总位移量的38%~46%,表明锚杆仍具有较大的承载潜力,满足锚杆的抗拔承载力设计的要求。

(2) 双折线模型能较好地反映抗浮锚杆的 $Q-S$ 曲线。与传统静压桩的抗拔承载力和锚固段长度的对比结果表明抗浮锚杆是一种安全可靠的选择。长期监测数据表明,抗浮锚杆用于大型地下工程抗浮是合理的,且长期承载性能的稳定性较好。

本文仅采用单调加载的方式对抗浮锚杆开展了抗拔试验,后续将通过建立数值模型对锚杆体系开展参数分析,重点研究抗浮锚杆的改善措施和循环荷载下的抗拔性能。

参考文献

- [1] 党昱敬. 复合地基与基础设计若干问题浅析[J]. 地基处理, 2019, 1(2): 33-43.
DANG Yu-jing. Discussion on several problems of composite foundation and foundation design[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2019, 1(2): 33-43.
- [2] 钱旭彤, 陈静. 某地下室上浮原因分析及加固处理[J]. 地基处理, 2021, 3(5): 415-419.
QIAN Xu-tong, CHEN Jing. Analysis and reinforcement of upheaval of a basement[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(5): 415-419.
- [3] 贾金青, 宋二祥. 滨海大型地下工程抗浮锚杆的设计与试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 769-771.
JIA Jin-qing, SONG Er-xiang. The design and test on anti floating anchorage of large substructure in coastal region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,

- 2002, 24(6): 769-771.
- [4] 付文光, 柳建国, 杨志银. 抗浮锚杆及锚杆抗浮体系稳定性验算公式研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 1971-1982.
FU Wen-guang, LIU Jian-guo, YANG Zhi-yin. Formulae for calculating stability of anti-floating anchor and anchor anti-floating system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(11): 1971-1982.
- [5] 马骥, 张东刚, 张震, 等. 承压型预应力抗浮锚杆设计方法的探讨[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 1143-1146.
MA Ji, ZHANG Dong-gang, ZHANG Zhen, et al. Design methods for pressured grout prestressed anti-floating anchor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 1143-1146.
- [6] 白晓宇, 张明义, 闫楠. 两种不同材质抗浮锚杆锚固性能的现场对比试验研究与机理分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(8): 38-46, 59.
BAI Xiao-yu, ZHANG Ming-yi, YAN Nan. Field contrast test and mechanism analysis on anchorage performance of anti-floating anchors with two different materials[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(8): 38-46, 59.
- [7] 白晓宇, 张明义, 张舜泉. 全长黏结螺纹玻璃纤维增强聚合物抗浮锚杆蠕变试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 804-813.
BAI Xiao-yu, ZHANG Ming-yi, ZHANG Shun-quan. Creep testing on anti-floating anchors of full-length bonding thread glass fiber reinforced polymer(GFRP)[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 804-813.
- [8] 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 Xiao-yu, ZHANG Ming-yi, 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.
- [9] 匡政, 张明义, 白晓宇, 等. 风化岩地基 GFRP 抗浮锚杆力学与变形特性现场试验[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(10): 1882-1892.
KUANG Zheng, ZHANG Ming-yi, BAI Xiao-yu, et al. Field tests on mechanics and deformation properties of GFRP anti-floating anchors in decomposed rock foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(10): 1882-1892.
- [10] 张明义, 白晓宇, 李伟伟. GFRP 抗浮锚杆螺母托盘锚具外锚固性能试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(1): 239-246.
ZHANG Ming-yi, BAI Xiao-yu, LI Wei-wei. Experiment on external anchorage performance for nut-pallet anchorage of GFRP anti-floating anchors[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(1): 239-246.
- [11] BAI X Y, ZHENG C, ZHANG M Y, et al. Bond mechanical properties of glass fiber reinforced polymer anti-floating anchor in concrete baseplate[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2021, 26(6): 804-812.
- [12] 柳建国, 吴平, 尹华刚, 等. 压力分散型抗浮锚杆技术及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3948-3953.
LIU Jian-guo, WU Ping, YIN Hua-gang, et al. Pressure-dispersive anti-float anchor technique and its application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3948-3953.
- [13] 陈崇茵, 王贤能. 抗浮锚杆应力-应变状态的线弹性理论分析[J]. 岩石力学, 2006, 27(11): 2033-2036, 2049.
CHEN Tang-yin, WANG Xian-neng. Linear elastic analysis of stress-strain state of anti-float anchor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 2033-2036, 2049.
- [14] 王贤能, 叶蓉, 周逢君. 土层抗浮锚杆试验破坏标准选取的建议[J]. 地质灾害与环境保护, 2001, 12(3): 73-77.
WANG Xian-neng, YE Rong, ZHOU Feng-jun. Proposals for the selection of failure criteria in soil float-resisting anchor rod test[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2001, 12(3): 73-77.
- [15] 徐向速. 海坛山城市广场工程抗浮锚杆的设计与应用[D]. 上海: 同济大学, 2008.
XU Xiang-su. The design and application of anti-float anchor rod in the Haitan Mountain City Square Project[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [16] 曾国机. 土层抗浮锚杆受力机理研究分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
ZENG Guo-ji. Carrying capacity mechanism analysis of anti-float anchor in the soil[D]. Chongqing: Chongqing

- University, 2004.
- [17] 曾国机, 王贤能, 胡岱文. 抗浮技术措施应用现状分析[J]. 地下空间, 2004, 24(1): 105-109, 142.
ZENG Guo-ji, WANG Xian-neng, HU Dai-wen. Analysis on present situation of anti-floating technology application[J]. Underground Space, 2004, 24(1): 105-109, 142.
- [18] 陈飞铭. 地下室上浮破坏及处理措施研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
CHEN Fei-ming. Study on floating destory and treatments of basement[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
- [19] 王浩. 地下室结构的抗浮设计与分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
WANG Hao. Basement structure design and analysis of anti-floating[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [20] 李胜旺. 抗浮锚杆施工技术应用[J]. 施工技术, 2020, 49(增刊 1): 695-698.
LI Sheng-wang. Application of anti-floating anchor construction technology[J]. Construction Technology, 2020, 49(S1): 695-698.
- [21] 马占峰. 拉力型抗浮锚杆的现场测试与数值分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.
MA Zhan-feng. Field testing and numerical analysis on tensile type anti-float anchor[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008.
- [22] 周宗道. 锚杆在地下室抗浮加固中的应用[J]. 土工基础, 2002, 16(4): 18-20, 23.
ZHOU Zong-dao. The Application of anti-floating anchor rod in soil and its analysis[J]. Soil Engineering and Foundation, 2002, 16(4): 18-20, 23.
- [23] KOU H L, GUO W, ZHANG M Y. Pullout performance of GFRP anti-floating anchor in weathered soil[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 49: 408-416.
- [24] SUN G, YAN N, BAI X Y, et al. Laboratory full-scale test on the bond property of GFRP anchor to concrete [J]. Construction and Building Materials, 2023, 396: 132216.
- [25] 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.
- [26] 张洁, 尚岳全, 叶彬. 锚杆 $p-s$ 曲线的双折线荷载传递解析算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1072-1076.
ZHANG Jie, SHANG Yue-quan, YE Bin. Analytic calculation of $p-s$ curve of bolts based on bilinear load-transfer function[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1072-1076.