

DOI: 10.7672/sjgs2025080138

玄武岩纤维增强塑料锚杆设计及应用研究*

李振海

(陕西华山建设集团有限公司, 陕西 西安 710016)

[摘要] 受地区地质条件影响,部分高层民用建筑在施工期间或竣工后,因土质条件或地下水位变化面临地基沉降或上浮问题。为此,提出了基于玄武岩纤维增强塑料的抗浮扩体锚杆方案,并通过试验研制了相应锚杆,基于土层勘察结果在施工点位进行钻孔作业。结果表明,玄武岩纤维增强塑料锚杆在抗浮工程中每米成本和总使用量均低于普通钢锚杆,总投资373.56万元,降低成本225.72万元;其总抗浮力达456 200kN,远高于普通抗浮锚杆,显著改善了地下室整体或局部上浮状况。

[关键词] 高层建筑;地下室;扩体锚杆;抗浮;试验

[中图分类号] TU973

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)08-0138-06

Design and Application Research of Basalt Fiber Reinforced Plastic Anchor Rod

LI Zhenhai

(Shaanxi Huashan Construction Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710016, China)

Abstract: Due to the influence of regional geological conditions, some high-rise civil buildings face the problem of foundation settlement or floating due to soil conditions or groundwater level changing during construction or after completion. To this end, a scheme of anti-floating expanding anchor rod based on basalt fiber reinforced plastic is proposed, and the corresponding anchor rod through experiments is developed. Based on the results of soil layer investigation, drilling operations were carried out at the construction point. The results show that the cost per meter and total usage of basalt fiber reinforced plastic anchor rod in anti-floating engineering are lower than those of ordinary steel anchor, with a total investment of 3.735 6 million yuan and a cost saving of 2.257 2 million yuan. The total anti-floating capacity of the anchor is 456 200kN, which is much higher than that of the ordinary anti-floating anchor rod, and significantly improves the overall or local floating situation of the basement.

Keywords: tall buildings; basement; anchor rod; basalt fiber; anti-floating; tests

0 引言

随着我国城市化进程的加快,在土地资源紧张条件下,地下空间的开发和利用日益受到关注。大多数高层民用建筑的地下室采用多层结构,导致基坑深度不断增加。然而,由于地下水位变化,特别是在雨季或地下水位较高地区,地下室可能因水的浮力作用而上浮,进而导致结构破坏^[1]。传统的抗浮措施,如增加建筑物自重或使用抗拔桩等方法,成本较高^[2-3]。而扩体锚杆抗浮技术具有施工

便捷、布置灵活、周期短等优点,且相较于传统抗浮措施,其结构造价较低,具有广泛的推广应用价值^[4]。扩体锚杆施工采用高压喷射扩孔工艺,对场地土层的适应性强,适用于多种土层条件,尤其在软弱土层中锚固效果显著^[5-6]。此外,扩体锚杆抗浮技术还能显著提高锚杆的竖向抗拔承载力,满足地下室抗浮设计要求。然而,目前普遍采用的以土侧摩擦阻力为动力的锚杆,只能通过延长锚杆长度提高锚固能力,难以满足高层民用建筑地下室的锚固性能需求;同时,锚杆周围土层易产生剪切损伤,导致侧摩擦阻力从静态摩擦转变为滑动摩擦,从而降低承载力^[7]。

多个工程实例表明,玄武岩纤维增强塑料扩体

* 2021年陕西省住房和城乡建设科技计划项目:大跨径双曲线变截面箱梁顶推施工关键技术研究(2021-K20)

[作者简介] 李振海,高级工程师,E-mail:391893075@qq.com

[收稿日期] 2024-11-20

锚杆抗浮技术在实际应用中效果良好。吴泽坤等^[8]将玄武岩纤维增强塑料抗浮锚杆应用于某抗浮工程中,通过现场多循环极限抗拔试验,发现玄武岩纤维增强塑料抗浮锚杆的最大破坏荷载较同规格钢筋有显著提高。冯君等^[9]在对玄武岩纤维增强塑料抗浮锚杆经济效益的探讨中发现,在不考虑锚杆配件、运输和施工成本的情况下,玄武岩纤维增强塑料抗浮锚杆性价比较高;同时,通过对室内黏结试验、现场静力锚固试验及动力模拟锚固试验的总结表明,其工程应用表现良好。为解决高层民用建筑地下室存在的整体上浮或部分上浮问题,防止相关事故发生,对民用建筑地下室的扩体锚杆抗浮施工工艺进行优化设计,并结合不同的施工辅助工法,使其能适应更大范围、更复杂的地质条件,同时还能提升锚固系统的承载力和变形能力。

1 工程概况

大连滨海地区某项目总用地面积 18 420 000m²,建筑面积 684 300m²,包括多个高层住宅、商业和配套的公共建筑。高层住宅包括 24 幢高层建筑和 1 座独立的幼儿园及沿街 2 层店铺;地下 3 层全部为地下停车场,层高为 3.9、4.2m,建筑面积 69 504.75m²。为掌握该地区地下水基本特性,并考虑到该地区的地下水环境变化较大,对勘测钻孔的钻孔水位进行观察,发现钻孔水位相差很大,观察水位为 5.000~13.500m,标高为 904.960~909.500m,说明地下水水位较高,并且水位变动范围大,这会导致地下工程抗浮难度增加。锚杆需提供足够的抗拔力抵抗地下水的浮力,防止结构因地下水位变化而产生不均匀上浮或倾斜。由于滨海地区地下水含有较高盐分,普通材料易腐蚀,而玄武岩纤维增强塑料抗浮锚杆耐腐蚀性能使其成为最佳选择。另外,该项目所处位置有 891d 风力为 4~5 级,184d 风力为 5~6 级,33d 风力为 6~7 级,常遭受台风和强降水侵袭,需有足够的侧向刚度抵抗风荷载和其他水平荷载。而玄武岩纤维增强塑料抗浮锚杆抗拉强度高、自重小,可减少风荷载和地震作用对建筑的影响。

2 高层建筑地下室抗浮扩体锚杆施工技术

2.1 抗浮扩体锚杆抗浮作用机理分析

抗浮扩体锚杆主要结构划分为扩体和非扩体两部分,截面构造如图 1 所示。该抗浮扩体锚杆以玄武岩纤维增强塑料为材料替代了传统钢锚杆中的钢材。且玄武岩纤维增强塑料锚杆的扩体段通常采用高压旋喷扩大头设计,这种设计能更好地与周围岩土体形成有效锚固,而普通钢锚杆则依赖钢材摩擦力和黏结力进行锚固。

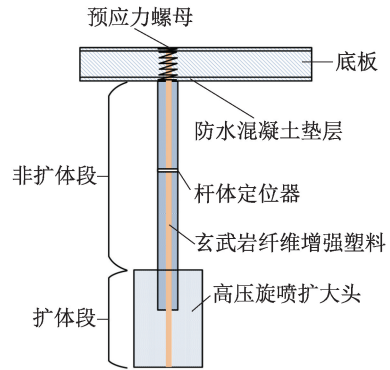


图 1 抗浮扩体锚杆截面构造

Fig. 1 Cross-section structure of anti-floating expanding anchor rod

抗浮扩体锚杆受拉构件一端锚固在建筑物底板,另一端锚固在地基持力层。其受力过程为:①在锚杆和注浆体共同作用下,向注浆体传递向上的作用力;②利用注浆体与周围土壤的摩擦作用,将注浆的受力传递给周围稳定土层,从而形成具有一定抗浮能力的抗浮扩体锚杆。采用抗浮扩体锚杆,除了平衡地下水浮力作用外,还可起到加固地基的作用,减少地基变形和不均匀沉降^[10]。其在地下建筑抗浮工程中的形态如图 2 所示,抗浮扩体锚杆锚固部位一般深埋于土质良好、稳定性好的土层,而扩体锚杆承载力为一般锚杆的 2~3 倍,并在一些饱和软黏土地区的抗浮工程中得到成功应用^[11]。

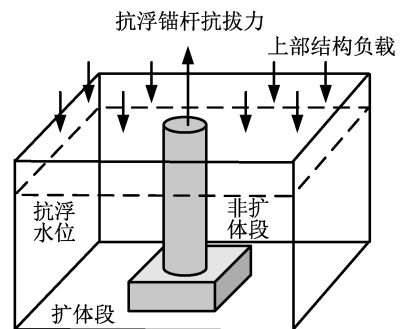


图 2 高层建筑地下室抗浮工程中的锚杆形态
Fig. 2 Anchor rod morphology in anti-floating engineering of high-rise building basement

目前用于抗浮的扩体锚杆存在以下问题:在地下水浮力作用下,锚杆受拉;随着地下水水位降低,浮力减小或消失,土拉力也随之消失^[12]。由于反复的拉压作用,锚杆的工作性能面临更高要求。而扩体锚杆因其承载力和稳定性优于普通锚杆,能有效减轻这种不良影响。

扩体锚杆在抗浮工程中具有独特的工作机制。与普通锚杆不同,在地下水浮力作用下,普通锚杆

主要依靠锚杆断面的侧阻力及其与周边土的黏附力抵御地下水浮力,其锚固力主要取决于有效锚固长度^[13]。在扩体锚杆抗浮过程中,随着水泥浆持续灌注,周边土体对扩体锚杆起到挤密加固作用,使扩体锚杆的作用范围达到扩体段的2倍,从而提升加固后地基强度,并使扩体段的承载力主要集中在末端。因此,扩体锚杆既可利用其侧壁的摩阻力及其与周边土的黏附力抵抗浮力,又可通过扩体段端部阻力抵抗浮力。扩体锚杆锚固力主要由端头承压面积决定。随着扩体直径的增大,锚固力的提升效果远大于增加锚固长度带来的效果。

2.2 抗浮扩体锚杆制作

玄武岩纤维增强塑料是一种由环氧树脂与玄武岩纤维复合而成的新型无机非金属材料,具有高强度、高绝缘性、耐腐蚀性和价格低廉的特点,可用于制备锚杆^[14-15]。为评估该抗浮扩体锚杆极限承载力和施工质量,对锚固件进行原位拉拔试验。参照 JG/T 406—2013《土木工程用玻璃纤维增强筋》,以 35kN/min 为加载速率,记录管夹起始间距,并在估计荷载为 20% 时测量管夹首次间距,记录对应荷载值。在试验过程中,将玄武岩纤维增强塑料锚杆的杆体折断或将其从钢管内拔出后,试验即终止。

常规抗拉式锚杆通过锚杆与土体间的摩擦提供承载力,其承载性能主要取决于扩体锚固段的侧摩阻力和土体对其端部的正压力^[16]。针对抗浮扩底锚固桩承载力,采用 Meyerhof-Adams 法进行计算^[17]。高层民用建筑地下室抗浮锚杆体系受力分析如图 3 所示。

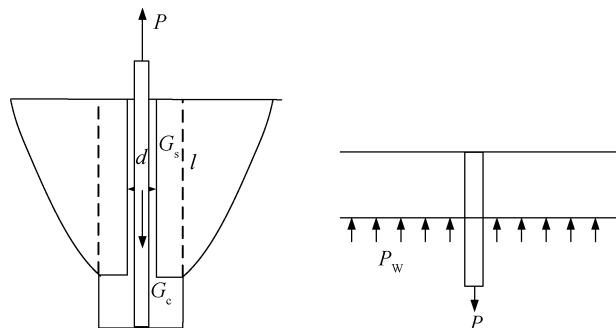


图 3 地下室抗浮扩体锚杆体系受力分析

Fig. 3 Stress analysis of anti-floating expanding anchor rod system in basement

由图 3 可知,混凝土底板承受向上浮力,并将浮力转移至锚固在其上的玄武岩纤维增强塑料锚杆。但由于玄武岩纤维增强塑料锚杆采用先注浆后锚固工艺,实际工程中,浮力最终被泥浆与土壁间的摩擦力及端头承载力抵消。研究采用 Meyerhof-

Adams 理论,推导抗浮扩体锚杆极限抗拔承载力 P 如式(1)所示。

$$P = P_w S = G_s + G_c + \pi d n l + \frac{\pi}{2} \eta d \mu l^2 k \tan \varphi \quad (1)$$

式中: P_w 为水浮力; S 为混凝土底板面积; G_s 为一定高度圆柱体内包含的土体有效自重; G_c 为锚杆体有效自重; d 为扩大头直径; n 为土黏聚力; l 为锚杆长度; η 为决定圆柱体侧面被动土压力大小的形状系数; μ 为土体有效重度; k 为竖直破坏面上桩的上拔系数; φ 为土体内摩擦角。

锚杆长度为 1 650mm,在开槽、埋好光纤串、用环氧树脂对其进行密封保护并锚固 48h 后,待环氧树脂固化成型,将 $\phi 250$ 长 350mm PVC 管插入中间,浇筑水泥砂浆,待水泥浆固化成型后,将 750mm 长锚固件置于 $\phi 75$ 长 750mm PVC 管内,浇筑水泥砂浆。水泥砂浆采用 P·C 32.5R 普通硅酸盐水泥,选用粒径为 3mm 左右的中砂作为骨料,拌合水选用纯净水,并加入少许早强剂,水砂比为 0.55:1,砂灰比为 1:1.1。待砂浆强度达到标准后,拆除模具,在砂浆中凿出 1 条缝隙,在每个锚固件上设置 6 条光纤光栅,其中钻孔砂浆上布置 3 点串联式光纤光栅,间距 260mm,扩体砂浆上布置 3 点串联式光纤光栅,间距为 100mm,位置逐一对应,然后养护约 1 个月。

玄武岩纤维增强塑料锚杆是一种具有良好耐腐蚀性的新型锚杆,若要替代现有钢锚杆,还需对该锚固体系的可靠性与安全性进行检验,试验装置如图 4 所示。试验装置包括土压力盒、装置外壳、支持架、锚固件、夹具和液压加载控制系统。土压力盒是用于测定施加于拉拔筒筒帽上压力值的一种设备。为便于穿心千斤顶施力,配套相应锚具、锚套。由于不能进行水压加载,所以采用拉出桶帽、在垂直方向上限制土位移的方法模拟水压。

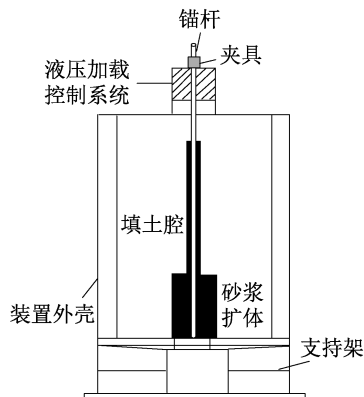


图 4 拉拔桶试验设计

Fig. 4 Testing design of pulling bucket

2.3 高层民用建筑地下室抗浮锚固方案设计

在进行锚孔钻探时,需架设钢木($\phi 50$ 钢管、型钢)脚手架,并按斜坡上的测量孔位精确安装和固定钻机,同时还要对场地进行仔细调试,保证锚孔开钻就位的纵横误差在 $\pm 50\text{mm}$,高程误差在 $\pm 100\text{mm}$,而钻孔倾角和方向要按设计要求,倾斜度偏差在 $\pm 1.0^\circ$,方位偏差应在允许范围内。

为保证锚固工程顺利进行,锚孔钻进应采用无水干钻,禁止使用水冲钻进。这种方法既能避免影响边坡的岩土工程性质,又能保证孔壁稳定性。施工中应根据钻具特性和岩层特点严格控制钻进速率,防止钻孔偏斜或孔径变化导致下锚困难或其他施工问题。

锚杆设计拉力为 460kN ,材料为 $\phi 32$ 精轧螺纹钢。钻孔孔径为 120mm ,在安装锚杆前,钢筋必须平整,并经过清理油污、除锈等工序。根据设计要求对锚杆进行防腐和隔离,在锚固件上涂有防腐油脂,外套 HDPE 或 PP 塑料管,并在孔壁间注入泥浆。

灌浆材料以水泥浆为主,配浆过程中严格按实验室配合比施工,监理工程师对灌浆原材料进行全过程监测,并检测原始灌浆材料,锚固段及张拉段灌浆压力 $\geq 2.5\text{MPa}$,浆液强度 $\geq 30\text{MPa}$,聚丙烯腈纤维掺入量为 $1.8\sim 2.0\text{kg}/\text{m}^3$ 。

3 结果分析

3.1 抗浮扩体锚杆力学性能分析

根据工程需求,研究选取了 3 根锚杆进行抗拔试验,参数如表 1 所示。该项目玄武岩纤维增强塑料锚杆项目所检测的 3 根高强度扩体锚杆抗拔承载力极限值由锚杆受力钢筋强度控制,均 $\geq 986.4\text{kN}$ 。

表 1 玄武岩纤维增强塑料锚杆设计及验收参数

Table 1 Design and acceptance parameters of basalt fiber reinforced plastic anchor rod

参数	锚杆编号		
	1	2	3
锚固段长度/m	8	8	8
锚杆长度/m	10	10	10
灌浆压力/MPa	≤ 4	≤ 4	≤ 4
锚杆抗拔力设计值/kN	480	480	480
锚杆抗拔力极限值/kN	≥ 960	≥ 960	≥ 960
最大加载值/kN	986.4	986.4	986.4
杆体直径/mm	32	32	32
试验最大锚头位移/mm	104.63	108.26	99.82
实测锚杆抗拔承载力极限值/kN	986.4	986.4	986.4

抗浮扩体锚杆剪应力随深度和荷载分布曲线如图 5 所示。由图 5a 可知,沿锚杆轴线方向,剪应力分布呈双峰特征。初始峰值点位于距离加载端 62mm 处,次峰值点则位于距离加载端 885mm 处的

扩体中心区域。随着荷载增大,剪应力逐渐增大,当荷载达 55kN 时,剪应力最大达 3.6MPa 。而当深度为 $200\sim 600\text{mm}$ 时,在 $5\sim 55\text{kN}$ 荷载下锚杆剪应力始终 $< 0.05\text{MPa}$ 。当荷载 $\leq 15\text{kN}$ 时,整个锚杆剪应力均 $< 1.00\text{MPa}$ 。由图 5b 可知,当荷载 $\leq 20\text{kN}$ 时,整个锚杆剪应力 $< 1.00\text{MPa}$ 。当荷载 $> 30\text{kN}$ 后,距离加载端 62mm 处剪应力未显著增大,产生了应力平台效应,这种现象可能源于近地表土体的约束失效机制,表层土对锚固砂浆的约束效果显著降低,从而抑制了剪应力的持续增大。

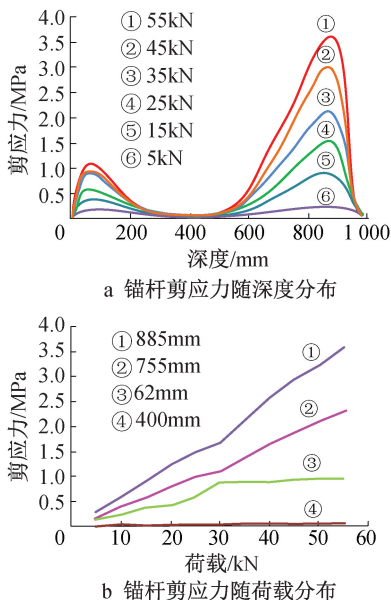


图 5 锚杆剪应力分布

Fig. 5 Distribution of shear stress for anchor rod

由于竖向土压力较小,在测试过程中使用了大量程电阻应变式土压力盒和量程为 0.7MPa 的土压力盒,以确保测量精度。1,2号光纤光栅式土压力盒埋设于锚杆端部,距锚杆中心 80mm 。在整个加载周期内,土压力如图 6a 所示,由图 6a 可看出,土压力 $< 1\text{MPa}$,且随着荷载增加而增大,而 1,2号土压力盒测试结果间的差异为 0.1MPa 左右,这可能是由于两边土的压实程度不同。锚杆端部位移如图 6b 所示,在初始荷载作用下,锚杆端部位移发生了显著变化,其原因在于混凝土与盖板间有一定厚度的疏松土层,其压实过程中需一定时间与荷载作用,且锚具、锚套间有一定的相对滑移。在 55kN 荷载作用下,该锚固系统的变形不断增大,最终发生剪切破坏,而土体不能为抗浮扩体锚杆提供足够的反作用力。

3.2 工程检测结果分析

在相同的地基抗浮构件和地基形式条件下,对其进行工艺优化,以等效总抗浮力为标准,对承载

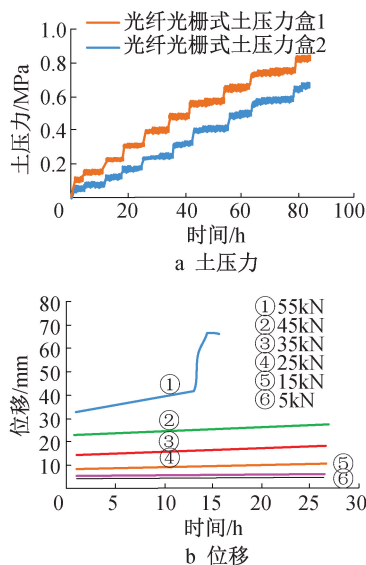


图 6 锚杆端部土压力及位移分析

Fig. 6 Analysis of earth pressure and displacement at the end of the anchor rod head

力较低的常规抗浮锚杆与玄武岩纤维增强塑料锚杆进行技术经济性比较,如表 2 所示。与一般的抗浮锚杆相比,玄武岩纤维增强塑料锚杆设计长度为 16.5m,承载力为 460kN,比常规抗浮锚杆大 210kN。单个常规抗浮锚杆使用成本为 220 元/m,玄武岩纤维增强塑料锚杆使用成本为 200 元/m,同比降低了 20 元/m。在整个抗浮工程中,常规抗浮锚杆需投资 599.28 万元,而玄武岩纤维增强塑料锚杆只需投资 373.56 万元,降低了 225.72 万元成本。

表 2 锚杆成本对比

Table 2 Comparison of bolt costs

类型	常规抗浮锚杆	玄武岩纤维增强塑料锚杆
设计长度/m	20	16.5
承载力/kN	250	460
总抗浮力/kN	364 000	456 200
安全度		456 200>364 000
数量/根	1 362	1 132
总长度/m	27 240	18 678
单价/(元·m ⁻¹)	220	200
合计/万元	599.28	373.56
降低成本/万元		225.72

根据工程需求,随机选取 1 根抗浮扩体锚杆进行抗拔试验,锚杆受力特性如图 7 所示。由图 7 可知,在 $\leq 50\%$ 极限荷载作用下,抗浮扩体锚杆荷载-位移曲线呈线性变化,且有较强弹性;在 $> 50\%$ 且 $\leq 70\%$ 极限荷载作用下,抗浮扩体锚杆荷载-位移曲线呈现非线性发展趋势,即在此过程中,弹性变形斜率有所改变,而塑性变形则快速增大;在 $> 70\%$ 极限荷载作用下,抗浮扩体锚杆结构弹性变形增

大,并有较大塑性变形,锚杆总位移增大,抗浮扩体锚杆荷载-位移曲线具有显著的非线性特点。

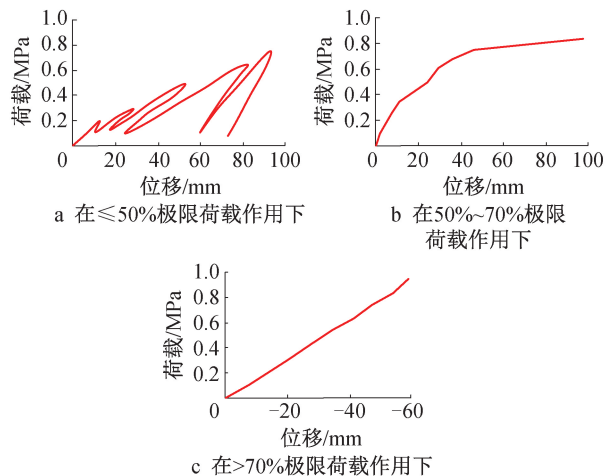


图 7 抗浮扩体锚杆力学曲线

Fig. 7 Mechanical curves of anti-floating expanding anchor rod

4 结语

在分析抗浮扩体锚杆作用机理的基础上,研究通过向锚杆筋体浇筑砂浆制备玄武岩纤维扩体锚杆,并分析其破坏形式及剪切破坏机理,最终与常规抗浮锚杆的经济性进行比较。结果表明,加载达 35kN 后,0.75m 深度处的剪应力基本保持不变,主要原因是表层土对锚固砂浆的约束效果显著降低,同时桩身端部产生环向裂纹。单个常规抗浮锚杆使用成本为 220 元/m,玄武岩纤维增强塑料锚杆使用成本为 200 元/m,同比降低了 20 元/m,且安全性显著增加。在 $\leq 50\%$ 极限荷载作用下,锚杆荷载-位移曲线基本呈线性变化,在弹性变形部位有较强的线性特征;在 50%~70% 极限荷载作用下,锚杆荷载-位移曲线出现了一种非线性发展趋势。本抗浮扩体锚杆施工技术具有工期短、质量可靠、环境影响小等优点,经济效益和社会效益显著,适用于地下室埋深较大、地下水位较高且软土分布广泛的地区。但研究仅局限于单一条件下的受力分析,其在抗浮工程中的应用还需进一步考虑多因素作用下的受力特性。

参考文献:

- [1] 党昱敬,程少振,柳勇. 承压型囊式扩体锚杆在抗浮工程中的锚固设计[J]. 建筑科学, 2023, 39(7):160-167.
DANG Y J, CHENG S Z, LIU Y. Anchoring design of pressure-bearing bladder-type expanded anchor rod in anti-floating engineering[J]. Building science, 2023, 39(7):160-167.
- [2] 高丽丽,李玉龙. 扩体锚杆在地下车库抗浮加固工程中的应用[J]. 施工技术, 2020, 49(3):49-53,66.
GAO L L, LI Y L. Application of expansion bolt in anti-floating

- reinforcement engineering of underground garage [J]. Construction technology, 2020, 49(3):49-53,66.
- [3] SAKR M, NAZIR A, AZZAM W, et al. Group efficiency of tension double under-reamed piles in sand [J]. Indian geotechnical journal, 2023, 53(1):11-28.
- [4] 夏亮, 张明山, 李本悦, 等. 高层建筑地下室的抗浮设计方案研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(8):83-89.
XIA L, ZHANG M S, LI B Y, et al. Research on anti-floating design scheme of basement of high-rise building [J]. Building structure, 2021, 51(8):83-89.
- [5] 唐延贵, 岳大昌, 朱维新. 膨胀土地层扩体锚杆施工工艺及拉拔试验[J]. 岩土工程技术, 2022, 36(6):511-515.
TANG Y G, YUE D C, ZHU W X. Construction technology and pull-out test of under reamed anchor in expansive soil [J]. Geotechnical engineering technique, 2022, 36(6):511-515.
- [6] LIU Y, XIA K, WANG B, et al. Experimental investigation on the anchorage performance of a tension-compression-dispersed composite anti-floating anchor [J]. Applied sciences, 2023, 13(21):12016.
- [7] YANG X, JIA S, WEN C, et al. Anchoring mechanism and bearing characteristics of the inflatable controlled anchor [J]. Geotechnical and geological engineering, 2020, 38(3):2523-2537.
- [8] 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 Z K, BAI X Y, SUN G, et al. Field test of anchorage performance of BFRP anti-floating anchor under multiple cyclic loads [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2024, 43(9):2314-2328.
- [9] 冯君, 赖冰, 张圣亮, 等. 玄武岩纤维增强锚杆加固混合土室内拉拔试验研究 [J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(6):1193-1200.
FENG J, LAI B, ZHANG S L, et al. Laboratory pull-out test study of basalt fiber reinforced polymer bolt for strengthening mixed soil [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(6):1193-1200.
- [10] 党昱敬, 程少振. 承压型囊式扩体锚杆在建筑物抗浮工程中的应用 [J]. 施工技术, 2020, 49(19):1-6,39.
DANG Y J, CHENG S Z. Application of pressure-bearing bladder expansion anchor in anti-floating engineering of buildings [J]. Construction technology, 2020, 49(19):1-6,39.
- [11] YAN N, LIU X, ZHANG M, et al. Analytical calculation of critical anchoring length of steel bar and GFRP anti-floating anchors in rock foundation [J]. Mathematical problems in engineering, 2021, 2021(1):1-10.
- [12] 聂俊, 甘来. 带主楼地下室抗浮锚杆变刚度设计 [J]. 建筑技术, 2023, 54(3):288-291.
NIE J, GAN L. Design of variable stiffness of anti-floating anchor bolt in basement with main building [J]. Architecture technology, 2023, 54(3):288-291.
- [13] BAI X, ZHAO X, YAN N, et al. Field test of GFRP bar anti-floating anchor slurry-rock interface bonding performance [J]. Composite structures, 2024, 331(4):1-14.
- [14] 屈凯. 囊式扩体抗浮锚杆在某污水处理厂工程中的应用 [J]. 给水排水, 2020, 46(8):47-51.
QU K. Application of capsule type underreamed anti-floating anchor in a wastewater treatment plant project [J]. Water & wastewater engineering, 2020, 46(8):47-51.
- [15] 任向鑫, 刘玮娟, 谷少康, 等. 抗浮设计常见问题及抗浮锚杆应用分析 [J]. 工业建筑, 2023, 53(1):477-480.
REN X X, LIU W J, GU S K, et al. Common problems in anti-floating design and application analysis of anti-floating anchor [J]. Industrial building, 2023, 53(1):477-480.
- [16] 王凤姣, 白晓宇, 张云光, 等. 不同材质抗浮锚杆与基础底板的黏结强度试验研究 [J]. 材料导报, 2023, 37(22):273-280.
WANG F J, BAI X Y, ZHANG Y G, et al. Experimental study on bond strength of foundation slabs and anti-floating anchors with different materials [J]. Materials reports, 2023, 37(22):273-280.
- [17] 徐洪涛, 余术刚. 某金融中心项目地下车库高压喷射扩大头锚杆抗浮设计 [J]. 结构工程师, 2023, 39(3):203-210.
XU H T, YU S G. Anti-floating design of underreamed anchor by jet grouting for underground garage of a financial center project [J]. Structural engineers, 2023, 39(3):203-210.