

## 抗浮锚杆极限荷载现场试验及抗拔承载力预测

苏杭<sup>1</sup>, 孙淦<sup>1</sup>, 陈建强<sup>1</sup>, 白晓宇<sup>1,\*</sup>, 包希吉<sup>2</sup>, 孙培富<sup>3</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 中建八局第二建设有限公司, 济南 250014;

3. 青岛中建联合集团有限公司, 青岛 266100)

**摘要:** 基于青岛某工程抗浮锚杆的极限承载力现场拉拔试验, 对抗浮锚杆荷载-位移规律进行分析, 明确“一锚多筋”型抗浮锚杆破坏形式、破坏机理, 同时, 采用三次多项式函数预测极限上拔位移下抗浮锚杆的抗拔承载力。研究表明: 锚杆的荷载-位移曲线呈“缓变-陡升”型; 锚-岩界面黏结强度较小, 抗浮锚杆主要产生锚固体拔出破坏; 规范公式预测值存在较大偏差。通过三次多项式函数的回归分析, 杆体位移的误差控制在 10% 以内, 且锚杆杆体位移小于 20 mm 时, 预测精度最高可达 97.4%。研究结果对该地层抗浮锚杆的设计与工程应用具有一定的参考价值。

**关键词:** 抗浮锚杆; 现场拉拔试验; 荷载-位移模型; 承载力预测

**中图分类号:** TU473 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)02-0043-07

## Field test on the ultimate load of anti-floating anchor and the prediction of its pull-out bearing capacity

SU Hang<sup>1</sup>, SUN Gan<sup>1</sup>, CHEN Jianqiang<sup>1</sup>, BAI Xiaoyu<sup>1,\*</sup>, BAO Xiji<sup>2</sup>, SUN Peifu<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. The Second Construction Limited Company of China Construction Eighth Engineering Division, Jinan 250014, China;

3. Qingdao Zhongjian United Group Co. Ltd., Qingdao 266100, China)

**Abstract:** Based on the field pull-out test on the ultimate bearing capacity of anti-floating anchor of a project in Qingdao, the load-displacement law of anti-floating anchor was analyzed, and the failure form and mechanism of anti-floating anchor of “one anchor and multi-reinforcement” type were defined. At the same time, cubic polynomial function was used to predict the uplift bearing capacity of anti-floating anchor under ultimate uplift displacement. The research showed that the load-displacement curve of anchor presents a “slow change-steep rise” pattern, the interfacial bond strength between anchor and rock was small, and the anti-floating anchor mainly produced pull-out failure of anchor solids. There were large deviations from the predicted values of the standard formulas. Through regression analysis of cubic polynomial function, the error of anchor displacement was controlled within 10%, and when the anchor position displacement was less than 20 mm, the forecast accuracy could reach 97.4%. The research results have a certain reference value for the design and engineer-

收稿日期: 2023-04-19

基金项目: 山东省自然科学基金重点项目 (ZR2020KE009)

作者简介: 苏杭 (1998-), 男, 山东枣庄人。硕士, 研究方向为地基基础及城市地下工程。E-mail: 1776890823@qq.com。

\* 通信作者: 白晓宇 (1984-), 男, 内蒙古呼和浩特人。博士, 教授, 主要从事地基基础及城市地下工程方面的研究。

E-mail: baixiaoyu538@163.com。

ing application of the anti-floating anchor in this formation.

**Key words:** anti-floating anchor; field pull-out test; load-displacement model; prediction of bearing capacity

随着建筑基础埋深的逐渐增加,结构抗浮问题日渐突出。抗浮锚杆作为地下结构抗浮的一种有效技术措施,因其单点应力小、结构应力分布合理、施工方便、工期短、成本低在国内外得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。但抗浮锚杆设计参数受岩土层性质与种类影响较大,工程中缺乏合理的设计依据,容易出现抗浮锚杆设计过长,直径过大,无法充分发挥锚筋的抗拔能力等现象,造成材料浪费。

抗浮锚杆的承载力作为结构抗浮的关键因素之一,备受工程人员的关注,许多学者对抗浮锚杆的极限抗拔承载力开展研究。HANSOR<sup>[3]</sup>和GOTO<sup>[4]</sup>在试验研究的基础上,认为钢筋锚杆的表面形状对其承载力有一定影响。贾金青等<sup>[5]</sup>通过锚杆的破坏性试验,发现试验加载至极限荷载时剪应力沿锚杆长度变化缓慢,得出增加锚杆长度并不能无限提高其承载力的结论。孙涛等<sup>[6]</sup>基于锚杆抗拔承载力试验,阐明了界面黏结对锚杆抗拔承载力的影响,并提出两种可显著提高锚杆黏结强度标准值的施工方法。李伟伟等<sup>[7]</sup>通过对钢筋锚杆和GFRP锚杆的现场拉拔试验得出结论,认为GFRP锚杆抗拔承载力可以达到钢筋锚杆的水平。白晓宇等<sup>[8]</sup>对比4种抗浮锚杆承载力的函数预测模型,结合现场试验数据,发现指-幂函数模型对GFRP锚杆极限承载力预测效果更好。亦有一些学者从理论分析的角度研究锚杆承载能力,孙长帅等<sup>[9]</sup>利用单根锚桩计算模型,推导出考虑岩体质量系数的抗拔承载力计算公式,并通过实例验证了公式的精度。魏新江等<sup>[10]</sup>针对锚杆-浆体、浆体-岩土体界面强度,提出了不同的抗拔承载力公式,并给出两种公式的适用范围及取值依据。郑全明<sup>[11]</sup>在变位-剪应力理论的支撑下,确定拉力型锚杆在不同土层中最大极限承载力的确定方法。潘殿琦等<sup>[12]</sup>分析土层锚杆承载力影响因素,在考虑地层的渗透性、注浆压力和成孔方法的前提下,对锚杆抗拔力的计算公式进行修正。

近年来,工程中抗浮锚杆型式也逐渐多样化,“一锚多筋”(一个锚孔中放置多根锚筋)的抗浮锚杆开始推广并使用。因此,针对单根锚筋抗浮锚杆的研究理论不能完全适用于工程。本文结合青岛地区某工程的4根抗浮锚杆现场拉拔试验,研究“一锚多筋”型抗浮锚杆的极限承载力,分析其破坏模式及原因,探讨锚杆杆体的荷载-位移变化规律,并利用三次多项式回归预测锚杆杆体的位移,为同类型锚杆的理论分析和工程应用提供参考。

## 1 试验方案

### 1.1 工程地质概况

试验场地位于青岛某在建建筑的基坑工程。场地地层分布较稳定,层序较清晰,试验锚杆全长位于上覆土层中,锚杆端部进入第⑦层粗砾砂不小于3.0 m,各岩土层力学参数如表1所示。

表1 各岩土层物理力学参数

层号	岩性	平均厚度 $d/m$	黏聚力 $c/kPa$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	锚-岩界面极限黏聚力标准值 $q_{sk}/kPa$
①	耕土	0.65	—	—	16
②	淤泥质粉质黏土	0.80	3.31	3.17	18
③	中砂	1.28	0	20.00	60
④	粉质黏土	4.49	29.52	13.09	55
⑤	中粗砂	4.73	0	25.00	150
⑥	粉质黏土	2.38	25.85	13.00	70
⑦	粗砾砂	5.77	0	30.00	200
⑧	强风化泥岩	2.23	0	35.00	180
⑨	中风化泥岩	—	0	40.00	300

注:“—”表示该土层某物理力学参数未能测出。

## 1.2 试验装置及材料

本次试验采用锚梁反力装置法,试验测试装置包括:刚性承压板、穿心千斤顶、锚具和锚口、手动油压泵等,使用位移百分表测读试验过程中的锚杆锚头位移,试验装置布置见图1。本次试验在同一场区进行抗浮锚杆现场拉拔试验,试验锚杆共4根,编号为KFMG25-01—KFMG25-04,采用Ⅲ级螺纹钢进行配筋,抗拉强度设计值为 $360\text{ N/mm}^2$ 。试验锚杆长度为 $11\ 000\text{ mm}$ ,锚固体直径为 $160\text{ mm}$ ,配筋均为 $3\Phi 25$ ,锚固段长度为 $9\ 000\text{ mm}$ 。注浆材料选用M30水泥砂浆,注浆完成制备标准砂浆试样,同等条件养护 $28\text{ d}$ ,随后检测得到砂浆的平均抗压强度为 $34.1\text{ MPa}$ 。

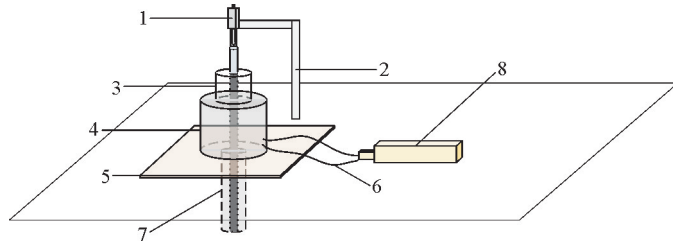


图1 抗浮锚杆试验加载装置

1—位移百分表;2—支架和横梁;3—锚具和锚口;4—穿心千斤顶;5—刚性承压板;6—高压油管;7—锚杆;8—手动油压泵

## 1.3 试验过程

试验开始前,依次进行钻孔、杆体制作、放置锚杆和注浆工作,其中钻孔深度较杆体长度深 $0.5\text{ m}$ 。待砂浆养护 $28\text{ d}$ 达到试验标准后,进行抗浮锚杆的现场拉拔试验。

按照图1所示自下而上进行试验加载装置安装。其中,锚具和锚口、穿心千斤顶、刚性承压板轴心与锚固体轴心在一条直线上,位移百分表固定在支架上,一端与待测锚杆接触,使用手动油压泵进行加载。试验荷载分为8个等级,以每级 $65\text{ kN}$ 逐级匀速加载,每级持荷不低于 $15\text{ min}$ ,每级荷载施加完毕后,及时读取并记录百分表的读数,读数间隔为 $5\text{ min}$ ,具体按照《建筑工程抗浮技术标准》(JGJ 476—2019)<sup>[13]</sup>的要求进行加载。

## 2 试验结果与分析

荷载-位移曲线( $Q-s$ 曲线)可以宏观地反应抗浮锚杆的荷载传递规律,一定程度上体现抗浮锚杆体系的承载特性,试验锚杆的 $Q-s$ 曲线如图2所示。抗浮锚杆的试验现象及具体结果如表2所示。

由图2可见,试验锚杆KFMG25-01—KFMG25-03的 $Q-s$ 曲线整体呈“缓变-陡升”型,在 $455\text{ kN}$ 处存在明显拐点,且后一极荷载产生的锚头位移增量是本级荷载的5倍以上,可判定这3根试验锚杆的极限抗拔承载力均为 $455\text{ kN}$ 。当荷载小于拐点值时,锚杆杆体位移与荷载量正相关,且位移增长速率几乎不变;当荷载超过拐点值后,杆体位移迅速增加,锚杆发生破坏。

表2所示试验锚杆KFMG25-01—KFMG25-03均发生锚固体拔出破坏。从界面黏结强度角度进行分析,本次试验锚杆采用“一锚多筋”的锚杆形式,锚杆配筋量较大,达到最大加载量时未出现材料屈服现象;结合文献[14]试验数据分析,锚杆-锚固体界面(杆-锚界面)平均黏结强度远大于

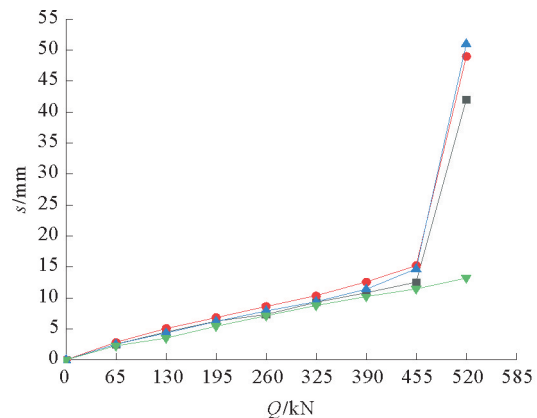


图2  $Q-s$ 曲线

—■— KFMG25-01; —●— KFMG25-02;  
—▲— KFMG25-03; —▼— KFMG25-04

锚固体-岩土体界面(锚-岩界面)平均黏结强度,因此,在加载初期,锚杆-锚固体界面出现微小裂缝,锚杆位移缓慢增加,当荷载达到最大加载量时,锚固体-岩土体界面发生破坏,表现为锚固体拔出破坏,反映在荷载-位移曲线里对应的阶段为陡升阶段。

表2 抗浮锚杆抗拔试验结果

锚杆编号	锚固段长度/mm	最大加载/kN	锚杆杆体上拔量/mm	破坏现象
KFMG25-01	9000	520	42.00	锚固体拔出
KFMG25-02	9000	520	49.00	锚固体拔出
KFMG25-03	9000	520	51.00	锚固体拔出
KFMG25-04	9000	520	13.22	未破坏

试验锚杆 KFMG25-04 在加载至最大荷载后并未发生破坏,且杆体位移量相对较小,其极限抗拔承载力大于 520 kN。针对此现象进行分析,发现锚杆 KFMG25-04 所处的岩土层情况与其余试验锚杆存在较大差异,锚杆 KFMG25-04 的端部进入粗砾砂层 5.3 m,而其余试验锚杆仅有 3 m 进入粗砾砂层,由表 1 可以发现,粗砾砂层极限黏聚力标准值明显大于其他土层,锚-岩界面具有更高的黏结强度,最终使得锚杆 KFMG25-04 具有更高的抗拔承载力。因此,工程中需要对土层分布情况予以重视。

目前相关规范并未对抗浮锚杆的上拔位移作出明确规定。陈根全<sup>[15]</sup>建议抗浮锚杆的极限抗拔承载力可取上拔位移 10~20 mm 所对应的荷载;刘国民<sup>[16]</sup>根据抗浮岩石锚杆现场抗拔试验,认为抗浮锚杆的极限承载力取值标准为抗浮锚杆位移量 5~10 mm 时对应的荷载;王小卫<sup>[17]</sup>认为抗浮锚杆位移设计允许值取不低于 10 mm 是安全的。由图 2 可得,试验锚杆 KFMG25-01—KFMG25-04 到达极限抗拔承载力时的位移分别为 12.52、15.24、14.67 和 13.22 mm。根据本文抗浮锚杆拉拔试验的结果,认为“一锚多筋”型抗浮锚杆的极限上拔量取值范围为 15~20 mm。

### 3 极限承载力预测

#### 3.1 规范公式法

现阶段针对抗浮锚杆承载力的计算方法主要有两类:一种是基于极限平衡理论的计算方法;另一种是基于锚固体系杆-锚界面与锚-岩界面共同变形的计算方法。规范中大多采用基于极限平衡理论的计算方法对抗浮锚杆的极限抗拔承载力进行预测。依据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)<sup>[18]</sup>、《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)<sup>[19]</sup>的相关规定:抗浮锚杆的极限抗拔承载力可按式(1)估算。表 3 为本次试验锚杆采用规范法进行的承载力预测与误差分析。

$$R_k = \pi d \sum q_{sik} l_i \quad (1)$$

式中: $R_k$  为抗浮锚杆的极限抗拔承载力; $d$  为锚固体直径; $q_{sik}$  为锚固体与第  $i$  层岩土体的极限摩阻力标准值; $l_i$  为锚杆的锚固段在第  $i$  层土中的长度。

表3 规范法预测分析结果

锚杆编号	极限抗拔承载力实测值/kN	极限抗拔承载力预测值/kN	预测精度/%
KFMG25-01	455	916.7	49.6
KFMG25-02	455	916.7	49.6
KFMG25-03	455	916.7	49.6
KFMG25-04	520	1147.8	45.3

由表 3 可知,规范公式法计算所得极限抗拔承载力偏大,与实测值相差甚远,结合文献[8]的试验结果分析得:抗浮锚杆在外荷载的作用下,锚杆剪应力沿锚固长度不均匀分布,呈上大下小的趋势,而锚杆底端

剪应力接近于零,而规范公式则是假定锚杆全长都进入极限状态,与实际锚杆剪应力分布情况相差较大,并且抗浮锚杆体系中杆-锚界面、锚-岩界面的承载机理存在复杂的耦合关系。因此,不能以单一分析某一界面的极限状态来判定整个体系的极限承载力。

### 3.2 三次多项式拟合分析

实际工程中,针对抗浮锚杆的验收试验较多,鲜有抗浮锚杆的破坏性试验,因此很难对抗浮锚杆极限承载力做出合理预测。推导出科学合理、精度较高的抗浮锚杆荷载-位移曲线模型,为预测抗浮锚杆极限承载力提供有力工具,具有深刻的意义。

由于本次试验所得的  $Q-s$  曲线“陡升”阶段位移变化过大,给曲线拟合带来不便,故忽略最后一级荷载对应的位移数据。根据图 2 所示试验锚杆 KFMG25-01—KFMG25-03 的  $Q-s$  曲线,对 3 组试验数据采用三次多项式模型进行拟合,得出极限抗拔承载力预测模型,如图 3、式(2)所示,其承载力预测平均精度超过 94%,具体预测结果见表 4。

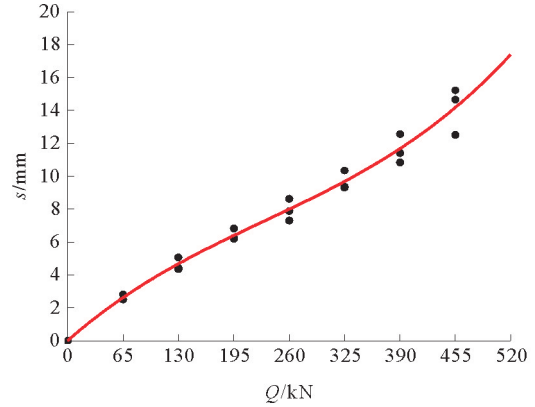


图 3 极限承载力预测模型

• 实测值; — 预测曲线

$$s = 1.2914 \times 10^{-7} Q^3 - 9.0364 \times 10^{-5} Q^2 + 0.0454 Q \quad (2)$$

式中: $Q$  为试验锚杆承载力预测值, kN;  $s$  为抗浮锚杆的上拔位移, mm, 可通过现场试验测得。

表 4 极限抗拔承载力预测结果

锚杆编号	极限抗拔承载力实测值/kN	极限抗拔承载力预测值/kN	预测精度/%
KFMG25-01	455	415	91.2
KFMG25-02	455	479	95.0
KFMG25-03	455	467	97.4

由图 3、表 4 可知,预测模型曲线基本反映了试验锚杆从加载到破坏过程中位移随荷载的变化情况, KFMG25-01—KFMG25-03 预测精度全部超过 90%, 预测效果较好, 总体来看, 三次多项式模型基本能实现对本次试验锚杆极限抗拔承载力的预测。

### 3.3 工程实例验证

案例 1: 根据本项目同一块场地, 对 3 $\Phi$ 28 的抗浮锚杆进行抗拔试验, 以其中 KFMG28-05、KFMG28-06 为例进行验证, 如图 4 所示。

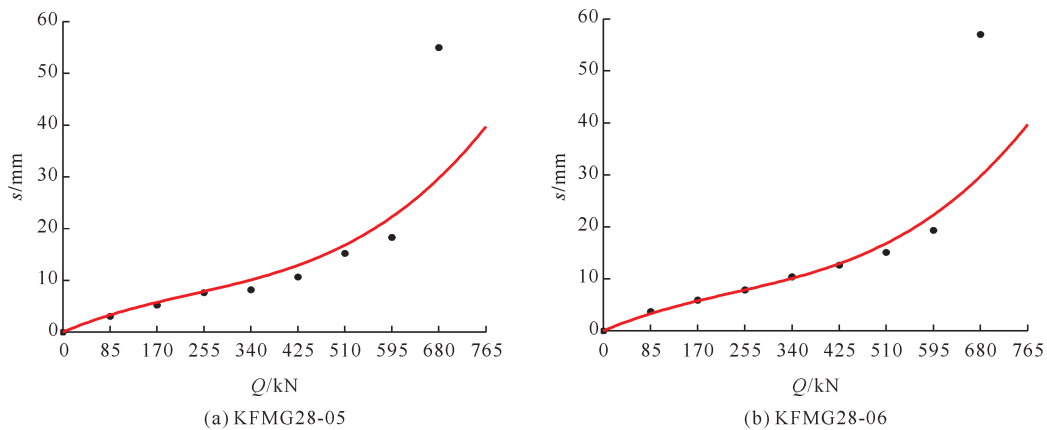


图 4 案例 1 中抗浮锚杆极限承载力预测

• 实测值; — 预测曲线

案例2:根据文献[20],对3 $\Phi$ 32的全长黏结式抗浮锚杆进行抗拔承载力研究,以其中3号、4号为例进行验证,如图5所示。

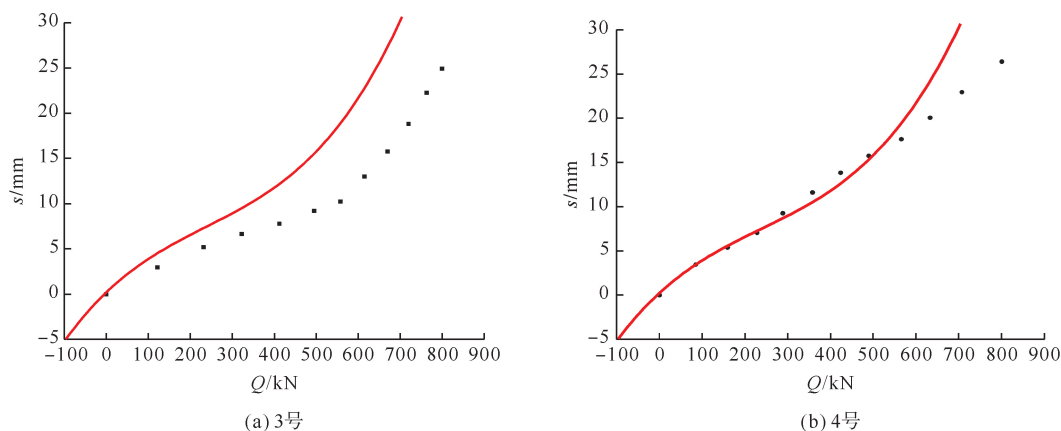


图5 案例2中抗浮锚杆极限承载力预测

■ 实测值; — 预测曲线

以上2个案例实测数据与采用式(2)进行极限抗拔承载力预测的计算结果见表5。可以看出,当锚头位移小于20 mm时,预测精度最大可达92.9%,预测效果较理想;当锚头位移大于20 mm时,平均预测精度为79.7%,预测效果不佳,需对预测模型做进一步优化。

表5 极限抗拔承载力预测分析

锚杆编号	锚头位移/mm	预测值/kN	实测值/kN	预测精度/%
KFMG28-05	18.34	537	595	90.3
KFMG28-06	19.34	553	595	92.9
3号 <sup>[20]</sup>	24.91	628	800	78.5
4号 <sup>[20]</sup>	26.44	646	800	80.8

## 4 结论

1) 在竖向拉拔荷载作用下,试验锚杆KFMG25-01—KFMG25-03发生锚固体拔出破坏,而KFMG25-04未发生破坏,分析认为是地层差异导致,其中土层的极限黏聚力标准值是影响抗浮锚杆极限承载力的关键。

2) 基于4根抗浮锚杆的现场拉拔试验,分析了抗浮锚杆的荷载-位移变化规律。抗浮锚杆破坏时,荷载-位移曲线存在明显拐点,当加载量小于拐点荷载值时,杆体位移随荷载匀速增加;当加载量超过拐点荷载值后,杆体位移迅速增加,随后抗浮锚杆发生破坏。

3) 基于三次多项式回归的方法,对抗浮锚杆的极限承载力进行预测,预测精度最高达到97.4%。利用实际案例验证预测方法的精度,发现当抗浮锚杆杆体位移小于20 mm时,预测结果较为精准,因此在岩土层相似的基坑工程施工过程中,可采用本文的极限抗拔承载力预测模型进行抗浮锚杆承载力预测,该模型为“一锚多筋”型抗浮锚杆的工程应用提供了参考依据。

### 参考文献(References):

- [1] 张明义,张健,刘俊伟,等. 中风化花岗岩中抗浮锚杆的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(S1):2741-2746.  
ZHANG Mingyi,ZHANG Jian,LIU Junwei,et al. Experimental investigation on anti-floating anchors in moderately weathered granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(S1):2741-2746.
- [2] 孙凌军. 抗浮锚杆防水施工工艺[J]. 青岛理工大学学报,2015,36(1):131-134.  
SUN Lingjun. Waterproofing technology of anti-floating anchor rod in construction[J]. Journal of Qingdao Technological University,

- 2015,36(1):131-134.
- [3] HANSOR N W. Influence of surface roughness of prestressing strand on bond performance[J]. Journal of the Prestressed Concrete Institute,1969,14(1):32-45.
- [4] GOTO Y. Cracks formed in concrete around deformed tension bars[J]. Journal of American Concrete Institute,1971,68(4):244-251.
- [5] 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 Jinqing, SONG Erxiang. The design and test on anti-floating anchor age of large substructure in coastal region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2002,24(6):769-771.
- [6] 孙涛,杨俊杰,安庆军,等. 土层抗浮锚杆承载力关键影响因素现场试验研究[J]. 中国海洋大学学报,2011,41(11):18-22.  
SUN Tao, YANG Junjie, AN Qingjun, et al. Study on key factors to affect the bearing capacity of soil anti-floating anchors by field tests[J]. Periodical of Ocean University of China,2011,41(11):18-22.
- [7] 李伟伟,张明义,白晓宇,等. GFRP与钢筋抗浮锚杆承载特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(1):108-114.  
LI Weiwei, ZHANG Mingyi, BAI Xiaoyu, et al. Experimental research on anchorage performance of GFRP and steel anti-floating anchors[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2015,11(1):108-114.
- [8] 白晓宇,刘雪颖,张明义,等. GFRP筋及钢筋抗浮锚杆承载特性现场试验及荷载-位移模型[J]. 复合材料学报,2021,38(12):4138-4149.  
BAI Xiaoyu, LIU Xueying, ZHANG Mingyi, et al. Field tests and load-displacement models of GFRP bars and steel bars for anti-floating anchors[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2021,38(12):4138-4149.
- [9] 孙长帅,杨海巍,徐光黎. 岩石锚杆基础抗拔承载力计算方法探究[J]. 岩土力学,2009,30(S1):75-78.  
SUN Changshuai, YANG Haiwei, XU Guangli. Researches on pull-out capacity calculating method of rock bolt foundation[J]. Rock and Soil Mechanics,2009,30(S1):75-78.
- [10] 魏新江,张世民,危伟. 全长粘结式锚杆抗拔力计算公式的探讨[J]. 岩土工程学报,2006,28(7):902-905.  
WEI Xinjiang, ZHANG Shimin, WEI Wei. Discussion of formula of pullout resistance for fully grouted anchor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(7):902-905.
- [11] 郑全明. 拉力型土锚最优长度及最大极限承载力的确定[J]. 西部探矿工程,2000(2):27-28.  
ZHENG Quanming. Determination of optimal length and maximum ultimate bearing capacity of tension type soil anchor[J]. West-China Exploration Engineering,2000(2):27-28.
- [12] 潘殿琦,吴银柱,吴丽萍. 土层锚杆抗拔力的影响因素及其计算公式的修正[J]. 地质找矿论丛,1999,14(2):89-94.  
PAN Dianqi, WU Yinzhu, WU Liping. The influencing factors of withdrawal resistance of soil anchor and revision to the formula of it[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research,1999,14(2):89-94.
- [13] JGJ 476—2019, 建筑工程抗浮技术标准[S].  
JGJ 476—2019, Technical standard for building engineering against uplift[S].
- [14] 白晓宇,张明义,刘鹤,等. 风化岩地基全螺纹玻璃纤维增强聚合物抗浮锚杆承载特征现场试验[J]. 岩土力学,2014,35(9):2464-2472.  
BAI Xiaoyu, ZHANG Mingyi, LIU He, et al. Field test on load-bearing characteristics of full-thread GFRP anti-floating anchor in weathered rock site[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(9):2464-2472.
- [15] 陈根全. 锚杆桩的抗拔试验[J]. 工程勘察,1997(2):15-16.  
CHEN Genquan. Pull-out test of anchor pile[J]. Geotechnical Investigation & Surveying,1997(2):15-16.
- [16] 刘国民. 全长粘结式抗浮锚杆在强中风化砂岩中承载力研究[D]. 成都:成都理工大学,2013.  
LIU Guomin. Research of bearing capacity for fully grouted anchor in highly-moderately weathered sandstone[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2013.
- [17] 王小卫. 软岩地基中全粘结式抗浮锚杆试验分析[J]. 土工基础,2018,32(6):681-684.  
WANG Xiaowei. Test analysis of fully bonded buoyancy anchors in soft rock[J]. Soil Engineering and Foundation,2018,32(6):681-684.
- [18] GB 50007—2011, 建筑地基基础设计规范[S].  
GB 50007—2011, Code for design of building foundation[S].
- [19] JGJ 120—2012, 建筑基坑支护技术规程[S].  
JGJ 120—2012, Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S].
- [20] 邱志华,戴自航,徐祥,等. 抗浮锚杆现场试验及数值模拟分析研究[J]. 土工基础,2019,33(6):713-716.  
QIU Zhihua, DAI Zihang, XU Xiang, et al. Field tests and numerical analysis of anti-buoyancy anchors[J]. Soil Engineering and Foundation,2019,33(6):713-716.