

# Experiment and Analysis of Anti-Floating Anchor Pullout Test of Basement

Xincheng Sun<sup>1</sup>, Huiyuan Deng<sup>2</sup>, Guoliang Dai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hefei Railway Construction Industrial Co., Ltd., Hefei

<sup>2</sup>College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing

Email: [973730609@qq.com](mailto:973730609@qq.com)

Received: Dec. 20<sup>th</sup>, 2014; accepted: Jan. 4<sup>th</sup>, 2015; published: Jan. 14<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The experience calculation methods of the pullout capacity of anchor pile are summarized in this paper. An engineering design of 768 pieces of anti-floating anchor was adopted in Bengbu city, and all the anchoring depth is 16 m, anchorage diameter is 150 mm. 8 pieces of anchor were selected to perform the pull-out tests. The test results show that, the range of uplift displacement is from 10.35 mm to 12.69 mm when the load reaches up to 300 kN, and it can reach a stable state. The residual displacement is about 2/3 of the maximum displacement after unloading, and all the anchors meet the design requirements of uplift bearing capacity test. The *Q-S* fitting curve is obtained by approximate prediction of bearing capacity of anchor pullout from the test results. Meanwhile, the results were compared with different calculation methods, and it shows that there is a slight difference between different calculation methods and predictive value. Nevertheless, they are all larger than the measured maximum load value 300 kN.

## Keywords

Pullout Test, The Residual Displacement, Anti-Floating Capacity, Experiment Method

---

# 地下室锚杆抗拔试验与分析

孙新成<sup>1</sup>, 邓会元<sup>2</sup>, 戴国亮<sup>2</sup>

<sup>1</sup>合肥铁建实业有限公司, 合肥

<sup>2</sup>东南大学土木工程学院, 南京

Email: [973730609@qq.com](mailto:973730609@qq.com)

收稿日期：2014年12月20日；录用日期：2015年1月4日；发布日期：2015年1月14日

## 摘要

总结了抗拔锚杆桩承载力的经验计算方法。蚌埠市某住宅项目工程设计采用768根抗浮锚杆，锚固段长度是16 m，锚固直径为150 mm，对其中8根锚杆进行了抗拔试验。测试结果表明，加载至300 kN时，上拔位移为10.35 mm~12.69 mm，且能达到稳定状态，卸载后残余位移约为最大位移的2/3，试验锚杆抗拔承载力均满足设计要求。通过试验结果数据拟合得到 $Q-S$ 曲线，预测了锚杆的抗拔极限承载力，并与不同经验方法计算结果进行了对比，结果表明不同方法计算结果与预测值略有差异，但均大于实测最大加载值300 kN。

## 关键词

抗拔试验，残余位移，抗拔承载力，经验方法

## 1. 前言

近几年来，随着我国经济的发展，城市化进程越来越快，为了充分利用空间资源，城市地下建筑不断增多，对于地下工程，特别在高水位地区，其抗浮问题也就随之而来。因地下水浮力引起基础的抗浮问题没处理好而引发的质量事故时有发生，可能导致地下室隆起，底板破坏，底板与桩头脱离；也可能导致地下建筑物整体浮起，造成了严重的经济损失。现在地下室设计时特别是高水位地区越来越重视地下室抗浮问题。工程上通常采用配重法、设置抗拔桩或抗拔锚杆来解决抗浮问题。配重法主要是增加地下室的重量，依靠重量来平衡地下水的浮力，这种方法成本较高，应用较少。抗拔桩主要有预应力管桩抗拔桩、钻孔灌注桩抗拔桩、锚杆桩，抗拔桩或抗拔锚杆都是利用桩侧阻力或锚杆与土层的摩阻力来平衡浮力。实际工程中应根据场地的地质情况、施工难度、场地条件限制、经济效益等方面综合考虑选用合适的方法解决抗浮问题。预应力管桩受工厂加工、单根长度、现场焊接工艺等因素影响。在地下室底板与可锚固地层距离较近的一些情况下，抗浮锚杆较抗浮桩在工程造价、施工工期上都显示出极大优越性，在工程中得到了广泛的应用[1]-[4]。在蚌埠地区采用抗浮锚杆也日渐增多，本文对该地区某住宅项目工程抗浮锚杆的抗拔试验做了介绍，对试验成果进行了分析，同时结合不同计算方法计算锚杆桩的极限承载力，与试验成果进行对比。

目前，国内外学者对于抗拔锚杆桩的研究较多，一般抗浮锚杆仍采用普通锚杆的设计和施工方法。但是，抗浮锚杆锚固体侧没有岩土层侧向压力作用，与普通的与水平成一定角度设置锚杆存在差别。已有很多研究者从荷载传递机理出发，研究锚杆的荷载的分布规律及影响锚杆承载力的因素。

Lutz (1967)等[5]研究荷载从锚杆传递到灌浆体的力学机制，认为锚杆体本身强度很高，且锚杆表面粗糙，与灌浆体之间的粘结力足以保证设计锚杆不会在脱离岩土体前破坏。因此锚杆的荷载传递机制的研究重点应放在灌浆体与周围岩土体界面的性质上。Evangelista [6] (1977)等对粘性土和粒状土中的锚杆进行拉拔试验，测出灌浆体表面摩阻力沿锚固长度呈非均匀分布。1970年 Philips [7]提出了摩阻力沿锚杆长度按幂函数分布的公式；Fujita [8]等总结了30例现场试验成果，认为增加锚杆长度对锚杆承载力的影响是有限的。Kaiser 等[9]通过现场和室内试验，认为影响锚杆承载力的主要是水泥砂浆性质、锚固长度、围压这三个因素。灌浆体外侧压力越高，锚杆承载力越高。1996年程良奎等[10]对上海太平洋饭店和北京京城大厦基坑工程的拉力型锚杆锚固段粘结应力的分布形态进行了测定，得到锚杆应力分布规律。

针对抗浮锚杆的力学传递机理的研究有：王贤能[11]等在总结深圳地区抗浮锚杆的应用现状的基础上，总结得到抗浮锚杆在花岗岩和粘土层中破坏的特点。贾金青[12]对大连滨海地下工程的抗浮锚杆进行试验研究，认为灌浆体与岩土间剪应力在孔口最大，分布不均匀，沿锚杆长度衰减；增加锚杆长度对提高承载力是有限的。陈荣茵[13]在假设锚杆受力状态为弹性的条件下，建立了粘性土中线弹性模型基础上的位移、剪应力、轴力公式。认为抗浮锚杆主要集中在端部，锚土截面处变形是土层抗浮锚杆的主要部分。

以上研究从力学机理方面分析了抗拔锚杆的特性，提出了有价值的计算模型，虽然没有在实际工程中广泛应用，但是对研究锚杆抗拔特性，估测锚杆抗拔极限承载力有一定的意义。

## 2. 抗拔锚杆桩承载力计算方法介绍

鉴于锚杆桩的抗拔承载力计算方法较少，现将抗拔桩计算方法应用于抗拔锚杆桩，计算分析对比不同计算方法应用于抗拔锚杆桩的抗拔极限承载力，现将各个行业几种规范方法做简要的介绍，并同国外的规范方法做个简要的比较。

### 2.1. 《建筑地基基础设计规范》计算法

《建筑地基基础设计规范》[14]认为：岩石锚固段的抗拔承载力特征值，对于永久性锚杆的初步设计或对于临时性锚杆的施工设计阶段，按下式计算：

$$R_t = \xi \cdot f \cdot u_r \cdot h_r \quad (1)$$

式中  $f$  为砂浆与岩石间的粘结强度特征值，MPa，由试验确定，当缺乏试验资料时，可按表 1 选用； $u_r$  为锚杆周长； $h_r$  为锚杆锚固段嵌入岩层中的有效锚固长度，按地区经验确定； $\xi$  经验系数，对于永久性锚杆取 0.8。

### 2.2. Phillips 公式改进计算法

Phillips [15]根据锚杆体与周围土体粘结特性，提出的摩阻力沿锚杆长度幂函数分布的公式。但是这些分布函数得出的最大剪应力在锚固段外端，与很多现场试验不相符。尤春安[16]基于 Mindlin 的位移解，将锚杆体与岩土体假设为弹性材料，推导出了全长粘结式锚杆剪应力分布弹性解，Mindlin 解计算简图如图 1 所示。

$$W = \frac{P(1+\mu)}{8\pi E(1-\mu)} \left[ \frac{(3-4\mu)}{R_1} + \frac{8(1-\mu)^2 - (3-4\mu)}{R_2} + \frac{(z-c)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\mu)(z+c)^2 - 2cz}{R_2^3} + \frac{6cz(z+c)^2}{R_2^5} \right] \quad (2)$$

式中： $E, \mu$ ——岩土体的弹性模量和泊松比。

孔口处，位移为 0，则上式简化为：

$$W = \frac{P(1+\mu)(3-2\mu)}{2\pi Ec} \quad (3)$$

在只考虑弹性变形状态下锚杆变形，孔口处，岩土体位移与杆体伸长量相等，锚杆无限长的情况下，导出：

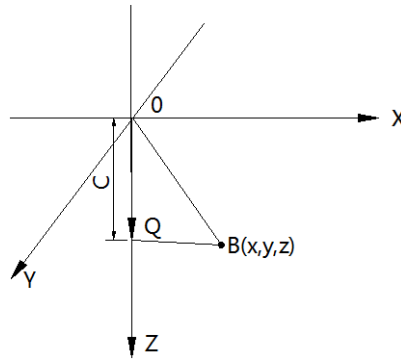
$$\int_0^\infty \frac{(3-2\mu)D}{2G} \cdot \frac{\tau}{z} dz = \int_0^\infty \frac{1}{E_a A} (P - 2\pi D \int \tau dz) dz \quad (4)$$

式中， $D$  为锚杆半径。

根据 Phillips 提出的假定摩阻力长度按幂函数分布的公式：

**Table 1.** Characteristics value of bond strength between mortar and rock (MPa)  
**表 1.** 砂浆与岩石间的粘结强度特征值(MPa)

岩石坚硬程度	软岩	较软岩	硬质岩
粘结强度	<0.2	0.2~0.4	0.4~0.6



**Figure 1.** The calculation diagram of Mindlin solution  
**图 1.** Mindlin 解计算简图

$$\tau(x) = \tau_{\max} \exp\left(-\frac{A'z}{D}\right) \quad (5)$$

上式可变换为:

$$\tau = \eta(\varepsilon) \exp\left(\frac{\varepsilon^2}{4}\right) \quad (6)$$

式中  $\varepsilon$  为土侧压力系数,  $\varepsilon = \mu/(1-\mu)$ 。

$$z = -i \cdot \frac{\varepsilon}{\sqrt{k}} \quad (7)$$

将上面两个等式采用韦伯方程和考虑边界条件最后解出剪应力为:

$$\tau = \frac{P}{\pi D} \left(\frac{tz}{2}\right) \exp\left(\frac{-tz^2}{2}\right) \quad (8)$$

$$t = \frac{1}{(1+\mu)(3-2\mu)D^2} \left(\frac{E}{E_a}\right) \quad (9)$$

将上式沿杆长积分, 可得轴力:

$$N = P \exp\left(-\frac{tz^2}{2}\right) \quad (10)$$

根据朱焕春的试验[17]分析, 全长粘结型锚杆在弹性状态下最大剪应力较大而分布范围小。因此, 假设锚杆拉力达到一定数值时, 锚杆的塑性区不断增长时, 塑性区剪应力为一定值。此时, 剪应力与位移关系如图 2 所示。

$$\tau_x = k \cdot u_x \quad (u_x \leq u_p) \quad (11)$$

$$\tau_x = \tau_p \quad (u_x \geq u_p) \quad (12)$$

将上式中  $0.5\tau_{\max}$  的取为灌浆体与岩土体间的极限粘结应力  $\tau_u$ ，则锚杆的极限承载力为：

$$P = \tau_u L_a = 0.5\tau_{\max} L_a \quad (13)$$

式中， $L_a$  为锚杆进入锚固体地层深度。

### 2.3. 魏新江极限承载力计算法

魏新江[18]假设灌浆体与岩土为锚杆的薄弱面，采用剪切刚度系数  $k$  [19]来表示锚固体在单位位移时的剪应力。并根据锚固地层是土层或岩层采用不同的影响系数来考虑施工质量、地层特性等对  $k$  值的影响[20] [21]，推导出基于浆体与岩土体界面强度的锚杆最大剪应力公式：

锚杆承受拉力  $P$ ，取长度为  $dx$  的单元体分析，计算简图如图 3 所示，根据单元平衡条件、静力学平衡条件，变形协调条件分析得到：

$$\tau_{\max} = 2k\sqrt{C_3 C_4} \quad (14)$$

其中，

$$C_3 = P \frac{\gamma}{\pi D k} \cdot \frac{e^{-\gamma l} + \gamma}{(e^{-\gamma l} + \gamma)(e^{\gamma l} - 1) - (e^{\gamma l} - \gamma)(e^{-\gamma l} - 1)} \quad (15)$$

$$C_4 = P \frac{\gamma}{\pi D k} \cdot \frac{e^{\gamma l} - \gamma}{(e^{-\gamma l} + \gamma)(e^{\gamma l} - 1) - (e^{\gamma l} - \gamma)(e^{-\gamma l} - 1)} \quad (16)$$

$\gamma = \sqrt{\frac{\pi D k}{E \cdot A}}$ ； $D$  为锚固体直径； $k = \frac{E_0}{4(1-\mu_0)^2 \cdot D}$ ，土体弹性模量； $E = \frac{E_g + E_b}{A_g + A_b}$ ， $E_g$ 、 $E_b$  分别为灌浆体与杆体的弹性模量， $A_g$ 、 $A_b$  分别为灌浆体与杆体的截面积。

将式中的  $\tau_{\max}$  取为灌浆体与岩土间的极限粘结应力  $\tau_u$ ，则锚杆极限承载力为：

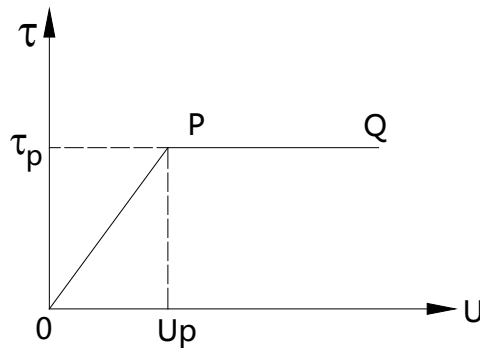


Figure 2. Shear stress displacement relationship graph of anchor  
图 2. 锚杆剪应力 - 位移关系图

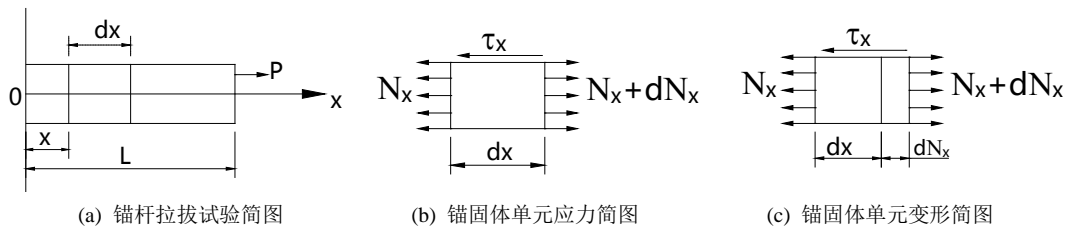


Figure 3. Calculation diagram  
图 3. 计算简图

$$P_{ul} = \tau_u \cdot L_u = \tau_{\max} \cdot L_u \quad (17)$$

式中,  $L_u$  为锚杆进入锚固地层深度。

#### 2.4. 《送电线路基础设计的技术规范》计算法

我国水利电力部电力规划设计院标准《送电线路基础设计的技术规范》(SDGJ62-84) [22]中第 9.6 条规定: 单桩轴向上拔力应符合下式的要求:

$$K_1 P \leq \alpha_b U L \tau_p + Q_f \quad (18)$$

式中  $\alpha_b$  为桩周土与桩之间极限摩阻力的上拔折减系数, 当无经验资料, 且桩入土深度不小于 6.0 m 时, 取为 0.6~0.8;  $U$  为桩设计周长(m);  $L$  为自设计地面算起的桩入土深度(m);  $\tau_p$  为桩周土与桩之间的加权平均极限摩阻力;  $Q_f$  为桩身有效重量(N);  $P$  为桩顶轴向上拔力(N);  $K_1$  为与土抗力有关的基础上拔稳定设计安全系数。

该规定认为: 由于受到上拔荷载与承受下压荷载的桩的破坏机理不同, 在选定上拔折减系数  $\alpha_b$  值时, 应考虑桩长这一重要的因素。当桩长不大于 6.0 m 时, 取  $\alpha_b = 0.6$ ; 当桩长不小于 20.0 m 时, 取  $\alpha_b = 0.8$ ; 当桩长介于 6.0 m~20.0 m 之间时, 可按线性插入计算取值。还指出,  $\alpha_b$  值主要适用于钻孔灌注桩。

#### 2.5. 《公路桥涵地基与基础设计规范》计算法

《公路桥涵地基与基础设计规范》[23]所提出的桩的抗拔承载力公式是建立在经验和相关统计资料的基础上的, 对灌注桩所采用的计算公式为:

$$[P_1] = 0.3UL\tau_p + W \quad (19)$$

式中,  $[P_1]$  为抗拔桩容许上拔荷载(N);  $W$  为桩自重(N)。

#### 2.6. 日本港湾协会编《港口建筑物设计标准》

该标准所提出的桩的抗拔承载力公式同时考虑土层强度中的粘聚力和内摩擦角, 计算公式如下:

$$R_{ult} = ULf_s \quad (20)$$

$$f_s = \sum_{i=1}^n (C_{ai} + K_s \cdot q_i \cdot \mu) l_i / L \quad (21)$$

式中,  $R_{ult}$  为抗拔桩的抗拔承载力;  $U, L$  分别为桩的周长和入土深度;  $K_s$  为桩侧土压力系数, 一般取值为 0.3~0.7;  $\mu$  为桩与土之间的摩擦系数, 可取  $\mu = \tan \phi_i$ ;  $q_i$  为  $i$  土层处平均有效上覆荷载;  $l_i$  为  $i$  土层的厚度;  $C_{ai}$  为  $i$  土层与桩间的粘聚力。

### 3. 试验锚杆工程概况

#### 3.1. 项目概况

拟建场地规划 1 幢 26 层公寓式住宅楼并附 3 层群楼、2 幢 28 层住宅楼、5 幢 18 层住宅楼、1 幢 3 层社居委及物管、及 3 层幼儿园一所。拟采用框架、框剪结构, 基础型式拟采用筏板或桩基础, 场区并设置了大面积的地下室, 地下室一层。根据区域水文地质资料和场地条件, 建议建筑抗浮设防水位可按埋深 1.0 m 左右, 即标高 22.50 m 进行设计。

根据抗拔锚杆试验场地的 ZK22 钻孔地勘资料, 统计各土层物理力学性质如表 2 所示。

#### 3.2. 试验锚杆施工概况

该工程在 2014 年 5 月开始施工。抗浮锚杆锚固体直径 150 mm, 单根锚杆抗拔力特征值 150 kN, 锚

筋采用 HRB400 级钢筋 3Φ20，锚杆钢筋锚入底板 40 d。锚杆锚固段长度  $L = 16\text{ m}$ ，锚杆顶部标高为设计地下室底板位置。锚固体直径 150 mm，灌注纯水泥浆体并加微膨胀剂，二次高压注浆工艺。注浆材料：采用普通硅酸盐水泥，强度等级 42.5，水灰比 0.55；采用二次注浆工艺，第二次注浆掺入水泥用量 10% 的微膨胀剂。锚固体强度等级为  $>M30$ 。有关参数见表 3。

### 3.3. 试验加载装置

本次试验采用 CH-600 型油压千斤顶分级加载，利用支墩承受荷载反力，支墩由工字钢梁组成，千斤顶置于支墩上，对试验锚杆施加抗拔力，用百分表测读锚头位移，试验设备经核定，均满足要求。现场加载装置如图 4 所示。八根试验锚杆平面布置图如图 5 所示，锚杆剖面图及土层分布如图 6 所示。

## 4. 测试结果分析

### 4.1. 试验结果

本次试验对抗浮锚杆 1#~8# 这八根锚杆进行抗拔试验，试验时均分级加载至 300 kN，然后进行分级卸载至零。最终加载值累计上拔量和卸载后残余累计上拔量测试结果如表 4 所示。不同等级荷载作用下，荷载—上拔位移关系曲线如图 7 所示。

Table 2. Physical and mechanical properties of soil layer

表 2. 土层物理力学性质

土层	层底标高/m	厚度/m	重度/kN/m <sup>3</sup>	粘聚力/kPa	内摩擦角	压缩模量/Mpa	抗拔系数建议值	土体与锚固体粘结强度特征值/kPa	预制桩	钻孔灌注桩
									侧摩阻力标准值/kPa	侧摩阻力标准值/kPa
①杂填土	22.2	1.3	19	15	10	—	—	—	—	—
②粉质粘土	12.4	9.8	19.4	51.4	14.27	9.29	0.76	27	90	85
③粉质粘土	2.2	10.2	19.5	54.2	15.36	9.76	0.8	30	95	90
④全风化混合花岗岩	-1.5	3.7	21	60	30	—	0.8	135	120	112
⑤强风化混合花岗岩	-5.4	3.9	22	100	40	—	0.8	150	—	200
⑥中风化混合花岗岩	-11.5	6.1	—	—	—	—	0.8	—	—	—

Table 3. The engineering parameter table of tested anchors

表 3. 试验锚杆工程参数表

序号	锚杆编号	直径(mm)	孔深(m)	锚杆长度(m)	注浆量(m <sup>3</sup> )	成孔日期	抗拔力特征值(kN)
1	锚杆 1#	150	19.5	20.0	0.34	2014-5-26	150
2	锚杆 2#	150	19.5	20.0	0.34	2014-5-26	150
3	锚杆 3#	150	19.5	20.0	0.34	2014-5-27	150
4	锚杆 4#	150	19.5	20.0	0.34	2014-5-27	150
5	锚杆 5#	150	19.3	19.8	0.34	2014-5-27	150
6	锚杆 6#	150	19.2	19.7	0.34	2014-5-27	150
7	锚杆 7#	150	18.8	19.3	0.33	2014-5-27	150
8	锚杆 8#	150	18.7	19.2	0.33	2014-5-27	150



Figure 4. Schematic diagram of field test  
图 4. 现场加载示意图

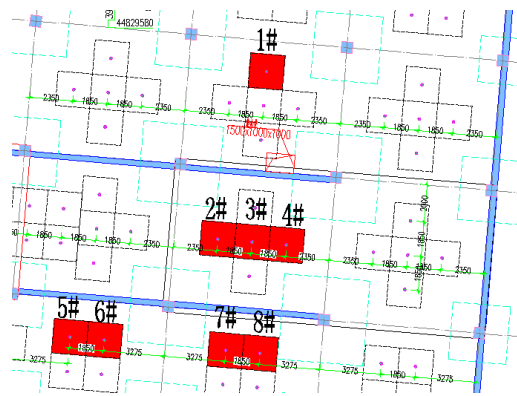


Figure 5. Plan view of tested anchors  
图 5. 试验锚杆平面布置图

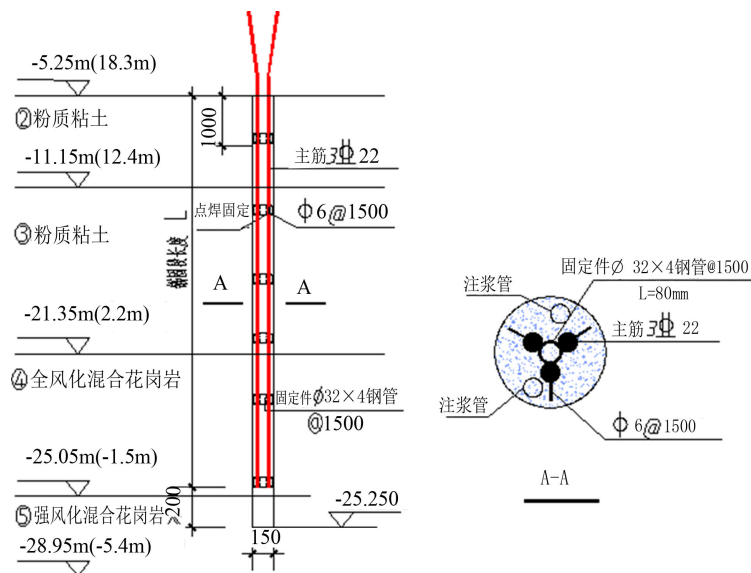
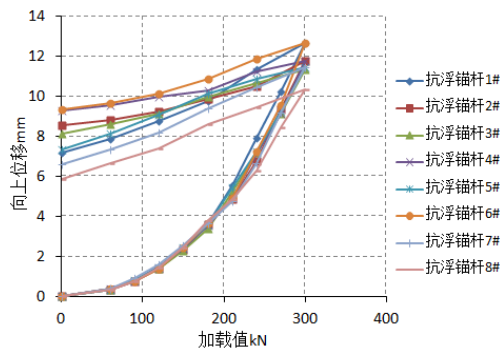


Figure 6. Anchor design and profile of soil  
图 6. 锚杆设计图及土层剖面图



**Table 4.** The summary table of test results  
**表 4.** 试验结果汇总表

序号	锚杆编号	设计抗拔承载力特征值(kN)	最终加载值(kN)	最终加载值对应累计上拔量(mm)	卸载后残余累计上拔量(mm)	回弹量(mm)	极限抗拔力取值(kN)
1	锚杆 1#	150	300	12.69	7.16	5.53	≥300
2	锚杆 2#	150	300	11.76	8.56	3.2	≥300
3	锚杆 3#	150	300	11.36	8.12	3.24	≥300
4	锚杆 4#	150	300	11.76	9.25	2.51	≥300
5	锚杆 5#	150	300	11.46	7.36	4.1	≥300
6	锚杆 6#	150	300	12.65	9.35	3.3	≥300
7	锚杆 7#	150	300	11.46	6.58	4.88	≥300
8	锚杆 8#	150	300	10.35	5.85	4.5	≥300



**Figure 7.** The Q-S relationship curve of anti floating anchor

**图 7.** 抗浮锚杆 Q-S 关系曲线图

## 4.2. 分析结果

### 4.2.1. 试验 Q-S 分析

从试验锚杆的荷载—位移(Q-S)曲线可以看出, 8 根试验锚杆的竖向位移与荷载近似线性关系, 在各级荷载作用下, 各受检锚杆的锚头位移均能保持相对稳定, 表明 8 根试验锚杆在各级荷载阶段均未达到承载能力极限。根据《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2011)中有关基础锚杆抗拔试验的规定判定: 8 根抗浮试验锚杆的极限抗拔力均满足设计要求。

此外, 从测试结果图 8 可以看出, 试验加载至 300 kN 时, 八根锚杆锚头最大上拔位移在 10.35 mm~12.69 mm 区间范围内变化, 平均最大上拔位移为 11.69 mm, 其中试验锚杆 1#上拔位移最大, 试验锚杆 8#上拔位移最小; 当卸载至零时, 八根锚杆的上拔位移并没有完全回弹, 存在较大的残余位移, 锚头上拔位移残余值在 5.85 mm~9.35 mm 范围, 残余值均值为 7.78 mm, 各试验锚杆残余值占最大加载位移值的比值为 56.4%~78.7%, 平均比值为 66.4%, 其中试验锚杆 6#残余值最大, 试验锚杆 8#残余值最小; 各锚杆卸载后回弹值在 2.51 mm~5.53 mm, 平均回弹 3.91 mm, 但是锚杆 1#回弹最大, 试验锚杆 4#回弹最小。上述分析结果表明, 各试验锚杆最大上拔位移、残余值、回弹值均存在一定的差异, 可能锚杆所处地质层差异、锚杆实际施工长度差异、相邻锚杆试验影响、以及注浆量不同, 都可能

影响测试结果存在差异，但是总体结果差别不大，特别是从零加载至 200 kN 过程，各锚杆位移基本是近似相同的。总体而言，本工程设计锚杆在 300 kN 荷载加载后再卸载，回弹了 1/3 位移，存在 2/3 的残余位移值。

#### 4.2.2. 抗拔极限承载力预测

根据 8 根锚杆试验结果，将加载阶段即从 0 分级加载到 300 kN 过程，取 8 根锚杆的位移平均值，绘出荷载-位移曲线如图 9 所示。

由图 9 可以看出，将平均值的荷载-位移结果近似拟合成二项式方程为  $y = 0.0002x^2 - 0.008x + 0.144$ ， $y$  为加载对应的位移， $x$  为加载值，写成  $Q-S$  形式为： $S = 0.0002Q^2 - 0.008Q + 0.144$ 。

由于本次试验加载到 300 kN 未达到锚杆的抗拔极限承载力，为了预测抗拔极限承载力，首先需确定极限荷载下锚头位移的允许值。目前各相关规范对锚杆极限荷载下的锚头位移没有明确的规定，贾金青和宋二祥[12]指出根据  $Q-S$  曲线找出位移变化较大的拐点，以此对应的荷载为每根抗浮锚杆的极限抗拔力。王贤能等[24]建议可取锚头位移达到 20~30 mm 时对应的拉拔荷载作为极限抗拔力，对于岩石抗浮锚杆可取低值，对于土层抗浮锚杆可取高值。Fecia [25]建议取上拔量 10~20 mm 时对应的荷载为极限抗拔力。参考桩基的上拔位移量，在国内，桩顶上拔位移控制在 10~20 mm 范围内；在深圳地区，锚固地层为砾粘性土、砂砾混粘土和砾质粘土中的土层锚杆，锚固体直径小于 180 mm，认为设计极限抗拔力所对应的锚头位移应小于 25 mm [25]。在英国，对较小直径(不大于 178 mm)的钻孔灌注桩，相应于最大上拔荷载时规定的桩顶位移为 6 mm，而相应于极限抗拔承载力的桩顶位移为 25 mm [26]。

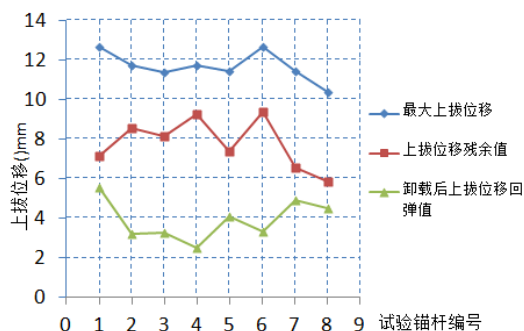


Figure 8. Displacement curve of anchor pull test  
图 8. 试验锚杆上拔位移曲线图

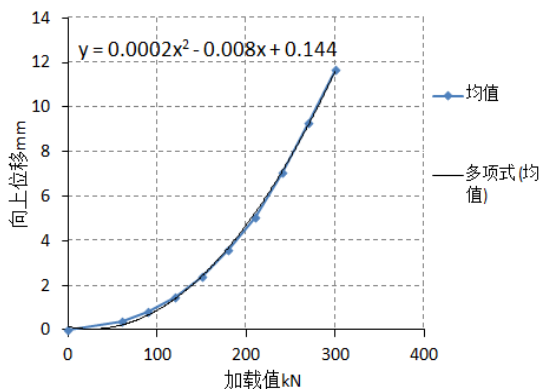


Figure 9. The average value of load displacement curve of test results  
图 9. 试验结果的平均值荷载 - 位移曲线

根据相关文献资料以及本工程设计要求,建议取锚头位移为 25 mm 时对应的拉拔荷载作为极限抗拔承载力,根据上述 Q-S 公式计算得到,极限承载力  $Q_u$  为 373 kN。极限值比测试最大值 300 kN 大 24.3%,根据测试结果推测的极限值可作为本地区锚杆抗拔极限承载力。

## 5. 不同方法理论计算分析

根据第二部分介绍的不同理论计算方法,结合安徽蚌埠抗拔锚杆桩试验资料,取  $\mu = 0.35$ ,钢筋弹性模量  $E_a = 2.0 \times 10^5$  MPa,灌浆体  $E_g = 3.0 \times 10^4$  MPa,计算出锚固长度为 16 m 的锚杆桩的抗拔极限承载力,计算结果统计如表 5 所示。

从表 5 可以看出,不同计算方法计算出的锚杆抗拔极限承载力大小略有差异,地基基础规范计算结果相对实测预测结果偏小 10.67%,相对保守一些,可以满足设计要求;Phillips 公式改进计算法和《送电线路基础设计的技术规范》计算结果分别比实测预测值小 3.49%、3.16%;魏新江极限承载力算法、《公路桥涵地基与基础设计规范》计算结果、日本港湾协会编《港口建筑物设计标准》计算结果分别比实测预测值大 1.80%、16.22%、36.17%,魏新江极限承载力计算结果与实测预测结果较接近,可用来近似计算锚杆桩的抗拔极限承载力,但是《公路桥涵地基与基础设计规范》和日本港湾协会编《港口建筑物设计标准》计算结果均比实测预测结果偏大较多,相对不安全,说明这两种抗拔桩的计算方法不宜用于锚杆的抗拔极限承载力计算当中。因此,为了经济和安全考虑,在锚杆抗拔承载力设计当中,可以利用 Phillips 公式改进算法、魏新江极限承载力算法、以及《送电线路基础设计的技术规范》算法来计算锚杆的抗拔极限承载力。

## 6. 结论

本次试验对抗浮锚杆 1#~8#这八根锚杆进行抗拔试验,试验时均分级加载至 300 kN,上拔位移较稳定,未出现破坏状态,荷载未到达极限承载力。说明满足极限承载力特征值 150 kN 抗浮力的设计要求。

(1) 本工程锚杆抗拔试验中,锚杆锚固长度 16 m 情况下,分级加载至 300 kN,各锚杆在 0~200 kN 加载范围内,荷载位移近似相同,在 200 kN~300 kN 加载范围内,荷载位移近似呈线性关系增加。

(2) 本工程设计锚杆在 300 kN 荷载加载后,平均上拔位移为 11.69 mm,卸载后,回弹了 1/3 位移,但仍存在 2/3 的残余位移。说明上浮力对地下室及其锚杆的位移影响很大,上浮力引起地下室及锚杆的位移很难完全恢复,设计时应控制上浮力引起结构的上浮位移以及残余位移影响。

(3) 结合不同计算方法计算锚杆桩的抗拔极限承载力,《建筑地基基础设计规范》计算结果相对较保守,在实际设计当中,可以利用 Phillips 公式改进算法、魏新江极限承载力算法、以及《送电线路基础设计的技术规范》算法来计算锚杆的抗拔极限承载力。

Table 5. Statistic result of different calculation methods

表 5. 不同方法计算结果统计表

计算方法	《建筑地基基础规范》	Phillips 公式改进算法	魏新江极限承载力算法	《送电线路基础设计的技术规范》	《公路桥涵地基与基础设计规范》	日本港湾协会编《港口建筑物设计标准》	实测预测值
锚杆桩抗拔极限承载力/kN	3303.2	360	379.7	361.2	433.5	507.9	373
相对实测预测值偏差	-10.67%	-3.49%	1.80%	-3.16%	16.22%	36.17%	—

## 参考文献 (References)

- [1] 王胜 (2001) 预应力钢绞线锚杆在地下停车场工程抗浮中的应用与研究. *建筑结构*, **8**, 60-62.
- [2] 彭涛, 武威 (2000) 复杂地质条件下预应力抗浮锚杆的应用. *工程勘察*, **2**, 31-33.
- [3] 崔京浩, 崔岩 (2000) 锚固抗浮问题的几个关键问题. *特种结构*, **1**, 9-17.
- [4] 林国卫, 张一志, 岑仰润 (2005) 杭州粉砂土地区某工程抗浮锚杆抗拔试验分析. *城市勘察*, **5**.
- [5] Lutz, L. and Gergeley, M. (1967) Mechanics of band and slip of deformed bars in concrete. *Journal of American Concrete Institute*, **64**, 711-721.
- [6] Evangelista, A. and Sapio, G. (1977) Behaviour of ground anchors in stiff clays. *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, 39-47.
- [7] Phillips, S.H.E. (1970) Factors affecting the design of anchorages in rock. Cementation Resear Ltd., London.
- [8] Fujita, K., et al. (1977) A method to predict the load-displacement relationship of ground anchors. *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, 58-62.
- [9] 尤春安 (2004) 锚固系统应力传递机理理论及应用研究. 博士学位论文, 山东科技大学, 青岛.
- [10] 程良奎, 胡建林 (1996) 土层锚杆的几个力学问题. In: 中国岩土锚固工程协会主编, *岩土工程的锚固技术*, 人民交通出版社, 北京.
- [11] 王贤能, 周逢君, 徐金台, 等 (2002) 深圳地区抗浮锚杆应用现状及分析. *岩土锚固技术与西部开发*.
- [12] 贾金青, 宋二翔 (2002) 滨海大型地下工程抗浮锚杆的设计与试验研究. *岩土工程学报*, **6**, 769-771.
- [13] 陈棠茵, 王贤能 (2006) 抗浮锚杆应力应变状态的线弹性分析理论. *岩土力学*, **11**, 2033-2036.
- [14] 中华人民共和国建设部 (2011) 建筑地基基础设计规范(GB50007-2011). 中国建筑工业出版社, 北京.
- [15] Phillips, S.H.E. (1970) Factors affecting the design of anchorages in rock. Cementation Research Ltd., London.
- [16] 张强勇 (2005) 岩土工程强度与稳定计算及工程应用. 中国建筑工业出版社, 北京.
- [17] 朱焕春, 荣冠, 肖明 (2002) 张拉荷载下全长粘结锚杆工作机理试验研究. *岩石力学与工程学报*, **3**, 379-384.
- [18] 魏新江 (2006) 全长粘结锚杆的抗拔力分析. *岩土工程学报*, **7**, 902-905.
- [19] 郑全明 (2000) 拉力型土锚最优长度及最大极限承载力的确定. *西部探矿工程*, **2**, 27-28.
- [20] 潘殿琦 (1999) 土层锚杆抗拔力的影响因素及其计算公式的修正. *地质找矿论丛*, **2**, 87-92.
- [21] 张发明, 陈祖煜 (2001) 岩体与锚固体间粘结强度的确定. *岩土力学*, **4**, 470-473.
- [22] 电力规划设计院 (1984) 送电线路基础设计的技术规范(SDGJ62-84).
- [23] 交通部 (2007) 公路桥涵地基与基础设计规范(JTG D63-2007). 人民交通出版社, 北京.
- [24] 王贤能, 曾卫东, 徐金台 (2002) 岩石抗浮锚杆的应用及分析. In: 中国岩石力学与工程学会, Ed., *中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集*, 中国科学技术出版社, 北京, 831-835.
- [25] 陈根全 (1997) 锚杆桩的抗拔试验. *工程勘察*, **2**, 15-16.
- [26] 贾金青, 宋二祥 (2002) 滨海大型地下工程抗浮锚杆的设计与试验研究. *岩土工程学报*, **6**, 769-771.

汉斯出版社为全球科研工作者搭建开放的网络学术中文交流平台。自2011年创办以来，汉斯一直保持着稳健快速发展。随着国内外知名高校学者的陆续加入，汉斯电子期刊已被450多所大中华地区高校图书馆的电子资源采用，并被中国知网全文收录，被学术界广为认同。

汉斯出版社是国内开源（Open Access）电子期刊模式的先行者，其创办的所有期刊全部开放阅读，即读者可以通过互联网免费获取期刊内容，在非商业性使用的前提下，读者不支付任何费用就可引用、复制、传播期刊的部分或全部内容。

