

软土地区超长抗拔桩成桩选型研究

安景波^{1,2} 赵思远¹ 邓志辉¹

(1. 上海市民防地基勘察院, 上海 200232; 2. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏徐州 221008)

【摘要】 对软土地区长抗拔桩中常用的常规直桩、扩底桩、注浆直桩的承载力性状进行了比较分析, 研究了不同桩型的荷载传递规律和承载力提高机理, 并引出其荷载-位移的理论计算公式, 认为抗拔桩存在“有效桩长”。通过对某沿海城市不同超长抗拔桩的现场抗拔试验, 分析比较了各种桩型在 30 mm 上拔位移控制值下的单桩承载力和桩侧摩阻力分布规律, 认为超过“有效桩长”的设计是不经济的, 注浆直桩可以提高安全系数, 宜优先选用注浆直桩。

【关键词】 抗拔桩; 常规直桩; 扩底桩; 注浆直桩; “有效桩长”

【中图分类号】 TU 19

【文献标识码】 A

doi: 10. 3969/j. issn. 1007-2993. 2009. 06. 004

Study of Choice Behavior on the Super-long Uplift Piles in Mollisol Area

An Jingbo^{1,2} Zhao Siyuan¹ Deng Zhihui¹

(1. Shanghai Foundation Surveying Institute of the Civil Defence, Shanghai 200232, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, Xuzhou 221008, Jiangsu, China)

【Abstract】 The long uplift piles are researched in this paper through the comparative analysis of conventional straight piles, grouting piles and under-reamed piles. The theoretical equation of load-displacement is derived by a mathematical model. The mechanism of increasing load-carrying capacity and load transfer law of the different piles are studied by analysing the load-carrying capacity when the displacement of the pile top is 30 mm, and the distribution of frictional resistances of different style of piles in a mollisol area of coastal. The grouting straight piles should be the priority selection because of the increase of safety probability.

【Key words】 uplift pile; conventional pile; enlarged base pile; post grouting pile; critical length of pile

0 引言

抗拔桩基础是建筑物基础的一种重要形式, 随着我国建设事业的不断发展, 抗拔桩的应用越来越广泛^[1], 一般用在地下水位较高, 地下水浮力比较大或上部结构产生偏心弯矩过大造成基础一部分受拉的情况。现在在承受巨大水平荷载的码头、桥台或特殊地区的建筑物如膨胀土或冻土建筑物的桩基都使用抗拔桩作为桩基础,

相对于承压桩的研究, 目前对抗拔桩工作机理的研究仍处于起步阶段, 且主要集中在粗短桩, 研究的理论和方法还不成熟, 设计上也无统一标准和规范, 研究所取得的成果也不具有广泛的代表性。当抗拔桩桩长增加后, 其主要受变形影响, 承载力选定标准及其工作机理与短抗拔桩有所差异, 仍有待于进一步研究。

1 抗拔桩桩型及其工作机理分析

目前, 抗拔桩桩型有很多创新, 可以分为四类:

钻孔灌注桩、预应力高强混凝土管桩、混凝土砌块砌筑配筋抗拔桩、树根桩。软土地区长抗拔桩一般使用钻孔灌注桩, 传统的钻孔灌注桩由于施工条件和施工机械的限制, 一般使用等截面桩, 受短桩工程经验影响, 近年来, 扩底长桩和桩侧注浆两种形式在软土地区应用增多, 但随着工程界在该方面的试验和理论研究发现, 扩底长桩对于提高抗拔桩承载力有所帮助, 但使用超长抗拔桩的工程一般均对变形要求比较高, 按变形要求来确定桩的承载力, 扩底长桩能否有效, 仍需通过现场试验决定。桩侧注浆能够通过提高桩侧摩阻力而提高桩身抗拔力, 但按照抗拔桩上拔位移变形要求来研究, 桩侧注浆对于超长桩承载力的提高是否仍然有效, 如果有效, 能够提高多少, 都必须通过现场试验决定。

等截面桩受上拔荷载时, 桩身拉应力开始产生在桩的顶部。随着桩顶向上位移的增加, 桩身拉应力逐渐向下部扩展。桩侧摩阻力随着荷载的增加而

逐级发挥出来,其桩顶上拔位移也在增加,桩侧摩擦力的发挥与上拔位移量的关系比较复杂。国内外许多学者多年的试验分析认为桩径对桩顶上拔位移虽然有一定的影响,但影响不太大,桩顶位移主要受桩长的影响^[2-3]。

与等截面抗拔桩不同,扩底抗拔桩上拔时的桩侧摩擦力先达到它的极限值,其次扩大头上的土抗力才逐步发挥出来^[4]。因此扩底桩总的极限抗拔承载力所对应的上拔位移很大,但这种桩型只能够在对变形要求不大的地方才能够发挥其巨大的潜能作用。其上拔位移的大小随土质、土层条件及桩形等变化。与此同时,扩大头在逐步上移过程中不断挤密土壤,由于相当大的范围内土体被牵动,所以土对它的反作用力也是随着上拔位移的增加而增加的。

抗拔桩后注浆主要加固桩侧泥皮和桩底以上桩周土体,浆液与桩周泥皮及相邻周围土形成一种特殊的水泥-土网状结构^[5]。当土中含有大量砂粒时,随着时间的流逝,砂粒与水泥起强烈的化学作用并在水泥石与矿物颗粒间的接触面上形成含水化合物;随着晶体的增大与土颗粒搭接,形成空间网状结构,从而增大桩周土或泥皮的强度。桩侧注浆可以增加桩周薄壁圆筒状各叠土之间的抗剪能力,增加桩周土或泥皮与桩身的粘结力从而提高桩侧极限摩擦力。抗拔桩的后注浆时间一般选择在成桩后尽可能短的间隔内进行,此时水泥浆注入桩周扰动土,有利于水泥浆扩散,使浆液与桩周土或泥皮混合形成强度较高的水泥土。

2 抗拔承载力标准的选取

抗拔桩在上拔荷载下,混凝土由于不耐拉,在一定荷载下将产生环向裂纹,由于桩身大部分均处于地下水位以下,开裂处的钢筋将爆露在地下水的浸蚀中,对桩基的正常使用状态产生很大影响。《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)规定其最大裂缝宽度为0.2~0.4 mm,这就要求抗拔桩必须严格控制上拔位移量。目前超长抗拔桩承载力的设计仍按短桩进行估算,其后进行抗拔验算和抗裂验算。对桩基要求较高时均应进行静荷载试验,此时必须采取科学的标准来确定抗拔桩承载力,传统方法是绘制荷载-位移曲线或位移-时间对数曲线,从拐点位置来判断桩基抗拔承载力,但对于超长抗拔桩,在拐点位置处,其上拔位移量已经很大了,所以必须选取更加科学的判断标准。《建筑桩基检测技术》(JGJ 106—2003)规定取上拔量控制值对应的荷载作为极限荷载,且不允许轻易外推。抗拔桩

当桩身出现多条环向裂缝后,其桩顶位移会出现小的突变,所以抗拔桩的上拔量控制值必须综合考虑裂缝和桩体拉伸引起得桩顶位移。上海市工程建设规范《建筑桩基检测技术规程》(DJG 08—218—2003)规定取30 mm上拔量控制值对应荷载作为抗拔桩极限承载力。

基于此标准,可见长桩承载力受其伸长变形影响比较大,所以设计一般要求桩在较小上拔位移时即能够达到承载力设计值。抗拔桩荷载-位移关系与桩的伸长变形,桩周土的不均匀性,桩周土的应力路径,桩周土的剪胀或剪缩等因素有关^[6]。荷载-位移关系按非均匀土中的非刚性桩表示见式(1):

$$\frac{P_s}{w_1} = \frac{\pi r_0^2 \mu \lambda G_s \eta}{\alpha + 1} \quad (1)$$

式中: P_s 为桩顶荷载; r_0 为桩半径; w_1 为桩顶位移; G_s 为土的剪切模量,随着深度而变化; $0 \leq \alpha \leq 1$,是 G_s 关于深度的影响系数; $\lambda = E_p / G_s$, E_p 为桩的弹性模量,

$$\mu = \sqrt{2 / r_0^2 \lambda \xi} \quad (2)$$

其中:

$$\xi = \ln(r_m / r_0) \quad (3)$$

式中: ξ 为有效影响系数,单位为1; r_0 为桩半径; r_m 为有效影响半径,

$$\eta = \text{th}(\mu l) \quad (4)$$

式中: l 为桩长。

从式(1)可以看出荷载-位移曲线与桩长 l 有着密切关系(摩擦力已经发挥到桩端),其斜率为关于桩长的双曲正切函数。随着桩长的增加,其曲线越平缓,说明对于超长抗拔桩,此时不易从荷载-位移曲线的拐点判断桩的极限承载力。当桩长继续增加到 $\mu l \geq 2$ 时, $\eta = \text{th}(\mu l)$ 趋于极限值 $0.964 \approx 1$,此时荷载-位移曲线不再与桩长有关,当上拔位移控制值确定后,其极限承载力也就确定了,从力学上来看,说明此时增加桩长对抗拔桩的刚度已经不产生影响了,此时的桩长定义为“有效桩长”:

$$L_{\text{eff}} = 2 / \mu \quad (5)$$

当桩长超过“有效桩长”,其桩顶位移控制值已经与桩长无关,此时在“有效桩长”之外设置扩大头或注浆,其位移控制值所对应的极限承载力均不能够得到提高。

3 试验结果与分析

某沿海城市一大型工程采用钻孔灌注桩,结合该地区的工程地质条件和施工经验,采取了直桩、扩底抗拔桩和直桩桩侧注浆三种方案进行了试桩工

程。根据试桩结果再确定安全可靠、经济合理的方案。初步设计方案三种桩型桩径均为700mm,桩顶标高为3.4m,有效桩长为50.4m,扩底桩扩底直径为1400mm,扩底部分高2000mm。勘察资料表明,本工程场地地层属于典型的沿海软土地层。本次试桩试验共进行7根抗拔桩试验,三根扩底抗拔桩K1、K2、K3,两根直桩在成桩后即进行桩侧注浆Z1、Z2,两根常规直桩C1、C2。各单桩上拔位移控制值为30mm时所对应的极限承载力见表1。

表1 单桩极限承载力表

桩号	C1	C2	K1	K2	K3	Z1	Z2
极限承载力/kN	7315	7379	7161	6562	6195	7391	7197

从表1可以看出,根据桩顶上拔位移量控制值来确定单桩极限承载力时,相同桩长的扩底桩和注浆直桩较常规直桩相比并无提高,这与传统短桩不太一致,说明超长扩底抗拔桩的扩大头还没有发挥出抗拔力,其上部桩身伸长量已经达到变形极限;注浆直桩桩周摩阻力还没有完全发挥,其拉伸变形也已经达到极限控制值。

为了得到试桩桩侧较准确的摩阻力分布规律,现场采取了光纤网络测试技术^[7],然后采取光顺样条法处理所测数据从而消除测量误差^[8]。常规直桩C2桩在各级荷载下侧摩阻力随桩身埋深分布见图1(C1桩不在此重复),扩底桩K2桩在各级荷载下侧摩阻力随桩身埋深分布见图2,注浆直桩Z2桩在各级荷载下侧摩阻力随桩身埋深分布见图3。

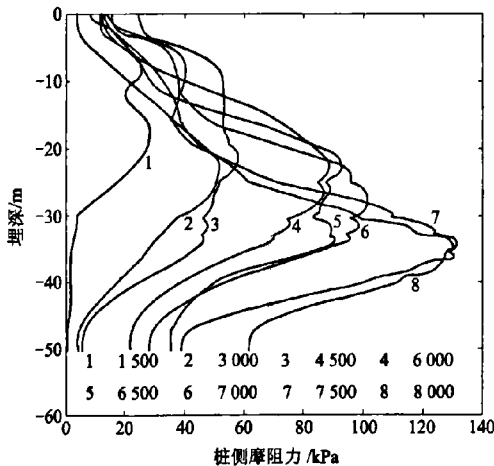


图1 C2桩桩侧摩阻力分布图

注:图中序号1~8分别表示第1级~第8级荷载1500kN、3000kN、4500kN、6000kN、6500kN、7000kN、7500kN、8000kN。

C2桩为常规直桩,在各级荷载下桩侧摩阻力发挥性状图见图1。从图1可以看出,摩阻力随着荷载的增加,其发挥峰值逐级下移。最大值达到130kPa,发生在埋深35m左右的地层,该层为⑦₁砂质粉土夹粉砂。当荷载较大时,其上部土层摩阻力已经达到极限,且表现出较强的“软化效应”。

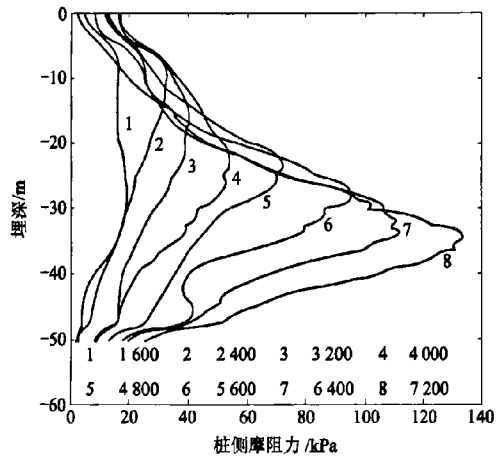


图2 K2桩桩侧摩阻力分布图

注:图中序号1~8分别表示第1级~第8级荷载1600kN、2400kN、3200kN、4000kN、4800kN、5600kN、6400kN、7200kN。

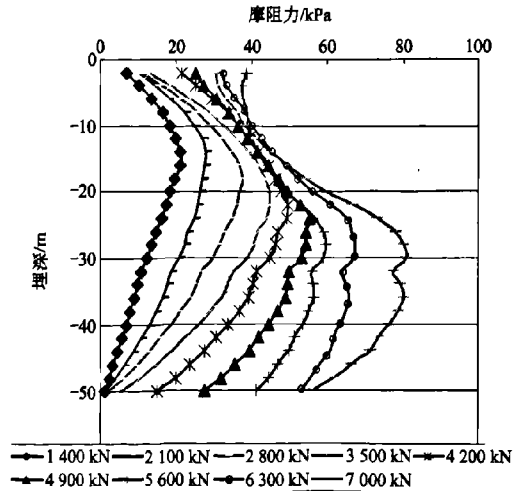


图3 Z2桩桩侧摩阻力分布图

K2为扩底桩,从图2可以看出其摩阻力最大值达到130kPa,也发生在⑦₁砂质粉土夹粉砂。比较图1和图2可以看出,超长扩底桩不能够提高桩侧摩阻力,荷载比较大的情况下,也就不能够减小桩身弹性伸长量,但由于扩大头的影响,桩端表现出土抗

力,桩端附近土层受扩大头影响随着桩身一起上移,固桩端附近的桩-土相对位移非常小,还处于弹性接触阶段,所以扩底桩桩端附近摩阻力小于直桩桩端附近摩阻力。

Z2为注浆直桩,比较图1、图2、图3可以看出,经注浆后,整个桩身的摩阻力都有了提高,且随着荷载的增加,桩身上部摩阻力各土层没有软化现象,其下部土层摩阻力还有较大发挥空间,而常规直桩和扩底桩上部摩阻力在一定荷载下都已经达到了峰值而出现了软化。注浆直桩当局部最大摩阻力为90 kPa左右时,就已经达到设计所需承载力,其桩侧摩阻力未充分发挥,桩的抗拔安全系数有了很大提高。

4 结论

1)软土地区超长抗拔桩在选型上与短桩不一样,本文以桩顶上拔位移控制值作为极限承载力选取标准,发现超长扩底桩和注浆直桩的承载力较常规直桩相比并无提高,是因为其桩身较长,已经超过了“有效桩长”,此时扩大头在“有效桩长”之外,所以其对承载力贡献不大甚至没有;桩侧经过注浆后,其摩阻力虽然有所提高,但在一定荷载下,其桩身上部混凝土仍然出现环向裂纹,桩身同样很快被拉伸到桩顶位移控制值,但此时桩侧土并未达到的极限抗拔力,还有较大发挥空间。

2)超长抗拔桩在长度选取上存在“有效桩长”,超过“有效桩长”的设计是不经济的,其对承载力的贡献得不到发挥,但“有效桩长”同时受桩径的影响,随着桩径的增加,其“有效桩长”增大。为了较小上拔量时能够达到较大承载力可以增大桩身模量或者

控制桩身上段桩侧注浆质量,可以适当提高桩身混凝土的标号或者增加桩身受拉钢筋含量。

3)软土地区超长抗拔桩的选型,如果在“有效桩长”以内,可以选取扩底抗拔桩,但由于其桩底扩桩对施工要求比较高,所以其造价也比较高;常规直桩由于在较大荷载下,其桩身上部摩阻力软化现象严重,安全储备系数低,一般不选用。基于桩侧注浆直桩其施工方便,成本较低,而且抗拔安全系数高,所以是超长抗拔桩的优先选用桩型。

参考文献

- [1] 万嘉康,徐云博. 抗拔桩应用与研究现状[J]. 地基基础工程,2007,11(3): 50-51.
- [2] 杨仕生. 软土地基中抗拔桩的受力与变形性状研究[D]. 杭州:浙江大学,2003.
- [3] 万世明. 抗拔桩的竖向承载力及其机理的研究[D]. 成都:西南交通大学,2001.
- [4] 王卫东,吴江斌,许亮,等. 软土地区扩底抗拔桩承载特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(9): 1419-1422.
- [5] 张武,高文生. 抗拔桩后注浆技术及其应用[J]. 岩土工程技术,2008,22(1): 32-34.
- [6] Randolph, A theoretical study of the performance of pile[D]. PH. D. Cambridge University,1977.
- [7] 马水山,王志望,李端有,等. 光纤传感器及其在岩土工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(增): 1692-1694.
- [8] 程正兴. 数据拟合[M]. 西安:西安交通大学出版社,1986.

收稿日期:2009-07-22