

钻孔灌注混凝土摩擦桩的荷载传递和测试

吴 玉 山 吕 绍 兴

提 要

在软弱地基和城市高层建筑物地基的工程处理中,钻孔灌注摩擦桩的应用有日益增多的趋势。本文结合其施工特征在理论上分析了灌注摩擦桩的承载机制和荷载传递性能,并以现场工程实例加以说明。同时,本文指出用实测法确定荷载传递规律时还存在着弹性模量、桩径变化等取值问题,须有待进一步研究。尽管如此,笔者认为用现场实测法确定荷载传递规律还是要比其它方法更接近于实际。

一、前 言

自古以来,在土木工程中,桩基础是经常使用的一种主要的基础型式。近年来随着我国四化建设的深入发展,沿海城市的开放和经济特区的建设,高层建筑物、核电站、海上石油平台、桥梁、港口、水利等工程建设大量兴建,采用桩基的工程越来越多,仅宝钢一期工程用桩量就超过5万余根,京津地区的建设用桩量也每年以万根计算。与此同时,桩基础的理论探讨和试验研究也随之广泛,深入开展。

从力学观点来看,桩可分为由桩身侧面与土层之间的摩擦支承荷重的摩擦桩、穿过比较软弱地层把荷重传到坚硬地层的支承桩和承受水平荷载的水平桩。实际工程中的桩并不象上述那样只单纯地具有某一种功能,而多是以一种功能为主兼有其它功能。在持力层埋深比较大的地基加固中,支承桩的施工难度大,工程费用高。在设计上要求单桩承载力越来越大,因而桩径加大桩身加长的情况下,用打入法(或压入法)施工就更困难,并且存在振动、噪声等公害问题。而现场灌注混凝土摩擦桩施工较易,单桩承载力大且抗震性能较好。这样,在软土地区的重大建筑中,现场灌注混凝土摩擦桩便得到较广泛的使用。

无论那一种桩基,其造价都比较昂贵,据统计要占总工程造价的20—30%,有些甚致还要大些。因此,如何从理论上阐明力学作用机制,荷载的传递特征,为工程建设提供科学依据,从而使工程施工安全合理,提高经济效益,这是工程界普遍关心的问题。近年来国内外在这方面做了不少的研究和探讨,笔者仅就现场灌注混凝土摩擦桩的一些问题进行分析 and 阐述。

二、桩的承力机制

施加在桩头的荷重由桩身周面和桩端传到地基中,因此桩头的荷载-下沉关系曲线,取决于桩材的应力-应变关系、桩土摩擦性状和桩端的荷载-下沉特征。要阐明桩的承力机理,

分别揭示这些因素的力学效应是非常必要的。一般而言,桩材的刚性远大于地基的刚性,在工程处理上往往视桩身为刚性体,而略去桩材的应力-应变关系的作用,因此本文暂对此不进行论述。

(一) 桩周面的摩擦阻抗

对于纯摩擦桩,桩头的荷载全部由桩周面的摩擦阻抗来承担。之所以产生摩擦阻抗,是由于桩土之间发生相对位移而引起的。当荷载比较小或相对位移比较小时,摩擦阻抗实际上是桩土之间的剪应力或土层中的剪应力;而剪应力的发挥则从桩头向桩端逐渐减弱,随着桩下沉量增加,摩擦阻抗也随之增大;达到完全发挥状态时的摩擦阻抗则为极限摩擦阻抗。当桩进一步贯入而超过极限摩擦阻抗时,桩土之间或桩周附近的土层内将发生滑动破坏。可以认为,在桩土之间发生滑动破坏的情况下,极限摩擦阻抗则等于固体间的库仑摩擦;在土层中产生滑动破坏时,则等于土的顺滑动面方向的不排水或排水剪切强度。桩在工程运转时,不可能都处于极限状态,而是桩头部分承载大,逐渐向桩端变小,相应的桩土之间的相对变形也是如此。桩的摩擦支承力是由接近于地表面的土层的极限剪切强度和较深处土层的剪应力这两部分组成的。

现场灌注混凝土桩时,所成的钻孔通常是不很规则的,甚至有扩孔和缩径现象。同时,桩身也不是绝对刚体。因此桩土之间的应力状态、滑动路径是非常复杂的。在理论分析和工程处理上,要贴切针对这样的复杂应力状态和滑动路径是近于不可能的,因而通常假定桩侧的摩阻面是在桩土的接触面和平行于桩身的附近土层中的滑动面。也就是说,桩土之间和土层中都是剪应力的作用,略去了挤压影响,滑动路径都是直的,不计路径曲折的效应。这样的考虑应该是偏于安全的。没有桩端反力影响的摩擦桩,如果仅是桩土之间滑动,那么其摩阻力由桩土之间的粘着力 C 和摩擦角 ϕ 所控制;若桩身侧面比较粗糙,则为土层中的 C 、 ϕ 值所左右。目前,在工程处理上往往采用后者。因为根据资料表明,桩侧的摩阻力由桩土之间引起的只不过占 7% 左右。当考虑桩的摩擦阻力对桩基进行设计时,以下两个问题是值得注意的:(1)在成孔过程中,由于应力释放,孔周附近土层的扰动往往要降低土层的 C 、 ϕ 值;(2)钻孔时,为了防止孔壁的塌落、垮孔,通常使用泥浆护壁。尽管在成孔后用清水冲洗及灌注混凝土时对泥浆有翻挤作用,但仍免不了有泥浆滞留孔壁,使桩周被泥浆包裹形成一层所谓的泥浆套。我们在某水利工程对某些试验桩开挖观察,有些桩的泥浆套厚达 3—4 cm。这些都导致桩侧摩阻力的减少。在设计时要定量确定这些影响因素是难以办到的。因此,在桩基础设计前,对桩的承载力、荷载传递特征进行现场测试是非常必要的。

(二) 桩端反力

支承桩主要靠桩端反力来支承荷载,摩擦阻力是次要的(有些情况还要考虑负摩擦力的作用)。摩擦桩则相反,现场灌注混凝土摩擦桩,通常是略去桩端反力的作用而作为纯摩擦桩来考虑。这是因为在成孔施工的过程中,松软淤泥在孔底的淤积(泥浆护壁施工更为严重)即使经过充分的冲洗清孔也难以除净,使桩的底面不能与地层接触,而坐落在一层易于变形的松软沉积物上。在某水利工地的现场量测了一些孔,孔底沉积物厚达 20 cm 以上。笔者对桩长 39m, 桩径 80cm 的混凝土灌注桩进行静载试验,测得如图 1 的桩端反力 P_p 和桩端位移

S_b 关系曲线。从曲线上看桩端反力最大 9t, 还不到极限荷载 (320t) 的 3%。因此, 将混凝土灌注桩作为纯摩擦桩来考虑是合理的。只有在建筑物允许有足够的下沉量且沉积物经过长时间的充分排水固结的情况下, 才可以计入桩端反力 P_b 。

三、荷载传递分析及测试

研究桩的荷载传递性能时, 一个重要的问题就是要知道桩侧壁摩阻力 P_f 与桩土相对位移 S_f 之间的关系, 即桩的荷载传递函数。目前用桩的荷载传递理论分析来确定传递函数的方法有两种: 一是把传递函数简化假定为某种曲线; 另一种是通过现场和室内试验的方法来

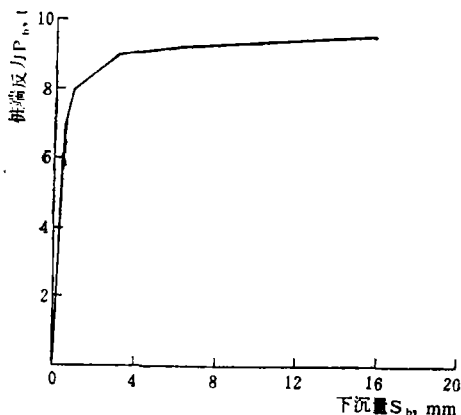


图1 桩端反力 P_b 与下沉量 S_b 的关系曲线

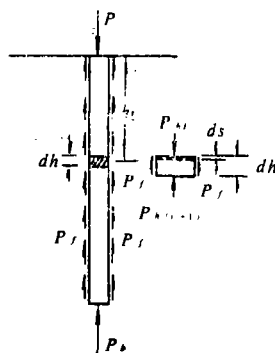


图2 荷载传递的分析

(一) 荷载传递基本微分方程

当荷载施加在桩头时, 上部桩身首先压缩并向下位移, 于是桩侧面受到土摩阻力的作用, 荷载在向下传递过程中必须不断克服这种摩阻力, 因而桩身的轴向力沿着深度而逐渐减少。如图2所示, 在桩的任意深度 h 处, 取一微分桩段, 根据平衡条件可得

$$P_{hi} = P_{h(i+1)} + P_f \quad (1)$$

式中 P_{hi} 、 $P_{h(i+1)}$ ——桩身轴向力, P_f ——桩侧摩阻力。

在微分段的压缩变形 $dS_{(h)}$ 与轴向力 $P_{(h)}$ 之间, 在桩身处于弹性变形时是服从虎克定律的, 则得

$$P_{(h)} = AE \frac{dS_{(h)}}{dh} \quad (2)$$

式中 A 、 E ——分别为桩身截面积和弹性模量。

由式(1)得摩阻力

$$P_f = P_{hi} - P_{h(i+1)} = dP_{(h)}$$

则摩阻应力

$$f_{(h)} = \frac{dP_{(h)}}{\pi D dh} = \frac{1}{\pi D} \frac{dP_{(h)}}{dh} \quad (3)$$

式中 D ——桩的直径。

把式(2)代入式(3)得

$$f_{(h)} = \frac{DE}{4} \frac{d^2 S_{(h)}}{dh^2} \quad (4)$$

这就是桩的荷载传递基本微分方程。可用以进行荷载传递的分析和计算。

(二) 荷载传递的测试方法

荷载传递测试是测量受载桩身材料的基本力学参量(应力或变形)变化,用基本微分方程求出荷载传递规律和摩阻力的分布特征。目前常用的测试方法有以下几种:

1.位移法:是通过实测受载桩身不同截面的下沉位移量 S ,从而得出任意相邻两截面之间的位移差 $\Delta S = S_i - S_{i+1}$,然最以 ΔS 代替 $dS_{(h)}$,以两截面之间距离 Δh 代替 dh ,并根据式(2)和式(3)求出轴向力 $P_{(h)}$ 和摩阻应力 $f_{(h)}$ 。目前位移测试多采用杆式滑动位移计和弦式多点位移计,但后者安装困难,精度低,因而用前者居多。

2.应变法:直接测试桩身不同深度点的应变值(ϵ_i),根据 $\epsilon_i = \frac{dS_{(h)}}{dh}$,用式(2)和式(3)求出轴向力 $P_{(h)}$ 和摩阻应力 $f_{(h)}$ 。该法常用的测试设备有电阻式钢筋应力计,其制作安装方便、精度高、价格便宜。但如果防潮处理不好,将造成零点飘移、数值不稳定,甚致造成失效。差动式钢筋应力计和卡尔逊应变计尽管比较稳定,但其读数精度比较低,特别用在靠近桩端部分的测试就更不合适。

3.应力法:是直接测试桩身不同深度的应力值(轴向的),再用式(3)计算摩阻应力。应力可用类似压力盒的设备进行测试,但笔者尚未见到这方面的测试结果的报导。

在测试位移和应变,再由微分基本方程计算轴向力和摩阻力时,需要注意以下两个问题:

(1)桩身混凝土的弹性模量:根据有关测试结果报导,由于桩身配筋的大小和疏密程度、混凝土标号大小及配制质量的不同,现场钻孔浇注混凝土桩的桩身弹性模量并不是个常量,而是不同深度处的桩身具有不同的值。一般是桩头向桩端,弹性模量逐渐增大。其原因一是在混凝土浇注过程中的捣固充实受自重影响很大,其结果必然是越深的混凝土越密实,且养护条件是下部优于上部,从而使弹性模量上小下大;二是在用泥浆护壁打孔的情况下,孔中残留泥浆,在浇注混凝土时泥浆被不断向上涌,总会有部分上涌的泥浆混入混凝土中,一般是上部混入的泥浆多于下部,造成了上部混凝土质量比下部差,也就使上部混凝土弹性模量比下部的低。

在分析荷载传递特征时,桩身的弹性模量是一个重要的参数。从式(2)可知,无论是用位移或应变来计算轴向力,都要引入该值。要测量桩身不同深度处的弹性模量值是非常困难的,因此目前常以露出地面桩头的实测弹性模量值来代表混凝土桩身段的弹模值。这是一种很不得已的方法,这也是造成荷载传递分析误差的一个重要原因。

(2)桩身的截面积:从式(2)和式(3)可知,桩的横截面积是荷载传递分析中的又一个重要参量,通常它被当作常量。但是现场钻孔灌注混凝土桩并不是等截面的,因为在土层钻孔不像在岩层中那样平直,难免有溶孔、塌孔,因而桩身表面有明显的凸凹不平,截面积亦有明显的变化,特别是施工质量差,有扩孔、缩颈现象时截面积的变化尤为突出。这是荷载传

递分析中引起误差的又一重要原因。

以上这两个问题,对于预制混凝土桩来说是不存在的,但对于现场钻孔灌注混凝土桩,就目前施工条件来看是难以克服的。因此用实测变形值按式(2)、式(3)推求荷载传递规律,其误差范围的准确确定还有待深入的探讨。

三、测试实例

试验是在湖北荆州地区某泵站工地进行的。试桩桩径 $\phi = 1.2\text{m}$, 桩长 $l = 33\text{m}$, 用与试桩同样尺寸的4根桩作为反力锚桩,用6个并联的油压千斤顶加载,最大出力为 1000t 。加载系统布置如图3所示。采用电阻式钢筋应力计和卡尔逊应变计进行荷载传递的测试。同时用这两种测试元件进行测试是为了相互验证。测量断面的布置原则是:(1)考虑土层变化情况,一般在不同土层交界处设置测量断面;(2)某一土层比较厚或单一土层时,主要考虑测量断面控制密度和测量精度的要求,其测量断面布置如图4所示。

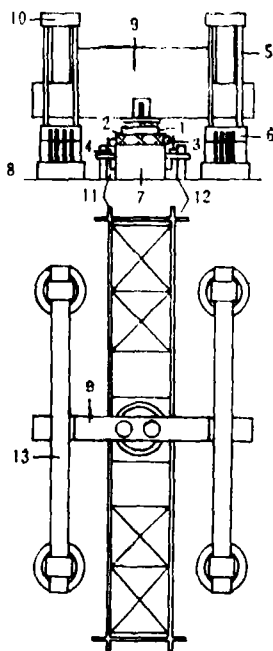


图3 垂直荷载试验布置图

1. 千斤顶 2. 传力板 3. 百分表 4. 表座
5. 拉杆 6. 双向拉力提篮 7. 试桩
8. 锚桩 9. 主梁 10. 承压梁 11. 测架
12. 基准桩 13. 侧梁

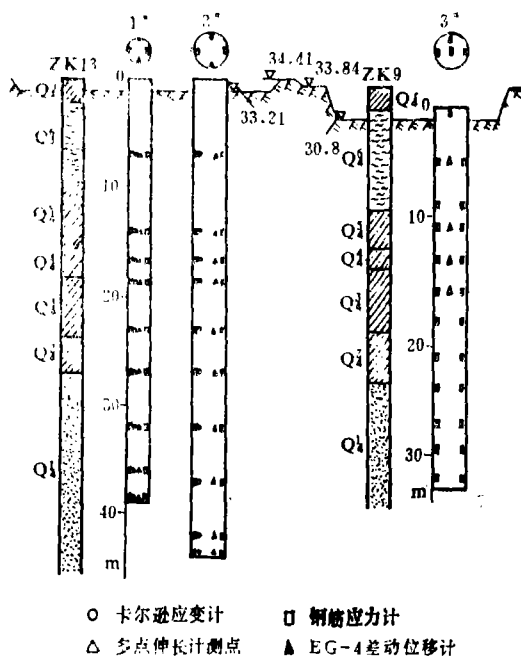


图4 桩身测量元件埋设分布图

- 卡尔逊应变计 □ 钢筋应力计
△ 多点伸长计测点 ▲ EG-4差动位移计
Q¹₄——人工填土 Q⁶₄——淤泥 Q⁵₄——高塑性粘土
Q⁴₄——中塑性粉质粘土 Q³₄——高塑性粘土
Q²₄——淤泥质粉质粘土 Q¹₄——粉细砂

测试结果分别有桩头荷载-桩顶下沉关系曲线(图5)、不同荷载下的轴向力分布曲线(图6)和摩阻应力分布规律(图7)。从图5可知,到达极限荷载前下沉位移很小;过了极限荷载后下沉位移量急剧增加。从几组单桩静压试验结果来看,到达极限荷载时下降位移量在3—6 mm的范围内。前面已提到,轴向力的分布是从上而下逐渐减小的,从图6可看到此变化规律。其减小的梯度取决于土层性质、土层应力状态、桩侧面的粗糙度和施工质量等,

而与桩径无关。从轴向力分布规律可知,现场灌注混凝土桩是没有充分利用桩材的强度的,特别是桩的下端。而等直径的空心桩则是比较合理的,既不减少摩阻力,也较充分地利用桩材强度。上面也谈过,摩阻力是上部先于下部逐渐得到发挥的,但并不等于说上部的摩阻力大、下部的摩阻力小。其值的大小也取决于土层性质、应力状态、桩侧粗糙度和施工质量等。从图7可知,土层性质不同,其摩阻力值的分布规律也不一样。同时,摩阻力的发挥与其位移量有关,根据我们的实测资料分析表明:在粘土中位移量为1—3 mm、砂土中位移量为4—10mm时,摩阻力得到了充分发挥。这些规律符合粘土和砂土的强度发挥与应变关系的基本特征。

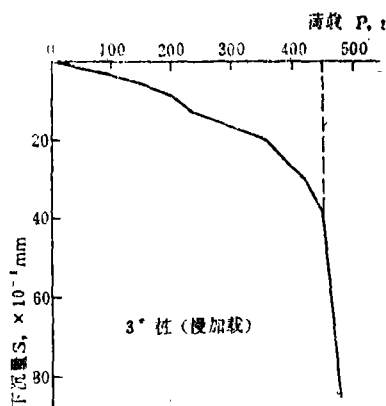


图5 桩端荷载与下沉量的关系

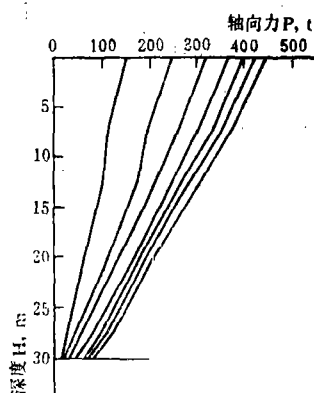


图6 桩身轴向力分布

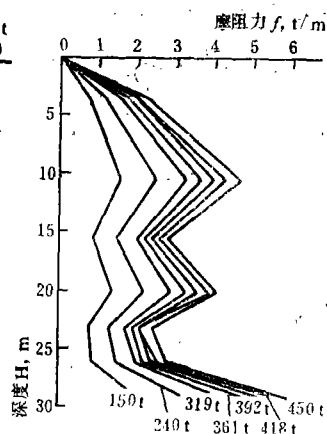


图7 不同荷载下摩阻力沿桩身的分布

四、负摩阻力

上面已述,摩阻力是由于桩土之间相对运动而引起的。当桩的下沉量大于土层的下沉量时,出现正摩阻力,一般就称摩阻力;相反,当土层的下沉量大于桩的下沉量时,则出现所谓负摩阻力。在同一根桩出现正、负摩阻力时,它们分别作用在桩的不同部位,且作用方向相反。

现场灌注混凝土摩擦桩可能出现负摩阻力的条件是:(1)桩周有堆载;(2)桩上部土层比较松散或是堆填土;(3)地下水位全面下降,土中有效应力增大使土骨架压缩而引起桩周土下降。

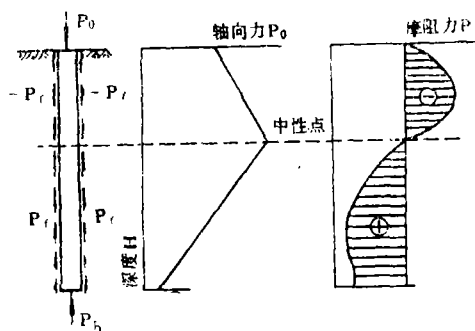


图8 负摩阻力分布示意图

当出现负摩阻力时,沿桩身某深度处必存在所谓中性点的断面。即在该断面以上,土的下沉量大于桩的,桩侧承受负摩阻力,该断面以下,桩的下沉量大于土的,桩侧面承受正摩阻力。因此该点的桩土位移相等,摩阻力为零,轴向力最大(见图8)。由此可知,负摩阻力将给桩增加一个有害荷载,实际上是减少了

桩的承载能力。因此,在桩侧面出现负摩阻力的情况下,设计、施工上都要慎重对待,以保证工程的安全。

五、结束语

现场钻孔灌注混凝土桩的承载机制和荷载传递特征,可以从理论分析和室内模拟试验得到结果,但是由于种种的假设和现场条件差别较大,要达到实用上的要求看来还有距离。相对来说,现场实测分析方法尽管存在有弹性模量取值、桩径变化及施工质量等问题,但仍得到较接近于实际的结果,因此为工程界所重视。

近年来,动力法测试单桩承载力引起人们的兴趣,因为它省时、省工,但是其理论分析公式众多,各家各行其事,众所公认的、合理的分析方法尚未形成,因此静力法测桩的结果又常常是动测法的检验标准。另外,通过静、动对比试验,寻找合理的动力分析方法是目前桩基试验中引起人们普遍重视的发展方向。

本文成文过程中,得到我所三室和中心试验室一些同志的协助和提供资料,在此一一致谢。

参 考 文 献

- 〔1〕 岸田英明,高野昭信,大口径杭の铅直极限支持力,土と基础,1980, No.11.
- 〔2〕 陂田 理,大口径场所打よ杭の铅直支持力,土と基础,1980, No.11.
- 〔3〕 西田义亲,摩擦杭の考え方レニフいて,土と基础,1982, No.2.
- 〔4〕 石井孝男,森博人,摩擦杭の铅直支持力レニフいて,土と基础,1982, No.2.
- 〔5〕 孙更生,郑大同主编,软弱地基与地下工程,中国建筑工业出版社,1984年.
- 〔6〕 洪毓康,陈强华,钻孔灌注桩的荷载传递性能,岩土工程学报,1985年第5期.
- 〔7〕 索富珍,俞振全,高层建筑大直径灌注桩试验研究,应力波理论在桩工程中应用论文集,1986年.
- 〔8〕 胡人礼编著,桥梁桩基分析和设计,中国铁道出版社,1987年.
- 〔9〕 王钟奇等编著,岩土工程测试技术,中国建筑工业出版社,1986年.

Load Transmitting and Measuring of Grouting Friction Piles

Wu Yushan

Lu Shaoming

Abstract

In engineering treatment of soft and weak ground and high rise building foundations, grouting friction piles are increasingly getting popular. This paper makes theoretical analyses to the bearing mechanism and the load transmitting behaviour of these piles in the light of construction cases and in-situ practice. Determination of load transmitting behaviour field tests is considered to be more close to the real case than from other methods, although there are some remaining problems from the alteration of modulus of elasticity and pile diameters.