

夯扩桩技术的发展与应用

沈保汉

兰小华

(北京建筑工程研究院 100039) (北京波森特岩土工程有限公司 102218)

【摘要】介绍了国外夯击式沉管扩底桩的基本情况,阐述了夯扩桩的工作机理、特点、适用范围、施工顺序等,总结了复合载体夯扩桩的基本原理、承载机理、适用范围及施工顺序。

【关键词】夯扩桩 复合载体 等效计算面积 承载力

Development and Application of Ram-compaction Piles/Shen Baohan¹, Lan Xiaohua² (1 Beijing Building Construction Engineering Research Institute, Beijing 100039, China; 2 Beijing Puissant Geotechnical Engineering Co., Ltd., Beijing 102218, China)

Abstract: The mechanism, characteristics, application scope and construction of ram-compaction piles are introduced. Further, the mechanism of bearing, application scope and construction order of ram-compaction piles with composite bearing base are summarized.

Keywords: ram-compaction piles; composite bearing base; equivalent calculation area; bearing capacity

一、夯扩桩的起源

1. 沉管扩底灌注桩

地基上部为软弱土层或较软弱土层,在不深处(一般20m以内)有物理力学性能较好的桩端持力层的地质条件下,采用扩底桩能够有效地发挥扩底支承性能,获得较高的单桩承载力和较好的技术经济效益。因此,扩底桩被广泛地应用于各类工程基础中,扩底成型的工艺有钻扩、爆扩、振扩、压扩、冲扩、夯扩、注扩、挖扩及挤扩等各种类型,沉管扩底灌注桩为其中的一类。

普通直径($d < 500\text{mm}$)的沉管灌注桩由于单桩竖向承载力不够大,一般只能作为多层和小高层建筑的基础。为了能满足20层左右的高层建筑桩基础单桩承载力的要求,国内外在研制开发大直径沉管灌注桩的同时,也研制开发出一系列沉管扩底灌注桩。

沉管扩底灌注桩按成孔方法可分为:锤击振动沉管扩底灌注桩,静压(振动)沉管扩底灌注桩,沉管预制平底大头灌注桩和夯(锤)击式沉管扩底灌注桩四类。

2. 国外的夯击式沉管扩底桩

国外的夯击式沉管扩底桩有两大类:第一类有钻孔灌注桩、西方扩底桩(Western Compressed Pile)、得尔塔桩(Delta Pile)、阿尔法桩(Alpha Pile)、麦克阿瑟柱桩(MacArthur Pile)、GKN桩(GKN Pile)、维斯特雷顿BV桩(Verstraeten BV Pile)及辛普莱克斯桩(Simplex Pile)等;第二类有弗兰克桩(Franki Pile)及道塞提桩(Dowsett Pile)等。

第一类桩(阿尔法桩除外)的成桩工艺是:把底端暂时封闭(用平板式钢桩尖、预制钢筋混凝土桩尖或铸

铁桩尖等)的厚壁钢桩管(带芯轴或内管)用锤打入到桩端设计所需要的人土深度;然后拔出芯轴或内管,往桩管内放入形成扩大头所需的干硬性混凝土或塑性混凝土,再次插入芯轴或内管;在稍稍提升桩管的同时锤击芯轴或内管形成扩大头;再次拔出芯轴或内管,往桩管中插入钢筋笼,浇注桩身混凝土;再把芯轴或内管压在桩身混凝土上继续锤击,最后拔出钢管、芯轴或内管,成桩。

阿尔法桩的成桩工艺是:把底端用平钢板暂时封闭的钢桩管和外侧装有钢筋笼的中空芯轴用锤打入到桩端设计深度;打入时采用打压填装法使混凝土从中空芯轴进入芯轴底板下端,达到设计深度时,稍稍提升桩管,使平钢板与桩管脱离,锤击芯轴,从而把混凝土挤出管外,形成扩大头;向中空芯轴再填充混凝土,并在提升桩管的同时锤击芯轴,使混凝土挤出形成桩身。

第二类桩中的弗兰克桩为单管内击式夯扩桩,其施工方法与第一类桩不同。该桩的基本成桩工艺是:先在钢管内投入一定数量的碎石或干硬性混凝土,形成管内的土塞桩;然后让卷扬机牵引的圆柱形重锤自由落锤,锤击管内的土塞桩,依靠土塞桩与管壁的摩擦阻力将钢管沉入土中;当沉管深度达到设计标高后,用钢丝绳把钢管吊住,将管内土塞桩强制锤击出管外,再灌入一定量的混凝土,在桩端锤击形成扩大头;插入钢筋笼,继续向桩管内灌注混凝土,换上轻锤(比重锤的直径小,以便在钢筋笼内锤打);继续灌入混凝土,边锤击混凝土,边拔出桩管,直到设计桩顶标高,最终成桩。

道塞提桩的成桩方法与弗兰克桩相似。

二、夯扩桩

夯扩桩是沉管灌注桩与扩底桩结合的产物,它吸收了国外的夯击式沉管扩底桩的优点,并摒弃沉管灌注桩的一些缺点,是具有中国特色的一种桩型。

1. 夯扩桩的沉桩机理

夯扩桩的施工设备在锤击沉管灌注桩的机械设备与施工方法的基础上加以改进,增加1根内夯管,按照一定的施工工艺(无桩尖或钢筋混凝土预制桩尖沉管),采用夯扩的方式(一次、二次、多次夯扩与全复打夯扩等),将桩端现浇混凝土扩成大头形,桩身混凝土在桩锤和内夯管的自重作用下压密成型。

2. 夯扩桩特点

(1)内管底部的干拌混凝土(无桩尖工艺)可有效起到止淤和短时止水作用,使后续混凝土灌注质量得到保证。

(2)桩身混凝土借助于桩锤和内夯管的下压作用成型,可避免或减少缩颈或断桩等弊病的产生。

(3)在夯扩过程中,锤击力经内夯管的传递,直接贯入桩端持力层,强制将现浇混凝土挤压成夯扩头,同时,也将桩端持力层压实挤密,使桩端持力层得以改善,桩端截面积增大,促使桩端阻力和桩承载力大幅度提高。

3. 夯扩桩适用范围

夯扩桩适用于单桩竖向极限承载力标准值不大于4 000kN的工业与民用建筑。其中单桩竖向极限承载力标准值大于2 000kN的桩,属高承载力夯扩桩工程,在设计与施工时应采取相应措施。高层建筑夯扩桩基的直径可达600mm。

夯扩桩成桩深度一般不宜大于20m,若桩周土质较好,成桩深度可适当加深,但最大成桩深度不宜大于25m。

夯扩桩的桩端持力层宜选择稍密~密实的砂土(含粉砂、细砂和中粗砂)与粉土层,砂土、粉土与粘性土交互层及可塑~硬塑粘性土层,福建部分地区已将花岗岩残积粘性土层和稍密~中密砾卵石层作为夯扩桩的桩端持力层,对高承载力夯扩桩宜选择较密实的砂土或粉土层作为持力层,桩端以下持力层的厚度不宜小于桩端扩大头设计直径的3倍;当存在有软弱下卧层时,桩端以下持力层厚度应通过强度与变形验算确定。

4. 夯扩桩优缺点

(1)优点:在桩端处夯出扩大头,单桩承载力较高;借助内夯管和柴油锤的重量夯击灌入的混凝土,桩身质量高;可按地层土质条件,调节施工参数、桩长和夯扩头直径以提高单桩承载力;施工机械轻便,灵活,适

应性强;施工速度快,工期短,造价低;无泥浆排放。

(2)缺点:遇中间硬夹层,桩管很难沉入;遇承压水层,成桩困难;振动较大,噪声较高;属挤土桩,对周边建筑和地下管线有挤土效应;扩大头形状很难保证与确定。

5. 夯扩桩施工特点

止淤封底措施成功与否是无桩尖夯扩桩施工成败的关键,因此正式施工前必须进行试成孔试验,以确保止淤封底效果良好。通常取外管与内夯管等长,并在外管顶部增加一个与外管同径、高130mm的加劲圈,使内、外管组合后,在外管下端形成一个高度为130mm的空腔。假如止淤填封底失效,则可将加劲圈的高度增加到200~250mm,并相应增加干拌混凝土的用量,增加隔水层的厚度。假如采取这一止淤封底措施还失败,则可采用带预制桩尖的夯扩桩。

在夯扩过程中,对最后一道形成夯扩头的双管同步下沉($h-c$)高度的控制,是保证夯扩质量的关键。成功的夯扩桩施工,双管同步下沉至($h-c$)高度时,往往要锤击50次以上,而此时柴油锤跳得最高,锤击贯入度却很小;反之,则说明夯扩效果不理想,应增加夯扩头的投料高度 H 值,重新调整夯扩参数或采用二次夯扩顺序等。总之,夯扩桩施工工艺参数($H, h, h-c$)的正确选择是衡量设计是否合理,施工是否切实可行的重要指标。针对桩端持力层而言,砂土中外管内混凝土的高度 H 值宜比粘性土层的大些,性质差一些的砂土中的 H 值比性质好一些的砂土中的宜大些。外管上拔高度 h 一般取 $(0.40\sim 0.55)H$,施工中一般取0.8~1.5m为宜。 H, h, c 的意义如图1所示。

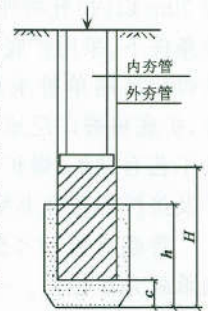


图1 夯扩头直径计算

6. 夯扩头的估算

夯扩桩是以桩端夯扩头支承为主的桩型,而夯扩头由现浇混凝土锤击夯扩挤压成型,隐藏在地层深处,桩端没有像预制桩那样固定的尺寸。因此,合理估算夯扩头的最大直径,对设计计算桩的端阻力和承载力,具有实用价值。

工程桩实测夯扩头形状与模拟试验夯扩头结果表明:在压缩模量大的中密粉砂、硬塑粉质粘土持力层中,由于侧向阻力大,较难夯扩,夯扩头形状呈扩大的圆柱体;在桩端为中密的粉土、可塑粉质粘土中的夯扩头形状呈中间略大的腰鼓型;在压缩模量较小的稍密粉土持力层中,由于侧压阻力较小、较易夯扩,夯扩头呈近似的灯泡形状;而在高压缩性、压缩模量小的淤泥

质土持力层中侧向阻力小,自由挤压的夯扩头近似呈球体。

随着夯扩桩在有关地区的试验、推广与应用,国内有关规范、规定及有关单位相继提出夯扩头直径的估算公式。这些估算公式大致将夯扩头投料量经过夯扩工序转变为假想体积,然后考虑修正系数,估算出夯扩头直径。《武汉市夯扩桩设计施工技术规定》(WBJ8-97)中夯扩桩端扩大头直径(图1)按下式估算:

$$D_n = \alpha_n d_0 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n H_i + h_n - c_n}{h_n}} \quad (1)$$

式中: D_n 为夯扩 n 次的扩大头计算直径(m); α_n 为扩大头直径计算修正系数; d_0 为外管直径(m); H_i 为夯扩 i 次时外管中灌注混凝土高度(m); h_n 为夯扩 n 次时外管上拔高度(m); c_n 为夯扩 n 次时外管下沉底端至设计桩底标高之间的距离,一般取 $c_n = 0.2m$ 。

三、复合载体夯扩桩

复合载体夯扩桩是近年发展起来的一种具有特色施工工艺的桩型,从受力和施工工艺来看,复合载体夯扩桩避软就硬,通过对承载性能较好的上层的工艺处理使经过处理的复合载体形成扩展基础。

1. 基本原理

复合载体夯扩桩先采用细长锤夯击成孔,然后将护筒沉到设计标高,再用细长锤夯击护筒到一定深度,最后分批向孔内投入填充料和干硬性混凝土,反复夯实、挤密,在桩端形成载体;然后放置钢筋笼,灌注混凝土,成桩。复合载体夯扩桩是由复合载体和混凝土桩身组成,复合载体是由干硬性混凝土、填充料、挤密土体和影响土体组成的。该工艺通过外加填充料和夯击对深层土体挤密形成载体,其核心是基于深层土体的密实理论。

复合载体受力与夯扩桩的受力是完全不同的,夯扩桩靠桩侧与桩端扩大头承载,而复合载体夯扩桩施工完毕后,深层载体为直径约2~3m,厚约3~5m的密实混合体,复合载体夯扩桩的承载特性是扩散受力,因此它是一种扩展基础。桩身将上部结构荷载传递到载体,再由载体传递并扩散到承载力高的持力层土体,承载力的验算可以等效为扩展基础的承载力验算。当承台梁下采用复合载体夯扩桩时,桩端载体等效为在桩端深度形成一条形基础;当独立柱基下采用复合载体夯扩桩,桩端载体等效为桩端深度处的深层独立基础;当采用满堂布设复合载体夯扩桩时,桩端载体在桩底等效为桩端深度处的筏板基础,故复合载体夯扩桩施工工艺实际上是一种将条基、独立基础、筏板基础等进行深层施工的技术。

2. 复合载体夯扩桩的优点与缺陷

复合载体夯扩桩作为一种新工艺具有以下几个优点:1)通过填料、夯击挤密土体形成复合载体,提高了单桩承载力。通常情况下,其承载力是同条件下相同桩径和相同桩长普通混凝土灌注桩的3~5倍;2)在同一施工场地,在不改变桩长、桩径的前提下,可根据不同的设计要求,通过调整施工参数来调节单桩承载力;3)施工机械轻便,移动灵活;4)施工速度快、工期短;5)施工过程中无泥浆产生,同时还消耗大量的建筑垃圾和工业废料,保护了建筑环境;6)造价经济。

在施工中复合载体夯扩桩也存在着一定的局限性:1)当土层中存在硬夹层时,普通锤击跟管困难,必须采用螺旋钻配合施工;2)该工艺会对周围建筑和管线产生挤土效应;3)在填料夯击过程中有轻微振感;4)当地下水位较高时,应注意封水、止水。

3. 复合载体夯扩桩的设计计算

复合载体夯扩桩的计算,借鉴单桩承载力特征值的计算公式,有:

$$R_a = u_p \sum q_{sia} l_i + q_{pa} A_e$$

式中: A_e 为复合载体等效计算面积(m^2); q_{pa} 为载体底部持力层修正后的承载力(kPa)。由于桩侧阻力较小,故设计中常常不考虑其贡献,其计算可以简化为:

$$R_a = q_{pa} A_e$$

复合载体夯扩桩由土体挤密而成,其等效面积与填料体积和挤密能量都密切相关,填料的体积与夯击直接影响土体的三击贯入度。根据试验与实践,规范JGJ/T135-2001给出了不同土体对应于不同三击贯入度的 A_e 值。

4. 复合载体夯扩桩的施工范围

复合载体夯扩桩自诞生以来已在工业、民用和市政工程中被广泛采用,普通复合载体夯扩桩的桩径可选用400,500,600mm。桩长可到24m,极限承载力可达4000kN,为国家节省了大量的成本,当地面以下4.0~10.0m范围内存在承载力高的持力层时,该工艺技术经济效益更加明显。

经过几年的研究与发展,大直径复合载体夯扩桩技术日趋成熟,试验的最大极限承载力可达10000kN。该桩型设备简单,成本低,且施工速度快,已经开始应用于桥梁基础。随着对该技术的不断研究,其将为市政建设节省大量投资。

5. 施工工艺和设备

施工工艺(图2)为:

(1)在桩位处挖直径等于桩身直径、深度约为500mm的桩位圆柱孔,移机就位;

(2)提起夯锤后快速下放,使夯锤出护筒,入土一定深度;

(3)用副卷扬机钢丝绳对护筒加压,使护筒底面与锤底齐平;

(4)重复步骤 2,3,将护筒沿垂直沉入到设计深度;

(5)提起夯锤,通过护筒投料孔向孔底分次投入填充料,并进行大能量夯击;

(6)填充料被夯实后,在不再填料的情况下连续夯击三次并测出三击贯入度,若三击贯入度不满足设计要求,重复步骤 5,6,直至三击贯入度满足设计要求为止;

(7)通过护筒投料孔再向孔底分次投入设计需要的干硬性混凝土,并进行夯击;

(8)放入钢筋笼;

(9)灌注桩身混凝土。

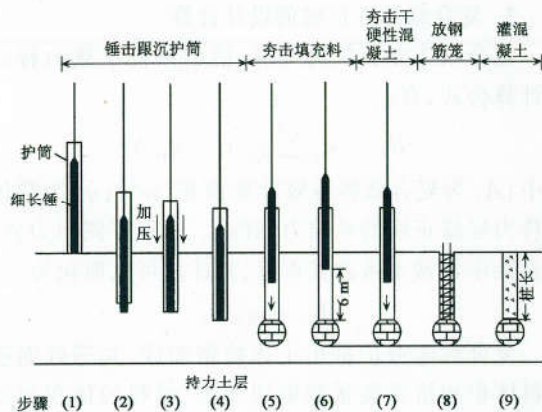


图2 复合载体夯扩桩的施工工艺

复合载体夯扩桩的施工设备为液压步履式夯扩桩机(图3),主要部件包括:1)由中空竖杆及支承斜杆等组成的框架;2)50kN快放式主卷扬机,用于提升及快

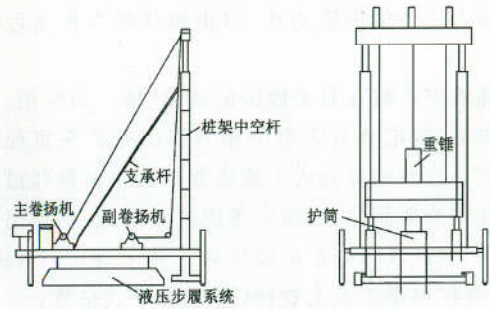


图3 复合载体夯扩桩的施工设备

放重锤;3)30kN副卷扬机,用于反压和提升护筒;4)护筒,主要起导向和护壁作用,通常采用 $\phi 327 \sim 600\text{mm}$ 的无缝钢管,其长度视设计桩长而定。

四、展望

夯扩桩与复合载体夯扩桩的受力机理和设计施工中的不同之处,夯扩桩通过提管、夯击混凝土在桩端形成扩大头,对一定埋深内存在卵石、砾砂、砂性土等持力层的地基具有一定的经济效益。复合载体夯扩桩通过特定的施工工艺在桩端形成复合载体,是一种新型环保的施工工艺,具有广阔的推广前景和显著的经济效益。

参考文献

1. 沈保汉. 桩基础施工技术现状及发展方向. 施工技术, 2000.
2. 杨家丽. 建筑工程地基处理技术-夯扩桩的设计与施工. 科学技术出版社, 1997.
3. Tomlinson M J(朱世杰译). 桩的设计和施工. 人民教育出版社, 1984.
4. 沈保汉等. 复合载体夯扩桩. 见:地基基础理论与实践新进展. 中国环境科学出版社, 2002.

(上接第 25 页)

的干硬性混凝土之上产生了类似缩径的信号,这样的信号来自于桩端混凝土质量受影响或桩身与载体的结合不良,但由于桩端同向反射小,说明这两方面影响较小,承载力不会受影响。曲线 4 在桩底有明显的同向反射,且振幅较大,同向反射后的反向信号也不明显,这类信号往往是由于相临桩施工时引起的桩身移动,造成载体与桩身结合不良,或是在载体与混凝土桩身间有夹泥或混凝土质量有缺陷等,对承载力有一定的影响,应根据试验而定。

根据众多工程实践,复合载体夯扩桩的桩身完整性检测容易出现的问题为载体与桩端的结合不良而影响承载力,而复合载体夯扩桩其承载力来源于桩端载体,只要三击贯入度满足设计要求,载体达到等效计算面积,只要对桩顶稍加复打,使桩端与载体结合密实,

即可达到设计的承载力。

三、结语

复合载体夯扩桩作为一种新型的地基处理技术,是等效扩展基础,同时也具有混凝土桩身,低应变检测时,应根据复合载体夯扩桩的结构特点与受力机理对桩身与桩端的缺陷进行正确分析和判断,根据其缺陷对承载力的影响进行分类,既保证复合载体夯扩桩的质量,又避免不合理的判断。

参考文献

1. 国家建设工程质量监督检验中心. 桩基动测技术. 中国建筑工业出版社, 2002.
2. 罗骥先. 桩基工程检测手册. 人民交通出版社, 2002.
3. 建筑桩基检测技术规范. 中国建筑工业出版社, 2003.
4. 桩基工程手册编写委员会. 桩基工程手册. 中国建筑工业出版社, 1995.