

# 深层水泥搅拌桩的设计施工与质量检测

汪士峰

(中航勘察设计研究院上海分院,上海 200134)

摘要:介绍了深层水泥搅拌桩在建筑工程中的应用、设计计算方法与施工要求,论述了搅拌桩的质量检测方法。

关键词:深层搅拌桩;钻孔抽心;动力触探

中图分类号:TU472.3+6 文献标识码:B 文章编号:1672-7428(2005)S1-0088-04

## 1 深层搅拌桩综述

深层搅拌加固软土地基是利用水泥或石灰等材料作为固化剂,通过特别的深层搅拌机械在地基深部就地软土和固化剂(浆体和粉体)强制搅和,利用软土和固化剂发生一系列物理化学反应,使软土硬结而形成强度较高、水稳定性好的水泥加固体,使其与天然地基共同组成承载力较高、压缩性较低的复合地基。

深层搅拌法处理软土地基是较为普通的一种地基处理方法,在地基加固过程中无振动、无噪声、对环境无污染,施工工艺简单、机械化程度较高、施工速度快、造价低廉、施工质量容易保证,处理效果容易检测,即使出现不合格桩,其补救方法也简单方便等优点。深层搅拌法最适宜加固较深厚的淤泥、淤泥质土、粉土和含水率较高、塑性指数较低、土性较差且地基承载力 $\geq 120$  kPa的粘性土地基,对超软土效果更为显著。多用于12层以下的建筑楼房和基坑支护帷幕止水,以及地下防渗漏等工程。

深层搅拌法最早是美国在二次大战后研制成功的。经过20年的探索及研究,于20世纪六七十年代,在日本、瑞典、法国、英国等国家广泛使用,并形成多种工法。国内1980年在上海宝钢的软土地基加固中首次正式采用深层搅拌法并获成功。同年11月由冶金部基建局主持,通过了“饱和软粘土深层搅拌加固技术”的鉴定,此后在全国各地特别是软土地区得到了广泛的应用。90年代,深层水泥搅拌法以其在淤泥、淤泥质土、粘性土、粉土、杂填土中显著的处理加固效果,及施工效率高、施工简洁、省料价廉、无环境污染、适用多种土层等优点,成为软土地基处理中最有前途、应用最广的方法之一。

深层搅拌法是相对于浅层搅拌法而言。根据施

工方法的不同,深层水泥搅拌法可分为水泥浆搅拌和粉体喷射搅拌两种。

### 1.1 水泥浆深层搅拌法(湿喷)

将水泥作为固化剂制成浆状液,通过深层搅拌机与土体均匀拌合成桩。根据经验和土体性质,一般水泥掺入比 $\alpha_w$ 为10%~20%,水灰比为0.4~0.5。

### 1.2 粉体喷射搅拌法(干喷)

通过粉体发送器将干水泥粉输入被搅拌的软土中,与土体充分拌合,形成水泥土桩。一般水泥掺入比 $\alpha_w$ 为10%~20%。

干喷法与湿喷法相比,由于它采用粉体作为固化剂,不再向地基中注入附加水分,反而能充分吸收周围软土中的水份,因此加固后初期强度高,对周围土质改善更有利,对于含水量高的软土地基加固效果尤为显著。特别是在与后续上部施工间隔短的情况下更显示了其初凝快的优点。

## 2 深层搅拌桩的设计计算

### 2.1 搅拌桩设计流程(见图1)

### 2.2 地质勘察及加固形式和范围

(1)地质勘察除常规要求外,还应特别注意:土质分析中的有机质含量,可溶盐含量,总损失量;水质分析中的地下水酸碱度(pH值),硫酸盐含量。

(2)选择加固的形式有柱(桩)状、壁状、块状三

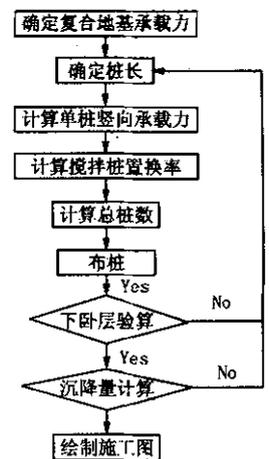


图1 搅拌桩设计流程图

收稿日期:2005-06-30

作者简介:汪士峰(1976-)男(满族),辽宁人,中航勘察设计研究院上海分院助理工程师,岩土工程专业,从事岩土工程勘察设计与施工工作,上海市浦东新区张杨路1647弄4号105(021)58853142、13341666772。

种,对单层工业厂房独立桩基础和多层房屋条形基础下的地基加固常采用桩状布置。

(3)确定加固范围。由于搅拌桩的强度和刚度介于刚性桩和柔性桩之间,承载性能又与刚性桩相似,因此可仅在上部结构基础范围内布桩,而不必象柔性桩那样在基础以外设置保护桩。

### 2.3 单桩尺寸

桩的设计应使土对桩的支承力与按桩身强度确定的承载力相近,因而,主要是确定桩长并选择水泥掺入比。就减少地基沉降而言,桩越长效果越好,但存在一个技术经济较为合理的桩长,如果增加桩长,按桩长平均后每米减小的沉降量不再增加,这说明该桩长是一个技术经济效果较为合理的值,一般情况下水泥搅拌桩的经济长度 $\geq 15.0$  m。桩的间距过小,水泥搅拌桩的数量急剧增加,因此,从技术经济角度看,也存在一个合理值。水泥搅拌桩设计就是首先根据以上原则考虑不同的地质特性、荷载大小等情况拟定一个初步的桩长和桩间距,计算复合地基承载力和沉降,若满足要求则停止计算若不满足要求则改变桩长和间距重新计算,直至满足要求为止。

### 2.4 单桩竖向承载力

单桩竖向承载力特征值宜通过现场单桩载荷试验确定,也可以按下式计算,并取其中较小值。

$$R_a = \eta f_{cu} A_p$$

或

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha A_p q_p$$

式中: $R_a$ ——单桩竖向承载力特征值,kN; $f_{cu}$ ——与搅拌桩桩身水泥石配比相同的室内加固土试块(边长为70.7 mm的立方体,也可采用边长为50 mm的立方体)在标准养护条件下90天龄期的立方体抗压强度平均值,kPa; $\eta$ ——桩身强度折减系数,干法可取0.20~0.30,湿法可取0.25~0.33; $u_p$ ——桩的周长,m; $n$ ——桩长范围内所划分的土层数; $l_i$ ——桩长范围内第*i*层土的厚度,m; $q_{si}$ ——桩周第*i*层土的侧阻力特征值。对淤泥可取4~7 kPa;对淤泥质土可取6~12 kPa;对软塑状态的粘性土可取10~15 kPa;对可塑状态的粘性土可以取12~18 kPa; $q_p$ ——桩端地基土未经修正的承载力特征值,kPa,可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007的有关规定确定; $\alpha$ ——桩端天然地基土的承载力折减系数,可取0.4~0.6,承载力高时取低值。

万方数据

### 3 深层搅拌桩的施工控制

#### 3.1 深层搅拌法的施工程序

桩机就位→预搅下沉→制作水泥浆(水泥粉或石灰粉)→喷浆(粉)搅拌,提升→重复搅拌下沉→重复搅拌提升直至孔口→关闭搅拌机,清洗→移至下一根桩。

#### 3.2 注意事项

(1)在粘性土层中进行搅拌桩施工时,在下搅或上提过程中叶片与周围土体切削摩擦,此时若只搅拌不喷浆或喷出的水泥浆液较浓(水泥浆采用水灰比0.40~0.55时),则粘性土很容易粘附于叶片上,造成喷浆孔堵塞,从而引起“堵管”现象的发生,进而影响搅拌桩的施工质量和进度。因此,在实际施工中应将水泥浆液的水灰比调整为0.60~0.70,这样可以有效地避免粘土层中的“堵管”现象发生,确保施工顺利进行。

(2)施工前期确定搅拌机机械的灰浆泵输送量,灰浆输送到搅拌机喷浆口的时间和提升速度等施工工艺参数,并根据设计要求,通过试验确定灰浆的配比值。

(3)深层搅拌机的成孔速度控制在0.57~0.97 m/min,随土质而定,到达设计桩底标高后,边搅拌、边喷浆、边提升,提升速度 $< 1.0$  m/min,用同样的方法重复搅拌,应有专人记录时间。

(4)搅拌桩的垂直度偏差 $\geq 1.5\%$ ,桩位偏差 $\geq 50$  mm。

(5)基坑机械挖土时,桩顶标高上应该留500 mm以上的土层,待搅拌桩施工完毕后,利用人工将桩顶标高上500 mm超高的桩头凿掉。

(6)根据对加固土层的物理力学特性分析来选用适当的搅拌桩机。由于水泥石桩抗压强度较低,当荷载较小时桩身发生变形,但仍遵循刚性桩应力传递规律,当承受荷载较大时桩身上部变形加大往下桩身应力与桩间土摩阻力逐步衰减。

### 4 深层搅拌桩的质量检测

在深层搅拌桩地基处理中,保证搅拌桩的有效长度和桩身强度达到设计要求是保证地基处理质量的关键。在实际工作中,这一问题就转化为如何对水泥石搅拌桩桩身质量进行有效检测,所谓桩身质量包括桩的物理尺寸、连续性和桩身材料的密实性等3方面,这就构成桩身质量检测的3个基本内容。对于水泥搅拌桩,则具体包括:

(1)桩身材料的密实度:主要指桩身材料的强

度,即水泥土的无侧限抗压强度。

(2)桩身的连续性:指桩身的搅拌均匀性,即水泥土搅拌是否均一。

(3)桩身的物理尺寸:指桩身的截面和桩的有效长度。

桩身水泥土强度是设计的主要依据之一,它与土质条件、水泥掺入量、添加剂种类、养护时间、覆盖压力、施工工艺等有关。关于水泥搅拌均匀性,在深层搅拌桩中随施工工艺不同存在一定的差异,在单头搅拌桩中,桩中心一般均存在直径约 10 cm 的水泥浆柱,其强度很高,而在桩体外围径向水泥含量逐渐减少。在双头搅拌桩中,在喷浆管附近,也存在水泥浆柱,其强度高,一般认为水泥土的搅拌均匀性要根据离桩中心 2/3 半径处的水泥土性状为标准来分析其搅拌的均匀性,桩长与垂直度可以在施工过程中及时检测。

为了保证搅拌桩的桩身质量,应根据工程重要性和复杂程度合理选择检验桩身质量的方法,常用的方法有:轻型动力触探试验( $N_{10}$ )、标准贯入试验( $N_{63.5}$ )、静力触探试验、低应变桩身无损检测、静载荷试验等原位测试方法以及钻探取心法。

#### 4.1 轻型动力触探试验

根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001),轻型动力触探试验的全称应为轻型圆锥动力触探试验。它是用一定质量的重锤(10 kg),以一定高度的自由落距(50 cm)将标准规格的圆锥形探头贯入土中,根据探头入土一定距离(30 cm)所需的锤击数(即 $N_{10}$ )来判定土的力学性能的一种原位测试方法。试验时还可利用其附带的钻头,取出桩体的水泥土,肉眼鉴定其颜色、均匀性及是否存在未被搅匀的团块等。依据有关技术规范,采用轻型动力触探( $N_{10}$ )进行检测的桩应占工程桩总数的 2% 以上。测试应在 7 天以内进行。轻型动力触探( $N_{10}$ )与水泥土强度之间具有一定的相关关系,表 1 初步归纳了若干对比试验的分析成果。

表 1 轻型动力触探( $N_{10}$ )与水泥土强度 $q_u$ 关系表

$N_{10}$ /击	15	20~25	30~35	>40
$q_u$ /MPa	0.2	0.3	0.4	>0.5

一般可根据表 1 按如下原则进行评判:1 天龄期,击数 $N_{10} > 15$  击时桩身强度即满足设计要求。7 天龄期, $N_{10}$  大于原天然地基击数 1 倍以上时,桩身强度也能达到设计要求。

这种检测方法设备简单,操作易行,经验性强,

测试数量不受限制,缺点为技术含量低,无法进行数据的自动采集和存储,检测深度一般不大于 4 m,无法对深部强度与桩身完整性进行判断。

#### 4.2 标准贯入试验

标准贯入试验与轻型动力触探试验类似,也是利用重锤(63.5 kg)的自由落距(76 cm)将标准规格的标准贯入器贯入土中,通过贯入器入土 30 cm 所需的锤击数( $N$ )来判定土的力学性能。通常用此来评价岩土的物理力学性状、地基土承载力和评价饱和砂土(粉土)的液化特征等。试验中也可自贯入器取出岩土,肉眼鉴定其颜色、均匀性等。应用标准贯入试验检测深层搅拌桩桩身质量的实例尚不多见,但其原理和方法如同轻型动力触探一样,完全是可行的。鉴于地基土、水泥土与均质的金属材料相比,强度特性差异很大,特定场地条件下的规律不尽相同,若要普遍运用此式,则依据尚不充分。

这种检测方法施工较简单,经验性强,测试数量及深度不受限制,可结合取心钻探同时进行,缺点是技术含量较低,无法进行数据的自动采集和存储,设备较笨重,需动用工程钻机,因而工效较低,尚无技术规范的依据和成熟的判定标准。

#### 4.3 静力触探试验

静力触探试验是一种兼有测试和勘探功效的原位测试方法,采用静力匀速将一定规格的探头压入土体测定比贯入阻力、锥尖阻力及侧壁摩擦力。此法适用于粘性土、粉土、粉砂和含少量碎石的土。一些检测单位将此法应用于深层搅拌桩桩身检测,取得了较好的效果。

根据 Broms 法计算公式,可以通过比贯入阻力求得一定龄期的水泥土强度:

$$q_0 = (p_s \sqrt{t_0}) / (10a \sqrt{t_i})$$

式中 $q_0$ ——标准强度; $p_s$ ——静力触探比贯入阻力; $t_0$ ——标准强度对应龄期,一般取 90 天; $a$ ——早强系数,深层搅拌桩为 1; $t_i$ ——检测实际龄期。

一般可在综合试桩阶段,将静探法结果与其他测试方法的结果做比较,确定桩身的标准强度,从而得到比贯入阻力标准值,工程桩检测时便可直接判定实测值是否符合要求。

采用轻便静探时工效较高,操作简单,能连续对桩体进行检测,可实现测试数据的自动记录和处理,测试深度一般不受限制。缺点为水泥土强度不能太高,一般应控制在 7 天龄期以内,若桩体四周有地表溢浆,探头贯入较困难,尚无技术规范依据和成熟的判定标准。

#### 4.4 静载荷试验

静载荷试验可直接获得深层搅拌桩单桩或复合地基的承载性能。对于新建场地或岩土工程条件复杂的工程,一般均应通过静载荷试验直接检验工程桩或复合地基的承载力。复合地基(或单桩)的试验原理、过程及分析方法基本等同浅层平板载荷试验或单桩竖向静载荷试验。单桩静载荷试验也与水泥土的龄期有很大关系,只有在满足一定龄期(一般要求 28 天)时,相同或相近龄期的桩体载荷试验才可进行统计对比分析。

桩的极限荷载用双曲线法确定,根据桩上荷载  $P$  和下沉量  $s$  之间的关系推算出破坏荷载,经修正推算出极限荷载,从而求得桩的承载力标准值。

该法可直接判定单桩或复合地基的承载力和变形是否满足要求。当两者均达到设计要求时,一般即可认为地基处理获得成功。缺点是试验设备繁重,历时较长,费用较多,测试数量相对较少,不能大面积检测。

#### 4.5 钻探取心

为直接检测深层搅拌桩的桩身完整性,采用钻探取心法检测当然是最为直观和最为真实的手段了。通过钻探取心将水泥土心完整地取出,可肉眼鉴定桩身的均匀性、颜色及桩长是否达到设计值,还可将水泥土心带到室内进行无侧限抗压强度试验,直接测试其强度。每一单桩的取样数量并无严格规定,一般应选择具有代表性的水泥土心作为试样,间距以 1~2 m 一个试样为宜。如果已经进行了轻便动探检测,则可在对桩身强度有疑问的部位钻取心样。该方法也须考虑龄期因素影响,若没有一定龄期标准(一般要求为 28 天),测得的强度不可作为设计和检测依据。

这种检测方法优点为施工简单,测试数量及深度不受限制,可取心进行强度试验。缺点是技术含量不高,经验性强,不能自动采集数据,设备较笨重,需动用工程钻机,试样需用专门的压力机进行室内测试,工效低,大面积测试需要动用足够设备。

#### 4.6 反射波法

能否用动测法来检验深层搅拌桩的桩身质量一直有争议。近年来,通过试验研究,认为水泥土胶基本符合一维波动理论的假设条件,用反射波法来分析深层搅拌桩的桩身质量具有一定可行性,动测波形能在一定程度上反映桩长、桩身的特性。

#### 4.7 基槽开挖后的检测

基槽开挖之后,可以检验桩位、桩数与桩顶质

量。如不符合规定要求,应采取有效的补救措施。但这种检验方法主要检测桩身顶部质量,很难反映桩身质量的完整信息。

#### 4.8 单桩和复合地基载荷试验

一般认为静载荷试验是桩的承载力检测中最可靠的手段。但对由水泥深层搅拌桩所构成的复合地基而言,静载荷试验得到的是维持荷载作用下,最薄弱破坏模式相应的桩土体系丧失承载刚度的外荷,尽管它能全面获得承载刚度的变化情况,描述桩身的破坏模式,并得到与之相应的承载力,但它不能提供桩身质量的完整信息,问题严重时可能在  $P-s$  曲线上有所反映,但不能定量定位,静载荷试验影响深度是 2~3 倍的压板宽度,并不能反映下部加固土的情况。

实际中,钻孔取心试验是检验桩身质量可靠的和最直观的方法。

#### 5 结语

(1) 选用适当的搅拌桩机械设备,是进行正常施工的先决条件。

(2) 一般来讲,在搅拌桩设计中应根据桩侧和桩端土体的参数所确定的单桩承载力合理选用水泥土强度标准,以防止过高确定该值而造成浪费。

(3) 随着搅拌桩应用的日益广泛、经验的不断积累,其施工工艺也得到不断完善和改进,已经突破了现行规范的适用范围。

(4) 作为合格的岩土工程师应根据施工的实际情况,合理确定施工工艺和与之配套的施工参数,只有这样才能确保达到设计要求,保证施工质量和进度。

(5) 从个别工程搅拌桩心样强度波动较大现象来看,对搅拌桩施工的过程控制还需加强。

(6) 进一步探索和积累不同地区、不同土质条件的搅拌桩施工工艺和与之配套的施工参数以及施工管理方法和施工质量检测方法是十分必要的。

#### 参考文献:

- [1] JGJ 79-2002 建筑地基处理技术规范[S].
- [2] 杨智良,王强,邱磊. 深层搅拌桩的设计方法分析[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版) 2002, 10(3).
- [3] 叶书麟,韩杰,叶观保. 地基处理与托换技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1994.
- [4] 张维. 论软土地基深层搅拌桩施工控制[J]. 山西建筑, 2003, 29(1).
- [6] 方磊,刘文亮,胡明岳. 深层搅拌法地基处理的质量检测方法[J]. 河海大学学报 2001, (增刊).