

# 深层搅拌法在广西软土地基加固处理中的应用

尹欣, 韦 漠

(广西第一地质工程施工公司, 广西南宁 530031)

**摘 要** 结合工程实例介绍了深层搅拌法在广西软土地基处理中的应用情况, 并对工程实践中的若干技术问题进行了分析和探讨。

**关键词** 广西 软土地基处理 深层搅拌法 群桩效应 垫层设计 变掺量设计 桩身强度

中图分类号: TU472.3+6 文献标识码: B 文章编号: 1672-7428(2005)06-0015-04

目前, 深层搅拌桩已在我国土木工程各个领域以各种形式迅速发展, 广泛应用。1992 年该项技术被引入广西, 在南宁市百货大楼朝阳商业城、南宁恒大新城等工程应用成功, 随后在南宁、桂林、玉林、北海、崇左等市广泛应用推广。广西软土深度一般不会很深, 对一般低层建筑(9 层以下)非常适宜于使用深层搅拌法。

## 1 工程概况

南宁市物价局集资住宅楼, 楼高 8 层(一层为车库), 砖混结构。建筑物长 27.6 m, 宽 12.4 m, 采用钢筋混凝土条形基础。根据勘察资料, 拟建场地各土层特征如下:

- ①杂填土, 褐灰、黑色, 松散状, 层厚 0.80 ~ 3.40 m;
- ②淤泥质土, 褐灰、灰黑色, 软 ~ 流塑状, 层厚 0.50 ~ 4.10 m, 承载力特征值  $f_{ak} = 70$  kPa;
- ③粘土, 灰、黄灰色, 可塑状, 层厚 0.80 ~ 4.30 m, 承载力特征值  $f_{ak} = 140$  kPa;
- ④粘土, 砖红、黄红、黄色, 硬塑状, 层厚 1.90 ~ 6.90 m, 承载力特征值  $f_{ak} = 230$  kPa;
- ⑤粉质粘土, 黄、灰白色, 可塑状, 层厚 0.80 ~ 5.00 m, 承载力特征值  $f_{ak} = 170$  kPa;
- ⑥粉质粘土, 灰白、黄灰色, 软塑状, 层厚 2.70 ~ 7.30 m, 承载力特征值  $f_{ak} = 120$  kPa;
- ⑦粉土, 青灰色, 稍密 ~ 松散状, 层厚 1.20 ~ 8.70 m, 承载力特征值  $f_{ak} = 90$  kPa;
- ⑧中砂, 灰色, 稍密状, 层厚 1.30 ~ 2.70 m, 承载力特征值  $f_{ak} = 150$  kPa;

⑨圆砾, 灰色, 中密 ~ 密实状, 最大揭露厚度 5.20 m, 承载力特征值  $f_{ak} = 450$  kPa。  
地下水为孔隙水, 埋深 6.70 m。

## 2 基础方案选择及设计

针对以上工程地质条件, 如采用桩基, 则持力层为圆砾, 桩长造价高, 不经济, 因此采用造价较低的复合地基较为合理。另外场地位于市区, 受排污和噪声限制, 高压旋喷桩显然被排除, 采用深层搅拌桩复合地基为最佳方案。设计要求复合地基承载力特征值  $f_{spk} = 230$  kPa, 基础埋深 -1.50 m(原地面为 ±0.00)。

深层搅拌法加固软土形成的桩体是具有一定压缩性的半刚性桩, 其复合地基承载力特征值应通过现场复合地基载荷试验确定, 也可按下式计算:

$$f_{spk} = mR_a/A_p + \beta(1-m)f_{sk} \quad (1)$$

式中  $f_{spk}$ ——复合地基承载力特征值;  $m$ ——面积置换率;  $A_p$ ——桩的截面积;  $f_{sk}$ ——桩间土承载力特征值, 可取天然地基承载力特征值;  $\beta$ ——桩间土承载力折减系数, 当桩端为软土(可压缩性土)时, 可取 0.5 ~ 1.0, 当桩端为硬土(不可压缩性土)时, 可取 0.1 ~ 0.4;  $R_a$ ——单桩竖向承载力特征值, 应通过现场载荷试验确定, 也可以按下列 2 式计算, 取其中较小值。

$$R_a = q_s U_p L + \alpha q_p A_p \quad (\text{按土的抗力确定}) \quad (2)$$

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad (\text{按桩材强度确定}) \quad (3)$$

式中  $f_{cu}$ ——与搅拌桩桩身水泥土配比相同的室内加固土试块在标准养护条件下 90 天龄期的立方体抗压强度平均值;  $\eta$ ——桩身强度折减系数, 可取

收稿日期 2005-03-17

作者简介: 尹欣(1971-), 男(汉族), 广西平乐人, 广西第一地质工程施工公司工程师, 岩土工程专业, 从事岩土工程勘察、施工与技术管理工作; 广西南宁市五一西路 20 号(0771)4867516, yinxin1998@126.com; 韦漠(1965-), 男(汉族), 广西灵山人, 广西第一地质工程施工公司总工程师, 岩土工程专业, 从事工程施工及行政与技术管理工作。

0.25 ~ 0.33 ;  $U_p$ ——桩的周长 ;  $\eta_s$ ——桩周土的平均侧阻力特征值 ,对淤泥可取 4 ~ 7 kPa ,对淤泥质土可取 6 ~ 12 kPa ,对软塑状粘性土可取 10 ~ 15 kPa ,对可塑状粘性土可取 12 ~ 18 kPa ;  $L$ ——搅拌桩桩长 ;  $q_p$ ——桩端地基土未经修正的承载力特征值 ;  $\alpha$ ——桩端天然地基土的承载力折减系数 ,一般可取 0.4 ~ 0.6。

复合地基的搅拌桩一般采用正方形或等边三角形格栅状布桩 ,其桩数可按下式计算 :

$$n = mA/A_p \quad (4)$$

式中  $n$ ——搅拌桩桩数 ;  $A$ ——基础底面积。

设计思路 :设计搅拌桩桩径 500 mm ,桩长 5.0 ~ 7.0 m (以桩端进入粘土④层 0.5 ~ 1.0 m 为准) ,通过做配比试验 ,水泥的掺入量为 13% ,取  $f_{cu} = 2$  MPa  $\eta = 0.33$   $\alpha = 0.6$  ,通过(2)、(3)式确定单桩承载力 120 kN。设计要求加固的复合地基承载力 230 kPa 取  $f_{sk} = 80$  kPa  $\beta = 0.4$  ,按(1)式计算得地基加固处理搅拌桩面积置换率约 34% ,根据基础布置取  $A = 214.8$  m<sup>2</sup> ,按(4)式计算桩数为 372 根 ,桩的平面布置以沿基础布置为原则 ,按单桩承担的加固处理面积进行分配布置 ,实际布置搅拌桩 412 根。

### 3 深层搅拌法施工工艺及施工参数

正式施工搅拌桩前 ,应进行现场采集土样的室内水泥土配比试验 ,当场地存在多层土时应取各层土样 ,至少应取最软弱层土样。通过配比试验测定各水泥土试块不同龄期、不同水泥掺入量、不同外加剂的抗压强度 ,为施工寻求满足设计要求的最佳水灰比、水泥掺入量及外加剂品种、掺量。再利用试验结果进行现场成桩试验 ,不得少于 2 根 ,以确定满足设计要求的施工工艺和施工参数。

#### 3.1 施工工艺

(1)场地整平。清除桩位处地表及地下障碍物 ,如大块石、树根和生活垃圾等 ,场地低洼时应回填粘性土料将地面整平。

(2)定位。将深层搅拌机移到指定桩位 ,对中。当地面起伏不平时 ,应调整塔架丝杆或平台基座 ,使搅拌轴保持垂直。

(3)浆液配制。①严格控制水灰比 ,一般为 0.45 ~ 0.55 ;②水泥浆必须充分拌和均匀 ,每次投料后拌合时间  $\leq 3$  min ;③为改善水泥和易性 ,可加入适量的外加剂 ,如夏季施工可加适量减水剂木质素磺酸钙 ,一般掺入量为水泥用量的 0.2%。

(4)选浆。将准备好的水泥浆经筛过滤后 ,倒

入贮浆桶 ,开动灰浆泵 ,将浆液送至搅拌头。

(5)钻进喷浆搅拌。证实浆液从喷嘴喷出并具有一定压力后 ,启动桩机搅拌头向下旋转钻进搅拌 ,并连续喷入水泥浆液。①根据设计要求和成桩试验结果调整灰浆泵压力 ,使喷浆量满足要求 ;②钻进喷浆搅拌至设计桩长或层位后 ,应原地喷浆搅拌 30 s ;③预搅下沉如遇较硬土层下沉太慢时(超过 30 min/m) ,可适当加水 ,但应考虑冲水成桩对水泥石强度的影响。

(6)提升搅拌喷浆。将搅拌头自桩端反转匀速提升搅拌 ,并继续喷入水泥浆液 ,直至预定的停浆面。

(7)重复搅拌下沉至设计加固深度。

(8)根据设计要求 ,喷浆或仅搅拌提升直至预定的停浆面 ,如只复搅需注意此时喷浆口易于堵塞。

(9)成桩完毕 ,清理搅拌叶片上包裹的土块及喷浆口 ,桩机移至另一桩位施工。

#### 3.2 施工参数

为满足设计要求 ,其施工参数根据成桩试验确定。

(1)搅拌钻杆的钻进、提升速度 0.5 ~ 1.0 m/min ;

(2)搅拌钻杆(轴)的转速 60 r/min ;

(3)钻进、提升次数 2 次 ;

(4)水泥浆液配合比(水泥:水:外加剂):1:0.5:0.002 ;

(5)灰浆搅拌机内每次投料量 :水泥量 + 水量 + 外加剂量 = 600 kg + 300 kg + 1.2 kg ;

(6)每根桩水泥浆液用量 400 ~ 500 L ;

(7)灰浆泵压力 2 ~ 4 MPa ;

(8)垂直度偏差  $\leq 1.0\%$  ,桩位偏差  $\leq 20$  mm。

### 4 深层搅拌法加固处理的质量控制

搅拌桩的质量控制应贯穿在施工的全过程 ,检查重点是 :水泥用量、桩长、搅拌头转数和提升速度、复搅次数和复搅深度、停浆处理方法等。

(1)软土应完全预搅切碎后才喷浆搅拌 ,这样利于同水泥浆液均匀结合 ;

(2)水泥浆液要严格按照配合比配置 ,不得发生离析 ;

(3)保证搅拌桩的加固强度和均匀性 ;

(4)保证搅拌桩的水平位置不得偏离轴线及垂直度。

## 5 搅拌桩复合地基载荷试验

工程竣工后,建设单位委托广西建筑工程质量检测中心对该工程搅拌桩复合地基进行静力载荷试验,在场地的左、中、右由设计和建设单位随机选取 3 个试验点,试验承压板面积为  $0.6 \text{ m}^2$ 。本次试验采用堆载反力装置,慢速维持荷载法,油压千斤顶逐级加荷,百分表观测沉降。当试验荷载加至  $460 \text{ kPa}$  时,经过  $120 \text{ min}$  承压板沉降已达到相对稳定,3 点承压板总沉降值为  $2.87$ 、 $2.94$ 、 $3.16 \text{ mm}$ ,试验所对应的荷载值为该试验点复合地基承载力基本值,即各点的  $f_0 > 460 \text{ kPa}$ ,复合地基承载力特征值  $f_{ak} > 230 \text{ kPa}$ ,满足设计的要求。

## 6 施工中存在的问题

### 6.1 群桩效应问题

搅拌桩加固设计中往往以群桩形式出现,群桩中各桩与单桩的工作状态迥然不同。试验表明,双桩承载力小于两根单桩承载力之和,双桩沉降量大于单桩沉降量。可见,当桩距较小时,由于应力重叠产生群桩效应。在设计时当置换率较大( $m > 20\%$ ),应将桩与桩间土视为一个假想的实体基础,用以验算软弱下卧层的地基承载力。设计人员通常认为复合地基不同于桩基础,往往忽略了对实体基础下地基土强度的验算。为减少群桩效应,笔者建议可考虑将目前  $500 \text{ mm}$  桩径缩小至  $350 \sim 400 \text{ mm}$ ,同时提高桩体强度,这样既有利于充分发挥桩侧阻力,又可避免较小的桩距,也可减小基础宽度,降低造价。

### 6.2 沉降计算问题

《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2002)第 11.2.9 条规定:“...桩端以下未加固土层的压缩变形可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2002)的有关规定进行计算。”下卧层变形按天然地基采用分层总和法进行计算。由于搅拌桩加固的复合地基与桩端以下未经处理土层两者刚度相差悬殊,不能采用均质体应力分布来计算桩端土的附加应力,而应按深度相当于桩端深度的似刚性实体基础来按地基规范规定计算桩端以下未经处理土层的压缩变形。否则将低估桩端附加应力,当桩端土层压缩性较高时,计算得出的桩端以下土层的压缩变形值将明显偏小。对此设计人员容易疏忽大意,因此而发生的工程事故较为普遍。当桩距较小时,搅拌桩群呈实体深基效应。建议按刚性桩来计算桩端以下土层的沉降,可参考《建筑桩基技

术规范》(JGJ 94-94)的等效作用分层总和法进行计算。计算中桩基沉降计算经验系数  $\psi$  根据桩端土质情况取  $1.2 \sim 1.7$ ,土软时取大值。

### 6.3 垫层的设计问题

深层搅拌桩是具有一定压缩性的半刚性桩,应在刚性基础和桩之间设置褥垫层,调整桩土荷载分担作用,降低桩土应力比,充分发挥桩土的作用,并减少基础底面应力集中,避免桩头破坏,调整和减少基底变形,达到提高复合地基承载力的目的。褥垫层设计构造通常是:厚度取  $300 \text{ mm}$ ,其材料可选用中砂、粗砂、级配砂石等,最大粒径不宜大于  $20 \text{ mm}$ ,一般是  $4:6$  的砂石垫层,分层夯实,并使桩头入垫层  $100 \text{ mm}$ 。实践证明,这样处理效果良好,建筑物竣工后的沉降较小。

### 6.4 龄期的问题

大部分工程的深层搅拌桩复合地基载荷试验都不是在成桩 90 天后进行的,通常在  $28 \sim 45$  天之间进行。水泥土的强度随龄期的增长而增大,在龄期超过 28 天后,强度仍有明显增长。考虑龄期的影响,复合地基的承载能力会进一步提高,由龄期 28 天推算到 90 天后的地基承载力,按当地工程经验,一般可乘以  $1.1$  的系数。

### 6.5 变掺量设计的问题

设计者往往将搅拌桩理解为桩基,因此要求其像刚性桩,在桩长范围内强度一致,且桩强度越高越好。这是违反复合地基基本假定的,应使桩身有一定的变形量,才能促使桩间土强度的发挥。根据室内模型试验和搅拌桩的加固机理分析,其桩身轴向应力自上而下逐渐减小,其最大轴力位于桩顶 3 倍桩径范围内。因此在设计中,为节约固化剂材料和提高施工效率,可采用变掺量的施工工艺。在全桩水泥总掺量不变的前提下,桩身上部  $1/3$  桩长范围内可适当增加水泥掺量及搅拌次数,桩身下部  $1/3$  桩长范围内可适当减少水泥掺量。实践证明,这种变掺量设计方法能获得良好的技术经济效果。

### 6.6 桩体强度差异问题

深层搅拌法利用原位土拌合,既有优点又存在弊端。由于桩身的强度与土质的关系非常密切,同样的掺入比,同样的工艺,在淤泥中和砂类土中其强度相差可达 10 倍。当搅拌桩穿越不同土层时,很难避免桩体强度的差异,这种差异处理不当,往往造成不良后果。桩体强度差异问题较难解决,可在不同土质中采用不同的水泥掺入比的方法缩小桩体强度差异,如在淤泥中喷搅的固化剂用量可大于砂类土

中的用量,但在实际施工时较难准确控制。所以深层搅拌法设计要求的桩身强度不高,一般在1 MPa以下,现场取样所做的试验结果大多是合乎要求的。

### 6.7 不同加固土质处理效果问题

根据试验结果,以水泥作加固料,对含有高岭石、多水高岭石、蒙脱石等粘土矿物的软土加固效果比较好;而对含有伊利石、氯化物和水铝石英等矿物的粘性土以及有机质含量高、pH值较低的粘性土加固效果比较差。有机质含量较高,造成土层酸碱度较低,呈弱酸性,会阻碍水泥水化反应,影响水泥土的强度增长。当pH值 $<4$ 时,掺入3%~5%的石灰,可使pH值 $>12$ 。当土层本身的土质颗粒非常细小,对水泥胶体的固结很不利,针对在胶结过程所必需的胶结核心可在施工中采用一些颗粒稍粗糙的外掺剂。在粘粒含量不足的情况下,可添加粉煤灰,不仅可以消耗工业废料,还可提高水泥土约10%的强度。

### 6.8 搅拌的均匀性问题

搅拌的均匀程度直接影响桩的强度,同样的水泥掺入量在实验室内由于搅拌均匀,水泥浆与土充分拌和可与土颗粒硬结形成强度很高的水泥石,而现场由于机具设备和施工工艺的限制,实际工程中加固土强度往往比试验值小,如何改进机具设备和施工工艺,提高桩的搅拌均匀程度,是提高复合地基承载力,减小建筑物沉降量的关键。我单位目前采用的主要措施:一是全程慢速喷浆,钻进和提升速度控制在0.5~0.6 m/min;二是增加搅拌次数,一般在基底以下2~3 m范围内(即桩的上部)增加喷浆、搅拌一次。实践证明这些措施对提高桩体强度有较好效果。

(上接第14页)

充和调整,如遇防空洞、下水道、古井、孔口不返浆等异常情况,应及时通知施工员和监理,进行仔细分析,采取对策,如减小桩距、增加水泥用量、减慢提升速度、增加桩位等措施。

(3)垂直度对三重管高压旋喷桩的质量控制很重要,它直接关系到桩与桩之间的搭接是否可靠,一般垂直度控制在0.5%之内。

(4)控制好围护桩的施工质量,在引孔过程中如发现围护桩“突肚子”,引孔时钻孔取心为砵心,

## 7 结语

(1)深层搅拌法是加固软土地基的有效方法。实践证明,广西的工程地质状况适合推广深层搅拌法,层高9层以下的建筑设计时都可考虑采用此法。

(2)深层搅拌法施工简便、质量可靠、造价低廉,施工中无振动、无噪声、无污染,不会对周围环境产生有害的影响。

(3)深层搅拌法一般加固深度十余米至持力层,可把地基承载力提高到150~250 kPa。工程实践证明,加固结果不仅提高了地基容许承载力,还可减少建筑物的总沉降量与差异沉降量。

(4)深层搅拌法施工速度快,缩短工期。制一根十余米的桩仅需40 min,一台机连续24 h作业,可完成30多根桩的任务。由于其复合地基沿深度方向的均匀性和整体性较好,加固后1个月即可投入使用,为工程建设赢取宝贵时间。

(5)深层搅拌法室内配比试验十分重要,关系到加固工程的成败,特别是含有有机质的土层,施工前必须通过配比试验,并根据土质条件和现场工程经验,确定桩身强度和水泥外加剂的掺入量及有关施工参数。

(6)深层搅拌桩与基础不宜直接连接,用无粘性散体材料作基础垫层,可较好地调整桩土应力比,确保桩土压力均匀扩散,弥补搅拌桩上部施工质量难以保证的缺陷。

## 参考文献:

- [1] JGJ 79-2002, 建筑地基处理技术规范[S].
- [2] GB 50007-2002, 建筑地基基础设计规范[S].
- [3] JGJ 94-94, 建筑桩基技术规范[S].
- [4] 叶书麟. 地基处理工程实例应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.

在该处旋喷桩施工时应采取一定技术措施。

## 5 结语

在浙医二院门诊科教综合楼基坑支护施工过程中,我们根据现场实际情况,有针对性地对围护桩边的4口古井、沉管灌注桩、地下块石和条形基础等地下障碍物进行仔细分析,采取合理技术措施,确保门诊楼和小营卫生院老办公楼的正常使用,在地下障碍物较多的粉砂地层中,整个基坑支护是成功的,这也为今后类似工程设计施工提供了宝贵的经验。