



# 水泥搅拌桩在工程地基处理中的应用实践

张高峰



在厦门岛南半部山前洼地,特别是山前洼地的边缘地带进行工程建设时,往往会遇到一幢建筑物的基础下,同时存在承载力高、变形性小的坡残积土与承载力低、变形性较大的极松砂层的极不均匀地基情况,给建筑物的地基基础设计造成很大的麻烦。本文通过总结在厦门一中职工宿舍工程中采用深层水泥搅拌桩处理这一类地基的成功实践,以起到抛砖引玉的作用。

## 工程概况

厦门一中已建的职工宿舍楼座落在学校的东南角,育青路的北侧。该宿舍楼工程共有 C、D、E、F 幢楼。C、D 幢布置在场地的北边,E、F 幢布置在场

地的南边。面临育青路,四幢楼均为 8 层框架结构的建筑物。总建筑面积 9237m<sup>2</sup>。

## 拟建场地岩土条件

已建场地处在花岗岩剥蚀残丘坡脚与丘间洼地两个微地貌单元上。地形由北向南偏西方向倾斜。在洼地中有小溪沟、溪流由东北流向西南,后经回填整平,可作为本工程场地。该场地上部为第四系土层所覆盖,下为伏燕山期粗粒花岗岩体,在勘探深度范围内场地岩土层有以下五种类型:杂填土层、冲洪积泥质中粗砂层、坡洪积砂质粘土层、残积砂质粘性土层、粗粒花岗岩强化层。

## 地基处理方案的选择

由于本工程四幢宿舍楼均为 8 层框架结构建筑物,桩荷载较大,杂填土层(厚度 0.4~1.7m)不宜作为基础天然地基持力层,而泥质中粗砂层(厚度 0~4m)属中高压缩性土,其承载力标准值仅 100KPa,也不是建筑物基础理想的天然地基持力层。除这两层外,其它各土层可作为基础(天然地基或桩基)持力层。

### 1、C、D 幢宿舍楼

该两幢宿舍楼部位因没有泥质中粗砂层,杂填土层厚度又不大,可以全部挖除。因此该两幢建筑物可直接采用以砂质粘土层为基础持力层的天然地基,不必进行地基处理。



## 2.E 幢宿舍楼

该楼部位土层比较复杂,杂填土层下为 2~4m 厚的泥质中粗砂层。对该幢地基基础处理基本上有三种方案可选择:一是采用片筏基础,基础落在泥质中粗砂层上,但泥质中粗砂层厚度不一,相差 2m,该层又属中高压缩性土,会产生均匀沉降,建筑物将会出现倾斜现象,故不可取。二是采用独立墩基础,该方案是将泥质中粗砂层挖除掉,然后用 C15 抛石砼墩基作为基础。考虑到泥质中粗砂层透水性好,且地下水位高于砂层,基础施工时,可能产生涌水,流沙等不良现象,给施工带来一定困难,开挖时须采取一些可靠的措施,而采取措施工程费用又要增加,故该方案无论从技术上,还是经济上来看,是大不可取。三是采用桩基础。该方案施工上既安全又可保证质量,但采用何种桩型,还得选择,下面再述。

## 3.F 幢宿舍楼

该幢楼地基土就更复杂。F 幢靠东部(约建筑物长的 1/3)其土层同 C、D 幢;而西部(约建筑物长的 2/3)其土层又同 E 幢,但泥质中粗砂层厚度变化更大,从 0~3m 厚,故只能用桩基来进行加固处理。

## 4.E、F 幢宿舍楼桩型的选择

沉管(包括振动或打入式)灌注桩是加固软弱地基常用桩型之一。但沉管灌注桩噪音较大,而场地四周密布教委、电业局、检察院及卫校等单位宿舍群,毗邻振万教学楼,必将严重影响周围居民的日常生活及学校教育教学活动的正常进行。再加上本场地分布着一定厚度的硬塑沙质粘土层(标贯击数在 40 左右)将增加桩身贯入的难度,给施工带来一定的困难。

还有一种桩型是用深层水泥搅拌来加固本场地中的泥质中粗砂层。水泥土搅拌法加固软土技术具有以下独特优点:

①由于将固化剂和原地基软土就地搅拌混合,因此最大限度地利用原土,减少外运土方的工程量,降低了工程成本。

②搅拌时不会使地基侧土挤出,所以对周围原有建筑物的影响很小。

③按照不同地基土的性质及工程设计要求,合理选择固化剂及其配方,设计比较灵活。C、D、E、F 幢从 62m<sup>2</sup>/套~135m<sup>2</sup>/套共计五种户型,可以根据上部结构的需要,灵活地采用桩状、壁状、格栅状和块状等加固型式。

④施工时无振动、无噪音、无污染,对在密集住宅建筑群周围进行施工,其优点尤为突出。

⑤土体加固后宽度基本不变,对软弱下卧层不致产生附加沉降。

⑥与钢筋砼桩基相比,节省了大量的钢材,并降低了造价。

综上所述,不管从技术上,还是从经济上比较,以及施工对周围环境的影响,用深层水泥搅拌桩来加固本场地的泥质中粗砂层有它独到的优越性。设计单位采纳了水泥土搅拌法来处理本场的软土地基。



## 城市建设

### 深层水泥搅拌桩的基本原理和设计计算

#### 1、深层水泥搅拌桩处理地基的基本原理

它是利用水泥等材料作为固化剂,通过特制的搅拌机械,在地基深处就地将软土和固化剂强制搅拌,利用固化剂和软土间所产生的一系列物理、化学反应,形成一种介于刚性桩与柔性桩之间具有一定压缩性的水泥土桩,使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的水泥加固土,从而提高地基强度和增大变形模量。

#### 2、深层水泥搅拌桩的设计

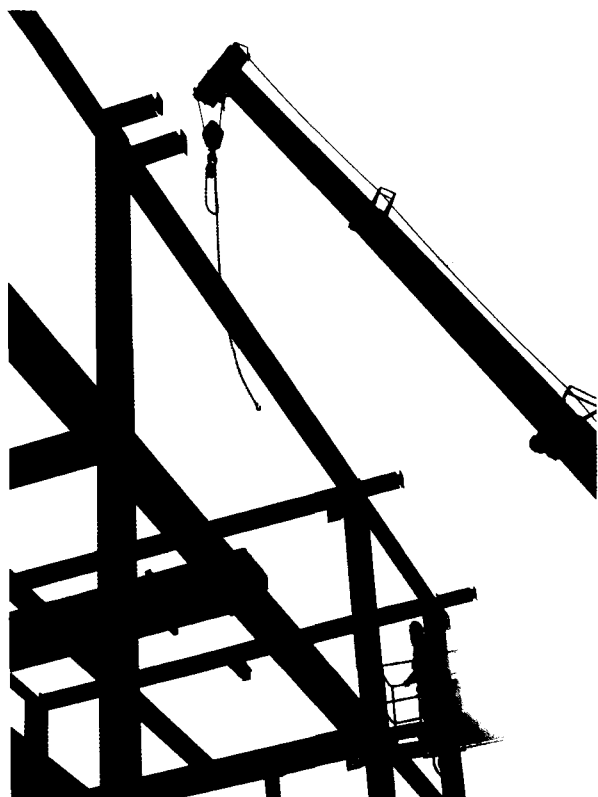
根据地质报告,泥质中粗砂层承载力标准100KPa。现要求通过深层水泥搅拌桩加固后的复合层的承载力提高到 $\geq 250\text{KPa}$ 。

根据本工程土层情况,桩长选择为5m。安全系数为1.5,桩径为0.55m。

##### ①复合地基的强度计算

$$\begin{aligned}\text{则单桩承载力: } Pa &= f_{sk}L_1 + f_{sk}L_2 \\ &= 20 \times 1.73 \times 3 + 45 \times 1.73 \times 2 \\ &= 259.5\text{KN}\end{aligned}$$

$$\text{桩身强度: } q_u = 2\text{kPa}/A = 3244\text{KPa}$$



根据有关资料和室内配合比表对照,相应于 $q=3244\text{KPa}$ 的水泥掺入比为15%~20%,水灰比为0.45~0.60。

$$\begin{aligned}\text{置换率 } ac &= \frac{Ra - \beta R_s}{Pa/A - \beta R_s} = 20.77\% \\ Pa/A &= \beta R_s\end{aligned}$$

桩数  $n$  以 J-3 独立桩基  $4 \times 3.9\text{m}$  为例

$$\text{则 } n = \frac{F \times a_s}{A} = \frac{4 \times 3.9 \times 0.2077}{0.24} = 13.5 \text{ 根 取 14 根}$$

##### ②复合地基的变形计算

经过水泥土加固的复合地基其沉降量的计算分为加固区的沉降量  $S_1$  和加固区下卧层的沉降量  $S_2$ 。

$S_1$  的计算  $L$  (仍以 J-3 独立桩基为例)

实体基础底面压力:

$$Pa = \frac{R_p F + G - f_{sk} F - R_s (F - F_1)}{F_1} = 130.4\text{KPa} < [R]$$

桩群顶面的平均压力:

$$p = \frac{R_p \times F - R_s (F - F_1)}{F_1} = 199\text{kPa}$$

桩群底面土的附加应力:

$$p_0 = Pa - R_p \times L = 130.4 - 8.8 \times 5 = 86.4\text{KPa}$$

桩群体中搅拌桩变形模量  $E_o$  取  $120q_u = 389280\text{KPa}$ , 桩间土的变形模量  $E_s$  取  $2200\text{KPa}$ , 则桩群体的变形模量  $E_o$  为:

$$E_o = E_{so} \times nA/F_1 + E_s \times \frac{F_1 - nA}{F_1} = 102.71 + 1.62 = 104.33\text{MPa}$$

$$S_1 = \frac{(P + p_0) \times L}{2E_o} = 0.7\text{cm}$$

$S_2$  用分层总和法计算, 实体基础底面中点沉降:

$$S_2 = \frac{mBP_o \cdot \sum \delta_{i1} - \delta_{i1}}{E_{i1} - 2_i} = 4.63\text{cm}$$

$$\text{则总沉降量: } S = S_1 + S_2 = 0.7 + 4.63 = 5.33\text{cm}$$

### 施工质量控制

#### 1、开工前的质量控制

(1) 必须认真分析工程地质资料,对地基土的成分,分层情况、含水量、有机物、可溶盐等对水泥搅拌桩强度发生影响的因素充分进行研究;(2) 在



室内标准下配备不同配方的水泥土样,进行不同龄期的试验,然后选择最佳的水泥掺入比,初步确定每延长米的水泥掺加量;(3)正式打设工程桩以前应按施工组织设计的搅拌施工工艺打设数根试桩,最后确定水泥浆的水灰比,泵送时间,搅拌提升速度和复搅深度。

## 2、施工过程的质量控制

### (1)严格控制水泥等材料的质量

水泥加固强度与水泥材料质量密切相关,因此进场的水泥必须有出厂合格检验单,水泥制备浆液前宜过筛,去除杂物和块状体。每批进场的水泥应备样进行水泥土强度试验,满足要求的水泥方可投入工程使用。

(2)确保搅拌桩桩身强度和均匀性,这是质量控制的重点

施工时必须要有专人负责制桩记录。详细记录每根工程桩的施工工艺,桩的位置,编号,注浆量及二次注浆量等。原始记录须如实并及时汇总分析,发现问题及时予以纠正或采取补救措施。

泵输浆液时不允许发生断浆现象,必须有专人监视发送设备。输浆管道发生堵塞主要是由于泵压骤然升高所致。

制桩质量的优劣关系到地基加固的成效。其关键是注浆量,喷浆与搅拌均匀程度,这是保证桩身质量的重点。因此,要严格按照要求控制喷浆及提升速度,以保证加固范围内每一深度均得到充分拌和。

根据水泥土室内模型试验及它的工作原理分析,搅拌桩质量检验重点应放在桩顶 3~4m 范围,确保该段桩身质量。因此在此桩段范围内降低提升速度,相应增加制桩时间,以增加喷浆量,并按工艺设计要求在桩顶部位原地重复搅拌一分钟。同时,根据受力需要进行该段的复搅。

在成桩过程中,凡是由于电压过低或其它原因造成停机。当搅拌机重新启动时,为了防止断桩,均应复沉半米再继续喷浆搅拌成桩。

严禁发生冒浆或同心转等现象。这两种现象都对桩身质量有严重的危害。必须设法克服。如改变挤压泵压力及水泥浆稠度,增加复搅等措施。

### (3)保证桩体垂直度

为使搅拌桩基本垂直于地面,要注意钻机操作平台的平整度和钻架对地面的垂直度。

3、桩体和复合地基加固效果的质量检验及工程验收

水泥搅拌桩施工完成后,应抽 2% 的桩进行桩质量检验,主要是对桩身强度、桩位、桩头及浅层水泥土强度进行检验。

### (1)桩身强度检验

在成桩 7 天内用轻便触探器进行桩身检验,抽样桩不应少于全部桩数的 2%,并不少于 6 根,检测深度不少于 1m,通过触探击数检验桩身水泥土强度。在轻便触探后,对桩身强度有怀疑的区段截取芯样,制成试件,逐一编号,经现场签证后方可进行桩身实际强度测定。通过动测检查桩身质量并进行静载试验,检验工程桩的承载力是否满足设计要求。

### (2)桩位及桩头水泥土强度检查

开挖基槽检查桩位,桩数及桩顶强度。施工过程中不定期抽查施工记录,并对每根桩进行质量评定。对不合格的桩根据其位置和数量等具体情况,督促施工单位采取补桩或加强邻桩等措施。

### (3)荷载试验

单桩荷载试验最大加载量为单桩设计荷载的两倍。压板直径和桩径相等,试桩数量不少于桩数的 1%,并不少于三根。

## 检测结果和经济对比

深层水泥搅拌桩完成后,经厦门集联基础工程公司抽芯检测,检测结果表明:

1、搅拌桩均达到砂质粘土层,根据抽芯时实测的标贯击数,按规范查得承载力标准值为 270~300KPa。

2、桩径满足要求,桩身强度大大超过设计的桩身强度,E 幢桩身饱和单轴抗压强度标准值为 6.72MPa,F 幢为 4.8MPa。

建筑物完成后,通过沉降观测,沉降还是均匀的,没有出现异常现象。通过以上表明,这次基础处理是成功的,达到了预期的效果。

3、宿舍楼 E、F 幢水泥搅拌桩共有 353 根,总延



长 4731.61m, 共有混凝土量 946.32m<sup>3</sup>, 施工时间 25天, 搅拌桩与沉管桩的经济对比见下表:

**两种桩型的经济对比表**

桩型	桩基造价 (万元)	承台及地梁造价 (万元)	总造价 (万元)
沉管桩	81.455	7.7	89.16
搅拌桩	55.5	11.44	66.94

搅拌桩比灌注桩节省造价 24.85%, 取得了较好的经济效益和社会效益。

## 若干问题的探讨

### 1、计算单桩承载力时侧壁摩阻力的取值

水泥搅拌桩单桩承载力设计时侧壁摩阻力往往是参照混凝土桩周土摩阻力, 若不加折减, 计算所得单桩承载力往往偏大, 其原因是: 混凝土桩为刚性桩, 而水泥搅拌桩为刚性—柔性桩, 其桩身变形大于混凝土桩, 因此, 侧壁摩阻力沿桩身的分布上部大于下部。所以, 应根据厦门地区的地质情况进行试验研究, 为水泥搅拌桩单桩承载力计算提供一个较为准确的侧壁摩阻力; 或者根据桩长乘上一个适当的深度变量折减系数。

### 2、关于置换率的计算

$$\text{置换率 } m = \frac{f_{sp} \cdot k - \beta f_s \cdot k}{R_k / A_p - \beta f_s \cdot k}$$

式中的  $\beta$  值反应出桩土共同作用下桩间土强度的发挥和分担问题。复合地基  $\beta$  值小于 1,  $\beta$  与面积置换率, 桩间土和桩端土的软硬, 固化剂掺量的多或小, 桩身龄期长短等因素密切相关。因此, 应进行试验, 获得更为准确的  $\beta$  值。

### 3、提高水泥搅拌桩在粘土层的搅拌均匀程度

工程实践证实, 现行的成桩施工工艺已可充分满足淤泥质土层的搅拌均匀程度, 但地表粘土层的搅拌均匀性则相差甚远, 其桩身质量问题总是与浅部硬壳层及素填土层的搅拌均匀有关, 主要反映在:

(1) 严重的搅拌不均匀。粘土层桩体内存在大块纯水泥块, 与原粘土分界清晰, 二者强度差异极大。

(2) 桩顶中心留有空洞, 有时还形成蜂窝状孔洞。

(3) 产生同心转。钻头带动粘土柱一起转动, 造成水泥浆在桩壁和桩中心局部富集, 其余部位几乎无水泥浆拌入或仅偶见水泥块。

处理方法:

(1) 根据粘土的天然含水量估算最大允许掺水量。

(2) 采用分次适量掺水, 以避免过多的水渗到桩周而导致同心转。

(3) 在复搅提升不喷浆时掺水, 避免直接降低水泥浆浓度。

(4) 适量增加粘土层的喷浆量, 弥补由于掺水引起的桩身强度下降。

## 体会

1、通过厦门一中宿舍楼工程地基的处理, 体会到一个工程的地基处理方案, 不仅要从技术上去比较, 还要从经济上去比较, 同时还要从施工对周围环境的影响程度去比较, 这样才能既保证质量, 又节约投资, 取得较好的社会效益的目的。

2、通过对该工程地基处理, 进一步认识到深层水泥搅拌桩不仅是处理软土地基的一种方法, 而且是处理山前洼地边缘, 软弱极不均匀地基的一种行之有效的好方法。特别是地面下 15m 内有持力层时, 水泥搅拌桩穿透淤泥进入持力层, 可大大提高复合地基承载力, 降低工程造价及减少建筑物沉降量。

3、厦门市旧城改造、危房改造中, 常因靠近邻近民房, 有的仅 2~3m 之间, 沉管桩震动影响会引起民房墙体及基础下沉, 墙面开裂, 造成纠纷, 影响工程开工与进展。而采用无震动、无噪音、无污染, 对周围软土无搅动的搅拌桩, 不但可解决上述问题, 且技术可靠, 经济与环境效益均佳, 适合在厦门地区推广应用。

4、沉管灌注桩常发生断桩, 缩颈吊脚等工程质量问题, 而水泥搅拌桩质量易控制, 只要喷浆及搅拌均匀, 制桩质量就会有保证, 静压的结果就会满足要求。

(作者单位: 厦门第一中学)