# 用长、短水泥粉喷桩处理深厚软弱地基

陈善雄
（中国科学院武汉岩力学研究所，武汉，430071）

提　要　论文介绍了一个用长、短水泥粉喷桩相结合的加固形式处理深厚软弱地基的工程实例。

## 一　前　言

水泥粉喷桩是一种良好的地基处理方法，它已在地基处理工程中得到广泛的应用，取得了良好的技术经济效果。

由于桩体强度和刚度不很高，水泥粉喷桩为柔性桩，亦即当其桩长大于有效桩长，再增加桩身长度对提高水泥粉喷桩承载力作用甚微，从这一角度出发，水泥粉喷桩不宜过长。但从减少变形的角度，又要求桩有相当的处理深度，水泥粉喷桩宜打穿软弱土层进入好土，以保证建筑物不致于有过大的沉降，对于深厚软弱地基，此种处理方法必然导致费用过高。从安全和经济两方面考虑，用长、短桩相结合的加固形式处理深厚软土地基不失为一个优化方案。

## 二　工程概况

武汉双狮涂料厂拟在汉口马场角厂区北部建一栋七层综合楼及一栋六层住宅楼，砖混结构。场地地势较为平坦，地貌单元属长江一级阶地。各土层物理力学指标见表1。

表1　土层的基本情况和物理力学指标见

| 层号 | 土层名称 | 层厚 (m) | 含水量 (%) | 孔隙比 | 重度 (kN/m³) | 粘聚力 (kPa) | 内摩擦角 (°) | 压缩模量 (MPa) | 承载力标准值 (kPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 杂填土夹淤泥 | 2.49 | | | | | | | |
| 2-1 | 粘土 | 1.21 | 34.7 | 0.99 | 18.5 | 26.5 | 8.6 | 4.3 | 103 |
| 2-2 | 淤泥质粉质粘土 | 8.42 | 41.9 | 1.20 | 17.7 | 12.1 | 8.8 | 3.3 | 72 |
| 2-3 | 粉质粘土夹粉土 | 1.94 | 42.6 | 1.29 | 17.0 | 11.5 | 8.5 | 6.5 | 110 |
| 3-1 | 粉砂夹粉质粘土 | 4.09 | | | | | | 9.2 | 130 |
| 3-2 | 粉细砂 | | | | | | | 16.7 | 193 |

# 三　水泥粉喷桩复合地基设计

由于存在深厚软土地层，必须进行地基处理或采用桩基础，但本场地极为狭窄且周围有多栋建筑物，大型设备难以施展，对周边有一定振动影响的机械在该工程中均不宜实施。考虑粉喷桩机设备相对较小，且无振动，对周边环境影响较小，该工程选用水泥粉喷桩加固深厚软土地基。

根据武汉市《粉喷桩设计与施工管理规定》[1]，粉喷桩桩端持力层不宜选在淤泥、淤泥质土等软土上，形成所谓的“悬浮桩”。该工程场地软土层厚达 13～16m，如全部采用桩端进入相对硬层的长桩，费用相当高。经仔细分析计算，决定采用长、短桩相结合的加固形式处理深厚软弱地基。要求经水泥粉喷桩加固后，复合地基承载力 $f_k$=160kPa。

1. 桩长确定

短桩桩长大约按水泥粉喷桩有效桩长控制。参考文献[2]，水泥粉喷桩有效桩长 $l_c$：

$$l_c = 2\sqrt{\frac{DES_m}{\alpha C_u}} \tag{1}$$

式中 $D$ 为桩径；$E$ 为桩身弹性模量；$S_m$ 为临界位移，取值范围 3~10mm；$C_u$ 为桩周土不排水剪强度；$\alpha$ 为折减系数。

取 $D$=0.50m，$E$=60MPa，$S_m$=5mm，$\alpha C_u$=10kPa，有 $l_c$ =7.7m。实际工程中短桩桩长 8.5m，长桩桩端进入(3-1)层 50cm，桩长 12～14.5m 不等。

2.单桩承载力标准值 $R_k^d$ 确定

根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-91)，单桩承载力 $R_k^d$ 按下二式计算取其小值

$$R_k^d = q_s U_p L_p + \alpha A_p q_p \tag{2}$$

$$R_k^d = \eta f_{cu,k} A_p \tag{3}$$

式中 $f_{cu,k}$ 为与粉喷桩桩身加固土配比相同的加固土试块的无侧限抗压强度平均值；$\eta$ 为强度折减系数；$q_s$ 为桩周土的平均摩擦力；$U_p$ 为桩周长；$L_p$ 为桩长；$q_p$ 为桩端天然地基土的承载力标准值；$\alpha$ 为桩端天然地基土承载力折减系数。

鉴于桩长已超过有效桩长，可不计桩的端承作用，即取 $\alpha$=0，同时，桩长按 8.5m 考虑，不计长桩 8.5m 以下段摩阻力对桩承载力的贡献。取 $q_s$= 8kPa，$U_p$=1.57m，$\eta$=0.4，$A_p$= 0.2m$^2$，$f_{cu,k}$=1600kPa，则有 $R_k^d$=105kN

3.计算复合地基承载力标准值 $f_{sp,k}$

$$f_{sp,k} = m R_k^d / A_p + \beta(1-m) f_{s,k} \tag{4}$$

式中 $m$ 为粉喷桩面积置换率；$\beta$ 为桩间土承载力发挥系数；$f_{s,k}$ 为原地基土承载力。

取 $\beta$=0.4，$f_{s,k}$=70kPa，可得 $m$ =0.266。

取置换率 $m$ =0.28，则有 $f_{sp,k}$=0.28×105/0.2+0.4×(1-0.28)×70=167.2 kPa

4.沉降验算[3]

以 B 栋为例。条基间空隙较小，建筑物沉降验算按整板基础核算。在荷载作用下复合地基沉降量 $s$ 为以下二部分压缩量之和：①短桩加固区压缩量 $s_1$；②地基压缩层厚度范围内短桩桩端以下土层(下卧层)压缩量记为 $s_2$。即

$$s = \Psi_s (s_1 + s_2) \tag{5}$$

式中 $\Psi_s$为沉降修正系数，可参照有关规程取值。

短桩加固区压缩量 $s_1$可按复合模量法计算：

$$s_1=\Sigma\ \Delta p_i H_i/E_{csi} \tag{6}$$

式中 $\Delta p_i$为基础附加应力 $p_0$作用下第 $i$ 层复合土上附加应力增量；$H_i$为第 $i$ 层复合土层厚度；$E_{csi}$ 为第 $i$ 层复合土压缩模量。

复合土压缩模量 $E_{csi}$可采用面积加权平均法计算，即

$$E_{cs}=mE_p+(1-m)E_s \tag{7}$$

式中 $m$ 为粉喷桩的面积置换率；$E_p$，$E_s$分别为粉喷桩、桩间土的压缩模量。

$s_2$可按下式计算：

$$s_2=\Sigma\ \Delta p_i H_i/E_{si} \tag{8}$$

式中 $\Delta p_i$为下卧层顶面附加应力 $\sigma_0$作用下第 $i$ 层土上附加应力增量；$H_i$为下卧层第 $i$ 层土层厚度；$E_{si}$为下卧层第 $i$ 层天然土层压缩模量。

下卧层顶面附加应力 $\sigma_0$按等效实体，并考虑下卧层中桩的作用进行计算。

B 栋基础长宽 56m×8.8m，基底附加荷载 $p_0$=140kPa，$\sigma_0$=57.4kPa，$E_{cs}$=19.3MPa，$\Psi_s$=0.7，$s$=82.6 mm

本工程共布置桩径 $\phi$500mm 粉喷桩 1097 根，其中 A 栋 568 根，B 栋 520 根，长、短桩按 1:1 布置，采用 325#普通硅酸盐水泥，上部 4m 喷灰量 60kg/m，其余部分喷灰量 55kg/m。

## 四　复合地基质量检测

本工程共进行 6 组单桩及 6 组单桩复合地基(承压板为 800×800mm² 刚性平板)静载试验。试验均采用堆载平台反力装置，采用慢速维持荷载法，各单桩及单桩复合地基静载试验荷载-沉降($Q$-$s$)曲线见图 1、图 2。

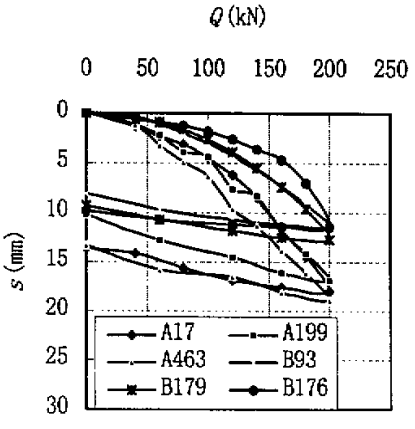



图 1　单桩静载荷载($Q$)-沉降($s$)关系曲线

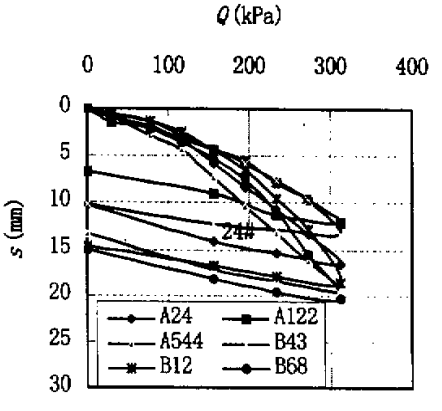



图 2 单桩复合地静载荷载($Q$)-沉降($s$)关系曲线

单桩复合地基静载试验 $Q$-$s$ 曲线呈缓变形，按相对沉降法，取 $s/b$=0.01 对应的压力作

为复合地基承载力基本值。

单桩静载试验 $Q$-$s$ 曲线呈缓变形，荷载加至试验最大荷载 200kN 各桩均未见破坏，故取试验最大荷载作为单桩竖向极限承载力。试验成果列于表 2。

从表 2 可以看出，当桩长超过其有效桩长后，粉喷桩单桩承载力及复合地基承载力不会随桩长的增长发生明显的增加。因此，用水泥粉喷桩复合地基处理深厚软弱地基有必要对桩长进行优化设计。

表 2　单桩及单桩复合地基静载试验成果表

| 单桩 | | | | 单桩复合地基 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 桩号 | 桩长 (m) | 极限承载力 (kN) | 相应沉降量 (mm) | 桩号 | 桩长(m) | 承载力基本值 (kPa) | 变形模量(MPa) |
| A17 | 12.5 | 200 | 18.01 | A24 | 8.5 | 190 | 23.4 |
| A19 | 8.5 | 200 | 16.87 | A122 | 12.5 | 235 | 21.4 |
| A46 | 12.5 | 200 | 18.87 | A544 | 8.5 | 165 | 15.2 |
| B93 | 8.5 | 200 | 11.42 | B43 | 13.7 | 235 | 33.1 |
| B17 | 14 | 200 | 12.69 | B12 | 8.5 | 215 | 31.6 |
| B17 | 8.5 | 200 | 11.42 | B68 | 13.8 | 200 | 20.2 |

## 五　结　语

A、B 二栋住宅楼沉降观测表明建筑物工后最大沉降不到 30mm，该二栋住宅楼已投入使用二年，一切正常。

该二栋住宅楼如全部使用深、长桩处理地基，约需布置粉喷桩 1100 根，总进尺约 15000 延长米，而采用长、短桩相结合的水泥粉喷桩复合地基粉喷桩总进尺 1300 延长米，二方案相比节省费用 15.4%。

在深厚软土地基上修筑多层建筑选用长、短桩相结合的水泥粉喷桩复合地基进行地基处理，是一个安全可靠且经济的优化方案。

### 参考文献

[1] 武汉市城乡建设管理委员会：《粉喷桩设计与施工管理规定》，1998。

[2] 陈善雄：《柔性桩荷载传递与有效桩长分析》，载《岩土工程师》，1995, 4(3):1-9。

[3] 陈善雄：《长、短桩相结合的水泥粉喷桩复合地基设计计算方法探讨》（待发表）。