

# 静压注浆结合树根桩复合地基加固机理及其工程应用

卢敦华<sup>1,2</sup>, 彭振斌<sup>2</sup>, 何忠明<sup>1,2</sup>, 陈科平<sup>2</sup>

(1. 郑州经济管理干部学院环境工程系, 河南 郑州 451191; 2. 中南大学地学与环境工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:**结合具体工程实例探讨了复合地基在地基加固中的应用机理, 指出对于该加固工程, 可采用静压注浆及树根桩相结合形成的复合地基进行加固。工程实践表明, 根据工程实际情况合理运用复合地基进行地基加固处理能取得良好的加固效果。

**关键词:**静压注浆; 树根桩; 复合地基; 地基承载力

**中图分类号:** TU473.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-7428(2007)07-0028-03

**Reinforcement Mechanism and Engineering Application of Composite Foundation with Static Pressure Grouting and Root Piles/LU Dun-hua<sup>1,2</sup>, PENG Zhen-bin<sup>2</sup>, HE Zhong-ming<sup>1,2</sup>, CHEN Ke-ping<sup>2</sup>** (1. Zhengzhou Economic Management Institute, Zhengzhou Henan 451191, China; 2. Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

**Abstract:** The paper analyzes the application mechanism of reinforcement for composite foundation based on engineering example. The combination of root piles with static pressure grouting can be adapted to this reinforcement engineering. The practice has certificated that the appropriate technique can get the good result in foundation reinforcement.

**Key words:** static pressure grouting; root piles; composite foundation; bearing capacity of foundation

现阶段国内外对住宅楼因不均匀沉降而引起的地面开裂等事故的处理方法一般是采用单一的静压注浆或树根桩等加固或托换的方法进行地基加固处理。采用单一的地基处理方法或多或少地存在着以下不足: (1) 仅仅进行静压注浆形成的复合土体的承载力和沉降变形有时难以达到设计要求; (2) 单独的树根桩设计只考虑了桩基的托换, 而忽略了对桩间土承载力的利用。为了较好解决上述问题, 笔者结合具体的工程实例, 对采用静压注浆及树根桩相结合形成的复合地基加固处理技术的作用机理进行初步探讨, 并对工程实例提出一种较好的加固处理措施。

## 1 复合地基加固机理

复合地基一般来说都具有桩体作用、垫层作用、化学固结作用、挤密作用及加筋作用中的一种或多种作用。采用静压注浆结合树根桩加固形成的复合地基, 则同时具备有化学固结和土的加筋 2 种作用。

### 1.1 化学固结作用

对土体采用静压注浆时, 渗入性注浆浆液由水泥加适量水玻璃配制而成。浆液注入地基土层后, 水玻璃可与土中的碳酸钙起化学反应, 生成硅胶; 水泥与土颗粒及土中其他物质胶结。同时, 水玻璃可促使水泥早凝, 避免水泥沉淀、析水, 保证浆液和易

性、可注性, 且其与水泥混合在一起的水解产物为活性很强的氢氧化钙, 水玻璃与氢氧化钙作用, 生成具有一定强度的凝胶体——水化硅酸钙。浆液凝结后形成结石体, 这样可将注浆深度范围内的较松软的地基土改变为胶结的混凝土, 其抗压强度提高, 压缩性降低, 地基均匀性得到改善。从而达到地基加固设计的目的。

### 1.2 土的加筋作用

采用树根桩加固, 实际上是在待加固的地基中设置一种小直径的就地灌注桩, 以桩和土体间的相互作用为基础, 将桩与土围起来的部分视为一个整体结构, 桩系内的各单根桩都用来承担拉应力、压应力和弯曲应力。由于树根桩在土中起加筋的作用, 因而土中刚度会有些变化。

采用树根桩加固形成的桩土复合地基的加筋作用主要表现在以下 2 个方面。

#### 1.2.1 提高地基的承载力

加固后的地基承载力其值可采用如下公式计算:

$$R_a = f_p A_p + f_s A_s \quad (1)$$

$$f_{sp} = k_1 \lambda_1 m R_k / A_p + k_2 \lambda_2 (1 - m) f_s \quad (2)$$

$$R_k = [f_{sp} - k_2 \lambda_2 (1 - m) f_s] A_p / (m k_1 \lambda_1) \quad (3)$$

式中:  $R_a$ ——复合地基极限承载力;  $f_{sp}$ ——复合地基单位面积极限承载力特征值;  $f_p$ ——桩体单位面积

收稿日期: 2006-11-13; 改回日期: 2007-03-23

作者简介: 卢敦华(1966-), 男(汉族), 浙江温岭人, 郑州经济管理干部学院讲师, 地质工程专业, 从事地质工程方面的教学与科研工作, 河南省新郑市龙湖镇中山北路 1 号, 13526565266, ldunhua@yahoo.com。

极限承载力特征值; $f_s$ ——桩间土单位面积极限承载力特征值; $A$ ——单根桩体所承担的加固地基面积; $A_p$ ——单根桩体的横截面面积; $A_s$ ——单根桩体所承担的加固范围内桩间土面积; $R_k$ ——自由单桩承载力特征值。

### 1.2.2 提高地基土体的抗剪强度,增加土体的抗滑能力

复合地基的抗剪特性可根据圆弧滑动面来进行计算。考虑桩土同时发挥抗剪作用,加固后的土体其沉降会有所好转。采用树根桩加固形成的桩土复合地基的沉降  $s$  可按复合模量法进行计算:

沉降计算公式为:

$$E_{psi} = mE_{pi} + (1 - m)E_{si} \quad (4)$$

式中: $E_{psi}$ 、 $E_{pi}$ 、 $E_{si}$ ——分别为第  $i$  层复合地基、桩体和桩间土的压缩模量; $m$ ——复合地基桩土面积置换率。

$$s = s_1 + s_2 = \sum_{i=1}^{n_1} \frac{\bar{\sigma}_{si}}{E_{psi}} H_i + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \frac{\bar{\sigma}_{si}}{E_{si}} h_i \quad (5)$$

式中: $s_1$ 、 $s_2$ ——分别为加固区及下卧层的沉降量; $\bar{\sigma}_{si}$ ——荷载  $P_0$  (基底附加应力) 在第  $i$  层土中产生的平均附加应力; $H_i$ 、 $h_i$ ——分别为加固区与下卧层第  $i$  层土的厚度; $n_1$ ——持力层所在的地层层数; $n_2$ ——下部下卧层所在的最后地层层数。

若先采用静压注浆对土体进行化学加固,则土的性质会变得较均匀,那么就可把整个加固体作为均匀土层来考虑,沉降计算公式相应可简化为:

$$s = s_1 = \frac{\bar{\sigma}_0}{E_{psi}} H = \frac{\bar{\sigma}_0}{E_p + (1 - m)E_s} \quad (6)$$

式中: $\bar{\sigma}_0$ ——荷载  $P_0$  在静压注浆加固后的土体中产生的平均附加应力; $H$ ——加固区平均厚度; $E_p$ ——树根桩弹性模量; $E_s$ ——加固区土层弹性模量。

## 2 工程应用

### 2.1 工程概况

湖南长沙市某住宅楼,经检测发现,在房屋内隔墙与承重墙相交处和外纵墙窗台下存在许多八字形裂缝,部分裂缝存在发展趋势;底层杂屋地面存在不同程度的沉降,最大沉降达 200 mm;房屋外墙部分倾斜度超出规范允许的范围。该住宅基础埋深为 2.6 m,但该场地内杂填土厚度为 1.6 ~ 4.6 m,据此可知该住宅部分基础的持力层为杂填土,其地基承载力和沉降量均不能满足设计要求,从而导致地基不均匀沉降,引起上部墙体开裂。另外,由于排水沟明沟开裂而未及时修补,加之近年在房屋旁边修路

引起的震动和水的渗入,加剧了房屋基础的不均匀沉降。为确保安全,该房屋必须经加固处理后才能继续使用。

根据工程地质报告,各土层性质如表 1 所示。各钻孔在钻探时均遇到地下水,初见水位距地表面 2 ~ 3 m,稳定水位距地表面 1.2 ~ 1.5 m。场地地下水对砼均无腐蚀性。

表 1 土层分层及力学性质

层号	土层名称	层厚/m	$f_k$ /kPa	$q_s$ /kPa	$q_p$ /kPa
①	杂填土	2.6	80	10	
②	淤泥质土	1.7			
③	粉质粘土	2.0	120	15	
④	中细砂	1.9	150	30	
⑤	圆砾	3.3			2000
⑥	残积粉质粘土	1.7			
⑦	强风化红色泥质粉砂岩	未穿透			

### 2.2 加固措施

经分析比较,认为本工程适合采用静压注浆与树根桩复合地基相结合的加固技术,即先通过静压注浆使土层强行固结,形成承载力较高且均匀的加固体,同时,可降低地基的不均匀沉降。再对该房屋倾斜度超出规范允许范围的部分,采用树根桩加混凝土梁分担部分上部荷载,以提高地基承载力、控制沉降及墙体的继续倾斜。

#### 2.2.1 静压注浆加固设计

对墙体基础下地基土采用静压注浆结合树根桩形成的复合地基进行加固,其主要的加固土层为杂填土和淤泥质土,分别在外墙和内墙布置(见图 1)。

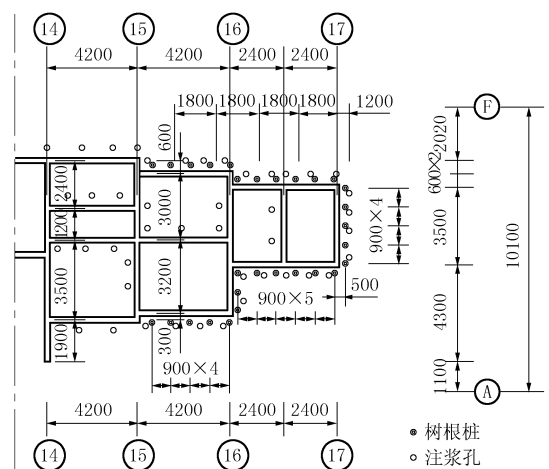


图 1 注浆与树根桩加固基础钻孔平面布置图

根据实际情况,为保证可以安全使用,所设计注浆处理方案为:注浆压力为 0.1 ~ 0.3 MPa,注浆深度为 3.0 ~ 7.0 m,孔距为 1.5 ~ 2.5 m,钻孔为 10°斜

孔,注浆材料为水灰比0.5~1.0的水泥浆液。对开裂严重程度不同的墙体下地基采用不同间距,不同的浆液配比,不同的注浆压力进行注浆强化固结处理。注浆加固效果可采用钻探取心进行检验。

### 2.2.2 树根桩复合地基加固设计

- (1)本工程树根桩桩径 $d$ 取150 mm。
- (2)桩距 $s$ 取900 mm。
- (3)根据文献[1]公式中计算得单桩自由承载力设计值 $R=96$  kN,取100 kN。
- (4)树根桩桩长可根据下式进行试算:

$$f = u \sum q_{si} l_i + q_p A_p \quad (7)$$

式中: $q_p$ ——桩端土承载力特征值; $q_{si}$ ——桩周第 $i$ 层土摩阻力特征值; $u$ 、 $A_p$ ——分别为桩身截面周长及桩端横截面面积。

经试算,桩长为9.5 m,满足要求。

- (5)计算树根桩桩数:

$$n_p = mA/A_p \quad (8)$$

式中: $n_p$ ——理论布桩数; $A$ ——基础面积。

通过计算,并考虑基础尺寸及桩距等其他因素,最后确定实际布桩数为29根。

- (6)布桩。树根桩布置在基础外墙一侧,倾角为 $5^\circ$ ,具体布置见图1。

## 2.3 施工步骤和工艺

### 2.3.1 静压注浆施工

- (1)成孔:对准孔位,进行钻探至设计要求的深度。
- (2)洗孔:采用高压清水泵进行洗孔。
- (3)注浆管的安装:将 $\varnothing 20$  mm的镀锌管安放至孔底,镀锌管每0.50 m钻2个 $\varnothing 8$  mm的小孔,并用电工胶布包裹好,管口采用止浆塞封闭;孔口管为 $\varnothing 127$  mm套管及变径接头。

- (4)注浆:先采用第一级配比(1:1纯水泥浆)注浆,当在规定压力(1.0~2.0 MPa)标准下,单位吸浆量 $\leq 2$  L/min,并延续注浆时间30 min后,可变换为第二级配比(1:0.6纯水泥浆)注浆,单孔注浆完成后移至下一个孔位。

### 2.3.2 树根桩施工

- (1)成孔:对准孔位,进行钻探至设计要求的深度。
- (2)钢筋制安:按设计要求制作好竖筋,并做好导中支架,主筋必须嵌入混凝土基础底板中的长度 $\geq 400$  mm。
- (3)投放中粗砂:根据试验室的配比,投放量测好的一定体积的中粗砂,用钢筋插捣,使细骨料均匀

分布于桩体。施工完成后,移至下一个坑位。

### 2.4 沉降计算及施工效果检测

根据复合模量法计算得到最大沉降量为2.14 mm,满足设计要求。施工结束后,对施工效果采用以下几种方法进行了检测。

- (1)钻孔取心。在注浆孔之间进行钻孔抽样取心,通过对加固前后土样物理力学指标的比较来检测注浆效果(见表2)。

表2 加固前后土体主要物理力学指标

项目	含水率 $w/\%$	孔隙比 $e$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	承载力 $F/\text{kPa}$
注浆前	33	0.77	2.8~3.9	115
注浆后	22	0.51	8.0	150

经抽心检测发现,水泥土均匀,土体性质均匀且强度得到了较大的提高,能满足设计要求。

- (2)桩身质量检查。树根桩施工结束后,随机抽取3根桩进行了开挖检查,证实成桩质量好,桩身强度高,满足设计要求。

- (3)沉降观测。在房屋两侧布置了4个水准基准点,在房屋四周外墙上布置了10个沉降观测点,施工结束后1个月内,每1个星期进行1次观测,后3个月每0.5个月观测1次,共观测了10次,观测结果显示,房屋的最大累积沉降仅1.6 mm,预测估计最终沉降量为2 mm左右,满足相关设计规范要求。

上述检测结果表明,地基加固处理已有了显著的效果,尤其是沉降控制达到了比较满意的效果,说明树根桩复合地基设计是比较成功的。

## 3 结语

- (1)复合地基一般来说都具有桩体作用、垫层作用、化学固结作用、挤密作用及加筋作用中的一种或多种作用。采用静压注浆结合树根桩加固形成的复合地基,则同时具备有化学固结和土的加筋两种作用。

- (2)采用静压注浆与树根桩相结合形成的复合地基加固处理,施工结束后发现地面均有不同程度的抬升,房屋外墙倾斜部分也得到了纠偏,经测量后发现满足规范的允许范围。沉降观测结果表明其沉降量很小,房屋沉降稳定,未出现倾斜量增大等异常现象,能够正常使用。

工程实践表明,根据工程实际情况合理运用复合地基进行地基加固处理能取得良好的加固效果。

(下转第32页)

其工艺流程为:成孔→注浆→下笼→灌注。

### 3.2.1 注浆

这种工艺是仿照钻孔压浆桩工艺进行的。在钻进到设计深度后停钻,向孔内注入少部分水泥浆后提出钻具。注入的这部分水泥浆主要是与孔底残渣混合形成砂混,减少孔内残渣。

### 3.2.2 下笼

钻具提出后,将钻机移开,下入合格钢筋笼,并校正其标高。校正后将其固定。

### 3.2.3 灌注

钢筋笼固定后向孔内灌注搅拌好的混凝土。边灌注边振捣。灌注的同时,要检查混凝土面,达到设计标高上0.2~0.3 m时停止灌注。

本工艺要求灌注混凝土的坍落度在8~10 cm,严格按配合比搅拌混凝土。

## 3.3 灌注混凝土成桩

其工艺流程为:成孔→下笼→灌注。

### 3.3.1 下笼

成孔钻进到设计标高后,空转充分返渣后将钻具提出并移开钻机,将合格的钢筋笼下入孔内,校核标高,并固定。

### 3.3.2 灌注

钻孔压浆成桩工艺由于是向孔内压入水泥浆,随之几次补浆使孔内水泥浆有一定压力,水泥浆在压力作用下向孔壁渗透并能与孔壁岩土凝固,提高桩摩擦力,因而桩承载力很高。注浆加混凝土成桩工艺由于开始时也注入水泥浆,水泥浆与孔底岩土凝固,也相应提高摩擦力,但由于注入水泥浆压力很小,故承载力提高不大。

钢筋笼固定后,向孔内灌注混凝土,边灌注边振捣,并随时检查混凝土面的高度,达到设计高度面上0.2~0.3 m后停止灌注。

本工艺要求成孔后要检查孔底残渣厚度,灌注混凝土的坍落度在8~10 cm。

## 4 桩质量

3种工艺所成桩质量是不一样的,钻孔压浆成桩工艺所成桩质量好于另两种工艺所成桩,桩身为无砂混凝土,桩身均匀致密、完整。注浆加混凝土成桩所成的桩由于底部注入水泥浆,再灌注混凝土时,桩底部混凝土被稀释,造成坍落度增大,与上部混凝土标号不一致。另外,注入的水泥浆在凝固时产生结晶水析出易造成断桩事故。灌注混凝土成桩工艺所成的桩底部残渣不易控制,易造成底部缩径及不密实现象。

## 5 桩承载力

成桩工艺不同,桩质量就不同,因而桩承载力也不同。据不完全统计,钻孔压浆成桩工艺所成桩承载力最高,注浆加混凝土成桩工艺次之,灌注混凝土成桩工艺最低。详见表1。

表1 不同成桩工艺承载力对比

工程名称	施工年份	桩径/mm	桩长/m	持力层	成桩工艺	设计承载力/kN	试桩结果/kN
铁路体育馆	2002	400	10	砾砂	钻孔压浆成桩	1200	1400
新达3号楼	2005	400	8	砾砂	注浆加混凝土成桩	600	700
税务局住宅楼	2004	400	8	砾砂	灌注混凝土成桩	470	500

## 6 结语

(1) 钻孔压浆成桩,不受地层条件及地下水限制,质量好,承载力比普通灌注桩高25%~30%。

(2) 注浆加混凝土成桩,底部桩身混凝土标号不易控制。

(3) 灌注混凝土成桩受地层、地下水等因素限制。

(上接第30页)

## 参考文献:

- [1] 龚晓南. 复合地基[M]. 杭州:浙江大学出版社,1992.
- [2] 许富华. 对复合地基作用机理的剖析[J]. 山西建筑,2006,32(14):78-79.
- [3] 王星华. 地基处理与加固[M]. 长沙:中南大学出版社,2002.
- [4] 叶书麟,韩杰,叶观宝. 地基处理与托换技术(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1994.

- [5] 唐冬初,张宁,胡迎新. 利用树根桩托换房屋基础[J]. 工业建筑,1999,8(4):15-17.
- [6] 彭振斌. 注浆工程设计计算与施工[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1997.
- [7] 彭振斌,胡贺松,何忠明,杨庆光. 复合注浆法在桩基加固中的应用[J]. 岩土工程界,2003,7(3):27-29.
- [8] 谢福和,彭濂清,万建文. 注浆法在填土地基加固处理中的应用实例[J]. 湖南地质,2001,20(2):123-125.