

# 多元桩复合地基在高层建筑地基处理中的应用

孙志军<sup>1</sup> 王应严<sup>2</sup>

(1. 中航勘察设计研究院,北京 100086; 2. 中建大成建筑有限责任公司,北京 100044)

**【摘要】** 介绍了钻孔夯底灌注桩——上部为灌注桩、下部为夯扩桩与钻孔夯扩挤密灰渣土桩相结合形成的多元桩复合地基在某工程中的应用,其中利用钻孔夯底灌注桩主要提高承载力和控制建筑物沉降,利用钻孔夯扩挤密灰渣土桩主要挤密桩间土,降低回填土层压缩性。通过分析计算得出了最佳地基处理方案,为类似工程提供了应用实例。

**【关键词】** 多元桩复合地基;夯底灌注桩;钻孔夯扩挤密桩;灰渣土桩

**【中图分类号】** TU 473.1

## Application of the Composite Foundation with Multi-element Pile in Ground Treatment for Highrise Building

Sun Zhijun<sup>1</sup> Wang Yingyan<sup>2</sup>

(1. Avic Institute of Geotechnical Engineering, Beijing 100086 China; 2. CHCEC-TAISEI Construction, LTD, Beijing 100044 China)

**【Abstract】** As composite foundation with multi-element pile, the under-rammed bored pile, which composites the cast-in-place pile in upper part and the rammed bulb pile in under part, is used in an engineering by combining with the rammed and compacted lime-waste-soil pile. The function of this composite foundation lies in, improving the bearing capacity of ground soil and controlling the settlement of building by the under-rammed bored pile, and compacting the soil around pile and improving the compressibility of artificial soil by the rammed and compacted pile. The best plan of ground treatment from analysis and calculation can provide some valuable informations for the similar engineering.

**【Key words】** composite foundation with multi-element pile; under-rammed bored pile; rammed and compacted bored pile; lime-waste-soil pile

## 0 引言

北京城近郊区分布着许多长期废弃并经杂乱无章回填的大面积采砂(石)坑,随着城市建设规模的不断扩大,此类采砂(石)坑场地由于地价低廉,又能恢复和保护环境,渐渐成为房地产开发商投资的热点。但是这种场地,由于其回填时间不一,物质组成成分不均,使得其作为地基土来说,具有低承载力、大压缩性、不均匀性并常常伴有湿陷性等物理力学特征。在这种场地建设高层、甚至超高层建筑,选择既经济又能满足结构设计要求的地基处理方式便成了地基处理的难点。本文根据某采砂(石)坑场地建设高层建筑地基处理工程实践,介绍了一种多元桩地基处理方法——钻孔夯底灌注桩和钻孔夯扩挤密灰渣土桩复合地基处理技术。

目前,多元桩设计方法虽然还没有相应的国家规范,但是二元桩的应用实例已有相关文献报道。陈强等人(2001)研究了碎石桩和CFG桩相结合的复合地基特性<sup>[1]</sup>;黎良杰等人介绍了利用长桩CFG桩和短桩钻孔夯扩挤密桩处理高层建筑地基实例<sup>[2]</sup>,并且其地基承载力特征值达478 kPa;文献<sup>[3,4]</sup>介绍一些二元桩处理承载力特征值要求小于300 kPa的工程实例。但是,在采砂(石)坑场地建设高层建筑,利用钻孔夯底灌注桩——上部为灌注桩、下部为夯扩挤密桩和钻孔夯扩挤密灰渣土桩这种相当于三元桩的方法处理地基还未见报道。

## 1 工程概况

拟建某住宅小区位于北京市丰台区田各庄。该

**作者简介:**孙志军,1969年生,男,汉族,吉林人,大专学历,主要从事岩土工程勘察和地基处理的设计与施工工作。

① 全利华.某建筑物混合桩设计施工.地基基础工程,2001,11(4):17~21

工程为一住宅小区,包括 15<sup>#</sup>、16<sup>#</sup>、24<sup>#</sup>、25<sup>#</sup>楼以及 14<sup>#</sup>地库。各楼座有关结构设计参数见表 1。

表 1 各楼座有关设计参数

楼座	±0.00 绝对标高/m	砼垫层底(槽底)标高/m	复合地基承载力特征值/kPa	结构(基础)形式	地上(下)层数/层
14 <sup>#</sup> 地库	53.75	46.14(-7.61)	120	框架(筏板)	0(2)
15 <sup>#</sup> 楼	54.15	47.66(-6.49)	372	框剪(箱基)	22(2)
16 <sup>#</sup> 楼	53.95	46.76(-7.19)	372	框剪(箱基)	22(2)
24 <sup>#</sup> 楼	54.15	52.15(-2.00)	180	框架(独基)	2
25 <sup>#</sup> 楼	54.25	52.25(-2.00)	150	框架(独基)	2

其中 15<sup>#</sup>楼和 16<sup>#</sup>楼要求的承载力为深度修正后的特征值,深度修正值为 40 kPa,其它不进行修正,同时,要求建筑物长期最大沉降量不大于 80 mm。

该工程 15<sup>#</sup>楼、24<sup>#</sup>楼、25<sup>#</sup>楼全部地基,以及 16<sup>#</sup>楼的西侧大半部分、14<sup>#</sup>地库的西侧大半部分地处原来的一深大采砂坑中,坑底最大深度约 16.7 m,现已经回填至自然地面,经开挖后,基础持力层主要为素填土①层以及杂填土①<sub>1</sub>层,厚度巨大,成分复杂且不均匀,欠固结,承载力特征值仅为 100 kPa。16<sup>#</sup>楼的东边小半部分、14<sup>#</sup>地库的东半部分基础持力层为天然砂卵石层。各楼座天然地基承载力及沉降均不能满足结构设计要求,需进行地基加固处理。本文以 16<sup>#</sup>楼为例进行分析,16<sup>#</sup>楼为地下两层,地上 22 层,箱型基础,基底标高 46.76 m。

## 2 工程地质与水文地质条件

该工程场地位于永定河冲洪积扇中上部。场地地层土质以碎石土为主。第四纪沉积物厚度小于 50.0 m。拟建场区原为民房和菜地,地形基本平坦,钻孔孔口地面标高为 52.57~54.62 m。拟建场区 35.0 m 深度范围内土层可分为人工堆积层、新近沉积层和第四纪沉积层三大类。地层岩性自上而下分述如下:表层为厚度 0.5~16.7 m 厚的人工堆积粉土填土;①层(黄褐色、中密、稍湿)、房渣土;①<sub>1</sub>层(杂色、稍密、稍湿)以及卵石填土①<sub>2</sub>层(杂色、稍密、稍湿)。人工堆积层之下为新近堆积层;标高 51.11~52.81 m 以下为砂质粉土、粘质粉土;②层(褐黄色、中密、稍湿),标高 50.75~52.81 m 以下为卵石圆砾;③层(杂色、稍密、稍湿)、粉细砂;③<sub>1</sub>层和中砂③<sub>2</sub>层(褐黄色、稍密、稍湿)。标高 34.80~46.39 m 以下为卵石圆砾;④层(杂色、中密一

密实、稍湿)和细中砂;④<sub>1</sub>层(褐黄色、密、稍湿)。

场地勘探期间未见地下水。

## 3 地基处理方案选择

根据场地踏勘及场地岩土工程勘察报告,场地回填土具有较差的岩土工程力学性质,主要表现为:

①回填物质成分复杂,有粉土填土,房渣土以及卵石填土。

②地基土结构松散,欠固结,承载力特征值仅为 100 kPa,且含水率低,孔隙率大,压缩性与差异性大。

③回填土层厚度大,最大达 16.7 m。

这给地基处理设计与施工带来了极大的困难。常规的单一地基处理方法大都难以满足结构设计的要求,或者在满足结构设计要求下大大增加了投资成本。下面以 16<sup>#</sup>楼为例对地基处理方案选择予以说明。

根据 16<sup>#</sup>楼结构设计要求及场地工程地质条件,在选择地基处理方案时,通常可以考虑 CFG 桩或钻孔灌注桩复合地基方案,钻孔夯扩挤密素混凝土桩复合地基方案,以及前两者与钻孔夯扩挤密灰渣土桩结合的方案。但是如果考虑到场地有丰富的灰渣土和天然级配砂石,那么如何充分利用这一现场资源,就是其地基处理方案达到最经济的关键。从单一的 CFG 桩或钻孔灌注桩复合地基方案看,桩体虽然具有较大的承载力,并能较好地控制沉降,但是它只是发挥了端部砂卵石的端承作用,不能降低桩间土的压缩性,提高地基土的承载力。从单一的钻孔夯扩挤密素混凝土桩方案看,它虽然既具有较大的承载力和能较好地控制沉降,也能挤密地基土,降低地基土的压缩性,提高地基土的承载力,同时还能夯实桩底,但是它不

能充分利用场地开挖出来的渣土资源。从单一的钻孔夯扩挤密灰渣土桩看,虽然它既能挤密地基土,降低地基土的压缩性,提高地基土的承载力,也能充分利用场地资源,但是它对高层建筑要求的承载力来说承载力提高毕竟有限。因此采用钻孔夯扩底灌注桩——上部为灌注桩、下部为夯扩桩和钻孔夯扩挤密灰渣土桩这种相当于三元桩的方法处理这种场地能同时综合上述优点,是经济上合理、技术上可行的方案。

#### 4 地基处理方案设计与计算

##### 4.1 钻孔夯扩底灌注桩单桩承载力特征值计算

为确保灌注桩桩底不留虚土,同时也为合理利用场地广泛存在的天然级配砂石,灌注桩下部4.0 m采用夯扩素混凝土桩,材料为水泥与场地内天然级配砂石混合料,当夯至约4.0 m后,灌注素混凝土至桩顶。

钻孔夯扩底灌注桩单桩竖向承载力特征值  $R_a$  可按式(1)计算

$$R_a = u_p \cdot \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + q_p \cdot A_p \quad (1)$$

式中:  $u_p$  为桩周长, 1.256 m;

$q_{si}$  为桩侧第  $i$  土层的侧阻力;

$q_p$  为桩端阻力特征值。

根据勘察报告以及桩基规范取值,综合取

$q_s = 40$  kPa,  $q_p = 3\ 500$  kPa;  $l_i$  为第  $i$  土层中桩长;  $A_p$  为桩截面面积, 0.125 6 m<sup>2</sup>。

当桩长为 8.80 m 时,单桩承载力特征值可取 420 kN。

##### 4.2 灰渣土桩复合地基承载力特征值计算

灰渣土桩复合地基承载力按照下式进行计算

$$f_{spk1} = m_1 \cdot f_{pk} + (1 - m_1) \cdot f_{sk} \quad (2)$$

式中:  $f_{pk}$  为桩体承载力特征值, kPa; 取 800;

$f_{sk}$  为处理后桩间土承载力特征值, kPa, 取 140;

$m_1$  为灰渣土桩面积置换率, 为 0.10。

经过计算,灰渣土桩复合地基承载力特征值  $f_{spk1}$  为 206.0 kPa。

##### 4.3 复合地基承载力特征值计算

复合地基承载力  $f_{spk}$  按下式进行计算

$$f_{spk} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1 - m)f_{spk1} \quad (3)$$

式中:  $\beta$  为灰渣土桩处理后等效桩间土承载力发挥系数,取 0.95。  $m$  为钻孔夯扩底灌注素混凝土桩的面积置换率,取 0.063。

据此计算,复合地基承载力特征值  $f_{spk}$  为 394 kPa。承载力提高倍数  $\zeta$  为 3.94。所以,地基处理以后,承载力满足建筑设计要求的 372 kPa。

##### 4.4 地基处理方案设计参数

根据设计采用钻孔夯扩挤密灰渣土桩与钻孔夯扩底灌注素混凝土桩复合地基方案。具体设计参数如下:

钻孔夯扩挤密灰渣土桩:平均有效桩长为 8.80 m,桩间距为矩形布置, 1.45 m × 1.50 m,桩径 520~550 mm,面积置换率 0.109,挤密灰渣土桩的桩体材料采用白灰、现场渣土和部分天然级配砂石。白灰为块灰,现场浇水粉化。混合料体积配比:  $V(\text{白灰}) : V(\text{级配砂石}) : V(\text{渣土}) = 1 : 1 : 3$ 。

混凝土桩:平均有效桩长为 8.80 m,桩间距为矩形布置, 1.45 m × 1.50 m,桩径 400 mm,面积置换率 0.057。下部钻孔夯扩挤密干硬性混凝土桩的桩体材料采用水泥、天然级配砂石,设计强度 C15。上部灌注桩混凝土桩体材料为水泥、砂、石,设计强度 C20。

打桩保护层厚度为 30 cm。桩长以桩端见原状砂卵石层控制。桩顶以上铺设褥垫层 200 mm,夯填度不大于 0.9。

##### 4.5 复合地基沉降计算

根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002),按照下式进行复合地基沉降量计算。

$$s = \varphi_s \cdot \sum_{i=1}^n \frac{P_0}{E_{spi}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \quad (4)$$

其中:各复合土层压缩模量按下式计算:

$$E_{sp} = \xi \cdot E_{s,k} \quad (5)$$

根据经验,取经过夯扩挤密后的地基土压缩模量为 5.5 MPa,则复合土层压缩模量为 18.4 MPa。通过计算,16<sup>#</sup>楼中心点最大沉降为 34.3 mm,满足结构设计要求。由于选用地质条件相对较差的情况进行计算,因此实际长期最大沉降量应小于上述计算值。

#### 5 多元桩的施工

16<sup>#</sup>楼地基处理施工具体过程为:(1)定位放线、满夯一遍→(2)定位放线、场地标高测量→(3)桩

位点施测→(4)灰渣土桩成孔→(5)灰渣土混合料拌制→(6)夯扩桩机就位→(7)分层投填灰渣土混合料、夯扩挤密→(8)夯底灌注桩成孔→(9)夯扩下半段4 m→(10)灌注上半段4 m、振捣混凝土施工→(11)复合地基检测→(12)清土、凿桩头→(13)验槽→(14)褥垫层施工。

5.1 钻孔夯扩挤密灰渣土桩

钻孔夯扩挤密灰渣土桩的桩体材料采用白灰、现场渣土和部分天然级配砂石。白灰为块灰,现场浇水粉化,土为现场渣土和级配砂石。体积配比为  $V(\text{白灰}) : V(\text{级配砂石}) : V(\text{渣土}) = 1 : 1 : 3$ 。铲车拌料,素土过筛,最大粒径小于5 cm。另外,在搅拌过程中,适量加水,使得搅拌后的灰渣土的含水量以“手握成团、落地开花”控制,要求拌和后的灰土均匀。

5.2 钻孔夯底灌注混凝土桩

下部钻孔夯扩挤密干硬性混凝土桩的桩体材料采用水泥、天然级配砂石和防冻剂等,设计强度C15。具体质量配比为:  $m(\text{水泥}) : m(\text{水}) :$

$m(\text{级配砂石}) = 315 : 205 : 1860$ , 施工中采用普通滚筒搅拌机现场搅拌,每盘配比为:  $m(\text{水泥}) : m(\text{水}) : m(\text{级配砂石}) = 50 : 32.5 : 295$ (每盘)。上部钻孔灌注桩原材料为水泥、砂、碎石,设计强度C20,塌落度12~14 cm,具体配比为:  $m(\text{水泥}) : m(\text{水}) : m(\text{砂}) : m(\text{碎石}) = 305 : 195 : 960 : 960$ , 施工中采用强制式搅拌机现场搅拌,每盘按照以下配比进行施工:  $m(\text{水泥}) : m(\text{水}) : m(\text{砂}) : m(\text{石}) = 150 : 96 : 470 : 470$ 。

6 多元桩复合地基检测

静载荷试验是用来确定经处理后的多元桩复合地基是否满足设计要求的最直接、最可靠的手段。施工结束后,建设单位委托中航勘察设计研究院工程测试中心进行了16#楼的载荷试验和混凝土桩低应变动力检测。检测结果表明,复合地基承载力特征值均满足建筑结构设计要求,桩身质量和完整性较好,总体上达到优良桩水平。钻孔夯底灌注桩与钻孔夯扩挤密灰渣土桩复合地基部分试验结果见表2和表3;相应的载荷试验曲线图见图1、图2。

表2 钻孔夯底灌注素混凝土桩试验成果表

$P/\text{kN}$	0	160	240	320	400	480	560	640	720	800
143# 沉降 $s/\text{mm}$	0.00	0.48	0.87	1.52	2.29	3.09	3.94	5.01	6.04	7.43

表3 钻孔夯扩挤密灰渣土桩复合地基试验成果表

$p/\text{kPa}$	0	80	120	160	200	240	280	320	360	400
234# 沉降	0.00	0.86	1.64	2.40	3.27	4.39	5.78	7.50	9.41	11.76
35# $s/\text{mm}$	0.00	0.52	0.90	1.35	1.90	2.64	3.44	4.42	5.72	7.32

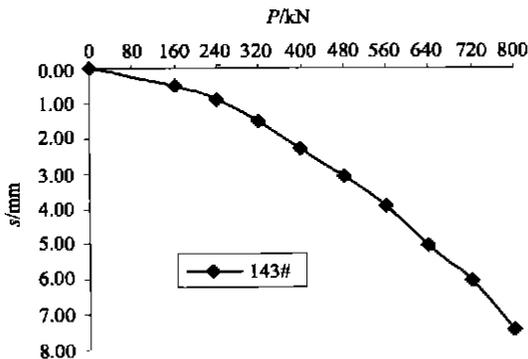


图1 钻孔夯底灌注桩单桩  $P-s$  曲线

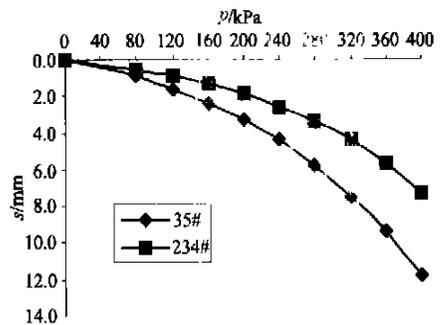


图2 灰渣土桩单桩复合地基  $p-s$  曲线

4)同时可以看出,用有限元数值方法对隧道开挖支护进行模拟能较真实地反映隧道结构的内力和变形情况,也可以用于对二次衬砌结构安全性能进行评价。

### 参 考 文 献

1 聂智平,朱少华,等.关于某隧道群病害原因分析及结构安全性评估.华中科技大学学报,2003,20(3):42~45

- 2 潘昌实.隧道力学数值方法.北京:中国铁道出版社,1995
- 3 刘涛.精通ANSYS.北京:清华大学出版社,2002
- 4 中华人民共和国行业标准.JTJ 026-90.公路隧道设计规范,1990

收稿日期:2004-07-12

(上接第251页)

由图1钻孔夯底灌注素混凝土桩荷载试验曲线可知,静荷载试验曲线基本呈弹性变形,在最大荷载800 kN时,沉降量仅为7.43 mm,可见其承载力提高和控制沉降的效果是很明显的。钻孔夯扩挤密灰渣土桩复合地基在最大荷载范围内没有出现比例极限值,因此按相对沉降确定承载力标准值,经计算多元桩复合地基承载力满足结构设计要求。

### 7 结 论

在类似情况下,采用钻孔夯扩挤密灰渣土桩和钻孔夯扩底灌注桩——下部为钻孔夯扩挤密桩、上部为混凝土灌注桩,这种相当于三元桩的方法进行地基处理是经济上合理、技术上可行的。

### 参 考 文 献

- 1 陈强,黄志义,左人宇,等.组合型复合地基的特性及其FEM模拟研究.土木工程学报,2001,34(1):50~55
- 2 黎良杰,程学军,等.二元桩复合地基的应用研究.探砂工程,2003(增刊):25~27
- 3 王步云,赵秀芹.砂石桩与低强度混凝土桩组合型复合地基在软土地基中的应用(一).岩土工程技术,1997(1):8~14
- 4 王步云,赵秀芹.砂石桩与低强度混凝土桩组合型复合地基在软土地基中的应用(二).岩土工程技术,1997(2):3~5

收稿日期:2004-09-01

## 公 告

《岩土工程技术》杂志《期刊出版许可证》2004年年检后,《岩土工程技术》杂志的分类号“TC”变更为“TU”,国内统一连续出版物号CN 11-3813/TC变更为CN 11-3813/TU,中国标准连续出版物号ISSN 1007-2993/CN 11-3813/TC变更为ISSN 1007-2993/CN 11-3813/TU,主管单位:中国兵器工业集团公司 变更为 中国兵器工业总公司。本刊的版权页等已作了变更。

特此公告

《岩土工程技术》编辑部  
2004-09-09