

# 粉煤灰垫层与夯扩灌注桩联合处理高层建筑地基

孙倡书<sup>1</sup>, 谭佳良<sup>2</sup>, 周旭荣<sup>3</sup>

(1. 机械工业第四设计研究院勘察分院, 河南 洛阳 471039; 2. 湖南省地质工程勘察院, 湖南 株洲 412003; 3. 中国石油工程建设(集团)公司, 北京 100011)

**摘要:**利用夯扩灌注桩对桩端持力层的加密作用,可解决水下填筑问题,利用粉煤灰的可压密性和夯扩灌注桩承载力高的特点,可大幅提高复合地基承载力,减少工程投资。以河南洛阳某高层建筑为例,介绍了粉煤灰垫层和夯扩灌注桩组成的刚性桩复合地基在高层建筑地基中的应用。

**关键词:**粉煤灰;垫层;夯扩灌注桩;刚性桩;复合地基

**中图分类号:**TU472.2<sup>+</sup>2;TU473.1<sup>+</sup>4 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2006)09-0004-03

**Flyash Cushion Combined with Ram-compaction Pile Applied in Foundation Treatment for High-rise Building/SUN Chang-shu<sup>1</sup>, TAN Jia-liang<sup>2</sup>, ZHOU Xu-rong<sup>3</sup>** (1. SCIVIC Engineering Corporation, Luoyang Henan 471039, China; 2. Hunan Province Geological Engineering & Reconnaissance Institute, Zhuzhou Hunan 412003, China; 3. China Petroleum Engineering & Construction (Group) Corporation, Beijing 100011, China)

**Abstract:** Ram-compaction pile can tamp bearing soil layers to densify the stratum in water. The bearing capacity of composite foundation can be greatly increased and engineering investment can be reduced by use of compressibility of flyash cushion and high bearing capacity of ram-compaction pile. The composite foundation, made up of ram-compaction rigid piles and fly-ash cushion, is introduced with the application of a high-rise building in Luoyang, Henan.

**Key words:** flyash; cushion; ram-compaction pile; rigid pile; composite foundation

河南洛阳地区有大量粉煤灰,粉煤灰废物处理成为环保部门一大问题;高层建筑采用传统钻孔灌注桩、预制桩等地基处理方法成本高。找到一种既能处理粉灰粉,使其变废为宝,又能降低高层建筑投资的地基处理方法,对该地区建筑和环保具有重要意义。

粉煤灰具有可压实性和与水反应后可获得较高的强度和刚度<sup>[1,2]</sup>。近年来,其作为一种垫层材料,广泛应用于路基和工业民用建筑地基处理中。夯扩灌注桩为通过在桩端重锤夯填干硬性混凝土,形成扩大头和对桩端持力层的挤密作用而获得较高的承载力<sup>[3~5]</sup>。

从粉煤灰和夯扩灌注桩的特点及洛阳地区工程地质条件分析认为,粉煤灰垫层与夯扩桩形成复合地基应用于该地区高层建筑,既能处理粉煤灰,使其变废为宝,又能降低高层建筑投资。实践证明,粉煤灰垫层与夯扩桩联合处理洛阳地区高层建筑地基是一种安全、经济和环保的方法。

下面以河南洛阳某高层建筑为例,介绍粉煤灰垫层和夯扩灌注桩组成的刚性桩复合地基在该地区

高层建筑地基中的应用。

## 1 工程概况

拟建高层住宅楼为 3 幢连体建筑,建筑面积 60000 m<sup>2</sup>,地上 26 层,地下 2 层,剪力墙结构。 $\pm 0.00$  标高为 148.10 m,基底标高 140.10 m,设计基底最大压力 600 kPa。拟采用桩基或筏基。3 幢高层之间为 2 层商场(商场同样也有 2 层地下室)。

## 2 场地岩土工程条件

该楼场地属洛河河漫滩,分布部分回填的采砂(石)坑,地形起伏较大,地面标高在 135.80 ~ 144.25 m 之间,最大相对高差 8.45 m。场地地面低于  $\pm 0.00$  标高,采砂(石)坑部位低于基底标高。

场地分布地层主要为河流冲、洪积作用形成的粉土、砂及卵石层。采砂(石)坑内分布有厚层的人工堆积的杂填土。场区从上到下各岩(土)层岩性特征为:①杂填土,主要由建筑垃圾组成,松散,厚度 0.30 ~ 5.80 m;②黄土状粉土,黄褐色,湿,稍密,具湿陷性,厚度 0 ~ 1.30 m;③卵石,杂色,稍密,其间

收稿日期:2006-07-24

作者简介:孙倡书(1968-),男(汉族),河南虞城人,机械工业第四设计研究院工程师,水文地质与工程地质专业,从事岩土工程勘察与治理工作,河南省洛阳市涧西区西苑路 13 号,(0379)64818461,scs\_kcfy@scivic.com.cn。

夹有中密的③<sub>1</sub>卵石、稍密的③<sub>2</sub>中砂、稍密的③<sub>3</sub>含泥圆砾和粉质粘土透镜体,层厚为 0.30 ~ 4.40 m; ④卵石,杂色,湿,密实,夹有④<sub>1</sub>卵石透镜体,揭露最大厚度为 12.80 m。

地下水类型为潜水,含水层为③层和④层,地下水受洛河河水直接补给。洛河在市区段修建了 4 座蓄水橡皮坝,其蓄水放水,对场地地下水位影响很大。勘察期间,地下水稳定水位在标高 131.00 ~ 137.00 m 左右,蓄水放水对地下水位影响幅度为 5.50 m 左右。地下水对混凝土无腐蚀性。

### 3 地基基础方案分析

由于场地部分地段天然地面低于拟建住宅楼基底,且①、②层强度均不能满足要求,③层内有承载力较低的③<sub>2</sub>层中砂和③<sub>3</sub>层含泥圆砾和粉质粘土,其强度亦不能满足要求。经综合分析,该建筑物可采用的地基基础方案为:(1)砂石垫层,挖除全部①、②层和部分③层,用人工或天然级配砂石回填至基底,基础采用筏基;(2)大直径扩底墩基础,先将场地回填整平到标高 141.00 m,然后施工大直径扩底墩基础,以承载力高的④层卵石作为墩端持力层。以上两个方案均存在地下水影响问题,由于施工时地下水位已接近标高 137.00 m,无论采用砂石垫层或是大直径扩底墩基础,均需降低地下水位施工,降低幅度在 1.00 ~ 3.00 m 之间,对于透水性很强的卵石层,难度很大,而且费用高。经过讨论,采用了砂石和粉煤灰垫层及夯扩桩复合地基上的筏基方案,即挖除全部第①、②层和部分③层后,对较深部位的水下部分,用级配砂石回填找平,再用粉煤灰回填至基底标高,然后施工夯扩灌注桩,以卵石层(回填和天然)作桩端持力层,以粉煤灰作为桩间土形成复合地基。

该地基基础方案的设计思路是:(1)基坑开挖结束后,立即用级配砂石对较深部位回填到地下水位以上,然后用重型振动压路机碾压,利用压路机和地下水的共同作用,使该部位回填砂石达到较好的密实度,再用级配砂石分层压实填平基坑底面(标高 137.00 m 左右);(2)对基坑底统一碾压后,用粉煤灰分层压实回填至基底标高 140.10 m;(3)施工夯扩桩,利用该施工工艺对持力层的挤密作用,使桩端下一定深度内的卵石层均达到很高的密实度,大幅提高了卵石层的承载能力,使复合地基承载力  $\leq 600$  kPa;(4)夯扩桩施工结束后,清除施工扰动层和桩头,铺垫褥垫层,形成复合地基。

## 4 复合地基的设计与施工

### 4.1 粉煤灰垫层的设计与施工

粉煤灰垫层的施工在砂石垫层施工结束后进行,粉煤灰采用洛阳某电厂的湿排灰,要求其压实系数  $\leq 0.93$ 。采用的主要施工参数如下:(1)使用 YZ168 型振动压路机,行驶速度  $\geq 2$  km/h;(2)每层虚铺厚度  $\geq 30$  cm;(3)每层先静压 2 遍,再振压 14 遍,检验不合格的区域再增压 7 遍,直至全部合格。

### 4.2 夯扩灌注桩的设计与施工

本工程采用夯扩灌注桩作为复合地基的竖向增强体,设计桩径  $d=0.45$  m,桩长  $l=2.9$  m,桩间距  $s=1.5$  m,等边三角形布置(置换率  $m=0.08$ ),桩身通长配筋,混凝土强度等级为 C30。采用螺旋钻孔,夯扩桩机夯扩灌注,以最后三击贯入度控制成桩质量。

其施工工序为:测量放线、定桩位→钻机就位、钻孔、移走钻机→清除孔口废土、桩机就位、下细长锤和桩管→填干拌混凝土、夯击,使填料量和三击贯入度满足设计要求→放置钢筋笼、灌注混凝土、逐渐上提桩管至孔口、振实混凝土→测量桩顶标高、移走桩机,开始下一根夯扩灌注桩。

### 4.3 褥垫层的设计

材料采用粗砂,设计厚度为 20 cm,碾压密实。

## 5 复合地基检验

### 5.1 粉煤灰垫层检验

粉煤灰垫层检验包括压实质量检验和承载力检验。

粉煤灰垫层压实质量检验在每层碾压结束后进行,根据检验分区,分层进行检验。检验采用环刀法,共检验 705 点次。由于回填粉煤灰量较大,所用粉煤灰的颗粒大小有一定差别,故在压实检验过程中分别对所用 4 种粉煤灰进行了 12 组击实试验,以确定粉煤灰最大干容重和最优含水量。最终控制粉煤灰垫层的压实系数  $\leq 0.93$ 。

粉煤灰垫层的承载力检验采取现场载荷试验,共作载荷试验点 6 个,试验结果见表 1。

从表 1 静载试验结果分析,在最大加载时,沉降量较小,均未达到极限荷载,说明各试验点处承载力在试验结果上仍有较大的发挥空间,粉煤灰垫层采用表 1 承载力时,安全储备较大。根据本工程需要,综合分析以上结果,本工程粉煤灰垫层地基承载力标准值采用 180 kPa。

表 1 粉煤灰垫层静载试验综合成果表

试验点号	承压板直径/m	承压板面积/m <sup>2</sup>	最大加载量/kPa	最大沉降量/mm	承载力基本值/kPa	承载力基本值对应的沉降/mm
S1	0.80	0.50	840	9.48	≥420	5.24
S2	0.80	0.50	900	5.98	≥450	2.99
S3	0.80	0.50	900	11.27	≥450	6.34
S4	1.50	1.77	286	5.87	≥182	4.17
S5	1.12	0.99	468	5.24	≥234	3.22
S6	1.12	0.99	700	10.21	≥350	5.84

### 5.2 夯扩灌注桩检验

夯扩灌注桩检验分为承载力检验和桩身完整性检测。

现场选取 3 根桩作单桩竖向抗压载荷试验,以确定单桩承载力。极限承载力基本值均为 2900 kN。详细结果见表 2。

表 2 单桩竖向抗压静载试验数据成果表

试验桩号	最大加荷/kN	累计沉降/mm	回弹量/mm	极限承载力基本值/kN	极限承载力标准值/kN
717	2900	11.13	5.48	2900	2900
1246	2900	14.40	6.94	2900	2900
650	2900	6.70	2.37	2900	2900

从表 2 试验结果分析,在最大加荷时,沉降量较小,且回弹量大,回弹率在 35.4% ~ 49.6% 之间,说明桩身和地基的弹性变形占总沉降的比例大,在桩身强度允许的情况下,单桩的承载力还将有较大提高。

采用低应变检测桩身完整性,共检测 490 根,其中 I 类桩 460 根,占所测桩数的 93.88%; II 类桩 25 根,占所测桩数的 5.10%; 浅部缺陷桩 5 根,占所测桩数的 1.02%。桩身完整性较好。

### 5.3 复合地基载荷试验结果分析

本工程共作单桩复合地基载荷试验 11 组,承压板为 1.95 m<sup>2</sup> 的圆形钢板,承压板下铺垫厚度为 15 cm 的粗砂垫层。根据试验结果,复合地基的最大加荷量为 2700 kN,对应沉降量为 24.08 ~ 36.21 mm,回弹量为 5.96 ~ 10.43 mm。按相对变形  $s/d = 0.010$  取值,复合地基的承载力基本值为 655 ~ 759 kPa,综合取复合地基承载力标准值为 717 kPa,满足设计要求。试验详细结果见表 3,典型静载试验曲线见图 1。

### 5.4 复合地基承载力验算

根据粉煤灰垫层和单桩静载试验结果,按刚性桩复合地基的承载力计算公式对复合地基的承载力进行验算:

表 3 复合地基静载试验数据成果表

中心桩号	最大加荷/kN	累计沉降/mm	回弹量/mm	复合地基承载力基本值/kPa	复合地基承载力标准值/kPa
1549	2700	33.66	9.52	655	717
256	2700	34.87	7.72	704	717
1754	2700	24.08	9.97	692	717
786	2700	36.21	9.05	694	717
1657	2700	27.92	6.68	679	717
486	2700	30.92	6.95	736	717
1363	2700	28.54	9.05	725	717
916	2700	28.88	9.30	739	717
879	2700	29.89	5.96	728	717
591	2700	27.26	9.15	778	717
564	2700	30.47	10.43	759	717

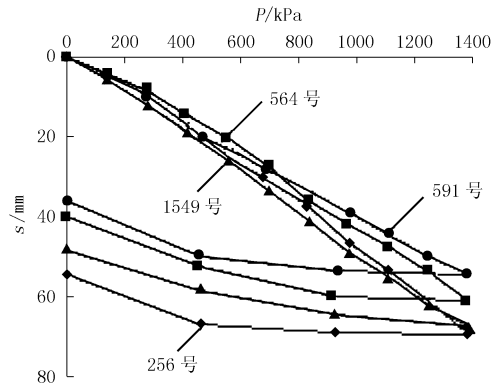


图 1 单桩复合地基静载试验成果图

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

取  $\beta = 0.8, R_a = 1450 \text{ kN}, f_{sk} = 180 \text{ kPa}$ , 代入上式计算得  $f_{spk} = 862 \text{ kPa}$ 。可见,采用经验公式对复合地基承载力的估算值高于载荷试验结果,原因有以下几点:(1) 载荷试验时铺垫的褥垫层未经大型机械压实,密实度较低,当按相对变形确定复合地基承载力时,其值稍低。(2) 根据现有研究成果,刚性桩复合地基由于褥垫层的作用,使桩间土与桩共同承担上部荷载,由于刚性桩对桩间土的约束作用较强和单桩承载力高,复合地基承载力高。因本工程载荷试验采用单桩复合地基试验,桩对桩间土的约束作用较弱,试验结果偏低(参见图 1)。

## 6 结语

本工程利用夯扩灌注桩对持力层的挤密作用,解决了水下填筑的问题。以粉煤灰垫层作桩间土、以夯扩桩作竖向增强体组成的刚性桩复合地基,承载力高、变形量小,可以满足高层建筑的要求。该工程已建成 2 年多,沉降量 < 20 mm,运行良好。经计算,该地基基础方案较人工降低地下水施工的砂石

(下转第 8 页)

## 2 工程实例

某湿陷性黄土场地位于中国湿陷性黄土工程地质分区的Ⅲ区——关中地区,自重湿陷性黄土场地发育较普遍,且黄土层深厚,桩端多选择低压缩性非湿陷性黄土层为持力层。某工程勘探深度内全为黄土,深约 25 m,评价为自重Ⅲ级湿陷性黄土场地,湿陷深度为 21.5 m,由于场地条件受限,采用干作业成孔(扩底)灌注桩基础方案,有效桩身长度为 20 m,分别按《桩基规范》和《湿陷规范》进行单桩承载力对比计算,具体情况见表 2。

表 2 单桩承载力计算对比表

假设桩基参数		按《桩基规范》计算			按《湿陷规范》计算	备注
桩身直径 /m	桩端扩底直径 /m	单桩竖向极限承载力 /kN	下拉荷载 /kN	单桩竖向荷载特征值 /kN	单桩竖向承载力特征值 /kN	
0.8	1.6	1802.16	634.03	1039.12	150.9	
1.0	2.0	2727.09	792.54	1678.41	471.0	
1.0	2.8	4426.39	792.54	2534.59	1827.48	
1.0	3.2				2534.59	>3d
1.2	2.8	4501.69	1055.04	2261.45	1639.08	
1.2	3.1				2261.45	接近 3d

注:特征值取极限值的 50%。

从表 2 可以看出,两规范的共同点是:当桩径不变,桩端扩底直径增大时,单桩承载力均有很大增加;在一定的桩径范围内,当桩端扩底直径不变,桩径增大时,单桩承载力不增反减,这就是为什么常采用增大桩端扩底直径来提高承载力的道理。按《湿陷规范》计算的承载力特征值远小于按《桩基规范》计算的值。如单桩荷载为 1600 kN,采用《桩基规范》设计时桩径 1.0 m,扩底直径 2.0 m 就可满足要求,而按《湿陷规范》设计时桩径 1.0 m,扩底直径约 2.7 m。同样的单桩承载力,同样的桩径,按《湿陷规范》设计时,扩底直径较大,接近 3d,甚至超过 3d。扩底直径增大,灌浆方量增大,给施工带来很大困难,也不安全,这样工程造价就会提高。

(上接第 6 页)

垫层或扩底灌注桩上的筏基方案,可节约 30 万元以上,并为使粉煤灰变废为宝提出了新的途径。该楼的地基处理经验已在河南洛阳地区初步推广,已取得良好的经济效益和社会效益。

## 参考文献:

[1] 沈保汉.我国夯扩桩的发展现状[J].工业建筑,2004,34(2):

## 3 中性点理论

负摩擦力产生的原理是指桩周土体相对桩身有向下的位移时(桩周土层产生的沉降超过基桩的沉降),在桩周就产生负摩擦力。对于端承型桩基,由于其桩端持力层较坚硬沉降变形小,而自重湿陷性黄土浸水后沉降变形大,对桩产生向下的摩擦力,即相当于增加了一部分荷载。当桩土位移相等时,负摩擦力为零,轴力最大,再向下轴力减小,此点为中性点。

自重湿陷黄土受水浸湿后产生湿陷,会使桩端支承在坚硬土层上的桩身受到负摩擦力的作用,随着自重湿陷量的增长,负摩阻力也逐渐增大,当整个湿陷性黄土层受水浸透后,负摩阻力达到峰值。受负摩阻力引起的下拉荷载将长期作用于桩身中性点以上侧表面。因此应计算中性点以上负摩阻形成的下拉荷载,并以下拉荷载作为外荷载的一部分验算其承载力。

## 4 结论

《湿陷规范》中未考虑中性点的问题,在自重湿陷性黄土段除不计摩阻力,还要全部扣除负摩阻,这样单桩承载力就减小,应该说是偏安全的,但会造成一定的浪费;而《桩基规范》根据负摩阻力产生的原理,采用了中性点的理念,将中性点以上负摩阻形成的下拉荷载作为外荷载的一部分扣除,应是科学合理的。结合本地区工程经验,建议采用如下公式:

$$R_a = \psi_p q_{pa} A_p + u \sum \psi_{sj} q_{sa} (L_n - L_0)_j - u \sum \psi_{sj} q_{sa} L_0$$

式中: $L_n$ ——桩长; $L_0$ ——中性点深度。

## 参考文献:

- [1] GB 50025-2004,湿陷性黄土地区建筑规范[S].
- [2] JGJ 94-94,建筑桩基技术规范[S].
- [3] 编委会.工程地质手册(第三版)[M].北京:中国建筑工业出版社,1990.
- [4] 米祥友,等.注册岩土工程师专业考试辅导指南[M].北京:地震出版社,2004.
- [5] 45-49.
- [2] 衣平,娄国充.粉煤灰地基的处理及应用[J].粉煤灰综合利用,2002,(3):3-4.
- [3] JGJ/T 135-2001,J121-2001,复合载体夯扩桩设计规程[S].
- [4] 王戈,张学灵,王利华.再谈复合载体夯扩桩[J].低温建筑技术,2002,(3).
- [5] 曾俊容,蓝琼.夯扩桩在高层建筑中的应用[J].广东建材,2005,(4):49-51.