

钻孔夯扩挤密复合桩地基试验研究

戴彦杰 王笃礼

(中航勘察设计研究院, 北京 100086)

【摘要】 复合桩地基的承载力是由桩和桩间土共同分担,旨在充分发挥和利用地基土的承载力潜力,通过串珠状桩体来实现对桩间土的加固和挤密,用多种试验检验方法对复合地基进行全面分析探讨,阐明了钻孔夯扩挤密复合桩地基可以有效地解决天然地基承载力不能满足高层建筑物设计要求的问题。

【关键词】 夯扩挤密复合桩地基;承载力;试验研究

【中图分类号】 TU472.3

Experimental Research on Composite Foundation with Drilling Ram—expanded Piles

【Abstract】 The composite foundation is composed of pile and soil in order to bring latent capacity of soil into full play by reinforcing the soil with string—pearl shape. According to many insitu tests and analyses, the result show that the composite foundation with drilling ram—expanded piles could be applied to high—rise building effectively and successfully.

【Key words】 Composite foundation with drilling ram—expanded piles; bearing capacity; experimental research

0 引言

随着城市建设的飞速发展,城市的土地就变得非常珍贵,这就必然使城市建筑物向节省用地的高层建筑发展。当天然地基承载力不能满足高层建筑物设计要求时,按原来的一些解决方案,通常是打预制桩、混凝土灌注桩等桩基础技术方法来解决,可是,这些解决方案缺点是工程造价很高,几乎相当建筑物工程总造价的 $1/5 \sim 1/3$,而且有施工噪音扰民、或泥浆污染环境等现象,技术上控制难度大,经常造成断桩、缩径或离析等桩身质量问题。而钻孔夯扩挤密复合桩地基处理方案,就可以很好地解决上述桩基工艺的不足。通过本次地基试验研究的探讨,表明钻孔夯扩挤密复合桩地基是一种行之有效的复合地基处理技术。

1 地基试验场地概况和土层特征

地基试验场地位于北京市朝阳区望京新

城开发区侯家庄村东南侧,选择了具有代表性的地段 200 m^2 。根据场地勘察报告,场地地面标高为 $37.10 \sim 37.35\text{ m}$,地基土主要由人工填土、第四纪冲洪积成因粘性土和砂性土组成,场地在 15 m 揭露深度内土层特征如下。

①素填土层:褐黄色,稍湿~湿,可塑,以粘质粉土和粉质粘土为主,含少量有机物,厚度为 $0.5 \sim 1.4\text{ m}$;

②粘质粉土层:褐黄色~灰褐色,湿,稍密~中密,含氧化铁、铁锰质、云母、钙质结核等,夹粉质粘土薄层,厚度为 $2.3 \sim 3.7\text{ m}$;

②₁砂质粉土层:褐灰色,湿,中密,含氧化铁、铁锰质、云母等,夹粉质粘土薄层,厚度为 $0.6 \sim 0.7\text{ m}$;

③粉质粘土层:褐灰色,可塑,含氧化铁、铁锰质等,夹重粉质粘土薄层,厚度为 $2.3 \sim 5.5\text{ m}$;

作者简介:戴彦杰,1964年生,男,汉族,内蒙古赤峰市宁城县人,高级工程师。1995年毕业于中国地质大学,获硕士学位,主要从事岩土工程勘察、设计、施工和研究工作。

③₁ 粘土层: 褐灰色, 可塑, 含氧化铁、铁锰质和少量有机物等, 厚度为 2.1~3.4 m;

③₂ 粘质粉土层: 褐黄色, 湿, 中密, 含氧化铁、铁锰质、云母等, 夹粉质粘土薄层, 厚度为 0.5~2.1 m;

④粉细砂层: 褐黄色, 饱和, 中密, 主要矿物成分为长石、石英、云母等, 含少量氧化铁, 未揭穿。

地基土主要物理力学性能指标统计见表 1。

表 1 地基土物理力学性能指标统计表

土 层	天然含水量 $w/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	天然孔隙比 e	液性指数 I_L	压缩模量 E_s/MPa			地基土承载力 标准值 f_k/kPa
					E_{s100}	E_{s200}	E_{s300}	
②粘质粉土	20.10	20.4	0.58	0.33	6.7	8.1	9.6	160
③ ₁ 粘土	39.70	18.3	1.12	0.71	3.5	4.13	4.75	120
③粉质粘土	22.50	20.3	0.65	0.54	7.8	9.0	10.2	150

场地地下水埋深为 0.85~0.90 m, 据水质分析结果, 地下水对混凝土无腐蚀性。

2 钻孔夯扩挤密复合桩地基试验设计思想

2.1 钻孔夯扩挤密复合桩地基试验设计思想

根据该住宅开发区未来修建的建筑物为 28 层, 要求复合地基承载力标准值不小于 450 kPa, 地基沉降量和差异沉降均满足有关规范的要求, 据此本次的钻孔夯扩挤密复合桩地基试验的设计思想如下:

1) 复合地基承载力由桩和桩间土共同分担, 充分发挥和利用地基土的承载力, 地基处理后复合地基承载力不小于 450 kPa;

2) 为了研究复合地基的沉降情况, 将试验桩的桩端持力层选在③₁ 粘土层;

3) 为了研究桩料对桩身强度和承载力的影响, 试验对桩身强度设计采用柔性-半刚性配制;

4) 采用桩体串珠状结构, 使力学性能相对较差土层桩径就大, 力学性能相对较好土层桩径相对就小;

5) 采用多种检测试验方法进行试验前后的地基土的强度对比, 深入了解地基土的力学指标的变化;

6) 采用单桩、单桩复合和大型压板(群桩)载荷试验等方法进行对比分析, 探讨钻孔夯扩

挤密复合桩地基处理效果。

2.2 钻孔夯扩挤密复合桩地基试验设计参数

根据试验场地勘察报告和试验设计思想, 地基试验设计参数为: 成孔孔径为 400 mm, 施工桩长为 7.50 m, 桩间距 1 000 mm(三角形布置), 桩体强度小于 C10, 桩径采取不同土层不同桩径, 粘质粉土②层中桩径为 500±20 mm, 粉质粘土③层中桩径为 550±20 mm, 粘土③₁层中桩径为 570±20 mm, 粘质粉土③₂层中桩径为 500±20 mm。

2.3 钻孔夯扩挤密复合桩地基试验施工工艺

工艺分 3 步: 1) 成孔; 2) 桩料搅拌; 3) 夯填成桩。地基试验共完成挤密复合桩 109 根。

3 试验结果及其分析

3.1 桩间土检测结果分析

为了对地基试验结果进行全面的评价分析, 对桩间土的检测分析采用了物理力学性能指标对比分析、轻型动力触探和标准贯入试验等方法。

3.1.1 物理力学性能指标对比分析

挤密复合桩地基处理试验结束后, 在桩间土钻孔取样, 进行了室内土的物理力学性能试验。地基处理前天然土和地基处理后桩间土主要土层物理力学性能指标对比见表 2。

表2 地基处理前后主要土层的土的物理力学性能指标对比表

土层名称	取样深度 /m	取样类型	含水量 w/%	孔隙比 e	液性指数 I_L	压缩模量 E_s / MPa	
						E_{s200}	E_{s300}
粘质粉土②	1.0~5.0	天然土	20.08	0.58	0.33	8.1	9.6
		桩间土	19.31	0.56	0.22	9.5	11.8
粘土③ ₁	5.0~7.8	天然土	39.7	1.12	0.71	4.13	4.75
		桩间土	39.2	1.02	0.66	4.54	5.19

从表2中天然土和桩间土的主要土层中土的物理力学性能指标对比中可以看出,桩间土的含水量减少1.3%~3.8%,孔隙比减少3.45%~8.92%,液性指数减少12.68%~33.33%,压缩模量增大9.93%~17.28% (E_{s200}),和9.26%~22.92% (E_{s300}),说明地基处理后,桩间土的密度、压缩模量比天然土的密度、压缩模量有明显增大,物理力学性能得到很好地改善。

3.1.2 轻型动力触探试验分析

地基处理结束后,在复合地基桩间土上进行了轻型动力触探试验,检测深度为1.0~5.0m,检测层位主要是粘质粉土②层。试验结果对比见表3。

表3 地基处理前后主要土层的轻型动力触探试验击数 (N_{10}) 对比表

检测土层	检测深度/m	检测土 类型	N_{10} /击数	
			范围值	平均值
粘质粉土 ②	1.0~5.0	天然土	12~110	26
		桩间土	33~196	66

从表3的数据对比中可以看出,地基处理后桩间土的轻型动力触探试验击数 N_{10} 比地基处理前天然土轻型动力触探试验击数 N_{10} 提高了2.54倍,说明桩间土的力学性能改善幅度很大,地基处理效果很好。从表中的数据判断桩间土承载力提高幅度约有40%。

3.1.3 标准贯入试验分析

地基处理结束后,对复合地基桩间土也进

行了标准贯入试验,检测深度为1.0~7.80m,检测层位主要是粘质粉土②层和粘土③₁层。地基处理前天然土与地基处理后桩间土的标准贯入试验击数 ($N_{63.5}$) 对比见表4。

表4 地基处理前后土的标准贯入试验击数 ($N_{63.5}$) 对比表

检测土层	检测深度/m	检测土 类型	$N_{63.5}$ /击数	
			范围值	平均值
粘质粉土 ②	1.0~5.0	天然土	3~13	8
		桩间土	15~27	18
粘土③ ₁	5.0~7.8	天然土	3~8	6
		桩间土	11~22	15

从表4可以看出,桩间土的实测击数平均值比天然土的实测击数平均值高出1倍以上,说明复合地基处理后桩间土的密实度明显增大,力学性能改善程度明显。因此,由表4中标准贯入试验数据对比分析,桩间土的承载力提高幅度达40%。

3.2 静载荷试验检测分析

地基处理施工结束后,分别进行了桩间土静载荷试验3台、单桩静载荷试验3台和单桩复合地基静载荷试验3台以及大型载荷试验2台。

3.2.1 桩间土静载荷试验分析

桩间土的静载荷试验的3个试验点选自38[#]-53[#]-54[#]之间、68[#]-69[#]-84[#]之间和90[#]-105[#]-106[#]之间,其承压板均为 $d=500$ mm。

桩间土的静载荷试验的 $p-s$ 曲线见图 1。从 3 个桩间土试验的 $p-s$ 曲线类型可以看出均属缓变型, 可按相对沉降标准确定承载力, 按 GBJ7-89 的有关规定, 试验点的岩土类型为粘质粉土, 可取沉降值 $s=0.015 d$ 对应的荷载为测点的承载力基本值。所以, 3 个桩间土的承载力基本值 f_0 分别为 260 kPa、240 kPa 和 240 kPa。因此, 桩间土的承载力标准值 f_k 为 246 kPa。

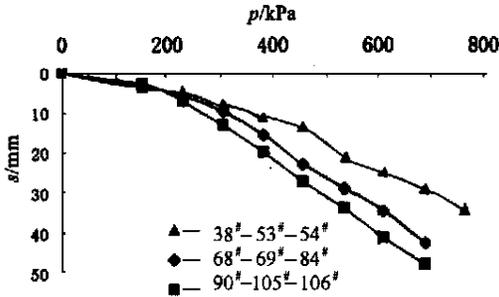


图 1 桩间土静载荷试验 $p-s$ 曲线图

3.2.2 单桩静载荷试验分析

单桩静载荷试验共进行了 3 台, 3 根桩分别是 55[#]、46[#]、85[#] 桩, 其承压板直径分别为 $d=500$ mm、 $d=560$ mm 和 $d=560$ mm, 有效桩长为 6.3 m。单桩的静载荷试验的 $P-s$ 曲线见图 2。3 根桩静载荷试验 $P-s$ 曲线均无明显的比例极限或拐点, 所以, 可在 $P-s$ 曲线上取桩顶总沉降量 $s=40$ mm 时所对应荷载值为单桩极限承载力 f_u , 取 f_u 的一半为单桩承载力基本值 f_0 。3 个单桩的承载力基本值分别为 320 kN、282 kN 和 260 kN。因此, 单桩的承载力标准值 R_k 为 287 kN。

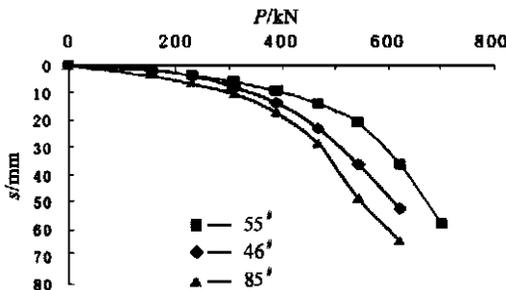


图 2 单桩静载荷试验 $P-s$ 曲线图

3.2.3 单桩复合地基静载荷试验分析

单桩复合地基静载荷试验共进行了 3 台, 3 根桩分别是 24[#]、57[#] 和 87[#] 桩, 其承压板直径均为 $d=1000$ mm; 有效桩长均为 6.3 m。单桩复合地基静载荷试验的 $p-s$ 曲线见图 3。3 根桩静载荷试验 $p-s$ 曲线均属缓变型, 不能确定比例极限, 所以, 可按相对变形确定单桩复合地基的承载力的基本值 f_0 , 参照 GBJ79-91 的有关条文的规定, 结合桩型和场地条件的情况, 选用相对变形标准 $s=0.01 d$ 对试验结果进行分析判定。三个单桩复合地基的承载力基本值 f_0 分别为 510 kPa、498 kPa 和 480 kPa。因此, 单桩复合地基的承载力标准值 $f_{ps}=496$ kPa。复合地基土的变形模量提高到 68.8 MPa。

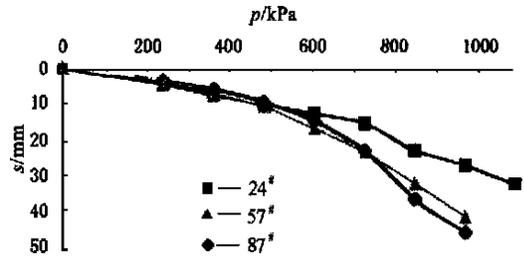


图 3 单桩复合地基静载荷试验 $p-s$ 曲线图

3.2.4 大型压板静载荷试验分析

地基处理施工结束后, 进行了二台大型压板静载荷试验。大型压板静载荷试验的深度在粘质粉土②层上, 采用锚桩横梁反力装置, 2 台并联的 5000 kN 级的液压千斤顶加载, 压板的面积为 $2.6 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$, 有效桩长 5.5 m。1[#]大型压板静载荷试验, 压板下包含 5 根桩分别是 35[#]、36[#]、51[#]、66[#]、67[#] 桩, 其置换率 $m=0.2403$, 2[#]大型压板静载荷试验, 压板下包含 5 根桩分别是 43[#]、44[#]、59[#]、74[#]、75[#] 桩, 其置换率 $m=0.2466$ 。二台大型压板静载荷试验的 $q-s$ 曲线见图 4。这两台大型压板静载荷试验 $q-s$ 曲线没有出现陡降段, 呈缓降型, 因此, 可按相对变形确定复合地基的承载力的基本值 f_0 , 同时考虑到复合地基中的

桩体为非散体,而是具有一定的粘结强度,所以,用相对变形标准 $s/b=0.006$ (即 $s=9.6$ mm)所对应的 q 值为承载力基本值,从 $q-s$ 曲线来看,对应于 $s=9.6$ mm, 1[#]大型压板静载荷试验 $f_0=560$ kPa, 2[#]大型压板静载荷试验 $f_0=610$ kPa。因此,复合地基承载力标准值为 $f_{ts}=585$ kPa;复合地基土的变形模量提高到 102.9 MPa。

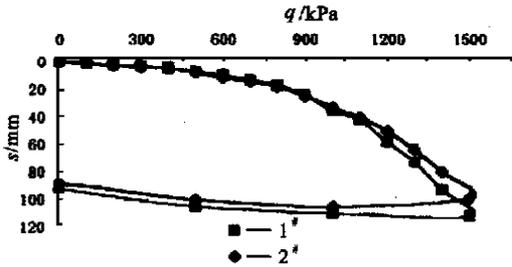


图4 大型压板静载荷试验 $q-s$ 曲线图

4 结 语

1) 本次的钻孔夯扩挤密复合桩地基试验,虽然桩端持力层选在③₁层粘土层上,而且有效桩长只有 5.5~6.3 m,试验按规范取沉降值 9.6 mm 时,复合地基承载力就高达 585 kPa,远大于设计要求,而且复合地基的变形模量提高到 102.9 MPa。因此,无论是地基承载力还是地基沉降量来看,钻孔夯扩挤密复合桩地基处理是一种行之有效的地基处理方法,尤其是高层建筑物的地基加固处理其优点更加突出。

2) 钻孔夯扩挤密复合桩地基处理的设计思想具有科学性,是从提高地基土的密实度和压缩模量,降低地基土的孔隙比,充分发挥和利用原有地基土的承载力的基础上,提高复合地基的承载力,而不是只靠地桩提高承载力,而且处理深度浅,承载力提高幅度大(可提高承载力达 3 倍)。

3) 钻孔夯扩挤密复合桩地基工法,设备简便,施工过程质量容易控制,几乎没有施工噪音扰民和泥浆污染等环境问题。

4) 钻孔夯扩挤密复合桩地基处理工程造价降低幅度大,只相当于一般灌注桩、预制桩基础造价的 40%~50%左右,具有较好的经济性。

5) 在实际运用中,钻孔夯扩挤密复合桩地基承载力还可根据设计要求,通过变化桩径、桩长,桩距和桩身强度等参数,无论是软土还是硬土都能对地基土进行不同程度的改善,使承载力得到进一步提高。

参 考 文 献

- 1 GBJ 7-89 建筑地基基础设计规范.
- 2 JGJ 79-91 建筑地基处理技术规范.
- 3 黄志仑等. 钻孔夯扩挤密桩地基. 军工勘察, 1996 (1): 41~45
- 4 林宗元主编. 岩土工程试验监测手册. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994