

# 扩顶桩复合地基的研究

王继忠 杨启安 蔺忠彦

(北京波森特岩土工程有限公司 102218)

**[提要]** 对复合地基的桩顶进行扩顶,可以将上部荷载更多地分配到桩体,提高了复合地基的承载力,减少了地基的变形。对于采用复合载体夯扩桩的复合地基,由于单桩承载力较高,扩顶的优势更加明显。

**[关键词]** 复合地基 复合载体 承载力 沉降

**Research on the Composite Ground with Enlarging the Top Area of Piles/Wang Jizhong, Yang Qi'an, Lin Zhongyan**  
(Beijing Puissant Geotechnical Engineering Co., Ltd., Beijing 102218, China)

**Abstract:** By the way of enlarging the area of pile on the top to transfer more loading to the pile, the bearing capacity increases, and the settlement reduces. Because of the high bearing capacity of the ram-compaction piles with composite bearing base, the effect of enlarging is obvious.

**Keywords:** composite ground; ram-compaction piles; composite bearing base; bearing capacity; settlement

## 一、前言

CFG 桩复合地基是最常用的地基处理方式,它采用长螺旋成孔、中心压灌混凝土而成,该工艺既发挥了单桩承载力高的特点,又充分利用了桩间土,在多高层建筑设计中得到广泛应用。由于 CFG 桩复合地基桩体承载力高,故处理后的复合地基承载力也较高,经过处理后的复合地基承载力可达到 200~450kPa。

复合地基中单桩承载力的计算采用传统桩基承载力计算方法,即桩侧摩阻力和桩端阻力之和。这种计算方法与实际承载力有一定的差距。首先桩侧摩阻力的发挥取决于桩与土的相对变形和相对变形的趋势,由于桩顶压缩区有限,桩土相对变形或变形的趋势有限,故传递到桩上的荷载有限。实际复合地基设计时,以承载力进行控制设计,达到设计需要的承载力,并进行沉降验算控制地基变形,故常常为了达到设计控制的变形而增加桩长,即沉降所需桩长往往比承载力所需桩长要长,桩身中性点以下的摩擦力往往无法发挥。若提高复合地基承载力必须减小桩间距,增加桩的数量。

## 二、扩顶桩复合地基的工作机理

复合地基承载力来源于地基土承载力和单桩承载力,故要提高复合地基承载力,有两种途径:1)增强挤密效果来提高桩间土的承载力;2)增加桩长或桩径提高复合地基中单桩的承载力。实际施工时,由于设备是一定的,对桩间土挤密效果不能增强,且过分的挤密桩间土体容易引起周围临近桩的断裂或其他缺陷,达不到预期效果。增加桩径或桩长能提高单桩的承载力,但实际受力时,复合地基的单桩承载力的发挥受褥垫层的影响较大,实际工程褥垫层厚度约 300mm 左

右,其调节桩土荷载分配的能力是有限的,常常单桩承载力还没有全部发挥或甚至只发挥了一小部分时,桩间土已经开始出现破坏,致使复合地基中单桩承载力无法充分发挥。

采用复合载体夯扩桩的复合地基,虽然复合载体大大提高了单桩的承载能力,但由于桩顶面积一定,在桩顶形成的压缩区不变。故桩顶分担的荷载也是有限的,复合地基受力时造成复合载体承载力无法充分发挥。扩顶工艺的施工增大了桩顶的受力面积,增加了褥垫层的压缩区域,将上部更多的荷载传递到桩顶,充分发挥了桩端载体的承载能力,提高了复合地基的承载力,如图 1 所示。扩顶复合地基研究的核心是如何增加复合地基中桩承载的比例,充分发挥桩的承载力,提高复合地基的承载力。

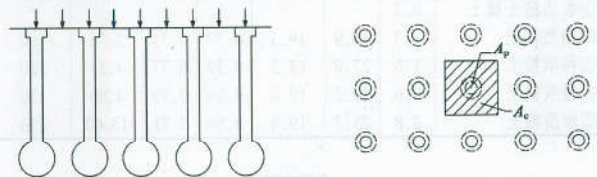


图 1 扩顶桩复合地基

为更好地了解扩顶复合地基的受力,可以做这样一个复合地基的载荷试验,如图 2。假设桩顶面积是可以变化的,桩长和桩身保持不变,由于单桩承载力大于地基土承载力,因此可通过改变桩顶面积来分析扩顶对地基承载力的影响。对于普通复合地基,桩土共同作用时复合地基承载力为  $P_1$ ,包括桩、土提供的承载力;若桩顶面积增大,则分担到桩顶的荷载增加,桩间土分担的荷载降低,若要桩间土达到塑性破坏,必须

增加上部荷载,则复合地基承受荷载  $P_2 = P_1 + \Delta P_1$ ,  $\Delta P_1$  为扩顶提高的承载力。当扩顶面积增大到联成一体时,即相当于筏板基础,所有上部荷载都由桩体承担,复合地基承载能力即为单桩承载力之和  $P_3 = P_1 + \Delta P_1 + \Delta P_2$ ,  $\Delta P_1 + \Delta P_2$  为扩顶对承载力的提高,只要  $P_3$  没有超过单桩承载力之和,则  $P_3 > P_2 > P_1$ 。

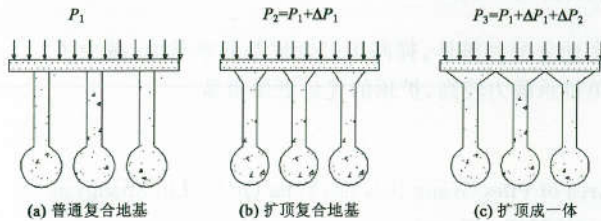


图2 桩顶面积对复合地基承载力的影响

扩顶复合载体夯扩桩的优点为充分发挥了单桩的承载力,提高了复合地基的承载力,减少了桩的数量和长度,提高了施工效率,降低了工程成本。

### 三、扩顶桩复合地基的试验

为更好地了解复合载体夯扩桩复合地基的受力与变形,做了四组普通复合地基与扩顶复合地基的对比试验,其中两组试验在北京波森特公司基地进行,桩体为复合载体夯扩桩,另两组试验取实际工程中的工程桩中进行,桩体为 CFG 桩,试验桩的施工资料和试验结果如下。

(1)波森特基地复合载体夯扩桩复合地基 12#, 13# 组试点的对比试验

场地的地基参数,施工参数,见表 1~2,静载试验结果的对比分别见表 3 和图 3。

地质参数 表 1

土层	厚度 (m)	w (%)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$I_L$	e	$E_s$ (MPa)	$f_k$ (kPa)
①粉质粘土填土	0.7	-	-	-	-	-	-
②粉质粘土	1.3	23.9	19.3	0.37	0.73	2.75	100
③粘质粉土	1.6	27.9	19.5	0.39	0.77	4.51	120
④粉质粘土	0.6	29.2	19.6	0.69	0.79	4.80	130
⑤砂质粉土	3.8	25.3	19.8	0.80	0.71	13.60	230

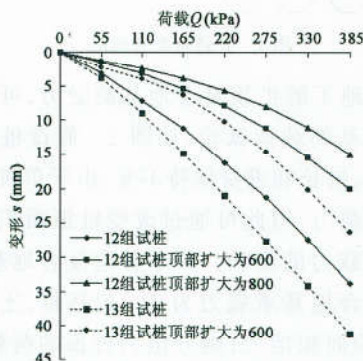


图3 波森特基地 12#, 13# 试桩扩顶对比试验 Q-s 曲线

施工参数 表 2

试验编号	桩身直径 (mm)	桩长 (m)	间距 (m)	桩端持力层	三击 (cm)	扩顶 (mm)	长径比
12#	扩顶桩复合地基	327	6.0	1.3×1.3	粉质粘土	8.0	600
	扩顶桩复合地基	327	6.0	1.3×1.3	粉质粘土	7.5	800
	复合地基	327	6.0	1.3×1.3	粉质粘土	9.0	-
13#	扩顶桩复合地基	327	2.5	1.3×1.3	粉质粘土	21.5	600
	复合地基	327	2.5	1.3×1.3	粉质粘土	20.0	-

静载试验变形 (mm) 表 3

荷载 (kPa)	55	110	165	220	275	330	375
12#	不扩顶	3.07	7.07	11.18	16.28	21.28	27.45
	扩顶至 600	1.49	3.10	5.38	7.84	11.23	15.47
	扩顶至 800	1.20	2.28	3.86	5.61	7.97	11.12
13#	不扩顶	3.76	8.97	14.86	21.03	27.68	34.14
	扩顶至 600	2.24	3.93	6.32	10.24	14.67	20.15

(2)几个实际工程中 CFG 桩复合地基的扩顶对比试验

对西坝河 UHN 国际村、北六环 10# 标段和道丰 15# 楼等三个工程的夯扩桩进行比较。表 4, 5 分别表示各工程的地质情况和桩的施工参数。

各工程地质情况 表 4

工程	土层	厚度 (m)	w (%)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$I_L$	e	$E_s$ (MPa)	$f_k$ (kPa)
西坝河 UHN 国际村	①房渣土	0.4	-	-	-	-	-	-
	① <sub>1</sub> 粘质粉土填土	1.4	-	-	-	-	-	-
	②砂质粉土	5.1	20.4	20.3	0.19	0.6	13.55	200
	③细粉砂	未揭穿	-	-	-	-	28	250
北六环 10# 标段	①耕土	1.20	-	-	-	-	-	-
	②亚粘土	0.75	21.7	19.9	0.50	0.65	5.0	120
	③泥潭质亚粘土	1.45	36.3	18.3	0.67	1.02	3.5	90
	③ <sub>1</sub> 亚粘土	2.00	24.7	20.2	0.70	0.66	9.2	150
	③泥潭质亚粘土	1.70	36.3	18.3	0.67	1.02	3.5	90
	④亚粘土	9.00	23.7	20.1	0.56	0.66	10.6	190
道丰 15# 楼	⑤亚粘土	未揭穿	22.9	20.4	0.30	0.63	13.8	210
	①杂填土	1.3	-	-	-	-	-	-
	②粉细砂	3.2	-	-	-	-	-	150
	② <sub>2</sub> 粉质粘土	1.0	28.1	19.2	0.61	0.81	6.1	120
	③ <sub>1</sub> 圆砾	1.7	-	-	-	-	-	220
④卵石	未揭穿	-	-	-	-	-	250	

施工参数 表 5

试验编号	桩身直径 (mm)	桩长 (m)	间距 (m)	桩端持力层	扩顶 (mm)	长径比
西坝河	扩顶桩复合地基	410	10.0	1.8×1.8	细砂	800
	复合地基	410	10.0	1.8×1.8	细砂	-
北六环 10# 标段	扩顶桩复合地基	420	10.5	1.7×1.7	粘土	800
	复合地基	420	10.5	1.7×1.7	粘土	-
道丰 15# 楼	扩顶桩复合地基	420	10.5	1.7×1.7	粘土	800
	复合地基	420	10.5	1.7×1.7	粘土	-

通过对这 4 组复合地基静载荷试验分析发现:在相同荷载下,扩顶的复合地基比普通复合地基的变形

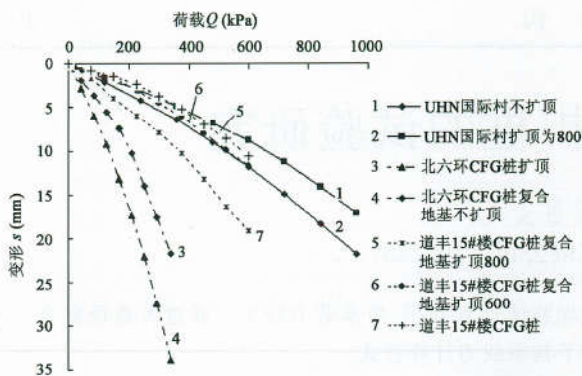


图4 不同工程复合地基的扩顶对比试验的 Q-s 曲线

小。由于复合地基承载力是由沉降来控制的,故扩顶复合地基承载力比普通复合地基承载力高;通过对扩径为  $\phi 600$  和扩径为  $\phi 800$  的复合地基的对比试验,在相同荷载作用下,扩径为  $\phi 800$  的比扩径为  $\phi 600$  的变形小,说明扩径把荷载更多地传到了桩上;由于复合载体夯扩桩采用复合载体工艺,单桩承载力高,故扩径对承载力的提高更加明显;桩间土压缩模量小,桩土刚度比大,扩顶对承载力和变形影响更大。

桩顶扩大的作用与褥垫层作用一致,褥垫层通过其深度对桩土受力进行重新分配,桩顶扩大头通过改变桩顶的受力面积对桩土受力进行调整,让荷载更多地分配到承载力高的桩体,使单桩与桩间土的承载力同时发挥到极限。

#### 四、扩顶复合地基承载力与沉降的分析与计算

现以采用复合载体夯扩桩的扩顶复合地基为例对扩顶复合地基的承载力进行计算,如图5所示,由于扩顶的存在,BC区域下的土体位移与桩体位移一致,不产生相对位移,故可以将桩身看成直径为  $D$  的桩体。由于桩短,桩侧摩阻力小,单桩的受力主要来自于载体扩展基础的承载力,故桩侧摩阻力忽略不计,单桩承载力计算可以简化为:

$$R_a = q_{pa} A_e \quad (1)$$

式中  $R_a$  为单桩承载力特征值,  $q_{pa}$  为桩端端阻力的特征值,  $A_e$  为复合载体等效桩端面积。

根据扩顶复合地基的受力(见图6),设上部荷载为  $p$ ,桩顶与桩间土上应力为  $p_p$  和  $p_s$ ,则

$$pA = p_p A_p + p_s A_s \quad (2)$$

$$p = \frac{p_p A_p}{A} + \frac{p_s A_s}{A} \quad (3)$$

设  $p_p = R_a / A_p$ ,  $A_s = A - A_p$ 。则复合地基承载力特征值可以表示为

$$f_{spk} = \frac{m R_a}{A_p} + \beta(1 - m) f_{sk} \quad (4)$$

$$m = A_p / A \quad (5)$$

式中  $m$  为有效置换率,  $A_p$  为扩顶桩的面积,  $\beta$  为地基土承载力提高系数。

由于扩顶桩复合地基从受力来分析也属于复合地基,故其沉降计算方法也与普通 CFG 桩复合地基一样,唯一不同的是置换率增加,故桩身范围内压缩模量当量值的计算也不同。

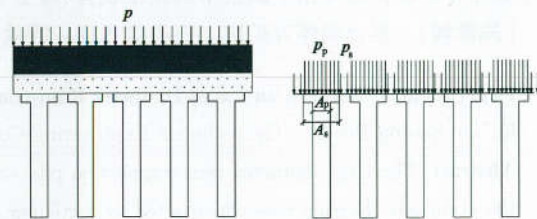


图6 扩顶复合地基计算简图

#### 五、扩顶复合地基设计中应注意的问题

由于扩顶的作用是对桩体与桩间土的应力进行调整,调整的的目的是让桩与桩间土的受力更加合理。由于桩土应力比  $n$  和扩顶面积  $A_s$  直接影响着应力的分配与传递,故设计中应重点考虑两个因素,选择合适的桩土应力比和扩顶面积,下面分别对这两个设计参数进行介绍。

复合地基桩体桩土应力比  $n$  为桩体上应力与桩间土应力之比值。通过试验发现  $n$  主要受桩土刚度比和扩顶面积的影响较大,扩顶面积越大,  $n$  越小;桩体与桩间土材料刚度比越大,  $n$  越大。若  $n$  越大,桩体顶受力越大,但由于桩身为素混凝土材料,为满足扩径处的抗剪和抗冲切,势必增加桩顶部扩径的深度,增加成本。桩土应力比  $n$  为多少才能使桩与土的承载力充分发挥,并使设计最优,有待进一步研究。

桩顶面积扩大直接对桩土之间的应力进行调整,扩顶面积太小,桩顶面分配荷载小,桩侧下部侧摩阻力无法充分发挥出来,造成桩的浪费;扩顶面积太大,桩间土的承载力小,没有合理利用桩间土承载力,且由于扩顶面积太大,桩顶没有配筋,设计时为满足抗冲切和抗剪,必然增加扩顶深度,不利于优化设计,故设计时应根据地质资料、桩土的刚度比和桩的承载力等,选择最佳的桩顶扩大面积。

#### 六、结语

由扩顶复合地基的研究与试验分析可得:

(1)通过复合地基进行扩顶施工,对桩土应力比进行调整,将上部荷载重新分配,充分发挥桩体的承载力,提高了复合地基的承载力。

(下转第43页)

静载实验,并绘制 Q-s 曲线见图 3。



图 2 316# 桩低应变完整性检测曲线

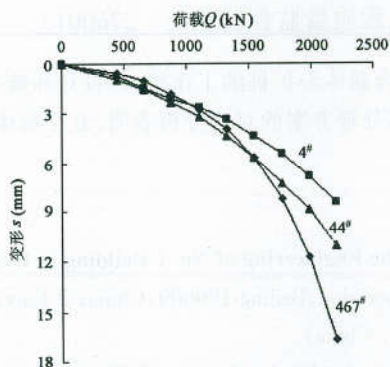


图 3 试验桩的荷载试验 Q-s 曲线

对于图 2 中的 316# 桩,设计单桩极限承载力为 2 200 kN。当试验加载量达到 2 200kN 时,对应的总沉降量为 6.42mm,承载力标准值为 1 100kN 时,对应的沉降量为 1.59mm。绘制的 Q-s 曲线为缓变型,在总加载量为设计单桩极限承载力即 2 200kN 时,并未出现极限状态。从低应变反射波法检测的波形来看,桩底反射表现的扩径反映明显,幅值也比较大,说明载体夯击密实,与桩端结合紧密,桩的极限承载力可判断为大于 2 200kN。经分析,其它桩的极限承载力都大于 2 200 kN。

(上接第 15 页)

(2) 桩身材料与桩间土之间刚度比直接影响着扩顶的效果,桩间土压缩模量越低,扩顶的效果越明显。

(3) 扩顶效果还与单桩的承载力有一定关系,扩顶传递到单桩的荷载不能超过单桩的承载力,否则适得其反。

随着对扩顶复合地基的进一步研究和推广应用,该工艺必将为社会带来更显著的社会效益。

#### 参 考 文 献

1. 阎明礼,张东刚.CFG 桩复合地基技术及工程实践.中国建筑工业出版社,2001.
2. 建筑地基基础设计规范.中国建筑工业出版社,2001.
3. 龚晓南.复合地基的理论及工程运用.中国建筑工业出版社,2002.
4. 张爱军.复合地基三维数值分析.科学出版社,2004.
5. 董必昌,郑俊杰.CFG 桩复合地基沉降计算方法的研究,岩石力学与工程学报.2002.

## 六、沉降观测

为了解建筑物沉降的发展情况,对该工程作了沉降观测,沉降观测点布置详见图 1。竣工一年后的最终沉降量见表 3。由表 3 可见,工程沉降较均匀。由此可见复合载体夯扩桩能使弱地基的建筑物沉降得到有效的控制。

各观测点的沉降(mm)

表 3

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
沉降	7.09	6.34	12.21	11.20	7.74	6.59	7.06	8.92	9.59	9.50	8.44	6.39	8.01

根据规范,该类建筑采用复合载体夯扩桩不必进行沉降验算,规范对民用建筑沉降要求为 200mm,根据沉降资料,采用复合载体夯扩桩后,基础沉降明显低于其他地基处理方法的沉降。可见复合载体夯扩桩对控制建筑物变形和倾斜具有明显效果。

## 七、结论

通过工程中复合载体夯扩桩的设计与应用,证明了复合载体夯扩桩在软弱地基处理中具有明显的优越性,而且施工中可消纳大量的旧砖及混凝土碎块等建筑废料,具有良好的社会生态效益。随着对该技术的进一步了解,该项新技术必将有更广阔的应用前景。

#### 参 考 文 献

1. 复合载体夯扩桩设计规程(JGJ/T135—2001).中国建筑工业出版社,2001.
2. 曾国熙等.地基处理手册.中国建筑工业出版社,2000.
3. 建筑地基基础设计规范(GB50007—2002).中国建筑工业出版社,2002.
4. 混凝土结构设计规范(GB50010—2002).中国建筑工业出版社,2002.

(上接第 29 页)

垃圾,利于保护环境。具有显著的经济效益和社会效益。

## 六、结论

(1) 复合载体夯扩桩是一种新型、经济、有效、可靠的处理软弱地基的方法。

(2) 该桩具有较高竖向和水平承载力。

(3) 该桩具有施工速度快、成桩质量好、造价低、沉降量小且均匀、利于保护环境等优点,比常规地基处理方法节省造价 20%~30% 左右,具有显著的经济效益和社会效益。

#### 参 考 文 献

1. 复合载体夯扩桩研究报告(内部资料).1997.
2. 复合载体夯扩桩设计规程(JGJ/T135—2001).中国建筑工业出版社,2001.
3. 建筑桩基技术规范(JGJ94—94).中国建筑工业出版社.1994.
4. 桩基工程技术.中国建筑工业出版社,1996.