

复合载体夯扩桩承载性状试验研究

王俊林¹, 胡彩虹¹, 祝彦知², 胡明新³

(1, 郑州大学环境与水利学院, 郑州 450002; 2, 中原工学院 建工系, 郑州 450007; 3, 河南宏基管桩技术有限公司, 郑州 450008)

摘 要: 复合载体夯扩桩是由干硬性混凝土及填充料等经细长锤夯扩形成的复合载体和钢筋混凝土桩身组成, 具有挤密地基和扩大桩端面积等的作用。分析了复合载体夯扩桩的作用机制, 并结合工程实例, 采用太沙基公式和规范推荐的理论公式计算了复合载体夯扩桩的极限承载力和沉降量, 并与现场静载试验结果相比较。结果表明, 理论计算结果比试验结果偏于保守, 并提出了相应的改进方法。

关 键 词: 复合载体夯扩桩; 承载力; 沉降量

中图分类号: TU 443 **文献标识码:** A

Testing study on the bearing capacity of the ram-compaction piles with composite bearing base

WANG Jun-lin¹, HU Cai-hong¹, ZHU Yan-zhi², HU Ming-xin³

(1, School of Environment and Water Conservancy, Zhengzhou University, Zhengzhou, 450002, China;

2, Department of Construction and Engineering, Engineering College of Zhongyuan, Zhengzhou, 450007, China ;

3, Hongji Piles Technology Company, Zhengzhou, 450008, China)

Abstract: Ram-compaction piles with composite bearing base, which has the function of densifying the foundation and enlarging the end area, is composed of Ram-compaction Piles, steel concrete formed by the non-plastic-concrete, packing, etc.. The action mechanism of the Ram-compaction piles with composite bearing base was analyzed. Based on the practical case, the K. Terzaghi formula and theoretical formula are applied to calculate the capacity and settlement, the calculated results were compared with the testing results. The results show that the theory is more conservative than the testing. The improved method was presented.

Key words: ram-compaction piles with composite bearing base; bearing capacity; settlement

1 引 言

夯扩桩是指利用细长锤夯击成孔, 将护筒沉到设计标高后, 细长锤击出护筒底一定深度, 分批向孔内投入填充料和干硬性混凝土, 用细长锤反复夯实、挤密, 在桩端形成复合载体, 最后放置钢筋笼, 灌注桩身混凝土而形成的桩。这种桩和其他桩的作用机制最大的区别就是它不是通过桩身形状、桩径、桩端扩底、桩顶承台的改变来提高单桩承载力, 而是利用天然土体对夯填料的约束和夯击能量累积的原理, 将浅层软弱松散地基进行加固挤密, 形成了高强度的持力层。建设部对此进行了行业标准的指定, 并指定了桩基承载力和沉降的计算公式。

桩设计规程^[1]应用多年来, 在全国各地已经有多个工程采用。但是根据理论计算、试验方法和按照该规程计算的结果有一定的出入, 本文通过工程实例采用理论计算方法、规范计算方法和试验结果进行对比分析, 为工程设计提供实用研究方法。

2 复合载体夯扩桩承载力和沉降计算

2.1 作用机制

复合载体夯扩桩处理技术是在综合了重锤夯实、强力夯实和钻孔灌注桩等地基处理技术的基础上, 吸收其长处, 抛弃其缺陷, 集高动能、高压强、强挤密各效应于一体的对软弱土层处理的方法。复合载体构造见图 1。其承载机制有如下几个特点,

(1) 是具有一般桩的作用^[2]。靠桩身侧摩阻力来抵抗竖向荷载作用；(2) 是具有扩底墩的特点。夯实干硬性混凝土与桩身混凝土能够很好地结合，形成扩底墩的形状。当承受竖向荷载时，就象锅底墩一样，扩大头将桩身荷载分散到桩端地基土层上（这里为夯实填充料形成的夯实体），从而减小地基土的作用力，提高了桩的承载力；(3) 是置换作用。桩端处碎砖、碎混凝土经强力夯击，排走原位置的地基土，形成抗剪强度较大、压缩模量较高的置换体，提高了桩端土体的承载力，减少了桩端土的变形量；(4) 是桩端地基土的强夯压密作用。重锤强力冲击对桩端下土体形成强大的压力，在该压力作用下形成一定范围内的压密区，提高了土的密实度和承载力，减少了土的变形能力；(5) 是振动挤密作用。长条形锤的自由下落对下层地基土形成强大的振动冲击力使土层受影响向下、向侧面挤压致密实，从而提高了其承载力和减少变形量。复合载体夯扩桩集桩基和地基处理的优点于一体，与单一的桩基础和地基处理相比具有明显的优点。

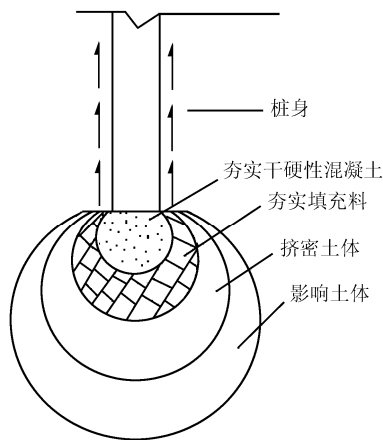


图 1 复合载体构造图

Fig.1 The Ram-compaction piles

2.2 承载力计算

2.2.1 理论计算方法

按极限平衡理论，复合载体夯扩桩的竖向极限承载力^[3]为：

$$Q_u = Q_{bu} + Q_{su} \quad (1)$$

式中：\$Q_u\$ 为竖向极限承载力 (kN)；\$Q_{bu}\$ 为桩底极限承载力 (kN)；\$Q_{su}\$ 为桩侧壁总的极限摩阻力 (kN)。

由于桩底多为较硬密土层，故常以深基础极限承载力公式按整体剪切破坏计算桩底极限承载力，即：

$$Q_{bu} = A_b \left(cN_c^* + qN_q^* + \frac{1}{2} \gamma D_b N_\gamma^* \right) \quad (2)$$

式中：\$A_b\$ 是桩底面面积 (m²)；\$D_b\$ 是桩底面直径 (m)；\$c\$ 是桩底土的粘聚力 (kPa)；\$\gamma\$ 是桩底土的重度 (kN/m³)；\$q\$ 是桩底土有效上覆压力 (kPa)；\$N_c^*\$、\$N_q^*\$ 和 \$N_\gamma^*\$ 分别是深基础极限承载力系数，一般按深基础太沙基公式或迈耶霍夫公式确定，本文采用太沙基公式计算^[3]。

2.2.2 规范计算

按照 JGJ/T135-2001 的规程^[1]要求，初步设计时，单桩竖向承载力特征值可用下式估算：

$$R_a = u_p \sum q_{sia} l_i + q_{pa} A_c \quad (3)$$

式中，\$R_a\$ 是单桩竖向承载力特征值；\$u_p\$ 是桩身断面周长 (m)；\$q_{sia}\$ 是桩侧第 \$i\$ 层土的侧层阻力特征值；\$l_i\$ 是桩身穿越第 \$i\$ 层土的厚度 (m)；\$q_{pa}\$ 是复合载体下地基土经深度修正后的地基持力层承载力特征值，应按现行国家《规范》^[4]确定；\$A_c\$ 等效桩端计算面积 (m²)。

2.3 沉降计算

在复合载体夯扩桩设计工程规范中，对 3 类建筑物的桩基应进行沉降计算：(1) 地基基础设计等级为甲级的建筑物桩基；(2) 对沉降有严格要求的建筑物桩基；(3) 体型复杂或桩端以下存在软弱土层的乙级建筑物桩基。

常用的理论计算公式^[4]为

$$S = S_1 + S_2 \quad (4)$$

式中：\$S_1\$ 是桩身压缩量；\$S_2\$ 是桩端下土层的压缩量。

$$S_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\sigma}_i}{E} L_i, \quad S_2 = \sum_{i=1}^m \frac{\bar{\sigma}_{zi}}{E_{si}} h_i \quad (5)$$

式中：\$\bar{\sigma}_i\$ 和 \$\bar{\sigma}_{zi}\$ 分别是计算 \$L_i\$ 段桩身平均轴应力和第 \$i\$ 层土的平均附加应力，\$E\$ 和 \$E_{si}\$ 分别是桩身弹性模量和第 \$i\$ 层土的压缩模量，\$L_i\$ 和 \$h_i\$ 分别表示第 \$i\$ 段桩长和第 \$i\$ 层土的厚度，\$n\$ 和 \$m\$ 分别是桩身所穿过的土层数和计算压缩土层数。

3 工程实例应用分析

3.1 工程概况

某电厂烟囱工程基础采用复合载体夯扩桩设计，总桩数为 96 根，桩长 10.0 m，桩径 420 mm，设计单桩竖向承载力特征值为 1000 kN，桩身采用 C25 混凝土。场区地貌类型属黄河冲积平原区，地

层主要由粉土、黏性土和少部分粉砂组成。按其岩性和物理力学特征，共划分 6 个地层单元，从上至下分别为：粉土、粉质黏土夹粉土、粉土、粉质黏

土、粉质黏土、粉砂和粉质黏土、粉细砂、粉质黏土、粉质黏土夹粉土，土层分布及物理力学性质指标见表 1。

表 1 土层分布及物理力学性质指标表
Table1 1 Table of the soil distribution and the physical mechanical indices

层号及土层名称	土层厚度 /m	重度 /kN.m ⁻³	压缩模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 / (°)	q_{sta} /kPa
(1) 粉土	4.3	18.6	13.7	52	28.8	45
(2) 粉质黏土夹粉土	2.55	19.4	10.8	19	27.8	30
(3) 粉土	2.35	19.6	18	18	14.6	50
(4) 粉质黏土	3.8	19.9	7.5	76	6.1	25
(5) 粉质黏土	2.05	20.5	12.7	72	3	32
(6) 粉砂	1.95	20.3	30.4			45
(7) 粉质黏土	1.3	20.4	14.8			40
(8) 细砂	12.45	20.1	41.4			60
(9) 粉质黏土	2.8	207	14.6			
(10) 粉质黏土夹粉土	3.75	20.1	16.3			

3.2 试验方法及结果

该次静载试验共做了 3 根工程桩，采用 QW320 型液压千斤顶，测力、位移传感器与 JCQ-503A 静力载荷测试仪连接测定荷载和沉降量。此仪器自动加载、自动判稳、自动补载、保证对桩施加压力准确可靠。试验的反力装置采用钢梁-堆重平台反力系统，加载采用慢速维持荷载法进行。按照设计承载力和规范（JGJ106-2003）的要求，确定本工程加载量为 1 704 kN，分 8 级进行，每级加载为 213 kN，各级加载量见表 2。

表 2 加载量表
Table 2 Table of the loads

分级	1	2	3	4	5	6	7	8
加载/kN	213	426	639	852	1 065	1 278	1 491	1 704

沉降的测读、稳定标准、卸载和终止加载条件依据《规范》^[4]。试验结果见表 3。 $Q-s$ 曲线及典型地质柱状图分别见图 2 和图 3。从 $Q-s$ 曲线上看，1[#]~3[#] 桩各级沉降变化均匀，曲线均没有明显的拐点出现

表 3 静载试验结果表
Table 3 Testing results

桩号	历时 /min	最大荷载 /kN	总沉降 /mm	回弹量 /mm
1 [#]	1230	1704	29.87	9.00
2 [#]	1080	1704	31.25	5.69
3 [#]	990	1704	34.67	5.69

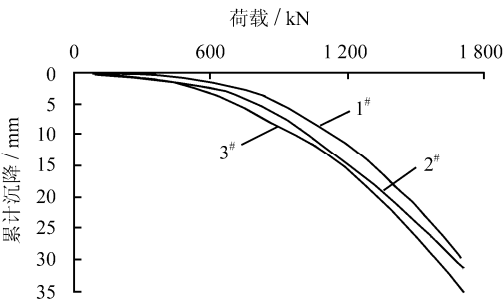


图 2 $Q-s$ 曲线图
Fig.2 $Q-s$ curve chart

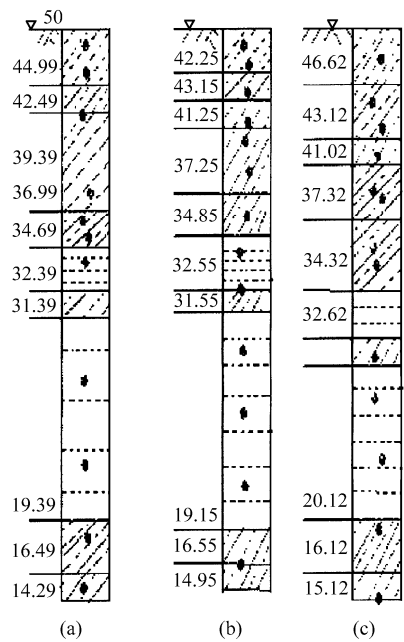


图 3 1[#]~3[#] 桩典型地质柱状图
Fig.3 1, 2 and 3 piles typical geology pillar chart

3.3 计算结果分析

根据太沙基公式和规范法计算的承载力及沉降结果分别见表 4 和表 5。从表可以看出,承载力试验值比两种方法的计算值偏大,规范法和太沙基公式法 1[#] 桩分别比试验值偏小 23.35%和 2.28 %, 2[#] 和 3[#] 桩分别偏小 18.41 %, 4.87 %, 18.84 %和 1.23 %。可见规范法计算承载力值最小,太沙基理

论公式法接近于试验值。而桩顶沉降量试验值较两种方法的计算值却偏小,1[#] 桩规范法和太沙基理论公式分别比试验值偏大 32.17 %和 82.12 %, 2[#] 和 3[#] 桩分别比试验值偏大 34.88 %, 77.79 %, 14.91 %和 56.38 %,可见规范法计算结果介于太沙基理论公式和试验值之间。说明规范所给出的计算公式和理论计算公式偏于保守。

表4 承载力计算及试验结果表 (单位: kN)

Table 4 The computed and testing results table of the bearing capacities (unit: kN)

桩号	规范法			太沙基理论公式法			试验值
	极限侧阻力	极限端阻力	合计	极限侧阻力	极限端阻力	合计	
1 [#]	576.18	784.55	1 306.17	576.18	1 089.01	1 665.19	1 704
2 [#]	583.64	806.62	1 390.26	583.64	1 037.36	1 621.0	1 704
3 [#]	578.58	804.37	1 382.91	578.58	1 104.32	1 683.0	1 704

表5 沉降计算及试验结果表 (单位: mm)

Table 5 The computed and testing results of the settlement (unit: mm)

桩号	规范法			太沙基理论公式法			试验值
	桩身压缩量	桩端土压缩量	合计	桩身压缩量	桩端土压缩量	合计	
1 [#]	2.92	36.56	39.48	2.92	51.48	54.40	29.87
2 [#]	3.04	37.25	40.29	3.04	52.52	55.56	31.25
3 [#]	2.98	36.92	39.84	2.98	50.69	53.67	34.67

4 结 论

复合载体夯扩桩具有承载力高、沉降小、成本低等优点,其作用机理明确,既有桩基的优点,又有地基处理中的置换、压密和挤密作用。通过实际计算对比,其承载力的理论计算值小于试验值,沉降量的试验值小于理论计算值。说明理论计算公式是偏于保守的。因此,建议在今后的实际工程中,可根据实际情况将计算的承载力乘以一个系数 ϕ (ϕ 一般大于1),将计算的沉降量乘以一个系数 φ (φ 一般小于1),以使其与实际情况相吻合。

参 考 文 献

- [1] 复合载体夯扩桩设计规程 (JGJ /T135 - 2001)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [2] 张聚山, 王俊林. 扩底墩基础设计与分析[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3): 67-73.
- [3] 顾晓鲁, 钱鸿缙, 等. 地基与基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [4] 《建筑地基基础设计规范》(GB5007-2002) [S]. 北京: 中华人民共和国建设部, 2002.
- [5] 《桩基工程手册》编写委员会, 桩基工程手册[M], 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.