

Experimental Investigation, Calculation and Analysis of Compressive Bearing Capacity of Squeezed Branch Piles

Longjin Yuan, Guoliang Dai, Weiming Gong

School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing
Email: fkedxin@163.com, daigl@seu.edu.cn, wmgong@seu.edu.cn

Received: May 10th, 2014; revised: Jun. 2nd, 2014; accepted: Jun. 12th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Compared with ordinary straight piles, squeezed branch piles have advantages such as higher bearing capacity and lower settlement. The bearing mechanism of squeezed branch piles and five calculation formulas of compressive bearing capacity are discussed in this paper. Besides, the influence of plate distance, plate number, plate position and plate diameter on compressive bearing capacity is analyzed. According to the static loading tests results of five piles of the first phase Ningbo City Eastern Expressway, under the same requirements for compressive bearing capacity, squeezed branch piles can save over 30% material more than ordinary straight piles. By using the results of the five calculation formulas of compressive bearing capacity and the measured data, the analysis is carried out.

Keywords

Squeezed Branch Pile, Bearing Capacity of Compressive Resistance, Static Loading Tests, Bearing Mechanism

挤扩支盘桩抗压承载力试验与分析

袁龙锦, 戴国亮, 龚维明

东南大学土木工程学院, 南京
Email: fkedxin@163.com, daigl@seu.edu.cn, wmgong@seu.edu.cn

收稿日期：2014年5月10日；修回日期：2014年6月2日；录用日期：2014年6月12日

摘要

挤扩支盘桩相比普通等截面桩具有承载力高、沉降小等特点。本文介绍了挤扩支盘桩承载机理以及多个抗压承载力计算公式，并分析支盘间距、支盘数量、支盘位置、支盘尺寸等因素对抗压承载力的影响。本文对宁波绕城高速公路东线一期的5根桩静载荷试验进行了分析，结果表明在同样承载力要求下，挤扩支盘桩比普通等截面桩节约材料30%以上，并通过五种抗压承载力计算公式的结果与实测资料进行了分析。

关键词

挤扩支盘桩，抗压承载力，静载荷试验，承载机理

1. 引言

挤扩支盘桩是一种异型桩，在原有的等截面钻孔灌注桩的基础上发展而来的。该桩型是依据树根的抗压、抗拔机理，结合变截面钻孔灌注桩而发明的一种新桩型。挤扩支盘桩是在桩基机械成孔后使用专用的液压挤扩设备在桩身和桩底挤扩数个承力支或承力盘(其结构见图1，a为支盘径向扩大半径，b为支盘厚度，h为支盘高度)，然后灌注混凝土形成的桩型。桩身的支、盘受土体的支撑作用，不仅改善了桩身刚度，提高了桩的抗压、抗拔力，而且增加了桩的稳定性，提高了抵抗水平荷载和地震荷载的能力。

20世纪50年代后期，印度开始在膨胀土中采用多节扩孔桩。60年代和70年代，印度、英国及前苏联在黑棉土、黄土、粉土、粘土和砂土中采用多节扩孔桩。印度的D. Mohan于1969年对变截面桩进行了小规模的应用，并探讨了最佳支盘的间距[1][2]。国外经验表明，多支盘扩孔桩与直孔桩相比，承载力大幅度提高，沉降小，技术经济效果显著。我国是从20世纪80年代末开始对挤扩支盘混凝土灌注桩的研究，1990年我国已有专利技术，并取得了发明专利权。从1992年开始，中国水利水电科学院和天津大学等单位对挤扩支盘桩的承载力计算公式、不同土层中的挤密效果和应力传递规律等进行了试验研究和分析[3]。史鸿林等[4]通过17组试桩的原型荷载试验及计算，对新型挤扩支盘桩的承载能力进行了计算分析和研究。研究表明：同一场地、相同桩长、相同桩径的新型挤扩支盘桩比钻孔灌注桩的单桩竖向承载力要提高一倍以上(混凝土量仅增加6%~12%)。杨锦东等[5]通过对挤扩支盘桩的现场试验，

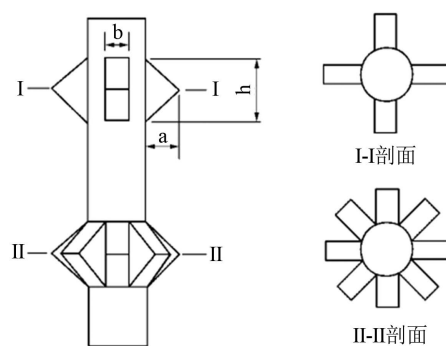


Figure 1. Branch structure diagram
图1. 支盘结构图

对埋设压力盒和布置变形片的实测记录进行了分析,讨论了新桩型荷载沿桩身的传递规律。战永亮等[6]通过现场试验及计算,对挤扩多支盘灌注桩的承载能力、设置效应进行了计算分析与研究。钱德玲[7]指出了承力盘的承力特性具有明显的时间效应和互补效应以及与其他桩型的不同点,分析了挤扩支盘桩高承载力和低沉降量的原因。

目前,虽然文献提出了多种挤扩支盘桩承载力计算方法,但计算结果差异较大。本文收集了5个已有的支盘桩抗压承载力计算公式上,结合5根现场原位静载试验结果,对比分析了各种方法的计算结果,以供参考。

2. 挤扩支盘桩的承载机理及影响承载力因素

2.1. 承载机理

挤扩支盘桩的受力性状可从普通灌注桩在竖向受压荷载下分析,然后通过挤扩支盘桩的试验资料,来分析桩的竖向荷载传递机理,桩的侧阻力和端阻力的发挥过程以及支、盘在桩的受力过程中发挥的作用。竖向受压荷载传递性状可通过静载荷试验,由竖向受压的荷载-沉降关系和桩身轴向力沿桩身深度的关系进行描述。

一些学者对于挤扩支盘桩的承载机理和荷载传递规律方面做了比较全面的阐述[8]-[10]。挤扩支盘桩的承载机理首先是利用桩周土中下部较好的土层,将荷载通过支盘传递到土层上去,即分层承受荷载。通过荷载沿深度的扩散,不仅减少了桩端荷载,而且还扩大了承力面积,从而达到大幅度提高承载力的目的。由于分层承受荷载,在工作荷载作用下,传至桩端的荷载很小,保证了桩端土的稳定。同时,支盘上、下土体在支盘机的挤扩作用下被压密,土体的物理力学性质高于原状土,并且支盘桩的受力特性具有明显的时间效应,即各支盘达到极限承载力的时间也不同。

2.2. 影响承载力因素

挤扩支盘桩是灌注桩的一种新桩型,因此,影响普通灌注桩承载力的因素同样会影响到支盘桩的承载力。由于支盘桩性状的特殊性,还需要考虑支盘间距、支盘数量、支盘位置、支盘尺寸等因素对承载力的影响。

2.2.1. 支盘间距的影响

支盘间距的大小是影响侧摩阻力和支盘阻力的重要因素。在支盘间距设计过程中,要综合考虑支盘的埋深、支盘尺寸大小和桩侧土的物理性质。通过现场静载试验表明,支盘间距对支盘桩的承载性能影响较大。在文献[11]中利用Abaqus软件对支盘桩间距影响进行了数值模拟。将支盘间距与支盘直径联系起来,在考虑不同支盘条件下支盘桩Q-s曲线及竖向应力云图下,认为最佳支盘间距为2.5~3倍支盘直径。

2.2.2. 支盘数量的影响

当支盘间距确定时,设置支盘应考虑土层的力学性质,而数量也应根据土层条件来确定。支盘数量不仅影响支盘桩承载力的大小,而且对工程造价和施工速度也有很大的影响。支盘桩在达到极限承载力时,并非每一个支盘桩都能发挥到极限,因此支盘数量不宜过多。根据数值模拟的结果[11],随着支盘数量的增加,支盘桩对应承载力增大的幅度逐渐减小,其单方混凝土承载力降低,支盘桩的经济性也随之下降。此外,过多的设置支盘数量也会导致施工困难,施工进度难以保证等问题。

2.2.3. 支盘位置的影响

各支盘极限承载力的不同主要取决于支盘所在位置的土层力学性质。一般情况下,支盘应避免设置

在软弱土层上，而尽量设置在较深较好的土层。当支盘所在土层为良好的土层，而该土层下方存在软弱土层时，支盘与下方软弱土层应保持一定的距离。此外，支盘发挥其承载作用是有时间效应的。

2.2.4. 支盘尺寸的影响

支盘尺寸不同，其承载力大小必然存在差异。一般而言，支盘直径越大，其承载力越高，但是过大的直径也会造成施工难度的加大。因此，在设计支盘直径时应考虑到施工难度、扩径效率及对周边土体影响程度等因素。在确定支盘直径后，需对支盘挤扩角度进行设计。由于支盘截面处无法配置钢筋，若支盘挤扩角度过大，可能会导致支盘本身的剪切破坏，工程实践中，支盘挤扩角度一般小于 70°。

3. 挤扩支盘桩抗压承载力计算方法

挤扩支盘桩单桩抗压承载力的确定方法主要分为两大类：直接法和间接法。

直接法一般为静载荷试验方法。这是确定支盘桩单桩极限承载力标准值最基本、最有效的方法，但是这种方法成本高且需要一定的时间，因此往往只在部分工程中才会运用。间接法则是根据室内试验的分析，现场试桩的结果以及工程中使用的情况，在考虑土层性质等因素的影响下，总结出用于计算的经验公式。

单桩承载力通常由桩侧摩阻力及桩端阻力两部分组成。由于挤扩支盘桩中支盘的存在，挤扩支盘桩的单桩承载力由桩侧摩阻力、桩端阻力及支盘端阻力三部分组成。据不完全统计，挤扩支盘桩单桩抗压承载力的计算公式有十多种，主要有以下公式。

1) 《火力发电厂支盘桩暂行技术规定》(DJGJ-2000)[12]根据土的物理性质指标与承载力参数之间的经验关系，提出支盘桩单桩竖向极限承载力标准值采用以下公式：

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum q_{sik} l_i + \sum \psi_{pi} q_{pik} A_{pi} + q_{pk} A_p \quad (1)$$

式中： Q_{uk} 为单桩竖向极限承载力标准值(kN)； Q_{sk} 为单桩总极限侧摩阻力标准值(kN)； Q_{pk} 为单桩总极限端阻力标准值(kN)； u 为主桩桩身周长(m)； q_{sik} 为桩侧第 i 层土的极限侧摩阻力标准值(kPa)； l_i 为桩穿越第 i 层土的厚度，计算时应减去盘根高度(m)； ψ_{pi} 为支或盘极限端阻力标准值的修正系数； q_{pik} 为桩身第 i 个支或盘处土的极限端阻力标准值(kPa)； A_{pi} 为扣除主桩桩身截面面积的支或盘的水平投影面积(m²)； q_{pk} 为主桩底处土的极限端阻力标准值(kPa)； A_p 为主桩桩端截面面积(m²)。

2) 中国工程建设标准化协会标准《挤扩支盘灌注桩技术规程》(CECS192: 2005)[13]挤扩支盘桩单桩竖向抗压承载力标准值按下式估算：

$$Q_{uk} = u \sum q_{si} l_i + \sum \eta q_{pj} A_{pj} + \eta q_p A_p \quad (2)$$

式中： η 为盘底土层极限端阻力标准值的修正系数； q_{si} 为桩侧第 i 层土的极限侧摩阻力标准值(kPa)； l_i 为当第 i 层土中设置承力盘时，桩穿越第 i 层土折减盘高的有效厚度(m)； q_{pj} 为桩身第 j 个支或盘处土的极限端阻力标准值(kPa)； A_{pj} 为扣除主桩桩身截面面积的支或盘的水平投影面积(m²)； q_p 为主桩底处土的极限端阻力标准值(kPa)； A_p 为主桩桩端截面面积(m²)。

3) 《浙江省挤扩支盘混凝土灌注桩技术规程》(J10270-2003)[14]按下式计算：

$$R_u = u \sum q_{si} l_i + \sum \psi_{pj} q_{pj} A_{pj} + q_p A_p \quad (3)$$

式中： l_i 为桩穿越第 i 层土的计算厚度(m)，取 $l_i = L_i - 1.2mh$ (L_i 为穿越第 i 层土的厚度， m 为第 i 层土桩身的盘数； h 为盘根高度)； ψ_{pj} 为支或盘极限端阻力标准值的修正系数；其它符号含义与式(2)相同。

4) 北京地区技术规程计算公式[15]：

$$Q_{uk} = u \sum q_{sik} l_{si} + \sum \eta_{pik} q_{pik} A_{pi} + \eta q_{pk} A_p \quad (4)$$

式中： l_{si} 为当第 i 层土中设置承力盘时，桩穿越第 i 层土折减盘高的有效厚度(m)； η_{pik}, η 为盘底土层极限端阻力标准值的修正系数；符号含义与式(1)相同。

5) 徐至钧等[16]通过收集现有工程实例中的试桩技术资料，统计分析了计算值与实验值的比值的平均值、均方差、变异系数等，提出的计算方法：

$$Q_{uk} = u \sum q_{sik} l_{si} + \sum \eta_{pik} q_{pik} A_{pi} + \psi_p \eta_p q_{pk} A_p \quad (5)$$

式中： l_{si} 为桩穿越第 i 层土的厚度，计算时应减去盘根高度(m)； ψ_p 为盘底尺寸效应；其它符号含义与式(4)相同。

以上所述的五种支盘桩承载力的计算公式均是根据工程实践资料进行统计和分析所总结出来的，这些设计计算方法和公式只是估算公式或半经验公式。但这些公式的单桩承载力均是由桩侧摩阻力、桩端阻力及支盘端阻力三部分组成，只是不同的公式采用了不同的修正系数，其中桩侧摩阻力部分式(1) l_i 、式(5) l_{si} 的计算需减去盘根高度，而式(2)、(3) l_i 、式(4) l_{si} 的计算需减去盘高的有效高度，支盘端阻力与桩端阻力部分的计算取决于不同的修正系数值。在实际工程中需要根据某一地区地质土层状况和当地的试桩技术资料进行分析，来确定原设计的合理性，必要时应对原设计进行修改。

4. 挤扩支盘桩现场静载荷试验

4.1. 工程概况

宁波绕城高速公路东线一期试桩共完成了 5 根桩静载荷试验，其中自平衡静载荷试验 3 根，堆载静载试验 2 根。其中两根位于沙河互通主线高架桥 K38 + 841 和 K38 + 860 处，一根位于第一合同段 K3 + 190 处。为了比较支盘桩的承载效果，在支盘桩同一场地进行了等截面桩的对比试验。

根据钻孔地质资料，K38 处桩的桩周土为粘土、淤泥质粘土和亚粘土，桩端持力层为亚粘土，其中粘土层 2.7 m 厚，极限侧摩阻力为 25 kPa；淤泥质粘土 11.4 m 厚，极限侧摩阻力为 15 kPa；亚粘土极限侧摩阻力为 30~45 kPa，极限端阻力 180 kPa。K3 处桩的桩周土以淤泥质亚粘土、亚粘土、粉砂为主，桩端持力层为粉砂，其中淤泥质亚粘土 28.7 m 厚，极限侧摩阻力为 15~20 kPa；亚粘土 12.6 m 厚，极限侧摩阻力为 30~60 kPa，极限端阻力为 160~210 kPa；粉砂极限侧摩阻力为 55 kPa，极限端阻力为 210 kPa。其中三根试桩的桩身结构见表 1。

4.2. 试桩结果

采用自平衡静载荷试验的 K38 + 841 试桩在加载到 7367 kN 时桩向上位移迅速增加至 61.42 mm，出现陡变，向下位移为 37.09 mm，故终止加载。加载值取前一级荷载 6800 kN，Q 取 7367 kN，而 K38 + 860 试桩在加载到 7367 kN 时桩向下位移 93.39 mm，出现陡变，上位移只有 12.73 mm，此时不考虑下位移继续加载到 8500 kN，上位移 19.38 mm。终止加载，加载值(8500 kN)，Q 取 6800 kN。采用堆载静载试验

Table 1. Structural size of three test squeezed branch piles
表 1. 三根支盘试桩的结构尺寸

桩号	桩长(m)	桩径(m)	盘径(m)	盘高(m)	支盘数	桩端土
K38 + 841	56.6	1.0	1.9	0.9	4	亚粘土
K38 + 860	56.0	1.2	1.9	0.9	4	亚粘土
K3 + 190	49.0	1.2	1.9	0.9	3	粉砂

的 K3 + 190 试桩在加载到堆载极限 13,000 kN 时, 位移为 43.21 mm, 此时没有出现陡变, Q 取 6500 kN。

与支盘桩进行对比试验的等截面 K38 + 865 试桩, 桩长 70 m, 桩径 1.2 m, 在加载到 6233 kN 时桩向上位移 54.21 mm, 出现陡变, 向下位移 28.14 mm, 出现陡变, 故终止加载。加载值取前一级荷载 5667 kN, Q 取 5667 kN。等截面 K3 + 200 试桩桩长 68.16 m, 桩径 1.2 m, 在加载到 6230 kN 时桩向上位移 6.98 mm, 向下位移 9.13 mm。已达荷载箱极限, 终止加载。故加载值取 6230 kN, Q 取 6230 kN。

对沙河互通主线高架桥与第一合同段 K3 + 200 处等截面桩和支盘桩自平衡静载试验结果进行等效转换, 得到各试桩极限承载力标准值的结果, 见表 2。

通过对沙河互通主线高架桥 K38 + 865 等截面桩和 K38 + 841、K38 + 860 支盘桩的比较, 桩长分别缩短 19% 和 20%, 其中 K38 + 841 桩径缩小了 17%, 而极限承载力标准值分别提高了 27% 和 43%。第一合同段等截面桩 K3 + 200 和支盘桩 K3 + 190 对比, 在桩径相同、支盘桩桩长比等截面桩短 28% 的情况下, 支盘桩承载力还略高于等截面桩, 即相当于考虑单方混凝土承载力, 支盘桩要高于等截面桩的承载力。

4.3. 计算对比分析

采用前面所述的五种挤扩支盘桩单桩抗压承载力的计算公式, 对该桩的单桩承载力分别进行了计算, 见表 3。

从计算的结果可知, 不同的计算公式所得的单桩承载力差异较大。对沙河互通主线高架桥的两根支盘桩分析得, 北京地区的技术规程公式(4)计算值最大, 而《挤扩支盘灌注桩技术规程》提出的公式(2)计算值最小。计算中公式(4)端阻力面积修正系数是与桩径和支盘所在土层性质相关, 取值均为 1.0, 这一系数高于其他公式中的修正系数, 使得最后的计算值大于其他公式所求得的承载力计算值。公式(2)在计算侧摩阻力时对有效厚度的折减较大, 并且对支盘及盘底的端阻力同时进行了修正, 使得计算值偏小。第一合同段的五个不同计算值相差较小, 是由于桩长较短, 各公式所取得因子对承载力的计算影响不大。

Table 2. Comparison of each test pile of ultimate bearing capacity

表 2. 各试桩极限承载力标准值对比

桩号	桩径(m)	桩(m)	极限承载力标准值(kN)	对应位移(mm)
K38 + 865	1.2	70.0	5863	21.23
K38 + 841	1.0	56.6	7456	62.71
K38 + 860	1.2	56.0	8385	66.85
K3 + 200	1.2	68.16	6454	23.78
K3 + 190	1.2	49	6500	43.21

Table 3. Comparison between calculation and experimental values of pile compression capacity

表 3. 单桩抗压承载力计算值与试验值的对比

桩号	试验值	公式 1	公式 2	公式 3	公式 4	公式 5
K38 + 841	7456	6112	5979	6021	6285	6049
	相差率	18.0%	19.8%	19.2%	15.7%	18.9%
K38 + 860	8385	6949	6779	6840	7060	6859
	相差率	17.1%	19.2%	18.4%	15.8%	18.2%
K3 + 190	6500	6100	5965	6002	6017	6011
	相差率	6.2%	8.2%	7.7%	7.4%	7.5%

上述计算结果中, 所计算值都低于实测值。相关地质资料参数的取值对于计算结果的影响较大, 并且不同公式选取的系数也会对结果造成影响。总体结果表明理论是偏于保守的, 不同规范计算值存在一定的差异。

5. 结语

本文对挤扩支盘桩的竖向承载机理进行了简述, 对挤扩支盘桩的竖向承载力的计算公式进行了一定的总结, 并分析主要影响挤扩支盘桩竖向抗压承载力大小的因素。通过宁波绕城高速公路东线一期的 5 根桩静载荷试验, 对比了支盘桩与等截面桩的承载力大小, 并通过五种抗压承载力计算公式的结果与实测资料进行了分析。从中可以得出以下结论:

- 1) 与普通等直径灌注桩相比, 挤扩支盘桩具有承载力高, 经济性优越等特点。
- 2) 工程设计中挤扩支盘桩单桩承载力计算公式一般较为保守, 且各个方法由于具体针对不同地层性质和施工经验所选用的系数不尽相同, 因此不同的计算方法的结果具有一定的偏差。
- 3) 前述的支盘桩设计计算方法和公式只是估算公式或经验公式, 因此还需要对实际的工程情况进行具体分析和研究, 并结合试桩的现场试验结果, 综合确定桩承载力的设计, 以提高使用的安全性与经济效益。

参考文献 (References)

- [1] Mohan, D., Murthy, V.N.S. and Jain, G.S. (1969) Design and construction of multi-under reamed piles. *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, 1969, 183-186.
- [2] Mohan, D. (1967) Bearing capacity of multi-under reamed piles. *Proceedings of 3th Asian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Kaifa, 1967, 98-101.
- [3] 高晓娟 (2007) 挤扩支盘桩承载性状试验和数值模拟分析. 浙江大学, 杭州.
- [4] 史鸿林, 胡林忠, 王维雅, 等 (1997) 新型挤压分支桩的计算与试验研究. *建筑结构学报*, **1**, 49-54.
- [5] 杨锦东, 崔江余, 唐业清 (1999) 挤扩支盘混凝土灌注桩现场试验研究. *工业建筑*, **10**, 49-51.
- [6] 战永亮, 张延庆, 孟凡丽, 等 (1999) 挤扩多支盘桩的试验研究. *工程力学增刊*, 542-546.
- [7] 钱德玲 (2002) 挤扩支盘桩的荷载传递规律及 FEM 模拟研究. *岩土工程学报*, **3**, 371-375.
- [8] 钱德玲 (2004) 支盘桩—地基相互作用及有限元法模拟的研究. *土木工程学报*, **2**, 82-86.
- [9] 王东坡, 钱德玲 (2004) 挤扩支盘桩的荷载传递规律及研究现状. *岩石力学与工程学报*, **z1**, 4645-4648.
- [10] 邓友生, 龚维明, 戴国亮, 等 (2005) 多级支盘桩与等截面直孔桩承载力对比试验. *重庆建筑大学学报*, **5**, 52-56.
- [11] 李碧青 (2011) 挤扩支盘桩竖向承载力特性研究. 浙江大学, 杭州.
- [12] DJGJ (2000) 火力发电厂支盘桩暂行技术规定. 电力出版社, 北京.
- [13] 中国工程建设标准化协会 (2005) CECS192: 2005 挤扩支盘灌注桩技术规程. 中国建筑工业出版社, 北京.
- [14] (2003) 浙江省工程建设标准. J10270-2003 挤扩支盘混凝土灌注桩技术规程. 浙江省标准设计站, 杭州.
- [15] (1999) 北京市标准. DBJ01-502-1999 北京地区大直径灌注桩技术规程.
- [16] 徐至钧, 张晓玲, 张国栋 (2007) 新型桩挤扩支盘灌注桩设计施工与工程应用. 机械工业出版社, 北京.