

# 软土地基挤扩支盘桩基础试验研究

张 琰<sup>1</sup>, 陈 培<sup>1</sup>, 赵贞欣<sup>2</sup>

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 河北省电力勘测设计研究院, 河北 石家庄 050031)

**摘要:** 挤扩支盘桩具有承载力高、沉降小、施工机具简单等优点。针对我国沿海地区软土地基, 开展了挤扩支盘桩的竖向抗压、抗拔和水平静载荷试验, 得到了极限抗压、抗拔和水平承载力。通过试桩的桩身内力测试, 得到桩身轴力的分布规律, 研究了挤扩支盘桩的荷载传递机理和承载性能。试验结果表明, 挤扩支盘桩的竖向承载力比普通直孔桩有较大提高, 具有广阔的应用前景。

**关键词:** 挤扩支盘桩; 软土地基; 静载荷试验; 承载能力

**中图分类号:** TU473.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2013)S2-0994-04

**作者简介:** 张 琰 (1981-), 男, 河北唐山人, 博士, 主要从事电力工程地基基础的研究工作。E-mail: zhangyan2009@gmail.com。

## Experimental study on squeezed branch pile foundation in soft soil ground

ZHANG Yan<sup>1</sup>, CHEN Pei<sup>1</sup>, ZHAO Zhen-xin<sup>2</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. Hebei Electric Power Design & Research Institute, Shijiazhuang 050031, China)

**Abstract:** The squeezed branch pile has the virtues of high bearing capacity, low settlement and simple machinery. With regard to soft soil foundation in the littoral of China, the vertical compressive, vertical pulling and horizontal static load tests are carried out to obtain the ultimate bearing capacity under various working conditions. By testing the internal force of piles, the distribution law of the axial force is obtained, and the load transfer mechanism and bearing capacity are studied. Based on the test results, the squeezed branch pile has obvious advantages in bearing capacity compared with the conventional piles.

**Key words:** squeezed branch pile; soft soil ground; static load test; bearing capacity

## 0 引言

我国沿海地区存在大量软土地基, 由于地基承载力较低, 该类地区使用灌注桩基础, 需要加大桩身直径、增加桩身长度, 这将大大增加钢筋和混凝土用量, 增加工程造价, 在经济方面已不具优越性。

挤扩支盘灌注桩是从普通混凝土灌注桩衍生而来的一种变截面新桩型, 具有多层分散承载的特点。其施工工艺是在普通钻孔灌注桩成孔后, 使用专用的液压挤扩设备在桩身不同深度处好土层挤扩成上下对称的空腔, 然后下钢筋笼浇灌混凝土。由于承力盘增大了桩身的有效承载面积, 并且挤扩时对周围土体有挤密作用, 与普通直孔(等截面)灌注桩相比, 挤扩支盘桩充分利用了好土层的地基承载力, 单桩竖向承载力比普通直孔灌注桩有较大提高, 并具备良好抗水平荷载的能力。

王东坡等<sup>[1]</sup>论述了挤扩支盘桩的成桩机理和荷载传递规律, 总结了挤扩支盘桩的研究现状; 钱德玲探讨了挤扩支盘桩的抗压、抗拔特性和破坏性状<sup>[2-3]</sup>; 高

笑娟等<sup>[4]</sup>分析了挤扩支盘桩的水平承载力计算方法和影响因素。以往研究大多针对挤扩支盘桩某一方面性能展开, 针对挤扩支盘桩在下压、上拔和水平荷载作用下承载性能的系统研究尚不多见。

本文开展了挤扩支盘桩的竖向抗压、抗拔和水平静载荷足尺试验, 对其荷载传递机理、承载性能等方面进行了研究和探讨。

## 1 试验概况

### 1.1 工程地质条件

现场静载试验场地位于华北东部沼泽化滨海平原和滨海滩涂地带, 地势开阔、平坦。

试桩区域场地土层除表层为填土外, 均为海陆相交互沉积形成的淤泥质土、黏性土、粉土、砂类土为主, 地下水位埋深 1.60 m 左右, 年变化幅度不大, 属

表 1 地基土物理力学性质指标

Table 1 Physical-mechanical indexes of ground soils

土层编号与名称	土层厚度/m	含水率 w/%	密度 $\rho/(g\cdot cm^{-3})$	孔隙比 e	直剪(快剪)		压缩模量 $E_s/MPa$	极限侧阻力 $q_{sik}/kPa$	极限端阻力 $q_{pk}/kPa$
					黏聚力 $c/kPa$	内摩擦角 $\phi/(^{\circ})$			
①粉土	2	32.7	1.90	0.902	9.0	13.5	6.12	40	250
②1 淤泥质粉质黏土	4	36.4	1.87	1.000	6.4	4.8	3.50	20	100
②2 淤泥质粉土	4	36.4	1.87	1.000	6.4	4.8	4.07	22	300
③1 粉土	4	30.3	1.93	0.832	9.6	20.5	7.44	40	400
③2 粉质黏土	4	34.0	1.90	0.926	6.0	3.8	3.80	45	450
④粉土	9	24.7	2.00	0.677	8.5	16.0	9.96	70	800

于典型的软土地基。根据岩土工程勘察报告, 场地各土层的主要物理力学性质指标见表 1。

## 1.2 基础设计与试验工况

试验现场共施工了 5 根试验桩, 其中 4 根挤扩支盘桩 (2 个承力盘), 1 根普通直孔灌注桩。试验桩设计桩径均为 700 mm, 承力盘直径 1400 mm, 设计桩长均为 20 m, 露头均为 200 mm。反力桩设计桩径均为 1500 mm, 设计桩长均为 20 m。承力盘位置示意图见图 1, 具体试验工况见表 2。

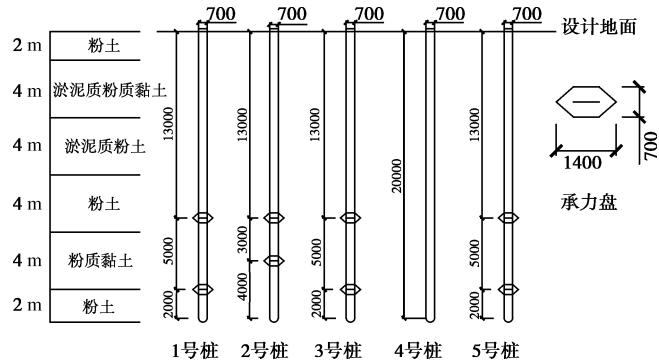


图 1 承力盘位置示意图

Fig. 1 Position of bearing plates

表 2 试验工况

Table 2 Experimental conditions

基础编号	基础类型	极限承载力 预估值/kN	试验工况
#1	挤扩支盘桩 (2 盘)	2890	抗压
#2	挤扩支盘桩 (2 盘)	2090	抗拔
#3	挤扩支盘桩 (2 盘)	2380	抗拔
#4	普通直孔灌注桩	1390	抗拔
#5	挤扩支盘桩 (2 盘)	140	水平

## 1.3 加载系统与测试系统

加载系统分为竖向加载 (抗压和抗拔) 系统和水平加载系统。竖向加载装置主要包括千斤顶、反力钢梁和反力桩, 水平加载装置主要包括千斤顶、连接件和反力桩。

试验采用慢速荷载维持法, 具体加卸载方案、加卸载终止条件和极限承载力的确定方法见相关规范<sup>[5]</sup>。采用 RS-JYC 型桩基静载荷测试分析系统实现自动记录、加载、补载。在试桩桩身主筋上布置振弦式钢筋应力计用于测量荷载作用下主筋的应力变化, 并据此

计算出相应的桩身轴力变化。钢筋应力计布置在不同土层的分界面处。为了研究承力盘承载性能, 本次试验在承力盘上下界面也布置了钢筋应力计。钢筋计具体布置位置如图 2 所示。

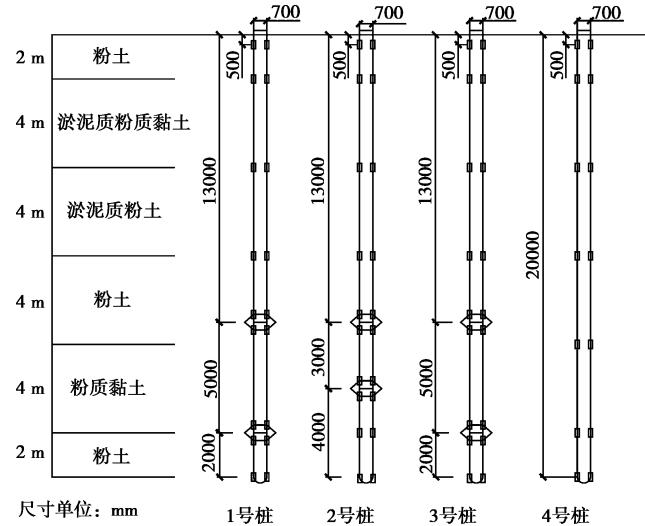


图 2 钢筋应力计布置图

Fig. 2 Layout of steel stress meters

## 2 试验结果分析

### 2.1 基础抗压试验

图 3 为 #1 试桩抗压荷载与竖向位移的关系曲线。由图可知, 荷载 - 位移曲线呈缓变型, 取沉降量  $s = 40$  mm 对应的荷载值作为抗压极限承载力, 约为 3600 kN, 比预估值提高了约 25%。由于承力盘的存在, 使得挤扩支盘桩受下压荷载时具有端承桩的力学特点, 荷载 - 位移曲线呈缓变型, 具有较大的抗压承载潜能。

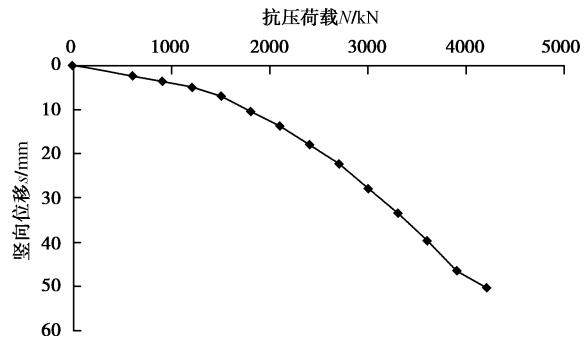


图 3 #1 试桩的抗压荷载与竖向位移关系曲线

Fig. 3 Compressive load-displacement curve of pile No. 1

## 2.2 基础抗拔试验

图 4 为<sup>#2</sup>、<sup>#3</sup> 和<sup>#4</sup> 试桩抗拔荷载与竖向位移的关系曲线。由图可知, <sup>#2</sup>、<sup>#3</sup> 和<sup>#4</sup> 试桩的荷载 - 位移曲线均呈陡变型, 取曲线陡变起始点对应的荷载值作为极限承载力, <sup>#2</sup>、<sup>#3</sup> 和<sup>#4</sup> 试桩抗拔极限承载力分别为 2200, 2400 和 1980 kN。

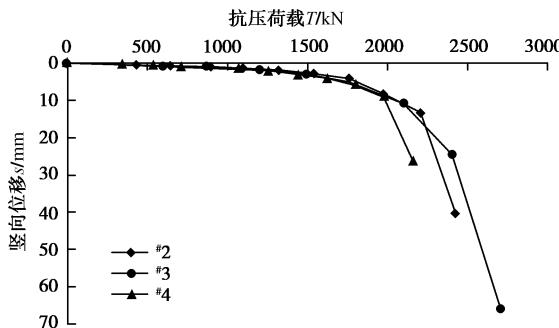


图 4 <sup>#2</sup>、<sup>#3</sup> 和<sup>#4</sup> 试桩的抗拔荷载与竖向位移关系曲线

Fig. 4 Uplift load-displacement curves of piles No. 2~4

由试验结果可知, <sup>#2</sup>、<sup>#3</sup> 试桩的抗拔极限承载力与预估值较为接近, <sup>#4</sup> 试桩的抗拔极限承载力比预估值提高了约 42%。<sup>#2</sup>、<sup>#3</sup> 试桩为挤扩支盘桩, <sup>#4</sup> 试桩为直孔灌注桩, <sup>#2</sup>、<sup>#3</sup> 试桩的抗拔极限承载力试验值比<sup>#4</sup> 试桩分别提高了约 11% 和 21%。

## 2.3 水平荷载试验

图 5 为<sup>#5</sup> 试桩水平荷载与水平位移的关系曲线。<sup>#5</sup> 试桩地面处桩身水平位移 10 mm 时对应的承载力值为 275 kN, 远大于水平承载力预估值, 说明该桩具有良好的抗水平荷载性能。

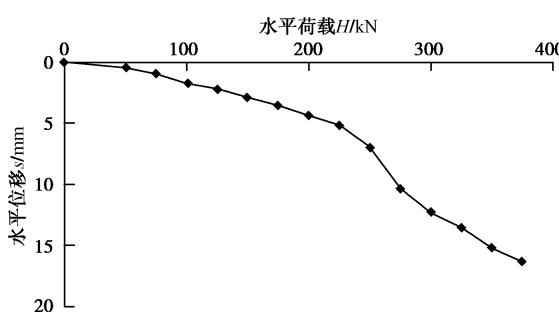


图 5 <sup>#5</sup> 试桩的水平荷载与水平位移关系曲线

Fig. 5 Horizontal load-displacement curve of pile No. 5

## 3 荷载传递机理研究

挤扩支盘桩属于部分挤土灌注桩, 不仅加大了桩侧、桩端承载面积, 同时还对承力盘上下的桩周土进行了挤密加固, 减小了土的压缩性, 提高了地基土的压缩模量, 其物理力学性质高于原状土。普通直孔灌注桩与挤扩支盘桩的荷载传递示意图如图 6 所示。

### 3.1 轴力传递规律

根据钢筋应力计的测试结果, 得出<sup>#1</sup> 试桩抗压试验各级荷载作用下桩身轴力的分布情况如图 7 所示。

由图 7 可知, 桩身轴力在承力盘上下发生突变(图中虚线框所示), 轴力明显降低。下压荷载达到 3600 kN 时, 上盘轴力降低约 658 kN, 下盘轴力降低约 570 kN。这部分轴力由承力盘承担, 并传递到盘底部的土层上。这是挤扩支盘桩荷载传递的特点, 也是挤扩支盘桩承载力相对较高的原因所在。

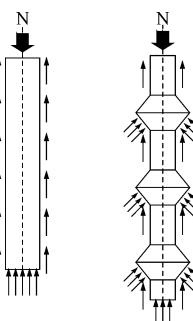


图 6 直孔灌注桩与挤扩支盘桩荷载传递示意图

Fig. 6 Sketch of load transfer mechanism of conventional pile and squeezed branch pile

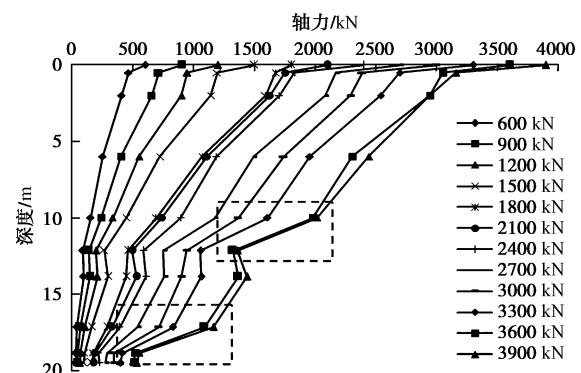


图 7 <sup>#1</sup> 试桩桩身轴力分布图

Fig. 7 Distribution curves of axial force of pile shaft No. 1

### 3.2 承力盘端承力传递规律

承力盘端承力是挤扩支盘桩承载力的主要组成部分。由于支盘上、下表面均为斜面, 当支盘桩承受下压荷载时, 支盘上表面处桩、土分离, 摩阻力降低, 而其底部的土体则既表现出端阻力的抗压缩性质, 又表现出摩阻力的抗剪切性质。

<sup>#1</sup> 试桩在下压荷载作用下, 各承力盘端承力随荷载变化关系如图 8 所示。由图可知, 总荷载小于 2000 kN 阶段, 桩体上部位移较大, 上部支盘先受力, 其端承力增加较快, 下盘端承力缓慢增长; 总荷载在 2000~3000 kN 阶段, 上盘端承力增加变缓, 下盘端承力增加较快; 当总荷载超过 3000 kN 以后, 上下两盘端承力均增加较快; 当总荷载达到极限荷载 3600 kN 时, 上下两盘的端承力分别为 658 和 570 kN, 分别占总荷载的 18.3% 和 15.8%, 共占总荷载的 34.1%。可见, 挤扩支盘桩荷载传递具有明显的顺序效应, 支盘按由上到下顺序发挥端承力。

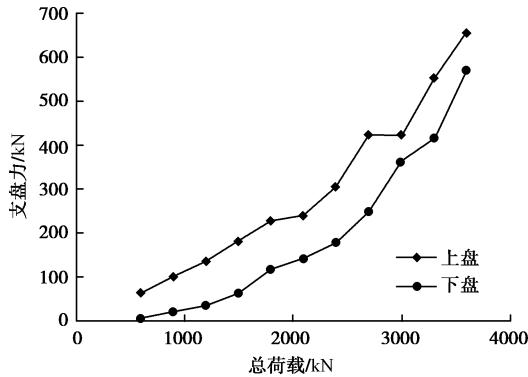


图 8 #1 试桩支盘端承力与总荷载关系曲线

Fig. 8 Load-bottom bearing curves of pile No. 1

### 3.3 桩侧摩阻力传递规律

桩侧摩阻力也是挤扩支盘桩承载力的重要组成部分。当挤扩支盘桩开始承受荷载时, 桩、土间有产生相对位移的趋势, 侧摩阻力开始发挥。桩侧摩阻力先于承力盘端承力发挥作用, 并随着桩、土相对位移的增加而增大。当某承力盘端承力不再增加时, 该盘下的桩侧摩阻力可以继续增大, 承力盘端承力与侧摩阻力之间存在着一定的互补关系。由于桩、土间产生相对位移, 受压桩承力盘上方的土体处于脱空状态, 使盘上一定范围内桩侧摩阻力下降。

桩侧摩阻力的大小与桩侧土的物理性质及承力盘间距有着重要的关系。承力盘间距较小时, 相邻盘间的土体存在应力叠加问题。由于盘间距过小, 上盘对盘间土体产生附加应力, 造成盘间土体的附加沉降, 因而抵消了一部分甚至完全抵消了盘间的侧摩阻力, 致使桩侧摩阻力明显降低, 同时也影响了各承力盘的端承力效果。

本次试验#1 试桩在下压荷载作用下, 两支盘总端承力约占总荷载的 34.1%, 桩底端承力约占总荷载的 12.8%, 侧摩阻力约占总荷载的 53.1%, 可见, 侧摩阻力仍是挤扩支盘桩承载力的重要组成部分。

## 4 结语

根据软土地基工程的建设需求, 开展了挤扩支盘

桩的竖向抗压、抗拔和水平静载荷现场足尺试验, 得到了相应的极限承载力, 研究了挤扩支盘桩的荷载传递机理和承载性能。试验结果表明, 挤扩支盘桩的竖向承载力比普通直孔桩有较大提高, 具有广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 王东坡, 钱德玲. 挤扩支盘桩的荷载传递规律及研究现状[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增刊 1): 4645 - 4648. (WANG Dong-po, QIAN De-ling. Law of load transmission of squeezed branch piles and its research advances[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S1): 4645 - 4648. (in Chinese))
- [2] 钱德玲. 支盘桩抗压和抗拔特性的研究[J]. 岩土力学, 2003, 22(3): 517 - 520. (QIAN De-ling. A study of compression and extraction resistance behavior of squeezed supporting disk piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 22(3): 517 - 520. (in Chinese))
- [3] 钱德玲. 对挤扩支盘桩破坏性状的探讨[J]. 合肥工业大学学报, 2001, 24(5): 955 - 958. (QIAN De-ling. On the failure behavior of squeezed branch pile[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2001, 24(5): 955 - 958. (in Chinese))
- [4] 高笑娟, 刘丰军, 李跃辉, 等. 挤扩支盘桩水平承载力计算和影响因素分析[J]. 工程力学, 2009, 26(7): 97 - 104. (GAO Xiao-juan, LIU Feng-jun, LI Yue-hui, et al. Calculation and influence factor analysis on lateral bearing capacity of squeezed branch and plate pile[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(7): 97 - 104. (in Chinese))
- [5] JGJ106—2003 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. (JGJ106—2003 Technical code for testing of building foundation piles[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003. (in Chinese))