

文章编号: 1000-7598-(2004) 11-1809-05

模型支盘桩的试验研究

卢成原, 孟凡丽, 王 龙

(浙江工业大学 建工学院, 浙江 杭州 310032)

摘 要: 设计了一个室内模型试验装置, 来研究支盘桩的承载和变形性能以及影响因素。通过其与等直径模型桩的对比试验, 证明了支盘桩在承载能力和抗沉降变形上的优越性, 证实了由于盘顶临空面的存在使盘顶一定范围的土体对桩的侧阻很小, 另外, 盘底土体由于与盘一起产生变形, 在紧邻盘底的位置甚至可能产生负摩擦作用, 因此在盘距较小时两盘之间的土体对桩的侧阻几乎可以忽略, 设计时应给予充分重视。

关 键 词: 支盘桩; 模型试验; 挤密效应; 临空面

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

Test study of model piles with branches and plates

LU Cheng-yuan, MENG fan-li, WANG long

(College of Architecture & Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: A model test equipment had designed to go into bearing property and other influence factors about the piles with branches and plates. In contrast to the equivalent-diameter mode pile, it can be proved that there are many advantages about pile with branches and plates in bearing property and anti-settlement deformation. The test also proves that soil above the plates in some ranges gets a little side-resistance due to the existing of air face between plates and soil. In addition, because the soil under plates bring deformation together with the plates, there will be negative friction close to the bottom of plates. So it can be ignored that the side-resistance of the soil between two plates with small plate-distance against the piles. We should make great attention about it.

Key word: piles with branches and plates; model test; compaction effect; air face

1 引 言

挤扩支盘桩由于其承载力高, 沉降变形小, 已越来越受到业内人士的重视, 在国内的应用实例也越来越多^[1, 2]。但由于缺乏对该桩型的工作机理的更深刻的认识, 目前还没有相应的国家标准, 因此, 有必要对支盘桩的工作性状作深入地研究。现有的有关挤扩支盘桩的研究报道, 多以工程现场实物的试验研究为主^[3], 其优点是能较正确的反映桩的实际工程性状, 具有较强的可信度, 缺点是试验成本高, 工作条件差, 只能根据实际进行研究, 不能很好地根据研究者的设想进行有针对性的研究, 由于试验不能重复, 一个试验只能反映某一特定条件下该桩的工作情况, 研究结果不具备代表性, 也很难得出有规律性的结论, 而且, 支盘桩的承载和变形

性能的影响因素很多, 要通过现场试验进行系统研究有较大的困难。另外一些数值模拟方法^[4, 5]也只是在给定条件下的辅助研究。

室内模型试验不失为一种有效的研究方法, 虽然模型试验与实际情况存在着相似性的问题, 但通过室内的定性的研究, 可得到一些局部、相对和有规律性的结论, 这些结论对支盘桩的研究有一定的意义。

2 试验准备

2.1 试验桩模型制作及电阻应变片粘贴

本次试验中制作了混凝土支盘桩和普通等直径桩的模型, 桩径为 50 mm, 桩长 580 mm, 盘直径为 120 mm, 盘高 50 mm, 模型示意图及应变片的粘贴位置见图 1。为了使应变的量测结果可靠, 制

收稿日期: 2003-12-18

修改稿收到日期: 2004-05-21

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (No. 502117) 资助。

作者简介: 卢成原, 男, 1964 年生, 副教授, 长期从事土木工程专业教学和科研工作, 目前主要进行支盘桩的理论研究和开发工作。

E-mail: zgdlucy@hotmail.com

作模型桩的混凝土骨料粒径控制在 8 mm 以下。

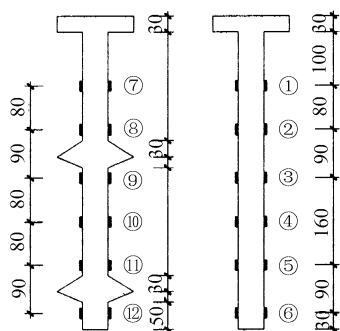


图 1 模型桩及应变片示意图 (单位: mm)

Fig.1 Sketch of model pile and strain gauges (unit: mm)

2.2 试验装置制作

整个试验装置如图 2 所示。



图 2 试验装置

Fig.2 Sketch of test set

试验用土样取自杭州下沙高教园区施工现场的原状粉质粘土。为了制作土层设计了直径为 600 mm, 高 600 mm 的铁桶, 中间可分开, 土层制作时分层夯实, 为了模拟钻孔, 在土中相应位置预埋 2 根圆管, 土层制作完成后拔出圆管, 并沿中间位置将土层锯成两半后把铁桶移开, 在相应位置埋入模型支盘桩和等直径桩, 然后用压力将铁桶合拢并用螺栓拧紧复位, 在此过程中支盘桩设盘的位置挤压土层, 虽然盘挤压土体时在盘上下有少量土掉落, 但在试验完成后重新挖开土体没有发现明显的空腔, 这与泥浆护壁扩成盘孔然后浇捣混凝土成盘的实际情况比较接近 (工程中扩孔时对盘上下的土体实际上也有扰动甚至使部分土体脱落)。

由于模型桩的比例较小, 承载力也比较小, 所以该模型试验的加载设备采用简单易操作的杠杆直接加载, 载荷采用等重砝码, 在每级加载后荷载大小保持不变。在桩顶固定 2 个百分表量测模型桩的沉降变形量, 每级加载后按规范的规定时间间隔记录百分表读数, 待基本稳定再加下一级荷载。

3 模型桩试验内容、方法和试验结果

3.1 试验内容和方法

本试验内容包括: ①两种模型桩的承载力和变形对比试验; ②荷载传递特性试验; ③支盘桩的工作性状试验研究, 包括盘对周围土体的挤密效应, 盘顶的临空面, 盘底土体的负摩擦等问题。

试验先后对 2 个模型桩进行分级加载, 载荷为等重砝码, 通过调节杠杆的力臂比例确定加荷大小, 对于等直径桩每级加载 0.2 kN, 支盘桩每级加载 0.3 kN, 满足终止加载条件停止加载。然后挖开土层取土样进行室内土工试验, 并观察桩受荷后桩周土体的变化。

3.2 等直径桩加载试验结果

等直径桩加载试验得到的 $Q-s$ 曲线和 $s-\lg t$ 曲线如图 3, 4, 由这些曲线可判断桩的极限承载力为 1.0 kN。另外, 根据电阻应变仪在不同荷载下所采集到的数据可绘制荷载-应变曲线, 如图 5 所示。

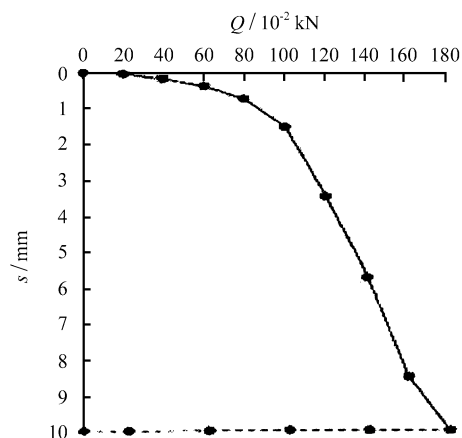


图 3 等直径桩 $Q-s$ 曲线

Fig.3 The $Q-s$ curves of the column pile

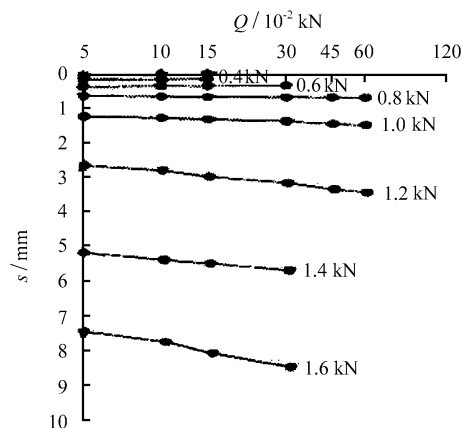


图 4 等直径桩 $s-\lg t$ 曲线

Fig.4 The $s-\lg t$ curves of the column pile

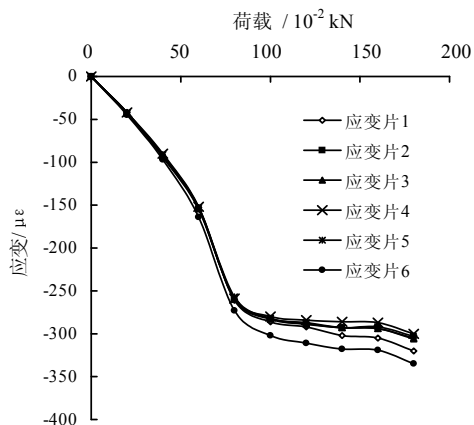


图 5 等直径桩荷载-应变曲线

Fig. 5 The load-strain curves of the column-pile

3.3 双支盘桩加载试验结果

对双支盘模型桩加载试验得到的 $Q-s$ 曲线和 $s-\lg t$ 曲线如图 7 和图 8。由于 $Q-s$ 曲线中没有明显的拐点, 由 $s-\lg t$ 曲线可判断该桩的极限承载力为 3.0 kN。另外, 根据电阻应变仪采集到的数据可绘制荷载-应变曲线, 如图 6 所示 (⑨号应变片试验开始后失效, 因此没有结果)。

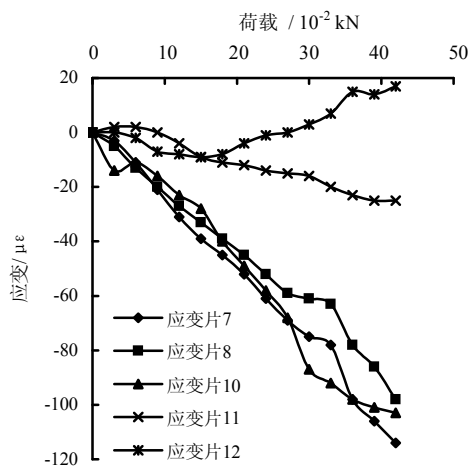


图 6 支盘桩荷载-应变曲线

Fig.6 The load-strain curves of the branches-pile

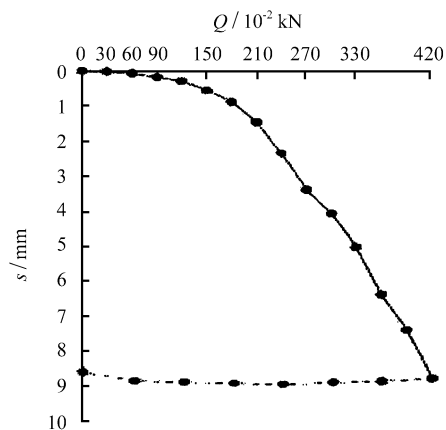
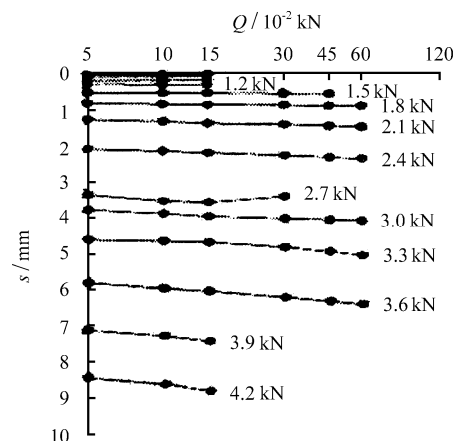
3.4 土层开挖

试验完成后, 在紧邻模型支盘桩上、下盘边两侧位置 (分别用土样①, ②表示) 以及在上、下盘等高但在离盘中心水平距离两侧各 300 mm 处位置 (分别用土样③, ④表示) 各取 2 个土样进行室内土工实验, 得到不同位置土的物理性质和各项力学指标的平均值见表 1。

表 1 对比试验土的物理力学性质指标

Table 1 Physico-mechanical property indexes of tested soils

土样	含水率 $\omega/\%$	干密度 $\rho_d / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	土粒比重 d_s	孔隙比 e	压缩系数 a / MPa	压缩模量 E_s / MPa	塑限指数 $I_p / \%$
①	28.67	1.40	2.73	0.923	0.173	11.13	10.1
②	28.38	1.42	2.73	0.920	0.170	11.15	10.1
③	29.87	1.28	2.73	1.038	0.233	8.75	10.1
④	29.83	1.29	2.73	1.024	0.223	8.80	10.1

图 7 支盘桩 $Q-s$ 曲线Fig.7 The $Q-s$ curves of the branches-pile图 8 支盘桩 $s-\lg t$ 曲线Fig.8 The $s-\lg t$ curves of the branches-pile

土层的开挖从试验桩的一侧进行, 卸开铁桶后可以清楚的看到支盘桩受力后盘顶土体出现的临空面^[1], 见图 9。



图 9 盘顶土体的临空面

Fig.9 The air face of the soil above the plate

4 试验结果分析

4.1 两种模型桩的承载力和变形性能的比较

根据《建筑桩基技术规范》^[6] 的承载力判别方法, 从 2 个模型桩的 $Q-s$ 和 $s-lgt$ 曲线可以确定等直径桩的承载力为 1.0 kN, 支盘桩的承载力为 3.0 kN, 后者为前者的 3 倍, 可见支盘桩的承载力得到大大提高, 而混凝土用量后者只比前者多约 15%, 说明其经济效益十分显著。

另外从图 10 中可以看出, 支盘桩的抗沉降变形性能远远好于等直径桩, 例如在加载到 1.0 kN 时, 等直径桩的沉降约为 1.5 mm, 而支盘桩的沉降只有约 0.3 mm, 是等直径桩的 1/5; 在其极限承载力 3.0 kN 时的沉降量也只有约 4 mm, 如此好的抗变形性能主要得益于支盘作用于土体压力的斜向扩散, 有更大范围的土体来分担桩传来的压力, 使桩周土体的应力强度降低, 土的压缩变形减小, 而等直径桩的荷载主要传递给桩端及桩侧附近较小范围的土体, 其变形由桩端压缩变形和桩侧土的剪切变形产生。

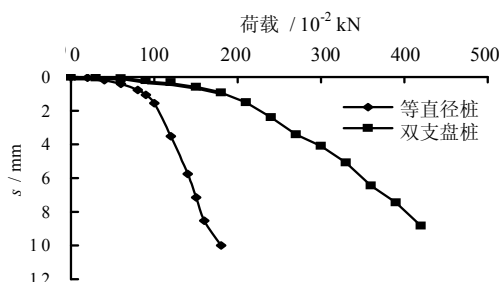


图 10 双盘桩和等直径桩 $Q-s$ 曲线比较
Fig.10 The comparison of the $Q-s$ curves between the two piles

4.2 摩擦侧阻的发挥以及对承载力的贡献

(1) 由于本次试验的模型尺寸较小, 其极限承载力也很小, 而模型桩的混凝土是按 C20 设计的, 3.0 kN 的压力只相当于桩身承载力的约 10%, 因此, 实际上由于桩身压力在模型桩截面上产生的应变是微乎其微的(理论计算约为 $60\mu\epsilon$), 即如果 3.0 kN 的荷载全部作用的桩身截面上, 理论上只能产生约 $60\mu\epsilon$, 该值比本文的实测值小得多, 所以贴在桩身表面的应变片所反映的应变值不能完全反映桩截面上的应力大小, 而主要反映了桩侧土对桩表面(或者说是对应变片)产生的摩擦作用引起的桩表面的变形, 即桩身同一截面上应力分布是不均匀的, 在桩表面和桩截面中间存在较大的应变梯度。

(2) 对于等直径桩, 当达到极限承载力(1.0 kN)以前, 桩身各测点的应变几乎相同, 而且应变的增量与荷载的增加几乎成线性关系, 说明作用在桩身侧面单位面积上的摩擦力几乎相等(实际上在不同高度桩截面上由于荷载传递而产生的应力变化对桩身的应变变化很小, 可以忽略)。

(3) 对于双盘桩的荷载-应变曲线, ① 应变片 7 由于离土层表面较近, 其表现的应以桩身压应力引起的应变为主, 应变的增加与荷载成线性关系, 应变片 8 的应变始终比应变片 7 小。实际上, 如果此处不是处在上盘顶的临空面处, 参照等直径桩的图 5, 两者应该还是比较接近的, 应变片 8 的应变减小主要是由于临空面的存在使该处土体对桩的摩擦作用减小所致; ② 应变片 10 的应变最大主要是由于此处是在上下两盘的中间, 土体对桩身的摩擦作用是最显著的位置, 如果从桩截面应力分析, 由于上盘荷载的传递此处的应力比应变片 7 位置小得多; ③ 下盘顶的应变片 11 的应变要比 10 小得多, 主要是因为此处又处在盘顶的临空面处, 土体对桩身的摩擦作用很小, 另外与应变片 7, 8 相比由于上盘的荷载传递使此处桩身应力减小也是原因之一; ④ 下盘底应变片 12 的应变在开始时表现为受压, 当荷载增加到 1.5 kN 以后表现为受拉, 似乎表明该位置土体作用在桩身表面表现为负摩擦, 这在理论上分析几乎不可能, 是否是由于试验误差所致还有待于进一步的研究, 但至少说明该处土对桩身的摩擦作用很小。

(4) 比较两种不同桩型的桩测应变值可以发现, 等直径桩的土体摩擦作用比支盘桩大得多, 就本试验而言在 10 倍以上。本试验中 2 个盘把桩侧土层分割成 3 段, 盘底的 2 段土层在盘底压力作用下与盘一起向下变形, 使土体与桩身的相对变形减小, 导致摩擦作用大大减小, 而盘顶位置随着压力的增大会出现临空面, 失去了对土体的支撑, 使摩擦作用减小, 理论上临空面处摩擦为零。如果盘的间距越小, 摩擦作用也越小, 同时, 由于盘间土体对盘的支撑能力降低也会减小盘的承载力, 因此保证盘的间距是保证支盘桩承载力的关键。显然, 目前许多地方及企业的支盘桩设计规程中还是采用等直径桩的方法来计算支盘桩的侧阻力是不符合实际的。

4.3 支盘桩的挤密效应

由于该试验是先在铁桶中预埋圆管分层堆土均匀夯实, 可以认为在同一高度的土体性质均匀, 土层制作完成后切开土层放入预制模型桩, 通过推压并用螺栓拧紧使土体复位, 使得模型支盘桩的盘挤

压土体, 产生了挤密效应, 从土工实验得到的结果充分证明了这一点。从表 1 的实验结果看到, 上盘边和下盘边的土体的干密度比同一水平高度离盘较远的位置的干密度分别提高 9.4 % 和 10.1 %, 压缩模量分别提高 27.2 % 和 26.7 %, 说明通过盘对土体的挤压作用使土体的物理性质有较好的改善, 这对提高土体的承载力有重要意义。

5 结 语

模型桩的室内试验可以很好的反映不同桩型的承载和变形性能, 在一定程度上可以模拟实际工程桩进行相关的研究工作, 对于挤扩支盘桩这种受力较复杂, 工程性状的影响因素较多, 要通过现场试验总结有关规律有相当困难的桩型, 进行模型桩的室内试验是一个比较理想的方法。

本试验中的模型桩是先在钢模具中预制好而后埋入土层中的, 虽然通过螺栓作用使土与桩之间连接紧密, 但由于桩土间存在明显的分界, 不能很好的比拟钻孔桩桩土连接面的粗糙程度, 因此侧阻提供的承载力可能偏小。另外, 由于试验装置的铁桶直径偏小, 在桶内埋设 2 个模型桩进行试验, 可能存在一定的相互作用和边界效应的影响, 这些有待于进一步改进。

通过本模型桩的室内试验得到如下结论:

(1) 支盘桩的单位体积承载力要远远高于等直径桩; 同时 2 个直径相同的等直径桩和支盘桩相比, 相同荷载作用下支盘桩的沉降变形要小得多, 对于对沉降变形有严格要求的建筑物和构筑物, 支盘桩是理想的桩型。

(2) 2 个桩的荷载-应变曲线反映了模型桩的摩擦力的大小及对桩承载力的贡献, 对于多支盘桩的承载力主要由盘底及桩端的端阻提供, 由于盘顶的临空面的存在和盘底土体与盘一起产生变形, 导致摩擦侧阻不能有效发挥, 盘间距的大小是影响侧阻和盘底承载力的关键, 因此在支盘桩设计计算时应充分考虑到这一点。

(3) 支盘桩在挤扩成盘时对土体的挤密作用效果明显, 本试验表明, 由于模型支盘桩对相邻土体

的挤密作用, 使盘周土的干密度提高 9 % 以上, 压缩模量提高 26 % 以上, 这种挤密效应对提高支盘桩的承载力有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 孟凡丽, 卢成原, 寿铁军. 挤扩支盘桩的工程实践及承载性能探讨[J]. 浙江工业大学学报, 2003, 31(6): 673—678.
MENG Fan-li, LU Cheng-yuan, SHOU Tie-jun. Research on bearing property and engineering application of cast-in-place piles with branches and plates[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*. 2003, 31(6): 673—678.
- [2] 张畅. 支盘灌注桩应用效果的调查分析与研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊): 572—574.
ZHANG Chang. Investigation analysis and research on application effect of cast-in-place pile with branches and plates[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(supp.): 572—574.
- [3] 钱德玲. 支盘桩抗压和抗拔特性德研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊): 517—520.
QIAN De-ling. A study of compression and extraction resistance behavior of squeezed supporting disk pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(supp.): 517—520.
- [4] 钱德玲. 挤扩支盘桩的荷载传递规律及 FEM 模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 371—375.
QIAN De-ling. Study on loading transfer law and FEM simulation of squeezed branch piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(3): 371—375.
- [5] 张玉敏, 王忠海. 新型挤扩支盘桩的非线性有限元分析[J]. 山东工业大学学报, 2002, 32(1): 76—80.
ZHANG Yu-min, WANG Zhong-hai. Nonlinear FEM analysis of character of the new compaction piles with expanded plates[J]. *Journal of Shandong University of Technology*, 2002, 32(1): 76—80.
- [6] JG94—94, 建筑桩基技术规范[S].