

非饱和粉质粘土模型支盘桩试验研究

Test of model piles with branches and plates in unsaturated silty clay

卢成原, 孟凡丽, 王章杰, 周奇辉
(浙江工业大学 建工学院, 浙江 杭州 310032)

摘要: 根据挤扩支盘桩的实际工作性状, 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, 通过与等直径模型桩的对比试验表明支盘桩的承载力远远高于等直径桩, 而沉降变形则要小得多。试验还证实盘底土体的侧阻对桩的承载力贡献很小, 在紧邻盘底的位置甚至可能产生负摩擦作用, 设计时应给予充分重视。另外, 根据土工试验表明, 通过盘的挤扩作用使其周围土体产生较明显的挤密作用, 这种挤密效应对桩的承载力的提高有积极作用。最后提出了一个支盘桩承载力计算公式。

关键词: 支盘桩; 模型试验; 承载力; 变形; 荷载传递; 挤密效应

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)04-0522-04

作者简介: 卢成原(1964-), 男, 副教授, 同济大学研究生毕业, 硕士, 主要从事结构工程和基础工程的教学和研究工作。

LU Cheng-yuan, MENG Fan-li, WANG Zhang-jie, ZHOU Qi-hui

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

Abstract: According to the actual behaviour of the piles with branches and plates, a model test equipment had been designed to study bearing property and other influence factors of the piles with branches and plates. In contrast to the model with equivalent-diameter pile, it can be seen that the bearing capacity of the pile with branches and plates is much higher than that of the piles with equivalent-diameter, while its settlement is much lower. The test also proves that the soil under the plates make a little contribution to the bearing capacity of the piles. On the contrary, there will be negative friction close to the bottom of the plates. Great attention should be paid to this phenomenon. In addition, according to the laboratory soil test, it is proved that the compaction effect of soil is obviously extended through the plates, and it has an active effect to improve the bearing capacity of the piles. A formula to calculate the bearing capacity of the piles with branches and plates is advanced at last.

Key words: piles with branches and plates; model test; bearing capacity; deformation; load transfer; compaction effect

0 前言*

挤扩支盘桩是近几年在我国发展起来的新桩型, 通过在桩穿越的各硬土层设置承力盘和分支的方法将传统的等截面灌注桩改变成多个端承面的摩擦端承桩, 充分提高了桩的端承能力。通过多项工程实践证明, 与同样直径的普通灌注桩相比, 每立方米砼完成的承载力可以提高 50% 以上, 同时其沉降变形大大减小。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。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, 而且一个试验只能反映某一特定条件下(如特定的土层性质, 特定的施工条件等)该桩的工作情况, 研究得到的某些结果不具备代表性, 而且支盘桩的承载和变形性能的影响因素很多, 要完全通过现场试验进行系统研究有较大的困难。因此通过室内模型试验进行研究不失为一种很好的补充研究方法, 它可以根据各种不同的情况设计有针对性的试验研究方法, 得到一些有规律性的结论, 并且其研究工作不受环境条件影响, 试验易做, 成本低。本文就是在此背景下开展的工作。

1 支盘桩模型试验研究概况

1.1 支盘桩模型制作

结合挤扩支盘桩在工程应用中的实际, 以约 1:10 的比例制作了砼支盘桩和普通等直径桩的模型, 桩身直径 50 mm, 盘直径 120 mm, 在对比试验中分别沿模型桩桩身粘贴应变片, 如图 1 所示位置, 桥路连接见图 2。

1.2 试验土样及土层制作

在杭州下沙高教园区施工现场取得粉质粘土土样, 为了制作土层设计了直径 600 mm, 高 600 mm 的铁桶, 中间可分开, 土层制作时分层夯实, 为了模拟钻孔先在土中相应位置预埋两根圆管, 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拉开, 在相应位置埋入模型支盘桩和等直径桩, 然后将铁桶合拢并用螺丝拧紧复位, 在此过程中支盘桩设盘的位置挤压土层, 比较真实地模拟了挤扩成盘时盘对土体的挤压作用。为了研究使土体产生挤密作用后对支盘桩的承载力的影响, 还采用预埋模型支盘桩(非挤密土体)的方法对

* 基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(502117)

收稿日期: 2003-07-20

其进行承载力试验。以上两个试验中在桩端以下约15 mm处分别埋置了压力盒,以观察桩端压力的变化,由于试验时等直径桩端的压力盒损坏而没有读数。等直径桩和支盘桩的对比试验装置如图3所示。

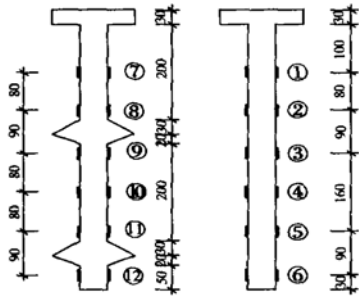


图1 模型桩及应变片示意图

Fig.1 Model pile and strain gauges

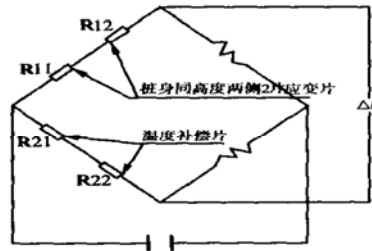


图2 应变片桥路示意图

Fig.2 Sketch of bridge way for strain gauges

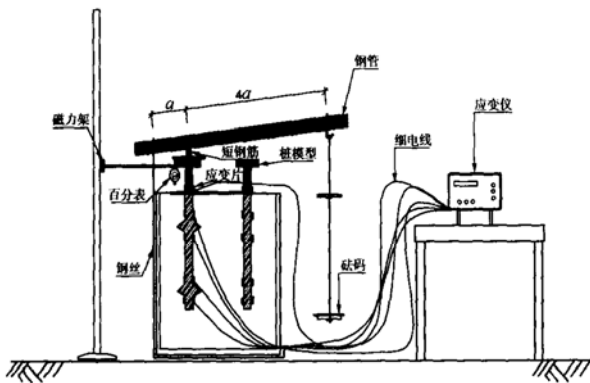


图3 试验装置示意图

Fig.3 Sketch of test set

2 试验内容及试验成果

2.1 等直径桩和双盘桩对比加载试验

在本试验中先后对等直径桩、挤密土体双支盘桩以及非挤密土体双支盘桩进行了逐级加载,由于初估挤密土体双支盘桩的承载力较高,限于加载条件,挤密土体双支盘桩加载等级为0.3 kN(增大杠杆力臂比例),其余两个桩的加载等级为0.2 kN,得到的 $Q-s$ 曲线如图4所示(为了制图方便把挤密土体双支盘桩的变形换算成每级0.2 kN),由这些曲线结合 $s-\log t$ 曲线(限于篇幅本文略去)参照《建筑桩基技术规范》

JCJ94—94^[1]的承载力判别标准可判断等直径桩的极限承载力为1.0 kN,挤密土双盘桩的极限承载力为3.0 kN,非挤密土双支盘桩的极限承载力为2.6 kN。

根据电阻应变仪在不同荷载下所采集到的数据分别绘制两个桩侧表面的荷载—应变曲线,如图5、6所示(应变片⑨试验时损坏没有测得数据)。由此可分析桩侧受到土体摩擦作用的程度。

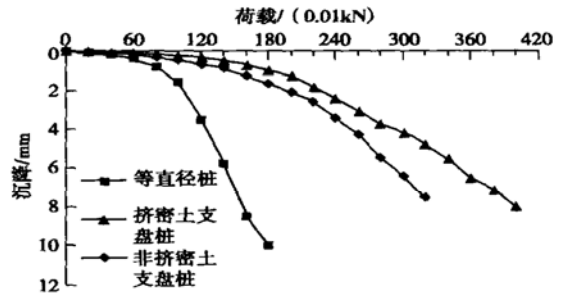


图4 三种试验桩的 $Q-s$ 曲线

Fig.4 The $Q-s$ curves of three test piles

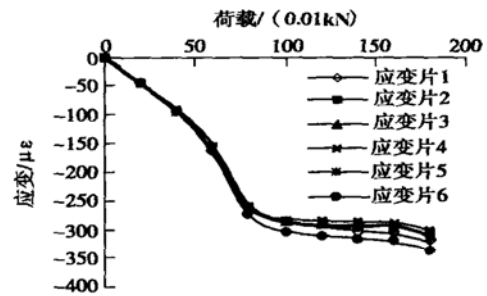


图5 等直径桩荷载—应变曲线

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

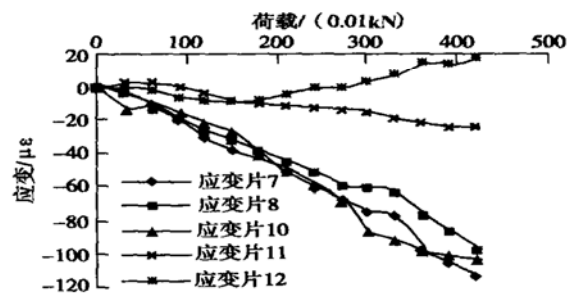


图6 支盘桩荷载—应变曲线

Fig.6 The load-strain curves of the pile with plates

2.2 挤密和非挤密土体双支盘桩对比加载试验

对非挤密土体双支盘桩加载试验得到的 $Q-s$ 曲线见图4,测得的桩端压力盒应力变化曲线见图7。

2.3 土样物理性质实验

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)各取两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。

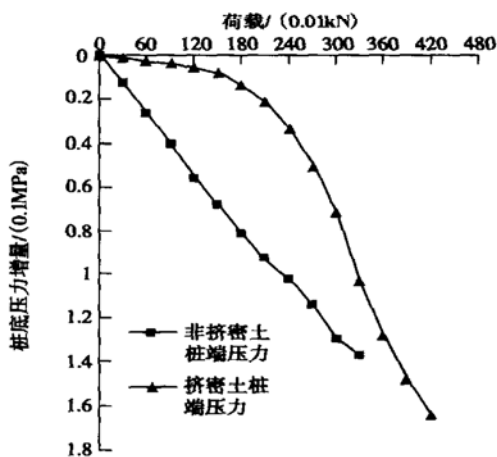


图7 挤密和非挤密土体支盘桩桩端压力变化曲线

Fig. 7 The toe pressure curves of piles with branches and plates in compacted soil and uncompacted soil

表1 对比试验土的物理力学性质指标

Table 1 The physical index of test soils

土样	w /%	γ_d /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	e	a_v / MPa^{-1}	E_s / MPa	I_p /%
①	28.67	14.0	0.923	0.173	11.13	10.1
②	28.38	14.2	0.920	0.170	11.15	10.1
③	29.87	12.8	1.038	0.233	8.75	10.1
④	29.83	12.9	1.024	0.223	8.80	10.1

3 试验结果分析与讨论

3.1 等直径桩与双盘桩的承载力和变形性能的比较

(1) 根据试验结果, 等直径桩的承载力为 1.0 kN, 双盘桩的承载力为 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, 而砼用量后者只比前者多约 15%, 说明其经济效益十分显著。

(2) 从图 4 中可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, 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。

3.2 荷载-应变曲线的分析

(1) 两个桩的荷载-应变曲线也较好地反映了模型桩的荷载传递规律, 对于等直径桩, 当荷载加到 0.8 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, 说明桩侧的摩擦阻力随着荷载的增加均匀地得到发挥, 当荷载达到其极限承载力(1.0 kN)以后, 桩侧的应变几乎没有增加, 这说明摩擦阻力已达到极限, 因此该桩的端阻在桩的总承载力中的贡献很小, 是典型的端承摩擦桩。以上

结果与工程桩显然有差别, 原因是由于模型桩桩侧与土接触面比较光滑, 导致摩擦作用减小(也是承载力比双盘桩低得多的原因之一), 而由于摩擦作用在桩身不同截面引起的应力和应变变化几乎可以忽略。

(2) 在双盘桩的荷载-应变曲线上, 桩顶荷载较大的情况下桩侧各测点的应变值均比等直径桩小得多, 这并不表示桩身的应力小, 只是说明支盘桩由于盘的存在使得桩周土体对桩侧表面的摩擦作用大大减小。究其原因: 一方面因为盘的存在把桩侧土体分割成若干段, 并且由于盘的向下变形在盘顶位置形成临空面, 使底盘以上各段土体失去向上的支撑, 减小了其对桩侧的摩擦力; 另一方面盘底土体与盘一起向下产生压缩变形, 也使摩擦作用减小, 特别是临近盘底的土体对桩不能形成摩擦作用, 甚至会产生负摩擦, 应变片 12 的应变变化就说明了这一点。

(3) 根据上述分析, 在两盘之间的应变片 9、10、11 的应变由于 10 号应变片离上、下盘最远, 受土体的摩擦作用最大, 其应变最大(与等直径桩相比还是很小)。虽然没能测出 9 号应变片处的应变, 由于 9 号应变片紧邻上盘底, 此处的土体摩擦作用应该很小, 甚至可能为负摩擦(类似应变片 12)。而应变片 11 处在临空面位置, 由于土体失去向上的支撑, 故摩擦作用很小。

综上所述, 等直径桩的荷载传递以桩侧摩擦力为主, 支盘桩的荷载传递显然以支、盘为主, 桩侧摩擦作用为等直径桩的 1/10 以下, 几乎可以忽略, 因此在目前许多资料中参照普通灌注桩的方法来计算支盘桩的承载力是不妥的。

3.3 关于支盘桩的挤密效应以及对承载力的影响

(1) 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, 通过推压并用螺丝拧紧使土体复位, 这样使得模型支盘桩的盘挤压土体, 产生一定的挤密效应, 从土工试验得到的结果充分证明了这一点。从表 1 的试验结果看到, 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。

(2) 从挤密和非挤密土体双支盘桩的 $Q-s$ 曲线可以看出, 前者具有更高的承载力和抗沉降变形性能, 根据《建筑桩基技术规范》JGJ94-94 的承载力确定方法, 前者的承载力约为 3.0 kN, 而后者约为 2.6 kN, 通过挤密土体后承载力提高了 15.4%, 在承载力计算时应该考虑到这种有利影响。

(3) 从两个桩的桩端压力盒的压力变化分析, 挤密和非挤密土体支盘桩桩端压力的增加规律是完全不同的, 前者开始增加缓慢, 随后加快, 达到最大承载力时其压力差不多只有后者的一半, 说明通过挤密土体使盘的承载力发挥得较早, 桩端的承载力在极限承载力中所占比例很小, 而非挤密土体支盘桩的桩端压力几乎与荷载线性增加, 说明桩端与盘同时发挥作用, 桩端的承载力对极限承载力的贡献也大。因此从另一个侧面来讲, 挤扩支盘桩由于桩端对极限承载力的贡献小, 施工时清孔质量的好坏对承载力的影响不大, 同时在承载力计算时应考虑到桩端承载力不能充分发挥的问题。

4 关于承载力计算公式的讨论

根据上述分析可知, 支盘桩的荷载传递过程比较复杂, 承载力的影响因素较多, 得出一个比较合理可信的计算公式对于该桩型的设计具有重要意义。目前有关资料中关于支盘桩单桩承载力的计算公式一般是套用普通灌注桩的计算公式^{*}, 其形式如下:

$$Q_u = Q_s + Q_p$$

$$u \sum q_{si} l_i + \sum \Psi_{pj} q_{pj} A_{pj} + q_p A_p, \quad (1)$$

式中 q_{pj} 、 A_{pj} 和 Ψ_{pj} 分别表示第 j 盘盘底土的极限端阻力、扣除主桩身截面积后第 j 盘的水平投影面积、第 j 盘极限端阻修正系数, 其它参数的意义同《建筑桩基技术规范》[1] 的规定。

上述公式中至少存在以下三个问题: 第一, 桩的侧阻(式中第一项)没有考虑到上文分析的盘顶临空面的存在和盘底土随盘产生向下变形而引起摩擦作用的大幅减小, 当设置多盘且盘间距较小(如 2~3 倍盘径)时, 盘间的侧阻很小, 几乎可以忽略。第二, Ψ_{pj} 的概念不明确, 许多资料中该值都是凭经验取值, 主要考虑施工因素对成盘质量的影响, 如施工工艺、孔壁稳定性、泥浆质量、孔径大小、土层扰动等, 而没有考虑挤扩支盘的挤密效应的有利影响, 以及当各盘处在不同土层时盘底承载力不能同步发挥的不利影响。第三, 没有考虑到桩端由于土的密实程度不同与盘不能同时发挥最大端阻的影响。

因此, 笔者建议支盘桩的单桩承载力计算公式表示为如下形式:

$$Q_u = Q_s + Q_p = u \sum q_{si} l_i - u \sum q_{si} n D_j +$$

$$\gamma \sum \Psi_{pj} \beta_{pj} q_{pj} A_{pj} + \Psi_p q_p A_p, \quad (2)$$

式中 第二项表示在盘 j 上下 n 倍盘径 D_j 的范围内的桩侧阻不应计入承载力, n 值应根据土质情况而定, 可以取 2~3; γ 为多盘时的各盘端阻力同步发挥系数, γ

≤ 1.0 , 各盘设在同一土层时可取 1.0, 当设在不同土层时应视各土层的力学性质差别而定, 主要与土的压缩模量有关; β 为支盘的挤密效应系数, $\beta > 1.0$, 根据不同的土质可分别取 $\beta = 1.1 \sim 1.3$; Ψ_p 为桩端承载力发挥系数, $\Psi_p < 1.0$ 。以上系数应通过大量试验并结合经验来确定。

5 结 语

模型桩和工程桩虽然在许多方面存在差异, 不能完全正确地反映工程桩的工程特性, 但模型桩的室内试验可以较好地反映不同桩型在承载和变形性能等方面的规律, 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。

通过本模型桩的室内试验得到如下结论:

(1) 支盘桩的承载力要远远高于等直径桩, 就本模型试验而言, 单位体积土的承载力支盘桩是等直径桩的 2.6 倍。支盘桩的抗沉降变形能力远远好于等直径桩, 本模型桩试验两个直径相同的等直径桩和支盘桩相比, 当荷载加到等直径桩的极限承载力 1.0 kN 时, 其沉降为 1.5 mm, 而对应荷载下支盘桩沉降变形只有 0.3 mm, 是等直径桩的 1/5。

(2) 支盘桩由于盘的存在, 把提供侧阻力的土层分割成若干段, 每段土体由于盘顶的临空面而失去向上的支撑, 使得土体对桩身的侧阻力大大减小, 另外盘底一定范围的土体与盘一起向下变形使该处的侧阻大大减小, 甚至会对桩身产生负摩擦作用, 因此在设计多支盘桩时, 应注意对侧阻力的折减。

(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。通过与非挤密支盘桩对比, 这种挤密效应对提高支盘桩的承载力和减小沉降变形作用明显。同时也要考虑到盘底和桩底土体的密实程度不同, 使得桩底的端阻不能和盘底端阻同时发挥对承载力的影响。

(4) 在支盘桩的承载力计算时应充分考虑到上述因素, 使计算公式更加科学、合理。

参考文献:

- [1] JGJ94—94, 建筑桩基技术规范[S].

* 浙江省挤扩支盘混凝土灌注桩技术规程(评审稿)