

文章编号: 1000-7598-(2007)增刊-0658-05

荷载作用下挤扩支盘桩支护特性数值模拟分析

王树仁¹, 李启民², 武崇福¹, 张延新¹

(1. 燕山大学 建筑工程与力学学院, 秦皇岛 066004; 2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 采用室内试验和数值分析相互验证方法, 对单排挤扩桩和悬臂直桩基坑支护的桩顶位移和受力特征进行了研究, 进而对基坑双排挤扩桩支护特性进行了分析。试验结果表明, 与悬臂直桩相比, 挤扩桩支护桩顶位移小, 挤扩桩支盘提供的抗倾覆力矩有效地改善了挤扩桩的工作性状; 与单排挤扩桩相比, 双排挤扩桩基坑支护结构刚度大, 在桩身内力分配以及控制基坑变形等方面有较大优势, 是深基坑工程中经济合理的支护形式。

关键词: 基坑支护; 模型试验; 数值模拟; 挤扩支盘桩

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Numerical analysis of the squeezed branch piles under loading for protecting foundation excavation

WANG Shu-ren¹, LI Qi-min², WU Chong-fu¹, ZHANG Yan-xin¹

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The displacement characteristics in the top of the cantilever piles and the squeezed branch piles, and the axial force and the distribution of bending moment of these single row piles for protecting foundation excavation are analysed by model test and numerical simulation, and that is also studied for the double rows squeezed branch piles. The model test and numerical simulation show that the displacement in top of the squeezed branch pile decreases, the multiple bending moments are distributed more evenly, and the maximum bending moment decreases compared with the cantilever piles. It is concluded that the double rows squeezed branch piles have many significant advantages, including displacement, structure stiffness, axial force and bending moment compared with the single row ones, and the double rows squeezed branch piles is a reliable and economical method to retain and to protect foundation excavation.

Key words: supporting foundation; model test; numerical simulation; squeezed branch pile

1 引言

悬臂直桩是基坑支护的一种基本结构形式, 广泛应用于一般基坑工程。但是, 普通悬臂直桩在受力机制上并不十分清楚, 使其适用范围受到了一定的限制, 研发受力合理的新型支护结构, 拓宽悬臂支护桩的工作领域十分必要。

挤扩支护桩是采用仿生原理发展而来的一种新型支护桩。近年来, 其在基坑支护工程中得到了推广应用。挤扩支护桩的桩身由主桩、多个分支和承

力盘组成, 形成一种介于摩擦桩和端承桩之间具有较高承载力的变截面混凝土灌注桩。

挤扩桩的施工工艺是在支护桩设计位置上钻(打)直孔, 再利用专用的挤扩机具在孔壁上挤扩成支状或盘状腔模, 然后放置钢筋笼, 浇注混凝土成桩^[1-3]。

2 基坑单排桩支护承载试验

2.1 单排模型桩室内试验

基坑挤扩桩支护模型试验, 在大型土工试验槽

收稿日期: 2007-03-12

基金项目: 燕山大学博士基金项目(No.B245)。

作者简介: 王树仁, 男, 1968年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程和岩土力学数值计算等方面的科研与教学工作。E-mail: w_88sr@sina.com

中进行^[4]。

2.1.1 试验准备

(1) 基坑制土

试验地基土取自北京地区一般性粉土，过筛后再按一定的含水率进行配置，分层回填夯实，并控制其重度。回填至设计标高后，进行静压处理，养护 60 d，使地基土固结。试验地基土的各种物理力学性质指标：含水率 $w = 16.2\%$ ，重度 $\gamma = 18.5 \text{ kN/m}^3$ ，塑限 $w_p = 16.6\%$ ，液限 $w_l = 26.1\%$ ，塑性指数 $I_p = 9.5$ ，压缩系数 $a_{1-2} = 0.37 \text{ MPa}^{-1}$ ，压缩模量 $E_{s(1-2)} = 4.8 \text{ MPa}$ 。抗剪强度指标：凝聚力 $c = 25.0 \text{ kPa}$ ，内摩擦角 $\varphi = 20^\circ$ 。

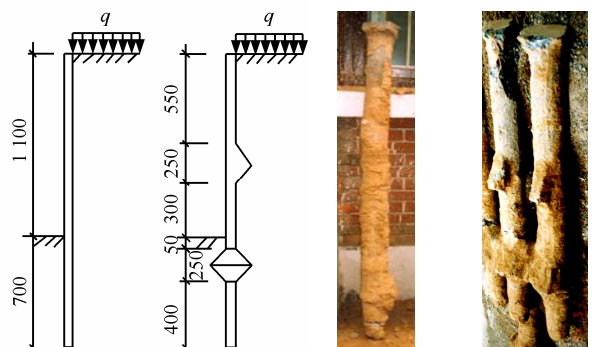
(2) 桩位成孔

在土工槽中养护地基土完毕后，用洛阳铲取土成孔，再按模型桩设计要求采用专用的挤扩机具形成挤扩体腔。

(3) 模型制作

模型桩采用钢筋混凝土灌注桩，混凝土强度等级为 C30，主筋为 $4\phi 12 \text{ mm}$ ，箍筋为 $\phi 4 @ 200 \text{ mm}$ ，细骨料为中砂，粗骨料为豆石，其粒径 $\leq 5 \text{ mm}$ 。模型桩直径为 148 mm ，长度为 1800 mm ，挤扩体直径为 306 mm 。

模型桩设计为钢筋混凝土直桩和钢筋混凝土上支下连挤扩桩两种类型，模型桩示意图及实物照片如图 1 所示。



(a) 直桩图 (b) 挤扩桩图 (c) 直桩照片 (d) 挤扩桩照片

图 1 模型桩示意图与实物照片 (单位: mm)

Fig.1 Photo and plan of piles for the Embankment(unit: mm)

2.1.2 试验过程

模型桩的中心间距为 298 mm ，模型桩在自然条件下养护，室温为 22°C ，60 d 后进行基坑开挖。然后在基坑顶面进行加载，模拟现场地表堆载，进行两种支护桩的对比试验。

试验采用液压千斤顶逐级加载，利用液压稳压

器控制工作压力。采用慢速维持荷载法，每级荷载达到相对稳定后再加下一级荷载，稳定标准为每 10 min 桩顶位移量小于 0.01 mm 。

2.1.3 试验结果

在地表分级加载条件下，基坑悬臂直桩支护和挤扩桩支护的桩顶水平位移曲线如图 2 所示。

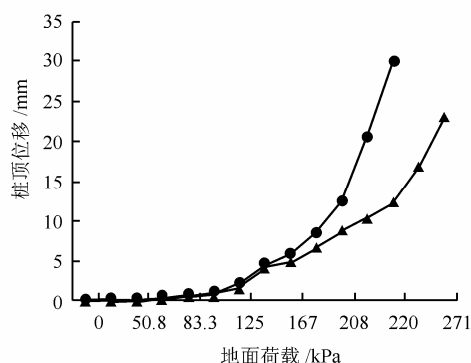


图 2 桩顶水平位移曲线图

Fig.2 The horizontal displacement curves of the piles' top

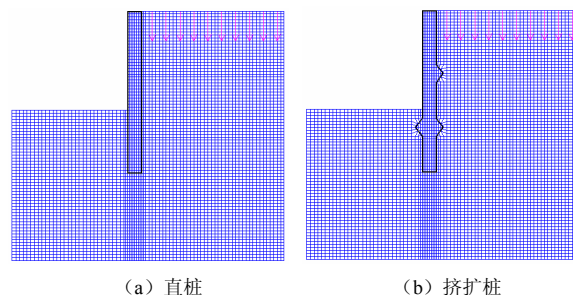
2.2 单排模型桩数值试验

2.2.1 构建模型

应用 FLAC^{2D} 有限差分程序构建计算模型，模型范围：宽 $\times$ 高= $3.0 \text{ m} \times 2.8 \text{ m}$ ；求解区域离散为四边形网格，共划分单元 7224 个^[5]。

在构建计算模型的过程中，对桩基与粉土间的接触面进行了接触面的模拟。

基坑开挖后的计算模型及网格划分如图 3 所示。基坑开挖前，模型侧面限制水平位移，底部固定；基坑开挖后，在基坑顶面桩侧施加荷载。计算参数见表 1。基坑填土材料采用 Mohr-Coulomb 屈服准则。混凝土桩与土层的接触面参数设定为 $K_n = 15 \text{ MPa}$ ， $K_s = 15 \text{ MPa}$ ， $f_{nc} = 15$ 。



(a) 直桩

(b) 挤扩桩

图 3 计算模型网格划分图

Fig.3 The mesh of the computational model

2.2.2 模拟工况

根据工程实际，将施工过程分为 3 步进行：基坑开挖前，在加入桩基的情况下，使填土材料在自重场下计算至平衡状态；然后进行桩侧土的开挖形成基坑，计算达到新的平衡；将上述位移清零后，

表 1 模型计算参数表
Table 1 Calculation parameters of the model

序号	参数名称	桩	土
1	密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2 500	1 850
2	弹性模量 /GPa	30	4.8
3	泊松比	0.20	0.35
4	体积模量 /GPa	16.7	8.0
5	剪切模量 /GPa	12.5	2.7
6	黏聚力 /kPa	/	25.0
7	摩擦角 / $(^\circ)$	/	20

在桩基非临空侧顶面进行分级加载试验。

2.2.3 计算结果分析

(1) 位移矢量场

如图 4 所示, 基坑开挖后, 随着在基坑顶面分级加载载荷的逐渐增大, 直桩和挤扩桩逐渐向基坑临空侧产生倾斜位移, 位移矢量场自上而下由大至小逐渐向下传递, 在同一荷载条件下, 挤扩桩的最大位移明显小于直桩。

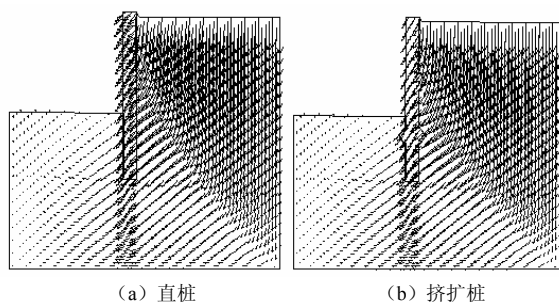


图 4 基坑位移矢量场图

Fig.4 The displacement vectors of the embankment

(2) 水平位移场

如图 5 所示, 基坑开挖后, 随着在基坑顶面支

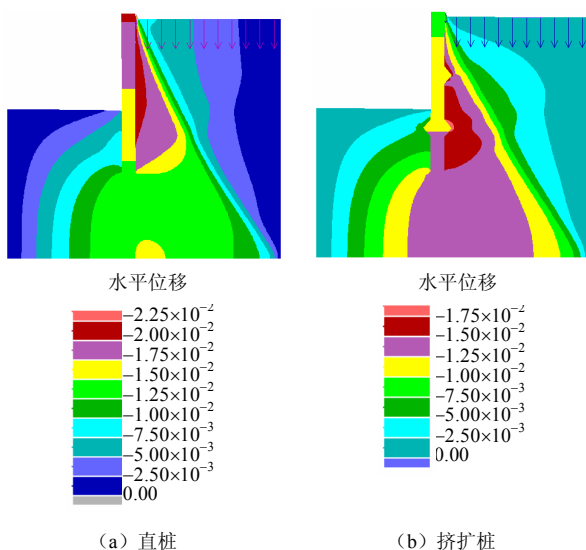


图 5 基坑水平位移场图 (单位: mm)

Fig.5 The horizontal displacement field of the embankment(unit: mm)

护桩侧分级加载的逐渐增大, 直桩和挤扩桩逐渐向基坑临空侧产生的水平位移逐渐增大。当载荷 $q = 208.3 \text{ kPa}$ 时, 直桩顶部最大水平位移为 22.5 mm , 挤扩桩顶部最大水平位移为 10 mm , 后者的最大水平位移明显小于前者。

(3) 荷载-位移关系曲线

分 5 次逐级连续加载(分别为 $50.8, 83.3, 125.0, 166.7, 208.3 \text{ kPa}$) 时, 基坑直桩和挤扩桩支护桩顶水平位移曲线如图 6 所示。由图中可见, 在基坑顶面桩侧分级加载过程中, 直桩和挤扩桩产生最大水平位移曲线的变化趋势与室内模型试验结果一致, 即基坑挤扩桩支护与普通悬臂直桩支护相比, 同一荷载条件下其桩顶最大水平位移可减小 $30\% \sim 60\%$ 。

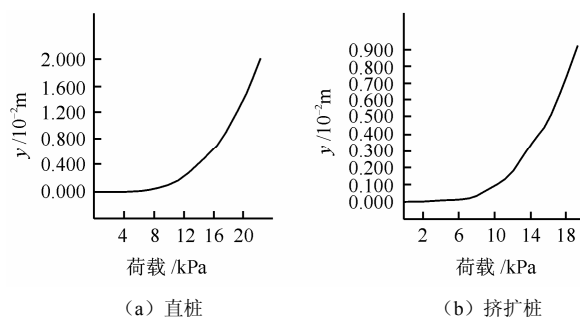


图 6 加载过程中桩顶水平位移曲线图

Fig.6 The horizontal displacement curves of the piles' top under loading

(4) 桩的受力分析

为可视化显示两类桩的受力承载特性, 采用位移控制连续加载的方式, 利用 FLAC 程序中的梁支护结构单元, 计算得到基坑直桩和挤扩桩支护的轴力图 and 弯矩图分别如图 7 和图 8 所示。

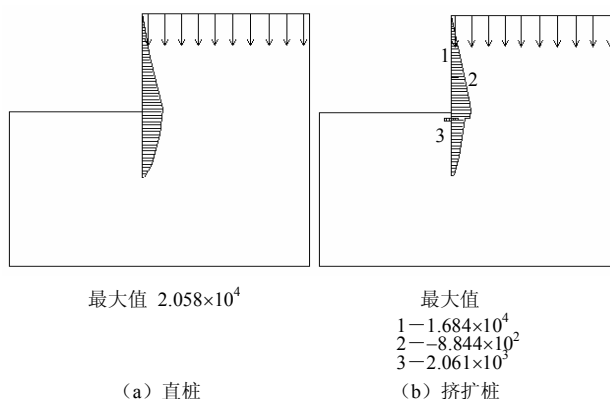


图 7 桩的轴力图 (单位: N)

Fig.7 The axial forces of the piles(unit: N)

由图 7 可知, 当分级加载的载荷逐渐增大到 $q = 208.3 \text{ kPa}$ 时, 直桩和挤扩桩的最大轴力分别为 $2.058 \times 10^4 \text{ N}$ 和 $1.68 \times 10^4 \text{ N}$, 后者明显小于前者。在相同条件下, 挤扩桩所受的最大轴力仅是直桩

的 81.6 %。

由图 8 可见, 当分级加载的载荷逐渐增大到 $q = 208.3 \text{ kPa}$ 时, 直桩和挤扩桩的最大弯矩分别为 $2.26 \times 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $1.22 \times 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}$, 后者明显小于前者, 可见, 基坑挤扩桩支护的支与盘起到了降低最大弯矩值的效果。在相同条件下, 挤扩桩所受的最大弯矩仅是直桩的 54.0 %。

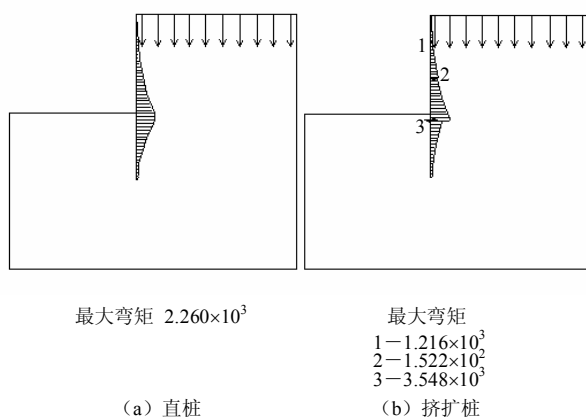


图 8 桩的弯矩图 (单位: $\text{N}\cdot\text{m}$)

Fig.8 The moment diagram of the piles(unit: $\text{N}\cdot\text{m}$)

模型试验和数值模拟结果均表明, 在基坑支护中, 与普通悬臂直桩相比, 挤扩桩所受最大弯矩及轴力减小了 20 %~60 %。如在中等深度基坑支护中, 采用挤扩桩代替普通悬臂直桩, 将产生显著的技术经济效益, 挤扩桩是一种经济合理的支护结构。

3 基坑单排桩支护数值模拟分析

3.1 构建计算模型

双排挤扩桩设计直径为 141 mm, 桩长为 1 800 mm, 挤扩头直径为 310 mm。双排挤扩桩中心距为 400 mm, 前后排中心距为 150 mm。基坑双排挤扩桩支护示意图及实物照片如图 9 所示。由此力学模型构建基坑双排挤扩桩支护的数值计算模型, 加载工况、边界条件和计算参数如前所述。

3.2 双排挤扩桩承载特性分析

3.2.1 位移矢量场

如图 10 所示, 在同等条件下, 当在桩侧分级加载的载荷增大到 $q = 208.3 \text{ kPa}$ 时, 双排挤扩桩支护的基坑向临空侧产生的最大位移值为 67.5 mm, 小于单排挤扩桩支护基坑的最大位移值的 71.5 mm。

3.2.2 水平位移场

如图 11 所示, 基坑开挖后, 随着在基坑顶面分级加载载荷的逐渐增大, 双排挤扩桩支护基坑向临空侧产生的水平位移逐渐增大。当载荷增至 $q = 208.3 \text{ kPa}$ 时, 双排挤扩桩的桩顶部最大水平位

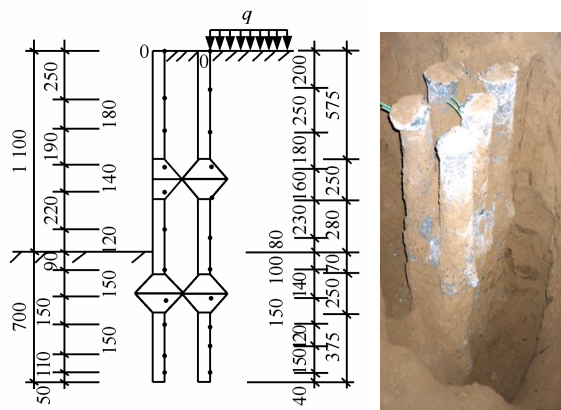
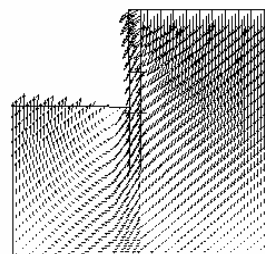


图 9 双排挤扩桩示意图与实物照片 (单位: mm)

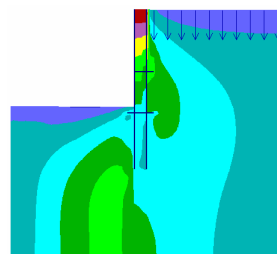
Fig.9 Photo and Plan of two-tier piles for the Embankment(unit: mm)



最大位移: $6.751 \times 10^{-3} \text{ m}$

图 10 位移矢量场图

Fig.10 The displacement vectors of the two-tier-pile embankment



水平位移

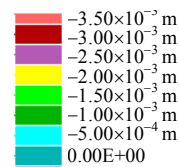


图 11 水平位移场图

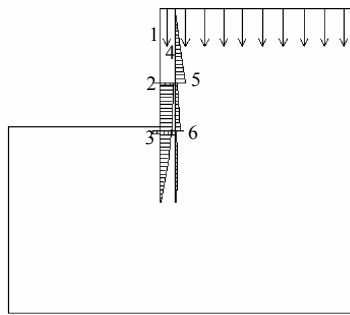
Fig.11 The horizontal displacement field of the two-tier-pile embankment

移为 4.0 mm, 远小于同等条件下单排挤扩桩的顶部最大水平位移值 10.0 mm。

3.2.3 桩的受力分析

由图 12 和图 13 可知, 在基坑顶面桩侧分级加载的载荷增大到 $q = 208.3 \text{ kPa}$ 时, 双排挤扩桩的最大轴力和最大弯矩分别为 $1.455 \times 10^4 \text{ N}$ 和 $5.874 \times$

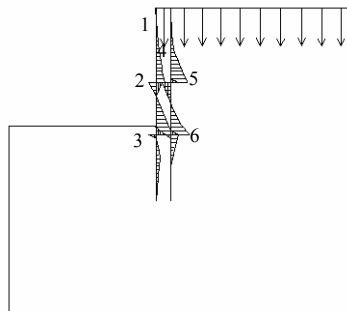
$10^2 \text{ N}\cdot\text{m}$, 明显小于同等条件下的单排挤扩桩。



1— 1.455×10^4 2— 1.803×10^3
3— 7.210×10^3 4— 1.138×10^4
5— 1.881×10^3 6— 7.296×10^3

图 12 双排挤扩桩轴力图 (单位: N)

Fig.12 The axial forces of the two-tier piles(unit: N)



1— 5.874×10^2 2— 8.690×10^2
3— 5.190×10^2 4— 8.566×10^2
5— 9.872×10^2 6— 2.396×10^2

图 13 双排挤扩桩弯矩图 (单位: $\text{N}\cdot\text{m}$)

Fig.13 The moment diagram of the two-tier piles(unit: $\text{N}\cdot\text{m}$)

基坑采用双排挤扩桩支护, 在地面荷载作用下, 双排挤扩桩的弯矩图与在水平荷载作用下悬臂式二层框架结构的弯矩图基本一致, 弯矩正负交替变化。但是, 值得注意的是, 框架结构底层框架的固定端比较靠上, 并不是支护桩的下端点。

4 结 论

(1) 采用挤扩桩进行基坑支护较传统的悬臂直桩支护桩顶位移小, 挤扩桩所受最大弯矩及轴力减小了 20%~60%, 挤扩桩的支盘提供的抗倾覆力矩有效改善了挤扩桩的工作性状, 可见在中等深度的基坑支护中, 挤扩桩是一种经济合理的基坑支护形式。

(2) 研究表明, 与单排挤扩桩相比基坑双排挤扩桩支护结构刚度大、桩顶位移小, 双排挤扩支护桩无论在支护高度、桩身内力分配以及控制基坑变形等方面都有较大的优势, 在较深基坑支护工程中推广应用, 将产生显著的技术经济效益。

参 考 文 献

- [1] 陈轮, 常冬冬, 李广信. DX 桩单桩承载力的有限元分析. 工程力学[J]. 2002, 19 (6): 67—72.
CHEN Lun, ChANG Dong-dong, LI Guang-xin. Finite analysis of bearing capacity of a single DX pile[J]. *Engineering Mechanics*, 2002, 19(6): 67—72.
- [2] 万林海, 郭鹏, 吴伟功. 变截面挤扩桩承载特性的数值模拟. 山西建筑[J]. 2005, 31 (17): 1—2.
WAN Lin-hai, GUO Peng, WU Wei-gong. Numerical simulation of carrying characteristics the variational section impacted-expanded pile[J]. *Shanxi Architecture*, 2005, 31(17): 1—2.
- [3] 唐业清. 建筑物改造与病害处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [4] 李启民, 何满潮, 唐业清. 挤扩支盘支护桩试验研究. 岩土力学[J]. 2005, 26 (10): 1 667—1 670.
LI Qi-min, HE Man-chao, TANG Ye-qing. Experimental study of squeezed branch piles as retaining and protecting of foundation excavation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(10): 1 667—1 670.
- [5] Itasca Consulting Group Inc. FLAC^{2D}(3.3) User's Manual[R]. Minnesota: Thresher Square East 708 South Third Street, Suite 310 Minneapolis, USA, 1996.