

# 基坑倾斜支护桩模型试验的数值模拟研究

孔德森<sup>1,2</sup>, 张秋华<sup>1</sup>, 史明臣<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学土木建筑学院, 山东 青岛 266510; 2. 山东省土木工程防灾减灾重点实验室(山东科技大学), 山东 青岛 266510)

**摘要:** 利用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件, 对某基坑倾斜支护桩模型试验的 5 种工况分别进行了模拟分析, 得到了不同支护形式、不同布桩方式下支护桩顶水平位移及桩身弯矩随基坑开挖的变化规律, 并对不同工况下倾斜支护桩的受力特性进行了对比分析。研究表明, 数值模拟结果与模型试验结果基本一致, 验证了模型试验结论的可靠性及基坑倾斜桩支护较传统直桩支护的优越性, 不仅为倾斜支护桩的推广应用提供了理论基础, 也为其实验设计提供了一定的参考依据。

**关键词:** 基坑; 倾斜支护桩; FLAC<sup>3D</sup>; 数值模拟

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S2-0408-04

**作者简介:** 孔德森(1977-), 男, 山东滕州人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土力学、基坑工程等方面的研究与教学工作。E-mail: dskong828@163.com。

## Numerical simulation of model tests on inclined retaining piles in foundation pit

KONG De-sen<sup>1,2</sup>, ZHANG Qiu-hua<sup>1</sup>, SHI Ming-chen<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China; 2. Shandong

Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation (Shandong University of Science and Technology),

Qingdao 266510, China)

**Abstract:** Five working conditions of model tests on the inclined retaining piles in a foundation pit are simulated respectively by means of the numerical simulation software FLAC<sup>3D</sup>. The variation laws of the horizontal displacement of pile top and the bending moment along the pile shaft with the excavation of the foundation pit under different supporting patterns and pile arrangements are obtained. The bearing behaviors of the inclined retaining piles under different working conditions are compared and analyzed. The research indicates that the results of the numerical simulation basically agree with those of the model tests, which verifies the reliability of the conclusions drawn from the model tests and the superiority of the inclined retaining piles to the traditional vertical retaining piles in the foundation pit. This research provides theoretical basis for the popularization and application of the inclined retaining piles and offers certain references for their design and calculation.

**Key words:** foundation pit; inclined retaining pile; FLAC<sup>3D</sup>; numerical simulation

## 0 引言

目前, 打设具有一定倾斜角度的桩已经可以实现。倾斜桩常见于公路桥梁、港口码头、输电线塔架及海上钻井平台等结构的基础中, 以充分发挥其轴向抗压能力, 减小风荷载、地震荷载、流水及波浪等水平荷载引起的桩身剪力和弯矩<sup>[1]</sup>, 却很少被用于基坑支护工程中。目前, 国内外关于基坑倾斜支护桩的研究还十分罕见, 只有极少数人进行过初步探索。郭建芝等结合具体工程实例, 介绍了深基坑斜桩支护的设计、施工经验等, 并指出斜桩挡土结构能充分发挥材料性

能, 节约造价<sup>[2]</sup>; 郑刚等将适当角度的倾斜单排桩作为基坑支护结构, 利用模型试验分析了不同倾角和不同布桩形式下单排支护桩的工作性状<sup>[3]</sup>。

为进一步深入了解基坑倾斜支护桩的受力特性, 掌握其受力性状随基坑开挖的变化规律等, 本文利用岩土工程专业分析软件 FLAC<sup>3D</sup>, 针对文献[3]中模型试验的 5 种工况进行了数值模拟, 并将所得结果与模

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41102166); 山东省自然科学基金资助项目(Y2007F48); 山东省“泰山学者”建设工程专项经费资助项目(SDTS2008); 山东省高等学校优秀青年教师国内访问学者资助项目(SDVS2009); 青岛市科技发展指导计划项目(KZJ-40)

收稿日期: 2011-08-04

型试验结果进行对比分析, 进一步验证了模型试验结

果的可靠性及倾斜支护桩的优越性。

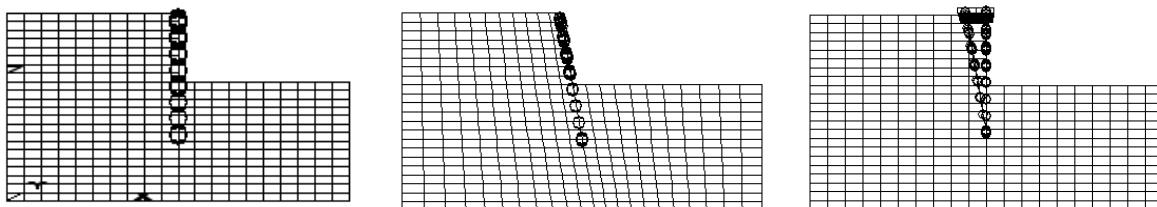


图 1 计算模型示意图

Fig. 1 Sketch map of calculation model

## 1 计算模型的建立

根据模型试验的 5 种工况(见表 1), 分别建立 1:1 三维数值计算模型。全直桩支护、全斜桩支护及斜直交替支护三种布桩方式下的数值计算模型如图 1 所示。由试验槽内净空尺寸, 选取土体模型长宽高分别为  $2\text{ m} \times 0.62\text{ m} \times 1.1\text{ m}$ 。支护桩长 70 cm, 桩径为 3.2 cm, 桩顶冠梁厚 3.3 cm。基坑采用分步开挖形式, 每步开挖 5 cm。

土体采用八节点实体单元模拟; 支护桩采用 pile 单元模拟, 每根桩分为 7 个桩构件 (pilesel), 桩土之间的相互作用通过 pile 单元各节点处与周围寄宿域网格相连的剪切与法向连接弹簧模拟<sup>[4]</sup>; 工况 1~3 中冠梁采用共用节点法, 通过桩顶节点生成 beam 单元来模拟<sup>[5]</sup>; 工况 4、5 中, 由于直桩与斜桩桩顶不在同一直线上, 故冠梁改用实体单元模拟, 并将支护桩桩顶节点 (node) 与冠梁单元的连接 (link) 属性均改为刚性 (rigid)。

模型试验中, 模型桩采用 PVC 管材, 冠梁采用木板加工, 土样采用粗砂。据此, 数值模拟中均选择了相应的材料参数 (见表 2), 其中土体选用摩尔—库伦模型。土体侧面限制其水平位移, 底面固定, 顶面为自由面。

模拟过程中, 分别对桩顶节点的水平位移以及桩身各节点处弯矩随基坑开挖的变化情况进行监测。

表 1 模型试验工况

Table 1 Working conditions of model tests

工况 编号	支护桩布 置方式	桩间距 /mm	支护桩 总数/根	斜桩总 数/根	斜桩倾角 ( $^{\circ}$ )
1	直桩	48	13	0	0
2	斜桩	48	13	13	10
3	斜桩	48	13	13	20
4	斜直交替	48	13	7	10
5	斜直交替	48	13	7	20

表 2 材料参数

Table 2 Material parameters

材料名称	弹模 /MPa	泊松比	内摩擦角 ( $^{\circ}$ )	黏聚力 /kPa
土体(粗砂)	25	0.32	35.2	0
支护桩(PVC 管材)	300	0.36	—	—

## 2 计算结果分析

### 2.1 桩顶水平位移分析

#### (1) 全直桩与全斜桩时的桩顶水平位移比较

图 2 所示为全直桩支护、 $10^{\circ}$  斜桩以及  $20^{\circ}$  斜桩支护三种工况下, 桩顶水平位移随基坑开挖深度的变化曲线。显然, 当基坑开挖深度较小时, 不同支护形式下的桩顶水平位移均趋于 0; 而当基坑开挖到一定深度时, 桩顶水平位移明显增大。其原因主要是, 随着基坑开挖深度的增加, 被动区土体内部产生了塑性变形, 同时开挖使得桩后土体约束变小, 其变形也得以释放<sup>[6]</sup>。

同时, 基坑开挖到同一深度时,  $20^{\circ}$  斜桩、 $10^{\circ}$  斜桩、直桩的桩顶水平位移依次减小, 这表明其相应的支护能力逐渐增强。以开挖到 40 cm 为例,  $10^{\circ}$  斜桩与竖直支护桩相比, 其桩顶水平位移大约减小了 33%, 而  $20^{\circ}$  斜桩相应的减小量则高达 70%。即在一定范围内, 随着倾斜角度的增加, 支护桩桩顶水平位移会明显减小。这与模型试验所得结果也十分吻合。

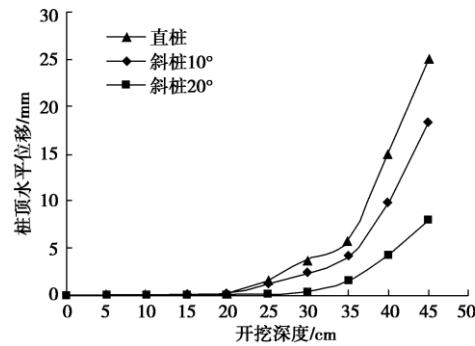


图 2 不同倾斜程度下桩顶水平位移变化曲线

Fig. 2 Variation curves of horizontal displacement of pile top under different inclination conditions

#### (2) 不同布桩方式时支护桩的桩顶水平位移比较

图 3 所示分别为  $10^{\circ}$  和  $20^{\circ}$  全斜桩支护与相应的斜直交替布置方式下桩顶水平位移的对比曲线。由图中很容易看出, 当开挖深度超过 40 cm 时, 斜直交

替布置方式下桩顶水平位移仍比较小。这说明, 斜直交替布置方式对于控制桩顶水平位移较全斜桩布置方式又有明显的提高, 从而对维持基坑稳定性有了更好的保证, 支护能力大大增强。

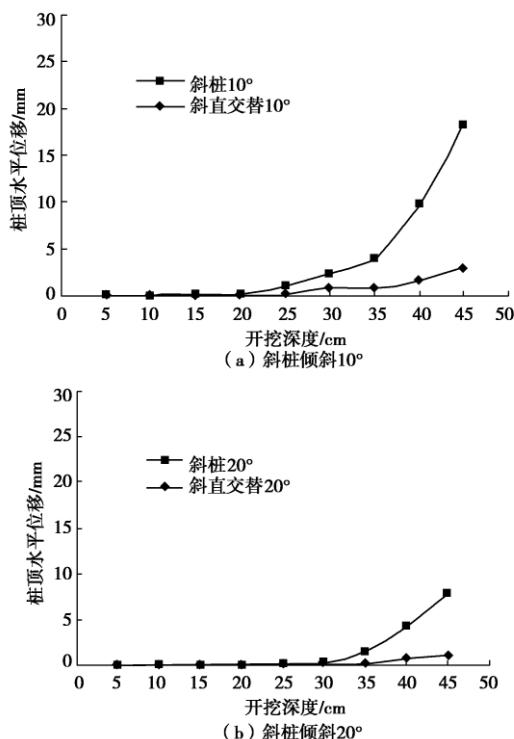


图 3 不同布置方式下桩顶水平位移变化曲线

Fig. 3 Variation curves of horizontal displacement of pile top under different pile arrangements

## 2.2 桩身弯矩分析

### (1) 全直桩与全斜桩时的支护桩弯矩比较

图 4 所示为全直桩支护、10° 斜桩以及 20° 斜桩支护三种工况下, 在基坑开挖至 40 cm 时, 弯矩沿桩身的分布曲线。

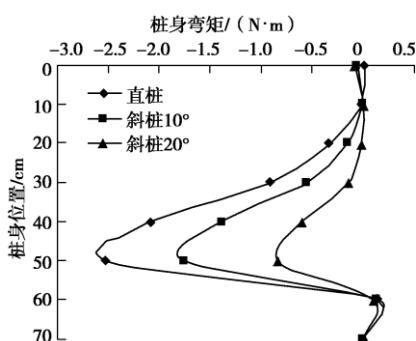


图 4 不同倾斜程度下桩身弯矩变化曲线

Fig. 4 Variation curves of bending moment along pile shaft under different inclination conditions

从图中可以看出, 三种工况下桩身弯矩沿桩身的变化规律大致相同, 最大弯矩均出现在 50 cm 左右, 而支护桩靠近桩底部分的弯矩则一直保持在 0 附近,

并且, 随着倾斜角度的增大, 最大弯矩点位置稍有下移的趋势。

很明显, 10° 斜桩支护条件下的最大弯矩较直桩支护条件下大约减小了 33%, 而 20° 斜桩支护条件下相应地则可减小 63%, 这说明, 斜桩支护形式较直桩支护形式能有效减小桩身弯矩, 且在一定范围内, 随着倾斜角度的增加, 最大弯矩值会明显降低。上述结果同时也印证了模型试验的相应结论。

### (2) 不同布桩方式时支护桩的弯矩比较

图 5 所示为基坑开挖至 40 cm 时, 10° 斜直交替布置中的直桩与全直桩支护、10° 全斜桩支护中支护桩桩身弯矩的比较。

显然, 三者的变化趋势基本一致, 最大弯矩点出现的位置也基本一致。10° 斜直交替布置中直桩的桩身弯矩与相应全斜桩支护方式下的桩身弯矩明显减小, 并远远小于全直桩支护形式 (最大弯矩减小量高达 80%)。这充分说明了, 斜直交替布置方式对于桩身弯矩的降低明显优于其它两种布置方式, 可降低支护结构材料消耗, 节省工程开支。

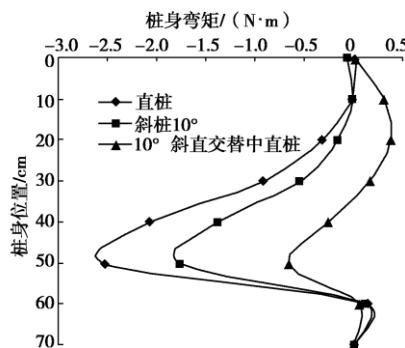


图 5 10° 斜直交替布置中直桩与全直桩、10° 全斜桩弯矩比较

Fig. 5 Comparison of bending moments among vertical piles in alternation arrangement and retaining piles in wholly vertical and inclined arrangements

图 6 所示则为基坑开挖至 40 cm 时, 10° 斜直交替布置中的斜桩与全直桩支护、10° 全斜桩支护中支护桩桩身弯矩的比较。

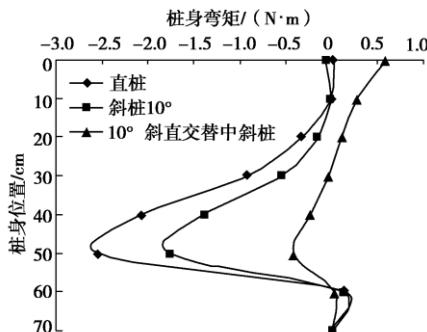


图 6 10° 斜直交替布置中斜桩与全直桩、10° 全斜桩弯矩比较

Fig. 6 Comparison of bending moments among inclined piles in alternation arrangement and retaining piles in wholly vertical and inclined arrangements

alternation arrangement and retaining piles in wholly vertical and inclined arrangements

从图中容易看出,  $10^\circ$  斜直交替布置中的斜桩桩身弯矩分布趋势其它两种分布曲线略有差异, 其最大弯矩点出现在桩顶, 且最大弯矩值为正值, 即由桩体受压侧转向至受拉侧, 且与图中其它两种情况相比, 略有降低。

对于  $20^\circ$  斜直交替布置情况下, 桩身弯矩变化规律与上述分析类似, 在此就不再赘述。

### 3 结 论

通过对基坑倾斜支护桩模型试验的 5 种工况进行数值模拟分析, 得到如下结论:

(1) 基坑全斜桩支护形式较全直桩支护形式, 支护桩桩顶水平位移明显减小, 并在一定范围内随着支护桩倾斜角度的增加而减小。倾斜桩支护形式可更好地维持基坑稳定性, 可提高基坑极限开挖深度。

(2) 斜直交替布置方式对于控制桩顶水平位移较全斜桩布置方式有明显提高, 且在一定范围内, 支护桩桩顶水平位移随着支护桩倾角的增加而减小。

(3) 基坑全斜桩支护形式较全直桩支护形式可明显降低桩身弯矩, 降低程度在一定范围内随着支护桩倾角的增加而增加。

(4) 斜直交替布置方式较全直桩和全斜桩两种支护形式大大降低了桩身弯矩, 优化了支护结构受力, 可节省材料, 降低工程开支。

### 参考文献:

[1] 陈孝堂. 建筑桩基抵抗水平力分体系的概念设计[J]. 建筑

结构, 2009, 39(11): 90 - 93. (CHEN Xiao-tang. Concept design for sub-system of resisting horizontal forces in pile foundation[J]. Building Structure, 2009, 39(11): 90 - 93. (in Chinese))

- [2] 郭建芝, 曹华先. 斜桩挡土支护深基坑[J]. 广州建筑, 1997(2): 38 - 41. (GUO Jian-zhi, CAO Hua-xian. Batter pile struted deep foundation pit[J]. Guangzhou Architecture, 1997(2): 38 - 41. (in Chinese))
- [3] 郑 刚, 白若虚. 倾斜单排桩在水平荷载作用下的性状研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 39-45. (ZHENG Gang, BAI Ruo-xu. Behaviors study of inclined single row contiguous retaining piles under horizontal force[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 39 - 45. (in Chinese))
- [4] 刘赪炜, 韩 煊. 单桩数值模拟参数与方法的研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 204 - 207. (LIU Cheng-wei, HAN Xuan. Method and parameters of numerical simulation on single pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 204 - 207. (in Chinese))
- [5] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (CHEN Yu-min, XU Ding-ping. FLAC/FLAC3D basics and engineering cases[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2009. (in Chinese))
- [6] 房艳峰, 高华喜. 悬臂式围护结构基坑的数值模拟[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2010, 29(1): 5 - 8. (FANG Yan-feng, GAO Hua-xi. Numerical simulation of excavation by cantilevered support[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2010, 29(1): 5 - 8. (in Chinese))

(本文责编 明经平)