

# 有无侧向约束夯实水泥土桩复合地基数值模拟

刘方, 刘杰, 何杰, 王垠翔

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 基于长桩侧向约束作用, 利用大型有限元软件 ADINA, 对柔性基础下夯实水泥土楔形桩及夯实水泥土圆柱形桩复合地基进行了数值模拟, 得到了在各级荷载作用下的桩土平均沉降差及桩土应力比, 并与无侧向约束条件时进行了对比。结果表明, 在侧向约束条件下, 与圆柱形桩复合地基相比, 楔形桩复合地基能减少桩土沉降差, 降低桩土应力比, 从而改善复合地基的工作性状, 为工程应用提供有益的参考。

**关键词:** 复合地基; 侧向约束; 楔形桩; 柔性基础; 数值模拟

中图分类号: TU413.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2011)02-0035-04

## Numerical Simulation of Rammed Soil-Cement Piles Composite Foundation with or without Lateral Constraints

Liu Fang, Liu Jie, He Jie, Wang Yinxiang

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Based on lateral restraint effect of long pile, conducts a numerical simulation with the large FEM software ADINA on the properties of the composite foundation with tapered piles and cylindrical piles under the flexible foundation, obtains the average differential settlements of pile and soil and the pile-soil stress ratio under different magnitudes, and compares it with no lateral restraint. The results show that the working properties of the composite foundation with tapered piles are much better than that with the cylindrical piles under the condition of lateral restraint: the differential settlements between pile and soil are decreased and the pile-soil stress ratio are reduced, therefore improves the working properties of composite foundation. Provides beneficial references for engineering application.

**Keywords:** composite foundation; lateral constraints; wedge pile; flexible foundation; numerical simulation

## 0 前言

对于软土地基上的路基, 其被过早破坏的原因之一是桩土之间的沉降差过大, 而这是在荷载作用下, 由桩顶向上刺入路堤引起。另外, 地基承载力不足, 在荷载作用下引起地基沉陷或地基土向两侧挤出而造成下沉。如果能有效地限制路堤下软基的竖向变形, 同时又能增强软基的刚度, 则能起到降低公路工后沉降的作用。在长短桩复合地基中, 短

桩所提高复合地基的承载力, 长桩能起到地下连续墙的作用, 约束复合地基的侧向变形, 从而改善软土复合地基的工作性状。

在工业与民用建筑中, 提出了多桩型复合地基法加固软土地基的加固技术, 并已具备了一定的理论与实践经验。陈强认为多桩型复合地基具有单一桩型复合地基无可比拟的优越性<sup>[1]</sup>。虽然刚柔性长短桩复合地基处理技术在工业与民用建筑中得到应用(刚性基础), 然而应用于公路或堤坝地基(柔性

收稿日期: 2010-12-31

作者简介: 刘方(1983-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为地基处理技术,

E-mail: 251494970@qq.com

基础), 至今还鲜见文献报道。

楔形桩起源于苏联。20世纪初, 他们对不同锥角的楔形单桩进行过系列实验研究, 20世纪70年代开始在工程上推广应用。Norlund对无黏性土中的楔形桩承载特性进行了研究, 发现圆柱形桩的竖向承载力要比平均直径相等的楔形桩承载力低很多<sup>[2]</sup>。

由于数值模拟方法相对于试验及理论研究方法具有更好的可操作性, 故这方面的研究成果相对较多。葛忻声等人利用有限元方法, 对同地质条件下的长短桩、全长桩、全短桩复合地基与天然地基的工作性状进行了应力、变形的对比分析, 结果表明: 长短桩复合地基在有效减小建筑物沉降量的同时, 还可降低基础沉降差, 使基础受力更均匀; 另外, 由于长桩的存在, 可使浅层土应力减少, 深层土的沉降值降低<sup>[3]</sup>。牛顺生等人在探讨长短桩复合地基承载力和沉降计算方法的基础上, 建立了长短桩复合地基优化设计数学模型, 提出了基于模拟退火算法的长短桩复合地基优化设计方法<sup>[4]</sup>。陈强等人对组合型复合地基进行了数值模拟实验研究<sup>[1]</sup>。石旭光、杨军龙在弹塑性理论基础上, 利用有限元软件分析了长短桩复合地基中长桩、短桩和桩间土的荷载分担情况, 及长短桩桩长、垫层厚度和弹性模量等因素对复合地基变形特性的影响<sup>[5-6]</sup>。

本文采用大型有限元软件ADINA, 对柔性基础下一组夯实水泥土圆柱形桩和一组楔角为 $1.19^\circ$ 的夯实水泥土楔形桩复合地基进行了数值模拟, 探讨了有无侧向约束条件下楔形桩及圆柱形桩复合地基的工作性状, 为水泥土桩复合地基的推广应用奠定基础。

## 1 有限元分析模型的建立

### 1.1 基本假定

- 1) 假定土体、褥垫层(标准砂)均为理想弹塑性体, 屈服准则采用Mohr-Coulomb屈服条件;
- 2) 假定桩体为线弹性体, 应力-应变符合广义虎克定律;
- 3) 同一种材料为均质、各向同性体;
- 4) 不考虑土体、桩体、垫层的重力(即不考虑土体原始位移场和应力场)。

5) 计算过程中桩土接触面摩擦系数保持不变。

### 1.2 计算模型

为排除边界条件影响, 经试算, 计算模型尺寸取 $3.0\text{ m} \times 3.0\text{ m}$ , 褥垫层尺寸取 $0.65\text{ m} \times 0.25\text{ m}$ 。由于模拟的是柔性基础下的荷载, 故将均布荷载直接作用于褥垫层上。边界条件应根据模型试验实际情况, 上表面为自由边界, 无约束; 底面在 $y, z$ 方向均施加约束, 左、右两面在 $y$ 方向上施加约束, 而在 $z$ 方向上可以发生竖向位移; 褥垫层左、右两面均施加 $y$ 向约束。桩、土及垫层均采用平面4节点单元, 合理的有限元网格划分如图1所示。计算模型中桩、土的计算参数见表1和表2。

为探讨侧向约束对复合地基沉降的影响, 在柔性基础边缘 $2\text{ m}$ 深范围内施加侧向约束, 如图1所示。

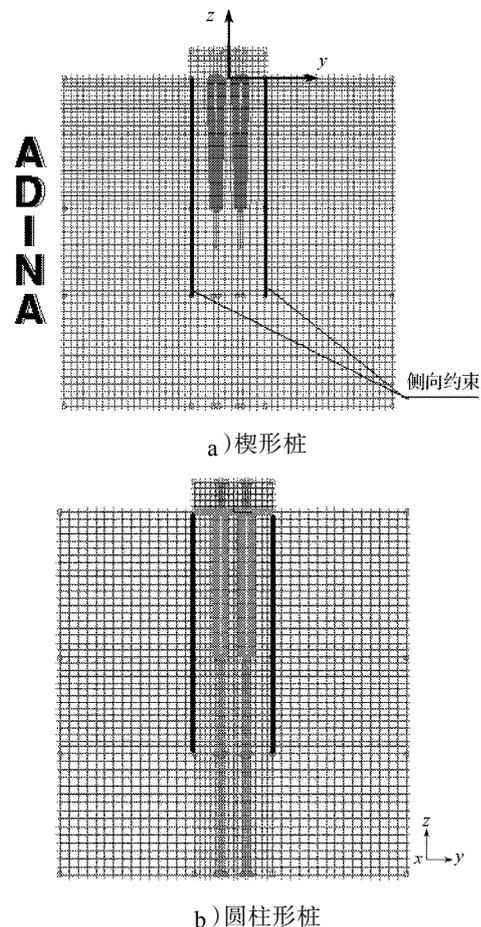


图1 计算模型有限元网格划分图

Fig. 1 Finite element mesh for calculating model

表1 有限元计算桩体参数

Table 1 The parameters of piles for FEM

试验编号	桩体类型	桩两端直径/m (顶/端)	楔角/ $^\circ$	复合地基 桩数/根	桩长/m	桩距/m	柔性荷载 加载范围/ $\text{m}^2$	弹性模量 $E_p/\text{MPa}$
1	圆柱形桩	0.075/0.075		9	1.2	0.225	$0.65 \times 0.65$	81.3
2	楔形桩	0.1/0.05	1.19	9	1.2	0.225	$0.65 \times 0.65$	81.3

表2 计算模型材料的物理参数

Table 2 The physical parameters of materials for calculation model

种类	弹性模量 / MPa	泊松比	内摩擦角 / (°)	黏聚力 / kPa	重度 / (kN·m <sup>-3</sup> )
桩体	81.3	0.30			20.03
桩端土	3.4	0.35	8.22	9.43	18.04
桩周土	3.4	0.35	8.22	9.43	18.04
垫层	41.5	0.30	35.00	0	19.07

## 2 结果对比分析

图2为楔形桩复合地基在无侧向约束条件下与圆柱形桩复合地基在有、无侧向约束条件下桩顶及桩周土顶表面平均沉降差与荷载的关系曲线。

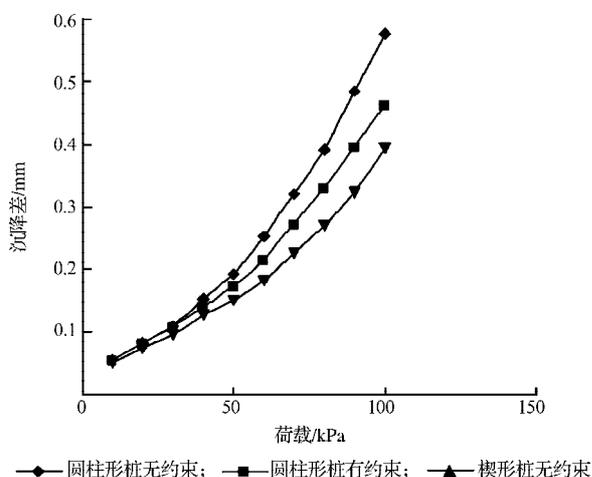


图2 荷载-沉降差曲线

Fig. 2 The curve of load - settlement difference

从图2可看出,当荷载小于22 kPa时,圆柱形桩复合地基有、无侧向约束的沉降差曲线基本吻合,侧向约束作用不明显;当荷载大于22 kPa时,圆柱形桩无侧向约束的沉降差增大幅度比有侧向约束时大;而楔形桩复合地基在无侧向约束时桩土沉降差小于圆柱形桩复合地基有、无侧向约束时的桩土沉降差,且随荷载的增大,沉降差亦增大,但圆柱形桩复合地基沉降差增大的幅度远高于楔形桩复合地基,也就是说,楔形桩桩土沉降差减少的效果远好于圆柱形桩。

图3为楔形桩复合地基在有、无侧向约束条件下桩顶及桩周土顶表面平均沉降差与荷载的关系。

由图3可以看出,当荷载小于30 kPa时,有、无侧向约束条件下的桩土沉降差曲线基本吻合;当荷载大于30 kPa时,有侧向约束条件下的桩土沉降差小于无侧向约束条件下的桩土沉降差,随着荷载的增大,沉降差增大,说明施加侧向约束可以减少楔

形桩复合地基的沉降差,改善复合地基的工作性状。

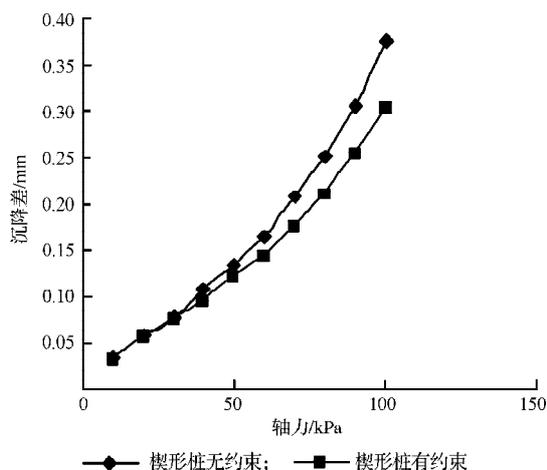


图3 荷载-沉降差曲线

Fig. 3 The curve of load-settlement difference

图4为楔形桩和圆柱形桩复合地基在有、无侧向约束条件下桩土应力比与荷载的关系曲线。

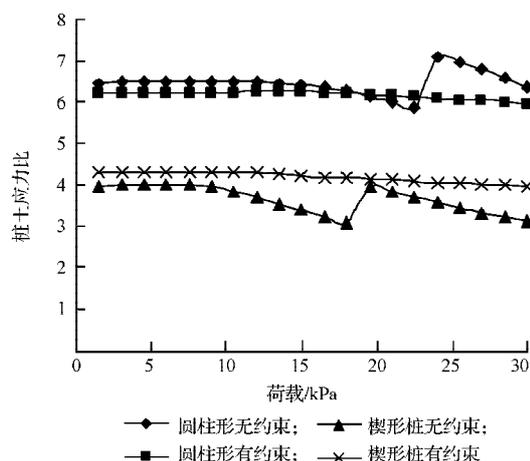


图4 荷载-桩土应力比曲线

Fig. 4 The curve of load vs pile-soil stress ratio

由图4可见,对于圆柱形桩复合地基,有侧向约束时的桩土应力比低于无侧向约束时的桩土应力比,而楔形桩复合地基有侧向约束时的桩土应力比略高于无侧向约束时的桩土应力比;有侧向约束时,随着荷载的增大,楔形桩和圆柱形桩的桩土应力比变化不大,而无侧向约束时,桩土应力比变化较大,甚至出现明显的拐点;楔形桩复合地基桩土平均应力均明显低于圆柱形桩复合地基,这说明楔形桩对降低复合地基中的桩土应力比,缓解桩顶应力集中,充分利用天然地基的承载能力具有良好的调节作用。

## 3 结论

1) 楔形桩和圆柱形桩复合地基在侧向约束时桩与桩间土之间的差异沉降均小于其无侧向约束时的

差异沉降;与圆柱形桩复合地基相比,楔形桩复合地基能较大幅度地减少桩与桩间土之间的差异沉降,从而改善柔性基础下复合地基的工作性状;同一种桩型在有无侧向约束条件下,沉降差都具有一个临界值,当荷载小于临界值时,侧向约束的作用不明显,当荷载大于临界值时,随着荷载的增大,沉降差也增大。

2)圆柱形桩复合地基有侧向约束时的桩土应力比低于无侧向约束时的桩土应力比,而楔形桩复合地基有侧向约束时的桩土应力比略高于无侧向约束时的桩土应力比;与圆柱形桩复合地基相比,楔形桩复合地基能较大幅度地减少桩土应力比,因此,楔形桩对缓解复合地基中桩顶应力集中,充分利用天然地基的承载能力具有良好的调节作用。

#### 参考文献:

- [1] 陈强,黄志义,左人宇,等.组合桩型复合地基的特性及其FEM模拟研究[J].土木工程学报,2001,34(1): 50-55.  
Chen Qiang, Huang Zhiyi, Zuo Renyu, et al. Behavior of Combined Composite Ground and Simulation Study by FEM[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(1): 50-55.
- [2] Norlund R L. Bearing Capacity of Piles in Cohesionless Soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations, 1963, 89(S3): 1-34.
- [3] 葛忻声,龚晓南,张先明.长短桩复合地基有限元分析及设计计算方法探讨[J].建筑结构学报,2003,24(4): 91-96.  
Ge Xinsheng, Gong Xiaonan, Zhang Xianming. FEM Analysis and Design Calculation Method of Long-Short-Pile Composite Foundation[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(4): 91-96.
- [4] 牛顺生,陈昌富,肖淑君,等.长短桩复合地基优化设计模拟退火算法研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2005,32(4): 24-28.  
Niu Shunsheng, Chen Changfu, Xiao Shujun, et al. Optimization Design of Long-and-Short-Piles Composite Foundation Based on Simulated Annealing[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2005, 32(4): 24-28.
- [5] 石旭光.刚柔组合桩复合地基性状的三维弹性分析[D].杭州:浙江大学,2001.  
Shi Xuguang. Three-Dimensional Elastic Analysis of Soft Combination-Pile Composite Foundation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.
- [6] 杨军龙.长短桩复合地基沉降计算[D].杭州:浙江大学,2002.  
Yang Junlong. Calculation of Long-Short-Pile Composite Foundation Settlement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [7] 杨利群.复合地基中散体材料桩荷载-沉降关系的数值分析[J].湖南工业大学学报,2008,22(4): 14-16.  
Yang Liqun. Numerical Analysis on the Load-Settlement Relation of Gravel Column in Composite Foundation[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2008, 22(4): 14-16.
- [8] 王亮亮,杨果林.桩承式路堤拱效应分析[J].湖南工业大学学报,2010,24(5): 67-70.  
Wang Liangliang, Yang Guolin. Subgrade Soil Arching Effect on Pile Reinforced Foundation[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2010, 24(5): 67-70.

(责任编辑:李玉珍)