

文章编号: 1001-1986(2011)06-0041-04

# 长短桩复合地基特性分析

## ——以盐城市某学校办公楼地基加固为例

曹 云, 孟云梅, 贾彩虹

(南京工程学院建筑工程学院, 江苏 南京 211167)

**摘要:** 为了更好地推广长短桩复合地基处理技术, 对其特性进行了研究。采用有限元分析法, 对同地质条件下的长短桩复合地基、全长桩、全短桩和天然地基 4 种地基加固方案进行了应力和变形的对比分析。研究表明, 作用相同荷载时, 全短桩加固地基的特性接近天然地基; 长短桩复合地基加固地基的特性接近全长桩加固地基。对比全短桩加固地基和天然地基, 长短桩复合地基可有效减小建筑物的沉降量和基础沉降差, 使基础受力更合理, 且与全长桩相比具有显著的经济效益, 其应用前景广阔。

**关键词:** 长短桩复合地基; 有限元法; 荷载-变形曲线; 沉降

**中图分类号:** TU473 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2011.06.010

### Characteristic analysis of long-short-pile composite foundation

CAO Yun, MENG Yunmei, JIA Caihong

(Department of Architecture, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** A practical engineering of the long-short-pile composite foundation is presented. By means of finite element analytical method, the stress distribution and displacement of four foundations reinforced by long-short-pile composite foundation, whole long piles, whole short piles and raft foundation under the same geological conditions have been compared and analyzed. The research results show that under the same loading condition, the characteristics of foundation reinforced by whole short piles are approximate to those of natural foundation while the characteristics of foundation reinforced by long-short-pile composite foundation are similar with those of foundation reinforced by whole long piles. Compared with foundation reinforced by whole short piles and raft foundation, the long-short-pile composite foundation can reduce the whole settlement and the settlement difference of foundation effectively, and it makes foundation more reasonable. Furthermore, long-short-pile composite foundation can achieve great economical benefit compared with whole long piles, therefore, it will be of immense foreground for engineering practice.

**Key words:** long-short-pile composite foundation; finite element method; load-deformation curve; settlement

长短桩复合地基是近几年广泛应用的一种地基处理方法, 它一般由刚性长桩与刚性、半刚性或柔性短桩复合而成。然而长短桩复合地基的理论研究远远落后于工程实践。到目前为止, 对长短桩复合地基的基本机理和工程性状的认识还不够深入和全面, 尚未形成比较完善的设计理论和计算方法。郑俊杰等<sup>[1]</sup>曾提出一些长短桩复合地基的承载力和沉降计算方法, 但目前工程中较多地还是依据地基处理规范中将短桩等效为长桩间的桩间土来进行设计计算, 是一种半经验半理论的方法, 较难合理反映长短桩复合地基的工程性状<sup>[2]</sup>。赵明华等<sup>[3]</sup>针对长短

组合桩复合地基的桩-土-承台整体相互作用特点, 基于剪切位移法建立了长短组合桩复合地基的沉降计算模型。杨敏等<sup>[4]</sup>对长短组合桩的研究也表明, 通过不同桩长的调整, 可有效利用地基中的硬土层, 并使设计合理, 获得较好的经济效益。刘海涛等<sup>[5]</sup>采用现场大型载荷试验研究了刚柔性长短桩复合地基性状, 但没有进行相应的数值分析研究。为更好地推广该地基处理技术, 本文通过有限元分析, 计算了同一工程背景下的几种地基加固的应力和变形特性, 揭示了长短桩复合地基加固方法在技术、经济上的合理性。

收稿日期: 2011-02-21

基金项目: 南京工程学院科研基金项目(QKJC2009004)

作者简介: 曹 云(1975—), 女, 江苏盐城人, 硕士, 讲师, 从事土木工程专业的教学和研究。

1 工程概况

盐城市某学校办公楼建于 1998 年。采用 5 层框架结构,建筑面积约 7 200 m<sup>2</sup>,为天然地基上的筏板基础,筏板厚 500 mm,基础长 110 m、宽 12 m。由于建筑物长宽比较大,因此可以简化为平面应变问题。由于不均匀沉降等原因,结构从底层到顶层出现了裂缝,宽度从数毫米到十几毫米不等。沉降观测表明,该楼虽建成十余年,但沉降还未稳定。因此必须对其地基进行加固处理,方能满足建筑物的正常使用功能。根据工程地质勘察报告,该建筑物土层分布及物理力学参数见表 1。

表 1 土层物理力学参数  
Table 1 Physic-mechanical parameters of soil layers

土层号	岩土名称	厚度/m	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	弹性模量 E <sub>s</sub> /MPa	地基承载力特征值 f <sub>a</sub> /kPa
1	杂填土	1.5				
2	淤泥质粘土	1.5	15	3	5	80
3	粉质粘土	2.0	30	20	10	180
4	淤泥质土	12.0	15	3	4	70
5	粉土	> 8	25	25	12	150

2 计算分析

2.1 有限元分析模型

用岩土工程有限元分析软件 PlaxisV8.0 对上述具体工程进行分析。土体采用莫尔-库伦弹塑性模型,计算参数见表 1。基础板厚 0.5 m,位于其下的碎石垫层厚 0.15 m。垫层也采用莫尔-库伦弹塑性模型。由于桩和筏板基础的刚度比周围土体大很多,工作状态下基本处于弹性阶段,故两者材料均可假定为线弹性体,采用线弹性模型,只涉及到弹性模量和泊松比这两个独立参数。考虑桩与土的相互作用,引入桩土接触面的强度折减系数  $R_{inter}$ 。有限元计算参数见表 2。根据长短桩复合地基的加固原理,并对照表 1 所示地层分布,为了有效利用第一硬层和第二硬层,短桩桩长取 3.5 m,长桩桩长取 18 m。桩满堂布置,桩间距为 2.5 m,长、短桩相间布置。基础板上均布荷载按结构实际作用荷载取为 85 kPa。

计算区域底面设定为完全固定支座,边界设在桩端下 1 倍桩长处,两边取至 50 倍桩径处。综合考虑,模型的计算范围取为 50 m×25 m。

PlaxisV8.0 具有完全自动生成有限元网格的功能。这里采用 15 节点三角形单元,程序自动剖分网格。网格生成过程以可靠三角剖分原理为基础,通过搜索最优三角形单元,生成一个非结构性网格。加固区和垫层区域网格加密,桩体简化为板桩形式。

表 2 有限元计算参数  
Table 2 Parameters of finite element analysis

材料	模型	弹性模量 E <sub>s</sub> /MPa	内摩擦角 φ/(°)	粘聚力 c/kPa	折减系数 R <sub>inter</sub>	泊松比 μ
长桩	线弹性	35 000			0.85	0.2
短桩	线弹性	35 000			0.85	0.2
基础	线弹性	35 000			0.85	0.2
垫层	莫尔-库伦	100	30	35	0.85	0.3
土层 1	莫尔-库伦	5	3	15	0.85	0.35
土层 2	莫尔-库伦	10	20	30	0.85	0.35
土层 3	莫尔-库伦	4	3	15	0.85	0.35
土层 4	莫尔-库伦	12	25	25	0.85	0.35

除了上述长短桩复合地基有限元模型建立和分析外,也分析了同等土质条件下,全长桩加固地基、全短桩加固地基和天然地基 3 种情况。

2.2 有限元结果分析

2.2.1 荷载-沉降曲线

图 1 为 4 种不同地基加固方案的荷载-沉降曲线,从图中可以看出,长短桩复合地基加固方案和全长桩加固方案的荷载-沉降曲线较为接近,均没有明显的下弯段。两者的接近主要是由于长短桩复合地基中长桩起到了控制沉降的作用。尽管长桩数量仅为全长桩加固方案的 3/5 左右,但其控制沉降的作用却和全长桩相当。当作用荷载为 85 kPa 时,长短桩复合地基加固方案的沉降为 113 mm,全长桩加固方案的沉降为 86 mm,两者差异并不是太大。而全短桩加固方案和天然地基上的筏板基础的荷载-沉降曲线较为接近,两者均有较明显的下弯段。两者的接近主要是由于短桩未能穿越基础板下的高压缩性土层,其表现的性质与筏板基础相似。当作用荷载为 85 kPa 时,全短桩加固方案的沉降为 273 mm,筏板基础为 335 mm,两者较为接近。因此,在控制沉降方面,短桩作用不大,而长短桩复合地基的作

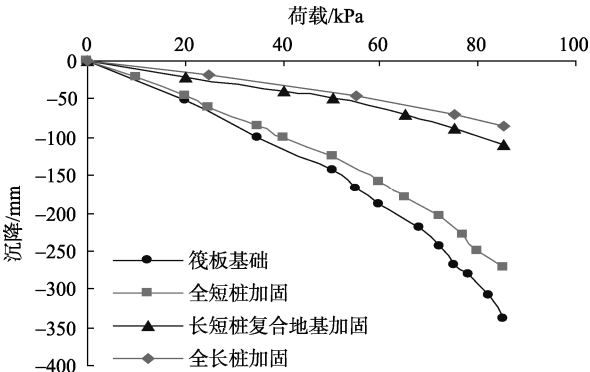


图 1 荷载-沉降曲线  
Fig. 1 Curves of load-settlement

用效果却接近于全长桩,其工程造价却远低于全长桩加固方案。

### 2.2.2 基础中心下土体沉降

图2所示为4种不同地基加固方案基础中心下的土体沉降分布。从图中可以看出,长短桩复合地基加固方案与全长桩加固方案基础中心下沉降分布较为接近;全短桩加固方案与天然地基上筏板基础中心下土体沉降分布较为接近。4条曲线明显分为两大类,其中全短桩加固方案和筏板基础的变形量很大;而长短桩复合地基加固方案和全长桩加固方案的沉降量较小。

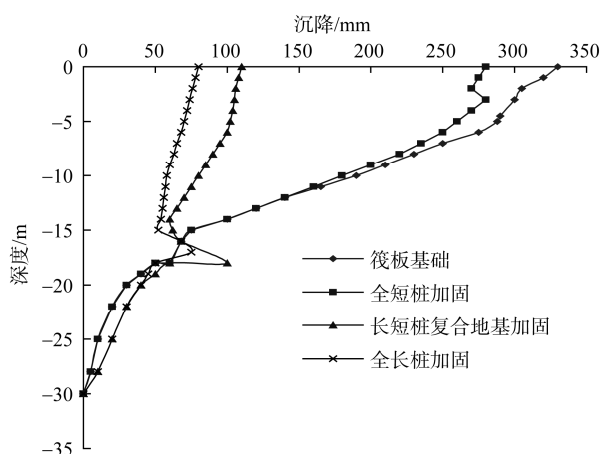


图2 基础中心下沉降分布

Fig. 2 Distribution of settlement at the center of foundation

从基础中心沉降沿深度的分布来看,全长桩和长短桩复合地基加固方案在桩端处的变形很大。这种现象符合桩的工作原理。桩体将荷载传递到力学性能较好和压缩性较低的持力层上,导致桩端土层的压缩量有所增加,但却大幅度减小了上部土体的压缩量。虽然长短桩复合地基中的长桩数量远比全长桩方案少,但控制沉降的效果却与全长桩相当。相反,全短桩加固方案控制沉降作用不大。在4.0 m以下,全短桩加固方案的沉降变形几乎与筏板基础相同,再往下两者的变形曲线几乎重合。所以,虽然全短桩加固方案能有效提高承载力,但是下卧层的沉降却无法消除,全短桩加固方案在具有高压缩性下卧层的地基土中控制沉降的作用不明显。

### 2.2.3 基底应力分布

图3是4种地基加固方案基底应力在横剖面上的分布。从图中可以看出,天然地基上的筏板基础基底应力分布最大;全短桩加固方案基底应力比筏板基础小。但两者的应力分布形状相似,都呈马鞍形——中间小,两头大,即基础中心点下基底应力最

小,离基础中心越远则基底应力越大。而长短桩复合地基和全长桩加固方案基底应力分布相近,但后者变化幅度更小,更均匀一些。由此可见,全短桩加固方案相比天然地基,可大大减少土中的应力。而全短桩方案的基底应力比长短桩复合地基和全长桩方案基底应力大。这表明经短桩加固的土体承受的荷载比长短桩和长桩加固的土体承受荷载大。这是由于短桩不能将荷载传递到更深土层,从而导致基底下土体的负担相应加大。而长短桩复合地基和全长桩加固方案由于有土层深部的长桩传递荷载,使得基底土中的应力分布比无桩(天然地基上的筏板基础)和全短桩方案减少很多。

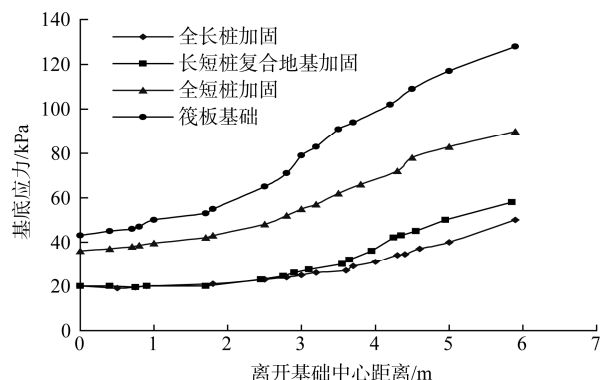


图3 基底应力分布

Fig. 3 Distribution of stress in foundation

### 2.2.4 土体中塑性区分布

图4和图5分别为筏板基础和全短桩加固方案的塑性区分布。图6和图7分别为长短桩复合地基和全长桩加固方案的塑性区分布。由图可以看出,全短桩加固方案与筏板基础具有相似的塑性区分布特征,两者的塑性区开展范围和强度都较大,且主要集中在上部土层。这是因为上部土层强度低,压缩性大,还具有流变性,导致土层产生次压缩而使得后期变形持续增大,从而影响建筑物的正常使用。两者的区别是在第三层土体上部,塑性区水平方向开展程度全短桩方案比筏板基础大。因为荷载在向下传递过程中,经短桩加固后,荷载传递时的扩散作用加强,所以塑性区开展范围增大,这也使得短桩加固后的土体沉降小于天然地基。同样,长短桩复合地基和全长桩加固方案具有相似的塑性区分布特性。两者的塑性区范围和强度远比全短桩和筏板基础小,只是零星地分布在基础板边缘及长桩桩端处。尽管长短桩复合地基中短桩长度较短,但由于长桩对塑性区的强度和发展起关键作用,所以短桩

对土体中塑性区的影响并不大。而由于长桩的桩端持力层有上部土体的超载作用,桩端处的零星塑性区并未连成一片,不能形成连续滑动面。所以采用长短桩复合地基能充分发挥短桩提高承载力和长桩控制沉降的能力,对有浅层两个硬层或多个硬层的工程,既能利用第一硬层土作为短桩持力层,又能利用第二或其它硬层土作为长桩持力层,起到控制沉降的作用。这就是长短桩复合地基加固地基的原理。

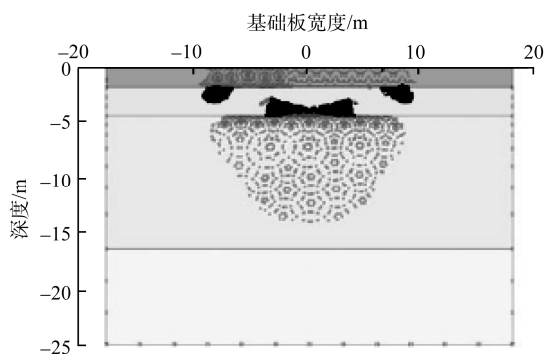


图 4 筏板基础塑性区分布

Fig. 4 Distribution of plastic range of raft foundation

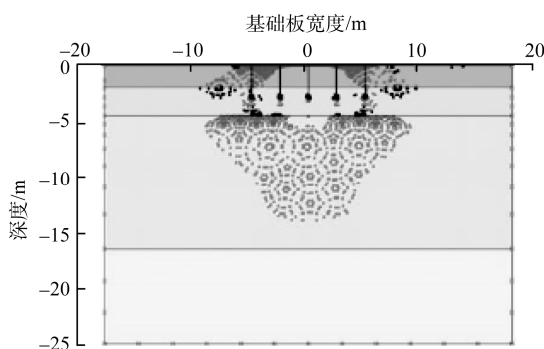


图 5 全短桩加固地基塑性区分布

Fig. 5 Distribution of plastic range of foundation reinforced by whole short piles

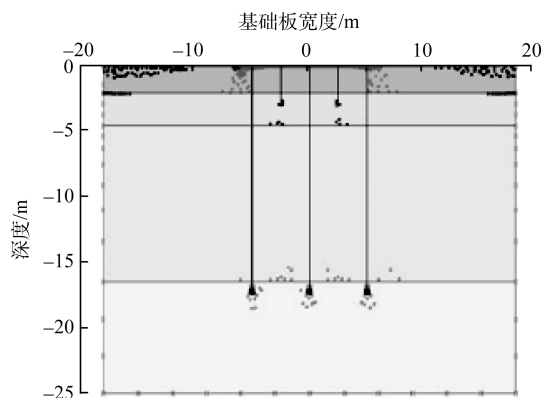


图 6 长短桩复合地基加固地基塑性区分布

Fig. 6 Distribution of plastic range of foundation reinforced by long-short-pile composite foundation

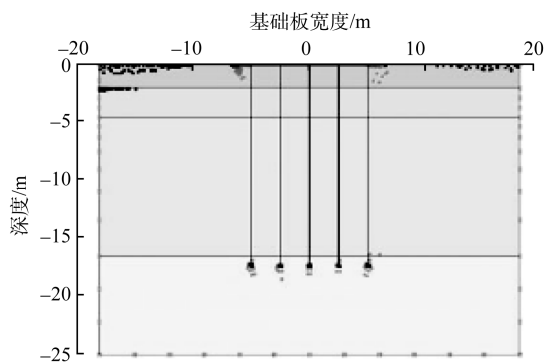


图 7 全长桩加固地基塑性区分布

Fig. 7 Distribution of plastic range of foundation reinforced by whole long piles

该工程后来采用长短桩复合地基加固方案,于 2006 年 10 月完成加固。加固完成后进行沉降观测,半年后最大沉降为 13 mm,差异沉降为 0.000 9,小于 0.002,此后沉降已趋于稳定,小于 0.01 mm/d 的控制标准,满足设计要求。

### 3 结 论

a. 长短桩复合地基和全长桩加固地基具有相似的荷载-沉降曲线,两者基础中心下的土体沉降分布较为接近,并具有相似的基底应力分布和塑性开展区。同样,全短桩加固地基和天然地基上的筏板基础具有相似的荷载-沉降曲线,两者基础中心下的土体沉降分布也较为接近,且具有相似的基底应力分布和塑性开展区。

b. 跟全短桩加固方案和天然地基相比,长短桩复合地基和全长桩加固方案可大幅度减少总沉降量和差异沉降,减少基底应力和不均匀程度,减少塑性开展区及强度。

c. 由于长短桩复合地基加固效果接近于全长桩,但施工难度及工程造价远比全长桩方案低,因此对具有浅深两个或多个硬层的工程可以采用长短桩复合地基加固,使长、短桩分别发挥各自作用。由于其具有良好的经济效益,其应用前景广阔。

### 参考文献

- [1] 郑俊杰,区剑华. 多元复合地基的理论与实践[J]. 岩工程学报, 2002, 24(2): 208-212.
- [2] 陈龙珠,梁发云,严平,等. 带褥垫层刚-柔性桩复合地基工程性状的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(3): 125-129.
- [3] 赵明华,张玲,杨明辉. 基于剪切位移法的长短桩复合地基沉降计算[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 994-998.
- [4] 杨敏,杨桦,王伟. 长短桩组合桩基础设计思想及其变形特性分析[J]. 土木工程学报, 2005, 38(12): 103-108.
- [5] 刘海涛,谢新宇,程功,等. 刚柔性桩复合地基试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 303-306.