

垫层厚度对复合地基特性的影响数值分析

翟晓力¹, 葛忻声²

(1. 山西水利职业技术学院, 山西 太原 030027; 2. 太原理工大学 建筑与土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 利用有限元分析软件 ANSYS 建立长短桩复合地基数值模型, 探索了垫层厚度变化对长短桩复合地基中长桩与短桩中角桩、边桩和中桩的沉降和应力特性的影响, 得出如下结论: 随着垫层厚度的增大, 长桩桩体沉降也随之减小, 短桩各桩体的沉降最大沉降值都出现在垫层厚度为 0.15 m 时, 并且在各种情况下短桩各桩体的沉降基本一致; 长桩各桩体的应力值随着垫层厚度的增大随之降低, 但变化越来越不明显, 尤其是厚度在 0.3 m ~ 1.0 m 之间, 基本没有变化。通过实际工程结合数值模型分析结果表明, 垫层厚度的最经济值应该取 0.3 m ~ 0.6 m 之间。

关键词: 垫层; 长短桩复合地基; 有限元法; 沉降; 应力

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)06—0035—05

Numerical Analysis for Influence of Cushion Thickness on Characteristics of Composite Foundation

ZHAI Xiao-li¹, GE Xin-sheng²

(1. Shanxi Vocational and Technical College of Water Conservancy, Taiyuan, Shanxi 030027, China;

2. College of Architectural and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: By using the finite element analysis software ANSYS to establish the numerical model of long-short-pile composite foundation, the influence of cushion thickness variation on the settlement and stress characteristics of the corner pile, side pile and center pile in long-short-pile composite foundation is researched here in detail. The analysis results show that with the cushion thickness increasing, the settlement of long pile also decreases, when the cushion thickness is 0.15 m, the maximum settlement of short pile appears, and in various cases, the settlement values of short pile are general in agreement; With the cushion thickness increasing, the stress value of long pile decreases, but the change is less and less obvious, especially when the thickness is from 0.3 m to 1.0 m, there is no change. Combined practical engineering with numerical model analysis, it is shown that the most economic value of cushion thickness should be between 0.3 m to 0.6 m.

Keywords: cushion; long-short-pile composite foundation; FEM; settlement; stress

0 引言

随着地基处理技术的不断发展, 复合地基技术在土木工程建设中广泛地应用。复合地基^[1]是指天然地基在地基处理过程中部分土体得到增强, 或被置换, 或在天然地基中设置加筋材料, 加固区是由基体(天然地基土体或被改良的天然地基土体)和增强体两部分组成的人工地基。增强体是由强度和模量

相对原土高的材料组成, 按照习惯将竖向增强体称为桩。为了充分发挥复合地基的承载特性, 黄熙龄先生提出在承台下设置褥垫层, 以改良地基中桩土荷载的分配, 充分发挥地基土的承载能力。垫层在复合地基中有着极为重要的作用, 可以有效地调整复合地基的桩土荷载分配, 充分发挥土体的承载能力特别是发挥浅层土体的承载作用^[2-6]。

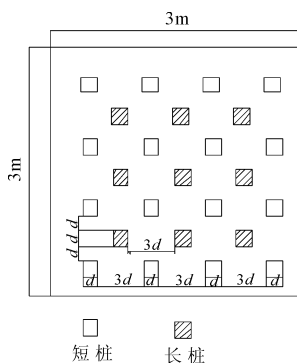
本文利用有限元分析软件 ANSYS 建立长短桩

复合地基模型,探索了垫层厚度变化对长短桩复合地基沉降和应力特性的影响,供工程设计人员参考。

1 计算模型与设计方

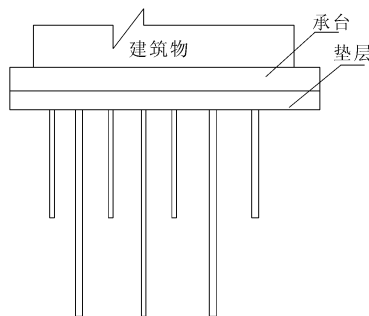
1.1 计算模型

结合目前的实际工程,考虑到长桩、短桩、桩间土相互布置及其作用的复杂性,本文仅考虑长桩与



(a) 平面布置图

短桩等距布置和均质土体的情况。计算模型采用长桩 9 根与短桩 16 根相结合的梅花形平面等距的桩体布置形式(即长 9 短 16 布置模型),具体布置如图 1 所示。由于长 9 短 16 的布置,对于长桩、短桩都有中桩、角桩、边桩的区分,所以把它可作为进行数值模拟的基本布置。



(b) 剖面图

图 1 长短桩复合地基计算模型桩位布置图

严格的说,复合地基的特性分析是一个空间问题。本文对长桩、短桩、承台、土体分别进行离散,长桩和短桩均采用空间杆单元,承台使用弹性壳单元,土体则采用三维结构实体单元^[7]。在实际工程中,土的工程性状是具有非线性的,但在常规荷载作用下,其塑性范围小,非线性表现并不明显,土体基本处于弹性状态,另一方面,即使土体存在非线性,用线弹性分析也不能改变其内在规律性的东西。分析时,采用三维线弹性模型。不考虑桩土间的相对滑动,不考虑土体、桩以及承台的重力(即不考虑原始位移和重力)。本文在计算分析时,由于模型和荷载、边界条件等均具有对称性,故取模型的 1/4 作为研究对象(图 2 所示)。

在基本模型中,长桩入土部分长度为 20 m,短桩入土部分长度 10 m,长桩为混凝土桩,短桩为搅拌桩,长桩与短桩均采用方桩,桩截面为 400 mm × 400 mm,桩间距均为 3 d (d 为桩径),即为 1.2 m。

垫层采用碎石垫层,承台采用混凝土,面积均为 3.0 m × 3.0 m。

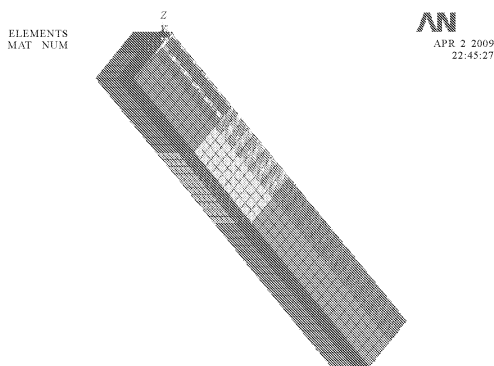


图 2 模型有限元网格图(1/4)

在计算分析中,对长桩、短桩、承台和碎石垫层以及土层各计算参数分别取有代表性的数值,取值如表 1。

表 1 有限元计算参数

| | 土体 | 长桩 | 短桩 | 垫层 | 承台 |
|--------------------------------------|------|-------------------|------------------|------------|------------|
| E_0/MPa | 8.13 | 30000 | 360 | 105 | 30000 |
| μ | 0.35 | 0.20 | 0.25 | 0.35 | 0.20 |
| $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 1780 | 2500 | 1750 | 2000 | 2500 |
| 土性描述 | 均质土体 | 混凝土桩,有限元计算长度 20 m | 搅拌桩,有限元计算长度 10 m | 厚度为 300 mm | 厚度为 400 mm |

根据试算,模型边界条件设在土体深度至少 3

倍的长桩长度(即 60 m)处,宽度为 50 m。在两个对

称侧面上施加对称约束,在两个外侧边界面上施加 x 向和 y 向的位移约束,土体底端固定,水平边界水平向约束、竖向滑动(如果求解区域足够大,则边界条件对计算结果影响不大)。

据文献[8],高层建筑的重量约为 $18 \text{ kN/m}^2 \sim 20 \text{ kN/m}^2$ (层),根据实际工程情况,因而考虑选取 20 kN/m^2 (层)进行计算。在模型加载时考虑共分 5 级

荷载,分别为 4 层(80 kPa)、8 层(160 kPa)、16 层(320 kPa)、24 层(480 kPa)和 32 层(640 kPa)进行计算。

1.2 设计方案

在基本模型里,其他参数保持不变的情况下,通过改变垫层厚度来分析沉降和应力的变化。计算参数见表 2,方案对比见表 3。

表 2 有限元计算参数

| | 土体 | 长桩 | 短桩 | 垫层 | 承台 |
|--------------------------------------|------|--|---|------|----------------------------|
| E_0/MPa | 8.13 | 30000 | 360 | 105 | 30000 |
| μ | 0.35 | 0.20 | 0.25 | 0.35 | 0.20 |
| $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 1780 | 2500 | 1750 | 2000 | 2500 |
| 土性描述 | 均质土体 | 混凝土桩,桩截面为 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$,有限元计算长度 20 m | 搅拌桩,桩截面为 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$,有限元计算长度 10 m | 碎石垫层 | 混凝土承台,厚度为 400 mm |

表 3 方案对比表

| | 方案 1 | 方案 2 | 方案 3 | 方案 4 | 方案 5 |
|--------|------|------|------|------|------|
| 垫层厚度/m | 0 | 0.15 | 0.30 | 0.60 | 1.00 |
| 参数描述 | 同表 2 | 同表 2 | 同表 2 | 同表 2 | 同表 2 |

2 计算结果分析

2.1 对沉降特性的影响

在长短桩复合地基中,长桩和短桩的模量一般均大于地基土的模量,当垫层厚度为 0 时,即是无垫层的情况,承台直接与桩和桩间土接触,基础承台的刚度一般都很大,其自身的变形都很小。这样在上部荷载的作用下,桩间土受压逐步固结,沉降加大,土体分担荷载降低,甚至承台与桩间土脱离,最后造成上部荷载全部由桩体来承担,而褥垫层的设置较好地解决了这一问题。

从图 3 和图 4 中可以看出:无垫层时,长桩和短桩的沉降大小差异很小,而有垫层时它们之间的沉降差异较大。无垫层时短桩的总沉降比有垫层时都小,这是因为长桩桩体模量远远大于短桩模量和土体模量,无垫层时荷载主要由长桩来承担,随着垫层厚度的增加,短桩和土体承担的荷载随之增加,并且土体发挥的作用越来越大。但对于长桩而言正好相反,无垫层时的沉降比有垫层沉降时大。这是因为由于垫层的存在,使基础的应力分布产生变化,桩土共同承担荷载。而无垫层时,地基中主要由刚柔性桩来承担外荷载,这样就变成了桩基础的受力机理,由于桩身的刚度较大,压缩性小,必然整个基础的沉降会减少。对于长桩和短桩,由于基础对各桩位移

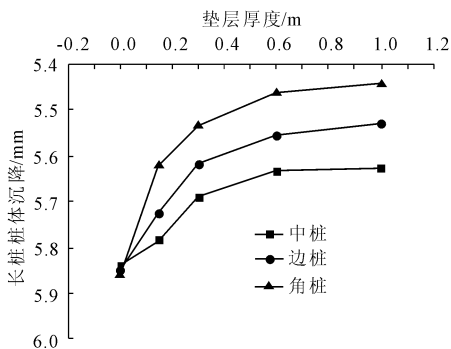


图 3 垫层厚度变化时长桩沉降变化图

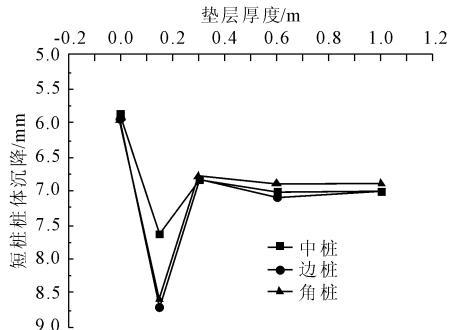


图 4 垫层厚度变化时短桩沉降变化图

有约束作用,地基中各桩引起桩间土的应力重叠,使中桩的桩身附近及桩尖处土体中的附加应力大于角桩和边桩,因此,中桩有更大的沉降趋势,由于垫层具有流动性,桩在荷载作用下产生的应力集中使垫层发生侧向流动,这就使得荷载必须由中桩向周围

的桩转移,使桩土间的应力重新分配,调节变形,以保证沉降一致。

复合地基有垫层的铺设时,其总沉降应该随着垫层厚度的增加而减少,但是当垫层厚度过小时,短桩的沉降反而变大。这是由于短桩模量相对于长桩模量小,垫层厚度太小时,在上部荷载作用下,垫层的作用没有充分发挥。但随着垫层厚度的增加,沉降变化是越来越小,但变化幅度越来越不明显。从图 3 和图 4 中可以看出,在 0.3 m ~ 1.0 m 之间,沉降变化很小,尤其是短桩的沉降基本一致。所以垫层厚度应该选择一个最经济值。

随着垫层厚度的增加,桩的沉降基本保持不变,桩间土的沉降增加幅度较大。这是因为:垫层厚度加大,桩顶作用的荷载减小,而土体表面作用的荷载增加,使得桩顶沉降略有减小,而土表面沉降增大。当垫层厚度达到一定水平,荷载已得到充分调整,桩顶、土表面应力值基本不变,两者沉降量的差值主要是垫层压缩量引起的。作用的荷载增加,使得桩顶沉降略有减小,而土表面沉降增大。当垫层厚度达到一定水平,荷载已得到充分调整,桩顶、土表面应力值基本不变,两者沉降量的差值主要是垫层压缩量引起的。

2.2 对应力特性的影响

复合地基区别桩基的关键是褥垫层的设置。在计算模型中,长桩各桩体的最大应力值出现在中性点处。从图 5 中可以看出,随着垫层厚度的增加,长桩各桩体的应力呈减小的趋势,但变化的幅度越来越小,垫层厚度从 0.3 m 到 1.0 m 之间应力的变化几乎没有改变。

当垫层厚度为零时相当于桩基的情况,复合地基中长桩与短桩桩体应力分布完全不同。长桩桩体应力比有垫层时大,而短桩正好相反,比有垫层时小。这是由于此时复合地基的受力特性跟传统桩基础设计相同。此时土体基本不承担外荷载,短桩虽然承担着荷载,但由于其模量与长桩相差较大,桩身压缩量大,承担的外荷载较小。而长桩则承担着大部分外荷载。从图 5 和图 6 中可以看出,此时长桩和短桩桩体 Z 轴方向应力均为角桩最大、边桩次之、中桩最小,但是长桩各桩桩体应力变化较大,范围在 4 800 kPa 到 7 200 kPa 之间,短桩各桩桩体应力变化较小,范围在 50 kPa 到 300 kPa 之间变化。

当复合地基铺设垫层时,长桩的应力最大值在桩顶附近的某一深度处。这是由于垫层的调整作用,使桩和土之间和荷载发生再分配。短桩的应力

最大值基本都处于桩顶处,但具体位置有所区别。长桩和短桩桩身应力随着垫层厚度的增加都有所变化,不过长桩的变化幅度大一些,短桩则没那么显著。在桩身下部,曲线基本重合,即基本不受垫层厚度变化的影响。

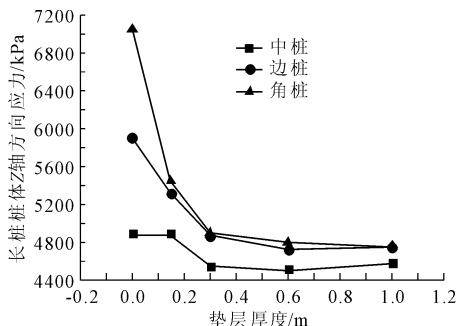


图 5 垫层厚度变化时长桩桩体最大应力值变化图

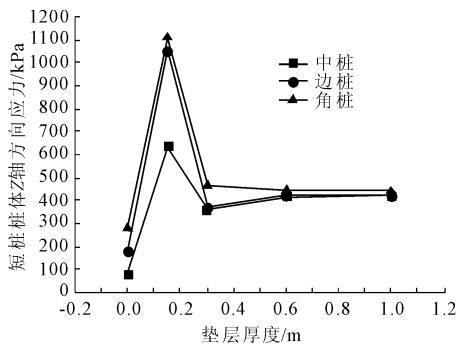


图 6 垫层厚度变化时短桩桩体最大应力值变化图

从图 5 和图 6 可以看出,褥垫层厚度的变化对桩体应力有较为明显的影响。对于长桩来说,随着垫层厚度的增加,长桩各桩体的应力基本呈现出下降趋势,中桩应力值减小的趋势最平缓,边桩应力值减小趋势有所增加,角桩应力值减小趋势最大。表明垫层设置降低了复合地基中基础对各桩体位移的约束,可降低架越作用,改善整个复合基础的受力状况,并说明褥垫层厚度对桩顶荷载分担的影响较大,同样对桩土荷载分担具有良好的调节能力。但随着垫层厚度的增加,变化的幅度越来越小,垫层厚度从 0.3 m 到 1.0 m 之间应力的变化几乎没有改变。短桩各桩体的应力值变化规律基本一致,但应力最大值出现在垫层厚度为 0.15 m,并且各桩应力大小差异明很大。表明褥垫层厚度过小,会产生桩对基础的应力集中现象,需考虑桩对基础的冲切,另外褥垫层厚度过小,桩间土的承载能力就不能充分发挥。若褥垫层厚度过大,会导致桩土应力比等于或接近于 1,此时桩承担的荷载太少,实际上复合地基中桩的设置已失去了意义。这样的设计,不但地基承载

力提高幅度不大,还会加大建筑物的变形。从图5和图6中可以看出,当褥垫层厚度从0.3 m增加到1.0 m时,桩体应力变化幅度减小,说明在一定厚度的垫层内,荷载已得到了相当充分的调整。随着垫层厚度的增加,褥垫层的作用将变得越来越不明显,所以如果仅仅通过增加垫层厚度来改变长短桩复合地基特性,这在工程中很不经济。因此,为了充分发挥褥垫层的作用和从工程经济性的角度考虑,在设计中垫层的厚度不宜太大,当然也要避免褥垫层设计过薄,以免出现桩体应力集中现象。在实际工程应用中,褥垫层厚度通常在0.2 m~0.3 m之间。

以上计算分析的结果与理论是基本吻合的,当复合地基承台下不设置垫层,由于土体模量与桩体模量相差较大,特别是与长桩桩体相差较大,根据变形协调原理,上部荷载基本上由桩体来承担。这时桩体的应力较大,不仅对桩体本身不利,而且对承台板的抗冲切能力也是不利的。通过设置垫层后,由于桩体相对于土体而言,在受荷载后不易下沉,此时桩顶上部的褥垫层在受压后向桩顶四周流动。正是桩体向褥垫层的刺入以及褥垫层材料向桩间的流动补偿作用,桩间土的应力才得到有效地发挥,同时增加了桩间土对桩体的围压作用。桩顶应力的降低和桩侧围压的增大都减少了桩的沉降,降低了桩端和桩端土的相对变形,也延缓了桩端塑性区的发展,从而改善了长短桩复合地基的承载特性。

分析计算中长短桩应力比值和长桩土应力比随着垫层厚度的增加而增加,而短桩土应力比值则刚好相反。这是因为垫层厚度增加对复合地基应力分配的调整。垫层厚度越大,桩土应力比越大,刚性桩的应力集中程度越高。岂连生通过试验研究了褥垫层厚度对CFG桩复合地基桩土应力比的影响^[9],当褥垫层厚度为300 mm时,实测桩土应力比为9.5;当褥垫层厚度为250 mm时,实测桩土应力比为12.6,也就是说桩分担的荷载增加了。因此,由于褥垫层厚度不同,也使得桩土应力比不同。

在分析过程中发现因为当垫层取最经济值的时候,复合地基中的应力分配和荷载承担比例是最合

适的,它能充分发挥桩土的受力特性,离开这个最经济值,复合地基必然会引起应力集中。

3 结 论

通过以上的分析计算,得出以下结论:

(1) 长桩桩体沉降随着垫层厚度的增大也随之减小。在垫层厚度为0时,中桩沉降<边桩沉降<角桩沉降。有垫层时中桩沉降>边桩沉降>角桩沉降。

(2) 随着垫层厚度的增大,短桩各桩体的沉降最大沉降值都出现在垫层厚度为0.15 m时,并且在每一种情况下短桩各桩体的沉降相差不大,基本一致。

(3) 长桩各桩体的应力值随着垫层厚度的增大随之降低,但变化越来越不明显,尤其是厚度在0.3 m~1.0 m之间,应力变化很小,基本没有变化。

(4) 对比图中的应力比分析,结合实际工程实践,垫层厚度的最佳值应该取0.3 m~0.6 m之间。

参考文献:

- [1] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 李进军, 黄茂松, 史三元. 复合地基上褥垫层设计的理论与试验研究[J]. 工业建筑, 2003, 33(11): 5-9.
- [3] 王凤池, 朱浮声, 王述红, 等. 复合地基的褥垫层设计[J]. 东北大学学报, 2004, 25(3): 287-290.
- [4] 李小青, 贾海艳, 黄 丹. 复合地基垫层调节作用研究[J]. 地质与勘察, 2008, 44(1): 102-108.
- [5] Engelhardt K, Golding H C. Field testing to evaluate stone column performance in a seismic area [J]. Geotechnique, 1975, 25(1): 61-69.
- [6] Randolph M F, Wroth C P. Analysis of deformation of vertically piles [J]. J of Geotechnical Engineering, 1978, 104(2): 1465-1488.
- [7] 郝文化. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [8] 赵西安. 高层建筑结构实用设计方法[M]. 上海: 同济大学出版社, 1988.
- [9] 岂连生. 低强度混凝土桩与振密砂石桩复合地基试验与应用[J]. 建筑结构, 1999, 8(8): 42-44, 51.