

文章编号:1671-6833(2010)01-0023-03

## 桩筏基础变刚度设计有限元分析

郭院成<sup>1</sup>, 赵旭阳<sup>2</sup>, 张四化<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 合生创展集团有限公司, 北京 100124)

**摘要:** 针对桩筏基础等刚度设计条件下普遍存在的“碟形沉降”现象, 从变形控制角度出发, 将筏底桩体视为非线性弹簧, 采用单桩载荷试验所得  $Q-s$  曲线作为弹簧刚度, 建立了桩筏基础简化分析模型。通过数值模拟手段, 采用平面变刚度、竖向变刚度和空间变刚度三种设计方法降低筏板基础的差异沉降, 比较分析了桩筏基础均布荷载下各种设计方法的沉降特征。结果表明桩筏基础的空间变刚度可有效减小基础差异沉降, 改善基础受力变形特征, 并降低材料用量, 技术经济效益显著。

**关键词:** 土木建筑工程设计; 变刚度设计; 数值模拟; 桩筏基础; 差异沉降

**中图分类号:** TU473.1<sup>1+2</sup>

**文献标识码:** A

### 0 引言

桩筏基础是软土地基上高层建筑广泛采用的基础型式, 常规设计方法按照基础所受外荷载和单桩承载力确定桩数, 采用等长度均匀布桩的等刚度设计方法。而实测沉降表明采用这种设计方法, “碟形沉降”仍不可避免, 特别是框-剪、框-筒、筒中筒结构等由于荷载在平面上的不均匀分布, “碟形沉降”尤为明显, 进一步导致上部结构产生次应力和基础内力增大, 是筏板厚度增加、配筋增多的根源<sup>[1-4]</sup>。

笔者参考文献[5-6]方法, 运用 ANSYS 数值分析软件, 通过调整筏板下基桩的布置形式, 从而改变基础的刚度布置, 模拟分析桩筏基础沉降变形特征与基础刚度分布间的关系, 提出以减小筏板差异沉降为目标的控制原则。

### 1 计算模型

桩筏基础共同作用分析时, 将桩简化成弹簧作用在筏板下, 然后进行筏板的分析, 所以群桩中单桩刚度的确定是桩筏基础共同作用分析的关键。单桩的轴向刚度是指桩和土组成的整个系统在桩顶产生一个单位竖向位移所需的轴向荷载, 即  $dQ/ds$ 。目前确定弹簧刚度有两种方法: 一种是根据单桩静载荷试验的  $Q-s$  曲线; 另一种是各种共同作用分析方法计算桩-桩和桩-土的相互作

用系数进而得出群桩中基桩的刚度<sup>[4]</sup>。

笔者将筏板视作为弹性板, 按 Kirchhoff 的薄板小挠度理论假定, 采用 SOLIDE45 单元模拟三维实体结构, 相应节点上的桩用 COMBIN39 非线性弹簧来模拟, 不考虑桩间土的有利影响, 采用有限单元法计算基础沉降, 如图 1。笔者采用实测的  $Q-s$  曲线作为弹簧刚度, 计算筏板沉降值, 从而得出等刚度均匀布桩下筏板的差异沉降值。而后通过改变桩的空间布置形式, 即变刚度设计控制筏板的差异沉降。

### 2 分析方案

模型采用郑东新区会展宾馆试桩  $Q-s$  曲线(图 2)模拟桩。筏板及桩体材料均采用 C50 级砼, 筏板尺寸  $43 \times 43$  m, 厚度 3 m, 桩间距 3 m, 桩径 1 m, 有效桩长 47 和 40 m 两种桩型, 桩位平面布置如图 3 所示。

施加竖向均布荷载根据郑东新区会展宾馆核心筒区设计值取  $1\,500\text{ kPa}$ <sup>[7]</sup>。如无特殊说明, 以下分析均取筏板底面 1-1 和 2-2 截面沉降特征进行分析。

笔者采用抽桩、变桩长的方式实现对桩筏基础的变刚度设计, 分为平面变刚度、竖向变刚度和空间变刚度 3 种方法, 比较分析了等刚度均匀布桩和各种变刚度工况下两个截面的沉降特征。

收稿日期: 2009-08-06; 修订日期: 2009-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978235)

作者简介: 郭院成(1965-), 男, 河南辉县人, 教授, 博士, 博士生导师。主要从事复合地基处理技术和基坑支护工程的科研和教学工作, E-mail: guoyc@zzu.edu.cn

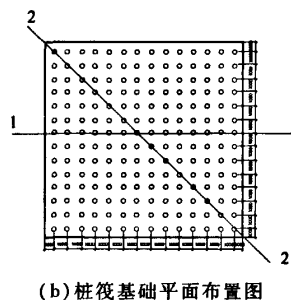
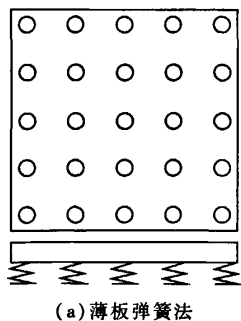
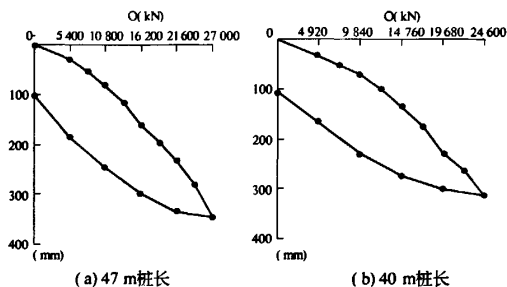


图1 基础计算模型

Fig. 1 Numerical Simulation - Model of foundation

图2 灌注桩  $Q-s$  曲线Fig. 2  $Q-s$  curves for the bored piles

平面变刚度即是在满足承载力条件下,抽取筏板外围第二排桩;竖向变刚度采用外部布短桩、内部布长桩的方式实现对均布荷载作用下桩筏基础的竖向变刚度设计.采用了先变筏板外围一排长桩为短桩再变四排为短桩的方法,实现桩筏基础差异沉降的逐步减小和调平.空间变刚度设计方法,即抽取筏板外围第二排桩,并且在筏板中部  $15\text{ m} \times 15\text{ m}$  范围内布置 47 m 的长桩,其余桩长 40 m.

### 3 数值模拟结果分析

图 3、4 是均布荷载下桩筏基础等刚度布桩和采用 3 种变刚度方法时两个截面沉降曲线对比图.

通过对比均布荷载下桩筏基础五种布桩方式下两个典型截面的沉降曲线,可以得出以下规律:

(1) 均布荷载等刚度布桩情况下,在中心部位沉降最大,周围沉降逐渐变小.

(2) 平面变刚度使均布荷载下等刚度布桩时的“碟形沉降”得到了显著改善,中间呈鼓起形态,沉降最大点由筏板中心转移到了外围.对比均布荷载等刚度布桩结果,1-1 截面沉降最大值由 13.5 mm 增加到了 17.4 mm,但是差异沉降却由 3.4 mm 下降到了 2.8 mm. 2-2 截面沉降最大值

由 13.5 mm 增加到了 17.4 mm,差异沉降由 5.5 mm 略微增加到了 6.4 mm.说明抽桩改变桩基础平面刚度的方式对筏板沉降性能影响较为复杂,抽桩不慎可能导致筏板基础的局部差异沉降增大.

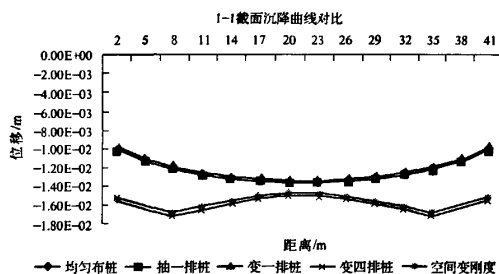


图3 桩筏基础均布荷载下各布桩方法 1-1 截面沉降曲线对比

Fig. 3 Comparison of settlement on section 1-1 between different design methods of piled raft foundation under uniform load

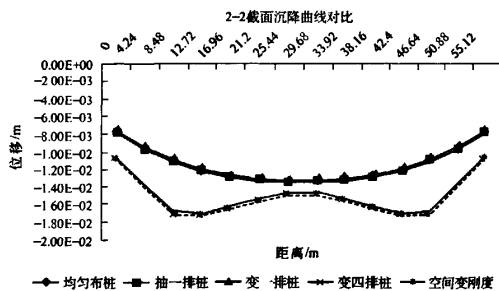


图4 桩筏基础均布荷载下各布桩方法 2-2 截面沉降曲线对比

Fig. 4 Comparison of settlement on section 2-2 between different design methods of piled raft foundation under uniform load

(3) 竖向变刚度下,当筏板周围布四排 40 m 短桩时,1-1 截面最大沉降 13.3 mm,差异沉降 3.5 mm, 2-2 截面最大沉降 13.3 mm;差异沉降

5.5 mm. 与均布荷载下 47 m 桩长等刚度布桩结果相比,1-1 截面差异沉降增大 0.1 mm,2-2 截面差异沉降无变化,同样说明桩长仍存在进一步优化的空间. 与筏板外围布一排 40 m 短桩结果相比,1-1 截面差异沉降无变化,2-2 截面差异沉降减小 0.2 mm,验证了短桩数量的增加使得差异沉降逐步减小的结论.

(4)空间变刚度设计使“碟形沉降”得到了有效改善,沉降最大点由筏板中心转移到了外围,筏板中部呈鼓起状态.1-1 截面最大沉降 17.4 mm,差异沉降 2.6 mm,2-2 截面最大沉降 17.1 mm,差异沉降 6.4 mm. 与均布荷载下 47 m 桩长等刚度布桩结果相比,1-1 截面差异沉降减小 0.8 mm,2-2 截面差异沉降增加 0.9 mm. 与平面变刚度结果相比,1-1 截面差异沉降继续减小 0.2 mm,与竖向变刚度结果相比,1-1 截面差异沉降继续减小 0.9 mm,因此均布荷载下桩筏基础空间变刚度方法优于其他两种变刚度方法.

#### 4 结论

(1)均布荷载下桩筏基础平面变刚度使得碟形沉降得到了有效改善,筏板的最大沉降位置发生了转移,基础不均匀沉降差得到了有效控制.

(2)对于本工程,7 m 的桩长改变量对于降低桩筏基础的差异沉降效果不很明显,桩长仍存在较大的优化空间.

(3)均布荷载下桩筏基础空间变刚度设计方案可以有效改善等刚度布桩时的碟形沉降,而且绝

对沉降小于抽桩时的结果,差异沉降控制效果最好.

(4)通过均布荷载和非均布荷载下桩筏基础的变刚度设计,可以看出后者筏板差异沉降大于前者的情况,说明上部结构的刚度和荷载分配特征对桩筏基础变刚度效果有直接的影响;

(5)研究表明,常规等长均匀布桩设计未考虑桩土共同作用,材料浪费严重,变刚度调平设计的优化空间较大. 从本研究抽桩和变桩长结果看来,桩筏基础变刚度为桩筏基础的优化设计提供了一种新思路.

#### 参考文献:

- [1] HORIKOSHI K. RANDOLPH M F. A contribution to optimum design of piled rafts [J]. Geotechnique, 1998, 48(3):301-317.
- [2] 刘金砺,迟铃泉. 桩土变形计算模型和变刚度调平设计[J]. 岩土工程学报,2000,22(2):151-157.
- [3] 刘金砺. 高层建筑地基基础概念设计的思考[J]. 土木工程学报,2006,39(6):100-105.
- [4] 王云岗. 高层建筑桩筏基础分析与设计[D]. 杭州:浙江大学硕士学位,2001.
- [5] 郭院成,王会杰,张四化. 地基基础空间变刚度调平设计方法的数值模拟[J]. 郑州大学学报:工学版,2008,29(3):126-128.
- [6] 郭院成,王会杰,陆俊虎. 考虑排桩支护影响的高层建筑复合地基沉降分析[J]. 郑州大学学报:工学版,2009,30(4):27-30.
- [7] 河南省建筑设计研究院. 郑东新区会展宾馆岩土工程勘察报告[R]. 郑州:河南省建筑设计研究院,2006.

### Analysis of Variable-stiffness Design on Piled Raft Foundation with FEM

GUO Yuan - cheng<sup>1</sup>, ZHAO Xu - yang<sup>2</sup>, ZHANG Si - hua<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Hopson Development Holdings Co. Ltd. Beijing 100124, China)

**Abstract:** The dish - shaped settlement curves are often induced in piled raft foundations. For reducing the differential settlement occurring in this kind of foundations, a simple numerical simulation model is presented in this paper. In this model, piles are treated as springs and the stiffness of the piles is decided according to the  $Q$ - $s$  curves of capacity test. To decrease the differential settlement, three analysis methods are employed, which are horizontal variable-stiffness design method, vertical variable-stiffness design method and dimensional variable-stiffness design method. Comparisons about settlement are made between the equivalent-stiffness design method and other variable-stiffness design method. The results indicate that the dimensional variable-stiffness design method is effective to reduce the differential settlement and to economize the building materials consumed.

**Key words:** civil construction design; variable-stiffness design; numerical simulation; piled raft foundation; differential settlement