

带桩筏基系统的弹塑性分析与设计方法研究

潘 健¹, 刘利艳¹, 王兴斌¹, 顾太华²

(1. 华南理工大学 建筑学院, 广州 510640; 2. 广州瀚华建筑设计有限公司, 广州 510630)

摘 要: 采用 ABAQUS 有限元程序中的线性扩展 D-P 模型对带桩筏基下的地基土进行弹塑性模拟, 建立了带桩筏基系统的 ABAQUS 程序三维有限元模型。经比较各种桩、筏基础的内力与沉降关系计算结果, 得到了带桩筏基的一些工作特性。在此基础上结合《建筑地基基础设计规范》(GB5007-2002), 改进了传统的复合桩基设计方法, 讨论了“三阶段”设计理念的可行性, 并将其应用于工程实例。分析结果表明, 改进的复合桩基设计方法和“三阶段”设计方法较常规设计方法更加经济合理。

关 键 词: 带桩筏基; 弹塑性模型; 复合桩基; “三阶段”设计方法

中图分类号: TU473.1⁺2

文献标识码: A

Elastic-plastic analysis and design method for piled raft foundation system

PAN Jian¹, LIU Li-yan¹, WANG Xing-bin¹, GU Tai-hua²

(1. College of Architecture and Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China;

2. Guangzhou Hanhua Architects & Engineers LTD, Guangzhou 510630, Guangdong, China)

Abstract: The soil under the piled raft foundation system was simulated by linear extended D-P elastic-plastic soil model. 3D finite element model of ABAQUS program was established to obtain some behaviors of the piled raft foundation system by comparison of load-settlement curves of several foundations. Composite pile foundation design method was studied and improved combined with Code for Design of Building Foundation (GB5007-2002), then the three-stage concept was discussed. Computation results show that these two methods are more economical than conventional design methods.

Key words: piled raft foundation; elastic-plastic model; composite pile foundation; “three-stage” design approach

1 引 言

在基础设计中, 我们通常优先考虑浅基础系统(比如筏板基础)来支撑上部结构。当筏板基础不能完全满足设计要求时, 在许多情况下可以考虑采用带桩的筏板基础以节省工程投资。目前, 国内外学者在带桩筏基的工作机理、工作性状等方面取得了大量的研究成果^[1-3]。然而, 对于考虑共同作用的带桩筏基设计理论和设计方法的研究大部分仍建立在弹性地基模型的基础上, 使得计算结果与工程实测结果往往偏差较大, 桩-土-筏共同作用的理论分析也过于侧重数值方法, 能为工程设计人员所采用且与规范相结合的、经济实用的分析方法较少。

本文以有限元程序 ABAQUS 中的弹塑性模型

为基础, 建立三维有限元模型来分析带桩筏基的工作特性, 在此基础上结合目前的《建筑地基基础设计规范》, 对复合桩基设计方法做出改进, 并对“三阶段”设计理念进行讨论。最后通过工程实例验证了这两种设计方法的实用性。

2 带桩筏基下地基的非线性特征

许多国内外学者进行地基基础共同作用时一般假定结构和地基土两者都是线弹性的材料, 将筏基视为弹性薄板或厚板, 地基土采用线弹性模型, 认为地基土在荷载作用下的应力-应变关系为直线, 用 Mindlin 解考虑桩和土的相互作用。然而, 这种共同作用分析没有考虑两者及其接触问题上的非线性性状, 夸大了桩与土的相互作用。因为地基土除应

力比较小时的 $\sigma - \varepsilon$ 关系为直线外,在一般的应力水平和可利用的强度范围内,它的 $\sigma - \varepsilon$ 关系都表现出明显的非线性和塑性性状。

弹塑性地基土模型考虑了土的非线性性状,可以较真实地反映地基土应力、应变与加载历史的关系。研究表明,弹塑性地基模型比线弹性地基土模型更符合实际的地基土特性^[4],主要表现在:(1)在相同条件下,弹塑性地基模型的筏板内力、桩顶反力比值、差异沉降比线弹性地基模型小,因为实际荷载作用下由于桩端及桩侧土体会进入塑性状态,单桩受相邻桩的影响会减小。(2)对于线弹性地基模型,随着荷载的增加,差异沉降成线性增大;弹塑性地基模型的差异沉降开始也是随着荷载的增加而成线性增大,但在荷载使土中产生塑性变形后,增加幅度开始变小,当达到某个最大值后又逐渐减小。

3 带桩筏基的工作特性

3.1 计算程序与模型

有限元程序 ABAQUS 具有强大的非线性分析功能,能自动选择相应载荷增量和收敛限度,选取合适的参数且连续调节参数以保证在分析过程中有效地得到精确解。线性扩展 Drucker-Prager (D-P) 地基模型是 ABAQUS 中模拟土的本构关系的一种弹塑性模型。有关线性扩展 D-P 模型的基本原理、参数选取及其与莫尔-库仑模型参数间的拟合转换关系详见文献[4]和[5]。本文采用 ABAQUS 中的线性扩展 D-P 地基模型进行分析计算。

带桩筏基平面布置如图 1 所示,在筏板上加均布荷载 q 进行分析。其中筏板面积为 $8.4 \text{ m} \times 8.4 \text{ m}$,厚度为 1.0 m 。筏板下均匀布置 49 根钢筋混凝土预制桩,桩长为 10 m ,桩截面尺寸为 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$,桩距 $S=3d=1.2 \text{ m}$, d 为桩径。筏板和桩身均采用 C25 混凝土并作为弹性均质材料,弹性模量和泊松

比分别为 $E=2.55 \times 10^4 \text{ MPa}$, $\nu=0.2$ 。桩和土采用空间八节点实体单元模拟,筏板采用四节点厚板单元模拟。

地基土分 4 层,在 ABAQUS 程序中建立模型时,地基土的平面尺寸取相应方向筏板尺寸的 3.5 倍左右,深度方向取桩长的 2 倍左右,即地基土范围为 $18.6 \text{ m} \times 18.6 \text{ m} \times 20 \text{ m}$,以有限大的区域来代替地基半空间无限体,可满足求解精度要求。地基土采用表 1 所示工程勘察数据。

3.2 地基参数分析

一般带桩筏基系统中地基土主要出现压应力,拉应力几乎不存在。因此取三轴拉伸下与三轴压缩下的屈服应力比率 $K=1$ 。正常固结粘土的剪胀角 $\psi = 0$ 。通过对地质勘察报告中提供的强度参数进行拟合,可转换得到表 2 中线性扩展 D-P 地基模型的计算参数,其中 β 为 $p-t$ 应力平面中的坡度。

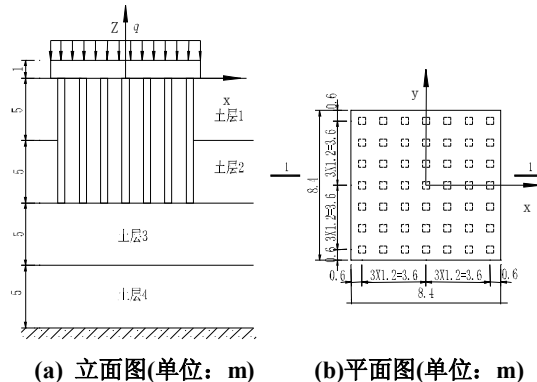


图 1 带桩筏基布置图

Fig.1 Piled rafts layout

3.3 结果分析

建立三维有限元分析模型及确定模型参数后,可以计算筏板基础、高承台群桩基础和带桩筏基的荷载、内力和沉降关系曲线,经分析得到如下结论:

表 1 地质勘察报告数据

Table 1 Data of geological exploration report

土层名称	土层类别	孔隙率	压缩模量/MPa	泊松比	粘聚力/kPa	摩擦角/(°)	重度/(kN·m ⁻³)
土层一	粉质粘土	0.942	6.43	0.30	30.5	16.7	19
土层二	砂质粘土	1.081	3.72	0.35	22.2	18.2	19
土层三	粉质粘土	0.716	6.73	0.28	50.8	27.2	19
土层四	粉土	0.550	8.49	0.25	21.7	31.5	19

表 2 地基土线性扩展 D-P 模型参数

Table 2 Soil parameters of the linear extended D-P model

土层类别	变形模量/MPa	泊松比	K	$\beta/(^\circ)$	剪胀角/(°)	屈服应力/kPa
粉质粘土	13.82	0.30	1	32.4	0	108
砂质粘土	7.19	0.35	1	34.9	0	198
粉质粘土	13.46	0.28	1	47.2	0	288
粉土	16.29	0.25	1	51.7	0	378

(1) 桩筏共同作用:在相同的沉降下,带桩筏基承载力显著地大于筏板基础的承载力,并且桩数越多承载力提高越多;在相同的荷载下,带桩筏基沉降又显著地小于筏板基础的沉降。

(2) 桩身侧摩阻力分布规律:角桩和内部桩(边桩和中桩)的摩阻力随桩间距 S/d 的增加而减少。承台对上部侧阻力存在“削弱效应”。

(3) 桩顶反力分布规律:角桩和内部桩桩顶反力的比值随桩间距 S/d 增加而减少,桩与土相互影响的距离约为 $6d$ 。当 $S/d \geq 6$,在上部荷载达到一定程度,桩端土产生一定的塑性变形之后,各桩所承担的荷载趋于均匀分布。

(4) 桩土荷载分担比:桩土荷载分担比随着桩间距 S/d 增加而减少,增加桩距可以显著提高筏下土的荷载分担比。

4 实用带桩筏基设计方法

4.1 复合桩基设计方法

根据上述三维有限元模型分析的结果及有关原型现场群桩试验^[6]资料,结合《建筑地基基础设计规范》^[7],对目前复合桩基设计方法^[8-10]进一步研究,得到如下复合桩基设计方法。

(1) 确定桩数

根据大量模型、原型试验和工程实测资料,对天然地基承载力特征值 f_{ak} 进行修正:

$$\eta_c = 0.04 \left(\frac{S}{d} \right)^{\frac{5}{4}} \left(\frac{B}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

$$f_a = \eta_c f_{ak} \quad (2)$$

式中: η_c 为土抗力群桩效应系数; S 为桩间距; d 为桩直径; B 为筏板宽度; L 为桩长; f_a 为承台土抗力。桩数 n 则按下式确定:

$$n = \frac{F_k + G_k - f_a A_c}{\xi R_u} \quad (3)$$

式中: F_k 为竖向荷载标准组合值; G_k 为筏板自重标准值; R_u 为单桩承载力极限值,可取 $R_u = 2R_a$; R_a 为单桩承载力特征值; ξ 为单桩极限承载力 R_u 的利用系数,一般取为 $0.8 \sim 0.9$; A_c 为承台净面积。

(2) 对复合桩基进行沉降量计算

$$Q_{i,\max} \leq R_u \quad (4)$$

$$Q_{i,\max} = \frac{F_k + G_k - f'_a A_c}{n} + \frac{M_{xk}}{\sum y_i^2} + \frac{M_{yk} x_i}{\sum x_i^2} \quad (5)$$

式中: Q_i 为单根桩承受的竖向荷载标准组合; M_{xk}, M_{yk} 为相应于荷载效应标准组合作用筏板底面通过桩群形心的 x, y 轴的力矩; x_i, y_i 为桩 i 至桩群桩群形心的 x, y 轴线的距离。

(3) 对复合桩基进行沉降量计算

复合桩基地基土的总沉降 s 由两部分组成:桩间土的沉降 s_1 和桩端以下土的沉降 s_2 。

$$s = s_1 + s_2 \quad (6)$$

桩间土沉降 s_1 可按下面两种方法计算:

(1) 将复合地基加固区增强体连同地基土看作一个整体,采用置换率加权模量作为地基土复合模量或根据试验确定地基土复合模量,并将其作为参数用分层总和法求 s_1 。

(2) 忽略土中桩的存在,先用弹性理论求出在筏下土承担荷载的土中应力,再用《建筑地基基础设计规范》推荐的地基最终沉降量公式计算 s_1 :

$$s_1 = \psi_s s' = \psi_s \sum_{i=1}^k \frac{p_0}{E_{si}} (z_i \alpha_i - z_{i-1} \alpha_{i-1}) \quad (7)$$

式中: s' 为按分层总和法计算的地基沉降量; ψ_s 为沉降计算经验系数,根据地区沉降观测资料及经验确定或采用规范提供的数值; k 为计算深度范围内所划分的土层数; p_0 为对应于荷载准永久值时的基础底面处的附加压力; E_{si} 为基础底面下第 i 层土的压缩模量,按实际应力范围取值; z_i, z_{i-1} 分别为基础底面至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面的距离; α_i, α_{i-1} 分别为基础底面计算点至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面范围内平均附加应力系数,可按规范附录采用。

s_2 可按《建筑地基基础设计规范》(GB5007—2002)附录R推荐的下列公式进行计算。

$$s_2 = \psi_p \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} \frac{\sigma_{j,i} \Delta h_{j,i}}{E_{sj,i}} \quad (8)$$

式中: m 为桩端平面以下压缩层范围内土层总数; $E_{sj,i}$ 为桩端平面下第 j 层土第 i 个分层在自重应力至自重应力加附加应力作用段的压缩模量(MPa); n_j 为桩端平面下第 j 层土的计算分层数; $\Delta h_{j,i}$ 为桩端平面下第 j 层土的第 i 个分层厚度(m); $\sigma_{j,i}$ 为桩端平面下第 j 层土第 i 个分层的竖向附加应力(kPa); ψ_p 为桩基沉降计算经验系数,根据当地的工程实测资料统计对比确定。

4.2 三阶段设计方法

合理的带桩筏基系统设计过程包括如图2所示的三个主要阶段。

(1) 初步设计阶段

在初步设计阶段,有必要首先评估筏基的性能。如筏板只能承担荷载的很少部分,则该基础可能需按常规设计思想进行带桩筏基设计,筏板的作用仅仅是稍微减少桩的需求。如独立筏基有足够或近似足够的荷载承担能力,但不满足沉降或不均匀沉降的标准,则可把桩作为减沉桩,采用“沉降控制复合桩基”设计方法^[11-12]得到桩数与沉降关系曲线,从而确定所需桩数。

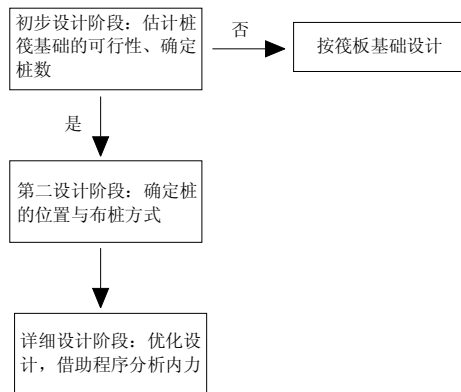


图2 “三阶段”设计方法流程

Fig.2 Process diagram of the three-stage design

(2) 第二设计阶段

在总桩数不变的情况下合理布桩,可以明显地减少差异沉降和筏板内力。在初步设计阶段确定桩数后,有必要按布桩原则对桩进行合理的布置。

(3) 详细设计阶段

详细设计将计算筏板内的沉降、弯矩和剪力的具体分布以及桩的荷载和弯矩。此时通常需借助较复杂的带桩筏基数值分析方法^[1]来说明桩-土-筏的相互作用。在满足构件强度和变形的条件下,减少工程造价,达到最优设计。

5 工程实例分析

5.1 工程概况

某综合大楼^[13],地面以上28层,局部30层,地下2层,埋深8.2 m。总建筑面积为4.5万平方米,基底面积约1 512 m²,地面以上总重635 690 kN,基底总重702 677 kN,基底压力 $p=465$ kPa。地质与基础剖面图见图3。

5.2 桩基设计与沉降计算

工程原采用常规设计方法,桩采用 $d=450$ mm的沉管灌注桩,桩长26 m,支持在④₆粉土层上,单桩承载力特征值为 $R_a=1\ 000$ kN,按基础上荷载进行计算,确定桩数为722根。在进行施工图设计时,考虑到地基整体情况较好,地下室土层为厚度

达3 m后的③₂圆砾,地基承载力特征值 f_k 为330 kPa,具有一定的强度,提出以控制地基沉降为

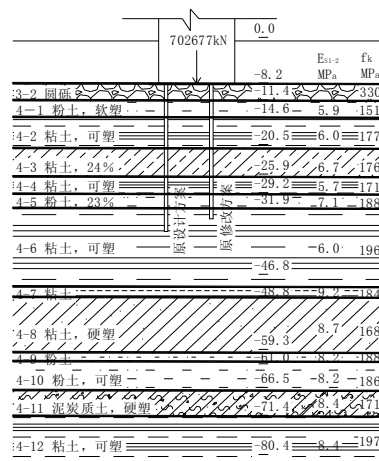


图3 地质剖面图

Fig.3 Geological section

目标的刚性桩复合地基方案。在不考虑地基土承载的条件下,桩径不变 $d=450$ mm,桩长改为24 m,依然支持在④₆粉土层上,单桩承载力极限值 $R_u=2\ 000$ kN,取 $\xi=0.85$,得到桩数 $n=702677/1700=413$,实用424根,沉降为58.18 mm。

按本文的复合桩基设计方法进行设计,设桩间距为 $5d$, $d=450$ mm,桩长为24 m,单桩承载力极限值为2 000 kN,得到 $n=322$, $s=91.93$ mm。按“三阶段”设计方法,取桩数 $n=722$ 、 $n=424$ 、 $n=322$ 以及 $n=0$ 时算得的相应的沉降,从而得到该工程的沉降与桩数关系曲线,如图4所示。假定允许沉降为 $[s]=150$ mm。则所需桩数为218根,承载力满足要求。四种设计方法的桩数与沉降比较见表3。

表3 不同设计方法结果比较

Table 3 Comparison of different design methods

类别	原常规设计方法	修改的刚性桩复合地基	复合桩基设计方法	“三阶段”设计方法
桩数/根	722	424	322	218
沉降/mm	40.18	58.18	91.93	150

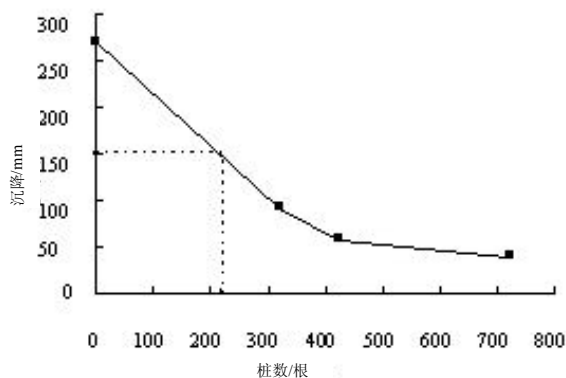


图4 沉降与桩数关系

Fig.4 Relationship between settlement and pile number

6 结 语

本文基于弹塑性地基土模型的有限元分析,得到了一些有意义的带桩筏基工作特性。通过研究大量文献,对复合桩基设计方法进行了简化改进,讨论了“三阶段”设计方法。通过工程实例的桩基设计与沉降计算比较表明,本文的复合桩基设计方法和“三阶段”设计方法尽管沉降偏大,但较常规设计经济,尤其“三阶段”设计方法更加经济,可在详细设计阶段借助功能强大的分析软件进行分析,以确保结构安全。

参 考 文 献

- [1] POULOS H G. Piled raft foundations: design and applications[J]. **Geotechnique**, 2001, 51(2): 95—113.
- [2] 潘健,肖学红,罗群. 带桩筏基的研究成果与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 1 054—1 058.
PAN Jian, XIAO Xue-hong, LUO Qun. Achievement and application of piled raft foundations[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(6): 1 054—1 058.
- [3] 顾太华,潘健. 岩溶地区基础选型及桩筏基础的工作性状[J]. 广东土木与建筑, 2005, 11: 20—22.
GU Tai-hua, PAN Jian. Foundation selection in karst area and behavior of piled raft foundation[J]. **Guangdong Civil Engineering & Construction**, 2005, 11: 20—22.
- [4] 顾太华. 桩筏基础的弹塑性分析及设计方法研究[D]. 广州:华南理工大学建筑学院, 2006.
- [5] Hibbitt, Karlsson&Sorensen inc. ABAQUS Theory manual Vresion 6.4[M]. Pawtucket, 1997.
- [6] 刘金砺. 竖向荷载下的群桩效应和群桩基础概念设计若干问题[J]. 土木工程学报, 2004, 37(1): 78—83.
LIU Jin-li. Group effects and some problems on the concept design of pile group foundation under vertical load[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2004, 37 (1): 78—83.
- [7] GB50007—2002,建筑地基基础设计规范[S].
- [8] 宰金珉. 桩土明确分担荷载的复合桩基及其设计方法[J]. 建筑结构学报, 1995, 16(4): 66—74.
ZAI Jin-min. Composite pile foundation with distinct load distribution in piles and soils and its design method[J]. **Journal of Building Structures**, 1995, 16(4): 66—74.
- [9] 蒋刚,宰金珉,陈国兴,等. 复合桩基设计与沉降分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 405—409.
JIANG Gang, ZAI Jin-min, CHEN Guo-xing, et al. Design of composite pile foundation and settlement calculation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(3): 405—409.
- [10] 张云军,宰金珉,王旭东,等. 南京地区复合桩基设计思考[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 581—588.
ZHANG Yun-jun, ZAI Jin-min, WANG Xu-dong, et al. Reflections on design of composite pile foundations in Nanjin district[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(2): 581—588.
- [11] 黄绍铭,王迪民,裴捷,等. 按沉降量控制的复合桩基设计方法(上)[J]. 工业建筑, 1992, 22(7): 36—38.
HUANG Shao-ming, WANG Di-min, PEI Jie, et al. Design method of controlled-settlement composited piled foundation(1)[J]. **Industrial Construction**, 1992, 22 (7): 36—38.
- [12] 黄绍铭,王迪民,裴捷,等. 按沉降量控制的复合桩基设计方法(下) [J]. 工业建筑, 1992, 22(8): 43—46.
HUANG Shao-ming, WANG Di-min, PEI Jie, et al. Design method of controlled-settlement composited piled foundation(II)[J]. **Industrial Construction**, 1992, 22(8): 43—46.
- [13] 龚晓南. 复合桩基与复合地基理论[J]. 地基处理, 1999, 10(1): 3—15.
GONG Xiao-nan. Theory of composite pile foundation and composite foundation[J]. **Ground Improvement**, 1999, 10(1): 3—15.