

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.05.005



减沉桩基变形控制机理的案例分

杨军¹, 杨敏², 罗如平²

(1. 广东华路交通科技有限公司, 广州 510420; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 桩数-沉降关系是按变形控制设计桩基础(减少沉降桩基础设计)的重要依据,受荷载大小、桩位布置和场地类别等多个因素共同影响。结合某工程现场实测数据,运用近似数值方法和平面应变有限元方法对 2 幢采用不同桩数的多层住宅桩筏基础进行计算分析,研究不同桩间距对地基压缩变形、基础内力和土体应力应变分布的影响,对桩数减少一半时基础沉降几乎没有变化这一问题给出合理解释。结果表明,作用于基础顶面的荷载水平越低,桩侧与桩端土层可压缩性差异越小,基础沉降量对桩数变化越不敏感。对于深厚软土地基中的低承台群桩基础,按变形控制进行桩基设计,能最大程度地节约基础用桩量,可获得十分显著的经济效益。

关键词: 减沉桩; 沉降; 桩数; 近似数值解法; 有限元法

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)05-0034-10

Case analysis of settlement control mechanism for settlement reducing pile

Yang Jun¹, Yang Min², Luo Ruping²

(1. Guangdong Hualu Transport Technology Co., Ltd, Guangzhou 510420, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: The relationship between pile numbers and settlement is the most important reference for pile foundation design, based on the deformation control (or design of reducing settlement pile foundation), which is affected by several factors, such as the loading magnitude, the pile arrangement and the soil type. Combined with the measured data from case history, the approximate numerical method and plane strain finite element method are put forward to analyze two piled raft foundations with different pile numbers for multi-storey residential buildings. The effects of different pile spacings on compressive deformation, internal force of foundation and stress-strain distribution of soils are studied, and a reasonable explanation is given for the problem that foundation settlement is almost unchanged after the pile number is reduced by half. The results show that, the lower the loading magnitude or the smaller the compressibility difference between pile side and pile tip soil layer, the foundation settlement is less sensitive to the change of pile numbers. For low-cap pile group foundation in deep soft soil, pile foundation design based on deformation

收稿日期: 2017-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(41372274)

作者简介: 杨军(1985-), 男, 博士, 主要从事地基基础检测研究, E-mail: yangjun851113@163.com。

杨敏(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: yangmin@tongji.edu.cn。

Received: 2017-09-21

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 41372274)

Author brief: Yang Jun(1985-), PhD, main research interest: foundation testing, E-mail: yangjun851113@163.com.

Yang Min(corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: yangmin@tongji.edu.cn.

control can reduce pile numbers considerably, with significant economic benefits.

Keywords: settlement reducing pile; settlement; approximate numerical method; finite element method

理论计算和模型试验结果表明,基础沉降随用桩数量增加而减小,当达到某一水平后继续增加桩数对基础沉降影响很小。根据地基变形控制设计理论,减少沉降桩基础的概念在20世纪八九十年代被提出,作为一种介于天然地基浅基础和传统桩基础之间的新型基础型式,被广泛应用于软土地基中的多层建筑基础设计领域,表现出十分显著的工程应用价值^[1-4]。近年来,学术和工程界针对该基础的复杂工作机理开展了不少研究工作,取得了一些有益的成果。静力学方面,Comodromos等^[5]基于单桩 $t-z$ 和 $p-y$ 曲线模型,建立了一种求解多向荷载作用下桩筏基础内力和变形的简化模型。Basile^[6]采用考虑土体非线性和极限承载力的边界元模型分析竖向受荷桩筏基础,强调应重视非线性特性对桩筏基础设计的影响。王涛^[7]进行了桩筏基础现场大比例尺模型试验,发现上部结构-地基-基础(桩基)共同工作下筏板钢筋的实测应力值与设计值(容许应力值)存在显著差异。动力学方面,马亢等^[8]通过数值模拟和动力离心试验研究高低承台群桩基础的动力响应问题,指出低承台群桩较高承台群桩具有更好的抗震性能。Das等^[9]通过动力有限元方法对带单个集中质量的刚性桩筏基础动力响应进行数值分析,指出结构-基础-地基动力相互作用将明显延长结构振动周期和增大桩身剪力。Kumar等^[10]对桩筏基础在多种类型地震下的响应进行分析,认为拟静力方法和动力方法计算的加速度响应总体比较接近。杨敏等^[11]通过动力离心模型试验研究不同桩筏连接形式(桩头刚接和桩头自由)下结构-基础体系的加速度和位移变化规律,以及地震动对桩筏竖向荷载分担的影响。已有研究表明,桩数(桩间距)是影响桩基础沉降的一个重要因素,桩数适当减少并不会使基础沉降明显增加,但桩数减少量超过一半后,基础沉降量往往将比原设计对应的沉降量增加不少。然而,根据文献[2-3]的现场实测结果,有建筑物在桩数减少一半(超过100根)后,其沉降量仍然与常规设计方法十分接近的情况,但还没有文献对该现象的原因进行过深入研究。

针对这一问题,以深厚软土地基某多层住宅桩基础工程案例为背景,在对荷载、基础和地基模型进行适当简化后,建立桩筏基础的近似数值模型和有限元模型,通过与实测结果进行对比,验证计算模型

的合理性,再利用该模型分析不同桩间距时地基压缩变形、基础内力和土体应力应变的分布特征,解释桩数变化对基础沉降的影响。通过比较不同荷载水平和土体分层情况对桩数-沉降关系的影响,明确软土地基按变形控制设计桩基所具有的基础造价优势。

1 案例概况

文献[2-3]提供的资料表明,2幢相邻多层住宅均采用桩筏基础,场地浅部为厚约50m的高塑性正常固结饱和软黏土,下伏砂砾层和基岩。图1为原位测试和室内试验得到的黏性土物理力学参数与深度的关系。可以看出,浅部土层不排水抗剪强度 c_u 、前期固结压力均沿深度近似线性增加,天然含水率接近液限(60%~80%),属典型的深厚软黏土。

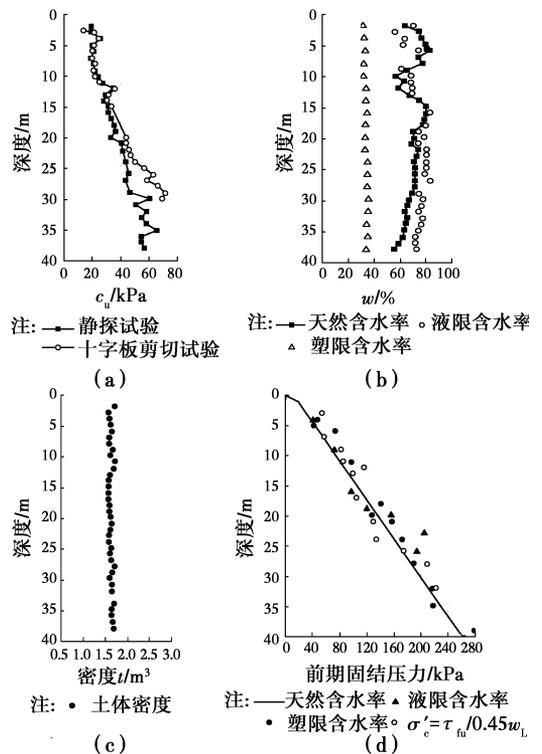


图1 场地土层物理力学性质(改自文献[3])

Fig. 1 Physical and mechanical properties of soil layer (modified from the literature[3])

2幢建筑地上4层,地下1层,基础埋深约3m,平面形状近似呈长方形。建筑1按常规桩基础进行设计,假定荷载全部由桩来承担,单桩承载力安全系数为3;建筑2按蠕变桩(减沉桩)基础设计,考虑筏

板对荷载分担作用,单桩设计承载力为极限承载力的70%。表1给出了2幢建筑桩基础设计资料,除用桩数量相差约一半(107根)外,二者在基础形状、桩型和上部荷载大小等方面均比较接近。

表1 建筑物基础资料汇总

Table 1 Foundation data summary of two buildings

参数	建筑1	建筑2
Q_{tot}/MN	46.4	54
p_{tot}/kPa	66	60
p_{eff}/kPa	22	9
p_{eff}/p_{pre}	<1	<1
长/m×宽/m	50×14	75×12
基础等效宽度 B_r/m	26.5	30
桩长 l_p/m	28	26
桩径 d/m	0.3	0.3
s/d	6	10
l_p/B_r	1.1	0.9
单桩设计承载力/kN	220	330
单桩极限承载力/kN	660	471
用桩数量	211	104

注: Q_{tot} 为基底总压力; p_{tot} 为基底平均应力; p_{eff} 为基底有效压力; p_{pre} 为前期固结压力; B_r 为基础等效宽度,即按面积等效原则换算的方形基础边长。

图2为基础不同位置的沉降和平均沉降随时间的发展曲线^[2]。可以看出,2幢建筑物沉降发展规律十分相似,建筑2沉降量在桩数减少一半后非但

没有增加,反而比建筑1略微偏小。由于桩端以下软土层厚度较大,2幢建筑在施工期(1981—1982年)结束后沉降仍持续增加,工后与施工期沉降量大小基本相当。表2给出了按减沉桩基础设计的另外4个工程资料。与上述4层住宅桩基础对比后不难发现,这些建筑物基础具有以下特点:1)上部结构为荷载不大的低层和多层建筑,基底有效接触压力基本不超过该基底埋深位置土体前期固结压力。2)场地土体性质相对单一,桩侧与桩端均位于软土中,荷载主要由侧摩阻力承担。3)筏板底面积较大,桩长大多未超过基础等效宽度。

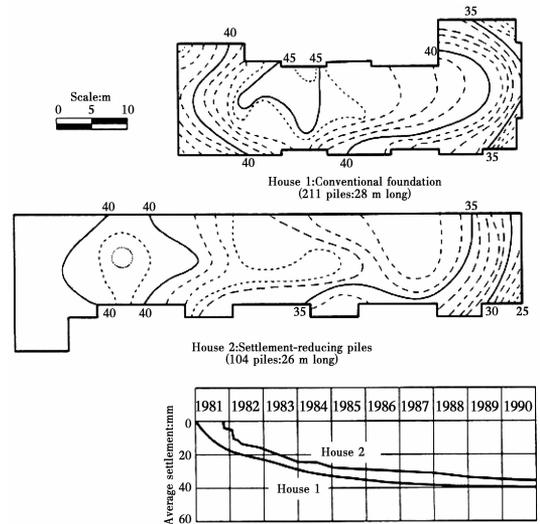


图2 实测桩筏基础沉降(引自文献[2])

Fig. 2 Measured settlements of piled raft foundations (from literature [2])

表2 减沉桩基础工程应用案例资料汇总

Table 2 Engineering application summary of reducing settlement piles

参数	7层办公楼	2~3层厂房	2层仓库	2层住宅楼
基础埋深/m	2.5~3.0	4.4~5.0	0.0	0.0
B_r/m	27	76	82	35
p_{tot}/kPa	75	50~70	20~30	25
p_{eff}/kPa	25	0	20~30	25
p_{eff}/p_{pre}	<1	<1	<1	<1
l_p/m	12	18~26	21	9
l_p/B_r	0.44	0.24~0.34	0.26	0.26
布桩密度	1根/4 m ²	1根/20 m ²	1根/30 m ²	1根/1.9 m ²
s/d	7	15	18	9
场地类型	微超固结软黏土	正常固结软黏土	微超固结软黏土	软弱粉质黏土
黏土层厚度/m	30~40	>50	>40 m	25~30 m
不排水抗剪强度 c_u/kPa	10~40	15~55	10~60	15~45
群桩荷载分担比	33%	14~30%	25~33%	—
实测沉降/mm	50(竣工8年)	25(竣工3年)	10~20(竣工2年)	8~22(时间不详)
文献来源	文献[1]	文献[1]	文献[1]	文献[12]

这些建筑物基础设计时假定筏板承担的压力小于土体前期固结压力,超出荷载由桩群承担,桩数比常规方法大为减少,桩间距超过 $6d$,但基础实测沉降普遍小于 50 mm ,与按常规方法设计的软土地基类似建筑桩基沉降相差并不大。

2 分析方法

桩-土共同作用的影响反映在两个方面:1)宏观现象:基础荷载-沉降关系、桩数-基础沉降关系等;2)微观现象:基础内力、土体位移、应力和应变分布等。

为较全面地研究该类型场地的桩基沉降控制机理,分别运用近似数值解法和有限元方法对实际案例进行计算分析。由于场地为深厚的饱和软黏土,土体透水性较低,计算按完全不排水条件考虑。

2.1 混合解析模型

图3为桩筏基础混合解析模型示意图。模型在筏板平面和桩长方向进行计算单元剖分,各筏板单元中心点和桩单元结点位置均采用集中弹簧表示。土弹簧刚度表达式在文献[13]的基础上,进一步考虑了土体非线性的影响。

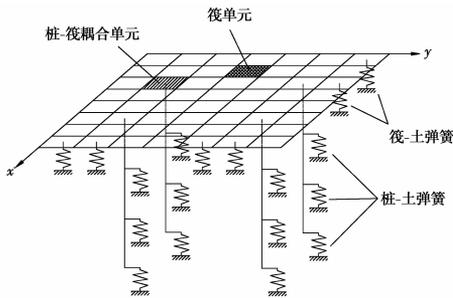


图3 桩筏基础混合解析模型

Fig.3 Hybrid analytical model of piled raft

筏板底面土体刚度为

$$K_z^r = \frac{4\bar{G}_s \left(1 - Rf_r \frac{p_r}{p_{ru}}\right)^2 a}{(1 - \bar{\nu}_s) \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{2a}\right)\right)} \quad (1)$$

式中: \bar{G}_s 和 $\bar{\nu}_s$ 为筏板底面土层等效剪切模量和泊松比; a 为筏板单元等效半径,根据面积相等原则换算得到; h 为筏板底面与可压缩土层底面之间的距离; Rf_r 为筏板位置土体非线性系数; p_{ru} 为筏板单元极限压应力。

桩端土体刚度为

$$K_z^{pb} = \frac{4G_b \left(1 - Rf_b \frac{p_b}{p_{bu}}\right)^2 r_0}{(1 - \nu_{sb}) \left(1 - \exp\left(-\frac{h^*}{2r_0}\right)\right)} \quad (2)$$

式中: G_b 和 ν_{sb} 分别为桩端土的剪切模量和泊松比; r_0 为桩半径; h^* 为桩端与可压缩土层底面之间的距离; Rf_b 为桩端土体非线性系数; p_{bu} 为桩端阻力极限值。

桩侧土体刚度为

$$K_z^{ps} = \frac{2\pi G_s \left(1 - Rf_s \frac{\tau_s}{\tau_{su}}\right)^2 \Delta l_p}{\ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right)} \quad (3)$$

式中: G_s 为桩侧土单元剪切模量; Δl_p 为桩单元长度; r_m 为两桩相互影响半径; Rf_s 为桩侧土非线性系数; τ_{su} 为桩侧摩阻力极限值。

桩-桩、桩-筏、筏-筏之间相互作用系数均基于Mindlin位移解进行计算,通过Steinbrenner假定可进一步考虑有限可压缩土层深度的影响。在确定土体柔度矩阵各元素后,不难建立土体位移方程

$$\dot{w}_1 = \mathbf{G}_s \times \dot{\mathbf{R}}_s \quad (4)$$

式中: \dot{w}_1 为土体位移增量列向量; $\dot{\mathbf{R}}_s$ 为桩周土反力增量列向量; \mathbf{G}_s 为满足线弹性应力应变关系的土体柔度矩阵,矩阵维数与计算结点总和相等。

根据筏板完全刚性的假定,桩顶(耦合)结点与筏板结点具有完全相同的竖向位移,将各桩视作桩头与筏板固接的梁柱杆件,通过Bernoulli-Euler梁理论建立各桩单元结点集中荷载与竖向位移的数学关系式,得到群桩与筏板的位移方程:

$$\dot{w}_2 = \mathbf{G}_{pr} \cdot \dot{\mathbf{R}}_{pr} + \dot{w}_{top} \quad (5)$$

式中: \dot{w}_2 为所有桩、筏结点的竖向位移增量列向量; \mathbf{G}_{pr} 为扩充后的群桩柔度矩阵; $\dot{\mathbf{R}}_{pr}$ 为桩、筏结点荷载增量列向量; \dot{w}_{top} 为桩顶与筏板单元结点的竖向位移增量列向量。

基础-地基体系应满足静力平衡和位移协调条件

$$\dot{w}_1 = \dot{w}_2, \quad \dot{\mathbf{R}}_s = -\dot{\mathbf{R}}_{pr} \quad (6)$$

整理式(4)~(6)可求得给定基础顶面位移时的桩-土、筏-土结点作用反力

$$\dot{\mathbf{R}}_{pr} = -\mathbf{G}_{pr} + \mathbf{G}_s^{-1} \cdot \dot{w}_{top} \quad (7)$$

将式(7)中的 $\dot{\mathbf{R}}_{pr}$ 代入式(4)可获得桩、筏结点的竖向位移。

图4为本文混合解析模型筏板网格划分和桩位示意图。2幢建筑物基础平面为矩形,埋深 3 m ,桩身弹性模量为 25 GPa 。模型按等间距进行布桩,建筑1和2的平均桩间距分别为 $6d$ 和 $10d$ 。该非线性模型采用位移增量法进行求解,当采用足够多的增量步时,计算精度与Cut-off(荷载超限转移法)方法^[14]相差不大,且具有良好的计算稳定性。

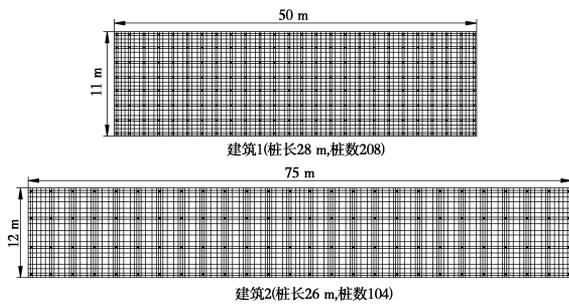


图 4 筏板网格划分和桩位布置示意图

Fig. 4 Schematic of raft mesh partition and pile layout

由现场试验结果(图 1)可知,软黏土不排水抗剪强度 c_u (单位 kPa)和弹性模量 E_u (单位 kPa)与埋深 z (单位 m)可简化为

$$\begin{cases} c_u = 15 + 1.67z \\ E_u = 400c_u \end{cases} \quad (8)$$

现场试桩结果反分析计算的建筑 1、2 桩侧摩阻力系数 α 分别为 0.45 和 0.42,桩端和筏板地基极限压应力取 $9c_u$ 和 $6c_u$,土体泊松比取 0.495。

2.2 有限元模型

由于 2 幢建筑物长度与宽度的比值较大,本文有限元模型采用 ABAQUS 有限元软件按二维平面应变模型进行(不排水)总应力分析。

如图 5 所示,数值模型将实际黏土层沿深度进行划分,分层厚度取 3~4 m,以各层土中心深度土体不排水抗剪强度 c_u 和弹性模量 E_u 作为该层土的参数代表值,即沿深度呈梯形分布,土体泊松比取 0.495。桩、筏结构假定为线弹性,土体应力-应变关系服从 Mohr-Coulomb 屈服准则,单元类型取 CPE8R,桩-土、筏-土界面采用无厚度单元,界面应

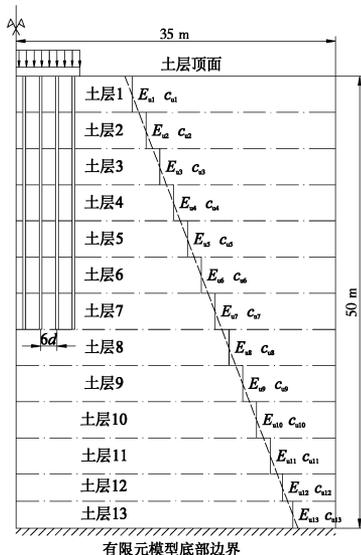


图 5 有限元模型土体分层示意图(建筑 1)

Fig. 5 Soil layer of finite element model (building 1)

力-应变关系满足 Coulomb 摩擦定律。

筏基础平面应变分析采用的基础刚度等效原则主要需满足竖直方向的受荷变形要求,基础长边方向(与计算模型垂直方向)的桩身等效轴向刚度 $E_{p,eq}$ 为

$$E_{p,eq} = \frac{n_{p,row} A_p E_p}{l_r d} \quad (9)$$

式中: $n_{p,row}$ 为沿长边方向的桩数; A_p 为桩身横截面积; E_p 为桩身弹性模量; l_r 为筏板长度(与计算模型垂直方向); d 为桩径。

桩-土界面摩阻力和端阻力需要进行等效替换,平面应变模型桩侧-土界面(两侧)极限剪应力 $f_{s,eq}$ 按式(10)进行计算。

$$f_{s,eq} = \frac{n_{p,row} A_s f_s}{2l_r} \quad (10)$$

式中: A_s 为单位深度桩侧面积; f_s 为单位深度桩侧极限剪应力。

表 3 为本文有限元模型的主要计算参数。

表 3 有限元计算模型参数

Table 3 Parameters of finite element models

有限元模型参数	建筑 1	建筑 2
筏板长度 l_r /m	50	75
筏板宽度 b_r /m	14	12
桩径 d /m	0.3	0.3
各排桩数 n_{pile}	26	26
桩身截面积 A_p /m ²	0.07	0.07
单位长度桩侧面积 A_s /m ²	0.94	0.94
桩身等效弹性模量 E_{eq} /GPa	3.06	2.04
桩侧摩阻力系数 α	0.45	0.42
桩侧极限摩阻力 f_s /kPa	19.43	17.48
桩侧等效极限摩阻力 f_{eq} /kPa	4.76	2.85

2.3 案例验证

图 6 给出了计算和实测的基础荷载-沉降曲线($Q-w$ 曲线)。当按不排水条件分析时,解析与数值方法的计算结果总体相差不大,与工作荷载下的实测沉降量也比较接近。由于有限元方法在产生较大变形时计算不易收敛,计算的 $Q-w$ 曲线并未完全进入极限阶段,根据曲线外推方法估算基础极限承载力分别为 205 MN(建筑 1)和 136 MN(建筑 2),与解析法计算结果(199 MN 和 130 MN)相当接近。

由此可以推算,实际荷载作用下基础整体安全系数分别为 4(建筑 1)和 2.6(建筑 2),表明按常规桩基础和减沉桩基础进行设计均具有足够的安全度。当上部荷载小于 50 MN 时,2 幢建筑基础沉降

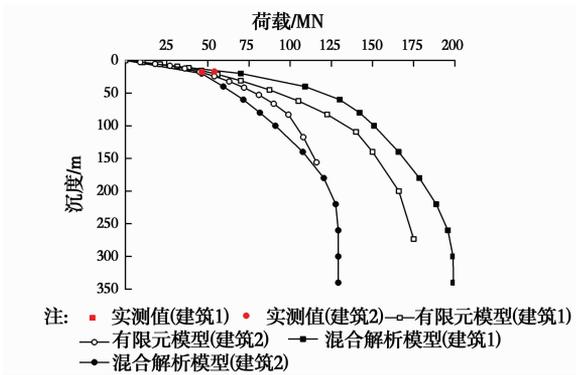


图 6 基础荷载-沉降曲线

Fig. 6 Load-settlement curves for piled raft

量相差不超过 5 mm,基础 $Q-w$ 曲线十分接近;上部荷载继续增大,二者沉降量差异开始变大,表明荷载水平提高使更多土体出现塑性。

表 4 为实际荷载作用下理论计算与实测的群桩荷载分担比。对于按常规方法设计的建筑 1,计算的群桩荷载分担比基本在 90% 以上,与实测结果基本吻合;对于采用减沉桩基础的建筑 2,两种方法计算的群桩荷载分担比均比实测值偏高。从总体上来看,理论计算的桩土荷载分担基本能够反映桩数(桩间距)对基础内力分布的影响,计算结果具有一定的合理性。值得注意的是,虽然建筑 1 采用了相对较大的桩间距($6d$),但由于设计的安全系数较高,用桩量明显超过实际所需水平,筏板对上部荷载的贡献水平很低。

表 4 群桩荷载分担比例

Table 4 Load bearing ratio of pile group %

建筑	解析方法	数值方法	实测值
建筑 1	97	89	100
建筑 2	85	78	62

见,工作荷载作用下,建筑 1 基底土体竖向位移沿在桩长范围内的变化明显不如桩端下卧土层,建筑 2 基底土体竖向位移沿深度变化相对较为均匀,桩端平面上下土体压缩变形大小基本相同。由(b)图可见,当承受较大荷载作用时,建筑 1 基底土体在桩长范围内主要发生整体下沉,土体压缩变形主要集中在埋深 28~37 m 之间,建筑 2 基底土体竖向位移沿深度衰减相对更快,桩间土压缩变形占总沉降的比例有所提高。

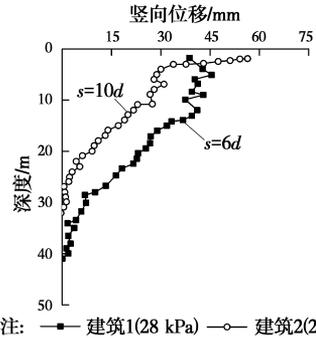


图 7 基底中心竖向位移实测曲线(改自文献[3])

Fig. 7 Measured vertical displacements of foundation centers (modified from literature [3])

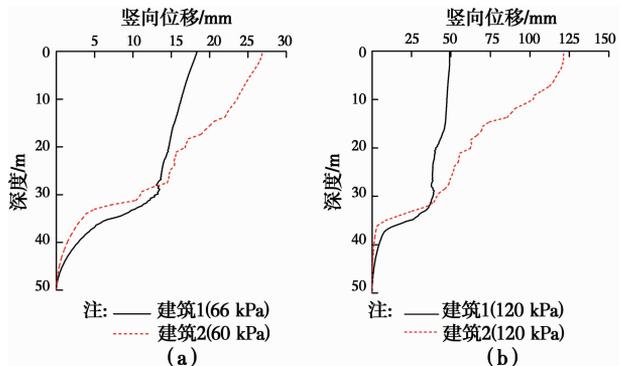


图 8 基础中心位置土体竖向位移

Fig. 8 Calculated vertical displacements of foundation centers

表 5 给出了基底中心位置桩端土体压缩占上部总沉降的百分比。可以看出,建筑 1 的沉降主要由桩端以下软土层的压缩变形引起,且沉降百分比基本不随荷载水平增加发生显著变化;建筑 2 基础沉降由桩间土和桩端以下土层压缩变形组成,由于较大荷载下筏板与土接触作用进一步增强,桩间土压缩变形占总沉降的比例超过 50%。

表 5 桩端下卧土层压缩沉降百分比

Table 5 Percentages of settlement of pile end

建筑	bearing layer		%
	工作荷载	2 倍工作荷载	
建筑 1($s=6d$)	75	76	
建筑 2($s=10d$)	52	33	

3 结果分析与讨论

3.1 土体竖向位移

图 7 为实测的建筑物基底中心土体竖向位移分布曲线。可以看出,建筑 1 土体竖向位移沿深度向下近似呈倒 S 形,浅部土体沉降沿深度变化不大,地基压缩变形主要分布在 12 m 深度以下。压缩层下移导致更多荷载向深部土层传递,桩端 10 m 以下深度内仍有土体压缩变形产生。建筑 2 土体竖向位移沿深度增加而递减,其变化规律与天然地基浅基础比较相似,桩端位置以下几乎没有土体压缩变形产生,说明桩端附近地基附加应力水平较小。

图 8(a)、(b)为有限元模型计算的不同荷载时基底中心位置土体竖向位移分布曲线。由(a)图可

图 9 给出了有限元模型计算的基础底面地基竖向位移云图,由该图能够看出:1)工作荷载下,2 种基础桩端沉降约为基础顶面沉降的 55%~70%,与周围土体之间相对位移较小;在接近极限荷载作用时,桩侧和桩端土体承载力完全发挥,桩侧-土界面产生明显滑动,桩身竖向压缩量保持稳定,桩端与基础顶面沉降基本一致。桩身竖向压缩比较明显,且与基础顶面作用荷载大小成正比,这是因为平面应变模型桩刚度代表其所在位置桩与桩间土的综合刚度,等效桩轴向刚度较实际降低明显。2)工作荷载下,桩长深度范围内建筑 1 土体竖向位移等值线间距大于建筑 2,但桩端下卧土层位移等值线分布更加密集,说明建筑 1 桩间土体随基础一同发生整体下沉,导致地基压缩层向深部土体转移。两种基础平均桩间距(6d 和 10d)均超过了软土地基中桩-桩之间最大影响距离,工作荷载下桩端附近土体位移未出现明显的叠加现象,接近极限荷载时桩端土体破坏模式仍以单桩局部刺入变形为主。

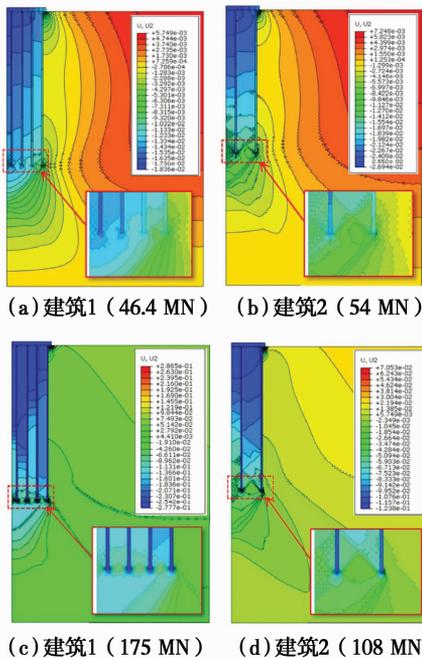


图 9 地基竖向位移云图

Fig. 9 Contour maps of soil vertical displacements

因此,2 种桩基设计方法均可达到减小基础沉降的目的,基础沉降量相差也不大,但不同桩距引起地基压缩变形分布特征明显不同。桩间距减小(或桩数增多)使桩基挟带更多土体一同发生竖向下沉,桩侧与土相互作用力受到削弱,由于桩身刚度远大于地基土,更多荷载向深部土层转移,基础沉降主要由桩端下卧土层压缩变形引起。桩间距增大(或桩数减少)时,邻近基桩相互叠加作用减弱,基础沉

降主要由筏板以下浅部土体的压缩变形和桩端局部刺入变形组成,地基压缩变形总体上更加接近天然地基浅基础。

3.2 土体应力和应变

图 10 为接近极限承载状态时地基土的塑性应变云图。可以看出,浅部土层由于受到筏板下沉的影响,内部基桩顶部附近土体塑性应变水平明显低于筏板边缘和桩端位置土体。两幢建筑基础采用的桩间距(6d 和 10d)均大于常规桩距(3d~4d),桩端附近土体塑性区域较为集中,且边桩桩端土体塑性应变水平高于内部基桩。由于受桩基遮拦和大桩距的影响,浅部地基土并无整体滑移趋势,桩端位置也未发生整体刺入变形。

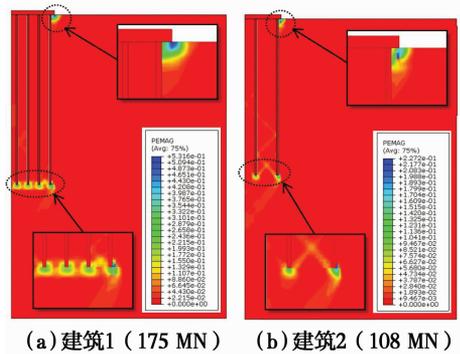


图 10 地基塑性应变云图

Fig. 10 Contour maps of soil plastic strains

图 11 为处于极限状态时基础底面地基竖向应力云图。桩间土和桩端附近土体应力值均大于基础外侧相同深度处的土体,说明上部荷载部分由筏板底面浅部土层承担,部分通过桩侧和桩端向深部土层传递。由于桩身刚度远大于周围土体,桩顶与筏板连接处应力集中程度明显高于其他位置,这将导致筏板内部产生较大的弯矩和剪力,故筏板设计时应考虑降低因基础刚度空间分布差异引起的结构内应力,尽可能将桩基布置在柱、墙等荷载集中部位。桩间距越大,桩端附近应力叠加作用越不明显,传递

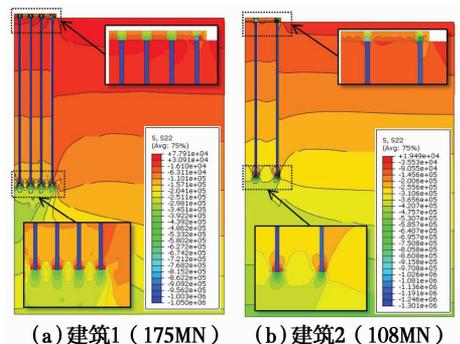


图 11 地基竖向应力云图

Fig. 11 Contour maps of soil vertical stresses

到下卧土层的荷载相对越少。

3.3 桩身内力

图 12 给出了本文混合解析模型计算与现场实测的桩顶荷载值。

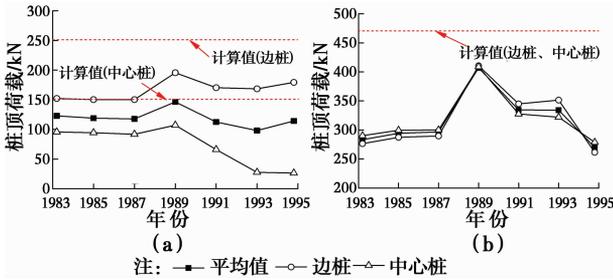


图 12 桩顶实测与计算荷载对比

Fig. 12 Measured and calculated pile top loads

建筑 1 各桩承载力发挥水平并不相同,基础边缘基桩的桩顶荷载大于内部基桩,实测桩顶平均荷载(120 kN)比设计荷载(210 kN)偏低约 40%;建筑 2 各桩桩顶荷载相差很小,桩顶实际荷载(约 320 kN)与设计荷载(330 kN)相差很小,表明工作荷载作用下各桩基本处于极限承载状态,桩周土承载力发挥充分。虽然桩顶荷载计算值均大于实测值,也未考虑土体固结的影响,但各桩荷载分布规律与实测结果基本一致,6d 桩距时边桩桩顶荷载约为中心桩的 1.5~1.6 倍,10d 桩距时各桩桩顶荷载几乎完全相同。

图 13 为计算的桩身轴力分布曲线。当桩间距相对较小($s=6d$)时,群桩相互作用和筏板与地基的接触作用使桩间土随基础一同发生竖向沉降,桩土之间相对变形减小,进而限制了中心桩浅部侧摩阻力发挥;当桩间距达到 10d 以上时,各桩之间相互作用变得很弱,即便筏板与土存在接触作用,桩侧土体摩阻力发挥基本不受影响。

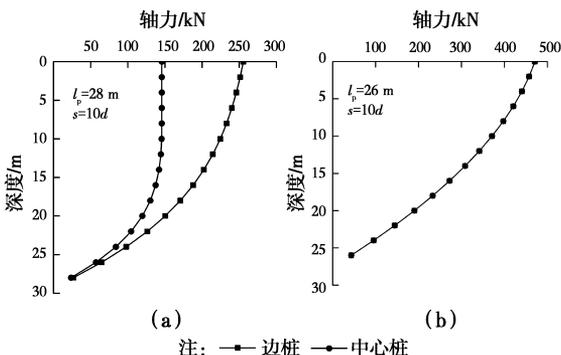


图 13 桩身轴力分布曲线

Fig. 13 Axial force distribution of pile foundations

3.4 桩数与沉降关系

表 6 为采用不同桩数时平面应变模型桩身等效

弹性模量和桩-土界面极限摩阻力,采用表中参数分别进行有限元数值计算。同时,运用混合解析模型计算不同桩数(桩距)对应的基础沉降。

图 14 给出了计算的桩数与基础沉降关系曲线。可以看出,2 种方法的计算结果在桩数较多时相差很小,但桩数较少时差异程度有所增加,这与桩数减少时有限元模型与混合解析模型在桩位布置、桩身轴向刚度等方面的不一致有关。当用桩数量大于 100 根时,建筑 1 基础沉降量几乎不随桩数增加而变化,实际用桩量(211 根)明显超出控制基础沉降所需的最少桩数。建筑 2 基础用桩量虽然较常规桩基设计方法减少了一半,但与建筑 1 基础沉降量相比,沉降量的增加并不十分明显(约 10 mm),除桩间距对基础底面地基压缩变形的影响不同外,可能也与建筑 2 筏板面积大于建筑 1(超出约 200 m²)有关。

表 6 平面应变模型计算参数

Table 6 parameters of plane strain model

建筑 1			建筑 2		
桩数	$E_{p,eq}/GPa$	$f_{s,eq}/kPa$	桩数	$E_{p,eq}/GPa$	$f_{s,eq}/kPa$
480	7.06	10.98	320	6.28	8.78
400	5.88	9.15	240	4.71	6.59
320	4.71	7.32	200	3.92	5.59
208	3.06	4.75	160	3.14	4.49
120	1.76	2.74	104	2.04	2.85
80	1.17	1.83	60	1.17	1.65
40	0.58	0.91	40	0.78	1.10
16	0.24	0.36	20	0.39	0.55
8	0.12	0.18	4	0.08	0.11

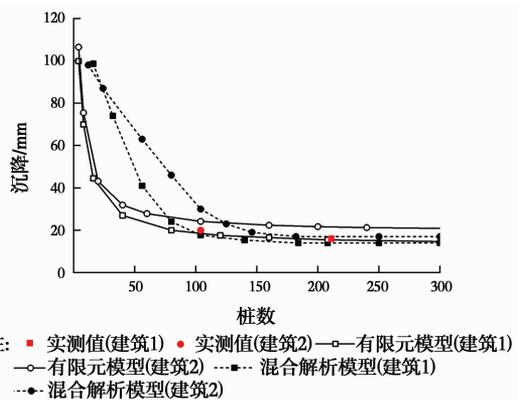


图 14 桩数-沉降关系曲线

Fig. 14 Relationship of pile number and settlement

3.5 上部荷载水平的影响

依次取上部荷载 10、20、30、40、50、60 MN,按

混合解析方法计算采用不同桩数时建筑 1 的基础沉降量。图 15 给出了不同荷载对应的桩数与沉降关系曲线。可以看出,上部作用的荷载水平越高,桩数变化对基础沉降的影响范围相对越广。例如,上部荷载由 10 MN 增加到 60 MN 时,桩数-沉降曲线转折位置对应桩数从 30 根提高到 110 根,曲线平缓段缩减十分显著。上部荷载水平普遍较低是 2 幢建筑在桩数相差十分明显时仍具有类似沉降的一个原因。

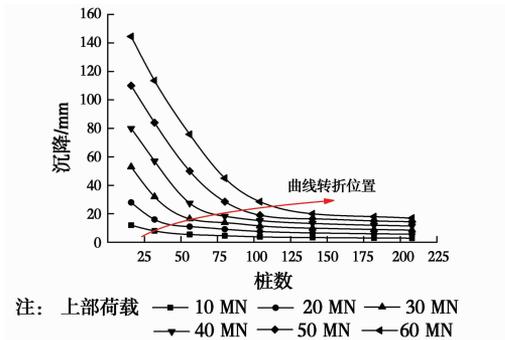


图 15 不同荷载时的桩数-沉降曲线(建筑 1)
Fig. 15 Pile number and settlement curves under different loads (building 1)

3.6 桩端持力层性质的影响

当桩侧和桩端均位于深厚软土中时,桩数变化对基础沉降的影响与上部荷载水平关系密切。当桩端土层性质与上覆土层具有明显差异时,上部荷载对桩数-基础沉降的关系有多大影响。仍以建筑 1 为例,桩筏基础尺寸不变,假定桩侧土层为软黏土,桩端土层性质根据土体类型取不同弹性模量和泊松比,桩端进入持力层深度均为 $3d$ 。表 7 给出了计算模型采用的桩侧和桩端土层基本参数。其中,桩侧土层(软黏土)的极限侧摩阻力统一取 20 kPa。

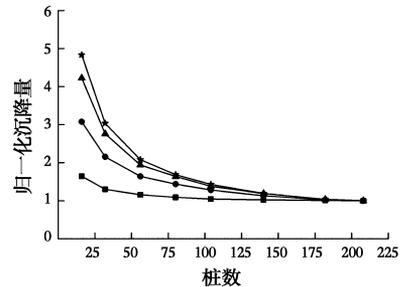
表 7 场地土层基本参数
Table 7 Basic parameters of sites

位置	土体类别	E_s/MPa	ν_s	q_{pk}/MPa
桩侧土层	软黏土	6	0.4	
桩端土层	软黏土	6	0.4	0.3
	松散砂土	20	0.3	0.8
	中密砂土	40	0.3	1.6
	密实砂土	60	0.3	2.5

注: q_{pk} 为桩端土层极限压应力。

图 16 给出了不同桩端土层对应的桩数与归一化沉降(实际基础沉降与最小沉降的比值)关系曲线。当桩侧和桩端土层均为软黏土时,桩数即使减少一半,基础沉降几乎没有多大变化。当桩端土层

与桩侧土层的刚度差异逐渐增加时,基础沉降对桩数的变化开始变得敏感。也就是说,对于上软下硬分层土中的桩筏基础,桩端所在持力土层越坚硬,采用不同桩数时的基础沉降量改变越明显。因此,2 幢建筑基础沉降量十分相似与桩侧和桩端均为软土同样具有一定关系。



注:桩端持力层 — 软黏土 — 松散砂土
— 中密砂土 — 密实砂土
图 16 不同桩端土层时的桩数-沉降曲线
Fig. 16 Pile number and settlement curves with different pile tip bearing stratum

4 结论

1) 案例分析结果表明,桩数减少量超过一半(桩距由 $6d$ 增加到 $10d$),基础沉降量并不一定会显著增大,这主要与基础顶面承受的荷载水平较低(原设计方法承载力安全系数偏高)以及桩端土层压缩性较大有关。

2) 桩间距大小影响地基压缩层分布。当桩间距逐渐变大时,筏板与土接触作用加强,浅部土层压缩变形占基础总变形的比例不断提高,桩端位置应力集中现象越发显著,桩-土界面相互作用力发挥水平越大。

3) 桩数-沉降关系受荷载水平、土体分层特性影响显著。基础顶面荷载水平越低或桩端土层与上覆土层性质越接近,桩数-沉降曲线转折位置对应的桩数越少,基础沉降对桩数的变化越不敏感。对于深厚软土中荷载水平不高的多层建筑来讲,按沉降控制进行桩基础设计可取得十分显著的经济效益。

参考文献:

- [1] HANSBO S. Foundations on friction creep piles in soft clays [C]// 1st International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Missouri University of Science and Technology, 1984: 913-922.
- [2] HANSBO S. Interaction problems related to the installation of pile groups [C]// Proceedings of the Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent, 1993: 59-66.

- [3] HANSBO S, JENDEBY L. A follow-up of two different foundation principles[C]// 4th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, 1998: 259-264.
- [4] YANG M. Study of reducing-settlement pile foundation based on controlling settlement principle [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(4): 481-486.
- [5] COMODROMOS E M, PAPADOPOULOU M C, LALOUI L. Contribution to the design methodologies of piled raft foundations under combined loadings[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 53(4): 559-577.
- [6] BASILE F. Non-linear analysis of vertically loaded piled rafts [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 63: 73-82.
- [7] 王涛. 变刚度调平设计中桩基承载性状研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 641-649.
WANG T. Bearing capacity of piles in optimized design of pile foundation stiffness to reduce differential settlement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(4): 641-649. (in Chinese)
- [8] 马亢, 许强, 李庶林, 等. 高低承台桩基地震行为差异研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1250-1258.
MA K, XU Q, LI S L, et al. Difference of seismic behavior of high and low caps of pile foundations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(6): 1250-1258. (in Chinese)
- [9] DAS B, SAHA R, HALDAR S. Effect of in-situ variability of soil on seismic design of piled raft supported structure incorporating dynamic soil-structure-interaction [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 84: 251-268.
- [10] KUMAR A, CHOUDHURY D, KATZENBACH R. Effect of earthquake on combined pile-raft foundation [J]. International Journal of Geomechanics, 2016: 04016013.
- [11] 杨敏, 杨军. 大间距桩筏基础地震响应离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(12): 2184-2193.
YANG M, YANG J. Centrifuge tests on seismic response of piled raft foundation with large spacing [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(12): 2184-2193. (in Chinese)
- [12] TAN Y C, CHOW C M, CLUE S S. A design approach for piled raft with short friction piles for low rise buildings on very soft clay [C]// Proc. 15th Southeast Asian Geot. Soc. Conf., Bangkok, 2004, 1: 171-176.
- [13] KITTIYODOM P, MATSUMOTO T. A simplified analysis method for piled raft foundations in non-homogeneous soils [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2003, 27(2): 85-109.
- [14] 杨敏, 王树娟, 王伯钧, 等. 考虑极限承载力下的桩筏基础相互作用分析[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 85-89.
YANG M, WANG S J, WANG B J, et al. Practical analysis of piled raft foundation considering ultimate capacity of piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(5): 85-89. (in Chinese)

(编辑 胡玲)