

上部结构-桩基—地基共同作用数值分析及桩基变刚度调平优化设计

李永乐¹, 王 茜²

(1. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450011; 2. 广西公路技工学校, 广西 南宁 530023)

摘要: 本文采用有限元法对高层建筑上部结构—桩筏基础—地基共同作用及相互影响进行了研究。研究表明: 高层建筑上部结构—桩筏基础—地基共同作用及相互影响时, 基础总体沉降和差异沉降随楼层的增加呈非线性变化趋势, 上部结构中存在次应力, 弯矩和轴力比常规法设计偏大; 随楼层的增加, 桩体对荷载的分担比在减少, 土体分担比在增加; 随着上部结构刚度的增加, 荷载向角桩、边桩集中; 增加筏板厚度, 能减少一定的差异沉降和基础平均沉降, 从而减少上部结构的次应力, 提高地基土的荷载分担比, 同时筏板下桩顶反力分布更不均匀, 因此需要从筏板受力, 以及考虑筏下桩、土的受力来综合确定一个合理的筏板厚度, 使设计安全经济; 随着地基土变形模量的提高, 地基土分担的上部荷载增加, 桩顶反力趋向平均, 筏板最大弯矩逐渐减小。桩筏基础在均匀布桩条件下呈中间大边缘小的“碟型”分布。差异沉降是由于上部结构次生应力和筏板内力产生的。通过对地基土刚度以及桩长、桩径、桩距等五种桩基刚度的调整, 并分析不同刚度对基础差异沉降影响可知: 改变桩长的布桩形式并结合地基土刚度调整的中心布桩形式是高层建筑桩筏基础最佳设计方案。

关键词: 上部结构; 桩筏基础; 地基; 共同作用; 有限元; 变刚度; 调平设计

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2013)01-0064-09

在常规的建筑结构设计中, 一般都是把上部结构隔离出来, 把基础视为绝对刚性支座, 求出上部结构的内力、变形; 再把地基反力作用在桩或地基上来设计桩或校核地基强度和变形。由于没有考虑基础差异沉降引起上部结构的次应力, 使上部结构的设计偏于不安全, 这种常规设计方法与建筑物实际工作性状不相符。因此, 研究上部结构—桩筏基础—地基共同作用机理具有重要的理论意义和实用价值。上部结构、基础与地基共同作用的课题研究从 20 世纪 50 年代开始, 逐步引起了国内外学者的重视, 已经获得了许多成果^[1~4]。但在本构模型、系统分析以及变刚度调平优化设计等方面, 还存在许多需要解决的问题。

1 共同作用模型的建立

1.1 实体模型介绍

本次研究实例为 15 层建筑, 上部结构采用纯框架结构, 框架层高 3.6m, 纵横方向柱距均为 8m, 分为 3

跨; 各层框架柱截面尺寸为 800mm × 800mm, 梁截面尺寸为 600mm × 400mm, 梁柱砼等级为 C30, 弹性模量为 3×10^4 MPa, 泊松比 $\mu = 0.17$, 密度 $\rho = 2500$ kg/m³; 楼板厚度为 0.20m, 材料参数同梁柱; 基础采用桩筏基础, 筏板厚度为 1m, 悬挑长度为 2m, 筏板砼等级为 C30; 桩采用均匀等长等距布置, 桩间距为 4m, 桩径 1m, 桩长 15m, 共布桩 49 根, 桩身砼等级为 C30; 场地地质条件为: 地表至 4.0m 深范围内为稍密或中密粉土, 4.0 ~ 8.5m 深范围内为可塑或软塑粉质粘土, 8.5 ~ 12.0m 深范围内为中密粉土, 12m 以下为硬塑粉质, 地下水位在地表以下 6.0m 左右。土体材料参数取各土层的加权平均值, 弹性模量为 1.8E7 Pa, 泊松比 $\mu = 0.35$, 内聚力为 12kPa, 内摩擦角 φ 为 28°。柱和桩的布置图如图 1 所示。

1.2 模型概化、计算域和边界条件

在建模过程中将上部结构钢筋混凝土梁、楼板和筏板基础均概化为线弹性体, 土体为连续的弹塑性体, 符合 Drucker-Prager 模型。土体范围向下取至桩端平面以下 30m 处, 水平方向向桩边缘外取至 12m 处。由于模型的对称性^[5], 取 1/4 模型计算, 除对称面施加对称约束外, 其余各边界均为采用滚动支座, 不允许 x 方向和 y 方向的移动, 底端采用固定支座, 顶端根据实际情况为自由面。整个有限元模型如图 2 所示。

收稿日期: 2012-04-24; 修订日期: 2012-05-22

基金项目: 河南省科技攻关项目(0624440017); 华北水利水电学院高层次人才科研项目资助(20050301)

作者简介: 李永乐(1957-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为岩土工程、地质工程、水文学及水资源等。

E-mail: hnhslyl@163.com

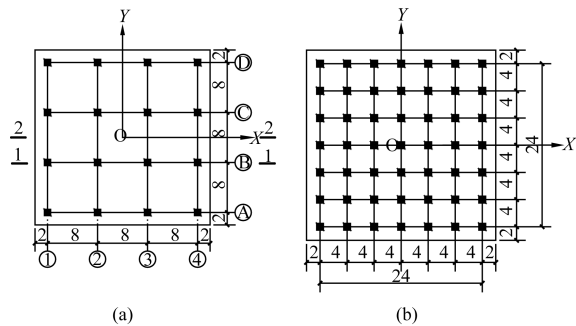


图 1 柱网 (a) 和桩位 (b) 布置平面图
Fig. 1 Map showing (a) column nettings sets and (b) pile position arrangement

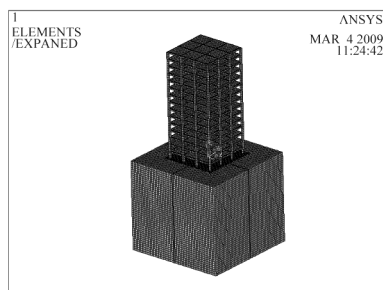


图 2 上部结构—桩筏基础—地基土共同作用有限元模型
Fig. 2 Synergy finite element model for superstructure-pile raft foundation-ground local guerillas

利用 ANSYS 有限元程序,借鉴前人已有研究成果^[6~11],将上部结构与桩筏地基土体整体建模,然后分别划分网格和单元,并通过合理的节点耦合来考虑上部结构和筏板共同作用,以及其作用下的桩基变刚度使得节点竖向位移以及变刚度调平优化设计。

2 上部结构-桩筏基础—地基土共同作用计算结果分析

2.1 应力分析

从图 3 的节点竖向位移等值线云图中可以看出,上部结构各楼板从底层到顶层依次向上竖向位移逐渐增大,并且同一楼板竖向位移中间部位大于边缘部位;土体中靠近筏板中部的竖向位移大于边缘部位,而且可从图中看出土体的压缩主要发生在桩间土及桩端以下 1/4 ~ 1/3 桩长范围的土体中;筏板的竖向位移如图 4 所示呈中间大边缘小的“碟形”分布。

从筏板节点和筏板单元等效应力分布云图中可以看出(图 5),柱端位置筏板节点和桩顶位置筏板节点的应力大于其余筏板各节点的应力,且筏板节点上布有柱下布有桩的节点应力最大,这是因为此处节点刚度最大的结果,大的刚度抵抗了筏板的变

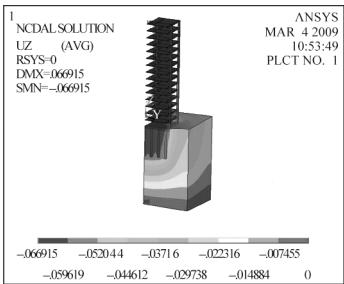


图 3 节点竖向位移等值线云图
Fig. 3 Isoline cloud chart for vertical displacement of pitch point

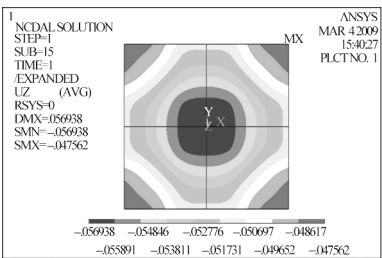


图 4 筏板单元节点竖向位移等值线云图
Fig. 4 Isoline cloud chart for vertical displacement of raft board unit pitch

形从而使局部应力增加,所以在筏板上有柱下有桩的情况下要确保该节点处的连接强度足以抵抗这部分的应力集中。

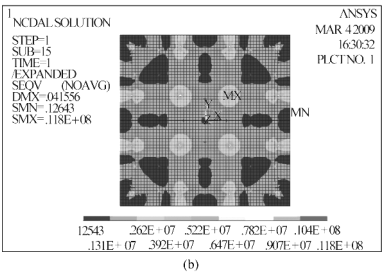
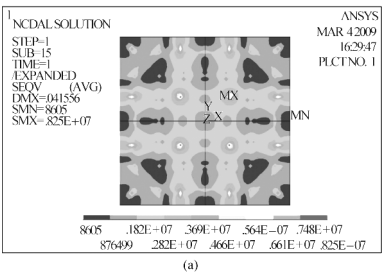


图 5 筏板节点 (a) 和筏板单元 (b) 等效应力分布云图
Fig. 5 Distributed cloud chart for equivalent stress of (a) raft board pitch point and (b) raft board unit

2.2 上部结构逐层施工的影响

随着楼层的逐层增加上部结构的总体自重和楼板

活荷载线性增加,采用有限元法,计算得到各层数所对应的筏板中心最大沉降值 $S_{\max}$ 和最大沉降增量图(图6)。由图6可见,随着上部结构逐层施工,最大沉降逐步增大,增量值先迅速增加,后迅速减小,大约在第9层后随着层数的增加最大沉降增量不再变化而趋于常数。这说明在上部结构刚度逐层形成的过程中刚度的贡献并不是线性的。上部结构对差异沉降的调整作用是有限度的。

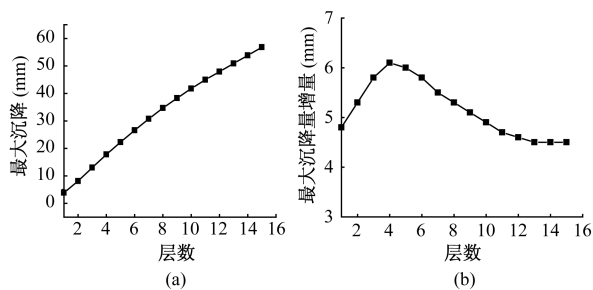


图6 逐层施工对所对应的筏板中心最大沉降(a)和最大沉降增量(b)的影响

Fig. 6 Influence of layer-by-layer construction on (a) the maximum settlement and (b) the maximum settlement increases

由图7可见,随着楼层的增加桩体分担荷载比率在减少,土体分担荷载的比率在增加,但在12层以后桩土分担趋于稳定;角桩桩顶反力 P_c 与中桩桩顶反力 P_i 的比值和边桩桩顶反力 P_e 和中桩桩顶反力 P_i 之间的比值,随着上部结构逐层施工在增加,但在一定层数比值变化趋于稳定。这说明随上部结构层数的增加,上部结构的荷载在传向筏板底面时便向周边集中,即架越作用的结果。这是由于随着上部结构层数的增加,荷载随着增加,基底反力也随着增大。由于筏板和上部结构组成结构体系的刚度随楼层增加而增加,筏板底面要尽量保持平面状态,这就使得桩顶反力向周边转移。这种架越作用大小与上部结构和筏板的整体刚度有关,刚度越大,架越作用越明显,反之越小。

2.3 筏板厚度的影响

结构模型和其余参数不变,筏板厚度按线性增加分别取0.5、1.0、1.5、2.0m四种厚度,对上部结构单元作用下的最大沉降量进行计算。其结果如图8所示。可见,随着筏板厚度的增大,最大沉降随之减小,地基土荷载分担比随之增大,桩荷载分担比随之减少。因此对于控制沉降来说存在一个最佳的筏板厚度。

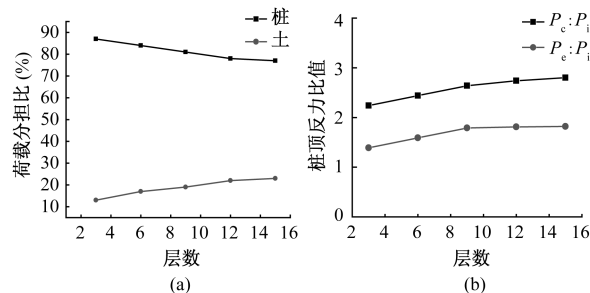


图7 逐层施工对桩土荷载分担(a)和桩顶反力比(b)的影响

Fig. 7 Influence of layer-by-layer construction on (a) the pile earth load shares the ratio and (b) the head of pile reaction the ratio

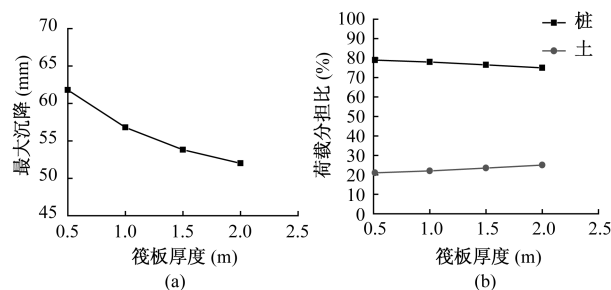


图8 筏板厚度对最大沉降(a)和桩土荷载分担比(b)的影响

Fig. 8 Influence of raft board thickness on (a) maximum settlement and (b) pile earth load shares the ratio

对于柔性筏板来说中心部位地基土的压缩沉降使得筏板连同中间柱一同向下沉降或具有向下沉降的趋势,导致上部结构中间柱轴向应力迅速减小,这就是通常所说的“中柱卸荷现象”,中间柱减小的轴向应力被分配到了更外围的柱端,使得外围柱轴向应力增加。筏板厚度的增加即增加了筏板的刚度,筏板中心部位连同中间柱向下沉的趋势减弱,与之对应的柱的轴向应力将增加。柔性筏板由于其刚度较小,随上部结构布置和荷载形式的不同变化较易出现整体弯曲和局部弯曲,这样上部结构梁和柱在承担自身结构自重和上部楼板传来的荷载造成弯矩的同时还要承担因筏板弯曲造成的额外的弯矩和应力。这就是上部结构的“次生应力”,差异沉降是造成次生应力的主要原因。

2.4 不同地基土变形模量的影响

有限元分析中,假定结构模型和其余参数不变,分别选取不同地基土的变形模量对桩筏基础进行整体共同作用分析,探讨其规律性。由图9可见,随着不同地基土变形模量的增大,筏板的最大沉降在逐渐减小,沉降变化趋势越来越平缓(差异沉降越来越小),当变形模量增大到25MPa后,对最大沉降和差异沉降的影响

变小。随不同地基土变形模量的增大,对减小筏板最大沉降比减小差异沉降效果明显。

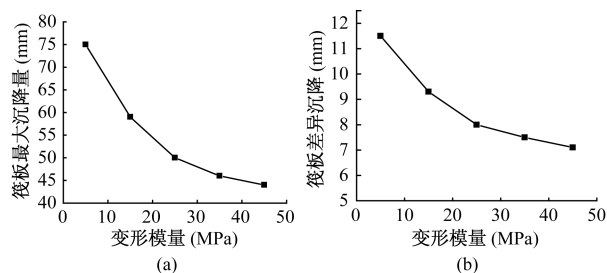


图 9 地基土变形模量对最大沉降 (a) 和差异沉降 (b) 的影响

Fig. 9 Influence of foundation soil modulus of deformation on (a) maximum settlement and (b) the differential settlement

由图 10 可见,随着不同地基土变形模量的增加,土体分担上部荷载的比例呈增加趋势,相应的桩分担的荷载将有所减少。这说明软土地基中采用桩来承担荷载和减少沉降的效果将比硬的土体来说更显著。同时,地基土变形模量越小,即土体越软,桩顶反力差别越大,荷载向角桩、边桩集中。

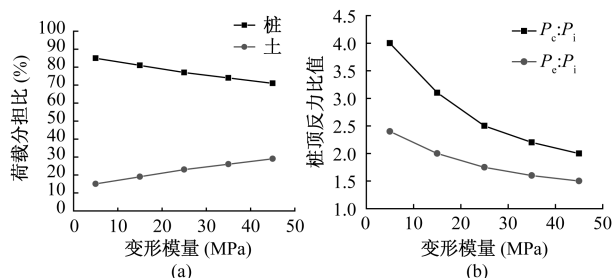


图 10 地基土变形模量对桩土荷载分担 (a) 和桩顶反力 (b) 的影响

Fig. 10 Influence of foundation soil modulus on (a) pile reaction the ratio and (b) the ratio of the pile earth load shares

3 桩基变刚度调平优化设计

3.1 均匀布桩有限元计算模型

均匀布桩条件下有限元计算得出筏板的节点竖向位移见图 11,由图 11b 可见,筏板呈中间大边缘小的“碟型”分布,中心处最大沉降为 67mm,而边缘处沉降为 47mm,最大差异沉降为 20mm。与上部结构为纯框架结构相比,最大沉降和最大差异沉降均有所增大,增加值分别为 11mm 和 12mm。

对于建筑物来说,在保证沉降满足要求的情况下,应对差异沉降进行控制。因此,下面探讨均匀布桩的有限元模型基础上,通过改变桩长、桩距、桩径、

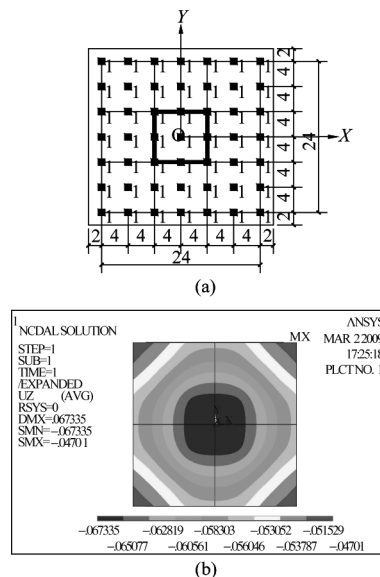


图 11 均匀布桩的桩筏基础 (a) 和筏板单元节点竖向位移等值线云图 (b)

Fig. 11 (a) Pile raft foundation with piles uniform distance and (b) isoline cloud chart of uniform distance for the raft board unit pitch vertical displacement

地基土刚度及布桩方式对差异沉降调平,对该模型进行优化;并试图总结出可较好控制基础差异沉降的布桩形式。

3.2 变桩距的有限元计算模型

针对均匀布桩产生的差异沉降,由茜平一等人^[12-13]提出从桩基优化设计的角度出发的非刚性底板下的“内强外弱”布桩方式,抽去群桩边缘部分桩可有效的较少差异沉降。本文在桩基优化设计中采用了这种“内强外弱”的布桩形式,在原有均匀布桩的前提下,抽掉了群桩边缘位置的 20 根桩,桩长、桩径不变(同上部结构为纯框架结构)形成“内强外弱”的布桩方式。桩①的桩径为 1m,桩长 15m,总桩数 29 根;其平面布置和变桩距的筏板单元节点竖向位移等值线云图如图 12 所示。

由图 12(b)可以看出,抽去群桩边缘位置部分桩,改变原来桩距,形成“内强外弱”布桩法式后,筏板的中心处最大沉降为 74mm,而边缘处沉降为 57mm,最大差异沉降为 16mm。与均匀布桩相比,筏板最大沉降值增加了 7mm,但是最大差异沉降减少了 4mm。这说明在在均匀布桩的基础上抽掉一部分桩后,增大桩距,减少桩数将导致筏板的整体沉降呈增大趋势,内强外弱布桩方式的差异沉降减少,但效果不明显。

3.3 变桩长、变桩距的有限元计算模型

在变桩距的前提下,仅以改变桩长的方式对基础

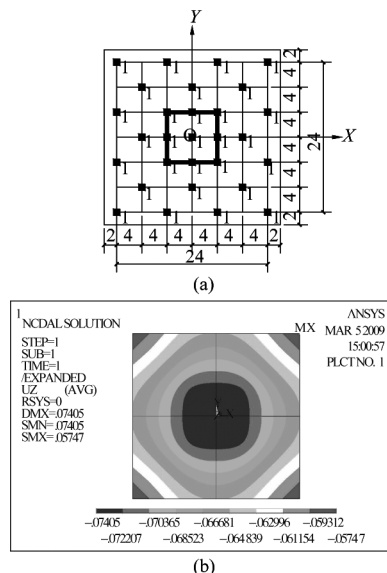


图 12 变桩距的筏板基础 (a) 和变桩距的筏板单元节点竖向位移等值线云图 (b)

Fig. 12 (a) Piled raft foundation with piles different distance and (b) isoline cloud chart of different piles distance for the raft board unit pitch vertical displacement

中心、边缘处的桩基支持刚度进行调整。所有的桩径均为 1m, ②桩长为 10m, 共 16 根; ③桩长为 20m 共 8 根; ④桩长为 30m, 共 5 根; 总桩数为 29 根; 其平面布置和变桩长、变桩距的筏板单元节点竖向位移等值线云图如图 13 所示。由图 13b 可见, 桩长调整后, 核心筒下及核心筒周边柱下③、④号桩的刚度增加, 边缘处②号桩的刚度减小, 筏板中心处最大沉降为 65mm, 边缘处沉降为 58mm, 最大差异沉降为 7mm。与均匀布桩相比, 筏板最大沉降值减少了 2mm, 最大差异沉降减少了 13mm。说明通过对桩长的合理调整能够有效地控制基础的差异沉降, 所以加大恰当位置的桩长来改变桩筏基础的刚度有益于调平设计。

3.4 变桩径、变桩距的有限元计算模型

改变桩径也是调整桩基支承刚度的手段之一, 在变桩距的“内强外柔”布桩方式的基础上, 保持桩长不变, 所有的桩长均为 15m, 仅对桩径进行改动, ①桩径为 1m, 共 16 根; ⑤桩径为 1.5m, 共 8 根; ⑥桩为 2m, 共 5 根; 总桩数为 29 根; 其平面布置和变桩径、变桩距的筏板单元节点竖向位移等值线云图见图 14。

由图 14b 可以看出, 变桩径布桩对减小基础平均沉降和差异沉降的作用并不明显。筏板中心处最大沉降为 70mm, 而边缘处沉降为 55mm, 最大差异沉降为 15mm。与均匀布桩相比, 筏板最大沉降值增加了 3mm, 最大差异沉降减少了 5mm。

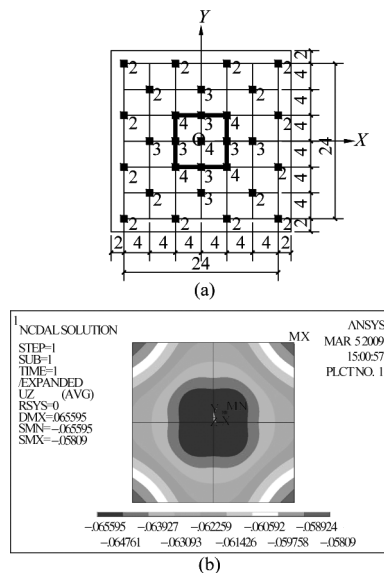


图 13 变桩长、变桩距的桩筏基础 (a) 和变桩长、变桩距的筏板单元节点竖向位移等值线云图 (b)

Fig. 13 (a) Piled raft foundation with piles different distance and length and (b) isoline cloud chart of piles different distance and length the raft board unit pitch vertical displacement

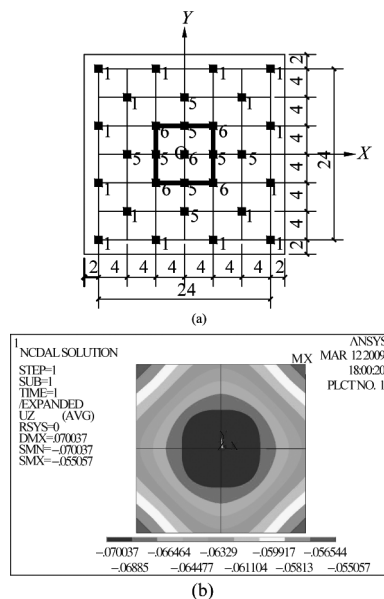


图 14 变桩距的桩筏基础 (a) 和变桩径、变桩距的筏板单元节点竖向位移等值线云图 (b)

Fig. 14 (a) Piled raft foundation with piles different distance and diameter and (b) isoline cloud chart of piles different distance and diameter for the raft board unit pitch vertical displacement

3.5 变桩径、变桩长、变桩距的有限元计算模型

前面分析可知, 变桩径布桩对减小基础平均沉降

和差异沉降的作用并不明显。为此本节讨论桩长和桩径调整相结合的布桩形式对基础差异沉降的影响。桩②桩径为 1m, 桩长 10m, 共 16 根; 桩⑦桩径为 1.5m, 桩长 20m, 共 8 根; 桩⑧桩径为 2m, 桩长 30m, 共 5 根; 总桩数为 29 根; 其平面布置和变桩径、桩长、变桩距的筏板单元节点竖向位移等值线云图如图 15 所示。

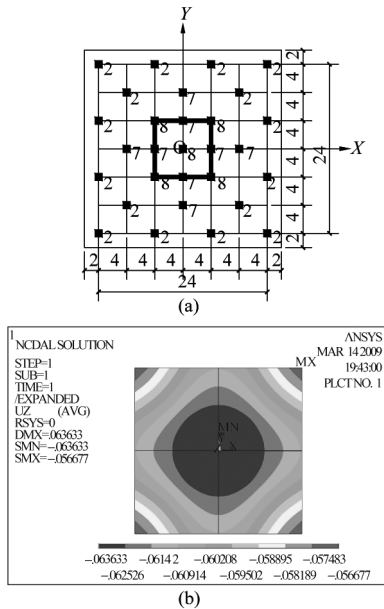


图 15 变桩径、变桩长、变桩距的桩筏基础 (a) 和变桩径、桩长、变桩距的筏板单元节点竖向位移等值线云图 (b)

Fig. 15 (a) Piled raft foundation with piles different distance,length and diameter and (b) isoline cloud chart of piles different distance,length and diameter for the raft board unit pitch vertical displacement

由图 15b 可以看出, 调整桩长、桩径后, 筏板中心处最大沉降为 63mm, 边缘处沉降为 57mm, 最大差异沉降为 6mm。与均匀布桩相比, 筏板最大沉降值减少了 4mm, 最大差异沉降减少了 14mm, 沉降控制效果明显。与仅变桩径的有限元模型相比, 该计算模型控制差异沉降的效果较好; 但与变桩长的模型相比, 由于此模型牵涉到了 3 种桩长、桩径不等的桩, 增加了施工的复杂程度, 不利于该方法的推广使用。

3.6 结合地基刚度调整的中心布桩有限元计算模型

1996 年, Horikoshi K^[14] 系列离心机试验证实, 在筏板中心区域设置少量群桩可以有效减少沉降差。文献[15]讨论了方形筏板下的中心布桩形式对基础差异沉降的影响, 分别计算了布桩面积率为 30%、47% 和 68% 时复合桩基的沉降情况, 得出了在筏板中心面积 30% 处布桩可以有效减小差异沉降的结论。

中心布桩的实质是削弱了筏板边角处的桩基支承刚度。因此, 同样可以考虑调整筏板下浅层土体刚度来实现对差异沉降的控制。为充分利用土体的承载能力, 可考虑先对软弱土层进行加固处理。本节针对深厚软土地区建筑物的差异沉降控制措施, 给出中心布桩结合地基土刚度调整的桩基础形式, 同时讨论其控制差异沉降的效果。

计算方案如下: 在筏板中心区域均匀布桩, 采用桩①桩长 15m, 桩径 1m, 桩间距为 4m, 布桩面积约为 30%, 共 25 根桩, 其平面布置和中心布桩、调整地基土刚度的筏板单元节点竖向位移等值线云图如图 16 所示。对地基土体进行加固, 加固范围: 加固区长宽为整个筏板面积, 加固区深度取为 15m。加固区地基土的弹性模量均取 25MPa。

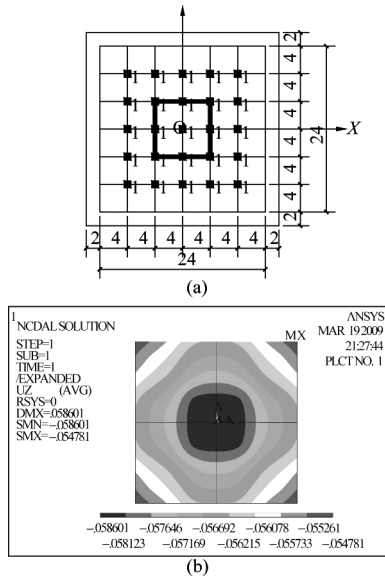


图 16 中心布桩的桩筏基础 (a) 和中心布桩、调整地基土刚度的筏板单元节点竖向位移等值线云图 (b)

Fig. 16 (a) Piled raft foundation with central piles layout and (b) isoline cloud chart of central piles layout and mutative soil rigidity for the raft board unit pitch vertical displacement

由图 16b 可以看出, 采取中心布桩结合地基土刚度调整的桩基础形式后, 筏板中心处最大沉降为 58mm, 边缘处沉降为 54mm, 最大差异沉降为 4mm。与均匀布桩相比, 筏板最大沉降值减少了 9mm, 最大差异沉降减少了 16mm, 这说明筏板的整体沉降和差异沉降都有在减少, 采用这种桩基础形式对控制差异沉降能达到很好的效果。

3.7 各种变刚度调平下沉降控制对比

图 17 比较了 5 种桩基刚度调整计算的沉降分

布,这5种模型分别通过调整桩基支承刚度和地基土刚度,均达到了控制基础差异沉降的目的。由于加固后地基土刚度提高,因此结合地基土刚度调整的中心布桩形式相比其他布桩形式,其平均沉降值最小;考虑到方案的可行性,优化设计结果必须方便施工,因此仅改变桩长的布桩形式更具适用性。同时,对于深厚软土地区的桩基设计,结合地基土刚度调整的中心布桩形式显示出较大的优越性。该种布桩形式通过加固后的地基土承担大部分荷载,主要是较为均匀地减小了桩间土的碟形沉降;而中心布桩主要是控制沉降,特别是控制差异沉降,两者结合可能使用桩数量大为减少。

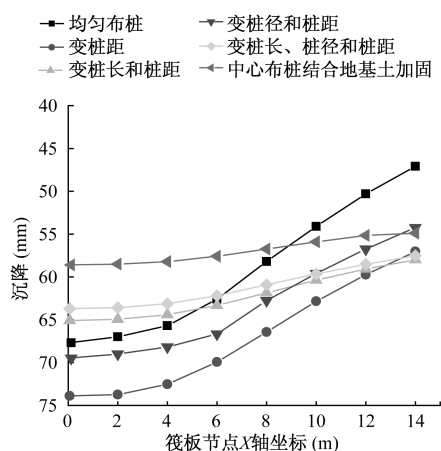


图 17 桩基刚度调整计算模型的沉降分布对比图

Fig. 17 Settlement of the pile foundation with rigidity adjustment

4 结论

(1)利用有限元分析软件 ANSYS 对上部结构—桩筏基础—地基共同作用进行三维分析,对上部结构—桩筏基础—地基共同作用情况下的受力情况及其规律进行了研究,得出基础总体沉降和差异沉降随楼层的增加呈非线性变化趋势。

(2)随楼层的增加,桩体对荷载的分担比在减少,土体分担比在增加。随着上部结构刚度增加,荷载向角桩、边桩集中,这种架越作用大小是与上部结构和筏板的整体刚度有关,刚度越大,架越作用越明显。

(3)增加筏板厚度,能减少一定的差异沉降和基础平均沉降,从而减少上部结构的次应力,可提高地基土的荷载分担比,设计时应从筏板受力以及考虑筏下桩、土的受力来综合确定合理的筏板厚度。

(4)基础的沉降量和沉降差随着不同地基土变形模量的变化而变化,地基土的变形模量越大,基础的最大沉降和差异沉降随之越小,但当变形模量大到某一定值后,沉降变化趋势减小,随着地基土变形模量的提高,地基土分担的上部荷载增加,中桩、边桩和角桩的桩顶反力趋向平均,筏板最大弯矩减小。

(5)计算结果表明:考虑上部结构—桩筏基础—地基共同作用时,桩筏基础在均匀布桩条件下,整个桩筏基础呈中心沉降大、边角沉降小的“碟型”分布。差异沉降是由于上部结构次生应力和筏板内力产生的。通过对地基土刚度以及桩长、桩径、桩距等五种桩基刚度的调整,可以得出高层建筑桩筏基础最佳设计方案。

参考文献:

- [1] Meyethof G G. Some recent foundation research and its application to design[J]. Struct. Eng, 1953, 82, SMI:1-9.
- [2] Sommer H. A method of calculation of settlements, contact pressures and bending Moments in a foundation including the flexural rigidity of the superstructure[C]//Proc. 6th ICSMFE., Montreal, 1965, 2:197-201.
- [3] Price G, Wardle I F. Queen Elizabeth II conference centre: monitoring of loading shearing between piles and raft[C]//Proc. ICE, 1986, Part 1, 80:1505-1518.
- [4] 宰金珉,张问清,赵锡宏.平面形状为L形的空间剪力墙结构与不均匀地基的共同作用[J].岩土工程学报,1983,5(2):125-130. [ZAI J M, ZHANG W Q, ZHAO X H. Interaction between a Space Shear Wall Structure Taking the L-form Plane and a Non-homogeneous Foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 5(2):125-130. (in Chinese)]
- [5] 屈智炯.土的塑性力学[M].成都:成都科技大学出版社,1987. [QU Z J. Thesoil plastic [M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1987. (in Chinese)]
- [6] 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. [HAO W H. Example of ANSYS applications in civil engineering [M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese)]
- [7] 尚晓江. ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用[M].北京:中国水利水电出版社,2008.

- [SHANG X J. ANSYS structural finite element analysis methods and sample applications [M]. Beijing: China Water Power Press, 2008. (in Chinese)]
- [8] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007. [WANG X M. Numerical analysis of ANSYS engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese)]
- [9] Poulos H. G.. Piled raft foundation: design and applications[J]. Geotechnique 2001, 51(2): 95 – 113
- [10] 宰金珉. 群桩与土和承台非线性共同作用的半数值半解析方法[J]. 建筑结构学报, 1996, 17(1): 63 – 74. [ZAI J M. Semi-analytical and semi-numerical method for analyzing nonlinear interaction of pile group-soil-pile cap system [J]. Journal of Building Structures, 1996, 17(1): 63 – 74. (in Chinese)]
- [11] 赵飞宇, 蒋永生, 吴俊. 按空间桁架理论设计的桩筏基础现场试验研究[J]. 东南大学学报, 2003, 33(5): 597 – 600. [ZHAO Y F, JIANG Y S, WU J. Field test study on piled raft foundation designed on spatial truss theory [J]. Journal of Southeast University, 2003, 33(5): 597 – 600. (in Chinese)]
- [12] 茜平一, 陈晓平, 高红升. 高层建筑带桩基础优化设计[J]. 土工基础, 1994, 8(1): 126 – 130. [QIAN P Y, CHEN X P, GAO H S. Optimizing Design of the Piled Foundations Under Tall Buildings [J]. Soil Engineering and Foundation, 1994, 8(1): 126 – 130. (in Chinese)]
- [13] 陈晓平, 茜平一. 桩筏基础设计的系统分析方法研究[J]. 水利学报, 1995(10): 35 – 39. [CHEN X P, QIAN P Y. The design of piled raft foundation system analysis method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995(10): 35 – 39. (in Chinese)]
- [14] Horikoshi K, Randolph M F. Optimum design of piled raft foundation [C]//Proc. 14th Int. Conf. SMFE. 1997: 85 – 92.
- [15] 凌华. 考虑筏板刚度的桩筏非线性共同作用分析[D]. 南京: 南京工业大学硕士学位论文, 2002. [LING H. Consider the stiffness of the raft and the nonlinear interaction of piled raft [D]. Nanjing: Journal of Nanjing University of Technology, 2002. (in Chinese)]

Numerical analysis of interaction of superstructure-piled raft foundation-the foundation soil and optimal design for variable stiffness of the pile raft foundation

LI Yong-le¹, WANG Qian²

(1. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou, Henan 450011, China;
2. The Highway Technical School of Guangxi, Nanning, Guangxi 530023, China)

Abstract: In this paper, finite element method was used to study the interaction and common effect among superstructure-piled raft foundation-foundation interaction. The research results show that when the interaction of superstructure-the pile raft foundation-foundation and the influence among them occur, the foundation settlement of overall and differential subsidence with the increase of the floor change nonlinearly, the upper structure existing in secondary stress and the bending moment and axial force are larger than those with the conventional design method. With the increase of the floor, the pile body load sharing ratio reduces and the soil sharing ratio increases along with the increase of the upper structure stiffness and the load concentration on the corner pile and side pile. Increasing raft thickness can reduce certain differential subsidence and the average base settlement, thus reducing the secondary stress of the upper structure and improving of the load sharing ratio of foundation soil. At the same time the under-raft reaction distribution on top of pile is more uneven, so it is needed to force from the raft and consider raft under the stress of the piles and soils forces comprehensive to determine a reasonable thickness of the raft, which makes the design safety and economy. With the increase of foundation soil deformation modulus, the upper load-sharing by the foundation soil

increases, the top of the pile reaction tends to be average, and the maximum bending moment of the raft gradually decreases. Piled raft foundation under the conditions of uniform cloth pile was at the middle edge of the small "dish type" distribution. Differential settlement is due to the upper structure of the secondary stress and raft internal force. Through adjustment of five pile foundation stiffness of foundation soil and pile length, pile diameter, pile spacing, etc, the influence of different foundation stiffness to differential subsidence can be learned. Change in pile lengths of pile form of cloth and combination with the center cloth pile of the foundation soil stiffness adjustment in the form are the optimal design for high-rise building pile raft foundation.

Key words: superstructure; pile-raft foundation; foundation; co-effect; finite element; variable stiffness; optimal design

责任编辑:张明霞

(上接第 63 页)

- [12] JGJ 94 - 2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. [JGJ 94 - 2008 Technical code for building pile foundations [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese)]
- [13] 张季荣, 朱向荣. 简明建筑基础计算与设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. [ZHANG J R, ZHU

X R. Design and calculation of the architecture foundation [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese)]

- [14] Poorooshasb H B, Alamgir M, Miura N. Negative skin friction on rigid and deformation piles[J]. Computers and Geotechnics, 1996, 18(2): 109 - 126.

Settlement of reinforced region for composite foundation under loads of embankment in stratified soil

CHEN Chang-fu, ZENG De-miao, WU Yan-quan, SUN Yan

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: Provided that the neutral point of a pile is insensitive to the variance of elastic modulus for stratified soil, which is verified by finite element stimulation in the following section, analytical formulas of compressive quantity for pile and surrounding soil in reinforced region of composite foundation under embankment loads were derived along with the expressions for vertical stress of pile and surrounding soil, and shear stress of pile surrounding in each soil layer, by applying elasticity, compatibility of pile-soil displacement and boundary conditions. Comparison between results of the calculation approach and those of finite element and in situ measurements indicates that a good agreement for the deformation of pile and surrounding soil within the precision tolerance of engineering computation is obtained. This work will benefit the settlement analysis for cases in similar stratified soil.

Key words: stratified soil; embankment loads; composite foundation; elasticity; neutral point; settlement

责任编辑:张明霞