

# 高层建筑地下室补偿基础设计研究

胡德华<sup>1</sup>,刘向东<sup>2</sup>

(1. 武汉工程大学环境与城市建设学院,湖北 武汉 430074;  
2. 武汉市民用建筑设计研究院,湖北 武汉 430014)

**摘 要:**高层建筑地下室桩筏基础设计,往往忽略桩筏底板桩间土分担上部荷载的作用,由桩承担全部的上部荷载.实际上在高层建筑巨大的竖向荷载作用下,地下室外墙与桩身将产生压缩变形与沉降,使桩间土的承载力、地下室对地基的卸荷补偿作用逐渐发挥出来.考虑地下室的卸荷补偿作用进行桩基设计时,可大大节省布桩数量;另外由于最小配筋率的限制,无端地增加基础底板厚度时,混凝土的收缩因素对钢材用量的减少并不显著.

**关键词:**地下室;桩筏基础;桩间土;补偿作用

中图分类号:TU473      文献标识码:A      doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2010.11.011

## 0 引 言

随着城市高层建筑大量兴建,桩筏基础如何经济合理地设计越来越引起相关人员的关注,传统的方法是不管是摩擦桩还是端承桩,一律不考虑筏板底桩间土分担上部荷载的作用,而将全部的上部荷载都由桩来承担.而且为减少基础的总沉降量和差异沉降量,往往都用规范规定的最小桩距限制来满堂布桩,并认为桩距越小,桩身越长,设计就越合理,越能保证安全.但是桩筏基础的真正受力变形特征却并非完全如此.

## 1 桩筏基础桩—土反力实测结果分析

桩筏基础实测结果表明,除基底土为液化土、湿陷土等欠固结土外,对于摩擦桩或端承摩擦桩,桩间土反力都客观存在,并稳定地分担了15%~35%的上部荷载<sup>[1-3]</sup>,从而使桩的承载力只能得到部分发挥.因此忽略桩间土的承载力作用,不仅无端地增加了基础工程投资,而且也延长了施工工期.

如图1是福州地区一栋高层建筑,地下室一层,地面以上23层,总高度83 m,筏板厚度1.25 m,筏板底为直径500 mm的钢筋混凝土预制桩,总桩数358根<sup>[4]</sup>.表1为桩反力计算值与实测结果.可以看出,桩的承载力发挥效率只有43.7%~59.9%,桩间土分担的比例在15.4%~32.5%之间,相当于分担了将近4层楼的荷载.虽然设计人员起初考虑是由桩来全部承担整个建筑物的荷载,但在上部荷载作用下,产生桩身压缩变形与沉降,使桩间土的承载力逐渐得到了发挥.

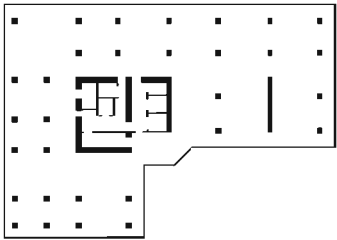


图1 柱、墙位置示意图

Fig.1 Columns, walls position diagram

表1 桩—土反力计算值与实测结果

Table 1 Pile-soil reaction force calculated and measured results								kN
点号	1	2	3	4	5	6	7	8
桩反力计算值	1527	1603	1508	1551	1644	1571	1481	1457
实测	桩反力	668	908	864	734	726	819	844
	土反力	231	192	257	353	186	161	159
土分担的比例		25.7%	17.5%	22.9%	32.5%	20.4%	16.4%	15.9%
桩实测值/计算值		0.437	0.565	0.571	0.474	0.443	0.521	0.571
							0.571	0.599

收稿日期:2010-07-15

作者简介:胡德华(1964-),男,湖北黄梅人,高级工程师,一级注册结构工程师.研究方向:建筑结构工程设计研究、安全审查与管理.

## 2 现行桩筏基础设计存在的问题

高层建筑基础的分析与设计经历了不考虑上、下共同相互作用阶段,仅考虑基础与地基的相互作用到现今开始全面考虑上部结构与地基基础的共同作用的新阶段,但仍存在如下问题:

a. 虽然目前我国已有了专门的高层建筑与地基基础共同作用理论的相关程序,但仍需要采取种种假定,无法避免计算模型与实际情况差异。无论是桩筏基础还是箱筏基础,诸多工程的实测表明:底板的整体弯曲率都很小,不到万分之五,如甘肃省的一些高层建筑箱形基础的实测都在  $0.16 \times 10^{-4} \sim 3.4 \times 10^{-4}$  之间;而测得的筏底板钢筋应力都在  $20 \sim 30$  MPa 之间<sup>[5]</sup>,只有钢筋强度设计值的 10%,个别内力较大的工程也没有超过 70 MPa。

b. 地下室深基坑的开挖对天然地基或复合地基的基础能起到很大的卸荷和补偿作用从而减少了地基的附加应力,不少设计人员在桩筏基础设计时未予考虑。至于地下水,仅考虑对筏基底板局部作用,而未考虑对整个建筑物的浮托补偿作用;

c. 地下室外墙与回填土之间的摩阻力必然使建筑物整体沉降受到了一定的影响,对地基基础也起了一定的补偿作用。但有关地下室外墙摩阻力的研究文献尚未见到。

## 3 混凝土收缩应力对地下室底板钢筋应力的影响

高层建筑桩筏基础底板施工时,只有底板自重,而无任何上部结构的边界约束,使混凝土在硬化过程中可以自由收缩,其收缩应变为<sup>[6]</sup>:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(t)_0 \beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 \beta_5 \quad (1)$$

式(1)中: $\varepsilon(t)$ 为任意天数 $t$ 时混凝土的收缩应变(mm/mm);

$\varepsilon(t)_0$ 为混凝土的基本收缩方程:

$$\varepsilon(t)_0 = \frac{t}{45.4 + 6.9t} \times 10^{-3} \quad (2)$$

式(2)中: $\beta_1$ 为混凝土强度影响系数(当强度等级为 C20、C40、C60 时, $\beta_1$  分别为 0.87、1、1.15);

$\beta_2$ 为温湿度影响系数, $\beta_2 = \frac{1}{0.01T + 0.009H}$ ,

其中 $T$ 为温度, $H\%$ 为相对湿度;

$\beta_3$ 为养护方法影响系数,标养时 $\beta_3 = 1.0$ ,自然养护时 $\beta_3 = 1.3$ ;

$\beta_4$ 为构件尺寸影响系数,当地下室地板厚度 $\leq 2$  m 时, $\beta_4 = 1.2$ ;

$\beta_5$ 为配筋率(含弹模)影响系数(当 $\rho = A\%$ , $n = E_s/E_c$  时, $\beta_5 = 0.9917 - 0.0804nA$ )。

对于地下室,一般混凝土强度等级为 C40, $\beta_1 = 1$ , $E_c = 32.5$  GPa; HB335 钢材,混凝土的配筋率约为 0.26%, $E_s = 200$  GPa, $n = E_s/E_c = 6.15$ , $\beta_5 = 0.8631$ ; 平均温度  $20^\circ\text{C}$ , 湿度 75% 时  $\beta_2 \approx 1.143$ , 自然条件下养护  $\beta_3 = 1.3$ ; 地板厚度 600 mm,  $\beta_4 = 1.2$ 。

当  $t = 7$  d、14 d、28 d 时, $\varepsilon(t)$  分别为  $0.115 \times 10^{-3}$ 、 $0.152 \times 10^{-3}$ 、 $0.181 \times 10^{-3}$ 。

当  $t \rightarrow \infty$  时, $\varepsilon(t) = 0.223 \times 10^{-3}$ 。

假定钢筋与混凝土间不产生相对滑移,即 $\varepsilon_s = \varepsilon(t)$ ,那么,混凝土收缩必然使钢筋产生预压应力,其大小为: $\sigma_s = E_s \varepsilon_s$ , 相应于  $t = 7$  d、14 d、28 d 时,钢筋预压应力为  $\sigma_s = 23.0$  MPa、30.4 MPa、36.2 MPa, 当  $t \rightarrow \infty$  时, $\sigma_s = 44.6$  MPa。

由于摩擦力等约束因素存在,筏板自由收缩仍受影响,钢筋预压应力不可能达到 44.6 MPa。如陕西省电信网管中心大楼测得筏板钢筋预压应力为 30.25 MPa,相当于 10% 的设计强度。因此充分发挥混凝土收缩产生的钢筋预压应力作用,理论上可以节省 10% 的桩筏底板钢筋。

## 4 桩筏基础地下室受力特征

### 4.1 地下室底板与桩及桩间土体的相互作用

如图 2 所示,外荷载作用下,筏基底板理应发生整体挠曲变形,使底板与桩间土发生滑移。但由于底板与桩间土存在一定的摩擦力以及桩、桩承台侧土对底板滑移变形的约束力作用,整体挠曲变形受到影响。不难看出:上部荷载越大 $\rightarrow$ 沉降越大 $\rightarrow$ 反作用力也越大 $\rightarrow$ 摩阻力越强 $\rightarrow$ 约束作用力越强。

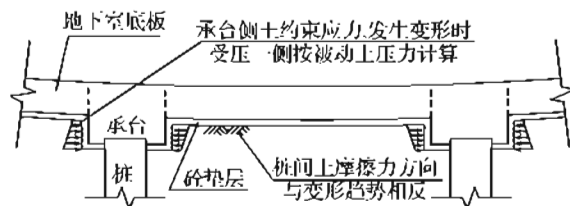


图 2 桩筏底板变形约束示意图

Fig. 2 Pile-raft floor deformation constraint diagram

### 4.2 地下室外墙回填土的摩擦力作用

分层夯实的回填土使地下室四周外墙的被动土压力和侧墙摩阻力限制了地下室外墙的水平摆动,加强了基础的稳定性。日本计算桩基承担地震剪力的经验方法表明,当地下室周边土标准锤击贯入度为 20 时,一层地下室所承担的剪力可减少 70%,两层地下室的桩基就不必考虑地震剪力的

问题;同时摩阻力的存在,对地基基础也起了很大的补偿作用.根据陕西省电信网管中心大楼测试资料计算分析<sup>[8]</sup>,外墙平均摩阻力可达到100 kPa以上.

#### 4.3 地下室对地基或桩基的补偿潜力

地下室深基坑的开挖,对天然地基或复合地基的基础起到了很大的卸荷和补偿作用,从而减少了地基附加应力,降低了对地基或桩基承载力的要求.

#### 4.4 上部结构对桩筏基础变形的约束作用

施工基础上面1~5层时,上部结构的整体刚度尚未形成,上部荷载主要由桩间土承担;随着楼层施工的进展,上部结构的整体刚度逐步形成,并且越来越大,此时所增加的上部荷载由桩间土转为由桩来承担.而且由于上部结构刚度贡献所形成的整体架越作用,渐次呈现出角桩的桩顶反力增长较快,边桩次之,内桩的桩顶反力增长最慢的现象.

### 5 桩筏基础设计方案实例研究

如图3为襄樊某医院(16层,高55.6 m)地下室平面图,边柱 $Z_1$ 最大轴向力标准值为7.5 MN,中柱 $Z_2$ 最大轴向力标准值为11.4 MN,地下室底板厚600 mm,板面为300 mm厚C20素混凝土设备垫层,板底置于粉质粘土夹粉土层, $E_s = 5.2$  MPa,  $f_{ak} = 120$  kPa,板底标高为-5.40,板底垫层C15厚100 mm,外墙C40,厚400 mm,后压浆钻孔灌注桩桩径 $D = 800$  mm,桩端置于细砂层,有效桩长21~23 m,承载力特征值2 600 kN,承台板厚1 400 mm,地下水稳定水位为地面以下1.10~1.20 m,室内外高差450.

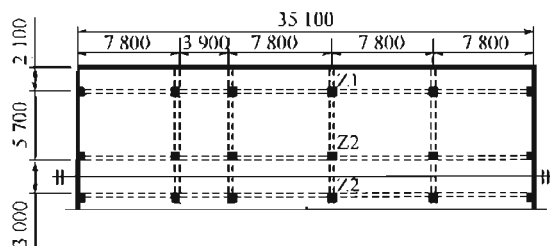


图3 桩筏基础墙柱平面图(筏板厚600)

Fig. 3 Pile-raft foundation walls-columns plan (raft thickness of 600)

a. 地下室的补偿作用对布桩的影响:初次设计时,按常规方法进行,不计桩间土的作用,桩距 $3.5D = 2 800$ , $Z_1$ 下布桩3根,两中柱 $Z_2$ 下联合布桩,共9根,合计工程桩总数为76根.

第二次按桩、土共同作用与地下室对地基的卸荷补偿作用重新考虑,桩距 $3.75D = 3 000$ ,考虑

到桩筏基础中间桩与外墙周边桩内力时间效应<sup>[7,8]</sup>,外墙与回填土间的摩擦力仅作安全储备,未参与边桩补偿计算.

挖土深度 $h_1 = 5.5 - 0.45 = 5.05$  m,卸去的土压力 $F_1 = h_1 \times r_0 = 5.05 \times 18 = 90.9$  kN/m<sup>2</sup>

其中: $r_0$ 为土的加权重度,一般取18 kN/m<sup>3</sup>;

地下水稳定水位:施工期间虽然采取降水措施,但主体结构完后停止降水时,必然又恢复到原稳定水位.考虑干旱等因素使地下水位稳定受到影响,保守取地下水稳定水位为地面以下1.60 m.

水对地下室地板的浮托力为 $F_2 = r_w \times d = 10 \times [-0.45 - 1.6 - (-5.5)] = 34.5$  kN/m<sup>2</sup>

总的补偿作用力为卸去的土压力与水对地下室地板的浮托力之和,即

$$F = F_1 + F_2 = 90.9 + 34.5 = 125.4 \text{ kN/m}^2;$$

与未修正的粉砂层地基承载力特征值基本一致.

补偿后 $Z_1$ 作用于桩顶最大有效轴力标准值为: $7 500 - 125.4 \times (5.7/2 + 2.1) \times 7.8 = 2 658$  kN,桩数1根即可;

同理: $Z_2$ 作用于桩顶最大有效轴力标准值为:

$$11 400 - 125.4 \times (5.7 + 3)/2 \times 7.8 = 7 145 \text{ kN,桩数3根即可,两中柱共布六桩.}$$

经全面复算,总的桩数为41根,与初次设计相比桩总数减少了46.1%.

b. 混凝土收缩对配筋的影响:因混凝土收缩使钢筋产生预压应力,取预压应力为钢筋设计强度的10%,可将钢筋强度设计值提高10%计算配筋量:

底板反力(水位按地面以下1.1 m计):  
(125.4 + 0.5 × 10 - 0.7 × 25 - 0.3 × 20) × 1.2 = 128 kPa.

不计设备荷载等有利因素,最大负弯矩为:

$$M_{\max} = 0.072 \times 128 \times 5.72 = 299.4 \text{ kNm}, a_s = \frac{299.4 \times 10^6}{1 000 \times 560^2 \times 19.1} = 0.05, \xi = 0.0513.$$

$A_s = \xi h_0 f_c / f_y$ ,取 $f_y = 300 \times (1 + 10\%) = 330$  N/mm<sup>2</sup>,得 $A_s = 1 663$  mm<sup>2</sup>.

最小配筋率为 $\rho_{\min} = \max\{0.002, 0.45f_t/f_y\} = 0.2565\%$ , $(A_s)_{\min} = 1 539$  mm<sup>2</sup>.

$A_s > (A_s)_{\min}$ ,取18@150双层双向, $A_s = 1 696$  mm<sup>2</sup>.

若筏板厚度为800(按每层50厚计算),则 $(A_s)_{\min} = 2 052$  mm<sup>2</sup>,按筏板最大负弯矩的计算配筋为 $A_s = 1 152$  mm<sup>2</sup>,整个筏板将按构造要求配

筋。

由此可见,考虑地下室卸荷补偿作用,却可大大减少布桩数量,节省基础工程投资,缩短施工工期。但由于最小配筋率的限制,加大筏基底板厚度,混凝土收缩因素对钢材用量的减少并不明显。

c. 按常规设计,桩筏基础底板的板底、板面钢筋应力最大值按常规设计,筏板厚度为 800,扣除混凝土收缩产生的钢筋预压应力后,板底钢筋最大应力值:

$$(\sigma_s)_{\max} = \frac{1}{2} \frac{152}{0.052} \times 330 - 30 = 155 \text{ MPa.}$$

板面钢筋(正弯矩钢筋)最大应力值:  $M = 0.028 0 \times 128 \times 5.72 = 116.4 \text{ kNm}$ ,  $A_s = 439 \text{ mm}^2$ .

$$(\sigma_s)_{\max} = \frac{439}{2 \times 0.052} \times 330 - 30 = 40.6 \text{ MPa.}$$

实际上,由于桩承台厚度远高于筏板,筏板四角存在厚度与面积较大的“板刚域”,使筏板理论计算跨度小于轴线尺寸,再加上地下室设备荷载的有利影响等,筏板钢筋最大应力值远远小于上述计算值,有关实测结果也证实了这一点。

## 6 结 语

综上所述,高层建筑桩筏基础地下室设计理论至今仍不完善,无端地加大布桩数量、缩小桩间距,会造成不良综合经济效益。具体的项目设计

中,必须凭借自身拥有的设计经验、力学概念和正确的判断力进行把握。本文根据地下室受力特征,在桩筏基础设计中进行了初步探索,并根据有关桩筏基础底板钢筋应力实测结果在理论上进行了简要阐述,其目的是希望建筑设计同仁能深刻地认识到高层建筑地下室的结构潜在作用。

参考文献:

- [1] 高立人,方鄂华,钱家茹. 高层建筑结构概念设计[M]. 北京:中国计划出版社,2005:247-263.
- [2] 袁凡凡,栾茂田. 筏板—桩—土相互作用的三维弹性有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(18):3332-3336.
- [3] 杨敏,王树娟. 桩筏基础相互作用下土中应力场的变化规律[J]. 岩土工程学报,1999,21(1):26-30.
- [4] Yang Min, Wan Shujun. The stress in soil under piled raft foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1999,21(1):26-30.
- [5] 史佩东,高大钊. 21 世纪高层建筑基础工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007:172-178.
- [6] 吕艳梅,刘立新. 商品混凝土收缩应力实验研究[J]. 东南大学学报:自然科学版,2005,35:144-148.
- [7] 齐良峰,张宝印. 某高层建筑桩筏基础桩间土反力原位测试研究[J]. 岩土力学,2004(25):827-831.
- [8] 程泽海,凌道盛. 桩筏基础在竖向荷载作用下的时间效应[J]. 土木工程学报,2004,37(2):73-77.

# Research on compensated foundation design of tall building basement

HU De-hua<sup>1</sup>, LIU Xiang-dong<sup>2</sup>

(1. School of Environmental and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan Research Institute of Civil Building Design, Wuhan 430014, China)

**Abstract:** Tall building basement piled raft foundation design often overlooked soil between piles to share the role of the upper load. In fact, under the action of tall building huge load, the basement wall and the piles will have a compression deformation and settlement, so that the bearing capacity of soil between piles and compensation for the role of the basement foundation gradually rise. Considering the role of unloading compensation to the basement for pile foundation design will reduce the number of piles, as the minimum reinforcement ratio limits and unwarranted increase in foundation slab thickness, concrete shrinkage factors on the reduction of steel consumption is not remarkable.

**Key words:** basement; pile-raft foundation; soil between piles; compensate effect

本文编辑:龚晓宁