

筏式和箱式承台弯矩的计算

董建国 杨 敏 赵锡宏

(同济大学地下建筑与工程系, 上海)

提 要

本文通过现场测试以及高层建筑桩筏和桩箱基础的共同作用分析, 提出了高层建筑桩筏(箱)基础底板的厚度、相对弯曲以及整体弯矩的确定方法。文中还给出了基底反力的统计值, 角桩反力、边桩反力与桩的平均反力的比值的统计值, 以利设计人员的使用。

一、前 言

筏式和箱式承台弯矩的计算问题是广大设计人员迫切关心的问题。全国的《建筑地基基础设计规范》(GBJ7—89)、上海的《地基基础设计规范》(DBJ08—11—89)以及《天津市建筑地基基础设计规范》(TBJ1—88)均未涉及到该问题。而国内各设计院凭经验所进行的设计, 在相同荷载条件下筏(箱)底板厚度差异很大。为了深入了解高层建筑桩筏和桩箱基础的性状, 我们针对高层建筑越造越高、桩越来越长、底板越来越厚的现象, 进行数幢高层建筑桩筏(箱)基础的现场实测, 收集了国内外仅有几幢的现场实测成果, 并研究各经验方法, 综合分析, 提出了比较合理的桩筏和桩箱承台弯矩的计算方法。

下面就高层建筑桩筏和桩箱基础以及纯桩筏和桩箱基础两种情况来分别介绍桩筏和桩箱基础承台弯矩的计算。

二、高层建筑桩筏和桩箱基础

(一)高层建筑桩筏基础

1. 桩筏基础厚度的确定

通常, 桩筏基础的厚度是凭经验假定的, 然后进行冲剪、抗剪强度的验算。但是, 这样做的结果, 会造成在同样的建筑荷载下筏底板厚度相差很大的现象(见表1)。混凝土量的浪费是显然的。若桩筏基础的厚度采用其在软土地基共同作用分析中所获得的桩筏基础的相对刚度来确定, 即可避免上述不合理现象。桩筏基础的相对刚度 K_{Rp} 可由下式表示^[1]:

$$K_{Rp} = \frac{E_r h^3 \delta_p}{12(1 - \nu_r^2) B_r S} \quad (1)$$

$$B_r = \sqrt{A} \quad (2)$$

式中 E_r 和 ν_r 分别为筏板混凝土的弹性模量和泊松比; δ_p 为单位荷载下的单桩沉降; h , B_r

分别为筏板厚度和等效宽度; A 为筏板平面面积; S 为桩间距。

表1

桩筏基础

编 号	5	6	11	12	13	14	15	16	17	18
上部结构	框筒	筒仓	框筒	框剪	框剪	剪力墙	筒体	框筒	框筒	框剪
高度(m)	94.5		125.5	117	153	122.56	120	91.25	112.75	71.8
层数	地上	26	24+6	35	43	34	36	23+2	33	20
	地下	2	2	1	1	1	1	2		1
总荷载(MN)			400.350	888.000*			632.150*	410.63606	852.000*	405.968
总压力(kPa)	360	288	562		>600			417		205
桩长(m)	53	30.7	52.7	70.3	40	39	66	25	20	21
桩径(宽)(cm)	φ 60.9×1.2	45×45	φ 60.9×1.1	φ 85	φ 60.9×1.1	φ 60.9×1.1	φ 60.9×1.2	φ 120	φ 100, φ 120	35×35
桩数	200	609	187	296	441		269	97	142	
埋深(m)	7.6	1.0	3.3	8.15	9.1	6.0	5.2	9.5		5.0
基础尺寸(m ²)	38.7×36.4	69.4×35.2	27×27	56×53	45×45	68×20	70×40	29.3×29.3	36.7×36	76×26
底板厚度(m)	2.3	1.6	1.5	2.8	4.0	3.0	2.5	1.8	3.0	2.0
桩位布置	满堂	满堂	满堂	满堂	满堂			满堂	满堂	满堂
桩类型	钢管桩	混凝土方桩	钢管桩	灌注桩	钢管桩	钢管桩	钢管桩	灌注桩	灌注桩	混凝土方桩

*根据单桩的设计荷载求得。

根据桩筏基础的相对刚度 K_{RD} 可以把桩筏基础的刚度大致划分为4个状态:

柔性状态: $K_{RD} \leq 10^{-2}$; 柔性点: $K_{RD} = 10^{-2}$

弹性状态: $10^{-2} < K_{RD} < 1$; 弹性点: $K_{RD} = 0.30$

刚性状态: $1 \leq K_{RD} < 10$; 刚性点: $K_{RD} = 1.0$

绝对刚性状态: $K_{RD} \geq 10$

用刚性点确定桩筏基础的筏板厚度,既能保证上部结构所需的基础刚度,又能使基础相对弯曲 θ_r 值处于建筑物的正常使用状态。

2. 桩筏基础筏板的相对弯曲和整体弯矩

桩筏基础的相对弯曲可用基础的相对刚度 K_{RD} 和基础的平均沉降 $\bar{w}_r$ 来描述(见图1)。

筏基的整体弯矩^[2]:

$$M_L = 8\theta_r \cdot D \left(\frac{1}{L} + \frac{\nu_r}{B} \right) \quad (3)$$

$$D = \frac{E_r h^3}{12(1 - \nu_r^2)} \quad (4)$$

式中 L , B 分别为筏基的长度和宽度; M_L 为长度方向单位宽度的整体弯矩。

桩筏基础,在可能的条件下,尽量使桩柱相对,这样可以减薄筏板的厚度。深圳的中国银行大厦^[3]地上38层,地下1层,总重692.644MN,桩基础,筏板厚度仅40cm即为一例。

(二) 高层建筑桩箱基础

1. 桩箱基础底板设计

桩箱基础,在可能的条件下,尽量使桩沿墙下轴线布置。这样布置的桩箱基础,箱基底

板厚度可以大大减薄^[4], 表2同样说明桩沿墙下轴线布置的桩箱基础底板厚度比满堂桩布置要薄得多。

表2

桩箱基础

编号	总压力 (kPa)	层数		底板厚度 (cm)	墙距 (m)	桩布置形式
		地上	地下			
1	250	18	1	30	3.3	轴线
2	228	12	1	35	4.2	满堂
3	240	16	1	68	3.35~3.65	满堂
4	500	32	1	60	3.5	轴线
7	310	22	1	150	6.6	满堂
19	513	26	1	160	3.8~7.6	满堂
20	344.1	23	1	100	2.5~3.8	满堂
21	327.4	23	1	35	3.3~5.1	轴线
22	400.5	19	1	120	4.4~7.5	满堂
23	281.5	16	2	50	5.7~6.0	轴线
24	359.1	20	1	145	5.3~7.0	满堂
25	390.6	20(局部22)	1	100	6.0	轴线
26	435.6	28	1	160	6.0~8.0	满堂

由于桩的存在, 对桩箱基础的箱基变形起到约束作用。图2给出了26幢桩箱基础和21幢箱形基础的实测沉降 $\bar{S}$ 和整体倾斜 Δ 图^[4], 从图中可知, 桩箱基础的沉降在15cm以内, 比之箱基有明显改善; 整体倾斜改善得更显著, 均在1.12‰以下(短桩除外), 我们知道, 纯

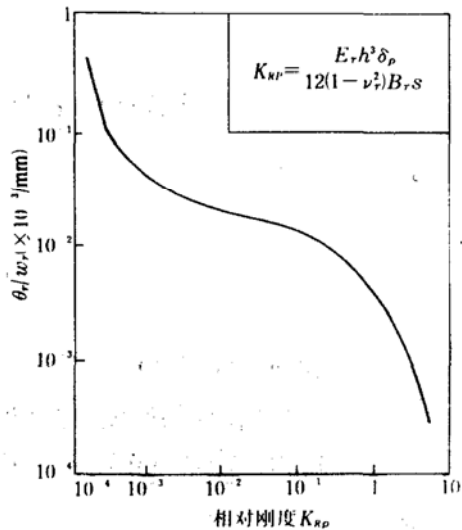


图1

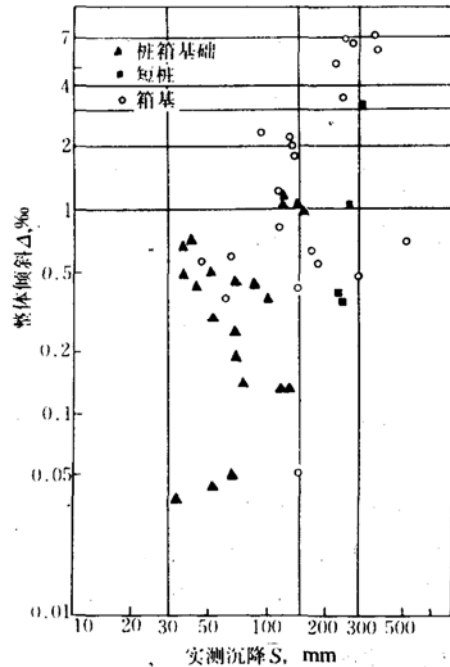


图2

箱基的整体刚度已经很大, 桩的存在进一步提高桩箱基础的整体刚度, 使之接近绝对刚性,

为此, 桩箱基础的整体弯矩可以不计。不管是轴线桩还是满堂桩布置, 桩箱基础的底板弯矩均按局部弯曲计算。当桩距按常规设计 $s = (3 \sim 4)d$ 时, 基底反力按总荷载的26%或按地下水浮力计算, 取大值。

2. 局部弯矩计算时的基底反力值

箱或筏分担总荷载的比例是相当复杂的问题, 它与很多因素有关。通过理论和实测分析可知, 桩的间距和施工方法等是主要影响因素。

表3给出了国内外按常规设计 $s = (3 \sim 4)d$ 的荷载分担比例的现场实测结果^[4-8]。可知, 在 $s = (3 \sim 4)d$ 的情况, 箱或筏底板分担荷载的比例为(10~25.5)%, 尽管现场实测数量不多, 还是能够从中得到一些资料, 底板分担荷载的平均值 $\bar{X} = 18.9\%$, $S_x = 6.06\%$ 。若基底反力取 $\bar{X} + S_x = 24.96\% \approx 25\%$, 其保证率为84.13%; 若基底反力取 $\bar{X} + 1.17S_x = 26\%$, 其保证率为87.9%。

表3

桩箱(筏)荷载分担比例现场实测结果

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
上部结构	剪力墙	剪力墙	框剪	剪力墙	框筒	筒仓	框剪	剪力墙	剪力墙	框筒
层数	18~20	12	16	32	26		22	22	16	30
基础类型	桩箱	桩箱	桩箱	桩箱	桩筏	桩筏	桩箱	桩筏	桩筏	桩筏
总压力(kPa)	250	228	240	500	360	288	310	270	190	625
基础尺寸(m)	29.7×16.7	25.2×12.9	44.2×12.3	27.5×24.5	38.7×36.4	69.4×35.2	42.7×24.7	47.0×25.0	43.3×19.2	22(22×15)
基础埋深(m)	2.0	4.5	4.5	4.5	7.6	1.0	5.0	2.0	2.5	2.5
桩长(m)	7.5	25.5	27.0	54.6	53.0	30.7	28.0	17.0	13.0	20.0
桩径(宽)(cm)	40×40	45×45	45×45	50×50	φ60.9×1.2	45×45	φ55.0	45×45	φ45	φ90
桩数	183	82	203	108	200	604	344	222	351	2×42
桩距(m)	1.20~1.35	1.80~2.10	1.65~3.3	1.60~2.25	1.90~1.95	1.9	1.7~2.0	1.6	1.6	2.7~3.15
荷载分担比例	箱或筏 (%)	15	25.5	17.5	11	25	10	20	15	25
		85	74.5	82.5	89	75	90	80	85	75

在桩箱基础的常规设计中, 是由桩来承担全部荷载的, 设计桩箱基础的箱基底板时, 再把总荷载的30%作为基底反力来设计箱基底板。根据实测结果, 在结构物竣工时, $s = (3 \sim 4)d$ 情况的基底反力均未达到30%的总荷载, 可见, 以往常规设计是保守的。现在我们根据现场实测统计提出26%的总荷载作为基底反力来设计桩箱基础的箱基底板, 已有近90%的保证率, 是能保证设计安全可靠的。

3. 桩箱基础桩沿轴线布置时箱基底板厚度的参考值

表4表示桩箱基础底板厚度和钢筋应力的实测值。从表中可见, 桩沿轴线布置最小底板厚度为30cm(18层高层住宅), 底板安然无恙; 底板厚度为60cm, 系32层高层住宅, 它的底板最大钢筋拉应力只有14.2MPa, 而底板混凝土开裂前的钢筋应力为28MPa, 可见底板的安全储备是很大的。从以上两例可知, 桩沿轴线布置的桩箱基础, 从18层到32层, 总荷载从250~500kPa, 箱基内墙间隔为3.3~3.5m, 这类箱基底板厚度可按下式确定:

$$h = \begin{cases} 30 & (p \leq 250 \text{ kPa}) \\ 0.12p & (250 \text{ kPa} \leq p \leq 500 \text{ kPa}) \end{cases} \quad (5)$$

式中 p 为高层建筑总荷载, 用kPa的值代入上式; h 为箱基底板厚度, cm。

4. 满堂桩箱基础的箱基底板厚度确定

一般仍以柱或桩对箱基底板的冲剪强度控制, 并适当加以安全储备。

表4 桩箱基础底板厚度和钢筋应力实测值

编号	总压力(kPa)	底板最大钢筋拉应力(MPa)	底板厚度(cm)	墙距(m)	桩布置形式
1	250		30	3.3	轴线
4	500	14.2	60	3.5	轴线
3	240	15.0	68	3.35~3.65	满堂
7	310	10.6	150	6.6	满堂

三、纯桩筏和桩箱基础情况

对于工业厂房, 设备往往直接安置在桩筏或桩箱基础上, 这类情况, 除计算筏或箱的局部弯矩外, 还应计算它们的整体弯矩。整体弯矩通常用静力学截面法求得。若桩的设计荷载采用桩的极限承载力的一半时, 整体弯矩计算的桩反力可以考虑: ①角桩反力采用1.53倍的平均桩反力; ②边桩反力采用1.12倍的平均桩反力。余下的外荷载由内桩均分, 平均桩反力等于全部外荷载除以总桩数。当地下水位较浅时, 外荷载采用上部荷载减去浮力。基底反力采用26%的总荷载。

关于桩筏和桩箱基础的桩反力分布规律, 理论和现场实测结果汇于表5^[4,5,7,8]。

表5 桩箱(筏)基础的桩反力分布规律

编号	基础类型	桩布置形式	桩距/桩径	$P_c : P_{av}$	$P_e : P_{av}$	$P_i : P_{av}$
1	桩箱	轴线	3.0	1.25 : 1	1.08 : 1	0.9 : 1
3	桩箱	满堂	3.3~6.5	1.38 : 1	1.04 : 1	0.4 : 1
6	桩筏	满堂	3.7	1.46 : 1		0.86 : 1
7	桩箱	满堂	3.4	1.32 : 1		0.74 : 1
8	桩筏	沿墙	3.2	1.32 : 1		
9	桩筏	满堂	3.6	1.83 : 1	1.42 : 1	0.83 : 1
10	桩筏	满堂	3.0~3.5	1.43 : 1	1.05 : 1	0.46 : 1
I	桩筏	满堂	3.0~3.5	1.93 : 1	1.21 : 1	0.62 : 1
II	桩筏	沿墙柱	4.0~5.5	2.01 : 1	1.03 : 1	0.67 : 1
III	桩筏	沿墙	8.0~12.0	1.35 : 1	1.03 : 1	0.72 : 1

当外荷载较小, 地基条件较好情况, 角桩和边桩反力取大值; 反之, 取小值。根据数理统计原理, 平均值的可能误差 $\varepsilon_0 = 0.6745 \sqrt{\frac{\sum \nu_i^2}{n(n-1)}}$ 。所以, 角桩反力 P_c 与平均桩反力 P_{av} 之比值 $(1.53 \pm 0.06) : 1$; 边桩反力 P_e 与平均桩反力 P_{av} 之比值为 $(1.12 \pm 0.04) : 1$; 内桩反力 P_i 与平均桩反力 P_{av} 之比值为 $(0.69 \pm 0.04) : 1$ 。

四、结 论

1. 根据高层建筑桩筏基础与软土地基共同作用分析的结果, 提出用刚性点来确定高层建筑桩筏基础筏板的厚度是合理的。

2. 柱桩相对安排, 可大大减薄筏板的厚度。

3. 高层建筑桩箱基础底板用局部弯矩设计为好, 基底反力采用26%的总荷载, 有近90%的保证率; 或采用地下水浮力, 取大值。

4. 高层建筑桩箱基础桩沿轴线布置, 箱基底板厚度可以大大减薄。文中给出了总荷载在500kPa以内, 墙间隔为3.3~3.5m的桩沿轴线布置的底板厚度计算公式。

5. 纯桩筏和桩箱基础需要计算它们的整体弯矩, 整体弯矩计算采用静力学截面法, 并给出了桩反力和基底反力的统计值。

参加本项研究工作的还有袁聚云、殷永安、钱宇平、沈伟跃, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 杨 敏. 上部结构与桩筏基础共同作用的理论与试验研究[博士论文]. 同济大学, 1989.
- [2] 董建国, 杨 敏, 赵锡宏等. 桩筏基础整体弯矩确定的新方法. 桩基技术新进展学术讨论会论文集(上), 1991: 62~67.
- [3] 《高层建筑结构设计实例集》汇编组. 高层建筑结构设计实例集. 中国建筑工业出版社, 北京, 1989: 53.
- [4] 赵锡宏等. 上海高层建筑桩筏与桩箱基础设计理论. 同济大学出版社, 上海, 1989: 1~90, 146~178, 195~211.
- [5] 陈强华, 陈冠发, 洪毓康. 高层建筑下桩-箱共同作用原位测试研究. 岩土工程师, 1990, (1): 1~10.
- [6] 贾宗元, 魏汝南. 软土地基桩土共同作用监测实测分析. 全国第五届土力学及基础工程会议论文集, 中国建筑工业出版社, 1990: 433~437.
- [7] 何颐华, 金宝森, 王秀珍等. 高层建筑箱型基础加摩擦桩的研究. 中国建筑科学研究院地基所, 1987.
- [8] Cooke R W, et al. Some Observations of the Foundation Loading and Settlement of a Multi-story Building on Piled Raft Foundation in London Clay. Proc ICE, Part 2, 1981, 70, 433~460.

Bending Moment for Piled Raft (or Piled Box) Foundation

Dong Jian-guo Yang Min Zhao Xi-hong

(Dept. of Geotechnical Engg., Tongji University, Shanghai)

Abstract

A calculating method for determining the thickness of foundation slab, relative deflection and whole bending moment for piled raft (or piled box) foundation for tall building is presented by means of field measurements and analysis of interaction between superstructure and piled raft (or piled box) foundation. The statistical values of the contact pressure, ratio of corner and side pile load to the average load are also given for the use of designers in practice.