

高层建筑下桩-箱基础共同作用研究

洪毓康 楼晓明 陈强华
(同济大学岩土工程系, 上海, 200092)

文 摘 为了研究在上海软土地区上高层建筑桩-箱基础共同作用机理, 本文对一高层建筑桩-箱基础进行了原位测试及共同作用分析。原位测试从基坑开挖开始到建筑物结构封顶后 3 个月, 历时 2 年零 3 个月, 取得了有关建筑物沉降特征、基底反力分布和桩顶作用力分布规律的实测资料。文中还按弹性理论方法对建筑物的群桩基础作了共同作用分析, 并与实测结果进行了对比。
关键词 桩-箱基础, 共同作用, 原位测试。

1 概 述

上海市杨浦区新建 24 层高层住宅建筑, 采用桩-箱基础, 箱基埋深 6.5m, 基础底板厚 1.5m, 平面面积约 917m²。基底下设置了 233 根钢筋混凝土预制桩, 桩截面为 45cm × 45cm, 桩长 24.2m。桩基平面布置示于图 1。

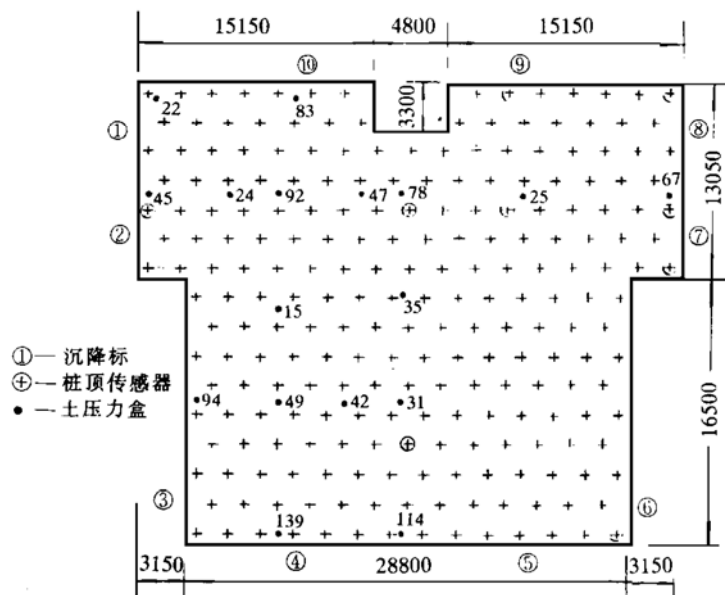


图 1 建筑物平面及量测元件布置图

建筑场地地质情况, 在地面下深度 25m 范围内, 主要土层为 ③ ④层淤泥质粉质粘土(粘土)及 ⑤层灰色粉质粘土, 其孔隙比 $e = 1.1 \sim 1.5$, 含水量 $w = 38\% \sim 52\%$, 静力触探比贯入阻力 $p_s = 0.4 \sim 0.9 \text{MPa}$, 压缩模量 $E_{1-2} = 2 \sim 5 \text{MPa}$; 其下为 ①层暗绿色粉质粘土, 层厚 3.5~

4.4 m, $e = 0.71$, $w = 23\%$, $P_s = 2.5 \text{ MPa}$, $E_{1-2} = 8.3 \text{ MPa}$; ①层褐黄色粉质粘土及 ①层草黄色粘质粉土夹粉砂, 作为桩尖持力层, 层厚 2.5~ 12.3m, $e = 0.78 \sim 0.89$, $w = 26.6\% \sim 31.4\%$, $p_s = 3.9 \sim 12.8 \text{ MPa}$, $E_{1-2} = 10 \sim 14.5 \text{ MPa}$; 下卧层 ⑦层为密实粉细砂, 层厚 7~ 10m, $e = 0.83$, $w = 28.2\%$, $p_s = 15 \text{ MPa}$, $E_{1-2} = 16.2 \text{ MPa}$ 。场地的静力触探比贯入阻力曲线示于图 2。

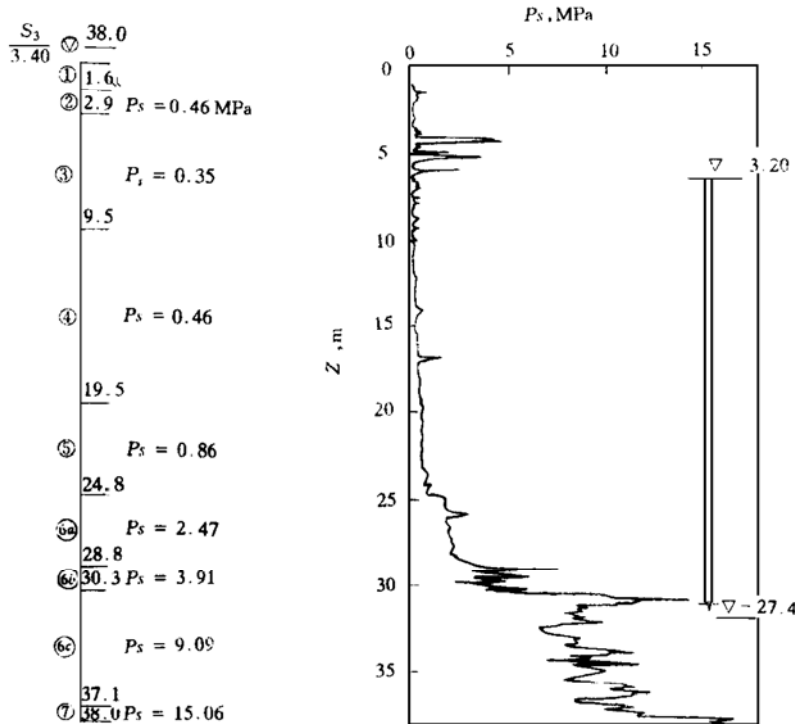


图 2 场地静力触探贯入阻力曲线

为了研究桩-箱基础共同作用机理及变形特征, 进行了原位测试和分析, 测试内容包括: ①建筑物沉降观测; ②用土压力盒实测箱底板与基底土间的接触压力; ③用桩顶荷重传感器实测桩顶荷载。量测元件埋设位置示于图 1。文中还按弹性理论法对建筑物的群桩基础作了共同作用分析并与实测结果进行对比。

2 原位测试结果与分析

2.1 建筑物的沉降

在建筑物地下室外墙四周设置了 10 个沉降观测点, 进行定期沉降观测, 观测结果列于表 1。图 3 是建筑物的施工层数- 时间 t - 平均沉降量 s 的关系曲线。从这些试验结果可以看出下述沉降特征。

表 1 建筑物实测沉降量表

施工层数	2	4	6	8	11	14	16	18	20	22	24	24
实测时间(d)	44	93	143	241	262	409	446	479	523	562	659	767
实测平均沉降量(mm)	0.3	0.8	1.6	2.3	7.4	11	15.2	15.9	18.5	22.6	28.1	31.1
沉降速率(mm/d)	0.007	0.010	0.016	0.007	0.04	0.076	0.113	0.02	0.059	0.107	0.056	0.028
平均沉降速率(mm/d)	0.01				0.06				0.028			

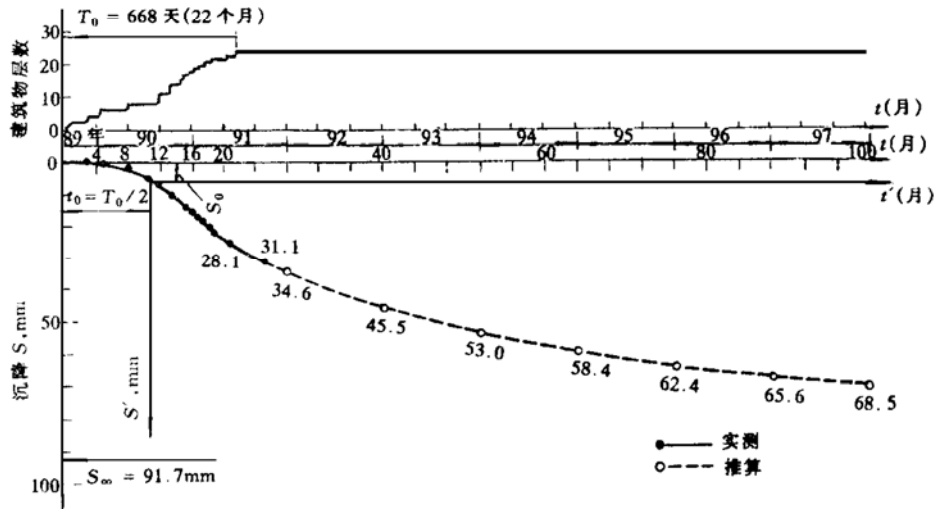


图3 建筑物施工层数-时间 t -沉降 s 关系

(1) 建筑物沉降发展可分为三个阶段: 第一阶段是建筑物施工到第8层前, 由于深基础的补偿作用及基础开挖时桩的牵制作用, 减小了回弹量, 这阶段沉降量较小仅 2.3mm, 平均沉降速率为 0.01mm/d。第二阶段从第8层到结构到顶(24层), 这阶段沉降发展明显加快, 平均沉降速率达 0.06mm/d。第三阶段是结构到顶后, 沉降速率逐渐降低为 0.03mm/d。

(2) 建筑物的沉降量是较小的, 至结构到顶后4个月, 总沉降量也仅 31mm, 主要是桩尖持力层为 15~ 20m 厚的中- 低压缩性土层。

(3) 建筑物下沉比较均匀, 根据建筑物周围 10 个测点的沉降数据可见, 没有出现明显的整体倾斜现象。

(4) 根据实测沉降资料, 按双曲线法推算的 $S-t$ 关系曲线示于图 3 中, 推算的最终沉降量 $S_{\infty} = 91.7\text{mm}$ 。由于最后一次实测值是在结构封顶后仅 3 个多月, 时间较短, 因此推算的最终沉降量估计偏大。

2.2 基础底板下土的接触压力

在箱基底板下不同部位处理设了 14 只土压力盒, 埋设位置示于图 1, 量测结果列于表 2 (其中有 3 只土压力盒受损数据未给出)。图 4 是箱基底板平均反力随建筑物层数变化情况, 从上述结果可见, 11 只土压力盒读数相近, 其平均基底反力从 42kPa 逐渐趋近于 55kPa。由于箱基底板的埋深为 6.5m, 地下水位深 1m, 故土压力盒实测压力 55kPa 接近于底板处的静水压力。因此可以判断建筑物施工过程中, 箱基底板仅受到地下水的浮力作用, 桩间土没有起到分担荷载的作用。

当箱基刚开始浇筑时, 基坑周围采用井点降水, 故不存在地下水对基础的浮力作用, 这时土压力盒测得的数值仅是 1.5m 厚箱基底板的自重压力(约 37.5kPa)。随着基础及上部结构刚度的逐步形成, 打桩引起的超孔隙水压力逐步消散, 土发生固结变形, 加以桩尖持力较硬, 故桩基沉降量较小, 导致基底与土的接触压力逐步减小, 甚至发生脱空现象, 这在上海也有过实测报道^[1]。当地下室建成, 停止井点降水。地下水位逐渐回升至常水位, 基底受到水浮力作用, 图 4 大致反映了上述过程。

表 2 实测基底反力值

施工层数	各测点基底反力值(kPa)											
	83#	24#	92#	47#	78#	25#	15#	49#	42#	31#	139#	平均
二 层	47	47	42	40	42	39	45	43	39	45	41	42
四 层	49	47	43	41	43	42	46	45	39	47	42	44
六 层	53	52	47	45	48	44	53	51	45	56	46	49
八 层	56	55	51	51	50	45	54	50	47	53	48	51
十 层	54	55	54	50	49	45	54	51	48	53	47	51
十二层	60	59	55	53	56	52	59	58	53	59	54	56
十四层	59	59	55	52	54	51	58	55	51	57	51	55
十六层	58	58	54	51	54	51	57	55	50	56	52	54
十八层	59	58	55	52	53	51	57	55	49	57	51	54
二十层	59	60	56	53	55	52	59	57	51	59	53	56
二十二层	58	59	55	52	54	59	58	56	51	58	52	56
二十四层	59	60	56	53	55	52	59	57	51	58	53	56

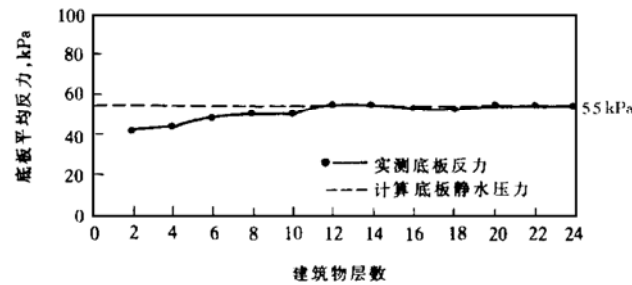


图 4 箱底板实测反力

2.3 桩顶作用力

在 7 根桩桩顶设置荷重传感器, 其位置见图 1。其中 3 只在角桩, 2 只在边桩, 2 只在中央桩, 这三类桩的桩顶平均荷载在施工过程中的变化情况列于表 3, 并如图 5 所示。箱底板下桩顶反力分布是角桩 $P_c >$ 边桩 $P_e >$ 中央桩 P_i , 这符合刚性基础的特点, 它们与桩顶平均荷载 \bar{P} 的比值是: $P_c/\bar{P} = 1.6 \sim 1.8$, $P_e/\bar{P} = 1.1 \sim 1.3$, $P_i/\bar{P} = 0.8 \sim 0.9$ 。

表 3 各类桩实测桩顶荷载情况表

施工层数	P_c (kN)	P_e (kN)	P_i (kN)	\bar{P} (kN)	P_c/\bar{P}	P_e/\bar{P}	P_i/\bar{P}
二层	467	464	304	360	1.29	1.29	0.84
四层	751	513	350	425	1.77	1.21	0.82
六层	953	700	385	513	1.86	1.36	0.75
八层	1077	706	585	613	1.75	1.15	0.95
十层	1158	766	628	706	1.64	1.08	0.89
十二层	1369	983	690	822	1.67	1.20	0.84
十四层	1430	983	799	897	1.59	1.09	0.89
十六层	1578	1140	829	971	1.63	1.17	0.85
十八层	1771	1237	879	1045	1.69	1.18	0.84
二十层	1839	1368	930	1119	1.64	1.22	0.83
二十二层	1902	1544	967	1195	1.59	1.29	0.81
二十四层	2141	1803	1036	1329	1.61	1.35	0.78

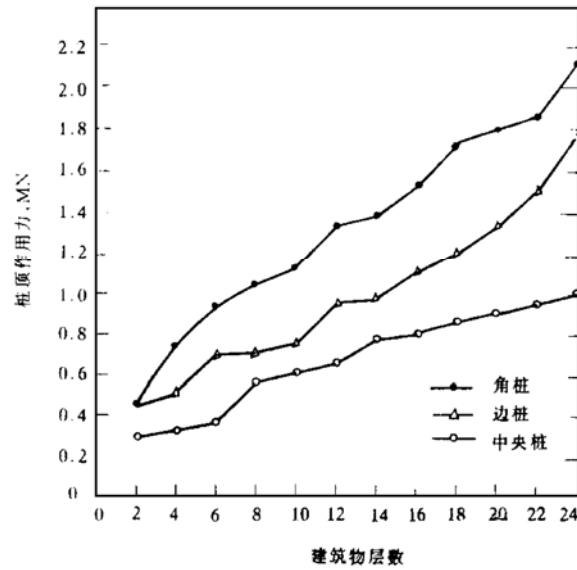


图5 施工期各类桩桩顶平均荷载变化情况

2.4 量测结果检验

为了验证上述观测成果的可信度, 根据实测结果推算建筑物在各施工阶段的重量, 与按施工图框算的建筑物实际荷重比较, 列于表4。可以看到, 其相对误差为5%~11%, 这表明本工程的实测结果是可信的。

表4 建筑物实测荷重与实际荷重的比较

施工层数	实测荷重(MN)		建筑物 实际荷重 N_0 (MN)	相对误差 $\delta = \frac{N_m - N_0}{N_0}$
	桩顶荷载 N_p	总荷载 $N_m = N_p + N_w$		
二层	83.8	131.7	119.5	0.10
四层	99.0	146.9	138.5	0.06
六层	119.8	167.6	157.5	0.06
八层	142.8	190.6	176.5	0.08
十层	164.6	212.4	195.4	0.08
十二层	191.4	239.3	214.4	0.11
十四层	209.1	257.0	233.4	0.10
十六层	226.3	274.1	252.4	0.09
十八层	243.4	291.3	271.4	0.07
二十层	260.6	308.5	290.4	0.06
二十二层	278.5	326.3	309.4	0.05
二十四层	309.6	357.4	328.4	0.09

注: 水浮力 $N_w = 47.9$ (MN)

3 理论计算与分析

3.1 基本原理

本建筑物整体刚度很大, 在上部结构与地基基础共同作用分析中, 简化为刚性基础-桩-

土的共同作用。同时利用结构的对称性,并假定刚性基础与地基始终保持接触和荷载无偏心作用。计算时将刚性基础底面划分成 n 个矩形网格单元,各单元的沉降与反力公式为

$$S_i = \sum_{j=1}^n \delta_{ij} p_j = S \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1a)$$

$$\sum_{i=1}^n p_i = P \quad (1b)$$

式中 P, S 为总荷载及总沉降; p_i 为矩形网格单元 i 处的集中地基反力(或桩顶反力); δ_{ij} 为各网格单元的相互影响系数(即桩-土-桩的相互作用系数),它是 i, j 单元间间距的函数,可用弹性理论的 Boussinesq 和 Mindlin 应力解,并按分层总和法求得。

从方程式(1)直接求解 p_i 及 S_i 值,是共同作用分析常用的方法,由于方程的系数矩阵是个满阵,当 n 值较大时,需较大的计算内存,很不经济。为此本文采用了迭代法。

3.2 迭代法的应用

为了在微机上实现本工程共同作用分析,必须避免解上述大型满阵方程组,本文采用了变基床系数迭代法^[2,3]。将各网格单元桩-土-桩间的相互影响,反映在各基底单元下的基床系数上,从而将刚性基础-桩-土的共同作用分析,转化为刚性基础-变基床系数的文克尔地基共同作用。由此可将式(1)写成

$$p_i^m = K_i^m S^m \quad (i = 1, 2, 3 \dots, n) \quad (2a)$$

$$\sum_{i=1}^n p_i^m = P \quad (2b)$$

其中
$$K_i^m = p_i^{m-1} / \sum_{j=1}^n \delta_{ij} p_j^{m-1} \quad (3)$$

式中 m 为迭代次数; K_i^m 为第 m 次迭代时,第 i 个桩、土单元的基床系数。

按公式(3)求得 K_i^m 后,由公式(2)即可求得第 m 次迭代时的基础沉降为

$$S = P / \sum_{i=1}^n K_i^m \quad (4)$$

再代入公式(2a),即可求得各网格单元下的桩、土反力 p_i^m 值。

当 $|\frac{S^m - S^{m-1}}{S^{m-1}}| \leq \varepsilon$ 时,即可终止迭代, ε 为两次迭代计算结果的容许相对误差,如取用 $\varepsilon = 0.002$ 。

利用结构对称性分析 1/2 基础板时^[4],由于地基的连续性,必须考虑另一半基础板下桩、土单元的影响,因此公式(1a)中的相互影响系数 δ_{ij} 应为

$$\left| \begin{array}{l} \delta_{ij} = \delta'_{ij} + \delta''_{ij} \quad (x_i \neq 0, i \text{ 单元不在对称轴上}) \\ \delta_{ij} = \delta'_{ij} \quad (x_i = 0, i \text{ 单元在对称轴上}) \end{array} \right.$$

其中 δ'_{ij} 为计算 1/2 基础板时, j 单元对 i 单元的影响系数; δ''_{ij} 为计算 1/2 基础板时, j 单元的对称单元对 i 单元的影响系数。

3.3 计算结果及结论

按刚性基础-变基床系数迭代法进行共同作用分析时,取用土的泊松比 $\mu = 0.3$,桩的最大影响范围 $r_m = 10d$,建筑物的总荷载为 328.4MN,附加总荷载为 218.6MN。其计算结果为:

(1) 按本文提出的迭代法计算建筑物的最终沉降量 $S_{\infty} = 107\text{mm}$, 计算时土的压缩模量是采用 E_{1-2} 值。

(2) 根据上海地区经验^[5], 深层土的压缩模量 $E_s = (2 \sim 3) E_{1-2}$, 若采用 $E_s = 2E_{1-2}$, 则按本文方法求得建筑物的最终沉降量 $S_{\infty} = 54\text{mm}$ ^[6]。故认为本工程最终沉降量 S_{∞} 约在 60mm 左右是较合理的。

(3) 桩间土荷载分担比的计算值很小, 仅 3.3%, 而不是零。这是因为打桩对土的挤压引起的超孔隙水压力随时间而消散, 使桩间土固结下沉, 土与基底脱空, 这在理论计算中未予以考虑。

(4) 桩顶作用力分布的相对比值为: $P_e/\bar{P} = 1.79$, $P_c/\bar{P} = 1.31$, $P_i/\bar{P} = 0.90$, 计算结果与实测很接近。

通过上述计算分析说明, 本文提出的方法是可行的。曾对上海地区高层建筑下短桩基础和中-长桩基础进行了一系列原位测试和计算分析研究, 加深了对其工作机理的认识。

参 考 文 献

- 1 陈绪禄. 群桩基础原体观测——上港二区散粮筒仓原位观测报告. 南京水利科学研究所, 1979.
- 2 洪毓康, 楼晓明. 群桩基础共同作用分析. 见: 第六届全国土力学与基础工程学术会议论文集. 北京: 中国建筑物工业出版社等, 1991.
- 3 楼晓明, 洪毓康. 承台-桩-土共同作用的迭代分析法. 见: 桩基技术新进展学术讨论会论文集, 1991.
- 4 姚炳卿. 弹性固体地基板有限元分析中对称性利用的问题. 岩土工程学报, 1987, 9(1).
- 5 赵锡宏等. 上海高层建筑桩筏与桩箱基础设计理论. 上海: 同济大学出版社, 1989.
- 6 楼晓明, 洪毓康, 陈强华. 群桩基础地基中竖向附加应力性状研究. 岩土工程学报, 1996, 18(4).

Studies of Pile-Box Foundation Interaction Under Highrise Buildings

Hong Yukang Lou Xiaoming Chen Qianghua

(Geotech. Eng. Dept., Tongji Univ., Shanghai, 200092)

Abstract To study pile-box foundation interaction under highrise buildings on Shanghai soft soil, field measurements are reported for a 24-storeyed building on box foundation with 233 precast concrete piles, including settlement and bearing pressure at different points of the box foundation, and load on head of piles. Field measurements were performed throughout the construction period, lasting about 2 years and 3 months. Computations based on elastic theory and current specification have been performed for comparison.

Key words pile-box foundation, interaction, field measurement.