

# 高层建筑箱形基础加摩擦群桩 的桩土共同作用

何颐华 金宝森

(中国建筑科学研究院地基所, 北京)

## 提 要

关于高层建筑箱形基础加摩擦群桩的桩土共同作用问题, 前人所作的理论探索较多, 但争议极大, 长期以来不能解决工程设计的实际问题。本文通过某高层建筑的原体工程实测和室内模型试验, 充分揭示了桩土共同作用的机理。本试验结果表明, 桩和桩间土共同承担建筑总荷载, 其中桩分担建筑物荷载的80%, 而桩间土约分担建筑物荷载的20%。还获得了由容许荷载, 极限荷载到破坏荷载全过程的桩顶荷载分配曲线, 为箱基下摩擦群桩的合理设计提供理论依据。

## 一、前 言

近年来, 我国高层建筑发展十分迅速。据不完全统计, 已建和在建的高层建筑达数千幢, 而且建筑高度不断增加, 体形日趋复杂。目前已建成一批高度超过百米的高层建筑, 并已开始设计兴建二百米以上高层建筑。

我国沿海及江湖沿岸的一些地区, 地基比较软弱, 承载力低, 地基土压缩性高, 兴建20层左右的高层建筑一般采用桩基础。鉴于高层建筑的荷载大, 对建筑物沉降变形要求严格, 很多设计采用箱型基础加满堂摩擦群桩, 而对这类基础工程中的桩土协同工作, 是长期以来工程界争议最多的重大问题, 亦是当前急待解决的课题, 它对节约基本建设投资有很大意义。

本文是通过实际高层建筑(22层, 高82m, 基础面积为 $42.7 \times 24.7\text{m}^2$ )的工程实测及模型试验的资料分析所获得的研究成果。

## 二、原体工程及模型试验概况

鉴于高层建筑桩箱基础工程中桩土协同作用的复杂性, 单纯以理论分析及一般的模型试验研究不能解决问题, 我们以原体工程实测为主导并配合模型试验, 使群桩的承载力由容许荷载过渡到极限荷载, 最后达到破坏荷载的全过程, 以便分析桩土协同作用的机理。

(一) 原体工程实测

原体工程实测对象是湖北省外贸中心大楼，该大楼是22层高层建筑，总高度82.80m，上部结构为现浇钢筋混凝土框架—剪力墙体系，地下部分为箱型基础加满堂摩擦群桩，箱底板为群桩的承台。大楼侧剖面见图1。

预制桩选用铁道部大桥工程局南京桥梁厂生产的混凝土管桩，桩外径 $D = 550\text{mm}$ ，壁厚80mm，桩长22m，桩尖进入粉细砂层内。单桩容许承载力经试验确定为1200kN。

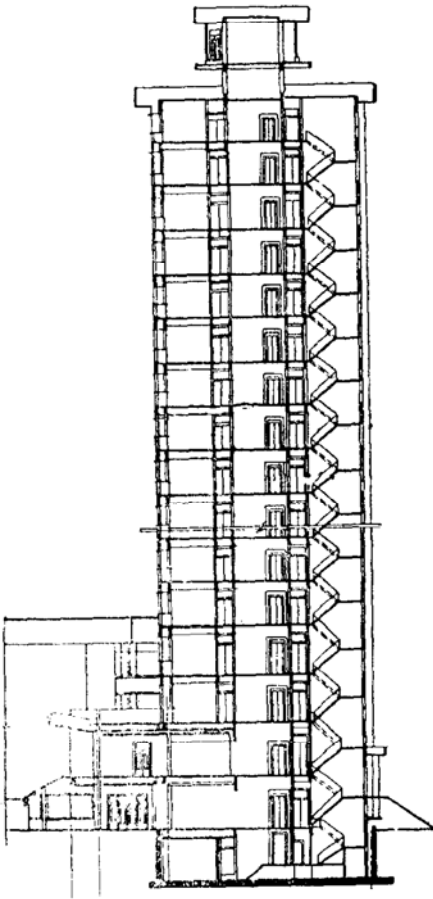


图1

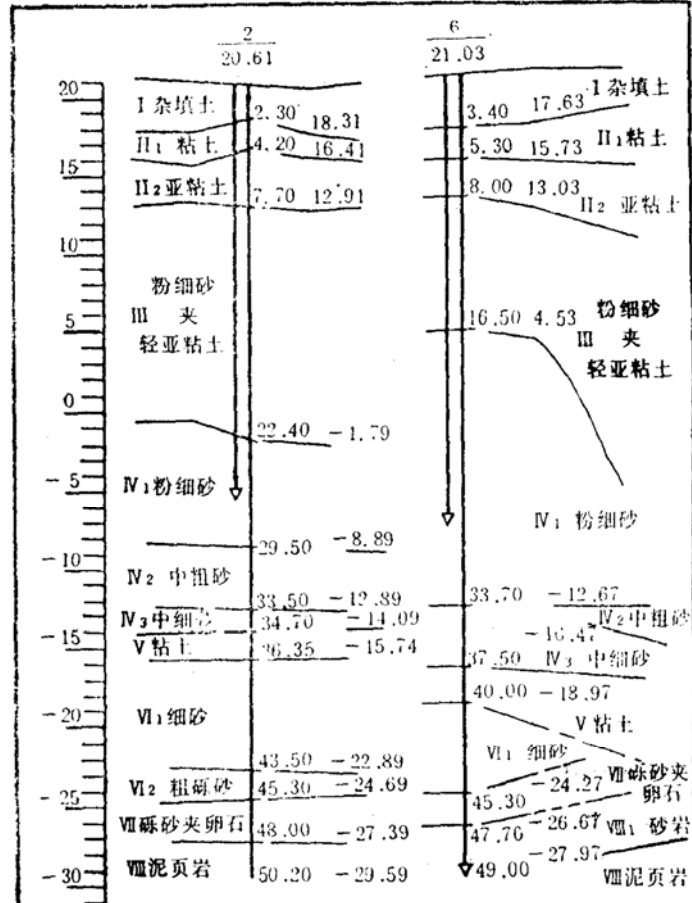


图2

建筑物场地比较平缓，高差不大，属长江冲积II级阶地。工程地质剖面详见图2。地基土的物理力学性质见表1。

箱型基础高5.5m，混凝土标号为300号，基础底板高度为1.5m，箱基自身刚度很大。桩与箱底板连接成整体。因此，在上部荷载作用下迫使支承箱基的各桩与箱基同步下沉。

为了实测箱基下桩土的协同作用，桩间土是否能分担上部荷载及桩顶的实际承受压力，在桩间土的位置埋设土压力盒25个，在基础下的桩顶上埋设桩顶压力传感器35个分布在基础下不同部位的桩顶上，传感器作为桩的一部分，承受上部结构传下来的荷载。土压力盒及桩顶压力传感器埋设位置见图3。在建筑物施工过程中的不同荷载时分别进行观测桩所承担的荷载及地基土分担的接触荷载。

表1 土的物理力学性质

层序	土层名称	含水量 $w$ (%)	密度 $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	比重 $G$	孔隙比 $e$	饱和度 $S_r$ (%)	液限 $w_L$ (%)	塑限 $w_P$ (%)	塑性指数 $I_P$	液性指数 $I_L$	粘聚力 $c$ (kPa)	摩擦角 $\phi$ (°)
II <sub>1</sub>	粘土	30.7	1.89	2.74	0.90	45	46.7	21.9	24.8	0.33	35	17.3
II <sub>2</sub>	亚粘土	31.7	1.89	2.72	0.90	46	34.7	21.9	12.8	0.78	25	15.0
III	粉细砂夹粉细砂	31.2	1.83	2.68	0.92	92	—	—	—	—	21	30.0
	轻亚粘土	32.1	1.87	2.72	0.92	94	32.4	23.3	9.1	0.92	10	27.0
IV <sub>1</sub>	粉细砂	33.1	1.77	—	0.98	90	—	—	—	—	9	30.0
IV <sub>2</sub>	中粗砂	21.0	1.91	2.68	0.69	81	—	—	—	—	—	—
IV <sub>3</sub>	中细砂	26.2	1.91	2.68	0.75	89	—	—	—	—	—	—
V	粘土	32.2	1.81	2.74	0.96	97	40.6	22.9	20.7	0.48	31	19.5
VI	细砂	35.1	1.75	2.70	1.08	87	—	—	—	—	—	—

## (二) 模型试验概况

为了探索群桩承台与地基土协同工作的机理，除了对湖北省外贸中心大楼工程进行综合测试外，同时进行了室内模型试验。

### 1. 模型试验场人工土的性质

模型试验场地的土质均匀性十分重要，选在中国建筑科学研究院地基所大型试验基坑中进行，试验基槽长18m，宽6m，将2m深的土挖出后进行过筛，分层回填夯实，并在过筛时进行人工洒水湿润，保证土的含水量和密实性。其土的物理力学指标见表2。

### 2. 群桩承台与上部荷载

模型的群桩承台应有足够的强度和刚度，使上部荷载可靠传递。基础承台长3.4m，宽1.0m，厚40cm，用250\*混凝土浇注而成，纵向配筋 $\phi 12@150$ ，横向配筋 $\phi 12@200$ 。

承台上用千斤顶施加垂直荷载，为了使荷载均匀施加在承台而避免偏心，同时也使千斤顶的集中力变换成均布荷载，将承台分成5块，在每块的重心位置上安装一台千斤顶，5个千斤顶的合力必须通过承台重心。

在千斤顶与基础承台间，叠加纵横向工字钢梁，这样既大大增加了基础承台刚度，也可使千斤顶荷载通过钢梁均匀地传递到承台。千斤顶通过自动稳压仪器进行荷载控制。承台及荷载装置见图4。

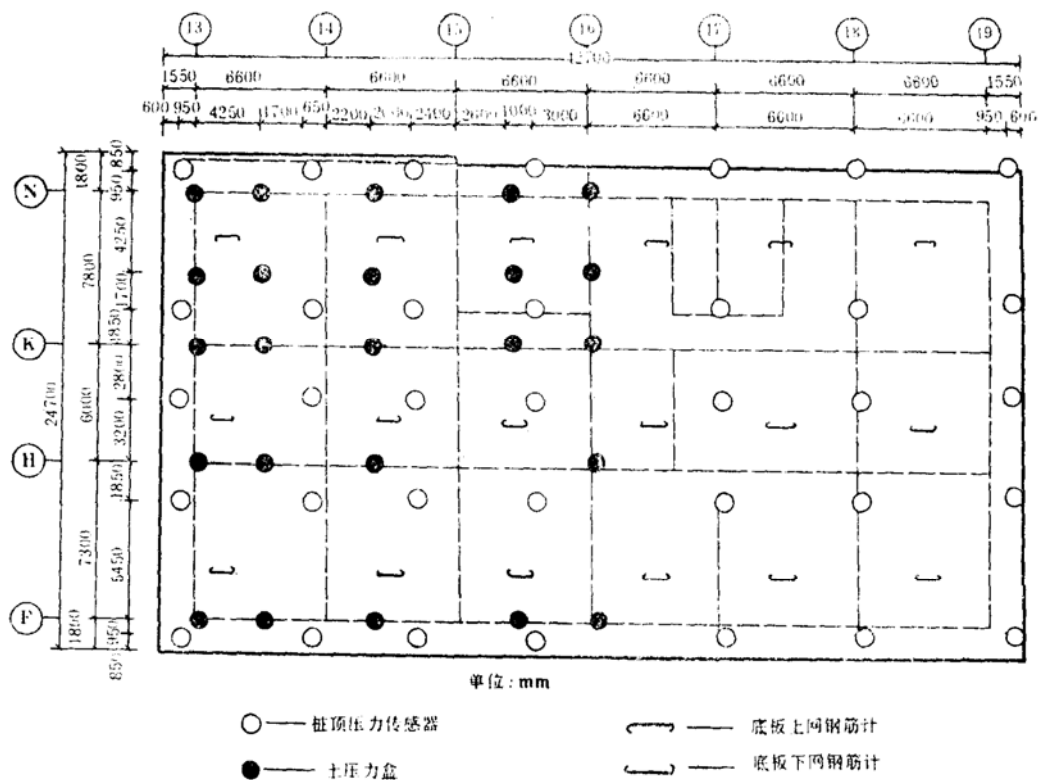


图 3

表 2

模型试验土的物理力学指标

层次	名称	深度 (m)	比重 $G$	密度 $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	含水量 $w$ (%)	孔隙比 $e$	饱和度 $S_r$ (%)	液限 $w_L$ (%)	塑限 $w_P$ (%)	塑性指数 $I_P$	液性指数 $I_L$	压缩模量 $E_{1-2}$ (kPa)
1	亚粘土	0.5	2.71	1.80	14.50	4.724	54.0	28.30	18.00	10.30	0.026	6500
2	轻亚粘土	0.5	2.71	1.85	14.70	0.680	59.0	26.70	17.20	9.5	0.013	12800
3	粘土	1.9—2.4	2.74	1.95	31.07	0.822	98.0	41.67	23.35	18.33	0.024	9400
4	亚粘土	2.4—2.9	2.72	2.03	22.53	0.655	96.6	31.37	19.70	11.67	0.012	14400
5	轻亚粘土	2.9—4.4	2.69	2.10	19.08	0.525	96.8	25.45	17.01	8.44	0.012	13300
6	亚粘土	>4.4	2.73	2.01	25.79	0.800	97.8	30.25	18.65	11.60	0.030	6700

为了正确测出各桩荷载分配情况，必须设计与模型桩相匹配的桩顶压力传感器，且这种传感器应灵敏度高，稳定性好，在弹性范围内具有良好的线性，传感器选用60 Mn 的弹簧钢

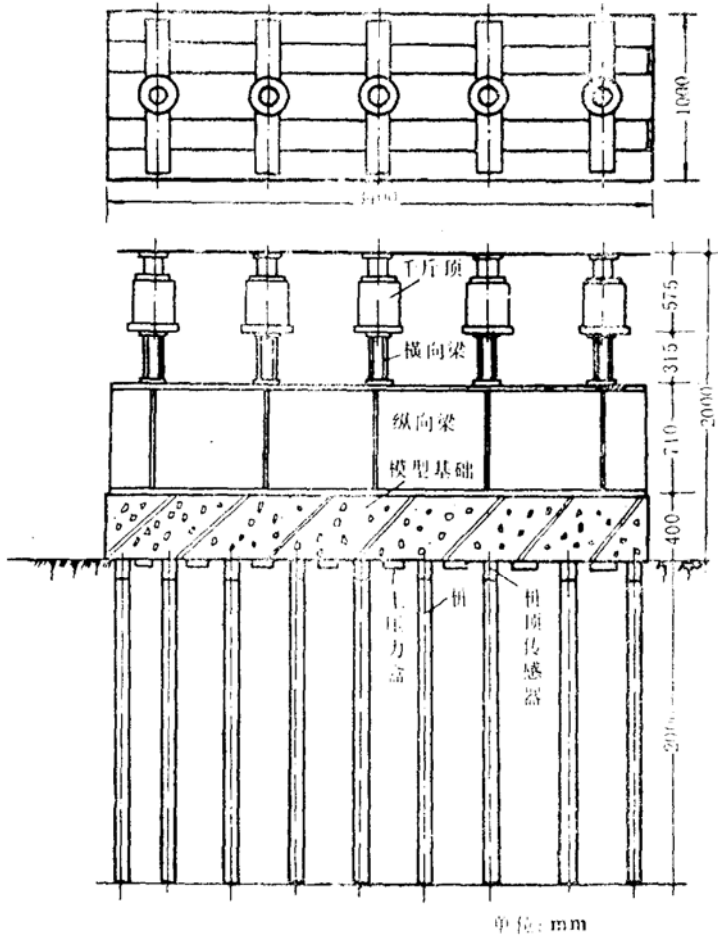


图4

为受力体外壳，贴电阻应变片(全桥)，进行性能试验和标定。桩顶荷载传感器的灵敏度为  $34.5\text{N}/\varepsilon\mu$ 。

模型桩选用114mm的无缝钢管制作，长为2 m，桩长与桩径比为  $L/D=17.5$ ，桩尖加工成  $60^\circ$  锥体，桩顶上加工丝扣与传感器连接成整体。

桩顶荷载传感器及模型桩详见图5，图6。

承台下群桩布置：桩距为40 cm (约为  $3.5d$ )，承台周边距桩中心为10 cm。承台下共布置桩27根，每根桩顶部都安装荷载传感器，并在传感器顶盖部，焊接4根  $\phi 6$  的钢筋，伸入承台与承台主筋连接，在浇注承台混凝土时桩顶与承台连成整体，使上部荷载通过承台传递给各桩。沉桩方法是用千斤顶通过可调反力钢架将桩压入土内，各桩顶标高严格控制在  $\pm 10$  mm 范围内。

土压力盒布置：为了能正确可靠测定承台板底与土的接触压力，压力盒埋设采用局部砂坑埋设法，在需放置压力盒的位置上挖一个直径为20 cm、深约5 cm坑，用0.3 mm的标准砂填满，洒水夯实。密实度控制在  $e < 0.6$ ，然后放上压力盒，使压力盒变形膜面与砂面紧密接触，用水平仪调平，压力盒量程为300 kPa。承台板下共布置压力盒26个。

承台变形与沉降观测：由于模型承台有较大刚度，且基础承台长宽比为3.4:1，因此基础挠曲主要在长方向出现。因而，变形观测点设置在沿纵向长度两侧。共设10个变形观测

点,用30mm百分表进行承台沉降变形观测。

模型群桩,土压力盒及变形观测布置见图7。

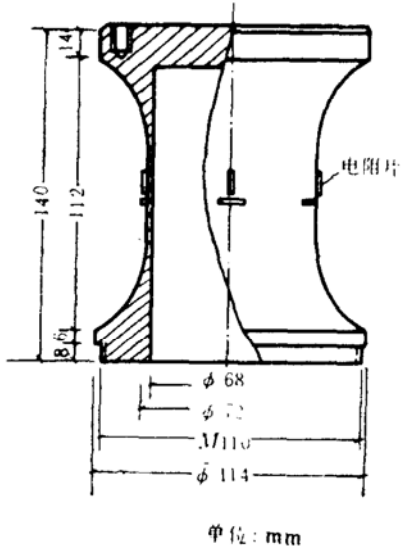


图5

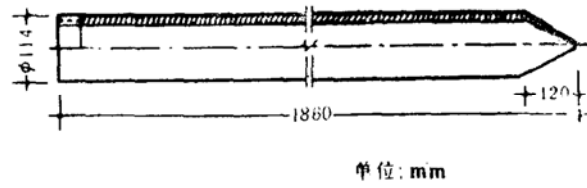


图6

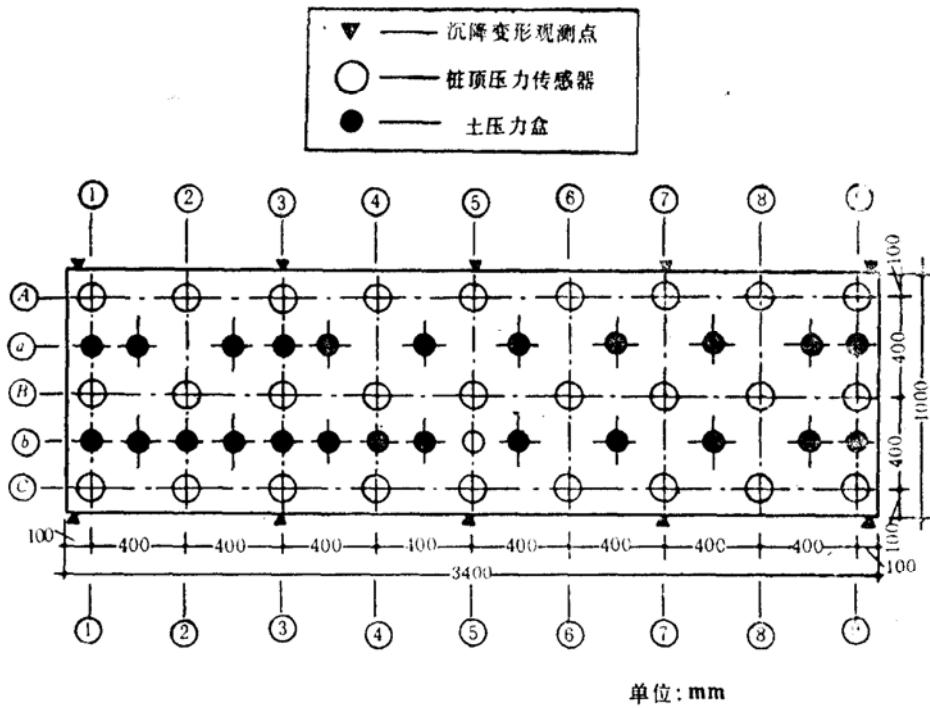


图7

### 三、原体工程与模型试验结果的整理分析

#### (一) 原体工程实测桩顶压力与桩间土反力

原体工程实测是探索桩土共同作用最有效最有说服力的方法，在湖北省外贸中心大楼高层建筑箱形基础加摩擦群桩的工程中，共埋置桩顶荷载传感器35个，土压力盒25个，以观测在上部结构荷载作用下桩所承担的荷载及地基土所分担的荷载。在建筑物施工过程中的不同荷载下分别进行观测，现将桩间土上埋设的土压力盒测到的土压力绘制成基础下纵向土反力曲线(取横向轴上的平均土反力值)见图8。

由图可见，在建筑物各阶荷载下，基础纵向桩间土反力是边缘大，中间小，逐渐呈抛物线形。

将35个桩顶荷载传感器按不同施工阶段的荷载下测得的结果绘制成基础下纵向平均桩顶压力曲线与横向平均桩顶压力曲线(见图9)。

从图8，图9看出，基础下纵向桩间土反力分布与纵向桩顶压力分布曲线，其变化规律

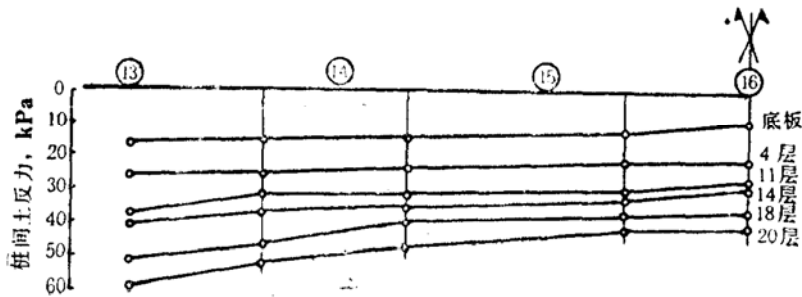


图8

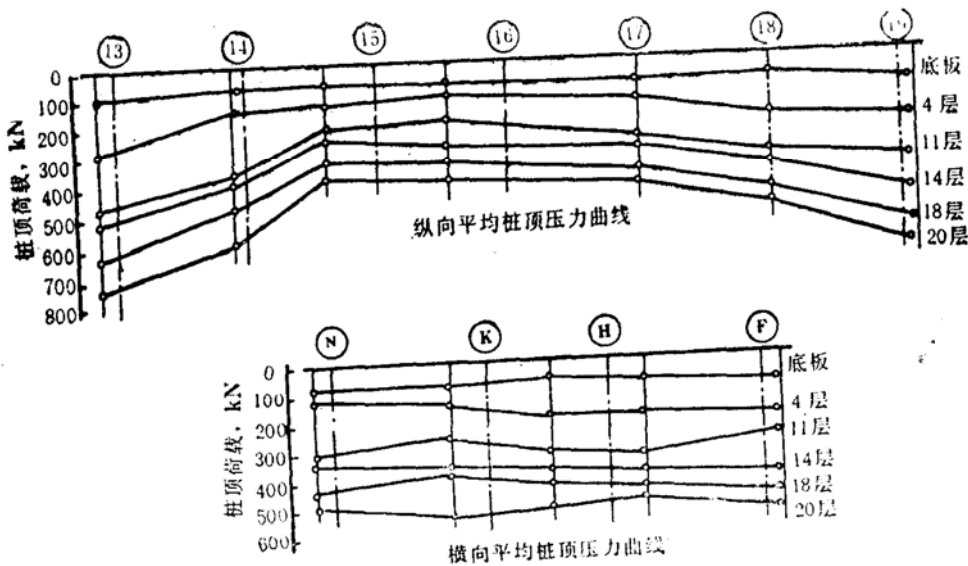


图9

基本相似,当基础底板施工完成,空间刚度尚未形成时,桩间土反力与桩顶压力曲线近似直线分布,随着建筑层数增加,空间刚度逐渐增大,基础由柔性渐渐过渡到刚性,其桩间土反力形状与桩顶压力分布形状由直线缓慢过渡形成抛物线。

这里将桩间土实测基础端部土反力,基础中部土反力与上部结构层数(荷载)变化的关系绘制曲线(图10)。同时将基础下端部桩顶压力及中部桩顶压力与上部结构层数(荷载)变化的关系绘制成曲线(图11)。可以看出,14层以下时,桩顶压力、土反力与结构层数(荷载)变化近似线性。

根据建筑物不同层数的计算荷载及实测桩顶压力(荷载)与桩间土的反力值绘制成桩、桩间土各自分担的荷载曲线(图12)可见:在建筑物施工中各阶段不同荷载实测桩顶承受的总荷载的曲线,地基的桩间土分担的荷载曲线,桩顶荷载与桩间土荷载之和的曲线,以及设计计算的荷载。当建筑物施工至四层以前的实测荷载与设计计算荷载比较接近,超过四层后计算荷载与实测荷载

逐渐产生了差异,例如,当建筑物施工到20层时,实测总荷载为231MN(桩顶总荷载与桩间土反力总荷载),而设计荷载为260MN,实测荷载为设计荷载的88.85%,误差11.15%,引起误差主要原因是建筑物尚未装修,加上设计计算时各荷载略大些而引起。从图中看到,桩间土反力与桩顶压力均随着荷载及建筑物沉降增加而增大,本工程实测结果,桩间土分担总荷载大约在20%左右,桩荷载约占80%左右。

桩间土分担荷载的多少,应根据地质情况决定。当桩端特力层较硬,地基的强度较高时,群桩沉降量小,桩间土分担上部荷载则小;当群桩沉降量大,箱底地基土沉降量小时,则地基土将分担较大的上部荷载;若桩间土产生自重固结或饱和软土中因打桩而隆起的土体逐渐固结下沉,土体有脱离基础底板的可能,此时,桩间土将不承担上部结构的荷载,上部结构荷载将由群桩承担,甚至可能对上部桩身产生负摩擦。

下面列举三个实例加以比较:

西德法兰克福市在粘土地基上有一幢30层高层建筑,该大楼由两个分离的桩筏基础支承,每一筏基平面尺寸则为 $22.0 \times 17.5 \text{m}^2$ ,筏基厚2.5m,桩长20m,桩径0.9m,桩距 $3-3.5d$ 。该工程用6个桩顶传感器量测桩顶反力,实测得到基础下地基土分担荷载为25%,而桩分担荷载为75%<sup>[11]</sup>。

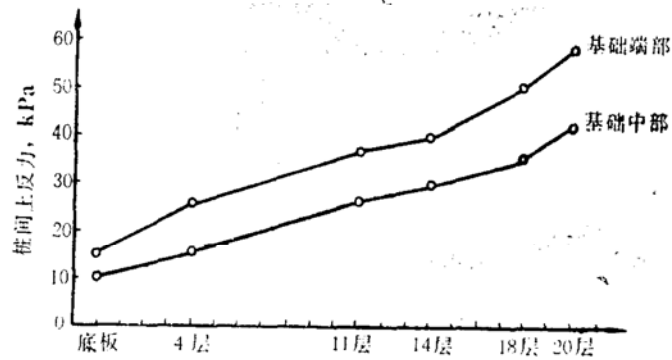


图10

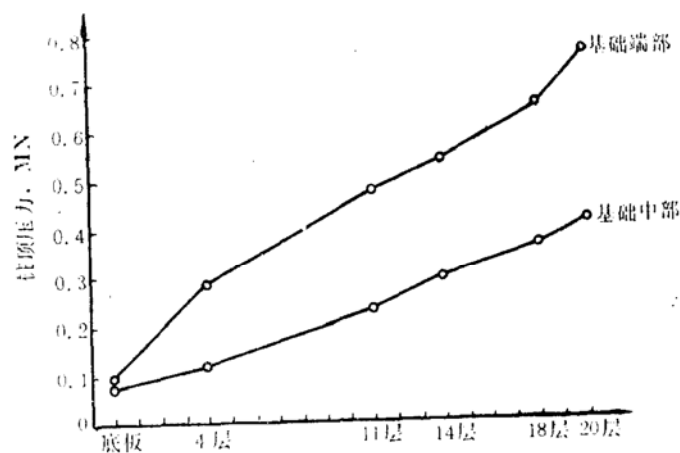


图11



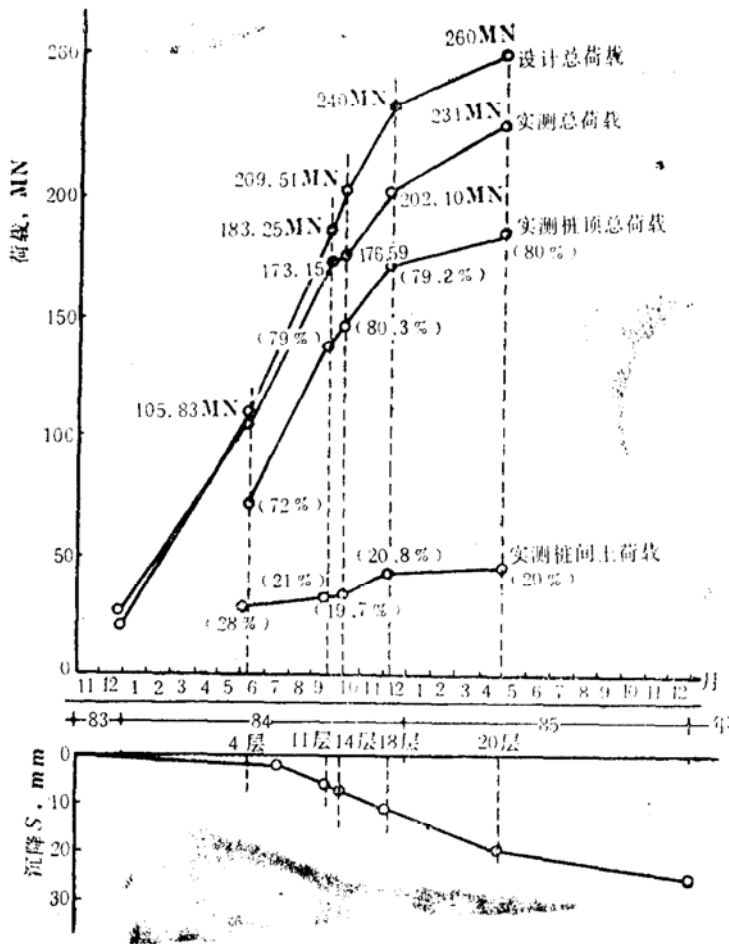


图12

上海港二区散粮筒仓工程<sup>[2]</sup>，打桩区内土体隆起的总体积占入土桩的40%，在群桩基础施工中土体最大隆起达40—50 cm，后期由于桩间土在自重下固结，而且桩端持力层为褐黄色粘土夹细砂、粉砂，标准贯入击数大于20以上，孔隙比小于0.7，其桩端持力层很好，桩的沉降量甚小的情况下为地基土与承台脱开提供了条件。

上海某高层建筑箱型基础下摩擦群桩<sup>[3]</sup>，上部结构为框架体系，高16至18层。基础面积为400 m<sup>2</sup>，钢筋混凝土桩，断面0.4×0.4 m<sup>2</sup>，桩长7.5 m，共用桩183根。按原设计每根桩的极限承载力为900 kN左右。经过现场单桩荷载试验，极限承载力为400 kN左右，设计修改为桩土协同工作，桩土分担比为6：4。而实际桩分担了80%上部荷载，桩间土分担了20%上部荷载。该建筑物沉降量较大，实测推算建筑物总沉降量约在35 cm左右，经使用一切正常。

从原体工程的桩土共用作用实测结果及实际工程中考虑了桩土协同情况分析，当桩的承载力以摩擦力为主，在正常情况下打桩，土体隆起不大时，桩间土是可以分担部分上部荷载。

**(二) 模型试验实测桩顶压力与桩间土反力**

为补充原体工程测试内容进行室内模型试验，充实工程实测不能获得的桩基受力的全过

程，即允许荷载—极限荷载—破坏荷载的全过程。在模型基础(承台)下的27根桩全部放置桩顶压力传感器。同时在桩间土放置25只土压力盒，并在基础纵向两侧布置10个沉降观测点。

试验结果，获得了基础纵向各断面的桩间土反力曲线，见图13。

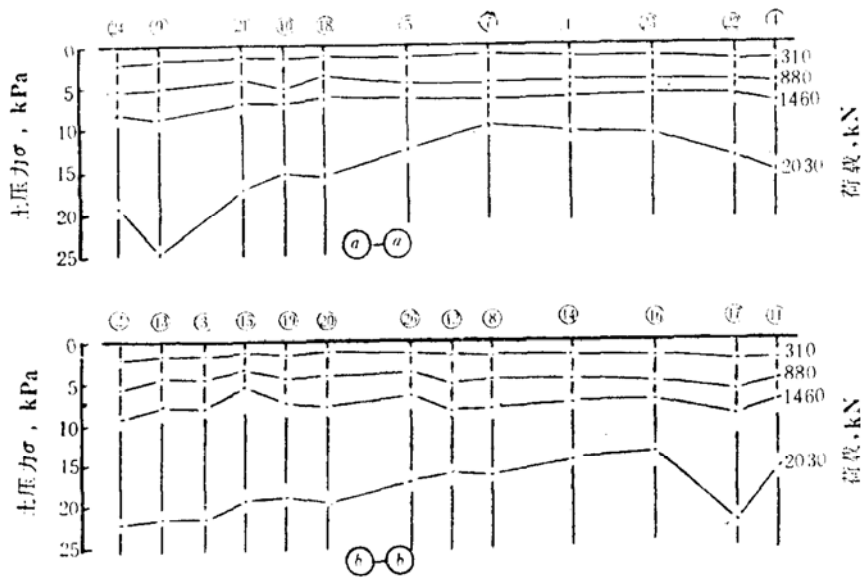


图13

从图中的桩间土反力曲线可知，当荷载为1460kN时，各点土反力在10kPa以内，反力曲线较平缓，当荷载增加到2030kN时，整个模型基础沉降变形已达到破坏，桩间土的反力曲线为抛物线形状。将基础下土反力①—①与⑤—⑤取平均值绘制成图14曲线与图13曲线相比较，由于取两个值的平均值，其规律性好些，当荷载加至1460 kN以前，桩间土反力比较均匀，当荷载加至2030kN时，桩间土反力形成较明显的抛物线形状，而此时，基础端边出现塑性区，导致土反力向内部调整。

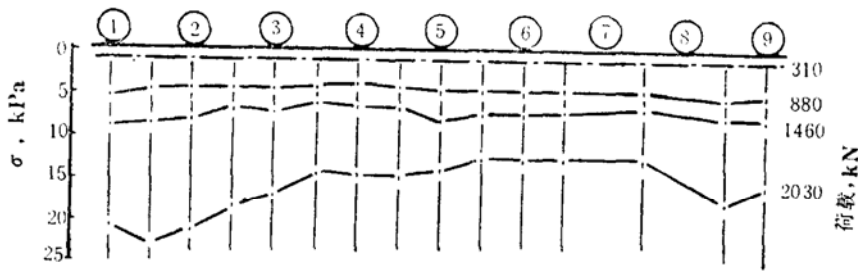


图14

基础下纵向桩顶压力曲线见图15，当荷载加至1460kN以前时，其曲线均为抛物线形状。当荷载为2030kN时，地基沉降变形很大，已达到破坏阶段。桩顶压力曲线由抛物线形变为锅底形，中间大，两端小。而此时，桩间土反力曲线仍为抛物线形。说明桩间土的承载力仍在允许范围之内，只是分担了上部总荷载的一部分，桩间土的承载力还有潜力。

模型试验中实际荷载与测试结果的量值误差在2—5%，引起误差的原因是加荷系统的油路损耗及千斤顶自身摩擦力影响等因素。然而这少量误差对试验结果的定量分析能满足要

求。试验误差如表3。

从模型基础各横向剖面上桩顶实测荷载与桩间土实测荷载的比例关系来看，基础端部①

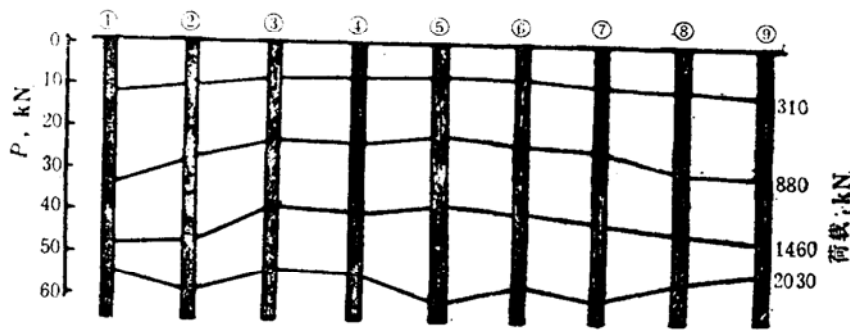


图15

表3 上部荷载与实测荷载相对误差

试验总荷载 (kN)		162.5	312.5	600.0	887.5	1180.0	1462.5	1752.5	2030.0
实测荷载	桩顶压力 (kN)	144.6	249.9	491.0	718.6	952.6	1153.4	1366.4	1542.1
	桩间土反力(kN)	24.9	47.0	97.9	143.2	183.6	234.3	436.4	570.7
	实测总荷载(kN)	169.5	296.9	588.9	861.8	1136.2	1387.7	1752.8	2113.0
相对误差 (%)		4.3	-4.9	-1.8	-2.8	-3.7	-5.1	0.17	3.9

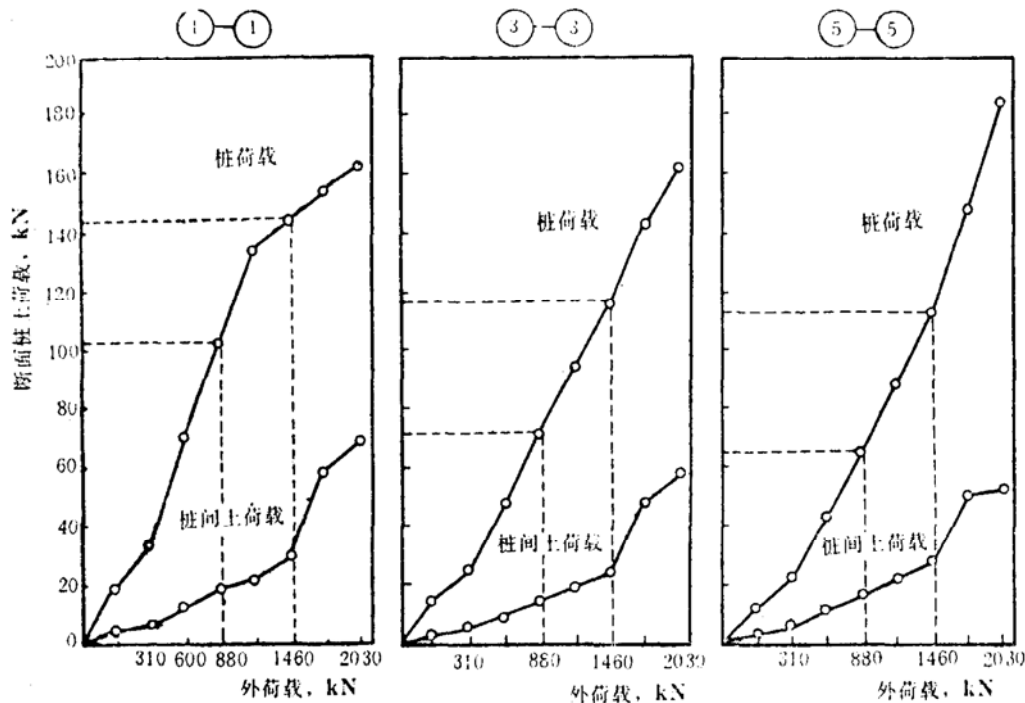


图16

—①剖面, 基础中部⑤—⑤剖面以及端部与中部之间的③—③剖面的三个部位曲线图16, 可见, 在极限荷载前基础端部由于桩承受荷载较大, 桩间土承担荷载相对小一些, 而基础中部则桩承受荷载较大, 桩间土承担荷载则相对大一点。

当上部荷载大于1460kN时, 桩间土承担的荷载随着上部荷重的增大而提高。当上部荷载为2030kN时, 桩间土分担的荷载由17%增加到25%左右, 而桩承担的荷载由84%逐渐降低到75%左右。从荷载与基础沉降量分析, 当荷载在1460kN时, 可近似为极限荷载, 超过该荷载时, 桩土的荷载比值发生了明显变化。

桩与桩间土所分担的荷载与基础总沉降的关系曲线从图17中可以看出, 当荷载不大于1460kN时, 桩间土分担的荷载成直线趋势, 即上部荷载为160—1460kN时, 土承担荷载在17%左右, 当荷载大于1460kN时, 桩间土分担的上部荷载开始逐渐增加, 而桩顶压力的总荷载则逐渐减少。

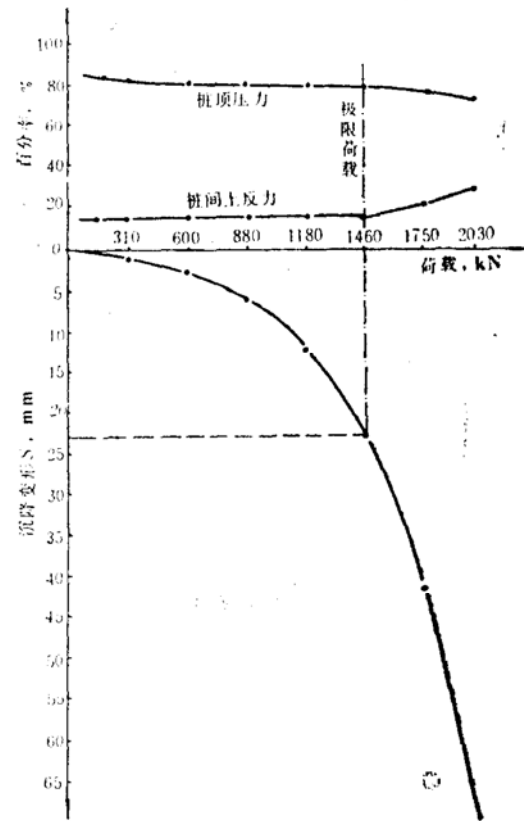


图17

## 四、结 论

1. 当地基土不因地下水变化而发生自重固结以及不发生震害、湿陷、液化等现象时, 基础承台底将随着沉降的发展而受到一定竖向土抗力, 即一部分荷载直接传递给桩间土体, 无论从原体工程实测或模型试验结果, 都存在桩土共同分担上部总荷载现象。

2. 本文原体工程测试结果表明, 桩荷载约分担建筑总荷载的80%, 而桩间土约分担建筑物总荷载的20%。

3. 模型试验进一步说明, 桩土荷载的分担比应视桩基的沉降大小, 在极限荷载前, 桩间土分担的荷载约为总荷载的16%。当达到破坏荷载时, 沉降变形增加, 桩间土分担的荷载逐渐增加到25%。因此, 对于一般土类的地基可根据建筑基础沉降变形情况酌情考虑桩土的共同作用。

## 参 考 文 献

- [1] Sommer, H., Piled Raft Foundation of A Tall Building in Frankfurt Clay, Pro. ICSMFEXI 1985年, p.2253.
- [2] 陈绪禄, 群桩基础原体观测——上港二区散粮筒仓原观报告, 水利部交通部南京水利科学研究所, 1979年8月。
- [3] 施云华、熊大闯, 双层地基上高层建筑物地基分析——介绍三个不同基础型式的高层建筑实

例，中国船舶工业总公司勘察研究院，1987年2月。

## The Interaction between Pile and Soil of Box-Foundation with Friction Pile-Group for Highrise Buildings

*He Yihua*

*Jin Baosen*

(China Academy of Building Research, Beijing)

### Abstract

The predecessors have been investigating on the interaction between pile and soil of box-foundation with friction pile-group under highrise buildings for a long time. The results of these investigation give rise to much controversy, and can not be used to solve the practical problem in engineering design. In this paper, the mechanism of interaction between pile and soil is fully brought to light, based on the prototype observation of one highrise building and the model test in laboratory. The results of the tests demonstrate clearly that the pile and soil work together to bear the load from the superstructure. Under given conditions, the piles bear 80% of the load, and the soil between the piles bear 20% of the load. The load distribution curve during the variation of load from the allowable load to the ultimate load and the failure load has been given, which provides the theoretical basis for rational design of box-foundation with friction pile-group.