

基于减小筏板差异沉降的刚性桩复合地基试验研究

刘冬林^{1,2}, 郑刚¹, 刘金砺³, 李金秀⁴

(1. 天津大学土木工程系, 天津 300072; 2. 河北省建筑科学研究院, 河北 石家庄 050021; 3. 中国建筑科学研究院, 北京 100013;
4. 河北城乡建设学校, 河北 石家庄 050021)

摘要: 针对高层建筑筏板荷载分布特点, 采用内密外疏布桩和仅在筏板中心布桩方式, 通过现场缩尺(1:10)模型试验, 完成了带上部结构无桩筏板和刚性桩复合地基筏板静载荷试验。分析了筏板沉降、桩端平面以下地基沉降和筏板外侧地面沉降、筏板下桩土反力分布、桩土荷载传递及桩土荷载分担比。研究了工作荷载下不同布桩方式降低筏板差异沉降的效果。

关键词: 高层建筑; 筏板; 刚性桩复合地基; 差异沉降; 桩土反力; 荷载传递; 荷载分担比

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2007)04-0517-07

作者简介: 刘冬林(1966-), 男, 天津大学土木工程系博士研究生, 高级工程师, 注册岩土工程师, 主要从事岩土工程设计与科研工作。E-mail: ldjia@yahoo.com。

Experimental study to reduce differential settlements of raft of composite foundation with rigid piles

LIU Dong-lin^{1,2}, ZHENG Gang¹, LIU Jin-li³, LI Jin-xiu⁴,

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Hebei Academy of Building Research, Shijiazhuang 050021, China; 3. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 4. Hebei Urban and Rural Construction School, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Based on the load distribution on the raft of high-rise buildings, different pile arrangement was adopted that more piles were used in the center than on the edge or piles were only arranged in the center area. Through model tests(1:10), the static load tests on unpiled raft and rigid composite foundation with super structure were carried out. The raft settlements, subgrade settlements under pile bottom plane, settlements of ground beside raft, distribution of reaction force from soil and pile top, load transfer and load share ratio between piles and soil were analyzed. The effect of different arrangements of piles to reduce differential settlements of raft was studied under working loads.

Key words: high-rise building; raft; composite foundation with rigid piles; differential settlement; reaction force of piles and soil; load transfer; load share ratio

0 前 言

刚性桩复合地基因其单桩承载力高而能获得较高的复合地基承载力且沉降较小的特点, 在高层建筑中得到了广泛的应用, 创造了巨大的社会效益^[1]。对于刚性桩复合地基设计, 多采用均匀布桩方式。由于高层建筑中上部结构作用到基础不同位置的荷载相差很大, 因此, 采用均匀布桩时筏板基础的差异沉降较大, 从而增加基础和上部结构内力^[2]。文献[3~6]从桩土相互作用角度对桩土荷载分担进行了研究, 认为调整桩土荷载分担可使建筑物沉降尽可能均匀。对于筏板的差异沉降, Randolph 在文献[7]指出筏板中心布置少量的桩可有效地减小筏板的差异沉降, 文献[8]

用离心模型试验对这种概念进行了验证, 该设计理念是从带桩筏板实验中得出的, 且筏板承受均布荷载, 未考虑上部结构与地基相互作用, 它在刚性桩复合地基中的应用效果如何, 还未见相关报道。因此, 进行基于减小筏板差异沉降的刚性桩复合地基试验研究, 具有理论和现实意义。

本文针对高层建筑筏板荷载分布特点, 对无桩筏板、内密外疏布桩和仅在筏板中心区域布桩刚性桩复合地基筏板, 进行了带上部结构框架的模型静载荷试

基金项目: 河北省建设科学基金资助项目(2004-292); 国家自然科学基金资助项目(50208012)
收稿日期: 2006-03-15

表 1 试验场地地基土物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical characteristics of soils

层序	层厚/m	土性描述	w/%	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	e	I_L	E_s/MPa	$\varphi/(\text{°})$	c/kPa
①	1.75	粉质黏土	23.3	18.6	0.802	0.65	5.5	18	38
②	2.50	粉土	14.8	19.2	0.619	0.25	12.0	24.9	38.4

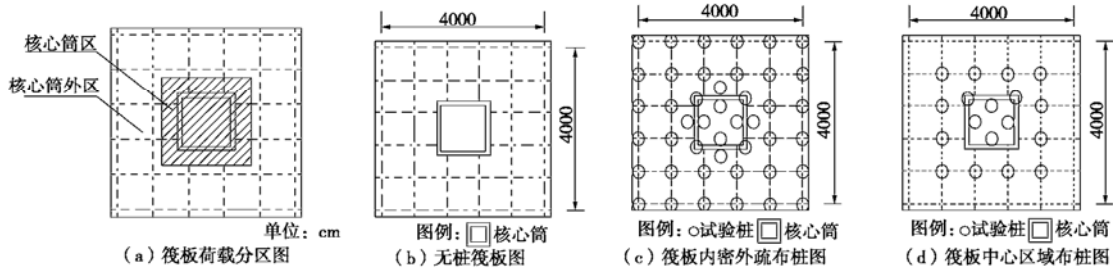


图 1 筏板荷载分区及桩位平面布置图

Fig.1 Load distribution on raft and pile arrangement under raft

验,研究了上部结构工作荷载下筏板沉降、筏板外侧地面沉降、桩端平面以下深层地基沉降、筏板下桩土反力、桩土荷载传递以及桩土荷载分担比,分析了布桩方式对降低筏板差异沉降的影响,所得结论可为进一步的理论研究和工程设计提供有益的参考。

1 现场地质资料

试验场地位于石家庄市河北省建筑科学研究院试验基地院内,场地地势平坦,为第四系冲洪积层,地层空间分布均匀,地基土物理力学指标如表 1 所示。

2 刚性桩复合地基试验方案

2.1 模型试验设计

本次模型试验以原型工程为基础,原型工程为地上 22 层(地下 1 层)的高层建筑,框剪结构,基础类型为筏板基础,筏板平面尺寸为 43 m×43 m,基础埋深 5.0 m。上部结构中心跨为核心筒剪力墙,柱网纵横向均为 8 m,每边各 5 跨。上部结构总荷载为 325000 kN;筏板基础厚 1.5 m,自重为 66560 kN。基底平均压力为 176 kPa。根据上部结构荷载分布情况将筏板分为两个区域:核心筒区、核心筒外区,如图 1(a)所示。在不考虑相邻区域荷载相互影响的前提下,各区域基底压力如表 2 所示。

表 2 筏板不同区域基底压力

Table 2 Stress on bottom of raft

项目	核心筒区	核心筒外区
基底压力/kPa	207	138
筏板平均基底压力/kPa	176	

模型试验比例尺为 1:10,上部结构用钢筋混凝土平面框架代替,其刚度与上部结构刚度等效,平面框架柱与筏板用螺栓连接,模拟固定支座。模型桩为混凝土桩,桩径 150 mm,桩长 2.0 m。复合地基采用内密外疏布桩方式和仅在筏板中心区域布桩方式,不

同布桩方式筏板下布桩参数见表 3,无桩筏板及复合地基桩位平面布置见图 1(b)~(d)。对于埋深效应的模拟,采用在筏板周边堆置 2~3 层铁砖。筏板上作用的荷载按中国建筑科学研究院建筑软件 PKPM 计算确定,并按模型比例换算后作用于等代框架顶部节点处。复合地基褥垫层厚 100 mm,垫层材料为砾砂。

表 3 复合地基布桩参数

Table 3 Parameters of composite foundation

项目	桩径/mm	桩长/m	桩数	桩距
内密外疏布桩	150	2.0	44	3d-5.3d
中心区域布桩	150	2.0	20	3d-5.3d

2.2 试验内容及方法

试验内容:带上部结构无桩筏板、内密外疏布桩和筏板中心布桩刚性桩复合地基静载荷试验。

试验方法:加荷方法采用慢速维持荷载法。加载装置采用钢梁反力架装置,用锚桩提供反力,采用 36 台千斤顶加载,千斤顶加载值按其在位置上部结构等效荷载施加。同一荷载区千斤顶并联连接并用同一油泵加压,油压值按千斤顶率定曲线确定,用标准压力表量测。试验中筏板不同区域加载值见表 4,试验装置见图 2。

2.3 测试内容

(1) 地基沉降测试

地基沉降采用电子位移计测量,电子位移计平面布置见图 3(a)。图中在核心筒区以“+”表示的电子位移计,用来测量桩端平面以下地基土沉降,其测试深度依次为地面以下 2(相当于桩端平面),4,6 m 和 8 m;筏板内电子位移计布置在筏板表面,用来量测筏板沉降;4-4' 剖面电子位移计量测筏板外侧地面沉降,5-5' 剖面电子位移计量测筏板外侧地面下 2m 深度(相当于桩端平面)处地基沉降,两剖面相距 150 mm,剖面内电子位移计间距均为 150 mm。

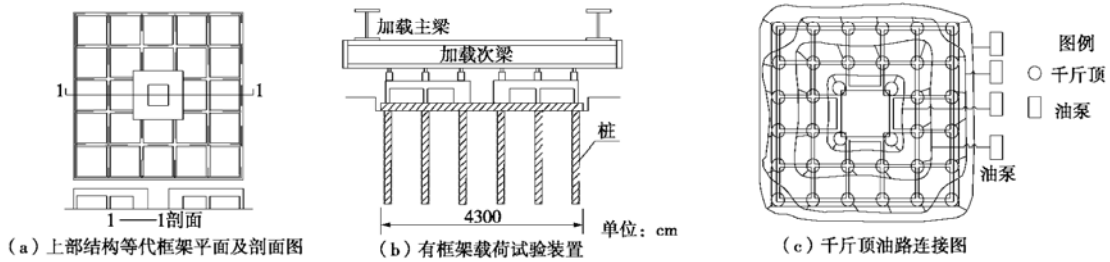


图2 加载设备平面布置及油路连接示意图

Fig. 2 Loading equipment and oil pipe connection

表4 筏板不同区域试验加荷值

Table 4 Experimental load on different areas of raft

加荷分级/级	2	3	4	5	6	7	8
筏板加荷量/kN	1625	2348	3250	4063	4875	5688	6500
核心筒区/kPa	104	156	207	250	311	363	415
核心筒外区/kPa	78	110	138	163	186	206	235
筏板平均加荷/kPa	88	132	176	220	264	308	352

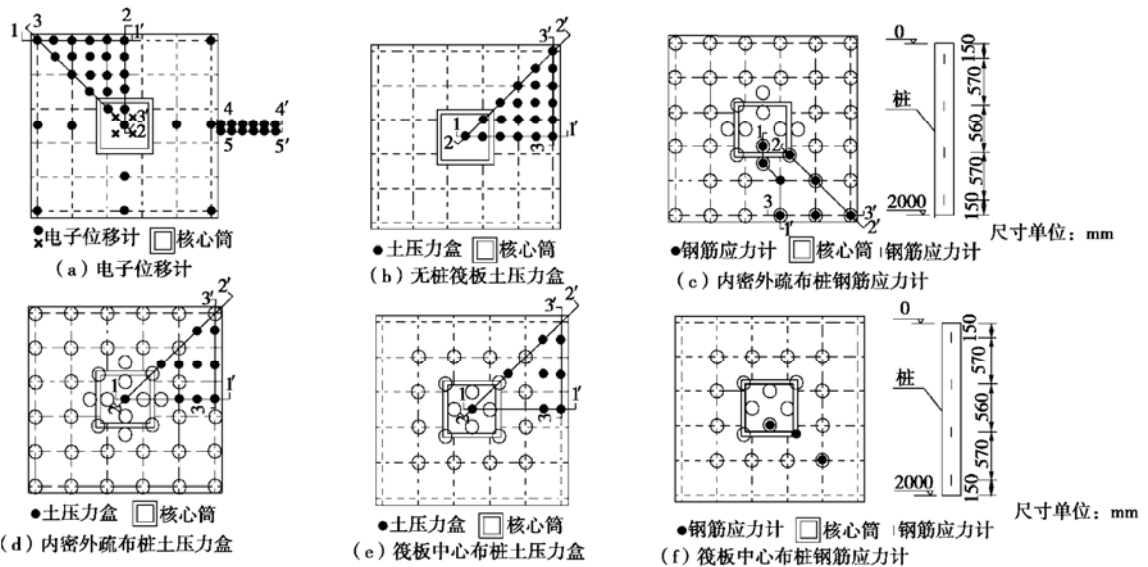


图3 测试元件布置及筏板剖面线

Fig. 3 Measuring components and cross-section of raft

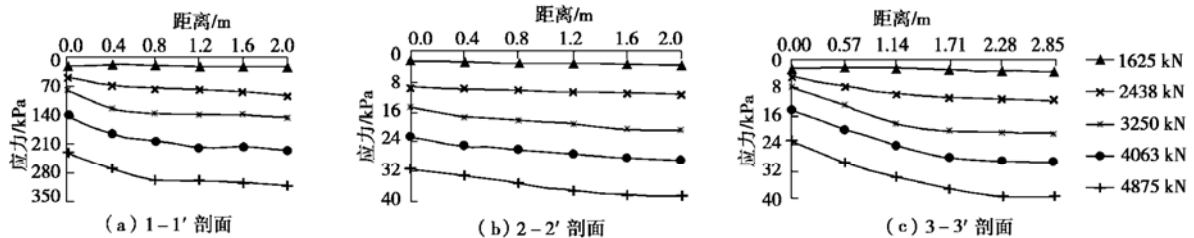


图4 无桩筏板沉降分布曲线

Fig. 4 Distribution of settlements of unpiled raft

(2) 桩身轴力及桩间土反力测试

桩身轴力采用埋设于桩身内钢筋应力计测量, 桩间土反力采用埋设于筏板素混凝土垫层底面下的钢弦式压力盒测量。钢筋应力计和土压力盒平面布置见图3(b)~(f)。

3 试验结果与分析

3.1 无桩筏板沉降及土反力分布

图4为天然地基筏板不同剖面位置沉降分布曲线。从图中可以看出, 筏板核心筒区沉降最大, 筏板

角部沉降最小。当筏板上作用的荷载超过第2级荷载（相当于筏板平均基底压力 88 kPa）时，筏板相邻柱距的差异沉降就已超过相邻柱距的 0.002 倍，基础差异沉降已不能满足结构使用要求。因此，地基允许上部结构正常使用的最大荷载为第2级荷载，平均基底压力为 88 kPa。

图5为天然地基筏板土反力分布曲线，从图中可以看出，筏板下土反力分布既不同于刚性基础的“马鞍形”分布，又不同于柔性基础的“盆形”分布。这是由于上部结构作用到筏板上的荷载为核心筒区最大、筏板板边位置次之、筏板角部位置最小，同时试验中上部结构框架对筏板土反力分布又产生影响，使得筏板土反力分布形式介于柔性基础和刚性基础反力分布之间，既体现了筏板荷载大的位置筏板土反力大的特点，又体现了上部结构使筏板内部土反力向筏板边部和角部转移的特点。总体来看，筏板土反力分布形式既与筏板上荷载分布形式有关，又与上部结构刚度对地基影响有关。

3.2 刚性桩复合地基试验结果与分析

本次试验中，内密外疏布桩复合地基最大加荷值为 6500 kN，而中心布桩复合地基在试验过程中由于停电，使得试验最大加荷值为 4875 kN。尽管来电后恢复试验加荷，但 4875 kN 以后的试验数据会受到影响，因此，对中心布桩筏板仅分析 4875 kN 及以前的数据。

(1) 筏板沉降分布

图6为不同布桩方式复合地基筏板不同剖面位置沉降分布曲线。从图中可以看出，内密外疏布桩方式筏板差异沉降大于筏板中心布桩方式，而其筏板平均沉降则小于筏板中心布桩方式。

从筏板不同剖面位置差异沉降来看，工作荷载（第4级荷载）时，内密外疏布桩方式最大差异沉降为 1.22 mm，最小差异沉降为 0.04 mm，平均差异沉降为 0.41 mm，筏板平均倾斜为 0.0009；筏板中心布桩方式最大差异沉降为 0.78 mm，最小差异沉降为 0.03 mm，平均差异沉降为 0.32 mm，筏板平均倾斜为 0.0007。筏板中心布桩方式与内密外疏布桩方式相比，筏板最大差异沉降降低了 36%，最小差异沉降降低了 25%，筏板平均差异沉降降低了 22%，筏板平均倾斜降低了 22%。尽管二种布桩方式筏板最大差异沉降均小于相邻柱距的 0.002 倍，但筏板中心布桩方式可以更有效地降低筏板差异沉降。

从筏板不同位置沉降来看，工作荷载（第4级荷载）时，筏板中心布桩方式最大沉降为 8.72 mm，最小沉降为 6.09 mm，平均沉降为 7.87 mm；内密外疏布桩方式最大沉降为 7.55 mm，最小沉降为 5.50 mm，

平均沉降为 6.58 mm。对比以上试验结果，可以看出，筏板中心布桩方式比内密外疏布桩方式最大沉降大 16%，最小沉降大 11%，平均沉降大 20%。说明筏板中心布桩方式可节约一定数量桩数，但略加大复合地基总沉降。

(2) 桩端平面以下地基土沉降及筏板外侧地面沉降

图7为不同布桩方式复合地基筏板核心筒区桩端平面以下地基土沉降、筏板外侧地面沉降及筏板外侧地面下 2 m 深度处（相当于桩端平面深度）地基土沉降分布曲线。从图中可以看出，随着筏板上作用荷载的增加，二种布桩方式复合地基在竖直方向和水平方向沉降影响范围逐渐增加。同一荷载水平，距桩端平面或筏板板边越近沉降越大；反之，沉降越小。

对于深层地基土沉降，工作荷载（第4级荷载）时，筏板中心布桩方式在核心筒区桩端平面以下不同深度沉降量略大于内密外疏布桩方式对应位置沉降量、在桩端平面深度筏板外侧地基沉降和筏板外侧地面沉降与内密外疏布桩方式对应位置沉降基本一致。这与不同布桩方式桩土反力分布有关，见后文分析。

从复合地基沉降影响范围来看，二者沉降影响范围大体一致。它们在地面下竖向沉降影响深度大致为 2 倍筏板宽度，在筏板外侧水平向沉降影响范围大致为 0.2 倍筏板宽度。

(3) 筏板板底桩土反力分布

图8(a)~(f)为两种布桩方式刚性桩复合地基筏板不同剖面位置土反力分布曲线。

对于内密外疏布桩方式，桩间土反力最大值位于筏板核心筒内部，最小值位于筏板角桩位置，筏板边桩位置桩间土反力居于二者之间。工作荷载（第4级荷载）时，核心筒区桩间土反力为 194 kPa，筏板边桩位置桩间土反力为 130 kPa，筏板角桩位置桩间土反力为 28 kPa。

在筏板中心布桩方式中，筏板板边中间位置桩间土反力最大，筏板核心筒区桩间土反力最小，筏板角部位置桩间土反力处于二者之间。工作荷载（第4级荷载）时，筏板核心筒区桩间土反力为 56 kPa，筏板板边中间位置桩间土反力为 126 kPa，筏板角部位置桩间土反力为 97 kPa。

可以看出，内密外疏布桩方式桩间土反力在核心筒区大于筏板中心布桩方式，在筏板板边位置二者基本一致。筏板板边土反力分布的一致性使得筏板外侧地面沉降影响范围基本一致。

图8(g)~(i)为内密外疏布桩方式筏板不同剖面位置桩顶反力分布曲线。桩顶反力在筏板核心筒区最大，筏板边桩位置次之，筏板角桩位置最小。工

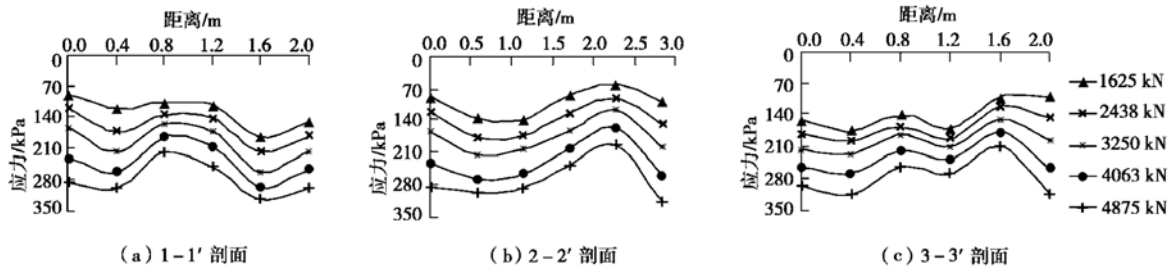


图 5 无桩筏板土反力分布曲线

Fig. 5 Distribution of reaction force on unpiled raft

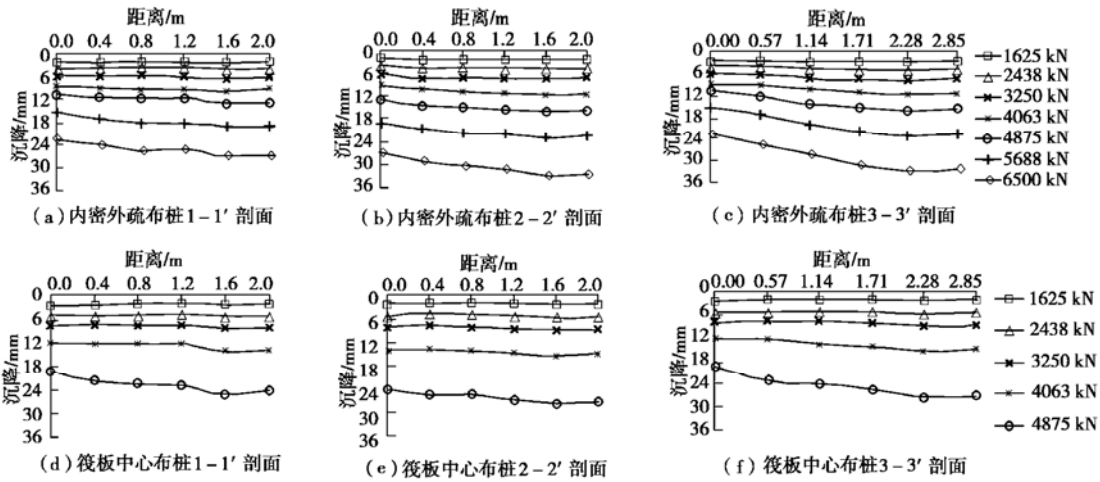


图 6 复合地基筏板沉降分布曲线

Fig. 6 Distribution of raft settlement of composite foundation

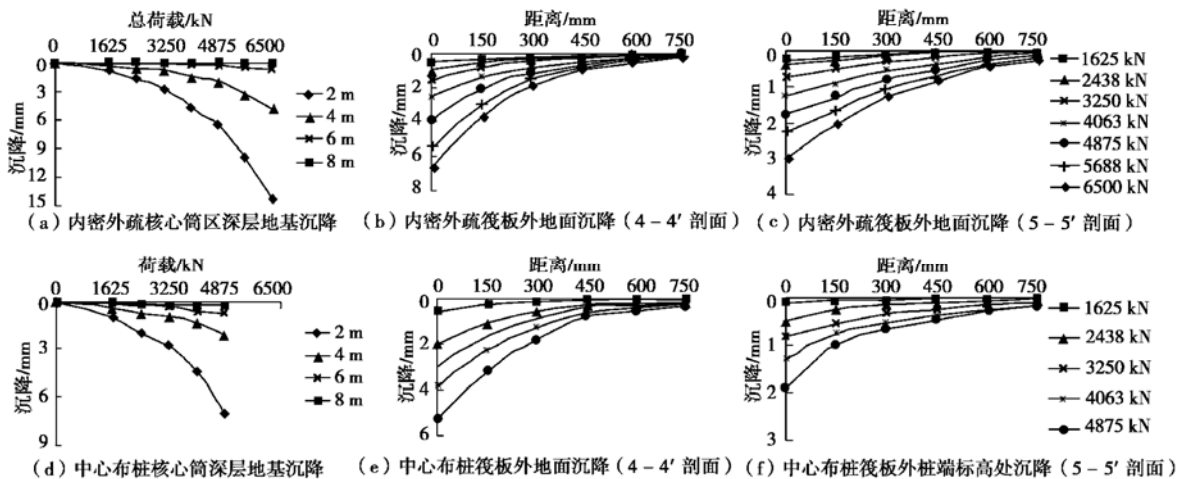


图 7 复合地基沉降影响曲线

Fig. 7 Effect of settlement of composite foundation

作荷载(第 4 级荷载)时,核心筒区桩顶反力为 44 kN (2491 kPa),边桩位置为 30.5 kN (1724 kPa),角桩位置为 13 kN (736 kPa)。桩顶反力分布形式与土反力分布形式相一致。

以上结果表明:筏板下桩间土反力分布既与刚性桩复合地基布桩方式有关,又与筏板荷载分布有关。

(4) 桩土荷载传递

图 9 为两种布桩方式复合地基核心筒角桩轴力分

布曲线。从图中可以看出,两种布桩方式的桩身最大轴力均不在桩顶,而在桩顶以下某一深度处,因此,桩顶以下一定范围内均存在负摩阻。

在核心筒角桩位置,工作荷载(第 4 级荷载)时,对于内密外疏布桩方式,桩顶轴力为 23.4 kN,桩端轴力为 9.4 kN,桩身最大轴力为 29.2 kN,桩端阻力占桩顶总荷载的 40%;对于筏板中心布桩方式,桩顶轴力为 18.5 kN,桩端轴力为 11.2 kN,桩身最大轴力为 21.0

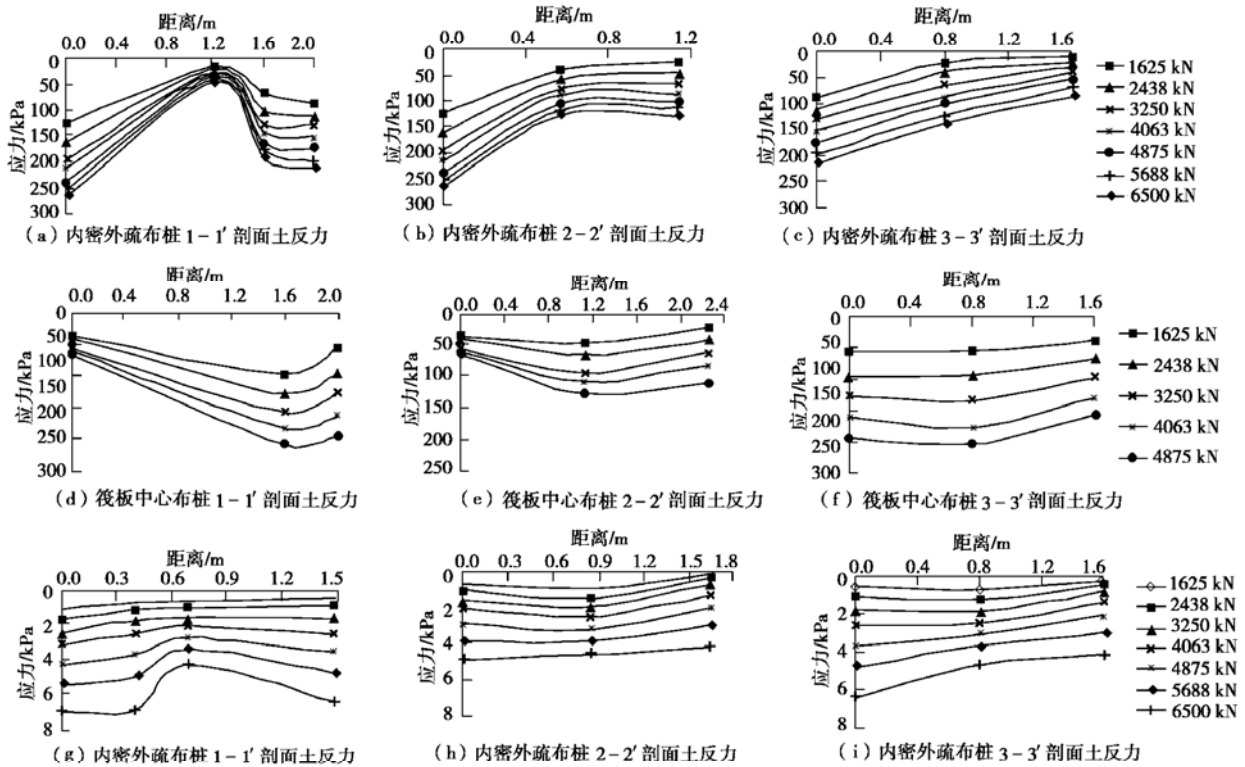


图 8 复合地基桩土反力分布曲线

Fig. 8 Distribution of reaction force on piles and soil of composite foundation

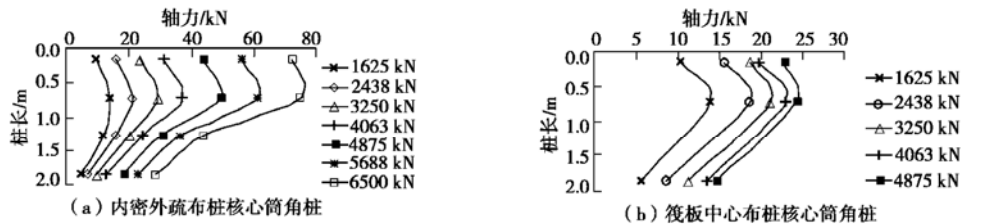


图 9 复合地基桩身轴力分布

Fig. 9 Distribution of axis force of piles in composite foundation

kN, 桩端阻力占桩顶总荷载的 61%。

以上结果表明：内密外疏布桩方式中由于核心筒外桩对核心筒下桩间土的侧向约束，使得核心筒下桩间土侧摩阻提高，桩受力以摩擦为主，桩顶大部分荷载传递给桩间土；而筏板中心布桩方式桩对桩间土的侧向约束相对较弱，桩顶大部分荷载传递给桩端土，桩受力以端承为主。该结果与工作荷载下筏板中心布桩方式在筏板核心筒区桩端地基沉降略大于内密外疏布桩方式对应位置地基沉降结果相一致。

(5) 桩土荷载分担比

图 10 为两种布桩方式复合地基桩土荷载分担比曲线。从图中可以看出，两种布桩方式筏板下桩土荷载分担方式不同。

对于内密外疏布桩方式，随着筏板上作用的荷载增加，桩分担筏板荷载的比例逐渐增加，桩间土分担筏板荷载的比例逐渐减小。工作荷载（第 4 级荷载）时，桩分担筏板总荷载的比例为 52%，桩间

土分担筏板总荷载的比例为 48%。

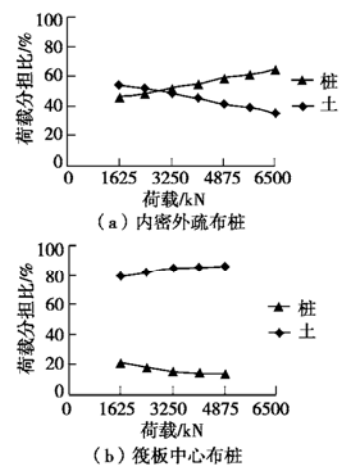


图 10 复合地基桩土荷载分担比曲线

Fig. 10 Load share ratio of composite foundation

在筏板中心布桩方式中，随着筏板上作用的荷载增加，桩分担筏板荷载的比例逐渐减小，桩间土分担筏板荷载的比例逐渐增加。工作荷载（第 4 级

荷载)时,土分担筏板总荷载的比例为85%,桩分担筏板总荷载的比例为15%。可以看出,筏板中心布桩方式充分发挥了筏板下土的潜力,而桩则真正起到了减沉调平的作用。

由以上分析可见,内密外疏布桩实际属于常规桩基范畴,以桩承担大部分荷载,而中心布桩方式时土承担大部分荷载,桩则作为沉降减小构件(settlement reducer)来减小筏基中心沉降,二者工作的机理是有很大不同的。当然,采用中心布桩时,必须有一个前提,即对边柱来说,其天然地基承载力是满足要求的,否则,就应考虑内密外疏的布桩方式。如果建筑物整体刚度及筏板整体刚度足够大,建筑物可按整体来验算地基承载力时,筏板中心布桩方法是可以的。

4 结 论

通过对带上部结构框架无桩筏板和不同布桩方式复合地基进行静载荷试验,在工作荷载下所得模型试验结论如下:

(1)无论是均匀地基还是非均匀布桩刚性桩复合地基,筏板的差异沉降和反力分布与筏板上的荷载分布和布桩方式有关,与结构与地基相互作用有关。

(2)筏板中心布桩方式筏板差异沉降小于内密外疏布桩方式,而筏板不同位置的沉降和平均沉降则大于内密外疏布桩方式。根据筏板荷载分布特点进行布桩可以有效地降低筏板差异沉降,但减少复合地基桩数则会加大筏板沉降。

(3)筏板中心布桩方式在桩端平面以下地基沉降略大于内密外疏布桩方式对应位置沉降、在筏板外侧地面沉降与内密外疏布桩方式对应位置沉降基本一致。平均来说,在筏板外侧水平方向沉降影响距离大致为0.2倍筏板宽度,在筏板下竖直方向沉降影响深度大致为2倍筏板宽度。

(4)两种布桩方式复合地基桩顶以下一定范围内均存在负摩阻,筏板中心布桩方式桩受力以端承为主,内密外疏布桩方式桩受力以摩擦为主。

(5)筏板中心布桩方式土分担筏板主要荷载,桩分担筏板少量荷载。桩主要起到减小差异沉降的作用。内密外疏布桩方式桩间土分担筏板荷载的比例随筏板上荷载的增加而减小、桩分担筏板荷载的比例随筏板上荷载的增加而增加,工作荷载时,桩和土分担筏板荷载的比例基本一致,基本属于常规桩基础范畴。

本次模型试验结果表明:筏板中心布置方式可以更有效地减小筏板差异沉降,充分发挥桩土反力。与内密外疏布桩方式相比,中心布桩方式筏板下布桩数

量减少了55%,达到了优化设计、降低造价的目的。因此,在实际工程中要根据结构的荷载分布和具体的地质条件进行复合地基设计,使复合地基设计得到优化,达到降低工程造价、节约资源、创造良好的社会效益的目的。

致谢:参加本次试验的人员还有中国建筑科学研究院地基所的张武博士、迟铃泉博士,河北省建筑科学研究院的王维玉硕士、赵占山硕士,在此对他们表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] 闫明礼. 地基处理技术[M].北京:中国环境科学出版社,1996. (YAN Ming-li. Technique of ground treatment[M]. Beijing: China Environment Science Press, 1996. (in Chinese))
- [2] 宰金珉,宰金璋. 高层建筑基础分析与设计——土与结构物共同作用的理论与运用[M].北京:中国建筑工业出版社,1993. (ZAI Jin-min, ZAI Jin-zhang. Analysis and design of high building foundation: the theory and application of soil and structure interaction[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1993. (in Chinese))
- [3] CAO X D. Performance of raft foundation with settlement reducing piles[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 1988.
- [4] CAO X D, WONG I H, CHANG M H. Behavior of model rafts resting on pile-reinforced sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(2): 129 - 138.
- [5] 郑刚,高喜峰,任彦华,吴永红. 承台-桩-土不同构造形式下的相互作用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 307 - 312. (ZHENG Gang, GAO Xi-feng, REN Yan-hua, WU Yong-hong. A Study on the interaction of cap (foundation), pile and soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 307 - 312. (in Chinese))
- [6] REUL O, RANDOLPH M F. Design strategies for piled raft subjected nonuniform vertical loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(1): 1 - 13.
- [7] RANDOLPH M F. Design methods for pile groups and piled rafts[C]//13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, 1994, 5: 61 - 82.
- [8] HORIKOSHI K, RANDOLPH M F. A contribution to optimum design of piled rafts[J]. Geotechnique 1998, 48(3): 301 - 37.