

变刚度布桩复合地基模型试验研究

张 武, 高文生

(中国建筑科学研究院, 北京 100013)

摘 要: 以模型试验方法研究了变刚度复合地基的承载特征、沉降分布、变形影响范围、桩土荷载分担比及基桩荷载传递特性。试验数据表明: 在荷载较大的核心筒区密集布桩而在荷载较小的边角区稀疏布桩或不布桩, 能有效地减少基础沉降差, 同时减少基桩工程量, 复合地基筏下布桩的平均桩顶反力应小于基桩的单桩极限承载力以保证基础总体沉降满足安全要求。

关键词: 复合地基; 变刚度; 模型试验; 沉降; 荷载分担比

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2009)06-0905-06

作者简介: 张 武(1963-), 男, 湖北汉川人, 博士, 高级工程师, 从事岩土工程研究。E-mail: wuzhang@163.com。

Experimental study on composite piled raft foundation

ZHANG Wu, GAO Wen-sheng

(China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: The behaviors of composite piled foundation with variable stiffnesses are studied by experiments, such as load - settlement relation, settlement pattern, effect scope, load sharing and interaction between piles and soil. The differential settlement and volume of piles can be reduced efficiently when the raft is piled more in high loading zone and less in low loading zone or no. The general settlement can be satisfied when the average reaction of piles under the raft is lower than the maximum bearing capacity of the single pile.

Key words: composite foundation; variable stiffness; model test; settlement; load sharing

0 前 言

在高层建筑筏板基础的地基处理中, 常采用 CFG 桩等刚性桩。复合地基筏下均匀布桩时, 其承载力验算和沉降估算可采用规范方法^[1-2]。当上部结构荷载差异较大时, 基础筏板之下的地基处理可采用变刚度布桩, 即依上部结构荷载分布, 在基础荷载较大的核心筒区域, 其筏下布较密的桩; 在基础荷载较小的边角区域, 其筏下稀疏布桩或不布桩^[3-4]。筏下非均匀布桩复合地基的基础沉降分布、沉降影响范围、桩土荷载分担和基桩荷载传递特性等是值得研究的问题。

为研究变刚度布桩复合地基承载变形特性, 通过在石家庄市南郊进行长达 1 a 的高层建筑桩筏基础及刚性桩复合地基现场模型试验, 包括变桩距满堂布桩复合地基(试验 G)和核心筒下局部布桩复合地基(试验 H), 为对比筏下布桩复合地基的减沉加固效果, 还进行了天然地基筏板承载试验(试验 A)。现场模型试验的筏板长×宽×厚为 4.3 m×4.3 m×0.15 m, 复合地基筏下布桩试验方案如表 1。模型场地原为 1500 m² 的干枯鱼塘, 塘底平整且低于自然地面约 2.0 m, 依

次下卧粉质黏土(厚约 1.75 m, $c = 38 \text{ kPa}$ 、 $\varphi = 18^\circ$)、粉土(厚约 2.48 m, $c = 38.4 \text{ kPa}$ 、 $\varphi = 24.9^\circ$)、细中砂(厚约 1.50 m)、砾砂(厚约 1.43 m)。试验通过核心区、内区、边区、角区 4 个荷载分区模拟上部结构加载, 各分区的加载节点依次分别为 4, 12, 16, 12 个(图 1), 相应的最大节点荷载分别为 $P_{核} = 425 \text{ kN}$ 、 $P_{内} = 200 \text{ kN}$ 、 $P_{边} = 130 \text{ kN}$ 、 $P_{角} = 80 \text{ kN}$ ^[4]。

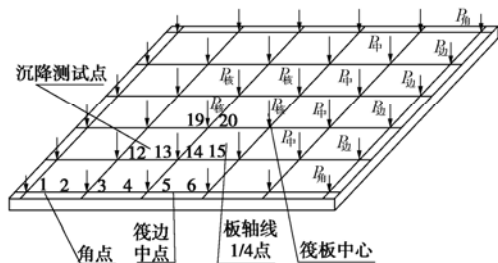


图 1 筏板基础沉降测试特征点

Fig. 1 Layout of model raft and displacement meters

表 1 天然地基与筏下布桩复合地基试验几何参数

Table 1 Geometrical parameters of natural ground and composite foundation

试验编号	布桩模式	桩径 d/mm	桩长 L/m	距径比 $\frac{S_a}{d}$	桩数 n	桩体积 V_p/m^3	最大加载 $/\text{kN}$
A	无桩	0	0	0	0	0	4875
G	变桩距复合地基	150	2	3~5.33	44	1.550	6500
H	局部复合地基	150	2	3~5.33	20	0.707	6500

1 基础荷载沉降特性

筏下布桩试验 G、H 均分为 8 级加载, 试验 A 天然地基由于承载力限制分 6 级加载。进行沉降测试的筏板各特征点的位置如图 1 所示。

基础荷载与筏板表面的中心点、筏边与核心筒间的中点、筏边缘的中点、角点等特征点的沉降关系如图 2 所示。从图中可以看出:

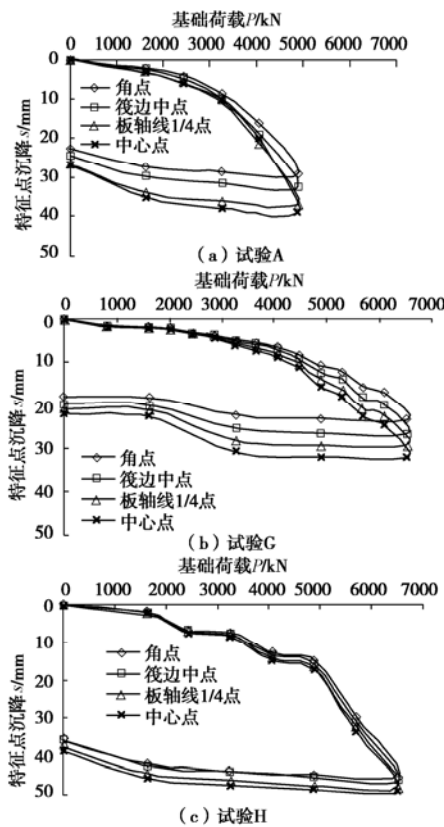


图 2 筏下布桩复合地基荷载与沉降关系

Fig. 2 Relationship between load and settlement of composite piled raft foundation

(1) 同一基础模型试验中, 筏板中心点的沉降最大、角点的沉降最小、其余点的沉降介于两者之间。各点的荷载沉降关系曲线基本相似。对天然地基试验 A, 荷载沉降关系在加载过程中分为初始线性与其后的沉降加速非线性两个阶段, 且存在明确的极限荷载。对筏下变桩距满堂布桩的复合地基试验 G, 加载过程分为初始线性、沉降加速、沉降硬化和沉降再加速四

个阶段。对筏下局部布桩的复合地基试验 H、加载过程为初始线性、沉降加速、沉降硬化、沉降再加速、沉降再硬化、和沉降急速增加六个阶段。

(2) 3 组试验的荷载沉降关系的卸载曲线表现为非线性。核心区局部布桩的试验 H 与天然地基筏板的试验 A 相比, 卸载初期, 各特征点的沉降回弹较小, 随后沉降回弹缓慢加速, 在卸至 2 级荷载时, 沉降回弹增大。布桩相对较密的试验 G, 卸至 4 级荷载时, 沉降回弹增大。即筏下布桩数量增加, 复合地基弹性特征明显。

(3) 同一试验场地平板、单桩试验确定的地基土和 $d=150\text{ mm}$, $l=2000\text{ mm}$ 基桩承载力特征值分别为 160 kPa , 60 kN ^[4], 由此确定的与试验 G, H 面积置换率相同的均匀布桩复合地基承载力分别为 5473 , 4105 kN 。由图 2 (b), (c), 与上述基础承载力相对应的实测基础沉降为 $12\sim 18\text{ mm}$, 从基础承载变形特性曲线可知, 基础处于沉降硬化阶段。采用筏下变刚度布桩, 按现行地基处理技术规范确定的基础承载力, 相应变形值可以控制在 20 mm 以内, 如果荷载超过上述承载力, 基础的总体变形可能急剧增大。

2 基础沉降分布

根据筏板表面测试点百分表读数绘制的天然地基试验 A、筏下群桩复合地基试验 G、H 在基础荷载为 4 级 ($P=3250\text{ kN}$) 时的沉降等值线如图 3 所示。图示基础沉降总体上呈现为碟形特征。

(1) 天然地基上筏板基础 A 的沉降量最大值为 11.5 mm , 复合地基试验 G, H 的沉降量最大值分别为 6.3 , 8.5 mm , 仅为天然地基的 54.7% , 73.9% , 复合地基沉降量随筏下布桩数量的增加而减少。



(a) 试验 A

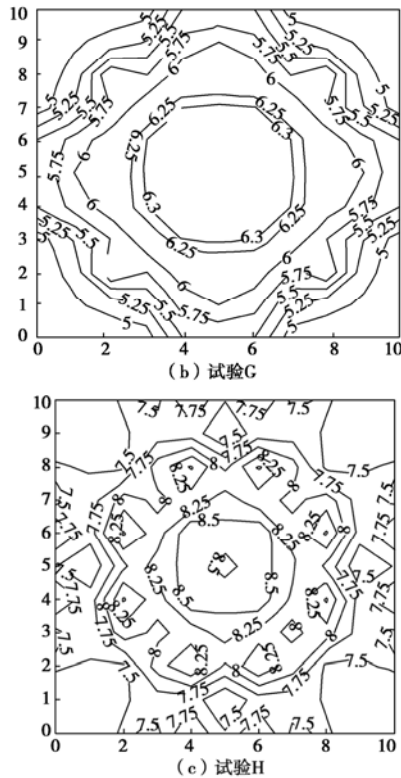


图 3 加载 4 级 ($P=3250\text{ kN}$) 筏板基础沉降等值线

Fig. 3 Settlement contour of piled raft foundation ($P=3250\text{ kN}$)

(2)天然地基上筏板基础 A 的最大沉降差为 4.5 mm, 复合地基试验 G 的沉降差为 1.3, 1.0 mm, 分别仅为天然地基的 28.9%, 22.2%。对应于上部结构荷载较大的区域布置相对较密的桩, 而对应于上部结构荷载较小的区域布置相对较少的桩或不布桩, 将更有效地减小基础的差异沉降。

(3)根据试验场地地质资料中各层土的变形指标及模型尺寸, 基础加载至 3250 kN 时, 采用复合地基沉降计算方法^[3], 试验 A, H, G 的计算沉降量最大值分别为 60.79, 42.22, 27.65 mm, 其试验值与相应的计算值之比分别为 18.9%, 20.1%, 22.8%; 计算沉降差分别为 21.74, 15.28, 10.24 mm, 其试验值与相应的计算值之比分别为 20.7%, 20.1%, 22.8%。计算与实测数据均表明:天然地基的沉降量与差异沉降最大, 复合地基的沉降量与差异沉降较小。由于沉降计算时假设荷载与基桩均匀分布, 未考虑核心筒区域荷载集中度较大、布桩较密; 边角区域荷载集中度较小、布桩较稀的特点, 因而试验 H 计算差异沉降较试验 G 计算差异沉降大。

由于桩长与基础边长之比约为 0.5, 基础中心区桩端位于基础应力扩散区以内, 基础中心区的沉降取决于桩端平面之下土层的压缩。密集布桩使复合地基的整体刚度增加, 但桩群的相互作用也使其中心局部刚度相对于边角局部刚度降低, 导致基础中心区沉降减小的幅度小于基础边、角沉降减小的幅度。因此加密

布桩可使基础沉降减小、但当桩群的相互作用较大时, 基础的沉降差增大。

3 地基土变形范围

筏下群桩复合地基的沉降影响包括筏下分层变形与筏板周边地表沉降范围, 分层变形由基础中心预埋若干深标测试, 周边地表沉降由筏边地表设置的位移计测试。

3.1 复合地基筏板基础的变形影响深度

天然地基试验 A、复合地基试验 G、H 基础中心以下不同埋深的竖向位移见图 4。从图中可以看出:

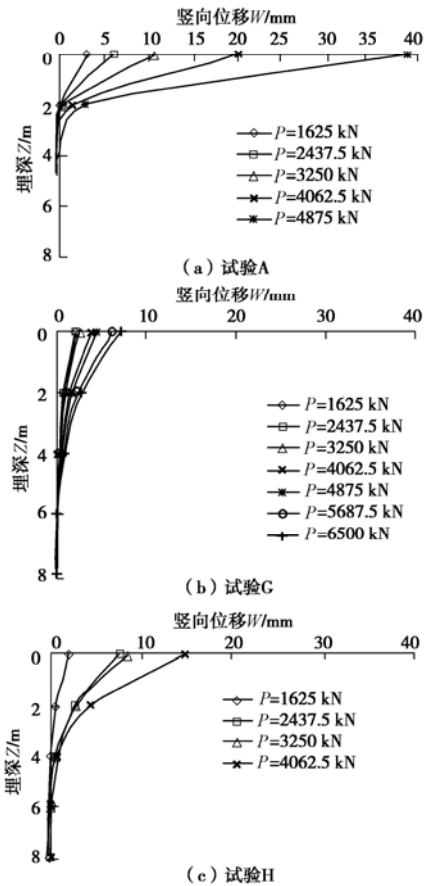


图 4 筏板中心区地基竖向位移

Fig. 4 Vertical displacement along depth at raft center

(1)同一基础不同荷载水平下, 土层竖向位移沿深度变化的模式大致相同, 只是竖向位移的数值随荷载水平的提高而增加。荷载的增加使地基浅层竖向位移增大, 地基深层竖向位移变化很小。

(2)天然地基上筏基的土层压缩层深度约为 2.0 m, 相当于 1/2 基础宽度。桩长为 2.0 m 变桩距复合地基试验 G 和局部布桩复合地基试验 H 的土层压缩层深度约为筏底下 4.0~5.0 m, 相当于 2~2.5 倍桩长。筏板下群桩复合地基筏底土层的影响深度约为桩端平面以下 0.5~1.0 倍基础宽度。

3.2 复合地基筏板基础周边水平影响范围

天然地基试验 A、复合地基试验 G, H 基础筏板外围地表沉降如图 5 所示。从图中可以看出:

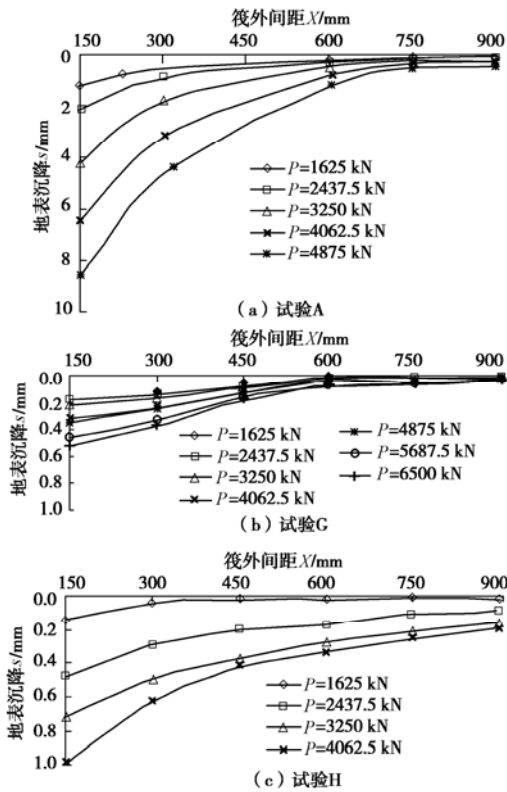


图 5 筏板基础外围地表沉降
Fig. 5 Surface settlement beside raft

(1) 不同荷载水平下, 复合地基筏板基础外围的地表沉降随与筏边距离的增加而减少的趋势大致相同, 只是地表沉降的数值随荷载水平的提高而增加。其影响范围为 (1/4~1/3) 基础宽, 随荷载水平提高有所增大。

(2) 相同荷载作用下, 不同布桩的复合地基筏板基础水平影响范围与趋势大致相同, 但天然地基筏板对周边的沉降量影响明显大于复合地基基础。如加载 4 级 ($P=3250\text{ kN}$) 时, 距板边 150 mm 处地表沉降分别为试验 G, H 的 20 倍、5.9 倍, 但影响范围并未明显增加, 仅为 1/4 基础宽。这是由于桩将部分荷载传至地基深处, 从而使基础对外围的影响减少, 桩的作用越大, 基础对外围的影响越小。

4 筏下布桩复合地基筏底土反力分布

筏板中心断面的土反力如图 6 所示, 由于模型结构和荷载的对称性, 仅取 1/2 板宽。从图中可知:

(1) 不同荷载水平时, 筏底特定断面土反力分布图式大致相似, 荷载水平提高, 只是增加了各点的土反力值。且筏边缘的土反力较大, 筏中心的土反力较

小。

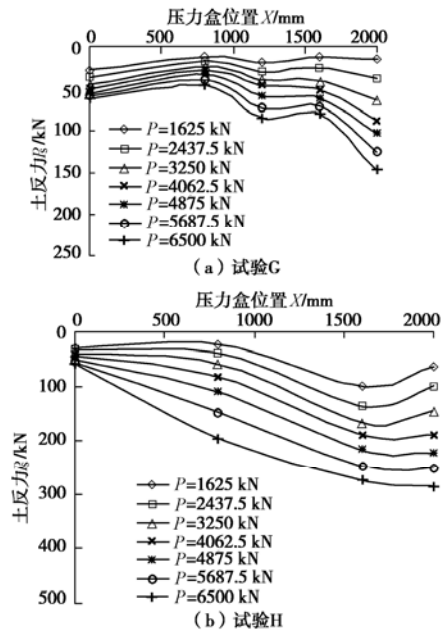


图 6 筏板中心断面土反力分布

Fig. 6 Contact pressure across section of raft center

(2) 筏板下布桩数量增加将使其土反力分布趋于更不均匀。如筏下没有布桩的天然地基试验 A, 筏底土反力最大值与土反力最小值之比为 2.33~2.92, 布桩数量由 20 根的试验 H 筏底土反力最大值与土反力最小值之比为 2.45~3.48, 布桩数量增加至 44 根时变桩距的试验 G 该比值为 5.23~7.40。

(3) 筏板下布桩数量增加将降低筏土反力最大值。如 4 级荷载时, 天然地基试验 A 的筏底土反力最大值为 318.3 kPa, 布桩 20 根的试验 H 为 201.1 kPa, 布桩 44 根的试验 G 为 171.5 kPa。

(4) 加载至 4 级 ($P=3250\text{ kN}$) 时, 由筏底土反力分布求出的筏底平均土反力, 试验 G 为 58.85 kPa, 试验 H 为 99.04 kPa, 天然地基试验 A 的筏底平均土反力为 175.8 kPa。如果认为试验 A 时, 天然地基的承载力全部发挥, 则试验 G, H 的桩间土承载力仅分别发挥了 33.4%, 53.6%, 且筏下布桩数量越多, 复合地基桩间土承载力发挥的程度越低。当加载至 8 级 ($P=6500\text{ kN}$) 时, 试验 G, H 的筏底平均土反力分别为 102.0, 188.3 kPa, 仅为地基土承载力极限值的 31.9%, 59.9%。即只要筏下布桩, 复合地基桩间土承载力难于全部发挥。

(5) 根据同场地单桩与平板试验实测的基桩承载力特征值 $R_a=60\text{ kN}$, 地基土承载力特征值 $f_{sk}=160\text{ kPa}$ ^[4], 复合地基试验 G, H 的面积置换率 m 分别为 4.20%, 1.91%, 其桩间土分担荷载比例计算值分别为 51.8%, 70.8%。按实测的筏底土反力推算, 试验 G 桩

表 2 筏下群桩复合地基试验桩顶反力对比

Table 2 Load on piles under raft in composite foundation in experimental model

荷载/kN	试验组别	桩顶反力/kN					
		最大值	最小值	平均值	中心桩	边桩	角桩
3250(4 级)	试验 G	74.66	21.43	38.36	44.58	50.96	21.43
	试验 H	91.66	39.40	66.08	66.08	—	—
6500(8 级)	试验 G	163.50	77.91	104.00	19.30	104.20	77.91
	试验 H	231.30	61.58	141.60	141.60	—	—

间土分担全部荷载的比例为 27.9%~32.1%; 试验 H 桩间土分担全部荷载的比例为 52.5%~58.1%。即筏板下布桩的复合地基, 桩间土实际分担荷载的比例较设计水平低。

5 复合地基中的桩顶反力

根据桩身应变计测试的试验 G 中心桩、边桩、角桩, 试验 H 基桩的桩顶反力如表 2 所示, 相应的桩顶反力最大值、最小值、平均值亦列于同一表中。从表中可知:

在筏板下布桩的复合地基中, 桩顶反力随桩位而变, 其中试验 G 的最大值与最小值之比在 4 级加载时为 3.48, 在 8 级加载时相为 2.10; 试验 H 的最大值与最小值之比在 4 级加载时为 2.33, 在 8 级加载时相为 3.76。且 4 级加载时, 试验 G 筏的桩顶反力平均值为 38.36 kN, 低于基桩的单桩承载力特征值 60 kN, 试验 H 的桩顶反力平均值为 66.08 kN, 超过基桩的单桩承载力特征值 60 kN; 8 级加载时, 试验 G 筏的桩顶反力平均值为 104.0 kN, 低于基桩的单桩极限承载力, 与图 2

(b) 对照, 基础沉降总体上未出现急剧变化; 试验 H 的桩顶反力平均值为 141.6 kN, 高于基桩的单桩极限承载力, 与图 2 (c) 对照, 筏板基础沉降总体上急剧增加。在筏下布桩的复合地基中, 工作荷载 ($P=3250$ kN) 或更高的荷载 (如 $P=6500$ kN) 时, 复合地基中的部分基桩荷载大于单桩承载力设计值, 基桩的实际安全度较设计值低, 因此在复合地基设计与施工中, 尤其筏板下局部布桩时, 基桩安全度更为重要。

6 基桩的荷载传递特性

通过对桩身轴力处理得到试验 G 特征位置桩的侧阻分布如图 7 所示, 端阻随基础荷载变化如图 8 所示。从图中可知:

(1) 试验 G 不同位置的桩, 其侧阻分布各不相同。如角桩侧阻在其上部最小、中部次之、下部最大; 中心桩侧阻在其中部最大、下部次之、上部最小。复合地基筏下群桩的上部存在负摩阻。

(2) 荷载水平不同, 试验 G 角桩的侧阻沿桩深的分布相近, 桩筏外荷载的增减, 只是改变了桩的侧阻数值的大小, 而并未改变不同测点侧阻的相互关系。

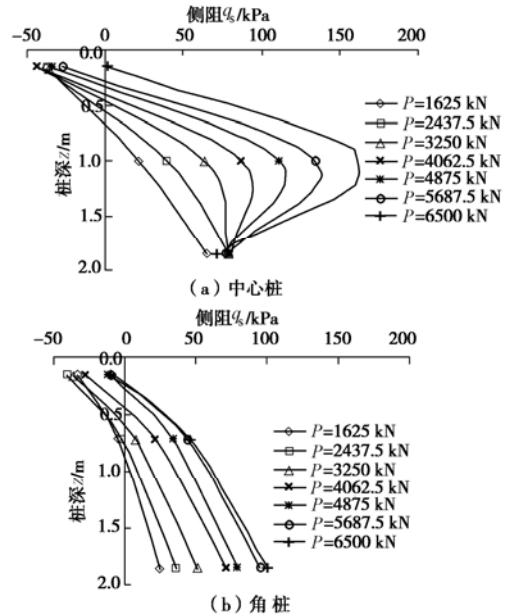


图 7 基桩侧阻分布

Fig. 7 Shaft friction along piles in composite foundation

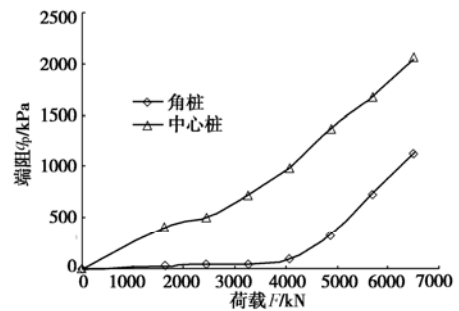


图 8 基桩端阻与基础荷载关系

Fig. 8 Relationship between bottom resistance of piles and load on foundation

(3) 单桩侧阻发挥峰值主要集中在桩的上部, 复合地基基础各特征桩的侧阻发挥峰值主要分布在桩的中、下部。

(4) 与同场地几何尺寸相同的单桩相比, 复合地基基础试验 G 桩侧阻的最大值较小。如 8 级荷载时, 角桩、中心桩的侧阻最大值分别为 99.89 kPa, 166.2 kPa, 而基桩在承载力极限值时的侧阻最大值分别为 293.0 kPa^[8]。

(5) 试验 H 中侧阻分布与试验 G 相似, 但较均匀。复合地基的基桩侧阻发挥与分布特征是由筏板对

桩顶的桩土相对位移的限制、黏性土中桩与桩的相互影响所产生的削弱效应所致；对于角桩的削弱效应较内部桩小，导致其侧阻分布介于单桩和内部桩之间。

(6)复合地基中桩端阻随荷载增加而近似线性增加。中心桩端阻高于角桩；端阻的发挥值与前述侧阻的变化特征相对应。说明上部结构的刚度与荷载最大处附近桩的端阻发挥值最高。复合地基的基桩端阻远高于相应的单桩端阻^[4]。4级荷载下，前者为后者的(1.20~20.85)倍，但荷载增至8级时为(2.96~2.99)倍。这一现象说明，群桩效应导致桩端阻明显提高，产生增强效应。

7 结 论

(1)按照现行地基处理技术规范确定的筏下布桩复合地基承载力，所对应的基础沉降量在12~18mm，当布桩数量减少至一定程度而荷载较大时，基础总体沉降可能突然增加。因此为确保结构安全，筏下布桩总数受桩的单桩承载力制约，即设计布桩的平均桩顶反力应小于单桩极限承载力。

(2)筏下布桩限制了复合地基中桩间土承载能力的发挥，桩数越多，桩间土承载力发挥的程度越低；实际工作状态下的桩荷载比其设计值高，桩间土分担的荷载较设计值低。因此，复合地基成桩质量的可靠性比桩间土对基础安全更重要。

(3)复合地基中的桩在桩顶附近存在少量负摩阻，为提高基础结构耐久性，可以在桩顶附近配少量钢筋。筏下基桩端阻发挥程度较高，在与重荷载对应区域，采用桩基后注浆方法加固桩端将使地基加固更具针对性。

(4)高层建筑复合地基筏下布桩对周边的影响局限在6倍的桩径范围内，比天然地基对周边的影响小。

(5)在上部结构荷载较大区域局部加密布桩、在上部荷载较小区域稀疏布桩或不布桩，即满足基础总体承载与沉降要求的复合地基变刚度布桩可以充分发挥基桩承载能力，更有效地减小基础沉降差。

致 谢：中国建筑科学研究院迟铃泉、刘金砺，河北省建筑科学研究院张振栓、王维玉、刘冬林、赵占山参加了本项目试验工作，在此致谢。

参考文献：

- [1] JGJ 79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (JGJ79—2002 Technical code for building ground treatment[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese))
- [2] 阎明礼, 张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. (YAN Ming-li, ZHANG Dong-gang. Technology and engineering practice of CFG composite foundation[M]. Beijing: China Water Power Press, 1993. (in Chinese))
- [3] 刘金砺, 迟铃泉. 桩土变形计算模型和变刚度调平设计[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 151 - 157. (LIU Jin-li, CHI Ling-quan. The modified model of pile-soil deformation calculation and variable rigidity design method for balance settlement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 151 - 157. (in Chinese))
- [4] 张 武. 高层建筑桩筏基础模型试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2002. (ZHANG Wu. Study on piled raft foundation by model tests[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2002. (in Chinese))
- [5] 张 武. 竖向抗压单桩承载力实例分析[J]. 建筑科学, 2008, 24(1): 75 - 79. (ZHANG Wu. Example analysis about bearing capacity of single vertical compressive pile[J]. Building Science, 2008, 24(1): 75 - 79. (in Chinese))
- [6] POULOUS H G. Alternative design strategies for piled raft foundations[C]// Piletalk, 94, Singapore. 1994: 239 - 244.
- [7] RANDOLPH M F. Central pile support for piled raft foundations[C]// Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1997: 2257 - 2258.
- [8] O'NEILL M W. Side resistance in piles and drilled shafts[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2001, 127(1): 3 - 16.
- [9] HAMMAM A H, SHERIF M M, et al. Effect of pile group size on its behavior in sand underlain by compressible soil[C]// Eleventh Asian Regional Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering. Rotterdam: Balkema, 1999: 159 - 161.
- [10] HORIKOSHI K, RANDOLPH M F. On the definition of raft-soil stiffness ratio[J]. Geotechnique, 1997, 47(5): 1055 - 1061.