

# 软土地区大型桩筏基础原位试验研究

水伟厚 梁永辉 詹金林

(上海现代建筑设计集团申元岩土工程有限公司, 上海 200011)

**摘要:** 结合某造船基地船台、横移区大型桩筏基础原位载荷试验, 对试验过程中筏板变形、桩顶反力、不同深度土中附加应力、深层分层沉降进行详细监测, 通过实测数据统计分析得出桩筏基础的一些受力变形规律, 同时也对试验中一些问题进行讨论, 指出现有监测设备存在的问题, 积累了软土地区桩筏基础试验经验。

**关键词:** 桩基; 筏板; 桩筏基础; 原位试验; 载荷试验; 监测

## FULL-SCALE LARGE FIELD TESTS OF PILE-RAFT IN SOFT SOIL AREA

Shui Weihou Liang Yonghui Zhan Jinlin

(Shenyuan Geotechnical Co., Ltd., Xiandai Architectural Design Group, Shanghai 200011, China)

**Abstract:** An in-situ test of a supergiant pile-raft was performed. During the experiment a great variety of monitoring instruments were embedded to monitor the deformation of the raft, reaction of the piles, soil pressures in several vertical and laminar displacements. Some important rules about pile-raft foundation are achieved, and some questions of the testing are discussed. Also some shortages of the monitoring instruments are presented.

**Keywords:** raft; pile-raft foundation; in situ testing; static load test; monitoring

软土地区由于地基承载力较低, 地基压缩性较高, 桩筏基础成为高层建筑以及大型工业设备等结构物保障地基承载力、控制地基沉降的主要基础形式, 对其受力变形机理的研究受到各国学者的高度重视。由于筏板的计算假定和设计计算方法不统一, 桩筏基础的设计计算结果可能差别很大。例如, 在工程实践中, 计算模型假定不同、计算参数取值不同, 同一建筑筏板厚度的设计可能有 30% 的差异, 内力计算差别可能达 40%。解决这一问题的有效途径之一是对桩筏基础进行现场试验监测和综合分析。监测工作既是完善桩筏基础工程设计的关键环节, 又是进行工程质量检验和评价的重要依据。目前, 对桩筏基础的监测工作, 尚无规范性的实施方案可循, 尤其是在软土地基上进行大型桩筏基础原位试验, 使整体建筑结构的设计经济合理尚缺乏经验。

根据前期的方案设计, 某造船基地拟建的横移区和室内船台若采用传统桩基方案, 不仅造价较高, 而且容易因桩基的群桩效应和土体的损伤造成基础的整体承载力下降。根据该地区的土层分布和土层的工程力学性质, 采用长桩基础, 综合“筏板—桩—土”效应(长桩以⑤<sub>1-2</sub>层为持力层, 起到减少沉降的作用)进行设计, 不仅可以在本次设计中节省大量基础投资, 同时可以推广到以后的类似工程中去, 丰富

在软基船坞、船台及其他结构的基础设计方法, 从而产生巨大的经济效益。

为此, 本文结合船台、横移区大型桩筏基础原位载荷试验, 对试验过程中筏板变形、桩顶反力、不同深度土中附加应力、深层分层沉降监测成果进行统计分析, 得出软土地基上桩筏基础的一些受力变形规律, 用以指导结构及桩筏基础设计。同时也对试验中一些问题进行讨论, 以积累软土地区桩筏基础试验经验, 供类似工程设计、试验、监测参考。

## 1 试验概况及设计

### 1.1 试验概况

本工程试验地点位于长江三角洲前沿, 地基土分布及主要力学指标如表 1 所示。筏板下 4.3 m 深度内土质较差的土皆被挖除清淤, 然后回填粉细砂掺 4% 强度等级为 32.5 的水泥, 并且分层压实。

### 1.2 试验设计

筏板尺寸为 12 m × 17 m × 0.9 m, 双层双向配

第一作者: 水伟厚, 男, 1976 年 10 月出生, 高级工程师, 国家注册土木工程师(岩土), 博士。

E-mail: sh191@126.com

收稿日期: 2009-01-07

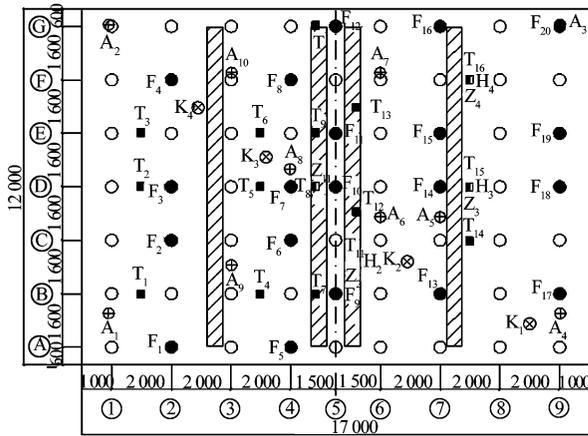
筋, 横向 $\phi 25 @ 200$ , 纵向 $\phi 20 @ 200$ 。桩基为 PHC—AB400(95)—34.5, 桩数 63 根, 桩距 2.0~1.8 m 或 1.5~1.8 m, 按方格网布置, 桩端持力层为灰色粉质黏土 $\textcircled{5}_{1-2}$ 层, 筏板尺寸、桩位布置和相关试验设备

埋设见图 1。荷载试验最大加载量为 21 000 kN, 加载配重采用压船铁, 钢板尺寸为 0.18 m $\times$ 1.02 m $\times$ 9.8 m 和 0.30 m $\times$ 1.5 m $\times$ 4.3 m 两种。

表 1 土层分布及主要力学性质指标

Table 1 Distribution of soil layer & mechanical indices

层号	土层名称	土层厚度 / m	标准贯入 击数 N/击	压缩系数 $\alpha_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$	地基土承载力 特征值/kPa	桩侧极限 摩阻力/kPa	桩端极限端 承载力/kPa
①	人工回填土	4.0	14.7		150		
② <sub>3</sub>	灰色砂质粉土	4.0	8.5	0.28	110	15/35	
② <sub>3</sub>	淤泥质粉质黏土(夹黏质粉土)	5.3	4.5	0.36	70	25	
② <sub>3</sub>	灰色砂质粉土	6.5	4.5	0.28	110	35	1 500~2 300
④	淤泥质黏土	7.3		1.04	60	35	
⑤ <sub>1-1</sub>	黏土	5.0		0.74		40	
⑤ <sub>1-2</sub>	粉质黏土	8.0	8.0	0.47		45	1 200
⑤ <sub>3-1</sub>	粉质黏土	9.0	8.5	0.43		45	1 500



○桩径; 阴影部分为加载区域; ●表示桩顶测力计埋设位置, 编号为 F1—F20; ⊕表示筏板沉降观测点位置, 编号为 A1—A10; ■表示筏板下土压力盒埋设位置, 编号为 T1—T16; ▣表示中层土压力盒和底层土压力盒, 中层土压力标高为+2.30 m, 编号为 Z1—Z4, 底层土压力标高为-1.00 m, 编号为 H1—H4; ⊗表示分层沉降仪埋设位置, 孔深为 40 m, 编号为 K1—K4

图 1 桩筏尺寸及监测点布置图

Fig. 1 The sketch of dimension for pile raft and layout of monitoring points

试验作业顺序: 挖除 $\textcircled{2}_3$ 层以上的软弱土层(挖深约 4.0 m)→采用粉细砂加 4%强度等级为 32.5 的水泥, 分层回填压实至+3.30 m 高程→施打 PHC—AB400(95)—34.5 试验桩→埋设土压力盒、分层沉降仪和桩顶反力计→浇筑混凝土垫层→绑扎筏板钢筋、安装试验必须的预埋件, 并浇筑筏板→筏板保湿养护不少于 14, 28 d 龄期后进行试验, 期间进行试验装置的搭设准备工作。

采用压船铁钢板对桩筏基础进行堆载试验, 沿筏板短轴堆放, 筏板中心部位为中墩, 宽 2.6 m, 边墩宽 1.03 m, 中墩与边墩间距为: 2.2 m, 加载位置如

图 1 中阴影所示, 加载级数和维持时间见表 2。

表 2 中中墩为 1 组, 边墩为 2 组, 每级荷载单位为千牛; 每级荷载维持的时间为 24 h, 其中包括加载或卸载时间; 最高级荷载维持时间不少于 15 d, 之后连续 3 d 数据无变化则可以卸载。本次试验加载分级为 3 级, 即 7 000, 14 000, 21 000 kN。

表 2 加载、卸载级数和维持时间

Table 2 The levels of loading & unloading and duration

阶段	第一级			第二级			第三级		
	中墩 / MN	边墩 / MN	维持 / h	中墩 / MN	边墩 / MN	维持 / h	中墩 / MN	边墩 / MN	维持 / d
加载	5	1	44	1	0.2	43	1.5	3	15
阶段	第一级			第二级			第三级		
	中墩 / MN	边墩 / MN	维持 / h	中墩 / MN	边墩 / MN	维持 / h	中墩 / MN	边墩 / MN	维持 / d
卸载	1.5	0.2	22	1.5	0	41	1	0	41
阶段	第四级			第五级					
	中墩 / MN	边墩 / MN	维持 / h	中墩 / MN	边墩 / MN	维持 / h			
卸载	0.5	0	17.5	0	0	72			

注: 72 h 后如数据无变化则进行下一级卸载。

### 1.3 监测内容及仪器的布置

本次桩筏基础试验监测的主要内容包括: 筏板底土的反力及筏板下土中压应力(-3.50, -2.70, +1.30, +1.10 m 处各安装 4 个土压力盒); 桩顶反力(在指定桩顶上安装 20 个反力计); 分层沉降监测(在筏板预留孔中安装分层沉降管, 共计 4 个); 筏板沉降监测(在筏板上预留的沉降观测杆上安装刻度尺, 为沉降观测点编号, 共计 10 点)。各项监测点的布置详见图 1。

## 2 试验成果及分析

试验历时 37 d, 测试频率为 2 次/d, 获得了桩筏基础各项监测的结果, 堆载至 21 000 kN 时现场照片如图 2 所示。

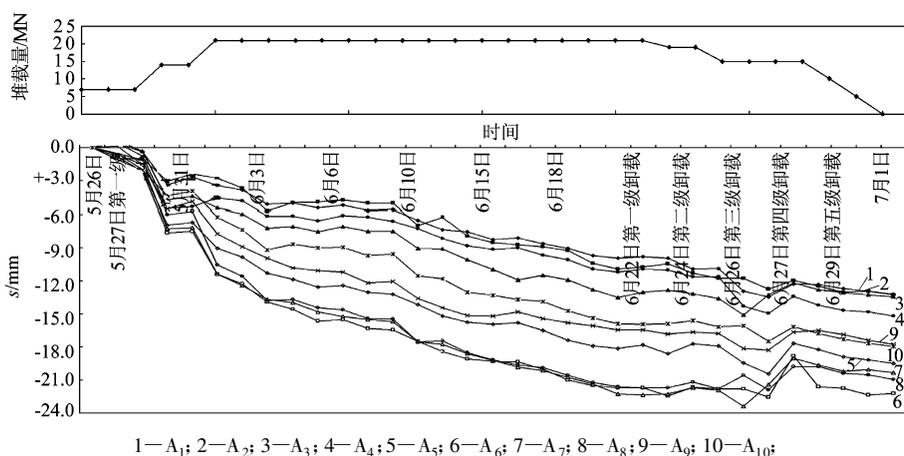


图 2 堆载 21 000 kN 时现场照片

Fig. 2 The photo for 21 000 kN loading test

### 2.1 筏板沉降监测结果分析

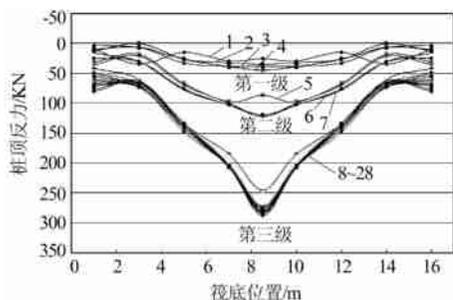
通过筏板上 10 个沉降点监测, 根据试验过程实



1—A<sub>1</sub>; 2—A<sub>2</sub>; 3—A<sub>3</sub>; 4—A<sub>4</sub>; 5—A<sub>5</sub>; 6—A<sub>6</sub>; 7—A<sub>7</sub>; 8—A<sub>8</sub>; 9—A<sub>9</sub>; 10—A<sub>10</sub>;

图 3 沉降观测点变形历时曲线

Fig. 3 Displacement-time curve of raft



1—5月26日; 2—5月26日; 3—5月27日; 4—5月28日; 5—5月29日; 6—5月30日; 7—5月30日; 8—5月31日; 9—6月1日; 10—6月2日; 11—6月3日; 12—6月4日; 13—6月5日; 14—6月6日; 15—6月7日; 16—6月8日; 17—6月9日; 18—6月10日; 19—6月11日; 20—6月12日; 21—6月13日; 22—6月14日; 23—6月15日; 24—6月16日; 25—6月17日; 26—6月18日; 27—6月19日; 28—6月21日

图 4 加荷阶段桩顶反力变化曲线

Fig. 4 Change in reaction of pile top during loading

测数据, 绘制变形—时间—荷载曲线如图 3 所示。

图 3 为筏板 10 个沉降监测点在加荷和卸荷全过程中各测点的变形曲线。可以看出, 随荷载增加变形量不断增大, 在第三级加载完成后的最大变形量在 23 mm 左右。从筏板对角线沉降断面监测可看出, 筏板整体呈中部沉降大、边缘沉降小的碟形变形特点。卸载后, 筏板整体仍保持呈中部沉降大、边缘沉降小的碟形变形特点。卸载前筏板平均沉降为 16.2 mm, 卸载初期略有回弹, 卸载完成后整个桩筏基础平均沉降反而增大到 17.4 mm, 造成的原因尚不明确, 可能是测量基准点的问题。

### 2.2 桩顶反力监测结果分析

图 4 为加荷阶段筏板下 20 个桩顶反力计 5 个横向监测线的平均值在纵向剖面的发展变化曲线 (依对称关系绘出 9 个点), 可以看出, 每级荷载作用

下的桩顶反力变化明显, 各级加载分界明确。第一级荷载作用下, 桩顶反力基本均匀。随荷载增加, 中部桩顶反力的增幅超过边桩反力, 在第三级荷载施加后尤为明显, 桩顶反力呈钟形, 实测的桩顶最大反力接近 300 kN。根据桩位及堆载的对称性布置, 由桩顶反力可计算出桩基承担 45% 的总荷载。

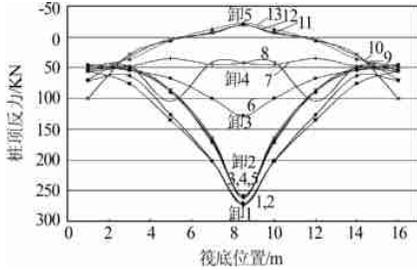
图 5 为卸荷阶段筏板下桩顶反力 20 个桩顶反力 5 个横向监测线的平均值在纵向剖面的发展变化曲线 (依对称关系绘出 9 个点)。卸载分 5 级, 第一级边墩卸载 1 000 kN, 第二级边墩卸载 2 000 kN, 边缘桩顶反力大量减少, 中部桩顶反力仅减少 20 kN。第三、四、五级中墩每次卸载 5 000 kN, 边缘桩顶反力变化不大, 中部桩顶反力大量减少。

桩顶反力的监测结果表明, 单纯的桩筏基础荷载试验不能考虑上部结构的刚度效应, 如筏板厚度相对较小, 堆载引起的筏板挠曲变形较大, 桩顶反力

分布呈中间大、边缘小的钟形分布。

### 2.3 桩间土上应力监测结果

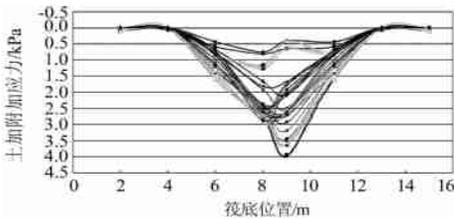
本次测试在筏板下 (+3.30, +1.30, -1.00 m) 上布设 24 个土压力计, 具体位置见土压力盒测点布置图 1 所示。图 6 为筏板底部实测土中平均值变化历时曲线。



1—6月22日; 2—6月23日; 3—6月23日; 4—6月24日; 5—6月25日; 6—6月27日; 7—6月27日; 8—6月28日; 9—6月28日; 10—6月29日; 11—6月30日; 12—7月1日; 13—7月1日

图5 卸荷阶段桩顶反力变化曲线

Fig. 5 Change in reaction of pile top during unloading



1—5月26日; 2—5月25日; 3—5月27日; 4—5月28日; 5—5月29日; 6—5月30日; 7—5月30日; 8—5月31日; 9—6月1日; 10—6月2日; 11—6月3日; 12—6月4日; 13—6月5日; 14—6月6日; 15—6月7日; 16—6月8日; 17—6月9日; 18—6月10日; 19—6月11日; 20—6月12日; 21—6月13日; 22—6月14日; 23—6月15日; 24—6月16日; 25—6月17日; 26—6月18日; 27—6月19日; 28—6月21日;

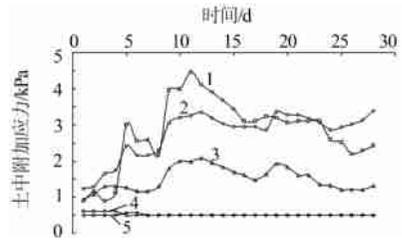
图6 加荷阶段土中压应力变化曲线

Fig. 6 Change in soil pressure during loading

图6为加荷阶段筏板下16个土压力计5个横向监测线的平均值在纵向剖面的发展变化曲线(依对称关系绘出9个点)。各级加载分界明确。随荷载增加, 中部土中附加压应力的增幅超过边缘土中附加压应力, 土反力呈钟形。以筏板长边中线为对称轴, 每边3.5m范围的土中压应力较大, 3.5m范围以外基本为零。实测反映的土中附加压应力数值较小, 在4kPa以内。

图7为沿筏板底部不同轴线处的平均土中附加压应力与时间变化曲线, 发现随着荷载增加, 中部土中附加压应力的增幅超过边缘土中附加压应力, 土中附加压应力呈钟形(如图6)。随荷载增加, 土压应力有上下波动和调整现象, 中部荷载较大, 地基反力得到较大发挥。筏板边缘的土中附加压应力很小。

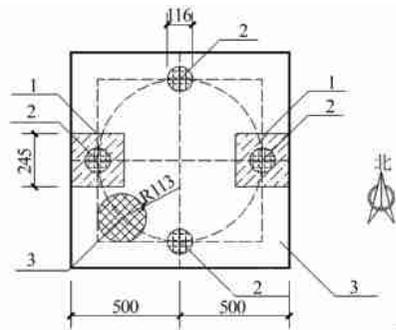
这与荷载的分布呈中间大、边缘小以及筏板变形特征呈“钟型”有关。本次加载量共21 000 kN, 实测反映的土中压应力数值较小, 均在4 kPa以内, 扣除根据观测的桩基分担荷载, 筏板产生的平均附加应力57.5 kPa, 而土中附加压应力实测所反映的地基反力不到理论值的8%。由此可见, 土中压应力测试结果反映的总体规律符合实际, 然而量值大小存在问题。为更加深入了解土压力的测试特性, 在筏板附近进行了平板载荷试验, 用来量测载荷板下的土中附加压应力的变化。本次静载试验在荷载板下10 cm内的砂垫层里共埋设了5个土压力计, 其中2个带沥青囊的钢弦式土压力计, 2个不带沥青囊的钢弦式土压力计, 一个进口的钢弦式土压力计, 土压力计埋深位置见图8。载荷板尺寸为1.0 m×1.0 m, 试验加荷方法采用慢速维持荷载法, 每级荷载为40 kPa, 做到地基土破坏。



1—①~②轴间; 2—⑤~⑥轴间; 3—④~⑤轴间; 4—②~③轴间; 5—⑦~⑧轴间

图7 筏板底部土中附加应力历时变化曲线

Fig. 7 Soil pressure-time curve under raft



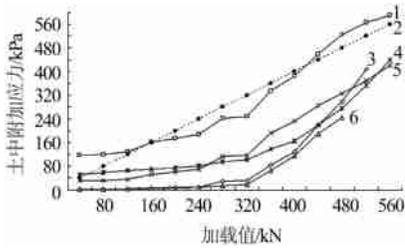
1—沥青囊; 2—土压力计; 3—载荷板

图8 土压力计埋深示意图

Fig. 8 Buried depth of soil pressure cell

图9为各级荷载下实测土中附加压应力与理论土中附加应力的对比曲线, 从图9可以看出, 带沥青囊的国产土压力计实测结果要比不带沥青囊的土中附加压应力计离散性小, 但无论是国产土压力计, 还是进口的土压力计, 其实测的土中附加压应力均小于理论值, 在加载到320kPa时实测土中附加压应力大约小了50%, 在理论土中压应力为40~120 kPa时, 带沥青囊的土压力计显示值仅2.08~2.66 kPa,

是理论值的 2.2%。对于土中压应力观测,当压应力较小时,观测结果很不明显,只有当压力足够大时观测结果才比较明显,并且观测值还是远远小于理论计算值。建议所有土压力计埋设前先埋设在土中进行标定,增加其监测结果的准确性。



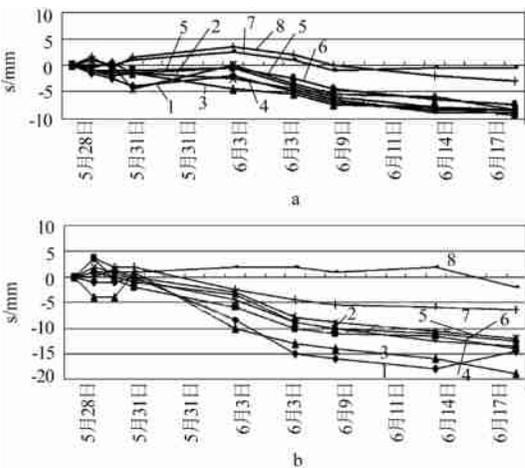
1—261 测点; 2—理论值; 3—252 测点(带沥青囊);  
4—1528 测点(进口); 5—262 测点; 6—249 测点(带沥青囊)

图 9 各级荷载下土中附加应力值

Fig. 9 The curve of soil pressure under all levels of load

## 2.4 深层沉降监测结果

本次测试在筏板上布设 4 个分层沉降孔,平面布置如图 1 所示,图 10 为加荷阶段筏板下 1~2 号孔的深层土体的沉降发展变化曲线。通过变化曲线可以看出,在加载期间,2 号、3 号两个分层沉降监测点大部分成呈下降状态,1 号、4 号两个分层沉降监测点大部分成呈上升状态,随着堆载静止时间的增长,大部分观测点呈下降状态。其中 20 m 深度以上的分层沉降测点较为明显,20 m 深度以下的分层沉降测点不太明显,测点埋深越浅沉降变化越明显。另外,桩端以下部分土体的沉降量比较小,桩间土变形较大,这与桩间土的分担作用有关,由桩顶反力监测结果表明,桩间土承担了较多的荷载,因而桩间土



a—1 号分层沉降孔; b—2 号分层沉降孔

1—8 m; 2—12 m; 3—17 m; 4—21 m;

5—25 m; 6—29 m; 7—34 m; 8—39 m

图 10 1、2 号孔的深层土体的沉降曲线

Fig. 10 The curve of settlement with depth of No. 1 and No. 2 holes

的沉降量必然也比较大。

## 3 结 语

通过对软土地基上某大型桩筏基础的原位试验,得到了大量的数据,得出软土地基上桩筏基础的一些受力变形规律,对优化设计有一定的指导意义,为上海地区此类桩筏基础试验积累了一定的经验和数据。

1)根据筏板桩基布置的对称性,由实测桩顶反力计算群桩所承受的荷载仅占整个堆载的 45%。桩顶反力相对来说比较准确,可推测其他 55%荷载被筏板底部地基土所承担,表明桩土的分担作用比较明显。

2)筏板底部埋设土压力计监测结果显示地基土所分担的荷载不到总荷载的 5%,与桩顶反力监测结果出现矛盾。其原因可能是土压力计标定与埋设在土中时土压力计的实际工作状态差别较大,及土拱效应造成无法准确测量筏板底部的附加应力。

3)深层土体的分层沉降监测结果表明,桩间土的沉降量必然也比较大,而桩端以下部分土体的沉降量比较小。这与桩间土的分担作用有关,由于桩间土承担了较多的荷载,桩端处的附加应力减小,因而产生桩间土沉降量较大而桩端以下土体沉降量较小。

4)建议所有土压力计埋设前应先在土中进行标定,增加其监测结果的准确性。

由于类似的地基基础原位试验很少,没有成熟经验可借鉴,因此,对试验中有些现象还缺乏认识,这有待于今后的深入研究。

参与本工程监测工作的还有中船九院的顾倩燕等,在此一并表示感谢!

## 参考文献

- [1] 张季如. 大规模带桩筏基模拟研究试验[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(6): 18—89.
- [2] 杨敏. 上部结构与桩筏基础共同作用的理论与试验研究[J]. 岩土工程师, 1991, 3(8): 57—60.
- [3] 刘金砺. 桩基研究与应用岩土进展浅析[J]. 施工技术, 2000, 29(9): 2—4.
- [4] 裴捷, 水伟厚, 曹晖. 上海软土地基长桩荷载传递新模型[J]. 工业建筑, 2005, 35(7): 50—54, 49.
- [5] 刘前曦, 侯学渊. 筏—桩—土共同作用分析方法[J]. 同济大学学报, 1996, 24(6): 625—630.
- [6] 程泽海, 凌道盛, 陈云敏. 桩筏基础在竖向荷载作用下的时间效应[J]. 土木工程学报, 2000, 37(2): 73—77.