DOI：10.16285/j.rsm.2017.0068

厚垫层–砂桩复合地基现场试验研究

王正振[1, 2]，龚维明[1, 2]，戴国亮[1, 2]，王晓阳[3]，李亮亮[3]，肖 刚[3]

（1. 东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室，江苏 南京 210096；
2. 东南大学 土木工程学院，江苏 南京 210096；3. 浙江省交通规划设计研究院，浙江 杭州 310006）

摘 要：以瓯江北口大桥南锚碇巨型沉井场地地基处理为科研背景，研究厚垫层–砂桩复合地基的适用性及其承载力的影响因素，针对不同的垫层材料、垫层厚度和砂桩间距共进行了 9 组静载试验。为得到砂桩施工对周围已完成砂桩的影响程度，还进行了砂桩施工相互影响试验。试验结果表明：厚垫层–砂桩加固软土地基效果非常好，是大型沉井地基处理较为理想的方式；垫层含水率、垫层材料和垫层厚度对其承载力的影响程度均大于砂桩间距；砂桩施工过程对周围已完成砂桩的影响和对周围土体的影响具有很大差别，利用传统沉桩挤土理论分析砂桩施工对周围已完成砂桩的影响将产生较大偏差；砂桩施工对周围已完成砂桩会产生较大影响，最大影响范围主要集中在地表以下 1/3 桩长范围内，影响程度与土层的种类和性质有密切关系，土性越好，影响程度越小；可利用增大砂桩间距和已有砂桩的阻隔效应减小影响程度。

关 键 词：巨型沉井；复合地基；静载试验；影响因素；水平位移

中图分类号：TU 473.1 **文献识别码**：A **文章编号**：1000－7598 (2018) 10－3755－08

Field test on composite foundation with thick cushion and sand pile group

WANG Zheng-zhen[1, 2], GONG Wei-ming[1, 2], DAI Guo-liang[1, 2],
WANG Xiao-yang[3], LI Liang-liang[3], XIAO Gang[3]

（1. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structure of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;
2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;
3. Zhejiang Provincial Institute of Communication Planning, Design & Research, Zhejiang, Hangzhou 310016, China）

Abstract: Base on the foundation treatment of south anchorage caisson of Wenzhou Oujiang Estuary Bridge, nine groups of field static loading tests on composite foundation with thick cushion and sand pile group of different cushion materials, cushion thicknesses and pile spacings were performed to study the application of this composite foundation and influencing factors of its bearing capacity. The interaction test on sand piles installation was conducted to investigate the impact of sand pile installation on completed sand piles. The results show that thick cushion and sand pile group, which can strengthen the soft foundation very well, is an ideal way of foundation treatment of super-large caissons. Water content of cushion, material of cushion and thickness of cushion have greater influence on bearing capacity than pile spacing. Because of the differences between the impact on sand pile and the impact on soil which are caused by installation of sand pile, it is inaccurate to use compaction effect of static-press pile to analyze the impact on existing sand pile. The impact on existing sand pile is very large and the maximum impact concentrates on the 1/3 pile length below earth surface. At the same time, the better of soil property, the smaller of this impact. A big pile spacing and blocking effect of existing sand pile can effectively reduce the impact.

Keywords: large-scale caisson; composite foundation; static loading test; influencing factor; horizontal displacement

1 引 言

随着我国桥梁建设的大力发展，巨型沉井凭借其出众的承载力和稳定性在桥梁索塔基础和锚碇基础中得到了广泛的应用[1–3]。但巨型沉井自重大、对地基承载力要求高，而桥梁工程两岸多为地质条件不良地段，未经处理的浅表地基一般难以满足承载力要求，这就需要在沉井正式施工之前对原有地基进行处理以保证沉井施工的顺利进行。

由于地基加固材料随着沉井下沉，需被水冲弱

收稿日期：2017-01-11
基金项目：国家重点基础研究发展计划（973 计划）(No. 2013CB036304)；“十二五”交通运输重大科技专项(No. 2011318494160)。
This work was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2013CB036304) and the Special Project of Important Science and Technology of Transport of Ministry of Transport in Twelfth-Five Year Plan Period (2011318494160).
第一作者简介：王正振，男，1989 年生，博士研究生，主要从事沉井、深基坑等岩土工程方面的研究工作。E-mail: 230159416@seu.edu.cn

挖掉，所以一般采用强度不高的散体桩，而在桩顶铺设垫层既可以保证桩体与桩间土共同承担上部荷载，又可以有效改善复合地基中浅层的受力状态[4–5]。故我国修建的一系列巨型沉井，如江阴长江大桥北锚碇沉井、泰州长江大桥南、北锚碇沉井、南京长江四桥北锚碇沉井、马鞍山长江大桥南、北锚碇沉井等，均采用厚垫层+砂桩这一行之有效的处理方法[6]。瓯江北口大桥南锚碇沉井场地地基处理仍沿用该方法。

砂桩复合地基在我国应用已久，众多学者也对其进行了深入的研究。张定[7]通过分析碎石桩复合地基桩土竖向及径向应力–应变关系，建立了桩土应力比表达式及沉降计算方法。肖文静[8]较为系统地总结了砂桩复合地基理论及其发展现状，利用有限元软件分析了砂桩复合地基承载力的影响因素，并对其沉降计算方法进行了探讨。徐东升等[9]进行了强夯砂桩置换试验，研究了强夯置换过程中周围土体的沉降、超孔隙水压力及水平位移变化情况，得到了诸多有益结论。朱小军等[10]分别进行了砂桩复合地基、钢管桩复合地基等室内试验，监测了加载过程中的桩体沉降及桩土应力比，试验数据说明砂桩复合地基应力集中现象不明显，比钢管桩复合地基承载力更高。郑刚等[11]利用有限差分法分析了刚性基础下散体桩变形模式及机制，进行了考虑桩、土为无重介质的散体桩复合地基极限承载力系数研究，利用极限分析法推导了浅基础破坏模式下复合地基的极限承载力系数解答。

上述研究成果多集中于砂桩复合地基，对厚垫层–砂桩复合地基研究较少，而对砂桩施工过程对周围已完成砂桩的影响研究则更为少见。本文以瓯江北口大桥南锚碇沉井场地砂桩+厚垫层复合地基为研究对象，结合现场静载试验和砂桩施工相互影响试验，对该种复合地基承载力影响因素及砂桩施工相互影响进行分析研究。

2 工程概况

2.1 工程背景

温州瓯江北口大桥位于温州市瓯江出海口，连接瓯江出海口两岸的灵昆岛和岐头山，主桥全长为2.09 km，为三塔四跨双层钢桁梁悬索桥，桥面分为上、下两层，上层为宁波－东莞国家高速公路，下层为 G228 国道。桥梁南锚碇位于灵昆岛上，为重力式锚碇，采用巨型沉井基础。沉井矩形布置，顺桥方向长 70 m，横桥方向宽 63 m，平面上共分为 30 个小井孔，内部填充水或混凝土；沉井整体高度为 66 m，底部为 8 m，为钢壳沉井，其余 58 m 为钢筋混凝土沉井。沉井井壁厚度为 2.0 m，内隔墙厚度为 1.2 m。沉井结构如图 1 所示。

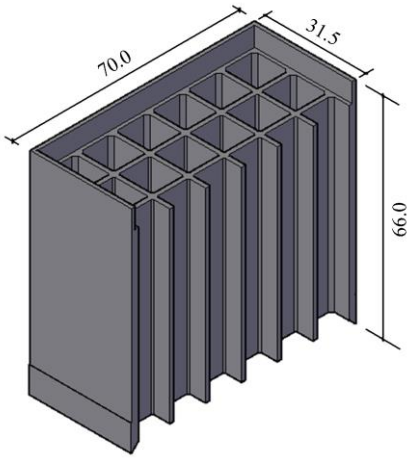


图 1 沉井半结构图（单位：m）
Fig.1 Diagram of semi-caisson (unit: m)

2.2 地质条件

大桥南锚碇沉井深度范围内共有 8 层土，各土层参数如表 1 所示。

表 1 各土层性能参数
Table 1 Soil parameters

土层名称	层底标高/m	层厚/m	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	重度/(kN/m³)	承载力特征值/kPa
地表	4.39	/	/	/	/	/
淤泥质黏土	−10.31	14.7	9.6	5.7	17.4	55
淤泥	−24.81	14.7	12.4	3.9	16.6	50
淤泥质黏土	−35.01	10.2	13.8	6.3	16.9	60
黏土	−41.11	6.1	19.0	4.5	17.7	100
粉质黏土	−55.91	14.8	10.5	18.7	18.4	120
粉砂	−58.81	2.9	13.5	21.4	19.9	140
卵石	/	/	0.0	40.0	22.0	400

2.3 地下水类型

南锚碇区域地下水可划分为潜水和承压水两类：

第一含水层（潜水）：该含水层由全新统冲海积相淤泥质黏土、淤泥、淤泥质粉质黏土及局部粉细砂薄夹层组成。透水性较弱，富水性一般，水量较小，水位标高一般约 2.90～3.30 m，接受大气降水与江水补给。

第二含水层（承压水）：该含水层主要由中更新统~上更新统冲积、冲海积、冲湖积相粉砂、粉质黏土、粉细砂、卵石层组成，透水性好，富水性强，单井涌水量大。

3　地基承载力试验

3.1　试验概况

由表 1 可知：南锚碇沉井所在场地上部有厚度较大的以淤泥和黏土为主的饱和软土，表层淤泥质黏土地基承载力特征值仅为 55 kPa，极限承载力取 2 倍特征值也仅为 110 kPa，远小于沉井施工所需的 620 kPa。采用砂石厚垫层置换原位土以满足承载力要求，并在下卧层主要承载范围内设置砂桩以提高下卧层承载力。初步确定的砂桩单桩竖向承载力特征值为 231 kPa，根据《建筑地基处理技术规范》（JGJ79−2012）[12]中复合地基承载力特征值计算公式：

$$f_{spk}=\left[1+m(n-1)\right]f_{sk} \tag{1}$$

式中：f_{spk} 为复合地基承载力特征值，此处取设计要求的 144.11 kPa；m 为砂桩置换率；f_{sk} 为处理后桩间土承载力特征值，由于缺乏地基处理后的桩间土试验参数，在此仍取 55 kPa；n 为复合地基桩土应力比，即 f_{sk} 与 f_{pk} 的比值，其中 f_{pk} 为砂桩承载力特征值。通过式（1）即可计算出砂桩置换率为 0.51。采用直径 0.6 m 的砂桩加固，利用《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTG D63−2007）[13]中砂桩间距计算公式：

$$l_s=1.08\sqrt{A_p/\mathrm{m}} \tag{2}$$

式中：l_s 为砂桩间距；A_p 为砂桩截面面积。可以得到砂桩间距为 0.8 m。

由于岩土体本身的不确定性及现有理论体系的不完善，理论结果往往与实际结果偏差较大，利用现场静载试验可直接确定砂桩单桩极限承载力和复合地基极限承载力，具有准确直观的特点。

从不同的桩间距、垫层材料和垫层厚度 3 个角度出发，共进行了 9 组复合地基静载试验；为验证砂桩单桩承载力是否达到设计要求，施工场地内还进行了 2 组砂桩单桩静载试验。其中，单桩静载试验采用直径 60 cm、厚度 3 cm 的圆形承压板，复合地基静载试验采用边长 80 cm、厚度 3 cm 的方形承压板。静载试验的相关参数见表 2。

试验过程中采用砂袋堆载，用工字钢作反力架，用液压千斤顶加载，将 4 只百分表读数平均值作为位移量，如图 2、3 所示。试验采用慢速维持荷载法，加载分为 8 级，卸载分为 4 级进行，并在全部荷载卸除完成 3 h 后读最终回弹量[12, 14]。2016 年 8 月 26 号进场，3 d 准备时间，从 2016 年 8 月 29 号开始进行第 1 个试验点的载荷试验，到 2016 年 9 月 14 号全部试验点试验完毕，共经历 20 d，其中降雨影响 3 d。

表 2　试验分组表

Table 2　Test groups

	组号	直径/m	桩间距/m	桩长/m	桩身材料	垫层材料	设计要求极限承载力/kPa	最大加载值	备注
单桩	DZ1	0.6	/	31	中粗砂	/	462	510 kPa（144 kN）	/
	DZ2	0.6	/	31	中粗砂	/	462	510 kPa（144 kN）	/
复合地基	FH1	0.6	0.7	31	中粗砂	50%粉砂+50%中粗砂	682	700 kPa（448 kN）	垫层 0.81 m
	FH2	0.6	0.8	31	中粗砂	50%粉砂+50%中粗砂	682	700 kPa（448 kN）	垫层 0.81 m
	FH3	0.6	0.8	31	中粗砂	50%中粗砂+50%石屑	682	700 kPa（448 kN）	垫层 0.81 m
	FH4	0.6	0.9	31	中粗砂	50%粉砂+50%中粗砂	682	700 kPa（448 kN）	垫层 0.81 m
	FH5	0.6	0.7	31	中粗砂	50%中粗砂+50%石屑	682	700 kPa（448 kN）	垫层 0.81 m
	FH6	0.6	0.9	31	中粗砂	50%中粗砂+50%石屑	682	700 kPa（448 kN）	垫层 0.81 m
	FH7	0.6	0.8	31	中粗砂	50%粉砂+50%中粗砂	682	700 kPa（448 kN）	垫层 1.6 m
	FH8	0.6	0.9	31	中粗砂	50%粉砂+50%石屑	682	700 kPa（448 kN）	垫层 1.6 m
	FH9	0.6	0.7	31	中粗砂	中粗砂、粉砂和石屑	682	700 kPa（448 kN）	垫层 1.6 m

注：表中最大加载值括号中数值为设计要求最大加载值，括号前数值为根据设计要求及载荷板面积计算得到的压强。



图 2　砂袋堆载、反力架

Fig.2　Heaped load and reaction frame



图 3　加载装置、百分表

Fig.3　Loading device and dial gauges

3.2 试验结果及分析

3.2.1 单桩试验

砂桩单桩静载试验时，为防止砂桩顶部因缺少围压产生桩顶破坏影响试验结果，在砂桩外打入直径 0.8 m、长度 1 m 的钢护筒，如图 4 所示。



图 4 砂桩单桩钢护筒

Fig.4 Steel casing of single sand pile

整个试验过程中，单桩 2（DZ2）加载至第 5 级荷载（90 kN）时，突降大雨，地下水上升，地下水位淹过百分表，试验被迫终止，次日地下水位下降之后重新进行单桩 2 的加载，单桩 2 的第 1 次（DZ2(2)）和第 2 次（DZ2(2)）加载的 *P-S* 曲线如图 5 所示，图中还展示了单桩 1（DZ1）的 *P-S* 曲线。图 6 为单桩 2 试验仪器泡水情况。

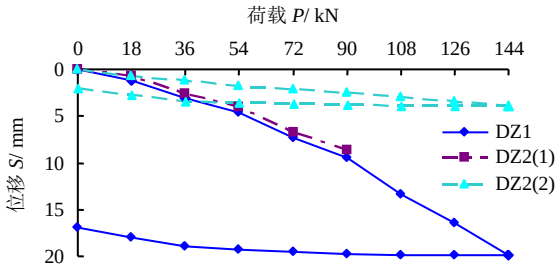


图 5 单桩 *P-S* 曲线

Fig.5 *P-S* curves of single sand piles



图 6 单桩 2 试验仪器泡水

Fig.6 Instruments soaking water for DZ2 test

由于砂桩施工前整个场地地表利用排水良好的粉砂和石屑混合物进行了置换，而置换层以下则是保水性良好的淤泥质黏土，故认为第 1 次和第 2 次加载时场地土层的含水率不变，忽略含水率不同对砂桩单桩承载力的影响。从 DZ1 和 DZ2(1)的 *P-S* 曲线及表 3 可以看出，两根单桩第 1 次加载过程中竖向位移差别不大，反映了场地地层分布的均匀性。对比 DZ1 和 DZ2(2)的 *P-S* 曲线，即可分析施工前预压对砂桩单桩承载力的提升效果。从图 5 可以看出，对于未预压的单桩 1，当荷载加至 144 kN 时，最大沉降量达到 19.93 mm，卸载后回弹了 2.98 mm，最终沉降量仍有 16.95 mm。而经过预压之后的单桩 2，加载到最大值时，最大沉降量仅为 3.90 mm，仅为未预压沉降量的 19.56%，下降了 80.44%，卸载之后回弹 1.85 mm 之后，最终沉降量为 2.05 mm，仅为未预压最终沉降量的 12.09%，降低了 87.91%。不论是最大沉降量还是最终沉降量的降低率均大于 80%，可见施工前预压对沉降量降低效果明显，如果通过沉降量来预测砂桩单桩极限承载力，单桩极限承载力也会大大提高。

从图 5 还可以看出，两根单桩的 *P-S* 曲线均为缓变型，且整个加载过程中未出现终止加载的情况，加载至最大值 144 kN 时，未达到单桩的极限承载力，故实际单桩承载力满足设计要求。

表 3 预压前后单桩静载试验结果

Table 3 Test results of single sand piles

单桩静载试验	最大沉降量/mm	最大沉降量降低率/%	最终沉降量/mm	最终沉降量降低率/%
预压前(DZ1)	19.93	/	16.95	/
预压后(DZ2(2))	3.90	80.44	2.05	87.91

3.2.2 复合地基试验

进行的 9 组复合地基试验，除 FH2 情况特殊之外，其他 8 组的 *P-S* 曲线均为缓变型，在加载至最大值时均未达到极限承载力，满足设计要求。

从受力特征角度出发，将最大加载值视为厚垫层−砂桩复合地基极限承载力，此时，厚垫层−砂桩复合地基承载力特征值为 350 kPa（取极限承载力的 1/2），已是原场地软土承载力的 636.4%。

从相对变形角度出发，取 S/b=0.01（b 为载荷板边长）对应的加载值为试验点复合地基承载力特征值。垫层厚度为 0.81 m 的 6 个试验点中，FH4 的承载力特征值最小，达到了 414.1 kPa，为原场地承载力的 752.8%；而垫层厚度为 1.6 m 的 3 个试验点中，FH7 的承载力特征值最小，为 679.7 kPa，是原

场地承载力的 1 235.8%。可见采用厚垫层−砂桩加固软土地基具有非常好的效果[15]。

为分析垫层土体含水率对复合地基承载力的影响，首先选择 FH1、FH2 和 FH4 共 3 组试验结果进行对比分析，3 组复合地基试验的 *P-S* 曲线如图 7 所示。

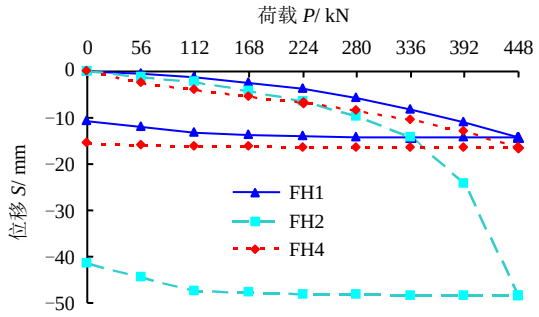


图 7　复合地基（FH1、FH2 和 FH4）*P-S* 曲线
Fig.7　*P-S* curves of composite foundations (FH1, FH2 and FH4)

从表 2 中不难看出，FH1、FH2 和 FH4 这 3 组复合地基试验中砂桩参数除了桩间距不同之外，其他参数均相同，但 *P-S* 曲线却大为不同：桩间距为 0.7 m 的 FH1 的最大沉降量为−14.36 mm，卸载回弹 3.66 mm 之后最终沉降量为−10.7 mm；桩间距为 0.9 m 的 FH4 的最大沉降量为−16.47 mm，卸载回弹 0.89 mm 之后最终沉降量为−15.58 mm；而桩间距为 0.8 m 的 FH2 的最大沉降量却达到−48.48 mm，卸载回弹 6.90 mm 之后的最终沉降量仍为−41.58 mm。按照常理，FH2 的沉降量应介于 FH1 和 FH4 之间，但实际情况与预设相反。其原因主要在于 FH2 在试验过程中突降暴雨导致地下水位上升，地下水虽未漫过地表，但从测点旁边低洼处可以看出，地下水位已接近地表，导致换填材料含水率达到饱和状态，而平时由于换填材料为排水良好的砂和石屑的混合物，且 8 月的灵昆岛气温高，空气干燥，换填材料的含水率相对较低。含水率的增加是导致 FH2 产生较大沉降的主要原因。故在实际施工中应尽量降低复合地基的含水率，从而保证足够的承载力。

再将 FH1、FH4、FH5 和 FH7 这 4 组试验结果进行两两对比来分别说明砂桩桩间距、垫层材料和垫层厚度对复合地基承载力的影响，4 组复合地基试验的 *P-S* 曲线如图 8 所示。

对比 FH1 和 FH4 可以看出，桩间距由 0.7 m 变成 0.9 m，沉降量由−14.36 mm 变为−16.47 mm，沉降量随着桩间距的增大而增大，但是增大效果不明显，桩间距增大了 28.6%，沉降量仅增大了 14.7%。

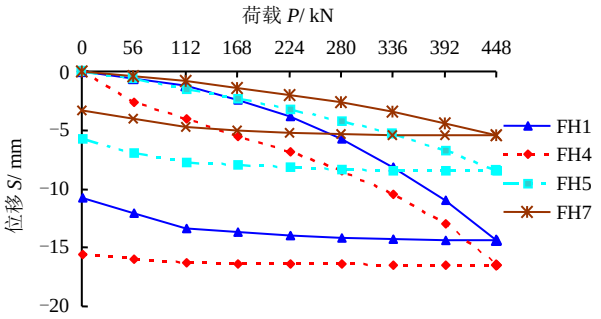


图 8　复合地基（FH1、FH4、FH5 和 FH7）*P-S* 曲线
Fig.8　*P-S* curves of composite foundations (FH1, FH4, FH5 and FH7)

从 FH1 和 FH5 的 *P-S* 曲线可以发现，不同的换填材料也会对复合地基沉降量产生影响：FH1 表面采用 50%粉砂和 50%中粗砂进行换填，而 FH5 表面采用强度更高的 50%中粗砂和 50%石屑换填，FH5 的最大沉降量比 FH1 的最大沉降量降低 41.3%，降低效果显著。

FH2 点试验情况特殊，故只能将 FH7 和 FH1 进行对比来说明垫层厚度对复合地基承载力的影响。从二者的 *P-S* 曲线可以看出，虽然 FH1 的桩间距为 0.7 m，FH7 的桩间距为 0.8 m，但由于 FH7 垫层厚度的增大，其沉降量还是明显小于 FH1。FH1 的最终沉降量为 14.36 mm，而 FH7 的沉降量仅为 5.40 mm。垫层厚度增加 50%，桩间距增大 14.3%，沉降量仍降低了 62.4%。垫层厚度对砂桩+厚垫层复合地基承载力影响明显大于砂桩间距对其承载力的影响。

4　砂桩施工相互影响试验

4.1　仪器布设

为分析砂桩施工过程对临近已完成砂桩的影响程度，在已施工完毕的 8#砂桩中心位置埋设 1#测斜管，并在临近土体中埋设 2#测斜管，通过测斜管得到的深层水平位移来进行相关分析。测斜管长度为 35.5 m，1#测斜管正方向沿着 6#、7#和 8#砂桩中心线沿线方向，2#测斜管正方向沿着 5#和 7#砂桩中心线沿线方向。8 根砂桩桩长均为 31.0 m，桩径为 600 mm，桩间距为 900 mm。砂桩及测斜管布置图如图 9 所示。

4.2　测试过程及结果分析

砂桩施工、测斜管安装及监测时间如表 3、4 所示。

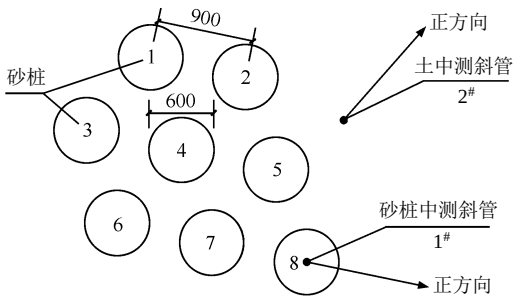


图 9 砂桩及测斜管布置图（单位：mm）

Fig.9 Layout of sand piles and inclinometer pipes (unit: mm)

表 4 砂桩施工、测斜管安装时间表

Table 4 Schedule for construction of sand piles and installation of inclinometer pipes

时间/年-月-日	工况
2016-08-21	8#砂桩施工
2016-08-22 下午	1#测斜管安装
2016-08-24	2#测斜管安装
2016-08-25 下午	5#、2#砂桩施工
2016-08-26 早上	1#、4#、7#砂桩施工
2016-08-26 下午	3#、6#砂桩施工

表 5 测斜管监测时间表

Table 5 Monitoring schedule for inclinometer pipes

时间	采集次数
2016-08-25 上午	第 1 次
5#砂桩桩管下沉到位，灌砂之前	第 2 次
5#砂桩灌砂之后	第 3 次
2#砂桩完成之后	第 4 次
1#、4#砂桩完成之后	第 5 次
7#砂桩完成之后	第 6 次
3#、6#砂桩完成之后	第 7 次

1#测斜管和 2#中测斜管 7 次采集数据得到的位移曲线分别如图 10、11 所示。2#测斜管第 4、5、7 次采集的数据有误，故在图 10 中未展示出来。为消除施工机具移动等干扰因素对测试结果的影响，将地表以下 2 m 范围内得到的结果不计入分析数据中。

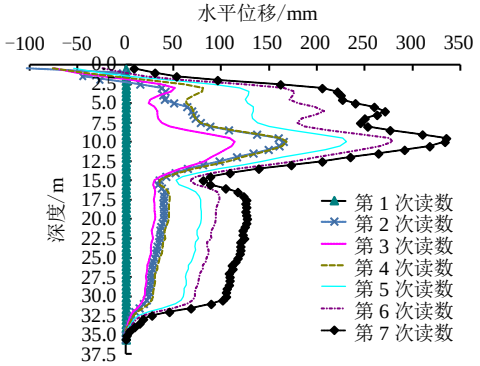


图 10 砂桩测斜管（1#）位移曲线

Fig.10 Displacement curves of No.1 inclinometer pipe

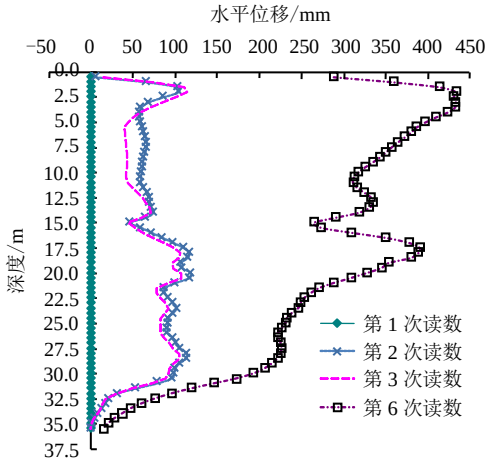


图 11 土中测斜管（2#）位移曲线

Fig.11 Displacement curves of No.2 inclinometer pipe

对比图 10、11 即可发现，砂桩施工过程对周围已完成砂桩的影响和对周围土的影响明显不同，二者的深层水平位移变化曲线差别较大，这主要是由土和砂桩材料性质的差异造成的，故利用传统沉桩挤土理论[16−17]分析砂桩施工对周围已完成砂桩的影响将产生较大偏差。

从图 10 可以看出：砂桩施工对周围已施工完成砂桩影响较大。以地表以下 10 m 处（水平位移最大处）为例：当 1#～7#砂桩全部施工完成后，−10 m 处的水平位移达到最大值 335.5 mm，超过了桩径的 1/2（300 mm）。

2#、5#和 8#砂桩处于同一条直线上，但施工 5#砂桩造成 8#砂桩−10 m 处产生 114.4 mm 的水平位移，而距离增大一倍后的 2#砂桩施工造成 8#砂桩−10 m 处产生的水平位移仅为 53.6 mm，仅为 5#砂桩影响程度的 46.8%。可见增大拟施工砂桩与已施工砂桩的距离以及利用已施工砂桩的阻隔效应可有效减小砂桩施工对周围已完成砂桩的影响，因此，建议砂桩加固软土地基时合理布置砂桩间距，并采用跳打的施工方式。

整个砂桩施工过程中对周围砂桩影响最大的过程为桩管下沉过程，而在灌砂拔管过程中，水平位移会发生明显的回弹现象：在 5#砂桩的施工过程中，分别采集了桩管下沉到位和拔管灌砂之后测斜管的水平位移，仍以水平位移最大的−10 m 处为例，桩管下沉到位后水平位移为 165.6 mm，而灌砂拔管之后水平位移减小到 114.4 mm，回弹幅度达到 30.92%。发生回弹现象的主要原因在于拔管之后，沉管过程中产生的超孔隙水压力迅速消散；砂桩与土体直接接触后，土体中的水可通过砂桩排出；桩管拔出后的空间也有利于土体应力的消散。

从测斜管的 7 次读数中可以发现，砂桩施工对周围已完成砂桩的影响具有明显的深度效应：6 次读数（初始值除外）在深度 0～−13 m 范围内均较大，最大水平位移均发生在−10 m 处，约为 1/3 桩长，深度−13 m 至桩端水平位移变化不明显，桩端以下水平位移迅速减小到 0 mm。这是因为砂桩施工过程对周围土体产生挤压，地表以下 1/3 桩长范围内土体由于地表的隆起现象水平位移逐渐增大，而深层土体由于上部土体重力作用，只能径向移动。

砂桩施工对周围已完成砂桩的影响与周围土体性质有较大关系：测斜管深度范围内土体以淤泥和淤泥质粉质黏土为主，土质条件较差，但在−15 m 位置附近存在淤泥质黏土夹粉砂层。从图 10 中可以看出，在−15 m 附近，砂桩桩体的水平位移有明显减小的现象：−15 m 处的水平位移在所有砂桩完成之后为 81.1 mm，而−17 m 处的水平位移则达到 127 mm，减小幅度达到 36%。由此可知，在土质条件较好的土层中，砂桩施工对临近已完成砂桩的影响将大大降低。

5　结　论

通过上述试验及相关分析可得以下结论：

（1）针对大型沉井施工，随着沉井的下沉，加固软土的材料需被水冲弱挖掉，这就要求加固体本身强度不可太高，厚垫层−砂桩复合地基满足该要求。通过上述静载试验可以看出厚垫层−砂桩加固软土地基效果非常好，是大型沉井地基加固较为理想的方式。

（2）可通过预压的方式提高砂桩单桩极限承载力，提高效果显著。而土体含水率是影响厚垫层−砂桩复合地基承载力的重要因素之一。在施工过程中应采取措施降低土体的含水率来保证复合地基承载力达到预期要求。

（3）垫层材料及垫层厚度比下卧层砂桩间距对厚垫层−砂桩复合地基承载力影响大。厚垫层−砂桩复合地基设计中宜考虑采用良好的垫层材料和较大的垫层厚度来提高其承载力。

（4）砂桩施工过程对周围已完成砂桩的影响和对周围土的影响有很大差异，利用传统沉桩挤土理论分析砂桩施工对周围已完成砂桩的影响将产生较大偏差。

（5）砂桩施工过程对周围已完成砂桩会产生较大影响。增大砂桩间距和利用已有砂桩的阻隔效应可大大削弱该影响程度。施工影响范围为整个桩长，但地表以下 1/3 桩长范围影响程度较大，影响范围与土层种类和性质有较大关系。

（6）桩管下沉是整个施工过程中对周围砂桩影响最大的环节；下沉到位拔管灌砂过程中影响程度会有一定的回弹，大约能恢复 30%左右。

参 考 文 献

[1] 朱建民, 龚维明, 穆保岗, 等. 南京长江四桥北锚碇沉井下沉安全监控研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(8): 16－21.
ZHU Jian-min, GONG Wei-ming, MU Bao-gang, et al. Sinking safety monitoring research on north anchorage caisson of the Forth Nanjing Yangtze River Bridge[J]. **Journal of Building Structures**, 2010, 31(8): 16－21.

[2] KELLY R B, HOULSBY G T, BYRNE B W. A comparison of field and laboratory tests of caisson foundations in sand and clay[J]. **Geotechnique**, 2006, 56(9): 617－626.

[3] 邓友生, 黄恒恒, 杨敏, 等. 大型桥梁圆形沉井锚碇下沉过程中力学特性监测分析[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 153－157.
DENG You-sheng, HUANG Heng-heng, YANG Min, et al. Monitoring analysis of mechanical characteristics for sinking of super-large bridge circular caisson anchorage[J]. **Journal of Building Structures**, 2015, 36(10): 153－157.

[4] 吕亚茹, 刘汉龙, 丁选明, 等. 刚性基础下现浇 X 形混凝土桩复合地基桩土应力比分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1774－1780.
LÜ Ya-ru, LIU Han-long, DING Xuan-ming, et al. Analysis of pile-soil stress ratio of cast-in-place X-section concrete pile composite foundation under rigid base[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(6): 1774－1780.

[5] 韩云山, 白晓红, 梁仁旺. 垫层对 CFG 桩复合地基承载力评价的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3498－3503.
HAN Yun-shan, BAI Xiao-hong, LIANG Ren-wang. Cushion influence on bearing capacity of composite foundation with cement-flyash-gravel piles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(20): 3498－3503.

[6] 朱建民. 超大型沉井设计施工关键问题研究[D]. 南京: 东南大学, 2012.

ZHU Jian-ming. Study on issues in design and construction of super-large caisson[D]. Nanjing: Southeast University, 2012.

[7] 张定. 碎石桩复合地基的作用机理分析及沉降计算[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 81－86.
ZHANG Ding. Functional mechanism analysis and settlement computation on composite foundation of gravel pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(2): 81－86.

[8] 肖文静. 挤密砂桩复合地基受力性能及计算理论研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
XIAO Wen-jing. Research on the bearing capability and design theory of sand compaction pile composite foundation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.

[9] 徐东升, 汪稔, 孟庆山, 等. 海相淤泥软上地基强夯置换砂桩试验分析[J]. 岩上力学, 2009, 30(12): 3831－3836.
XU Dong-sheng, WAND Ren, MENG Qing-shan, et al. Field test analysis of dynamic consolidation and replacement sand pile on marine soft soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3831－3836.

[10] 朱小军, 龚维明, 赵学亮. 砂桩群桩复合地基模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 680－683.
ZHU Xiao-jun, GONG Wei-ming, ZHAO Xue-liang. Model tests on composite foundation with group sand piles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(Supp.2): 680－683.

[11] 郑刚, 周海祚, 刁钰, 等. 饱和黏性土中散体桩复合地基极限承载力系数研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 385－399.
ZHENG Gang, ZHOU Hai-zuo, DIAO Yu, et al. Bearing capacity factor for granular column-reinforced composite ground in saturated soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(3): 385－399.

[12] 中国建筑科学研究院. JGJ79−2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版, 2012.
China Academy of Building Research. JGJ79−2012 Technical code for ground treatment of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

[13] 中交公路规划设计院有限公司. JTG D63−2007 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
CCCC Highway Consultants Co., Ltd. JTG D63−2007 Code for design of ground base and foundation of highway bridges and culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.

[14] 中国建筑科学研究院. GB50007−2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
China Academy of Building Research. GB50007−2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

[15] ZHANG Ling, ZHAO Ming-hua, SHI Cai-jun, et al. Settlement calculation of composite foundation reinforced with stone columns[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2013, 13(3): 248－256.

[16] 曹兆虎, 孔纲强, 周航, 等. 基于透明土的静压楔形桩沉桩效应模型试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1363－1367.
CAO Zhao-hu, KONG Gang-qiang, ZHOU Hang, et al. Model test on installation effect of tapered piles in transparent soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(5): 1363－1367.

[17] 李镜培, 李雨浓, 张述涛. 成层地基中静压单桩挤土效应试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(6): 824－829.
LI Jing-pei, LI Yu-nong, ZHANG Shu-tao. Experimental analysis of compaction effect of single pile jacked in layered ground[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2011, 39(6): 824－829.