

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.06.001



刚柔性桩复合地基加固双层软弱地基 现场试验研究

杨鹏¹, 李照东², 胡永涛², 丁锴², 章定文¹, 杨泳^{1,3}

(1. 东南大学 交通学院, 南京 2100962; 2. 连云港港务工程公司, 江苏 连云港 222042;
3. 江苏盛泰建设工程有限公司, 江苏 连云港 222042)

摘要:为研究路堤荷载下刚柔性桩对深厚双层软弱地基的加固效果及其桩土荷载传递规律, 结合连云港港某铁路软基处理工程, 采用带帽预制方桩和带扩大头的双向搅拌粉喷桩联合加固, 对路堤填筑过程及预压期内地表沉降、桩土差异沉降、深层水平位移、超静孔隙水压力、桩土应力比以及桩土荷载分担的变化规律进行了分析。结果表明: 载荷试验中复合地基桩土应力比随外荷载增加而增加; 地基变形发生在填土期, 预压期内沉降变形继续并逐渐趋于稳定; 填土荷载向刚性桩及搅拌桩桩顶集中, 刚性桩桩顶应力增长较快; 面积置换率为 22.2% 的预制方桩(含桩帽)承担了 56.2% 的荷载, 但其承载力只发挥了不到 18%; 面积置换率和土质条件是桩土荷载分担比的主要影响因素。

关键词:软弱地基; 刚柔性桩; 地基变形; 桩土应力比; 桩土荷载分担

中图分类号: TU447 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)06-0001-08

Field test of double-layered soft ground improved by rigid-flexible composite pile foundation

Yang Peng¹, Li Zhaodong², Hu Yongtao², Ding Kai², Zhang Dingwen¹, Yang Yong^{1,3}

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China; 2. Lianyungang Harbour Engineering Company, Lianyungang 222042, Jiangsu, P. R. China; 3. Jiangsu Shengtai Construction Engineering Co., Ltd., Lianyungang 222042, Jiangsu P. R. China)

Abstract: To limit the settlement of double-layered soft ground formed by the dredging blow filled soft soil and the natural deposited soft soil, precast square pile and deep mixing column with expanded head are combined to improve the ground. A field test was carried out in Lianyungang port railway project. The ground settlement, differential settlement between pile and soil, layered soil settlement, deep horizontal displacement, pore water pressure and loading ratios between pile, soil and column were studied. The test results show that the column-soil stress ratio of composite foundation increases with the external loadings. The foundation deformation occurs in the filling stage, and the settlement in the preloading period

收稿日期: 2017-10-09

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0800200)。

作者简介: 杨鹏(1992-), 男, 主要从事地基处理研究, E-mail: 220152470@seu.edu.cn。

章定文(通信作者), 男, 教授, 博士, E-mail: zhangdw@seu.edu.cn。

Received: 2017-10-09

Foundation item: National Key Research and Development Program(No. 2016YFC0800201)

Author brief: Yang Peng(1992-), main research interest: foundation treatment, E-mail: 220152470@seu.edu.cn.
Zhang Dingwen(corresponding author), professor, PhD, E-mail: zhangdw@seu.edu.cn.

continues and tends to be stable. Filling load transfers to the precast square pile and T-shape deep mixing column by 56.2% and 20.4% of the total loadings, respectively, the replacement ratio and soil condition is the main influential factor for the proportion of loadings.

Keywords: soft ground; rigid and flexible piles; foundation deformation; stress ratio; load sharing

沿海地区为解决土地资源紧缺的问题,常采用吹填淤泥填海造陆,尤其在港口扩建工程中应用较多^[1]。其填海造陆所用的吹填土一般采用港池和航道的疏浚淤泥,强度及承载力极低,需采用真空预压法进行初步处理,形成人工硬壳层,以满足后续二次处理施工设备的承载力要求^[2]。在原有软土地基上吹填淤泥造地形成的双层软弱地基的二次处理是工程中面临的挑战之一。

对于这种由吹填形成的深厚双层软土地基以往常采用真空预压法或者深层搅拌桩处理,效果往往不太理想,工后沉降较大,当搅拌桩无法穿透软土层时还会造成工程事故^[3-5]。刚柔性桩是在刚性桩基础上用柔性桩改良桩间土后形成的一种新的复合地基形式,已成功应用于建筑地基处理^[6-9]。鉴于该复合地基在控制沉降方面的显著优势,工程中正尝试将其应用于高速公路、高速铁路等路基下深厚软土的加固处理,现有研究主要是采用模型试验^[10]和数值模拟^[11-13]方法分析垫层、刚性桩、柔性桩及桩间土等性质对刚柔性桩复合地基桩土荷载分担及荷载传递的影响规律,得到一些有价值的研究结论,但缺少现场试验验证。目前,关于路堤荷载下刚柔性桩复合地基现场试验研究较少,特别是针对 35 m 以上的深厚软土地基,现有现场试验研究^[14-17]处理深度大多在 20 m 以上。

因此,以连云港港某铁路路基工程为依托,对于深厚软弱地基,为同时满足地基承载力和控制变形的要求,在预制方桩复合地基的基础上,采用钉型粉喷桩加固上部软弱桩间土,形成预制方桩+钉型粉喷桩复合地基。预制方桩打入地基持力层,进而控制地基变形量。预制方桩顶部设置的钢筋混凝土承

台可以调整桩土荷载分担比,充分发挥预制方桩的高承载力性能。与常规水泥土粉喷桩相比钉型粉喷桩,能够充分利用土中应力传递规律,增强土体上部复合地基强度,大大提高单桩承载力,同时还能提高上部桩体置换率,增大桩间距,节省工程造价。

1 工程概况

试验场地位于连云港港陇海铁路起点站连云港站以东 4.5 km 处,该路基设计等级为专用线 IV 级,整体道床段落要求地基承载力不小于 120 kPa,工后沉降不大于 2 cm。该区域原滩面标高 -2.5 ~ -4.9 m,现地面标高为 5.6 ~ 7.0 m,吹填土层厚度为 9.5 m。吹填土层下为天然沉积淤泥层,其底面标高 -33.0 ~ -21.9 m,厚度为 28.1 m。淤泥层以下为粉质黏土层、黏土层,如图 1 所示。地下水位约为 0.3 m。具体土层参数如表 1 所示。

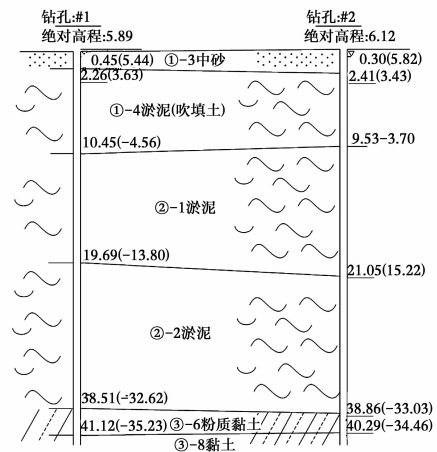


图 1 地基剖面图(单位:m)

Fig. 1 Soil profile

表 1 土层物理力学性质参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

层号	层名	层厚/m	天然密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	压缩模量/ MPa	液性指数	孔隙比	含水率/%	液限/%
①-3	中砂	2.4						
①-4	淤泥(吹填土)	7.1	1.68	1.91	1.33	1.578	56.9	49.2
②-1	淤泥	10.5	1.61	1.58	1.03	1.784	63.6	55.8
②-2	淤泥	17.6	1.58	1.75	1.14	1.969	70.9	66.2
③-6	粉质黏土	2.8	1.91	5.85	0.91	0.861	30.5	31.5
③-8	黏土	6.7	1.74	4.85	0.73	1.347	49.4	57.5

2 地基处理设计与现场监测方案

2.1 加固方案

采用刚柔性桩复合地基处理双层软土地基,其中刚性桩采用预制预应力混凝土薄壁方桩(以下简称预制方桩),柔性桩采用钉型水泥土双向搅拌粉喷桩(以下简称钉型粉喷桩)。复合地基桩位平面布置如图 2 所示,刚性桩呈正方形布置,中间隔排设置钉型粉喷桩,坡脚布置两排钉型水泥土双向搅拌桩。预制方桩桩间距为 3.4 m,桩体横截面尺寸为 45 cm×45 cm,内径为 25 cm,混凝土强度等级 C80,桩长要求打入持力层 1 m。预制方桩顶部现浇尺寸为 160 cm×160 cm×40 cm 的钢筋混凝土桩帽,混凝土等级为 C30。钉型粉喷桩桩长 15 m,上部扩大头桩径 0.9 m,高 4 m,下部桩径 0.5 m,桩长 11 m。钉型粉喷桩采用 C45 矿渣水泥,水泥掺入量(土体中掺入的水泥重量与被加固软土干重度的比值)为 15%。桩帽上铺设 50 cm 碎石垫层,夹铺一层双向高强经编聚酯土工格栅。

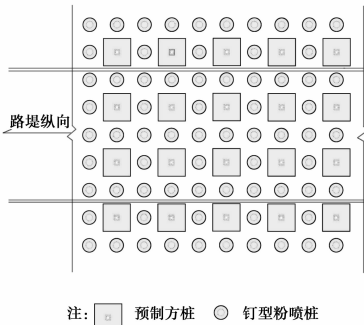
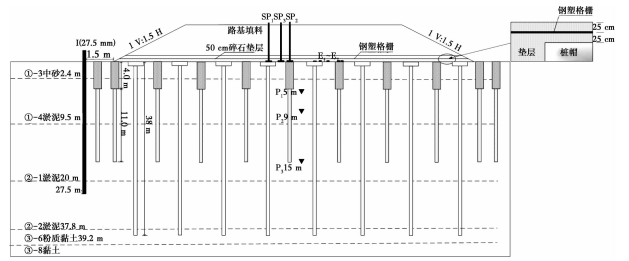


图 2 复合地基桩位平面布置图

Fig. 2 Layout of piles and columns

2.2 监测方案

图 3 为试验段监测传感器布置剖面示意图,SP (SP₁~SP₃) 为沉降板、E(E₁~E₇) 为土压力盒、P(P₁~P₃) 为孔隙水压力计、I 为测斜管。沉降板监测预制方桩桩顶、钉型粉喷桩桩顶及桩间土表面沉降。土压力盒用来监测预制方桩、钉型粉喷桩和桩间土的桩土荷载分担。地表下 5、9、15 m 处埋设孔压计监测地基土中超静孔隙水压力的消散规律。另外,在路堤坡脚外 1.5 m 处埋设测斜管,量测土体深部侧向位移。图 4 为土压力盒平面布置图,该试验段共埋设 7 个土压力盒,其中预制方桩帽中心 1 个(E₁)、桩帽边缘 2 个(E₂、E₃),双向粉喷桩桩中心 1 个(E₅),双向粉喷桩边缘 1 个(E₆),桩间土 2 个(E₄、E₇)。



注: 1 沉降板(SP) 土压力盒(E) 孔隙水压力计(P) 1 测斜管(I)

图 3 监测点布置示意图

Fig. 3 Arrangements of monitoring transducers

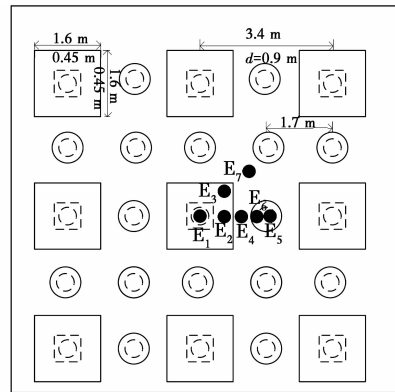


图 4 土压力盒布置平面示意图

Fig. 4 Layout of earth pressure cells

3 监测结果分析

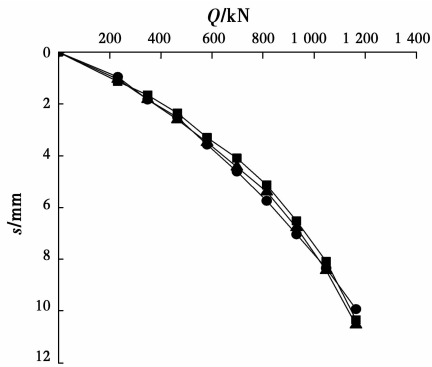
3.1 静载试验下地基承载力

预制方桩和钉型粉喷桩的单桩及单桩复合地基承载力静载荷试验测试结果见表 2。图 5 和图 6 分别为预制方桩单桩和钉型粉喷桩单桩载荷试验的 Q-s 曲线,图 7 为钉型粉喷桩单桩复合载荷试验的 p-s 曲线,从图中可以看出,当加载到两倍设计荷载时,曲线均没有出现明显的拐点,表明单桩(单桩复合)载荷试验达到设计要求,但尚未达到极限状态。为测试钉型粉喷桩复合地基在载荷试验中的桩土荷载分担,在其中一组荷载板下埋设土压力盒,其加载值为 345 kPa。荷载板下共布置 4 个土压力盒,其中钉型粉喷桩中心 1 个,桩边缘 1 个,桩间土 2 个。从图 8 可以看出,加载初期,桩顶和桩间土压力区别不大;随着外荷载的增加,更多的荷载向桩顶集中,桩土应力比也随之增加。将搅拌桩桩中心实测土压力与桩间土实测平均土压力的比值定义为 n₁,搅拌桩边缘处实测土压力与桩间土实测平均土压力的比值定义为 n₂,n₁ 和 n₂ 都随外荷载的增加而增加,且其差值随荷载增加而增大,最大荷载作用下(345 kPa),n₁ 为 6.7,n₂ 为 4.8。

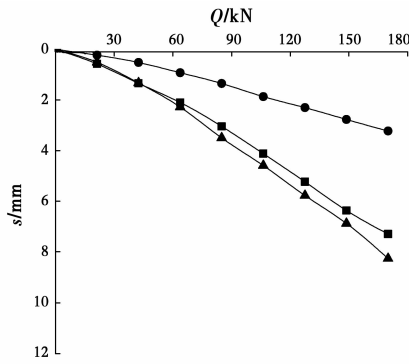
表 2 预制方桩与钉型粉喷桩承载力测试结果

Table 2 Bearing capacity test results of precast square piles and T-shape deep mixing columns

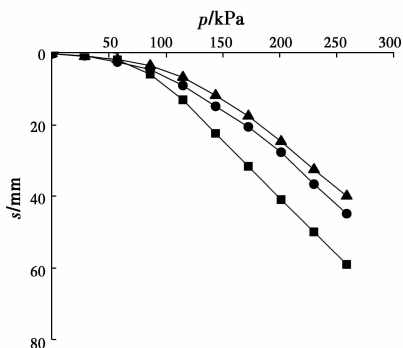
桩类型	测试桩数	桩长/m	载荷板尺寸	加载极限值	承载力特征值
预制方桩	3	38	0.45 m×0.45 m	>1 164 kN	582 kN
钉型粉喷桩(单桩)	3	15	$\Phi=0.9$ m	>170 kN	85 kN
钉型粉喷桩(单桩复合)	3	15	1.70 m×1.70 m	>258 kPa	179 kPa



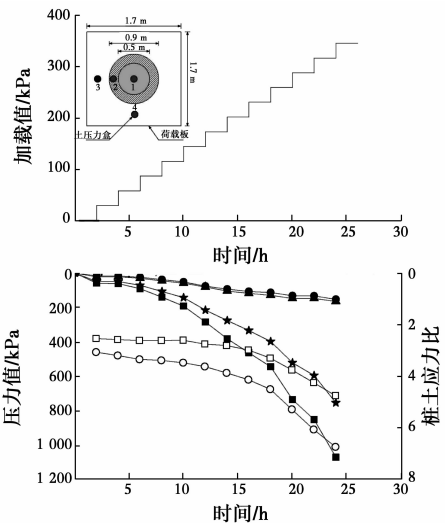
注: 桩编号 ■— 预制桩1 ●— 预制桩2 ▲— 预制桩3

图 5 预制方桩单桩载荷 $Q-s$ 曲线Fig. 5 $Q-s$ curves of precast square pile

注: 桩编号 ■— AA277 ●— AF120 ▲— EH126

图 6 钉型粉喷桩单桩载荷 $Q-s$ 曲线Fig. 6 $Q-s$ curves of T-shape deep mixing column

注: 桩编号 ■— 粉喷桩1 ●— 粉喷桩2 ▲— 粉喷桩3

图 7 钉型粉喷桩单桩复合地基载荷 $p-s$ 曲线Fig. 7 $p-s$ curves of T-shape deep mixing column composite foundation

注: ■— 桩中心1 *— 桩边缘2 ▲— 桩间土3 ●— 桩间土4
□— 桩中心/桩间土均值 ○— 桩边缘/桩间土均值

图 8 钉型粉喷桩桩土荷载分担和桩土应力比随荷载的变化

Fig. 8 Variation of column-soil load share and column-soil stress ratio

3.2 路堤荷载下地基变形监测

3.2.1 孔隙水压力 路堤荷载下地基土中超静孔隙水压力变化如图 9 所示。由图 9 可以看出,超静孔压与路堤填土荷载呈正相关,且填土过程中超静孔隙水压力变化规律基本一致,均是开始堆载时,超静孔压急剧增大,然后慢慢消散。100 d 后超静孔隙水压力消散了近 90%。地表下 5、9、15 m 的超静孔隙水压力最大值分别是 24.5、12、10.4 kPa。超静孔隙水压力增长受埋深影响,埋深越大,路堤荷载引起的超静孔隙水压力越小,主要与土体附加应力随深度减小有关。9 m 和 15 m 处超静孔隙水压力相差不大。填土开始时超静孔压值不为零,主要是刚柔性桩在施工过程由于挤土效应产生的超静孔隙水压力尚未完全消散所致。

3.2.2 地表沉降 图 10 为路堤中心处桩顶面和桩间土地表沉降随时间变化曲线。由图 10 可以看出,预制方桩桩顶沉降很小(不超过 10 mm);钉型粉喷桩的桩顶沉降在路堤荷载下迅速发展,约 30 d 后趋于稳定值(16 mm);桩间土地表沉降随时间的增

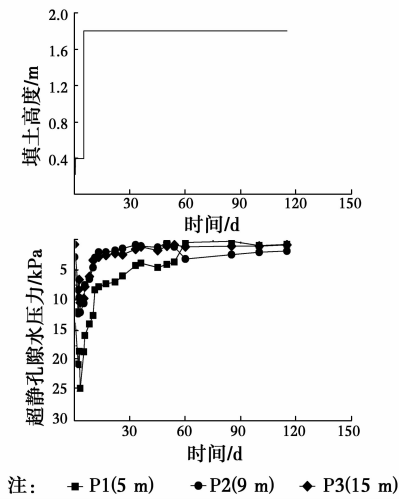


图 9 超静孔隙水压力变化

Fig. 9 Pore water pressure versus embankment filling

长而增长,约 60 d 后趋于稳定值(38 mm)。桩间土地表沉降远大于桩顶面沉降,桩间土与预制方桩的差异沉降为 35 mm,与钉型粉喷桩的差异沉降为 22 mm,两者的差异主要由桩体模量导致,钉型粉喷桩的桩体模量远远小于预制方桩。同时,桩土差异沉降导致路堤出现土拱效应,应力向桩端集中,但由于两者桩土差异沉降不同,使得桩顶应力集中程度不一样,这与后面桩土应力发展规律一致。

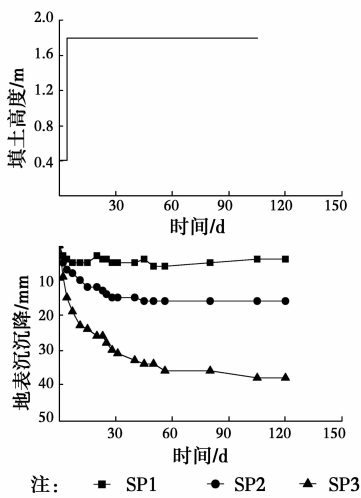


图 10 路堤中心处桩土沉降变化

Fig. 10 Settlement at embankment center versus embankment filling

3.2.3 土体深层水平位移 图 11 为坡脚 1.5 m 处深层水平位移变化曲线。由图 11 可看出,水平位移主要发生在填土阶段;在 0~5 m 深度内基本不变或略微增大,其最大水平位移为 9.5 mm。从该深度往下水平位移逐渐减小。路堤荷载下吹填软弱土层和天然地基软土层均发生了一定量的侧向位移,但最

大水平位移发生在浅层吹填土层中。

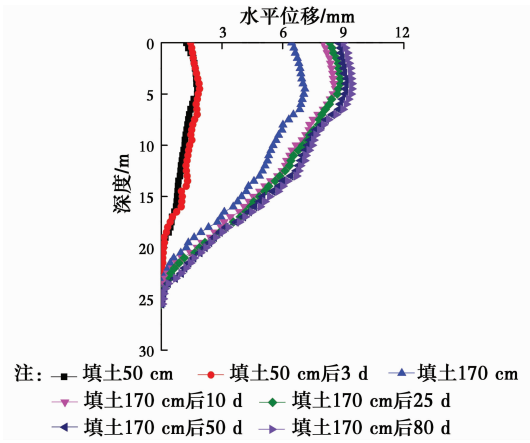


图 11 深层水平位移变化曲线

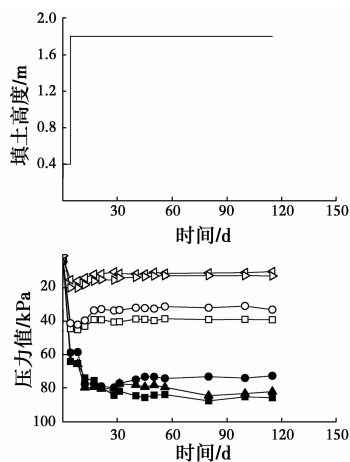
Fig. 11 Variation of lateral displacements

3.3 路堤荷载下桩顶及桩间土土压力监测

3.3.1 土压力及桩土应力比 图 12 为预制方桩、钉型粉喷桩及桩间土土压力监测结果,从图中可以看出:1)桩顶和桩间土土压力随填土高度增加而增大,填土结束后出现小幅度应力调整或转移,桩间土和钉型粉喷桩桩顶土压力略微减小,预制方桩桩顶土压力增加,后逐渐趋于稳定,这说明随着地基固结度的增加,原先由桩间土和钉型粉喷桩承担的荷载向预制方桩转移,荷载转移过程与桩土差异沉降发展过程一致;2)填土荷载向预制方桩桩帽集中,预制方桩桩帽上土压力平均值为 80 kPa,远远超过预压期内填土荷载值(32 kPa),桩间土土压力均值为 12 kPa,预制方桩桩帽上稳定桩土应力比为 6.2;3)钉型粉喷桩桩顶土压力平均值为 39 kPa,其桩土应力比为 2.5。预制方桩与钉型粉喷桩桩土应力比的差异主要由两者刚度差异所致。

3.3.2 桩土荷载分担 取一个单元体分析,单元体中心有一根预制方桩,周围布有 8 根钉型粉喷桩,如图 13 所示。填土荷载下(上部填料的重度按 19 kN/m³ 计算),一个单元内的土柱理论总重为 373.4 kN,实际测量值为 364.4 kN,误差为 2.4%,理论值和实际测量值接近,说明现场实测数据是可靠的。

由表 3 可以看出,预制方桩(带桩帽)的面积置换率为 22.2%,钉型粉喷桩面积置换率为 16.5%,路堤荷载下,复合地基中预制方桩(带桩帽)和钉型粉喷桩的荷载分担比分别为 56.2%和 20.4%,桩间土的受荷面积占总面积比例达 61.3%,但只承担了 23.4%的荷载。根据表 2 可知,预制方桩和钉型粉喷桩承载力分别为 1 164、170 kN,在填土荷载下,其实际最大承担荷载分别为 204.8、74.5 kN,分别占



注: ■ E1 ● E2 ▲ E3 ◻ E4 ◊ E5 ◄ E6 ▷ E7

图12 预制方桩桩帽、搅拌桩与桩间土土压力

Fig. 12 Earth pressure on pile cap, top of deep mixing column and soil

其承载能力的17.6%和43.8%。这说明预制方桩、钉型粉喷桩承载能力还远没充分发挥,具有较高的安全储备。

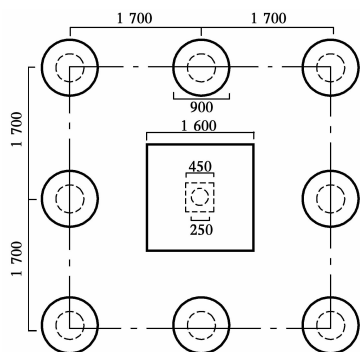


图13 单元体布桩图(单位:mm)

Fig. 13 Layout of piles and columns in a cell

表3 桩土荷载分担

Table 3 Load sharing on pile, column and soil

名称	受荷面积/m ²	占总面积比例/%	压力平均值/kPa	承担的荷载/kN	占总荷载的比例/%
预制方桩 (含桩帽)	2.56	22.2	80	204.8	56.2
钉型 粉喷桩	1.91	16.5	39	74.5	20.4
桩间土	7.09	61.3	12	85.1	23.4
合计	11.56	100.0		364.4	100.0

表4为根据文献[18](预制管桩+水泥土搅拌桩加固处理)计算的桩土荷载分担结果。文献[18]中桩间土承担的荷载比例(68.8%)远高于本研究中桩间土承担的荷载比例(23.4%),主要由于文献

[18]地基上部为土质较好的淤泥质亚黏土,采用桩的面积置换率较小(5.7%),而地基土条件(浅层吹填软土层,下层天然沉积软土层)较差,采用减小桩间距、增加预制方桩桩帽面积和采用大直径的变径桩来处理由吹填形成的双层软弱地基,以提高桩体面积置换率(22.2%),使桩体承担更多的荷载,降低作用在桩间土上荷载。现场实测沉降和侧向位移等结果也验证了这一方法的有效性。因此,对于这种由吹填软土层和天然沉积软土层形成的双层软弱地基,为了减小桩间土变形,需提高桩体的面积置换率,可采用减小桩间距和采用带有大桩帽的预制桩或带有扩大头的水泥土搅拌桩进行加固处理。

表4 桩土荷载分担^[18]

Table 4 Load sharing on pile, column and soil^[18]

名称	受荷面积/m ²	占总面积比例/%	土压力平均值/kPa	承担的荷载/kN	占总荷载的比例/%
预制方桩 (含桩帽)	1.0	5.7	297.7	297.7	25.4
搅拌桩	0.59	3.3	115.1	67.8	5.8
桩间土	16.05	91.0	50.3	807.4	68.8
合计	17.64	100.0		1172.7	100.0

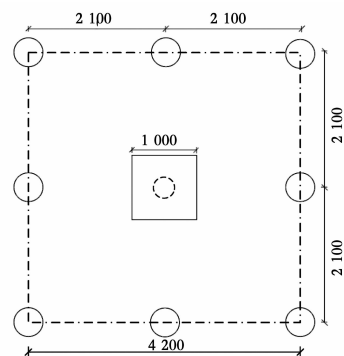


图14 预制桩和常规搅拌桩布置图^[18](单位:mm)

Fig. 14 Layout of piles and cement-soil columns^[18]

4 结论

对由吹填软土层和天然沉积软土层形成的深厚双层软弱地基,采用带大桩帽的预制方桩和带有扩大头的水泥土搅拌桩进行加固处理,基于现场试验结果,得到以下几点结论:

1) 钉型水泥土双向搅拌桩单桩及单桩复合地基以及预制方桩单桩承载力均满足设计要求;复合地基荷载试验中桩土应力比随着外荷载的增大而增大,桩顶荷载分布不均匀,桩中心实测压力值大于桩

外缘部分实测压力值。

2) 预制方桩、搅拌桩和桩间土三者刚度差异导致填土荷载向预制方桩桩帽及搅拌桩桩顶集中, 预制桩帽上的桩土应力比为 6.2, 搅拌桩上的桩土应力比为 2.5; 预制方桩桩帽的面积置换率为 22.2%, 承担着 56.2% 的荷载, 钉型粉喷桩的面积置换率为 16.5%, 承担了 20.4% 的荷载。此时, 预制方桩的承载能力只发挥不到 18%, 搅拌桩的承载能力也只发挥了 44%, 还可以通过优化设计使预制管桩承担更多的荷载。

3) 桩土荷载分担取决于桩体面积置换率和土质条件等, 桩体面积置换率越高, 桩顶荷载分担越大; 土质条件越差, 桩间土荷载分担越小。

4) 对于由吹填软土层和天然沉积软土层形成的双层软弱地基, 减小桩间距、增大预制方桩的桩帽面积和采用大直径的变径搅拌桩是提高桩体荷载分担比、减小软土层变形的有效措施。

参考文献:

- [1] 董志良, 张功新, 周琦, 等. 天津滨海新区吹填造陆浅层超软土加固技术研发及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 1073-1080.
- DONG Z L, ZHANG G X, ZHOU Q, et al. Research and application of improvement technology of shallow ultra-soft soil formed by hydraulic reclamation in tianjinbinhai new area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (5): 1073-1080. (in Chinese)
- [2] 闫澍旺, 郭炳川, 孙立强, 等. 硬壳层在吹填土真空预压中的应用[J]. 岩石力学与工程报, 2013, 32(7): 1497-1503.
- YAN S W, GUO B C, SUN L Q, et al. Application of crust layer to vacuum preloading dredge fill [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1497-1503. (in Chinese)
- [3] 杨庆光, 刘杰, 张可能. 深厚软土中水泥土长短桩复合地基承载特性试验[J]. 中国公路学报, 2008, 21(3): 19-23.
- YANG Q G, LIU J, ZHANG K N. Bearing characteristic experiment of cement-soil long-short piles composite foundation in deep soft soil [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(3): 19-23. (in Chinese)
- [4] CAO W Z, ZHENG J J. Field test of a geogrid-reinforced and floating pile-supported embankment[J]. Geosynthetics International, 2016, 23(5): 1-14.
- [5] YOUNG I O, EUN C S. Reinforcement and arching effect of geogrid-reinforced and pile-supported embankment on marine soft ground [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2007, 25(2): 97-118.
- [6] 林志强, 黄伟达, 姜彦彬, 等. 长短桩复合地基工程事故原因分析与预防措施[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 185-191.
- LIN Z Q, HUANG W D, JIANG Y B, et al. Analysis and precautionary measures of engineering accidents of composite foundations with long and short pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 185-191. (in Chinese)
- [7] 葛忻声, 甄正. 高层建筑长短桩复合地基技术应用及理论探讨[J]. 太原理工大学学报, 2017, 48(3): 288-295.
- GE X S, ZHEN Z. Application and theoretical discussion of the long-short piles composite foundation in high-rise building [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2017, 48(3): 288-195. (in Chinese)
- [8] 周同和, 王非, 赵宏, 等. 多桩型刚性承台下刚性长短桩复合地基载荷试验分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 105-111.
- ZHOU T H, WANG F, ZHAO H, et al. Bearing capacity tests on multi-type pile composite foundation with rigid cap [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 105-111. (in Chinese)
- [9] 陆华, 高全臣, 周波, 等. 长短组合桩复合地基承载性状的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(1): 56-63.
- LU H, GAO Q C, ZHOU B, et al. Experimental research on bearing capacity of long-short pile composite foundation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(1): 56-63. (in Chinese)
- [10] 李善珍, 马学宁, 田兆斌. 高速铁路长短桩加固黄土地基模型试验研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(10): 78-84.
- LI S Z, MA X N, TIAN Z B. Experimental study on long-short piles reinforced loess foundation for high speed railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(10): 78-84. (in Chinese)
- [11] 李波, 黄茂松, 程岳, 等. 路堤荷载下长短桩组合型复合地基现场试验与数值模拟[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1): 9-14.
- LI B, HUANG M S, CHENG Y, et al. Field test and numerical analysis of composite foundation with long and short piles under embankment [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(1): 9-14. (in Chinese)

- [12] KOIZUMI K, HIRAI T, MMURAKAMI K, et al. Experimental and numerical studies of bending moment of steel sheet pile wall composed of long and short piles [J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser A1, 2016, 72(1): 1-20.
- [13] 焦国木, 刘恒. 刚柔性长短桩复合地基工程特性有限元分析 [J]. 路基工程, 2017, 2(1): 43-48.
JIAO G M, LIU H. Finite element analysis of engineering characteristics of composite foundation with rigid flexible and long-short piles [J]. Subgrade Engineering, 2017, 2(1): 43-48. (in Chinese)
- [14] ZHANG M F, YANG G H, WANG E Q. A new type of pile-long with cushion -short without cushion rigid pile[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 23(3): 803-808.
- [15] 左坤, 刘维正, 张瑞坤, 等. 路堤荷载下刚柔长短桩复合地基承载特性研究[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(3): 379-385.
ZUO K, LIU W Z, ZHANG R K, et al. Bearing behavior of composite foundation with rigid flexible and long short piles under embankment load [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(3): 379-385. (in Chinese)
- [16] BIPIN K G, DIPANJAN B. Analysis of laterally loaded short and long piles in multilayered heterogeneous elastic soil [J]. Soil and Foundations, 2017, 57(1): 92-110.
- [17] 马学宁, 李善珍, 田兆斌, 等. 长短桩复合地基变形及承载特性研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(3): 6-11.
MA X N, LI S Z, TIAN Z B, et al. Research on the deformation and bearing characteristics of composite foundation with long and short piles [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(3): 6-11. (in Chinese)
- [18] 娄炎, 何宁, 娄斌. 长短桩复合地基中的土拱效应及分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 77-80.
LOU Y, HE N, LOU B. Analysis of soil arching of composite foundation with long and short piles [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 33(1): 77-88. (in Chinese)

(编辑 胡玲)