

长板-短桩组合型复合地基固结特性试验

叶观宝^{1,2}, 陈 健^{1,2}, 邢皓枫^{1,2}, 黄茂松^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 长板-短桩组合型复合地基是由长塑料排水板与短水泥土搅拌桩组成的新型复合地基, 该工法不仅利用短桩提高浅部地基承载力, 而且通过长塑料排水板加快深部饱和软土的排水固结过程. 针对长板-短桩工法处理上海 A15 I 级公路深厚软基的固结特性, 开展了现场试验研究, 通过试验段不同位置和深度的超孔隙水压力、沉降变形以及桩土压力等参数随时间变化的观测与分析总结发现: 排水板的存在, 可以有效提高深厚软粘土的固结速率; 长板-短桩组合型复合地基通过排水固结快速地提高桩间土强度, 发挥桩间土承载作用; 长板-短桩工法利用施工期的预压完成了 80% 以上的固结沉降, 从而实现减小工后沉降的目的.

关键词: 复合地基; 长板-短桩工法; 孔隙水压力; 固结性状; 桩土应力比

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

In-situ Tests on Consolidation of Composite Foundation Composed of Short Cement-soil Piles and Long Plastic Drainage Plates

YE Guanbao^{1,2}, CHEN Jian^{1,2}, XING Haofeng^{1,2}, HUANG Maosong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Short cement-soil piles and long plastic drainage plates are used to form a new composite foundation, which is called as D-M method. It not only improves the bearing capacity of the upper soft soil through the short soil-cement piles, but also accelerates the consolidation process of the deep soft soil through the action of long plastic drainage plates. Field tests were carried out to research the consolidation characteristic of this composite foundation at A15 high way in Shanghai, and the test results such as the pore water pressure

curves, settlement curves and pile-soil stress ratio curves were analyzed and some conclusions were drawn. The rate of the consolidation of the deep soft clay is greatly accelerated due to the drainage of the prefabricated vertical drain. The D-M method improves the bearing capacity of the soft soil; and more than 80% consolidation settlement is finished during the construction period, which effectively reduces the residual settlement.

Key words: composite foundation; D-M method; pore water pressure; degree of consolidation; pile-soil stress ratio

长板-短桩工法(简称 D-M 工法)是采用长的塑料排水板(或砂井)与短的水泥土搅拌桩联合的新型地基处理方法. 该工法通过施打搅拌桩来提高地基土强度, 以解决路堤施工期和预压期的稳定性问题, 并部分消除软基沉降; 通过长塑料排水板来加速下部地基土的排水固结, 尽可能多地消除工后沉降. 该工法最大的特点就是形成了组合型复合地基, 把两种地基处理工法联合起来: 一方面在地表一定深度范围内, 利用水泥土搅拌桩与桩间土共同组成的复合地基, 提高浅层地基的承载力和地基复合模量, 并减小软土地基的总沉降量; 另一方面, 将塑料排水板打穿上部复合层, 插入深部软土层, 给固结层提供排水通道, 缩短排水路径, 有利于固结层和下部未加固层的排水固结在高速公路填土期, 由于复合层稳定性的提高, 理论上可以加快填土速率; 利用填土荷载, 在高速公路施工的固有填土期和预压期内, 完成大部分固结层和未加固层的固结沉降, 以满足工后沉降要求; 随着软土地基的排水固结, 地基土强度逐步提高, 地基稳定性得到保证^[1-3].

随着理论的发展和工程实践的普及, 复合地基固结特性的研究取得了极大的发展. 张忠苗等^[4]研

收稿日期: 2009-08-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50678130); 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA11Z117); 上海市重点学科建设项目资助项目(B308)

作者简介: 叶观宝(1964—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为岩土加固与原位测试技术. E-mail: yeguanbao@vip.citiz.net

究了复合地基沉降计算方法,发现柔性承台下复合地基桩体有向下刺入的趋势.徐超和叶观宝^[5-6]研究了水泥土搅拌桩有效桩长的问题,发现短水泥土搅拌桩可以向下刺入变形,减小桩土应力比,发挥桩间土作用.邢皓枫等^[7]研究了水泥土桩复合地基的固结特性,发现置换率提高将加快复合地基固结过程等.以上研究成果都是针对单一地基处理方法下的复合地基固结特性的研究,有关组合型复合地基固结的研究也取得了一些进展:章定文和刘松玉^[8-9]通过塑料排水板和土体竖向渗透系数等效为均质土体渗透系数方法研究了粉喷桩和排水板组成复合地基的固结特性,成果表明排水板的排水效应、粉喷桩的应力集中效应以及桩土间荷载转移形成的孔压梯度,三者均能加速地基的固结,减少工后沉降;长板短桩工法是近年来新兴工法,叶观宝和徐超^[1-3]通过有限元分析研究了长板-短桩组合型复合地基排水固结特性和强度增长规律,发现短桩的作用在于提高地基强度和稳定性,减少总沉降和侧向位移,排水板则能够加快地基固结速率,及时提高地基强度,控制工后沉降.

本次现场试验利用现场监测手段重点研究了路

堤荷载下组合型复合地基的超孔隙水压力、桩土沉降、桩土应力比等参数随附加荷载和时间变化的规律性以及该组合型复合地基的固结特性,为相关的工程实践提供了理论指导.

1 现场试验研究方案与实施

1.1 试验段工程概况

上海 A15(I 级公路)工程南汇段西起南汇区界,东至围场河,道路全长 27.8 km,设计道路宽度 39.5 m.拟建公路沿线需建箱涵 7 座,中小桥梁约 26 座,跨线桥 2 座,立交桥 9 座(包括浦东运河桥).

本次试验位于瓦横立交桥东桥台过渡段 K66 + 469.5~K66 + 489.45,试验段长 20 m,地面标高 4.35 m 左右,填土高度在 2.12~3.96 m.经勘察表明地基土下有 11~12 m 厚的淤泥质粘土(见表 1),为确保填土路基的稳定和安全,减少工后沉降和不均匀沉降,缩短工期,在瓦横立交桥东桥台过渡段采用长板-短桩工法进行地基处理.经加固处理后,复合地基承载力达到 120 kPa,工后沉降控制在 100 mm 以内.

表 1 地基土分布及其物理力学指标
Tab.1 Soil layers and their physic-mechanical parameters

土层名称	层厚/m	含水量/%	重度/(kN·m ⁻³)	孔隙比	渗透系数/(10 ⁻⁶ cm·s ⁻¹)	
					竖向 k_v	水平向 k_h
① ₁ 素填土	0.5~0.6	19.3	19.30	0.73		
② ₁ 褐黄色粉质粘土	1.0~1.7	28.4	18.90	0.83	0.371	1.710
② ₂ 灰黄色粉质粘土	0.0~0.5	34.7	18.20	0.96	0.433	6.670
③ ₁ 灰色淤泥质粉质粘土	3.0~3.5	39.6	17.70	1.10	0.212	0.277
③ ₂ 灰色砂质粉土夹粉质粘土	0.7~1.0	31.3	18.50	0.88	10.600	45.900
④ 灰色淤泥质粘土	9.0~12.5	49.5	16.80	1.39	0.306	0.864
⑤ ₁₋₁ 灰色粘土	5.5~6.5	40.2	17.60	1.14	0.340	0.447
⑥ 暗绿~草黄色粉质粘土	3.8~4.0	24.6	19.50	0.72	3.200	6.560
⑦ ₁ 草黄色砂质粉土	3.5~5.5	28.5	18.70	0.84		
⑦ ₂ 草黄色粉砂		25.4	18.90	0.76		

1.2 长板-短桩工法地基处理方案与施工

结合试验路段工程地质条件,依照设计要求,长板-短桩组合型复合地基处理方案为:

根据路基上部荷载和场地地质条件,本试验段采用 10 m 长水泥土桩和 20 m 长塑料排水板是比较合理和经济的试验方案,如图 1 所示.水泥土搅拌桩和塑料排水板均按梅花形布置,间距为 2.5 m.搅拌桩桩径为 700 cm,塑料排水板尺寸为 4 mm×100 mm.塑料排水板穿透软土层并为满足水平排水要求而露出地面 20 cm,其长度总长为 20.2 m.搅拌桩顶

设置 20 cm 的砂垫层,与塑料排水板形成了一个完整的排水系统,这有助于确保其排水效果.

1.3 填土期和预压期的现场监测与测试

试验段自 2008 年 9 月 28 日开始填土,于 2009 年 1 月 16 日达到设计填土高度,进入预压期.图 2 为试验段填土及预压历程.

路堤填筑之前,在现场设置了孔隙水压力计和土压力盒,并进行初读测量.在整个填土期和预压期,对试验路段孔压、桩土应力比和沉降变化进行观测,测点布置见图 1.根据长板和短桩的作用机理与

特点,在地基剖面上应可划分为:① 水泥土搅拌桩与塑料排水板复合的地层(简称复合层);② 塑料排水板处理的地层(简称固结层);③ 未加固处理的下卧软土层(简称未加固层).本次试验注重研究复合层和固结层的孔压变化,因此孔压计均埋设在这两个层内.

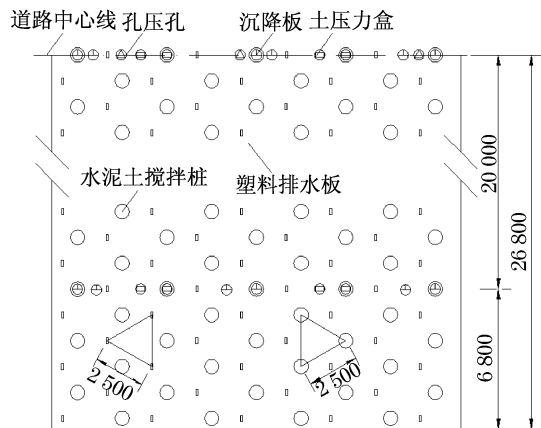


图 1 观测仪器布置简图(单位:mm)

Fig.1 Layout of the test instruments (unit:mm)

孔隙水压力计采用振弦式孔隙水压力计,本试验段共 12 只,布置在公路中心线上,分 3 个孔布置.孔压孔在水泥土搅拌桩和排水板施工养护后进行钻孔,每个孔中 4 只孔压计分别测量不同土层的孔隙水压力.上下两只孔压计之间用膨胀土球进行隔水处理,然后填砂,以确保测量数据的准确性.振弦式土压力盒分别布置在桩顶和桩间土体上以监测桩土的应力分担规律,共 6 组分两个断面布置.沉降板也同时布置在桩顶和土体表面,布置 9 组,分 3 个断面布置,监测路肩和路中心的沉降值.

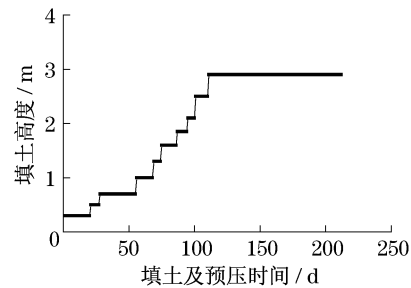


图 2 试验段填土及预压历程

Fig.2 Progress of embankment construction and preloading of experimental section

2 现场监测结果与分析

2.1 孔隙水压力的分析

图 3 为实测孔压随时间变化曲线.对比图 3 中 4 条曲线,可以看出每条曲线孔压随时间变化规律一致,且与填土施工进度基本相符,每次填筑荷载增加都会导致超孔压产生然后随时间延长而逐渐消散.从 117 d 开始快速填筑预压土,超孔隙水压力在短时间内迅速增大,121 d 时超孔隙水压力便达到峰值,而后超孔压逐渐消散.从曲线上可以看出施加每级荷载以后前三处深度孔压的消散曲线的斜率维持在 $-0.161 \sim -0.185 \text{ kPa} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间且变化趋势基本一致,也就是不同深度处孔压的消散速度是一样的,这是因为组合型复合地基中排水板的存在为复合层和固结层提供了固定的排水通道,超孔隙水主要通过径向渗透到排水板,20 m 处孔压消散曲线斜率为 $-0.112 \text{ kPa} \cdot \text{d}^{-1}$,较上部土体消散速率略小,这是因为塑料排水板在加快了深部未加固层的排水

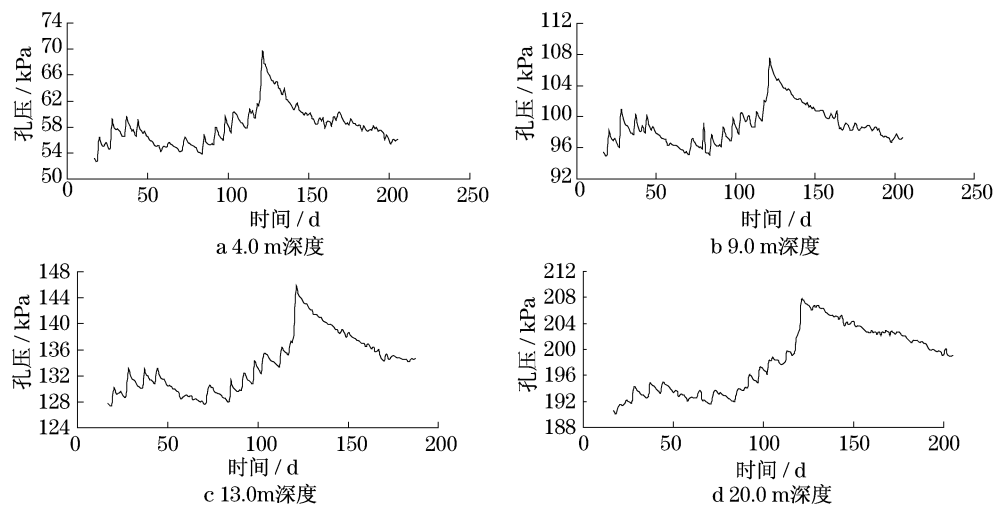


图 3 路堤下不同深度处孔压随时间变化的曲线

Fig.3 Variation curves of the pore water pressure at different depths underground

过程的同时,也略微受到竖向排水影响而固结速率较上部土体略减.总之,长板短桩对于加快深厚软粘土的固结是很有益的.

图4为不同时间超孔压随深度变化曲线,可以看出:地基土中深度越浅起始超孔压越大,这主要是上部附加荷载为局部荷载引起的.75 d和121 d曲线对比发现,由于荷载的增加,4个深度处超孔压的变化值分别为13.29,12.61,15.76和13.33 kPa,曲线基本呈平行移动,而超孔压消散值则随着深度增加而变小,与图3曲线趋势一致.

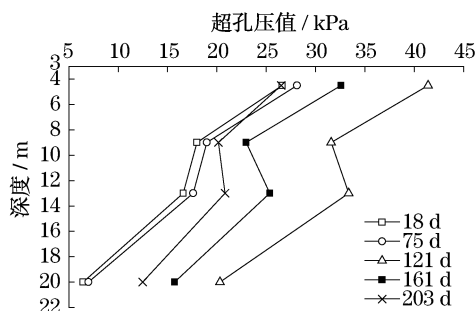


图4 路基竖向超孔压变化的曲线

Fig.4 Excess pore water pressure curve of vertical underground

2.2 桩土沉降分析

图5为桩顶和桩间土沉降随时间变化曲线,从图中可以看出:桩间土和水泥土搅拌桩的沉降变化是同步的,在每级填土初期沉降急速增大,荷载稳定以后沉降趋缓,在200 d以后桩土沉降都趋于稳定.从图中也可看出,其沉降差随时间不断增大,这是因为试验段的复合地基置换率较小(置换率 $m = 7\%$),桩间土承担了很大一部分荷载,因此其沉降较大,这与文献[3]研究成果一致.

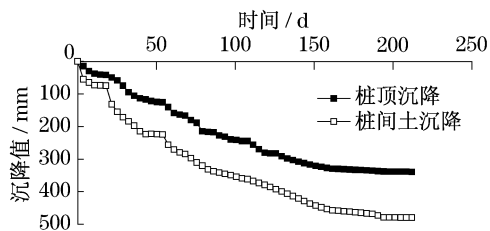


图5 复合地基桩土沉降对比曲线

Fig.5 Comparison figures for settlements of the piles and soils

2.3 桩土应力分析

图6为桩土应力比随时间变化曲线,从图中可以看出:随着路堤荷载的施加,桩土应力比总体是逐渐上升的,桩体发挥了增强的作用.当达到预压期稳

定以后,桩土应力比也稳定在一个固定值2.5左右,比常规复合地基刚性基础下的桩土应力比(3~5)要小,这是因为路基为柔性基础,且长板短桩组合型复合地基中水泥土搅拌桩的桩长较短,所以桩端可以向下刺入和沉降,有利于均匀桩土分担的应力,减小了桩头应力集中;而且排水板的存在可以使桩间土排水固结,提高桩间土强度,更好地发挥桩间土的作用;同时路堤荷载属于柔性荷载,并配合砂垫层的作用,可以均匀桩土分担的荷载.

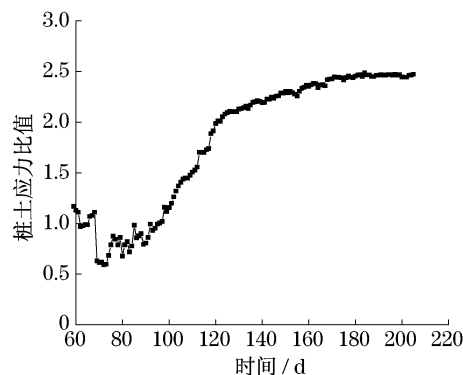


图6 路堤下桩土应力比曲线

Fig.6 Pile-soil stress ratio curve of composite foundation under embankment filling load

2.4 固结度分析

本文利用改进的高木俊介固结方程对121 d时实测数据进行计算得到的固结度与规范推荐的理论方法计算的固结度进行了对比分析,见表2.从表中可以看出,按孔压和沉降实测数据计算的固结度都比理论值要大,并且在填土施工期间地基的沉降就已经完成了80%以上,这是由于长板短桩将填土施工和预压期作为地基处理过程,利用填土荷载加速路基沉降,达到了减小工后沉降的目的.

表2 实测固结度与设计值的对比

Tab.2 Comparison between the consolidation degrees of in-situ test and its design value

深度/m	孔压曲线计算固结度	沉降曲线计算平均固结度	设计计算值
4.5	0.882 321	0.835 518	0.834
9.0	0.856 926		0.771
13.0	0.824 123		0.771
20.0	0.713 854		0.740

3 结论

(1) 本次试验得到的孔压实测曲线真实地反映

了长板短桩组合型复合地基的孔压消散规律和固结效果,不仅能够加快复合层的固结,同时也能保证固结层的固结速度,可以有效提高深厚软粘土路基的固结速率。

(2) 长板短桩组合型复合地基可以提高桩间土的强度,发挥桩间土的作用。同时短桩可以向下刺入变形,调整地基差异沉降。故长板-短桩工法可用于协调不同路段差异沉降。

(3) 从沉降曲线和孔压曲线中可以看出,在路堤施工期间完成了 80%以上的超孔压消散和固结沉降,而预压期间变化值较小,说明长板短桩组合型复合地基充分利用了施工期加速地基固结,达到减少工后沉降的目的。

参考文献:

- [1] 叶观宝,徐超,王艳.长板-短桩工法处理高速公路深厚软基的理论与方法[J].岩土工程师,2003,14(4):3.
YE Guanbao, XU Chao, WANG Yan. The theoretic and design method about combining cement deep mixing with prefabricated vertical drainage to treat deep soft foundation[J]. Geotechnical Engineer, 2003, 14(4): 3.
- [2] 周荣超,潘思建,叶观宝.高速公路长板-短桩工法复合地基的理论与方法研究[J].盐城工学院学报:自然科学版,2007,20(2):73.
ZHOU Rongchao, PAN Sijian, YE Guanbao. Study on the theory and method of D-M processing for expressway's composite foundation[J]. Journal of Yancheng Institute of Technology: Natural Science Edition, 2007, 20(2): 73.
- [3] 徐超,姜竹生,周启兆,等.路堤荷载下长板-短桩工法复合地基[J].同济大学学报:自然科学版,2006,34(12):1597.
XU Chao, JIANG Zhusheng, ZHOU Qizhao, et al. Cement mixing pile composite foundation combined with prefabricated vertical dran preloading under embankment [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(12): 1597.
- [4] 张忠苗,陈洪,吴慧明.柔性承台下复合地基应力和沉降计算研究[J].岩土力学,2004,25(3):451.
ZHANG Zhongmiao, CHEN Hong, WU Huiming. Research on stress and settlement of composite ground with soft base slab [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3): 451.
- [5] 徐超,叶观宝.水泥土搅拌桩复合地基的变形特性与承载力[J].岩土工程学报,2005,27(5):600.
XU Chao, YE Guanbao. Deformation and bearing capacity of composite foundation with cementsoil mixed piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 600.
- [6] 徐超,廖星樾,叶观宝.利用荷载试验研究水泥土搅拌桩的有效桩长[J].水文地质工程地质,2005,32(3):105.
XU Chao, LIAO Xingyue, YE Guanbao. Research on effective cement soil mixing pile length by load tests[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, 32(3): 105.
- [7] 邢皓枫,杨晓军,龚晓南.刚性基础下水泥土桩复合地基固结分析[J].浙江大学学报:工学版,2006,40(3):485.
XING Haofeng, YANG Xiaojun, GONG Xiaonan. Consolidation analysis of cementpile composite foundation under rigid foundation [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006, 40(3): 485.
- [8] 章定文,刘松玉.路堤荷载下 DJM-PVD 复合地基固结特性数值分析[J].东南大学学报:自然科学版,2008,38(5):829.
ZHANG Dingwen, LIU Songyu. Numerical analysis for performance of ground improved by DJM-PVD combined method [J]. Journal of Southeast University: Natural Science, 2008, 38(5): 829.
- [9] 刘松玉,杜广印,洪振舜,等.排水粉喷桩加固软土地基(2D 工法)的试验研究[J].岩土工程学报,2005,27(8):869.
LIU Songyu, DU Guangyin, HONG Zhenshun, et al. On combined method of dry mixing with vertical drain and its practice in soft ground improvement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 869.