

DOI: 10.11779/CJGE202103004

陀螺桩垫层加强袋装砂井排水地基现场试验

李国维^{1,2}, 余彦杰^{1,3}, 熊力^{1,4}, 吴建涛^{*1,2}, 曹雪山^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学道路与铁道工程研究所, 江苏 南京 210024;
3. 浙江省电力建设有限公司, 浙江 宁波 315000; 4. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 常规袋装砂井排水的软土地基要求缓慢加荷因而占用了较多工期不利于工后沉降控制。为加快袋装砂井排水地基的加荷速率开展陀螺桩垫层加强袋装砂井排水地基现场试验。研究表明: 陀螺桩垫层可以提高地基的整体稳定性, 在快速加荷导致软土孔压系数 \bar{B} 值大于 1 的条件下保持地基稳定; 陀螺桩垫层降低了地基浅部高压缩性土层的压缩量, 相对增大了软土层下无排水体土层的压缩量, 抑制软土侧向变形的发展, 降低工后沉降的速率; 陀螺桩垫层降低了压缩层中的孔压峰值, 使软土固结过程加快; 相对于砂垫层陀螺桩垫层具有更大刚度, 导致上部荷载在地基中产生的附加应力分布型式发生显著变化, 使得袋装砂井排水地基的综合性状得到加强。

关键词: 陀螺桩垫层; 袋装砂井; 工后沉降; 孔隙水压力; 数值模拟

中图分类号: TU441 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)03-0425-07

作者简介: 李国维(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事软基路堤变形和高边坡稳定性等方面的教学与科研工作。

E-mail: lgwnj@163.com。

Field tests on top-shaped concrete block cushion-reinforced soft soil foundation drained with sand bag well

LI Guo-wei^{1,2}, YU Yan-jie^{1,3}, XIONG Li^{1,4}, WU Jiang-tao^{1,2}, CAO Xue-shan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;
2. Highway and Railway Research Institute, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. Zhejiang Electric Power Construction Company, Ningbo 315000, China; 4. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: The soft soil foundation drained by the conventional sand bag wells requires slow loading, which occupies more construction period and is not conducive to post-construction settlement control. In order to accelerate the loading rate of the drainage foundation of sand bag wells, field tests on the top-shaped concrete blocks-reinforced drainage foundation of sand bag wells are conducted. The research shows that the top-shaped concrete blocks can improve the overall stability of the foundation, and keep the foundation stable under the condition that the rapid loading causes the value of the pore pressure coefficient \bar{B} of soft soil to be greater than 1. The top-shaped concrete blocks reduce the high-compressibility soil in the shallow part of the foundation. The compression of the layer relatively increases the compression of the undrained soil layer under the soft soil layer, inhibits the development of lateral deformation of the soft soil, and reduces the rate of post-construction settlement. The top-shaped concrete block layer reduces the pore pressure in the compression layer, and the peak value accelerates the consolidation process of soft soil. The top-shaped concrete blocks have greater rigidity than the sand cushions, resulting in a significant change in the type of additional stress distribution generated by the upper load in the foundation, leading to that the comprehensive behavior of the drainage sandbag ground is strengthened.

Key words: top-shaped concrete block cushion; sand bag well; post-construction settlement; porewater pressure; numerical simulation

0 引言

排水固结法处理软土地基是相对经济有效的方法之一, 一般是工期允许工况的首选方案。软土地基经过袋装砂井处理后, 相对于天然状态, 地层土的强度因扰动而降低导致地基整体稳定性下降, 地基总沉降

因土的天然结构扰动而有所增大。由此, 排水固结法处理的软基路堤填土高度和填筑速率均受到严格限

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272327)

收稿日期: 2020-06-15

*通信作者(E-mail: jiantao.wu@hhu.edu.cn)

表1 土层物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soil

地层名称	层厚/m	含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	孔隙比	液限/%	塑限/%	压缩系数/MPa ⁻¹	压缩模量/MPa	q_c /MPa	f_s /kPa	黏聚力 c_0 /kPa	内摩擦角 ϕ_0 /(°)
① 淤泥质土	3.7	55	1.56	1.7	58	41	1.25	2.15	0.22	6.0	8.4	11
② 淤泥质土	4.0	52	1.70	1.4	62	45	0.76	3.12	0.45	14.4	11.4	16
③ 淤泥质细砂	7.7	22	2.06	0.6	—	—	0.13	12.12	2.65	34.5	—	32
④ 粉质黏土	4.6	35	1.82	0.9	43	30	0.21	8.85	1.85	40.7	12.8	18

制,严重影响了排水固结法处理软土地基的适用范围。陀螺桩垫层,如图1,整体性好,单桩强度高,用于结构物基础具有良好效果^[1-3]。陀螺桩垫层用于大面积软土地基处理,鲜有案例报道。这种方法于1990年代在日本兴起,在地基表面铺设陀螺形的混凝土实体,通过筏式栅网连接,充填碎石或砂等透水材料^[4-6]。

本试验旨在研究陀螺桩垫层加强排水固结处理的软土地基的作用效果,据此发掘排水固结法加固软土地基的优势,由此拓展排水固结法的适用条件。



图1 铺设陀螺桩混凝土块

Fig. 1 Laying top-shaped concrete blocks

1 现场试验方案

1.1 地层物理力学性质

根据地质勘察报告及场地静力触探试验,工程现场地基土层及相应的物理力学性质指标如表1。

1.2 陀螺桩垫层方案

现场试验采用陀螺桩+袋装砂井+超载预压方案,设计参数列表2。陀螺桩施工次序:①铺设陀螺桩桩脚部分碎石;②铺设钢筋筏式栅网;③在开挖已压实的土基上钻出桩靴先导孔;④铺设500型陀螺桩混凝土块;⑤焊接上部筏式连接网,使各个桩块成为一体;⑥充填压实陀螺桩块之间的碎石。

表2 软土地基加固方案参数汇总表

Table 2 Parameters of soft soil foundation reinforcement program

加固措施	直径/mm	间距/m	深度位置/m	材料属性	布置方式
袋装砂井	70	1.3	10	聚丙烯编织布	正三角形
砂垫层	中粗砂	—	0.6	2.3×10^{-3} cm/d	等厚
陀螺桩	500	0.5	0.5	C30 砼	正方形
桩顶系筋	12	0.5	桩顶面	HRB400	正方形网格
桩身系筋	横筋 20 纵筋 14	0.5	桩顶下 0.25	HRB400	正方形网格

试验过程监测的指标包括地基总沉降、分层沉降、深层水平位移、土层内孔隙水压力,监测断面布置如图2,埋设的原位监测仪器和设施列入表3。

表3 原位试验方案汇总表

Table 3 Summary of test plan

序号	材料仪器	测点深度/m	仪器型号	量程	精度	测点土层
1	沉降计	8	CJ-1000	1000 mm	±0.1 mm	淤泥质粉质黏土
2	沉降计	18		mm	mm	黏土
3	孔压计	4	JMZ-X-	200 kPa	±0.1 kPa	淤泥质土
4	孔压计	6	55XXHAT	kPa	kPa	淤泥质土
5	测斜管	0~15	JMZ-X7000	偏离垂直±30°	±0.1 mm/m	淤泥质砂土粉质黏土

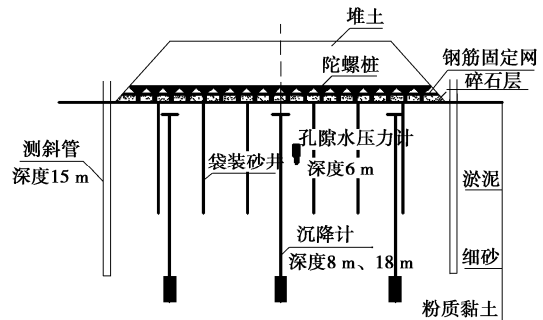


图2 仪器埋设布置图

Fig. 2 Layout of instrument embedment

2 现场试验结果及分析

2.1 地基分层沉降及固结特征

图3为现场试验沉降时间过程线,表4为沉降观测数据分析汇总表。图3显示,路中心沉降大于路肩沉降,填土完成后100 d即工期260 d时沉降趋于收敛趋势。表4显示,路中线地基0~18 m土层压缩362 mm,其中0~8 m压缩337 mm占93%,8~18 m压缩25 mm占7%。由此,地基沉降主要来自于0~8 m土层的压缩。

表1显示,地基0~8 m为淤泥质软土层①、②,

表4 沉降观测数据分析汇总表

Table 4 Analysis of observed data of settlement

观测时间/d	累计填土厚度/m	左路肩地基土 0~18 m		路中地基土 0~18 m		路中地基土 0~8 m	
		累计压缩量/mm	沉降速率/(mm·d ⁻¹)	累计压缩量/mm	沉降速率/(mm·d ⁻¹)	累计压缩量/mm	沉降速率/(mm·d ⁻¹)
0~23	0	0.5	0.02	0.2	0.01	0.2	0.01
24~42	0.5	1.4	0.05	6.9	0.38	31.0	1.71
43~62	2.5	78.9	4.07	105.0	5.16	116.3	4.27
63~81	3.0	112.9	1.88	153.7	2.70	178.6	3.46
82~145	3.5	135.9	0.37	182.9	0.46	200.4	0.34
146~163	4.5	149.4	0.79	198.3	0.91	219.6	1.13
164~260	5.5	243.6	0.98	362.2	1.71	337.7	1.23

为高压缩性土, 8 m 以下③、④层为中低压缩性土, 地基沉降主要缘于 0~8 m 范围高压缩性土层的压缩。

沉降中占比较大(55%)。由此, 陀螺桩垫层使地基软土下卧层压缩量在总沉降中占比较高, 由此导致地基工后沉降的较大部分发生在无排水体土层中, 工后沉降在较长的时段内缓慢发生, 这对于延长道路养护周期是有益的。

表5 地基沉降双曲线经验模型参数和固结度

Table 5 Parameters and consolidation degrees of hyperbolic empirical model for foundation settlement

测点位置/ 压缩层范围	双曲线模型参数		S _{i=168d} / mm	S _{i=260d} / mm	S _∞ / mm	U _{T=260d} / %	工后沉降 /mm
	α	β					
路基中/ 0~18 m	0.0993	0.0055	209	362	391	93	29
路基中/ 0~8 m	0.1070	0.0078	223	338	351	96	13
路基中/ 8~18 m	—	—	—	24	40	61	16

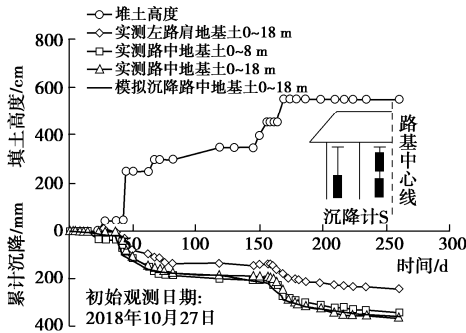


图3 地基沉降时间曲线
Fig. 3 Settlement-time curve of foundation

图4为依据实测沉降数据推测的后继沉降发展趋势。实测沉降时间过程符合双曲线规律, 拟合双曲线模型如式(1), 依据实测数据确定模型参数, 据此计算地基平均固结度, 计算结果列入表5。

$$S_t = S_0 + \frac{t - t_0}{\alpha + \beta(t - t_0)} \quad (1)$$

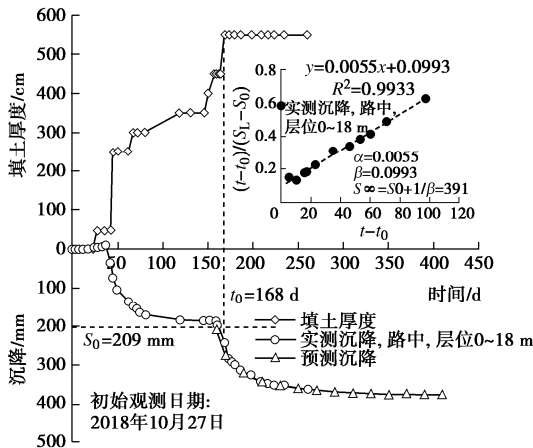


图4 双曲线法推算最终沉降量
Fig. 4 Hyperbolic method for calculating final settlement

表5显示, 地基0~18 m 地层总压缩 391 mm, 其中0~8 m 地层压缩量占 90% 平均固结度达到 96%, 8~18 m 土层压缩量占 10% 平均固结度为 61%。表1显示软土下卧层 8~18 m 土层含细砂较多, 为中低压缩性, 渗透性并不高, 仅 8~10 m 有竖向排水体, 故在施工期内土层固结度不高, 导致其后继压缩在工后

2.2 软土层超静孔隙水压力特征

图5为荷载附加应力引起的超静孔隙水压力时间过程, 以下简称孔压, 表6为孔压实测数据分析汇总表。表6数据显示, 第(2)次快速加荷后的孔压系数 \bar{B} 值为 0.73, 第(6)次快速加荷后的孔压系数 \bar{B} 值为 0.74, 处于正常值范围(饱和土 $\bar{B} < 1$), 第(5)次快速加荷后 \bar{B} 值为 1.09, 超过了正常值范围, 说明软土中孔压同时受到了竖向压力和周围压力增量的双重影响, 地基软土强度处于临界状态。这种情况下路基最终还能保持稳定且达到沉降收敛, 说明陀螺桩垫层增强的袋装砂井排水软土地基的稳定安全性得到较大提高, 孔压系数 \bar{B} 值的安全范围应给予适当调整, 本案例显示该值在 1 左右地基是有安全储备的。

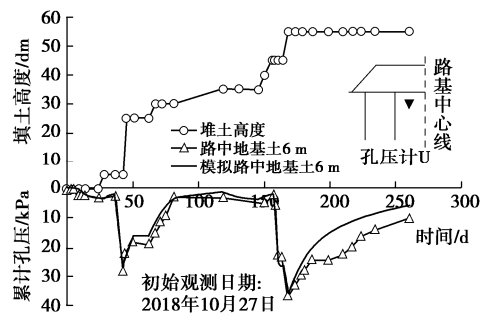


图5 路基中深度 6 m 处实测孔压时间曲线
Fig. 5 Curve of measured pore pressure at a depth of 6 m in roadbed

表 6 超静孔隙水压力观测数据分析汇总表

Table 6 Analysis of observed data of excess-static pore water pressure

观测时间 /d	填土高度/m	荷载增量 $\Delta\sigma_3$ /kPa	孔压 u /kPa	Δu /kPa	$\bar{B} = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_1}$	速率/(kPa·d ⁻¹)	荷载	孔压
(1) 0~42	0.5	8.75	2.3	2.3	0.26	0.21	0.05	
(2) 43~62	2.5	35.0	27.9	25.6	0.73	1.84	1.34	
(3) 63~81	3.0	8.75	18.5	-9.4	-1.07	0.49	-0.52	
(4) 82~145	3.5	8.75	4.3	-14.2	-1.62	0.14	-0.23	
(5) 146~163	4.5	17.5	23.4	19.1	1.09	1.02	1.12	
(6) 164~168	5.5	17.5	36.4	13.0	0.74	4.38	3.25	
(7) 168~260	5.5	0	9.6	-26.8	—	0.00	-0.29	

2.3 地基深层水平位移分布特征

图 6 为深层水平位移分布的发展过程。图 6 显示，路基坡脚处地表未发生明显的向路基外侧的水平位移，后期发生的向内侧的位移缘于路基中部沉降大于坡脚处引起的测斜管倾斜，路基填土体稳定性良好。地基土深层水平位移主要发生在 0~8 m 层淤泥土层中，与土层压缩的情况相类似，细砂层几乎没有水平位移发生。填土完成（168 d）以后，软土层水平位移还有所发展，说明软土层中的剪切变形在固结过程中也是存在的，软土剪切变形并非只发生在瞬时沉降阶段。这一现象和软土层的性状有关，软土层经过袋装砂井施工扰动后抗剪强度下降，更容易发生剪切变形。现场试验路基填土高度累计达到 5.5 m，大于天然地基的极限填土高度 4.7 m，但路基仍保持稳定。由此，陀螺桩垫层使地基表层整体性加强，地基整体稳定性得到提高，但软土层侧向蠕变在加荷完成后还有所发展。

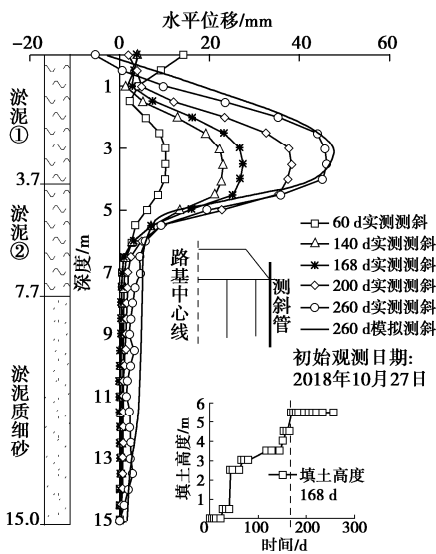


图 6 深层位移曲线

Fig. 6 Curve of deep displacement

综上，陀螺桩垫层地基中软土下卧层压缩量在总沉降中占比较大，无排水体土层的工后沉降占比较高，有益于道路养护周期延长；陀螺桩垫层使得袋装砂井排水地基的附加应力场与均质地基差别较大，实测软土的孔压系数 \bar{B} 值相对较大，本试验中 \bar{B} 值在 1 左右时地基是安全的；陀螺桩垫层使地基表层整体性加强，路基坡脚无明显水平位移，地基深层软土的侧向蠕变在加荷完成后还有所发展。

3 数值模拟结果及分析

3.1 数值模型

采用ABAQUS有限元软件，根据试验路段的断面尺寸，建立如图7所示的三维模型。计算中采用Mohr-Coulomb本构模型进行应力和变形分析。选用C3D8单元作为陀螺桩的单元，即空间8节点四面体且不考虑孔压的实体单元，选用C3D8P单元作为土体和砂井的单元，即空间8节点六面体且考虑孔压和固结的实体单元。

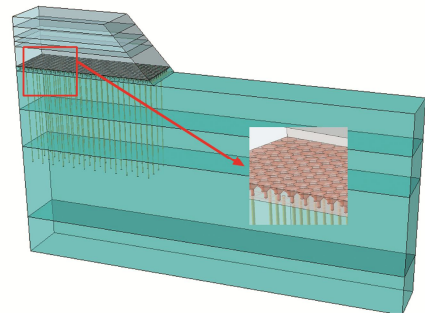


图 7 模型视图

Fig. 7 Model view

按工程实际情况等比还原陀螺块形状，如图 8，将其紧密排列。实际工程中陀螺桩下层有筏式格栅，上部有连接筋将陀螺砌块连成一个整体。模拟中采用线性部件模拟钢筋，并将钢筋使用绑定约束与陀螺桩块绑定在一起，使整个陀螺桩垫层成为一个整体。陀螺桩之间充填碎石，具有良好的排水能力和较大的弹性模量。

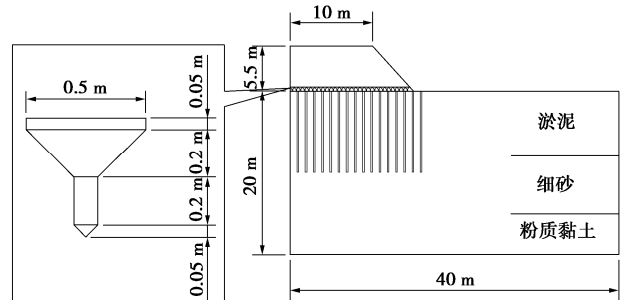


图 8 模型剖面图

Fig. 8 Model section

3.2 数值模型采用的材料参数

本数值模型使用的材料性质参数, 包括密度、弹性模量、泊松比、凝聚力和内摩擦角等。根据工程地质勘察报告和路基土体类别暂定材料性质参数指标值, 以此进行数值计算, 拟合现场试验监测的指标时间过程。修改暂定值, 使拟合程度达到最佳, 据此确定材料参数指标的等效值。

图 3 中包含数值模型的拟合沉降过程, 表 7 为沉降拟合误差情况。拟合曲线和实测曲线发展趋势一致, 最终沉降拟合误差小于 15 mm。

表 7 模拟与实测累计沉降量对比表

Table 7 Comparison of simulated and measured progressive Accumulated settlements

测点位置	0~145 d 累计沉降		0~260 d 累计沉降	
	/mm		/mm	
	实测值	模拟值	实测值	模拟值
路基中 0~8 m	182.9	197.8	337.7	332.5
路中 0~18 m	200.4	209.9	362.2	358.5
路肩 0~18 m	136.9	150.3	243.6	248.3

图 5 包含数值模型拟合的孔隙水压力时间过程, 表 8 为孔隙水压力拟合误差具体情况。模拟孔压与实测孔压的发展趋势总体一致, 峰值相近, 但模拟孔压消散更快, 原因可能在于试验现场加载过程中的局部或临时荷载的影响, 在数值模型中没有得到对应的反映。

表 8 模拟与实测最大孔隙水压力对比表

Table 8 Comparison between simulated and measured maximum pore water pressures

测点位置 /深度	0~145 d 最大孔压		145~260 d 最大孔压	
	/kPa		/kPa	
	模拟值	实测值	模拟值	实测值
路基中心/6 m	25.93	27.92	35.92	36.40

图 6 包含数值模型拟合的深层水平位移分布时间过程, 拟合曲线与实测曲线变化趋势总体一致, 侧向变形最大值对应的深度有一定差异, 拟合曲线为 2.9 m, 实测曲线为 3.5 m, 原因可能在于测斜管体相对于软土刚度过大而导致测斜管体和软土水平位移不协调, 由此可导致实测的软土侧向流动的体积偏小。

图 6 显示, 软土层以下相对硬土层中的实测水平位移小于模拟值, 原因可能在于附加应力分布形态差异, 现场实际附加应力衰减速率可能大于模拟计算值。

通过三维数值模拟和实测数据比较确定数值模型采用的材料参数, 基于沉降、孔隙水压力和深层水平拟合情况综合确定的地层等效力学参数如表 9。

3.3 陀螺桩垫层对沉降的影响

常规袋装砂井处理的软土地基采用砂垫层为水平向排水体, 陀螺桩垫层与砂垫层在刚度方面有显著差异, 采用陀螺桩垫层替代砂垫层产生的处理效果改善,

通过数值模拟方法加以比较分析。图 9 为两种垫层对应的软土路基沉降发展趋势, 表 10 为特征时刻的累计沉降量。

表 9 数值模型采用的等效力学参数

Table 9 Equivalent mechanical parameters used in numerical model

材料	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	E/MPa	ν	$k/(m \cdot d^{-1})$	$k/(cm \cdot s^{-1})$
填土	1.75	15.0	20	20.0	0.22	4.3×10^4	4.98×10^6
碎石	2.30	0.1	40	4.5	0.30	15	1.7×10^2
淤泥质土①	1.56	8.0	11	2.7	0.33	9.53×10^5	1.1×10^7
淤泥质土②	1.70	11.0	16	5.8	0.28	1.43×10^4	1.7×10^7
淤泥质细砂	1.80	0.1	32	12.2	0.25	4.32×10^2	5.0×10^5
粉质黏土	1.90	13.0	18	8.6	0.25	8.01×10^4	9.3×10^7
砂井	2.12	5.0	30	1.2	0.25	20	2.3×10^2
钢筋	7.80	—	—	2×10^5	0.31	—	—
陀螺桩	2.40	—	—	3×10^4	0.30	—	—

图 9 显示, 路中地基 0~18 m 土层压缩过程在两种垫层工况下变形趋势一致, 变形收敛的时间相近, 但陀螺桩垫层对应的地基沉降量远小于砂垫层, 不到后者的 60%, 如表 10, 说明陀螺桩垫层相对于砂垫层减小路基沉降的作用显著。

表 10 数据显示, 路中地基 0~8 m 土层压缩量陀螺桩垫层地基是砂垫层地基的 56%, 而 8~18 m 土层压缩量前者是后者的 140%, 由此说明陀螺桩地基降低了地基浅部高压缩性土层的压缩量, 而增大了软土下卧层的压缩量, 根本原因在于垫层刚度增大改变了附加应力的分布型式。

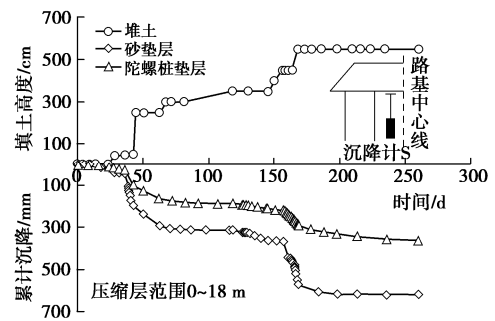


图 9 路中地基 0~18 m 土层模拟沉降时间过程

Fig. 9 Time histories of simulated settlement of soil layer of 0~18 m in foundation of road

表 10 累计沉降对比表

Table 10 Comparison of cumulative settlements

压缩层 范围	0~145 d 累计沉降/mm			0~260 d 累计沉降/mm		
	陀螺桩	砂垫层	S_a/S_b	陀螺桩	砂垫层	S_a/S_b
	S_a	S_b		S_a	S_b	
路基中 0~18 m	209.9	357.7	0.58	358.5	616.6	0.58
路基中 0~8 m	197.8	347.0	0.57	332.5	598.0	0.56
路基中 8~18 m	12.1	10.7	1.13	26.0	18.6	1.40

3.4 陀螺桩垫层对孔隙水压力的影响

图 10 为路中地基深度 6 m 处模拟孔压时间过程,

表 11 为模拟孔压的特征值。

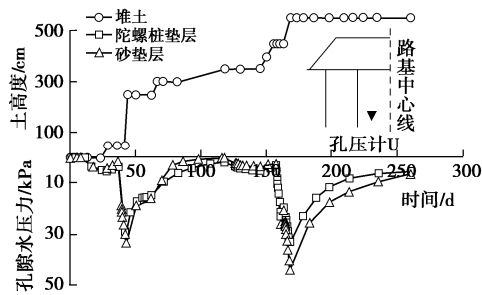


图 10 路中地基深度 6 m 处模拟孔压时间过程

Fig. 10 Time histories of simulated pore pressure at depth of 6 m

表 11 路中地基深度 6 m 处模拟孔压特征值

Table 11 Characteristic values of simulated pore pressure at depth of 6 m

模拟过程时段/d	荷载增量 $\Delta\sigma_1$ /kPa		陀螺桩孔压峰值 u_a /kPa		砂垫层孔压峰值 u_b /kPa		$\bar{B} = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_1}$	路基塑性区贯通状态	
	u_a	Δu_a	u_b	Δu_b	陀螺桩	砂垫层		陀螺桩	砂垫层
(2) 43~63	35.0	27.9	24.8	32.9	29.9	0.85	0.71	0.85	无
(5) 146~163	17.5	23.1	20.1	25.8	24.1	0.90	1.14	1.37	无
(6) 164~168	17.5	32.9	13.3	43.6	23.3	0.75	0.76	1.33	无

图 10 显示,两种垫层条件下模拟孔压时间过程趋势一致,陀螺桩垫层条件下孔压消散更快。表 11 显示,3 次较快加荷过程对应的孔压峰值,陀螺桩垫层约为砂垫层的 85%,对应的孔压系数 \bar{B} 值在两种垫层条件下均存在大于 1 的时刻,但砂垫层条件下路基稳定性处于临界状态。由此,陀螺桩垫层相对于砂垫层,使压缩区内软土层的孔压减小约 15%,软土固结过程加快,在孔压系数 \bar{B} 值大于 1 的条件下还能保持地基稳定。

3.5 陀螺桩垫层对地基侧向变形的影响

图 11 为路基坡脚处模拟地基深层水平位移分布时间过程,表 12 为水平位移分布特征值。图 11 显示,砂垫层地基侧向变形量大于陀螺桩垫层地基,且在地基浅层出现了向路基内侧的位移。砂垫层刚度小,路中基底沉降远大于坡脚处沉降引起基面倾斜,从而牵引地基浅层向路基内侧位移。陀螺桩垫层具有相对较大的刚度,因此只发生了较小的侧向变形,且未出现向路基内侧变形的现象。较大的侧向变形也会衍生出较大沉降,如表 12,也是导致砂垫层地基总沉降大于陀螺桩垫层地基的因素之一。由此,陀螺桩垫层相对于砂垫层,对于袋装砂井排水的软基浅层软土具有抑制软土侧向变形的作用,从而降低由此衍生的地基附加沉降。

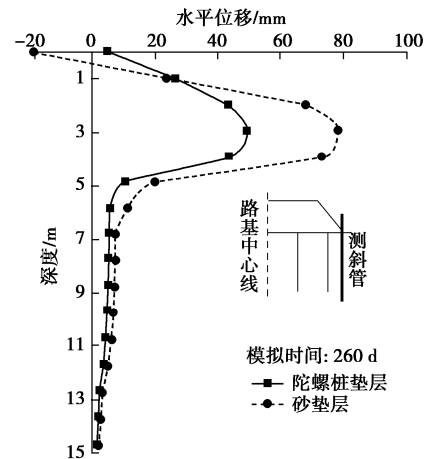


图 11 有无陀螺桩的路基边缘水平位移 - 深度的对比曲线
Fig. 11 Comparative curves of horizontal displacement-depth of subgrade edge with or without top-shaped concrete block pile

表 12 路基坡脚深层水平位移分布特征值

Table 12 Characteristic values of deep horizontal displacement distribution of subgrade slope foot

模拟加荷过程	匝道基底宽 /m	最大位移点深 /m	地基软土侧凸面积 /m ²			软土侧凸衍生沉降均值 /mm		
			陀螺桩 A_a	砂垫层 A_b	A_a/A_b	陀螺桩 D_a	砂垫层 D_b	D_a/D_b
0~145 d	30	2.9	0.105	0.169	0.62	3.5	5.6	0.62
145~260 d	30	2.9	0.398	0.628	0.63	13.3	20.9	0.63

4 结 论

(1) 陀螺桩垫层可以减小地基总沉降。相对于砂垫层条件,陀螺桩垫层降低了地基浅部高压缩性土层的压缩量,相对增大了软土下无排水体土层的压缩量,抑制软土侧向变形的发展从而减小由此产生的附加沉降,降低工后沉降的速率。

(2) 陀螺桩垫层可以加快地基固结过程。相对于砂垫层条件,陀螺桩垫层降低了压缩层中的孔压峰值,使软土固结过程加快。

(3) 陀螺桩垫层可以提高地基的稳定性。相对于砂垫层条件,陀螺桩垫层使地基的承载力提高,可在加荷产生的软土孔压系数 \bar{B} 值大于 1 的条件下保持地基稳定。

(4) 垫层刚度影响地基加固效果。相对于砂垫层陀螺桩垫层具有更大刚度,导致上部荷载在地基中产生的附加应力分布型式发生显著变化,使得袋装砂井排水地基的综合性状得到加强。

参考文献:

[1] SUSUMU Y, MOTOHIKO H, HIDEO N, et al. Effectiveness of top-shaped concrete blocks in preventing settlement of foundations in liquefied ground[J]. Soils and Foundations, 1994, 34(1): 65 - 76.

- [2] SUSUMU Y, KENJI I, KENJI H, et al. Effect of soil improvement on ground subsidence due to liquefaction[J]. *Soils and Foundations*, 1996, **36**(S0): 99 - 107.
- [3] 李平, 荒井克彦, 横倉幹雄. こま型基礎工法の支持力と沈下に関する現場載荷試験[J]. *応用力学論文集*, 2004(7): 543 - 552. (LI Ping, KATSUHIKO Arai, MIKIO Yokokura. Full-scale loading tests for bearing capacity and settlement of top base method[J]. *Papers on Applied Mechanics*, 2004(7): 543 - 552. (in Japanese))
- [4] 唐业清, 唐作华. 陀螺桩的原理及应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 1995(5): 55 - 56. (TANG Ye-qing, TANG Zuo-hua. The principle and application of gyro piles[J]. *Prospecting Engineering (Rock and Soil Drilling Engineering)*, 1995(5): 55 - 56. (in Chinese))
- [5] 孙兴松. 陀螺桩基础应力与沉降特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2007. (SUN Xing-song. Research on the Stress and Settlement Characteristics of Gyro Pile Foundation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese))
- [6] 严驰, 孙兴松, 孙训海, 等. 陀螺桩地基土体应力分布有限元分析[J]. *港工技术*, 2007(4): 43 - 45. (YAN Chi, SUN Xing-song, SUN Xun-hai, et al. Finite element analysis of the stress distribution of soil in gyro pile foundation[J]. *Port Engineering Technology*, 2007(4): 43 - 45. (in Chinese))
- [7] 于志强. 加密塑料排水板真空联合堆载预压法在天津港南疆港区的应用[J]. *港口工程*, 1996(2): 19 - 22. (YU Zhi-qiang. The application of vacuum combined stacking preloading method of encrypted plastic drainage board in South Xinjiang Port Area of Tianjin Port[J]. *Port Engineering*, 1996(2): 19 - 22. (in Chinese))
- [8] 刘吉福, 杨春林. 珠江三角洲地区竖向排水体施工扰动初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, **22**(1): 142 - 147. (LIU Ji-fu, YANG Chun-lin. Preliminary study on construction disturbance of vertical drainage in the Pearl River Delta[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, **22**(1): 142 - 147. (in Chinese))
- [9] 刘松玉, 朱志铎, 方磊, 等. 高速公路液化地基处理原则与方法[J]. *岩土工程学报*, 2001, **23**(2): 135 - 138, 182. (LIU Song-yu, ZHU Zhi-duo, FANG Lei, et al. Principles and methods for treatment of liquefied foundation of expressway[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, **23**(2): 135 - 138, 182. (in Chinese))
- [10] 中华人民共和国交通部文件.关于汕头至汾水公路(含潮州支线)初步设计的批复,交通部公路发(1997)888号[Z]. 北京:中华人民共和国交通部, 1997. (Documents of the Ministry of Communications of the People's Republic of China. Approval of the preliminary design of the Shantou-Fenshui Highway (including Chaozhou Branch), Ministry of Communications Highway No. (1997) 888[Z]. Beijing: Ministry of Communications of the People's Republic of China, 1997. (in Chinese))
- [11] 高晖. ABAQUS在软基固结过程分析中的应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006. (GAO Hui. Application of ABAQUS in the Analysis of the Consolidation Process of Soft Ground[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [12] 王扶志, 张心剑. 陀螺桩在近海岸沙土基础中的应用[J]. *西部探矿工程*, 2004(5): 176 - 177. (WANG Fu-zhi, ZHANG Xin-jian. Application of gyro piles in sand foundation near the coast[J]. *Western Prospecting Engineering*, 2004(5): 176 - 177. (in Chinese))
- [13] 蒋建清, 曹国辉, 刘热强. 排水板和砂井联合堆载预压加固海相软土地基的工作性状的现场试验[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(增刊 2): 551 - 558. (JIANG Jian-qing, CAO Guo-hui, LIU Re-qiang. Field test of the working behavior of the combination of drainage plates and sand wells combined with preloading to strengthen marine soft ground[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(S2): 551 - 558. (in Chinese))
- [14] 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 2012. (Technical Specifications for Building Foundation Treatment: JGJ 79—2012[S]. 2012. (in Chinese))
- [15] 曹杰, 郑建国, 刘智, 等. 真空预压法处理软土地基的工程应用[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(增刊 2): 124 - 127. (CAO Jie, ZHENG Jian-guo, LIU Zhi, et al. Engineering application of vacuum preloading method to treat soft soil foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(S2): 124 - 127. (in Chinese))