

DOI: 10.11779/CJGE20230277

支盘桩加固既有填砂路基深层软土的模型试验研究

李国维^{1,2}, 赵星宇¹, 张黎明³, 周洋⁴, 熊力¹, 赫新荣¹

(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. 广东省路桥建设发展有限公司, 广东 广州 510660; 4. 河南工业大学土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 高速公路改扩建中既有填砂路基深层软土加固时存在路面结构层和施工场地空间限制的问题。首先, 提出使用单盘挤扩支盘桩方案进行地基处理, 通过挤扩法成盘于桩顶, 以期实现不破除路面结构层的情况下达到设置桩顶承台或托板的效果。其次, 利用群桩地基物理模型试验模拟一个桩土单元体研究加固方案的承载过程, 通过分析桩体、盘体和土体的力学及变形指标研究支盘桩加固既有填砂路堤的承载表现和土体变形特征, 最后, 考虑土体参数和桩体尺寸推导了既有填砂路基深层软土支盘桩加固方法的二维简化模型。研究结果表明, 软土在恒载下桩体轴力和土压力随时间变化调整, 原因在于软土的压缩性和砂土的散粒体属性; 桩顶轴力总和与恒载大小近似线性正相关, 同时支盘直径越大桩顶轴力总和越大、桩承载占比越高, 试验发现支盘桩加固法的桩承载占比约 70%。另外, 利用所建二维简化模型进行参数分析发现填砂路基中的最小盘间净距与上覆荷载、填砂内摩擦角、深层软土强度指标和支盘桩几何参数相关。

关键词: 高速公路; 改扩建; 既有填砂路基; 支盘桩; 模型试验

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)08-1768-08

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。

Model tests on deep soft ground improvement of existing sand-filled subgrade with squeezed branch piles

LI Guowei^{1,2}, ZHAO Xingyu¹, ZHANG Liming³, ZHOU Yang⁴, XIONG Li¹, HE Xinrong¹

(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. Guangdong Road and Bridge Construction

Development Co., Ltd., Guangzhou 510660, China; 4. Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: There are limitations from the pavement structure layer and construction site space during the deep soft soil reinforcement of the existing sand-filled subgrade in expansion of expressways. Firstly, a new method using the squeezed branch pile (SBP) with one single plate for treatment of the existing soft foundation is proposed. In this method, a plate is set on the top of the piler to achieve the effects similar to a pile cap or support plate without breaking the road structure layer. Secondly, a physical model test on the pile group foundation is performed, and a pile-soil unit is simulated to study the bearing behavior of the SBP. By analyzing the mechanical and deformation indices of the pile, plate and soil, the bearing performance and soil-deformation characteristics of the new reinforcement method are studied. Finally, a simplified two-dimensional model for the reinforcement method with SBPs for the existing sand-filled embankment is derived by considering the soil parameters and pile sizes. The results indicate that the axial force of piles and soil pressure vary with time under constant loads due to the compressibility of soft soil and the properties of loose sand. The total axial force at the top of the pile is approximately positively correlated with the magnitude of the constant loads linearly. At the same time, the larger the diameter of the support plate, the greater the total axial force at the top of the pile and the higher the proportion of pile-bearing loads. It is found that the pile-bearing ratio of the reinforcement method with SBPs is about 70%. In addition, the proposed two-dimensional simplified model for parameter analysis shows that the minimum pile spacing in the sand-filled subgrade is related to the overlying load, internal friction angle of sand-filled soil, strength index of deep soft soil and geometric parameters of support piles.

Key words: expressway; expansion; existing sand-filled subgrade; squeezed branch pile; model test

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42177126)

收稿日期: 2023-04-03

*通信作者 (E-mail: robertzhouy@haut.edu.cn)

表 1 模型试验用土性状指标
Table 1 Parameters of soils

土类	w/%	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	G_s	$w_L/\%$	I_p	C_c	$C_v/(10^{-4}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	C_q/kPa	$\phi_q/(^\circ)$	粒组含量/%	
										<0.075	<0.5
天然软土	53.6	16.5	2.65	44	20	1.12	2.30	10	8	54	94
干散砂	—	15.5	2.62	—	—	—	—	0	20	0	99.1

0 引 言

既有高速公路改扩建是广东省珠三角地区交通工程的热点问题^[1], 其中新老路基差异沉降问题因其严重影响道路使用性能而被格外关注^[2], 深厚软土地基上高速公路既有填砂路基扩建的工况条件相对更为复杂, 其差异沉降的控制难度也大大增加。

对于深厚软土地基上的高速公路运行期沉降持续发展的路段, 既有路基下的深层软土加固受到更多条件限制, 包括工期、施工安全控制、路面结构层利用等因素。受工期限制, 扩建路基软土加固通常采用刚性桩方案, 仅有较小的工后沉降, 由此规定了既有路基深层软土加固后的沉降标准, 使得刚性桩成为首选方案^[3]。

高强度预应力管桩 (PHC) 和水泥粉煤灰碎石桩 (CFG) 用于桩帽—地梁复合地基方案, 加固既有路基深层软土均可以满足沉降控制标准, 但须大面积破除路面结构层, 会大大降低既有结构层的利用价值和产生建筑垃圾^[4-6]。由此, 大间距、无桩帽、无地梁成为刚性桩方案加固既有路基深层软土的优化选项。

挤扩支盘桩 (简称支盘桩) 利用仿生原理, 模仿树根结构, 在传统直杆灌注桩施工时增加挤扩支盘工序, 从而形成变截面异形桩, 其具有任意位置成盘、单桩承载力大、桩身沉降变形小等优点^[7-14]。

针对中江高速公路改扩建工程既有填砂路基深层软土加固问题, 开展模型试验研究支盘桩加固既有填砂路基深层软土的机制, 反映桩顶设盘的承托作用, 揭示既有填砂路基中在成桩后的应力分布状态和变形规律, 为既有填砂路基深层软土加固选择大间距、无桩帽、无地梁的刚性桩方案, 提供理论和技术依据。

1 模型试验设计

1.1 试验用土

模型下层为软土, 上层为砂土。软土取自中江高速公路地基深层, 砂土基于中江高速公路既有路基填砂性状配制, 土层物理性指标见表 1。

1.2 模型结构

模型箱为正方柱体, 容积为长宽高 450 mm×450 mm×700 mm, 侧壁和底板为透明亚克力板, 边角衔接处以角铝加螺栓锁定且密封, 见图 1 (a), (b)。

加载系统为杠杆比 1 : 10 的刚架, 使用砝码分级加载, 模型试验装置的整体结构如图 1 (c)。

模型桩材质为 6061 铝合金, 有全桩、1/2 桩、1/4 桩, 桩长 350 mm, 支盘体高 40 mm, 尺寸如图 1 (d) 所示。模型桩正方形布置, 盘设置在桩顶, 如图 1 (a) 所示。

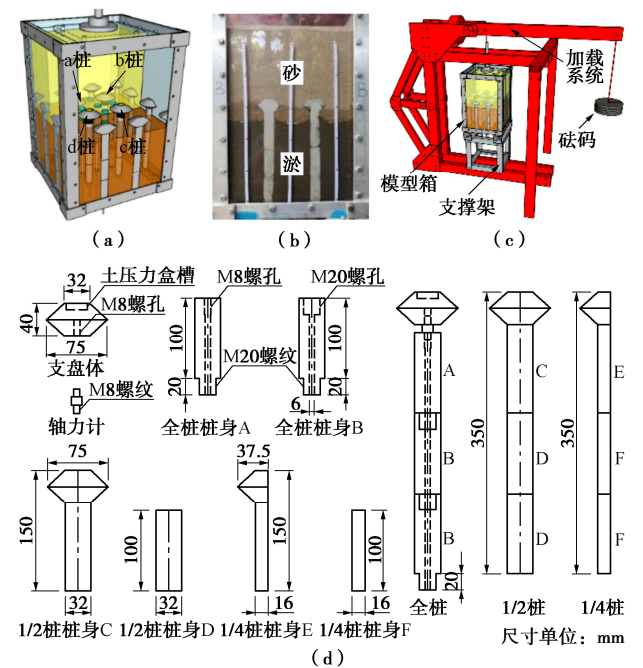


图 1 支盘桩试验模型

Fig. 1 Model tests on squeezed branch piles

1.3 测试指标及传感器参数

试验过程中测试多项指标, 包括桩体轴力、盘顶压力、盘面压力、桩间土压力、软土中孔隙水压力、模型顶板下沉量、软土层压缩量、软土含水率、密度、模型剖面土层各点位移矢量。试验使用传感器的相关信息列入表 2。模型箱内传感器的位置见图 2。

表 2 传感器参数

Table 2 Parameters of sensors

测量指标	传感器类型	量程	数量	量测频率
桩体轴力	轴力计	0~5 kN	4	1 次/min
盘顶压力	土压力计	0~500 kPa	4	1 次/min
盘面压力	土压力计	0~200 kPa	4	1 次/min
桩间土压力	土压力计	0~200 kPa	5	1 次/min
软土孔隙水压力	孔压计	0~100 kPa	1	1 次/min
模型顶板下沉量	百分表	0~15 mm	1	1 次/min
软土层压缩量	位移杆	0~10 cm	4	1 次/h
	位移片	0~10 cm	12	1 次/h
模型剖面土层各点位移矢量	PIV 设备	—	1	1 次/h

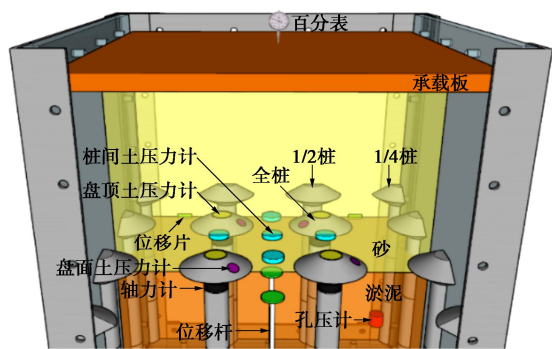


图 2 传感器安装示意图 (图 (1) 传感器)

Fig. 2 Installation of sensors

由于传感器制作时标定环境和试验使用条件不同,出厂标定系数不能直接使用。为得到试验过程各项指标更准确的变化过程,应模拟试验条件进行传感器标定^[15]。

盘顶和盘面土压力计采用界面模型标定,如图 3 (a),在容器中加入试验用砂,上覆厚度不同时测定压力和读数的关系。试验中桩间土压力计为圆饼形,直径 28 mm,厚度 5 mm,为消除介质不均引起的量测误差,传感器敏感面直径应大于土介质最大颗粒粒径的 50 倍^[16],试验中用砂为粒径小于 0.5 mm 的细砂。轴力计采用如图 3 (b) 机构校验出厂标定系数。

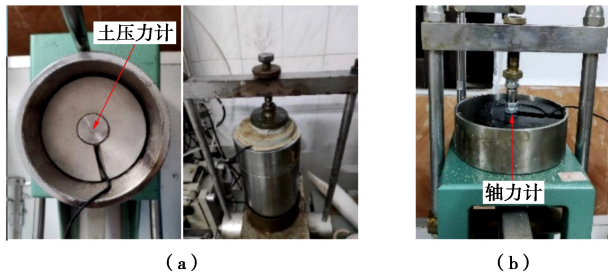


图 3 传感器标定

Fig. 3 Calibration of sensors

1.4 试验流程

试验模型参数及控制条件见表 3,模型试验实施情况指标见表 4。

表 3 试验模型参数及控制条件

Table 3 Parameters of model tests

砂层厚度/mm	淤泥厚度/mm	模型桩直径/mm	桩间距/mm	荷载级数	分级荷载/kPa	变形稳定标准/(mm·h ⁻¹)
350	260	32	150	12	5	<0.01

表 4 模型试验实施情况指标

Table 4 Implementation indices of model tests

编号	试验时间/h	支盘直径/mm	盘净距/盘径	盘面积占比/%	盘净距/mm	淤泥含水率/%		
						试验前	试验后	变化量
#1	229.8	75	1.00	19.6	75	59.94	54.81	5.13
#2	220.1	85	0.76	25.2	65	56.56	51.64	4.92
#3	192.3	95	0.58	31.5	55	55.54	52.60	2.94

模型组件安装。包括①安装模型箱与模型桩,全桩暂不安装支盘体,②模型箱内壁接缝处使用黏结且

防水材料充实,③模型箱底部胶结线性轴承并安装预制的位移杆。

模型软土层制备。采用中江高速公路既有路基下淤泥层扰动土为原料,调制到含水率 75%左右,每次调配约 15 kg,多次合并后搅拌均匀。在软土中放置竖向和横向排水体以加速淤泥固结^[17],模型箱底部铺设 1 cm 厚细砂,其上设海绵薄片作为横向排水体,四周与箱壁耦合。将制备的流态软土注入模型箱至液面齐平盘顶,插入海绵长条与底部海绵薄片相接,上端埋入淤泥中。使用真空泵对模型箱内流态软土施加负压进行预固结,直至软土含水率约 60%,挖除顶层软土至盘下约 2 cm。

模型砂土层制备。试验用干砂筛除 0.5 mm 以上颗粒,分层均匀填铺,层厚约 5 cm,以承载板自重压实,砂层累计厚度 35 cm。

传感器仪表安装。①软土中设孔压计,流态淤泥注入到位后植入,位于液面下 10 cm。②软土预固结并挖除余土后在桩顶安装轴力计,在盘顶和盘面安装土压力计。③分层铺砂过程中安装桩间土压力计,位于两桩连线中点位置,与盘顶土压力计齐平。④砂层顶面设刚性承载板,调平后安装竖向位移百分表。

PIV 设备安装。使用定焦距工业相机,固定在模型箱一侧,拍摄模型竖剖面内的土颗粒位移过程,拍摄环境内用遮光布围闭,保持光源亮度、位置恒定,保持相机拍摄角度、位置恒定。

加载控制标准。模型箱置于加载系统,使用砝码分级加载,共 12 级,每级砝码 10.197 kg 经杠杆放大后对应承载板承压 5 kPa,恒载时长控制标准为承载板下沉速率小于 0.01 mm/h。

2 模型试验结果及分析

2.1 桩体轴力和桩承载荷载占比

图 4 为试验模型中的整桩的荷载、时间、轴力对应关系。

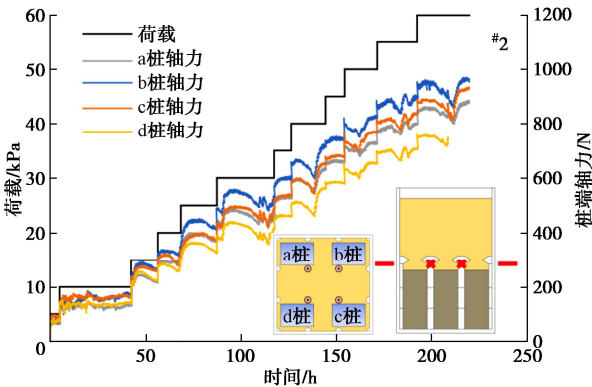


图 4 试验#2 时间-轴力关系曲线

Fig. 4 Time-axial force curve in test No. 2

图 4 显示, 试验#2 中 4 根桩的顶端轴力有一定的分散性, 但总体变化趋势一致, 即同一级荷载过程桩端轴力呈现稳定、下降、增长的调整现象, 说明测试结果具有客观性。试验#1、#3 也有相同的表现。

根据模型试验测定的整桩桩端轴力, 考虑模型边缘 1/2 桩和拐角处 1/4 桩的作用, 4 根全桩的总轴力作为 8 个 1/2 桩的轴力之和, 4 根全桩的总轴力的 1/4 作为 4 个角桩的轴力之和, 据此计算桩承载荷载占比。图 5 为桩端轴力总和、桩承载荷载占比与荷载的关系。

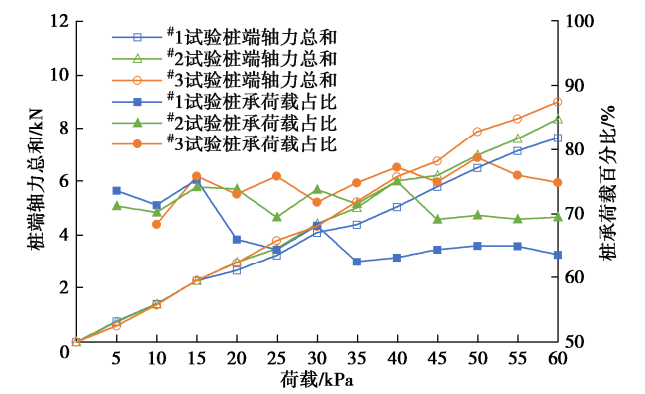


图 5 参数随荷载变化

Fig. 5 Variation of parameters with loading pressure

图 5 显示, 模型中桩端轴力总和与荷载量级近似线性正相关, 最大荷载下的桩端轴力总和及桩承载荷载占比如表 5 数据, 支盘直径越大桩端轴力总和越大、桩承载荷载占比越高。桩承载荷载占比随荷载增大呈小幅波动变化, 荷载较大时趋于稳定。

表 5 桩体轴力比较

Table 5 Comparison of pile axial force

试验编号	试验时间/h	支盘直径/mm	盘缘距/mm	最大荷载/kPa	桩端轴力总和/kN	桩承载荷载占比/%
#1	229.8	75	75	60	7.63	63.6
#2	220.1	85	65	60	8.33	69.4
#3	192.3	95	55	60	8.98	74.8

综上所述, 模型中桩端轴力在上覆砂层的附加荷载恒定时呈现调整现象, 砂层附加荷载增大时桩端轴力总和近似线性增长, 桩承载荷载占比呈小幅波动变化及荷载较大时趋于稳定, 支盘直径越大桩端轴力总和越大、桩承载荷载占比越高。

2.2 盘顶及盘面土压力

图 6 为模型试验中整桩的荷载、时间、盘面压力、盘顶压力对应关系。图 6 显示, 试验#2 中 4 根桩的盘面压力、盘顶压力变化特征表现为同一级荷载过程有增长、稳定和下降等调整现象, 和图 3 中桩端轴力变化趋势具有相似性和对应性, 在试验#1、#3 中也有相同的表现。

表 6 为最大荷载下测试指标稳定后的盘顶压力、盘面压力及相关指标。表 6 数据显示, 盘面上法向压

力远小于盘顶压力。

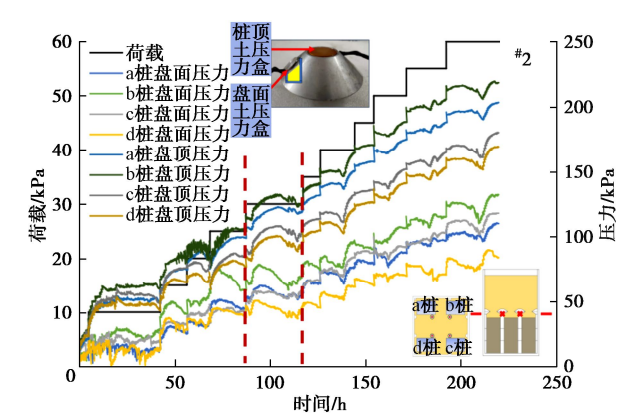


图 6 试验#2 荷载、盘顶压力、盘面压力时间过程

Fig. 6 Variation of parameters with loading time in test No. 2

根据盘面压力和盘面倾斜角度可以计算测点所在位置的竖向向压力。表 6 含试验#2 最大荷载下支盘表面上的盘顶压力和盘面法向压力、盘面竖向压力。由于盘轮廓呈轴对称特征, 根据盘面测点位置可以确定轴对称位置的盘面压力, 据此可以确定两盘连线路径上的竖向压力, 图 7 为两盘连线路径上支盘表面上的竖向压力分布状态。

表 6 模型#2 盘顶、盘面压力

Table 6 Pressures on bulb top and surface of model No. 2

桩位序号	荷载/kPa	盘顶压力/kPa	盘面法向压力/kPa	盘面竖向压力/kPa	盘顶压力/荷载	盘面法向压力/荷载	盘面法向压力/盘顶压力
a 桩	60	202.99	109.74	137.48	3.38	1.83	0.54
b 桩	60	218.10	132.16	165.57	3.64	2.20	0.61
c 桩	60	180.01	117.95	147.77	3.00	1.97	0.66
d 桩	60	169.09	83.79	104.97	2.82	1.40	0.50

图 7 显示支盘连线路径上的竖向压力分布特征, 据此可以判定, 盘顶位置是竖向压力最大点, 支盘斜面上的竖向压力随水平距离增大而衰减, 两盘之间砂土是路径上竖向压力最小点。

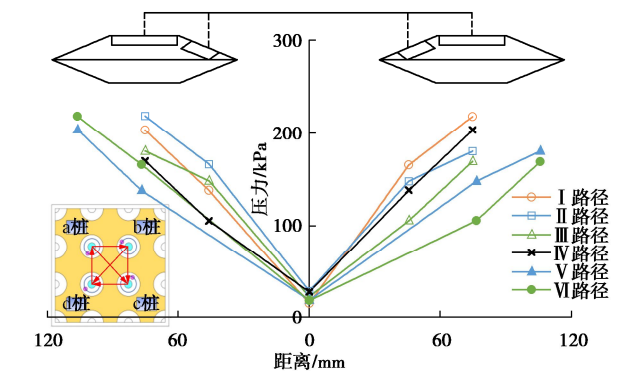


图 7 支盘表面竖向压力空间分布状态

Fig. 7 Spatial distribution of vertical pressure on bulb

图 8 为试验#2 加载过程盘面压力与盘顶压力比值的时间过程。图 8 显示, 每次加载引起该比值陡增, 随后衰减。由图 6 可以发现, 同一级荷载过程内盘顶

压力和盘面压力并非同步变化,多数情况为盘顶压力处于增长或稳定阶段时盘面压力表现为下降趋势,由此导致盘面压力与盘顶压力比值出现较大的波动现象。

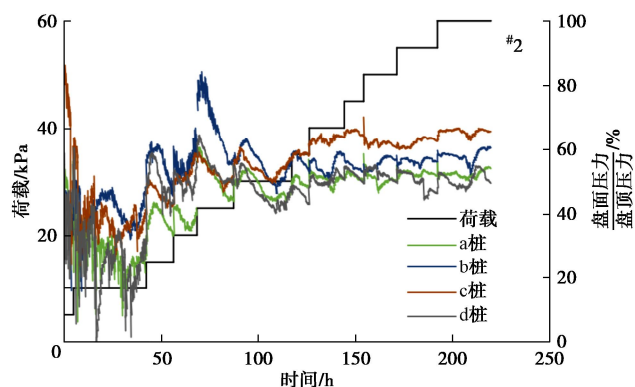


图8 试验#2 荷载、盘面压力/盘顶压力的时间过程

Fig. 8 Time histories of loads and pressures on bulb surface and top in test No. 2

综上,同一级荷载过程盘顶压力和盘面压力并非同步变化,盘顶压力处于增长或稳定阶段时盘面压力有下降现象。模型中桩的盘面压力、盘顶压力变化特征表现为同一级荷载过程有增长、稳定和下降等调整现象,和桩端轴力变化趋势具有相似性和对应性。盘面上法向压力远小于盘顶压力。支盘连线路径上盘顶位置竖向压力最大,支盘斜面上的竖向压力随水平距离增大而衰减。

2.3 桩间砂层土压力及淤泥层孔隙水压力

图9为模型#2加载过程的桩间砂层土压力及淤泥层孔隙水压力时间过程,其中桩间砂层土压力为5个测点的平均值用于反映测点处土压力的相对变化过程,孔压测点位于模型外围用于反映淤泥层的受力响应状态和过程。

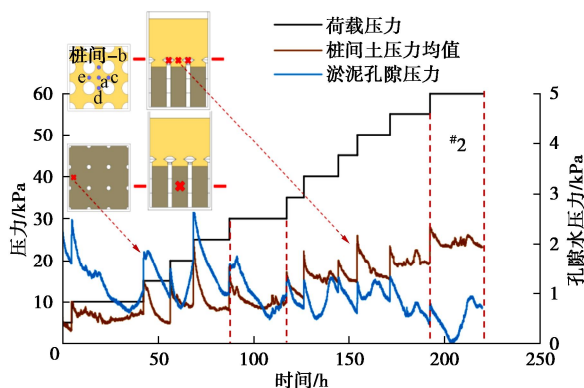


图9 模型#2 加载过程中的桩间土压力与孔隙水压力

Fig. 9 Soil pressures and pore water pressures between piles during loading of test No. 2

图9显示,在同一级荷载过程,桩间砂层土压力

和淤泥中孔隙水压力均表现出变化和调整特征,加荷瞬间土压力和孔隙水压力同步增长,随后土压力衰减时孔隙水压力同步衰减,土压力稳定时孔隙水压力持续消散,土压力增加时孔隙水压力同步增加。

上述现象具有合理性。加荷瞬时桩间砂层承受荷载附加压力,淤泥层中孔压来不及消散而同步增长,随后孔压消散淤泥固结导致桩间砂土孔隙率增大压缩模量降低,衍生砂土颗粒填充空隙形成宏观位移,由此产生应力松弛效应引起桩间砂层土压力衰减,淤泥固结后强度增加且压缩变形渐趋稳定,导致砂土颗粒位移产生的应力松弛效应消失,因此桩间砂层的土压力随之稳定或增长。由此,桩间砂层土压力和淤泥层中孔隙水压力相互关联,孔压的变化趋势反映了桩间砂层土压力的增减调整过程,也揭示了淤泥层压缩变形的固结过程特征。

2.4 支盘桩承载机制及土体变形特征

图10为模型#2加载过程中桩端轴力和桩间砂层土压力的对应关系。图10显示,在同一级荷载过程,桩端轴力和桩间砂层土压力的变化具有对应性,加荷瞬时轴力和土压力同步增加,随后土压力下降时轴力增长,土压力调整时轴力同步反方向变化调整。由于桩底固定在模型箱底板上即桩身不会发生竖向位移,桩端轴力下降的原因应该是桩间砂土层土压力的变化。桩间砂层土压力下降时,荷载转移到桩上遂表现为桩端轴力增长。

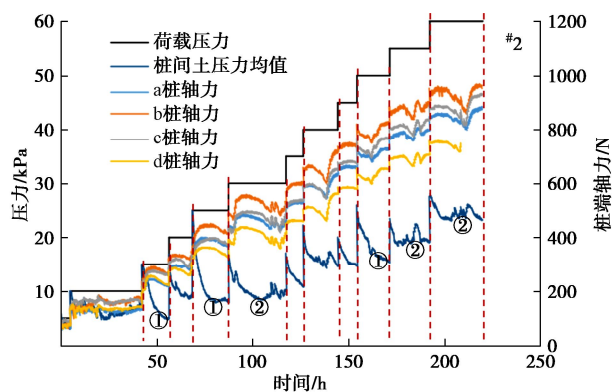


图10 模型#2 加载过程中的桩端轴力与桩间土压力

Fig. 10 Axial forces at pile end and soil pressures between piles during loading of test No. 2

图11为模型#2加载过程中土体压缩、土压力、孔隙水压力时间过程。图11显示,在同一级荷载过程内,土层总压缩量和淤泥层压缩量均为单调增长曲线,而作用在土体上的总应力并非恒定值,与此对应的淤泥层中的孔隙水压力也并非单调衰减过程。土体压缩变形一部分来自砂层孔隙压密产生的瞬时沉降,一部分来自淤泥层的排水固结,两种变形均是不可逆的过

程。表 7 为 3 个模型试验结束时土层的性状指标和土层压缩量, 数据显示土层的压缩量和支盘直径负相关。

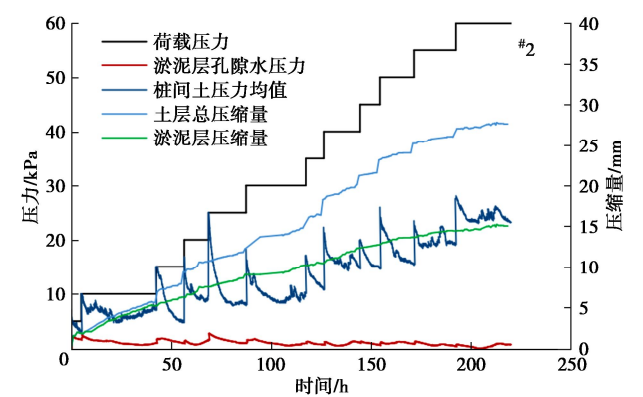


图 11 模型#2 加载过程中的桩端轴力与桩间土压力

Fig. 11 Axial forces at pile end and soil pressures between piles during loading of test No. 2

表 7 试验前后淤泥参数

Table 7 Parameters of sludge before and after tests

试验 编号	试验 时间/ h	支盘 直径/ mm	最大 荷载/ kPa	淤泥含 水率初 值/%	淤泥含 水率终 值/%	淤泥孔 隙比 初值	总压 缩量/ mm	淤泥层 压缩量/ mm
#1	229.8	75	60	59.94	54.81	1.618	30.1	15.4
#2	220.1	85	60	55.56	51.64	1.527	27.6	15.0
#3	192.3	95	60	55.54	52.60	1.500	24.2	8.3

桩、土承担荷载的变化调整特征和砂土层瞬时变形及淤泥层的固结变形过程相关。初始阶段, 加荷瞬间桩土同时承担荷载, 砂土瞬时固结和淤泥的剪切变形引起桩间土压力减小, 使得荷载向桩体转移, 表现为桩端轴力随时间增大; 中继阶段, 淤泥固结时强度增长使自身承载力提高, 桩间土的抗力即土压力得以增长, 这一过程荷载向桩间土转移表现为桩端轴力减小, 土压力曲线如图 10 中①型, 即单调衰减趋稳曲线; 调整阶段, 由于淤泥固结引起砂土颗粒位移诱导土拱形成, 表现为桩体轴力增加和桩间土压力减小, 土压力曲线如图 10 中②型, 即衰减后锯齿状调整曲线。由此, 各级荷载恒持过程中, 桩土分担荷载历程分两类, ①型包含前两个阶段, 对应不完整土拱。②型包含全部 3 个阶段, 对应完整但不稳定土拱。

图 12 为模型#2 试验中土层剖面上土颗粒的位移矢量场分布图, 是本级荷载下试验完成后相对于初始状态的位移矢量, 通过粒子图像测速技术 (PIV) 实现, 对模型箱一侧壁拍摄, 每级加载结束后的图片与初始状态对比, 得到本级荷载作用后的累计位移矢量。

图 12 包括 3 个级别荷载下试验完成后的土颗粒累计位移矢量, 其中显示, 荷载越大累计位移越大, 砂土颗粒和淤泥颗粒均发生了位移。砂土中远离支盘的颗粒位移大且方向竖直, 临近支盘的颗粒位移小且方向偏转, 两盘之间的砂颗粒有明显位移。淤泥中上部

颗粒位移大下部颗粒位移小, 远离桩体的颗粒位移大临近桩体的颗粒位移小, 支盘下方的颗粒位移小且方向有偏转。图 12 (d) 显示了土层剖面上不同区域内的平均位移差别, 亮度越大的区域位移越大, 由此显示两盘之间区域砂土发生了明显位移, 揭示了前述桩间砂层土压力松弛效应的物理依据, 和桩端轴力调整成因的客观性。

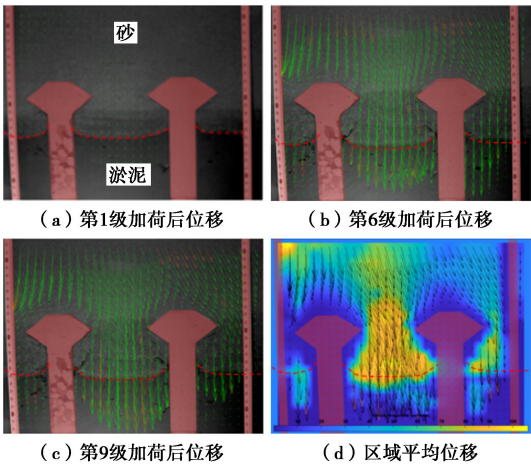


图 12 本级荷载试验过程时段的土颗粒位移矢量云图

Fig. 12 Nephogram of displacement of soil particles during loading at various levels

综上, 支盘桩加固既有填砂路基深层软土模型, 附加荷载由桩和土共同分担, 即使在桩底端无刺入条件下, 依然存在桩土分担荷载相互转移和调整的过程。桩间土瞬时变形引起桩体轴力增大, 软土固结压密提升桩间土承载力, 同时接受砂土颗粒充填空隙引起桩承载荷载松弛, 桩间砂土颗粒位移诱导土拱形成引起荷载向桩体集中即桩体轴力增大和桩间土压力下降。由于路基填砂的散粒体属性, 砂土颗粒位移过程紧随软土固结压密过程, 砂土中难以形成完整且稳定的土拱, 每一级附加荷载恒持过程都要对应一个桩土荷载调整过程, 都会产生深层软土的固结压密过程。

2.5 支盘置于填砂路基中的桩间距简化模型

既有填砂路基深层软土采用支盘桩加固, 目的在于利用支盘桩的结构特点和工艺方法, 发挥既有路面结构层的再利用价值和提高施工效率, 达到有效抑制既有路基后继沉降变形和优化工程造价的目标。

基于模型试验揭示的桩土受力机制, 将物理模型简化为二维平面模型, 如图 13 所示, 采用摩擦拱原理分析模型中各参数的相关性。假定摩擦拱临界高度 h 以上的荷载为均布荷载 p_L , 包含上覆荷载及设计超载, 等效为 $\gamma\Delta H$ 。 p_{cr} 为软土顶面处临塑压力。支盘斜面上的土压力 E_a 按坦墙土压力考虑, 采用简化算法计算其竖直方向的分力。竖直破坏面上的摩阻力 F 是临界高度的函数。图 13 中桩间土隔离体竖直方向上的

静力平衡方程为

$$G + p_L(D + 2L \cos \alpha) = 2E_a \cos(\alpha - \delta) + 2F + (p_{cr} - \gamma L \sin \alpha)D \quad (1)$$

式中,

$$G = \gamma(D + 2L \cos \alpha)(h + L \sin \alpha) - \gamma L^2 \sin \alpha \cos \alpha, \quad (2)$$

$$F = \int_0^h \gamma(\Delta H + z)K_0 \tan \varphi dz$$
$$= \gamma \left(\Delta H h + \frac{1}{2} h^2 \right) K_0 \tan \varphi, K_0 = 1 - \sin \varphi, \quad (3)$$

$$E_a \cos(\alpha - \delta) = \frac{1}{2} \gamma L^2 \sin \alpha \cos \alpha + \gamma(\Delta H + h)L \cos \alpha, \quad (4)$$

$$p_{cr} = \gamma(h + 2L \sin \alpha)(1 + N_c \tan \varphi') + cN_c, \quad (5)$$

$$N_c = \frac{\pi \cot \varphi'}{\cot \varphi' - \frac{\pi}{2} + \varphi'} \quad (6)$$

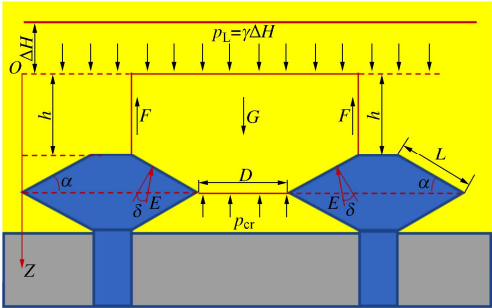


图 13 简化模型示意图

Fig. 13 Diagram of simplified model

化简式 (1) 得

$$D = \frac{\gamma(2\Delta H h + h^2)K_0 \tan \varphi}{\gamma(\Delta H + h + 2L \sin \alpha) - p_{cr}} \quad (7)$$

式中, D 为支盘间净距; h 为土拱临界高度; ΔH 为临界高度以上等效荷载厚度; γ 为砂土重度; φ 为砂土内摩擦角; c 为软土黏聚力; φ' 为软土内摩擦角; L 为支盘斜面长度; α 为支盘斜面倾角。

依据中江高速公路既有填砂路基及其深层软土的相关参数指标, 计算支盘桩的桩净距列入表 8, 相关性曲线见图 14。

图 14 显示, 支盘间净距与上覆荷载等效厚度负相关, 与土拱临界高度正相关。土拱临界高度与桩净距的比值与上覆荷载等效厚度正相关。有研究表明土拱临界高度与盘净距的经验关系^[18-19]为 $h/D = 0.5 \sim \sqrt{2}/2$, 据此可以计算盘间距, 为设计方案提供参考。

表 8 工况参数与盘间净距

Table 8 Working parameters and disc clearances

材料属性参数				盘几何参数		条件参数		盘间距	
γ	φ	φ'	c	L	α	h	ΔH	D	
($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	($^\circ$)	($^\circ$)	kPa	m	($^\circ$)	m	min max	max min	
17	25	8	15	0.57	25	2.0	7.0	8.25	3.99
						3.0	8.0	9.50	5.89
						4.0	9.0	10.75	7.76
								2.92	4.33
								5.72	

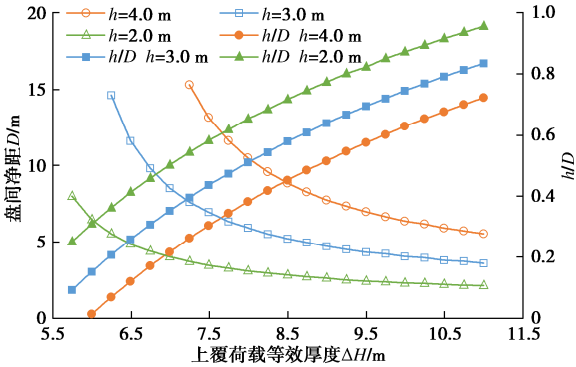


图 14 $D-\Delta H$ 图

Fig. 14 Diagram of $D-\Delta H$

3 结 论

(1)既有填砂路基深层软土采用支盘桩加固时恒载下的桩体轴力和时间有关。路基荷载恒持过程中, 在桩底端无刺入条件下桩体轴力随时间起伏变化, 桩顶端轴力总和与恒载大小近似线性正相关, 支盘直径越大桩顶端轴力总和越大、桩承载荷载占比越高。

(2)盘顶、盘面压力与桩体轴力变化调整非同步进行。同一级恒载过程中盘顶压力和盘面压力均有起伏调整, 变化趋势与桩体轴力相似但三者并非同步变化, 盘顶和盘面压力的变化过程叠加合成了桩顶压力变化特征。盘面上法向压力远小于盘顶压力。支盘连线路径上盘顶位置竖向压力最大, 支盘斜面上的竖向压力随水平距离增大而衰减。

(3)桩间土压力的调整缘于软土的压缩性和砂土的散粒体属性。桩间土压力变化调整导致盘顶压力、盘面压力、桩体轴力随之变化。支盘间砂土和下层软土同时承受附加应力, 软土固结压密提升桩间土承载力, 同时接受砂土颗粒充填空隙引起桩承载荷载松弛, 桩间砂土颗粒位移诱导土拱形成引起桩体轴力增大和桩间土压力下降。砂土的散粒体属性导致砂土颗粒位移过程紧随软土固结压密过程, 难以形成完整且稳定的土拱, 每一级附加增量荷载恒持过程都要产生桩土荷载调整, 使深层软土层产生附加沉降。限制既有路基填砂的散粒体属性应作为这一加固方法的补充措施。

(4)既有填砂路基深层软土支盘桩加固模型可以用二维简化模型反映各项参数的相关性。填砂路基中的盘净距与上覆荷载、填砂内摩擦角、深层软土强度指标、支盘几何参数相关。

参考文献:

[1] 沈立森, 杨广庆, 程和堂, 等. 高速公路路基加宽土工格栅加筋优化技术研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 789-793. (SHEN Lisen, YANG Guangqing, CHENG Hetang, et al. Optimization technology for geogrid-reinforced subgrade

- widening projects of highways[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(4): 789-793. (in Chinese))
- [2] 高翔, 刘松玉, 石名磊. 软土地基上高速公路路基扩建加宽中的关键问题[J]. 公路交通科技, 2004, **21**(2): 29-33. (GAO Xiang, LIU Songyu, SHI Minglei. Key problems in embankment widening of expressway on soft ground[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, **21**(2): 29-33. (in Chinese))
- [3] 马文生. 管桩在津滨高速改扩建工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊1): 138-141. (MA Wensheng. Application of pipe piles to reconstruction project of Tianjin-Tanggu Expressway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S1): 138-141. (in Chinese))
- [4] 刘广宇, 熊力, 李国维, 等. 填土堆载下梁式带帽支盘桩现场试验研究[J]. 公路交通科技, 2022, **39**(6): 66-72. (LIU Guangyu, XIONG Li, LI Guo-wei, et al. Field Experimental Study on Beam-type Capped Squeezed Branch Pile under Fill Loading[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, **39**(6): 66-72. (in Chinese))
- [5] 赵明华, 吴岳武, 郑玥. 变荷载下双层不排水桩复合地基一维固结分析[J]. 公路交通科技, 2016, **33**(11): 42-49. (ZHAO Minghua, WU Yuwu, ZHENG Yue. Analysis of 1D consolidation of double-layered composite foundation with impervious pile under time-dependent loading[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, **33**(11): 42-49. (in Chinese))
- [6] 杨涛, 滕世权, 李国维, 等. 动载下桩承式路堤中平面土拱形态演化的数值模拟[J]. 公路交通科技, 2020, **37**(5): 25-32. (YANG Tao, TENG Shiquan, LI Guowei, et al. Numerical simulation of evolution of 2D soil arch shape in pile supported embankment under dynamic load[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, **37**(5): 25-32. (in Chinese))
- [7] MOHAN D. Design and construction of multi-under-reamed piles[C]// The Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City, 1969.
- [8] QIAN Y M, XIE X W, WANG R Z. Research on the ultimate bearing capacity of soil about push-extend multi-under-reamed pile at the compression[J]. Advanced materials research, 2013, **718**: 1867-1871.
- [9] XIONG L, LI G W, ZHOU Y, et al. Experimental and analytical investigation of the bearing capacity of bulbs for squeezed branch piles[J]. International Journal of Geomechanics, 2023, **23**(5).
- [10] 卢成原, 孟凡丽, 王龙. 模型支盘桩的试验研究[J]. 岩土力学, 2004, **25**(11): 1809-1813. (LU Chengyuan, MENG Fanli, WANG Long. Test study of model piles with branches and plates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(11): 1809-1813. (in Chinese))
- [11] 张琰, 陈培, 赵贞欣. 软土地基挤扩支盘桩基础试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊2): 994-997. (ZHANG Yan, CHEN Pei, ZHAO Zhenxin. Experimental study on squeezed branch pile foundation in soft soil ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 994-997. (in Chinese))
- [12] 王东坡, 钱德玲. 挤扩支盘桩的荷载传递规律及研究现状[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(增刊1): 4645-4648. (WANG Dongpo, QIAN Deling. Law of load transmission of squeezed branch piles and it's research advances[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(S1): 4645-4648. (in Chinese))
- [13] 张忠苗, 辛公锋, 夏唐代, 等. 软土地基灌注桩、挤扩支盘桩和注浆桩应用效果分析[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(5): 709-711. (ZHANG Zhongmiao, XIN Gongfeng, XIA Tangdai, et al. Analysis on effect of grouting pile, squeezed branch pile and bottom grouting pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(5): 709-711. (in Chinese))
- [14] 王伊丽, 徐良英, 李碧青, 等. 挤扩支盘桩竖向承载力特性和影响因素的数值研究[J]. 土木工程学报, 2015, **48**(增刊2): 158-162. (WANG Yili, XU Liangying, LI Biqing, et al. Finite element numerical study on the axial bearing behaviors and factors of squeezed branch pile[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, **48**(S2): 158-162. (in Chinese))
- [15] 李连祥, 符庆宏, 张海平. 微型土压力传感器标定方法研究[J]. 地震工程学报, 2017, **39**(4): 731-737. (LI Lianxiang, FU Qinghong, ZHANG Haiping. Study on the calibration method of micro earth pressure sensors[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, **39**(4): 731-737. (in Chinese))
- [16] 曾辉, 余尚江. 岩土应力传感器设计和使用原则[J]. 岩土工程学报, 1994, **15**(1): 93-98. (ZENG Hui, YU Shangjiang. Principles of design and application of geotechnical stress sensors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **15**(1): 93-98. (in Chinese))
- [17] KHOTEJA D, ZHOU Y, PU H, et al. Rapid treatment of high-water-content dredged slurry using composite flocculant and PHD-facilitated vacuum[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2022, **40**(3): 297-307.
- [18] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of piled embankments[J]. Ground Engineering, 1988, **21**(3): 12-18.
- [19] BRITTON E, NAUGHTON P. An experimental investigation of arching in piled embankments[C]// Proceedings of the 4th European Geosynthetics Congress EuroGeo. Vienna, 2008.