

DOI: 10.11779/CJGE202012018

可控刚性桩与排水体组合型复合地基受力与变形特性的模型试验研究

周志军¹, 陈昌富², 肖水强³

(1. 五邑大学土木建筑学院, 广东 江门 529020; 2. 湖南大学岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082; 3. 茂名市交通运输局, 广东 茂名 525000)

摘要: 在复合地基中, 桩、土的变形受诸多因素的影响, 褥垫层较难协调、匹配好所有桩土之间的沉降差, 往往存在桩承载过大而破坏, 或桩承载过小而浪费的情况。提出一种新型复合地基——可控刚性桩与排水体组合型复合地基, 该复合地基通过桩顶注浆装置来协调桩土的沉降差, 使得注浆前刚性桩基本不承担上部荷载, 地基土充分排水固结、提高承载力; 注浆后刚性桩恢复承载作用, 桩土共同承担荷载和控制沉降。通过室内模型试验研究该新型复合地基的受力与变形特性, 试验结果表明: 新型复合地基的沉降主要产生于注浆前, 注浆后沉降量相对较小, 而且, 新型复合地基能有效减小不均匀沉降; 桩顶盖板所分担的荷载压力在注浆前小于桩间土压力, 注浆后盖板顶压力迅速增大, 而桩间土压力相应减小; 刚性桩的承载作用可由注浆实现人为可控。

关键词: 复合地基; 受力与变形; 刚性桩; 排水体; 模型试验

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)12-2308-08

作者简介: 周志军(1979—), 男, 博士, 主要从事道路与地基处理方面的教学和研究。E-mail: zzzjwyu@163.com。

Model tests on stress and deformation properties of composite foundation with controllable rigid piles and drainage bodies

ZHOU Zhi-jun¹, CHEN Chang-fu², XIAO Shui-qiang³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuyi University, Jiangmen 529020, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Maoming Municipal Bureau of Transport, Maoming 525000, China)

Abstract: In a composite foundation, the deformations of piles and soils are affected by many factors. The cushion is difficult to coordinate and match the differential settlement between all piles and soils. Therefore the piles often carry the excessive loads and are destroyed, or the piles bear too small loads and are wasted. A new composite foundation composed of controllable rigid piles and drainage bodies is proposed. The differential settlement between piles and soils is coordinated by the grouting device at the top of piles in the composite foundation, rigid piles hardly carry the upper loads before grouting, and the foundation soils are fully consolidated and their bearing capacity is improved. After grouting, the rigid piles begin to support the loads, and the piles and soils work together to share the loads and to control settlement. The stress and deformation properties of the composite foundation are studied through indoor model tests. The results show that the settlement of the new composite foundation mainly increases before grouting and is effectively controlled after grouting. Moreover, the new composite foundation can effectively reduce the differential settlement. The load pressure shared by the cover plate on piles is less than that shared by the soils between piles before grouting, and the pressure shared by the cover plate increases rapidly after grouting, while that by the soils between piles decreases correspondingly. The bearing capacity of rigid piles can be controlled by grouting.

Key words: composite foundation; stress and deformation; rigid pile; drainage body; model test

0 引言

软土具有含水率高、孔隙比大、渗透性差、抗剪强度低等特点。在软土地基上修建路堤, 需要加固地基来提高其承载力和稳定性, 同时, 软土地基的沉降, 尤其是工后沉降, 一直是一个重要而棘手的技术难题,

沉降超过限值会对工程后期的运营、维护产生很大的影响^[1]。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0800203); 江门市基础与理论科学研究类科技计划项目 (2020JC01023)

收稿日期: 2020-02-24

当前, 复合地基技术在软基处理中应用广泛, 常用的有水泥搅拌桩复合地基^[2]、CFG 桩复合地基^[3]、双向增强体复合地基^[4-5]、组合型复合地基^[6-8]等, 其中, 刚性桩复合地基由于桩体刚度大、荷载传递深, 对地基沉降的控制效果较好^[9-11], 但刚性桩复合地基也存在工程造价较高、桩土变形难以协调等问题。

刚性桩复合地基的核心技术是褥垫层, 因为褥垫层的变形协调作用, 使得桩、土共同承担上部荷载^[12]。褥垫层协调桩、土差异变形的大小跟褥垫层的材料、厚度、密实度、桩间土压力等密切相关^[13]。一般而言, 褥垫层材料越松散、厚度越大、桩间土压力越小, 桩就越容易刺入, 褥垫层能匹配的桩、土沉降差就越大; 相反, 褥垫层材料越密实、厚度越小、桩间土压力越大, 褥垫层能匹配的桩、土沉降差就越小。

然而, 桩土之间的沉降差, 因为地基软土层的厚度和变形模量、桩的长度和刚度、桩-土之间的剪切变形特性以及持力层受力变形特性等不同而有很大的差异, 即使是同一工程地段, 也会因上部附加荷载不同而不同。所以, 实际工程中, 褥垫层很难设计出合适的厚度及密实度, 使褥垫层的变形能够很好匹配桩土之间的沉降差。

研究表明, 桩刺入褥垫层偏小时, 桩需要承担过多的上部荷载, 导致桩体容易发生破坏; 桩刺入褥垫层偏大时, 桩的承载力往往得不到充分发挥^[14-15]。要保证桩能安全、充分发挥承载力, 传统褥垫层技术还存在缺陷。

为了匹配桩土之间的沉降差, 本文提出一种新型复合地基: 可控刚性桩与排水体组合型复合地基, 其中, 可控刚性桩由刚性桩与桩顶注浆装置组成。注浆前桩顶刺入注浆装置, 协调桩土的沉降差; 注浆后桩顶与注浆装置刚性结合, 刚性桩发挥承载作用。该复合地基既能有效发挥桩的承载力, 又能通过排水体提高地基土的承载力。

本文对路堤下可控刚性桩与排水体组合型复合地基进行室内模型试验研究, 通过监测复合地基各测点的沉降随荷载、时间的变化情况, 桩间土及桩顶盖板的受力变化情况, 并通过分析试验结果, 获得了该新型复合地基的受力与变形规律。

1 新型复合地基

可控刚性桩与排水体组合型复合地基^[16-17]的组成为: ①排水体, 包括: 竖向排水体 (常用砂井或塑料排水板) 以及水平铺设的砂垫层; ②刚性桩, 可用 CFG 桩、素混凝土桩、PHC 管桩或 PTC 管桩等; ③桩顶注浆装置, 包括: 盖板、套筒、注浆管。新型复合地基结构组成如图 1 所示。

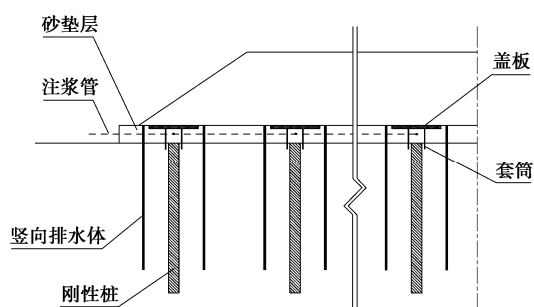


图 1 新型复合地基结构组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of new composite foundation

新型复合地基的工作原理: ①在注浆前, 路堤填筑预压, 软土地基在上部荷载的作用下, 经竖向排水体和砂垫层逐渐发生固结沉降; 刚性桩沉降变形较小, 在路堤和地基沉降时, 桩顶向上刺入空的套筒内, 因此, 在注浆前, 刚性桩基本上不承担上部荷载, 软土地基因排水固结而提高承载力。②通过注浆管往套筒内注浆, 填充套筒内空隙; 在浆液固化后, 刚性桩与套筒、盖板形成刚性支撑, 刚性桩开始发挥承载作用, 与软土地基共同承担上部荷载。

新型复合地基的优点: ①桩间土在注浆前的排水固结过程受刚性桩影响较小, 土体经排水固结后承载力提高, 可减少刚性桩用量; ②刚性桩在注浆后发挥承载作用, 达到桩土共同承载状态, 且刚性桩沉降变形较小, 可有效控制复合地基的沉降。

2 室内模型试验

2.1 模型箱

模型箱尺寸为 500 cm (长) × 200 cm (宽) × 150 cm (高), 见图 2, 模型箱侧面采用厚钢化玻璃, 既可减小土体与箱侧壁的摩擦力, 也有利于箱体的密封防水和试验观测, 模型箱底座为混凝土, 试验前, 模型箱做好防水措施和浸水试验。

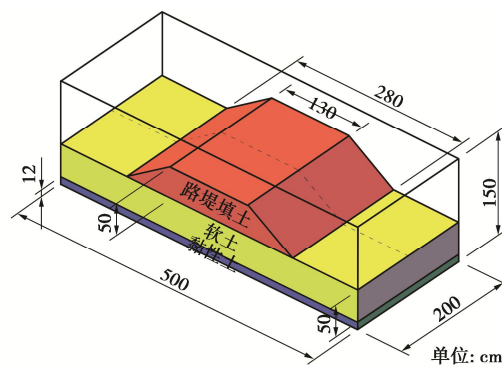


图 2 模型箱三维视图

Fig. 2 Three-dimensional diagram of model box

2.2 地基土及路堤填筑

模型试验的地基土有两层, 上层为软土, 厚 50

表 1 地基土和路堤填土的物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of foundation and embankment

土层	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$w/\%$	c_{cu}/kPa	$\varphi_{cu}/(^{\circ})$	E_s/MPa	k_h 或 $k_v/(10^{-7}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
软土	17.2	50.6	16.9	3.4	0.364	2.69
黏性土	18.6	30.8	28.4	18.6	3.981	—
路堤填土	18.9	—	—	—	—	—

cm，取自广东省江门市某市政道路工程，该软土属海相沉积软土；下层为黏性土，厚 12 cm，起持力层作用；黏性土层以下是模型箱的混凝土底板，其类似于实际工程的基岩；保持模型箱水位至软土表面处，使地基土处于饱和状态。由室内土工试验测得软土及黏性土的物理力学参数值见表 1，其中，软土的 $e-p$ 曲线见图 3，因模型试验中软土所受荷载压力在 20.68 kPa 以下，对应于压缩试验中荷载 p 在 0~25 kPa 范围的压缩模量 $E_s=0.364$ MPa。

地基沿模型箱宽度方向分成两段，长 100 cm，见图 2，分别为新型复合地基加固区、无加固软土地基区两种。与无加固区对比，有利于分析新型复合地基的沉降特性，以及各增强体的作用效果。这在试验结果分析（见 3.2 节）中得到说明和印证。

试验路堤高 50 cm，路基宽 130 cm，两侧边坡的坡率为 1:1.5，模型试验比例为 1:20，模拟高 10 m，路基宽 26 m 的路堤工程。由于试验路堤均为人工填筑和压实，工作量较大，试验路堤简化为 4 层填筑，第 1 层、第 2 层、第 3 层的填土厚度均为 10 cm，第 4 层填土厚度为 20 cm。路堤填料采用普通黏性土，其压实后的平均重度 γ 见表 1。

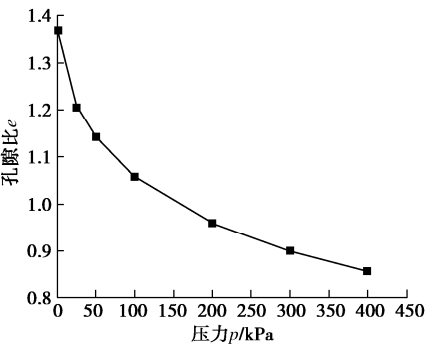


图 3 软土的 $e-p$ 曲线

Fig. 3 $e-p$ curve of soft soils

2.3 排水体

模型试验的水平向排水体采用砂垫层，其横向宽度 320 cm，两侧超出路堤底边 20 cm。砂垫层的厚度约为 7 cm，可对套筒有一定的围护作用。

竖向排水体采用袋装砂井，长约 55 cm，袋装砂井贯穿整个软土层，顶部埋入砂垫层内，确保竖向、横向排水体相互连通。袋装砂井为正方形布置，砂井间距 10 cm，如图 4 所示。实际工程中，袋装砂井的

直径一般为 7~12 cm，按模型比例 1:20，反算试验的袋装砂井直径只有 0.35~0.6 cm，制作较困难，本试验采用 1 cm 直径的袋装砂井来近似模拟。垫层和袋装砂井均采用中细砂材料。

2.4 刚性桩

模型试验的刚性桩采用直径 2.5 cm 的 PVC 管，内灌水泥砂浆，桩长 50 cm，正方形布桩，桩间距 20 cm，复合地基加固区横向布置了 14 根桩，纵向布置 4 根桩，如图 4 所示。试验中，刚性桩采用静压施工，从路中线开始向两边对称施工，参考桩基规范^[18]，控制垂直度偏差不超过 1%，桩端穿过软土层达到黏性土层。

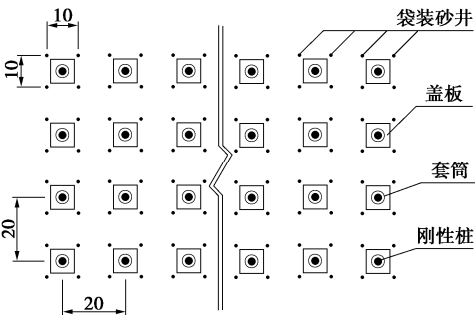


图 4 袋装砂井与可控刚性桩布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of bagged sand drains and controllable rigid piles

一般情况下，刚性桩复合地基，如 CFG 桩，桩间距大都为 3~6 倍桩径^[19]，而本试验的桩间距达到 8 倍桩径，主要是考虑到桩间土排水固结后承载力提高，刚性桩数量可适当减少。

2.5 桩顶注浆装置

桩顶注浆装置如图 5 所示。其中，套筒为直径 5 cm、高 10 cm 的 PVC 管，套筒下部套住刚性桩，套筒周围用砂垫层围护，并填筑密实，套筒顶安放盖板，盖板与砂垫层顶面平齐。盖板尺寸为 7.5 cm（长）× 7.5 cm（宽）× 0.3 cm（厚）。盖板的作用主要有两个，①封闭套筒的上端面，②注浆后扩散桩顶压力。

注浆管分主管和支管，二者均采用直径 0.6 cm 的 PVC 管。为了让每个套筒注浆饱满，注浆主管内部放置一条直径 0.4 cm 的塑料软管，见图 6 所示。注浆时，浆液通过注浆软管流向最远端的套筒内，注满后，拖出注浆软管一个桩间距长度，对下一个套筒进行注浆，如此反复，实现对所有套筒的注浆过程。图 7 是整个

注浆管路的现场布置图。

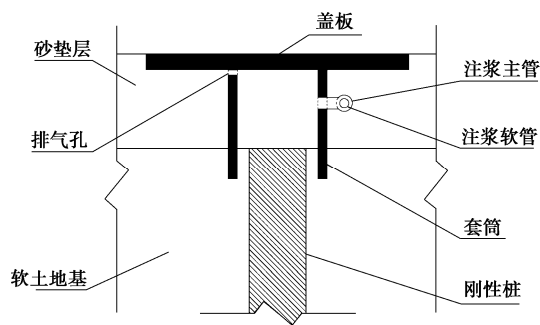


图 5 盖板、套筒、刚性桩结构示意图

Fig. 5 Structural diagram of cover plate, sleeve and rigid piles

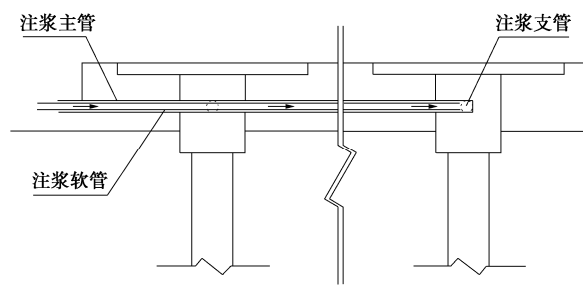


图 6 注浆管路示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the grouting pipeline



图 7 注浆管路的现场布置图

Fig. 7 Arrangement site of grouting system

采用手动注浆泵注浆，通过注浆量和注浆压力来判断套筒是否注满。图 8 是试验结束后挖开部分路堤所见的桩顶注浆效果图，由图可见，套筒内浆液均已注满，注浆管路完好。

2.6 试验仪器布置

测量沉降主要通过沉降板，如图 9 所示，沉降测点设置在路堤横断面的中心、路肩、坡脚、坡外共 7 个位置，测点的沉降板埋设在地基表面处。新型复合地基加固区和无加固软土地基区都按图 9 布置测点，测点横断面分别在各自路段的中间部位。

同时，新型复合地基在路堤中心、路肩、坡脚这 5 个测点的桩顶盖板处增设沉降板。测量沉降板的百分表精度为 0.01 mm，量程为 0~50 mm。



图 8 注浆效果图

Fig. 8 Diagram of grouting effects

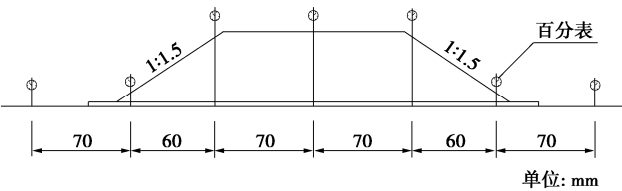


图 9 路堤横断面沉降观测点布置图

Fig. 9 Arrangement of settlement-measuring points in cross section of embankment

采用土压力盒测量桩、土的受力，在路中线附近的盖板顶、盖板底以及桩间土处分别埋设土压力盒，如图 10 所示，盖板顶的土压力盒量程为 0~50 kPa，受压面朝上，盖板底和桩间土的土压力盒量程为 0~30 kPa，受压面朝下。

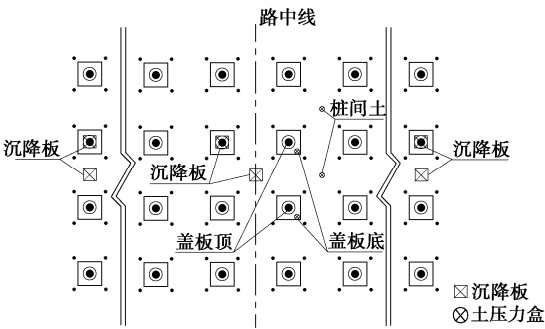


图 10 微型土压力盒布置图

Fig. 10 Arrangement of miniature earth pressure cells

3 试验结果分析

3.1 加载情况

由表 1 中路堤填土的平均重度 γ ，以及路堤分层填筑情况，计算各层填土的体积、自重荷载见表 2。

表 2 路堤填土、超载产生的基底中心处附加压力

Table 2 Additional pressures at base center generated by embankment and overloading

填土	厚度/cm	体积/m ³	荷载值/kN	附加压力/kPa	
				上限	下限
第1层	10	0.5303	10.023	1.890	1.790
第2层	10	0.4702	8.887	1.890	1.587
第3层	10	0.4100	7.749	1.890	1.384
第4层	20	0.6400	12.096	3.780	2.160
超载	13.9		6.844	2.632	1.222

路堤填筑完成后，通过在路堤顶面堆砌砖块来模拟超载（路面及车辆荷载等）作用，如图 11 所示。通过称重，路堤顶面的总堆载为 6.844 kN，反算填土厚度见表 2。



图 11 路堤顶面堆载图

Fig. 11 Loads on embankment top

路堤是梯形横断面，在分层填筑时，因应力扩散、路堤结构性、地基变形等影响，路堤自重产生的底面压力较为复杂。以路堤底面中心处的压力为例，计算方法主要有：①按路堤土层重度乘以土层厚度来计算，其力学模型是路堤沿横向无限延伸的实体，计算结果可作为真实值的上限解；②按土层自重荷载除以路堤底面积来计算，其原理是把路堤荷载等效为均布荷载，计算结果可作为真实值的下限解，如表 2 所示。

试验的加载过程：从第 1 层填土开始，第 17 天施加第 2 层填土，第 31 天施加第 3 层填土，第 47 天施加第 4 层填土，第 54 天注浆，第 62 天施加超载，保持荷载到第 273 天。按上述方法①计算路堤底面中心处的附加压力与时间关系图，见图 12 所示。

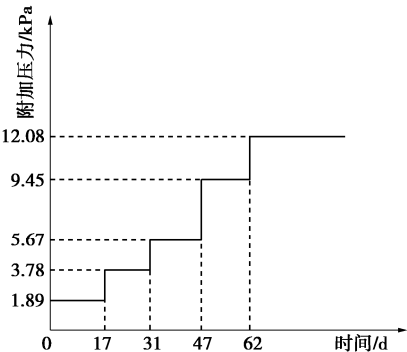


图 12 附加压力与时间关系图

Fig. 12 Relationship between additional pressure and time

3.2 新型复合地基的沉降特性

(1) 路堤底面中心处沉降

图 13 表示了路堤底面中心处的新型复合地基沉降（盖板、桩间土）、软土地基沉降 - 附加压力 - 时间的关系曲线。从图 13 读取注浆前后的沉降量，见表 3。分析图表有如下规律：

a) 新型复合地基盖板的沉降量稍大于桩间土的沉降量。由表 3 可知，二者沉降差异主要产生于注浆前，累计相差 0.995 mm；注浆后，盖板的沉降增量比桩间土小，累计减小 0.156 mm。从变形机理上分析：盖板由套筒及砂垫层支撑，套筒内空，见图 5，盖板下砂垫层和软土在承压较大时变形量增大，且软土可能发生挤入套筒的流动，从而导致盖板的沉降量稍大于桩间土的沉降量。注浆后，盖板、套筒与刚性桩形成刚性支撑，刚性桩承载力的发挥，使得盖板的沉降增量相对减小。

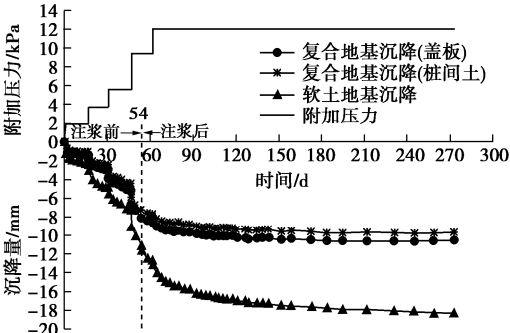


图 13 路堤中心处沉降曲线对比图

Fig. 13 Comparison of settlement curves at center of embankment

b) 新型复合地基桩间土在注浆前的累计沉降量为 7.120 mm，见表 3，总沉降量为 9.660 mm。图 13 的桩间土沉降曲线在后期已基本稳定，若把总沉降量作为桩间土的最终沉降量，按固结理论算得固结度为 $U=7.120/9.660\approx73.7\%$ ，表明桩间土在注浆前已较好固结，注浆后沉降占比小，这不仅有利于桩间土的排水固结，也有利于减小工后沉降量，实现这一效果的关键是刚性桩的人为可控。

需说明的是：注浆时间点是关键问题，其不仅决定刚性桩何时发挥承载作用，还与地基土的受力性状有关，注浆早了地基土固结不充分，注浆晚了地基稳定性降低。根据试验结果和工程常识分析，注浆时间点要综合考虑地基土的承载力、变形量和变形速率，路堤荷载大小，桩土设计荷载分担比，工期要求等来确定。这还需要进一步系统的试验和理论研究。

c) 由表 3 可知，新型复合地基盖板和桩间土的累计沉降量注浆前分别为软土地基的 73.0%和 64.0%，注浆后分别为软土地基的 33.0%和 35.2%，说明新型复合地基在注浆后减沉效果更显著。需要说明的是：新型复合地基有袋装砂井等排水系统，本应固结沉降

速率更快、沉降量更大些,但由于复合地基桩体和袋装砂井的施工对地基土有一定的挤密作用,且桩侧负摩阻力对地基的沉降变形有阻碍作用,使得新型复合地基的沉降量反而变小;注浆后,刚性桩发挥承载控沉作用,两种地基的沉降差就越来越大。

表 3 路堤中心处沉降的对比

Table 3 Comparison of settlements at center of embankment			
对比项目	注浆前累计 沉降量/mm	注浆后累计 沉降量/mm	总沉降量 /mm
复合地基(盖板)	8.115	2.384	10.499
复合地基(桩间土)	7.120	2.540	9.660
软土地基	11.118	7.222	18.340

(2) 路堤横断面各测点的沉降差异

从图 14 可以看出:新型复合地基在路堤中心、路肩测点的沉降量较大,坡脚、坡外测点的沉降量相对较小;同时,新型复合地基与软土地基对比,在路肩、坡脚、坡外测点的沉降量相差不大(1.4 mm 以内),但在路堤中心测点新型复合地基的沉降量(8.115, 7.120 mm)比软土地基的沉降量(11.118 mm)减小明显,说明新型复合地基施加以后,即使注浆前刚性桩未直接承载,也改善了地基土的变形性能,减小了地基的不均匀沉降。

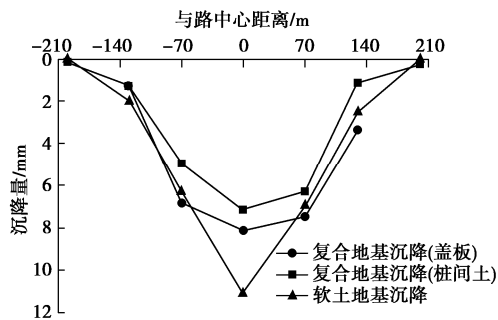


图 14 路堤横断面各测点在第 54 天的沉降对比图

Fig. 14 Comparison of settlements at measuring points in cross section of embankment at 54th day

图 15 是新型复合地基在注浆并施加超载后与软土地基的最后沉降对比图。与图 14 相比,新型复合地基的沉降量增加较小,最大为路堤中心处(2.540 mm),而软土地基在路堤中心和路肩的沉降增量分别为 7.222, 4.420 mm。可见,新型复合地基在注浆后控制不均匀沉降的效果较好,可防止附加压力较大处沉降急剧增加的情况,这对工后期路面结构物的稳定是非常有利的。

3.3 新型复合地基的受力特性

(1) 桩间土压力

随着路堤荷载分级施加,桩间土压力呈阶梯状递增,见图 16,同时,桩间土压力在各级荷载施加后有减小趋势。桩顶注浆引起桩间土压力突降,图 16 中曲

线 1 减小了 1.17 kPa,曲线 2 减小了 0.64 kPa,说明刚性桩发挥承载作用后分担了部分土压力。第 62 天施加超载,桩间土压力陡增,两曲线分别增加 0.83, 1.21 kPa,之后土压力大致保持平稳,可判断刚性桩已处于极限承载状态,土压力不再往刚性桩转移。图 13 中盖板沉降量在超载后仍增加,也印证刚性桩达到极限状态并发生刺入变形。

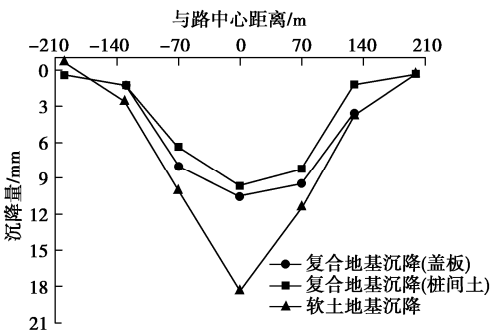


图 15 路堤横断面各测点的最后沉降对比图

Fig. 15 Comparison of final settlements at measuring points in cross section of embankment

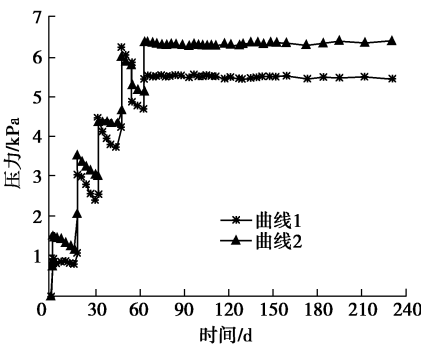


图 16 桩间土压力曲线图

Fig. 16 Pressure curves of soils between piles

(2) 盖板顶土压力

如图 17 所示,盖板顶土压力在注浆前也呈阶梯状变化,注浆后,盖板顶土压力迅速增大,达到 20.7 kPa 左右,表明刚性桩承载作用非常显著。施加超载,盖板顶土压力略有增加,峰值约 21 kPa,之后土压力逐渐减小到 17 kPa 左右,盖板顶土压力的减小可能与刚性桩的刺入变形以及桩间土固结沉降引起承载性能提高有关,这个下一步还需深入研究。

取图 16, 17 两组曲线数据的平均值,绘制出盖板与桩间土的应力比变化曲线,见图 18。可以看出,注浆前,盖板顶土压力小于桩间土压力,这与套筒支撑不足导致盖板沉降偏大有关;注浆后,盖板与桩间土的应力比增大到 3~4,因盖板面积是桩顶面积的 11 倍多,盖板底局部有垫层支撑,求得桩土应力比大致为 25~38。盖板与桩间土的应力比变化,反映了桩-土的受力变化情况。

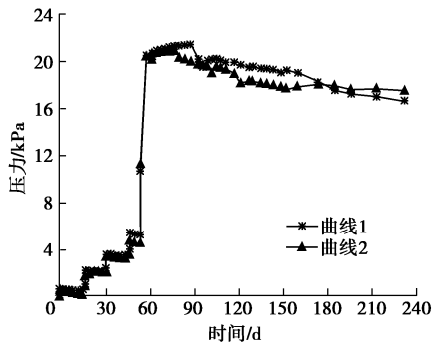


图 17 盖板顶土压力曲线图

Fig. 17 Pressure curves of soils on cover plate

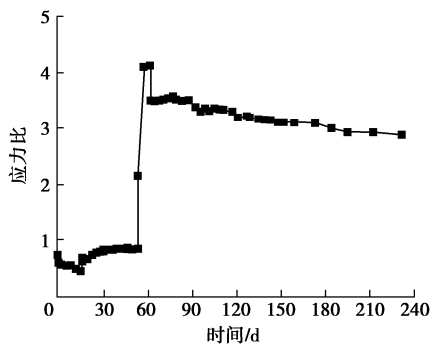


图 18 盖板与桩间土的应力比变化图

Fig. 18 Diagram of stress ratio between soils and cover plate

(3) 盖板底土压力

盖板底土压力反映了盖板受垫层及软土支撑情况, 见图 19。盖板下垫层密实度、盖板可能产生差异沉降等原因, 使得试验所测的两个盖板底土压力在注浆前存在一定差距, 但在注浆后接近相等, 峰值均为 6.9 kPa 左右。分析发现: 盖板底土压力峰值跟注浆压力接近, 且大于桩间土压力峰值, 见图 16, 所以盖板底土压力即使有超载施加也在逐渐减小。试验中后期, 盖板底土压力呈现略微增加, 曲线 1 和曲线 2 分别增加了 0.26, 0.53 kPa, 与桩间土压力趋于接近。

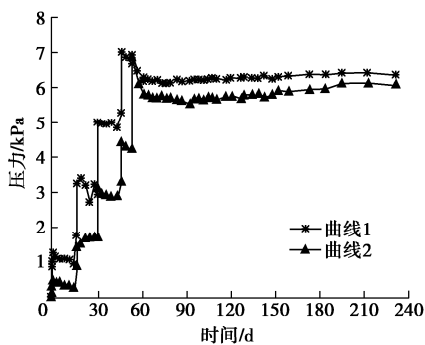


图 19 盖板底土压力曲线图

Fig. 19 Pressure curves of soils under cover plate

4 结 论

(1) 本文基于褥垫层的分析研究, 提出了一种新型复合地基, 并对其组成、工作原理以及受力与变形特性进行了说明和研究。

(2) 新型复合地基中砂垫层、竖向排水体、刚性桩都是传统地基加固措施, 唯有桩顶注浆装置是新构造, 根据图 8 所示, 注浆管路完好、套筒内浆体是充满状态, 试验注浆是成功的, 试验结果分析也表明可控刚性桩和排水体均发挥了作用, 验证了新型复合地基在试验阶段的可行性。但也需看到, 模型试验是缩尺试验, 其与工程实际还是有一定差距的, 特别是桩顶注浆方案在工程应用中是否经济、可行还需要进一步研究。

(3) 新型复合地基的沉降主要产生于注浆前, 占总沉降量的 70% 多, 桩间土可较好排水固结; 注浆后刚性桩发挥承载作用, 桩土共同承担荷载, 新型复合地基的沉降得到有效控制。

(4) 注浆前, 刚性桩刺入空套筒, 桩顶盖板所分担的荷载压力小于桩间土压力; 注浆后, 刚性桩恢复承载作用, 盖板顶压力迅速增大, 桩间土压力相应减小, 综合来看, 刚性桩承载作用的发挥是通过人为注浆来控制。

(5) 本文研究成果是对复合地基技术的积极探索, 限于时间有限, 在注浆时间、新型复合地基与传统复合地基的差异性等问题尚未解决, 将在后续试验中再做研究。

参考文献:

- [1] 赵维炳, 刘国楠, 李荣强. 控制工后变形新一代软基处理技术的发展[J]. 土木工程学报, 2004, 37(6): 78 - 81. (ZHAO Wei-bing, LIU Guo-nan, LI Rong-qiang. Development of new improving techniques for controlling post-construction deformation of soft soil ground[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(6): 78 - 81. (in Chinese))
- [2] ZHOU Hai-zou, ZHENG Gang, YU Xiao-xuan, et al. Bearing capacity and failure mechanism of ground improved by deep mixed columns [J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2018, 19(4): 266 - 276.
- [3] ZOU Xin-jun, ZHAO Zeng-ming, XU Dong-bin. Consolidation analysis of composite foundation with partially penetrated cement fly-ash gravel(CFG) piles under changing permeable boundary conditions [J]. Journal of Central South University, 2015, 22: 4019 - 4026.
- [4] 陈昌富, 周志军. 双向增强体复合地基桩土应力比分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2660 - 2666. (CHEN Chang-fu, ZHOU Zhi-jun. Analysis of pile-soil stress ratio for double reinforced composite ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2660 - 2666. (in Chinese))
- [5] 赵明华, 刘 猛, 马宾辉, 等. 路堤下“土工格室+碎石桩”双向增强复合地基桩土应力比及沉降计算[J]. 中国公路学

- 报, 2016, **29**(5): 1 - 10. (ZHAO Ming-hua, LIU Meng, MA Bin-hui, et al. Calculation for stress concentration ratio and settlement of bidirectional reinforced composite foundation consisting of geocell mattress and stone column under embankment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, **29**(5): 1 - 10. (in Chinese))
- [6] 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 Bo, HUANG Mao-song, CHENG Yue, 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))
- [7] 沈宇鹏, 田亚护, 冯瑞玲. GC-CFG 组合桩复合地基处理高速铁路基底的应用研究[J]. 土木工程学报, 2013, **46**(2): 136 - 142. (SHEN Yu-peng, TIAN Ya-hu, FENG Rui-ling. Study on treatment of GC-CFG composite piles to base of high-speed railway[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, **46**(2): 136 - 142. (in Chinese))
- [8] 杨 涛, 李 超. 刚性基础下组合渗流碎石桩-不排水桩复合地基固结分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(11): 2631 - 2640. (YANG Tao, LI Chao. Consolidation analysis of stone column-impervious pile composite ground underneath rigid foundation considering radial and vertical flows within stone columns[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(11): 2631 - 2640. (in Chinese))
- [9] 何 宁, 娄 炎. 路堤下刚性桩复合地基的设计计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(5): 797 - 802. (HE Ning, LOU Yan. Design and calculation method for rigid pile composite foundation under embankments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(5): 797 - 802. (in Chinese))
- [10] 齐昌广, 刘汉龙, 陈永辉, 等. 塑料套管混凝土桩承载试验及沉降计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(12): 2302 - 2308. (QI Chang-guang, LIU Han-long, CHEN Yong-hui, et al. Bearing capacity tests and settlement calculation method of plastic tube cast-in-place concrete pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(12): 2302 - 2308. (in Chinese))
- [11] 刘吉福, 郑 刚, 龚晓南. 附加应力法计算刚性桩复合地基路基沉降[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(11): 1995 - 2002. (LIU Ji-fu, ZHENG Gang, GONG Xiao-nan. Superimposed stress method to calculate settlement of embankment with rigid-pile composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(11): 1995 - 2002. (in Chinese))
- [12] 郑 刚, 刘双菊, 伍止超. 不同厚度褥垫层刚性桩复合地基工作特性研究[J]. 岩土力学, 2006, **27**(8): 1357 - 1360. (ZHENG Gang, LIU Shuang-ju, WU Zhi-chao. Study on behavior of rigid pile composite ground with different cushion thicknesses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(8): 1357 - 1360. (in Chinese))
- [13] 周志军, 郑 昊. 桩体刺入全过程褥垫层的工作特性[J]. 土木与环境工程学报, 2019, **41**(3): 41 - 48. (ZHOU Zhi-jun, ZHENG Hao. Working characteristics of cushion subjected to pile penetration[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, **41**(3): 41 - 48. (in Chinese))
- [14] 亓 乐, 施建勇, 曹 权. 刚性桩复合地基垫层合理厚度确定方法[J]. 岩土力学, 2009, **30**(11): 3423 - 3428. (QI Le, SHI Jian-yong, CAO Quan. Method for calculating rational thickness of cushion in rigid pile composite ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(11): 3423 - 3428. (in Chinese))
- [15] 周志军, 王连坤, 王敏容, 等. 复合地基中褥垫层的极限下限分析[J]. 中国科技论文, 2013, **8**(11): 1153 - 1158. (ZHOU Zhi-jun, WANG Lian-kun, WANG Min-rong, et al. Lower bound limit analysis of cushion in composite foundation[J]. China Science Paper, 2013, **8**(11): 1153 - 1158. (in Chinese))
- [16] 五邑大学. 后注浆带帽刚性桩与排水体组合型地基处理方法: 中国专利, ZL201310067750.6 [P]. 2016-08-17. (WUYI University. Ground treatment method of post-grouting rigid pile with cap and drainage body: China Patent, ZL201310067750.6 [P]. 2016-08-17. (in Chinese))
- [17] 五邑大学. 可控刚性桩+排水体+加筋垫层组合型地基: 中国专利, ZL201510798115.4 [P]. 2018-12-28. (WUYI University. Controllable rigid pile + drainage body + reinforced cushion composite foundation: China Patent, ZL201510798115.4 [P]. 2018-12-28. (in Chinese))
- [18] 建筑桩基技术规范: JGJ94—2008[S]. 2008. (Technical Code for Building Pile Foundations: JGJ94—2008[S]. 2008. (in Chinese))
- [19] 建筑地基处理技术规范: JGJ79—2012[S]. 2012. (Technical Code for Ground Treatment of Buildings: JGJ79—2012[S]. 2012. (in Chinese))