

桩网复合地基的模型试验加固效果对比研究

王瑞芳^{1,2a,2b}, 傅旭东^{2a,2b}, 潘孝诚^{2a,2b}, 吴志权^{2a,2b}

(1. 武汉科技大学 城建学院土木系, 武汉 430070;

2. 武汉大学 a. 岩土与结构工程安全湖北省重点实验室; b. 土木建筑工程学院, 武汉 430072)

摘要:为了探究不同形式的桩网复合地基加固软土的效果,设计了3组复合地基进行室内模型试验。第1组为PVC管材加固软土地基,第2组为桩承式复合地基,第3组为PVC管材与砂桩复合地基。在模型箱钢板内侧壁涂上黄油,并覆以塑料薄膜来减小边界效应;在PVC管材和土工编织网(格栅)上粘贴应变片,来测试PVC桩体应力及加筋拉力;在桩间土、砂桩顶部安装土压力盒,在路面的中心、路肩处安装百分表来测定相应的变形。试验结果表明:1)对于路面、路肩的沉降及二者的差异沉降,第3组沉降值最大,第2组沉降值最小;2)PVC桩与土应力比中,第2组应力比与其它2组比较则大得多;3)格栅应变变化规律较紊乱,在相应测点的格栅应变则是第2组最大。3组试验的结果说明在软土路段,在条件允许时,宜采用桩承式路堤来加固,加固效果更好。

关键词:桩网复合地基;沉降;差异沉降;桩土应力比;格栅应变

中图分类号:TU 473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)05-0075-08

Contrast Analysis of the Reinforcement Effect of Pile-Net Composite Foundation

WANG Rui-fang^{1,2a,2b}, FU Xu-dong^{2a,2b}, PAN Xiao-cheng^{2a,2b}, WU Zhi-quan^{2a,2b}

(1. Department of Civil Engineering of Urban Construction College, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, P. R. China; 2a. College of Civil and Architecture Engineering; 2b. Key Laboratory of Geotechnical and Structural Engineering safety of Hubei Province, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China)

Abstract: To investigate the effect of consolidation soft soil, three groups of model tests were designed. The first group was PVC pile-net composite foundation, the second was pile-cap-net composite foundation, and the third was PVC and sand pile composite foundation. Butter was coated and plastic membrane was covered on inner side wall of model cast to reduce border effect. The gauges were glued with epoxy on the surface of the model with PVC piles and geogrids to measure the stress of PVC piles and geogrids. Soil pressure cells were installed in the middle of piles and the top of the sand piles, and dial indicators were installed in the middle of road and road shoulder to measure deformations. It is that shown: 1) as for the distribution of the road settlement and the differential settlement, the settlements of the third group are the largest and those of the second group are the least; 2) in terms of the stress ratio of PVC pile and soil, the values of the first group and the third group are similar, while the value of the second group is much larger; 3) the change of geogrid strain is disorderly. There are periodic peaks in the strain of geogrid of pile top and periodic troughs in the soil between the piles. The geogrid strain of the second group measured in the corresponding spot is much larger than those of the other two groups. The results of three groups of tests illustrate that if the condition is permitted, it would be the best to adopt the scheme of pile-cap-net

收稿日期:2011-01-12

基金项目:湖北省自然科学基金(2005ABA291)

作者简介:王瑞芳(1972-),女,副教授,博士生,主要从事地基处理方面研究,(E-mail)luolanming@sina.com。

composite foundation, which has better reinforcement effect for soft soil.

Key words: pile-net composite foundation; settlement; differential settlement; stress ratio of pile and soil; strain of geogrid

在软土地基中修建高速公路、铁路,对于地基沉降尤其是不均匀沉降控制很严格,桩网复合地基具有施工简便、加固效果好等优点,因而在高速公路、铁路的软土地基中应用很广泛。预应力混凝土管桩加固软土地基所具有的施工工期短、质量易于控制等优点逐渐体现出来^[1],人们开始使用 PHC 管桩处理桥头跳车等病害或作为常规软土地基预压处理的补救措施,大规模地与其他类型桩组成组合桩复合地基以加固软土地基。国内外已有大量学者从理论分析^[2-6]、现场试验^[7-10]、室内模型试验^[11-13]、数值分析^[14-16]方面做了大量的工作。其中, J. G. Collin 等^[2-6]从理论上分析了桩网复合地基的承载特性;牛建东^[7]、徐林荣^[8]只从砂桩桩网复合地基来分析受荷机理;连峰^[9]是从带桩帽的管桩、搅拌桩复合地基来分析桩、网、土的承载性状,取得了一定的现场可靠试验数据;赵明华^[12]从碎石桩、石灰桩的桩网复合地基的室内模型试验分析受荷特性;张良^[13]用离心试验来分析桩帽网在不同桩端持力层强度的受荷性能的不同;芮瑞^[16]中用 FLAC^{3D}对桩网复合地基与桩承式路堤的承载性能进行了对比分析,但关于 PHC 管桩、桩承式及 PHC 管桩与砂桩(即长短桩)加固软土路基的系统模型试验还较少。

本文通过 3 组加固软土路基的模型试验,从路面和堤底的变形和桩土应力比、格栅的应变变化进行了分析,来比较 3 组试验的异同点及加固效果,从而为在软土路基中选择合适的地基处理方案提供一定的依据。

1 模型试验设计

1.1 模拟试验相似准则及尺寸

试验是在武汉大学力学实验中心模型室的模型箱上进行的,3 组模型试验均以路基中心线为对称中心模拟半幅路基。模拟对象为以南京到杭州的高速公路为工程原型,工程试验中采用模型率 $n=30$ ^[17]。

1.1.1 模型试验相似准则 按控制复合地基承载力和沉降为原则,分析对试验结果可能产生影响的物理量来采用量纲进行分析。路基厚度 H (含软土厚度)、其它特性尺寸 L 、软土压缩模量 E_s 、土工格栅模量 E_g 、管桩压缩模量 E_p 、路堤荷载 P 、土的粘聚力 c 、管桩长度 L 、桩径 D (含外径 D_1 、内径 D_2)、管桩间距 s_a 、土工格栅尺寸等。对于几何尺寸,只选其中的一种(如管桩长度 L)来做量纲分析。基于

相似准则 π 原理,得出量纲方程为:

$$\frac{H^2 E_p}{P} = f\left(\frac{E_s}{E_p}, \frac{E_g}{E_p}, \frac{L}{D_1}, \frac{D_1}{D_2}, \frac{s_a}{D_1}\right) \quad (1)$$

1.1.2 模型尺寸 工程原型及试验模型的几何尺寸如表 1 所示。模型箱尺寸为 1.9 m×0.5 m×1.3 m(长×宽×高),其中三面为厚约 12 cm 的钢板,一面为 10 cm 厚的钢化玻璃,外侧面贴有坐标网格供观测位移用,按模型率 30 缩小原型的模型尺寸如图 1 所示。为减小模型槽钢板侧壁摩擦对模型试验结果的影响,在钢板侧壁均匀涂上一层黄油,再覆以一层塑料薄膜来减小边界效应。

表 1 模型试验中主要参数的取值

物理量	工程原型	试验模型	量纲	几何缩尺比
路面宽度	21	0.35	m	30:1
路基宽度	96	1.6	m	30:1
路基厚度	15	0.5	m	30:1
路基第 1 层土(底层)厚度	15	0.5	m	30:1
路基第 2 层土厚度	9	0.3	m	30:1
路基第 3 层土厚度	3	0.1	m	30:1
路堤高度	6.0	0.30	m	30:1
砂垫层厚度	0.6	0.02	m	30:1
软土含水量	—	—	—	—
PVC 桩长度	13.5	0.45	m	30:1
PVC 桩外径	500	25	mm	20:1
PVC 桩内径	400	20	mm	20:1
PVC 桩间距	3 000	150	mm	20:1

假设沿路基纵向土体均匀分布,路堤荷载沿纵向一致,则路基的变形问题可视为平面应变问题。由于模型箱的钢板刚度大,可较好地约束路基的纵向变形,从而保证模型试验平面应变条件的成立。根据对称性原理,模型试验以路基中线为对称中心模拟半幅路基。在表 1 中,按对称性原理模型取半幅宽。



图 1 模型装置图

1.2 模型材料及制备

1.2.1 PHC 管桩及砂桩的材料模拟 工程桩采用 C80 的 PHC 管桩, $E_c = 3.8 \times 10^4$ MPa, 按 $c_{E_p} = 30$, 则模型桩的模量 $E_p = 1.26 \times 10^3$ MPa, 用 PVC 管材进行模拟, 在武汉大学力学实验中心的疲劳试验机上做压缩试验, 如图 2 所示, 测得 PVC 管模量为 $E_c = 0.545 \times 10^3$ MPa, 近似满足要求。用直径为 25 mm 的钢管在地基土中成孔, 并灌注一定质量砂来制备砂桩。其中:第 1、第 3 组桩中心距为 150 mm, 第 2 组为 200 mm。然后在其上铺设厚度为 20 mm 厚的砂垫层, 模型土工格栅布置在砂垫层中间。

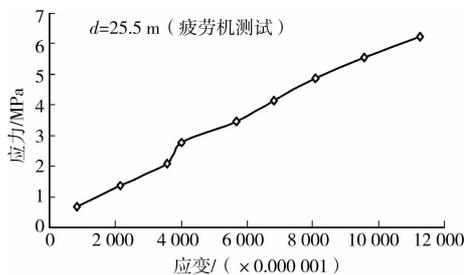


图 2 PVC 管材的应力-应变曲线

1.2.2 加筋垫层 工程原型中的砂垫层中布设 TGSG4040 型经编涤纶土工格栅, 纵/横伸长率为 2% 的拉伸强度 ≥ 14 kN/m, 伸长率为 5% 的拉伸强度 ≥ 28 kN/m。模型土工格栅材料的选择需同时满足力学相似和几何相似条件。本文从塑料纱窗布、医用纱布、双向编织网进行了选择, 从几何上, 土工编织网与双向格栅相似度大些, 采用 YJ-25 型数据采集仪来采集拉伸力的大小, 用刻度尺来测编织网的变形, 分别对粗、细方向做拉伸试验, 当伸长率为 2% 时, 细向拉伸力为 1.41 kN/m, 粗向拉伸力为 2.23 kN/m; 伸长率为 5% 时, 细向拉伸力为 1.52 kN/m, 粗向拉伸力为 1.73 kN/m, 曲线如图 3 所示, 基本满足 $c_{E_p} = 30$ 的要求。砂垫层采用级配较好的砂, 最小干容重 $\gamma_{dmin} = 15.31$ kN/m³, 来模拟工程的砂垫层。

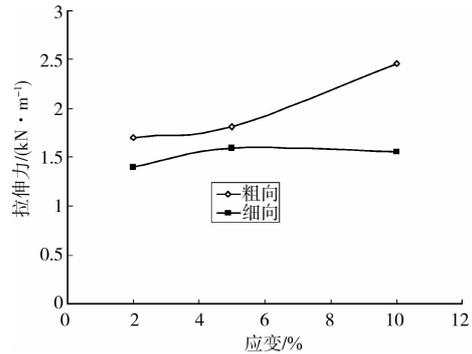


图 3 土工编织网的拉伸力-应变曲线

1.2.3 桩帽 工程原型中的桩帽尺寸为:1 000 mm \times 1 000 mm \times 200 mm, 试验中采用 50 mm \times 50 mm \times 10 mm 的有机玻璃, 来模拟工程中混凝土等级为 C30 的桩帽。由于制作上有偏差, 实际尺寸为 51.14 mm \times 51.14 mm \times 10.04 mm。试验中通过 502 胶水将有机玻璃板与桩连接, 注意粘贴时要避免有机玻璃压着桩身应变片的引线。

1.2.4 模型地基土和路堤填土 模型地基土和制备路堤土采用中南路一基坑的粘土。将土样风干、粉碎, 并过孔径为 3 mm 的筛子。风干后土的含水率为 13.9%, 相对密度为 2.72。通过 $m_w = \frac{m}{1 + \omega_h} \times (\omega - \omega_h)$ 计算出 3 层地基土的加水量, 在武汉大学岩土实验室做压缩和固结快剪剪切试验, 得出的数据如表 2 所示。路堤填土采用轻型击实试验, 测得最优含水率为 16.6%, 最大干密度为 $\rho_{dmax} = 1.71$ g/cm³, 如图 4 所示。用刀将压实后的路堤填土削成试验路堤形状和尺寸。

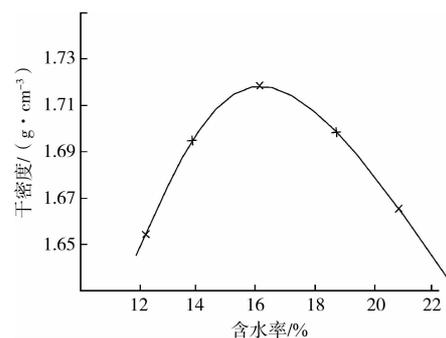


图 4 路堤填土击实曲线

表 2 土的物理力学指标

名称	含水量/%	液限/%	塑限/%	密度/(g · cm ⁻³)	压缩模量/MPa	粘聚力 c/kPa	内摩擦角/(°)
路堤填土	16.6	—	—	2.01	7.8	34	31
持力层	26	42.68	21.83	1.96	5.1	29.2	27
第 2 层土	36	42.68	21.83	1.83	2.82	8.4	10.2
第 3 层土	30	42.68	21.83	1.9	3.5	13.5	22.5

2 仪器埋设及加载方式

2.1 仪器埋设

在路面中心、路肩各埋设一个百分表,来测相应的竖直沉降;在堤底中心、堤底路肩处埋设自制的深层沉降板,如图 5(a)所示,其中 A 点为堤底中心,B 点为堤脚。土压力盒采用 6 个量程为 0.5 MPa 的应变式土压力盒。其中有 2 个埋设在贴有应变片的

桩 3、4 和桩 1、2 的桩间土中;桩 1、2、3、4 分别于桩顶、桩中、桩端对称贴有 2 个应变片,如图 5(b)所示。于桩顶两侧、桩间土处的格栅贴上应变片,共 14 个,如图 5(c)所示。在砂垫层铺设贴有应变片的土工编织网时,为减小所贴应变片的引线对沉降的影响即减小加筋效应,可将引线竖直地从路堤填土中引出,让引线竖直地与应变片相连但又能保证土工编制网的应变片水平埋置,来减小引线对沉降的影响。

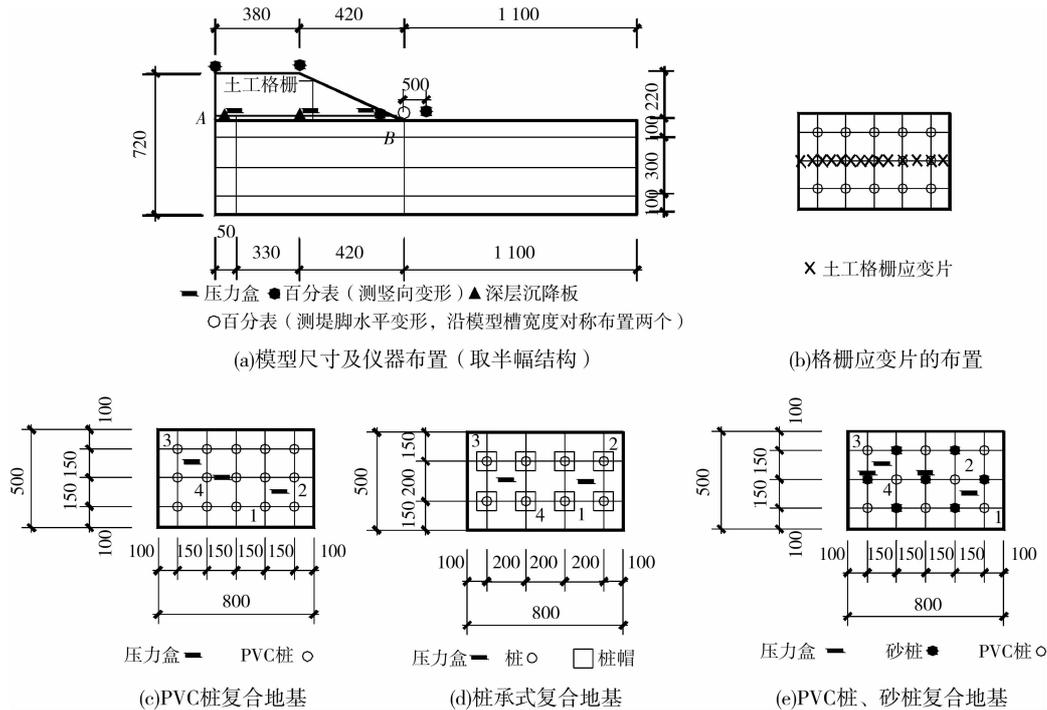


图 5 量测仪器布置图

2.2 加载方式

工程中路堤填土厚度为 6 m,按 1:30 的相似比,在模型箱中采用 200 mm 的填土,采用变加速度方法分 4 层来模拟路堤的 4 级堆载,每次在模型箱里的填筑高度为 50 mm。地基土和路堤填土在固结时的物理学指标如表 1 所示。取几何相似常数为 $c_1 = 30$,根据相似要求,从理论上模型土体的容重应为原型的 30 倍,这是很难实现的。因而在路堤顶面上设置载荷板,其上放置经标定后的千斤顶加荷的方式来解决这个问题,如图 1 所示。每级加荷,每隔 5~15 min 各观测一次沉降、应变片和土压力读数,以后每隔 20 min 各测读一次,累计 2 h。沉降量小于 0.1 mm/h 被认作稳定。沉降相对稳定标准为 ≤ 0.1 mm/h。通过有限元计算,对于第 1、第 3 组试验,在路面上施加均布荷载 $P_u = 84.2$ kPa,第 2 组试验 $P_u = 115.8$ kPa,路堤填土完毕视为 $P = 0$ 的情形。

3 试验结果分析

3.1 变形分析

从图 6、图 7 可以看出,随着荷载的增大,路面中心的沉降也趋于增大,而且沉降的增长速率也在增大。在路面荷载相同时,每组试验的路面路肩沉降明显比相应的路面中心沉降小,其沉降趋势与路面中心沉降相仿。当加载到 $P = 84.2$ kPa 时,第 3 组试验的差异沉降(为 13.2 mm)比第 1 组大(为 12.37 mm),如图 8 所示。说明桩体刚度越大,桩体能承担的荷载也越大,差异沉降越小。对于桩承式路基,桩的中心距为 200 mm,但由于有桩帽的作用,其承担荷载的比例比第 1 组试验的桩体还要大,土体承担的荷载减小,附加应力的影响减小,因而在相同荷载的情况下,可有效地减小沉降量。当路面施加荷载为 84.2 kPa 时,差异沉降为 10.77 mm;加载到 116 kPa 时,差异沉降为 15.5 mm。这说明桩承

式路基在减小差异沉降的同时,还可以适当增大桩的中心距,可以减少桩数。

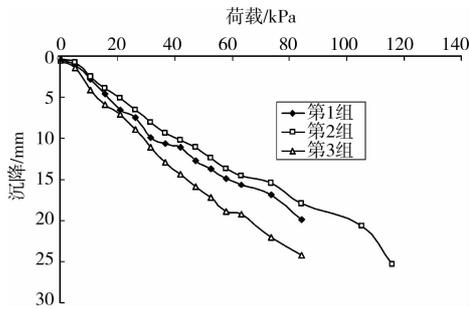


图 6 路面中心的荷载-沉降曲线

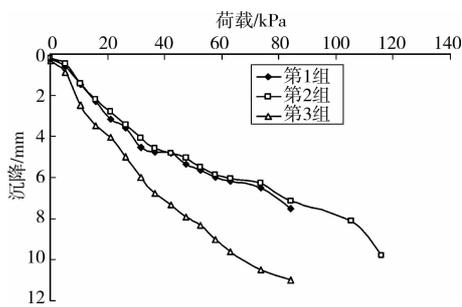


图 7 路面路肩的荷载-沉降曲线

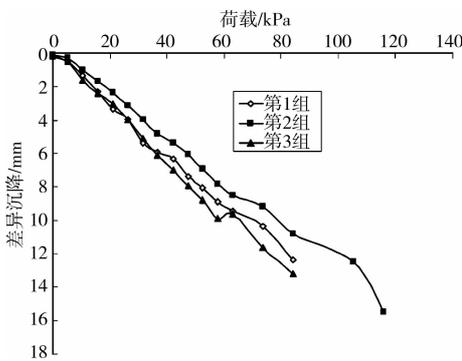


图 8 荷载-路面中心与路肩变形的差异沉降曲线

A、B 点位置见图 5(a)图所示。从图 9 可以看出,3 组试验的堤底中心的沉降比相应的路面中心沉降大,但沉降趋势与路面中心的沉降不完全相同。在图 10 中,当对路面施加荷载等级相同时,对于堤底路肩的沉降,有:第 2 组沉降>第 3 组沉降>第 1 组沉降。

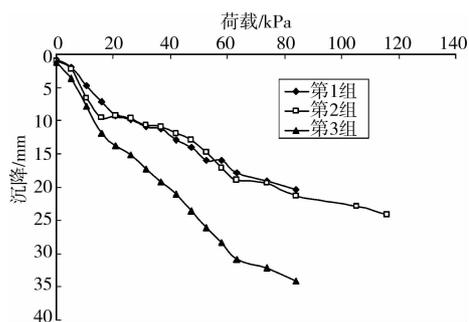


图 9 堤底中心 A 点的荷载-沉降曲线

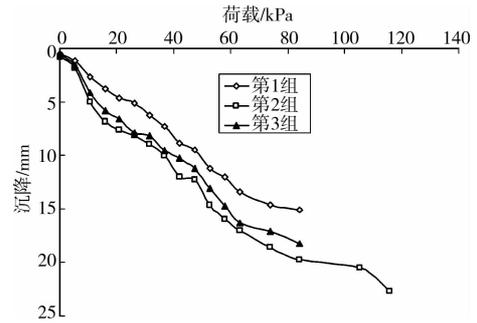


图 10 堤脚 B 点的荷载-沉降曲线

随着荷载的增大,堤底中心及堤底路肩的沉降也随着增大。当在路面施加相同的荷载时,第 3 组试验的沉降最大。在加载初期($P=0\sim 15.8$ kPa),第 2 组试验的堤底中心沉降比第一组略大;从 $P=21\sim 52.6$ kPa,第 2 组试验的堤底中心沉降比第 1 组略小,当 $P>52.6$ kPa 后,第 2 组试验的堤底中心沉降又比第 1 组略大,这可能与试验的加荷速率不完全相同有关。当加荷速度越快,相应的沉降也越大。

3.2 桩土应力比

桩土应力比为桩顶的平均应力与桩间土应力的比值,桩顶应力取对称粘贴于桩顶侧壁的应变片所换算的平均应力。对于第 2 组试验,路堤中心处、堤脚处的桩土应力比比第 1 组、第 3 组大得多。桩抗压刚度大于桩间土抗压刚度,因此桩间土上路堤沉降大于桩帽上路堤沉降,两者之间存在相对位移,在路堤沉降变形过程中,桩间土上路堤通过与桩帽上路堤之间相互作用的剪应力将部分自重传递给桩帽上路堤,使得桩间土承担的荷载减小,而桩承担的荷载增加,路堤中出现了土拱效应。在第 2 组试验中,由于桩帽的加设,使桩体强度在通长范围内发挥更明显^[17],转移到桩体的荷载更多,因而桩土应力比更大。对于第 1 组试验中,当荷载较小时,路堤中心处、堤脚处的桩土应力比和第 3 组试验接近;当荷载较大($P>36.8$ kPa)时,路堤中心处的桩土应力比比第 3 组稍大,但堤脚处桩土应力比比第 3 组稍小,如图 11、图 12 所示。

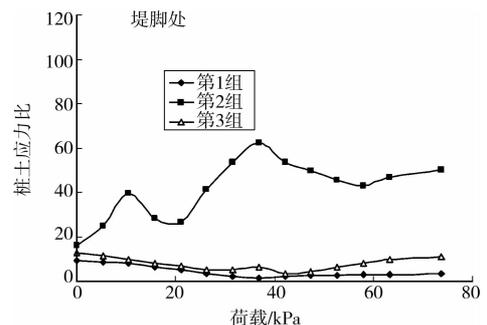


图 11 路堤中心处的桩土应力比

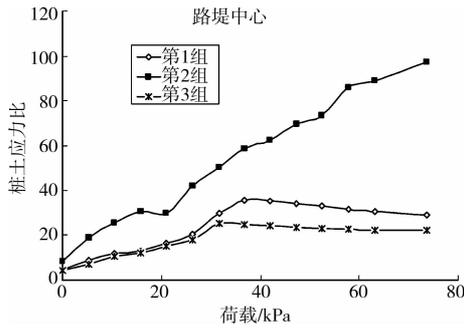


图 12 堤脚处的桩土应力比

在 3 组试验中,在荷载等级相同时,路堤中心处的桩土应力比均比堤脚大。当加载等级较大($P > 63.2 \text{ kPa}$)时,桩土应力比曲线出现平台,说明桩土位移差较大,即填土中出现了土拱效应,同时也说明了桩间土的固结具有时效性。

3.3 土工编织网(格栅)的应变分布

在图 13 和图 14 可以看出,3 组试验的格栅应变变化较紊乱,规律性较差。第 1 组、第 3 组靠近堤脚处的格栅应变为负值;随着与路堤中心的靠近,格栅的应变转化为正值。3 组试验中,越接近路堤中心,格栅的应变越大。在桩顶边缘和桩间土处,桩顶处的格栅应变出现阶段性的峰值,桩间土处的格栅应变数值出现阶段性的波谷。对于第 2 组试验,由于桩顶上有桩帽,传到相应上面的格栅应变片的数值比相同位置的格栅应变片数值大很多,即承担的拉力大得多。

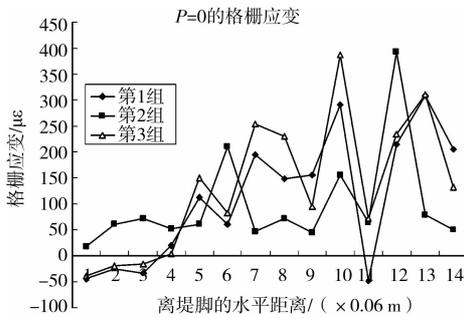


图 13 $P=0$ 时的加筋应变

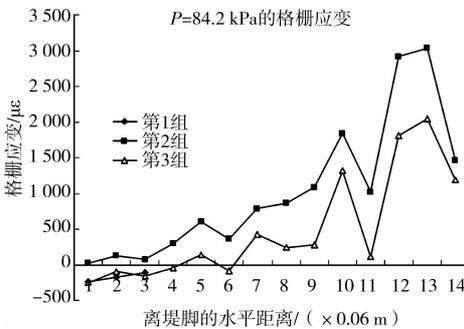


图 14 $P=84.2 \text{ kPa}$ 时的加筋应变

桩顶和桩间土处的格栅应变规律说明,在路堤施工和路面加荷时,格栅与桩相互作用是一个反复调整的过程。从路堤填土完成到千斤顶加荷维持在一

定水平后,通过土工编织网及砂垫层的应力调整,使桩与桩间土分担的应力趋于稳定,此时编织网承受的应力也趋于某一稳定值^[8],如图 13 和图 14 所示。

4 数值模拟分析

为验证模型试验的准确性,采用 ABAQUS 大型有限元软件进行数值分析,由于路基的长度远远大于路基宽度,因而采用 2D 平面应变。在计算中,将桩简化为桩墙,将空间问题转化为平面问题来计算,采用对桩身模量进行折减的方法模拟桩。

$$E_{sp} = \frac{\pi D}{4l} E_p + (1 - \frac{\pi D}{4l}) E_s \quad (2)$$

式中: E_{sp} 为桩墙的弹性模量; E_p 为桩体弹性模量; E_s 为土体弹性模量; l 为桩间距; D 为桩径。

4.1 有限元模型

因路基横断面沿路基中心为对称,有限元模型采用半幅路基建立,以模型试验的材料参数、几何尺寸进行数值分析。水平边界加与之垂直的位移约束,底部加上水平、竖直位移约束。由于桩、桩帽、土的刚度不同,在桩帽、桩侧与土的接触面设定滑动接触单元,桩帽顶、桩底分别与地基土 tie 接触。在数值分析时,桩体和桩帽采用线弹性模型,地基土、路堤填土、砂垫层本构模型为弹塑性模型,屈服准则采用 Mohr-Coulomb 准则,3 组模型试验的计算简图分别如图 15、16、17 所示。

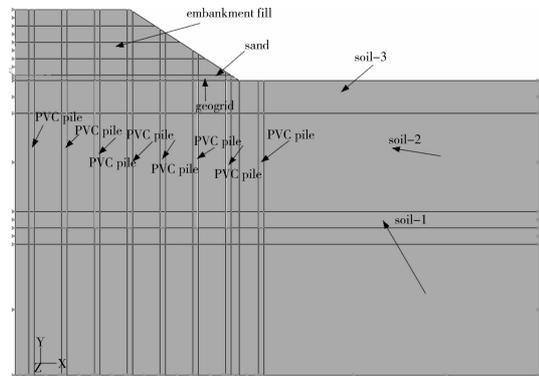


图 15 PVC 桩复合地基计算模型

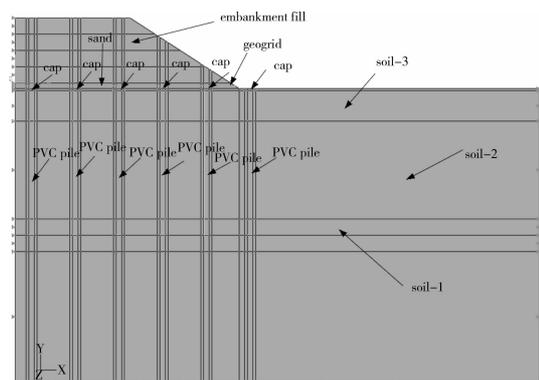


图 16 带帽 PVC 桩复合地基计算模型

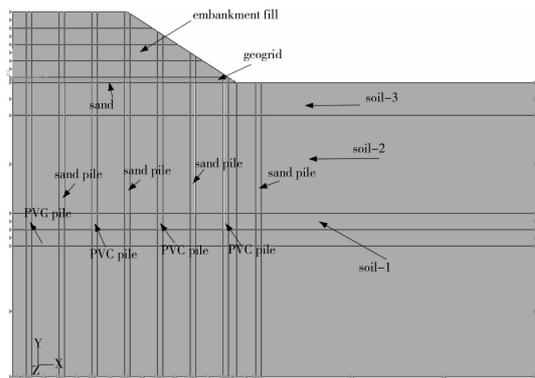


图17 PVC桩及砂桩复合地基计算模型

4.2 计算结果分析

以3组试验的路面中心的荷载-沉降关系为例进行分析,将数值计算结果与试验数据进行对比,如图18所示。可以看出,每组试验在相同荷载下的沉降与计算结果相隔较近,说明试验结果可信度较高,试验数据对于工程设计有一定的指导意义。

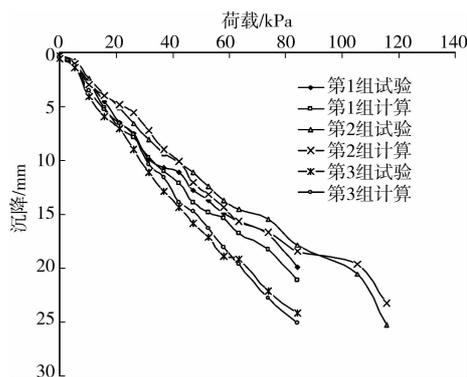


图18 试验与计算结果的对比

5 结论

由于试验条件的局限性,桩网复合地基做到了几何相似,但模型材料选择很难做到完全的相似,模型边界条件与路基的实际边界有一定的出入,实质是缩尺试验。本文室内试验虽不能完全模拟现场桩网复合地基的工作性状,但从定性上分析其规律是可行的。通过3组加固软土路基的试验,得出如下结论:

1)随着荷载的增大,3组试验的路面中心、路肩的沉降、二者的差异沉降也趋于增大。其中,第3组沉降最大,第2组沉降最小。这说明桩承式路基在减小差异沉降的同时,还可以适当增大桩的中心距,可以减少桩数。

2)在3组试验中,在荷载等级相同时,路堤中心处的桩土应力比均比堤脚大。对于第2组试验,路

堤中心处、堤脚处的桩土应力比比第1组、第3组大得多,这是由于桩帽的作用,使桩体承担的荷载更多,因而桩土应力比更大。对于第1组试验中的桩土应力比和第3组接近。

3)3组试验中,越接近路堤中心,格栅的应变越大对于第2组试验,由于桩顶上有桩帽,相应上面的格栅应变片的数值比相同位置的格栅应变片数值大很多。在桩顶边缘和桩间土处,桩顶处的格栅应变出现阶段性的峰值,桩间土处的格栅应变数值出现阶段性的波谷。

由桩土应力比曲线和沉降曲线可知,第2组试验的路面、路肩沉降及二者差异沉降最小,路堤中心、堤脚处的桩土应力比也最大,相应测点的格栅应变也大得多,说明在工程条件相近时,桩承式路基加固软土效果更好。

参考文献:

- [1] 张凤程,夏元友,冯仲仁.管桩加固软土路基处理效果的现场试验研究[J].公路,2005,8(8):290-293.
ZHANG FENG-CHENG, XIA YUAN-YOU, FENG ZHONG-REN. Study on the effect of consolidation soft soil field test by PHC piles[J]. Highway, 2005, 8(8): 290-293.
- [2] COLLIN J G. State-practic for the design of the geosynthetic reinforced load transfer platform in column supported embankments[C]//New Peaks in Geotechnics, 2007:1-12.
- [3] COLLIN J G, WATSON C H, HAN J. Column-supported embankment solves time constraint for new road construction [J]. Contemporary Issues in Foundation Engineering, 2005, 131:1-10.
- [4] MICHAEL P, Mc GUIRE P E, GEORGE M, et al. Almeida load-displacement compatibility analysis of a low-height column-supported embankment[C]//International foundation Congress and Equipment Expo, 2009:225-232.
- [5] SARI W ABUSHARAR, ZHENG JUN-JIE, CHEN BAO-CUO, et al. A Simplified method for analysis of a piled embankment reinforced with geosynthetics [J]. Geotextiles and Genmembranes, 2009(27): 39-52.
- [6] YAN L, YANG J S, HAN J. Parametric study on geosynthetic-reinforced pile-supported embankments [J]. Advances in Earth Structures: Research to Practice, 2006, 151: 255-261.
- [7] 牛建东. 高速铁路桩-网复合地基性状及设计方法研究 [D]. 长沙:中南大学, 2006.
- [8] 徐林荣,牛建东,吕大伟,等. 软基路堤桩-网复合地基试

- 验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2149-2160.
XU LIN-RONG, NIU JIAN-DONG, LV DA-WEI, et al. Experimental study on pile-net composite foundation of high-speed railway on soft soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2149-2160.
- [9] 连峰, 龚晓南, 崔诗才, 等. 桩-网复合地基承载性状现场试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1057-1062.
LIAN FENG, GONG XIAO-NAN, CUI SHI-CAI, et al. Field study of bearing behavior of pile-net composite foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 1057-1062.
- [10] CHEN YUN-MIN, CAO WEI-PING, CHEN REN-PENG. An experimental investigation of soil arching within basal reinforced and unreinforced piled embankments [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008 (26): 164-174.
- [11] 叶阳升, 蔡德钧, 张千里, 等. 桩网支承路基结构的模型试验方法[J]. 铁道建筑, 2009, 6(6): 40-43.
YE YANG-SHENG, CAI DE-JUN, ZHANG QIAN-LI, et al. Model test of pile-net support roadbed structure [J]. Railway Engineering, 2009, 6(6): 40-43.
- [12] 赵明华, 姚琪阳, 陈昌富, 等. 碎石桩复合地基模型试验 [J]. 公路, 2003, 10(10): 33-36.
ZHAO MING-HUA, YAO QI-YANG, CHEN CHANG-FU, et al. Study on model experiment of gravel pile composite foundation [J]. Highway, 2003, 10(10): 33-36.
- [13] 张良, 罗强, 裴富营, 等. 基于离心模型试验的桩帽网结构路基桩端持力层效应研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1192-1199.
ZHANG LIANG, LUO QIANG, PEI FU-YING, et al. Bearing stratum effect at pile end of pile-cap-net structure subgrade based on centrifugal model tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1192-1199.
- [14] HUANG JIE, HAN JIE. 3D coupled mechanical and hydraulic modeling of a geosynthetic-reinforced deep mixed column-supported embankment [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(27): 272-280.
- [15] HAN JIE, BHANDARI ANIL. Evaluation of geogrid-reinforced pile-supported embankments under cyclic loading using discrete element method [C]//US-China Workshop on Ground Improvement Technologies, 2009: 73-82.
- [16] 芮瑞, 夏元友. 桩-网复合地基与桩承式路堤的对比数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 769-772.
RUI RUI, XIA YUAN-YOU. Numerical simulation and comparison of pile net composite foundation with pile supported embankment [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 769-772.
- [17] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.

(编辑 王秀玲)