

基于离心模型试验的高强度桩复合地基桩帽效应分析

BUI Phu Doanh, 罗强, 张良

(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 桩帽的设置及其覆盖率的变化对高强度桩复合地基的工程特性影响巨大, 对桩帽尺寸的合理设计是实现高强度桩-桩间土-加筋垫层协调承载和变形控制的技术关键。结合某铁路新建双线段 ($v \geq 200$ km/h) 现场软基处理工点的具体情况, 进行了 4 组设置桩帽的高强度桩复合地基离心模型试验, 测试了地基变形、桩身应变、桩帽顶面及桩间土压力、垫层拉筋受力等数据。试验数据表明: ①在桩顶设置桩帽能有效发挥高强度桩的承载能力, 调整桩和桩间土的荷载分配, 提高地基的稳定性; ②在桩间距不变的条件下, 地基变形、垫层拉筋受力、桩帽顶面及桩间土压力等随桩帽覆盖率的提高而减小, 桩土应力比则增加; ③垫层拉筋受力沿路基横截面基本呈 M 型对称分布, 峰值出现在左右路肩附近位置, 与地基的剪切破坏位置有较好的一致性。

关键词: 离心模型试验; 软土地基路堤; 高强度桩复合地基; 桩帽效应

中图分类号: TU41 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2008)08-1158-07

作者简介: BUI Phu Doanh (裴富营) (1977-), 越南河内人, 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事路基工程与土工技术方面的研究。E-mail: fuying771020@163.com。

Analysis on pile cap effect in composite foundation with high strength pile by centrifugal model tests

BUI Phu Doanh, LUO Qiang, ZHANG Liang

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The effect of pile caps with various sizes on engineering properties of composite foundation with high strength pile was great. Specific data were collected from the settlement of a soft clay foundation in new double-line railway ($v > 200$ km/h) project. 4 sets of centrifugal model tests were conducted using CFG pile with different sizes of pile cap for soft clay foundation. The pile strain, distribution of pressure on pile caps and on earth, and stress of reinforcement were measured. It was shown that: ①The stability of embankments was raised by CFG piles with caps. ②The larger the size of pile cap, the greater the variation of embankment and decrease of strain of reinforcement with increase of pile strain. ③The reinforcement was distributed in a shape of M along the transverse section. The peak values occurred at the road abutment, indicating good agreement with the failure position of embankments.

Key words: centrifugal model test; soft ground embankment; high strength pile composite foundation; pile cap effect

0 前言

随着社会和经济的发展, 复合地基技术在中国地基处理中得到了愈来愈多的应用。通过二十余年的科研和工程实践, 作为高强度桩复合地基的主要代表, CFG 桩复合地基技术已从最初应用于低层和多层建筑发展到广泛应用于高层和超高层建筑地基处理, 并以其具有施工速度快、工期短、质量容易控制及工程造价低廉等优点, 成为某些地区应用最普遍的地基处理方法之一^[1]。近年来高速公路和铁路客运专线建设逐步引入了 CFG 桩地基处理工法。铁路路基首次应用 CFG 桩地基处理技术是在 2002 年的高速铁路软土地基沉降控制试验研究^[2]科研试验之中, 并在上海安亭

试验工点进行了大规模工程验证测试, 并取得了一系列研究成果, 其后在铁路客运专线建设中逐渐发展成为沉降控制的主要手段。据统计约有 9600 km 在建或拟建客运专线铁路在沉降控制设计中采用 CFG 桩为主的复合地基处理方案。新建武广客运专线铁路的部分路段采用了 CFG 桩-桩帽-加筋垫层复合地基处理技术, 新建京沪高速铁路以 CFG 桩-桩帽-加筋垫层复合地基为主型地基处理措施^[2]。

根据中国“中长期铁路网规划”, 到 2020 年中国

基金项目: 铁道部科技研究开发计划项目 (2007G012)

收稿日期: 2007-09-26

铁路将建成“四纵四横”快速客运通道及 3 个区域城际快速客运系统。高速度、高密度、长距离跨线运输是中国客运专线的主要运营特点。为满足行车安全，乘车舒适和准点运行的要求，铁道线路必须具有结构连续、平顺、稳定、耐久和少维修的性能^[3]。为此，高速铁路无砟轨道路基工后沉降要求不大于 15 mm，该标准明显严于高速公路（100~300 mm）和民用建筑地基（120 mm 总沉降）的要求^[4-8]。

目前，高速铁路软土或松软土地基主要采用高强度桩复合地基处理措施来控制路基沉降。但关于柔性路堤荷载作用下的高强度桩复合地基的作用机理、设计计算方法的研究还较少，远远不能满足其在工程中大规模应用的需要。结合路基工程特点，开展柔性荷载作用下高强度桩复合地基承载特性的研究具有重要的理论意义和工程价值。

针对高速铁路采用高强度桩复合地基技术的应用情况，本文利用土工离心模拟试验技术进行了 4 组不同桩帽尺寸的高强度桩 - 桩帽 - 加筋垫层复合地基的离心模型试验，测试了地基变形、桩身应变、筋带受力、桩帽顶面及桩间土压力等数据，分析了桩帽覆盖率变化对桩 - 帽 - 网相互作用特性的影响。

1 模型设计与试验方法

1.1 试验设备及传感器

本次试验所使用的离心机是西南交通大学的 TLJ—2 型土工离心机，其主要性能指标为：离心机半径（摆动吊斗表面至主轴中心）3 m；有效半径（模型重心至主轴中心）2.7 m；加速范围 10~200g；最大载荷 1000~500 kg（对应 100~200g）；最大载荷时，吊斗底板最大挠度≤0.5 mm；模型箱有效容积 0.8 m（长）×0.6 m（宽）×0.6 m（高）。

试验采用的传感器包括：3 个沉降板 - 位移计（量测路堤中心地基表面的沉降），15 个桩身应变测试点（共测了 3 根桩，每根桩布置 5 个应变测点，分别距桩顶 10, 21.5, 59, 96.5, 145 mm），10 个筋带应变测试点（共测试 2 条筋带，每条筋带布置 5 个应变测点，分别距路堤中心 0, 80.5, 155.5 mm），5 个微型土压力盒（均位于路堤中心附近，3 个布置于桩帽顶面，2 个布置于相邻桩间土），具体情况见图 1、表 1。

表 1 传感器数量表

Table 1 Quantity of sensors

传感器名称	数量	备注
沉降板 - 位移计	3	地基表面沉降(10 mm)
应变计(片)	25	桩身应变, 拉筋应变
微型土压力盒	5	桩帽顶面 (2 MPa) 桩间土 (0.2 MPa)

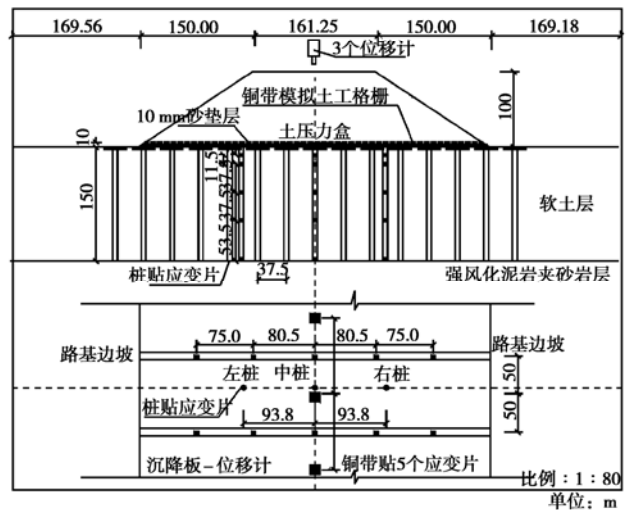


图 1 离心模型路基设计及主要传感器布置图

Fig.1 Layout of main sensors

1.2 试验方案

(1) 工点概况

原型路基工点场地属低丘区，地势平缓，地表多为水田，地基表层软土厚 0~10 m，软塑一流塑状，松软土层厚 1~8 m，软塑状，粉质黏土厚 1~5 m，软塑—硬塑状，下卧强风化泥岩夹砂岩，地基土层见图 2。

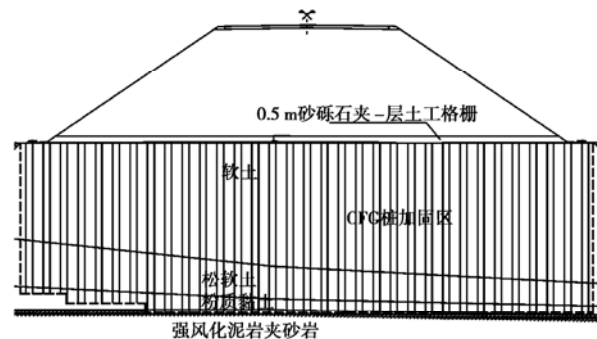


图 2 现场原型路基设计图

Fig. 2 Design of embankment

试验模型计划模拟的原型路堤：双线铁路厚层水平状软土地基路堤，软土层厚 12 m，路基面宽 12.9 m，边坡坡度 1:1.5，路堤中心高度 8.2 m。路堤底部设有 0.5 m 厚砂砾石垫层，中间夹一层双向抗拉强度为 50 kN/m 的土工格栅。地基处理措施为 CFG 桩，振动沉管法施工，桩径 Φ0.5 m、桩长 12 m、桩间距 1.3 m，正三角形布置，处理至坡脚外 2 m，打穿软土层至粉质黏土顶面。原型路基结构见图 2。

试验模型尺寸由原型地基和路堤按模型率 $N=80$ 换算得出，模拟了在 3 m 桩间距条件下的 4 组不同桩帽尺寸（无桩帽、880 mm×880 mm、1360 mm×1360

mm、1840 mm×1840 mm)的原型路基。模型路堤高100 mm,模型地基软土层厚150 mm,模型桩直径 $\Phi 6.25$ mm,长度150 mm,按正三角形布置,桩间距37.50 mm(6倍桩径间距),模型桩帽尺寸分别为0, 11, 17, 23 mm。

(2) 模型材料

由于离心模型试验是以相似理论为基础的缩尺模型试验,所以模型试验用的材料与边界条件要满足相应的相似原则与条件。

a) 地基软土

模型所用地基软土由现场原型工点取回,其主要物理力学为:天然含水率为34.5%,重度为18.93 kN/m³, $c=21.41$ kPa, $\omega=8.63^\circ$ 。取样点位于地表下1 m;由于距实验室较远,天气较热,尽管采取了密封措施途,但试样的水分难免会有所损失,其强度指标偏大。统计分析表明,平均值的0.95置信区间分别为 $c[13.48$ kPa, 29.94 kPa], $\varphi[5.33^\circ, 11.93^\circ]$ 。试验中取下置信界限 $c=13.48$ kPa, $\varphi=5.33^\circ$ 为强度控制指标。

在离心机中进行的固结试验表明,当软土地基制备含水率为37%时,在80 g的离心机运行3 h后,其固结强度与原型较为接近,见表2。

表2 离心固结后模型地基软土强度指标

Table 2 Physical and mechanical parameters of soil layers after consolidation

模型	含水率/%	重度/(kN·m ⁻³)	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
一	35.18	18.66	12.13	0.23
二	36.11	18.79	8.25	2.72
三	35.75	19.12	10.38	2.86
四	35.65	18.96	12.50	2.35

b) 路堤填土

模型所用路堤填土由现场原型工点取回,为红层泥岩。重型击实试验的最佳含水率为10.8%,最大干密度为21.7 kN/m³,击实曲线见图3。模型路堤按压实系数 $K=0.95$ 进行制作。

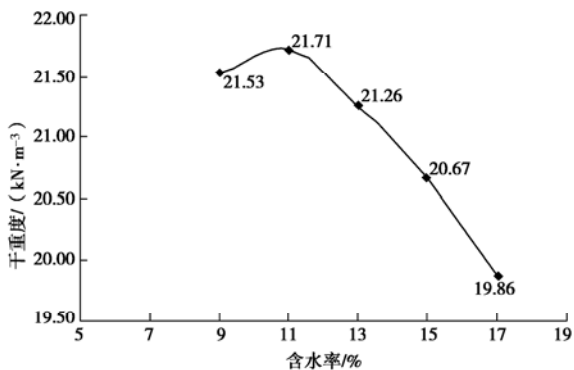


图3 红层泥岩击实试验曲线

Fig. 3 Compaction test curves of red clay

c) 桩体材料

原型CFG桩材料为C15~C20混凝土,直径为 $\Phi 50$ cm。按应变等效(E_A 相等)及密度等效原则,采用0.3 mm厚白铁皮制作模型管桩,外径 $\Phi 6.25$ mm,管内填充矿粉(重量等效)。模型桩与原型桩的刚度换算见表3。

表3 模型与原型桩的刚度换算

Table 3 Conversion of stiffness of piles

材料	E/MPa	A/mm^2	E_A
原型CFG桩	2.3×10^4	3.07×10^{-5}	0.705
模型白铁皮薄管桩	1.2×10^5	5.60×10^{-6}	0.673

d) 拉筋材料

原型拉筋材料为土工格栅,若按模型比尺缩小将无法实现。按强度相似原则,本次试验用抗拉强度375 MPa、延伸率8%的紫铜带模拟,带宽,布置成10 mm, 30 mm×3 mm的网格,其强度等效为300 kN/m的原格栅抗拉强度(该值明显大于50 kN/m的设计土工格栅强度是因为更低强度的铜带模型格栅在制作上出现了困难)。

e) 桩帽材料

原型桩帽材料为C20~C25混凝土,厚400 mm。模型采用模量 $E_{\text{铁}}=210 \times 10^3$ MPa的铁板来模拟,按抗弯刚度等效原则得铁板厚2.6 mm,正方形边长分别为0, 11, 17, 23 mm,对应的桩帽覆盖率为2.5%, 10%, 23.8%, 43.5%。相当于桩间距分别为6, 3, 1.96, 1.46倍桩径。

1.3 试验过程

模型地基制作完毕后,在 $n=80g$ 的离心加速度下固结3 h,使模型地基软土强度与原型基本一致。然后,在预定位置布设模型桩,安装相应传感器,再在路堤坡脚范围内铺设细砂夹一层铜带的加筋垫层,再放上预制好的模型路堤,之后布设剖面变形测量网格。模型制作完成之后,即可按试验方案进行离心加载。

在模型试验正式加载前,为保证模型各部分,尤其是传感器的紧密接触,消除模型制作过程产生的一些不利影响,首先进行了在16g离心加速度条件下的2 min预压。试验中,用一次成形的路堤来模拟原型路堤的分层填筑,模型路堤高100 mm,分成4次加载,每次加载按荷载等效的原则算出相应离心加速度。每层填筑时间按原型填筑45 d进行换算,模拟路堤填筑施工工期时间为180 d;之后模拟185 d年的放置期,然后模拟为期4 a的工后运行期。具体加载历程见图4和表4。

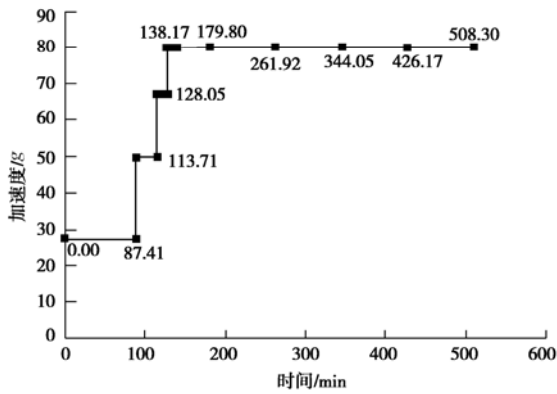


图 4 离心加载时间历程曲线

Fig. 4 Curve of loading process of centrifugal models

表 4 离心加载历程

Table 4 The loading process of centrifugal models

时期	加速度 /g	离心加载时间 /min	原型填筑工期 /d
模型预压	16.00	2.000	—
填土至 2 m	27.23	87.410	45
填土至 4 m	49.64	26.300	45
填土至 6 m	67.23	14.340	45
填土至 8 m	80.00	10.130	45
放置期	80.00	41.630	185
工后 1 a	80.00	82.125	365
工后 2 a	80.00	82.125	365
工后 3 a	80.00	82.125	365
工后 4 a	80.00	82.125	365

整个试验过程包括制模、离心加载运转、拆模、数据记录等步骤，其中制模包括地基软土的配制、砂垫层的铺设、路堤模型的制作、相关传感器的加工和埋设，拆模后还将测试模型土层的相关物理力学数据，用于对各组不同条件下的试验数据进行分析 and 比较。

2 试验结果与分析

2.1 地基变形

离心运行结束后，未设桩帽的模型一地基沉降显著，向两侧挤出明显，已发生了破坏，如图 5 所示。设置桩帽的模型二、三、四地基沉降变形较小，处于稳定状态，如图 6 所示。

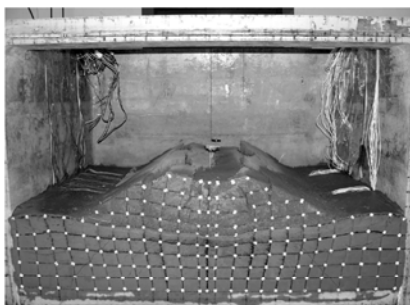


图 5 离心模型一的运行后地基变形情况

Fig. 5 Cross-section of Model 1 after testing

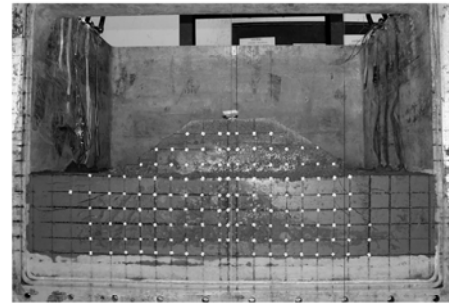


图 6 离心模型二的运行后地基变形情况

Fig. 6 Cross-section of Model 2 after testing

试验数据表明，在桩间距为 6 倍桩径的情况下，随着桩帽尺寸增加，地基变形逐渐减小，见图 7~9。地基沉降随加载时间逐渐增加，路堤施工期增长较快，工后运营期逐渐减小，见图 10。与未设桩帽的模型一相比，当桩帽边长分别增加至 11 m（模型二）、17 m（模型三）、23 m（模型四）时，路堤中心下地基表面沉降（工后 4 a）别减小 72.3%，88.6%，91.4%，坡脚地表水平变形分别减小 85%，91.7%，98.3%。对比各模型之间的沉降变形数据可知，桩帽边长大于 17 mm 以后，进一步减小地基沉降变形的效果已不显著，表明在本文的试验条件下，桩帽边长取 17 mm、对应的桩帽覆盖率为 23.8% 有较好的技术经济效益。

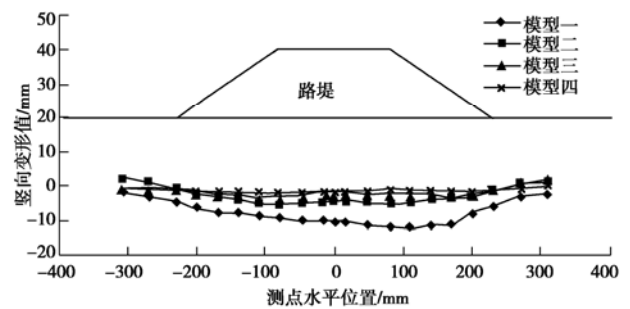


图 7 离心运行后各模型地表沉降曲线

Fig. 7 Settlement curves of ground surface of models after testing

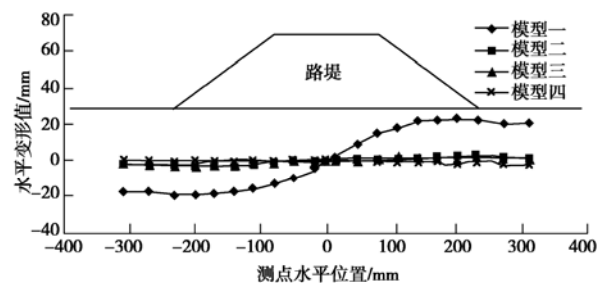


图 8 离心运行后各模型水平变形曲线(正/负值分别表示向右/左变形)

Fig. 8 Horizontal displacement curves of ground surface models of after testing

当桩帽边长分别为 11, 17, 23 mm 时，对应的地基施工期与工后沉降如表 5 所列。依据新建客运专线铁路设计暂行规定^[7-8]，时速 300, 250, 200 km/h 有

砟轨道一般路段路基工后沉降量应不大于 50, 100, 150 cm。由试验数据可知, 桩帽覆盖率分别为 43.5%, 23.8%, 10%时, 所对应的 4 a 工后沉降分别为 0.39, 0.92, 1.89 mm, 基本满足规范要求。

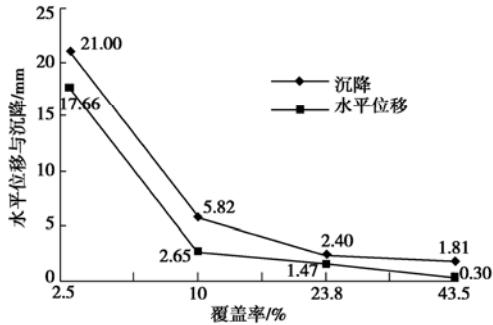


图 9 地表沉降与水平位移随桩帽覆盖率变化曲线

Fig. 9 Variation of surface settlement and horizontal of ground displacement with size of pile cap

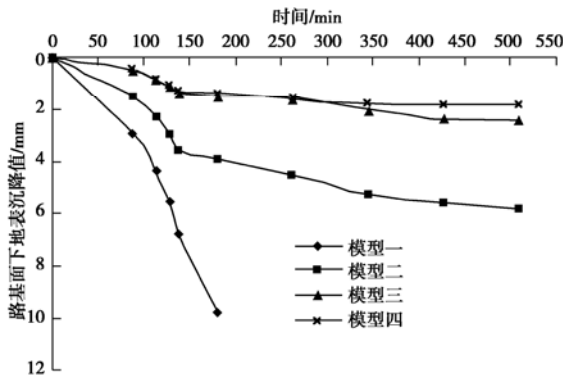


图 10 各模型路堤中心地表沉降加载历程曲线

Fig. 10 Variation of ground surface settlement nearby the center of embankment with time

表 5 不同桩帽边长的地基施工期与工后沉降

Table 5 Settlements of foundation with pile caps of different size during and after construction

桩帽边长/mm	覆盖率/%	施工期/mm	4 a 工后沉降/mm
23	43.50	23.80	10.00
17	1.41	1.47	3.92
11	0.39	0.92	1.89

2.2 桩体受力

试验数据表明, 桩身应变沿桩深表现出先增大后减小的基本趋势, 如图 11 所示。随着加载历程的增加, 桩身应变总体上也表现出增大的趋势。各模型的桩体应变随加载历程的变化如图 12 所示(数据为桩身应变最大的#2 测点)。

测试数据表明, 路堤填筑完成后的地基固结阶段, 随着时间的增加, 各模型的桩身应变均表现出减小的趋势(模型一在填土结束时应变片发生了故障)。

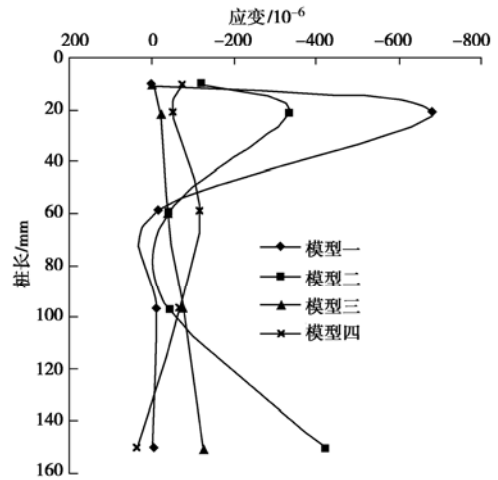


图 11 填土至 4 m 时各模型桩体应变分布曲线

Fig. 11 Distribution of pile strain when embankment fills = 4 m

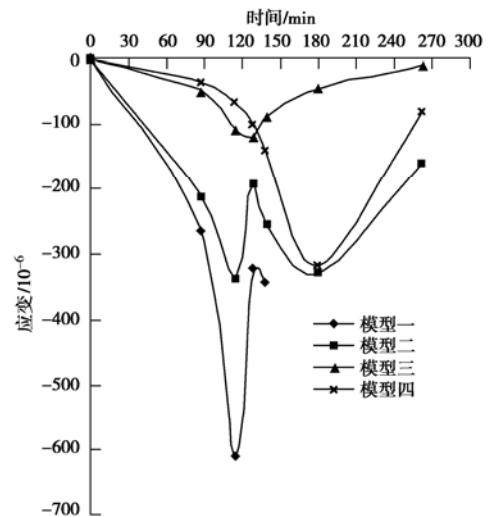


图 12 各模型桩体应变(2 应变片)随加载历程曲线

Fig. 12 Variation of pile strain during loading

2.3 垫层拉筋受力

试验数据表明, 土工格栅应变值沿路基横向表现出在路堤中心及两侧边坡处较小, 在左右路肩附近位置较大的基本规律, 呈 M 形分布, 如图 13 所示。

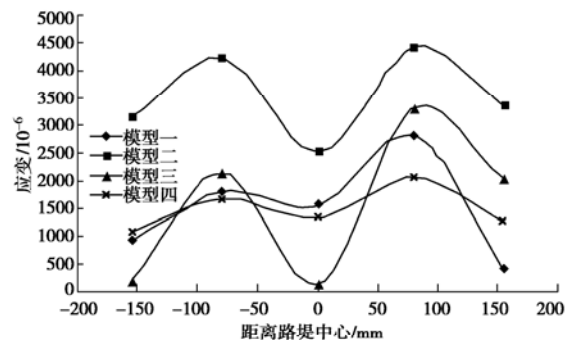


图 13 填土完成时各模型垫层拉筋应变分布曲线

Fig. 13 Distribution of strain in reinforcement when embankment filling was completed

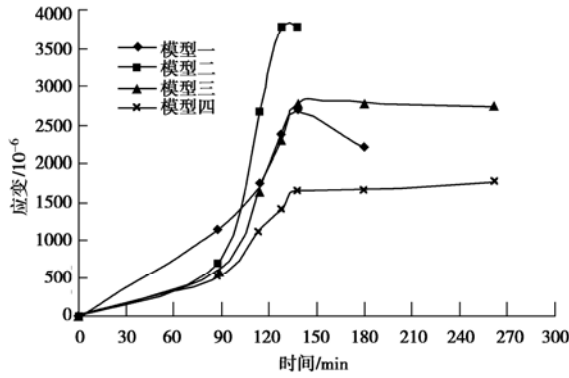


图 14 各模型垫层拉筋应变(左路肩下)随加载历程曲线
Fig. 14 Distribution of strain in reinforcement during loading

随时间延长,各模型筋带应变逐渐增加,施工期、放置期及工后 1 a 增长明显,其后趋于稳定,见图 14。对比各模型二、三、四的垫层拉筋受力可知,随桩帽尺寸的增加,地基沉降的减小,筋带应变也逐渐减小。

2.4 桩帽顶面和桩间土压力

随着桩帽尺寸的增大,桩帽顶面和桩间土的压力值均减小。随着时间延长,在施工期、放置期及工后 1 a 各模型桩帽顶和桩间土的压力逐渐增加,其后桩间土压力略有减小,而桩帽顶面压力略有增加,如图 15, 16 所示。其中,模型一由于未设桩帽,桩顶应力集中,刺入垫层现象显著,拉筋断裂,垫层结构破损;同时,桩间土压力较大,已超过其承载能力,产生了剪切破坏,水平变形较大,推斜桩体。

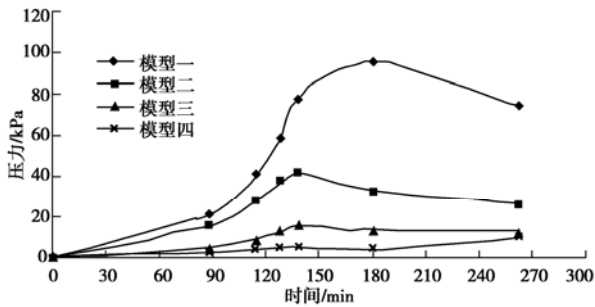


图 15 各模型桩间土应力随加载历程曲线
Fig. 15 Variation of earth pressure during loading

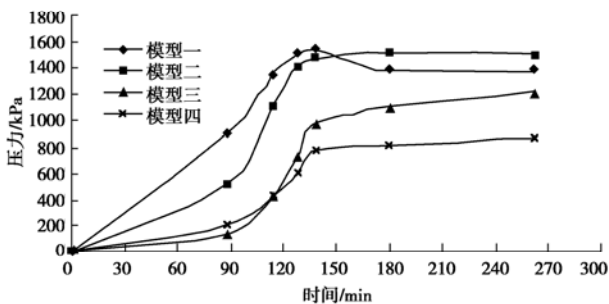


图 16 各模型桩帽顶面应力随加载历程曲线
Fig. 16 Variation of earth pressure on pile caps during loading

测试数据表明,在填土完成至工后 1 a 期间,随着桩帽覆盖率的增加,桩间土的压力平均值由模型一的约 85.07 kPa 减小至模型四的约 7.43 kPa; 同样,桩帽顶面的压力平均值由模型一的约 1383.53 kPa 减小至模型四的约 846.50 kPa。变化规律如图 17 所示。

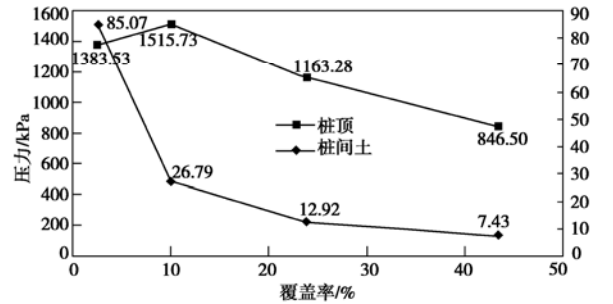


图 17 桩帽顶面和桩间土应力平均值随桩帽覆盖率曲线
Fig. 17 Variation of earth pressures on pile cap and between piles with sizes of pile cap

由测试数据可得,无桩帽的模型一桩顶和桩间土压力最大值分别约为 1535 kPa 和 96 kPa,地基已发生破坏;有桩帽的模型二、三、四(桩帽边长为 11, 17, 23 mm)桩顶和桩间土压力最大值分别约为 1524, 1223, 869 kPa 和 41, 16, 10 kPa,地基稳定状态逐渐提高。由此可以初步判定,在设计高强度桩复合地基时,通过在桩顶设置桩帽,合理确定桩帽的覆盖率来控制桩顶和桩间土承受的压力及垫层拉力是实现桩土协调承载和控制地基沉降变形的重要条件。

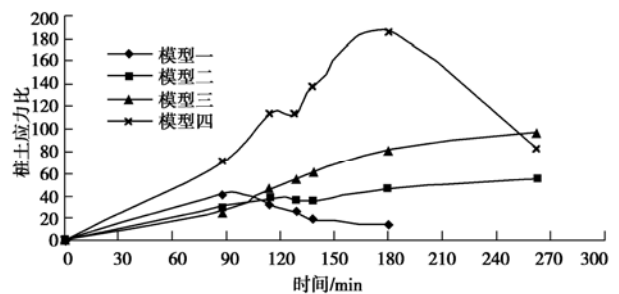


图 18 各模型桩土应力比随加载历程曲线
Fig. 18 Variation of pile - soil stress ratio during loading

由图 18 的数据曲线可知,桩帽顶面土压力明显大于桩间土压力,桩土应力比随着加载历程而增大(放置期结束后,模型四的桩帽顶面压力值增加较小,而桩间土压力值增加相对较大,桩土应力比减小明显)。图 19 的数据曲线表示,在填土完成至工后 1 a 期间,随着桩帽边长的增加,桩土应力比平均值由模型一的 16.53 增加至模型四的 134.26。可见,随着桩帽覆盖率的增加,桩间土承受的压力减小率大于桩帽顶面压力的减小率。

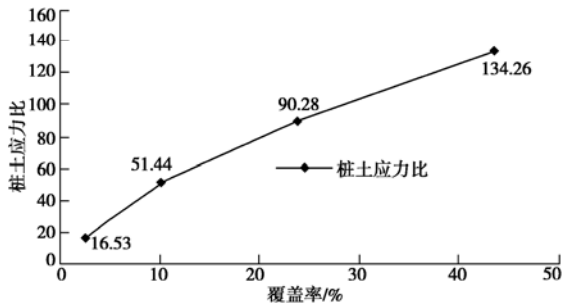


图 19 桩土应力比平均值随覆盖率曲线

Fig. 19 Variation of average pile - soil stress ratio with sizes of pile cap

3 结 论

(1) 在高强度桩顶布置桩帽能有效发挥高强度桩的承载能力, 调整桩和桩间土之间的荷载分配, 提高地基稳定性; 即使在 3 m 桩间距的疏桩布设条件下, 在高强度桩的桩顶设置一定尺寸的桩帽, 仍能实现减小地基变形、降低垫层拉筋受力、改善桩土受力的工程效果。试验数据表明, 当桩帽覆盖率在 2.5%~43.5% 变化时, 路基中心地表沉降在 21.00~1.81 mm、坡脚地基表层水平位移在 17.66~0.30 mm、垫层筋带应变从在 3793~1754 $\mu\epsilon$ 、桩帽顶面压力在 1384~869 kPa、桩间土压力在 85.07~7.43 kPa、桩土应力比在 16.53~134.26 变化。

(2) 高强度桩复合地基的桩帽尺寸对桩帽顶面和桩间土承受的压力及垫层拉力有重大影响, 合理设置桩帽覆盖率是实现桩土协调承载和控制地基沉降变形的重要条件。试验结果表明, 在 6 倍桩径间距条件下, 若桩顶未设桩帽, 桩顶应力集中, 刺入变形明显, 垫层拉筋断裂, 桩间土承受的应力超过了其强度, 地基沉降变形显著, 发生了剪切破坏; 相应, 若在桩顶设置的一定覆盖率的桩帽, 均能减小桩帽顶面和桩间土的压力及垫层拉筋受力, 提高垫层的抗刺入和桩间土的抗变形能力, 降低地基的沉降。当桩帽边长约为桩间距的 0.35, 0.50, 0.65 倍时, 路基的工后沉降基本能满足新建时速 200, 250, 300 km 客运专线铁路设计暂行规定对有砟轨道一般路段路基的要求。

(3) 设置了桩帽的高强度桩复合地基的垫层拉筋受力 (应变) 沿路基横向基本呈 M 型对称分布, 峰值

出现在左右路肩的附近, 与地基的剪切变形破坏位置有良好的对应关系。桩身应力 (应变) 沿桩长基本呈现先增大后减小的变化趋势, 最大值出现在距顶约 21.5 mm 的位置; 地基的沉降变形基本对称于路堤中心, 沉降主要发生在路基面范围的地基处, 水平变形主要发生在左右侧的边坡下。

参考文献:

- [1] 闫明礼, 张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (YAN Ming-li, ZHANG Dong-gang. Technology and engineering practice of CFG pile composite foundation[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese))
- [2] 铁道第四勘察设计院, 等. 京沪高速铁路 CFG 桩复合地基综合技术研究[R]. 2007. (China Railway Siyuan Survey and Design Group Co, Ltd, et al. Beijing-Shanghai high-speed railway research comprehensive technology of CFG pile composite foundation[R]. 2007. (in Chinese))
- [3] 何华武. 无砟轨道技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005. (HE Hua-wu. Technology of ballastless track[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005. (in Chinese))
- [4] [2005]754 客运专线无砟轨道铁路设计指南[S]. 2005. ([2005]754 Interim design provisions for ballastless track passenger special line of railway[S]. 2005. (in Chinese))
- [5] JGJ79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 2002. (JGJ79—2002 Technical code for building foundation treatment[S]. 2002. (in Chinese))
- [6] JTGD30—2004 公路路基设计规范[S]. 2004. (JTGD30—2004 Specification for design of highway subgrades[S]. 2004. (in Chinese))
- [7] [2007]47 新建时速 300~350 公里客运专线铁路设计暂行规定[S]. 2007. ([2007]47 Interim design provisions for a new 300 km/h passenger special line of railway[S]. 2007. (in Chinese))
- [8] [2005]140 新建时速 200~250 公里客运专线铁路设计暂行规定[S]. 2005. ([2005]140 Interim design provisions for a new 200~250 km/h passenger special line of railway[S]. 2005. (in Chinese))