

文章编号: 1000-7598(2012)11-3323-08

超大面积深厚软土桩-网复合地基承载性状 模型试验研究

于进江^{1,2}, 程谦恭¹, 贺宏武², 李成辉¹, 文 华³

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 中铁十九局集团有限公司, 辽宁 辽阳 111000;
3. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010)

摘 要: 基于厦深铁路潮汕车站地基处理加固工程, 完全参照原型的软土地基地层分布情况, 设计了两种不同桩间距下的超大面积深厚软土桩-网复合地基物理模型试验, 对荷载传递机制与不同桩间距下桩体荷载分担比、桩土应力比及地基沉降规律等进行了系统研究。结果表明, 桩身轴力沿着桩身高度往下先逐渐增大到某一深度后又逐渐减小, 随着桩间距增大, 桩承担上部荷载的方式由摩擦桩逐渐向端承桩变化; 随着桩间距增大, 桩身中性点下移, 桩身最大负摩阻力出现的位置下降, 且其值减小; 桩间距对桩-土应力比有显著影响, 而对桩体荷载分担比影响较小; 不同桩间距下, 两桩中心桩间土与桩顶差异沉降均小于4桩中心桩间土与桩顶差异沉降; 随着路堤填土荷载增加, 土工格栅表现为拉应变逐渐增大, 拉应变曲线刚开始比较平缓, 后逐渐变陡, 增大的速率先慢后快。

关 键 词: 深厚软土; 桩-网复合地基; 承载性状; 模型试验

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Model test research on bearing behavior of pile-net composite foundation on oversized deep soft soil

YU Jin-jiang^{1,2}, CHENG Qian-gong¹, HE Hong-wu², LI Cheng-hui¹, WEN Hua³

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. China Railway 19 Bureau Group Co., Ltd., Liaoyang, Liaoning 111000, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract: Based on the foundation treatments of Xiamen-Shenzhen railway Chaoshan station and in-situ distribution of soft soil layers, two laboratory models of pile-net composite foundation with different pile spacings are designed to study the load transfer mechanism, pile load sharing ratio, pile-soil stress ratio and settlement laws. The results show that the axial force of pile shaft increases first down along pile shaft to a certain depth, then gradually reduces. With the increment of pile spacing, the bearing pattern tends to be ending-bearing form; and the neutral point and the position of maximum negative skin friction move down. The pile spacing has obvious effect on pile-soil stress ratio, but minor influence on pile load sharing ratio. The differential settlement of center soil between piles and pile top is smaller for double pile than that of four piles. Tensile strain of geogrid rises gradually as the embankment filling load increasing; tensile strain curve is initially smooth, then steepening gradually; the rising rate of curve is slow at first then becomes fast afterwards.

Key words: deep soft soil; pile-net composite foundation; bearing behavior; model test

1 引 言

软土在我国分布广泛, 类别众多。由于软土具有天然含水率高、孔隙比大、压缩性高、结构性强以及抗剪强度低等特点, 其工程性质极差, 必须对地基进行处理加固, 才能满足要求。桩-网复合地基

是近年来发展起来的一种软土地基处理方法, 国内外已有不少学者对其进行了多方面的研究。1990年, 根据 Terzaghi 的沟渠式土拱模型, Jones 等^[1]给出了桩-网复合地基桩-土应力比经验公式。在此基础上, 1995年英国建立了世界上第一套用于桩-网复合地基设计的“BS8006”规范, 在理论上填补了

收稿日期: 2011-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41172260, No. 51108393); 高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20110184110018); 国家重点基础研究发展计划(973计划)(No. 2008CB425801); 四川省教育厅科研项目(No. 09ZC108)。

第一作者简介: 于进江, 男, 1964年生, 博士研究生, 从事岩土工程与铁道工程方面的研究和施工。E-mail: 47702099@qq.com

通信作者: 程谦恭, 男, 1962年生, 博士生导师, 从事地质工程与岩土工程方面的研究。E-mail: chengqiangong@home.swjtu.edu.cn

桩-网复合地基设计的空白。Yvonne Rogbeck 等^[2]介绍了瑞典、挪威等北欧国家桩-网复合地基简化计算模型,并提出了基于侧向滑移和竖向荷载扩散极限状态的设计步骤。饶为国^[3]在总结已有工程经验和理论研究成果的基础上,给出了桩-网复合地基的定义,揭示了其特点和应用前景,分析了其组成和工作机制。连峰^[4]设计了一个小比尺模型试验,研究在路堤荷载作用下,桩和桩间土之间的荷载分配。芮瑞^[5]通过理论分析与数值计算相结合的方法,对路堤荷载传递机制进行了深入的分析。余闯^[6]利用轴对称有限元计算模型,分析了路堤荷载作用下刚性桩复合地基中不带桩帽和带桩帽刚性桩单桩性状。袁则循^[7]对复合地基褥垫层的作用随厚度变化的规律进行了研究。夏元友等^[8]利用设置试验段进行现场试验,对采集到的路基孔隙水压力和桩-土相对位移数据进行分析处理,从应力和变形两方面验证了刚性桩竖向土拱的存在性。牛建东^[9]在现场试验的基础上利用数值计算方法对桩-网复合地基的承载机制、稳定性及沉降规律进行研究。张超^[10]对桩-网复合地基进行了室内模型试验,通过多组对比试验;对影响桩-网复合地基性能的桩间距、加筋体位置、加筋体层数、填料高度等进行了研究,揭示桩-网复合地基的工作特性。

从目前的研究现状来看,对于桩-网复合地基的研究,主要以现场监测和数值模拟方法为主,模型试验进行的相对较少。在所做的模型试验中,对桩、土差异沉降的模拟,多采用人工控制的方式,与实际工程的工况有出入,不利于研究桩、土差异沉降规律。

本文针对厦深铁路潮汕车站特有的超大面积深厚软土地基(潮汕车站整个软基处理面积达 $25 \times 10^4 \text{ m}^2$,其中仅车站场坪区就超过了 $10 \times 10^4 \text{ m}^2$,潮汕车站软土埋深多为 30~40 m,局部可达 60~70 m,层厚多为 10~20 m,最大可达 30 m。),完全参照工程现场的软土地基地层分布情况进行了物理模型试验,其路堤荷载参照实际工况施加,消除了人工控制地基沉降所造成的不利影响。同时,利用模型的对称性,在同一个模型中设置了两种桩间距的布桩方案,以研究不同桩间距下的桩-网复合地基承载性状差异。本文研究成果为类似工程积累经验,为工程设计和施工提供借鉴和指导。

2 模型试验研究

2.1 原型地质概况及处理方案

原型地层从上到下分布情况为:粉质黏土(Q_4^{al})、

淤泥质细砂(Q_4^{al})、淤泥(Q_4^{mc})、黏土(Q_3^{al})、中砂(Q_3^{al})。

原型路基顶面宽为 26 m,路堤边坡坡率为 1:1.5,路基填方高度共 5.5 m(路基本体为 2.5 m,基床底层为 2.3 m,基床表层为 0.7 m),褥垫层(碎石垫层)3 层共 0.6 m,其间铺设细砂两层共 0.1 m 及两层双向土工格栅,双向土工格栅设计抗拉强度不小于 80 kN/m。原型路堤及地层分布如图 1 所示。地基加固区采用预应力管桩(PHC 桩)处理,正方形布置,桩间距为 2.5 m,PHC 桩采用 PHC500A 100-12 型,外径为 0.5 m,壁厚为 0.1 m,混凝土强度等级为 C60,经现场实测该断面管桩实际压入地基为 25 m。管桩桩顶设置长×宽×高为 1.6 m×1.6 m×0.35 m 的钢筋混凝土桩帽,桩帽采用 C35 混凝土现浇。

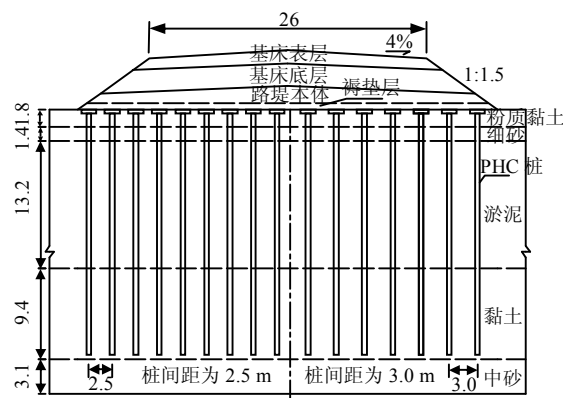


图 1 原型路堤及地层分布(单位: m)

Fig.1 Embankment and layer distribution of prototype (unit: m)

2.2 模型试验介绍

2.2.1 模型试验设计及材料选择

在模型设计中,为了使试验结果尽可能地与工程实际效果相似,运用了相似理论。原型超大面积深厚软土桩-网复合地基物理模型相关参数表达式如下:

$$f(\sigma, \varepsilon, E, \nu, \gamma, \varphi, c, q, l, \delta) = 0 \quad (1)$$

式中:各参数依次分别为应力、应变、弹性模量、泊松比、重度、内摩擦角、黏聚力、均布面力荷载、长度、位移。参数总数为 10,基本量纲数为 2(对静力学问题,基本量纲为 F 、 L),根据 π 定理,独立的 π 项有 8 个。

选取几何相似常数作为第 1 基本量,基于实验室条件、所取土样多少、可操作性等因素综合考虑,取几何相似常数为 20;选取重度相似常数作为第 2 基本量,由于模型试验采用的地基土是从现场取回来的,且试验过程中要将模型地基土体的物理性质尽量还原到与原型现场相似的状态,因此,要求模

型和原型地基土的重度相等，从而确定重度相似常数为 1。为了达到重度相似，要通过加水的处理方法满足含水率相同的要求，通过分层填筑的方法达到重度相等的要求。

模型试验在 2.53 m×0.75 m×1.82 m 的模型槽中进行，该尺寸满足沿线路延伸方向 4 排桩帽的宽度，且考虑了边界效应的影响；由于路堤及地基的对称性，以模型槽中线为界，两边按照不同的桩间距布置（模型中为 0.125 m 和 0.15 m，对应原型的桩间距分别为 2.5 m 和 3.0 m），如图 1 所示。

PHC 管桩采用 PP-R 管模拟；桩帽采用普通杉木来模拟；土工格栅采用聚乙烯四宗单层网来模拟。按照重度相似条件，地基土层按照密度控制（相似比取 1）；褥垫层采用细角砾石来模拟；路堤填土模拟的关键是满足荷载相似比，为此，采用普通中砂，按照荷载相似比来加载。

在模型试验中，要完全实现所有材料的参数相似是不可能的，本试验中桩（PP-R 管）及桩帽（普通杉木）的弹性模量、网（聚乙烯四宗单层网）的抗拉强度等指标都未能严格满足相似比要求，因此，本试验为小结构试验^[11]。

2.2.2 量测仪器布置

本模型试验中采用了电阻应变片、微型土压力盒、沉降观测标 3 种量测仪器来采集试验数据。测试的主要内容为：桩身轴力、桩和桩间土附加应力、土工格栅应变、桩和桩间土的沉降量。桩身电阻应变片对称地布置在桩内壁，每种桩间距下布置 4 根测试桩，按照两种不同的贴片方案粘贴应变片，每种方案各 2 根，如图 2 所示。其余量测仪器布置如图 3 所示。图中“cg”代表内壁贴有应变片的测试管桩，“ty”代表微型土压力盒，“cj”代表沉降观测标点，“g”代表土工格栅上的应变片。图 3 中，奇数号测试管桩按照方案 1 粘贴应变片，偶数号测试管桩按照方案 2 粘贴应变片。具体测试方案如表 1 所示。

2.2.3 路堤加载方案

工程现场的路堤加载受原料供应、天气变化等多种因素影响，没有固定的规律。模型试验中，按每层 3 cm 的速率加载，每层所加荷载根据现场路基对应高度处的填料密度及厚度，按照相似比确定，共需加载 9 次，每次加载对应的厚度及荷载如表 2 所示。

由于模型试验中对路堤填土的压实难以达到原型现场的压实度，造成最上层填土铺设时路堤实际高度超过预计路基顶面和模型槽顶面，为了达到荷载相似，对于超过的部分采用等重砝码代替。

力扩散角的影响下，复合地基顶面受到最上层砝码荷载的作用与等重路堤填料的作用是相近的，不存在明显的应力集中等差异，满足重力加载的要求^[12]。故对于最上层路堤填土，采用等重砝码代替是可行的。本试验最终的模型如图 4 所示。

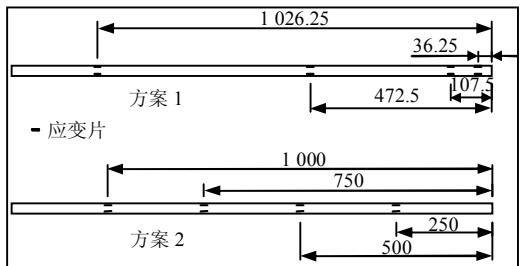


图 2 管桩应变片布置方案（单位：mm）

Fig.2 Distribution plan of strain gauges in pile (unit: mm)

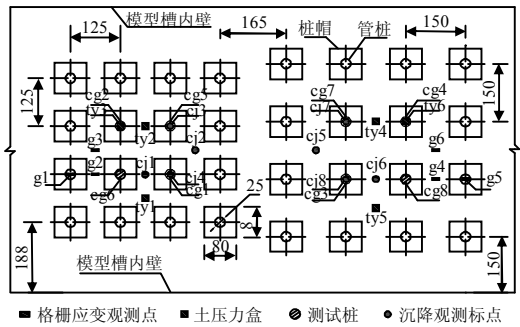


图 3 测试元器件布置图（单位：mm）

Fig.3 Distribution chart of testing components(unit:mm)

表 1 试验具体测试方案

Table 1 Detailed testing scheme

测试项目	量测仪器	布置方案	数据采集
桩身轴力	电阻应变片 (BE350-3AA)	合理安置于 管桩桩身	CM-1L 静态 电阻应变仪
摩阻力			由桩身轴力推算
桩土应力比、 桩体荷载比	BW-0.5 型微型 土压力盒	分别埋设于 桩帽与桩间土	CM-1L 静态 电阻应变仪
桩、土沉降	沉降观测标	分别安设于 桩帽与桩间土	百分表
土工格栅变形	电阻应变片 (BE350-3AA)	粘贴在模型 网材上	CM-1L 静态 电阻应变仪

表 2 模型路堤分层填土情况

Table 2 Layered filling situation of model embankment

序号	厚度/cm	荷载/kN	备注
1	3.5	1.19	路堤本体填料
2	3	2.16	路堤本体填料
3	3	2.94	2.45 cm 路堤本体填料+ 0.55 cm 基床底层填料
4	3	3.96	基床底层填料
5	3	4.79	基床底层填料
6	3	5.58	基床底层填料
7	3	6.33	2.32 cm 基床底层填料+ 0.68 cm 基床表层填料
8	3	7.03	基床表层填料，用等重砝码代替
9	3	7.69	基床表层填料，用等重砝码代替



图4 模型试验俯视图

Fig.4 Top view of model test

3 试验结果及分析

3.1 桩身轴力分析

两种桩间距下桩身轴力随荷载的变化情况分别如图 5、6 所示。小桩间距表示现场 2.5 m 的桩间距,即模型中 12.5 cm 的桩间距;而大桩间距表示现场 3 m 的桩间距,即模型中 15 cm 的桩间距,下同。

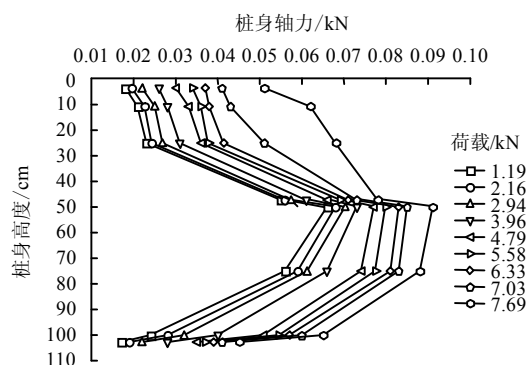


图5 小桩间距下桩身轴力

Fig5 Axial forces of piles with small pile-spacing

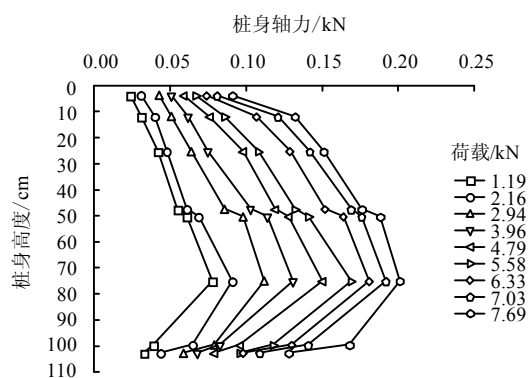


图6 大桩间距下桩身轴力

Fig.6 Axial forces of piles with large pile-spacing

从图 5、6 可知:桩身轴力沿着桩身高度往下先逐渐增大到某一深度后又逐渐减小;在不同的地基土层中,桩身轴力以不同的速率变化,大桩间距下桩身轴力沿桩身分布比小桩间距下桩身轴力沿桩身分布更均匀,说明小间距下桩侧摩阻力较大间距桩侧摩阻力发挥更充分;对应每一级荷载,小桩间距

下桩端轴力都小于大桩间距下桩端轴力,说明小桩间距下桩体下部承载力发挥程度不如大桩间距下桩体下部承载力发挥程度。桩身轴力随深度增加说明管桩受到桩侧土体的负摩阻力,而随深度减小说明管桩受到桩侧土体的正摩阻力,因此,随着桩间距增大,桩身受负摩阻力区段加深,桩承担上部荷载的方式由摩擦桩逐渐向端承桩变化。

3.2 桩身侧摩阻力分析

两种桩间距下桩身侧摩阻力随荷载的变化情况分别如图 7、8 所示。

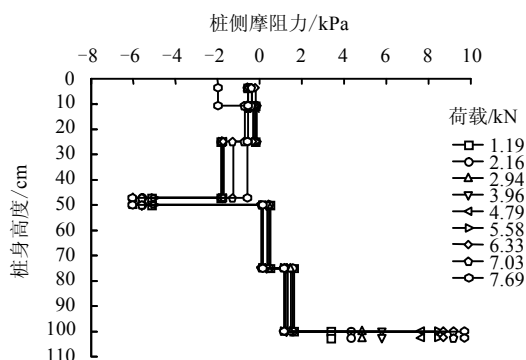


图7 小桩间距下桩身侧摩阻力

Fig.7 Side friction forces of piles with small pile-spacing

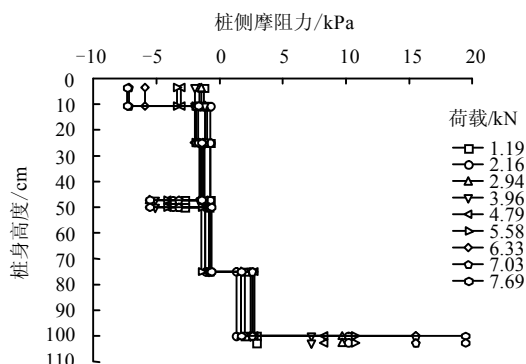


图8 大桩间距下桩身侧摩阻力

Fig.8 Side friction forces of piles with large pile-spacing

从图 7、8 可知:两种桩间距下,随着桩身深度增加,桩侧摩阻力最初为负摩阻力,到达一定深度后又变为正摩阻力,说明在上部荷载作用下,桩顶向褥垫层产生了一定的刺入量,且桩的沉降量比桩间土的沉降量小,桩顶相对桩间土向上位移;小桩间距下,中性点位置在桩身深度 50 cm 附近,负摩阻力的桩长区约占整个桩长的 40%,而大桩间距下,中性点位置在桩身深度 75 cm 附近,负摩阻力的桩长区约占整个桩长的 60%,说明室内试验模型中,随着桩间距的加大,桩身中性点下移,轴力增大,桩承担上部路堤填土荷载的方式由端承摩擦桩逐渐向端承桩转变,这与桩身轴力所反映的规律是一致的。

在不同地基土层中, 桩侧摩阻力以不同的速率变化, 且都是在对应桩身深度 50 cm 附近的淤泥层中产生最大负摩阻力, 说明淤泥层中桩-土相对位移相对其他土层要大, 且土的压缩位移量比桩的位移量大, 从而使桩侧产生负摩阻力。

两种桩间距下都是在淤泥层底部出现中性点。小桩间距下, 桩身最大负摩阻力位于桩身 46 cm 高度附近, 其值约为 6 kPa; 大桩间距下桩身最大负摩阻力位于桩身 50 cm 高度附近, 其值约为 5 kPa, 说明随着桩间距增大, 桩身最大负摩阻力出现的位置下降, 且其值减小。

3.3 桩-土应力比、桩体荷载分担比分析

两种桩间距下的桩-土应力比随荷载变化情况分别如图 9、10 所示。两种桩间距下的桩体荷载分担比分别如图 11、12 所示。

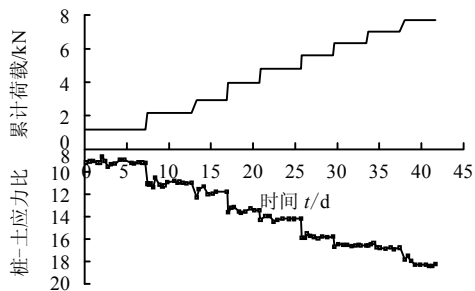


图 9 小桩间距下桩-土应力比

Fig.9 Pile-clay stress ratio of small pile-spacing

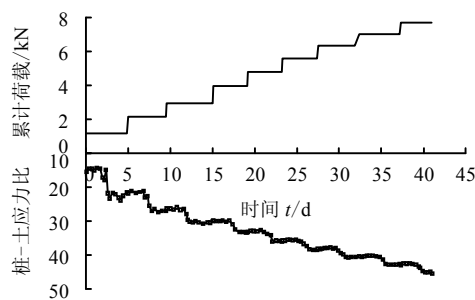


图 10 大桩间距下桩-土应力比

Fig.10 Pile-clay stress ratio of large pile-spacing

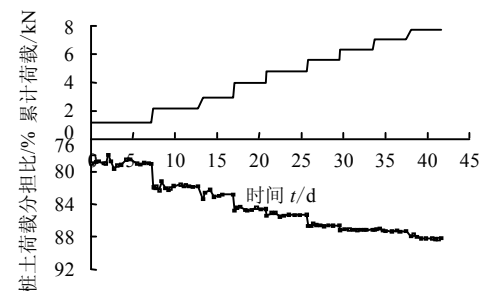


图 11 小桩间距下桩体荷载分担比

Fig.11 Pile-clay load-sharing ratio of small pile-spacing

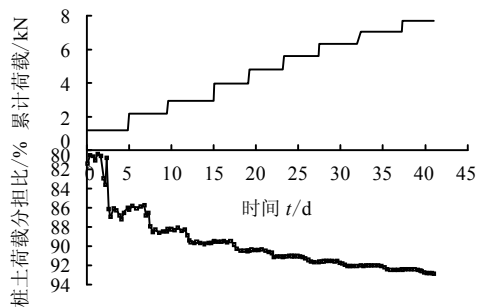


图 12 大桩间距下桩体荷载分担比

Fig.12 Pile-clay load-sharing ratio of large pile-spacing

从图 9~12 可知, 随着时间的增长, 随着路堤填土荷载的增加, 两种桩间距下的桩-土应力比与桩体荷载分担比变化规律相似: 小桩间距下桩-土应力比从最初的 9 逐渐增大到最终稳定的 20, 桩体荷载分担比从最初的 79% 逐渐增大到最终稳定的 88%, 而大桩间距下桩-土应力比从最初的 15 逐渐增大到最终稳定的 45, 桩体荷载分担比从最初的 81% 逐渐增大到最终稳定的 92%; 桩-土应力比和桩体荷载分担比增大的速率随着时间的增长均逐渐变慢, 说明在加载初期, 桩的承载力发挥并不充分, 随着路堤填土荷载的进一步增加, 桩、土共同承担的荷载由桩间土逐渐向桩顶转移, 桩的承载力才逐渐发挥出来; 随着路堤填土荷载增加, 对应于每一级荷载, 桩-土应力比和桩体荷载分担比都有一次激增, 然后趋于平稳, 直至施加下一级荷载, 越接近加载后期, 跃升幅度越小, 直至达到最终的稳定值; 小桩间距下, 桩-土应力比稳定在 20 左右, 桩体荷载分担比稳定在 88% 左右; 大桩间距下, 桩-土应力比稳定在 45 左右, 桩体荷载分担比稳定在 92% 左右, 可见, 室内试验模型中, 随着桩间距增大, 桩-土应力比明显增大, 桩体荷载分担比略有增大, 说明桩间距对桩-土应力比有显著影响, 而对桩体荷载分担比影响较小; 两种桩间距下, 桩体荷载分担比在加载初期就已达到 80% 左右, 且在加载后期都稳定在较高水平, 说明桩-网复合地基中, 管桩承担了绝大部分上部荷载, 将路堤荷载传递到深层地基, 减小了桩间土受到的附加荷载, 从而起到控制沉降的作用。

3.4 桩、土沉降分析

对桩、土沉降的分析, 有利于研究复合地基的土拱效应作用及理清褥垫层的性状原理。图 13、14 分别为小桩间距、大桩间距下的桩顶和桩间土沉降随荷载变化曲线; 图 15 为小桩间距下的 2 桩中心及 4 桩中心桩间土与桩顶差异沉降随荷载变化曲线; 图 16 为大桩间距下的 2 桩中心及 4 桩中心桩间土与桩顶差异沉降随荷载变化曲线。

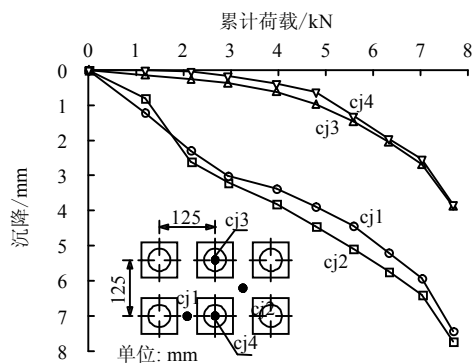


图 13 小桩间距下沉曲线

Fig.13 Settlement curves of small pile-spacing

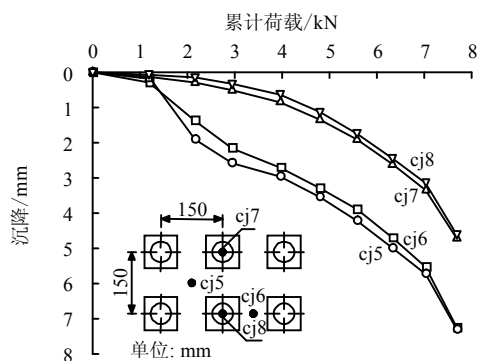


图 14 大桩间距下沉曲线

Fig.14 Settlement curves of large pile-spacing

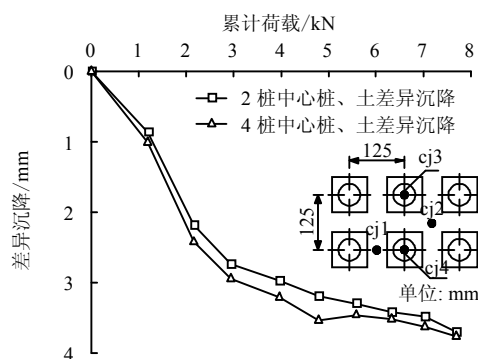


图 15 小桩间距下差异沉降曲线

Fig.15 Differential settlement curves of small pile-spacing

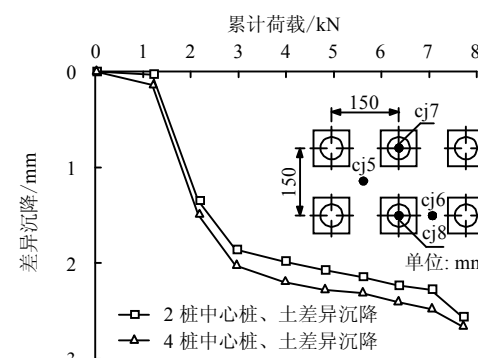


图 16 大桩间距下差异沉降曲线

Fig.16 Differential settlement curves of large pile-spacing

从图 13、14 可知：由于桩、土刚度差异，桩间土的沉降大于桩顶的沉降，桩顶发生向上刺入褥垫

层的变形；小桩间距下，桩顶的平均沉降变化速率约为 0.5 mm/kN ，桩间土平均沉降变化速率约为 1 mm/kN ；大桩间距下，桩顶平均沉降变化速率约为 0.62 mm/kN ，桩间土平均沉降变化速率约为 1 mm/kN ，可见，桩间土的沉降随荷载变化速率明显大于桩顶沉降随荷载变化速率，这是由桩、土之间的刚度差异所引起的；两种桩间距下，对应于各级荷载水平，2 桩中心桩间土沉降（对应于 cj1、cj6 沉降标）比 4 桩中心桩间土沉降（对应于 cj2、cj5 沉降标）小。例如，当上部路堤填土荷载为 6.33 kN 时，cj1 的沉降为 5.196 mm ，cj2 的沉降为 5.738 mm ，cj6 的沉降为 4.699 mm ，cj5 的沉降为 4.993 mm ，可见，2 桩中心桩间土沉降小于 4 桩中心桩间土沉降，说明 2 桩中心桩间土承担荷载小于 4 桩中心桩间土分担荷载，两桩中心处上部路堤土拱效应大于四桩中心处。两种桩间距下，随着路堤荷载增加，桩顶沉降曲线都是由缓变陡，桩间土沉降曲线经历了陡-缓-陡的变化过程，这也间接反映了褥垫层调节桩、土沉降是一个反复进行递进调节的过程。

从图 15、16 可知：两种桩间距下，随着路堤填土荷载增加，桩、土差异沉降曲线都是由陡变缓，说明越到加载后期，桩、土差异沉降变化越小。小桩间距下，2 桩中心桩间土与桩顶差异沉降从 0 逐渐增大到约 3.7 mm ，4 桩中心桩间土与桩顶差异沉降从 0 逐渐增大到约 3.8 mm ；而大桩间距下，2 桩中心桩间土与桩顶差异沉降从 0 逐渐增大到约 2.5 mm ，4 桩中心桩间土与桩顶差异沉降从 0 逐渐增大到约 2.6 mm 。可见，不同桩间距下，2 桩中心桩间土与桩顶差异沉降均小于 4 桩中心桩间土与桩顶差异沉降，且随着桩间距增大，2 桩中心桩、土差异沉降与 4 桩中心桩、土差异沉降的差别减小。

3.5 土工格栅变形分析

两种桩间距下的土工格栅变形随荷载变化情况如图 17、18 所示。

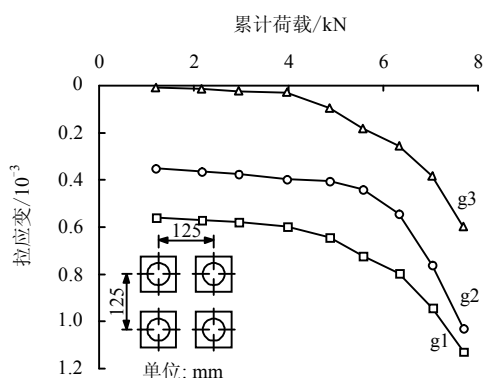


图 17 小桩间距下格栅应变曲线

Fig.17 Geogrid strain curves of small pile-spacing

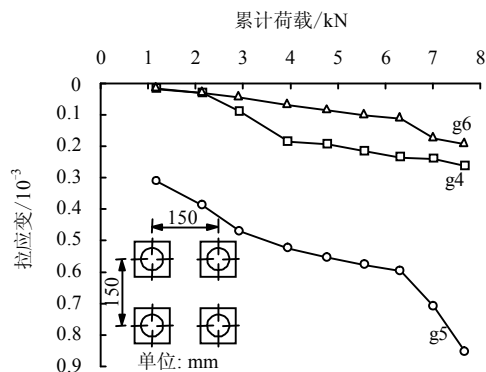


图 18 大桩间距下格栅应变曲线

Fig.18 Geogrid strain curves of large pile-spacing

从图 17、18 可知, 两种桩间距下随着路堤填土荷载的增加, 土工格栅都表现为拉伸应变逐渐增大, 小桩间距下, 格栅应变从 0 逐渐增大到约 1.1×10^{-3} ; 而大桩间距下, 格栅应变从 0 逐渐增大到约 0.9×10^{-3} , 说明从一开始增加荷载到最终施加荷载结束, 褥垫层全程参与了协调桩、土受力及调节桩、土差异沉降的作用; 小桩间距下, 在上部荷载从 0~4.79 kN 过程中, 拉伸应变曲线较为平缓, 平均增大速率约为 10^{-5} kN^{-1} , 在上部荷载从 4.79~7.69 kN 过程中, 拉伸应变曲线斜率较大, 平均增大速率约为 $18.5 \times 10^{-5} \text{ kN}^{-1}$, 而大桩间距下, 在上部荷载从 0~6.33 kN 过程中, 拉伸应变曲线较为平缓, 平均增大速率约为 $1.9 \times 10^{-5} \text{ kN}^{-1}$, 在上部荷载从 6.33~7.69 kN 过程中, 拉伸应变曲线斜率较大, 平均增大速率约为 $18.3 \times 10^{-5} \text{ kN}^{-1}$, 可见, 随着上部路堤填土荷载的增大, 褥垫层的作用逐渐得到了发挥, 且加载后期比加载初期发挥得更快; 小桩间距下, 桩帽顶上的格栅 (对应于 g1 应变片) 应变最终约为 1.15×10^{-3} , 2 桩中心桩间土上的格栅 (对应于 g2 应变片) 应变最终约为 1.05×10^{-3} , 4 桩中心桩间土上的格栅 (对应于 g3 应变片) 应变最终约为 0.6×10^{-3} , 而大桩间距下, 桩帽顶上的格栅 (对应于 g5 应变片) 应变最终约为 0.88×10^{-3} , 2 桩中心桩间土上的格栅 (对应于 g4 应变片) 应变最终约为 0.28×10^{-3} , 4 桩中心桩间土上的格栅 (对应于 g6 应变片) 应变最终约为 0.2×10^{-3} , 可见, 土工格栅最大的应变位于桩帽顶, 2 桩中心的其次, 最小的应变位于 4 桩中心, 说明桩帽顶的土工格栅受力最大, 2 桩中心的其次, 最小的位于 4 桩中心, 这间接反映了褥垫层调整荷载分担比及协调桩、土差异沉降的作用发挥度, 且其与沉降曲线反映出的规律是一致的。

4 结 论

(1) 桩身轴力沿着桩身高度往下先逐渐增大到某一深度后又逐渐减小。小桩间距下桩体下部承载力发挥程度不如大桩间距下桩体下部承载力发挥程度。随着桩间距增大, 桩身受负摩阻力区段加深, 桩主要承载方式由摩擦型逐渐向端承型变化。

(2) 淤泥层中桩-土相对位移相对其他土层要大, 且土的压缩位移量比桩的位移量大, 从而使桩侧产生负摩阻力; 随着桩间距增大, 桩身中性点下移, 桩身最大负摩阻力出现的位置下降, 且其值减小。

(3) 在加载初期, 桩的承载力发挥得并不充分, 随着路堤填土荷载的进一步增加, 桩、土共同承担的荷载由桩间土逐渐向桩顶转移, 桩的承载力才逐渐发挥出来。随着路堤填土荷载增加, 对应于每一级荷载, 桩-土应力比和桩体荷载分担比都有一次跃升, 然后趋于平稳。桩间距对桩土应力比有显著影响, 而对桩体荷载分担比影响较小。

(4) 由于桩、土刚度差异, 桩间土的沉降速率大于桩顶的沉降, 桩顶发生向上刺入褥垫层的变形; 随着桩间距增大, 2 桩中心桩、土差异沉降与 4 桩中心桩、土差异沉降的差别减小。

(5) 随着路堤填土荷载增加, 土工格栅都表现为拉伸应变逐渐增大; 从一开始增加荷载到最终施加荷载结束, 褥垫层全程参与了协调桩、土受力及调节桩、土差异沉降的作用; 随着上部路堤填土荷载的增大, 褥垫层的作用逐渐得到发挥。

参 考 文 献

- [1] British Standard 8006. Code of practice for strengthened/reinforced clays and other fills[S]. London: British Standards Institute, 1995.
- [2] ROGBECK Y, FRANZÉN G, SCANDIACONSULT C A, et al. Nordic guidelines for reinforced soils and fills[S]. [S. l.]: Nordic Geosynthetic Group, 2003.
- [3] 饶为国. 桩-网复合地基原理及实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [4] 连峰. 桩网复合地基承载机理及设计方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [5] 芮瑞. 刚性桩加固软土地基的路堤荷载传递机理与优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.

- [6] 余闯. 路堤荷载下刚性桩复合地基理论与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [7] 袁则循. 复合地基褥垫层作用规律的模型试验研究[J]. 北京城市学院学报, 2006, (2): 80—84.
YUAN Ze-xun. Research on the effect of the composite foundation cushion by the method of the physical model experiment[J]. **Journal of Beijing City University**, 2006, (2): 80—84.
- [8] 夏元友, 芮瑞. 刚性桩加固软土路基竖向土拱效应的试验分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 327—331.
XIA Yuan-you, RUI Rui. Experimental analysis of vertical soil arching effect of embankment reinforced by rigid piles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(3): 327—331.
- [9] 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.
- [10] 张超. 桩承加筋土复合地基的模型试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [11] 李德寅, 王邦楣, 林亚超. 结构模型实验[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [12] 马永欣, 郑山锁. 结构试验[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

上接第 3322 页

- [7] 苏承东, 张振华. 大理岩三轴压缩的塑性变形与能量特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 273—280.
SU Cheng-dong, ZHANG Zhen-hua. Analysis of plastic deformation and energy property of marble under pseudo-triaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(2): 273—280.
- [8] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003—3010.
XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun. Criteria for strength and structure failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(17): 3003—3010.
- [9] 余红发, 裴锐, 任岩. 石膏脱水动力学机理及不同脱水相的性能[J]. 沈阳建筑工程学院学报, 1998, 14(4): 380—383.
YU Hong-fa, PEI Rui, REN Yan. The principle of dehydration kinetics of gypsum and the properties of dehydrated phases[J]. **Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute**, 1998, 14(4): 380—383.
- [10] 刘泉声, 许锡昌. 温度作用下脆延岩石的损伤分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 408—411.
LIU Quan-sheng, XU Xi-chang. The analysis of damage of brittle rock under temperature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(4): 408—411.
- [11] OLGAARD D, KO S C, WONG T F. Deformation and pore pressure in dehydrating gypsum under transiently drained conditions[J]. **Tectonophysics**, 1995, 245(3—4): 237—248.