

DOI: 10.11779/CJGE2022S2011

桩承式路堤桩土荷载分担特性物理模型试验研究

吕玺琳^{1,2}, 庞博¹, 朱长根³, 张甲峰⁴, 徐柯锋³, 马泉¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 陕西省特殊岩土性质与处理重点实验室; 3. 上海宝冶集团有限公司 上海 200941;
4. 上海民航新时代机场设计研究院有限公司, 上海 200335)

摘要: 基于自主研发的物理模型试验装置, 开展了桩承式路堤桩土荷载分担特性试验。通过模拟桩土差异沉降形成过程, 分析了不同填土高度下桩承式路堤应力分布变化特性, 并阐明了桩土应力传递规律。研究表明: 桩间土上方路堤自重传递至桩顶, 进而导致桩间土的竖向土压力减小, 桩顶土压力增加。随着桩土差异沉降增加, 桩土应力比变化呈现出先快速增加、后略有减小、最后趋于稳定的变化趋势。路堤填土高度越大, 最终稳定状态的桩土应力比越大。试验研究成果可为桩承式路堤工程设计提供理论支持。

关键词: 桩承式路堤; 差异沉降; 模型试验; 桩土应力比

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2022)S2 - 0050 - 04

作者简介: 吕玺琳(1981—), 男, 教授, 主要从事岩土力学与工程方面研究工作。E-mail: xilinlu@tongji.edu.cn。

Physical model tests on load-sharing characteristics of piles and soils in pile-supported embankment

LÜ Xi-lin^{1,2}, PANG Bo¹, ZHU Chang-gen³, ZHANG Jia-feng⁴, XU Ke-feng³, MA Quan¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shaanxi Key Laboratory for the Property and Treatment of Special Soil and Rock; 3. Shanghai Baoye Group Co., Ltd., Shanghai 200941, China; 4. Shanghai CAAC New Era Airport Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: Based on the self-developed physical model test device, the model tests on the load-sharing characteristics of piles and soils in pile-supported embankment are carried out. Through the formation process of the differential settlement between the piles and the soils, the stress transfer laws of pile-soil under different fill heights are studied and clarified. The results show that the partial weight of the embankment above the soils between the piles transfers to the pile top so as to lead to the decrease of the vertical pressure between the piles and the increase of the pressure at the pile top. With the increase of the differential settlement between the piles and the soils, the change of pile-soil stress ratio shows a trend of rapid increase at first, then a slight decrease, and finally tends to be stable. Furthermore, with the increase in the height of embankment fill, the stable value of pile-soil stress ratio becomes large. The experimental results may provide a theoretical support for the design of pile-supported embankment.

Key words: pile-supported embankment; differential settlement; model test; pile-soil stress ratio

0 引言

桩承式路堤能有效控制沉降, 在软土地区路基工程中得到广泛应用。当路堤变形时, 桩和土间的差异沉降导致路堤应力重分布从而发生土拱效应^[1]。土拱效应发生过程中, 桩间土承担的土压力朝桩传递, 因而有必要针对桩土应力传递规律开展研究。

模型试验及数值模拟被用于桩承式路堤土拱效应及桩土分担变化规律的研究。芮瑞等^[2]通过模拟桩间土下降导致的土拱效应, 提出适用于砂填料桩承式路堤三角拱计算模型。基于大量试验研究, Van Eekelen等^[3]指出桩间软土固结导致桩土应力比和土拱效应增

加, 且粗填料内摩擦角越大土拱效应越显著。庄妍等^[4]通过数值模拟研究了桩承式路堤中的土拱效应, 并获得了完整的土拱。吕玺琳等^[5]建立了桩承式高速铁路路基数值分析模型, 计算结果与试验结果^[6]符合较好, 并获得了桩长对路基沉降、桩土应力比的影响规律。马一跃等^[7]对土拱效应进行离散元模拟, 获得了土拱形成过程荷载传递规律。

为分析桩土荷载分担与桩土差异沉降的关系, 通

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973)青年科学家专题项目(2014CB049100); 广西重点研发计划项目(AB22080032)
收稿日期: 2022 - 12 - 06

过自主设计的物理模型试验装置, 采用电机控制活动板位移模拟桩土差异沉降, 研究了桩土荷载分担变化规律及填土高度的影响特性。

1 桩承式路基土拱效应物理模型试验

1.1 试验材料

试验材料取自宁杭高铁德清站的路基填料。考虑模型试验缩尺效应, 剔除直径大于 6 cm 碎石后进行筛分, 得到填料级配曲线如图 1 所示, 位于高速铁路设计规范(2014)上下限之间。填料平均粒径 $d_{50}=7.1$ mm, $d_{30}=2.7$ mm, 有效粒径 $d_{10}=0.35$ mm, 不均匀系数 $C_u=13.77$, 曲率系数 $C_c=1.35$ 。

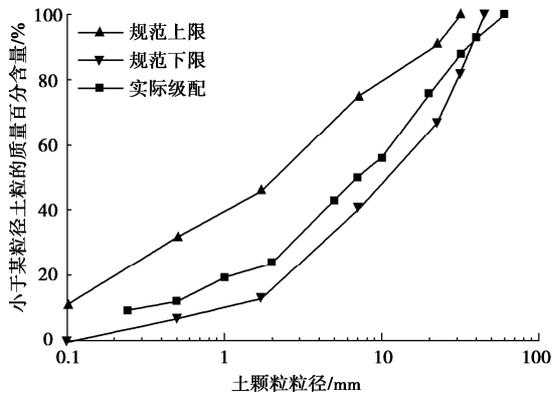
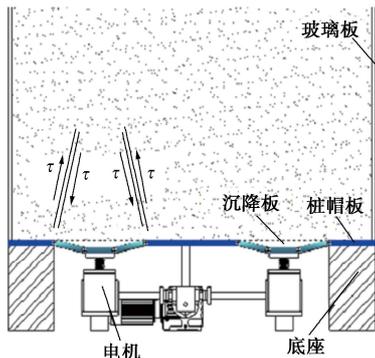


图 1 颗粒级配曲线

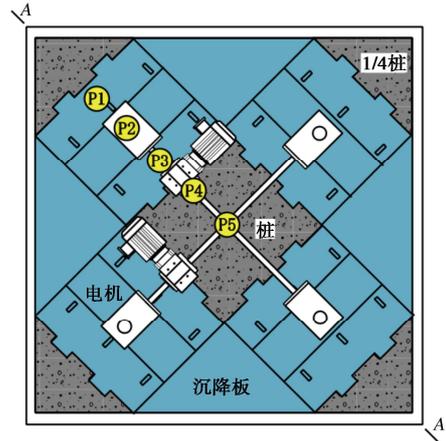
Fig. 1 Grain-size distribution curves of particles

1.2 模型试验装置

设计的物理模型试验装置如图 2 所示。模型箱尺寸为 100 cm×100 cm×140 cm (长×宽×高), 上部由钢制框架和透明玻璃板组成, 底部为模型箱底板和加载控制电机。桩帽板由四块三角形钢板和一块正方形钢板组成, 底部固定不动; 桩间土支承板由四块活动连接板和四块三角形钢板组成, 底部与动力螺栓杆和电机连接, 三角形钢板和活动连接板通过角钢连接。试验过程中, 控制桩间土支承板以恒定速率下降, 从而模拟桩土差异沉降。为减小边界摩擦, 在制作试样模型时, 边界上涂抹润滑材料。



(a) 剖视图



(b) 俯视图

图 2 土拱效应模型试验装置

Fig. 2 Model test device for soil arching

1.3 测点布置和量测

在桩间土和桩帽不同位置布置薄膜压力传感器, 具体如图 3 所示。传感器 P1~P5 距模型边缘为 24, 36, 48, 60, 72 cm。P1~P3 用于测量不同水平位置处桩间土的竖向土压力, P4 和 P5 用于测量不同水平位置桩顶竖向土压力。通过测得的桩顶和桩间土的竖向土压力值, 可获得桩土应力比值。

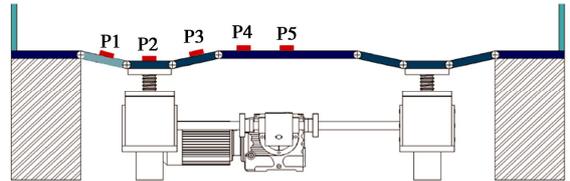


图 3 薄膜压力传感器布置位置示意图

Fig. 3 Diagram of position of thin-film pressure sensors

1.4 试验步骤

为研究不同路堤高度条件下桩和桩间土竖向应力随桩土差异沉降的变化规律, 设置桩净间距为 0.35 m, 开展路堤填土高度为 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 m 的 4 组模型试验。具体试验步骤如下:

(1) 对模型箱进行清理和组装, 通过电机控制桩间土板上升至与桩帽板齐平, 避免在试验前桩间土上方路堤与桩帽上方路堤出现差异沉降, 按图 3 在桩帽板和桩间土板对应位置粘贴薄膜压力传感器。

(2) 为避免大颗粒与薄膜压力传感器接触面不同造成的测试误差, 在模型箱底部均匀铺设一层薄的细粒土, 保证传感器与路堤土充分接触。每次将等量填料填入模型箱后, 采用电机振动密实, 直至填料厚度压缩至 10 cm, 保证每组试验填料密实度基本相同。

(3) 试验过程中采用分级施加位移方式进行位移控制加载, 控制电机使桩间土板以一定速率匀速下降, 桩间土板下降位移即为桩土差异沉降, 每级位移后稳定读取薄膜压力传感器数值。

(4) 为分析路堤填土高度对桩土荷载分担的影

响,重复上述步骤进行4组物理模型试验。

2 试验结果分析

2.1 竖向土压力分布及变化规律

通过测量试验过程中不同位置处桩间土板和桩帽板的竖向土压力,得到桩顶和桩间土竖向土压力随桩土差异沉降变化如图4所示。图中传感器P1、P3测定靠近桩间土边缘处的桩间竖向土压力,P2测定桩间土中心处的桩间竖向土压力,P4、P5测定靠近桩帽边缘处和桩帽中心处桩顶的竖向土压力。

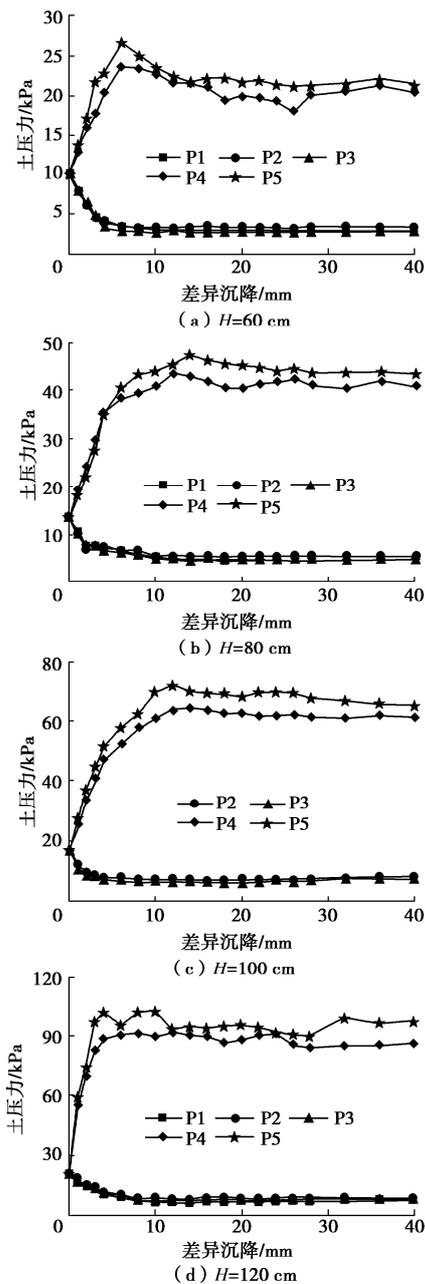


图4 桩土竖向应力变化规律

Fig. 4 Change laws of vertical stress of pile-soil

从图4可知,随着桩间土活动沉降板下降,桩土差异沉降产生,不同填土高度下桩顶、桩间土竖向土

压力变化曲线均表现为两个阶段。在第一阶段,桩顶竖向土压力随桩土差异沉降增大先急剧增大,当桩土差异沉降达到临界值后,桩顶竖向土压力达到最大值 σ_{\max} 。此阶段由于桩土差异沉降逐渐增大,从而在路堤内形成土拱,导致桩顶竖向土压力逐渐增大到最大值。而桩间竖向土压力随着桩土差异沉降增大而急剧减小,当达到极限状态时,桩间土竖向压力减小到最小值 σ_{\min} ,此阶段与桩顶竖向土压力变化的第一阶段同步产生。第二阶段,随着差异沉降继续增大,桩顶竖向土压力减小然后趋于一个稳定值。这是由于路堤内已形成完整土拱,土拱高度不再随桩土差异沉降增大而增大,故桩顶竖向土压力趋于稳定。随着桩土差异沉降继续增大,桩间土竖向土压力达到最小值后趋于稳定,此阶段与桩顶竖向土压力变化的第二阶段同步产生。

当桩顶和桩间土顶部的土压力达到稳定状态后,得出路堤底面不同水平位置处的竖向土压力稳定值的变化规律,结果如图5所示。

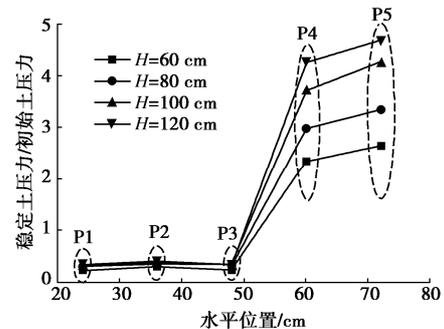


图5 稳定状态时竖向土压力水平分布

Fig. 5 Distribution of vertical stress in steady state

2.2 桩土应力比

桩顶竖向土压力与桩间竖向土压力的比值($n = \sigma_p / \sigma_s$)是衡量土拱效应发挥程度的重要指标。桩土应力比越大,反映出路堤中土拱效应发挥程度越高,反之发挥程度越低。桩土应力比随桩土差异沉降的变化如图6所示,桩土压力最大、最小值与不同填土高度的关系如图7所示。从图6可知,桩土应力比随桩土差异沉降变化可分为两个阶段。第一阶段,桩土应力比随着差异沉降迅速增大,两者近似呈线性变化,

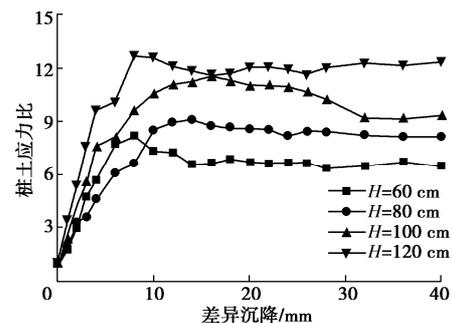


图6 桩土应力比变化规律

Fig. 6 Variation laws of pile-soil stress ratio

当土拱效应达到极限时, 桩竖向土应力比达到最大值。第二阶段, 随着桩土差异沉降继续增大, 桩土应力比先减小后稳定。桩顶和桩间土顶部竖向土压力极值随路堤填土高度变化如图 7 所示。桩顶竖向土压力最大值随路堤高度呈二次抛物线增大, 而桩间土顶部竖向土压力最小值则随路堤填土高度近似呈线性增大。基于试验结果可知, 可通过增加路堤高度使桩承担更多的上部荷载且桩间土承担较少上部荷载, 从而有效减小路堤沉降。

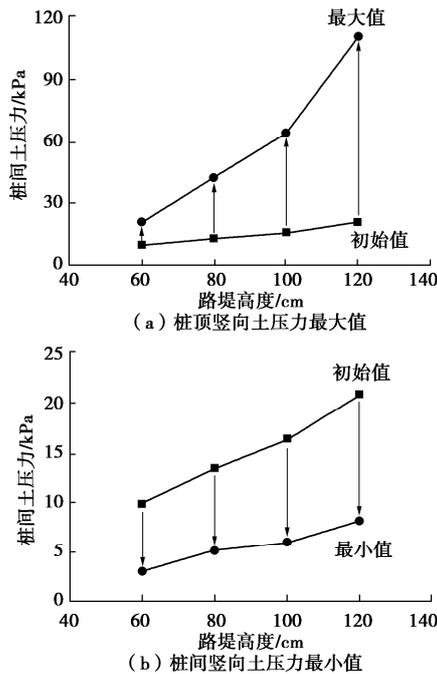


图 7 竖向土压力极值随路堤填土高度变化

Fig. 7 Variation of maximum or minimum stress with embankment height

3 结 论

通过开展桩承式路堤土拱效应物理模型试验, 研究了桩承式路堤土拱的形成过程, 并分析了路堤填土高度的影响, 得出主要结论如下:

(1) 桩土间的差异沉降导致桩承式路堤桩间土上方路堤自重传递到桩顶, 使得桩顶竖向土压力增大, 桩间竖向土压力减小, 从而使得刚度更大的桩承担了更多上部荷载。

(2) 桩土应力随桩土差异沉降的变化可分为两个阶段, 第一阶段表现为桩顶竖向土压力迅速增大, 桩间竖向土压力迅速减小; 第二阶段桩顶和桩间土竖向压力基本趋于稳定值。随着桩土差异沉降增大, 桩土应力比先迅速增大, 之后达到峰值然后减小, 最终趋于稳定值。

(3) 路堤填土高度越大, 桩土应力比的稳定值越大, 即土拱效应发挥程度越高。桩顶竖向土压力和桩

间土竖向土压力在水平位置上呈不均匀分布, 靠近桩帽中心和桩间土中心处的竖向土压力较大, 而靠近桩帽边缘和桩间土边缘处竖向土压力较小。

参考文献:

- [1] 陈云敏, 贾 宁, 陈仁朋. 桩承式路堤土拱效应分析[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 1 - 6. (CHEN Yun-min, JIA Ning, CHEN Ren-peng. Soil arch analysis of pile-supported embankments[J]. China Journal of Highway and Transport. 2004, 17(4): 1 - 6. (in Chinese))
- [2] 芮 瑞, 万 亿, 陈 成, 等. 加筋对桩承式路堤变形模式与土拱效应影响试验[J]. 中国公路学报, 2020, 33(1): 41 - 50. (RUI Rui, WAN Yi, CHEN Cheng, et al. Experimental investigation on influences of geosynthetic reinforcement on deformation pattern and soil arching in piled embankments[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(1): 41 - 50. (in Chinese))
- [3] VAN EEKELEN S J M, BEZUIJEN A, LODDER H J, et al. Model experiments on piled embankments: Part I[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, 32: 69 - 81.
- [4] 庄 妍, 崔晓艳, 刘汉龙. 桩承式路堤中土拱效应产生机理研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 1): 118 - 123. (ZHUANG Yan, CUI Xiao-yan, LIU Han-long. 3D FE analysis of arching in a piled embankment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 118 - 123. (in Chinese))
- [5] 吕玺琳, 马 泉. 高铁复合结构路基荷载传递及沉降数值模拟[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(7): 1 - 6. (LÜ Xi-lin, MA Quan. Numerical research on the load transfer and settlement of composite structural subgrade of high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(7): 1 - 6. (in Chinese))
- [6] 刘飞禹, 余 炜, 蔡袁强, 等. 桩承式加筋地基室内试验及数值分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 1): 244 - 250. (LIU Fei-yu, YU Wei, CAI Yuan-qiang, et al. Model test and numerical analysis of geogrid-reinforced pile-supported foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S1): 244 - 250. (in Chinese))
- [7] 马一跃, 吕玺琳, 黄茂松. 桩承式路堤土拱效应形成机制离散元模拟[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(8): 22 - 26. (MA Yi-yue, LÜ Xi-lin, HUANG Mao-song. Discrete element simulation of the formation mechanism of soil arching in piled embankment[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(8): 22 - 26. (in Chinese))