

DOI: 10.11779/CJGE2024S10049

桩网复合地基离心模型试验中桩顶轴力测试方法研究

张军杰¹, 顾行文^{2,3}, 任国峰^{*2,3}, 周春儿⁴, 王年香^{2,3}

(1. 河南省核技术应用中心, 河南 郑州 450000; 2.南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 3. 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 4.广东省航运规划设计院有限公司, 广东 广州 510050)

摘要: 桩网复合地基是常见的软土加固措施。在开展桩网复合地基离心模型试验时, 为了分析桩土应力比, 需要测量桩顶轴力和桩间土压力。微型土压力计在离心模型试验中已经得到广泛应用, 但尚无成熟的微型桩顶轴力测试传感器。利用模型桩的桩帽, 开发了一种离心模型试验专用桩顶轴力测试方法, 标定结果显示该方法测试线性度好。通过某桩网复合地基离心模型试验和数值分析的桩土应力比结果对比分析, 验证了该方法的测试效果。

关键词: 桩网复合地基; 离心模型试验; 桩顶轴力; 测试; 桩土应力比

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S1-0264-04

作者简介: 张军杰(1973—), 陕西宝鸡人, 学士, 高级工程师, 主要从事地质灾害治理、山水林田湖草地质环境治理及岩土工程勘察工作。E-mail: 445149227@qq.com。

Test method for axial force at pile top in centrifugal model tests on pile-net composite foundation

ZHANG Junjie¹, GU Xingwen^{2,3}, REN Guofeng^{2,3}, ZHOU Chun'er⁴, WANG Nianxiang^{2,3}

(1. Henan Nuclear Technology Application Center, Zhengzhou 450000, China; 2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 3. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210029, China; 4. Guangdong Province Planning & Design Institute for Water Transportation Co., Ltd., Guangzhou 510050, China)

Abstract: The pile-net composite foundation is a common soft soil reinforcement measurement. In order to analyze the pile-soil stress ratio, it is necessary to measure the axial force at the pile top and the soil pressure between piles in the centrifugal model tests. The mini-earth pressure cells have been widely used in the centrifugal model test, but there is no commonly accepted mini-axial force sensor. In this study, a special method is developed for testing the axial force at the top of piles in the centrifugal model tests by using pile caps. Great linearity is shown through the calibration data. The effects of the proposed method are verified by the pile-soil stress ratio results from the centrifugal model test and numerical analysis of a pile-net composite foundation.

Key words: pile-net composite foundation; centrifugal model test; axial force at pile top; measurement; pile-soil stress ratio

0 引言

桩网复合地基是软土地基常见的加固措施, 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, 因而在房屋建筑工程及水利工程中得到了广泛应用^[1-4]。

针对桩网复合地基的研究, 众多学者在室内模型试验及现场试验方面均取得了较多的科研成果。顾行文等^[5]通过离心模型试验对倾斜软土 CFG 桩复合地基上的路堤破坏模式进行了研究; 张树明等^[6]过离心模型试验研究了加固范围及边坡坡率对 CFG 桩-网复合地基受力变形特性的影响。潘高峰等^[7]通过开展全尺寸现场路基填筑试验, 对比分析了天然地基和 CFG 桩网复合地基在路基荷载下的侧向变形规律; Liu 等^[8]

通过现场试验研究了荷载作用下不同深度桩网结构路堤侧向变形发展规律。姜彦斌^[4]结合管桩复合地基现场试验段工程, 建立有限元数值模型, 对比了几种管桩复合地基单桩建模方法, 并基于轴对称接触模型结果对桩网复合地基受力及变形进行了研究。

受限于测试技术及方法, 上述试验成果多侧重于地基变形规律研究, 较少涉及到桩顶轴力测量, 特别是在缩尺的离心模型试验中。姜彦斌^[4]将微型轴力计至于桩和桩帽之间, 测试桩顶轴力, 用于分析桩土应力比。他的试验中模型桩和轴力计的外径均为 20 mm,

基金项目: 国家重点研发计划“交通基础设施”重点专项2023年度项目(2023YFB2604200)

收稿日期: 2024-04-29

*通信作者 (E-mail: gfrn@nhri.cn)

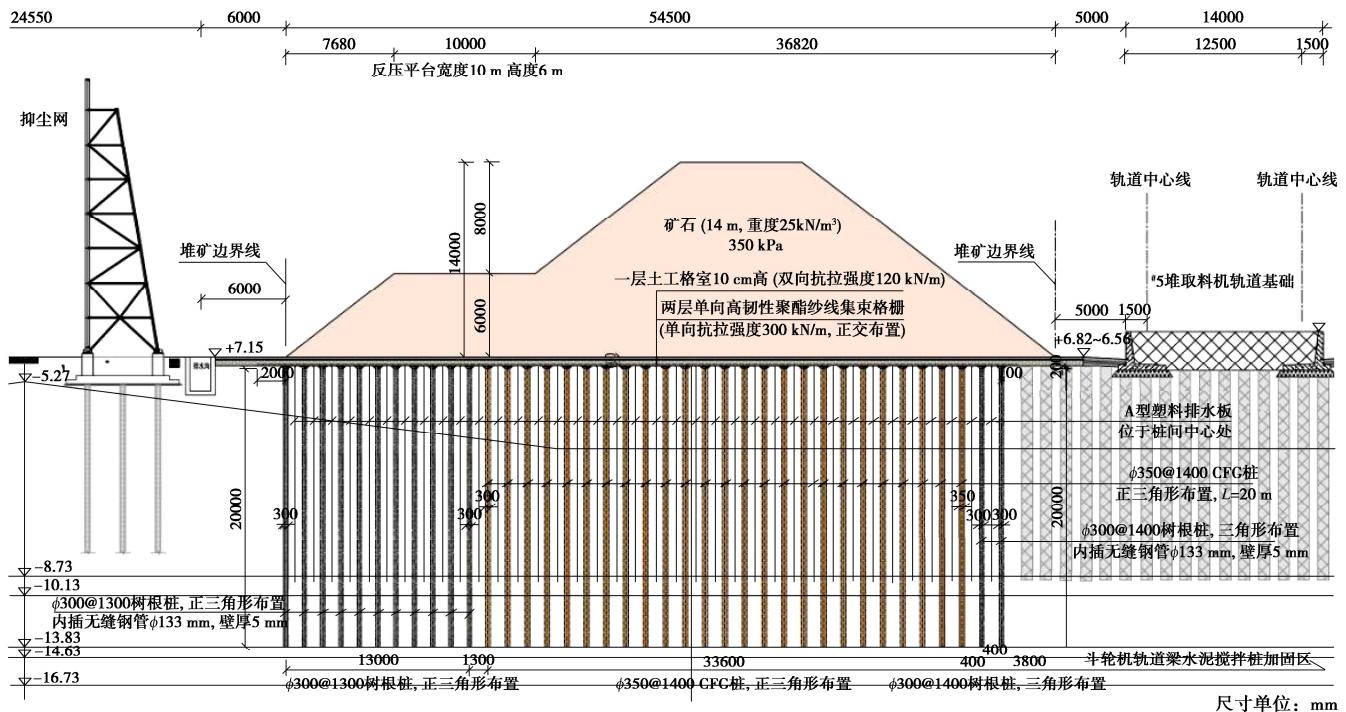


图 1 复合地基设计图

Fig. 1 Profile of composite foundation design

如果遇到更细的模型桩，就无法采用这种方法了。

随着社会经济的发展，工程中遇到的软土地基更加深厚、地基的承载力要求更高，导致复合地基中的桩长径比更大。相应的，桩网复合地基离心模型试验需要更大的几何缩尺、更大的模型箱；同时也面临更长、更小直径（5 mm）的模型桩^[9-11]，桩顶轴力测试的难度也更大。针对这种情况，离心模型试验中亟需开发适用于小直径模型桩的桩顶轴力测试方法。

1 桩顶轴力测试方法

1.1 问题的提出

某码头堆场承载力要求高达 350 kPa。堆场地基为软土地基, 采用 CFG 桩和树根桩桩网复合地基加固。桩网复合地基的设计方案如图 1 所示。为了研究复合地基的承载力特性, 需开展 1/70 几何缩尺的离心模型试验^[9-10]。然而试验中的模型桩直径仅 5 mm (图 2)。

若采用传统的微型轴力计^[4]，其直径 20 mm，高度也约 20 mm。无论是相对 5 mm 的模型桩，还是模型桩帽 (10 mm×10 mm)，体积都过大；另外也没有稳定的连接方式。因此，必须开发新的桩顶轴力测试方法，即新型桩顶轴力计。

1.2 新型桩顶轴力计设计参数

直径 5 mm 的模型桩截面积非常小, 目前没有相匹配的微型轴力计; 而模型桩帽相对模型桩面积稍大, 可以利用的空间有所改善。因此本文的桩顶轴力测试方法, 基本思路仍然是考虑改造桩帽, 使之成为新型

桩顶轴力计（图3）。其基本测试原理是应变花测量。

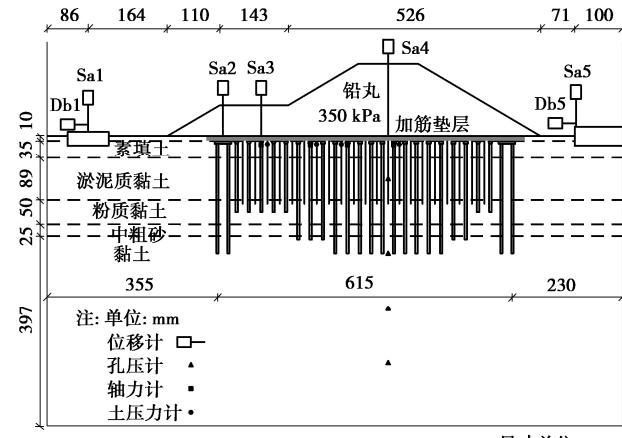


图2 离心模型试验布置图

Fig. 2 Layout of centrifuge model tests

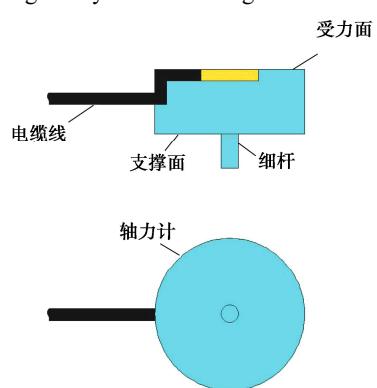


图 3 新型轴力计示意图

Fig. 3 Schematic of new type of mini-axial force sensor

首先考虑的是桩帽置换率不变，简单换算可知，

将 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的方形桩帽改成圆形的轴力计, 其直径约为 11.2 mm 。

其次需要解决的是新型轴力计和模型桩的连接问题。要保证轴力计稳定在模型桩上, 并将上覆荷载传递至模型桩上。由于轴力计和模型桩都很细小, 常规的直接放置法, 在制模过程中容易错位; 也无法通过螺丝固定。本文采用在模型桩顶钻 1 mm 细孔, 轴力计中心向下延伸 1 mm 细杆插入模型桩的方法。试验证明了这种安装方法是稳固的, 并且能够精确测定桩顶轴力。

1.3 新型桩顶轴力计的标定

采用螺旋测力机架对新型桩顶轴力计进行加载标定(图 4), 加载分为 3 级, 每级加载力增量为 50 N , 采用。仪器标定结果如图 5, 研制的新型轴力计线性度优。



图 4 新型轴力计标定

Fig. 4 Calibration of new axial force sensors

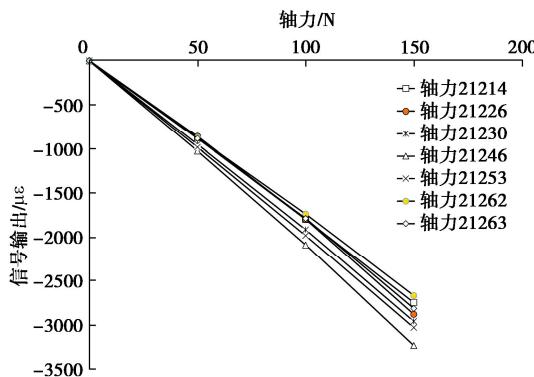


图 5 标定结果

Fig. 5 Results of calibration

2 离心模型试验桩土应力分析

2.1 试验情况

利用新型桩顶轴力计, 开展了 CFG 桩网复合地基离心模型试验。具体模型布置如图 2, 试验设备、材料模拟、试验程序与文献[9]中一致。其中, 堆载期指堆场区开始加载直到矿石堆载完成, 它对应于离心模型试验中离心机开始加速, 直至达到设计加速度 $70g$;

之后就意味着原型堆场堆载完成, 进入恒载期。

2.2 模型桩顶轴力测试结果

图 6 为复合地基 CFG 桩桩顶轴力过程线, 表 1 列出了不同时间和位置 CFG 桩桩顶轴力特征值。从此可以看出, 堆载期, 桩顶轴力随堆载高度的增加几乎线性增大, 上部荷载越大, 桩顶轴力也越大; 恒载期, 随着桩间土和桩端土层沉降的增加, 加筋垫层网逐渐发挥调整上部荷载和桩土沉降的作用, 桩顶轴力也随之逐渐调整。上部荷载较小的 Tf1 和 Tf2 测点, 桩顶轴力随时间略有增大, 上部荷载较大的 Tf3 和 Tf4 测点, 桩顶轴力随时间开始明显减小然后趋于恒值, 表明加筋垫层网调整上部荷载的作用还是比较明显的。也说明新型桩顶轴力计的反应是灵敏的。

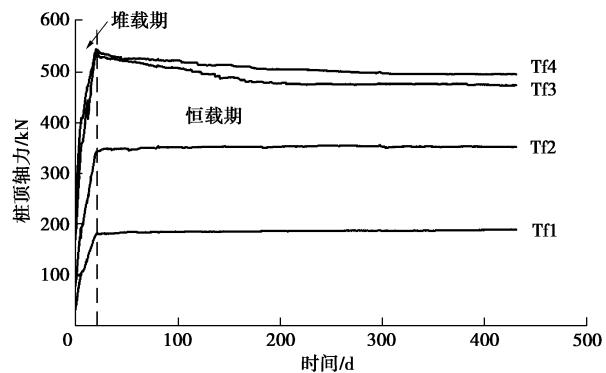


图 6 复合地基 CFG 桩桩顶轴力过程线

Fig. 6 Load-time curves at top of CFG pile

表 1 复合地基 CFG 桩顶轴力特征值

Table 1 Loads on top of CFG pile of composite foundation

测点	Tf1	Tf2	Tf3	Tf4
桩长、间距/m	10, 1.8	14, 1.8	16, 1.8	16, 1.65
上覆荷载/kPa	150	232	319	350
轴力/kN				
堆载期	184	344	539	543
试堆期	185	349	522	528
恒载 365 d	190	354	475	496
恒载 408 d	191	353	474	495

2.3 桩土应力比

图 7 给出了离心模型试验和数值模拟^[11]得到的桩土应力比分析对比情况。可以看出, 桩土应力比的试验结果与计算结果较为一致, 桩土应力比介于 $20\sim 40$, 桩土共同并且合理地承担堆场上部荷载。说明新型桩顶轴力计的测试效果是准确的。

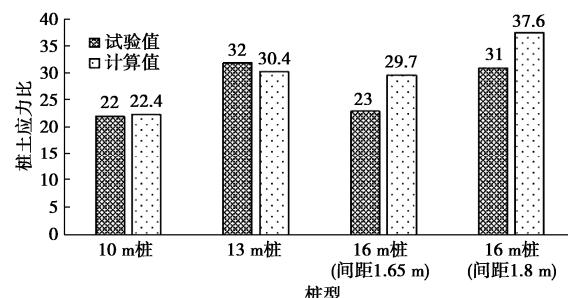


图 7 桩土应力比分布

Fig. 7 Distribution of pile-soil stress ratio

3 结 论

(1) 根据新的桩网复合地基离心模型试验要求, 基于改造桩帽的思路, 研制了新型桩顶轴力计。

(2) 新型轴力计体积较小, 连接方式适合小直径的模型桩, 线性度优。

(3) 离心模型试验和数值模拟的结果表明, 新型轴力计测试反应灵敏, 测试准确度高。

参考文献:

- [1] 孙少锐, 吴继敏, 魏继红, 等. 树根桩加固边坡的稳定性分析与评价[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 776-780. (SUN Shaorui, WU Jimin, WEI Jihong, et al. Stability analysis and evaluation of slope reinforced with root piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5): 776-780. (in Chinese))
- [2] 王 辉, 陈剑平, 阙金声. 树根桩在基础加固中的设计与应用研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊): 1290-1294. (WANG Hui, CHEN Jianping, QUE Jinsheng. Research on design and application of root piles to strengthening foundations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S1): 1290-1294. (in Chinese))
- [3] 邱发波, 刘志强, 严松宏. 树根桩加固隧道软基的数值分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2010, 34(2): 270-272. (QIU Fabo, LIU Zhiqiang, YAN Songhong. Numerical analysis of root pile in reinforcement tunnel basis[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2010, 34(2): 270-272. (in Chinese))
- [4] 姜彦斌. 桩承式加筋路堤整体工作机制模型方法研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2020. (JIANG Yanbin. Integrated Performance and Modelling of Geosynthetic-reinforced and Pile-supported Embankments[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2020. (in Chinese))
- [5] 顾行文, 谭祥韶, 黄炜旺, 等. 倾斜软土 CFG 桩复合地基上的路堤破坏模式研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊 1): 111-115. (GU Xingwen, TAN Xiangshao, HUANG Weiwang, et al. Failure mechanisms of embankment on inclined soft foundation reinforced by CFG Piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S1): 111-115. (in Chinese))
- [6] 张树明, 蒋关鲁, 廖祎来, 等. 加固范围及边坡坡率对 CFG 桩-网复合地基受力变形特性影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(1): 192-202. (ZHANG Shuming, JIANG Guanlu, LIAO Yilai, et al. Effect of the strengthening area and the slope rate on bearing and deforming behaviors of CFG pile-geogrid composite foundations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(1): 192-202. (in Chinese))
- [7] 潘高峰, 刘先锋, 袁胜洋, 等. 云桂客专 CFG 桩网结构路堤侧向变形规律试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(增刊 2): 1-11. (PAN Gaofeng, LIU Xianfeng, YUAN Shengyang, et al. Lateral deformation of embankment with the CFG pile-net structure for Yun-Gui passenger dedicated line[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(S2): 1-11. (in Chinese))
- [8] LIU H L, NG C W W, FEI K. Performance of a geogrid-reinforced and pile-supported highway embankment over soft clay: Case study[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(12): 1483-1493.
- [9] 王年香, 周春儿, 董华钢, 等. 超大荷载下 CFG 桩网复合地基离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(增刊 2): 87-91. (WANG Nianxiang, ZHOU Chunler, DONG Huagang, et al. Centrifuge model test of CFG pile-mesh composite foundation under super-large load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(S2): 87-91. (in Chinese))
- [10] 王年香, 周春儿, 吴加武, 等. 推移区树根桩网复合地基加固效果离心模型试验验证[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(增刊 2): 107-111. (WANG Nianxiang, ZHOU Chunler, WU Jiawu, et al. Verification of reinforcement effect of root pile and net composite foundation in pushing area by centrifuge model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(S2): 107-111. (in Chinese))
- [11] 李 威, 周春儿, 吴加武, 等. 重载堆场桩网复合地基离心模型试验与数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(增刊 2): 71-75. (LI Wei, ZHOU Chunler, WU Jiawu, et al. Centrifuge model test and numerical simulation of pile and net composite foundation in heavy load yard[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(S2): 71-75. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)