

DOI: 10.11779/CJGE2017S1028

高铁桩网复合结构路基长期运营沉降模型试验研究

吕玺琳^{1,2}, 马泉^{1,2}, 方航^{1,2}

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 高铁路基沉降控制是保证列车安全性和舒适性的重要因素。随着高铁运营时间增长, 软土地区高铁路基长期沉降问题越来越引起关注。针对京沪高速铁路徐沪段某试验段, 开展了桩网复合结构路基长期循环动态加载物理模型试验, 获得了路基沉降、桩土应力分担及桩身轴力分布的变化规律。试验结果表明: 在初始 1000 次加载时, 路基沉降随加载次数增加明显, 之后达到稳定; 桩上部位置土体变形大于桩身变形, 桩侧呈现负摩阻力, 中性点位于距桩顶约 2/3 桩长位置; 桩身轴力随加载次数增加而增大, 说明桩分担荷载增加, 当达到 4 万次加载后, 轴力随加载次数增加不再明显。

关键词: 高铁; 桩网结构; 长期沉降; 模型试验; 软土路基

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)S1 - 0140 - 05

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

Model tests on the long-term settlement of pile-net composite structure subgrade for high-speed railways

LÜ Xi-lin^{1,2}, MA Quan^{1,2}, FANG Hang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The settlement control of the high-speed railway subgrade plays an important role in comfortable and safe running of high-speed train. With the growth of operation time, the long-term settlement of railway in soft subgrade has been concerned. Based on the Xuzhou-Shanghai section of Beijing-Shanghai high-speed railway, the model tests on the pile-net composite structure subgrade under dynamic loading were carried out, and the variation rules of subgrade settlement, stress ratio of pile-soil, and axial force distribution were obtained. The results show that in the first 1000 loading cycles, the subgrade settlement increases with loads significantly, and then it reached a constant value. The deformation of soil is larger than that of pile at the upper pile position, the negative friction resistance appears, and the neutral point of pile is located near 2/3 pile length away from the pile top. The axial force of pile increases with the increase of the cycles of loads, when the loading cycles reach 40000, the axial forces doesn't obviously increase.

Key words: high-speed railway; pile-net structure subgrade; long-term settlement; model test; soft subgrade

0 引言

由于高铁路基长期经历高速列车动载作用, 其长期沉降不容忽视。如不能有效控制路基的长期运营沉降, 将会影响到高铁的正常运营, 严重时甚至会造成列车脱轨事故, 从而引起巨大经济损失并造成不利社会影响。因此, 有必要针对高速铁路长期运营沉降发展机理开展研究。桩网结构复合路基具有沉降变形小、工后沉降较易控制、稳定性高、施工方便等优点, 在软土地区高铁建设中得到了广泛应用。

桩网复合结构路基由桩-网-土三者协同作用, 共同承担高速列车荷载。目前已经开展过一些对桩网复合结构路基承载特性及沉降机理的研究。Rogbeck 等^[1]

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。Bergado 等^[2]开展了全尺寸复合结构路基模型试验, 研究了土工格栅对路堤变形及稳定性的影响。Cheng 等^[3]通过京沪高铁现场试验, 并结合数值模拟, 研究了桩网复合结构路基应力分布状况。Pan 等^[4]建立了桩网复合地基三维有限元模型, 研究了列车动应力在桩网结构路基中的传递与分布。Jamsawang 等^[5]通过三维数值分析方法, 研究了水泥

基金项目: 国家重点基础研究发展计划青年科学家专题项目 (2014CB049100); 中央高校基本科研业务费专项资金项目

收稿日期: 2016 - 11 - 28

搅拌桩桩承路堤沉降、桩土荷载分布、孔压变化等规律。肖宏^[6]基于遂渝线无砟轨道桩网结构路基,进行了大比例尺动态模型试验,研究了桩网结构路基加固机理。焦栋梁^[7]通过室内模型试验,研究了循环荷载下桩承加筋复合地基工作性状与沉降发展规律。孙晋永^[8]运用模型试验,研究了桩体、格栅、地基含水率等因素对复合地基沉降、桩土应力比及桩身轴力的影响。于进江等^[9]通过设置不同桩间距的桩网复合地基模型试验,研究了复合地基荷载传递规律和沉降规律。韩高等^[10]通过三维模型试验,研究了列车动荷载下桩网复合结构路基中的土拱效应。陈仁朋等^[11]通过足尺模型试验,研究了动、静荷载下应力传递特性及长期列车荷载下桩网结构路基的累积沉降规律。

从当前研究现状分析表明,有关高铁桩网复合结构路基沉降主要通过数值模拟、现场试验和室内模型试验进行。相比数值模拟而言,模型试验更真实可靠,且结果可为数值分析提供对比。由于试验的复杂性,有关现场和室内模型试验研究目前仍主要集中在静力加载情形,鲜见针对长期循环荷载下的研究。本文基于京沪高铁徐沪段某试验段,开展了循环动载下高铁桩承加筋复合结构路基沉降模型试验,获得了路基变形、桩土应力比和桩身轴力随循环加载次数的变化规律。

1 试验原型及模型设计

1.1 试验原型

试验原型为京沪高铁徐沪段某试验段,地基土层为第四系覆盖层,系江河湖泊海相沉积深厚淤泥质软土,采用桩网复合结构路基。路基填高为 4.5 m,边坡率为 1:1.5,桩长为 25 m,桩径为 0.5 m,桩间距为 2.5 m,正方形布桩。桩帽直径 1 m,厚 40 cm。桩帽顶端设置 30 cm 厚碎石垫层,夹铺两层设计抗拉强度大于 120 kN/m,厚度 10 cm 的土工格栅。具体布置见图 1 所示。

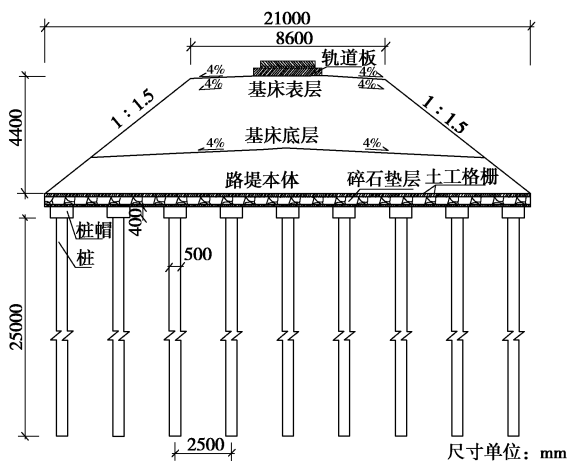


图 1 京沪高铁徐沪段某路基断面

Fig. 1 Cross-section of subgrade in Xuzhou-shanghai section of Beijing-Shanghai high-speed railway

1.2 试验模型制作

(1) 模型地基与路堤

由于本试验主要针对桩网复合结构路基的长期承载性能演化进行研究,为提高试验效率,并不失代表性,本试验采用粉砂制作模型路基中的地基部分。试验前先测定了砂土的相关物理属性:平均粒径 $d_{50} \approx 0.15 \text{ mm}$,天然干密度 $\rho_d = 1.556 \text{ g/cm}^3$,内摩擦角约为 34° 。在填筑模型地基时,为保证填土的均匀性,采用分层填筑,每填筑 15 cm 砂土,就用 6 块 20 kg 砧码压实。

原型路堤部分多采用 A、B 组填料和 C 组碎石、砾石类填料。其中 A 组为优质填料, B 组为良好填料。A 组和 B 组填料均由岩块和粗粒土组成。A、B 组填料的区别在于细粒土含量,细粒土为粒径大于 2 mm 颗粒的质量超过总质量的 50%。细粒土小于 15% 为 A 组, 15%~30% 之间的为 B 组, 大于 30% 的为 C 组。取粒径为 10~15 mm 的碎石和砂土按照 4:1 质量比例混合,人工配制路堤填料,填筑时,为满足同原型路堤类似的压实标准,需进行分层填筑压实。

(2) 模型桩

模型桩采用铝合金制作,其弹性模量为 70 GPa,根据 1:25 模型比例,模型桩长为 1 m,外径为 20 mm,内径 16 mm。桩顶固定一个铝合金制作的桩帽,桩端由塑料孔塞盖封底。共制作了 63 根试验用桩,其中两根为测试桩。测试桩桩身内部从上至下布置了 9 个应变片,并在距离桩顶 20 mm 处,两侧开有 7 mm 小孔,以便导出桩身内侧应变片的导线,制作的模型桩见图 2 所示。

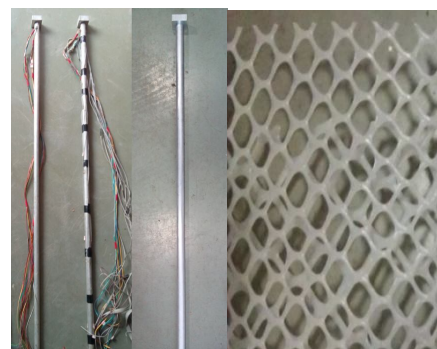


图 2 模型桩和土工格栅

Fig. 2 Model pile and geogrid

(3) 模型格栅

土工格栅一般分为塑料土工格栅、钢塑土工格栅、玻璃纤维土工格栅、玻纤聚酯土工格栅。本次试验采用高密度低压 HDPE (高密度聚乙烯) 材料格栅模拟塑料土工格栅,格栅的孔径为 8 mm,见图 2 所示。试验时需将模型格栅表面涂抹 802 胶并粘砂,以满足模型具有和原型相同的摩擦特性。

2 测点布置和试验步骤

2.1 测点布置与量测

试验模型桩的布置及测点布置如图 3, 4 所示。图 3 中红线标示为所需模拟测试的复合结构路基断面, 该路基断面共 9 根桩对称布置。沉降测点用符号 D 表示, 图 3 中 D1 为量测地基表面竖向位移的 LVDT 位移传感器, D2 为路堤顶面位移的测点。应变片量测桩身应变测点如图 4 所示, 测试桩符号为 P, 分别为 P1、P2、P3; 测点符号为 S, 如 S11 代表#1 桩的第一个桩身应变测点。桩和土竖向应力的测点符号用 F 表示, 图 4 中共有 F1~F5 测点, 用 FlexiForce A301 薄膜压力传感器量测桩和土的竖向应力分布情况, 阴影部分为加载板的加载位置。

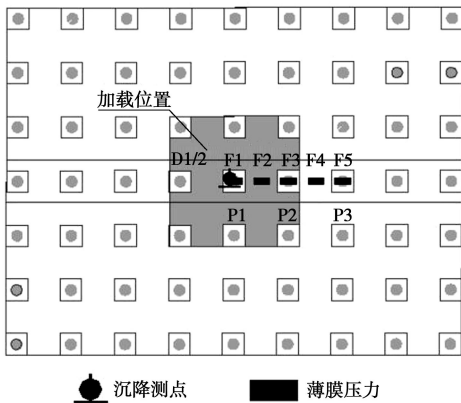


图 3 桩网结构路基测点平面布置图

Fig. 3 Layout plan of measuring points for pile-net composite structure subgrade

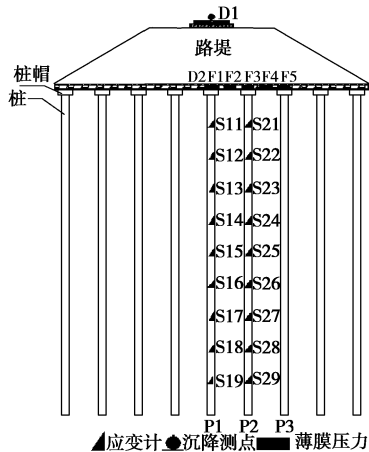


图 4 桩网复合结构路基测点的竖向分布图

Fig. 4 Vertical layout of the measuring points for pile-net composite structure subgrade

2.2 试验步骤

在开展复合结构路基动力加载试验前, 施加 4.36 kN 的静荷载, 以消除路基初始工后沉降对长期沉降的影响。在加载过程中, 记录桩身应变片、薄膜压力传

感器、LVDT 位移传感器及加载设备自带的位移与荷载测量装置等的相关读数。当静载沉降稳定时, 路堤顶面的位移达到了 1.32 mm, 地基表面的位移为 0.23 mm。

为模拟列车荷载通过扣件系统传递到路基表面的动应力, 根据路基面设计动应力经验公式 $\sigma_a = 0.26P(1 \pm 0.004v)$, 其中 P 为车辆静轴重, v 为列车速度。高铁运行速度取 300 km/h, 车辆静轴重为 17 吨, 得到路基面动应力为 97.24 kPa, 这里取 100 kPa, 加载板尺寸为 240 mm×240 mm, 因此激振器峰值荷载为 5.76 kN, 加载频率 5 Hz。

3 试验结果分析

3.1 路基沉降

通过开展循环动载试验得到的桩网复合结构路基累积沉降如图 5 所示。在前 1000 次加载过程中, 沉降变化较剧烈, 路堤顶面沉降可达 0.83 mm, 地基表面沉降变形为 0.32 mm。在 10000 次加载之后, 沉降变化趋平缓。最终加载到 1.5 万次左右时, 沉降变化为 0.009 mm/万次, 沉降变化已很小, 可认为沉降变形基本稳定。此时, 路堤顶面最终沉降值达 1.52 mm, 地基表面沉降值为 0.61 mm, 地基部分的沉降占总沉降变形的 40%。

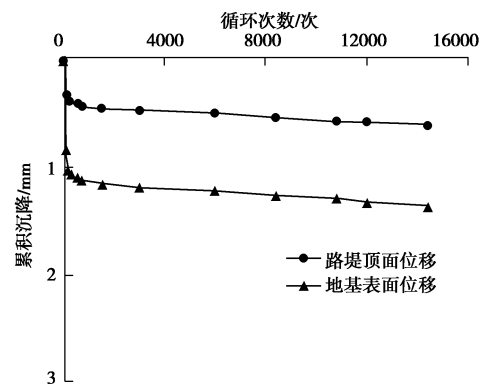


图 5 桩网复合结构路基的累积沉降

Fig. 5 Cumulative settlements of pile-net structure subgrade

3.2 桩土应力分布

桩网复合结构路基桩顶与桩间土压力分布如图 6 所示。桩顶和桩间土压力较稳定, 在动态加载过程中变化不明显。#1, #2 桩桩顶土压力分别为 60.86, 63.76 kPa, 而#1, #2 桩间土与#2, #3 桩间土的土压力值分别为 17.8, 3.73 kPa, 因而#1, #2 桩桩顶土压力明显大于桩间土压力。#1 中心桩的桩土应力比分别为 3.4, 这是由于土工格栅和垫层的存在, 增强了桩网复合结构路基的竖向传力作用, 使得桩顶承担了比土体大的荷载。3 号桩顶土压力仅为 3.3 kPa, 这是由于#3 桩已超

出了加载板的竖向加载区域, 加载板竖向荷载对其影响已很小造成的。

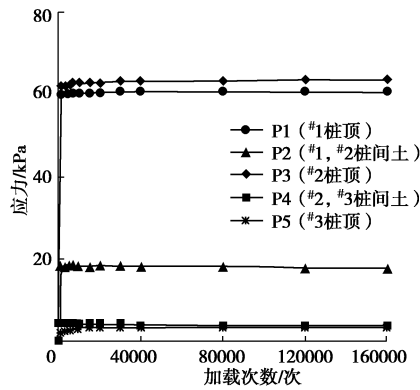


图 6 桩网复合结构路基的桩土压力

Fig. 6 Pile-soil pressures of pile-net structure subgrade

3.3 桩身应变

动态加载情况下, 桩网复合结构路基#1, #2 桩身应变随加载次数变化情况如图 7 所示。其中 S11 为#1 桩从上至下第 1 个应变片输出的应变数据, 其它应变片命名类似, 因 S19、S26、S29 应变片损坏, 图中没有给出其应变值。从图中可看出, 开始加载从 0~1000 次范围内, 桩身应变变化较为剧烈, 加载 20000 次以后, 桩身应变基本保持恒定。#1, #2 桩的桩身最大应变基本发生在桩中下部位置处, 桩顶和桩端的应变均较小, 说明桩的承载力主要由桩侧摩阻力承担。

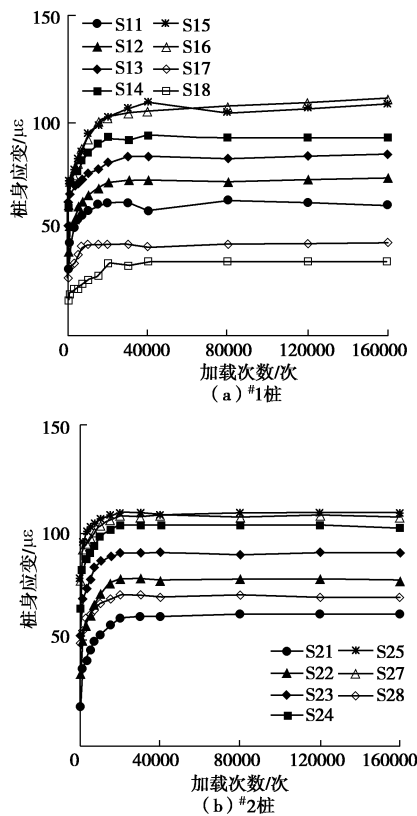


图 7 桩身应变随加载次数变化

Fig. 7 Variation of the pile axial strain of piles with dynamic

loading

3.4 桩身轴力分布

从#1, #2 桩的桩身轴力图(如图 8 所示)可看出, 在长期循环加载情况下, 桩身轴力随加载次数有一定程度增长, 在前 40000 次加载中, 轴力增大较明显, 40000 次加载以后, 桩身轴力基本稳定。桩的中性点随加载次数变化不明显, 始终位于距桩顶 2/3 桩长的位置。

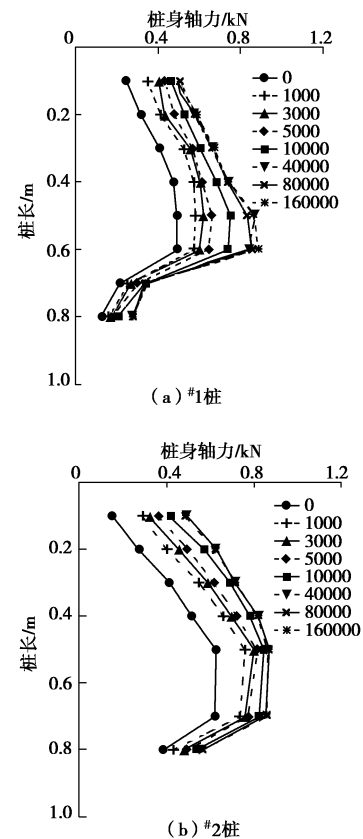


图 8 桩身轴力随加载次数的变化

Fig. 8 Variation of pile axial force with dynamic load

4 结 论

基于京沪高铁徐沪段某试验段, 开展了长期循环加载下桩网复合结构路基的工作性状与沉降机理物理模型试验, 得出了以下 3 点结论。

(1) 在动态循环加载的初期, 路基累积变形随加载次数变化较大, 尤其是初始 1000 次时, 变化最为剧烈。在达到 1 万次加载后, 沉降变化趋于平缓。

(2) 随着加载次数增加, 桩体承担的荷载增加, 累积沉降增加幅度减小, 当循环次数达到 4 万次后, 基本达到稳定。

(3) 由于桩身中上部位置处土体变形大于桩身变形, 桩侧出现负摩阻力。桩网复合结构路基中桩的中性点位于距桩顶约 2/3 桩长位置, 且中性点位置几乎不随加载次数而变化。

参考文献:

- [1] ROGBECK Y, FRANZÉN G, SCANDIACONSULT C A, et al. Nordic guidelines for reinforced soils and fills[R]. Baraboo: Nordic Geosynthetic Group, 2003.
- [2] BERGADO D T, LONG P V, MURTHY B R S. A case study of geotextile-reinforced embankment on soft ground[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2002, **20**(6): 343 - 365.
- [3] CHENG J, ZHANG J W. Research on stress distribution of cfg pile-net composite foundation in high-speed railway[C]// *Applied Mechanics and Materials*. 2013: 1833 - 1837.
- [4] PAN Z H, YAN K M, WU J B, et al. The dynamic analysis of soft soil subgrade in high-speed railway strengthened by PHC pile[J]. *Advanced Materials Research*, 2014: 908 - 911.
- [5] JAMSAWANG P, YOOBANPOT N, THANANISATHIT N, et al. Three-dimensional numerical analysis of a DCM column-supported highway embankment[J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, **72**: 42 - 56.
- [6] 肖 宏. 高速铁路无碴轨道桩网结构路基研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007. (XIAO Hong. Study on column-net structure embankments of ballastless track in high speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese))
- [7] 焦栋梁. 循环荷载下桩承加筋土复合地基模型试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. (JIAO Dong-liang. Model test research on geogrid-reinforced and pile-supported foundation under cyclic loading[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese))
- [8] 孙晋永. 桩承加筋土复合地基模型试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010. (SUN Jin-yong. The model test research on geogrid-reinforced and pile-supported foundation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [9] 于进江, 程谦恭, 贺宏武, 等. 超大面积深厚软土桩-网复合地基承载性状模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, **33**(11): 3323 - 3330. (YU Jin-jiang, CHEN Qian-gong, HE Hong-wu, et al. Model test research on bearing behavior of pile-net composite foundation on oversized deep soft soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(11): 3323 - 3330. (in Chinese))
- [10] 韩高孝, 宫全美, 周顺华. 列车动荷载下桩网结构路基土拱效应试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, **35**(6). (HAN Gao-xiao, GONG Quan-mei, ZHOU Shun-hua. Experimental study of soil arching effect in geogrid reinforced pile supported embankment under train dynamic load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(6). (in Chinese))
- [11] 陈仁朋, 陈金苗, 汪焱卫, 等. 桩网结构路基应力传递特性及累积沉降规律[J]. *土木工程学报*, 2015, **48**(增刊 2): 241 - 245. (CHEN Ren-peng, CHEN Jin-miao, WANG Yan-wei, et al. Stress transmission and cumulative settlement characteristics of geogrid reinforced pile supported embankment[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, **48**(S2): 241 - 245. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)