

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201711007

短桩桩-网复合地基荷载传递规律及变形特征研究*

商拥辉^{1,2}, 徐林荣¹

(1.中南大学土木工程学院,湖南长沙410075;2.黄淮学院建筑工程学院,河南驻马店463000)

摘要:为探索中低压缩性土短桩桩-网复合地基荷载传递规律及变形特性,依托赣龙(赣州-龙岩)高速铁路工程背景,借助现场测试数据,分析路堤填筑过程中桩—土应力/荷载分担比、地基沉降及侧向变形规律。结果表明:短桩桩-网复合地基能够有效传递上部附加应力至桩端土层,土压力对上部荷载变化敏感度小于高压缩性软土桩-网复合地基;稳定时桩—土荷载分担比约为50%,桩与土同时发挥承载功效较好;地基沉降在填筑期达到占总沉降90%,侧向变形沿深度呈“弓”型分布,最大侧向变形25 mm,约为高压缩性软土桩-网复合地基60%;桩—土应力对上部荷载变化敏感性高于地基沉降,可依桩—土应力比变化判别地基沉降状态,达到评判工后沉降控制效果目的。

关键词:桩-网复合地基;荷载传递;变形特性;现场测试

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1316-07

Study on Load Transfer Law and Deformation Characteristics of Short Pile-net Composite Foundation

SHANG Yonghui^{1,2}, XU Linrong¹

(1.School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2.College of Architecture and Civil Engineering, Huanghuai University, Zhumadian 463000, China)

Abstract: In order to explore the load transfer law and deformation characteristics of short pile-net composite foundation, on the basis of the Gan Long (Ganzhou-Longyan) high-speed railway project, field test data was included in this study to analyze the pile-soil stress to load sharing ratio, settlement and lateral deformation of embankment during embankment filling. Results show that: the short pile-net composite foundation can effectively transfer the additional stress to the soil at pile bottom, and the sensitivity of soil pressure to the upper load is less than that of the pile-net composite foundation in high compressible soft soil; stable pile-soil load sharing ratio is about 50%, pile and soil are in good coordination in bearing the loads; 90% of the total settlement is completed in the construction period, lateral deformation along the depth shows a bow type with a maximum lateral deformation of about 25mm, which is about 60% of the pile-net composite foundation in high compressible soft soil; comparing to ground settlement, pile-soil stress is more sensitive to the upper loads, so the ground settlement status can be discriminated according to the change of pile-soil stress ratio to assess the control effect of post construction settlement.

Keywords: pile net composite foundation; load transfer; deformation characteristics; field test

* 收稿日期:2017-11-02;修回日期:2017-11-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51778634,42172322)、中国博士后科学基金项目(2020M682589)、河南省科技攻关重点研发项目(202102310264)、河南省教育厅重点研发项目(20B58003)资助

作者简介:商拥辉(1985—),男,讲师,博士后,博士。主要从事土木工程教学及科研方面的工作。E-mail:mlpeter@163.com

引言

桩-网地基始于20世纪70年代,最早是1975年应用于日本石狩川泥炭软土堤岸改造工程^[1-3]。英国于1980年,将带有桩帽的桩-网地基应用到Stansted机场铁路连线拓宽工程^[4]。桩-网地基进入中国相对较晚,1994年南昆铁路线首次将桩-网复合地基应用到路基地基处治中^[5],其效果在秦沈客运专线路桥过渡段软土地基处治中再次得到验证^[6]。随着桩-网复合地基工艺不断完善,目前已广泛应用到武广客专、郑西客专、京沪高铁等线路中^[7]。完善桩-网复合地基工作体系包括^[8-10]:上部路堤填土、格栅网、砂石垫层、桩土复合地区加固区、桩土下卧软土层和持力层,由“桩-网-土”协同工作共同承担上部荷载,是“水平和竖直”双向增强体型的联合复合地基形式^[10]。随着我国高速铁路快速发展,桩-网复合地基要面临更多复杂地质条件,研究其承载性状对类似工程实践具有重要意义。

国内外学者结合理论分析、数值模拟和现场试验等方法,对桩-网复合地基土拱效应、拉膜效应及地基变形等热点问题进行研究^[11]。W.J.Hewlett等^[12]及D.Russell等^[13]针对桩-网复合地基的土拱形成机理及算法进行了研究。陈云敏等^[14]引进了极限状态判定系数,改进了Hewlett土拱算法。费康等^[15]综述国内外土拱效应研究存在的问题,提出设计中应将土拱效应和拉膜效应分开考虑的建议。借助桩-土应力比及桩-土荷载分担比,可以深层次揭示桩-网复合地基上部路堤荷载传递特性。左坤等^[16]依托京沪铁路昆山试验段测试数据,分析散体桩-网复合地基桩-土应力比及荷载分担比的变化规律,后期又结合沪宁城际铁路,对比分析了排水桩与刚性桩对桩-土应力比及荷载分担比影响。商拥辉等^[17]结合哈大高铁现场测试数据及数值模型,探讨了格栅强度对桩-土应力比及荷载分担比的影响。

连峰等^[18]总结桩-土应力比随桩土沉降差的增大而增大。杨涛等^[19]总结桩-土应力随荷载增加先减小后增大,呈波浪式变化。张崇磊等^[20]结合模型试验,分析中等压缩性土桩-网复合地基荷载传递和地基变形特性。宋鑫等^[21]基于武-广高铁24组路堤断面测试数据,分析了地基沉降计算修正系数的变化与工后沉降的时间效应。

目前,仅有部分国家针对桩-网复合地基设计及施工制定相应规范,而传荷机理及地基变形特性至今仍存在诸多问题有待进一步解决。同时,鉴于目前中低压缩性土地基加固技术还不完善,短桩桩-网复合地基研究成果相对较少。基于此依托赣龙高铁工程背景,采用现场试验方法,对短桩桩-网复合地基荷载传递规律及变形特性进行研究,对探索中低压缩性土区域桩-网复合地基工作性状及指导类似工程实践具有重要理论意义。

1 工程概况与试验方案

1.1 桩-网复合地基工程概况

赣龙(赣州市—龙岩市)铁路设计时速 ≥ 250 km,试验段DK86+998.0~DK87+191.2位于赣州市于都县小密镇附近。土层自上而下依次为:(1)黏性土(Q_4^{al+pl}),局部含砾,褐黄色~棕黄色,硬塑,土质较均匀,刀切面较光滑,砾石含量2%~5%,粒径2~10 mm,多为砂粒、细圆砾,层厚0.5~15 m。(2) Q_4^{el+cl} 含砾黏土,棕黄色,硬塑,以黏性土为主,土质较均匀,局部砾石含量5%~30%,粒径2~20 mm,个别达60 mm,多为砂岩风化碎块,棱角状、碎块状,层厚8~25 m。(3)灰岩(C_2h),岩溶较发育,青灰色弱风化。埋深18.7~31.8 m。结合室内原位测试和室内土工试验,整理试验段土层的基本物理力学参数见表1。

由表1可知:试验段黏性土和含砾黏土属于中

表1 土层物理力学指标(均值)

Table 1 Statistics of physical properties

土层类别	层厚/m	密度/($g \cdot cm^{-3}$)	天然含水率/%	孔隙比 e	黏聚力/kPa	压缩模量/MPa
黏性土	0~15	1.95	24.18	0.75	57.12	7.42
含砾黏土	8~25	2.00	24.03	0.70	49.88	7.19
土层类别	液限/%	塑限/%	塑限指数 I_p	液限指数 I_L	摩擦角/($^\circ$)	压缩系数/(MPa^{-1})
黏性土	41.32	21.27	19.96	0.20	21.85	0.24
含砾黏土	37.91	19.33	18.46	0.25	15.94	0.24

低压缩性土。DK87+070.0~+168.0区间为天然地基(对比分析),仅采用堆载预压(预压土柱高2.0 m)处理;DK87+168.0~+191.2区间采用桩-网复合地基处理,其中CFG桩采用正方形布置,间距1.6 m,桩径0.5 m,桩长6 m,堆载预压高度2.0 m。褥垫层由0.4 m厚碎石和0.2 m中粗砂组成,垫层内铺设单层单向聚丙烯土工格栅,每延米极限抗拉能力为100 kN,延伸率 $\leq 10\%$ 。试验段路基顶面宽约13.2 m,边坡斜率1:1.5。

1.2 桩-网复合地基试验方案

借助测试桩顶与桩间土土压力、地基沉降等数据分析荷载传递规律及变形特性。埋设土压力盒型号为JMZX-5020AT,灵敏度0.001 MPa,桩间土和桩顶量程分别为0.2 MPa和1.2 MPa;路基中心埋

深沉降板,借助经纬仪测试地基沉降规律;地基侧向位移借助地基两侧埋测斜管测试。测试元件布置如图1所示,元件埋设及数据采集过程如图2所示。

2 路基荷载传递规律分析

2.1 土压力-时间-填筑荷载变化规律

随路基上部路堤填高逐渐增加,地基承担的上部荷载逐渐变大,表现为土压力测试值随时间—荷载的变化曲线。由图3(a)可知:测试土压力与填筑荷载曲线随时间变化趋势吻合;静置期①时,土压力盒TP-5、TP-7和TP-8测试值分别为52、90、85 kPa,约为路堤填筑荷载值37.2 kPa的1.4、2.4和2.3

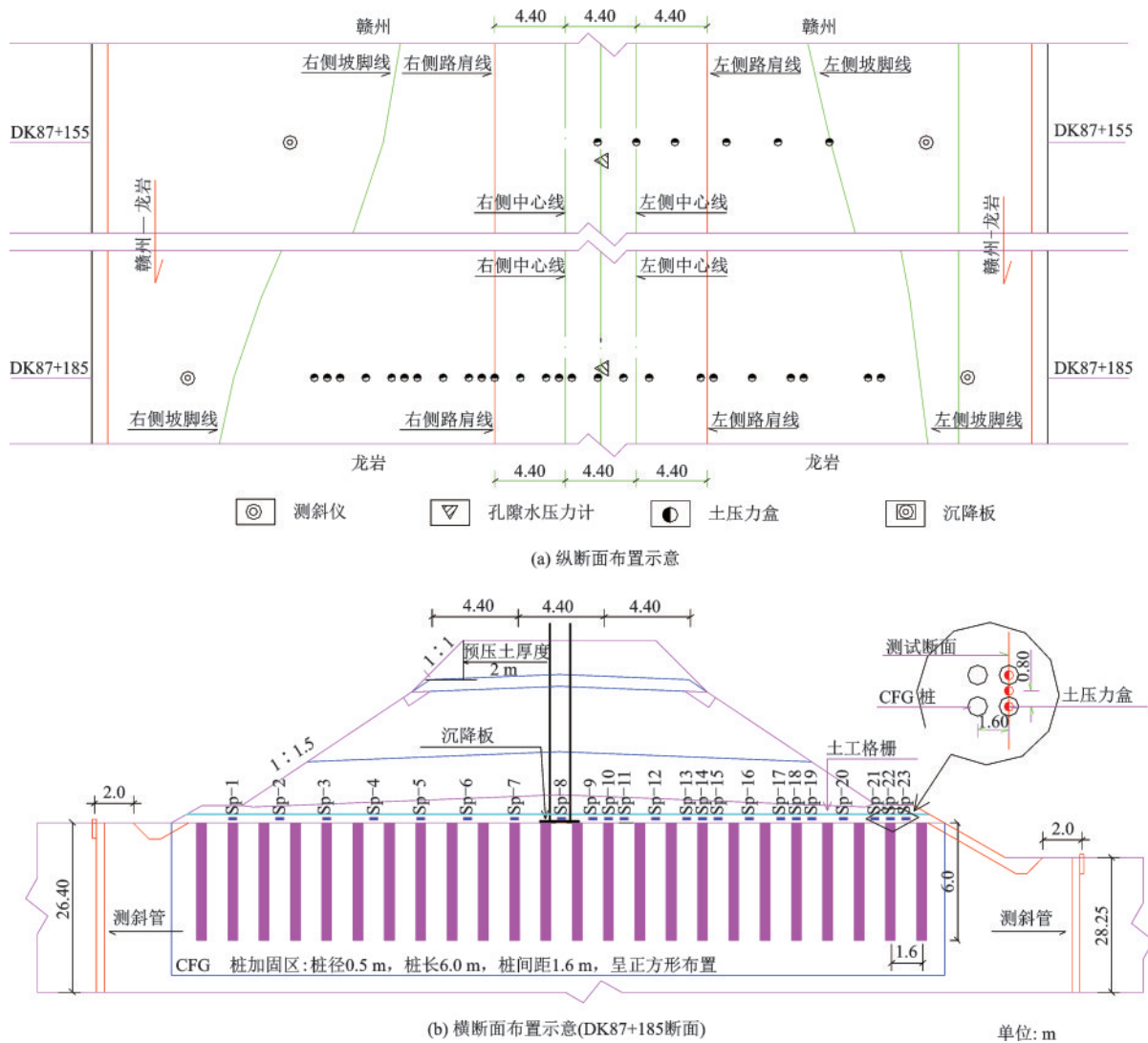


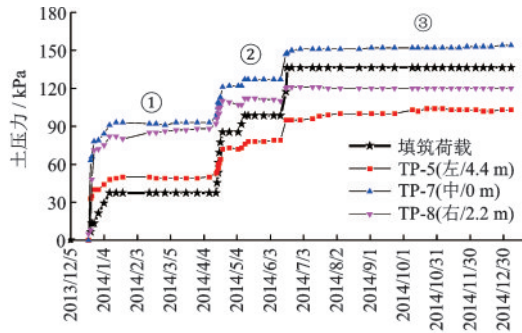
图1 测试元件布置

Fig.1 Layout of the test element

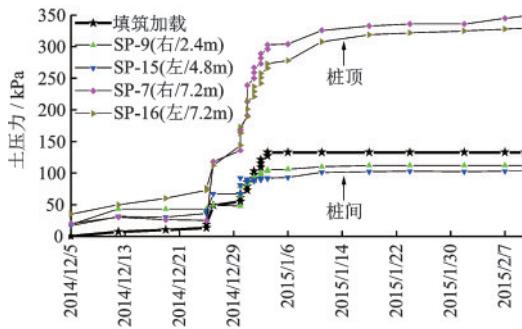


图2 测试元件埋设及数据采集照片

Fig.2 Photos of the test components arrangement and data acquisition



(a) 天然地基(赣龙DK87+155断面)



(b) 复合地基(赣龙DK87+185断面)

图3 土压力—时间—荷载变化曲线

Fig.3 Curve of earth pressure—time—load

倍。两者差异较大主要考虑初期路堤填筑荷载较小,测试易受填筑及碾压等大型施工机械荷载影响所致;静置期②时,土压力盒 TP-5、TP-7 和 TP-8 测试值为 79、127 kPa 和 111 kPa,约为填筑荷载值 98.4 kPa 的 0.8、1.3 和 1.1 倍。实测与填筑荷载差异逐渐缩减主要考虑路堤填筑高度增加,测试受施工机械荷载影响降低,土压力测试主要考虑为填筑荷载对地基表层压力的分布值;静置期③填筑结束,土压力盒 TP-5、TP-7 和 TP-8 测试值为 103、154 kPa 和 120 kPa,约为填筑荷载值 136.4 kPa 的 0.8、1.1 和 0.9 倍。距离路基中心越远测点,稳定时测试土压力值越小,主要考虑路堤为梯形荷载形式分布于地基,路肩与坡脚处地基受梯形荷载中三角形荷载,测试值小于填筑荷载值;而同为路肩内部测点 TP-7 和 TP-8 存在差值,主要考虑为地基受填

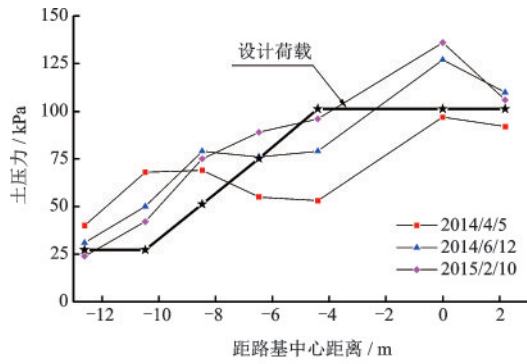
筑荷载作用形成沉降盆,路基变形在中心处挤压形成应力集中,距离路基中线处测点 TP-7 大于填筑荷载,距离路基中心 2.2 m 测点 TP-8 小于填筑荷载。

由图 3(b)可知:复合地基与天然地基测试规律的不同之处具体表现为:(1)测试土压力与填筑荷载曲线变化趋势吻合;(2)填筑初期测试易受施工机械荷载影响;(3)同类别测点距离路基中线越远测试值越小。与天然地基测试规律不同之处在于:复合地基受桩与桩间土客观刚度差异存在影响,路堤填筑过程中刚度较大的桩易发生应力集中,对应测试值明显大于桩间土;稳定时桩顶土压力盒 SP-7 和 SP-16 测试值为 320 kPa 和 310 kPa,约为填筑荷载值 133 kPa 的 2.4 倍;桩间土压力盒 SP-9 和 SP-15 测试值为 101 kPa 和 102 kPa,约占填筑荷载的 77%。

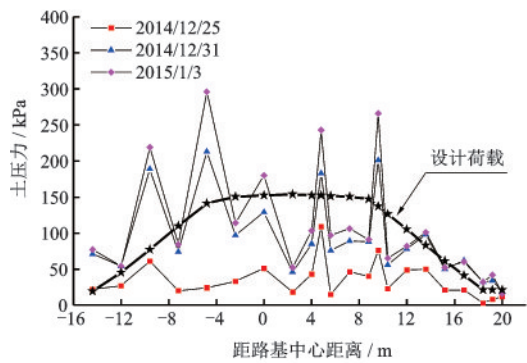
2.2 土压力沿路基横向分布变化规律

结合土压力沿路基横向分布曲线,可探索上部路堤荷载填筑过程中不同横向位置地基应力变化特性,进而达到优化复合地基设计参数目的。由图 4(a)天然地基土压力横向分布曲线可知:测点测试值绘制横向曲线与路基填筑设计荷载趋势吻合;除特殊点外,各测点随时间延长测值增加,与土压力随时间及荷载变化规律类同。由图 4(b)复合地基土压力横向分布曲线可知:受桩-土客观刚度差异影响,土压力沿路基横向分布曲线与设计荷载吻合度远低于天然地基;土压力沿路基横向分布表现为“锯齿状”特征;对称测点测值存在差异,考虑两侧路肩处临时行车道荷载、桩基质量及天气等因素影响。

笔者结合沪宁、京沪、哈大等线路大量测试数据认为,桩-网复合地基土压力的变化规律与地质条件、复合地基设计参数等密切相关。结合文献[17]



(a) 天然地基(赣龙DK87+155断面)



(b) 复合地基(赣龙DK87+185断面)

图4 土压力沿路基横向分布

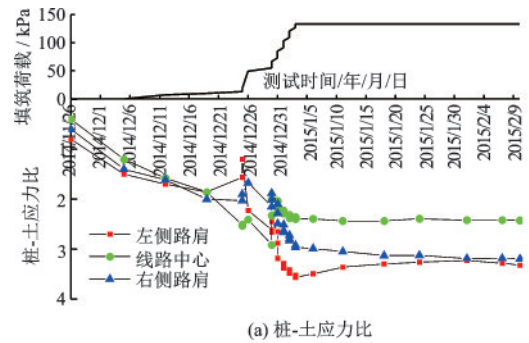
Fig4 Earth pressure distribution along the base

对比可知:中低压缩性土与高压缩软土桩-网复合地基土压力随时间及填筑荷载变化规律类似;相比中低压缩性土,高压缩性软土区域桩-网复合地基土压力受填筑荷载影响更为敏感。

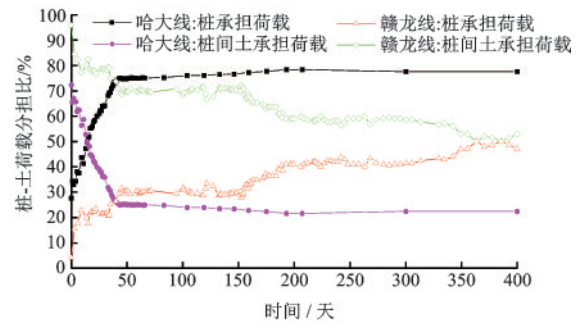
2.3 桩-土应力比与荷载分担比

桩-土应力比及荷载分担比是桩-网复合地基设计重要参考指标^[10,18]。由图5(a)可知:桩-土应力比随填筑荷载增加而呈相应变化,填筑初期桩-土应力比较小,稳定时左侧路径、路基中心和右侧路肩桩-土应力比依次为3.2、2.8和3.1,平均值3.0。

图5(b)中哈大线DK369+520断面铺设双层土工格栅,抗拉强度为320 kN,桩顶设置桩帽^[18]。由图4(b)可知:随荷载增加,桩间土承担荷载逐渐减小,桩承担荷载逐渐增加;赣龙线桩与桩间土承担的荷载比例基本相等,均为50%,验证中低压缩性土采用短桩桩-网复合地基同时发挥桩与桩间土承载功效较好;哈大高铁桩承担荷载达到80%左右,说明借助桩帽增大接触面积及使用高强格栅,有利用进一步发挥桩承载功效。



(a) 桩-土应力比



(b) 桩-土荷载比

图5 桩-土应力/荷载比变化曲线

Fig.5 Curve of the pile-soil stress ratio/load sharing ratio

3 地基变形特征分析

3.1 地基沉降与侧向变形测试分析

路基填筑过程中,受上部路堤荷载影响地基发生变形,具体表现为竖向沉降和侧向位移。

由图6(a)可知:地基沉降随填筑荷载增加逐渐变大;填土前期沉降速率最大,达到0.63 mm/d,累积沉降38 mm,占总沉降的69.09%;填土中期,填土高度不变而沉降缓慢发展,主要考虑土体固结时间效应;填土后期,沉降随增加速率较小,仅为0.11 mm/d,累积沉降约为52 mm;恒载期沉降曲线变化缓慢,近似“直线”发展,最终累积沉降量为55 mm。

由图6(b)可知:地基侧向位移沿深度方向呈“弓”型分布,且变形主要区域位于地表以下10 m范围,约占全部侧向变形的75%以上;加固区桩端附近地基侧向位移曲线出现“拐点”,主要由于桩刚度较大,对土体侧向位移有一定的约束作用。于进江等^[3]在松软土地区潮汕车站的现场试验,其所选试验段地基侧向位移值达到30~45 mm,甚至个别值超过60 mm,是本试验中等缩性土地基1.5~2倍。

3.2 沉降与桩-土应力比相关性分析

课题组基于多年研究发现:(1)桩土应力比与

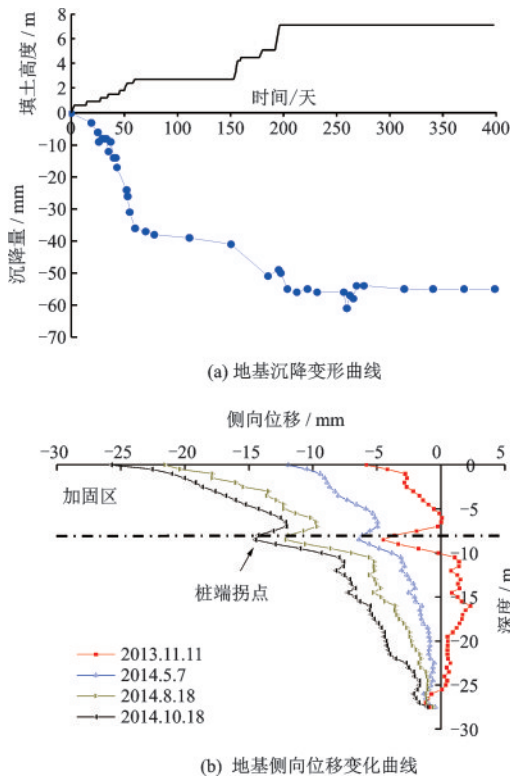


图6 地基变形—时间—填土高度变化曲线

Fig.6 Foundation deformation-time-filling height curves

桩顶及桩间土的沉降变化有一定的对应关系,即桩土应力比与地基沉降状态存在对应关系;(2)桩土应力比随上部荷载、固结时间的发展规律与地基沉降随荷载、时间发展的规律存在一定相似性;(3)沉降稳定状态本质是土体内部各种力达到平衡状态,换言之,地基土体内部力学达到平衡状态时,地基沉降也达到稳定状态。故猜想桩土应力比与地基沉降状态存在对应关系,且桩土应力比的变化可判别地基沉降状态。为此,开展地基沉降状态与桩土应力比相关性研究成为必要。

由图7可知:地基沉降与桩-土应力比随时间及荷载变化规律相似;填筑加载期,沉降与桩土应力比曲线均较陡,增速较大,此时桩与桩间土的沉差异出现并迅速扩大,桩侧摩阻力迅速增大;随着上部荷载的稳定,桩土应力比增速减缓,但仍缓慢增大,桩顶与桩间土沉降曲线表现为缓慢下降,两者差值逐渐稳定,并保持不变。

通过对比曲线可知,桩-土应力比较地基沉降更早进入稳定状态,说明桩土应力比对上部荷载变化的敏感度高于沉降变形,地基沉降变形存在一定滞后效应。可依桩-土应力比的变化判别地基沉降状态,进而评判工后沉降控制效果,为地基沉降状态

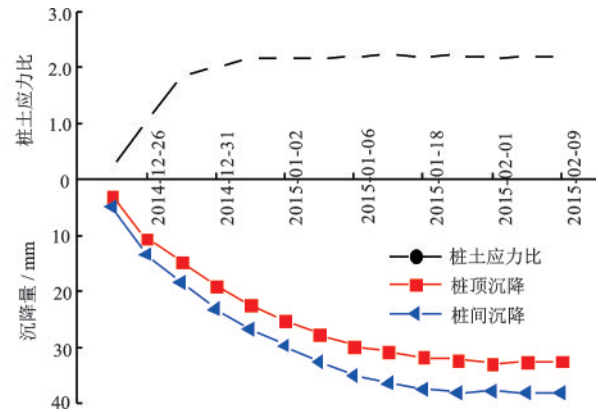


图7 沉降与桩-土应力比曲线

Fig.7 Curves of settlement and pile-soil stress ratio

的判定与计算开拓新思路。

4 结论

依托赣—龙高速铁路为背景,结合现场试验数据,对短桩-桩网复合地基荷载传递及变形特性进行研究,主要结论如下:

(1)中低压缩性土桩-网复合地基稳定时路肩和线路中心处桩-土应力比分别为3.2和2.8,荷载比例均为50%,验证其同时发挥桩与桩间土承载功效显著;与哈大高铁对比可知,借助桩帽及采用高强格栅,可以进一步发挥桩的承载功效。

(2)填土前期地基沉降基本完成,累积沉降约38 mm,占总沉降的69.09%;地基侧向位移沿深度变化呈“弓”型,约占全部侧向变形的75%;桩端附近侧向位移出现“拐点”,验证桩对土体侧向位移有一定的约束作用;最大侧向位移为25 mm,约为高压缩性软土桩-网复合地基的60%左右。

(3)桩-土应力比较沉降更早进入稳定状态,且对上部荷载变化的敏感性高于地基沉降;可依桩-土应力比变化判别地基沉降状态,达到评判工后沉降控制效果目的,进而为地基沉降状态的判定与计算开拓新一种思路。

参考文献:

- [1] 牛婷婷,刘汉龙,丁选明,等. 高铁列车荷载作用下桩网复合地基振动特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2018,39(3): 1-10.
Niu T T, Liu H L, Ding X M, et al. Piled embankment model test about vibration characteristics under

- train loads of high-speed railways [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(3): 1-10. (in Chinese)
- [2] 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): 1600-1606. Han G X, Gong Q M, Zhou Sh H. Experimental study of soil arching effect in geogrid reinforced pile supported embankment under train dynamic load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1600-1606. (in Chinese)
- [3] 于进江,程谦恭,李成辉,等. 超大面积深厚软土桩-网复合地基现场试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2881-2889. Yu J J, Chen Q G, Li Ch H, et al. Field test study of pile-net composite foundation on oversized deep soft soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 2881-2889. (in Chinese)
- [4] 徐林荣,王宏贵,左坤,等. 高速铁路沉降控制复合桩基的性状试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2605-2612. Xu L R, Wang H G, Zuo Sh, et al. Test study of performance of composite pile foundation of high-speed railway controlling settlement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2605-2612. (in Chinese)
- [5] 赵明华,刘苏,尹平保,等. 考虑桩土界面初始临界摩阻力影响的基桩沉降计算方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(8): 3425-3431. Zhao M H, Liu S, Yin P B, et al. Settlement calculation method of piles considering effect of initial critical friction on pile-soil interface [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(8): 3425-3431. (in Chinese)
- [6] 王锐,程培峰,韩春鹏. 高纬度多年冻土区路基工后沉降变形[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(1): 43-49. Wang R, Cheng P F, Han Ch P. Roadbed settlement deformation after construction in permafrost regions of high altitude [J]. Journal of Chang an University (Natural Science Edition), 2017, 37(1): 43-49. (in Chinese)
- [7] 闫澍旺,郎瑞卿,孙立强,等. 基于薄板理论的刚性桩网复合地基桩土应力比计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8): 2051-2060. Yan Sh W, Lang R Q, Sun L Q, et al. Calculation of pile-soil stress ratio in composite foundation with rigid pile-net based on plate theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(8): 2051-2060. (in Chinese)
- [8] 李运成,彭振斌,何杰. 夯实水泥土桩-网复合地基工作性状对比试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(10): 3531-3535. Li Y Ch, Peng Zh B, He J. Comparative experimental study on working behavior of rammed cement-soil pile-net composite foundation [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(10): 3531-3535. (in Chinese)
- [9] 赵明华,张玲,赵衡. 双向增强复合地基沉降计算方法研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2741-2746. Zhao M H, Zhang L, Zhao H. Settlement calculation of two-directional reinforced composite foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2741-2746. (in Chinese)
- [10] 张栋. 桩网结构低路基土拱效应及加筋垫层动力特性研究[D]. 北京:北京交通大学, 2015. Zhang D. Study on soil arching effect and mechanical properties of cushion within geogrid reinforced pile supported low embankment [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [11] 魏平,魏静,杨松林,等. 静动荷载下桩网结构路基土拱效应细观分析[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(5): 1-5, 99. Wei P, Wei J, Yang S L, et al. Research on the soil arching effect in pile net structure of embankment under static load and dynamic load [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(5): 1-5, 99. (in Chinese)
- [12] Hewlett W J, Randolph M F. Analysis of piled embankments [J]. Ground Engineering, 1988, 21(3): 12-18.
- [13] Russel D, Pierpoint N. An assent of design methods for piled embankments [J]. Ground Engineering, 1997(11): 39-44.
- [14] 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 Y M, Jia N, Chen R P. Soil arch analysis of pile-supported embankments [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(4): 1-6 (in Chinese)
- [15] 费康,刘汉龙. 桩承式加筋路堤设计理论研究进展[J]. 水利水电科技进展. 2008, 28(4): 89-94. Fei K, Liu H L. Advances in research on design theory of geosynthetic reinforced pile supported embankment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(4): 89-94. (in Chinese)
- [16] 左坤,王敏,徐林荣,等. 高速铁路中低压缩性土桩-筏(网)地基加固效果研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(5): 1590-1597. Zuo Sh, Wang M, Xu L R, et al. Research on reinforce effect of high-speed railway low and medium compressible soil pile-raft (net) foundation [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), (本文责编:苏泽云)