

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.05.009



中等压缩性土短桩-网复合地基 变形现场测试特性

王敏, 徐林荣

(中南大学 土木工程学院, 长沙 410012)

摘要:为优化高速铁路中等压缩性土地基处理方案, 依托赣龙高速铁路试验段, 采用现场试验及理论分析方法, 研究了短桩-网复合地基的变形特性, 并与天然地基进行对比。结果表明: 复合地基加固区沉降占总沉降的 62%~75%; 地基侧向位移主要发生在预压土堆载期, 20 m 深度范围是主要的侧向位移层, 在相似条件下, 复合地基与天然地基沉降主要发生的时间、主要的沉降土层厚度及路基横断面沉降差异较大。结果显示了短桩-网复合地基可有效控制中等压缩性土地基变形。

关键词: 高速铁路; 中等压缩性土; 复合地基; 天然地基; 变形特性

中图分类号: TU441.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)05-0063-08

Deformation characteristics of short pile net composite foundation with medium compression soil by field test

Wang Min, Xu Linrong

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410012, P. R. China)

Abstract: In order to optimize the processing scheme of medium compression soil foundation, the short pile-net composite foundation deformation characteristics is explored using the method of field test and theoretical analysis on a test section of Ganlong high-speed railway, and it's compared with the natural foundation. It is shown that the settlement of composite foundation reinforced area is 62%~75% of total settlement, the lateral displacement mainly occurred in preloading soil loading period and 20m depth is the main layer. Under similar conditions, the main stage of settlement, the main settlement layer thickness and settlement of cross section are quite different between composite foundation and natural foundation. The results show that the short pile-net composite foundation can effectively control the deformation of the medium compression soil foundation, which can provide reference for similar projects.

Keywords: high-speed railway; medium compression soil; composite foundation; natural foundation; deformation characteristics

收稿日期: 2016-10-19

基金项目: 铁道部科技研究开发计划项目(2012G009-C); 国家自然科学基金(51078358); 高铁联合基金(U1134207)

作者简介: 王敏(1969-), 女, 博士, 主要从事道路与铁道工程研究, (E-mail) wmpo@126.com。

徐林荣(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) lrxu@csu.edu.cn。

Received: 2016-10-19

Foundation item: Research and Development Program for Technology of the Chinese Ministry of Railway(No. 2012G009-C); National Natural Science of China(No. 51078358); United Foundation of High-Speed Railway of China(No. U1134207)

Author brief: Wang Min(1969-), PhD, main research interests: road and railway engineering, (E-mail) wmpo@126.com.

Xu Linrong(corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail) lrxu@csu.edu.cn.

路基变形控制是确保列车安全、平顺运行的前提条件^[1-2],主要由两部分组成:路基本体变形、地基变形,而地基变形是路基变形控制研究的重点^[3]。同时,随着列车运营的提速,地基变形控制的要求愈加严格,而对变形特性的深入了解是解决变形控制问题的重要前提,故变形特性的研究就成为工程设计中的主要问题之一^[4]。

地基变形特性主要可归纳为空间特性和时间特性两个方面。空间特性主要包括路基横断面沉降差异^[5]、加固区及下卧层差异^[6-7]、桩土沉降差^[8-9]等;在时间特性上,主要有各建设阶段沉降值比较及沉降预测^[10-11]等。在高速铁路路基的勘察设计中,大量承载力在 150 kPa 以上的黏性土、粉土、砂类土、卵砾石类土大多属于非饱和土范畴^[12],压缩性和渗透性比较复杂,其变形的时间及空间特性与饱和土有很大的不同^[13]。已建及在建的一些高标准无砟轨道工程,对该类地基大都采用 CFG 桩、旋喷桩等进行加固^[14],而现场试验和长期监测表明:经处理后的路基实测沉降量很小,远低于理论计算结果^[15]。因此,地基处理方案、设计的加固间距、加固深度均存在着一定的优化空间。随着中国高速铁路网的大规模建设,对中等压缩性土地基的沉降变形特性开展试验研究,对于指导无砟轨道路基地基处理设计、施工,促进高速铁路路基工程地基处理技术发展等具有重要意义。

1 试验段概况及现场试验方案

2.1 试验段概况

试验工点位于赣州市于都县小密镇附近,里程:

DK86+998.0~DK87+191.2,长 193.2 m。

试验段土层由上至下依次为:

1) Q^{4al+pl} 含砾黏土,褐黄~棕黄色,硬塑,黏性土为主,土质较均匀,刀切面较光滑,局部含砾,含量 2%~5%,粒径 2~10 mm,多为砂粒、细圆砾,层厚 0.5~>20 m。

2) Q^{el+dl} 含砾黏土,棕黄色,硬塑,以黏性土为主,土质较均匀,部分夹铁锰结核,切面粗糙,局部含砾,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 5.9~20 m。

3) C_2h 灰岩,青灰色,弱风化。岩溶较发育。通过对已钻钻孔分析,灰岩埋深 18.7~31.8 m,钻孔揭示溶洞埋深 22.4~57 m 不等,大小为 0.4~5.1 m,均无充填,溶洞见洞率 71%,单孔线性岩溶率 0~43.4%,平均线性岩溶率 22%。

试验区内地表水以大气降水为主,地下水主要为碳酸盐岩类岩溶水,其次为第四系孔隙潜水,埋深 1.5~12.7 m,受季节变化的影响较大,水动态不稳定。由于区内第四系地层直接覆盖在石炭系之上,因此,地表水与地下水的含水层有密切的水力联系,第四系孔隙潜水与石炭系岩溶裂隙水两者为互补型。

根据机动钻探取样分析结果,结合平板载荷试验和静力触探试验成果,根据《铁路工程地质勘察规范》的统计方法,对地层的成因、时代、物理力学特征等进行分析、统计,取得主要土工参数指标,如表 1 所示。

表 1 主要土工参数指标

Table 1 main geotechnical parameters

地层	统计量	天然含水量/ 量/%	天然密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	颗粒密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	天然孔 隙比	内摩擦角 $\Phi_0/(^\circ)$	凝聚力 C_u/kPa	压缩 系数	压缩模 量/MPa
(2)1	平均值	24.18	1.95	2.74	0.75	21.85	57.12	0.24	7.42
Q^{4al+pl}	标准值	24.95	1.94	2.74	0.77	18.64	48.63	0.26	6.63
(4)1	平均值	24.03	2.00	2.74	0.70	15.94	49.88	0.24	7.19
Q^{el+dl}	标准值	24.69	1.98	2.74	0.72	13.55	41.85	0.25	6.71

2.2 现场试验方案

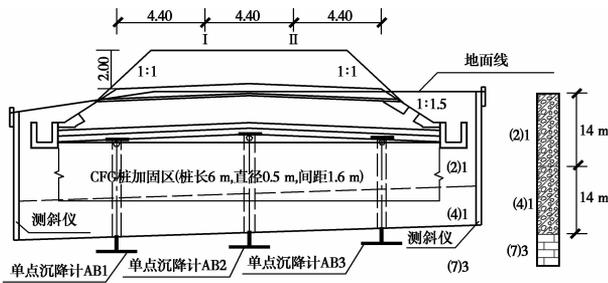
为分析含砾黏土地基不同加固方案中地基沉降随时间、荷载的变化规律,在 DK87+070.0~+168.0 采用堆载预压(预压土柱高 2.0 m)处理,DK87+168.0~+191.2 采用 CFG 桩(6 m)+堆载预压(预压土柱高 2.0 m)处理。CFG 桩复合地基中桩正方形布置,间距 1.6 m,桩径 0.5 m,桩长 6 m。桩顶垫层(0.4 m 厚碎石垫层+0.2 m 中粗砂)内铺设单层单向聚丙烯土工格栅(TGDG100 kN/m),其延伸率 $\leq 10\%$ 。路

基顶面宽 13.2 m,边坡斜率 1:1.5。

根据工点地层情况,布置了 4 个测试横断面(参考图 1)。主要布置的观测测试元件及测试内容:地面沉降、路基面沉降、分层沉降、地基侧向(水平)位移测试断面一览表见表 2。

主要测试内容如下:

1) 分层沉降:采用采用单点沉降计进行监测,分别布置于路基中心线附近及两侧路肩,埋置深度在 24~29 m 之间,与中心沉降板对应设置;观测地表



注: DK86+998.0~DK87+191.2土石代号及工程等级:
 (2)1 Q_{41}^{pl+pe} 粉质粘土:褐黄色~棕黄色,硬塑,局部含少量砾石, $\sigma_c=160$ kPa, III。
 (4)1 Q_{41}^{pl+pe} 粉质粘土:棕黄色、棕黄色,硬塑,局部含少量砾石, $\sigma_c=180$ kPa, III。
 (7)3 C₂b灰岩,青灰色,弱风化,岩溶发育, $\sigma_c=800$ kPa, V。

图 1 单点沉降计布置图

Fig. 1 Arrangement of single-point settlement meter

以下各点(层)的沉降,以了解加荷过程中、工后地基

表 2 测试断面一览表

Table 2 Test section list

分区	填高/m	地基加固类型	里程范围	长度/m	测试断面
A 区	-0.5~5.2	预压 2 m	DK87+070~+168	98	DK87+100、+155
B 区	6.7~9.8	CFG 桩 6 m+预压 2 m 处理	DK87+168~+191.2	23.2	DK87+175、+185

表 3 单点沉降计埋设情况

Table 3 Single-point subsidence meter laying situation

编号	断面	中心距/m	埋深/m
Ss-1-1	1	左 4.4	27.09
Ss-1-2	1	右 2.2	27.11
Ss-1-3	1	右 8.8	26.74
Ss-2-1	2	左 4.4	26.39
Ss-2-2	2	右 2.2	25.46
Ss-2-3	2	右 8.8	25.47
Ss-3-1	3	左 4.4	24.60
Ss-3-2	3	右 2.2	24.54
Ss-3-3	3	右 8.8	25.84
Ss-4-1	4	左 4.4	27.13
Ss-4-2	4	右 2.2	27.38
Ss-4-3	4	右 8.8	28.72

土的沉降量。分层量测系统由多个单点沉降单元(YH-2620A 单点位移计)与 PVC 管串接而成,适用于测试多层土壤与相对不动点之间的垂直位移变化。多单位移计量程 200 mm,分辨率 0.01 mm,采用 YH6406 手持便携读数仪采集数据。

2)地基深层侧向(水平)位移观测:采用测斜仪进行地基深层水平变形观测,估算侧向位移所产生的沉降,设置在路堤坡脚处,共 4 个断面埋设,每个观测断面设置 2 个孔。侧向位移量测系统有 PVC 测斜管和 XB338-2 型滑动式测斜仪组成,测斜管直径 70 mm,测斜仪量程范围 0~53°,分辨率 0.000 4°。

各断面测点编号及埋设位置如表 3 所示。

表 4 DK87+185 路堤基底不同位置沉降情况

Table 4 DK87 + 185 embankment basement

settlement at different locations			
建设阶段	中心距/ m	沉降/ mm	沉降速率/ (mm · d ⁻¹)
路基填筑期/ 2013 年 11 月 11 日— 2014 年 5 月 27 日	左 4.4	22.6	0.058
	右 2.2	37.3	0.098
	右 8.8	36	0.093
预压土填筑期/ 2014 年 5 月 27 日— 2014 年 6 月 18 日	左 4.4	1.3	0.025
	右 2.2	1.1	0.021
	右 8.8	2.5	0.048
静置期/ 2014 年 6 月 18 日— 2015 年 2 月	左 4.4	3.8	0.022
	右 2.2	3.6	0.020
	右 8.8	6	0.034

表 5 DK87+155 路堤基底不同位置沉降情况

Table 5 DK87 + 155 embankment basement

settlement at different locations			
建设阶段	中心距/ m	沉降/ mm	沉降速率/ (mm · d ⁻¹)
路基填筑期/ 2013 年 11 月 11 日— 2014 年 5 月 27 日	左 4.4	35.0	0.182
	右 2.2	45.4	0.233
	右 8.8	8.7	0.045
预压土填筑期/ 2014 年 5 月 27 日— 2014 年 6 月 18 日	左 4.4	2.6	0.118
	右 2.2	2.1	0.095
	右 8.8	1.4	0.063
静置期/ 2014 年 6 月 18 日— 2015 年 2 月	左 4.4		
	右 2.2		
	右 8.8		

2 地基变形特性测试数据分析

2.1 路堤基底横向差异沉降

为保证运营的安全及平稳,不但要求工后沉降满足标准,对轨面的平整状态也有严格规定,横向不均匀沉降会引起轨面在水平面上高低偏差,从而影响高速列车的正常运行。基于此,以 DK87+100~DK87+185 试验段沉降监测数据为基础,对建设期路堤基底横向差异沉降特性展开分析。

路堤基底不同位置沉降差异情况见表 4 和表 5。

从图 2 可见,总体上,路堤基底横向沉降大致呈盆状,中心沉降大,两侧较小;表 3 显示了近路基中心线处地基沉降稳定的速度较远路基中心线处快。路基填筑期中心距 2.2 m 处路堤基底已完成沉降的

91%，预压土填筑期沉降完成 93%；中心距 4.4 m 处路堤基底在路基填筑期沉降完成 86.7%，预压土填筑期沉降完成 90%；中心距 8.8 m 处路堤基底在路基填筑期沉降完成 84%，预压期填土堆载完成后沉降完成 88.7%。表 4 所显示的 DK87+155 路堤基底横断面沉降特性与 DK87+185 断面相似，均显示了在路基填筑期间，路堤基底便已完成总沉降的 84% 以上，预压土堆载完成后沉降已完成总沉降的 90%，且近路基中心线处地基沉降稳定的速度较远路基中心线处快。

中路基中心线附近，沉降-填土高度-时间曲线见图 3。

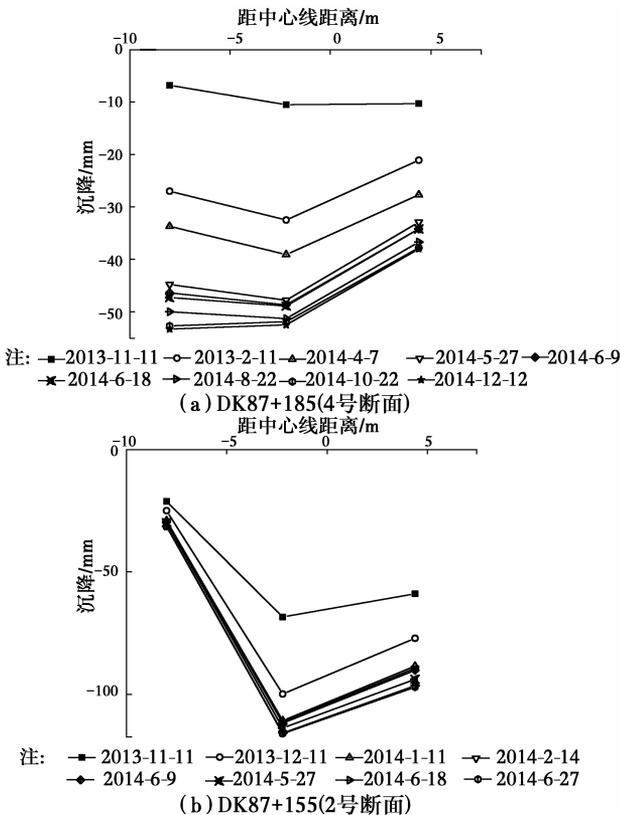


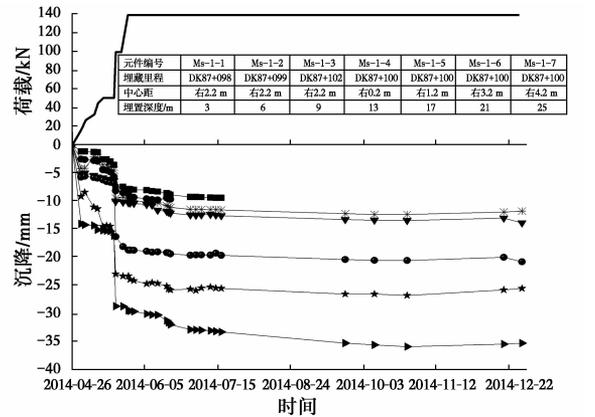
图 2 路堤基底横向差异沉降示意图

Fig. 2 Schematic diagram of lateral differential settlement of embankment foundation

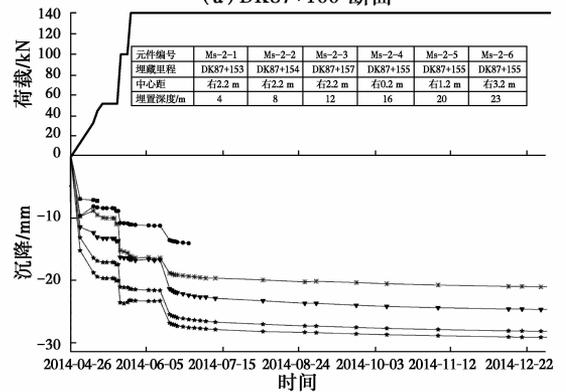
对照上述两个试验段的分析，DK87+185 断面的地基处理方式“堆载预压+桩-网复合结构”，其路堤基底横断面“沉降盆”的矢跨比为 1.48，而 DK87+155 断面的地基处理方式堆载预压，其横断面“沉降盆”的矢跨比为 5.30，是 DK87+185 断面的 3 倍左右，其横断面沉降的“盆”状较 DK87+185 断面更为明显，表明了桩-网复合结构能极大地提高天然地基的整体性。

2.2 地基分层沉降

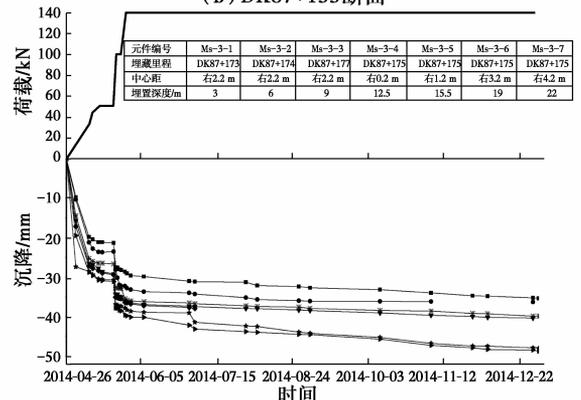
2.2.1 沉降随时间及荷载变化特性 分层沉降监测的目的在于分析不同深度地基沉降特性。本项目中，分层沉降利用单点沉降计进行监测，埋设于地基



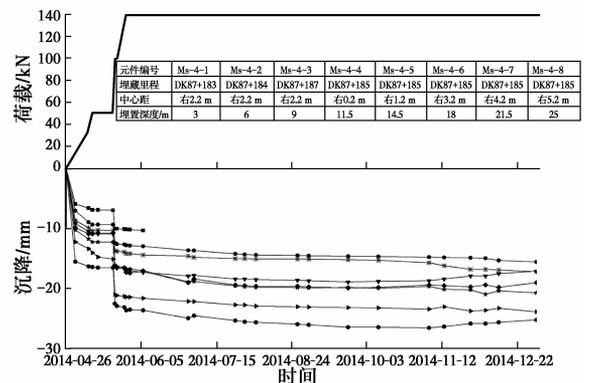
注：— 3 m — 6 m — 9 m — 13 m — 17 m — 21 m — 25 m (a) DK87+100 断面



注：— 4 m — 8 m — 12 m — 16 m — 20 m — 23 m (b) DK87+155 断面



注：— 3 m — 6 m — 9 m — 12.5 m — 15.5 m — 19 m — 22 m (c) DK87+175 断面



注：— 3 m — 6 m — 9 m — 11.5 m — 14.5 m — 18 m — 21.5 m — 25 m (d) DK87+185 断面

图 3 分层沉降-填土高度-时间曲线

Fig. 3 layered settlement-fill height-time curve

表 6 分层沉降-时间发展情况

Table 6 Layered settlement-time development

建设阶段	截面	中心距/ m	沉降/ mm	沉降速率/ (mm · d ⁻¹)
路基填筑期/ 2013年11月11日— 2014年5月27日	DK87+100	右 4.2	29.54	0.15
	DK87+155	右 3.2	23.13	0.12
	DK87+175	右 4.2	39.56	0.20
	DK87+185	右 5.2	23.10	0.12
预压土填筑期/ 2014年5月27日— 2014年6月18日	DK87+100	右 4.2	2.16	0.10
	DK87+155	右 3.2	3.76	0.17
	DK87+175	右 4.2	2.58	0.12
	DK87+185	右 5.2	1.80	0.08
静置期/ 2014年6月18日— 2015年2月	DK87+100	右 4.2	3.66	0.015
	DK87+155	右 3.2	2.07	0.009
	DK87+175	右 4.2	6.61	0.028
	DK87+185	右 5.2	0.3	0.001

从图 3 及表 6 可知:

1)DK87+100 在路基填筑期沉降 29.54 mm, 沉降速率为 0.15 mm/d, 完成总沉降的 83.5%; DK87+155 沉降 23.13 mm, 沉降速率为 0.12 mm/d, 完成总沉降的 79.9%;DK87+175 沉降 39.56 mm, 沉降速率为 0.20 mm/d, 完成总沉降的 81.1%; DK87+185 沉降 23.10 mm, 沉降速率为 0.12 mm/d, 完成总沉降的 91.7%;路基填筑速率为 0.013 m/d。总体上看,天然地基在路基填筑完成后已完成沉降的 79%~84%,其沉降速率基本与路基填筑速率一致,而复合地基则完成了总沉降的 81%~92%,其沉降速率是路基填筑速率的 1~1.7 倍,说明桩-网复合地基沉降主要发生在路基填筑期,而天然地基在堆载预压期仍有较大沉降。

2)堆载预压时间超过 1 个月时,4 个试验段的沉降占总沉降的比值均超过 94%,沉降速率为 0.015~0.028 mm/d;预压时间超过 5 个月时的沉降均超过总沉降的 98%,沉降速率为 0.001~0.015 mm/d;而高速铁路无砟轨道铺设轨道的沉降速率要求是“≤0.088 mm/d”,表明中等压缩性土地基的堆载预压时间要求相对较低。

3)对于桩-网复合地基,断面 DK87+175 加固区的沉降量 36.29 mm,占总沉降的 74.4%,下卧层的沉降量 12.46 mm,占总沉降的 25.6%;断面 DK87+185,加固区的沉降量 15.56 mm,占总沉降的 61.7%,下卧层的沉降量 9.64 mm,占总沉降的 38.3%。对比天然土地基断面 DK87+100 和断面 DK87+155,在深度为 6 m 的沉降量分别约占总沉降的 28.3%和 51.8%。表明复合地基加固区的沉降占总沉降的比例是天然地基在与复合地基加固区

同等深度范围的 1~3 倍。

2.2.2 地基沉降随深度变化特性 地基沉降随深度变化情况见图 4。由图可知:不同地基处理方式

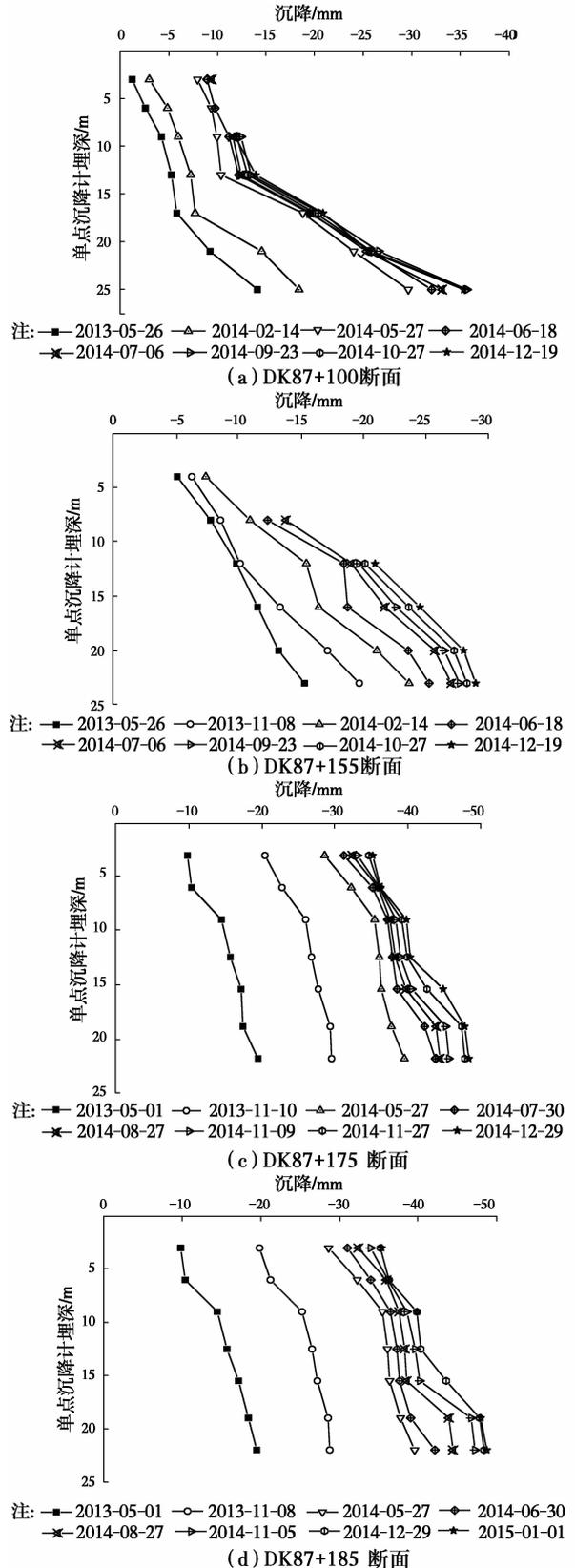


图 4 地基沉降沿深度的变化曲线

Fig. 4 Curve of the depth variation of foundation settlement

下,地基的主要沉降土层厚度差异较大。对地基处理方式采用堆载预压的 DK87+100 及 DK87+155 进行分析可知,DK87+100 断面 24 m 厚土层沉降占总沉降的 90%,DK87+155 断面占总沉降 90% 的土层厚度大概在 18 m 左右;对比桩-网复合地基 DK87+175 及 DK87+185 断面,其占总沉降的 90% 的土层厚度为 14~15 m。天然地基主要沉降土层厚度是复合地基的 1.3~1.7 倍。

3.3 地基侧向位移

地基侧向位移采用测斜仪进行观测,每个观测断面共两个测点,对称分布在左右路堤坡脚处。

由图 5 可知:1)预压土堆载期地基土层侧向位移的增大速率是路基填筑期的 5 倍左右,是静置期侧向位移的增大速率的 10 倍左右。例如,图 5(b)中,路基填筑期间(2013-11-11—2014-05-27)最大侧向位移出现在 0.5 m 深度处,平均侧向位移速率为 0.021 mm/d;从 2014-05-27—2014-06-18 预压土堆载期间,平均侧向位移速率为 0.109 mm/d;2014-

06-18 堆载完成后的 4 个月静置期间,平均侧向位移速率为 0.007 mm/d。2)路基填筑期地基侧向位移速率是路基填筑速率的 1.5 倍左右。例如,图 5(b)中,路基填筑期间平均侧向位移速率为 0.021 mm/d,路基填筑速率为 0.013 m/d。3)深度 20 m 范围内地基侧向位移占总侧向位移的 75% 以上,是主要的侧向位移层。例如,图 5(a)中测斜管在监测结束时,深度 0~10 m 范围内的侧向位移超过 15 mm;深度 15~20 m 范围的侧向位移基本保持在 5 mm 之内;埋深 20 m 处侧向位移在 0 mm 左右小幅波动。4)CFG 桩对土体侧向位移有较好的束缚作用。对比仅用堆载预压处理的试验段 DK87+100~155 及采用堆载预压+CFG 桩处理的 DK87+175~185 段可见,CFG 桩端附近处土体的侧向位移出现明显的拐点(见图 5(c)、图 5(d)),可知 CFG 桩对土体的侧向位移有一定的约束作用,CFG 桩的应用有效增强地基土的整体性。

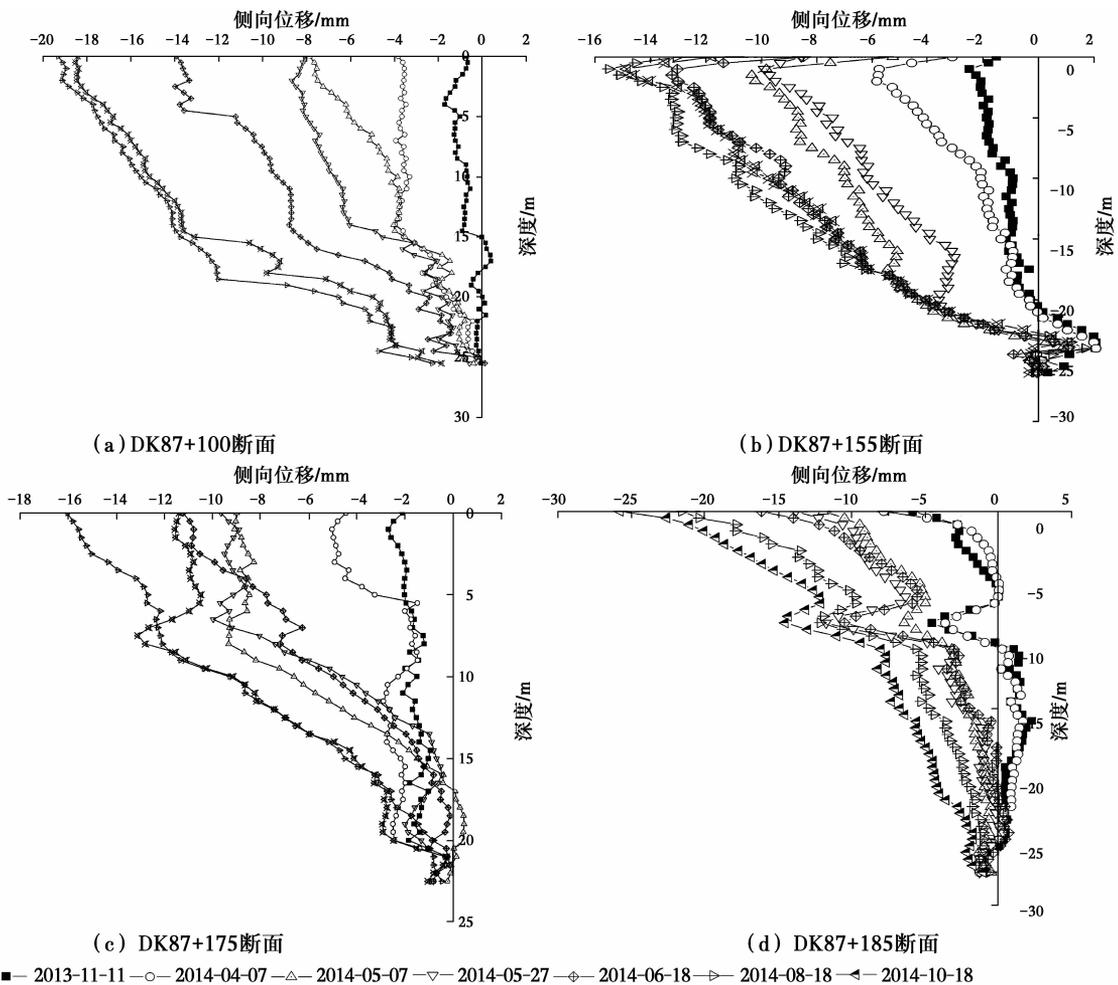


图 5 地基侧向位移-深度曲线

Fig. 5 The lateral displacement-depth curve of the foundation

3 结论

以赣龙高铁试验段为工程背景,通过现场测试及理论分析的方法,对中等压缩性土地基沉降特性研究得到以下结论:

1)复合地基沉降主要发生在路基填筑期,而天然地基在堆载预压期仍有较大沉降。复合地基在路基填筑完成后已完成了总沉降的81%~92%,其沉降速率是路基填筑速率的1~1.7倍,而天然地基在路基填筑完成后已完成沉降的79%~84%,其沉降速率与路基填筑速率基本一致。

2)路基中心沉降稳定速率快于两侧路肩;天然地基横断面“盆”状沉降较复合地基更为明显。预压土填筑完成后路基中心处沉降已完成总沉降的93%,而中心距4.4、8.8m处分别完成总沉降的90%、88.7%;天然地基“沉降盆”的矢跨比为5.30,而复合地基仅为1.48,前者是后者的3倍左右。

3)桩-网复合地基加固区沉降占总沉降的62%~75%,下卧层沉降占总沉降的25%~38%,其加固区的沉降占总沉降的比例是天然地基在与复合地基加固区同等深度范围的1~3倍。

4)不同地基处理方式下,地基的主要沉降土层厚度差异较大。天然地基主要沉降层厚度为18~24m,而复合地基主要沉降层厚度为14~15m,天然地基主要沉降土层厚度是复合地基的1.3~1.7倍。

5)深度20m范围内地基侧向位移占总侧向位移的75%以上,是主要的侧向位移层;CFG桩对地基土侧向位移有一定的约束作用。

参考文献:

[1] 曾俊铖,张继文,童小东,等.高速铁路CFG桩-筏复合地基沉降试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2010,40(3):570-574.
ZENG J C, ZHANG J W, TONG X D. In-situ test on settlement of CFG pile-raft composite foundation in high-speed railway [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 29(3): 570-574. (in Chinese)

[2] 翟婉明,赵春发,夏禾,等.高速铁路基础结构动态性能演变及服役安全的基础科学问题[J].中国科学:技术科学,2014,44(7):645-660.
ZHAI W M, ZHAO C F, XIA H, et al. Basic scientific issues on dynamic performance evolution of the high-speed railway infrastructure and its service

safety [J]. Scientia Sinica Technologica, 2014, 44(7): 645-660. (in Chinese)

- [3] 罗强,李铁,王佳敏,等.高速铁路路堤传递地基差异沉降特性及控制限值研究[J].中国科学:技术科学,2014(7):736-743.
LUO Q, LI T, WANG J M, et al. Analysis on conduction characteristics from embankment and control limits of foundation differential settlement for high speed railway [J]. Scientia Sinica Technologica, 2014, 44: 736-743. (in Chinese)
- [4] 刘升传,曹渊.新建铁路软土地基沉降规律研究[J].铁道工程学报,2010(5):1-3.
LIU S C, CAO Y. Research on settlement law of soft soil subgrade of new railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010(5): 1-3. (in Chinese)
- [5] 肖启航,谢朝娟,黄启舒.高速铁路CFG桩筏复合地基沉降特性试验研究[J].工程勘察,2010,38(11):6-10.
XIAO Q, XIE C, HUANG Q. Experimental study on settlement performance of CFG pile-RC mat composite foundation of high railway [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(11): 6-10. (in Chinese)
- [6] 周境,叶阳升,蔡德钧.国外加筋垫层桩支承路基计算方法分析[J].中国铁道科学,2007,28(2):1-6.
ZHOU J, YE Y S, CAI D G. Analysis of calculation method for foreign geosynthetic reinforced pile supported embankments [J]. China Railway Science, 2007, 28(2): 1-6. (in Chinese)
- [7] 王炳龙,杨龙才,周顺华,等.CFG桩控制深厚层软土地基沉降的试验研究[J].铁道学报,2007,28(6):112-116.
WANG B L, YANG L C, ZHOU S H, et al. Experimental study on the settlement control of high-speed railway subgrade over deep soft clay reinforced by CFG piles [J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(6): 112-116. (in Chinese)
- [8] 付强,刘汉龙,庄妍,等.高速铁路CFG桩筏复合地基沉降变形特性研究[J].铁道科学与工程学报,2014,11(6):45-51.
QIANG F U, LIU H, ZHUANG Y, et al. Analysis of settlement characteristic of CFG piled raft composite foundation in high-speed railway [J]. Journal of Railway Science & Engineering, 2014, 11(6): 45-51. (in Chinese)
- [9] 徐林荣,牛建东,吕大伟,等.软基路堤桩-网复合地基试验研究[J].岩土力学,2007,28(10):2149-2154.
XU L R, NIU J D, LYU D W, et al. Experimental study on pile-net composite foundation of high-speed railway

- on soft soils [J]. *Rock & Soil Mechanics*, 2007, 28 (10):2149-2154. (in Chinese)
- [10] 刘俊飞,赵国堂,马建林. 铁路 CFG 桩桩网、桩筏复合地基沉降变形特点对比[J]. *西南交通大学学报*, 2012(5): 189-193.
- LIU J F, ZHAO G T, MA J L. Comparison of settlement characteristics of CFG pile-net and pile-raft composite foundation under railway embankments [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2012(5):189-193. (in Chinese)
- [11] 冯胜洋,魏丽敏,郭志广. 基于最小二乘支持向量机的高速铁路路基沉降预测[J]. *中国铁道科学*, 2012, 33 (6):6-10.
- FENG S, WEI L, GUO Z. Settlement prediction of high-speed railway subgrade based on least squares support vector machine [J]. *China Railway Science*, 2012, 33(6):6-10. (in Chinese)
- [12] 曹文昭,郑俊杰,董同新,等. 中低压缩性黏土地基沉降变形特性试验研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2016(1):1-5.
- CAO W Z, ZHENG J J, DONG T X, et al. Experimental investigation of physico-mechanical properties of medium-low compressible soil of high-speed railway [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2016(1):1-5. (in Chinese)
- [13] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(2):201-272.
- CHEN Z H. On basic theories of unsaturated soils and special soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(2):201-272. (in Chinese)
- [14] 马明正,海振雄,叶阳升,等. 高速铁路 CFG 桩复合地基沉降计算适用方法研究[J]. *中国铁道科学*, 2014, 35 (2):7-13.
- MA M Z, HAI Z X, YE Y S, et al. Applicable method for settlement calculation of CFG pile composite foundation for high speed railway [J]. *China Railway Science*, 2014, 35(2):7-13. (in Chinese)
- [15] 王长丹,王炳龙,周顺华,等. 高速铁路刚性桩网复合地基沉降计算方法与实测数据对比分析[J]. *铁道学报*, 2013, 35(8):80-87.
- WANG C D, WANG B L, ZHOU S H, et al. Calculation method of settlement of rigid pile-geogrid composite foundation of high-speed railways and comparison with measured data [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2013, 35 (8): 80-87. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)