

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.06.003



# 高速铁路基动载沉降现场监测分析

王敏<sup>1</sup>, 李义杰<sup>2</sup>, 徐林荣<sup>1</sup>

(1. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075; 2. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300251)

**摘要:** 高速铁路基的工后沉降控制是一大难题, 其中, 动荷载影响的研究尚处于数值计算与试验阶段。依托沪宁城际铁路建设、运营监测数据, 基于分离动、静荷载引起沉降的思路, 通过静载作用沉降与实测运营沉降取差值, 获取动载作用下的沉降测试值, 分析了路基由动载引起的沉降特性。结果表明: 动载引起的沉降对运营后实测沉降的贡献有限, 并不是引起部分断面总体沉降偏大的主要原因; 不同地质条件及路堤填筑高度对动载引起沉降的影响较小; 动载引起沉降的速率在运营前期发展较快并达到最大, 之后沉降速率减小, 沉降趋于稳定, 运营后的第 4 年累积沉降约为 2~3 mm。

**关键词:** 高速铁路; 路基; 动荷载; 工后沉降

**中图分类号:** U213.1; TU413.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2017)06-0022-08

## Field monitoring and analysis of dynamic load settlement of high speed railway subgrade

Wang Min<sup>1</sup>, Li Yijie<sup>2</sup>, Xu Linrong<sup>1</sup>

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

2. China Railway Design Corporation, Tianjin 300251, P. R. China)

**Abstract:** The control of settlement after construction of subgrade for high speed railway is a difficult problem, and the study of dynamic load is still in the stage of numerical calculation and experiment. Therefore, relying on the construction and operation monitoring data of Shanghai-Nanjing intercity railway, test values of settlement under the action of dynamic load are used to analyze the settlement characteristics caused by dynamic load based on the method of separating the settlement caused by static and dynamic load. The results show that settlement caused by dynamic load has limited contribution to the operation data of the settlement, while it is not the main reason causing settlement large. Different geological conditions and construction of embankment height have little influence on the settlement caused by dynamic load. Settlement rate caused by dynamic load is faster and reaches the maximum in the early development of the operation, then gradually decreases. The settlement tends to be stable after operation

**收稿日期:** 2017-03-07

**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, 博士生, 主要从事铁道工程研究, (E-mail) wmp@126.com。

徐林荣(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) csulrxu@163.com。

**Received:** 2017-03-07

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

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

Xu Linrong (corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail) csulrxu@163.com.

four years is about 2~3 mm.

**Keywords:** high speed railway; subgrade; dynamic load; post construction settlement

高速铁路建设中广泛使用的无砟轨道对下部基础的沉降和差异沉降提出了严格要求,相比桥、隧工程,路基的工后沉降更难以控制。路基上部沉降主要由列车高速运行时产生的动荷载引起<sup>[1]</sup>,在对列车动荷载影响范围的分析中,遂渝铁路无砟轨道综合试验段<sup>[2]</sup>、武广高速铁路<sup>[3]</sup>实测路基面下不同深度处的动应力的统计表明,距路基面 2.7 m 深度处动应力衰减约 60%;模型试验<sup>[4]</sup>表明,基床底面的最大动应力约为路基面的 30%;数值模拟<sup>[5]</sup>表明,路基面下 1 m 处应力约为路基面应力的 1/3 左右。

目前,对动载作用下土体的变形研究主要分为两类:一类基于经验拟合公式的简化算法<sup>[6-9]</sup>;另一类基于复杂本构模型的有限元理论分析方法<sup>[10-13]</sup>。有限元方法参数不易取得,循环次数较高导致误差较大<sup>[13]</sup>,且由于土体本构关系复杂,计算代价较大<sup>[14]</sup>;经验拟合公式较为实用,但存在预测模型与实际土体性状脱节的问题<sup>[14]</sup>,且不能考虑变形与孔隙水压相互影响<sup>[13]</sup>。中国对高速铁路沉降监测数据不少,如何利用基础理论和现场试验结果,来分析高铁路基由列车循环荷载引起的累积变形非常必要。

笔者基于现场实测数据,通过分析工后沉降组成,用计算与推算方法得到上部静荷载作用下地基的沉降量,与实测运营期沉降取差值,获取了运营后路基沉降动载作用下的测试值。

## 1 工程概况与工后沉降分析

### 1.1 工程概况

沪宁城际铁路是目前中国建设的工期最短、路基比例最高、一次建成最长的城际铁路。全线位于长江三角洲深厚软土地区,地质条件较差;为了保障沪宁城际铁路的持久、平稳、安全运行,对线路沉降情况进行了全面监测。

建设期 CFG 桩-筏复合地基综合采用了沉降板、分层沉降管、单点沉降计 3 种测试方法。CFG 桩-筏复合地基测试剖面如图 1 所示,所取建设期地基沉降数据由线路中心的沉降板提供。

运营期沉降监测时间为 2010 年 7 月—2014 年 7 月。重点监测段沉降监测内容包括:线路水准基点控制网的管理和维护、路堤表面 CPⅢ 点、底座板、轨道板和基准轨面沉降变形。所取运营沉降数据由轨道维护基点提供,轨道维护基点位于轨道板上,其

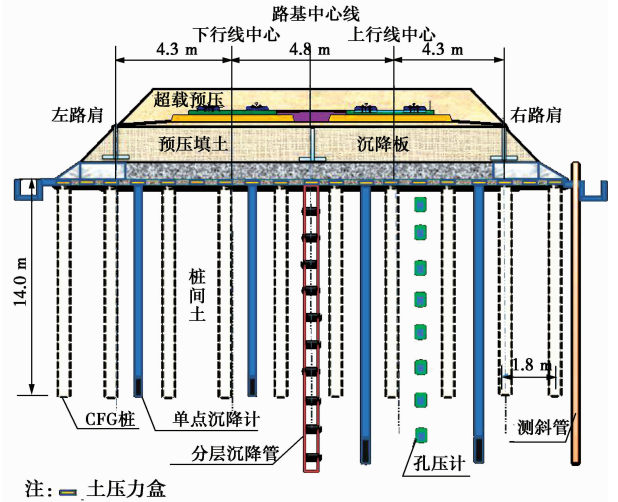


图 1 CFG 桩-筏复合地基测试剖面图

Fig. 1 Test section of CFG pile raft composite foundation

测量数据反映路基工后沉降的状况,如图 2。沉降变形监测剖面如图 3。

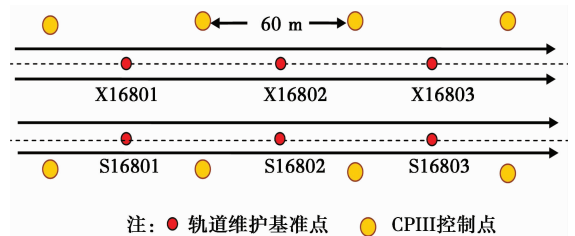


图 2 维护基点及 CPⅢ 点平面图

Fig. 2 Points and maintenance of CPⅢ plane map

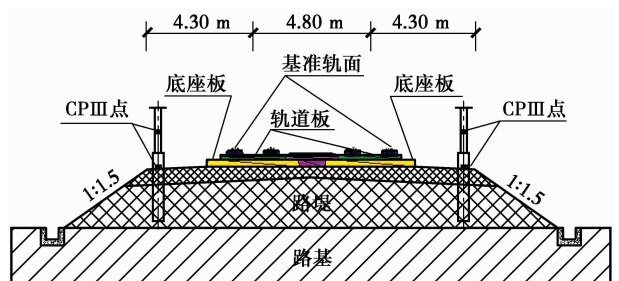


图 3 沉降变形监测剖面图

Fig. 3 Section drawing of settlement deformation monitoring

### 1.2 工程地质条件

选取不同区段及不同沉降量值的重点监测段内断面,断面 K83+878.6、K166+244.8、K235+781.1、K279+607.8 分别编号为①、②、③、④,计算参数如表 1~表 4 所示。

表 1 沉降计算土层主要物理力学参数

Table 1 Main physical and mechanical parameters of soil layer

土层名称	土层厚度/m				$\gamma/$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	$w/\%$	$e$	$E_s/MPa$	$\varphi/(\circ)$
	①	②	③	④					
粉质粘土	0.5	0.6	0.35	0.25	1.99	25.9	0.72	5.97	11.8
粉质粘土	6.7	8.8	13.6	10.95	1.8	32.2	0.9	4.68	7.6
粉质粘土	13.5	11.7	6.9	9.3	2	23.1	0.66	12.8	12.5
全风化层	12.3	11.05	10.45	9.55					

表 2 CFG 桩计算参数

Table 2 Calculating parameters of CFG pile

桩长/m				桩径/m	桩间距/m	变形模量/ MPa	压缩模量/ MPa	弹性模量/ MPa	布置方式
①	②	③	④						
14	16	18	17	0.5	2.4	1 000	15 000	1 000	正方形

表 3 钢筋混凝土筏板计算参数

Table 3 calculating parameters of reinforced concrete raft

长度/m	宽度/m	板下桩数	厚度/m	容重/ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	压缩模量/ MPa
16.8	14.4	6×7=42	0.5	25	30 000

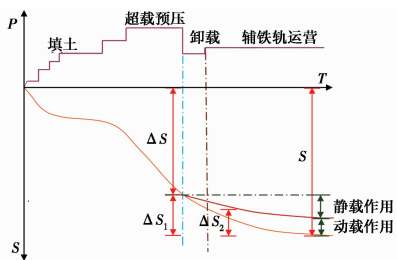
表 4 垫层与路堤填土参数

Table 4 parameters of cushion and embankment fill

碎石垫层 厚度/m	碎石垫层容重/ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	路堤土填高/m				填土容重/ ( $kN \cdot m^{-3}$ )
		①	②	③	④	
0.5	20	2.84	3.21	5.36	4.53	20

1.3 工后沉降分析

路基在铺轨之后产生的沉降为工后沉降,由施工完成后填土压密下沉、列车荷载引起的基床累积沉降和铺轨后软土地基仍未完成的沉降组成。试验研究<sup>[15-16]</sup>表明,路堤沉降主要由地基沉降控制,因高铁对路基本体填料质量及压实标准要求较高,且填筑后要求保证必要的放置调整期,工后沉降中可不考虑本体(含基床部分)的残余变形。故运营后的实测沉降主要由地基在恒载下的沉降及列车荷载引起的沉降组成,如图 4 所示。



注: S:最终沉降 ΔS:施工沉降 ΔS<sub>1</sub>:工后沉降 ΔS<sub>2</sub>:运营后工后沉降

图 4 高速铁路软基土工后沉降组成示意图

Fig. 4 Schematic diagram of settlement of soft foundation of high speed railway

2 静载计算与推算方法

通过试算与实测沉降对比,选择现有精度最高的沉降计算方法。

2.1 静载计算方法

2.1.1 加固区计算

1)复合模量法 《客运专线铁路路基设计技术》推荐的加固区计算采用复合模量法将桩和土两部分视为一复合土体,采用复合压缩模量  $E_{cs}$  来评价复合土体的压缩性。

2)基于荷载传递法的计算 根据桩、土的变形协调及荷载传递推导了一种加固区沉降计算方法,结合实测数据建立桩-筏复合地基反力模型,如图 5 所示。

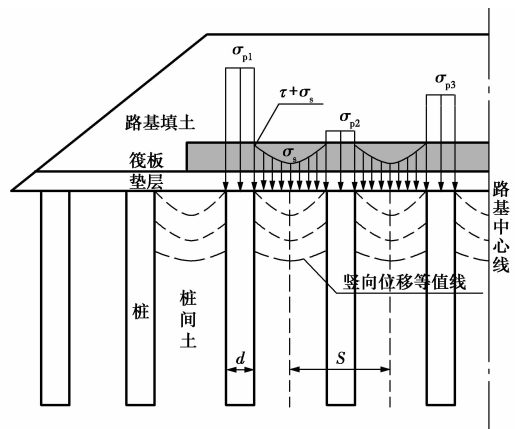


图 5 地基反力模型

Fig. 5 Foundation reaction model

如图 6 所示,根据等沉面上下方桩、土不同的受力平衡条件与变形协调条件:等沉面以上土体压缩量=桩体上穿量,等沉面以下土体压缩量=桩体下

刺量,以及桩和桩间土荷载分担条件;建立求解方程组,可求得加固区沉降  $S$ 。

$$S_{11} = \Delta_{\text{上}} \quad (1)$$

$$S_{12} = \Delta_{\text{下}} \quad (2)$$

$$p_0 \cdot A = p_p \cdot A_p + p_s \cdot A_s \quad (3)$$

$$S = S_{11} + S_{12} \quad (4)$$

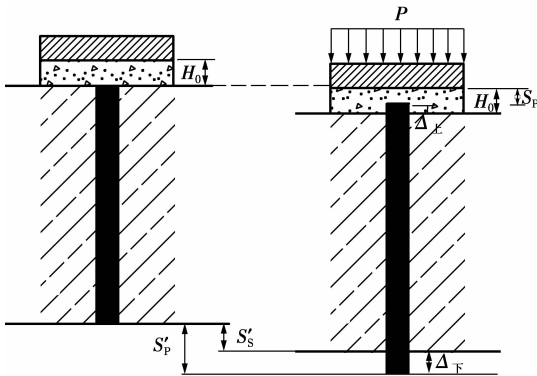


图 6 复合地基变形示意图

Fig. 6 deformation of composite foundation

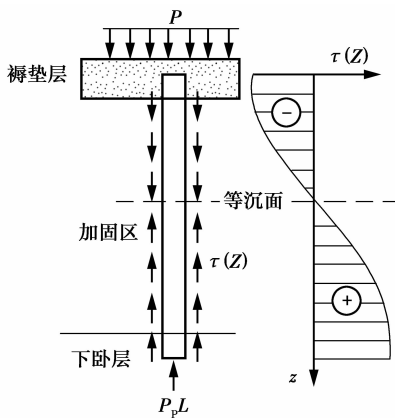


图 7 桩土体系荷载传递规律

Fig. 7 Load transfer law of pile and soil system

2.1.2 下卧层计算 下卧层的计算关键在于确定下卧层的附加应力。参考 Mindlin-Boussinesq 联合求解<sup>[17]</sup>,采用 Boussinesq 解计算桩底处条形分布的桩间土荷载,使用 Mindlin 法计算桩端阻力和桩侧摩擦力在下卧层产生的额外附加应力。

## 2.2 地基固结沉降计算

改进的高木俊介法,可以考虑分级荷载的施加计算固结度,修正方法在《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2002)中推荐使用。把桩和桩周土视为均质复合材料,根据固结分层计算固结度,再计算整个地基得平均固结度。

## 2.3 沉降推算方法

沉降推算使用《客运专线铁路无砟轨道铺设条

件评估技术指南》中给出的参考方法——曲线拟合法,基于实测数据,具有快捷、计算简单等优点。推算方法选取能够较好适用于路基小变形情况的修正双曲线拟合法;拟合曲线与实测数据吻合度较高,建设期实测数据能够满足拟合方法的要求。

表 5 沉降计算对比

Table 5 Comparison of settlement calculation

沉降计算 方法	沪宁 K166+244.8		沪宁 K83+878.6		京沪 DK1073+551	
	计算值/ mm	相对误 差/%	计算值/ mm	相对误 差/%	计算值/ mm	相对误 差/%
复合 模量法	94	196.5	44	69.9	25.72	3.7
应力 修正法	53.6	69.1	42	62.2	28.17	13.5
加 固 区 桩身 压缩法	42.1	33	41.95	62	15.88	-36
解析法	35.7	12.6	31.6	22	33.8	36.3
荷载 传递法	35.3	11.4	30.4	17.4	27.9	12.5
实测值	31.7		25.9		24.8	
压力 扩散法	17.9	72.1	9.8	16.7	8.7	20.8
等效 实体法	8	-23.1	7.1	-15.5	5.3	-26.4
下 卧 层 改进 Geddes	8.7	-16.5	5.1	-39.3	5.2	-27.8
M-B 联合	9.8	-5.8	9.1	8.3	7.9	9.7
实测值	10.4		8.4		7.2	

与实测值的试算对比,荷载传递法不论在计算精度还是稳定性上都为最优,Mindlin-Boussinesq 联合求解计算附加应力精度较高。沉降推算方法与计算方法作为相互验证。

## 3 计算结果与动载沉降分析

### 3.1 静载沉降分析

图 8 为 K83+878.6 断面的沉降随时间变化曲线,包括了建设期及运营期的实测总沉降与运营后静载作用沉降。随着时间的增长,实测沉降与静载沉降逐渐增大,但明显可以看出沉降曲线逐渐趋于平缓;开通运营后实测沉降与静载沉降曲线不重合,有一定差值。图 9~图 11 为不同沉降量值断面的沉降

随时间变化曲线;为保证沉降曲线精度,只选取了运营后的实测沉降。

不同沉降量值的断面,其沉降随时间逐渐增加,沉降速率随时间的增大而逐渐减小;静载沉降占总沉降比例各不相同,3、6、10 mm 沉降量值的断面,其开通运营后静载沉降占总沉降比例分别为 39.15%、62.54%、76.23%,两者呈正相关关系。

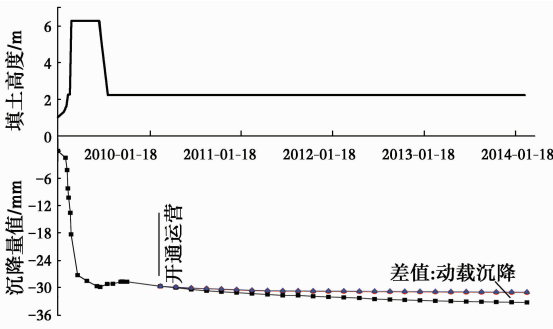


图 8 K83+878.6 断面沉降示意

Fig. 8 Settlement diagram of K83+878.6 section

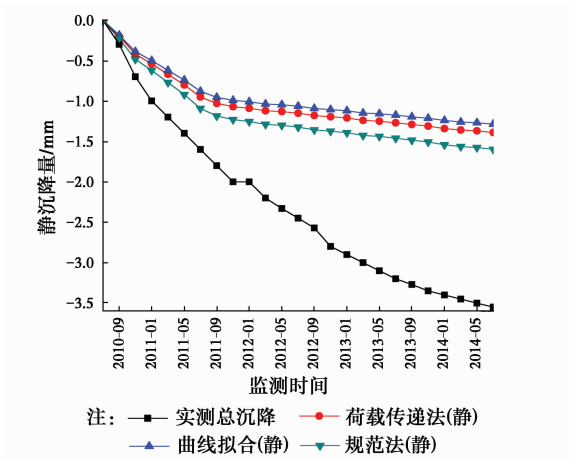


图 9 K166+244.8 断面静载沉降

Fig. 9 Static load settlement of K166+244.8 section

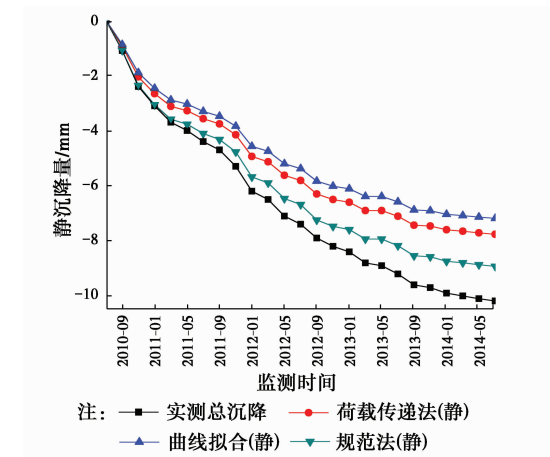


图 10 K235+781.1 断面静载沉降

Fig. 10 Static load settlement of K235+781.1 section

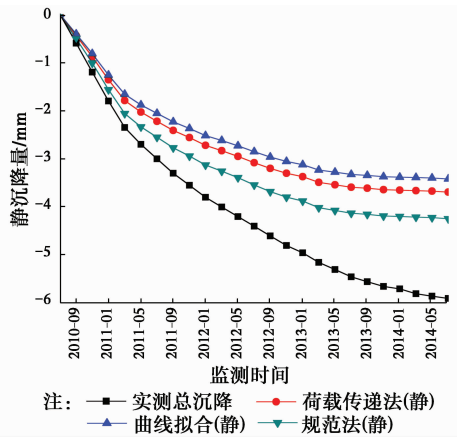


图 11 K279+607.8 断面静载沉降

Fig. 11 Static load settlement of K279+607.8 section

### 3.2 动载沉降分析

3.2.1 动载沉降与实测沉降对比 图 12~图 15 为获取的动载沉降与开通运营后实测总沉降随时间变化曲线。与静载引起的沉降不同,动载引起的沉降量值与总沉降量值相关关系不大;在实测总沉降很小(3~4 mm)的断面,动载引起的沉降占比较大,平

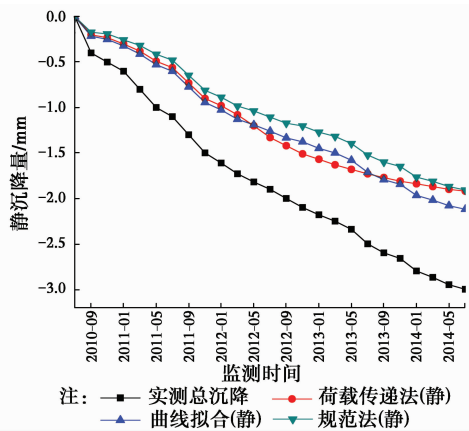


图 12 K83+878.6 断面动载沉降

Fig. 12 Dynamic load settlement of K83+878.6 section

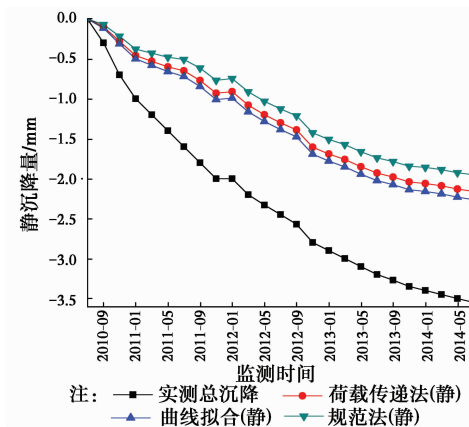


图 13 K166+244.8 断面动载沉降

Fig. 13 Dynamic load settlement of K166+244.8 section



均可达 62.4%,在实测总沉降相对偏大(6~10 mm)的断面,动载引起的沉降占比平均为 30.53%。

趋于稳定;数据显示,运营第 4 年时动载沉降量在 2~3 mm。

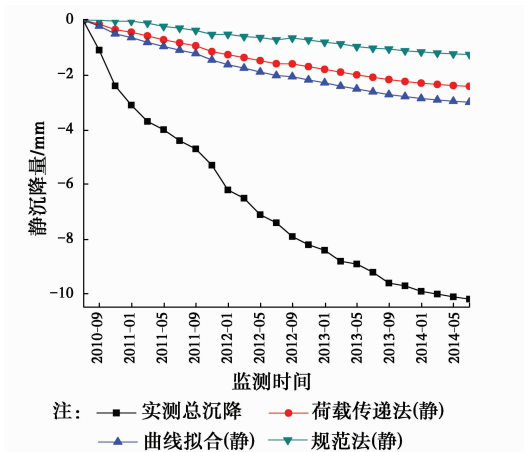


图 14 K235+781.1 断面动载沉降

Fig. 14 Dynamic load settlement of K235+781.1 section

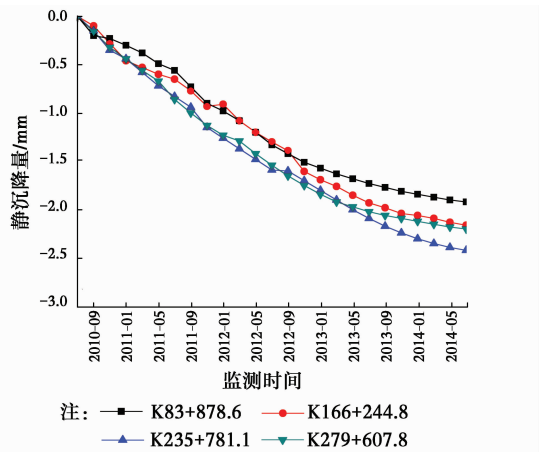


图 16 不同断面动载沉降对比

Fig. 16 comparison of dynamic load settlement of different section

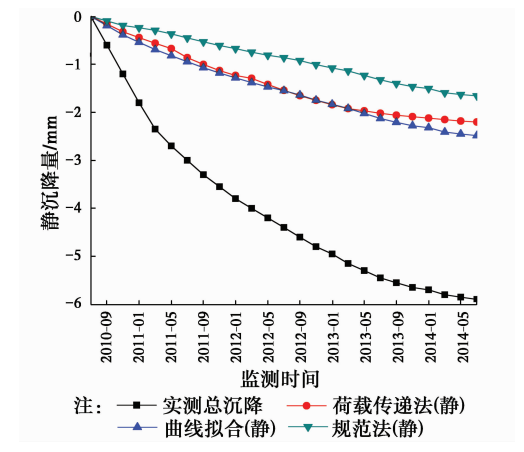


图 15 K279+607.8 断面动载沉降

Fig. 15 Dynamic load settlement of K279+607.8 section

对于运营后路基实测沉降较大的断面,动载占总沉降比例较小,对实测总沉降的贡献有限,并不是引起总体沉降偏大的主要原因。

3.2.2 不同断面的动载沉降-时间曲线 图 16 所示 4 个断面沉降随时间的发展一致性较大,虽然其运营后实测沉降量差异明显,但动载作用下的沉降量差异并不大,说明不同地质条件及路堤填筑高度对动载引起沉降的影响较小;这与基床设计的原理相一致,动应力传递至基床底部已经衰减了大部分。

3.2.3 动载沉降规律 图 16 所示 4 个断面沉降随着运营时间的增长呈现出非线性增大的趋势;就沉降速率来看,在运营后的初期,即施加动荷载的前期,平均沉降速率增大较快,并在第 16 个月时达到最大,达 0.11 mm/月;之后沉降速率缓慢减小,在运营 2 a 左右时沉降速率减小较快,并逐渐减慢,沉降

### 3.3 验证分析

沪宁城际铁路运营以来一直维持高密度运行,开行列车数量无明显变化,可以判定列车荷载频率无明显变化。

1)目前对循环荷载下路基沉降量的研究,通过京沪高铁现场激振试验与经验公式预测<sup>[9]</sup>,在 400 万次振动(约为京沪运行 3.6 a)时沉降约为 2 mm;杭长客专某断面足尺模型试验加载<sup>[18]</sup>,沉降在 1~2 a间达到 1.5 mm。

2)对循环荷载下路基沉降速率的研究,依据瑞典高速列车实测振动,通过经验公式预测<sup>[10]</sup>,沉降在加载初期发展迅速,之后发展缓慢;杭长客专某断面足尺模型加载<sup>[18]</sup>,沉降前期发展较快,后期平缓;依据青藏铁路实测振动,结合有限元模拟<sup>[11]</sup>,路基最大变形速率发生在通车约 1 a 时间,之后沉降速率减小。

3)动载沉降曲线与文献<sup>[19]</sup>室内试验分析中循环荷载作用下土体的变形规律一致。

以上各型试验与理论分析结果验证了方法的可行性。

## 4 结论

依托沪宁城际铁路现场(建设期填筑与运营期沉降)监测数据,基于分离动、静荷载沉降的思路,分析了列车荷载引起的沉降特性:

1)基于分离动、静荷载沉降的方法,结合实测数据分析列车荷载引起的沉降具有一定的合理性,可

以为相关研究提供参考。

2) 列车动荷载引起的沉降对开通运营后实测沉降的贡献有限,并不是引起总体沉降偏大的主要原因。

3) 不同断面的动荷载沉降随时间发展一致性较大;不同地质条件及路堤填筑高度对动载引起沉降的影响不明显。

4) 列车动荷载引起的沉降,就沉降速率而言,在运营初期先增大,并在约 1.3 a 时达到最大,之后沉降速率减小,沉降逐渐趋于稳定;运营的第 4 年动载引起的累积沉降约为 2~3 mm。

#### 参考文献:

- [1] 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, 2006, 28(6): 112-116.  
WANG B L, YANG L C, ZHOU S H, et al. Experimental study on the settlement of soft soil foundation with CFG piles [J]. Journal of China Railway, 2006, 28(6): 112-116. (in Chinese)
- [2] 张崇磊,蒋关鲁,袁胜洋,等. 循环荷载下桩网结构路基和垫层动力响应研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1664-1670.  
ZHANG C L, JIANG G L, YUAN S Y, et al. Study on dynamic response of piles under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1664-1670. (in Chinese)
- [3] 刘钢,罗强,张良,等. 列车荷载作用下无砟轨道路基动力特性分析[J]. 铁道学报, 2013, 35(9): 86-93.  
LIU G, LUO Q, ZHANG L, et al. The stress analysis of dynamic characteristics of subgrade of ballastless track under train load [J]. Journal of the China Railway, 2013, 35(9): 86-93. (in Chinese)
- [4] 蒋红光,边学成,徐翔,等. 列车移动荷载下高速铁路板式轨道路基动力性态的全比尺物理模型试验[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 354-362.  
JIANG H G, BIAN X C, XU X, et al. The train moving load under the high-speed railway ballastless track subgrade dynamic behavior of full scale physical model test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 354-362. (in Chinese)
- [5] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(11): 907-916.
- [6] 沈礼伟,庄海洋,陈磊,等. 列车振动荷载作用下南京细砂累积变形预测公式对比分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3170-3176.  
SHEN L W, ZHUANG H Y, CHEN L, et al. Analysis of Nanjing fine sand accumulated deformation under the effect of train vibration load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11): 3170-3176. (in Chinese)
- [7] LI D Q, SELIG E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(12): 1006-1013.
- [8] COLLINS I F, BOULBIBANE M. Geomechanical analysis of unbound pavements based on shake down theory [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(1): 50-59.
- [9] 董亮,蔡德钧,叶阳升,等. 列车循环荷载作用下高速铁路路基累积变形预测方法[J]. 土木工程学报, 2010, 43(6): 100-108.  
DONG L, CAI D G, YE Y S, et al. The prediction method of the high speed railway subgrade under the action of the train cyclic loading [J]. Journal of Civil Engineering, 2010, 43(6): 100-108. (in Chinese)
- [10] 边学成,曾二贤,陈云敏. 列车交通荷载作用下软土路基的长期沉降[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 2990-2996.  
BIAN X C, ZENG E X, CHEN Y M. Long term settlement of soft soil subgrade under the action of train traffic load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 2990-2996. (in Chinese)
- [11] 吴志坚,陈拓,马巍. 重复列车荷载作用下多年冻土路基长期变形分析[J]. 上海交通大学学报, 2015, 45(7): 929-934.  
WU Z J, CHEN T, MA W. Analysis on long term deformation of permafrost subgrade under repeated train loading [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2015, 45(7): 929-934. (in Chinese)
- [12] KUTARA K. Settlement and countermeasures of the road with low embankment on softground [J]. Technical Reports of Civil Engineering, 1980, 22(8): 12-16.
- [13] ABDELKRIM M, BONNET G, DE BUHAN P. A computational procedure for predicting the long term residual settlement of platform induced by repeated traffic loading [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30: 463-476.
- [14] 邵光辉,赵志峰. 海相结构性软黏土地基的沉降特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(5): 539-545.  
SHAO G H, ZHAO Z F. Study on the settlement characteristics of marine structural soft clay foundation

- [J]. Chinese Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(5): 539-545. (in Chinese)
- [15] LOW B K, TANG S K, CHOA V. Arching in piled embankments [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1993, 120(11): 917-938.
- [16] 王小军, 曲耀辉, 魏永梁, 等. 郑西客运专线湿陷性黄土区试验路堤的沉降观测与预测研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31(Sup1): 220-231.
- WANG X J, QU Y H, WEI Y L, et al. Settlement observation and prediction research of test embankment in collapsible loess area along Zhengzhou-Xi'an passenger dedicated line [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup1): 220-231. (in Chinese)
- [17] 郭彪, 龚晓南, 卢萌盟, 等. 真空联合堆载预压下竖井地基固结解析解 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1045-1054.
- GUO B, GONG X N, LU M M, et al. Analysis of the consolidation of vertical shaft foundation under vacuum combined with surcharge preloading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1045-1054. (in Chinese)
- [18] 陈仁朋, 陈金苗, 汪炎卫, 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(Sup2): 241-245.
- CHEN R P, CHEN J M, WANG Y W, et al. Characteristics of stress transfer and accumulation settlement of pile net structure [J]. Journal of Civil Engineering, 2015, 48(Sup2): 241-245. (in Chinese)
- [19] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading [J]. Transportation Research Record, 1975(537): 1-17.

(编辑 胡英奎)