

文章编号: 1674—8247(2022)04—0008—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.04.002

复杂施工环境下高速铁路软土地基浆固碎石桩 复合地基加固沉降变形分析

刘汉龙 龙永红 丁选明

(重庆大学, 重庆 400045)

摘 要:高速铁路软基处理中经常遇到施工场地上方存在高压电线、高架桥,贴近既有线或狭小空间等复杂施工环境,常规施工设备和施工方法无法满足环境的严苛要求,而浆固碎石桩复合地基技术可很好地适用于复杂施工环境的地基处理。本文依托商合杭高速铁路,采用 PLAXIS 3D 有限元数值计算软件,对浆固碎石桩复合地基加固的沉降变形进行了研究,分析了路堤及列车等效荷载对工后沉降变形的影响,研究了桩长、桩径及弹性模量对路堤沉降特性的影响,结果表明:浆固碎石桩复合地基处理后工后沉降满足无砟轨道要求。研究结论可为复杂施工环境下高速铁路软基处理提供借鉴。

关键词:高速铁路; 复合地基; 浆固碎石桩; 复杂施工环境; 工后沉降

中图分类号:U213.1⁺4 文献标志码:A

8

Analysis of Settlement and Deformation of Composite Foundation Reinforced by Cement-stabilized Gravel Pile for Soft Soil Base of High-speed Railway Under a Complex Construction Environment

LIU Hanlong LONG Yonghong DING Xuanming

(Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In the soft soil base treatment of high-speed railways, there are often complex construction environments such as high-voltage wires and viaducts above the construction site, and construction sites close to existing lines or narrow spaces. Conventional construction equipment and construction methods can't meet the stringent requirements of the environment, and the composite foundation technology of cement-stabilized gravel pile can be well applied to the foundation treatment of complex construction environments. Based on a case study of Shangqiu-Hefei-Hangzhou High-speed Railway and using PLAXIS 3D finite element numerical calculation software, this paper studies the settlement and deformation of the composite foundation reinforced by cement-stabilized gravel pile, analyzes the influence of embankment and train equivalent load on post-construction settlement and deformation and studies the influence of pile length, pile diameter and elastic modulus on embankment settlement characteristics. The results show that: The post-construction settlement of the composite foundation of cement-stabilized gravel piles after treatment shall meet the requirements of ballastless tracks. The research conclusion can provide a reference for soft soil base treatment of high-

收稿日期:2022-07-04

作者简介:刘汉龙(1964-),男,教授。

引文格式:刘汉龙,龙永红,丁选明. 复杂施工环境下高速铁路软土地基浆固碎石桩复合地基加固沉降变形分析[J]. 高速铁路技术,2022,13(4): 8-12.

LIU Hanlong, LONG Yonghong, DING Xuanming. Analysis of Settlement and Deformation of Composite Foundation Reinforced by Cement-stabilized Gravel Pile for Soft Soil Base of High-speed Railway Under a Complex Construction Environment[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(4):8-12.

speed railways under a complex construction environment.

Key words: high-speed railway; composite foundation; cement-stabilized gravel pile; complex construction environment; post-construction settlement

近年来,我国高速铁路快速发展,截至2021年,铁路营运总里程突破15万km,其中高速铁路运营里程突破4万km。此外,我国疆域版图辽阔,地形、地质条件复杂,软土地基分布广泛,考虑到高速列车运行对路基工后沉降的严格要求,软土地区高速铁路的地基处理面临着极大的挑战。

目前,复合地基法加固软土地基成效明显,已在高速铁路的建设中被大量采用,如PHC桩^[1-2]、CFG桩^[3-4]、PCC桩^[5-6]等。然而,高速铁路软基处理中时常面临复杂施工环境,如施工场地上方存在高压电线、高架桥,近接既有线或隧道软塑基底加固等,此时常规的施工设备和施工方法无法满足环境的严苛要求。

浆固碎石桩复合地基技术是刘汉龙教授等^[7-8]针对复杂施工环境下深厚软土地基处理难题而研发的工后沉降控制的新技术。浆固碎石桩设备由成孔系统、导向系统、注浆系统等组成。施工时先采用钻机钻进成孔,在孔内放入注浆管,然后向孔内投入骨料,通过注浆管向桩孔内的骨料注入浆液,浆液与骨料固结后成桩,浆液同时渗入到桩周土体中改善土体性质^[9-11]。浆固碎石桩技术具有以下优点:

(1)传统的桩基设备高度较高,无法在复杂环境既有障碍物下施工,而浆固碎石桩的施工设备高度可控制在6m之内;浆固碎石桩填补了复杂环境下刚性桩复合地基处理技术的空白。

(2)采用振动施工的桩基和有挤土效应的桩基会对周边建筑产生影响,而浆固碎石桩无挤土、无振动、无噪音,适用于对施工振动有严格要求的工程。

(3)浆固碎石桩通过浆液与骨料固结成桩,桩身强度高,此外浆液还向桩周土渗透,同时改善了桩周土性质和桩土接触面性质,从而显著提高了桩基承载力。

本文依托商合杭高速铁路工程,采用PLAXIS 3D软件建立数值模型,对邻近既有铁路浆固碎石桩复合地基沉降变形特性进行分析,研究成果可为复杂环境下高速铁路地基处理提供参考。

1 数值模型和参数

1.1 工程概况

商合杭高速铁路阜阳至杭州段新建工程试验段

(YDK 404 + 950 ~ YDK 405 + 340.85)长390.85 m,线路正线为CRTSⅢ型板式无砟轨道。地表水不发育,水位埋深1.5 m。为减小高速铁路施工对邻近既有铁路的影响,拟采用浆固碎石桩复合地基法对地基进行加固,地基承载力为395 kPa。浆固碎石桩的桩径为0.5 m,桩长为8~15 m,桩间距为1.6 m,呈正方形布置。垫层由级配碎石和中粗砂组成,具体铺设工艺为:①先铺设15 cm厚的级配碎石,经机械压实后铺设5 cm厚的中粗砂,砂垫层采用机械压实;②铺设第一层土工格栅,然后铺设5 cm厚的中粗砂并机械压实;③铺设10 cm的级配碎石并机械压实,而后顶铺设5 cm厚的中粗砂,砂垫层采用机械压实;④铺设第二层土工格栅,再铺设5 cm的中粗砂并机械压实,最后铺设15 cm厚的级配碎石并机械压实。垫层总计厚0.6 m。

1.2 典型工况断面

选取肥东站DK 405 + 325.62断面作为数值模拟的典型工况断面,现场勘察资料表明,该断面桩基的持力层位于承载力较高的黏土层之中;浆固碎石桩桩长12 m,路基顶面宽8.6 m,路堤坡度为1:1.5,路堤填高为5.6 m。路堤填料采用分层填筑法,即在理想的工况条件下,前17 d每天填筑0.3 m,最后1 d填筑0.5 m,路堤填筑施工完成后静置180 d。

1.3 数值计算模型

数值计算采用PLAXIS 3D有限元计算软件,其用于计算土体渗透固结的模块能计算生成稳态孔压,可对路基在固结过程中孔隙水压力的消散过程进行追踪分析。浆固碎石桩采用线弹性模型,地基土采用Mohr-Coulomb模型模拟。考虑到垫层中的两层土工格栅形成了加筋垫层,垫层也采用线弹性模型。

考虑到路堤是左右轴对称的,故仅取半幅地基和路基结构进行模拟,如图1所示。模型中竖向计算范围取32.3 m,横向取26 m。模型X和Y方向施加水平约束, Z_{\min} 为固定约束, Z_{\max} 不约束。渗流边界条件: X_{\min} 、 Z_{\min} 、 Z_{\max} 为打开,其余边界均为关闭。网格选用“中等”类型的划分方式自动划分,且对桩体范围内的网格局部加密,如图2所示。模型包含34 328个单元和51 255个节点。

1.4 模型计算参数

模型中计算的参数由典型工况断面的地勘报告和

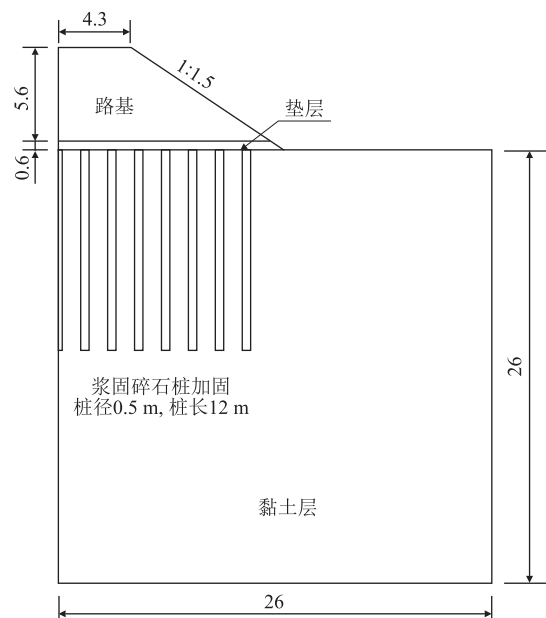


图1 桩土复合地基横截面图(m)

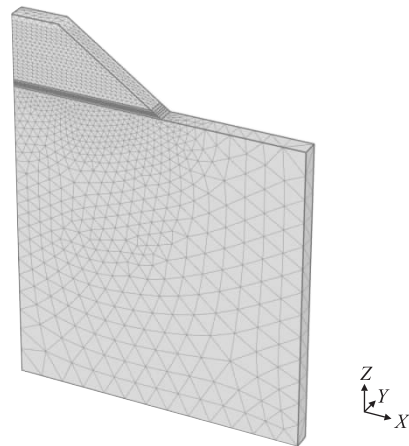


图2 网格划分图

工程资料得到,如表1所示。

表1 模型材料参数取值表

参数	AB 填料	桩	黏土	碎石	中粗砂
材料模型	摩尔-库伦	线弹性	摩尔-库伦	摩尔-库伦	摩尔-库伦
重度/(kN/m ³)	22.5	25	19.90	22	20
弹性模量/MPa	60	20 000	35	120	60
泊松比	0.15	0.2	0.3	0.15	0.25
粘聚力/kPa	20	-	36	0	1
摩擦角/(°)	25	-	15	30	36
渗透系数K/(m/d)	-	-	4.75 × 10 ⁻⁴	-	-

2 沉降变形计算及分析

对于高速铁路路堤而言,施工完成后必须保证列车运行时路堤的沉降在合理范围内,即要严格控制路堤的工后沉降。因此,必须分析等效列车荷载作用对路堤工后沉降变形的影响。根据 TB 10621-2014《高

速铁路设计规范》^[12],高速铁路路基应满足的工后沉降如表2所示。

表2 路基工后沉降控制标准表

轨道形式	设计速度/(km/h)	一般地段工后沉降/cm	桥台台尾过渡段工后沉降/cm	沉降速率/(cm/年)
有砟轨道	250	≤10	≤5	≤3
	300,350	≤5	≤3	≤2
无砟轨道	一般路段不宜超过15 mm,及规范其它要求			

根据《京沪高速铁路暂行规范》,数值计算中路堤等效列车荷载为 54 kN/m²,荷载分布宽度为 3.4 m。考虑到列车荷载冲击对路基沉降变形的影响,需在路堤上方进行土体预压堆载及卸载,即在路堤上方分5次填筑共 2.0 m 高的堆载预压土体,每次填高 0.4 m,预压静置 180 d 后卸载,之后再行路堤上覆作用计算。

2.1 工后沉降分析及桩长的影响

列车荷载作用下,不同的桩长、桩体的沉降曲线如图3所示,土体的沉降曲线如图4所示,桩土差异沉降曲线如图5所示。

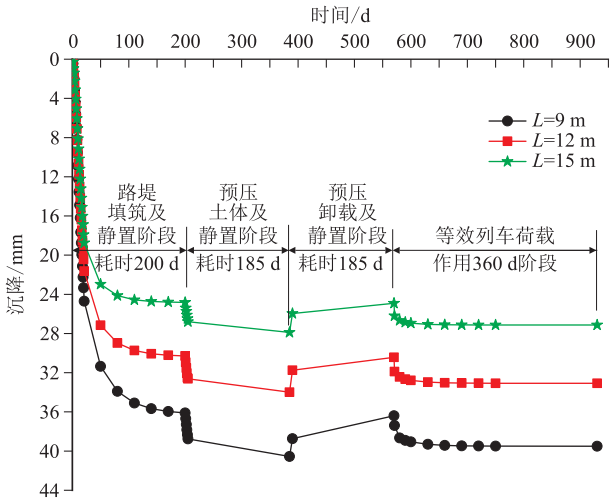


图3 列车荷载作用下桩长不同时桩体的沉降曲线图

由图3~图5可知,在等效列车荷载作用的初期,桩体和土体的工后沉降发展相对较快,然后增速放缓,之后随着时间的推移进入稳定状态。等沉面累计沉降的最大值约为 35.68 mm,其中在等效列车荷载作用下的工后沉降值约为 2.88 mm,满足无砟轨道对路基工后沉降的控制要求;桩土差异沉降累计的最大值为 2.60 mm,其中在等效列车荷载作用下的桩土工后差异沉降值为 0.22 mm,不会对路堤产生破坏作用。此外,桩越长,路堤下桩土的工后沉降越小,两者的差异沉降则越大;具体来说,桩长每增加 3 m,其值变化幅

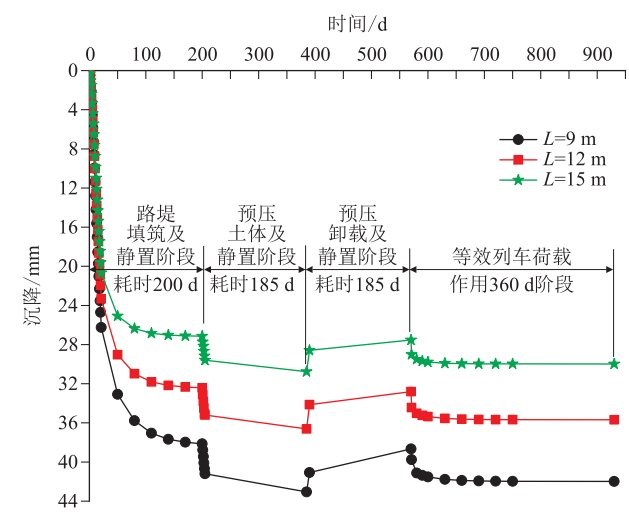


图4 列车荷载作用下桩长不同时土体的沉降曲线图

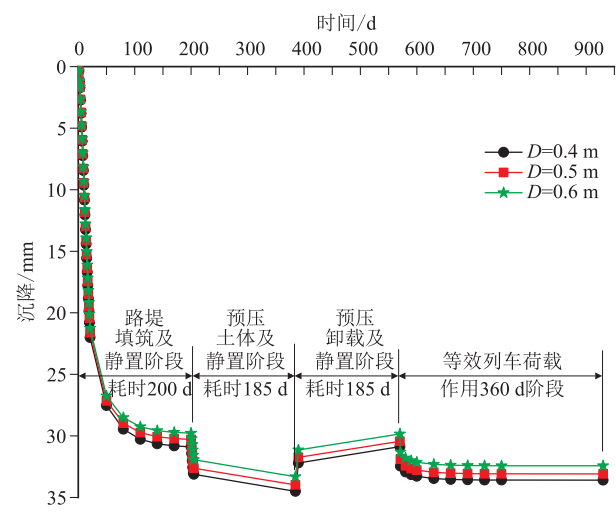


图6 列车荷载作用下桩径不同时桩体的沉降曲线图

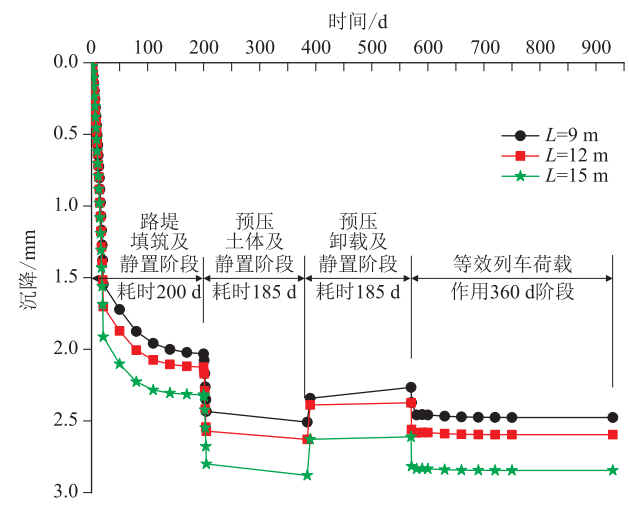


图5 列车荷载作用下桩长不同时的桩土差异沉降曲线图

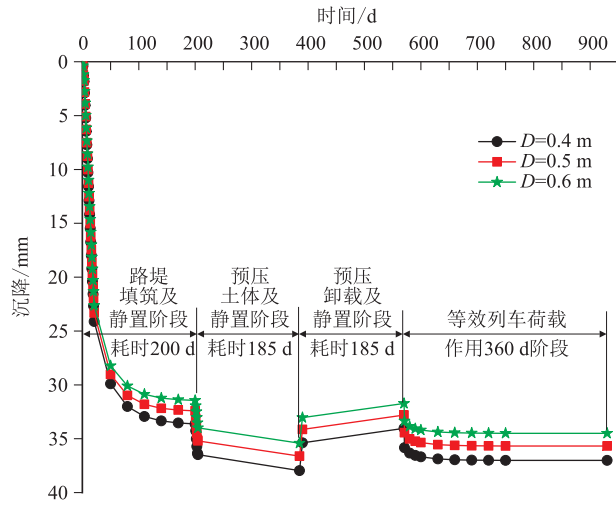


图7 列车荷载作用下桩径不同时土体的沉降曲线图

度分别约为15%、14%、5%。

值得一提的是,依据规范路基主体工程设计的使用年限应为100年,然而,有限元计算结果表明,典型工况在等效列车荷载作用的第2年及以后,工后沉降增加的速率小于0.0001mm/年。这说明路堤的工后沉降在后期增长非常缓慢,因此本文计算结果仅分析至等效列车荷载作用的第360d。

2.2 桩径对工后沉降的影响

列车荷载作用下,桩径不同时桩体的沉降曲线如图6所示,土体的沉降曲线如图7所示,桩土差异沉降曲线如图8所示。

由图6~图8可知,路堤在经预压加载之后,桩径越大,路堤下桩土的工后沉降及两者工后差异沉降均越小;具体来讲,桩径每增加0.1m,其值分别减小约2%、4%、15%。

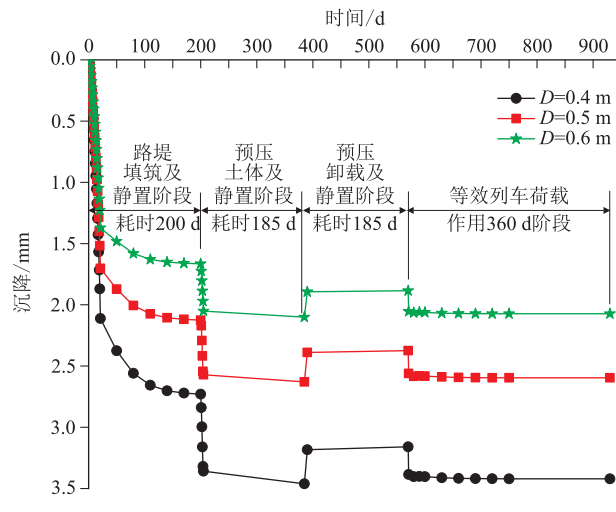


图8 列车荷载作用下桩径不同时的桩土差异沉降曲线图

2.3 土弹性模量对工后沉降的影响

列车荷载作用下,土弹性模量不同时桩体的沉降

曲线如图9所示,土体的沉降曲线如图10所示,桩土差异沉降曲线如图11所示。

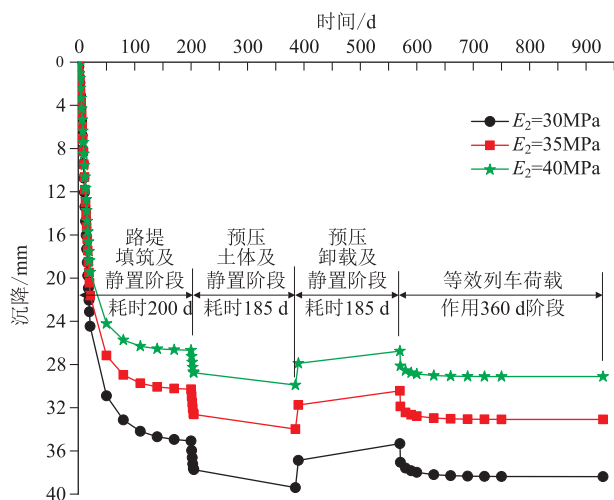


图9 列车荷载作用下土弹性模量不同时桩体的沉降曲线图

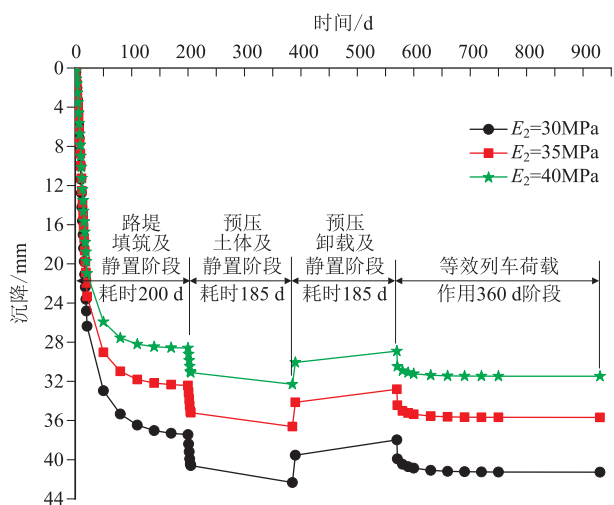


图10 列车荷载作用下土弹性模量不同时土体的沉降曲线图

由图9~图11可知,路堤在经预压加载之后,土的弹性模量越大,路堤下桩土的工后沉降及两者工后差异沉降均越小;具体来讲,土的弹性模量每增加5 MPa,其值分别减小约12%、12%、6%。

3 结论

本文采用PLAXIS 3D有限元数值计算软件,对商合杭高速铁路浆固碎石桩复合地基加固工程中典型路堤断面的沉降变形进行了研究,分析了路堤及列车等效荷载对工后沉降变形的影响,研究了桩长、桩径及模量对路堤沉降特性的影响,得到主要结论如下:

(1)商合杭高速铁路典型断面路堤经预压加载后,在等效列车荷载作用的初期,桩体和土体的工后沉

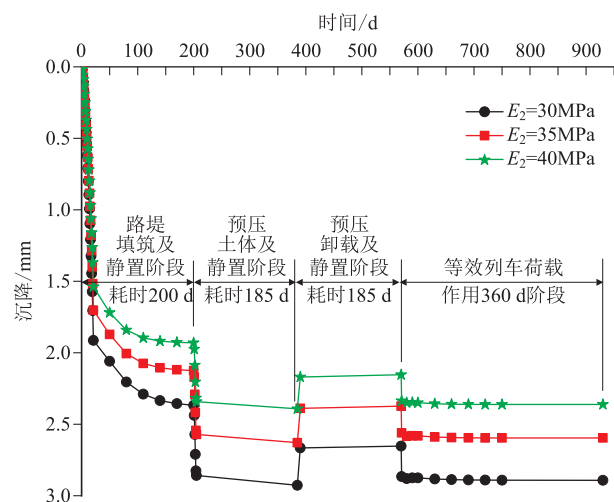


图11 列车荷载作用下土弹性模量不同时的桩土差异沉降曲线图

降发展相对较快,随后增速放缓,之后随着时间推移进入稳定状态。

(2)在其他参数保持一致的条件下,高速铁路浆固碎石桩复合地基的桩长每增长3 m,路堤下桩土的工后沉降分别减小约15%、14%、5%;桩径每增加0.1 m,路堤下桩土的工后沉降及两者工后差异沉降分别减小约2%、4%、15%;高速铁路浆固碎石桩复合地基土的弹性模量每增加5 MPa,路堤下桩土的工后沉降及两者工后差异沉降分别减小约12%、12%、6%。

(3)浆固碎石桩复合地基施工技术机械轻便,成桩过程对周围影响小,适用于处理贴近既有铁路线等复杂施工环境,计算结果表明沉降变形满足无砟轨道工后沉降要求。

参考文献:

- [1] 雷瑜,张震,孔庆哲. 高速铁路路基工程PHC桩沉桩挤土效应研究[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(9): 9-14.
LEI Yu, ZHANG Zhen, KONG Qingzhe. Research on Soil Squeezing Effect of Pile Sinking of PHC Pile for Subgrade of High-speed Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(9): 9-14.
- [2] 沈宇鹏,毛远凤,荆鹏,等. PHC与CFG桩复合地基在高速铁路基底中处理效果试验对比[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 4174-4180.
SHEN Yupeng, MAO Yuanfeng, JING Peng, et al. Experimental Effect Contrast between Phc and Cfg Pile-raft Composite Foundation in High Speed Railway Base Treatment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 4174-4180.

(下转第54页)

及轮轨垂向力与静轮重比值均明显较大,必须以标准、规范等文件对扁疤长度进行限制。

参考文献:

[1] 谢毅,寇峻瑜,姜梅,等. 中国铁路发展概况与技术展望[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(1): 11-16.
XIE Yi, KOU Junyu, JIANG Mei, et al. Development and Technical Prospect of China Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(1): 11-16.

[2] 杨光,任尊松,袁雨青. 车轮扁疤损伤对高速列车轮对动力学性能影响[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(3): 103-111.
YANG Guang, REN Zunsong, YUAN Yuqing. Influence of Wheel Flat on Dynamic Performance of High-speed Train Wheelset [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(3): 103-111.

[3] 王建斌,邬平波,唐兆. 车轮扁疤引发附加冲击力对车轴应力谱影响的研究[J]. 铁道学报, 2006, 28(1): 39-43.
WANG Jianbin, WU Pingbo, TANG Zhao. Research on the Axle Stress Spectrum Considering Extra Wheelflat Impact Forces [J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(1): 39-43.

[4] 翟婉明. 铁路车轮扁疤的动力学效应[J]. 铁道车辆, 1994, 32(7): 1-5.

ZHAI Wanming. Dynamic Effect of Railway Wheel Flat [J]. Rolling Stock, 1994, 32(7): 1-5.

[5] 韩亮亮. 铁道车轮扁疤引起的轮轨冲击力学响应与损伤规律分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
HAN Liangliang. The Impact Mechanical Response and Damage Rule of the Wheel-Rail System with a Wheel Flat [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[6] 王忆佳,曾京,高浩,等. 车轮扁疤引起的轮轨冲击分析[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4): 700-705.
WANG Yijia, ZENG Jing, GAO Hao, et al. Analysis of Wheel /Rail Impact Induced by Wheel Flats [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(4): 700-705.

[7] 任尊松. 车轮踏面三维扁疤轮轨系统冲击振动研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(15): 78-85.
REN Zunsong. Study on Wheel/Rail Impact Dynamics with Three Dimensional Wheel Flat Model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(15): 78-85.

[8] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学(第四版)上册[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
ZHAI Wanming. Vehicle-Track Coupling Dynamics (Fourth Edition) [M]. Beijing: The Science Publishing Company, 2014.



(上接第12页)

[3] 李波,冷景岩. 高速铁路 CFG 桩-筏结构沉降控制现场试验[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(2): 48-52.
LI Bo, LENG Jingyan. Research on Settlement Control Effect of CFG Pile-Raft Structure Based on Field Test of High-speed Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(2): 48-52.

[4] 张敏静,罗强,詹学启,等. 高速铁路穿透型 CFG 桩复合地基沉降计算修正系数分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 519-525.
ZHANG Minjing, LUO Qiang, ZHAN Xueqi, et al. Research on Settlement Calculation Empirical Coefficient of End-Bearing CFG Pile Composite Foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 519-525.

[5] ZHOU Mi, LIU Hanlong, CHEN Yumin, et al. First Application of Cast-in-Place Concrete Large-Diameter Pipe (PCC) Pile-Reinforced Railway Foundation: a Field Study [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(4): 708-716.

[6] 张万里. 基于 PCC 桩处理高速铁路软土路基施工工艺的研究[J]. 北方交通, 2011(6): 43-45.
ZHANG Wanli. Construction Technology Research on Soft Soil Subgrade of High-speed Railway Based on PCC Pile Treatment [J]. Northern Communications, 2011(6): 43-45.

[7] 刘汉龙,陈永辉,宋法宝. 一种桩土互动浆固散体材料桩复合地基施工工法:中国,ZL200510038903.X[P]. 2007-12-19.
LIU Hanlong, CHEN Yonghui, SONG Fabao. A Construction Method

of the Composite Foundation of Pile-soil Interactive Cement-stabilized Discrete Material Pile: China, ZL200510038903.X[P]. 2007-12-19.

[8] 刘汉龙,左威龙,陈永辉,等. 浆固碎石桩荷载传递特性试验与数值分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(4): 524-528.
LIU Hanlong, ZUO Weilong, CHEN Yonghui, et al. Numerical Analysis and Model Tests on Axial Load Transfer of Grouted Gravel Pile [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(4): 524-528.

[9] 左威龙,刘汉龙,陈永辉. 浆固碎石桩成桩注浆影响范围现场试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3329-3332.
ZUO Weilong, LIU Hanlong, CHEN Yonghui. Field Testing Analysis of Grouting Impact Range of Grouting Gravel Pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3329-3332.

[10] 温世清,刘汉龙,陈育民. 浆固碎石桩单桩荷载传递特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3637-3641.
WEN Shiqing, LIU Hanlong, CHEN Yumin. Analysis of Load Transfer Characteristics of Single Grouted Gravel Pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3637-3641.

[11] LIU Hanlong, KONG Gangqiang, CHU Jian, et al. Grouted Gravel Column-Supported Highway Embankment over Soft Clay: Case Study [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(11): 1725-1733.

[12] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].
TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway[S].