

轨道交通桩板结构施工对临近既有线路影响的数值模拟^{*}

王海峰

(中铁二十四局集团上海铁建工程有限公司, 200071, 上海//高级工程师)

摘 要 采用有限元 Plaxis 3D 软件建立三维模型, 分析沪宁城际铁路接轨工程中桩板结构和路基填筑等施工对既有线路及周边地层的扰动影响。模拟研究结果表明: 桩板结构施工对既有线路变形影响较为明显, 既有线路最大横向水平及竖向位移均出现在桩基钻孔成桩过程; 施工过程中路基两侧帮宽处逐渐出现明显沉降槽, 槽底最大沉降发生于联络线右线侧桩板结构板浇筑阶段。

关键词 轨道交通; 桩板结构; 施工扰动; 数值模拟

中图分类号 TU433

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.03.008

Numerical Study on the Influence of Rail Transit Pile Slab Structure Construction on Adjacent Existing Lines

WANG Haifeng

Abstract Three-dimensional model is constructed with finite element Plaxis 3D software. The disturbance impact on existing line and surrounding stratum caused by construction of pile slab structure and subgrade filling in the connection project of Shanghai-Nanning Intercity Railway is analyzed. Simulation research results show that the construction of pile slab structure has an obvious impact on the deformation of existing lines. Maximum horizontal and vertical displacement of all lines appears in the process of pile drilling and forming. During construction, obvious settlement grooves gradually appear at the side widths on both sides of the subgrade during the construction process. The maximum settlement of the groove bottom occurs at the slab pouring stage of link line right side pile slab structure.

Key words rail transit; pile slab structure; construction disturbance; numerical simulation

Author's address Shanghai Tiejian Engineering Co., Ltd., China Railway 24th Bureau Group, 200071, Shanghai, China

随着轨道交通线网规模不断扩大, 不可避免地会出现新建线路与既有线路接轨或并线的需求。接轨或并线工程中所涉及的一系列轨道结构改造、路基帮宽、地基处置和站场改造等相关施工项目, 均对既有线路的结构变形控制及行车安全提出挑战。如何有效防控接轨或并线工程施工对既有线路结构运营安全的影响已成为轨道交通建设中必须面对的新问题^[1]。目前, 国内外有较多学者从既有线路周边加、卸载活动出发, 研究路基帮宽施工引发的既有结构变形问题^[2-5], 围绕接轨或并线工程施工过程对临近既有线路及周边地层扰动的相关研究较少。文献[6]以鲁南铁路引入京沪高铁曲阜东站为背景, 围绕接轨段路基的临界距离、路基填料、地基处理及施工安全等技术进行研究分析。文献[7]基于鲁南铁路曲阜东站联络线接轨工程, 采用有限元软件 ABAQUS 建立模型, 分析隔离桩桩长、桩径、桩间距及排数对既有路基附加沉降的影响。

本文依托沪宁城际铁路镇江站接轨工程, 利用有限元计算软件 Plaxis 3D 建立三维模型, 详细研究接轨工程中新建联络线桩板结构施工及路基填筑施工对既有线路沉降及水平位移的影响。

1 接轨工程概述

1.1 新建线路设计

本接轨工程中新建线路为连镇铁路至沪宁城际铁路的左、右联络线, 联络线从沪宁城际铁路镇江站接入, 其对应沪宁城际铁路线路里程为 HNK 236 + 837.46 ~ HNK 237 + 142.29。新建线路设计速度为 160 km/h, 采用有砟轨道形式, 其中里程 HNK 236 + 837.46 ~ HNK 237 + 082.46 范围采用桩

^{*} 国家自然科学基金项目(51778485)

板结构,而 HNK 237 +082.46 ~ HNK 237 +142.29 范围则采用路基填筑形式。本接轨工程中涉及路基帮宽、接轨和线路站场改造等系列施工项目。

1.2 工程地质及水文条件

本接轨工程施工场地位于长江二级阶地,为冲湖积微地貌,地势平坦,填土分布广泛,地面高程在 7.7 ~16.5 m 之间,主要土层物理力学参数如表 1 所示;地下水不发育,主要为第四系孔隙水及下伏基岩裂隙水。

表 1 土层物理力学参数表

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil layer						
土层名称	重度/ (kN/m³)	孔隙比	含水 率/%	压缩模 量/MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
粉土	20.40	0.64	23.75	10.00	19.00	37.40
淤泥质粉 质黏土	16.60	0.90	36.77	8.83	7.40	8.27
粉质黏土 夹粉土	19.80	0.72	25.54	5.25	12.33	21.53
粉质黏土	19.80	0.71	24.80	6.29	21.00	14.90
粉质黏土	20.10	0.69	24.38	9.29	33.86	13.38
粉质黏土	19.50	0.82	29.53	4.77	20.00	11.10

2 有限元模型建立

为明确新建联络线左、右线施工中各工序对周围地层及临近的沪宁城际铁路既有线路结构的扰动情况,本文利用有限元软件 Plaxis 3D 建立三维模型,计算并分析接轨工程中桩板结构及路基填筑施工等对既有沪宁城际铁路正线与到发线的沉降及水平位移的影响。

2.1 模型建立

1) 计算域:接轨工程中既有城际铁路线路里程 HNK 237 +117.46 ~ HNK 237 +142.29 内路基开挖及填筑土方量较小,可忽略其对既有铁路的影响,因此本模型仅选取 HNK 236 +837.46 ~ HNK 237 +117.46 展开研究,如图 1 所示。考虑模型边界尺寸效应影响,模型总长度设为 280 m、总宽度设为 100 m,深度设为 60 m。其有限元模型如图 2 所示。图 2 中 x 轴正方向为沿沪宁城际铁路正线,纵向自大里程指向小里程方向;y 轴正向为联络线左线指向联络线右线方向;z 轴为既有城际线路的竖向方向。

2) 边界条件:模型底部施加完全固定约束,侧向施加竖直滑动约束,模型表面为自由边界。

3) 结构单元及材料设置:土体及既有线路下方

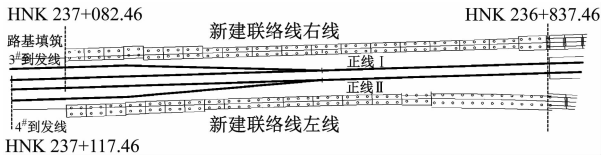


图 1 模型计算范围示意图

Fig.1 Diagram of model calculation range

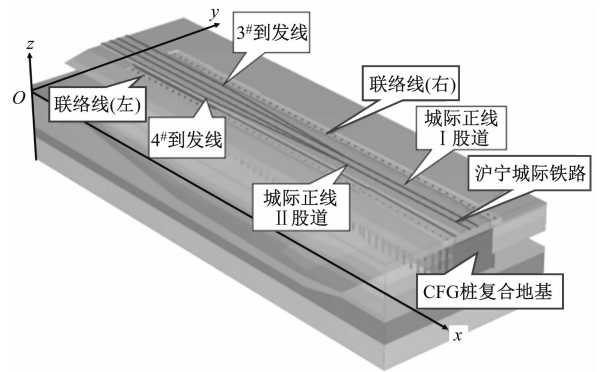


图 2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

CFG(水泥粉煤灰碎石)桩复合地基均采用实体单元模拟,材料设置采用硬土模型;土体参数结合表 1 及相关工程经验进行取值,复合地基参数可依据设计参数等效计算获得;桩板结构(桩基础、混凝土板)采用实体单元模拟,材料设置采用线弹性模型;轨道结构采用梁单元模拟并采用线弹性材料。

2.2 施工步设置

在有限元软件 Plaxis 3D 中,可按照实际施工顺序激活及冻结相关单元开展分步计算,以实现施工全过程模拟。本接轨工程首先对联络线左线侧帮宽位置的桩板结构进行施工,然后完成该侧帮宽路基的填筑;最后对联络线右侧帮宽位置的桩板结构进行施工,并完成该侧帮宽路基的填筑。考虑本工程关键施工节点,模型施工步设置如下:

- 施工步 1:联络线左线侧桩基钻孔 + 成桩;
- 施工步 2:联络线左线侧轻质土回填路基;
- 施工步 3:联络线左线侧开挖成槽;
- 施工步 4:联络线左线侧桩板的结构板浇筑;
- 施工步 5:联络线左线侧板上路基填筑;
- 施工步 6:联络线右线侧桩基钻孔 + 成桩;
- 施工步 7:联络线右线侧轻质土回填路基;
- 施工步 8:联络线右线侧开挖成槽;
- 施工步 9:联络线右线侧桩板的结构板浇筑;
- 施工步 10:联络线右线侧板上路基填筑。

3 计算结果分析

本文主要通过分析施工过程中既有线路的竖向(模型 z 方向)及横向水平位移(模型 y 方向),评估该接轨工程对既有城际铁路线路的影响。计算结果中,横向水平位移正值表示自联络线左线偏向联络线右线方向,反之为负值;竖向位移负值表示为沉降,反之为隆起。

3.1 联络线左线施工对既有城际铁路的影响

1) 施工步1(联络线左线侧桩基钻孔+成桩):本施工步通过冻结钻孔内土体单元,同时在孔壁施加向外的面荷载模拟泥浆护壁,以实现完整的桩基钻孔过程模拟;随后冻结孔壁面荷载,激活钻孔内实体单元并替换为混凝土材料来模拟成桩过程。该施工步对既有城际铁路正线I、II股道以及3[#]、4[#]到发线线路位移分布的影响如图3所示。由图3可知,该工况对既有城际铁路线路影响较大,卸荷会引起轨道线路产生偏向施工侧水平位移并发生沉降。

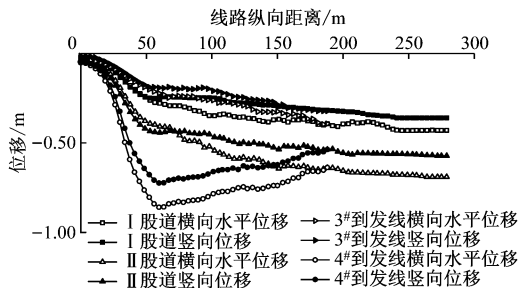


图3 施工步1的既有城际铁路线路位移分布
Fig. 3 Displacement distribution of existing intercity railway lines in case 1

2) 施工步2(联络线左线侧轻质土回填路基):本施工步可通过激活相应土体单元实现轻质土回填模拟。该过程对既有城际铁路正线I、II股道的影响如图4所示。从图4可知,联络线左线侧轻质土回填路基施工,会引起既有城际铁路线路股道产生远离施工侧的横向水平位移及竖向沉降。由于该部分路基填筑施工位置距离3[#]、4[#]到发线较远,因此省略该工况对到发线的扰动分析。

3) 施工步3(联络线左线侧开挖成槽):本施工步通过冻结相应土体单元模拟开挖成槽过程。该过程对既有城际铁路正线I、II股道以及3[#]、4[#]到发线的影响如图5所示。联络线左线侧开挖成槽施工会造成土体应力损失,使得既有城际铁路线路股道

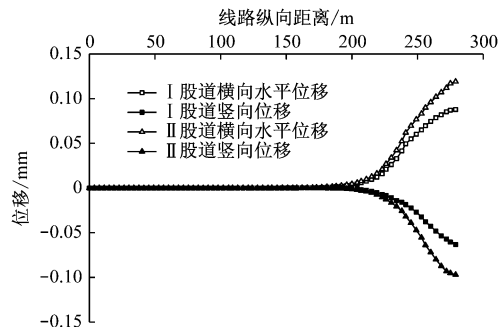


图4 施工步2的既有城际铁路线路位移分布
Fig. 4 Displacement distribution of existing intercity railway lines in case 2

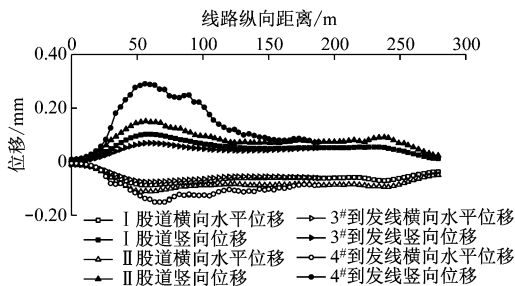


图5 施工步3的既有城际铁路线路位移分布
Fig. 5 Displacement distribution of existing intercity railway lines in case 3

均向施工侧偏移并隆起。

4) 施工步4(联络线左线侧桩板结构板浇筑):本施工步通过在路基上施加面荷载模拟板浇筑,见图6。如图6所示,联络线左线侧桩板结构的板浇筑施工对既有城际铁路线路存在挤压作用,使其股道均产生远离施工侧的横向水平位移,且同时发生沉降。

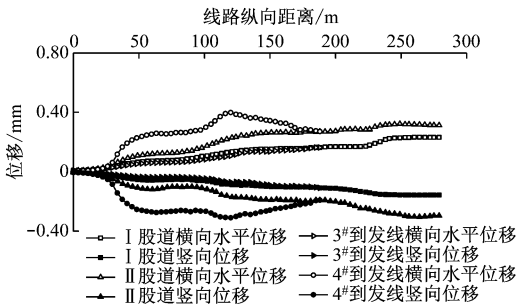


图6 施工步4的既有城际铁路线路位移分布
Fig. 6 Displacement distribution of existing intercity railway lines in case 4

5) 施工步5(联络线左线侧板上路基填筑):本施工步通过激活相应土体单元模拟板上路基填筑过程,见图7。如图7所示,联络线左线侧板上路基填筑施工对既有城际铁路线路扰动较小,最大沉降

位于4[#]到发线,其值为0.083 mm。

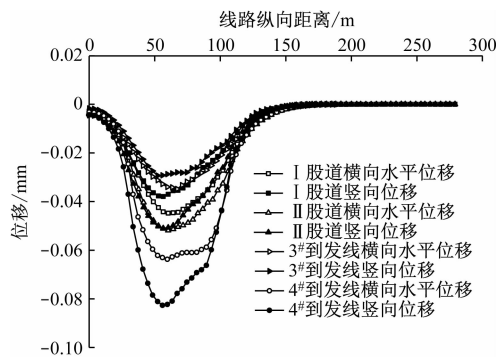


图7 施工步5的既有城际铁路线路位移分布

Fig. 7 Displacement distribution of existing intercity railway lines in case 5

3.2 联络线右线施工对既有城际铁路线路的影响

1) 施工步6(联络线右线侧桩基钻孔+成桩): 本施工步模拟方法与施工步1所述相同,见图8。由图8可知,联络线右线侧桩基钻孔+成桩施工会对既有城际铁路线路产生较大影响,钻孔引起的土体应力损失会使既有城际铁路线路股道产生偏向施工侧的横向水平位移,并发生沉降。

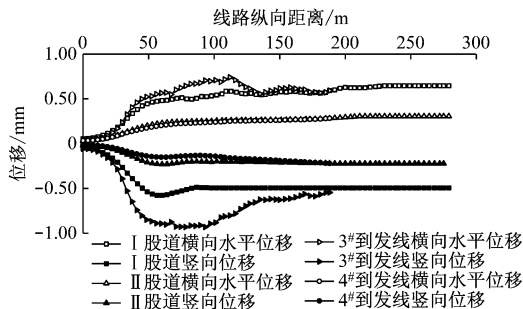


图8 施工步6的既有城际铁路线路位移分布

Fig. 8 Displacement distribution of existing intercity railway lines in case 6

2) 施工步7(联络线右线侧轻质土回填路基): 路基回填模拟方法与施工步2相同,见图9。由图9可知,轻质土回填路基对既有线影响较小,既有城际正线铁路I股道最大沉降值仅为0.174 mm。

3) 施工步8(联络线右线侧开挖成槽): 开挖成槽模拟方法与施工步3相同,见图10。由图10可知,联络线右线侧开挖造成的土体应力损失会导致既有城际铁路线路股道产生偏向施工侧的横向水平位移,并引起隆起。

4) 施工步9(联络线右线侧桩板结构板浇筑): 混凝土板浇筑模拟方法与施工步4相同,见图11。

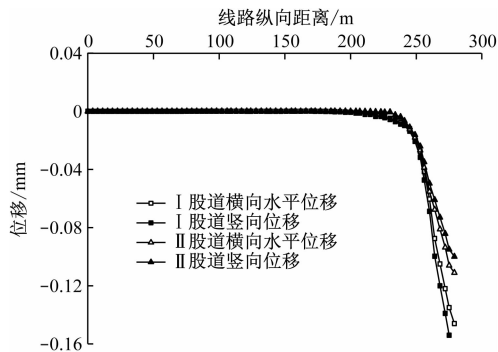


图9 施工步7的既有城际线路位移分布

Fig. 9 Displacement distribution of existing intercity railway lines in case 7

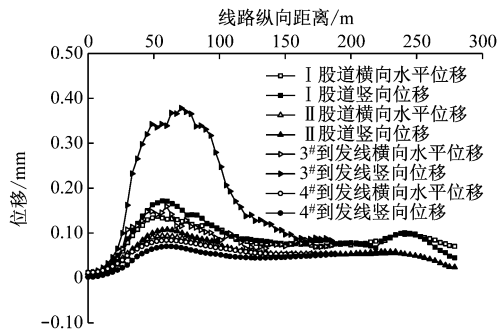


图10 施工步8的既有城际线路位移分布

Fig. 10 Displacement distribution of existing intercity railway lines in case 8

如图11所示,联络线右线侧桩板结构的板浇筑施工会对既有城际铁路造成挤压,使其线路均产生偏离施工侧的横向水平位移并发生沉降。

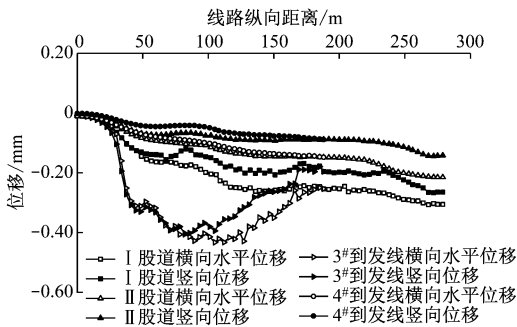


图11 施工步9的既有城际线路位移分布

Fig. 11 Displacement distribution of existing intercity railway lines in case 9

5) 施工步10(联络线右线侧板上路基填筑): 路基填筑模拟方法与施工步5相同,见图12。由图12可知,联络线右线侧板上路基填筑施工会引起既有线路产生偏向联络线右线的横向水平位移并出现沉降现象。该施工步的既有城际铁路线路位移

分布显示,在线路纵向 125 m 处随着联络左、右线与既有城际铁路线路水平距离增大,新建线路路基填筑施工对既有城际铁路线路影响显著减弱。

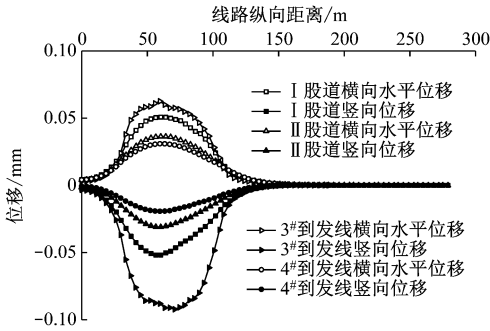


图 12 施工步 10 的既有城际线路位移分布
Fig. 12 Displacement distribution of existing intercity railway lines in case 10

3.3 模拟试验结果汇总分析

各施工步引起的既有城际铁路正线 I、II 股道

以及 3[#]、4[#]到发线的最大横向水平位移和竖向位移如表 2 所示。由表 2 可知,该接轨工程施工过程中,既有城际铁路正线 I 股道的最大横向水平位移和最大沉降均发生于联络线右线侧桩基钻孔 + 成桩期间,分别为 0.702 mm 和 -0.603 mm;城际正线 II 股道最大横向水平位移和沉降则发生于联络线左线侧桩基钻孔 + 成桩期间,分别为 -0.691 mm 和 -0.572 mm;3[#]到发线及 4[#]到发线的最大横向水平位移和最大沉降也同样出现在各自临近的联络线桩基钻孔 + 成桩工况中。综上可知,本接轨工程施工全过程中,桩基钻孔 + 成桩施工步对既有线路的位移影响最为显著,因此在类似工程施工时,需要合理选择开挖机械设备及钻孔保护措施以减少对临近地层的施工扰动。本工程建议采用护筒跟进方式穿越淤泥层,同时采取加大护壁泥浆比重等措施以有效避免成孔过程中塌孔的发生,防止对既有城际铁路线路造成更大的影响。

表 2 各施工步的既有城际铁路位移最大值								单位:mm
Tab.2 Maximum displacement of existing intercity railway under various construction conditions								unit:mm
施工步	正线 I 股道		正线 II 股道		3 [#] 到发线		4 [#] 到发线	
	横向水平位移	竖向位移	横向水平位移	竖向位移	横向水平位移	竖向位移	横向水平位移	竖向位移
施工步 1	-0.423	-0.365	-0.691	-0.572	-0.403	-0.325	-0.861	-0.721
施工步 2	0.087	-0.063	0.121	-0.097				
施工步 3	-0.087	0.101	-0.112	0.151	-0.076	0.070	-0.150	0.281
施工步 4	0.230	-0.157	0.312	-0.303	0.160	-0.109	0.401	-0.310
施工步 5	-0.045	-0.041	-0.051	-0.050	-0.033	-0.030	-0.062	-0.081
施工步 6	0.702	-0.603	0.431	-0.331	0.801	-0.836	0.391	-0.309
施工步 7	-0.145	-0.166	-0.110	-0.099				
施工步 8	0.137	0.179	0.093	0.107	0.165	0.361	0.084	0.071
施工步 9	-0.310	-0.271	-0.214	-0.143	-0.423	-0.397	-0.147	-0.088
施工步 10	0.050	-0.053	0.036	-0.031	0.061	-0.085	0.030	-0.020

3.4 典型断面的沉降曲线分析

为研究接轨工程中帮宽施工引发的既有线路沉降问题,选取里程 HNK 236 + 916.77 的典型横断面。提取该断面既有线路路基地部及帮宽位置地表在相应施工步的沉降值,如图 13 所示。

由图 13 可知,桩板结构施工会导致该典型断面两侧帮宽处出现沉降槽,槽底最大沉降出现在联络线右线侧桩板结构板浇筑阶段中(施工步 9),此时联络线右线侧路基帮宽位置最大沉降达到 22.7 mm。由于复合地基 CFG 桩的存在,既有线路路基地部位置沉降较小;但为了满足高铁线路变形控制的严苛要求及保障列车运营安全,在联络线的左右线施工期间,也应重点加强既有线路的安全防

护,如对路基水平变形、地基分层沉降和桩板结构内力进行全过程动态监测和预警,以保障新建线路施工中既有线路的安全运营。

4 结论

1) 有限元模型对接轨工程施工模拟计算的结果显示,各施工步的既有线路结构变形控制符合规范要求,该接轨工程设计方案原则可行。

2) 接轨工程施工过程引起的既有城际铁路正线 I 股道和 3[#]到发线的最大横向水平位移和最大沉降均发生于联络线右线侧桩基钻孔 + 成桩期间,分别为 0.702 mm、0.603 mm 和 0.801 mm、0.836 mm;既有城际正线 II 股道和 4[#]到发线的最大

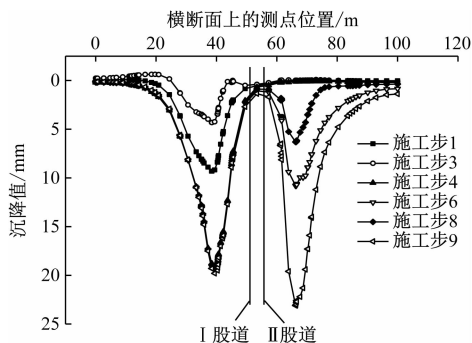


图13 路基帮宽施工时线路典型横断面沉降值分布

Fig. 13 Settlement value distribution of line typical cross section during subgrade widening construction

横向水平位移和最大沉降则发生在联络线左线侧桩基钻孔+成桩期间,分别为0.691 mm、0.572 mm和0.861 mm和0.721 mm。对于桩基施工所造成的周围地层及结构的扰动影响,建议采用跳桩方式进行桩基施工,同时可采用护筒跟进穿越淤泥层施工工艺及加大护壁泥浆比重等措施,以有效防止塌孔现象出现。

3) 接轨工程施工中,既有线路两侧帮宽处会出现明显沉降槽,其中最大沉降为22.700 mm,位于联络线右侧路基帮宽位置。

4) 临近既有线路并行帮宽施工过程中,桩基施工、土体开挖、板浇筑及路基填筑等施工步骤均应重视既有线路的安全防护,可通过对路基横向水平变形、地基分层沉降和桩板结构内力全过程动态监测和及时预警,以保障新建线路施工中既有城际铁路线路的安全运营。

参考文献

- [1] 中华人民共和国铁道部. 铁路路基设计规范:TB 10001—2005 [S]. 北京:中国铁道出版社,2005.

Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for design on subgrade of railway: TB 10001—2005 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.

- [2] 蒋关鲁, 庞梅, 肖东, 等. 新建跨线桥对高铁路基的附加影响及处治技术[J]. 中国铁道科学, 2013(5): 6.
JIANG Guanlu, PANG Mei, XIAO Dong, et al. Additional effects on high-speed railway subgrade caused by newly-built flyover and treatment techniques[J]. China Railway Science, 2013(5): 6.
- [3] 左坤. 新建高铁对紧邻运营铁路路基服役状态影响研究[D]. 长沙:中南大学, 2014.
ZUO Shen. Research on effect of new-built high-speed railway on adjacent operating railway subgrade in service status[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [4] 陈磊, 陆海源, 陈育民, 等. 原有路基荷载作用对加宽工程路基沉降变形的影响分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2008(1): 59.
CHEN Lei, LU Haiyuan, CHEN Yumin, et al. Analysis of effects of old embankment's stability on expressway widening engineering [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008(1): 59.
- [5] 刘源浩, 胡仲春, 任高峰, 等. 既有线路基帮宽施工的形变分析及方案优化[J]. 武汉工程大学学报, 2018(2): 190.
LIU Yuanhao, HU Zhongchun, REN Gaofeng, et al. Deformation analysis and construction optimization of subgrade widening construction in existing line[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2018(2): 190.
- [6] 李井元, 陈伟志, 李宁, 等. 引入既有无砟高铁接轨段路基工程关键技术[J]. 铁道工程学报, 2017(8): 22.
LI Jingyuan, CHEN Weizhi, LI Ning, et al. Key technology of introducing ballastless track upon high-speed railway subgrade[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017(8): 22.
- [7] 李帆, 周宝岐, 郭帅杰, 等. 并线高速铁路路基隔离桩隔离效果的影响因素[J]. 铁道建筑, 2020(10): 83.
LI Fan, ZHOU Baoqi, GUO Shuaijie, et al. Influential factors of isolation effect of isolated piles for co-line high speed railway subgrade[J]. Railway Engineering, 2020(10): 83.

(收稿日期:2021-10-16)

敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式阅读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

