

明挖隧道下穿桥梁工程中既有桩注浆加固方法与应用^{*}

张海东

(中铁上海设计院集团有限公司, 200070, 上海)

摘 要 [目的] 明挖法新建隧道下穿桥梁时,需重点保护坑内既有桥梁桩基体系。基于湖滨南路隧道下穿广清高速公路桥梁工程中基坑开挖导致既有桥梁桩暴露,影响桥梁整体刚度及造成桥墩沉降的问题,拟采用注浆加固方式进行坑底及桩周加固。需研究注浆加固范围(加固宽度及厚度)变化对桥梁变形的影响。[方法] 通过有限元软件 Midas GTS 进行三维建模,对比不同注浆加固范围下桥梁墩顶位移及桩身轴力分布情况,分析桩周注浆加固宽度和注浆加固厚度变化对桥梁变形的影响及对桩承载力的提高效果。结合数值计算结果及变形控制需求,制定施工加固方案,并对隧道施工过程中墩台沉降现场进行监测。[结果及结论] 桩周注浆加固可有效补偿摩擦桩侧摩阻力损失,提高加固区段荷载传递效率,从而更好地分担上部结构荷载;增加桩周加固厚度可有效改善墩顶沉降及邻墩差异沉降。隧道注浆加固施工现场监测结果表明,桥梁沉降变形及差异沉降均满足控制需求。

关键词 基坑开挖; 桩基加固; 沉降位移; 桩身轴力

中图分类号 U433.17

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.025

Grouting Reinforcement Method and Application for Existing Piles in Open-excavation Tunnel Under-passing Bridge Engineering

ZHANG Haidong

(China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., 200070, Shanghai, China)

Abstract [Objective] When constructing a new tunnel under-passing bridge with open-excavation method, it is crucial to protect the existing pile foundation system within the excavation pit. In the project of South Hubin Road Tunnel under-passing Guangqing Highway Bridge, the foundation pit excavation leads to the exposure of existing bridge piles, affecting the bridge overall stiffness and causing pier settlement. Grouting reinforcement is proposed to stabilize the pit bottom and the pile surrounding. It is aimed to investigate the impact of varia-

tion in the grouting reinforcement range (thickness and width) on bridge deformation. [Method] Using finite element software Midas GTS for three-dimensional modeling, the bridge pier top displacement and the axial force distribution along the pile shafts are compared under different grouting reinforcement ranges. The impact of changes in grouting reinforcement width and thickness around the piles on bridge deformation, and the effect of improving pile bearing capacity are analyzed. Based on numerical calculation results and deformation control requirements, a construction reinforcement plan is formulated, and the pier abutment settlement is monitored on-site during tunnel construction. [Result & Conclusion] Grouting reinforcement around the piles can effectively compensate for the loss of friction pile side friction resistance, improving the load transfer efficiency in the reinforced section and better distributing the load from the superstructure. Increasing the thickness of reinforcement around the piles can significantly improve pier top settlement and differential settlement between adjacent piers. On-site monitoring of tunnel grouting reinforcement construction shows that both bridge settlement deformation and differential settlement meet the control requirements.

Key words foundation pit excavation; pile reinforcement; settlement displacement; pile shaft axial force

随着城市综合交通网络快速拓展,利用既有公路和铁路桥下空间是解决通道紧张的重要途径。明挖法新建隧道下穿桥梁时,需重点保护坑内既有桥梁桩基体系^[1]。土体开挖不仅会引起土体应力释放,使桩土间法向应力降低,也会造成桩身暴露,致使有效桩长减小。尤其对于摩擦桩而言,周边土体开挖直接造成桩侧摩阻力损失,使其承载力难以满足设计要求,影响桥梁整体刚度及造成桥墩沉降。

基坑开挖中常采用桩基托换手段^[2]保护既有桥梁,仅采用基坑底部注浆加固的方式保护既有桥

^{*} 中铁上海设计院集团有限公司科技研究开发计划课题(集 15-14)

桩的案例较少。已有研究表明,注浆加固后,桩侧土强度和刚度的提高会增大摩擦桩桩土界面摩擦阻力和粗糙度,从而提高桩的承载力^[3]。

本文基于广州市湖滨南路隧道下穿广清高速公路工程展开研究。该工程中部分桥桩在基坑开挖范围,拟采用注浆加固方式进行坑底及桩周加固,以增强桩基承载性能。本文主要探究注浆加固范围(加固宽度及厚度)对桥梁变形的影响,并结合现场监测成果,评估加固方案对桥梁运营的保护作用。

1 工程概况

广州市湖滨南路隧道的建设标准为城市次干路,设计车速 40 km/h,下穿广清高速公路桥。新建

隧道采用明挖法施工,基坑开挖深度约为 6~10 m,开挖宽度约 31.5 m,运营中的广清高速公路桥桩基位于隧道基坑开挖范围。受桥下净高影响,隧道基坑支护结构采用钻孔灌注桩围护+止水帷幕形式。

广清高速公路桥梁为3孔(16 m + 20 m + 16 m)简支空心板梁桥,0[#]桥墩桥台,3[#]桥墩桥台基础采用桩径1.2 m 嵌岩桩,桩长28 ~ 36 m;1[#]、2[#]桥墩采用柱式墩,墩柱直径1.2 m,墩高5.3 m,基础除2[#]-14 和2[#]-15 桥墩下为摩擦桩,其余基础均为柱桩(桩径1.3 m,桩长25 ~ 46 m);2[#]-15 桥墩基础采用直径1.3 m、桩长40 m 的摩擦桩,2[#]-14 桥墩下设置承台,基础则采用2 根直径1.3 m、桩长30 m 摩擦桩。下穿处新建隧道与既有桥梁相对位置关系如图1 和图2 所示。

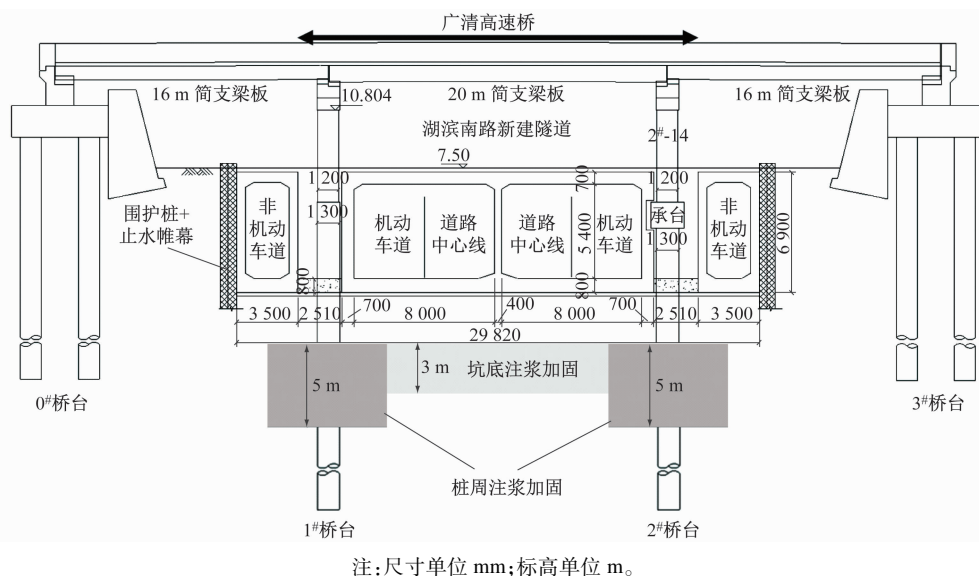


图 1 隧道下穿处既有高速桥纵断面示意图

Fig. 1 Profile diagram of tunnel under-passing existing highway bridge

基坑开挖造成 1[#]和 2[#]两排桥墩的桩身暴露,有效桩长减小。根据设计规范^[4],对开挖后单桩竖向承载力进行验算。结果表明,基坑开挖后柱桩竖向承载力仍满足原设计要求,但 2[#]-14 和 2[#]-15 桥墩下摩擦桩的竖向承载能力无法满足原设计要求。

为防控桥墩沉降变形及差异沉降问题,在隧道底板以下设置厚度为 5 m 的桩周初始加固区域,其他范围土体因考虑基坑封闭截水,坑底采用满堂加固,加固厚度为隧道底板以下 3 m;桩周注浆采用 MJS (Metro Jet System) 工法,要求加固体不少于两排,为此,桩周加固区初始宽度设为 3 m。初始加固设计分别如图 1 和图 2 所示。

2 数值模拟与计算分析

考虑 2[#]-14 和 2[#]-15 桥墩下摩擦桩承载性能受损严重,为保证能有效弥补其承载力,本工程在初始加固基础上,在其桩周设置附加加固区域,并结合有限元方法探究附加注浆加固区宽度和厚度的合理范围。

2.1 有限元建模

1) 计算域。选取隧道暗埋段右侧三幅高速公路桥进行模拟。采用 Midas GTS 有限元软件建立三维整体模型,如图 3 所示。

2) 结构单元及材料设置。岩土体采用 Mohr-

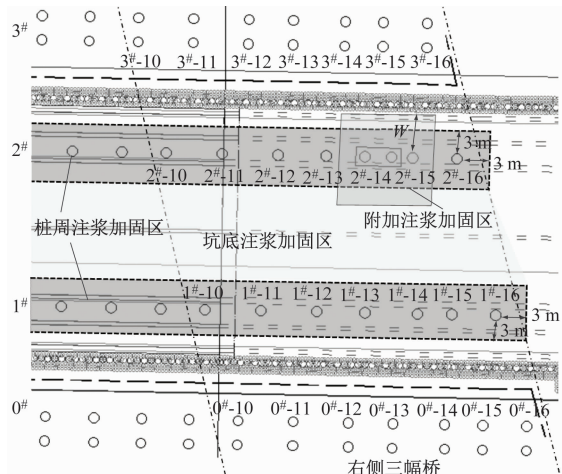


图2 隧道下穿既有高速桥处桩位平面示意图

Fig. 2 Pile position planar diagram of tunnel under-passing existing expressway bridge

Coulomb 本构模型, 参数见表 1; 混凝土、钢材采用弹性本构模型, 结构单元及材料参数见表 2。

3) 边界条件。模型设置地面为自由面, 侧面和底面则分别约束水平向及竖向位移。

4) 施工步骤。①初始地应力平衡及激活既有桥梁结构; ②施作支撑结构同时基坑开挖到底; ③

拆除基坑临时支撑, 施作隧道主体并回填桩周土。若存在注浆加固措施, 则在步骤①和步骤②间增加注浆步。

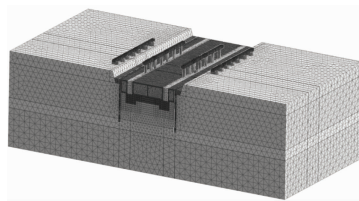


图3 Midas GTS 三有限元计算模型

Fig. 3 Midas GTS 3D finite element calculation model

2.2 计算分析

未注浆条件下, 基底最大隆起量为 2.5 cm, 同时, 坑内摩擦桩基础墩产生较大沉降, 2[#]-14 和 2[#]-15 桥墩墩顶沉降值分别达到 5.09 cm 和 4.16 cm; 2[#]-14 和 3[#]-14 相邻桥墩墩顶差异沉降可达 3.9 cm。增设初始注浆加固区后, 坑底最大隆起量减小为 1.8 cm, 2[#]-14 和 2[#]-15 桥墩墩顶沉降则分别减小为 2.75 cm 和 2.41 cm, 可见注浆加固对控制基坑及桥梁变形有明显效果。

表1 土层物理力学参数表

Tab. 1 Soil physical and mechanical parameters

土层标号	土层	厚度/m	重度/ (kN/m ³)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	桩侧摩阻力 标准值/kPa
〈1〉	杂填土	5.2	19.9	6	0.33	9	6	20
〈3-2〉	中粗砂	19.1	20.0	23	0.22	0	28	50
〈5C-1B〉	灰岩残积土	4.3	18.7	15	0.30	22	16	65
〈9C-2〉	微风化灰岩	21.4	27.0					
	注浆加固区		25.0	2 000	0.20	1 000	42	120

表2 结构单元及材料参数设置

Tab. 2 Structural unit and material parameter settings

结构	结构类型	单元类型	材料	重度/(kN/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比
既有桥梁	桥桩	梁单元	C25 钢筋混凝土	25.0	28.0	0.2
	桥墩、盖梁、承台	梁单元	C30 钢筋混凝土	25.0	30.0	0.2
	围护结构	板单元	C35 钢筋混凝土	25.0	31.5	0.2
基坑支护	冠梁	梁单元	C35 钢筋混凝土	25.0	31.5	0.2
	第一道混凝土支撑	梁单元	C30 钢筋混凝土	25.0	30.0	0.2
	第二道钢管支撑	梁单元	钢管	78.5	206.0	0.3
隧道主体	主体结构	实体单元	C35 钢筋混凝土	25.0	31.5	0.2

3 附加注浆加固范围影响分析

为控制摩擦桩处沉降变形, 继续扩大摩擦桩桩

周加固范围, 并探讨桩周注浆加固宽度 W 和注浆加固厚度 T 对桥梁变形的影响及对桩承载力的提高效果。针对注浆加固厚度进行研究时, 摩擦桩桩周

加固宽度保持 3 m 不变, T 分别设置为 5 ~ 8 m; 针对摩擦桩桩周注浆加固宽度进行研究时, 加固厚度保持 5 m 不变, W 分别设置为 3 ~ 6 m。

3.1 桥梁墩顶沉降变形分析

不同加固厚度及不同加固宽度下坑内 2[#]墩顶沉降量分别如表 3 和表 4 所示。在未进行注浆加固时, 柱桩沉降量相对较小, 原因为柱桩主要发挥桩端阻力, 基坑开挖造成的桩身暴露对其承载性能影响较小, 摩擦桩所受影响较大, 2[#]-14 桥墩墩顶沉降量可达到 5.09 cm。

表 3 不同加固厚度下 2[#]桥墩墩顶沉降

Tab.3 Settlement of 2[#] pier top under different reinforcement thicknesses

T/m	墩顶沉降/cm			
	2 [#] -13	2 [#] -14	2 [#] -15	2 [#] -16
未注浆加固	2.58	5.09	4.16	2.32
5	2.28	2.75	2.41	2.14
6	2.22	2.31	2.26	2.12
7	2.16	1.87	1.95	2.09
8	2.01	1.41	1.49	1.99

表 4 不同加固宽度下 2[#]桥墩墩柱沉降

Tab.4 Settlement of 2[#] pier abutment under different reinforcement widths

W/m	墩顶沉降/cm			
	2 [#] -13	2 [#] -14	2 [#] -15	2 [#] -16
未注浆加固	2.58	5.09	4.16	2.32
3	2.28	2.75	2.41	2.14
4	2.28	2.74	2.40	2.14
5	2.28	2.74	2.40	2.14
6	2.28	2.74	2.40	2.14

以未加固状态下各墩台沉降值为基准, 随着摩擦桩注浆加固厚度及宽度变化, 墩顶沉降减小幅度的变化趋势如图 4 所示。

1) 加固厚度变化影响。初始注浆加固下, 各墩顶沉降有不同程度减小, 2[#]-14 和 2[#]-15 桥墩墩顶沉降分别减少 46.01% 和 42.09%。随着桩周加固厚度增加, 沉降量逐渐减小; 加固厚度为 7 m 时, 摩擦桩沉降量已小于柱桩沉降量; 加固厚度为 8 m 时, 2[#]-14 桥墩墩顶沉降相比于未注浆工况下的减少 72.38%。

2) 加固宽度变化的影响。随着桩周加固宽度增加, 各桩沉降没有继续减小的趋势。

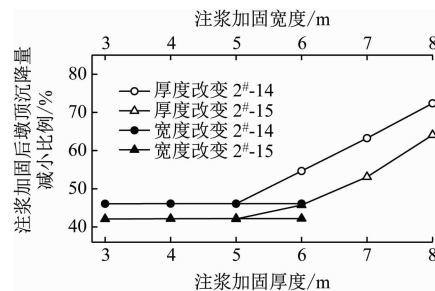


图 4 2[#]桥墩墩顶沉降减小幅度的变化趋势

Fig.4 Variation trend of 2[#] pier top settlement reduction amplitude

3) 综合考虑附加加固区宽度及厚度耦合作用。将摩擦桩桩周加固宽度分别固定在 3 ~ 5 m, 桩周加固厚度变化时, 2[#]-14 及 2[#]-15 桥墩墩顶沉降值如图 5 所示。图 5 中各曲线变化趋势一致甚至基本重合, 进一步说明注浆加固对摩擦桩承载能力的补强效果主要依赖于桩土接触部分力学性能的改善, 扩大桩-加固区接触面积更有助于侧摩阻力发挥。

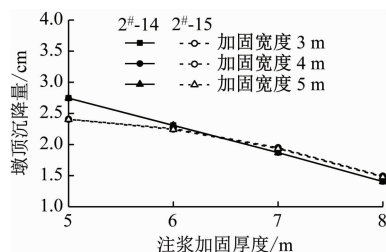


图 5 附加加固区耦合作用下墩顶沉降情况

Fig.5 Settlement of pier top under coupled actions in additional reinforcement zone

综上所述, 对摩擦桩桩周进行附加注浆加固可进一步有效减小墩顶沉降; 随着摩擦桩桩周加固厚度的增加, 相比于未注浆工况, 各墩顶沉降的减小幅值均逐渐变大, 且摩擦桩受控显著; 但摩擦桩桩周加固宽度的增加对墩顶沉降控制影响甚微。

3.2 桩身轴力传递分析

2[#]-14 桥墩摩擦桩坑底以下部分桩身轴力分布如图 6 所示。由图 6 可见: 增加桩周加固厚度可明显提升摩擦桩承载性能; 荷载传递到加固段桩身截面的轴力增加的同时桩端阻力减小, 加固段的总侧摩阻逐步提高, 表明注浆加固段荷载传递效率提高, 可发挥更多侧摩阻力承担桥梁上部荷载; 而调整桩周加固宽度对桩身轴力增加影响甚微。综上所述, 注浆加固可提升摩擦桩的承载性能, 使其在相对位移减小的情况下发挥更大桩侧摩阻力。在注浆厚度达到平衡后, 过度加大注浆宽度实际作用

不大。

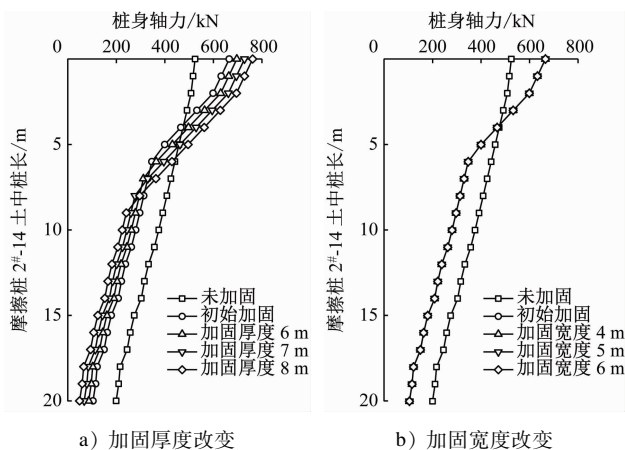


图 6 2[#]-14 桥墩摩擦桩桩身轴力分布

Fig. 6 Shaft axial force distribution of pier friction pile 2[#]-14

3.3 桥梁的差异沉降分析

考虑基坑范围内墩顶受基坑开挖影响沉降较大,同一跨桥两端桥墩的差异沉降会导致桥面不顺,选取 2[#]桥墩、1[#]桥墩及 3[#]桥墩桥台对应点位进行墩顶差异沉降分析。不同注浆加固工况下,2[#]-14、2[#]-15 桥墩与相应 1[#]桥墩及 3[#]桥墩桥台的沉降差分别如图 7 和图 8 所示。同一幅桥中坑内两墩差异沉降量小于坑内墩与桥台差异沉降,若桥幅存在摩擦桩则沉降差较大,如未加固情况下 2[#]-14、2[#]-15 桥墩与 3[#]桥墩桥台对应点位沉降差可分别达到 3.0 cm 和 3.9 cm。增加摩擦桩桩周加固厚度可使沉降差得到控制。当加固厚度达到 7 m 以上时,摩擦桩沉降变形受控明显,其沉降甚至低于 1[#]对应桥墩,而出现沉降差回升现象;加大桩周注浆宽度,对改善差异沉降无明显效果。

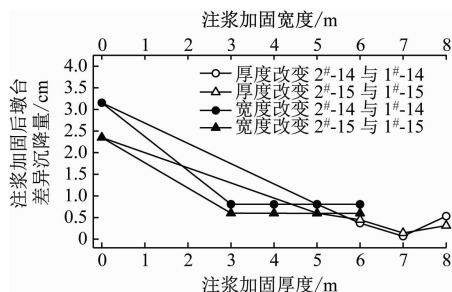


图 7 2[#]和 1[#]桥墩的差异沉降变化趋势

Fig. 7 Variation trend of differential settlement between piers 2[#] and 1[#]

4 现场实测结果

本工程基坑环境等级为一级,开挖中地面最大

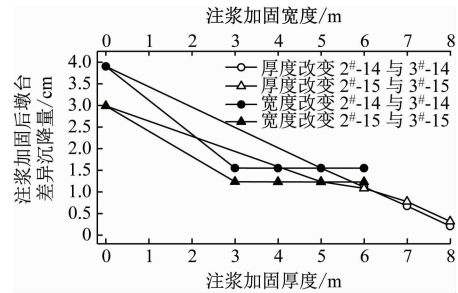


图 8 2[#]和 3[#]桥墩桥台的差异沉降变化趋势

Fig. 8 Variation trend of abutment differential settlement between piers 2[#] and 3[#]

沉降应满足 $\leq 0.15\% H$ 且 ≤ 20 mm 的需求(H 为开挖深度)。综合规范^[4]要求,为保证隧道施工期间高速桥运营安全,允许标准变形值定为 20 mm。结合前述数值计算结果及变形控制需求,加固区设计最终方案为:采用 MJS 工法进行桩周加固,水泥掺量达 40% 以上,桩周加固厚度为 5 m,摩擦桩桩周加固厚度为 8 m(即附加增厚 3 m 区域),加固宽度则统一为 3 m;桩周加固范围外土体,采用高压旋喷桩固化砂层,加固厚度为基底以下 3 m。

隧道施工过程中墩台沉降现场监测结果如表 5 所示,墩顶差异沉降如表 6 所示。2[#]-14、2[#]-15 桥墩墩顶沉降分别为 5.8 mm 和 5.1 mm;2[#]-14、1[#]-14 桥墩墩顶差异沉降值较大,为 5.1 mm,均满足控制要求。总体来说,面对基坑内既有桩基承载力性能亏损情况,可通过注浆加固方式对桩进行承载力补强实现,进而保护桥梁结构安全运营。

表 5 桥梁墩台监测点位最大沉降

Tab. 5 Maximum settlement at monitoring points of bridge piers and abutments

监测项	监测点位沉降最大值/mm	
	X [#] -14	X [#] -15
1 [#] 桥墩	0.7	0.4
2 [#] 桥墩	5.8	5.1
3 [#] 桥台	1.2	1.2

表 6 桥梁墩顶差异沉降值

Tab. 6 Values of differential settlement of bridge pier tops

相邻墩台	差异沉降值/mm
1 [#] -14 及 2 [#] -14	5.1
1 [#] -15 及 2 [#] -15	4.7
3 [#] -14 及 2 [#] -14	4.6
3 [#] -15 及 2 [#] -15	2.2

5 结论

1) 增加桩周注浆加固厚度可有效提升摩擦桩承载性能,加固区段荷载传递效率提升明显,桩侧摩阻力显著增大。相比于未注浆状态,摩擦桩桩周加固厚度 8 m 时,2[#]-14 桥墩墩顶沉降减少了 72%,墩台差异沉降也可得到充分改善;桩周加固宽度扩大对桩承载性能改善作用有限。

2) 采用数值计算结果指导注浆加固现场施工,由桥梁监测结果可知,保持初始加固方案下,将摩擦桩桩周注浆加固厚度设置为隧道底板下 8 m 时,各点位沉降及差异沉降均可满足控制要求。在有效的桩周注浆加固中,可将桩与加固区结合体看作特殊的桩基托换形式,在低碳模式下解决部分桥梁结构保护问题。

该明挖法隧道施工实现对既有桥梁变形有效控制的经验,可为类似工程提供参考。

参考文献

- [1] 李恒一,王志杰,何晟亚,等. 地铁基坑下穿铁路桥的桥墩保护设计方案合理性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(7): 180.
- LI Hengyi, WANG Zhijie, HE Shengya, et al. Rationality study
- [3] 张龙. 麦加轻轨列车运行模式分析与优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2022, 44(1): 134.
- ZHANG Long. Analysis and optimization of train operation mode of mecca light rail[J]. Railway Transport and Economy, 2022, 44(1): 134.
- [4] QUAGLIETTA E, SPARTALIS P, WANG M, et al. Modelling and analysis of Virtual Coupling with dynamic safety margin considering risk factors in railway operations[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2022, 22: 100313.
- [5] QUAGLIETTA E, WANG M, GOVERDE R M P. A multi-state train-following model for the analysis of virtual coupling railway operations[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2020, 15: 100195.
- [6] DI MEO C, DI VAIO M, FLAMMINI F, et al. ERTMS/ETCS virtual coupling: proof of concept and numerical analysis[J].

on pier protection and design scheme of metro foundation pit under-crossing railway bridge[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(7): 180.

- [2] 黄银钉. 地铁区间隧道下穿既有桥梁的桩基托换[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(2): 100.
- HUANG Yinding. Bridge pile foundation underpinning in subway tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(2): 100.
- [3] 张忠苗. 灌注桩后注浆技术及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 153.
- ZHANG Zhongmiao. Post-grouting technology of cast-in-place pile and its engineering application[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 153.
- [4] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG 3363—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019: 31.
- Ministry of Transport of the People's Public of China. Specifications for design of foundation of highway bridges and culverts: JTG 3363—2019 [S]. Beijing: China Communications Press, 2019: 31.

· 收稿日期:2022-10-09 修回日期:2023-01-20 出版日期:2024-07-10
Received:2022-10-09 Revised:2023-01-20 Published:2024-07-10
· 通信作者:张海东,高级工程师,24098831@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 145 页)

IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(6): 2545.

- [7] 方明华,魏玉光. 麦加轻轨运营经验 对中国铁路“走出去”的启示[J]. 中国铁路, 2016(12): 15.
- FANG Minghua, WEI Yuguang. Enlightenment of mecca light rail operation experience on “going global” of China railway[J]. China Railway, 2016(12): 15.
- [8] LIU Y, ZHOU Y, SU S, et al. An analytical optimal control approach for virtually coupled high-speed trains with local and string stability[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 125: 102886.
- 收稿日期:2023-07-06 修回日期:2023-10-06 出版日期:2024-07-10
Received:2023-07-06 Revised:2023-10-06 Published:2024-07-10
· 通信作者:张龙,高级工程师,1776877996@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license