

软土地区盾构隧道斜下穿多股铁路路基变形规律

黄 龙¹ 吴国伟¹ 涂家康²

(1. 绍兴市轨道交通集团有限公司, 312099, 绍兴; 2. 中铁第五勘察设计院集团有限公司, 102600, 北京//第一作者, 高级工程师)

摘 要 目的: 目前, 地铁隧道穿越铁路路基的情况越来越多, 但软土地区盾构隧道斜下穿既有运营铁路的研究相对较少, 因此需分析该情况下的路基变形规律。方法: 以绍兴轨道交通 1 号线大滩站—火车站站区间盾构隧道下穿杭甬铁路绍兴站站房及 6 股铁路股道工程为例开展研究。采用有限元法分析了盾构隧道掘进施工对杭甬铁路路基的变形影响, 并基于实测数据对数值模拟结果进行了对比分析, 充分验证了袖阀管注浆加固方案的有效性。结果及结论: 有限元分析结果表明: 未考虑盾构穿越区域地基加固的情况下, 杭甬铁路路基顶面最大沉降值为 13.12 mm, 不满足沉降控制标准要求; 当盾构穿越区域采用袖阀管注浆加固措施后, 杭甬铁路路基顶面最大沉降值为 8.20 mm, 满足沉降控制标准要求, 说明袖阀管注浆能够有效控制铁路路基沉降和轨道的不平顺。实测数据结果表明, 盾构隧道下穿铁路施工期间的累计变形历程可分为路基隆起、路基快速沉降、路基平稳波动及后续沉降 4 个阶段, 且前期隆起量大、后续变形相对较小, 加固后的路基累计变形量能控制在 10.00 mm 以内。

关键词 城市轨道交通; 盾构隧道; 下穿铁路; 路基

中图分类号 U455.43; U213.1⁺5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.09.030

Deformation Law of Shield Tunnel Oblique Under-passing Existing Multi-track Railway Subgrade in Soft Soil Area

HUANG Long, WU Guowei, TU Jiakang

Abstract Objective: Currently, with an increasing number of metro tunnels crossing existing railway subgrades, there is relatively insufficient study on shield tunnel oblique under-passing operating railways in soft soil area, thus it is necessary to investigate the deformation law of subgrades in such situations.

Method: The interval shield tunnel engineering of Shaoxing Rail Transit Line 1 Datan Sta. to Railway Sta. under-passing Shaoxing Railway Station building and six railway tracks on Hangzhou - Ningbo Intercity Railway (Hang - Yong Railway) is taken as study case. Finite element method is employed to analyze the impact of shield tunnel excavation on the deformation of Hang - Yong Railway subgrade, and the comparative analysis of numerical simulation results based on field-measured data fully validates the effectiveness of the sleeve valve pipe grouting reinforcement scheme. **Result & Conclusion:** The finite element analysis results show that the maximum settlement value of Hang - Yong Railway subgrade surface reaches 13.12 mm when the foundation reinforcement in shield crossing area is not considered, failing to meet the settlement control standard. However, when sleeve valve pipe grouting reinforcement measure is implemented in the shield crossing area, the maximum settlement value of Hang - Yong Railway subgrade surface decreases to 8.20 mm, meeting the settlement control requirements. This demonstrates the effectiveness of this measure in controlling the railway subgrade settlement and track irregularity. The field-measured results show that the cumulative deformation process during the construction period of shield tunnel under-passing railway can be divided into four stages: subgrade heave, subgrade rapid settlement, subgrade stable fluctuation and subsequent settlement. The initial heave amount is large, while the subsequent deformation is relatively small. The cumulative deformation amount of the reinforced subgrade can be controlled within 10.00 mm.

Key words urban rail transit; shield tunnel; under-passing railway; subgrade

First-author's address Shaoxing Rail Transit Group Co., Ltd., 312099, Shaoxing, China

随着铁路和城市轨道交通的不断发展, 地铁隧道穿越铁路路基的情况也越来越多, 地铁盾构隧道的施工可能会引起铁路轨面不平顺, 甚至影响到铁路的运行安全。目前, 研究人员已对盾构隧道施工引起的铁路沉降规律及加固方案进行了大量研究^[1-3], 但对软土地区盾构隧道斜下穿既有运营铁路的研究相对较少。基于此, 本文以绍兴轨道交通 1 号线(以下简称“1 号线”)下穿杭甬铁路为例, 采用数值模拟分析法, 研究地层加固及盾构隧道下穿施工对既有铁路路基的影响规律。同时, 结合现场

监测数据验证地层预加固措施对控制铁路路基沉降的有效性。

1 工程概况

1.1 盾构穿越情况

1 号线大滩站—火车站站区间盾构穿越杭甬铁路绍兴站站房及站内 6 个铁路股道,隧道采用土压平衡盾构施工,盾构内径为 5.9 m,外径为 6.7 m,管片宽度为 1.2 m,厚度为 40 cm,管片采用错缝拼装形式,区间线路与杭甬铁路交角为 70.3°,下穿铁路位置的盾构埋深约为 18.5 m,左右线中心距约为 16 m。盾构区间与杭甬铁路的平面位置关系示意图如图 1 所示。盾构下穿的杭甬铁路绍兴站为有砟轨道、电气化线路(软横跨),站内共有 6 股铁路股道,其中萧甬(杭州萧山—宁波)铁路上下行正线 2 股,到发线 4 股,下穿处无道岔。

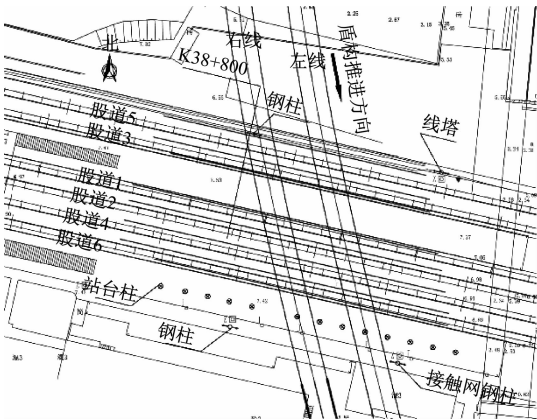


图 1 盾构区间与杭甬铁路的平面位置关系示意图
Fig. 1 Planar position relation diagram of shield interval and Hang-Yong Intercity Railway

1.2 工程地质条件

下穿位置盾构上覆土层,自上而下依次为①₁ 碎石填土、①₂ 素填土、③_{1,2} 淤泥质黏土、④₂ 粉质黏土、④₃ 粉质黏土,盾构主要穿越④₃ 粉质黏土和⑤₂ 粉质黏土,土质相对较差。土层主要参数如表 1 所示。

2 盾构隧道掘进施工对杭甬铁路路基的变形影响

通常情况下,铁路路基沉降是导致上方线路不平顺的主要原因,结合以往地铁盾构隧道下穿有砟铁路线路的经验,并征询铁路部门意见,盾构下穿施工引起的铁路路基沉降需控制在 10.00 mm 以内。

表 1 土层主要参数					
Tab. 1 Main parameters of soil layer					
岩土名称	重度/ (kN/m ³)	含水量/ %	内摩 擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	压缩 模量/ MPa
① ₂ 素填土	18.4	33.8	12.0	3	—
③ _{1,2} 淤泥质黏土	17.1	49.1	9.0	12	2.4
④ ₂ 粉质黏土	19.3	26.5	16.0	42	6.0
④ ₃ 灰黄色粉质黏土 夹粉土	18.5	32.7	12.5	29	4.3
⑤ ₂ 灰色粉质黏土	17.9	38.9	11.0	18	3.5
⑥ ₂ 灰黄色粉质黏土	19.6	24.2	16.0	46	6.0

在 1 号线下穿杭甬铁路的施工过程中,地铁盾构施工会导致既有铁路下部地层损失,进而引起地层的沉降或隆起,造成铁路路基和轨道的变形,危害列车的正常运行。采用有限元分析软件建立三维仿真模型,模拟盾构掘进对杭甬铁路的影响,为采取预加固措施提供理论依据。

2.1 数值模型

基于岩土有限元软件 Plaxis3D,建立岩土、盾构隧道、铁路路基一体化模型。土层计算参数结合本工程地质勘察报告和相关的工程经验进行取值,数值计算模型如图 2 所示。假设围岩为理想弹塑性材料,采用 Mohr-Coulomb 模型,围岩均采用实体单元模拟,盾构隧道管片采用结构板单元模拟,土体单元为 10 节点四面体单元,结构板单元为 6 节点面单元。在有限元软件中,通过冻结隧道范围内的土体单元激活管片单元,同时进行断面收缩来模拟盾构

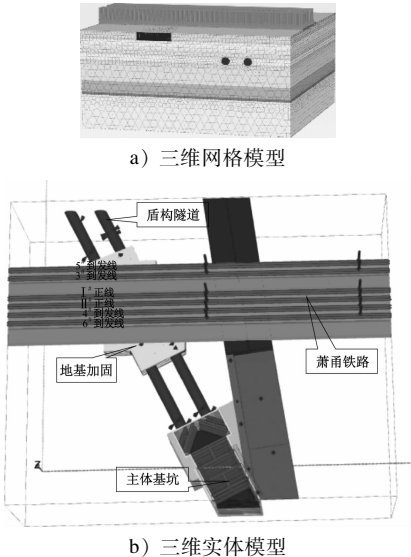


图 2 数值计算模型
Fig. 2 Numerical calculation model

掘进过程,即先施工左线隧道,再施工右线隧道。隧道下穿杭甬铁路路基区域的主要穿越土层为④₃粉质黏土和⑤₂粉质黏土,土体的强度较差。根据工程经验,采用5‰~8‰的地层损失率分析盾构隧道施工对杭甬铁路路基的变形影响,其中未采取地基预加固时地层损失率取8‰,采取加固时地层损失率取5‰。路基上部列车和轨道荷载参照TB 10001—2016《铁路路基设计规范》,路基上所施加的列车和轨道荷载的分布宽度定为3.5 m,等效荷载为60 kPa。

2.2 加固方案

对于穿越铁路段,盾构隧道在轨道两侧向轨道下方斜向打设袖阀注浆管,袖阀管呈梅花形布置,间距为1 m,加固范围为盾构区间上方2 m(覆盖④₃粉质黏土)至盾构底部以下3 m土体,加固宽度为左右线盾构两侧各3 m范围,同时保证加固体边线与铁路股道及盾构掘进面垂直。加固方案示意图如图3所示。

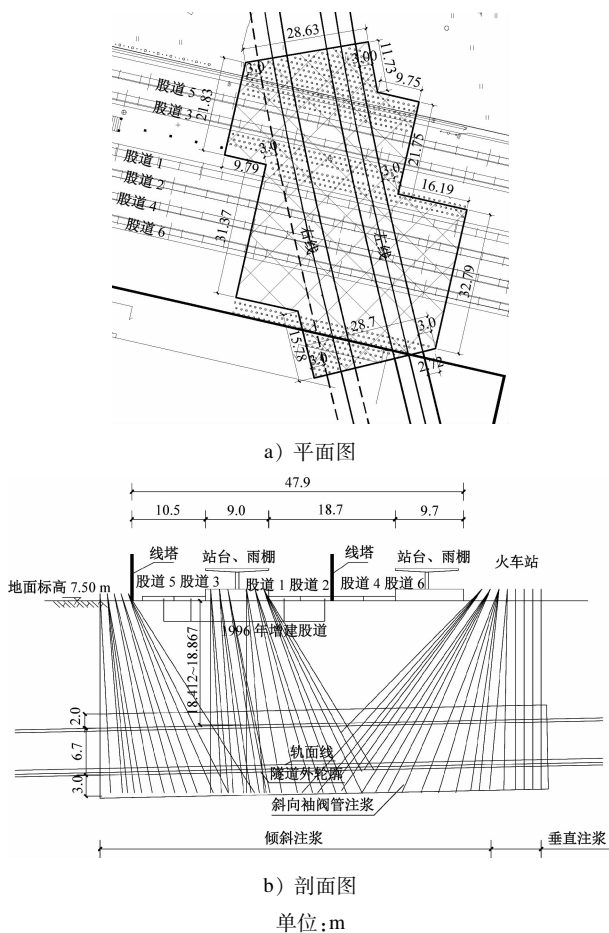


图3 加固方案示意图

Fig.3 Diagram of reinforcement scheme

2.3 盾构掘进施工对抗甬铁路的影响分析

2.3.1 路基沉降变形分析

由于穿越的股道较多且各股道的变形规律基本类似,因此以盾构隧道施工对抗甬铁路5[#]到发线为例进行分析。各工况下,5[#]到发线路基中心沿铁路线纵向位置的竖向变形曲线如图4所示,其他股道仅列出其路基最大沉降值,如表2所示。

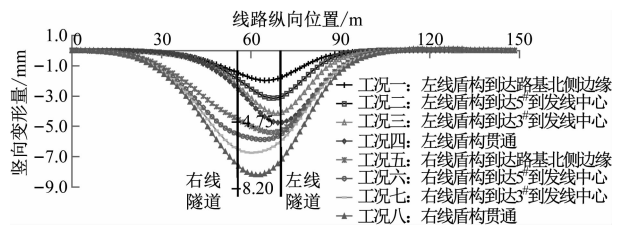


图4 各工况下5[#]到发线路基中心沿铁路线纵向位置的竖向变形曲线

Fig.4 Vertical deformation curve of 5[#] arrival/departure track subgrade center along railway line longitudinal position under each working condition

由图4可知:盾构掘进过程中,杭甬铁路5[#]到发线的路基在左线贯通时的最大沉降值为4.75 mm,位于左线开挖面正上方;随着盾构隧道右线的贯通,铁路路基沉降最大值逐渐向两隧道中间偏移;当盾构隧道右线贯通时,路基的最大沉降值为8.20 mm,位于左右线隧道的中间位置。由表2可知:当铁路路基未采取加固措施时,杭甬铁路路基最大沉降值为13.12 mm,位于杭甬铁路5[#]到发线,超过沉降控制标准要求;当采用注浆加固措施后,杭甬铁路路基最大沉降值为8.20 mm,满足控制标准要求。由此可见,对盾构穿越区域的地基进行主动加固是非常有必要的。

表2 各股道路基最大沉降值

Tab.2 Subgrade maximum settlement of each track

名称	未加固时的最大沉降值/mm		注浆加固后的最大沉降值/mm	
	左线贯通	双线贯通	左线贯通	双线贯通
杭甬铁路5 [#] 到发线	7.8	13.12	4.75	8.20
杭甬铁路3 [#] 到发线	7.2	13.04	4.58	8.13
杭甬铁路I [#] 正线	6.8	12.87	4.34	8.04
杭甬铁路II [#] 正线	6.6	12.70	4.21	7.91
杭甬铁路4 [#] 到发线	6.4	12.50	4.23	7.84
杭甬铁路6 [#] 到发线	6.2	12.42	4.07	7.76

2.3.2 轨道几何状态分析

根据各工况下股道左右轨的竖向变形分析结

果,按照 10 m 弦长计算各工况下左右轨的高低几何形态,同样仅对 5[#]到发线的不平顺性进行分析。各工况下,5[#]到发线左右轨高低不平顺及水平不平顺曲线如图 5 所示,其他股道仅列出其不平顺最大值,如表 3 所示。

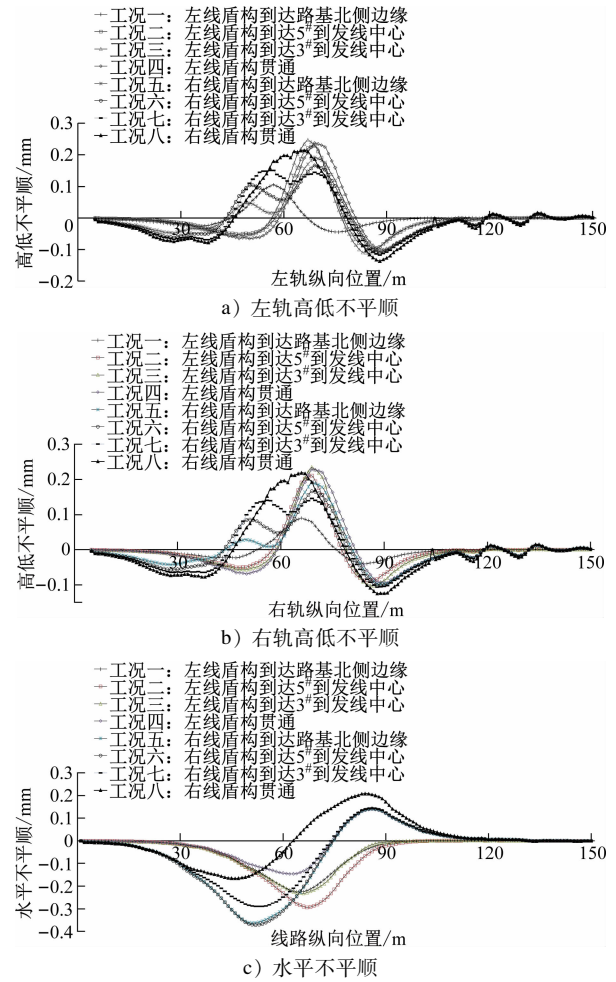


图 5 各工况下 5[#]到发线路左右轨高低不平顺及水平不平顺曲线

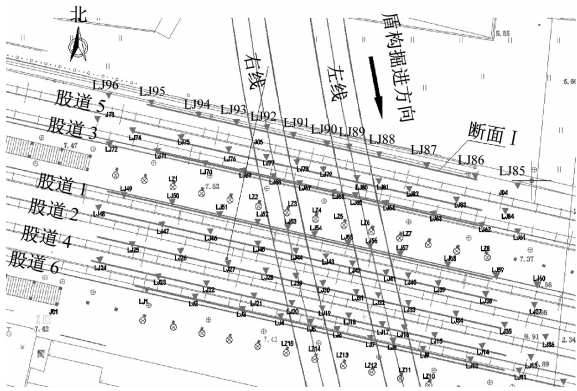
Fig. 5 Left and right rail vertical irregularity and horizontal irregularity curves of 5[#] arrival/departure track under each working condition

表 3 各股道轨道几何不平顺最大值			
Tab. 3 Maximum geometric irregularity of each track			
名称	高低不平顺/mm		水平不平顺/mm
	左轨	右轨	
杭甬铁路 5 [#] 到发线	0.247	0.228	0.371
杭甬铁路 3 [#] 到发线	0.223	0.224	0.401
杭甬铁路 I [#] 正线	0.225	0.227	0.451
杭甬铁路 II [#] 正线	0.212	0.215	0.445
杭甬铁路 4 [#] 到发线	0.209	0.200	0.458
杭甬铁路 6 [#] 到发线	0.205	0.199	0.465

由图 5 a) 和 5 b) 可知:各工况下,由盾构施工引起的 5[#]到发线左轨轨面高低不平顺最大值为 0.247 mm,发生在工况三;5[#]到发线右轨轨面高低不平顺最大值为 0.228 mm,也发生在工况三,但其均未超过 TG/GW 102—2019《普速铁路线路修理规则》规定的控制标准要求。由图 5 c) 可知,各工况下,由盾构施工引起的 5[#]到发线钢轨轨面水平不平顺最大值为 0.371 mm,发生在工况六,未超过 TG/GW 102—2019《普速铁路线路修理规则》规定的控制标准要求。由表 3 可知:盾构施工引起的轨道高低不平顺最大值为 0.247 mm,发生在 5[#]到发线左轨位置;水平不平顺最大值为 0.465 mm,发生在 6[#]到发线位置。以上轨道几何不平顺均未超过控制标准要求。

3 现场监测分析

在盾构下穿施工期间,杭甬铁路处于正常运营状态。为实时监测铁路线路的沉降控制效果,对隧道顶部注浆加固区布设监测点。本工程盾构下穿绍兴站内杭甬铁路共 6 道股道,监测点分别在 1、3、5、6 股道外侧各布置 1 个监测断面,另外分别在 1、2 股道之间,2、4 股道之间,4、6 股道之间,3、5 股道之间各布置 1 个监测断面,共布置 8 个监测断面,每个监测断面点埋设 12 个测点。监测点在施工影响区域中心向两侧展开,沿铁路路基纵向呈断面埋设,布设在铁路路基两侧路肩上,盾构隧道顶部轴线布设 1 个路基测点、盾构两侧轮廓边线布设路基测点各 1 个,盾构外边线向外沿路基布置间距不大于 10 m。现选取变形最大的股道 5 外侧断面 I 作为典型截面,其沉降监测点布置示意图如图 6 所示。



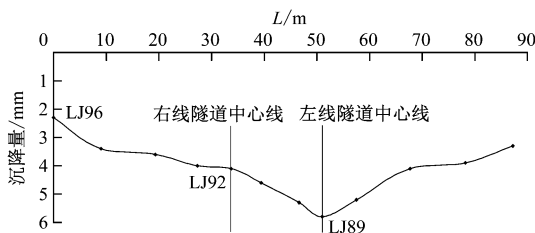
注:LZ 为路中监测点;LJ 为路肩监测点。

图 6 沉降监测点布置示意图

Fig. 6 Layout diagram of settlement monitoring points

下穿铁路期间的盾构现场施工参数为:总推力 11 000 ~ 12 400 kN,刀盘扭矩 2 000 ~ 2 650 kNm,刀盘转速为 1.1 ~ 1.2 r/min,掘进速度为 35 mm/min,土仓压力为 0.22 MPa,注浆压力为 0.3 MPa,注浆量为每环 2.8 ~ 3.0 m³。受盾构接收时间限制,盾构左线需要 3 d 通过下穿铁路区域,平均每天掘进 20 环;盾构右线需要 5 d 通过下穿铁路区域,平均每天掘进 12 环。这可能也是导致铁路累计沉降左线位置大于右线位置的部分原因。

盾构隧道施工引起的铁路路基断面 I 的沉降曲线,如图 7 所示,以 LJ96 作为横轴 0 点,34 m 位置为盾构隧道右线中心线,51 m 位置为盾构隧道左线中心线。由图 7 可知,盾构隧道下穿杭甬铁路引起的铁路路基沉降最大值约为 5.80 mm,最大值发生在左线中心线上方而不是两隧道线路中心上方,该变形规律与数值模型计算结果有差异,主要原因可能与盾构施工的推进速度、正面土压力、注浆量、注浆压力或推进顺序等因素有关。



注:L 为沿铁路方向各点至 LJ96 的距离。

图 7 铁路路基断面 I 沉降曲线

Fig. 7 Railway subgrade settlement curve at section I

隧道下穿铁路施工期间,2 个测点累计竖向位移时间历程曲线对比,如图 8 所示。盾构施工期间,铁路路基隆起值越大,后续的收敛沉降值越小。路基竖向变形大致可分为 4 个阶段。阶段 1 为路基隆起阶段,测点 LJ92 平均隆起量约为 2.17 mm,测点 LJ89 平均隆起量约为 1.40 mm。产生这种现象的主要原因为盾构到达路基下方时,由于盾构推力及同步注浆压力的共同作用,铁路路基总体呈现隆起现象。阶段 2 为路基快速沉降阶段,在 3 d 时间内,测点 LJ92 从隆起 2.40 mm 变到沉降 1.40 mm,变形速率为 1.27 mm/d;测点 LJ89 从隆起 3.20 mm 变到沉降 1.70 mm,变形速率为 1.63 mm/d。产生这种现象的主要原因为盾构通过后,由于盾尾建筑空隙(管片与盾构外径之间的空隙)的存在,导致壁后土体发生较大的弹塑性变形,此沉降也是盾构法

施工引起地层沉降的主要来源^[4]。阶段 3 为路基的平稳波动阶段,施工期间采取二次注浆,使路基发生轻微的隆起和沉降。阶段 4 为后续固结沉降阶段,产生沉降的原因主要为盾构顶推过程及注浆过程中,原状土层受到了较大程度的扰动,当盾构施工完成后,发生了超孔隙水压消散的主固结沉降,以及土体骨架蠕变所引起的次固结沉降现象。

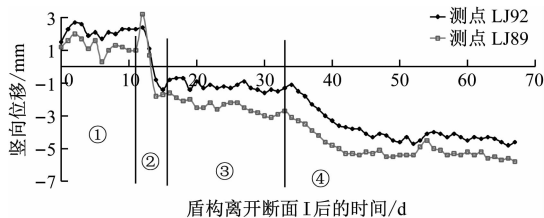


图 8 隧道下穿铁路施工期间 2 个测点累计竖向位移时间历程曲线对比

Fig. 8 Comparison of cumulative vertical displacement time-history curves of 2 measuring points during tunnel under-passing railway construction period

4 结论

1) 未考虑盾构穿越区域地基加固的情况下,杭甬铁路路基顶面最大沉降值为 13.12 mm,位于杭甬铁路 5[#]到发线路基处,不满足沉降控制标准要求;当盾构穿越区域采用袖阀管注浆加固措施后,杭甬铁路路基顶面最大沉降值为 8.20 mm,位于杭甬铁路 5[#]到发线路基处,满足沉降控制标准要求。

2) 由监测结果可知,盾构隧道下穿杭甬铁路引起的路基最大沉降值约为 5.80 mm,进一步表明了袖阀管注浆在控制铁路路基沉降变形方面的有效性。

3) 监测数据结果表明,盾构施工期间铁路路基隆起值越大,后续的收敛沉降值相对越小,建议在后续类似工程的盾构推进过程中,可适当增加土仓压力和注浆压力,以减小后续路基沉降值。

4) 盾构隧道下穿杭甬铁路引起的铁路路基横向沉降最大值发生在左线中心线上方,而不是两隧道线路中心上方,主要原因可能与盾构施工的推进速度、正面土压力、注浆量和注浆压力等因素有关,因此盾构施工期间应加强盾构掘进参数的控制。

参考文献

- [1] 黄龙,周顺华,宫全美.软土地区盾构隧道下穿新建铁路的地基处理方案研究[J].城市轨道交通研究,2013,16(2): 56.

(下转第 179 页)

轨道交通之间无缝互通、票证互认、安检互信、应急互联,进一步提升多层次轨道交通一体化运营服务水平,提升旅客出行体验^[7]。例如,按照 MAAS(出行即服务)理念^[7],推进多层次轨道交通之间信息服务数据的互联、共享、协作,依托手机、电脑等数字化平台,实现轨道交通信息的全面对接,将轨道交通的基本信息(时刻、班次、列车运行图等)全面整合到客户端,及时发布给广大旅客,全面实现“门到门”运输效率的提升,保证旅客对服务品质百分百的满意。

4 结语

本文通过对国外轨道交通融合发展现状和发展经验的总结,提出了多层次轨道交通融合发展的目标和原则,并从功能融合、网络融合、运营融合3个方面提出了多层次轨道交通融合发展的方式。多层次轨道交通融合发展对于区域经济一体化具有极大的推动作用,能够促进区域低碳经济发展,助力实现“碳达峰,碳中和”,可以进一步优化区域产业布局,带动关联行业发展,加速区域多中心商业模式的发展,进一步解放劳动力,加快区域城市化进程。政府应在政策、资金、科研等方面进一步加大对多层次轨道交通融合发展的投入力度,为区域经济一体化发展助力。

参考文献

- [1] 张杰. 对“四网融合”基本问题的探讨[J]. 交通工程, 2020(4): 9.
ZHANG JIE. Integration of state railway, intercity express railway, suburban railway, and urban rail transit[J]. Journal of Transportation Engineering, 2020(4): 9.
- [2] 刘鹏, 刘金成. 区域轨道交通与区域经济的协调发展研究[J]. 城市轨道交通研究, 2011, 14(8): 45.

LIU Peng, LIU Jincheng. Coordination between regional rail transit and regional economy development[J]. Urban Mass Transit, 2011, 14(8): 45.

- [3] 杨卫东, 范东涛. 多层次推进轨道交通多网融合[N]. 中国交通报, 2021-12-14(6).
YANG Weidong, FAN Dongtao. Multi-level promotion of rail transit multi-network integration[N]. China Communications News, 2021-12-14(6).
- [4] 李妍. 东京都市圈轨道交通与城市协调发展分析[J]. 铁道建筑, 2022, 62(2): 167.
LI Yan. Analysis on coordinated development of rail transit and cities in Tokyo metropolitan area[J]. Railway Engineering, 2022, 62(2): 167.
- [5] 倪金城. 大巴黎都市圈城区与郊区融合的纽带: 巴黎市域(郊)铁路[J]. 城市轨道交通, 2021(2): 26.
NI Jincheng. The link between urban and suburban areas in the greater Paris metropolitan area: Paris metropolitan suburban railway[J]. China Metros, 2021(2): 26.
- [6] 殷勇, 鞠子奇, 吴雨遥, 等. 国外轨道交通发展对我国城市群轨道交通一体化的启示[J]. 交通运输工程与信息学报, 2021, 19(1): 52.
YIN Yong, JU Ziqi, WU Yuyao, et al. The enlightenment of foreign rail transit development to the rail transit integration of China megalopolis[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2021, 19(1): 52.
- [7] 潘昭宇, 张天齐, 唐怀海, 等. 多层次轨道交通“四网融合”体系研究[J]. 交通工程, 2020(4): 1.
PAN Zhaoyu, ZHANG Tianqi, TANG Huaihai, et al. Research on the 'four-network integration' system of multi-level rail transit[J]. Journal of Transportation Engineering, 2020(4): 1.
- [8] 杜运国, 苟长飞, 卢生安. 温州多层次轨道交通建设探索与实践[J]. 交通节能与环保, 2021, 17(4): 148.
DU Yunguo, GOU Changfei, LU Sheng'an. Exploration and practice of multi-level rail transit construction in Wenzhou[J]. Energy Conservation & Environmental Protection in Transportation, 2021, 17(4): 148.

(收稿日期: 2021-05-01)

(上接第174页)

- HUANG Long, ZHOU Shunhua, GONG Quanmei. Analysis on foundation treatment in soft soil crossed underground by shield tunneling[J]. Urban Mass Transit, 2013, 16(2): 56.
- [2] 卢华喜, 王漪璇, 周珍伟, 等. 盾构隧道下穿铁路股道及火车站站房的影响分析[J]. 华东交通大学学报, 2015, 32(4): 25.
LU Huaxi, WANG Yixuan, ZHOU Zhenwei, et al. Influence analysis of subway shield tunneling on existing track and railway station building[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2015, 32(4): 25.

- [3] 阮雷, 孙雪兵, 申兴柱, 等. 新建盾构隧道施工对既有铁路路基的影响研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(6): 99.
RUAN Lei, SUN Xuebing, SHEN Xingzhu, et al. Study of the influence of new shield tunnel construction on existing railway subgrade[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(6): 99.
- [4] 梁荣柱. 软土盾构隧道掘进环境效应及其邻近开挖响应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
LIANG Rongzhu. Study on environmental effect of shield tunneling in soft soil and its adjacent excavation response[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

(收稿日期: 2021-03-08)