

富水卵漂石地层盾构近距离下穿运营地铁隧道 施工技术研究

刘 文^{1,2,4} 姚翔川^{1,5} 杨志勇^{1,3} 徐 波^{1,3} 王 强⁵ 郑龙威⁶

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 430040, 武汉; 2. 中交武汉智行国际工程咨询有限公司, 430040, 武汉; 3. 交通运输部行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 430040, 武汉; 4. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司, 430040, 武汉; 5. 中交二航局(成都)建设工程有限公司, 610218, 成都; 6. 中国地质大学经济管理学院, 430074, 武汉)

摘 要 [目的]富水卵漂石地层盾构下穿既有地铁线路施工过程中,易导致既有地铁线路上方土体不规则沉降超出控制范围,进而可能引发地下水喷涌和地面塌陷问题。为此,需要对富水卵漂石地层盾构近距离下穿运营地铁隧道的施工技术进行研究。[方法]以新建成都地铁 17 号线凤溪大道站盾构下穿既有地铁 4 号线为案例,在阐述工程概况的基础上,选取了 4 个地面沉降测点和 4 个深层土体沉降测点,分析了盾构掘进过程中地层的沉降变化规律。采用 MIDAS GTS 软件建立了三维有限元模型,对采用 38 m 超长管棚与斜向注浆相结合的加固施工进行模拟,对 4 号线隧道预加固效果进行了分析。基于此,明确了地面跟踪注浆的时机,进一步分析了地面跟踪注浆的效果。[结果及结论]该加固措施有效提高了 4 号线结构底部土体的整体性,改善了 4 号线结构的受力状况,有效控制了 4 号线的结构沉降。

关键词 地铁盾构隧道;富水卵漂石地层;盾构下穿;土体加固;长大管棚;地面跟踪注浆

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.04.032

Construction Technology for Shield Tunneling Under-passing in Proximity to Operation Metro Tunnels in Water-rich Pebble Stratum

LIU Wen^{1,2,4}, YAO Xiangchuan^{1,5}, YANG Zhiyong^{1,3}, XU Bo^{1,3}, WANG Qiang⁵, ZHENG Longwei⁶

(1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., 430040, Wuhan, China; 2. CCCC Wuhan Zhixing International Engineering Consulting Co., Ltd., 430040, Wuhan, China; 3. Research & Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, 430040, Wuhan, China; 4. CCCC Highway Bridge National Engineering Research Centre Co., Ltd., 430040, Wuhan, China; 5. CCCC SHEC (Chengdu) Construction Engineering Co., Ltd., 610218, Chengdu, China; 6. School of Economics

& Management, China University of Geosciences, 430074, Wuhan, China)

Abstract [Objective] In the process of shield construction under-passing the existing metro line in water-rich pebble stratum, irregular settlement of the overlying soil mass beyond control range may occur, potentially leading to issues such as underground water gushing and ground collapse. Therefore, it is necessary to research the construction technology for shield under-passing in proximity to operation metro tunnel in water-rich pebble stratum. [Method] Taking the case of shield under-passing existing Chengdu Metro Line 4 at the newly-built Fengxi Avenue Station on Chengdu Metro Line 17, on the basis of introducing project overview, four land subsidence monitoring points and four deep soil mass settlement monitoring points are selected to analyze the stratum settlement variation law during shield excavation process. A three-dimensional finite element model is created using MIDAS GTS, simulating the reinforcement construction with a combination of 38 m super-long pipe shed and oblique angle grouting. The pre-reinforcement effect on Line 4 tunnel is analyzed. Based on this, the timing for ground tracking grouting is determined, and its effectiveness is further analyzed. [Result & Conclusion] The reinforcement measures effectively enhance the overall integrity of structure bottom soil mass, improve the structural loading conditions, and successfully control the structural settlement of Line 4.

Key words metro shield tunnel; water-rich pebble stratum; shield under-passing; soil mass reinforcement; long-large pipe shed; ground surface tracking grouting

盾构掘进施工会导致周围土体扰动,造成地层不规则沉降,对上方建构筑物产生影响^[1]。为保证既有地铁的安全运营,需对盾构近距离下穿既有地铁线路的变形规律进行分析,避免下穿施工期间对既有地铁线路行车安全造成危害^[2]。文献[3]基于两阶段分析法,提出了考虑新建隧道上浮效应的隧

道下穿施工引发既有隧道纵向变形的计算方法。文献[4]运用 Peck 方程,提出了地面最大沉降差的表征参数。文献[5]对于近距离小交角下穿隧道的沉降特性进行了研究。

既有研究中,对富水卵漂石特殊地层中盾构下穿运营地铁隧道的沉降规律及施工关键技术鲜有研究。本文针对富水卵漂石地层沉降控制这一难题,提出了在卵漂石夹混凝土素桩地层中采用 38 m 超长管棚与注浆相结合的方法,对既有地铁隧道进行预加固,并在富水卵漂石地层实施地面精细化跟踪注浆的沉降控制措施,以确保盾构下穿既有运营地铁隧道的施工安全。

1 工程概况

本工程为成都地铁新建的 17 号线(以下简称“17 号线”)凤溪大道站盾构下穿既有已运营的地铁 4 号线(以下简称“4 号线”),下穿区域的空间位置关系如图 1 所示,地铁 17 号线和地铁 4 号线的最小间距仅 3.41 m。下穿区域位于富水卵漂石地层,卵漂石颗粒之间的黏聚力较低,不能承受拉应力和拉应变。在盾构开挖扰动及卸载作用影响下,卵漂石层结构变得松散,易产生较大沉降。此外,下穿区域卵漂石在土层中的占比较高、地下水含量大,盾构掘进施工过程中存在重大喷涌和地面塌陷风险。

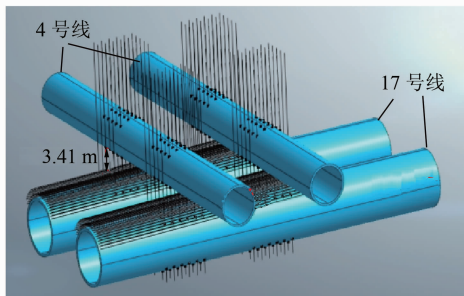


图 1 17 号线下穿 4 号线的空间位置关系

Fig. 1 Spatial location relationship of Line 17 under-passing Line 4

2 盾构掘进过程中地层沉降变化规律

为研究 17 号线下穿 4 号线施工过程中的地层沉降变化规律,在 17 号线右线隧道顶部沿轴线方向选取 4 个地面沉降测点(测点 1、测点 2、测点 3 及测点 4),各测点的间距均为 5.00 m。此外,取测点 2 和测点 3 的中点,在该点埋深方向的 6.00 m、9.00 m 及 12.00 m 处作为深层土体沉降的 3 个测点(测点

A、测点 B 及测点 C),在这 3 个测点处均布置深层沉降计,沉降计的采集频率 10 min/次,用以测量 6.00 m、9.00 m 及 12.00 m 处土体的沉降变化情况。此外,在既有 4 号线底部再设 1 个测点 D,用以对 4 号线隧道结构进行沉降监测。地面沉降测点及深层土体沉降测点布置如图 2 所示。

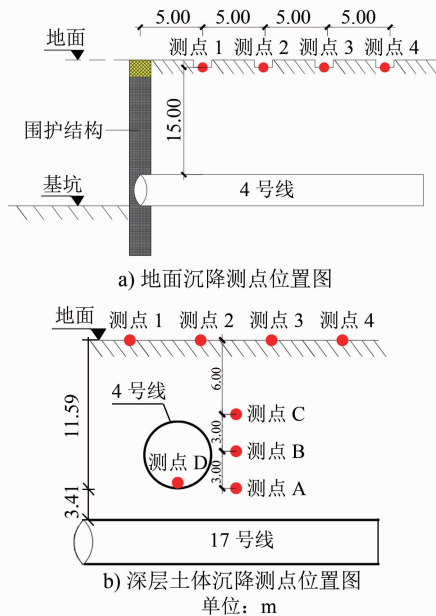


图 2 地面沉降测点及深层土体沉降测点布置示意图

Fig. 2 Layout diagram of land subsidence measurement points and deep-level soil settlement measuring points

2.1 地面沉降规律分析

对 4 个地面沉降测点的沉降进行测量,得到各测点的沉降时程曲线,如图 3 所示。由图 3 可知:①测点 1 的最大沉降量为 23.96 mm,其中盾体通过阶段的沉降量为 18.00 mm,沉降量占比约为 75%;②测点 2 的最大沉降量为 28.94 mm,其中盾体通过阶段的沉降量为 18.60 mm,沉降量占比约为 64%;③测点 3 的最大沉降量为 21.96 mm,其中盾体通过阶段的沉降量为 12.80 mm,沉降量占比约为 58%;④测点 4 的最大沉降量为 39.06 mm,其中盾体通过阶段的沉降量为 23.38 mm,沉降量占比约为 60%。

由图 3 还可知:①在刀盘通过阶段,各测点的地面沉降量较小;②在盾体通过阶段,各测点的地面沉降量变化最大(其沉降占比均超过 50%);③在盾体通过阶段及盾尾脱出后,各测点的地面沉降量仍持续增长,并在盾构通过 4 h 后逐步趋于稳定。因此,在盾构下穿的过程中,地面沉降主要发生在盾体通过阶段和盾尾脱出后,应采取措施控制盾构下穿施工引起的地面沉降。

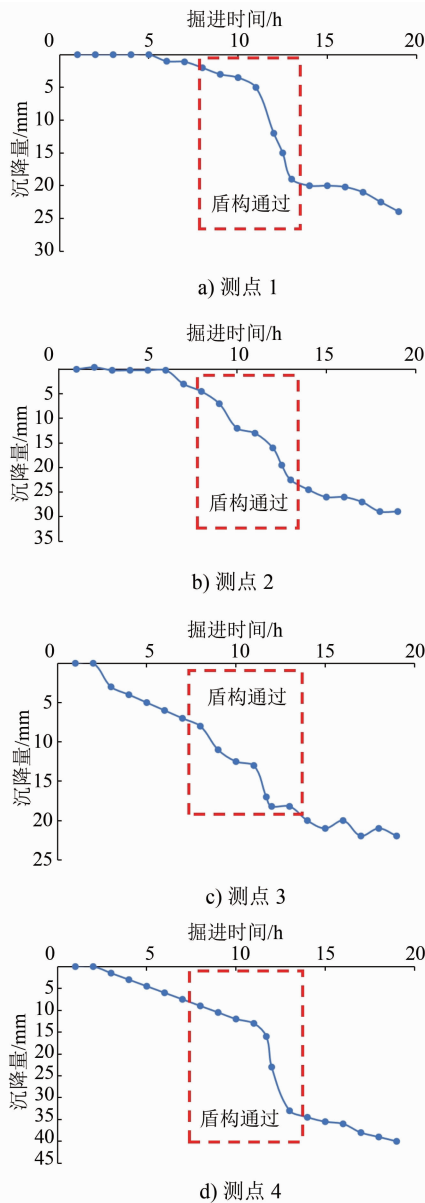


图 3 4 个地面沉降测点的沉降时程曲线

Fig. 3 Subsidence time-history curves for four land subsidence measuring points

2.2 深层土体的沉降规律分析

将测点 A、测点 B、测点 C 处的沉降结果绘制成曲线图,如图 4 所示。由图 4 可知:①深层土体的沉降主要发生在盾体通过阶段,测点 C 的最大沉降量为 35.95 mm,测点 B 的最大沉降量为 30.83 mm,测点 A 的最大沉降量为 29.73 mm;②随着土体埋深的增加,测点处的沉降值有增大趋势;③在掘进时间为 12 h 时,各深层土体测点的沉降数值均发生了突变,说明卵漂石地层有一定自拱性,地层空洞坍塌具有一定时效性,盾构掘进产生的空洞从盾构上方逐渐向地面扩展,造成了地面沉降的滞后。

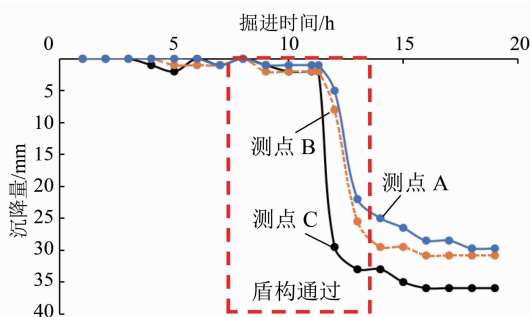


图 4 3 个深层土体沉降测点处的沉降量
Fig. 4 Settlement values at three deep-level soil settlement measuring points

3 既有地铁隧道的预加固控制措施

为解决卵漂石地层既有地铁隧道的加固难题,本文对长大管棚在该地层条件下的技术要点展开研究,提出了 38 m 超长管棚与注浆相结合的加固方式,以满足既有地铁隧道的变形控制要求,确保地铁线路运营安全。

3.1 卵石夹混凝土素桩地层狭小空间超长管棚加固技术

在隧道开挖前,计算 4 号线拱部区域所需水平孔的数量、间距及深度,使用水平钻机钻设水平孔。埋设提前钻好孔眼的钢管,通过管壁预钻孔眼注入水泥浆,用以加固土体、提高钢管刚度,使 4 号线隧道拱部预先形成伞状钢管棚。4 号线隧道管棚施工现场如图 5 所示。

沿 17 号线隧道轴向布置 6 排素混凝土桩(混凝土强度为 C25),沿 17 号线隧道横向布置 5 排素混凝土桩(混凝土强度为 C25)。素混凝土桩的直径均为 1 000 mm,桩间距均为 1 350 mm。混凝土素桩从地面打设至 17 号线隧道底以下约 900 mm。针对管棚的垂直偏差,采用钻头连接水位管进行测量;针对管棚的水平偏差,采用自制全站仪棱镜小车进行测量;针对管棚变形,采用陀螺仪进行测量。图 6 为管棚穿混凝土素桩精度控制的 3 个技术,这 3 个测量技术组合形成了整套测量方案,以满足管棚精度控制要求。

超长管棚加固施工后,4 号线左线累计注浆量为 51.1 m³,右线累计注浆量为 56.1 m³,注浆浆液的水灰比为 0.9。管棚一端深入 4 号线隧道前方地层中,另一端在已支护土体的上方。在管棚内部进行注浆,通过管棚可将局部应力(特别是开挖区段的拱部应力)均匀分布到 4 号线隧道地层的前、后区域



图 5 4 号线隧道管棚施工现场图

Fig. 5 Line 4 tunnel tube shelter construction site photos



图 6 管棚穿混凝土素桩精度控制的 3 个技术

Fig. 6 Three precision control technologies of pipe shed penetrating cast-in-place concrete pile

内,避免局部应力集中导致结构失稳。

3.2 卵漂石地层斜向袖阀管注浆加固技术

为了对 4 号线隧道底部的土体进行注浆加固,在 4 号线两侧各设置了 1 排垂直袖阀管和 1 排斜向袖阀管,这 2 排袖阀管在 4 号线底部相交。其中,斜向袖阀管施工须严格按照设计方案控制入射角度和垂直度,既要防止潜孔钻施工过程中偏向 4 号线,造

成 4 号线管片受损,又要避免斜向袖阀管离 4 号线底部过远,影响跟踪注浆的效果。

3.3 既有地铁隧道预加固效果分析

3.3.1 模型建立

素混凝土桩的长度为 38 m,混凝土的强度为 C25。管片为钢筋混凝土材料,其中,钢材的型号为 Q345,混凝土强度为 C50。模型的计算参数如表 1 所示。

表 1 模型计算参数表

Tab. 1 Model calculation parameters

编号	项目	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	重度/(kN/m ³)
1	卵漂石	64	0.30	50	33	20.0
2	C25 混凝土素桩	2.55×10 ⁴	0.15			25.0
3	管棚	20.00×10 ⁴				78.5
4	管棚加固区土层	200	0.25	100	35	20.5
5	C50 混凝土管片	4.45×10 ⁴	0.13			25.0

为了研究 38 m 超长管棚的加固效果,本文通过 MIDAS GTS 软件建立了三维有限元模型,模型尺寸为 60 m(长)×60 m(宽)×40 m(高)。模型设置时,将管棚以外 0.5 m 区域定为管棚施工后的注浆有效加固范围。

3.3.2 计算结果分析

3.3.2.1 管棚加固效果分析

图 7 管棚未注浆加固及注浆加固后 2 种工况下 4 号线沉降控制效果云图。由图 7 可知:①未注浆加固情况下,4 号线结构最大沉降量为 12.80 mm;

注浆加固后,4 号线结构最大沉降量为 9.05 mm;
②未注浆加固情况下,4 号线结构变形区域主要分布在 17 号线正上方;注浆加固后,4 号线结构变形的范围扩大了,即管棚注浆加固提高了 4 号线底部结构的整体性,有效控制了结构底部的沉降。

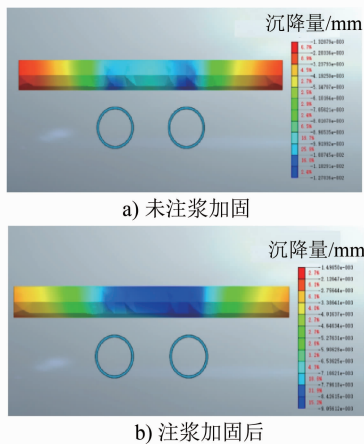


图 7 管棚未注浆加固及注浆加固的 2 种工况下 4 号线沉降控制效果云图

Fig. 7 Nephogram of Line 4 settlement control effectiveness under two working conditions of pipe shed with and without grouting reinforcement

3.3.2.2 加固体强度分析

图 8 为管棚实施注浆加固后加固体的沉降控制效果云图。由图 8 可知:注浆加固后,加固体可有效控制 4 号线的结构沉降;注浆加固区强度超过 100 MPa 后,继续提高其强度,4 号线的沉降变形减小值变化不大,最大沉降量从 8.70 mm(加固体强度为 100 MPa 时)减少至 8.44 mm(加固体强度为 120 MPa 时)。这主要是由于加固体面积较小,对 4 号线结构沉降的控制作用有限。

4 既有地铁隧道预加固控制技术

4.1 地面跟踪注浆时机的选择

地面跟踪注浆能有效填充盾构掘进过程中的地层空隙,减小注浆区地层的渗透系数及盾构开挖时的渗漏水量,能固结软弱和松散岩体,使地层的强度和自稳能力得以提高。在盾构掘进过程中,盾尾通过后应及时实施地面注浆,注浆量及注浆压力应根据监测情况适时调整,以确保沉降监测数据在可控范围内。注浆采用水泥单液浆,水灰比为 1:1,参考的注浆压力为 0.3~0.5 MPa,终止注浆压力为 0.5~0.8 MPa。

为了减小 4 号线结构沉降,盾尾通过第 1 环和

第 2 环、盾构继续向前掘进时,应立即进行地面袖阀管注浆,以减小盾构通过后的地面沉降量。注浆过程中,地面应配备 3 台注浆设备,实现多点同步注浆。注浆必须与盾构推进同步,以防止地面注浆浆液击穿盾尾或困住盾体。

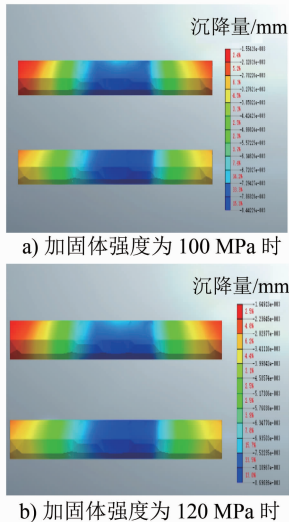


图 8 管棚实施注浆加固后加固体的沉降控制效果云图
Fig. 8 Nephogram of settlement control effectiveness of adding solid after implementing grouting reinforcement in pipe shed

4.2 地面跟踪注浆效果分析

本工程盾构下穿跟踪注浆共注入了 30.16 m³ 单液浆,其中第 3 排垂直孔的注浆量最大(8.45 m³)。以 17 号线右线下穿 4 号线为例,选取测点 D 的沉降数值拟合曲线,图 9 为测点 D 数值模拟沉降量与现场实测沉降量的对比。

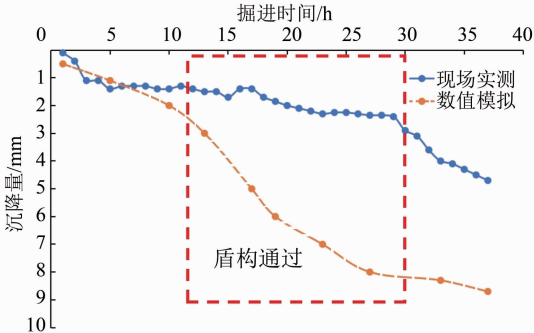


图 9 测点 D 数值模拟沉降量与现场实测沉降量的对比
Fig. 9 Comparison of numerical simulated settlement with field-measured settlement at measuring point D

由图 9 可知,在 17 号线右线下穿过程中:①测点 D 的最大沉降量为 4.85 mm,沉降主要发生在盾构通过阶段。②在盾构刀盘通过前,测点 D 的沉降量较小;盾构通过阶段,测点 D 的沉降量激增;脱出

盾尾后,测点 D 的沉降仍在持续,并在盾构通过 1 d 后沉降趋于稳定。③由于后续持续注浆,测点 D 的沉降有所减小。图 9 的数值模拟曲线显示,测点 D 的模拟最大沉降量为 8.95 mm,较现场实测曲线的最大沉降量大,这是由于数值模拟过程没有考虑卵漂石地层沉降滞后性的缘故。

5 结论

1) 富水卵漂石地层盾构掘进过程中易产生空洞,空洞的持续性坍塌将造成地面沉降的滞后性。该地层地面处沉降主要发生在盾体通过阶段和盾尾脱出后。

2) 由超长管棚注浆加固的数值仿真模型结果可知,采取 38 m 超长管棚与斜向注浆预加固的加固措施,既可提高既有地铁线结构底部土体的整体性,还可改善既有地铁线结构的受力状况,有助于控制既有地铁隧道结构沉降。

3) 注浆加固区强度超过 100 MPa 后,继续提高其强度,既有地铁线沉降量减小幅度不大。

参考文献

- [1] 彭光火. 大直径盾构下穿密集建筑沉降控制技术研究[J]. 路基工程, 2020(5): 222.
PENG Guanghuo. Study on settlement control technology of large-diameter shield tunneling underneath passing dense buildings[J].

Subgrade Engineering, 2020(5): 222.

- [2] 温克兵, 卢艳. 盾构下穿既有地铁隧道监测分析[J]. 现代城市轨道交通, 2017(8): 28.
WEN Keping, LU Yan. Monitoring and analysis of shield tunneling under-passing existing metro tunnel[J]. Modern Urban Transit, 2017(8): 28.
- [3] 甘晓露, 俞建霖, 龚晓南, 等. 考虑上浮效应的盾构下穿对既有隧道影响研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增刊 1): 87.
GAN Xiaolu, YU Jianlin, GONG Xiaonan, et al. Performance of existing tunnels due to shield under-crossing considering buoyancy effect[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S1): 87.
- [4] 李卫华, 张浩文, 孔德骏. 富水砂性地层中地铁盾构下穿铁路施工引起的沉降分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(5): 115.
LI Weihua, ZHANG Haowen, KONG Dejun. Settlement analysis caused by metro shield tunneling through railway in water-rich sandy stratum[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2020, 18(5): 115.
- [5] ZHANG Z, HUANG M. Geotechnical influence on existing subway tunnels induced by multiline tunneling in Shanghai soft soil[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 56: 121.

· 收稿日期:2021-11-02 修回日期:2022-03-30 出版日期:2024-04-10
Received:2021-11-02 Revised:2022-03-30 Published:2024-04-10
· 第一作者:刘文,高级工程师,379047775@qq.com
通信作者:姚翔川,工程师,605866412@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

国家铁路局拟在粤港澳大湾区进行轨道交通“四网融合”试点

2024 年 2 月 28 日,国务院新闻办就交通运输高质量发展服务中国式现代化有关情况召开新闻发布会。国家铁路局局长费东斌介绍,推动轨道交通“四网融合”是党中央、国务院做出的重大决策部署,也是交通强国的重要内容,旨在实现各种交通方式的连接贯通,更加方便人民群众的出行,也更好地服务区域经济社会发展。

当前,地铁和铁路在车辆制式、供电方式、信号制式和运输组织等方面标准各不相同,在基础设施“硬联通”和规则标准“软联通”方面还存在一些卡点和堵点。国家铁路局将重点做好三个方面工作,加快推动轨道交通“四网融合”发展:一是加强规划引领。以一体化和高质量发展为指引,指导地方政府进一步优化区域内城际铁路、市域(郊)铁路布局,谋划下一阶段轨道交通规划建设,推动构建高度融合的设施网络。二是加强标准支撑。以标准兼容和车辆统型为重点,研究制定轨道交通互联互通技术规范,制定/修订一批急需的装备技术、工程建设和运输服务标准。三是加强统筹协调。会同相关部门和地方政府,完善综合协同管理机制,强化行业监管,发挥企业主体作用,指导支持具备条件的地区和单位先行先试、探索经验。

费东斌表示,下一步,国家铁路局准备在粤港澳大湾区等重点地区进行试点,大力推动轨道交通的设施互联、票制互通、安检互信、信息共享,创新具有中国特色的轨道交通融合发展模式,打造轨道上的城市群都市圈,更好服务区域一体化发展。

(来源:经济观察网)