

新建盾构隧道下穿施工对既有铁路影响分析

肖 飞

(上海东华地方铁路开发有限公司, 200071, 上海)

摘 要 [目的] 新建盾构隧道下穿既有铁路施工会引起既有铁路路基的变形, 为了保证既有铁路的稳定和安全, 需采取合适的加固方案。[方法] 以上海机场联络线下穿李莘铁路工程为案例进行分析, 该工程采用的是“门式隔离桩+地层注浆”加固方案。根据数值模拟结果和现场监测数据, 分析了盾构隧道下穿施工对既有铁路的影响, 并评估了“门式隔离桩+地层注浆”方案的加固效果。[结果及结论] 盾构隧道下穿施工会引起既有铁路路基发生较大沉降。采用“门式隔离桩+地层注浆”加固方案可以有效控制盾构隧道下穿施工引起的既有铁路路基变形。根据数值模拟结果, 加固后, 既有铁路路基的最大沉降减小了 67%, 隧道上部的收敛变形减小了约 41%, 各变形均在规范规定的限值内。根据现场实测数据, 盾构施工引起的既有铁路轨道和路基的累计变形均满足规范要求。受盾构顶进影响, 盾构顶进侧的既有铁路路基及轨道变形波动较大。

关键词 城市轨道交通; 盾构隧道; 数值模拟; 路基沉降; 轨道变形

中图分类号 U231.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.12.032

Impact Analysis of New Shield Tunnel Under-passing Construction on Existing Railways

XIAO Fei

(Shanghai Donghua Local Railway Development Co., Ltd., 200071, Shanghai, China)

Abstract [Objective] The construction of new shield tunnels under-passing existing railway can cause deformation of the former railway subgrade. To ensure the stability and safety of the existing railway, appropriate reinforcement measures must be adopted. [Method] The Shanghai Airport Connection Line under-passing Lijiatang-Shenzhuang Railway project is analyzed as a study case, which adopts a reinforcement scheme involving 'portal isolation piles + ground grouting'. Numerical simulation results and on-site monitoring data are used to assess the impact of shield tunnel under-passing construction on the existing railway, and to evaluate the effectiveness of the 'portal isolation piles + ground grouting' reinforcement scheme. [Result & Conclusion] The shield tunnel under-passing construction may cause significant settlement of the existing railway

subgrade, while the 'portal isolation piles + ground grouting' reinforcement scheme effectively controls the above-mentioned railway subgrade deformation. According to numerical simulation results, the maximum settlement of existing railway subgrade decreases by 67% after reinforcement, and the convergence deformation on tunnel upper part decreases by approximately 41%. All deformations are within the limits specified by the relevant standards. On-site measurements confirm that the cumulative deformation of existing railway track and subgrade caused by the shield construction meets the regulatory requirements. However, due to the impact of shield tunneling, larger deformation fluctuations are observed in existing railway subgrade and track on one side of the shield tunneling.

Key words urban rail transit; shield tunnel; numerical simulation; subgrade settlement; track deformation

近年来,随着城市轨道交通建设的大规模发展,地铁盾构隧道下穿既有铁路的复杂施工越发常见,准确分析盾构隧道施工对既有铁路变形的影响,对保障既有铁路安全十分重要。

目前国内外已对盾构隧道下穿引起的上部结构变形和沉降展开大量研究。文献[1]通过实测数据,研究了西安地铁1号线盾构隧道下穿高速铁路轨道和路基的沉降规律。文献[2]采用FLAC3D软件及Peck沉降公式,研究了“D形梁+地层注浆”对下穿铁路沉降控制的可靠性。文献[3]基于深圳地铁大量穿越施工案例,分析了新建盾构隧道对既有隧道和地面的变形影响,并提出了新的经验公式估计既有隧道的沉降。文献[4]采用MIDAS有限元分析软件建模,计算盾构隧道施工引起的铁路路基和桩基的变形情况。文献[5]表明采用门式隔离桩防护可以有效减小盾构隧道施工对既有铁路变形的影响。关于门式隔离柱对盾构隧道施工的防护作用,目前国内的研究较少。

本文依托于上海市机场联络线穿越李莘铁路区段工程,采用有限元分析软件Plaxis3D进行模拟,并根据现场实测结果分析了新建盾构隧道施工

引起上方铁路的变形情况,研究了“门式隔离桩 + 地层注浆”方案的加固效果。

1 工程概况

1.1 项目简介

上海市机场联络线起于上海虹桥机场,止于上海浦东机场,采用盾构法施工。李莘铁路连接了李家塘站和莘庄站,是一条单线联络线。上海市机场联络线下穿李莘铁路路基范围为里程 K2 + 580—K2 + 640,区间盾构隧道与李莘联络线路基走向的交角约为 21.8° 。下穿位置主要土层物理力学性能指标见表 1,工程地质剖面图见图 1。工程采用开挖直径为 14.02 m 的泥水平衡盾构机开挖,管片外径为 13.6 m,其厚度为 0.55 m。

表 1 土体物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil

地层编号	层厚/m	天然密度/ (g/cm^3)	内摩擦 角/ $(^{\circ})$	黏聚力/ kPa	压缩模量/ MPa
④ ₁ 淤泥质粉质黏土	10.0	1.74	12.57	13.22	2.55
④ ₂ 淤泥质粉质黏土	6.7	1.80	16.23	15.33	3.63
⑤ ₁ 粉质黏土	4.9	1.98	16.00	42.00	6.98
⑥ ₁ 粉质黏土	5.4	1.94	31.38	10.04	10.69

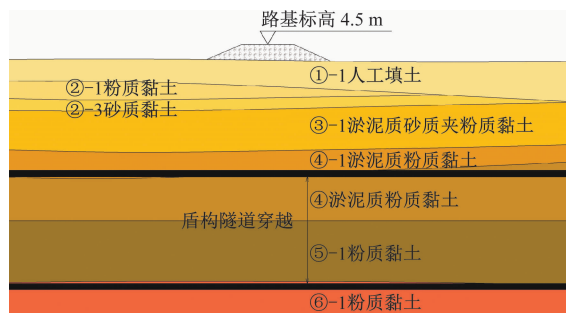


图 1 下穿位置工程地质剖面图

Fig. 1 Stratigraphical profile diagram of the shield under-passing location engineering

1.2 加固方案

将隔离桩之间通过顶部连梁相连,形成门架形状的大刚度隔离体系,可以进一步从源头上控制隧道内外地层变形。本项目汲取类似工程经验,在下穿铁路路基前后,采用直径为 1.0 m、间距为 1.2 m 门式隔离桩的防护方式,在两排隔离桩的桩顶冠梁处设置内撑,水平间距 6.0 m,内撑间距和角度在接近路基坡脚位置略做调整。冠梁断面尺寸为 1.0 m

$\times 0.8$ m。铁路路基北侧盾构隧道门式隔离桩延伸到里程 DK11 + 481.2 处至路基坡脚,铁路路基南侧盾构隧道门式隔离桩延伸至路基坡脚,并沿着铁路路基靠近沪昆高铁桥梁的一侧延伸约 38.0 m,与北侧隔离桩断开处平齐。隔离桩与沪昆高铁桥梁桩基的最小桩间距约为 11.0 m,如图 2 所示。

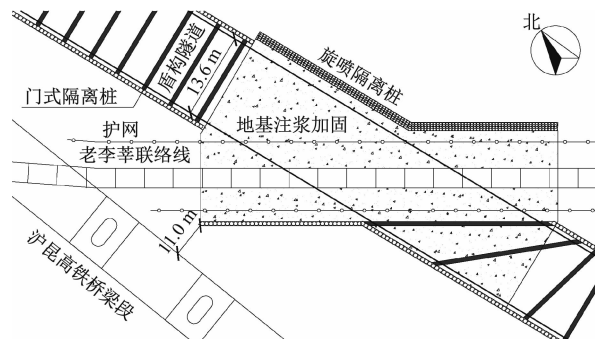


图 2 盾构隧道与李莘铁路交叉平面示意图

Fig. 2 Cross-sectional diagram of the intersection between the shield tunnel and the Lijiatang-Shenzhuang Railway

在隔离桩之间对土体进行注浆加固,加固区南北侧边界与路基和隧道方向均垂直,水平方向加固范围为隧道两侧外边缘 0.5 倍直径距离,并在加固区东侧边缘用 3 排 $\phi 0.8$ m@0.6 m 旋喷桩隔离。下穿位置立面图如图 3 所示。下穿处路基高为 2.0 m,路基顶面距离隧道顶面为 14.38 m。加固区竖向范围为隧道顶以上 7.0 m、隧道底以下 5.0 m,旋喷桩隔离区比加固区顶面和底面各长 1.0 m。

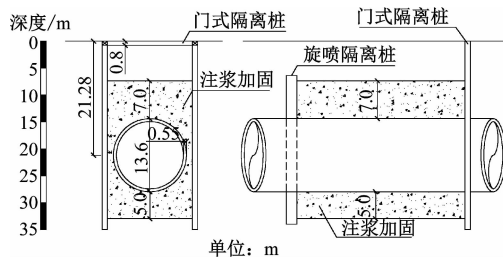


图 3 盾构隧道与李莘铁路交叉立面示意图

Fig. 3 Elevation diagram of the intersection between the shield tunnel and the Lijiatang-Shenzhuang Railway

2 既有铁路变形分析方法

2.1 数值模型建立

采用有限元分析软件 Plaxis 3D 对盾构隧道穿越进行数值模拟。土体采用小应变土体硬化本构模型,混凝土采用线弹性本构,隧道衬砌采用板单元模拟,隔离桩之间的内撑采用梁单元模拟。该模

型底部施加完全固定约束,两侧施加竖直滑动约束,模型沿 X 、 Y 、 Z 三个方向的尺寸分别为 200 m、160 m、65 m (X 为顺盾构隧道方向, Y 为垂直盾构隧道方向, Z 为竖向)。结构模型示意图见图 4, 采用的隧道支护与铁路结构参数见表 2。

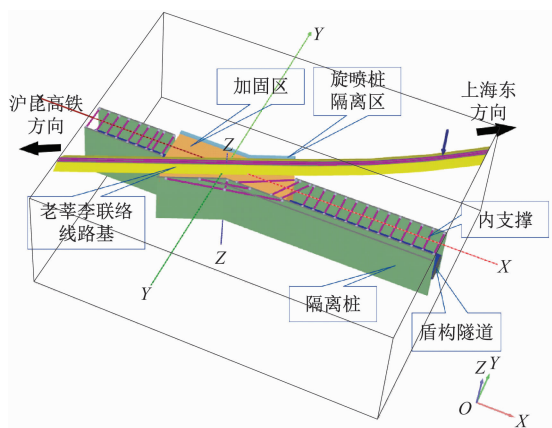


图 4 结构模型示意图

Fig. 4 Diagram of structural model

表 2 隧道支护与铁路结构参数

Tab. 2 Tunnel support and railway structure parameters

类型	厚度/m	重度/ (kN/m^3)	弹性模量/ MPa	泊松比
衬砌	0.55	25	30 000	0.2
注浆层	25.60	25	150	0.3
隔离桩		25	30 000	0.2
路基	2.00	20	180	0.2
轨道	/	/	210 000	0.3

该模型采用的施工顺序为:隔离桩及隔离桩间支撑施工;隧道盾构机刀盘到达老李李联络线路基北侧坡脚;隧道盾构机刀盘到达老李李联络线股道中线;隧道盾构机刀盘到达老李李联络线路基南侧坡脚;隧道贯通。

2.2 修正 Peck 公式验证

为验证本文所构建数值模型的可靠性,将地面沉降的数值模拟结果与 Peck 公式计算结果进行对比。文献[6]针对上海软土地区盾构隧道施工案例进行研究,提出了具有针对性的修正 Peck 公式,即:

$$S(x) = \alpha S_{\max} \exp\left(\frac{-x^2}{2(\beta i)^2}\right) \quad (1)$$

$$S_{\max} = \frac{\pi D^2 V_{\text{loss}}}{4i\sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

$$\frac{i}{D} = \frac{1}{2} \left(\frac{Z}{D}\right)^{0.8} \quad (3)$$

式中:

$S(x)$ ——距隧道中心轴线水平距离 x 处地面沉降值,单位 mm;

x ——某点距离隧道中心轴线的水平距离,单位 m;

S_{\max} ——地面沉降最大值,单位 mm;

α, β ——修正系数;

i ——沉降槽宽度,单位 mm;

D ——隧道直径,单位 mm;

V_{loss} ——单位土体损失率,单位 %;

Z ——隧道中心埋深,单位 m。

式(1)中修正系数 α, β 根据上海地区经验取值分别为 0.506 和 1.8,式(2)中 V_{loss} 根据参考文献[7]的上海地区经验取值为 0.5%。

在该模型中,可冻结内支撑、隔离桩,取消注浆加固后进行施工模拟,得到未加固时铁路周边地面横向沉降的竖直模拟计算结果,与修正 Peck 公式计算结果进行比较,结果如图 5 所示。

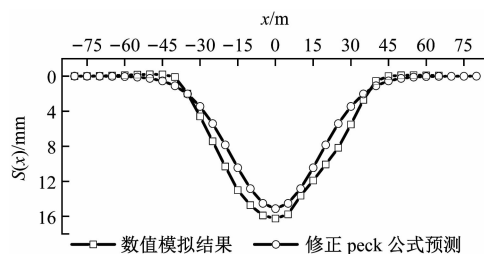


图 5 地面沉降的数值模拟结果与修正 Peck 公式计算结果对比

Fig. 5 Comparison between numerical simulation results and modified Peck formula calculation results of land subsidence

地面沉降的数值模拟结果与修正 Peck 公式计算结果的最大差值仅为 2.55 mm,最大值相差 1.12 mm,说明本文所建立的数值模型较为可靠。

3 数值模拟结果分析

为考察加固方案的效果,对加固与未加固工况下的数值模拟结果进行对比分析。根据文献[8]和文献[9],路基、轨道位移和隧道净空收敛监测预警值、报警值和控制值如表 3 所示。

1) 路基变形分析。如图 6 所示,铁路路基沉降变形呈现“V”字形沉降槽,符合 Peck 公式沉降槽横向分布基本规律;横向变形以 Y 轴方向为正,以铁路和隧道交叉点为界,两侧铁路路基均向隧道所在

方向变形。未加固时,路基最大沉降达 16.25 mm,最大横向位移达 5.08 mm;加固之后,路基最大沉降下降约 67%,最大横向位移下降约 76%。说明隔离桩围护和注浆加固效果显著,地层自稳能力得到了显著提高,各变形均满足表 3 所示控制要求。

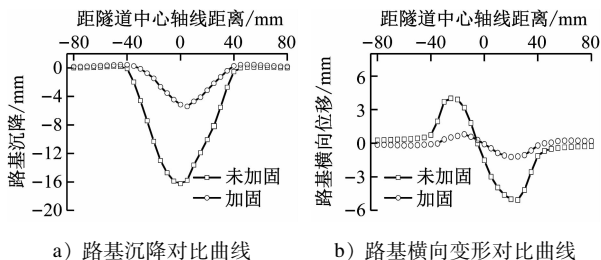


图 6 路基变形对比曲线

Fig. 6 Comparison curves of subgrade deformation

表 3 变形控制标准

Tab.3 Deformation control standard

监测项目	累计预警值/ mm	累计报警值/ mm	控制值/ mm
路基竖向位移	± 6.0	± 8.0	± 10.0
路基水平位移	± 4.2	± 5.6	± 7.0
轨道竖向位移	$+1.8$ -4.8	$+2.4$ -6.4	$+3.0$ -8.0
轨道水平位移	± 4.2	± 5.6	± 7.0
隧道净空收敛			34

注:根据参考文献[9],盾构隧道净空收敛监测控制值选取范围为 $0.2\% D_0 - 0.2\% D_0$,其中 D_0 为盾构隧道外径,本工程选取为 $0.25\% D_0$ 也即 34 mm。

2) 隧道横断面变形分析。以隧道与铁路交叉点正下方断面为例,对比分析加固前后隧道收敛变形情况。如图 7 所示,加固前隧道上下方向内收敛变形均较大,上下方最大变形分别为 27.29 mm 和 28.29 mm,呈横鸭蛋形,系隧道上方荷载较大、两侧荷载较小且土性软弱导致,隧道上下方均承受较大应力。实行门式隔离桩+地层注浆后,隧道下方最大变形增加约 3.00 mm,但是上半部分整体变形显著减小,最大变形仅为 15.96 mm,减小约 41%,说明加固方案对隧道上部收敛变形具有明显的改善效果。

4 监测结果分析

4.1 监测方案布置

本工程监测范围涉及隧道中心两侧约 80~100 m 内的李莘铁路的轨道和路基,对盾构上方进行重点监测。测点布置为每 5 m 一个断面,共计 18 个测

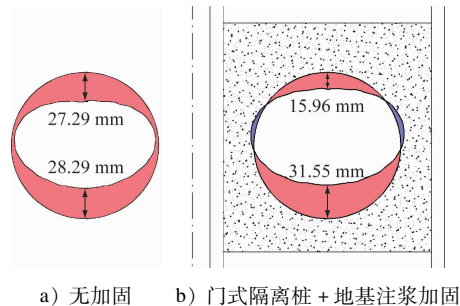


图 7 隧道横断面变形对比

Fig. 7 Comparison of cross-sectional deformation in tunnels

点,如图 8 所示。其中,GD11—GD16 为轨道测点,LJ11A—LJ16A 和 LJ14—LJ16B 为路基测点,监测曲线以各点开始监测时间为起始点。

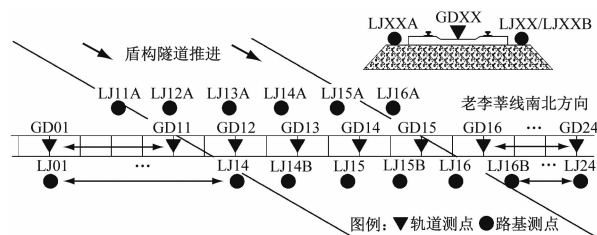


图 8 穿越处部分监测点布置示意图

Fig. 8 Layout diagram of some monitoring points in underpassing area

4.2 监测结果分析

1) 路基变形分析。盾构隧道穿越对李莘铁路路基变形位移影响时程曲线如图 9 所示。其中,水平位移“+”代表朝向盾构顶进方向,“-”代表盾构顶进反方向。由图 9 可见,受盾构顶进方向影响,测点 LJ11A、LJ12A、LJ13A、LJ14A、LJ15A 沉降和水平位移曲线变化较为明显。LJ14A 监测点累计沉降值最大,为 4.3 mm;LJ15A 监测点累计水平变形最大,为 3.7 mm。部分路基变形呈现出隆起趋势,原因可能是两次注浆压力过大以及盾构顶推力过大。当盾构离开下穿范围后,路基隆起逐渐减小。监测结果说明李莘铁路北侧路基受盾构顶进施工影响较大,所有变形均满足监测控制值。

2) 轨道变形分析。盾构隧道穿越对李莘铁路轨道变形位移影响时程曲线如图 10 所示。由图 10 可知,仅有测点 GD11、GD12 发生较大幅度的沉降和水平变形,呈现出与路基北侧测点一样的隆起趋势。各点沉降最终均在 ± 3 mm 之内,水平变形在 ± 6 mm 之内,满足变形控制要求。

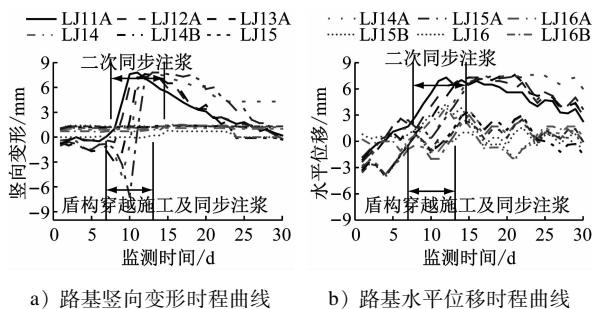


图 9 路基不同监测点变形曲线

Fig. 9 Deformation curves at different subgrade measuring points

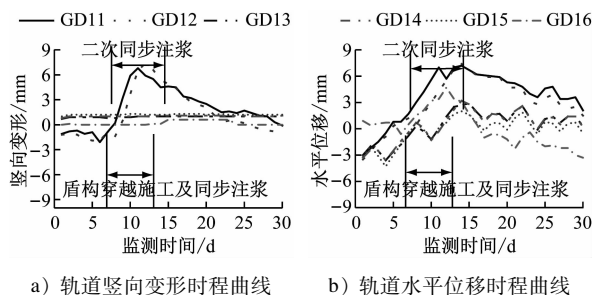


图 10 轨道不同测点变形曲线

Fig. 10 Deformation curves at different track measuring points

5 结论

1) 数值模拟结果表明,采用门式隔离桩+地层注浆加固方案,可使盾构隧道上方铁路路基的最大沉降减小约 67%,同时可使隧道上半部分的最大收敛变形减小约 41%。说明该加固措施对盾构隧道施工造成的周边地层扰动具有良好的控制效果,能够满足既有铁路安全运营要求。

2) 现场实测结果表明,盾构隧道下穿施工易造成顶进侧既有铁路轨道和路基发生显著变形,两者的隆起可能是两次注浆量过大和盾构挤压力传递造成的,其中的机理还需要进一步研究。路基的最大累计沉降和最大水平变形分别为 4.3 mm 和 3.7 mm,轨道的最大累计沉降和最大水平变形分别为 2.7 mm 和 4.5 mm,各变形均满足表 3 的控制要求。

参考文献

- [1] 李斯. 盾构隧道下穿高速铁路路基沉降监测与预警[J]. 铁道建筑, 2023, 63(11): 127.
LI Si. Monitoring and early warning of subgrade settlement for high speed railway undercrossed by shield tunnel[J]. Railway Engineering, 2023, 63(11): 127.
- [2] 戴志成. 超大直径盾构隧道浅埋下穿铁路变形及控制技术研究[J/OL]. 铁道标准设计, 2024-02-04[2024-04-28]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202307260001>.

doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202307260001.

- DAI Zhicheng. Research on deformation and control technology for shallow buried crossing of railway in super large diameter shield tunnels[J/OL]. Railway Standard Design, 2024-02-04[2024-04-28]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202307260001>.
- [3] JIN D, YUAN D, LI X, et al. Analysis of the settlement of an existing tunnel induced by shield tunneling underneath[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2018, 81: 209.
- [4] WANG H, LIU J, ZHANG L. The research and control measures of the influence on the complicated tie-line and the bridge under the shield tunnel[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 295(4): 042081.
- [5] 叶俊能, 酆亮, 郑翔, 等. 基坑开挖中门架式隔离桩对减小邻近地铁隧道影响的研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(11): 32.
YE Junneng, LI Liang, ZHENG Xiang, et al. Research on frame isolation pile to reduce the influence of foundation pit excavation on adjacent tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(11): 32.
- [6] 张彬. 基于上海地层多线叠交盾构施工的 Peck 公式之改进[J]. 土工基础, 2020, 34(6): 695.
ZHANG Bin. Improvement of peck formula in multi-line overlapped shield tunnel construction in Shanghai[J]. Soil Engineering and Foundation, 2020, 34(6): 695.
- [7] 吴昌胜, 朱志铎. 不同隧道施工方法引起地层损失率的统计分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(1): 19.
WU Changsheng, ZHU Zhiduo. Statistical analysis of ground loss ratio caused by different tunnel construction methods in China[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(1): 19.
- [8] 国家铁路局. 邻近铁路营业线施工安全监测技术规程: TB 10314—2021[S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2021: 25.
National Railway Administration. Technical specification for safety monitoring of operating railway infrastructures with adjacent constructions: TB 10314—2021[S]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd., 2021: 25.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 盾构隧道工程设计标准: GB/T 51438—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021: 79.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of shield tunnel engineering: GB/T 51438—2021[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021: 79.

· 收稿日期:2024-05-20 修回日期:2024-06-10 出版日期:2024-12-10
Received:2024-05-20 Revised:2024-06-10 Published:2024-12-10
· 通信作者:肖飞,工程师,359816150@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