

盾构隧道联络通道注浆加固范围及开挖方案分析*

汪 波¹ 王运周¹ 陈 凯²

(1. 中铁隧道集团三处有限公司, 518052, 深圳; 2. 南昌大学工程建设学院, 330031, 南昌)

摘 要 [目的] 盾构隧道联络通道矿山法施工中, 土体坍塌和地面沉降过大会危及工程安全, 而注浆加固范围及开挖方案直接影响地面沉降和既有隧道安全, 因此须对注浆加固范围和开挖方案进行研究。[方法] 以南昌轨道交通 4 号线坛子口站—丁公路南站盾构区间的联络通道为研究对象, 采用 PLAXIS 3D 有限元软件模拟不同注浆加固范围、不同开挖分区对隧道开挖的影响, 并将有限元模拟值与实际监测值进行对比分析。[结果及结论] 联络通道分区开挖能有效减小隧道、联络通道变形及地面沉降; 注浆范围越大, 隧道、联络通道变形及地面沉降越小, 当注浆加固范围大于 3 m 时, 地面沉降随着加固厚度增大而略有减小, 但变化很小。联络通道的注浆加固范围取 3 m 时经济安全, 完全满足设计要求。

关键词 盾构隧道; 联络通道; 注浆加固范围; 开挖方案
中图分类号 U455.48

DOI:10.16037/j.1007-869x.20230553

Analysis of Grouting Reinforcement Scope and Excavation Scheme for Shield Tunnel Link Passage

WANG Bo¹, WANG Yunzhou¹, CHEN Kai²

(1. China Railway Tunnel Group Sanchu Co., Ltd., 518052, Shenzhen, China; 2. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, 330031, Nanchang, China)

Abstract [Objective] During the construction of shield tunnel link passages using mining method, excessive soil collapse and land subsidence can pose significant safety risks. Since the scope of grouting reinforcement and the excavation scheme directly affect land subsidence and the safety of existing tunnels, it is necessary to analyze both the grouting reinforcement scope and the excavation strategy. [Method] Taking the link passage between Tanzikou Station and Dinggong Road South Station on Nanchang Rail Transit Line 4 as research object, the effects of different grouting reinforcement scopes and excavation partitions on tunnel excavation is simulated by PLAXIS 3D finite element software. The finite element simulation results are compared with actual monitoring data for validation. [Re-

sult & Conclusion] Partitioned excavation of link passage effectively reduces tunnel and passage deformation, as well as land subsidence. A larger grouting scope results in less deformation and subsidence; when the grouting reinforcement scope exceeds 3 meters, further increase in reinforcement thickness leads to only slight land subsidence reduction. A grouting reinforcement scope of 3 meters for link passage is both economically efficient and meets all safety and design requirements.

Key words shield tunnel; link passage; grouting reinforcement scope; excavation scheme

联络通道的开挖方法有矿山法、明挖法和盾构法等。采用矿山法暗挖联络通道的施工难度高、风险大。文献[1-6]通过数值模拟分析了联络通道力学行为。文献[7-11]研究了联络通道开挖对围岩变形的影响。文献[12-15]通过对复杂地层联络通道开挖的加固技术进行研究, 探索出 1 套相对安全可靠的加固方案。文献[16-18]针对岩脉构造发育岩石地层中的联络通道工程, 总结出 1 套完整的开挖支护方案。上述研究探索了开挖过程中联络通道和盾构隧道的变形、围岩压力及围岩加固方案, 但均未对联络通道加固范围及开挖方案进行相应研究。

南昌轨道交通 4 号线(以下简称“4 号线”)坛子口站—丁公路南站区间(以下简称“坛丁区间”)隧道所处地层为富水砂砾地层, 如何控制开挖过程中联络通道及盾构隧道的变形和地面沉降具有重大意义。

1 工程概况

坛丁区间联络通道及泵站位于铁路二村居民房空地下方, 上、下行线隧道直径均为 6 m。联络通道所处地层自上而下依次为: 素填土、粉质黏土、细砂、粗砂、砾砂、强风化泥质粉砂岩、中风化泥质粉砂岩。联络通道位于中风化泥质粉砂岩, 顶部埋深

* 国家自然科学基金项目(51268046)

26.3 m, 围岩等级为Ⅳ级。

通过方案比选采用注浆加固方法对联络通道周围土体进行加固改良。在掌子面及初期支护开挖轮廓线外3.0 m范围内进行全断面注浆加固。根据工程结构特点, 联络通道采取分区、分层方式进行施工。

2 联络通道计算模型及参数

2.1 计算模型

考虑施工影响范围、模型边界效应等因素, 模型边界按照左、右隧道中心分别向外扩展3~5倍隧道直径原则, 确定模型尺寸为77 m(X向) × 80 m(Y向) × 60 m(Z向)。岩土层均采用四面体实体单元, 管片、初期支护及二次衬砌均采用板单元, 模型底部采用固定约束, 侧面采用水平约束。计算模型如图1所示。

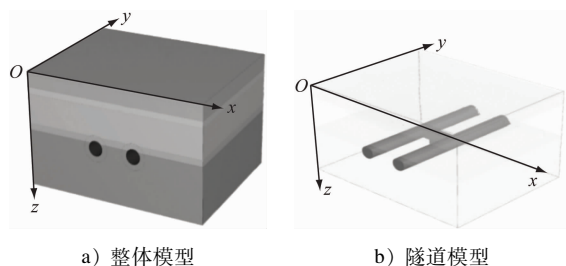


图1 计算模型

Fig. 1 Computational model

2.2 计算参数

岩土体采用HSS(小应变硬化)模型, 该模型参数包括11个HS(硬化土)模型参数和2个小应变参数。其中: HS模型的11个参数分别为标准三轴试验平均参考割线模量 $E_{ref,50}$ 、侧限压缩试验切线模量 $E_{ref,oed}$ 、卸载再加载模量 $E_{ref,ur}$ 、破坏比 R_f 、刚度参考应力 p_{ref} 、有效黏聚力 c' 、有效内摩擦角 φ' 、卸载重加载泊松比 ν_{ur} 、剪胀角 Ψ 、刚度应力相关幂指数 m 及正常固结状态下的静止土压力系数 K_0 , 小应变参数为参考初始剪切模量 $G_{ref,0}$ 和割线剪切模量衰减到初始剪切模量70%时的剪应变 $\gamma_{0.7}$ 。通过压缩试验和三轴剪切试验, 获得 c' 、 φ' 、 $E_{ref,oed}$ 、 $E_{ref,50}$ 、 $E_{ref,ur}$ 等5个参数。其他土层的有效黏聚力、内摩擦角和压缩模量参考地勘报告。

根据2组标准固结试验, 通过拟合轴向荷载-应变关系曲线(见图2), 可求出粉质黏土平均参考割线模量 $E_{ref,50}$ 为4.19 MPa。土样的轴向荷载-孔隙比关系曲线见图3。根据轴向荷载100~200 kPa下

的孔隙比, 计算得到粉质黏土的压缩模量 E_{s1-2} 为4.17 MPa。

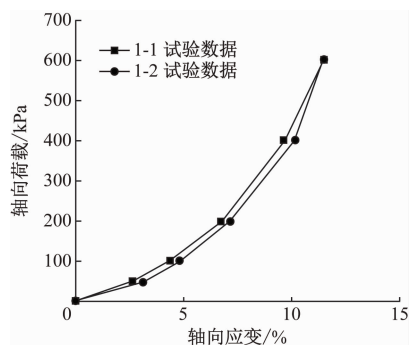


图2 土样的轴向荷载-应变关系曲线

Fig. 2 Curves of soil sample axial load-strain relation

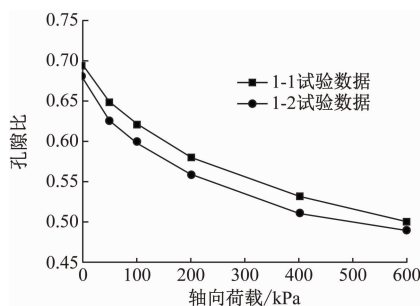


图3 土样的轴向荷载-孔隙比关系曲线

Fig. 3 Curves of soil sample axial load-porosity ratio relation

为获取土样的有效黏聚力 c' 和有效内摩擦角 φ' , 将粉质黏土在3种不同轴向荷载条件下进行固结排水试验, 并根据应力莫尔圆的公切线得到 $c' = 36.86$ kPa, $\varphi' = 26^\circ$ 。

根据三轴固结排水剪切试验, 在轴向荷载为100 kPa的条件下, 选取土样的轴向应力-应变关系曲线(见图4), 计算得到平均参考割线模量 $E_{ref,50}$ 为4.62 MPa, 破坏比 R_f 为0.758。

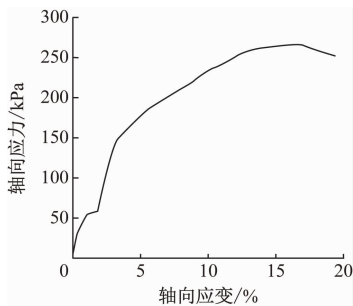


图4 三轴固结排水剪切试验下土样的轴向应力-应变关系曲线

Fig. 4 Axial stress-strain relation curves of soil sample under triaxial consolidated drained shear test

根据三轴固结排水加载卸载剪切试验,得到三轴加载卸载试验下土样的轴向应力-应变关系曲线,如图 5 所示。在轴向荷载为 100 kPa 的条件下,计算可得粉质黏土的 $E_{\text{ref,ur}}$ 为 28.9 MPa。

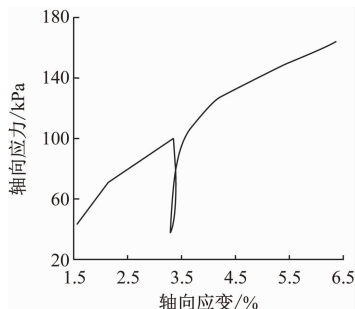


图 5 三轴固结排水加载卸载试验下土样的轴向应力-应变关系曲线

Fig. 5 Axial stress-strain curve of soil sample under triaxial consolidated drained loading and unloading test

土层小应变模型其他相关参数取值依据地勘资料。HSS 模型中,管片、联络通道初期支护与二

次衬砌的饱和重度均取 25 kN/m^3 , v_{ur} 为 0.2, $E_{\text{sl-2}}$ 分别取 35 500 MPa、28 000 MPa 和 31 000 MPa。土层及相关材料参数取值见表 1。

3 计算结果与分析

3.1 不同注浆加固范围下的沉降对比

通过对比注浆加固范围 2 m、3 m、4 m 及 5 m 下联络通道沉降及隧道沉降,得到图 6 和图 7。

由图 6 和图 7 可见:联络通道在掌子面及初期支护开挖轮廓线外 2 m、3 m 范围内进行全断面注浆加固时,其拱顶最大沉降值分别为 6.18 mm、4.13 mm,区间盾构隧道的最大沉降值分别为 4.29 mm、2.57 mm,联络通道拱顶和区间盾构隧道的最大沉降值分别减少了 33.2% 和 40.1%。联络通道在掌子面及初期支护开挖轮廓线外 3 m、4 m、5 m 范围内进行注浆加固时,沉降值变化不大仅略有减小。因此,综合考虑经济性,最佳注浆加固范围为 3 m。

表 1 土层及相关材料参数取值

Tab. 1 Values of soil layer and related material parameters

土层	$\gamma_{\text{sat}} /$ (kN/m^3)	v_{ur}	$c' /$ kPa	$\varphi' /$ ($^\circ$)	$E_{\text{sl-2}} /$ MPa	$E_{\text{ref, oed}} /$ MPa	$E_{\text{ref, 50}} /$ MPa	$E_{\text{ref, ur}} /$ MPa	$G_{\text{ref, 0}} /$ MPa	$\gamma_{0.7} /$ 10^{-4}	m	$p_{\text{ref}} /$ kPa
素填土	18.5	0.32	12.00	10	3.00	3.00	3.00	9.0	27.0	2	0.9	100
粉质黏土	18.7	0.31	36.86	26	4.17	4.19	4.62	28.9	86.7	2	0.9	100
细砂	19.6	0.29	2.00	28	18.00	14.40	18.00	54.0	162.0	2	0.9	100
粗砂	20.0	0.25	1.00	36	20.00	16.00	20.00	60.0	180.0	2	0.9	100
砾砂	20.5	0.25	1.00	38	40.00	32.00	40.00	120.0	360.0	2	0.9	100
注浆前的中风化泥质粉砂岩	23.9	0.20	350.00	32	1 000.00							
注浆后的中风化泥质粉砂岩	24.9	0.20	500.00	32	1 500.00							

注: γ_{sat} 为土体饱和重度。

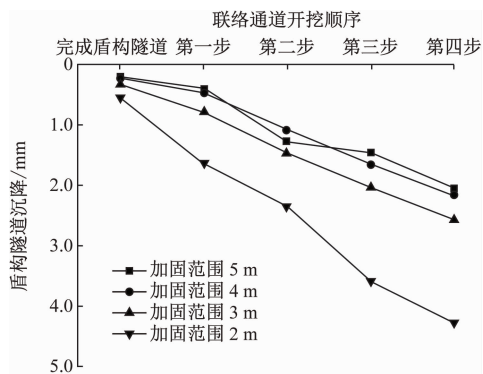


图 6 盾构隧道沉降-联络通道开挖顺序关系曲线

Fig. 6 Relation curves of shield tunnel settlement and link passage excavation sequence

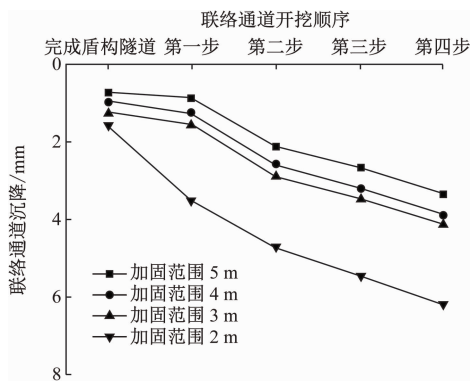


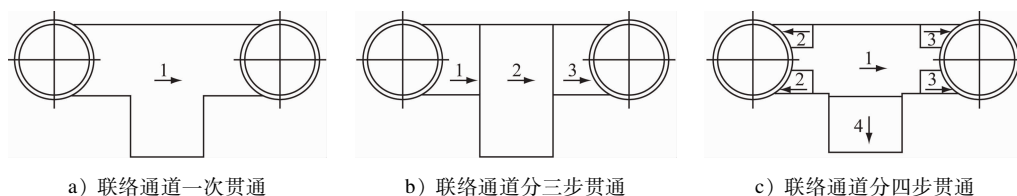
图 7 联络通道沉降-联络通道开挖顺序关系曲线

Fig. 7 Relation curves of link passage settlement and link passage excavation sequence

3.2 不同开挖分区下的沉降对比

联络通道分区施工(见图8)对联络通道及隧道沉降有较大影响。对联络通道一次性贯通、联络通道分三步贯通及联络通道分四步贯通等3种联络通道分区施工方案进行分析。其中:这3种方案下联络通道拱顶最大沉降值分别为6.52 mm、5.59 mm和4.15 mm,隧道最大沉降值分别为4.28 mm、4.03

mm和2.57 mm,地面最大沉降值分别为4.54 mm、3.57 mm和2.68 mm。联络通道采用分四步贯通时,其拱顶、隧道和地面沉降值分别比一次性贯通方案减少了36.3%、39.9%、40.9%,比分三步贯通方案减少了25.8%、36.2%、24.9%。综上,联络通道分四步贯通方案能有效减小竖向变形。



注:图中数字代表联络通道贯通的顺序。

图8 联络通道分区施工方法

Fig. 8 Sectional construction method for link passage

3.3 有限元模拟结果与监测结果对比

坛丁区间联络通道及隧道监测点布置如图9所示。有限元模拟数据为注浆加固范围3 m的数据。联络通道拱顶监测点GD-1累计沉降值为2.60 mm,有限元模拟值为2.57 mm;盾构隧道拱顶监测点SD-1累计沉降值为3.90 mm,有限元模拟值为4.15 mm;联络通道监测点TD1—TD9地面沉降值为0.31~3.32 mm,其中监测点TD8地面最大沉降值为3.32 mm,有限元模拟值为2.68 mm。由此可见,无论是隧道、联络通道拱顶,还是地面沉降的模拟值均与监测值很接近,说明建模合理、计算结果可靠。

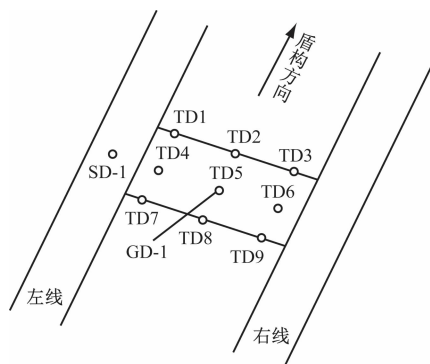


图9 坛丁区间联络通道及隧道监测点布置图

Fig. 9 Layout diagram of Tanzikou Station-Dinggong Road South Station interval link passage and tunnel monitoring points

4 结语

1) 当注浆加固范围为3 m时,地面、联络通道

拱顶和区间盾构隧道的最大沉降值分别减少了35.7%、33.2%和40.1%。当注浆加固范围大于3 m时,联络通道及区间盾构隧道沉降值随着注浆加固范围增大而略有减小,但变化很小。联络通道的注浆加固范围取3 m时经济安全,完全满足设计要求。

2) 联络通道采用分四步贯通方案相比一次性贯通方案和分三步贯通方案,更能有效减少联络通道沉降值及地面沉降值,安全性更高。

参考文献

- [1] 刘玉发, 邹玉强. 武汉地铁27号线联络通道矿山法施工数值计算分析[J]. 工程技术研究, 2020, 5(7): 15.
LIU Yufa, ZOU Yuqiang. Numerical calculation and analysis of mining method construction for connecting passage of Wuhan Metro Line 27[J]. Engineering and Technological Research, 2020, 5(7): 15.
- [2] 张付林, 刘正好, 朱瑶宏, 等. 机械法联络通道T接部位受力特性及弱化分析[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(增刊2): 116.
ZHANG Fulin, LIU Zhenghao, ZHU Yaohong, et al. Stress characteristics and weakening analysis of T-joint of connection passage by mechanical excavation method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(S2): 116.
- [3] 袁勇, 李若舟, 贺维国, 等. 岩石场地群洞地铁站联络通道地震响应分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(8): 182.
YUAN Yong, LI Ruozhou, HE Weiguo, et al. Seismic response analysis of link passage in rock site tunnel-group metro station[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(8): 182.
- [4] 黄毅, 刘正好, 马险峰, 等. 机械法联络通道管片切削试验

- 与数值模拟研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(增刊1): 93.
- HUANG Yi, LIU Zhenghao, MA Xianfeng, et al. Research on cutting test and numerical simulation of segment used in connection passage with mechanical excavation method[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(S1): 93.
- [5] 陶东军, 桂林, 李建望. 地铁隧道联络通道冻结施工引起地表变形实测分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(5): 69.
- TAO Dongjun, GUI Lin, LI Jianwang. Measurement analysis of surface deformation caused by freezing construction of connection passages in metro tunnels[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(5): 69.
- [6] 伍世龙, 杨登献, 谭远志, 等. 联络通道冻结工程中冻土力学性能研究及安全性评价[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(1): 92.
- WU Shilong, YANG Dengxian, TAN Yuanzhi, et al. Frozen soil mechanical properties research and safety evaluation of cross passage freezing engineering[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(1): 92.
- [7] 张治国, 杨轩, 赵其华, 等. 盾构隧道开挖引起地层位移计算理论的对比与修正[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊2): 272.
- ZHANG Zhiguo, YANG Xuan, ZHAO Qihua, et al. Comparison and correction of calculation theory of ground displacement caused by shield tunnel excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S2): 272.
- [8] 王军, 李海峰, 李克金, 等. 盾构隧道联络通道钢管片快速开口施工技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(增刊2): 551.
- WANG Jun, LI Haifeng, LI Kejin, et al. Rapid opening technology of steel pipe sheet for connecting gallery of shield tunnel[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S2): 551.
- [9] 姜智彬. 地铁联络通道受损管片修复方法的适应性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(3): 129.
- JIANG Zhibin. Adaptability of damaged segment repair system for subway connecting passage[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(3): 129.
- [10] 郑丽海, 王渡, 孙坚强, 等. 基于半逆作法深基坑施工对地铁车站变形影响分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊1): 1935.
- ZHENG Lihai, WANG Du, SUN Jianqiang, et al. Analysis of influence of deep foundation pit construction based on semi-reversed construction method on deformation of metro station[J]. Building Structure, 2021, 51(S1): 1935.
- [11] 谷拴成, 王博楠, 樊琦, 等. 综采面回撤通道围岩变形及矿压显现观测研究[J]. 煤炭技术, 2014, 33(5): 162.
- GU Shuancheng, WANG Bonan, FAN Qi, et al. Observational study of surrounding rock deformation and strata behaviors in dismantling channel of fully-mechanized face[J]. Coal Technology, 2014, 33(5): 162.
- [12] 岳丰田, 张水宾, 仇培云, 等. 地铁联络通道冻结加固技术研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(增刊2): 1341.
- YUE Fengtian, ZHANG Shuibin, QIU Peiyun, et al. Study on freezing reinforcement technology of subway connecting passage[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(S2): 1341.
- [13] 陈雪莹, 谭忠盛, 袁杰, 等. 富水圆砾地层盾构隧道联络通道加固技术研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊1): 105.
- CHEN Xueying, TAN Zhongsheng, YUAN Jie, et al. Case study on soil reinforcement method for the cross-passage construction of shield tunnel in water-rich round gravel stratum[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S1): 105.
- [14] 陈金刚, 郭强, 周海龙, 等. 地铁区间盾构与联络通道冻结加固同步施工技术方案及应用分析[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(1): 233.
- CHEN Jingang, GUO Qiang, ZHOU Hailong, et al. Construction scheme and application analysis of synchronous construction of subway shield tunnels and freezing reinforcement for cross passages[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(1): 233.
- [15] 王博. 兰州地铁砂岩地层联络通道冻结法加固技术分析[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(11): 116.
- WANG Bo. Analysis on freezing reinforcement technology of connecting passage in sandstone stratum of Lanzhou Metro[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(11): 116.
- [16] 潘娜娜, 颜治国. 岩石地层中矿山法联络通道开挖支护施工技术[J]. 城市建筑, 2019, 16(2): 110.
- PAN Nana, YAN Zhiguo. Excavation and construction technology of mining excavation method in link channel in the rocky strata[J]. Urbanism and Architecture, 2019, 16(2): 110.
- [17] 柳献, 高一民, 张蛟龙, 等. 机械法联络通道施工中主隧道的破洞响应分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 951.
- LIU Xian, GAO Yimin, ZHANG Jiaolong, et al. Structural response of main tunnel linings during construction of connecting aisle by means of mechanized drilling[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 951.
- [18] 王军, 黄万朋, 左建平, 等. 深井交岔点围岩流变扰动效应及钢管混凝土组合支架支护技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(2): 461.
- WANG Jun, HUANG Wanpeng, ZUO Jianping, et al. Rheological perturbation effect of rock and combined support of concrete filled steel tubes in deep coal mine roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(2): 461.

· 收稿日期:2023-05-17 修回日期:2023-06-13 出版日期:2025-06-10

Received:2023-05-17 Revised:2023-06-13 Published:2025-06-10

· 第一作者:汪波,工程师,1443509431@qq.com

通信作者:陈凯,硕士研究生,1783892104@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