

联络通道冻结工程中冻土力学性能研究及安全性评价

伍世龙¹ 杨登献¹ 谭远志¹ 郑 军² 郭书刚² 邢 乐²

(1. 中国中铁广州工程局集团有限公司, 511458, 广州; 2. 中煤光华地质工程有限公司, 056004, 邯郸//第一作者, 高级工程师)

摘 要 以广州地铁 7 号线北滘新城站—林头站区间 2# 联络通道及泵房冻结工程为背景, 开展冻土物理力学性能试验及冻结壁安全性评价。通过试验得到 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以及 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下粉质黏土及粉细砂冻土单轴抗压应力-应变曲线, 以及 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下粉质黏土及粉细砂冻土抗折强度。 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下, 粉质黏土单轴抗压强度平均值为 2.63 MPa , 弹性模量平均值为 82.93 MPa , 抗折强度平均值为 2.384 MPa ; $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下, 粉细砂单轴抗压强度平均值为 3.22 MPa , 弹性模量平均值为 49.3 MPa , 抗折强度平均值为 2.048 MPa 。利用 ANSYS 软件, 结合冻土物理力学性能参数, 模拟得到联络通道段及泵房冻结壁的第一主应力、剪应力以及位移。联络通道开挖后, 冻结壁安全系数满足要求, 能够保证联络通道暗挖施工过程的安全性和可靠性。

关键词 地铁; 联络通道; 冻结法; 力学性能; 数值模拟

中图分类号 U231+3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.01.018

Frozen Soil Mechanical Properties Research and Safety Evaluation of Cross Passage Freezing Engineering

WU Shilong, YANG Dengxian, TAN Yuanzhi, ZHENG Jun, GUO Shugang, XING Le

Abstract Based on the freezing project of 2# cross passage and pump house of Guangzhou Metro Line 7 Beijiao New Town station-Lintou station interval, the physical and mechanical properties test of frozen soil and the safety evaluation of frozen wall are carried out. The uniaxial compressive stress-strain curves of silty clay and silty fine sand frozen soil at $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ are obtained, as well as the flexural strength of silty clay and silty fine sand frozen soil at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. At $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, the average uniaxial compressive strength of silty clay is 2.63 MPa , the average elastic modulus is 82.93 MPa and the average flexural strength is 2.384 MPa . At $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, the average uniaxial compressive strength of silty fine sand is 3.22 MPa , the average elastic modulus is 49.3 MPa , and the average flexural strength is 2.048 MPa . The first principal stress, shear stress and displacement of the frozen wall of the cross passage section and the pump house are simulated by using

ANSYS software with the physical and mechanical parameters of the frozen soil. The safety factor of the frozen wall meets the requirements after the excavation of the cross passage, which ensures the safety and reliability of the underground excavation construction process.

Key words metro; cross passage; freezing method; mechanical properties; numerical simulation

First-author's address China Railway Guangzhou Engineering Group Co., Ltd., 511458, Guangzhou, China

当地层温度低于结冰温度时, 土层中的水会结冰, 形成含有冰层的冻土^[1]。冻土是一种包含固体土颗粒、未冻水、冰、空气等组分的复杂多相介质, 其状态会随环境条件而发生变化。因此, 冻土的性质比常规土更加复杂^[2-3]。冻土的力学性质不稳定, 确定冻土的力学参数在人工冻结法理论与实践具有重要意义^[4-6]。目前, 国内外学者对人工冻土力学性质的研究较多, 并取得了大量研究成果^[7-9]。

地铁联络通道是地铁工程中必不可少的重要工程, 设置在两条隧道中间, 可以起到逃生、排水及防火等作用^[10]。联络通道为高风险工程, 目前经常采用人工冻结法对地层进行加固, 在待开挖土体周围形成封闭的冻结壁, 然后采用矿山法暗挖施工^[11-12]。隔水性好、对周边环境影响小、加固后土体强度高突出优点使冻结法能有效克服含水地层地下工程施工中存在的安全隐患^[13-14]。冻结法已广泛地应用到隧道、深基坑、地铁联络通道以及紧急抢险修复等各项地下工程中。

广州地铁 7 号线一期工程西延伸线顺德段的北滘新城站—林头站区间设 3 座联络通道, 均采用人工冻结法加固地层, 矿山暗挖法施工。2# 联络通道及泵房所处地层复杂, 且埋深最深, 冻结壁厚度最大, 因此, 本文以 2# 联络通道及泵房为例, 开展联络通道冻结壁物理力学性能试验及安全性评价。

1 工程概况

2[#]联络通道及泵房中心距为 13.01 m,左线隧道中心标高为-26.88 m,右线隧道中心标高为-26.89 m,联络通道及泵房所处位置地面标高为+2.83 m。联络通道及泵房隧道中心埋深为 29.82 m,设计冻结壁厚度为 2.4 m,冻结帷幕平均温度≤-10 ℃。佛山市属亚热带季风性湿润气候区,雨量充足,年平均气温 22.1 ℃。地质勘察报告表明地表以下 1.0 m 地温为 26.6~27.2 ℃。

2[#]联络通道及泵房设计冻结壁立面图如图 1 所示。地层由浅至深依次为中粗砂、粉质黏土、淤泥质土、粉细砂和强风化含砾砂岩。取佛山地区典型

的粉质黏土及粉细砂为研究对象,研究其形成冻土的物理力学性能,土体基本物理参数见表 1。

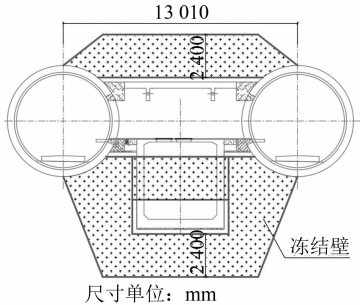


图 1 2[#]联络通道及泵房冻结壁剖面图
Fig. 1 Cross section of frozen wall of 2[#] cross passage and pump house

表 1 土样物理参数

Tab. 1 Physical parameters of the soil sample

岩土名称	天然密度 ρ /(g/cm^3)	天然含水量 $w/\%$	孔隙比 e	渗透系数 K /(m/d)	导热系数 λ /($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	比热容 C /($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)
粉质粘土	2.00	22.5	0.660	6.00	1.61	1.200
粉细砂	1.80	23.6	0.750	9.00	1.50	1.420

2 冻土单轴抗压强度试验

2.1 试验简介

冻土单轴抗压强度试验设备及夹具如图 2 所示。对粉质黏土及粉细砂进行-5 ℃、-10 ℃以及-15 ℃这 3 个温度下的人工冻土单轴抗压强度试验,加载应变速率保持恒定值 1%/min。冻土试样采用重塑方式制备,规格为 $\Phi 61.8 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。

2.2 试验结果及分析

试验得到在-5 ℃、-10 ℃以及-15 ℃条件下,粉质黏土及粉细砂冻土单轴抗压应力-应变曲线分别如图 3~4 所示。由图 3~4 可得到:

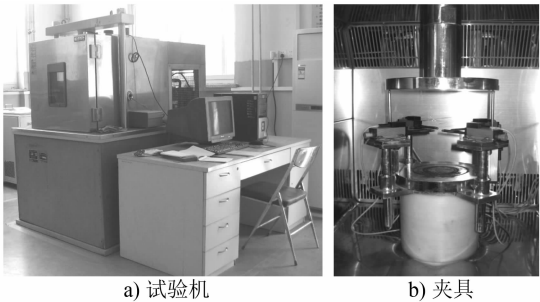


图 2 冻土单轴试验机及夹具照片
Fig. 2 Photos of the frozen soil uniaxial testing machine and fixture

1) 应力-应变曲线呈线性快速发展,达到一定值后会趋于缓慢,最后保持稳定或略有下降。

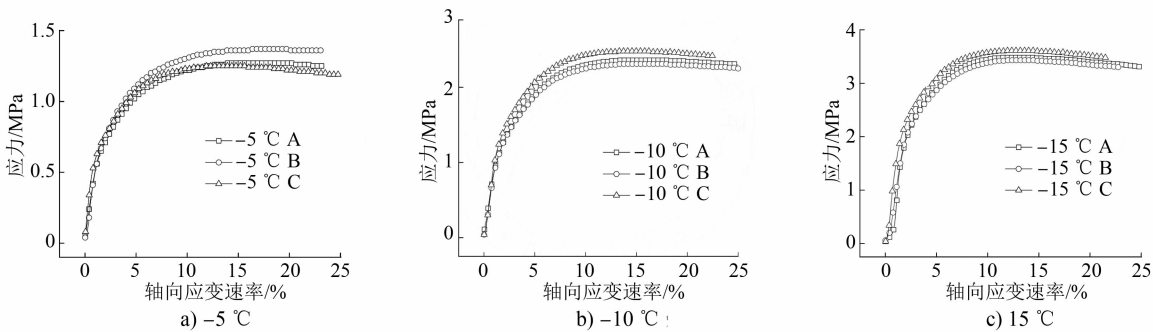


图 3 不同温度条件下的粉质黏土单轴抗压应力-应变曲线
Fig. 3 Uniaxial compressive stress-strain curve of silty clay at different temperatures

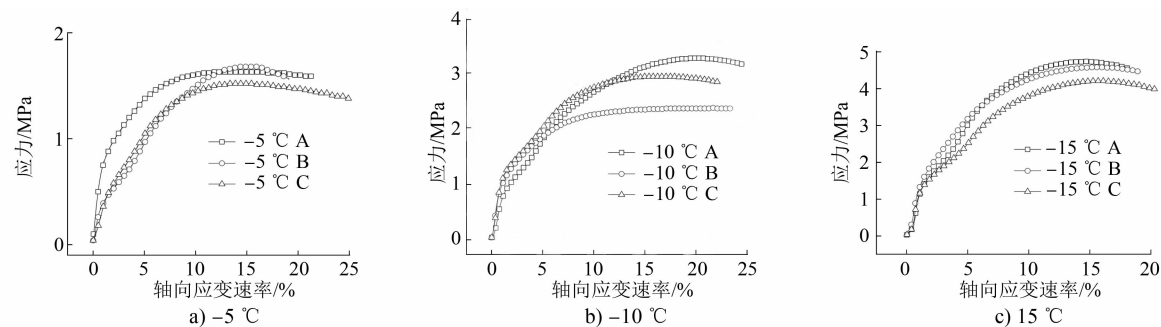


图 4 不同温度下粉细砂单轴抗压应力-应变曲线

Fig. 4 Uniaxial compressive stress-strain curve of silty fine sand at different temperatures

2) 相同土层、相同冻结温度下的试样其应力-应变变化曲线规律一致。但由于样本及试样不确定因素的影响,个别试样可能存在偏差。

3) 在弹性阶段,应力-应变线性相关;试样塑性屈服后其应力达到最大值;之后应变持续增大,而应力开始减小,表现出软化型。

根据试验结果可得到冻土单轴抗压强度值、弹性模量和泊松比,如表 2 所示。由表 2 可知:冻结温度越低,冻土的单轴抗压强度以及弹性模量均会增大;与粉质黏土相比,粉细砂在相同冻结温度下的单轴抗压强度以及弹性模量均较大。

表 2 冻土力学性能试验结果

Tab. 2 Test results of frozen soil mechanical properties				
岩性	温度/℃	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
粉质黏土	-5	1.46	44.17	0.26
	-10	2.63	82.93	0.22
	-15	3.89	132.64	0.21
粉细砂	-5	1.78	20.97	0.41
	-10	3.22	49.30	0.40
	-15	4.86	83.72	0.39

3 冻土抗折强度试验

依据冻土试验标准,在冻土试验机上开展冻土抗折强度试验,冻土抗折试验加载夹具如图 5 所示。对粉质黏土及粉细砂进行-10 ℃下的人工冻土抗折强度试验,控制加载试验力速率保持恒定值 60 N/s 进行加载,得到粉质黏土和粉细砂的抗折强度分别为 2.383 MPa 和 2.048 MPa。

4 安全性评价

4.1 数值模型及边界条件

2#联络通道及泵房设计冻结壁厚度为 2.4 m。为检验冻结壁安全性,利用 ANSYS 模拟软件对冻结壁安全性进行模拟分析。冻土物理力学参数通

过前述试验获得。根据对称性,建立 1/4 模型。边界条件为:模型外侧水平位移固定,模型对称面位移固定,模型顶部为自由边界条件,采用 M-C 本构模型。

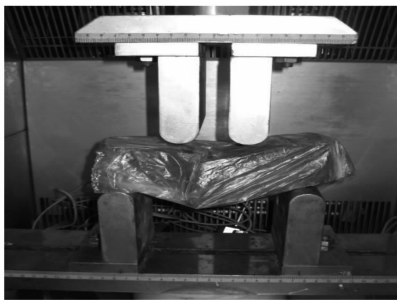


图 5 冻土抗折试验照片

Fig. 5 Set-up of frozen soil in bending test

4.2 结果分析

通过计算获得联络通道段及泵房冻结壁的第一主应力、剪应力和位移,以此判断联络通道开挖后,冻结壁独自承载条件下的安全性及可靠性。ANSYS 软件计算结果如图 6~7 所示和表 3 所示。

对联络通道段及泵房冻结壁应力状态和位移模拟结果进行分析可以得到:联络通道段上部冻土主要处于压应力状态,而下部冻土主要处于弯拉应力状态;冻结壁与隧道连接界面的上部位置局部会存在应力集中现象;冻结壁最大弯拉应力为 0.11 MPa,最大压应力达到 0.72 MPa。泵房底板冻土主要处于弯拉应力状态,最大应力值为 0.25 MPa;泵房侧壁冻土主要处于压应力状态,最大压应力值出现在侧壁与底板交接处,最大值为 1.05 MPa。冻结剪应力分布特征与上述结果相似,在冻结壁与隧道接触界面的上部出现最大剪应力,为 0.39 MPa。联络通道段最大变形位于联络通道中间底板位置处,达到 10.3 mm;泵房底部中间位移较大,最大达到 18.1 mm。

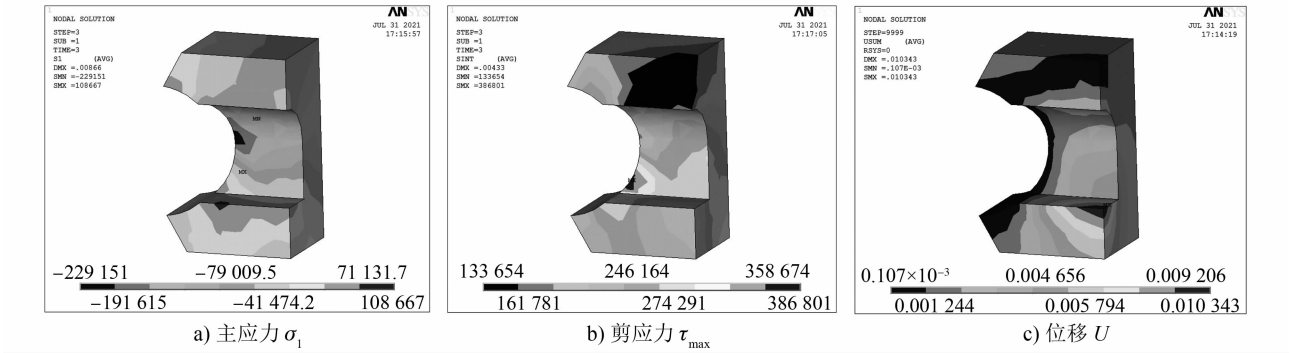


图 6 联络通道段模拟结果
Fig. 6 Simulation results of cross passage section

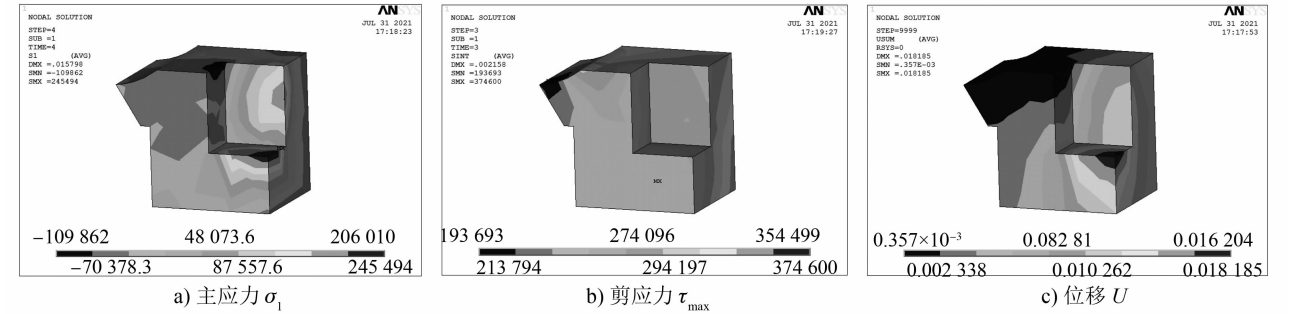


图 7 泵房段模拟结果
Fig. 7 Simulation results of pump house section

表 3 冻结壁最大应力和位移的模拟结果

Tab. 3 Simulation results of maximum stress and displacement of frozen wall

部位	最大弯拉应力		最大压应力		最大剪应力		最大位移/mm
	应力值/MPa	安全系数	应力值/MPa	安全系数	应力值/MPa	安全系数	
联络通道冻结壁	0.11	32.7	0.72	2.8	0.39	3.8	10.3
泵房冻结壁	0.25	14.4	1.05	1.9	0.37	4.1	18.1

根据模拟得到的冻结壁应力与变形结果,可进一步计算冻结壁的安全系数。冻结壁抗弯、抗压及抗剪安全系数均满足 DBJT 13-280—2018《通道冻结法技术规程》中给出的标准值,满足安全设计要求,计算结果是安全的。因此,冻结帷幕安全系数满足要求,能够保证暗挖施工过程的可靠性和安全性。

5 结语

本文通过室内试验获得不同冻结温度下粉质黏土及粉细砂冻土力学性能参数。采用 ANSYS 模拟软件对冻结壁应力状况和位移进行分析,并对开挖后冻结壁安全性及可靠性进行评估。如下研究结论可为类似工程提供参考。

- 1) 加载初期,冻土应力-应变曲线呈线性快速发展,达到一定值后会趋于缓慢,最后保持稳定或略有下降。弹性阶段,应力-应变为直线变化,达到塑性屈服后应力达到峰值;随后应变持续增大,应力降低,应力-应变呈软化型。
- 2) 联络通道上部冻土主要处于压应力状态,而下部冻土主要处于弯拉应力状态,冻结壁与隧道连接界面的上部位置局部会存在应力集中现象。冻结壁最大弯拉应力为 0.11 MPa,最大压应力达到 0.72 MPa。联络通道最大变形位于通道中间底板位置,为 10.3 mm;泵房底部中间位移较大,最大值为 18.1 mm。
- 3) 冻结帷幕安全系数满足要求,能够保证暗挖施工过程的安全性和可靠性。

参考文献

[1] 蔡强. 滨海深厚软土加固变形机理及工程运用[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.

CAI Qiang. Deformation mechanism and engineering application of the strengthened deep soft soil in the coastal[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2018.

[2] 杨岁桥,王宁宁,张虎. 高温冻土的蠕变特性试验及蠕变模型研究[J]. 冰川冻土, 2020(3): 834.

- YANG Suiqiao, WANG Ningning, ZHANG Hu. Study on creep test and creep model of warm frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020(3):834.
- [3] 刘子昕,张潮潮,周艳. 滨海软土地层人工冻土蠕变试验研究[J]. 四川建材, 2018(9):95.
- LIU Zixin, ZHANG Chaochao, ZHOU Yan. Study on creep test of artificial frozen soil in coastal soft soil layer[J]. Sichuan Building Materials, 2018(9):95.
- [4] 姜自华,姚兆明,陈军浩. 长期荷载对人工冻土单轴强度的影响[J]. 煤炭技术, 2017(2):47.
- JIANG Zihua, YAO Zhaoming, CHEN Junhao. Influence of long term load on uniaxial strength of artificial frozen soil[J]. Coal Technology, 2017(2):47.
- [5] ZHANG C C, LI D W, CHEN J H, et al. Research on the temperature field and frost heaving law of massive freezing engineering in coastal strata[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 5575940:1.
- [6] 黄星,李东庆,明锋,等. 冻土的单轴抗压、抗拉强度特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2016(5):1346.
- HUANG Xing, LI Dongqing, MING Feng, et al. Experimental study of the compressive and tensile strengths of artificial frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016(5):1346.
- [7] 蔡正银,吴志强,黄英豪,等. 冻土单轴抗压强度影响因素的试验研究[J]. 冰川冻土, 2015(4):1002.
- CAI Zhengyin, WU Zhiqiang, HUANG Yinghao, et al. Experimental study on the factors influencing the uniaxial compressive strength of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015(4):1002.
- [8] LI D W, YANG X, CHEN J H. A study of triaxial creep test and yield criterion of artificial frozen soil under unloading stress paths[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015(141):163.
- [9] LI D W, ZHANG C C, DING G S, et al. Fractional derivative-based creep constitutive model of deep artificial frozen soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020(170):102942.
- [10] 奚家米,熊元林,马新民,等. 地铁联络通道冻结法施工研究现状[J]. 科学技术与工程, 2020(17):6720.
- XI Jiami, XIONG Yuanlin, MA Xinmin, et al. Research status of freezing method construction of subway contact passage[J]. Science Technology and Engineering, 2020(17):6720.
- [11] 李鹏飞,贾航,马佳,等. 冻结法在富水砂层地铁联络通道施工中的应用[J]. 施工技术, 2020(增1):649.
- LI Pengfei, JIA Hang, MA Jia, et al. Application of freezing method in construction of connecting channel of subway in water-rich sand layer[J]. Construction Technology, 2020(S1):649.
- [12] 孙雪兵. 国内地铁首条越江区间联络通道结构设计[J]. 铁道工程学报, 2014(2):72.
- SUN Xuebing. The structural design of contact channel of the first domestic metro cross-river interval[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014(2):72.
- [13] 陈军浩,刘桐宇,张潮潮,等. 超长联络通道冻结温度场发展特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019(12):3059.
- CHEN Junhao, LIU Tongyu, ZHANG Chaochao, et al. Analyzing development characteristics of freezing temperature field to ultra-long connected aisle[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019(12):3059.
- [14] 李方政,李栋伟,韩圣铭. 液氮冻结帷幕水热耦合温度场数值分析及应用[J]. 地下空间与工程学报, 2013(3):590.
- LI Fangzheng, LI Dongwei, HAN Shengmin. Numerical analysis on water-thermal coupling temperature field of liquid nitrogen freezing wall and its application[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013(3):590.

(收稿日期:2021-09-09)

无人驾驶:北京地铁燕房线所有列车取消驾驶室

12月24日早晨,最后一列拆除间壁门的燕房线“海豚号”列车从阎村北车辆段出发,这条国内首条采用自主知识产权、列车无人值守(UTO模式)全自动运营的轨道交通线路,所有列车取消驾驶室。

“这司机视角的风景就是不一样!”作为燕房线“常乘客”的王先生发现了燕房线的“新变化”,原本用来隔开司机驾驶室的间壁门被拆除了。他赶紧举着手机来到了列车车头,从不同角度不停地拍照。“眼瞅着列车自己跑,这种新奇感和科技感,真的很难用言语描述,就是很棒!”

据北京轨道交通运营公司介绍,燕房线坚持自主创新路线,通过一手抓自主化核心技术研制,一手抓智能化升级试验,引领城市轨道交通由高速发展向高质量发展。目前线路在安全运营、行车效率、节能降耗、服务质量等方面的表现均优于以往非全自动运行线路,有效满足了运营需求,改善了乘车体验。

燕房线于2017年12月30日开通初期运营。2019年12月19日,燕房线实现最高等级(GoA4)的全自动运营。2021年6月21日,燕房线成功实现列车内无人值守(UTO模式)的全自动运营。再到2021年12月24日完成现有列车间壁门拆除工作,全面“取消”列车驾驶室。截至目前,燕房线已安全平稳运送乘客近2600万人次。

(摘自2021年12月25日《北京青年报》,记者 刘洋报道)