

既有管线影响下地铁车站基坑围护结构 局部冷冻加固技术研究^{*}

李文

(中铁十四局集团有限公司, 250014, 济南//高级工程师)

摘要 目的:邻近地铁车站基坑的既有管线往往会导致围护结构施工时基坑的局部支护能力被削弱,进而可能导致基坑失稳。为减小既有管线对基坑围护结构施工造成的影响,需深化研究既有管线影响下基坑围护结构局部采用冷冻加固技术的应用效果。方法:基于济南地铁 R1 号线大杨庄站附属结构工程,针对既有高压电缆管道影响基坑围护结构产生的一系列施工问题,提出了采用“地下连续墙+钻孔灌注桩”组合支护结构形式,并采用冷冻法进行局部加固的应对措施。建立了该基坑的简化数值模拟模型,对冷冻加固前及冷冻加固后基坑的稳定性进行对比分析,并进一步提出了冷冻层合理的宽度和厚度取值。结果及结论:冷冻加固前,地下连续墙与钻孔灌注桩因支护刚度差异较大,难以协调二者周边土体的变形,钻孔灌注桩支护处围护结构明显内挤、地面凹陷较大,地下水渗流严重;冷冻加固后形成冷冻隔水墙,钻孔灌注桩处土体的支护刚度增加明显,围护结构周边土体的水平变形、地面沉降大幅降低。增加冷冻加固的土体范围能有效抑制围护桩变形、地面沉降与地下水渗流,但冷冻层的长度与厚度超过一定范围后,其冷冻后效果并不明显。冷冻加固范围取 1.5 m 厚、9.0 m 宽较为合理。

关键词 地铁车站;基坑围护结构;既有管线影响;冷冻法

中图分类号 U231.3; TU472.9

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.07.029

Research on Local Freezing Technology for Metro Station Foundation Pit Retaining Structure under the Existing Pipeline Impact

LI Wen

Abstract Objective: The proximity of existing pipelines often weakens the local support capacity of the retaining structures during construction, potentially leading to foundation pit instability. To minimize the impact of existing pipelines on foundation pit retaining structures during construction, it is necessary to conduct an in-depth research on the application effect of local reinforcement using freezing technology. Method:

Based on the ancillary structure project of Jinan Metro Line R1 Dayangzhuang Station, focusing on the construction problems caused by the presence of high-voltage cable pipelines near the foundation pit retaining structure, a combined retaining structure of 'underground diaphragm wall + bored in-situ pile' is proposed, which adopts the freezing technology for local reinforcement. A simplified numerical simulation model of the foundation pit is established, and the stability of the foundation pit before and after freezing reinforcement is compared and analyzed. Furthermore, reasonable values for the width and thickness of the freezing layer are determined. Result & Conclusion: Before freezing reinforcement, the significant difference in stiffness between the underground diaphragm wall and bored in-situ piles made it difficult to coordinate the deformation of the surrounding soil. The support area of bored in-situ piles experiences significant internal extrusion, accompanied by substantial land subsidence and severe groundwater seepage. After freezing reinforcement, a frozen cut-off wall is formed, significantly increasing the support stiffness of the bored in-situ pile area and reducing the horizontal deformation and land subsidence of the surrounding soil around. Extending the freezing reinforcement range can effectively suppress deformation of the support piles, land subsidence, and ground water seepage. However, when the width and thickness of the freezing layer exceed a certain range, the post-freezing effect becomes less significant. A freezing reinforcement range of 1.5 m in thickness and 9.0 m in width is found to be reasonable.

Key words metro station; foundation pit retaining structure; existing pipeline impact; freezing method

Author's address China Railway 14th Bureau Group Co., Ltd., 250014, Ji'nan, China

针对基坑施工中冷冻法的加固效果,诸多学者做了广泛研究。文献[1]对实际工程进行分析,得

^{*} 山东省自然科学基金项目(ZR2020QE265);中国铁建股份有限公司 2020 年度科研计划课题(2020-B05)

出冻结法的适用性及其关键技术参数,并展望了人工冻结技术在地铁建设中的发展与应用。文献[2]分析了采用人工地层冻结法施工的风险,提出了冻结法施工的工程风险预控方法与技术。文献[3]基于在南京首次实施的地下工程人工冻结法施工案例,论述了冻结法在实际应用中取得的良好效果。文献[4]介绍了冷冻设计方案及实际应用效果。文献[5]重点分析了人工地面冻结可能产生的冻胀与解冻沉降问题。上述研究表明:采用冷冻法对维护结构进行加固,对提升地层稳定性、降低渗透性具有积极意义。但是,如果地铁基坑围护结构施工受邻近既有管线所在位置的影响,可能会导致局部围护结构被削弱,进而导致基坑稳定性下降、基坑变形过大、地面沉陷及结构渗漏水等问题发生。业内对该类工程冷冻加固技术的研究较少。

本文依托济南市轨道交通 R1 号线大杨庄站附属结构项目,通过数值模拟计算与现场监测 2 种方式,采用冷冻法对“地下连续墙 + 钻孔灌注桩”组合支护结构的加固机制进行研究,以期为管线影响地铁围护结构情况下的基坑施工安全提供借鉴。

1 工程概况

大杨庄站附属结构项目位于济南市经十西路与齐鲁大道交叉口。该项目基坑南北侧最大宽度约 46 m,基坑深度约 20 m。基坑区域周边管线众多,其中有 2 根高压电缆管道,其内部分别包含了 3 根品字形排列的 220 kV 高压电缆及 2 根上下排列的 10 kV 高压电缆。这 2 根高压电缆管道均从纵向穿越该基坑的围护结构,基坑及高压电缆管道的具体位置如图 1 所示。

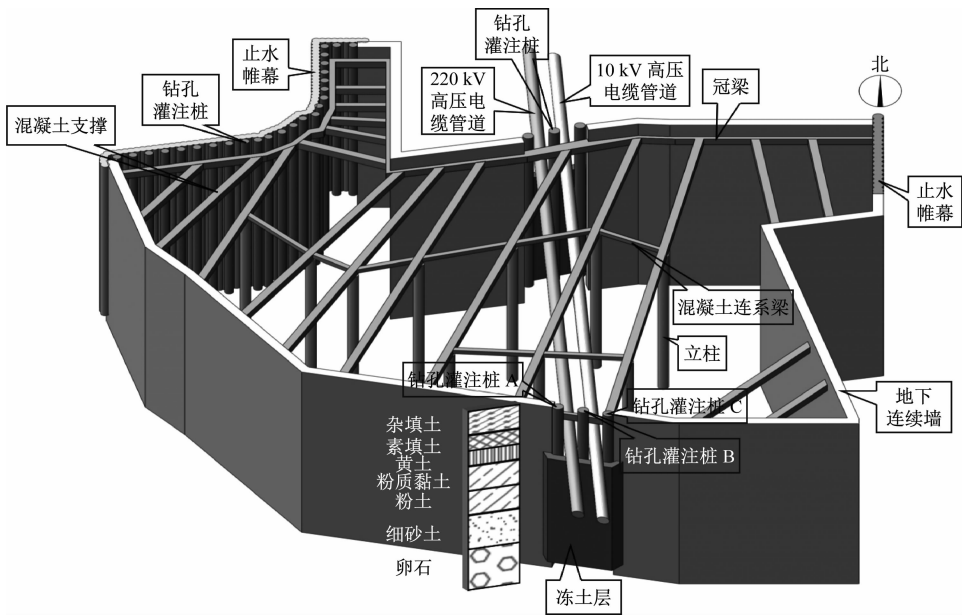


图 1 基坑及管线位置示意图

Fig. 1 Diagram of foundation pit and pipeline location

如图 1 所示,2 根高压电缆管道的埋深高度均在基坑开挖高度以内。为了不影响高压电缆的正常使用,邻近高压电缆处的围护结构不采用地下连续墙,而改用钻孔灌注桩。考虑到该基坑所处位置的地下水位约在 -5 m 处,桩与桩间并不能起到隔水作用,因而采用局部冷冻法施工。

2 冷冻加固措施

该项目的水平冷冻加固范围为 9 m,垂直加固范围从高压电缆管线 1 m 以下起至钻孔灌注桩底。

冻结壁厚度均为 1.5 m。

在该项目的冷冻土层处建立冻结站。冷冻层的积极冻结时间为 40 d,维护冻结时间为 60 d,冻结时间满足基坑开挖、主体结构施工及基坑回填所需的时间要求。采用冷冻法施工时,部分参数设置如下:①单孔盐水流量为 5 m³/h;②设计最低盐水温度为 -28 ℃;③冷冻层平均温度 ≤ -10 ℃;④冷冻层与地下连续墙交界面处温度 ≤ -5 ℃。

积极冻结 40 d 后实施基坑开挖,基坑开挖过程中要确保冻结土层的温度 ≤ -10 ℃。主体结构防

水结构施工完成后将冻结管封堵。为了防止解冻后土体发生较大的沉降,该项目采用了融沉注浆方式。

3 冷冻法对围护结构稳定性的影响

3.1 模型的建立

为了分析冷冻法对基坑围护结构稳定性的影响,本文基于大杨庄站附属结构项目的基坑实际情况,采用 Midas GTS NX 有限元软件建立了简化的数值模拟模型,如图 2 所示。基坑开挖深度取 20 m。由于基坑宽度较大,为提高数值模拟计算效率,根据对称性的原则,模拟的基坑开挖宽度取实际最大开挖宽度的一半(23 m)。模型尺寸为 100 m(长)×40 m(宽)×60 m(高)。地下连续墙的埋深是 26 m。

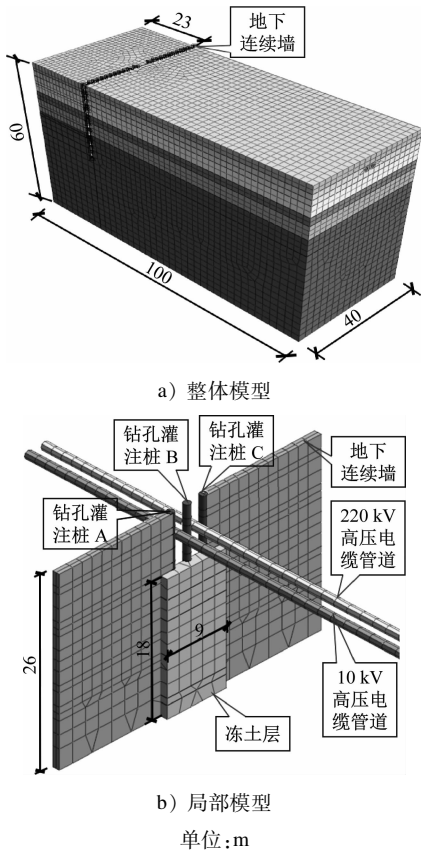


图2 大杨庄站附属结构项目的简化数值模拟模型
Fig. 2 Simplified numerical simulation model for Dayangzhuang Station auxiliary structure project

模型进一步对各土层的物理参数进行了简化,如表 1 所示。模拟土层采用 MMC(修正摩尔-库伦)模型,钻孔灌注桩的直径为 1.0 m,桩长为 26 m;地下连续墙厚 1.0 m,埋深 26 m(见图 2);钻孔

灌注桩、地下连续墙等结构采用线弹性模型。

表 1 模拟模型的各土层物理参数
Tab.1 Physical parameters of each soil layer in the simulation model

土层	厚度/ m	重度/ (kN/m ³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	压缩模量/ MPa
杂填土	3.0	19.0	9.0	9.0	9.0
素填土	2.0	17.0	8.0	15.0	10.0
黄土	2.0	18.0	23.0	17.0	25.0
粉质黏土	4.0	18.9	17.7	10.0	15.0
粉土	3.0	19.5	12.0	16.8	16.0
细砂土	5.0	19.8	0.0	32.0	25.0
卵石	41.0	21.0	0.0	40.0	50.0
冻土层	18.0	20.0	50.0	20.0	150.0

基坑施工过程中,地下连续墙与钻孔灌注桩的支护刚度、防水性能差异较大,为此,本文提取了钻孔灌注桩支护的 1-1 断面及地下连续墙支护的 2-2 断面,以分析冻结加固前后这 2 种支护结构的协调变形机制和渗流特性。模拟数据提取断面位置如图 3 所示。

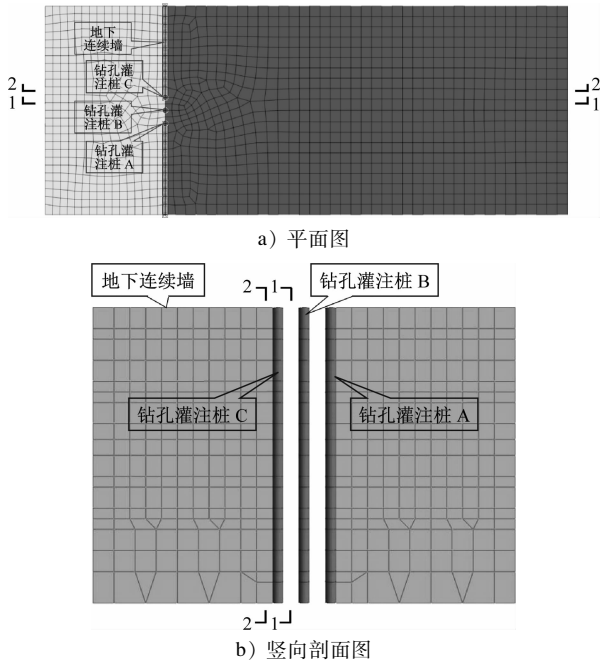


图3 模拟数据提取断面位置示意图
Fig. 3 Diagram of cross-section position extracted from simulation data

3.2 冷冻法加固施工前基坑稳定性分析

在未实施冷冻法加固施工前,本文分析了“地下连续墙 + 钻孔灌注桩”组合支护结构受基坑开挖

的影响,图 4 为模拟提取得到基坑开挖至基底时的整体变形图。由图 4 可知,基坑开挖至基底时,钻孔灌注桩间的土体产生了较大的水平位移,围护结构明显内挤。基坑外侧邻近钻孔灌注桩处的地面产生了较大的地面沉降,地面呈现凹陷趋势。

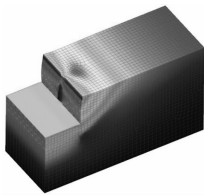


图 4 模拟提取得到基坑开挖至基底时的整体变形图
Fig. 4 Overall deformation diagram of foundation pit excavation to bottom extracted through simulation

进一步提取 1-1 断面与 2-2 断面处的地面沉降和地层塑性区数据,并进行对比,其结果如图 5 及图 6 所示。

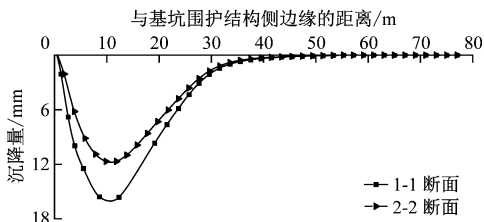


图 5 冷冻法施工前 2 个断面处的地面沉降
Fig. 5 Land subsidence at 2 sections before freezing method construction



a) 1-1 断面处 b) 2-2 断面处
图 6 冷冻法施工前 2 个断面处的地层塑性区
Fig. 6 Stratum plastic zone at 2 sections before freezing method construction

由图 5 及图 6 可知:钻孔灌注桩与地下连续墙支护结构的支护刚度差异较大,钻孔灌注桩处地层塑性区范围明显大于地下连续墙支护处地层塑性区范围;钻孔灌注桩处的地面沉降也较地下连续墙的地面沉降增加了 20%。可见,基坑施工过程中地下连续墙与钻孔灌注桩无法协调变形,钻孔灌注桩处成为基坑支护的薄弱部位。

钻孔灌注桩各桩间位置的支护防水性能较差,易出现渗漏灾害,为此本文提取了实施冷冻法施工前

基坑的地下水渗流云图,如图 7 所示。由图 7 可知:桩间区域的支护防水性能明显低于地下连续墙的支护防水性能,这导致钻孔灌注桩的桩间区域地下水渗流明显,而地下连续墙支护处基本不发生地下水渗流。地下水渗流容易导致钻孔灌注桩的桩间区域发生渗漏灾害,且地下水的渗流必然导致地层损失的增加,进而增大钻孔灌注桩支护处的地面沉降量。由此可见,钻孔灌注桩桩间支护处是基坑施工的薄弱部位,需对地层进行加固。

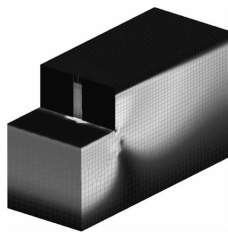
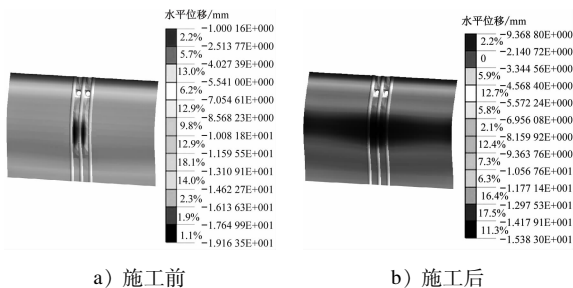


图 7 冷冻法施工前基坑地下水渗流云图
Fig. 7 Nephogram of groundwater seepage in foundation pit before freezing method construction

3.3 冷冻法加固施工对基坑稳定性的影响

冷冻法加固施工可以明显提升基坑的稳定性。本文通过数值模拟对比了冷冻法施工前后“地下连续墙 + 钻孔灌注桩”组合支护结构的水平位移,其结果如图 8 所示。由图 8 可知,采用冷冻施工前,最大水平位移发生在桩间,且围护结构明显挤出。冷冻法加固后钻孔灌注桩处地层稳定性增强,支护刚度增大,围护结构变形降低 20%。此外,冷冻施工后土体将部分土压力传递至地下连续墙,分担了原本钻孔灌注桩承担的荷载,地下连续墙与钻孔灌注桩变形更加协调。



a) 施工前 b) 施工后
图 8 冷冻法施工前后“地下连续墙 + 钻孔灌注桩”的水平位移对比
Fig. 8 Comparison of 'underground diaphragm wall + bored in-situ pile' horizontal displacement before and after freezing method construction

进一步对冷冻法施工前后“地下连续墙 + 钻孔

灌注桩”组合支护结构中 1-1 断面与 2-2 断面的地面沉降进行对比,其结果如图 9 所示。由图 9 可知:冷冻加固后地面沉降在 1-1 断面处降低了 35%;2-2 断面处地面沉降量降低了 24%。冷冻加固降低了钻孔灌注桩与地下连续墙支护刚度的差异性。可见,基坑施工过程中采用冷冻加固后,冷冻加固可以协调钻孔灌注桩与地下连续墙的变形。

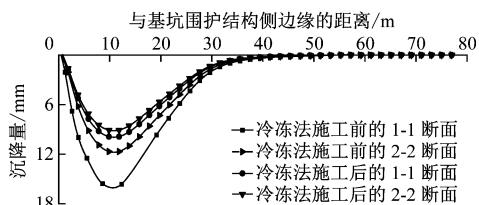


图 9 冷冻法施工前后“地下连续墙+钻孔灌注桩”的地面沉降对比

Fig. 9 Comparison of 'underground diaphragm wall + bored in-situ pile' land subsidence before and after freezing method construction

冷冻法施工加固后,加固土体有效阻止了地下水渗流,其地下水渗流云图如图 10 所示。由图 10 所知:冷冻法施工后,冷冻土体处的渗流速度有效降低,且与相对于基坑底面其余位置的地下水渗流速度相比,基坑底部钻孔灌注桩间区域产生的地下水渗流速度较小。冷冻施工后土体强度的提高对围护结构变形产生了有利的影响,冷冻土层还起到阻隔地下水的作用,降低了基坑开挖产生的不利渗流影响。

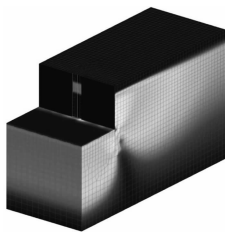


图 10 冷冻法施工后地下水渗流云图

Fig. 10 Nephogram of groundwater seepage after freezing method construction

3.4 冷冻加固范围对基坑稳定性的影响

由于合理的冷冻加固范围对基坑施工稳定性具有重要影响,需要进一步分析冷冻法加固范围对基坑变形的影响。数值模拟时,为了确定冷冻层厚度及宽度的合理范围,本文采用单一变量的对比模拟方式,先对冷冻层的宽度进行假定,在选取合理的厚度后,再选取合理的冷冻层厚度,以模拟分析

冷冻层宽度的合理范围。

3.4.1 冷冻层厚度的合理取值

当冷冻层宽度取 9.0 m 时,提取模拟计算得到的灌注桩 B 的水平位移(见图 11 a))及地面最大沉降(见图 11 b))。由图 11 可知,未进行冷冻加固时,灌注桩 B 的最大水平位移为 -19.16 mm(本文取基坑向内变形为负值);当冷冻层加固厚度为 1.5 m 时,灌注桩 B 的最大水平位移为 -15.38 mm,此时灌注桩 B 的最大水平位移较冷冻前减少了约 20%。

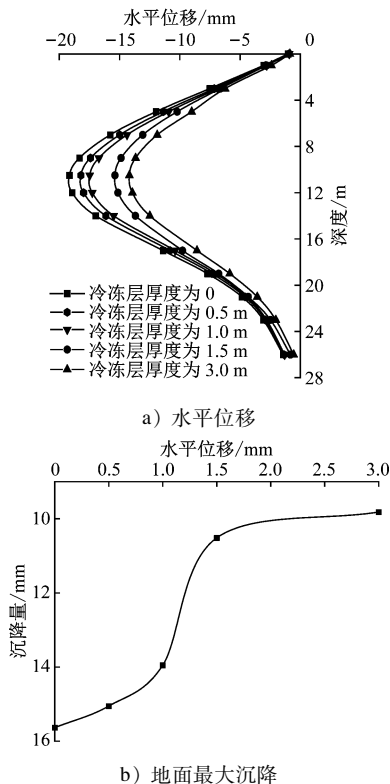


图 11 冷冻层宽度为 9.0 m 时不同冷冻层厚度下灌注桩 B 的水平位移及地面最大沉降

Fig. 11 Horizontal displacement and maximum land subsidence of bored in-situ pile B under different frozen layer thicknesses when the frozen layer width is 9.0 m

综合灌注桩 B 的水平位移与地面最大沉降模拟结果,得到结论如下:当冷冻加固厚度为 1.5 m 时,冷冻加固的效果较为明显;当冷冻加固厚度大于 1.5 m 时,冷冻加固效果的增加趋势逐渐减弱。因此冷冻层加固厚度取 1.5 m 较为合理。

3.4.2 冷冻层宽度的合理取值

当冷冻层厚度取 1.5 m 时,模拟不同冷冻层宽度(0 及 6 m、9 m、12 m)下灌注桩 B 水平变形及地

面最大沉降的变化情况,其结果如图 12 所示。由图 12 可知:冷冻法施工加固前,灌注桩 B 结构水平位移及地面最大沉降均达到最大;当冷冻层加固宽度为 6 m 时,灌注桩 B 结构水平位移及地面最大沉降得到较少的控制;当冷冻层宽度增加至 9 m 时,灌注桩 B 的结构水平位移及地面最大沉降得到较大的改善;当冷冻层宽度增加至 12 m 时,灌注桩 B 的结构水平位移及地面最大沉降相对较小,但冷冻加固效果的增加趋势逐渐减弱。因此冷冻层加固宽度采用 9 m 时较为合理。

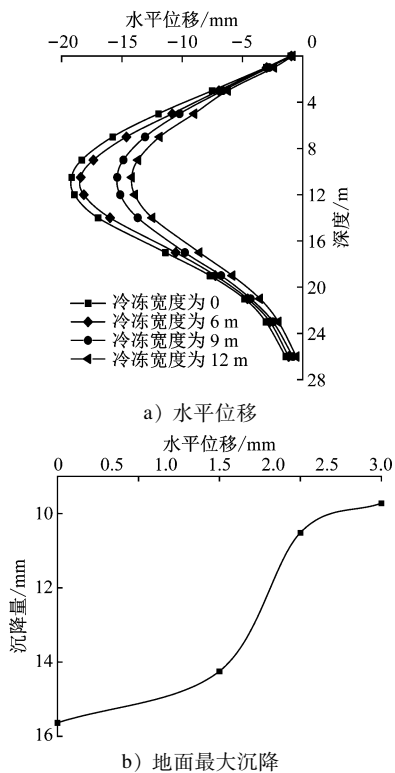


图 12 冷冻层厚度为 1.5 m 时不同冷冻层宽度下灌注桩 B 的水平位移及地面最大沉降

Fig. 12 Horizontal displacement and maximum land subsidence of bored in-situ pile B under different frozen layer widths when frozen layer thickness is 1.5 m

4 实际工程验证

依据模拟数值分析结果,该基坑项目现场的加固范围取 1.5 m 厚、9 m 宽。现场实施冷冻法加固后,地下水渗流被有效阻隔,杜绝了渗漏灾害。将冷冻法加固后现场监测得到的地面沉降与模拟计算得到的地面沉降进行对比,其结果如图 13 所示。由图 13 可知:冷冻法施工加固后地面沉降量处于较低水平,冷冻加固的效果良好;模拟计算结果与现场监测结果接近,验证了模拟计算结果的准确性。

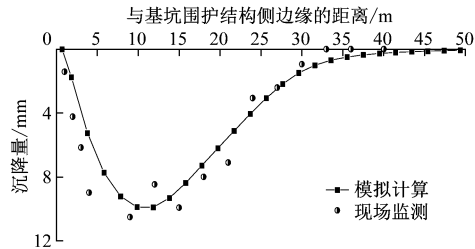


图 13 冷冻法施工后现场监测的地面沉降与数值模拟的地面沉降结果对比
Fig. 13 Comparison of field-monitored and numerical simulated land subsidence results after freezing method construction

5 结论

- 1) “地下连续墙 + 钻孔灌注桩”组合支护形式下,钻孔灌注桩与地下连续墙的支护刚度差异较大,组合支护形式变形不一致,钻孔灌注桩支护处结构土体明显内挤,地面沉陷情况较为严重。
- 2) 钻孔灌注桩处土体实施冷冻法加固后,其支护刚度得到提升。冷冻加固后形成的冷冻墙将部分水土压力分担至地下连续墙,能够有效协调钻孔灌注桩与地下连续墙附近土体的变形。
- 3) 增加冷冻加固的土体范围,能有效抑制围护桩变形、地面沉降与地下水渗流,但冷冻层的宽度与厚度超过一定范围后,其冷冻后效果并不明显。冷冻加固范围取 1.5 m 厚、9.0 m 宽较为合理。

参考文献

[1] 张婷, 杨平. 人工冻结法在地铁建设中的应用与发展[J]. 森林工程, 2012, 28(6): 74.
ZHANG Ting, YANG Ping. The application and development of artificial freezing method in the subway construction[J]. Forest Engineering, 2012, 28(6): 74.

[2] 鲁先龙, 陈湘生, 陈曦. 人工地层冻结法风险预控[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(12): 2308.
LU Xianlong, CHEN Xiangsheng, CHEN Xi. Risk prevention and control of artificial ground freezing (AGF)[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(12): 2308.

[3] 杨平, 余才高, 董朝文, 等. 人工冻结法在南京地铁张府园车站的应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊2): 388.
YANG Ping, SHE Caigao, DONG Chaowen, et al. Application of artificial freezing method in Zhang Fuyuan Station of Nanjing Subway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S2): 388.

[4] 刘祥, 赵玉善, 解文杰, 等. 水平冻结法在无锡地铁站盾构始发与接收洞门加固中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(1): 75.

(下转第 171 页)

的地铁过海隧道,同时也是我国穿越海域最长的地铁过海隧道,其地质条件和海域周边环境非常复杂。本文通过理论分析和综合比选等方法,对该海底区间隧道设计的关键技术进行了分析研究,得到结论如下:

1) 单一的施工方法难以适应长大区间海底隧道复杂多变的地质情况,因此需结合地质条件及各单一施工方法的适用范围,采用组合施工方案予以修建。

2) 海底隧道矿山法施工段应统筹考虑地层透水性和地下水腐蚀性,条件允许时尽量采用半包限量排放防水模式,以控制隧道的结构尺寸。

3) 当长大区间海底隧道无法在海域段内设置通风竖井时,可考虑在隧道内设置专用风道,利用岸边通风竖井排风,此时应采用分段纵向排烟设计方案。

4) 长大区间海底隧道给排水及消防系统的潜水泵和配套管路均应进行耐腐蚀处理,泵站水池容积需按应急工况考虑,即泵站在一定时间(一般为48 h)内无法排水时也可满足安全运营需求。

近年来,我国海底隧道建设发展较快,跨海段隧道长度越来越长。为进一步控制海底隧道的建设风险与工程投资,建议就离岸深水作业竖井平台开展深入研究,以提高水下隧道的地质勘察技术及长距离独头快速与安全掘进技术。

参考文献

- [1] 陈建芹,冯晓燕,魏怀,等. 中国水下隧道数据统计[J]. 隧道建设(中英文),2021,42(3):483
CHEN Jianqin, FENG Xiaoyan, WEI Huai, et al. Data statistics

(上接第158页)

LIU Xiang, ZHAO Yushan, XIE Wenjie, et al. Application of horizontal freezing technique in shield departure and reception portal reinforcement of Wuxi Metro station[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(1): 75.

of underwater tunnels in China[J]. Tunnel Construction, 2021, 42(3): 483.

- [2] 杜闯东. 狮子洋隧道盾构地中对接技术及实施[J]. 隧道建设, 2014, 34(8): 771.
DU Chuangdong. Shield docking technologies for Shiziyang Tunnel[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(8): 771.
- [3] 张健儒. 广深港客运专线狮子洋隧道泥水盾构泥浆综合管理技术[J]. 隧道建设, 2017, 37(增刊2): 189.
ZHANG Jianru. Comprehensive slurry management technology for slurry shield used in Shiziyang Tunnel on Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong Passenger-dedicated Line[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(S2): 189.
- [4] 陈永胜. 上海长江隧道火灾事故应急救援方法研究[J]. 武警学院学报, 2016, 32(10): 30.
CHEN Yongsheng. On the methods of fire accident emergency rescue in Shanghai Yangtze River Tunnel[J]. Journal of the Armed Police Academy, 2016, 32(10): 30.
- [5] 陈启伟. 台山核电取水隧洞工程泥水处理技术的应用[J]. 隧道建设, 2011, 31(1): 130.
CHEN Qiwei. Application of slurry treatment technology in construction of intake tunnel of Taishan nuclear power station[J]. Tunnel Construction, 2011, 31(1): 130.
- [6] 杜宝义, 宋超亚, 贺维国, 等. 海底隧道钻爆法与盾构法交接技术及应用[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(2): 208.
DU Baoyi, SONG Chaoye, HE Weiguo, et al. On transfer technology of D & B construction method and shield construction method at the interface of a subsea tunnel and its application[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(2): 208.
- [7] 胡哲睿. 地铁超长海底隧道给排水系统超压模拟及防护[J]. 给水排水, 2016, 52(10): 127.
HU Zherui. Overpressure simulation and protection of water supply and drainage system in super-long submarine tunnel of subway[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 52(10): 127.

(收稿日期:2022-02-14)

- [5] YANG P, KE J, WANG J G, et al. Numerical simulation of frost heave with coupled water freezing, temperature and stress fields in tunnel excavation[J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33(6-7): 330.

(收稿日期:2022-10-31)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821