

朱敏, 刘律, 武卫星, 等. 粉砂互层联络通道冻结法施工温度场和位移场演变分析[J]. 安全与环境学报, 2026, 26(6): 2293–2303.

ZHU M, LIU L, WU W X, et al. Analysis of temperature and displacement field evolution during the freezing method construction for interbedded silty sand cross passages[J]. Journal of Safety and Environment, 2026, 26(6): 2293–2303.

粉砂互层联络通道冻结法施工温度场和位移场演变分析*

朱敏¹, 刘律², 武卫星¹, 袁刚^{3,4}, 黄超群², 欧阳院平¹, 赵文博^{3,4}, 程红战^{3,4}

(1 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 武汉 430014; 2 武汉市市政建设集团有限公司, 武汉 430020;

3 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082; 4 地下空间开发先进技术与智能装备湖南省工程研究中心, 长沙 410082)

摘要: 由于粉砂互层联络通道冻结法施工易引起较大的冻胀融沉变形, 施工风险高, 因此掌握施工过程温度场与位移场变化规律对施工安全十分重要。研究基于武汉市轨道交通 12 号线联络线金后区间联络通道冻结施工工程, 利用 ABAQUS 软件构建联络通道冻结法施工三维数值模型, 探究冻结法施工过程中积极冻结期、维护开挖期以及自然解冻期内的温度场和位移场演变规律, 并进行参数敏感性分析。计算结果显示: 在积极冻结期内, 冻结壁温度下降速率随冻结时间的延长逐渐减小, 且地表隆起呈“倒 U 形”分布, 正中心隆起最大值为 14.1 mm; 在冻结开挖期内, 地表最大沉降为 -3.6 mm; 在自然解冻期内, 地表融沉“U 形”分布, 正中心融沉最大值为 -9.5 mm。此外, 研究发现随着冷媒温度的降低与导热系数的增大, 冻结壁平均温度达到 -10 ℃ 所需时间减少, 最低冷媒温度为 -30 ~ -25 ℃ 较为合理, 并且随着冻胀率及融沉率增大, 冻胀位移与融沉位移明显增大。

关键词: 安全工程; 粉砂互层; 联络通道; 冻结法施工; 数值模拟; 热力耦合

中图分类号: X947 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6094(2026)06-2293-11

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2025.1220

0 引言

随着城镇化的不断深入与发展, 我国一线及新一线城市人口密度逐年升高, 地上交通方式越来越难以满足城市高峰客流量的需求, 而城市地下交通的开发成为解决这一难题的最佳选择。为确保消防安全, 在上行隧道与下行隧道之间会设置联络通道, 以便在隧道发生紧急情况时疏散乘客至另一条安全的隧道。虽然联络通道施工的工程量较小, 但是施工安全风险大, 尤其对于富水敏感地层, 联络通道易出现涌水、涌砂、地面塌陷等事故, 同时还会影响地面周围建筑物, 造成不可逆的巨大伤害和工程损失。因此, 目前主要采用冻结法进行联络通道施工。

冻结法最初源于天然冻结现象, 随着人工制冷技术的持续进步, 如今已在各类实际工程中得到了极为广泛的应用。学者主要采用理论分析、数值模拟、模型试验、现场实测等方法研究施工过程中温度场与位移场的演变规律。1989 年, Duquenois 等^[1]率先提出热力学模型, 随后 Fremont 等^[2]对其予以

完善。2002 年, Konrad^[3]依据分凝势冻胀模型, 开发出二维数值计算程序 SP-2D, 并首次利用该程序对地铁隧道在冻结法施工期间的地层冻胀规律展开了分析, 为后续冻结法安全施工奠定了基础。2003 年, 程桦等^[4]提出了考虑热力耦合的数值分析方法, 借助 ADINAT 有限元程序, 对冻结法施工中的温度与应力进行耦合计算分析, 并引入考虑热力耦合计算冻结温度场的思想。乔京生等^[5]、王晖等^[6]以不同水平冻结法施工项目为依托, 运用 FLAC 软件对冻结法施工过程进行模拟, 分析了施工过程中温度场、位移场和应力场的变化, 为冻结法施工温度场与应力场计算奠定了基础。石荣剑等^[7]构建了地层冻结法加固的试验模型, 发现冻结壁形状与外圈冻结管布置形式较为接近, 冻结法施工的积极冻结工期不应超过 47 d, 为后续冻结法施工提供了参考。李培涛等^[8]利用 COMSOL 软件建立了数值模型, 并运用蒙特卡罗算法考虑冻结管偏斜与地层导热系数不确定性, 发现钻孔误差将导致冻结区域不均匀发展, 建议最大钻孔偏斜控制在 0.1 m 内。2022 年, Cai

* 收稿日期: 2025-07-11

作者简介: 朱敏, 正高级工程师, 硕士, 从事隧道工程、岩土工程的设计研究, 11439688@qq.com; 程红战(通信作者), 副教授, 博士, 从事盾构/TBM 智能掘进控制与运营隧道安全保护技术等研究, hzcheng@hnu.edu.cn。

基金项目: 国家重点研发计划课题(2023YFB2604402); 国家自然科学基金面上项目(52378395); 武汉市市政建设集团有限公司科技项目(wszky202216)

等^[9]考虑土壤的各向异性变形特性,提出一种能够准确模拟冻胀融沉位移的高精度数值分析方法,为后续预测冻结法施工位移变化奠定了基础。2024年,徐亚峰等^[10]第一次利用 ABAQUS 软件分析了超长倾斜联络通道冻结法施工过程中的位移与应力变化,发现地表的冻胀和融沉竖向位移均存在单向对称性,且隧道管片和倾斜联络通道衬砌应力分布非对称,为后续超长倾斜联络通道冻结法施工奠定了基础。

上述研究对冻结法施工研究很多,但针对高孔隙率、受工程施工及环境变化影响较大的粉砂互层冻结法施工研究不足,亟须分析施工过程中温度场与位移场的演变规律以保证施工安全。鉴于此,本文依托武汉市轨道交通 12 号线联络线金后区间联络通道冻结法施工工程,采用 ABAQUS 有限元分析软件建立联络通道冻结法施工过程的三维数值模型,对施工全过程中温度场与位移场演变规律进行模拟研究,涵盖积极冻结阶段、维护开挖阶段以及自然解冻阶段。通过对各阶段热力耦合响应的系统分析,揭示冻胀与融沉的时空发展特征。同时,选取冷媒温度、冻胀率及融沉率等关键参数,开展冻结法施工参数敏感性分析,通过定量研究不同参数变化对施工过程中温度场分布及地层位移响应的影响机制,揭示其作用规律,以期联络通道冻结法施工提供具有针对性与实用性的参考。

1 三维数值模拟

1.1 工程概况

依托武汉市轨道交通 12 号线联络线金桥大道站与后湖大道站区间联络通道工程,根据实际工程资料可知,该区间盾构隧道埋深为 15.3 m,外径为 6.2 m,管片厚度为 0.35 m,左右线中心线间距为 15 m,两线联络通道埋深为 16.5 m,区间地层从地表向下依次为杂填土、素填土、黏土、粉砂互层、粉细砂及强风化粉砂质泥岩,地下水位深度为 2.4 m,工程地质剖面图见图 1。

联络通道断面采用圆拱直墙式,净宽 3.8 m,净高 4.3 m。初期支护采用 C25 喷射混凝土,顶板、侧墙及底板厚度均为 0.25 m;二次衬砌采用 C40 模筑钢筋混凝土,顶板与侧墙厚度为 0.4 m,底板厚度为 0.45 m。采用冻结法施工,在联络通道外侧布置 52 个冻结孔,其中 4 个为透孔,冻结孔采用上 3 层布置,下两层布置,左右单层布置,冻结管均采用水平布置形式,并在冻结开挖区内布置 2 个泄压孔监测

2294

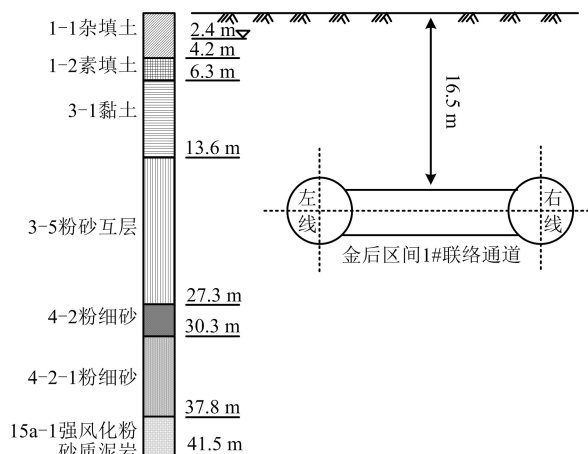


图1 金后区间联络通道工程地质图

Fig. 1 Engineering geological map of the Jinhou interval connection channel project

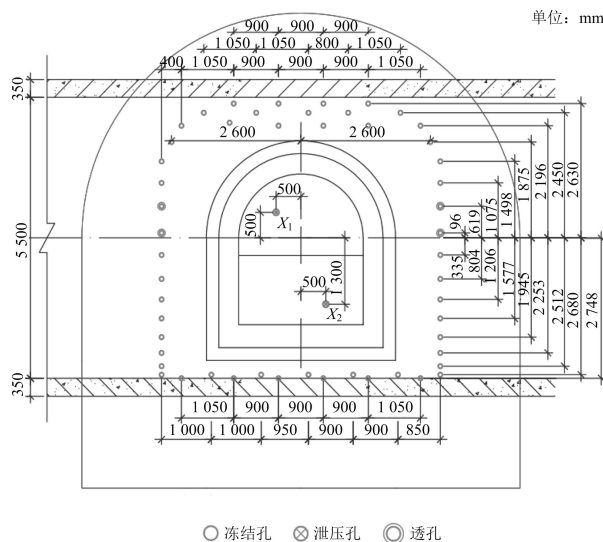


图2 联络通道冻结管布置方案

Fig. 2 Layout plan for the freezing pipe of the communication channel

冻结帷幕内压力变化和释放冻土压力,具体布置位置见图 2。

1.2 模型建立

由于该工程还未施工,因此模拟的冻结方案和联络通道尺寸都基于工程设计资料设定,从而保证模拟结果的合理性。根据金后区间联络通道冻结法的实际工程经验,其洞室开挖扰动产生的应力重新分布主要集中在洞室周边约 3~5 倍洞径范围内,为简化计算,联络通道周围各土层简化为一定厚度的水平土层,各土层为连续均匀的各向同性的摩尔库伦模型,盾构隧道衬砌、初衬、二衬简化为连续均匀

的理想弹塑性模型。此外,土体传热遵循傅里叶定律,主要考虑土体的热传导及冰水相变引起的相变潜热,忽略地下水渗流导致的温度损失及土体间温差引起的热辐射和热对流。利用 ABAQUS 软件建立尺寸为 50 m×40 m×20 m(长×宽×高)的三维数值模型,地层及构件网格均采用 C3D8R 六面体单元,单元类型在热分析中设置为 Heat Transfer 类型,而在力分析中设置为 3D Stress 类型。在相互作用中,Tie 接触是一种常用的简化方式,其假设接触面在法向和切向都完全连续,能有效传递应力和位移。这极大地简化了接触非线性问题,提高了复杂三维模型的计算效率和收敛性,且本文主要分析冻结帷幕的温度场发展以及开挖引起的地层位移响应,一般在冻胀量可控的情况下,冻土-结构界面的脱开不是影响整体变形的主要因素,因此,地层及构件之间采用 Tie 接触连接。整体有限元模型见图 3。

1.3 模型参数设置

根据岩土地勘报告,各层土与构件相关参数取值见表 1。由于在人工冻结法施工过程中,土中的自由水存在冰水相变且会释放潜热,因此还需设置联络通道周围地层中自由水的相变温度及相变潜热。由文献[11]可知,设定地层中自由水的固相温

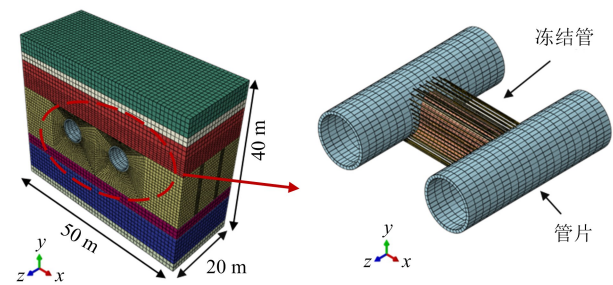


图 3 整体有限元模型
Fig. 3 Overall finite element model

度为 -2 ℃ 和液相温度为 -1 ℃ ,并设定开挖土层相变潜热为 87 214 J/kg。

此外,根据《隧道联络通道冻结法施工及验收规范》^[12],最低冷媒温度为 -30 ~ -28 ℃ ,选取最低冷媒温度 -28 ℃ 进行研究。冷媒温度须分级下降至最低冷媒温度,在积极冻结 7 d 时,冷媒温度应降至 -18 ℃ 以下;在积极冻结 15 d 时,冷媒温度应降至 -24 ℃ 以下。冷媒温度与时间关系见表 2。

1.4 模型初始条件与边界条件

考虑到在人工冻结法施工中主要由温度场变化导致土中发生水冰相变,并使得土体内部应力重分

表 1 各土层与隧道结构相关参数取值

Table 1 Values of parameters related to tunnel structure for each soil layer

材料	弹性模量/ MPa	泊松比	有效黏聚 力/kPa	有效摩擦 角/(°)	天然含 水率/%	孔隙 比	密度/ (kg·m ⁻³)	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
1-1 杂填土	5.0	0.35	8.0	18	32.52	0.98	1 830	1.50	1 650
1-2 素填土	5.0	0.35	10.0	8	33.54	1.00	1 820	1.55	1 600
3-1 黏土	5.5	0.33	19.0	11	35.67	0.99	1 860	1.62	1 470
3-5 粉砂互层	7.0	0.33	15.3	28	35.26	1.02	1 830	1.55	1 650
4-2 粉细砂	18.0	0.28	0	33	29.55	0.83	1 930	1.45	1 450
4-2-1 粉细砂	23.0	0.28	0	35	30.21	0.83	1 940	1.35	1 350
15a-1 强风化 粉砂质泥岩	43.0	0.27	10.0	38	28.52	0.56	2 250	1.20	800
冻结管	206 000.0	0.30					7 800	48.00	430
管片	34 500.0	0.22					2 550	1.91	1 050
初衬	25 000.0	0.20					2 500	1.28	970
二衬	33 500.0	0.20					2 500	1.28	970

表 2 冷媒温度与时间关系

Table 2 Relationship between refrigerant temperature and time

天数/d	[0, 3)	[3, 5)	[5, 8)	[8, 11)	[11, 17)	[17, 28)	[28, 50]
冷媒温度/℃	-2	-10	-18	-22	-24	-26	-28

布,而应力重分布对温度场影响较小,因此采用顺序热力耦合进行分析。本文先开展温度场的求解工作,待温度场求解完成后,将所得结果作为已知既定条件,求解应力场与位移场,设置4个分析步:初始地应力平衡、积极冻结期(先计算50 d 积极冻结温度场,再计算冻胀位移场)、联络通道开挖阶段与自然解冻期(先计算150 d 自然融化温度场,再计算自然融沉位移场)。

为简化初始温度场的设定,温度初始条件根据地温与深度的关系进行设置,见图4。设定0~3 m 内地层温度为21.9℃,深度>3 m 的地层温度设定为20.3℃。温度边界条件是:模型上表面、隧道管片与联络通道衬砌内侧的热对流换热系数分别为8.5 W/(m²·K)与2.1 W/(m²·K)。位移边界条件为四周法向约束,底部固定约束,上表面为自由面。

2 三维数值模拟计算结果分析

2.1 积极冻结期

在冻结法施工过程中,冻结帷幕达到规定厚度和平均温度时所需天数是重要的工程参数,这与联络通道埋深、冻结管布置方式、冷媒温度等有关。冻结帷幕厚度一般设为2 m,冻结帷幕平均温度低于-10℃^[13]。冻结帷幕的平均温度可选取某一沿冻结壁厚度扩展方向的监测断面,并取监测断面内多个温度监测点的平均温度进行表示^[14]。

$$t = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + \cdots + t_N}{N} \quad (1)$$

式中 t 为冻结壁平均温度,℃; t_i 为冻结壁内各监测点的温度,℃。

选取的监测断面位于冻结帷幕薄弱处,见图5。监测断面位于左侧单排冷冻管,监测点以1号温度

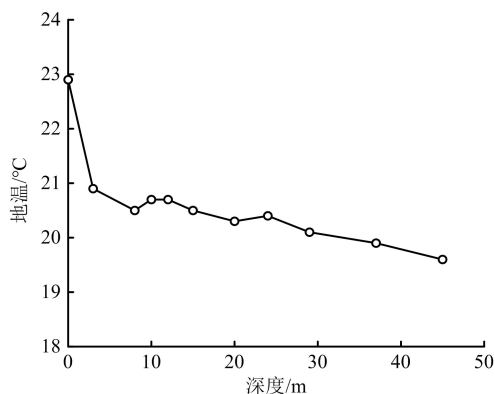


图4 地温与深度关系

Fig. 4 Relationship between ground temperature and depth

监测点为中心,沿冻结壁厚度方向两侧展开,两个相邻监测点的距离为250 mm。

不同温度监测点的温度随时间的变化情况见图6。随着冻结时间的延长,不同温度监测点的温度随时间逐渐降低,地层温度在积极冻结期前期,由于地层温度与冻结管中低温盐水的温度相差大,两者之间发生剧烈的热交换,温度下降速率最快;地层温度在0℃左右时,冻结锋面开始交圈,温度下降速率逐渐减小;随着冻结时间继续延长,降温速率进一步减小,温度趋于平稳。

随着积极冻结时间的延长,距离冻结管较近的温度监测点,其温度下降速度明显更快。位于冻结管正下方的监测点,温度下降速率在各监测点中最快;在监测断面左侧和右侧的监测点,随着与冻结管距离的依次增加,温度下降速率依次降低,最终冻结温度越来越高。此外,在冻结过程中,对于距冻结管相等距离的温度监测点,处于冻结管内侧的温度监测点的温度下降速率更快,最终冻结温度越低。

根据图6提取的温度监测点的温度随时间的变化情况,采用式(1)计算监测冻结壁1 m、1.5 m、2 m、2.5 m 的温度随时间的变化关系,见图7。冻结壁平均温度随时间延长逐渐降低,且温度下降速率越来越小,在0~10 d,冻结壁平均温度下降较快,在10 d之后,冻结壁平均温度下降速率明显减缓,在40~50 d,冻结壁平均温度逐渐稳定,变化幅度较小。此外,监测冻结壁厚度越大,冻结壁平均温度越高,温度下降速率越低。

在完成积极冻结场分析后,基于计算完成的50 d 冻结温度场分析冻结位移场。根据式(2)和(3)计算土层的冻胀系数,结果见表3。

$$\alpha(t_i) = \frac{i(t_{i+1}) - i(t_i)}{i(t)} \times \eta \frac{1 - \mu}{1 + \mu} \quad (2)$$

$$i(t_i) = 1 - K_i \quad i \in N^+ \quad (3)$$

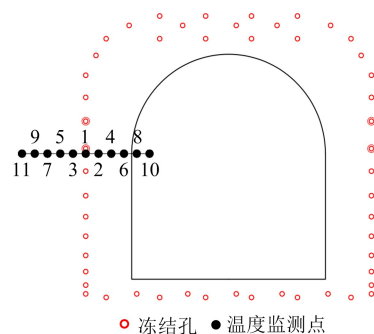


图5 温度监测断面

Fig. 5 Temperature monitoring cross section

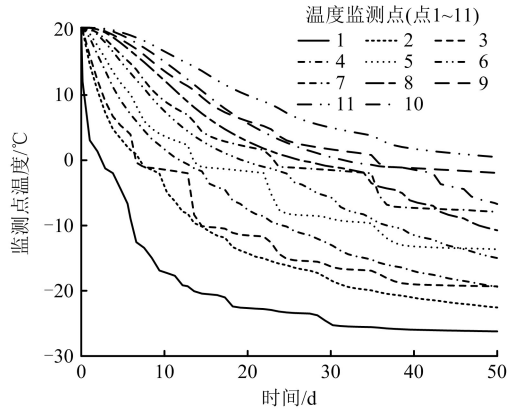


图 6 冻结温度场监测点温度与时间关系

Fig. 6 Relationship between temperature and time at monitoring points in the freezing temperature field

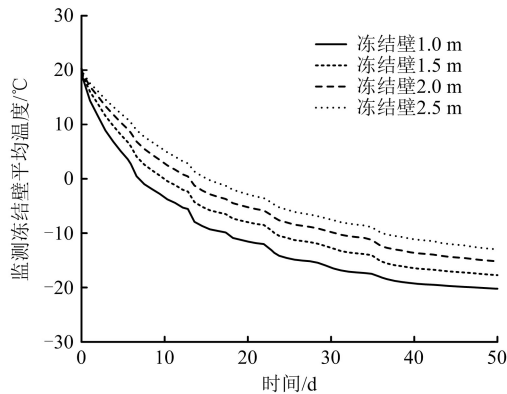


图 7 不同冻结壁厚度下温度随时间变化

Fig. 7 Temperature variation over time for different freeze wall thicknesses

式中 $\alpha(t_i)$ 为不同温度下的冻胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$, t_i 为某一处的温度, $^{\circ}\text{C}$; η 为冻胀率, %, 本文取饱和砂层冻胀率为 4.01%; μ 取饱和砂层的泊松比, 为 0.32^[15]; $i(t_i)$ 为不同温度下的相对冰含量; K_i 为不同温度下对应的温度修正系数^[16]。

在不同冻结时间下, 过地表中心竖直路径的冻胀位移与深度关系见图 8。联络通道上方地层产生垂直向上的冻胀位移, 联络通道下方地层产生垂直向下的冻胀位移; 联络通道内部地层的冻胀位移较

小, 这是由于拱顶冻结管与仰拱冻结管产生的冻结锋面方向相反并不断向外扩展, 在联络通道内部相互抵消, 使得联络通道内部地层冻胀位移较小。拱顶附近向上的冻胀位移与仰拱向下的冻胀位移较大, 在 50 d 时观测线拱顶附近产生的最大向上冻胀位移为 39.7 mm, 仰拱附近产生的最大向下冻胀位移为 -22.5 mm, 这是由于拱顶与仰拱附近冻结管与周围地层产生剧烈热交换, 冻土中大量孔隙水相变为冰, 从而加大了拱顶和仰拱的冻胀位移。

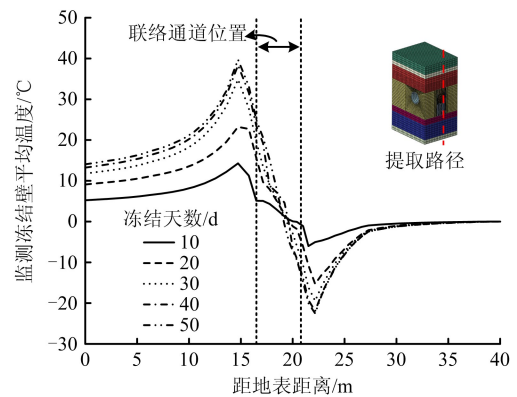


图 8 不同冻结时间下地层冻胀位移随深度变化关系

Fig. 8 Relationship between frost heave displacement and depth under different freezing times

距离拱顶正上方 1 m、3 m、5 m 处 A-1、B-3、C-5 与距离仰拱正下方 1 m、3 m、5 m 处 D-1、E-3、F-5 的冻胀位移随时间的变化关系见图 9。随着冻结时间的延长, 周围地层冻胀位移逐渐增加, 各观测点冻胀位移增长速率逐渐变缓; 在 10 ~ 20 d 内, 冻胀位移增长速率较快; 在冻结 20 d 后, 增长速率逐渐放缓; 在冻结 40 d 后, 几乎不再增长。距联络通道拱顶正上方和仰拱正下方相等的点, 拱顶正上方点的冻胀位移比仰拱正下方点的冻胀位移大, 这是由联络通道拱顶上部土层较仰拱下部土层更为软弱导致。

垂直于联络通道轴线方向的地表冻胀位移曲线见图 10。地表隆起呈“倒 U 形”分布, 靠近联络通道地表中心点的地方, 地表隆起值较大, 越远离地表中心点, 地表隆起值越小。在冻结 10 d、20 d、30 d、40 d、50 d 时, 联络通道正上方地表中心点隆起值分别

表 3 粉砂互层和饱和砂层冻胀系数

Table 3 Frost heave coefficient of interbedded silt and saturated sand layers

温度/ $^{\circ}\text{C}$	-0.2	-0.5	-1	-2	-3	-5	-10
$\alpha(t_i) / ^{\circ}\text{C}^{-1}$	0	-0.025 6	-0.007 7	-0.003 8	-0.003 8	-0.001 0	-0.000 4

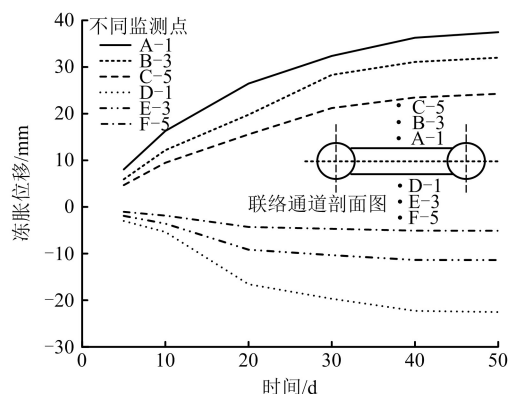


图9 联络通道附近点冻胀位移随时间变化关系

Fig. 9 Relationship between frost heave displacement near the communication channel and time

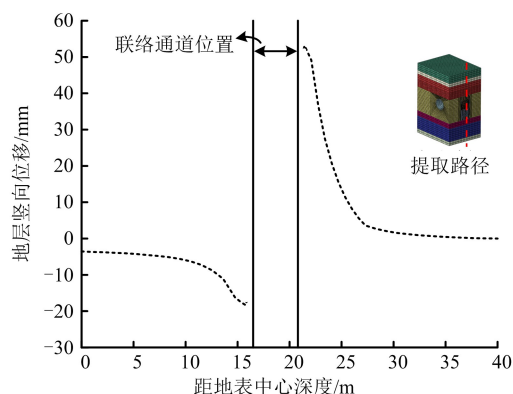


图11 冻结开挖位移随深度变化关系

Fig. 11 Relationship between frozen excavation displacement and depth

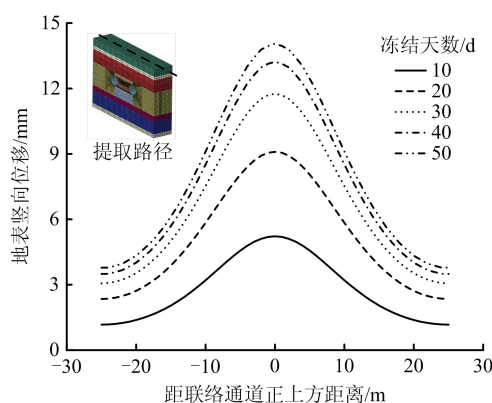


图10 地表冻胀位移曲线

Fig. 10 Surface frost heave displacement curve

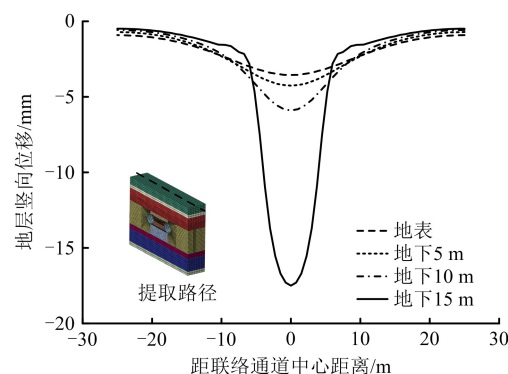


图12 不同深度下水平路径冻结开挖位移曲线

Fig. 12 Horizontal path freezing excavation displacement curve at different depths

为5.2 mm、9.1 mm、11.8 mm、13.2 mm、14.1 mm。

2.2 联络通道开挖阶段

基于积极冻结50 d的冻结温度场,采用全断面开挖方式开挖。过地表中心的竖直路径的冻结开挖位移随深度的变化关系见图11。在联络通道上方覆土层产生沉降位移,在联络通道下方土层产生隆起位移。位于拱顶附近的最大沉降位移为-18.4 mm,位于仰拱附近的最大隆起位移为53.2 mm,这是由于开挖土层较为软弱,开挖后底部仰拱未冻结,软弱地层更容易在卸荷载作用下产生较大的回弹变形,导致隆起值较大。

垂直于联络通道轴线方向不同深度下地层竖向位移曲线见图12。研究发现各深度地层沉降呈“U形”分布,并随着地层深度的增加,冻结开挖产生的竖向位移越大;地表面、地表以下5 m、地表以下10 m、地表以下15 m的最大位移分别为-3.6 mm、-4.3 mm、-5.9 mm、-17.5 mm。

2.3 自然解冻期

在冻土自然解冻过程中,位于边墙冻结管两侧距冻结管500 mm的融化温度场监测点的温度与时间关系见图13。在0~20 d内,监测点1与监测点2的温度迅速回升,并达到冰水相变区间 $[-2, -1]^{\circ}\text{C}$ 。在相变区间,温度回升速率明显减缓,在相变结束后,温度上升速率加快,且靠近联络通道一侧(对流换热边界)的监测点1的相变阶段更短,升温速率更快。

基于计算完成的融化温度场,根据式(2)计算得到的融沉系数见表4。

过地表中心的竖直路径不同自然解冻时间下地层融沉位移随深度的变化关系见图14。在联络通道上方覆土层产生垂直向下的融沉位移,在联络通道下方土层产生垂直向上的融沉位移;拱顶附近向下的融沉位移与仰拱向上的融沉位移较大。在自然融化120 d时,拱顶附近产生的最大向下融沉位移

表 4 粉砂互层融沉系数

Table 4 Melting coefficient of interbedded silt and sand

温度/℃	-0.2	-0.5	-1	-2	-3	-5	-10
$\alpha(T_i)/^{\circ}\text{C}^{-1}$	0	-0.022 9	-0.006 9	-0.003 4	-0.003 4	-0.000 9	-0.000 3

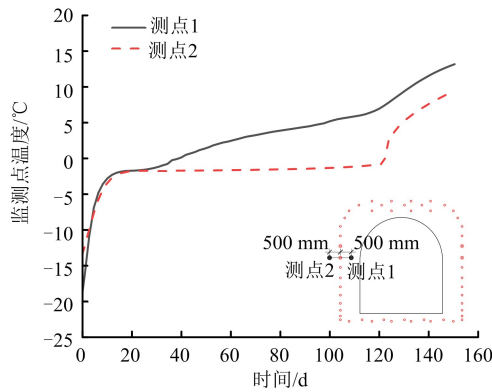


图 13 融化温度场监测点温度与时间关系

Fig. 13 Relationship between temperature and time at melting temperature field monitoring points

为 -24.1 mm , 仰拱附近产生的最大向上融沉位移为 9.6 mm , 这是由于在拱顶与仰拱处布置了冻结管, 冻结管附近周围地层冻结温度低且冻结壁较厚, 在自然解冻过程中, 拱顶与仰拱附近的地层逐渐融化而形成较大的融沉位移。

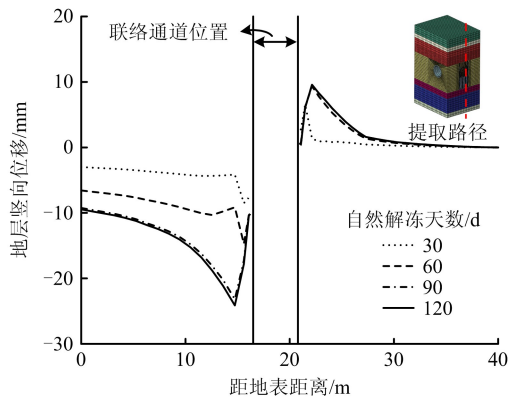


图 14 不同自然解冻时间下地层融沉位移随深度变化关系

Fig. 14 Relationship between subsurface thawing displacement and depth under different natural thawing times

距离拱顶正上方 1 m 、 3 m 、 5 m 的点 A-1、B-3、C-5 与距离仰拱正下方 1 m 、 3 m 、 5 m 的点 D-1、E-3、F-5 的冻胀位移随时间的变化关系见图 15。随着自然解冻时间的增加, 周围地层的融沉位移增

加, 各观测点融沉位移增长速率变缓; 在 $0 \sim 90\text{ d}$ 内, 地层融沉位移增长速率较快, 在自然解冻 90 d 后, 融沉位移增长速率逐渐放缓; 距联络通道拱顶正上方和仰拱正下方相等的点, 拱顶正上方点的融沉位移比仰拱正下方点的融沉位移大, 这主要是因为自然解冻过程中, 联络通道周边自然融土的排水固结沉降大于地层抬升作用。

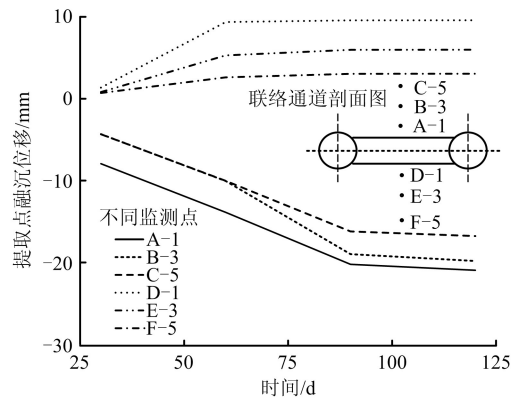


图 15 联络通道附近点融沉位移随时间变化关系

Fig. 15 Relationship between point settlement displacement near the communication channel and time

垂直于联络通道轴线方向的地表融沉位移曲线见图 16。地表融沉呈“U 形”分布, 靠近联络通道地表中心点的地方, 地表融沉值较大, 离地表中心点越远, 地表融沉值越小。在自然解冻 30 d 、 60 d 、 90 d 、 120 d 时, 联络通道正上方的地表中心点融沉值分别为 -3.0 mm 、 -6.6 mm 、 -9.3 mm 、 -9.5 mm 。

3 参数敏感性分析

3.1 冷媒温度

冷媒温度的选取是冻结法施工的关键参数, 冷媒温度将影响冻结帷幕的发展速率及冻结壁的最终厚度。若冷媒温度过高, 将影响冻结壁的发展速度; 若冷媒温度过低, 则会降低工程经济收益。

不同最低冷媒温度取值分别为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。不同冷媒温度下冻结壁的平均温度与时间关系见图 17。随着冻结时间的推移,

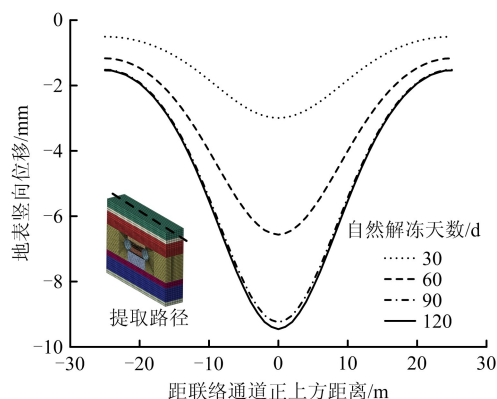


图16 地表融沉位移曲线

Fig. 16 Surface thawing displacement curve

不同冷媒温度下冻结壁平均温度为 -10°C 时所需时间差值逐渐增大,这是由于不同冷媒温度的传热效率不同,随着时间的推移,冻结效果差异越来越明显。

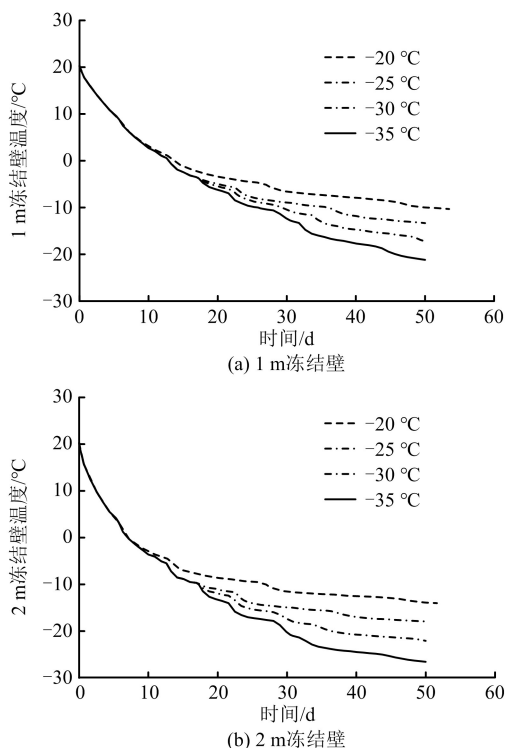
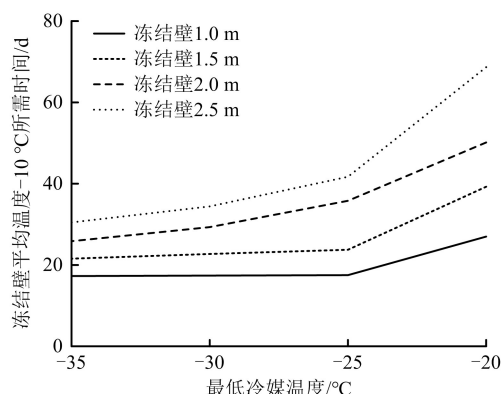


图17 不同冷媒温度下冻结壁平均温度与时间关系

Fig. 17 Relationship between average freezing wall temperature and time at different refrigerant temperatures

通过冻结壁平均温度到达 -10°C 的时间,可得到不同冷媒温度与冻结壁平均温度为 -10°C 所需时间的关系,见图18。对于不同冷媒温度下冻结壁平均温度为 -10°C 所需时间,冷媒温度在 $-25^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$

-20°C 时下降速率较快,而在 $-35^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$ 时,下降速率较慢。因此,考虑经济效益及冻结效果,冷媒温度在 $-30^{\circ}\text{C} \sim -25^{\circ}\text{C}$ 较为合理。

图18 最低冷媒温度与冻结壁平均温度 -10°C 所需时间关系Fig. 18 Relationship between minimum refrigerant temperature and time required to reach an average freezing wall temperature of -10°C

3.2 导热系数

导热系数是影响土体冻结温度场的重要影响因素,保持其余土体热参数不变,取不同导热系数以研究导热系数对冻结温度场的影响。根据不同导热系数取值设置4个工况:工况一为原工程导热系数,工况二、工况三、工况四分别为原工程导热系数的90%、80%、70%。不同导热系数条件下的冻结壁平均温度随时间的变化关系见图19。随着导热系数的增大,冻结壁平均温度达到 -10°C 所需时间逐渐减少,对于工况一、工况二、工况三、工况四的2 m冻结壁,平均温度达到 -10°C 的时间分别为39.7 d、35.7 d、32.5 d、30.5 d,时间差最大为9.2 d,表明导热系数对土体冻结温度场影响较大。

通过冻结壁平均温度达到 -10°C 时所需时间,可得出不同导热系数与冻结壁平均温度降至 -10°C 所需时间的关系,见图20。对于不同导热系数下冻结壁平均温度达到 -10°C 所需时间,导热系数在 $1.1 \sim 1.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时下降较为明显,而在 $>1.3 \sim 1.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时下降速率减缓。

3.3 冻胀率与融沉率

地层的冻胀率与融沉率是影响地层冻胀位移场与融沉位移场的重要影响因素,地层的冻胀率与融沉率受土体含水量、初始干密度、温度变化、孔隙特征等多种因素影响。当冻胀率取值分别为2%、4%、6%、8%时,过地表中心的竖直路径不同冻胀率下的竖向位移见图21。随着冻胀率的增大,拱顶附

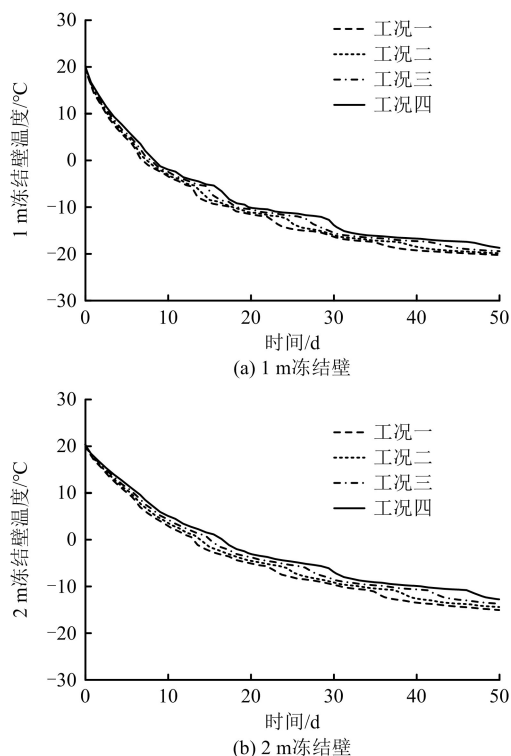
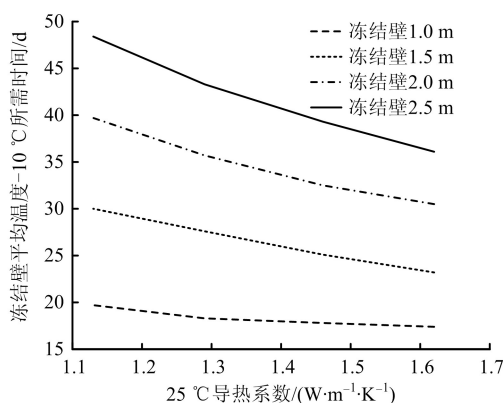


图 19 不同导热系数下冻结壁平均温度与时间关系

Fig. 19 Relationship between average temperature of frozen wall and time under different thermal conductivity coefficients

图 20 导热系数与冻结壁平均温度 -10°C 所需时间关系Fig. 20 Relationship between thermal conductivity and time required to reach an average freezing wall temperature of -10°C

近最大向上冻胀位移与仰拱附近最大向下冻胀位移增大。当冻胀率为 2%、4%、6%、8% 时,拱顶附近最大向上冻胀位移分别为 17.4 mm、34.7 mm、52.0 mm、69.4 mm,仰拱附近向下最大的冻胀位移分别为 -9.8 mm、 -19.7 mm、 -29.5 mm、 -39.4 mm;地表中心最大隆起值不断增大,其值分别为 6.1 mm、

12.3 mm、18.4 mm、24.6 mm。

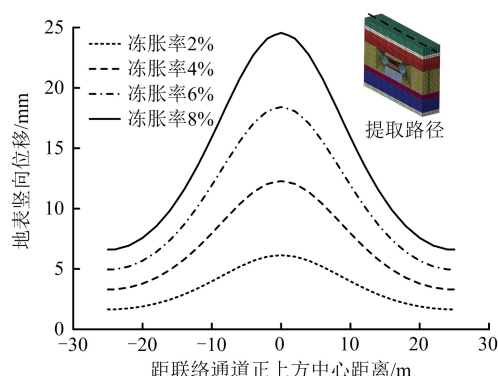


图 21 不同冻胀率下提取路径竖向位移

Fig. 21 Vertical displacement of extraction path under different frost heave rates

当融沉率取值分别为 2%、4%、6%、8% 时,过地表中心的竖直路径不同融沉下的竖向位移见图 22。随着融沉率的逐渐增大,拱顶附近最大向下融沉位移与仰拱附近最大向上融沉位移逐渐增加。当融沉率为 2%、4%、6%、8% 时,拱顶附近最大向下融沉位移分别为 -11.1 mm、 -22.2 mm、 -33.2 mm、 -44.3 mm,仰拱附近最大向上的融沉位移分别为 4.7 mm、9.4 mm、14.1 mm、18.7 mm;地表中心最大融沉值不断增大,其值分别为 -4.6 mm、 -9.3 mm、 -13.9 mm、 -18.5 mm。

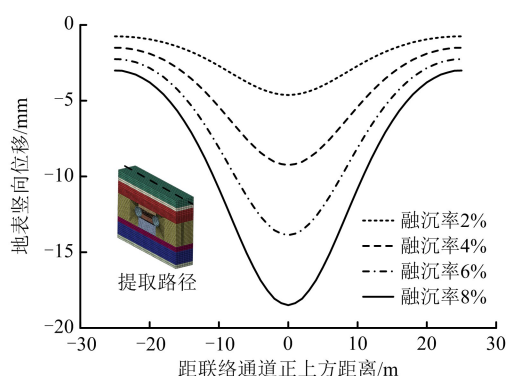


图 22 不同融沉率下提取路径竖向位移

Fig. 22 Vertical displacement of extraction path under different melting rates

4 结 论

(1) 通过监测冻结帷幕薄弱处温度变化,发现在积极冻结期内,2 m 冻结壁平均温度达到 -10°C 需要 30.5 d,且冻结壁平均温度随冻结时间的增加而逐渐降低,其降温速率逐渐减缓。

(2)通过提取不同路径位移的变化情况,发现在积极冻结期内,拱顶最大向上冻胀位移为39.9 mm,仰拱最大向下冻胀位移为-24.1 mm,地表隆起呈“倒U形”分布,中心点隆起值为14.1 mm,且冻胀位移增长速率逐渐减慢。在冻结开挖期内,拱顶最大沉降位移为-20.4 mm,仰拱最大隆起位移为55.3 mm,地表最大沉降位移为-3.6 mm;在自然解冻期内,拱顶最大融沉位移为-24.7 mm;仰拱最大融沉位移为12.8 mm;地表融沉呈“U形”分布,中心点融沉值为-9.5 mm,且融沉位移增长速率逐渐减慢。

(4)通过分析不同参数对冻结法施工的影响,发现随着冷媒温度和导热系数增大,冻结壁平均温度达到-10℃所需时间逐渐减少,冷媒温度在-30~-25℃效果最好,且地表中心的冻胀隆起位移和融沉位移随冻胀率与融沉率的增大而增大。

参考文献(References):

- [1] DUQUENNOI C, FREMOND M. Modelling of thermal soil behaviour[J]. Openalex, 1989, 95: 895-915.
- [2] FREMOND M, MIKKOLA M. Thermomechanical modeling of freezing soil[C]//Proceedings of the Sixth International Symposium on Ground Freezing, September 10-12, 1991, Beijing, China. Rotterdam: A. A. Balkema, 1991: 17-24.
- [3] KONRAD J M. Prediction of freezing-induced movements for an underground construction project in Japan[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39: 1231-1242.
- [4] 程桦, 臧华. 人工地层水平冻结冻胀效应耦合数值分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 87-90.
CHENG H, ZANG H. Quasi-coupled numerical analysis of frost heave effects in artificially frozen strata[J]. Journal of Rock and Soil Mechanics, 2003, 25(1): 87-90.
- [5] 乔京生, 陶龙光. 地铁隧道水平局部冻结施工应力和位移场数值模拟分析[J]. 铁道建筑, 2004(2): 39-41.
QIAO J S, TAO L G. Numerical simulation analysis of stress and displacement fields during horizontal localized freezing construction in subway tunnels[J]. Railway Construction, 2004(2): 39-41.
- [6] 王晖, 李大勇, 李健, 等. 地铁联络通道冻结法施工三维数值模拟分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增刊2): 1589-1593.
WANG H, LI D Y, LI J, et al. Three-dimensional numerical simulation analysis of frozen method construction for subway connecting passages[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(Suppl. 2): 1589-1593.
- [7] 石荣剑, 岳丰田, 张勇, 等. 盾构地中对接冻结加固模型试验(I): 冻结过程中地层冻结温度场的分布特征[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 368-376.
SHI R J, YUE F T, ZHANG Y, et al. Shield tunnel underground freezing reinforcement model test (I): distribution characteristics of the freezing temperature field during the freezing process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 368-376.
- [8] 李培涛, 李典庆, 牛会峰, 等. 考虑冻结管偏斜与地层导热系数不确定性的隧道人工冻结法数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(5): 435-442.
LI P T, LI D Q, NIU H F, et al. Numerical simulation of artificial freezing method for tunnels considering freezing pipe deviation and uncertainty of formation thermal conductivity [J]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2022, 55(5): 435-442.
- [9] CAI H B, RONG B H, XU L X, et al. Frost heave and thawing settlement of the ground after using a freeze-sealing pipe-roof method in the construction of the Gongbei tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 125: 104503.
- [10] 徐亚峰, 童俊, 陈玮, 等. 超长倾斜联络通道冻结施工全过程有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(4): 1317-1326.
XU Y F, TONG J, CHEN W, et al. Finite element analysis of the entire process of frozen construction of ultra-long inclined connecting passages[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(4): 1317-1326.
- [11] 洪荣宝. 地铁隧道水平冻结法施工期地层三维融沉变形规律研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2023: 91-140.
HONG R B. Study on the three-dimensional thawing and subsidence deformation patterns of the subsoil during the construction period of horizontal freezing method for subway tunnels [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2023: 91-140.
- [12] 中华人民共和国国家能源局. 隧道联络通道冻结法施工及验收规范: NB/T 10222—2019[S]. 北京: 应急管理出版社, 2019: 10-35.
National Energy Administration of the People's Republic of China. Construction and acceptance specifications for freezing method of tunnel connecting passages: NB/T 10222—2019 [S]. Beijing: Emergency Management Press, 2019: 10-35.
- [13] 田瀚. 哈尔滨地铁人工冻结法施工冻结管位布置方

- 案研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 41–55.
- TIAN H. Research on the layout plan for freezing pipe positions using the artificial freezing method in Harbin metro construction [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 41–55.
- [14] 于长一. 地铁联络通道冻结法施工数值模拟分析 [D]. 天津: 天津大学, 2013: 12–24.
- YU C Y. Numerical simulation analysis of frozen construction method for subway connecting passages [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013: 12–24.
- [15] 黄哲峰. 富水砂层中地铁联络通道冻结法施工数值模拟 [D]. 南昌: 南昌大学, 2020: 47–61.
- HUANG Z F. Numerical simulation of frozen construction of subway connecting passages in water-rich sand layers: [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020: 47–61.
- [16] 王贺, 郭春香, 吴亚平, 等. 基于弹性力学考虑冰水相变过程下多年冻土冻胀系数与冻胀率之间的关系 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2839–2845.
- WANG H, GUO C X, WU Y P, et al. Relationship between the frost heave coefficient and frost heave rate of permafrost under ice-water phase transition considering elastic mechanics [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(12): 2839–2845.

Analysis of temperature and displacement field evolution during the freezing method construction for interbedded silty sand cross passages

ZHU Min¹, LIU Lü², WU Weixing¹, YUAN Gang^{3,4}, HUANG Chaoqun²,
OUYANG Yuanping¹, ZHAO Wenbo^{3,4}, CHENG Hongzhang^{3,4}

(1 Yangtze River Survey, Planning and Design Research Co., Ltd., Wuhan 430014, China;

2 Wuhan Municipal Construction Group Co., Ltd., Wuhan 430020, China;

3 College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

4 Hunan Engineering Research Central for Advanced Technology and Intelligent Equipment for Underground Space Development, Changsha 410082, China)

Abstract: This paper focuses on the freezing construction project of the cross passage in the Jinhou section of the Wuhan Metro Line 12 connection line. Using ABAQUS software, a three-dimensional numerical model for the freezing construction method of the cross passage was developed. Numerical simulations were conducted to investigate the evolution of temperature fields and displacement fields during the active freezing stage, frozen excavation stage, and natural thawing stage of the construction process. Additionally, a parameter sensitivity analysis was performed. By monitoring temperature changes at weak points of the frozen curtain, it was observed that during the active freezing stage, the average temperature of the 2 m frozen curtain reached $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ after 30.5 days. The rate of temperature decrease in the frozen curtain gradually diminished as freezing time increased. Analysis of displacement along different paths indicated that, during the active freezing stage, the maximum upward frost heave displacement at the arch crown was 39.9 mm, while the maximum downward frost heave displacement at the invert reached -24.1 mm . Moreover, ground surface uplift exhibited an inverted U-shaped distribution, with a maximum uplift of 14.1 mm at the center. During the frozen excavation stage, the maximum settlement displacement at the crown was -20.4 mm , the maximum uplift displacement at the invert reached 55.3 mm, and the maximum surface settlement was -3.6 mm . During the natural thawing stage, surface thawing settlement displayed a U-shaped distribution, with a maximum settlement of -9.5 mm at the center. The parameter sensitivity analysis further indicated that, as the refrigerant temperature decreased and thermal conductivity increased, the time required for the average temperature of the frozen curtain to reach $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ decreased. An optimal refrigerant temperature range of $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ was identified. Furthermore, as the frost heave rate and thaw settlement rate increased, both the frost heave displacement and thaw settlement displacement at the ground surface significantly increased.

Key words: safety engineering; interbedded silty sand; cross passages; freezing method construction; numerical simulation; thermal coupling