

DOI: 10. 20174/j. JUSE. 2026. 02. 28

超长联络通道冻结-开挖位移场演化规律研究

陈军浩^{1,2}, 游泽彪^{1,2}, 王建林^{1,2}, 李彧翰^{1,2}

(1. 地下工程福建省高校重点实验室, 福州 350108; 2. 福建理工大学 土木工程学院, 福州 350108)

摘要:人工冻结法因其环保、安全可靠的特点,在地下工程建设中被广泛应用。本研究以福州地铁某区间联络通道为工程依托,采用现场实测以及数值模拟等研究方法对冻结-开挖全过程冻结帷幕温度场与位移场耦合的演化规律进行研究。结果表明:为减小大体积冻结带来强冻胀影响,选用双侧错开冻结方式进行冻结,冻结完成时左、右侧地表位移分别为64.51 mm、76.72 mm;在联络通道开挖过程中,冻结帷幕的最大位移收敛为1.52 mm,最大位移收敛速率为0.082 mm/d,均远小于控制值;在不同支护时机下,冻结帷幕的变形与位移变化均随支护时机的延长而增大,但各监测点的平均竖向位移变化均小于0.03 mm/d;开挖步距从1.5 m增大到2.5 m,冻结帷幕的底部隆起和顶部沉降分别增大了1.16倍、5.56倍;开挖步距在1.5 m~2.0 m时产生的竖向位移变化均大于开挖步距在2.0 m~2.5 m时的竖向位移变化。研究成果可为今后超长地铁联络通道冻结-开挖工程提供参考。

关键词:人工冻结法;位移场;冻结-开挖;冻结帷幕;超长联络通道

中图分类号: TU46

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2026)02-0664-09

Study on the Evolution Law of the Displacement Field during Excavation of Super-Long Connection Passage under Freezing Conditions

Chen Junhao^{1,2}, You Zebiao^{1,2}, Wang Jianlin^{1,2}, Li Yuhan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Underground Engineering of Fujian Provincial Universities, Fuzhou 350108, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, P. R. China)

Abstract: The artificial ground freezing method is widely used in underground engineering due to its environmental friendliness, safety, and reliability. This study is conducted based on the connection passage of a section of the Fuzhou metro. Field measurement data and numerical simulation are used to investigate the coupled evolution of temperature and displacement fields of the frozen curtain during the freezing-excavation process. The study results indicate that: A staggered freezing method on both sides was chosen to reduce the strong frost heave impact caused by large-volume freezing. Upon completion of freezing, the surface displacements on the left and right sides were 64.51 mm and 76.72 mm, respectively. Upon completion of the freezing process, the surface displacements on the left and right sides were 64.12 mm and 73.84 mm, respectively. During the excavation, the maximum convergence displacement of the frozen curtain was 1.52 mm, and the maximum displacement convergence rate was 0.082 mm/d, both well below control values. Under varying support timing conditions, deformation and displacement of the frozen curtain increased with extended support timing. The average vertical displacement change at each monitoring point is less than 0.03 mm/d. Increasing the excavation step length from 1.5 m to 2.5 m resulted in the frozen curtain's bottom heave and top settlement increasing by 1.16 times and 5.56 times, respectively. Vertical displacement changes were greater when the excavation step length was between 1.5 m and 2.0 m compared to when it was between 2.0 m and 2.5 m. These findings can be a reference for

收稿日期: 2025-06-15(修改稿)

作者简介: 陈军浩(1986—),男,福建永泰人,博士,副教授,主要从事岩土与地下工程等领域的教学与科研工作。

E-mail: chjhtougao@163.com

基金项目: 福建省自然科学基金(2022J01925)

future freezing-excitation projects of ultra-long subway connecting passages.

Keywords: artificial ground freezing method; displacement field; freeze-excitation; frozen curtain; super-long connection passage

0 引言

人工冻结法是在待开挖的地下空间周围土体中钻设冻结管,使低温冷媒在管内循环吸收土体热量,降低土体温度,使土体中的水分冻结为冰,并与土体牢固胶结,最终形成高强度、抗渗透的冻土体^[1-4]。在滨海城市的地铁联络通道建设中,由于地质复杂且地面加固条件有限,人工冻结法尤为常用^[5-6]。被称为“生命通道”的地铁联络通道不仅是突遇险情时人们上下行进的重要路径,还具备隧道集、排水等基础设施功能^[7]。

国内外学者对冻结温度场、位移场的发展规律开展了大量研究^[8-10]。陈军浩等^[11]、陈冠任等^[12]对超长联络通道冻结采取分区冻结、错开起始冻结时间等措施,冻结温度场的发展规律进行了较为全面的分析,验证了双侧冻结方案的可行性,并得到了冻结温度场和位移场的分布仍具有良好的对称性。Zheng 等^[13]对联络通道冻结帷幕厚度的优化进行研究,得出随着冻结帷幕厚度的减小,冻胀和融沉的变形量及其影响范围均呈递减趋势。Zhou 等^[14]研究比实际冻结帷幕大 3.5 倍的分层温度和位移的现场实验,并基于实验结果提出了分离潜力概念的简化冻胀预测方法。李孟凯等^[15]建立地铁双线隧道冻结帷幕交圈前后地表冻胀的历时预测模型,并对不同隧道净距与埋深下冻结法施工引起的地表垂直位移进行对比分析。郜新军等^[16]研究了冻结法在富水粉质黏土地层中地表变形的演化规律,得出冻结主面土体受开挖引起的升温影响大于冻结辅面。王建林^[17]对联络通道开挖过程冻结帷幕发展特性进行研究,得到位移变化最大为冻结帷幕底部。徐亚峰等^[18]研究了超长倾斜联络通道冻结法施工中,开挖引起的应力释放对管片及联络通道衬砌应力变化的影响。

如上所述,既有的研究主要集中在温度场^[19-21]、位移场^[22-24]的发展规律及其影响因素等方面,而对联络通道冻结-开挖过程中冻结帷幕的位移发展规律研究相对较少。为此,本文以福州地铁某区间联络通道为背景,开展了冻结与开挖全过程的地层温度变化和地表变形监测分析,获得了冻结帷幕厚度及温度的变化规律,为联络通道开挖过

程中冻结帷幕变化规律及其影响提供参考。

1 工程实例

1.1 工程概况

福州地铁 2 号线某区间联络通道主体位于埋深 20 m 的淤泥质土夹薄层砂土层中。联络通道左、右线盾构隧道里程为 YDK35+898.17、ZDK35+939.022,中心标高为-19.75 m、-19.71 m。联络通道上方建筑密集、地表交通繁忙,在隧道右线上方存在埋深为 2.5 m 的 DN800 排水管线;联络通道所处区域受温泉影响,使得其地层初始地温高达 38 ℃。为减小大体积冻结带来强冻胀影响,联络通道采用分区水平冻结地层的方法,即在地铁隧道两侧中错开左、右侧冻结起始时间,其中左侧较右侧推迟 7 d 开机冻结;经过积极冻结形成高强度、抗渗透的冻结帷幕后,采用矿山法进行暗挖构筑。

1.2 联络通道冻结设计

联络通道长 42.68 m,采用双侧冻结和双泵房的设计方案,在隧道左、右线分别采用上仰、水平、下俯方式布设 80、78 个冻结孔,共 158 个冻结孔,冻结管采用 $\Phi 89 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的低碳无缝钢管。冻结帷幕设计要求平均温度 $\leq -10 \text{ }^\circ\text{C}$,冻结帷幕厚 $\geq 1.7 \text{ m}$;在冻结过程中,盐水的最低温度为 $-30 \text{ }^\circ\text{C} \sim -28 \text{ }^\circ\text{C}$,要求待冻结稳定后,盐水去回路之间的温差不超过 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.3 测温孔与地表位移监测

为获得冻结温度场的发展规律,在隧道左、右线分别布置 11 个测温孔,如图 1 所示。由于各冻结管入土深度不同,根据临近冻结管的入土深度,在各测温孔孔深分别为 0.5、5、12、19 m 处布置测温点,以监测冻结帷幕的厚度和温度,进而判断开挖条件。温度监测选用 DS18B20 温度传感器,采用一线制全自动测温系统对温度数据进行采集,可实现实时监测功能。各测温点编号为 C_{i-j} 或 J_{i-j} ,其中 $i=1 \sim 11$ 代表开孔位置, $j=1 \sim 4$ 代表不同孔深的入土深度,如图 2 所示。

为监测超长联络通道冻胀融沉对地表变形的影响,在联络通道中轴线的左右两侧共布设 41 个地表位移监测点,测点以 3、5、7 m 的间距由近及远进行对称布置,并在喇叭口、中部交叉搭接处等关

键区域进行密集布置。冻胀融沉的位移监测选用 DNA03 水准仪,地表监测点布置如图 3 所示。

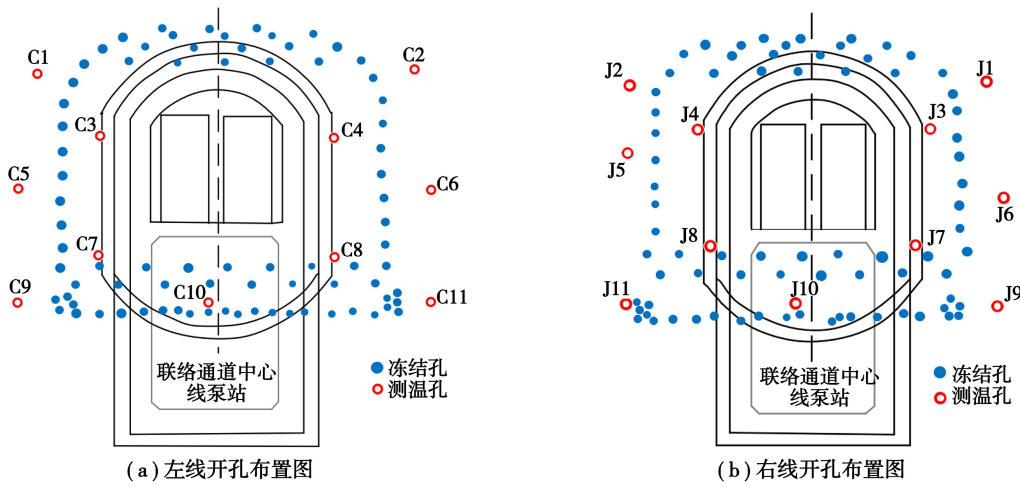


图 1 联络通道左、右线开孔布置

Fig. 1 Left and right line hole layout for the connection passage

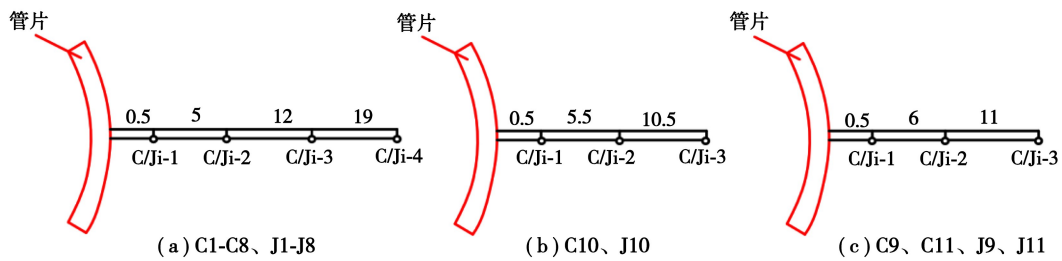


图 2 测温孔内测温点布置(单位:m)

Fig. 2 Layout of measuring points in the temperature monitoring (unit: m)

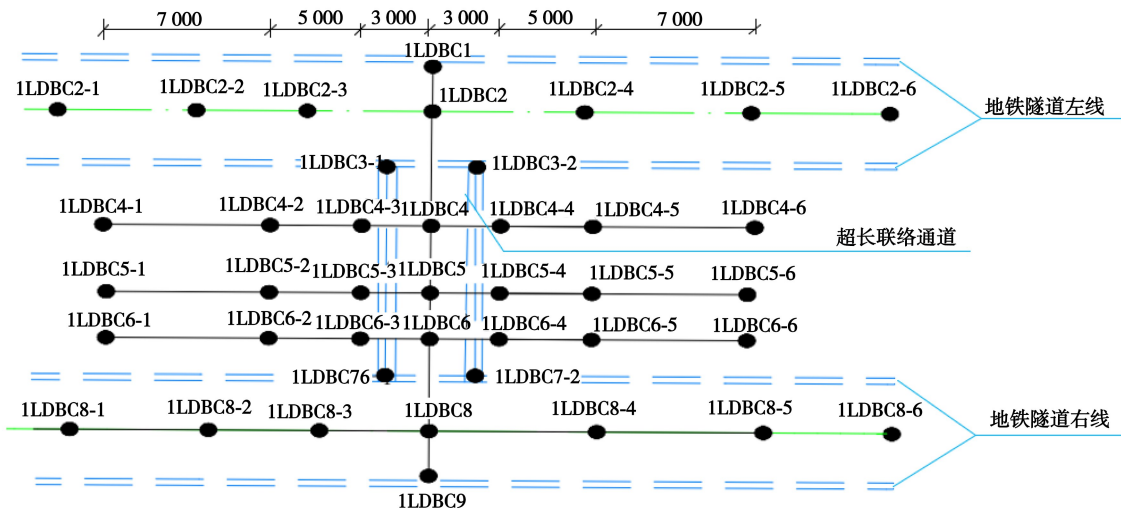


图 3 地表监测点布置图(单位:mm)

Fig. 3 Surface monitoring point layout diagram (unit: mm)

2 温度场和位移场实测分析

2.1 冻结土体温度变化规律

由于深度较深的测点能够更准确地反映土体

深层的温度变化规律,因此对联络通道冻结管外侧(非开挖区)12 m、19 m 深度的测温孔监测数据进行分析,如图 4 所示。

由图 4 可知,在整个冻结过程中,土体的温度

变化分为 3 个阶段:① 积极冻结前期(0~40 d):此阶段,冻结管内盐水的温度显著低于周围土体,形成较大的温度梯度,导致土体温度迅速下降;测温孔 J9 位于拱脚位置且靠近冻结管密集区域,40 d 后其温度已降至 -0.43 ℃,平均降温速率为 0.68 ℃/d。19 m 深度的测温孔 J6 位于冻结管交叉区域,积极冻结 40 d,温度已降至-4.06 ℃,平均降温速率为 0.94 ℃/d。② 积极冻结末期(40~66 d):冻结 66 d 积极冻结期完成,由表 1 内、外侧测温孔冻结帷幕厚度发展情况可知:左侧冻结帷幕向开挖区内、外两侧的最慢发展速率分别为 16.04 mm/d、13.67 mm/d,按最慢发展速率计算,冻结帷幕厚度大于 1.96 m;右侧的最慢发展速率分别为 17.92 mm/d、13.43 mm/d,冻结帷幕厚度大于 2.07 m,均满足设计要求。③ 维护冻结期(66~110 d):在此阶段,土体热交换已基本完成,冻结帷幕呈现出良好的完整性。不同深度处的测点温度波动主要受到联络通道开挖的影响,波动范围在±1 ℃之间。

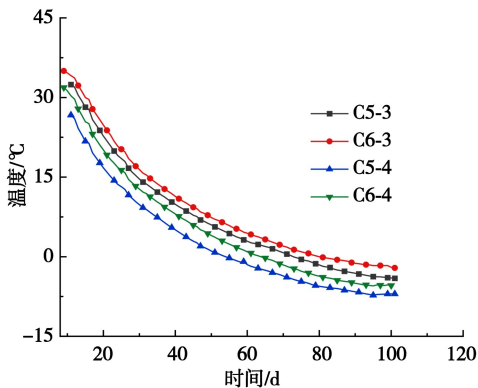
2.2 地表位移变化规律

为了监测冻结对周围环境和建筑物的影响,对现场地表位移实测数据进行分析,呈现出的发展规律如图 5 所示(Z-左线监测;Y-右线监测)。

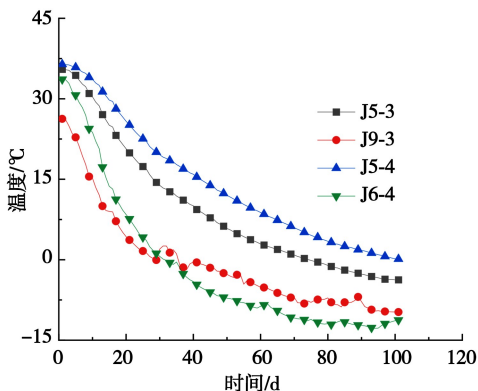
表 1 内、外侧测温孔冻结帷幕厚度发展情况

Table 1 Development of frozen curtain thickness at the inner and outer temperature measurement holes

测温孔编号	降至 0 ℃ 平均时间/d	距最近冻结孔距离/mm	冻结帷幕发展速率/mm/d	冻结帷幕厚度/mm
C1(外测)	48	656	13.7	904.2
C3(内测)	49	786	16.0	1 056
C6(外测)	59	907	15.4	1 014.4
C8(内测)	12	400	33.3	2 197.8
J1(外测)	46	618	13.4	884.4
J4(内测)	52	932	17.9	1 181.4
J7(内测)	42	773	18.4	1 214.4
J9(外测)	43	887	20.6	1 359.6



(a) 左线12 m、19 m处土体温度随时间变化图



(b) 右线12 m、19 m处土体温度随时间变化图

图 4 不同测点土体温度随时间变化对比图 (左线较右线晚 7 d 冻结)

Fig. 4 Comparison of soil temperature changes over time at different measurement points (left line frozen 7 days later than the right line)

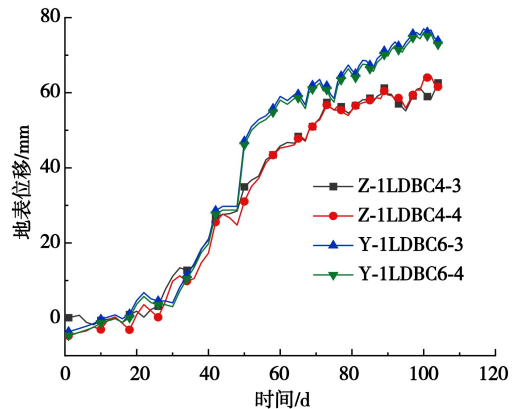


图 5 左、右侧地表位移随时间变化 (左线较右线晚 7 d 冻结)

Fig. 5 Surface displacement on the left and right over time (left line frozen 7 days later than the right line)

由图 5 可知,冻结前 30 d,冻结锋面以冻结管为中心向四周推进,逐渐形成冻结圆柱,由于此时冻结帷幕尚未交圈,因此冻胀对地表造成的位移较小;在此期间,地表的最大隆起位移为 11.13 mm,平均增长速率为 0.37 mm/d。在维护冻结期间,随着联络通道的逐步开挖,土体应力迅速释放;此时,由于土体冻胀作用导致的地表隆起与土体开挖卸载导致的地表沉降之间的相互作用,从而导致各测点的位移呈现波动现象。由于现场施工采取随开随支的方式,在联络通道初衬完成后,地表位移再

次增长。在冻结完成时,左、右侧地表的最大位移分别为 64.51 mm、76.72 mm,相应的平均增长速率为 0.62 mm/d、0.75 mm/d;右侧位移比左侧大 10 mm,主要是由于右侧的冻结机组较左侧先开机运作,导致右侧土体先于左侧发生变形,从而使右侧的总体位移显著大于左侧。

2.3 开挖阶段冻结帷幕位移变化规律

在积极冻结 66 d 后,冻结帷幕的厚度与平均温度均已满足设计要求,冻结阶段进入维护冻结期。在此期间,随着土体的挖除,土体应力得到释放,原冻结帷幕稳定性被破坏,冻结帷幕承受新的附加荷载并发生蠕变现象。若冻结帷幕的收敛速度过快,可能会导致其失去稳定性,从而引发安全事故。因此,在联络通道开挖过程中,对冻结帷幕的位移变化进行现场实测和数据分析,以确定合理的开挖步距和支护时机,从而确保施工安全。

联络通道从右侧隧道开始挖,每日开挖 2 m,采取随开随支的开挖方式。开挖分为两阶段:第一阶段从右侧喇叭口至联络通道纵深 15 m 处;第二阶段从纵深 15 m 至 27 m 处。如图 6 所示,在每个开挖阶段的过程中,每开挖 4 m,在左右两侧侧墙中依次布置冻结帷幕位移收敛监测点,共布设 6 个监测点,编号为 LGJ001 ~ LGJ006 (LGJ001 ~ LGJ003 为第一阶段;LGJ004 ~ LGJ006 为第二阶段)。

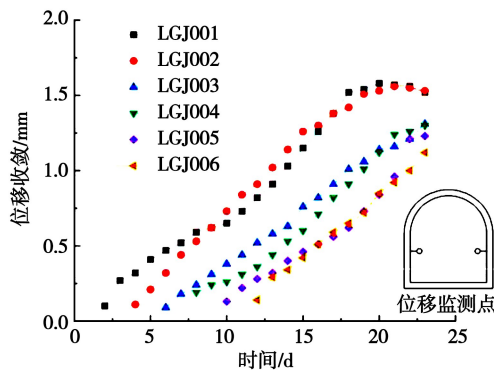


图 6 冻结帷幕位移收敛随时间变化

Fig. 6 Displacement convergence of the frozen curtain over time

由图 6 可知,在开挖的两阶段中,测点 LGJ001 ~ LGJ003 的平均收敛速率分别为 0.065 mm/d、0.071 mm/d、0.068 mm/d,各测点的收敛速率均远小于报警值 3 mm/d。开挖后期,第一阶段开挖的联络通道初衬和二衬都已完成,但由于测点 LGJ001、LGJ002 的支护时间早于测点 LGJ003 的支护,因此其后期的位移收敛趋于平稳。在开挖第二阶段中,测点 LGJ004 ~ LGJ006 的位移

分别增大了 1.11 mm、1.1 mm、0.98 mm,各测点的位移变化不大,表明冻结帷幕均匀完整,无明显薄弱位置。在整个开挖阶段,冻结帷幕的位移收敛大致都呈线性变化,最大收敛位移为 1.52 mm,远小于安全控制值 30 mm,表明冻结帷幕具有良好的稳定性,能够提供有效的支护作用。

3 数值模拟与分析

3.1 控制方程

三维瞬态温度场的分布满足能量守恒和傅里叶定律。在求解过程中,瞬态温度场分布遵循热量守恒微分方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \rho Q - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 表示密度; c 表示比热; Q 表示热源密度; t 表示时间; k_x, k_y, k_z 表示沿 x, y, z 方向的导热系数。

表达含义主要由第一热力学定律,对于封闭的系统存在:

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad (2)$$

式中: Q 表示热量, kJ; W 表示功, kJ; ΔU 表示系统内能, kJ; ΔKE 表示系统动能, kJ; ΔPE 表示系统势能, kJ;

瞬态热分析时:物体升温(降温)所需的能量等于物体内源产热与传入物体的热量。

瞬态热分析时除约束方程外,还应加入边界条件。对于导热问题边界条件主要分为三类:

(1) 温度边界条件

$$T_w = f(x, y, z, t) \quad (3)$$

式中: T_w 代表边界任何时刻的温度。

(2) 热流边界条件:

$$Q_w = f(x, y, z, t) \quad (4)$$

式中: Q_w 代表边界任何时刻的热流密度。

(3) 对流换热边界条件:

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} nx + k_y \frac{\partial T}{\partial y} ny + k_z \frac{\partial T}{\partial z} nz = h(T_w - T_f) \quad (5)$$

式中: h 代表物体与周围物体之间的传热系数; T_w 代表自然对流条件下的环境温度; T_f 代表周围流体温度。

本文首先对结构体进行温度场分析,获得温度场的分布结果;然后将该结果作为结构荷载施加到结构模型上进行结构分析,得到变形、应力的分布规律,从而实现温度场与应力场的耦合分析。

3.2 模型建立与网格划分

建立联络通道三维热-力耦合模型时作如下假设:假设冻结土体连续且均匀;盐水温度视为温度荷载直接作用于冻结管壁;仅考虑冻结管与土体之间的热交换,不考虑热对流的影响;假定在开挖过程中,冻结帷幕的形状在积极冻结结束前后保持不变。

鉴于联络通道截面形状以及冻结管布置的近似对称性,本文采用 ANSYS 软件建立冰水相变的 1/2 模型用于模拟温度场的变化和后续联络通道土体开挖的计算。考虑冻结施工对周边环境的影响,选取了实际工程 5 倍大小的计算模型边界尺寸,分别为长 89.2 m、宽 15 m、高 39 m。数值模型

试验结果,具体参数如表 2 所示。为提高计算精度,本文对冻结管周围及联络通道土体开挖过程中,采用网格加密的方法进行网格划分,而远离冻结管的土体区域则采用映射网格划分。在进行温度场模拟时,采用 SOLID70 单元;而在进行热-力耦合时,则采用 SOLID185 单元。整个模型共划分了 1 325 732 个网格单元和 245 031 个节点。

在模型的上下、左右以及后边界施加与地温相同的 38 °C 恒温边界,在前边界施加对称边界,冻结管内温度与现场盐水温度保持一致。施加重力荷载,土体底部采取完全约束,四周采取法向约束。计算位移场时对由于重力产生的位移进行初始清零,将其作为位移场计算的初始条件。

表 2 不同土层物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of different soil layers

土层/结构	泊松比 ν	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 c/kPa	含水率/%	导热系数 $\lambda/$ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	比热容 $C/$ $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
填土	0.35	18	5	18	1.05	1.48
淤泥	0.31	5.3	10.3	53.2	1.2	1.88
黏土	0.31	13.8	37	37.6	2.65	1.63
淤泥质土(含砂)	0.33	5.2	13.5	48	2.37	1.75
(泥质)中砂	0.38	32	3	33	2.41	1.98
黏土	0.27	10.5	34	38.4	2.63	1.58

3.3 温度场实测与模拟分析

C2、J1 测温孔布置在冻结管外侧的拱肩位置, J6 测温布置在侧墙位置, 这两个位置仅布置了一排冻结管, 属于冻结薄弱区域且深层测点能够更准确地反映土体的温度变化规律。因此, 分别选取了位于 12 m (C2-3、J1-3)、19 m (J6-4) 的测温孔温度变化进行对比, 以探究模拟结果与实测数据之间的关系, 如图 7 所示。

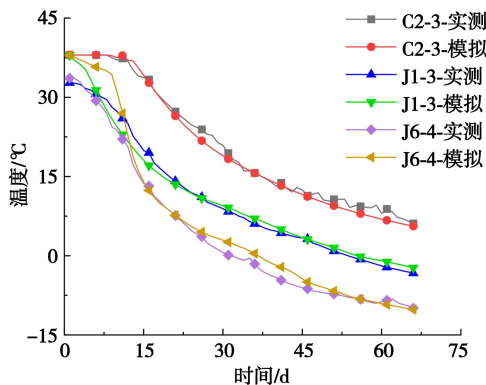


图 7 不同测点温度随时间变化对比图

Fig. 7 Comparison of temperature changes over time at different measurement points

由图 7 可知, 积极冻结前期, 由于左侧冻结机组较右侧晚 7 d 开机且该区域位于温泉区, 因此 C2 测温孔的温度仍维持在 38 °C; 受隧道内外空气对流的影响, 到了积极冻结末期, C2 测温孔的温度仍维持在 0 °C 以上。J1 测温孔在实测 54 d 时温度降至 0 °C 以下, 而数值模拟在 56 d 达到该温度, 两者的平均降温速率分别为 0.70 °C/d 和 0.68 °C/d。在积极冻结的初期阶段(前 15 d), J6 测点实测与模拟之间的温度差值较大, 最大约为 3 °C; 这是因为 J6 测点位于深层土体, 导致该位置的盐水与土体之间的热交换相较于浅层土壤延迟发生, 进而在冻结初期获得的冷量较少。然而, 经过 66 d 的积极冻结, J6 的数值模拟温度为 -10.2 °C 而实测为 -9.93 °C, 两者之间的差值在 0.3 °C 之内。

3.3 开挖不同位置冻结帷幕变化规律

积极冻结 66 d, 冻结帷幕的厚度和平均温度均已满足设计要求, 已具备联络通道开挖条件。联络通道从右侧隧道开始开挖, 开挖进度为 2 m/d, 每开挖 0.5 m 即施作临时支护结构。通过对喇叭口开挖和联络通道贯通的分析, 得出了冻结帷幕位移场的变化规律, 如图 8 所示。在喇叭口段开挖过

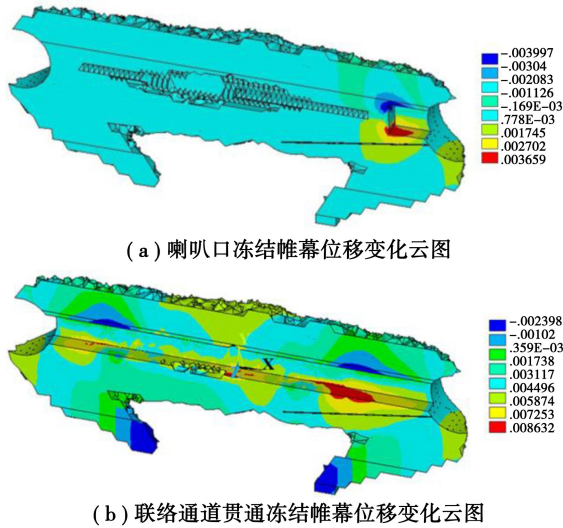


图 8 开挖阶段不同位置冻结帷幕位移变化云图

Fig. 8 Displacement variation nephogram of the frozen curtain at different positions during the excavation stage

程中,右侧冻结帷幕的顶部出现了 3.9 mm 的沉降,而底部则发生了 3.7 mm 的隆起,这是由于联络通道土体开挖引起土体压力释放,从而导致冻结帷幕顶部和底部发生变形。随着联络通道内部土体的持续开挖和应力释放,冻结帷幕的底部均出现了不同程度的向上隆起,最大隆起值位于右侧和中部,达到 8.6 mm。由图 8(b)可知,联络通道开挖结束后,隧道左右两侧的位移基本呈对称分布。

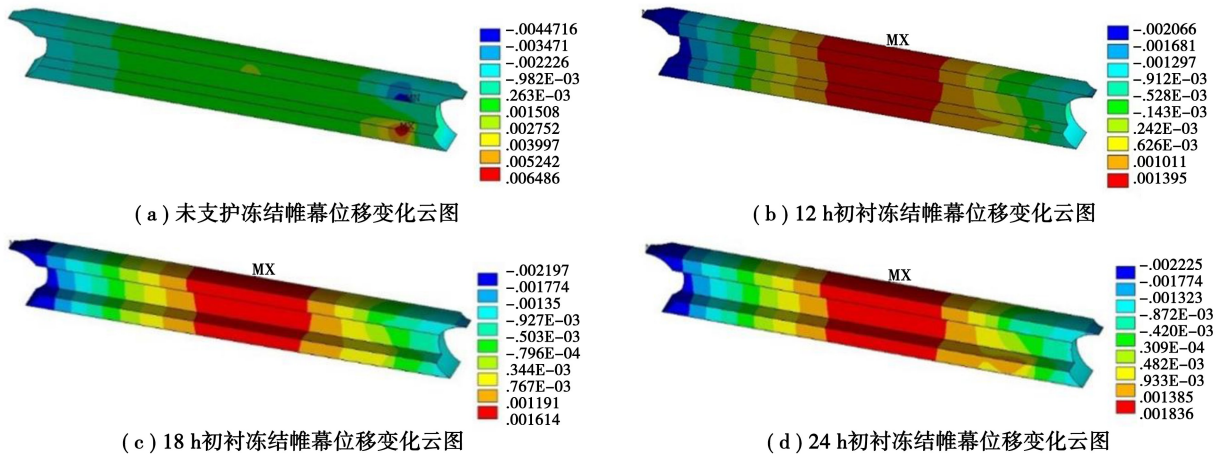


图 9 不同支护时机冻结帷幕位移变化云图

Fig. 9 Displacement nephogram of the frozen curtain under different support timing

由图 9(b)—(d)可知,随着初衬支护时间的延长,冻结帷幕承受的压力逐渐增大,导致位移逐渐增大,最大沉降和隆起均出现在左侧喇叭口和联络通道中部。初衬支护时间从 12 h 延长至 18 h,再到 24 h,冻结帷幕的最大沉降分别为 0.21 mm、

4 不同支护时机与开挖步距位移场分析

4.1 不同支护时机下的冻结帷幕变形分析

在正常的联络通道开挖过程中,为了确保安全,常采用“随开随支”的施工方式,这在一定程度上未能充分利用冻结帷幕的承载能力。因此,基于先前的模型进行优化,分析在相同开挖步距(2 m)下,开挖至联络通道纵深 20 m 处,支护时机分别为 12 h、18 h、24 h 时的位移变化规律,图 9 为开挖至联络通道纵深 20 m 处的冻结帷幕位移变化云图。表 3 为不同支护时机下不同监测点的竖向位移变化。

表 3 不同支护时机下监测点竖向位移变化值

Table 3 Vertical displacement variation values at monitoring points under different support timing

支护时间/h	拱肩 /mm	侧墙顶 /mm	侧墙中 /mm	侧墙底 /mm
12	-0.71	-0.51	-0.50	-0.50
18	-0.79	-0.59	-0.58	-0.59
24	-0.92	-0.74	-0.72	-0.81

由图 9 (a)可知,在开挖至联络通道纵深 20 m 处,冻结帷幕最大位移出现在右侧喇叭口的拱顶和拱底,分别为拱顶沉降 0.47 mm 和拱底隆起 0.65 mm。

0.22 mm、0.22 mm;最大隆起分别为 0.14 mm、0.16 mm、0.18 mm。

由表 3 可知,在相同开挖步距下,随着初衬支护时间的延长,各监测点的位移变化均有所增加;由于拱肩同时受到向下和向左(或向右)的压力,

其位移变化最大。支护时间从 12 h 延长至 18 h, 拱肩、侧墙顶、侧墙中的平均位移变化均为 0.013 mm/d, 而侧墙底的平均位移变化为 0.015 mm/d; 支护时间从 18 h 延长至 24 h, 各监测点的平均位移变化分别为 0.022 mm/d、0.025 mm/d、0.023 mm/d、0.02 mm/d, 差距并不明显。

综上所述,在相同开挖步距下,开挖至联络通道纵深 20 m 处,随着初衬支护时间的延长,冻结帷幕的位移和不同监测点的竖向位移变化均有所增加,但增长速率较慢,表明冻结帷幕具有良好的支

撑作用。

4.2 不同开挖步距下的冻结帷幕变形分析

开挖步距的变化会引起土体中地应力释放程度的不同,随着开挖步距的逐步增大,冻结帷幕所承受的土体压力也随之增加。因此,对不同开挖步距(1.5 m、2.0 m、2.5 m)相同支护时机条件下,开挖至联络通道纵深 20 m 处支护后冻结帷幕的位移变化规律进行研究,图 10 为相应的位移云图。表 4 为不同开挖步距下不同监测点的竖向位移变化。

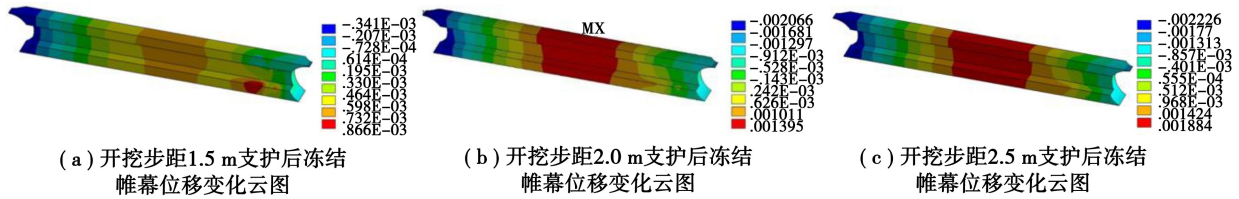


图 10 不同开挖步距支护后冻结帷幕位移云图

Fig. 10 The displacement nephogram of the frozen curtain after support with different excavation steps

由图 10 可知,在相同支护时间下,增大开挖步距会导致冻结帷幕变形的增大。开挖步距从 1.5 m 增加到 2 m,冻结帷幕底部隆起增大了 45.5%,顶部沉降增大了 80.8%;开挖步距从 2.0 m 增加到 2.5 m,冻结帷幕底部隆起增大了 40.6%,顶部沉降增大了 17.0%。

表 4 不同开挖步距下监测点竖向位移变化值

Table 4 Vertical displacement variations at monitoring points under different excavation step distances

开挖步距/m	拱肩/mm	侧墙顶/mm	侧墙中/mm	侧墙底/mm
1.5	-0.19	-0.29	-0.31	-0.29
2.0	-0.71	-0.51	-0.50	-0.50
2.5	-1.35	-0.76	-0.76	-0.75

由表 4 可知,开挖步距对冻结帷幕在不同位置产生的竖向位移变化各异,并随着开挖步距的增加而加剧。当开挖步距从 1.5 m 增大到 2.0 m 时,拱肩的竖向位移变化从 -0.19 mm 增至 -0.71 mm,增大了 2.74 倍,远大于其他监测点的竖向位移变化;开挖步距从 2 m 增大到 2.5 m,侧墙中的竖向位移变化从 -0.50 mm 增至 -0.76 mm,增大了 1.52 倍。

综上所述,不同开挖步距对冻结帷幕的变形和在不同位置产生的竖向位移变化具有显著影响。开挖步距从 1.5 m 增加到 2.5 m,冻结帷幕的底部隆起和顶部沉降分别增大了 1.16 倍、5.56 倍。开

挖步距从 1.5 m 增大到 2.0 m,冻结帷幕在不同位置产生的竖向位移变化均大于 2.0 m 增大到 2.5 m。

5 结论

(1)冻结完成时,地表最大位移分别为左侧 64.12 mm、右侧 76.72 mm,右侧位移较左测大 10 mm,主要是因为右侧冻结先于左侧 7 d。在联络通道开挖过程中,冻结帷幕的位移收敛速率最大为 0.098 mm/d,最大收敛位移为 1.82 mm,均远小于控制值。

(2)随着联络通道内部土体的持续开挖和应力释放,冻结帷幕底部出现不同程度的隆起,最大隆起值位于右侧和中部,为 8.6 mm;当联络通道开挖完成时,左右侧位移基本对称。

(3)不同支护时机下,将初衬支护时间从 12 h 延长至 18 h,再到 24 h,冻结帷幕的最大沉降为 0.22 mm,最大隆起为 0.16 mm。随着初衬支护时间的延长,各监测点的平均位移变化均小于 0.03 mm/d,增长速率较慢,表明冻结帷幕具有良好的支撑作用。

(4)相同支护时间下,开挖步距从 1.5 m 增大到 2.5 m,冻结帷幕的底部隆起和顶部沉降分别增大了 1.16 倍和 5.56 倍。开挖步距在 1.5~2.0 m 时不同监测点产生的竖向位移变化均大于开挖步距在 2.0~2.5 m 时的竖向位移变化。

参考文献(References)

- [1] 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, 20(17): 6720-6728. (Xi Jiami, Xiong Yuanlin, Ma Xinmin, et al. Research status of freezing method construction of subway connecting channel [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(17): 6720-6728. (in Chinese))
- [2] Alzoubi A M, Xu M, Hassani P F, et al. Artificial ground freezing: A review of thermal and hydraulic aspects [J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2020, 104: 103534.
- [3] Fu Y, Hu J, Wu Y W. Finite element study on temperature field of subway connection aisle construction via artificial ground freezing method. Cold Regions Science and Technology, 2021, 189: 103327.
- [4] 沙志远,周晓敏,张松. 北京地铁联络通道冻结热固耦合与实测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(增2): 872-879. (Sha Zhiyuan, Zhou Xiaomin, Zhang Song. Frozen thermo-solid coupling and measured analysis of Beijing subway contact channel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(Supp. 2): 872-879. (in Chinese))
- [5] Zhou X M, Jiang G J, Li F Z, et al. A comprehensive review of artificial ground freezing applications to urban tunnel and underground space engineering in China in the last 20 years[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2022, 36(3): 04022002.
- [6] 夏才初,方杭楠,赵昊楠,等. 富水软土地层联络通道冻结温度场分布规律[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(4): 1339-1350. (Xia Caichu, Fang Hangnan, Zhao Haonan, et al. Distribution law of freezing temperature field in connecting channel of water-rich soft soil layer [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(4): 1339-1350. (in Chinese))
- [7] 张世雷,汪磊,何越磊,等. 复合地层联络通道冻结温度场发展规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(增1): 266-273. (Zhang Shilei, Wang Lei, He Yuelei, et al. The development regularities research of freezing temperature field for the cross passage in compound stratum [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(Supp. 1): 266-273. (in Chinese))
- [8] 董新平,井景凤,王余飞,等. 地铁联络通道冻土帷幕薄弱部位及其成因分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(10): 20-23, 29. (Dong Xinping, Jing Jingfeng, Wang Yufei, et al. Weak parts and cause analysis of frozen soil wall in the metro cross passage [J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(10): 20-23, 29. (in Chinese))
- [9] 李孟凯,蔡海兵,洪荣宝,等. 平面斜交联络通道冻结温度场分析及工程应用研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(5): 1374-1384. (Li Mengkai, Cai Haibing, Hong Rongbao, et al. Analysis and engineering application of freezing temperature field in planar skew connecting passage [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(5): 1374-1384. (in Chinese))
- [10] 张松,周晓敏,张基伟,等. 基于冻结器温升公式的单排管温度场求解方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(3): 1102-1113. (Zhang Song, Zhou Xiaomin, Zhang Jiwei, et al. A method for solving temperature field of single-row freezing pipe based on temperature rise formula of freezer [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(3): 1102-1113. (in Chinese))
- [11] 陈军浩,陈笔尖,庄言,等. 超长联络通道冻结温度场发展规律及其对隧道变形的影响[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(8): 104-111. (Chen Junhao, Chen Bijian, Zhuang Yan, et al. Development of freezing temperature field of extra-long connecting aisle and its impact on tunnel deformation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(8): 104-111. (in Chinese))
- [12] 陈冠任,李栋伟,陈军浩,等. 富水地层地铁超长联络通道冻结位移场演化规律研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(8): 3000-3013. (Chen Guanren, Li Dongwei, Chen Junhao, et al. Study on the evolution law of freezing displacement field of super-long connecting passage of subway in water-rich stratum [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(8): 3000-3013. (in Chinese))
- [13] Zheng L F, Gao Y T, Zhou Y, et al. A practical method for predicting ground surface deformation induced by the artificial ground freezing method [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 130: 103925.
- [14] Zhou J, Zhao W Q, Tang Y Q. Practical prediction method on frost heave of soft clay in artificial ground freezing with field experiment [J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2021, 1107: 103647.
- [15] 李孟凯,蔡海兵,洪荣宝. 地铁双线隧道冻结施工期地表冻胀解析预测方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(6): 2198-2209. (Li Mengkai, Cai Haibing, Hong Rongbao. Analytical prediction method of ground frost heave during freezing construction of subway twin-tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(6): 2198-2209. (in Chinese))

- 特征仿真与实测对比分析[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(4): 173-178. (Wang Dehong, Qin Yubin, Ma Dongyun, et al. Comparative simulation and measurement of the deformation features of the soil-rock deep foundation pit with appositive corner [J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(4): 173-178. (in Chinese))
- [10] Frangopol D M, Curley J P. Effects of damage and redundancy on structural reliability [J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(7): 1533-1549.
- [11] 程雪松. 地下工程中若干失稳破坏问题的机理和冗余度研究[D]. 天津: 天津大学, 2014. (Chen Xuesong. Mechanism and redundancy study of some collapse problems in underground engineering [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese))
- [12] 江杰, 肖萌, 龙团元, 等. 基于冗余度理论的深基坑环梁支撑优化分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(6): 2339-2346. (Jiang Jie, Xiao Meng, Long Tuanyuan, et al. Redundancy of ring-beam supporting structures of deep excavations [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2017, 42(6): 2339-2346. (in Chinese))
- [13] 江杰, 顾倩燕, 胡何, 等. 双排钢板桩围堰的冗余度分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(增1): 518-522. (Jiang Jie, Gu Qianyan, Hu He, et al. Study of redundancy of double-row steel sheet piles cofferdam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Supp. 1): 518-522. (in Chinese))
- [14] 宋利文, 谭燕秋. 基于施工工况下冗余度的深基坑支护体系研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(增1): 321-326. (Song Liwen, Tan Yanqiu. Research on deep foundation pit support system based on redundancy under construction condition [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(Supp. 1): 321-326. (in Chinese))
- [15] 郑刚, 程雪松, 周海祚, 等. 岩土与地下工程结构韧性评价与控制[J]. 土木工程学报, 2022, 55(7): 1-38. (Zheng Gang, Chen Xuesong, Zhou Haizuo, et al. Resilient evaluation and control in geotechnical and underground engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(7): 1-38. (in Chinese))

(上接第 672 页)

- [16] 郜新军, 李铭远, 张景伟, 等. 富水粉质黏土中地铁联络通道冻结法试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(6): 1267-1276. (Gao Xinjun, Li Mingyuan, Zhang Jingwei, et al. Field research on artificial freezing of subway cross passages in water-rich silty clay layers [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(6): 1267-1276. (in Chinese))
- [17] 王建林. 联络通道冻结-开挖过程冻结帷幕发展特性研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2023. (Wang Jianling. Study on the development law of temperature stress field of the freezing curtain in the freezing-excavation process of connecting passage [D]. Fuzhou: Fujian University of Technology, 2023. (in Chinese))
- [18] 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 Yafeng, Tong Jun, Chen Wei, et al. Fem analysis of the whole construction process of super-long inclined connecting passage by freezing method [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(4): 1317-1326. (in Chinese))
- [19] 向亮, 王飞, 靳宝成, 等. 红砂岩地层联络通道冻结法施工温度场分布研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增1): 306-311. (Xiang Liang, Wang Fei, Jin Baocheng, et al. The distribution of temperature field with the construction of connecting passage in red sandstone formation by freezing method [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(Supp. 1): 306-311. (in Chinese))
- [20] 黄建华, 严耿明, 杨鹿鸣. 水泥改良土地层联络通道冻结温度场分析[J]. 土木工程学报, 2021, 54(5): 108-116. (Huang Jianhua, Yan Gengming, Yang Luming. Analysis of freezing temperature field in connecting passage of cement improved soil layer [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(5): 108-116. (in Chinese))
- [21] 梅源, 赵良杰, 周东波, 等. 冻结法在富水砂层暗挖施工中的应用[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(4): 1-10. (Mei Yuan, Zhao Liangjie, Zhou Dongbo, et al. Application of freezing method in the concealed excavation construction of water-rich sand layer [J]. China Railway Science, 2020, 41(4): 1-10. (in Chinese))
- [22] Liu P, Hu J, Dong Q X, et al. Studying the freezing law of reinforcement by using the artificial ground freezing method in Shallow Buried Tunnels. Applied Sciences, 2024, 14(16): 7106.
- [23] Cui Z D, Zhang L J, Xu C. Numerical simulation of freezing temperature field and frost heave deformation for deep foundation pit by AGF. Cold Regions Science and Technology, 2023, 213: 103908.
- [24] Yan Q X, Wu W, Zhong H J, et al. Temporal and spatial variation of temperature and displacement fields throughout cross-passage artificial ground freezing. Cold Regions Science and Technology, 2023, 209: 103817.