

富水地层多圈水平杯型冻结温度场分布形式及变化机理研究

高磊^{1,2}

(1. 中铁十九局集团轨道交通工程有限公司, 北京 101300; 2. 西安科技大学 高新学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了掌握富水地层多圈水平杯型冻结温度场的分布形式及发展规律, 以昆明地铁城市轨道交通 5 号线冻结加固工程为背景, 通过现场监测、数值计算、室内试验对冻结帷幕温度场变化规律及内在机理展开研究, 分析冻结壁温度场在形成过程中的变化规律。试验结果表明: 在外部降温计划的作用下, 冻结壁温度场按照温度变化过程分为快速降温阶段、潜热释放阶段、稳定温度阶段及冻结维护阶段 4 个阶段。各阶段曲线变化速率与加固范围内试样未冻水含量变化具有一定的关联, 未冻水往往通过影响比热容、导热系数与潜热等热参数对冻结壁温度场的变化规律从而影响到整体下的温度场分布规律。未冻水含量变化通过改变冻结冰体圆柱与土柱的几何位置关系从而影响到试样冻结过程中的热传导形式, 其中比热容在正温阶段时随温度降低逐渐增加。

关键词: 人工冻结; 杯型冻结; 冻结帷幕; 未冻水含量; 热参数

中图分类号: TU 43

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)01-0103-10

Study on distribution form and variation mechanism of multi circle horizontal cup freezing temperature field in water rich formation

GAO Lei^{1,2}

(1. China Railway 19 Bureau Group Rail Transit Engineering Co., Ltd., Beijing 101300, China;

2. Xi'an Kedagaoxin University, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to master the distribution form and development law of multi circle horizontal cup freezing temperature field in water rich stratum, taking the freezing reinforcement project of Kunming Metro Urban Rail Transit Line 5 as the background, the variation law and internal mechanism of freezing curtain temperature field are studied through field monitoring, numerical calculation and indoor test, and the variation law of freezing wall temperature field in the formation process is analyzed. The test results show that under the action of external cooling plan, the temperature field of freezing wall can be divided into four stages according to the temperature change process: rapid cooling stage, latent heat release stage, stable temperature stage and freezing maintenance stage. There is a certain correlation between the rate of curve change in each stage and the change in unfrozen water content of the samples within the reinforcement range. Unfrozen water often affects the overall temperature distribution of the frozen wall by influencing thermal parameters such as specific heat capacity, thermal conductivity, and latent heat. The change of unfrozen water content affects the heat conduction form during the freezing process of the sample by changing the geometric position relationship between the frozen ice cylinder and the soil column, and the specific heat capacity increases gradually with the decrease of temperature in the positive temperature stage.

Key words: artificial freezing; cup-shaped freezing; frozen curtain; unfrozen water content; thermal parameters

随着城市地铁建设的不断推进, 下穿既有线、敏感建筑等工程案例逐渐丰富, 但在我国沿海地区, 地层多为软土地层、且含水量较大, 承载力较差, 极易发生失稳事故。而冻结法利用人工制冷技术使得天然岩土体结冰固化, 增加土体强度的同时能够隔绝地下水, 从而保证进(出)洞口工

程的安全与稳定。在冻结工程施作过程中, 温度场作为衡量冻结加固范围、冻结帷幕发展规律以及冻结加固效果的重要指标, 其分布形式及变化机理对于冻结工程设计与施工具有重要指导作用。

地层类型^[1-3]、冻结管布置形式^[4-5]、水力场作用^[6-7]等作为影响温度场分布的主要原因, 大量专

收稿日期: 2022-11-10

修回日期: 2023-02-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072319)

第一作者: 高磊(1990—), 男, 工程师, 主要从事城市轨道交通施工技术与管理工作。E-mail: gaoleibangong@foxmail.com

家学者以此为载体开展机理研究. Zhan 等^[8]、Fu 等^[9]基于现场监测数据研究分析了冻结过程中温度场的分布规律; Wang Zhi 等^[10]通过模型实验的方法研究了钙质黏土层冻结温度场的发展规律; Hu Xiangdong 等^[11]研究了 FSPR 的冻结特性, 同时探索了冻土墙在冻结和开挖时期随时间发展的变化规律. 同时, 很多学者利用数值计算软件针对具体工程进行优化设计, 寻求最优方案^[12-13]的研究也逐渐丰富. Wang Bin 等^[14]采用数值模拟对冻结温度场的发展情况进行预测; Yao Zhishu 等^[15]基于实际工程, 采用人工冻结法对白垩纪地层凿井温度场进行数值模拟和试验分析; Yu 等^[16]通过数值模拟复杂水平冻结工程中温度场的发展过程. 另外, 围岩参数作为影响温度场分布的主要原因, 探究各个物理量对试验土样热参数的敏感性也成为研究热点方向^[17-19]. 张潮潮等^[20]以福州地铁冻结工程为例, 对土体的冻结温度场和物理参数进行研究, 结合数值模拟对冻土温度场的变化规律进行总结. 秦坤元^[21]采用水平冻结法对冻结情况下的温度场扩散进行分析研究, 对冻结壁的发展速率和内外圈的速度变化规律进行总结. 冯志超等^[22]以熵值理论对人工冻结温度场的演变进行研究, 针对单管、双管和多管过程中的不同温度场

分布规律进行分析, 得出三种情况下的不同温度场演化规律. 陈玉燕等^[23]将模型试验和数值模拟结合, 研究不同环境温度和含水率对土体温度场的影响, 两者相互对照为冻土地区的工程建设提供参考意义.

通过以上研究可以看出, 虽然对冻结法施工技术的应用与探索已逐渐深入, 但理论研究仍落后于工程实践, 对于不同条件下的冻结温度场变化还需要更加深入地研究. 因此, 本文以昆明地铁为依托, 在对冻结壁形成过程的温度场变化规律进行研究的同时, 利用核磁共振技术对富水状态下结合水相变过程展开研究. 所取得的研究成果以期对富水地层冻结帷幕设计与施工提供理论依据.

1 工程概况

依托工程为昆明地铁五一路地铁区间, 该车站位于城市主干道五一路下方, 紧邻运营地铁 3 号线、云南美术馆建筑等敏感建筑. 施工段自上而下地层分别为人工填土、黏质粉土、圆砾土、黏质粉土、圆砾土及粉质黏土. 地铁隧道主要穿越第四系冲湖积层的中下部粉砂地层, 地内圆砾土、粉砂为主要含水层, 层间水力联系较弱, 透水性一般, 主要接受大气降水补给, 总体富水性中等.

表 1 黏土基本物理力学参数

Tab. 1 Basic physical and mechanical parameters of clay

塑限 $\omega_p / \%$	液限 $\omega_L / \%$	干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	粒径组成/ $\%$		
			2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm
15.6	30.2	1.63	0.33	1.09	1.71

全线采用盾构法进行开挖, 其中右线长 802.052 m, 左线长 791.015 m(短链长 11.037 m). 由于穿越层中含有富水砂层, 且受场地限制, 采用冻结法进行进出端头加固. 每个洞门水平引孔埋管 65 个孔, 其中外圈布置冻结孔 34 个, 中圈布置冻结孔 16 个, 内圈布置冻结孔 9 个, 测温孔 6 个. 施工过程中为保障杯型水平冻结工程加固质量, 洞口杯底加固长度 3.0 m, 外圈杯壁 9.0 m, 现场布置图如下 1.

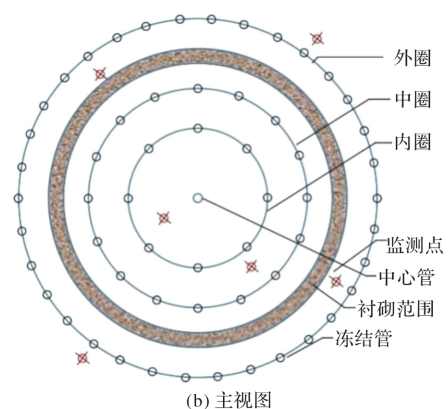


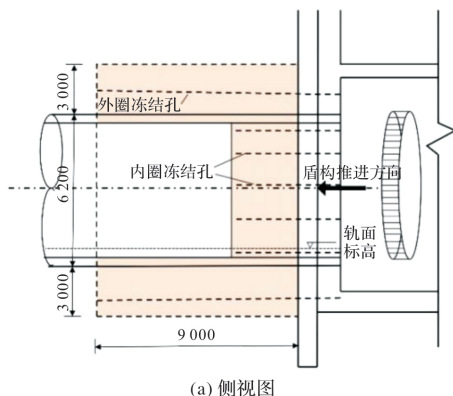
图 1 冻结孔及冻结帷幕示意图

Fig. 1 Schematic diagram of freezing hole and freezing curtain

2 温度场发展变化规律研究

2.1 盐水去回路温度变化分析

昆明市轨道交通 5 号线 5 标五一路站盾构接收工程(左线)自 2021 年 04 月 04 日开始准备工作, 至 06 月 12 日冻结结束, 共计冻结 70 d. 期间, 对管路盐水进行测温, 结果绘制了如下图 2 所示的干



管来回路盐水温度变化曲线。

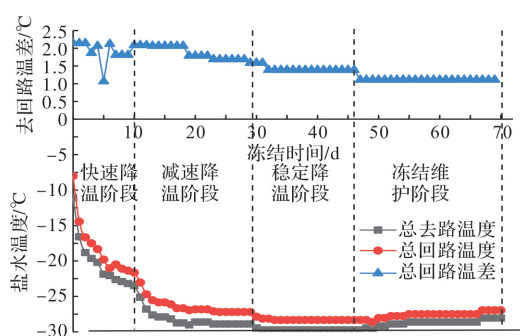


图 2 干管来回路盐水温度变化曲线

Fig. 2 Brine temperature change curve of main pipe incoming and outgoing circuit

由图 2 盐水温度监测结果可得, 人工冻结过程大体分为 4 个阶段: (1)快速降温阶段;《盾构始发与接收冻结法施工及验收规范》(NB/T 10221—2019)要求冻结法施作过程 7 d 盐水温度宜降温到 -18°C , 而本工程仅用 3 d 即将温度下降到设计要求的 -18°C , 平均降温速率达到 $6^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。同时, 该阶段盐水干管去回路温差相差较大, 起始温差为 2.14°C , 但随着盐水、地层热量交换的进行, 温差逐渐变小; (2)减速降温阶段; 此时冻结管温度应当达到设计要求的 -28°C , 此过程累计耗时 13 d, 平均降温速率为 $0.72^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。 (3)稳定降温阶段; 此阶段盐水去路温度稳定在 -29°C 左右, 保证冻结强度, 去回路温差逐渐减小, 说明冻结壁形成良好。 (4)维护冻结阶段; 在该阶段进行破除地连墙, 为保障开挖顺利进行, 需要盐水温度维持在设计要求范围内。

2.2 土体降温规律

现场测试过程中, 共设置 6 个测温孔, 其中 C1、C3 测点位于外圈外侧, C2、C4 测点位于中圈和外圈中, C5 测点位于内圈和中圈中部, C6 测点位于内圈中。由于施工中途需要破除地连墙, 使得 C5、C6 测点仅监测 47 d, 而其余测点均监测了 90 天。同时, 应当说明第 40 天时, 因地连墙破除需要外部保温层去除, 破除断面逼近内圈测点 C5、C6, 造成这两个测点数据发生波动。第 48 天时, 地连墙破除完成, 内圈冻结孔、测温孔开始拆除。由于 C1、C3 和 C2、C4 测点每组中相同半径范围存在两个测点, 因此, 由于文章篇幅原因, 仅列举这两组数据中的一组, 将 C1、C2、C5、C6 监测结果绘制了如下图 3 所示的降温曲线。

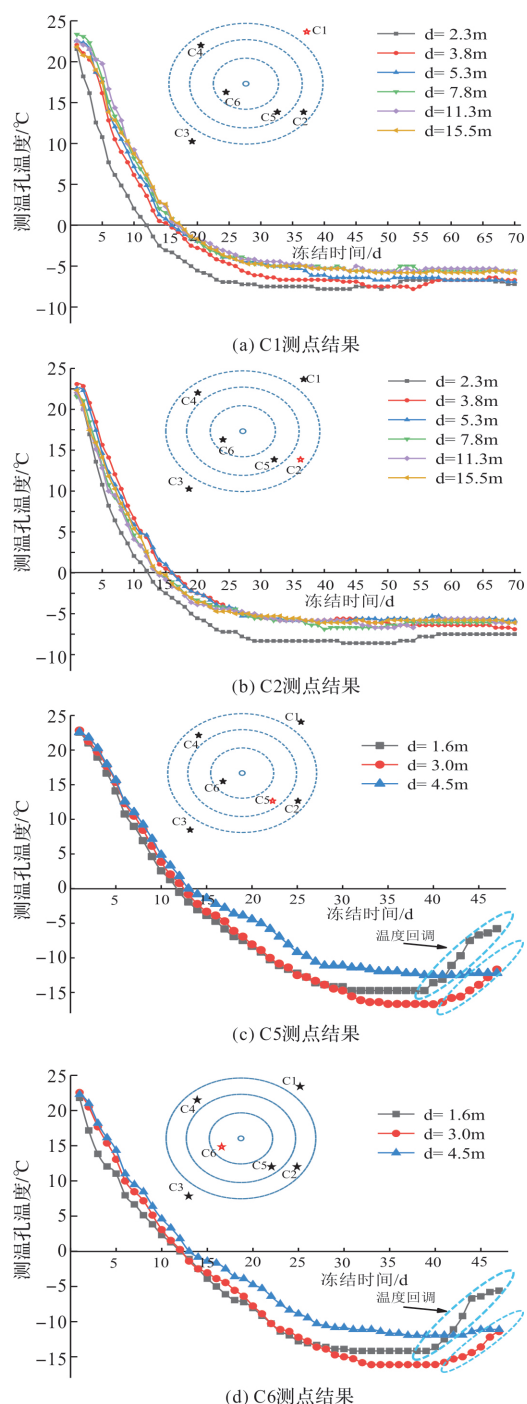


图 3 各测点降温曲线

Fig. 3 Cooling curve of each measuring point

从上图 3 可以看出, 冻结过程测温孔温度虽然随时间呈现递减趋势, 但由于循环盐水与地层相互作用而呈现出一定的阶段性, 大致结合干管来去回路盐水温度变化将地层温度分为 4 个阶段: ①快速降温阶段。此阶段地层温度与盐水温度存在较大温差, 在较大温差作用下土体开始冻结, 初始温度呈现线性快速下降的趋势, 此时孔隙水并未结晶, 温度快速下降达到过冷温度。但由于现场测试过程冻结区域相比依托工程, 冷源影响范围往往有限, 造成过冷现象很少出现在冻结法施

工过程中;②潜热释放阶段.随着土体温度逐渐降低,与盐水温度形成的温差逐渐减小.此阶段土体达到冷点,孔隙水开始大量结晶,水发生相变,瞬间释放大量的潜热.因此,该阶段降温速率较小;③稳定温度阶段.该阶段土体中往往以水、冰混合体形式存在,孔隙水结晶速率变缓,结晶释放潜热与外界冻结提供的冷量达到了一个平衡状态,使得土体温度在很长的一段时间内保持一个稳定温度.由于存在人工破除地连墙的过程,使得该阶段表现出2个特征.当未破坏地连墙保温材料时,孔隙水结晶速率逐渐减缓,结晶释放潜热与外界提供冷量达到一个平衡状态,但该阶段冻结管周围冻土圈径仍不断扩展,冻结锋面外推并逐渐交圈,各测点土层温度基本从 -1°C 向 -8°C 发展.但当破除地连墙使得外部保温层去除后,位于内圈的C5、C6测点与外界环境联通,造成这两测点发生明显回温现象.随后,这两测点也在该阶段即将结束时拔除;④冻结维护阶段.此阶段只保留中圈、外圈测点,内圈测点已被拔除.该阶段冻结壁达到设计要求,盐水与冻结壁温度基本一致,为了保证结构在开挖衬砌过程中的安全,继续向冻结器输送冷量,以维持冻结壁满足设计要求.此时由于孔隙中部分弱结合水缓慢结晶,释放少量潜热,外界提供冷量不再使得土体持续降温时,温度曲线最后趋于稳定.

冻结管交圈作为衡量冻结壁形成效果的重要指标,C1测点交圈时间为18 d,C2测点交圈时间为16 d,C5测点交圈时间为13 d,C6测点交圈时间也为13 d,具体见表1.

表2 冻土交圈时间和发展速度表

Tab.2 Permafrost intersection time and development speed

类别	外圈 外侧	外、中圈 之间	中、内圈 之间	内圈
管号	C1	C2	C5	C6
交圈时间/d	18	16	13	13
发展速度/ $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	46.2	37.5	50	61.5

由表2可知,内圈土体降温速度最快,外圈外侧、中内圈之间次之,而外、中圈之间最慢.这与冻结管布置形式一致,冻结孔在内圈最为密集,冷量输出充足.而外圈外分布广泛的未冻结区,需要消耗较大冷量,冻结效率较差.

3 冻结过程冻结壁形成规律研究

从现场测试结果可以定量明确温度场分布规律,但由于该工法为三圈冻结,除了受到地层影

响外,层与层间相互影响较大.数值模拟在提供可视化云图的同时,能够对试验结果进行补充.因此,现拟采用有限元软件建立三维冻结工程温度场模型,对该工程温度场形成过程进行研究.

3.1 数值建模

利用有限元软件Abaqus对地铁接收加固工程温度场变化情况进行建模,选取模型尺寸为 $40\text{ m} \times 20\text{ m} \times 20\text{ m}$,隧道埋深16.6 m.由于接收工程左右端对称,现仅分析一侧冻结工程的温度场分布情况.地温是冻结法施工的重要参数,测量时室外温度为 9°C 左右,地面深度9.0~24.0 m,地温稳定在 $19 \sim 21^{\circ}\text{C}$ 范围内.为了简化计算,8.0 m以下土层的初始温度设置为 20°C .该模型仅考虑重力作用,设置计算时间步长为1 d,总增量步为70 d.同时,进行网格划分时,选取单元类型为DC3D8,该单元为8结点线性传热六面体单元,能够传递温度;具体模型如下图4.

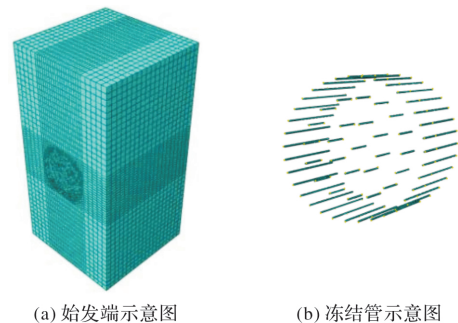


图4 数值模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of numerical model

另外,在建模过程中,设置初始地温为 26.5°C ;模型Z方向地表设置对流换热边界,对流换热系数取 $12.4\text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$,其他为绝热边界;冻结管管壁降温计划按照图2实测干管来去回路盐水温度变化曲线进行输入;另外,应当指出,该模型为了洞察温度场及冻结帷幕形成过程,不涉及开挖过程.

3.2 与实测数据对比

选取外圈外侧测温孔C1,在相同深度选取测点进行数值模拟计算结果与现场实测值的比较,具体曲线见下图5.

从对比曲线可知,无论降温趋势和降温量值,数值模拟结果与现场测试结果均表现出较高的一致性.同时,模拟曲线虽然较为平滑,但依旧呈现出一定的阶段性.虽然现场监测结果受地层情况、施工工法、冷冻设备功率等影响较大,但基本能够反映现场工况,因此该模型能够反映温度场变化及冻结帷幕形成过程.

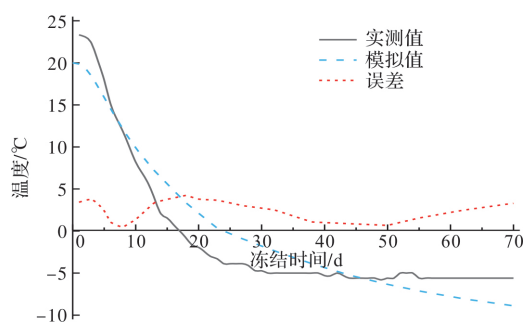


图5 模拟值与实测值温度曲线对比

Fig. 5 Comparison of temperature curve between simulated value and measured value

3.3 冻结壁形成过程

根据数值计算结果,选取1、7、13、18、27、

32、55、70 d作为重要时间节点,分别得到如图6和7所示的冻结过程温度场横截面及纵截面分布云图,具体如下。

从上图可以看出,开始阶段仅在冻结管附近区域产生环形负温圈;随着降温计划的不断推进,冻结锋面不断扩张,加固区范围不断扩展,外圈内侧及内圈外侧范围均基本达到负温;随着盐水回路冷源的不断输入,冻结加固范围全部进入负温状态,但此时强度尚未达到设计要求;接着随着冻结时长的累计,外侧冻结管开始出现交圈,基本达到设计强度;降温计划步入最后阶段,内圈、中圈冻结壁形成冻结帷幕,加固计划完成。

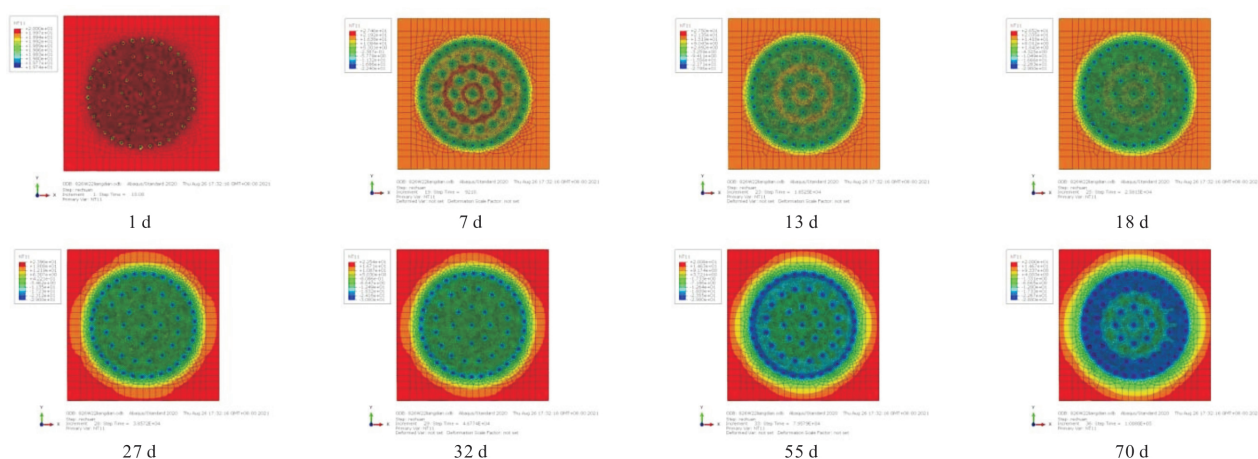


图6 冻结过程温度场横截面分布云图

Fig. 6 Cloud diagram of cross section distribution of temperature field in freezing process

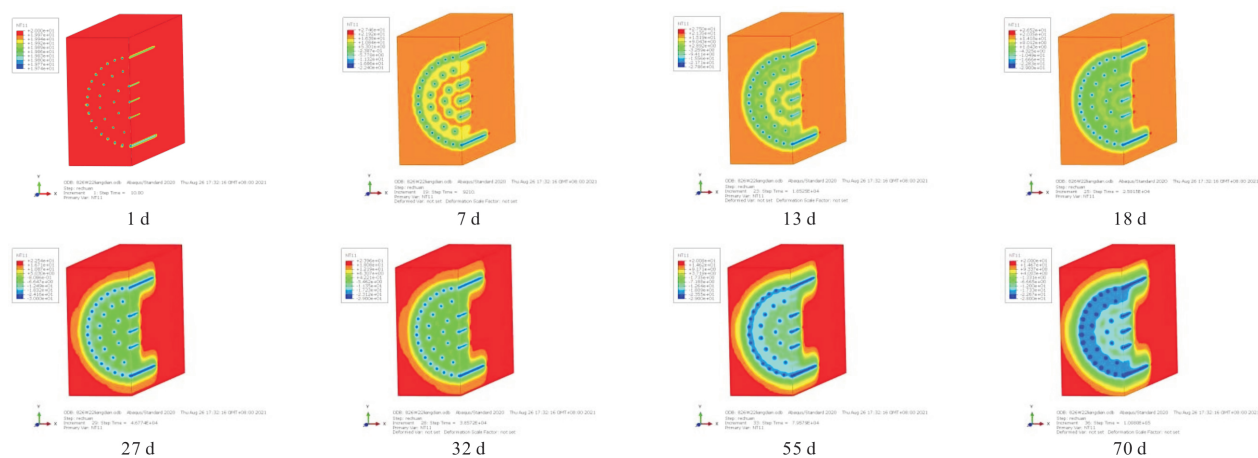


图7 冻结过程温度场纵截面分布云图

Fig. 7 Cloud diagram of longitudinal section distribution of temperature field in freezing process

4 冻结加固温度场变化机理分析

冻结过程中监测工作对准确掌控冻结壁的状态、及时处理异常情况有着至关重要的作用,可确保整体协调性、开挖的适用性,合理、科学地

控制各个因素的变化。加固区域温度监测的测温管管材选用 $\Phi 89 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 20# 钢管,温度监测设备采用自制 MS-100 型温度采集仪,配合热电偶联结若干传感器。C1~C4 测温孔布置 11 个温度传感器, C5~C6 布置 5 个温度传感器,监测频率为

1~2次/d. 冻胀力的监测通过在测温管的管壁上固定土压力盒进行;采用电子温度传感器配合精密水银温度计实时监测盐水温度,对去、回路盐水温度,包括总管去、回路盐水温度和分管去、回路盐水温度.

从现场监测、室内试验结果可以看出,冻结帷幕形成过程温度场并非与时间呈现良好的线性负相关,而表现出一定的阶段性,且各阶段降温速率存在较大差异.同时,不同阶段冻结帷幕形成过程及温度场变化情况依旧存在差异.揭示出现这种现象的机理,对于日后冻结帷幕设计及确定冻结加固范围具有重要指导意义.

众所周知,冻结法施作过程中,温度场影响下冻结范围内土体经历了未冻土、冻结土、冻实土三个过程,该过程使得土体中的孔隙水发生相变转化为冰、水结合体,且冰、水混合体比例在相变过程中不断调整.即,当土体处于负温状态时,其中仍有液态水存在,这部分液态水称为未冻水.明确未冻水含量变化便是抓住相变变化诱因,这对衡量地层热传导情况,评判冻结效果具有重要意义.

4.1 未冻水含量测试

本文利用低场核磁共振技术对土体未冻水含量进行测试.测试过程,充分考虑依托工程地层工程地质情况,设置试样干密度为 1.8 g/cm^3 ,初始含水率为 24%,采用静压式制样仪制备 $61.8 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的试样.同时,将试验试样装入密闭的塑料盒内,装入热电偶 K 型测温仪,将塑料盒置于冷冻箱中,分别当土体温度为 15、5、1、0.5、0、-0.5、-1、-3、-5、-8、-10、-15 $^{\circ}\text{C}$ 进行核磁共振测试.

将核磁共振谱面积进行整理,绘制在温度与信号强度组成的坐标系内.由于正温情况下,孔隙水与核磁信号强度之间存在着良好的线性关系,对正温实测数据进行顺磁线性回归并延长至负温,在负温区的某温度下未冻水含量等于该温度下信号强度 Y_1 乘以未冻结的含水率除以该温度下回归线所示的信号强度 Y 值,具体见下式.

$$\omega_u = \omega_0 \cdot \frac{Y}{Y_1} \quad (1)$$

式中: ω_0 为土样的初始含水率; Y 为信号强度; Y_1 为计算的信号强度.由于篇幅原因,本文未冻水求解图解以及求解过程均绘制在下图 8 中.

从上图可以看出,未冻水含量随温度场变化过程大致分为两个部分,试样温度为正温时,试样中未出现冰晶,随着温度的降低未冻水含量基

本保持平稳状态;随着温度降低至负温,未冻水含量快速下降,尤其当温度在 $[-1, -5 \text{ }^{\circ}\text{C}]$ 区间时,此时未冻水含量变化最快,冰晶快速形成,这也是发生相变的主要阶段;此后,未冻水含量随温度降低逐渐放缓,最后曲线趋于平稳,在此过程大量未冻水已经发展为冰相,核磁已很难捕捉到液态水;为了能够较为直观反映该相变过程,绘制了如图 9 所示的示意图.

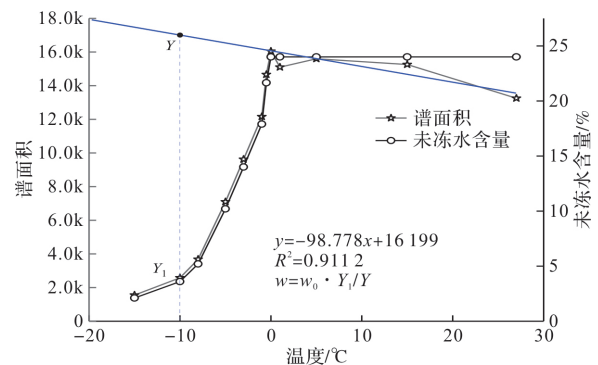


图 8 未冻水计算图解及含量变化曲线

Fig. 8 Calculation diagram and content change curve of unfrozen water

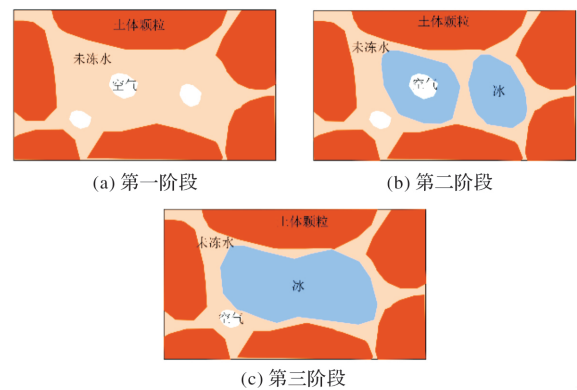


图 9 相变过程示意图

Fig. 9 Schematic diagram of phase transition process

4.2 热参数随温度变化情况

从以上研究结果可知,土体冻结过程实为相变过程,也是未冻水含量逐渐调整的过程.而比热容、导热系数、相变潜热作为影响冻结温度场变化的主要原因,也与未冻水含量之间表现出较强的相关性.以比热容为例,液态水的比热容为 $4.200 \text{ J/(g} \cdot ^{\circ}\text{C)}$,冰的比热容为 $2.100 \text{ J/(g} \cdot ^{\circ}\text{C)}$,且两者比例不断调整,势必造成热参数的变化,从而影响温度场分布.本文利用瞬态平面热源法对不同饱和度、不同温度下试样比热容、导热系数进行测试,得到如下试验结果.

4.2.1 比热容随时间变化的敏感性分析

比热即比热容,又称比热容量,指单位质量

物体改变单位温度时吸收或放出的热量。在试样冻结过程中, 存在固态冰与液态水之间的转化过程, 该过程必然涉及到热量交换。因此, 冻土的比热应该涵盖五个组成部分, 即固体颗粒、孔隙水、孔隙冰和孔隙气的比热权重, 以及孔隙水(冰)的相态改变需要的热量^[24]。

图 10 为比热容随温度变化曲线, 从图上可以看出, 土体比热随温度变化基本呈现三个阶段, 当温度为正温阶段时, 比热容随温度降低逐渐增加, 且增加速率逐渐加快; 当温度处于 $[0, -2\text{ }^{\circ}\text{C}]$ 范围内时, 土体比热容曲线直线下降, 此时为试样中相变发生的主要阶段, 试样中孔隙水发展为以孔隙水与孔隙冰为主的混合物; 当环境温度降至 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时, 随着温度变化试样比热容逐渐减小, 最终趋于平稳状态。此时, 试样中相变已完全结束, 孔隙充填物完全为孔隙冰。

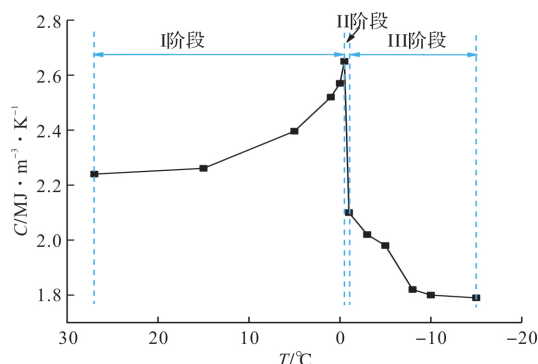


图 10 比热容随温度变化曲线

Fig. 10 Variation curve of specific heat capacity with temperature

4.2.2 导热系数随时间变化的敏感性分析

在稳定传热条件下, 单位时间内通过单位面积的热量称为导热系数, 导热系数的单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。由于冰的导热系数与水的导热系数相差很大, 因此在冻结过程中, 土的导热系数往往会随着冰与水之间的比例的变化而不断变化。

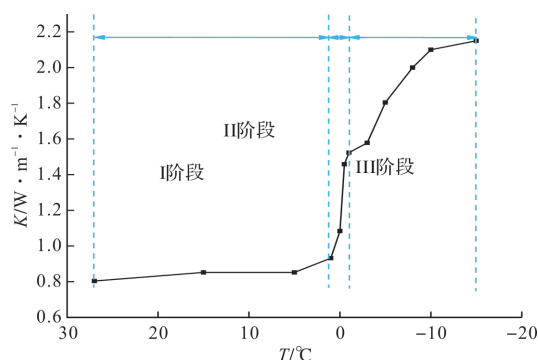


图 11 导热系数随温度变化曲线

Fig. 11 Variation curve of thermal conductivity with temperature

图 11 为比热容随温度变化曲线, 从上图可知,

土体导热系数同样随温度变化呈现出三个变化阶段, 即平缓阶段、相变潜热阶段和增长阶段。其中, 当试样温度为正温时, 导热系数几乎不发生变化, 此时试样依然为固体颗粒、空气以及液态水组成的三相体, 组分、含量均未发生变化; 而当温度处于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近时, 试样发生相变过程, 由以往的三相体向四相体发生变化, 部分孔隙水转换为孔隙冰, 此阶段导热系数急剧增长; 当潜热阶段结束后, 试样导热系数发展为稳定增长阶段, 此时为未冻水含量调整变化最为剧烈的过程。

4.2.3 相变潜热随时间变化的敏感性分析

土体温度降低到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时, 土中水进入水冰土体的降温过程, 而释放大量的潜热。通常, 冻土的相变热可以通过量热法测得, 但是相比于比热容测试, 其对测试环境及量热测温设备精度要求更高, 非专业实验室的测试结果误差较大。因此, 可通过未冻水含量对冻土相变热进行计算。

$$Q = L\rho_d(\omega - \omega_u)$$

式中: Q 为相变热, L 为水结晶或融化释放的潜热, KJ/kg ; ρ_d 为土的干密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ω 为土体的总含水率; ω_u 为冻土的未冻水含量。

根据计算结果绘制了如图 12 所示的潜热随温度变化曲线。

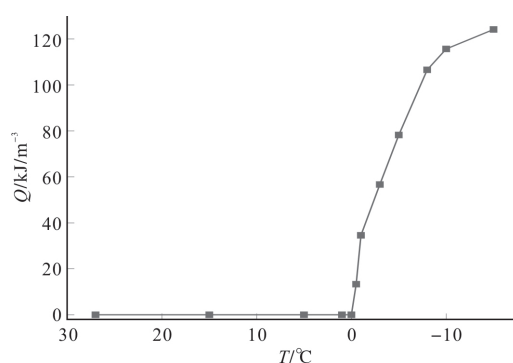


图 12 潜热随温度变化曲线

Fig. 12 Variation curve of latent heat with temperature

从上图可以看出, 相变潜热与冻结温度息息相关, 在正温阶段并未发生相变, 因此潜热值为 0; 当温度达到 $[-5, 0\text{ }^{\circ}\text{C}]$ 时, 曲线变化速率最大, 而低于 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 变化速率明显减弱。此规律与图 3 各测点降温曲线中测点温度变化情况高度一致。

4.3 机理讨论

结合现场测试、数值计算以及室内试验结果, 对上文人工冻土冻结过程温度曲线变化机理进行分析。在进行冻土热参数计算时, 通常采用紧密排列土柱模型对热参数进行计算分析。因此, 利

用土柱间几何关系进行机理分析,不但具有十足依据,并且更加直观.该模型假定冻土热参数变化模型可以采用土柱几何模型.假定土柱被水分充填,冻结过程始发于土柱包围区域的几何中心.随着温度的降低,土体中冰柱出现,冰柱发展过程又可以分为四种几何关系,分别为未出现冰柱、冰柱与土柱相离和相切以及孔隙完全被冰柱覆盖,如图 13 所示.

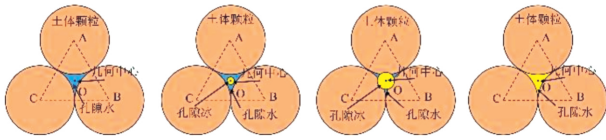


图 13 冻结冰体圆柱与土柱的位置关系

Fig. 13 Positional relationship between frozen ice column and soil column

根据不同时期土柱、水柱和冰柱的几何关系能够直接反映各相变体的体积比例关系,进而推算材料的热参数.上图仅为冻土相变过程的空间代表单元,对于人工冻结工程,涉及千千万万个单元组合而成.因此,热参数应当为所有单元热参数耦合的结果.以导热系数为例,根据 Johansen 的广义几何平均法^[25],得到

$$\lambda_f = \lambda_i^{r_i} \lambda_w^{r_w} \lambda_s^{r_s}$$

式中: λ_i 、 λ_w 、 λ_s 分别表示冰、水、土体矿物的导热系数; r_i 、 r_w 、 r_s 分别表示单位体积中冰柱、水柱、土柱所占比例.因此,各项物质所占比例将对试样热参数产生较大影响,且直接影响了各相物质单元之间的几何关系,从而会对各相物质间热传导路径产生影响.

为了说明各项物质所占比例对热传导通路的影响机理,利用 Wiener 提出的复合介质热传导理论对其进行揭示.通常认为复合介质材料的导热系数存在上下两个界限,在这两个界限上导热系数分别为最大值和最小值.当各相叠加方向与热量方向垂直时,导热系数最小,此时试样热传导过程为垂直流过程,图 14(a).当叠加方向与热量方向平行时,导热系数最大,此时试样热传导过程为平行流过程^[14],图 14(b).

当为未冻结状态时,认为当各相叠加方向与热量方向垂直时,按照垂直流计算,此时导热系数最小;当为冻结状态时,当叠加方向与热量方向平行时,按照平行流计算,此时导热系数最大.其余冻结过程的热传导方式均介于垂直流和平行流之间,属于混合流传导方式,并随着孔隙水与孔隙冰之间比例调整而进行调整.因此,结合试

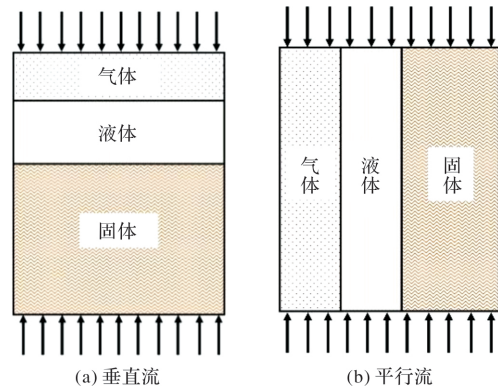


图 14 热传导形式

Fig. 14 Heat conduction form

验结果可以看出,当试样处于未冻结状态时,此时未冻水含量为恒定值 1,冻结冰体圆柱与土柱的位置关系相对恒定,土体中热传导方式近似为垂直流状态;当试样处于完全未冻结状态时,此时未冻水含量为 0,冻结冰体圆柱与土柱的位置关系同样相对恒定,土体中热传导方式近似为平行流状态.这也说明随着未冻水的完全消耗,试样中冰体圆柱与土柱的位置关系及热传导形式到达稳态,试样热参数趋于稳定;而在未冻水含量尚未达到恒定值时,冻结冰体圆柱与土柱的位置关系及热传导形式均处于动态变化中,该过程热参数变化最为复杂,这也使得土体热参数不断发生动态变化,这也影响人工冻结工程温度场变化速率不断调整的本源所在.

5 结论

通过现场测试、数值计算和室内试验的方式对多圈水平杯型冻结过程温度场变化形式及内在机理进行了研究,得到如下结论:

(1)富水地层人工冻结工程降温计划通常为快速降温、减速降温、稳定降温及维护冻结 4 个阶段.其中稳定降温阶段冻结壁形成良好;

(2)多圈冻结工程冻结壁温度场在干管来去回路盐水作用下:快速降温阶段地层与盐水间温度差异较大,初始温度开始呈现线性快速下降;潜热释放阶段土体达到冷点,孔隙水开始大量结晶发生相变,瞬间释放大量潜热;稳定温度阶段孔隙水结晶速率变缓,使得土体温度在很长的一段时间内保持一个稳定温度;冻结维护阶段冻结壁已达到设计要求;

(3)通过室内试验可知,冻结过程冻结壁温度场变化规律是由于试样中未冻水含量引起的,而未冻水含量在正温状态基本保持平稳状态;而在

$[-1, -5\text{ }^{\circ}\text{C}]$ 区间时变化最快;最后,未冻水含量随温度降低逐渐放缓,最后趋于平稳;

(4)未冻水含量变化通过改变冻结冰体圆柱与土柱的几何位置关系从而影响试样冻结过程中的热传导形式,具体表现出热参数随温度变化而变化的现象.其中比热容在正温阶段时随温度降低逐渐增加.在 $[0, -2\text{ }^{\circ}\text{C}]$ 范围内时,土体比热容曲线直线下降.当环境温度降至 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时,随着温度变化试样比热容逐渐减小,最终趋于平稳状态;而导热系数、相变潜热均表现出正温阶段基本平稳,负温阶段逐渐增加的变化趋势.

参考文献 References

- [1] 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.
HU 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.
- [2] 杨笑.粗粒土地层人工冻结过程中的温度场研究[D].北京:北京建筑大学,2020.
YANG Xiao. Study on thermal regime of coarse-grained soil layer under artificial freezing[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
- [3] 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.
- [4] 向亮,叶飞,梁兴,等.考虑冻结管影响范围的多管冻结温度场研究[J].隧道建设(中英文),2021,41(1):52-59.
XIANG Liang, YE Fei, LIANG Xing, et al. Multi-tube freezing temperature field considering range of influence of freezing tubes[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(1): 52-59.
- [5] 方涛,胡向东.广义单排管冻结稳态温度场解析解[J].煤炭学报,2019,44(S2):535-543.
FANG Tao, HU Xiangdong. Generalized analytical solution to steady-state temperature field of single-row piped freezing[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S2): 535-543.
- [6] 张松,岳祖润,孙铁成,等.突发定渗流作用下冻土温度场演化规律及判别方法[J].煤炭学报,2020,45(12):4017-4027.
ZHANG Song, YUE Zurun, SUN Tiecheng, et al. Evolution of ground freezing temperature field under sudden seepage with stable flow rate and discriminate method of seepage[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(12): 4017-4027.
- [7] 杨凡.大流速渗透地层人工冻结温度场模型试验研究[D].合肥:安徽理工大学,2020.
YANG Fan. Model test of artificial freezing temperature field in high velocity permeable formation[D]. Hefei: Anhui University of Science & Technology, 2020.
- [8] ZHAN Z X, CUI Z D, PING Y, et al. In situ monitoring of temperature and deformation fields of a tunnel cross passage in Changzhou Metro constructed by AGF[J]. Arabian Journal of Geosciences, 13(8): 1-12.
- [9] FU Y, HU J, WU Y W. Finite element study on temperature field of subway connection aisle construction via artificial ground freezing method[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 189: 103327.
- [10] WANG Zhi, RONG Chuanzin, DU Meng, et al. The development law of the freezing temperature field of a calcareous clay layer[J]. Math Emtical Problems in Engineering. 2020(11): 1-12.
- [11] HU Xiangdong. WU Yuanhao, LI Xinyi. A field study on the freezing characteristics of freeze-sealing pipe roof used in ultra-shallow buried tunnel[J]. Applied Sciences, 2019, 9(8): 1532.
- [12] 尚晓林.人工冻结法施工地铁联络通道冻结设计及实测研究[D].西安:西安科技大学,2019.
SHANG Xiaolin. Freezing design and actual measurement of subway communication channel constructed by artificial freezing method[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [13] 姬文轩.富水卵砾石地层地铁联络通道人工冻结法施工模型试验研究[D].西安:西安科技大学,2017.
JI Wenxuan. Research on modeling test of construction by artificial freezing method of metro contact passage in gravel stratum with abundant water[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.
- [14] WANG Bin, RONG Chuanxin, CHENG Hua, et al. Research and application of the local differential freezing technology in deep alluvium[J]. Advances in Civil Engineering, 2020(9): 1-15.
- [15] YAO Zhishu, CAI Haibing, XUE Weipei, et al. Numerical simulation and measurement analysis of the temperature field of artificial freezing shaft sinking in Cretaceous strata[J]. AIP Advances, 2019, 9(2):

- 025209.
- [16] YU C Y, LU M Y. Study on development characteristics of horizontal freezing temperature field in subway connecting passage [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 619: 01 2086.
- [17] 李长清. 富水卵砾石地层水平冻结基本物理力学参数及应用研究[D]. 西安:西安科技大学, 2018.
- LI Changqing. Research on basic physical and mechanical parameters and application of horizontal freezing in water rich gravel stratum[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018.
- [18] 董西好, 叶万军, 杨更社, 等. 温度对黄土热参数影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2888-2894, 2900.
- DONG Xihao, YE Wanjun, YANG Gengshe, et al. Experimental study of influence of temperature on thermal properties of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 2888-2894, 2900.
- [19] 叶万军, 董西好, 杨更社, 等. 含水率和干密度对黄土热参数影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 656-662.
- YE Wanjun, DONG Xihao, YANG Gengshe, et al. Effect of moisture content and dry density on thermal parameters of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(3): 656-662.
- [20] 张潮潮, 崔猛. 复杂地质条件下地铁联络通道冻结工程冻土温度场变化规律[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(9): 150-154, 159.
- ZHANG Chaochao, CUI Meng. Variation law of frozen soil temperature field in freezing engineering of subway connecting passage under complex geological conditions [J]. Urban Rail Transit Research, 2023, 26(9): 150-154, 159.
- [21] 秦坤元. 水平冻结法温度场温度扩散分析[J]. 科技和产业, 2023, 23(12): 245-249.
- QIN Kunyuan. Temperature diffusion analysis of temperature field in horizontal freezing method [J]. Technology and Industry, 2023, 23(12): 245-249.
- [22] 冯志超, 刘朝福, 罗金梅. 基于焓值理论土体人工冻结温度场演变规律研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(S1): 429-433.
- FENG Zhichao, LIU Chaofu, LUO Jinmei. Study on the evolution law of artificial freezing temperature field of soil based on enthalpy theory [J]. Industrial Building, 2023, 53(S1): 429-433.
- [23] 陈玉燕, 马学宁, 张正. 环境温度及含水率对土体温度场影响研究[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(5): 168-174.
- CHEN Yuyan, MA Xuening, ZHANG Zheng. Study on the influence of ambient temperature and water content on soil temperature field [J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(5): 168-174.
- [24] 夏锦红. 粘土的热物理参数和冻结过程中的温度场演变研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- XIA Jinhong. Study on thermal parameters and temperature field evolution of clay during freezing [D]. Wuhan: Wuhan University of technology, 2020.
- [25] 陈之祥, 李顺群, 夏锦红, 等. 基于紧密排列土柱模型的冻土热参数计算[J]. 深圳大学学报(理工版), 2017, 34(4): 393-399.
- CHEN Xiangzhi, LI Shunqun, XIA Jinhong, et al. Calculation of thermal parameters of frozen soil based on the closely spaced soil column model [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2017, 34(4): 393-399.

(编辑 郑晓龙 沈 波)