

# 地铁双线隧道下穿既有车站冻结加固冻胀控制措施

陈湘生<sup>1,2,3</sup>, 丁航<sup>1</sup>, 李方政<sup>1</sup>, 陈曦<sup>2,3</sup>, 高伟<sup>1</sup>, 王恒<sup>1</sup>, 王磊<sup>1</sup>, 陈汉青<sup>2,3</sup>

(1. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 2. 深圳大学土木与交通工程学院, 广东深圳 518060; 3. 深圳大学未来地下城市研究院, 广东深圳 518060)

**摘要:** 针对城市长距离大断面地下空间冻结工程的冻胀特性问题, 依托上海地铁18号线国权路站双线隧道下穿既有车站冻结工程, 基于热力耦合方程, 利用有限元软件建立三维数值模型, 结合室内试验所得物理参数, 研究该工程的冻胀位移场演化规律, 并探究错峰冻结、调整盐水温度等措施对冻胀位移场的影响规律。在本试验条件下, 研究表明: ① 冻胀引起的车站底板变形主要发生于积极冻结期; 双线隧道同时冻结模式下, 冻结45 d时车站底板竖向位移量达到冻结90 d时竖向位移量的77.72%。② 冻结90 d时, 错峰冻结工况下车站底板竖向位移量较双线隧道同时冻结时减小了7.7%, 表明错峰冻结避免了同一时间段内的冻胀叠加效应, 一定程度上降低冻胀效应。③ 冻结90 d时, 调整盐水温度工况下车站底板竖向位移量较温度调控前减小34.2%; 表明调整盐水温度可控制冻土扩展速率, 有效降低冻胀效应。实际工程中, 采用错峰冻结、调整盐水温度等措施协同控制冻胀, 车站底板最大竖向位移为25.41 mm; 数值模拟所得车站底板抬升规律与实测数据基本一致, 有效指导了工程施工。

**关键词:** 隧道; 地铁车站; 冻胀; 地下空间; 数值分析

**中图分类号:** TU91 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)01-0172-09

## Frost heave control measures for the frozen double-line tunnel undercrossing an operation station

CHEN Xiangsheng<sup>1,2,3</sup>, DING Hang<sup>1</sup>, LI Fangzheng<sup>1</sup>, CHEN Xi<sup>2,3</sup>,  
GAO Wei<sup>1</sup>, WANG Heng<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, CHEN Hanqing<sup>2,3</sup>

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 3. Underground Polis Academy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** Aiming at the frost heave characteristics of long-distance and large-section underground freezing projects in cities, the double-line tunnel of Shanghai Metro Line 18 undercrossing an operation station was select as an example, a three-dimensional numerical model was established by using finite element software based on the thermal-mechanical coupling equation. Combined with the physical parameters obtained from laboratory tests, the evolution law of frost heave displacement field of the project was studied, and the influence of measures such as the staggered peak freezing and the adjustment of brine temperature on the frost heave displacement field was explored. Under the experimental conditions, the results show that: ① the deformation of the station floor caused by frost heave which mainly occurs in the active freezing

收稿日期: 2023-12-20 修回日期: 2024-02-27 责任编辑: 王凡 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1721

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(52090084); 天地科技股份有限公司科技创新创业资金青年资助项目(2022-2-TD-QN010); 国家自然科学基金青年资助项目(52008197)

作者简介: 陈湘生(1956—), 男, 湖南湘潭人, 中国工程院院士。E-mail: xschen@szu.edu.cn

通讯作者: 李方政(1972—), 男, 安徽合肥人, 研究员, 博士。E-mail: 1291441700@qq.com

引用格式: 陈湘生, 丁航, 李方政, 等. 地铁双线隧道下穿既有车站冻结加固冻胀控制措施[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 172-180.

CHEN Xiangsheng, DING Hang, LI Fangzheng, et al. Frost heave control measures for the frozen double-line tunnel undercrossing an operation station[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 172-180.



移动阅读

period. When the double-line tunnel is frozen at the same time, the vertical displacement of the station floor at 45 days of freezing reaches 77.72% of the displacement at 90 days of freezing. ② When the freezing time reaches 90 days, compared with simultaneous freezing, the displacement of the station floor reduced by 7.7% under the condition of staggered peak freezing. The superposition effect of frost heave in the same time period is effectively avoided, and the frost heave effect is reduced to a certain extent. ③ When the freezing time reaches 90 days, compared with simultaneous freezing, the displacement of the station floor reduced by 34.2% under the condition of adjusting the brine temperature, it shown that the expansion rate and frost heave effect of frozen soil are effectively controlled. In engineering practice, measures such as staggered freezing and adjusting brine temperature are used together to control frost heave, and the maximum vertical deformation of the station floor is 25.41 mm. The deformation law of the station floor obtained by numerical simulation is basically consistent with the measured data, which effectively guided the construction of the project.

**Key words:** tunnel; subway station; frost heave; underground space; numerical analysis

21 世纪是地下空间开发利用的世纪<sup>[1-3]</sup>。在城市土地与空间资源高度集约化利用的背景下, 地下空间的开发利用已成为缓解地上建设空间压力的重要手段之一, 而地下空间工程的安全高效建设至关重要。城市浅层土质多松软富水、稳定性较差, 而国内外工程实践表明, 冻结法仍是当前解决地下工程建设面临“水、软、变形难以预测”三大难题的一种灵活可靠绿色技术<sup>[4-6]</sup>。冻结法是通过人工制冷的方式使地层中的水结冰, 在地层中形成一定厚度的冻结壁, 提高土体强度且抵抗水土压力<sup>[7]</sup>, 在冻结壁的保护下进行地下工程结构的掘砌施工; 冻结法已在地铁车站出入口、地下换乘通道、地铁联络通道等城市地下工程中得到广泛的应用<sup>[8]</sup>。但在冻结施工过程中, 地层水冰相变产生体积膨胀使地层冻胀变形<sup>[9-12]</sup>, 若控制不当易出现地表建筑不均匀隆起、管线断裂等现象, 甚至造成工程事故。

国内外学者针对市政冻结施工过程中冻胀效应展开研究, 李方政<sup>[13]</sup>以上海体育场穿越工程为背景, 采用随机介质理论, 得出多管冻结冻胀叠加理论计算公式; 季昌等<sup>[14]</sup>基于现场实测数据, 结合数值计算分析, 得出冻土体的实际冻胀率, 并采取泄压控制冻胀; 陶东军等<sup>[15]</sup>以苏州地铁某联络通道冻结工程为例, 得出距离联络通道中轴线约 25 m 范围内的地表变形受到冻结法施工的影响较大的结论; 杨平<sup>[16]</sup>对软弱地层联络通道温度场及位移场进行了全程实测研究, 基于实测数据得出地表冻胀融沉槽为联络通道中线两侧符合拟正态分布规律, 其影响范围约为隧道底部埋深的 1.2 倍。

以上工程中关于冻胀效应的研究成果多集中于联络通道, 针对城市长距离大断面地下空间冻结工程的工况鲜有研究。类似地铁车站、隧道穿越等城市长

距离大断面地下空间冻结工程的冻土体量约万方, 是常规联络通道冻土体量的 30 倍, 冻胀效应显著; 因此对城市长距离大断面地下空间冻结工程冻胀效应及控制措施的研究具有一定的必要性。为此, 依托上海地铁 18 号线国权路双线隧道下穿既有车站冻结工程, 基于热力耦合方程, 结合室内试验所得土体物理参数, 对该工程进行数值分析, 研究隧道冻结温度场及车站底板位移动演化规律, 及不同冻胀控制措施对车站底板位移动的影响规律。经工程验证数值模拟方法可行, 冻胀控制措施应用效果良好。以期类似长距离大断面地下空间冻结工程设计施工提供参考。

## 1 工程概况

根据地质勘察资料, 上海地铁 18 号线国权路站隧道冻结工程下穿 10 号线车站, 隧道顶部埋深 18.79 m, 距离 10 号线车站底板仅 2.21 m, 且车站下方存有 4 道地连墙和钻孔灌注桩; 隧道断面为圆形, 管片外径 6.6 m, 壁厚 0.35 m, 拟冻结长度为 36 m。冻结地层主要位于灰色黏土、灰色粉质黏土中, 上述土层为典型的上海地区软土层; 地层中的灰色淤泥质土具有高含水量、高压缩性、低强度等特点, 易出现突发涌水流砂事故; 隧道上方存有较多管线, 若冻胀引起车站底板较大位移变形时, 将导致车站底板开裂或管线破坏。

该隧道水平冻结加固设计采用“内圈孔+外圈孔+加强孔”理念, 采用 $\phi 108 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的低碳无缝钢管作冻结管、测温管及泄压管, 上、下行线共布置 126 个冻结孔、18 个测温孔, 计划双线隧道同时冻结时积极冻结期 45 d, 上、下行线冻结壁厚度设计值为 2 m、冻结壁的平均温度不低于 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 。国权路隧道冻结如图 1 所示。

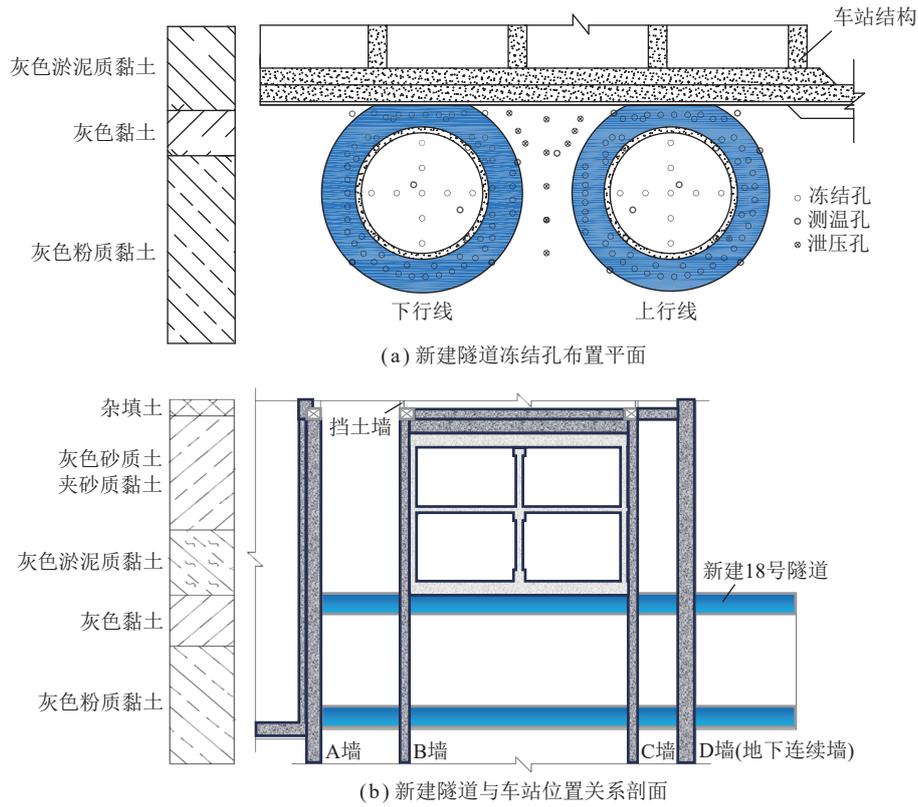


图1 国权路隧道冻结示意

Fig.1 Freezing schematic diagram of Guoquan Road Tunnel

## 2 冻结热力耦合机制

### 2.1 基本假定

冻结施工期间温度场是与空间、时间相关的瞬态温度场,冻结过程中包含相变、冻结锋面迁移、对流换热等物理现象,影响因素众多。因此假设:①不考虑土体中水渗流对冻结壁发育的影响;②冻结管壁温度近似为盐水温度;③水冰相变仅发生在 $[T_m, 0]$ 内,其中, $T_m$ 为结冰点温度。

### 2.2 控制方程

#### 2.2.1 温度场方程

根据孔隙介质的热传导原理,其温度场控制方程<sup>[5]</sup>为

$$C_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (K_{eq} \nabla T) + q = Q_m \quad (1)$$

式中, $C_{eq}$ 为等效体积热容,  $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $T$ 为土体温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $t$ 为时间,  $\text{s}$ ;  $K_{eq}$ 为等效导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $q$ 为相变潜热,  $\text{kJ}/\text{m}^3$ ;  $Q_m$ 为热源汇。

该方程的初始条件与边界条件为

$$\begin{cases} T|_{t=0} = T_0 \\ T(r=0)|_{t=0} = T_y \\ T(r=\infty) = T_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $T_0$ 为土体的初始温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $r$ 为距离冻结管外壁的长度,  $\text{m}$ ;  $T_y$ 为盐水温度,  $^\circ\text{C}$ 。

空气与冻结壁交界面处的对流换热边界条件为

$$K_{eq} \frac{\partial T}{\partial n_1} = h_f (T_a - T) \quad (3)$$

式中, $T_a$ 为大气温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $n_1$ 为地表的法线方向矢量;  $h_f$ 为大气与土体的对流换热系数,  $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

#### 2.2.2 本构方程

冻结法施工时,土体中发生水冰相变,土体弹性模量随温度降低而逐渐增大,土体中应力随温度变化。因此除考虑力场作用下土体应力和应变外,还需要考虑温度场对土体力场的影响。基于弹性力学,建立热应力方程,其应力-应变关系<sup>[5]</sup>为

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E(T)} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha(T) \Delta t \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E(T)} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] + \alpha(T) \Delta t \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E(T)} [\sigma_z - \mu(\sigma_y + \sigma_x)] + \alpha(T) \Delta t \end{cases} \quad (4)$$

式中, $x$ 、 $y$ 、 $z$ 为 $x$ 方向、 $y$ 方向、 $z$ 方向;  $E(T)$ 为弹性模量随温度变化的关系式,  $\text{MPa}$ ;  $\alpha(T)$ 为热膨胀系数随温度变化的关系式;  $\Delta t$ 为温度变化。

结合冻结温度场控制方程与土体热力本构方程,得出人工冻结条件下热力耦合控制方程。由该方程可知,冻胀量与土体膨胀系数及温差有关,减小冻胀量需要控制土体温度梯度及减小土体膨胀系数;因此

在城市长距离大断面地下空间冻结工程中可以通过改变盐水温度梯度、错峰冻结及改良土体冻胀特性<sup>[17]</sup>等措施以实现冻胀控制。

### 2.3 计算参数取值

采用 ISOMET 热导仪对国权路灰色粉质黏土导热系数及比热进行测定, 所得数据如图 2 所示。由图 2 可以看出, 随着冻结温度不断降低, 灰色粉质黏土的导热系数不断增高, 2 者之间近似呈线性变化; 灰色粉质黏土的比热容随冻结温度降低而降低, 2 者之间亦近似呈线性变化。采用 XT5201FST 冻土冻结温度测定仪测定了灰色粉质黏土的结冰温度为 $-0.51\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

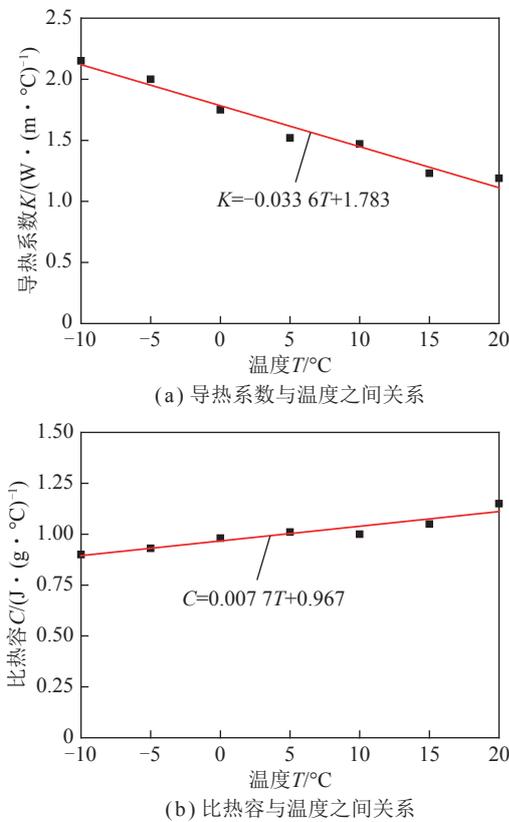


图 2 热物理参数与温度之间关系

Fig.2 Relationship curve between thermophysical parameters and temperature

冻土弹性模量取瞬时抗压强度 ( $\sigma_s$ ) 的一半与其所对应的应变值 ( $\varepsilon/2$ ) 的比值。试验得到的土样弹性模量随温度的变化规律如图 3 所示。由图 3 可以看出, 在本试验区间内, 弹性模量与温度之间近似呈指数变化, 当冻结温度由 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  降至 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 冻土弹性模量增加  $61.1\text{ MPa}$ 。

进行无水源补给封闭条件下的单向冻胀试验<sup>[18-19]</sup>, 采用 XT5405B 型冻胀仪测定 $-5$ 、 $-10$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  时灰色粉质黏土冻胀率; 试验得到的不同冷端温度下土样冻胀率随时间变化的规律曲线如图 4 所示。由图 4 可

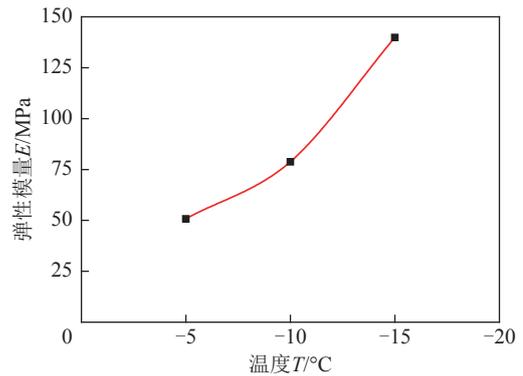


图 3 弹性模量与温度之间关系

Fig.3 Relationship curve between elastic modulus and temperature

以看出, 不同冷端温度下, 土体冻胀率随时间变化规律基本一致, 可大致分为 3 个阶段: ① 快速增长阶段 ( $0\sim 10\text{ h}$ )。此阶段当冷端温度越低, 冻胀率曲线曲率越大, 增长速率越快。② 缓慢增长阶段 ( $11\sim 25\text{ h}$ )。此阶段当冷端温度越低, 土体冻胀率越快进入稳定阶段。③ 稳定阶段 ( $26\sim 80\text{ h}$ )。此阶段土体冻胀率增速都趋于平缓。

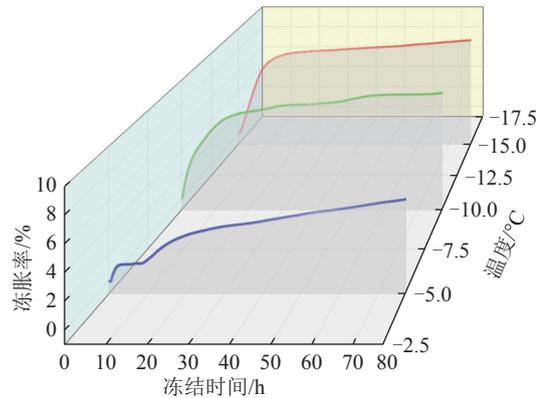


图 4 不同温度下土体冻胀率与时间的关系曲线

Fig.4 Relationship curves between frost heave rate and time at different temperatures

## 3 工程案例数值分析

### 3.1 数值计算模型

基于热力耦合方程, 结合室内试验获得灰色粉质黏土热物理参数; 通过编写 APDL 程序, 实现土体热物理学参数随温度变化进行调整, 从而建立了计算参数随温度场变化的热力耦合数值模型; 研究地铁双线隧道下穿既有车站时隧道冻结温度场、车站底板冻胀位移场演化规律。

考虑到冻结施工对周边环境的影响及边界效应对计算结果的影响, 计算模型在 X 轴、Y 轴、Z 轴方向上尺寸分别取  $85$ 、 $50$ 、 $40\text{ m}$ ; 建立如图 5 所示的有限

元模型。为简化计算,视隧道全部处于灰色粉质黏土层中;当土体温度低于 $-0.51\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,认为此处土体已由未冻土转化成冻土。模型边界条件为:假定隧道周围土体初始地温为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;冻结管壁温度为实际盐水降温曲线;模型底面设置为垂直约束,4个侧面设置法向约束,模型顶面设置为自由边界条件。

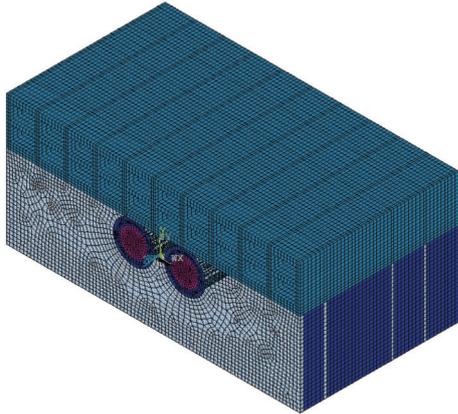


图 5 有限元模型

Fig.5 Finite element model

为研究隧道下穿车站冻胀位移场演化规律,参照现场监测点的位置在车站底板布设 D1、D2、D3 三个位移监测点,用于监测冻胀引起的竖向位移演化规律,监测点位置如图 6 所示。考虑到调整盐水温度会延长积极冻结期<sup>[20-23]</sup>;因此将双线隧道同时冻结、错峰冻结、调整盐水温度这 3 种冻结模式的冻结时间统一为 90 d,以冻结 90 d 时冻胀引起的监测点竖向位移量为指标,研究错峰冻结、调整盐水温度等措施的冻胀控制效果。数值计算采用热膨胀系数模拟土体冻胀过程。基于不同温度下的土体冻胀率与时间的关系曲线,结合模型试验数据<sup>[24]</sup>,对热膨胀系数取值进行迭代优化,反演出更符合本工况下的热膨胀系数。

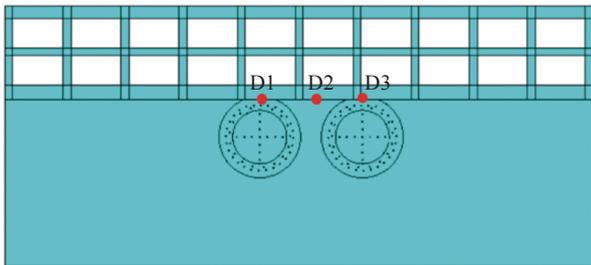


图 6 监测点布置

Fig.6 Layout of monitoring points

### 3.2 计算结果分析

#### 3.2.1 冻结温度场演化规律

冻结 45 d 时的隧道冻结温度场分布规律如图 7 所示。当冻结进行到 45 d 时,冻结壁厚度达到 2.2 m、平均温度为 $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,均超过设计值,待开挖冻土

量较大。基于冻结温度场演化规律分析可知,该设计方案偏保守;因此在实际冻结施工中,可通过调低盐水温度、错峰冻结等措施来降低冻土体量。

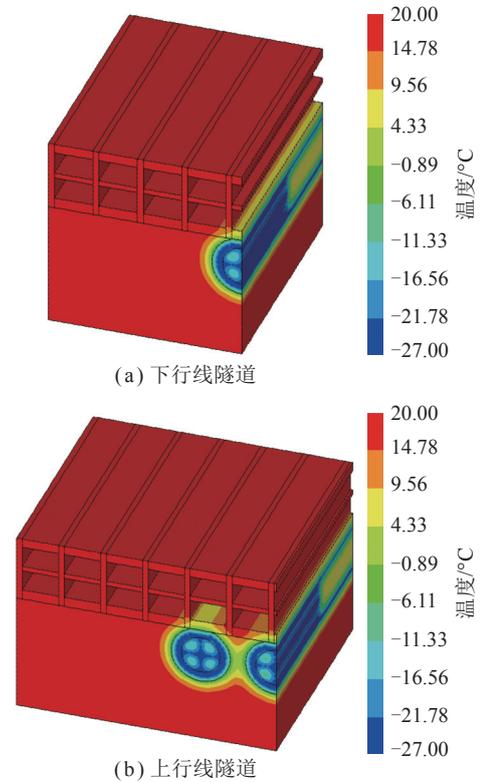


图 7 隧道温度场剖面

Fig.7 Tunnel temperature field profile

#### 3.2.2 冻胀位移场演化规律

冻结 45 d 时的冻胀位移场分布规律如图 8 所示。由图 8 可知,隧道周边土体及车站都因冻胀效应发生竖向位移;车站底板最大竖向位移在冻结壁与车站底板界面处,位移为 28.425 mm。靠近冻结壁区域的土体、车站底板竖向位移较为明显,远离冻结壁区域土体、车站底板竖向位移逐渐减小,表明冻胀效应对周边环境的影响程度随着远离冻结壁逐渐减弱。

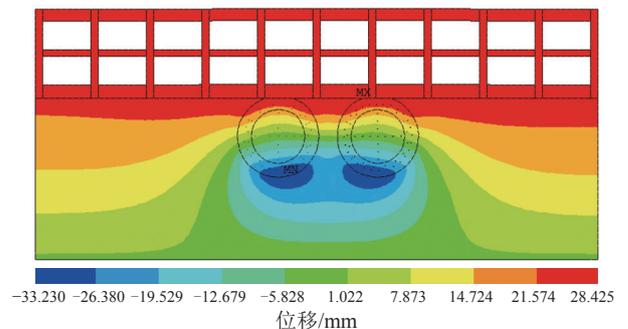


图 8 冻胀位移场云图

Fig.8 Cloud image of frost heave displacement field

监测点 D1、D2、D3 的时间位移曲线如图 9 所示。冻结期间,冻胀引起车站底板位移的演化规律大致分

为3个阶段。以监测点D1为例: ① 位移快速增长阶段(0~20 d)。冻结20 d时, 位移达到17.48 mm; 位移平均增速为0.87 mm/d, 表明冻胀现象显著。② 位移缓慢增长阶段(21~45 d)。冻结45 d时, 位移达到27.91 mm; 位移平均增速为0.42 mm/d, 冻胀位移平均增速减缓, 表明冻胀现象减弱。③ 位移趋于稳定阶段(46~90 d)。冻结90 d时, 位移达到34.43 mm; 位移平均增速为0.14 mm/d, 表明冻胀现象趋于稳定。分析可知, 冻胀引起的位移场与冻结壁存在密切联系; 冻结壁交圈前, 冻胀位移变化量明显, 冻结壁交圈后, 冻胀位移变化量随冻结壁厚度增加线性上升; 在冻结后期, 冻胀位移变化量趋于平缓。数值计算未考虑取土泄压等工况对冻胀的抑制作用, 用该方法模拟预测冻胀变形时需对计算结果相应折减以符合实际工况。

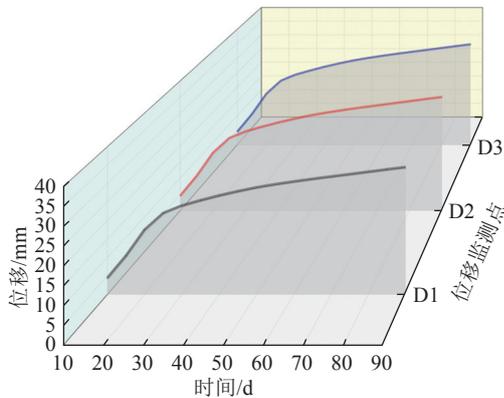


图9 车站底板位移变化曲线

Fig.9 Displacement curves of station floor

### 3.3 冻胀控制措施分析

#### 3.3.1 错峰冻结

下行线先行冻结45 d后, 上行线再冻结45 d。冻结期间, 监测点D1、D2、D3的时间位移曲线如图10所示。由图10可知, 冻结初期, 由于上行线未形成冻结壁, 下行线冻结壁周围土层冻胀现象更为明显; 冻结45 d时, 测点D1、D3位移分别为12.78、11.08 mm, 测点D1位移较测点D3位移高出13.4%; 冻结45 d后, 上行线也进入积极冻结期, 测点D1与测点D3间位移差距不断减小; 冻结90 d时, 两者间差距仅为0.07 mm。冻结45 d时, 测点D1位移为12.78 mm, 为双线隧道同时冻结时位移量的45.8%; 冻结90 d时, 测点D1位移为31.78 mm, 较双线隧道同时冻结时减小了2.65 mm, 位移量减小7.7%。

采用错峰冻结模式延长了车站底板位移达到峰值的时间点, 避免了同一时间段内冻胀的叠加效应; 采用错峰冻结能在一定程度上减小冻胀效应, 但冻胀效应的显著程度主要受冻土体量的影响。当冻结工期较为宽松时, 可采取错峰冻结模式避免冻胀的叠加

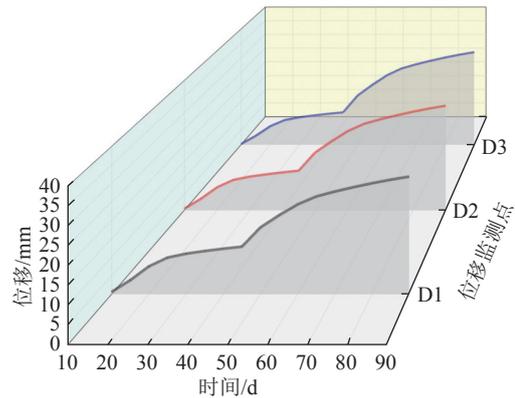


图10 错峰冻结下车站底板位移变化曲线

Fig.10 Displacement curves of station floor under the staggered peak freezing

效应, 以减轻同一时间段冻胀对地表构筑物的影响。

#### 3.3.2 调整盐水温度

调整盐水温度是将盐水温度由 $-28^{\circ}\text{C}$ 调整至 $-20^{\circ}\text{C}$ 。冻结期间, 监测点D1、D2、D3的时间位移曲线如图11所示。由图11可知, 各监测点冻胀量随时间变化的规律与采用 $-28^{\circ}\text{C}$ 盐水冻结时的规律基本一致; 冻结90 d时, 测点D1位移为22.63 mm, 位移较同时冻结模式下时降低了34.2%。冻结前30 d时, 各测点位移与时间呈线性关系, 平均增速为0.54 mm/d; 冻结31~50 d时, 冻胀现象减弱, 平均增速为0.15 mm/d; 冻结51~90 d时, 冻胀位移呈缓慢增长趋势, 平均增速为0.08 mm/d, 即冻结后期冻胀现象趋于稳定。

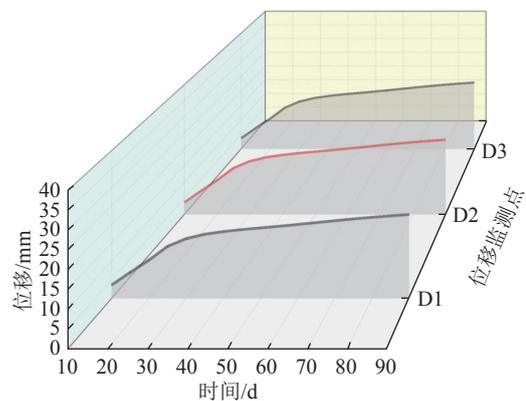


图11 调整盐水温度下车站底板位移变化曲线

Fig.11 Displacement curves of station floor under the adjustment of brine temperature

盐水温度为 $-20^{\circ}\text{C}$ 时, 土体的降温速度较慢, 冻胀引起车站底板位移明显降低; 通过调整盐水温度, 在保证冻结壁厚度及完整性的基础上, 通过控制冻土发展速率减小冻土体量, 以减小冻胀效应。

## 4 工程应用效果实测分析

基于数值分析得出的不同冻胀控制措施下车站

底板位移演化规律,提出在工程实践中采取调整盐水温度、错峰冻结等措施协同控制冻胀对车站结构的影响。在10号线国权路车站轨行区布设车站结构竖向变形监测点D1、D2、D3,测点的布设位置如图12所示。

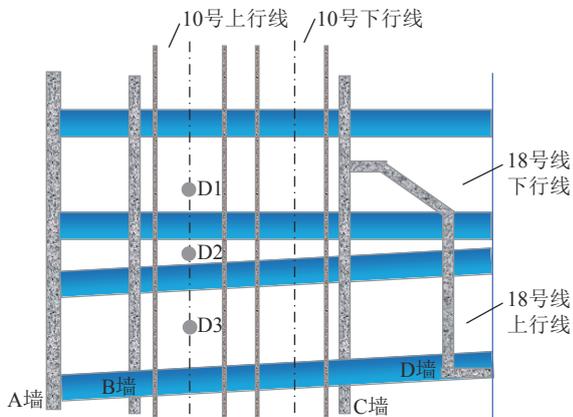
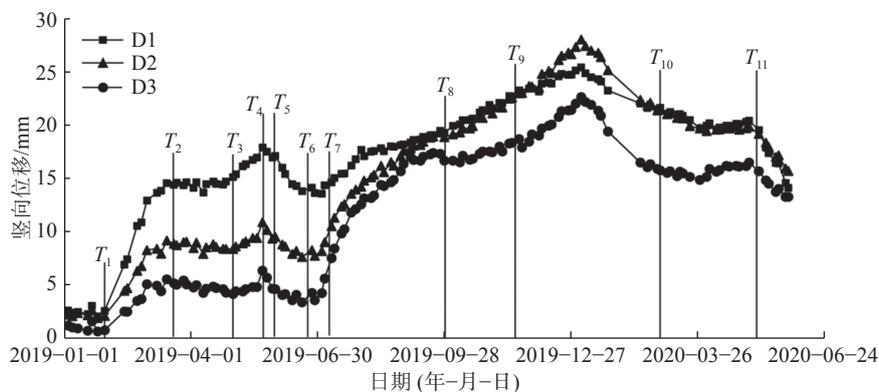


图12 车站结构变形监测布点

Fig.12 Layout of monitoring points for structural deformation of stations

实际施工中,为保证冻结质量,对积极冻结时间进行了延长;选取测点从2019-01-04—2020-05-28的竖向位移数据,测点的竖向位移量随时间的变化曲



注:  $T_1$  为下行线全线冻结;  $T_2$ — $T_3$  为下行线内圈孔取土泄压;  $T_4$ — $T_5$  为上行线试冻;  $T_5$  为下行线BC段(B墙—C墙)开始开挖;  $T_6$  为上行线AB段(A墙—B墙)冻结;  $T_7$  为上行线全线冻结;  $T_8$ — $T_9$  为上行线BC段(B墙—C墙)开挖;  $T_{10}$ — $T_{11}$  为维护冻结。

图13 监测点竖向变形实测曲线

Fig.13 Measured vertical displacement curves of monitoring points

## (2) 调整盐水温度。

选取D1、D2、D3进行变形速率分析,见表2。上、下行线隧道在积极冻结期间盐水温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。上、下行线隧道开挖完成后,开始填充泡沫混凝土。全部施工工序完成,2020-02-28将盐水温度调整为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,通过维护冻结( $T_{10}$ — $T_{11}$ 阶段)在保证冻结壁完整的前提下控制冻土扩展速率。以测点D1为例:  
① 盐水温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,2019-01-30测点的竖向变形量为2.66 mm,2019-03-15测点的竖向变形量为14.62 mm,冻胀引起的车站底板位移平均变化速率为

线如图13所示,图中 $T_n(n=1, 2, \dots, 10)$ 为不同施工工序的时间节点。

### (1) 错峰冻结。

选取D1、D2、D3进行变形速率分析,见表1。2019-05-15( $T_4$ 时刻)上行线进行开机试冻结,冻结7 d后停止冻结;此时下行线BC段(B墙—C墙)尚未开挖。以测点D1为例:5月15日测点的竖向变形为16.78 mm,5月22日测点的竖向变形为17.95 mm,冻胀引起的车站底板位移平均变化速率为 $0.18\text{ mm/d}$ 。7月1日( $T_7$ 时刻)上行线再次开始开机冻结,此时测点的竖向变形为13.69 mm,7月7日测点的竖向变形为14.42 mm,冻胀引起的车站底板位移平均变化速率为 $0.10\text{ mm/d}$ 。分析原因,上行线第1次全线冻结时,下行线仍处于积极冻结阶段,存在冻胀叠加作用,导致车站结构的竖向变形增长速率较快;上行线第2次全线冻结时,此时下行线(B墙—C墙)已开挖完成,下行线冻结对车站影响较小。监测点实测位移演化规律与数值模拟规律基本一致,错峰冻结时双线隧道上方车站底板同时抬升,其中先行冻结区域冻胀引起的位移更为明显;说明数值模型能较好地模拟冻胀过程。

$0.27\text{ mm/d}$ 。② 盐水温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,2020-02-28测点的竖向变形为21.65 mm,2020-05-01测点的竖向变形为20.46 mm,冻胀引起的车站底板位移平均变化速率为 $-0.02\text{ mm/d}$ ,即车站结构竖向位移基本保持不变。

分析原因,调整盐水温度与间歇冻结控制冻胀的机理是一致的,较高的冻结温度使土体内的温度梯度较小,导致冻结锋面的水分迁移量小,从而抑制了冻胀的产生;同时通过控制冻土发展速率减小冻土体量,以减小冻胀效应。监测点实测位移演化规律与数值

表 1 错峰冻结下监测点的竖向变形量

Table 1 Vertical displacement of monitoring points under the staggered peak freezing

冻结日期	上行线第1次全线冻结		上行线第2次全线冻结		
	2019-05-15	2019-05-22	2019-07-01	2019-07-07	
D1	竖向变形/mm	16.78	17.95	13.69	14.42
	变化速率/(mm · d <sup>-1</sup> )		0.18		0.10
D2	竖向变形/mm	9.48	10.95	7.8	9.09
	变化速率/(mm · d <sup>-1</sup> )		0.21		0.18
D3	竖向变形/mm	4.88	6.43	3.66	5.67
	变化速率/(mm · d <sup>-1</sup> )		0.22		0.28

表 2 不同温度盐水冻结时监测点的竖向变形量

Table 2 Vertical deformation of monitoring points during freezing at different brine temperatures

盐水温度	盐水温度-25 ℃		盐水温度-10 ℃		
	2019-01-30	2019-03-15	2020-02-28	2020-05-01	
D1	竖向变形/mm	2.66	14.62	21.65	20.46
	变化速率/(mm · d <sup>-1</sup> )		0.27		-0.02
D2	竖向变形/mm	2.19	9.23	21.47	19.88
	变化速率/(mm · d <sup>-1</sup> )		0.16		-0.03
D3	竖向变形/mm	0.85	5.62	15.8	16.52
	变化速率/(mm · d <sup>-1</sup> )		0.11		0.01

模拟规律基本一致,均表现为车站底板位移影响受盐水温度影响较为显著,盐水温度越低,冻胀引起的车站底板位移越大,说明数值模型能较好地模拟冻胀过程。

## 5 工程对策

在城市富水软土地层中进行长距离大断面地下空间冻结工程施工时,若无冻胀控制措施,将会产生较大的冻胀效应;因此需要做到“事前精准设计,事中协同控制”,进行针对性管控,以实现对环境微扰动的效果。

(1) 结合冻结温度场控制方程与土体热力本构方程可知,当工程原状土体冻胀特性较为明显时,可在冻结施工前向地层中掺入水泥以改良土体,通过降低土体冻胀率以减小施工中冻胀效应对周边环境的影响;最优水泥掺入比通过室内冻胀特性试验进行确定。

(2) 对于重大敏感工程,在工期允许的情况下,采用调整盐水温度、错峰冻结等措施,在保证冻结壁厚度的前提下控制冻结壁向外发展速率,通过减小冻土体量实现协同控制冻胀的目标。

## 6 结 论

(1) 经现场实测数据验证,基于人工冻土室内试验数据和热力耦合方程建立的数值计算模型,能较为有效地模拟预测城市长距离大断面地下空间冻结工程的冻胀演化规律,可为实际工程应用提供参考。

(2) 数值计算中,在错峰冻结模式与同时冻结模式下,车站底板最大抬升量分别为 31.78、34.43 mm;错峰冻结模式下产生的车站底板位移量较同时冻结模式下减小 7.7%。当冻结工期较为宽松时,可采取错峰冻结的方式,避免冻胀的叠加效应,以减轻同一时间段冻胀对地表构筑物的影响。

(3) 冻胀引起的车站底板变形主要发生在冻结壁交圈期间,车站底板竖向位移量随着冻结壁厚度的增加不断增大;当冻胀位移较为明显时,通过调整盐水温度,在保证冻结壁厚度及完整性的基础上,通过控制冻土体量以控制冻胀效应。

## 参考文献(References):

- [1] 陈湘生,付艳斌,陈曦,等. 地下空间施工技术进展及数智化技术现状[J]. 中国公路学报, 2022, 35(1): 1-12.  
CHEN Xiangsheng, FU Yanbin, CHEN Xi, et al. Progress in underground space construction technology and technical challenges of digital intelligence[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(1): 1-12.
- [2] 金乐文,王琛,梁发云. 城市滨海软土地区深层地下空间开发现状及工程问题[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 178-183.  
JIN Lewen, WANG Chen, LIANG Fayun. Status and engineering problems of utilization of deep underground space in urban coastal soft soil areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 178-183.
- [3] 孙钧. 国内外城市地下空间资源开发利用的发展和问题[J]. 隧道建设, 2019, 39(5): 699-709.  
SUN Jun. Development and some issues on exploitation and utilization of urban underground space in China and abroad[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(5): 699-709.

- struction, 2019, 39(5): 699–709.
- [4] 陈湘生. 地铁域地下空间利用的工程实践与创新[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [5] 陈湘生. 地层冻结工法理论与实践[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007.
- [6] 李方政. 地铁冻结技术发展现状与趋势[J]. 建井技术, 2020, 41(5): 33–42.  
LI Fangzheng. Development status and tendency of groundfreezing technology in metro system[J]. Mine Construction Technology, 2020, 41(5): 33–42.
- [7] 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): 2308–2314.  
LU Xianlong, CHEN Xiangsheng, CHEN Xi. Risk prevention and control of artificial groundfreezing(AGF)[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(12): 2308–2314.
- [8] 盛应平. 软土地层地铁车站浅埋冻结暗挖法施工方案分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(6): 138–142.  
SHENG Yingping. Analysis on metro station construction with shallow-buried frozen excavation method in soft soil stratum[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(6): 138–142.
- [9] 余才高, 黎庆, 周子朋, 等. 交叠车站下穿段 MJS+水平冻结冻胀位移场研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(3): 1034–1043.  
SHE Caigao, LI Qing, ZHOU Zipeng, et al. Study on MJS +horizontal freezing frost heave displacement field incrossing section of overlapping station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(3): 1034–1043.
- [10] 张婷. 盾构进出洞水平冻结温度场及地表冻胀变形研究[J]. 南京: 南京林业大学, 2013.  
ZHANG Ting. Study on horizontal freezing temperature and frost heaving deformation of ground surface of shield's starting and arriving[J]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013.
- [11] 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.
- [12] 李方政, 方亮文, 王磊, 等. 近接隧道冻结对运营车站冻胀变形控制研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S1): 292–299.  
LI Fangzheng, FANG Liangwen, WANG Lei, et al. Thefrost heave deformation controlling method of anoperation station caused by freezing adjacent tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S1): 292–299.
- [13] 李方政. 土体冻胀与地基梁相互作用的叠加法研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 79–85.  
LI Fangzheng. Research on superposition method of interaction between soil frost heave and beams on foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 79–85.
- [14] 季昌, 许恺, 贾煜. 复杂地层内地铁联络通道冻结施工冻胀控制研究[J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(6): 17–23.  
JI Chang, XU Kai, JIA Yu. A research on frozen -heave control of freezing method applied to thesubway connected aisle in complex strata[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2011, 28(6): 17–23.
- [15] 陶东军, 桂林, 李建望. 地铁隧道联络通道冻结施工引起地表变形实测分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(5): 69–73.  
TAO Dongjun, GUI Lin, LI Jianwang. Measurement analysis of surface deformationcaused by freezing construction of connection passages in metro tunnels[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(5): 69–73.
- [16] 杨平, 陈瑾, 张尚贵, 等. 软弱地层联络通道冻结法施工温度及位移场全程实测研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2226–2234.  
YANG Ping, CHEN Jin, ZHANG Shanggui, et al. Wholerange monitoring for temperature and displacement fields of cross passage in soft soils by AGF[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12): 2226–2234.
- [17] 方亮文, 李方政, 丁航, 等. 水泥改性冻土力学特征和冻融特征研究[J]. 建井技术, 2023, 44(3): 8–13.  
FANG Liangwen, LI Fangzheng, DING Hang, et al. Research on mechanical characteristics and freeze-thaw characteristics of cement-modified frozen soil[J]. Mine Construction Technology, 2023, 44(3): 8–13.
- [18] 国家安全生产监督管理总局. 人工冻土物理力学性能试验第 1 部分: 人工冻土试验取样及试样制备方法: MT/T 593.1—2011[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011.
- [19] 国家安全生产监督管理总局. 人工冻土物理力学性能试验第 2 部分: 土壤冻胀试验方法: MT/T 593.2—2011[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011.
- [20] 王磊, 李方政, 方亮文, 等.  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  盐水冻结隧道近接下穿上覆结构冻胀规律试验研究[J]. 隧道建设, 2020, 40(9): 1307–1313.  
WANG Lei, LI Fangzheng, FANG Liangwen, et al. Experimental study on influence of frost heaving ofundercrossed tunnel by freezing method with  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  refrigerant on upper structure[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(9): 1307–1313.
- [21] WANG Lei, WANG Yanting, LI Fangzheng, et al. Influenceof different freezing modes on the base slab displacement of anupper structure[J]. Applied Sciences, 2020, 10(1): 27.
- [22] 商厚胜, 岳丰田, 石荣剑. 浅覆土下矩形冻结加固的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 149–155, 161.  
SHANG Housheng, YUE Fengtian, SHI Rongjian. Modeltest of artificial ground freezing in shallow-buried rectangular cemented soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 149–155, 161.
- [23] CAI H, LI S, LIANG Y, et al. Model test and numericalsimulation of frost heave during twin-tunnel constructionusing artificial ground-freezing technique[J]. Computersand Geotechnics, 2019(115): 103155.
- [24] 方亮文. 淤泥质土层中穿越隧道冻结冻胀规律试验研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2021.  
FANG Liangwen. Experimental research on freezing and frost heaving laws of crossing tunnel in muddy soil[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2020.