

DOI: 10.11779/CJGE201712011

# 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

杨 平<sup>1</sup>, 陈 瑾<sup>1</sup>, 张尚贵<sup>2</sup>, 万朝栋<sup>2</sup>

(1. 南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 中铁十八局集团有限公司, 天津 300222)

**摘要:** 研究软弱地层联络通道冻结法施工的冻结温度场、解冻温度场、冻胀融沉发展规律, 是解决其冻胀及工后融沉预测与控制的前提。以软土隧道联络通道冻结法工程为背景, 对冻结温度场、解冻温度场、地表变形、深层土体冻胀融沉及温度变化规律等进行了全程实测, 对冻结壁的形成及解冻全过程进行了分析。结果表明: 冻结过程温度变化规律可分为温度快速下降、降温减慢、降温速度加快、土体温度稳定、维护冻结等5个阶段。解冻期间, 土体温度经历快速回升、0℃附近稳定、温度持续回升3个阶段。冻结圆柱交圈是产生迅速冻胀的临界时间点, 冻胀主要发生在冻结18~45 d; 联络通道解冻15 d, 部分土体温度达到0℃附近, 冻土进入相变阶段, 因此应在15 d后开始融沉跟踪注浆; 入土深度越大土体相变阶段持续时间越长, 粉土融沉主要发生在解冻前2个月, 其完全解冻需要100 d左右, 此为跟踪注浆至少应持续时间。深部土体温度、冻胀融沉位移均随深度增大呈线性递增。实测拱顶冻结壁处最大冻胀及融沉位移分别是对应地表冻胀、融沉量的3.6倍、4.9倍。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。

**关键词:** 联络通道; 冻结法; 冻结温度场; 解冻温度场; 深层土体冻胀融沉; 全程实测

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)12-2226-09

作者简介: 杨 平(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土与地下工程的教学与研究。E-mail: [yangping@njfu.edu.cn](mailto:yangping@njfu.edu.cn)。

## Whole range monitoring for temperature and displacement fields of cross passage in soft soils by AGF

YANG Ping<sup>1</sup>, CHEN Jin<sup>1</sup>, ZHANG Shang-gui<sup>2</sup>, WAN Chao-dong<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

**Abstract:** Studying the temperature fields of freeze-thaw and development laws of frost heave and thaw settlement in the construction of cross passage in soft soils by artificial ground freezing method (AGF) is the premise to solve the problem of frost heave and thaw settlement. Taking the construction of cross passage in soft soils by AFG as the engineering background, the variation rules of freeze-thaw temperature, ground surface deformation, frost heave and thaw settlement of the deep soils are monitored during the whole range, then the variations of temperature and deformation of the frozen wall are analyzed. The results show that the process of freezing can be divided into five stages by temperature: rapid drop of temperature, slow drop of temperature, accelerated drop of temperature, temperature stability and freezing maintenance. But during the thawing period, the variation of soil temperature can be divided into three stages: rapid rise of temperature, temperature stability around 0°C and sustainable rising. The frozen cylinder closed is the critical time to produce rapid frost heave, and frost heave mainly occurs during 18 to 45 days after the start of freezing. After thawing for 15 days, the temperature of soils partly reaches that close to 0°C, then comes into the phase transformation stage. Therefore, in order to control the thaw settlement, tracing compensation grouting should be taken after 15 days from the starting of thawing. The soil phase transition process lasts longer as the soil is deeper. The thawing settlement of silt mainly occurs in the first two months since thawing, and it completely thaws for about 100 days. This is also the minimum time that should be continued for tracking compensation grouting. The temperature and displacement of frost heave and thaw settlement in deep soils increase linearly with the increasing depth. The maximum

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478226); 中铁18局科研项目  
收稿日期: 2016-09-28



displacement of frost heave and thaw settlement at the dome of frozen wall are respectively 3.6 times and 4.9 times those of ground surface. The frost heave and thaw settlement slots of the ground surface are vertical to the center line of the cross passage, and both sides are in line with the normal distribution. The influence range is about 1.2 times the depth of the bottom of the tunnel.

**Key words:** cross passage; freezing method; freezing temperature field; thawing temperature field; frost heave and thaw settlement of deep soil; whole range monitoring

## 0 引言

冻结法因其具有止水性、较高冻土强度和对复杂地层适应性等特点, 已成为地铁联络通道的主要施工方法, 但软弱地层中冻胀及工后融沉预测与控制问题仍未得到很好解决, 时有发生营运期间融沉过大而影响正常运营事件。

不少学者对冻结法施工联络通道进行了研究, 在冻结温度场、位移场实测研究方面, 胡向东等<sup>[1]</sup>通过对不同位置, 不同深度的实测分析, 探究了管片散热对冻结壁的影响; 岳丰田<sup>[2]</sup>对江底联络通道冻结工程冻结期间的盐水温度、冻土温度、冻胀压力、隧道变形进行了实测。覃伟等<sup>[3]</sup>对南京某超长联络通道冻结效果进行分析, 提出超长联络通道宜采用两条隧道分别安放冻结站进行冻结施工。

有关冻胀融沉的试验研究, 目前主要涉及土层冻胀融沉特性研究较多, 严晗等<sup>[4]</sup>通过室内试验, 控制不同初始含水率、荷载条件、干密度、冻融次数, 研究了粉砂经反复冻胀、融沉后的物理力学特性及温度变化规律; 王效宾等<sup>[5]</sup>、张海银等<sup>[6]</sup>通过试验, 分别研究了不同土质在不同冻结温度下融沉特性, 分析了含水率、干密度对冻土融沉的影响; Klas Hansson 等<sup>[7]</sup>通过室内模型试验研究了不同参数对冻土冻胀的影响。Muto Y 等<sup>[8]</sup>保持温度恒定, 通过观察冻结锋面微观结构研究土体的冻胀。而有关冻结温度场试验研究主要以模型试验方法为主, 吴海燕等<sup>[9]</sup>对固定冻融界

面、变化冻融界面两种情况下冻融界面处温度场进行了分析; 程桦等<sup>[10]</sup>以广州地铁 3 号线为背景, 利用模型试验的方法研究了冻结法施工联络通道温度场、湿度场及力学场; 胡向东等<sup>[11]</sup>通过物理模型试验探究了管幕钢管内部布置“圆形主力冻结管”、“异形加强冻结管”和“升温盐水限位管”3 种特殊管路冻结方案的可行性。

另外, 不少学者使用 FLAC、ANSYS、ADINA 等有限元软件对联络通道冻结法施工及开挖期间土体的温度场、位移场以及应力场进行了较多分析研究<sup>[12-15]</sup>。

综上, 尽管前人做了不少研究, 有关冻结温度场及冻胀融沉变形研究无论是实测、模型试验, 还是数值模拟研究均取得了不少成果, 但从冻结到完全解冻全过程的温度及位移变化规律, 特别是深层土层冻胀融沉与温度发展的实测全过程变化规律尚缺乏研究。而研究软弱地层联络通道冻结法施工冻结温度场, 特别是解冻温度场与深部土体冻胀融沉实际发展规律, 是优化工后融沉注浆, 解决其工后融沉预测与控制的前提, 为此以苏州市轨道交通 2 号延伸线月亮湾站—松涛街站区间联络通道为工程背景开展了冻结全过程土体温度、深层土体冻胀融沉位移、地表变形的实测与研究, 旨在通过实测研究取得丰富可信数据, 为优化注浆工艺, 解决工后融沉预测与控制问题提供有力依据。

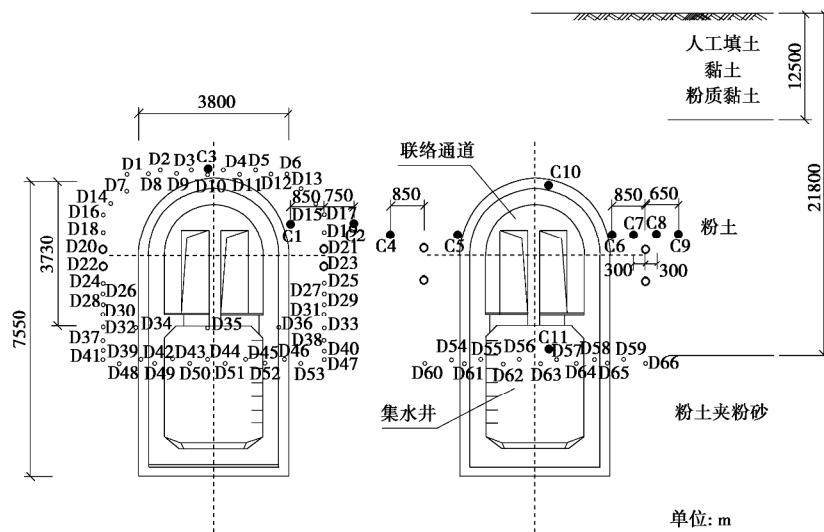


图 1 冻结孔、测温孔布置图

Fig. 1 Layout of measuring points in soils for freezing and temperature holes

## 1 工程概况

苏州轨道交通 2 号延伸线月亮湾站—松涛街站区间联络通道及泵房, 通道中心线间距 13.00 m, 隧道中心高程左(右)行线 -16.541 m (-16.543 m), 地面标高 +3.09 m, 隧道底部埋深 24.8 m。隧道直径 6200 mm, 管片厚度 350 mm。水平通道为直墙圆弧拱结构, 通道开挖轮廓高 5.25 m, 宽 3.8 m, 通道影响范围内土层主要为③1 黏土、③2 粉质黏土、④1 粉质黏土、④2 粉土、⑤2 粉土夹粉砂。

## 2 冻结加固方案及冻结参数

### 2.1 冻结加固方案

根据联络通道特点及所处地层特性, 采用“隧道内水平冻结加固土体、矿山法开挖构筑”的施工方案。依据以往工程经验及规范要求, 为保证冻结壁厚度达到设计要求 1.8 m, 冻结孔按上仰、水平、下俯 3 种角度布置, 拱顶及喇叭口处冻结效果较差区域采用双排孔布置方式, 共布置冻结孔 66 个(左线 53 个, 右线 13 个), 其中左线 4 个为对穿冻结孔, 孔号为 D21~D23)。地层条件及冻结孔布置如图 1 所示。

### 2.2 冻结参数

积极冻结期设计温度 -28°C 以下, 维护冻结期温度为 -25°C~-28°C。积极冻结时间 45 d, 维护冻结 25 d。冻结帷幕设计参数如下: 冻土帷幕平均温度 -10°C; 设计取苏州地区 -10°C 粉土弹性模量和泊松比分别为 200 MPa 和 0.3, 抗压强度 4.4 MPa, 抗剪强度指标黏聚力 1.54 MPa, 内摩擦角 6.04°<sup>[16]</sup>; 设计取水平通道外围冻土帷幕有效厚度 1.8 m, 并利用有限元软件 ANSYS 核算冻结帷幕承载力后得出: 设计采用冻结帷幕厚度 1.8 m, 平均温度 -10°C 能够满足施工要求。

## 3 实测内容与测点布置

### 3.1 测温孔布置

为掌握冻结温度场和解冻温度场发展规律, 在上、下行隧道联络通道洞口两侧布置 11 个测温孔, 其中冻结站一侧布 3 个测温孔 C1、C2、C3, 冻结站对侧布置 8 个测温孔 C4~C11。集水井内测点 C11 位于粉土夹粉砂土层中, 其余测点均处于粉土层, 为研究冻结壁完整断面上的温度分布规律, 在 C6、C9 之间补充设置测点 C7、C8, 测温孔位置如图 1。因管片与土交界面是冻结薄弱处, 各测孔第一个测点均设置在管片与土交界面附近, 其余各点沿孔深均匀分布于孔中。具体为, C10 孔深(含管片厚度部分) 3.5 m, 分别在入土 0.1, 1.65, 3.15 m 深度处布设 3 个测温点; C11 孔深 4.5 m, 分别在入土 0.1, 1.65, 3.05, 4.05 m 深

度处布设 4 个测温点; C6~C9 孔深 3 m, 分别在入土 0.15, 0.98, 1.82, 2.65 m 深度处布置 4 个测点; 其余测温孔孔深均为 2 m, 分别在入土 0.1, 0.85, 1.65 m 深度处布置 3 个测温点。各孔内测温点编号由管片处到土体内部依次为 Ci-1, Ci-2……(i=1~11), 见图 2。

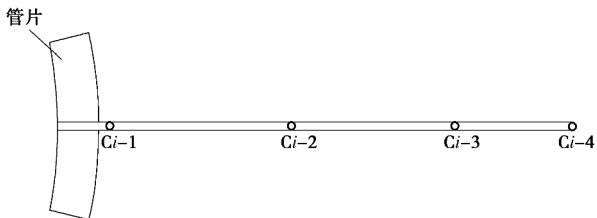


图 2 测孔内测温点布置示意图

Fig. 2 Layout of measuring points in temperature monitoring

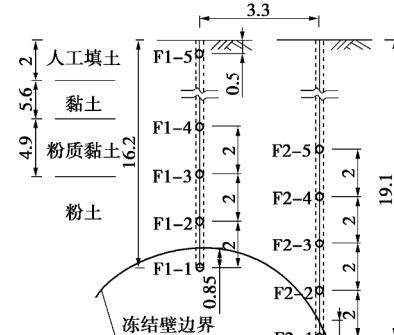
### 3.2 深层土体温度、位移测点布置

联络通道顶部覆土厚 17.2 m, 设计冻结壁厚 1.8 m。为了实测不同深度处深层土体温度与冻胀融沉变化规律, 在联络通道轴线处和轴线外侧 3.3 m 地表分设 2 个分层沉降孔 F1, F2, 图 3(a)。为使沉降孔与最近冻结管保持安全距离, 并能使沉降孔底部尽量深入冻结壁, F1 孔从联络通道拱顶距冻结管 0.1 m(深入冻结壁 0.85 m) 处至地表 16.2 m 深度范围内设置 5 个测点, 分别为 F1-1~F1-5; F2 孔从联络通道拱顶与直墙连接处(深入冻结壁 0.7 m) 至其以上的 8 m 深度范围内设置 5 个测点, 分别为 F2-1~F2-5。具体分层沉降孔孔位及测点如图 3(b) 所示。

为研究冻结和解冻过程中冻结壁外侧土体温度场变化规律, 在每个深层土体垂直位移孔内的设计冻结壁内侧、冻结壁界面及冻结壁外侧设置测温点, 对冻结壁内、外深层土体温度进行监测。F1 测孔布置 3 个测温点, J1-1~J1-3, F2 测孔内布置 4 个测点, J2-1~J2-4, 测点布置如图 3(c) 所示。



(a) 深层沉降孔地表位置



(b) 深层土体位移测点示意图

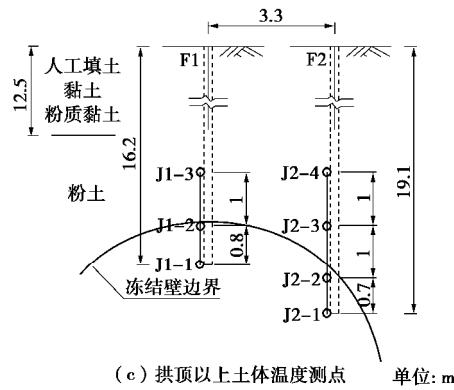


图3 深层位移及温度测点布置图

Fig. 3 Layout of displacement and temperature monitoring holes in deep soils

### 3.3 地表沉降点布置

为掌握联络通道施工全过程中冻结区域影响范围内地表变形，在靠近冻结区域联络通道中线两侧布置地表沉降点，联络通道顶部埋深 17.2 m，底部埋深 22.5 m。参看盾构推进地表沉降范围研究成果<sup>[16]</sup>，将联络通道底部向上按 45° 角延伸至地面确定实测布点范围，在联络通道中线及向隧道轴线方向各 24 m 范围内布置地表沉降点，测点布置如图 4 所示。

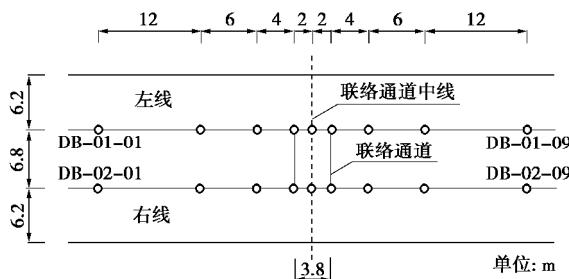


图4 联络通道地表沉降监测点布置

Fig. 4 Layout of ground surface settlement monitoring points of connected aisle

## 4 冻结温度场实测分析

### 4.1 盐水温度实测分析

工程于 2015 年 2 月 4 日开机冻结，去回路盐水管测温点监测结果如图 5 所示。

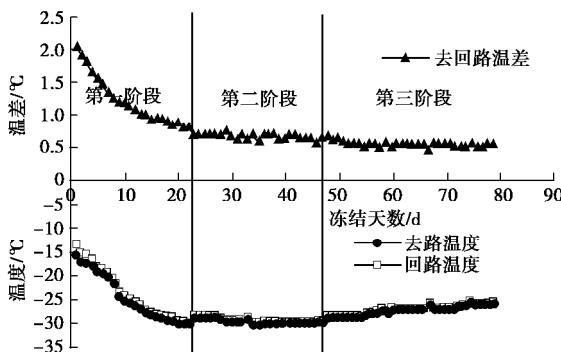


图5 盐水去回路温度及去回路温差曲线

Fig. 5 Curves of temperatures of salty water in freezing pipe and temperature difference between feeding and returning brines

数据表明：盐水去回路温度变化大致可分为 3 个阶段：第一阶段，盐水温度快速下降阶段，平均降温速率为  $0.71^{\circ}\text{C}/\text{d}$ ，去回路温度相差较大，冻结开始时温差达到  $2.1^{\circ}\text{C}$ ，随时间推移，以后去回路温差逐渐缩小，此阶段持续 22 d 左右；第二阶段，冻结 22 d 后，冷冻机温度持续保持在  $-28^{\circ}\text{C} \sim -29^{\circ}\text{C}$  左右，此时，去回路温差基本稳定在  $0.8^{\circ}\text{C}$  以下，说明土体温度降低幅度减小，冻结壁形成效果较好，此阶段持续约 23 d；第三阶段为维护冻结期，联络通道开挖后，维护冻结期间盐水温度保持在  $-26^{\circ}\text{C} \sim -27^{\circ}\text{C}$  左右，去回路温差仍然保持在  $0.8^{\circ}\text{C}$  以内。

### 4.2 土体温度实测分析

在联络通道冻结、开挖施工及解冻过程中，为了获得同一界面上冻结壁温度发展及分布规律，以处于冻结壁同一界面上 C6~C9 测孔为例，测点温度随时间变化如图 6~9 所示，图中测点编号由管片处到土体内部依次为 C1~C4。

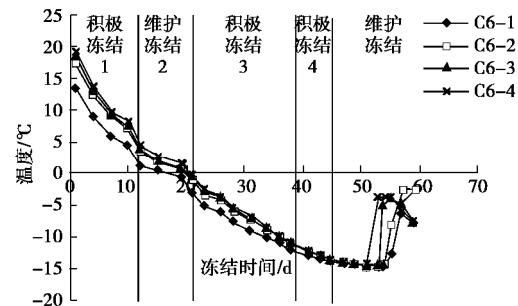


图6 C6 测温孔测点温度与时间的关系

Fig. 6 Correlation between the temperature in temperature hole C6 and time

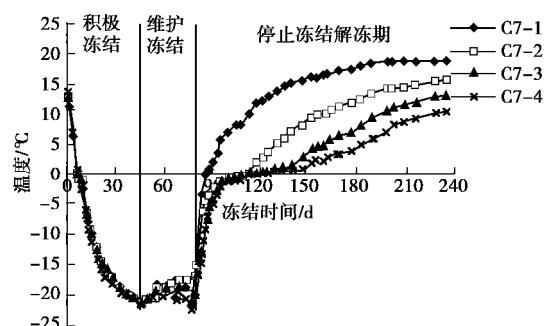


图7 C7 测温孔测点温度与时间的关系

Fig. 7 Correlation between temperature in temperature hole C7 and time

### (1) 冻结阶段

冻结期间，各测点温度变化趋势大致相同，按温度变化规律可将冻结期间测温孔的温度变化分为 5 个阶段（图 6）。由图可知，积极冻结阶段 1，由于地层温度高，盐水与地层温差大，测温孔温度变化较快，并随温度降低，温差逐渐缩小，降温速率也逐渐减小，

该阶段持续 12 d 左右, 平均降温速率为  $1.16^{\circ}\text{C}/\text{d}$ ; 积极冻结阶段 2, 测温孔温度接近  $0^{\circ}\text{C}$ , 由于水潜热影响, 导致土体温度降低变缓, 该阶段持续约 8 d, 平均降温速率为  $0.39^{\circ}\text{C}/\text{d}$ , 冻结管周围冻结圆柱逐渐交圈形成冻结壁, 在此阶段, 冻结壁以较快速度发展, 冻结壁厚度逐渐增大; 积极冻结阶段 3, 测温孔测点温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  后, 水结冰潜热完成, 温度降低速度又开始加快, 土体温度继续下降, 当冻结壁发展接近设计厚度, 发展速度逐渐减缓, 该阶段持续约 18 d 左右, 平均降温速率为  $0.63^{\circ}\text{C}/\text{d}$ ; 积极冻结阶段 4, 去回路盐水温度差小于  $1^{\circ}\text{C}$ , 热交换达到基本平衡, 土体温度下降趋于平缓, 冻结壁达到设计厚度, 平均降温速率为  $0.26^{\circ}\text{C}/\text{d}$ ; 维护冻结阶段 5, 联络通道开挖, 由于施工影响, 测温孔温度不再是平稳下降, 靠近开挖面一侧冻结壁内测温孔温度受开挖面暴露空气对流的影响, 联络通道从左线开挖, 测温孔 C6~C9 布置在右线隧道中, 分析数据可知, 4 个测孔中最深处测点 (C6-4) 随开挖面暴露, 最先开始出现回升现象, 之后, 埋深较浅的测点温度依次开始回升。

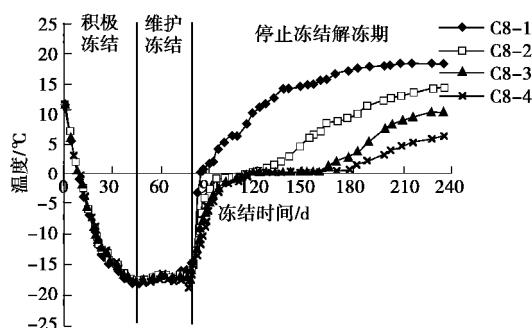


图 8 C8 测温孔测点温度与时间的关系

Fig. 8 Correlation between temperature in temperature hole C8 and time

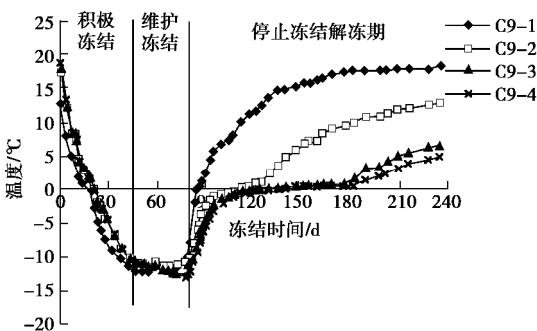


图 9 C9 测温孔测点温度与时间的关系

Fig. 9 Correlation between temperature in temperature hole C9 and time

整体来看, 入土深度小的测点 C<sub>i</sub>-1 较入土深度大的测点 C<sub>i</sub>-4 温度变化梯度小, 冻结初期, 入土深度小的测点温度比入土深度大的测点温度低, 而冻结壁形成后, 入土深度小的测点温度比入土深度大的略高,

这是由于管片表面空气对流散热, 影响了靠近管片土体的温度降低, 因此距离管片越近的测点温度变化越缓慢。

C6, C7 测温孔在冻结壁内侧, 距离开挖面较近, 并且, 由于施工误差导致冻结孔偏斜, C6 测孔在开挖 5 d (冻结 50 d) 时深入土体的一端露出冻土壁面, 图 7 明显可见, 冻结 52 d 后, 由于测温孔露出壁面, C6-3, C6-4 测点温度明显上升, 冻结 56 d, 随着开挖面的推进, C6-1, C6-2 测点温度也开始大幅回升, 而 C6-3, C6-4 测点由于逐渐远离开挖面温度变化趋于平缓, 并出现下降趋势。C7 测温孔相比于 C6 测温孔更靠近冻结管, 在联络通道开挖阶段出现了一定的温度回升(图 7), 但幅度比 C6 小。C8, C9 测温孔在冻结管外侧, 距离开挖面较远, 受开挖影响小, 除管片处的测点 (C8-1, C9-1) 温度有回升, 其余各点温度基本未变。

## (2) 冻结壁发展速度及温度分布规律

测温孔 C6, C7, C8, C9 温度到达  $0^{\circ}\text{C}$  的时间分别为 21 d, 7 d, 10 d, 22 d, 由此可以计算出, 冻结壁发展至 C6, C7, C8, C9 测点时, 冻结壁发展速度分别为  $40.47, 42.9, 30.0, 29.5 \text{ mm/d}$ 。可见, 冻结壁向内发展速度比向外快, 究其原因为冻结壁内侧参与热传导的土体范围小于外侧, 且受顶部冻结管低温盐水吸热的影响, 两者叠加效应导致冻结壁向内发展速度更快。C7, C8 测孔与冻结管距离均为 30 cm, 冻结锋面发展到 C7 孔的速度是发展到 C8 孔速度的 1.43 倍, 即冻结壁向内发展速度是向外的 1.43 倍。

分别取积极冻结、维护冻结期间 C6~C9 测温孔 C6-2~C9-2 (入土深度 1.18m) 处温度, 根据冻结管温度推算与 C6~C9 测孔同一平面上冻结孔轴面处温度, 绘制该断面温度分布如图 10 所示。可见以冻结管所在面为中心, 向两侧土体温度逐渐升高。由于 C6 在冻结壁内侧, C6 孔温度比 C9 孔低, 内侧冻结壁厚度明显大于外侧, 进一步证明了冻结壁向内发展速度比向外快。随冻结天数增加, 各点与冻结管轴面处温差逐渐减小。

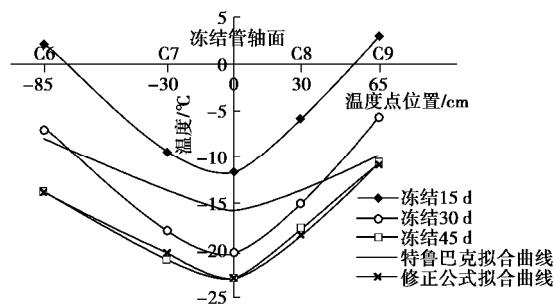


图 10 积极冻结结束时 C6~C9 断面温度分布

Fig. 10 Distributions of temperatures on section of C6~C9 at the end of freezing process

### (3) 解冻阶段

由图7~9解冻阶段可见, 不同入土深度的测点温度变化规律不同, 靠近管片测点(C7-1、C8-1)由于受冻结结束时测温孔封孔水泥水化热和空气热交换效应影响, 解冻初期温度回升较快, 停止冻结4 d, 温度即回升到0℃附近, 并受水的潜热作用也不明显, 土体温度在0℃附近维持2 d便继续以较快速度回升。随测点入土深度的增大, 温度回升速度逐渐减缓, 距离管片较远的测温点Ci-2、Ci-3、Ci-4( $i=7, 8, 9$ ), 其温度变化规律大致可分为3个阶段: ①温度快速上升阶段。由于土体温度与外界温度相差较大, 土体温度快速回升, 该阶段约15 d。②土体相变阶段。土体温度回升至-1℃左右时, 温度变化明显减缓, 当温度达到0℃附近时, 一段时间维持不变。这是由于温度达到0℃附近, 土中冰进入相变阶段, 而相变需要吸收大量热量。从图7~9中曲线可以看出, 不同深度处土体相变持续时间不同, 靠冻结管越近、距离管片越远的点相变阶段持续时间越长, 如C9-2持续时间13 d, 而C8-4持续时间51 d。③继续升温阶段。土体温度升至正温后, 温度变化幅度突然变大, 且随着温度的逐渐升高, 升温速度又逐渐减缓。

### 4.3 拱顶以上冻结壁内外深层土体温度、位移分析

通过地表钻孔对深层土体进行温度及位移实测, 结果如图11~14所示。

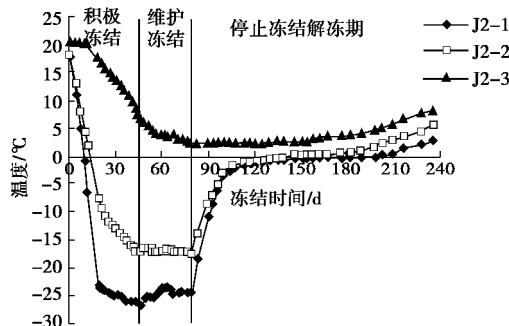


图11 F1沉降孔不同深度处温度变化

Fig. 11 Variation of temperatures in deep soil settlement hole F1 at different depths

从图11~12中可知, 距冻结管越近测点(J1-1)温度变化越快, J1-1进入冻结壁内0.85 m; J1-2在设计冻结壁边缘附近, 温度变化趋势大致与点J1-1相同, 冻结前18 d温度下降较快, 之后温度仍继续降低, 但降低幅度明显减弱, 这与测温孔温度变化趋势相吻合, 结合测温孔数据可以表明, 冻结壁发展较快, 进入维护冻结期该点温度达到-16.9℃, 说明实际冻结壁厚度已远远超过设计厚度1.8 m; J1-3测点位于设计冻结壁以外0.95 m, 由于距离冻结区域较远, 从冻结初期开始, 该点温度持续以较小的幅度下降, 进入维护冻

结期降温更慢, 开挖时该点温度为2.4℃。

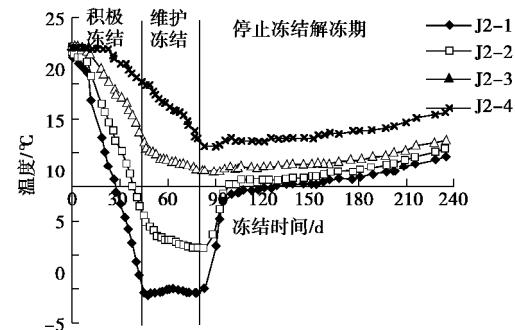


图12 F2沉降孔不同深度处温度变化

Fig. 12 Variation of temperatures deep soil settlement hole F2 at different depths

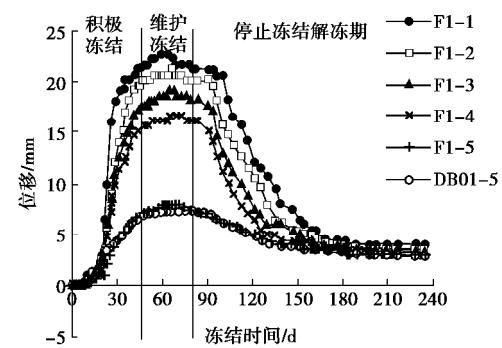


图13 F1分层沉降孔冻胀融沉位移变化

Fig. 13 Variation of displacement in deep soil settlement hole F1 at different depths

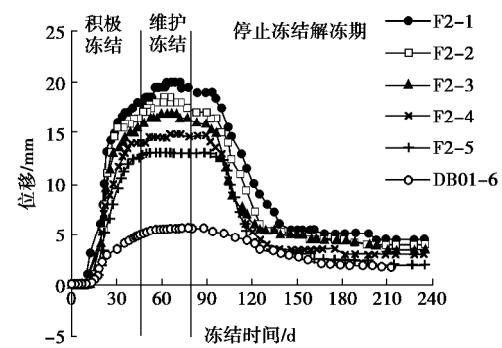


图14 F2分层沉降孔冻胀融沉位移变化

Fig. 14 Variation of displacement in deep soil settlement hole F2 at different depths

从图可知, 维护冻结期间, 由于盐水温度比积极冻结期间略有回升, 且受联络通道开挖施工影响, F1、F2孔最深处测温点J1-1、J2-1温度有所回升, 由于J1-1点距冻结管更近, 因此受影响较测点J2-1明显, 最大回升3.3℃, 之后随继续冻结, 测点温度又有所下降。冻结壁边界处测点J2-2温度在维护冻结期间并无明显变化, 这说明, 维护冻结期间盐水温度适当增加3℃左右, 对设计冻结壁有效边界处温度没有影响, 能够维持冻结壁的有效厚度与温度。其余测温点在此阶段

由于距冻结管较远，且温度相对较高，受周边低温区的影响在维护冻结期间，仍有温度下降，但下降趋势明显减缓。

从图13~14中可见，冻结开始前18 d，由于此时冻结圆柱尚未交圈，各深层土体点的位移变化并不明显，且冻结前5 d，几乎没有产生位移，冻结5 d后，分层沉降孔最下部的点开始产生冻胀位移，上部测点随后逐渐开始位移。这说明，土体冻胀效应的影响范围是逐渐扩大的，随着冻结时间延长，冻胀区域也逐渐变大。冻结18 d后，此时，冻结圆柱已经交圈，沉降孔各点位移变化速度明显加快，土体冻胀向上部释放，联络通道上部土体位移变化明显增大，因此冻结圆柱交圈是产生快速冻胀的临界时间点。土体冻胀主要发生在冻结18~45 d的积极冻结期，冻结45 d后，土体冻胀速率有所减缓。

从图13、14中不难看出，此阶段，联络通道上方深层土体位移变化量很小，这也进一步说明冻结壁已经形成较大厚度的整体，冻结壁发展速度缓慢，且联络通道开挖施工并没影响冻结壁上部土体位移，说明冻结壁强度较高，能够承受外部土压力，而受开挖的影响小。

停机解冻期间，由于测点J1-3、J2-3、J2-4距离冻结区域较远，冷冻机停机时土体温度仍未达到0℃，停机后，该区域土体温度以较慢的速度回升；停冻时，距冻结管较近的冻结壁内测点J1-1、J1-2、J2-1、J2-2温度均较低，解冻前15 d温度回升较快，但由于冻土尚未解冻，融沉变形很小。解冻15 d后，土体温度接近0℃，温度变化速度明显降低，因水的潜热影响，土体温度保持在0℃附近，冻结壁开始解冻，土体出现较为明显的下沉，因此融沉跟踪注浆应该在15 d后即开始进行。解冻100 d，土体温度到达0℃以上，并逐渐上升，此时，土体变形已基本稳定，基本没有沉降，说明融沉基本完成，因此工程中粉土融沉基本稳定最少需要100 d。

图15、16表明，冻胀融沉量均随深度近似呈线性增大且F1、F2孔在同一深度位置的差值也逐渐增大。距冻结区域越近冻胀融沉量越大，联络通道中线处F1孔比联络通道侧边F2孔的位移变化大，最大冻胀量相差3 mm。当冻胀融沉位移传递至地表时，引起的地表变形很小，测孔最深处冻胀量及融沉量分别22.5、18.5 mm是相应位置地表变形的3.6倍、4.9倍。

#### 4.4 地表沉降实测分析

DB02-09测点破坏，无测量数据。地表沉降监测点自冻结孔钻孔施工开始测量，至联络通道施工完成后6个月结束。实测结果见图17。

从图中可知，冻结孔施工28 d，由于钻孔期间部

分水土流出，导致地表产生沉降变形，但量不大，最大沉降发生在DB1-5点，仅4.8 mm。冻结开始后，初期由于土体还未冻结，地表变形很小，此过程持续5 d左右，随着土体温度下降，从冻结第6~18 d，土体开始冻结，但冻结圆柱并未交圈，变形量较小，冻结前18 d冻胀速率为0.02 mm/d。冻结18 d后，土体开始产生明显的膨胀变形，并引起地表隆起，土体冻胀变形以较快速度发展，平均冻胀速率为0.18 mm/d。维护冻结期间，由于温度惯性，冻结壁还在缓慢扩展，土体继续发生冻胀变形，但变化速度较小，冻胀速率为0.03 mm/d。在整个冻结期间，由于土体冻胀引起的地表变形不大，最大变形量为DB01-05点7.3 mm。为防止融沉造成较大影响，停止冻结16 d后开始进行了工后注浆，由于及时跟踪注浆，融沉变形不大，最大融沉量仅有3.7 mm。解冻100 d后，地表变形基本趋于稳定。

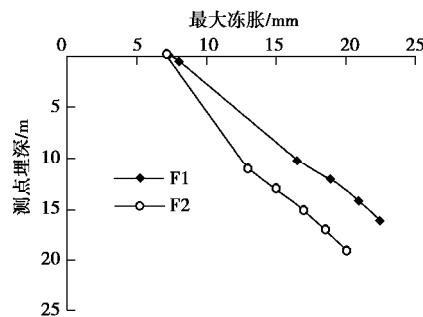


图15 F1, F2测孔各测点最大冻胀

Fig. 15 Curves of maximum frost heaving at each measuring point in monitoring holes F1 and F2

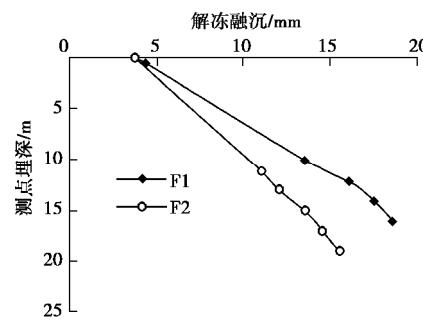
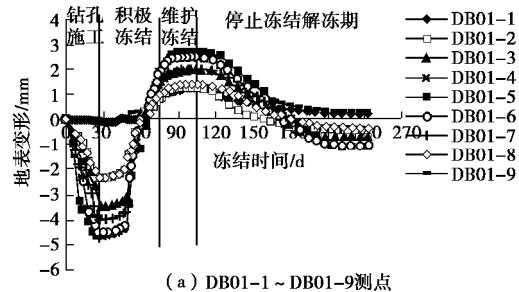


图16 F1, F2测孔各测点最大融沉

Fig. 16 Curves of maximum thawing at each measuring point in monitoring holes F1 and F2



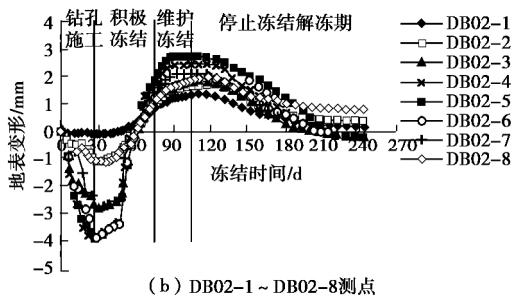


图 17 地表竖向位移与时间的关系

Fig. 17 Correlation between vertical displacement of ground surface and time

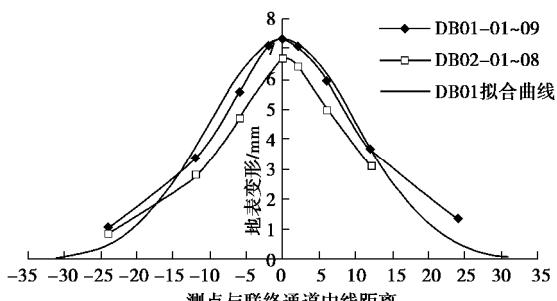


图 18 垂直于联络通道断面地表最终冻胀分布

Fig. 18 Distributions of final frost heaving of ground surface on section perpendicular to connected aisle

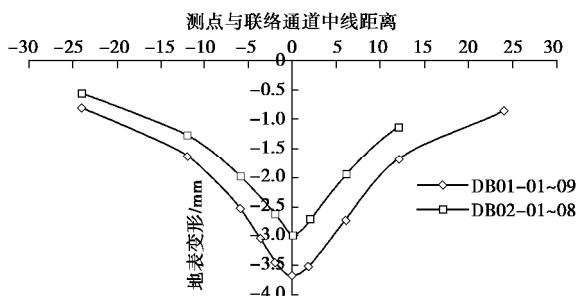


图 19 垂直于联络通道断面地表最终融沉分布

Fig. 19 Distributions of final thawing of ground surface on section perpendicular to connected aisle

地表变形各测点最大冻胀、最大融沉如图 18, 19, 不同位置测点, 位移变化并不相同, 这与测点距离联络通道位置远近以及冻结孔布置情况有关。距离冻结区域越近, 处在冻结管布置较为密集位置的测点, 沉降越大。联络通道中线及两侧各 2 m 处均位于冻结壁范围内, 位移变化较大, 且由于中线处冻结管布置密集, 因此冻胀产生的地表位移以联络通道中线位置处最大, 往两侧逐渐衰减。Peck<sup>[14]</sup>提出盾构隧道地面沉降槽呈拟正态分布, 横向地面沉降估算公式为

$$s(x) = s_{\max} \exp[-x^2 / 2(i^2)] \quad (1)$$

式中  $x$  为距隧道轴线横向水平距离;  $s(x)$  为  $x$  位置处的地表面沉降量;  $s_{\max}$  为隧道轴线上方最大地表面沉降量;  $i$  为地表面沉降槽宽度系数, 即沉降槽曲线拐点离隧道轴线的水平距离。

与盾构隧道地表面沉降类似, 将由于冻胀引起的地

表沉降槽曲线看作拟正态分布。依据 Peck 公式拟合 DB01-01~DB01-09 沉降槽曲线, 当  $i$  取 10.4 时,  $s(x)$  曲线如图 18, 可以看出, 实测值与拟合曲线相似并接近。若按 Peck 提出的算法, 沉降槽影响范围为  $5i$ , 即距离隧道中线  $2.5i$  (26 m) 处地面沉降为 0 mm, 计算得出  $s(26) = 0.33$  mm, 也有学者认为地面沉降槽宽度可取  $6i$ , 即离轴线  $3i$  (31.2 m) 处地面沉降为 0 mm<sup>[15]</sup>, 此时  $s(31.2) = 0.08$  mm, 此时可近似为“0”。可见, 取后者 (31.2 m) 为沉降槽影响宽度更为合适。因此人工冻结联络通道地表冻胀影响范围为隧道底部冻结壁埋深 26.6 m 的 1.2 倍。

## 5 结 论

通过对联络通道冻结法施工温度及位移场全程实测与分析, 获得如下主要结论:

(1) 冻结期间, 各测点温度变化趋势大致相同, 可分为 5 个阶段, 冻结壁向内发展速度是向外发展速度的 1.43 倍。

(2) 解冻期间温度变化为 3 个阶段, 解冻 15 d, 部分冻土温度回升至 0℃, 进入相变阶段, 开始产生融沉, 因此融沉跟踪注浆应在 15 d 后进行。粉土解冻 100 d, 土体温度达 0℃以上, 融沉基本完成, 因此工程中粉土融沉稳定最少需 100 d。

(3) 距离冻结区域越近的土体位移变化越大, 冻结初期冻胀位移变化较小, 冻结圆柱交圈后, 土体冻胀明显加快, 因此冻结圆柱交圈是产生迅速冻胀的临界时间点, 冻胀主要发生在冻结圆柱交圈后。

(4) 联络通道拱顶以上土体越靠近冻结区域产生的冻胀融沉位移越大, 冻结圆柱交圈之前, 深层土体位移变化量较小, 之后位移变化明显加快。停机 15 d 内融沉变形较小, 之后随时间推移, 土体的融沉变形量持续增大。

(5) 获得了深层土体沿竖向位移变化规律, 从深层至浅层其冻胀融沉量基本呈线性增大, 拱顶冻结壁处最大冻胀及融沉位移分别是对应地表冻胀、融沉量的 3.6 倍、4.9 倍。

(6) 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相似, 其影响范围约为隧道底部埋深的 1.2 倍。

## 参 考 文 献:

- [1] 胡向东, 赵飞. 主隧道结构散热对联络通道冻结效果的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 3109–3115. (HU Xiang-dong, ZHAO Fei. Influence of heat dissipation of main tunnel structure on freezing effect in cross

- passage construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S1): 3109 – 3115. (in Chinese))
- [2] 岳丰田, 仇培云, 杨国祥, 等. 复杂条件下隧道联络通道冻结施工设计与实践[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(5): 660 – 663. (YUE Feng-tian, QIU Pei-yun, YANG Guo-xiang, et al. Design and practice of freezing method applied to connected aisle in tunnel under complex conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(5): 660 – 663. (in Chinese))
- [3] 覃伟, 杨平, 金明, 等. 地铁超长联络通道人工冻结法应用与实测研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, **6**(5): 1065 – 1071. (QIN Wei, YANG Ping, JIN Ming, et al. Application and survey analysis of freezing method applied to ultra-long connected aisle in metro tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, **6**(5): 1065 – 1071. (in Chinese))
- [4] 严晗, 王天亮, 刘建坤. 粉砂土反复冻胀融沉特性试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(11): 3159 – 3165. (YAN Han, WANG Tian-liang, LIU Jian-kun. Experimental study of repeated frost heave and thaw settlement properties of silty sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(11): 3159 – 3165. (in Chinese))
- [5] 王效宾, 杨平, 张婷. 人工冻土融沉特性试验研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, **32**(4): 108 – 112. (WANG Xiao-bin, YANG Ping, ZHANG Ting. Study on thaw settlement behavior of artificial freezing soil[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2008, **32**(4): 108 – 112. (in Chinese))
- [6] 张海银. 人工冻结黏土冻胀特性试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013. (ZHANG Hai-yin. Experimental study on the frost heave characteristics of artificial freezing clay[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2013. (in Chinese))
- [7] KLAS Hansson, LARS-CHRISTER Lundin. Water content reflectometer application to construction materials and its relation to time domain reflectometry[J]. Cold Regions Science and Technology, 2006, **44**(1): 20 – 37.
- [8] MUTO Y, WATANABE K, ISHIZAKI T, et al. Microscopic observation of ice lensing and frost heaves in glassbeads. Lewkowicz AG Allard M[C]// The 7th International Permafrost Conference. Quebec City, 1998: 783 – 87.
- [9] 吴海燕. 模拟冻融界面的冻土模型实验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007. (WU Hai-yan. Experimental Study of frozen soil model with a simulative frost-thawing interface[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese))
- [10] 程桦, 姚直书, 张经双. 人工水平冻结法施工隧道冻胀与融沉效应模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, **40**(10): 80 – 85. (CHENG Hua, YAO Zhi-shu, ZHANG Jing-shuang, et al. A model test study on the effect of freeze heaving and thaw subsidence for tunnel construction with artificial horizontal ground freezing[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, **40**(10): 80 – 85. (in Chinese))
- [11] 胡向东, 任辉, 陈锦, 等. 管幕冻结法积极冻结方案模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2014, **51**(5): 92 – 98. (HU Xiang-dong, REN Hui, CHEN Jin, et al. Model test study of the active freezing scheme for the combined Pipe-roof and freezing method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, **51**(5): 92 – 98. (in Chinese))
- [12] 袁云辉, 杨平, 江天堑. 复杂环境下浅埋暗挖隧道穿越薄富含水层冻结温度场研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(增刊1): 388 – 393. (YUAN Yun-hui, YANG Ping, JIANG Tian-qian. Study of thermal field of soil freezing in shallow covered tunnel with subsurface excavation passing through ground with thin aquifer under complex conduction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S1): 388 – 393. (in Chinese))
- [13] YANG Ping, KE Jie-ming, WANG J G, et al. Numerical simulation of frost heave with coupled water freezing, Temperature and stress fields in tunnel excavation[J]. Computer and Geotechnics, 2006, 33.
- [14] 武亚军, 杨敏, 李大勇. 大连路隧道联络通道冻土帷幕数值分析[J]. 岩土力学, 2006, **27**(3): 487 – 490. (WU Ya-jun, YANG Min, LI Da-yong. Numerical analysis of freezing soil curtain of tunnel connected aisle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(3): 487 – 490. (in Chinese))
- [15] 张志强, 何川. 用冻结法修建地铁联络通道施工力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(18): 3211 – 3217. (ZHANG Zhi-qiang, HE Chuan. Study on construction of cross connection of shield tunnel and connecting aisle by freezing method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(18): 3211 – 3217. (in Chinese))
- [16] 杨平, 张婷. 城市地下工程人工冻结法理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 32 – 38. (YANG Ping, ZHANG Ting. The theory and practice of artificial ground freezing in urban substructure work[M]. Beijing: Science Press, 2015: 32 – 38. (in Chinese))
- [17] PECK R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground[C]// Proc 7th Int Conf on Soil Mech and Found Engng. Mexico City, 1969: 225 – 229.
- [18] O'REILLY M P, NEW B M. Settlements above tunnels in the United Kingdom: their magnitude and prediction[C]// Proc Tunnelling 82. London, 1982: 173 – 181.