

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.03.006



# 冻结法施工中的冻土特性试验研究

朱现磊<sup>1</sup>, 吴云龙<sup>1</sup>, 郝振群<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;

2. 北京航天勘察设计研究院有限公司, 北京 034000)

**摘要:**为获得冻结法施工中土体冻胀融沉特性规律,以某地下联络通道工程为原型,根据相似理论,进行了水平冻结模型试验。结果表明,冻胀融沉过程中,土体温度先迅速降低后升高,维持在 0 °C 一段时间后,继续缓慢升高至室温;土压力值先增加后减小,其中,竖向土压力值随深度的增加而增大,相同埋深下,距冻结管越近,水平土压力值越大;土体融化固结沉降值明显大于冻胀位移值,土体竖向位移较水平位移变化显著。积极冻结期内土体温度降低速率变慢,且埋深越大、距冻结孔越近,土体温度降低越快、降幅越大;无侧限土体压力值先增加后减小,侧限土体压力值则逐渐增大,全封闭土压力值变化率更显著。

**关键词:**人工冻结;冻胀;融沉;模型试验

**中图分类号:**TU443 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)03-0038-06

## Experimental analysis on frozen soils behavior in freezing method construction

Zhu Xianlei<sup>1</sup>, Wu Yunlong<sup>1</sup>, Hao Zhenqun<sup>2</sup>

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, P. R. China;

2. Beijing Aerospace Geotechnical Engineering Institute Co., Ltd., Beijing 100161, P. R. China )

**Abstract:** In order to obtain frost heave and thawing settlement of frozen soils behavior, an underground connected aisle was studied through the model test based on similarity theory. The results indicate that, the soil temperature firstly decreases rapidly, then increases and maintains 0 °C for a while, at last continues to slowly rise to room temperature in the whole process. The soil pressure value goes up firstly and then goes down, and that of vertical pressure increases exponentially with the increasing of depth, meanwhile the distance from the freezing tube is more closer, the horizontal pressure is more bigger. Contrast with frost heave displacement, the thawing settlement value is greater, and the vertical displacement is more significant than the horizontal as well. In positive frozen period, the temperature reducing rate becomes slower, the greater depth and closer distance from the freezing hole, the greater decline speed and amplitude come up. Unlike vertical restriction soil always increases, the soil pressure value of unlimited presents a first increasing and then decreasing trend, while the variable rate is bigger with complete restriction situation.

**收稿日期:**2017-08-20

**基金项目:**国家重点研发计划(2016YFC0600903)

**作者简介:**朱现磊(1983-),男,博士生,主要从事岩土工程研究,E-mail:zhuxianlei@cumtb.edu.cn.

**Received:**2017-08-20

**Foundation item:**National Key Research and Development Plan (No. 2016YFC0600903)

**Author brief:**Zhu Xianlei(1983-), PhD candidate, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: zhuxianlei@cumtb.edu.cn.

**Keywords:** artificial frozen; frost heave; thawing settlement; model experiment

在市政岩土工程及地下空间开发中,往往会遇到地层含水、软弱破碎、稳定性差等复杂地质条件,一般工法施工难度较大,工程事故时有发生<sup>[1]</sup>。人工冻结法具有技术可靠、工艺成熟和施工可控的特点,不受支护范围和支护深度的限制,能在极其复杂的地质条件下形成冻土墙,因此,成为该地质特征下工程施工的主要技术手段之一<sup>[2]</sup>。然而,该工法施工后会引发地层温度场的变化,使周围地层产生冻胀融沉,可能造成地基失稳、邻近建筑物倾斜和产生裂缝、地下管线破坏等不良后果,甚至关系到工程成败<sup>[3]</sup>。

学者们对冻土冻胀理论和土体冻胀预测模型进行了大量研究,取得了诸多成果。杨维好等<sup>[4]</sup>、马巍等<sup>[5]</sup>通过室内模型试验,揭示了人工冻结壁解冻过程中冻土物理力学特性及正融土机制过程; Hansson 等<sup>[6]</sup>通过高含冰冻土路基解冻实验室与现场研究,得出了适用的计算模型;姚晓亮等<sup>[7]</sup>基于 R. E. Gibson 饱和黏土一维固结理论,对冻土解冻的三维固结大变形计算方法进行研究; Zhou 等<sup>[8]</sup>通过研究环境对冻胀性的影响,得出了当温度稳定时冻胀速率与温度梯度有着近似线性关系的结论;胡向东等<sup>[9-11]</sup>对单排管冻结温度场公式以及双排管冻结温度场公式进行了完善与应用性研究,并获得了环形冻结管中的单圈管冻结温度场解析解; Klinova 等<sup>[12]</sup>研究了含水率、孔隙率等对土体融沉特性的影响;王效宾等<sup>[13]</sup>利用自制的冻胀融沉试验装置,对南京地区典型土质进行了融沉特性室内试验;陶祥令等<sup>[14]</sup>研究人工凿井冻结法施工中冻结壁解冻融沉效应的产生而导致井筒壁后的变化。

目前,已开展的冻土特性研究多偏于理论计算或有限尺寸的冻结模型试验,对于水平冻结温度场的耦合作用、不同深度土体位移及侧限影响下的冻土特性研究相对较少。本文运用大尺度真三维人工冻结试验系统,在考虑水平冻结温度场和侧限影响工况下,进行了人工冻土冻胀融沉试验研究。

## 1 试验系统简介

### 1.1 主试验台

主试验台采用中国矿业大学(北京)完全真三维城市地下工程模型试验系统,包括模拟箱、加载装置、地下水模拟系统和数据采集系统。试验系统主体为 2 030 mm × 2 030 mm × 2 000 mm 的密闭箱

体,可容土砂相似材料 20 t。模拟箱内设有水平和垂直加载板,可实现模型体的三维加载。若干层水平进水管能根据地下水的实际情况分别模拟不同含水层地下水位与水压,进行地下水影响试验。

### 1.2 冻结系统

冻结系统由制冷压缩系统、制冷剂循环系统、冷媒循环系统和温度监测系统组成。制冷系统最大制冷量 > 8.5 HP,可实现模型箱体全部或部分体积土样的冻结,最低温度 -35 ℃。冷媒(CaCl<sub>2</sub> 溶液)循环系统选用进口防腐耐低温水泵一台,通过去回路主管道与分水器连接,接高压橡胶管,再接冻结管,形成循环回路。制冷剂循环系统使用钛金属管材,冻结管采用紫铜管。通过主控制面板对整个系统进行控制,并显示主要温度值。

### 1.3 数据采集系统

进行数据采集的敏感元件有微型土压力盒、温度传感器、位移计。土压力盒和位移计测得的数据由便携式数据采集仪 TDS-303 采集,温度传感器的数据由万用表测量。

## 2 试验方案设计

### 2.1 工程背景

某城市地铁联络通道主要穿过第四系全新统下组河床~河漫滩相沉积层,所处土层为粉质粘土、粉土,土层含水量大,强度低,且地面为交通繁忙的道路,无地面施工条件,设计采用隧道内水平冻结加固土体、暗挖法施工。联络通道处左线、右线盾构隧道中心距 19.12 m,左线隧道中心标高为 -14.63 m,右线隧道中心标高为 -14.63 m,地面标高约 +3.236 m。

### 2.2 相似准则

#### 1) 冻结温度场相似准则

$$\varphi(K_0, F_0, \theta, R) = 0 \quad (1)$$

式中:  $K_0 = Q/(c\tau)$  为柯索维奇准则,  $Q$  为单位土体冻结放热,  $c$  为岩土比热容,  $\tau$  为温度;  $F_0 = at/r^2$  为温度场傅里叶准则,  $a$  为导热系数,  $r$  为冻结壁位置,  $t$  为时间;  $R$  为几何准则;  $\theta = t_0/t_y = t_D/t_y$  为温度参数,  $t_0$  为岩土初始温度,  $t_y$  为盐水温度,  $t_D$  为冻结温度。

#### 2) 应力场相似准则

$$P = \rho \cdot h \cdot k \quad (2)$$

式中： $\rho$  为岩土密度； $h$  为深度； $k$  为侧推力系数。

### 3) 位移场相似准则

$$F(\sigma, E, \varepsilon, u, \mu, \gamma, H, S_D, P) = 0 \quad (3)$$

式中： $\sigma$  为应力； $E$  为弹性模量； $\varepsilon$  为应变； $u$  为位移； $\mu$  为泊松比； $\gamma$  为土的重度； $H$  为隧道埋深； $S_D$  为冻结壁厚； $P$  为土压力。

## 2.3 模型相似比及参数确定

1) 模型几何相似比 根据联络通道现场尺寸和试验台尺寸，经多次试验研究得到几何相似比  $C_l = 1:10$ ，即联络通道模型高 400 mm、宽 350 mm、弧顶半径 220 mm、厚度 15 mm。根据位移相似准则，位移相似比  $C_u = C_l$ 。

2) 时间比 试验选取与现场岩土材料近似的粉质粘土，根据傅里叶准则可知，时间相似比为  $C_t = C_l^2 = 1:100$ 。本工程的积极冻结时间为 50 d，故试验的积极冻结时间为 12 h。

3) 温度比 模型试验所用岩土材料、含水量与现场近似，土体冻结放出的热量相等，因此，模型温度不需缩比，只要将温度改为无量纲量。

4) 应力模拟 根据应力场相似准则，应力相似比、荷载相似比和弹性模量相似比  $C_\sigma = C_P = C_E = 1$ 。原型上覆土厚度为 15.74 m、重度  $18 \text{ kN/m}^3$ ，上覆土自重应力为 285 kPa。模型选取与现场接近的粉质粘土，将粉质粘土制作成直径 61.8 mm、高 100 mm 的土样进行试验，得到模型土重度为  $20 \text{ kN/m}^3$ 。冻结试验联络巷上覆土层厚 0.6 m，故模型上覆土自重为 12 kPa，因此，加载系统需提供 273 kPa 垂直压力。

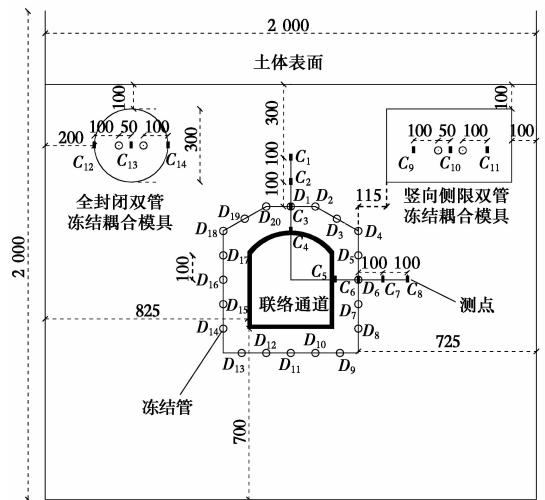
## 2.4 冻结管布置

原型中联络通道冻结孔数为 70 个，模型试验在满足温度要求和冻结帷幕厚度要求的同时，借鉴王运刚冻结壁内外壁的厚度基本相同的试验结论<sup>[15]</sup>，将冻结管布设在距联络通道模型 100 mm 位置。使单管冻结壁外缘与相邻冻结管中心相交，模型冻结管与联络通道近似平行布置，如图 1 所示，冻结管  $D_1$ 、 $D_1$ 、 $\dots$ 、 $D_{20}$  共布置 20 个，间距 100 mm。

## 2.5 测点布置

如图 1 所示，在联络通道模型周边布置  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $\dots$ 、 $C_8$  共 8 个测点，并在竖向受侧限双管冻结耦合装置中布设  $C_9$ 、 $C_{10}$ 、 $C_{11}$  3 个测点，在封闭式双管冻结耦合装置中布设  $C_{12}$ 、 $C_{13}$ 、 $C_{14}$  3 个测点，各测点分别埋装温度传感器和土压力盒，测量不同深度和位置处的温度、土压力值及变化规律。同时，在  $C_1 \sim C_3$  3 个测点及土体表面布置竖向位移测点，在  $C_7$ 、

$C_8$ 、 $C_{11}$  3 个测点布置水平位移测点。为便于对比说明，将各测点归为 4 个测区，其中， $C_1 \sim C_4$  为第 1 测区； $C_5 \sim C_8$  测点为第 2 测区； $C_{10} \sim C_{11}$  测点为第 3 测区； $C_{12} \sim C_{14}$  测点是第 4 测区。



注：○ 冻结管(20个) ■ 测点(14个) ◐ 冻结管、测点

图 1 冻结管及测点布置图

Fig. 1 Freezing tube and measuring point map

## 2.6 温度控制方案

传感器及模型埋设完成后，放置 7 d 进行固结，自然室温(约  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ )条件下开始试验。压缩机工作，冷媒( $\text{CaCl}_2$  溶液)温度逐渐降低，当其温度达  $-25 \text{ }^\circ\text{C}$  时关闭压缩机，进入冻结维护期，冻结维护期冷媒温度控制在  $-25 \sim -23 \text{ }^\circ\text{C}$ ，冻土最低温度达  $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 。冻结帷幕形成后，即可进行联络通道开挖，开挖完毕即停机进行自然解冻。随解冻时间的增加，土体温度最终升高至室温。

## 3 试验结果分析

### 3.1 土体温度变化规律

图 2 为不同测区、测点温度随土体冻融相变的变化情况，其中， $T_n$  为测点  $C_n$  处的温度。从图 2 (a)、(b) 可知，冻融过程中，土体温度先迅速降低后升高，并维持在  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  上下一段时间后，缓慢升高至室温。这是因为：冻结阶段，当土体温度达到起始冻胀温度时，土体中水迅速相变结晶，土体温度迅速下降；融沉阶段，冻土先达到  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ，部分开始融化，此时，冰、水共存的状态需维持较长一段时间，待冰完全融化时，土体温度继续上升。

有效冻结时间内，土体降温速度先快后缓，并在较短时间内降至最低温度。这是因为，随冻结的不断发展，土中冻结锋面的发展速度趋于平缓。第 1 测区  $C_{12}$  处土体温度降低快、降幅大(约  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ )， $C_4$

处次之,  $C_1$  处土体温度降低慢、降幅小。表明距地表越近、距冻结孔越远土体温度降越慢、降幅越小, 这是因为冻结锋面到达该处时间迟、发展慢, 且土体受地表温度影响显著。第2测区  $C_5$  处土体温度降低速度和幅度较  $C_7$  处土体大, 这是因为,  $C_5$  处土体在冻结壁交圈内,  $C_7$  处土体不仅受冻结管影响, 还受到外部土体的热源补给。

由图 2(c)、(d)可知, 位置较浅土体与外界热交换更多, 土体温度降幅较小(最大不超过  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。全封闭测区中心  $C_{13}$  处土体较竖向受限测区  $C_{10}$  处温度降低值大, 是因为全封闭模具起到一定的保温作用。

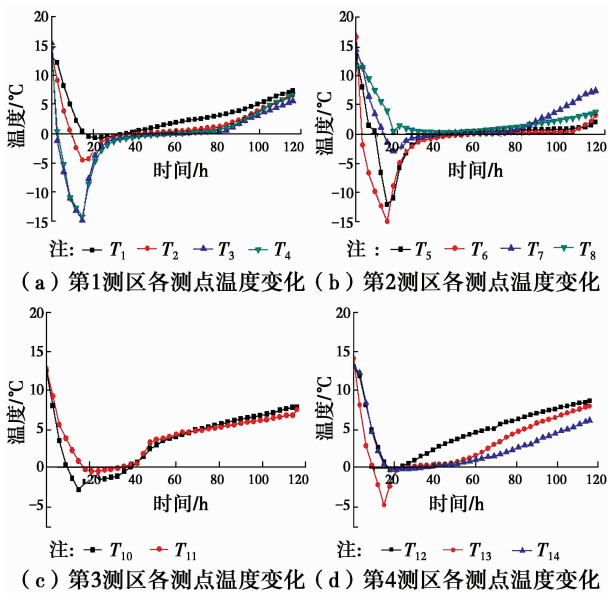


图2 不同测区、测点温度对比分析

Fig. 2 Temperature contrast analysis about different measuring areas and points

### 3.2 土压力变化分析

图3为不同测区、测点土压力值随土体冻胀融沉相变的变化情况。其中,  $P_{nb}$  代表测点  $C_n$  处的竖向土压力值;  $P_{na}$  代表测点  $C_n$  处的水平土压力值。

由图3(a)、(b)可知, 土体冻融过程中, 土压力值呈现先增大后减小的趋势。这是因为, 土冻结时水结晶成冰, 体积增大, 推动土颗粒移动, 产生冻胀变形, 当冻胀变形受到边界及上覆荷载约束时, 冻土就产生了冻胀力, 融沉阶段, 结晶冰融化, 土压力回复至初始值。第1测区距离冻结管较近的  $C_4$  测点土压力变化值  $12\text{ kPa}$ , 大于  $C_1$  测点的  $6\text{ Pa}$ , 第2测区埋深较大, 土压力变化值最小的  $C_5$  测点近  $20\text{ kPa}$ , 表明距冻结管越近、埋深越深, 土压力值变化越大。冻结管路附近位置水体首先相变结晶产生冻胀力, 若该处深度较大, 则上覆土体的压力较大, 导致

土压力值迅速增大到较大值, 整个冻融过程体现的土压力变化值也就更显著。

如图3(c)所示, 第3测区位于竖向受侧限的模具中, 在积极冻结期, 测点土压力不断增大。但是, 在融解阶段的土压力比初始的土压力要小, 这是由于受竖向侧限影响, 测点正上方土体仅受模具内土体的影响, 而水平向是开放的, 侧向土体会给测点处土体一个相反作用力, 使土压力盒所测得的值偏小。待冻土融解至一定阶段, 水平土压力值趋于初始土压力值, 该区  $C_{10}$  测点位于竖向侧限中间位置, 现象更为显著。

第4测区的土体在水平向、竖向均有侧限, 可以看出, 其土压力变化与其他测区明显不同。虽土压力变化值最大仅为  $17\text{ kPa}$ , 但其变化率较大,  $C_{13}$  测点的土压力变化量比初始土压力还要大。这是由于侧限的影响使土体的冻胀压力无法更好地扩散, 使测点处土压力值增加比例较大。

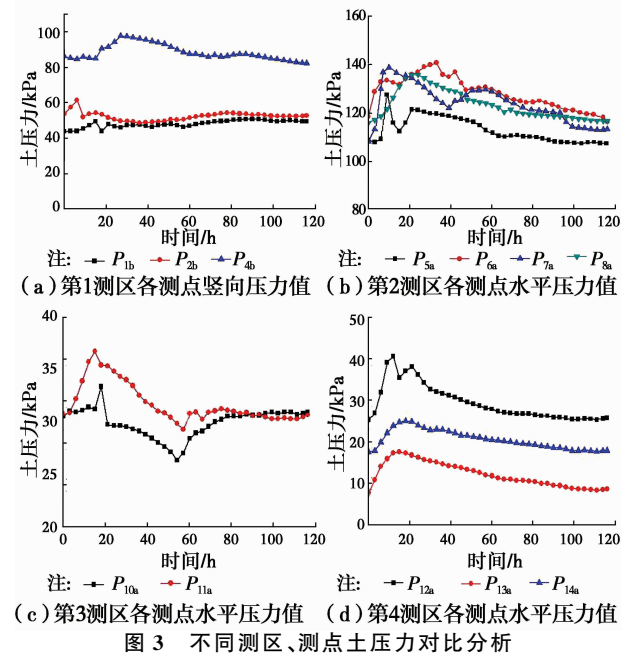


图3 不同测区、测点土压力对比分析

Fig. 3 Soil pressure comparison analysis about different measuring areas and points

### 3.3 位移变化分析

图4为不同测区、测点位移随土体冻胀融沉相变的变化情况。其中,  $D_n$  代表测点  $C_n$  处的位移;  $D_0$  表示土体表面位移。如图4(a)所示, 冻融过程中, 土体先冻胀隆起后融化固结沉降。土体冻结过程是土体中水的相变过程, 当土体温度达到起始冻胀温度时, 液态水相变结晶, 土体体积增大, 同时, 周围未冻结水分不断向冻结峰面迁移、聚集, 土体冻胀位移持续增加。联络通道开挖完成后, 进入土体融化固

结沉降阶段。此阶段冰逐渐融化成水,土体压实沉降,沉降位移逐渐增大。

由图4(a)中可知,试验阶段地表沉降值约10 mm(相当于现场0.1 m),冻胀位移量约6 mm(相当于现场0.06 m),融化固结沉降值明显大于冻胀位移值。这是因为冻土融沉阶段的位移除来自冻土中冰-水相变及自由消散带来的沉降变形外,冻胀还破坏了土体原有的结构,使其摩擦力和粘聚力减弱,在自重和外荷载的作用下产生进一步压缩沉降,导致融化固结沉降值更大。

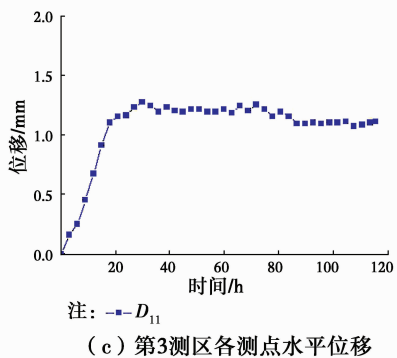
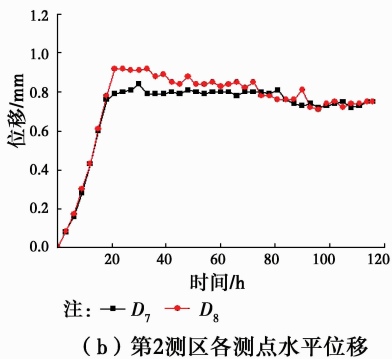
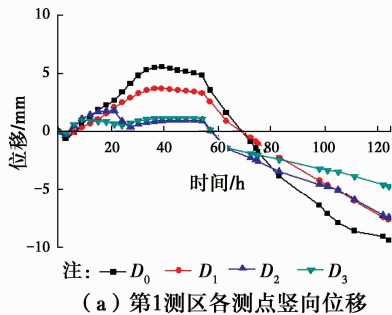


图4 不同测区、测点位移对比分析

Fig. 4 Soil displacement comparison analysis about different measuring areas and points

由图4(b)可以看到,在积极冻结阶段土体水平位移不断增大,在冻结维持及解冻阶段,土体水平位移缓慢减小并总体处于平稳。这是由于冻土竖向融化固结沉降量较大,侧向挤压使之水平位移变化较小。受竖向侧限影响, $C_{11}$ 测点处土体的水平位移(图4(c))略增大,总体变化趋势与无侧限状态下基

本相同。总体来说,冻土在冻胀融沉过程中,竖向位移变化较大,水平方向位移变化较小。

## 4 结论

以某地下联络通道的冻结施工为工程背景,运用物理相似模拟方法,研究了人工水平冻结工法冻结、融解过程中土体温度、应力和位移的变化规律,得到主要结论如下:

1)冻胀融沉过程中,土体温度先迅速降低后升高,并维持在 $0^{\circ}\text{C}$ 上下一段时间后,继续缓慢升高至室温。积极冻结期内土体温度降低速度先快后慢,且埋深越大、距冻结孔越近,土体温度降低越快、降幅越大;冻结壁内侧土体较同位置外侧土体温度降低快、降幅大。

2)土体冻胀融沉过程中,土压力值先增加后减小,最终趋于初始压力值。其中,竖向土压力值随埋深的增加而增大;相同埋深下,距冻结管越近水平土压力值越大。

3)积极冻结期内,无侧限土体压力值先增加后减小,竖向侧限与全封闭土体压力值则逐渐增大,且竖向侧限内冻土融解阶段的最小土压力值较初始值要小,全封闭测区内土体压力值变化率更大。

4)土体冻胀融沉过程中,土体先冻胀隆起后融化固结沉降,且融化固结沉降值明显大于冻胀位移值;土体竖向位移变化显著,水平位移在积极冻结阶段不断增大,在冻结维持及融解阶段变化不大。

## 参考文献:

- [1] 周金生,周国庆,马巍,等. 间歇冻结控制人工冻土冻胀的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(6): 708-712.  
ZHOU J S, ZHOU G Q, MA W, et al. Experimental research on controlling frost heave of artificial frozen soil with intermission freezing method [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(6): 708-712. (in Chinese)
- [2] 胡坤,周国庆,张琦,等. 变温幅度和间歇时间对土体冻胀影响的试验研究[J]. 工业建筑, 2011, 41(3): 86-90.  
HU K, ZHOU G Q, ZHANG Q, et al. Influences of temperature amplitudes and time intervals on frost heave [J]. Industrial Construction, 2011, 41(3): 86-90. (in Chinese)
- [3] 付财,韩圣铭,韩玉福. 浅覆土条件下地铁出入口冻结法暗挖施工技术[J]. 施工技术, 2014, 43(7): 41-43.

- FU C, HAN S G, HAN Y F, et al. Mining method with freezing method used in subway passageway under shallow covering condition [J]. *Construction Technology*, 2014, 43(7): 41-43. (in Chinese)
- [4] 杨维好,杜子博,杨志江,等. 基于与围岩相互作用的冻结壁塑性设计理论[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(10): 1857-1862.
- YANG W H, DU Z B, YANG Z J, et al. Plastic design theory of frozen soil wall based on interaction between frozen soil wall and surrounding rock [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(10): 1857-1862. (in Chinese)
- [5] 马巍,王大雁. 冻土力学[M]. 北京:科学出版社, 2014: 21-45.
- MA W, WANG D Y. *Frozen soil mechanics* [M]. Beijing: Science Press, 2014: 21-45. (in Chinese)
- [6] HANSSON K, LUNDIN L N. Equifinality and sensitivity in freezing and thawing simulations of laboratory and in situ data [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2006, 44(1): 20-37.
- [7] YAO X L, QI J L, WU W. Three dimensional analysis of large strain thaw consolidation in permafrost [J]. *Acta Geotechnica*, 2012, 7(3): 193-202.
- [8] ZHOU J, WEI C, WEI H, et al. Experimental and theoretical characterization of frost heave and ice lenses [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 104/105(3): 76-87.
- [9] HU X D, ZHANG L Y. Analytical solution to steady-state temperature field of one and two freezing pipes near linear adiabatic boundary [C]//ICDMA, Qingdao, 2013: 257-260.
- [10] 胡向东,任辉. 三排管冻结梯形-抛物弓叠合等效温度场模型和平均温度[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(1): 78-83.
- HU X D, REN H. A trapezoidal-parabolic arch superimposed equivalent temperature field model and its average temperature formula for triple-row-pipe freezing [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(1): 78-83. (in Chinese)
- [11] HU X D, ZHANG L Y. Analytical solution to steady-state temperature field of two freezing pipes with different temperatures [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2013, 18(6): 706-711.
- [12] KLINOVA G I, AKSENOV V, DZHAKHAN GIROVA N. Thaw-induced deformation properties of frozen soils [J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2010, 47(3): 102-107.
- [13] 王效宾,杨平,王海波. 冻融作用对黏土力学性能影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(11): 1768-1772. (in Chinese)
- WANG X B, YANG P, WANG H B, et al. Experimental study on effects of freezing and thawing on mechanical properties of clay [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(11): 1768-1772. (in Chinese)
- [14] 陶祥令,马金荣,黄凌. 人工冻土融沉试验及融沉系数预测研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2015, 32(6): 996-1003.
- TAO X L, MA J R, HUANG L. A study of the prediction of artificial frozen soil thaw settlement test and thaw settlement coefficient [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2015, 32(6): 996-1003. (in Chinese)
- [15] 王运钢. 上海地铁某联络通道冻结施工模拟实验研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2009.
- WANG Y G. Experimental study on freezing method construction of an underground connected aisle in Shanghai [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2009. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)