

DOI: 10.11779/CJGE2015S2027

人工冻土冻结过程中热-力耦合的数值模拟方法研究

孙立强^{1, 2}, 任宇晓^{*2}, 闫澍旺², 杨爱武¹, 韩圣章³

(1. 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 3. 天津市地下铁道集团有限公司, 天津 300051)

摘要: 随着地下工程的发展, 人工冻结法已成为地下工程建设中常用的技术。关于人工冻土在冻结过程中温度场的发展规律以及冻结过程中因为冻胀产生的对周边环境的影响有待于进一步深入的研究。通过室内试验得出了热物理参数随温度场的变化规律, 结合天津地铁某联络通道的人工冻土工程, 提出并建立了人工冻结过程中考虑热物理参数随温度变化的热-力耦合的数值计算方法, 利用该方法计算分析了人工冻结过程中土体的温度场和位移场的发展规律, 通过与实测数据对比, 证明了该方法的可行性, 成果可以指导人工冻土工程的设计与施工。

关键词: 人工冻结法; 数值模拟; 温度场; 位移场

中图分类号: TU445 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)S2-0137-06

作者简介: 孙立强(1979-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学科研工作。E-mail: slq0532@126.com。

Numerical simulation method for thermal-stress coupling in artificial freezing process

SUN Li-qiang^{1, 2}, REN Yu-xiao², YAN Shu-wang², YANG Ai-wu¹, HAN Sheng-zhang³

(1. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin 300384, China; 2. School of Civil

Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Tianjin Metro Group Co., Ltd., Tianjin 300051, China)

Abstract: With the development of underground engineering, the artificial freezing method has become the common techniques of underground construction. The law of the development of artificial frozen temperature field and the influence on the surrounding environment because of frost heave in the freezing process need to be further studied. The law of variation of the thermal physical parameters along with the temperature field is obtained through laboratory tests, then a numerical method considering thermal stress coupling in the process of artificial freezing is proposed and established based on an artificial frozen soil project of a connecting passage of Tianjin subway. The development law of temperature fields and the amount of frost heaving of soil during freezing process are calculated by using this method. The proposed method is proved to be feasible by comparing the calculated results with the actual data. Consequently, the proposed method can provide guidance and reference for the design and construction of artificial freezing projects.

Key words: artificial freezing method; numerical simulation; temperature field; displacement field

0 引言

人工冻结法具有强度高、隔水性能好、无污染、施工方便、可复原等优点, 被广泛应用于矿山、隧道开挖、地铁站出口和联络通道等工程。本文选用工程实例为天津某地铁联络通道的人工冻土施工。

国内外学者对人工冻土进行了大量研究, 并提出了很多预测人工冻土温度场的计算公式, 但这些公式多具有区域性和经验性, 且与实测值有较大的偏差^[1]。同时, 采用冻结法施工, 会引起冻结管周围土体的冻胀问题, 从而对冻结管周围的地下管线、地表建筑、交通产生不利影响, 因此须控制冻胀的影响范围^[2-3]。

为了研究人工冻结过程中温度场的发展分布规律

及由冻结引起土体的变形规律, 本文先进行室内试验, 确定了热物理参数随温度场的变化规律, 进而结合工程实例, 建立了考虑上述参数随温度场变化的热力耦合的数值计算方法, 利用该方法对实际工程冻结过程中温度场的发展规律及土体冻胀量进行了计算分析。

1 室内试验研究

1.1 导热系数试验

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402263); 天津市自然科学基金重点项目(13JCZDJC35300)

收稿日期: 2015-03-26

*通讯作者

本文参考煤炭行业标准《人工冻土物理力学性能试验规程》^[4], 利用导热系数测定仪通过室内试验对天津地区人工冻土的导热系数进行测试。

试验得到的土样导热系数随温度的变化规律如图 1 (a) 所示, 可以看出, 随着温度降低, 即土体由未冻结状态转向冻结状态过程中, 土样的导热系数逐渐增大。该规律线性拟合后可由方程(1) 表示:

$$\lambda = aT + b \quad , \quad (1)$$

式中, λ 为土样的导热系数, T 为土样的温度, a 、 b 为无量纲的系数, 本文经过试验得到 $a=-0.023$, $b=1.66$ 。

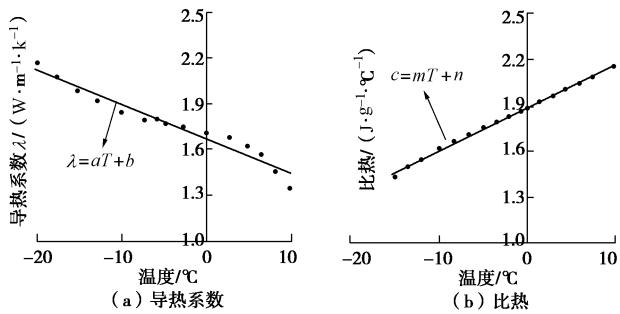


图 1 热物理参数随温度变化曲线

Fig. 1 Relation between thermal physical parameters and temperature

1.2 比热试验

本试验参考煤炭行业标准《人工冻土物理力学性能试验规程》试验方法进行, 采用冷却法, 以纯水为标准样品, 考虑了岩土试样的不均质特性, 温度测试采用热电偶测温技术。得到的土样比热随温度变化规律如图 1 (b) 所示。可以看出, 随着温度降低, 即土体在由未冻结转向冻结状态的过程中, 土体的比热容逐渐减小。该规律经线性拟合后可由方程(2) 表示:

$$c = mT + n \quad , \quad (2)$$

式中, c 为土样的比热容, T 为土样的温度, m 、 n 是无量纲的系数, 本文经过试验得到 $m=0.026$, $n=1.76$ 。

2 数值模拟计算方法

2.1 温度与位移耦合方程

(1) 温度场微分方程

人工冻结法施工时, 土体中的温度场呈非稳态变化。从冻结施工的现场跟踪测量可以知道, 土体在冻结过程中会发生相变。按照传热学理论, 考虑土体冻结相变过程的非稳态温度场微分方程如下:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{q_v}{\lambda} = \frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad . \quad (3)$$

式中 q_v 为单位体积的材料在相变过程放出或吸收的热量 (J/m³); λ 为导热系数 (W/m·°C); ρ 为密度

(kg/m³); c 为比热 (J/kg·°C); t 为温度 (°C)。在非相变区, 式(3) 中的 $q_v/\lambda=0$ 。

(2) 本构方程

当土体中作用一个温度场时, 除考虑力场作用下的应力和应变外, 还需要考虑温度场对土体力场的影响。土中的应力会随着温度的变化而变化, 这种由于温度变化产生的应力被称为热应力。

按照弹性力学方法, 建立热应力方程。其中平衡方程只与物体受力有关, 而与产生力的原因无关; 几何方程中应变只与位移有关, 而与引起位移的原因无关, 所以平衡方程和几何方程的形式不变。在变温时, 弹性体的应变由两部分组成。

(1) 自由膨胀引起的正应变分量 $\varepsilon_0 = \alpha \Delta t$, 其中 α 为膨胀系数, Δt 为温度变化值。自由膨胀引起的剪应变分量为 0。

(2) 热膨胀时, 土体的应力 - 应变关系符合广义胡克定律:

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

联合温度场微分方程和热力本构关系, 可以得到热力耦合控制方程。

在进行冻胀位移计算时, 地铁隧道衬砌管片设为线弹性材料; 土体亦假设为线弹性材料, 但其弹性模量的取值随温度变化而变化; 土体的冻胀率通过原状土的冻胀试验确定。

2.2 计算参数的取值方法

土样的物理力学性质指标、热物理参数随冻结过程存在较大的变化, 若采用常量指标进行运算不符合实际情况, 本文根据室内试验得出导热系数、比热以及其他指标随温度场的变化规律, 在进行数值计算时, 通过建立比热、导热系数随温度场变化的场变量赋予冻土的热物理参数, 同时也考虑了模量随温度场的变化。从而建立了计算参数随温度场变化的热力耦合的数值计算方法。

本文结合天津地铁某联络通道的人工冻土工程, 利用上述方法代入随温度场变化的参数指标进行计算, 具体取值见下文第 3.2 节。

3 工程实例模拟计算

3.1 工程概况

地铁联络通道设置在地铁两条隧道之间, 具有逃生、救援、排水的作用, 一般由与主干隧道相交

的喇叭口、通道和集水井组成, 其纵向剖面如图 2 所示。通道断面形状为直墙拱形, 高度一般为 2.5~3.5 m, 跨度一般为 2~3 m, 如图 3 所示, 联络通道人工冻结法施工主要过程为: 在开挖面四周布置冻结管, 通过将制冷设备制成的冷媒导入冻结管中进行冻结, 使得开挖土体周围形成冻结壁, 之后进行开挖支护。

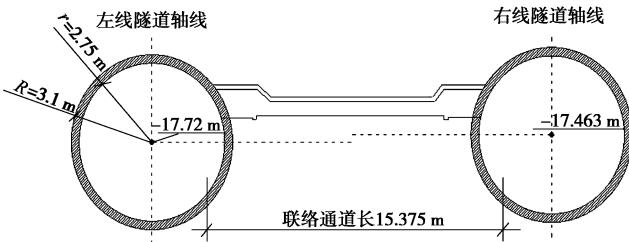


图 2 联络通道纵向剖面

Fig. 2 Section of connected aisle in longitudinal direction

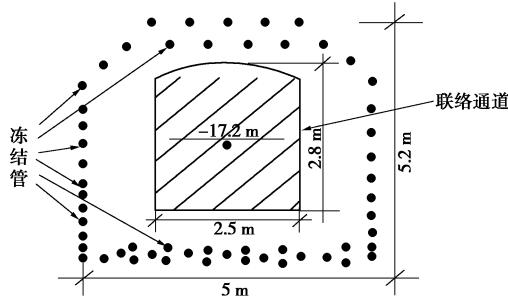


图 3 冻结管布置图

Fig. 3 Layout of freezing tubes

该地铁工程联络通道的位置里程左线为 DK20+576.673、右线为 DK20+581.858, 隧道中心线间距为 15.375 m, 联络通道所在位置的隧道中心标高左线为-17.72 m, 右线为-17.46 m, 联络通道的中心线标高为-17.20 m、地面标高约为+2.500 m、断面呈直墙拱顶, 净空宽 2.5 m、高 2.8 m, 如图 2、3 所示。根据地质勘查报告资料, 场地以淤泥质粉质黏土为主。

3.2 模型参数

(1) 土体物理力学参数指标

模型所用土层物理参数表 1 所示。

表 1 土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

| 温度 /℃ | 密度 /(kg·m⁻³) | 弹性模量 /MPa | 泊松比 | 膨胀系数 /(m·K⁻¹) |
|-------|--------------|-----------|------|---------------|
| -10 | 1840 | 190 | 0.25 | -0.039 |
| -2 | 1889 | 105 | 0.28 | -0.021 |
| -1 | 1920 | 20 | 0.32 | -0.002 |
| 10 | 1964 | 3.92 | 0.34 | 0 |

(2) 土体热物理参数

前文给出了土体热物理参数随温度变化的规律, 如式(5)和(6), 数值计算时建立随温度场变化的热物理参数取值规则。

$$\lambda = -0.023T + 1.66 \quad , \quad (5)$$

$$c = 0.026T + 1.76 \quad . \quad (6)$$

根据当地气象和地质资料, 大气温度取 13°C, 土体温度取 18°C。土体的相变潜热为 $1.07 \times 10^8 \text{ J/m}^3$ 。

另由于土体的表面和隧道内部需要与空气接触, 本文设置土体四周的导温系数为 $5.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, 土体表面与空气接触的散热系数及地铁隧道衬砌的散热系数分别为 $8.16 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 和 $2 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 。

3.3 几何模型及边界条件

(1) 几何模型

根据工程实际情况, 计算模型分别在长、宽、高三个方向上分别取 45 m、40 m、45 m, 如图 4 所示, 冻结管围绕联络通道外侧约 1.2 m 的位置呈直墙拱形布置, 如图 3 所示。土体模型共划分 72400 个单元, 隧道衬砌模型 1880 个单元, 温度场计算采用热传递单元, 冻胀分析采用三维 8 节点应力单元。

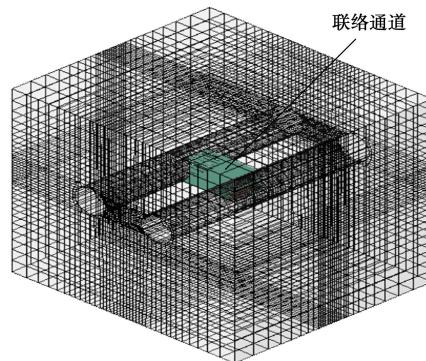


图 4 有限元计算模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of computational model

(2) 荷载及边界条件

a) 荷载主要为重力荷载。

b) 物理边界: 土体底部采取完全约束, 四周对相应方向分别进行约束, 地铁隧道采取完全约束。

c) 温度边界: 土体的初始温度场按人工冻土工程开始冻结时的实际温度场设定, 冻结管内的温度场按工程设计中的进管温度选取。设定土体底部边界为恒定温度。

3.4 计算结果及分析

(1) 温度场发展规律

图 5 所示为联络通道的纵向剖面, 在该联络通道范围内, 取 3 个代表性的位置分析其温度变化: 点 1 在联络通道外部、其长度方向 1/2 断面处; 点 2 在联

络通道内部, 点 1 的正下方; 点 3 在联络通道内部, 喇叭口附近, 与点 1 位于同一深度。

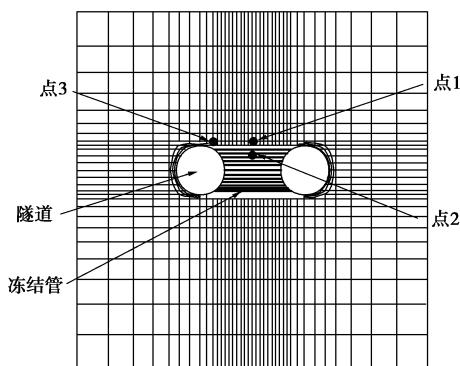


图 5 温度对比点示意图

Fig. 5 Schematic diagram of comparison points

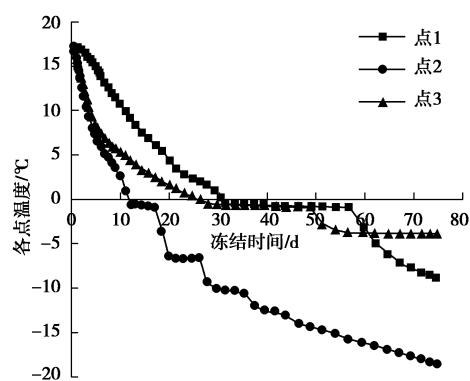


图 6 各点温度随时间变化曲线

Fig. 6 Change curves of temperatures at three points along with freezing time

根据计算结果, 绘制图 5 中 3 个代表性点的温度随冻结时间的关系曲线, 如图 6 所示, 对比点 1、点 2 发现, 联络通道内部的温度下降要比外部下降得快, 这是由于洞室效应, 冻土向内扩展速度要大于向外的扩展速度; 对比点 1、点 3 发现, 在低于零度后, 联络通道的喇叭口处冻结速度要比联络通道中间部位冻结速度小。

设计冻结壁厚度为 2 m 时, 冻结壁的平均温度随冻结时间变化的计算值与实测值对比情况如图 7 所示。当设计冻结壁厚度为 2 m, 设计平均冻结温度为 -10°C 时, 计算得到的冻结工期为 48 d, 实测记录为 50 d, 考虑到现场施工和检测的复杂性, 可以判定两者基本吻合。

图 8 所示为冻结壁在冻结工期结束后的温度场分布规律。

图 9 表示在不同的冻结时刻, 联络通道剖面上土体的温度场发展规律。在冻结初期, 靠近冻结管周围

的土体温度最低, 以各个冻结管为中心偏向外侧呈发散形态温度逐渐升高; 随着人工冻结过程的进行, 冻结管内外土体以冻结管布置形状中心为圆心, 逐渐呈现出同心圆状的温度场分布特征。这与文献[5]经过理论计算得到的规律一致。图 10 和图 11 为初始和结束时的温度场。

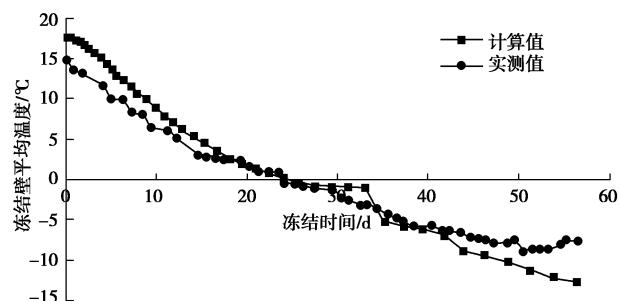


图 7 冻结壁平均温度与冻结时间关系曲线

Fig. 7 Change curves of average temperatures of frozen wall along with freezing time

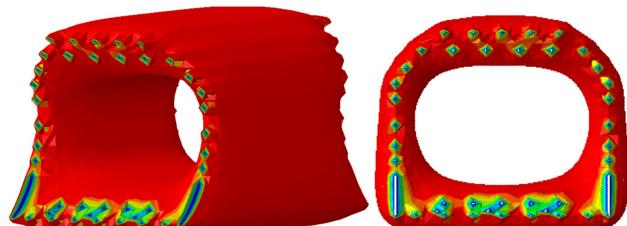


图 8 冻结壁形状及其温度场分布图

Fig. 8 Shapes and temperature fields of frozen wall

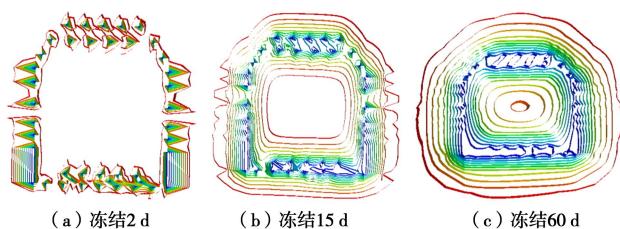


图 9 冻结温度场随时间变化云图

Fig. 9 Freezing temperature fields along with time

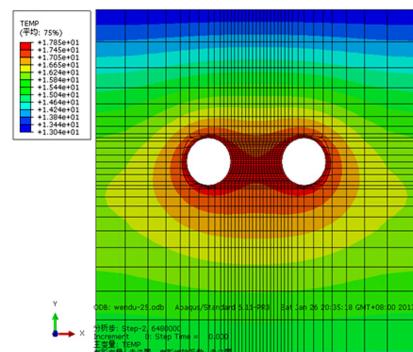


图 10 初始温度场

Fig. 10 Initial temperature fields

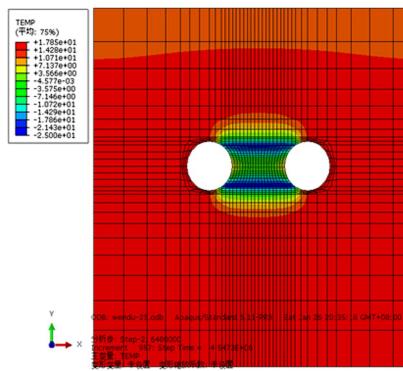


图 11 最终温度场

Fig. 11 Final temperature fields

(2) 土体位移场发展规律

本文在通过热-力耦合模拟方法计算温度场的同时, 进行了考虑膨胀系数随温度变化的位移场的计算。

图 12 分别从不同剖面分析了土体经过冻结施工的位移即冻胀量。图 12 (a) 为隧道横切面, 中间线上各点的变形情况由图 12 (b) 表示, 可以看出, 在联络通道上、下表面附近的土体冻胀量达到最大, 向联络通道轴线处逐渐减小。图 12 (c) 为沿隧道方向过隧道轴线的平剖面, 中间线平行于两侧隧道方向, 并经过联络通道中心点, 其上各点的变形情况由图 12 (d) 表示, 可以看出, 在联络通道两侧的水平冻胀量达到最大, 而靠近联络通道轴线处逐渐减小。

(d) 表示, 可以看出, 在联络通道两侧的水平冻胀量达到最大, 而靠近联络通道轴线处逐渐减小。图 12(e) 为地表上平行于图 12(c) 的面, 中间线垂直于隧道方向, 与联络通道中轴线平行, 其上各点的变形情况由图 12(f) 表示, 可以看出地表竖向位移在联络通道中心点上部达到最大, 向两侧逐渐减小。

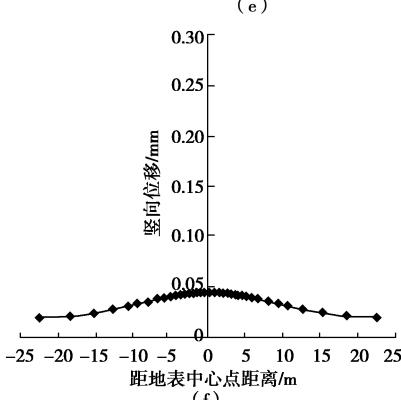
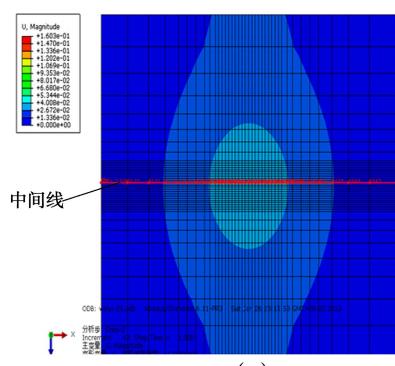
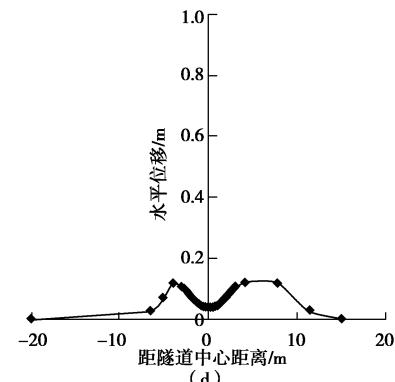
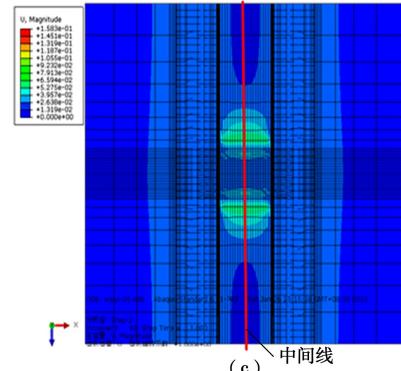
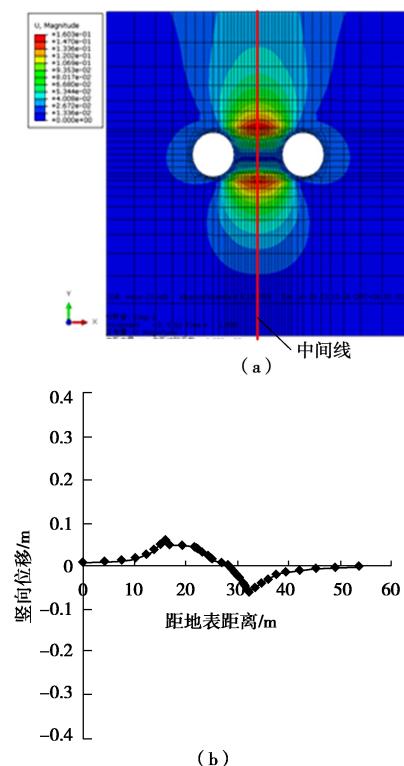


图 12 土体冻胀量

Fig. 12 Frost heave of soil

根据图 12 (a), (c) 分别绘制位移等值线图如图 13。地层竖向位移等值曲线表明, 联络通道冻结壁的冻胀对其周围土体的位移场有较大影响: 距离冻结壁越远, 土体的冻胀位移越小; 联络通道的中轴部位由于受到冻结壁的箍紧作用, 其位移近似于零; 采用直墙拱形方式布置冻结管, 联络通道底部产生的冻胀影

响范围小于其顶部的影响范围。综合图 12 和图 13 可以知道, 地表位移最大处位于联络通道中心处正上方, 这与实际结果相同。

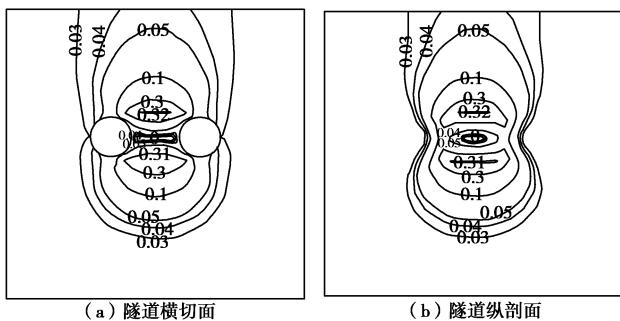


图 13 土体内部位移等值线图

Fig. 13 Displacement contours in soil

4 结 论

本文通过对热物理参数及膨胀系数等的室内试验, 建立了考虑计算参数随温度场变化的热–力耦合的数值模拟方法, 并利用该方法对天津地铁某联络通道的人工冻土工程进行了计算分析, 得到如下结论。

(1) 本文通过大量的室内试验, 得到了土样的热物理参数随温度的变化规律, 如导热系数和比热的取值可分别按下式取值: $\lambda = -0.023T + 1.66$, $c = 0.026T + 1.76$ 。

此外, 文中给出了土体一般物理力学参数随温度场的变化规律, 最终建立了在冻结过程中实时考虑温度场发展情况的热力耦合计算方法。

(2) 根据本文建立的数值计算方法得到的人工冻结过程中温度场及位移场的发展规律与现场实测规律较为一致。文中经过计算得到的达到设计平均冻结温度 -10°C 时所需时间为 48 d, 与实际监测得到的冻结工期 50 d 较为接近; 人工冻结初期, 土体冻胀量发展较快, 后期逐渐稳定, 该规律与实测规律非常吻合。

(3) 根据本文计算得到了冻结土体中冻胀量的发展规律: 联络通道的中轴部位由于受到冻结壁的箍紧作用, 其冻结位移很小; 在冻结壁附近土体的冻胀量最大, 随着与冻结壁距离的增大, 土体冻胀位移逐渐减小; 地表最大竖向位移位于联络通道中心点上方。

参 考 文 献:

- [1] 毛良根.任意冻结管分布下冻土温度场计算方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2007: 25 – 31. (MAO Liang-gen. Research on calculation method for temperature field of frozen soil considering irregular layout of freezing pipes[D]. Shanghai: Tongji University, 2007: 25 – 31. (in Chinese))
- [2] 陈瑞杰, 程国栋, 李述训, 等. 人工地层冻结应用研究进展和展望[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 40 – 44. (CHEN Rui-jie, CHENG Guo-dong, LI Shu-xun, et al. Development and prospect of research on application of artificial ground freezing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 40 – 44. (in Chinese))
- [3] YANG P, KE J M, WANG J G, et al. Numerical simulation of frost heave with coupled water freezing, temperature and stress fields in tunnel excavation[J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33: 6 – 7.
- [4] MT/T 593.1—2011 人工冻土物理力学性能试验[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011. (MT/T 593.1—2011 Artificial frozen soil physics mechanics performance test[S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2011. (in Chinese))
- [5] 沈碧伟, 胡向东, 沈伟杰. 单排管冻土帷幕平均温度计算方法分析[J]. 低温建筑技术, 2010, 32(11): 81 – 84. (SHEN Bi-wei, HU Xiang-dong, SHEN Wei-jie. Calculation method of average temperature for temperature field of single-row-frozen soil wall[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2010, 32(11): 81 – 84. (in Chinese))

(本文责编 明经平)