

文章编号: 1000-7598 (2014) 02-0504-07

隧道水平冻结施工期地表融沉的历时预测模型

蔡海兵^{1,2}, 彭立敏², 郑腾龙¹

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075)

摘 要: 隧道冻结工程中所形成的人工冻结壁为临时支护结构, 隧道衬砌结构施工后, 冻结壁要进入解冻期, 由于冻结壁解冻过程中的地层融沉现象对隧道周边环境的影响较大, 因此, 应建立合理的方法对地表融沉量进行预测, 以便于实际施工中采取相应的融沉控制措施。为此, 考虑冻结壁的自然解冻过程, 基于随机介质理论, 建立了隧道水平冻结施工期地表融沉的历时预测模型。并提出冻结壁自然解冻条件下瞬态温度场由平板解冻理论近似求解, 基于平板解冻理论和一维情况下已融土层的稳定融沉量计算公式, 确定了预测模型中解冻锋面半径和融缩区域内半径这 2 个关键参数的取值方法。将所建立的预测模型应用于隧道全断面水平冻结工程中, 得到了地表融沉随解冻时间的变化规律。研究表明, 地表融沉在解冻初期增长速度较快, 而在解冻后期增长速度减缓, 地表历时融沉量与崔托维奇通过试验得出的天然冻土历时融沉量变化规律相一致。

关键词: 隧道冻结; 地表融沉; 解冻过程; 预测模型; 随机介质理论

中图分类号: U 45

文献标识码: A

A duration prediction model of surface thawing settlement in construction period of tunnel with horizontal freezing method

CAI Hai-bing^{1,2}, PENG Li-min², ZHENG Teng-long¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Artificially frozen wall is a temporary support structure in tunnel freezing engineering; and frozen wall will gradually thaw after construction of the tunnel lining. In the process of frozen wall thawing, thawing settlement of ground can produce serious influence on the surrounding environment. So a reasonable method must be established for predicting surface thawing settlement. On this basis, suitable thawing settlement prevention measures can be determined in the actual construction. For this reason, considering the thawing process of frozen wall, using stochastic medium theory, a duration prediction model of surface thawing settlement in the period of tunnel construction with horizontal freezing method is presented. Temperature field under natural thawing conditions can be approximately analyzed by flat-panel thawing theory; based on flat-panel thawing theory and thawing settlement content calculation formula in one-dimensional case, value methods of thaw front radius and thaw compression region inner radius are determined in the duration prediction model. The prediction method is applied to circular tunnel full section horizontal freezing engineering, surface thawing settlement variations with thawing time are presented. The results show that surface thawing settlement grows faster in the early stages of thawing, and grows slower in the later stages of thawing. Surface thawing settlement variations with thawing time is presented, which is consistent with thawing settlement characteristics of natural permafrost researched through test method by ЦЫТОВНИЧ.

Key words: tunnel freezing; surface thawing settlement; thawing process; prediction model; stochastic medium theory

1 引 言

无论是天然冻土还是人工冻土, 当其吸收热量时, 土孔隙中的冰融化成水后, 体积减小 9%, 首先产生融化沉降; 之后, 融化区域内土体因自重和

外载作用而发生排水固结, 引起土层的压密沉降。其中, 融化沉降与压力无关, 而压密沉降则与压力密切相关, 两种沉降的综合效应所产生的土体沉降称为冻土的融化下沉, 简称融沉^[1]。

隧道水平冻结施工中所形成的冻结壁为临时支

收稿日期: 2012-11-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973)(No. 2011CB013802); 国家自然科学基金项目(No. 51208004); 安徽省自然科学基金项目(No. 1208085QE87)。

第一作者简介: 蔡海兵, 男, 1980 年生, 副教授, 博士, 主要从事地下结构工程方面的教学与科研工作。E-mail: haibingcai@163.com

护结构，当隧道衬砌结构修建完毕，冻结管停止供冷则冻结壁进入解冻期。在解冻过程中，随着冻结壁逐渐融化，地表会产生融沉现象，故应采用合理方法对可能引起的地表融沉量进行预估，以便于实际施工过程中采取相应的融沉控制措施。

崔托维奇^[1]采用室内试验和现场实测的方法对天然冻土的融沉量进行了相关研究，并首次提出了一维情形下冻土融化后的稳定沉降量计算公式为

$$S = \varepsilon_{\text{th}} h_r + \varepsilon_a p h_r \quad (1)$$

式中： S 为融土层的稳定融沉量； h_r 为融土层厚度； p 为融土层外荷载； ε_{th} 为冻土融沉系数； ε_a 为融土压密系数。

该公式自提出后，在前苏联、北美以及我国天然冻土地基融沉量预测中得到广泛应用，且一直沿用至今。鉴于冻土融沉问题的复杂性，融沉计算模型远不及冻胀模型研究得深入，国内外专家学者大都在应用该公式的基础上，集中在融沉系数、压密系数及二者与天然冻土基本物理量间的关系等方面开展研究工作^[2-5]。

虽然天然冻土和人工冻土的组成成分相同，但人工地层冻结和天然地层冻结的原理和边界条件截然不同。天然冻土的融化过程可近似为一维问题，而人工冻土的融化过程不能简化为一维问题，应为二维或三维问题。对于隧道水平冻结法施工而言，更是如此，其冻结壁的自然解冻过程为：当隧道衬砌结构施工完成后，此时隧道周边已形成如图1(a)所示的冻结壁；关闭冻结系统，冻结管内则无冷媒剂循环，外部地层与冻结壁产生热交换，使得冻结壁外缘向隧道内方向逐渐融化，隧道内通风和大气温度使得冻结壁内缘向隧道外方向逐渐融化，冻结壁处于自然解冻过程中，见图1(b)；随着自然解冻时间延长，冻结壁完全融化，如图1(c)所示。

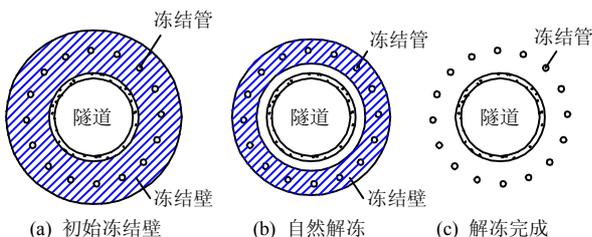


图1 冻结壁的自然解冻过程

Fig.1 Natural thawing process of frozen wall

人工冻结壁解冻过程中产生的土体融沉可视为一个随机事件，因此，隧道冻结施工引起地表的融沉问题可以采用随机介质理论进行分析。现有相关

方面的研究主要有，宁方波^[6]针对上海地铁明珠线西藏南路—南浦大桥区间旁通道冻结工程，应用随机介质理论建立了地表融沉量的简化计算模型；刘波等^[7]针对某地铁隧道旁通道冻结工程，采用随机介质理论建立了能够同时反映土体压力和融沉系数对地表沉降量影响的计算模型，并预测分析了地表沉降量。这些研究得出了一些有意义的结论，但不足之处是在分析过程中均未考虑冻土随时间的融化过程，即冻结壁的解冻过程。而解冻温度场实则则为瞬态的导热问题，地层融沉与解冻时间势必存在着密切联系。有鉴于此，本文考虑冻结壁的自然解冻过程，基于随机介质理论，建立隧道水平冻结施工期地表融沉的历时预测模型，并应用于圆形隧道全断面水平冻结工程中，得到了地表融沉随解冻时间的变化规律。

2 地表融沉的历时预测模型

在冻结壁自然解冻前，隧道周边已形成外半径为 $R(0)$ 的圆环柱状冻结壁，一般隧道冻结工程中，隧道开挖边界土体温度均为负温，因此，冻结壁内半径可近似认为是隧道衬砌外半径 R_0 ，冻结壁有效厚度则为 $R(0) - R_0$ 。冻结壁开始自然解冻，隧道内通风和大气温度使得冻结壁内缘向隧道外方向逐渐融化，经 t 时刻后，解冻锋面半径为 $R_1(t)$ ，冻结壁内缘解冻过程中的体积收缩假定为从半径 $R_1(t)$ 均匀径向融缩至 $R_{\Delta 1}(t)$ ，融缩区域面积为 $\Delta_1(t)$ ，如图2(a)所示。外部地层与冻结壁产生热交换，使得冻结壁外缘向隧道内方向逐渐融化，解冻锋面半径为 $R_2(t)$ ，冻结壁外缘解冻过程中的体积收缩假定为从半径 $R_2(t)$ 均匀径向融缩至 $R_{\Delta 2}(t)$ ，融缩区域面积为 $\Delta_2(t)$ ，如图2(b)所示。则冻结壁内、外缘解冻后所产生的融缩区域，反映到地表便形成地表的融沉位移。

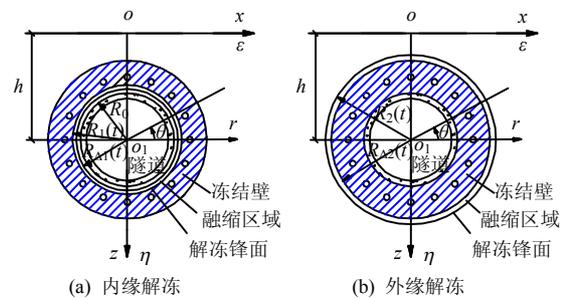


图2 冻结壁解冻期坐标系转换图

Fig.2 Coordinate system transformation of frozen wall in thawing period

根据随机介质理论的基本原理^[8]，在冻结壁自然解冻过程中，融缩区域内各微单元体融缩引起地

表各点的沉降位移为

$$S_e(x) = \frac{\tan \beta}{\eta} \exp \left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{\eta^2} x^2 \right] d\varepsilon d\eta \quad (2)$$

式中: β 为岩土层主要影响角; x 为在 $\varepsilon o\eta$ (xoz) 直角坐标系下地表各点的横坐标; $d\varepsilon$ 、 $d\eta$ 为微单元体长度、宽度; η 为微单元体中心距地表的深度。

如图 2, 将 $\varepsilon o\eta$ (xoz) 直角坐标系转换成 $ro'\theta$ 极坐标系, 则该两坐标系之间的转换公式为

$$\varepsilon = r \cos \theta \quad (3)$$

$$\eta = h - r \sin \theta \quad (4)$$

式中: h 为隧道中心距地表的距离; r 、 θ 分别为在 $ro'\theta$ 极坐标系下的极径、极角。

根据双重积分的换元公式, 在平面问题条件下, 由式 (2) 可得 t 时刻冻结壁自然解冻引起地表各点融沉位移表达式为

$$S(x) = \iint_{\Delta_1(t)+\Delta_2(t)} \frac{\tan \beta}{h - r \sin \theta} \exp \left\{ -\frac{\pi \tan^2 \beta}{(h - r \sin \theta)^2} [x - r \cos \theta]^2 \right\} r dr d\theta \quad (5)$$

融缩区域 $\Delta_1(t)$ 的内半径为 $R_{\Delta_1}(t)$, 外半径为 $R_1(t)$; 融缩区域 $\Delta_2(t)$ 的内半径为 $R_{\Delta_2}(t)$, 外半径为 $R_2(t)$, 则式 (5) 又可变为

$$S(x) = S_1(x) + S_2(x) \quad (6)$$

$$S_1(x) = \int_{R_{\Delta_1}(t)}^{R_1(t)} \int_0^{2\pi} \frac{\tan \beta}{h - r \sin \theta} \exp \left\{ -\frac{\pi \tan^2 \beta}{(h - r \sin \theta)^2} [x - r \cos \theta]^2 \right\} r dr d\theta \quad (7)$$

$$S_2(x) = \int_{R_{\Delta_2}(t)}^{R_2(t)} \int_0^{2\pi} \frac{\tan \beta}{h - r \sin \theta} \exp \left\{ -\frac{\pi \tan^2 \beta}{(h - r \sin \theta)^2} [x - r \cos \theta]^2 \right\} r dr d\theta \quad (8)$$

对于平面问题, 在 $ro'\theta$ 极坐标系下, 式 (6) 即为隧道水平冻结施工过程中, 冻结壁自然解冻引起地表融沉位移的计算表达式。

3 解冻锋面半径的确定方法

冻结壁自然解冻条件下的解冻锋面半径分为两个部分, 其一为冻结壁内缘的解冻锋面半径 $R_1(t)$,

其二为冻结壁外缘的解冻锋面半径 $R_2(t)$ 。该两值的确定问题即为冻结壁自然解冻规律的求解问题。

对于隧道冻结工程, 所形成的冻结壁为临时支护结构, 隧道衬砌结构施工后, 冻结壁要进入解冻期, 由于冻结壁解冻过程中的地层融沉现象对隧道周边环境的影响较大, 冻结壁的解冻规律得到了一定关注, 如陈明雄等^[9]、肖朝昀等^[10]和王效宾等^[11]均各自采用模型试验、现场实测和数值模拟等方法, 对隧道工程冻结壁自然解冻规律进行了分析。由于工程的特殊性难以形成统一的冻结壁解冻规律求解方法, 且对于隧道冻结工程施工前解冻温度场的预测, 上述成果更无直接的借鉴性。

为此, 本文采用平板解冻理论进行冻结壁自然解冻条件下瞬态温度场的近似求解, 进而可得到冻结壁融化过程中解冻锋面半径的确定方法。

如图 3 所示, 薄板表面温度为正温 T_b 且保持恒定, 使得其右侧冻结壁逐渐融化, 从左至右, 土体可分为解冻区和冻结区。解冻区土体温度为 T_u , 冻结区土体温度为 T_f , 均为时间 t 和坐标 x 的函数。解冻锋面为一移动的相变边界, 其与初始冻结壁内缘或外缘的距离为 $X(t)$, 且有解冻面温度 $T_f = 0^\circ\text{C}$ 。

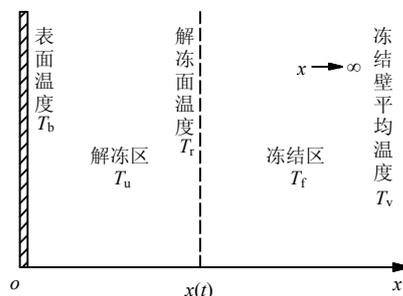


图 3 平板解冻理论示意图

Fig.3 Schematic diagram of flat-panel thawing theory

解冻区和冻结区热传导微分方程可写为

$$\frac{\partial T_u}{\partial t} = \alpha_u \frac{\partial^2 T_u}{\partial x^2}, \quad (0 \leq x \leq X(t)) \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \alpha_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2}, \quad (X(t) \leq x \leq \infty) \quad (10)$$

式中: α_f 、 α_u 分别为冻土、融土的热扩散系数。

$$\alpha_f = \frac{k_f}{c_f \rho_f}, \quad \alpha_u = \frac{k_u}{c_u \rho_u} \quad (11)$$

式中: k_f 、 k_u 分别为冻土、融土的导热系数; c_f 、 c_u 分别为冻土、融土的比热; ρ_f 、 ρ_u 分别为冻土、融土的饱和密度。

如不考虑冻结壁内的温度梯度，假定冻结壁具有初始均匀温度 T_v ，则微分方程的初始条件为

$$\text{当 } t = 0 \text{ 时, } T_f = T_u = T_v \quad (12)$$

同时假定冻结壁范围无限大，则有微分方程的边界条件为

$$\text{当 } x = 0 \text{ 时, } T_u = T_b \quad (13)$$

$$\text{当 } x = X(t) \text{ 时, } T_f = T_u = T_r = 0 \quad (14)$$

$$\text{当 } x = \infty \text{ 时, } T_f = T_v \quad (15)$$

在解冻锋面，即相变边界 $X(t)$ 处的热平衡方程为

$$\left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial x} - k_u \frac{\partial T_u}{\partial x} \right)_{x=X(t)} = L \frac{dX(t)}{dt} \quad (16)$$

式中： L 为单位容积土体的相变潜热。

从而可求得解冻区和冻结区的温度分布规律分别为

$$T_u = T_b \left[1 - \frac{\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_u t}}\right)}{\Phi\left(\frac{B}{2\sqrt{\alpha_u}}\right)} \right], \quad (0 \leq x \leq X(t)) \quad (17)$$

$$T_f = T_v \left[1 - \frac{1 - \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_f t}}\right)}{1 - \Phi\left(\frac{B}{2\sqrt{\alpha_f}}\right)} \right], \quad (X(t) \leq x \leq \infty) \quad (18)$$

式中： $\Phi(y)$ 为高斯误差函数，且有

$$\Phi(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-\eta^2} d\eta \quad (19)$$

由 $x = X(t)$ 时， $T_f = T_u = T_r = 0$ ，可知解冻锋面位置 $X(t)$ 与解冻时间的平方根成正比，即

$$X(t) = B\sqrt{t} \quad (20)$$

式中： B 为待定常数，需满足下式：

$$\frac{k_u T_b e^{-\frac{B^2}{4\alpha_u}}}{\sqrt{\alpha_u} \Phi\left(\frac{B}{2\sqrt{\alpha_u}}\right)} + \frac{k_f T_v e^{-\frac{B^2}{4\alpha_f}}}{\sqrt{\alpha_f} \left[1 - \Phi\left(\frac{B}{2\sqrt{\alpha_f}}\right) \right]} = LB \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad (21)$$

当冻土和融土的导热系数、比热、密度等热物理参数确定后，解冻锋面位置可采用式 (20) 进行计算。

根据冻结壁的自然解冻过程，冻土从冻结壁内缘和外缘向中间融化。在冻结壁自然解冻前，其外半径为 $R(0)$ ，内半径即为隧道衬砌外半径 R_0 ，从而由式 (20) 可得冻结壁内缘和外缘的解冻锋面半径分别为

$$R_1(t) = R_0 + B\sqrt{t} \quad (22)$$

$$R_2(t) = R(0) - B\sqrt{t} \quad (23)$$

需要注意的是，上述两式对解冻锋面半径的求解是假定冻结壁内、外缘解冻速度相同，而冻结壁实际自然解冻过程的监测结果表明^[12-13]，相对于冻结壁外缘，冻结壁内缘（隧道衬砌结构旁边冻土）的解冻速度较快。鉴于目前尚无对两者解冻速度量化的相关文献报导，在此假定冻结壁内、外缘解冻速度一致，以便于理论计算。

鉴于上述假设，自然解冻条件下冻结壁的解冻锋面半径可由上述平板解冻理论近似求解。

4 融缩区域内半径的确定方法

冻结壁经 t 时刻自然解冻后，产生的融缩区域分为内、外侧两个部分，内侧融缩区域假定为从冻结壁内缘解冻锋面半径 $R_1(t)$ 径向均匀收缩至 $R_{\Delta 1}(t)$ ，外侧融缩区域假定为从冻结壁外缘解冻锋面半径 $R_2(t)$ 径向均匀收缩至 $R_{\Delta 2}(t)$ 。融缩区域由冻土的融沉特性引起，冻土的融沉量不仅包括冻土融化产生的沉降量，而且还包括融土在外载作用下产生的压密沉降量。

在融缩区域内取一个径向长度为 dr 、单位环向宽度的单元体，根据一维情况下已融土层的稳定融沉量计算公式，如式 (1)，则该单元体的融沉量为

$$dS = \varepsilon_{th} dr + \varepsilon_a p_z dr \quad (24)$$

式中： dS 为单元体的融沉量； p_z 为作用于单元体上的荷载。

为计算简便起见，假定融缩区域内各单元体承受的外荷载均相等，即与单元体的位置无关，且不考虑地面超载，外荷载可近似认为等于隧道上覆土层自重，则式 (24) 又可写为

$$dS = \varepsilon_{th} dr + \varepsilon_a \gamma h dr \quad (25)$$

式中： γ 为隧道上覆各土层重度的加权平均值； h 为隧道中心距地表的距离。

土体解冻过程中某点的融沉量也可认为是该点之下单元体融沉量沿融缩区域的积分，则可得自然解冻条件下，融沉区域内半径的求解公式如下：

冻结壁内缘融缩区域内半径为

$$R_{\Delta 1}(t) = R_1(t) - \int_{R_0}^{R_1(t)} (\varepsilon_{th} + \varepsilon_a \gamma h) dr \quad (26)$$

冻结壁外缘融缩区域内半径为

$$R_{\Delta 2}(t) = R_2(t) - \int_{R_2(t)}^{R_0} (\varepsilon_{th} + \varepsilon_a \gamma h) dr \quad (27)$$

5 工程案例计算

以某隧道全断面水平冻结工程为例^[14-16], 进行自然解冻期地表融沉的预测计算, 隧道埋深 $h = 15 \text{ m}$, 衬砌外半径 $R_0 = 3 \text{ m}$, 冻结管外半径 $R_p = 80 \text{ mm}$, 隧道所处土层以砂质黏土为主。冻结 60 d 后隧道周边已形成有效厚度为 2.35 m 的冻结壁, 即冻结壁外半径 $R(0) = 2.35 + 3 = 5.35 \text{ m}$ 。取冻土的融沉系数 $\varepsilon_{th} = 1\%$, 融土的压密系数 $\varepsilon_a = 0.01 \text{ MPa}^{-1[17]}$, 岩土层主要影响角的正切值 $\tan \beta = 0.8$ 。冻土、融土的热物理参数取值如表 1^[16]。

表 1 热物理参数
Table 1 Thermophysical parameters

土体	饱和密度 (g/cm^3)	导热系数 ($\text{kcal}/(\text{m}^2\text{d})$)	比热 ($\text{kcal}/(\text{kg}^\circ\text{C})$)	相变潜热 (kcal/m^3)
冻土	1.928	32.46	0.27	24 421.28
融土		23.14	0.34	

取 $T_b = 15^\circ\text{C}$, $T_v = -10^\circ\text{C}$ 。将冻土、融土热物理参数代入到式 (20) 中可得自然解冻条件下解冻锋面位置 $X(t)$ 为

$$X(t) = 127.8\sqrt{t} \text{ mm} \quad (28)$$

冻结壁的完全自然解冻时间 t_j 为

$$t_j = \left(\frac{2 \ 350}{2 \times 127.8} \right)^2 = 85 \text{ d} \quad (29)$$

根据式 (22), 冻结壁内缘解冻锋面半径为

$$R_1(t) = 3 \ 000 + 127.8\sqrt{t} \text{ mm} \quad (30)$$

根据式 (26), 冻结壁内缘融缩区域内半径为

$$R_{\Delta 1}(t) = 3 \ 000 + 0.987 \ 1 \times 127.8\sqrt{t} \text{ mm} \quad (31)$$

根据式 (23), 冻结壁外缘解冻锋面半径为

$$R_2(t) = 5 \ 350 - 127.8\sqrt{t} \text{ mm} \quad (32)$$

根据式 (27), 冻结壁外缘融缩区域内半径为

$$R_{\Delta 2}(t) = 5 \ 350 - 1.012 \ 9 \times 127.8\sqrt{t} \text{ mm} \quad (33)$$

根据式 (6), 采用 Maple 数学软件编制自然解

冻条件下的地表融沉计算程序。地表计算区域选为 $-20 \text{ m} \leq x \leq 20 \text{ m}$, 可得冻结壁自然解冻期地表融沉分布规律随解冻时间的变化曲线如图 4 所示。

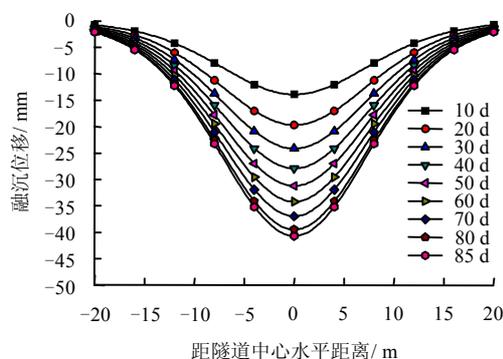


图 4 地表融沉分布规律随时间变化曲线
Fig.4 Variations of surface thawing settlement distribution with time

由图可知, 自然解冻期内, 地表最大融沉位移发生在隧道中心轴线位置, 随着距离隧道中心线越远, 地表融沉位移逐渐减小, 并最终将趋于 0。在自然解冻初期, 地层融沉现象不很明显, 如解冻 10 d 后, 隧道中心线处地表最大融沉位移为 13.9 mm, 随着解冻时间的增长, 地层融沉现象增强, 地表的融沉位移也随之增大, 冻结壁完全融化后 (自然解冻 85 d 后), 隧道中心线处地表最大融沉位移达到 40.7 mm, 距隧道中心水平距离 8 m 处的地表融沉位移也达到 23.2 mm。地表融沉随时间变化规律表明, 隧道水平冻结施工期地表融沉现象与冻结壁的自然解冻过程有着密切的联系, 随着解冻时间延长, 地表融沉位移逐渐增大。

图 5 给出了距隧道中心水平距离分别为 0、4、8、12、16、20 m 的地表各点融沉位移随冻结壁自然解冻时间 (共 85 d) 的变化曲线。由图可知, 在冻结壁的自然解冻过程中, 地表融沉位移增长速度均随着距隧道中心越远而变小。在解冻初期, 融沉位移增长速度较快, 自然解冻 10 d 内, 隧道中心线处地表融沉位移增长速度为 1.39 mm/d, 距隧道中心水平距离 8 m 处的地表融沉位移增长速度为 0.8 mm/d; 在解冻后期, 融沉位移增长速度减缓, 20~85 d 的解冻时间内, 隧道中心线处地表融沉位移增长速度约为 0.32 mm/d, 距隧道中心水平距离 8 m 处的地表融沉位移增长速度则仅为 0.18 mm/d, 距隧道中心水平距离 16 m 以外的地表可近似认为融沉位移无明显增长。

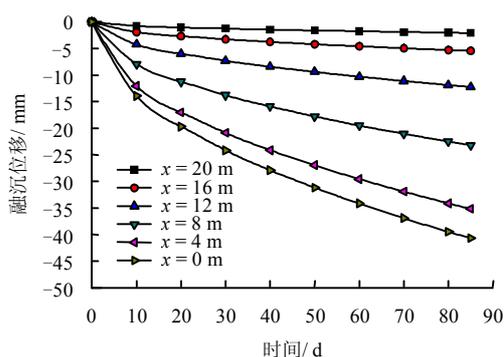


图5 地表各点融沉位移随时间变化曲线
Fig.5 Variations of surface points thawing settlement with time

在冻结壁自然解冻期内, 地表融沉位移在解冻初期增长速度较快, 而在解冻后期增长速度减弱, 根据图5曲线的非线性形状, 自然解冻期内地表融沉位移与时间的关系可由下式表示:

$$S(t) = C\sqrt{t} \quad (28)$$

式中: C 为系数。

崔托维奇^[1]早期通过试验研究天然冻土的融沉量时, 提出融沉量随时间变化的公式与之相同。

6 结论

(1) 考虑冻结壁的自然解冻过程, 基于随机介质理论, 建立了隧道水平冻结施工期地表融沉的历时预测模型。

(2) 确定了计算模型中解冻锋面半径和融缩区域内半径这2个关键参数的取值方法。推导了冻结壁平板解冻理论, 并提出平板解冻理论可用于冻结壁自然解冻条件下瞬态温度场的近似求解, 进而导出了解冻锋面半径的计算方法。采用一维情况下已融土层的稳定融沉量公式, 得到了冻结壁自然解冻条件下融沉区域内半径的计算方法。

(3) 工程案例分析结果表明, 隧道水平冻结施工期地表融沉现象与冻结壁的自然解冻过程有着密切的联系, 随着解冻时间延长, 地表融沉位移逐渐增大, 地表融沉位移在解冻初期增长速度较快, 而在解冻后期增长速度减弱。自然解冻期内, 最大融沉位移均发生在隧道中心轴线处地表位置, 且随着距离隧道中心线越远, 地表融沉位移逐渐减小。

(4) 需特别指出的是, 隧道实际冻结施工中, 一般都在解冻期采用地层注浆的方式来控制融沉量, 以尽可能减小对周边环境的影响程度。而本文上述对自然解冻期的地表融沉计算过程中, 未考虑

地层注浆, 即为无注浆条件下的地表融沉预测。但所提出的预测模型可用于隧道冻结工程的设计阶段, 针对特定的冻结方案分析其可能引起的地表融沉量, 进而对解冻期融沉注浆的必要性进行考量。

参考文献

- [1] 崔托维奇 H A. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [2] WASTON G, SLUSARCHUK W, ROWLEY R. Determination of some frozen and thawed properties of permafrost soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1973, 10: 592—606.
- [3] CRORY F. Settlement associated with the thawing of permafrost[C]//Proceedings of 2nd International Conference on Permafrost. Yakutsk: [s. n.], 1973: 599—607.
- [4] 陈肖柏, 刘建坤, 刘鸿绪, 等. 土的冻结作用与地基[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [5] 张喜发, 陈继, 张冬青. 融沉系数在季冻区高速公路路基冻害研究中的应用[J]. *冰川冻土*, 2003, 24(5): 634—638.
- [6] ZHANG Xi-fa, CHEN Ji, ZHANG Dong-qing. Application of thawing settlement coefficient to the research on the roadbed frost damage of freeway in seasonal frost region[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 24(5): 634—638.
- [7] 宁方波. 地下冻结工程中土体冻胀融沉对地表变形的影响分析[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2005.
- [8] 刘波, 李东阳, 廖建军. 土体压力对地铁旁通道解冻后地表沉降的影响[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(4): 551—555.
- [9] LIU Bo, LI Dong-yang, LIAO Jian-jun. The effect of earth pressure on ground settlement after frozen soil thawing in connect aisle construction of metro engineering[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(4): 551—555.
- [10] 阳军生, 刘宝琛. 城市隧道施工引起的地表移动及变形[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [11] 陈明雄, 傅德明. 上海软土地层浅覆土盾构隧道冻结加固模拟试验研究[J]. *地下工程与隧道*, 1995, (3): 2—7.
- [12] CHEN Ming-xiong, FU De-ming. Simulation test study of shallow covering shield tunnel freezing in Shanghai soft soil layer[J]. *Underground Engineering and Tunnels*, 1995, (3): 2—7.
- [13] 肖朝昀, 胡向东. 人工地层冻结冻土自然解冻与强制解冻实测分析[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2009, 6(3): 92—95.

- XIAO Zhao-yun, HU Xiang-dong. Field measurement analysis of natural thawing and artificial thawing of frozen soil by artificial ground freezing[J]. **Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)**, 2009, 6(3): 92—95.
- [11] 王效宾, 杨平, 张婷, 等. 盾构出洞水平冻结解冻温度场三维有限元分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2009, 10(6): 586—590.
- WANG Xiao-bin, YANG Ping, ZHANG Ting, et al. 3-D finite element analysis of melting temperature field in shield tunneling horizontal freezing reinforcing engineering[J]. **Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)**, 2009, 10(6): 586—590.
- [12] 韩玉福, 李方政. 地铁联络通道冻土融化规律实测研究[J]. 上海建设科技, 2009, (4): 53—55.
- HAN Yu-fu, LI Fang-zheng. Study of frozen soil melting law measuring in the subway contact channels[J]. **Shanghai Construction Science & Technology**, 2009, (4): 53—55.
- [13] 蔡海兵, 程桦, 彭立敏, 等. 地铁双线隧道水平冻结位移场的模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2088—2095.
- CAI Hai-bing, CHENG Hua, PENG Li-min, et al. Model test on displacement field of double-route metro constructed with horizontal freezing method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(10): 2088—2095.
- [14] 蔡海兵, 彭立敏, 郑腾龙. 隧道水平冻结施工引起地表冻胀的历时预测模型[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1761—1768.
- CAI Hai-bing, PENG Li-min, ZHENG Teng-long. A duration prediction model of surface frost heave induced by tunnelling with horizontal freezing method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(6): 1761—1768.
- [15] 程桦, 臧华. 人工地层水平冻结冻胀效应耦合数值分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 87—90.
- CHENG Hua, ZANG Hua. Quasi-coupling numeric analysis of frost heave effect of horizontal freezing in artificial ground[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(1): 87—90.
- [16] 臧华. 地层水平冻结冻胀效应数值分析[D]. 淮南: 淮南工业学院, 2000.
- [17] 黑龙江省寒地建筑科学研究院. JGJ 118—98 冻土地区建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.

中国建筑学会地基基础分会 2014 年学术年会

(1 号通知 征集论文)

四川·成都 (2014.10)

主办单位: 中国建筑学会地基基础分会

承办单位: 中国建筑西南勘察设计研究院, 其他单位待定

协办单位: 《岩土力学》、《建筑科学》、《地下空间与工程学报》, 其他单位待定

会议征文内容: 本次会议旨在展示和交流近年来全国在岩土工程勘察、土的基本性质、天然地基、桩基础、地基处理、基坑(边坡)支护、特殊土地基、地下空间工程等地基基础领域理论与实践方面的最新研究成果、发展趋势及热点难点问题, 确定会议征文内容如下: ①地基基础设计理论研究; ②模型试验研究; ③数值模拟与分析方法; ④设计方法与工程实践; ⑤基坑工程; ⑥施工技术; ⑦边坡及地质灾害治理; ⑧检验与监测技术; ⑨地下空间开发设计与施工新技术; ⑩地基基础规范编制修订研究。

论文出版方式: 会议论文采取集中推荐期刊发表的方式。论文推荐发表方式为: 会议部分优秀论文将由《岩土力学》(EI 收录)增刊发表; 其它优秀论文将由《地下空间与工程学报》、《建筑科学》(核心期刊)增刊发表。所有论文由学会组织专家统一审阅, 决定是否录用、推荐具体发表刊物和形式。

重要日期: ①提交全文截止日期: 2014 年 5 月 15 日; ②全文录用截止日期: 2014 年 6 月 30 日; ③修改稿提交截止日期: 2014 年 7 月 30 日

论文投稿及联系方式: 康景文: 028-83220415/13608053247; 郑文华: 010-64517820/13488783714;

宫剑飞: 010-64517232/13501172090

通讯地址: 北京市北三环东路 30 号中国建筑科学研究院地基所

投稿邮箱: wenhuacabr@163.com, kangjingwen007@163.com