DOI：10.16285/j.rsm.2016.1357

基于温度场时空分布特征的寒区隧道冻胀模型

张玉伟[1, 2]，谢永利[2]，李又云[2]，赖金星[2]

（1. 西安建筑科技大学 土木工程学院，陕西 西安 710055；2. 长安大学 公路学院，陕西 西安 710064）

摘 要：寒区隧道冻胀力随时间和隧道进深呈三维时空分布，为建立描述冻胀力时空效应的简化模型，首先以某寒区隧道温度场测试成果为基础，建立了三维温度场模型，通过 Stephen 公式得到围岩冻结深度变化规律，以围岩冻结深度为参数，结合冻融圈整体冻胀模型和风化层冻胀模型建立了新的冻胀模型。分析结果表明：围岩冻结深度受温度场影响呈三维时空分布，随隧道进深逐渐减小，随时间呈弦函数变化；考虑风化层和破碎层建立冻胀模型，当冻结深度小于风化层厚度时，冻胀力只由风化层产生，冻结深度大于风化层厚度时，冻胀力由风化层和扰动层叠加产生；冻胀力时空分布规律与围岩冻结深度变化规律一致。

关 键 词：寒区隧道；温度场；冻胀模型；冻胀力；时空分布

中图分类号：U 452 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2018)05－1625－08

A frost heave model based on space-time distribution of temperature field in cold region tunnels

ZHANG Yu-wei[1, 2], XIE Yong-li[2], LI You-yun[2], LAI Jin-xing[2]

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;
2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: Frost heaven force, related with tunnel axial length and time, has three dimensional space-time characteristics in cold region tunnels. In order to establish a frost heave model for studying the change rule of frost heaven force, three dimensional temperature field model of cold region tunnels was firstly established based on the field test results, and the changing law of surrounding rock frozen depth was obtained by Stephen formula. On this basis, a new temperature-frost heave model was established in combination with freeze-thaw circle theory and weathering layer theory. The results show that the frozen depth of surrounding rock influenced by environment temperature has a trend of decrease with the increase of tunnel axial length and changes periodically with time. According to this new model, when the frozen depth is smaller than the weathering layer depth, the frost heaven force is only induced by the weathering layer; when the frozen depth is bigger than the weathering layer depth, the frost heaven force in induced by both the weathering layer and freeze-thaw circle. The change rule of frost heaven force is similar with the change rule of surrounding rock frozen depth.

Keywords: cold region tunnels; temperature field; frost heave model; frost heaven force; space-time distribution

1 引 言

我国季节性冻土区分布广泛，相比多年冻土隧道，季冻区隧道更容易受冻害威胁[1]。季冻区全年温度变化明显，受大气温度周期性影响，围岩温度也呈周期性变化，温度变化可能引起周期性冻胀作用，致使隧道支护体系损伤裂化，最终出现衬砌漏水、衬砌挂冰等各种冻害[2]，更有甚者，隧道在冰期无法正常运营，或整个隧道由于内部冰塞而导致报废[3]。冻胀力是导致上述病害的直接因素，研究冻胀力时空分布规律是解决隧道冻害的关键。以往研究表明，研究冻胀力首先要明确温度场变化，乜凤鸣[4]和李时赞[5]测试了西罗奇 2 号隧道洞内外气温的变化规律；陈建勋等[6−7]测试了梯子岭隧道围岩最大冻结深度随进深的变化规律；Bonacina[8]、Takumi[9]等分别研究了隧道温度场的数值解和解析解；赖远明等[10]对大坂山隧道围岩最大冻结深度进行了长期现场观测；谢红强等[11]结合鹧鸪山隧道开

收稿日期：2016-06-07
基金项目：交通运输部应用基础研究项目（No. 2015319812140）；四川省交通厅科技项目（No. 2012C5-3）。
This work was supported by the Applied Basic Research Project (Main Subject) of the Ministry of Transport of China (2015319812140) and the Scientific Research Project of Transport Department of Sichuan Province (2012C5-3).
第一作者简介：张玉伟，男，1989 年生，博士后，主要从事岩土与隧道工程方面的研究工作。E-mail：1032659676@qq.com

展了支护结构和围岩温度的现场测试研究；张学富等[12]编制了有限元程序，分析了风火山隧道热传导问题；张耀等[13]根据隧道现场实测结果得到了隧道温度场的解析解；张国柱等[14]从理论角度得到了隧道围岩径向温度解。冻胀力方面，赖远明等[15]依据数值逆变换方法给出了冻胀力解析式；张德华等[16]采用弹性力学方法建立了冻胀力解析解；王建宇等[17]结合存水空间冻胀假定，提出了一种冻胀力求解方法，范磊[18]、邓刚[19]等进一步修正了存水空间冻胀法；张祉道等[20]提出了风化层冻胀假说，开展了冻胀力分析；仇文革等[21]开展了隧道不同断面型式室内冻胀试验，分析了衬砌冻胀力的分布规律；渠孟飞等[22]建立了室内冻胀模型，研究了冻胀力量值及变化。可以看出，现有的研究多关注冻胀力最大值计算或沿衬砌的分布规律，却很少关注冻胀力的时间效应和空间效应。

冻胀力受季冻区隧道温度场影响也呈三维时空分布，本文从温度场出发，首先通过现场测试成果，得到隧道环境温度随时间变化规律，并通过回归分析拟合公式得到了两者的时空分布规律，进而依据 Stephen 公式得到围岩冻结深度随隧道进深和时间的分布规律。在温度场基础上，以围岩冻结深度为参数，结合冻融圈整体冻胀说和风化层冻胀说建立一个新的冻胀模型，考虑冻胀力的时空效应，最终得到冻胀力随隧道进深、时间的变化规律，为寒区隧道冻胀力研究提供了一条新思路。研究结果可作为寒区隧道保温设计的依据之一。

2 隧道温度场时空分布

2.1 温度测试方案

依托某寒区隧道对温度场进行现场测试，测试断面布置见图 1，洞口段断面布置较密，测试仪器为温度计，测点布置于断面两侧边墙处，同断面温度取平均值，测试频率为 4 次/d，取平均温度作为月平均温度，环境温度随时间和空间的变化规律如图 2 和图 3 所示。

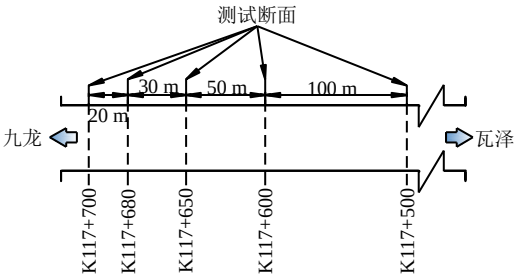


图 1 温度测试断面布置

Fig.1 Test section layout of temperature

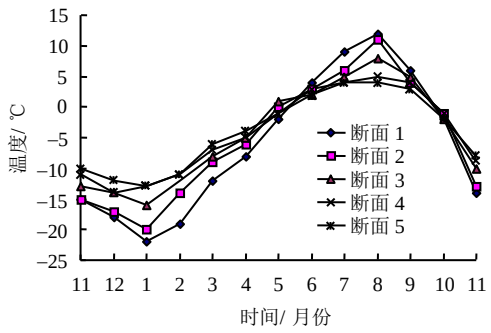


图 2 环境温度随时间变化

Fig.2 Environmental temperature change with time

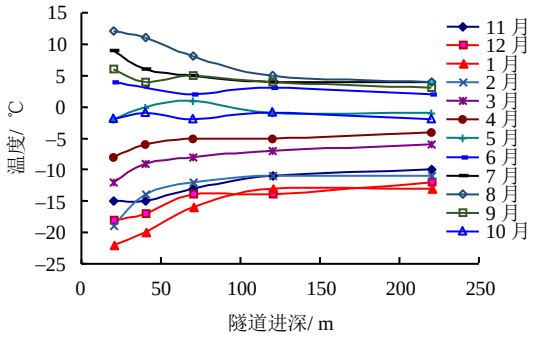


图 3 环境温度随隧道进深变化

Fig.3 Environmental temperature change with tunnel axial length

2.2 温度场时空分布

由图 2 看出，环境温度随时间呈正弦函数规律变化，不同断面处平均温度和振幅不同。由图 3 可看出，随着隧道进深的增大，温度振幅逐渐减小，越靠近洞口温度变化越剧烈。文献[6]曾给出如下环境温度拟合公式：

$$T_{\mathrm{d}} = T_0 + A_0 \sin\left[\frac{2\pi(D - D_0)}{365}\right] \tag{1}$$

式中：T_{d} 为断面温度；T_0 断面平均温度；A_0 为温度振幅；D 为天数；D_0 为日相位。

本文测试结果为月平均温度变化，考虑到一月内每天日均温度值相差较小，月平均温度能更直观地反映隧道年温度变化，且公式描述更为简化，也便于后续计算分析，因此本文环境温度采用下式：

$$T_{\mathrm{m}} = T_0 + A_0 \sin\left[\frac{2\pi(t - t_0)}{12}\right] \tag{2}$$

式中：T_{m} 为断面处平均温度；t 为月数；t_0 为月相位。式（2）为环境温度随时间的变化规律，并未涉及隧道进深，而 T_0 和 A_0 均是随隧道进深变化的，通过测试数据可得到两者随隧道进深的函数关系，将 T_0 和 A_0 随进深的关系代入式（2）即得隧道环境温

度场时空分布。

表 1 给出了平均温度 T_0 和振幅 A_0 随隧道进深的变化关系，对两者分别进行回归分析并拟合可得到两者与进深的关系，图 4 给出了两者的拟合关系，平均温度随轴向深度呈近似线性关系，振幅随轴向深度呈对数关系，即振幅和平均温度可分别用式（3）、（4）表示。

表 1　振幅与平均温度随隧道进深关系

Table 1　Correlation of amplitude and average temperature with tunnel axial length

断面	隧道进深 / m	振幅 / ℃	平均温度 / ℃
1	20	17.0	−5.58
2	40	15.5	−4.83
3	70	12.0	−4.08
4	120	9.0	−3.92
5	220	8.5	−3.83

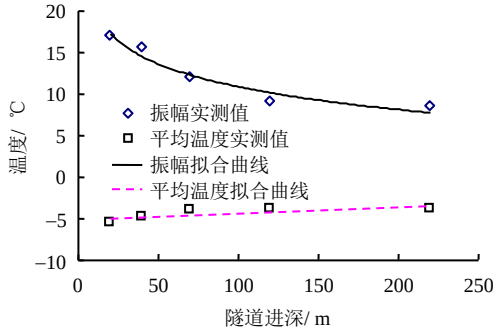


图 4　平均温度和振幅拟合曲线

Fig.4　Fitting curves of average temperature and amplitude

$$A_0 = a\ln x + b \tag{3}$$

$$T_0 = cx + d \tag{4}$$

式中：a、b、c、d 分别为拟合值，本文中测试数据拟合 a 取 −3.96，b 取 29.14，c 取 0.007 3，d 取 −5.14；x 为隧道进深距离。式（3）、（4）代入式（2）得

$$T_{\mathrm{m}} = cx + d + (a\ln x + b)\sin\left[\frac{2\pi(t-t_0)}{12}\right] \tag{5}$$

式（5）即为隧道环境温度时空分布规律。

2.3　冻结深度的确定

围岩冻结深度可由现场实测得到，但考虑到现场实测的复杂性以及仪器布设的局限性，围岩冻深很难精确测定，本文中采用理论推导法确定。在季冻区围岩的冻结深度可由 Stephen 公式确定[1]：

$$h_{\mathrm{w}} = \sqrt{\frac{\pm 2\lambda_{\mathrm{w}}\sum T_{\mathrm{w}}}{Q_{\mathrm{w}}}} \tag{6}$$

$$Q_{\mathrm{w}} = q\rho_{\mathrm{d}}(w - w_{\mathrm{c}}) \tag{7}$$

式中：h_{w} 为围岩冻结深度；λ_{w} 为围岩导热系数；$\sum T_{\mathrm{w}}$ 为围岩冻结指数；Q_{w} 为围岩单位体积相变潜热；q 为水结冰相变潜热；ρ_{d} 为围岩干密度；w 为围岩总含水率；w_{c} 为冻结围岩中含冰量。要确定围岩冻结深度关键是确定围岩冻结指数 $\sum T_{\mathrm{w}}$，围岩冻结指数与衬砌表面温度有关，衬砌表面的温度可用式（5）表达。

隧道衬砌表面温度变化见图 5。其中，$x_1 = (12/2\pi)\arcsin\left[-(cx+d)/(a\ln x+b)\right]$，对阴影部分进行积分即得到围岩的冻结指数：

$$\begin{aligned}\sum T_{\mathrm{w}} = 2\int_{\frac{12}{2\pi}\arcsin\left(-\frac{cx+d}{a\ln x+b}\right)}^{9}\Bigg[(cx+d)+(a\ln x+b)\sin\frac{2\pi t}{12}\Bigg]\mathrm{d}t = -\Bigg[12(cx+d)-\frac{12}{\pi}(cx+d)\arcsin\left(-\frac{cx+d}{a\ln x+b}\right)\Bigg]-\frac{12}{\pi}\sqrt{(a\ln x+b)^2-(cx+d)^2}\end{aligned} \tag{8}$$

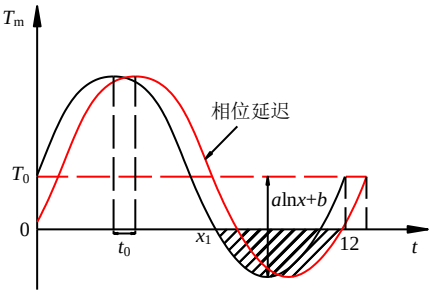


图 5　衬砌表面温度变化

Fig.5　Temperature change of lining surface

联立式（6）～（8）可得围岩最大冻结深度随隧道深度的变化：

$$h_{\mathrm{w}} = \sqrt{\frac{2\lambda_{\mathrm{w}}\left[12(cx+d)-\frac{12}{\pi}(cx+d)\arcsin\left(-\frac{cx+d}{(a\ln x+b)}\right)\right]+\frac{12}{\pi}\sqrt{(a\ln x+b)^2-(cx+d)^2}}{q\rho_{\mathrm{d}}(w-w_{\mathrm{c}})}} \tag{9}$$

式（9）给出了围岩最大冻结深度随轴向深度的变化，事实上围岩冻结深度随时间是时刻变化的，我们知道围岩冻结深度受大气温度影响与围岩温度有直接关系，而大气温度与围岩温度均可用正弦函

数规律描述，因此冻结深度的变化规律应与大气温度变化相一致，即假设围岩冻结深度随时间有正弦规律变化：

$$h = h_{\mathrm{w}} \sin\left[\frac{2\pi}{12}\left(t - t_0'\right)\right] \tag{10}$$

由上述分析可知，寒区隧道温度场呈三维时空变化，围岩冻结深度受温度影响也具有明显的时空效应，围岩冻结深度直接影响冻胀力大小，下文在温度场基础上，以围岩冻结深度为参数，建立一个冻胀模型，能够描述冻胀力的三维时空分布特征。

3 基于温度场的冻胀模型

3.1 基本假设

冻胀力影响因素众多，如围岩破碎程度、含水率、冻结深度等，本文主要以冻结深度的三维特征为切入点，研究冻胀力的三维时空分布特性，因此对冻胀模型及影响因素做了一些假定，已有的冻胀模型有冻融圈整体冻胀模型[16]、风化层冻胀模型[17]、局部存水冻胀模型[18]等，本文结合冻融圈整体冻胀模型和风化层冻胀模型建立一个新的冻胀模型，见图 6，作如下假设：①隧道断面简化为圆形，②冻融圈与衬砌、原始围岩之间为弹性接触，③冻胀力垂直于约束面，④冻融圈受温度影响沿环向无变化，⑤不考虑风化层和破碎层变形的耦合效应。模型围岩包括三部分：衬砌Ⅰ、冻融圈Ⅱ、原始围岩Ⅲ，冻融圈Ⅱ由风化层Ⅱ–1 和破碎层Ⅱ–2 组成，各参数定义如下：h_1 为风化层厚度，h_2 为破碎层厚度，h 为围岩冻结深度，Δ_1 为衬砌位移，Δ_2 为破碎层位移，Δ_2' 为风化层位移，Δ_3 为原始围岩位移，$R_2 = R_1 + h_1$，$R_3 = R_2 + h_2$，R_1 为衬砌半径，R_2 为风化层半径，R_3 为破碎层半径。R_1、R_2、R_3 分别为衬砌、风化层及破碎内径。

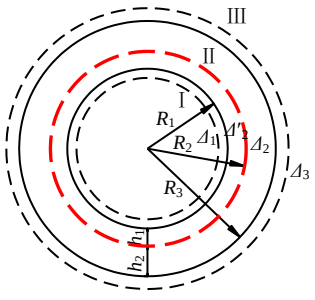


图 6 冻胀力计算模型

Fig.6 Calculation model of frost heaven force

3.2 冻胀力推导

根据以上假定，冻融圈包括风化层和破碎层，围岩冻结深度关系着冻胀力大小，若围岩冻深未超过风化层厚度，则仅仅风化层冻胀，若围岩冻深大于风化层厚度，则冻胀力由风化层与破碎层共同产生。假定风化层冻结后产生的冻胀力为 P_1，破碎层冻胀力为 P_2，冻胀力在空间中各个方向均相等，作用于衬砌的冻胀力 P。当风化层发生冻胀时，风化层与衬砌和破碎层接触面产生的位移分别为

$$\Delta_1 = \frac{P_1}{K_1},\ \Delta_2 = \frac{P_1}{K_3} \tag{11}$$

式中：K_1 为衬砌当量弹性抗力系数；K_3 为破碎层围岩弹性抗力系数。

假定隧道纵向长度取单位长度，则风化层围岩体的体积为

$$V_{\mathrm{f}} = \pi(R_2^2 - R_1^2) \tag{12}$$

风化层冻胀后体积增量为

$$V_{\mathrm{fz}} = \pi\left[\left(R_2 + \Delta_2\right)^2 - R_2^2\right] + \pi\left[R_1^2 - \left(R_1 - \Delta_1\right)^2\right] \tag{13}$$

风化层体积膨胀与体积增量关系为

$$\alpha_{\mathrm{f}} V_{\mathrm{f}} = V_{\mathrm{fz}} \tag{14}$$

式中：α_{f} 为风化层冻胀率。

由式（11）～（14）得风化层围岩产生的冻胀力为

$$P_1 = \frac{\sqrt{\left(\frac{R_2}{K_3} + \frac{R_1}{K_1}\right)^2 + \alpha_{\mathrm{f}}\left(\frac{1}{K_3^2} - \frac{1}{K_1^2}\right)\left(R_2^2 - R_1^2\right)} - \left(\frac{R_2}{K_3} - \frac{R_1}{K_1}\right)}{\frac{1}{K_3^2} - \frac{1}{K_1^2}} \tag{15}$$

当破碎层冻胀时，破碎层与风化层接触面、原始围岩接触面位移分别为

$$\Delta_2' = \frac{P_2}{K_2},\ \Delta_3 = \frac{P_2}{K_4} \tag{16}$$

式中：K_2 为风化层围岩弹性抗力系数；K_4 为原始围岩弹性抗力系数。

破碎层围岩体的体积为

$$V_{\mathrm{p}} = \pi(R_3^2 - R_2^2) \tag{17}$$

破碎层冻胀后体积增量为

$$V_{\mathrm{pz}} = \pi\left[\left(R_3 + \Delta_3\right)^2 - R_3^2\right] + \pi\left[R_2^2 - \left(R_1 - \Delta_2'\right)^2\right] \tag{18}$$

破碎层体积增量关系为

$$\alpha_{\mathrm{p}} V_{\mathrm{p}} = V_{\mathrm{pz}} \tag{19}$$

式中：α_p 为破碎层冻胀率。

由式（7）～（11）得破碎层围岩冻胀力为

$$P_2=\frac{\sqrt{\left(\frac{R_3}{K_4}+\frac{R_2}{K_2}\right)^2+\alpha_p\left(\frac{1}{K_4^2}-\frac{1}{K_2^2}\right)\left(R_3^2-R_2^2\right)}-\left(\frac{R_2}{K_4}-\frac{R_1}{K_2}\right)}{\frac{1}{K_4^2}-\frac{1}{K_2^2}} \tag{20}$$

由上述小节可知，围岩冻结深度 h 受温度场影响呈三维时空变化，冻胀力也具有三维时空分布特征，且当围岩冻深不超过风化层（$h\leqslant h_1$），冻胀力仅仅由风化层产生，冻胀力由式（15）计算，参数 h_1 取冻结深度 h（$R_2=R_1+h$），即有 $P=P_1$。当围岩冻深介于风化层与破碎层之间（$h_1<h<h_2$），风化层和破碎层一起冻胀，此时冻胀力由式（15）、（20）共同计算，式（15）中 h_1 为风化层厚度（$R_2=R_1+h_1$）得到风化层冻胀力 P_1，式（20）中参数 h_2 取为 $h-h_1$（$R_3=R_2+h-h_1$），求得破碎层冻胀力 P_2，最终有 $P=P_1+P_2$。当围岩冻深超过破碎层厚度（$h>h_2$），冻胀力由风化层、破碎层和原始围岩产生。一般而言，围岩冻深不会超过破碎层厚度，并且原始围岩完整性较好，认为不发生冻胀，此种情况可不予考虑。

3.3　冻胀因素分析

由式（15）和式（20）可以看出，冻胀力与冻结深度、约束强度（衬砌弹性抗力系数、原始围岩弹性抗力系数）以及风化层和破碎层冻胀率有关，冻融圈冻胀率与围岩含水率有密切关系，因此冻胀力由约束体的弹性抗力系数、冻融圈冻胀率、冻结深度 3 个因素最终决定。结合 SPSS 偏相关分析模块，研究 3 因素与冻胀力相关程度的大小，结果列于表 2。

表 2　冻胀力与影响因素相关性

Table 2　Correlation between influencing factors and frost heaving force

控制变量	自变量	与冻胀力关系		
		相关性	显著性(双侧)	自由度 d_f
冻结深度抗力系数	冻胀率	0.878	0	71
冻结深度冻胀率	抗力系数	0.637	0	71
抗力系数冻胀率	冻结深度	0.905	0	71

分析可知，三因素与冻胀力相关程度由大至小依次为：冻结深度、冻胀率、衬砌弹性抗力系数，冻结深度与冻胀力变化关系最紧密，是影响冻胀力的关键因素。基于温度场，考虑冻融圈整体冻胀性和风化层冻胀性，建立了新的冻胀模型，对于某一特定隧道，冻胀率和弹性抗力系数等均为定值，而围岩冻结深度呈三维时空分布特征，实际中冻胀力也呈三维时空分布特征，下面结合工程实例分析本文模型的适应性。

4　工程算例

4.1　工程概况

隧道海拔平均为 4 200 m，隧址区为青藏高原气候，夏季温度适中，冬季出现极端低温。查阅当地气象局统计资料发现，夏季极端高温大于 30 ℃，冬季极端低温小于 –20 ℃。隧址区降水丰富，统计多年平均降水量大约为 906.0 mm，日最大降水量为 56.9 mm，隧址区水系发育，极端低温和围岩富水条件为冻胀力产生提供了条件。

4.2　冻深分析

围岩冻深计算值可由式（6）得到，现场测试值由温度计直接测试得到，图 7 为环境温度计算值与实测值对比。可以看出，计算值与实测值吻合较好，不同断面的平均温度与振幅拟合函数能够描述环境温度的变化，由环境温度进一步分析围岩冻结深度。

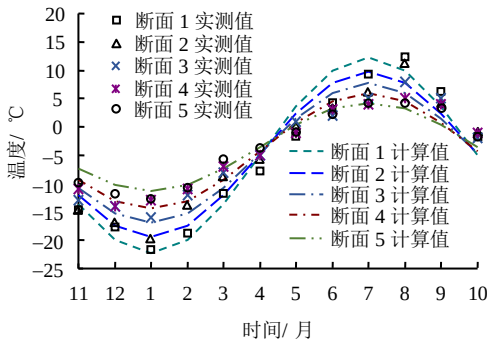


图 7　环境温度对比分析

Fig.7　Contrast analysis of environmental temperature

隧道当量半径为 4.5 m，围岩导热系数 λ_w、水结冰相变潜热 q、围岩干密度 ρ_d、围岩总含水率 w、冻结围岩中含冰量 w_c 等参数均由设计资料得到，参数 a、b、c、d 可由测试结果拟合得到，计算参数汇总见表 3。

表 3　模型计算参数

Table 3　Calculation parameters of model

λ_w / W/(m·k)	q / (kJ/kg)	ρ_d / (kg/m^3)	w	w_c	a	b	c	d
1.36	333.56	2 160	41.8	41.7	–3.96	29.14	0.007 3	–5.14

由式（9）得围岩最大冻结深度随距洞口距离

关系，进而由式（10）得到冻深随时间的变化关系，如表 4 所示。分析可知，围岩冻结深度具有明显的三维时空效应，随时间呈弦函数规律变化，随隧道进深增加呈逐渐减小趋势，围岩冻结深度的时空效应也导致冻胀力具有明显的时空效应。

表 4 冻结深度随时间和进深关系

Table 4 Correlation of frozen depth with time and axial distance

时间/ 月	冻结深度/ m				
	断面 1 (20 m)	断面 2 (40 m)	断面 3 (70 m)	断面 4 (120 m)	断面 5 (220 m)
1	1.83	1.78	1.72	1.64	1.48
2	1.58	1.54	1.49	1.42	1.29
3	0.91	0.89	0.86	0.82	0.74
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.91	0.89	0.86	0.82	0.74
12	1.58	1.54	1.49	1.42	1.29

4.3 冻胀力时空特征分析

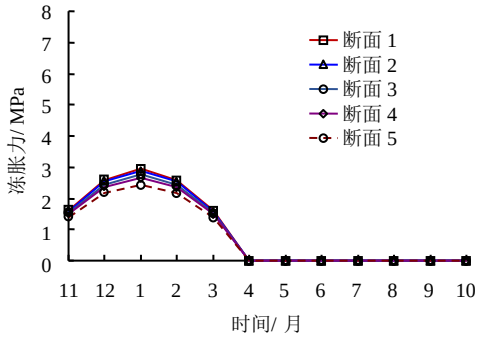
模型中计算参数可由设计资料确定，衬砌为厚度 40 cm 的 C30 混凝土，弹性抗力系数取 75 kPa/ mm；风化层冻胀率取 0.15，破碎层冻胀率[15]取为 0.04；原始围岩等级为Ⅴ级，抗力系数为 200 kPa/ mm，风化层抗力系数取 100 kPa/mm，破碎层抗力系数取 150 kPa/mm；隧道当量半径设定为 4.5 m，风化层厚度[21] h_1 =10 cm。由上述分析可知，围岩冻结深度大于风化层厚度，因此冻胀力需由式（15）和式（20）共同求得。式（15）中，风化层半径取 $R_2 = R_1 + h_1$；式（20）中，破碎层半径取 $R_3 = R_2 + h - h_1$，经过计算可得冻胀力时空分布特征，列于表 5。为验证本文模型可靠性，以文献[16]冻胀模型为基础，引入建立的冻结深度三维时空特征，与本文模型计算结果进行对比分析，模型其余计算参数取值均同上，结果见图 8。

图 8 和图 9 为本文模型与文献[16]冻胀力计算值时空效应对比，两者变化基本一致。图 8 可以看出，冻胀力变化具有明显的时间效应，随时间大致呈正弦规律变化，由于本文模型考虑风化层，计算结果较未考虑风化层的文献[16]计算值整体偏大。图 9 为 1 月份冻胀力随隧道进深的关系，可以看出冻胀力也具有空间效应，随轴向深度增加，冻胀力呈逐渐减小趋势，洞口处应着重采取措施减小冻胀力，图 8 和图 9 表明冻胀力随时间和空间的宏观变化规律，说明本文模型能够模拟冻胀力的三维时空效应。另外，冻胀力值还与冻胀率、衬砌弹性抗力系数等因素有关，本文针对某一隧道对冻胀率和抗力系数进行了取值，当本文模型应用于其他隧道时，应首先确定上述因素。

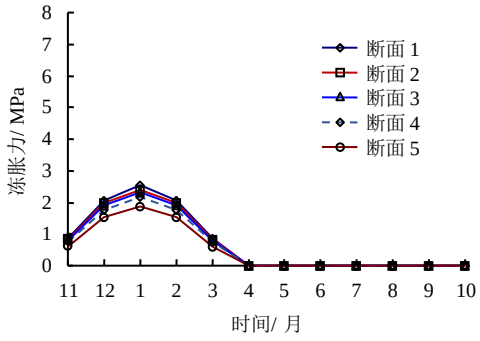
表 5 冻胀力随时间和进深的关系

Table 5 Correlation of frost force with time and axial distance

时间/ 月	冻胀力/ MPa				
	断面 1 (20 m)	断面 2 (40 m)	断面 3 (70 m)	断面 4 (120 m)	断面 5 (220 m)
1	2.94	2.87	2.78	2.66	2.43
2	2.57	2.53	2.44	2.34	2.15
3	1.62	1.59	1.54	1.49	1.38
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	1.62	1.59	1.54	1.49	1.38
12	2.57	2.53	2.44	2.34	2.15



(a) 本文模型计算值



(b) 文献[16]计算值

图 8 冻胀力随时间关系

Fig.8 Curves of frost force with time

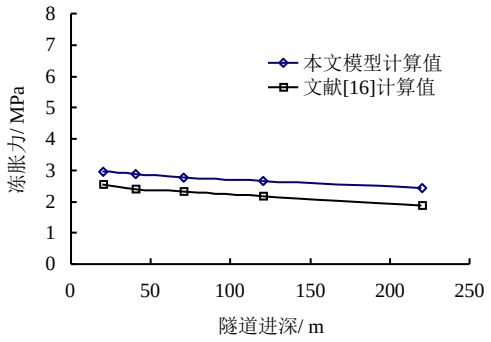


图 9　冻胀力随隧道进深关系

Fig.9　Curves of frost force with the axial distance

寒区隧道温度场具有三维时空分布特征，受温度场影响，冻胀力也具有上述特征，建立合理的模型描述冻胀力的三维时空变化对于寒区隧道防冻设计有重要的参考价值。本文从温度场出发，通过围岩冻结深度这一参数，结合冻融圈整体冻胀模型和风化层冻胀模型，建立了一个新的冻胀模型，模型能够描述冻胀力的三维时空分布规律，这对进一步深刻认识冻胀力及寒区隧道冻害防治具有指导意义。需要指出的是，冻胀力与围岩压力耦合在一起，目前国内外关于冻胀力测试的资料较少，本文的模型适用性还需通过现场实测进一步验证。

5　结　论

（1）以现场实测成果为基础，建立了寒区隧道三维温度场模型，依据 Stephen 公式得出围岩冻结深度三维时空分布特征。

（2）在温度场基础上，以围岩冻结深度为参数，结合冻融圈整体冻胀模型和风化层冻胀模型建立一个新的冻胀模型，并确定各因素与冻胀力相关程度由大至小依次为：冻结深度、冻胀率、衬砌弹性抗力系数。

（3）冻胀模型表明，受温度场影响，冻胀力也具有三维时空分布特征，随时间呈弦函数规律变化，随进深呈逐渐减小趋势。

（4）本文模型是在温度场基础上做了一些假设得到的，并结合实体工程与现有模型进行了对比分析，但目前冻胀力测试成果较少，模型的广泛适应性尚待进一步验证。

参 考 文 献

[1] 吴紫汪, 赖远明, 藏恩穆, 等. 寒区隧道工程[M]. 北京: 海洋出版社, 2003.

WU Zi-wang, LAI Yuan-ming, ZANG En-mu, et al. Cold region tunnel engineering[M]. Beijing: China Ocean Press, 2003.

[2] 张国柱, 夏才初, 马绪光. 寒区隧道地源热泵型供热系统岩土热响应试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 99－105.

ZHANG Guo-zhu, XIA Cai-chu, MA Xu-guang. Rock-soil thermal response test of tunnel heating system using heat pump in cold region[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(1): 99－105.

[3] 冯强, 蒋斌松. 多层介质寒区公路隧道保温层厚度计算的一种解析方法[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1879－1887.

FENG Qiang, JIANG Bin-song. Analytical method for insulation layer thickness of highway tunnels with multilayer dielectric in cold regions[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(10): 1879－1887.

[4] 乜风鸣. 寒冻地区铁路隧道气温状态[J]. 冰川冻土, 1988, 10(4): 450－453.

NIE Feng-ming. The air temperature condition of railway tunnel in cold area[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 1988, 10(4): 450－453.

[5] 李时赞. 嫩林线西罗奇二号隧道温度场测试研究[J]. 隧道及地下工程, 1989, 10(3): 51－60.

LI Shi-zan. Temperature measurement study of Xiluoqi No.2 tunnel of Nenlin line[J]. **Tunnel and Underground Engineering**, 1989, 10(3): 51－60.

[6] 陈建勋, 罗彦斌. 寒冷地区隧道温度场的变化规律[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(2): 45－48.

CHEN Jian-xun, LUO Yan-bin. Changing rules of temperature field for tunnel in cold area[J]. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, 2008, 8(2): 45－48.

[7] 陈建勋, 昝勇杰. 寒冷地区公路隧道防冻隔温层效果现场测试与分析[J]. 中国公路学报, 2001, 14(4): 75－79.

CHEN Jian-xun, ZAN Yong-jie. Field test and analysis of anti-freezing thermal-protective layer effect of the highway tunnel in cold area[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2001, 14(4): 75－79.

[8] BONACINA C, COMINI G, FASANO A, et al. Numerical solution of phase-change problems[J]. **International Journal of Heat Mass Transfer**, 1973, 16(6): 1852－1832.

[9] TAKUMI K, TAKASHI M, KOUICHI F. An estimation

of inner temperatures at cold region tunnel for heat insulator design[C]//Proceedings of Structral Engineering Symposium. [S. 1.]: [s. n.], 2008: 32－38.

[10] 赖远明, 吴紫汪, 张淑娟. 寒区隧道保温效果的现场观察研究[J]. 铁道学报, 2003, 25(1): 81－86.
LAI Yuan-ming, WU Zi-wang, ZHANG Shu-juan. In-situ observed study for effect of heat preservation in cold regions tunnels[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2003, 25(1): 81－86.

[11] 谢红强, 何川. 寒区公路隧道保温层厚度的相变温度场研究[J]. 岩石力与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 4395－4401.
XIE Hong-qiang, HE Chuan. Study on insulating layer thickness by phase-change temperature field of highway tunnel in cold region[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.2): 4395－4401.

[12] 张学富, 喻文兵, 刘志强. 寒区隧道渗流场和温度场耦合问题的三维非线性分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1095－1100.
ZHANG Xue-fu, YU Wen-bing, LIU Zhi-qiang. Three-dimensional nonlinear analysis for coupled problem of seepage field and temperature field of cold regions tunnels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(9): 1095－1100.

[13] 张耀, 何树生, 李靖波. 寒区有隔热层圆形隧道温度场解析计算[J]. 冰川冻土, 2009, 31(1): 113－118.
ZHANG Yao, HE Shu-sheng, LI Jing-bo. Analytic solutions for the temperature fields of a circular tunnel with insulation layer in cold region[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2009, 31(1): 113－118.

[14] 张国柱, 夏才初, 殷卓. 寒区隧道轴向及径向温度分布理论解[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(8): 1117－1122.
ZHANG Guo-zhu, XIA Cai-chu, YIN Zhuo. Analytical solution to axial and radial temperature of tunnel in cold region[J]. **Journal of Tongji University (Natural Sciences)**, 2010, 38(8): 1117－1122.

[15] 赖远明, 吴紫汪, 朱元林. 寒区隧道冻胀力的黏弹性解析解[J]. 铁道学报, 1999, 21(6): 70－74.
LAI Yuan-ming, WU Zi-wang, ZHU Yuan-lin. Analytical viscoelastic solution for frost force of cold regional tunnels[J]. **Journal of the China Railway Society**, 1999, 21(6): 70－74.

[16] 张德华, 王梦恕, 谭忠盛. 风火山隧道围岩冻胀对衬砌结构体系的影响[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 571－573.
ZHANG De-hua, WANG Meng-shu, TAN Zhong-sheng. Effect of frost heaving on tunnel supporting systems of Fenghuoshan railway tunnel[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(5): 571－573.

[17] 王建宇, 胡元芳. 隧道衬砌冻胀压力问题初探[J]. 铁道工程学报, 2004, (1): 87－93.
WANG Jian-yu, HU Yuan-fang. A discussion on frost heave force acting on tunnel lining[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2004, (1): 87－93.

[18] 范磊, 曾艳华, 何川. 寒区硬岩隧道冻胀力的量值及分布规律[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(1): 44－48.
FAN Lei, ZENG Yan-hua, HE Chuan. Magnitude and distribution of frost heave force for cold region strong rock tunnels[J]. **China Railway Science**, 2007, 28(1): 44－48.

[19] 邓刚, 王建宇, 郑金龙. 寒区隧道冻胀压力的约束冻胀模型[J]. 中国公路学报, 2010, 21(1): 81－86.
DENG Gang, WANG Jian-yu, ZHENG Jin-long. Model of constraint on deformation due to frost heave for tunnels in cold region[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2010, 21(1): 81－86.

[20] 张祉道, 王联. 高海拔及严寒地区隧道防冻设计探讨[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(3): 1－6.
ZHANG Zhi-dao, WANG Lian. Discussion on the design of tunnels in high elevation and bitter cold region[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2004, 41(3): 1－6.

[21] 仇文革, 孙兵. 寒区破碎岩体隧道冻胀力室内对比试验研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(3): 557－561.
QIU Wen-ge, SUN Bing. Model test study of frost heaving pressures in tunnels excavated in fractured rock mass in cold regions[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2010, 32(3): 557－561.

[22] 渠孟飞, 谢强, 胡熠. 寒区隧道衬砌冻胀力室内模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1894－1900.
QU Meng-fei, XIE Qiang, HU Yi. A model test study on frost heaving pressures on tunnel lining in cold region[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(9): 1894－1900.