

考虑寒区隧道围岩冻结温度渐变的冻胀力解析解

曹善鹏¹, 夏才初², 周舒威¹, 寇继生³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 宁波大学 岩石力学研究所, 浙江 宁波 315211;

3. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 为考虑寒区隧道围岩单向冻结和径向冻结温度渐变引起的不同方向和不同冻结深度处的非均匀冻胀变形, 通过引入冻胀围岩径向冻结温度 $T(r)$ 和平行与垂直冻结方向的非均匀冻胀系数 k 反映围岩的非均匀冻胀性, 理论推演建立了寒区隧道冻胀力解析解, 并进行了案例和影响因素分析。研究表明: 忽略冻结温度渐变影响时冻胀力明显偏大, 考虑冻结温度渐变可有效提高冻胀力计算的可靠性; 考虑冻结温度渐变影响的冻胀力随着非均匀冻胀系数 k 的增大呈对数函数增大, 随冻结与未冻围岩的弹性模量比 E_{\parallel}/E_{\perp} 的增大而线性减小, 且 E_{\parallel}/E_{\perp} 越大时冻胀力产生所需围岩达到的临界 k 值也越大; 隧道冻胀力随围岩冻结圈外径、未冻围岩弹性模量和原岩应力的增大而增大, 但随衬砌内径、冻结围岩单位温度冻胀系数的增大而逐渐降低。

关键词: 寒区隧道; 冻胀力; 非均匀冻胀; 冻结温度渐变

中图分类号: U459.3

文献标志码: A

Analytical Solution for Frost Heave Force of Cold Region Tunnel Caused by Non-uniform Frost Heave of Surrounding Rock Considering Freezing Temperature Gradient

CAO Shanpeng¹, XIA Caichu², ZHOU Shuwei¹, KOU Jisheng³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Institute of Rock Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 3. School of Civil Engineering Shaoxing University, Shaoxing 312000, China)

Abstract: To account for the non-uniform frost heave deformation at different directions and freezing depths caused by the unidirectional freezing and the radial freezing temperature gradient of tunnel surrounding rock in cold regions, this study introduces the radial freezing

temperature $T(r)$ and the non-uniform frost heave coefficient k in parallel and vertical freezing directions to characterize the non-uniform frost heave of the rock mass. Theoretical derivations establish an analytical solution for frost heave force in cold region tunnels, followed by a case study and analysis of influencing factors. The research reveals that neglecting the impact of freezing temperature gradient leads to a significantly overestimated frost heave force. Considering the influence of freezing temperature gradient effectively enhances the reliability of frost heave force calculations. The frost heave force, when influenced by freezing temperature gradient, increases logarithmically with the growth of the non-uniform frost heave coefficient k . Additionally, it decreases linearly with the increase in the elastic modulus ratio E_{\parallel}/E_{\perp} of frozen and unfrozen surrounding rock, with larger E_{\parallel}/E_{\perp} requiring a higher critical value of k to generate frost heave force. Furthermore, tunnel frost heave force increases with the enlargement of the frozen surrounding rock's outer radius, the elastic modulus of the unfrozen surrounding rock, and field stress. Conversely, it gradually decreases with the increase in the inner radius of the lining and the frost heave coefficient per unit temperature of the frozen surrounding rock.

Keywords: cold region tunnel; frost heave force; non-uniform frost heave; freezing temperature gradient

随着国家级顶层合作倡议“一带一路”的陆上“丝绸之路经济带”在沿线各国的顺利推进, 交通路网也逐渐延伸至有重要国防和国际战略意义的寒冷地区, 如中欧班列铁路、川藏铁路、青藏铁路等工程^[1-3]。但是, 在寒冷地区建设的隧道工程常常面临严重的冻害问题, 威胁行车安全、甚至造成失稳破

收稿日期: 2022-05-22

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2020A03003-2); 国家自然科学基金(51778475)

第一作者: 曹善鹏, 博士生, 主要研究方向为寒区隧道和冻融岩石力学。E-mail: shanpengcao@163.com

通信作者: 夏才初, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为寒区隧道和能源地下结构。

E-mail: tjxiacbb@126.com



论文
拓展
介绍

坏,进而影响国家和社会的发展^[4-6]。目前,寒区隧道冻害防治措施主要以保温层防冻和支护抗冻措施为主,其中保温层在达到一定厚度后主要起到减缓隧道围岩冻结发展的速率,抗冻设计则是避免在隧道全寿命周期发生冻胀破坏失稳的关键^[7-9]。隧道围岩冻胀变形作用在衬砌表面上的冻胀力是引起寒区隧道衬砌变形、开裂和失稳等类型冻胀灾害的主要原因^[10]。因此,合理的寒区隧道抗冻设计可以有效避免冻胀灾害的发生,其中冻胀力计算理论是抗冻设计的重要理论依据,国内外学者针对隧道冻胀力计算理论研究也已取得了一定进展。

目前,隧道冻胀力理论计算模型主要有含水风化层冻胀模型^[11]、衬砌背后积水冻胀模型^[12]和冻融圈整体冻胀模型^[13],尤其是冻融圈整体冻胀模型方面的研究较多,如吴紫汪等^[14]、Gao G等^[15]、覃爱民等^[16]分别假定冻结圈内径不变、中心线位移为零和某个半径处位移为零的冻胀位移方式求得了冻胀力解析解。夏才初等^[17]分析认为在单向冻结条件下岩石在平行于垂直于温度梯度方向的非均匀冻胀性是冻胀力产生的关键,并提出了考虑不同方向围岩非均匀冻胀的冻胀力计算理论。在寒区隧道围岩不同方向非均匀冻胀理论的基础上,Lü ZT等^[18]考虑MC准则建立了冻胀力弹塑性解答,Feng Q等^[19]推导了基于D-P准则的弹塑性解答,并对比了不同D-P准则表达形式计算得到的冻胀力大小,Lü ZT等^[20]进一步给出考虑侧压系数寒区隧道非均匀冻胀的冻胀力解,Zhang JB等^[21]考虑围岩冻融损伤和非均匀冻胀性分析了冻融循环次数和岩体层理角对隧道冻胀力分布的影响,张常光等^[22-23]在非均匀冻胀理论下考虑中间主应力和位移释放系数建立了寒区隧道应力与位移的弹塑性统一解析解。然而,上述的解答均只考虑了冻胀围岩在不同方向的非均匀冻胀性。然而,试验结果表明围岩的冻胀性与冻结温度密切相关,当冻结温度越低时岩土内部的未冻水含量也越少,从而产生冻胀变形也越大^[24-27]。在实际寒区隧道工程中围岩的冻结温度沿径向方向是渐变的,尤其是冻结围岩圈的内径(最低负温)和外径(0℃)处的冻结温度差距显著。因此,在寒区隧道的冻胀力计算中不仅需要考虑不同方向上的非均匀冻胀性,围岩沿径向不同冻结温度引起的非均匀冻胀性也不可忽视。但是,考虑围岩径向冻结温度渐变引起的非均匀冻胀性的寒区隧道冻胀力解答尚未见有相关报道。

为此,本文综合考虑隧道围岩在冻结方向和径

向冻结温度渐变影响下的非均匀冻胀特性,建立寒区隧道冻胀力解析解,通过实际工程案例分析和对比验证本解答的合理性及优势,分析不同因素对考虑冻结温度渐变影响的隧道冻胀力演化的影响,以指导寒区隧道工程的抗冻设计。

1 寒区隧道围岩的非均匀冻胀性

寒冷地区的隧道贯通后,大量冷空气进入带来的冷量使隧道出现自洞口至洞身和自洞壁至围岩深处的冻结现象,由于隧道轴向温度梯度相对较小,因此可认为围岩冻结是沿隧道径向的单向冻结。同时,寒区隧道冻结围岩的冻结温度在洞壁处最低,然后沿径向逐渐升高,在最大冻结深度边界处围岩温度升高至0℃,因此,寒区隧道围岩的冻结温度沿径向是渐变的,即冻结温度渐变。需要关注的是:第一,当岩石单向冻结时会表现出非均匀冻胀特性,平行于冻结方向的冻胀应变大于垂直于冻结方向,在垂直于冻结方向的面上的各方向的冻胀应变相等。第二,冻结温度是影响岩石冻胀的重要影响因素,同种岩石在不同冻结温度下的冻胀变形量具有明显的差异,当冻结围岩径向的温度逐渐升高时,沿径向不同位置处围岩的冻胀率是冻结温度 $T(r)$ 的函数,冻结围岩内壁处冻胀体应变 $\epsilon_r^T(r_1)$ 为最大,冻结围岩外壁处冻胀体应变 $\epsilon_r^T(r_n)$ 为最小,即冻结围岩的冻胀体应变受冻结温度的渐变沿径向逐渐降低。因此,寒区隧道围岩具有典型的冻结方向和不同冻结温度的引起的非均匀冻胀特性,如图1所示。

假设围岩冻结圈内半径 r_1 处温度为 $T(r_1)$,外半径 r_n 处温度 $T(r_n)$ 为0℃,由定常无热源轴对称热传导方程

$$\nabla^2 T = \frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} \quad (1)$$

可解得冻结围岩区半径为 r 时基于0℃的变温为^[28]

$$T(r) = T(r_1) \ln(r_n/r) / \ln(r_n/r_1) \quad (2)$$

第一,假设冻胀围岩的单位温度冻胀系数为 ξ ,不同冻结深度处的围岩冻胀变形体应变可表示为 $\epsilon_r^T(r) = \xi T(r)$;第二,假设冻胀围岩径向冻胀应变与环向冻胀应变的比值为围岩的非均匀冻胀系数 k ,即 $k = \epsilon_r^T(r) / \epsilon_\theta^T(r)$ 。根据围岩的冻胀体应变与各分量冻胀应变关系: $\epsilon_v^T(r) = \epsilon_r^T(r) + \epsilon_\theta^T(r) + \epsilon_z^T(r)$ 和垂直于冻结方向平面内各方向冻胀应变相等(即 $\epsilon_\theta^T(r) =$

$\epsilon_z^T(r)$))的条件,则有

$$\begin{cases} \epsilon_r^T(r) = \frac{k\xi T(r)}{k+2} \\ \epsilon_\theta^T(r) = \epsilon_z^T(r) = \frac{\xi T(r)}{k+2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\epsilon_r^T(r)$ 、 $\epsilon_\theta^T(r)$ 和 $\epsilon_z^T(r)$ 分别为半径 r 处围岩的径向、环向和轴向的冻胀应变; ξ 为冻结围岩单位温度冻胀系数。

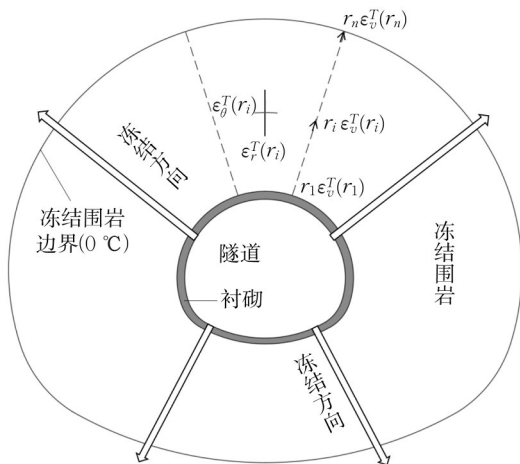


图1 考虑冻结方向和冻结温度渐变的围岩非均匀冻胀

Fig.1 The non-uniform frost heave of surrounding rock caused by freezing direction and temperature gradient

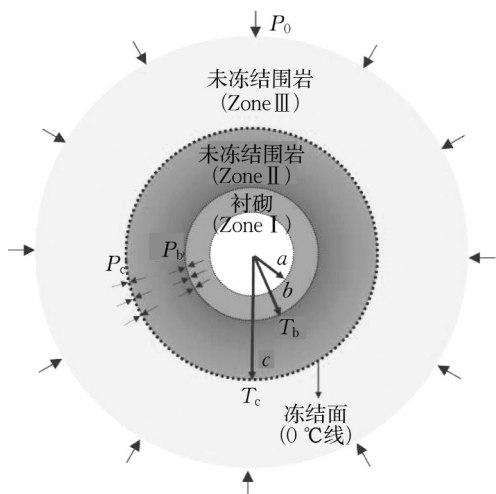


图2 寒区隧道冻胀力计算模型

Fig.2 Calculation model for frost heave force of cold region tunnel

2 考虑冻结温度渐变的围岩非均匀冻

胀的冻胀力解答

2.1 基本假设

隧道冻胀力模型采用冻融圈整体冻结假设,即隧道一定半径内的围岩圈随季节发生冻结和融化,具体如图2所示。冻胀力计算模型中Zone I是内径为 a 的衬砌区,Zone II是内径为 b 的冻结围岩区,冻结围岩区内径处冻结温度边界为 T_b ,外径处温度为 0°C ,Zone III是内径为 c 的未冻结围岩区,冻结围岩与衬砌外表面的压力为 P_b ,外侧未冻结围岩边界处压力为 P_c ,原岩应力为 P_0 。

同时,考虑围岩径向温度梯度的冻胀力求解按如下假设简化问题:①隧道截面等代为圆形;②简化为平面应变问题;③衬砌、围岩假设为均质连续弹性介质;④冻结围岩为非均匀冻胀,包括不同方向和冻结深度处的非均匀冻胀性,具体如节1所述。

2.2 衬砌与围岩的位移解

(1) 衬砌 (Zone I) 的位移

根据弹性力学理论^[28],在衬砌荷载 P_b 作用下,Zone I 区衬砌的径向位移为

$$u_r^I = -\frac{1+\mu_1}{E_1} \frac{(1-2\mu_1)b^2r^2 + b^2a^2}{r(b^2-a^2)} P_b \quad (4)$$

式中: E_1 、 μ_1 分别为衬砌的弹性模量和泊松比。

(2) 冻结围岩区 (Zone II) 的应力与位移

对于轴对称问题,不考虑体力时,围岩的平衡方程为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (5)$$

式中: σ_r 和 σ_θ 分别为围岩的径向和环向应力。

在轴对称条件下,围岩的几何方程为

$$\epsilon_r = \frac{du_r}{dr}, \quad \epsilon_\theta = \frac{u_r}{r} \quad (6)$$

式中: ϵ_r 和 ϵ_θ 分别为围岩的径向和环向弹性应变; u_r 为围岩的径向位移。

当围岩冻结后发生冻胀变形时,Zone II 区冻结围岩的弹性本构方程为

$$\begin{cases} \epsilon_r^{\text{II}} = \frac{1-\mu_{\text{II}}^2}{E_{\text{II}}} \left[\frac{(\sigma_r^{\text{II}} - P_0)}{1-\mu_{\text{II}}} - \frac{\mu_{\text{II}}}{1-\mu_{\text{II}}} (\sigma_\theta^{\text{II}} - P_0) \right] + (\epsilon_r^T(r) + \mu_{\text{II}} \epsilon_\theta^T(r)) \\ \epsilon_\theta^{\text{II}} = \frac{1-\mu_{\text{II}}^2}{E_{\text{II}}} \left[\frac{(\sigma_\theta^{\text{II}} - P_0)}{1-\mu_{\text{II}}} - \frac{\mu_{\text{II}}}{1-\mu_{\text{II}}} (\sigma_r^{\text{II}} - P_0) \right] + (\epsilon_\theta^T(r) + \mu_{\text{II}} \epsilon_r^T(r)) \end{cases} \quad (7)$$

式中: ϵ_r^{II} 和 $\epsilon_{\theta}^{\text{II}}$ 分别冻结围岩区 (Zone II) 的径向和环向弹性应变; E_{II} 和 μ_{II} 分别为冻结围岩的弹性模量和泊松比; P_0 为原岩应力。

令式(1)中 $r_1 = b$, $r_n = c$ 和 $T(r_1) = T_b$, 将式(2)和(3)代入(7)可变形得到冻结围岩的应力为

$$\sigma_r^{\text{II}} = \left[\frac{\mu_{\text{II}}}{(1-2\mu_{\text{II}})} (\epsilon_{\theta}^{\text{II}} + \epsilon_r^{\text{II}}) + \epsilon_r^{\text{II}} - D_1 \ln\left(\frac{c}{r}\right) \right] \frac{E_{\text{II}}}{1+\mu_{\text{II}}} + P_0$$

$$\sigma_{\theta}^{\text{II}} = \left[\frac{\mu_{\text{II}}}{(1-2\mu_{\text{II}})} (\epsilon_r^{\text{II}} + \epsilon_{\theta}^{\text{II}}) + \epsilon_{\theta}^{\text{II}} - D_2 \ln\left(\frac{c}{r}\right) \right] \frac{E_{\text{II}}}{(1+\mu_{\text{II}})} + P_0$$

其中,

$$D_1 = \frac{\xi T_b [k + (2-k)\mu_{\text{II}} + (k-1)\mu_{\text{II}}^2]}{\ln(c/b)(k+2)(1-2\mu_{\text{II}})}$$

$$D_2 = \frac{\xi T_b [1 + (2k-1)\mu_{\text{II}} + (1-k)\mu_{\text{II}}^2]}{\ln(c/b)(k+2)(1-2\mu_{\text{II}})}$$

联立式(5)、(6)和(8)可得

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (ru_r) \right) = \frac{(1-2\mu_{\text{II}})}{1-\mu_{\text{II}}} \left(\frac{1}{r} \ln\left(\frac{c}{r}\right) (D_1 - D_2) - \frac{1}{r} D_1 \right) \quad (9)$$

将式(9)经二次积分可得到冻结围岩的径向位移为

$$u_r^{\text{II}} = \frac{(1-2\mu_{\text{II}})}{1-\mu_{\text{II}}} \left[\left(\left(\ln(r) - \frac{1}{2} \right) \left(\ln(c) + \frac{1}{2} \right) \right) \left(-\frac{1}{2} \ln^2(r) \right) \frac{r(D_1 - D_2)}{2} - \frac{rD_1}{2} \left(\ln(r) - \frac{1}{2} \right) \right] + \frac{C_1}{2} r + \frac{C_2}{r} \quad (10)$$

由式(10)代入式(6)可得冻结围岩的径向和环向应变为

$$\epsilon_r^{\text{II}} = \frac{(1-2\mu_{\text{II}})}{1-\mu_{\text{II}}}$$

$$\left[\left(\left(\ln(r) + \frac{1}{2} \right) \left(\ln(c) + \frac{1}{2} \right) \right) \frac{(D_1 - D_2)}{2} - \left(-\frac{1}{2} \ln^2(r) - \ln(r) \right) \frac{D_1}{2} \right] + \frac{C_1}{2} - \frac{C_2}{r^2}$$

$$\epsilon_{\theta}^{\text{II}} = \frac{(1-2\mu_{\text{II}})}{1-\mu_{\text{II}}}$$

$$(8) \quad \left[\left(\left(\ln(r) - \frac{1}{2} \right) \left(\ln(c) + \frac{1}{2} \right) \right) \frac{(D_1 - D_2)}{2} - \left(-\frac{1}{2} \ln^2(r) \right) \frac{D_1}{2} \left(\ln(r) - \frac{1}{2} \right) \right] + \frac{C_1}{2} + \frac{C_2}{r^2} \quad (11)$$

然后,将式(11)代入式(8)可得冻结围岩区的径向和环向应力为

$$\sigma_r^{\text{II}} = \left[\left(\left(\ln(r) + \frac{1}{2} - \mu_{\text{II}} \right) \left(\ln(c) + \frac{1}{2} \right) \right) \frac{(D_1 - D_2)}{2(1-\mu_{\text{II}})} - \left(-\frac{1}{2} \ln(r) + 1 - \mu_{\text{II}} \right) \ln(r) \frac{D_1}{2(1-\mu_{\text{II}})} + \frac{C_1}{2(1-2\mu_{\text{II}})} - \frac{C_2}{r^2} - D_1 \ln\left(\frac{c}{r}\right) \right] \frac{E_{\text{II}}}{1+\mu_{\text{II}}} + P_0$$

$$\sigma_{\theta}^{\text{II}} = \left[\left(\left(\ln(r) - \frac{1}{2} + \mu_{\text{II}} \right) \left(\ln(c) + \frac{1}{2} \right) \right) \frac{(D_1 - D_2)}{2(1-\mu_{\text{II}})} - \left(-\frac{1}{2} \ln(r) + \mu_{\text{II}} \right) \ln(r) \frac{D_1}{2(1-\mu_{\text{II}})} - \left(\ln(r) - \frac{1}{2} + \mu_{\text{II}} \right) \frac{D_1}{2(1-\mu_{\text{II}})} + \frac{C_1}{2(1-2\mu_{\text{II}})} + \frac{C_2}{r^2} - D_2 \ln\left(\frac{c}{r}\right) \right] \frac{E_{\text{II}}}{(1+\mu_{\text{II}})} + P_0 \quad (12)$$

根据冻胀力计算模型中冻结围岩区 Zone II 的应力边界条件

$$\sigma_r^{\text{II}} = -P_b \quad (r=b) \quad (13)$$

$$\sigma_r^{\text{II}} = -P_c \quad (r=c) \quad (14)$$

联立式(12)和(13)可解得积分常数 C_1 和 C_2

$$\begin{cases} C_1 = A - \frac{2(1-2\mu_{\text{II}})(1+\mu_{\text{II}})(c^2 P_c - b^2 P_b)}{E_{\text{II}}(c^2 - b^2)} \\ C_2 = B + \frac{(1+\mu_{\text{II}})b^2 c^2}{E_{\text{II}}(c^2 - b^2)}(P_b - P_c) \end{cases} \quad (15)$$

其中,

$$A = (2\mu_{\text{II}} - 1) \left[\left(\ln^2(c) - \mu_{\text{II}} + \frac{1}{2} \right) \frac{(D_1 - D_2)}{2(1 - \mu_{\text{II}})} - \left(\ln(c) + \frac{1}{2} - \mu_{\text{II}} \right) \frac{D_1}{(1 - \mu_{\text{II}})} - \frac{2B}{c^2} + \frac{2(1 + \mu_{\text{II}})}{E_{\text{II}}} P_0 \right]$$

$$B = \frac{b^2 c^2}{(c^2 - b^2)} \left[\left(\left(\ln(c) + \mu_{\text{II}} - \frac{1}{2} \right) \ln\left(\frac{b}{c}\right) + \frac{\ln^2(c) - \ln^2(b)}{2} \right) \frac{(D_1 - D_2)}{2(1 - \mu_{\text{II}})} + \frac{(1 - 2\mu_{\text{II}})D_1}{2(1 - \mu_{\text{II}})} \ln\left(\frac{b}{c}\right) \right]$$

将积分常数 C_1 和 C_2 代入式(10)进一步获得冻胀围岩的径向位移

$$u_r^{\text{II}} = \frac{(1 - 2\mu_{\text{II}})r}{2(1 - \mu_{\text{II}})} \left[\left(\left(\ln(r) - \frac{1}{2} \right) \left(\ln(c) + \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{2} \ln^2(r) \right) \frac{(D_1 - D_2)}{2(1 - \mu_{\text{II}})} - \left(\ln(r) - \frac{1}{2} \right) D_1 \right] - \frac{(1 - 2\mu_{\text{II}})(1 + \mu_{\text{II}})(c^2 P_c - b^2 P_b)r}{E_{\text{II}}(c^2 - b^2)} + \frac{Ar}{2} + \frac{B}{r} + \frac{(1 + \mu_{\text{II}})b^2 c^2}{E_{\text{II}}(c^2 - b^2)}(P_b - P_c) \quad (16)$$

(3) 未冻结围岩区 (Zone III)

根据地下空间圆形洞室围岩变形的弹性分析,在原岩应力 P_0 和内边界处应力 P_c 共同作用下,未冻结围岩的径向位移为

$$u_r^{\text{III}} = \frac{(1 + \mu_{\text{III}})c^2}{rE_{\text{III}}}(P_c - P_0) \quad (17)$$

式中: E_{III} 、 μ_{III} 分别为未冻结围岩的弹性模量和泊松比。

2.3 寒区隧道冻胀力解答

寒区隧道冻胀力计算模型在 $r=b$ 和 $r=c$ 界面

上应满足如下位移连续条件,则

$$u_r^{\text{I}} = u_r^{\text{II}} \quad (r=b) \quad (18)$$

$$u_r^{\text{II}} = u_r^{\text{III}} \quad (r=c) \quad (19)$$

联立式(4)、(16)和(17),并代入位移连续条件式(18)和式(19),解得考虑围岩冻结温度渐变的围岩非均匀冻胀性寒区隧道衬砌表面和最大冻结深度处的径向压力 P_b 和 P_c , 则

$$P_b = (W_2 W_4 - W_5 W_3 c^2) / (W_1 W_4 + W_3^2 c^2 b^2) \quad (20)$$

$$P_c = (W_5 + W_3 b^2 P_b) / W_4 \quad (21)$$

其中,

$$W_1 = - \frac{(1 + \mu_{\text{II}})((1 - 2\mu_{\text{II}})b^2 + c^2)}{E_{\text{II}}(c^2 - b^2)} -$$

$$\frac{(1 + \mu_{\text{I}})((1 - 2\mu_{\text{I}})b^2 + a^2)}{E_{\text{I}}(b^2 - a^2)}$$

$$W_2 = \frac{(1 - 2\mu_{\text{II}})}{1 - \mu_{\text{II}}}$$

$$\left[\left(\left(\ln(b) - \frac{1}{2} \right) \left(\ln(c) + \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{2} \ln^2(b) \right) \frac{(D_1 - D_2)}{2} - \frac{D_1}{2} \left(\ln(b) - \frac{1}{2} \right) \right] +$$

$$\frac{A}{2} + \frac{B}{b^2}$$

$$W_3 = \frac{2(1 - \mu_{\text{II}})(1 + \mu_{\text{II}})}{E_{\text{II}}(c^2 - b^2)}$$

$$W_4 = \frac{(1 + \mu_{\text{III}})}{E_{\text{III}}} + \frac{(1 + \mu_{\text{II}})((1 - 2\mu_{\text{II}})c^2 + b^2)}{E_{\text{II}}(c^2 - b^2)}$$

$$W_5 = \frac{(1 - 2\mu_{\text{II}})}{1 - \mu_{\text{II}}}$$

$$\left[\left(\left(\ln(c) - \frac{1}{2} \right) \left(\ln(c) + \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{2} \ln^2(c) \right) \frac{(D_1 - D_2)}{2} - \frac{D_1}{2} \left(\ln(c) - \frac{1}{2} \right) \right] +$$

$$\frac{A}{2} + \frac{B}{c^2} + \frac{(1 + \mu_{\text{III}})}{E_{\text{III}}} P_0$$

式(20)计算得到的是围岩非均匀冻胀后隧道衬砌表面受到围岩压力,包含了围岩冻结前作用在衬砌上表面上的初始压力 P'_b 。因此,由围岩非均匀冻胀引起的隧道冻胀力 ΔP_b 为

$$\Delta P_b = P_b - P'_b \quad (22)$$

$$\text{其中, } P'_b = P_0 / \left(1 + \frac{E_{\text{III}}(1 + \mu_{\text{I}})((1 - 2\mu_{\text{I}})b^2 + a^2)}{E_{\text{I}}(1 + \mu_{\text{III}})(b^2 - a^2)} \right)$$

3 非均匀冻胀性围岩的冻胀力验证与分析

3.1 算例分析与对比

青海省内的太坂山隧道海拔3 750m,年平均气温为 -3.2°C ,年最低温度为 -15.3°C ,隧道K106+440断面处围岩主要为绢云母片岩,且围岩裂隙发育,孔裂隙水基本饱和,通过一个完整冻融周期的现场监测获得K106+440断面最大冻结深度为2.1m,断面K106+440的具体参数如表1所示^[14]。由于文献^[14]仅给出隧址区绢云母片岩类型围岩的孔隙率在5%~25%之间,冻胀率范围为0.45%~2.25%,断面K106+440处围岩的实际孔隙率未能准确获知,黄继辉解^[29]在案例分析时取围岩孔隙率为15%和冻胀率为1.35%,本文为作对比也按此取值。此外,为保证本文解与未考虑围岩冻结温度渐变和原岩应力影响解的冻胀参数一致,使冻结围岩圈的整体冻胀变形量保持相等,即在考虑和未考虑冻结温度影响时时围岩径向不同半径处冻胀应变的积分相等,可表示为 $\int_b^c \eta dr = \int_b^c \xi T_b \ln(c/r) / \ln(c/b) dr$, η 为未考虑冻结温度渐变影响时不同径向深度冻胀变形相等的围岩冻胀率,解积分可得考虑冻结温度渐变影响时冻胀围岩单位温度冻胀系数 $\xi = \eta(c-b) \ln(c/b) / (T_b(c-b-b \ln(c/b)))$ 。在合理的冻结围岩弹性模量和非均匀冻胀系数的取值范围内^[30-31],将太坂山隧道K106+440断面的参数代入考虑围岩冻结温度渐变影响的冻胀力解答式(22)计算得到相应的冻胀力值,如表2所示。由于文献^[29]未考虑原岩应力,当本解假定原岩应力 P_0 为0MPa时,本文解与之相比为增加考虑了围岩径向冻结温度渐变的引起的非均匀冻胀影响的区别。

由表2可知,考虑围岩径向冻结温度渐变影响的寒区隧道冻胀力显然低于未考虑温度渐变时的情况。为更清晰对比两种冻胀力解答方案的区别,将不同非均匀冻胀系数 k 和冻结与未冻结围岩弹性模量之比 E_{II}/E_{III} 条件下的冻胀力绘制成图3。由图3可知,随着非均匀冻胀系数 k 和冻结与未冻结围岩弹性模量之比 E_{II}/E_{III} 的增大,考虑与未考虑冻结温度渐变影响的冻胀力差值呈逐渐增大的趋势,当 k 为3和 E_{II}/E_{III} 为2时,未考虑冻结温度渐变的冻胀力甚至达到了考虑温度渐变影响的2倍以上,这进一步说明围岩径向温度渐变对隧道冻胀力计算的影响显著而不

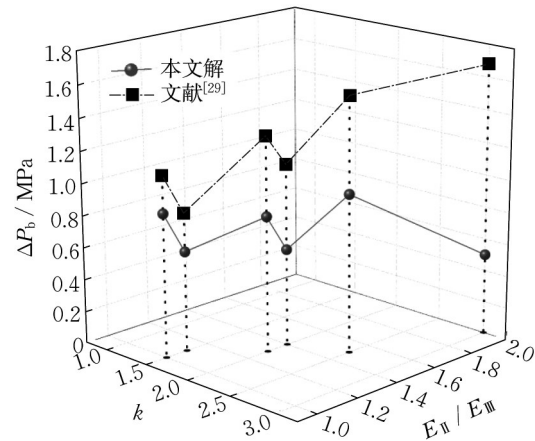


图3 考虑与未考虑冻结温度渐变影响的冻胀力结果对比

Fig.3 Comparison of frost heave force results with and without considering freezing temperature gradient

可忽略。因此,通过引入围岩径向冻结温度渐变反映不同冻结温度下不同径向深度处围岩空间上的非均匀冻胀性,然后在空间非均匀冻胀性基础上进一步考虑冻结方向引起的非均匀冻胀性,进而取得更好的反映寒区隧道围岩实际非均匀冻胀变形特征的效果,这对寒区隧道冻胀力的计算提升具有重要的作用。采用本文建立的寒区隧道围岩非均匀冻胀计算方法,有效降低了目前研究中冻胀力计算理论的较大误差。此外,初步对比考虑原岩应力 P_0 时的冻胀力结果可知,考虑原岩应力的影响后冻胀力将会有所增大,这表明原岩应力也是寒区隧道冻胀力精确评估不可忽略的影响因素,具体影响规律在节3.2中讨论。

表1 太坂山隧道K106+440断面参数^[14]

Tab.1 Basic parameters of K106+440 of the Daban Mountain Tunnel

隧道参数	数值
衬砌内径 a/m	4.55
衬砌外径 b/m	5.45
衬砌厚度 D/m	0.90
围岩冻结圈内径 b/m	5.45
围岩冻结圈外径 c/m	7.55
衬砌弹性模量 E_I/MPa	28 300
衬砌泊松比 μ_I	0.18
未冻结围岩弹性模量 E_{III}/MPa	3 300
未冻结围岩泊松比 μ_{III}	0.25
冻结围岩泊松比 μ_{II}	0.25
围岩孔隙率 $n/\%$	5~25
围岩整体冻胀率 $\eta/\%$	0.45~2.25
围岩最低冻结温度 $T_b/^{\circ}\text{C}$	-15.3
冻胀围岩单位温度冻胀系数 ξ	-0.0019

表2 冻胀力计算结果对比

Tab.2 Comparison of frost heave force calculation results

断面位置	参数取值		冻胀力 ΔP_b /MPa				偏差率/%
	k	$E_{\text{II}}/E_{\text{III}}$	本文解			文献 ^[29] $P_0=0$	
			$P_0=3$	$P_0=1$	$P_0=0$		
K106+440	1.0	1.0	0	0	0	0	0
	1.5	1.0	0.89	0.89	0.89	1.12	25.8
	1.5	1.1	0.65	0.63	0.62	0.86	38.7
	2.0	1.3	0.90	0.86	0.84	1.33	58.3
	2.0	1.4	0.67	0.63	0.60	1.12	86.7
	2.5	1.5	1.06	1.01	0.98	1.57	60.2
	3.0	2.0	0.55	0.51	0.50	1.68	236

3.2 影响因素分析

为了对不同工况条件下的寒区隧道工程具有更直接的借鉴意义,以表1所示的大坂山隧道参数作为因素分析的基准工况(其中 $k=2.5$, $E_{II}/E_{III}=1.5$),在此基准工况上采用控制单一变量法,对比分析不同因素(包括非均匀冻胀系数 k 、 E_{II}/E_{III} 、冻结围岩单位温度冻胀系数、隧道尺寸、围岩冻结圈外径及应力场参数等)对冻胀力的影响规律,从而为不同寒区隧道的抗冻设计提供参考。

寒区隧道冻胀力与非均匀冻胀系数 k 的关系如图4a所示,冻胀力 ΔP_b 随着非均匀冻胀系数的增大呈对数函数关系增大。但是需特别注意的是冻胀力开始产生时的 k 值和冻结围岩与未冻围岩的弹性模量之比密切相关,表现为冻结与未冻围岩的弹性模量比越大,隧道冻胀力产生所需冻结围岩达到的非均匀冻胀系数 k 的临界值越大,否则无冻胀力产生,如 E_{II}/E_{III} 为1.3和1.5时,冻胀力产生的临界 k 值分别为1.45和1.75。当非均匀冻胀系数 k 为2.5时,在基准工况的参数条件

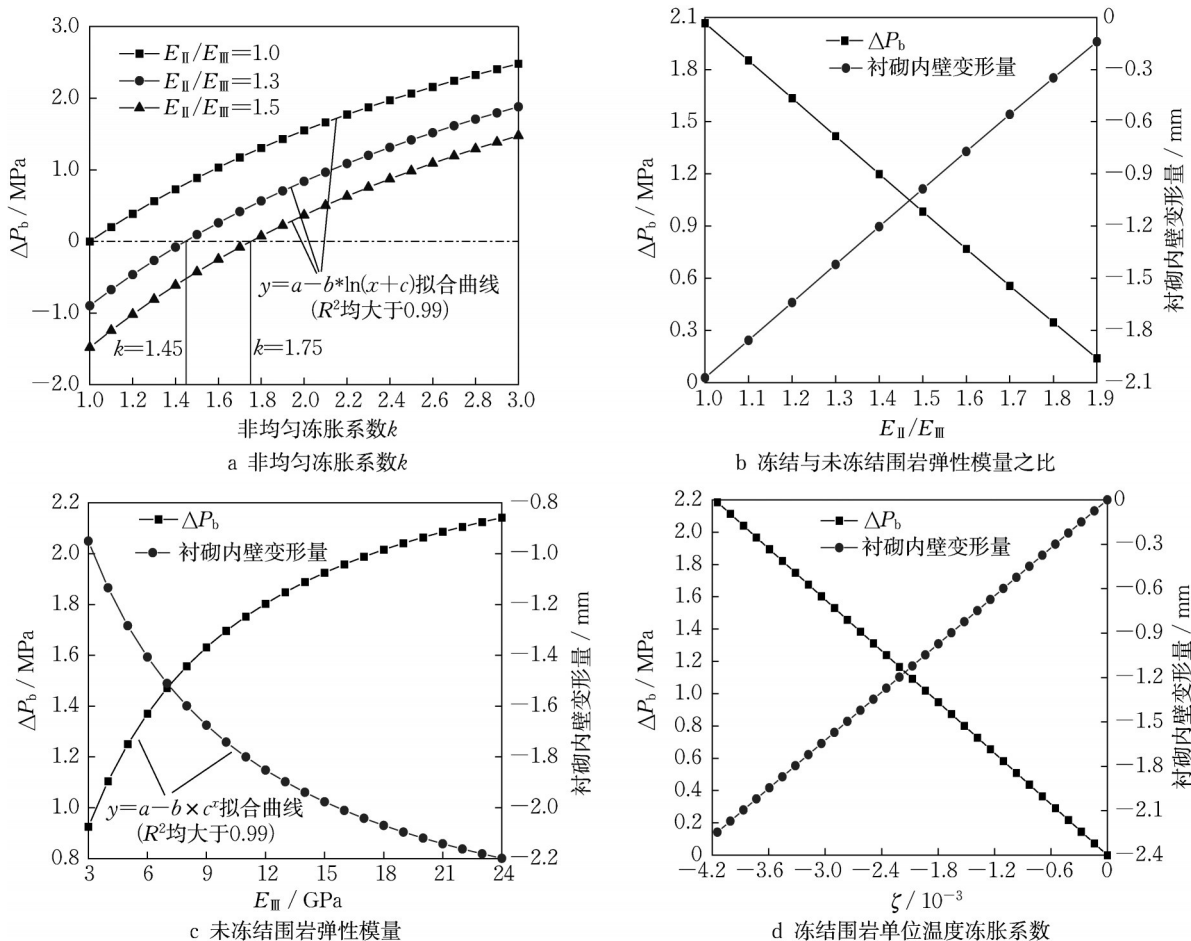


图4 隧道围岩冻结参数影响分析

Fig.4 Influence analysis of freezing parameters of tunnel surrounding rock

下,隧道冻胀力以及引起的衬砌内壁变形量和冻结围岩与未冻结围岩的弹性模量之比的关系如图4b所示,冻胀力随冻结与未冻围岩的弹性模量比的增大而线性降低,冻胀力荷载引起的衬砌内壁变形量也逐渐减小(需注意的是衬砌变形量的符号仅表示方向,负号表示朝向隧道中心方向)。此外,综合图4a和4b可知,同等非均匀冻胀系数条件下,冻结后围岩的弹性模量显著增强可以提高寒区隧道的抗冻胀性能,这对寒区隧道冻害显著的洞口段选址具有一定参考意义。

图4c所示为当冻结与未冻围岩的弹性模量比为1.5时,隧道冻胀力与冻结前围岩弹性模量的关系:同等冻结条件下,隧道围岩冻结前的弹性模量越大,围岩非均匀冻胀引起的冻胀力呈指数函数增大,但

冻胀力的增长速率逐渐减小,相似的冻胀力引起的衬砌内壁变形量也相应的增大。在围岩冻结状态下,围岩的冻胀变形量随冻结温度的降低而增大,冻结围岩单位温度冻胀系数为负值,其与冻胀力的演化关系如图4d所示,隧道冻胀力随冻结围岩单位温度冻胀系数的降低呈线性增大,但其增速要小于未考虑冻结温度渐变影响时的情况^[29],这是因为当未考虑围岩冻结温度渐变时,远离隧道洞壁的冻结围岩的冻胀率被高估了,通过引入围岩径向冻结温度 $T(r)$ 将原被高估的围岩冻胀率误差降低,从而更好的表征符合工程实际的围岩非均匀冻胀性。

寒区隧道冻胀力与隧道开挖、衬砌支护、冻结区范围以及原岩应力等参数的关系如图5所示。

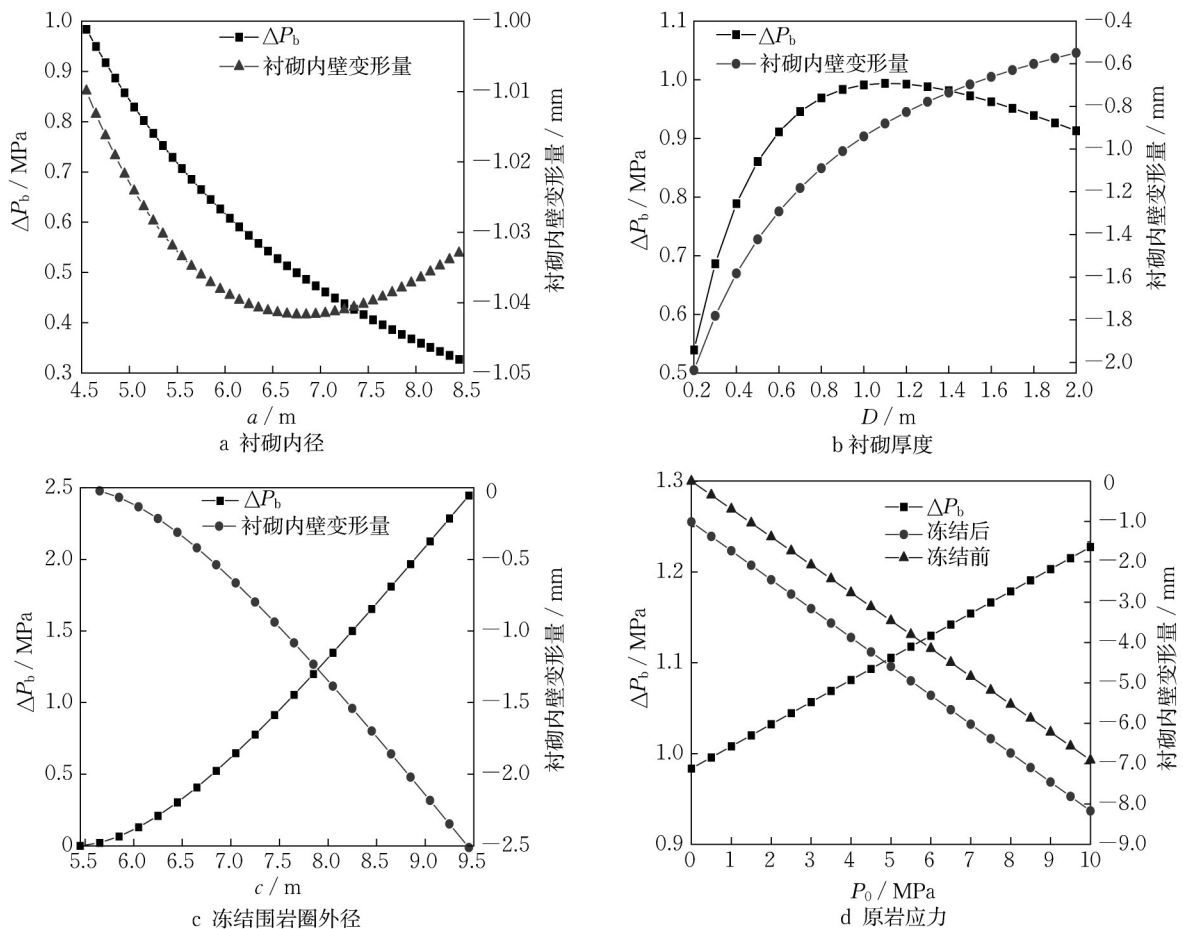


图5 隧道尺寸及应力场参数影响分析

Fig.5 Influence analysis of tunnel size and stress field parameters

根据图5a,在基准工况条件下等代圆形隧道衬砌的内径越大,冻胀力反而越小,分析认为当隧道的净空断面面积越小时越不利于抗冻设计。因此,在隧址区气候近似的寒区隧道中小断面的单线隧道的冻胀破坏风险要大于双线隧道,这就要求单线隧道要采用更强性能的支护方案抵抗冻胀破坏风险。另

一方面,对于隧址区气候条件极端恶劣的情况,隧道断面可以优先考虑双线设计以避免较大的冻害风险。寒区隧道的冻胀力及其引起的衬砌内壁变形量随衬砌支护厚度的关系如图5b所示,随着支护厚度的增大,冻胀力呈现出先快速增大后低速下降的变化趋势,衬砌内壁处的变形量则是逐渐降低,寒区隧

道衬砌厚度可以综合考虑冻胀力和变形量的演化规律,在变形安全范围内建议避免冻胀力最大值对应的衬砌支护厚度,以降低长期较大的冻胀力造成的衬砌耐久性的降低。图5c反映的是冻胀力及衬砌变形随着围岩冻结圈外径的关系,随着围岩冻结圈外径的增大,隧道冻胀力及其引起的衬砌变形量均逐渐增大,同时在围岩冻结发展初期,冻胀力的增长速率较小,随着围岩冻结深度的进一步增大,冻胀力增长速度显著提高,衬砌最大变形量变化趋势与之相似。因此,在实际寒区隧道工程中必需采取一定的防冻措施将围岩最大冻结半径控制在冻胀力快速增长前的范围内(本例大约7m),从而使隧道保温和防冻措施的功能发挥到最大以保证寒区隧道的稳定。寒区隧道的严重冻害多发生于洞口,一般情况下洞口埋深较浅,围岩周围的原岩应力较小而不考虑其影响,但部分寒区隧道受复杂地质条件影响可能导致原岩应力较大而不可忽略。原岩应力对冻胀力的影响如图5d所示,冻胀力随原岩应力呈线性增长关系,冻胀引起衬砌内壁的变形量也略有增大,在同等冻胀条件下原岩应力 P_0 从0增长到10MPa时隧道冻胀力增大了0.25MPa,提高了24.8%。因此,考虑原岩应力大小对寒区隧道冻胀力的影响是重要的,尤其是对于高地应力条件的寒区隧道。

4 结论

(1)建立的寒区隧道冻胀力解析解综合考虑了围岩在不同冻结方向 and 不同冻结温度下的非均匀冻胀性,计算得到更符合寒区隧道围岩冻结实际的冻胀力,并通过算例分析与对比,验证了本解的可靠性;考虑围岩径向冻结温度渐变引起的非均匀冻胀性的冻胀力明显小于忽略冻结温度影响的情况。

(2)寒区隧道围岩受冻结温度场的分布影响具有方向上和空间上的非均匀冻胀特点,非均匀冻胀系数 k 可表征方向上的非均匀冻胀,进而引入冻结温度变温和冻结围岩单位温度冻胀系数可较好的反映围岩在不同空间位置处的非均匀冻胀变形,合理避免远离隧道洞壁处围岩的冻胀率被高估。

(3)冻结围岩的非均匀冻胀特性和冻结与未冻围岩的弹性模量比是影响隧道冻胀力产生的关键因素,隧道冻胀力随非均匀冻胀系数 k 的增大而呈对数函数增大,但随冻结与未冻围岩的弹性模量比的增大而线性降低,当冻结与未冻围岩的弹性模量比越大,冻胀力产生时围岩达到的临界非均匀冻胀系数

越大,否则隧道无冻胀力产生。

(4)寒区隧道冻胀力随未冻结围岩的弹性模量、衬砌内径以及冻结围岩圈外径的增大而增大,随衬砌支护厚度的增大先迅速增大后逐渐降低的趋势,同时冻胀力在围岩冻结初期时发展较慢,后期则迅速增长,采取一定防冻措施将围岩最大冻结深度控制在其迅速增长前的阶段有助于降低冻胀破坏风险。

作者贡献声明:

曹善鹏:理论研究、数据分析及论文撰写;

夏才初:论文统筹、规划及审阅修改;

周舒威:论文构思及审阅修改;

寇继生:提供理论指导。

参考文献:

- [1] ORAKOGLU M E, LIU J K, TUTUMLUER E. Frost depth prediction for seasonal freezing area in eastern turkey [J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 124: 118.
- [2] BARTOSIEWICZ A. Poland on the new silk road: current state and perspectives [M]. Łódź: Łódź University Press, 2020.
- [3] LI X L, WU W, LIU W C. Analyzing the highway accessibility in the belt and road region based on international highway transport chain [J]. Geographical Research, 2020, 39 (11): 2552.
- [4] LAI J X, WANG X L, QIU J L, *et al.* A state-of-the-art review of sustainable energy based freeze proof technology for cold-region tunnels in china [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 3554.
- [5] WU H, ZHONG Y J, XU W, *et al.* Experimental investigation of ground and air temperature fields of a cold-region road tunnel in nw china [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020 (2): 4732490.
- [6] ZHAO X, ZHANG H W, LAI H P, *et al.* Temperature field characteristics and influencing factors on frost depth of a highway tunnel in a cold region [J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 179: 103141.
- [7] FENG Q, JIANG B S, ZHANG Q, *et al.* Reliability research on the 5cm-thick insulation layer used in the yuximolegai tunnel based on a physical model test [J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 124: 54.
- [8] HU Z, DING H, LAI J X, *et al.* The durability of shotcrete in cold region tunnel: a review [J]. Construction and Building Materials, 2018, 185: 670.
- [9] LAI J X, QIU J L, FAN H B, *et al.* Freeze-proof method and test verification of a cold region tunnel employing electric heat tracing [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 60: 56.
- [10] XIA C C, LYU Z T, WANG Y S. Advance and review on frost heaving force calculation methods in cold region tunnels [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(5): 35.

- [11] 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.
ZHANG Zhidao, WANG Lian. Discussion on antifreeze design of tunnels in high altitude and severe cold regions [J]. Modern Tunnel Technology, 2004, 41(3): 1.
- [12] 王建宇, 胡元芳. 隧道衬砌冻胀压力问题研究 [J]. 冰川冻土, 2004, 26(1): 112.
WANG Jianyu, HU Yuanfang. A discussion on frost-heaving force on tunnel lining [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(1): 112.
- [13] LAI Y M, WU H, WU Z W, *et al.* Analytical viscoelastic solution for frost force in cold-region tunnels [J]. Cold Regions Science and Technology, 2000, 31(2): 227.
- [14] 吴紫汪, 赖远明, 臧恩穆, 等. 寒区隧道工程 [M]. 北京: 海洋出版社, 2003.
WU Ziwan, LAI Yuanming, ZANG Enmu, *et al.* Tunnel engineering in cold regions [M]. Tunnel Engineering in Cold Regions, 2003.
- [15] GAO G Y, CHEN Q S, ZHANG Q S, *et al.* Analytical elastoplastic solution for stress and plastic zone of surrounding rock in cold region tunnels [J]. Cold Regions Science & Technology, 2012, 72: 50.
- [16] 覃爱民, 骆汉宾. 基于 mohr-Coulomb 准则寒区隧道围岩应力弹塑性解析 [J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(2): 395.
QIN Aimin, LUO Hanbin. Analytical elasto-plastic solution for stress of surrounding rock based on mohr-coulomb criterion [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(2): 395.
- [17] XIA C C, LV Z T, LI Q, *et al.* Transversely isotropic frost heave of saturated rock under unidirectional freezing condition and induced frost heaving force in cold region tunnels [J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 152: 48.
- [18] LV Z T, XIA C C, WANG Y S, *et al.* Analytical elasto-plastic solution of frost heaving force in cold region tunnels considering transversely isotropic frost heave of surrounding rock [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 163: 87.
- [19] FENG Q, FU S G, WANG C X, *et al.* Analytical elastoplastic solution for frost force of cold-region tunnels considering anisotropic frost heave in the surrounding rock [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(9): 3831.
- [20] LYU Z T, XIA C C, LIU W P. Analytical solution of frost heaving force and stress distribution in cold region tunnels under non-axisymmetric stress and transversely isotropic frost heave of surrounding rock [J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 178(4): 103117.
- [21] ZHANG J B, ZHANG X H, FU H L, *et al.* An analytical solution for the frost heaving force considering the freeze-thaw damage and transversely isotropic characteristics of the surrounding rock in cold-region tunnels [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 6654778.
- [22] 张常光, 高本贤, 单冶鹏, 等. 横观各向同性冻胀寒区隧道应力与位移的塑性统一解 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1825.
ZHANG Changguang, GAO Benxian, SHAN Yepeng, *et al.* Unified plastic solution for stress and displacement of tunnels in cold regions considering transversely isotropic frost heave [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10): 1825.
- [23] 张常光, 高本贤, 李天斌, 等. 考虑位移释放的横观各向同性冻胀寒区隧道冻胀力弹塑性解答 [J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 1.
ZHANG Changguang, GAO Benxian, LI Tianbin, *et al.* An elastic-plastic solution for frost heaving force of cold region tunnels considering transversely isotropic frost heave and displacement release [J]. Rock And Soil Mechanics, 2021, 42(11): 1.
- [24] HUANG S B, XIN Z K, YE Y H, *et al.* Study on the freeze-thaw deformation behavior of the brittle porous materials in the elastoplastic regime based on mohr-coulomb yield criterion [J]. Construction and Building Materials, 2020, 268: 121799.
- [25] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 低温饱和岩石未冻水含量与冻胀变形模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 2000.
LIU Quansheng, HUANG Shibing, KANG Yongshui, *et al.* Study of unfrozen water content and frost heave model for saturated rock under low temperature [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 2000.
- [26] YANG L, JIA H L, HAN L, *et al.* Hysteresis in the ultrasonic parameters of saturated sandstone during freezing and thawing and correlations with unfrozen water content [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13(5): 1078.
- [27] KANG Y S, HOU C C, LIU B, *et al.* Frost deformation and a quasi-elastic-plastic-creep constitutive model for isotropic freezing rock [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(8): 04020119.
- [28] 吴家龙. 弹性力学 [M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2011.
WU Jialong. Mechanics of elasticity [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2011.
- [29] 黄继辉, 夏才初, 韩常领, 等. 考虑围岩不均匀冻胀的寒区隧道冻胀力解析解 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 3766.
HUANG Jihui, XIA Caichu, HAN Changling, *et al.* Analytical solution of tunnel frost heave force in cold region considering uneven surrounding rock frost heave [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 3766.
- [30] BAI Y, SHAN R L, JU Y, *et al.* Study on the mechanical properties and damage constitutive model of frozen weakly cemented red sandstone [J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 171: 102980.
- [31] XIA Caichu, LI Qiang, LIU Zhitao, *et al.* Comparative experimental study on frost deformation characteristics of saturated rock under uniform freezing and uni-directional freezing conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(2): 274.