



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405562

引用格式:张康健,张志强,朱星宇,等.寒区隧道半椭圆形局部积水空间的冻胀力解析[J].科学技术与工程,2025,25(16):6922-6932.

Zhang Kangjian, Zhang Zhiqiang, Zhu Xingyu, et al. Frost heave pressure analysis of a semi-elliptical partially water-accumulated space for the cold region tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(16): 6922-6932.

## 寒区隧道半椭圆形局部积水空间的冻胀力解析

张康健<sup>1,2</sup>, 张志强<sup>1,2\*</sup>, 朱星宇<sup>1,2</sup>, 王珣<sup>3,4</sup>

(1. 西南交通大学极端环境岩土和隧道工程智能建养全国重点实验室, 成都 610031; 2. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031;  
3. 中铁九局集团有限公司, 沈阳 110013; 4. 中铁九局集团第二工程有限公司, 吉林 132001)

**摘要** 寒区隧道衬砌背后空洞中的积水在低温条件下冻结会产生局部冻胀力。假设隧道衬砌背后空洞为半椭圆形空间, 将冻胀过程中围岩-冰体-衬砌间的相互作用简化为串联弹簧, 推导半椭圆形积水空间局部冻胀力解析解, 建立三维数值模型验证了该解析解的有效性。进一步研究局部积水冻胀力和围岩级别、衬砌刚度、积水深度、冻胀率的关系, 分析冻胀位置对衬砌结构力学特征的影响。结果表明:寒区隧道局部积水冻胀力与围岩级别负相关, 与衬砌刚性、积水深度、冻胀率均正相关。各因素对冻胀力的影响程度为:积水深度 > 衬砌刚度 > 围岩级别 > 冻胀率。积水冻胀对衬砌结构的影响主要发生在冰体和衬砌接触区域, 导致隧道向内侧收敛变形。当积水空间位于仰拱处时衬砌主应力最大, 位于拱脚处时衬砌主应力最小。在局部冻胀作用下衬砌结构弯矩和轴力出现突变, 表现为临空侧受拉区衬砌的弯矩增大、轴力减小, 围岩侧受拉区衬砌的弯矩减小, 轴力减小。衬砌不同部位的刚度差异导致冻胀力对结构安全产生不同的影响。冻胀位置对结构安全影响程度为:拱顶 > 仰拱 > 拱肩 > 拱脚 > 墙脚。

**关键词** 寒区隧道; 半椭圆形积水空间; 冻胀力; 衬砌结构

中图分类号 U451;

文献标志码 A

## Frost Heave Pressure Analysis of a Semi-elliptical Partially Water-accumulated Space for the Cold Region Tunnel

ZHANG Kang-jian<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhi-qiang<sup>1,2\*</sup>, ZHU Xing-yu<sup>1,2</sup>, WANG Xun<sup>3,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunnelling, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

3. China Railway No.9 Group Company Limited, Shenyang 110013, China;

4. No.2 Engineering Company of China Railway No.9 Engineering Group Company Limited, Jilin 132001, China)

**[Abstract]** The accumulated water in the cavity behind the tunnel lining in cold regions may freeze under low-temperature conditions, resulting in local frost heave pressure. Assuming that the cavity behind the tunnel lining was a semi-elliptical space, the interaction between the surrounding rock, ice body, and lining during the frost heave process was simplified as springs in series, and an analytical solution for the local frost heave pressure in the semi-elliptical water-accumulated space was proposed. A three-dimensional numerical model was developed to verify the effectiveness of the analytical solution. Further, the relationships between local water-accumulated frost heave pressure and surrounding rock grade, lining stiffness, water-accumulated depth, and frost heave level were studied, and the influences of frost heave position on the mechanical characteristics of lining structure were analyzed. The results show that the local water-accumulated frost heave pressure of the cold region tunnel is negatively correlated with the surrounding rock grade and positively correlated with the lining stiffness, water-accumulated depth, and frost heave level. The influence degree of various factors on frost heave pressure is as follows: water-accumulated depth > lining stiffness > surrounding rock grade > frost heave level. The impact of water-accumulated frost heave on the lining structure mainly occurs in the contact area between the ice body and the lining, leading to the convergence of the tunnel towards the inner side. The principal stress of the lining is maximum when the water-accumulated space is located at the inverted arch, and the principal stress of the lining is minimum when it is located at the arch foot. Under the action of local frost heave, there is a sudden change in the bending moment and axial force of the lining structure, manifested as the bending moment increase and axial force decrease of the lining under tension on the air side, as well as the bending moment decrease and axial force decrease of the lining under tension on the surrounding rock side. The stiffness differences in different

收稿日期: 2024-07-24; 修订日期: 2025-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(52378414)

第一作者: 张康健(1995—), 男, 汉族, 安徽蚌埠人, 博士研究生。研究方向: 隧道与地下工程。E-mail: zkj130281@my.swjtu.edu.cn。

\* 通信作者: 张志强(1968—), 男, 汉族, 四川自贡人, 博士, 教授。研究方向: 隧道与地下工程。E-mail: clarkchang68@163.com。

zones of the lining lead to different impacts of frost heave pressure on structure safety. The influence degree of frost heave position on structure safety is as follows: vault > inverted arch > arch shoulder > arch foot > wall foot.

[Keywords] cold region tunnel; semi-elliptical partially water accumulated space; frost heave pressure; lining structure

近年来,一大批重大交通工程向建设环境极端复杂的高纬度和高海拔地区转移,沿线不可避免地出现了大量寒区隧道工程,在建设和运营过程中面临着衬砌冻胀劣化的巨大挑战,如青藏铁路风火山隧道和昆仑山隧道、沈白高铁西古隧道和前林子隧道、国道317线鹫鹑山隧道和雀儿山隧道、国道227线大坂山隧道、平阿高速青沙山隧道、独库公路玉希莫勒盖隧道等。寒区隧道爆破开挖过程中由于地质条件和施工不当等造成超挖现象<sup>[1-2]</sup>,即使经过人工回填工序,衬砌也难以与隧道开挖面紧密贴合,导致衬砌背后空洞产生<sup>[3]</sup>。围岩中的水汇集于这些空洞中形成积水,在低温条件下冻结膨胀产生冻胀力,对衬砌结构产生严重危害<sup>[4-5]</sup>。

现有隧道冻胀力计算主要基于含水风化层冻胀模型、积水局部冻胀模型和冻融圈整体冻胀模型三大理论开展研究工作<sup>[6-7]</sup>,尤其是冻融圈整体冻胀模型方面的研究较多。张祉道等<sup>[8]</sup>用不同弹性系数的理想弹簧代替衬砌结构和冰冻层,提出含水风化层冻胀力计算公式。张玉伟等<sup>[9]</sup>提出更为完善冻胀模型。但含水风化层冻胀计算公式均存在适用范围无法明确,衬砌和围岩弹性系数难以确定的问题。王建宇等<sup>[10]</sup>基于岩石隧道提出三角形水体的冻胀力计算公式。范磊等<sup>[11]</sup>在王建宇研究成果基础上,引入冰体弹性抗力系数获得修正计算公式。邓刚等<sup>[12]</sup>假定积水体与数个围岩约束面接触,将二维计算模型扩展到三维。谭书平等<sup>[13]</sup>分析了隧道衬砌背后积水冻胀后冻胀率对衬砌应力和结构变形的影响,发现冻胀率越小时储水空间向围岩侧变形量的占比越大。马云峰等<sup>[14]</sup>提出局部存水空间冻胀对衬砌劣损的影响程度为:拱顶存水 > 拱腰存水 > 拱脚存水 > 仰拱存水。Gao等<sup>[15]</sup>、覃爱民等<sup>[16]</sup>假定冻结围岩内侧位移零点不在内侧,得出修正冻胀力弹性解。高焱等<sup>[17]</sup>认为冻胀力是围岩整体冻胀和局部冻胀共同作用的结果并推导了冻胀力计算公式。

目前对隧道冻胀力的计算主要集中在冻融圈整体冻胀模型方面,考虑衬砌结构弹性抗力系数、冻结围岩弹性抗力系数、冻胀率等进行力学模型分析,计算参数多且参数获取困难,难以直接运用于实际工程中。考虑到局部积水冻胀模型研究尚不充分,现提出更符合实际工程的半椭圆形积水空间局部冻胀模型,推导理论解析解,并建立相应的力学模型进行对照验证,进一步研究围岩级别、衬砌

刚度、积水深度、冻胀率和冻胀位置对冻胀力和结构受力的影响规律。

## 1 半椭圆形积水空间冻胀模型

隧道采用光面爆破方法进行施工时由于爆破工艺及围岩特性等原因,开挖实际轮廓线与设计轮廓线存在差异,即超欠挖现象,如图1<sup>[18]</sup>所示。隧道欠挖区域围岩外凸,采用人工挖掘方式消除,超挖区域围岩内凹,采用人工回填方式补足,然而衬砌结构和围岩常因回填不密实留下积水空间,低温条件下发生水冰相变,体积膨胀,受到围岩和衬砌结构的约束产生冻胀力。

隧道工程实际开挖轮廓线与设计开挖轮廓线差异较大,造成积水体的超挖空间并不规则,现有局部积水冻胀力研究直接将积水空间简化为三角形显然是不合理的。因此,基于隧道横截面,结合超挖区域实际形状建立半椭圆形积水空间冻胀模型,如图2所示。

为方便局部积水冻胀力计算,做出如下假定:  
①忽略人工填土作用,认为水体充满超挖空间及水体深度等于超挖量;  
②隧道衬砌结构和围岩物理力学性质均匀;水体冻结膨胀过程中,始终受到围岩

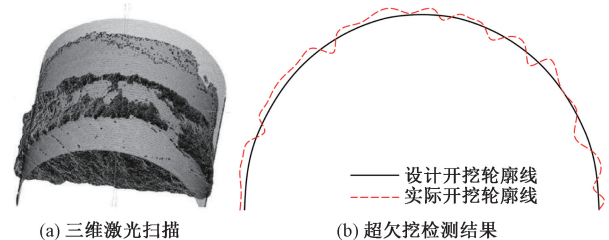
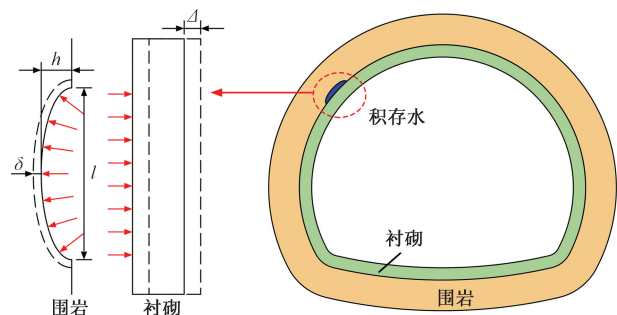


图1 隧道超欠挖现象<sup>[18]</sup>

Fig. 1 Overbreak and under break phenomenon of tunnel<sup>[18]</sup>



$h$  为原积水深度; $l$  为积水环向长度; $\delta$ 、 $\Delta$  为围岩冻胀位移

图2 隧道横截面半椭圆形积水空间冻胀模型

Fig. 2 Frost heave model of semi-elliptical water-accumulated spaces in tunnel cross sections

和衬砌结构的约束作用;③冻胀力方向垂直于水体-围岩接触面或水体-衬砌结构接触面;④忽略隧道轴线方向上的冻胀位移,仅进行隧道横截面上冻胀力计算。

冻胀过程中,假设冰体中心点  $O$  为位移零点,靠近围岩侧冰体向围岩方向发生位移变形,对围岩产生挤压作用,靠近衬砌侧冰体向衬砌方向发生位移变形,对衬砌结构产生挤压作用,受到围岩和衬砌的约束作用进而产生冻胀力  $P$ 。将围岩、冰体、衬砌结构简化为 3 个串联的弹簧模型,如图 3 所示。

基于局部变形理论,结构某一点的压力  $P_a$  和其对应的位移  $S_a$  成正比,即

$$K = \frac{P_a}{S_a} \quad (1)$$

式(1)中: $K$ 为结构弹性抗力系数。

围岩、冰体、衬砌结构的弹性抗力系数分别为  $K_r, K_i, K_l$ , 围岩侧点  $A$  冻胀位移  $\delta$  及衬砌侧点  $B$  冻胀位移  $\Delta$  为

$$\begin{cases} \delta = \frac{P}{K_r + K_i} \\ \Delta = \frac{P}{K_l + K_i} \end{cases} \quad (2)$$

冻胀过程中,半椭圆形冰体体积膨胀量  $\Delta V_i$  恒等于围岩与衬砌体压缩量之和,可表示为

$$\Delta V_i = \Delta V_r + \Delta V_l \quad (3)$$

椭圆状积水空间短轴方向位移变形增量为  $\delta$ , 则长轴方向位移变形增量为  $\frac{\delta l}{2h}$ , 假设冰体沿隧道纵向的长度为  $B'$ , 冰的冻胀率为  $\alpha$ , 则冻胀前后,冰体体积增加量  $\Delta V_i$  为

$$\Delta V_i = \frac{1}{2} \alpha \pi \frac{l}{2} h B' \quad (4)$$

围岩体积减少量  $\Delta V_r$  为

$$\Delta V_r = \frac{1}{2} \pi \left( \frac{l}{2} + \frac{\delta l}{2h} \right) (h + \delta) B' - \frac{1}{2} \pi \frac{l}{2} h B' \quad (5)$$

衬砌结构体积减少量  $\Delta V_l$  为

$$\Delta V_l = \left( l + \frac{\delta l}{h} \right) \Delta B' \quad (6)$$

将上述体积变化量代入式(3),可得

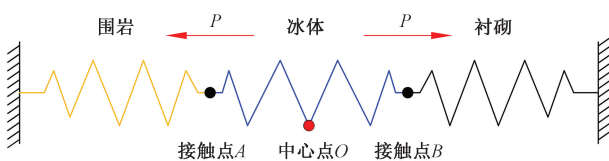


图3 简化计算模型

Fig. 3 Simplified computational model

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \alpha \pi \frac{l}{2} h B' &= \frac{1}{2} \pi \left( \frac{l}{2} + \frac{\delta l}{2h} \right) (h + \delta) B' - \\ &\frac{1}{2} \pi \frac{l}{2} h B' + \left( l + \frac{\delta l}{h} \right) \Delta B' \quad (7) \end{aligned}$$

为方便计算,令

$$\mu = \frac{\Delta}{\delta} = \frac{K_r + K_i}{K_l + K_i} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{\delta}{h} \quad (9)$$

将式(8)、式(9)代入式(7)得到一元二次方程为

$$\left( 1 + \frac{4\mu}{\pi} \right) \lambda^2 + \left( 2 + \frac{4\mu}{\pi} \right) \lambda - \alpha = 0 \quad (10)$$

求解得

$$\lambda = \frac{- \left( 2 + \frac{4\mu}{\pi} \right) \pm \sqrt{\left( 2 + \frac{4\mu}{\pi} \right)^2 - 4 \left( 1 + \frac{4\mu}{\pi} \right) (-\alpha)}}{2 \left( 1 + \frac{4\mu}{\pi} \right)} \quad (11)$$

去掉负根得

$$\lambda = \frac{-2 - \frac{4\mu}{\pi} + \sqrt{\frac{16\mu^2}{\pi^2} + \frac{16\mu}{\pi} + \frac{16\mu\alpha}{\pi} + 4\alpha + 4}}{2 + \frac{8\mu}{\pi}} \quad (12)$$

代入式(8)得

$$\begin{aligned} \lambda &= \left\{ -2 - \frac{4}{\pi} \frac{K_r + K_i}{K_l + K_i} + \left[ \frac{16}{\pi^2} \left( \frac{K_r + K_i}{K_l + K_i} \right)^2 + \right. \right. \\ &\left. \left. \frac{16}{\pi} \frac{K_r + K_i}{K_l + K_i} + \frac{16\alpha}{\pi} \frac{K_r + K_i}{K_l + K_i} + 4\alpha + 4 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \times \\ &\left( 2 + \frac{8}{\pi} \frac{K_r + K_i}{K_l + K_i} \right)^{-1} \quad (13) \end{aligned}$$

代入式(2)得

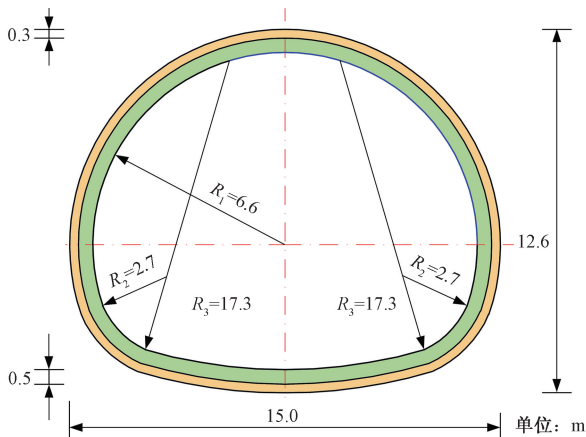
$$\begin{aligned} P &= (K_r + K_i) h \left\{ -2 - \frac{4}{\pi} \frac{K_r + K_i}{K_l + K_i} + \right. \\ &\left[ \frac{16}{\pi^2} \left( \frac{K_r + K_i}{K_l + K_i} \right)^2 + \frac{16}{\pi} \frac{K_r + K_i}{K_l + K_i} + \frac{16\alpha}{\pi} \frac{K_r + K_i}{K_l + K_i} + \right. \\ &\left. \left. 4\alpha + 4 \right]^{\frac{1}{2}} \left( 2 + \frac{8}{\pi} \frac{K_r + K_i}{K_l + K_i} \right)^{-1} \right\} \quad (14) \end{aligned}$$

由式(14)可知,只要确定衬砌弹性抗力系数、围岩弹性抗力系数、冰体弹性抗力系数、积水深度、积水冻胀率,即可计算相应的冻胀力大小。

## 2 冻胀力解析模型验证

采用有限元软件建立寒区隧道局部积水冻胀数值模型,计算冻胀率 1% ~ 12% 条件下的冻胀力,

并与理论公式计算的冻胀力比较,验证提出的半椭圆形积水空间冻胀力计算公式的正确性。隧道初期支护厚度为 30 cm,二次衬砌厚度为 50 cm,详细的尺寸如图 4 所示。数值模型围岩分布范围为隧道大小的 3~5 倍,纵向总长度为 60 m,积水空间处于模型  $z$  向中间且位于隧道顶部,沿隧道轴向长度  $B' = 3$  m,深度  $h = 0.5$  m,环向长度  $l = 1$  m,局部冻胀隧道三维数值模型如图 5 所示。



$R_1, R_2, R_3$  为圆弧半径

图 4 隧道尺寸

Fig. 4 Tunnel dimensions

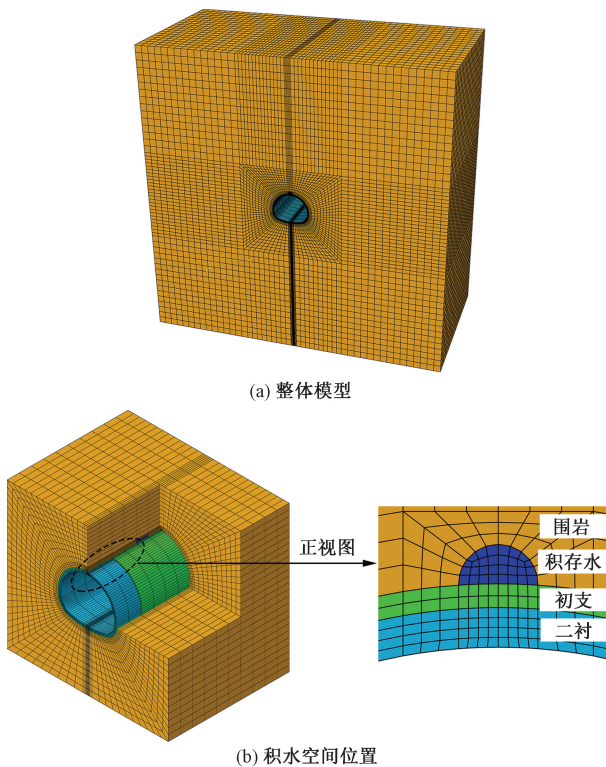


图 5 隧道局部冻胀三维数值模型

Fig. 5 Three-dimensional numerical model of local frost heave in tunnel

围岩级别为 IV 级,二次衬砌结构采用 C40 混凝土,有限元计算参数如表 1 所示。为模拟隧道开挖和衬砌施作后积水冻胀破坏的全过程,设置多分析步进行计算:①“杀死”积水和衬砌结构单元,平衡地应力平衡;②隧道开挖,将隧道及顶部积水空间区域围岩单元同时杀死;③激活衬砌单元,模拟结构随围岩向内收敛直至稳定;④激活冰体单元,并施加温度场产生体积膨胀。

数值模拟中输入的膨胀系数为线性膨胀系数,而水体冻结成冰产生的为体积膨胀。对于各项同性体,材料各方向物理性质相同,体积膨胀系数为线性膨胀系数的 3 倍<sup>[19]</sup>。理论计算时,IV 级围岩的弹性抗力系数为 350 MPa/m,冰的弹性抗力系数按经验取值为 50 MPa/m。C40 衬砌结构的弹性抗力系数基于荷载-结构法进行计算<sup>[12]</sup>,如图 6 所示。在衬砌周围遍布仅受压弹簧模拟围岩抗力作用(弹簧刚度为  $3.5 \times 10^8$  N/m,等于围岩弹性抗力系数乘以弹簧连接的单元面积),在衬砌某点施加径向作用力使其产生相应位移,以径向作用力除以位移得到衬砌弹性抗力系数。

分别计算 1%~12% 冻胀率下局部积水冻胀力的数值结果与理论结果,如表 2 所示。理论计算与数值模拟值相差 -8.73%~1.14%,误差均在 10% 以内,证明建立的半椭圆形空间积水冻胀模型是有效的。

表 1 模型计算参数

Table 1 Model calculation parameters

| 材料     | 容重/<br>( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 弹性模量/<br>GPa | 泊松比  | 黏聚力/<br>MPa | 内摩擦角/<br>( $^\circ$ ) |
|--------|--|--------------|------|-------------|-----------------------|
| IV 级围岩 | 22   | 3.7          | 0.33 | 0.5         | 33                    |
| 衬砌     | 25   | 33.5         | 0.20 | —           | —                     |
| 冰      | 9  | 0.1          | 0.30 | —           | —                     |

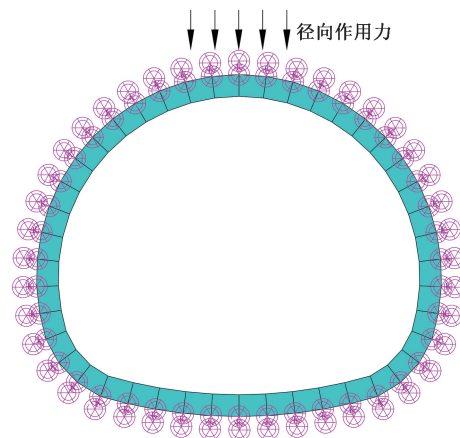


图 6 衬砌弹性抗力系数计算模型

Fig. 6 Calculation model for elastic resistance coefficient of lining

表2 结果验证

Table 2 Results validation

| 冻胀率/% | 局部积水冻胀力/MPa |       | 误差 /% |
|-------|-------------|-------|-------|
|       | 数值模拟        | 理论计算  |       |
| 1     | 0.294       | 0.311 | -5.47 |
| 2     | 0.608       | 0.621 | -2.09 |
| 3     | 0.922       | 0.930 | -0.86 |
| 4     | 1.235       | 1.238 | -0.24 |
| 5     | 1.549       | 1.545 | 0.26  |
| 6     | 1.863       | 1.852 | 0.59  |
| 7     | 2.177       | 2.158 | 0.88  |
| 8     | 2.491       | 2.463 | 1.14  |
| 9     | 2.754       | 2.768 | -0.51 |
| 10    | 2.978       | 3.071 | -3.03 |
| 11    | 3.179       | 3.374 | -5.78 |
| 12    | 3.355       | 3.676 | -8.73 |

### 3 基于理论模型冻胀力影响因素分析

式(14)中冰体弹性抗力系数  $K_i$  为常数,局部积水冻胀力大小  $P$  与围岩弹性抗力系数  $K_r$ 、衬砌弹性抗力系数  $K_l$ 、积水深度  $h$ 、积水冻胀率  $\alpha$  有关。进一步分析各因素对冻胀力的影响规律。

#### 3.1 围岩级别

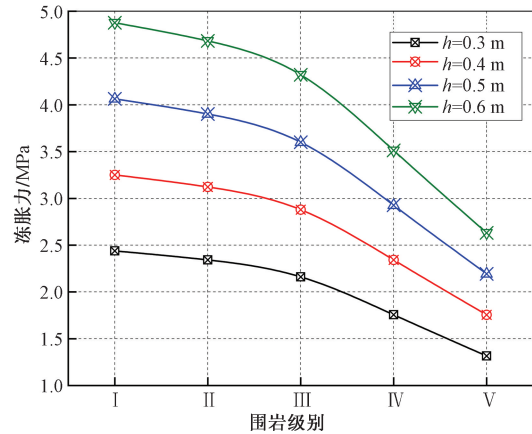
计算 I ~ V 级围岩条件下的冻胀力大小,绘制冻胀力变化曲线如图 7 所示。可以看出,冻胀力大小与围岩级别呈负相关,随着围岩级别增大,冻胀力逐渐减小,且围岩级别越大,冻胀力减小速率越快。围岩级别较小的岩体硬度和完整度良好,整体刚度更大,受到冰体冻胀形变作用产生的冻胀力更大,随着围岩级别增加,岩体愈发软弱破碎,刚度减小导致产生的冻胀力也相应减小。

#### 3.2 衬砌刚度

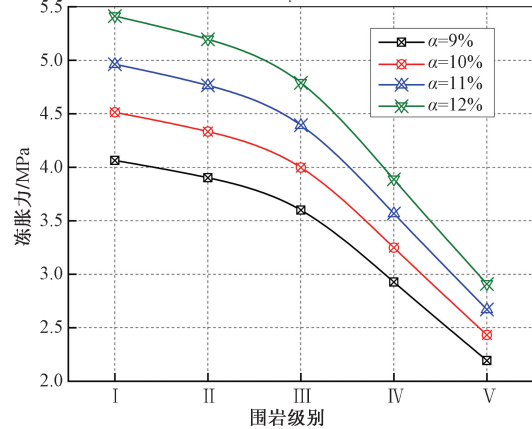
计算衬砌 50 ~ 125 MPa/m 刚度条件下的冻胀力大小,绘制冻胀力变化曲线如图 8 所示。可以看出,冻胀力大小与衬砌抗压刚度呈正相关,随着衬砌抗压刚度增大,冻胀力呈线性增加。衬砌结构抗压刚度受浇筑材料和结构尺寸影响较大,在寒区隧道衬砌结构设计时应尽量选择柔性支护,并在满足设计安全的条件下适当减小衬砌厚度。

#### 3.3 积水深度

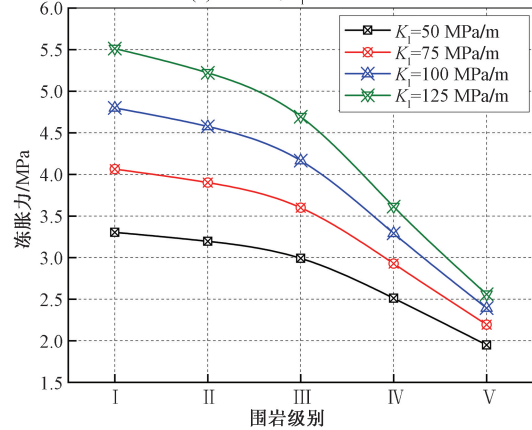
计算 0.3 ~ 0.6 m 积水深度条件下的冻胀力大小,绘制冻胀力变化曲线如图 9 所示。可以看出,冻胀力大小与积水深度呈正相关,随着积水深度增大,冻胀力呈线性增加。由于隧道施工过程中超挖回填不密实,产生积水空间,积水空间越深,低温冻结后体积膨胀越大,作用在衬砌结构上产生的冻胀作用越明显。因此施工期间要确保衬砌与围岩贴紧,对超挖区域夯实,减少积水空间出



(a)  $\alpha=9\%$ ,  $K_i=75$  MPa/m



(b)  $h=0.5$  m,  $K_i=75$  MPa/m



(c)  $\alpha=9\%$ ,  $h=0.5$  m

图7 衬砌冻胀力与围岩级别的关系

Fig. 7 Relationships between the frost heave pressure on lining and surrounding rock grade

现的可能。

#### 3.4 冻胀率

计算 0% ~ 12% 积水冻胀率条件下的冻胀力大小,绘制冻胀力变化曲线如图 10 所示。可以看出,冻胀力大小与冻胀率呈正相关,随着冻胀率增大,冻胀力呈线性增加。围岩中的孔隙水和裂隙水等流入积水空间,在低温条件下发生水冰相变,产生体积膨胀,冰体的冻胀率越高,冰体产生的形

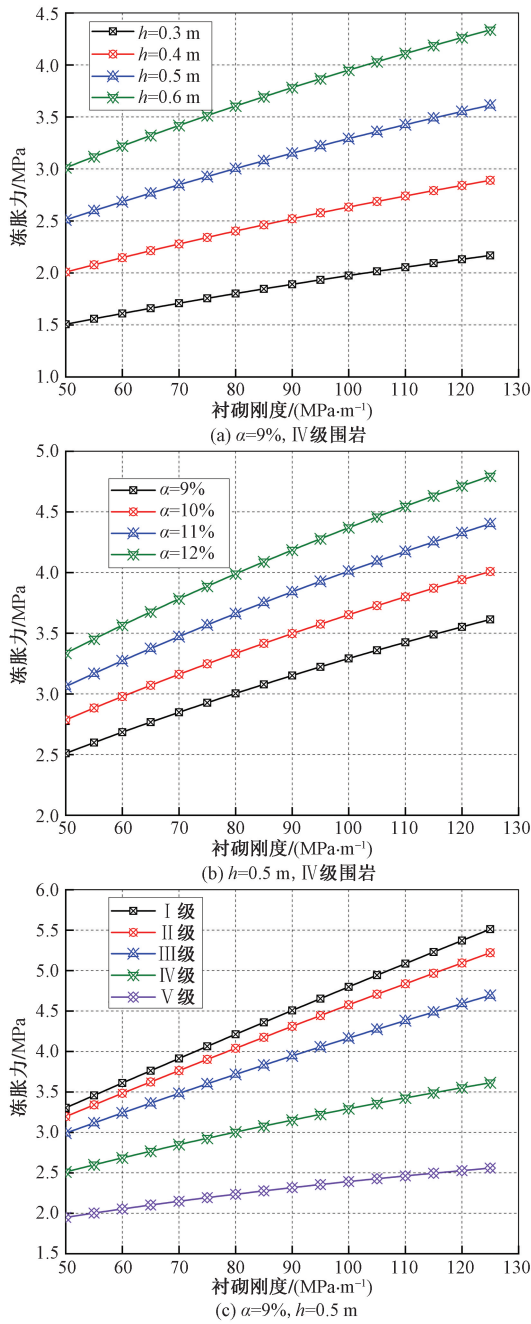


图8 衬砌冻胀力与衬砌刚度的关系

Fig. 8 Relationships between the frost heave pressure on lining and lining stiffness

变压力越高。因此施工期间要使用保温层等措施,升高环境温度,尽可能降低冰体膨胀带来的风险。

### 3.5 多因素正交分析

为系统性地研究不同因素对冻胀力影响,采用正交试验法对多因素共同作用下冻胀力结果进行分析,采用 $L_{25}(5^1 \times 4^4)$ 混合正交表,计算结果如表3所示。折算后极差 $R'$ 的计算公式为

$$R' = dR\sqrt{r} \tag{15}$$

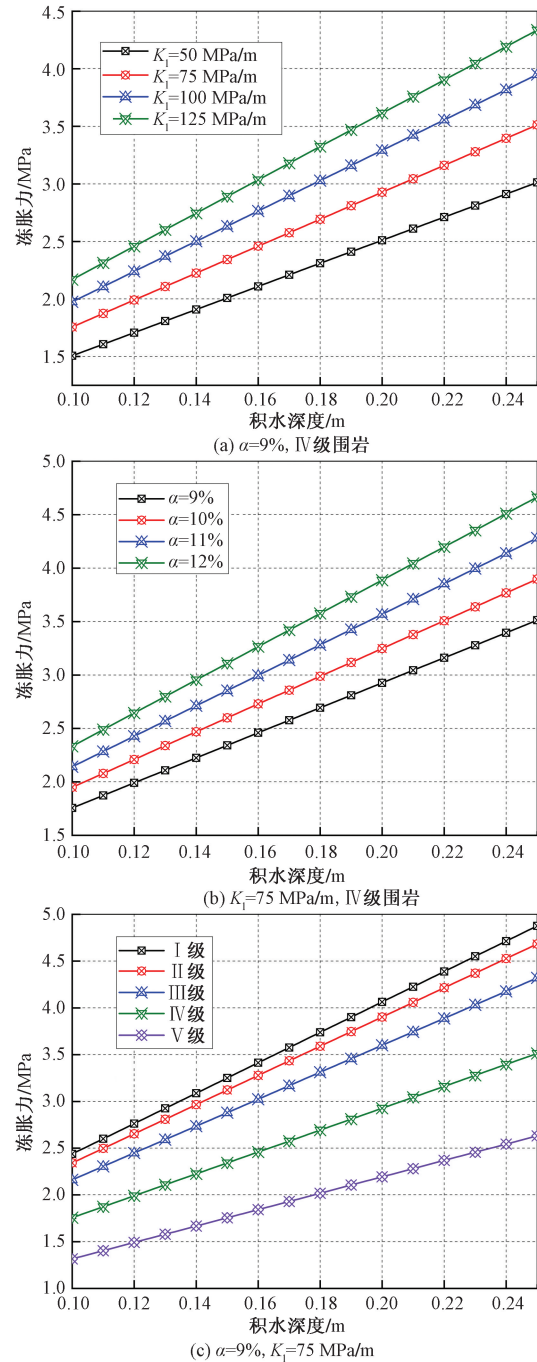


图9 衬砌冻胀力与积水深度的关系

Fig. 9 Relationships between the frost heave pressure on lining and waterlogging depth

式(15)中: $d$ 为折算系数; $R$ 为极差; $r$ 为每水平重复数。

采用正交试验法对多因素共同作用下冻胀力结果进行分析,绘制各因素冻胀力指标关系,如图11所示。可以看出,各因素下冻胀力变化规律与3.4节基本一致。极差 $R'$ 和因素指标图的波动范围代表该因素对冻胀力的影响程度,由正交计算结果可知各因素对冻胀力的影响程度排序为:积水深度>衬砌刚度>围岩级别>冻胀率。

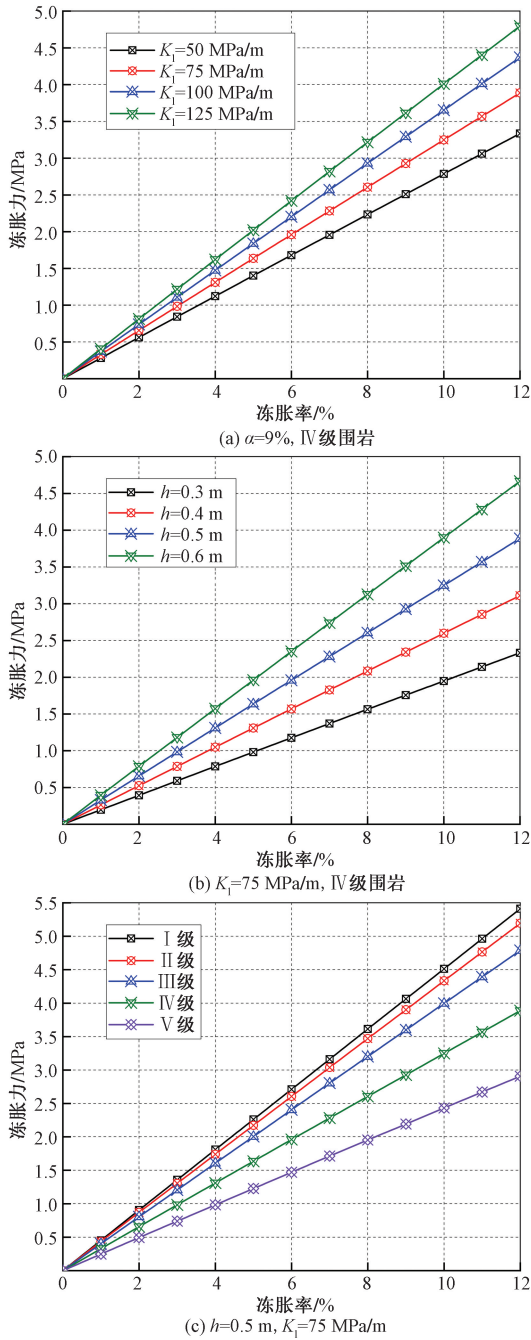


图 10 衬砌冻胀力与冻胀率的关系

Fig. 10 Relationships between the frost heave pressure on the lining and frost heave level

## 4 局部冻胀位置对衬砌力学性能影响

### 4.1 隧道应力

超挖产生的积水空间普遍存在于隧道的各个部位。积水空间分别位于拱顶、拱肩、拱脚、墙脚、仰拱处时会对衬砌结构力学性能产生不同的影响。隧道局部冻胀图如图 12 所示。以 C40 等级隧道衬砌混凝土、IV 围岩、0.5 m 积水深度、9% 冻胀率为例进行模拟计算。计算结果表明，局部积水冻胀主要

表 3 计算结果

Table 3 Calculation results

| 编号    | 因素      |       |         |       |         |     |        |    |       |       | 冻胀力/MPa |
|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-----|--------|----|-------|-------|---------|
|       | A: 围岩等级 |       | B: 衬砌刚度 |       | C: 积水深度 |     | D: 冻胀率 |    | E: 空列 |       |         |
|       | 水       | 围岩    | 水       | 衬砌    | 水       | 积水  | 水      | 冻胀 | 水     |       |         |
| 平     | 等级      | 平     | 刚度/MPa  | 平     | 深度/m    | 平   | 率/%    | 平  | 平     |       |         |
| 1     | 1       | I级    | 1       | 50    | 1       | 0.3 | 1      | 9  | 1     | 1.982 |         |
| 2     | 1       | I级    | 2       | 75    | 2       | 0.4 | 2      | 10 | 2     | 3.611 |         |
| 3     | 1       | I级    | 3       | 100   | 3       | 0.5 | 3      | 11 | 3     | 5.861 |         |
| 4     | 1       | I级    | 4       | 125   | 4       | 0.6 | 4      | 12 | 4     | 8.808 |         |
| 5     | 2       | II级   | 1       | 50    | 2       | 0.4 | 3      | 11 | 4     | 3.123 |         |
| 6     | 2       | II级   | 2       | 75    | 1       | 0.3 | 4      | 12 | 3     | 3.117 |         |
| 7     | 2       | II级   | 3       | 100   | 4       | 0.6 | 1      | 9  | 2     | 5.492 |         |
| 8     | 2       | II级   | 4       | 125   | 3       | 0.5 | 2      | 10 | 1     | 5.797 |         |
| 9     | 3       | III级  | 1       | 50    | 3       | 0.5 | 4      | 12 | 2     | 3.980 |         |
| 10    | 3       | III级  | 2       | 75    | 4       | 0.6 | 3      | 11 | 1     | 5.272 |         |
| 11    | 3       | III级  | 3       | 100   | 1       | 0.3 | 2      | 10 | 4     | 2.775 |         |
| 12    | 3       | III级  | 4       | 125   | 2       | 0.4 | 1      | 9  | 3     | 3.756 |         |
| 13    | 4       | IV级   | 1       | 50    | 4       | 0.6 | 2      | 10 | 3     | 3.344 |         |
| 14    | 4       | IV级   | 2       | 75    | 3       | 0.5 | 1      | 9  | 4     | 2.927 |         |
| 15    | 4       | IV级   | 3       | 100   | 2       | 0.4 | 4      | 12 | 1     | 3.496 |         |
| 16    | 4       | IV级   | 4       | 125   | 1       | 0.3 | 3      | 11 | 2     | 2.642 |         |
| 17    | 5       | V级    | 1       | 50    | 1       | 0.3 | 1      | 9  | 1     | 1.170 |         |
| 18    | 5       | V级    | 2       | 75    | 2       | 0.4 | 2      | 10 | 2     | 1.946 |         |
| 19    | 5       | V级    | 3       | 100   | 3       | 0.5 | 3      | 11 | 3     | 2.913 |         |
| 20    | 5       | V级    | 4       | 125   | 4       | 0.6 | 4      | 12 | 4     | 4.070 |         |
| $k_1$ | 5.066   | 2.720 | 2.337   | 3.065 | 3.543   |     |        |    |       |       |         |
| $k_2$ | 4.382   | 3.375 | 3.186   | 3.495 | 3.534   |     |        |    |       |       |         |
| $k_3$ | 3.946   | 4.107 | 4.296   | 3.962 | 3.798   |     |        |    |       |       |         |
| $k_4$ | 3.102   | 5.015 | 5.397   | 4.694 | 4.341   |     |        |    |       |       |         |
| $k_5$ | 2.525   | —     | —       | —     | —       |     |        |    |       |       |         |
| $R'$  | 2.033   | 2.309 | 3.079   | 1.639 | 0.811   |     |        |    |       |       |         |

注： $k_i$ 为因素列下所有水平  $i$  结果平均； $R'$ 为折算后极差。

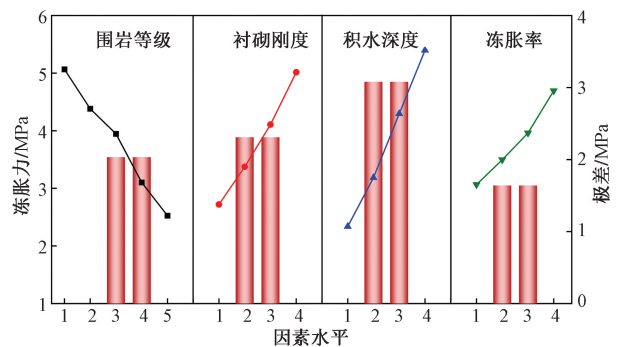


图 11 因素-指标关系图

Fig. 11 Relationship diagram between factor and indicator

对积水空洞和衬砌结构接触区域产生影响，其余部位的主应力变化较小。衬砌结构冻胀区域向内侧收敛变形，围岩侧产生压应力，临空侧产生拉应力。衬砌结构不同位置的弹性抗力系数不同导致

冻胀力大小发生变化,因此,拱顶、拱肩、拱脚、墙脚、仰拱冻胀引起的结构受力也存在差异,如表4所示。

受到曲率影响,当积水空洞位于仰拱处时,结构主应力最大,位于拱脚处时,结构主应力最小。积水对应位置的衬砌结构受到冻胀作用产生的压应力明显高于拉应力。当积水位于仰拱时,由于该部位曲率最大,结构受到的拉应力和压应力最大,分别为2.436 MPa和15.629 MPa,拱肩、拱顶、拱脚依次次之,墙脚最小,拉应力和压应力分别为1.961 MPa和12.240 MPa。

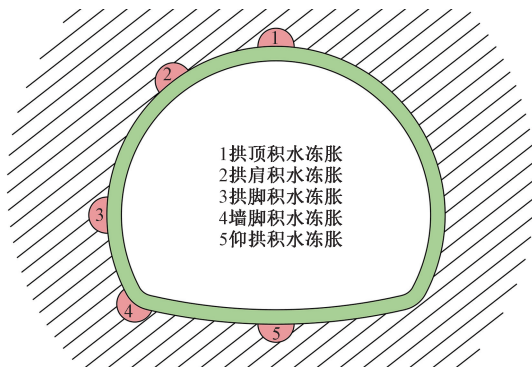


图12 隧道局部冻胀位置

Fig. 12 Local frost heave position of the tunnel

表4 不同冻胀位置下隧道主应力

Table 4 Principal stress of tunnel under different frost heave positions

| 冻胀位置      | 拱顶      | 拱肩      | 拱脚      | 墙脚      | 仰拱      |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 最大主应力/MPa | 2.126   | 2.172   | 2.051   | 1.961   | 2.436   |
| 最小主应力/MPa | -14.168 | -14.531 | -13.552 | -12.240 | -15.629 |

### 4.2 隧道损伤

不同冻胀位置下隧道结构损伤分布如图13所示。观察结构损伤分布,可以明显发现拱顶、拱肩、仰拱处冻胀产生的结构损伤分布范围更大,拱脚和墙脚处冻胀产生的结构损伤分布范围相对有限。当在墙脚和拱脚超挖空洞处积水时,由于冻胀作用较弱,积水两侧损伤最为严重,积水中心处损伤较轻。

### 4.3 隧道内力

不同冻胀位置下衬砌结构轴力和弯矩分布如图14、图15所示。可以看出,衬砌结构受到局部冻胀作用,在积水空洞和衬砌结构接触区域内弯矩、轴力出现突变,表现为临空侧受拉区衬砌的弯矩增大、轴力减小,围岩侧受拉区衬砌的弯矩减小,轴力减小,其余区域内力变化不大。不同冻胀位置导致的弯矩轴力变化各不相同,总体来说表现为轴力减小,正弯矩增大,负弯矩减小并向正弯矩改变。仰拱的轴力降幅最大,达31.59%,拱肩的轴力提高最大,达15.59倍。特别需要注意的是拱脚和墙脚位置由冻胀前围岩侧受拉转变为冻胀后临空侧受拉。

不同冻胀位置下隧道安全系数如表4所示。当积水储存在拱顶、拱肩、拱脚、仰拱时,冻胀作用、造成结构安全程度显著降低,当冻胀位置为拱顶、拱肩、仰拱时,对结构最为不利。当积水储存在墙脚时,冻胀作用对结构安全有一定程度的提升。冻胀位置对结构安全的影响程度为:拱顶 > 仰拱 > 拱肩 > 拱脚 > 墙脚。因此综合主应力云图、结构内力弯矩和安全系数可得同等衬砌条件下,衬砌结构不同部位抗压刚度不同,导致结构冻胀区域的应力、轴

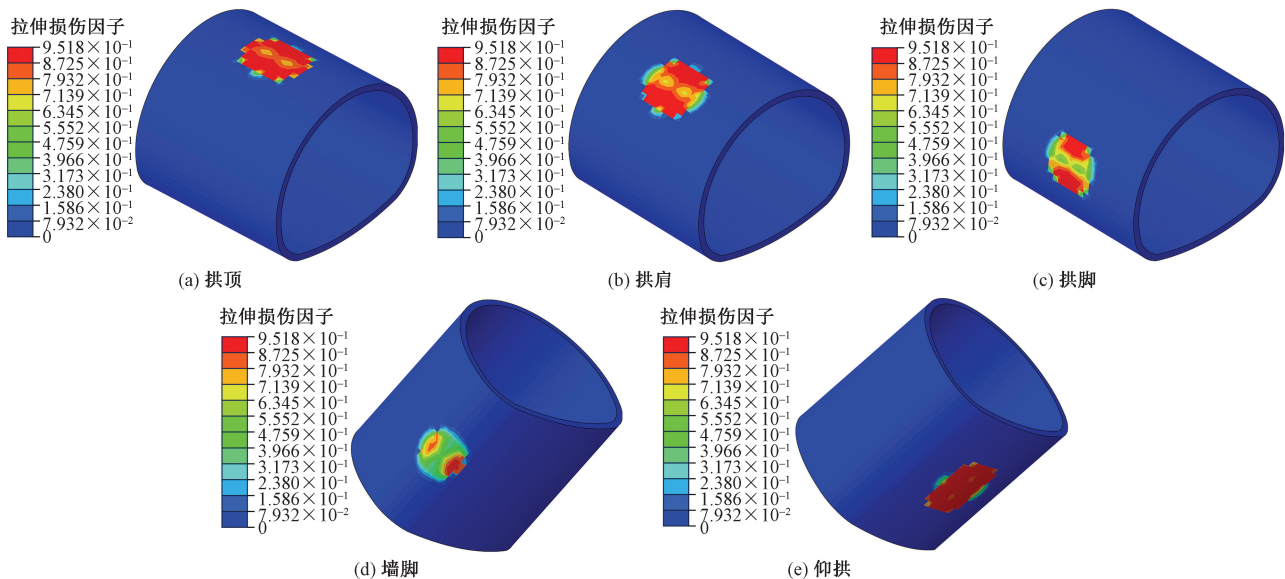
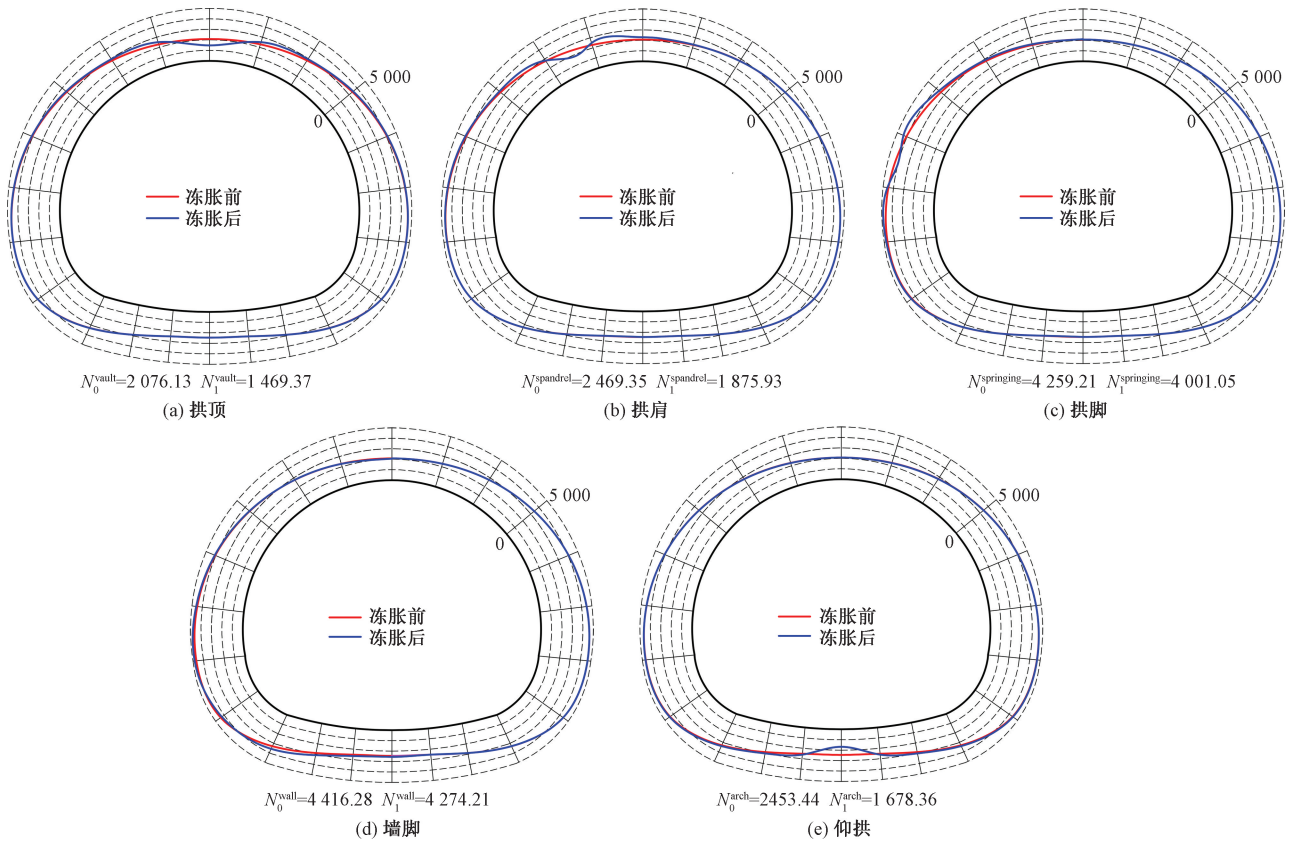


图13 隧道结构损伤分布

Fig. 13 Damage distributions of tunnel structure



$N_0$ 、 $N_1$  分别为冻胀前后的轴力,单位:kN; vault 为拱顶; spandrel 为拱肩; springing 为拱脚; wall 为墙脚; arch 为仰拱

图 14 衬砌结构轴力分布

Fig. 14 Axial force distributions of lining structure

表 4 不同冻胀位置下隧道安全系数

Table 4 Safety factors of tunnel under different frost heave positions

| 冻胀位置 | 冻胀前安全系数 | 冻胀后安全系数 | 差值   | 降幅/%   |
|------|---------|---------|------|--------|
| 拱顶   | 7.14    | 0.45    | 6.69 | 93.70  |
| 拱肩   | 6.03    | 0.57    | 5.46 | 90.55  |
| 拱脚   | 3.49    | 1.67    | 1.82 | 52.15  |
| 墙脚   | 2.94    | 3.48    | 0.54 | -18.37 |
| 仰拱   | 5.67    | 0.40    | 5.27 | 92.95  |

力弯矩、安全性影响不同,其中拱顶、拱肩和仰拱安全程度变化最大,要尤其注意该区域冻胀防护。

### 5 结论

提出半椭圆形积水空间局部冻胀模型,研究局部积水冻胀力和围岩级别、衬砌刚度、积水深度、冻胀率的关系,并进一步分析冻胀位置对衬砌结构应力、内力、安全系数的影响。得出以下主要结论。

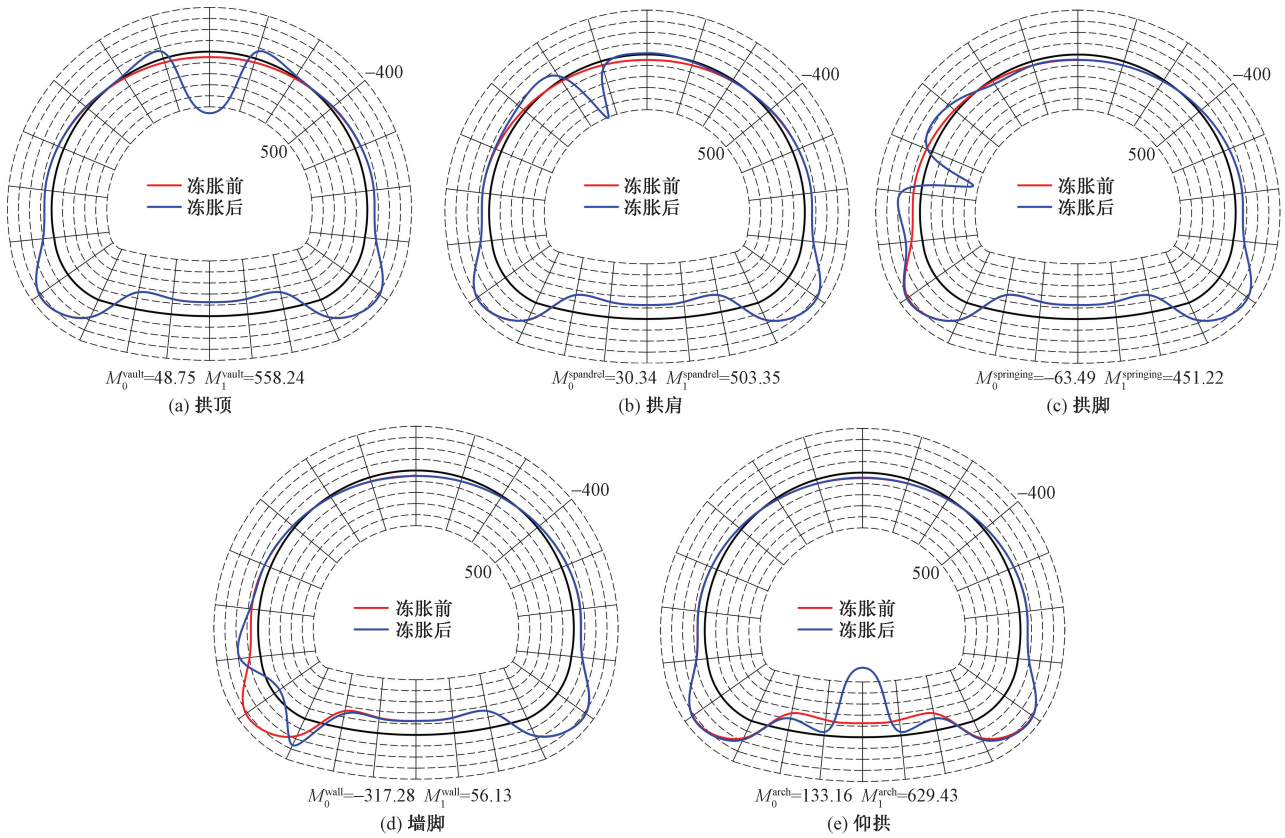
(1)将冻胀过程中围岩-冰体-衬砌间相互作用简化为串联弹簧,假设隧道施工超挖空间为半椭圆形积水空间,提出了半椭圆形积水空间局部冻胀力解析解。数值模拟结果验证了提出的冻胀模型的有效性。

(2)局部积水冻胀力与围岩级别负相关,且其减小速率随围岩级别增大而加快。冻胀力与衬砌刚性、积水深度、冻胀率均正相关,且冻胀力随各因素增加约线性增加。各因素对冻胀力的影响程度为:积水深度 > 衬砌刚度 > 围岩级别 > 冻胀率。

(3)寒区隧道局部积水冻胀后主要在积水空洞和衬砌结构接触区域产生冻胀影响,加剧隧道向内收敛变形,在围岩侧产生压应力,临空侧产生拉应力。受到曲率影响,当积水空洞位于仰拱处时,结构主应力最大,位于拱脚处时,结构主应力最小。

(4)衬砌结构受到局部冻胀作用,一定区域内弯矩、轴力出现突变,表现为临空侧受拉区衬砌的弯矩增大、轴力减小,围岩侧受拉区衬砌的弯矩减小,轴力减小,其余区域内力变化不大。

(5)衬砌不同部位的抗压刚度差异导致局部冻胀对结构安全产生不同的影响。当冻胀发生在拱顶、拱肩、拱脚和仰拱部位时,对结构安全不利,而在墙脚时,冻胀作用对结构安全有利。冻胀位置对结构安全的影响程度为:拱顶 > 仰拱 > 拱肩 > 拱脚 > 墙脚。



$M_0$ 、 $M_1$  分别为冻胀前后的弯矩,单位:kN·m;vault 为拱顶;spandrel 为拱肩;springing 为拱脚;wall 为墙脚;arch 为仰拱

图 15 衬砌结构弯矩分布

Fig. 15 Bending moment distributions of lining structure

参 考 文 献

[1] 王道远,袁金秀,朱永全,等. 浅埋隧道局部存水冻胀作用机制与安全性评价[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(3): 40-50.  
Wang Daoyuan, Yuan Jinxiu, Zhu Yongquan, et al. Safety evaluation and action mechanism of frost heave with local water storage in shallow tunnel[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(3): 40-50.

[2] 刘德军,仲飞,黄宏伟,等. 运营隧道衬砌病害诊治的现状与发展[J]. 中国公路学报, 2021, 34(11): 178-199.  
Liu Dejun, Zhong Fei, Huang Hongwei, et al. Present status and development trend of diagnosis and treatment of tunnel lining diseases[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(11): 178-199.

[3] 田四明,王伟,刘建友,等. 寒区铁路隧道防寒抗冻关键技术研究及展望[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(1): 21-34.  
Tian Siming, Wang Wei, Liu Jianyou, et al. Research on and prospect of key technologies of frost-proofing and anti-freezing for railway tunnels in cold regions[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(1): 21-34.

[4] 赵立财,殷珂,王瑞,等. 斜风作用下季冻区隧道冻胀力分布规律及结构安全性评价[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(16): 7087-7095.  
Zhao Licai, Yin Ke, Wang Rui, et al. Distribution law of frost heave force and structural safety evaluation of tunnel in seasonally

frozen area under oblique wind[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(16): 7087-7095.

[5] 罗燕平,马超,黎忠灏,等. 季冻区隧道冻胀力影响因素交互性及敏感性正交试验分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(27): 12183-12191.  
Luo Yanping, Ma Chao, Li Zhonghao, et al. Orthogonal test analysis on interaction and sensitivity of influencing factors of tunnel frost heaving force in seasonal freezing area[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(27): 12183-12191.

[6] 朱杰兵,祝永锁,汪斌,等. 岩石冻胀力研究综述[J]. 人民长江, 2023, 54(3): 173-178.  
Zhu Jiebing, Zhu Yongsuo, Wang Bin, et al. Review on research of rock frost heaving force[J]. Yangtze River, 2023, 54(3): 173-178.

[7] 夏才初,吕志涛,王岳嵩. 寒区隧道冻胀力计算方法研究进展与思考[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 35-43.  
Xia Caichu, Lü Zhitao, Wang Yuesong. Advance and review on frost heaving force calculation methods in cold region tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(5): 35-43.

[8] 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(3): 1-6.  
Zhang Zhidao, Wang Lian. Discussion on the design of tunnels in high elevation and bitter cold region[J]. Modern Tunnelling Technology, 2004(3): 1-6.

[9] 张玉伟,谢永利,李又云,等. 基于温度场时空分布特征的寒区隧道冻胀模型[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1625-1632.

- Zhang Yuwei, Xie Yongli, Li Youyun, et al. A frost heave model based on space-time distribution of temperature field in cold region tunnels[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(5): 1625-1632.
- [10] 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 Jianyu, Hu Yuanfang. A discussion on frost heave force acting on tunnel lining[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2004(1): 87-93.
- [11] 范磊, 曾艳华, 何川, 等. 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(1): 44-49.
- Fan Lei, Zeng Yanhua, He Chuan, et al. Magnitude and distribution of frost heave force for cold region strong rock tunnels[J]. *China Railway Science*, 2007(1): 44-49.
- [12] 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, 23(1): 80-85, 110.
- Deng Gang, Wang Jianyu, Zheng Jinlong. Model of constraint on deformation due to frost heave for tunnels in cold region[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010, 23(1): 80-85, 110.
- [13] 谭书平, 卢锋. 高海拔寒区隧道衬砌背后积水冻胀分析[J]. *公路工程*, 2024, 49(2): 46-53.
- Tan Shuping, Lu Feng. Frost heaving analysis of water behind tunnel lining in high altitude cold region[J]. *Highway Engineering*, 2024, 49(2): 46-53.
- [14] 马云峰, 徐林生. 局部存水空间对寒区隧道衬砌劣损特性的影响分析[J]. *西安理工大学学报*, 2021, 37(1): 129-135.
- Ma Yunfeng, Xu Linsheng. Analysis of the influence of local water storage space on the inferior damage characteristics of tunnel lining in cold region[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2021, 37(1): 129-135.
- [15] Gao G Y, Chen Q S, Zhang Q S, et al. Analytical elasto-plastic solution for stress and plastic zone of surrounding rock in cold region tunnels[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 72: 50-57.
- [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): 395-402.
- 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): 395-402.
- [17] 高焱, 朱永全, 耿纪莹, 等. 寒区隧道衬砌结构冻胀破坏规律研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(17): 125-131.
- Gao Yan, Zhu Yongquan, Geng Jiying, et al. Study on the law of frost-heaving damage of tunnel lining structure in cold regions[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(17): 125-131.
- [18] 方剑, 周雪云, 盛吉崇, 等. 基于三维激光点云数据隧道超欠挖分析及应用[J]. *科学技术创新*, 2022(11): 145-148.
- Fang Jian, Zhou Xueyun, Sheng Jichong, et al. Analysis and application of over and under excavation of tunnel based on 3D laser point cloud data[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2022(11): 145-148.
- [19] 谭书平, 卢锋. 高海拔寒区隧道衬砌背后积水冻胀分析[J]. *公路工程*, 2024, 49(2): 46-53.
- Tan Shuping, Lu Feng. Frost heaving analysis of water behind tunnel lining in high altitude cold region[J]. *Highway Engineering*, 2024, 49(2): 46-53.