

寒区隧道衬背局部积水冻胀对衬砌力学性能影响的数值模拟研究

秦超^{1*}, 蒋佳¹, 陈雨薇¹, 高鑫瑞², 向航², 马家利¹

¹重庆科技大学土木与水利工程学院, 重庆

²重庆科技大学管理学院, 重庆

收稿日期: 2026年8月11日; 录用日期: 2026年9月2日; 发布日期: 2026年9月15日

摘要

针对寒区偏压浅埋隧道衬背局部积水诱发的非对称冻胀病害, 本文依托索同坡隧道开展了热-力顺序耦合数值模拟。研究引入二维Cohesive单元等效表征局部积水区, 提出随温度动态衰减的正则化热膨胀系数以精细刻画水-冰相变膨胀行为, 系统对比了10次冻融循环下无积水、拱顶及边墙积水的力学演化规律。结果表明: 局部冻胀对衬砌具有显著的“非对称杠杆破坏效应”; 边墙积水对结构的劣化威胁远超拱顶, 其单侧膨胀不仅致使积水侧横向鼓出变形, 更诱发结构整体偏移, 导致对侧及拱顶产生高达1.62 MPa的拉应力集中。多次循环加载下, 衬砌残余变形与拉应力峰值呈“先累加、后稳定”的演化特征, 但高幅值周期性偏压仍使边墙面临长期疲劳损伤风险。研究成果可为类似隧道的局部防排水与抗冻设计提供理论依据。

关键词

寒区隧道, 局部积水, 非对称冻胀, 热-力耦合, Cohesive单元

Numerical Simulation of the Mechanical Effects of Localized Frost Heave behind Linings in Cold-Region Tunnels

Chao Qin^{1*}, Jia Jiang¹, Yuwei Chen¹, Xinrui Gao², Hang Xiang², Jiali Ma¹

¹School of Civil and Hydraulic Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

²School of Management, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: August 11, 2026; accepted: September 2, 2026; published: September 15, 2026

*通讯作者。

文章引用: 秦超, 蒋佳, 陈雨薇, 高鑫瑞, 向航, 马家利. 寒区隧道衬背局部积水冻胀对衬砌力学性能影响的数值模拟研究[J]. 土木工程, 2026, 15(9): 67-76. DOI: 10.12677/hjce.2026.159224

Abstract

Asymmetric frost heave caused by localized water accumulation behind tunnel linings is a critical issue for shallow-buried, unsymmetrically loaded tunnels in cold regions. To investigate this, sequential thermo-mechanical coupled simulations were conducted using the Suotongpo Tunnel as a case study. A 2D cohesive element was introduced to equivalently model the localized water accumulation zone. Additionally, a temperature-dependent regularized thermal expansion coefficient was proposed to accurately capture the volumetric expansion during the water-ice phase transition. The structural responses over 10 freeze-thaw cycles were systematically evaluated under three conditions: no water accumulation, vault accumulation, and sidewall accumulation. Results indicate that localized frost heave exerts a pronounced “asymmetric leverage failure effect” on the tunnel lining. Specifically, water accumulation at the sidewall poses a significantly greater threat of structural degradation than at the vault. Unilateral expansion at the sidewall not only causes lateral bulging on the affected side but also drives overall structural deflection, resulting in tensile stress concentrations of up to 1.62 MPa on the contralateral side and vault. Over multiple freeze-thaw cycles, the residual deformation and peak tensile stresses initially accumulate before reaching a stabilized state. Nevertheless, the high-amplitude periodic unsymmetrical loading still exposes the sidewall to long-term fatigue risks. These findings offer a theoretical reference for targeted waterproofing, drainage, and frost-resistance designs in similar tunnels.

Keywords

Cold-Region Tunnel, Localized Water Accumulation, Asymmetric Frost Heave, Thermo-Mechanical Coupling, Cohesive Element

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国交通网络不断向西部高原及高海拔山区延伸，寒区隧道工程建设日益增多。地处严寒地带的隧道在冬季运营中，常因围岩内地下水相变结冰产生巨大冻胀力，进而诱发衬砌开裂、渗漏及掉块等严重结构病害[1][2]。特别是对于具备“浅埋、偏压”特征的高原过渡地带隧道，其复杂的不对称初始地应力状态与周期性冻融作用的叠加，极大增加了结构的致灾风险与工程维护难度。

针对寒区隧道冻胀力学机理，国内外学者已取得丰硕成果。在理论解析与数值仿真方面，现有研究多聚焦于围岩整体冻结或基于均质冻胀圈假设的宏观受力模式[3]。然而，大量工程现场调研表明，由于防水层破损或混凝土浇筑缺陷，衬背局部脱空并形成积水空间更为常见。这种局部积水在冻结时产生的“非对称冻胀偏压”，往往是诱发隧道衬砌纵向主裂缝的直接元凶[4][5]。近年来，部分学者开始关注局部冻胀问题，如推导半椭圆形局部积水空间的冻胀力解析解[6]，以及分析衬背空隙积水冻胀的力学行为等。但针对偏压浅埋地形下，局部不规则积水在多次循环冻融过程中对衬砌结构产生空间非均匀劣化的精细化模拟研究仍显薄弱，现有常规实体单元难以稳定且精确地刻画局部的相变挤压过程[7]。

基于此，本文以大河家(甘青界)至清水公路的索同坡隧道为工程依托，开展寒区浅埋偏压隧道局部积水冻胀的热-力顺序耦合数值模拟。研究创新性地引入二维粘聚力(Cohesive)单元，通过建立随温度动态衰减的正则化等效热膨胀系数，精细表征衬背局部积水的物理相变膨胀效应。本文系统对比了无积水、

拱顶积水及边墙积水三种工况在极寒降温及多次冻融循环下的温度场、主应力场与位移场演化特征，量化揭示了局部积水位置对衬砌力学性能的非对称劣化机理，以期为类似寒区隧道抗冻结构优化与防排水设计提供理论依据与技术支持。

2. 工程依托与数值计算模型

2.1. 工程概况

本项目以青海省重大交通基础设施建设项目——大河家(甘青界)至清水公路工程 DQ-SG2 标段索同坡隧道为研究背景。该隧道地处青藏高原向黄土高原过渡的严寒地带，具有典型的“高寒、浅埋、偏压”特征。工程监测数据表明，隧道所在区域每年 11 月上旬起进入冰冻期，至次年 4 月底方才解冻。这种极端的环境气候条件极易诱发衬背脱空积水及后续的非均匀冻胀病害[1][2]。因此，针对该工程开展局部积水冻胀模拟，对评估类似高寒地区公路隧道的防冻害性能及长期运营安全具有直接的工程指导意义[4]。

2.2. 热 - 力顺序耦合计算理论

寒区隧道衬砌的损伤演化受到水 - 热 - 力多场耦合作用的深刻影响[8]。本项目采用顺序热 - 力耦合分析方法：首先基于非稳态热传导理论计算隧道及其周边围岩的温度场时空演化规律，随后将获取的节点温度历史序列作为预定义场导入静力学模型中，通过相变介质的热膨胀响应实现对非均匀冻胀力的精确施加。

瞬态热传导计算的控制方程为[3][9]：

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

其中： ρ 为介质密度， C 为比热容， k 为导热系数， T 为温度， t 为时间。在后续的应力场分析中，热应变由温度梯度及材料的线膨胀系数共同诱发，结合固体力学平衡方程与材料本构模型，即可迭代求解衬砌结构内部的应力场与位移场分布。

2.3. 几何模型建立与材料属性

根据索同坡隧道的设计图纸与实际勘察资料，提取典型剖面建立二维平面应变热 - 力耦合数值模型。为消除边界效应对计算精度的影响，模型整体宽度设定为 27 m，左侧高度为 22 m，右侧高度为 24 m，隧道开挖跨度为 11.5 m，并针对该段浅埋偏压的地形地貌进行了非对称地表轮廓的真实还原。

模型计算的边界条件设定如图 1 所示。

热学边界条件(图 1(a))：地表与隧道内壁直接暴露于冷空气中，设为第一类温度边界条件；模型左右两侧及底部距离温度扰动区较远，热流交换趋于零，近似设为绝热边界。

力学边界条件(图 1(b))：模型左右两侧施加水平法向位移约束，底部施加完全固定约束，限制其水平方向与竖直方向的位移；模型顶部地表为自由面。

在模型网格划分阶段，为兼顾计算效率与应力集中区的求解精度，对衬砌结构及局部积水接触区实施了局部网格加密，并进行了网格独立性验证。材料热力学属性依据工程地质资料与规范标准设定，其中衬砌混凝土采用 C30 标准物理力学参数，具体数值见表 1。

2.4. 局部积水冻胀精细化模拟方法

针对衬背脱空引发的不规则局部积水，传统整体冻胀模型难以准确刻画其非均匀受力特征[6]。本项目创新性地引入二维粘聚力单元(Cohesive Elements)进行积水区的物理等效表征。该方法在积水预留区域

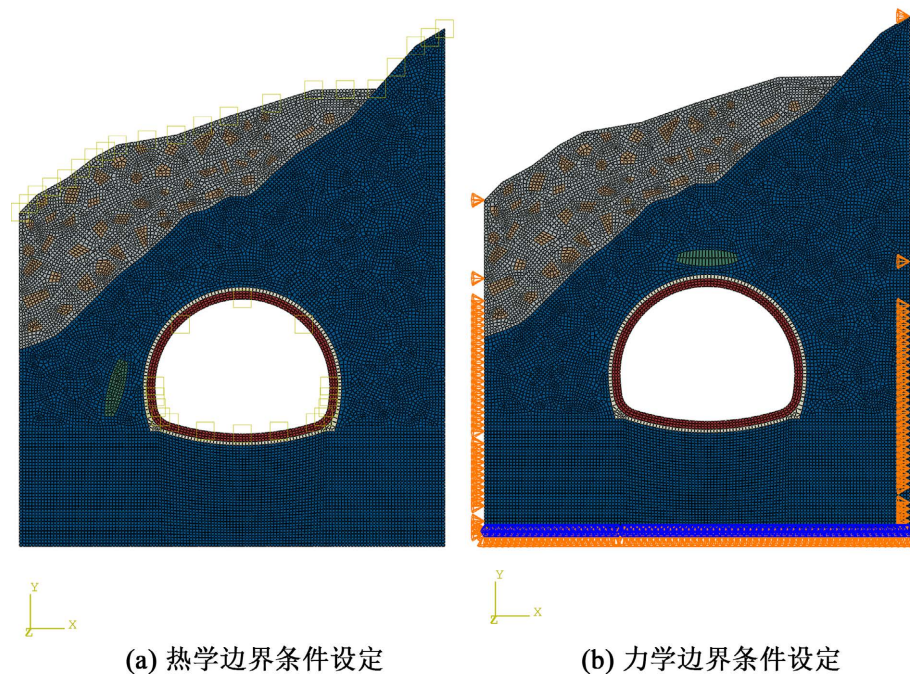


Figure 1. Thermal-mechanical coupled numerical model and boundary conditions for the shallow-buried bias section of Sutongpo tunnel

图 1. 索同坡隧道浅埋偏压段热 - 力耦合数值模型及边界条件设定

Table 1. Physical and mechanical properties of primary materials for the tunnel

表 1. 隧道工程主要材料物理力学参数表

材料名称	密度(kg/m ³)	弹性模量(GPa)	泊松比	导热系数(W/m·K)	比热容(J/kg·K)
围岩	2100	2.5	0.35	1.8	920
衬砌 C30	2500	30.0	0.2	2.5	960
局部积水	1000	-	-	2.2	2100

采用高导热属性的 Cohesive 单元，以模拟相变界面的传热与受力演化。

为克服相变瞬态膨胀带来的有限元网格极度畸变与非线性收敛困难，本文采用温度相关的等效热膨胀系数法对水冰相变体积膨胀进行平滑正则化处理[4]。设定积水在 0℃至-2℃的区间内逐步完成相变并释放冻胀应变梯度。

$$\alpha(T) = \begin{cases} 0, & T > 0^{\circ}\text{C} \\ \alpha_{\max} \cdot \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi(T+1)}{2}\right) \right], & -2^{\circ}\text{C} \leq T \leq 0^{\circ}\text{C} \\ \alpha_{\max}, & T < -2^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

式中， $\alpha_{\max}$ 为完全冻结状态下对应的最大等效线性膨胀系数[4]。通过设定动态衰减的割线膨胀系数，确保当结构最低温度逼近索同坡冬季极限气温-15℃时，宏观等效线应变被稳定限制在 3%的物理合理阈值内。该技术策略既保障了水 - 冰相变膨胀机理的物理真实性，又显著改善了多次冻融循环加载下的计算收敛性[5]。

3. 寒区隧道温度场演化特征

3.1. 极端降温工况下的围岩与衬砌温度场分布

寒区隧道冻害的本质是由外部周期性低温引发的非稳定热传导过程与冰水相变共同作用的结果[7]。在顺序热-力耦合分析的第一阶段,数值模型计算了索同坡隧道在冬季极端降温气候下的温度场时空演化。为真实反映该隧道特定的工程边界条件,模型在瞬态计算中将气象及通风边界的极限最低温度严格控制在逼近 -15°C ,以此驱动冷量向隧道深部的传递,如图2所示。

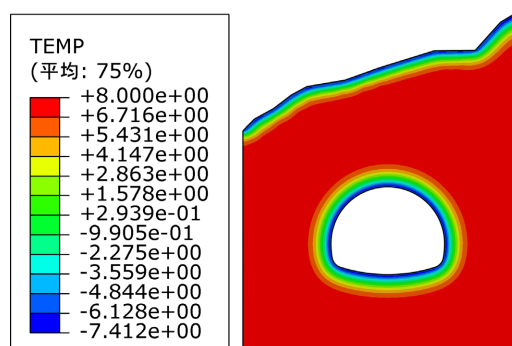


Figure 2. Contour plot of the overall temperature field in the tunnel under extreme cooling conditions
图 2. 隧道极端降温工况整体温度场分布云图

计算结果表明,随着冷空气的持续侵入,隧道围岩与衬砌内部的温度场呈现出显著的非均匀梯度分布。冷量主要由隧道内表面及上方地表边界同时向深部围岩传递。受不对称地形影响,左侧浅埋段受地表冷源与隧道内冷源的“双向叠加”作用更为强烈,导致该侧围岩的整体降温幅度显著大于右侧深埋段。同时,由于C30混凝土衬砌的导热系数大于周边V级围岩,衬砌环成为冷量传递的优势通道,导致衬背预留的局部积水区域(拱顶与边墙)响应外部温降的速度更快,这为后续局部水冰相变的触发提供了直接的热力学前置条件[10]。

3.2. 冻结锋面演化与积水相变触发机制

冻结锋面(0°C 等温线)的最大侵入深度是界定隧道冻害设防范围及判定积水是否发生相变的核心物理指标[11]。提取降温至极寒状态(逼近 -15°C)下的节点温度数据可知, 0°C 等温线已完全穿透二次衬砌与初期支护,深入衬背围岩内部,如图3所示。

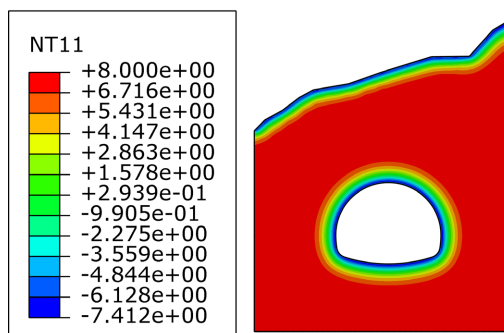


Figure 3. Schematic diagram of the maximum penetration depth of the freezing front (0°C isotherm) and localized phase change triggering in the water accumulation zone

图 3. 冻结锋面(0°C 等温线)最大侵入深度及积水区局部相变触发示意图

本研究预设的衬背局部积水区(拱顶与左侧边墙)均处于冻结锋面的最大侵入范围之内。当局部环境温度跌破 0°C 并向 -2°C 逼近时,预设的 Cohesive 单元内部即触发相变机制。此时,液态水转化为固态冰,激活预定义的等效相变膨胀率。随着时间步长推移且温度持续降低至 -15°C ,积水区的热学响应完全激发,热应变梯度平滑且严格地过渡至 3% 的物理极限。这一准确的温度场演化不仅证实了局部积水冻胀现象发生的必然性,更为后续的非对称力学突变与结构劣化提供了精确的热学触发前置条件。

4. 局部积水冻胀下的衬砌力学响应

4.1. 无积水基准工况受力特征

作为对比基准,首先提取了无积水工况下索同坡隧道的力学响应。在仅考虑自重地应力与环境降温的条件下,隧道整体变形以向内的均匀收缩为主,衬砌内部应力分布相对均匀,如图 4 所示。由于浅埋偏压地形的存在,左侧围岩压力略大于右侧,但整体最大主应力(受拉)远低于混凝土的抗拉极限,结构处于安全弹性工作状态。此基准工况排除了单一温度应力导致结构破坏的可能,确立了衬背积水相变是诱发严重冻害的主控因素[4]。

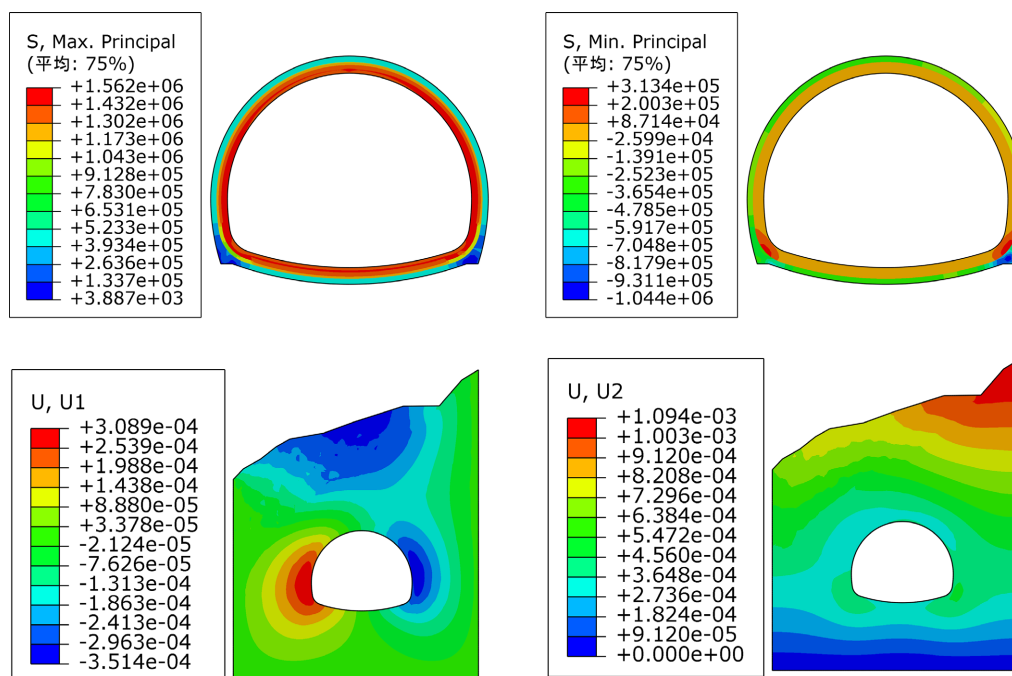


Figure 4. Contour plots of stress and displacement under conditions without water accumulation

图 4. 无积水工况下的应力与位移云图

4.2. 局部冻胀位移场特征

引入 Cohesive 单元计算局部积水冻胀后,隧道的变形模式发生显著改变,如图 5 所示。位移云图及沿衬砌内表面提取的环向位移曲线表明,冻胀力导致结构产生了强烈的局部向内侵入变形。

在边墙积水工况下,水-冰相变引发的体积膨胀对左侧边墙施加了巨大的横向挤压,该侧衬砌向隧道净空内产生明显的鼓出变形。受结构连续性影响,原本对称的收缩变形被打破,呈现出显著的非对称空间分布特征[12]。这种毫米级的局部非均匀位移虽不至于立即切断隧道净空,但其诱发的次生偏压弯矩是导致衬砌劣化的关键物理机制。

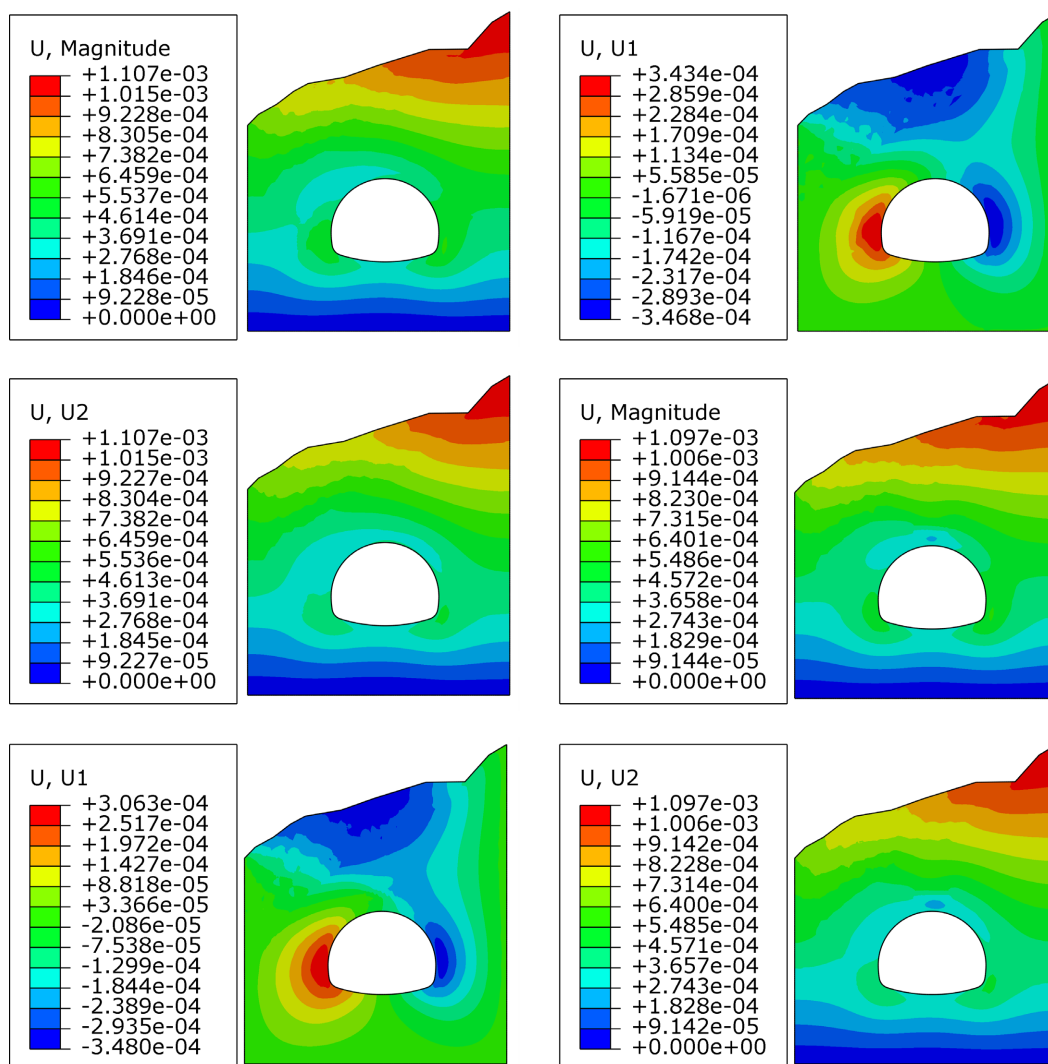


Figure 5. Displacement contour plots under conditions of sidewall water accumulation (left) and crown water accumulation (right)

图 5. 边墙积水(左)与拱顶积水(右)工况下的位移云图

4.3. 局部非均匀冻胀应力场与损伤区甄别

应力场演化最直观地反映了局部冻胀的破坏力。提取极寒状态(-15°C)下不同工况的 Mises 应力与主应力分布进行量化对比, 如图 6 所示。

数值结果揭示了局部积水冻胀典型的“非对称杠杆破坏效应”。在左侧边墙积水工况下, 结冰膨胀区正对的衬砌外表面承受了极大的局部压应力, 最小主应力极值达到 -1.79 MPa 。由于该数值远低于 C30 混凝土的抗压强度, 该区域不易发生压溃破坏。

受单侧冻胀推挤, 隧道结构整体向右侧产生弯曲趋势, 导致左侧边墙内表面、拱顶外表面及右侧拱腰内表面出现了显著的拉应力集中[13]。其中, 最大主应力极值逼近 1.62 MPa 。该数值已逼近甚至局部超过普通混凝土的抗拉强度标准值, 表明在此极端降温工况下, 边墙局部积水极易诱发贯穿性纵向裂缝。相比之下, 拱顶积水虽同样产生拉应力, 但由于其受压方向与重力轴线共面, 未引发剧烈的偏压扭转, 其抗拉劣化威胁次于边墙积水。

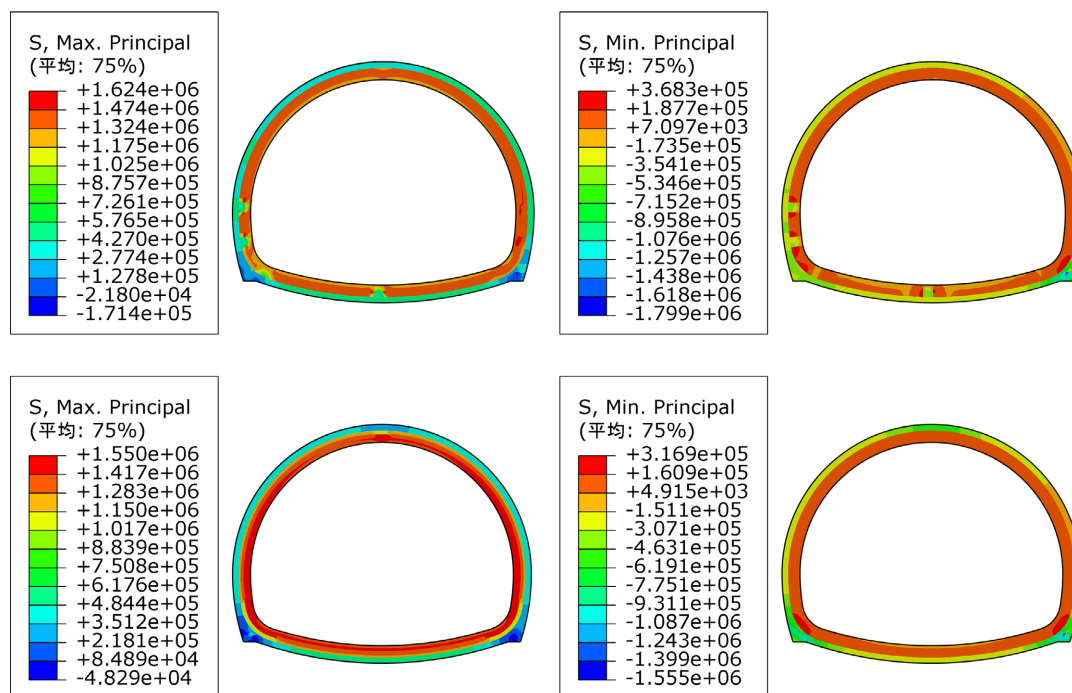


Figure 6. Contour plots of maximum and minimum principal stresses under conditions of sidewall water accumulation (left) and crown water accumulation (right)

图 6. 边墙积水(左)、拱顶积水(右)工况下的最大主应力与最小主应力分布云图

5. 冻融循环下的累积劣化规律

5.1. 关键节点时程响应特征

寒区隧道衬砌的损伤并非单次冻胀所致,而是长期周期性冻融循环作用下的累积过程[14]。提取左侧边墙受拉最恶劣节点(最大主应力极值点)在 10 次完整冻融循环下的时程数据进行分析。随着环境温度的周期性波动,衬砌关键节点的拉应力与径向位移呈现出显著的“波峰-波谷”交替演化特征。在每次降温冻结期,水-冰相变膨胀驱动主应力迅速攀升至波峰;而在融化期,冻胀挤压力消散,结构弹性变形恢复,应力回落至波谷。

5.2. 残余变形与损伤稳定态评估

经过连续 10 次冻融循环模拟,力学响应曲线的演化趋势揭示了结构的长期服役劣化规律。计算结果表明,在初始的第 1 至第 3 次循环中,每次融化期结束后,结构均会产生微小的不可逆残余变形,且波峰拉应力呈逐级递增趋势。然而,从第 4 次循环开始,每次冻结期的最大拉应力逐渐趋于稳定(峰值维持在 1.62 MPa 左右),融化后的残余位移增量也显著收敛。这表明在设定的极端温降与局部积水约束条件下,衬砌结构在经历初期应力重分布后,逐渐进入了动态的稳定状态。虽然极值应力未超过 C30 混凝土的极限抗拉强度,但长期处于高幅值应力的循环加载下,偏压侧边墙依然是诱发疲劳开裂的高危区域[15]。

5.3. 研究局限性与展望

尽管本文系统揭示了局部积水冻胀对寒区浅埋偏压隧道衬砌的非对称劣化机理,但本研究仍存在一定的局限性。首先,数值计算采用了二维平面应变模型,将其简化为平面问题进行求解,未能全面捕捉衬砌纵向的空间非均匀受力特征及三维变形效应。其次,研究预设了固定的局部积水工况,未考虑地下

水渗流、冻结、融化的动态演化过程,以及水文周期性补给对冻胀力的实时影响[8] [10]。此外,当前的力学模型尚未引入混凝土材料在多次冻融循环作用下的微观损伤与劣化本构关系,这可能会在一定程度上低估偏压结构长期的疲劳致灾风险[14]。基于上述不足,未来研究将致力于建立三维实体结构模型,并开展考虑水-热-力-损伤(THMD)全耦合的精细化模拟分析[15],以期更真实地反映寒区隧道结构的长期服役动态,进一步指导工程的抗冻防排水设计实践。

6. 结论

本文依托索同坡隧道工程,采用引入温度相关膨胀系数的 Cohesive 单元,对寒区浅埋偏压隧道衬背局部积水冻胀的力学响应及劣化规律进行了热-力耦合数值模拟,主要得出以下结论:

(1) 提出了一种基于 Cohesive 单元的局部不规则积水冻胀精细化模拟方法。通过正则化等效热膨胀系数,使局部积水区的相变膨胀率在极寒工况(-15°C)下稳定维持在 3% 的物理极限,有效克服了有限元网格严重畸变问题,实现了冻胀力的平滑演化与稳定传递。

(2) 揭示了局部非均匀冻胀的“非对称杠杆破坏效应”。相较于拱顶积水,边墙局部积水对偏压隧道衬砌抗拉性能的危害更为致命。单侧水冰相变膨胀不仅使积水侧承受极大压应力,更诱发结构整体偏移,导致对侧及拱顶外围产生高达 1.62 MPa 的拉应力集中,极易诱发结构纵向开裂。

(3) 明确了多次冻融循环作用下的累积劣化特征。在 10 次冻融循环加载下,衬砌结构关键节点的残余变形与拉应力峰值在初期逐级累加,随后逐渐收敛并趋于动态稳定。但高幅值的周期性应力仍对偏压侧边墙构成长期疲劳损伤威胁。

(4) 针对高寒浅埋偏压隧道提出了明确的工程防治建议。防冻害设计不应仅局限于整体保温,必须高度重视边墙局部的防排水盲区。建议在偏压侧边墙强化纵向盲沟与环向透水管的设计与维护,严防衬背脱空积水,从根源上切断局部相变冻胀的触发条件。

基金项目

本研究得到重庆科技大学研究生创新计划项目资助,批准号 YKJCX2520744。

参考文献

- [1] 杨峻熙,温智,周亮,等.寒区隧道冻害机理与防控:研究评述与展望[J].铁道建筑,2025,65(5):13-21.
- [2] 马伟斌.我国寒区铁路隧道冻害机理及防治技术综述与展望[J].铁道学报,2025,47(6):196-210.
- [3] 曹善鹏,夏才初,周舒威,等.考虑寒区隧道围岩冻结温度渐变的冻胀力解析解[J].同济大学学报(自然科学版),2024,52(3):360-369.
- [4] 许鹏,杨瑞松,刘平飞,等.寒区隧道衬背脱空积水冻胀对衬砌结构的影响及预测方法[J].长安大学学报(自然科学版),2025,45(4):107-117.
- [5] Ding, W., Wu, Y., Xu, P. and Hu, K. (2024) Research on the Mechanism of Frost Heaves Caused by Void Water Accumulation behind the Lining of High-Speed Railway Tunnels in Cold Regions. *Applied Sciences*, **14**, Article 750. <https://doi.org/10.3390/app14020750>
- [6] 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.
- [7] 潘振华,包卫星,郭强,等.高海拔寒区隧道水热力现场试验及数值模拟[J].地下空间与工程学报,2025,21(2):637-647.
- [8] 孙克国,贾敬龙,封坤,等.寒区隧道衬砌构件水-热-力耦合加载模型试验设计[J].实验技术与管理,2025,42(12):10-18.
- [9] Liu, N., Liang, S., Wang, S. and Song, Z. (2024) THM Model of Rock Tunnels in Cold Regions and Numerical Simulation. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 3465. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53418-0>

-
- [10] 杨天娇, 王述红, 张泽, 等. 寒区隧道围岩水热力耦合数值分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(8): 1178-1184.
 - [11] Xiao, H., Tian, S., Tan, X., Wang, W., Tan, X. and Chen, W. (2025) Generalized Prediction Model of Temperature Field for Tunnels in Cold Regions Based on Numerical Simulation and Deep Learning. *Case Studies in Thermal Engineering*, 75, Article 107173. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.107173>
 - [12] Du, J., An, X., Sun, P., Lyu, X. and Feng, Q. (2024) Mechanical Analysis of Frost Heaving of Weakly Cemented Soft Rock Tunnels in Cold Regions. *Computers and Geotechnics*, 171, Article 106354. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106354>
 - [13] 蔡东, 罗龙, 朱开成, 等. 冻融循环下寒区隧道衬砌结构性能劣化研究[J]. 铁道标准设计, 2026, 70(4): 156-164+195.
 - [14] Zhang, J.M. and Guo, L. (2022) Peridynamics Simulation of Shotcrete Lining Damage Characteristics under Freeze-Thaw Cycles in Cold Region Tunnels. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 141, 17-35.
 - [15] Chen, W. and Xiang, T. (2024) Frost Heaving and Crack Initiation Characteristics of Tunnel Rock Mass in Cold Regions under Low-Temperature Degradation. *Journal of Mountain Science*, 21, 2844-2854. <https://doi.org/10.1007/s11629-024-8699-4>