

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.01.014

寒区引水隧洞冻融变形特性及防治措施

解豪^{1,3}, 刘乃飞^{2,3,4}, 万志鹏^{2,4}, 王宇航^{2,4}

- (1. 陕西省水利电力勘测设计研究院(集团)有限公司 水电工程分院, 陕西 西安 710001;
2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 3. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048;
4. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 寒区引水隧洞冻融灾害严重威胁工程安全与输水效率, 探明致灾机理并提出针对性防治措施具有重要意义。文章以甘肃某输水隧洞为依托, 采用数值模拟方法研究无水、有压、无压三种类型隧洞的温度场与变形特征, 并揭示冻融致灾机理并提出针对性防治措施。结果表明: 三类隧洞最大变形均出现于12月, 位置与量值存在差异; 无水隧洞冻融深度约141 cm, 有压隧洞约96 cm, 无压隧洞水位以上与无水隧洞接近, 水位以下与有压隧洞相当。冻害程度上无水隧洞最大, 无压隧洞次之, 有压隧洞最小。防治方面, 无水及无压隧洞可在无水洞壁设置保温层, 有压隧洞无需设置保温层但需加固衬砌及围岩以应对高水压。

关键词: 寒区; 引水隧洞; 冻融变形; 致灾机理; 防治措施

中图分类号: TV672

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)01-0119-10

Freeze-thaw Deformation of Diversion Tunnel in Cold Area and Its Prevention Measures

XIE Hao^{1,3}, LIU Naifei^{2,3,4}, WAN Zhipeng^{2,4}, WANG Yuhang^{2,4}

(1. Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design(Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710001, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

3. School of Water Resources and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

4. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: Freeze-thaw disasters in water diversion tunnels in cold regions seriously threaten engineering safety and water conveyance efficiency. It is of great significance to clarify the disaster-causing mechanism and propose targeted prevention and control measures. Based on a water diversion tunnel in Gansu Province, this paper adopts the numerical simulation method to study the temperature fields and deformation characteristics of three types of tunnels, namely dry, pressure and free-flow tunnels, the freeze-thaw disaster-causing mechanism is revealed and corresponding prevention measures are proposed. The results show that the maximum deformation of all three types of tunnels occurs in December, with differences in location and magnitude. The freeze-thaw depth of the dry tunnel is approximately 141 cm, and that of the pressure tunnel is about 96 cm. For the free-flow tunnel, the freeze-thaw depth above the water level is close to that of the dry tunnel, while it is equivalent to that of the pressure tunnel below the water level. The degree of frost damage is the highest in the dry tunnel, followed by the free-flow tunnel, and the lowest in the pressure tunnel. For prevention and control, insulation layers can be set on the dry tunnel walls of dry and free-flow tunnels. Pressure tunnels do not need to be equipped with insulation layers, but the lining and surrounding rock need to be reinforced to withstand high water pressure.

Keywords: cold area; water diversion tunnel; freeze-thaw deformation; disaster-causing mechanism; prevention and control measures

收稿日期: 2025-10-08

修稿日期: 2025-11-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52278370); 西北旱区生态水利国家重点实验室开放基金(2022KFKT-8)

作者简介: 解豪(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水利水电工程方面的设计研究工作。E-mail: 369935096@qq.com

通讯作者: 刘乃飞(1985—), 男, 博士, 教授, 主要从事低温多场耦合和隧道工程方面的研究工作。E-mail: liunaifei@xauat.edu.cn

我国水资源总量丰富,但人均和地均拥有量低。南方水资源丰富,而西北方水资源非常稀少,在空间上分布及其不平衡,严重制约了我国经济、社会快速发展。为缓解西部地区严重缺水的现状,我国先后在西部地区投资建设了大批的引水、调水工程,规划建设中的南水北调西线工程更是投资巨大^[1]。然而,由于我国西北位于高寒地带,引水隧道洞口一定范围内的围岩会遭受冻融循环的影响,致使作为输水工程咽喉的引水隧洞在建设和运营期冻融灾害频发,对结构安全性与供水效率产生严重影响^[2]。因此,研究不同工况条件下寒区引水隧洞的冻融损伤特性及致灾机理,提出针对性的改善隧洞冻融损伤方法对于寒区引水工程建设和运营具有重大意义。

寒区隧洞(道)是水热力三场耦合作用(THM)的结果,众多学者基于不同的物理机制建立了相应的耦合方程。Liu 等^[3]运用经典渗流力学和传热学原理,推导了寒区隧道围岩的 THM 耦合控制方程; Tan 和 Chen 等^[4-5]考虑体积应变以及温度梯度、渗透压力的变化对围岩应力场的影响,建立了通风条件下寒区隧道 THM 耦合模型; Kang 等^[6]基于水-冰相变理论和能量守恒原理建立了冻结条件下裂隙岩体的 THM 耦合控制方程;瞿栋森等^[7]以实际工程资料和多场耦合理论为基础,建立了瞬态水-热-力三场耦合作用下的三维冻胀模型,但并未考虑水位对围岩冻胀情况的影响。冻胀问题是寒区隧道工程中 THM 耦合作用的典型表现形式。张巨康等^[8]建立了隧道围岩的冻胀发生机理及水热力耦合控制方程,但并未对隧道冻胀圈的整体冻胀问题给出数值解析;郑新雨等^[9]为了探究围岩冻胀力的演化规律,建立了考虑围岩含水率和围岩比重指标的冻结圈围岩冻胀力理论解;邓刚等^[10]在存水空间模型的基础上,分析了冻胀水体的形变约束特征,提出了关于冻胀压力的新的约束冻胀模型,但对于水分迁移作用对模型的影响未做具体研究;黄诗冰等^[11]对低温岩体裂隙冻胀力及冻胀扩展进行了系统性的试验研究,建立了水分迁移下的冻胀力求解模型和数值模拟分析方法;彭小丽等^[12]利用摩尔库伦塑性准则和支护结构应力应变曲线,建立了考虑冻胀作用的围岩-支护结构受力模型,研究了不同因素对冻胀力和支护结构安全性的影响。上述理论研究虽然极大的推动了寒区工程建设,但由于没有考虑隧道(洞)水流的影响,在应用到水利水电工程领域仍存在一定缺陷。

基于构建的 THM 耦合模型,不少学者开发了数

值分析程序,以研究复杂工况下寒区隧道(洞)的冻融特性。杨更社等^[13]利用 Femlab 软件,分析了软岩隧道中的水热耦合迁移特征;杨天娇等^[14]利用 COMSOL 软件,并基于“三区域理论”建立了考虑水冰相变和水分迁移的寒区隧道水热耦合问题的联合求解微分方程。此外,严健等^[15]针对裂隙冻岩设计了现场原位试验,得到了裂隙花岗岩冻结过程中冻胀压力分布和变化规律,建立了裂隙成环贯通裂隙水原位冻胀时隧道宏观冻胀力的理论模型;张列等^[16]创新性的提出了“注浆隔水,管道排水”的新理念,使用泡沫混凝土来吸收冻胀能量的新做法,为解决隧道冻灾问题提供了新思路。可见,当前寒区隧洞(道)冻融研究主要集中于交通隧道(公路隧道、铁路隧道),对输水隧洞关注不足。输水隧洞受动态水流影响,其冻融过程涉及渗流-冻胀耦合、动水压力等复杂作用,现有理论存在缺陷。特别是缺乏水流-围岩相互作用的相关研究,导致现有成果难以直接指导寒区输水工程的建设工作。

鉴于此,本研究以甘肃某输引水隧洞工程为研究对象,采用多物理场耦合数值模拟方法,系统研究三种典型工况下隧洞的温度场分布特征:①有压隧洞(洞内满水运行工况);②无压隧洞(洞内自由水面工况);③无水隧洞(放空检修工况)。重点分析内水压力作用下寒区输水隧洞的围岩变形规律,深入揭示其冻融损伤演化机理,并基于研究成果提出相应的工程防治措施。

本文拟以甘肃某输引水隧洞为依托,采用多物理场耦合方法研究有压隧洞、无压隧洞以及无水隧洞等三种不同类型隧洞的温度场,探明内水压力作用下寒区输水隧洞的变形特征,进而揭示寒区引水隧洞的冻融致灾机理并提出针对性的防治方法,以为寒区输水工程建设提供理论指导。

1 工程概况

甘肃某引水隧洞位于季节性冻土区,该地区全年平均气温 -4.2°C ,极端最低气温 -24°C ,冻结期为 10 月至次年 3 月,融化期一般发生在 4 月至 9 月。隧道所处基岩为三叠系板岩夹片岩,围岩强度较低,稳定性较差;原岩部分结构经隧道开挖后被破坏,节理、裂隙发育,岩体破碎,围岩稳定性较差,为地下水较丰富的较软岩。属于典型的寒区裂隙岩体隧道,其稳定性受水分场-温度场-应力场耦合作用控制。引水隧洞内部水流量随季节而变化。丰水期流量相对较大,隧道内满压运行;枯水期水流量相对

较小,隧洞内明流运行;检修期隧洞内无流动水流。隧洞宽 8.1 m,高 7.9 m,衬砌厚度为 0.3 m,隧洞埋深 22.5 m(见图 1)。调研表明,洞口部位冻融灾害最为严重(包括挂冰、衬砌开裂、掉块等)。因此,本文选取隧洞中冻融灾害最严重的位置,即隧洞进口段进行研究。

2 研究方案及数值模型

2.1 研究方案

根据寒区输水隧洞实际工作情况,将其划分为三种类型的隧洞,即有压隧洞(洞内充满水,水压为 0.1 MPa)、无压隧洞(洞内水流具有自由水面,水深为 3.6 m)以及无水隧洞(放空洞内水流)。针对不同隧洞,采用多物理场耦合分析软件研究隧洞的温度及变形特征,基于数值模拟结果揭示寒区输水隧洞的冻融致灾机理并提出针对性的防治方法。

2.2 数值模型

采用多物理场耦合分析软件进行模拟分析,选取隧洞进口段作为研究对象进行建模。寒区输水隧洞属于典型的平面应变问题,因此忽略隧洞长度对冻融作用的影响,纵向取单位长度建立数值模型。模型四周边界尺寸均设置为 3 倍洞径(上部取至地表)。将隧洞及围岩等划分为大小不等的网格,靠近隧洞网格密集而小,远离隧洞网格稀疏而大。数值模型包含 14 706 个域单元和 17 450 个边界单元。考虑到隧洞空气热对流及衬砌-围岩间热传导,将衬砌部位的单元进行加密处理。隧洞数值分析模型

如图 2 所示。

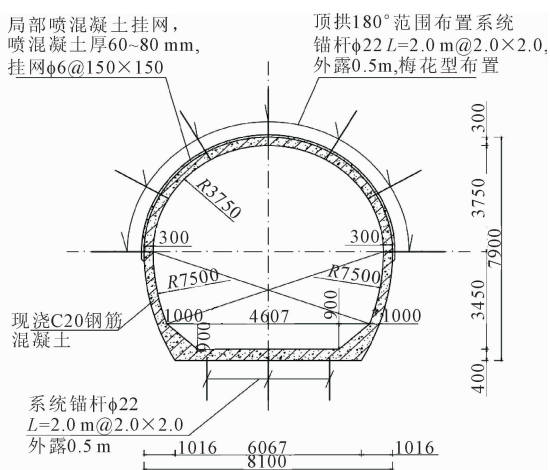


图 1 隧洞断面图

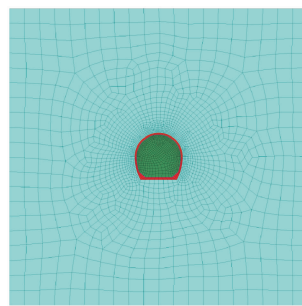


图 2 隧洞数值模型

2.3 计算参数

隧洞围岩为三叠系板岩夹片岩,围岩等级为 V 级,根据勘察报告,相关参数如表 1 所示。

表 1 计算参数表

材料	弹性模量 /GPa	泊松比	内聚力 /MPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	热膨胀系数 / $^{\circ}\text{C}^{-1}$	热传导系数 /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	比热容 /($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)
未冻结围岩	0.9	0.40	0.06	45	2500	10.8×10^{-6}	1.75	2240
冻结围岩	1.2	0.35	0.50	25	2500	10.8×10^{-6}	3.00	1260
衬砌	29.5	0.20	—	—	2600	15.0×10^{-6}	1.93	993
保温材料	14.6	0.20	—	—	600	—	0.03	5000
水	—	—	—	—	1000	21.0×10^{-6}	0.54	4200
冰	—	—	—	—	917	51.0×10^{-6}	2.22	1930

2.4 初始条件及边界条件

对于低温多场耦合问题,在进行三场耦合计算时,需要结合初始条件和边界条件进行求解。

位移场:模型两侧边界为法向约束,模型底部边界为固端约束,均不允许发生变形;模型上边界设置为自由边界,允许发生变形。根据实测地质资料,该区域构造应力较小,只考虑自重应力。

渗流场:根据地质报告,假定水分场是饱和的并有外界水补给,模型两侧及底部为不透水边界,洞壁为透水边界。

温度场:模型左右两侧边界为绝热边界,底部及隧洞内壁取为热流边界,热流密度为 0.06 W/m^2 。根据地质报告取围岩初始温度 -2.5°C ,隧洞进口处气温设置为当地外界大气温度,即:

$$T_a = -2.2 + \frac{1.5}{30 \times 12}t - 10\cos\left(\frac{2\pi}{12 \times 2}t + \frac{11}{12}\pi\right) \quad (1)$$

式中: T_a 表示气温; t 表示时间, 单位为月。

3 寒区引水隧洞温度及变形特性

根据研究方案分别研究有压隧洞、无压隧洞和无水隧洞的温度及变形特性。一年中隧洞最暖月为 6 月份, 最冷月为 12 月份, 故重点分析这两个月份的温度及变形特征, 同时选取 3 月和 9 月的数值模拟结果作为补充, 以便分析一年内隧洞温度和变形的变化趋势。

3.1 有压隧洞

有压隧洞洞内充满水, 衬砌各部位均与水流接触, 发生对流换热。有压隧洞一年内不同月份的温度场分布如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 有压隧洞衬砌表面均与水流

接触, 其各部位温度基本相同且与水温一致, 无突变现象。3 月份隧洞内水温近似为 0°C , 衬砌表面温度也为 0°C ; 6 月份隧洞内水流温度为 3.2°C , 衬砌表面温度约 3.0°C , 隧洞围岩融化区域深约 96.43 cm ; 9 月份隧洞内水温约 2°C , 衬砌表面温度也近似为 2°C ; 12 月份隧洞内水温再次回到 0°C , 衬砌表面温度也随之回到 0°C 。随着隧洞内水流及围岩温度变化, 隧洞围岩的位移场也在发生变化, 如图 4 所示。

由图 4 可知, 对于有压隧洞, 一年内变形的最大值均出现在拱底, 且各月份位移云图差异不大。3 月份, 拱顶变形为 1.53 mm , 拱脚变形约为 2.61 mm , 拱底变形约为 2.89 mm ; 6 月份, 拱顶变形为 1.47 mm , 拱脚变形约 2.62 mm , 拱底变形约为 2.84 mm ; 9 月份, 拱顶变形约为 1.55 mm , 拱脚变形约为 2.61 mm , 拱底变形约为 2.92 mm ; 12 月份, 拱顶变形约为 1.65 mm , 拱脚变形约为 2.65 mm , 拱底变形约为 2.96 mm 。

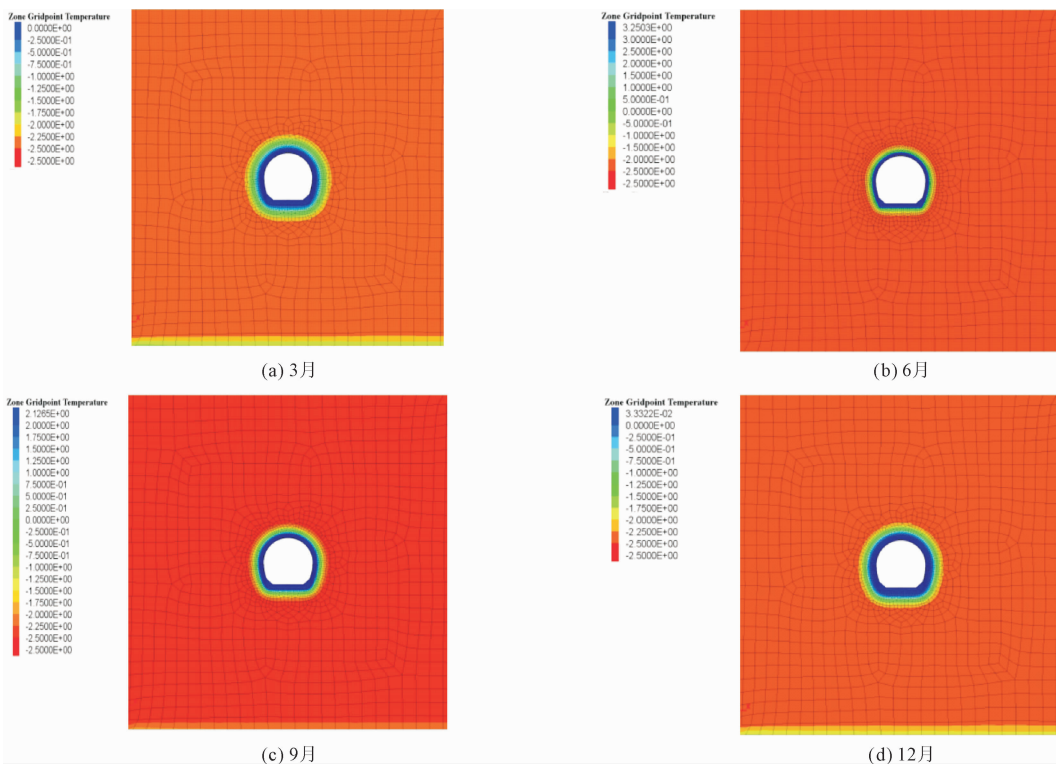


图 3 有压隧洞温度云图

3.2 无压隧洞

无压隧洞只有中下部充满水, 其他部位则为空气, 各部位对流换热的方式不同。无压隧洞一年内不同月份的温度场分布如图 5 所示。

由图 5 可知, 无压隧洞衬砌及围岩温度在洞内水位处发生了突变。3 月份平均气温为 -4.9°C , 洞

内水流温度近似为 0°C , 隧洞上部衬砌表面温度为 -0.3°C , 下部衬砌表面温度为 0°C ; 6 月份平均气温为 8.1°C , 隧洞内水流温度为 3.2°C , 水位以上衬砌表面温度约 7.8°C , 围岩融化深度约 141.75 cm , 水位以下衬砌表面温度约 3.2°C , 围岩融化区域深约 96.43 cm ; 9 月份平均气温为 -3.2°C , 隧洞内水温

为 2℃。上部衬砌 -3.2℃,下部衬砌约 2.1℃。12 月份平均气温为 -11.8℃,水流温度再次近似为 0℃,上部衬砌表面温度约 -11.0℃,下部衬砌表面

温度同样再次降为 0℃。不同温度条件下无压隧洞围岩位移场如图 6 所示。

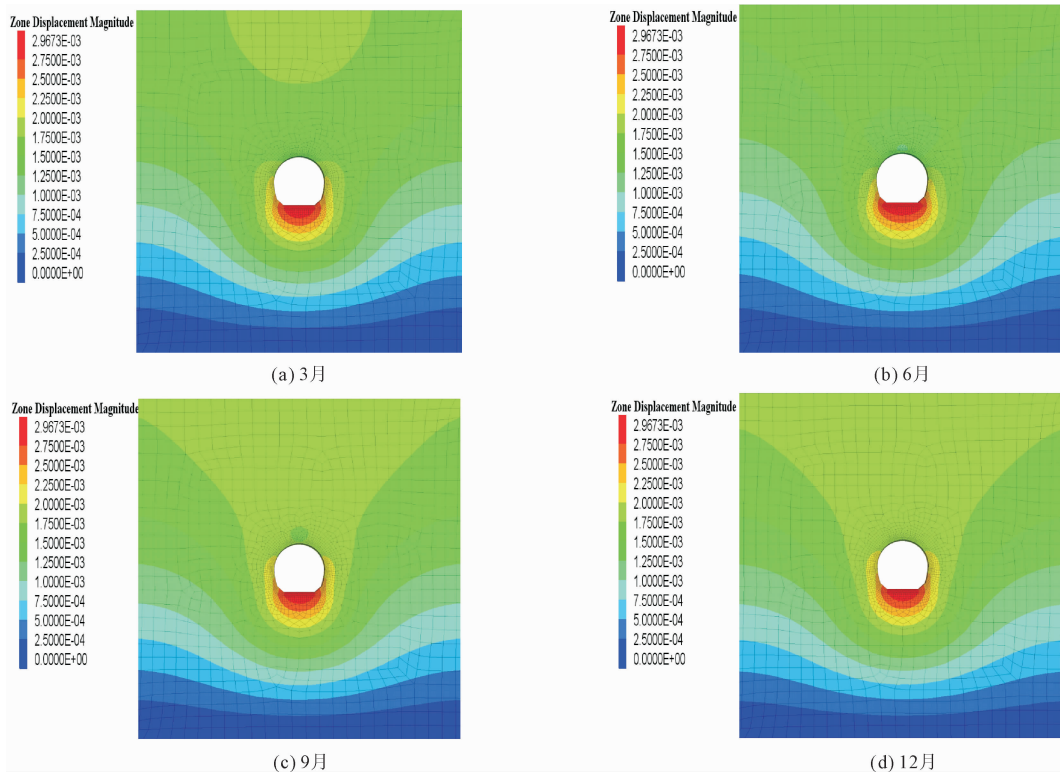


图 4 有压隧洞位移云图

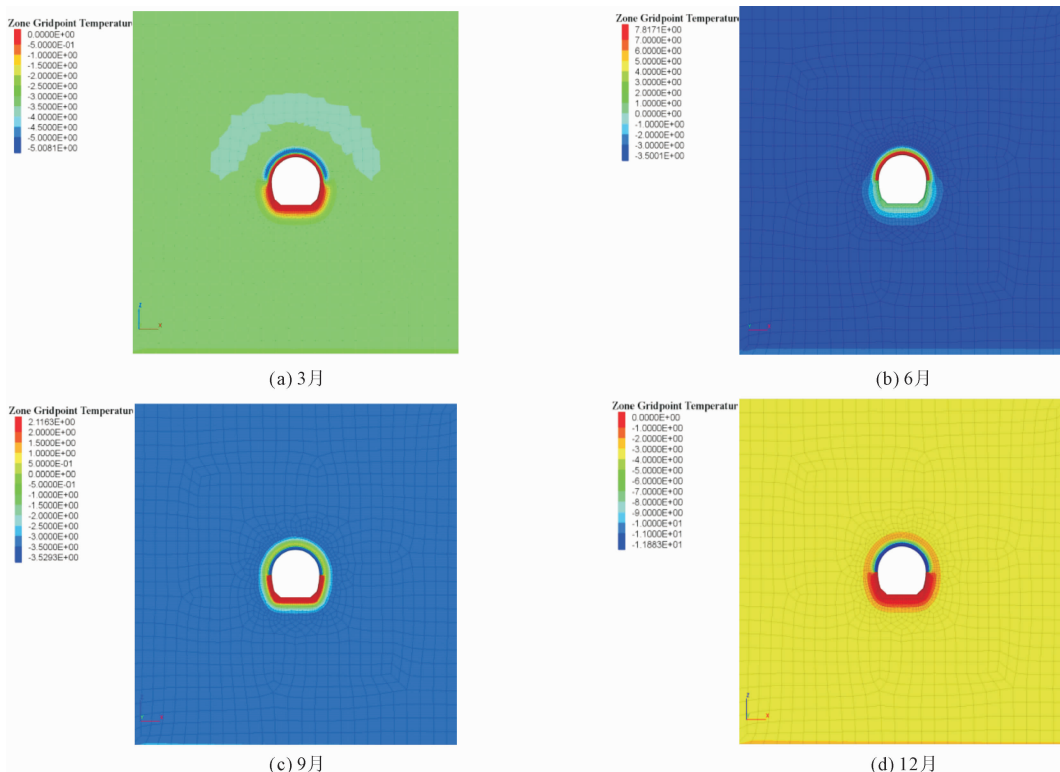


图 5 无压隧洞温度云图

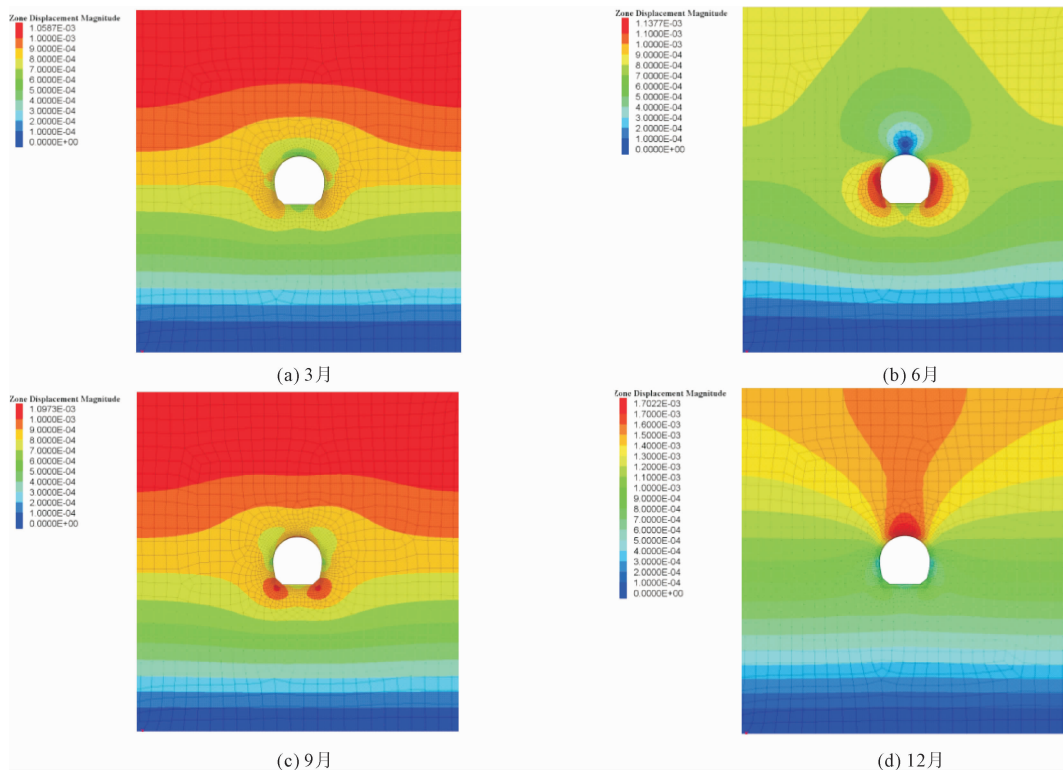


图 6 无压隧洞位移云图

由图 6 可知,不同温度场条件下,无压输水隧洞围岩位移场明显不同。3 月份时,隧洞拱顶变形约 0.51 mm;拱脚变形约为 0.85 mm,拱底变形约为 0.60 mm;6 月份隧洞拱顶变形 0.12 mm、拱脚变形约 0.89 mm,拱底变形约 0.60 mm;9 月份最大变形区域集中在拱脚,约为 1.00 mm,拱底变形约 0.61 mm,拱顶变形约 0.82 mm;12 月份最大变形区域集中在拱顶,最大变形量约为 1.67 mm,拱脚变形约 0.91 mm,拱底变形约 0.72 mm。

3.3 无水隧洞

检修时隧洞内无水,隧洞衬砌各部位均与空气发生对流换热。检修时隧洞一年内不同月份温度场分布如图 7 所示。

由图 7 可知,3 月份平均气温为 -4.9°C ,隧道衬砌表面温度为 -0.28°C ,隧洞围岩均为冻结状态;6 月份平均气温为 8°C ,隧洞衬砌表面温度为 7.83°C ,隧道围岩融化区域深约 141.75 cm;9 月份平均气温为 -3.2°C ,隧洞衬砌表面温度 -3.2°C ;12 月份平均气温为 -11.8°C ,衬砌表面温度 -11.8°C ,隧洞围岩均已处于冻结状态。无水隧洞一年之内不同月份的位移场分布如图 8 所示。

由图 8 可以看出,不同温度条件下无水隧洞位移场明显不同。3 月份时,隧洞最大变形区域集中

在拱脚,约为 1.36 mm,拱底变形仅为 0.30 mm,拱顶变形约 0.50 mm;6 月份,隧洞拱顶变形约为 0.40 mm,拱脚变形约为 1.00 mm,拱底变形约为 0.20 mm;9 月份隧洞拱脚变形逐渐增加,达到 1.47 mm,拱顶变形约为 0.50 mm,拱底变形约为 0.20 mm;12 月份隧洞最大变形出现在拱脚,约为 2.43 mm,拱顶和拱底变形均为 1.20 mm。

4 寒区引水隧洞冻融致灾机理分析

为了便于分析洞内水流对隧洞温度及变形特性的影响,在隧洞关键位置设置监测点并对模拟结果进行对比分析。隧洞温度监测点设置在拱顶及拱底位置,隧洞变形监测点设置在拱顶、拱脚及拱底位置。图 9 为各监测点的温度变化曲线,图 10 为不同隧洞的最大融化深度曲线。

由图 9 可知,外界气温在一年之中发生了剧烈的变化,但洞内水流温度的变化则较为平稳且从未降至 0°C 以下。有压隧洞各监测点的温度变化曲线明显比无水隧洞平缓,其更接近于洞内水温变化曲线;而无水隧洞无论是拱顶还是拱底温度变化基本与气温一致。对于无压隧洞,拱顶(与外界大气相接触)处监测点的温度变化情况几乎与无水隧洞拱顶和拱底温度变化情况一致,拱底(与洞内水流相

接触)处监测点的温度变化情况则与有压隧洞拱顶和拱底温度变化情况一致。显然,隧洞温度场受洞

内水流影响显著,隧洞温度变化主要受到与其相接触的大气或水流影响。

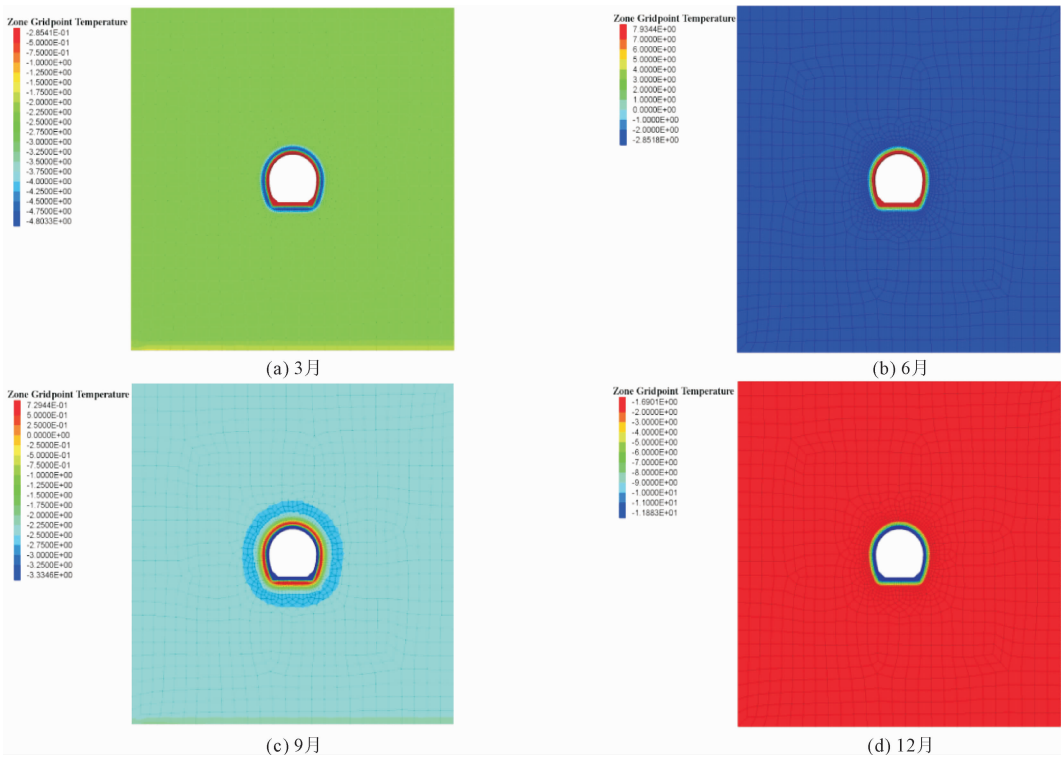


图 7 无水隧洞温度云图

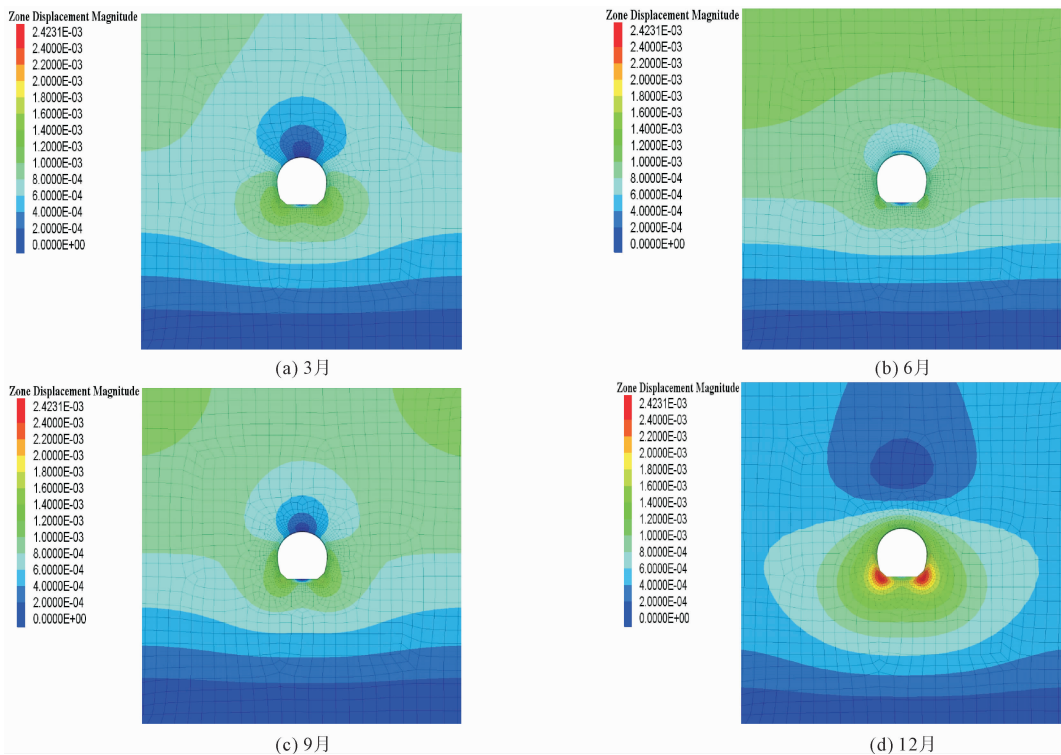


图 8 无水隧洞位移云图

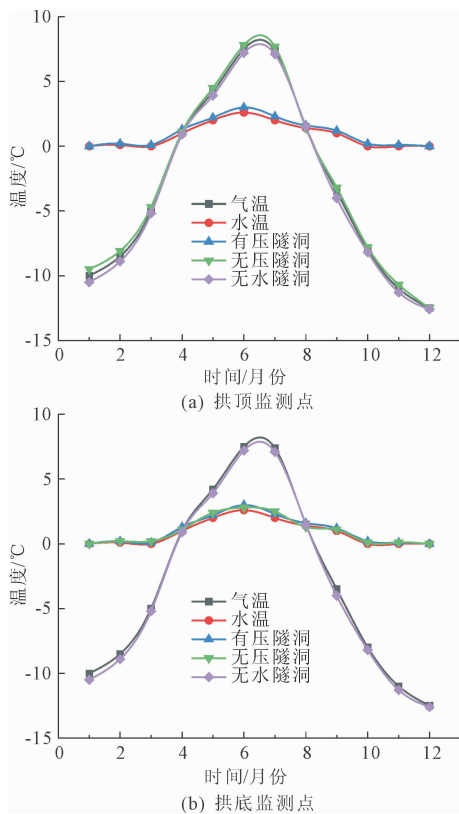


图9 隧洞各监测点温度曲线

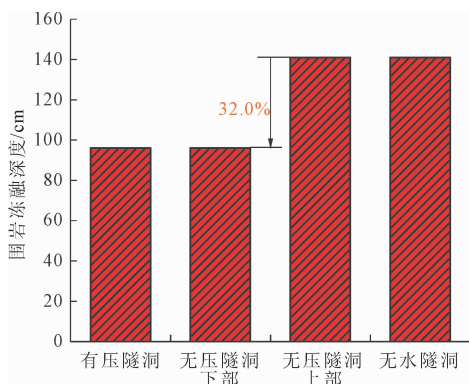


图10 各隧洞最大冻融深度

由图 10 可知,水流在影响隧洞衬砌温度的同时显著降低了围岩的冻融深度,无水隧洞以及无压隧洞上部(与外界大气接触)围岩冻融深度约 141.75 cm,有压隧洞及无压隧洞下部(与洞内水流接触)围岩冻融深度约 96.43 cm,减少了约 32.0%。各监测点变形如图 11 所示。

综合图 9 和图 11 可知,所有监测点的变形均受到了季节性温度变化的影响,且大部分呈现“外界温度越低,变形量越大”的规律。无水隧洞一年中变形量的最大值出现在 12 月份的拱脚位置,可能是由于该月份温度最低致使拱脚位置出现了较大冻胀

应力所致;无压隧洞一年中变形量的最大值出现在 12 月份的拱顶位置处;有压隧洞一年中变形量的最大值出现在 12 月份的拱底位置处。对比无水隧洞和无压隧洞拱底和拱脚监测点的变形曲线可以发现,冬季无压隧洞中下部由于与水流接触,使得衬砌温度比无水隧洞更高,所以变形量相对较小。隧洞内水流对衬砌及围岩起到了“保温”作用,从而在减少了由于冬季温度所引起的隧洞变形。分析有压隧洞三监测点变形曲线,可以发现该隧洞变形总是远大于其他两种隧洞。结合前文的分析可知,这部分变形量应来自于洞内水流对洞壁造成的压力,尤其是在拱底部位,由于该处受到水压力是最大的,故变

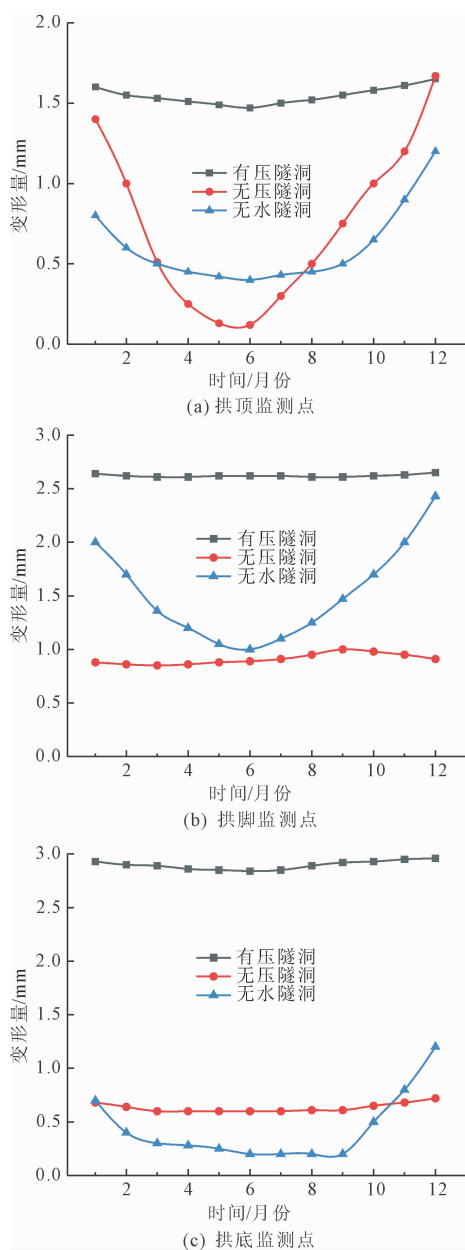


图11 隧洞各监测点变形曲线

形量也是整个隧洞中的最大的。可见寒区引水隧道的冻融变形是温度和水压力耦合作用的结果,且外界温度变化影响更甚。

5 寒区引水隧洞冻融灾害防治

衬砌背部以及围岩内部的水分在低温下冻结成冰会体积膨胀^[17],反复多次冻融会促进围岩裂隙发育,降低其力学性能,进而导致隧洞发生冻融灾害^[18]。可在衬砌表面铺设保温材料^[19-20],以减小外界气温变化对隧道温度场的影响范围。保温层结构如图 12 所示,保温材料相关参数见表 1,保温层的厚度为 5 cm,图中红色部分为衬砌,绿色为保温层。选取最冷月 12 月份来研究保温层对寒区无水隧洞温度场

和应变场的影响,图 13 分别为隧洞在有/无保温层下的温度场和位移场。

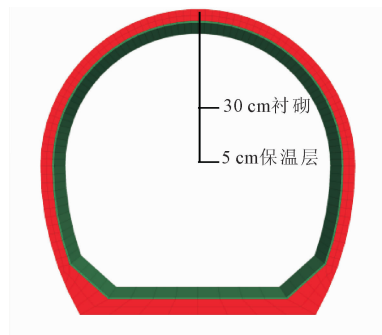


图 12 隧洞保温层铺设示意图

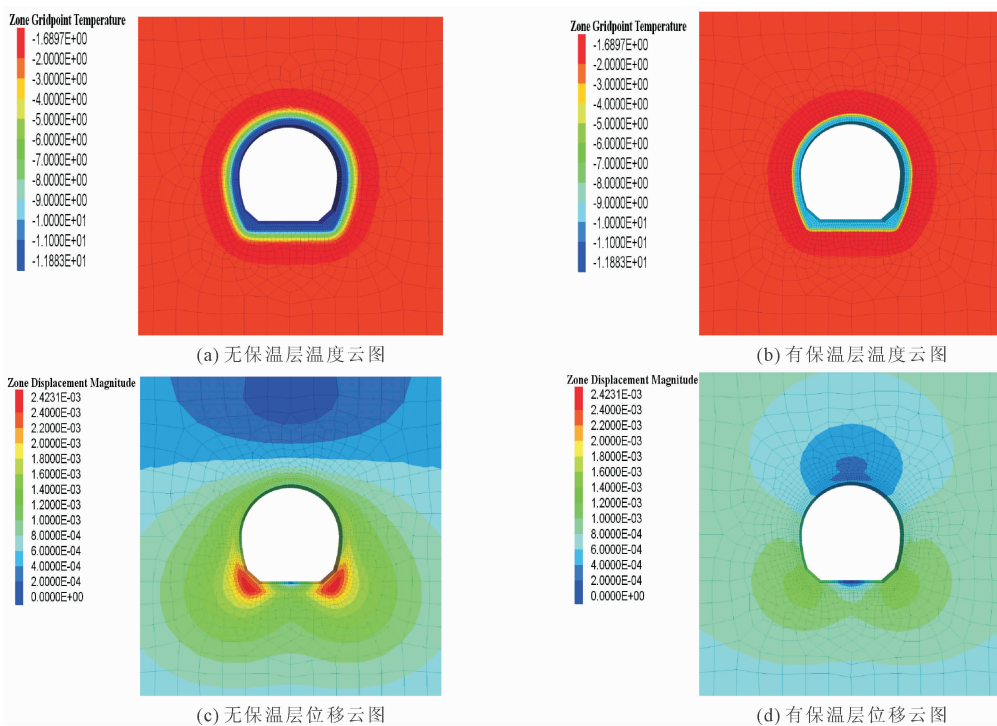


图 13 有/无保温层隧洞温度和位移云图

由图 13 可知,铺设保温层后衬砌温度从 -11.80°C 升高至 -8.16°C ,冻融深度也由 141.75 cm 减小为 71.53 cm,缩小了约 50%。在隧洞变形方面,无论是否铺设保温层最大变形区域均出现在拱脚位置,但无保温层时拱脚变形数值为 1.39 mm,而铺设保温层后拱脚变形数值仅为 0.69 mm,减小约 50%。可见,铺设保温层后隧洞变形明显减少,整体稳定性提高显著提高。故对于寒区引水隧洞冻融问题,可通过铺设保温层加以改善。

基于数值模拟结果并考虑到保温材料的造价以及施工方便等,针对不同类型的隧洞可采取不同的防冻方案:①无水隧洞全断面设置保温层,对于变形

较大的拱脚位置可适当加厚保温层;②无压隧洞可在洞内水位以上设置保温层,拱顶位置处可适当加厚;③有压隧洞因洞内充满水,受外界气温影响较小,隧洞变形的主要原因是内水压力,故可不设保温层,但需对变形较大处进行特殊处理(如适当加厚衬砌厚度或加大配筋,必要时对围岩进行固结灌浆等)。

6 结论

本文以甘肃某引水隧洞为依托,采用数值模拟研究寒区有压、无压、无水工况下隧洞温度分布与变形特性,揭示冻融灾害机理并提出防冻措施,主要结论如下:

(1) 不同充水条件下隧洞冻融范围与变形值差异显著。无水、有压隧洞冻融深度分别为 141.75、96.43 cm, 无压隧洞水位以上和以下部分冻融深度分别与无水、有压隧洞相近;三类隧洞最大变形均出现在 12 月,但位置与量值不同,无水、无压、有压隧洞最大变形依次为 2.43 mm(拱脚)、1.67 mm(拱顶)、2.96 mm(拱底)。

(2) 洞内水流可阻隔冷空气,减小冻融影响范围,冻害程度呈现无水隧洞 > 无压隧洞 > 有压隧洞的规律。

(3) 基于经济性提出差异化防冻方案:无水隧洞全断面布设保温层,拱脚部位适当加厚;无压隧洞在水位以上设置保温层,拱顶适当加厚;有压隧洞可不设保温层,但需对大变形部位进行特殊处置。

(4) 建立了参数物理意义明确的岩质输水隧洞冻融模型,建模方法与参数确定思路可供同类研究借鉴,为工程防治提供参考,但对土质隧洞并不适用。鉴于围岩参数离散性大、冻胀压力分布不确定等工程实际特点,建议结合现场监测数据优化验证,提升工程适用性。

参考文献:

- [1] 张佳星. 南水北调西线工程将有更多世界首创[N]. 科技日报, 2023-09-13(3).
- [2] 魏 来. 寒区隧道围岩冻融循环损伤扩展特征研究[J]. 交通世界, 2024(22):167-170.
- [3] Liu Dan, Zhang Liming, Li Shichang, et al. Three-dimensional nonlinear analysis for the coupled problem of the heat transfer of the surrounding rock and the heat convection between the air and the surrounding rock in cold-region tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(4):323-332.
- [4] Tan Xianjun, Chen Weizhong, Liu Hongyuan, et al. A unified model for frost heave pressure in the rock with a penny-shaped fracture during freezing[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 153:1-9.
- [5] Chen Weizhong, Tan Xunxian, Yu Hongdan, et al. A fully coupled thermo-hydro-mechanical model for unsaturated porous media[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009, 1(1):31-40.
- [6] Kang Yongshui, Liu Quansheng, Huang Shibing. A fully coupled thermos-hydro-mechanical model for rock mass under freezing/thawing condition[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 95:19-26.
- [7] 翟栋森. 基于瞬态水-热-力耦合的寒区水工隧洞冻胀特性及围岩承载特性研究[D]. 石河子:石河子大学, 2022.
- [8] 张巨康. 寒区隧道冻胀水热力耦合分析及控制措施研究[D]. 北京:北京交通大学, 2021.
- [9] 郑新雨. 寒区富水隧道围岩冻胀力及衬砌结构裂损演化规律研究[D]. 济南:山东大学, 2023.
- [10] 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.
- [11] 黄诗冰, 刘泉声, 程爱平, 等. 低温岩体裂隙冻胀力与冻胀扩展试验初探[J]. 岩土力学, 2018, 39(1):78-84.
- [12] 彭小丽. 寒区水工隧洞水热力耦合数值分析及衬砌结构稳定研究[D]. 石河子:石河子大学, 2021.
- [13] 杨更社, 周春华, 田应国. 寒区软岩隧道的水热耦合数值模拟与分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(8):1258-1262.
- [14] 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.
- [15] 严 健, 何 川, 周子寒, 等. 寒区裂隙冻岩隧道岩-水-冰力原位测试及冻胀力模型[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S1):300-305, 311.
- [16] 张 列, 孙克国. 寒区富水隧道冻胀机理及防治措施[C]//中国土木工程学会隧道及地下工程分会. 第十二届海峡两岸隧道与地下工程学术与技术研讨会论文集. 2013:5.
- [17] 王志杰, 蔡李斌, 李金宜, 等. 考虑相变和围岩含水裂隙的隧道冻胀力研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(3):53-60.
- [18] 孙克国, 贾敬龙, 潘兵兵, 等. 基于孔隙演化的寒区隧道围岩冻融劣化机制与损伤本构模型[J]. 中国公路学报, 2024, 37(11):52-63.
- [19] 袁金秀, 王道远, 王 悦, 等. 寒区隧道温度场理论解及防寒保温设防长度[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(5):59-64.
- [20] 夏才初, 曹善鹏, 陈 维, 等. 考虑全寿命周期围岩冻结规律的寒区隧道抗冻设计研究[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(9):1736-1743.