

DOI: 10.11779/CJGE201911019

寒区冻融隧道二衬横向渐近偏转演化及力学性态研究

黄宏伟, 陈佳耀*, 张东明

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 寒区季节性冻融导致围岩破碎层和松动圈的应力应变空间重构, 为描述冻融影响下隧道二衬沿断面横向偏转的渐近演化, 以吉林老爷岭寒区隧道入口和中段两个代表性断面的拱腰、拱墙 390 d 现场倾角变形数据为基础, 结合衬砌开裂及偏转力学性态特征, 应用数值模拟试验, 综合分析正温、负温、冻季、融季 4 时期衬砌渐近性偏转、围岩破碎层及松动圈演化、衬砌应力应变特征等关键问题。研究表明: 隧道入口段偏转随季寒交替变化显著, 左拱墙和左拱腰测点倾角变化分别呈“倒 V”及“下凹”状, 偏转在融季响应滞后, 在冻季响应超前, 在冻融期则有“突变”趋势; 而隧道中段受到的影响总体比入口处小, 右拱腰在冻季、正温期有不同程度的波动偏转, 左拱腰倾角则呈现“上凹”变化, 其在融季有滞后偏转现象; 计算松动圈直径满足冻融期 > 负温期 > 正温期, 且隧道入口 > 隧道中段, 通过数值模拟得到塑性区轮廓 > 计算松动圈, 可见在衬砌冻融期的伤害比在其他时期更显著, 应防范冻融期温度变化带来的衬砌偏转风险。

关键词: 寒区; 隧道; 冻胀力; 松动圈; 数值模拟

中图分类号: U45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)11-2126-07

作者简介: 黄宏伟(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道结构健康监测与检测、地下工程风险评估、预警与控制方面的教学与研究工作。E-mail: huanghw@tongji.edu.cn。

Lateral asymptotic deflection evolution and mechanical behavior of secondary linings of freeze-thaw tunnels in cold regions

HUANG Hong-wei, CHEN Jia-yao, ZHANG Dong-ming

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The seasonal freezing and thawing in cold regions result in the spatial reconstruction of stress and strain in fractured strata and loosening zones of the surrounding rocks. To describe the asymptotic evolution of transverse deflection of tunnel linings under the influences of freezing and thawing, the key characteristics of asymptotic deflection, evolution of rupture layer, loosening zone and stress-strain of linings in the period of positive temperature (PT), negative temperature (NT), frozen season (FS) and melting season (MS) are analyzed based on the 390 days' in-situ inclination deformation data of the arch waist and wall at tunnel entrance and in the middle section in the Laoyeling cold region of Jilin Province, China. The numerical simulation tests are applied and combined with the mechanical properties of cracking and deflection of linings. The results show that the deflection at tunnel entrance changes significantly with the alternation of seasonal cold. The wall and waist of the left arch are "inverted V"- and "concave"-shaped, respectively. In terms of deflection response, it shows a "lag" in MS and an "ahead" trend in FS, and a "sudden change" trend in MS and FS. And the influence in the middle section of the tunnel is smaller than that at the entrance. The waist of the right arch has different degrees of "fluctuation" deflection in FS and PT, while that of the left arch presents "concave" change, and it has "lag" deflection in MS. The calculated diameter of loosening circle satisfies MS & FS > NT > PT, and that at the entrance is larger than that in the middle of the tunnel. The contour of plastic zone is larger than that of loosening ring by numerical simulation. Therefore, the damage of the linings during the freeze-thaw period is more significant than that in other periods, so the risk of deflection of linings caused by temperature change should be highlighted.

Key words: cold region; tunnel; frost heaving force; loose ring;
numerical simulation

基金项目: 吉林省交通运输科技计划项目(2015/1/18); 国家自然科学基金项目(51278381); 科技部创新人才推进计划重点领域创新团队(2016RA4059)

收稿日期: 2018-12-17

*通讯作者(E-mail: chenjiayaozj@163.com)

0 引言

中国多年冻土地区占国土总面积 20% 左右, 季节

性冻土占 55%, 频繁的冻融交替引起的冻胀可能会造成围岩松动圈改变、衬砌开裂等灾害, 更有甚者将导致隧道无法正常运营, 这无疑给隧道施工、运行和维护带来巨大挑战。随着建养一体化的深入人心, 寒区隧道围岩、衬砌等性态演化逐渐成为学者、建设者关注的焦点。

国内外针对寒区隧道的研究成果颇丰, 主要集中于寒区划分^[1]、温度场研究^[2-3]、冻结深度剖析^[4]、围岩松动圈分析^[5]、围岩破坏模式^[6]、防冻保温圈的界定^[7]及衬砌结构设计^[8]等方面, 采用的方法也各有侧重, 包括解析解推导^[9]、数值模拟^[10]以及室内模型试验^[11]等。值得一提的是, Lai 等^[9]利用 Galerkin 法分析了青藏铁路风火山隧道围岩的冻结、融化状态, 推导了考虑隧道围岩热对流与内空气耦合作用的温度场控制方程三维有限元公式; Matsuoka^[12]将季寒区岩石实测温度代入 Berggren 修正方程, 揭示岩石地基浅层 1 年经历了几十次的短周期冻融; 陈建勋等^[13]针对某寒区隧道 11 处典型断面开展了一年半的长期测试, 揭示了隧道洞内气温大致呈正弦曲线型分布。这些为寒区隧道的施工建设管理提供了重要思路。

然而运行维护期间由于隧道衬砌偏转垮塌造成的人员伤亡的案例屡见不鲜, 目前关于二衬的研究集中在材料研究^[14]和承载性能^[14-15]等方面。其中崔光耀等^[16]通过室内试验发现纤维的掺入对混凝土的增韧效果远超增强效果, 并提出二衬裂结构受力计算公式; 伍毅敏等^[17]结合监测数据与差分方程模拟了过渡段二衬短周期冻融循环过程, 并探讨了保温层铺设位置对冻融的影响; 张德华等^[18]对比分析了软岩大变形隧道在不同双层支护方案下的变形控制效果, 并运用数值仿真手段, 揭示了软岩大变形隧道双层支护的作用机理, 给出了第二层支护最佳施作时机的判据。然而由于实时衬砌监测数据匮乏, 当前对衬砌性态、二衬裂缝发展规律及渐近偏转演化方面的研究鲜有报道。

鉴于此, 本文以吉林老爷岭寒区隧道入口和中段代表性断面多个现场倾角变形数据为基础, 结合衬砌裂缝扩展、冻胀力及松动圈计算理论, 分析了正温、负温、冻季和融季 4 时期衬砌渐近性偏转、围岩破碎层及松动圈演化等的特征, 并应用 FLAC^{3D} 数值软件进行数值验证。

1 工程概况

1.1 老爷岭隧道

老爷岭隧道地处中一深季节冻土的吉林蛟河市, 隧道构造与山体走向基本一致, 如图 1。隧道位于背斜西北角, 山体主要构造为柳树沟-双顶屯褶皱带, 海拔范围 542~827 m, 下行线桩号 K335+465—K337+756, 里程 2291 m, 最大埋深 285 m, 隧道地层主要为蚀变凝灰岩和早期燕山花岗斑岩。

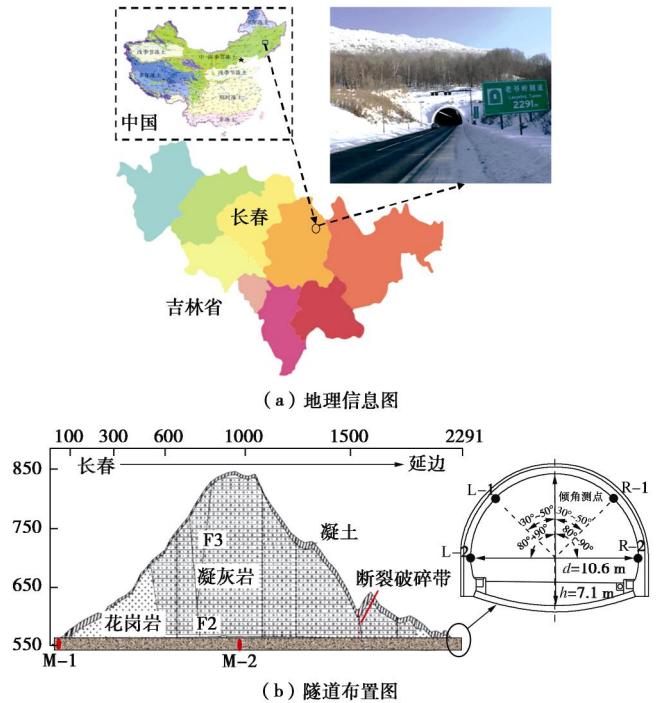


图 1 隧道基本情况示意图

Fig. 1 Basic situations of tunnel

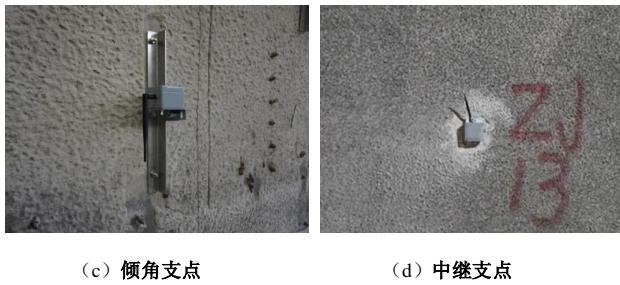
1.2 衬砌无线传感网络布设

采用自主研发的 MEMS 倾角支点, 实现隧道建养期间倾角变形、温湿度等信息的无线实时监测。研究表明^[17, 19], 当隧道长度大于 1 km, 冻害主要集中在洞口及距洞口约 0.15 倍隧道长度的过渡段, 主要因为洞口受太阳照射昼夜温差较大, 而洞中冻害相对较小。基于此, 本文将分别研究隧道入口、隧道中段的冻害情况以实现对比, 测点布置如图 1 (b), 在隧道入口 M-1 (距离洞口 2 m 处) 及隧道中段 M-2 (距离洞口 1 km 处) 代表的 2 个断面进行测点布置, 每个断面布置 4 个测点, 分别在左右两侧拱腰和拱墙位置布置 L-1, L-2, R-1, R-2 共 4 个测点, 左右侧界定以长春—延边方向为参照。如图 2, 沿隧道下行线共布设 37 个节点, 包括 28 个倾角支点, 8 个中继支点, 1 个智能网关。



(a) 安装过程

(b) 智能网关



(c) 倾角支点

(d) 中继支点

图 2 MEMS 传感器现场安装示意图

Fig. 2 Schematic diagram of field installation of MEMS sensors

1.3 温度监测

图 3 为传感器监测得到的月平均气温, 该区全年平均气温约 3.4℃, 正温期为 3 月中至 10 月中, 负温期为 10 月中至次年 3 月中, 属典型的季寒隧道, 每年 10 月、4 月为冻、融季, 季寒期每年持续 112~171 d。

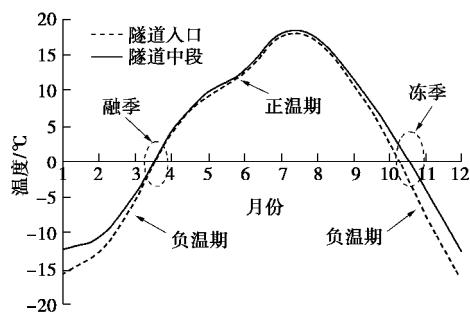


图 3 月平均气温图

Fig. 3 Monthly mean temperatures

2 二衬受力计算模型

2.1 二衬结构承载机理

隧道衬砌结构一般受轴力(压力)、弯矩和剪力的综合作用, 二衬相对初衬更易养护, 但由于冻融期的频繁交替和极寒恶劣天气的影响, 二衬在寒区常因弯曲应力过大而开裂, 更严重时会出现二衬大面积脱离初衬而出现不规则偏转, 造成混凝土剥落、成片掉块甚至二衬结构规模化垮塌, 图 4 所示为某隧道二衬局部破坏及偏转破坏现场。



(a) 二衬局部破裂

(b) 二衬大面积偏转

图 4 二衬破裂及偏转现场

Fig. 4 Field breaking and deflection of secondary linings

二衬偏转演化: 混凝土二衬在压弯荷载作用下受

拉区发生开裂, 开裂后的二衬仍可继续承载并传递轴力、剪力及一定的弯矩, 随着变形增大, 结构稳定性逐渐弱化, 此时二衬开裂部位形成了一个“塑性铰”, 同时, 由于季寒冻融造成的围岩不均匀受荷, 导致“塑性铰”在初衬、二衬环向界面出现脱离, 在重力影响下剪切应力不断逼近切应力强度, 最终造成“脱落”及“偏转”, 如图 5 所示。

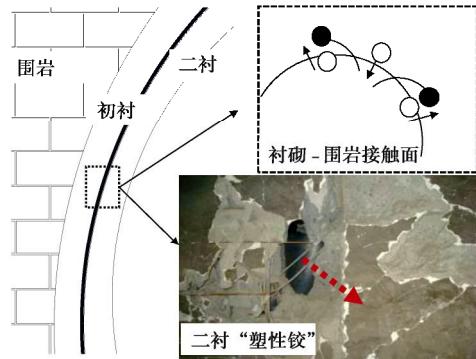


图 5 二衬“塑性铰”示意图

Fig. 5 Schematic diagram of "plastic hinge" of secondary linings

2.2 二衬开裂及偏转分析

以冻胀深度及冻胀力的三维时空分布为切入点, 在冻胀作用下, 隧道体积变化如图 6 虚线圆部分, 二衬偏转计算需要进一步探究冻胀力的不均匀作用, 其中, 冻胀力作用及开裂处混凝土的拉应力分布如图 6, 由于冻融作用, 衬砌表面形成了裂缝。为简化计算, 对开裂面的受力状态做如下假设^[16]: ①隧道断面简化为圆形; ②冻融圈与围岩、初衬间的接触为弹性界面; ③二衬受压区的应力-应变曲线等效于 C30 混凝土应力应变曲线; ④最大裂缝长度为恒定值, 即 70% 二衬厚度。

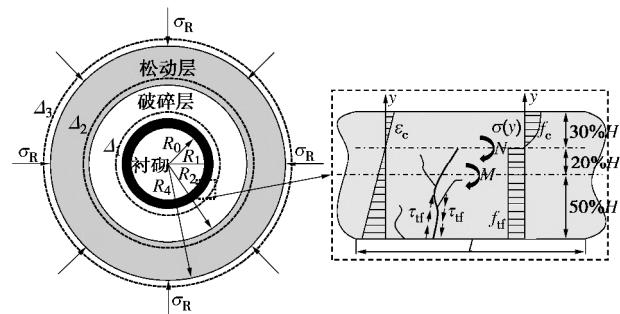


图 6 围岩应力圈分布及裂缝受力示意图

Fig. 6 Distribution of stress circle in surrounding rock and stress diagram of cracks

在冻融作用下, 衬砌、破碎层及松动层直径分别有 D_1 , D_2 , D_3 的变化, 则衬砌、破碎层及松动层的位移变化^[16]分别为

$$D_1 = \frac{P_1}{K_1}, \quad D_2 = \frac{P_2}{K_2}, \quad D_3 = \frac{P_3}{K_2} \quad . \quad (1)$$

式中 K_1, K_2 分别为衬砌及围岩的弹性抗力系数; P_1, P_2, P_3 分别为作用层上的冻胀力。

根据文献[16], 求得破碎层的体积增量和破碎层的围岩冻胀力分别如下:

$$V_{pz} = \pi \left[(R_3 + D_3)^2 - R_3^2 \right] + \pi \left[R_2^2 - (R_2 + D_2)^2 \right], \quad (2)$$

$$P_2 = \frac{\sqrt{\left(\frac{R_3}{K_4} + \frac{R_2}{K_2} \right)^2 + a_p \left(\frac{1}{K_4^2} - \frac{1}{K_2^2} \right) (R_3^2 - R_2^2)} - \left(\frac{R_2}{K_4} - \frac{R_1}{K_2} \right)}{\frac{1}{K_4^2} - \frac{1}{K_2^2}}, \quad (3)$$

式中, a_p 为破碎层的冻胀率, K_4 为冻胀时围岩弹性抗力系数。

在冻胀力的作用下, 不仅应力圈发生了变化, 同时还引起了裂纹的发展, 在裂纹径向力作用下, 衬砌间存在错开滑移, 该部分滑移造成了衬砌的偏转。根据本文假设, 有如下关系成立:

$$M/b = \int_0^{0.3H} s(y)(y + 0.2H)dy + f_{tf} \times 0.7H \times 0.15H, \quad (4)$$

$$N/b = \int_0^{0.3H} s(y)dy - 0.7Hf_{tf}, \quad (5)$$

$$s(y) = k_1 \times f_c \times \frac{e_c(y)}{0.002} \left[2 - \frac{e_c(y)}{0.002} \right], \quad (6)$$

$$e_c(y) = \frac{e_c}{0.3H} y. \quad (7)$$

式中 f_c 为混凝土抗压强度, e_c 为受压区极限压应变, b 为截面宽度, M 为衬砌中心线处弯矩, N 为衬砌裂纹处的弯矩, P_t 为围岩荷载。

当 $N=0$ 时, 则有下式成立:

$$f_{tf} = 0.43 \frac{P_t}{h^2 b}. \quad (8)$$

以上公式可用于计算冻融状态下松动圈体积变化情况、冻胀力大小及裂缝不均匀力的大小, 给衬砌偏转提供了理论依据。

3 二衬偏转监测数据分析

分别对隧道入口、中段 2 个典型断面进行倾角监测, 选取 390 d 监测数据作为研究对象, 得到拱墙左右侧、拱腰左右侧的倾角曲线图, 其中倾角正值为顺时针偏转, 负值为逆时针偏转。

3.1 隧道入口断面数据分析

本项目布设的无线传感倾角监测系统能够持续不间断地监测结构的偏转及变形发展, 对掌握隧道结构的变形规律及监控隧道结构的异常变形具有重要意义。对位于季寒区的老爷岭隧道而言, 衬砌结构在 1 年的监测周期内会受到周边围岩融化及冻结的扰动而产生变形, 图 7 为老爷岭隧道入口处测点的倾角监测

数据, 可见, 隧道入口段拱墙、拱腰位置的倾角随季寒的交替变化显著, 尤其是左拱墙和左拱腰, 变化分别呈现“倒 V 型”和“下凹型”, 且左、右侧的偏转基本成反方向。二衬的偏转在融季相对“滞后”, 因为正温期由 4 月—10 月, 而衬砌偏转从 6 月开始, 拱腰的偏转也是如此, 且滞后的时间较长。同时, 随着冻季逼近, 偏转会沿原来相反的方向发展, 且相对负温期的 10 月“超前”, 但超前的时间不长。而拱墙、拱腰的二衬偏转在冻融交接处呈现“突变”发展, 对冻融交替表现敏感。

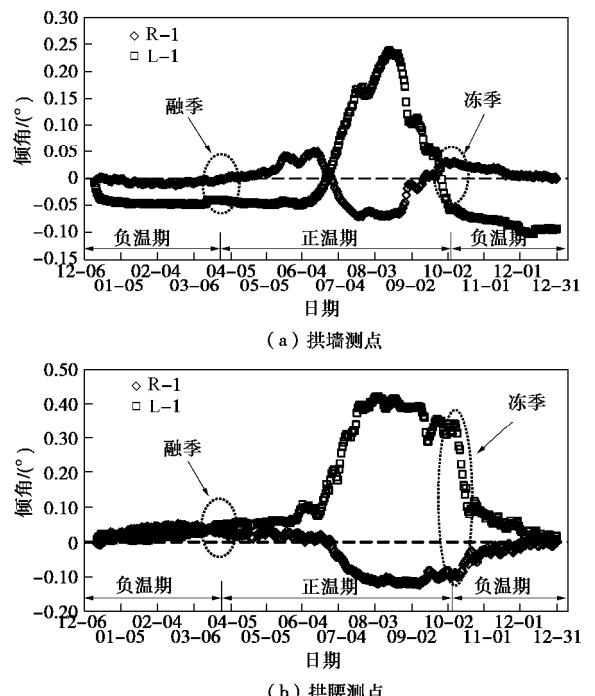


图 7 隧道入口 (M-1) 断面测点倾角监测数据

Fig. 7 Monitoring data of inclination at measuring points of entrance (M-1) section of tunnel

3.2 隧道中段断面数据分析

隧道中段不同于入口处, 该段常年缺少光照, 且空气流动不频繁, 倾角监测数据如图 8 所示, 可见隧道中段拱墙、拱腰的倾角变形与隧道入口的差别较大, 其中, 拱墙在正温期的倾角变化相对负温期要显著, 变化显著区没有分布在冻融交接处, 同时左拱墙的倾角波动更明显。另外, 右拱腰在正负温交接期、正温期有不同程度的“波动”偏转, 左拱腰则呈现“上凹型”变化, 在融季有“滞后”偏转现象。

4 偏转效应分析

4.1 模型建立

为深入研究断面二衬偏转应力特征及衬砌周边应力分布特点, 以 FLAC^{3D} 构建 1:1 模型, 并将初

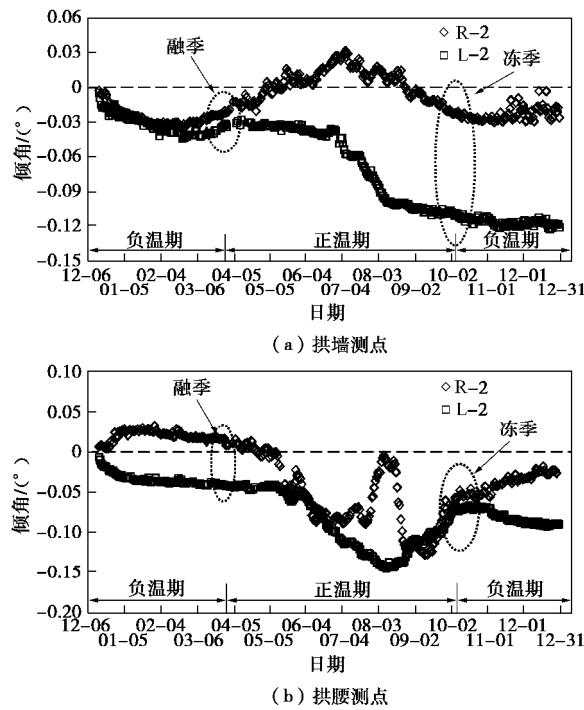


图 8 隧道中段 (M-2) 断面测点倾角监测数据

Fig. 8 Monitoring data of inclination at measuring points in middle section of tunnel (M-2)

衬围岩做一体处理，忽略初衬与围岩的偏转效应。选用的物理力学参数如表 1 所示。围岩本构关系选用弹塑性模型，模型中采用线性 D-P 屈服准则。

表 1 围岩及衬砌物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of surrounding rock and linings

材料	弹性模量 /GPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力 /MPa
围岩	1.0	0.27	27.0	0.1
C30 模筑混凝土	31.0	0.20	—	—

4.2 衬砌及围岩松动圈

结合上述松动圈破碎层体积增量关系及隧道周边塑性区模拟轮廓，分别绘制隧道入口及中段的围岩周边松动圈和塑性区。为比对 3 月、6 月、9 月围岩塑性区及松动圈的性态，针对每个断面分别绘制负温期、正温期、冻融期的共 3 个轮廓线。因为公式 (2) 计算中将隧道断面假定为圆形，而实际模拟中则是实际尺寸，故松动圈的示意存在一定误差。

图 9 为不同时期松动圈及塑性区轮廓图，可知正温期、负温期的计算松动圈没有显著的差别，而冻融期的计算松动圈稍大于前两时期。在隧道入口的模拟塑性圈均大于隧道中段的塑性圈，可见隧道入口相对于中段区间更易发生围岩松动、二衬偏转等灾害。同时，相对于计算松动圈，塑性区轮廓总体要大，这与文献[20]相一致。从图 9 可知，无论隧道入口还是中段，松动圈的大小关系始终为：冻融期>负温期>正

温期，可见冻融期对围岩、衬砌的伤害是最显著的，应防范该时期的剧烈变化带来的工程危害。

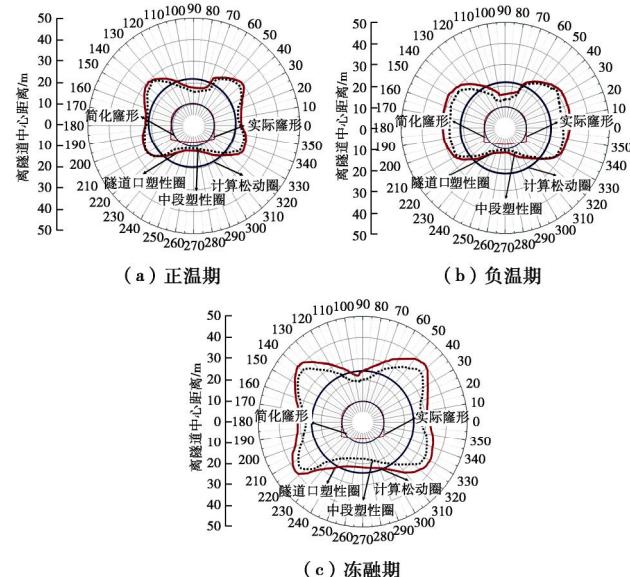
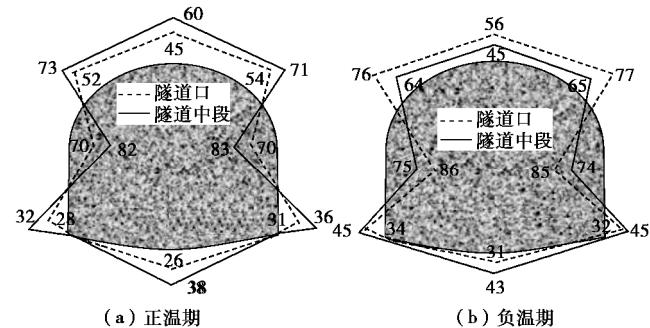


图 9 不同时期松动圈及塑性区轮廓图

Fig. 9 Profile of loose ring and plastic zone in different periods

4.3 衬砌应力

分别计算出正温期、负温期、冻融期 3 个代表性阶段的衬砌应力值，如图 10 所示，可见三者受力规律基本相似，即 3 个时期均表现为左右拱墙处受拉应力作用，拱腰、拱顶、仰拱均受压应力作用。但 3 个时期也存在一些差异，其中拱腰、仰拱位置的应力大小均表现为冻融期>负温期>正温期，且冻融期受压应力显著大于负温期和正温期的压应力。同时，在同一断面中各处受力不尽相同，其中拱墙和拱腰位置受力明显大于其他区域，由于该区域拉压应力的显著变化，常引起拱腰位置出现二衬破裂及偏转。另外，应力的最大值出现在拱腰、拱墙区域，这也是测点布置的主要依据。由图 10 可知，正温期受力值满足隧道中段>隧道入口；而负温期和冻融期的受力值满足隧道入口>隧道中段，可见季寒和冻融季对于洞口的影响大于隧道中段。



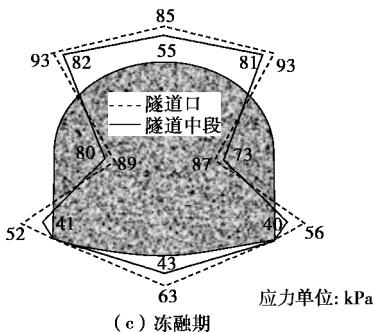


图 10 不同时期衬砌应力值分布示意图

Fig. 10 Schematic diagram of stress distribution of linings in different periods

图 11 为正温期、冻融期隧道入口的应力云图, 颜色越深应力越大, 冻融期的拱腰和拱墙应力显然大于正温期, 这与松动圈及应力分布相一致。此时, 由于冻融作用显著, 造成隧道围岩的不均匀受荷, 导致“塑性铰”在初衬、二衬环向界面出现脱离, 此时的剪切应力在重力影响下逼近切应力强度, 故在冻融交界的季节隧道易引发二衬破裂及局部偏转。

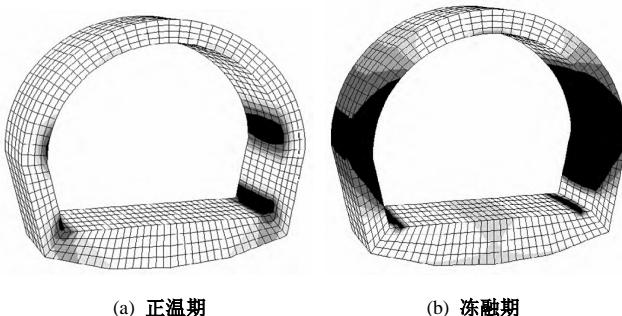


图 11 不同时期隧道入口的衬砌应力云图

Fig. 11 Stress nephogram of linings at tunnel entrance in different periods

5 结 论

通过对隧道入口和中段两个断面的倾角变形现场监测, 探究冻融交替对衬砌开裂和偏转的力学性态特征, 并基于数值模拟试验对隧道不同段围岩的破碎层和松动圈及衬砌应力应变特征进行分析, 得到以下结论:

(1) 隧道入口拱墙、拱腰偏转随季寒的交替变化显著, 其中左拱墙和左拱腰分别呈“倒 V 型”及“下凹型”, 但偏转在融季表现“滞后”, 在冻季相对“超前”, 且衬砌偏转在冻融交接处均呈现“突变”发展趋势。隧道中段倾角变形与隧道入口差别较大, 中段右拱腰在冻季、正温期有不同程度的“波动”偏转, 左拱腰则呈现“上凹型”变化, 且在融季有“滞后”偏转现象, 但总体上隧道中段较入口处的影响小。

(2) 计算松动圈的大小满足冻融期>负温期>正

温期, 且松动圈: 隧道入口>隧道中段, 通过数值模拟进一步分析得到, 总体上塑性区轮廓比计算松动圈大。

(3) 通过对比冻融期、负温期、正温期 3 个时期的应力应变特征, 发现拱墙和拱腰位置受力明显大于其他区域, 且冻融期的应力值要大于其它时期对应位置的应力值。由此可见, 无线传感倾角监测系统能够持续不间断监测结构的偏转及变形发展, 对掌握隧道结构的变形规律及监控隧道结构的异常变形具有重要意义。同时, 衬砌在冻融期的伤害比在其他时期更显著, 应防范冻融期的温度变化带来的工程灾害。

参 考 文 献:

- [1] 高焱, 朱永全, 赵东平, 等. 隧道寒区划分建议及保温排水技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊 1): 3489 – 3499. (GAO Yan, ZHU Yong-quan, ZHAO Dong-ping, et al. Study on classified suggestion of tunnel in cold region and thermal insulation-considered drainage technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3489 – 3499. (in Chinese))
- [2] 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.
- [3] TAKUMI K, TAKASHI M, KOUICHI F. An estimation of inner temperatures at cold region tunnel for heat insulator design[C]// Proceedings of Structural Engineering Symposium, 2008: 32 – 38.
- [5] 夏才初, 黄继辉, 卞跃威, 等. 融化作用下多年冻土隧道围岩的弹塑性解及其与支护的相互作用分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1987 – 1994. (XIA Cai-chu, HUANG Ji-hui, BIAN Yue-wei, et al. Elastoplastic analysis of surrounding rock of permafrost tunnel with thawing effect and its interaction with support[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1987 – 1994. (in Chinese))
- [6] LAI Y M, JIN L, CHANG X. Yield criterion and elasto-plastic damage constitutive model frozen sandy soil[J]. International Journal of Plasticity, 2009, 25: 1177 – 1205.
- [7] 高焱, 朱永全, 何本国, 等. 寒区高速铁路隧道温度场模型试验系统的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8): 1989 – 1998. (GAO Yan, ZHU Yong-quan, HE Ben-guo, et al. Development and application of test system modeling temperature field for high speed railway tunnel in cold region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(8): 1989 – 1998. (in Chinese))
- [8] 夏才初, 李强, 黄继辉, 等. 寒区隧道衬砌结构设计方法

- [J]. 地下空间与工程学报, 2017, **13**(增刊 1): 182 - 190. (XIA Cai-chu, LI Qiang, HUANG Ji-hui, et al. Design method of tunnel lining structure in cold region[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, **13**(S1): 182 - 190. (in Chinese))
- [9] LAI Y M, ZHANG X F, YU W B, 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.
- [10] 康永水, 刘泉声, 赵军, 等. 岩石冻胀变形特征及寒区隧道冻胀变形模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(12): 2518 - 2526. (KANG Yong-shui, LIU Quan-sheng, ZHAO Jun, et al. Research on frost deformation characteristics of rock and simulation of tunnel frost deformation in cold region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(12): 2518 - 2526. (in Chinese))
- [11] 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. (in Chinese))
- [12] MATSUOKA N. Diurnal freeze-thaw depth in rockwalls: Field measurements and theoretical considerations[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 1994, **19**(5): 423 - 435.
- [13] 陈建勋, 罗彦斌. 寒冷地区隧道温度场的变化规律[J]. 交通运输学报, 2008, **8**(2): 44 - 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): 44 - 48. (in Chinese))
- [14] 郭艳华. 钢纤维混凝土增韧性能研究及韧性特征在地下结构计算中的应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2008. (GUO Yan-hua. Research on the ductility of the steel fiber reinforced concrete and its application in the underground structure calculation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008. (in Chinese))
- [15] 胡元芳. 钢纤维喷混凝土隧道衬砌作用机理的探讨[J]. 现代隧道技术, 2002, **39**(3): 35 - 38. (HU Yuan-fang. Discussion on support behavior of steel fiber reinforced shotcrete lining in tunneling[J]. Modern Tunnelling Technology, 2002, **39**(3): 35 - 38. (in Chinese))
- [16] 崔光耀, 左奎现, 朱长安, 等. 隧道纤维混凝土二衬承载机理及受力计算方法研究[J]. 土木工程学报, 2018, **51**(10): 122 - 128. (CUI Guang-yao, ZUO Kui-xian, ZHU Chang-an, et al. Study on bearing mechanism and stress calculation method of tunnel secondary lining of fiber reinforced concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, **51**(10): 122 - 128. (in Chinese))
- [17] 伍毅敏, 李文博, 傅鹤林, 等. 季冻区隧道过渡段二衬短周期冻融数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(10): 1930 - 1935. (WU Yi-min, LI Wen-bo, FU He-lin, et al. Numerical simulation of freeze-thaw in short period of secondary lining at tunnel transition section in seasonal frozen area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(10): 1930 - 1935. (in Chinese))
- [18] 张德华, 雷可, 谭忠盛, 等. 软岩大变形隧道双层初期支护承载性能对比试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, **50**(增刊 2): 86 - 92. (ZHANG De-hua, LEI Ke, TAN Zhong-sheng, et al. Field test on bearing and deformation properties of double primary layers applied to large deformation tunnel in weak rock[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, **50**(S2): 86 - 92. (in Chinese))
- [19] 关宝树. 隧道工程设计要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (GUAN Bao-shu. Key points in the design of tunnel engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))
- [20] 樊克恭, 蒋金泉. 岩性弱结构巷道围岩的塑性区与松动圈形态[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **34**(增刊 1): 5275 - 5280. (FAN Ke-gong, JIANG Jin-quan. Shape of plastic areas and fractured zone of surrounding rocks of roadways with weak lithology structures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **34**(S1): 5275 - 5280. (in Chinese))