

考虑冻胀影响的高纬度寒区隧道洞口段稳定性分析

于凤春

黑河铁路(集团)有限责任公司

摘要: 新乡隧道是北黑铁路(龙镇至黑河段)升级改造工程的重点工程,以该隧道为工程依托,利用FLAC^{3D}数值模拟软件对隧道洞口段5a内的稳定性进行了研究,结果表明:洞口段主拉应力区会在一次循环中随时间向围岩深处移动扩展,在次年6月坡肩内部会有较大的主拉应力集聚,且隧道周围出现主拉应力为0的环形区域;山体拱肩位移呈现“倒三角形”分布;衬砌的两侧拱肩变形不对称程度在一次循环中变化剧烈,变化幅度约为2.88mm,但逐渐不受循环次数影响;5次冻融循环后使得洞口段主拉应力区向围岩深度扩展、坡肩位移增幅最大、最大主应变增量增幅46.5%;衬砌结构受压变形最大达到为4.38mm。

关键词: 严寒隧道;冻融循环;洞口稳定性

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.09.046

引言

近年来,我国东北的交通基础设施建设持续推进^[1],然而,由于东北年温差较大且冬季严寒,易导致隧道发生结构性病害^[2-3]。针对冻融循环造成的影响,近年来有不少学者进行了深入的研究,并取得了相应的科研成果。张常光等^[4]推导了寒区隧道冻胀力、应力与位移的塑性解答。李凌浩等^[5]对保温材料的冻融耐久性进行了测试表明,浸润作用对保温材料物理力学性质影响显著。张宇等^[6]通过实验发现冻土的冻结锋面稳定深度随冻融循环次数的增加而增加。

一、工程概况

北黑铁路(龙镇至黑河段)升级改造工程项目是黑龙江联接亚欧国际货物运输通道的重要组成部分。其中,新乡隧道对于缩短铁路既有线路里程具有重要意义,该隧道进口段为低山丘陵斜坡地形,坡度约为40°,地表植被茂密,覆土厚度约为2.0~10.0m,主要地层岩性为下伏华力西期花岗岩。根据临近黑河机场近十年来日均最高与最低温度的变化资料的分析,隧址处温差较大,冬季严寒漫长,夏季温和短促。年平均气温0.4℃,最热月平均气温29℃,最冷月平均气温-29℃。其次,隧址区土壤冻结深度为2.98m。

二、计算理论分析

由于国内高纬度隧道的工程气象条件往往具有温度振幅较大且冬季较为严寒的特性,故隧道围岩及衬砌的冻融损伤涉及低温环境下复杂的温度场、渗流场和应力场的耦合问题。以下分别列出三场各自的平衡条件。

(1) 流体质量守恒方程为:

$$-q_{i,i} + q_v = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $q_{i,i}$ 为某点的单位流体的流速; q_v 为初始流速; ζ 为由于渗流引起单位体积内流体质量的变化。

(2) 热平衡方程为:

$$-q_{i,i} + q_v = \frac{\partial \zeta^T}{\partial t} \quad (2)$$

式中: $q_{i,i}^T$ 为某点单位体积的热源强度; q_v^T 为初始热源强度; ζ^T 为多孔材料单位体积存储的热量。

(3) 动量平衡方程为:

$$\sigma_{ij,j} + \rho g_i = \rho \frac{dv_i}{dt} \quad (3)$$

$$\rho = \rho_d + ns\rho_w \quad (4)$$

式中: $\sigma_{ij,j}$ 为某点的应力; ρ 为密度; g_i 为某点的重力加速度; v_i 为某点的速度; n 为孔隙率; s 为饱和度; ρ_d 为干密度; ρ_w 为流体密度。

三、考虑冻胀影响的隧道稳定性分析

(一) 模型建立

图1主要展示了利用FLAC^{3D}数值软件,参考新乡隧道进口所建立的数值计算模型。该模型主要包含山体、待开挖的隧道部分、隧道二衬,共计三大部分。其中,模型下边界长95.0m、右边界高66.50m、上边界长58.0m,左边界高23.0m,山体边坡仰度为1:1.25,单元厚度设定为1,单元数量为56260。

(二) 模型参数及其边界条件的确定

可根据2021.09.01-2022.08.31期间的温度实测,得到的地表与二衬表面1年内的温度函数作为地表与二衬的温度边界条件,山体表面与二衬的温度函数分别见下式5,6所示。

$$Y = 3.9 - 18 \times \sin(2 \times 3.14 / 365 \times (X - 774)) \quad (5)$$

$$Y = 0.4 + 26.5 \times \sin(2 \times 3.14 / 365 \times (X + 136)) \quad (6)$$

根据现场以及相应的地勘报告确定花岗岩及衬砌的强度参数,具体地如表1所示。另外,根据综合徐光苗等的研究成果,本算例中岩石与流体的热膨胀系数,见表2所示。

为更具体分析隧道衬砌结构自身的变形,故在拱顶、拱肩、拱腰,拱底的内外两侧设置点位监测温度、位移以及应力的变化情况,共计设置16个监测点位。

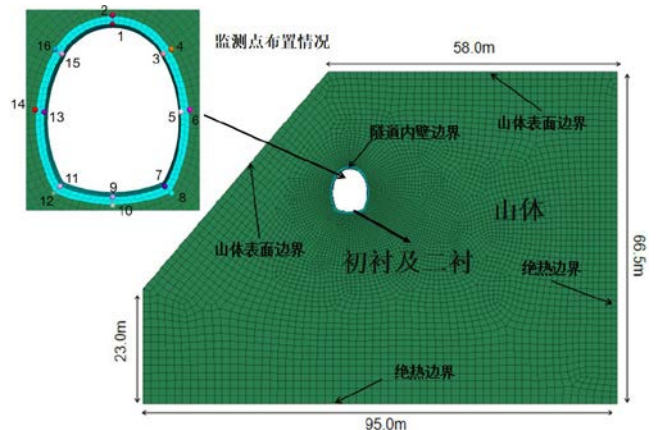


图1 有限差分模型

表1 花岗岩及衬砌的力学参数

材料	密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	内摩擦角 $\phi / (^\circ)$	粘聚力 C/MPa	弹性模量 $E / (\text{GPa})$	泊松比
花岗岩	2650	50.0	1.5	20	0.24
衬砌	2400	—	—	29.5	0.2

表2 热学参数

材料	恒压比热容 / $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	导热系数 / $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	渗透系数	膨胀系数	
花岗岩	0℃以上	750	3.49	1.0×10^{-7}	5.0×10^{-6}
	0℃以下	750	3.49	1.0×10^{-10}	-2.0×10^{-5}
流体	0℃以上	4190	0.52	—	2.1
	0℃以下	1880	2.21	—	-1.5×10^{-4}

(三) 洞口段冻融循环过程

(1) 洞口段1年内的冻融循环过程

图3展示了在1次冻融循环过程中，负温区、整体竖向位移场、最大主拉应力场与最大主应变场的演化过程。由于篇幅所限，仅在图中依次列出代表次年9月的三场瞬时数值结果。计算得出，整体Z向位移在9月~次年3月期间变化幅度较小。

最大主拉应力在一次循环过程中也同样具有较为明显的演化过程。当12月时，隧道衬砌右侧拱脚附近的主

拉应力最大，达到67.40MPa；当12月~次年3月时，地表与衬砌周围的主拉应力区逐渐向围岩深处扩大，在坡体浅层形成相对较高的应力带夹层；当次年3月~6月时，距隧道外轮廓线垂直距离为1.30m范围内的主拉应力减小至0，主拉应力区域开始向坡肩聚集，使得山体的变形在坡肩开始呈现“倒三角形”状分布。

图2c展示了隧道周围最大主应变增量的分布情况。计算得出，围岩应变以压应变为主，但由于衬砌结构与岩体的物理性质不同，在衬砌背后会存在局部的拉应变。

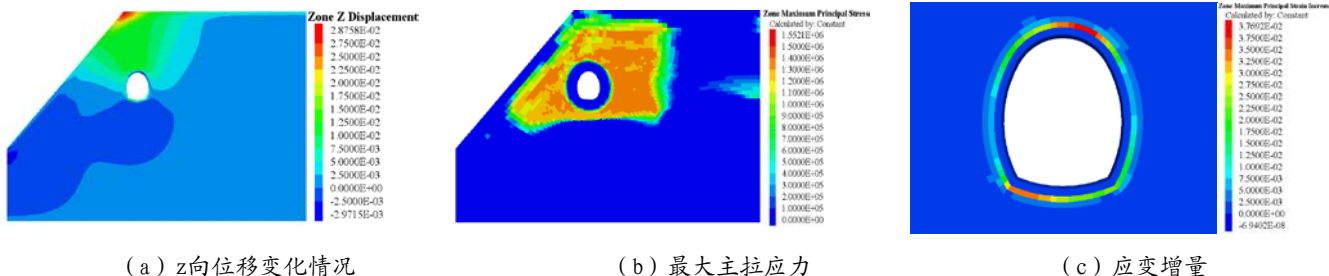


图2 1次冻融循环

(2) 5年内洞口段的冻融循环过程

由于在1次冻融循环过程中，山体与隧道结构会产生不可恢复的变形，为探究循环次数对温度场、力场以及变形的影响，图3展示了5次冻融循环后各场的分布情况。图3a描述了整体的竖向变形分布情况，其中“倒三角形”状分布的竖向变形区域随循环次数逐渐扩大，最大位移从第一次循环的28.76mm增至127.37mm，增幅442.87%，而隧道底部以下岩体的压缩变形基本不随时间变化，其大小为-3.99mm。但是，如

图3b所示的最大主拉应力的数值在5次循环中基本没有增减，最大主拉应力维持在1.31MPa，仅拉应力的区域开始水平的向深部围岩扩展，在竖直方向上的区域范围没有较大变动。

如图3c所示，在5次冻融循环过程中，最大主应变增量由第1次循环中的最大值0.02增至第5次循环的最大值0.093，增幅46.5%。与第一次循环不同的是，最大主应变增量的区域在拱顶和左侧拱脚方向开始向围岩深度扩展。

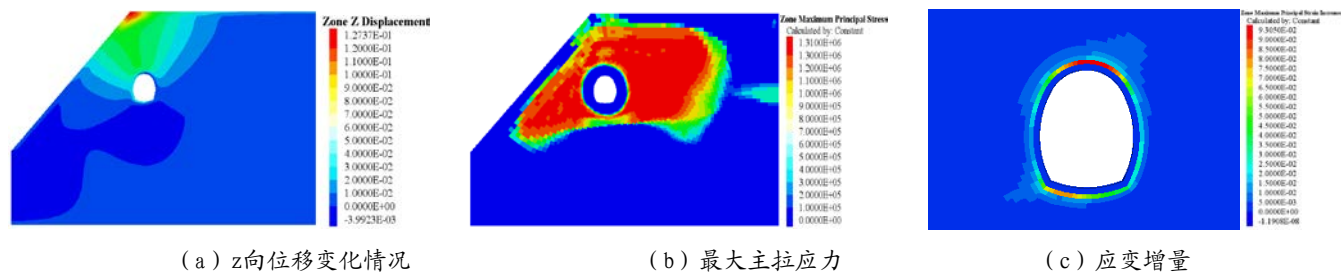


图3 5次冻融循环

(四) 衬砌结构的冻融循环过程

(1) 1次冻融循环衬砌冻融影响

图4展示了2、10与14监测点在1次冻融循环过程中

位移随温度的变化情况。可以看出，2号Z向、10号X向和14号Z向的位移随温度的变化关系均不相同。首先，2号Z向位移随温度的下降快速下降至-8.2mm，随后温

度升高,拱顶位移也开始逐渐上升。其次,10号Z向位移整体上表现为隆起,在温度回落时,冻胀位移快速上升。

(2) 5次冻融循环衬砌冻融影响

图5展示了2号、14号与10号位移在五次冻融循环中的变化情况。可以看出,2号的Z向位移随冻融循环次数的增加表现为螺旋式上升,最低的位移为-8.38mm,最大位移为12.50mm。

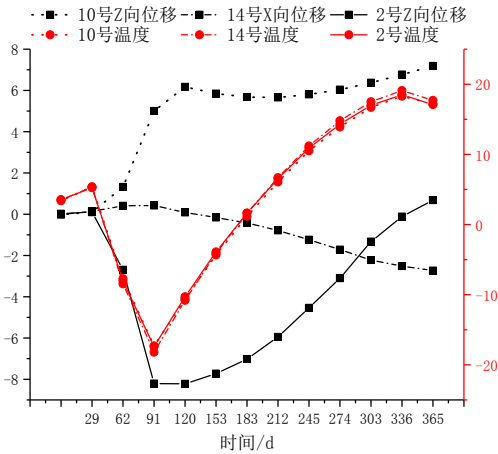


图4 监测点温度与位移关于时间的曲线

10号监测点位的X向位移在一个循环中以两种不同速率逐步增大。在前两次循环中,当11月到次年7月时是温度上升阶段,平均每天的位移增量为0.01mm,在次年7月到次年12月时是温度下降阶段,平均每天的位移增量为0.004mm。而在最后的循环中温度升高与降低阶段对应的位移速率分别为0.006mm/d, 0.004mm/d。

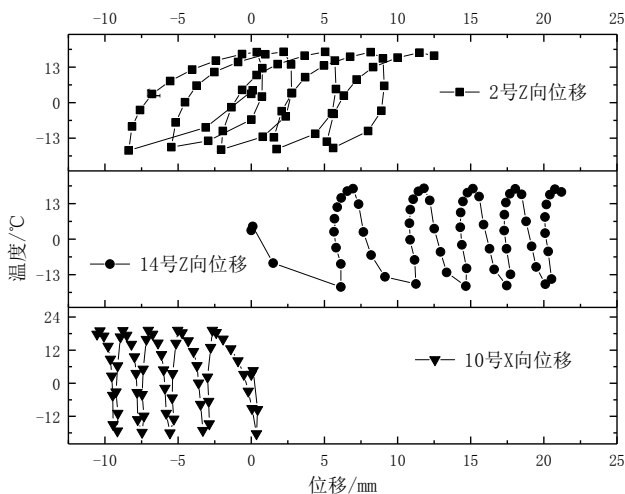


图5 监测点的冻融循环曲线

(3) 衬砌结构变形分析

以图1中16个监测点的位移数据为基础,计算得出拱顶、两侧拱肩、两侧拱腰、两侧拱脚、拱底处的衬砌变形,图6展示了这几处特征点变形的演化过程。其中,各位置处的变形规律受冻融循环影响表现为“波浪”型推进。

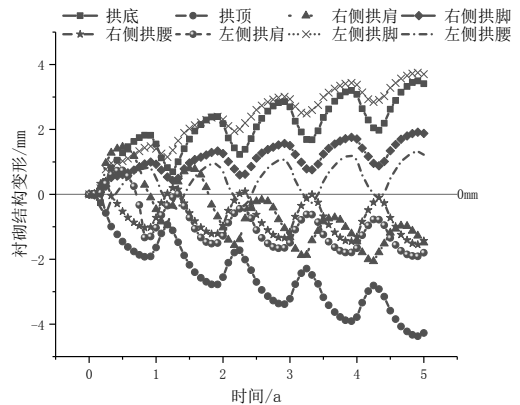


图6 衬砌结构变形演化过程

可以看出,图中衬砌结构变形有正负两种,正值表明衬砌结构受拉,负值则表示受压。受拉变形主要出现在左侧拱脚、拱底、右侧拱脚以及左侧拱腰处,其中左侧拱脚的变形最大,达到了3.75mm。而在受压变形中拱顶的整体变形最大,在第5次冻融循环过程中其最大变形达到了-4.38mm。

四、总结

(1) 考虑冻融影响,隧道洞口坡肩会在6月集聚较大的主拉应力,相应位移表现为“倒三角形”的分布。拱顶的Z向位移与温度变化趋势相同。拱底Z向位移整体表现为逐步增大,但在温度较低时,存在较小的回落。左侧拱腰X向位移在温度下降阶段,增量较小,而随着相应位置温度的上升,位移逐步减小至-2.73mm。

(2) 5次冻融循环后的结果表明,洞口段的最大主拉应力的数值大小受循环次数影响较小,但区域向围岩深处逐步扩展;坡肩位移增幅最大,洞口段最大主应变增量增幅46.5%。

(3) 5次冻融循环后,衬砌背后拱顶的Z向位移呈现出螺旋式上升的趋势,拱底与左侧拱腰则表现为在温度的上升或下降阶段,位移以不同速率持续增大及减小;左侧拱脚处的衬砌结构受拉变形最大,拱顶的受压变形最大,且隧道中线两侧拱肩的变形不对称程度在冻融循环过程中起伏较大,但逐渐不受冻融循环次数的影响。

参考文献

[1] 刘立君, 张友祥, 李雨婷. 交通发展格局演变的动力机制分析—以东北地区为例[J]. 安徽师范大学学报(人文社会科学版), 2023, 51(01): 144-157.
 [2] 万建国. 我国寒区山岭交通隧道防冻技术综述与研究展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(07): 1115-1131.
 [3] 崔国军, 李伟, 魏凡钦, 等. 季冻区运营公路隧道冻害分析及对策研究[J]. 公路, 2021, 66(02): 324-329.
 [4] 张常光, 高本贤, 周涓, 等. 冻融循环和不均匀冻胀下寒区隧道的塑性解答[J]. 力学学报, 2022, 54(01): 252-262.
 [5] 李凌洁, 穆彦虎, 明锋, 等. 循环冻融下寒区工程常用保温材料性能变化试验研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(02): 693-707.