

寒区公路隧道保温层设置的数值分析

霍润科^{1,2}, 汤寅净¹, 宁翠萍^{1,3}, 许健¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055;
3. 杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:针对东西部寒区隧道出现的冻害工程问题, 结合哈尔滨天恒山公路隧道现场监测数据, 提出考虑相变的平面瞬态温度场计算模型, 利用有限元软件对隧道温度场进行了数值模拟, 计算得到隧道运营期内保温层的设防厚度, 考虑隧道贯通后会在当地形成新的季节冻结层的实际情况, 计算了三种不同工况相同厚度保温层的设置方式, 结果表明分层设置保温层具有有效防治冻害的效果, 同时结合传热学理论, 对隧道结构设置保温层和不设置保温层两种工况进行热-应力耦合分析, 发现温度场对隧道结构应力场有较大影响, 因此在寒区进行隧道设计时, 应考虑热-应力相互作用的影响。

关键词:寒区隧道; 温度场; 保温层; 热-应力耦合

中图分类号: U451

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)02-0158-06

近年来, 随着我国交通基础产业的迅速发展, 东西部寒冷地区隧道工程正在大规模的兴建, 与一般地区隧道相比将面临更多复杂的技术难题, 尤其是冻害问题。据报道^[1-2], 仅在我国东北和西北地区就有 33 座铁路隧道和多座公路隧道遭受不同程度的冻害, 每年都有 8~9 个月不能正常使用。鉴于寒区隧道遭受冻害的严峻形势, 许多学者开展了对隧道保温隔热技术的研究, 取得了不少研究成果。陈建勋等^[3-4]采用 4 种防冻隔温材料对大坂山隧道的保温效果进行了现场测试, 证明了采取防冻隔温措施治理冻害的可行性; 马建新、谢红强等^[5-6]对高寒地区隧道保温隔热层设防厚度进行了分析, 并比较了硬质聚胺脂泡沫塑料和干法硅酸铝纤维板的保温性能; 晏启祥等^[7]以高寒地区某隧道工程为背景, 分析了隧道保温隔热材料厚度为 0.0, 3.0 cm 情况下二次衬砌及周边围岩温度的变化过程, 研究了温度应力分布及其可能导致的混凝土开裂, 对保温隔热材料的防冻效果进行了评价。本文以严寒地区天恒山绕城公路隧道为背景, 提出考虑相变的平面瞬态温度场计算模型, 模拟分析了 20 年后温度场及冻结层的变化规律, 对其工程防治效果进行了验证, 并利用有限元方法对保温材料所处不同位置隧道的温度场进行模拟分析, 确定了防冻保温层的最佳设防位置, 同时对隧道结构进行热-应力耦合分析, 研究了温度与应力相互作用的影响规律。

1 工程概况

天恒山隧道工程是哈尔滨绕城公路东北段的重要组成部分, 该隧道为双线分离式隧道, 其中上行线隧道长度为 1 660 m, 下行线隧道长度为 1 690 m, 基本宽度为 11.5 m, 建筑限界净高为 5 m, 隧道围岩为第四系堆积层粘土、亚粘土, 局部地下水较丰富, 围岩级别 V、VI 级, 按新奥法原理设计与施工, 采用复合式支护结构形式。该隧道位于北寒带气候区, 冬季长达 5 个月之久, 最冷月平均气温达到 -18℃ 左右, 最大冻深 2.05 m, 地面稳定冻结日期为 11 月下旬, 稳定解冻日期为翌年 4 月中旬。

2 隧道保温隔热层计算

2.1 模型建立

选取距隧道洞口 50 m 测试断面 XK89+990 进行分析, 利用有限元软件 ANSYS 建立隧道有限元

收稿日期: 2012-08-20 修改稿日期: 2013-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41172237); 陕西省教育厅专项基金资助项目(11JK0947)

作者简介: 霍润科(1963-), 男, 陕西岐山人, 博士, 教授, 从事岩土工程与隧道工程教学及科研工作。

分析模型.

2.1.1 基本假定

(1)假定围岩为各向同性的均匀介质;(2)各层混凝土是完全均匀且各向同性的连续材料;(3)为简化计算,不考虑防水层的影响;(4)隧道为二维、稳态及无限长圆筒壁.

2.2.2 计算范围及材料参数

计算范围取左右边界距中心点距离为 30 m,下边界距中心点距离为 30 m,上边界取到地表.其中左右边界为绝热边界,下边界的温度梯度为 0.04℃/m,上边界和隧道内边界均与大气相通,隧道内空气对流换热系数为 10 W/m²·K^[8].

由工程勘察报告知,计算范围内的围岩均为粘土,亚粘土,由中国科学院冻土工程国家重点实验室测试结果得到围岩的热物理参数见表 1^[9],考虑材料相变参数热焓值见表 2^[10].

表 1 材料的热物理参数

Tab.1 The thermal parameters of materials

名称	干容重 /kg·m ⁻³	含水量 /%	比热容		导热系数		弹性模量 /MPa	泊松比 /μ	膨胀系数 /℃	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /°
			/ J·(kg·K) ⁻¹		/ W/(m·K) ⁻¹						
			-20℃	20℃	-20℃	20℃					
粘土	1 520	27.2	1 222	1 608	2.12	1.42	2	0.4	8×10 ⁻⁵	16.9	26.2
混凝土	2 480	2.86	560	774	2.56	2.23	3×10 ⁴	0.2	1×10 ⁻⁵	—	—
PU	45	—	1 720	1 720	0.024	0.024	0.02	0.2	—	—	—

表 2 粘土的相变参数热焓值

Tab.2 The heat enthalpy of clay

温度/℃	20~0	0.0~-0.2	-0.2~-0.5	-0.5~-1	-1~-2	-2~-3	-3~-5	-5~-10	-10~-20
视比热 /J·(kg·K) ⁻¹	1 608	130 278	35 903	11 864	6 678	6 640	2 702	1 737	1 222
热焓值 (×10 ⁷ J/m ³)	22.1	15.9	10.87	8.79	7.65	6.36	5.08	4.04	2.36

2.2 数值模拟

2.2.1 计算模型

由现场已测温度数据利用有限元法推算出研究范围内围岩的原始地温值 T₀,拟合出当地的气温函数 T₁和隧道洞内的气温函数 T₂,以 T₀、T₁及 T₂作为边界条件,输入各材料热物理参数,计算隧道冻融圈范围和温度场分布,以评价保温层设置厚度的冻害防治效果.

隧道采用平面四节点二维热实体单元 PLANE55 模拟围岩、衬砌及保温层,运用 ANSYS 的自由网格划分功能对模型进行网格划分,共生成 1 315 个单元,1 399 个节点,划分后的模型局部放大如图 1 所示.

2.2.2 计算结果分析

通过数值模拟,得到在运营期内寒区隧道设置保温层以后围岩冻融圈范围及温度场变化规律,其结果如图 2(a, b, c)所示.

从图中可知,在隧道运营第 1 年冬季,地面冻胀深度为 2.1 m,在隧道内部从保温层表面算起 0.5 m 范围内出现负温,二次衬砌内部 0.4 m 范围出现负温,在围岩内没有出现负温及冻胀现象.通过对隧道运营 10、20 年模拟计算发现,地面冻深由 2.3 m 增加到 2.5 m,二次衬砌内负温范围由 0.46 m 增加到 0.5 m,而在围岩内不会出现负温及冻胀现象.由此可知,隧道保温层的设置厚度可以有效防治隧道冻害,从地面的冻深程度可知,由于

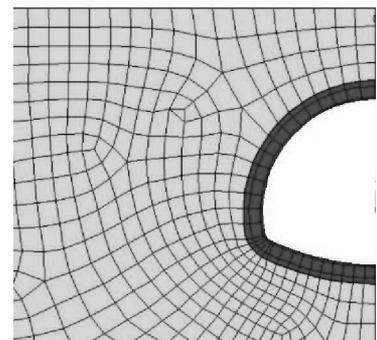


图 1 模型中心网格划分图

Fig.1 The meshing of the model center

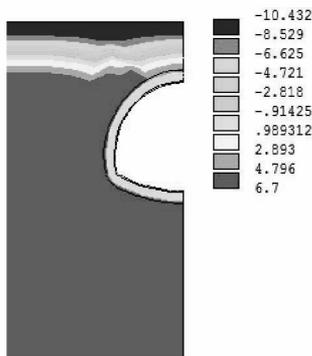


图 2(a) 第 1 年的温度场变化
Fig.2 (a) Temperature field of the first year

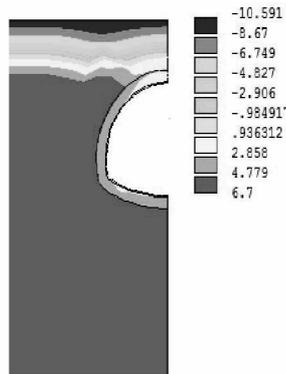


图 2(b) 10 年后的温度场变化
Fig.2 (b) Temperature field after ten years

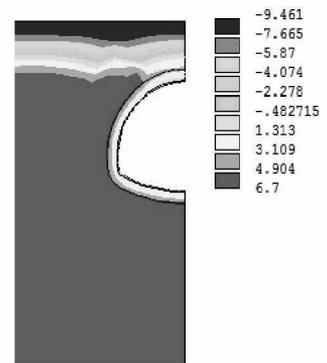


图 2(c) 20 年后的温度场变化
Fig.2 (c) Temperature field after twenty years

隧道贯通会在当地形成新的冻结层,随着时间的延续,冻深范围会有所增加.

2.3 现场监控量测

为了确定数值模拟所选取的边界条件与材料物力学参数的合理性,对测试断面 XK89+990 进行验证.由现场监测数据,得到第 1 年隧道温度与距二次衬砌表面距离的关系见图 3.

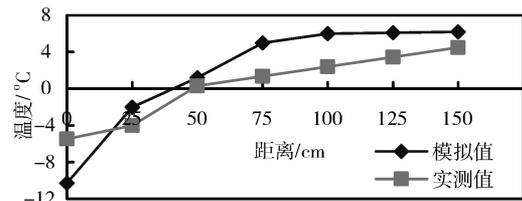


图 3 隧道围岩温度与距二次衬砌表面距离的关系图

Fig. 3 Relationship between distance from the second lining and temperature of the surrounding rock

由图可知实测温度值与数值模拟温度值变化趋势基本吻合,在距衬砌表面 50 cm 范围内会出现负温,围岩内没有出现负温及冻胀现象,从而防止了因冻胀和融沉而引起隧道结构破坏,同时也验证了数值模拟结果的合理性.

2.4 隧道保温层设置分析

目前,设置防冻保温层已成为寒区隧道防治冻害的有效措施之一^[11],但对于防冻保温层的最佳设防位置仍在探讨之中,现利用有限元模拟方法确定防冻保温层的最佳设防位置.

2.4.1 在二次衬砌表面设置 10 cm 保温层

天恒山隧道采用保温层设计方案为:保温层厚度为 10 cm,预制 F13-1PU 硬质聚氨酯板,通过轻型龙骨架(龙骨架内填充 F13-1PU 硬质聚氨酯板)固定在二次衬砌表面,将保温层设在二次衬砌表面,保温层破坏后维修方便.利用有限元法将边界条件施加到模型上,得到隧道运营 20 年后的温度场变化规律见图 4.

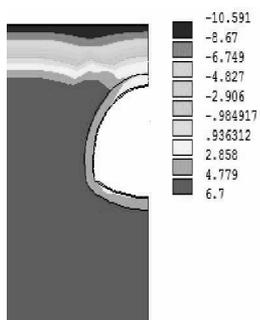


图 4 保温层设置在二次衬砌表面 20 年后温度场
Fig. 4 The temperature field twenty years after insulation layer was set on the second lining surface

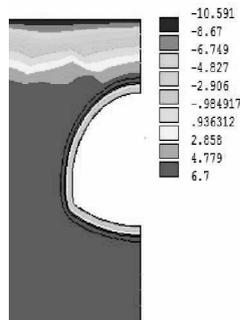


图 5 保温层设置在初期支护与二衬之间 20 年后温度场
Fig. 5 The temperature field twenty years after the insulation layer was set between primary support and second lining

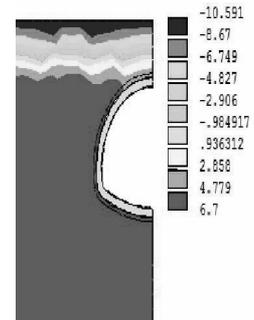


图 6 保温层分层设置 20 年后的温度场
Fig. 6 The temperature field twenty years after the insulation layered was set

由图可知,隧道运营 20 年后冬季,地面冻深为 2.5 m,在二次衬砌内 0.5 m 范围会出现负温,围岩内部不会出现冻胀现象.与隧道在运营第 1 年地面冻结深度比较可知,由于隧道贯通,当地的冻结深度增加了 0.4 m.

2.4.2 在初期支护与二次衬砌之间设置 10 cm 保温层

为了确定保温层最佳设防位置,将保温层设置在初期支护与二次衬砌之间,利用数值模拟 20 年后隧道温度场变化规律见图 5,由图可知,隧道运营 20 年后冬季,地面冻深为 2 m,二次衬砌内 0.39 m 范围会出现负温,隧道运营第 1 年地面冻结深度为 1.8 m,由此可知,当地冻结深度增加了 0.2 m.

2.4.3 在初期支护与二次衬砌表面各设 5 cm 保温层

将 10 cm 厚保温层分层设置在初期支护表面和二次衬砌表面各 5 cm,模拟计算隧道 20 年后温度场变化见图 6,由图可知,在运营 20 年后隧道地面冻结深度为 2.5 m,在隧道内部只有 5 cm 厚的保温层会出现负温,在喷射混凝土、二次衬砌及围岩内都不会出现负温,从而说明将保温层分层设置具有更好的冻害防治效果.

比较以上三种工况,将 10 cm 保温层设置在二次衬砌表面与设置在初期支护与二次衬砌之间时,隧道贯通对当地冻结层的影响相差不大,而将保温层设置在初期支护与二衬之间时,隧道内出现负温的范围较小;将保温层分设在初期支护和二次衬砌表面各 5 cm 时,负温仅出现在保温层范围内,说明分层设置保温层较前两种情况更能有效地防治冻害的发生.

2.5 热-应力耦合分析

由于寒区隧道温度有较大的变化,因此需考虑隧道结构在温度场作用下的应力分布.利用间接耦合法计算隧道结构不设置保温层和设置保温层两种工况下,隧道结构温度应力的分布,对计算模型进行温度场与应力场的耦合分析,得到隧道结构在不设保温层时的主应力和竖向变形如图 7(a,b)所示.

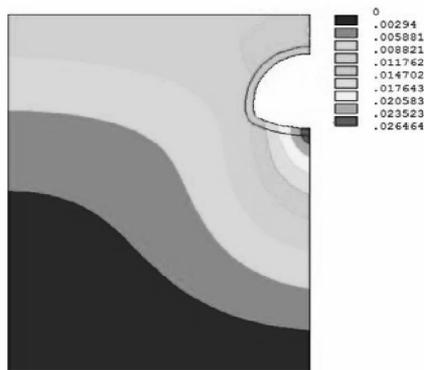


图 7(a) 无保温层时隧道结构竖向变化图

Fig. 7(a) The vertical deformation of tunnel structure when insulation layer is not set

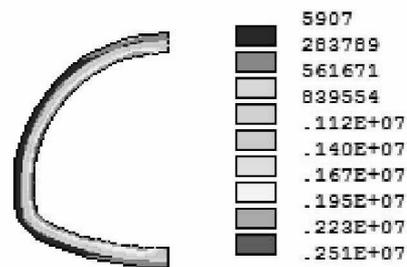


图 7(b) 无保温层时隧道时砌结构的主应力图

Fig. 7(b) Principal stress of lining structure when insulation layer is not set

从图 7 可以得到,在非均匀温度场作用下,隧道及围岩均发生了变形.图 7(a)显示,隧道衬砌结构最大变形发生在仰拱处,其值约为 26.5 mm,拱顶变形次之,约为 17.6 mm,边墙处变形较拱顶与仰拱都小.由前面温度场的分析可知,隧道衬砌结构边墙处围岩温度变化较小,因此产生变形比拱顶和仰拱处要小,隧道拱顶处埋深较浅,属于超浅埋的情况,拱顶处温度受气温影响变化较大,产生变形也会较大,在仰拱处,隧道围岩温度变化较大,所以产生变形会比拱顶处大.从图 7(b)可以看出,隧道衬砌结构拉应力最大值为 2.51 MPa,大于 C30 混凝土的抗拉强度设计值 1.43 MPa,二次衬砌混凝土会产生开裂引发渗水现象,在冬季渗水的发生会在二次衬砌表面产生冻害,需要设置保温层,预防隧道冻害发生.因此假设在隧道二次衬砌表面设置 10 cm 厚的硬质聚氨酯保温材料,模拟计算得到隧道主应力与竖向变形见图 4.8 所示.

从图 8(a)可知,设置保温层以后,隧道仰拱处的最大变形值由 26.5 mm 减小为 21.5 mm,拱顶变形由 17.6 mm 减小为 16.7 mm,且边墙处变形值减小了 2.8 mm.设置保温层以后,隧道及周围围岩的

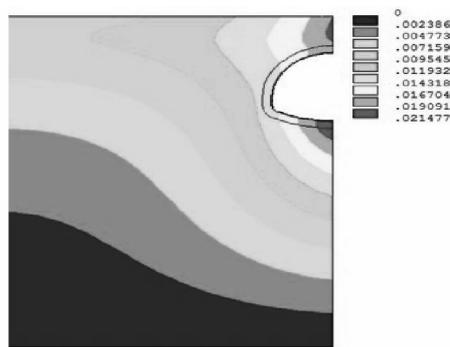


图 8(a) 设保温层隧道围岩的竖向变化图

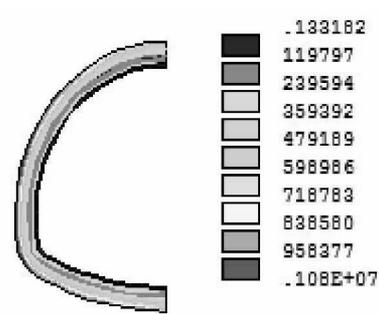
Fig. 8 (a) The vertical deformation of tunnel
Structure when insulation layer is set

图 8(b) 设保温层隧道衬结构的主应力图

Fig. 8 (b) Principal stress of lining structure
when insulation layer is set

温度受外界气温的影响较小,因此由温度变化所引起的变形值较不设保温层时有所减小。图 8(b) 所示隧道衬砌结构的主应力图,隧道衬砌结构的最大拉应力为 1.08 MPa,小于 C30 混凝土抗拉强度的设计值,二次衬砌混凝土不会产生开裂,衬砌不会发生渗水,在寒季隧道衬砌表面将不会发生冻害现象,由此可知保温层设置对防治隧道冻害是大有好处的。

3 结 语

借助有限元分析对哈尔滨天恒山公路隧道保温层设置进行了数值模拟,分析了隧道在运营后冻融圈范围及温度场分布,研究发现:

(1) 隧道围岩温度实测值与计算值变化趋势基本吻合,在距二次衬砌表面 0.5 m 范围内会出现负温,衬砌围岩内没有出现负温及冻胀现象,从而防止了因冻胀和融沉而引起隧道结构的破坏,同时也验证了模拟所选取的边界条件与材料物理力学参数的合理性。

(2) 保温层设防对冻害有明显的防治效果,相同厚度的保温层,将其设置在初期支护与二次衬砌之间时,隧道内部出现负温范围较小,而将保温层分层设置在初期支护表面与二次衬砌的表面各 5 cm,隧道内部出现负温范围最小,为达到相同的防治效果,分层设置保温层可以减小保温层厚度,节约工程成本。

(3) 温度场对寒区隧道结构应力场有较大的影响,特别会产生较大拉应力,所以进行寒区隧道结构设计时,要考虑热与应力相互耦合作用的影响。

参考文献 References

- [1] 赖远明,吴紫旺,朱远林. 寒区隧道温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 529-533.
LAI Yuan-ming, WU Zi-wang, ZHU Yuan-lin. Nonlinear analyses for the couple problem of temperature, seepage and stress fields in cold region tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5): 529-533.
- [2] 程 凡. 鲁霍一级公路阿拉坦隧道温度场特性研究[D]. 西安:长安大学, 2009.
CHENG Fan-Research on the Temperature Field of Alatan Tunnel in Lu-Huo Highway. [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [3] 陈建勋, 咎勇杰. 寒冷地区公路隧道防冻隔热层效果现场测试与分析[J]. 中国公路学报, 2001, 14(4): 75-79.
CHEN Jian-xun, ZAN Yong-jie. Field test and analysis of antifreezing thermal-protective layer effect of the highway tunnel in cold area. [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(4): 75-79.
- [4] 陈建勋. 公路隧道冻害防治技术[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2006, 26(4): 68-70.
CHEN Jian-xun. Technique of preventing frost damage in highway tunnel[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(4): 68-70.
- [5] 马建新, 何 川, 谢红强, 等. 高寒地区隧道保温隔热层设防厚度的研究[J]. 铁道建筑技术, 2003(6): 20-22.

- MA Jian-xin, HE Chuan, XIE Hong-qiang. Study on thickness fortified heat preservation and heat insulation layer in cold area tunnel[J]. Railway Construction Technology, 2003(6):20-22.
- [6] 谢红强,何 川. 寒区公路隧道保温层厚度的相变温度场研究[J]. 岩石力与工程学报, 2007, 26(增刊 2):4395-4401.
- XIE Hong-qiang, HE-Chuan. Study on insulating layer thickness by phase-change temperature field of highway tunnel in cold region [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2):4395-4401.
- [7] 晏启祥,何 川,曾东洋. 寒区隧道温度场及保温隔热层研究[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2005, 37(3):25-27.
- YAN Qi-xiang, HE Chuan, ZENG Dong-yang. Study of temperature field and heat preservation and insulation layer for tunnel in cold area[J]. Journal of Sichuan University, Engineering Science Edition, 2005, 37(3):25-27.
- [8] 章熙民,任泽霈,梅飞鸣. 传热学[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2007.
- ZHANG Xi-min, REN Ze-pei, MEI Fei-ming. Heat transfer[M]. Beijing: China building industry press, 2007.
- [9] 郑 波. 高温-高含冰量冻土力学特性及冻土路基变形研究[D]. 兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2007.
- ZHENG Bo. Study on warm and ice-rich permafrost beneath Physic-Mechanical Properties and Embankment Deformation Rules[D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [10] 王泽鹏,张秀辉,胡仁喜,等. ANSYS12.0 热力学有限元分析从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- WANG Ze-peng, ZHANG Xiu-hui, HU Ren-xi, et al. Beginner to proficient in thermodynamics finite element analysis ANSYS 12.0[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [11] 吴紫汪. 寒区隧道工程[M]. 北京:海洋出版社, 2003.
- WU Zi-wang. Tunnel Engineering in cold area [M]. Beijing: Ocean Press, 2003.

Numerical analysis of insulating layer setting of highway tunnel in cold regions

HUO Run-ke^{1,2}, TANG Yin-jing¹, NING Cui-ping^{1,3}, XU Jian¹

- (1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;
2. Key Laboratory of Structural Engineering and Earthquake Resistance. Ministry of Education, Xi'an 710055, China;
3. Yangling Vocational & Technical College, Yangling 712100, China)

Abstract: According to the frost damage to the eastern and western cold region tunnels, this paper, combining with the TianHengshan highway tunnel and the temperature field data monitored in the job-location, creates the plane and transient temperature model considering the phase change and simulates the temperature field of the tunnel. The results show that the thickness of the insulating layer can effectively protect the tunnel from frost damage. Considering the local region will form a new frozen layer because of the tunnel, the paper also calculates the three different working conditions which insulating layer with the same thickness is set by different methods. The result reveals that the insulating layer set by layering can more effectively stop the frost damage. According to the theory of heat transfer, this paper has researched on hot-stress field coupling analysis about tunnel structure in two different kinds of working conditions where insulation layer is not set and insulation layer is set. The result reveals that the temperature field has a major effect on the stress field. So when the tunnel in cold regions is designed, the influence of thermal stress must be considered.

Key words: tunnel in cold regions; temperature field; insulating layer; hot-stress field coupling analysis