

风火山隧道围岩冻胀对支护结构体系的影响

Effect of frost heaving on tunnel supporting systems of Fenghuoshan railway tunnel

张德华^{1,2}, 王梦恕¹, 谭忠盛¹, 孔恒¹, 崔隽²

(1. 北方交通大学 土建学院隧道试验与研究中心, 北京 100044; 2. 太原理工大学 建筑与环境学院, 山西 太原 030024)

摘要: 针对目前在建的青藏铁路工程——世界第一高隧风火山隧道, 探讨了围岩冻胀对隧道支护结构体系的影响, 给出了隧道围岩冻胀力的弹性解; 根据风火山隧道岩层地质条件, 分析了寒区隧道支护结构的力学性能, 得到了不同围岩完整度情况下, 随着冻融圈厚度的变化, 衬砌刚度不同、厚度不同时冻胀力的分布规律, 确立了高海拔寒区隧道围岩冻胀对支护结构体系的影响; 同时在明确冻土隧道冻害概念基础上, 提出了减弱围岩冻胀对支护结构体系影响的有效措施。

关键词: 冻土; 隧道; 支护结构; 冻胀; 冻害

中图分类号: TU 445; U 451

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)05-0571-03

作者简介: 张德华(1972-), 女, 山西太原人, 北方交通大学博士生, 太原理工大学讲师, 主要从事隧道及地下工程研究。

ZHANG De-hua^{1,2}, WANG Meng-shu¹, TAN Zhong-sheng¹, KONG Heng¹, CUI Jun²

(1. Northern Jiaotong University of Technology, Beijing 100044, China; 2. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Based on the construction of Fenghuoshan railway tunnel, the effect of frost forces on tunnel supporting system in cold region is discussed. First, the elastic formula of the frost force is given. Second, according to geological condition of rock surrounding Fenghuoshan railway tunnel, the mechanical properties of tunnel supporting system in cold region are analyzed. And with the variation of integrity of rock, thickness and stiffness of lining, and thickness of active layer, the variation of frost force is determined. At last, based on the concept of frost damage of tunnel in cold region, some effective measures are proposed to alleviate the influence of the frost force on tunnel supporting system in cold region.

Key words: frozen soil; tunnel; supporting system; frost heave; frost damage

0 引言*

高原、高寒、冻土条件会对隧道支护体系产生较大影响。隧道开挖后, 冻土区原有的稳定热力条件遭到破坏, 代之以开放通风对流, 避开太阳热辐射的新的热力系统, 此时衬砌背后围岩形成季节融化圈, 对隧道支护结构产生反复冻胀力作用。冻胀力与其他作用力共同作用于隧道衬砌上可能造成隧道的开裂和剥落, 导致隧道出现漏水、结冰、挂冰等冻害, 威胁隧道的正常运营。在我国东北和西北地区有 33 座铁路隧道, 由于地处寒区, 这些隧道都有不同程度的冻害。有的隧道由于冻害影响, 常年有 8~9 个月不能使用。因此, 分析预测高海拔、严寒地区隧道开挖后, 围岩及支护结构体系力学性能及安全耐久性问题, 成为高海拔严寒地区隧道建设亟待解决的问题。针对寒区隧道, 文献[1~3]给出了一些理论分析, 但未见到关于高寒地区隧道支护结构性能分析的报道。本文结合目前在建的青藏铁路工程——世界第一高隧风火山隧道, 对围岩冻胀对隧道支护结构体系的影响进行了探讨。

1 隧道围岩冻胀力理论分析

寒区隧道正冻时围岩与支护结构分区模型见图 1。

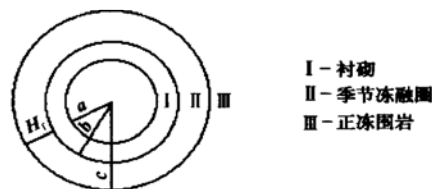


图1 隧道围岩冻胀力分析力学模型

图1 Mechanical model of frost force in rock surrounding the tunnel

将衬砌、季节融化圈和正冻围岩看成是由三个轴对称弹性体相互接触组成的受力体系。由弹性力学^[4], I区应力和径向位移表达式如下:

$$\sigma_r^I = -\frac{b^2(r^2 - a^2)}{r^2(b^2 - a^2)}P_b, \quad (1)$$

$$\sigma_\theta^I = -\frac{b^2(r^2 + a^2)}{r^2(b^2 - a^2)}P_b, \quad (2)$$

$$u_r^I = \frac{b^2 P_b}{E_1(b^2 - a^2)}(1 + \mu_1)\left[(2\mu_1 - 1)r - \frac{a^2}{r}\right]. \quad (3)$$

式中 E_1 , μ_1 分别为 I 区衬砌的弹性模量和泊松比; P_b 为季节融化圈冻胀时作用于衬砌上的均布力。

II 区为季节冻融区, 其内壁受到 P_b 的作用, 外壁受正冻围岩压力 P_c 作用。当围岩冻融圈厚度为 H_f 时, 冻融圈外壁的膨胀量为

$$\Delta h = \frac{\Delta V}{2\pi(H_f + b)} = \frac{n\alpha f(H_f + b)^2 - b^2}{2(H_f + b)} \quad (4)$$

式中 n 为围岩完整度; α 为水变成冰的体积膨胀系数。

冻融圈在均布力 P_b 及 P_c 作用下, 冻胀膨胀量为 Δh 时轴对称平面问题的应力和位移弹性解为

$$\sigma_r^{\text{II}} = \frac{1 - c^2/r^2}{c^2 - b^2} b^2 P_b + \frac{b^2/r^2 - 1}{c^2 - b^2} c^2 P_c \quad (5)$$

$$\sigma_\theta^{\text{II}} = \frac{1 + c^2/r^2}{c^2 - b^2} b^2 P_b - \frac{b^2/r^2 + 1}{c^2 - b^2} c^2 P_c \quad (6)$$

$$u_r^{\text{II}} = \frac{(1 + \mu_2)r}{E_2} \left[\frac{b^2(1 + \frac{(b + H_f)^2}{r^2} - 2\mu_2)P_b}{(b + H_f)^2 - b^2} - \frac{(1 + \frac{b^2}{r^2} - 2\mu_2)P_b(b + H_f)^2}{(b + H_f)^2 - b^2} \right] + r\epsilon_0(1 + \mu_2) \quad (7)$$

式中 E_2 , μ_2 分别为 II 区(季节冻融区)围岩的弹性模量和泊松比。

III 区为正冻围岩区, 外壁为不受力的无限大平面体, 其弹性解析解为

$$\sigma_r^{\text{III}} = -\frac{c^2}{r^2} P_c + (\frac{c^2}{r^2} - 1) P_0 \quad (8)$$

$$\sigma_\theta^{\text{III}} = -\frac{c^2}{r^2} P_c - (\frac{c^2}{r^2} + 1) P_0 \quad (9)$$

$$u_r^{\text{III}} = \frac{r(1 + \mu_3)}{E_3} \left[\frac{c^2}{r^2} P_c - (1 + \frac{c^2}{r^2} - 2\mu_3) P_0 \right] \quad (10)$$

上述诸式中, P_b 及 P_c 是未知的, 其大小可由在 I、II、III 区相互交界处位移的连续条件来确定, 即

$$u_r^{\text{I}}|_{r=b} = u_r^{\text{II}}|_{r=b} \quad (11)$$

$$u_r^{\text{II}}|_{r=c} - u_r^{\text{III}}|_{r=c} = \Delta h \quad (12)$$

将式(3) (4) (7) 和(10)代入式(11)和(12), 并令

$$\begin{aligned} m_1 &= (b^2 + a^2)/(b^2 - a^2) \\ m_2 &= [(b + H_f)^2 + b^2]/[(b + H_f)^2 - b^2] \\ p &= 2b^2/[(b + H_f)^2 - b^2] \\ q &= 2(b + H_f)^2/[(b + H_f)^2 - b^2] \\ e &= E_2/E_1 \end{aligned} \quad (13)$$

可得衬砌所受围岩冻胀力弹性解析解为

$$P_b = \frac{n\alpha E_2}{pq + (m_2 + 1)[e(m_1 - \mu_1) + (m_2 + \mu_2)]} \quad (14)$$

2 围岩冻胀对隧道支护结构体系的力学效应分析

2.1 风火山隧道概况

风火山隧道建成后将是世界上海拔最高的隧道。它位于青藏高原腹地, 昆仑山与唐古拉山间, 线路行走于风火山低山丘陵区, 山顶海拔高 4995 m, 属高原丘陵地貌, 自然条件恶劣。隧道进口处为山梁地带, 坡度较

陡; 出口位于山凹地带, 坡度较缓。处于低温多年冻土区, 冻土层厚 80~100 m。该段出露地层主要为第四系全新统坡 残积地层及第三系砂岩与泥岩互层。隧道通过地质主要为泥岩 砂岩 层状结构, 风化严重。气候属高原冰雪气候, 气候干燥, 气温、气压低, 春秋季节短暂, 冻结期长。风火山隧道 C25 衬砌的弹模为 28.3 GPa, 泊松比为 0.18; 砂岩弹模为 0.6 GPa, 泊松比为 0.38。

2.2 围岩完整度对支护结构体系力学性能的影响

取膨胀系数 $\alpha = 0.09$, 隧道内外径尺寸分别为 $a = 5.56$ m, $b = 6.66$ m。由式(14)求得围岩完整度为 5%, 10%, 15%, 20% 和 30% 时砂岩冻胀力随冻融厚度的变化规律如图 2 所示。可见, 冻胀力随冻融厚度的增加而增加, 但冻胀力增加的速率随冻融圈厚度的增加而逐渐降低。冻胀力随围岩完整度 n 的增大而增大。

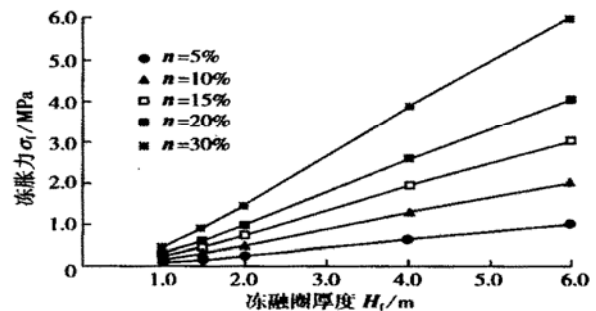


图 2 冻胀力变化规律
Fig. 2 Variation of frost force

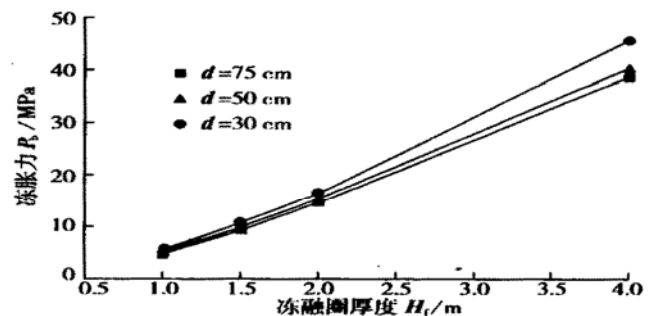


图 3 衬砌厚度对冻胀力的影响
Fig. 3 Effect of thickness of lining on frost force

2.3 衬砌厚度对支护结构体系力学性能的影响

为了得到冻胀力作用下隧道支护体系的力学性能, 本文分别计算了围岩完整度 $n = 30\%$ 、衬砌厚度为 75, 50, 30 cm 时, 随着冻融圈厚度的变化, 冻胀力对支护结构体系的影响, 见图 3。由图可知, 衬砌厚度越小, 衬砌上所受冻胀力越大。但当冻融圈厚度小于 2 m 时, 衬砌厚度变化所引起的冻胀力变化幅度仅在 10% 左右。由于冻融圈厚度应不超过冻土上限, 而风火山隧道所处地区冻土上限小于 2 m; 据此, 可得到初步结论, 风火山隧道支护结构体系所受冻胀力并不随衬砌厚度产生较大变化。因此, 明显加大衬砌厚度并不能有效减弱其所受冻胀力作用。可以认为, 冻土隧道所

普遍存在的衬砌破坏现象,并不因衬砌厚度的增加而减弱,还需通过其他有效途径来解决。

3 控制冻胀对支护结构体系影响的措施

3.1 寒区隧道冻害的概念

围岩冻融是多年冻土区隧道开挖后形成的一种自然现象,也是一种循环过程。冻融将使隧道支护结构体系不可避免地遭受冻害。尽管对于冻土隧道冻害概念尚无统一定义,但分析认为,寒区冻土隧道冻害的概念应指两个方面:①隧道衬砌工程冻害,不仅仅单纯指围岩冻胀造成的衬砌体位移过大的现象,而更主要的是指围岩冻融的物理力学特性变化及各种不同期的外力对衬砌体的联合作用造成的衬砌体破坏现象,这种作用是相互的,冻害形成应是这一过程的终结;②隧道衬砌工程冻害内涵,应包括衬砌的变形、变位程度和防渗体的维护能力两个方面。

3.2 围岩冻胀对支护结构体系的力学效应

冻胀力对支护结构体系的作用,不仅会引起衬砌变形,而且会通过板体的内力作用引起侧向变位,衬砌的设计不考虑这种力的作用将铸成错误。围岩冻胀是促使衬砌遭受冻害的另一原因,就是衬砌自身及工程设计原因。按非冻土地区的衬砌形式和工程设计,简单移用于冻土地区,冻土冻胀又防不住的情况下,冻害出现是毋庸置疑的。过去曾经有过适应冻土冻胀变形的工程技术措施,但由于忽略了各种外力作用,使得衬砌在整个冻土冻融过程中,完全处于被动地位,失去衬砌本身的自身调节和稳定性的作用而遭冻害。因此应增加关于多年冻土区支护结构体系支护机理研究,建立更为合理的工程设计理论。

总之,隧道支护结构体系的力学稳定性及安全耐久性受众多因素的影响,不仅取决于衬砌结构本身,亦随隧道围岩冻融状况的变化而变化。衬砌厚度越小,冻融圈厚度越大,衬砌上所受冻胀力越大。不过,随着衬砌厚度的减小,作用在支护结构上的冻胀力增加的速率随冻融圈厚度的增加而逐渐降低。另外,冻胀力随围岩孔隙率的增大而增大。围岩冻胀对支护结构体系的影响,随着支护结构体系和围岩两种因素的变化而变化。

3.3 减弱围岩冻胀对隧道支护结构体系影响的措施

对于风火山隧道,为避免产生冻害,分析认为应从应用隔热保温技术、加强防排水及优化衬砌结构等方面出发,采取综合防治措施。

(1) 隔热保温技术。目前还没有在多年冻土中采用隔热保温措施的先例。风火山隧道采用敷设隔热保温层的措施以减弱洞内外气温与围岩间的热交换,从而减小冻融圈的范围。保温层采用聚氨酯,其敷设形

式为喷涂和硬质泡沫型材料两种形式。

(2) 衬砌结构优化。考虑多年冻土区施工环境温度较低,喷混凝土支护在施工工艺上及其与围岩的黏结强度方面都需要作进一步的研究,因此风火山隧道支护形式推荐模筑混凝土支护。模筑混凝土衬砌与支护中掺加低温早强剂,以确保混凝土强度及衬砌质量。

(3) 防排水措施。多年冻土区隧道防排水结合隔热保温措施,采取“防、排、截、堵多道防线,综合治理”的原则。根据钻探资料,风火山地区未发现地下水,冻结围岩的含冰量较低,防排水设计以堵为主,结合隔热保温措施,尽量减少贯通后衬砌内外侧的热交换,使围岩当中水处于冻结状态。但考虑衬砌周边围岩暖季融化在所难免,在隔热层外侧全断面设防水板,在墙角纵向设 $\phi 150$ mm PVC盲沟,环向结合施工缝位置设盲沟。变形缝和施工缝设止水条或止水带。

4 结 语

(1) 隧道支护结构体系所受冻胀力随冻融圈厚度的增加而增加,但冻胀力增加的速率随冻融圈厚度的增加而逐渐降低。

(2) 在一定的围岩完整度情况下,当衬砌厚度变化时,随着衬砌背后围岩冻融圈厚度的变化,冻胀力对支护结构体系也产生影响。衬砌厚度越小,衬砌上所受冻胀力越大。但当冻融圈厚度小于2 m时,衬砌厚度变化所引起的冻胀力变化幅度仅在10%左右。明显增加衬砌厚度并不能有效减弱隧道支护结构体系所受冻胀力作用。

(3) 围岩冻胀对隧道支护结构体系的影响,不仅指围岩冻胀造成衬砌体位移过大的现象,更主要指围岩冻融的物理力学特性变化及各种不同期外力对衬砌体的联合作用造成的衬砌破坏,具体包括衬砌的变形、变位程度和防渗体的维护能力两个方面。

(4) 为避免产生冻害,对风火山隧道,从应用隔热保温技术、加强防排水及优化衬砌结构等方面出发,采取综合防治措施。

参考文献:

- [1] 潘昌实,杨力.黄土隧道地震反应分析初探[J].土木工程学报,1987,20(2):85-93.
- [2] 赖远明,吴紫汪,等.寒区隧道温度场和渗流场耦合问题的非线性分析[J].中国科学D辑,1999,29(增刊1):21-26.
- [3] 赖远明,吴紫汪,朱元林,等.寒区隧道冻胀力的黏弹性解析解[J].铁道学报,1999,21(6):70-74.
- [4] 徐芝纶.弹性力学.第2版[M].北京:高等教育出版社,1982.