

季冻区隧道冻害防控关键技术研究

曹哲

辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁阜新, 123000;

摘要: 季节性冻土地区隧道工程冻害防治的目的—是防止衬砌混凝土因富水冻结融解而产生强度损伤劣化造成的围岩—衬砌结构破坏; 另一方面要阻止衬砌背后围岩的冻胀压力造成的隧道变异。因此, 本文归纳总结分析季冻区隧道冻害的形式, 并结合室内试验、数值模拟、冻胀力理论分析和现场监测等的研究成果, 以季冻区富强隧道为工程案例, 研究季冻区隧道冻害防控关键技术措施, 有效解决了富强隧道冻害防治工程技术难题。

关键词: 季冻区隧道; 结构; 冻害; 防控技术

DOI: 10.69979/3060-8767.25.04.001

1 季冻区隧道冻害的形式

隧道由于在寒冷环境下围岩冻胀及经受冻融循环, 造成季冻区铁路隧道会发生不同程度的病害, 此现象称为季冻区铁路隧道冻害。大量的调查研究表明, 季冻区铁路隧道冻害普遍发生在寒冷和严寒地区, 并且其形式各有不同。

根据冻害发生的位置不同, 季冻区隧道常见的病害可以分为: (1) 衬砌渗漏水、挂冰; (2) 隧道翻浆冒泥、冻胀结冰; (3) 隧道衬砌破裂, 隧道洞门墙开裂; (4) 隧道排水系统冻结堵塞; (5) 隧道洞口处岩体和积雪热融滑塌等^[1]。

1.1 隧道衬砌渗漏水、挂冰

当季节性冻土地区年降水量较大、围岩破碎、围岩内贮水量丰富时, 隧道通过融区时往往有地下水涌出, 在排水系统不通畅的情况下, 地下水将不可避免的通过隧道衬砌上的裂缝向隧道内渗漏^[2]。由于山体中通常会存在地下水, 所以对于年降水量大以及存在山体岩层破碎的地区, 都存在隧道渗漏水。一旦铁路隧道的排水系统不通畅并且山体中的地下水含量丰富, 必定会造成隧道内衬砌渗透水现象的发生。隧道渗漏水的情况几乎存在于所有隧道。当渗流水流出后, 会随着温度的降低从而冻结成冰^[3]。但在深冬时期, 在冻胀性围岩地质条件下有极大的可能发生其他危害严重的冻害。衬砌挂冰对于铁路的养护工作极为困难, 并且其存在也会导致冬季冻结期和春季融沉期在役隧道交通安全事故的发生。

1.2 隧道翻浆冒泥、冻胀结冰

在铁路隧道的常见病害中, 隧道翻浆冒泥尤为突出。

调查哈尔滨铁路局、沈阳铁路局、太原铁路局、西安铁路局和呼和浩特铁路局辖区内隧道时发现, 隧道翻浆冒泥是一个普遍存在的现象, 并且在某些隧道中隧道翻浆冒泥现象尤其严重。甚至有些隧道由于现象严重而导致整体道床下沉。列车行驶安全, 地基承载能力, 隧道使用寿命均会因这些病害遭受巨大负面影响。排水系统失灵, 基底仰拱的损坏, 地下水浸入道床, 地下水的抽吸随着列车的荷载而加速, 都是造成隧道翻浆冒泥的主要原因^[4]。

冻胀结冰是季冻区隧道翻浆冒泥的主要表现, 严重地段会出现大量冰柱。现已知基底冻胀结冰形成的冰锥沿线方向最大达 300 m。为防止积冰埋没轨顶影响铁路安全, 铁路隧道维修人员需对线路进行及时清理。由于冬季冻胀结冰现象更加严重, 隧道内铺设的线路会隆起, 并随着春季的到来而恢复, 如此反复循环为铁路维修及运营带来了极大的麻烦, 从而导致列车行驶至此类路段只能减速行驶, 以减小病害带来的影响。

1.3 隧道衬砌冻胀破裂、酥碎、剥落

衬砌破裂是季冻区铁路隧道中常见的病害之一。衬砌破裂的起因主要是冻胀力以及混凝土衬砌结构的设计和围岩基本工程特性以及隧道施工和排水系统的影响, 除此之外隧道衬砌冻胀破裂的影响因素还包括: 地质情况、结构类型和施工影响, 特别是由于季冻区地区气温的日较差及年较差都很大, 因而隧道衬砌上产生的温度应力和冻胀力的作用是隧道衬砌开裂最主要的原因。隧道衬砌开裂形式根据裂缝方向分为环向开裂、纵向开裂和斜向开裂三种^[5]。冻胀力由冻胀受到约束而产生, 冻胀性围岩的深度越大, 冻胀力越大, 造成的破坏

就越强。排水系统和施工质量的完善对冻胀破裂的影响极大。根据调查统计,在季节性冻土地区铁路隧道中,沿着隧道轴向环向裂缝平均0.25条/m,裂缝宽度为1.0-3.0 mm。季冻区隧道混凝土衬砌裂缝在冬季发生延伸和扩展,在夏季出现缩小和闭合,裂缝宽度与当地大气温度具有显著的相关性。

1.4 隧道排水系统凝固堵塞

在季节性冻土地区,冬季隧道排水系统凝固堵塞是常见的隧道工程灾害问题,其不仅是一种严重冻害,并且还会导致一系列的工程灾害。隧道排水系统主要包括盲沟、盲井、排水沟、泄水洞等,发生凝固堵塞的主要原因是排水系统设计不够完善或保温措施力度不够。在东北地区,翠岭隧道、奥拉岭隧道和岭顶隧道等,在冬季时泄水洞局部冰厚超过1m,冻结长度可达400余米。排水系统的瘫痪和故障会导致隧道内的地下水溢上道床淹没线路,最终严重影响线路的安全运行。此外,如果保温措施处理不当,隧道的总排水口位置也容易发生凝固堵塞,这种病害经常出现在小流量、低水温的出水口处。

1.5 隧道洞门墙裂开

在严寒地区铁路隧道中,洞门墙裂开的现象普遍存在。例如在对牙林线、嫩林线的30个隧道洞门进行的调查统计中,就有17个洞门墙出现裂开,超过了调查数量的一半以上。洞门墙裂开的部位大多数容易出现在洞门墙的中部,裂开位置从帽石顶部往下发展,最终导致裂隙形成上宽下窄,外宽里窄的形状,这与隧道洞门处受到的冻胀力有关。因为在冻胀力的作用下,隧道洞门上部产生拉应力,越往外拉应力越大,产生的裂缝宽度也会越大,这部分内容在后面的内容中有更加详细的表述。在隧道的施工过程中,如果洞门处的混凝土养护存在缺陷会导致后期洞门的裂开存在安全隐患,甚至会加剧洞门处裂开。

2 富强隧道冻害工程整治案例

2.1 富强隧道冻害工程概况

富强隧道位于蛟河市富强村,进口里程为DK80+160,出口里程为DK82+590,隧道全长2430 m,最大埋深170 m。富强隧道坡度/坡长为-0.00252193 ‰/m,地下水正常涌水量=1264 m³/a,最大涌水量1976 m³/a;隧道走向为WNW,进口阴坡、迎风,出口阳坡,背风。隧道

于2013年8月贯通,石质隧道,水量丰富。富强隧道洞口如图1所示。



图1 富强隧道洞口

2.2 围岩注浆加固堵水

季节性冻土地区的隧道在建造和使用过程中,要求对冻结合水围岩,特别是含水裂隙围岩层和含水量较多的破碎带进行注浆加固和止水。围岩注浆具有以下作用:

- (1) 提高隧道围岩的强度,增强隧道围岩的稳定性;
- (2) 减弱和阻断冻结隧道围岩冻胀力;
- (3) 防止围岩渗漏渗漏水,起到截断水流动的作用。

富强隧道围岩等级为IV级和V级,其中洞口段V围岩,洞身段为IV~V级围岩全线隧道洞口均较平缓,覆盖层较薄,围岩较破碎。围岩裂隙发育,加之该地区水量丰富,容易形成渗水通道,同时洞口段又是洞内气温较低的段落。

采用围岩注浆止水的方法,即可以提高季冻区隧道围岩的承载能力,同时使得注浆加固区可以形成加固圈,将围岩裂隙水甚至具有动水力的水挡在衬砌外围,从而降低水对隧道围岩的冻结作用以及减小因围岩冻胀形成的衬砌-围岩冻胀力。因此,对距离进口和出口洞口段500m范围采取适合的施工工艺,根据不同地层围岩破碎、地下水发育情况和冻结因素等进行径向注浆减小围岩空隙率,注浆孔深度设计为2m。为检测注浆效果,注浆完成后须进行渗漏水实验,做到不渗不漏。

(1) 注浆设计及注浆参数

a) 隧道围岩注浆孔采用梅花型布置,如图6.8所示。注浆孔口采用 $\phi 50$ mm,壁厚3.5 mm的热轧无缝钢管,注浆孔间距应小于每孔的扩散半径,孔口环向间距 $d_{孔口} = 2.0$ m,孔底环向间距 $d_{孔底} = 2.2$ m,纵向注浆孔的间距2.6 cm。孔口管应埋设牢固,并有良好

的止浆措施。

b) 完成 30 m 隧道注浆后, 再在原两排注浆孔中间补打一排孔做为复注注浆孔, 以弥补初次注浆的不足, 保证注浆效果。

c) 注浆材料的选择

注浆材料主要应具有可泵、速凝和早强等特性, 采用隧道、巷道等注浆堵水施工采用广泛且成本低廉的水泥砂浆作为注浆材料, 其水灰比 $W/C=1:1$ 的水泥浆, 施工时可根据地质条件和围岩裂隙发育情况及时适当调整。

d) 注浆压力

采用 TBW-50/15 泥浆泵进行围岩注浆, 注浆压力 0.5~2.0 MPa, 注浆前进行现场试验, 根据实际情况调整注浆参数。

(2) 施工工艺流程

围岩注浆加固和止水施工工艺流程, 如图 3 所示。

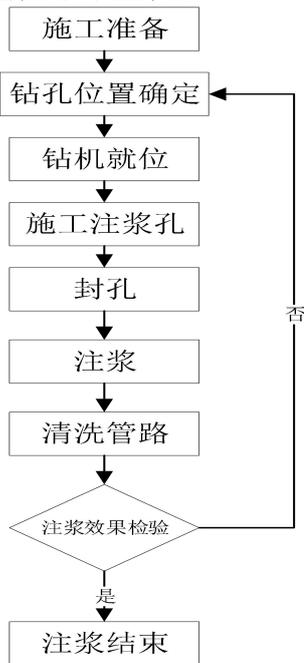


图 2 注浆工艺流程

2.3 隧道防排水措施

富强隧道排水施工设计采取“注浆堵水+电伴热带+排水盲管+保温层+波纹橡胶板”相结合的综合治水方案。综合利用注浆堵水、排水盲管排水, 电伴热带加热升温, 通过保温层和波纹橡胶板进行保温隔热。另外, 波纹结构的橡胶板可将残余的渗漏水引致排水沟, 具有双重保险的效果。

(1) 凿槽引水

施工时用混凝土切割机对放线区段进行切槽施工, 凿槽截面呈倒梯形, 其中外侧宽度为 10 cm, 内侧宽度为 12 cm, 凿槽深度为 12 cm。

(2) 钻孔引水

凿槽施工结束后, 在渗漏水的围岩断面钻设引水孔。引水孔布置在所确定的凿槽区内, 与水平方向夹角 $\alpha = 45^\circ$, 钻孔直径 $\phi = 30$ mm, 深度 $h = 2$ m 为宜。钻孔结束后, 在孔内布置引水盲管。引水盲管外包土工布, 防止细颗粒流失。

(3) 设置排水盲管

在排水槽内埋设直径 $\phi = 100$ mm 的半圆形排水管, 管上均匀设置 3 条电伴热带, 采用钢卡将排水半管和电伴热带一齐固定于槽内。排水盲管上端至渗漏水最高段, 下端深入排水盲沟。

(4) 设置波纹橡胶板

将波纹橡胶板紧贴衬砌表面预固定, 用钻机在波纹板凹槽处预先钻设深度 $h=40$ cm、孔径 $d=18$ mm 的螺栓孔; 采用 pvc 管片和膨胀螺栓将波纹橡胶板固定, 膨胀螺栓末端用封缝胶严密丰实并用聚氨酯发泡胶将波纹板橡胶板两侧封缝严密。

(5) 混凝土衬砌结构防水

季冻区隧道衬砌混凝土应采用防水混凝土, 其抗渗等级 $\geq P10$, 对于围岩裂隙发育、地下水丰富地段抗渗等级 $\geq P12$ 。明洞衬砌均采用防水钢筋混凝土, 抗渗等级 $\geq P12$ 。

(6) 防水层防水

季冻区隧道明洞结构外均应设置防水层, 回填土表面均铺设粘土隔水层。顶部设不小于 3% 的排水坡度。初期支护与二次衬砌间铺设 EVA 防水板加土工布的分层式防水层, EVA 防水板的厚度 $t \geq 1.5$ mm, 防水板采用无钉铺设工艺。

(7) 洞内排水设计

洞内排水采用两侧排水沟, 深部中心水沟和集水槽相结合的方法, 其中普通水沟采用 $\phi 600$ mm 钢筋混凝土预制管, 水沟混凝土壁厚 6 cm。中心深埋水沟采用 $\phi = 600$ mm 钢筋混凝土预制管, 壁厚 12cm, 并于水管上方设 2 m 宽, 10 cm 厚的聚氨酯保温板保温层。

(8) 洞外排水设计

富强隧道端洞外设置深埋排水暗沟, 埋设于冻结深度 (1.45m) 以下 ≥ 25 cm, 坡度大于 5‰, 出水口坡度大于 5%。暗沟采用 $\phi 600$ mm 钢筋混凝土预制管, 壁厚 6

cm, 排水沟每 50m 设置一处检查井。排水沟末端设置保温出水口, 施工期间对洞外保温出水口进行优化, 根据现场实际地形及风向测试情况本着背风向阳的原则进行逐个优化。

3 结语

在前述室内实验、冻胀力计算、冻胀机理分析、数值模拟和现场监测的基础上, 归纳并总结季冻区隧道冻害形式及隧道冻害的主控因素, 以富强隧道冻害整治案例为工程背景, 提出了围岩注浆加固和围岩-衬砌保温等针对性的冻害防治措施, 主要结论如下:

(1) 归纳并总结了季冻区隧道冻害类型, 主要包括: 衬砌渗漏水、挂冰; 隧道翻浆冒泥、冻胀结冰; 隧道衬砌破裂, 隧道洞门墙开裂; 隧道排水系统冻结堵塞和隧道洞口处岩体和积雪热融滑塌等形式。

(2) 以富强隧道冻害整治案例为工程背景, 提出了围岩注浆加固、隧道洞身、洞口和洞外排水设计以及

围岩-衬砌保温等针对性的冻害防治措施, 综合利用注浆堵水、排水盲管排水, 电伴热带加热升温以及洞内外综合排水措施, 有效的解决了富强隧道冻害防治工程技术难题。

参考文献

- [1] 王兴. 公路隧道常见病害及治理对策研究[J]. 低碳世界, 2023, 13(01): 138-140.
- [2] 杨明宇, 王晓宇. 寒区隧道排水系统冻害分析及防冻措施研究[J]. 北方交通, 2022, (07): 80-84.
- [3] 王晓宇, 杨明宇. 寒区运营隧道洞口段冻害分析及对策[J]. 山东交通学院学报, 2022, 30(02): 63-71.
- [4] 郭宏新, 孙田, 周天宝, 等. 高寒铁路隧道排水系统冻害主动热防护新技术研究[J]. 青海交通科技, 2023, 35(04): 153-158.
- [5] 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.