

文章编号: 1000-582X(2011)12-138-06

大坂山隧道病害处治工程工艺设计与实证分析

刘海京¹, 郑佳艳², 程崇国¹, 黄伦海¹

(1. 重庆交通科研设计院 交通部隧道建设与养护行业重点实验室, 重庆 400067;

2. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074)

摘要:在国道 227 线控制工程大坂山隧道病害检测基础上, 综合考虑高寒隧道工程地质、水文、气候等自然特征和原隧道施工工艺、施工工法、运营养护等人为因素, 分析了渗漏水、衬砌裂缝、低温冻融、混凝土材料劣化等病害演化过程, 以及各种不良因素在高寒隧道病害演化发展过程中所起的作用。在病害成因分析的基础上, 介绍了大坂山高寒隧道渗漏水、保温、衬砌加固等病害处治的基本原则、思路和具体措施, 为后续类似高寒隧道和寒区隧道的病害处治提供经验和借鉴。

关键词:大坂山隧道; 高寒隧道; 病害处治

中图分类号: U457

文献标志码: A

Rehabilitation project of the Dabanshan highland road tunnel

LIU Hai-jing¹, ZHENG Jia-yan², CHENG Chong-guo¹, HUANG Lun-hai¹

(1. Key Laboratory of Road tunnel Construction and Maintenance of the Communication Ministry, Chongqing Communications Research and Design Institute, Chongqing 400067, P. R. China;

2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

Abstract: The rehabilitation project of road tunnel in highland area and cold region is an important and worthy exploring research field. The development of the defects of crack in the liner, water leakage, structural deterioration and frost defects for Dabanshan road tunnel are studied. After an insight into the cause and development of tunnel defects, the water leakage and frost damage are considered as the root of defect, so restoration of drainage system and the reinstallation of cold prevention system are the focuses of the rehabilitation project. For consideration of safety, cover arch is installed for the tunnel structure enforcement as well. Results indicate measures in Dabanshan road tunnel rehabilitation project are effective for road tunnel of high altitude and tunnel in cold region.

Key words: road tunnel of high altitude; tunnel liner defects; tunnel repair and rehabilitation

作为世界上隧道工程最多、建设速度最快的国家, 中国多数运营隧道存在衬砌裂损、渗漏水、掉块坍塌等多种病害, 部分病害严重影响到隧道结构和运营安全^[1-2], 必须尽快进行病害检测评估、成因分析和加固处治, 国内外隧道工程界已积累了部分渗

漏水和衬砌裂损等常见病害的处治经验^[3-6]。高寒隧道地理、气候条件复杂, 运营条件恶劣, 常存在渗漏水、衬砌裂损、冻融等多种病害, 传统的渗漏水堵排和衬砌裂损处治技术难以彻底解决高寒隧道冻害问题, 所以高寒隧道病害处治经验国内外基本上处

收稿日期: 2011-07-05

基金项目: 交通部应用基础研究项目(2007319740120); 重庆市科技攻关项目(CSPC, 2009AC6083)

作者简介: 刘海京(1977-), 重庆交通科研设计院副研究员, 主要从事工程力学及公路隧道病害检测、评估与自治研究,

(E-mail)liuhaijing@cmhk.com。

于空白。文中对高寒隧道病害处治工程的工法、工艺进行了深入地研究,可为后续高寒及寒区隧道的病害处治工程提供经验和借鉴。

1 隧道原设计及病害概况

大坂山隧道海拔 3 792.75 m,共长 1 530 m,是世界上著名的高寒隧道。隧道于多年冻土与季节冻土临界线上穿过,隧道冬令期长达 228 天,最低气温 -34°C ,最大冻结深度 3.0~4.5 m,最大积雪深度达 200 cm。由于气候条件恶劣、工程地质条件复杂,隧道原设计通过初支与二衬间设置防水板结合中心防寒泄水洞和泄水横洞的方式对地下水进行防排,同时采用聚氨酯与硅酸铝组合保温防火层^[7],该方法取得了良好防排水及保温效果,为青藏铁路高寒隧道及类似寒区隧道施工提供了宝贵的经验。

但隧道运营十多年来,出现了严重的渗漏水、挂冰、衬砌裂损等多种病害,严重影响到隧道的正常运营和洞内行车安全。根据病害检测结果可知^[8-9],大坂山隧道存在渗漏水冻害、衬砌裂缝错台、衬砌侵限等多种病害,病害具体特征如下。

1)隧道衬砌结构裂损严重。衬砌表面存在多处严重斜向及纵向裂缝,出口段拱腰两侧灯架高度存在大范围的纵向裂缝和错台尤为严重,裂缝宽度最大达 5 cm,长度大于 25 m,图 2 和图 3 是典型裂缝和错台。

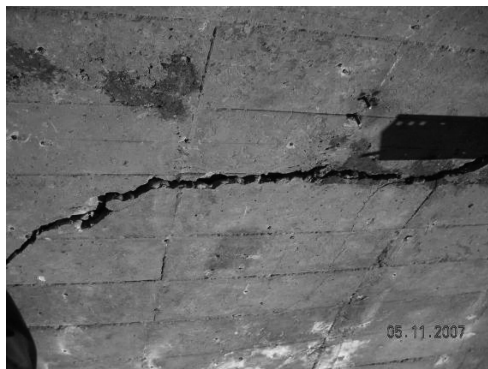


图 2 衬砌纵向裂缝



图 3 衬砌纵向错台

2)衬砌结构渗漏水 and 冻胀现象严重。检查发现,隧道洞内及两端洞口段拱腰和拱顶共有 86 处渗漏水点,低温下形成冰锥;渗漏水在保温装饰层后面形成冰块,附着在装饰层上,增加了装饰层的荷载,形成安全隐患;同时渗漏水在路面上冻结形成冰层,隧道衬砌渗漏水冰锥和路面结冰情况见图 4、图 5。

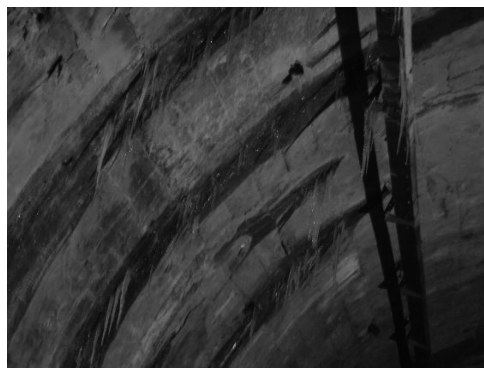


图 4 衬砌渗漏水冰锥



图 5 隧道路面结冰

3)隧道侵限现象严重。据激光断面检测结果可知,大部分检测断面均存在侵入设计内轮廓的现象,施工期间发生超过大塌方段的区段拱顶及两侧拱脚侵限现象尤为严重,侵限最大值达 23.6 cm。

4)衬砌混凝土强度不足。据隧道衬砌混凝土强度检测结果,275 个超声一回弹测区中,50 多个测区二次衬砌混凝土的强度小于设计强度,且不合格测区均处于隧道端测区。占总测区数的 81.8%,北端出口段(K106+000~K106+550)衬砌混凝土强度拱顶合格率仅为 48.8%。

汇总病害类型、数目及特征统计见表 1,根据病害检测评价意见,必须尽快对病害进行处治,保证隧道运营安全^[10]。

表 1 隧道病害统计表

病害类型	病害数目	病害特征
裂缝错台	9 处	长度最长达 25 m, 宽度最大达 5 cm
渗漏水	74 处	包括点、线、面状渗流
衬砌侵限	19 个断面	侵入建筑轮廓 0~23.9 cm
背后空洞	44 处	纵向长度 1~15 m 不等, 深度 60~240 cm
砼强度不足	51 处	总测区 275 处, 满足要求 23.7%

2 病害成因分析及分类处治

2.1 病害成因分析

根据隧道病害类型、几何特征及分布位置, 综合隧址区工程地质、水文地质、施工建设、运营养护及气候等条件, 将隧道病害成因总结如下^[10]。

1) 隧道穿越段有绢云母片岩、石英片岩、洞口端的残积坡积土石等多种岩土体, 岩体节理发育、产状近直立、风化严重, 地质条件极其恶劣, 仅距北口 650、410、360、230 m 处就曾出现过 4 次千立方米以上的大塌方, 坍塌段及不良地质段围岩自稳能力极差, 围岩压力及冻胀压力主要由临时支护及衬砌结构物承担, 过大荷载引起隧道结构物裂缝。

2) 隧道地区年降水量 841.4 mm, 丰沛的地表降水为隧道地下水提供了充足的来源, 隧道地表存在大量块状、巨块状坡积岩, 地表水极易下渗并集中于隧道穿越段, 地下水穿过在防水板、裂缝后极易发生渗漏水病害和冻害。

3) 隧道保温门停用及保温板系统破损致使保温系统失效, 低温冻融作用导致隧道结构混凝土及防水板材劣化破损, 同时也降低了衬砌结构的强度和承载能力, 从而产生裂缝, 混凝土强度检测结果也印证了这一点。

4) 地质雷达检测表明, 衬砌拱背后存在大范围充填不密实和空洞, 衬砌结构缺乏有利的围岩抗力, 衬砌结构承受不利荷载, 导致拱部产生严重纵向裂缝。

综合分析以上各种不利因素可知, 渗漏水冻胀是大坂山病害的罪魁祸首, 结构超载、材料劣化、渗漏水、裂缝、低温冻融共同导致了大坂山隧道病害的产生和发展, 多种病害恶性循环发展导致更为严重的隧道衬砌裂缝和渗漏水病害, 图 6 为隧道病害恶化循环演化过程图。

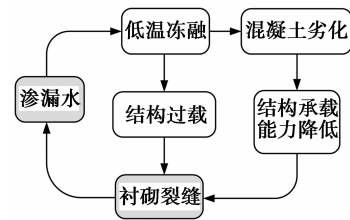


图 6 大坂山隧道病害演化过程图

2.2 病害处治分类与分段

高寒隧道病害源于其独特的地理特征, 国内外尚未见类似处治工程实例, 可供参考的经验较少。根据病害形成原因, 综合考虑安全、经济及处治效果, 处治工程将渗漏水冻害处治和隧道衬砌结构加固作为 2 项核心内容, 同时考虑隧道运营限界、通风和照明要求, 综合改善隧道结构安全性和使用功能。大坂山隧道病害处治工程的分类处治理念如图 7 所示。

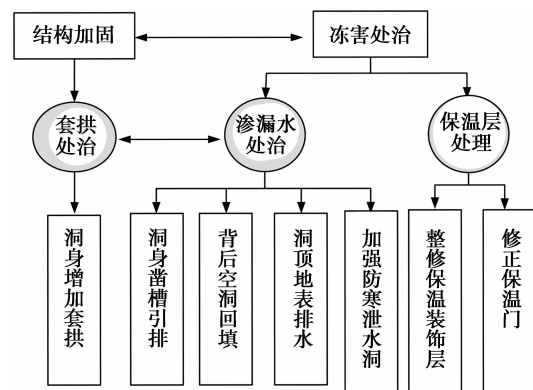


图 7 大坂山病害处治框架图

根据病害类型及严重程度的沿隧道纵向分布特征, 将隧道洞身病害处治划分为南北两段进行。

1) 北端洞口段 550 m 范围内渗漏水病害严重, 衬砌结构同时存在严重的裂缝和错台, 安全隐患比较严重, 且多个测区混凝土强度低于设计强度要求, 应综合处治结构裂损和渗漏水病害。

2) 隧道其余 980 m 衬砌裂缝较少, 结构承载能力较强, 隧道部分断面存在渗漏水 and 冻害现象, 雨季地表水直接形成隧道渗漏水, 冬季渗则形成冰柱、冰锥、路面结冰, 影响到隧道内行车安全, 所以应以渗漏水病害处治为主。

3 病害处治设计与施工

3.1 套拱段衬砌加固及渗漏水综合处治

经过套拱和换拱方案的经济性和安全性对比评价分析, 决定于隧道北段采用 25 cm 钢筋混凝土套拱方案进行衬砌结构加固, 图 8 是套拱施工流程图。

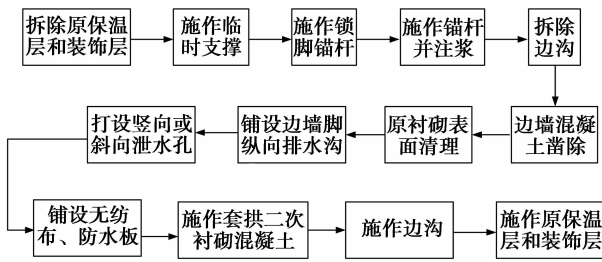


图 8 套拱施工流程图

按照衬砌裂损和渗漏水病害严重程度及需要加固强度等级,将套拱段病害处治方案分为 ABC 3 类病害处治措施,对严重程度不同的病害进行处治,图 9 是 A 类病害处治断面图,对衬砌裂损最严重段进行加固处治。需特别指出的是,套拱段渗漏水处治工程按新建隧道防排水方法进行施工,防水板焊接质量和防水效果必须得到保证。

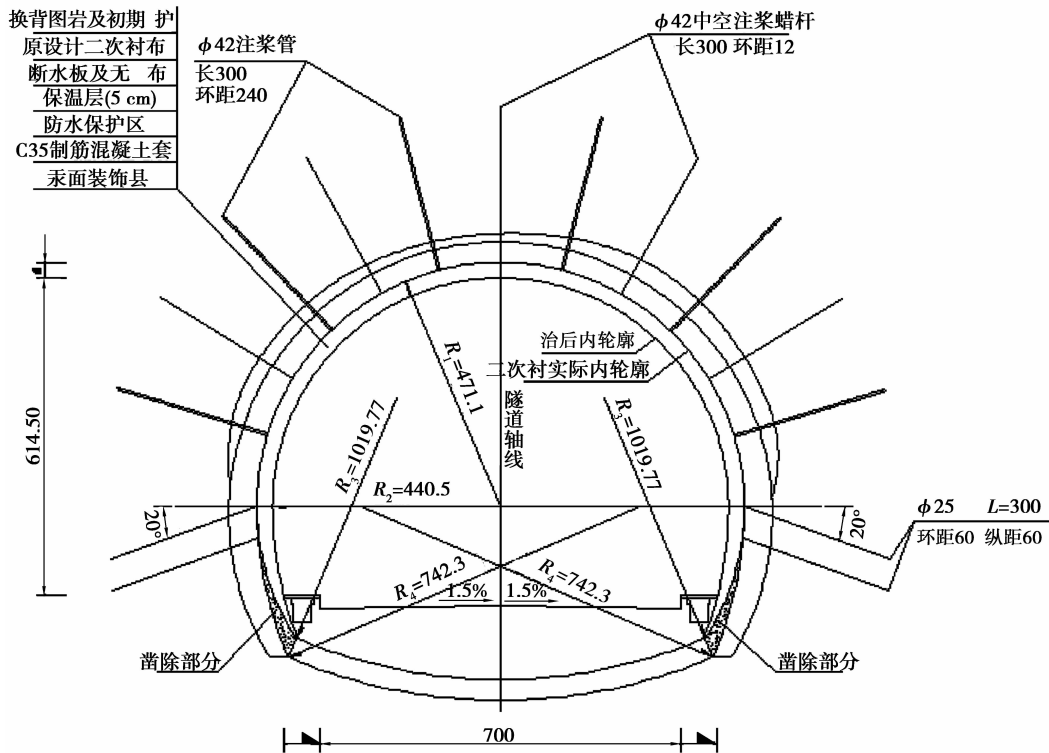


图 9 A 类病害处治断面图

3.2 隧道渗漏水病害处治

隧道设计规范要求新建隧道宜按照“防、排、截、堵相结合,因地制宜”的原则进行防排水施工,但运营隧道渗漏水治理表明,堵水同时会封堵地下水通道,改变下水通道分布,导致地下水流向、水量水压无法预知,致使原来未渗漏的隧道产生严重的渗漏水,故运营隧道渗漏水病害处治原则应与新建隧道防排水处理方法有所不同,渗漏水病害处治应慎用堵水方案。

大坂山隧道渗漏水病害处治工程综合“截、排、防”相结合的原则,建立立体防排水体系,通过截水沟进行“截”水,阻止地表水下渗,从而减少隧道赋存环境地下水,减少渗漏水来源;同时采用洞身渗漏水凿槽引排、纵向排水管、中心及路缘竖向泄水孔、泄水横洞、防寒泄水洞等引排措施组成的立体泄水网络,规范疏导地下水引排,减少地下水在隧道内渗

漏;通过防水层进行“防”水,防止地下水在隧道内渗漏。

3.2.1 衬砌渗漏水凿槽引排

根据渗漏水出水点特征,对于集中段和大量渗漏水分别按照以下 2 种方案进行治理。

1)衬砌渗漏水集中、严重地段,采用环向凿槽埋管(TS50 软式透水管加劈竹束)引排的方法,将地下水引至边墙脚竖向泄水孔(φ50),泄水孔直接连接泄水横洞或防寒泄水洞,地下水可引排到防寒泄水洞或泄水横洞内。围岩自稳性较差段须先加固围岩,然后方可钻孔泄水。

2)衬砌表面渗水面积较大又不易找到集中渗漏水处的地段,按 10 m 间距设环向盲沟,将渗水引至墙脚纵向排水管。少量渗漏水的地段,采用聚硫密封胶封堵的方法进行处治。图 10 和图 11 是施工缝渗漏水处治图和裂缝渗漏水处治图。

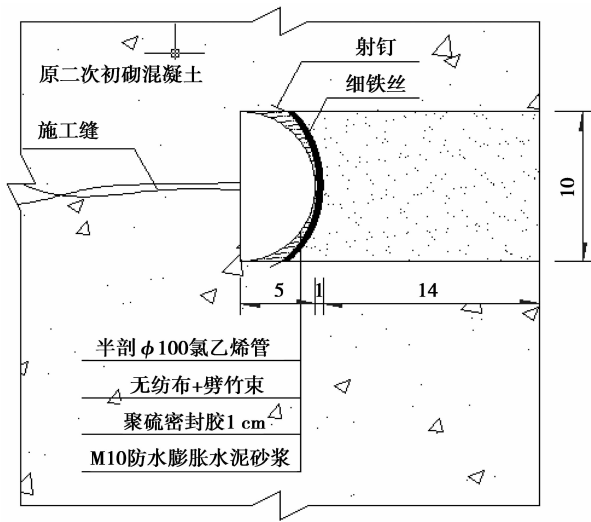


图 10 施工缝渗漏水防治图

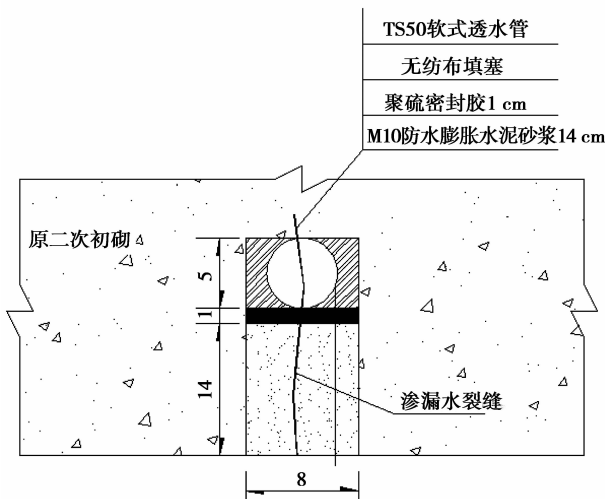


图 11 裂缝渗漏水防处治图

3.2.2 加强防寒泄水洞

据防寒泄水洞水流、水文观测可知,防寒泄水洞和泄水横洞起到了良好的防冻、保温、排水作用,对缓解和防止隧道围岩及衬砌结构的冻胀有重要作用。病害处治工程通过加密增长泄水洞横洞、增加泄水孔,放大防寒泄水洞的保温防冻排水作用。

1) 根据隧道渗漏水分布情况,加密加长泄水横洞,隧道原泄水横洞的间距约为 50 m,长度为 10 m,处治工程将泄水横洞间距加密到 20~25 m,将且横洞长度加长到 15 m。

2) 泄水横洞两端不封闭,且泄水洞周边环向围岩内布设深度 1 m 的 $\phi 100$ 泄水孔,使泄水洞与隧道围岩水体尽量连通,可以有效疏导引排地下水。

3) 从隧道边墙脚垂直打设 $\phi 50$ 泄水孔,使纵向

排水管和泄水横洞保持通畅,同时埋设泄水管道,将洞周地下水引至泄水横洞或防寒泄水洞主洞。

3.2.3 地表处治

北口洞顶原地表曾采用浆砌片石防护、地表压浆等处治措施防止地表水下渗,由于防护面积不足和浆砌片石冻融的破坏,截排水效果不太理想,压浆阻水未能有效地阻止地下水渗漏,反而堵塞了排水通道,加剧了隧道渗漏水。处治工程考虑到隧道洞顶地表范围大,且地表多为巨块石、块状石组成的坡积体,地表防排水施工难度较大,处治工程采用在洞顶地表修筑小型截排水沟槽,引导地表水排泄远离隧道洞顶地区,减少地表水下渗。

3.3 衬砌背后空洞回填

地质雷达检测表明,隧道局部区段衬砌背后存在大型空洞,为衬砌提供抗力、加固岩体,防治隧道突然坍塌。病害处治工程对空洞进行回填处治,以加固岩体,同时起到防水作用。处治工程首先根据地质雷达扫描确定的空洞分布位置和范围,利用锚杆钻孔确定衬砌背后空洞范围和深度,空洞回填按照以下原则和方式进行施工。

1) 衬砌背后空洞环向宽度大于 4 m、深度大于 2 m 时,须开孔以检查衬砌背后空洞情况,开孔尺寸以方便检查人员进出检查为宜。施工方便时对空洞洞壁进行喷锚支护,然后泵送 1 m 厚碎石混凝土填充空洞;回填后吹沙 1.5 m 厚防止空洞坍塌对衬砌产生冲击荷载,处治方案见图 12。

2) 空洞深度大于 20 cm 而小于 2 m 时,应利用泵送细石混凝土将空洞回填密实,泵送混凝土压力以将空洞贯注饱满为宜。

3) 空洞深度小于 20 cm 时,可压注 M20 砂浆进行回填。

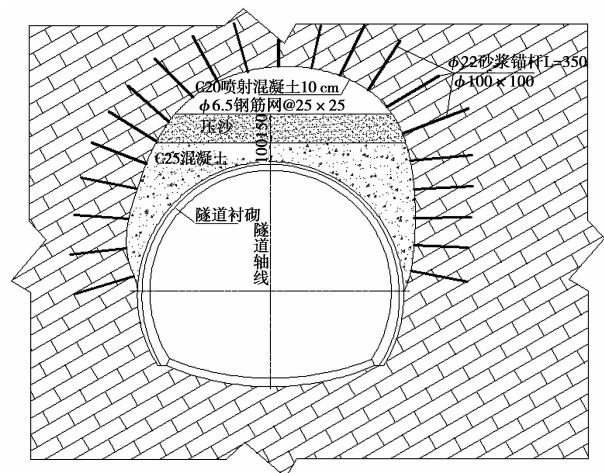


图 12 衬砌背后大型空洞处治方案

为防止空洞回填时压注压力可能导致衬砌结构荷载过重而变形裂损,条件许可时首先施加锚杆加固,回填前必须施加临时支撑,然后压浆或泵送混凝土,且压注压力不得过大(≤ 0.2 MPa)。压注细石混凝土或砂浆完成后,同时加强隧道衬砌的变形和裂缝观测。如衬砌变形过大、裂缝发生新扩展或产生新裂缝,必须停止压注,增加临时支护且结构稳定后方可继续施工,保证施工安全。

3.4 隧道保温系统

3.4.1 洞身保温系统

隧道原二次衬砌表面设置了硅酸铝和聚氨酯保温层,并起到良好的保温效果,但在地下水冻胀及结构变形作用下完全失效^[11-12]。参照以往保温系统设置经验^[12-15],此次处治工程将原保温层拆除,在二次衬砌表面重新施工保温层和纤维板组成的保温系统。通过性能分析和比较,保温材料采用具有隔热性能好(导热系数 ≤ 0.027 W/(mk))、阻燃、低毒、耐老化等特性的 FL 保温材料,此外该材料还具有一定的弹性和抗拉、抗压强度(抗压强度 ≥ 0.2 MPa)。

图 13 是保温层安装方案图,保温板和纤维板利用膨胀螺栓、U 型构件和龙骨进行固定,安装时保温板块间必须连接紧密,相邻两温板间按错缝设置,并完整覆盖二次衬砌表面,不得留有空隙。保温板外覆纤维板拼接缝须用腻子膏嵌缝处理,防止空气进入保温层,降低保温效果。

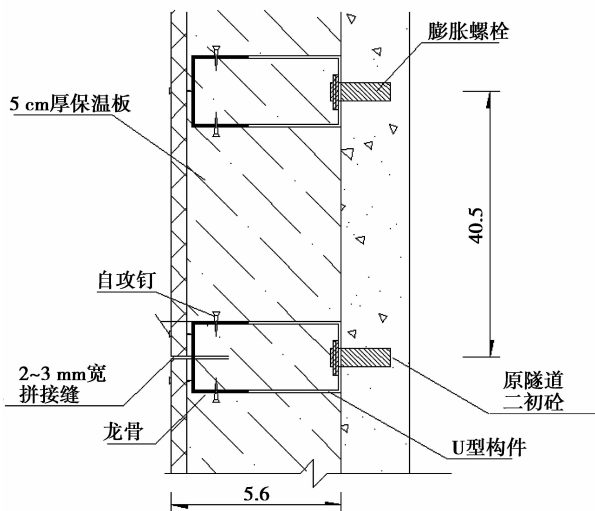


图 13 保温层安装图

3.4.2 洞口保温门

原隧道建成后曾于南北两洞门位置各修建一道推拉保温门,冬季车流量小时关闭保温门保持洞内温度,避免冻害,保温效果明显。运营过程中由于车

辆碰撞、轨道变形、自重过大等原因造成推拉门无法闭合而停用。考虑使用效果和维修方便,此次处治在 2 个洞口均设计自动卷帘门保证能快速方便封闭洞口,确保冬季洞内保温。

此外,非套拱段隧道凿槽引排水段,引排水管采用 5 cm 保温材料包裹防冻,然后引排至竖向泄水孔,引排至防寒泄水洞。

4 结 语

大坂山高寒隧道病害处治工程结束后,经过 2 个雨季的观察,渗漏水病害处治效果良好,仅非套拱段存在 3 个渗漏水点;套拱段衬砌结构稳定,无新裂缝产生且无渗漏水点出现,达到了病害处治预期效果,运营通车状况良好。图 14 是处治工程结束后的大坂山隧道。



图 14 处治结束后的大坂山隧道

1) 高寒隧道渗漏水、裂缝与低温冻害等多种病害共同作用,互为因果,一个环节出现问题可能引起其他类型病害,并导致病害恶性循环。高寒隧道病害的核心问题是渗漏水病害,高寒病害处治应着重处治隧道渗漏水,同时应完善好隧道保温系统。

2) 运营隧道渗漏水病害处治原则与新建隧道不同,应综合利用“截、防、排”措施进行渗漏水处治,慎重采用堵水方法治理隧道渗漏水病害。

3) 防寒泄水洞能够有效的排泄隧道地下水。永久性冻土、季节性冻土地区修建隧道或冻害处治时,如条件许可,可修建防寒泄水洞、泄水横洞,以加强地下水排泄,有效缓解或减少隧道渗漏水及冻害。

4) 凿槽引排方法可快速有效的减少隧道渗漏水及冻害,但是长期来看治理效果不如套拱与防水板、无纺布及排水管组成的完善的防排水系统。

(下转第 150 页)

- storage in salt rock in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (24): 4409-4417.
- [2] STORMONT J C. In situ gas permeability measurements to delineate damage in rock salt [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(7):1055-1064.
- [3] 杨春和. 深部盐岩层地下石油储备中的基础性研究-国家自然科学基金资助项目结题报告[R]. 武汉: 武汉岩土所, 2008.
- [4] 赵国藩, 金伟良, 贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [5] BUCHER C G, BOURGUND U. A fast and efficient response surface approach for structural reliability problems[J]. Structural Safety, 1990, 7(1):57-66.
- [6] RAJASHEKHAR M R, ELLINGWOOD B R. A new look at the response surface approach for reliability analysis[J]. Structural Safety, 1993, 12(3):205-220.
- [7] 徐军, 郑颖人. 可靠度响应面有限元及其工程应用[J]. 地下空间, 2001, 21(5):354-360.
XU JUN, ZHENG YING-REN. Reliability response surface FEM and its application in engineering [J]. Underground Space, 2001, 21(5):354-360.
- [8] KIM S H, NA S W. Response surface method using vector projected sampling points[J]. Structural Safety, 1997, 19(1):3-19.
- [9] 张明. 结构可靠度分析-方法与程序[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [10] DITLEVSEN O. Narrow reliability bounds for structural system[J]. Structural Mechanical, 1979, 4 (1):117-122.
- [11] KAMINSKI M M, SZAFRAN J. Random eigenvibrations of elastic structures by the response function method and the generalized stochastic perturbation technique [J]. Archives of civil and mechanical engineering, 2009, 9(4):5-32.
- [12] EAMON C. D, RAIS-ROHANI M. Integrated reliability and sizing optimization of a large composite structure [J]. Marine structures, 2009, 22 (2): 315-334.
- [13] SONG J, KANG W H. System reliability and sensitivity under statistical dependence by matrix-based system reliability method[J]. Structural safety, 2009, 31(2): 148-156
- [14] 张胜民. 基于有限元软件 ANSYS 7.0 的结构分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [15] 张继周, 缪林昌. 岩土参数概率分布类型及其选择标准[J]. 岩石力学与工程报, 2009, 28(2):3526-3532.
ZHANG JI-ZHOU, MIAO LIN-CHANG. Types and selection criteria of probability distribution of rock and soil parameters[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2009, 28(2):3526-3532.

(编辑 陈移峰)

(上接第 143 页)

参考文献:

- [1] 刘海京, 夏才初, 罗鑫, 等. 隧道病害研究现状与进展[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5):947-953.
LIU HAI-JING, XIA CAI-CHU, LUO XING, et al. Studies on tunnel damage [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3 (5): 947-953.
- [2] ZHENG J Y, LIU H J, ZOU Z L. Defects inspection and cause analysis of six tunnels in Chongqing [J]. Advanced Materials Research, 2011, 261-263: 1261-1264.
- [3] US Department of Transportation. Highway and rail transit tunnel maintenance and rehabilitation manual[S]. New York: US Department of Transportation, 2004.
- [4] 侯建斌. 公路隧道病害治理研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- [5] 王勇. 寒冷地区公路隧道病害处治技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [6] 关宝树. 隧道工程维修管理要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [7] 杨彦民, 焦建宏. 2001 年全国公路隧道学术会议论文集: 青海大坂山公路隧道设计[C]. 厦门: [出版者不详], 2001.
- [8] 铁道部第十六工程局第一工程处. 青海省国道 227 线大坂山隧道工程病害处治工程竣工报告[R]. 西宁: 铁道部第十六工程局第一工程处, 2008.
- [9] 刘海京, 郑佳艳, 涂耘, 等. 大坂山高寒隧道病害检测与状态评定[J]. 公路交通技术, 2009(6):120-124.
LIU HAI-JING, ZHENG JIA-YAN, TU YUN, et al. Diseases detection and status assessment for high and cold tunnels in Daban mountain [J]. Technology of Highway and Transport, 2009(6):120-124.
- [10] 重庆交通科研设计院. 大坂山隧道病害处治施工图设计[C]. 重庆: [出版者不详], 2007.
- [11] 郑佳艳, 刘海京, 林志. 大坂山高寒隧道渗漏水处治及保温设计与施工[C]. 兰州: 2009 年全国公路隧道学术会议, 2009.
- [12] LIU H J, ZHENG J Y, LIN Z. The rehabilitation project of highland road tunnel [J]. Advanced Materials Research, 2011, 255-260: 1048-1051.
- [13] ZHANG X F, LAI Y M, YU W B, et al. Forecast and analysis of refreezing in Fenghuoshan permafrost tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24):4170-4178.
- [14] ZHANG, D H, WANG M S, REN S Q. Experimental study on temperature and response of seasonal active layer of tunnels surrounding rock in permafrost region on Qinghai-Tibet plateau[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3):614-619.
- [15] JIANG Y Y, WANG M S, WANG X H, et al. Research on construction technology and plans of tunnels in the plateau permafrost region[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(2):67-73.

(编辑 陈移峰)