

对高原冻土隧道防排水系统的几点思考

王星华, 江亦元

(中南大学土木学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 首先通过现场连通试验, 对昆仑山隧道渗漏水的水源、流径进行了试验研究; 从试验数据出发, 深入分析了问题产生的机理, 提出了自己的一些见解。通过试验研究和分析为治理方案的制定提供了依据。最后介绍了治理方案的制定、实施, 通过借助地质雷达等手段进行效果检测, 治理达到了预期效果。

关键词: 高原; 多年冻土; 隧道; 渗漏水

中图分类号: U455.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2006)01-0037-05

作者简介: 王星华(1957-), 男, 湖南长沙人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程、地下工程、城市轨道交通工程等领域的教学与科研工作。

Some thoughts on waterproof and water-abstraction system of tunnel permafrost on plateau

WANG Xing-hua, JIANG Yi-yuan

(College of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: The connectivity experiment was carried out to research the source and the flowing of the leakage water in the Kunlunshan Tunnel. The mechanism of leakage was analyzed deeply based on the experimental data, and some opinions were put forward. The basic methods for the treatment scheme has been offered based on the experimental study and analysis. Finally, the formulation and the implementation of the treatment scheme were introduced. It was shown by the measured effect with some means such as the geological radar, etc. that the treatment has reached the anticipated result.

Key words: plateau; permafrost; tunnel; leakage

0 引言

在高原冻土地区修建隧道, 是一项开拓性的工作。青藏铁路昆仑山隧道是高原连续多年冻土区修建的仅有的两座隧道之一。昆仑山隧道防排水系统设计为: 在两层混凝土衬砌间按“防水板+隔热层+防水板”结构形式设置隔热防水层, 并在初次衬砌与第一层防水板间设置以排水盲沟组成的排水系统。

2003年5月22日在昆仑山隧道DK977+618线路右侧拱腰处施工缝突然出现涌水, 隧道衬砌背后水压力最大测试值为43.1 kPa, 出现在#2冲沟浅埋段DK977+630线路右侧边墙防水板的外侧(图1), 时间为2003年6月4日, 同时该断面右拱腰防水板外侧水压力也达到40.7 kPa。上述两个部位的水压力是在2003年5月22日开始出现急剧增长至6月初达到最大值^[1]。

同时发现隧道进口端往里130 m左右保温水沟在寒季全部被冰冻结, 6月中旬才开始融化, 7月初水沟排水才畅通。2003年10月中旬, 隧道两侧水沟开始从进口(总出水口)往里冻结, 到11月底, 全隧水沟

被冰冻结。经过盲沟进入隧道的水无法通过两侧水沟排出, 翻上道床、结冰, 影响行车, 见图2。

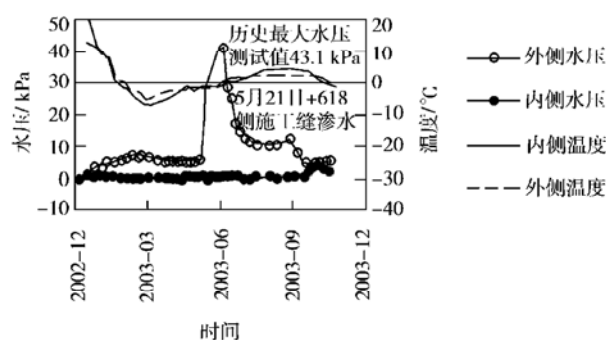


图1 南冲沟浅埋段水压力测试情况(DK977+630右边墙)

Fig. 1 Measured water pressure in shallow tunnel on south gully

1 连通试验

为详细调查昆仑山隧道出水来源, 于2003年9

基金项目: 铁道部重点项目(2001G001-E)

收稿日期: 2004-12-29

月 23 日~2003 年 10 月 6 日开展了昆仑山隧道涌水灾害治理连通试验研究^[2]。

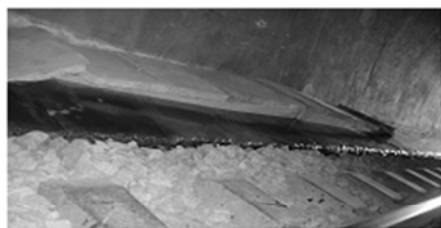


图 2 隧道内部水沟昌水冻结照片

Fig. 2 Photo of icing in water ditch of the tunnel

1.1 试验点的选择

主要根据洞内出水点和地表水的实际调查情况选择试验点。根据调查分析,隧道内最主要的出水点里程及位置分别为:① DK976+283 右侧避车洞;② DK976+793 左侧避车洞,当日监测流量 $5 \text{ m}^3/\text{d}$;③ DK977+573 左侧避车洞,股状涌水,当日监测流量 $40 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

因其余出水点多为渗水,流量及流速均比较小,在出水点部位均以结冰的形式出现,无法采取水样进行水质分析。为此,选定前述 3 个以水流形式出现的点为本次连通试验的监测点。

1.2 现场试验

采用无碘食盐作为本次连通试验的示踪剂,对地表#2 沟与 DK977+573 左侧避车洞涌水点、地表#1 沟与 DK976+793 左侧避车洞涌水点及地表#2 沟与地表#1 沟对应的 DK976+793 左侧避车洞涌水点的连通试验。

1.3 小结

图 3 给出水沟流量沿隧道纵向分布的情况^[1]。该分布表明,隧道内水沟流量主要在南冲沟以及北冲沟下游、进口段出现明显的增量变化,其中以南冲沟浅埋段水沟流量增长最为显著,其次为北冲沟下游段。右侧水沟则在进口段流量增长比较明显。

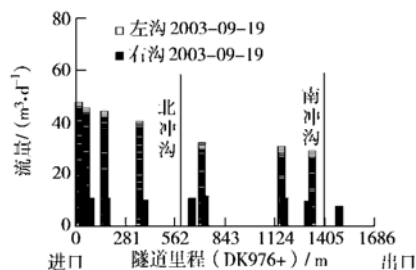


图 3 水沟流量沿隧道纵向分布情况

Fig. 3 Distribution of discharge in water ditch along longitudinal direction of the tunnel

综上结合连通试验分析,可获得如下结果:

(1) 昆仑山隧道内 DK977+573 左侧避车洞涌水是与地表#2 沟的流水直接连通的,且 DK977+573 左侧

避车洞涌水点是#2 沟内的地表水在转化为地下水后的主要排泄点。

(2) 昆仑山隧道#1 沟的地表水是与 DK976+793 左侧避车洞涌水点连通的,并且 DK976+793 左侧避车洞与进口浅埋段 DK976+283 右侧避车洞涌水点是通过隧道衬砌外侧与围岩间的空隙连通的。

(3) 昆仑山隧道进口浅埋段 DK976+283 右侧避车洞涌水主要来自于#1 沟,但由于该段隧道拱顶上方的围岩非常破碎,地表降雪在融化后垂直下渗,其中的一部分是可以补给 DK976+283 右侧避车洞涌水的。

(4) 昆仑山隧道#2 沟与#1 沟之间是通过隧道衬砌背后与围岩之间的空隙局部连通的。

2 渗漏水原因分析

2.1 冻土地质因素

由于设计是以全隧穿越多年冻土区为模型,考虑隧道的水补给为冻融圈的水,冻融圈内有限的水以堵、防为主进行处理,仅采用双侧保温水沟排除经堵、防措施后渗出的少量的水^[3]。

从连通试验结果可以看出,施工后的昆仑山隧道结构穿越的地层并非全部为多年冻土层,在其结构周围(或部分)存在融化圈。特别是的两冲沟段隧道结构所处的是季节性融化层或冻土上限层。融化圈、季节性融化层或冻土上限下移主要可能是施工扰动造成的,这种结果风火山隧道同样存在。当没有大的外来水源补给时,融化圈的存在不会带来水对结构的危害,如火山隧道。但当有大的外来水源补给时,水会积聚在隧道结构的周围,对结构造成危害,如昆仑山隧道。

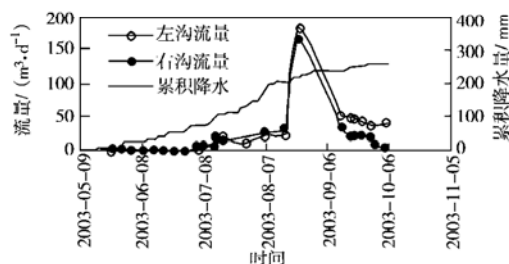


图 4 水沟流量与累积降水的时态曲线

Fig. 4 Time curve of discharge and accumulation of rainfall in water ditch

图 4 给出昆仑山隧道水沟流量与大气累积降水的时态曲线,降水曲线取自昆仑山隧道气象站资料^[1]。可以看出,隧道水沟流量与大气降水量有关联。这期间大气累积降水 258 mm。

2.2 衬砌背后存在承压水

寒末暖初,隧道所穿越的两个冲沟的季节融化层,

随着温度的升高开始解冻, 并且融化范围逐渐扩大, 地表水流不断下渗, 而此时隧道内的大部分排水系统仍然处于冻结状态。这样, 随着水流的大量积聚, 就在隧道结构特别是线路右侧衬砌结构外侧积聚大量承压水。同样在暖末寒初, 由于进口处于阴面, 出水口将首先被冻结并逐渐往里发展, 这样洞身的水将无法排出而堵在衬砌背后, 同样形成承压水。这部分承压水随着冻结过程的完成, 将会在结构外侧及结构中产生巨大的冻胀力。周而复始, 会对混凝土结构和防水板接缝产生周期性的冻胀破坏。

2.3 冻胀力破坏

由于隧道两层防水板之间铺设了一层保温板, 而保温板采用的是平板拼接而成, 这样就在板状保温板与弧形一衬之间形成一弧形空隙。暖末寒初, 由于三段季节融化层中的水无法排走, 形成的承压水进入到这一弧形空隙中。寒季中随着这一部分水的冻结, 产生的冻胀力将对防水板接缝产生破坏, 并形成了出水通道。

2.4 排水系统只能季节性排水

(1) 目前测得水沟温度在6月~10月之间为正温。其中, 进入10月, 进口段沟温已进入负温, 洞身及出口段水沟尚处于正温。图5(a)给出昆仑山隧道不同区间水沟月平均温度的逐月变化情况^[1] (图中气温为全隧平均值), 可以看出, 由暖季进入寒季时, 该隧道进口段水沟温度先于隧道其他地段进入负温状态。图5(b)给出不同区间沟温与该处气温较差的逐月变化情况, 可看出, 暖季月平均沟温低于气温最大为1.2℃ (进口段)、2.6℃ (中间段) 和1.8℃ (出口段)。

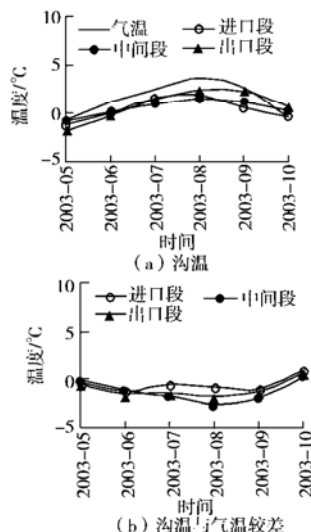


图5 昆仑山隧道水沟温度及与洞内气温差的时态曲线

Fig. 5 Time curves of temperature difference between water ditch and the tunnel

(2) 图6给出了水沟流量与沟温的时态曲线^[1]。

(3) 进一步分析由图7给出, 可清楚看出靠近洞

口地段的沟温分布由暖季进入寒季时的变化情况^[1]。该图表明, 10月份在进口30 m处的沟温已为负温, 月平均值为-1.8℃ (极端值-2.7℃)。从50 m一直到隧道出口段, 沟温则均为正温, 最大值出现于最后一个测试断面 (距出口约50 m), 其月平均值为1.1℃ (极端值2.1℃)。

由于隧道属单面坡排水, 出水口在进口, 从以上观测数据分析可以看出, 隧道既有排水系统在寒末暖初和暖末寒初无法发挥排水作用。特别是出水口 (隧道进口) 处于阴面, 在暖末寒初将首先冻结, 进入暖季后才最后解冻, 这将导致寒末暖初及暖末寒初, 隧道内的水无法顺利排出。

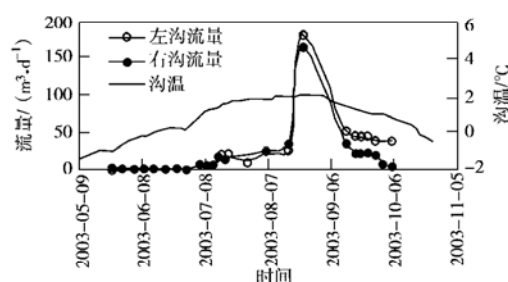


图6 水沟流量与沟温的时态曲线

Fig. 6 Time curves of temperature and discharge of the water ditch

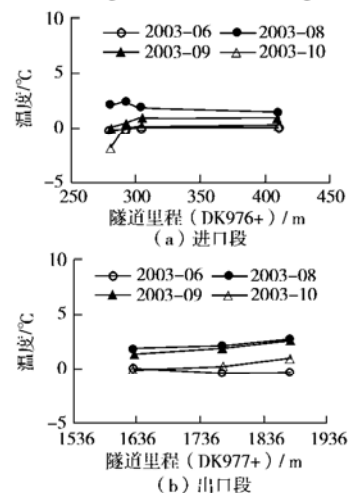


图7 水沟温度沿隧道纵向分布情况

Fig. 7 Temperature curves of water ditch in the longitudinal direction of the tunnel

3 渗漏水治理

3.1 治理方案

隧道渗漏水治理的原则为“彻底根治、保护冻土、不留后患, 地表截、排、降结合, 洞内堵、排结合, 综合治理”。方案如下:

(1) #2 冲沟截、排、降综合措施。在#2 冲沟采取地表处理, 确保地表水排水顺畅; 在线路上游设降水井, 以截断冻结层上水的下渗途径, 降低地下水位。

表 1 一、二次衬砌间回填注浆工程数量表

Table 1 Amount of backfill grouting between the first and second liners

注浆部位		注浆材料	孔数	总孔数	总进浆量/m ³
第一次拱顶回填注浆 (包括 I、II 序孔)		抗裂微膨胀水泥浆	113	186	64.48
		GRM 水泥浆	73		17.58
一、二次衬砌 间回填注浆 I 序孔	边墙	抗裂微膨胀水泥浆	820 孔	1906	1705.89
	拱脚	抗裂微膨胀水泥浆	820 孔		
	拱顶	抗裂微膨胀水泥浆	266 孔		
一、二次衬砌 间回填注浆 II 序孔	边墙	抗裂微膨胀水泥浆	695 孔	1569	446.08
	拱脚	抗裂微膨胀水泥浆	665 孔		
	拱顶	抗裂微膨胀水泥浆	209 孔		
	边墙	GRM 水泥浆	123 孔	332	66.18
	拱脚	GRM 水泥浆	153 孔		
	拱顶	GRM 水泥浆	56 孔		
一、二次 衬砌间回填注浆仰拱	水沟	抗裂微膨胀水泥浆	268 孔	936	57.48
	墙脚	抗裂微膨胀水泥浆	668 孔		
	水沟	GRM 水泥浆	66 孔	230	9.67
	墙脚	GRM 水泥浆	164 孔		

表 2 环向缝、纵向缝化学注浆工程数量表

Table 2 Amount of chemical grouting in hoop and longitudinal joints

注浆部位	注浆材料	环数	孔数	总进浆量 L/m ³
纵向缝	路得水溶性聚氨酯		3565	2376.18
环向施工缝	路得水溶性聚氨酯	97 (环)	4817	4950.32
环向变形缝	122 油溶性聚氨酯	4 (环)	181	217.10

(2) 延长[#]2 冲沟地表帷幕注浆的范围。[#]2 冲沟在原地表帷幕注浆的基础上,按沿线路方向两侧适当延伸、垂直线路方向适当加宽注浆的范围,对隧道围岩实施注浆堵水。

(3) 洞内水沟采暖措施。在洞内水沟及洞外出水口设加热电缆进行沿程加热,确保寒季水沟不冻结,洞内排水顺畅,洞外出水口不冻结。

(4) 洞内回填注浆措施。一、二次衬砌间全断面回填注浆,以填充空隙,防止两层衬砌间积水,堵塞地下水沿两层衬砌间迁移的可能通道。

3.2 实施情况

(1) 一、二次衬砌间回填注浆

一、二次衬砌间回填注浆各部位压浆孔数及进浆情况见表 1。

(2) 化学注浆

环向缝、纵向缝化学注浆孔数及进浆情况见表 2。

(3) 封孔、封缝处理及集中出水点注浆

一、二次衬砌间回填注浆及环向缝、纵向缝注浆完成后,在[#]1 冲沟段的 DK976+730~+850 尚有几个集

中出水点,对这些集中出水点实施了围岩注浆堵水处理。集中出水点处理比较困难,原出水点注浆堵住未渗漏后,间隔一定时间又会出现新的漏水点。经过多次反复,目前集中出水点已全部处理完毕,再无渗漏。

(4) 避车洞注浆

正洞注浆完成后,尚有[#]1 冲沟段的 DK976+733、+763、+793、+823、+853,[#]2 冲沟段的 DK977+393、+423、+453、+483、+513、+543、+573、+603、+633,共计 14 个避车洞出现渗漏。其中,尤以[#]1 冲沟段较为严重,DK976+733 车洞内有 3 个注浆钻孔的出水量达 20 m³/d。其余车洞有的预埋盲管出水,有的壁面渗水、滴水,有的底板冒水。

采用了可注性好且遇水反应、渗透性强的化学浆料(路得水溶性聚氨酯)。针对渗漏部位钻孔至一衬与围岩间的空隙,实施化学注浆。

3.3 治理效果

(1) 直观效果

截止 2004 年 10 月 19 日,洞内注浆全部结束后,隧道正洞及避车洞内再无渗漏点,侧沟内的所有泄水

孔也不再出水,隧道侧沟和进口端左、右两侧集水井内均无积水。这表明昆仑山隧道洞内渗漏水点已被堵住,直观的治水效果较好。

(2) 采用地质雷达检测结果

洞内注浆前,采用地质雷达对隧道衬砌进行了检测,注浆后重新进行了雷达检测。据比较分析有93.7%的不密实段落在本次注浆中被填充密实,表明一、二次衬砌回填注浆效果非常显著。

通过直观效果及地质雷达检测结果,本次隧道洞内注浆达到了设计要求,实现了隧道渗漏水治理的预期目标。

4 结 语

本文首先通过现场连通试验,对渗漏水的水源、流经进行了试验研究;从试验数据出发,深入分析了问题产生的机理,提出了自己的一些见解。通过试验研究和分析为治理方案的制定提供了依据。由于合理地制定了治理方案,并组织实施,最后通过借助地质雷达等手段进行效果检测,证明治理达到了预期效果。

参考文献:

- [1] 伍晓军,等. 青藏铁路试验工程科研项目阶段成果报告—隧道防排水技术试验研究[R]. 兰州:铁道第一勘察设计院,2003.(WU Xiao-jun, et al. Experiment research of waterproof and water-abstraction of tunnel, Reports of phase result of science projects of experiment engineering of Qinghai-Tibet Railway[R]. Lanzhou: The First Survey and Design Institute, Ministry of Railway, 2003.)
- [2] 李苍松,等. 昆仑山隧道渗漏水连通试验报告[R]. 成都:中铁西南科学研究院,2004.(LI Chan-song, et al. Report of interconnected experiment of Kunlunshan Tunnel[R]. Chengdu: South-west Institute of China Railway Engineering, 2004.)
- [3] 铁道第一勘察设计院. 青藏铁路多年冻土隧道设计综述[R]. 兰州:铁道第一勘察设计院,2001.(First Survey and Design Institute, Ministry of Railway. Design survey of permafrost tunnel of Qinghai-Tibet Railway[R]. Lanzhou: The First Survey and Design Institute, Ministry of Railway, 2001.)
- [4] 王建宇,等. 对青藏线昆仑山隧道渗漏水问题的治理意见[R]. 兰州:铁道第一勘察设计院,2002.(WANG Jian-yu, et al. Harnessing suggestion on leakage of Kunlunshan Tunnel of Qinghai-Tibet Railway[R]. Lanzhou: The First Survey and Design Institute, Ministry of Railway, 2002.)
- [5] 乜凤鸣. 通过多年冻土区的铁路隧道冻害整治方法[J]. 隧道译丛,1990,(1).(NIE Feng-ming. Harnessing method of railway tunnels through permafrost[J]. Translation Series of Tunnel, 1990, (1).)
- [6] 张祉道,王 联. 高海拔及严寒地区隧道防冻设计探讨[J]. 现代隧道设计,2004,41(3):1 - 6.(ZHANG Zhi-dao, WAQNG Lian. Discussion on the design of tunnels in high elevation and bitter cold region[J]. Modern Tunnelling Technology, 2004, 41(3):1 - 6.)
- [7] 周幼吾,等. 中国冻土[M]. 北京:科学出版社,2000.(ZHOU You-wu, et al. China frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 2000.)
- [8] 李述训,等. 冻融土中的水热运输问题[M]. 兰州:兰州大学出版社,1995.(LI Shu-shun, et al. Questions on transportation of the water-heat in the frozen-thawed soil[M]. Lanzhou: Press of Lanzhou University, 1995.)
- [9] 铁道部第三勘测设计院. 冻土工程[M]. 北京:中国铁道出版社,1994.(The Third Survey and Design Institute, Ministry of Railway. Frozen soil engineering[M]. Beijing: China Press of Railway, 1994.)
- [10] 江亦元,王星华. 昆仑山隧道施工技术[J]. 中国铁道科学,2003,24(3):12 - 16.(JIANG Yi-yuan, WANG Xinghua-hua. Construction technology of Kunlunshan Tunnel[J]. China Railway Science, 2003, 24(3):12 - 16.)
- [11] 江亦元. 昆仑山隧道施工温度控制及施工措施[J]. 现代隧道技术,2002,39(6):56 - 58.(JIANG Yi-yuan. Temperature control and countermeasures during the construction of Kunlunshan Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2002, 39(6):56 - 58.)