

高原冻土隧道开挖与保温施工技术

郭朋超

(中铁二十局集团有限公司科技部 陕西咸阳 712000)

摘 要 以风火山隧道为实例,在施工中充分把握冻土的工程性质,采用台阶分层微差松动控制爆破,注浆管棚、注浆锚杆,洞内光面爆破等项开挖技术和综合运用换填明洞覆盖层,全长、全断面设置多重保温层,以及供水、通风(供气)、混凝土保温等技术,尽量缩小冻土融化圈,使冻土隧道重建新的热量平衡系统,从而满足了安全、优质、高效建设隧道的要求。

关键词 冻土隧道 开挖 保温

1 工程概况

青藏铁路风火山隧道是世界海拔最高的隧道,地处青藏高原可可西里无人区的风火山地段,起讫里程为 $D_1K1159+000-D_1K1160+338$,全长 1 338 m。最小埋深 8 m,最大埋深 100 m,隧道经过处山坡自然坡度平缓,一般 $10^\circ \sim 15^\circ$,山顶海拔 4 996 m。

该隧为高原多年冻土隧道,多年冻土上限 1.2 ~ 1.8 m,下限深度大于 110 m。洞身全部位于冻岩之中,穿越含冰冻土、厚层地下冰、少冰及多冰冻土、饱冰及富冰冻土等不良地质,地表上层为坡积粉质黏土,厚约 1 ~ 3 m,下覆第三系砂岩、泥岩,泥岩成分较多。风化层厚约 20 m,多破碎,呈土状、碎石土状,基岩隙冰发育,局部含冰量达 50%,围岩分为 IV、V、VI 类 3 种。主要工程特点如下。

(1) 高寒、低压、缺氧,自然环境极为恶劣

该地区属于典型的青藏高原冰雪型气候,寒季很长,为每年 9 月至次年 4 月。极端最低气温 -41°C ,年平均气温 -6.11°C ,最冷月平均气温 -17.8°C ,最大日温差 30°C 左右。当地气压约为内地的 70%;最低氧分压 11 kPa;冬季冰天雪地,沙尘暴频繁;暖季紫外线强烈,雷暴期较长,平均雷暴日数年最多 37 d。恶劣自然环境挑战人类的生命极限,人工、机械效率大幅降低,施工异常艰难。

(2) 高原冻土隧道施工可借鉴的经验较少,科研

院校安排了大量的现场试验、研究项目

中铁西北科学研究院等科研单位从上世纪 50 年代开始,对青藏高原冻土的成因、冻土的工程性质、力学特征等方面进行了长期、系统的试验研究。

为验证多年冻土地带隧道结构设计、开挖支护技术及隔热保温技术的合理性,建立一套寒区隧道工程冻融范围的计算理论,获得相应的试验成果和温度场的计算结果,铁道部科学研究院,中铁西北、西南科研院,北方交通大学,北京科技大学,石家庄铁道学院等科研院、校在风火山隧道安排了许多项目作试验研究,如隧道施工通风技术、洞内外气温变化对围岩冻融圈影响等,为风火山隧道冻土施工提供了相关理论依据。冻土隧道开挖与保温施工等直接经验需要在具体施工过程中不断总结提高。

2 冻土的工程性质

含水的松散岩石和土体,温度降到 0°C 时,伴随有冰体的产生,这是冻结状态的主要标志。由于冰的粘结作用,土体抵抗外力的强度提高了。

2.1 冻土的组成成分

冻土是复杂的多成分体系。矿物颗粒、冰、未冻水和气体是冻土的基本成分。即使在很低的负温度下,散粒冻土中也总有未冻水与冰共存。未冻水的数量与土的温度、成分等有关。散粒土的析冰作用使土的结构构造发生变化。

2.2 冻土的强度

冻土的抗压强度很高,其极限抗压强度甚至与

收稿日期:2003-06-10

混凝土相当。

决定冻土强度的主要因素是内部粘结力。它是冻土各组成部分(矿物颗粒及其集成体、冰和未冻水)之间的相互作用力。冰胶结作用对冻土具有极大意义。

冻土的强度与冻结温度、冻土的组成成分直接相关,温度愈低,冻土抗压强度愈高。这是因为温度降低时,有更多的未冻水冻结成冰,冻土矿物颗粒的胶结更牢固;由于温度降低,冰晶格中的氢原子活动减小,使冰本身的强度增大。不同类型的冻土,抗压强度差异很大,试验表明,冻结砂土较冻结黏土具有更大极限的抗压强度。

冻土的强度除与土的基本矿物组成有关外,还取决于含冰条件。随着含水量增加,含冰量相应增大,从而有更多的矿物颗粒被胶结,抗压强度提高。但含水量达某一值后(相当于孔隙全部被冰充填),含水量增加,矿物颗粒明显被冰分开,抗压强度减小。

2.3 冻土的融化沉降与压缩

融土在冻结过程中由于水变冰体积增大9%,并引起水分迁移、析冰、冻胀、土骨架位移,因而改变了融土的结构。融土在融化过程则必然伴随着土颗粒的位移,充填过剩冰融化排出的空间产生融化固结,从而引起局部地面的向下运动,即热融沉降(热融下沉)。

冻土融化后又和普通土一样,当其上施加荷载时(包括土体自重),将产生压缩下沉,称为融化压缩下沉。

3 洞口段(含明洞)开挖与保温防护措施

为减少对原地貌的破坏和扰动,结合隧道进、出口地形情况,在格尔木端洞口 D₁K1159+000 处,设计接建 35 m 明洞;在拉萨端洞口 D₁K1160+338 处,接建 35 m 明洞。进、出口均采用斜切式明洞门。

3.1 明洞开挖

洞口段的开挖会严重破坏多年冻土的天然状态,尤其是暖季施工的富含冰冻土地带,开挖过程中边坡、基底所暴露的冰层在太阳辐射热作用下发生融化,轻则产生融化泥流,重则产生热融滑坍。因而《铁路路基施工规范》(TB 10202-2002)(下称《路基规范》)要求:富冰冻土、饱冰冻土或含土冰层地段路堑,当按保护冻土原则设计时,宜在寒季施工;所有换填、保温、防护排水等设施均宜在春融前完成。

2001 年 10 月底开工时,首先在洞顶设置截水天沟;边坡开挖线外低凹处设排水沟,天沟与排水沟相

连。按环保要求将地表草皮进行养护(等待移植),机械开挖表层季节融化层。

季节融化层下(冻土上限 1.2~1.8 m 以下)均为多年冻土永久冻结层,自上而下依次为坡积粉质黏土;第三系砂岩、泥岩;在洞口处粉质黏土层和土岩接触面发育富冰及饱冰冻土;局部有薄层地下冰分布。按《路基规范》中多年冻土的工程分级,以上冻土分别为Ⅳ类软石和Ⅴ类次坚石。采用台阶分层微差松动控制爆破开挖,使用 KBW 抗冻防水型乳化炸药,用非电毫秒雷管起爆。粉质黏土、含土冰层和纯冰层等Ⅳ类软石类冻土单位耗药量 q 值按 0.35~0.6 kg/m³ 控制;局部石灰岩、砂页岩Ⅴ类次坚石类冻土单位耗药量 q 值按 0.5~0.8 kg/m³ 控制。

3.2 边、仰坡防护

明洞两侧边坡和洞口位置处仰坡根据少超不欠的原则进行布孔,各层尽量做到一次成形,最大限度地缩短补欠挖时间,以减少热融影响。

边、仰坡刷坡后及时进行锚、喷、网支护,采用 2.5~3 m 长 $\phi 22$ 钢筋锚杆,间距 0.8~1.0 m 梅花形布设,上覆网格 15 cm×15 cm $\phi 8$ 钢筋网片,喷混凝土厚 20 cm。边坡坡面防护向两侧地表各延伸 0.5 m 以上,仰坡坡面防护向山上延伸 5 m 以上。

3.3 保温防护措施

为了保持多年冻土隧道边、仰坡的稳定,就必须根据热力相似原理,通过施工季节的调整,施工工艺的细化和临时措施的应用保证开挖断面的成形,通过换填保温层或设置支挡结构,合理布设排水措施来重建新的热量平衡系统。

(1)搭设临时遮阳保温棚。保温棚采用桁架式结构,搭设高度满足机械作业要求,桁架立柱距开挖边坡不小于 1.5 m,以免边坡融塌损坏。

(2)细化施工工艺。堑区梯段分层爆破开挖;边坡开挖、刷坡、锚喷网支护流水作业,做到成形一段封闭一段。在明洞基底开挖到位后,清理虚碴迅速用粗颗粒土回填,防止基底冻土融化。

(3)选好施工季节。2001 年 10 月底开工,当年完成了明洞开挖、衬砌和正洞掘进、衬砌 100 m。在冬季明洞边坡稳定,但春融后明洞截水沟处有水外渗痕迹。

(4)铺设保温层。明洞衬砌拱部背后铺设甲种防水层,保温层铺设与正洞相同。为确保防水效果,明暗分界处暗洞防水层向明洞延伸。

(5)换填措施。为尽量减少冻胀对明洞衬砌结

构的影响,将进出口明洞开挖边坡中富冰、饱冰冻土用粗颗粒土进行换填。待明洞顶部粗颗粒土回填完工后进行锚喷网支护。

采取保温、换填措施后,明洞渗水消失。经过新一轮冬冻、春融过程检验和测温分析,明洞边、仰坡稳定,正逐步回冻形成新的热量平衡系统。

4 冻土隧道洞内光面爆破与保温防护

4.1 进洞方案与洞口浅埋段开挖

隧道进出口明暗洞交界处埋深均为 3 m 左右,地表坡度平缓。根据地质资料并结合明洞地段的开挖情况,暗洞洞口段冻土多为层状构造和网状构造,局部有纯冰层分布。

层状构造的特点是:冻土中的冰体以层状形式分布,与土矿物层呈冰层土层互层形式。这种构造是高含水量土体慢速冻结时,或土体冻结过程中有外来水源补给时生成的。粉质黏砂土、砂黏土和黏土单向慢速冻结情况下,常生成层状构造冻土。层状构造冻土一般具有较高的强度,但融化时强度急剧下降,土常变成流动状态。

网状构造的特点是:不同尺寸、不同形状、不同方位的冰体形成大小不一、不连续的网格或框格分布于冻土中。这种构造的生成与贯穿于土中的裂隙有关,即沿不同方向贯穿的裂隙是导致冻结过程中形成网状冰脉出现的原因。网状构造冻土强度较小,融化时下沉量大。

考虑到上述构造特点,设计将进口 40 m、出口 48 m 确定为Ⅵ类围岩。施工中采用常规 $\varnothing 80$ 注浆管棚进洞;上下台阶分步开挖,周边微震光爆,严格控制超欠挖。

上断面开挖后清除拱部夹层散碎冰块,初喷混凝土 3~5 cm 封闭岩面;及时施作系统锚杆,安装型钢钢架支撑,复喷混凝土至设计厚度;拱墙分界处设锁脚锚杆。上断面开挖 3~5 m 后进行下断面开挖,开挖、支护工序与上断面相同。

4.2 洞内光面爆破

由于高海拔地区接触网的空气绝缘间隙较平原地区增大,并考虑预设保温层条件,拱顶内缘至内轨顶面直线段设计净高为 7.05 m。衬砌断面均为曲墙有仰拱,其中Ⅵ类围岩衬砌断面为 850 cm \times 999 cm(宽 \times 高)。

本隧道除洞口浅埋段为Ⅵ类围岩外,其余均为

Ⅳ、Ⅴ类围岩。分别采用短台阶分步开挖和全断面开挖。施工时根据明洞和浅埋段开挖情况,采用风动凿岩机钻孔,钻头直径 42 mm;KBW 型防水抗冻性乳化炸药;抗冻型非电毫秒雷管和非电导爆管复合网路。掏槽眼形式为楔形掏槽。在正洞开挖时掏槽眼、辅助眼、底眼用 $\varnothing 32$ mm、2 号岩石硝铵炸药连续装药。

光面爆破和预裂爆破参数通过在明洞和浅埋段试验确定:Ⅴ类围岩周边眼间距 30 cm,最小抵抗线 40 cm;Ⅳ类围岩周边眼间距 40 cm,最小抵抗线 50 cm。周边眼用 $\varnothing 32$ mm 乳化炸药间隔装药,用导爆索连接,炸药和导爆索绑在竹片上送进炮眼内。

严格按钻爆设计组织施工。掏槽眼眼口间距误差和眼底间距误差不得大于 5 cm;辅助眼孔位偏差控制在 10 cm 以内。为防止钻孔机械用水在孔内冻结,成孔后及时用 $\varnothing 20$ mm 钢管送高压风将炮眼内石屑、积水吹干净。

为减弱爆破对围岩的震动,减少围岩爆破松动圈的范围,采用多段位延时非电毫秒雷管。根据围岩含冰量情况优化光爆参数,严格控制周边眼角度和眼口位置误差,洞内光面爆破效果良好,光爆残眼率达 70% 以上。

4.3 洞内衬砌与保温防护

该隧道洞身全部位于冻岩之中,含土冰层、饱冰、富冰冻土发育,为减少洞内气温与地层热交换的影响以及冻土热融造成混凝土渗水,在隧道初衬混凝土与二衬混凝土之间设置保温层。保温层按“防水板+隔热层+防水保护层”的结构形式,沿隧道全长全断面铺设,将隧道二次衬砌以内人为因素造成的气温变化与永久冻土层隔离开。

(1) 模筑混凝土支护

开挖后及时喷射厚 5 cm 掺加 WQDZ 低温早强剂的混凝土,阻止洞内空气和冻岩之间热交换,防止冻岩风化及融化。

进入正洞后,为确保提供圆顺基面,采用模筑混凝土支护。自制初衬台车,泵送低温早强耐久混凝土入模,插入式振捣器振捣密实。混凝土入模温度控制在 5~8 $^{\circ}\text{C}$,尽量减小围岩融化圈。

模筑 C25 混凝土强度达到设计强度的 70% 以后,即可利用预埋注浆管向模筑混凝土支护背后压注 1:1 水泥浆,以回填支护与围岩间的空隙,避免冻害隐患。注浆压力控制在 0.6 MPa。

(2) 防水及隔热保温层施工

采用 PVC 复合防水板,要求拉伸强度 ≥ 15 MPa;断裂伸长率 $\geq 300\%$;低温柔性, $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 无裂纹;抗渗透,耐穿刺;耐水、耐低温;无毒、无菌、耐腐蚀。要求盲沟在低温条件具有弹性,透水性好,能承受不小于 0.5 MPa 的压力,并不易锈蚀。在基底及仰拱部位铺设大于 300 g/m^2 的无纺布。

保温材料聚胺酯板厚 5 cm。选用导热系数低、抗压强度高、体积吸水率小的低毒性材料。

施工顺序为:①仰拱及墙底防水板→保温板→防水板→无纺布,②墙脚水沟纵向 $\varnothing 100\text{ mm}$ PVC 盲沟,③拱墙环向 $\varnothing 50\text{ mm}$ 盲沟→防水板→保温板→防水板。

“三缝”防水施工。水平及环向施工缝在新浇混凝土前刷厚 2 mm 的 WJ 接口粘结剂,在衬砌截面中间布置遇水膨胀止水条;在预设衬砌伸缩缝、沉降缝的断面中间铺设橡胶止水带;在靠近初期支护侧沿衬砌边缘设 10 cm 遇水膨胀橡胶,其余采用 2 cm 浸油木板填塞。

(3) 模筑钢筋混凝土衬砌

采用 43 kg/m 扣轨梁式栈桥方案开挖、衬砌仰拱,铺底混凝土与仰拱一同铺砌并预置曲边墙钢筋。

拱墙衬砌一次成型。采用自制长 6 m 全液压整体钢模衬砌台车,混凝土采用自动计量拌和, TST-6 型轨行混凝土输送车运输, HBT60 混凝土输送泵泵送入模,插入式振动器配合台车附着式振动器振捣。

(4) 混凝土拌和保温措施

工作面最低气温低于 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,衬砌混凝土按冬期施工措施办理。用 DZLZ-10-A 型蒸汽锅炉烧热水;搭设保温大棚接通暖气对砂、石料进行保温加热。混凝土生产、运输、浇筑及质量检验均按《铁路混凝土与砌体工程施工规范》(TB 10210-2001)中混凝土冬期施工相关规定执行,确保混凝土温度下降到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以前获得抗冻所需要的临界强度。

4.4 洞内其它保温措施

(1) 施工通风、供氧保温措施

风火山隧道地处高原,空气稀薄、含氧量低,严重影响施工人员的工作效率,施工通风、供氧至关重要。为满足尽量缩小冻土融化圈的低温要求并同时满足混凝土的衬砌温度要求,洞内施工环境温度控制在 $-5\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,采用压入式通风,改善洞内作业环境。风机置于洞外距洞口 25 m 处,选用 $\varnothing 1.0\text{ m}$ 软风管,暖季通风避开高温时段,利用早晚及夜间通风;寒季采用 STDK-100 型暖风机通风。

为保证洞内作业人员吸氧需求,我单位与北京科技大学联合研制 ZO-30/PSA 制氧站(制氧量 $20\text{ m}^3/\text{h}$,氧气纯度达 96%),用管道向洞内掌子面作弥散式供氧,也向可移动氧吧车供氧,管道通至距掌子面 10 m 左右,人员休息时可在氧吧车内吸氧。生活供氧采用充罐的方式。

(2) 洞内供水保温措施

隧道进口处用风压供水:在距掌子面 50~100 m 处设置两台 5 m^3 高压水罐,用 $\varnothing 100\text{ mm}$ 钢管向高压水罐送风,高压水罐上设安全阀、单向逆止阀,供风压力 1.0 MPa,满足了凿岩机、混凝土喷射机的高压用水需求。

隧道出口施工时在距掌子面 50~100 m 处放置水箱,用 50 m 扬程多级泵供水。

风火山隧道施工采用以上保温防护措施,有效地控制了洞内环境温度,洞内主要作业区环境温度实测平均值见表 1。

表 1 2002 年洞内主要作业区环境温度实测平均值 $^{\circ}\text{C}$

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
温度	-2.67	-4.33	-0.67	2.67	4.33	7.33	10.67	10	8	5.5	4.5	2.5

冬季半年 11 月至次年 5 月对低温的控制十分有效,洞顶、拱墙分界处、边墙墙角处气温均在 $-5\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,能够确保低温早强耐久混凝土衬砌的温度要求。夏季半年 6 至 10 月对高于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的正温控制不理想,爆破后约 1 h 拱墙开挖面即有未冻水外渗。为此,快速喷射厚 5 cm 掺加 WQDZ 低温早强剂的混凝土封闭开挖面和掌子面,后续工序及时跟进,尽量减小围岩融化圈。

5 结论

高原冻土隧道施工必须充分把握冻土的工程性质,在进出口及洞身发育富冰、饱冰冻土和纯冰层地段,应采取注浆、强支撑措施,超短台阶开挖。洞身其余少冰、多冰冻土则应大胆采用全断面、正台阶开挖,及时采取各种保温防护措施,尽量减少对冻土的扰动,缩小冻土融化圈。

风火山高原冻土隧道于 2001 年 10 月底开工,2002 年 10 月顺利贯通,该隧道现已竣工,满足了安全、优质、高效的建设要求。被评为 2002 年公众关注的中国十大科技事件。