

文章编号:1006-2106(2012)03-0026-04

青藏铁路多年冻土区路基热防护工程效果分析^{*}

牛东兴^{**} 李 勇 韩龙武

(中铁西北科学研究院有限公司, 兰州 730000)

摘要:研究目的:我国青藏铁路的修建充分考虑了对多年冻土的保护,在路基热防护措施中采用了热棒路基,碎(片)石护坡、块石护坡、片石气冷等关键技术。文章对青藏铁路各种路基新结构的地温进行研究,通过地温值计算得出最大融化深度,从各年最大融化深度的对比分析,研究这些措施对保护多年冻土,保证线路安全的作用。

研究结论:通过对实测数据的分析得出热防护措施能使路肩下最大融化深度减小。路基新结构的应用对保护多年冻土、降低地温、稳定路基是有效的。

关键词:青藏铁路;多年冻土;防护措施;工程效果;热棒

中图分类号:TU443 **文献标识码:**A

Analysis of Engineering Effect of Heat Safeguard in Permafrost Regions along Qinghai – Tibet Railway

NIU Dong – xing , LI Yong , HAN Long – wu

(Northwest Research Institute Co. Ltd of China Railway Engineering Corporation ,Lanzhou ,Gansu 730000 ,China)

Abstract: Research purposes: We matured the protecting of the permafrost in construction of the Qinghai – Tibet railway. We adopt some key technics at heat fense measure to roadbed ,for example thermal probes , rubble revetment , and crushed rock embankment and so on. The paper researched the ground temperature of such roadbed new structure of Qinghai – Tibet Railway. Through calculating of the ground temperature we obtain corresponding the maximum thawed depth. Through comparative analysis of the maximum thawed depth ,the paper researches the measure 's effect at protecting permafrost and the safety of the railway.

Research conclusions: The paper based on the analysis of the data concludes that the heat fense measure can minish maximum thawed depth under shoulder. The applying of the roadbed new structure can protect permafrost ,debase ground temperature and make the roadbed stabilization.

Key words: Qinghai – Tibet railway; permafrost; fense measure; engineering effect; thermal pipe

1 概述

举世瞩目的青藏铁路已于2006年7月1日开通试运营,并且在多年冻土区地段达到了100 km/h的速度,这在世界各个存在多年冻土的国家的铁路运营史上是罕见的,实现了“世界一流高原铁路”的建设目标。青藏铁路有546 km通过多年冻土区,其中融区

101.70 km,Ⅰ区(高温极不稳定多年冻土亚区,年平均地温 $T_{cp} \geq -0.5^{\circ}\text{C}$)199.75 km,Ⅱ区(高温不稳定多年冻土亚区, $-1.0^{\circ}\text{C} \leq$ 年平均地温 $T_{cp} < -0.5^{\circ}\text{C}$)74.50 km,Ⅲ区(低温基本稳定多年冻土区, $-2.0^{\circ}\text{C} \leq$ 年平均地温 $T_{cp} \leq -1.0^{\circ}\text{C}$)110.71 km,Ⅳ区(低温稳定多年冻土区,年平均地温 $T_{cp} < -2.0^{\circ}\text{C}$)59.74 km,Ⅰ~Ⅳ区中高含冰量地段为223.16 km,低含冰量地

^{*} 收稿日期:2011-09-30

^{**} 作者简介:牛东兴,1981年出生,男,工程师。

段为 221.48 km^[1]。

2 国内外多年冻土区的铁路工程

国外多年冻土区铁路主要集中在俄罗斯、加拿大和美国。俄罗斯于 1895 年开始修建第一条西伯利亚大铁路,即后贝加尔铁路。该线全长 9 446 km,穿越多年冻土地段 2 200 km。20 世纪 70 年代,又开始修建第二条西伯利亚铁路,即贝阿铁路。该线全长 3 500 km,通过多年冻土地段长约 2 500 km。别尔卡基特—托莫特—雅库茨克铁路全长 818 km,几乎全部位于多年冻土区。

加拿大在二战期间开始在多年冻土地地区修建铁路。目前,加拿大在多年冻土地地区共有五条铁路,即:埃得蒙顿—丘吉尔港(哈得森湾);利贾纳—海利克(大努湖);梅尼埃港—谢费维尔;迫斯—林莱克;锡基特波蒂奇—林莱克。五条铁路穿越多年冻土区长度约 2 000 km。美国 1904 年修建阿拉斯加铁路,线路总长 756 km。其中多年冻土地地区铁路长度约 300 km。

据有关资料介绍,1996 年有关部门对后贝加尔铁路多年冻土地段路基病害进行了调查,线路的病害率竟高达 40.5%;贝阿铁路多年冻土地段的病害率,据 1994 年调查达 27.7%。贝阿铁路病害与施工有直接关系,该铁路修建时直接在铁路两侧进行挖方填筑路堤,使得冻土层暴露出来或使冻土层上覆土层较薄,致使冻土环境遭到破坏,因此多年冻土区段出现大量路基病害,线路破坏严重。在冻土区进行工程建设,不得不考虑冻土对工程建设及修建完成后的使用过程的影响。

青藏铁路格拉段全长 1 142 km,其中有 546 km 铁路线位于高原多年冻土区,多年冻土区平均海拔 4 300 m 以上,青藏铁路的设计及修建充分吸取了国外多年冻土区铁路的经验教训,自主进行了大量的现场和室内试验及科学研究,为其修建提供的保障。青藏铁路自 2006 年 7 月 1 日开通运营,至今运营良好,充分说明青藏铁路是成功的。

国内外多年冻土区铁路工程的运营实践表明,要维持多年冻土区铁路工程的稳定,必须根据铁路通过地段多年冻土的不同特性,采用不同的特殊工程措施才能达到。如果设计和维修不当,多年冻土区铁路路

基工程的病害率可达 20%~40%,甚至更高。

3 青藏铁路特殊路基结构

路基是铁路线中最重要的组成部分之一。路基状态的完整与路基结构的稳定是关系到铁路建设质量与列车安全运行的关键,因此铁路路基在整个设计、施工及运营过程中应受到充分的重视。

保持青藏铁路多年冻土区路基稳定的重要原则就是采用主动降温与被动降温的工程结构来防止热量进入路基土体中和路基地基中,以保持多年冻土区路基的稳定,即保护多年冻土,避免其融化,这样也就保护了路基本身,使其具有足够的稳定性。

路基土体发生的冻融过程与天然土体类似,只不过由于路基填土改变了原来天然地面的散热特征,路基特殊结构(如片石气冷路基)使融化过程向多年冻土的散热受阻,冻结过程中多年冻土向上的散热加速,从而在一定程度上改变了传热过程的方向和强度,使路基基底以下原最大季节融化深度减小,即所谓多年冻土上限抬升。

综上所述,路基基底以下多年冻土上限抬升,实际上是路基填土(或结构)和原天然地面以下土体组成的热传导综合体,在新的散热界面和内部新的传热介质条件下发生冻融过程的结果。新的多年冻土上限的稳定形成(路基人为上限形成)和天然条件类似,都是外界热源和内部介质(土体或新结构材质)热传导过程的结果。在整个热传导过程的不同阶段,多年冻土年变化深度以上土体由于参与了其中的散热和吸热过程,温度有可能升高或降低。

为了适应青藏高原的多年冻土条件,减少不利因素对青藏铁路路基的影响,保证青藏铁路的安全运营,在修建过程中采用了一些新型的路基结构形式,如片石气冷路堤、热棒路基等。

4 青藏铁路路基防护措施效果分析

4.1 热棒

热棒是一种主动降温的工程措施,热棒的使用致使部分路基断面天然上限的变化情况,左、右路肩的最大融化深度的变化情况分别如表 1、表 2 所示。

表 1 热棒路基左路肩最大融化深度

序号	断面	工程措施	线路走向	左路肩最大融化深度/m			2009 年比 2007 年减小深度/m
				2007 年	2008 年	2009 年	
1	K 1 074 + 430	左右侧双排热棒 + 片石护道	南偏西 85°	2.89	2.69	—	—
2	K 1 250 + 700	碎石护坡 + 热棒路基	南偏西 25°	4.25	—	3.95	0.3
3	K 1 404 + 750	热棒路基	南偏西 50°	1.75	—	1.39	0.36

表 2 热棒路基右路肩最大融化深度

序号	断面	工程措施	线路走向	右路肩最大融化深度/m			2009 年比 2007 年减小深度/m
				2007 年	2008 年	2009 年	
1	K 0 972 + 580	热棒	南偏西 10°	1.7	—	1.64	0.06
2	K 1 074 + 430	左右侧双排热棒 + 片石护道	南偏西 85°	3.74	3.24	—	—
3	K 1 250 + 700	碎石护坡 + 热棒路基	南偏西 25°	3.84	—	3.6	0.24
4	K 1 435 + 377	热棒 + 碎石护坡	南偏西 5°	6.25	—	5.75	0.5

从表 2 可见 ,K 1 074 + 430 断面左路肩最大融化深度 2007 年为 2.89 m 2008 年为 2.69 m 2008 年比 2007 年减小 0.2 m ,右路肩最大融化深度 2007 年为 3.74 m 2008 年为 3.24 m 2008 年比 2007 年减小 0.5 m。

K 1 250 + 700 断面左路肩最大融化深度 2007 年为 4.25 m 2009 年为 3.95 m 2009 年比 2007 年减小 0.3 m ,右路肩最大融化深度 2007 年为 3.84 m 2009 年为 3.6 m 2009 年比 2007 年减小 0.24 m。

其他观测断面经过 1 ~ 2 个冻融循环最大融化深度均有减小 ,说明热棒对降低地温 稳定路基有积极的作用。

用热棒来冷却多年冻土地基 ,几乎可以解决多年冻土工程中所有的地基基础热学问题。多年冻土地区

地基基础的突出问题是多年冻土的退化和融化 ,这些问题的产生均是由地基基础中的热传导过程所引起的 ,是多年冻土区地基基础设计中的热工问题。多年冻土的退化使多年冻土地基强度降低、承载力下降 ,地基冻土蠕变速率增大 ,基础下沉增加;而多年冻土的融化 ,将使地基持力层强度降低 ,基础产生较大下沉 ,尤其在高含冰量冻土地区 ,这种下沉可能是突发性的 ,后果甚为严重 ,使用热棒制冷装置可以较好地解决上述冻土问题^[2]。

4.2 碎(片)石护坡、块石护坡、片石气冷

碎(片)石护坡、块石护坡、片石气冷工程措施部分路基断面左、右路肩的最大融化深度变化情况分别如表 3、表 4 所示。

表 3 碎(片)石护坡路基左路肩最大融化深度

序号	断面	工程措施	线路走向	左路肩最大融化深度/m		2009 年比 2007 年减小深度/m
				2007 年	2009 年	
1	K 0 977 + 730	片石气冷 + 碎石护坡	南偏西 20°	3.53	3.28	0.25
2	K 1 011 + 654	片石气冷 + 碎石护坡	南偏西 68°	3.82	3.62	0.2
3	K 1 034 + 090	片石气冷 + 碎石护坡	南偏西 60°	6.01	5.51	0.5
4	K 1 038 + 670	片石气冷 + 碎石护坡	南偏西 60°	4.97	4.44	0.53
5	K 1 051 + 810	碎石护道 + 碎石护坡	南偏西 43°	4.34	3.86	0.48
6	K 1 058 + 750	片石气冷 + 碎石护坡	南偏西 2°	4.29	3.89	0.4
7	K 1 101 + 795	碎石护坡 + 碎石护道	北偏西 10°	3.69	3.37	0.32
8	K 1 161 + 625	片石气冷 + 片石护坡	南偏西 56°	4.24	3.9	0.34
9	K 1 169 + 641	土护道 + 片石护坡	南偏西 30°	13.45	13.2	0.25
10	K 1 203 + 150	片石气冷 + 碎石护坡	南偏西 79°	6.88	6.33	0.55
11	K 1 231 + 260	片石护道 + 碎石护坡	南偏西 63°	3.91	3.41	0.5
12	K 1 262 + 192	碎石护坡 + 块石护道	南偏西 23°	5	4.6	0.4

表 4 碎(片)石护坡路基右路肩最大融化深度

序号	断面	工程措施	线路走向	右路肩最大融化深度/m		2009 年比 2007 年减小深度/m
				2007 年	2009 年	
1	K 0 977 + 730	片石气冷 + 碎石护坡	南偏西 20°	2.22	2.03	0.19
2	K 1 001 + 750	片石护坡 + 土护道	西偏北 6°	2.67	2.35	0.32
3	K 1 011 + 654	片石气冷 + 碎石护坡	南偏西 68°	2.95	2.76	0.19
4	K 1 034 + 090	片石气冷 + 碎石护坡	南偏西 60°	4.65	4.05	0.6
5	K 1 045 + 350	片石气冷 + 碎石护坡 + 土护道	南偏西 65°	3.69	3.45	0.24
6	K 1 051 + 810	碎石护道 + 碎石护坡	南偏西 43°	4.16	3.86	0.3
7	K 1 082 + 575	块石护坡 + 块石护道	西偏北 5°	2.71	2.44	0.27
8	K 1 106 + 780	土护道 + 片石护坡	南偏西 30°	3.77	3.53	0.24
9	K 1 139 + 771	片石护道 + 碎石护坡	南偏西 14°	3.53	3.37	0.16

续表 4 碎(片)石护坡路基右路肩最大融化深度

序号	断面	工程措施	线路走向	右路肩最大融化深度/m		2009 年比 2007 年 减小深度/m
				2007 年	2009 年	
10	K 1 203 + 150	片石气冷 + 碎石护坡	南偏西 79°	3.83	3.65	0.18
11	K 1 250 + 700	碎石护坡 + 热棒路基	南偏西 25°	3.84	3.6	0.24
12	K 1 254 + 020	片石护道 + 碎石护坡	南偏西 5°	4.38	4	0.38
13	K 1 392 + 250	片石护道 + 碎石护坡	北偏西 78°	6.8	6.21	0.59
14	K 1 435 + 377	热棒 + 碎石护坡	南偏西 5°	6.25	5.75	0.5
15	K 1 485 + 340	片石气冷 + 碎石护坡	南偏东 35°	5.23	4.86	0.37

从表 3、表 4 中可见 ,K 1 254 + 020 断面为片石护道 + 碎石护坡工程措施 ,线路走向南偏西 5° ,为双阳侧路基 ,左路肩最大融化深度 2007 年为 4.46 m 2009 年为 3.64 m ,经过两个冻融循环最大融化深度减小了 0.82 m ,右路肩最大融化深度 2007 年为 4.38 m 2009 年为 4.00 m ,经过两个冻融循环最大融化深度减小了 0.38 m。

K 1 203 + 150 断面为片石气冷 + 碎石护坡工程措施 ,线路走向南偏西 79° ,左侧为阳侧 ,右侧为阴侧 ,左路肩最大融化深度 2007 年为 6.88 m 2009 年为 6.33 m ,经过两个冻融循环最大融化深度减小了 0.55 m ,右路肩最大融化深度 2007 年为 3.83 m 2009 年为 3.65 m ,经过两个冻融循环最大融化深度减小了 0.18 m。

K 1392 + 250 断面为片石护道 + 碎石护坡工程措施 ,线路走向北偏西 78° ,左侧为阳侧 ,右侧为阴侧 ,右路肩最大融化深度 2007 年为 6.8 m 2009 年为 6.21 m ,经过两个冻融循环最大融化深度减小了 0.59 m。

K 1 312 + 270 断面为片石气冷 + 碎石护坡工程措施 ,线路走向南偏西 25° ,左侧为阳侧 ,右侧为阴侧 ,左路肩最大融化深度 2006 年为 4.56 m 2007 年为 5.00 m ,经过一个冻融循环最大融化深度减小了 0.44 m ,右路肩最大融化深度 2006 年为 4.3 m 2007 年为 4.29 m ,经过一个冻融循环最大融化深度减小了 0.01 m。

碎(片)石护坡、块石护坡、片石气冷等工程措施是通过改变传热方式而保护冻土的工程措施 ,它使传入路堤中的热量 ,不仅仅通过颗粒接触的传导传热 ,还通过人为地制造堤中介质间的空隙而形成以对流传热为主的传热机制 ,利用高原冻土区负积温远大于正积温的气候特征 ,改变堤中的温度场 ,达到降低基底温度 ,保护多年冻土的目的。

在暖季 ,太阳辐射热通过路堤表面以传导方式将热量传入路堤和基底 ,路堤空隙中的空气被加热 ,热空气会沿空隙上升 ,从而在一定程度上阻止了热量进入路堤及基底;在寒季 ,冷空气在冷却路堤表面的同时 ,还会进入路堤中的空隙 ,通过对流换热不断地置换出空隙中的热空气 ,从而进一步冷却路堤和基底 ,较大地增加了路堤中的冷量 ,起到保护多年冻土的作用 ,所以

片石层具有类似于热开关的作用。由此可见 ,片石气冷路堤在暖季可以减少外部热量的流入 ,而在寒季能显著提高冷量的传入 ,所以片石气冷路堤对多年冻土能起到积极保护的作用^[3]。

5 结论

(1) K 1 074 + 430 断面为双排热棒路基 ,线路走向南偏西 85° ,左侧为阳侧 ,右侧为阴侧。该断面经一个冻融循环周期 ,左右两侧最大融化深度分别减小了 20 cm、50 cm ,充分说明热棒降低地温的效果显著。

(2) K 1 435 + 377 断面为热棒 + 碎石护坡工程措施 ,线路走向南偏西 5° ,为双阳侧路基 ,右路肩最大融化深度 2009 年比 2007 年减小 50 cm ,热棒的使用使得右路肩的最大融化深度减小 ,热棒的降温效果显著。

(3) 由于碎(片)石护坡、块石护坡、片石气冷工程措施的应用使得左右路肩下最大融化深度呈减小趋势 ,热防护工程措施的使用对保护多年冻土、稳定路基有积极的作用 ,起到了稳定路基的效果。

参考文献:

[1] 牛东兴 牛怀俊. 浅谈青藏高原多年冻土区铁路路基运营养护[J]. 铁道工程学报 2008(1): 41-47.
Niu Dongxing , Niu Huaijun. The Discussion on Conveying and Conserving of Railway Subgrade in Permafrost Region of Qinghai - Tibet Plateau [J]. Journal of Railway Engineering Society 2008(1): 41 - 47.

[2] 中铁西北科学研究院有限公司. 热棒在冻土路基中的应用试验研究[R]. 兰州: 中铁西北科学研究院有限公司 , 2007.
Research Report of Northwest Research Institute CO. LTD. ,of C. R. E. C. Experimental Study of the Thermal Pipe's Apply in Permafrost Subgrade [R]. Lanzhou: Research Report of Northwest Research Institute CO. LTD. ,of C. R. E. C. February 2007: 9 - 13.

(下转第 34 页)

周有无渗水,有水时要及时采取措施给予封堵。从所述两座大桥的四个深水基坑开挖情况看,三个基坑非常成功,基坑四周没有发生漏水。一个基坑在靠岸侧接近河床时由于桩发生偏离未嵌套,漏水严重,现场分析主要原因是施工速度太快,两侧的 A 桩灌注结束就开始施工 B 桩,使 A 桩混凝土强度不足而对 B 桩钻孔失去导向作用。

8 结论

所谓钻孔嵌套灌注桩围护结构,也就是指相邻混凝土排桩部分圆周相嵌,使之形成具有良好止水防渗作用的整体连续排桩或挡土支护结构,其特点为桩间相互嵌套排列,并且钢筋混凝土钻孔桩和素混凝土交替排列,形成一个整体。除具有挡土作用外,还同时具有封闭渗水作用。该施工工艺的特点就是充分利用了河床基岩作为桩的一个支撑点,使桩成为一个稳定的支护体系,同时桩端伸入基岩有效封堵了河水的流入,加上桩间的有效嵌套达到彻底封水的目的。即使施工中桩间嵌套没有达到预期效果,存在有小的缝隙,在桩身混凝土的凝固过程中水泥可对缝隙填充物(泥皮)产生改良效果达到堵水目的。

需要说明的是,基坑周边的布桩要考虑桩间的嵌套、桩径和桩的检算。桩间理论嵌套不应小于 5 cm。

本文方案的设计计算仅是一个算例,针对不同条件可改变结构形式并进行有针对性的计算检算。但是施工工艺的几个关键点有别于一般的基础桩,必须提高围护桩位置的精度和垂直度同时要保证在先施工桩的混凝土强度达到一定水平后才能施工后续桩,这样先期施工的桩可对后期施工桩的钻孔作业产生导向作

用,达到充分嵌套的目的。

通过在两座黄河大桥水中墩深水基坑中的成功应用,解决了在河水流动状态下深基坑施工难的问题。同其它方案比较减少了很多施工风险,比如注浆方案效果的不可预见性和沉井方案的技术难度大,施工控制复杂性等风险。同时该方案施工简单,比其他方案都容易实施,其经济性也是比较显著的。

参考文献:

- [1] 任伟. 黄河特大桥水中桩基双护筒成孔施工技术[J]. 山西建筑, 2007(27): 154-156.
Ren Wei. Pore-forming Technique of Yellow River XL Bridge Water Pile Foundation[J]. Shanxi Construction Engineering, 2007(27): 154-156.
- [2] 陈立成,等. 钻孔嵌套桩: 中国, 201020532115. 2 [P]. 2011-03-16.
Lichen Chen, etc. Bored Nested Pile: China, 201020532115. 2 [P]. 2011-03-16.
- [3] 罗照新,等. 深基坑支挡加固防渗止水复合构造: 中国, 200810147961. X [P]. 2011-03-30.
Luo Zhaoxin. Deep Foundation Retaining Strengthens and Waterproof Structure: China, 200810147961. X [P]. 2011-03-30.
- [4] 周心培. 挖孔桩围护墙在工程中的应用[J]. 铁道工程学报, 1997(1): 169-173.
Zhou Xinpei. Bored Pile Applications in Engineering [J]. Journal of Railway Engineering Society, 1997(1): 169-173.
- [5] TZ 322—2010, 铁路桥梁钻孔桩施工技术指南[S].
TZ 322—2010, Technical Guide of Bored Pile in Railroad Bridge [S].

(上接第 29 页)

- [3] 中铁西北科学研究院. 路基新结构—片石气冷路堤试验研究[R]. 兰州: 中铁西北科学研究院有限公司 [R]. 2006.
Research Report of Northwest Research Institute Co. Ltd of CREC. Roadbed New Structure—Experimental Study of the Riprap Air Cooled Embankment [R]. Lanzhou: Research Report of Northwest Research Institute Co. Ltd of CREC, 2006.
- [4] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing. China's Permafrost [M]. Beijing: Science Press, 2000.

- [5] 中铁西北科学研究院研究. 冻土地区热桩技术的应用[R]. 兰州: 中铁西北科学研究院, 1990.
The Apply of Thermal Pipe Technology in Permafrost region [R]. Lanzhou: Research Report of Northwest Research Institute of CREC, 1990.
- [6] 吴青柏, 梁素云, 高兴旺. 热桩与空气间的对流换热规律研究[J]. 冰川冻土, 1996(1): 37-41.
Wu Qingbai, Liang Suyun, Gao Xingwang. Research of Convection Heat Transfer Between Thermalpile and Air [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996(1): 37-41.