

青藏铁路沿线主要次生不良冻土现象的调查和机理分析

余绍水^{1,3}, 潘卫东², 史聪慧^{1,3}, 王小军⁴, 梁波⁵

- (1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096; 3. 中铁 12 局集团有限公司, 山西 太原 030024;
4. 中铁西北科学研究院, 甘肃 兰州 730000; 5. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730300)

摘要: 经过野外调查发现, 完成施工但尚未投入运营的青藏铁路沿线出现了一些次生不良冻土现象。通过讨论这些次生不良冻土现象的分布规律和危害, 认为铁路路基对地下水条件和冻土热稳定性的破坏是导致产生次生不良冻土现象的根本原因, 并初步探讨了针对这些现象的工程防治措施。

关键词: 土力学; 青藏铁路; 次生不良冻土现象; 机理; 调查

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)06-1082-04

INVESTIGATION AND MECHANISM ANALYSIS OF THE MAJOR SECONDARY HARMFUL FROZEN-SOIL PHENOMENA ALONG QINGHAI—TIBET RAILWAY

YU Shao-shui^{1,3}, PAN Wei-dong², SHI Cong-hui^{1,3}, WANG Xiao-jun⁴, LIANG Bo⁵

- (1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. Twelve Bureau Group Ltd. Co., China Railway Engineering Corporation, Taiyuan 030024, China; 4. Northwest Research Institute of China Railway Engineering Corporation, Lanzhou 730000, China; 5. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730300, China)

Abstract: A number of secondary harmful frozen soil phenomena were found along Qinghai—Tibet railway which are being developed since the completion of construction of the railway. The distribution laws and danger of these phenomena are discussed. These are mainly caused by disturbance of ground water condition and thermal stability. Some key principles to control these disasters are also discussed.

Key words: soil mechanics; Qinghai—Tibet railway; secondary harmful frozen-soil phenomena; mechanism; investigation

1 引言

不良冻土现象, 是指土体在冻结和融化作用下产生的物理地质现象。在多年冻土区修筑铁路会遇到许多不良冻土现象^[1], 反过来, 铁路的修建又会

形成新的不良冻土现象即次生不良冻土现象, 对铁路路基等建筑物产生种种危害。因此, 调查和研究青藏铁路沿线多年冻土区主要不良冻土现象的类型、分布和发育特征, 对避免和防治次生不良冻土现象的发生和发展, 保证铁路工程的稳定和安全有着非常重要的现实意义。

收稿日期: 2004-03-30; **修回日期:** 2004-05-20

作者简介: 余绍水(1969-), 男, 现为博士研究生, 主要从事工程管理、冻土工程和土木工程方面的研究工作。E-mail: wdpan@seu.edu.cn.

多年冻土区不仅气候严寒,而且还有多年冻土层作为底板使地表水的下渗和多年冻土层上水的活动受到约束,加之工程结构物的修建破坏了天然的水文地质条件,这是多年冻土区次生不良地质现象发生和存在的基本条件。

多年冻土区常见的次生不良地质现象主要有冰锥(冰丘、冰幔)、冻胀丘、厚层地下冰、热融滑塌和热融湖塘等^[2]。

2 次生不良冻土现象的工程危害和野外调查

根据前人的研究发现,在青藏高原多年冻土区修建铁路造成的次生不良冻土现象,可能直接导致路基产生很大变形,对行车安全会带来严重威胁。这种现象,已经引起决策部门和运营企业的高度关注。

表 1 列出了 2003 年初青藏铁路沿线发生的典型

次生不良冻土现象。

在表 1 所列出的已调查的 18 处次生不良冻土现象中,冰锥、冰幔共 9 处,主要位于路基两侧、桥墩和涵洞,这种次生不良冻土现象主要是在施工时将冻土层打穿导致层下承压水或堵塞地表水排泄通道引起的。厚层地下冰共 2 处:DK1136+300~DK1136+500 处厚层地下冰发育在路堑边坡上,由于施工组织问题,在暖季演化为热融滑塌,产生了较大变形;DK1142+000~K1142+350 处,从原地面向下 1.8~2.5 m 处出现厚度大且连续分布的水平产状的厚层地下冰,该段路基为路堤。热融湖塘共 5 处,位于路基两侧,有些与冰幔连通。冻胀丘和热融滑塌未作调查。

3 主要次生不良冻土现象的机理分析

青藏铁路的次生不良冻土现象的形成原因不外乎 2 个:(1) 铁路施工较严重地破坏了所在区域

表 1 2003 年初青藏铁路沿线发生的典型次生不良冻土现象

Table 1 Typical secondary harmful frozen-soil phenomena along Qinghai—Tibet railway in the beginning of year 2003

序号	里程/km	距路基距离/m	与线路关系	不良冻土现象	说明
1	DK1091+000	20.0	线路上方	泉冰锥	位于路基右侧
2	DK1123+610	2.5	线路上方	泉冰锥	于 2002 年 9 月出现,为路基修筑后改变地下水运移条件所形成
3	DK1130+593	0.0	线路上、下方	热融湖塘、冰幔	此处有一涵洞,尚未施工,因排水不畅,涵洞左右两侧热融湖塘连通,形成大面积冰幔
4	DK1136+300~DK1136+500	0.0		开挖基底后发现厚层地下冰,最厚处达 0.6 m	左侧堑顶有 1 条贯通的纵向裂缝,长 200 m,宽 200 mm;左侧堑坡上有 2 条裂缝,长 20 m,宽 10~25 mm;右侧堑顶的纵向裂缝有 6 条,最大的裂缝长 20 m,最大宽 350~400 mm。如不及时采取措施,暖季坡面会大面积坍塌
5	DK1139+284	0.0	线路上、下方	冰锥、冰幔	该处为小桥,桥的两侧发育有冰锥、冰幔
6	DK1142+000~K1142+350	0.0		厚层地下冰,厚度达 0.6~3.9 m,产状近水平	从原地面向下 1.8~2.5 m 处出现连续分布的厚层地下冰,该段路基为路堤
7	DK1144+550	100.0	线路下方	泉冰锥、河冰锥	
8	DK1164+400	15.0	线路上方	冰幔	
9	DK1172+304	0.0	线路上、下方	冰幔涵洞冰塞	涵洞内及出入口已被冰堵死,涵洞进水口外两侧积冰
10	DK1178+000~DK1178+050	0.0	线路上、下方	冰锥、冰幔	片石通风路基左侧有大面积的冰锥、冰幔,积冰从片石层中渗出,又在右侧坡脚形成冰幔
11	DK1178+800	10.0	线路上、下方	冰锥、冰幔	桥梁钻孔灌注桩的施工已完成,受施工影响,线路左侧(上游)积冰严重,长约 300 m,最宽处 50 m
12	DK1199+900	30.0	线路右侧	热融湖塘	
13	DK1229+280	0.0		冰锥、冰幔	因打测温孔时打出承压水,且此处涵洞排水不畅,因而在涵洞两侧形成冰锥及冰幔
14	DK1199+900	30.0	线路右侧	热融湖塘	
15	DK1207+650	0.0	线路上方	冰幔	该冰幔规模较大,且位于桥的右侧
16	DK1269+600	150.0	线路下方	热融湖塘	该处热融湖塘规模大,长 650 m
17	DK1308+250	150.0	线路下方	热融湖塘	在铁路路基左侧 300 m 内热融湖塘发育
18	DK1370+600	0.0	线路上、下方	冰幔	该段路基两侧的冰幔比较发育

注:DK 表示推算的铁路里程,因现场里程桩较少,所提供的里程仅供参考。

的水文地质条件；(2) 填筑后的路基对多年冻土的热平衡产生了较大影响。第 1 种主要形成了冰锥、冰幔和热融湖塘等不良冻土现象，随着工程施工的完成以及相应的补救工程措施和时间的推移，这类次生不良冻土现象对铁路建筑物的影响会逐渐减小；第 2 种主要形成了冻胀丘和厚层地下冰，原因是工程构筑物改变了多年冻土的水、热输运状态和条件。这类次生不良冻土现象对铁路建筑物危害巨大，伴随冻结和融化过程，会导致冻胀和融沉等大变形，而且预计在以后铁路运营时将是主要的冻害，以下重点对这类现象的形成机理进行分析。

与土壤冻结和融化有关的水分迁移过程、成冰规律和冻胀(或融沉)现象在一定条件下实际上完全由过程的水、热输运特征所决定^[3]。

在一定条件下，水可以以气态、液态和固态形式存在于土壤中，并可以以气态、液态和可能的复冰过程进行迁移。每相的迁移速度取决于具体的条件^[4]。影响水分迁移的因素主要有以下几个：

(1) 温度场

研究表明，温度场的相变是造成冻土水分迁移的极其重要的因素之一。水分迁移量的大小与冻结锋面推进的快慢有直接关系，而冻结锋面的推进速度又依赖于冻结速率。冻结速率大时，冻结锋面处的水分冻结快，破坏了原来的能量平衡和物质平衡，冻结锋面相对稳定时间短，迁移来的水分在数量上难以维持相变所需要的水量，为了维持相变界面的能量和物质平衡，冻结锋面推进加快，以达到新的平衡，而这样水分迁移时间相对变小，迁移量也相对要小。水分、土质和初始含水量一定时，水分迁移的强度主要取决于冻结速率的大小。冻结速率小时，冻结锋面推进相应变缓，相对维持时间增长，水分有比较充裕的时间向锋面处迁移，以维持相变处的能量和物质平衡。随之而来的是水分迁移量和相变量的增加，这又进一步阻滞了冻结锋面的推进，造成水分向锋面处聚集加剧，特别是有外界水源补给的开放系统中，导致冻结速率推进更为缓慢。在冻结速率很小或接近于零的情况下，若这一过程维持到足够长，则常在接近锋面处形成冰夹层或冰透镜体。

(2) 初始含水量和土的密度

初始含水量本身对水分迁移并无影响，真正产生影响的是水相变延缓了冻结锋面推进能力，这种延缓使冻结过程相对延长，在相同的常规冻结速率等条件下，初始含水量大者冻深发展慢，为水分迁移提供的有效时间增多，迁移水分的积累量增加，

客观上表现为初始含水量对水分迁移的作用。

一般而言，在温度、土的密度等相同的条件下，初始含水量越大，水分迁移量越大；反之则越小。饱水土体的水分迁移量一般大于非饱水土体的水分迁移量。

(3) 水分补给条件

水分补给条件的好坏，对水分迁移极为重要。一般来说，在三维空间上，补给的水分有 3 种来源：地下水、地表水和侧向水。是否有水分补给，对水分迁移量和饱和程度起着决定性的作用。以地下水补给的影响为例，其他方向的水分补给条件的影响可类推。

在开放系统中，足够的迁移水量使冻结锋面推进缓慢，水分分布沿垂直方向呈总体增加趋势。在封闭系统中，仅以土体本身原有的水分冻结并向冻结锋面迁移，水分分布沿垂直方向呈总体减小趋势。

工程实践表明，地下水对水分迁移的影响，宏观上通过土体冻胀量及其上部建筑物的冻胀变形破坏程度表现出来。

(4) 土的颗粒成分和矿物成分

在温度场、饱和度和水分补给一定的情况下，土的颗粒成分和矿物成分对水分迁移也有很大的影响。

对于粒径大于 2 mm 的粗颗粒土，由于孔隙度大，在无水分梯度存在的情况下，不具有毛细作用，土体冻结过程中，基本无水分迁移。如果这类土中含有细颗粒土，即随着粒度级配的改变，将产生水分迁移。

对于粒径小于 0.005 mm 的粘土其矿物成分主要为不可溶次生矿物和高价阳离子吸附基，比表面积大，表面吸附能力强，持水性也较好，但孔隙通道连通性差，阻滞了水分迁移，致密的土质尤其如此，这给水分迁移和补给造成了困难，水分迁移作用较小。

粒径为 0.05 ~ 2 mm 的砂粒土与粒径为 0.005 ~ 0.05 mm 的粉粒土相比较，后者迁移作用较大，主要是粉粒土具有砂粒土和粘粒土二者的特点，即连通性好、毛细作用强、持水性较好，为水分迁移的最佳媒介，属水分聚集、聚冰的最敏感性土类。

(5) 渗透系数

冻土中渗透系数不仅与土质有关，而且是负温的函数。研究证明，冻土中渗透系数随温度变化而变化，温度降低，渗透系数也急剧减小。

土壤在冻结和融化过程的水分迁移试验研究结

果也表明,水分从未冻区和融化区向冻融界面迁移,并通过冻融界面向冻土区和冻结未融区迁移。由于冻土中土壤的未冻水含量和温度的非线性关系,导致了其中水分迁移流的不均匀,从而在冻结时所产生的冻胀力能够克服上部荷载的重力形成聚冰体。

可以认为,土壤在冻融过程中冻土中聚冰体形成的充分必要条件,就是冻土区水分迁移流的不均匀和相应区域中温度克服外荷的压力,这两个条件成立,土壤在冻融过程中就能形成聚冰体。但实际冻结过程和冻结、融化条件下发生的水分迁移过程是相当复杂的,天然条件下多种水分迁移方式可能同时出现。

铁路工程中的路基填料基本上是粗颗粒土,如果含 0.005 ~ 0.05 mm 的粉粒较多,且水分补给条件较好,就很有可能形成冻胀丘和厚层地下冰等次生不良冻土现象,并且在路基边坡上形成热融滑塌。这种冻害一旦形成,整治将十分困难。

4 次生不良冻土现象的防治原则

针对以上讨论的次生不良冻土现象的形成机理,可以提出以下几点防治原则和方法:

(1) 加强冻土工程地质性质的研究。通过勘探了解线路经过区域的冻土地温及冻土工程地质分区,并对比已有的青藏公路冻土灾害整治的研究成果,对不同地温分区和冻土工程地质分区的自然地理环境、地质环境以及可能出现的不良冻土现象做到心中有数。

(2) 由于铁路建筑物的修建破坏了原始的水文地质条件,从而形成了次生不良冻土现象。因此,必须重视水文地质条件的调查和研究。首先,对区域的水文地质条件进行详细的调查,明确铁路建筑物与地下水、地表水的补给、排泄关系;然后,根据这种关系预测冰锥、热融湖塘等次生不良冻土现象。

(3) 在相对容易发生次生不良冻土现象的区域,应对路基结构形式和路基填料的级配进行设计优化,消除水分输运迁移的途径。尽量采用粒径大于 2 mm 的粗颗粒土,并在路基底部设计厚度大于 20 cm 的砾石或碎石(道渣)层,并在该层上、下设计反滤层以防止细颗粒土进入粗颗粒土层。这种方法可有效地防止路基中出现冻胀丘、聚冰(厚层地下冰)等次生不良冻土现象。青藏铁路在冻土区的设计中大量采用的挡水埝和抛填片石路基等工程措施,非常有利于消除次生不良冻土现象。

(4) 优化施工环境和施工组织,尽量减少对施

工场地的水文地质条件和冻土工程地质条件的破坏。绝对不可以对原始状态的地层或冻土层进行大开挖式的破坏。由于路堑冻土层被大规模开挖时,后续的工程措施很难及时跟上,引起冻土层融化,极易导致热融滑塌等次生不良冻土现象发生。因此,在冻土区施工要遵从“多填少挖”的原则,避免大规模的路堑开挖。对于水文地质条件复杂的地区,路基施工要尽量避免对水的扰动,建议修建了临时的排水或引水工程后再进行路基或桥基础的施工。

(5) 次生不良冻土现象在形成初期,相对比较容易处理。在出现次生不良冻土现象的初期,要尽快查明其类型和成因,并采取相应的工程措施进行整治,如(3)所述,使其不再继续发展。

(6) 采用热棒等工程措施,整治已经发生的次生不良冻土现象。当次生不良冻土现象比较严重,威胁到铁路的安全运营时,就必须采取主动方法进行整治。对于路堑上发生的热融滑塌,可以采用热棒技术进行主动冷却,以快速增加失稳土体的冷储量。对于路基处的冰丘、冻胀丘、热融湖塘等次生不良冻土现象,要从调整水文地质条件入手,采取置换路基填料、修建排水沟,开挖积冰坑(沟)或冻结沟和挡水埝甚至修建旱桥、涵洞等工程措施。

(7) 对次生不良冻土现象发生的地点、类型、规模进行详细地调查,建立相应的动态数据信息管理系统,对各种次生不良冻土现象的产生机理、发展过程、防治工程措施进行系统研究,形成针对性和操作性较强的应对方案。

参考文献(References):

- [1] 潘卫东,朱元林,吴亚平等. 青藏高原多年冻土地区不良冻土现象对铁路建设的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2002, 38(1): 127 - 131. (Pan Weidong, Zhu Yuanlin, Wu Yaping, et al. The effect of harmful feature related to frozen ground on building railway in permafrost area on Qinghai—Tibet Plateau[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Science), 2002, 38(1): 127 - 131. (in Chinese))
- [2] 《青藏冻土研究文集》编写组. 青藏冻土研究文集[M]. 北京: 科学出版社, 1983. (Compilation Group of the Corpus. Study Corpus of Permafrost in Qinghai—Tibet area[M]. Beijing: Science Press, 1983. (in Chinese))
- [3] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 冻土的温度水分应力及其相互作用[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1989. (Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS. Interaction Among Temperature Moisture and Stress Fields in Frozen Soil[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1989. (in Chinese))
- [4] 李述训,程国栋. 冻融土中的水热输运问题[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1995. (Li Shuxun, Cheng Guodong. Problem of Heat and Moisture Transfer in Freezing and Thawing Soils[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1995. (in Chinese))