

多年冻土湿地 路基工程研究

段东明 著

中国铁道出版社

CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

铁路科技图书出版基金资助出版

多年冻土湿地路基工程研究

段东明 著

中国铁道出版社

2010年·北京

内 容 简 介

青藏铁路作为世界上海拔最高的高原多年冻土铁路,它的修建创造了世界铁路修建史上的奇迹。在海拔 5 072 m 以上的高原多年冻土湿地地区修建铁路更是难上加难的难题,唐古拉山越岭铁路就正是修建在海拔 5 072 m 以上的高原多年冻土湿地地区。本书以铁道部重点科研项目和唐古拉山湿地地区路基工程实际为依托,针对高原多年冻土湿地路基修筑技术的实际难题,从理论上进行了分析研究,并就分析计算结果与现场实际的监测数据进行对比分析,得出了一些有益的结果。

本书可供路基工程、湿地工程等领域的科研人员参考,也可作为有关专业的研究生、本科生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

多年冻土湿地路基工程研究/段东明著.

北京:中国铁道出版社,2010.6

ISBN 978-7-113-10973-8

I. ①多… II. ①段… III. ①冻土区—铁路路基—铁路工程—研究 ②沼泽化地—铁路路基—铁路工程—研究 IV. ①U213.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 011168 号

书 名:多年冻土湿地路基工程研究

作 者:段东明 著

责任编辑:江新锡 徐 艳 电话:010-51873018 电子信箱:jxinxi@sohu.com

编辑助理:江新照

封面设计:冯龙彬

责任校对:张玉华

责任印制:李 佳

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街 8 号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:北京华正印刷有限公司

版 次:2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

开 本:880 mm×1230 mm 1/32 印张 7.25 字数:184 千

书 号:ISBN 978-7-113-10973-8

定 价:30.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部联系调换。

电 话:市电(010)51873170,路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

前言

青藏铁路是世界上海拔最高的高原铁路,又具有多年冻土特点,是世界上独一无二的高原多年冻土铁路。青藏铁路格尔木至拉萨段全长 1 118 km,其中多年冻土区长度 632 km,海拔 4 000 m 以上地段约为 965 km,其中唐古拉山越岭地段的海拔高度达 5 072 m,是世界上海拔最高的湿地地区。

在海拔 5 072 m 的高原多年冻土湿地地区修建铁路,其关键技术是如何保护好多年冻土湿地,防止铁路施工造成多年冻土湿地的破坏,从而引发铁路路基的病害,给行车安全带来不稳定因素。

针对东北多年冻土地区的既有铁路和俄罗斯西伯利亚贝阿铁路的路基病害调查显示,沼泽湿地地段的病害占到总病害的 60%~70%,这些病害严重影响了铁路的正常运营并大大增加了路基的运营养护支出,影响铁路的使用寿命。湿地现象对铁路工程修建及其运营期间路基工程稳定性产生了长期巨大的影响,因此必须重视冻土沼泽湿地地段修建路基的特殊技术,并将此项技术运用于现实建设中,以增加铁路使用年限,减少日常养护支出,保证铁路的营运稳定。

青藏铁路格拉段唐古拉山越岭方案选择了铁路垭口方案,该段冻土技术问题的特殊性表现在广布的冻土沼泽湿地和陡(斜)坡湿地等不良冻土地段的筑路技术问题和工程稳定性问题,也是本书研究的重点所在。

本书为国内外有关高原多年冻土湿地路基修筑技术与施工的研究专著,共分七章。第一章简单介绍了多年冻土湿地路基修筑

技术的国内外概况:第二章介绍了所研究地区高原多年冻土湿地的基本工程地质条件和地基土的基本力学性能;第三章介绍了冻土湿地路基稳定性分析方法及其所采取的工程措施;第四章介绍了多年冻土湿地地区路基稳定性试验研究及其研究成果;第五章介绍了保证多年冻土湿地路基稳定性的施工技术、质量控制方法及有关施工工艺参数;第六章介绍了多年冻土湿地路基稳定性评价方法及其现场实测结果分析;最后,简单介绍了结论及创新。

本书在撰写过程中得到了中铁第一勘察设计研究院、兰州交通大学、中南大学和中铁十七局青藏铁路建设指挥部等单位的热情帮助和通力合作;同时,魏庆朝教授、张鲁新教授、王星华教授、沈宇鹏博士和丁愿文工程师等人为本书提供了有关试验数据和诚恳的意见;尤其是中国铁道出版社的江新锡、陈德明和中南大学的王星华教授等对本书所给予的热情鼓励和支持,使得本书得以完成;本书依托的科研项目得到铁道部重点科研项目资金的资助,本书的出版也得到了铁路科技图书出版基金的资助,著者在此一并表示衷心的感谢。

本书是以著者的博士论文和有关科研研究报告为主要蓝本整理形成的,由于时间仓促,书中难免有错漏之处,敬请广大读者批评指正,择机修订。

著 者

2009年8月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 冻土湿地路基工程主要研究内容	3
1.2 国内外研究状况	3
1.2.1 冻土湿地的类型及工程特点	5
1.2.2 冻土湿地的变形特点及主要原因	7
1.2.3 冻土湿地路基的结构措施及技术方案	9
1.2.4 冻土湿地工程措施原理——片石层气冷作用的发现及研究	11
1.2.5 冻土湿地地基土体性质研究	13
1.2.6 冻土湿地的防治措施及技术指标特点	19
1.2.7 冻土湿地地基处理与路基填筑及质量控制的关键因素和技术指标	20
1.2.8 冻土湿地路基设计原则研究	21
1.3 国内外有关研究现状的启示	26
1.4 研究思路和技术路线	27
第 2 章 区域冻土湿地工程地质条件	28
2.1 区域冻土环境和冻土特征	28
2.1.1 冻土湿地生存水文条件	28
2.1.2 冻土生存环境气候条件	29
2.1.3 地层岩性特征	37

2.1.4	研究区域冻土湿地典型断面及工程措施·····	40
2.2	地基土体土质特征·····	43
2.2.1	地基土的颗粒组成·····	43
2.2.2	地基土界限含水量·····	45
2.2.3	地基土的比重·····	47
2.2.4	地基土的击实试验·····	47
2.2.5	研究区域土质特征·····	49
2.3	地基土体的力学特征·····	50
2.3.1	地基土压缩性质·····	50
2.3.2	地基土的抗剪强度特性·····	52
2.4	地基土的冻胀与融沉特性·····	55
2.4.1	融沉特征·····	55
2.4.2	冻胀特征·····	60
2.5	影响冻土湿地工程措施的工程地质条件分析·····	67
第3章	冻土湿地路基稳定性分析及工程对策 ·····	69
3.1	冻土湿地路基土体冷生过程特征及影响·····	70
3.1.1	路基修筑后影响滑动面的多年冻土上限 变化·····	70
3.1.2	路基填土冻融过程影响·····	72
3.2	冻土湿地路基稳定性分析·····	73
3.2.1	稳定性分析数学模型——冻土的弹塑性本构 方程·····	73
3.2.2	冻土湿地路基稳定性计算条件·····	76
3.2.3	冻土湿地稳定性计算结果分析·····	76
3.2.4	冻土湿地路基稳定性影响因素·····	84

3.3 冻土湿地路基工程关键技术·····	87
3.3.1 冻土湿地路基稳定工程对策·····	87
3.3.2 冻土湿地路基稳定工程措施·····	89
第4章 高原冻土湿地路基稳定性工程实体试验研究 ·····	91
4.1 试验工程设计·····	91
4.1.1 针对性工程措施·····	91
4.1.2 观测研究设计·····	92
4.1.3 测试仪器设备元件及埋设·····	94
4.1.4 观测试验方法·····	95
4.2 测试结果的分析研究·····	95
4.2.1 测试断面地温变化情况分析研究·····	96
4.2.2 测试断面路基变形分析 ·····	114
4.3 试验段相邻地区路基地温场特征 ·····	117
4.3.1 DK1406+770 路基地温变化 ·····	117
4.3.2 DK1419+360 路基地温变化 ·····	118
4.3.3 DK1361+500 路基地温变化 ·····	120
4.4 小 结 ·····	121
第5章 保证冻土湿地路基稳定的施工技术研究 ·····	123
5.1 多年冻土地区路基填筑施工技术与工艺控制 ·····	123
5.1.1 路基填料的选择 ·····	123
5.1.2 路堤基底处理 ·····	124
5.1.3 多年冻土区路堤填筑工艺及质量检测 ·····	124
5.2 基底处理施工技术与工艺控制 ·····	129
5.2.1 少冰、多冰冻土分布地段及融区路堤基底 处理 ·····	129

5.2.2	高含冰量冻土分布地段(富冰、饱冰冻土区和含土冰层)路堤基底处理·····	130
5.2.3	不良冻土现象分布地段路堤基底处理·····	130
5.3	片石通风路基施工技术和工艺控制·····	131
5.3.1	片石通风路堤的结构形式·····	131
5.3.2	片石开采及质量控制·····	131
5.3.3	片石通风路堤施工工艺和技术参数·····	132
5.3.4	质量控制要点·····	136
5.4	路基铺设土工格栅施工工艺和技术参数研究·····	136
5.4.1	冻土湿地路基中铺设土工格栅的原因·····	136
5.4.2	冻土湿地路基土工格栅技术指标·····	137
5.4.3	土工格栅的备料、运输及储存·····	137
5.4.4	土工格栅的施工技术和工艺控制·····	137
5.4.5	质量控制要点·····	140
5.5	片石气冷结构施工技术和工艺·····	140
5.5.1	碎石、片石质量要求·····	140
5.5.2	片石通风护道和碎石护坡的施工工艺·····	140
5.5.3	质量控制要点·····	141
5.6	过渡段施工技术·····	141
5.6.1	过渡段及其处理·····	141
5.6.2	质量控制·····	142
5.7	冻土湿地路基周围排水设施施工技术·····	143
5.7.1	冻土湿地路基挡水埝高度计算·····	143
5.7.2	冻土湿地路基挡水埝设计·····	144
5.7.3	冻土湿地路基挡水埝施工工艺·····	145
5.8	冻土玺施工技术与工艺控制·····	149
5.8.1	工程概况·····	149

5.8.2 主要施工技术	149
5.8.3 质量控制	155
5.9 遮阳棚施工技术与工艺控制	155
5.9.1 工程概况	155
5.9.2 总体施工方案	156
5.9.3 施工方法	156
5.10 骨架护坡施工技术与工艺控制	159
5.10.1 施工方法	159
5.10.2 质量控制要点	160
5.11 施工技术是冻土湿地路基处理效果的保证	160
第6章 唐古拉山区冻土湿地路基稳定性评价	162
6.1 典型断面路基整体性稳定分析	162
6.1.1 DK1405+700 富冰冻土区抛填片石路堤填筑 断面	162
6.1.2 DK1410+300 低温基本稳定冻土区抛填片 石+土工格栅路堤断面	167
6.1.3 考虑现场测试结果的稳定分析结论	173
6.2 典型断面路基变形分析	174
6.2.1 地基土的压缩沉降	174
6.2.2 地基土中冻土上限下移引起的沉降	177
6.2.3 在路堤和列车静载作用下下伏多年冻土的 蠕变沉降	179
6.2.4 多年冻土区路基的总沉降量	180
6.3 试验段相邻地区路基稳定分析	181
6.4 唐古拉山区高原冻土湿地路基地温场变化趋势 预测	185



6.4.1	数学模型	186
6.4.2	年平均气温 -4.0°C 时片石层路基的计算 分析	187
6.4.3	年平均气温 -3.5°C 时片石层路基的计算 分析	193
6.4.4	年平均气温 -3.5°C 时片石层+片石护坡复合 路基计算分析	197
6.4.5	年平均气温 -3.1°C 时片石层+片石护坡复合 路基计算分析	203
6.4.6	年平均气温 -4.0°C 时普通填土路基计算 分析	209
6.4.7	小结	212
第7章 结论和创新		214
参考文献		217

第1章 绪 论

青藏铁路格拉段建设的关键技术问题之一是如何解决青藏高原多年冻土区的筑路技术,唐古拉山越岭地段由于其广布的冻土沼泽湿地和陡(斜)坡湿地等不良冻土地段的特殊性,将对筑路技术和工程稳定性产生影响。

根据对东北多年冻土地地区既有铁路和俄罗斯西伯利亚贝阿铁路的路基主要病害调查的结果显示,沼泽湿地地段的病害占到总病害的60%~70%,这些病害严重影响了铁路的正常运营,大大增加了路基的运营养护支出。尽管青藏铁路冻土区(主要是唐古拉山越岭地段)的湿地现象与我国东北地区以及俄罗斯西伯利亚地区有所不同,但是这种现象对于铁路工程修建及其运营期间路基工程稳定性都有着长期而巨大的影响,因此我们必须重视冻土沼泽湿地地段修建路基的特殊技术研究。

本书重点研究地段是地处青藏高原腹地的唐古拉山越岭地段,那里具有随海拔增高而明显的气候垂直分带性的独特冰缘干旱气候特征,年平均蒸发量远大于降水量,气候干燥,气温多变,四季不明,冰冻期长,山顶终年积雪,现代冰川发育,暴风、雷电、暴雨、冰雪天气变化无常(中国科学院青藏高原综合科学考察队,1982年)。该地域中,各处气候条件也存在较大的差异。在唐古拉山中高山区,气候较为寒冷;而在温泉谷地和安多谷地气候则相对比较温暖,气候条件的分区造成了本区多年冻土发育程度上的差异,多年冻土空间分布的差异性也较强,从而使冻土湿地的性质产生了较大的变化。

区域内包括高寒草甸、高寒草原和沼泽化湿地,各生态系统类型的特殊性决定了该区域内冻土湿地特征。高寒草甸生态系

统一般在海拔为 4 600~5 200 m 的高山地带,多分布在山地阴坡、河谷阶地,呈片状,植被盖度较大。高寒草原生态系统一般分布在低山丘陵和河谷阶地上,多呈片状,植被覆盖度较低。沼泽化湿地生态系统,多分布在坡麓山裙、滩地等积水谷地和排水洼地,多呈条带状或斑块状,常有热融湖塘以及冻胀草丘,植被密集。高寒草甸和沼泽化湿地生态系统与地域多年冻土上限较浅、温度较低,上限附近地下冰发育的特征的关系较为明显。

该段线路走向基本平行于唐古拉山脉,为长江水系、扎加藏布内陆河、怒江水系的分水岭,线路翻越唐古拉山及其支脉头二九山,地貌单元主要包括唐古拉山区、唐古拉山间盆地、扎加藏布曲谷地、安多谷地等。唐古拉山区主要是布曲河源头一带,河谷狭窄,山坡陡峻,基岩裸露,地形起伏较大,海拔 4 800~5 200 m;唐古拉山间盆地主要是垭口以南至土门一带,地势开阔,地形略有起伏,植被稀疏,海拔约 5 000 m 左右;扎加藏布曲谷地及安多谷地主要由河谷、山前洪积扇、低山丘陵组成,地形起伏较大,海拔 4 800~5 000 m。扎加藏布曲和捷布曲形成了河流的贯穿性融区,河流融区可影响到一级阶地。

唐古拉山垭口处山体较厚,呈低缓丘陵,其山脊海拔高程为 5 200~5 800 m,青藏公路垭口为 5 232 m,北侧为布曲支流茸玛曲,下游地形开阔;南侧为扎加藏布支流布纽曲,两岸边坡竖陡,下游地形开阔。唐古拉山与头二九山间为扎加藏布内陆河洪积平原区,区内地形平缓。头二九山垭口高程为 5 172~5 185 m,是扎加藏布与怒江水系分水岭。南侧属拉日曲及其支流捷布曲峡谷区,沟谷狭窄,两侧边坡竖陡。

地形地貌特征影响了冻土湿地的形成和发育。目前国内外关于冻土湿地的研究,大多数还是针对我国东北兴安岭地区自满洲里、牙克石至瑯琿以北地区的铁路。俄罗斯等国的研究资料,主要是针对西伯利亚地区,其冻土属高纬度多年冻土,青藏高原多年冻土也属于高纬度多年冻土。然而,现有的技术成果不能完



全照搬到工程研究中来,我们必须要结合青藏铁路冻土湿地的实际情况进行研究。

现有的青藏铁路冻土区路基工程设计,虽然已经借鉴了国内外冻土路基的资料及研究成果,但是在对冻土湿地特殊性的认识上还缺乏研究,有一定局限性,因为唐古拉山越岭地段,在青藏铁路勘测之前,几乎无任何水文及地质资料可作为参考,如今仍有部分影响工程安全的因素未考虑。

开展青藏铁路冻土湿地地基处理与路基填筑施工技术研究,对于评价青藏铁路冻土湿地地段路基稳定性以及今后运营的安全性具有重要的现实意义,研究成果将具有实际推广应用价值。

1.1 冻土湿地路基工程主要研究内容

本书研究内容和研究方法主要包括:

(1)对国内外有关冻土湿地地基的类型、分布及相应的地基处理措施等资料进行研究分析,进而研究青藏铁路冻土湿地地基处理与路基填筑及质量控制的关键影响因素和主要技术指标。

(2)研究典型冻土湿地的水文、地质条件,通过室内试验确定冻土湿地地基土的冻胀融沉变形特点。

(3)研究冻土湿地路基不同处理措施条件下的路基稳定性。

(4)研究不同水文、地质条件下,冻土湿地路基施工关键技术。

(5)通过对冻土湿地在不同地基处理措施下路基地温和路基沉降变形的观测,研究路基处理措施对冻土热稳定性变化趋势影响。

(6)研究冻土湿地的工程特性、冻土湿地地基处理和路基填筑施工工法。

1.2 国内外研究状况

人们很早就意识到冻土的冻胀问题对道路的破坏作用。

1885年,俄国工程师斯图金伯格提出了冻土水分迁移假说,将冻胀形成同土的毛细管作用相联系。根据这个假说,水转变为冰时体积增大,结果在入冻带里形成微裂隙造成入冻土里水分迁移,土中水沿毛细管由下层向上迁移。他的这种观点在勃格达诺夫的著作中得到发展(1912年)。1916~1930年,由美国学者泰伯研究出结晶力作用下的迁移理论,使水分迁移理论向前跨出了一大步。它揭示了由于在冰的表面存在着的吸附水膜,具有很大的拉力强度,所以水分向增长起来的冰晶迁移。泰伯认为,虽然水是沿着毛细管迁移,但它还是在结晶力作用下移动的。

美国学者贝斯考认识到吸附水在结冰迁移过程中的意义,他观察了冰的形成,还进行了专门的试验,通过分析实验数据,提出了土颗粒“临界尺寸”概念。他认为,在水分迁移过程中,土的分散性是通过毛细管作用表现出来的。贝斯考选用毛细管水上升高度作为冻胀性的指标,将地下水、土颗粒性质、毛细管性质综合起来评价土的冻胀情况。

随着理论研究的深入,人们对土的冻胀机理有了更进一步的認識。很多研究者通过研究,也提出了众多的水分迁移理论,人们对未冻土和已冻土中的水分结构和性质有了更清楚的了解。关于水分迁移的动力问题,很多研究者从一般方面,概括描述了水分迁移是在各种梯度力下完成的一个复杂过程。居密克斯在他的一系列著作中(1958~1962年)指出,依照土的孔隙率(密度),冻结时土中水分借助于薄膜机构、毛细管机构、蒸汽机构等发生迁移。居密克斯认为冻土中迁移水转移的最有效途径是通过毛细管——薄膜机构,正是它为冻土带中生长起来的冰晶提供水分。也有些学者提出,水分迁移是在毛细管吸力作用下进行的。德国学者吕克利认为有很多种因素影响吸力的大小,如埋藏条件、岩石及其化学成分、空隙率等。1957年美国学者潘纳提出一个假说,认为水冰边界上的吸力和水向生长起来的冰晶的迁移决定于土系的孔隙尺寸。同时也有一些学者将水分迁移变化、冰



析出、土冻胀等问题与冻结锋面上的水分冷却、自由能、土水势的变化现象等联系起来,从而探讨冻胀问题。

综合研究认为,温度、土的性质、细粒的含量、含水量和土的密度都是影响多年冻土融沉冻胀的因素。

由于冻土湿地地质条件的特殊性和局限性,而且有关于多年冻土湿地地基处理方法和路基填筑技术的资料与文献非常少,因此开展冻土湿地地基处理方法和路基填筑施工技术试验研究是非常迫切的。

1.2.1 冻土湿地的类型及工程特点

很久以前,人们在多年冻土岛上开采金矿时就对多年冻土有了初步认识。之后,在前苏联及北美地区,多年冻土区的公路、输油管道、铁路和矿业开发等工程建设相继开展。随着人们在多年冻土区活动的日益增多,与冻土有关的问题被提到议事日程上来,多年冻土问题也开始得到了较为系统的研究。

一百多年前,人们就已经在多年冻土区修筑铁路了,世界上第一条横贯西伯利亚冻土区的铁路,自1892年开始新建,到1905年日俄战争期间,莫斯科与海参威之间已经开行了直通列车。20世纪70年代末,前苏联修建的贝阿铁路,该线全长3 500 km,途经多年冻土湿地长达2 500 km。

俄罗斯贝阿铁路投入运营后一段时间,路基融化,造成路堤不均匀急剧沉陷,路基大范围地出现了变形现象,尤其是冻土沼泽湿地地段。

路基沉陷通常速度为每年4~12 cm,路基变形是不连续和局部性的,长度一般为100~300 m不等,个别情况下,不稳定地段的变形长度可达到1 km及以上。在较长的低洼地段也经常发生路基急剧沉陷,如果不及时采取抬高线路的预防措施,线路纵断面(尤其是在桥隧建筑物的引线上)就会产生严重变形。一般在路堤沉陷不均匀的地方,道床厚度增加会超过1 m,导致枕端外

露,而路基顶面道床的宽度不减小,其边坡与路堤边坡重合,护道沉入地基,甚至个别地段还会沉入水中。在沼泽地区,热溶孔隙被水充满。这样的情况如果继续发展,路堤周围将会产生热溶洞湖。

路堤沉陷最容易发生在以下各种类型地基上:古河道和有热溶洞湖的河滩地;苔藓地与苔藓-青草沼泽地;分水线(包括其局部低洼地)上的排水量少的沼泽地;河谷平缓坡(包括梯地平缓坡)上的沼泽地;深谷隔开的河谷坡地和山坡上的草丘和青草-苔藓沼泽地。位于沼泽地的局部低洼地上的路堤最容易出现不均匀急剧沉陷,这些低洼地呈椭圆形,上面生长着畸形落叶松(高达3 m),低洼地周围则生长着大片各种树林的森林。

影响路堤沉陷的另一个因素是地基土层的构成。在黏土地基和含有大块碎石的黏土地基上修筑的路堤容易发生沉陷,因为泥炭土下面含有少量淤泥的土层含冰量最多,因此在富冰土层融化时,路堤沉陷异常迅速。

为了研究路堤沉陷,前苏联铁路运输科学研究院除安排了三个试验地段外,还在贝尔卡基特斯克工务段和乌尔佳里斯克工务段进行了试验,以研究整治路堤变形的新方法(由哈巴罗夫斯克铁路运输科学研究所开发)。

在第一试验段地基上部是砂质黏土,黏性差,砂砾和矿石的含量达80%,并发现矿石-砂砾土层(含30%砂质黏土)的厚度不大,长度短。从深约7 m处起,出现亚砂土,细粒和微粒砂土,这些砂土层中往往夹杂很薄的砂质黏土层和带砾石和鹅卵石的砂质黏土层。在6~7 m的深处还发现了厚度达10~15 cm的泥炭层以及有机物含量为6%~25%的软弱泥炭化砂质黏土。

冻土层包括厚度为20~40 mm及以上的冰层,冰土出现在泥炭土层与黏土层间及黏土层中。在路基下面深约6.75~10.3 m处的亚砂土泥炭层中发现埋置的3.2 m厚的冰层,透明冰层是与含有矿物(5%~25%)的冰层交错的。在冲积土层中,冻土厚实,冰层节理不明显。而在堆积土层中,发现冰的含量高,厚达6~7 m的整个