

季冻区粉质黏土路基 回弹模量预估与性能劣化机制

◎ 付伟 王云 何斌 著

中国建筑工业出版社

非
外
借

季冻区粉质黏土路基 回弹模量预估与性能劣化机制

付伟 王云 何斌 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

季冻区粉质黏土路基回弹模量预估与性能劣化机制/
付伟等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 6
ISBN 978-7-112-22093-9

I. ①季… II. ①付… III. ①公路路基-回弹模量-
研究 IV. ①U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 077557 号

本书针对季节性冰冻区路基性能劣化问题, 重点围绕粉质黏土路基回弹特性变化与控制, 系统阐述了季冻区路基回弹模量预估模型、性能劣化机制与控制方法。主要内容有: 绪论、季冻区路基冻害与回弹模量影响因素、未冻融粉质黏土回弹特性试验分析、冻融作用下粉质黏土回弹特性试验分析、基于 SEM 的季冻区路基土性能劣化机制分析、真实气候条件下季冻区路基结构性能劣化机制、典型处治措施下季冻区路基结构性能控制机理、总结。

本书可供从事公路设计、施工、养护及管理工作的技术人员参考, 也可作为相关专业大专院校师生学习用书。

责任编辑: 杨 允

责任设计: 李志立

责任校对: 李美娜

季冻区粉质黏土路基回弹模量预估与性能劣化机制

付伟 王云 何斌 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京佳捷真科技发展有限公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 11½ 字数: 228 千字

2018 年 7 月第一版 2018 年 7 月第一次印刷

定价: 50.00 元

ISBN 978-7-112-22093-9

(31986)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

季节性冻土广泛分布于我国东北、西北、华北等地区,近年来,随着“一带一路”倡议、西部大开发、振兴东北等国家战略的深入推进,我国基础设施建设力度逐渐向西部北部地区加大,季节性冰冻区已建和待建的高等级公路越来越多,交通需求和服务质量要求也逐步提高。道路冻害一直是困扰季节性冰冻区公路建设与养护的技术难题,如何建立安全舒适、经济耐久、环保美观的公路工程,成为当前季冻区道路工程建设管理日益关切的问题。

本书在中交第二公路勘察设计研究院有限公司承担的大量季冻区公路勘察设计工程实践基础上,相继开展了路堤合理高度的研究(西部交通建设科技项目200831822312-1)、低路堤防排水技术研究(西部交通建设科技项目200831822312-2)、公路路基结构性能与设计指标研究(西部交通建设科技项目2011318493720)、季冻区公路低路堤修筑关键技术研究(吉林省交通运输科技项目2011-1-3)、季冻区路基土回弹模量衰减机理与预估模型研究(中交二公院科技研发项目KJFZ-2012-045)等课题研究,形成了以路基填料微观分析、室内小尺度冻融循环、路基结构足尺仿真分析等多尺度研究路基结构性能的方法,对季冻区路基回弹特性预估模型、性能劣化机制与控制方法,进行了较为系统地分析研究。

全书分为8章:第1章绪论,主要介绍了季冻区公路路基结构性能的特点、技术问题和研究进展情况;第2章季冻区路基冻害与回弹模量影响因素,阐述我国典型季冻区公路路基病害及成因、路基土回弹模量影响因素;第3章未冻融粉质黏土回弹特性试验分析,研究不同含水率、压实度状态下粉质黏土填料的回弹特性及变化规律,建立未冻融粉质黏土回弹模量的预估模型;第4章冻融作用下粉质黏土回弹特性试验分析,研究不同冻结温度、水补给环境及不同含水率、压实度状态下粉质黏土填料的回弹特性及衰减规律,建立粉质黏土填料冻融后稳定回弹模量的预估模型;第5章基于SEM的季冻区路基土性能劣化机制分析,定量分析不同冻融次数后路基土结构微观特性,阐释季冻区路基土路用性能劣化机制;第6章真实气候条件下季冻区路基结构性能劣化机制,模拟不同气候环境条件下季冻区路基内部温度场、湿度场、回弹模量场分布变化特征,分析季冻区路基结构性能劣化机制;第7章典型处治措施下季冻区路基结构性能控制机理,阐述季冻区路基病害常用防护措施,重点仿真分析防水保温措施对季冻区路基结构

性能的控制效果和机理；第 8 章总结。其中，第 1、3、4、7、8 章由付伟撰写，第 2 章由何斌撰写，第 5、6 章由王云撰写，全书由付伟统稿。

本书即将出版之际，首先感谢中交第二公路勘察设计研究院有限公司为本书的完成提供了资金支持和人力保障；感谢中交第二公路勘察设计研究院有限公司吴万平教授级高工，为系列课题研究和本书撰写给予了大量的悉心指导和无私帮助；感谢吉林省交通运输厅陈东丰研究员，为本书撰写提供了部分调研资料；感谢三峡大学谈云志、武汉理工大学陈奇、武汉工程大学陈文，为本书撰写进行了部分室内实验工作；感谢张晶、卓浩对全书的校核，为本书的撰写提供了有益帮助。

本书适合公路设计、施工、养护及管理人员在具体工作中参照使用，也可作为相关专业本科生、研究生的教学参考书。限于作者的认识水平，书中难免存在疏漏和不足，请广大读者不吝赐教。

作者
2018 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本书的主要内容	14
第 2 章 季冻区路基冻害与回弹模量影响因素	15
2.1 季冻区公路路基冻害与回弹模量调查	15
2.2 季冻区路基回弹模量影响因素分析	36
2.3 本章小结	38
第 3 章 未冻融粉质黏土回弹特性试验分析	40
3.1 方案设计与试验方法	40
3.2 未冻融粉质黏土回弹特性	45
3.3 回弹模量预估模型构建与验证	46
3.4 本章小结	48
第 4 章 冻融作用下粉质黏土回弹特性试验分析	49
4.1 方案设计与试验方法	49
4.2 冻融作用下路基土回弹模量衰减规律	60
4.3 开放系统冻融稳定后粉质黏土回弹模量试验	67
4.4 封闭系统冻融稳定后粉质黏土回弹模量试验	73
4.5 开放与封闭系统条件下粉质黏土回弹特性对比分析	79
4.6 冻融稳定后路基土回弹模量预估模型构建与验证	82
4.7 本章小结	88
第 5 章 基于 SEM 的季冻区路基土性能劣化机制分析	90
5.1 土体微观结构研究方法	90
5.2 不同冻融次数后路基土颗粒微观特性分析	100
5.3 不同冻融次数后路基土孔隙微观特性分析	105
5.4 本章小结	109
第 6 章 真实气候条件下季冻区路基结构性能劣化机制	111
6.1 季冻区路基土湿热耦合分析模型	111
6.2 路基土冻融过程湿热响应分析模型与参数	115

6.3 气候作用下典型季冻区路基内部温湿度响应特征 120

6.4 典型季冻区路基模量场分布与演化特征 127

6.5 不同气候环境下季冻区路基结构性能劣化机制分析 138

6.6 本章小结 142

第7章 典型处治措施下季冻区路基结构性能控制机理 144

7.1 季冻区路基冻害处治措施 144

7.2 典型处治措施下季冻区路基回弹模量变化分析 149

7.3 防水保温措施下季冻区路基结构性能控制机理分析 162

7.4 本章小结 163

第8章 总结 165

参考文献 167

第 1 章 绪 论

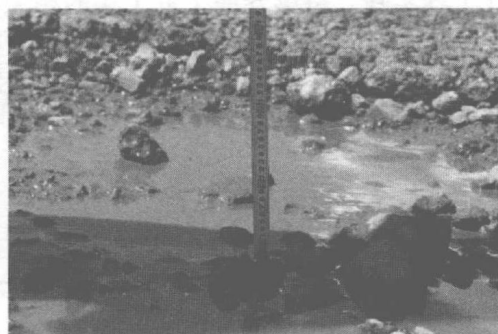
1.1 背景

我国季节冻土分布广泛, 约占国土面积的 53.5%, 其中, 中深度季节冻土 (冻深 $>1\text{m}$) 约占国土面积的 $1/3$, 主要分布于东北三省、内蒙古、甘肃、宁夏、新疆北部、青海、川西和西藏等地。

在季节性冰冻地区 (季冻区), 随着冬季气温的下降, 土体中原有的水分和从外界迁移进来的水分逐渐相变成冰, 引起土颗粒间的相对位移, 使土体体积产生冻胀, 春季气温升高后土中冰逐渐相变成水, 致使土体融化沉降, 这种反反复复的冻胀和融沉变形, 引起路基路面开裂、凸凹不平、鼓胀、翻浆等多种病害, 如图 1.1-1 所示。



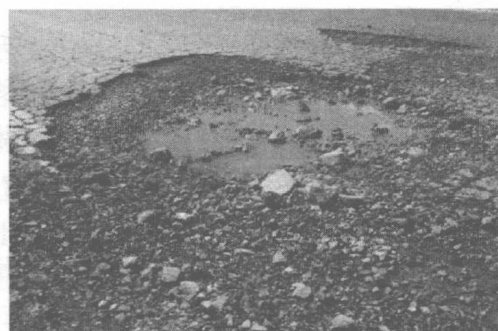
(a) 长春-松原K65+100道路冻胀翻浆



(b) 长春-松原K630+700路面冻融破坏



(c) 吉林环长白山线路路基路面纵向裂缝



(d) G302国道吉林段路面破损

图 1.1-1 季冻区道路常见病害

公路是直接修筑于自然环境中的人工线形结构物,季冻区反复的冻融循环作用,使路基湿度状态、回弹模量等表征路基性能的参数逐渐发生变化,路基性能的衰减导致路面受力状态与性能发生变化,最终导致路面结构破坏,严重影响了道路的服务水平和使用寿命,给公路尤其是高等级公路的正常运营带来了安全隐患,同时也额外增加了公路养护费用。季节性冰冻地区道路的主要病害是冻融对路基路面结构层的影响,抬高路基是防治道路冻害的有效措施,这种方式虽达到了减轻或防止冻融的目的,但会占用大量土地,由于土地是不可再生性资源,通过抬高路基防冻抗冻的方式已难以持续。

在路基路面设计中,我国现行的《公路路基设计规范》JTG D 30—2015 和《公路沥青路面设计规范》JTG D 50—2017 规定以最不利季节下路基土回弹模量为设计值,给出了标准状态下典型土组的回弹模量参考值,也明确非冰冻区路基土湿度预估方法及干湿循环条件下回弹模量湿度调整系数,但对季冻区路基土只给出了一个范围比较宽泛的回弹模量冻融循环折减系数,还没有具体细化如何考虑冻融作用来确定回弹模量调整系数的测试方法及状态,因此有必要深入研究不同影响因素条件下回弹模量的劣化规律,进一步加强土基回弹模量预估研究,以使规范操作起来更加便捷、准确。

为此,中交第二公路勘察设计研究院有限公司结合多年的季冻区公路勘察设计工程实践,持续开展了近十年的相关科技攻关,对季冻区公路路基结构性能及修筑技术进行了深入研究。本书为项目研究成果的部分总结,以粉质黏土填方路基为对象,重点阐述季节性冰冻区路基性能衰减规律与劣化机制,以及路基回弹模量预估模型和控制方法。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 冻土力学

冻土是指温度在 0°C 或 0°C 以下,并含有冰的各种岩石和土壤。冻土包括多年冻土和季节冻土,前者指冻结状态连续两年或两年以上的温度低于 0°C 且含冰的土,后者指随季节冻结和融化(冬季冻结、夏季全部融化)的土。冻土区别于常规融土的最本质的特征是冰的存在,也就是说,通常情况下融土是三相体系,而冻土是四相体系,如图 1.2-1 所示。

广义的冻土力学可以分为冻融作用和已冻土的力学性质两大部分,前者又涉及冻胀、融沉和冻融作用对土力学性质的改变,而后者则主要是已冻土的强度、应力-应变关系和动力特性等。冻土力学是冻土学的一个分支,国外冻土力学特性的研究始于 20 世纪 30 年代的苏联,以维亚洛夫(Vyalov)和崔托维奇(Tsy-

ovich) 为代表的冻土力学专家, 在 60 年代和 70 年代取得了大量的成果。第一篇研究冻土力学性质的论文是苏联的崔托维奇 (1930) 发表的, 随后崔托维奇又写了冻土力学的第一部著作《冻土力学基础》(1937)。《冻土力学原理》(1952) 和维亚洛夫的《冻土流变性质及承载能力》(1959) 以及冻土奠基人崔托维奇博士论文《冻土变形研究》(1940) 这些论文和专著成为冻土力学的奠基之作, 同时这些冻土在载荷下的应力应变关系随温度变化关系、长期强度理论以及冻土的流变特性都有效地指导了苏联当时的寒区工程建设。从此之后冻土力学在美国、加拿大、日本、中国得到了蓬勃的发展。我国冻土力学研究则始于 70 年代中期的青藏公路建设项目, 由于与国际接轨早发展极为迅速, 目前有些研究已处于国际先进水平。

(1) 冻融作用

冻融作用可分为冻胀、融沉以及冻融循环对土力学性质的影响几个方面的内容。自然条件下地基土及土工构筑物本身土质、水文及冻结条件的不均一性, 造成建筑物的不均匀冻胀变形而不能正常运行, 甚至破坏; 或者即使在冻结时尚能运行, 一旦融化便丧失承载力而破坏, 称为冻害, 是造成多年冻土地区建筑物破坏的主要原因。

1) 冻胀

土的冻胀是由于土温度降至冰点以下, 土体原孔隙中的部分水结冰体积膨胀, 以及更主要的是在土壤水势梯度作用下未冻区的水分向冻结缘迁移、聚集, 并冻结膨胀所致。土的冻胀受很多因素影响, 如土质、水分补给、冻结条件 (温度梯度和冻结速率) 以及上覆荷载等。

冻胀是人们认识土冻结的最直观的现象, 也是研究较为深入的课题, 迄今为止已有十几个相关的冻胀模型或理论, Harlan 在 20 世纪 70 年代初提出水-热耦合模型, 分凝势模型、水-热-力耦合模型、刚体冰模型、分离冰模型、热力学模型等; Konrad 等分析认为分凝冰产生的位置在冻结缘内某固定温度处; Nixon 指出, 其实质与冰压力方法完全类似, 且应用不如冰压力方法来得简洁。Konrad 等的模型对冰透镜体的判断分析混合了力学和物理方法, 从能量和水阻的角度分析判断。Gilpin 在冻胀模型中采用冰压力的大小以判断分凝冰的形成; 曾桂军、张明义运用试验与数值分析相结合的方法对饱和正冻土水分迁移及冻胀模型进行了验证试验。

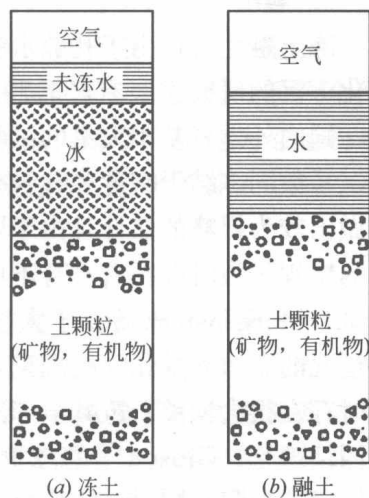


图 1.2-1 冻土和融土的物质构成图 (马巍)

2) 融沉

冻土融化时, 由于孔隙水的排出, 使土体产生下沉, 叫作融沉。对于冻土的融化下沉的研究主要有经验和理论两种方法。经验方法是预测融沉最直接的方法, 国内外学者基于大量的试验数据得到了土体参数, 这些研究大多集中于研究融沉系数同冻结干密度和含水率之间的统计关系, 但由于经验方法对融化沉降只能做出较为粗略的估计且由于取样的随机性存在较大的随机误差, 因此在进行准确的工程预报时存在着自身不可避免的局限性。融化固结理论为理论方法的最早尝试, Morgenstern 等基于太沙基一维固结理论, 结合纽曼热传导方程得到了一维情况的变边界融化固结理论, 但该模型基于小变形假设, 预测大含冰量冻土融化时存在很大误差。Foriero 等基于一维大变形固结理论, 建立了一维大变形融化固结理论。Gibson 等的理论基于对流坐标系, 以孔隙比为场变量突破了小变形假设的局限, 同时使用压缩系数和渗透系数同孔隙比间的非线性关系反映大变形对材料性质的影响, 能够合理地描述一维情况高含水率土体的固结问题。但由于场变量孔隙比的引入, 使得该理论无法拓展至三维情况。Cater 基于现时构型得到了三维情况下的大变形固结理论, 物理意义明确, 方程形式简洁, 可以借鉴用以描述复杂条件下冻土融化的大变形固结问题。

3) 冻融作用对土力学性质的影响

冻融作用影响土的孔隙比、渗透性、密度及微观结构, 进而影响土的强度、应力应变关系等力学性质。王大雁, 马巍等对经历了 0~21 次冻融过程的黏土进行三轴剪切试验, 系统地研究了试样高度、含水率、应力 - 应变行为、破坏强度、弹性模量、抗剪强度指标等物理力学性质的变化, 结果表明: 在封闭自由冻结条件下随着冻融循环次数的增加, 试样高度将逐渐升高, 试样的含水率将逐渐降低, 土的黏聚力逐渐下降, 冻融循环对土内摩擦角的作用无规律可循, 试验黏土的内摩擦角在 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 之间波动; 徐学祖、马巍 (1996, 1999) 等通过 5、10 和 21 次室内冻融试验, 得到石灰土每一次冻融循环的变形曲线大致可分为冻胀发育、冻胀相对稳定和融化下沉 3 个阶段。同时还发现, 反复冻结和融化强烈影响着石灰土的强度特性, 一次冻融循环后, 对未加石灰的粉土来说, 其剪切强度变化不大, 但是对石灰粉土来说, 其剪切强度明显低于未冻融状态, 而且随着冻融循环次数的增加, 石灰粉土的剪切强度逐渐衰减, 经历 10 次冻融循环的饱水石灰粉土强度最低。陈湘生等 (2002) 利用自行研制的岩土离心模型试验装置对地基经 2 个冻融循环后进行离心模拟重复试验, 表明该试验装置及其测试系统是可行、可靠的, 同时试验表明, 适当的荷载可抑制地基冻胀; 离心模型试验是解决寒区工程问题试验研究的最佳手段之一。和礼红、汪稔等在大量单轴冻融试验的基础上发现冻融循环对 c 值的扰动较大, 而对 φ 值的扰动较小, c 扰动达到稳定状态需要 5 个循环次数。朱志武、宁建国等基于广义塑性力学对冻土的体积屈

服面进行了探讨。李宁、陈飞熊等从多孔多相连续介质的平衡条件、各相成分之间的变形协调条件、各相成分的应力传递机理及水、冰相变、水、热迁移等应遵循的能量守恒条件出发,建立了饱和正冻(融)土的水、热、力与变形耦合作用的理论框架。李洪升、王悦东等把冻土冻结过程中的内部空穴简化为冻土的初始裂纹,应用断裂力学理论研究了冻土的非线性断裂过程,给出了冻土非线性断裂破坏的胶结力裂纹模型。

(2) 已冻土的力学性质

国内外学者通过大量试验,陆续系统地对冻土在不同负温、不同土性、不同含水率和荷载下的强度与变形性质的研究,揭示了冻土的单轴强度、瞬时三轴强度,尤其是冻土的流变特性及最基本的本构关系,并提出了相应的试验拟合模型。F. H. Sayles 在 20 世纪 60 年代末至 70 年代初对渥太华冻砂的蠕变特性作了极详细的研究,研究表明冻砂蠕变曲线分三个阶段:减速蠕变阶段,恒速蠕变阶段和加速蠕变阶段,并针对各个不同蠕变阶段提出了蠕变本构关系;密执安大学 O. B. Andersland 等人(1967, 1970)就应力水平及受载时间对冻土蠕变速率及强度的影响进行了研究;B. Ladanyi(1972)通过对冻土蠕变状态的仔细研究,提出一种冻土蠕变的工程理论模型;Haynes et al.(1975)通过单轴压缩和拉伸试验发现冻结粉土的弹性模量随应变率的增加而稍有增加;Bragg et al.(1980)通过单轴压缩试验发现冻结砂土的弹性模量随应变率的增加和温度的降低而增加。

在国内由于青藏公路、青藏铁路等寒区工程建设需要,冻土力学研究如火如荼。吴紫汪、马巍对不同围压下冻土的三轴抗剪强度特性作了系统的试验研究,详细分析了围压对冻土的抗剪强度的影响关系,围压的增大则加速了孔隙冰的压融,当围压大于某值时,会降低冻土的粒间连接强度导致冻土弱化。朱元林、张家懿等根据冻土室内单轴受压的研究成果,将冻土的单轴压缩本构关系归为黏弹塑性和弹塑性两大类,每一大类又包含若干亚类。李海鹏、朱元林等对饱和冻结黏性土在常应变率下的单轴抗压强度进行了研究,建立了以温度、应变率及破坏时间为变量的强度预报方程。李洪升、杨海天等研究了冻土的单轴抗压强度对应变速率的敏感性问题,把单轴抗压强度对应变速率的敏感性分成几个区域,得到了一定温度下的强度与应变速率之间的关系式。马芹永对冻土的抗拉、抗压强度进行了试验研究,得到了冻结黏性土的抗压与抗拉强度之比为 3~5,冻结砂土的抗压与抗拉强度之比为 9~12。马巍、常小晓等对三轴应力作用下的冻结砂土、黄土和黏土的弹性模量进行了室内试验研究,初步得到了弹性模量随围压变化的规律。

马巍、朱元林等分析了冻结黏性土的变形特性,指出其体积变形在加荷初期缩小,随着荷载的增大,又逐渐膨胀。盛煜、吴紫汪等对变应力过程中冻土长期

强度以及变形特性进行了试验研究,指出冻土在变应力过程中的破坏时间基本符合破损度线性累加原理,结合冻土的长期强度曲线即可得到冻土在变应力过程中的长期破坏时间准则。张长庆、张建明等还对冻土的正交各向异性特征进行了初步研究。赵淑萍、何平等对冻结砂土在动荷载下的蠕变特性进行研究,分析了最大加载应力、温度及加载频率对冻土蠕变破坏应变、破坏时间及最小蠕变速率的影响。

沈忠言、张家懿等研究了冻结粉土的动强度特性,并且提出了抛物线破坏准则。朱元林、何平等对冻结粉土在往复荷载作用下的变形特性及不同动载频率下冻土的强度特性进行了试验研究,发现冻结粉土在振动荷载作用下的破坏应变基本与围压无关,冻土在振动荷载作用下的蠕变破坏准则与静载下具有相同的形式,冻土在振动荷载作用下颗粒产生定向排列,是导致蠕变强度和破坏应变减小的主要原因。俞祁浩、朱元林等还对冻结兰州黄土、中砂和纯冰的抗冲击强度进行了试验研究,试验发现裂纹扩展所需要能量随速度的增加而增加。李洪升、刘增利等应用断裂力学理论对冻土断裂韧度以及原状冻土非线性断裂韧度进行了试验测试和修正,获得了加力点处位移与力的关系曲线。

1.2.2 季冻区路基

季节性冰冻地区(季冻区)指季节冻土分布的地区,季冻区路基的研究从道路冻害开始,人们很早就认识到土的冻害会对道路造成破坏。为了减少冰冻破坏,延长道路的使用寿命,改善道路的使用性能,不少道路工作者持续开展冰冻作用机理及防治技术研究。随着季冻土地区建设事业的蓬勃发展,有关季冻区路基的研究,得到了较大的发展,并取得了相应的研究成果。

(1) 季冻区路基冻害

季节冻土区高速公路路基冻害的主要形式为冻胀形成的纵向裂缝、道路翻浆导致的沉陷鼓包及车辙变形。

1885年俄国工程师斯图金伯格关于路基土的冻胀问题,提出了冻土水分迁移假说,将毛细管的作用导致水分迁移,与土体冻胀相联系,人们才认识到水分迁移是导致土体冻胀的主要根源。1916年美国人泰伯提出水分迁移是由结晶力作用下移动的,而在土中有被水填充的不同直径的孔隙存在时,则大孔隙中先形成冰晶体,而小孔隙中小冰晶体还没冻结(冰晶体直径越小,融解温度越低),在结晶力作用下,从没有结冰的小孔隙吸取水分,使大孔隙冰晶体不断地增大,冻胀产生。

1994年,戴惠民等通过现场试验和室内模拟试验所得数据进行分析处理,对季节性冻土区公路路基土冻胀性进行研究,提出了粉性土路基的冻胀模型及冻胀分类,建立路基潮湿状态模型,提出通过适当增加路基至地表水位距离以降低

冻害的方案。

2002年,郑秀清等著的《水分在季节性非饱和冻融土壤中的运动》一书以大量的室内外试验资料为基础,系统分析了土壤的季节性冻结和融化规律、冻融土壤水分入渗的基本特性、阻渗机理及主要影响因素,建立了冻土入渗参数预报模型。

2003年第八届国际冻土大会上,俄罗斯学者 V. Ulitsky 认为俄罗斯铁路路基变形主要表现为冻胀和融陷,并运用泡沫聚苯乙烯材料作为保温层以减少路基变形,保持路基稳定。

(2) 季冻区路基冻害防治技术

1965年我国道路冻害防治会议上,交通部研究院等单位针对不同道路的水文条件类型,提出了路基水分集聚计算公式,总结了灰土垫层、石灰与砂桩在改善路基水温状态,减少道路冻害方面取得的成功经验。70年代初期,根据青藏公路、铁路的建设、运营与科研实践,总结了我国第一部冻土地区铁路勘测设计文件,东北地区也对多年冻土与翻浆冻害地区的公路设计作出了规范性规定。70到90年代,经济建设的飞速发展使道路建设与科研工作上了一个新台阶,先进的技术手段与方法使研究工作更为细致和深入,无论在理论上还是实践上都取得了大丰收。相比于多年冻土的研究,季节性地区的研究较少,近十年来吉林、辽宁、黑龙江、北京等地方的交通科学研究所、高等级公路建设局和科研单位院所等对公路冻害进行了调查,发现季节性冻土区的道路冻害主要有道路的冻胀、翻浆、水泥路面的面层结构开裂破坏和损耗,沥青路面的粒料损耗和裂纹等,深入分析发现道路冻害的发生与道路中水分的变化状态和运动形式有关,通过控制道路中水分的含量、稳定道路所处的温度场的环境及控制填土的材料性能等措施可以一定程度上缓解道路冻害。

1997年“国际地层冻结和冻结作用研讨会”上,日本学者 Kunio Watanabe 通过室内冰冻试验,用 CCD 照相机观测了冻结锋面的微观结构。美国学者 Karen S. Henry、芬兰学者 S. Saarelainen 和日本学者 F. Tsuchiya 分别报道了用土工布隔断毛细水作为防冻材料的室内外试验结果;日本学者 Sinichiro Kawabata 报道了用石灰土换填法处理路基冻胀。

2006年,吉林大学李向群博士对季冻区公路冻害进行了调查研究,并从设计、施工、养护等方面提出了详尽的防治措施。

2007年,吉林大学谷宪明博士的毕业论文中,对季冻区公路路基冻胀翻浆及整治措施进行了较详细的分析。

2011年,许健、牛富俊等研究了铺设保温层和加铺防冻胀护道对路基地温特征的影响规律,得出铺设保温材料对减小路基中部附近土体季节冻结深度有明显作用,但对路基两侧冻结深度影响相对较小;加铺防冻胀护道对边坡下土体季

节冻结深度有一定程度的抬升作用, 上升幅度由路基坡脚向路肩逐渐减小, 但对路基中部附近土体季节冻结深度影响甚微; 保温板-防冻胀护道复合路基结构形式, 充分利用两种措施优点, 对路基中心、路肩以及坡脚下最大冻结深度抬升的综合效果更好, 抬升最大值分别为 1.48m、1.01m、0.68m。

2016 年, 于静波、程培峰等为了能够全面评价季冻区公路路基使用状况, 分析了影响路基使用状况的各项因素, 建立了一套适用于季冻区公路路基使用状况的评价指标体系, 通过研究比较已有评价方法的不足, 提出了基于专家法与熵度量法的季冻区公路路基使用状况评价方法。

1.2.3 路基土回弹模量

回弹模量是指路基土在荷载作用下产生的应力与其相应的回弹应变的比值, 表征路基的承载能力, 反映路基在瞬时荷载作用下的可恢复变形性质。

(1) 路基土回弹模量预估模型

长期以来, 国内外许多学者和研究机构在深入分析回弹模量主要影响因素的基础上, 分别从路基土的应力状况、土组基本物理性质指标等不同角度出发, 建立了相应的回弹模量预估模型。根据模型建立所采用变量的不同, 可将其分为两类, 即以土的应力状态为变量的本构模型和以土的基本物理、力学性质指标为变量的经验模型。根据所选应力变量的不同又可分为 3 类: 仅考虑剪切影响的模型, 如双线性模型、幂指数模型; 仅考虑侧限影响的模型, 如围压模型、 $k-\theta$ 模型; 综合考虑两种影响的复合类模型, 如 Uzan 模型、八面体剪应力模型、UT-Austin 模型、Superpave 模型 (NCHRP1-37A)、Ni 模型等。复合类本构模型兼顾考虑了侧限力和剪切力的影响, 可以更真实、全面地反映路基土回弹模量的应力依赖性。其中, Uzan 模型是回弹模量本构模型研究的基础, 其他模型大多是对 Uzan 模型修正的结果。

国内外的学者通过大量的现场和室内试验, 分析了路基湿度对回弹模量的影响, 并探讨建立了回弹模量的预估方程。总体上看, 早期研究主要集中于对静态回弹模量的研究, 构建与含水率、稠度、压实度以及与土质物性参数 (塑性指数 I_p 、曲率系数、不均匀系数、干密度、粉黏粒含量) 相关的回弹模量预估方程, 如 Heukelom 与 Klomp 模型 (1962)、Green 和 Hall 模型 (1975)、申爱琴 (1996)、谢华昌 (2001)、戴裕聪 (2004) 等模型。中期随着动回弹模量概念的提出, 基于应力状态、含水率 (饱和度)、压实度等因素的动回弹模量预估模型随之产生, 如 USDA 模型、Thornton 模型 (1988), 以及 Uzan 模型、NCHRP 1-28A 推荐的模量预估模型等。随着非饱和土力学的发展, 关于应力状态、基质吸力、含水率 (饱和度)、回弹模量之间相互影响规律的研究取得较大进展, 杨树荣 (2005)、张世洲 (2005)、邱欣和钱劲松 (2011) 等提出了以基质吸力表征

湿度状况,构建应力状态、基质吸力与动回弹模量之间的相关关系,并预估动回弹模量。此时的预估模型中都选择采用基质吸力来描述路基的湿度状态,这与非饱和土力学中“基质吸力能更为准确有效地表征路基的湿度状态”相符。

(2) 季冻区路基土回弹模量预估模型

在季节性冰冻地区,路基存在四种状态:冻结、融化饱和、湿度恢复、湿度平衡期。冰冻过程伴随着冰晶体的形成,当路基完全冻结后,路基模量能提高20~120倍。而在解冻时随着冰晶体的融化,水分因无法迅速排除而大量积聚在路基中,使其模量大幅度降低。因此,对于季节性冰冻地区,路基回弹模量由于受温度变化将发生较大的波动。为了在路面结构设计中反映路基回弹模量的变化规律,需要明确一定的换算准则,将不同状况下路基的回弹模量当量为单一值,以便设计采用。这一在设计中采用的回弹模量值称为有效回弹模量,它与标准状态(路基处于最佳含水率和最大干密度条件下)的回弹模量之比值,称为回弹模量调整系数 F_{sc} 。

一个冰冻循环周期各个阶段对应的路基回弹模量为冰冻状态回弹模量、饱和状态回弹模量、中间状态回弹模量、平衡湿度状态回弹模量。将一年划分为24个时间段,根据各个时间段路基的含水率确定相应的回弹模量调整值,并按照损伤系数法得到季节性冰冻地区的有效回弹模量,由此确定回弹模量调整系数 F_{sc} 。

损伤系数法为美国 AASHTO 推荐方法,其基本原理是当路基模量较小,在行车荷载作用下路面结构受到的损害也更为严重,相应对该模量值赋予较大的损伤系数,以反映路基处于不利模量状态下对路面结构造成的损伤情况。不同回弹模量值所对应的损伤系数 $\mu_{Rs,i}$ 按式(1.2-1)计算:

$$\mu_{Rs,i} = 4.022 \times 10^7 M_R^{-1.962} \quad (1.2-1)$$

相应的有效回弹模量可采用式(1.2-2)来计算:

$$\overline{M_R} = \frac{\sum M_{R,i} \mu_{Rs,i}}{\sum \mu_{Rs,i}} \quad (1.2-2)$$

由此可获得季节性冰冻地区路基回弹模量的综合调整系数 F_{sc} :

$$F_{sc} = \frac{\overline{M_R}}{M_{Ropt}} \quad (1.2-3)$$

式中: F_{sc} ——路基回弹模量调整系数;

$\mu_{Rs,i}$ ——路基回弹模量值损伤系数;

M_{Ropt} ——标准状态,即路基土处于最佳含水率、最大干密度时的回弹模量(MPa);

$\overline{M_R}$ ——路基实际使用状态下的回弹模量(MPa)。

(3) 季冻区路基土回弹模量实验研究

路基土回弹模量实验包括室内试验和现场试验，目前，室内试验方法主要有承载板法和强度仪法，现场试验方法有静载贝克曼梁（简称 BB）试验方法、动载落锤式弯沉仪（简称 FWD）试验方法和承载板试验方法。

毛雪松等选取西安黄土（粉质黏土）进行试验。直径为 50mm，高度为 50mm；试件成型采用静力一次成型法。测试过程中测得的模量为无侧限回弹模量。试件的冻融循环过程应用冻融循环试验机来控制，试验机内最低温度为 -18°C ，最高温度为 18°C 。为了使试件达到完全的冻结和融化状态，在试验机内部同时放置一标准试件，内设温度传感器，以判断试件是否冻结、融化，试验结果见图 1.2-2。

程培峰等选取黑龙江省内几种代表性的土样——黏性土、粉性土、砂性土。其中黏性土取自哈大老路（二级路），粉性土取自黑大公路（一级路），砂性土取自绥满高速公路（大庆至林甸路段）。试验采用承载板法对所取土样进行回弹模量试验。试件采用 $10\text{cm}\times 10\text{cm}$ 的圆柱体。根据黑龙江地区的实际情况，试验的冻融循环温度区间为 $-20^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。一个冻融循环周期为 16h，其中冻结 8h，融化 8h。

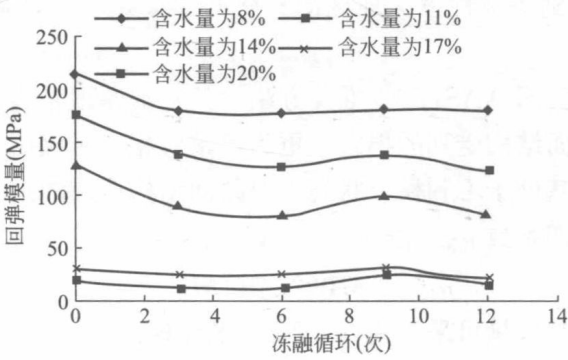


图 1.2-2 冻融循环回弹模量试验成果（毛雪松）

韩春鹏等选取黑龙江省鸡西-讷河公路 K546+550 处取土场土样，为鸡讷公路路基填筑用土。试验所用试件按照《公路土工试验规程》（JTG E40—2007）中规定，尺寸为直径 $10\text{cm}\times 10\text{cm}$ ，采用静压法成型。针对不同温度区间冻融循环下土体回弹模量的变化进行了试验研究，其试验冻融循环温度范围确定为 $-3^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ 、 $-6^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ 、 $-9^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ 及 $-15^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ 等 4 个区间，按照循环次数分别为 1 次、3 次、6 次和 10 次进行试验，分析回弹模量变温区冻融循环作用下的变化规律。试验采用冻融箱作为冷冻源，运用冻融箱的温控功能控制循环温度。每个冻融循环为 12h，其中从 15°C 降至负温为 4h，然后保持负温恒温 2h，再用 4h 从负温上升至 15°C ，保持 15°C 恒温 2h。同时配一自体试件，内部布设温