

季冻区

● 戴惠民 编著

公路路面厚度

公路路面厚度

黑龙江人民出版社

雪冻区公路路面厚度

戴惠民 编著

黑龙江人民出版社

图书在版编目(CIP)数据

季冻区公路路面厚度/戴惠民编著. —哈尔滨:黑龙江人民出版社, 2007

ISBN 978 - 7 - 207 - 07268 - 9

I. 季... II. 戴... III. 公路路面—厚度—研究
IV. U418.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 002189 号

责任编辑:陈 愚 常 松

装帧设计:霍向宇

季冻区公路路面厚度

Jidongqu Gonglu Lumian Houdu

戴惠民 编著

出 版 者 黑龙江人民出版社

通讯地址 哈尔滨市南岗区宣庆小区 1 号楼(150008)

网 址 www.longpress.com E-mail hljrmcbs@yeah.net

印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂

开 本 850 × 1168 毫米 1/32

印 张 6.125

字 数 150 000

版 次 2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 207 - 07268 - 9/U · 22

定价:12.00 元

(如发现本书有印制质量问题,印刷厂负责调换)

前 言

沥青混凝土路面、水泥混凝土路面是季冻区公路,尤其是季冻区高速公路、一级公路的主要路面类型。由于,沥青混凝土路面具有表面平整、坚实、无缝,行车舒适、造价低、养护维修方便,竣工后即可开放交通等优点;水泥混凝土路面具有强度高、刚性大、稳定性与耐久性好、平整度与粗糙度好、养护费用少等长处,所以,在季冻区公路建设中得到广泛应用,并实现了跨越式发展。其投资规模之大,建设速度之快,工程质量之好,标准等级之高,都是本地区公路建设史上前所未有的。为促进城乡经济持续高速发展,为稳定提高城乡人民生活水平,起着重要作用。

但一些路段在应用过程中,即使使用不久,路面便发生了不同程度的冻胀损坏现象。主要表现为路面冬季冻胀、隆起、裂缝(纵裂);春季融沉,路面整体强度降低,在交通荷载作用下,发生变形、龟裂、松散,甚至出现弹簧、唧泥、冒浆等。常见的“冻裂”、“翻浆”便是其冻害的典型特征,如图0-1、图0-2、图0-3所示。这不仅严重影响正常交通,还给社会造成许多不良影响,给国家造成重大损失。

分析路面的损坏原因很多,也很复杂。其中,有路面结构的问题,也有筑路材料的问题;有路面面层的问题,也有基层的问题,更有路基的问题;有路面强度的问题,也有路面稳定性与耐久性的问题;有交通荷载作用的问题,也有工程环境影响的问题;有设计的

2 季冻区公路路面厚度

因素,也有施工与养护的原因,等等。大量工程实践表明,路面损坏往往又是以上因素综合作用与影响的结果。



图 0-1 沥青混凝土路面翻浆处理



图 0-2 水泥混凝土路面纵向裂缝

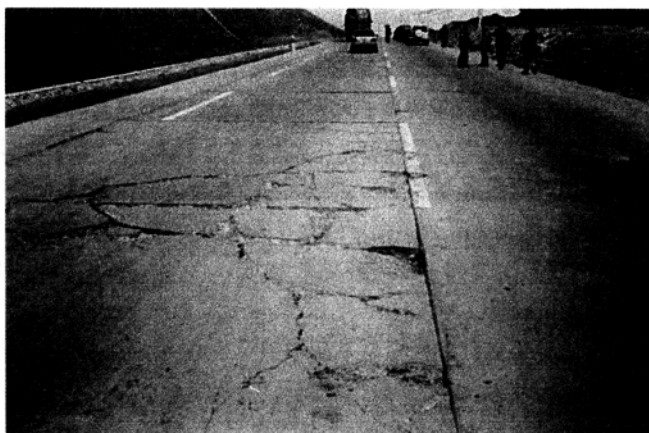


图0-3 水泥混凝土路面综合性裂缝

从我们多年从事防治公路冻害的研究看,季冻区,尤其是深季冻区沥青混凝土路面、水泥混凝土路面的损坏,除有全国公路路面损坏的普遍(共性)因素外,而严寒的气候、冻胀敏感性的土质、充足的补给水分所形成的冻胀,是路面损坏的特殊原因。也就是说,路面在路基土冻胀的作用下,抗冻胀稳定性不足;面层、基层乃至土基,在反复冻融条件下强度衰减,路基密实度降低,干湿类型改变等,是路面损坏的主要因素。

为解决季冻区,尤其是深季冻区公路冻害问题,二十多年来,黑龙江省交通科学研究所及本书作者,从治本入手,从实际出发,找准技术突破点,主攻技术难点,从路基到基层乃至面层,有计划、有针对性地开展防治公路冻害的系列研究。主要有季冻区公路路基土冻胀性的研究;土冻胀、盐胀试验研究及其在工程中的应用;季冻区高级路面基层结构及冰冻稳定性的研究;季冻区潮湿路段常用路面结构抗冻厚度的研究等。通过大量调查研究,国内外

4 季冻区公路路面厚度

交流与协作,室内外系统试验与观测,资料整理与科学分析和实体工程验证,提出了基层材料与路基强度衰减系数,提出了不同干湿类型(不同冻胀类别)下的路基临界高度,提出了公路路基土季节性冻胀分类及其分类依据,提出了沥青混凝土路面、水泥混凝土路面容许不均匀冻胀值与冻胀(总冻胀)值,提出了季冻区沥青混凝土路面、水泥混凝土路面厚度等多项成果。其水平,多数居国内领先,部分达到国际先进水平。其成果,全部荣获部、省级科技进步奖。本书是依据以上研究编著的,是集体劳动的成果。

黑龙江省交通科学研究所总工程师王兴隆研究员级高工、副所长高伟研究员级高工、室主任杨猛高工,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所陈肖柏研究员、王雅卿研究员,哈尔滨工业大学交通学院邵文山教授,庆安县公路管理站王利民工程师等,在各自参加的研究课题中,付出辛勤劳动。研究所领导班子,尤其是所长曹贵允研究员级高工对本书撰写出版十分重视,予以很大的关心与支持。研究所情报资料室主任王银涛高工对本书出版给予很大帮助。在此一并表示衷心感谢。

作 者

2006 年 12 月

目 录

第一章 土的冻结	1
一、冻土的定义.....	1
二、我国季节性冻土分布.....	1
三、冻土的基本组成.....	4
四、土的冻结及其温度特征.....	6
五、冻土中的未冻水与冰的动力平衡.....	8
六、冻土基本物理指标	14
第二章 路基土冻胀	16
一、冻胀的主要特征指标	16
二、冻胀试验与观测	20
三、路基土的冻胀形成与发展	28
四、冻土中的水分迁移	29
五、影响路基土冻胀的因素	38
六、路基土的季节性冻胀分类	58
第三章 路基干湿类型	77
一、路基潮湿来源	77
二、路基干湿类型	78
三、路基干湿类型变化	79

2 季冻区公路路面厚度

四、基垫层材料与路基强度衰减	82
第四章 路基临界高度	88
一、公路自然区划	88
二、路基临界高度	90
三、季冻区路基临界高度的研究	96
第五章 路面容许冻胀与不均匀冻胀	108
一、路面容许冻胀值介绍	109
二、路面容许冻胀试验与观测	111
三、水泥混凝土路面容许不均匀冻胀值	117
四、水泥混凝土路面容许冻胀值	127
五、沥青混凝土路面容许不均匀冻胀值	130
六、沥青混凝土路面容许冻胀值	133
七、小结	135
第六章 季冻区公路路面厚度研究	137
一、公路路面厚度国内外之研究	139
二、公路设计冻深	151
三、路面下容许最大冻层厚度	164
四、公路路面厚度	173
结语	176
参考文献	183

第一章 土的冻结

一、冻土的定义

冻土,一般是指温度在 0°C 或 0°C 以下,含有冰的各种岩土和土壤。温度在 0°C 或 0°C 以下,不含冰的岩土和土壤,为寒土。寒土可分为不含冰和重力水的干寒土和不含冰但含负温盐水或卤水的湿寒土。在自然界,作为冻土层或冻土区整体来说,既包含冻土本身,也包括寒土在内。所以,冻土区系指岩土温度在 0°C 或 0°C 以下的那部分地壳。岩土温度为正温的称为非冻土,非冻土中曾经处于冻结状态的称为融土。

根据冻土存在的时间可分为:

多年冻土——冻结状态持续二年以上的土层(土壤、土、岩石);

季节冻土——地壳表层冬季冻结、夏季全部融化的岩土层,多年冻土区的活动层也是季节冻土;

瞬时冻土——冬季冻结状态仅维持几个小时至数日。

二、我国季节性冻土分布

我国季节性冻土分布相当广泛,普布于长江流域以北十余个省份。从图1-1中可以看出,季节冻土层厚度变化的总趋势是服从于纬度分布规律,从北向南逐渐减薄。然而,在东北及西部山区,更主要是受着多年冻土以及现代冰川、积雪的影响。例如,大

2 季冻区公路路面厚度

小兴安岭、天山、祁连山、昆仑山、阿尔泰山及喜马拉雅山等地区附近的季节冻土层等深度曲线,都是平行于高山走向而分布。表1-1列出了我国一些主要地区的最大季节冻结深度。从中我们大致可以看出我国季节性冻土层分布的广泛性。

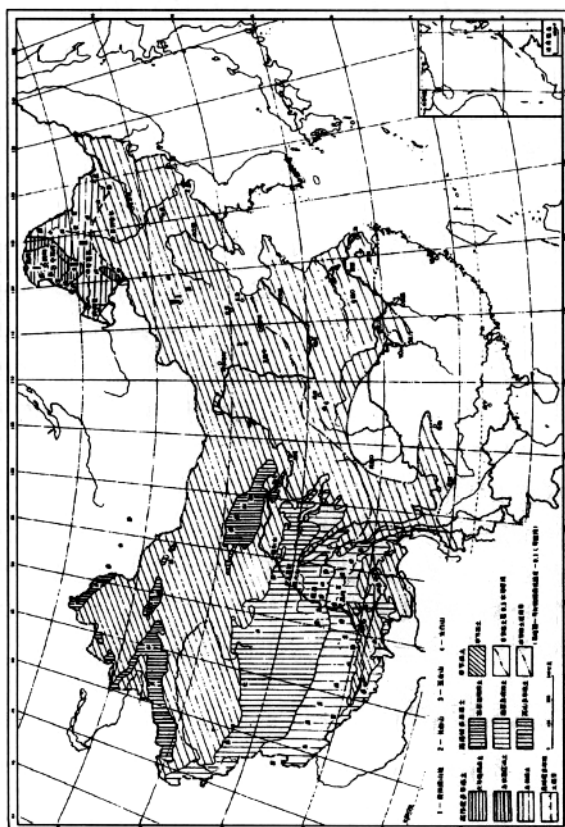


图1-1 中国冻土分布图

表 1-1 我国一些地区最大季节冻结深度

地 点	最大冻结深度 (厘米)	地 点	最大冻结深度 (厘米)	地 点	最大冻结深度 (厘米)	地 点	最大冻结深度 (厘米)
黑龙江		辽宁	179	西 宁	134	洛 川	76
呼玛	281	通林	149	都兰	201	铜 川	54
嫩江	252	林西	200	共和	133	彬 县	50
克山	282	乌丹	147	兰 州	131	大 荔	28
伊春	290	赤峰	201	达日	119	宝 鸡	29
齐齐哈尔	208	新林	289	玉 树	>200	武 功	24
富锦	228	浩特	>300	甘 肃	94	西 安	45
安通	207	二连	337	安 西	116	商 留	23
哈河	193	多伦	227	金 塔	99	四 川	15
尚志	198	固阳	>203	敦 煌	>150	阿 坝	91
牡丹	255	集和	191	酒 泉	144	松 潘	50
富锦	179	新街	>150	张 掖	132	甘 孜	95
吉林	191	乌 兰	150	山 丹	123	乾 理	48
扶余	209	哈巴	154	民 勤	143	班 戈	>50
长岭	171	阿巴	>146	勒 勒	115	班 那	26
吉林	177	和布	171	靖 远	93	昌 日	179
长春	169	塔克	146	合 水	87	拉 山	169
敦化	177	奇台	243	榆 中	103	大 石	127
四平	148	奇台	141	榆 阳	118	山 河	141
延吉	200	精伊	196	临 夏	82	原 平	110
临江	136	巴里	62	通渭	94	兴 阳	117
通化	131	乌木	>253	平 凉	86	太 高	68
辽宁		鲁角	141	华 家	122	和 介	77
彰武	148	新阳	115	凉 州	62	石 顺	92
阜宁	140	沈建	69	临 洮	82	休 县	69
建本	148	辽恒	83	南 夏	94	城 城	103
宽营	178	锦仁	197	天 水	142	京 城	43
兴岫	149	阿哈	111	岷 武	61	北 密	85
盖县	111	库奇	126	石 嘴	75	天 津	65
丹 东	113	阿哈	120	宁 夏	11	塘 沽	59
内蒙古		巴哈	111	山 川	104	河 场	124
根河	295	巴哈	82	宁 夏	103	宁 德	126
满洲	389	巴哈	61	石 嘴	105		
海拉尔	241	巴哈	>150	石 嘴	103		
博克图	>250	巴哈	90	石 嘴	137		
阿拉坦	>250	巴哈	96	石 嘴	114		
通榆	178	巴哈	56	石 嘴	109		
开鲁	151	巴哈	98	石 嘴	146		
		巴哈	85	石 嘴	148		
		巴哈	67	石 嘴	129		
		巴哈	87	石 嘴	119		
		巴哈	174	石 嘴	103		
		巴哈	172	石 嘴	94		
		巴哈	204	石 嘴	79		
		巴哈	129	石 嘴			

三、冻土的基本组成

冻土是复杂的多相和多成分体系,矿物骨架或有机物骨架、冰、未冻水和气体为其基本成分。就是这些基本组成的差异,使之有独特的冻土构造、物理力学性质、热力学性质以及对其冻结和融化过程的影响。

1. 固体土骨架

固体土骨架是多成分体系冻土的基础,对冻土性质的影响极为重要。不仅是矿物颗粒的尺寸、形状,而且反映土颗粒表面物理力学性质的交换性离子的交换容量及成分,都会对土的结构构造特性、冻结时的土壤水分迁移、聚集与冰晶析出产生重大的影响。

土颗粒形状对冻土性质的影响也很重要,因为它决定着冻土传递外荷载的局部应力大小。如俄国冻土学家 Цытович 和 Сумгин 在曾列举说明的(Цытович, 1973),当外压力为 0.2MPa 时,直径 1mm 的圆形石英颗粒与片状冰夹层相接触处的应力为 1170MPa,而按同样直径的两固体颗粒相接触处计算得到的应力则要大许多倍。由于石英颗粒的弹性模量为 3×10^5 MPa,而冰夹层的为 3×10^4 MPa,因此只有在弹性变形的短时荷载下才有这样的压力。随着时间的增长,由于冰夹层具有蠕变性,即使在极小的压力下它都会发生“塑性流动”,以使其接触面处的应力减小。

土体矿物颗粒的分散度,在于颗粒中产生的不同的物理化学表现现象,并取决于颗粒的比表面积。如高岭土的比表面积约 $12\text{m}^2/\text{g}$,而蒙脱土可达 $800\text{m}^2/\text{g}$ 。其比表面积愈大,化学结合能就愈高,对土壤孔隙水的影响就愈甚。

在其他条件相同时,交换性阳离子性质对冰晶形成和冻胀过程的影响力依次为: $\text{Fe}^{3+} > \text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$, Fe^{3+} 影响最大, Na^+ 影响最小。

2. 冰

冰是冻土中不可缺少的组成部分,它决定着冻土的结构构造及相应的物理化学与力学性质。

众所周知,由于水的密度为 $0.999968\text{g}/\text{m}^3$,比热为 $4.226\text{kJ}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$;冰的密度为 $0.9168\text{g}/\text{m}^3$,比热为 $2.081\text{kJ}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ 。因此,水结冰时,其体积增加 9.07% 、密度减少 8.31% ,比热减小一半多,并形成六角形的冰晶体,在副轴方向上冰晶增长得最强烈,沿主对称轴方向冰晶增长得缓慢。因此,冰晶呈片状构造,各向异性。冰在垂直于主轴方向上,其黏塑性变形最大,而在平行于主光轴方向上流变性最小。试验表明,冰的黏滞度取决于应力方向,可变化 100 倍以上。仅在瞬时载荷下,冰体才有弹性特征。

3. 未冻水

土的冻结作用是随时间发生的复杂的热力学过程。孔隙水的结晶实际上是在任何负温度下逐渐发生的,至少在 -70°C 前总会有一定数量的未冻水存在,而且土在某一负温下的未冻结水含量不随负温的持续而变化。对此早在 1939 年 Цытович 就提出了有关理论,即在某一温度下,土中总会有一部分水会处于与冰共存的不冻结状态,随着温度降低,冰含量增加,而未冻水含量减少,使土从融化状态经过塑性冻结,而变成坚固的冻结状态。

4. 水汽

当冻土孔隙中没有被冰和未冻水完全充填时,即有部分被水蒸气和其他气体所充填,这些气体处于自由、受压或吸附状态。冻土中的水汽有时起着重要的作用,将在压力梯度的作用下迁移。在非饱和土体中,水汽可能是温度变化和冻结过程中水分向冻结前缘迁移、聚集的主要来源,也是小含水量砂性土类冻结时出现聚冰现象的原因。当受压气体形成封闭气泡时,土的弹性增加,而土中被吸附的气体的数量随有机质含量而递增。

总之,冻土中各相成分之间发生的作用,取决于矿物颗粒、冰表面与各种状态水之间的相互作用力场,其程度与土的固体成分、比表面积、物理力学性质及交换性阳离子种类有关,也与外部温度及压力等条件相关。

四、土的冻结及其温度特征

众所周知,标准大气压下自由水的冻结温度是 0°C ,而土壤中的孔隙水因其与土颗粒表面的相互作用以及水中含有某种数量的盐分,其冻结温度要低于 0°C 。所谓冻结温度是指孔隙水稳定冻结时的温度。大量试验表明,在土壤冷却与冻结过程中,第一阶段要出现过冷现象,即土温下降而无冰析出现。这种过冷现象与试验的条件有关,主要与受冻结之土样的总热量平衡有关,同一种土其过冷过程并非常数,对于天然土层,只有上部逐渐冷却和土中无冰晶时才能见到。

接着土样中孔隙水开始冻结,析出结冰潜热,土温急剧增高。如在湿砂与饱水砂条件下,温度升至接近 0°C ,此时自由水在稳定温度下冻结,如图1-2中的Ⅲ阶段所示,在自由水冻结后,若温度继续下降,因继续析出一些结晶潜热和相成分可变的弱结合水冻结,放出潜热,土温呈曲线型缓慢下降。当温度低于 -1°C 时,则呈直线冷却,即为图1-2中的Ⅳ阶段,此时所有水分均已冻结成冰,砂土处于冻结状态。如温度开始上升,则开始时温度呈直线变化,如Ⅴ段所示,而后在 $-0.5 \sim -1.0^{\circ}\text{C}$ 时,又呈曲线上升,此时尚未达到土的融化温度时,已冻结的弱结合水冰晶融化吸热,最后,进入自由水结冰的稳定融化过程。

上述现象在各类黏性土中均会出现,其特点在于过冷后温度跃变时,土的冷却作用在一个较低的温度($-0.1 \sim -2.5^{\circ}\text{C}$,甚至更低)下进行。如图1-3所示,而且随着大量薄膜水逐渐结冰时

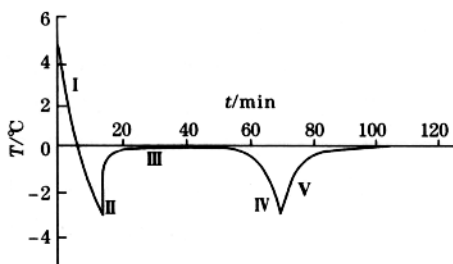


图 1-2 砂土的冷却与冻结过程线

潜热的影响,温度将缓慢下降(Ⅲ阶段),而且持续时间长得多,此后才进入无明显潜热影响的直线冷却过程Ⅳ阶段。而后在温度升高时,由于薄膜水冰晶的不断融化吸热,温度逐渐呈曲线上升,直至全部冻土融化完毕,土温才进入正值。

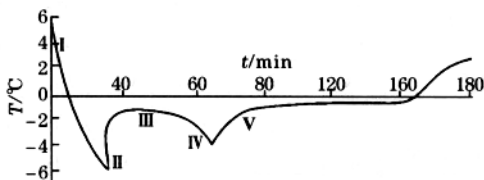


图 1-3 分散性黏土的冷却与冻结过程线

各类土的冻结——融化过程的温度变化曲线基本趋势相似。但各阶段的温度曲线特征又因土的类型而异。从图 1-2、1-3 中可以看出,第Ⅲ区段是最有意义的,它标志着种类土的起始冻结温度。由于各类土的颗粒分散程度、矿物成分、含水量、土粒子被不同类型阳离子饱和的情况,以及孔隙水中的可溶盐成分和浓度不同,它们的起始冻结温度也就不同。一般需通过试验来确定。通常情况下,孔隙中的自由水为 0°C 冻结,塑性黏土的平均冻结温度为 $-0.1^{\circ}\text{C} \sim -1.2^{\circ}\text{C}$,坚硬、半坚硬黏土为 $-2^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$ 。

8 季冻区公路路面厚度

根据试验资料,同一类土的冻结温度是随土体的含水程度而变化,含水量增加,土体的起始冻结温度也升高;相反,含水量减少,起始冻结温度则降低,它们之间大致呈指数函数关系。

压力对冻结温度也有较大影响。试验表明,每当作用于土的附加压力增加一个大气压,土的冻结温度便降低 0.0075°C 。因为压力的增大,使土体压密,减小土体的比表面积和表面能,导致薄膜水冻结温度上升。另一方面,由于压力的增大,水的冻结温度降低,土中液态水相应增加,这又降低了水溶液浓度,反而又提高冻结温度。由此可见,压力—比表面积—水溶液浓度三者互相牵制,并处于动平衡状态。

几种土的冻结温度,见表 1-2。

表 1-2 几种土的过冷和冻结温度

土壤名称	压力 kPa	环境温度 ($^{\circ}\text{C}$)	含水量 (%)	过度冷却 温度($^{\circ}\text{C}$)	起始冻结 温度($^{\circ}\text{C}$)
中粒砂	100	-10	20.5	-3.0	0
亚黏土 ($<0.001\text{mm}$ 占 20.8%)	50	-10	32.2	-4.0	-0.1
亚黏土 ($<0.001\text{mm}$ 占 20.8%)	1000	-10	19.6	-3.3	-0.9
黏土	100	-10	80.5	-4.9	-0.7

五、冻土中的未冻水与冰的动力平衡

1. 什么是未冻水

当土壤冻结时,特别是当细粒土壤(如黏质土)冻结时,土壤中的孔隙水决不可能在土冻结晶温度下全部冻结,而仅仅是冻结其中的一部分。这部分不冻结状态的水分称为“未冻水”。

冻土中的未冻水是冻土含水量的组成部分,它对土的冻结与