

关于东北片区公路路面抗冻厚度问题

吉林省试验路观测资料分析研究

报 告 之 一

吉林省交通科学研究所
哈尔滨建筑工程学院

关于东北片区公路路面抗冻厚度问题

东北片区处于我国北方严重季冻区，气候变化幅度大，土壤分布极不均匀，公路冻胀现象普遍存在。对公路路面抗冻厚度问题的解决，历来都被视为公路设计养护工作中的一大关键，引起公路工作者们的密切关注。

国外文献，对路面抗冻厚度的研究，约在三十年代前后，就已开始。大体上冰冻深度不大，处于温暖地带的国家不予考虑。最低气温 -10°C 以内的国家，路面的抗冻厚度取与约冻深相等。地居北方严寒而冻深超过一米以上的国家，抗冻厚度按冻深的几分之几进行取用，如英国规定路面抗冻厚度约其冻深的0.6倍，捷克规定为其冻深的0.6—0.85倍，视地下水位和土类而不同，苏联一般规定约为冻深的 $\frac{2}{3}$ ，但对潮湿土基另有专用计算图表，不受此限。日本则建议按冰冻线的0.7—0.8倍，考虑路面抗冻厚度〔1、2、3、4。〕

由于影响路面抗冻厚度的因素较多，各国的情况不一，各自的理论和依据并不一样。我们本着毛主席“洋为中用”的教导，结合自己的实际，对片区路面抗冻厚度的问题，初步地作了若干分析和讨论，这些问题是：

一、东北片区公路路面冬春季节的工作特征及其利用，

二、关于路面容许冻胀值问题；

三、路面抗冻厚度的确定。

本文凭借东北三省公路及部分城建单位包括沈阳、长春、吉林、哈尔滨等地过去对道路冻害防治问题研究中所得到的实地观测数据，特别着重地将吉林省交通研究所1963年以后各试验路观测站点的历年纪录，结合有关气象资料，进行了整理。但是，所掌握的情况，并不全面，已经掌握的资料，还没有得到完善的利用，甚至被利用的资料是否合适，都可能存在一些问题或谬误，希望及时给予指正。

对于路面抗冻厚度的问题，初步考虑是这样进行的：

1、从观测资料的具体特点出发，进行有关抗冻厚度因素间的相互关系的分析，以便寻求它们内在的规律性；

2、总结现有的抗冻厚度设计方法，结合我国的实际经验，发现问题，解决问题，尽可能将理论和实践距离拉近一些；

3、方法应简单易行，利于掌握运用，便于积累和收集有关参数，以要求各典型地区设置试验路，作较系统的观测为前题。

一、东北片区公路路面冬春季节的工作特征及其利用的探讨

本节以吉林省各试验路观测站（附录表一1）的有关地冻、地温及冻胀等观测资料

为依据，按不同的土基干湿情况，不同土类，不同路面结构及厚度，黑白类型等因素分别绘制冻深、冻胀随时间变化的曲线。分别进行分析，并从中找出共同的特征，现试述如下：

(一)、路面冻胀和土基冻深的变化规律性

公路或城内道路冬季由于土基冻结而导致路面标高增加的现象，称为路面冻胀，单位为毫米，以 ξ 表示出。从片区公路某些试验路段冬春季观测的资料来看，土基冻深达一定的深度以后，路面才开始胀上，如图 I—I，

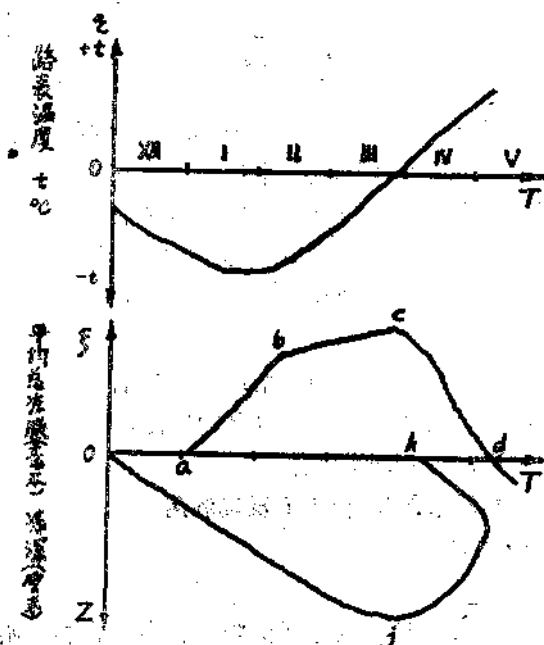


图 I-I 冻胀冻深随时间变化图

a b C d 为冻胀随时间的变化曲线，a 为始胀点，相应于 a 点的冻深，称为始胀冻深，以 Z_a 表示，b 为冻速变化的转折点，相应于 b 点的冻深，称为不利冻深，以 Z_b 表示，c 点为最大冻胀点，相应于 c 点的冻深，以 Z_c 表示，即平常所称的临界冻深。图中 O 至 j 为冻深线，j 为最大冻深点，j 点不一定与最大冻胀 c 点重合。以下将分别用 Z_c 和 Z_j 表示，以示区别。图 I—I 指出，当土基冻结至一定深度后，路面胀高，其胀高速度明显的以 b 为转折，ab 段斜率较 bc 为陡，至 b 到 c，增长缓慢，超过 c 后，土基转为沉落变形，其变形速度往往较冻结时为快，即 cd 段较 ab 段变化大，这说明土基在冻融过程中，只有在 b 之前，或在 c 之后，将有可能出现危险点。

为了说明这一事实，将吉林省各试验路的观测资料汇总如表 1—1，表中胀落速度以每日毫米表示出，它们按 a b、b c 及 c d 段落计算时，相差可达 4—5 倍甚至几十倍。表中还说明胀高和沉落时速度较为接近，且互有高低，反映了具有同等的重要性，以兹分别给予讨论。

关于路面冻胀和土基冻深随时间的变化曲线，现有国外文献上都有过详细的讨论，我们根据观测站点的实际记录，进行整理，发觉冻胀与冻深两条曲线的起始点并不在一点上，这一事实，1963年长春市政方面，就已指出〔5〕。我们同时参照哈尔滨市的资料和分析了黑龙江7404工程试验路1975—1976年有关冻胀冻深的观测结果以后，才得到初步的肯定。

与外国文献相比〔6、7、8、9〕路面的冻胀和土基冻深的变化曲线（以下简称 $\xi-T$ 和 $Z-T$ ），具有下列不同点：

（1）国外资料，特别是苏联〔10、11〕和北欧文献中，都把冻胀和冻结的起点，合在一处。认为土基冻结开始时，路面出现胀起，而我们的观测指出，路面的冻胀仅当土基冻深到一定值时才出现，在此情况下，研究冻深与冻胀关系时，应将观测冻深（ Z ）减去对冻胀不产生影响的始胀冻深（ Z_a ），现称之为计算冻深（ $Z_{\text{计}}$ ）可表如下式：

$$Z_{\text{计}} = Z - Z_a \quad (1-1)$$

我们的观测指出，只有在土基上直接观测或路面本身明显冻胀时， Z_a 才为零。为区别观测冻深与计算冻深，以下将分别用 Z 和 $Z_{\text{计}}$ 来表示，以免混淆。

（2）苏联资料〔8、12〕，对冻胀随时间变化曲线仅指出具有最大点，而我们根据多数路段的观测记录，在起始点 a 和最大 C 之间，还存在转折点 b ， b 以前和 b 以后曲线的斜率具有明显的差异，斜率的大小（表1—1速度栏），反映冻胀力的作用性质，联系气温资料，往往都是出现在最低日平均气温的前后。事实上，不少路面的冻裂，就在这个时候出现，因为这时路表的温度最低，路面材料呈脆性，其相对延伸度为最小值，故为最不利点。而当最大冻胀点 C 出现之际，气温一般已趋上升（约在三月份），路面表面温度也随之上升，材料的相对延伸度值增大，但此时由于沉落的速度较大，另外还伴随着不均匀沉陷变形，问题就更严重， b 、 C 点之间究竟哪一点最不利，要根据具体条件分析对比。所以，对北方严寒的公路路面的抗冻验算，应同时将 C 、 b 两种状态，进行对比后，选其最不利者作为控制点。

（3）国外均以最大冻深作为路面考虑抗冻厚度的依据。因根据观测资料，土基最大冻深时不一定出现最大冻胀，而且当 $\xi-T$ 曲线由 b 点到点 C 点变化十分缓慢，此一阶段即使到达最大值，路面材料本身应变的能力完全可以适应。因此，我们没有将最大冻深 Z_{max} 作为参考指标。

（二）土基冻胀和融沉的周期性

图1—1中可以推知，冬季气温在零度以下，土基冻结，随着冻深的增大致使路面胀起，春季气温上升至正温度以后，土基融化致使路面沉落，然后，在夏秋之间，暂时有一段相对稳定期。此时，如遇雨水或地下水位的变迁，土基也会产生一些胀落，由于目前观测站尚未掌握观测路段的非冬季的实际沉陷资料，暂绘制图1—2，供分析之用。

由图1—2所示的周年变化，可以看出路面的高程并非恒定不变。有些路面化冻以后不能恢复到原着高程，有的则继续下降。现有的观测记录以平均路温由正转负约为 0° 的前后，作为胀前的零点，故得到的最大的冻胀值（ ξ_{max} ）并不是路面全

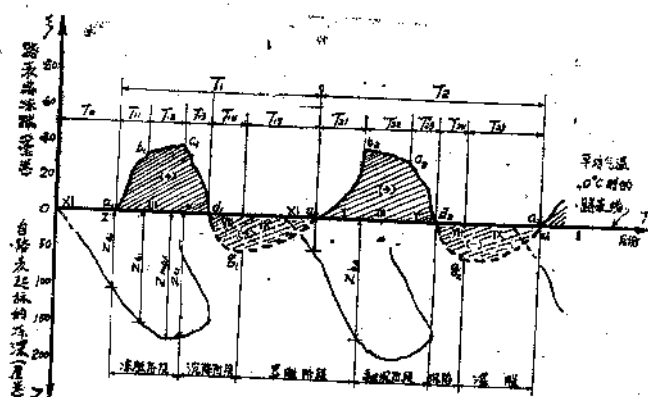


图1-2 路基路面全年的冻结、冻融、沉降变化曲线

年度的总变形(Δ)。对东北片区来说,春融期间随着气温升高的快慢, Δ 值的大小和比重多少,都具有更为特殊的意义,需要以后积累。根据北京市1955—1956所得的部分街道的冻胀观测记录(表1—2),十八条街道71点中,平均总变形与平均冻胀的比值(即 $\frac{\Delta}{\xi}$ 称沉胀比)、波动于1.06—3.08,平均2.05,可见路面总变形 Δ 影响是不容忽视的。

北京各街道冻胀观测部分资料

表1—2

街道名称	第一批 测点数	平均总变形 Δ (Cm)	平均冻胀 ξ (Cm)	沉 胀 比 ($\frac{\Delta}{\xi}$)	备 注
师 府 国	1	8.64	4.53	1.91	
东 长 安 街	10	7.26	4.67	1.55	
(0+900)					
东华门大街南侧	8	7.17	3.27	2.19	
东华门大街北侧	9	5.66	3.02	1.87	
台基厂头条	1	5.56	2.27	2.45	
东长安街南侧	6	4.86	3.68	1.32	
(0+200—0+500)					
东 长 安 街	3	3.99	1.80	2.22	
(1+200+500)					
八面槽(Ⅱ)	2	3.53	3.32	1.06	m i m
王府井(Ⅰ)	7	3.31	1.30	2.54	
地安门内大街	2	2.55	1.06	2.40	
景 山 后 街	3	2.49	1.21	2.06	
南 长 街	1	2.53	1.06	2.39	
南 池 子	6	2.49	1.21	2.06	
东长安街北侧	6	2.40	1.55	1.55	
(0+200—0+500)					
景 山 东 街	1	1.60	0.52	3.08	m a x
景 山 东 前 街	1	1.29	1.06	1.22	
北 长 街	6	1.02	0.55	1.96	
王 府 大 街	1	0.57	0.19	3.00	

由此可知,单掌握冻胀的资料,不能彻底解决路面的冻裂问题。由于沉融阶段路基路面的工作条件完全不同,冻胀与沉融的问题性质也截然两样。如冻胀阶段,土基冻结,具有更高强度,此时冻结结构由路面与冻结土基组合而成,冻胀的作用力向上,而结构的本身重量起着阻碍冻胀的作用。但在春融季节,土基融化,失去了强度,路面成了孤立的,此时其本身重与车辆作用力方向一致,成了破坏的因素,两者受力条件完全不一样,应加以区别。

苏联文献中一向没有把冻胀和融沉两个问题分开,认为冻胀与沉落属同一性质,很多料中〔7、8、13〕还以“冻胀(沉落)”来表达,意思是它们之间具有共通性,没有另外叙述的必要。我们认为,结合路面的具体条件,是不该同样看待的。因此,本文讨论冻胀时,把冻胀与沉融两个阶段分别进行研究,在土基沉融过程中,把冻融和干湿度变化两部份分开。各试验路段的冻胀冻深曲线的时间间隔及数值见表1—1所列。

(三) 总冻胀与不均匀冻胀的基本性质

路面总冻胀是观测断面或观测段落内各冻胀点胀高数值的平均值,以毫米计。其大小反映该断面冻胀的程度,图1-1的总坐标,就以总冻胀表示。但是同一断面内(或段落)各冻胀点的实际冻胀高并不一致,因此,同一断面的冻胀又反映着不均匀性。这就叫做不均匀冻胀。

现以 h 表示冻胀点(钉)的冻胀前后的高差毫米数,若某断面(或段落)内设置几个冻胀点,则总冻胀 ξ 由下式计得:

$$\xi = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{n} = \frac{1}{n} \sum h_i \quad (1-1)$$

路面的不均匀冻胀(f),是某一断面(段落)上中是胀高与其左右间距相等的两点间平均胀高之差,通常由下式计示:

$$f = h_{\text{中}} - \left(\frac{h_{\text{左}} + h_{\text{右}}}{2} \right) \quad (1-3)$$

式中 $h_{\text{中}}$ 、 $h_{\text{左}}$ 、 $h_{\text{右}}$ ——分别为中、左、右三点的胀高毫米数,由精密水准实测而得。 $h_{\text{左}}$ 和 $h_{\text{右}}$ 两点的距离 S ,可根据观测断面的具体条件而定。当 S 约等于路面宽度(边点离路边1.0米)时,就以 F 代 f 。 F 表示某一路面宽度下意想的不均匀冻胀值。

为了整理资料的需要,苏联普扎可夫曾建议采用相对不均匀冻胀 i 为指标,我们也应用这个指标 i 的计算式:

$$i = \frac{f}{S} = \frac{f}{2e} \quad (1-4)$$

式中 e ——中点和边点冻胀钉的间距。

必须指出,在同一路段的同一断面内,如采用不同的 S 进行观测,所得的 i 值将也不相同,故 i 仅用相同路宽下相同冻胀钉间距 S 下的观测资料的分析(表1—3)。式(1—3)中的 f 值,是由三个观测数据计示而得,如断面具有三个以上观测数据时,即不能全部利用在计算中。这个问题,牵涉较多,以后再深入研究。

横向最大冻胀观测资料分析

表 1—3

项 目		长 农 试 验 路		长 春 市			备 注
		Ⅱ	Ⅳ	东盛四条街	杭州路	宝善路	
		66.3.4	66.3.4	65.3.29	65.3.20	65.2.27	
冻 胀 钉 编 号	1	34.5	66	82.5	20.5	—14	长农Ⅱ 段为4 列平均 其余为 2列平 均值
	2	63.5	100	77.5	16	—9.5	
	3	92	115.5	71	16	—15	
	4	72	97	71	12.5	—23.5	
	5	48	57	80	15.5	—19	
	6	—	—	—	18.5	—20.5	
	7	—	—	—	19.5	—13.5	
总冻胀号 (毫米)		62	87.1	76.4	16.1	—16.4	
不均 匀冻 胀 f	按1.3.5(1.4.7)计	50.7	54	—13.5	—7.5	—9.3	f为 毫米
	按2.3.4(2.4.6)计	24.3	17.1	—3.3	—4.8	—8.5	
	按3.4.5计	—	—	—	—3.3	—6.5	
相匀 对冻 不胀 均 i	按1.3.5(1.4.7)计	12.7	13.5	—3.8	—1.25	—1.55	i以% 表示
	按2.3.4(2.4.6)计	12.2	8.6	—1.6	—1.2	—2.1	
	按3.4.5计	—	—	—	—1.65	—3.25	

表 1—3 反映的下列现象, 值得注意:

(1) 不管公路或城市道路的路面, 冬季都有冻胀的现象, 其值有正, 也有负。负值表明, 中点冻胀量较两边点平均量为小, 呈下凹。

(2) 相同路段的冻胀值与路面结构有密切关系, 长农Ⅱ段为灰土基层, Ⅳ段为泥结碎石基层, 总冻胀相差约25, 但同为灰土基层, 土基的干湿状况和路面厚度, 决定着冻胀值, 东盛四条灰土基层18 Cm, 较长农Ⅱ段38 Cm薄约一半, 土基属Ⅲ类。其总冻胀较Ⅱ类路段为大, 但仍少于Ⅱ类非灰土基层。这反映灰土类基层的特点, 虽然厚度不大, 却仍不失整体性作用。

(3) 城市道路和公路间的不均匀冻胀, 相差也大, 因间次 S 不同的影响没有排除, 而另一方面, 即使在同一个观测断面, 由于取用三点观测数据不同 (如 1、3、5 或 2、3、4) 所计得的 f 及 i, 也不能相互对比。其本身数值相差很大, 有必要考虑其修正方法, 修正以后, 才能利用。

i 和 f 是抄苏联建议的两个指标。目前暂时统一在 S=4 米的条件下使用, 对它们的进一步研究, 容下阶段进行。

(四) 公路路面横向冻胀变形曲线的验证

路面冻胀变形的性质和发展速度, 除取决于地理、地形、土壤、气象和水文地质等宏观

因素外，在很大程度上随着路基路面构造形状，朝向和路面类型的变化而不同。因此，即使较小范围内，冻胀变形曲线的形状，也很难相同。

当土基冻结的过程中，路面的冻胀变形，既是大地冻胀的一个组成部分，却又具有自己的特点。在此情况下路面因不均匀冻胀而致的局部变形，也属空间课题。苏联文献在研究路面冻胀的变形问题中，采用了两个基本假设〔7、8〕，它们是：

1、认为路面的冻胀变形呈球面状，假定纵向和横向的变形相对称，其相值等。

2、认为路面冻裂破坏的极限状态，服从简单单元的几何组成关系。

显然，上列的假设与路面的实际是有相当距离的。路面的冻胀变形，主要根据土的不均匀性和冻深分布的不对称性。拿公路来说，同一断面下左右两侧的冻深截然不同(表1—4)。这是由于路线的朝向的关系和路面各点所受日照风力等条件不同的结果影响。在城市道路，路面宽窄不一，且受两旁建筑物的影响，变化尤为显著。北京天津市的观测，都证明了此理〔14、15〕。

长农观测站Ⅳ段地冻记录(摘抄)(1964—1965)

表 1—4

观测日期	自路面起算的冻结深度(厘米)							备 注
	左侧田间	左侧路肩	左侧路面	中线	右侧路面	右侧路肩	右侧田间	
1964、12、1	39	45	50	56	54	53	46	11.10开始冻结。
15	63	82	77	80	81	74	66	
30	78	96	92	108	93	106	81	
1965、1、15	104	119	116	127	125	125	106	
30	121	133	133	142	138	138	122	
2、15	133	147	147	154	151	154	133	
27	138	155	155	164	161	161	140	
3、15	141	162	162	170	166	168	146	
30	134	156	156	160	159	157	(140)	
4、10	—	111	108	(112)	112	128	94	
20	82	85	89	91	94	90	76	
30	62	61	64	63	66	69	70	
5、5	49	51	56	49	52	58	55	
10	40	39	38	38	38	45	49	
15	31	24	28	26	24	31	36	
20	—	0	10	11	7	14	—	
22	—	—	0	0	3	11	—	
25	—	—	—	—	—	9	—	5.27融化完毕

根据我们的资料，认为第一，既然路面的纵向和横向冻裂的性质并不相同，路面横断面上冬季出现纵向（沿路中心线方向）开裂，原属不均匀冻胀所引起的冻裂，但纵断面上出现的横向裂缝，却不完全由于前述原因。在东北片区的具体条件下，路基的冻裂，较为普遍，如果土壤良好，也有可能路面由于路面材料冻缩而产生了贯穿全宽的横裂。因此，应该视裂缝间距（是否超过路面宽度）和裂缝深度，出现时间等因素，分清情况，分别处理。第二：路面的冻胀变形随着时间而发展，故冻胀变形曲线也将随时间变化而呈现不同的形状，路面冻胀破坏的极限状态，应从具体路段的冻胀变形和破坏出现日期之间总结其规律，在没有得到证明之前，似不应用简单圆的几何关系来概括。

为阐明此点，引用了苏联的实测资料〔7〕和吉林省部分路段的横向冻胀观测资料，依其随时间的变化，取出现最大冻胀值时的曲线，与下列各种曲线进行对比，视其面积差的小，确定其曲线形状。

所用曲线有以下几种：

（a）圆弧形或弓形曲线

此曲线一直被苏联文献用作主要的极限变形曲线，现以统一的座标轴表为图 1—3 a，图中 A' A C B B' 为半径 ρ 的弧，A C B 为路面冻胀变形曲线，O C 为不均匀冻胀高，即 f ，A B 为两边点间距，以 L 表之，令以 A B 中点 O 为原点，由几何关系，可得方程式为下，

$$y = \sqrt{\left(\frac{L^2}{8f}\right)^2 - x^2} = \sqrt{\left(\frac{L^2}{8f}\right) - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \quad (1-5)$$

上式实际上即可以 $(0, -(\rho - f))$ 为圆心的简单圆方程式。

（b）拱形抛物线

拱形抛物线即通常的路拱曲线（图 1—3b）其为程式为下：

$$y = \frac{4f}{L^2} \left(\frac{L^2}{4} - x^2 \right) \quad (1-6)$$

（c）余弦曲线

余弦曲线常被国外用于路面不均匀沉陷时一种变形假设〔16〕其方程式为下（图 1—3c）

$$y = f \cos \frac{\pi x}{L} \quad (1-7)$$

（d）反向简支梁挠曲曲线

反向简支梁挠曲曲线（图 1—3d）与路面冻胀力作用下的变形相近，到此以作对比。

其方程式为下:

$$y = \frac{8}{5L^4} (2X^4 + 3L^2X^2) + f \quad (1-8)$$

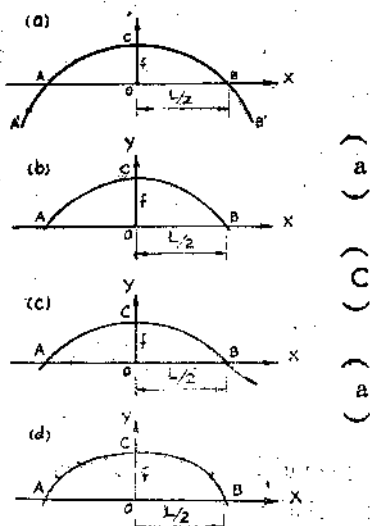


图1-3 各种曲线表示法

- (a) 弓形 (b) 抛物线
(c) 余弦曲线 (d) 反向挠曲线

将上式各式进行对比时, 设各式的 f 或 L 分别相等, 为简化计, 并令 $f=1$, 按不同的水平向间距, 计算其纵座标 y , 列表 1-5。

曲线垂距比 ($\frac{y}{f}$) 比较表

表 1-5

$\frac{y}{f}$ 曲线	相应 X 值下的垂距比 ($\frac{y}{f}$)						
	$+\frac{L}{2}$	$+\frac{L}{8}$	$+\frac{L}{3}$	$+\frac{L}{4}$	$+\frac{L}{6}$	$+\frac{L}{8}$	0
(a) 弓形	0	0.44	0.56	0.75	0.88	0.93	0.10
(b) 抛物线	0	0.438	0.554	0.750	0.890	0.938	0.10
(c) 余弦曲线	0	0.383	0.500	0.707	0.866	0.924	0.10
(d) 反向挠曲线	0	0.503	0.598	0.806	0.896	0.940	0.10

*注: 弓形曲线垂距 (y) 依 f 及 L 不同而变化, 计算较繁, 列表为 $L=4$ 米, $f=4-12$ 的平均值。

表 1—5 中, 各种曲线在相同 f 下的垂距比表明, 弓形曲线和路拱抛物线比较接近, 它们还同时通过 $\frac{L}{4}$ 点, 但抛物线略形陡峻, 余弦曲线最为平, 缓反向挠曲线靠近支点两头, 变形特大。当气温逐步下降, 路面的冻胀变形必将逐步由平缓趋向陡峻, 至于发展到什么形状才告停止, 应该根据各地区自己设置冻胀站点进行确定。

为了进一步分析苏联公路冻胀观测资料, 与其假定之间是否存在差距, 我们引用 С. В. Бельковский 1953 年发表的〔2〕, 在其 I—5 号试验路段上出现纵向冻裂时的原始数, 据按照如下方法进行对比计算。

根据斜坐标 X' 上的冻胀 (y') (毫米, 其关系如下:

$$y' = y - \frac{X}{S} (\Delta') \quad (1-9)$$

式中符号见图 1—4, y' 值有正负号, 联成实际冻胀线后, 与计算曲线分割成的面积之和最小时, 即为合适。计算结果列于表 1—6。

图1-2 路基路面全年的冻融、融沉和冻深变化示意图

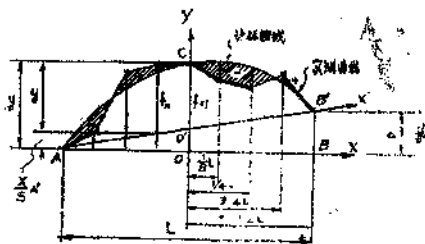


表 1-4 冻融前后对比试验本组数据

由表 1—6 所得结论, 首先, 该试验路段路面开裂时的冻胀变形曲线与余弦曲线最为接近, 因为其误差面积和为最小, 其次, 抛物线, 弓形曲线, 反向挠曲线的误差面积依次增加, 其中反向挠曲线的误差面积最大, 约为余弦曲线的一倍, 其三, 表中的分析说明苏联文献以简单圆 (即弓形曲线)、的关系推导路面允许冻胀值和相对延伸度间的公式。其根据似乎不足或者误差较大。

我们的资料尚缺少路面破坏时的冻胀记录,由于观测断面设钉过少,还不足以反映冻胀曲线的性质和形状,现将长农的观测资料中较大的 t 为例,计算如表 1—7.

长农试验路冻胀观测资料对比计算表

表1-7

路段号	点位	实测 净值 f_x (分析法)	(d) 反向挠曲线			(a, b) 弓形或抛物线			(c) 余弦曲线		
			垂距Y毫米		误差 面积 厘米 ²	垂距毫米		误差 面积 厘米 ²	垂距毫米		误差 面积 厘米 ²
			计算 f	$f-f_x$		计算 f	$f-f_x$		计算 f	$f-f_x$	
I	$-\frac{L}{4}$	-2.7	-6.05	-5.35	-33.5	-5.6	-2.9	-29	-5.3	-2.6	-26
	$+\frac{L}{4}$	-11.5	-6.05	+5.45	+54.5	-5.6	+5.9	+59	-5.3	+6.2	+62
					+21			+30			+36
II	$-\frac{L}{4}$	+3.9	+1.7	-2.2	-22	+1.6	-2.3	-23	+1.48	-2.42	-24.2
	$+\frac{L}{4}$	+2.6	+1.7	-0.9	-9	+1.6	-1.0	-10	+1.48	+1.12	+11.2
					-31			-33			-35.4
III	$-\frac{L}{4}$	+13.8	+9.5	-4.3	-43	+8.85	-4.95	-49.5	+8.32	-5.48	-54.8
	$+\frac{L}{4}$	+7.3	+9.5	+2.2	+22	+8.85	+1.55	+15.5	+8.32	+1.02	+10.2
					-21			-34			-44.6
IV	$-\frac{L}{4}$	+9.1	+8.8	-0.3	-3	+8.2	-0.9	-9	+7.7	-1.4	-14
	$+\frac{L}{4}$	+7.7	+8.8	+1.1	+11	+8.2	+0.5	+5	+7.7	0	0
					+8			-4			-14
V	$-\frac{L}{4}$	+1.4	+3.3	+1.9	+19	+3.1	+1.7	+17	+2.9	+1.5	+15
	$+\frac{L}{4}$	+4.4	+3.3	-1.1	-11	+3.1	-1.3	-13	+2.9	-1.5	-15
					+8			+4			0
				Σ	-15			-37			-58

表1—7的计算结果指出,长农I、II、III,路段以反向挠曲所得误差最小,II段以弓形或抛物线的误差最小(因这两条曲线在 $\frac{L}{4}$ 处重合,形成假象,说明冻胀钉数量不足),而V段则以余弦曲线为最小。反映了同一时间内不同路段冻胀变形曲线是完全不一样的。

因此,必须根据不同路线,组织冻胀变形的观测,方有可能摸清路面的冻胀变形规律性,确定极限变形曲线的形状。

本文将同时采用了余弦曲线和弓形曲线两种形式作为分析的基础,以便对比。

(五)不均匀冻胀比,冻胀率和冻胀系数

已知观测路段的不均匀冻胀 f 以后,用对应的平均总深胀 ξ 除之,得不均匀冻胀比 η 即

$$\eta = \frac{f}{\xi} \quad (1-10)$$

η 值随 f 及 ξ 的正负而变, η 随时间 T 的变化反映了不同阶段冻胀比的不均匀程度。如果准确掌握了它的规律性,以用来推算 f 或 ξ 。

冻胀率是平均冻胀 ξ 与其对应计算冻深 $Z_{\text{计}}$ 百分比,用 Q 表示。冻胀率实际上可以理解为冻胀速度之比,在特定条件下反映着土基冻胀的性质。

$$Q = \frac{\xi / \Delta T}{Z_{\text{计}} / \Delta T} = \frac{\xi}{Z_{\text{计}}} \quad (1-11)$$

ΔT 为时间间隔,由(1—8)式的 ξ 值代入上式,则得:

$$f = Q \eta Z_{\text{计}} \quad (1-12)$$

$$\text{或} \quad f = i S = Q \eta Z_{\text{计}}$$

$$\therefore i = \frac{Q \eta Z_{\text{计}}}{S} \quad (1-13)$$

由上式可知,如果某种土类一定状态下的冻胀参数 $Q \xi$ 已知,从 $f_{\text{容}}$,可计算允冻深值 $Z_{\text{容}}$ 。 $Z_{\text{容}}$ 为计算冻深与始胀冻深之和。

$$Z_{容} = Z_{计} + Z_a = Z_{计容} + Z_a$$

冻深观测值 Z 系从路面起算，由表 1—8 可以看到，有些路段的始胀冻深小于路面总厚度，这是由于路面结构层本身存在冻胀的原故。我国民航经验指出，干土路堤无冻胀，冻前雨水和施工时含水量较大的填土，冻胀显著可见始胀冻深还与土基的干湿状况直接有关。如果不考虑地区差别，并设路面材料本身无冻胀时，路面总厚度与始胀冻深间的路面材料冻胀量可以通过两种不同材料的关系如图 1—5。此图根据表 1—8 (甲) 和 表 1—8 (乙) 资料绘制，虚线表大致走向，分析所用 Z_a 值，即依此线造定。

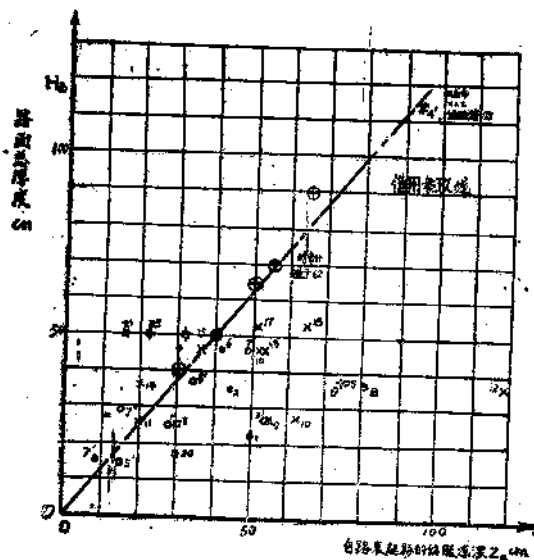


图 1-5 Z_a, H_b 是试验点示意图
(⊙ 本文表 2-9 值同点位)

各试验路的 Q 和 η 等参数列如表 1—9，表中 Q 为平均值， η 为最大值的平均（附录表 2）。值得注意的是，冻胀率 Q 的变化，与土基类型路面类型等有着明显的相关性，这为以后进一步利用此值提供了可能性。在 η 值的正理中，数值波动幅度较大，其极大值与平均值之间的比值可达 5 倍，因为目前数据有限，对它认识还不清楚，故在表中取用平均最大值，以保安全。

表中 η 值按基层类型平均，整体性 0.67 非整体性约与苏联初期所用 1—0.60 接近〔7、8〕，但较后来建议的 0.4〔13〕和 0.35〔32〕为大〔7、8、13、32〕。今后计算中对正体性基层和对非正体性基层拟用 0.7，暂不再细分。

整理资料中，我们还引进一个冻胀系数 $K_{冻}$ ， $K_{冻}$ 是冻胀 ξ 与 $Z_{计bc}$ 的比值，它于胀冻

观测路段始胀冻深 Z_a 与路面结构关系表 表1—8(甲)

土基干湿	基层类别	路面结构及厚度				总厚度 H (厘米)	始胀冻深 (自路表面 算起厘米)	线路名	备注
		面 层	基 层	垫 层	其 他				
中湿	整体性	表2.5	砖灰土	20		22.5	50	长岭 IV	
		表2.5	灰渣土	25		27.5	54	II	
		表2.5	灰土	25		27.5	44	IV	
		贯6	灰渣土	40		46	30	长春大街 II	
		贯6	石灰土	32		38	76	长农 II	
		贯6	灰土	40		46	49	长春大街②	
		贯6	灰渣土	40		46	42	③	
	▲	泥结6	灰土	32		38	80	长农 III	
	非整体 ×	表2.5	块石	25		27.5	55	长岭 I	
		表2.5	碎料	25		27.5	62	长岭 II	
		贯6	块石	20		26	20	杭州路	
		贯6	块石	32		38	118	长农 I	
		贯6	块石	40		46	53	人民广场	
		贯6	块石	35		41	22	长春大街 III	
		贯6	块炉	40		46	36	长春大街④	
		贯6	块粒	40		46	52.5	⑤	
		贯6	块炉	沙		51	53	吉林大路⑦	
		表2.5	泥结	沙		53	65	长农 V	
		泥结30	碎石			38	74		
潮湿	正体性	贯6	石灰土	12		18	30	东盛四条	
		贯5		15		50	16	琿春街 II	
		贯8		25		23		口前 II	
		泥结				33		口前 III	
	非整体	贯5	块石	45		50	32	琿春街 III	
		贯5	混沙石	45		50	22	I	
		贯8	块石	42		50		口前 VI	
		泥结				50		口前	

北方其他各省试验路路面结构与膨胀冻深 Z_a 关系初步统计表

表1—8(乙)

地名及路线名	路面结构材料及厚度	总厚度 H (厘米)		土基干湿类	资料来源	资料来源
		始胀冻深 Z_a (厘米)	土基干湿类			
辽宁省大石桥试验路	表处石灰土	26	27	粉轻亚粘土, I	查自图1—3	“利用冻胀高度推求路基冻期湿度” 1964辽宁省交研所喻纯多
哈尔滨市甘道街试验路	沥青混凝土手摆块石灰土类	72	55	粉亚粘土, I	查自图7、图8平均而得	[33] 1964, 10哈尔滨市市政建设技术研究所
黑龙江省昌五试验路	沙土磨耗层(4)石灰土	26	27	亚粘土 I	查自图32	[30] 1965, 12, 黑龙江省交通科研所
哈尔滨×××试验路	粘土, 加周土	120	90	黑土 I 米下黄土 I	直接测定	×××××试验路1975—76冻胀观测记录
北京市×××大街	沥青混凝土 I7	17	15	亚粘土 I	由附图2、图3估计	“第卅六号”调查报报附图(1955—1956)、1958, 1北京市政设计院
包头市建设路	水泥混凝土(18)块石(20)	38	35	粉砂、亚砂土	由图5, 图6 a和图—10 a综合	“建设路翻浆观测研究” 1963, 11包头市城建局勘测设计室
张掖试验路	表处, 灰土(8—15)砾石(8—15)	16 30	9 25	沙砾土粉亚粘	按附件图5 a图5b及表1整理而得	“张掖观测站观测工作报告”及附图, 1962—1964年道路翻浆学术会议论文, 甘肃省交通厅基建处, 张掖公路总段刘希杰程懋方

各 试 验 路 段 Q 和 η 值 汇 总 表

表 1—9

土基干湿	路 面		基 层		路面厚度 H (厘米)	冻胀率 Q (%)	不均匀冻胀比 $\eta = \frac{f}{\xi}$	线 路 段 号	备 注
	黑白	种类 厚度	正体和 非正体	材料 厚度					
中湿	黑	表2.5	正体	灰渣土	22.5	4.27	0.63	长 岭 IV	Q平均4.08
		"		灰渣土	27.5	4.64	0.90	长 岭 III	η 平均0.67
		"		石灰土	27.5	3.16	0.48	长 岭 VII	
		贯6		灰渣土	46		0.78	吉林长春 大街 III	
		"		石灰土	38	4.23	0.55	长 农 II	
	白	泥结		石灰土	38			长 农 III	
	黑	表2.5	非正体	块石	27.5	4.14	0.76	长 岭 I	Q平均4.22
		"		砾料	27.5	4.18	0.43	长 岭 II	η 平均0.75
		贯6		块石	26			杭 洲 路	
		"		块石	38	4.57	0.88	长 农 I	
		"		块石	46		0.86	人民广场	
		"		块石	41		0.89	吉林长春 大街 I	
		表3.0		泥结	53	7.74	0.65	长 农 V	
	白	泥结		块石	38	12.72		长 农 IV	
潮湿	黑	贯6	正体	石灰土	18			东盛四条	
		贯5		石灰土	50	8.04		琿春街 II	
		贯8		石灰土	33			口 前 II	
	白	泥结		石灰土	33	18.35		口 前 III	
	黑	贯5	非正体	块石	50	8.93		琿春街 II	
		"		石沙	50	6.96		琿春街 I	
		"		块石	50	18.35		口 前 IV	
	白	泥结		块石	50			口 前 I	