

# 关于森林地带土冻结深度计算方法的研究<sup>1</sup>

艾 军 刘保仲 张海涛 龚 丽

(东北林业大学土木工程系, 哈尔滨 150040)

**提 要** 由于森林地带植被特征、地面特性等因素差异的影响,使土冻结深度计算成为较复杂的问题,通过在小兴安岭的凉水自然保护区所建立的32个观测点,历经两年的实验研究,摸索出采用换算导热系数及等值土冻结深度的计算方法,与实测值验证表明,是解决设计森林地带的土木结构物基础埋置深度的一种途径。

**关键词** 森林地带 土冻结深度

在工程结构物设计中,土的冻结深度对正确决定结构物基础埋置深度问题十分重要,稍有疏漏,将使结构物遭受冻害。森林区域由于植被特征、地面特性的差别,特别是不同森林地带的小地形区的影响作用,使其土的冻结深度计算较为复杂,在当前普遍使用的负温积值的计算公式时,如何考虑森林地带一些特殊条件的影响,这便是本文探讨的目的。

为此在小兴安岭的凉水自然保护区,进行了历时两年(1990年10月至1992年11月)的实验观测研究。凉水自然保护区(原东北林业学院自然保护区基础资料)是东北林业大学教学、科研的重要基地之一,位于 $128^{\circ}53'20''E$ ,  $47^{\circ}10'15''N$ ,居于小兴安岭南部达里带岭支脉的东坡。境内森林类型多样,是我国现有保存的较大片原始红松林地之一,也有次生林及人工林,林分类型为草甸、塔头、云冷杉林、冷杉林、白桦林、杂木林、落叶松林、椴树红松林等。区内地形有谷地、塔头沼泽、阶地、山麓、山脊,其坡向有阳坡、阴坡、半阳坡、半阴坡之分。

实验观测研究就是着眼于充分利用自然保护区的自然条件、科研试验条件,本着地区性的气候是控制土冻融历时进程的前提条件,及不同地段的自然地理条件与其林分类型的差异等因素构成的组合的原则,探求计算土的冻结深度方法。

## 1 观测点的布设及观测方法

为充分反映植被特征,于不同地形处设置了24个观测点。无林地的场区公路及房屋建筑物,考虑朝向影响作用,设置了8个观测点。有关32个观测点布置具体情况,

<sup>1</sup> 本文于1994年1月27日收到,6月14日改回。

见表1所示。

为保证准确观测上的冻融历时变化关系,针对一些测点地下水位较高,易发生测管

表1 各观测区状况

Table 1 Fundamental conditions in the observation areas

测区	测点	所在林班	林分类型	森林类型	郁闭度	L-层厚度	地形
I	1	19	草甸			40	谷地
	2	19	草甸				谷地
	3	19	草甸				谷地
II	4	19	塔头				塔头沼泽
	5	19	塔头				塔头沼泽
	6	19	塔头				塔头沼泽
III	7	18	草甸				场内公路
	8	13	草甸				场内公路
	9	18	草甸				场内公路
	10	13	草甸				场内公路
IV	11	13	云冷杉林	原始林	0.7		二级阶地
	12	13	云冷杉林	原始林	0.6		一级阶地
	13	13	云冷杉林	原始林	0.6		一级阶地
V	14	13	冷杉林	原始林	0.7		二级阶地
	15	13	冷杉林	原始林	0.7		一级阶地
	16	13	冷杉林	原始林	0.7		一级阶地
VI	17	19	白桦	次生林	0.8		山麓
	18	19	白桦	次生林	0.9		半阳坡
	19	19	白桦	次生林	0.8		半阳坡
VII	20	19	落叶松	人工林	1.0		半阴坡
	21	19	杂木林	原始林人工林	1.0		半阴坡
	22	19	杂木林	原始林	1.0		山坡
VIII	23	19	椴树红松林	原始林	0.7		山坡
	24	19	椴树红松林	原始林	0.8		山坡
	25	16	椴树红松林	原始林	0.7		山坡
	26	16	椴树红松林	原始林	0.7		山脊
	27	16	椴树红松林	原始林	0.8		阴坡
	28	16	椴树红松林	原始林	0.9		阴坡
IX	29	19	场区旷地	无林地			办公楼南向
	30	19	场区旷地	无林地			办公楼西向
	31	19	场区旷地	无林地			办公楼西向
	32	19	场区旷地	无林地			办公楼北向

冻裂, 以及为保证地温的测定精度, 采取了双重管式测试装置, 外套管内径 5 cm, 为—端尖形封闭(方便打入地中)的无缝钢管, 管长 210 cm, 内套管内径 2.54 cm, —端封闭的玻璃钢管, 中间装有固定在尺板上, 内有冻融试剂的硬塑透明管, 尺板上、下附装地温计, 其测试装置如图 1 所示。

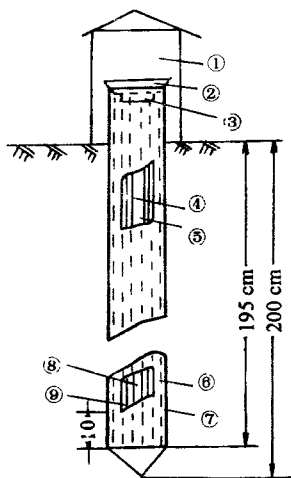


图 1 冻深测试装置图

1.防护罩; 2.橡胶塞; 3.硬塑料; 4.尺板; 5.Pink 试剂; 6.内管; 7.外套管; 8.硬塑透明管; 9.温度计

Fig 1 An installation diagram of frost depth observation

观测时间为每月每隔 5 日进行观测, 按记录表格要求项目(如气温、阴晴、雪深、地温、冻融深度等), 填好观测数据。

## 2 观测结果与分析

1990 年 10 月至 1991 年 11 月观测年中, 月平均气温最低值发生在 1 月, 其温度为  $-23.2^{\circ}\text{C}$ , 10 月下旬开始冻结, 于翌年 4 月上旬开始融化, 7 月上旬融化基本完毕。1991 年 11 月至 1992 年 11 月观测年中, 月平均气温最低值发生在 12 月, 温度为  $-23.1^{\circ}\text{C}$ , 10 月下旬开始冻结, 翌年 3 月中旬开始融化, 至 6 月中旬基本融毕。

观测年旬平均气温变化 (图 2), 不同观测区的土冻融历时变化与气温、林内温度、雪盖等因素关系, 以 1990—1991 观测年的第 IV、V、VI、VII、VIII 观测区为例, 如图 3 所示。各测区冻结深度见表 2。

最大冻结深度, 不出现在最冷月, 一般滞后 3—4 旬, 例如, 1990—1991 年 1 月中旬为最冷时间, 旬均温度为  $-25.6^{\circ}\text{C}$ , 视观测区而异, 其冻结速率为 75—90%。

第一观测年月均负温积值为  $-76.7^{\circ}\text{C}$ , 月均林内负温积值为  $-68.3^{\circ}\text{C}$ ; 第二观测年月均负温积值为  $-65.0^{\circ}\text{C}$ , 月均林内(1.5 m 层处)负温积值为  $-62.05^{\circ}\text{C}$ 。

依据观测区具体条件, 对雪盖来讲, 隔热保温为主导地位作用, 由 1991 年 12 月上旬至 1992 年 2 月中旬所测自然积雪平均厚度的表层与底层温差值如表 3 所示。

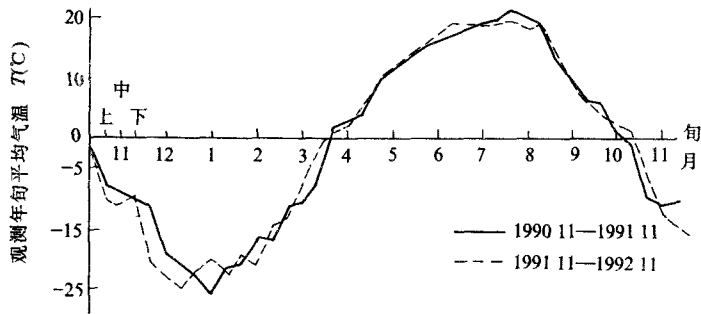


图 2 年旬均气温变化

Fig 2 Ten-days average air temperature during the year

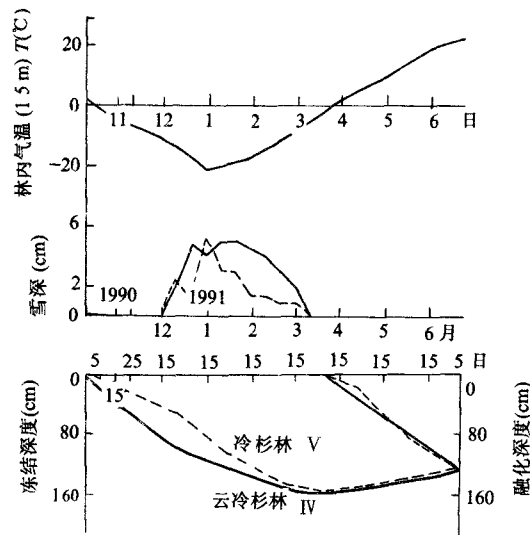


图 3 冻融深度历时变化

Fig 3 Frost and thaw depths changing with time

表 2 1990—1992 观测年度土的冻结深度(cm)

Table 2 Soil frost depth (cm) observed during 1990—1992

观测区	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
空矿地			场内林道						房屋
林分类型				云冷杉林	冷杉林	白桦林	落叶松林	椴树红松林	
冻结深度	172 (152)	138 (133)	190 (172)	155 (138)	152 (136)	半阴坡 184 (150) 半阳坡 158 (124)	160 (140)	山阳坡 146(130) 山脊 184(170) 山阴坡 187(176)	南向 172(168) 西向 189(182) 北向 190(187)

注 括号内数字为 1991—1992 年观测值。

表 3 雪盖温差值

Table 3 Temperature differences due to snow cover

地 带	自然积雪深度 (cm)	温 度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
空 旷 地	8	1.5—2.5
	15	2.0—4.0
白桦林地	8	2.0—3.0
	15	3.0—5.0
云冷杉林地	8	1.0—2.0
	15	2.5—4.5
落叶松林地	8	2.0—3.0
	15	3.0—4.0
椴树红松林地	8	1.0—2.0
	15	2.0—4.0

观测区 II 的干松塔头草保温作用较为明显, 1990 年 11 月至 1991 年 2 月实测 11—17 cm, 厚塔头草其表层与底层平均温差值为 0.6—1.1 $^{\circ}\text{C}$ 。

地形通过坡度、坡向(或朝向)表现明显, 具体体现在观测区 IV、VI 及 VIII 与 IV 中, 图 4 表示了原始椴树红松林的观测点冻深数值, 以第一观测年为例, 山阳坡为 146

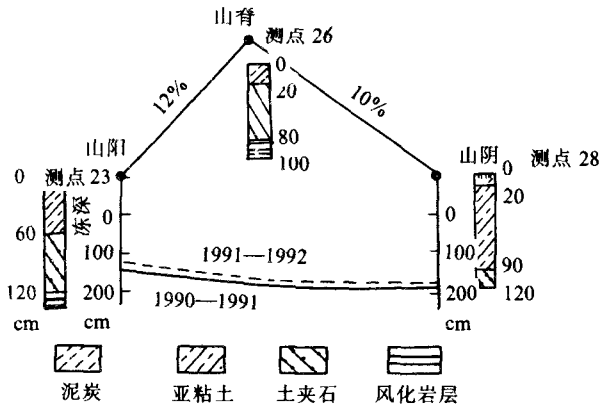


图 4 坡向与冻深关系

Fig 4 Relationship between exposure and frost depth

cm, 山脊处为 184 cm, 山阴坡为 187 cm。

### 3 土的冻结深度计算与实测值的比较

有关土的冻结深度计算, 除主要的气温条件外, 地质地理、水文地质、地面覆盖等条件的差异均会引起同一地区, 不同地段冻结深度的变化。冻结期间, 人气负温积值、土的导热系数和密度增大及含水量减少, 会加大冻结深度, 与此相反, 地下水、雪盖、植被及枯枝落叶层等因素影响, 又会导致冻结深度的减小。

现时多应用根据土的冻结深度与当地气温而建立的相关表达式, 即

$$h_j = \alpha \sqrt{\sum T + b} - c$$

式中:  $h_j$  为标准冻结深度;  $\sum T$  为冻结期间月平均负温积值(计算时采用绝对值);  $\alpha$  为小于 1 的系数;  $b, c$  均为常数。

在应用建筑地基基础设计规范 GBJ(7-89)推荐公式

$$h = 0.28 \sqrt{\sum T + 7} - 0.5(\text{m})$$

对各观测区冻结深度计算时, 有关因素作如下考虑: 1) 空旷地, 冻结期间的白桦林及落叶松林, 采用大气负温积值。云冷杉林、冷杉林、红松林采用林内负温积值; 2) 对雪盖、枯枝落叶层(L-层)的影响作用, 通过导热系数(中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1978)的换算关系, 视为等值的土冻结深度; 3) 对观测区的岩土层, 采用不同土层导热系数加权平均值, 视为匀质土层的导热系数。

各观测区土质剖面图, 有关导热系数的换算关系, 积雪与 L-层换算等值的 L 冻结深度, 以 1990—1991 年观测年为例, 如图 5, 表 4 和表 5 所示。

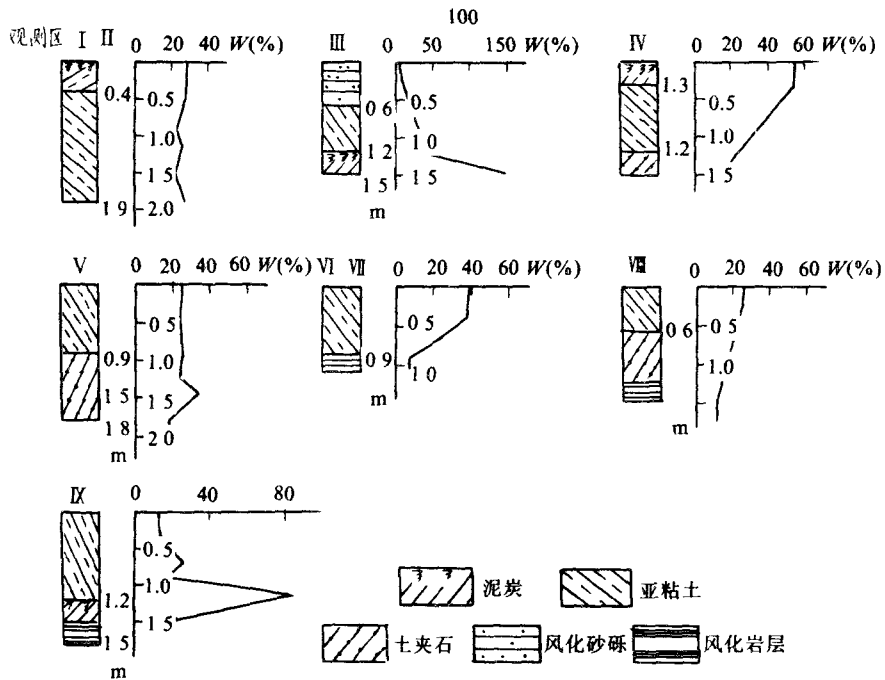


图 5 各测区土质剖面图

Fig 5 Soil sections in the observation areas

由计算而得到的冻结深度, 应为理论公式计算值  $h_j$ , 减去  $h_{CM} + h_{LM}$  之值, 即  $H_j = h_j - h_{CM} - h_{LM}$ ,  $H_j$  计算结果如表 6。冻结深度计算值与实测值的比较如表 7 所示。

关于土冻结深度, 对常青的针叶树种, 应用林内负温积值进行计算, 对非匀质土的岩土层采用换算匀质土的导热系数, 而将雪盖与 L-层的影响, 换算成等值的土冻结深

表 4 等值导热系数计算

Table 4 Calculation of equivalent thermal conductivities

岩石换算等值导热系数 $\lambda_{CM}$							
观测区	土名称	土容重 ( $kN/m^3$ )	含水量 (%)	导热系数 $\lambda_M$ ( $W/(C \cdot m \cdot s)$ )	厚度 (cm)	等值导热系数 $\lambda_{CM}$ ( $J/(C \cdot cm \cdot s)$ )	备注
I (II)	草炭	6 768	20.12	$1.38 \times 10^{-3}$	40	$5.23 \times 10^{-3}$	$\lambda_{CM}$ 系加权平均值。 $\lambda_M$ 、 $\lambda_{CM}$ 均指冻结土的导热系数。
	亚粘土	12 635	24	$6.53 \times 10^{-3}$	140		
III	风化砂砾	15 401	11	$7.95 \times 10^{-3}$	60	$7.70 \times 10^{-3}$	
	亚粘土	13 439	28.5	$11.05 \times 10^{-3}$	60		
	草炭	5 003	152.88	$5.65 \times 10^{-3}$	30		
IV	草炭	6 180	55.07	$2.89 \times 10^{-3}$	10	$6.32 \times 10^{-3}$	
	亚粘土	13 537	25.2	$6.53 \times 10^{-3}$	110		
	土夹石	13 243	20	$6.78 \times 10^{-3}$	30		
V	亚粘土	13 439	26	$6.62 \times 10^{-3}$	90	$6.70 \times 10^{-3}$	
	土夹石	15 303	18	$6.78 \times 10^{-3}$	90		
VI VII(半阳坡)	亚粘土	13 341	31	$9.00 \times 10^{-3}$	30	$7.58 \times 10^{-3}$	
	风化岩层	16 578	7	$6.91 \times 10^{-3}$	60		
VIII(山阳坡)	亚粘土	13 537	25.2	$6.53 \times 10^{-3}$	60	$6.53 \times 10^{-3}$	
	土夹石	15 401	16	$6.53 \times 10^{-3}$	60		
IX(西向)	亚粘土	13 537	25	$6.53 \times 10^{-3}$	120	$6.70 \times 10^{-3}$	
	草炭	6 180	83.33	$5.95 \times 10^{-3}$	30		
	风化岩层	16 578	8.84	$7.83 \times 10^{-3}$	40		

表 5 自然积雪( $h_c$ )与 L-层( $h_L$ )等值土冻结深度Table 5 Equivalent soil frost depths for snow cover ( $h_c$ ) and L-layer ( $h_L$ )

测区	$h_c$ (cm)	$\frac{\lambda_{CM}}{\lambda} h_c$ (cm)	$h_L$ (cm)	$\frac{\lambda_{CM}}{\lambda_L} h_L$ (cm)	$h_{CM} + h_{LM}$
I	6.5	13 206	4.0	10 300	23 506
II	6.0	12 190	19.0	48 640	60 830
III	6.0	17 523			17 523
IV	5.0	11 954	5.5	16 710	28 664
V	5.0	12 698	6.0	19 316	32 014
VI	7.0	20 111	6.0	21 850	41 061
VII	7.5	21 547	7.0	28 679	50 226
VIII	5.0	12 380	6.0	18 872	31 252
IX	6.0	15 238			15 238

注: 积雪导热系数  $\lambda = 26.38 \times 10^{-4} \text{J}/(\text{C} \cdot \text{cm} \cdot \text{s})$ , L-层导热系数  $\lambda_L = 20.81 \times 10^{-4} \text{J}/(\text{C} \cdot \text{cm} \cdot \text{s})$ ,  $h_c$  为自然积雪厚度,  $h_L$  为 L-层厚度。

表 6 冻结深度(cm)的计算值

Table 6 Calculation of frost depth

测区	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
$h_j$	206 10	206 10	206 10	192 97	192 97	206 10	206 10	192 97	206 10
$h_{CM}$	13 206	12 190	17 523	11 984	12 698	20 111	21 547	12 380	15 238
$h_{LM}$	10 300	48 640		16 710	19 316	21 850	28 679	18 872	
$H_j = h_j - h_{CM} - h_{LM}$	182 594	145 27	188 577	164 846	160 956	164 14	155 874	161 718	190 802

表 7 冻深计算值与实测值比较

Table 7 Calculated frost depths compared with observations

测区	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
计算值 $H_j$ (cm)	182 594	145 27	188 577	164 846	160 956	164 14	155 874	161 718	190 862
实测值 $H_c$ (cm)	172 0	138 0	190 0	155 0	152 0	158 0	160 0	146 0	184 0
误差 (%)	5.8	5.07	0.75	5.97	5.56	3.70	2.64	9.71	3.58

注: 误差小于 5% 占 4 个测区, 其余 5 个测区误差值在 5—10% 内。

度的方法是切实可行的, 有助于正确设计森林地带结构物的基础埋置深度, 其关键是在于把握实验数据的精度。该计算方法适用于北方林区的季节冻土地带。

## 参 考 文 献

中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1978 冻土 北京 科学出版社



## The Study of Calculation Method of Soil Frost Depth in the Forest Zone

Ai Jun, Liu Baozhong, Zhang Haitao and Gong Li  
(Civil Engineering Department, Northeast Forestry University, 150040)

### Abstract

In different forest areas it becomes a complicated problem about the calculation of soil frost depth under the influence of green covering and ground characteristics. 32 observation points set up in Liangshui Protection Area, Xiao Xinggan Mountains, have been studied for 2 years. We put forward a calculation method by converting thermal conductivity and converting equivalent frost depth. Verification by observation shows that it is a way to determine the buried depth of a foundation in the forest zone.

**Key word:** Forest zone, soil frost depth