

土的冻胀对建筑物基础的作用

Б. И. 达尔马托夫 著

建筑工程出版社

前 言

本書是在作者科学指导下，多年来进行的實驗室及野外实验研究成果的簡述；同时也是在上述研究的基础上，由作者所完成的理論概述，它被用来研究基础隆脹稳定的計算方法。

在实验研究中列宁格勒建筑工程学院土工實驗室、苏联科学院伊加尔卡冰冻科学研究所 (ИНИМС)、苏联商路总局阿尔齐克設計院北方勘测設計队 (СПИЗ)、契列波維茨冶金工厂 (ЧМЗ) 及列宁格勒工业建筑設計院的工作人員进行了創造性的协作。作者对于他們全体致以衷心的謝意。

作者也对 В. А. 奥勃魯契夫冰冻科学研究所的工作人員致以深切的謝意；特别是对于苏联科学院通訊院士 Н. А. 崔托維奇在研究过程中所作的批評性意見及建議致以深切的謝意。

作 者

目 录

前 言

第一节	緒 論	1
第二节	土的冻结	4
第三节	連成一片的活动层中冻结深度的預測	8
第四节	所得关系与观察結果的比較	11
第五节	土冻脹的观察結果	13
第六节	关于水份轉移条件的几点意見	15
第七节	冻脹有效区域厚度估計条件的探討	19
第八节	土与基础材料冻结阻力的研究	26
第九节	多年冻土条件下隆脹力的研究	29
第十节	在土的季节冻结条件下冻脹切力的研究	36
第十一节	基础的隆脹計算	45
第十二节	計算数值的結果与試驗資料的比較	48
第十三节	增加基础对隆脹稳定性的措施	51
第十四节	結 論	55

第一节 緒 論

建筑工作者早已知道：由于基础下土的冻结而引起土的冻胀，会因冻胀力而使这些基础抬高。因为这种力量相当大，所以在冻胀土中基础底面通常比冰冻深度为低。但是在许多情况下，这种做法并不能避免土冻胀对于基础的影响。

冻结时土通常与基础体一起冻结。冻胀多半要伴随着冰冻区内土体积的增大，此时增加的压力可以分解为两个方向：与基础侧面垂直的及切向的。在基础周围土冻胀均匀发展的情况下，压力的垂直分量在每一水平面上导致砌体受压。

向上的压力切向分量（切向冻胀力）合成一个隆起的力量。假如这个沿基础侧面的力超过了传递给地基的荷载数值，那末基础将同上部结构一起依冻胀的加剧而向上移动。

在不均匀的升高时，轻型建筑物和低层房屋显著变形。这样，甚至当基础深度低于冻结深度时，都使其正常使用发生困难。这种变形是建筑者很熟悉的。

为了说明起见，在图1、2及3中引用了木桥，不采暖仓库及上水道检查井的变形情况。

切向冻胀力引起的建筑物变形，首先在强烈季节冻结区及多

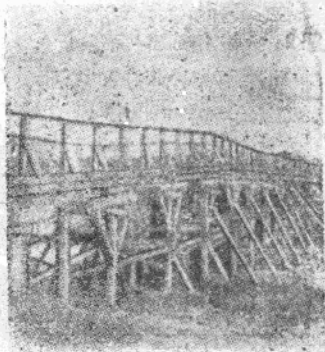


图1 在多年冻土情况下由于冻胀力作用的桥变形

年冻土区（永冻土）^①見到。

考虑到苏联北部和东部地区建筑工程量的不断增长，必須研究出在冻脹性土上建造建筑物的一些方法，以便在最少投資下保証其强度、稳定及耐久性。

最近建筑工作者解决的这个問題，多半是仅应用于多年冻土

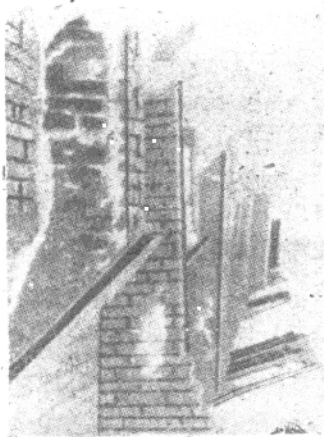


圖2 列宁格勒省某不采暖倉庫
內牆的傾斜（防火牆突出部分
保持垂直位置）

分佈区域的結構物的建筑。在这种情况下，基础的稳定是由于基础嵌固于土的冻结层中而保証的，或者是采取能减少切向冻脹力的特殊方法。

在季节冻结区域，直到最近切向冻脹力的影响通常是不考虑的。因此輕型建筑物常常遭受变形，不仅使其使用条件变坏，有时还导致破坏。由于这种情况就出现了各种减少切向冻脹力的建議（采用不冻的回填料、涂料及其他措施）。

近30年来許多学者——Н·А·崔托維奇（Цытович）、Н·И·薩尔蒂科夫（Салтыков）、М·Н·戈尔德什騰（Гольдштейн）及П·Е·阿帕克（Апак）作了很多工作来研究計算基础隆脹的方法。М·Н·戈尔德什騰[1]批判地研究了前人研究出来的方法之后，采用了Н·А·崔托維奇的計算方案。

① 通常將那些在數百年或數千年的長時期中，在自然埋藏条件下处于冻结状态的土，称为多年冻土。此处应說明，多年冻土层是某些区域性条件：气候、地形、地下水与地面水、植物及其他自然因素长期作用的结果。

在进行了广泛研究的基础上，他建議应根据土与基础材料冻结的持久强度值来决定冻胀力，他認為必須將此持久强度減少一半，因为土不断地滑过基础的側面。按此法計算时，隆胀力值要比实际作用的力大得多。因此，M·H·戈尔德什騰补充建議：应当考虑好象是在土的冻结层与基础間形成的裂縫。

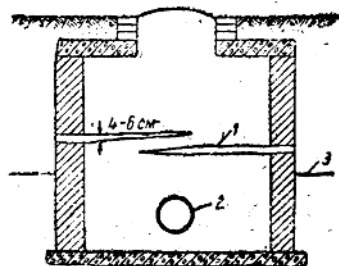


圖3 契列波維茨上水道檢查井中的水平裂縫：

1—裂縫；2—管道；3—冻结面

如我們的研究所表明：上述裂縫在土的冻结过程中实际上是不会形成的。所以按M·H·戈尔德什騰建議的計算方法，使隆胀力得到較高的数值。

由于用現存的計算方法求隆胀力的結果不能令人滿意，就有必要为此而采用近似計算法。就这样，H·A·崔托維奇[2]建議以很大的近似性来求隆胀力，其出发点是：土与基础間的相互作用力等于土与基础材料的临时冻结强度的5%。按照规范隆胀力可近似地取为100~250公斤/每公分基础周長。

显然，这类粗糙的計算方法根本不可能可靠地反映出当土在冻胀时基础側面实际作用的力。

为了正确求得作用于基础的隆胀力的大小，以及适合于采取那些措施来減少这种力量，就必须知道这些力的发展規律。因此六年来在秋冬时期进行了一些綜合的实驗研究，以了解土在冻结过程中的冻胀性質，切向冻胀力沿基础側面的分佈，这种力与湿度，含水量及土性質的关系，以及減少隆胀力的可能性等。

这些广泛的研究不可能在本書极其有限的篇幅中加以闡述，

所以下面只引述一些最具有代表性的，主要是在野外进行的实验结果。此外，書中还簡短地阐述了一些理论研究，作为我們所建議的基础隆脹計算方法的依据。

最后引述已由野外試驗所証实的增強基础对隆脹的穩定性的建議。

第二节 土的冻結

由于冻土的力学性質特征依其溫度而定，所以切向冻脹力的增長在頗大的程度上取决于土的冻結过程和基础附近的溫度場。

在伊加尔卡冰冻科学研究所和契列波維茨冶金工厂的場地上研究了实验基础附近冻結深度范围内的溫度場。观测时采用了大量的多点温差电偶和电阻溫度計，它們是利用放置在实验基础上的測力器电磁線圈作成。

按照这些观测的结果作出了一些图表（图4），表明冻土溫度与所观测层的深度成直線关系。从所得到的資料得出，已冻土在深度 z 处的溫度可以表达如下：

$$\theta_z = \theta \left(1 - \frac{z}{h} \right) + \theta_{\text{зам}}. \quad (1)$$

式中 θ_z —— 深度 z 处土的溫度；

θ —— 土表面溫度与其冻結溫度之差；

$\theta_{\text{зам}}$ —— 土的冻結溫度；

h —— 冻結深度。

土在冻結层范围内的溫度按直線分佈，这与通常計算冻結深度时所采用的假設相一致[3]。

观测不同深度上土的溫度，就能定出土中 0° 等溫線随時間的位移。值得提出的是伊加尔卡冰冻科学研究所場地上輕亞粘土

及中亚粘土和契列波茨冶金工厂厂区亚粘土的冻结深度实际上与 0° 等温线的位置相重合。显然，这种重合可以用土的含水量和结构性的提高来解释；这是土在自然条件下经过多次冻结和融化之后得到的。

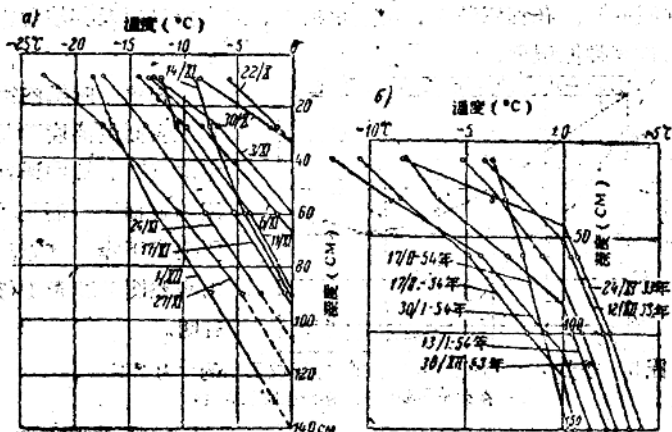


圖4 上层土在其冻结过程中温度的分佈

- a) — 在伊加尔卡冰冻科学研究所地上进行的試驗結果 (1952年)
- b) — 在契列波茨冶金工厂地上进行的試驗結果 (1953—1954年)

这就有可能根据对土中 0° 等温线位移观测的结果来确定冻结界限的下降特性。比較图 5 及图 6 就能确定：在与多年冻土层连成一片的活动层[●]（相連的活动层）范围内，冻结深度的增加近似地与自冻结开始时算起的时间成正比。在沒有多年冻土层时，土冻结深度随时间的增加按抛物线关系进行。由于这个区别，在有连成一片的活动层情况时，不能根据遵循抛物线规律的公式 [3] 来决定冻结深度。所以就有必要确定在有连成一片的活动层时土冻结的过程，它应与观测结果相一致。

● 在多年冻土分佈条件下，每年最大融化与冻结的层称为活动层。

由于这个原因，我們注意到：在苏联的北方地区，当可融化的活动层比較薄时，活动层的全部冻结通常可以在开始冰冻的头一两个月，也即在上半个冬季內完成。如根据观测資料，在伊加尔卡厚1.3~1.5公尺的活动层大約在兩个月的时期內全部冻结（图6）。在雅庫茨克、諾里爾斯克、迪克遜島以及其他北方地区也有类似現象。

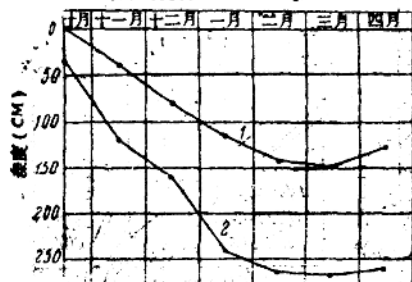


圖5 季节冻结条件下外表面 0° 等温線入土的平均深度
1—在列宁格勒；2—在伊尔庫茨克(14)

在这个时期內空气和土表面的温度不是恒定的（如計算中通常采用的那样），而是随時間逐步下降。这方面可由观察图7和表1得到証明。

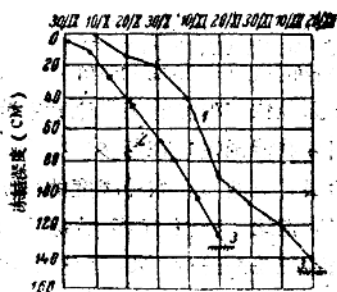


圖6 按C·C·符亞洛夫 (Валов) 資料，在變成一片的活動层的条件下在伊加尔卡冰凍科学研究所場地上外表土冻结的过程
1—在1951年；2—在1952年；3—多年冻土层的上限

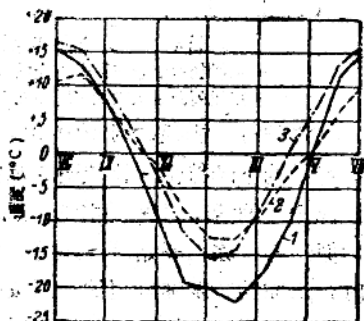


圖7 深度0.4公尺处土壤的平均温度
1—在雅庫茨克(15)；2—在斯科沃丁諾；3—在伊尔庫茨克(14)

凍結的前數月中空氣溫度的月平均下降①

表 1

觀 測 地 區	溫度下降 (度)			觀 測 者
	第一個月	第二個月	第三個月	
伊加爾卡	12.1	13.2	6.7	列昂齊耶娃
諾里爾斯克	9.2	11.1	10.4	蘇斯洛夫
阿納盧爾	8.7	9.7	6.4	什維佐夫
外貝加爾彼得羅夫斯克	9.0	11.8	7.1	韋爾德
鄂爾次克	11.4	8.3	0.8	"
黑龍江畔尼古拉耶夫斯克	10.0	10.1	3.3	"
雅庫茨克	14.7	20.7	13.7	"
根據雅庫茨克共和國的25個站	12.7	14.8	7.9	紹斯塔科維奇
根據鄂畢和叶尼塞北部的25個站	9.3	10.8	7.3	列昂齊耶娃

① 根據多年觀測結果編制

應注意，空氣溫度的月平均下降在個別情況下第二個月比第一個月為劇烈。但大多數情況，在凍結的头兩個月中空氣溫度的下降通常與時間成正比。土表面的溫度也相應地下降。因而，可以認為：

$$\theta = \beta t \quad (2)$$

式中 t ——從土表面發生負溫度時算起的时间，以小時計；
 β ——比例系数。

這樣，在多年凍土层分佈區的中部和北部地區，當有連成一片的活動層時，可以將土的表面溫度和凍結時間的關係當作直線。

現在讓我們根據H. A. 崔托維奇編制的凍土力學的基本原理[16]來研究溫度下降時土中水相組成的變化。

3. A. 涅爾謝索娃 (Нерсеова) 曾廣泛地研究過當溫度下降和升高時土中水相組成的變化。按她所獲得的結果 (圖 8)，

对亚粘土和亚砂土当一次近似时在负温度 ($-2^{\circ} \sim -14^{\circ}$) 范围内可以认为：土中未冻结的水的数量依直线规律变化。这个结论也为我们的试验（见图36）所证实。

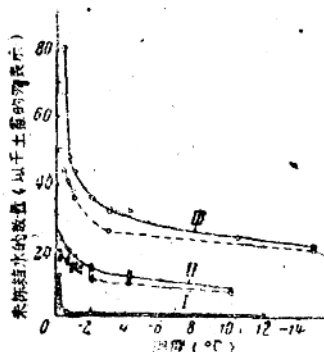


圖 8 未冻结水的含量与温度的关系

I—砂; II—复盖亚粘土;
III—侏罗纪粘土;
虚线—融化时; 实线—冻结时

将确定的直线关系推广至冻结温度在 -2° 以内的温度变化区也是适合的。这样就可以大致决定在土的始冻温度时处于未冻结状态的水的数量。

在北方地区当温度梯度大时，温度在 -2° 以上的冻土厚度约达10公分（见图4）。因而，从温度下降时未冻结水变化的直线关系出发，我们实际上将使一部分水的散发其冻结潜热的地点移向已冻层深处10公分以内。

由于粘土在天然条件下没有显明的冻结界限，而孔隙水及由下一层转移来的水分的冻结约在10~20公分厚的范围内发生，故上面关于未冻结水数量变化直线关系的假定不会反映到问题的近似解的结果上来。

第三节 连成一片的活动层中冻结深度的预测

有关决定土的冻结问题应当在研究岩石圈、土壤圈、大气圈系统中的热交换原理上加以解决。П. Ф. 什维佐夫 (Швецов) [4] 只考虑热循环的主要几项，导出了土壤最上一层热平衡的方

程式，但他認為，要解求它暫時還不可能。

因而現在只限于該問題的近似解。

前面提到過，土表面的溫度在凍結的头兩個月近似地與時間成比例變化。

為了得出近似解，參照觀察的結果，我們作了以下的假定：

- 1) 整個凍結深度的土是均質的；
- 2) 沒有來自下面的熱流；
- 3) 凍結線以下土的溫度等於始凍溫度；
- 4) 土已凍層的溫度為深度的一次函數；
- 5) 土中未凍結水的數量按直線

關係隨溫度下降而減少。

在這些假設下可以立出一個熱傳導的微分方程式。當土表面溫度隨時間而下降時，由土散發的熱量應當與通過土單位表面的熱量相等。考慮到公式(1)及圖(4)，在時間 t 及 $t+dt$ 內土已凍層中的溫度分佈可以認為與圖(9)相符。

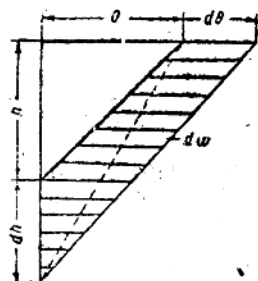


圖9 土溫度沿已凍層深度的分佈圖

在這種情況下

$$dw = \frac{1}{2} \theta dh + \frac{1}{2} h d\theta. \quad (8)$$

因為主要的熱量是在接近于凍結界線的一帶中散發的，按已知的假定可以認為：在時間 dt 內通過土單位表面將有下述熱量：

$$\frac{\lambda \theta}{h} = dt.$$

這個熱量由三部份組成：

- 1) 土單位體積內（考慮到轉移到凍結地點的平均含水量）

散发出的固化潜热 Qdh ;

2) 当温度下降到低于冻结温度时束缚水固化的潜热 $Q_1 d\omega$;

3) 具有热容量为 c_0 的土散发的热 $c_0 d\omega$ 。

引入关于土有效热容量 c 的概念是合理的,其中包括束缚水固化的潜热。

所以
$$c = c_0 + Q_1. \quad (4)$$

现在列出热传导方程式:

$$\frac{\lambda \theta}{h} \cdot dt = Qdh + cd\omega. \quad (5)$$

代入公式(2)及(3)中的 θ 及 $d\omega$ 值,得下一形式的微分方程式:

$$\frac{dh}{dt} + \frac{\beta c}{2Q + \beta ct} \times h = \frac{2\lambda \beta t}{2Q + \beta ct} \times \frac{1}{h}. \quad (6)$$

考虑起始及边界条件,积分后得:

$$h = \frac{2t}{2Q + \beta ct} \sqrt{\frac{\beta^2 \lambda ct}{3} + \beta \lambda Q}, \quad (7)$$

应当注意,通常

$$2Q \gg \beta ct \quad \text{且} \quad \beta \lambda Q \gg \frac{\beta^2 \lambda ct}{3}.$$

所以在解决与确定冻结进程有关的实际问题时,公式(7)可以写成这样:

$$h = t \sqrt{\frac{\beta \lambda}{Q}}, \quad (8)$$

或者
$$h = at \quad (9)$$

式中
$$a = \sqrt{\frac{\beta \lambda}{Q}} \quad (10)$$

这样，当連成一片的活动层在土表面溫度不断下降的条件下，可以近似地認為：冻结深度是時間的一次函数。

第四节 所得关系与观察結果的比較

为了决定野外条件下的冻结深度，考虑到土在过渡到冻结状态时其电阻显著增大的特性。为此，应用了經我們改良了的由膠木板構成的电气冰冻計，在每一个深度上通过膠木板向外等齐地引出一对鍍銀的銅端鈕接头（图10）。

这样的接头佈置与垂直的佈置不同，它能增大土在过渡到冻结状态时电阻变化的急剧性，因为在第二种情况下冻结界線区域内两个接头間的电流，仅部分地通过冻土，而另一部分通过未冻的土。当冻结界線逐步下降时，接头間的电阻改变得比較平穩。

測定成对接头間土的电阻是按图11所示的線路，用电流通过土而得。如此把开关接上0.5~1秒鐘，按伏特計讀数。有了这些讀数，应用公式

$$R_x = \frac{E}{v_x} R_0 - (R_0 + r), \quad (11)$$

即可求出外电路中土的欧姆电阻。

式中 E ——电源的电动势；

R_0 ——伏特計的电阻，以欧姆計；

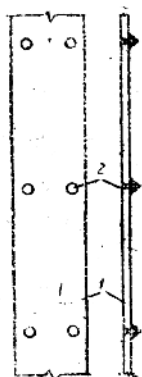


圖10 供电气冰冻計用的帶成对接头的膠木板

1—胶木； 2—接头

v_x ——当在線上接上电阻为 R_x 的电气冰冻計时，伏特計的讀数。

· 当在線路上接通两个事先已知的电阻时，就可以确定 R 和 r 值。

如观察所表明, 当测定冻结深度时, 更适合于用电气冰冻计来测定土的电阻变化指数

$$K_{\Omega} = \frac{v_0}{v_r} \quad (12)$$

式中 v_0 ——当伏特计与电池组极点相连接时的读数。

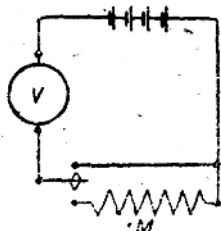


圖11 冰凍計 (M) 和伏特計 (V) 連接線路圖

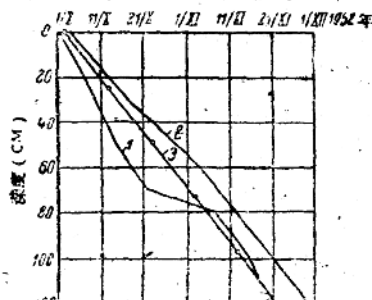


圖12 伊加尔卡城基础3附近凍結深度
的增加

1—按电气冰冻計；2—按电热偶；
3—按公式(9)

在未冻结状态, 当土的电阻不大时, $K_Q \approx 1$ 。当土冻结时 K_Q 显著增大而趋向无穷大。利用指数 K_Q , 可以消除因电池组电动势随时间变化而产生的错误。

、按照所述的方法测定了实验基础(图12)附近的土的冻结深度。在图上也繪出了零度等温线入土深度的观察结果以及按公式(9)的计算结果。

研究图12，可以看出：理論計算結果与观察資料符合。按热电偶观察結果的某些不符，也許可以这样解釋：即热电偶是放在与电气冰冻計相对的基础的另一側。

第五节 土冻脹的观察結果

不可能在这本簡短的書中敘述对土冻脹进行广泛观察的結果，讓我們根据这些观察作某些主要的結論。

1) 在季节冻结层和未連成一片的活动层（冻结层不与多年冻土层連成一片）时，冻脹性土的体积在整个冻结进行期間增大。

2) 当冻脹性土在連成一片的活动层及沒有地下水流的情况下，这一层可以分成两个部份：上层——主动冻脹层和下层——非主动冻脹层。伊加尔卡冰冻科学研究所場地上基础5附近的，在80公分深处放置的冻脹計的位移对此作了証实。当低于上述深度时，土冻结时的此位移等于零，虽然活动层的深度为120公分（图13）。由此得出，活动层的下面部份沒有受到冻脹。

3) 在由冻脹性土組成的連成一片的活动层冻结时，发现水份由其下面部份向上面部份——主动冻脹部份轉移。这就使活动层的下面部份脱水，因此失去了在冻结时的隆脹能力（图14），这現象也同样为多次含水量測定結果所得資料証实。

4) 实验基础附近土的冻脹在冻结进程初始時間內伴随着已冻层的急剧的撓曲。以后，除了土表面撓曲慢慢增長之外，发现正在冻脹的土沿着不动基础的側面明显的滑过。契列波維茨冶金工厂場地实验基础1附近土表面的变形可以作为明显的例子（图15）。这种变形在所有的实验基础处都可看出。

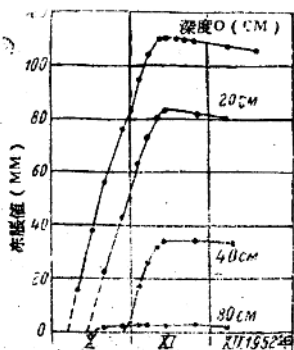


圖13 放在不同深度上的凍
眼計的垂直位移

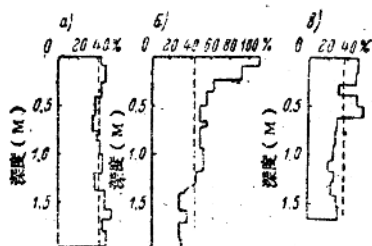


圖14 伊加爾卡冰原科學研究站場
地上土中含水量在凍結前(虛線)
及凍結後(實線)的分佈
a—基礎1附近的粉質重亞粘土
b—基礎3附近的粉質重亞砂土
c—基礎5附近的粉質輕亞粘土

5) 研究土在凍結前后水份的分佈表明, 在亞粘土及亞砂土中水份既向上也向鋼筋混凝土實驗基礎方向轉移。在木基礎時沒有發現水份的水平轉移。

6) 如果水平方向的滲透不大, 那末與水份向凍結前線轉移有關的土的凍脹就導致地下水位下降(圖16)。

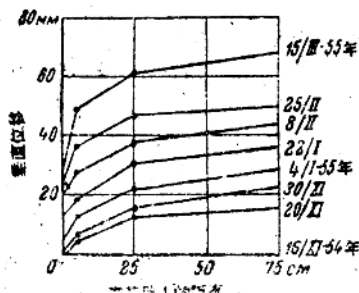


圖15 契列波維茨城一個實驗
基礎附近土壤表面的位移

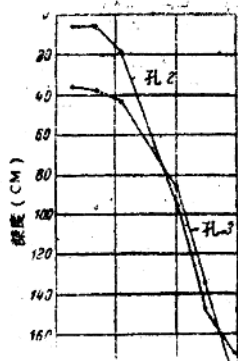


圖16 伊加爾卡城土凍結時地下水
位位置的变化