

## 对土冻结过程中若干冻胀力学问题的商榷(续)

刘 鸿 绪

(黑龙江省低温建筑科学研究所)

### 4 水平冻胀力中的几个问题

#### 20. 冻胀与冻缩

很多学者在讨论水平冻胀力时都认为,凡是冻胀性土在整个冬季都要冻结膨胀,产生水平冻胀力。水平冻胀力根据力的作用性质可分为平面水平冻胀力与垂直水平冻胀力两类,如图15所示。平面水平冻胀力的特点是,冻胀力的作用方向与冻结平面平行;

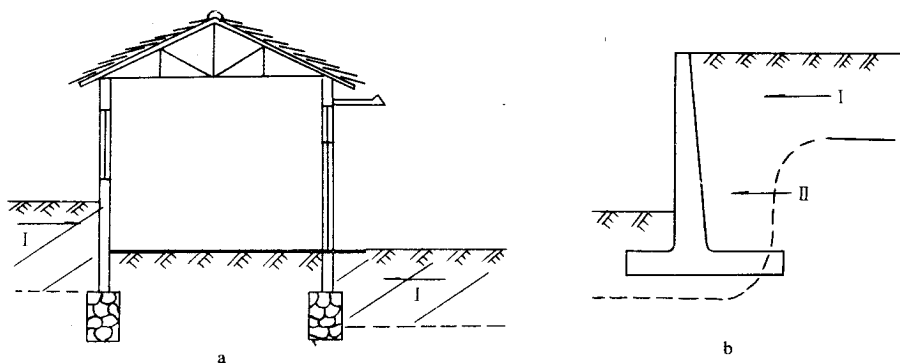


图 15 水平冻胀力

a) 房屋地基; b) 支挡结构; I 为上部水平冻胀力; II 为下部水平冻胀力

Fig.15 Horizontal frost-heaving force

而垂直水平冻胀力其力作用方向与冻结平面垂直。苏联学者 В.И.达尔马托夫、В.О.奥尔洛夫和 Н.А.别列特鲁辛等先后做过野外测试,得出平面水平冻胀压力为 0.064—0.066MPa,最高可过 0.2—0.3MPa (Перетрухин Н.А.,1967; Орлов В.О.,1977),见图 16。

在讨论寒区地裂缝时不少学者根据物体的热胀冷缩性质认为,所有地基土在土温下降到某一温度值后即产生裂缝。温度降低,土体收缩,内部产生温度应力。该应力是张力(拉应力),对均质各向同性无限大面积的冻结层在均匀气温下,收缩应力也是各个

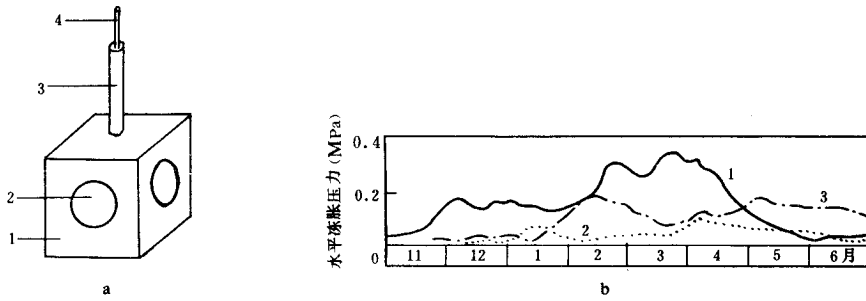


图 16 上部水平冻胀力

a) 上部水平冻胀力测量装置: 1. 混凝土块; 2. 钢弦式压力盒; 3. 套管; 4. 引出线;

b) 1959—1960 年上部水平冻胀应力观测结果: 1. 深度 0.6 m; 2. 深度 1.2 m; 3. 深度 1.8 m

Fig.16 The upper horizontal frost-heaving force

方向相等的, 当拉应力增长到一定数值, 其拉伸变形达到极值后, 出现裂缝, 并随着土温的继续降低而扩展。平面水平冻胀应力是压应力, 而温降收缩应力是拉应力, 它们不相容, 冻层中二者不能同时存在。

冻结敏感性土当含水量超过起始冻胀含水量之后, 其土温降至起始冻结温度之下时开始冻胀, 过了剧烈相变区后随着温度的继续降低, 其冻胀率越来越小直至零, 而温降的收缩则贯穿始终, 当冻胀率降到足够小时, 冷缩现象就体现出来。土壤从冻结膨胀产生压应力, 中间经过中性点零应力, 最后落到出现由收缩应力引起的裂缝。一般高塑性(粉、粘粒比重大)、高湿度(含水量大、地下水位高)的强冻胀性地基土由于水平冻胀力较大, 裂缝出现要晚于其他类土, 平面水平冻胀应力产生、发展与消失过程的示意图见图 17。温降收缩可看成是线性的, 但冻土的长期拉伸弹性模量与负温度不是线性的, 所以呈曲线状。

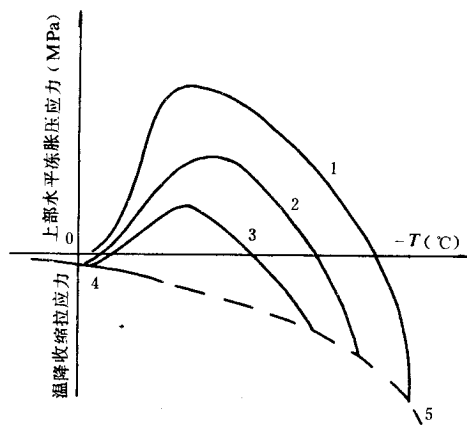


图 17 上部水平冻胀压应力及温降收缩拉应力与温度的关系

1. 高塑性,高湿度的强冻胀性土; 2. 冻胀性土; 3. 弱冻胀性土; 4. 不冻胀土; 5.地裂缝出现界限

Fig.17 The upper horizontal frost-heaving compressive stress and cooling contractive tensile stress as a function of temperature

## 21. 寒冬收缩裂缝

不少学者对地裂缝进行了研究, 有的认为是剪切产生的(庞国良, 1986), 有的认为裂缝间距取决于冻土的抗剪强度<sup>①</sup>, 其裂缝的夹角一般为 70—100℃ 左右, 多数呈正交形式, 或呈直角多边形(庞国良, 1986)。笔者认为在理想的非常均质各向同性的无限平面介质中的冻缩裂缝应是正六边形形状。由于冻土层沿垂直方向存在着温度梯度, 所以同一点位置上下各层的收缩量存在差异, 这就产生了因下层的收缩量减少而对上层作用着阻力, 即剪应力。如果剪应力较大, 则多边形的面积就较小, 因多边形内切圆半径  $R_{内}$  等于土层的极限拉伸强度  $\sigma_{拉}$  除以上下土层间的剪切应力  $\tau$ , 即  $R_{内} = \sigma_{拉} / \tau$ 。剪应力的大小取决于冻土层中的温度梯度, 即上下相邻土层的收缩差值, 温度梯度越小, 剪应力也越小。由于土层的均质性较差(无论水平向还是垂直向), 加之各种设施之分割(房屋基础、道路、围墙、沟槽以及堆物等等)以及土温的非均质(向阳, 背阴、地表覆盖以及高低不平等)条件, 致使形状很不规则, 但它们仍看得出是属于多边形的龟裂。裂缝的间距越大、裂缝的宽厚也越大。计算时<sup>①</sup>取冻土层的抗剪强度这不太合适。因抗剪强度远大于其抗拉强度。

裂缝的深度一般应终止在冻结前锋顶面剧烈相变区的上方, 平面水平冻胀力为零的附近, 虽然按温度应力计算尚未达到开裂程度, 但由于上层裂缝开展, 突出的应力集中所造成撕裂现象的延伸。

## 22. 挡土墙的水平冻胀力

挡土墙的水平冻胀力分为两部分, 墙背顶面所产生的平面水平冻胀力和下部出现的垂直水平冻胀力, 见图 15b。平面水平冻胀力全部由本水平平面冻结膨胀产生的, 与其他层次平面的冻胀关系不大, 因此它是一次性的, 所谓一次性即冻胀力不是冻层厚度的单值递增函数。冻结界面如在中部, 其平面水平冻胀力不但受到下面不冻土层的阻力, 上面已冻土层也起很大的阻碍作用, 同时冻胀的方向垂直于水分补给、冰夹层和冰透镜体的增长方向, 所以冻胀量和冻胀力不会很大, 上面土温更低的地方还有收缩拉应力, 这说明了平面水平冻胀力对房屋基础的危害不大, 常被一般工程技术人员所忽视。第二部分为垂直水平冻胀力, 它的受力情况与当基础底板面积足够大时普通房屋建筑基础所受的法向冻胀力一样, 墙背上单位面积的接触冻胀力就等于冻结锋面处的法向冻胀应力。它与墙背填土的静止土压力是相互转换而不是叠加的关系。它绝不会像一般普通基底为有限尺寸基础所受到的法向冻胀力那么大, 因它不存在象双层地基冻胀应力的集中现象那样。

①夏兆君, 1983, 关于寒冻裂缝的研究之三。

## 5 关于地基土冻胀性分类的问题

### 23. 土的冻胀性分类

地基土的冻胀性分类始终是很受重视的研究课题, 至今也没停止, 提出了很多分类方案<sup>①</sup>, 尽管百花齐放千差万别, 但归纳起来可分为: 1) 地基土冻结敏感性分类; 2) 地基土冻胀率分类; 3) 地基冻胀量分类。

冻结敏感性分析的对象是土质, 主要研究什么样的土质在冻结时有可能产生冻胀, 其中最关键的两点是矿物成分和粒度分布。冻结敏感性只是产生冻胀的可能性, 有可能性不见得有现实性, 更不存在必然性, 它只表示提供了产生冻胀的土质因素, 如果缺乏有利的水分条件, 照样不会冻胀, 这种情况便是冻胀性地基土而是非冻胀性地基。在这种地基上修建工程时要注意, 任何时候也不得改变地基土的水分条件, 一旦施工用水, 生活污水, 生产废水和管道跑水渗入地基内, 就变成了冻胀性地基。按冻胀率的分类同时考虑了土质及水分两个条件, 根据不同冻结敏感性的土质, 结合含水量和地下水位等综合考虑, 按实际发生的冻胀率定出冻胀性的不同类别, 这种分类是地基土冻胀必然性的分类, 尽管土是很敏感的, 但在使用阶段不出现酿成冻胀的水分条件, 如仍按冻胀性土加的设防既不经济也没必要, 按冻胀率的分类就为不冻胀性土。按冻胀量的分类, 不是“地基土”冻胀量分类而是“地基”冻胀量分类, 这种分类和土质关系不大, 因同一冻胀率的土, 在不同冻层厚度或不同冻结深度时的冻胀量不同, 冻深差别较大时这一问题更突出。它是一与前两种都不同的独立的分类方法。

### 24. 容许变形值

建筑物承重结构的容许变形值由其本身的强度所决定, 这是结构设计时主要考虑的问题之一。变形的容许值是指地基变形时不可避免地要产生差异沉降, 该沉降差导致承重结构出现附加应力(静定系统除外), 当拉应力和剪应力达到材料的强度极限之前的变形称为容许变形值。均匀变形或平均变形(压缩沉降或冻胀隆起)都不会引起结构的附加应力, 所以它不是容许变形值的控制指标, 犹如一艘舰船在风平浪静中水面高低无关紧要, 水涨船高, 水落则船降, 对船体的受力没有任何影响。在大风浪中却不然, 如处在波峰-波谷-波峰上时, 船体将受到很大的弯曲应力, 强度不够就有折断的危险。对物体或框架承重结构变形的控制指标是局部倾斜和沉降差, 一般的设计规范不给平均沉降<sup>②</sup>, 个别规范<sup>③</sup>也仅是第二控制指标。对冻土地基更应严格控制: 1) 建筑物建成交付使用后, 在土冻结之前基本固结完毕, 地基的沉降量、局部倾斜和沉降差都已经产生

① 陈肖柏, 李志军, 1983, 国外土冻结敏感性评价介绍。

② 工业与民用建筑地基基础设计规范, TJ7-74, 1974。

③ 苏联建筑法规《房屋及建筑物地基》, СНиП 202·01-83。

并存在, 此时结构内部已经引起了一定的附加应力, 就是地基土在初冬由于冻胀而出现了结构变形开始之前, 承重结构内部的附加应力已不是初始的零应力状态了, 当基底用足地基的容许承载力时, 有可能已经耗尽了容许变形值。2) 冻胀性地基土的匀质性很差, 其冻胀率各点不一样。3) 即便是各点都很均匀, 也由室外日照和室内供暖不平衡的热影响, 导致不同朝向(向阳和背阴)和不同部位(凸墙角、凹墙角、直线段、门厅、过道和冷房间等)的冻深不同与冻胀量的差异。4) 假设基础各点的冻胀量是均匀相等的, 翌年春融时, 同样由于基础所处的朝向和部位不同, 其开始融化时间的早晚有别和融化快慢的速度不一, 出现融沉变形的差异量。

上述第 1 和第 2 点其大小和出现的部位是随机的, 第 3 和第 4 点所发生的条件是清楚的, 二者之间存在内部联系, 即凡是热影响大的部位不但冻胀量小, 而融化得既早又快, 这就加大了变形的不均匀性。若要计算容许变形值, 需综合考虑上述四个方面的因素。

### 25. 按冻胀量的分类 (王希尧, 1983)<sup>①</sup>

每一建筑物的承重结构都容许有一定的垂直变形, 这样在进行基础埋深或换填砂垫层厚度的设计时, 就可根据该容许变形值来选择冬季可能出现这一最大冻胀量的那种地基, 这是按冻胀量分级的特点和优点。

但是规定承重结构的容许变形值, 并不意味着每个结构都要达到这一值后才为最佳设计, 这一值也不单单留给不均匀冻胀量使用的, 这一变形值的全部或一部分是为应付在漫长的有效使用年限内, 出现不以人们的意志为转移的偶然事件的安全储备, 即安全度。如在正常条件下使用了全部或绝大部分容许值, 这就削弱了建筑物适应最不利因素的能力, 安全度下降。设计有一定的结构变形而使基础浅埋所得到的经济效益, 是以建筑物部分或全部的安全储备为代价换来的。一般的说, 单层房屋和轻型建筑物由于上部荷重较轻, 基底压力远小于地基的容许承载力, 除了冻胀变形之外, 很少遇到较大的不均匀沉降和其他偶然事件, 动用些安全储备也是可以的, 但不宜用尽。

这一分类方法笔者认为也存在下述几个值得讨论的问题:

1) 确定的地点, 分类的不唯一性, 只有有确定地点和具体的基础埋深之后才可定类, 基础埋深不同按冻胀量的分类有别。

2) 和土的物理力学指标不挂勾, 设计人员一般都凭借工程地质报告参照地基设计规范的有关规定就可很快地判定和给出地基土的冻胀类别, 而按冻胀量的分类由于它与指标间无直接联系而不能。

3) 和土的冻结过程力学指标无联系, 即是按冻胀量给出冻胀类别, 也很难定出各冻胀力方面的数值(冻结强度、切向冻胀力, 法向冻胀力等)。

4) 容许变形值也不是只留给不均匀冻胀用的, 有 4 项因素都在其内, 容易用过量。

<sup>①</sup> 《水工建筑物抗冻设计规范》编制组, 1987, 水工建筑物抗冻设计规范(征求意见稿)。

5) 按地基土空载(仅土自重)冻胀量来直接移到建筑物基础下面,根本实现不了预想的按冻胀变形的的设计,因地基土在一定负荷或满负荷之后冻胀量降低甚多,还可能根本胀不起来,没有考虑荷载影响的计算和设计,是无法达到预期效果的,当然总比不考虑要前进一步。

### 参 考 文 献

- 王希尧, 1983. 土的冻胀量简易估算
- 刘鸿绪, 1982. 冻胀量与冻胀力关系分析. 低温建筑技术, (1)
- 刘鸿绪, 1983. 季节冻土地基冻胀力的计算. 低温建筑技术
- 孙更生、郑大同主编, 1984. 软土地基与地下工程. 中国建筑工业出版社
- 庞国良, 1986. 关于冻土裂缝的探讨. 冰川冻土, 8(3): 287—290
- 童长江、俞崇云, 1982. 论法向冻胀力与压板面积的关系. 冰川冻土, 4(4): 49—54
- 童长江、俞崇云, 1983. 法向冻胀力研究. 见: 第二届全国冻土学术会议论文选集, 科学出版社
- 童长江、管枫年, 1985. 土的冻胀与建筑物冻害防治. 水利出版社
- 隋咸志、左力, 1983. 冻胀反力的试验研究. 冰川冻土, 5(2): 19—29
- 崔成汗、周开炯, 1983. 冻胀反力的试验研究. 见: 第二届全国冻土学术会议论文选集, 科学出版社
- 崔托维奇 Н А, 1985. 冻土力学. 科学出版社
- Перетрухин Н А, 1967. СиАа морозного выпувивания фундамянтов. В кн: морозное пучение грунтов и способы защиты сооружений от его воздействия. М. транспорт
- Орлов В О, 1977. чение промезающих грунтов и его влияние на фундаментысооружении (吉林省水利科技情报中心站刊印)

## Discussion on Some Problems of Frost-Heaving Mechanics in Freezing Process of Soil

Liu Hongxu

( Heilongjiang Provincial Institute of low Temperature Construction Science )

### Abstract

Some problems of frost-heaving mechanics dealing with frost-heaving reaction and normal, tangential and horizontal frost heaving forces are put forward to be discussed with the researchers and engineers in this field.

It is considered that the frost-heaving reaction occurs at the frozen soil near the lateral surface of foundation, but not at the freezing front.

The frost-heaving stress at the freezing front is the internal force of subsoil so that it is incorrect to estimate the frost heaving stress at the freezing front by using the frost heaving amount of the subsoil outside of foundation.

It is necessary to fix the thickness of subsoil underneath a bearing plate while analyzing the relationship between normal frost-heaving force and the area of the bearing plate. The

parameter  $b$  in the formula  $\sigma_n = a\eta^b$  which relates to the normal frost-heaving force ( $\sigma_n$ ) and frost-heaving ratio ( $\eta$ ), should be less than 1, but not greater than 1. The frost heaving amount is the integral of the frost-heaving ratio along frost depth, while the frost heaving force is the integral of the frost heaving stress at the freezing front over effective area. There is no direct relationship between them.

The stress state of the part of a pile in unfrozen layer should be considered as compression, but not tension, and the friction between the pile and subsoil is not necessary to be reduced while checking the anti-frost wplift capacity of the pile.

When a frost susceptible soil is under freezing, horizontally frost-heaving compressive stress firstly occurs, then the compressive stress gradually decreases and finally frost contractive tensile stress occurs, resulting in the frost cracking of the ground. The stronger the frost susceptibility of soil is, the later the frost cracking occurs.

The existing classification of frost susceptibility of soil can be classified into three types, i.e., the classification based on the frost susceptibility of soil, which is safer for engineering design; the classification based on the frost-heaving ratio; the classification based on frost-heaving amount. The disadvantage of the last classification is that it has nothing to do with the physical and mechanical properties of soil during freezing. Further-more, this classification is difficult to be used in the foundation design based on allowable deformation, because it does not take the effect of loading into consideration.

**Key words:** freezing process, frost reaction, normal frost-heaving force, tangential frost-heaving force, horizontal frost-heaving force, classification of frost susceptibility