

~~苏联科学院~~ 院

凍土試驗室研究資料

第一集

H. A. 崔托維奇 等著



地質出版社

苏联科学院奥勃鲁契夫冻土研究所

冻土試驗室研究資料

第一集

H. A. 崔托維奇 等著

地質出版社

1959·北京

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ИНСТИТУТ МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЯ им. В. А. ОБРУЧЕВА
МАТЕРИАЛЫ
ПО ЛАБОРАТОРНЫМ
ИССЛЕДОВАНИЯМ
МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ
СБОРНИК I

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
МОСКВА—1953

本書共包括論文十篇，都是苏联科学院冻土研究所中央試驗室研究員的研究資料。其中一部分論文闡明了土在冻结与融化时所发生的过程，另一部分探討了冻土力学性質的研究方法。它們不仅具有重要的科学理論价值，而且对研究与土的冻结及融化有关之工程問題以及研究利用和改善冻土的性質方面具有着指导意义。本書对于地質工作者、土木建筑工程技术人員，特别是对于从事研究土方工程冬季施工問題和寒冷地区水利、道路工程問題的科学工作者有很大的价值。全書由沈阳水工試驗所郭文干和王田瑞两同志翻譯。

冻土試驗室研究資料

第一集

著 者 H.A. 崔托維奇等 著
譯 者 郭文干、王田瑞
出版者 地質出版社
北京宣武門外永光寺西街3号
北京市書刊出版業設計證出字第050号
发行者 新华書店科技发行所
經售者 各地新华書店
印刷者 地質出版社印刷厂
北京安定門外六鋪炕40号

印数(京) 1—2,500册 1959年8月北京第1版
开本 $787 \times 1092^{1/25}$ 1959年8月第1次印刷
字数 120 000 印张 $5^{3/25}$
定价(10) 0.74元

目 录

原序.....	(4)
关于冻土的試驗室研究..... Н. А. 崔托維奇	(6)
关于土的冻结与融化深度之計算..... А. Г. 科連斯尼科夫 Г. А. 馬尔提諾夫	(13)
冻结与融化时土中水的相成分..... З. А. 涅尔謝索娃	(35)
正在冻结的土中隔热对水份轉移过程的影响 А. П. 博任諾娃	(48)
冻土热容量的确定法..... О. С. 康諾娃	(59)
測定冻土中含冰量的量热法..... З. А. 涅尔謝索娃	(69)
負溫恒定时局部荷重作用下土的强度 В. Г. 別列贊采夫	(77)
冻土融化系数和压实系数的确定法..... Е. П. 舒謝丽娜	(103)
論土的膨胀剪力之平均值 (根据試驗室資料) Б. И. 达尔馬托夫	(117)
冻结时土壤和土中水的过冷..... А. П. 博任諾娃	(124)

原 序

苏联共产党第十九次代表大会的決議，在苏联科学面前提出了一些根据我国共产主义建設綱領所規定的巨大任务，其中包括：为了創造共产主义的物質技术基础，要在最近时期內增加建筑数量、降低建筑造价和改善其質量。

研究土的冻结与融化过程及其伴随而生之現象对解决这些問題具有很大的意义（例如，全年性施工方法的研究將使建筑工期大为縮短等）。在这里，正在冻结的土与其相鄰的建筑物部件之間相互作用的特点以及冻土本身的性質就具有极其重大的意义。知道了这些特性，可使建筑物避免不良的变形，同时可以改善建筑物的使用和养护条件。特别是对于冬季工作条件下的灌溉系統和明渠的边牆冻结时土中所发生的过程具有极大的作用。

当然，与土的冻结和融化有关的尚未解決的問題現在还有很多，而且在研究上也还努力得不够。但是就以現時所得資料来看，这些复杂的問題可按以試驗研究为基础的新的方式加以闡明。

本选集（第一集）中所发表的是冻土研究所中央試驗室的科学工作者們的著作（主要是关于冻土实验研究方面的）。这些著作可作为闡明这些复杂問題的一些資料。

在第一类著作中——物理-数学科学博士 A. Γ. 科連斯尼科夫教授，科学工作者 Γ. A. 馬尔提諾夫和一級研究員 З. A. 涅尔謝索娃，以及研究員 A. П. 博任諾娃和 O. C. 康諾娃的論文中——闡明了在研究湿润散布土的冻结过程和伴随而生的各种現象方面所得到的成果。

在第二类著作中——技术科学博士 B. Γ. 別列贊采夫教授，研究員 E. П. 舒謝丽娜和副教授 B. H. 达尔馬托夫的論文中——主要探討了

冻土力学性質的研究方法。

最后，第一篇論文为本选集的緒論。

冻土的試驗室研究中所得到的这些資料較之早先的資料是詳尽而正确了，这些資料闡明了土在冻结与融化时所发生的过程。在現時，毫无疑问的能使我们充分考虑和利用冻土的性質，而在今后亦將有助于研究和改善已冻土和正在冻结的土的性質之方法，以滿足社会主义經濟发展的需要。

科 学 領 导 人

苏联科学院通訊院士

H. A. 崔托維奇教授

关于冻土的試驗室研究

H. A. 崔托維奇

冻土研究所中央試驗室所进行的各种試驗研究之目的在于：一方面，是研究湿土冻结与融化时所发生的物理力学和物理化学现象；另一方面，是研究土在冻结、融化过程中和已冻状态下受外界作用的影响时其本身性质之变化。

試驗室有条件使人们能够造成一个若干个或影响某种现象的因素，从而可以研究出这些现象的一些内在联系。

正在冻结的土中之物理力学过程的实验研究和已冻状态的土中的抗压强度之测定，早在1929年[1,2]就开始了。这些試驗是系統的試驗室研究的开端，其成果发表在1932年出版的“冻土研究資料”[3]集中。

1930-1932年的著作包括了相当多的問題（冻土的力学性质、冻结与融化过程的研究、模型試驗），然而它們仅仅闡明了綜合的效果，而沒有深入于所研究现象的本質。

当时，为了解决生产实践中所发生的問題，曾特別着重研究了冻土的力学性质，这些研究是在以B. A. 奥勃魯契夫院士、地質科学博士M. И. 苏姆金为首的苏联科学院永冻土研究委员会总的领导下进行的。1936年П. И. 安德里昂諾夫发表的关于土冻结溫度的研究及冻结时其膨胀系数测定的資料[4]和在我們领导下工作的作者們集体发表的兩本論文集[5,6]就是这些研究的結果。后面这两本論文集闡明了試驗室研究冻土力学性质的一些問題。

在安德里昂諾夫利用膨胀計法进行土的冻结的研究工作中，曾发现了一系列富有趣味的现象，但对那些现象的物理本質沒有闡明，这就阻碍了它們的廣泛应用。

冻土力学性质的研究著作获得了实际应用。

冻土研究的試驗室試驗亦曾在交通部〔7〕和道路部門中进行过。

在1937年問世的“冻土力学原理”〔8〕曾对最早的冻土性質的研究工作作出了总结。这项工作具有重要的科学理論价值和实用价值，借之能确定一系列的規律：机械成分、含水量、溫度和其他一些因素对冻土力学性質的影响。然而当时尚未确定出能够解釋土在冻结时的力学性質之某些变化，亦即能闡明單个因素（溫度，压力等）对冻土物理力学性質影响的共通的物理理論。当时把冻土看作是和整体岩石一样，也就是把它里面的水看作实际上完全冻成了冰（苏姆金等，1940年）〔9〕。

关于水在冻土中的相成分問題的探討是冻土研究中的一个新阶段。在我們的报告中最先提出了散布土在任何負溫下都含有一些不冻水量的問題，并且指出了这些不冻水对冻土的物理性質和物理力学性質具有极大的影响（1941年所作的报告〔10〕）。由于这一报导的結果，在冻土研究所中央試驗室和地方机关（A. E. 費多索夫，1942年，等）中便进行了專門的試驗室研究。

四十年代初期，由冻土研究所中央試驗室进行的水在冻土中的相成分之研究，使我們得以論証冻土物理学和力学方面的許多新的原理，創立了有可靠試驗資料証实的“冻土中水的均衡状态原理”（崔托維奇）〔11, 12〕。我們曾指出〔11, 12, 13〕，由于冻土內一定有若干不冻水量，所以冻土的含冰量（冰重与冻土中全部水重之比）不是充分的。換言之，只有部分水冻结为冰。不知道冻土的含冰量，就无法确定組成冻土的各个部分（固体矿物顆粒、冰、水、空气）間之数量比，而确定这些东西对于与土的冻融有关的热物理計算是必需的。随溫度和其他因素而有很大变化的冻土含冰量在这里有着特別重大的意义。

由上面提到的那些著作〔11, 12〕首先查明的，而在以后的著作中〔14, 15〕又加以論証了的是：当土冻结与融化时，形成冰的潜热（скрытая теплота льдообразования）如象斯捷芬（Стефан）提出的那样，在冻结或融化的分界处并不完全析出，甚至当負溫有稍許变化时，含冰量也会发生变化〔15〕。这种新的原則性的理論要求在用数学

方法解决有关土的冻结与融化之热物理课题时，必须考虑到形成冰的潜热在所研究的全部土内的析出问题（确切地说，必须考虑含冰量随时间和空间的变化）。

例如，根据这样的考虑，科连斯尼科夫教授曾得以创立公式并顺利地解决了关于敷设在冻土中的煤气管路的散热问题。这是其埋设深度得以减小的论据之一，同时也可论证关于土的冻结与融化课题之普遍提法^①。

试验室研究关于冻土中水的相成分变化与外界作用间的关系的工作（涅尔谢索娃和冻土研究所中央试验室其他同事们进行的工作）表明：负温值是决定冻土中不冻水量的基本因素。这里尚应指出，当土冻结与融化时，土要发生一系列量的（物理的、物理化学的和力学的）和质的变化。

关于负温对于冻土含冰量和不冻水量变化的影响问题，曾在冻土研究所中央试验室详尽地研究过[14]。列于表1中的三种典型土（粒径为0.25—0.05公厘、颗粒含量为75%的石英砂，粒径为0.005—0.001公厘、粘土粒含量为21.8%的复盖亚粘土和粒径小于0.005公厘、颗粒含量为24.9%的侏罗纪粘土）的含冰量和不冻水量的测定结果可作为示例。

不同温度下砂、亚粘土和粘土中的含冰量和不冻水量 表1

温 度 °C	砂 $W=11-12\%$		壤土 $W=27-28\%$		粘土 $W=45-46\%$	
	相 对 含冰量 i	不冻水量 (以干土重 的%計) W_H	i	W_H	i	W_H
-0.5—0.6	0.92	0.54	0.48	20.0	0.46	46.6
-1.0—1.1	0.97	0.30	0.55	17.3	0.58	37.5
-2.0	—	—	0.63	14.5	0.58	34.5
-4.5—4.6	0.97	0.30	0.71	11.2	0.62	31.2
-10.6—10.8	0.98	0.26	0.76	9.3	0.70	22.2

应该指出，用作试验的侏罗纪粘土曾略被盐渍化（水溶盐含量为1.36%），这在某种程度上导致冻结温度的降低和粘土中不冻水量的

①参見本论文集A.Г.科连斯尼科夫和Г.А.马尔提诺夫的论文。

增多。

在石英砂中，仅在溫度約为 -1° 时，含冰量和不冻水量才发生显著的变化。当溫度更低时，这些变化已很小了，在实用上，例如热物理計算时，可不予考虑。

按表 1 的資料繪出亞粘土和粘土中不冻水量的变化与負溫值的关系曲綫（图 1）。这一曲綫以及冻土研究所中央試驗室在試驗各种土时所得的其他許多資料^①表明：冻土的不冻水量与負溫值間存在着一种十分有規律的关系，如象非冻土的压缩关系一样。

不过这种規律較非冻土的压缩关系更为复杂，因为除負溫值的影响外，土中所含之水溶鹽和其他許多因素在这里也有很大的作用。

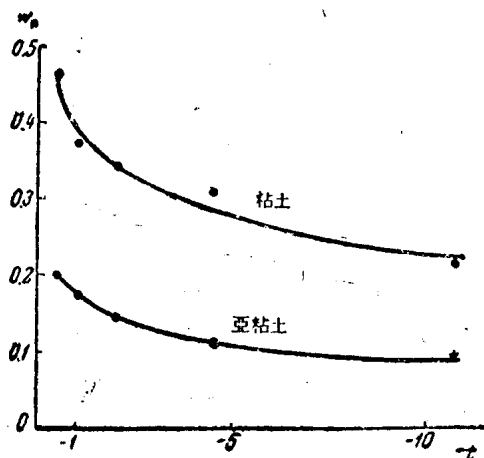


图 1. 在冻结的亞粘土和粘土中不冻水量的变化曲綫

应指出，各冻结曲綫以及融化曲綫（融化期內不冻水量的变化）是不重合的（有滞后現象）。冻结曲綫是冻土的主要特征曲綫之一，在冻土的物理学和力学中的重要意义并不亚于压缩曲綫对于非冻土那样重要。有必要指出，不冻水量并不相当于非冻土中的結合水量，而是大得很多，它不仅高于土中的疏松結合水量，而且当溫度相当高时，

①參見例如本論文集中3. A. 涅尔謝索娃的論文。

还高于土中的最大分子含水量。冻土中的不冻水量不仅取决于冻土的负温值，而且还取决于冻土的分散度、矿物成分、阳离子的代换性和組成以及水溶鹽的含量。同时每一种冻土均有其独特的不冻水量变化曲线。

土的冻结和融化曲线也可用数学方法表示。例如，H. A. 普查科夫[16]提出采用对数坐标的冻结曲线，并列出了类似于压缩曲线二次方程式的简化方程式。然而普查科夫的这些曲线（见他的著作中图5）的可靠性是令人怀疑的，因为它没有被精确的试验研究所证实。冻土研究所中央试验室采用了如下的冻结曲线的数学公式，这一式子与试验资料十分相符。

$$W_H = A + (W_{H3} - A)e^{-a(t_3 - t)}$$

式中：

W_H ——温度为 t 时的不冻水量；

A 和 a ——曲线参数，对一定的土为常数；

W_{H3} ——在开始冻结的那一温度下的不冻水量；

t_3 ——冻结温度。

当 (W_{H3}) 的开始纵坐标已知时，只要有二个被很好验证过的实验曲线点，利用上列方程式就可绘出实际上已是很完整的冻结曲线。

根据最新的研究成果得出结论^①：当土的含水量高于其最大分子含水量（按列别捷夫）时，不冻水量（以干土重的分数计）实际上与土的含水量无关。这样就可以在很广的含水量变化范围内把冻结曲线当作冻土的基本特征曲线之一。

对所研究的土（见表1）曾绘出其在未冻状态下的压缩曲线，利用这些曲线可以确定出：例如，多大的外压力值下的含水量变化便相当于冻土的负温值改变时不冻水量的变化。这些土的压缩曲线与冻结曲线之比较表明：当冻土温度为 -0.5° 时，约相当于压力值为 $5-8$ 公斤/公分²，当冻土的温度为 -10° ， -11° 时，相当于压力值为 $160-200$ 公斤/公分²。这是一个很有趣的事实，然而研究得还很不够。

① 参见本论文集 中 3. A. 涅尔谢索娃的资料。

凭借冻土中水的相成分变化规律之研究，目前已使我们能够在新的理论基础上解决一系列的问题。在这些问题中最主要的是：考虑到正在冻结或正在融化的全部土中形成冰的潜热的析出，来研究土冻融时的热物理计算法；不冻水在冻土中的转移；考虑土的含冰量在负温范围内的变化，来研究冻土热力常数的测定法；研究冻土的电学性质及其抵抗外力的强度。在这方面的研究应继续进行，无疑地将会得出新的更为重要的实用成果。

参 考 文 献

1. Сумгин М. И. Физико-механические процессы во влажных и мерзлых грунтах в связи с образованием пучин на дорогах. Изд. «Транспечать», 1929.
2. Цытович Н. А. Сборник Комиссии по изучению естественных производительных сил. № 80. Изд. АН СССР, 1930.
3. Материалы по исследованию мерзлых грунтов. Сводка лабораторных работ 1930 г. под руковод. Н. А. Цытовича, Изд. Кубуч. Л., 1932.
4. Андрианов Н. И. I. Коэффициенты расширения грунтов при замерзании. II. Температуры замерзания грунтов. Комитет по изучению вечной мерзлоты. Изд. АН СССР, 1936.
5. Сборник I. «Лабораторные исследования механических свойств мерзлых грунтов». Комитет по изучению вечной мерзлоты, вып. 2. Изд. АН СССР, 1936.
6. Сборник II. «Лабораторные исследования механических свойств мерзлых грунтов». Комитет по изучению вечной мерзлоты, вып. 3. Изд. АН СССР, 1936.
7. Труды Научно-исследоват. ин-та пути. Об. № 28, Изд. Госжелдориздат, 1933.
8. Цытович Н. А. и Сумгин М. И. Основания механики мерзлых грунтов. Изд. АН СССР, 1937.
9. Сумгин М. И. и др. Общее мерзлотоведение, Изд. АН СССР, 1940.
10. Цытович Н. А. Тезисы докладов Якутской конференции (Совет

по изучению производительных сил). Изд. АН СССР, 1941.

11. Цытович Н. А. Изв. АН СССР, сер. географич. и геофизич., т. 9, № 5—6, 1945.
12. Цытович Н. А. Изв. АН СССР, сер. геологич., № 3, 1947.
13. Цытович Н. А. Механика грунтов, изд. 3-е. Госуд. издат. литер. по строительству и архитектуре, 1951.
14. Нерсесова З. А. ДАН СССР, 1950, т. 75, № 6.
15. Нерсесова З. А. ДАН СССР, 1951, т. 79, № 3.
16. Пузаков Н. А. Теоретические основы накопления влаги в дорожном полотне и их практическое применение (сб. Министерства путей сообщения). Изд. Дориздат, 1948.
17. Гольдштейн М. Н. Деформация земляного полотна и оснований сооружений при промерзании и оттаивании. Тр. Всес. науч.-исследоват. ин-та жем дор. трансп., № 16, Трансжелдориздат, 1948.

关于土的冻结与融化深度之计算

A. Γ. 科達斯尼科夫、Γ. A. 馬尔提諾夫

尽管了解湿土的冻结与融化深度有着很重大的意义，但到目前为止还没有计算它的可靠方法。一方面，这是因为冻结与融化过程本身非常复杂，以致难以合理而精确地作出定量描述，另一方面，是因为难以找到切实的数学解。

本文试图根据冻土研究所中央试验室所得到的关于物理过程最新和可靠的资料，重新探讨土的冻结问题的现有提法和数学公式，把从前的工作[3]加以发展。

一、问题的现有提法

从文献中仅知道有一种关于在两相介质中相过渡界限的移动速度问题之提法，即所谓水面上冰的生长速度之斯捷芬问题[1]。现时这种问题的数学解法也被利用来计算湿土的冻结与融化深度。但是这样来引用这种方法遭到了强烈的反对；这一问题需要进一步地仔细研究。

在水面上冰的生长问题的提法中，斯捷芬构成她的数学公式时，是根据假设存在两种均一介质（冰和水）出发的。每一介质中的温度分布遵循于导热方程。为简单起见，下面只研究半空间内的线性问题；推广到三维空间三个坐标和有界介质的情形是不困难的：

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = k_1 \frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2}; \quad 0 \leq x \leq \xi(\tau), \quad (1)$$

$$\frac{\partial t_2}{\partial \tau} = k_2 \frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2}; \quad \xi(\tau) \leq x \leq \infty,$$

式中：

$$k_n = \frac{\lambda_n}{c_n \tau_n} \quad (n=1,2) \quad (2)$$

k_n ——導溫性系数；

λ_n ——導熱系数；

c_n ——熱容量；

γ_n ——容重；

t_n ——相對於 n -相的溫度；

$\xi(\tau)$ ——兩相交界綫的移動方程；

τ ——時間。

除了一般的边界条件和初始条件

$$\begin{aligned} x=0; t_1(0, \tau) &= \Phi(\tau), \\ \tau=0; t_1(x, 0) &= \varphi_1(x); t_2(x, 0) = \varphi_2(x), \end{aligned} \quad (3)$$

以外，又导入了一些附加条件：

(1) 兩相交界处的溫度恒定条件

$$x = \xi(\tau); t_1(\xi, \tau) = t_2(\xi, \tau) = t^* \quad (4)$$

和

(2) 兩相交界处的熱力平衡条件

$$x = \xi(\tau); \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} = \gamma_2 q_0 \frac{d\xi}{d\tau} + \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x}. \quad (5)$$

在式 (5) 中 $\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x}$ 項表示導于第一種介質中的熱量，

$\lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x}$ ——由第二種介質中吸取的熱量， $\gamma_2 q_0 \frac{d\xi}{d\tau}$ ——兩相交界面上

析出的結晶熱： $\gamma_2 q_0 = \gamma_2 q + t^*(c_1 \rho_1 - c_2 \rho_2)$ ； $q = 80$ 卡/克——水的結晶熱，而 t^* ——凍結溫度。方程 (1—5) 乃是封閉的非綫性方程 (边界 $x = \xi(\tau)$ 是可移動的)。

為了解決濕土凍結速度問題，以後利用了方程組 (1—5)，同時其中唯一改變之處是將式 (5) 中的 $\gamma_2 q_0$ 代換成 $\gamma_2 q_0 W_{0.6}$ ，這裏的 $W_{0.6}$ ——含水量 ($W_{0.6}$ 的單位為 $\frac{\text{水的克數}}{\text{土的克數}}$)。

即令要採取這樣的問題提法，那麼正確的寫法也是 $\gamma_2 q_0 W_{0.6} i_{\max}$ 。式中係數 $i_{\max}$ ——所謂土的最大含冰量——表明，土中可能凍結的水

量經常小于 $\gamma_2 W_{06}$, 亦即 $i_{\max} < 1$ (i 的單位為 $\frac{\text{冰的克數}}{\text{水的克數}}$)。

現在我們來說明一下方程 (1—5) 所反映的濕土凍結過程之物理本質究竟正確到什么程度。

1. 在構成方程 (1—5) 時, 系假設水在 $t^* = \text{常數}$ 時轉變為冰。這種條件只有在純水凍結時才會嚴格地遵守, 以及對非鹽漬化的濕砂才能很好地滿足。在過濕的粘性土中, 當溫度為 0 時僅有一部分水 (自由水) 凍結。結合水是在更低的溫度下才轉變為冰的。在所有其他情況下, 相的轉換系在整個溫度區間內發生, 例如土中冰的數量系隨着溫度降低而均勻地增加 [4]。由此可見, 即使溫度極低, 而 $i < 1$, 亦即粘土和亞粘土中總含有若干不凍水量。因此, 斯捷芬關於水在某一恒定凍結溫度 t^* 時成躍進式地轉變為冰的假設, 象在潮濕散布土這樣的介質中是沒有得到証實的。

2. 因為水轉變為冰的過程是在整個溫度區間內均勻地發生, 那麼凍土和未凍土在空間上就沒有鮮明的分界, 而存在着實際上是限制在兩根等溫綫 t_1^* 和 t_2^* (圖 1) 之間的相轉換區。當土中水的固相數量增加時, 本區內介質的全部指標 (熱容量、導熱性、容重等) 便隨着一根等溫綫向另一根等溫綫的移動而均勻地改變。在構成方程 (1—5) 時曾經認為, 水的結晶僅發生在兩相的交界面處, 因而在這上面所有的物理常數均躍進式地改變。這種情況在潮濕粘性土中也沒有得到証實。

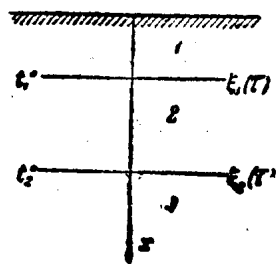


圖 1. 土融化時的溫度分布

1—未凍土; 2—相轉換區;
3—凍土

3. 若結晶熱僅在兩相的交界面析出, 則方程組 (1—5) 中的方程 (5) 是正確的。事實上, 結晶熱既能在交界面上析出, 也能從整個土層內析出。例如, 在過濕的粘土和亞粘土中, 這兩種情況便同時發生。類似的情況在溶液中也存在, 溶液中的液體部分在低熔溫度時 (雖有相轉換) 便發生結晶, 因而其中熱的析出開始得很早。若土中的水全部為結合水或均被鹽漬化時, 則結晶熱僅在土體內部析出。反

之，砂中的水几乎全是自由水，且全部热量均从表面析出。

因此，土中水的相轉換形式是各式各样的，总而言之，并不符合斯捷芬問題中所述的轉換方式。湿土冻结过程的正确描述要求改变問題的数学提法。

二、問題的新提法

在轉到問題的新提法以前，必須簡略地說明一下根据 H.A. 崔托維奇提出的均衡状态理論〔2〕而得到的土中水的相轉換之主要特点。根据水的粘滯程度可有下列三种情况：

(1) 在某一非常固定的冻结溫度 t^* 下，全部水均轉变为冰 ($i_0 = i_{\max}$, i_0 ——当 $t = t^*$ 时含冰量的突变量)；

(2) 当 $t = t^*$ 时，有部分水立即冻结，而剩余的一部分是在溫度降低时逐渐冻结 ($0 < i_0 < i_{\max}$)；

(3) 土中冰的数量随着溫度的改变而平稳地增加；沒有突变 ($i_0 = 0$)。

这也就是說：

(1) 結晶热既可在表面析出，也可在土体内析出；析出的热量与土的种类、含水量和溫度有关；

(2) 土的热力指标可随溫度的改变而平稳地或突然地变化，并且这种变化主要是由于水的相成分改变而引起的。

今后我們將認為土中冰的数量 g 以及所有其他指标和它們与溫度的关系均可由試驗得知。

我們現在来研究一下热量不在表面析出的情况。为了满足第一个条件，我們在相轉換区中导入热源，热源的功率根据当时的結晶水量和当时的水溫而定，即：

$$q \frac{dg}{d\tau} = r_q W_{00} \frac{di(t)}{d\tau} = \left[r_q W_{00} \frac{di(t)}{dt} \right] \frac{\partial t}{\partial \tau},$$

式中： $i(t)$ ——土的含冰量；

W_{00} ——含水量；

$r(t)$ ——容重；