

“十三五”普通高等教育实验实训规划教材

冻土试验指导

主 编 汪恩良
副主编 王正中 戴长雷
 韩红卫 刘兴超
主 审 马 巍



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

“十三五”普通高等教育实验实训规划教材

冻土试验指导

主 编 汪恩良
副主编 王正中 戴长雷
 韩红卫 刘兴超
主 审 马 巍



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书是作者根据多年的冻土材料试验研究和教学工作积累的经验，遵照土工试验相关的国家标准、技术规范和规程，编写的冻土工程研究过程中常用的十二个试验。重点强化试验过程和试验方法的掌握，并简单介绍了一些冻土相关的概念。全书语言简练，内容全面，并自成体系。

本书可以作为冻土相关课程的实验课教材使用。

图书在版编目（C I P）数据

冻土试验指导 / 汪恩良主编. -- 北京：中国水利水电出版社，2017.8
“十三五”普通高等教育实验实训规划教材
ISBN 978-7-5170-5805-2

I. ①冻… II. ①汪… III. ①冻土—试验—高等学校—教学参考资料 IV. ①P642.14-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第213003号

书 名	“十三五”普通高等教育实验实训规划教材 冻土试验指导 DONGTU SHIYAN ZHIDAO
作 者	主 编 汪恩良 副主编 王正中 戴长雷 韩红卫 刘兴超 主 审 马 巍
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址：www.waterpub.com.cn E-mail：sales@waterpub.com.cn 电话：(010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心（零售） 电话：(010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 3.5印张 83千字
版 次	2017年8月第1版 2017年8月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	12.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

一般情况下,把温度低于 0°C ,且含有冰胶结体的土(岩)称为冻土。它是一种由固体颗粒、冰、液态水和气体4种基本成分所组成的非均质、各相异性的多相复合体。土体由融化状态变为冻结状态时,其物理力学性质发生了非常大的变化,表现出强烈的温度敏感性和流变性。

冻土试验可以测量冻土的基本物理力学指标,为工程建设提供设计依据。通过冻土试验,可以让学生更好地了解冻土的性能,熟悉冻土的基本性质,便于掌握冻土的基本理论知识,是高校水利类和土建类专业重要的实践教学环节。试验的教学目的一是熟悉试验仪器设备的使用方法;二是掌握冻土基本物理力学参数的测试方法和步骤;三是提高学生的动手能力和解决问题的能力。

由于相关的标准、规范和规格需经常更新、修订,作为高校教材,本书尽可能遵照最新的国家标准、规范和规程,结合作者多年的冻土工程试验教学和研究工作积累的经验,重点强化试验过程和试验方法的掌握。通过试验教学训练,使学生对试验原理融会贯通,并能够做到举一反三。

本书共12个试验,由东北农业大学汪恩良教授主编,试验一、二、三、十二由汪恩良编写;试验八、十由西北农林科技大学王正中编写;试验四、七由黑龙江大学戴长雷编写;试验九、十一由东北农业大学韩红卫编写;试验五、六由东北农业大学刘兴超编写;最后由中国科学院西北生态环境资源研究院马巍主审。在编写过程中得到了中国水利水电出版社的大力帮助,并参考了书末所列文献和多位专家的科研成果,在此表示衷心感谢。限于水平,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

2017年4月

目 录

前言

试验一	冻土试样制备方法	1
试验二	冻土密度试验	4
试验三	冻土冻结温度试验	10
试验四	未冻含水率试验	13
试验五	冻土导热系数试验	15
试验六	冻胀量试验	18
试验七	冻土融化压缩试验	22
试验八	单轴抗压强度试验	29
试验九	三轴剪切强度试验	32
试验十	单轴压缩蠕变试验	36
试验十一	三轴剪切蠕变试验	40
试验十二	冻土模型试验	44
参考文献		49

试验一 冻土试样制备方法

一、试验目的

试样分为原状土试样和重塑土试样。冻土试验所用试样多为标准尺寸试样，需要对外形进行加工，本试验为冻土试样的制备提供依据。

二、基本概念

原状土是指土样取出后其颗粒、含水量、密度、胶结性和结构等物理性能保持不变的土样。

重塑土是指土样取出经重新制备后其胶结性、密度和结构等物理性能有所改变的土样。

试样是指按规定制备，用于试验测试的冻结土样。

负温原状土试样是指从冻结土结构物上取得冻结原状土，进行加工而成的冻土试样。

负温重塑土试样是指由原状土经烘干、破碎、配土、加工成型，再负温冻结而成的冻土试样。

三、仪器设备

1. 取土工具：风镐、铁锹、岩芯钻具等。
2. 储运设备：冻土集装箱（容量 0.03m^3 以上，保温防震）、冷藏运输车（温度 $-30\sim-1^\circ\text{C}$ ）等。
3. 保存设施：低于 -30°C 的负温冷库或冷箱。
4. 量具：台称两台（量程 10kg ，感量 10g ；量程 1kg ，感量 0.1g ），量筒（量程 100mL ，分度 1mL ），直角尺（ $200\text{mm}\times 200\text{mm}$ ，分度 1mm ）。
5. 破土设备：颚式碎土机或其他破土设备。
6. 成型模具：击实筒、环刀、切土盘、切土器等。
7. 其他：烘箱、保湿器、干燥器、木锤、橡皮板、玻璃缸、修土刀、钢锯、凡士林、保鲜膜、塑料袋、土样标签以及其他盛土器皿等。

四、技术要求

1. 土样基本要求

1.1 土样在冻结壁或工地现场未冻地层中采集时，每块土样尺寸不小于 $250\text{mm}\times 250\text{mm}$ ；在检查钻孔采集时，土样尺寸不小于 $\phi 90\text{mm}\times 200\text{mm}$ 。

1.2 土样数量应满足试验项目的要求。

1.3 土样采集时必须做好原始记录并对每块土样进行编号，贴上标签。

2. 试样基本要求

2.1 规格：试样规格分别为 $\phi 50\text{mm}\times 100\text{mm}$ 、 $\phi 61.8\text{mm}\times 150\text{mm}$ 和 $\phi 100\text{mm}\times 200\text{mm}$ 。必须保证试样最小尺寸大于土样中最大颗粒粒径的 10 倍。

2.2 精度：外形尺寸误差小于1.0%，试样两端面平行度不得大于0.5mm。

2.3 配土：重塑土含水和粗细颗粒混合都应均匀，试样击实密度均匀。

2.4 含水量：重塑土含水量与天然含水量误差不大于1.0%，或根据用户和项目需要确定。同一组试样的含水量差值不大于1.0%。

2.5 密度：重塑土密度与天然密度误差不大于0.03g/cm³，同一组试样密度差值不大于0.03g/cm³。

五、试验步骤

1. 土样采集及接收管理

1.1 冻土样的采集和接收

1.1.1 从冻结壁或冻土墙采集的冻土块，用修土刀修成所需尺寸，并做好土性、标高、层位及数量等土样记录。

1.1.2 将土样用双层塑料袋包装密封，标上标签，并用线绳捆扎好。

1.1.3 将捆好的冻土样，用保温材料（棉絮、玻璃棉或泡沫塑料）和双层塑料袋包严。再用绳捆扎好，标上标签并附土样记录装入冻土集装箱。

1.1.4 用冷藏车负温（-15~-10℃）恒温运至试验地点。

1.1.5 试验人员根据土样记录验收土样，验收合格后在验收单上签字登记。

1.1.6 将土样按层位分别存放在-10℃以下负温恒温冷库的指定位置。

1.1.7 试验后的土样，应保存至提交试验报告后半年，如委托单位事先提出特殊要求，可协商确定。

1.2 未冻土样的采集和接收

1.2.1 从地质检查孔中取得芯样，刮去泥浆皮，或从工地现场未冻地层中取得土样，用修土刀修成所需尺寸，并做好土性、标高、层位及数量等土样记录。

1.2.2 包装按本试验步骤1.1.2规定进行。

1.2.3 将捆好的非冻土样浸入石蜡中，再次密封，标上标签并附土样记录装入土样箱，运至试验地点。

1.2.4 按本试验步骤1.1.5规定进行验收。

1.2.5 将土样按层位存放在常温试验室内。

1.2.6 试验后的土样按本试验步骤1.1.7规定进行。

2. 试样制备步骤

2.1 负温原状土试样的制备

2.1.1 在负温试验室内，小心开启原状土包装，辨别土样上下层次，用钢锯平行锯平土样两端。无特殊要求时，使试样轴向与自然沉积方向一致。用削土刀、切土盘和切土器将土块修整成形，使其符合本试验技术要求的2.1和2.2的规定，即可用于试验。

2.1.2 制备过程中，细心观察土样的情况，并记录它的层位、颜色、有无杂质、土质是否均匀和有无裂缝等。

2.2 负温重塑土试样的制备

2.2.1 在常温试验室内，小心开启土样密封层，去掉土样表皮，记录土样的颜色、土类、气味及夹杂物等，并选取有代表性土样进行天然含水量和密度的测定。

2.2.2 将土样切碎，在 105~110℃ 温度下恒温烘干，放入干燥器中冷却至室温。

2.2.3 将烘干、冷却的土样进行破碎（切勿破碎颗粒）。

2.2.4 根据土样天然含水量，对干土进行配水，并搅拌均匀，密封后放入保湿器内存放 24h 以上。

2.2.5 彻底清洗模具，并在模具内表面涂上一层凡士林，分次均匀将土样放入模具击实，要保证试样密度与天然密度在允许误差范围内。

2.2.6 将试样连同模具密封并在低于 -30℃ 温度下速冻 4~6h。

2.2.7 将试样在所需试验温度下脱模，并用修土刀修整，使其符合本试验技术要求的 2.1 和 2.2 的规定。

2.2.8 将制备好的低温重塑土试样贴上标签（标明来源、层位、重量、日期等），装入塑料袋内密封，置于所需试验温度下恒温存放，在 24~48h 内可用于试验。

六、思考题

1. 什么是原状土和非原状土？
2. 什么是负温原状土试样和负温重塑土试样？
3. 试样常用的规格有哪些？

试验二 冻土密度试验

一、试验目的

冻土密度是冻土的基本物理指标之一。它是冻土地区工程建设中计算土的冻结或融化深度、冻胀或融沉、冻土热学和力学指标、验算冻土地基强度等所需的重要指标。测定冻土的密度，关键是准确测定试样的体积。

二、试验原理

冻土密度试验在负温环境下进行。试验中对原状冻土和人工冻土测定其含水率、质量、体积等参数，采用公式计算法计算出冻土的密度。根据冻土的特点和试验条件选用浮称法、联合测定法、环刀法或充砂法。浮称法用于各类冻土；联合测定法用于砂质土和层状、网状结构的黏质冻土；环刀法用于温度高于 -3°C 的黏质和砂质冻土；充砂法用于表面有明显孔隙的冻土。

(一) 浮 称 法

三、仪器设备

根据国家标准《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)的规定，试验仪器设备主要是：

1. 天平：称量 1000g，最小分度值 0.1g。
2. 液体密度计：分度值为 $0.001\text{g}/\text{cm}^3$ 。
3. 温度计：测量范围为 $-30\sim+20^{\circ}\text{C}$ ，分度值为 0.1°C 。
4. 量筒：容积为 1000mL。
5. 盛液筒：容积为 1000~2000mL。

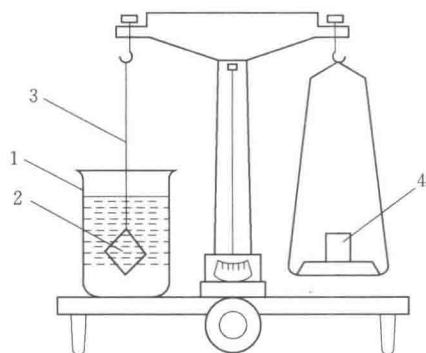


图 2.1 浮重天平

1—盛液筒；2—试样；3—细线；4—砝码

试验装置浮重天平见图 2.1。

试验所用的溶液采用煤油或 0°C 纯水。采用煤油时，应首先用密度计法测定煤油在不同温度下的密度，并绘出密度与温度关系曲线。采用 0°C 纯水和试样温度较低时，应快速测定，试样表面不得发生融化。

在进行试验时，所用仪器设备必须按有关规程进行校验后方可使用。

四、试验步骤

1. 调整天平，将空的盛液筒置于天平称重

一端。

2. 切取质量为 300~1000g 的冻土试样, 用细线捆紧, 放入盛液筒中并悬吊在天平挂钩上称盛液筒和冻土试样质量 m_1 , 准确至 0.1g。
3. 将事先预冷至接近冻土试样温度的煤油缓慢注入盛液筒, 液面宜超过试样顶部 2cm, 并用温度计量测煤油温度, 准确至 0.1℃。
4. 称取试样在煤油中的质量 m_2 , 准确至 0.1g。
5. 从煤油中取出冻土试样, 削去表层带煤油的部分, 然后按规定取样测定冻土的含水率。

五、试验结果计算

冻土密度应按下列公式计算:

$$\rho_f = \frac{m_1}{V} \tag{2.1}$$

$$V = \frac{m_1 - m_2}{\rho_{ct}} \tag{2.2}$$

式中 ρ_f ——冻土密度, g/cm³;
 V ——冻土试样体积, cm³;
 m_1 ——冻土试样质量, g;
 m_2 ——冻土试样在煤油中的质量, g;
 ρ_{ct} ——试验温度下煤油的密度, g/cm³, 可由煤油密度与温度关系曲线查得。
冻土的干密度按下式计算:

$$\rho_{fd} = \frac{\rho_f}{1 + 0.01\omega} \tag{2.3}$$

式中 ρ_{fd} ——冻土干密度, g/cm³;
 ω ——冻土含水率, %。

需要注意的是: 本试验应进行不少于两组平行试验。对于整体状构造的冻土, 两次测定的差值不得大于 0.03g/cm³, 并取两次测值的平均值; 对于层状和网状构造的其他富冰冻土, 宜提出两次测定值。

六、记录表格

表 2.1 冻土密度试验记录表 (浮称法)								
试样 编号	土样描述	煤油温度 /℃	煤油密度 /(g/cm ³)	试样质量 /g	试样在油 中的质量 /g	试样体积 /cm ³	密度 /(g/cm ³)	平均值 /(g/cm ³)

(二) 联合测定法

三、仪器设备

1. 排液筒 (图 2.2)。

2. 台秤：称量 5000g，最小分度值 1g。
3. 量筒：容积为 1000mL，分度值 10mL。

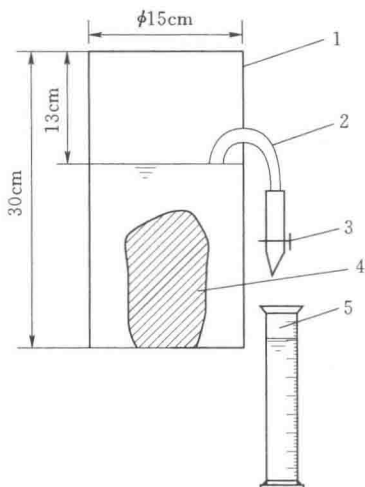


图 2.2 排液筒示意图

- 1—排液筒；2—虹吸管；3—止水夹；
4—冻土试样；5—量筒

四、试验步骤

1. 将排液筒置于台秤上，拧紧虹吸管止水夹。注意排液筒在台秤上的位置一次要放好，在试验过程中不得再移动。
2. 取冻土样 1000 ~ 1500g，称其质量 m ，以备使用。
3. 将接近 0℃ 的清水缓缓倒入排液筒中，使水面超过虹吸管顶（大约水深 20cm 左右）。
4. 松开虹吸管的止水夹，使排液筒中水面缓慢下降，待虹吸管不再滴水，亦即排液筒中水面稳定后，关闭止水夹，称排液筒和水的重量 m_1 。
5. 将已称定质量的冻土试样轻轻置入排液筒中，随即打开止水夹，使排液筒的水流入量筒中，当水流停止，关闭止水夹，立即称排液筒、土样和水三者的质量 m_2 ，同时记录量筒中接入的水的体积，用以校核冻土试样的体积。

6. 待冻土试样在排液筒中充分融化呈松散状态，且排液筒中水呈澄清状态，再往排液筒中补加清水，使水面超过虹吸管顶，然后松开止水夹排水，当水流停止后，关闭止水夹，再次称排液筒、土样和水的总质量 m_3 。

注意在整个试验过程中应保持排液筒水面平稳，在排水和放入冻土试样时，排液筒不得发生上下剧烈晃动。

五、试验结果计算

$$\omega = \left[\frac{m(G_s - 1)}{(m_3 - m_1)G_s} - 1 \right] \times 100 \quad (2.4)$$

$$V = \frac{m + m_1 - m_2}{\rho_w} \quad (2.5)$$

$$\rho_f = \frac{m}{V} \quad (2.6)$$

$$\rho_{fd} = \frac{\rho_f}{1 + 0.01\omega} \quad (2.7)$$

式中 ω ——冻土的含水率，%；

V ——冻土试样体积， cm^3 ；

m ——冻土试样质量，g；

m_1 ——冻土试样放入排液筒前的筒、水总质量，g；

- m_2 ——放入冻土试样后的筒、水、土样总质量，g；
 m_3 ——冻土溶解后的筒、水、土颗粒总质量，g；
 ρ_w ——水的密度，g/cm³；
 G_s ——土颗粒比重。

需要注意的是：含水率计算至 0.1%，密度计算至 0.01g/cm³。本试验应进行二次平行测定试验，取两次测值的算术平均值，并标明两次测值。

六、记录表格

表 2.2 冻土密度试验记录表（联合测定法）

试样编号	试样质量	筒加水质量 /g	筒加水加 试样质量 /g	筒加水加 土粒质量 /g	土粒比重	试样体积 /cm ³	密度 /(g/cm ³)	含水率 /%

(三) 环 刀 法

三、仪器设备

1. 环刀：容积应大于或等于 500cm³。
2. 天平：称量 3000g，最小分度值 0.2g。
3. 其他：切土器、钢丝锯等。

四、试验步骤

1. 本试验宜在负温环境中进行。无负温环境时，必须快速进行。切样和试验过程中的试样表面不得发生融化。
2. 取原状土样，整平其两端，将环刀刃口向下放在土样上。
3. 用切土刀（或钢丝锯）将土样削成略大于环刀直径的土柱，然后将环刀垂直下压，边压边削，至土样伸出环刀为止。将两端余土削去修平，取剩余的代表性土样测定含水率。
4. 擦净环刀外壁称量，算出湿土质量，准确至 0.2g。

五、试验计算结果

$$\rho_f = \frac{m}{V} \tag{2.8}$$

$$\rho_{fd} = \frac{\rho_f}{1 + 0.01\omega} \tag{2.9}$$

式中 m ——湿土质量，g；
 ω ——含水率，%。

结果计算至 0.01g/cm³。

需要注意的是：本试验应进行 2 次平行试验。其平行差值不应大于 0.03g/cm³。取其算术平均值。

六、记录表格

表 2.3 冻土密度试验记录表（环刀法）

试样编号	环刀号	湿土质量 /g	试样体积 /cm ³	湿密度 /(g/cm ³)	试样含水率 /%	干密度 /(g/cm ³)	平均干密度 /(g/cm ³)

(四) 充 砂 法

三、仪器设备

- 1. 测筒：内径宜用 15cm，高度宜用 13cm。
- 2. 量砂：粒径 0.25~0.5mm 的干净标准砂。
- 3. 漏斗：上口直径可为 15cm，下口直径为 5cm，高度为 10cm。
- 4. 天平：称量 5000g，分度值 1g。

四、试验步骤

(1) 测筒的容积，应按下列步骤测定：

- ①称量测筒的质量 m_1 。
- ②测筒注满水，水面必须与测筒上口齐平。称量测筒和水的总质量 m_2 。
- ③测量水温，并查取相应水温下的密度 ρ_{wt} 。

(2) 测筒充砂密度，应按下列步骤进行测定：

①准备不少于 5000g 的清洗干净的干燥标准砂。标准砂的温度应接近冻土试样的温度。

②用漏斗架将漏斗置于测筒上方。漏斗下口与测筒上口应保持 5~10cm 的距离。

③用薄板挡住漏斗下口，并将标准砂充满漏斗后移开挡板，使砂充入测筒。与此同时，不断向漏斗中补充标准砂，使砂面始终保持与漏斗上口齐平。在充砂过程中不得敲击或振动漏斗和测筒。

④当测筒充满标准砂后，移开漏斗，轻轻刮平砂面，使之与测筒上口齐平。在刮砂过程中不应将砂压密。称筒、砂的总质量 m_3 。

(3) 充砂法试验应按下列步骤进行：

①切取冻土试样。试样宜取直径为 8~10cm 的圆形或 $L \times B$ (cm)：(8~10)×(8~10) 的方形。试样底面必须削平，称试样质量 m 。

②将试样平面朝下放入测筒内。试样底面与测筒底面必须接触紧密。用标准砂充填冻土试样与筒壁之间的空隙和试样顶面。充砂和刮平砂面应按测筒充砂密度的第 2、3 步骤进行。

③称量筒、试样和充砂的总质量 m_4 。

五、试验计算结果

$$V_0 = \frac{m_2 - m_1}{\rho_{wt}}$$

(2.10)

$$\rho_s = \frac{m_s - m_1}{V_0} \tag{2.11}$$

$$\rho_f = \frac{m}{V} \tag{2.12}$$

$$V = V_0 - \frac{m_4 - m_1 - m}{\rho_s} \tag{2.13}$$

式中 V_0 ——测筒的容积， cm^3 ；
 m ——冻土试样质量， g ；
 m_1 ——测筒质量， g ；
 m_2 ——筒、水总质量， g ；
 ρ_{wt} ——不同温度下水的密度， g/cm^3 ；
 ρ_s ——充砂密度， g/cm^3 ；
 m_s ——测筒、砂的总质量， g ；
 V ——冻土试样的体积， cm^3 ；
 m_4 ——测筒、试样和量砂的总质量， g 。

需要注意的是：测筒的容积应进行 3 次平行测定，并取 3 次测定值的算术平均值，各次测定结果之差不应大于 3mL；充砂密度应重复测定 3~4 次，并取其测值的算术平均值，各次测值之差应小于 $0.02\text{g}/\text{cm}^3$ ；充砂法试验应重复进行两次，并取其两次测值的算术平均值，两次测值的差值应不大于 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ 。

六、记录表格

表 2.4 冻土密度试验记录表（充砂法）

试样编号	测筒质量	试样质量 /g	测筒加试样 加量砂质量 /g	量砂质量 /g	量砂密度 /(g/cm ³)	测筒容积 /cm ³	试样体积 /cm ³	冻土密度 /(g/cm ³)

七、思考题

- 1. 冻土密度试验的关键是什么？
- 2. 冻土密度试验的测定方法有哪些？
- 3. 冻土密度试验的测定方法分别适用哪些情况？
- 4. 各试验方法结果处理应注意哪些事项？

试验三 冻土冻结温度试验

一、试验目的

土的冻结是以土中孔隙水结晶为表征的。冻结温度是判别土是否处于冻结状态的指标。纯水的结冰温度为 0°C ，土中水分由于受到土颗粒表面能的束缚且含有化学物质，其冻结温度均低于 0°C ，土的冻结温度主要取决于土颗粒的分散度、土中水的化学成分和外加载荷。本试验的目的是掌握测定土体的冻结温度的方法，了解土冻结过程中的温度特征。

二、试验原理

纯净的水在 0°C 冻结。有人将蒸馏水置于清洁的容器中，冷却到摄氏零度以下几度，但仍处于液态。现在发现最低过冷水的温度可达 -5°C 。可是将这种过冷温度的水稍微震动一下，立刻出现冰晶。水的这种超过相变温度而不发生相变的现象，称为水的过冷现象。

根据 A·Π·波仁诺娃的试验资料表明，各种土的冻结和融化过程，其温度特征都可以分成五个阶段，砂土、膨润土的冷却-冻结曲线如图 3.1 和图 3.2 所示。

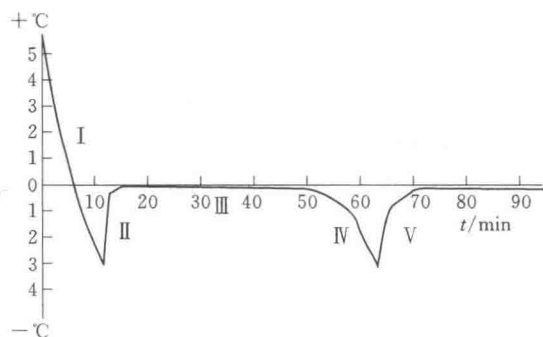


图 3.1 砂土的冷却-冻结曲线
(砂的含水量 $\omega=19.6\%$ ，冷冻剂温度为 -10°C)

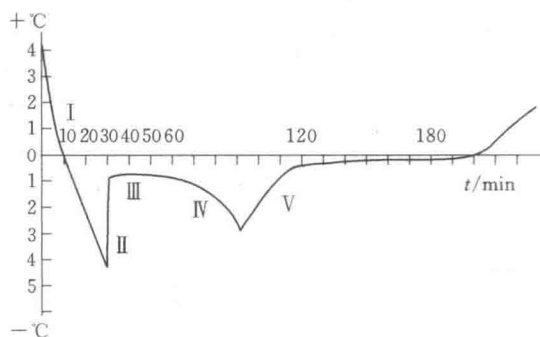


图 3.2 膨润土(细黏土)的冷却-冻结曲线
(膨润土的含水量 $\omega=80.5\%$ ，冷冻剂温度为 -10°C)

图 3.1 和图 3.2 中：

I —— 冷却与过冷阶段。这阶段土体在外界负温环境里逐渐冷却，并处于过冷状态。

II —— 温度突变阶段。此时冰结晶形成，水发生相变，放出潜热，温度跳跃上升到土中水冻结温度。

III —— 水结晶阶段。此阶段温度稳定并等于土中水冻结温度，出现土中水结晶时相幕(零度幕)现象。由于砂土颗粒直径大，表面能小，土中水基本上为自由水，因此冻结温度十分稳定，并接近 0°C 。此阶段外界冷量与土中水冻结时放出的潜热相平衡，一直延续到砂土中水分几乎全部冻结为止。

Ⅳ——进一步冷却阶段。对于黏性土来讲，土中水除自由水外，还有吸着水、薄膜水的结晶需要更低的温度，随着薄膜厚度的减薄，受到矿物颗粒分子引力增大，所以冻结温度越低，在冻结曲线上由Ⅲ过渡到Ⅳ。

Ⅴ——环境温度升高时的融化阶段。此阶段前一部分由于土温度提高，部分冰融化，为此要吸收相变热。所以这时土温相对稳定。当土中冰全部融化后，土温开始明显上升。

试验表明，土中水在过冷以后，只要一开开始结晶，由于释放潜热，土温就迅速上升，达到某一温度时就稳定下来，这时发生土孔隙中水的冻结过程。这一稳定温度称为起始冻结温度。

三、仪器设备

仪器设备包括土工冻胀试验箱（图 3.3）、试样杯、切土刀、温度传感器、数据采集仪等。

1. 土工冻胀试验箱：-30~50℃，为试验提供恒定的低温环境。

2. 温度传感器：热敏电阻温度传感器，精度为 0.01℃。

3. 试样杯：直径 6cm，高 4cm。

四、试验步骤

1. 原状土试验步骤

(1) 土样应按自然沉积方向放置。剥去蜡封和胶带，开启土样筒取出土样。

(2) 试样杯内壁涂一薄层凡士林，杯口向下放在土样上。将试样杯垂直下压，并用切土刀沿杯外壁切削土样。边压边削至土样达到试样杯高度，用钢丝锯整平杯口，擦净外壁，并取余土测定含水率。

(3) 将热敏电阻测温端插入试样中心。

(4) 试样杯周侧包裹 5cm 厚的泡沫塑料保温，将其放入土工冻胀试验箱。

(5) 调节土工冻胀试验箱箱体温度为 -3℃，保持恒温。

(6) 开启数据采集仪，对数据进行采集，当温度突然跳跃并连续 3 次稳定在某一数值（相应的温度即为冻结温度），试验结束。

2. 扰动冻土试验步骤

(1) 称取风干土样 200g，平铺于搪瓷盘内，按所需的加水量将纯水均匀喷洒在土样上，充分拌匀后装入盛土器内盖紧，润湿 24h（砂质土的润湿时间可酌减）。

(2) 将配制好的土样装入试样杯中，以装实装满为止。杯口加盖。将热电偶测温端插

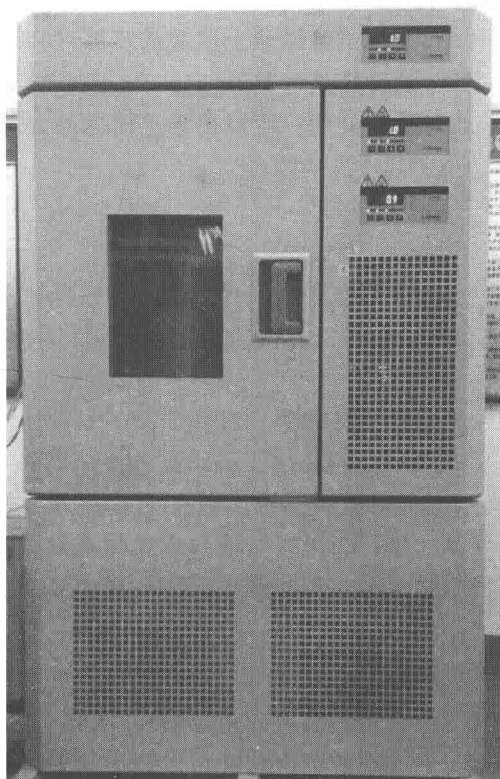


图 3.3 土工冻胀试验箱

入试样中心。杯盖周侧用硝基漆密封。

(3) 按本试验原状土试验的步骤 (3)~(6) 进行试验。

五、试验结果计算

通过数据处理,可以得到土体冻结温度曲线,如图 3.4 所示。

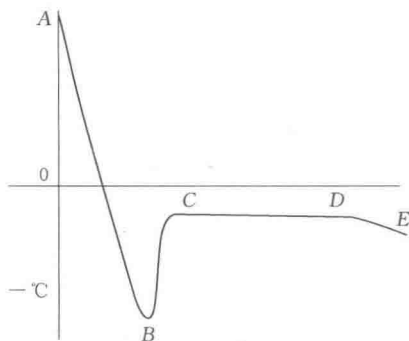


图 3.4 土体冻结温度曲线

根据曲线中温度跳跃的特征,得到跳跃后最高且稳定点的温度即为土壤的起始冻结温度,即图 3.4 中 C 点对应的温度。

六、思考题

1. 什么是水的过冷现象?
2. 土冻结的温度特征可以分为几个阶段?
3. 什么是土的起始冻结温度?