

DOI: 10.11779/CJGE20240683

水平冻结下软黏土水热力响应及冷生构造研究

张 虎^{1,2}, 胡金涛^{*1}, 郑 波³, 杨岁桥¹, 东宇轩¹, 鲁 明¹, 梁 煜¹, 邢利军¹

(1. 东北林业大学土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

3. 中铁西南科学研究院有限公司, 四川 成都 611731)

摘 要: 利用自主研发的一维可视化水平冻结装置, 在不同温度梯度下对软黏土开展了单向水平冻结试验, 并对土体纵剖面冷生构造的发育过程进行了全程观测。结果表明水平冻结过程中水分迁移会引起温度、水分、孔隙水压力、土压力等水热力响应, 温度梯度是水分迁移的主要诱因。在重力作用下, 水平冻结过程中土体发生双向水分重分布, 但水平向水分迁移量显著高于竖直向。冻结 120 h 后, 冻结区含水率显著高于初始含水率, 最大值常出现在离冻结锋面 1~3 cm 处; 未冻区的含水率要普遍低于初始值, 这表明未冻区存在脱水固结现象。此外, 水平冻结过程中软黏土纵剖面具备清晰显著的冷生构造, 其形成主要是低温吸力和结晶应力诱导张拉应力增大作用的结果。以冷生构造的形态、密度和分布特征为依据, 将其定性划分为整体状、纤维层状、薄层状、厚层状。该项研究成果初步揭示了水平冻结过程中软黏土水-热-力-构造响应过程, 为准确阐述水平冻胀机制提供了必要的理论参考。

关键词: 软黏土; 水平冻结; 水分迁移; 分凝冰; 冷生构造

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)08-1681-09

作者简介: 张 虎(1986—), 男, 博士, 教授, 主要从事冻土工程方面的研究工作。E-mail: zhanghu@nefu.edu.cn。

Hydrothermal, mechanical responses and cryostructure of soft clay under horizontal freezing

ZHANG Hu^{1,2}, HU Jintao¹, ZHENG Bo³, YANG Suiqiao¹, DONG Yuxuan¹, LU Ming¹, LIANG Yu¹, XING Lijun¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. State Key Laboratory of

Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. Southwest Research Institute Co. Ltd. of C.R.E.C., Chengdu 611731, China)

Abstract: Using the self-developed one-dimensional visual horizontal freezing device, one-way horizontal freezing tests are conducted on soft clay under various temperature gradients. The development of the cryostructure in the longitudinal section of the soil is observed. The results indicate that the water migration during the horizontal freezing process induces thermal responses, including variations in the temperature, water content, pore-water pressure and soil pressure, with the temperature gradient being the primary driver of water migration. During the horizontal freezing process, bidirectional water redistribution occurs in the soil due to the gravitational effects. However, the horizontal water migration is significantly greater than the vertical one. After freezing of 120 h, the water content within the freezing zone is markedly higher than the initial water content, with the maximum often observed at 1~3 cm from the freezing front. Conversely, the water content in the unfrozen area is generally lower than the initial value, indicating the dehydration consolidation in this region. Additionally, the longitudinal section of the soft clay exhibits a distinct and pronounced cryostructure during the horizontal freezing process, primarily resulting from the increased tensile stress due to low-temperature suction and crystallization stress. Based on the shape, density and distribution characteristics of the cryostructure, it can be qualitatively categorized into whole, fibrous layered, thin layered, and thick layered structures. The findings of this study provide preliminary insights into the water-heat-force-structure response processes of soft clay during the horizontal freezing, whole, fibrous layered, thin layered, and thick layered structures providing

基金项目: 黑龙江省自然科学基金优秀青年项目 (YQ2022D001); 国家自然科学基金面上项目 (41971085); 四川省科技计划项目 (2024NSFSC0158); 黑龙江省博士后资助项目 (LBH-Z23062) This work was supported by Science Foundation for Outstanding Young Scholars of Heilongjiang Province, China (Grant No.YQ2022D001), the National Natural Science Foundation of China (Grant No.41971085), Sichuan Science and Technology Program (Grant No.2024NSFSC0158), and Heilongjiang Postdoctoral Fund (Grant No.LBH-Z23062).

收稿日期(Received): 2024-07-12 **修回日期(Revised):** 2025-03-04 **接受日期(Accepted):** 2025-03-13 **网络出版日期(Online):** 2025-03-14

***通信作者** (E-mail: hjt5674@nefu.edu.cn)

a theoretical basis for understanding horizontal frost heave mechanisms.

Key words: soft clay; horizontal freezing; water migration; segregated ice; cryostructure

0 引言

冻胀现象是寒冷地区常见的工程病害问题之一^[1], 位于这些地区的基础设施工程在建设前后需考虑冻胀的影响。据调查这些冻结工程中大部分存在水平冻结的情况, 给我国造成了巨大的经济损失。如边坡、沟渠等深基坑工程在越冬过程中, 由于气温降低, 其开挖剖面因长时间暴露在冷空气中而经历水平冻结作用, 这可能导致支护结构发生变形或破坏^[2]。在水平冻结作用下, 一些建筑物的挡土墙、地下侧室等结构可能会产生不良滑动位移^[3]。在寒区隧道建设中, 由于低温气流沿隧道纵向扩散, 水平向会产生较大的冻胀力, 导致隧道衬砌混凝土常因水平冻结作用而开裂甚至剥落^[4]。此外, 近年来人工冻结法在城市地下空间建设中得到广泛应用, 但施工过程中往往会产生显著的冻胀融沉变形, 对周围建筑设施和地质造成了严重影响。尤其是在地铁联络通道施工时, 冻结管沿水平地层方向布置会导致发生水平冻结问题, 其危害程度甚至要高于垂直冻结施工^[5-6]。

土体冻胀现象主要是由原位冻结和水分迁移共同作用所引起的, 且后者占主导作用^[7], 因此掌握冻结过程中水分迁移规律对剖析冻胀形成机制具有重要意义。为合理解释冻土水分迁移发生机制, 毛细理论^[8]、薄膜理论^[9]及冻结缘^[10]的概念先后被提出, 受到了学者们广泛关注。尤其是冻结缘的概念, 其指出了在冻结锋面和最暖冰透镜体之间存在一个过渡带, 其可能是深入认识冻土水分迁移、分凝冰形成过程、冻胀机理的关键区域。基于该理论, 各种冻胀理论和模型相继出现, 如刚性冰模型^[11]、分凝冰模型^[12]等, 这些模型有效揭示了冻胀过程中的冰-水相互作用、分凝冰的形成机制以及影响冻胀程度的主要因素, 从而为寒区工程设计与地基处理等实际工程应用提供了理论支持和优化方向。

目前研究主要集中在垂直冻结条件下土体物理力学参数的变化过程^[13-15], 然而实际上和垂直冻胀的形成类似, 水平冻胀的产生主要是由未冻水发生水分迁移引起的。Tang 等^[16-17]通过室内试验认为水平冻结过程中土体水分的迁移受基质吸力与重力之间的非零夹角影响, 并以此推导建立了描述水平冻结过程中的水热力耦合模型; He 等^[18]利用自行设计的横向冻结装置对水平冻结过程中土体的温度场、水分场及冻结锋面的分布进行了观察, 并讨论了温度梯度的影响。尽管垂直方向的水分迁移机制已经得到了广泛研究, 但显然土壤在垂直冻结条件下的水分迁移规律不能完全

适用于水平冻结。而目前关于土体水平方向上水分迁移规律的研究成果十分有限, 大部分研究仍聚焦于水平冻胀力方面, 这也是导致水平冻害频发的原因之一。因此, 研究水平冻结条件下的水分迁移过程具有重要的现实意义和必要性。

本研究主要基于自主研发的一维水平可视化冻结装置, 在不同温度梯度下对高含水率软黏土开展单向水平冻结试验。通过分析冻结过程中土体温度、水分、孔隙水压力、土压力的变化过程, 以此来揭示水平冻结过程中软黏土的水热力响应。同时结合延时摄影技术, 初步阐述软黏土冷生构造的形成机理。

1 试验介绍

1.1 试验材料

试验土样取自黑龙江省北漠高速五大连池至嫩江段附近, 根据《土工试验方法标准: GB/T50123—2019》^[19], 测得土体液限为 44.76%, 塑限为 27.05%, 塑性指数为 17.71, 其粒径级配分布如图 1 所示。在制备重塑土样过程中, 将经过烘干、碾散、过 2 mm 筛的土样与一定数量的去离子水混合, 以配置出试验规定含水率的软黏土试样。配置好的重塑土样还需密封保存 24 h 以上, 以确保土体含水率分布均匀。

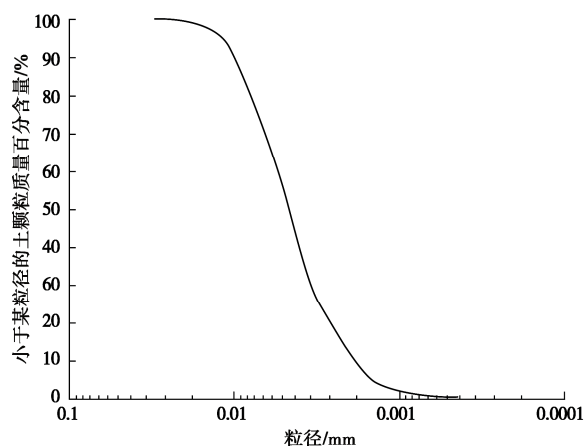


图 1 粒径级配示意图

Fig. 1 Grain-size distribution of soil sample

1.2 试验设备

为实现试验过程中精准控温、可视化等要求, 该试验主要在自主设计的一维可视化水平冻结系统中进行, 如图 2 所示。该测试系统主要由温度控制模块、图像采集模块、数据采集模块及水平冻结试验仓四部分组成。

(1) 温度控制模块由一台恒温恒湿循环箱和两台

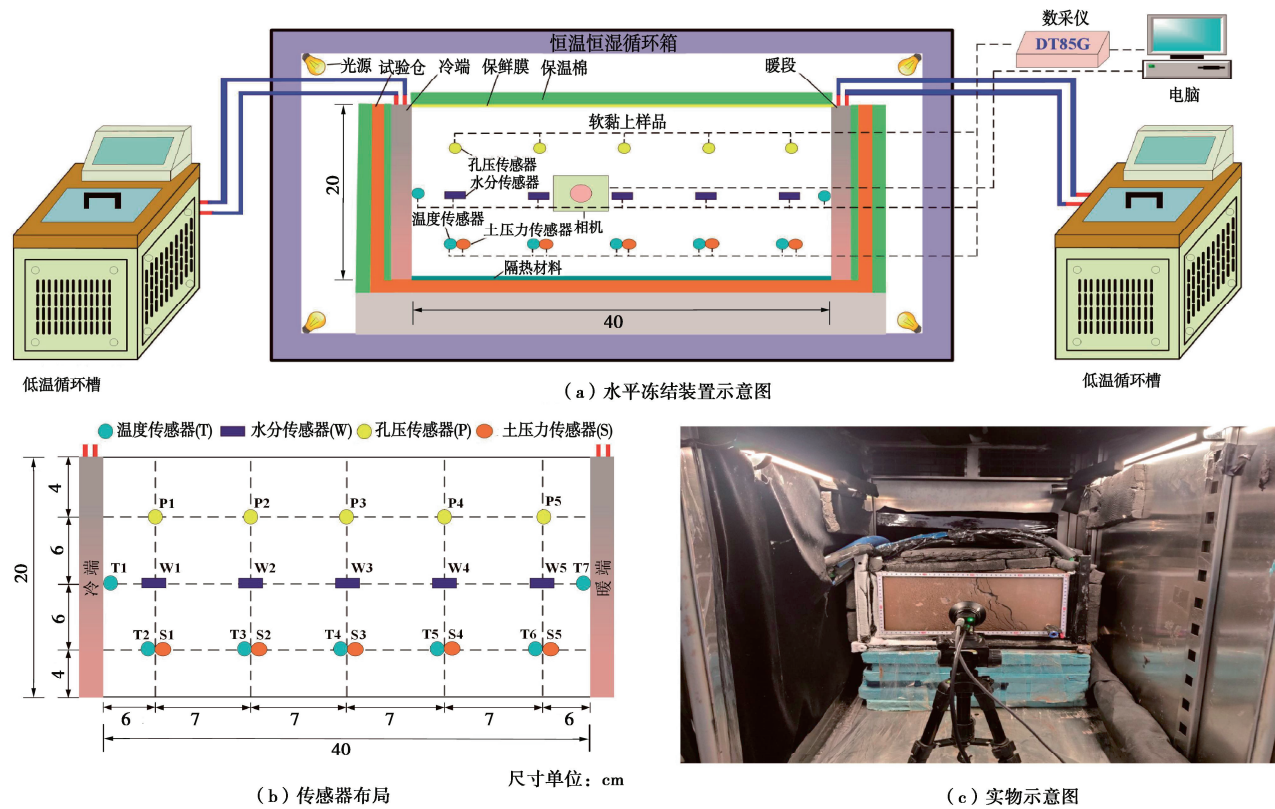


图 2 水平冻结装置

Fig. 2 Schematic diagram of horizontal freezing test apparatus

低温循环槽构成，三者控温精度均能达到 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。本试验全程是在循环箱中进行，以避免较大的环境温度波动影响试验结果的准确性。两台低温循环槽主要用于连接试验仓左右两侧的控温铜板，槽内的低温防冻液利用外循环形式与控温铜板进行热传递以调节土体温度。

(2) 图像采集系统由一台高精度工业相机(型号为 MV-SUA2000C)和多个光源构成。该相机具备 2000 万像素，所拍照片分辨率高达 5488×3672 。同时该相机配备有对应的控制软件，可在负温环境下长时间工作，并具备延时摄影和实时上传等功能。试验时始终保持相机位置恒定，并设置每 10 min 进行采集一次图片。

(3) 数据采集模块由 DT85G 数采仪和多个传感器构成，主要用于监测各水平位置处温度、水分、孔隙水压力、土压力等参数的变化趋势，布置位置如图 2 (b) 所示。其中温度传感器采用精度 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 的热敏电阻；水分传感器采用 EC-5 型，精度 $\pm 3\%$ ；孔隙水压力传感器采用 HC-25 型，精度 $\pm 0.5\%\text{FS}$ ；土压力传感器采用 DMTY 型，精度 $\pm 0.1\%\text{FS}$ 。试验前确保传感器均能正常运作，并设置数采仪每 5 min 记录一次传感器读数。

(4) 水平冻结试验仓为自主设计而成，仓内净尺寸为 $400\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ ，具备灵活拆卸、可视化、精准控温等特点。试验仓正面为真空双层有机玻璃，厚度为 10 mm，透明度高达 98%。试验前利用

抽气机缓慢抽去真空有机玻璃内的空气，从而确保良好的隔热效果。试验仓内左、右两侧布置长宽高为 $200\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 的控温铜板，以分别调节土体冷端和暖段温度。试验仓底部放置一层隔热材料，其余各面外部均附着双层保温棉，在一定程度上可以有效减少热量损失。

1.3 试验方法与过程

考虑到土样含水率较高(呈淤泥状)且传感器需分 3 排布置，装样时将密封完成后的湿土分 3 次填入水平试验仓中。在重力作用下，试验仓底部土样的含水率可能要高于顶部。每次填土前需提前安装传感器，且传感器接缝处需做好防漏水措施，避免产生水分散失。在本试验中主要采用硅胶垫片和密封胶来规避漏水现象，经多次检验证明该方法效果较好。同时值得注意的是，位于背面最上层的 5 个孔压传感器在安装前还需用硅油进行抽气饱和，防止内部空气影响其精准度。安装结束后将各传感器连接至 DT85G 数采仪，架设并调整相机至合适角度。随后启动温度控制模块，使室内环境温度和试验仓左右两侧控温铜板温度均为 $+5^{\circ}\text{C}$ 。恒温 24 h 后，待试验仓内各处温度均稳定在 $+5^{\circ}\text{C}$ 后即可开始正式试验。试验时以左侧为冷端，右侧为暖端，在不同温度梯度下开展 4 组水平单向冻结试验，以探究软黏土在水平方向上的水分迁移规律，试验方案如表 1 所示。

表 1 冻结试验方案

编号	含水率/ %	干密度/ (g·cm ⁻³)	温度设置/°C		
			冷端	暖端	环境
S1~S4	45	1.51	-5/-7.5/-10/-15	+5	+5

2 试验结果与分析

2.1 温度演化过程

冻土是一种对于温度极为敏感的特殊土^[1]，因此冻结过程中土体各位置温度的监测极为重要。温度的降低既是导致孔隙冰和未冻水含量变化的直接原因，也是造成土体内部冰水相变、水分迁移等现象产生的原因之一。水平冻结过程中，根据各位置处土体温度变化速率可以将其分为快速冻结、缓慢冻结和稳定冻结 3 个阶段，如图 3 所示。

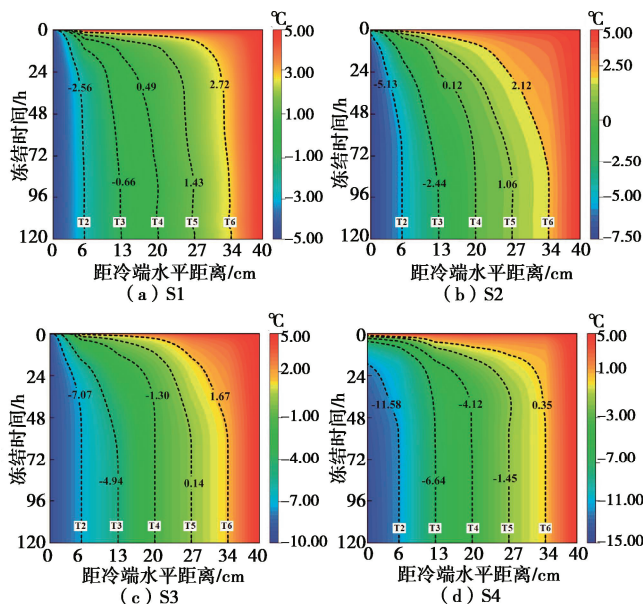


图 3 温度响应过程

Fig. 3 Response processes of temperature

冻结初期，随着左侧冷端温度逐渐降至试验设定值，负温开始朝着右侧土体进行热传递。土体内部各水平位置温度依次下降，负温传递速率逐渐衰减，离冷端较近的土体温度下降速率较快。在该阶段中，当土体温度低于对应的冻结温度时，土体内部就会发生冰水相变。据观察土体基本上在 12 h 左右后开始缓慢冻结，这主要是由于土体内部剧烈冰水相变的发生会释放大 量潜热，在一定程度上减缓了温度变化速率。随后，负温在向右传递的过程中，随着冻结时间和冻结深度的发展，土体降温速率在不断减小且产生的热阻增量消耗在变大。当冰水相变潜热释放的能量与左侧冷端传递下来的冷量相抵消时，温度曲线就开始动态稳定。此外，不同的温度梯度是冻结过程中软黏土热传递有所差异的主要原因。试验仓两侧的温度梯度

越大，土体内部发生的冰水相变越剧烈，对应的温度变化速率就越快，负温热传递的距离也就相对越远。

2.2 体积含水量演化过程

温度的改变必然会导致土体内部未冻水含量发生改变，冻结过程中未冻水含量的响应既是衡量水分迁移的重要指标，也在一定程度上可以反映出土体的冻结程度^[20]。水平冻结过程中，结合 EC-5 水分传感器对软黏土体积含水量的变化过程进行了监测，并将其分为轻微下降、剧烈下降、保持稳定 3 个阶段，如图 4 所示。首先，当土体冻结深度未达到水分传感器位置时，土体体积含水量虽会出现轻微的下降，但对应的变化量较小，这是因为该位置土体温度还未达到其对应的冻结温度。其次，当冻结深度达到传感器影响范围内，这也意味着该区域土体温度开始低于冻结温度，此时所测体积含水量会出现剧烈下降。这一阶段体积含水量变化最大，主要是由于内部的未冻水会发生显著的冰水相变，导致大量的未冻水转换成孔隙冰。最后，伴随着冰水相变的完成，该区域土体体积含水量也逐渐保持稳定。此外，土体未冻水含量与冻结深度有关，而冻结深度随着温度梯度的增大而增大，这就导致各水平位置处体积含水量有所差异。

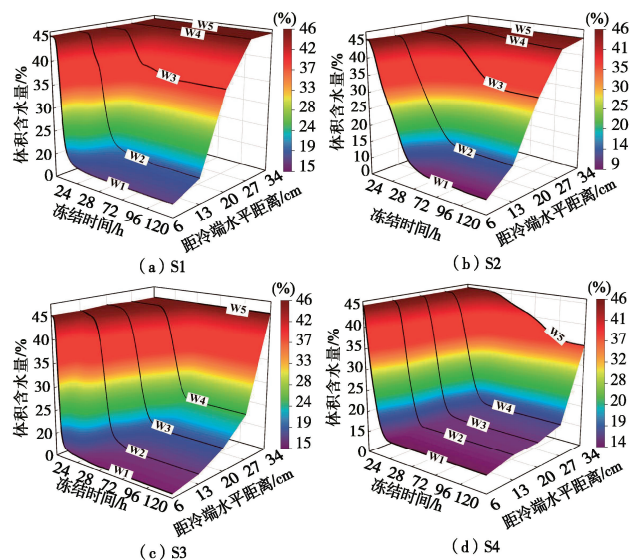


图 4 体积含水量响应过程

Fig. 4 Response processes of volumetric water content

2.3 孔隙水压力演化过程

孔隙水压力是揭示冻结过程中土体水分迁移机理的一个关键指标，现有研究表明其不仅可以促进水分迁移的发生，也是影响未冻区固结的重要因素^[21]，因此监测水平冻结过程中的孔隙水压力具有重要意义。图 5 表示不同温度梯度下各水平位置处孔隙水压力的变化趋势，结果显示在水平冻结过程中，测得的孔隙水压力均为负值，并整体呈下降趋势。这主要是由于温度降低导致土中的液态水持续相变成冰晶，冻结区

域近似于封闭真空状态。随着冻结锋面的右移, 孔压因抽吸力作用而逐渐减小。孔隙水压力的下降过程可以被概括成三部分: 快速下降、缓慢下降、稳定或轻微抬升。首先在冻结初期, 冻结区土体内部冰水相变的发生使孔压值快速减小, 靠近冷端的孔压值最小。冻结过程中未冻区的未冻水也会向冻结锋面处发生迁移, 导致未冻区孔压降低。然后冻结锋面随着温度传递逐渐向右侧暖段移动, 冻土区孔压虽然仍保持继续减小, 但孔压减小速率显著降低。最后当冰水相变完成后, 孔压逐渐保持动态稳定。尽管冻土区和未冻区孔压的变化过程相似, 但显然冻土区孔压的变化更加剧烈, 最大值可达 -53.79 kPa, 而靠近温端的孔压变化幅度较小。此外, 冷端温度的不同也导致孔压值有所差异, 孔压下降幅度随着冷端温度的降低而逐渐减小, 这主要是因为负温条件下冻土内部的未冻水数量与温度有关。

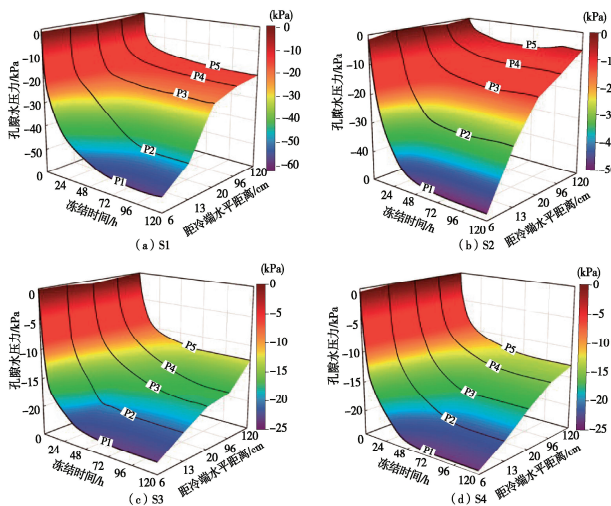


图5 孔隙水压力响应过程

Fig. 5 Response processes of pore-water pressure

2.4 土压力演化过程

冻结过程中土体内部未冻水发生冰水相变, 必然会导致土压力产生变化。土压力的改变会导致土颗粒排列顺序和空间分布发生改变, 从而影响水分迁移路径^[22]。同时土压力的改变在一定程度上也会影响未冻区的固结, 因此掌握水平冻结条件下土压力的变化过程对于剖析水平方向的水分迁移机理具有一定的意义。图6表明在不同温度梯度条件下各水平位置土压力的变化趋势。该研究中土压力变化过程总体上可以被分为4个主要阶段: 轻微增长阶段、快速增长阶段、短暂下降阶段、稳定阶段。冻结初期, 由于没有孔隙冰的产生且在温度梯度影响下水分仅发生少量的迁移, 此时土压力基本上保持轻微增长状态。当土体温度低于冻结温度时, 未冻水迅速转变成冰, 导致土压力快速增大。当冻结区冰水相变基本完成后, 所测的土

压力达到最大值。该过程中土颗粒会被压缩, 这主要是因为土压力作为张应力作用在土颗粒表面^[23]。随后, 附着在黏土颗粒上的薄膜水开始被冻结, 土压力在短暂下降后保持稳定。此外, 各温度条件下冻结区土压力的变化基本相似, 且变化幅度要比未冻区更为显著。试验结束后, 土压力分布沿着水平冻结方向逐渐减小且各水平位置土压力基本随着冷端温度的降低而增大, 这也充分说明了冻土土压力主要由冰水相变所引起。

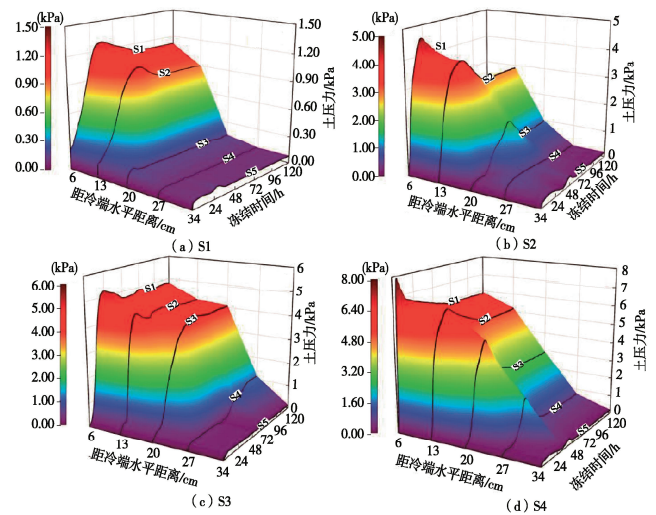


图6 土压力响应过程

Fig. 6 Response processes of soil pressure

2.5 冷生构造发育过程

冻结过程中土体内部相变产生的冰晶与土颗粒在空间上的排列和组合就构成了冻土独有的冷生构造^[1]。以S3试样为例, 分别截取各时刻试样水平宽度 $0\sim40$ cm、高度 $9.5\sim13.5$ cm的图像, 获得了水平冻结过程中软黏土冷生构造的发育全过程, 如图7所示。结果表明冻结区土体纵向剖面分布着数量较多且清晰显著的冷生构造特征(呈形态各异的冷生裂隙), 未冻区几乎没有变化。通过结合上述水热力试验数据和目测裂隙的形态、密度和分布特征, 将水平冻结过程中的冷生构造定性分为四部分: 整体状构造区(L1前)、纤维层状构造区(L1~L2)、薄层状构造区(L2~L3)、厚层状构造区(L3~L4)。

整体状构造区形成于水平冻结初期, 约3 h左右基本完成, 后期基本不随冻结时间的增加而出现显著改变。该区域软黏土冻结速率和冻结锋面右移速率较快, 且由于没有分凝冰存在, 导致土体纵剖面未观测到显著的冷生裂隙。随着负温向右热传递, 热阻的增大致使土体冻结速率和冻结锋面移动速率稍有降低, 并逐渐形成纤维层状冷生构造。纤维层状构造区(L1~L2)基本在12 h后完全形成, 该区域生长着众多数量的分布均匀的冷生裂隙, 多数呈四边形结构(极

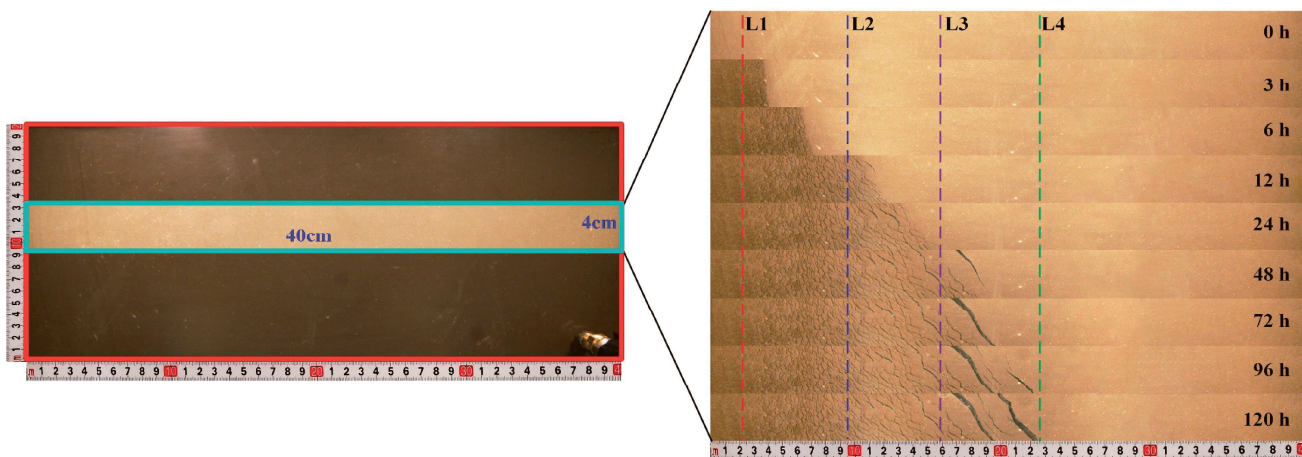


图7 试样 S3 冷生构造发育过程

Fig. 7 Development processes of cryostructure of sample S3

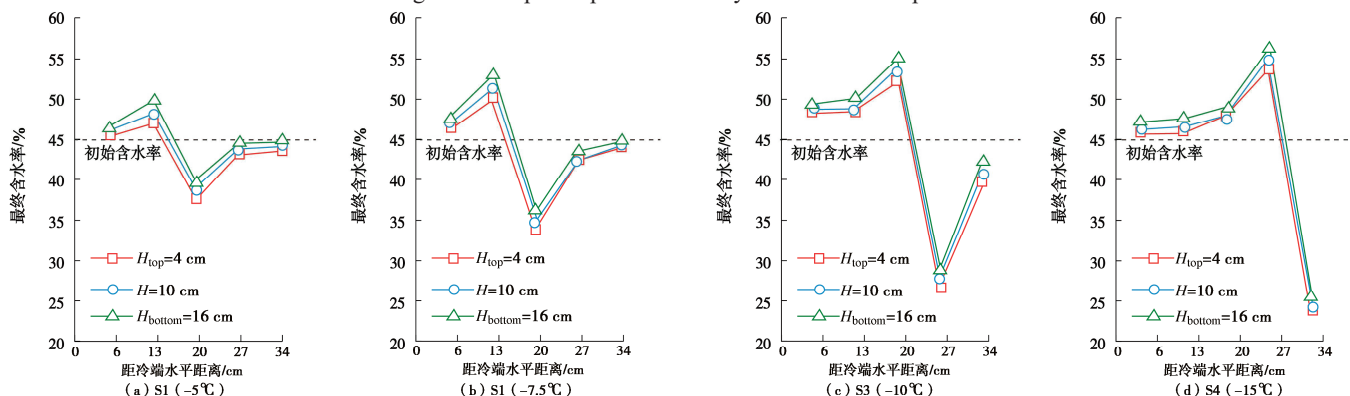


图8 最终含水率分布

Fig. 8 Distribution of final moisture content

少数为六边形结构), 其普遍宽度约为 1~4 mm 且相邻结构间具有高度的平行性。薄层状冷生构造区 (L2~L3) 与纤维层状构造区类似, 主要区别在于冷生裂隙的分布数量和形态大小。虽然该区域含有较少数量的冷生裂隙, 但单个冷生裂隙的面积要普遍大于上一区域。同时, 该区域形成的部分多边形冷生裂纹开始相互联结, 并逐渐形成倾斜式的褶皱形分布。随着热阻的增大, 冻结锋面逐渐停止移动, 水分迁移和冰分凝基本完成, 软黏土最终会形成厚层状冷生构造 (L3~L4)。该区域生长着厚度最高的冰透镜体, 具体表现为土体纵向剖面会形成 1~2 条较宽的竖向裂隙, 最大裂隙宽度可达 5~6 mm。

3 讨论

3.1 水分重分布

冻结过程中土体会发生显著的水分迁移现象, 其是导致冻胀灾害的重要原因。试验后将土样沿水平方向切割成 5 层, 每层从顶部依次在 4, 10, 16 cm 处向下取样并测定最终含水率。结果表明水平冻结过程中水分实际上是发生双向迁移的, 如图 8 所示。对于竖向来说, 冻结后底部土样的含水率始终高于顶部。这是由于在重力作用下, 顶部淤泥土样中的水分会向底

部迁移, 因此在冻结时底部土体降温速率更快, 这就会形成竖向的温度梯度, 从而导致水分发生轻微迁移。这也证明了水平冻结过程中重力对水运移的影响是不可忽视的。对于水平向来说, 冻土区含水率要明显高于初始含水率, 这是由于未冻水在相变成冰时会产生负孔压, 促使未冻区的液态水在抽吸力作用下发生迁移。同时根据薄膜水理论, 土颗粒表面厚度不一的未冻水膜会形成渗透压力驱使未冻水会从水膜较厚的一端向水膜较薄的一端运移^[9]。

冻结后土体含水率最大值常出现在离冻结锋面约 1~3 cm 处, 这主要是因为冰水相变形成的冰晶会离散分布在土体各孔隙中, 导致土体孔隙连通性发生改变, 从而降低了渗透性。因此, 实际上大多数未冻区的液态水主要迁移至冻结锋面附近, 难以迁移至最冷端。同时, 温度梯度是影响水分迁移的一个重要因素, 已有研究表明温度梯度与冻结时形成的冻结缘有关^[24], 冻结缘厚度可能会因梯度的增加而减小, 从而导致水分顺利的迁移。这正好与图 8 所示的各位位置含水率分布情况相互验证, 即水分迁移量随着温度梯度的增大而增大, 如冷端温度为 -5°C, -15°C 时, 冻结后最大含水率分别为 49.8%, 56.2%。这也说明在封闭试验条件下冻土内部水分迁移主要由温度梯度所主导, 冷端温度的差异将直接影

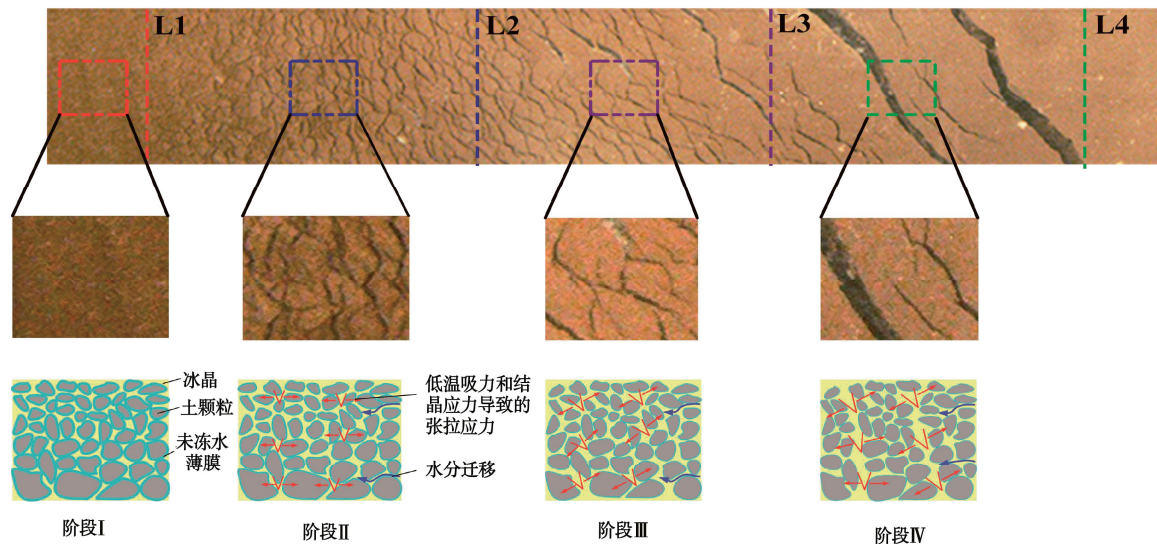


图9 冷生构造形成机制

Fig. 9 Formation mechanism of cryostructure

响着冰水相变速率和温度传递速率。即较低的负温可以加速土体中孔隙水的相变及加快冻结锋面右移,从而提高水分迁移速率。此外,冻结后未冻区土体的含水率低于初始值,这表明未冻区出现脱水固结现象,其主要由负孔压(抽吸力)与温度梯度所引起。

3.2 冷生构造形成机理

水平冻结过程中,土体冷生构造的发展与内部冰透镜体的生长息息相关。由于冰晶的产生及其分布的离散性,导致土体纵剖面形成了形态不一的冷生裂隙,如图9所示。冻结试验开始后,土体内部首先发生原位冻结,靠近冷端的孔隙水迅速被冻结。虽然该阶段也存在温度梯度,但由于时间较短,未冻区的液态水来不及迁移,因此该区域不存在分凝冰。随着冻结锋面的推进,附着在土颗粒上的薄膜水逐渐被冻结,水分开始初步迁移。但由于黏土颗粒的持水性好,因此该阶段主要冻结的是孔隙水和土颗粒表面的薄膜水,水分迁移量较少。该阶段会产生少量分凝冰,它会压缩周围土体,导致土颗粒原有排列顺序和空间位置发生一定的改变。在该过程中,在冰透镜体产生的结晶应力和低温吸力的共同作用下导致张拉应力增大,从而形成了土体冷生微裂隙。而微裂隙经过不断发展、相互联结,就构成了多边形的冷生构造。随着水平冻结的持续进行,未冻区的水分不断地迁移至冻结区的微裂隙处,并相变成冰晶充满裂隙。然而由于冻土区渗透性较差,各区域实际水分迁移量与温度相关,靠近冻结锋面附近的水分迁移最明显。因此,第三和第四阶段水分迁移量要明显高于前两个阶段,在该阶段冰透镜体获得更多水分补充,促进了张拉应力的积累,从而导致宏观微裂隙的形成,尤其是第四阶段。该阶段临近冻结锋面,积累着大量的冰透镜体,因此该处土体受到较大的拉应力作用,这也是该区域裂隙

最为显著的原因。

3.3 软黏土水-热-力-构造耦合过程

水平冻结过程中,试验仓两侧形成的温度梯度会导致软黏土发生水分迁移,该过程伴随着温度、水分、孔隙水压力、土压力、冷生构造的变化,如图10所示。当饱水土颗粒温度低于冻结温度时,位于孔隙中的部分液态水就会相变成冰晶,并将土颗粒紧密的胶结在一起。冰晶的产生会直接导致土体体积含水量快速下降,但在土颗粒表面仍然存在未冻水膜,这也是温度梯度条件下水分迁移发生的基础(薄膜理论)。冰晶也会导致孔压和土压力发生变化,前者主要在抽吸力作用下产生负孔压,其为液态水的迁移提供了驱动力,并且也是造成未冻区固结的原因之一。后者主要是由于液态水相变成冰晶的过程会导致体积膨胀,从而导致土压力增大。冻结过程中土压力的变化也会影响未冻区固结,与负孔压引起的真空固结不同,土压力主要引起未冻区压密固结。

此外,软黏土水分迁移过程中冰透镜体的产生和积累影响着冷生构造的发育,其是形成冷生构造的重要物质组成^[25]。不同于垂直冻结,水平冻结过程产生的冰透镜体并不是完全垂直于温度梯度方向,往往呈一定角度倾斜分布,尤其是冻结后期。这是由于在重力和水分迁移驱动力共同作用下,淤泥样品底部的含水率高于顶部,而水的导热速率快于土颗粒,从而导致试验仓底部样品的温度更快达到冻结温度。同时,冷生构造的形态、排列顺序会影响冻结区水分迁移的进行。垂直于热流方向的褶皱型冷生构造无疑会导致水分迁移通道受阻。而对于多边形冷生构造,相邻裂隙间接触点处相互贯通联结,可能会形成平行于热流方向的“通道”,保障冻土区水分迁移的顺利进行。

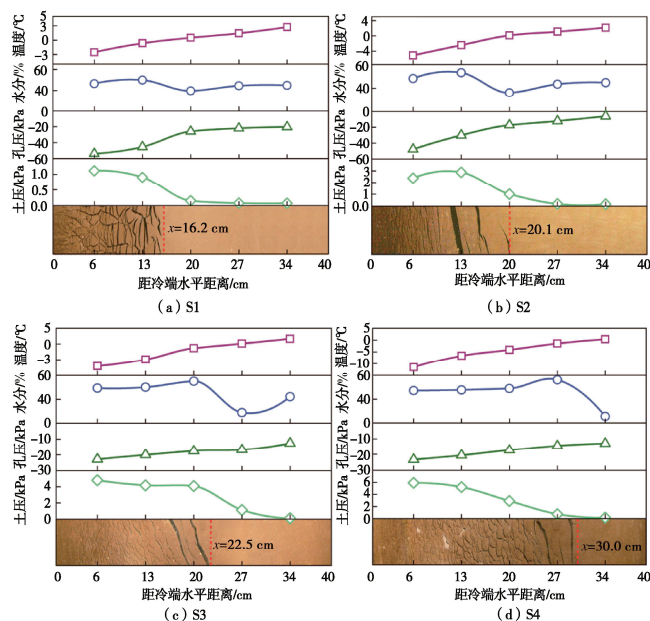


图 10 冻结后水-热-力-构造分布特征

Fig. 10 Water-heat-force-structure coupling process after freezing

4 结 论

利用自主研发的一维可视化水平冻结装置,对高含水率软黏土进行了单向水平冻结试验,探究了水平冻结过程中软黏土水-热-力-构造响应规律,得出以下4点结论。

(1)试验时各水平位置处温度变化可分为快速冻结、缓慢冻结和稳定冻结3个阶段,对应位置的体积含水量变化可分为轻微下降、剧烈下降、保持稳定3个阶段。冻结过程中测得的孔隙水压力均为负值,且整体呈下降趋势;冻结区土压力分为轻微增长阶段、快速增长阶段、短暂下降阶段、稳定阶段。

(2)水平冻结过程中土体纵剖面具备显著清晰的多边形冷生构造。各阶段冷生构造的分布与冰透镜体的时空分布、受力相关,其形成主要是低温吸力和结晶应力诱导下张拉应力作用的结果。

(3)水平冻结过程中软黏土会发生双向水分迁移现象,竖向水分迁移量远小于水平向。水平向上,冻结区含水率均高于初始含水率,未冻区则相反,最大值出现在离冻结锋面1~3 cm处;竖向上,底部土样的含水率要始终高于顶部。

(4)水平冻结过程实际上是水-热-力-构造耦合过程,涉及水分迁移、未冻区固结、冷生构造发育等现象。水分迁移会引起各水平位置处温度、水分、孔隙水压力、土压力发生改变,且相变产生的冰透镜体是冷生构造的重要物质组成,而冷生构造的形态、排列顺序也会影响着冻结区水分迁移的顺利进行。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 张虎和胡金涛参与试验设计和文章撰写;郑波参与数据分析和经费支持;杨岁桥、东宇轩、鲁明参与实施研究和采集数据;梁煜和邢利军参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。ZHANG Hu and HU Jintao participated in the experimental design and article writing; ZHENG Bo participated in data analysis and financial support; YANG Suiqiao, DONG Yuxuan and LU Ming participated in the implementation of research and data collection; LIANG Yu and XING Lijun participated in the writing and revision of the paper. All authors read and agree to the submission of the final manuscript.

参考文献:

- [1] 徐学祖. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (XU Xuezu. Frozen Soil Physics[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [2] 沈宇鹏, 王笃礼, 林园榕, 等. 越冬基坑水平冻胀的防治措施效果分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1434-1442. (SHEN Yupeng, WANG Duli, LIN Yuanrong, et al. On the effect of prevention measures against horizontal frost heave of foundation pits over winter[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(5): 1434-1442. (in Chinese))
- [3] 胡康琼. 多年冻土区 U 型槽的水平冻胀特性试验及理论研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017. (HU Kangqiong. Study on On-Site Test and Theoretical Analyses of Horizontal Frost Heaving Characteristics of U-shape Canal in Permafrost Region[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese))
- [4] 郜新军, 李铭远, 张景伟, 等. 富水粉质黏土中地铁联络通道冻结法试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(6): 1267-1276. (GAO Xinjun, LI Mingyuan, ZHANG Jingwei, et al. Field research on artificial freezing of subway cross passages in water-rich silty clay layers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(6): 1267-1276. (in Chinese))
- [5] 陈瑞杰, 程国栋, 李述训, 等. 人工地层冻结应用研究进展和展望[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 40-44. (CHEN Ruijie, CHENG Guodong, LI Shuxun, et al. Development and prospect of research on application of artificial ground freezing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 40-44. (in Chinese))
- [6] 鲁先龙, 陈湘生, 陈曦. 人工地层冻结法风险预控[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(12): 2308-2314. (LU Xianlong, CHEN Xiangsheng, CHEN Xi. Risk prevention and control of artificial ground freezing(AGF)[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(12): 2308-2314. (in Chinese))
- [7] 温智, 邓友生, 冯文杰, 等. 冻土水分迁移机理研究: 评

- 述与展望[J]. 冰川冻土, 2023, **45**(2): 588-598. (WEN Zhi, DENG Yousheng, FENG Wenjie, et al. Study on the mechanism of moisture migration in freezing soils: review and prospect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, **45**(2): 588-598. (in Chinese))
- [8] EVERETT D H. The thermodynamics of frost damage to porous solids[J]. Transactions of the Faraday Society, 1961, **57**: 1541-1551.
- [9] HOEKSTRA P. Moisture movement in soils under temperature gradients with the cold-side temperature below freezing[J]. Water Resources Research, 1966, **2**(2): 241-250.
- [10] MILLER R D. Freezing and heaving of saturated and unsaturated soil[C]// 51st Annual Meeting of the Highway Research Board: Issue 393. Columbia, 1972.
- [11] O'NEILL K, MILLER R D. Exploration of a rigid ice model of frost heave[J]. Water Resources Research, 1985, **21**(3): 281-296.
- [12] 周 扬, 周国庆, 王义江. 饱和土水热耦合分离冰冻胀模型研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(11): 1746-1751. (ZHOU Yang, ZHOU Guoqing, WANG Yijiang. Separate ice frost heave model for coupled moisture and heat transfer in saturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(11): 1746-1751. (in Chinese))
- [13] 常文正, 王天亮, 王 林. 水热力作用下铁路基床翻浆冒泥力学特征试验研究[J]. 岩土力学, 2024, **45**(11): 3304-3314. (CHANG Wenzheng, WANG Tianliang, WANG Lin. Mechanical characteristics of mud pumping in railway subgrade under hydrothermal action[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, **45**(11): 3304-3314. (in Chinese))
- [14] HAO X Y, MA W, FENG W J, et al. Investigation on the frost heave-induced pressure and hydro-thermal processes in freezing soil under rigid constraint and hydraulic pressure[J]. Engineering Geology, 2023, **323**: 107238.
- [15] 张玉芝, 刘文龙, 王海永, 等. 冻融循环作用下含水率对粗颗粒填料水分迁移影响的宏细观试验研究[J]. 冰川冻土, 2022, **44**(2): 591-601. (ZHANG Yuzhi, LIU Wenlong, WANG Haiyong, et al. Macro-micro experimental investigation of the initial water content influence on water migration of coarse-grained soil subjected to freezing and thawing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, **44**(2): 591-601. (in Chinese))
- [16] TANG T X, SHEN Y P, LIU X, et al. The effect of horizontal freezing on the characteristics of water migration and matric suction in unsaturated silt[J]. Engineering Geology, 2021, **288**: 106166.
- [17] SHEN Y P, TANG T X, WANG D L, et al. Nonzero angle between the directions of matric suction and gravity during horizontal freezing[J]. Acta Geotechnica, 2024, **19**(2): 821-831.
- [18] HE X H, RUI D H, QIN B, et al. Water migration and temperature field evolution under horizontal freezing condition[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2023, **16**(2): 91-99.
- [19] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [20] 孙颜顶, 刘 波, 张静涛, 等. 冻融状态下粉质黏土电阻率、未冻水含量及温度关系[J]. 中国矿业大学学报, 2023, **52**(1): 52-62. (SUN Yanding, LIU Bo, ZHANG Jingtao, et al. Relationship between electrical resistivity, unfrozen water content and temperature of silty clay under freeze-thaw condition[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, **52**(1): 52-62. (in Chinese))
- [21] ZHANG L H, MA W, YANG C S, et al. Investigation of the pore water pressures of coarse-grained sandy soil during open-system step-freezing and thawing tests[J]. Engineering Geology, 2014, **181**: 233-248.
- [22] 郭从洁, 时 伟, 杨忠年, 等. 冻融作用下初始含水率对膨胀土边坡稳定性的影响研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, **53**(1): 69-79. (GUO Congjie, SHI Wei, YANG Zhongnian, et al. Research on the influence of initial moisture contents on the stability of the expansive soil slope under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2021, **53**(1): 69-79. (in Chinese))
- [23] 谭仁义, 吴道勇, 黄佑芬, 等. 冻结过程中水分盐分结晶相变对盐渍土压力的影响[J]. 硅酸盐通报, 2021, **40**(4): 1296-1303, 1329. (TAN Renyi, WU Daoyong, HUANG Youfen, et al. Effects of water and salt crystallization phase change on saline soil pressure during freezing process[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, **40**(4): 1296-1303, 1329. (in Chinese))
- [24] SHENG D C, ZHANG S, YU Z W, et al. Assessing frost susceptibility of soils using PCHeave[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, **95**: 27-38.
- [25] WANG Y T, WANG D Y, MA W, et al. Laboratory observation and analysis of frost heave progression in clay from the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, **131**: 381-389.