

DOI: 10.11779/CJGE20231279

考虑循环冻融历史与初始各向异性的非饱和膨胀土 冻结变形特征试验研究

张思钰^{1,2}, 张勇敢^{1,3,4}, 鲁 洋^{*1,4}, 刘斯宏^{1,4}

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049; 3. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 4. 河海大学大坝长效特性及环保修复技术中西联合实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 地处季冻区的膨胀土胀缩变形显著, 由此诱发的工程隐患与灾害尤为严重。为探究循环冻融历史与初始各向异性影响下非饱和膨胀土的冻结变形特征, 开展了压实膨胀土的循环冻融和体变量测试。试验结果表明: ①相较于融化状态, 膨胀土在冻结状态下的体积应变受干密度与含水率影响更显著, 含水率越高、干密度越大, 试样融化和冻结状态下的体积应变差异越大。②膨胀土试样冻结体变随初始饱和度增加呈先减小后增大的变化趋势, 且表现为低饱和度时“冻缩”, 高饱和度时“冻胀”。③试样的冻结体积应变与含水率呈二次函数关系, 存在一个“临界含水率”特征值, 使得试样的体积收缩率最大。④循环冻融作用下, 低含水率试样的冻结体积应变较高含水率时更易稳定; 轴向应变随冻结次数的累积效应较径向应变更为显著。⑤压实作用诱导膨胀土试样冻结变形呈各向异性, 且含水率越高, 冻结变形各向异性越显著。研究结果可为季冻区膨胀土地段工程的变形控制和灾害防治提供参考。

关键词: 膨胀土; 冻融循环; 冻结变形; 各向异性; 变形机理

中图分类号: TU445 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)05-1004-10

作者简介: 张思钰(1999—), 女, 博士研究生, 主要从事水工岩土工程等方面的研究工作。E-mail: siyu.zhang@hhu.edu.cn。

Experimental study on freezing deformation characteristics of unsaturated expansive soils considering cyclic freeze-thaw and initial anisotropy

ZHANG Siyu^{1,2}, ZHANG Yonggan^{1,3,4}, LU Yang^{1,4}, LIU Sihong^{1,4}

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 4. International Joint Laboratory of Long-term Behaviour & Environmentally Friendly Rehabilitation Technologies on Dams, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The swelling and shrinkage deformation of the expansive soils in seasonally frozen regions is significant, which seriously induces engineering hazards and disasters. To investigate the freezing-induced deformation characteristics of the unsaturated expansive soils under the influences of cyclic freeze-thaw and initial anisotropy, a series of cyclic freeze-thaw tests and volumetric variation measurement tests on the compacted expansive soils are carried out. The test results show that: (1) Compared with the melting state, the volumetric strain of the expansive soils in freezing state is more significantly affected by the dry density and water content. The higher the water content and dry density, the greater the difference of frozen and melted volumetric strains. (2) With the increase of the initial saturation, the frozen volumetric strain of the expansive soil samples first decreases and then increases, indicating freezing shrinkage at low saturation and freezing swelling at high saturation. (3) There is a good quadratic relationship between the frozen volumetric strain and the water content, and there exists a characteristic value of "critical water content", at which the maximum volumetric shrinkage occurs. (4) Under the cyclic freeze-thaw action, the frozen volumetric strain of the samples with low water content is more stable than that with the higher water content. The cumulative effects of the axial strain with freezing times are more significant than those of the radial strain. (5) The frozen deformation has compaction-induced anisotropy, which is more significant at higher water contents. The research results can provide reference for the deformation control and disaster prevention of the expansive soils in seasonally frozen regions.

Key words: expansive soil; freeze-thaw cycle; freezing
deformation; anisotropy; deformation mechanism

基金项目: 国家自然科学基金项目(52109123, 52279099)

收稿日期: 2023-12-28

*通信作者 (E-mail: luy@hhu.edu.cn)

0 引言

膨胀土是一类结构性不稳定的高塑性黏土, 富含强亲水性的蒙脱石和伊利石等矿物质, 其胀缩变形特征受外界环境因素影响显著^[1]。近年来, 随着中国基础设施建设的纵深发展, 季冻区涌现了大量膨胀土地段, 观测资料表明, 循环冻融作用下膨胀土胀缩变形显著, 破坏程度比常规环境作用更加严重, 由此诱发的工程隐患和灾害突出。例如, 新疆北部供水工程膨胀土渠坡发生变形破坏^[2], 吉长长珲高铁沿线膨胀土路堑变形导致抗滑桩倾斜^[3], 黑龙江北部引嫩总干渠的膨胀土渠坡发生冻胀变形和失稳破坏等^[4]。上述灾害的发生造成了巨大经济损失, 膨胀土工程问题面临更为严峻的新挑战, 由此也引发了学术界对循环冻融作用下膨胀土胀缩变形特征的日益关注。

目前, 对膨胀土胀缩变形问题已开展了大量研究, 需要指出的是, 早期的成果主要集中在其遇水膨胀特性^[5], 随着气候变化影响下极端干旱事件的频发, 膨胀土干缩变形产生的危害也逐渐受到关注^[6]。目前关于膨胀土的胀缩变形规律的认识比较统一, 在干湿循环作用下表现为典型的“干燥收缩、浸水膨胀”特征^[7]。相比之下, 关于循环冻融作用下膨胀土变形特征的研究还有所欠缺。冻融作为一种强风化作用会显著改变土的结构性, 进而对其胀缩变形产生显著影响^[8]。其中, 冻结阶段的土体变形更为复杂, 一方面, 土中的液态水结冰, 水冰相变导致体积膨胀, 从而诱发土体发生“冻胀”变形; 另一方面, 液态孔隙水减少会导致类似“干燥收缩”的体积收缩现象^[9]。为此, 有学者开展了不同含水率^[10]、压实度^[11]、竖向荷载^[12]条件下土的冻融变形试验, 并初步得到了膨胀土冻融变形规律, 也有学者探究了冻融作用下膨胀土的微观结构演化特性^[13]。事实上, 忽略土体固相变形, 膨胀土的冻融变形与孔隙大小及初始含水率密切相关^[14], 换言之, 其受初始饱和度影响, 然而, 现有研究对膨胀土试样初始状态的考虑仍存局限, 冻融变形规律暂未得到一般性结论, 冻胀冻缩变形机制尚不清晰。此外, 冬夏季节交替和气温变化, 膨胀土往往经历多个周期的冻融作用, 其冻结变形规律与循环冻融历史密切相关, 多次冻融累积效应对土体再次遭遇低温冻结时变形特性的演化规律仍需探明。

实际膨胀土地段工程中, 往往重点关注土体沿某一方向的变形, 如挡墙和桩基工程中, 需监测构筑物的横向挤压变形; 而在路基和地基工程中, 隆起或塌陷等竖向变形则更受关注。事实上, 无论是天然沉积土或是人工碾压土, 土体内部结构均呈各向异性, 而

这种因压实作用或沉积作用引起的土体结构初始各向异性对其冻结变形影响的规律及机制尚不清晰。

鉴于此, 本文以南水北调中线工程的膨胀土为研究对象, 开展压实膨胀土的循环冻融和变形量测试, 探究循环冻融历史和初始各向异性影响下非饱和膨胀土的冻结变形演化规律及其物理机制, 以期为季冻区膨胀土地段工程的变形控制和灾害防治提供参考。

1 试样制备与试验方案

1.1 试验土料与试样制备

试验采用的膨胀土取自南水北调中线工程叶县段, 该地区常年遭受冻融循环作用, 最低负温稳定在-10℃。根据土工试验方法标准^[15]对该膨胀土进行基本物理特性测试, 获得相关物性参数: 最大干密度 ρ_{dmax} 为 1.60 g/cm³, 最优含水率 w_{opt} 为 21.7%, 颗粒相对质量密度 G_s 为 2.67, 液限、塑限含水率分别为 70.8%, 26.3%; 此外, 该膨胀土的自由膨胀率为 59%, 按照技术规范^[16]分类属于弱膨胀土, 级配曲线如图 1 所示。试验选用直径 61.8 mm、高 50 mm 的重塑圆柱样与尺寸为 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 的立方体试样, 具体制备过程与文献^[17]一致。

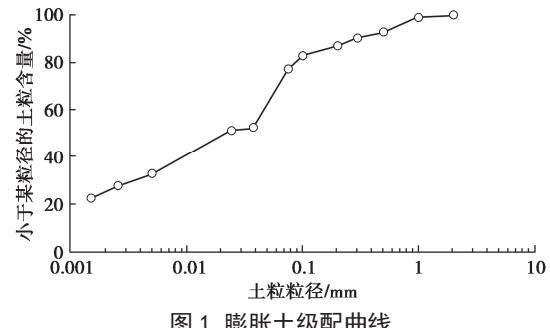


图 1 膨胀土级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of expansive soils

1.2 试验方法

如图 2 所示, 试验在河海大学冻土试验室的两组恒温试验箱内进行, 试验箱控温精度为±0.5℃。经预试验发现, 12 h 可以确保本文尺寸膨胀土试样的冻结变形和融化变形完全达到稳定, 因此, 试验开始后, 首先将试样放入-10℃恒温试验箱持续冻结 12 h, 随后移入 20℃恒温试验箱中持续融化 12 h, 一次完整的冻融循环共历时 24 h。综合考虑一般土体力学性质的冻融劣化规律以及试验过程中膨胀土试样的冻融变形特征^[10], 最终确定试样在经历 8 次冻融循环后结束试验。

为确保试验精度, 圆柱形试样的高度变化采用图 3 所示百分表进行实时监测, 百分表针尖与试样顶部中心放置一块光滑平整的不锈钢垫片; 圆柱形试样的直径变化采用精度为 0.01 mm 的数显游标卡尺进行测量, 测量时采用 4 块等厚度的有机玻璃板对数据测量

点进行精确定位, 最终将试样 4 个测点测量的直径变化进行平均; 立方体试样的三向变形分别采用百分表进行监测。试样轴向应变、径向应变、线应变及体积应变分别为冻结/融化稳定后其轴向、径向、棱长及体积变形量与初始轴向、径向、棱长及体积的比值。

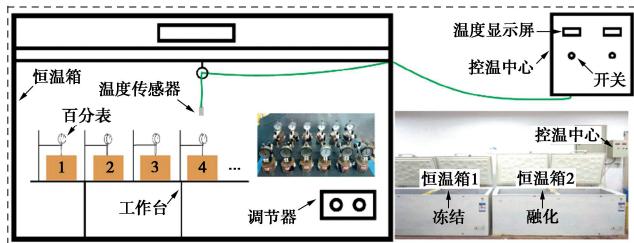


图 2 试验装置

Fig. 2 Test apparatus

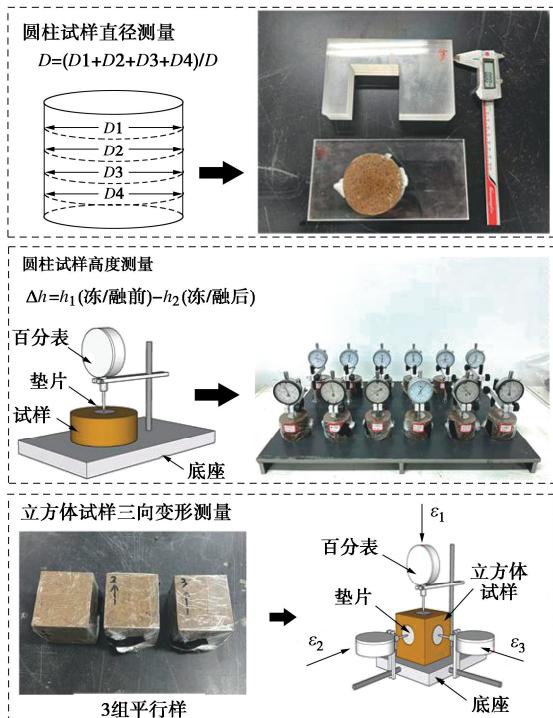


图 3 变形量测方法示意图及照片

Fig. 3 Diagram and photos of measuring method for deformation

1.3 试验方案

为探究饱和度对土体物理力学特性的影响, 多数学者采用干燥/吸湿的方式控制试样的饱和度^[18-19], 这种方式实质上忽略了土体的吸水膨胀和失水收缩特性, 当然, 对于水分不敏感的土体, 这种忽略并不会显著影响试验结果, 而膨胀土则不然。事实上, 对于一个制备完成的试样, 其饱和度是干密度和含水率的单值函数, 也即是说, 试样的饱和度由干密度和含水率共同决定。此外, 已有研究表明, 对于两个土质与饱和度完全相同的试样, 当二者的干密度不同时, 冻胀变形存在显著的差异^[14]。因此, 忽略影响饱和度的

两个直接因素(干密度和含水率), 直接控制饱和度来探究其对土体冻结变形的影响具有一定的局限性。为此, 本文以干密度和含水率为基本变量, 设计了表 1 所示的试验方案。为确保试验结果的可靠性, 各试验工况均设置 3 组平行试样, 共计 60 个试样。

表 1 试验方案

Table 1 Test programs

试样 编号	干密度/ (g·cm ⁻³)	含水率/%	饱和度	冻融循环 次数
T1	1.60 (ρ_{dmax})	17.7	0.70	
T2	1.60 (ρ_{dmax})	19.7	0.78	
T3	1.60 (ρ_{dmax})	21.7 (w_{opt})	0.86	
T4	1.60 (ρ_{dmax})	23.7	0.94	
T5	1.60 (ρ_{dmax})	25.7	1.00	
T6	1.52	17.7	0.62	
T7	1.52	19.7	0.69	
T8	1.52	21.7 (w_{opt})	0.76	
T9	1.52	23.7	0.83	0, 1, 2, 3,
T10	1.52	25.7	0.90	4, 5, 6, 7,
T11	1.44	17.7	0.55	8
T12	1.44	19.7	0.61	
T13	1.44	21.7 (w_{opt})	0.68	
T14	1.44	23.7	0.74	
T15	1.44	25.7	0.80	
T16	1.36	17.7	0.49	
T17	1.36	19.7	0.54	
T18	1.36	21.7 (w_{opt})	0.60	
T19	1.36	23.7	0.66	
T20	1.36	25.7	0.71	

2 试验结果与分析

2.1 循环冻融作用下膨胀土体变规律

图 4 给出了不同含水率下各干密度试样的体积应变与循环冻融次数的关系曲线(横坐标 0.5, 1.5 等代表冻结状态, 1, 2 等代表融化状态), 可以看出: ①在循环冻融作用下, 仅有含水率为 25.7%, 干密度为 1.60 g/cm³ 的试样表现为“冻胀融缩”, 其余试样表现为“冻缩融胀”的变化趋势。②当含水率等于或低于 19.7% 时, 试样的体积应变在经历 2 次冻融循环后趋于稳定; 反之, 在经历 4 次冻融循环后趋于稳定。即试样含水率越高, 其体变受循环冻融历史影响越大。③含水率 17.7% 的试样, 循环冻融作用下各干密度试样的体积应变几乎完全相同, 但随着含水率的增加, 各干密度试样的体积变化关系曲线逐渐发生分离; 当含水率增至 25.7% 时, 各干密度试样的体积应变呈现显著差异, 即试样含水率越大, 干密度对冻融作用下试样的体变行为影响越大。④相较于融化状态, 冻结状态下试样的体积应变受干密度影响更大, 且含水率越高, 影响越显著。例如含水率为 25.7% 的试样在冻结状态下各干密度试样的体积应变最大差值为 7.7%, 而在融化状态下体积应变最大差值仅为 1.8%。

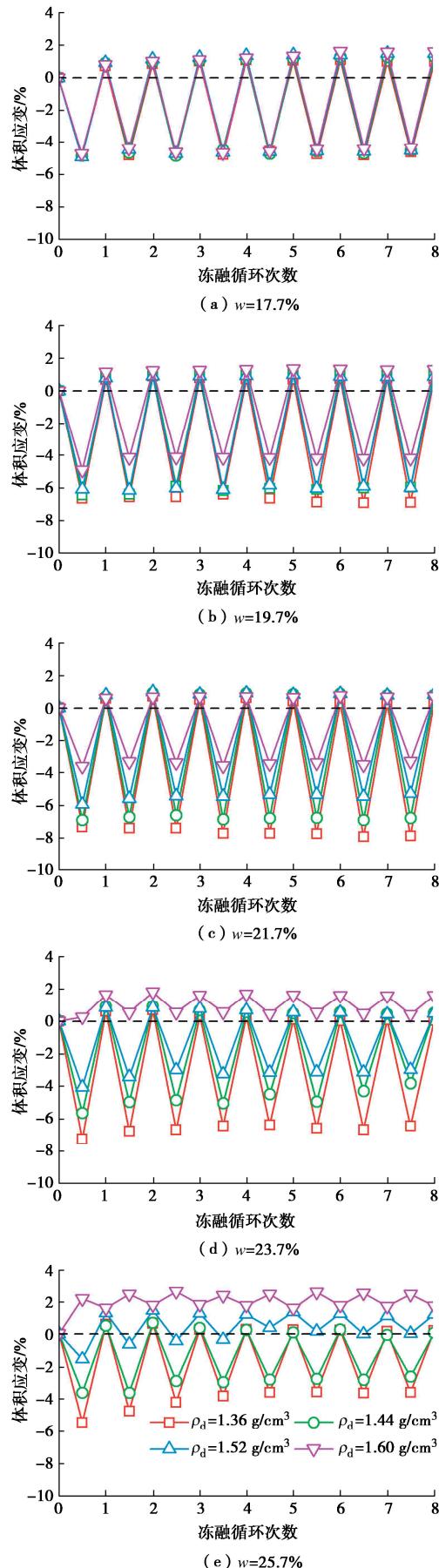


图4 不同含水率下试样体积应变与干密度关系

Fig. 4 Relationship between volumetric strain and dry density of samples with different water contents

图5给出了不同干密度下各含水率试样的体积应变与循环冻融次数的关系曲线,可以看出:①随着试样干密度增大,各含水率试样的体积应变差异性更为显著,说明试样干密度越大,含水率对冻融作用下试样的体变行为影响越大。②相较于融化状态,冻结状态下含水率对试样体积应变影响更大。例如干密度为 1.6 g/cm^3 的不同含水率试样在冻结状态下体积应变的最大差值为7.1%,远大于融化状态下试样体积应变的最大差值(仅为1.5%)。

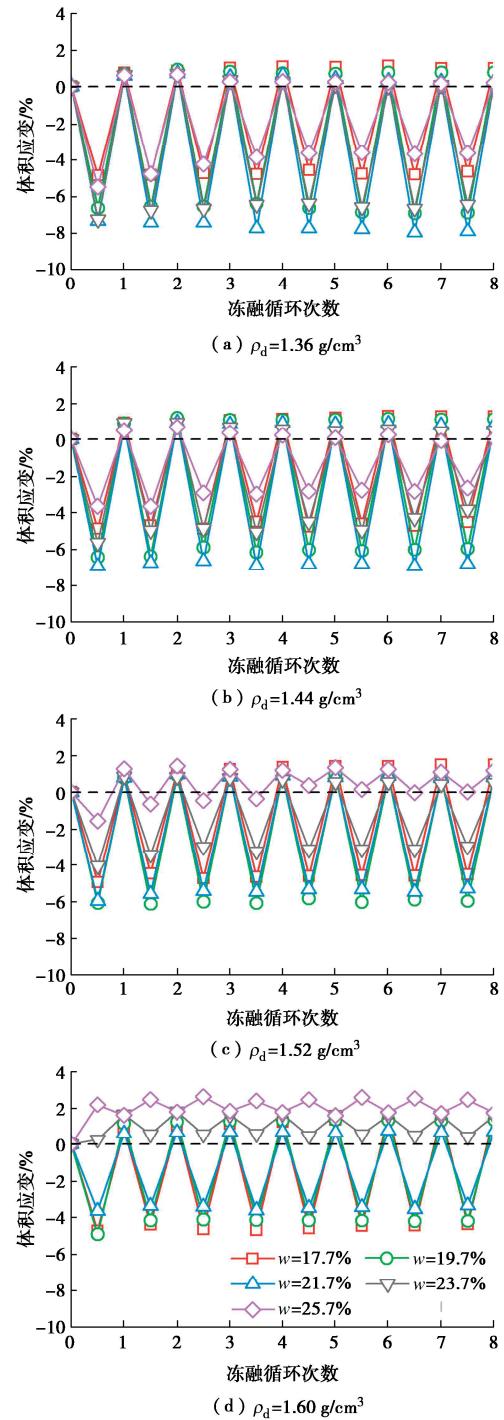


图5 不同干密度下试样体积应变与含水率关系

Fig. 5 Relationship between volumetric strain and water content of samples with different dry densities

综合图 4, 5 可知, 相较于融化状态, 膨胀土在冻结状态下的体积应变受干密度与含水率影响更显著, 且试样在第 1 次冻结后体积便发生显著变化, 在 4 次冻结后所有试样变形趋于稳定。进一步地, 图 6 给出了试样在第 1 次、第 4 次冻结作用下体积应变与初始饱和度的关系曲线, 可以看出, 膨胀土试样的体积应变与饱和度密切相关, 表现为试样的体积应变随初始饱和度增加呈先减小后增大的变化趋势, 类似的试验现象在 Hamilton 等^[9]的研究中也有所发现。

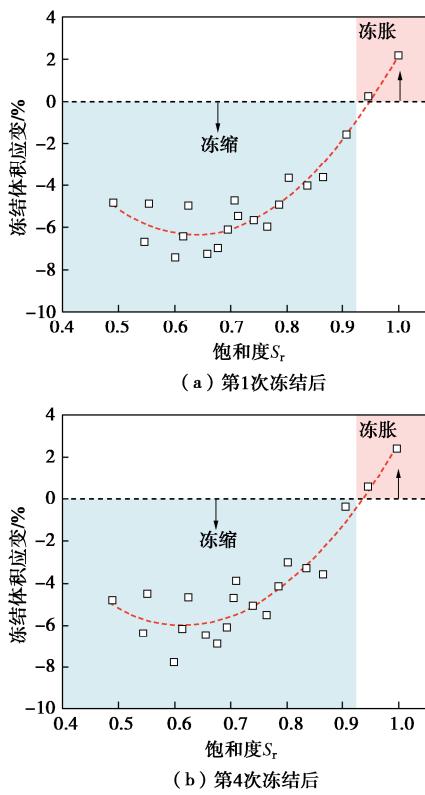


图 6 试样冻结后体积应变与饱和度关系

Fig. 6 Relationship between volumetric strain and saturation of frozen samples

2.2 膨胀土冻胀、冻缩变形机制

根据大量文献报道可知, 膨胀土具有典型的双孔隙结构特征^[20], 其聚集体内孔隙水为土颗粒附着的强、弱结合水^[21], 聚集体间孔隙储存毛细水、自由水。冻结作用下, 土体内部将同时经历以下 3 个过程: 聚集体间孔隙水相变成冰并产生 9% 的体积增量, 引起膨胀变形; 与此同时, 土体冻结后, 并非所有的液态水相变成冰, 土颗粒的表面吸附作用会使得土体内部赋存一定数量的未冻水, 未冻水与冰界面之间形成的冻吸力将直接作用于土骨架^[22], 且由于冻吸力远大于未冻结状态下水-气界面的基质吸力^[23], 使得冻结后土骨架间的有效应力显著增大, 孔隙发生压缩; 此外, 由于聚集体间大孔隙中的液态水率先冻结^[9], 聚集体内的液态水在势能梯度的作用下从聚集体内向聚集体

间的固态冰处迁移^[24], 从而导致聚集体失水收缩。

基于上述认知, 图 7 给出了不同饱和度下膨胀土试样冻结过程的微观结构变化示意图。土体作为三相体, 由于土颗粒不可压缩, 在冻结作用下, 其宏观变形与孔隙水含量及内部空隙体积(即孔隙气)密切相关。低饱和度试样体积含水量较低、空隙体积较大, 冻结后, 孔隙冰引起的体积增量充填部分原空隙体积, 与此同时, 冻吸力引起的土骨架收缩作用压缩部分空隙, 试样表现为冻缩; 而高饱和度试样体积含水率高、空隙体积小, 孔隙冰引起的体积增量大于原空隙体积, 此时, 收缩作用受固态冰影响被显著抑制, 试样宏观表现为冻胀。

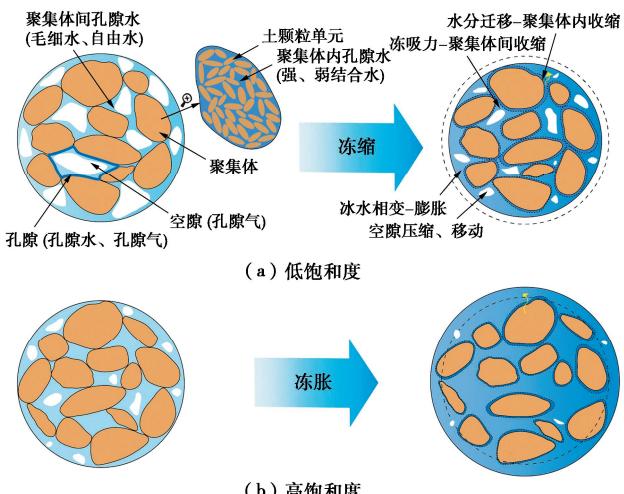


图 7 冻结变形微观示意图

Fig. 7 Microcosmic diagram of freezing-induced deformation

2.3 膨胀土冻结体积应变特征值分析

(1) 临界含水率与最大收缩应变

考虑到所有试样在第 1 次冻结后变形显著, 经历 4 次冻结后变形趋于稳定, 图 8 给出不同干密度试样在经历第 1, 第 4 次冻结作用后的体积应变与含水率的关系曲线。可以直观地看出, 试样冻结后体积应变随含水率增大呈先减小后增大的变化趋势, 二者之间的关系均可用二次函数较好地拟合, 也就是说, 膨胀土试样冻结后的体积应变随含水率的增加并非单调变化, 而是存在一个“临界含水率”, 该含水率下试样的冻结体应变最小, 将其绝对值定义为“最大收缩应变”。产生上述现象的原因可以解释如下: 土体的冻结变形是孔隙冰充填空隙和低温冻吸力压缩空隙相互博弈的结果。如图 9 所示, 在冻结前, 试样的空隙总体积随含水率增大而减小。在冻结后, 孔隙水相变成冰产生的体积增量填充空隙, 且随含水率增加而增大; 与此同时, 低温冻吸力诱导的收缩作用压缩空隙, 低温冻吸力的大小可由下式所示 Clapeyron 方程^[25]进行估算:

$$\psi = p_i - p_w = -\rho_i L_f \frac{\Delta T}{T_0} \quad (1)$$

式中: ψ 为土体冻吸力; p_i 与 p_w 分别为冻结土的冰压力与未冻水压力; L_f 为相变潜热; T_0 为土体的冻结温度; ΔT 为试样温度与冻结温度的差值。

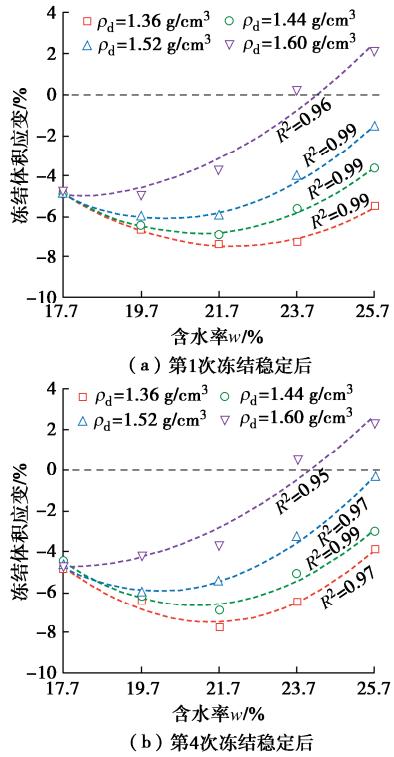


图 8 不同冻结次数下体积应变随含水率变化规律

Fig. 8 Variation of volumetric strain with water content under different freezing times

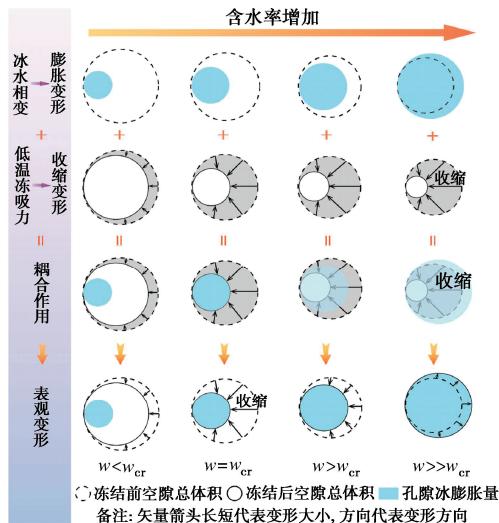


图 9 相同负温下冻结后空隙体积变形示意图

Fig. 9 Diagram of volume deformation of void after freezing under same negative temperature

由式(1)可知, 冻吸力主要受试样温度控制, 在同一负温下, 冻吸力近似相同, 即使不同含水率试样的冻结温度存在一定差异^[26], 而冻结前土体的基质吸力随初始含水率增大而减小^[18]。因此, 试样初始含水

率越高, 冻结过程引起的吸力增量(冻吸力与基质吸力之差)越大, 即收缩势越大, 在不考虑固态冰的影响下, 空隙的收缩变形也越大。综上, 试样冻结产生的孔隙冰膨胀量与空隙收缩量均随含水率增加而增大。当试样含水率低于“临界含水率”时, 上述两种变形互不影响, 固态冰体积增量填充部分空隙, 基质吸力-冻吸力转化压缩部分空隙, 试样宏观上表现为收缩, 且空隙的收缩量即为体积变化量; 当含水率增至临界含水率时, 上述两种变形处于相互影响的临界状态, 此时, 试样的体积收缩量达到最大; 随着含水率进一步增加, 上述两种变形相互影响, 但由于孔隙冰表面压力大于土骨架间有效应力^[27], 孔隙冰的膨胀变形可以继续正常发展, 收缩变形因空隙内部固态冰的存在而受到限制, 因此, 试样宏观收缩量开始减小; 当孔隙冰体积增量超过原空隙体积时, 试样宏观表现为冻胀。

(2) 干密度、冻融历史对冻结体积应变特征值的影响

图 10 展示了试样第 1 次、第 4 次冻结后临界含水率、最大收缩应变与初始干密度的变化关系曲线, 可以看出, 二者均随初始干密度的增加而降低。这是因为低干密度试样孔隙体积大, 冻结后在容纳较大孔隙冰的同时, 也允许发生较大的收缩变形, 而高干密度试样则相反。

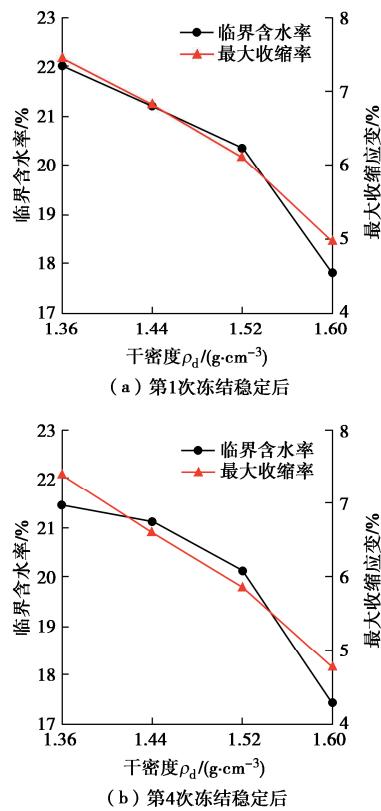


图 10 临界含水率、最大收缩应变与干密度的关系

Fig. 10 Relationship among critical water content, peak shrinkage strain and dry density of samples

进一步地,图 11 给出了试样临界含水率与最大收缩应变随冻结次数的变化关系曲线。可以看出,当试样干密度低于 1.60 g/cm^3 时,临界含水率随冻结次数增加略微减小,而干密度为 1.60 g/cm^3 时则相反。当试样干密度大于 1.36 g/cm^3 时,最大收缩应变随冻结次数增加而减小,而干密度为 1.36 g/cm^3 时则呈相反的变化趋势。事实上,在循环冻融累积效应下,土样内部结构劣化,产生了不可恢复的塑性变形(图 4,5),进而使土骨架间有效应力减小。当再次冻结时,孔隙较前一次冻结过程将更容易被撑开或压缩,膨胀或收缩作用更为显著。干密度为 1.60 g/cm^3 试样其孔隙体积小,冻结变形易受膨胀作用主导,孔隙在循环冻融历史累积效应下持续略微增大,使得试样临界含水率较前一次冻结过程增加,最大收缩应变有所减小。而干密度为 1.36 g/cm^3 试样其内部孔隙较大,孔隙冰难以直接作用于土骨架,由低温冻吸力引起的收缩作用主导变形,且土骨架间有效应力受循环冻融历史累积效应影响持续减小,收缩变形更为显著,可容纳的孔隙冰体积减小,使得试样临界含水率较前一次冻结过程略有减小,最大收缩应变有所增加。

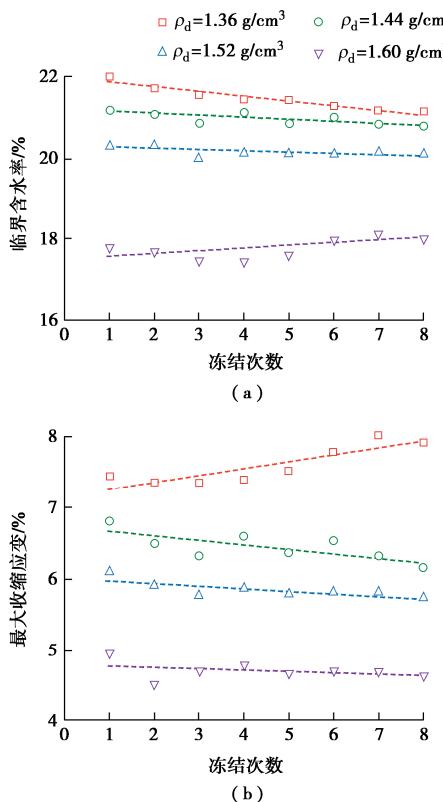


图 11 临界含水率、最大收缩应变随冻结次数变化规律

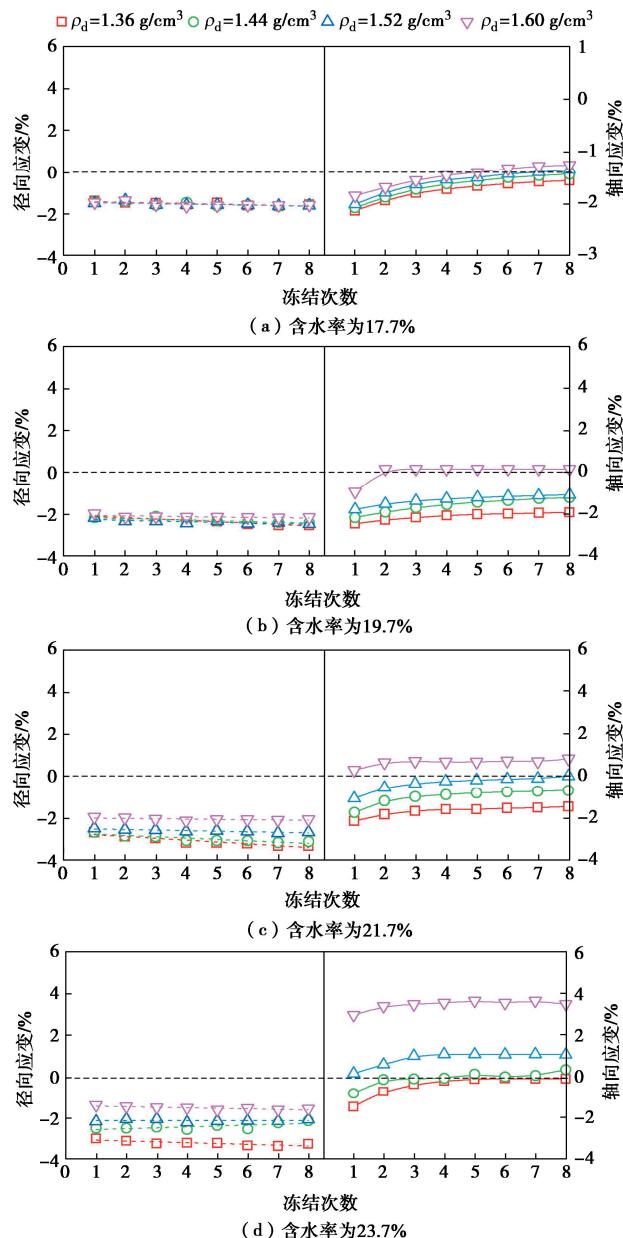
Fig. 11 Variation of critical water content, peak shrinkage strain with freezing times

2.4 压实膨胀土冻结变形各向异性

(1) 冻结变形各向异性现象

为探究试样三向冻结变形特征,图 12 给出了冻结条件下试样径向应变、轴向应变与冻结次数的变化关

系曲线,可以直观地看出,试样在直径方向均发生冻缩,但不同含水率下试样径向应变随冻结次数增加的变化趋势有所差异:当含水率为 $17.7\% \sim 23.7\%$,试样的径向应变随冻结次数增加呈略微减小的变化趋势,而含水率为 25.7% 试样的径向应变随之呈增大趋势。除干密度为 1.60 g/cm^3 、含水率为 25.7% 的工况外,试样的轴向应变随冻结次数的增加呈先增大后趋于稳定的变化趋势。此外,试样轴向应变呈现出较强的含水率依赖性:在循环冻融历史累积效应下,含水率为 17.7% 、 19.7% 的试样轴向主要发生冻缩,随含水率增大,干密度较大的试样其轴向变形随冻结次数增加率先由冻缩转变为冻胀,当含水率增至 25.7% 时,试样轴向主要发生冻胀。从图 12 中还可以看出,随着含水率增加,不同干密度试样的径向应变、轴向应变与冻结次数的关系曲线逐渐发生分离,且干密度越大,试样的径向应变值和轴向应变值越大。



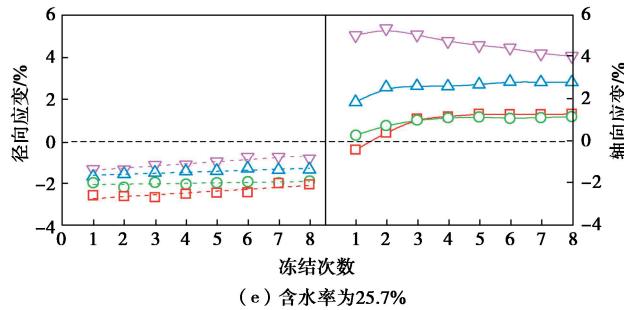


图 12 径向应变、轴向应变与冻结次数变化关系

Fig. 12 Relationship among radial strain, axial strain and freezing times

值得注意的是, 通过对试样径向应变与轴向应变随冻结次数的变化关系可以发现, 在相同冻结条件下, 试样的径向应变与轴向应变不但在数值大小上存在显著差异, 甚至表现为完全相反的变形趋势 (即径向发生冻缩、轴向发生冻胀), 并且试样初始含水率越高, 上述差异越显著。冻结作用下压实膨胀土试样径向与轴向的变形差异一定程度上预示着压实土体不同方向的冻结变形并不一致, 即存在冻结各向异性。

(2) 冻结变形各向异性机制分析

理论上来说, 圆柱样径向与轴向截面的形状和尺寸均有差异, 这可能会对圆柱样直径和高度方向的冻结变形产生影响。为排除土样体型对冻结变形各向异性的影响, 进一步开展了等截面立方体膨胀土试样的三向冻结变形试验 (图 3), 以含水率 25.7%、干密度 1.60 g/cm^3 的组合工况为例。

图 13 给出了立方体试样与圆柱样压实方向与垂直于压实方向在循环冻融作用下的变形规律, 可以直观地看出, 立方体试样与圆柱样压实方向与垂直于压实方向的冻结变形规律极为相似, 冻结作用下立方体试样沿压实方向发生了显著的膨胀变形, 而在垂直于压实方向上, 试样在第一次冻结作用后发生冻缩, 随着冻结次数增加, 变形逐渐由冻缩转变为冻胀并趋于稳定。两种体型的膨胀土试样在同一方向的线应变数值略有不同, 造成这一差异的原因可能是立方体试样具有较为明显的边界效应, 使得试样表面中心处的变形更加显著。由上述试验结果可知, 两种体型的膨胀土试样在压实方向均发生了显著的冻胀变形, 且明显区别于垂直压实方向上的变形, 也即是说, 试样体型并不是诱导冻结变形各向异性的主要原因。

图 14 给出了膨胀土试样在压实作用下不同方向的 SEM 微观结构特征。可以看出, 试样的径向孔隙 (图 14 (a)) 明显大于轴向孔隙 (图 14 (c)); 此外, 从图中还可以发现, 压实面方向的土粒呈堆叠状 (图 14 (b)), 垂直压实面方向的土粒呈定向层状排列 (图 14 (d))。类似现象在 Vasseur 等^[28]、戴张俊等^[29]的研

究中也有所发现。由此可以合理推测, 试样不同方向的冻结变形差异主要是由压实作用引起的试样结构各向异性导致。进一步地, 图 15 给出了试样压实作用与冻结作用下的孔隙结构演变示意图, 由于试样径向孔隙较大, 在赋存不同水量后仍具有较大空隙体积, 冻结作用下, 在孔隙冰充填部分空隙的同时, 空隙仍允许发生收缩变形, 因此, 试样在直径方向宏观表现为冻缩; 而轴向孔隙较小, 在赋存一定水量后空隙体积小, 使得冻结变形受含水率影响显著, 高含水率下孔隙冰引起的体积增量大于原空隙体积, 试样在高度方向宏观表现为冻胀; 低含水率则相反, 呈冻缩特征。

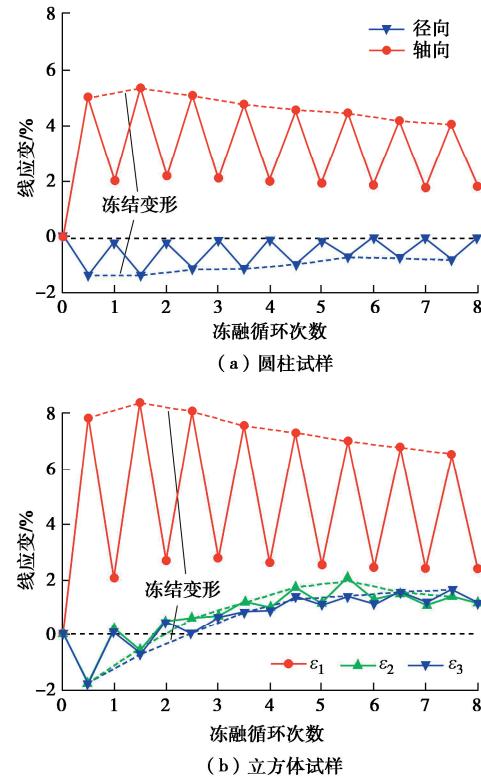


图 13 线应变与冻融循环次数关系

Fig. 13 Relationship between linear strain and numbers of freeze-thaw cycle

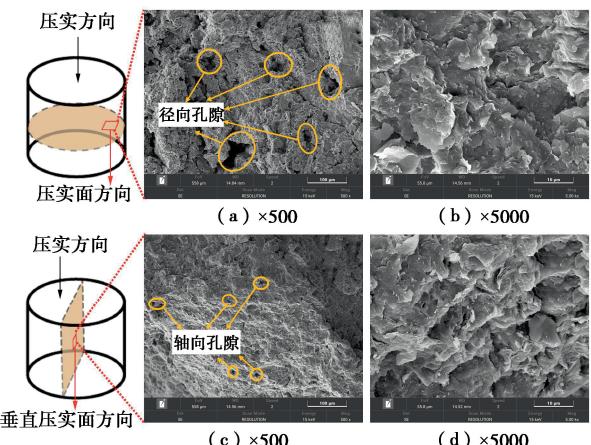


图 14 膨胀土试样 SEM 微观结构特征

Fig. 14 Microstructural characteristics of expansive soil samples

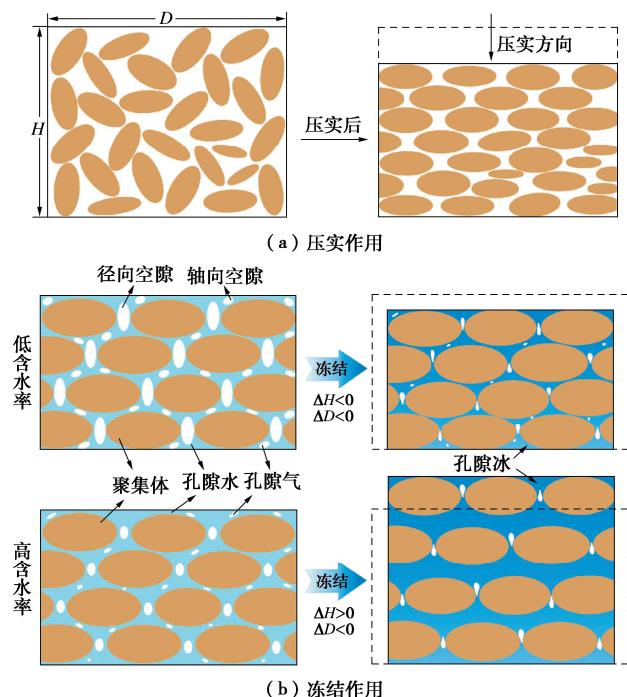


图 15 冻结前、后试样孔隙结构状态示意图

Fig. 15 Diagram of pore structure state of samples before and after freezing

3 结 论

本文以压实膨胀土为研究对象, 探究了循环冻融历史与初始各向异性对非饱和膨胀土冻结变形特性的影响, 得到 5 点结论。

(1) 试样含水率越高, 干密度越大, 融化和冻结状态下的体积应变差异性越大。相较融化状态, 膨胀土试样冻结状态下体积变化更显著。试样含水率越高, 冻结变形越不易稳定。

(2) 膨胀土试样冻结体积应变随初始饱和度增加呈先减小后增大的变化趋势, 且低饱和度时呈“冻胀”, 高饱和度时呈“冻缩”特征。在冻结过程中同步发生由冰水相变引起的膨胀变形及低温冻吸力与势能梯度引起的收缩变形。

(3) 存在某一“临界含水率”, 使试样冻结体积收缩应变最大。临界含水率与最大收缩应变均随试样干密度增大而减小。受循环冻融历史累积效应影响, 高干密度试样临界含水率增大, 最大收缩应变减小; 低干密度试样则相反。

(4) 膨胀土试样冻结后径向均发生收缩变形, 轴向变形受含水率影响, 低含水率时冻缩, 高含水率时冻胀。径向应变随冻结次数增加较为平稳, 轴向应变呈先增大后稳定的变化趋势。

(5) 压实膨胀土试样不同方向的冻结变形差异性由压实作用诱导的原生结构各向异性引起, 且表现为试样含水率越高, 其冻结变形各向异性越显著。

参考文献:

- [1] 刘祖强, 罗红明, 郑敏, 等. 南水北调渠坡膨胀土胀缩特性及变形模型研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊 1): 409-414. (LIU Zuqiang, LUO Hongming, ZHENG Min, et al. Study on swelling and shrinkage characteristics and deformation model of expansive soil on canal slope of South-to-North Water Transfer Project[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(S1): 409-414. (in Chinese))
- [2] 张凌凯, 崔子晏. 干湿-冻融循环条件下膨胀土的压缩及渗透特性变化规律[J]. 岩土力学, 2023, 44(3): 728-740. (ZHANG Lingkai, CUI Ziyan. Compression and permeability characteristics of expansive soil under drying-wetting-freezing-thawing cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(3): 728-740. (in Chinese))
- [3] 凌贤长, 罗军, 耿琳, 等. 季节冻土区非饱和膨胀土水-热-变形耦合冻胀模型[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(7): 1255-1265. (LING Xianchan, LUO Jun, GENG Lin, et al. Coupled hydro-thermo-deformation frost heave model for unsaturated expansive soils in seasonally frozen soil regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(7): 1255-1265. (in Chinese))
- [4] 徐丽丽, 刘丽佳, 徐昭巍, 等. 季节冻土区膨胀土边坡冻害防护综合技术[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊 1): 216-220. (XU Lili, LIU Lijia, XU Zhaowei, et al. Integrated protection technology for expansive soil slopes in seasonally frozen zones[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S1): 216-220. (in Chinese))
- [5] 高国瑞. 膨胀土的微结构和膨胀势[J]. 岩土工程学报, 1984, 6(2): 40-48. (GAO Guorui. Microstructures of expansive soil and swelling potential[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 6(2): 40-48. (in Chinese))
- [6] 曾浩, 唐朝生, 刘昌黎, 等. 膨胀土干燥过程中收缩应力的测试与分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 717-725. (ZENG Hao, TANG Chaosheng, LIU Changli, et al. Measurement and analysis of shrinkage stress of expansive soils during drying process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(4): 717-725. (in Chinese))
- [7] 胡东旭, 李贤, 周超云, 等. 膨胀土干湿循环胀缩裂隙的定量分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊 1): 318-324. (HU Dongxu, LI Xian, ZHOU Chaoyun, et al. Quantitative analysis of swelling and shrinkage cracks in expansive soil under dry-wet cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S1): 318-324. (in Chinese))
- [8] QI J L, VERMEER P A, CHENG G D. A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical

- properties[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2006, **17**(3): 245-252.
- [9] HAMILTON A B. Freezing shrinkage in compacted clays[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1966, **3**(1): 1-17.
- [10] LU Y, LIU S H, ALONSO E, et al. Volume changes and mechanical degradation of a compacted expansive soil under freeze-thaw cycles[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, **157**: 206-214.
- [11] HUANG Y H, CHEN Y, WANG S, et al. Effects of freeze-thaw cycles on volume change behavior and mechanical properties of expansive clay with different degrees of compaction[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, **22**(5): 04022050.
- [12] LI T G, KONG L W, GUO A G. The deformation and microstructure characteristics of expansive soil under freeze-thaw cycles with loads[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, **192**: 103393.
- [13] 赵贵涛, 韩仲, 邹维列, 等. 干湿、冻融循环对膨胀土土-水及收缩特征的影响[J]. *岩土工程学报*, 2021, **43**(6): 1139-1146. (ZHAO Guitao, HAN Zhong, ZOU Weilie, et al. Influences of drying-wetting-freeze-thaw cycles on soil-water and shrinkage characteristics of expansive soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(6): 1139-1146. (in Chinese))
- [14] 刘振亚, 刘建坤, 李旭, 等. 非饱和粉质黏土冻结温度和冻结变形特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(8): 1381-1387. (LIU Zhenya, LIU Jiankun, LI Xu, et al. Experimental study on freezing point and deformation characteristics of unsaturated silty clay subjected to freeze-thaw cycles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(8): 1381-1387. (in Chinese))
- [15] 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))
- [16] 膨胀土地区建筑技术规范: GB 50112—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. (Technical Code for Building in Expansive Soil Regions: GB 50112—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese))
- [17] 张勇敢, 鲁洋, 刘斯宏, 等. 基于巴西劈裂试验的冻结膨胀土拉伸特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, **43**(11): 2046-2054. (ZHANG Yonggan, LU Yang, LIU Sihong, et al. Experimental study on tensile strength of frozen expansive soils based on Brazilian splitting tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(11): 2046-2054. (in Chinese))
- [18] 范秋雁, 梁昕, 韩进仕. 非饱和膨胀岩饱和度及胀缩特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, **39**(1): 45-56. (FAN Qiuyan, LIANG Xin, HAN Jinshi. Experimental study on saturation and swelling-shrinkage characteristics of unsaturated expansive rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, **39**(1): 45-56. (in Chinese))
- [19] 周葆春, 孔令伟, 梁维云, 等. 压缩过程中非饱和膨胀土体变特征与持水特性的水力耦合效应[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(4): 629-640. (ZHOU Baochun, KONG Lingwei, LIANG Weiyun, et al. Hydro-mechanical coupling effects on volume change and water retention behaviour of unsaturated expansive soils during compression[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(4): 629-640. (in Chinese))
- [20] ALONSO E E, GENS A, HIGHT D W. Special problems soils. General Report[C]// 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Dublin, 1987.
- [21] SABA S, DELAGE P, LENOIR N, et al. Further insight into the microstructure of compacted bentonite-sand mixture[J]. *Engineering Geology*, 2014, **168**: 141-148.
- [22] COUSSY O. Poromechanics of freezing materials[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005, **53**(8): 1689-1718.
- [23] REN J P, VANAPALLI S K. Comparison of soil-freezing and soil-water characteristic curves of two Canadian soils[J]. *Vadose Zone Journal*, 2019, **18**(1): 1-14.
- [24] HOHMANN M. Soil freezing—the concept of soil water potential. State of the art[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1997, **25**(2): 101-110.
- [25] THOMAS H R, CLEALL P, LI Y C, et al. Modelling of cryogenic processes in permafrost and seasonally frozen soils[J]. *Géotechnique*, 2009, **59**(3): 173-184.
- [26] HAN Y, WANG Q, KONG Y Y, et al. Experiments on the initial freezing point of dispersive saline soil[J]. *CATENA*, 2018, **171**: 681-690.
- [27] HENRY K S. A review of the thermodynamics of frost heave[R]. Technical Report ERDC/CRREL TR-00-16, 2000.
- [28] VASSEUR G, DJERAN-MAIGRE I, GRUNBERGER D, et al. Evolution of structural and physical parameters of clays during experimental compaction[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1995, **12**(8): 941-954.
- [29] 戴张俊, 陈善雄, 罗红明, 等. 南水北调中线膨胀土/岩微观特征及其性质研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(5): 948-954. (DAI Zhangjun, CHEN Shanyong, LUO Hongming, et al. Microstructure and characteristics of expansive soil and rock of middle route of South-to-North Water Diversion Project[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(5): 948-954. (in Chinese))