DOI：10.16285/j.rsm.2022.0524

干湿−冻融循环条件下膨胀土的压缩及渗透特性变化规律

张凌凯[1,2]，崔子晏[1,2]

（1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院，新疆 乌鲁木齐 830052；
2. 新疆农业大学 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830052）

摘 要：北疆供水一期工程穿越膨胀土区域，历经多次干湿−冻融循环后力学特性衰减严重，易产生渠坡局部浅层滑坡和冻胀破坏等现象。为深入研究其劣化机制，通过干湿−冻融循环条件下的压缩试验、渗透试验和 SEM 微观扫描试验，从宏−细−微观多角度分析其压缩和渗透指标的变化规律。研究结果表明：随干湿−冻融循环次数的增加，膨胀土整体压缩性增大，其压缩曲线可分为拟弹性段与拟塑性段；随循环次数的增加，回弹指数呈波动趋势，压缩指数与循环次数呈指数正相关，与细−微观裂隙呈线性正相关。黏土颗粒在循环作用下组成“团聚体−孔隙−填充颗粒”形式的较松散的临时结构，絮凝结构增加，各向异性减少；土样承受竖向压力时，膨胀土孔隙间距减少，压缩性较大；压力超过固结屈服应力时，团聚体颗粒扁角化、极角频率增加、孔隙压密，压缩性逐渐稳定。渗透系数在循环过程中变化分为缓慢、迅速、稳定 3 个阶段；渗透系数在第 5 次循环变化较大，第 7 次循环后逐渐稳定，与循环次数及表面裂隙率呈正相关趋势。渗透系数与各项微观参数的灰色关联度均大于 0.65，微观孔隙率是最主要的影响因素；循环作用下微观孔隙发育明显，形成新渗流通道，渗透系数与微观孔隙率呈线性正相关。

关 键 词：干湿−冻融循环；膨胀土；压缩特性；渗透特性；微观机制
中图分类号：TU411 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2023) 03－0728－13

Compression and permeability characteristics of expansive soil under drying-wetting-freezing-thawing cycles

ZHANG Ling-kai[1,2], CUI Zi-yan[1,2]

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: The first phase of water supply project in northern Xinjiang crossed the expansive soil area, and the mechanical properties of expansive soil are seriously weakened after repeated drying-wetting-freezing-thawing cycles, which cause local shallow landslide and frost heave damage of the canal slope. To further explore the deterioration mechanism of expansive soil canal slope, the changes of compression and permeability indexes are analyzed from macro-, meso-, and micro-perspectives through the compression test, the permeability test, and the SEM microscopic scanning test under drying-wetting-freezing-thawing cycles. The overall compressibility of expansive soil increases with the increase of drying-wetting-freezing-thawing cycles, and its compression curve can be divided into pseudo-elastic section and pseudo-plastic section. With the increase in the number of cycles, the rebound index shows a fluctuation tendency. The compression index is exponentially positively correlated with the number of cycles, and it is linearly correlated with the meso-micro cracks. Under the action of drying-wetting-freezing-thawing cycle, clay particles form a loose temporary structure of 'aggregates-pores-filled particles', flocculation structure increases, and anisotropy decreases. When the soil sample is subjected to vertical pressure, the pore spacing of expansive soil decreases, and the compressibility is large. When the pressure exceeds the consolidation yield stress, the aggregate particles become flat, the polar angular frequency increases, the pores are compacted, and the

收稿日期：2022-04-14 录用日期：2022-09-27
基金项目：新疆维吾尔自治区水利科技专项资金项目（No.XSXJ-2023-22）；新疆维吾尔自治区自然科学基金杰出青年科学基金项目（No.2022D01E45）；新疆维吾尔自治区寒旱区水资源与生态水利工程研究中心（院士专家工作站）项目（No.2022.C-001）。
This work was supported by the Xinjiang Uygur Autonomous Region Water Conservancy Science and Technology Special Fund Project(XSXJ-2023-22), the Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region Outstanding Youth Science Fund Project(2022D01E45) and the Xinjiang Uygur Autonomous Region Cold and Arid Region Water Resources and Ecological Water Conservancy Project Research Center (Academician Expert Workstation) Project (2022.C-001).
第一作者简介：张凌凯，男，1987 年生，博士，副教授，主要从事环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: xjau_zlk@163.com
通讯作者：崔子晏，男，1992 年生，硕士研究生，主要从事于膨胀土力学特性方面研究工作。E-mail: cuiziyan@163.com

compressibility is gradually stabilized. Three stages i.e., slow, rapid, and stable stages, are identified in variation of permeability coefficient in the cycle process. The permeability coefficient changes greatly in the fifth cycle, and gradually stabilizes after 7 cycles, which is positively correlated with the number of cycles and surface fracture rate. The grey correlation degrees between the permeability coefficient and microscopic parameters are greater than 0.65, and microscopic porosity is the most important influencing factor. Under cyclic action, the microscopic pores develop obviously and form new seepage channels. The permeability coefficient is linearly and positively correlated with the microscopic porosity.

Keywords: drying-wetting-freezing-thawing cycles; expansive soil; compression test; permeability test; micro mechanism

1　引　言

北疆供水一期工程主要以输水明渠为主，其中部分渠段通过膨胀土地区，在季节气温交替变化和渠道历年夏季通水、冬季停水的运行方式的共同作用下，随明渠使用年限的增加，历经多次干湿−冻融循环后力学特性衰减严重，渠基土逐渐劣化，极易产生滑坡或局部坍塌[1-2]。渠底局部冻涨、浅层蠕变破坏以及大范围、大面积的滑坡、坍塌严重影响着供水渠道的正常供水，给区域水利建设带来巨大损失。这些工程问题实质上是膨胀土在干湿−冻融循环条件下力学性能衰减所致。

对于膨胀土在干湿、冻融及干湿−冻融耦合循环下作用下所造成的力学特性劣化问题，其本质是微观结构变化的外在反应，许多学者从宏观强度衰减、细观裂隙发育、微观结构特性等方面进行深入研究。时伟[3]、柯睿[4]、杨忠平[5]、Gao[6]等研究了膨胀土随冻融循环次数增加压缩模量及无侧限抗压强度等指标的衰减情况，认为其原因是冻融循环破坏了土体的内部结构，降低了颗粒间胶结连结，产生了损伤破坏。Chu[7]、Soltani[8]、唐朝生[9]、Chang[10]、Zhu[11]等基于室内试验结果，分析了土体干缩裂隙形成的发育过程及机制，认为在干燥过程中引起的基质吸力和土体干缩引起的张拉应力是裂隙形成和发育的主要因素。蔡正银[12]、Zhu[13]等通过 CT 扫描技术研究了不同干湿−冻融耦合循环次数对膨胀土三维裂隙演化规律的影响，描述了内部裂隙由循环初期浅层分散分布向后期深层汇聚偏转的发育模式。王港[14]、王丽琴[15]、周葆春[16]等研究发现黄土、残积土和膨胀土等具有拟超固结现象的土体，在较小荷载作用下，结构特性抑制土体变形，微观结构变化较小，当荷载大于固结屈服应力时，微观结构变化明显。刘宽[17]、骆赵刚[18]、张先伟[19]等总结提出圆度、颗粒定向频率、孔隙长径比微观孔隙率等微观定量评价指标，表征分析微观结构所反映的宏观力学特性。赵茜[20]、王佳妮[21]、张乐[22]等研究发现干湿−冻融条件下的渗透系数变化以干湿作用为主导，冻融作用为促进。Zhu[23]、Qi[24]、Ma[25]等研究了干湿循环下的裂隙发展规律与渗透系数变化，发现裂隙率与渗透系数之间存在二次函数关系。

综合上述研究表明：目前国内外学者的研究多侧重于对循环条件下膨胀土强度及裂隙特性方面，关于干湿−冻融循环作用下膨胀土的压缩特性和渗透特性其研究相对较少，研究膨胀土的压缩特性变化规律可预测在循环作用后明渠的沉降规律，研究膨胀土的渗流特性可探究在多次循环作用后膨胀土渠坡的渗流规律，膨胀土渠坡发生渗流现象可间接加快渠坡发生滑动破坏。因此，本文重点关注膨胀土在干湿−冻融作用下的压缩特性及渗透特性的变化规律，开展循环条件下的压缩试验、裂隙性试验、SEM 试验和变水头渗透试验，结合开展的细微观研究，由微观至宏观分析其变化，力图从根本上揭示边坡失稳的原因，为北疆供水一期工程膨胀土渠坡的工程安全问题提供科学依据。

2　试验概况

2.1　试验材料

试验所用膨胀土材料取自北疆供水一期工程总干渠 13+175 挖方段的黄色泥岩，黄色泥岩为中膨胀性，外观颜色为土黄色，带有少量青色杂质，具有较好的代表性。通过室内颗分试验测定膨胀土的颗粒级配，如图 1 所示。

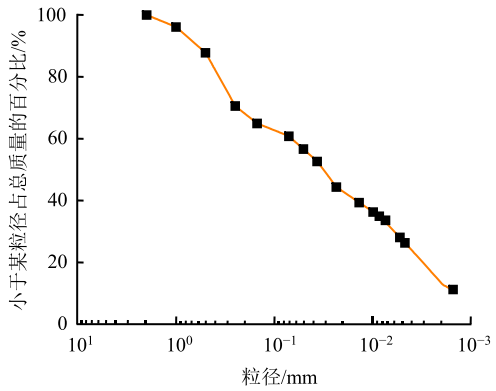


图 1　膨胀土颗粒级配曲线

Fig.1　Particle size distribution of expansive soil

通过室内土工基本试验及 X 射线衍射试验，获得北疆膨胀土的矿物成分及基本物理性质见表 1。黏土矿物成分主要由蒙脱石及少量长石、钠长石与方解石构成，砂砾主要由不同粒径的石英构成。

表 1 膨胀土基本物理性质指标及矿物组成

Table 1 Basic physical properties and mineral composition of expansive soil

土样名称	矿物含量/%					天然含水率ω/%	天然干密度ρ_d/(g·cm^{-3})	液限ω_L/%	塑限ω_P/%	塑性指数I_P	液性指数I_L	风干含水率ω/%	最大干密度ρ_{dmax}/(g·cm^{-3})	最优含水率ω_{opt}/%	线缩率/%	体缩率/%	自由膨胀率δ_{ef}/%
	蒙脱石	石英	长石	方解石	钠长石												
黄色泥岩	60.4	32.7	6.0	0.5	0.4	14.8	1.60	61.3	20.1	41.2	−0.13	8.0	1.67	18.9	18.4	29.5	75

2.2 循环试验方案

干湿−冻融循环过程依次为湿−干−冻−融，如图 2 所示。①干湿循环：湿润过程，采用抽气饱和法模拟膨胀土湿润至饱和状态的过程；干燥过程，参考渠道沿线地温分布，确定干燥阶段边界温度为 40 ℃，将饱和试样在烘箱中干燥 12 h（温度为 40 ℃），采用称重法控制试样目标含水率为 14.8%（现场实测含水率）。②冻融循环：冻结及融化过程均在 GDJ/YH-225L 高低温交变湿热试验箱中进行，温度及持续时间分别对应−20℃，24 h 和 20 ℃，24 h[12]。为避免试样在冻融循环过程中与其他试样及外界发生水分交换，产生含水率变化，将不同编号的试样分别置于密封袋中。冻融完成后测量试样质量变化小于总质量的 0.1%，含水率变化小于 0.5%，可继续进行试验，否则需对试样进行增湿及烘干处理。试验共进行 9 次循环，循环次数记为 N。由于文中所用膨胀土在湿润情况下体积变化明显，且在长期置于水中时会发生崩解现象，因此经历干湿−冻融循环时，饱和过程试样受饱和器约束，体积膨胀受限，其余阶段体变较小，均不约束试样变形。

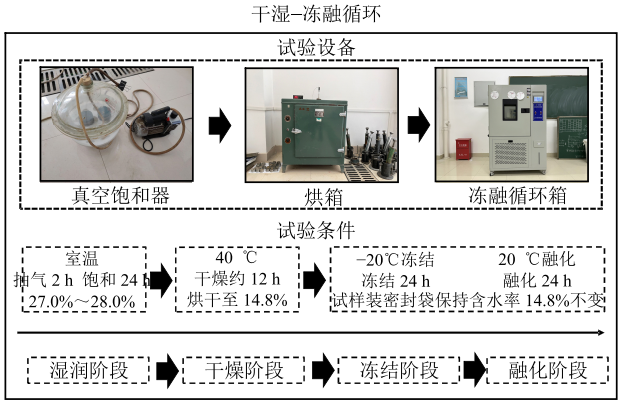


图 2 干湿−冻融循环过程

Fig.2 Drying-wetting-freezing-thawing cycles

试验所用试样均采用最优含水率为 18.9%，现场实测干密度为 1.6 g/cm^3，共设置 3 组平行试验，每组 5 个试样，分别对应循环次数为 1、3、5、7、9 次，压缩试验采用高为 20.0 mm，直径为 61.8 mm 的重塑环刀样，渗透试验采用高为 40.0 mm，直径为 61.8 mm 的重塑环刀样，通过轻型击实法制样，电镜扫描试验（scanning electron microscope，简称 SEM）采用压缩和渗透完成试样进行。由于循环过程结束后，部分试样表面会产生不同程度的冻胀现象，影响试验结果。为便于分析，采用深度计测量试样表面多点的实际高度，取平均值对土体实际高度进行修正。

2.3 试验方案

2.3.1 宏观力学特性试验

（1）侧限压缩试验：对不同循环次数试样进行压缩试验。加压方式采用加载—卸载—加载循环的压缩试验，加压等级采用 25、50、100、200、400、200、100、50、25、50、100、200、400、800、1 600 kPa。

（2）变水头渗透试验：干湿−冻融循环完成后，提取表观裂隙，采用真空抽气法对试样进行抽气饱和，后进行变水头渗透试验。

2.3.2 细观裂隙性试验

（1）干湿−冻融循环试验：采用铁架台将数码相机固定，拍摄试样干湿−冻融循环 1、3、5、7、9 次的裂隙图像。通过 IPP（Image Pro Plus）软件对裂隙图像进行预处理（见图 3）。

（2）细观裂隙定量分析方法：通过表面裂隙率 R_n 来进行分析，考虑循环过程中土体边界收缩所产生裂隙在广义上也属于裂隙的范畴，可作为产生于边界的收缩裂隙计入裂隙面积。计算裂隙时，考虑开裂及收缩影响，定义表面裂隙面积为实际开裂裂隙与收缩裂隙之和，该指标从总体上反映了开裂及收缩对土体的影响[9]，具体计算方法如下：

$$R_{f1}^{n}=\frac{A_{f1}^{n}}{A_0} \tag{1}$$

$$R_{f2}^{n}=\frac{A_{f2}^{n}}{A_0} \tag{2}$$

$$R_{\mathrm{n}}=R_{\mathrm{f}1}^{\mathrm{n}}+R_{\mathrm{f}2}^{\mathrm{n}}=\frac{A_{\mathrm{f}1}^{\mathrm{n}}+A_{\mathrm{f}2}^{\mathrm{n}}}{A_0} \tag{3}$$

式中：$A_{\mathrm{f}1}^{\mathrm{n}}$ 为开裂部分裂隙面积；$A_{\mathrm{f}2}^{\mathrm{n}}$ 为收缩部分面积；A_0 为初始试样面积；$R_{\mathrm{f}1}^{\mathrm{n}}$ 为裂隙面积与试样总面积比值；$R_{\mathrm{f}2}^{\mathrm{n}}$ 为收缩部分面积与总面积比值；R_{n} 为不同循环次数下的裂隙率。

2.3.3 微观 SEM 试验

（1）SEM 试验：使用 S-3400N II 型扫描电子显微镜，选取固结及渗透试验完成的土样，经烘干、切样后选取有代表性的截面进行 SEM 试验，所取的截面位置为试样内部中心位置的裂隙带土颗粒，取样方向主要为水平方向土颗粒，同时取少量竖直方向土颗粒作定性分析，试验时用扫描电子显微镜在放大 10 000 倍情况下进行微观结构分析（见图 3）。

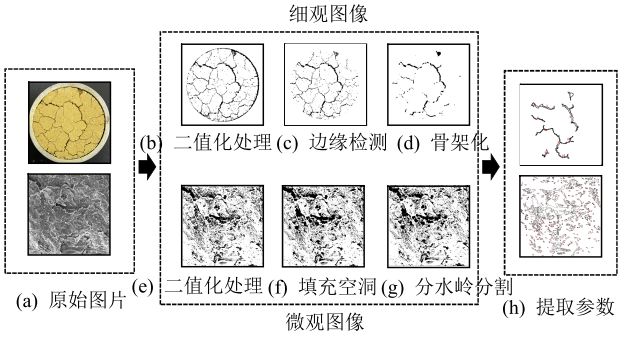


图 3　裂隙处理流程

Fig.3　Fracture treatment process

（2）微观结构定量分析方法：本文采用颗粒团聚体圆度、定向频率、孔隙长径比和孔隙体积等参数来描述微观结构的颗粒特征和孔隙特征。

①圆度 R 表征颗粒团聚体或孔隙的形状与圆形的接近程度[14]，可表示为

$$R=4\pi A/P^2 \tag{4}$$

式中：A 和 P 分别为颗粒团聚体面积和周长。

②定向频率 $F_i(a)$表征其颗粒结构单元排列的混乱程度，计算式[17]如下：

$$F_i(a)=\frac{U_i}{U}\times 100\% \tag{5}$$

式中：U_i 为第 i 方向内颗粒数量；U 为总颗粒数量；a 为颗粒排列方向。

③长径比 C 表征孔隙总长度与孔隙平均直径之比[18]：

$$C=\sum\nolimits_{i=1}^{n} l_i/d_0 \tag{6}$$

式中：l_i 为第 i 个孔隙长度；d_0 为孔隙平均直径。

④微观孔隙率 $V_{3\mathrm{D}}$ 以二维孔隙率为底面，孔隙各点像素对应灰度值为高，利用 Matlab 软件进行编程，基于灰度值计算微观孔隙率[19]，如图 4 所示。

$$V_{3\mathrm{D}}=\sum_{i=1}^{V}S(M-D_i)/(SMV)=\sum_{i=1}^{V}S(255-D_i)/(255V) \tag{7}$$

式中：S 为每一个像素的面积，选择单位像素，则 $S=1$；M 为图像灰度的最大值，$M=255$；D_i 为第 i 个像素对应的灰度；V 为图像像素的总个数。

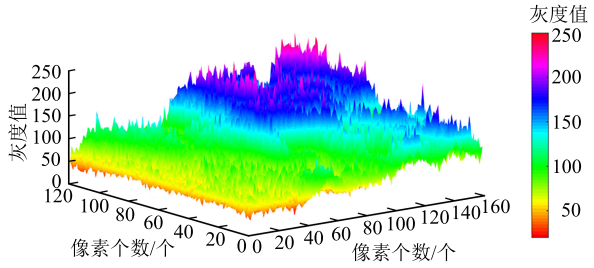


图 4　基于灰度值计算微观孔隙率

Fig.4　Calculation of 3D porosity based on gray value

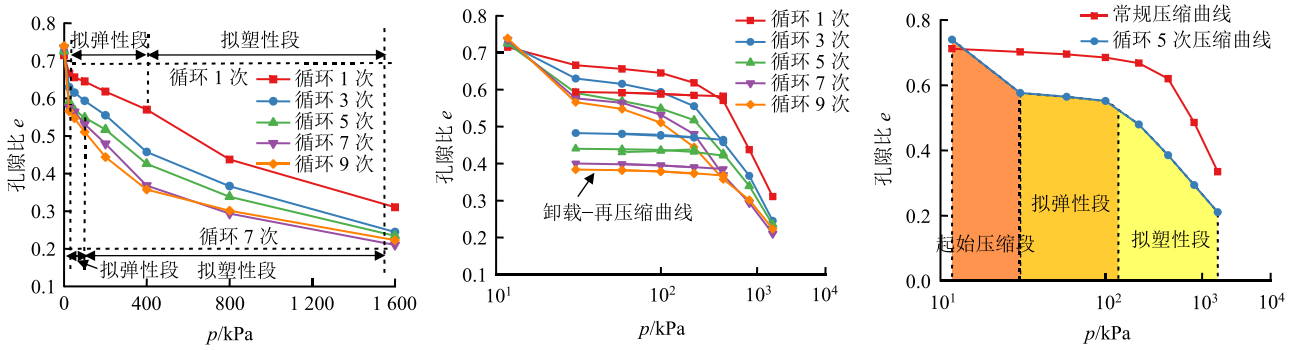
3　试验结果及分析

3.1　压缩试验

3.1.1 循环作用对压缩指标的影响

图 5(a)为不同干湿–冻融循环次数下的 e-p 曲线（图中 e 为孔隙比，p 为竖向有效应力），由图 5(a)可知，压缩曲线前半段变化较缓，近似线性变化，随循环次数的增加，线性变化区段减小，非线性段增加。1～5 次循环时非线性段曲线特征并不明显，7～9 次循环时可明显看出土体压缩曲线后半段呈非线性变化。但 e-p 曲线不易看出线性变化段如何过渡至非线性段，两者之间的界限较为模糊。图 5(b)为不同循环次数下的 e-lg$p$ 曲线，由图 5(b)可知，在 e-lg$p$ 曲线中，卸载—再加载回弹段受循环作用影响较小，不含回弹部分的压缩曲线则在线性段与非线性段之间存在转折点，呈现明显的两段式双线性特征。当压力未超过土的结构强度时，土的压缩性较小，土体变形较缓，接近于线弹性变化，因此定义此段为“拟弹性变形阶段”；当压力超过土的结构强度时，土体结构破坏，压缩性急剧增大，其变形难以恢复，定义此段为“拟塑性变形阶段”，其转折点对应着固结屈服应力 σ'_{vy}，这种压缩曲线形式与超固结土相似，源自干湿–冻融循环过程中形成的胶结结构，是结构强度的一种反应，与天然土层在历史上受到的先期固结压力有本质区别，是一种“拟

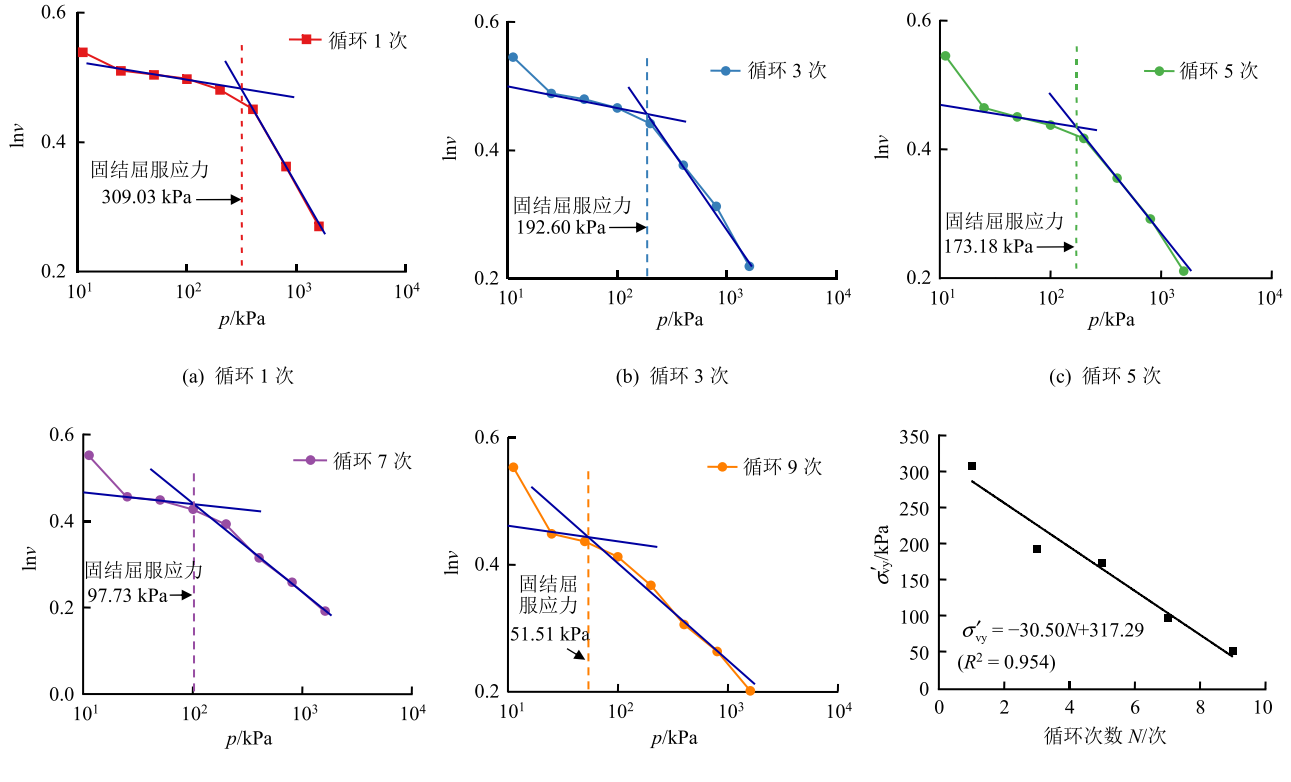
超固结现象”。图 5(c)是常规与干湿–冻融循环条件下的压缩曲线，由图 5(c)可知，常规压缩曲线变化较为平滑，而经过循环作用的曲线存在明显转折，说明干湿–冻融循环条件是改变土体结构的重要原因[14-16]。为方便描述拟弹塑性段间的界限，采用双对数法来确定两段的分界点。图 6 为不同循环次数下的双对数压缩曲线 $\ln v$-$\lg\sigma_v$（比体积 $v = 1+e$，σ_v 为竖向有效应力），压缩曲线的形态可由双直线表示，两段直线分别代表拟弹性和拟塑性段区间，两段的分界点在 $\ln v$-$\lg\sigma_v$ 坐标系中由双直线交叉点确定，交叉点所对应的应力即为固结屈服应力[16]，固结屈服应力 σ'_{vy} 随循环次数 N 增加而减小，如图 6(f)所示。定义拟弹性段区间的原则是该区段压缩过程近似线弹性变化，因此在选取拟弹性段时应注意区别拟弹性段与起始段压缩段。起始段受膨胀土内部裂隙发育程度影响，在 e-lg$p$ 曲线中呈跌落趋势，与拟弹性段之间有明显转折，在一定程度上反映了膨胀土内部的开裂程度，不同循环次数下起始压缩段均为 0～25 kPa，如图 5(b)、6 所示。综上所述，分析图 5(b)、6(f)的变化趋势可得出如下结论：①随着循环次数的增加，起始压缩段曲线下移，土体在较小的压力下即可产生较大沉降变形；②随着循环



(a) 循环作用下 e-p 曲线　(b) 循环作用下 e-lg$p$ 压缩曲线　(c) 常规与循环作用下压缩曲线

图 5　膨胀土的压缩曲线

Fig.5　Compression curves of expansive soil



(a) 循环 1 次　(b) 循环 3 次　(c) 循环 5 次

(d) 循环 7 次　(e) 循环 9 次　(f) 固结屈服应力变化

图 6　双对数坐标曲线

Fig.6　Double logarithmic coordinate curves

次数的增加，屈服点前移，拟弹性段减少，拟塑性段增加；③随着循环次数的增加，膨胀土压缩完成后稳定孔隙比减小，整体压缩性增大。

通常工程上压缩系数、压缩模量为 100～200 kPa 压力范围的取值，由于文中部分固结屈服应力点在 100～200 kPa 压力范围内，屈服应力点为压缩性转折点，两侧压缩性差异较大，常规方法确定的压缩系数和压缩模量并不能很好地说明压缩性的变化。因此从压缩系数的定义出发，将压缩系数 a_v 定义为在 e-p 曲线中（见图 5(a)）压缩曲线前半段拟弹性变形阶段线性拟合的斜率，拟弹性变形阶段为起始压缩段结束（25 kPa）至接近固结屈服应力处（图 6 中由双对数曲线确定），压缩模量通过 $E_s=(1+e_0)/a_v$ 确定。计算压缩系数时，由于屈服固结应力处曲线斜率会发生突变，考虑压缩系数定义，选取拟弹性段试验点时应尽量小于固结屈服应力，以确保各试验点均位于线弹性变化段，如循环 1 次时固结屈服应力为 309.03 kPa，则计算压缩系数的拟弹性段选取 25～200 kPa，当试验点与固结屈服应力相近时，曲率变化对压缩系数取值影响较小，可近似认为拟弹性压缩段终点为固结屈服应力处，如循环 7 次和 9 次时固结屈服应力为 97.73 kPa 和 51.51 kPa，计算压缩系数时拟弹性变形段分别取 25～100 kPa 和 25～50 kPa。图 7 为压缩指标随干湿–冻融循环次数的变化趋势，由图可知，随循环次数的增加，压缩系数与压缩指数所反映的压缩性变化趋势相反，回弹指数呈波动趋势。如表 2 所示：①当加载压力 σ'_v 小于固结屈服应力 σ'_{vy}，即 $\sigma'_v<\sigma'_{vy}$ 时，随循环次数增加压缩系数 a_v 呈增加趋势，压缩模量 E_s 逐渐减小，表明屈服前膨胀土压缩性随循环次数增加而增大；② $\sigma'_v>\sigma'_{vy}$ 时，随循环次数增加 C_c 呈减少趋势，表明屈服后土体压缩性随循环次数

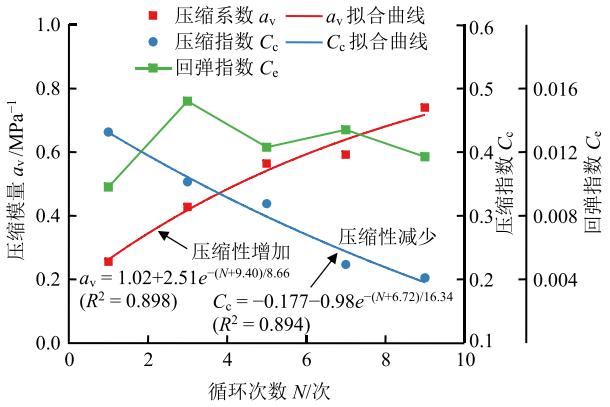


图 7　压缩指标随循环次数变化曲线

Fig.7　Variation of compression index with cycles

表 2　膨胀土的不同循环次数下压缩性指标

Table 2　Compression indexes of expansive soil under different cycles

循环次数/次	拟弹性段压缩指标			拟塑性段压缩指标	分界点
	压缩系数 a_v/MPa^{-1}	压缩模量 E_s/MPa	回弹指数 C_e	压缩指数 C_c	固结屈服应力 σ'_{vy}/kPa
1	0.256	6.711	0.009 8	0.431	309.03
3	0.427	4.035	0.015 2	0.353	192.60
5	0.563	3.061	0.012 3	0.319	173.18
7	0.592	2.690	0.013 4	0.223	97.73
9	0.740	2.352	0.011 7	0.203	51.51

增加而减小；③压缩系数和压缩指数与循环次数的关系可用指数函数表示，1～3 次循环变化最大，5～7 次循环变化幅度最小。综上所述，随循环次数的增加，起始压缩段和拟弹性段压缩性增加，拟塑性段压缩性减少，由于压缩完成后稳定孔隙比减少，膨胀土整体压缩性增加。

3.1.2　循环作用对细观裂隙率的影响

图 8 为不同循环次数与膨胀土裂隙的关系。由图 8 可知，经过 1～3 次循环后，膨胀土内部出现了长度和宽度较小的 3 条主干裂隙，裂隙率缓慢增加；经过第 5 次循环，主干裂隙宽度减少，但周边生成新生细微裂隙，裂隙网络规模扩大，连通程度也相应提高，裂隙率迅速增加；7～9 次循环过程中，主干裂隙显现变粗，长度和宽度有明显增大趋势，网状微裂隙在冻融作用下逐渐修复隐去，新增 4 条贯通土体的主干裂隙，裂隙率逐渐稳定。

裂隙率 R_n 和干湿–冻融循环次数 N 的关系曲线如图 8 所示，膨胀土的裂隙率与循环次数之间保持良好的幂函数关系，其表达式为

$$R_n=6.50N^{0.395} \tag{8}$$

相关系数 $R^2=0.915$，说明采用式（8）可以有效地预测裂隙率 R_n 的发展趋势。

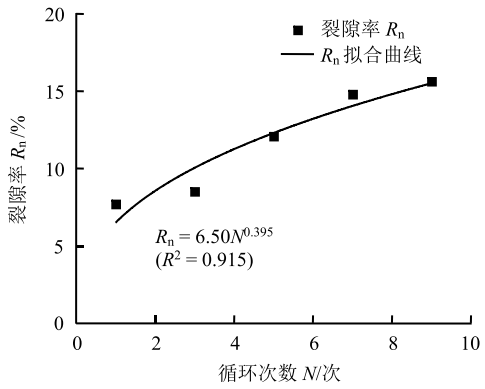
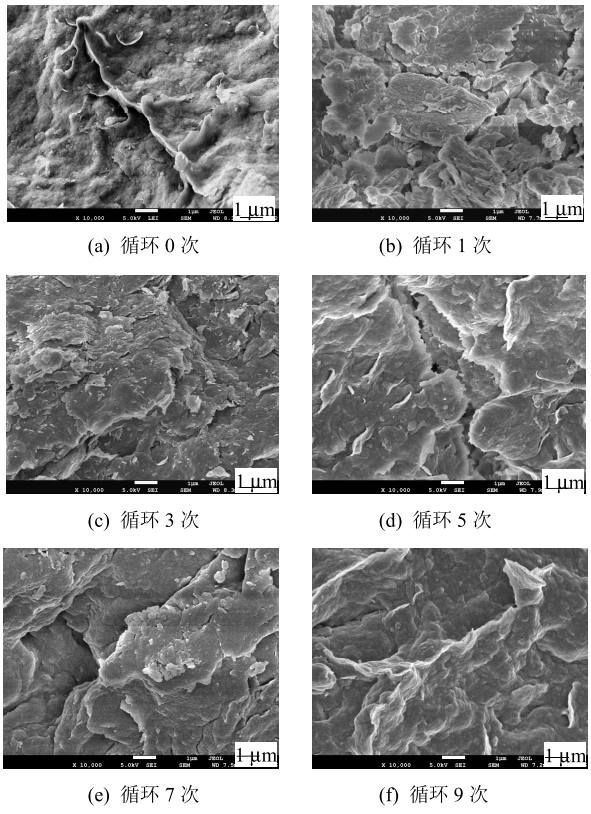


图 8　裂隙率与循环次数的关系

Fig.8　Fracture rate of expansive soil under different drying-wetting-freezing-thawing cycles

3.1.3 循环作用对微观结构特性的影响

图 9 为经历不同循环次数（0、1、3、5、7、9 次）后放大 10 000 倍 SEM 图像，由图 9 可知，膨胀土试样未经循环时，微观颗粒以蒙脱石组成的片状叠聚体为主，整体结构密实且无明显裂隙，部分叠聚体边缘在干燥过程中产生卷曲变形。经过干湿−冻融循环后，原有片状叠聚体结构逐渐破坏，黏土矿物由定向结构转向无序结构，少量黏土颗粒逐渐剥落并脱离土颗粒叠聚体，土体裂隙开始发育。5 次循环后土体破碎严重，叠聚体、团聚体内部孔隙与粒间较大孔隙连接贯通，使得裂隙数量显著增加，剥落的黏土颗粒在反复干湿−冻融作用下被搬运至裂隙处无序聚合，在一定程度上修复了原有裂隙，使得裂隙平均宽度有所减少。由此可见，土体宏观压缩指标的劣化及细观裂隙的增长，在微观结构演化中主要表现在：①土颗粒团聚体的变形；②裂隙数量增加，平均宽度减少。



(a) 循环 0 次 (b) 循环 1 次

(c) 循环 3 次 (d) 循环 5 次

(e) 循环 7 次 (f) 循环 9 次

图 9 不同循环次数试样的 SEM 扫描结果(10 000 倍)
Fig.9 SEM scanning results of samples subjected to different cycles (10 000×)

图 10 为循环作用下微观指标定量分析，研究从圆度、颗粒定向频率、长径比和微观孔隙率多方面开展，探究反复干湿−冻融循环对膨胀土宏观力学特性与微观孔隙结构的影响。

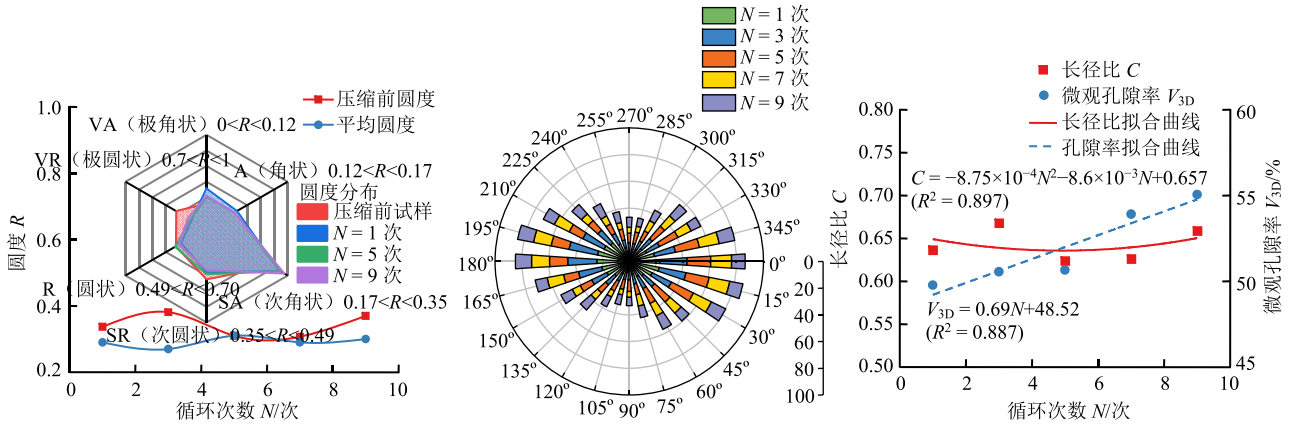
（1）圆度：圆度 R 值越大，颗粒团聚体越接近圆形。由图 10(a)可知，统计各循环次数下颗粒团聚体的圆度，SA 级（次角状）与 SR 级（次圆状）占整体的 60.9%～64.3%，VR 级（极圆状）占比最少，仅有 1.05%～4.24%，表明压缩作用下，极圆状团聚体颗粒占比下降，整体上趋向扁角状（包括 SA 次角状及 SR 次圆状），堆叠形成颗粒间结合更为紧密的叠聚体结构，压缩性显著降低。随循环次数的增加，压缩前后平均圆度均无明显变化，频率曲线为 SA 级，扁角状占比小幅增加，说明循环作用对颗粒团聚体形态影响较小。

（2）颗粒定向频率：由图 10(b)可知，循环作用参与下的压缩试样，颗粒定向频率的分布呈“两极化”，0°～15°和 165°～195°范围内定向频率分布占整体的 47.4%，而在受力方向（75°～120°和 255°～300°）分布较低，占整体的 19.9%。这是由于土体颗粒在压力作用下会逐渐偏转，角度偏向于水平面方向，部分团聚体颗粒在压力作用下发生形态变化，圆度下降逐渐扁角化，使统计为极角方向的颗粒数量增加，形成片状堆积的分散结构，具有各向异性。另一方面，循环 1～3 次的定向频率分布峰值更“陡峭”，垂直方向的颗粒占比为极角范围的 30.1%，随循环次数的增加，颗粒定向频率分布逐渐均质化。究其原因，循环过程中产生的含水率变化会改变部分极角范围内颗粒的方向，使颗粒相互靠近，增加角−边或面−边的接触方式，形成絮凝结构，各向异性减小，导致压缩性降低。

（3）长径比：由图 10(c)可知，循环作用参与下的长径比整体上较为稳定，保持在 0.6～0.7 之间，3 次循环时孔隙数量增加，长径比进入上升阶段，随后有小幅下降，平均宽度减少。5～9 次循环过程中长径比进入缓慢增加阶段，整体变化趋势呈二次函数形式。综上，孔隙长径比整体为 3 阶段发育：①孔隙网络扩张，长径比增加；②孔隙主干发育，细微孔隙减少，长径比下降；③孔隙逐渐稳定，长径比缓慢增加。

（4）微观孔隙率：由图 10(c)可知，循环作用参与下的压缩试样孔隙率受微观图选区影响有一定的波动，整体稳定在 50%～55%范围内，随循环次数的增加，微观孔隙率呈缓慢、迅速、稳定 3 阶段发展，整体与循环次数呈线性正相关。微观孔隙与细观裂隙的发育阶段有一定相似性，但其面积占比高于细观裂隙。究其原因，压力的作用主要反映在细观层面，对微观层面的孔隙影响有限，循环作用在一定程度上改变土体微观结构，提高膨胀土所能达

到的压缩上限。综上可知，随干湿–冻融循环次数的增加，颗粒圆度和孔隙长径比变化较小，颗粒定向频率和微观孔隙率变化较大，说明膨胀土压缩性主要受定向频率和孔隙率影响。



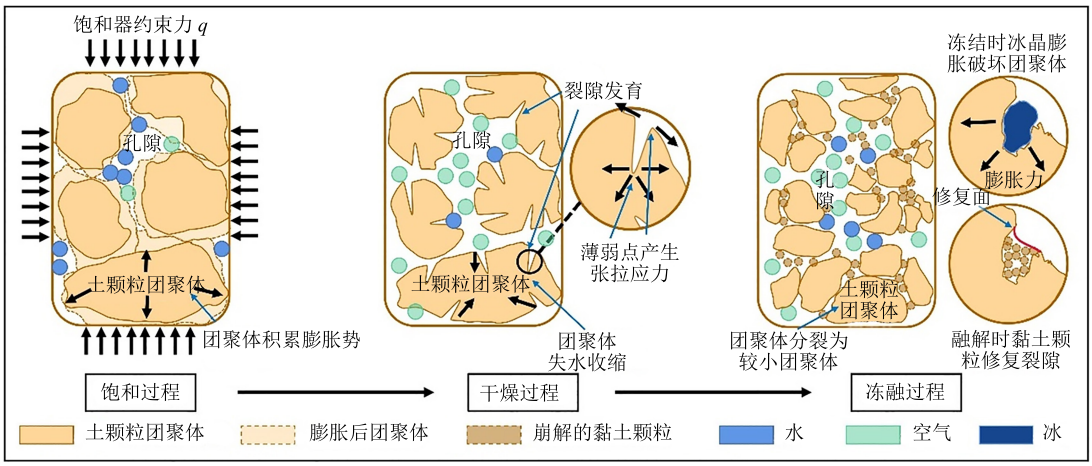
(a) 圆度变化　　(b) 定向频率分布　　(c) 长径比及微观孔隙率变化

图 10　循环作用下微观指标定量分析

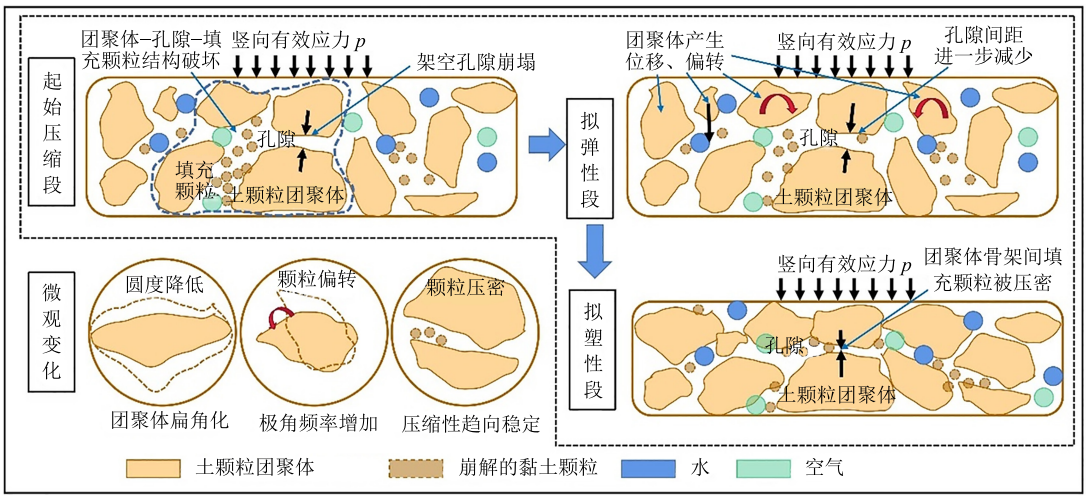
Fig.10　Quantitative analysis of micro indicators after cycles

3.1.4 膨胀土的压缩性衰减机制

图 11(a)为膨胀土干湿–冻融循环的演化过程示意图。由图 11(a)可知，试样饱和受饱和器约束体积不变，膨胀力以膨胀势的形式积聚在试样内部，增



(a) 膨胀土干湿–冻融循环的演化过程示意图



(b) 膨胀土压缩过程示意图

图 11　膨胀土干湿–冻融循环及压缩过程演化示意图

Fig.11　Evolution diagram of drying-wetting-freezing-thawing cycles and compression process of expansive soil

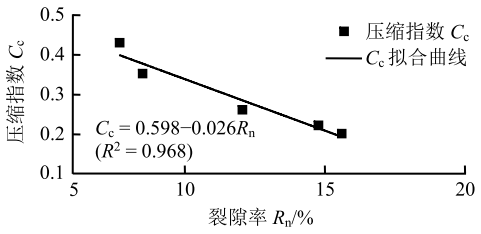
大土体刚度；干燥过程中试样失水收缩，主要承受张拉破坏，在应力薄弱点产生裂隙；冻融过程主要造成颗粒团聚体的破碎迁移，在一定程度上修复了土体的裂隙，但整体土体骨架结构被贯通裂隙分割为多个以裂隙为边界的较小刚体，刚体间裂隙被崩解的细微黏土颗粒填充，降低了颗粒间的胶结作用。随循环次数的增加，这种结构变化逐渐稳定，土体的孔隙显著增大，形成一种新的土体结构，以被主干裂隙分割开的较小刚体为骨架，连接处填充崩解的细微黏土颗粒所组成的“团聚体–孔隙–填充颗粒结构”。

图 11(b)为膨胀土压缩过程示意图，由图 11(b)可知，当土样所承受的竖向有效应力 p 后：①起始压缩段干湿–冻融循环产生的细观裂隙被压缩，是膨胀土多裂隙性的体现。此时被裂隙分割的土体实际开始接触，压缩过程主要包括架空孔隙崩塌及临时胶结结构破坏两方面，最终导致土颗粒骨架发生脆性破坏而无法恢复；②拟弹性段压缩变形主要包括土颗粒团聚体间产生位移、偏转，孔隙间距减少等方面，对土样进行卸载后，其回弹量有限，无法达到初始状态；③以固结屈服应力为转折点，达到固结屈服应力后压缩变形主要是土颗粒骨架间的填充颗粒被压密所产生的，膨胀土压缩性较小，且随循环次数的增加有所减小。随压力的进一步增加，土颗粒团聚体扁角化、极角频率增加、孔隙率减少，压缩性趋向于稳定。综上所述，起始压缩段和拟弹性段压缩性主要受表面裂隙率影响，拟塑性段压缩性主要受微观孔隙率影响。建立压缩指数与细–微观孔隙的关系如图 12 所示。由图 12 可知，细观裂隙率和微观孔隙率与压缩指数的关系可用线性函数表示，随裂隙和孔隙的发育，压缩指数呈下降趋势。

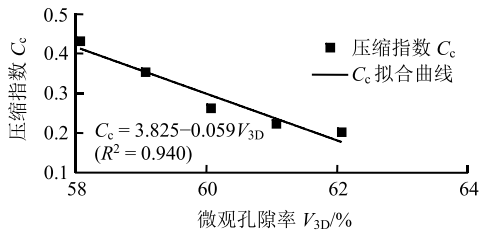
3.2 渗透试验

3.2.1 循环次数对渗透系数的影响

图 13 为干湿–冻融条件下膨胀土的渗透系数 k_s 的变化曲线，由图 13 可知①随循环次数的增加，渗透系数 k_s 呈增加趋势，增加幅度逐渐降低并趋于平稳，根据曲线可以得出试样渗透系数变化分为缓慢、迅速、稳定 3 个阶段；②试样前 3 次干湿–冻融循环渗透系数的变化较小；5 次循环完成后，渗透系数变化大；7 次和 9 次循环完成后渗透系数的变化较小，衰减幅度逐渐降低趋向于平稳。③渗透系数变化范围为 8.95×10^{-6}～7.36×10^{-5} cm/s。渗透系数随循环次数的增加而增加，一方面随着干湿–冻融循环的进行，膨胀土颗粒表面的结合水膜厚度会产生较大变化，结合水包括强结合水和弱结合水两部分，强结合水性质接近于固态，基本不受循环作用的影响，影响结合水膜厚度变化的主要是弱结合水。由于循环时孔隙水（自由水）在颗粒间反复发生冻结和融化，影响颗粒及孔隙的结构，弱结合水受其影响也发生相应变化，导致结合水膜厚度减小，使得土体黏性逐渐降低。同时结合水膜变薄也使颗粒间流动自由水的阻力减小，渗透系数随之增加；另一方面干湿–冻融循环下土体产生裂隙，饱和后裂隙没有完全愈合，从而为水流提供了良好的渗流通道，使饱和渗透系数逐渐增加。



(a) 压缩指数随细观裂隙率变化曲线



(b) 压缩指数随微观孔隙率变化曲线

图 12 压缩指数与细观–微观裂隙率的关系曲线

Fig.12 Variation of compression index with micro-fracture rate

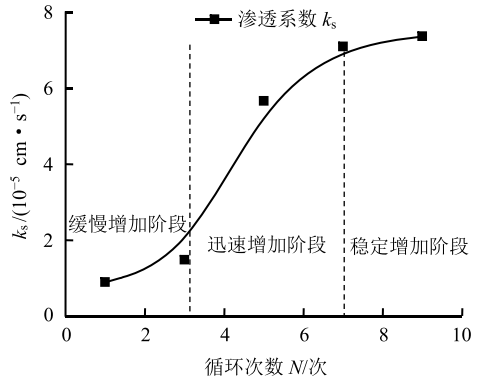
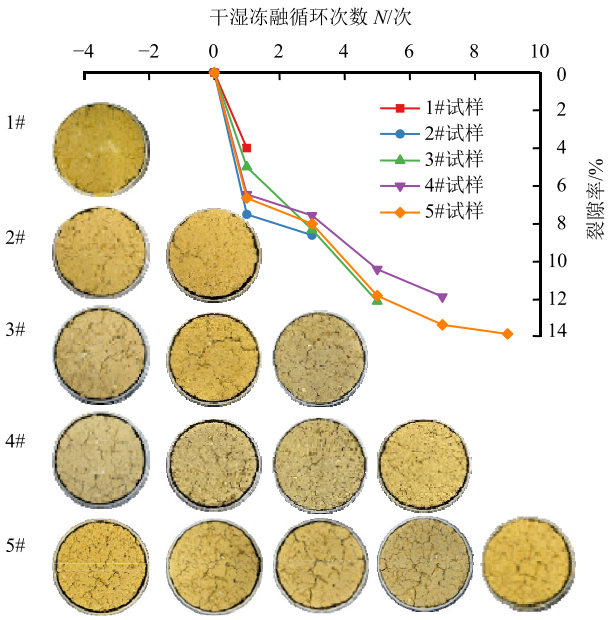


图 13 渗透系数曲线

Fig.13 Permeability curve

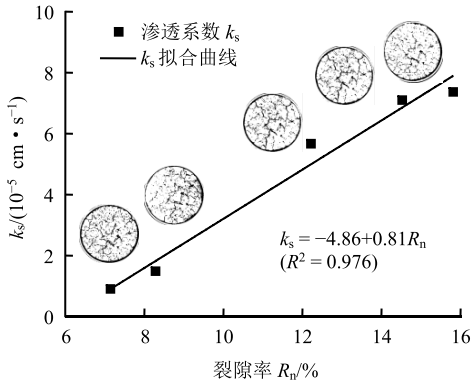
3.2.2 裂隙率对渗透系数的影响

图 14(a)为不同干湿–冻融循环次数下渗透系数随表面裂隙发展情况，由图 14(a)可知：①不同试样裂隙发展规律相近；②循环前期裂隙率对其渗透性



N/次	k_s/(10^{-5} cm • s^{-1})	R_n/%
1	0.90	7.15
3	1.48	8.29
5	5.66	12.22
7	7.09	14.53
9	7.36	15.82

(a) 裂隙率发育情况



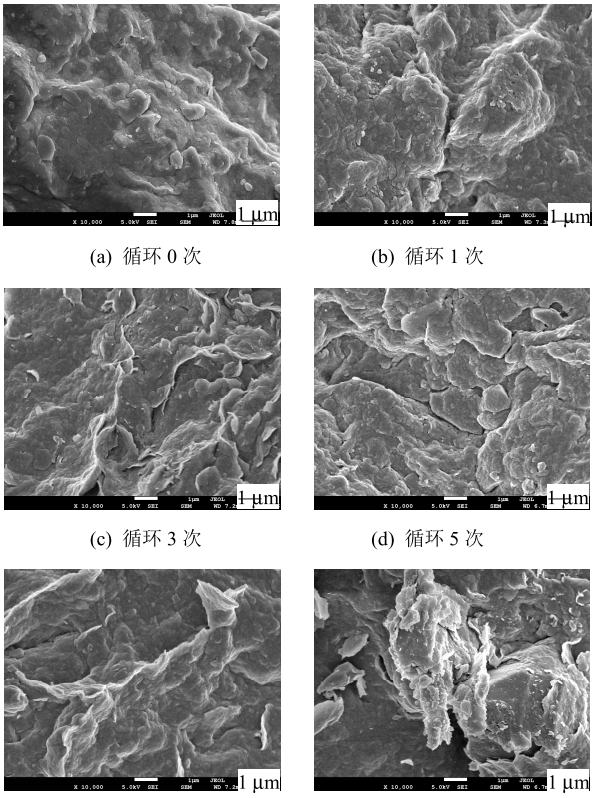
(b) 裂隙率与渗透系数关系曲线

图 14　裂隙率与渗透系数关系
Fig.14　Relationship between fracture rate and permeability coefficient

能的影响较小，渗透系数随裂隙发育逐渐增大，而当循环进行到一定程度后，裂隙不再发育，渗透系数逐渐稳定。裂隙率与渗透系数之间存在明显的线性关系，且拟合度较高，如图 14(b)所示。可以看出：①当试样出现裂隙时，裂隙在循环过程中急速发育，渗透系数也随之显著提高；当裂隙发育趋向稳定时，渗透系数增长缓慢；②渗透系数主要受土体的黏性、裂隙发展深度以及裂隙率的影响，裂隙发展越深则试样表面裂隙率越大，而黏性越低则裂隙发展也越剧烈。由于膨胀土具有多裂隙性，裂隙发育明显，其存在为水分的下渗提供了通道，易通过裂隙率的发展预测渗透系数的变化趋势。

3.2.3　微观孔隙对渗透系数的影响

图 15 为经历不同循环次数（0、1、3、5、7、9 次）的土样的放大 10 000 倍的 SEM 图像。由图 15 可知，膨胀土未经循环时，蒙脱石晶体颗粒饱满，黏土矿物具有良好的层间结构，表面光滑平顺，颗粒间孔隙较少。经过干湿–冻融循环后，蒙脱石晶体多呈卷曲褶皱状，土颗粒团聚体边缘界限逐渐模糊，裂隙数量和长度增加，与粒间孔隙连通形成裂隙网络，原有层间结构弯曲破坏，循环作用造成的侵蚀在团聚体与新生裂隙接触点尤为明显。由于膨胀土中蒙脱石含量较高，晶粒较小，比表面积较大，且层间作用力较弱，在循环作用下易剥离、崩解形成更薄的单晶片，增加膨胀土裂隙面积，成为新的渗流通道。



(a) 循环 0 次　(b) 循环 1 次

(c) 循环 3 次　(d) 循环 5 次

(e) 循环 7 次　(f) 循环 9 次

图 15　不同循环次数试样的 SEM 扫描结果(10 000 倍)
Fig.15　SEM scanning results of samples subjected to different cycles (10 000×)

以上研究定性分析了微观变化对渗透系数的影响，但对于各微观指标的重要程度没有较精确的度量，因此引入灰色关联度来阐述孔隙数量、平均圆度、颗粒角、长径比和微观孔隙率等微观参数对

渗透系数的影响程度。表 3 为循环作用下宏观渗透系数和微观参数之间的平均关联度。由表 3 可知，渗透系数与各微观参数之间的关联度在 0.65～0.82 之间。根据与渗透系数的关联度大小对微观参数进行排序，微观孔隙率>平均颗粒角>孔隙数量>平均圆度>长径比。各项微观参数与渗透系数的关联度均大于 0.65，微观孔隙率与渗透系数的关联度为 0.82，表明在循环作用下各微观参数均对渗透系数产生一定影响，微观孔隙率是最主要的影响因素。渗透系数与微观孔隙率呈线性正相关，如图 16 所示。

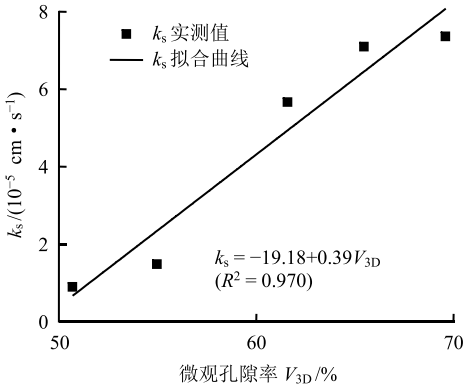


图 16 微观孔隙率与渗透系数关系曲线

Fig.16 Relationship between microscopic porosity and permeability coefficient

表 3 微观参数关联度

Table 3 Particle parameters

微观参数	关联度
孔隙数量	0.721 8
平均圆度	0.693 3
平均颗粒角	0.735 6
长径比	0.667 3
微观孔隙率	0.817 9

综合前述试验结果分析，裂隙发育是干湿–冻融循环作用下膨胀土渗透性增大的最主要原因，其外在表现为膨胀土表面裂隙率的增加，内在机制为膨胀土微观结构的变化，各微观参数均对渗透系数产生一定影响，其中微观孔隙率是最主要的影响因素。图 17 为膨胀土干湿–冻融循环渗透性变化过程示意图，由图可知，循环作用不同时期微观孔隙发育模式不同，渗透系数受其影响也有一定差别，其中：①循环初期：石英、方解石和伊利石等矿物在干缩过程中体积变化较少，以蒙脱石为主的黏土矿物干缩变形较大，砂粒边缘大孔开始发育，渗透系数较小；②循环中期：蒙脱石为主的团聚体颗粒反复胀缩，造成的土体损伤逐渐累积，粒间孔隙扩张造成介孔粗化贯通，渗透系数迅速增加；③循环后期：土颗粒破碎形成破碎带填充微孔，孔隙数量增加尺寸减少，渗透系数逐渐稳定。究其原因，循环作用使孔隙水在土颗粒间不断发生冻结和融化，干燥时不同矿物亲水性的差距使土体不均匀收缩产生张拉应力，裂隙发育扩张；冻结时黏土颗粒表面结合水膜变薄，部分结合水脱离黏土颗粒形成冰晶，产生冻胀破坏使裂隙进一步发育；饱和及融解时膨胀土胶结物质水解，细颗粒剥落破碎沿裂隙带缓慢崩解。多次循环后微观结构的损伤逐渐累积，干燥及冻结作用均对裂隙发育有促进作用，造成膨胀土渗透性增加，而饱和及融解作用在一定程度上修复

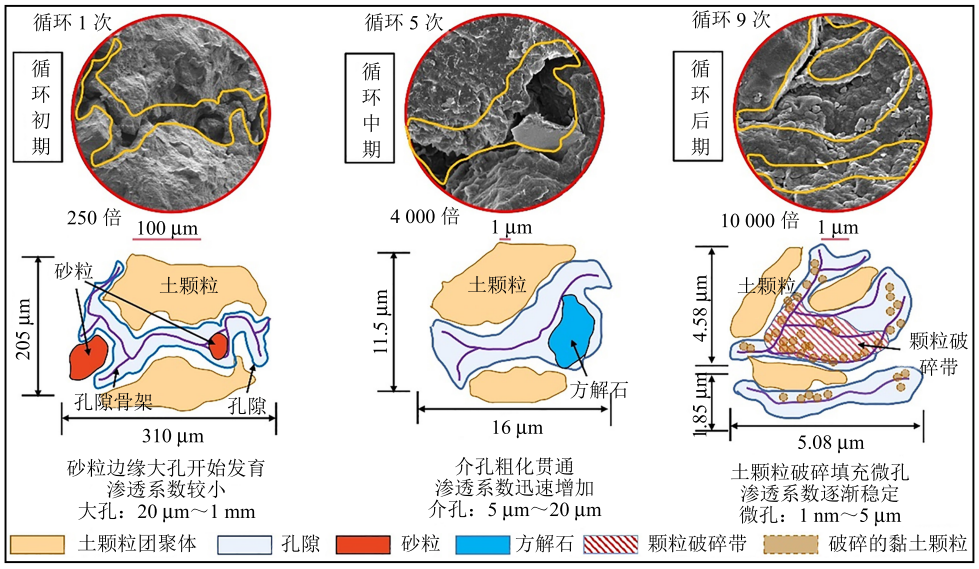


图 17 膨胀土干湿–冻融循环渗透过程演化示意图

Fig.17 SEM scanning results of samples subjected to different cycles (10 000×)

干燥时产生的裂隙，抑制其发育，减缓了膨胀土渗透性增加效率。综上所述，在大孔与介孔发育、土颗粒破碎填充微孔等多种因素共同作用下，多次干湿−冻融循环后土体原有致密结构丧失，内部裂隙连接贯通，最后反映到宏观层面，发育成为宏观裂隙，为水提供渗流通道，造成膨胀土渗透性增加。

4　结　论

本文以北疆供水一期工程为研究背景，通过对膨胀土进行室内宏观力学特性试验及 SEM 微观试验，探究了北疆膨胀土的宏微观力学特性变化规律，可得如下结论：

（1）干湿−冻融循环条件下膨胀土压缩曲线具有拟超固结性，将压缩过程分为拟弹性段与拟塑性段，以固结屈服应力为转折点。循环作用下拟弹性段压缩性呈增大趋势，拟塑性段压缩性则呈减小趋势，膨胀土整体压缩性呈增大趋势。回弹指数呈波动趋势，压缩指数与循环次数呈指数正相关，与细−微观裂隙呈线性正相关。

（2）干湿−冻融循环作用改变膨胀土的微观结构，细微黏土颗粒组成“团聚体−孔隙−填充颗粒”形式的较松散临时结构，絮凝结构数量增加，各向异性减小。土样承受竖向压力时，在细观层面有：①起始压缩段架空孔隙崩塌及临时胶结结构破坏；②弹性阶段土颗粒团聚体间产生位移、偏转，孔隙间距减少；微观层面有：③塑性阶段团聚体颗粒扁角化、极角频率增加、土颗粒骨架间的填充颗粒被压密，压缩性逐渐稳定。

（3）渗透系数 k_s 在循环过程中变化分为缓慢、迅速、稳定 3 个阶段，7 次干湿−冻融循环完成后渗透系数的变化较小，衰减幅度逐渐降低趋向平稳。渗透系数与循环次数呈正相关，当试样出现裂隙时，渗透性显著提高，表明渗透系数与试样表面裂隙率之间关系明显。

（4）各项微观参数与渗透系数的关联度均大于 0.65，微观孔隙率是最主要的影响因素。渗透系数与微观孔隙率呈线性正相关，其变化可分为 3 个阶段，①循环初期：砂粒边缘大孔开始发育，渗透系数较小；②循环中期：介孔粗化贯通，形成较大一级的孔隙，渗透系数迅速增加；③循环后期：土颗粒破碎形成破碎带填充微孔，孔隙数量增加尺寸减少，渗透系数逐渐稳定。

参 考 文 献

[1] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
LIAO Shi-wen. Expansive soil and railway engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984.

[2] 陈善雄, 赵旻, 冷星火. 强膨胀土渠坡破坏机理及处理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
CHEN Shan-xiong, ZHAO Min, LENG Xing-huo. Strong expansive soil slope failure mechanism and treatment technology[M]. Beijing: Science Press, 2016.

[3] 时伟, 张亮, 杨忠年, 等. 冻融循环条件下膨胀土力学特性试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(4): 480-485.
SHI Wei, ZHANG Liang, YANG Zhong-nian, et al. Experimental study on mechanical properties of expansive soil of artificial[J]. **Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)**, 2019, 51(4): 480-485.

[4] 柯睿, 汪洪星, 谈云志, 等. 冻融循环对固化淤泥土力学性质的影响[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(8): 136-139, 145.
KE Rui, WANG Hong-xing, TAN Yun-zhi et al. Effect of freeze-thaw cycle on mechanical properties of solidified silt[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2019, 36 (8): 136-139, 145.

[5] 杨忠平, 李登华, 邓仁峰, 等. 冻融循环对固化铅污染土强度与孔隙特征影响的试验研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(3): 539-549.
YANG Zhong-ping, LI Deng-hua, DENG Ren-feng, et al. An experimental study for influence of freeze-thaw cycles on strength and pore characteristics of solidified lead-contaminated soil[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2019, 27(3): 539-549.

[6] GAO Z N, ZHONG X M, WANG Q, et al. The influence of freeze-THAW cycles on unconfined compressive strength of lignin fiber-reinforced loess[J]. **Journal of Renewable Materials**, 2022, 10(4): 1063-1080.

[7] CHU C F, ZHAN M H, FENG Q, et al. Effect of drying-wetting cycles on engineering properties of expansive soils modified by industrial wastes[J]. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2020(12): 1-9.

[8] SOLTANI A, DENG A, TAHERI A, et al. Swell-shrink behavior of rubberized expansive clays during alternate wetting and drying[J]. **Minerals**, 2019, 9(4): 224.

[9] 唐朝生, 施斌, 崔玉军. 土体干缩裂隙的形成发育过程及机理[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(8): 1415-1423.
TANG Chao-sheng, SHI Bin, CUI Yu-jun, et al. Behaviors and mechanisms of desiccation cracking of soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(8):

1415-1423.

[10] CHANG J, XIAO J, JIANG J Q, et al. Study on hygroscopic swelling and dehumidi-fication cracking characteristics of expansive soil under acid rain and cyclic drying-wetting[J]. **Advances in Civil Engineering**, 2021(1): 1-10.

[11] ZHU H X, ZHANG Y, LI Z H, et al. Study on crack development and micro-pore mechanism of expansive soil improved by coal gangue under drying-wetting cycles[J]. **Materials**, 2021, 14(21): 6546.

[12] 蔡正银, 朱洵, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合循环作用下膨胀土裂隙演化规律[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1381-1389.
CAI Zheng-yin, ZHU Xun, HUANG Ying-hao, et al. Evolution rules of fissures in expansive soils under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(8): 1381-1389.

[13] ZHU R, HUANG Y H, SONG Z, et al. Volume changes and mechanical properties of expansive mudstone below canals under wet-dry/wet-dry-freeze-thaw cycles[J]. **Advances in Civil Engineering**, 2021(10): 1-11.

[14] 王港, 张先伟, 刘新宇, 等. 厦门花岗岩残积土的压缩变形特性及其微观机制[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3291-3300, 3314.
WANG Gang, ZHANG Xian-wei, LIU Xin-yu, et al. Compression characteristics and microscopic mechanism of Xiamen granite residual soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(12): 3291-3300, 3314.

[15] 王丽琴, 邵生俊, 王帅, 等. 原状黄土的压缩曲线特性[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1076-1084, 1139.
WANG Li-qin, SHAO Sheng-jun, WANG Shuai, et al. Compression curve characteristic of undisturbed loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(3): 1076-1084, 1139.

[16] 周葆春, 张彦钧, 汤致松, 等. 不同压实度荆门弱膨胀土的一维膨胀−压缩特性[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1275-1283.
ZHOU Bao-chun, ZHANG Yan-jun, TANG Zhi-song, et al. One-dimensional swelling-compression characteristics of Jingmen weak expansive soil under different compactnesses[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(5): 1275-1283.

[17] 刘宽, 叶万军, 高海军, 等. 干湿环境下膨胀土力学性能劣化的多尺度效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2148-2159.
LIU Kuan, YE Wan-jun, GAO Hai-jun, et al. Multi-scale effects of mechanical property degradation of expansive soils under drying-wetting environments[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(10): 2148-2159.

[18] 骆赵刚, 汪时机, 杨振北. 膨胀土湿干胀缩裂隙演化及其定量分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2313-2323.
LUO Zhao-gang, WANG Shi-ji, YANG Zhen-bei. Quantitative analysis on fracture evolution of expansive soils under wetting-drying cycles effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(7): 2313-2323.

[19] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 基于SEM和MIP试验结构性黏土压缩过程中微观孔隙的变化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 406-412.
ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Evolution of microscopic pore of structured clay in compression process based on SEM and MIP test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(2): 406-412.

[20] 赵茜, 杨金熹, 赵晋萍. 冻融和干湿循环对原状黄土渗透系数的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(2): 119-126.
ZHAO Qian, YANG Jin-xi, ZHAO Jin-ping. Experimental study on permeability of undisturbed loess under freezing-thawing and drying-wetting cycling conditions[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2020, 31(2): 119-126.

[21] 王佳妮, 马戍, 张晓明. 干湿循环下崩岗土体裂隙发育对其渗透性能的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 90-95, 102.
WANG Jia-ni, MA Xu, ZHANG Xiao-ming. Effect of fissure development of collapsed soils on their permeability under dry-wet cycle[J]. **Journal of Soil and Water Conservation**, 2021, 35(1): 90-95, 102.

[22] 张乐, 党发宁, 高俊, 等. 考虑应力历史的饱和黏土一维固结渗透试验研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(4): 84-96.
ZHANG Le, DANG Fa-ning, GAO Jun, et al. Experimental study on 1-D consolidation permeability of saturated clay considering stress history[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2021, 40(4): 84-96.

[23] ZHU R, CAI Z Y, HUANG Y H. Centrifugal and field studies on water infiltration characteristics below canals under wetting-drying-freezing-thawing cycles[J]. **Journal of Central South University**, 2021, 28(5): 1519-1533.

[24] QI W, WANG C, ZHANG Z Y, et al. Experimental investigation on the impact of drying-wetting cycles on the shrink-swell behavior of clay loam in farmland[J]. **Agriculture-Basel**, 2022, 12(2): 1-15.

[25] MA T T, WEI C F, YAO C Q, et al. Microstructural evolution of expansive clay during drying- wetting cycle[J]. **Acta Geotechnica**, 2020, 15(8): 2355-2366.