

干湿-冻融循环作用下北疆膨胀土力学特性的劣化机制及其非线性模型研究

张凌凯^{1,2}, 徐浩振^{1,2}, 丁旭升^{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:为深入探究渠坡失稳破坏机理,通过开展干湿-冻融循环作用下北疆膨胀土的三轴试验和电镜扫描试验,从宏观、细观和微观3个角度研究了膨胀土劣化物理机制,并分析了干湿-冻融循环作用对邓肯-张 $E-B$ 模型参数的影响规律。结果表明:干湿-冻融循环作用下,膨胀土应力-应变曲线均呈硬化型,体变曲线呈剪缩特征;黏聚力随循环次数非线性衰减,首次衰减最为显著,7次循环后趋于稳定;内摩擦角变化较小,基本保持恒定;循环作用过程中,膨胀土裂隙由两端向中间发育,内部裂隙网格逐渐汇聚并在土体薄弱处形成裂隙核心,整体破坏面由循环初期“Y”形或“X”形逐渐发育为“爪”形纵向贯穿破坏面;循环作用造成土体的团聚结构破碎重组为松散的絮凝结构,粒间孔隙增大,黏土颗粒逐渐剥落脱离,导致结构损伤,其中颗粒间胶结作用减弱是黏聚力下降的主要原因;循环作用对邓肯-张 $E-B$ 模型参数 n 、 K 、 K_b 影响显著,循环次数大于3次时,参数变化幅度较小。经指数函数拟合,各参数与循环次数呈良好相关性。

关键词:干湿-冻融循环;膨胀土;强度劣化;裂隙;邓肯-张模型;北疆

中图分类号: TU411.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2025)04-0045-09

Deterioration mechanism and non-linear model of mechanical properties of expansive soil in northern Xinjiang under dry-wet-freeze-thaw cycle conditions//ZHANG Lingkai^{1,2}, XU Haozhen^{1,2}, DING Xusheng^{1,2}, CUI Ziyang^{1,2}
(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to further explore the failure mechanism of canal slope, triaxial tests and scanning electron microscope (SEM) tests were conducted on expansive soil in northern Xinjiang under dry-wet-freeze-thaw cycle conditions, the physical deterioration mechanism of expansive soil was studied from macroscopic, mesoscopic and microscopic perspectives, and the influence of dry-wet-freeze-thaw cycles on the parameters of the Duncan-Zhang $E-B$ model was analyzed. The results show that under the dry-wet-freeze-thaw cycle conditions, the stress-strain curve of the expansive soil exhibits a hardening type, and the volumetric strain curve shows shear shrinkage characteristics. The cohesion decreases nonlinearly with the increase of the number of cycles, with the most significant reduction occurring during the first cycle, and it tends to be stable after seven cycles. The internal friction angle changes little and remains almost constant. During the cyclic process, cracks in the expansive soil develop from both ends to the center, the internal crack grids gradually converge and form a crack core in the weak area of the soil body, and the overall failure surface gradually develops from an initial “Y” shape or “X” shape to a “claw-shaped” longitudinal penetration damage surface. The cyclic action caused the aggregated structure of the soil to break down and reorganize into a loose flocculent structure, the intergranular pores increase, and the clay particles gradually peel off and detach, resulting in the structural damage of the soil body. The weakening of the intergranular bonding effect is the main reason for the decrease in cohesion. The cyclic action has significant influence on the Duncan-Zhang $E-B$ model parameters n , K , and K_b . When the number of cycles is more than three, the changes in these parameters are relatively small. Exponential function fitting indicates a good correlation between these parameters and the

基金项目:新疆维吾尔自治区中央引导地方科技发展资金项目(ZYYD2024CG20);2022年自治区杰出青年科学基金项目(2022D01E45);
2022年自治区重点研发任务专项资金项目(2022B03024-3);2023年度自治区“天山英才”培养计划青年拔尖人才项目
(2023TSYCJU0007)

作者简介:张凌凯(1987—),男,副教授,博士,主要从事环境岩土工程研究。E-mail:xjau_zlk@163.com

通信作者:徐浩振(1998—),男,硕士研究生,主要从事特殊土的力学特性研究。E-mail:xjauhxz@163.com

膨胀土作为特殊类土,自身含有大量的亲水性矿物,如蒙脱石和伊利石,具有吸水膨胀、失水收缩的特性。北疆供水一期工程渠坡上广泛分布蒙脱石质膨胀土,在季节气温交替变化和渠道历年夏季通水、冬季停水运行方式的共同作用下,土体历经多次干湿-冻融循环作用导致其强度参数显著劣化,进而诱发一系列工程问题。

近年来,众多学者围绕膨胀土在干湿循环和冻融循环作用下的力学性质演化规律展开了深入研究,并取得大量的成果。在干湿循环作用方面,随着干湿循环次数的增加,膨胀土的强度逐渐减弱,且循环作用对膨胀土强度的衰减作用具有累积效应^[1-3],含水率和裂隙对膨胀土的强度影响较大,干密度对强度的影响较小^[4-6]。在冻融循环作用方面,膨胀土的力学特性受到冻融循环作用的显著影响,首次冻融循环后,土体的破坏强度和黏聚力急剧下降,而内摩擦角几乎不受冻融循环作用的影响,且冻融循环作用并未改变膨胀土的应力-应变曲线形态^[7-9]。针对干湿-冻融循环作用对膨胀土三轴试验的研究相对较少,朱洵等^[10]分析了干湿-冻融循环作用对膨胀土力学性能参数的影响规律,但未结合细观、微观方面揭示其力学特性的变化机理。膨胀土裂隙的发育是影响其抗剪强度的重要因素,干湿循环作用^[11-12]和冻融循环作用^[13-14]对膨胀土裂隙的影响规律一直是研究的热点,并在此基础上,张浩等^[15-16]提出了定量描述膨胀土裂隙发育特征的方法,以便更精确地评估裂隙对膨胀土力学性质的影响。微观物理机制是揭示土体宏观力学变化的重要证据,因而结合宏微观尺度研究土体力学变化规律受到众多学者的认可。刘宽等^[17-18]研究了干湿循环过程中微观结构对力学强度的影响,认为干湿循环作用导致亲水性黏土矿物反复变化,导致黏聚力下降。张凌凯等^[19-21]分析了干湿-冻融循环过程中微观结构的变化规律,认为颗粒总数和颗粒总面积的变化是造成膨胀土宏观力学特性变化的主要原因。非线性本构模型参数获取简单,在岩土体的模拟中应用较为广泛,如上官云龙等^[9]通过邓肯-张模型描述膨胀土的三轴试验结果,验证了邓肯-张模型有一定的可靠性。但干湿-冻融循环作用对邓肯-张模型参数的影响规律还有待研究。

综上所述,现有研究主要集中在膨胀土力学特性方面,通常侧重于干湿循环作用、冻融循环作用等

单一因素,且针对干湿-冻融循环作用下的本构模型研究相对较少。基于此,为更精确描述膨胀土在干湿-冻融循环作用下的力学特性衰减规律,本文开展干湿-冻融循环作用下北疆膨胀土的三轴试验和扫描电镜(SEM)试验,分别从宏观强度衰减、细观裂隙发育和微观结构变化三个角度探讨北疆膨胀土力学特性的劣化机理,并基于邓肯-张 *E-B* 模型对三轴试验结果进行拟合,分析各参数的变化规律,以期为实际工程中膨胀土的处理提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用膨胀土取自北疆供水一期工程总干渠“13+175”挖方段渠坡位置,外观颜色呈土黄色。通过室内土工基本试验及X射线衍射试验,得到北疆膨胀土的基本物理性质如下:最大干密度 1.67 g/cm^3 ,最优含水率 18.9%,液限 61.3%,塑限 20.1%,塑性指数 41.2,液性指数-0.13;矿物成分中,蒙脱石、石英、长石、方解石、钠长石和杂质的质量分数分别为 60.3%、32.7%、6.0%、0.5%、0.4%、0.1%。

1.2 循环试验方案

干湿-冻融循环试验过程为干湿循环和冻融循环的交替过程:①干湿循环。湿润过程采用抽气饱和和法模拟膨胀土湿润至饱和状态的过程;干燥过程参考明渠沿线地温分布,确定干燥阶段边界温度为 40°C ,将饱和试样在烘箱中干燥 12 h(温度 40°C),采用称重法控制试样目标含水率为 14.8%。②冻融循环。冻结和融化过程均在冻融循环箱中进行,温度和持续时间分别为 -20°C 、24 h 和 20°C 、24 h。试验共进行 9 次循环,循环次数记为 N 。

1.3 三轴试验方案

试验采用 TSZ 全自动三轴仪,进行常温条件下和干湿-冻融循环作用下的固结排水三轴试验。制备高为 80 mm、直径为 39.1 mm 的试样,制样条件控制为干密度 1.60 g/cm^3 、含水率 18.9%。通过分层击实法制样,击实时共分 5 层。对每组 4 个试样分别施以 100、200、300、400 kPa 的围压进行持续 2 h 的固结,剪切速率为 0.0096 mm/min ,轴向应变达 20%时终止剪切。

2 试验结果与分析

2.1 宏观力学特性分析

a. 应力-应变曲线。图 1 为不同循环次数下试

样的应力-应变曲线(图中 σ_1 为最大主应力, σ_3 为最小主应力, $\sigma_1-\sigma_3$ 为偏应力, ε_1 为轴向应变),由图1可知:①不同围压下膨胀土的应力-应变曲线均呈硬化型曲线,干湿-冻融循环作用下,试样均无明显峰值,且未表现出明显的软化趋势。②随着围压的增大,从未循环到1次循环的应力-应变曲线下降更为显著。③随着围压的增大,循环作用下试样的应力-应变曲线变化趋势逐渐一致。说明干湿-冻融循环对膨胀土的结构有较大的损伤作用,结构损伤作用主要发生在第1次循环过程中;随循环次数的增加这种结构损伤会逐渐累积,但下降的幅度远小于第1次循环;增加荷载可以抑制多次循环作用对膨胀土结构的影响,但对首次循环作用影响不大。这是由于高荷载通过增加土体有效应力、压密孔隙结构并减少水分迁移通道,从而降低胀缩幅度,抑制循环作用对膨胀土的影响。

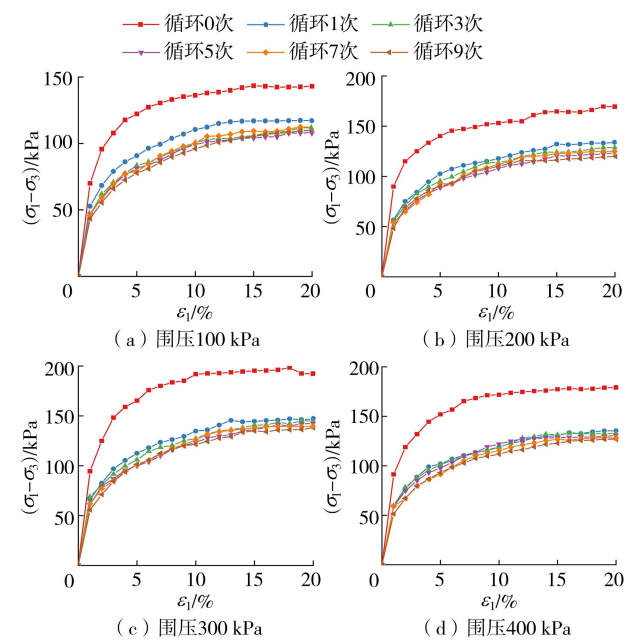


图1 不同循环次数下膨胀土的应力-应变曲线

b. 体变曲线。图2为不同循环次数下试样的体变曲线(图中 ε_v 为体积应变即体变),由图2可知:①试验中不同围压下的体变均为负值,表现为剪缩特征,与应力-应变曲线类似,膨胀土的体变曲线为无明显峰值的双曲线。②未经循环作用时,试样体积变化较小,不同围压下体变均小于1.5%。循环1~3次试样的体变曲线变化较大,最大体变可达2.2%,循环5~9次试样的体变较为稳定,均在2.5%左右。产生这种现象的原因可能是,初期(1~3次)干湿-冻融循环作用破坏膨胀土的结构,试样中裂隙逐渐发育,为试样内部的自由水提供了存储空间,土体结构松散易于排水,在剪切过程中表现为体变增大,即循环1~3次试样的体变显著大于未循

环试样,干湿-冻融循环作用后期(5~9次),试样内部结构破损逐渐稳定,裂隙变细变密,不同循环次数的试样体变稳定在2.0%~2.5%之间。

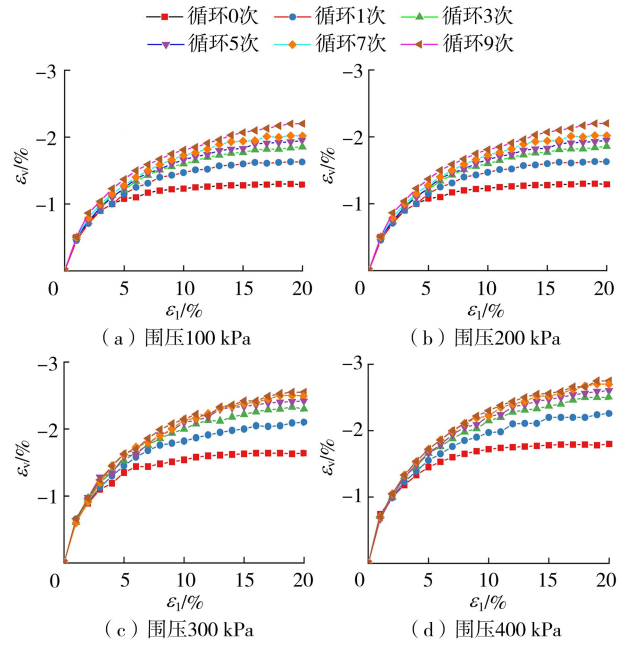


图2 不同循环次数下膨胀土的体变曲线

c. 抗剪强度参数。图3为黏聚力 c 和内摩擦角 φ 随循环次数的变化规律,未循环试样的黏聚力为53.95 kPa,内摩擦角为6.27°。随着干湿-冻融循环次数的增加,黏聚力持续下降,经过7次循环后约下降了25.4%,随后趋于稳定。与此同时,内摩擦角在首次循环后显著下降,之后基本保持在4.20°~4.72°之间,变化幅度较小,保持在较为稳定的范围。为了预测干湿-冻融循环次数对膨胀土抗剪强度参数的影响,对黏聚力和内摩擦角进行线性拟合,得到如下拟合函数关系式:

$$c = 34.66 + 20.25e^{-(N+0.594)/5.82} \quad (1)$$

$$\varphi = 3.94 + 0.0835N \quad (2)$$

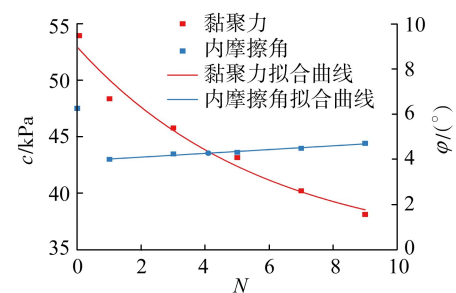


图3 抗剪强度参数随循环次数的变化曲线

2.2 细观与微观损伤规律分析

2.2.1 细观破坏特征

图4为干湿-冻融循环作用下膨胀土试样的细观破坏特征,可以看出未经干湿-冻融循环作用的试样整体无明显剪切破坏面,仅在试样中部的鼓胀处有微小裂隙产生,属试样受拉伸产生的张拉破坏裂

隙。当试样经历 1 次干湿-冻融循环时,上下表面因循环作用更为剧烈而出现裂隙,裂隙宽度远高于未循环时鼓胀处裂隙,裂隙深度在 0~2 cm 范围内,裂隙整体呈现出由上下两端向中间发育的趋势。循环 3~5 次时,试样两端开始出现水平裂隙,水平裂隙的深度在循环 1 次的纵向裂隙范围内。一部分水平裂隙逐渐向试样中间发育,与试样中部剪切形成的鼓胀裂隙汇聚,发育成为贯穿试样的纵向贯穿破坏面,其余裂隙汇聚偏转形成有一定夹角的斜向裂隙。在试样侧面可以看到整体破坏面呈“Y”形或“X”形分布,试样剪切破坏面的斜向裂隙与水平面夹角小于 45°,这反映最大剪应力偏移方向与循环作用下试样端部的应力集中及损伤演化相关。循环加载过程中,试样端部因界面摩擦约束易形成轴向的应力集中,导致主应力轴发生偏转;同时,试样端部反复的应力波动引发局部疲劳损伤累积,从而弱化了土体

的抗剪强度并影响破坏路径的扩展趋势,导致试样端部在循环作用下更容易发生破坏。循环 7~9 次时,贯通裂隙宽度增大,试样裂隙进一步发育形成裂隙网络,将试样分割成为破碎的小土块,在贯通裂隙边缘和试样两端,这种土体逐渐破碎化的现象更为显著,试样的其余部位相对较为完整,仅有若干细微裂隙分布,整体破坏面呈“爪”形分布,试样剪切破坏面的斜向裂隙与水平面夹角在 45°左右,说明此时三轴试样结构性损伤已经由两端逐渐发育至试样整体。

对膨胀土的细观裂隙发育模式进行分析可发现:①在循环作用初期,裂隙由直接与边界接触的试样两端开始发育,受有机玻璃套筒保护的试样中部裂隙相对较少。说明干湿-冻融循环作用是影响裂隙发育程度的直接原因。②随着循环次数的增加,试样两端结构完全破坏,内部的裂隙网络逐渐汇聚、扩展形成水平裂隙。汇聚的裂隙会在土体薄弱处形成裂隙核心,即形成多条主干裂隙,此时试样的裂隙转而在试样中部发育,与另一端裂隙汇合并贯通整个试样。③循环作用后期,试样的破坏形式逐渐由鼓胀破坏转化为剪切破坏,主干裂隙宽度增加,以裂隙核心为中心向周边辐射发育若干细微裂隙,试样进一步破碎化,说明干湿-冻融循环作用显著改变了膨胀土的内部结构,土体的张拉应力通过破碎化的过程得以释放,结构损伤逐渐积累,最终导致了膨胀土的结构破坏、强度下降及剪切模式的变化。

2.2.2 微观结构损伤机理

2.2.2.1 定性分析

图 5 为经历不同次数干湿-冻融循环作用后,完成三轴剪切试验试样的 SEM 图像(放大 1 万倍)。由图 5 可知:①膨胀土试样未经干湿-冻融循环作用

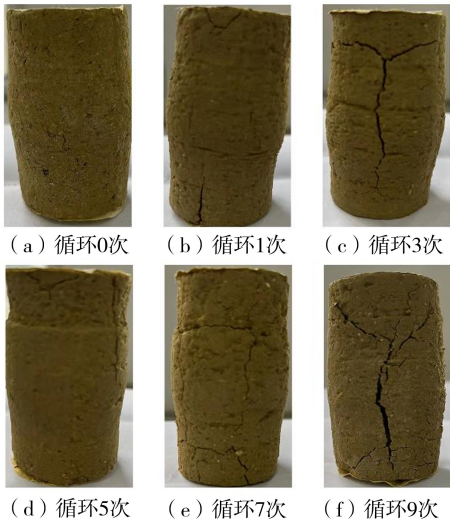


图 4 循环作用下膨胀土细观破坏特征

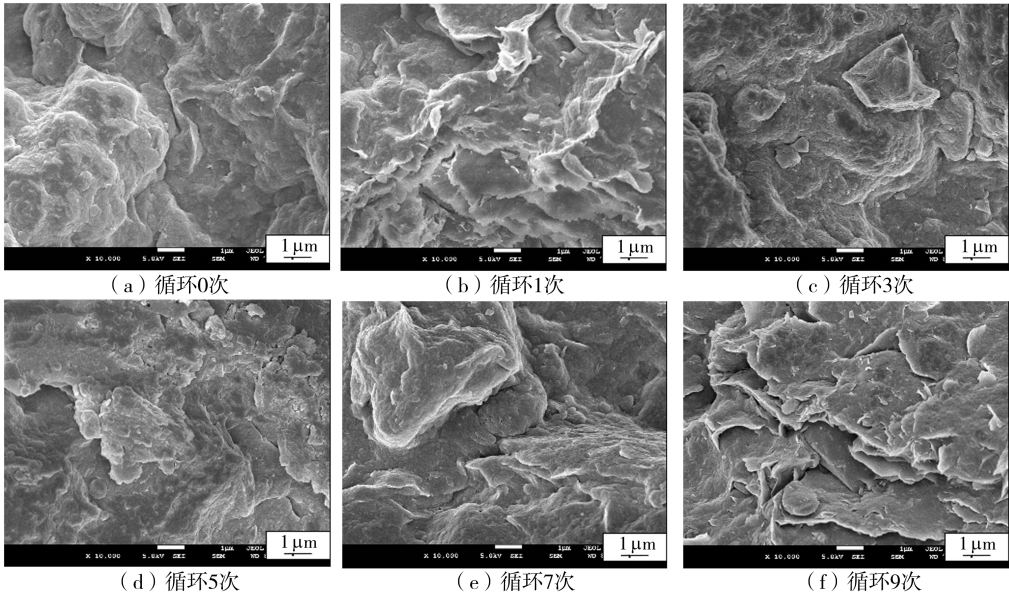


图 5 不同循环次数试样的 SEM 图像(放大 1 万倍)

时,微观颗粒以蒙脱石组成的片状叠聚体为主,有较
强的层次感,整体结构有序排列、层理分明,密实且
无明显裂隙。②经过干湿-冻融循环作用后,原有片
状叠聚体结构逐渐破坏,部分层间结构断裂,黏土矿
物边缘呈锯齿状卷曲,并伴随少量黏土颗粒逐渐剥
落并脱离土颗粒叠聚体,微观裂隙开始发育。5 次
循环后叠聚体边缘颗粒更加破碎,形成“珊瑚状”多
孔结构,矿物颗粒、土颗粒团聚体由裂隙处开始逐渐
剥落,在水流作用下呈堆积状填充裂隙内部。7 次
循环后,黏土颗粒片状叠聚体无法保持有序的层间
结构,土体结构呈破碎状,黏土颗粒主要以单片叠聚
体的形式交错堆积,形成松散的絮凝结构,黏土颗粒
间的接触形式由面-面接触转化为点-面接触,颗粒
间咬合作用被显著削弱。在循环过程中,孔隙水更易
顺叠聚体间的夹层渗入土体内部,包裹亲水性较强
的矿物(如蒙脱石),结合水膜变厚,颗粒间产生
粒间膨胀,进一步扩大层间裂隙,削弱土体强度。说
明干湿-冻融循环次数可以显著影响膨胀土结构性,
造成土体损伤,进而降低膨胀土抗剪强度。

2.2.2.2 定量分析

采用 Image-J 软件对经历不同循环次数干湿-冻
融循环作用后的膨胀土颗粒参数进行微观信息处
理,量化颗粒微观形态变化对抗剪强度的影响,结果
如表 1 所示。由表 1 可知:①黏土颗粒在循环作用
下,颗粒总数逐渐增加,与未经循环作用的初始颗粒
数量相比增加了 77.6%。颗粒总面积与平均尺寸
等微观指标逐渐下降,分别下降了 33.3% 与
50.1%,颗粒平均周长总体在 1.8~2.3 μm 范围
内波动变化。②在放大 1 万倍时,设置颗粒取值范围
0.05~100 μm,可观察到的颗粒多为较小的叠聚体
(直径 $d<1\text{ }\mu\text{m}$)与蒙脱石晶体单粒($d<0.2\text{ }\mu\text{m}$)。量
化微观指标可以更清晰地看出,循环作用造成膨胀土
团聚体破碎,颗粒总面积减小,尺寸较小的单片状叠
聚体和蒙脱石单晶颗粒数量显著增加,颗粒平均尺寸
呈下降趋势。说明在循环作用下,团聚体边缘受侵蚀
影响逐渐剥落,土体原有致密结构受到破坏,颗粒间
小孔隙逐渐张开,自由水进入粒间孔隙,在颗粒间反
复发生相变,主要通过吸水膨胀、失水收缩及冻胀破

表 1 膨胀土颗粒微观参数

循环 次数	总数	总面积/ μm ²	平均尺 寸/μm	面积占 比/%	平均周 长/μm
0	259	73.240	0.283	55.878	2.279
1	295	54.021	0.183	48.090	1.976
3	327	56.587	0.170	43.172	1.776
5	388	57.546	0.150	43.904	1.899
7	407	51.435	0.146	39.242	1.878
9	460	48.831	0.141	37.255	1.948

坏的形式影响颗粒和孔隙的结构,较大的团聚体被分
割、破碎为较小颗粒,逐渐形成新的孔隙。循环 5 次
之后,颗粒破碎程度趋向平稳,颗粒平均尺寸变化较
小,黏土颗粒与微观裂隙总面积达到平衡状态。

2.2.2.3 灰色关联度分析

为确定微观参数对抗剪强度参数的影响程度,
采用灰色关联度进行宏观与微观定量分析。表 2 为
循环作用下宏观抗剪强度参数和微观参数之间的平
均关联度,由表 2 可知:黏聚力与各微观参数的关联
度在 0.56~0.94 之间,内摩擦角与各微观参数的关
联度在 0.51~0.89 之间。根据微观参数与抗剪强
度参数的关联度大小对颗粒微观参数从大到小进行
排序,对黏聚力大小顺序为:面积占比、总面积、平均
周长、平均尺寸、总数;对内摩擦角大小顺序为:面积
占比、总面积、平均尺寸、平均周长、总数。比较可
得,抗剪强度参数受颗粒总数影响不大,其余各项微
观参数与抗剪强度参数的关联度均大于 0.7,有较
好的相关性,颗粒面积占比与黏聚力和内摩擦角的
关联度均为 0.9 左右。综上所述:①在循环作用下
各微观参数均对抗剪强度参数产生一定的影响,颗
粒总面积是最主要的影响因素。②黏聚力受颗粒面
积的影响较大,受颗粒平均尺寸大小影响较小,因为
黏聚力变化主要依赖于颗粒间胶结作用,颗粒面积
占比的下降说明了微观裂隙的滋生,颗粒间原有的
胶结作用受到破坏。微观结构的损伤,累积至细观
裂隙扩展,最后反映到宏观层面,发育成为宏观裂
隙,造成膨胀土黏聚力下降。③内摩擦角受控于颗
粒的粗糙程度,循环作用对内摩擦角有一定影响,但
整体作用不大,表现为膨胀土内摩擦角在首次循环
下降后呈波动趋势。

表 2 宏观与微观参数的关联度

颗粒微观参数	与黏聚力关联度	与内摩擦角关联度
总数	0.568 7	0.511 4
总面积	0.912 3	0.868 3
平均尺寸	0.741 1	0.833 9
面积占比	0.939 9	0.891 8
平均周长	0.904 9	0.828 1

图 6 为抗剪切强度与颗粒面积占比的关系曲
线。由图 6 可知:黏聚力与颗粒面积占比正相关,随
着循环次数的增加,颗粒面积占比减小,黏聚力呈逐
渐减小的趋势,而内摩擦角拟合曲线呈凹形的抛物
线变化,颗粒面积过大或过小均会造成膨胀土内摩
擦角增大,颗粒面积占比在 43%~46% 时内摩擦角
达到最小值。已有学者^[22-24]研究表明:当颗粒面积
较大时,粗颗粒间形成骨架结构,接触点减少但摩擦
力增强,导致内摩擦角增大;当颗粒面积较小时,细
颗粒膨胀土比表面积大,吸水膨胀能力显著。在

干燥状态下,颗粒收缩形成致密结构或裂隙,剪切时需克服颗粒咬合和裂隙间的阻力,导致内摩擦角增大。对图 6 中抗剪强度与颗粒面积占比变化规律进行拟合,得到如下拟合函数关系式:

$$c = 0.84x + 7.45 \tag{3}$$

$$\varphi = 0.0153x^2 - 1.35x + 33.88 \tag{4}$$

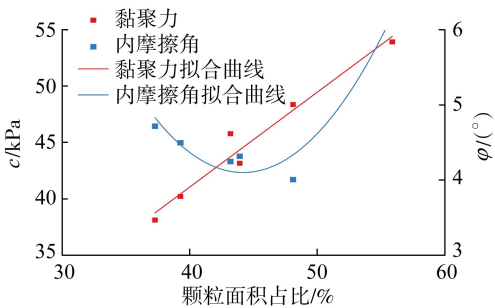


图 6 抗剪强度与颗粒面积占比的关系曲线

2.3 劣化机理分析

图 7 为干湿-冻融循环作用下三轴压缩试验的机理示意图。由图 7 可知:①干湿循环过程中试样裂隙主要由两端向中心发育,当裂隙发育达到一定深度时,发育趋势逐渐减缓,裂隙开始偏转横向发育,最终形成一段颗粒破碎区。②膨胀土的黏聚力取决于颗粒之间胶结作用的强度,而内摩擦角受控于颗粒的粗糙程度。未循环时膨胀土结构层理性较强,颗粒间有较强的胶结作用,颗粒间孔隙较小、贴合紧密,不易发生相对错动。循环后团聚体结构重组为松散的絮凝结构,各向异性发生改变,土颗粒破碎卷曲,胶结作用减弱,粒间孔隙增大,更易滋生裂隙。③胶结作用减弱是试样黏聚力下降的主要原因,在轴向荷载作用下,破坏模式由张拉破坏逐渐转变为剪切破坏。

3 邓肯-张 E-B 模型的应用

邓肯通过大量三轴试验数据分析得出,正常固

结黏土、松砂及中密砂的应力-应变曲线均呈硬化型,可通过双曲线进行拟合,以此提出了邓肯-张非线性模型。在邓肯-张 E-B 模型中,包含 c 、 φ 、 K 、 n 、 R_f 、 K_b 、 m 7 个可由常规三轴试验得到的参数。

3.1 干湿-冻融循环次数对模型参数的影响

a. 对破坏比 R_f 的影响。图 8 为参数 R_f 随循环次数的变化趋势,其中破坏比 R_f 代表土体在剪切过程中的破坏主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 与极限主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 的比值,由图 8 可知:不同围压下 R_f 的变化趋势基本相近,均在循环 1~5 次的过程中波动较大,整体曲线呈下降趋势,循环 7~9 次后 R_f 基本趋向稳定, R_f 平均值的波动区间则在 0.60~0.89 之间。不同围压下 R_f 曲线变化趋势相似,由于破坏主应力差与固结压力相关,所以围压变化时 R_f 会有一定差别,随着围压的增大 R_f 波动幅度逐渐减小。

b. 对模量指数 n 的影响。图 9 为参数 n 随循环次数的变化趋势,参数 n 代表 $\lg(E_i/P_a)$ 与 $\lg(\sigma_3/P_a)$ 直线的斜率。由图 9 可知:随循环次数的增加,参数 n 均呈波动增大趋势,在循环 1~3 次时, n 值上升了 0.19,在循环 5 次后呈波动变化,干湿-冻融循环作用对参数 n 的影响主要发生在前 3 次循环过程中。

c. 对初始模量系数 K 的影响。图 10 为参数 K 随循环次数的变化趋势,参数 K 代表 $\lg(E_i/P_a)$ 与 $\lg(\sigma_3/P_a)$ 直线的截距。由图 10 可知:随循环次数的增加,参数 K 呈波动减小的趋势,0~9 次循环过程中,参数 K 与初始值相比降低了 1.55,其中第 1 次循环降低了 1.34,第 3 次循环后 K 值变化较小,仅降低了 0.06,参数 K 与循环次数呈指数关系。说明循环初期对参数 K 的影响较大,长期受干湿-冻融循环作用对参数 K 的影响有限。

d. 对卸载-再加载模量指数 m 的影响。图 11 为参数 m 随循环次数的变化趋势,参数 m 代表

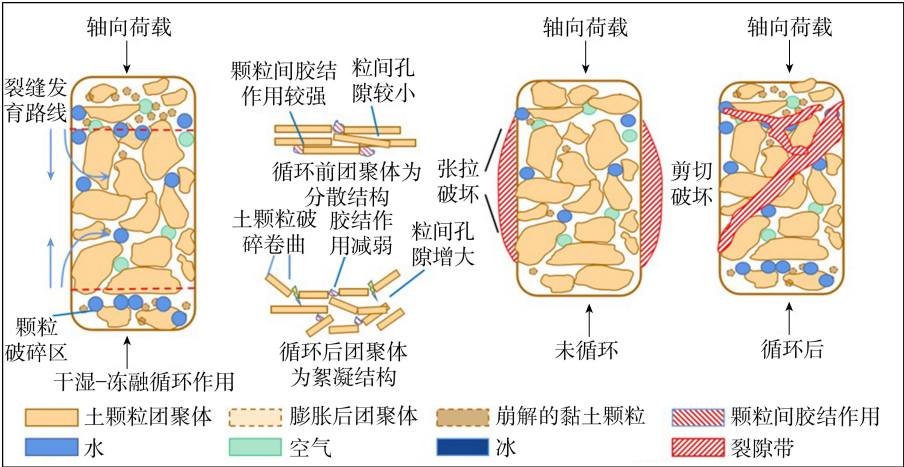


图 7 干湿-冻融循环三轴压缩试验机理示意图

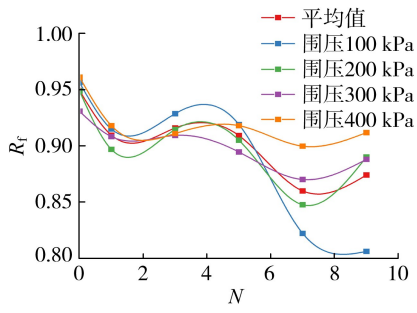


图 8 参数 R_f 随循环次数的变化趋势

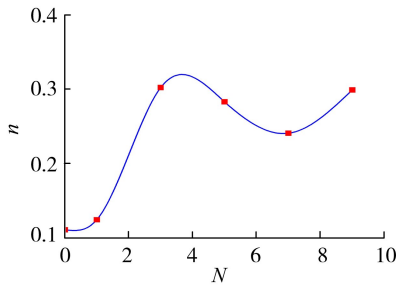


图 9 参数 n 随循环次数的变化趋势

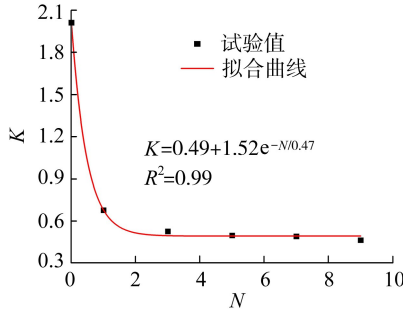


图 10 参数 K 随循环次数的变化趋势

$\lg(B_i/P_a)$ 与 $\lg(\sigma_3/P_a)$ 直线的截距,由图 11 可知:随循环次数的增加,参数 m 取值在干湿-冻融循环过程中上下变动幅度较大,呈明显波动趋势,其变化可能是试验误差所致,可以认为循环作用对参数 m 的取值影响不大。

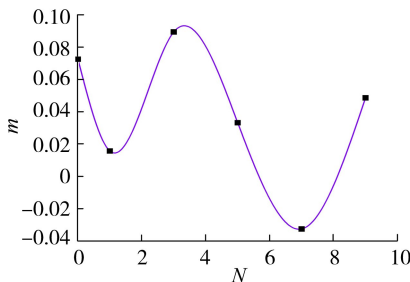


图 11 参数 m 随循环次数的变化趋势

e. 对体变参数 K_b 的影响。图 12 为参数 K_b 随循环次数的变化趋势,参数 K_b 代表 $\lg(B_i/P_a)$ 与 $\lg(\sigma_3/P_a)$ 直线的斜率,由图 12 可知:随干湿-冻融循环次数的增加,参数 K_b 整体呈减小的趋势,第 1 次循环后变化最明显,3 次循环后与初始值相比下降了 0.17,5 次循环后,参数 K_b 逐渐趋向于稳定,

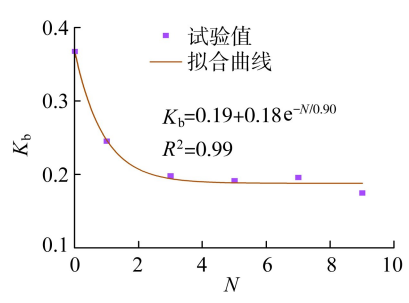


图 12 参数 K_b 随循环次数的变化趋势

9 次循环后下降了 0.19,参数 K_b 在循环初期无波动现象,整体变化曲线与黏聚力相似,与循环次数呈指数关系,拟合关系如图 12 所示。

3.2 模型模拟结果

图 13 和图 14 为邓肯-张 $E-B$ 模型的拟合结果。由图 13 和图 14 试验值与模型值的对比可知:①邓肯-张 $E-B$ 模型可以较好地反映干湿-冻融循环作用下膨胀土的三轴试验曲线;②循环作用下的三轴试验应力-应变曲线符合双曲线特征,整体拟合情况良好;③相较应力-应变曲线而言,体变曲线的拟合度较差,这可能是由于试样在干湿-冻融循环过程中内部裂隙不规则滋生发育造成的,整体而言体变曲线影响因素众多,规律性较差。

4 结 论

a. 干湿-冻融循环作用下膨胀土的应力-应变曲线均呈硬化型曲线,体变曲线表现为剪缩特征,应力-应变、体变、黏聚力和内摩擦角均在循环初期迅速降低,而后趋于稳定。干湿-冻融循环作用对膨胀土的结构有较大的损伤,结构性损伤作用主要发生在第 1 次循环过程中。

b. 干湿-冻融循环作用产生的裂隙发育由循环作用更为剧烈的试样两端逐渐向中间发展,发育到一定深度会产生汇聚偏转,最终成为贯穿试样的纵向贯穿破坏面。试样的整体破坏面由循环初期“Y”形或“X”形破坏面的张拉破坏,发育为循环后期呈“爪”形破坏面的剪切破坏。

c. 膨胀土未经干湿-冻融循环作用时膨胀土结构层理性较强,颗粒间有较强的胶结作用,颗粒间孔隙较小、贴合紧密,不易发生相对错动。经循环作用后团聚体结构重组为松散的絮凝结构,土颗粒破碎卷曲,胶结作用减弱,颗粒间孔隙增大,黏土颗粒逐渐剥落并脱离,造成土体结构损伤。循环作用导致胶结作用减弱是试样黏聚力下降的主要原因,在轴向荷载作用下,破坏模式由张拉破坏逐渐转变为剪切破坏。

d. 邓肯-张 $E-B$ 模型参数在循环初期呈波动趋势,在循环后期各参数与干湿-冻融循环次数有较好

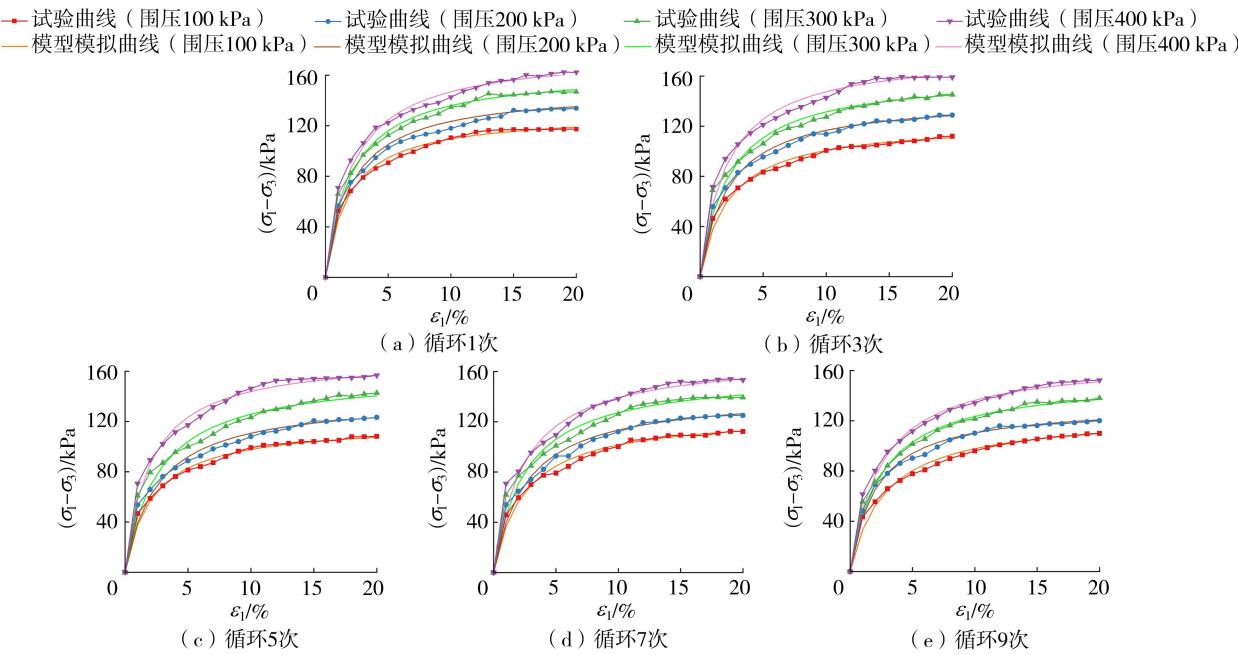


图 13 邓肯-张 *E-B* 模型应力-应变拟合曲线与本文试验结果对比

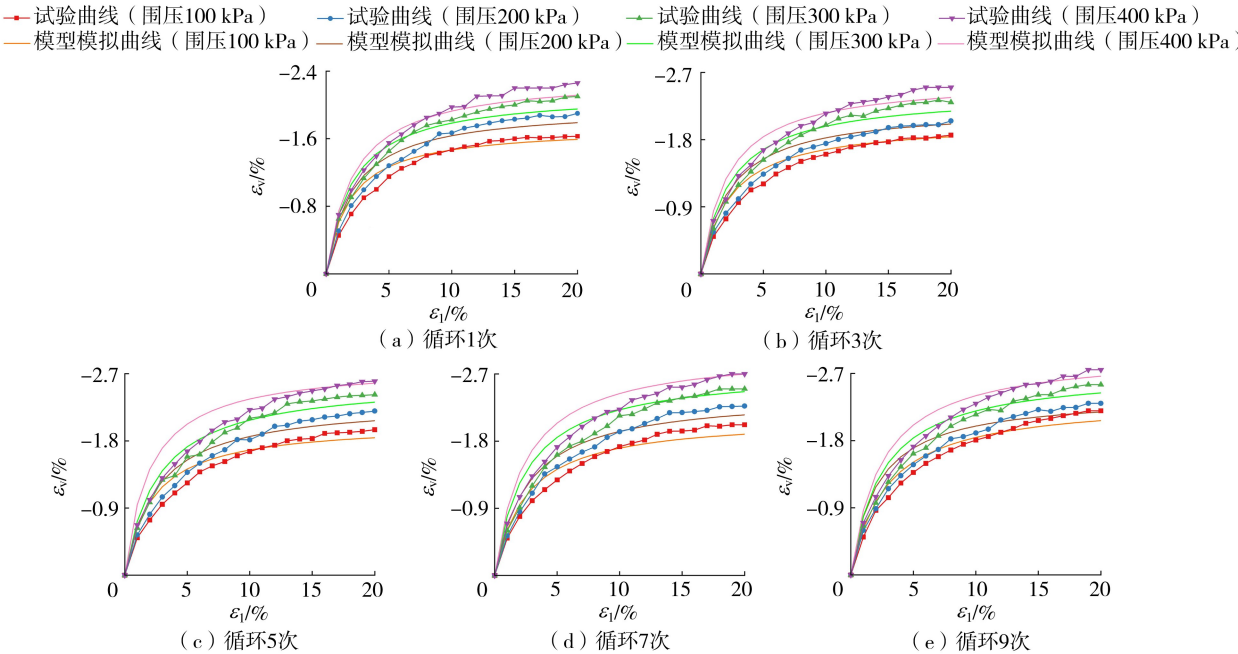


图 14 邓肯-张 *E-B* 模型体变拟合曲线与本文试验结果对比

的相关性,通过拟合建立各参数与循环次数的函数关系,邓肯-张 *E-B* 模型可较好地反映干湿-冻融循环作用下膨胀土的三轴试验曲线。

参考文献:

[1] RAYHANI M H T, YANFUL E K, FAKHER A. Physical modeling of desiccation cracking in plastic soils [J]. Engineering Geology, 2008, 97(1/2): 25-31.

[2] 方瑾瑾, 杨小林, 冯以鑫, 等. 干湿循环后膨胀土力学特性的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 1043-1055. (FANG Jinjin, YANG Xiaolin, FENG Yixin, et al. True triaxial experimental study on

mechanical properties of expansive soils after drying and wetting cycles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(5): 1043-1055. (in Chinese))

[3] 肖杰, 杨和平, 林京松, 等. 模拟干湿循环及含低围压条件的膨胀土三轴试验[J]. 中国公路学报, 2019, 32(1): 21-28. (XIAO jie, YANG Heping, LING Jingsong, et al. Simulating wet-dry cycles and low confining pressures triaxial test on expansive soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(1): 21-28. (in Chinese))

[4] 徐彬, 殷宗泽, 刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 44-50. (XU Bin, YIN Zongze, LIU Shuli. Experimental study of factors

- influencing expansive soil strength [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 44-50. (in Chinese))
- [5] 杨俊, 童磊, 张国栋, 等. 初始含水率和改良材料掺量对膨胀土抗剪强度的影响[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(3): 39-43. (YANG Jun, TONG Lei, ZHANG Guodong, et al. Effect of initial moisture content and improved material amount on shear strength of expansive soil[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(3): 39-43. (in Chinese))
- [6] 张俊然, 孙德安, 姜彤. 吸力历史对非饱和弱膨胀土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3094-3100. (ZHANG Junran, SUN Dean, JIANG Tong. Effect of suction history on mechanical behavior of unsaturated weakly-expansive soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3094-3100. (in Chinese))
- [7] HOTINEANU A, BOUASKER M, ALDAOOD A, et al. Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays [J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 119: 151-157.
- [8] LU Yang, LIU Sihong, ALONSO E L, 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.
- [9] 上官云龙, 李东鑫, 王罡. 冻融循环对膨胀土力学特性的影响及本构描述[J]. 吉林建筑大学学报, 2023, 40(6): 33-38. (SHANGGUAN Yunlong, LI Dongxin, WANG Gang. Effect of freeze-thaw cycles on mechanical properties of expansive soil and its constitutive description [J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2023, 40(6): 33-38. (in Chinese))
- [10] 朱洵, 蔡正银, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合循环及干密度对膨胀土力学特性影响的试验研究[J]. 水利学报, 2020, 51(3): 286-294. (ZHU Xun, CAI Zhengyin, HUANG Yinghao, et al. Research on mechanical properties of expansive soils under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw and density [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(3): 286-294. (in Chinese))
- [11] 王欢, 曹义康, 任俊玺. 干湿循环对粉砂土改良膨胀土裂隙及强度影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(5): 213-221. (WANG Huan, CAO Yikang, REN Junxi. Influence of dry-wet cycle on crack and strength of silty sand improved expansive soil[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(5): 213-221. (in Chinese))
- [12] ZHANG Qi, XIA Yingjie, ZHAO Jinch, et al. Experimental investigation of crack evolution in expansive soil-rubber mixture (ESR) under freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 217: 104016.
- [13] 蔡正银, 朱洵, 黄英豪, 等. 冻融过程对膨胀土裂隙演化特征的影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4555-4563. (CAI Zhengyin, ZHU Xun, HUANG Yinghao, et al. Influences of freeze-thaw process on evolution characteristics of fissures in expensive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12): 4555-4563. (in Chinese))
- [14] 曹雪山, 章纬, 李国维, 等. 膨胀土裂隙发育特征定量方法的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(12): 2556-2564. (CAO Xueshan, ZHANG Wei, LI Guowei, et al. Experimental study on quantitative method for crack development characteristics of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(12): 2556-2564. (in Chinese))
- [15] 张浩, 张凌凯. 干湿-冻融循环条件下膨胀土剪切特性的劣化机制研究[J]. 工程力学, 2024, 41(4): 94-105. (ZHANG Hao, ZHANG Lingkai. Study on degradation mechanism of shear properties of expansive soil under drying-wetting-freezing-thawing cycles [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(4): 94-105. (in Chinese))
- [16] 黎伟, 刘观仕, 姚婷. 膨胀土裂隙特征研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(4): 78-82. (LI Wei, LIU Guanshi, YAO Ting. Research progress in crack features of expansive soils[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(4): 78-82. (in Chinese))
- [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 Wanjun, GAO Haijun, 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. (in Chinese))
- [18] 常锦, 杨和平, 肖杰, 等. 酸雨湿干循环作用下百色膨胀土裂隙发育规律及其微观机制[J]. 中国公路学报, 2021, 34(1): 47-56. (CHANG Jin, YANG Heping, XIAO Jie, et al. Fissure development law and micro-mechanism of Baise expansive soil under wet-dry cycles of acid rain [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(1): 47-56. (in Chinese))
- [19] 张凌凯, 张浩, 崔子晏. 不同循环模式条件下膨胀土的力学特性变化规律及其物理机制研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(10): 135-148. (ZHANG Lingkai, ZHANG Hao, CUI Ziyang. Study on mechanical properties and physical mechanism of expansive soil under different cyclic modes[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(10): 135-148. (in Chinese))
- [20] 张浩, 张凌凯, 许佳, 等. 北疆供水一期工程膨胀土不同循环模式条件下的胀缩特性[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(5): 107-114. (ZHANG Hao, ZHANG Lingkai, XU Jia, et al. Swelling-shrinkage characteristics of expansive soil under different circulation modes in first phase of Northern Xinjiang Water Supply Project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(5): 107-114. (in Chinese))

(下转第 84 页)

- [37] 李明超,任秋兵,沈扬. 贝叶斯框架下的大坝变形交互式时变预测模型及其验证[J]. 水利学报,2018,49(11):1328-1338. (LI Mingchao, REN Qiubing, SHEN Yang. Prediction model for interactive time series evolution and its verification of dam deformation under Bayesian framework[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,49(11):1328-1338. (in Chinese))
- [38] 黄宇,顾智勇,李永玲,等. 基于时间模式注意力机制的CNN-BiGRU短期负荷预测[J]. 华北电力大学学报,2023,50(6):11-20. (HUANG Yu, GU Zhiyong, LI Yongling, et al. Short-term power load forecasting based on temporal pattern attention mechanism of CNN-BiGRU[J]. Journal of North China Electric Power University,2023,50(6):11-20. (in Chinese))
- [39] 任爽,杨凯,商继财,等. 基于CNN-BiGRU-Attention的短期电力负荷预测[J]. 电气工程学报,2024,19(1):344-350. (REN Shuang, YANG Kai, SHANG Jicai, et al. Short-term power load forecasting based on CNN-BiGRU-attention[J]. Journal of Electrical Engineering,2024,19(1):344-350. (in Chinese))
- [40] 杨超,冉启武,罗德虎,等. 基于注意力机制的CNN-BiGRU短期电价预测[J]. 电力系统及其自动化学报,2024,36(3):22-29. (YANG Chao, RAN Qiwu, LUO Dehu, et al. CNN-BiGRU short-term electricity price prediction based on attention mechanism[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2024,36(3):22-29. (in Chinese))
- [41] SONG Jintao, YANG Zhaodi, LI Xinru. Missing data imputation model for dam health monitoring based on mode decomposition and deep learning[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring,2024,14(5):1111-1124.
- [42] 张建中,顾冲时,袁冬阳,等. 基于优化VMD与GRU的混凝土坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展,2023,43(5):38-44. (ZHANG Jianzhong, GU Chongshi, YUAN Dongyang, et al. Deformation prediction model of concrete dams based on optimized VMD and GRU[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(5):38-44. (in Chinese))
- [43] 钱杰杰,余军合,战洪飞,等. 基于DL-BiGRU多特征融合的注塑件尺寸预测方法[J]. 浙江大学学报(工学版),2024,58(3):646-654. (QIAN Qingjie, YU Junhe, ZHAN Hongfei, et al. Dimension prediction method of injection molded parts based on multi-feature fusion of DL-BiGRU[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2024,58(3):646-654. (in Chinese))
- [44] XUE Jiankai, SHEN Bo. Dung beetle optimizer: a new meta-heuristic algorithm for global optimization[J]. The Journal of Supercomputing,2023,79(7):7305-7336.
- [45] 潘劲成,李少波,周鹏,等. 改进正弦算法引导的蜣螂优化算法[J]. 计算机工程与应用,2023,59(22):92-110. (PAN Jincheng, LI Shaobo, ZHUO Peng, et al. Dung beetle optimization algorithm guided by improved sine algorithm[J]. Computer Engineering and Applications,2023,59(22):92-110. (in Chinese))
- [46] 刘相杰,刘小生,张龙威. 基于二次模态分解和深度学习的大坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):101-106. (LIU Xiangjie, LIU Xiaosheng, ZHANG Longwei. Dam deformation prediction model based on quadratic modal decomposition and deep learning[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(3):101-106. (in Chinese))
- [47] 高睿颖,顾冲时,王岩博,等. 基于DBO-DA-GRU的大坝变形预测模型[J]. 水电能源科学,2024,42(9):134-138. (GAO Ruiying, GU Chongshi, WANG Yanbo, et al. Dam deformation prediction model based on DBO-DA-GRU[J]. Water Resources and Power,2024,42(9):134-138. (in Chinese))
- (收稿日期:2024-09-13 编辑:俞云利)

(上接第53页)

- [21] 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 Ziyang. 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))
- [22] 梁谏杰,张祖莲,黄英,等. 干湿循环作用下加砂对红土抗剪强度及微结构特性的影响[J]. 山地学报,2019,37(6):848-857. (LIANG Jianjie, ZHANG Zulian, HUANG Ying, et al. Effect of sand adding on shear strength and microstructure characteristics of laterite under dry-wet cycling condition[J]. Mountain Research,2019,37(6):848-857. (in Chinese))
- [23] 曾铃,邱健,匡波,等. 干湿循环作用下预崩解炭质泥岩强度特性及其劣化机制[J]. 中南大学学报(自然科学版),2023,54(9):3635-3646. (ZENG Ling, QIU Jian, KUANG Bo, et al. Strength characteristics and deterioration mechanism of pre-disintegrated carbonaceous mudstone in wetting and drying cycles[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2023,54(9):3635-3646. (in Chinese))
- [24] 苏安双,王宇,石北啸,等. 冻融循环条件下粗粒料变形特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):61-66. (SU Anshuang, WANG Yu, SHI Beixiao, et al. Experimental study on deformation characteristics of coarse aggregates under freeze-thaw cycling conditions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):61-66. (in Chinese))
- (收稿日期:2024-06-27 编辑:熊水斌)