

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.06.010

冻融循环下黄河堤岸砂质壤土宏细观破坏过程

张江浩^{1,2}, 冀鸿兰^{1,2}, 杨震¹, 李志军³, 刘晓民^{1,2}

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 黄河流域内蒙古段水资源与水环境综合治理自治区协同创新中心, 内蒙古 呼和浩特 010018;

3. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为揭示黄河堤岸砂质壤土在冻融循环下的宏细观破坏规律, 通过三轴剪切试验和离散元数值模拟分析了堤岸砂质壤土在不同冻融循环次数下的抗剪强度变化、形变破坏特征、力链发展趋势和组构张量演化规律。结果表明: 冻融循环会显著降低砂质壤土的抗剪强度, 诱发砂质壤土产生冻胀融沉, 抗剪强度平均损失率在15次冻融循环后达到了24.06%; 冻融循环后砂质壤土鼓胀破坏区最大直径变小, 接触力最大值平均降幅为26.89%; 冻融循环后法向接触数目组构张量略微增大, 法向接触力组构张量明显降低, 各向异性程度减弱; 冻融循环前后砂质壤土强接触和全接触等效各向异性均低于冻融前, 强接触等效各向异性系数与偏应力变化趋势基本一致。基于离散元模拟结果建立了一种以冻融循环次数为控制参数的堤岸砂质壤土抗剪强度预测模型, 具有较好的预测效果。

关键词: 砂质壤土; 黄河堤岸; 冻融循环; 离散元数值模拟; 组构张量; 各向异性

中图分类号: TU432; TV84

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)06-0069-12

Macroscopic and microscopic damage processes of sandy loam soils in Yellow River embankment under freeze-thaw cycles

ZHANG Jianghao^{1,2}, JI Honglan^{1,2}, YANG Zhen¹, LI Zhijun³, LIU Xiaomin^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. Autonomous Region Collaborative Innovation Center for Integrated Water Resources and Water Environment in Inner Mongolia Section of Yellow River Basin, Hohhot 010018, China;

3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to reveal the macroscopic and microscopic damage law of sandy loam on the embankment of the Yellow River under freeze-thaw cycles, the changes in the shear strength, the deformation damage characteristics, the development trend of force chain, and the evolution of fabric tensor of sandy loam on the embankment were analyzed by the triaxial shear test and the numerical simulation of the discrete element under different numbers of freeze-thaw cycles. The results showed that freeze-thaw cycles significantly reduced the shear strength of sandy loam and induced the sandy loam to freeze and thaw, with the average loss of shear strength by 24.06% after 15 freeze-thaw cycles. The maximum diameter of the bulging damage zone of sandy loam became smaller after freeze-thaw cycles, and the average decrease of maximum contact force was 26.89%. The normal contact number of fabric tensor increased slightly after the freeze-thaw cycle, the normal contact force group tensor decreased significantly, and the degree of anisotropy was weakened. The strong-contact and full-contact equivalent anisotropies of sandy loam before and after the freeze-thaw cycle were lower than that before the freeze-thaw cycle, and the strong-contact equivalent anisotropy coefficients showed the same as the trend of bias stress change. Based on the discrete element simulation results, a prediction model for the shear strength of embankment sandy loam with the number of freeze-thaw cycles as the control parameter was established, with a better prediction effect.

Key words: sandy loam; Yellow River embankment; freeze-thaw cycle; discrete element simulation; fabric tensor; anisotropy

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U23A2012); 国家自然科学基金项目(52379014); 内蒙古自然科学基金重点项目(2022ZD08); 内蒙古自然科学基金青年基金项目(2023QN05026); 内蒙古博士研究生科研创新项目(B20231084Z)

作者简介: 张江浩(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事寒旱区河道安全与防护研究。E-mail: nmndzjh@emails.imau.edu.cn

通信作者: 冀鸿兰(1970—), 女, 教授, 博士, 主要从事寒区河冰过程与河流泥沙运动力学研究。E-mail: honglanji@imau.edu.cn

引用本文: 张江浩, 冀鸿兰, 杨震, 等. 冻融循环下黄河堤岸砂质壤土宏细观破坏过程[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 69-80.

ZHANG Jianghao, JI Honglan, YANG Zhen, et al. Macroscopic and microscopic damage processes of sandy loam soils in Yellow River embankment under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(6): 69-80.

冻土是一种温度低于 0℃ 且含有冰的特殊岩土,根据冻结时间的长短,可分为短时冻土、季节性冻土和多年冻土,我国是世界第三大冻土分布国,季节性冻土与多年冻土约占全国陆地面积的 48% 和 22%^[1]。黄河内蒙古段是典型的季节性冻土区,堤岸土体经过反复的冻融侵蚀破坏,土体颗粒结构会破坏重组,土体强度降低,导致堤岸发生失稳破坏^[2]。探究冻融循环对黄河内蒙古段堤岸土体强度的损伤程度及机理,对于解决季节性冻土区的工程冻害问题至关重要。

冻融侵蚀对土体特性的影响主要是改变了土体的细观结构,导致土体黏聚力和内摩擦角变化,进而弱化土体的破坏强度和抗剪强度^[3-4]。由于土体粒径组成、密度、含水率以及冻结温度等条件的不同,土体强度参数受冻融循环影响产生的变化也有明显差异。冻融循环下粉质黏土的黏聚力和内摩擦角会随着含水率的升高而减小,且黏聚力减小幅度是内摩擦角的 5 ~ 10 倍^[5];而在相同含水率下黏质粗粒土的黏聚力随冻融循环次数的增加而减小,内摩擦角变化无规律可循^[6];随着含水率的升高,冰渍土黏聚力和内摩擦角的劣化程度增大,土体黏聚力和内摩擦角变化基本保持稳定所需的冻融循环次数增多^[7];改良土的抗剪强度受冻融循环的影响则更为复杂多变^[8-10]。

冻融循环下土体宏观强度特性的变化都是其细观结构发生改变所呈现的结果。目前,土体细观特性的研究大多是利用核磁共振和扫描电镜等手段对其在冻融循环下的颗粒团聚现象和孔隙变化进行分析^[11-12],只能得到冻融前后土体微观参数的变化规律,难以观测试样在受力变形直至破坏过程中局部应变的发展情况。离散单元法可从细观角度分析试样在试验过程中的破坏特征,因其可靠性与灵活性被国内外学者应用到冻土方面的研究。例如:周凤玺等^[13]采用接触黏结模型模拟土体冻结时的冰胶结作用,在此基础上尹楠等^[14]探究了胶结作用下土体宏观特性变化响应关系,袁伟等^[15]则分析了冻结砂土离散元细观参数的敏感性;Chang 等^[16]使用平行黏结接触模型对不同负温下的冻结砂土进行直剪试验模拟,分析了剪切过程中颗粒的运动、力链的演化和剪切面的发展。

现阶段针对季节性冻土区土体宏观细观特性的研究大多采用室内试验方法,并未从细观层面揭示土体的力学行为特征,且仍较缺乏针对季节性冻土区黄河流域堤岸砂质壤土力学特性的适用模型研究。本文以黄河什四份子弯道处堤岸非饱和砂质壤土为研究对象,通过三轴剪切试验分析冻融循环对堤岸砂质壤土宏观物理力学特性的影响,并基于抗转动线性接触模型结合室内试验结果进行三轴模拟试验,研究冻融循环前后堤岸砂质壤土细观破坏过程,以期为黄河流域内蒙古段土质堤岸工程的建设与维护提供理论基础。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验土样取自黄河内蒙古段什四份子弯道处堤岸(40°17'9.6"N,111°2'56.4"E),该河段为典型的急变弯道,极易卡冰雍水^[17],在挟冰水流冲击、冻融循环及重力侵蚀的共同作用下,堤岸滑坡和倒塌现象频发^[18-19]。什四份子堤岸所处区域年均降水量为 362 mm,蒸发量为 1783.5 mm,最高气温 39℃,最低气温 -29℃,日均气温在 11 月下旬转负,次年 3 月中旬转正,在此期间日平均气温主要在 -20 ~ 10℃ 之间波动^[20],堤岸土体冻融期长达近 120 d,是典型的季节性冻土区。

根据野外勘测以及冻土气象观测资料可知,什四份子堤岸冻土深约 1.3 m,依据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》采集 0.05 ~ 1.6 m 深度的土体进行试验研究。图 1 为该处堤岸土体粒径级配曲线,其中黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002 ~ 0.02 mm)和砂粒(0.02 ~ 2 mm)质量占比分别为 2.93%、13.25% 和 83.82%,根据国际土壤质地分类标准该处堤岸土体属于砂质壤土,其基本物理指标如下:天然含水率为 10.47% ~ 32.22%,最优含水率为 18.48%,最大干密度为 1.58 g/cm³,比重为 2.71,液限为 30.08%,塑限为 19.12%,液性指数为 0.20,塑性指数为 10.96。

将取回的土样烘干碾碎过 2 mm 筛,按照 18.48% 的最优含水率加水搅拌均匀装入密封袋内进行 2 d 的闷样处理。试验所需试样用保鲜膜包裹密实,将其放入冻融试验箱内,使试样在 -15℃ 下

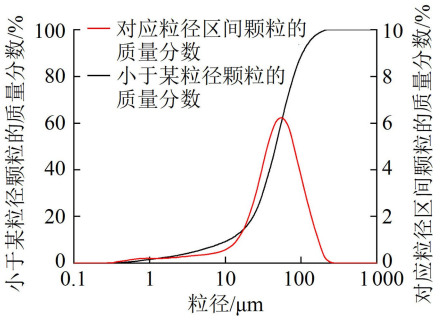


图1 堤岸砂质壤土颗粒级配曲线
Fig.1 Particle grading curves of embankment sandy loam soils

恒温冻结 12 h 后逐渐升温至 15℃ 恒温融化 12 h, 共计 24 h, 整个过程为一次完整的冻融循环, 同时设置 0 次冻融循环为对照组(即未经历冻融循环处理的土样)。

1.2 试验方法

1.2.1 三轴剪切试验

将闷样处理过的重塑土样分 5 层击实装入直径为 39.1 mm、高度为 80 mm 的三瓣模内, 脱模后用保鲜膜密封进行 0、1、3、5、7、10、15 次冻融循环试验, 采用 TSZ10-1.0 型应变控制式三轴仪进行三轴剪切试验, 设置围压为 50、100、150 kPa, 剪切速率为 0.8 mm/min。当轴向应变达到 15% 时停止试验, 取最大偏应力作为土体的破坏强度, 分别以 $q=(\sigma_1+\sigma_3)/2$ 和 $p=(\sigma_1-\sigma_3)/2$ 为横、纵坐标绘制土体破坏强度的主应力线, 主应力线与纵轴截距记为 d , 倾角为 α , 根据式(1)与式(2)得到土体的内摩擦角与黏聚力^[21], 再根据式(3)和式(4)计算出冻融循环后的抗剪强度及其损失率。

$$\varphi = \sin^{-1}(\tan \alpha)$$
(1)

$$c = d/\cos \varphi$$
(2)

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$
(3)

$$K_{\tau} = 1 - \tau_N/\tau_0$$
(4)

式中: φ 为内摩擦角, (°); c 为黏聚力, kPa; τ 为土体的抗剪强度, kPa; K_{τ} 为冻融循环后的抗剪强度损失率, %; τ_N 、 τ_0 分别为 N 次和 0 次冻融循环后的土体抗剪强度。

1.2.2 基于离散元法的三轴剪切试验数值模拟

离散元法将试样视为大量颗粒的集合体, 黄河堤岸砂质壤土粒径主要分布在 0.002 ~ 0.2 mm 之间, 如果按照试验真实粒径进行模拟将会生成数十万个颗粒, 模拟试验计算效率极低, 而当数值模拟试样的最小粒径与试验模型长度之比小于 0.01 时, 颗粒尺寸对土体宏观特性的影响相比颗粒接触强度与摩擦系数要小很多^[22-23]。因此, 为提高计算效率, 基于三轴试验的试样尺寸, 确定模拟试验试样尺寸为高 80 mm、直径 39.1 mm 的圆柱体, 按实际土体颗粒级配采用半径放大法生成试样颗粒, 最小粒径为 0.51 mm, 最大粒径为 2.77 mm, 颗粒总数接近 15 000 个。同时, 为颗粒赋予合适的接触本构关系是能否反映真实土体力学特性的关键, 杨震等^[24]研究发现在冻融循环下黄河堤岸土体颗粒的不规则程度会降低, 通过采用抗转动线性接触模型来考虑该影响, 可有效再现冻融循环前后土体剪切过程中的力学特征^[25-27]。

2 试验结果与分析

2.1 堤岸砂质壤土宏观力学特性变化

2.1.1 应力-应变关系

图 2 为不同冻融循环次数下堤岸砂质壤土在 50、100、150 kPa 围压下的应力-应变曲线, 曲线总体上属于应变稳定型。堤岸砂质壤土破坏强度会随冻融循环次数的增加而逐渐降低, 应力-应变曲线降幅在试样经历 1 次冻融循环后最为明显, 7 ~ 15 次冻融循环后的试样应力-应变曲线差异很小, 降幅变化趋于稳定。说明在经历 1 次冻融循环后, 试样的初始结构已经被破坏, 随着冻融循环次数的增加, 冻融诱发的内部损伤程度

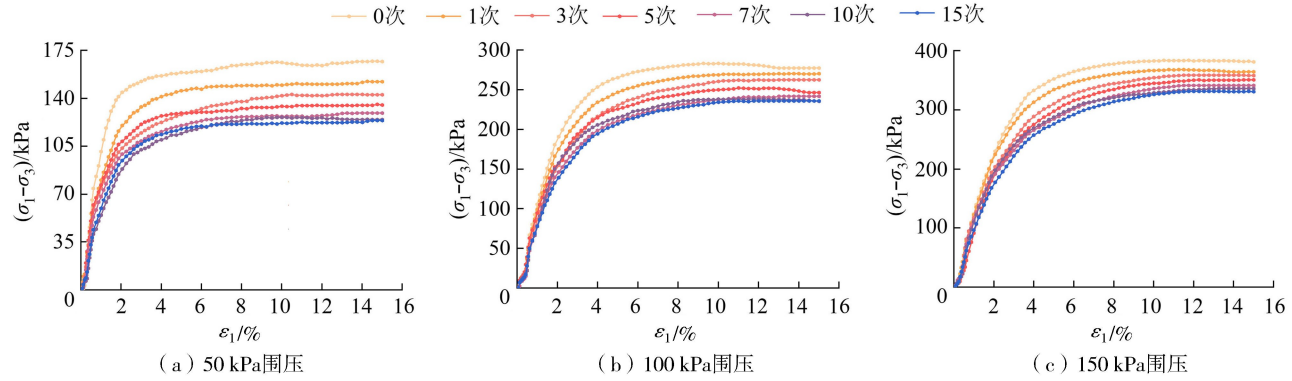


图 2 不同冻融循环次数下试样的应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of specimens with different numbers of freeze-thaw cycles

增大,从而使堤岸砂质壤土的承载力不断下降。

2.1.2 强度变化

图3为堤岸砂质壤土在不同冻融循环次数下内摩擦角、黏聚力、抗剪强度及其损失率变化情况。从图3可以看出随着冻融循环次数的增加,堤岸砂质壤土内摩擦角、黏聚力和抗剪强度均呈减小趋势,抗剪强度损失率不断增大。未经历冻融循环的试样黏聚力为17.24 kPa,内摩擦角为31.33°;1次冻融循环对试样的黏聚力影响最大,3~5次冻融循环后试样的黏聚力降幅均为22%左右,7~15次冻融循环后试样的黏聚力降幅不明显,15次冻融循环后的黏聚力达到最小,为6.40 kPa;不同冻融循环次数之间,试样内摩擦角变化不超过1°,15次冻融循环后内摩擦角降幅仅为2.15%;不同围压下试样抗剪强度变化趋势基本相同,抗剪强度损失主要发生在前7次冻融循环,15次冻融循环后抗剪强度平均损失率为24.06%,且围压越高试样抗剪强度损失率随冻融循环次数的增加越不显著。

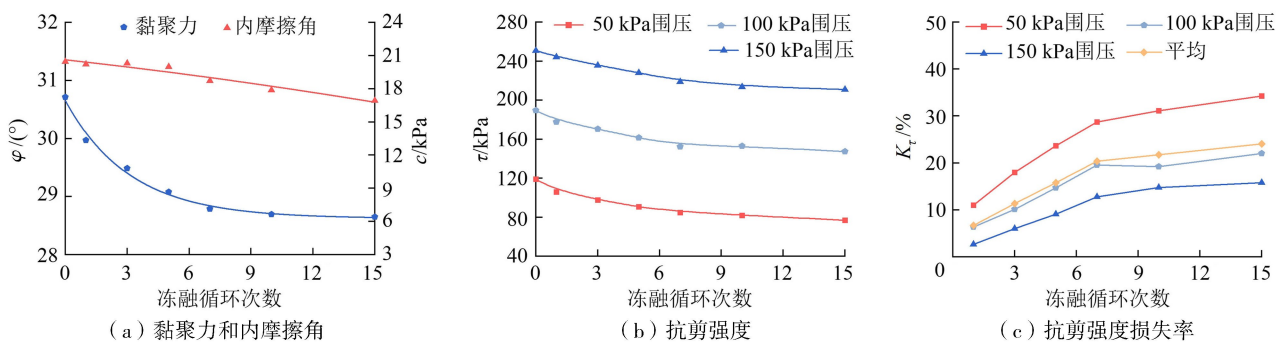


图3 不同冻融循环次数下试样的强度变化

Fig.3 Changes in strength of embankment sandy loam under different number of freeze-thaw cycles

2.2 应变破坏过程离散元分析

根据上述研究,经历7~15次冻融循环后的试样应力-应变曲线较为接近,且偏应力峰值变化幅度小,故选取0次与10次冻融循环后的三轴试验结果进行计算标定,三维模拟试验参数如表1所示。由图4可知,不同围压下的模拟试验结果与室内试验结果基本一致,表明模拟试验能够反映实际堤岸砂质壤土的力学特性。

表1 三维数值模拟试验参数

Table 1 Parameters of three-dimensional numerical simulation test

冻融循环次数	有效模量/ MPa	刚度比	摩擦系数	抗转动系数
0	145	2.00	0.33	1.41
10	130	2.00	0.28	0.72

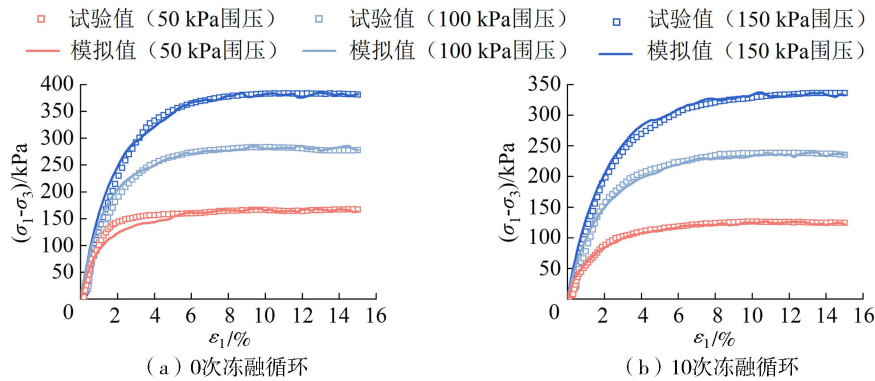


图4 室内试验与模拟试验的试样应力-应变曲线对比

Fig.4 Comparison of stress-strain curves of specimens from in-house and simulated tests

2.2.1 试样形变破坏分析

由试样实际破坏形态(图5)可知,三轴剪切试验后试样中部会出现鼓胀破坏。如图6和图7所示,试样颗粒的位移基本呈上下对称递减状态,最大位移颗粒均位于上、下两端处,颗粒由两端向中间运动,越往试样中部颗粒位移越小,颗粒运动向横向发展,且小粒径颗粒更易在颗粒间隙内运动。表明在施加竖向荷载的过程中,试样高度逐渐降低,中部逐渐膨胀。试样中部径向变形最大,外观上呈鼓胀破坏形态,颗粒粒径越大对

试样形变的影响越明显。

对比图 6 和图 7 可知,当试样的轴向应变 ε_1 在 0 ~ 5% 时,颗粒位移变化以竖向位移为主;随着轴向应变不断增大,在轴向应变为 10% 时,颗粒位移开始出现了不均匀分布,此时试样中部开始出现较明显的鼓胀,冻融循环前 50、100、150 kPa 围压下试样鼓胀破坏区最大直径 $D_{\max}$ 分别为 40.85、40.79、40.61 mm,冻融循环后为 40.78、40.65、40.53 mm;当轴向应变达到 15% 时,颗粒位移不均匀分布现象增强,各试样右侧鼓胀较为突出,冻融循环前 50、100、150 kPa 围压下试样鼓胀破坏区 $D_{\max}$ 分别增大至 42.19、42.16、41.98 mm,冻融循环后增大至 42.82、41.97、41.82 mm,试样鼓胀破坏区更为明显,预示着剪切破坏的发生。

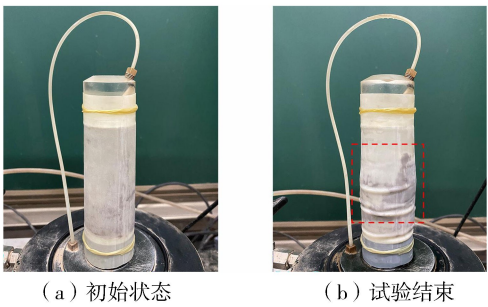


图 5 三轴剪切试验前后试样形态变化
Fig. 5 Morphological changes of specimens before and after triaxial shear test

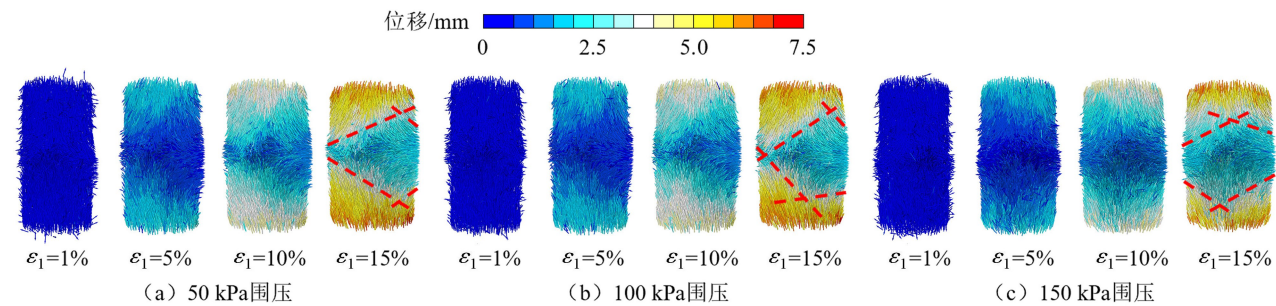


图 6 冻融循环前试样颗粒位移分布
Fig. 6 Particle displacement distribution of specimens before freeze-thaw cycles

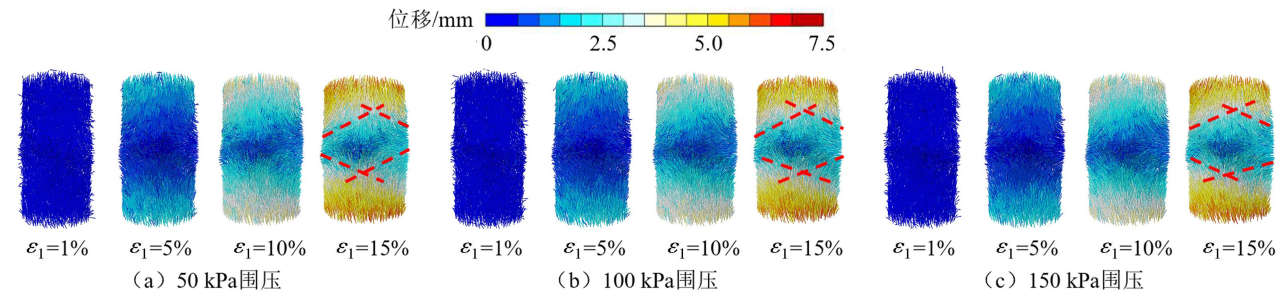


图 7 冻融循环后试样颗粒位移分布
Fig. 7 Particle displacement distribution of specimens after freeze-thaw cycles

由图 6 和图 7 可知,冻融循环前后 50 kPa 围压下试样颗粒最大位移分别为 7.45、7.04 mm,150 kPa 围压下分别为 7.16、7.01 mm,未经冻融循环试样颗粒竖向最大位移略大于冻融循环后的试样。围压大小影响试样的鼓胀破坏形态,围压越小横向变形越大,这是由于围压起一定的支撑作用,低围压下的试样更易发生剪胀,故未冻融试样在 50、100 kPa 围压下的侧向鼓胀较 150 kPa 围压更明显,而经冻融循环后的试样鼓胀破坏区形状更接近菱形,但鼓胀破坏区 $D_{\max}$ 均值减小,说明冻融循环后的试样更易产生规律性破坏,未经冻融循环的试样剪胀特性较显著。

2.2.2 接触力链变化分析

力链是相邻颗粒互相接触所形成的传递应力的路径,力链网络的演变反映试样对外部荷载的响应^[28]。在试验加载过程中,由于颗粒材料的非连续性,颗粒位置并不固定,力链的大小、位置和形态也随之变化。图 8 和图 9 是冻融循环前后试样颗粒接触力链分布情况,力链粗细代表颗粒间接触力大小。结合颗粒位移情况可知,随着轴向应变与加载围压不断增大,试样上、下两端颗粒不断向中部移动,改变了其与中部颗粒的接触情况,致使各试样内部颗粒接触力链不断增多,接触力最大值增大,强力链也随之增多,不仅生成的旧力链会变粗,也会产生新的强力链^[29]。

由图 8 与图 9 中红圈标记位置可知,冻融循环前不同围压下强力链的产生位置不同,且 50、100、150 kPa 围

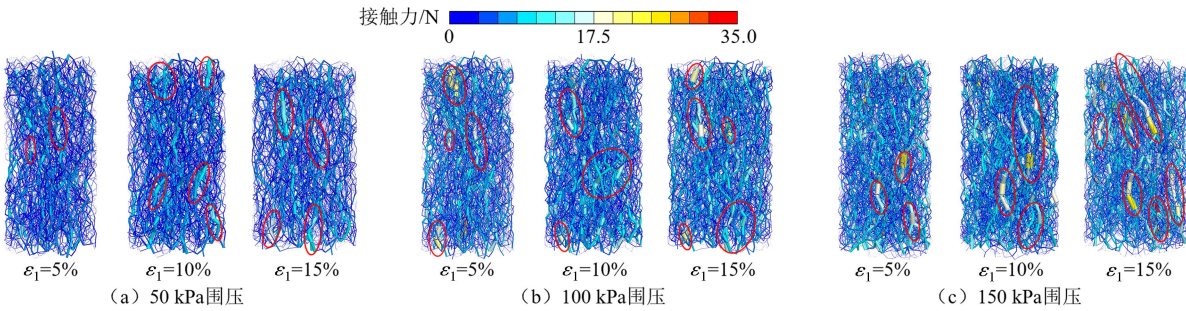


图 8 冻融循环前试样颗粒接触力链分布

Fig. 8 Distribution of particle contact force chains of specimens before freeze-thaw cycles

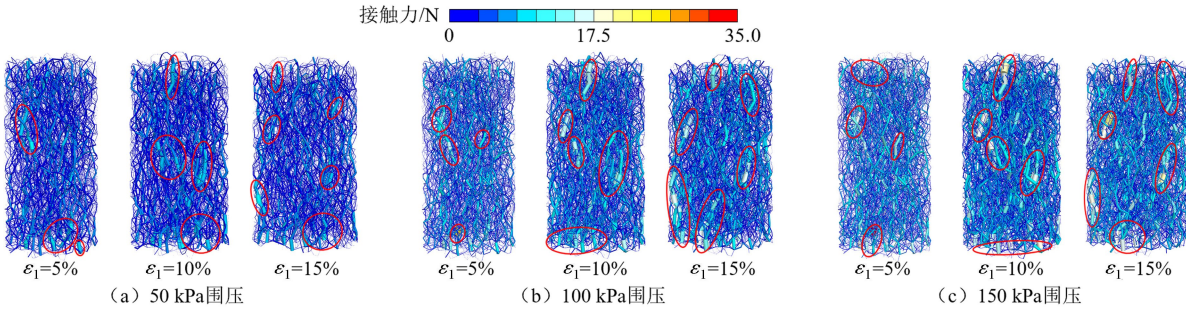


图 9 冻融循环后试样颗粒接触力链分布

Fig. 9 Distribution of particle contact force chains of specimens after freeze-thaw cycles

压下的颗粒间接触力最大值分别为 19.95、24.71、34.05N;冻融循环后不同围压下力链发展规律较一致,强力链的产生位置大致重合,50、100、150 kPa 围压下的颗粒间接触力最大值分别降低至 13.13、19.05、26.02N,较冻融循环前分别降低了 34.19%、22.91%、23.58%,平均降幅为 26.89%,试样抵抗剪切破坏的能力减弱。

2.2.3 试样细观组构演化规律

Satake^[30]和 Oda^[31]提出使用三维组构张量来反映试样在承受外部荷载时所表现出的各向异性,且已有研究表明法向接触对承担外部荷载起主导作用^[32]。图 10 和图 11 为冻融循环前后试样法向接触数目组构

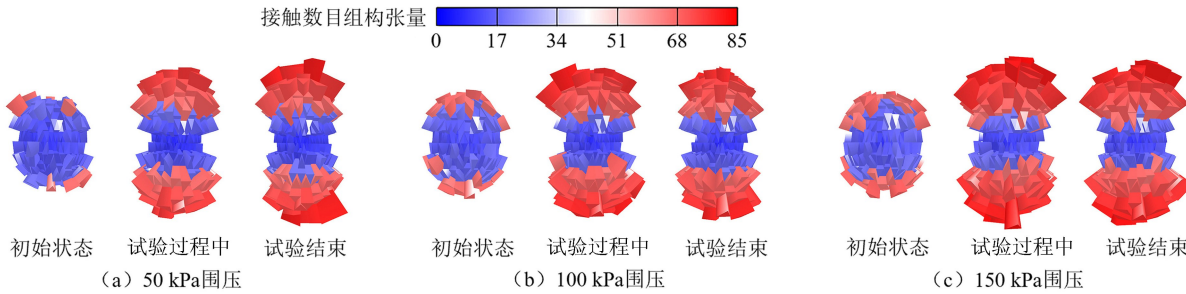


图 10 冻融循环前试样法向接触数目组构张量分布

Fig. 10 Fabric tensor distribution of the number of normal contacts of specimens before freeze-thaw cycles

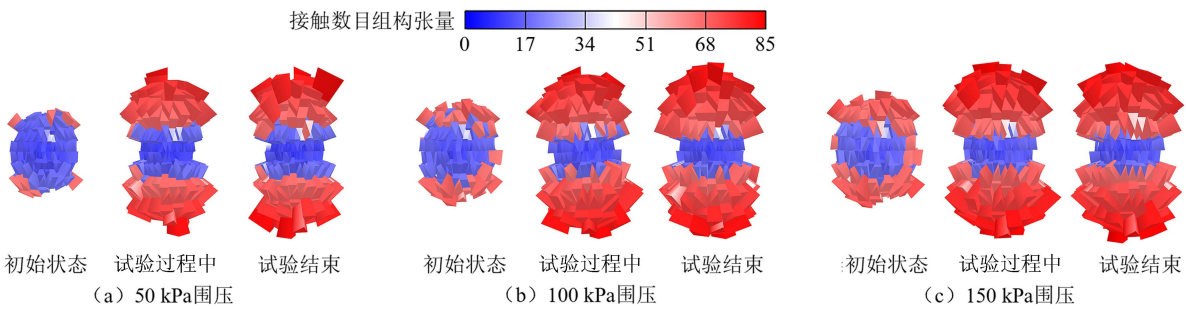


图 11 冻融循环后试样法向接触数目组构张量分布

Fig. 11 Fabric tensor distribution of the number of normal contacts of specimens after freeze-thaw cycles

张量分布情况,柱体越高代表试样接触分布越集中。由图 10 和图 11 可以看出,在初始状态下,冻融循环前后各试样法向接触数目分布近似一个椭球形,试样的各向异性程度极低,试样接触数目在空间上近似于均匀分布,冻融循环前 50、100、150 kPa 围压下的试样法向接触数目组构张量最大值分别为 15、16、17,冻融循环后分别为 16、21、23;随着试样的轴向应变不断增大,柱体沿轴向方向被拉伸成类似花生状,各向异性程度持续增强,通过柱体向外的延伸情况可知试样颗粒接触的密集程度相比初始状态更大;到试验结束时,试样的各向异性程度达到峰值,冻融循环前 50、100、150 kPa 围压下的试样法向接触数目组构张量最大值分别为 75、74、81,冻融循环后分别为 81、82、85,此时无论试样是否经过冻融循环,其在 50 kPa 与 100 kPa 围压下与试验过程中柱体的分布情况差异较大。

试验结束时试样法向接触数目组构张量在 50 kPa 围压下柱体高度升高,上下两端分布更分散,而 100 kPa 围压下柱体分布则更为集中,这是由于随着围压的增大,对试样颗粒的约束力也随之提高,不仅能增加试样的接触数目,还会限制颗粒的运动,进而影响试样法向接触数目组构张量的发展,且受到外部荷载时冻融循环后试样的颗粒间接触更为频繁,在宏观上表现为试样偏应力减小,承载能力降低。

图 12 和图 13 为冻融循环前后试样在不同状态下的法向接触力组构张量分布。初始状态时,各试样法向接触力组构张量分布近似球形,围压越小试样法向接触力组构张量数值越接近 0,且较法向接触数目组构张量分布更为均匀,法向接触力基本表现为各向同性,这是因为此时试样处于静止状态,在均匀分布的初始围压和重力荷载作用下,颗粒之间几乎未发生相对运动,粒间接触少,试样没有表现出其抵抗剪切破坏的能力;在试验过程中,试样法向接触力组构张量沿轴向伸长,表示试样内部沿轴向逐渐生成强接触力,50、100、150 kPa 围压下未经冻融循环试样法向接触力组构张量峰值分别为 1.66、2.49、3.26 N,冻融后分别为 1.18、1.99、2.65 N,试样各向异性程度增强;相较于试验过程中状态,试验结束时的柱体拉伸程度更大,50、100、150 kPa 围压下冻融循环前试样法向接触力组构张量峰值分别增大至 1.88、2.91、3.35 N,增幅达到 13.25%、16.86% 和 2.76%,冻融循环后分别增大至 1.32、2.17、2.72 N,增幅达到 11.86%、9.05% 和 2.64%,各向异性发展近似呈缓慢硬化趋势,冻融循环后的试样增幅较小。

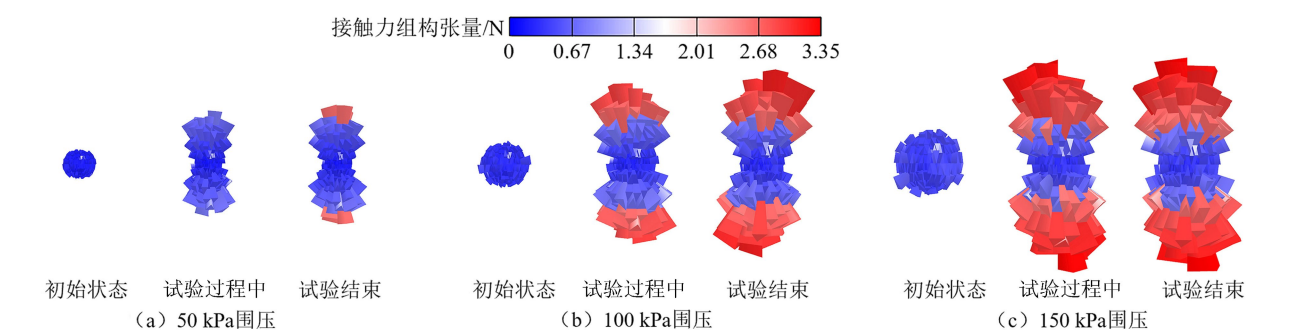


图 12 冻融循环前试样法向接触力组构张量分布

Fig. 12 Fabric tensor distribution of normal contact force of specimens before freeze-thaw cycles

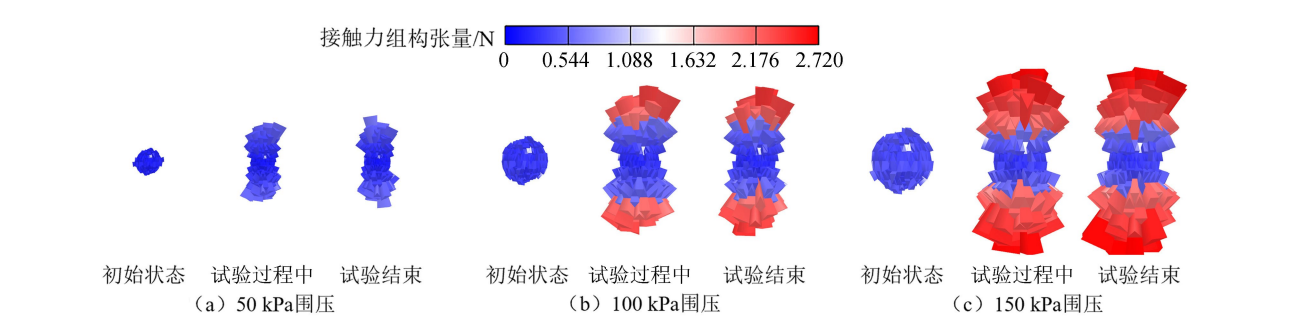


图 13 冻融循环后试样法向接触力组构张量分布

Fig. 13 Fabric tensor distribution of normal contact force of specimens after freeze-thaw cycle

当外部荷载作用于试样时,颗粒之间的接触概率增大、频率升高,同时诱导颗粒产生抵抗转动的阻力,进而使试样整体抗剪强度和剪胀性能发生改变。如前所述,冻融循环后不同围压下试样的法向接触力组构张量峰值均小于冻融循环前的试样,试样鼓胀破坏区 $D_{\max}$ 均值减小,颗粒在加载过程中更易发生接触,法向接

触增加,但接触力最大值均大幅减小,在宏观上表现为偏应力峰值降低,且不同围压下试样法向接触数目组构张量与法向接触力组构张量峰值空间分布位置并不相同,二者对试样各向异性的贡献不一致,说明颗粒接触数目的增多对偏应力影响较小,其主要受法向接触力的影响而变化,颗粒间构成的骨架强度才是承担荷载的关键,而冻融循环会使颗粒间骨架强度降低,在试验过程中,试样为抵抗剪切变形被动增加颗粒接触数目,以此来获得更多的支撑力链,故冻融循环后试样的法向接触数目组构张量会表现出更显著的各向异性,但由于受到接触力最大值的限制,冻融循环后试样法向接触力组构张量表现出的各向异性程度远低于冻融循环前。

在离散元颗粒体系中,颗粒间的相互作用力是通过接触点传递的。当外部荷载作用于试样时,颗粒运动引起颗粒间接触力分布发生非均匀变化,Radjai 等^[33]将颗粒体系的接触力链网络划分为两个互补的子网络,即强接触力链网络和弱接触力链网络,强接触力链网络的颗粒间接触力高于均值接触力。基于此分别计算试样的全接触力链网络等效各向异性系数(A)和强接触力链网络等效各向异性系数(A_s)^[34]。

图 14 为冻融循环前后试样加载过程中 A 与 A_s 的演化过程,可以看出在三轴剪切试验过程中冻融循环前后试样 A 与 A_s 初始值和变化趋势基本保持一致,10 次冻融循环后的试样 A 与 A_s 均低于冻融循环前,该大小关系与冻融循环前后试样抗剪强度相一致。 A 与 A_s 快速增大阶段发生在试样轴向应变为 0 ~ 2% 左右时间段内,且 A_s 增大趋势更明显,说明颗粒间接触力在三轴剪切试验初期普遍增大,颗粒接触网络中已经产生可以传递较大应力的力链;当轴向应变达到 5% 时, A 与 A_s 进入缓慢增大阶段,对比图 2 可知此时宏观上试样偏应力大小已接近峰值应力,颗粒间已经形成较为稳定的应力传递链来抵抗外部荷载;随着轴向应变继续增大, A 与 A_s 趋于稳定,试样偏应力也趋于稳定。 A_s 在试验过程中明显大于 A ,且 A_s 与偏应力变化趋势基本一致,故强接触力链网络在颗粒体系的应力构成中起主要作用。

图 15 给出了冻融循环前后 150 kPa 围压下试样强接触力链数量占全接触力链数量的百分比(强接触占比(P_s))与接触力最大值($F_{\max}$)的变化情况。在试样轴向应变达到 2% 前,试样强接触占比呈显著减小趋势,接触力最大值显著增大,结合图 14 分析可知,在这一过程中试样接触力链增多、强接触占比下降,导致 A 增大,而 A_s 的迅速增长主要是接触力最大值对试样颗粒体系不断贡献的结果;随着轴向应变的增大,试样强接触占比呈先增大后减小的变化趋势,接触力最大值呈先增大后减小、然后又增大的趋势,此时试样 A 与 A_s 均趋于稳定,说明试样的强接触力链网络不是由单一强接触力链构成的,试样的力链分布是随着轴向应变的增大不断发展变化的,其各向异性由于强、弱力链贡献的抵消从而达到动态平衡。10 次冻融循环后试样强接触占比始终高于 0 次冻融循环试样,但其等效各向异性却低于 0 次冻融循环试样,证明冻融循环会降低颗粒体系整体构成的骨架强度,使其细观结构更易表现出各向同性,而不只是影响颗粒间接触力最大值。

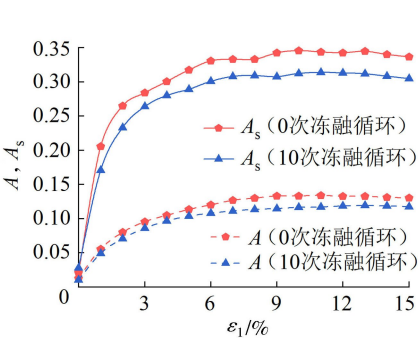


图 14 冻融循环前后等效各向异性系数演化过程
Fig. 14 Evolution of equivalent anisotropy coefficients before and after freeze-thaw cycles

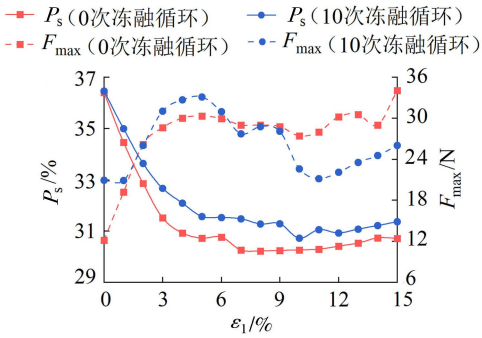


图 15 冻融循环前后试样强接触占比与接触力最大值的变化
Fig. 15 Changes in strong contact ratio and maximum contact force of specimens before and after freeze-thaw cycles

3 讨 论

图 16 为冻融循环前后试样表面细观形貌的变化,试样尺寸为长 2.21 mm、宽 1.64 mm。从图 16 可知,在冻融循环与重力势的共同作用下土体会产生冻胀融沉,土体结构平整性被破坏,诱发土体内部损伤,经历 5 次和 15 次冻融循环后的土体表面高差较未经历冻融循环的土体分别增大了 67、176 μm ,增大幅度为 32.06% 和 84.21%。经历 15 次冻融循环后,土体冻融过程中产生的贯穿孔隙和裂隙继续发展致使土体表

面高差继续增大,结构平整性持续下降。由此可以推断土质堤岸在经历反复冻融循环后,堤岸土体结构变松散,空隙增多,密实度降低^[35],减弱了颗粒间的黏聚作用,加之冻融循环会改变颗粒形状,增大颗粒磨圆度和降低其分形维度^[24],从而减弱颗粒间的咬合作用,降低土体的摩擦强度,在土体宏观力学特性上表现为冻融循环会使其抗剪强度显著降低,当堤岸受到外部承载作用时更易发生崩塌。

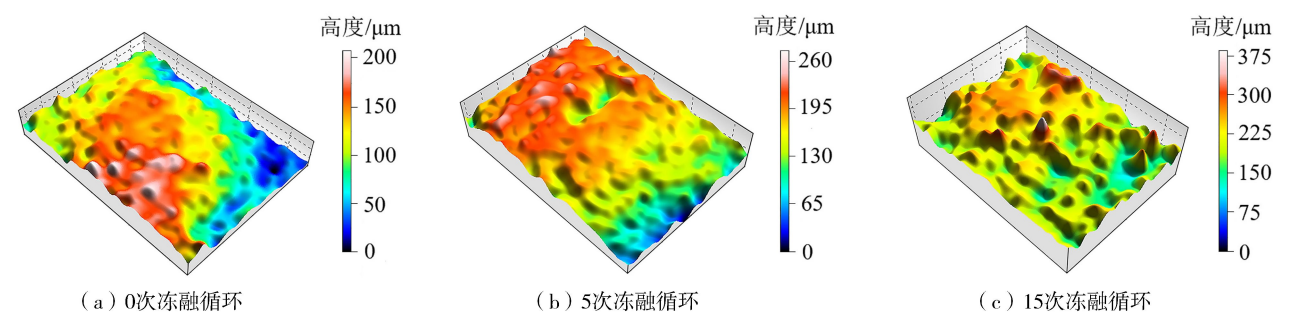


图 16 冻融循环前后试样表面细观形貌的变化

Fig. 16 Changes in surface micro-morphology of specimens before and after freeze-thaw cycles

在离散元中,颗粒体系是颗粒→力链→整体的多尺度结构,颗粒的非连续性和接触变化是基本特征,不同的颗粒接触情况和颗粒表面摩擦系数等会产生不同的接触力链网络^[28]。冻融循环前后颗粒空间位置不同,冻融循环后的试样颗粒更易发生横向位移,鼓胀破坏更明显;颗粒间通过接触点非均匀分布,形成不同强度的接触力链网络,冻融循环后试样具有较大接触力的力链数目减少,颗粒骨架强度较冻融循环前低,试样组构张量各向异性降低,导致其对外荷载的响应更差,宏观上试样的破坏强度更低。结合室内试验与离散元模拟试验结果可知,当轴向应变不断增大时,试样的偏应力达到峰值后基本保持稳定,其等效各向异性系数不再增大,接触力最大值呈现波动变化,试样强接触占比与等效各向异性系数变化趋势相反,说明在颗粒运动过程中出现了强、弱接触的增减与替换现象^[36],强接触力链网络是应力传递的主要通道,具有高稳定性和高应力承载能力,而弱接触力链网络由低于或等于平均接触力的力链构成,为强接触力链网络提供支撑,使其能在承受荷载时调整力链的大小和分布,防止试样发生局部或整体破坏,从而维持整个颗粒体系的稳定^[37],体现出冻融循环前后试样在宏观力学上的应变稳定特性。

如图 17 所示,根据离散元模拟的试样应力-应变曲线拟计算得到不同冻融循环次数下的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 以及不同围压下偏应力峰值 $\sigma_{\max}$ 的数值解,将数值解代入式(3),得到 50、100、150 kPa 围压下堤岸砂质壤土抗剪强度 τ 与冻融循环次数 n 的预测模型分别为

$$\tau_{50} = 10.94e^{-n/3.88} + 128.13 + (43.40 \times 0.79^n) \tan(31.37 - 0.047n) \tag{5}$$

$$\tau_{100} = 10.94e^{-n/3.88} + 237.57 + (53.00 \times 0.82^n) \tan(31.37 - 0.047n) \tag{6}$$

$$\tau_{150} = 10.94e^{-n/3.88} + 334.20 + (53.74 \times 0.83^n) \tan(31.37 - 0.047n) \tag{7}$$

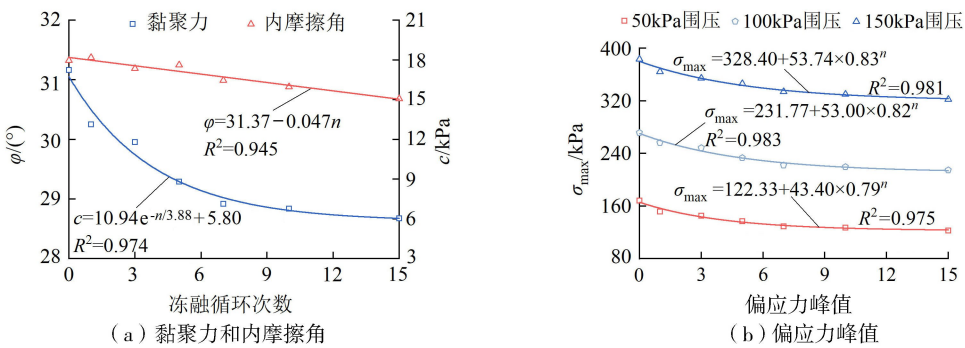


图 17 基于离散元模拟结果的堤岸砂质壤土强度拟合曲线

Fig. 17 Fitted curves of strength of embankment sandy loam soil based on discrete element simulation results

对比预测与实测土体抗剪强度(图 18),50、100、150 kPa 围压下抗剪强度在不同冻融循环次数下的最大误差绝对值分别为 3.44%、2.43%和 3.91%,相对误差绝对值均值分别为 1.44%、1.35%和 2.34%,150 kPa 围压下的预测效果不如低围压,但整体误差较小。

目前,黄河内蒙古段堤岸大多采用铅丝石笼和土工袋等进行加固和防护,本文从宏细观尺度上揭示了冻融循环下黄河堤岸砂质壤土的抗剪强度变化机制,并给出了土体抗剪强度随冻融循环次数变化的预测模型,在此基础上可根据不同类型的土质堤岸增添挡土墙和抗滑桩等防护措施进行三维数值模拟来探寻适宜的堤岸防护施工方案,亦可采用生态护坡或固化剂等手段来削弱冻融循环对土体抗剪强度的影响来达到提高堤岸稳定性的目的^[38-39]。

本文试验试样黏粒占比不到3%,土体内部的胶结力所能提供的黏聚强度十分有限,目前对没有胶结或胶结力极低的颗粒集合体多使用离散元法中的线性接触模型进行模拟^[40],而非圆颗粒集合体的细观数值模拟需要进行庞大复杂的试错计算,计算效率较低,故本文仅考虑了冻融循环对土体颗粒摩擦强度的影响,选用抗转动线性接触模型来进行数值模拟分析^[41]。虽然抗转动线性接触模型能够较好地反映堤岸土体的力学特性,但仍难以精确表征冻融循环对颗粒局部圆度和表面粗糙度的影响,在未来的研究中,可以尝试采用赫兹接触模型并模拟颗粒破碎过程来实现这一目标^[42-43]。

4 结 论

- a. 冻融循环前后黄河堤岸砂质壤土应力-应变曲线为应变稳定型,土体经历首次冻融循环后其破坏强度下降最为显著,3~5次冻融循环后土体的黏聚力降幅均为22%左右,内摩擦角变化幅度不超过1%,且抗剪强度损失主要发生在前7次冻融循环。
- b. 抗转动线性接触模型能很好地模拟黄河堤岸砂质壤土的力学特性。试样经冻融循环后的鼓胀破坏区形状更接近菱形,鼓胀破坏区 D_{max} 均值减小,颗粒间接触力最大值降幅达到22.91%~34.19%,试样抵抗剪切破坏的能力减弱。
- c. 试样对外部荷载的响应主要体现为强接触等效各向异性的变化,整体力链网络的结构强度是土体颗粒体系稳定的关键。冻融循环会破坏土体内部结构完整性,受外部荷载作用时颗粒更易发生接触,其内部力链网络结构强度降低和等效各向异性程度减弱,宏观上表现为土体稳定性更差。
- d. 基于离散元模拟结果建立的黄河堤岸砂质壤土抗剪强度随冻融循环次数变化的预测模型预测结果与实测结果一致性较好,可为黄河堤岸防护工程建设提供一定的参考依据。

参考文献:

[1] 赖远明,张明义,李双洋,等. 寒区工程理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2009:1-3.

[2] 马巍,王大雁,齐吉琳,等. 冻土力学[M]. 北京:科学出版社,2014:39-40.

[3] 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))

[4] QU Yonglong, CHEN Guoliang, NIU Fujun, et al. Effect of freeze-thaw cycles on uniaxial mechanical properties of cohesive coarse-grained soils[J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(9): 2159-2170.

[5] 黄万俊,毛雪松,吴谦. 细粒土冻融界面抗剪强度试验研究及灰关联分析[J]. 工程地质学报,2022,30(5):1477-1484. (HUANG Wanjun, MAO Xuesong, WU Qian. Experimental investigation on the shear strength of freeze-thaw interface in fine-grained soil and grey relational analysis[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(5): 1477-1484. (in Chinese))

[6] 穆彦虎,陈涛,陈国良,等. 冻融循环对黏质粗粒土抗剪强度影响的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2019,39(3):375-386. (MU Yanhu, CHEN Tao, CHEN Guoliang, et al. Experimental study on effect of cyclic freeze-thaw on shear behaviors of clayey coarse-grained soil[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(3): 375-386. (in Chinese))

[7] 蒋婷婷,潘华利,艾一帆,等. 冻融循环及含水率对冰碛土力学特性影响[J]. 地质科技通报,2024,43(2):238-252. (JIANG Tingting, PAN Huali, AI Yifan, et al. Effect of freeze-thaw cycles and water content on the mechanical properties of moraine soil [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 238-252. (in Chinese))

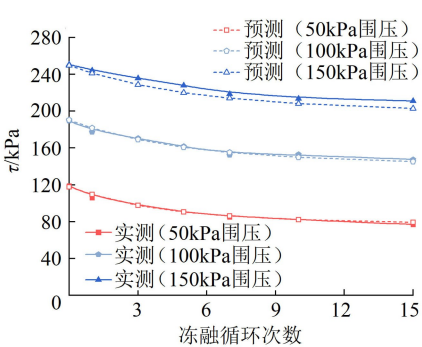


图 18 预测与实测的堤岸砂质壤土抗剪强度对比
Fig. 18 Comparison of predicted and measured shear strength of embankment sandy loam soils

- [8] 李新明,张浩扬,武迪,等. 石灰-偏高岭土改良遗址土强度劣化特性的冻融循环效应[J]. 岩土力学,2023,44(6):1593-1603. (LI Xinming,ZHANG Haoyang,WU Di,et al. Strength deterioration characteristics of lime-metakaolin improved earthen site soil under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics,2023,44(6):1593-1603. (in Chinese))
- [9] 魏丽,柴寿喜,薛美玲,等. 以抗剪性能与结构损伤评价纤维加筋土的冻融耐久性[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(增刊2):3453-3463. (WEI Li,CHAI Shouxi,XUE Meiling,et al. Evaluation of freeze-thaw durability of fiber reinforced soil by shear performances and structural damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(Sup2):3453-3463. (in Chinese))
- [10] AYGÖRMEZ Y,CANPOLAT O,Al-MASHHADANI M M,et al. Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites[J]. Construction and Building Materials,2020,235:117502.
- [11] 王伯昕,刘佳奇,王清,等. 冻融循环条件下粉质黏土-混凝土界面细观损伤及宏观剪切性能研究[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(增刊1):3792-3800. (WANG Boxin,LIU Jiaqi,WANG Qing,et al. Study of meso-damage and macroscopic shear performance of silty clay-concrete interface under freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2023,42(Sup1):3792-3800. (in Chinese))
- [12] 郑英杰,金青,崔新壮,等. 冻融循环作用下黄泛区饱和含盐粉土动力性能及细观损伤演化规律[J]. 中国公路学报,2020,33(9):32-44. (ZHENG Yingjie,JIN Qing,CUI Xin Zhuang,et al. Dynamic behavior and meso-damage evolution of saturated saline silt from Yellow River flooded area under freeze-thaw cycle[J]. China Journal of Highway and Transport,2020,33(9):32-44. (in Chinese))
- [13] 周凤玺,赖远明. 冻结砂土力学性质的离散元模拟[J]. 岩土力学,2010,31(12):4016-4020. (ZHOU Fengxi,LAI Yuanming. Simulation of mechanical behavior for frozen sand clay by discrete element method[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(12):4016-4020. (in Chinese))
- [14] 尹楠,李双洋,施烨辉,等. 不同围压下冻结黄土胶结行为的离散元分析[J]. 冰川冻土,2017,39(4):858-867. (YIN Nan,LI Shuangyang,SHI Yehui,et al. Discrete element analysis of cemented behavior of frozen loess under different confining pressures[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2017,39(4):858-867. (in Chinese))
- [15] 袁伟,姚晓亮,王文丽. 基于离散元的冻结砂土三轴力学特性研究[J]. 冰川冻土,2019,41(6):1388-1396. (YUAN Wei,YAO Xiaoliang,WANG Wenli. Study on triaxial mechanical behaviors of frozen sand based on discrete element method[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2019,41(6):1388-1396. (in Chinese))
- [16] CHANG Dan,YAN Yihui,LIU Jiankun,et al. Micro-macroscopic mechanical behavior of frozen sand based on a large-scale direct shear test[J]. Computers and Geotechnics,2023,159:105484.
- [17] 罗红春,冀鸿兰,郜国明,等. 黄河什四份子弯道冰期水流及冰塞特征研究[J]. 水利学报,2020,51(9):1089-1100. (LUO Hongchun,JI Honglan,GAO Guoming,et al. Study on the characteristics of flow and ice jam in Shisifenzi bend in the Yellow River during the freeze-up period[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(9):1089-1100. (in Chinese))
- [18] 刘昉,戚园春,吴敏睿. 冻土条件下均质土堤漫顶溃决试验研究[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6):21-27. (LIU Fang,QI Yuanchun,WU Minrui. Experimental study on erosion process of homogeneous embankment breaching due to overtopping under frozen soil condition[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(6):21-27. (in Chinese))
- [19] 曹小红,吴彬,尚彦军,等. 季冻区冻融型黄土滑坡特征及成灾模式分析:以伊犁喀拉吐木苏克滑坡为例[J]. 新疆地质,2022,40(4):502-506. (CAO Xiaohong,WU Bin,SHANG Yanjun,et al. Analysis of characteristics and disaster model seasonal freeze-thaw loess landslides:taking Yili Kalatumusuke landslide as an example[J]. Xinjiang Geology,2022,40(4):502-506. (in Chinese))
- [20] 杨震,李超,冀鸿兰,等. 冻融期黄河堤岸土体温湿度变化特征及影响因素研究[J]. 干旱区资源与环境,2021,35(1):76-83. (YANG Zhen,LI Chao,JI Honglan,et al. Characteristics and influencing factors of soil temperature and moisture of the Yellow River bank during freeze-thaw period[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2021,35(1):76-83. (in Chinese))
- [21] 李广信. 高等土力学[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2016:137-146.
- [22] 李瑶,伏映鹏,廖红建,等. 考虑吸力作用的非饱和土离散元模型及细观参数影响分析[J]. 岩土工程学报,2021,43(增刊1):246-250. (LI Yao,FU Yingpeng,LIAO Hongjian,et al. Discrete element model for unsaturated soils considering suction effect and its meso-parameter influence analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(Sup1):246-250. (in Chinese))
- [23] 尹小涛,郑亚娜,马双科. 基于颗粒流数值试验的岩土材料内尺度比研究[J]. 岩土力学,2011,32(4):1211-1215. (YIN Xiaotao,ZHENG Ya'na,MA Shuangke. Study of inner scale ratio of rock and soil material based on numerical tests of particle flow code[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(4):1211-1215. (in Chinese))

[24] 杨震,冀鸿兰,李超,等. 冻融作用对岸坡土体宏微观特性及岸坡稳定性影响研究[J]. 水利学报,2023,54(6):706-716. (YANG Zhen,JI Honglan,LI Chao,et al. Effects of freezing-thawing action on the macro-micro properties of bank slope soil and bank stability[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2023,54(6):706-716. (in Chinese))

[25] 王壮,段志波,廖新超,等. 考虑转动阻抗作用的砂土模拟直剪试验[J]. 水利水运工程学报,2021(6):142-151. (WANG Zhuang,DUAN Zhibo,LIAO Xinchao,et al. Numerical simulation of direct shear test of sand considering rotational impedance [J]. Hydro-Science and Engineering,2021(6):142-151. (in Chinese))

[26] IWASHITA K, ODA M. Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by DEM [J]. Journal of Engineering Mechanics,1998,124(3):285-292.

[27] JIANG Mingjing,SHEN Zhifu,WANG Jianfeng. A novel three-dimensional contact model for granulates incorporating rolling and twisting resistances[J]. Computers and Geotechnics,2015,65:147-163.

[28] 孙其诚,辛海丽,刘建国,等. 颗粒体系中的骨架及力链网络[J]. 岩土力学,2009,30(增刊1):83-87. (SUN Qicheng,XIN Haili,LIU Jianguo,et al. Skeleton and force chain network in static granular material[J]. Rock and Soil Mechanics,2009,30 (Sup1):83-87. (in Chinese))

[29] 朱旭芬,黄庭伟,刘瑾,等. 有机聚合物复合纤维改良砂土无侧限抗压强度研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023, 51(6):90-98. (ZHU Xufen,HUANG Tingwei,LIU Jin,et al. Study on unconfined compressive strength of sand improved by organic polymer composite fiber[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(6):90-98. (in Chinese))

[30] SATAKE M. The role of the characteristic line in static soil behavior[C]//IUTAM Symposium on Deformation and Failure of Granular Materials. Delft: A A Balkema,1982:63-68.

[31] ODA M. Fabric tensor for discontinuous geological materials[J]. Soils and Foundations,1982,22(4):96-108.

[32] 赵仕威. 颗粒材料物理力学特性的离散元研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.

[33] RADJAI F,JEAN M,MOREAU J J,et al. Force distributions in dense two-dimensional granular systems[J]. Physical Review Letters,1996,77(2):274-277.

[34] 杨舒涵,周伟,马刚,等. 粒间摩擦对岩土颗粒材料三维力学行为的影响机制[J]. 岩土工程学报,2020,42(10):1885-1893. (YANG Shuhan,ZHOU Wei,MA Gang,et al. Mechanism of inter-particle friction effect on 3D mechanical response of granular materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2020,42(10):1885-1893. (in Chinese))

[35] 赵文,汪小静,徐正宣,等. 季节性冻土区粗颗粒土边坡自然演化特征试验研究[J]. 工程地质学报,2021,29(5):1497-1506. (ZHAO Wen,WANG Xiaojing,XU Zhengxuan,et al. Experimental study on natural evolution characteristics of coarse-grained soil slope in seasonal frozen soil region[J]. Journal of Engineering Geology,2021,29(5):1497-1506. (in Chinese))

[36] 杨升,李晓庆. 基于 PFC^{3D} 的砂土直剪模拟及宏细观分析[J]. 计算力学学报,2019,36(6):777-783. (YANG Sheng,LI Xiaoqing. Shear simulation and macro meso analysis of sand based on PFC^{3D} [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2019,36(6):777-783. (in Chinese))

[37] WANG Jinan,YANG Liu,LI Fei,et al. Force chains in top coal caving mining[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2020,127:104218.

[38] 谢亚军,顾浩,苏宇宸,等. 考虑植被力学-水力作用的洪泽湖堤防加固效果分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024, 52(2):61-68. (XIE Yajun,GU Hao,SU Yuchen,et al. Reinforcement effects of Hongze Lake embankment considering hydro-mechanical effects of vegetation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(2):61-68. (in Chinese))

[39] 李骞,罗璟,裴向军,等. 秸秆纤维加筋固化土物理力学特性与抗冻融性能试验研究[J]. 长江科学院院报,2024,41(1): 128-135. (LI Qian,LUO Jing,PEI Xiangjun,et al. Experimental study on physical and mechanical properties and freeze-thaw resistance of straw fiber reinforced solidified soil[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2024,41(1):128-135. (in Chinese))

[40] 孙佳政,傅翼,仇雅诗,等. RB 模式下砂土非极限主动土压力的离散元模拟与理论研究[J]. 岩土力学,2023,44(2):603-614. (SUN Jaizheng,FU Yi,QIU Yashi,et al. Discrete element simulation and theoretical study on non-limit active earth pressure of sand under RB mode[J]. Rock and Soil Mechanics,2023,44(2):603-614. (in Chinese))

[41] 王一伟,刘润,孙若晗,等. 基于抗转模型的颗粒材料宏-细观关系研究[J]. 岩土力学,2022,43(4):945-956. (WANG Yiwei,LIU Run,SUN Ruohan,et al. Macroscopic and mesoscopic correlation of granular materials based on rolling resistance linear contact model[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(4):945-956. (in Chinese))

[42] YANG Siyuan,HUANG Duruo. Investigating the influence of inherent soil fabrics on reliquefaction resistance of sands using DEM-clump simulation[J]. Computers and Geotechnics,2023,164:105817.

[43] 徐靖,叶华洋,朱晟. 粗粒料颗粒破碎三维离散元模型及其在密度桶试验中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022,50(4):127-134. (XU Jing,YE Huayang,ZHU Sheng. Three-dimensional discrete element model of coarse particle breakage and engineering application in density barrel test[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(4): 127-134. (in Chinese))