秘贝,宋杨,时秀莲,等.季冻区滨海盐渍土冻融力学特性及模型参数研究[J].地震工程学报,2026,48(6):1390-1398.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250430001

Bei Bei, Song Yang, Shi Xiulian, et al. Freeze-thaw mechanical properties and model parameters of coastal saline soil in seasonally frozen regions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2026, 48(6): 1390-1398. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250430001

季冻区滨海盐渍土冻融力学特性及模型参数研究

秘 贝[1], 宋 杨[1,2,3], 时秀莲[2,3], 李艳红[4], 王运达[2]

(1. 河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038;
2. 河北水利电力学院 交通工程系,河北 沧州 061001;
3. 河北省岩土工程安全与变形控制重点实验室,河北 沧州 061001;
4. 沧州市市政工程股份有限公司,河北 沧州 061001)

摘要:渤海湾西岸作为典型季节性冻土区,广泛分布着滨海盐渍土,其在冻融循环作用下易引发公路翻浆、冻胀等病害。为掌握该地区滨海盐渍的土力学特性,以沧州黄骅地区滨海盐渍土为研究对象,基于邓肯-张模型,采用LFTD1820型动三轴试验系统进行冻融循环后土样的三轴压缩试验,分析不同冻融循环次数下土体的偏应力-应变关系,揭示邓肯-张模型参数随冻融循环次数的演化规律。结果表明:随冻融循环次数增加,黏聚力呈指数衰减趋势,内摩擦角总体减小;冻融循环作用下邓肯-张参数K值呈线性减小,n值受冻融循环影响波动显著,破坏比R_f在0.959~0.909范围内波动。所建立的考虑冻融循环作用的邓肯-张模型,能准确反映围压与冻融循环对滨海盐渍土强度及变形的影响规律。

关键词:滨海盐渍土;冻融循环;偏应力-应变关系;邓肯-张模型参数

中图分类号:TU411; TU448 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)06-1390-09

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250430001

Freeze-thaw mechanical properties and model parameters of coastal saline soil in seasonally frozen regions

Bei Bei[1], Song Yang[1,2,3], Shi Xiulian[2,3], Li Yanhong[4], Wang Yunda[2]

(*1.School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China;*
2.Department of Traffic Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, Hebei, China;
3.Hebei Key Laboratory of Geotechnical Engineering Safety and Deformation Control, Cangzhou 061001, Hebei, China;
4.Cangzhou Municipal Engineering Company Limited, Cangzhou 061001, Hebei, China)

Abstract: The western coast of Bohai Bay is a typical seasonally frozen region where coastal saline soil is widely distributed. Under freeze-thaw cycling, this saline soil is prone to frost boiling, frost

收稿日期:2025-04-30

基金项目:河北省高等学校科研重点项目(ZD2021068);基于EPS块的市政管道减荷措施与施工技术研究项目

第一作者简介:秘 贝(2000-),男,硕士研究生,主要从事交通岩土方面研究。E-mail:287255478@qq.com。

通信作者:宋 杨(1982-),男,博士,教授,主要从事交通岩土方面研究。E-mail:songyang@hbwe.edu.cn。

heave, and other pavement distresses, compromising highway serviceability. To investigate the mechanical properties of this soil, this study examined coastal saline soil from Huanghua, Cangzhou. Triaxial compression tests were conducted using the LFTD1820 dynamic triaxial test system on soil specimens subjected to freeze-thaw cycles, and the resulting stress-strain relationships were analyzed. Based on the Duncan-Chang model, the variation patterns of its parameters with freeze-thaw cycles were then determined. The results indicate that the deviatoric stress-strain curves of the coastal saline soil under different freeze-thaw cycles conform to the Duncan-Chang hyperbolic model. As the number of freeze-thaw cycles increases, the cohesion decays exponentially, whereas the internal friction angle generally decreases. Meanwhile, the Duncan-Chang parameter K decreases linearly, parameter n fluctuates considerably with freeze-thaw cycles, and the failure ratio R_f varies between 0.959 and 0.909. A modified Duncan-Chang model incorporating the effects of freeze-thaw cycles is proposed, which accurately reflects the influence of confining pressure and freeze-thaw cycles on the strength and deformation of coastal saline soil.

Keywords: coastal saline soil; freeze-thaw cycles; stress-strain relationship; Duncan-Chang model parameters

0　引言

渤海湾西岸地理位置特殊，受地下水矿化度、气候条件、人类活动等多重作用影响，土壤类型以滨海盐渍土为主[1]。春季干旱少雨与冬季寒冷多风的气候条件交替出现，使得土体春季融化、冬季冻结，形成显著的季节性冻融循环[2]。季节性冻融循环驱动土体产生体积胀缩变形，不仅引发土体物理变化，导致路面结构翻浆、不均匀沉降等病害，还造成土体力学性能衰减，严重制约公路使用寿命。为构建“通道＋枢纽＋网络”的现代综合交通运输体系，环渤海西岸的交通与港口发展规划正逐步实施。因此，开展滨海盐渍土冻融循环作用下强度特性研究，对解决工程实践中的地质难题具有重要指导意义。

在分析土体变形与强度特性时，通常需借助本构理论构建相应数学模型以揭示其力学行为。土的本构模型主要分为非线性弹性模型和弹塑性模型。非线性弹性模型的典型代表是邓肯-张双曲线模型；弹塑性模型则包括基于屈服面理论的剑桥模型、双屈服面模型，以及基于边界面理论的无屈服面模型等[3]。近年来，学术界针对冻融循环作用下不同土体的本构模型开展了广泛研究，已形成系列理论成果。殷溥隆等[4]揭示了寒区黄土基水泥土在冻融-围压耦合作用下的力学性能劣化机制，构建了考虑冻融损伤与围压效应的三轴本构模型。胡田飞等[5]通过分析青藏高原粉质黏土在不同冻融循环条件下的三轴试验数据，明确了邓肯-张模型参数随冻融循环次数变化的回归拟合规律。包卫星等[6-7]阐明了季冻区沙漠边缘盐渍化风积沙与伊犁盐渍化黄土在不同因素影响下的力学特性，提出了强度劣化公式和本构模型。Liu等[8]针对邓肯-张模型，建立了考虑冻融循环和围压影响的粉砂土应力-应变归一化预测模型。杨震等[9]针对黄河岸坡土体，探究了初始干密度、初始含水率、冻融循环次数及其交互作用对抗剪强度参数的影响，并构建了多元非线性回归预测模型。阮永芬等[10]揭示了滇池湖相沉积泥炭土偏应力与孔隙水压力系数随埋深的变化规律。王云等[11]通过对比单一与混合纤维加筋效果，验证了玄武岩-聚丙烯混合纤维对西宁黄土的显著增强作用。余云燕等[12]通过对比分析邓肯-张模型与沈珠江推广双曲线模型，确定了适用于甘肃红层泥岩填料的本构模型。

上述研究成果为冻融循环下土体强度及本构模型研究奠定了理论基础，并表明邓肯-张模型物理意义明确、适用土类较广，可通过参数改进合理反映各影响因素的作用[13]。滨海盐渍土因特殊盐分含量，与其他土体性质差异显著；目前针对其在冻融循环作用下邓肯-张模型参数变化规律的研究仍缺乏系统性。

综上所述，本研究以滨海盐渍土为研究对象，通过开展冻融循环条件下的三轴压缩试验，系统分析试验数据，揭示冻融循环作用对滨海盐渍土抗剪强度、偏应力-应变曲线及邓肯-张本构模型参数的

影响规律，为环渤海西岸盐渍土地区的工程设计与耐久性提升提供理论依据。

1 材料与试验

1.1 试验材料

实验所用土样采集自沧州黄骅地区地表以下0～2 m深度。试验严格按照《土工试验方法标准(GB/T 50123—2019)》[14]执行，测得土样易溶盐总量为1.43%，其中Cl^-含量0.94%、SO_4^{2-}含量0.10%。依据《盐渍土地区公路路基设计与施工技术细则(JTG/T 3331-08—2022)》[15]判定，该土样属细粒弱氯盐渍土。土样基本物理性质列于表1，颗粒级配曲线如图1所示。根据《建筑地基基础设计规范(GB 50007—2011)》[16]分类标准，该土体为粉质黏土。

表1 滨海盐渍土基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of coastal saline soil

最优含水率/%	最大干密度/(g/cm³)	液限/%	塑限/%	塑性指数
15.3	1.73	29	12	17

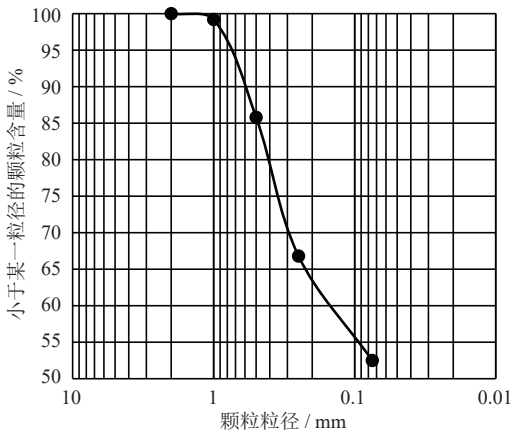


图1 土样的颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle grading curve of soil samples

将土料经自然风干、翻晒并碾碎后，过2 mm筛进行颗粒分级，制备试验用土。

根据《公路路基设计规范(JTG D30—2015)》[17]要求，路基压实度不应低于90%，且含水率宜接近最优含水率。为保障制样质量，按含水率15%、压实度96%控制，精确称取干土和蒸馏水；将蒸馏水分次加入干土并充分拌合，焖料24 h后进行试件制备。制样采用标准三轴击实器，分三层击实成型，制得高80 mm、直径39.1 mm的圆柱形试件。为防止冻融循环过程中水分散失或外界水分侵入，试样成型后立即采用塑料薄膜包裹并密封。

1.2 试验方案

为研究冻融循环条件对滨海盐渍土力学特性的影响，本研究采用低温冻融循环机与LFTD1820型动三轴试验系统(图2)。根据中国气象数据网观测资料，沧州黄骅地区土体冻结期为12月至次年2月，期间历史极端最高气温19 ℃，历史极端最低气温－18.7 ℃。综合考虑当地历史气温特征与试验可行性，选取20 ℃和－20 ℃分别作为融化与冻结温度。为保障试样经历完整冻融循环过程，单次冻结与融化时长设定为12 h[18]；冻融循环次数N设置为0、2、4、6、8、10次。待试样完成预设冻融循环次数后，取部分试样开展三轴试验，其余试样继续后续冻融循环试验。



(a) 三轴仪 (b) 低温冻融循环机

图2 试验仪器

Fig. 2 Test instruments

参照路基设计中典型的水平应力状态，围压分别设置为50、100和200 kPa三个等级；轴向加载速率为0.1 mm/min，试验终止条件为轴向应变达到15%。

2 试验结果分析

2.1 偏应力–应变曲线特性分析

2.1.1 冻融循环作用的影响

图3所示为不同围压σ_3和冻融循环次数N下试样的偏应力-应变关系曲线。由图可知，在加载初始阶段，土体呈现显著的线弹性变形特征，所有试样均迅速经历线弹性阶段，偏应力随轴向应变增加快速上升；随着加载进程推进，土体进入非线性变形阶段，表现出非理想弹塑性特性。经历不同冻融循环次数的试样在各围压条件下均呈现相似的偏应力-应变曲线形态，且未出现明显强度峰值，属于典型的应变硬化型曲线。冻融循环持续作用下，土体

经历反复的冰水相变过程，破坏了颗粒间的胶结结构，导致土体结构趋于松散（其表观结构变化如图 4 所示）；未冻融试样表面致密，经历 1～5 次冻融后，试样两端逐步出现细小裂纹、碎屑及微小孔隙；经历 6～10 次冻融后，试样表面裂纹进一步扩展、数量增多，四周出现不同程度的劣化。同时，温度变化诱发可溶盐（氯化钠）的结晶-溶解循环，加剧了孔隙结构的改变。值得注意的是，随着冻融循环次数增加，土体内部结构逐渐趋于新的稳定状态，强度衰减速率呈现减小趋势。

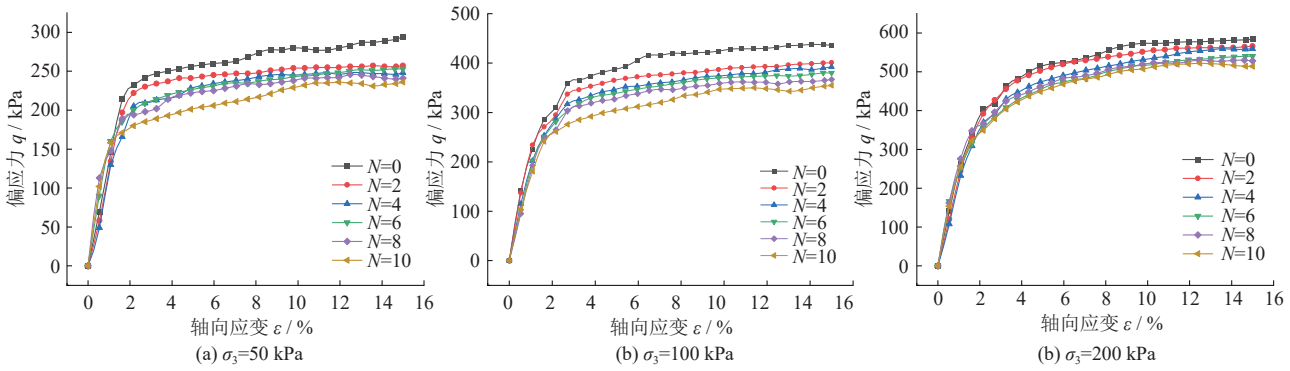


图 3　不同冻融循环次数下偏应力-应变关系曲线

Fig. 3　Deviatoric stress-strain curves under different freeze-thaw cycles

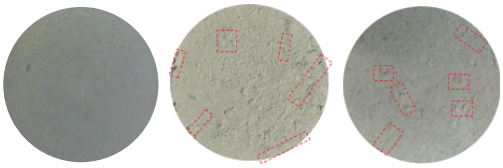


图 4　冻融循环后试样变化图

Fig. 4　Changes in specimen morphology after freeze-thaw cycles

2.1.2　围压的影响

不同围压下试样的偏应力-应变曲线如图 5 所示。由图可知，围压对试件的偏应力-应变曲线形态具有显著影响。在同一围压下，试样偏应力随轴向应变增大呈先急剧增长后增速趋缓的非线性变化规律。对比分析发现，当轴向应变相同时，土体的偏应力随围压增大而提高；以应变值 1.08% 为例，在 50、100、200 kPa 围压下的偏应力区间分别为 130～161、181～228、244～276 kPa。其机理在于：围压为试样提供了侧向约束，高围压下的侧向约束效应强于低围压状态。低围压时土体颗粒间相互约束较弱；当围压增至 100 kPa 和 200 kPa 时，颗粒间约束显著增强，有效抑制了结构破坏进程，提升了土体抵抗变形的能力，因而即便经历冻融循环，其强度损失也相对较小。在三轴试验加载过程中，随着试样内部结构损伤与颗粒重组，偏应力-应变曲线未表现出明显峰值点，而是呈现缓慢上升的硬化趋势。

2.2　破坏强度分析

基于偏应力-应变曲线特性，破坏强度取值准则确定为：对于软化型曲线，取峰值偏应力作为试件破坏强度；对于硬化型曲线，取轴向应变达 15% 所对应的偏应力作为破坏强度 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$[14]。不同围压和冻融循环次数下的破坏强度变化规律如图 6 所示。数据分析表明，土体破坏强度与冻融循环次数呈显著负相关。在围压分别为 50、100 和 200 kPa 条件下，土体强度衰减率依次为 19.7%、18.6% 和 12.0%。其原因在于，随着围压增大，土体内部裂隙发育受到的约束作用逐渐增强，这在一定程度上缓解了冻融损伤对土体强度的劣化程度，从而表现出更高的残余强度[4]。

2.3　抗剪强度指标分析

土体抗剪强度指标是岩土工程中评价其稳定性与承载能力的关键参数。基于不同围压下的破坏强度，采用应力路径法分别绘制各冻融循环次数下土样的莫尔应力圆，进而确定对应工况下的内摩擦角 φ 与黏聚力 c。抗剪强度指标随冻融循环次数的演化规律如图 7 所示。

为量化冻融循环次数对黏聚力的劣化效应，引入黏聚力劣化度参数 D_n[6]，其表达式为：

$$D_n=\frac{c_n-c_0}{c_0} \tag{1}$$

式中：D_n 为黏聚力劣化度；c_0 为未冻融试样的黏聚力；c_n 为经历 N 次冻融循环后试样的黏聚力。

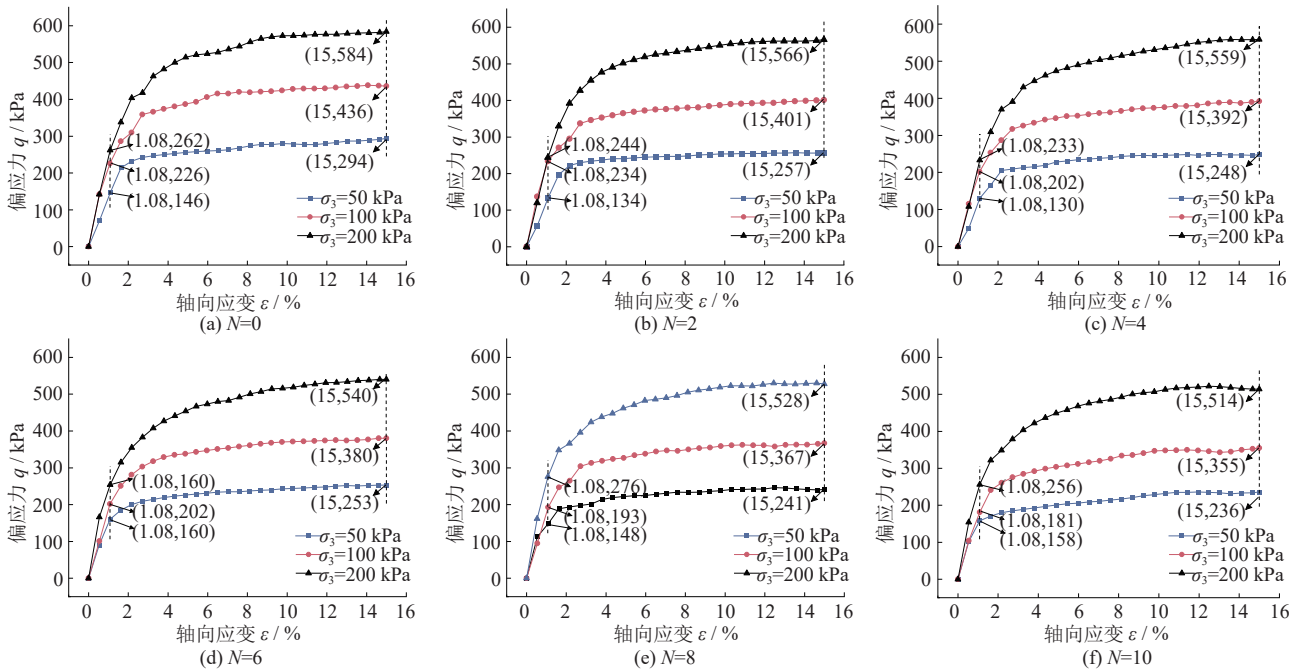


图 5 不同围压下偏应力-应变曲线

Fig. 5 Deviatoric stress-strain curves under different confining pressures

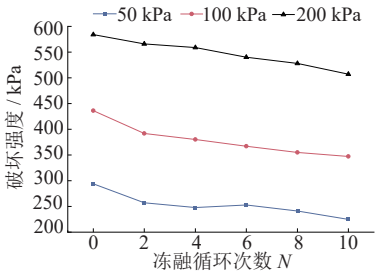


图 6 冻融循环作用下试样破坏强度

Fig. 6 Failure strength of specimens under freeze-thaw cycles

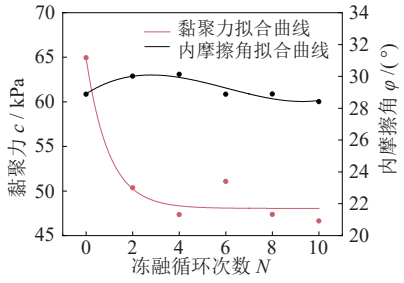


图 7 抗剪强度变化规律

Fig. 7 Variation patterns of shear strength parameters

基于式(1)计算不同冻融循环次数下的 D_n 值，并对计算结果进行曲线拟合(图8)。拟合曲线的相关指数 R^2 为 0.93，表明拟合效果良好，能较好地反映黏聚力随冻融循环次数的劣化规律。

黏聚力随冻融循环次数增加呈指数衰减规律。冻融循环初期，土体结构损伤处于快速累积阶段。

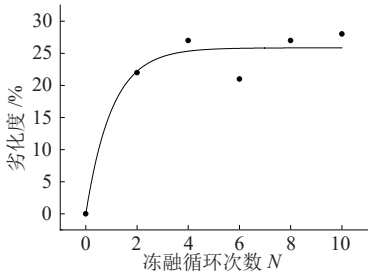


图 8 冻融循环次数与劣化度的关系

Fig. 8 Relationship between the number of freeze-thaw cycles and deterioration degree

冻结过程中，盐分以结晶形式析出，孔隙水形成冰晶，二者临时起到骨架支撑作用；而融化阶段，冰晶消融、盐晶复溶，伴随水盐动态迁移，导致孔隙结构恶化、颗粒离散化加剧，最终削弱土体骨架承载能力，使劣化度上升、黏聚力显著下降[19]。随着冻融循环次数持续累积，土体结构破坏渐趋极限，难以发生显著变化，劣化度增幅放缓，黏聚力亦趋于稳定。

内摩擦角随冻融循环次数增加总体呈减小趋势：循环次数较少时波动变化，循环次数较多后转为持续衰减。这是由于冻胀作用不断改变大颗粒受力状态，使土中大颗粒发生碎裂，粒径分布向细粒级迁移；细颗粒伴随水分迁移填充孔隙，短期内增强颗粒间接触与咬合摩擦，可使内摩擦角暂时升

高。但随着冻融循环次数持续增加，土体内部经历多次水-冰相变与盐晶重分布，孔隙和裂隙扩展并连通，颗粒间连结力被削弱，最终导致内摩擦角出现明显下降趋势[6]。

2.4　邓肯-张模型参数研究

邓肯-张模型是 1970 年由 Duncan 等提出的岩土工程领域经典非线性弹性本构模型[20-21]。该模型基于三轴试验建立，通过数学推导确定相关参数，其基本形式为：

$$\sigma_1-\sigma_3=\frac{\varepsilon}{a+b\varepsilon} \tag{2}$$

式中：ε 为土的轴向应变；$\sigma_1-\sigma_3$ 为土的主应力差；a、b 均为拟合参数。

2.4.1　切线模量 E_i 与破坏比 R_f

基于式(2)所建立的本构模型，土体在荷载作用下的偏应力-应变关系可转化为线性形式：

$$\frac{\varepsilon}{\sigma_1-\sigma_3}=a+b\varepsilon \tag{3}$$

为了减少人为因素影响，降低试验数据的偶然误差，本文采用 Duncan 等[21]的经验公式求解 a、b。引入应力水平 S，其定义为：

$$S=\frac{\sigma_1-\sigma_3}{(\sigma_1-\sigma_3)_f} \tag{4}$$

选取应力水平 S=70%($S_{70\%}$)和 S=95%($S_{95\%}$)两点的偏应力和轴向应变建立线性回归方程，该方程的截距与斜率即为参数 a、b。以经历 2 次冻融循环的试样为例，绘制 ε-$\varepsilon/(\sigma_1-\sigma_3)$ 关系曲线，各围压下的线性关系结果如图 9 所示。

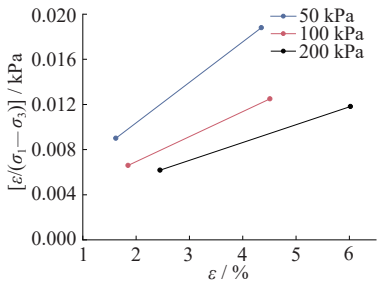


图 9　ε-$\varepsilon/(\sigma_1-\sigma_3)$ 关系曲线

Fig. 9　Relation curves of ε-$\varepsilon/(\sigma_1-\sigma_3)$

在常规三轴试验中，一般围压为常数，偏应力-应变曲线的切线模量 E_t 计算公式为：

$$E_t=\frac{\mathrm{d}(\sigma_1-\sigma_3)}{\mathrm{d}\varepsilon}=\frac{a}{(a+b\varepsilon)^2} \tag{5}$$

在三轴试验加载初期，试样处于弹性阶段，即当应变为 0 时，$E_t=E_i$，初始切线模量：

$$E_i=\lim_{\varepsilon\to 0}\frac{a}{(a+b\varepsilon)^2}=\frac{1}{a} \tag{6}$$

由式(1)可知，当 $\varepsilon\to\infty$ 时，理想双曲线关系渐进线所对应的偏应力即为极限主应力差 $(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$：

$$(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}=\lim_{\varepsilon\to\infty}\frac{\varepsilon}{a+b\varepsilon}=\frac{1}{b} \tag{7}$$

联合式(5)、(6)、(7)，即可求得 E_i 与 $(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$。不同围压及冻融循环次数下的拟合参数 a、b、E_i 和 $(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$ 值列于表 2。

表 2　不同冻融循环作用下邓肯-张模型参数

Table 2　Duncan-Chang model parameters under different freeze-thaw cycles

冻融循环次数	σ_3 /kPa	a /($\times10^{-3}$)	b /($\times10^{-3}$)	E_i /kPa	$(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$ /kPa
0	50	3.34	3.23	311.53	307.69
	100	2.80	2.04	357.14	588.24
	200	2.46	1.51	456.62	649.35
2	50	3.26	3.58	313.48	278.55
	100	2.69	2.27	434.78	420.17
	200	2.43	1.56	434.78	632.91
4	50	3.14	3.78	271.74	271.74
	100	2.62	2.38	384.62	414.94
	200	2.41	1.63	384.62	625.00
6	50	2.97	3.79	336.70	263.85
	100	2.5	2.46	378.79	409.84
	200	2.32	1.71	408.16	591.72
8	50	2.57	3.95	400.00	251.89
	100	2.46	2.55	400.00	395.26
	200	2.21	1.71	497.51	574.71
10	50	2.56	4.18	313.48	242.72
	100	2.39	2.72	336.70	378.79
	200	2.15	1.74	425.53	574.71

分析表 2 数据可知，在相同冻融循环次数下，E_i 与围压呈正相关。冻融循环 0 次时，E_i 从 311.53 kPa 增至 456.62 kPa，增幅达 46.6%；冻融循环增至 10 次时，E_i 从 313.48 kPa 增至 425.53 kPa，增幅降至 35.7%。E_i 的增幅随冻融循环次数增加呈下降趋势，其主要原因为：冻融 0 次时土体结构完好，围压增大可有效促使颗粒重新排列、压缩孔隙，从而显著增强颗粒间摩擦力与咬合力，使 E_i 对围压变化敏感，增幅显著。随着冻融循环次数增加，土体内部裂隙网络逐渐发育、孔隙率增大、结构松散化，即便围压增大，受损颗粒间也难以形成有效紧密排列，围压对土体刚度的强化作用被削弱，导致 E_i 增幅降低。

$(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$随冻融循环次增加呈逐渐减小的趋势(图10)。采用Logistic回归模型对该变化趋势进行拟合,拟合相关系数均大于0.96,表明拟合效果较好。

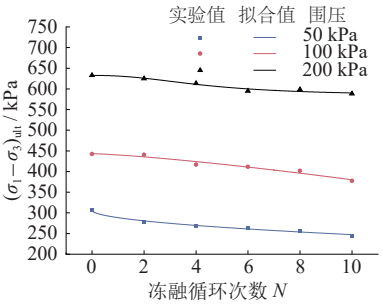


图10 冻融循环次数与$(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$变化曲线

Fig. 10 Variation curves of the number of freeze-thaw cycles with $(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$

在常规三轴试验中,试样通常达到理论极限强度前即发生破坏,导致极限偏应力$(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$难以直接测定。为此,引入破坏比$R_f$作为强度评价指标,其表达式为:

$$R_f=\frac{(\sigma_1-\sigma_3)_f}{(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}} \tag{8}$$

式中:$(\sigma_1-\sigma_3)_f$为试样破坏时的偏应力(即破坏强度)。对各围压下的R_f计算结果取平均值,作为该冻融循环次数下的最终取值,结果列于表3。R_f随冻融循环次数增加在0.959~0.909范围内波动,表明冻融循环作用使试样剪切破坏时的强度逐渐趋近于极限偏应力值。

表3 冻融循环作用下破坏比R_f取值

Table 3 Values of R_f under freeze-thaw cycles

围压/kPa	冻融循环次数					
	0	2	4	6	8	10
50	0.958	0.923	0.923	0.956	0.938	0.970
100	0.985	0.910	0.941	0.923	0.914	0.941
200	0.934	0.894	0.911	0.907	0.882	0.874
平均值	0.959	0.909	0.925	0.929	0.911	0.928

2.4.2 参数K与n

Janbu[22]于1963年通过试验研究建立了E_i与围压之间的经验关系[20]:

$$E_i=KP_a\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^n \tag{9}$$

式中:K、n均为常数;P_a为标准大气压力,取值为101.3 kPa。

以冻融循环6次后的试样为例,绘制$\lg(E_i/P_a)$与$\lg(\sigma_3/P_a)$的关系曲线,结果如图11所示。计算不同冻融循环次数下的参数K与n,计算结果列于表4。

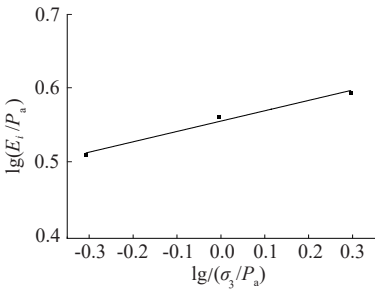


图11 $\lg(E_i/P_a)$-$\lg(\sigma_3/P_a)$曲线

Fig. 11 Relationship curve between $\lg(E_i/P_a)$ - $\lg(\sigma_3/P_a)$

表4 冻融循环作用下K、n取值

Table 4 Values of K and n under freeze-thaw cycles

参数	冻融循环次数					
	0	2	4	6	8	10
$\lg(K)$	0.575	0.565	0.555	0.547	0.544	0.526
K	3.754	3.673	3.588	3.526	3.498	3.351
n	0.276	0.236	0.251	0.139	0.133	0.130
R^2	0.97	0.99	0.83	0.98	0.98	0.97

在冻融循环过程中,参数n呈先增大后减小的非线性变化,变化范围为0.129 1~0.275 8,整体变化幅度为53.2%,表明其对冻融循环作用较为敏感。当冻融循环超过6次后,n值由0.138 8降至0.129 1,变化趋缓并逐渐稳定。参数K则表现出随冻融循环次数增加而衰减的特性:在冻融循环由0次增至10次的过程中,K值降低了10.47%。采用线性回归模型拟合K值与冻融循环次数的关系,结果如图12所示。K值与冻融循环次数呈显著线性负相关关系,其函数关系式见式(10),相关系数R^2为0.96。

$$K=-0.037n+3.751 \tag{10}$$

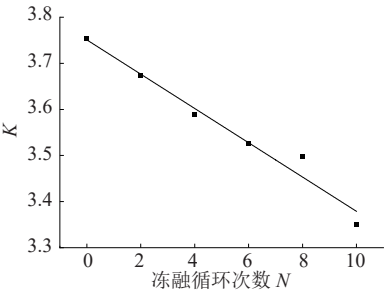


图12 K与冻融循环次数关系曲线

Fig. 12 Relationship curve between K and freeze-thaw cycles

2.4.3　邓肯-张模型的修正与验证

为建立模型参数 a、b 与围压、冻融循环次数之间的定量关系，基于表 4 数据，利用 SPSS 软件进行多元线性回归分析，得到回归方程式(11)和式(12)。回归结果显示，a 的相关系数 R^2 为 0.86，b 的 R^2 为 0.88，均接近 1，表明回归方程的拟合效果极佳。

$$a = 3.39 \times 10^{-3} - 4.67 \times 10^{-5} X_1 - 4.34 \times 10^{-6} X_2 \tag{11}$$

$$b = 3.84 \times 10^{-3} + 5.72 \times 10^{-5} X_1 - 1.31 \times 10^{-5} X_2 \tag{12}$$

式中：X_1 为冻融循环次数；X_2 为围压；a、b 均为回归系数。回归系数表明，a 与冻融循环次数、围压均呈负相关，而 b 与冻融循环次数呈正相关，与围压呈负相关。

将式(11)、式(12)代入式(2)，得到考虑冻融循环与围压影响的修正邓肯-张模型：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{f(a, X_1, X_2) + f(b, X_1, X_2)} \tag{13}$$

为验证修正模型的可靠性，将模型计算值与图 3 中的实测数据进行对比，结果如图 13 所示(以 200 kPa 围压为例)。对比表明，修正后的邓肯-张模型能较好地拟合不同冻融循环次数下的偏应力-应变曲线，具有较高精度，证明该模型能够有效反映围压与冻融循环共同作用下滨海盐渍土的偏应力-应变规律。

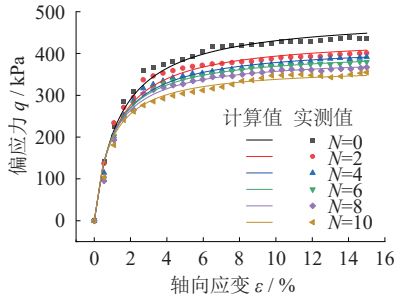


图 13　模拟值与试验值对比

Fig. 13　Comparison between simulated and experimental values

3　结论

本文研究了冻融循环次数对渤海湾西岸地区滨海盐渍土物理力学特性及其邓肯-张模型参数的影响，主要得到以下结论：

(1) 不同冻融循环条件下，滨海盐渍土的偏应力-应变曲线均表现为应变硬化型。随围压升高，土体强度衰减率由 19.7% 降低至 12.0%，表明围压对冻融循环诱发的土体劣化具有一定的抑制作用。

(2) 黏聚力随冻融循环次数增加呈指数型衰减趋势，由 64.95 kPa 减小至 46.63 kPa，可采用 Exp-Dec 函数进行拟合；内摩擦角呈波动式减小。冻融循环增至 4 次后，试样表面出现明显裂纹和碎屑，黏聚力劣化度达 27%，劣化速率较快；冻融循环增至 6～10 次时，裂纹逐渐扩展并贯通，此阶段黏聚力劣化度仅变化 1.5%，劣化速率明显放缓。

(3) 邓肯-张模型参数受冻融循环影响显著：初始切线弹性模量 E_i 的增幅由 46.6% 降低至 35.7%，呈下降趋势；极限偏应力 $(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$ 随冻融循环次数增加逐渐减小，可采用 Logistic 回归模型进行拟合；参数 K 值呈线性减小，n 值波动幅度较大；破坏比 R_f 在 0.959～0.909 区间内波动。

(4) 基于试验数据，建立考虑冻融循环次数与围压双重影响的邓肯-张修正模型。参数 a、b 的多元线性回归方程相关系数 R^2 分别达 0.86 和 0.88，表明模型具有较高的可靠性，能够准确反映不同围压与冻融循环作用下滨海盐渍土的变形和强度特性。

(5) 本文仅探讨了冻融循环作用下滨海盐渍土的静力特性及邓肯-张参数的影响。鉴于道路工程中路基长期承受车辆动荷载作用，后续将进一步开展冻融循环条件下滨海盐渍土的动力学特性研究。

参考文献(References)

[1] 柴寿喜，杨宝珠，王晓燕，等. 渤海湾西岸滨海盐渍土的盐渍化特征分析[J]. 岩土力学，2008，29(5)：1217-1221，1226.
Chai Shouxi，Yang Baozhu，Wang Xiaoyan，et al. Analysis of salinization of saline soil in west coast area of Bohai Gulf[J]. Rock and Soil Mechanics，2008，29(5)：1217-1221，1226.

[2] 赵玉洁，宋国辉，徐明娥，等. 天津滨海区 50 年局地气候变化特征[J]. 气象科技，2004，32(2)：86-89，96.
Zhao Yujie，Song Guohui，Xu Ming'e，et al. Analysis of local climate changes in Tianjin coastal area in last 50 years[J]. Meteorological Science and Technology，2004，32(2)：86-89，96.

[3] 姚仰平，张丙印，朱俊高. 土的基本特性、本构关系及数值模拟研究综述[J]. 土木工程学报，2012，45(3)：127-150.
Yao Yangping，Zhang Bingyin，Zhu Jungao. Behaviors，constitutive models and numerical simulation of soils[J]. China Civil Engineering Journal，2012，45(3)：127-150.

[4] 殷溥隆，李艳，田勇，等. 冻融循环作用下黄土基水泥土三轴压缩力学特性及本构模型研究[J]. 材料导报，2025，39(21)：

60-67.
Yin Pulong, Li Yan, Tian Yong, et al. Study on triaxial compressive mechanical properties and constitutive model of loess-based cemented soil under freeze-thaw cycle [J]. Materials Reports, 2025, 39(21): 60-67.

[5] 胡田飞, 刘建坤, 常丹, 等. 冻融循环对粉质黏土力学性质的影响及邓肯-张模型[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 298-307.
Hu Tianfei, Liu Jiankun, Chang Dan, et al. Influence of freeze-thaw cycling on mechanical properties of silty clay and Ducan-Chang constitutive model [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 298-307.

[6] 包卫星, 吴倩, 吴谦, 等. 冻融循环作用下伊犁盐渍化黄土力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(7): 1775-1787.
Bao Weixing, Wu Qian, Wu Qian, et al. Mechanical properties of Ili salinized loess under freeze-thaw conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(7): 1775-1787.

[7] 包卫星, 李伟, 毛雪松, 等. 冻融循环条件下盐渍化风积沙力学特性[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(6): 114-124.
Bao Weixing, Li Wei, Mao Xuesong, et al. Mechanical properties of salinized aeolian sand under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(6): 114-124.

[8] Liu J K, Chang D, Yu Q M. Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of a silty sand [J]. Engineering Geology, 2016, 210: 23-32.

[9] 杨震, 冀鸿兰, 李昊, 等. 冻融作用下黄河内蒙古段砂质粉土强度影响因素及回归模型研究[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(11): 137-147.
Yang Zhen, Ji Honglan, Li Hao, et al. Investigating influence factors and developing regression model for sandy silt strength in Inner Mongolia section of Yellow River under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(11): 137-147.

[10] 阮永芬, 蔡斯, 李荣玉, 等. 滇池湖相沉积泥炭土参数测定与剪切特性研究[J]. 地震工程学报, 2024, 46(2): 259-268.
Ruan Yongfen, Cai Si, Li Rongyu, et al. Parameter determination and shear characteristics of lacustrine sedimentary peat soil in Dianchi Lake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(2): 259-268.

[11] 王云, 李辉, 孙渊, 等. 玄武岩和聚丙烯混合纤维改良西宁黄土力学和热学特性分析[J]. 地震工程学报, 2025, 47(5): 1138-1148.
Wang Yun, Li Hui, Sun Yuan, et al. Mechanical and thermal properties of Xining loess reinforced by basalt-polypropylene hybrid fiber [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2025, 47(5): 1138-1148.

[12] 余云燕, 崔文豪, 罗崇亮, 等. 红层泥岩填料的力学特性及本构模型研究[J]. 地震工程学报, 2024, 46(1): 1-9.
Yu Yunyan, Cui Wenhao, Luo Chongliang, et al. Mechanical properties and constitutive model of the red mudstone fill material [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(1): 1-9.

[13] 李广信. 高等土力学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2016.
Li Guangxin. Advanced soil mechanics seconf edition [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.

[14] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准 [S].
GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method [S].

[15] JTG/T 3331-08—2022 盐渍土地区公路路基设计与施工技术细则[S].
JTG/T 3331-08—2022 Technical guidelines for design and construction of highway subgrade in saline scil region [S].

[16] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范 [S].
GB 50007—2011 Code for design of building foundation [S].

[17] JTG D30—2015 公路路基设计规范 [S].
JTG D30—2015 Specifications for design of highway subgrades [S].

[18] Kim W H, Daniel D E. Effects of freezing on hydraulic conductivity of compacted clay [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(7): 1083-1097.

[19] 廖昕, 范茂基, 陈治良, 等. 冻融循环下罗布泊盐渍土的累积变形特性研究[J]. 工程地质学报, 2024, 32(3): 800-810.
Liao Xin, Fan Maoji, Chen Zhiliang, et al. Accumulative deformation characteristics of saline soils in Lop Nur under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(3): 800-810.

[20] 冯卫星, 常绍东, 胡万毅. 北京细砂土邓肯-张模型参数试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 327-330.
Feng Weixing, Chang Shaodong, Hu Wanyi. Experimental study on parameters of Duncan-Chang model for Beijing fine sandy soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(3): 327-330.

[21] Duncan J M, Chang C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(SM5): 1629-1653.

[22] Janbu N. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests [C]//Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Wiesbaden: Deutsche Gesellschaft für Erd-und Grundbau, 1963: 19-25.

(本文编辑:张向红)