

引用格式: 吴鄂, 李明俐, 张丰述, 杨帆, 王纳纳. 藏南地区冰碛土在冻融循环下动力特性劣化规律[J]. 山地学报, 2025, 43(5): 709-722.
WU E, LI Mingli, ZHANG Fengshu, YANG Fan, WANG Nana. Degradation law of dynamic properties of glacial till in southern Xizang of China under freeze-thaw cycles [J]. Mountain Research, 2025, 43(5): 709-722.

藏南地区冰碛土在冻融循环下动力特性劣化规律

吴鄂^{1,2,3}, 李明俐^{4*}, 张丰述^{1,2,3}, 杨帆^{5,6}, 王纳纳^{1,2,3}

(1. 四川省地质环境调查研究中心, 成都 610036; 2. 四川省九一五建设集团有限公司, 成都 620020;
3. 四川省地质灾害防治工程技术研究中心, 成都 610036; 4. 成都理工大学 地质灾害与环境保护国家重点实验室, 成都 610054
5. 四川省金属地质调查研究所, 成都 611700; 6. 四川省蜀水地质环境研究有限责任公司, 成都 611700)

摘要: 冻融循环与动荷载的耦合作用导致冰碛土动力特性持续劣化, 严重威胁寒区交通基础设施的长期稳定性, 但其耦合损伤机制尚未明晰。本研究以青藏高原藏南奴觉沟典型冰碛堤为对象, 通过控制排水条件模拟天然冻融过程, 对表层土与 30 cm 深度冰碛土开展冻融-动三轴耦合试验, 系统揭示冻融循环次数 ($N=0\sim 10$) 与动荷载共同作用下土体动力参数的演化规律。主要结论如下: (1) 动应力-动应变滞回曲线呈非对称塑性主导特征, 表现出显著滞后性、非线性及应变累积效应, 土体结构损伤持续累积 35%, 变形抵抗能力衰减速率达 $-10\%/kPa$ 。(2) 冻融前期 ($N\leq 5$) 动力参数劣化最为剧烈。冻融 5 次循环后, 动弹性模量 (E_d) 与动剪切模量 (G_d) 分别衰减 21% 和 30%, 当循环至 $N=10$ 时, E_d 损伤率高达 90.81%, 土体已无法有效抵抗变形。(3) 阻尼比 (λ) 在 20 次冻融后累计降幅达 25.21%, 其衰减速率由初期的每周期 2.85% 降至后期的每周期 0.24%, 表明土体通过颗粒摩擦耗散振动能量的能力持续衰退, 导致更多能量转化为结构破坏功。研究成果可为青藏高原高寒区抗震工程设计和地质灾害监测预警提供关键参数依据。

关键词: 冰碛土; 冻融-动荷载耦合; 动力参数劣化; 滞回特性; 阻尼比

中图分类号: TU41

文献标志码: A

冰碛土是冰川地质作用的典型产物, 其形成过程历经冰川搬运、磨蚀及堆积的复杂物理化学作用^[1-2], 呈现出级配宽、结构单元松散、胶结强度弱等显著区别于常规土体的工程特性。在高寒地区, 季节性冻融循环通过双重机制持续劣化其工程性能: 一方面, 冻融过程中冰-水相变引发土颗粒间水膜体积变化, 导致孔隙结构发生“蜂窝状”重构^[3]; 另一方面, 反复冻融削弱土颗粒间的胶结作用, 使微观结构产生不可逆损伤^[4]。这种动态劣化过程不仅显著降低土体的动力强度参数, 更对青藏铁路等寒区交通基础设施的长期稳定性构成严峻挑

战^[5-7], 尤其在动荷载活跃区域(如铁路路基), 冻融损伤与循环荷载的耦合作用可能引发土体动力响应的突发性失稳^[8], 亟需深入揭示其耦合劣化机制。

冻融循环对冰碛土静力强度参数的影响机制已较为明晰。实验发现, 在冻融循环下, 冰碛土黏聚力损失占总强度损失的 73%^[9], 而内摩擦角在冻融循环 5 次后下降速率达每周期 0.8° ^[10]。现有研究系统揭示了冻融对静力参数(抗剪强度、压缩性、黏聚力、内摩擦角等)的削弱机理^[11-12], 相关成果有效支撑了冻土区静态工程设计。

然而, 在动力特性研究方面, 目前仍存在显著的

收稿日期 (Received date): 2025-05-08; 改回日期 (Accepted date): 2025-09-19

基金项目 (Foundation item): 四川省科技计划 (2025YFNH0008)。[Sichuan Provincial Science and Technology Plan Funding (2025YFNH0008)]

作者简介 (Biography): 吴鄂 (1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 地质灾害。[WU E (1983-), male, M. Sc., senior engineer, research on geological disasters] E-mail: 645991204@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 李明俐 (1990-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 边坡灾害防治。[LI Mingli (1990-), female, Ph. D., associate professor, research on slope disaster prevention and control] E-mail: limingli18@cdut.edu.cn

研究缺口:(1) 现有动力试验多基于未经历冻融过程的“原状土”,忽略了冻融损伤对土体微观结构的改造效应^[13-15]; (2) 动力荷载研究集中于列车轴载引起的间歇性荷载^[16-18],缺乏对冻融-动荷载耦合路径的模拟; (3) 动力强度参数研究聚焦于动模量与阻尼比,而冻融循环-动荷载耦合作用下动抗剪强度阈值、动剪切模量衰减律等关键参数的演变规律尚未建立^[19]。

本研究选取青藏高原藏南地区奴觉沟冰碛堤作为研究对象,针对不同类型冰碛土(表层土和30 cm深度冰碛土),分别采用不同的排水条件控制模拟天然排水状态,开展室内土动三轴试验,探究冻融循环次数(6水平)、围压(3水平:100/150/200 kPa)、剪切模式(Unconsolidated Undrained Test, UU/Consolidated Drained Test, CD)等6个关键变量对冰碛土动力特性的影响,分析冰碛土在微震-微震耦合作用下动应力-动应变曲线的演化特征,厘清动弹性模量、动剪切模量、动剪应变等土动强度参数在冻融-动力耦合作用下的劣化特性,探讨冻融损伤对土体非线性动力行为的耦合效应,以期为寒区工程抗震设计与灾害防控提供理论依据。

1 试样材料及试验方案

1.1 试样物料

青藏高原山南市错那市觉拉乡奴觉沟坐标位置为92°20'15"E、29°13'39"N,沟源处发育一处高风险冰湖,高程5060 m,冰碛堤一旦失稳,易形成冰湖溃决—山洪—泥石流灾害链的发生。本研究所用土样均取自该冰碛堤,取土深度分别为表层土和30 cm深度冰碛土,取土方式为开挖探槽并在中间预留方形土柱(15 cm × 15 cm),切削成型后套入取样盒中并用保鲜膜进行密封(图1),以防扰动和水分流失。表层土为降雨及湖水漫溢侵蚀作用形成的粗化层,为冰碛砂土($D_{50} = 0.03$ mm);冰碛堤内部30 cm

处为冰碛粉土($D_{50} = 0.25$ mm)。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[19]及筛分试验显示,两类冰碛土小于2 mm粒径颗粒的质量分数分别为74.2%和75.9% (>70.00%),满足动三轴试验要求,级配曲线见图2。室内土工试验测得的冰碛土基本物理力学参数见表1。



图1 冰碛土现场取样

Fig. 1 On-site soil extraction of glacial moraine

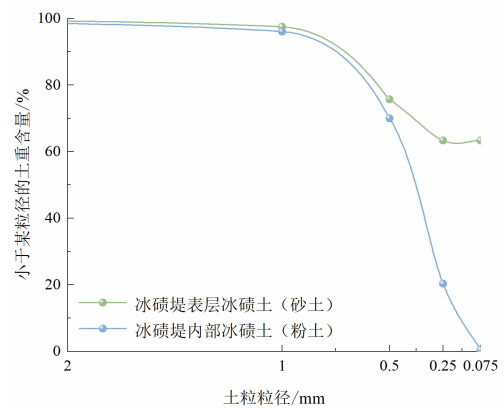


图2 冰碛土级配曲线

Fig. 2 Cumulative weight passing of glacial moraine

1.2 试验方案与组别设计

冰碛土的动力特性反映在其受动力荷载影响时的力学表现,例如动态应力与动态应变之间的关系,这也是构建动力本构模型的核心;动剪模量、阻尼比

表1 冰碛土基本物理力学参数

Tab. 1 Basic physical and mechanical parameters of glacial moraine

土体分类	取样位置	液限/%	塑限/%	含水率/%	密度/($g \cdot cm^{-3}$)	比重	孔隙比
冰碛砂土	表层土	14.3	0	10.7	1.77	2.66	0.728
冰碛粉土	30 cm 深处	16.5	6.1	17.3	1.88	2.69	0.67

等动力学参数,对于有关冰碛土的抗震分析和设计至关重要。本试验依托地质灾害与环境保护国家重点实验室,采用英国 GDS-DYNTTS 型微机控制振动三轴试验系统(图 3),该试验系统由 DYNTTS 硬件系统和 GDSLAB 软件构成。



图 3 GDS-DYNTTS 型微机控制三轴试验系统
Fig. 3 GDS-DYNTTS microcomputer-controlled dynamic triaxial test system

冰碛砂土与冰碛粉土动三轴试样为圆柱形,尺寸为直径 100 mm、高度 200 mm,试样分 5 层夯实,配得含水率与其初始含水率一致 (10.7% 和 17.3%)。本研究使用国产 TFD-200 型高低温冻融试验箱,控温精度 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度波动范围 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,冻融速度为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。为保证冻融循环温度与研究区历年气温一致,根据山南市气象局近十年数据(图 4),将冻融温度设定为低温 $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ (即冬季实测低温平均 $-15.8\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和高温 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ (即实测平均最高温 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$),冻结、融化时间均为 11 h,即 22 h 完成一个冻融循环。冻融循环前期对冰碛土强度的影响更加显著^[20-21],本试验将冻融循环次数分别设置为 0、2、5、10、15、20 次。

冰碛堤表面粗化层砂土内聚力较小且排水性良好,剪切方式采用不固结不排水剪(UU),冰碛堤深

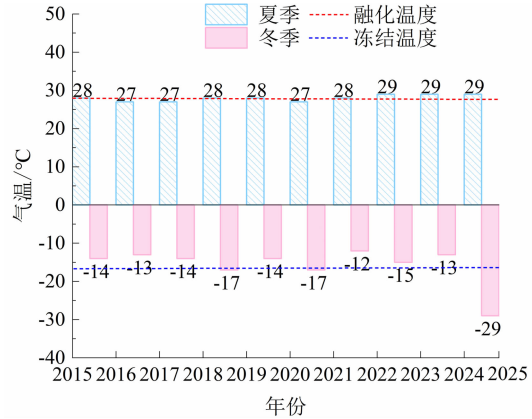


图 4 山南市近十年气象资料
Fig. 4 Temperature data of Shannan City in recent 10 years

部低塑性粉土采用固结排水(CD)的剪切方式。本研究仅考虑地震微震产生的震动荷载,李瑞山^[22]等通过分析地震动记录指出,浅层土体动力响应的主频多低于 5 Hz,而 1 Hz 可覆盖微震能量集中频段。结合振幅比资料测定的微震震源机制解^[23],土动三轴试验振动频率选取为 1 HZ,振幅为 75 N。考虑冰碛土的不同类型及不同埋深条件,分级围压分别设置为 100、150、200 kPa,轴向应变达到 15% 时,试验共计 36 个样品,组别设计如表 2 所示,冰碛土冻融循环下动力特性劣化试验流程如图 5 所示。

2 结果分析

2.1 冻融循环下冰碛土的动应力-动应变关系

在实验数据分析前,将冻融循环过程细分为冻融前期($N=0\sim 5$)、冻融中前期($N=5\sim 10$)、冻融中后期($N=10\sim 15$)、冻融后期($N=15\sim 20$)四个阶段。当周期性往复荷载施加在冰碛土试样上时,在动荷载加载初期土体未产生较大的塑性变形,冰碛土土体变形处于粘弹性变形阶段,由于土体材料的粘性,加载曲线与卸载曲线不重叠,形成了滞回曲线,一次动力循环加载在动应力-动应变曲线上呈现为一个封闭的滞回圈(图 6),为类椭圆形,以两

表 2 试验方案及组别设计
Tab. 2 Experimental design and grouping scheme

土体类型	剪切方式	饱和方式	围压 σ_3/KPa	冻融循环次数 N	试样个数/个
冰碛砂土	不固结不排水剪(UU)	非饱和	100,150,200	0,2,5,10,15,20	18
冰碛粉土	固结排水剪(CD)	饱和			18

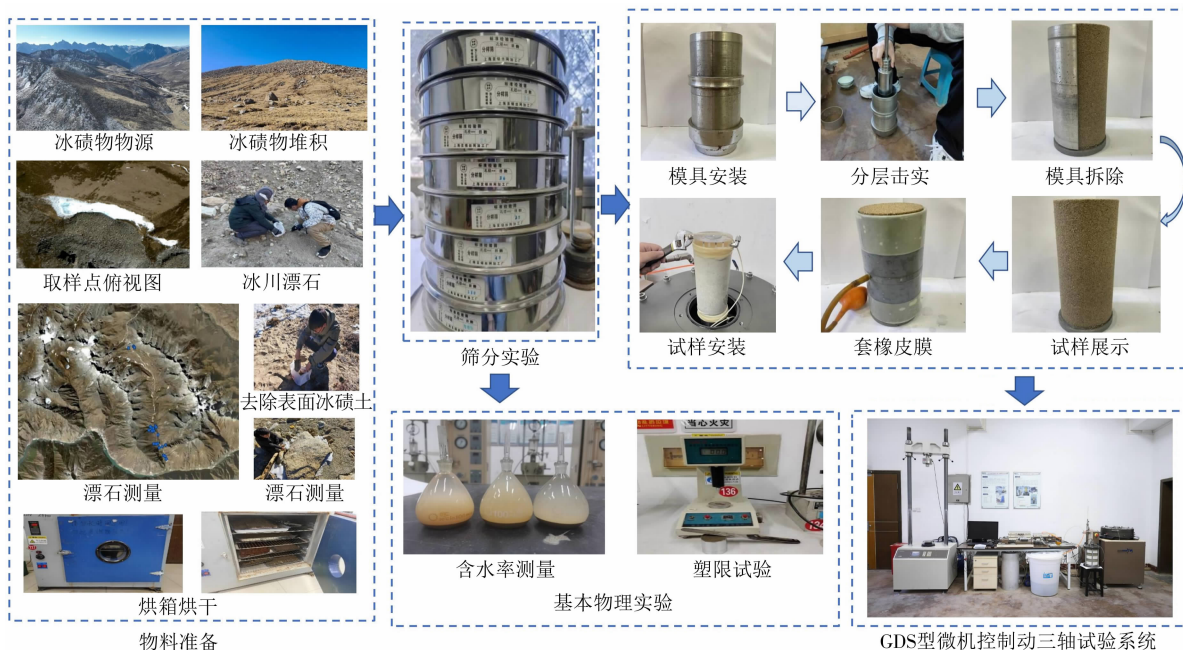
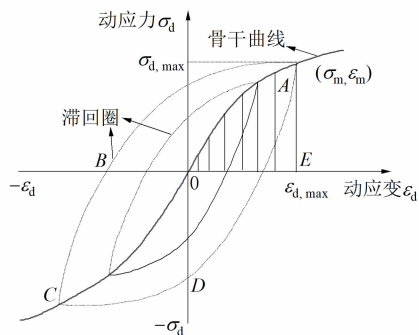


图 5 冰碛土冻融循环下动力特性劣化试验流程图

Fig. 5 Test flow chart of dynamic characteristics degradation of glacial moraine under freeze-thaw cycles

个荷载反向点所在直线为长轴,动应力-动应变关系曲线由于加卸载周期的往复运动呈现多个滞回圈。根据动三轴实验中分级加载所得数据,连接每一级荷载下的动应力幅值与动应变幅值的对应点,形成骨干曲线(图 7)。在周期性荷载作用下,滞回曲线呈以坐标原点为中心的、基本对称的闭合环状。

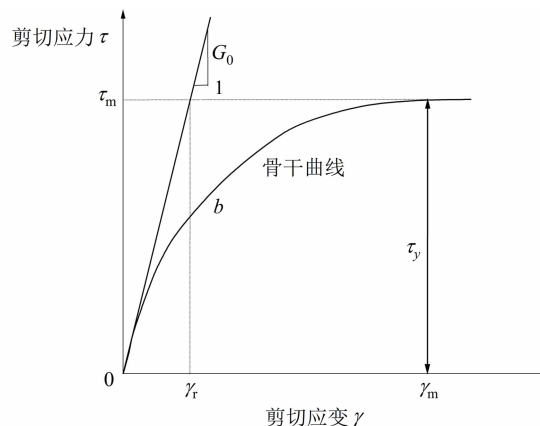
在 100 kPa 设定围压条件下,经历不同冻融循环次数(0、2、5、10、15、20 次)后的非饱和冰碛砂土试样,在固结排水剪切试验中的动应力-动应变关系曲线如图 8 所示。随冻融次数增加,动应力幅值



说明: $\sigma_{d,max}$ 为滞回圈轴向最大动应力(kPa); $\epsilon_{d,max}$ 为滞回圈轴向最大动应变(%)。

图 6 动应力-动应变曲线的单个滞回圈

Fig. 6 Single hysteresis loop of dynamic stress-strain curve



说明: G_0 为初始剪切模量(MPa); γ_r 为屈服应变(%); τ_y 为屈服应力(kPa); γ_m 为峰值应变(%); τ_m 为峰值应力(kPa); b 为模型参数。

图 7 动应力-动应变曲线的骨干曲线

Fig. 7 Backbone curve of dynamic stress-strain curve

(最大值和最小值)均降低,表明冻融循环作用对冰碛土的土体结构造成损伤,导致动应力幅值降低。滞回圈形态不对称,表征冰碛土在动循环荷载作用下以塑性变形为主。在循环动荷载加载过程中,动应力幅值降低,试样在塑性变形过程中,抵抗变形的能力变弱,即较小动应力即可达到与变形初期相同的动应变。在塑性变形阶段,滞回曲线不再封闭且形态不对称,中点向应变增大方向移动,显示出动应

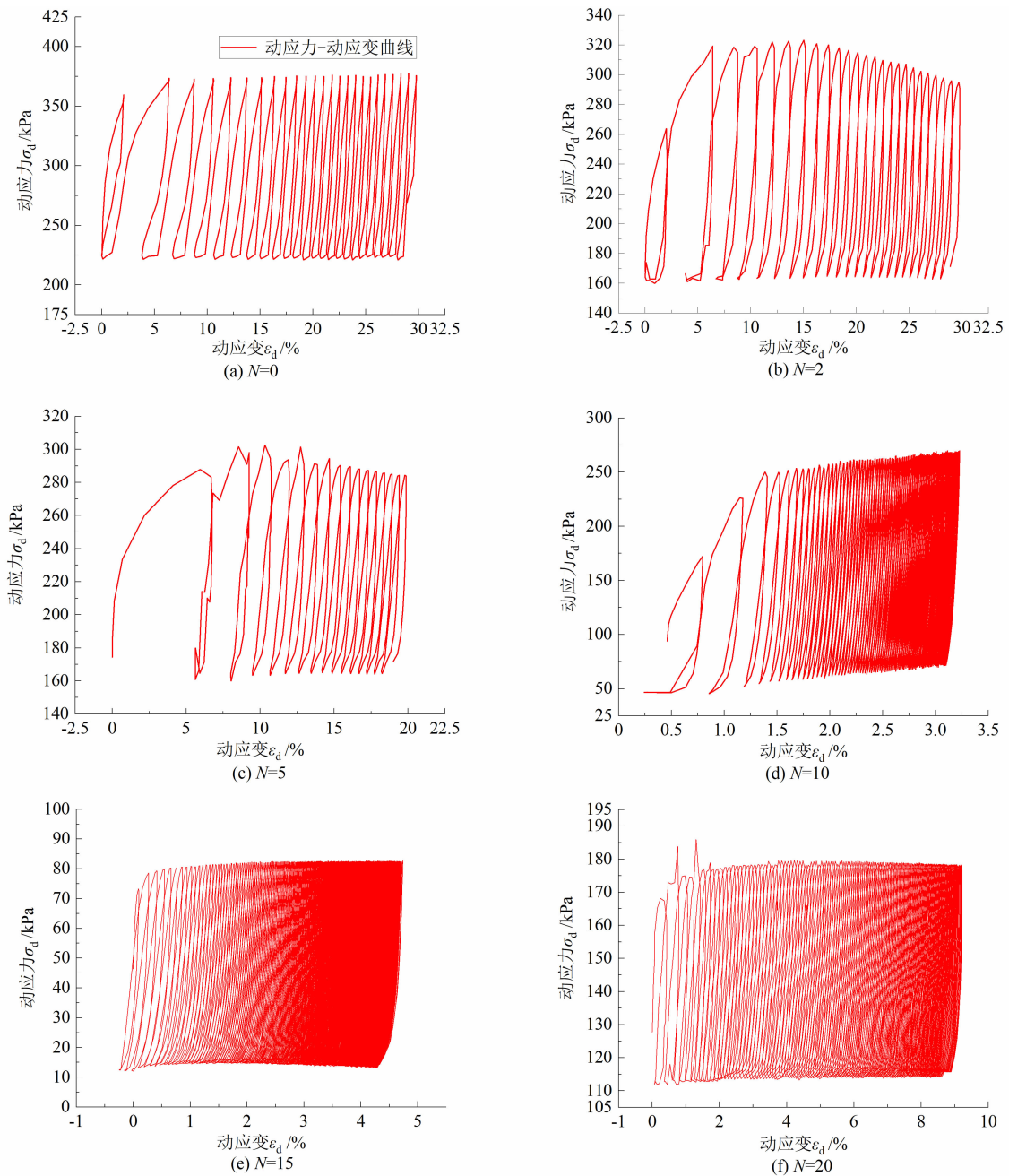


图8 不同冻融循环次数下动应力-动应变曲线 ($\sigma_3 = 100$ kPa 冰碛砂土)

Fig. 8 Dynamic stress-strain curves under different freeze-thaw cycles ($\sigma_3 = 100$ kPa moraine sand)

变的累积特性。这种滞后性、非线性和应变累积特性是冰碛土动应力-动应变曲线的主要特点。

2.2 冻融循环下冰碛土的动弹性模量

冰碛土动弹性模量是指在动力循环加载过程中,土体抵抗弹性变形的能力。Hardin 和 Drnevich^[24]等效线性模型(等效粘弹性线性模型)为土动力学中的本构模型,把冰碛土视为粘弹性介质,该方法利用动弹性模量等效值参数,来反映冰碛

土在动态应力与应变关系中的非线性特性。等效粘弹性线性模型考虑了平均面应力影响,具有较好的工程实用性,在相关领域得到了广泛应用。依据该模型,冰碛土的动弹性模量计算公式如下^[25]:

$$E_d = \frac{\sigma_{d,max} - \sigma_{d,min}}{\epsilon_{d,max} - \epsilon_{d,min}} \quad (1)$$

式中, E_d 为动弹性模量 (kPa); $\sigma_{d,min}$ 为滞回圈轴向最小动应力 (kPa); $\epsilon_{d,min}$ 为滞回圈轴向最小动应变

(%)。通过数个滞回圈动应力动应变最大、最小值来计算冰碛土动弹性模量,得到的平均值即为动弹性模量,计算所用滞回圈越多,结果越可靠(图9)。

图10为冰碛土动弹性模量与冻融循环次数关系曲线,为量化冰碛土各动力参数劣化规律,引入动力学参数损伤率,计算公式如下^[26]:

$$K_E = 1 - \frac{E_N}{E_0} \quad (2)$$

式中, K_E 为动弹性模量的损伤率; E_N 为冰碛土冻融循环 N 次后的动弹性模量; E_0 为未经冻融循环作用冰碛土动弹性模量参数值。

在冻融循环前期及中前期,动弹性模量迅速下降,其中冰碛砂土的动弹性模量损伤率高达90.81% ($N=10$),中后期和后期降幅仅0.3%/次 ($N=10 \sim 20$);冰碛粉土的动弹性模量损伤率高达82.85% ($N=5$),后期趋于稳定。这表明,在冻融循环前期和中前期 ($N=0 \sim 10$),冰碛土动强度性质发生迅速劣化;随冻融循环次数增加,冰碛土在动荷载作用下抵抗变形的能力变弱(图11)。冻融初期 ($N < 10$)以孔隙结构破坏为主,后期胶结物质逐渐流失殆尽,损伤进入平台期。冰碛砂土在冻融10次

后,动弹性模量下降速度急剧降低并趋于平缓,而冰碛粉土在冻融5次后,动强度特征参数动弹性模量劣化基本完成。这些结果表明,与冰碛粉土相比,冰碛砂土在冻融循环下动弹性模量的劣化相对滞后。根据文献^[27],青藏粉砂土的黏粒占比约为5%~8%,而本研究中冰碛砂土的黏粒占比低于3%。这种黏粒含量的差异导致青藏粉砂土在冻融过程中损伤速率较慢但累积损伤程度更深。反复冻融使冰碛土中黏粒-碎屑胶结点断裂(X-ray Powder Diffractometer, XRD显示伊利石含量减少12%)^[4],胶结弱化是导致动弹性模量非线性下降的主因。冻胀作用导致冰晶撑大孔隙(Scanning Electron Microscope, SEM显示孔径增大23%~45%)^[22],孔隙重构效应降低了土体密实度,直接削弱动弹性响应。

2.3 冻融循环下冰碛土的动剪切模量和动剪应变的衰减规律

动剪切模量变化是土体变形特性的重要参数,能够揭示出土体在受到动力影响时变形趋势的规律。引入泊松比后,动剪切模量与动弹性模量有如下关系^[28]:

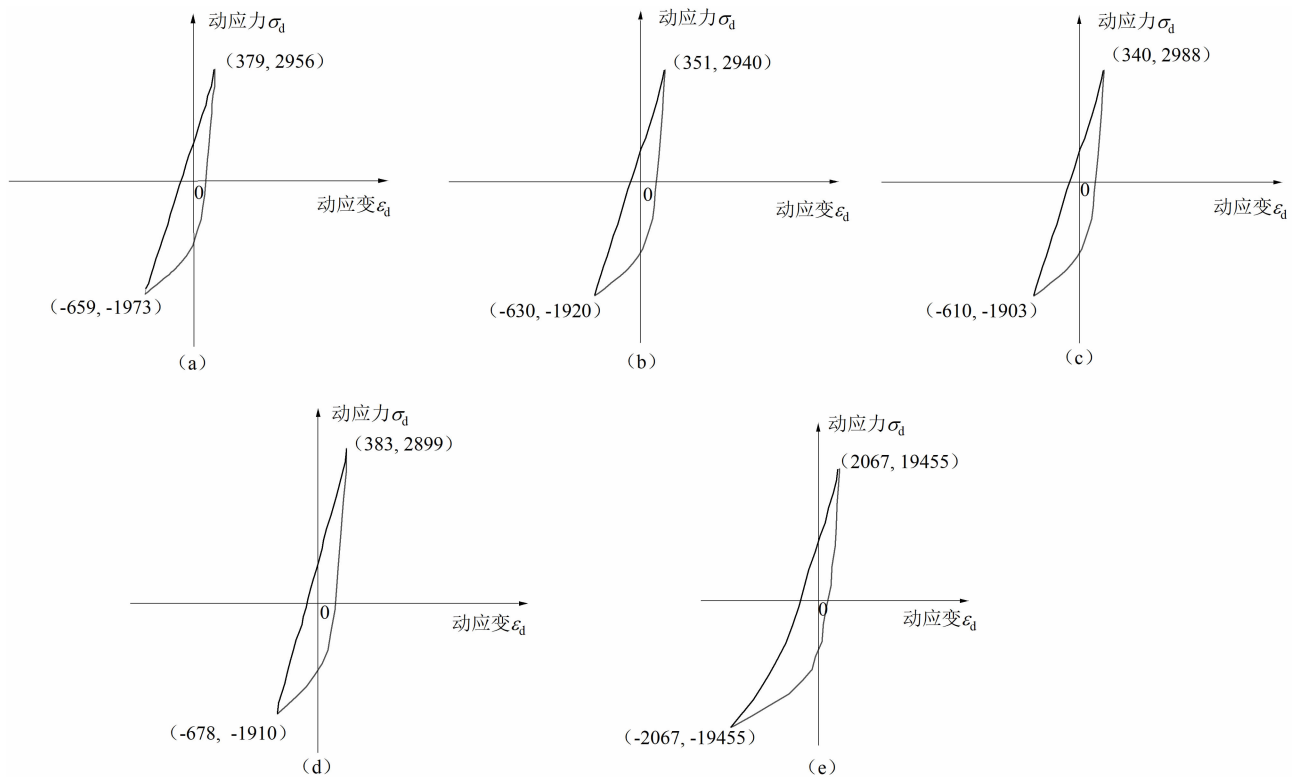


图9 试样弹性模量计算例样

Fig.9 Sample of elastic modulus calculation

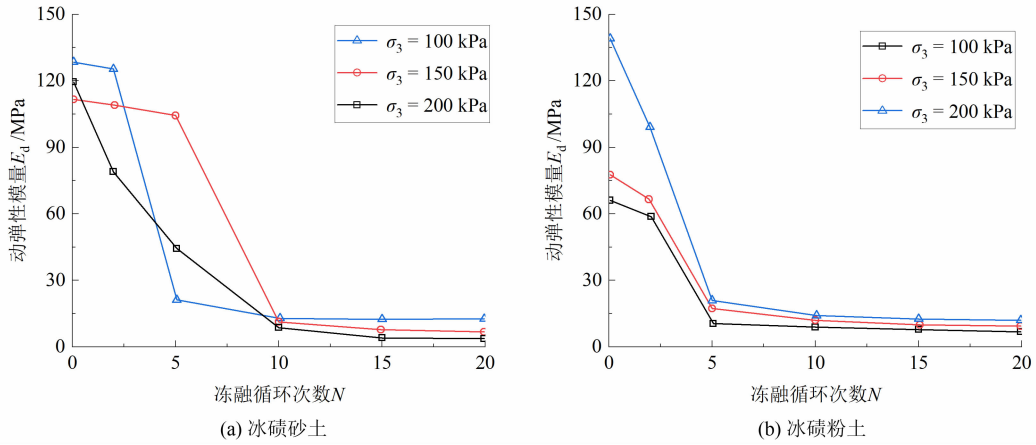


图 10 冰碛土动弹性模量与冻融循环次数变化曲线

Fig. 10 Change curve of dynamic elastic modulus of glacial moraine and freeze-thaw cycles

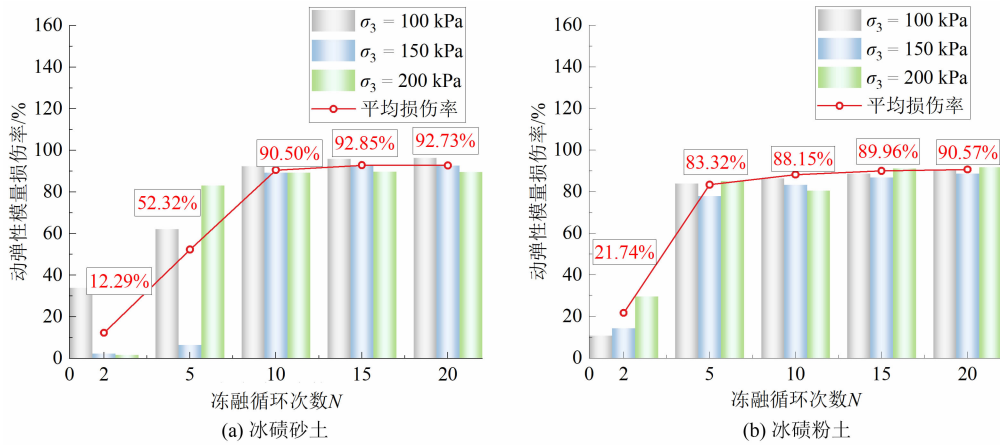


图 11 冰碛土动弹性模量损伤率与冻融循环次数变化曲线

Fig. 11 Change curve of dynamic elastic modulus damage rate and freeze-thaw cycles of glacial moraine

$$G_d = \frac{E_d}{2(1 + \mu_d)} \quad (3)$$

式中, G_d 为冰碛土的动剪切模量 (MPa); μ_d 为冰碛土的泊松比。根据不同类型土的泊松比参考值^[29], 冰碛砂土泊松比为 0.25, 冰碛粉土泊松比为 0.35。动剪切模量与动弹性模量存在定量关系。因此, 两者随冻融循环次数增加的变化趋势一致 (图 12)。

动剪应变的计算公式如下^[30]:

$$\gamma_d = \varepsilon_{d, \min} (1 + \mu_d) \quad (4)$$

式中, γ_d 为动剪应变 (%)。动剪应变参数的劣化特征在冻融循环中后期及后期 ($N = 10 \sim 20$) 表现明显, 由于冻融循环下冰碛土孔隙结构的演化在冻融循环前期及中前期 ($N = 0 \sim 10$) 已基本完成, 冻融后

期表现为动剪应变值的不断增大 (图 13)。

2.4 冻融循环下冰碛土的阻尼比

冰碛土的阻尼比是土体的实际阻尼系数与临界阻尼系数的比值, 它反映了在循环荷载作用下的能量耗散, 其物理意义是土体在一次循环荷载作用下损失的能量与其处于弹性阶段所具有能量的比值^[31]。通常采用滞回圈面积法来计算阻尼比, 选取每级荷载下具有代表性的某一振次, 绘制出其动应力应变滞回曲线。其中, 滞回圈面积表示一个周期系统损耗的能量 ΔW , 三角形 OAB 的面积 A_t 为线性弹性体达到相同应变峰值时所储存的能量 (图 14)。土体的阻尼比计算公式为^[32]:

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \frac{A_s}{A_t} \quad (5)$$

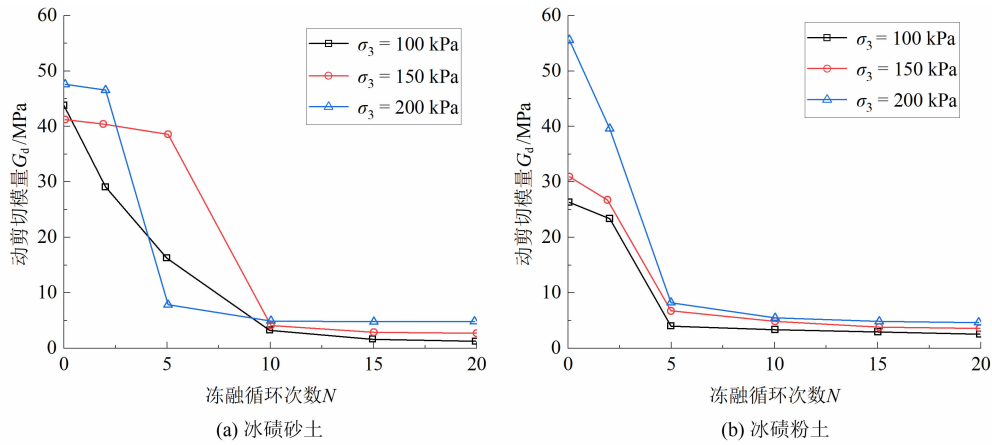


图 12 冰碛土在冻融循环作用下动剪切模量变化曲线

Fig. 12 Change curve of dynamic shear modulus of glacial moraine under freeze-thaw cycle

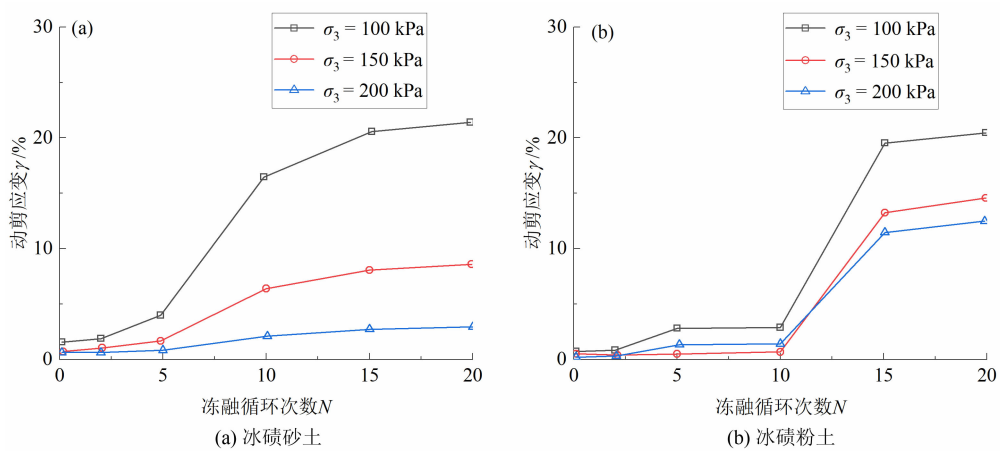


图 13 冰碛土在冻融循环作用下动剪应变关系曲线

Fig. 13 Dynamic shear strain relationship curve of glacial moraine under freeze-thaw cycle

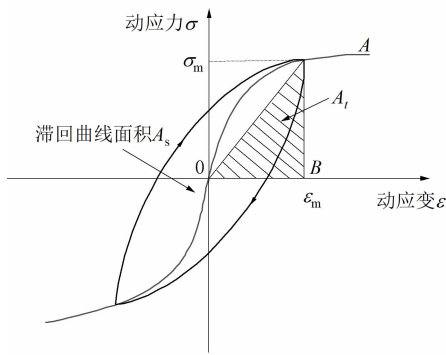


图 14 动应力-动应变滞回圈

Fig. 14 Dynamic stress-strain hysteresis loops

式中, λ 为阻尼比; A_s 为滞回曲线所包围的面积; A_t 为滞回圈顶点到原点连线与横轴所形成的直角三角形面积。

冰碛土的阻尼比随冻融循环次数增加均呈现线性下降趋势。初始未冻融时,在不同围压下,冰碛砂土阻尼比分别为 13.71%、21.30%、31.82%;经过 20 次循环后,阻尼比进一步降至 3.18% (累计降幅 10.53%)、4.53% (累计降幅 16.77%)、6.61% (累计降幅 25.21%)。整体表现为在冻融前期、中前期及中后期 ($N = 0 \sim 15$) 阻尼比下降速率较快,冻融循环后期 ($N = 15 \sim 20$) 下降趋缓 (图 15a)。这表明,冰碛砂土结构损伤在冻融后期 ($N > 15$) 接近稳定,残余阻尼比由骨架颗粒摩擦主导。冰碛粉土在初始未冻融时,在不同围压下,阻尼比分别为 13.86%、18.51%、20.35%;经过 20 次循环后,阻尼比进一步降至 1.4% (累计降幅 12.46%)、3.68% (累计降幅 14.83%)、10.08% (累计降幅 10.27%),后期降幅减缓主因骨架颗粒摩擦主导能量耗散。整体表现为

冻融初期 ($N=0 \sim 5$) 阻尼比下降速率较快, 中前期、中后期及后期 ($N=5 \sim 20$) 下降趋缓。这些表明, 冻融破坏效应在前期更强, 而冰碛粉土的能量耗散能力逐渐减弱。图 16 定量化展示了阻尼比损伤率的变化规律, 冻融 2 次时冰碛砂土与粉土的平均损伤率分别为 17.74% 和 28.16%; 冻融循环 5 次时冰碛砂土与粉土的平均损伤率分别为 44.85% 和 46.13%; 冻融循环 10 次时冰碛砂土与粉土的平均损伤率分别为 58.7% 和 60.18%; 冻融循环 15 次时冰碛砂土与粉土的平均损伤率分别为 75.51% 和 68.33%; 冻融循环 20 次时冰碛砂土与粉土的平均损伤率分别为增至 79.53% 和 73.05%, 曲线整体呈加速趋势上升。本研究区地处青藏高原藏南地区, 冻融速率较快 (平均 $3 \sim 5 \text{ }^\circ\text{C/h}$), 加速了冰-水相变引发的结构破坏, 砂土因颗粒松散导致损伤更剧

烈^[33]。图 15 的阻尼比衰减与图 16 的损伤率上升具有强相关性, 阻尼比下降幅度越大, 损伤率越高, 表明二者共同表征了冻融循环对土体动力特性的劣化作用。

采用数值回归分析方法, 建立了冰碛砂土与冰碛粉土在不同围压、冻融循环次数作用下的阻尼比多参数衰减模型 (图 17), 其表达式如下:

$$\lambda = 0.132 + 1.02 \times 10^{-4} N - 0.0185 \sigma_3 + 2.937 \times 10^{-6} N^2 + 5.077 \times 10^{-4} \sigma_3^2 \quad (6)$$

$$\lambda = 0.584 + 5.834 \times 10^{-4} N - 0.0139 \sigma_3 + 7.310 \times 10^{-6} N^2 + 4.237 \times 10^{-4} \sigma_3^2 \quad (7)$$

以上模型相关性系数 R^2 分别为 0.903 和 0.936, 均达到了较高的拟合度。研究结果可为不同地质环境对冰碛土动力学特性的影响提供可靠的参数指导和理论支撑。

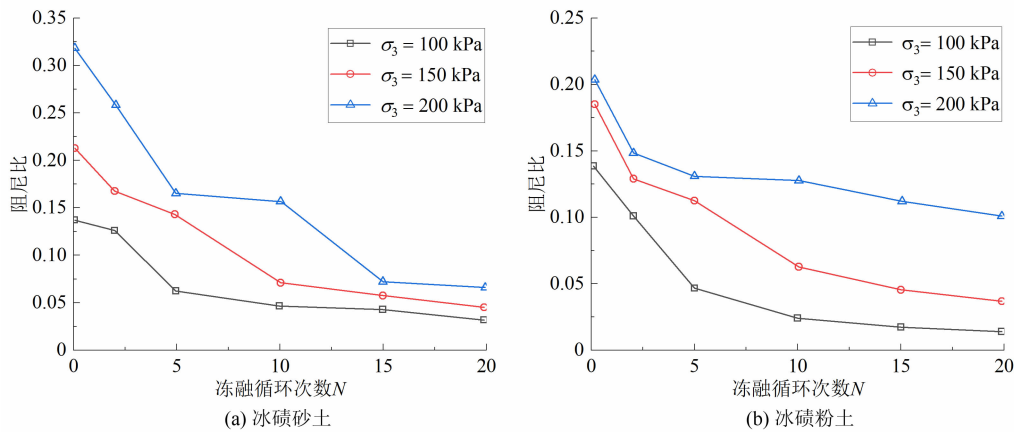


图 15 冰碛土冻融循环下阻尼比变化曲线

Fig. 15 Damping ratio curve of glacial moraine under freeze-thaw cycles

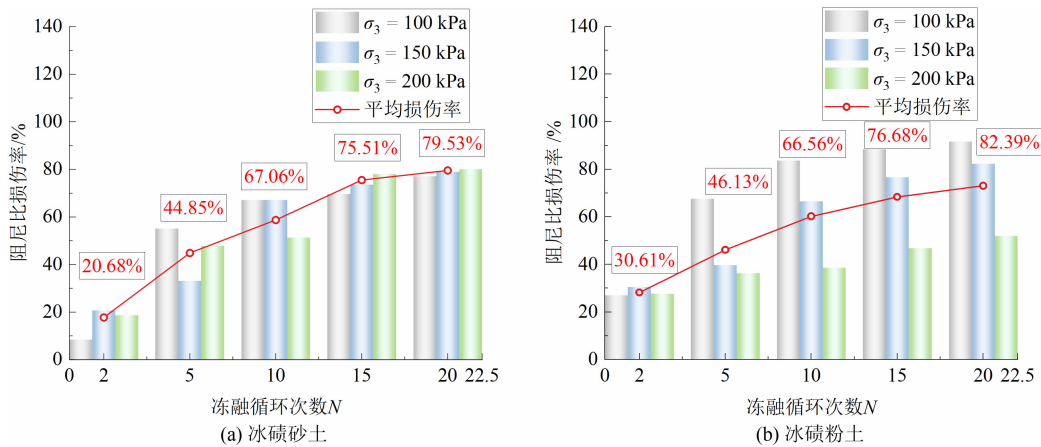


图 16 冰碛土冻融循环下阻尼比损伤率

Fig. 16 Damping ratio damage rate of glacial moraine under freeze-thaw cycle

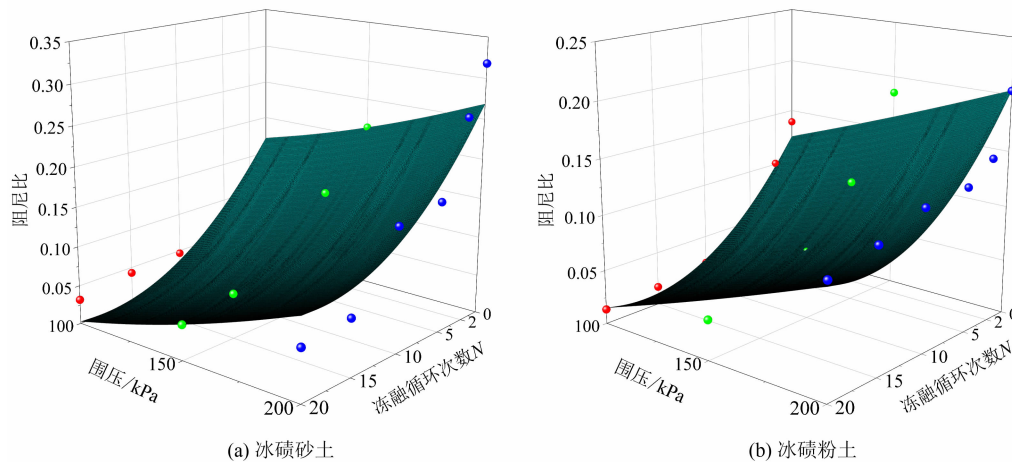


图 17 冰碛土阻尼比在不同围压、冻融循环次数作用下的多参数衰减模型

Fig. 17 A multi-parameter attenuation model of the damping ratio of glacial moraine under different confining pressures and the number of freeze-thaw cycles

3 讨论

在全球气候变暖背景下,冰川退缩使得冰川运动形成的冻结冰碛物开始受到季节性冻融循环和高原高频微震^[34]的叠加影响,冰碛土动力学特性持续劣化,导致冰碛堤失稳—冰湖溃决—洪水—泥石流—堵江高原灾害链频发。本研究以藏南地区奴觉沟冰碛堤为研究对象,对冰碛土进行野外现场取样,对其开展了不同冻融循环次数下的动三轴试验,获取了动应力-动应变关系,厘清了冰碛土在冻融循环和微震耦合作用下的动力学劣化特性,并最终提出了冰碛土阻尼比的衰减模型。

本研究开展了冰碛土在不同冻融循环次数下的动三轴实验,揭示了动力学特性在冻融循环前期($N=0\sim 5$)劣化明显的规律。与一般粉土或砂土相比,冰碛土因冰川搬运形成宽级配、无胶结、无分选等特点,粗颗粒($>2\text{mm}$)占比高(约 $25\%\sim 30\%$),颗粒形态不规则、棱角分明,导致其在动荷载作用下易发生颗粒重排与应力集中,滞回曲线表现出更强的非对称性和塑性累积。此外,冰碛土中黏粒含量低($<5\%$),胶结能力弱,冻融过程中更易发生结构崩塌。对比蒋婷婷^[21]等对青藏粉砂土的研究,其黏粒含量为 $5\%\sim 8\%$,冻融损伤速率虽较慢,但累积损伤更深,说明物质组成对冻融敏感性有显著影响。因此,冰碛土动力特性的快速劣化是“冰碛成因”所

决定的结构特征与“物质组成”共同作用的结果。相较于左志强^[22]等仅考虑静力荷载,其结论难以反映地震频发区的工程风险,本研究创新性地考虑了冻融循环与微震对冰碛土的叠加作用,填补了在冻融-动力耦合作用下冰碛土动力学特征参数劣化规律的空白。以往有关冰碛土动力荷载的研究多集中于列车间歇荷载对路基土体动力特性的影响^[18],而本研究聚焦于冻融循环-动荷载耦合作用下冰碛土动强度参数的劣化规律。此外,本研究还考虑了冰碛堤表面的粗化层,根据埋深条件对冰碛土进行了细致划分,最终得到了冰碛砂土与冰碛粉土阻尼比的衰减模型,研究结果可为冰碛堤稳定性分析和防护工程设计提供可靠的参数指导。

受室内试验条件及试样尺寸限制,本研究中最大冻融循环次数设置为20次,未来可通过延长冻融循环次数(超过100个循环),探索冰碛土动力参数在长期冻融条件下的演化规律,其是否会出现新的稳态阶段或加速劣化阶段。研究区冰碛堤的主要土体类型为冰碛砂土和冰碛粉土,对二者进行了小尺度的动三轴试验,然而通过对研究区其他地质体(碎屑坡、震裂山体、沟道物源)的冰碛物粒度统计表明,砾石土也是冰碛土的主要类型^[35]。本研究仅开展了一种应力路径条件下的土动三轴试验,但针对不同振动频率下,冰碛土动力特性的劣化规律,有待进一步全面探究。另外,本文所建立的阻尼比衰

减模型基于藏南地区典型冰碛砂土与粉土试验数据,但未考虑冰碛土化学成分(如盐和有机质)对冻胀和变质过程的潜在影响,其不同地区、不同冰碛成因土体中的推广性仍需结合区域地质与气候条件谨慎评估。未来可进一步开展有关粗粒土的大型动三轴试验,结合离散元数值仿真分析、扫描电镜(SEM)、核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)等研究方法,建立冰碛土在加载过程中裂纹演化特征与动力学参数衰减规律的定量关系,将参数和模型直接应用于工程实践,通过案例反演验证和修正室内试验得到的本构模型与参数,最终探明冰碛土动力特性劣化的微观机制,以更精准地支撑青藏高原重大工程建设和灾害防控实践。

4 结论

(1)冰碛土因其冰川搬运形成的宽级配、无胶结、无分选、无磨圆等特点,在冻融循环—动力荷载耦合作用下,表现出显著的非对称滞回特性,土体结构损伤在冻融过程中持续累积达 35%,变形抵抗能力衰减速率高达 $-10\%/kPa$ 。相较于常规黏性土或结构性土,其动应力-应变关系呈现出更强的塑性变形主导性(塑性应变占比达 65%~82%)、非线性退化速率加快(动弹模量损伤率高达 90.81%)和应变累积效应显著等特征。冰碛土因自身结构性缺陷,在冻融-动力耦合作用下以塑性变形为主导,其内部结构的急剧损伤是动力性能劣化的根本原因。

(2)动弹模量在冻融循环前期($N=0\sim 5$)下降明显。冻融循环会显著削弱土体的动力学特性,冻融循环 5 次后,动弹模量与动剪切模量分别衰减 21% 和 30%,当冻融循环 10 次时,动弹模量损伤率高达 90.81%,土体基本失去抵抗变形的能力。数据表明了冻融循环作用下冰碛土抵抗动荷载变形的能力变弱;动剪切模量与动弹模量存在与泊松比相关的定量关系,变化趋势与动弹模量一致;动剪应变随冻融循环次数的增加而不断增加,表明冰碛土在冻融循环作用下结构损伤累积,动力特性劣化不断加重。这表明冻融前期($N=0\sim 5$)是冰碛土动力特性劣化的关键阶段,也是工程防护需重点关注的敏感期。

(3)阻尼比随冻融循环次数增加呈线性下降,冰碛砂土 20 次冻融后累计降幅达 10.53%~25.21%,粉土达 10.27%~14.83%,其衰减速率由冻融初期的每周期 2.85% 降至后期的每周期 0.24%。冻融前期($N=0\sim 5$)劣化显著,损伤率在 2 次时即达 17.74%~28.16%,表明冰碛土能量耗散能力急剧减弱,导致更多振动能量发生集中并进一步破坏试样的土体内部结构,揭示了其动力参数于冻融前期快速劣化的内在机理。

参考文献(References)

- [1] 范金珂,岳祖润,韩子豪,等. 高频冻融循环作用下冰碛土强度劣化预测模型的研究[J]. 冰川冻土, 2024, 46(2): 602-611. [FAN Jinke, YUE Zurun, HAN Zihao, et al. Study on prediction model of strength deterioration of moraine soil under high frequency freeze-thaw cycles [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2024, 46(2): 602-611] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2024.0049
- [2] 张旭. 冻融循环作用下细粒含量对冰碛土特性的影响研究[D]. 拉萨: 西藏大学, 2024: 1-107. [ZHANG Xu. Influence of fine particle content on characteristics of moraine soil under freeze-thaw cycles [D]. Lhasa: Tibet University, 2024: 1-107] DOI: 10.27735/d.cnki.gxzd.2024.000449
- [3] 方学东, 黄润秋. 青藏高原典型冰碛土的物理力学特性研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 123-128. [FANG Xuedong, HUANG Runqiu. Physical and mechanical properties of typical moraine soil on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 123-128] DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2013.01.016
- [4] 刘佳诺, 李明俐, 姜元俊, 等. 基于 PFC2D 的冻融循环作用下冰碛土微观损伤研究[J]. 地球科学, 2025, 50(10): 4137-4154. [LIU Jianuo, LI Mingli, JIANG Yuanjun, et al. Microscopic damage evolution of moraine soils under freeze-thaw cycles based on PFC2D simulation [J]. Earth Science, 2025, 50(10): 4137-4154] DOI: 10.3799/dqkx.2024.128
- [5] 杨爱武, 王斌彬, 姜帅. 干湿冻融耦合作用下碱渣固化轻质土动力特性研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(6): 1962-1973. [YANG Aiwu, WANG Binbin, JIANG Shuai. Dynamic characteristics of alkali slag cured lightweight soil under action of dry and wet freezing and thawing [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(6): 1962-1973] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2021-0295
- [6] 张玉芝, 王玺, 王盟, 等. 冻融过程中冰水相变对非饱和粉土动力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(7): 1799-1808. [ZHANG Yuzhi, WANG Xi, WANG Meng, et al. Effect of ice-water phase change on the dynamic properties of unsaturated silt during freeze-thaw process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(7): 1799-1808]

- DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0872
- [7] 曾志杭, 姚忠劭, 李龙起. 反复冻融作用下裂隙岩体宏细观损伤机理研究[J]. 矿业研究与开发, 2024, **44**(10): 89-98. [ZENG Zhihang, YAO Zhongshao, LI Longqi. Study on macroscopic and microscopic damage mechanism of fractured rock under freeze-thaw cycles effect [J]. Mining Research and Development, 2024, **44**(10): 89-98] DOI: 10.13827/j.cnki.kyyk.2024.10.012
- [8] 张安顺. 基于 LSTM + Transformer 的冻融循环作用下路基土永久变形预估模型[J]. 中外公路, 2025, **45**(1): 67-72. [ZHANG Anshun. Permanent deformation prediction model of subgrade soil under freeze-thaw cycles based on LSTM and transformer [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2025, **45**(1): 67-72] DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2025.01.008
- [9] 刘耀辉, 陈志敏, 郭利民, 等. 冻融循环作用下冻结冰碛土剪切特性[J]. 中国科技论文, 2023, **18**(2): 166-171+203. [LIU Yaohui, CHEN Zhimin, GUO Limin, et al. Shear characteristics of frozen moraine soil under freeze-thaw cycle [J]. China Sciencepaper, 2023, **18**(2): 166-171+203]
- [10] QI Jilin, MA Wei, SONG Chunxia. Influence of freeze-thaw on engineering properties of a silty soil [J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, **53**(3): 397-404. DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.05.010
- [11] 冯俊德, 李建国, 汪稔, 等. 云南某铁路冰碛土大型直剪强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(12): 3205-3210. [FENG Junde, LI Jianguo, WANG Ren, et al. Large scale direct shear test on strength behavior of railway moraine soils in Yunnan [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(12): 3205-3210] DOI: 10.16285/j.rsm.2008.12.006
- [12] DONG Chenjie, GU Yuzheng, JIA Yinglan, et al. Effects of freeze-thaw cycles on the size distribution and stability of soil aggregate in the permafrost regions of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Environmental Research Communications, 2023, **5**(9): 095008. DOI: 10.1088/2515-7620/acf651
- [13] WANG Shengmian, XIANG Yuting, WU Zhijian, et al. Damage mechanism and evolution model of geopolymer stabilized coarse grained fillings subjected to repeated freeze-thaw actions [J]. Scientific Reports, 2025, **15**(1): 12166. DOI: 10.1038/s41598-025-94908-z
- [14] DENG Hongwei, ZHAO Bokun, XIAO Yigai, et al. Experimental study on macroscopic mechanical characteristics and microscopic pore structure evolution of soil-rock mixture under repeated freeze-thaw cycles [J]. Applied Sciences, 2023, **13**(20): 11504. DOI: 10.3390/app132011504
- [15] 李丽华, 李泽升, 梅利芳, 等. 改良膨胀土动力特性试验研究[J]. 人民长江, 2025, **56**(6): 191-197. [LI Lihua, LI Zesheng, MEI Lifang, et al. Experimental study on dynamic characteristics of improved expansive soil [J]. Yangtze River, 2025, **56**(6): 191-197] DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2025.06.025
- [16] 庄心善, 杨端, 张博文, 等. 间歇荷载下黄土路基累积塑性变形及刚度软化[J/OL]. 铁道科学与工程学报, 2025: 1-13 [2025-03-26]. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20240930> [ZHUANG Xinshan, YANG Duan, ZHANG Bowen, et al. Cumulative plastic deformation and stiffness softening of loess subgrade under intermittent loading [J/OL]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025: 1-13 [2025-03-26]. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20240930>] DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20240930
- [17] 杨安晴, 温森, 孔庆梅, 等. 列车荷载作用下复合土样动力特性研究[J/OL]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2025: 1-10 [2025-03-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20240821.1623.002.html>. [YANG Anqing, WEN Sen, KONG Qingmei, et al. Study on dynamic characteristics of composite soil samples under train load [J/OL]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2025: 1-10 [2025-03-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20240821.1623.002.html>]
- [18] 聂如松, 张腾腾, 谭永长, 等. 列车间歇荷载作用下粉土填料改正骨干曲线模型[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, **22**(9): 3968-3983. [NIE Rusong, ZHANG Tengting, TAN Yongchang, et al. An improved backbone curve model of silt filler under intermittent train-induced loading [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, **22**(9): 3968-3983] DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20241945
- [19] GB/T 50123—2019. 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. [GB/T 50123-2019. Standard for soil test method [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019]
- [20] 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] DOI: 10.19509/j.cnki.dzqk.tb20220649
- [21] 左志强, 李政男, 刘佳诺, 等. 青藏高原冰碛土在冻融循环下强度劣化特性及其微观机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, **54**: 1-11. [ZUO Zhiqiang, LI Zhengnan, LIU Jianuo, et al. Strength degradation characteristics and microscopic mechanism of the Tibetan plateau moraine under freeze-thaw cycle [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, **54**: 1-11]. DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.20240149
- [22] 李瑞山, 陈龙伟, 袁晓铭, 等. 荷载频率对动模量阻尼比影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(1): 71-80. [LI Ruishan, CHEN Longwei, YUAN Xiaoming, et al. Experimental study on influences of different loading frequencies on dynamic modulus and damping ratio [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(1): 71-80] DOI: 10.11779/CJGE201701005

- [23] 胡新亮, 刁桂苓, 马瑾, 等. 利用数字地震记录的P、S振幅比资料测定小震震源机制解的可靠性分析[J]. 地震地质, 2004, **26**(2): 347 - 354. [HU Xinliang, DIAO Guiling, MA Jin, et al. Reliability analysis of focal mechanism solutions of micro-earthquakes determined from amplitude ratio of P and S recorded by digital seismograph [J]. Seismology and Geology, 2004, **26**(2): 347 - 354] DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2004.02.017
- [24] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972, **98**(SM7): 667 - 692.
- [25] 邹超英, 赵娟, 梁锋, 等. 冻融作用后混凝土力学性能的衰减规律[J]. 建筑结构学报, 2008, **29**(1): 117 - 123 + 138. [ZOU Chaoying, ZHAO Juan, LIANG Feng, et al. Degradation of mechanical properties of concrete caused by freeze-thaw action [J]. Journal of Building Structures, 2008, **29**(1): 117 - 123 + 138] DOI:10.3321/j.issn:1000-6869.2008.01.017
- [26] 袁璞, 马冬冬. 干湿循环与动载耦合作用下煤矿砂岩损伤演化及本构模型研究[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(8): 119 - 124. [YUAN Pu, MA Dongdong. Damage evolution and constitutive model of coalmine sandstone under coupling wetting-drying cycles and dynamic loading [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(8): 119 - 124] DOI: 10.11988/ckyyb.20180054
- [27] 常丹, 刘建坤, 李旭, 等. 冻融循环对青藏粉砂土力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(7): 1496 - 1502. [CHANG Dan, LIU Jiankun, LI Xu, et al. Experiment study of effects of freezing-thawing cycles on mechanical properties of Qinghai-Tibet silty sand [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(7): 1496 - 1502] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.07.023
- [28] 王志杰, 骆亚生, 王瑞瑞, 等. 不同地区原状黄土动剪切模量与阻尼比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(9): 1464 - 1469. [WANG Zhijie, LUO Yasheng, WANG Ruirui, et al. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of undisturbed loess in different regions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(9): 1464 - 1469]
- [29] 王雪冰, 张楠, 杨跃辉. 考虑填土泊松比变异性的挡土墙失稳概率分析[J]. 科学技术与工程, 2021, **21**(34): 14680 - 14687. [WANG Xuebing, ZHANG Nan, YANG Yuehui. Failure probability analysis of retaining wall considering Poisson's ratio variability of backfill soil [J]. Science Technology and Engineering, 2021, **21**(34): 14680 - 14687] DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.34.030
- [30] 陈湘亮, 王永和, 周天应, 等. 泥质粉砂岩物理改良土路基长期动力稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, **43**(9): 3619 - 3624. [CHEN Xiangliang, WANG Yonghe, ZHOU Tianying, et al. Long-term dynamic stability analysis on argillaceous siltstone physical improved soil subgrade of high-speed railway [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, **43**(9): 3619 - 3624]
- [31] 宋东松, 刘红帅, 赵帅. 基于动三轴试验的砂土阻尼比确定方法对场地地震动参数的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2023, **43**(6): 194 - 202. [SONG Dongsong, LIU Hongshuai, ZHAO Shuai. Effects of sand damping ratio determination methods induced from dynamic triaxial tests on ground motion parameters [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, **43**(6): 194 - 202] DOI: 10.13197/j.eeed.2023.0621
- [32] 孙静, 袁晓铭, 孙锐. 土动剪切模量和阻尼比的推荐值和规范值的合理性比较[J]. 地震工程与工程振动, 2004, **24**(2): 125 - 133. [SUN Jing, YUAN Xiaoming, SUN Rui. Reasonability comparison between recommended and code values of dynamic shear modulus and damping ratio of soils [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, **24**(2): 125 - 133] DOI: 10.13197/j.eeev.2004.02.022
- [33] 刘闻慧, 文军, 陈金雷, 等. 青藏高原土壤冻融过程关键参量时空分布特征分析[J]. 高原气象, 2022, **41**(1): 11 - 23. [LIU Wenhui, WEN Jun, CHEN Jinlei, et al. Characteristic analysis of the spatio-temporal distribution of key variables during the soil freeze-thaw process over the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology, 2022, **41**(1): 11 - 23] DOI: 107522/j.issn.1000-0534.2021.00024
- [34] 刁洋洋, 潘正洋, 邵志刚, 等. 青藏高原东北缘地震活动与地壳变形研究展望[J]. 地球与行星物理评论(中英文), 2025, **56**: 1 - 21. [DIAO Yangyang, PAN Zhengyang, SHAO Zhigang, et al. Research on seismicity and crustal deformation in the northeastern Qinghai-Xizang Plateau: Current status and future prospect [J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 2025, **56**: 1 - 21] DOI: 10.19975/j.dqyx.2025-012
- [35] 谢春庆. 冰碛土工程性能的研究[J]. 山地学报, 2002, **20**(S1): 129 - 132. [XIE Chunqing. The engineering properties of moraine [J]. Mountain Research, 2002, **20**(S1): 129 - 132] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2002.s1.020

Degradation Law of Dynamic Properties of Glacial Till in Southern Xizang of China under Freeze-Thaw Cycles

WU E^{1, 2, 3}, LI Mingli^{4*}, ZHANG Fengshu^{1, 2, 3}, YANG Fan^{5, 6}, WANG Nana^{1, 2, 3}

(1. Sichuan Geological Environment Survey and Research Center, Chengdu 610036, China;

2. Sichuan 915 Construction Group CO., LTD., Chengdu 620020, China;

3. Sichuan Province Engineering Technology Research Center of Geohazard Prevention, Chengdu 610036, China;

4. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610054, China;

5. Institute of Sichuan Metal Geology Survey, Chengdu 611700, China;

6. Sichuan Shushui Geological Environment Research CO., LTD., Chengdu 611700, China)

Abstract: The coupling effect of freeze-thaw cycles and dynamic loading leads to continuous degradation of the dynamic properties of glacial till, posing a serious threat to the long-term stability of transportation infrastructure in cold regions of China. However, the underlying coupled damage mechanism remains unclear.

This study investigated typical glacial moraine deposits from the Nujuego Gully in southern Qinghai-Tibet Plateau. By simulating natural freeze-thaw processes under controlled drainage conditions, coupled freeze-thaw and dynamic triaxial tests were conducted on surface and 30 cm deep glacial till samples to systematically reveal the evolution of soil dynamic parameters under varying numbers of freeze-thaw cycles ($N = 0 - 10$) combined with dynamic loading. The main findings are as follows:

(1) The dynamic stress-strain hysteresis loops exhibited an asymmetric, plasticity-dominated behavior, characterized by significant hysteresis, nonlinearity, and strain accumulation, the continuous accumulation of soil structure damage has reached 35%, and the rate of decline in deformation resistance capacity has reached $-10\%/kPa$.

(2) The most drastic deterioration of dynamic parameters occurred during the early freeze-thaw stages ($N \leq 5$). After 5 freeze-thaw cycles, the dynamic elastic modulus (E_d) and the dynamic shear modulus (G_d) damped by 21% and 30%, respectively. When the number of cycles reached $N = 10$, the damage level of E_d reached as high as 90.81%, indicating that the soil had lost its ability to effectively resist deformation.

(3) The damping ratio (λ) accumulated a total reduction of 25.21% after 20 freeze-thaw cycles, with its decay rate decreasing from an initial 2.85% per cycle to 0.24% per cycle in later stages, indicating a sustained decline in the soil's ability to dissipate vibrational energy through particle friction — resulting in more energy being converted into structural damage work.

These findings provide essential parameter support for seismic engineering design and geological hazard monitoring and early warning systems in the alpine regions of the Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: glacial moraine; freeze-thaw and dynamic loading coupling; dynamic parameter degradation; hysteresis behavior; damping ratio

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)