

干湿和冻融循环作用下固化淤泥的动力特性及 微观结构演化

王协群¹, 于祥伟¹, 邹维列², 韩 仲²

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072)

摘要:为探明镁质水泥基多相胶凝材料固化的淤泥用作路基土的可行性,对经历不同干湿、冻融循环及加载条件的固化淤泥进行了动三轴和微观结构试验。基于动剪切模量、阻尼比等参数,研究了围压、动应力及加载频率对固化淤泥动力特性的影响,并建立了考虑干湿和冻融循环次数的动剪切模量预估模型。通过定量分析微观孔隙参数,揭示了不同干湿、冻融循环次数后固化淤泥微观结构的演变规律,并进行了微观结构参数与宏观力学性能的关联性分析。结果显示,干湿、冻融循环作用后,试样的动剪模量减小,阻尼比增大,且干湿循环引起的刚度衰减大于冻融循环。随着围压和加载频率的增大,固化淤泥的动剪切模量增大而阻尼比减小。干湿和冻融循环作用使固化淤泥的孔隙率增加,大孔隙数量增多,孔隙形态逐渐转变为平滑的扁角状。循环次数和加载频率对固化淤泥动力特性的影响程度大于围压和动应力幅值;微观结构形态参数对固化淤泥动力特性的影响都较为显著,其中孔隙率的影响程度最大。

关键词:岩土工程;固化淤泥;干湿循环;冻融循环;动剪模量;阻尼比;微观结构

中图分类号:TU414 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)05-1617-12

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230788

Dynamic characteristics and microstructural evolution of solidified sludge under wet-dry and freeze-thaw cycling

WANG Xie-qun¹, YU Xiang-wei¹, ZOU Wei-lie², HAN Zhong²

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To investigate the feasibility of using magnesium oxychloride cement solidified sludge as subgrade, dynamic triaxial and microstructural tests were conducted on solidified sludge under different wet-dry and freeze-thaw cycles and loading conditions. The influences of confining pressure, dynamic load amplitude and loading frequency on the dynamic characteristics of solidified sludge were studied in terms of dynamic shear modulus and damping ratio, and a prediction model for dynamic shear modulus considering wet-dry and freeze-thaw cycle numbers was established. Quantitative analysis of microscopic pore

收稿日期: 2023-07-27.

基金项目: 湖北省重点研发计划项目(2023BCB112); 国家自然科学基金项目(52478360, 52078400, 52378365).

作者简介: 王协群(1971-), 女, 教授, 博士. 研究方向: 岩土力学, 地基处理. E-mail: xqswang@126.com

通信作者: 邹维列(1970-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 非饱和土特性, 交通岩土, 土工合成材料应用原理, 岩土数值计算. E-mail: zwilliam@whu.edu.cn

parameters revealed the microstructural evolution of solidified sludge after different wet-dry and freeze-thaw cycle numbers, and correlation analysis was performed between microstructural parameters and macroscopic mechanical properties. The results show that after wet-dry and freeze-thaw conditioning, the dynamic shear modulus of specimens decreases while the damping ratio increases progressively, and wet-dry cycles lead to greater stiffness deterioration than freeze-thaw cycles. As confining pressure and loading frequency increase, the dynamic shear modulus of solidified sludge increases while the damping ratio decreases. Wet-dry and freeze-thaw cycles increase the porosity and coarse pores of solidified sludge, and the pore shape gradually transforms into smooth lamellar. The cycle number and loading frequency have more significant effects on the dynamic characteristics of sludge than confining pressure and dynamic stress amplitude. Among the microstructural morphology parameters, porosity has the greatest influence on the dynamic properties of sludge.

Key words: geotechnical engineering; solidified sludge; dry wet cycle; freeze-thaw cycle; dynamic shear modulus; damping ratio; microscopic structure

0 引言

江河湖泊疏浚产生的淤泥会对建筑工程、交通工程等多种不利影响,例如易液化、易沉降、易流失等问题^[1]。在淤泥固化处理技术中,水泥类固化方法应用最为广泛。然而,普通硅酸盐水泥、石灰等传统无机材料存在生产能耗高、CO₂排放量大、环境污染严重等问题,其固化土体强度增长缓慢^[2],不符合“节能减排”要求。相比之下,氯氧镁水泥具有生产成本低、能耗小、CO₂排放量和环境适应性强等优点,是绿色环保的胶凝材料^[3]。基于氯氧镁水泥,掺入高钙粉煤灰、粒化高炉矿渣等工业副产物组成的复合改性剂(镁质水泥基多相胶凝材料)对淤泥进行固化,并将固化后的淤泥用作路基土,有望成为淤泥资源化利用的一条有效途径。

路基在服役过程中不仅受到车辆荷载作用,还要经历外界环境变化的影响^[4,5]。路基土在冻融循环、干湿交替甚至两者共同作用下,土体中的液相水、固相冰与水蒸汽之间相互转化,土颗粒之间的结构联结以及排列方式产生变化^[6,7],土体内部微小的孔洞逐渐发展为裂隙,削弱土体的力学强度,严重时会引起路堤边坡变形失稳和路面结构破坏^[8,9]。对此,不少学者对不同土体经历干湿、冻融循环后的动力特性演变做了大量研究。刘文化等^[10]研究了干湿循环对不同基质吸力下非饱和粉质黏土动强度的影响;Wu等^[11]研究了干湿循环次数和应力条件对黄土动剪切模量和阻尼比的影响,并使用扫描电镜研究了干湿循环对土体的损伤机制;胡再强等^[12]对经历不同干湿循

环次数的遗址土开展动三轴试验,建立了描述动剪切模量比和阻尼比变化的归一化拟合模型;魏新江等^[13]基于冻融循环后地铁荷载作用下阻尼比的变化趋势,建立了阻尼比与累积轴向应变的预测模型;徐永丽等^[14]研究了冻融及不同温度下石灰改良盐渍土的动力参数,提出了动剪切模量和阻尼比的修正系数拟合模型;Lin等^[15]分析了不同冻融循环和应力条件下饱和黏土的动剪切模量和阻尼比的演变情况,并对比了多级循环加载和单级循环加载的差异。

目前,关于镁质水泥胶凝材料的研究已取得一系列成果。Tang等^[16]模拟了微尺度氯氧镁水泥的水化和浸出机理;Chang等^[17]探究了氯氧镁水泥水合产物的相组成和微观结构演变规律,发现水化产物 $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 的微观结构变化是氯氧镁水泥力学性能波动的主要原因;李颖等^[18]以砾石土为固化对象,通过改变原料配比来探究氯氧镁水泥对稳定材料抗压强度的影响规律;Yao等^[19]分析了不同含量的氧化镁水泥稳定软土的强度特性和微观结构;Wang等^[20,21]研究了氯氧镁水泥固化淤泥的内在机理和强度演变规律。

综上所述,当前关于镁质水泥基多相胶凝材料的研究多关注其物理力学和微观机理等方面;而在用于固化特殊土体时,对其非饱和状态和环境作用(干湿、冻融循环)下的力学特性和微观结构演变的研究有待加强。考虑到淤泥特有的成分与固化材料在动力荷载和环境条件影响下的物理-化学作用非常复杂,因此在评估镁质水泥基多

相胶凝材料固化淤泥用作路基填土的可行性时,有必要开展干湿、冻融循环下其动力性能演变规律的研究。

本文研究了干湿、冻融循环作用下,镁质水泥基多相胶凝材料固化淤泥的动力特性和微观结构演变。通过干湿、冻融循环条件下的扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)试验,分析了不同循环次数后土体内部孔隙数量、孔隙形态和孔径分布的变化;通过动三轴试验,分析了围压(σ_c)、循环动应力(σ_d)和加载频率(f)等因素对固化淤泥刚度和能耗指标(动剪切模量、阻尼比)的影响;结合微观与宏观分析,揭示了干湿、冻融循环对固化淤泥物理力学性能的演变规律,探究了镁质水泥基多相胶凝材料固化淤泥用作路基土的可行性。

1 试样制备及试验方案

1.1 试验材料

试验用淤泥为武汉东湖的疏浚淤泥土, X射线衍射结果显示,该淤泥的矿物成分以石英为主,还包含少量的伊利石、钠长石和方解石。根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[22],测定其基本物理指标如表1所示。颗粒分析试验显示,其中黏粒(粒径 <0.002 mm)含量为22.2%,粉粒(0.002 mm $<$ 粒径 <0.075 mm)含量为71.2%,砂粒(0.075 mm $<$ 粒径 <2 mm)含量为6.6%,属于低液限黏土(CL)。

表1 淤泥的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of the sludge

液限	塑限	塑性	比重	最大干密	最优含水	CBR
$w_L/\%$	$w_p/\%$	指数 I_p	G_s	度 $\rho_{max}/(g\cdot cm^{-3})$	率 $w_{opt}/\%$	$/\%$
34	12	22	2.7	1.96	11.4	5.9

1.2 试样制备

课题组前期通过加州承载比(California bearing ratio, CBR)、压缩-固结、SEM、核磁共振(Nuclear magnetic resonance, NMR)等试验^[23,24],确定了该淤泥固化的最优配比(氯氧镁水泥掺量3%+高钙粉煤灰掺量2%+粒化高炉矿渣掺量2%),固化后淤泥试样的物理指标见表2。综合考虑氯氧镁水泥中MgO与MgCl₂浓度对固化淤泥影响以及材料的经济性,本试验设计MgO与MgCl₂摩尔浓度比为6:1。制样时,先将脱水淤泥磨细后过2 mm筛,再加入上述最优配比的改性

材料并与蒸馏水充分混合,使其达到最优含水率。将配制好的湿土放置在密封的塑料袋中,静置24 h使土中的水分均匀分布,随后参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[22],采用静压方式,按照94%的压实度,将配制好的湿土分3次压制成直径38 mm、高76 mm的三轴试样,用塑料薄膜包裹后在20℃、湿度90%的密闭环境下养护28 d。养护过程中,改性材料的水化反应生成的多种胶结物,提高了固化淤泥的动力性能。

表2 固化淤泥的基本物理性质指标

Table 2 Basic physical properties of the solidified sludge

液限	塑限	塑性指	比重	最大干密度	最优含水	CBR
$w_L/\%$	$w_p/\%$	数 I_p	G_s	$\rho_{max}/(g\cdot cm^{-3})$	率 $w_{opt}/\%$	$/\%$
33	15	18	2.6	1.78	14.8	72

1.3 试验方案

1.3.1 干湿、冻融循环试验

利用恒温恒湿试验箱对改性固化试样进行冻融、干湿循环处理。参考胡再强等^[12]的研究,在5次干湿、冻融循环后,土体力学性质趋于平稳,选取每种循环作用的次数为1、3、5、7次。根据当地的气候条件,冻融循环时,试样首先在-5℃的低温下冻结12 h,然后在20℃常温下解冻12 h,完成一次冻融循环。在冻融过程中,试样用塑料薄膜包裹,防止水分蒸发。干湿循环过程参考赵贵涛等^[25]的方法,首先将试样在20℃的自然环境中风干脱湿至缩限 w_{SL} ,然后增湿至最优含水率 w_{opt} ,完成一次干湿循环。在增湿过程中,用滤纸包裹试样,将蒸馏水均匀喷洒在滤纸上使试样均匀吸水。喷水后,将试样同滤纸包在塑料薄膜中放置在恒温恒湿环境(室温20℃、湿度90%)中24 h,以达到水分平衡。重复此过程,直至试样达到最优含水率。干湿循环过程中,试样表面产生裂缝,随着循环次数的增加,裂缝的数量和尺寸也增大。

1.3.2 动三轴试验

(1) 试验过程。试验采用GDS公司生产的DYNTTS动三轴试验系统,采用5级循环加载进行测试,每级加载2 000次,所有试样的测试程序如表3所示。根据前人研究,为模拟交通荷载,本次试验采用连续的半正弦波进行循环加载^[26]。由于0~3 m深度范围内的路基土易受车辆动荷载和冻融、干湿作用的影响,是路基土的敏感区域^[27],且该深度围压水平在60 kPa内,因此试验的围压值选取为27.6、41.4和55.2 kPa。结合美

国 AASHTO T307-99 (2017)^[28] 的建议,5 级动应力幅值取 13.8、27.6、41.4、55.2 和 68.9 kPa。鉴于路基所受车辆动荷载频率 f 一般分布在 0.1~10 Hz 范围内^[29],且国内外诸多学者在探究路基土动态响应时采用的荷载频率多为 1.0 Hz,本文选取 $f=1、2、3$ Hz 为试验变量。在循环加载之前,对试样施加微小的轴向荷载(约 2 kPa)以确保试样接触良好并防止试验过程中出现拉伸状态。所有试样均为不饱和试样($\tau_w=14.8\%$),试验在不排水条件下进行。

表 3 试验序列
Table 3 Test programs

类型	循环次数 N	围压 σ_c /kPa	频率 f /Hz
对照	0	27.6, 41.4, 55.2	1
	1, 3, 5, 7	41.4	1
冻融/干湿	7	27.6, 55.2	1
	7	41.4	2, 3

(2) 动剪模量和阻尼比的计算方法。动剪模量 G 表征土体的动刚度,常由动剪应变-剪应力 ($\gamma_d-\tau_d$) 曲线形成的滞回圈斜率(BC 斜率)表示,如图 1 所示。 G 的计算公式为:

$$G = \frac{\tau_d}{\gamma_d} \quad (1)$$

阻尼比 λ 反映了土体克服黏滞阻力的能量损失情况,可以表示为单个滞回曲线的面积 A_s 与弹性能量的面积 A_e 的比值,如图 1 所示。 λ 的计算公式为:

$$\lambda = \frac{A_s}{4\pi A_e} \quad (2)$$

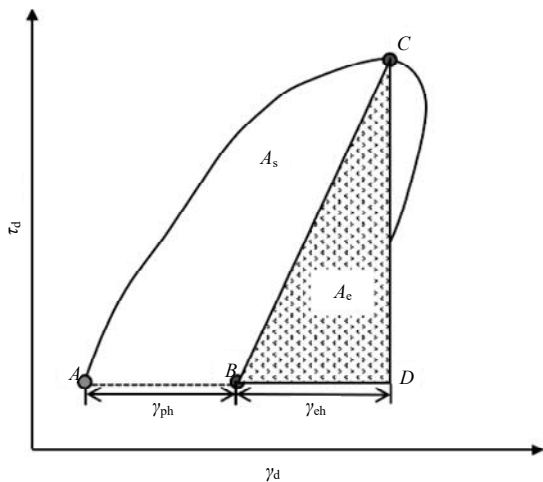


图 1 动力参数计算示意

Fig. 1 Schematic diagram of dynamic parameter calculation

1.3.3 SEM 试验

(1) 试验过程。将经历过 0、1、3、5、7 次干湿、冻融循环的固化淤泥试样切开,得到表面未扰动的 SEM 试样。接着用液氮冷冻法干燥后,再对 SEM 试样进行喷金,使样品导电。最后,使用 SEM 拍摄微观结构照片。

(2) 微观参数定量计算方法。使用 ImageJ 软件中的机器学习算法 Trainable Weka Segmentation,通过多组图像上学习不同孔隙/颗粒团聚体的特征,进行快速的图像分割,对图片中的孔隙/颗粒团聚体进行自动识别,进而提取微观参数。重点选取了等效孔隙直径(d)、孔隙率(n)、孔隙圆形度(R)、平均分形维数(D)和孔隙定向概率熵(H_m)等微观参数描述土体的微观结构特征。

如图 2 所示,孔隙等效直径(d)采用孔隙的长轴 L_a 表示。孔隙率(n)定义为 SEM 图像中孔隙面积 A_a 与 SEM 图像总面积 A_0 的比值。孔隙的方向角(α_d),用孔隙长轴 L_a 与水平线的夹角表示。圆形度 R 是孔隙与圆形的接近程度,按式(3)计算。平均分形维数 D 描述孔隙的粗糙程度,参考彭瑞东等^[30]对分形维数的算法研究,采用盒计数法计算,计算公式见式(4)。定向概率熵 H_m 描述孔隙方向的有序性,按式(5)计算。

$$R = \frac{4\pi A_a}{Q^2} \quad (3)$$

$$D = \frac{1}{m} \sum_i^m \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(r)}{\ln r} \quad (4)$$

$$H_m = - \sum_{i=1}^k P_i(\alpha_d) \log_k P_i(\alpha_d) \quad (5)$$

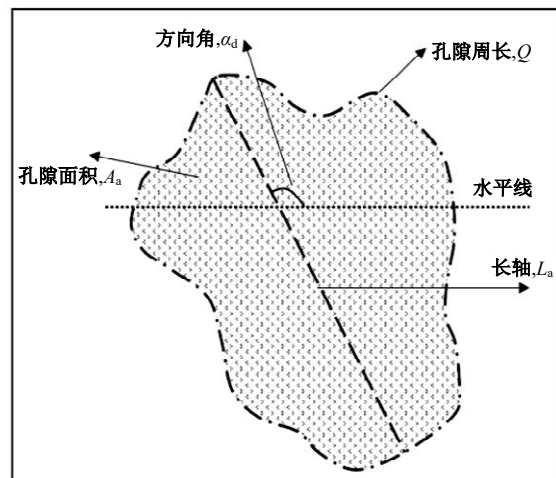


图 2 微观参数计算示意

Fig. 2 Schematic diagram of micro parameter calculation

式中： m 为统计孔隙数； r 为计数盒子的边长； $N(r)$ 为方形盒子数量； A_s 为孔隙面积； Q 为孔隙周长； α_d 为方向角； k 为夹角的等分区域个数，本文取 $k=18$ ； $P_i(\alpha_d)$ 为方向角在某个区间的孔隙占总个数的百分数。

2 试验结果及分析

2.1 循环作用对动力特性的影响

图 3 是不同循环作用下，动剪模量 G 、阻尼比 λ 与加载次数 N_{load} 的关系曲线。未经历干湿和冻融循环的试样，其动剪模量持续增大，表现为“硬化”型，阻尼比则持续减小；当循环次数 $N=7$ 时，动剪模量先增大后减小，表现为“软化”型，阻尼比表现出先减小后增大的变化趋势。究其原因，经历干湿和冻融循环的土体，其内部孔隙增多，土颗粒间的粘结以及排列方式波动大，土体结构趋于松散。动力荷载的剪切破坏使得土体刚度降低，而动荷载产生的塑性变形的累积又会使得土体密实度增大。对于非饱和土体，加载前期，动荷载较小，塑性变形累积产生的压实作用占据主导地位，土体的动剪模量增大，阻尼比减小；加载中后期，随着动荷载的增大，剪切破坏效应占据主导地位，因此土体的动剪模量减小，阻尼比增大。

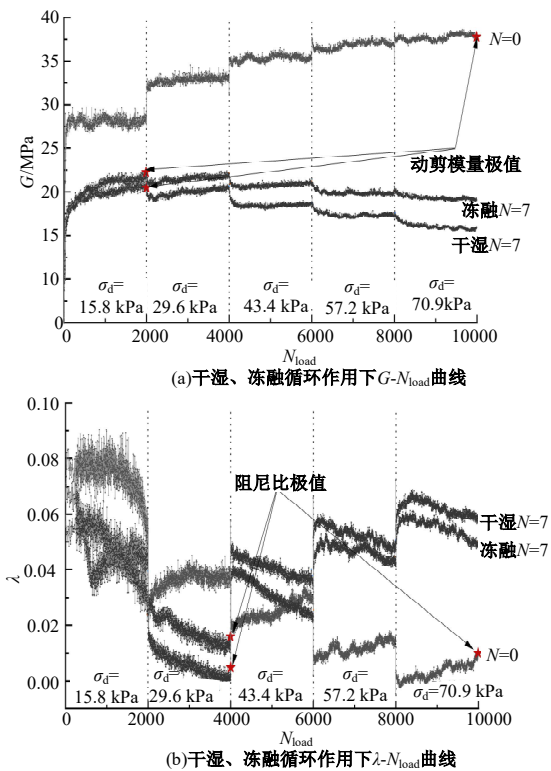


图 3 $G-N_{load}$ 和 $\lambda-N_{load}$ 变化曲线

Fig. 3 $G-N_{load}$ and $\lambda-N_{load}$ variation curve

为探究不同干湿、冻融循环次数对土体动剪模量和阻尼比的影响，选取每级动荷载加载最后 10 次的动剪模量和阻尼比均值作为代表值 G_R 、 λ_R 。定义动剪模量最大代表值和阻尼比最小代表值为动剪模量极值 G_e 和阻尼比极值 λ_e (如图 3 所示)，极值点对应的动应力大小定义为极值动应力 σ_{d-e} 。动剪模量极值 G_e 反映土体破坏时的强度，该值越小，表明土体的刚度越低；阻尼比极值 λ_e 反映土体破坏时的能量耗散情况，该值越大，表明土体的塑性变形越显著；极值动应力 σ_{d-e} 越小，则表明土体承受动荷载的能力越差。

不同干湿和冻融循环次数后，固化淤泥的 G_R-N_{load} 关系曲线如图 4(a)、(b) 所示。可见，经历较大循环次数后的曲线明显呈现“软化”型发展趋势；随着循环次数的增加，动剪模量下降，极值动应力 σ_{d-e} 逐渐减小。可见，干湿、冻融循环不仅影响土体的 G_e-N_{load} 关系曲线形态，还显著改变土体抵抗动力破坏的能力。

干湿、冻融过程引起的土体结构损伤是试样阻尼比变化的主要原因，如图 5(a)、(b) 所示。随着循环次数的增加，试样结构变得松散，从而在加载过程中产生了更多的塑性变形，土体内部能量耗散增大，导致阻尼比 λ_R 增大。

图 6(a) 是不同干湿/冻融循环次数下试样的 $G_e-\sigma_{d-e}$ 关系变化情况，同一循环次数下干湿循环对应的 G_e 明显小于冻融循环，这表明干湿循环对土体刚度的损伤度更大。对比图 6(b) 中不同干湿/冻融循环次数下试样的 $\lambda_e-\sigma_{d-e}$ 关系变化情况，同一循环次数下干湿循环对应的 λ_e 明显小于冻融循环；与动剪模量不同的是， λ_e 并非完全随循环次数的增加而增大，而是在循环次数 $N=1$ 时有小幅度减小，这可能与首次干湿、冻融循环后土体内部孔隙变化有关。

用干湿、冻融循环后动剪模量的损伤度 δ_N 和过程损伤度 δ_{M-N} ，定量描述干湿、冻融循环作用对土体刚度的影响。

$$\delta_N = 1 - \frac{G_{e,N}}{G_{e,0}} \quad (6)$$

$$\delta_{M-N} = \delta_M - \delta_N \quad (7)$$

式中： $G_{e,0}$ 为试样干湿、冻融前的极值动剪模量； $G_{e,N}$ 为 N 次干湿、冻融循环后的极值动剪模量； δ_M 和 δ_N 分别为第 M 次和第 N 次的损伤度。

干湿、冻融循环后的动剪模量损伤度如图 7

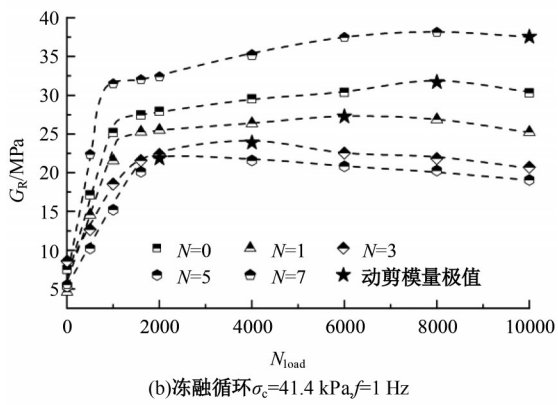
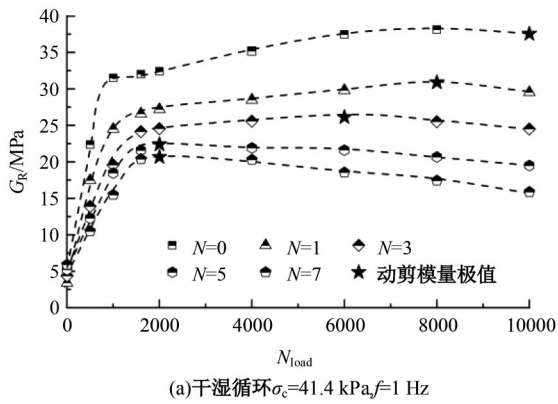


图 4 动剪模量变化曲线

Fig. 4 Dynamic shear modulus variation curve

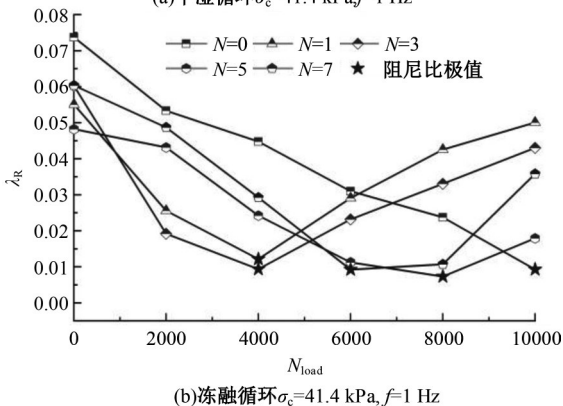
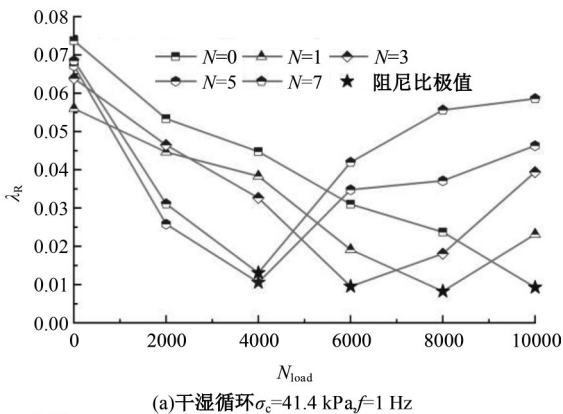


图 5 阻尼比变化曲线

Fig. 5 Damping ratio variation curve

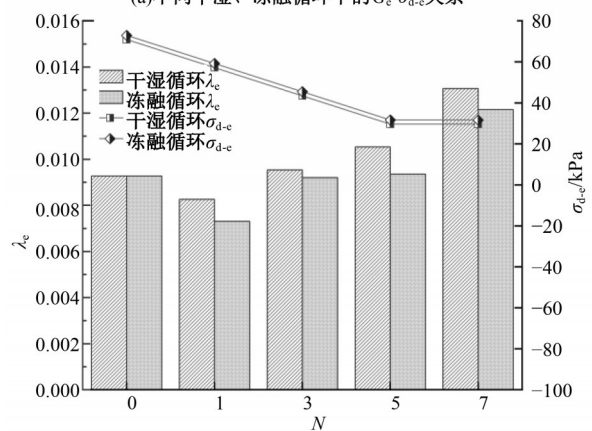
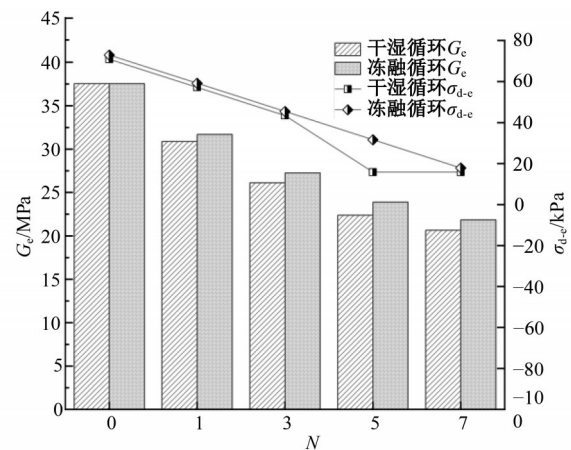


图 6 G_c - σ_{d-e} 和 λ_e - σ_{d-e} 变化曲线

Fig. 6 G_c - σ_{d-e} and λ_e - σ_{d-e} variation curve

所示,可以发现:

(1) 首次干湿、冻融循环后的 δ_N 为 15%~17%, 3、5 和 7 次干湿、冻融循环后 δ_N 呈现小幅度上升。说明 3 次干湿、冻融循环后,再进行干湿、冻融循环对动剪模量的衰减作用已趋于稳定。

(2) 干湿、冻融循环过程损伤度 δ_{M-N} 比 N 次干湿、冻融循环损伤度 δ_N 更能清晰地描述每一次循环过程中的固化淤泥的动剪模量损伤情况,其中 δ_{0-1} 明显大于 δ_{1-3} 、 δ_{3-5} 和 δ_{5-7} , 这意味着首次干湿、冻融循环对土体动剪模量损伤最大。这可能是因为土体强度衰减主要受首次干湿、冻融循环过程中孔隙大小和形态变化的影响。

(3) 相同干湿、冻融循环次数下,干湿循环的损伤度大于冻融循环的损伤度。如图 7 所示,动剪模量损伤度与干湿、冻融循环次数 N 的关系可用如式(8)所示的指数模型预测,拟合优度 $R^2=0.95$,模型的拟合效果较为理想。

$$\delta_N = ae^{bN} + c \quad (8)$$

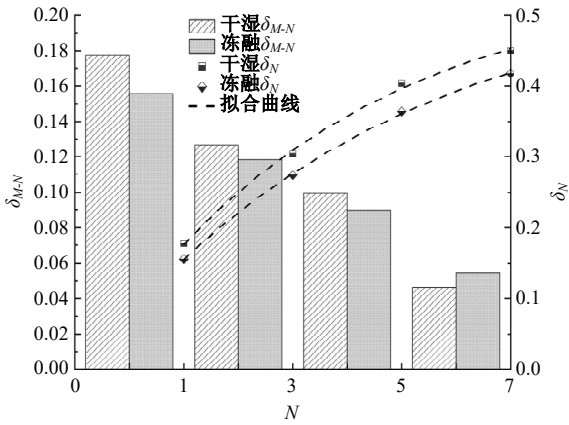


图 7 不同干湿、冻融循环次数下的动剪模量损伤度
Fig. 7 Attenuation of shear modulus after DW and FT cycles

2.2 加载条件对动力特性的影响

2.2.1 围压

图 8 为不同围压下代表动剪模量 G_R 和代表阻尼比 λ_R 随加载次数 N_{load} 的变化曲线。可以看出,3 种围压(27.6、41.4、55.2 kPa)下,干湿、冻融循环后固化淤泥的动剪模量均呈现“软化”特性,阻尼比均呈现出先减小后增大的变化趋势。随着围压的增大,干湿循环后试样的代表动剪模量 G_R 较前一级围压增大 7% 和 13%,冻融循环后增大 11% 和 13%;干湿循环后试样的代表阻尼比 λ_R 较

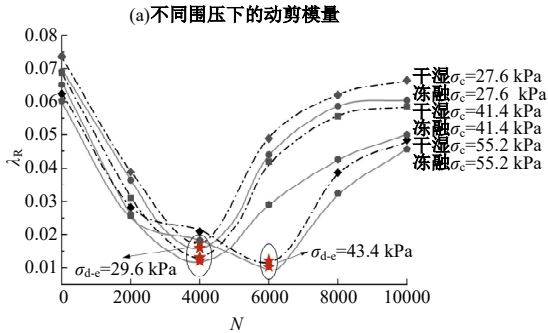
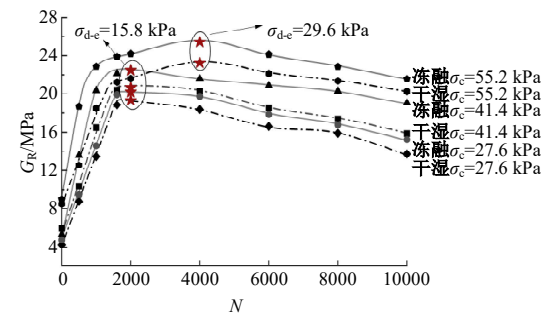


图 8 不同围压下的动剪模量和阻尼比变化曲线
Fig. 8 G_R and λ_R curve under different confining pressures

前一级围压下降 25% 和 7%,冻融循环后下降 24% 和 16%。表明围压的增大使得土体抵抗动力破坏的能力增大,当围压 $\sigma_c=55.2$ kPa 时,动剪模量和阻尼比的极值动应力 σ_{d-e} 明显大于其他围压下的极值动应力。究其原因,增大的围压使得试样中的一些开敞孔隙变小、微裂隙愈合,土颗粒之间的相对滑动和重新排布变得困难,导致试样的塑性变形降低,能量耗散减少,刚度增大。

2.2.2 加载频率

3 种不同加载频率(1、2、3 Hz)下, G_R-N_{load} 和 λ_R-N_{load} 的关系曲线如图 9 所示。随着加载频率 f 的增大,动剪模量增大, $f=2$ Hz 时,经历干湿、冻融循环的试样 G_R 较 1 Hz 时增加 19% 和 20%; $f=3$ Hz 时,经历干湿、冻融循环的试样 G_R 较 2 Hz 时增加 20% 和 24%。加载频率的增大,使得土体抵抗动力破坏的能力增强,表现为动应力极值 σ_{d-e} 明显增大。如图 9(b) 所示,阻尼比对加载频率也较为敏感,随着加载频率的增大而降低, $f=2$ Hz 时,经历干湿、冻融循环的试样 λ_R 较 1 Hz 时下降 29% 和 37%; $f=3$ Hz 时,经历干湿、冻融循环的试样 λ_R 较 2 Hz 时下降 21% 和 37%。这是由于施加的动荷载主要作用在土颗粒间,加载频率越高,

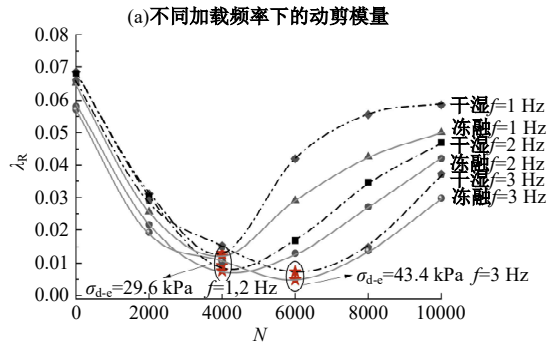
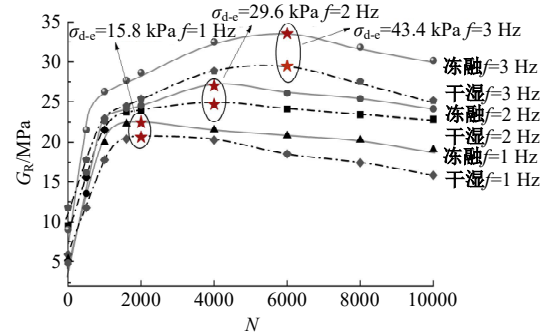


图 9 不同加载频率下的动剪模量和阻尼比变化曲线
Fig. 9 G_R and λ_R curve under different loading frequency

动应力传递的越快,作用在颗粒间的时间越短,形成相应的塑性变形越少,从而使土体刚度相对提高,产生的能量消耗减少,表现出土体的动剪模量增大,阻尼比减小。

2.2.3 环境因素与动力特性的关联度分析

运用灰度分析法^[31],以动剪模量和阻尼比作为参考数列,干湿/冻融循环次数、围压、加载频率、动应力幅值等影响因素作为比较数列,计算这些数据的关联度,结果如表 4 所示,可见,循环次数和加载频率与刚度、能耗指标的关联度均大于 0.65,可认为循环次数和加载频率对刚度和能耗的影响程度较大。究其原因,加载频率决定了动荷载的破坏程度,频率越快,土体对能量的消耗越少,土体破坏越少;干湿、冻融循环次数决定了土体的孔隙发展情况,直接影响土体的强度。而围压和动应力与剪切模量和阻尼比的关联程度较低,这表明外部应力环境对土体刚度和能耗的影响有限。

表 4 环境因素与动力特性指标的关联度

Table 4 Relevancy between environmental factor and dynamic characteristic indicators

动力特性 指标	关联度 R_i			
	循环次数	围压	加载频率	动应力
动剪模量	0.725	0.657	0.672	0.579
阻尼比	0.746	0.675	0.681	0.596

2.3 循环作用对微观结构特征的影响

2.3.1 SEM 试验结果

图 10 为经历不同循环次数后放大 10 000 倍的 SEM 图像。固化淤泥试样未经循环时,微观结构以片状堆叠体为主,整体结构密实,存在少量裂隙。经过 1 次干湿、冻融循环后,少量片状结构逐渐剥离并脱落土颗粒团聚体,土体裂隙开始发育; 7 次循环后,土体破碎明显,团聚体内孔隙变大并与粒间较大孔隙连接贯通,使得裂隙数量显著增加,部分团聚体破碎,剥落的片状结构逐渐形成松散的堆聚体,附着在大的团聚体周围。由此可见,土体刚度和能耗指标的劣化,主要与裂隙增大、团聚体变形破碎等微观结构演变有关。

2.3.2 微观参数定量分析

图 11 为不同干湿和冻融循环次数后的固化淤泥微观结构定量分析结果。通过微观孔隙率、孔径分布、圆形度、定向概率熵和分形维数等参数,探究经历干湿和冻融循环后固化淤泥的微观结构演变情况。

(1)孔隙率和孔径分布。根据 Delage 等^[32]关于土的孔径划分标准,可将土的孔径划分为微孔隙($<1 \mu\text{m}$)、中孔隙($1\sim 4 \mu\text{m}$)和大孔隙($> 4 \mu\text{m}$)3 个区间。图 11(a)为不同干湿、冻融循环次数的孔隙率和等效孔隙直径的分布情况。未经历干湿、冻融循环时,土体孔隙率较低,且内部孔

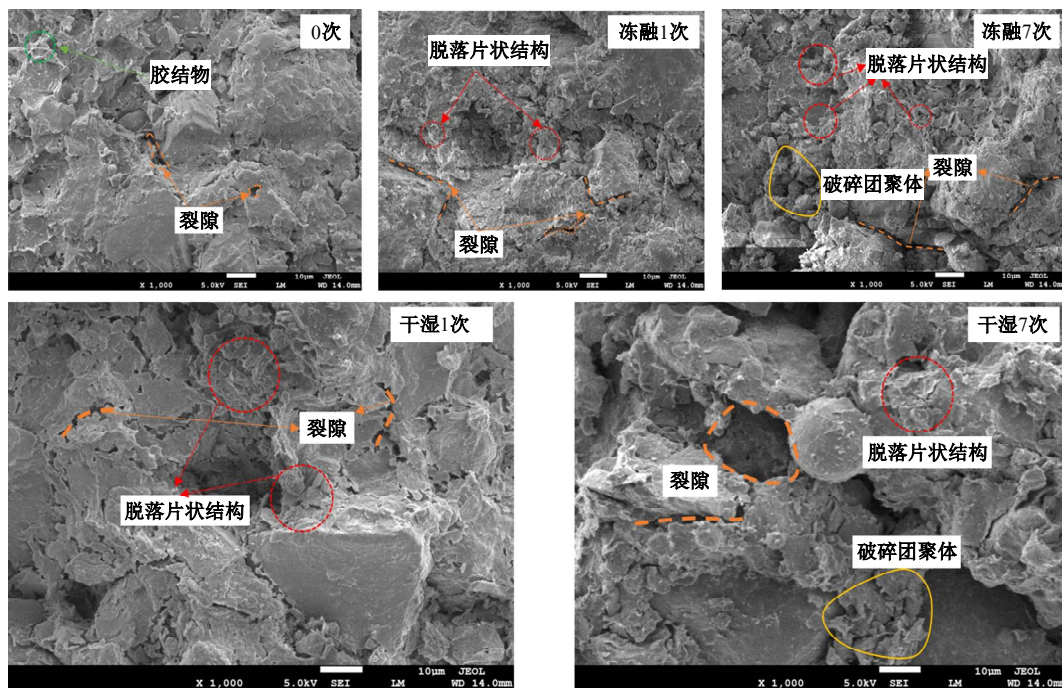


图 10 不同循环次数试样的 SEM 扫描结果(10 000 倍)

Fig. 10 SEM scanning results of samples subjected to different cycles ($\times 10\ 000$)

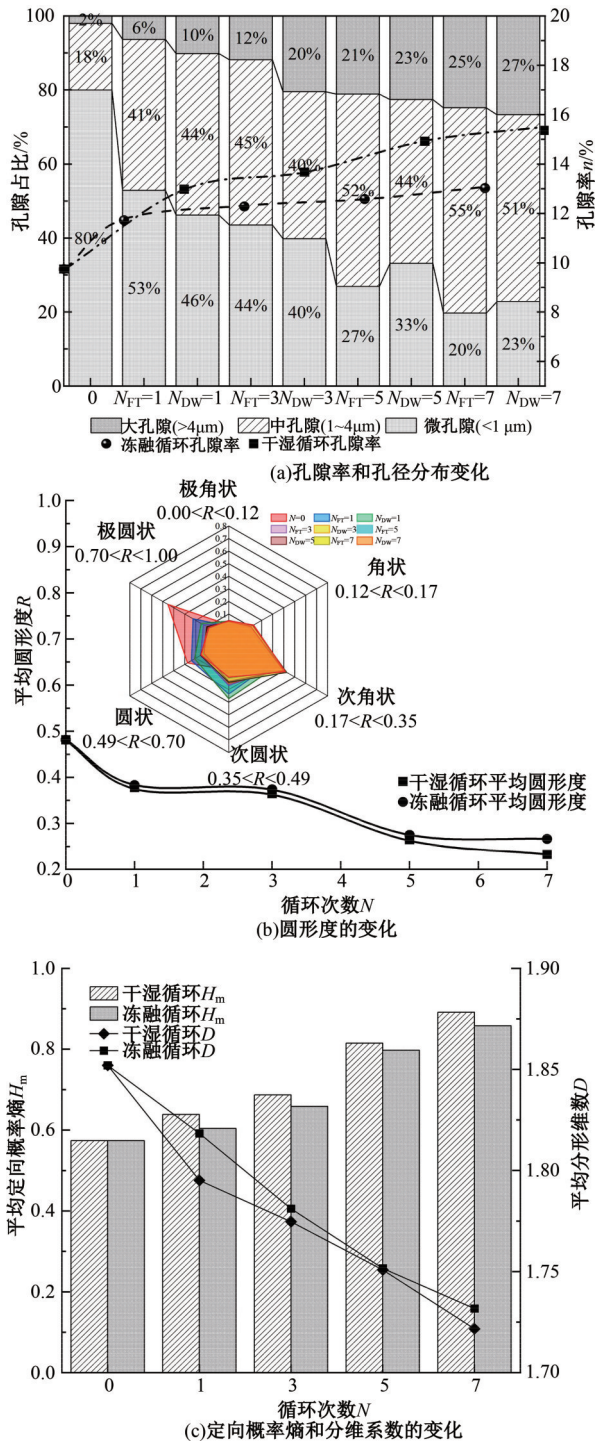


图 11 微观指标定量分析

Fig. 11 Quantitative analysis of micro indicators

隙多为微孔隙和中孔隙;经历首次干湿、冻融循环后,土体孔隙率明显上升,微孔隙占比下降,但仍然高于大孔隙的占比;经历3次干湿、冻融循环后,微孔隙占比大幅度减少,大孔隙数目明显增加;经历5~7次干湿、冻融循环后,土体的孔隙率增幅较小,大孔隙和中孔隙占比明显增大。

(2)圆形度。圆形度 R 值越大,孔隙越接近圆

形,将孔隙的圆度分为6类。由图 11(b)可知,随着循环次数 N 的增加,土体内部孔隙的圆形度不断减小;极圆状和圆状占比逐渐下降,次角状和角状的占比逐渐增大,表明干湿和冻融循环促使孔隙由扁圆状向扁角状(狭长)状转变。根据孔隙率和孔径分布变化推测,干湿和冻融循环使得土体内部中小孔隙增大、联通形成大孔隙,大孔隙形状以扁角状为主,导致孔隙圆形度下降。

(3)定向概率熵和分形维数。如图 11(c)所示,随着干湿和冻融循环次数的增加,平均定向概率熵 H_m 增大,这表明孔隙分布的方向性减弱,孔隙分布的方向更均匀;平均分形维数 D 减小,这说明孔隙的轮廓变得更加平滑,经历5~7次干湿、冻融循环后,固化淤泥的 H_m 和 D 变化最为显著。究其原因,干湿、冻融循环过程中热和水分交换导致土颗粒的结合和排列发生显著变化,部分颗粒方向改变,团聚体相互靠近,由此导致孔隙分布的方向性减弱。此外,添加的改性固化材料填充了部分裂隙,影响了土颗粒间的粘结排布方式,也使得孔隙形状发生变化。

2.3.3 微观参数与动力特性关联度分析

为直观地表征固化淤泥动力特性与微观参数的关联程度,采用灰色关联分析法^[31]定量评估孔隙率、平均圆形度、定向概率熵和平均分形维数等微观等参数对动力特性的影响程度。

由表 5 可知,微观指标与刚度和能耗指标间的灰色关联度均 >0.7 ,这表明固化淤泥的微观结构与其动力特性存在显著相关性,但各微观结构参数对动力特性的影响程度不一,从高到低依次是孔隙率 $>$ 平均圆形度 $>$ 定向概率熵 $>$ 平均分形维数。孔隙形态对土体刚度和能耗的影响可能与其反映土颗粒间的摩擦和粘结特性有关,分形维数和圆形度的增大意味着孔隙形状类型更为统一且趋向于扁角状,导致土颗粒间摩擦力下降。

表 5 微观指标与动力特性指标的关联度

Table 5 Relevancy between micro-parameters and dynamic characteristic indicators

动力特性 指标	关联度 R_i			
	孔隙率	平均圆形度	定向概率熵	平均分形维数
动剪模量	0.835	0.784	0.728	0.717
阻尼比	0.782	0.775	0.761	0.765

3 结 论

(1)经历干湿、冻融循环后,动剪模量呈“软

化”型发展趋势,阻尼比表现为先减小后增大;随着循环次数的增加,动剪模量减小,阻尼比增大。首次干湿、冻融循环对土体的损伤最大;3次循环后,干湿、冻融循环对动剪模量的衰减效果减弱。相同干湿、冻融循环次数下,干湿循环后的损伤度大于冻融循环的损伤度。

(2)增大的围压使得试样抵抗动力破坏的能力增大,表现为动剪模量增大、阻尼比减小。同时,加载频率越高,土体的抵抗能力也越强,表现为动剪模量增大、阻尼比减小。外部环境因素与动剪切模量和阻尼比的关联度较低,其中围压和动应力的影响程度明显小于循环次数和加载频率。

(3)干湿、冻融循环对土体微观结构的影响显著,干湿、冻融循环使结构松散,团聚体变形破碎,裂隙增大;随着循环次数的增加,土体中孔隙数量增多,中小孔隙逐渐发展形成大孔隙,孔隙形态多样性减小,孔隙逐渐演变成平滑的扁角状且方向分布更均匀。微观结构参数与动力性能显著相关,灰色关联度均 >0.7 ,其中孔隙率的影响程度最大。

参考文献:

- [1] 李丽华, 韩琦培, 杨星, 等. 稻壳灰-水泥固化淤泥土力学特性及微观机理研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(12): 166-176.
Li Li-hua, Han Qi-pei, Yang Xing, et al. Mechanical properties and micro-mechanisms of RHA-cement solidified sludge[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(12): 166-176.
- [2] Jin F, Wang F, Altabbaa A. Three-year performance of in-situ solidified/stabilised soil using novel MgO-bearing binders[J]. Chemosphere, 2016, 144: 681-688.
- [3] Viani A, Lanzafame G, Chateigner D, et al. Microstructural evolution and texture analysis of magnesium phosphate cement[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2020, 103(2): 1414-1424.
- [4] 刘维正, 徐阳, 蔡雨, 等. 湿化作用下重载铁路改良膨胀土动力响应与累积变形试验研究[J]. 铁道学报, 2023, 45(2): 127-138.
Liu Wei-zheng, Xu Yang, Cai Yu, et al. Dynamic response accumulative deformation of modified expansive soil of heavy-haul railway under wetting action [J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(2): 127-138.
- [5] 王协群, 张伊, 彭琛, 等. 废旧橡胶轮胎颗粒-水泥改性强膨胀土的长期路用性能研究[J]. 公路, 2023, 68(6): 362-370.
Wang Xie-qun, Zhang Yi, Peng Chen, et al. Road performance of highly expansive soil modified with waste rubber tire particles and cement[J]. Highway, 2023, 68(6): 362-370.
- [6] Zhao G T, Han Z, Zou W L, et al. Evolution of mechanical behaviours of an expansive soil during drying-wetting, freeze-thaw, and drying-wetting-freeze-thaw cycles[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80: 8109-8121.
- [7] 李甜果, 孔令伟, 周振华. 原状膨胀土脱湿过程中多层次微细观结构演化特征与概化模型[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(增刊1): 35-39.
Li Tian-guo, Kong Ling-wei, Zhou Zhen-hua. Evolution characteristics and generalized model of multi-level microstructure of undisturbed expansive soils during dehumidification[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(Sup. 1): 35-39.
- [8] 安然, 孔令伟, 张先伟, 等. 干湿循环效应下花岗岩残积土结构损伤的多尺度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 758-767.
An Ran, Kong Ling-wei, Zhang Xian-wei, et al. A multi-scale study on structure damage of granite residual soil under wetting-drying environments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3): 758-767.
- [9] 张建新, 马昌虎, 郎瑞卿, 等. 不同冻融模式下淤泥质土力学及微观结构特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增刊1): 3801-3811.
Zhang Jian-xin, Ma Chang-hu, Lang Rui-qing, et al. Experimental study on mechanical properties and microstructure of muddy soil under different freeze-thaw modes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(Sup. 1): 3801-3811.
- [10] 刘文化, 杨庆, 唐小微, 等. 干湿循环条件下粉质黏土在循环荷载作用下的动力特性试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(4): 425-432.
Liu Wen-hua, Yang Qing, Tang Xiao-wei, et al. Experimental study on the dynamic characteristics of silt clay subjected to drying-wetting cycles under cyclic loading[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(4): 425-432.

- [11] Wu H, Shao S, Shao S, et al. Variations in dynamic shear modulus of loess exposed to dry-wet cycles from Xi'an area, China[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 173: No. 108126.
- [12] 胡再强, 黄帅, 周衡立, 等. 干湿循环条件下人工制备遗址土动力特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(增刊2): 3499-3507.
Hu Zai-qiang, Huang Shuai, Zhou Heng-li, et al. Experimental study on dynamic characteristics of artificial ruins under drying-wetting cycles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(Sup. 2): 3499-3507.
- [13] 魏新江, 庄家煌, 丁智, 等. 地铁循环荷载作用下冻融土滞回曲线及阻尼比特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(10): 2092-2102.
Wei Xin-jiang, Zhuang Jia-huang, Ding Zhi, et al. Research on the characteristics of hysteretic curves and damping ratio of frozen-thawed soils under cyclic subway loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(10): 2092-2102.
- [14] 徐永丽, 董子建, 周吉森, 等. 冻融及不同温度下石灰改良盐渍土动力参数研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(1): 90-97.
Xu Yong-li, Dong Zi-jian, Zhou Ji-sen, et al. Dynamic parameters of lime-improved saline soil under freeze-thaw and different temperatures[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(1): 90-97.
- [15] Lin B, Zhang F, Feng D, et al. Dynamic shear modulus and damping ratio of thawed saturated clay under long-term cyclic loading[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 145: 93-105.
- [16] Tang S, Hu Y, Ren W, et al. Modeling on the hydration and leaching of eco-friendly magnesium oxychloride cement paste at the micro-scale[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 204: 684-690.
- [17] Chang C, Dong J, Xiao X, et al. Long-term mechanical properties and micro mechanism of magnesium oxychloride cement concrete[J]. *Advances in Cement Research*, 2020, 32(8): 371-378.
- [18] 李颖, 余红发, 董金美, 等. 氯氧镁水泥的水化产物、相转变规律和抗水性评价方法的研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2013, 41(11): 1465-1473.
Li Ying, Yu Hong-fa, Dong Jin-mei, et al. Research development on hydration product, phase transformation and water resistance evaluation method of magnesium oxychloride cement[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 41(11): 1465-1473.
- [19] Yao K, Wang W, Li N, et al. Investigation on strength and microstructure characteristics of nano-MgO admixed with cemented soft soil[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 206: 160-168.
- [20] Wang D, Di S, Gao X, et al. Strength properties and associated mechanisms of magnesium oxychloride cement-solidified urban river sludge[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 250: No. 118933.
- [21] Wang D, Gao X, Liu X, et al. Strength, durability and microstructure of granulated blast furnace slag-modified magnesium oxychloride cement solidified waste sludge[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 292: No. 126072.
- [22] JTG 3430-2020. 公路土工试验规程: [S].
- [23] 刘宁. 氯氧镁水泥基多相胶凝材料改性固化淤泥的路用性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 2022.
Liu Ning. Study on road performance of modified solidified mud by magnesium oxychloride cement-based multiphase cementing material[D]. Wuhan: School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, 2022.
- [24] 王协群, 刘宁, 李智奇, 等. 干湿循环作用下氯氧镁水泥基多相胶凝材料改性固化淤泥的水力-力学特性[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(10): 2004-2013.
Wang Xie-qun, Liu Ning, Li Zhi-qi, et al. Hydro-mechanical behaviors of sludge stabilized with magnesium oxychloride cement-based multi-cementitious materials under influence of drying-wetting cycles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(10): 2004-2013.
- [25] 赵贵涛, 韩仲, 邹维列, 等. 干湿、冻融循环对膨胀土土-水及收缩特征的影响[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(6): 1139-1146.
Zhao Gui-tao, Han Zhong, Zou Wei-lie, et al. Influences of drying-wetting-freeze-thaw cycles on soil-water and shrinkage characteristics of expansive soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(6): 1139-1146.
- [26] 刘维正, 徐阳, 石志国, 等. 湿化作用下改良膨胀土永久变形特性多级加载试验研究[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2022, 53(1): 296-305.
Liu Wei-zheng, Xu Yang, Shi Zhi-guo, et al. Characterization of permanent deformation of modified ex-

- pansive soil under wetting effect using multi-stage dynamic triaxial test[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(1): 296-305.
- [27] Ren J, Vanapalli S K, Han Z, et al. The resilient moduli of five Canadian soils under wetting and freeze-thaw conditions and their estimation by using an artificial neural network model[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 168: No. 102894.
- [28] T307-99. Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials[S]. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1999.
- [29] 蔡袁强, 赵莉, 曹志刚, 等. 不同频率循环荷载下公路路基粗粒填料长期动力特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(5): 1238-1246.
- Cai Yuan-qiang, Zhao Li, Cao Zhi-gang, et al. Experimental study on dynamic characteristics of unbound granular materials under cyclic loading with different frequencies[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(5): 1238-1246.
- [30] 彭瑞东, 谢和平, 鞠杨. 二维数字图像分形维数的计算方法[J]. *中国矿业大学学报*, 2004, 50(1): 22-27.
- Peng Rui-dong, Xie He-ping, Ju Yang. Computation method of fractal dimension for 2-D digital image [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2004, 50(1): 22-27.
- [31] 谭学瑞, 邓聚龙. 灰色关联分析:多因素统计分析新方法[J]. *统计研究*, 1995, 12(3): 46-48.
- Tan Xue-ruì, Deng Ju-long. Grey relational analysis: a new method for multifactor statistical analysis [J]. *Statistical Research*, 1995, 12(3): 46-48.
- [32] Delage P, Audiguier M, Cui Y-J, et al. Microstructure of a compacted silt[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(1): 150-158.