

DOI: 10.11779/CJGE20230902

# 不同温湿路径下压实黏土的土-水和动力响应特性

韩仲<sup>1</sup>, 张琳<sup>\*1</sup>, 丁鲁强<sup>2</sup>, 邹维列<sup>1</sup>, 冯怀平<sup>3</sup>, 应镇谦<sup>1</sup>

(1. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 3. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043)

**摘要:** 以黑龙江黏土为研究对象, 按照3种不同的路径(干湿—冻融路径、冻融—干湿路径、交叉的干湿冻融路径)施加了温湿作用, 对比分析了不同温湿路径下压实黏土的微观结构、土-水特性、累积塑性应变( $\epsilon_p$ )和回弹模量( $M_R$ )的演化规律。结果表明: ①温湿作用后土体内宏观孔隙发育, 微观孔隙收缩, 持水能力降低, 脱湿速率增大。多次温湿作用后, 经不同温湿路径的试样具有相似的微观孔隙结构及土-水特性; ② $\epsilon_p$ 和 $M_R$ 在高含水率下对湿度变化(包括含水率 $w$ 和吸力 $s$ )更敏感。冻融循环后,  $\epsilon_p$ 对湿度的敏感性显著增加,  $M_R$ 对湿度的敏感性显著降低; ③温湿作用后土体的 $M_R-s$ 关系呈现非线性特征,  $M_R-w$ 关系呈现线性特征。长期温湿作用后, 不同温湿路径对 $\epsilon_p$ 和 $M_R$ 的影响差异较小; ④基于非饱和土力学原理建立模型, 较好地预测了不同温湿路径下 $M_R$ 随湿度的变化规律。

**关键词:** 压实黏土; 温湿路径; 动力响应; 土-水特性; 微观结构

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)12-2591-11

**作者简介:** 韩仲(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事非饱和土、道路工程、土工合成材料等方面的研究。E-mail: zhong.han@whu.edu.cn。

## Soil-water characteristics and dynamic responses of compacted clay under different moisture and temperature paths

HAN Zhong<sup>1</sup>, ZHANG Lin<sup>1</sup>, DING Luqiang<sup>2</sup>, ZOU Weilie<sup>1</sup>, FENG Huaiping<sup>3</sup>, YING Zhenqian<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 3. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** The microstructure, soil-water characteristics, accumulative plastic strain ( $\epsilon_p$ ) and resilient modulus ( $M_R$ ) of a compacted Heilongjiang clay are compared. The specimens are imposed with three different moisture (wetting-drying, WD) and temperature (freeze-thaw, FT) paths (i.e., WD-FT, FT-WD and interlaced FTWD histories). The experimental results show that: (1) After moisture-temperature (M-T) actions, the structural pores develop while the textural ones shrink, which leads to reduction in the water retention capacity and increase in the desaturation rate. After M-T effects are stabilized, the microstructure and soil-water characteristics of the specimens with different M-T paths become similar. (2) Under at high moisture content ( $w$ ),  $\epsilon_p$  and  $M_R$  are more sensitive to moisture changes (including  $w$  and suction  $s$ ). After FT cycles,  $\epsilon_p$  becomes more sensitive while  $M_R$  becomes less sensitive to moisture changes. (3) After M-T effects, the  $M_R-s$  relationships are nonlinear while the  $M_R-w$  relationships are linear. The different M-T paths do not generate differences in  $\epsilon_p$  and  $M_R$  when the M-T effects are stabilized. (4) A model based on the mechanics of unsaturated soils is used to rationally predict the variation of  $M_R$  with  $w$  and  $s$  for the specimens with different M-T paths.

**Key words:** compacted clay; moisture and temperature path; dynamic response; soil-water characteristic; micro structure

## 0 引言

路基土在交通动荷载作用下的动力响应特性是表征路基承载能力、设计路基厚度、预估道路结构服役寿命的核心参数。动力响应特性一般包括描述弹性变形的回弹模量 $M_R$ 及描述塑性变形的累积塑性应变 $\epsilon_p$ 。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52378365, 52308346); 中央引导地方科技发展资金项目(236Z5409G); 中国博士后科学基金项目(2022M720986)

**收稿日期:** 2023-09-15

**\*通信作者** (E-mail: zhanglin2022@whu.edu.cn)

路基土动力响应特性在长期、反复、交替的环境荷载（如温湿作用及其循环）和车辆动荷载的作用下持续变化<sup>[1-2]</sup>，其规律及劣化机理非常复杂。Jong 等<sup>[3]</sup>研究了路基承载能力随季节的变化规律，如图 1 所示。可见，路基承载能力随季节动态变化，特别是冬春交际时，路基土经历融化和增湿过程，其承载性能显著降低。有研究表明，该降幅可达 50%~60%<sup>[4-5]</sup>。

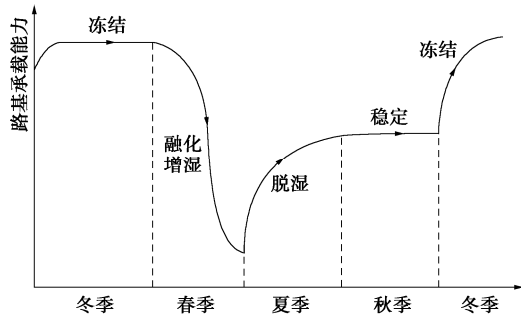


图 1 路基承载能力随季节的变化规律<sup>[6]</sup>

Fig. 1 Seasonal evolution of pavement capacity

温湿作用下路基土中水分的分布与迁移对其动力响应特性影响显著，相关分析与预测依赖于路基土的土-水特征，即土中吸力与含水率的本构关系。同时，土体微观结构的变化是其土水和动力响应特性变化的本质。近年来，研究中开始关注环境荷载对土体的微观结构、土-水特性和动静力学特性的影响规律。

#### （1）微观结构特征方面

相关研究通过观测冻融和干湿作用前后压实土体的微观结构发现，冻融和干湿作用均会诱发土体颗粒产生团聚现象，使土体结构中出现团聚体，且黏粒含量越高，团聚现象越显著<sup>[6-7]</sup>。土体骨架颗粒间的连接方式由面-面接触形式逐渐转化为点-面和点-点接触形式<sup>[8]</sup>。Ding 等<sup>[9]</sup>、赵贵涛等<sup>[10]</sup>发现，在无水分补给的冻融循环过程中，随着冰晶的形成和发育，水分逐渐从团聚体内孔隙（又称微观孔隙）迁移至团聚体间孔隙（又称宏观孔隙），导致微观孔隙逐渐减少，宏观孔隙逐渐增多，土体出现微观裂隙。赵贵涛等<sup>[10]</sup>、万勇等<sup>[11]</sup>、Burton 等<sup>[12]</sup>发现，干湿作用对压实土的微观孔隙影响较大，对宏观孔隙影响较小。干湿循环作用后，微观孔隙增多，宏观孔隙减小。对于膨胀土，干湿循环后土体内部还会产生不同尺度的裂隙<sup>[9-10]</sup>。

#### （2）土-水特性方面

研究表明<sup>[13-14]</sup>，土体的脱、吸湿速率（即土-水特征曲线在过渡区的斜率）在干湿和冻融循环作用后显著变化<sup>[15-16]</sup>。同时，干湿和冻融循环可能引发不同尺度裂隙的产生，土体中出现较大的孔隙，导致土-水特征曲线进气值显著减小。因此，边界效应区内土体的持水能力常表现出减小的趋势<sup>[17-18]</sup>。伴随着裂隙的产

生，土体的孔隙比和渗透系数显著增大<sup>[19-20]</sup>。干湿和冻融对土颗粒表面的吸附特性影响很小，故在高吸力水平下，残余区的土-水特性几乎不受影响<sup>[10]</sup>。

#### （3）动力响应特性方面

历经一次冻融循环，路基土的回弹模量即产生显著衰减，累积塑性明显增加。动力响应特性的变化一般在 3~5 个冻融循环后达到稳定状态<sup>[21-22]</sup>。干湿过程中，回弹模量和累积塑性应变随土中吸力和含水率变化。一般在吸力增加、含水率降低时，路基土的回弹模量上升，累积塑性应变降低<sup>[23-25]</sup>。随着干湿循环次数的增加，回弹模量降低而累积塑性应变增加<sup>[26-27]</sup>。相关研究以吸力变化表征干湿作用影响，探究了路基土回弹模量和累积塑性应变随吸力和含水率的变化规律，并提出了多种类型的预测模型<sup>[28-30]</sup>。

既有研究多关注单独作用或按特定顺序先后作用的冻融和干湿循环过程对土体的微观结构、土-水和动态响应特性的影响规律。然而，自然界中的路基土实际上经历着交替进行、顺序随机的干湿和冻融作用，其温湿路径呈现多样性和随机性的特点。尽管相关研究已取得一定成果，但其是否能够全面描述不同温湿路径下路基土的服役性能仍未可知。因此，仍需进一步研究和对比不同温湿路径下路基土的微观结构、土-水及动力响应特性。

本文以黑龙江压实黏土为研究对象，设计了 3 种温湿路径（先干湿后冻融、先冻融后干湿和交叉的干湿、冻融路径）对压实试样进行处理。通过动三轴、压力板、滤纸法和压汞试验，对比分析了压实黏土的土-水特征曲线、微观结构特征、回弹模量及累积塑性应变在不同温湿路径作用下随冻融循环次数、含水率和吸力的演化规律，并采用半经验模型对不同温湿路径作用下路基土的回弹模量随吸力和含水率的变化规律进行了分析和预测，可为进一步认识复杂环境作用下路基土的水力-力学特性提供试验数据和理论依据。

## 1 试验材料与方案

### 1.1 土的基本物理性质指标

试验用土取自黑龙江省齐齐哈尔市富裕县（图 2），为典型季节性冻土区。将土样烘干、碾碎、过 2 mm 筛后开展试验研究。土样的基本物理性质指标列于表 1。颗粒级配试验结果表明，该土样含有 10% 的砂粒（粒径 > 75 μm），73% 的粉粒（5 μm < 粒径 < 75 μm）和 17% 的黏粒（粒径 < 5 μm）。根据《公路土工试验规程》（JTG 3430—2020）<sup>[31]</sup>，该土为低液限黏土。

### 1.2 试验方案

本文试验研究遵照的具体流程如图 3 所示。

表 1 试验用土的基本物理性质指标  
Table 1 Physical index properties of test soil

$G_s$	$w_L / \%$	$w_p / \%$	$I_p$	$w_{opt} / \%$	$\rho_{dmax} / (kg \cdot m^{-3})$
2.69	45	23	22	22.76	1610

注:  $G_s$  为相对质量密度,  $w_L$  为液限,  $w_p$  为塑限,  $I_p$  为塑性指数,  $w_{opt}$  为最优含水率,  $\rho_{dmax}$  为最大干密度。



图 2 取土地点及试验用压实土样

Fig. 2 Location of test soil and compacted specimens

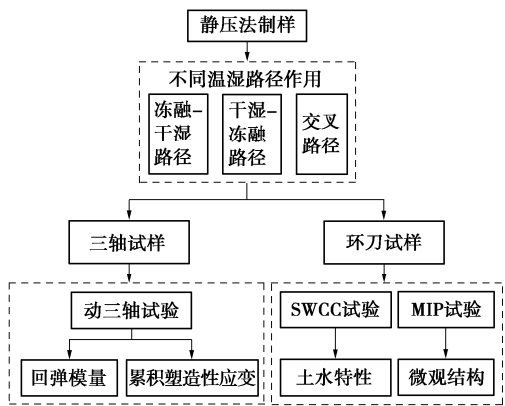


图 3 试验研究流程

Fig. 3 Procedures of experimental studies

(1) 试样制备

路基土是典型的非饱和压实土<sup>[32]</sup>。试验研究中采用静压法, 在最优含水率和最大干密度条件下压制两种尺寸的压实试样: 直径 38 mm、高 76 mm 的三轴试样及直径 61.8 mm、高 20 mm 的环刀试样。制样过程中, 首先将土样放入 105℃ 的烘箱烘干, 后按一定的水土质量配比将蒸馏水均匀喷洒在土样上, 并充分搅拌混合, 直至土样达最优含水率 (22.76%)。之后将配置好的土样放于密封袋中静置 24 h, 使土中水分均匀分布。24 h 后复测土样的实际含水率, 保证实际含水率与最优含水率的差值小于 0.1%。用静压法压制试样, 所有制备好的三轴试样和环刀试样用两层保鲜膜包裹, 放置于塑料瓶中密封保存 2 d, 以防止试样水分散失及机械损伤, 并使试样中的水分进一步均匀分布。

(2) 施加不同温湿路径

设置了 3 种不同的温湿路径对试样进行处理 (图

4), 即干湿—冻融路径、冻融—干湿路径以及干湿、冻融过程相互交叉的路径 (简称交叉路径)。

a) 图 4 (a) 为干湿—冻融路径

试样从最优含水率 ( $w_{opt} = 22.76\%$ ) 先干湿至 5 级含水率 ( $w$ , 包括饱和含水率  $w_{sat} = 25.04\%$ ), 然后对不同含水率状态下的试样分别进行不同次数的冻融循环处理 ( $N_{FT}=1, 3, 10$ )。经干湿—冻融路径处理后的试样共有 24 种不同的温湿作用历史 (即测试状态)。

b) 图 4 (b) 为冻融—干湿路径

试样首先经历 1, 3, 10 次冻融循环, 然后干湿至 5 种不同的含水率。因最优含水率下试样只经历冻融循环, 故经冻融—干湿路径处理后的试样共有 15 种不同的温湿作用历史。

c) 图 4 (c) 为交叉路径

由随机交错的干湿、冻融过程组成。试样在最优含水率下进行 1 次冻融循环后再经 6 种不同干湿、冻融过程, 最终在 10 次冻融循环后达到不同的含水率。经交叉路径处理后的试样共有 6 种不同的温湿作用历史。比如, 图 4 (c) 中 A 点试样的温湿路径为 1—3—8—9—A, 即试样在最优含水率下经 1 次冻融循环 (点 1) 后增湿至 24.47% (点 3), 再经 2 次冻融循环 (点 8) 后增湿至 25.04% (点 9), 最后经 7 次冻融循环达到测试状态 A。

由图 4 可知, 具有相同  $w$  和  $N_{FT}$  的试样可能经历 2~3 种不同的温湿作用历史, 通过比较分析可反映温湿路径对于压实黏土的微观结构特征、土-水特性及动力响应特性的影响规律。

在冻融过程中, 用多层塑料薄膜包裹试样后置于恒温恒湿箱中, 在常含水率条件下进行冻融循环。参考齐齐哈尔的气温变化范围<sup>[31]</sup>, 令试样在 -20~20℃ 进行冻融循环。因试样尺寸较小, 参考既有研究经验<sup>[32]</sup>, 试样冻结和融化过程的时长均选为 12 h, 即试样内部温度和水分布可以在 12 h 内达到平衡。

在干湿过程中, 参考 Han 等<sup>[29]</sup>提出的试验方法, 采用不同湿度的滤纸包裹试样, 使其缓慢增湿或脱湿, 直至达到预设的含水率。之后将试样用两层保鲜膜包裹, 放置于塑料瓶中密封保存 2 d, 使含水率均匀分布。相关研究表明<sup>[9-10, 16]</sup>, 该方法能够有效改变较小的三轴试样的含水率并保持含水率均匀分布。

(3) 微观结构观测试验

基于压汞试验 (MIP) 探究不同温湿路径下压实黏土的微观结构特征及其演化规律。将环刀试样切分为若干个 1 cm<sup>3</sup> 大小、质量 1~2 g 的立方体。利用液氮冻干法进行脱水处理, 将脱水后的试样置于 Quantachrome 压汞仪中开展 MIP 试验。

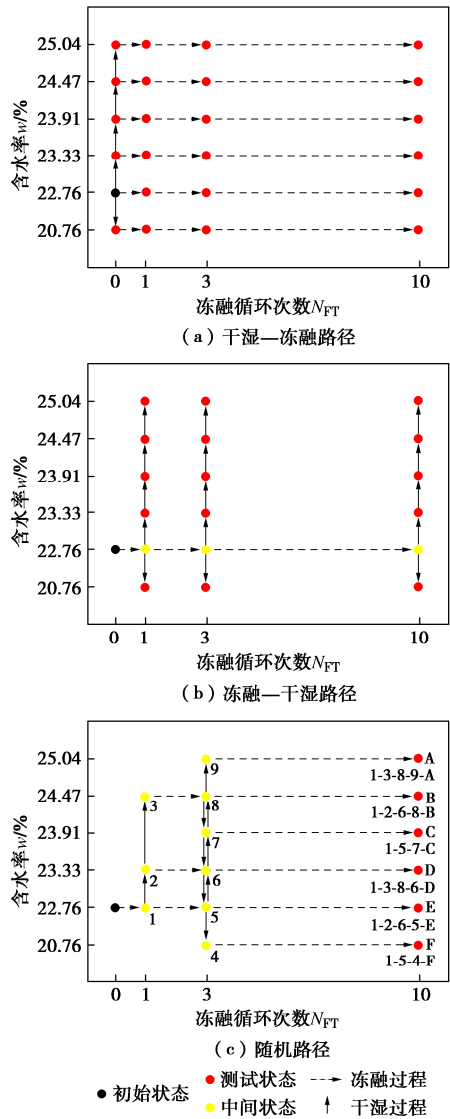


图 4 不同的温湿路径

Fig. 4 Different moisture and temperature paths  
(4) 动力响应特性试验

使用英国 GDS 公司生产的非饱和土动/静三轴仪, 参照 AASHTO (T307—99) [33]回弹模量试验方法, 采用固结不排水振动试验测定回弹模量。试验中采用三级静围压 ( $\sigma_c$  为 13.8, 27.6, 41.4 kPa) 和五级偏应力 ( $\sigma_d$  为 13.8, 27.6, 41.4, 55.2, 68.9 kPa;  $\sigma_d$  由动偏应力  $\sigma_{cyc}=0.9\sigma_d$  和静偏应力  $\sigma_{sta}=0.1\sigma_d$  组成), 共 15 种应力组合。参考《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020) [34]及 AASHTO (T307—99) [33], 偏应力加载波形为半正弦波, 加载频率为 1.0 Hz。先在  $\sigma_c=41.4$  kPa 和  $\sigma_d=27.6$  kPa 应力组合下对试样进行 5000 次预载, 以消除试样端部与试样帽、底座间因不平整接触造成的误差, 并使试样达到一个准弹性状态。之后, 按照 AASHTO (T307—99) [33]预设的加载顺序进行试验, 每种应力组合下加载 100 次。取各级荷载作用下最后 5 次循环的回弹应变均值  $\varepsilon_r$ , 按下式计算  $M_R$  [35]:

$$M_R = \frac{\sigma_{cyc}}{\varepsilon_r} = \frac{0.9\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (1)$$

累积塑性应变试验中的动荷载频率和波形与回弹模量试验一致。其中,  $\sigma_c$  取 13.8 kPa,  $\sigma_d$  取 27.6, 41.4, 68.9 kPa, 共 3 种应力组合, 每种组合下加载 5000 次。

(5) 土-水特性试验

对经历图 4 所示 3 种温湿路径作用的环刀试样, 按照《非饱和土试验方法标准》(T/CECS 1337—2023) [34], 采用接触式滤纸法和 Whatman No. 42 型滤纸, 测定了试样的含水率-吸力关系, 即土-水特性。后续分析用其确定动力响应特性试验中试样的吸力水平。

2 微观结构特征及土-水特性

2.1 微观结构特征

图 5 为未经冻融循环的试样在不同含水率下的 MIP 试验结果。图 6, 7 分别为为经冻融—干湿路径、干湿—冻融路径以及交叉路径作用的试样在 2 种不同含水率 (20.76%, 25.04%) 下的 MIP 试验结果。

图 5~7 中累积进汞曲线 (CI 曲线) 为累积进汞孔隙比 ( $e_{MIP}$ , 累积进汞体积与土颗粒体积之比) 和孔径 ( $d$ ) 的关系, 孔隙分布曲线 (PSD 曲线) 为 CI 曲线的偏导曲线 (即  $\partial e_{MIP}/\partial \lg d$  与  $\lg d$  的关系)。

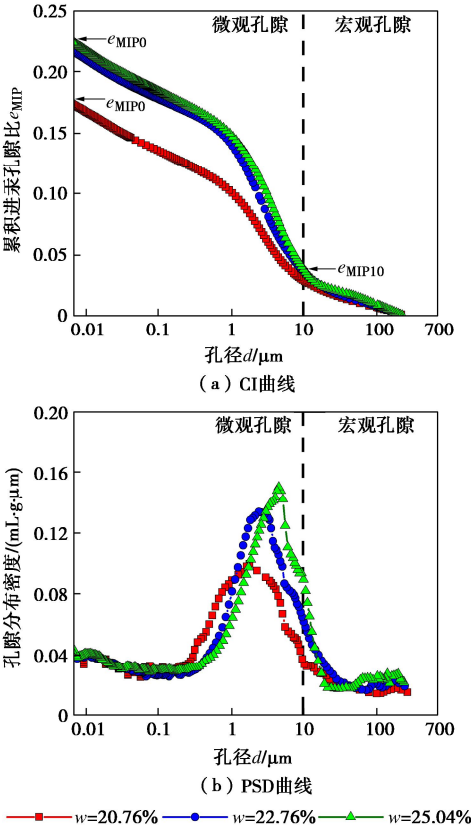


图 5 不同含水率下未冻融试样的曲线

Fig. 5 (a) CI curves and (b) PSD curves of untreated specimens under various moisture contents



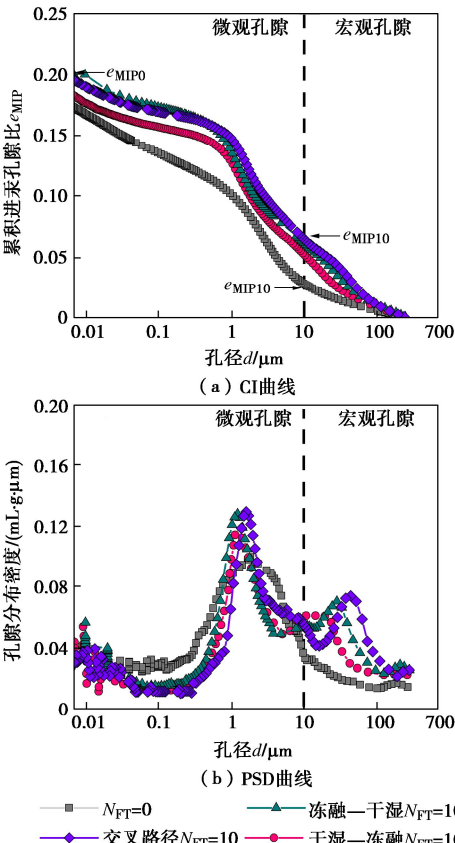


图 6 不同温湿路径下试样的曲线 ( $w=20.76\%$ )

Fig. 6 (a) CI curves and (b) PSD curves of specimens under different moisture and temperature paths ( $w = 20.76\%$ )

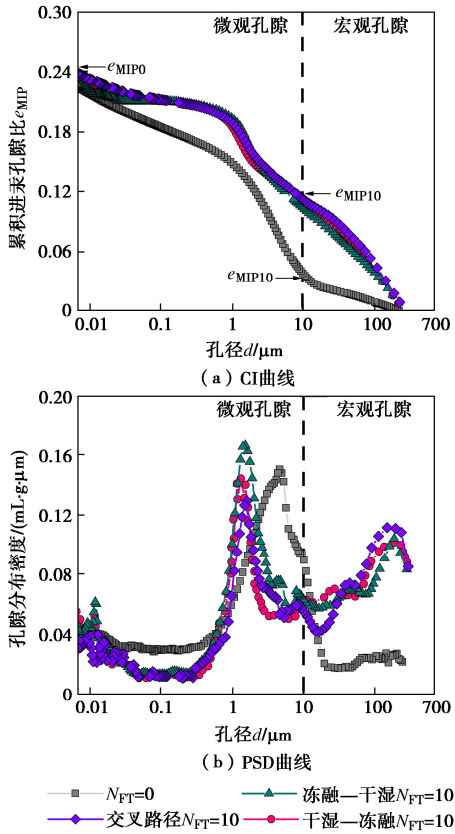


图 7 不同温湿路径下试样的曲线 ( $w=25.04\%$ )

Fig. 7 (a) CI curves and (b) PSD curves of specimens under different moisture and temperature paths ( $w = 25.04\%$ )

压实黏土通常具有二元孔隙结构, 即土中孔隙可分为团聚体内的微观孔隙和团聚体间的宏观孔隙<sup>[33]</sup>。由图 5~7, 经历不同温湿作用试样的 CI 和 PSD 曲线在  $d=10 \mu m$  处均表现出较为统一和显著的变化, 如大小孔隙峰的交界、小孔隙峰的出现等。故取  $d=10 \mu m$  为试样宏、微观孔隙的界限<sup>[33]</sup>。土体微观孔隙的孔隙比 ( $e_{tp}$ ) 与宏观孔隙的孔隙比  $e_{sp}$  可由 CI 曲线确定, 即  $e_{sp}=e_{MIP10}$ ,  $e_{tp}=e_{MIP0}-e_{MIP10}$ , 其中  $e_{MIP0}$  和  $e_{MIP10}$  分别为总累积进汞孔隙比 (即 CI 曲线的最大值) 和  $10 \mu m$  界限处的累积进汞孔隙比。表 2 总结了不同温湿路径下试样的  $e_{tp}$  与  $e_{sp}$  值。

对未经冻融循环作用的试样 (图 5, 表 2), 不同含水率下土体的 PSD 曲线均表现为单峰形式, 峰值出现在微观孔隙区 (对应孔径  $2 \sim 5 \mu m$ ), 此时土体较为密实, 土中微观孔隙占主导 ( $e_{MIP0}$  中  $e_{tp}$  占比约 83%), 故 PSD 曲线呈现单峰形式, 与 Burton 等<sup>[36]</sup>的研究结果一致。微观孔隙对增、脱湿过程敏感, 它们在脱湿时收缩, 在增湿时膨胀。其 PSD 曲线的峰值及 CI 曲线的形态随  $w$  显著变化。相对地, 宏观孔隙的 CI 曲线和 PSD 曲线在增、脱湿过程中无明显改变, 这与文献中相关研究结论一致<sup>[10, 37]</sup>, 即增、脱湿过程主要影响土体微观孔隙, 造成团聚体自身的胀缩, 对宏观孔隙影响相对较小。

对经历不同温湿路径作用的试样 (图 6, 7), 10 次冻融循环后, 其 PSD 曲线由单峰形式转化为双峰形式, 新的峰值出现在宏观孔隙区。宏观孔隙的峰值孔径在含水率较低时 ( $w=20.76\%$ ) 在  $20 \sim 50 \mu m$ , 在含水率较高时 ( $w=25.04\%$ ) 在  $200 \mu m$  左右。

表 2 不同温湿路径下试样的宏、微观孔隙比

Table 2 Void ratios of structural and textural pores of different moisture and temperature paths

$N_{FT}$	$w / \%$	路径	$e_{MIP0}$	$e_{sp}$	$e_{tp}$
0	22.76	初始状态	0.218	0.036	0.182
0	20.76	脱湿	0.175	0.029	0.146
0	25.04	增湿	0.225	0.038	0.187
10	20.76	干湿—冻融	0.185	0.053	0.132
10	20.76	冻融—干湿	0.200	0.062	0.138
10	20.76	随机	0.197	0.066	0.131
10	25.04	干湿—冻融	0.235	0.112	0.123
10	25.04	冻融—干湿	0.228	0.105	0.123
10	25.04	随机	0.239	0.113	0.126

2.2 土-水特性

图 8 为通过滤纸法测得的压实黏土的土-水特征曲线 (SWCC)。图 8 中符号表示实测值, 曲线表示 SWCC 模型的拟合结果。采用简化的 Van Genuchten SWCC 模型<sup>[38]</sup>对实测结果进行拟合:

$$w = w_{sat} \left[ 1 + \left( \frac{s}{a_w} \right)^{n_w} \right]^{1/n_w - 1} \quad (2)$$

式中： $s$  为吸力； $w_{\text{sat}}$  为饱和含水率； $a_w$  为与土体进气值有关的参数； $n_w$  为与土体孔隙大小分布有关的参数，主要控制曲线在过渡段的形态。

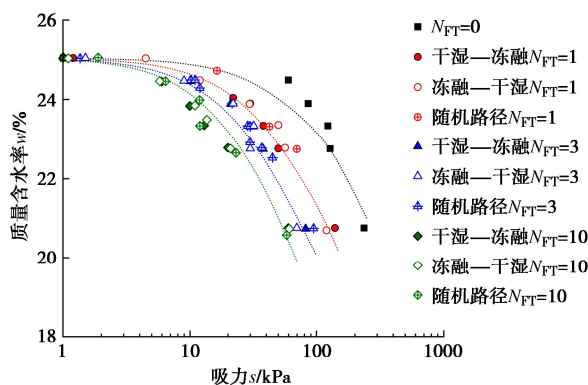


图 8 滤纸法所得不同温湿路径下试样的 SWCC

Fig. 8 SWCCs of specimens under different moisture-temperature paths (filter paper method)

由图 8 可知,随着冻融循环次数增加,所测 SWCC 均呈现两种变化:①SWCC 下移,即相同吸力对应的含水率下降,相同含水率对应的吸力下降;②过渡区 ( $10\text{ kPa} < s < 300\text{ kPa}$ ) 内 SWCC 的斜率略微增加。上述变化在第一次冻融后最为明显。该现象表明,土体持水能力随冻融循环次数的增加而显著降低,这与文献[16, 19]中的试验结论一致。压实土体的土-水特性决定于其孔隙结构。过渡区内,土中水分主要赋存于微观孔隙中,故其持水能力取决于微观孔隙[35]。由 MIP 试验结果可知,经历温湿作用后,土体内的宏观孔隙发育,微观孔隙收缩。因此,随着温湿作用后微观孔隙的减少,土体的持水量(即相同  $s$  下的  $w$ )下降,脱湿速率(即 SWCC 的斜率)增大,持水能力降低。

图 8 中,含水率相同但经历不同温湿路径的试样吸力值较为接近。所有试验数据中,相同吸力下含水率差别与相同含水率下吸力差别均在 10%以内。可见,长期温湿作用后,经历不同温湿路径的试样的 SWCC 没有显著差别,这与 MIP 试验结果呼应,即不同温湿路径对微观结构和土-水特性的影响具有相似性。

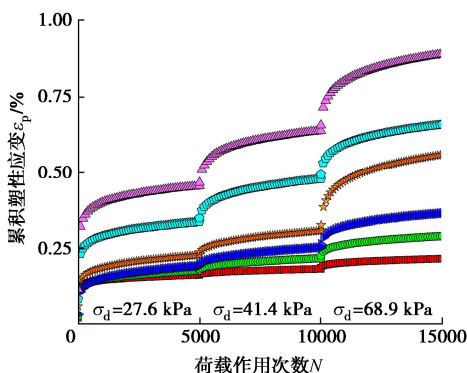
### 3 压实黏土的动力响应特性

#### 3.1 累积塑性应变

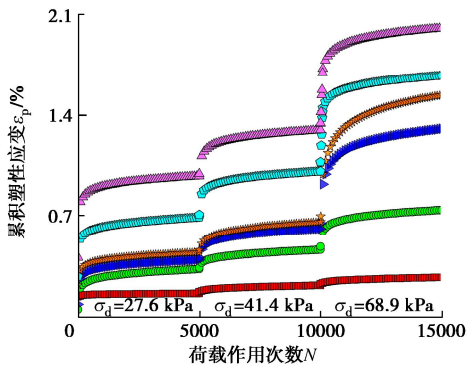
动三轴试验中经历冻融-干湿路径作用试样的累积塑性应变  $\varepsilon_p$  随动荷载作用次数  $N$  的发展关系如图 9 所示(其余路径下试样的试验结果类似)。

在其他条件相同情况下,  $\varepsilon_p$  随冻融循环次数、含水率以及偏应力的增加而增大,说明土体的力学特性

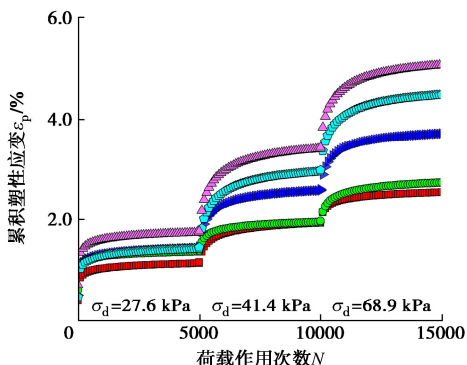
在冻融循环、增湿以及反复加载过程中产生了弱化,这与相关研究结论是一致的[25],也与 2.1 节中结论呼应,即土体经温湿作用后宏观孔隙增多,土体出现更多大孔隙与微裂隙,土体结构弱化。



(a)  $N_{\text{FT}}=0$



(b)  $N_{\text{FT}}=1$



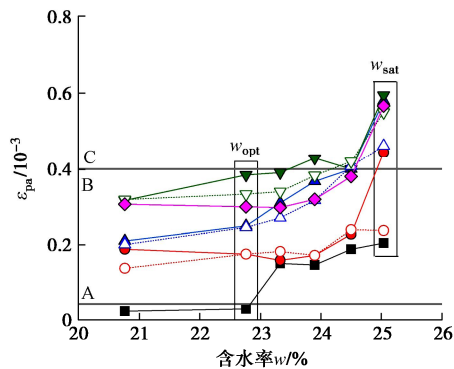
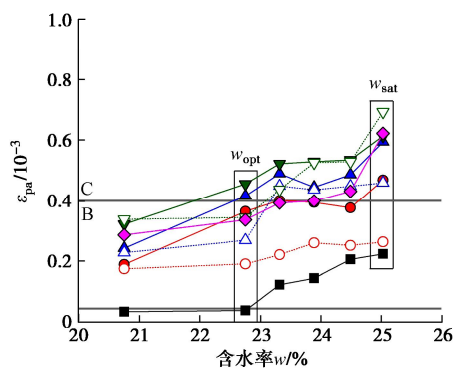
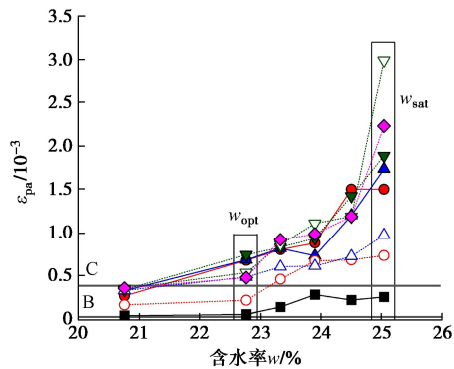
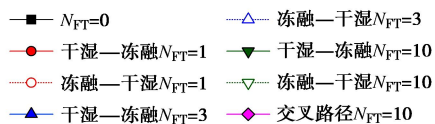
(c)  $N_{\text{FT}}=10$

图 9 累积塑性应变随荷载作用次数的发展

Fig. 9 Development of  $\varepsilon_p$  during cyclic loading

Werkmeister 等[39]将动荷载作用下  $\varepsilon_p$  随  $N$  发展的关系划分为塑性稳定型、塑性过渡型和递增破坏型 3 种类型,并基于第 5000 次加载时的累积塑性应变与第 3000 次加载时的累积塑性应变的差值  $\varepsilon_{\text{pa}}$  提出了判定方法(式(3))。 $\varepsilon_{\text{pa}}$  体现了  $\varepsilon_p$ - $N$  关系在达到稳定后的斜率,即  $\varepsilon_p$  在反复加载过程中的累积速度。本文将  $\varepsilon_{\text{pa}}$  作为表征土体累积塑性变形特性的关键参数,研究其在温湿过程中的变化规律(图 10)。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{pa} < 0.045 \times 10^{-3} & \quad (\text{塑性稳定型}), \\ 0.045 \times 10^{-3} < \varepsilon_{pa} < 0.4 \times 10^{-3} & \quad (\text{塑性过渡型}), \\ \varepsilon_{pa} > 0.4 \times 10^{-3} & \quad (\text{递增破坏型}). \end{aligned} \right\} (3)$$

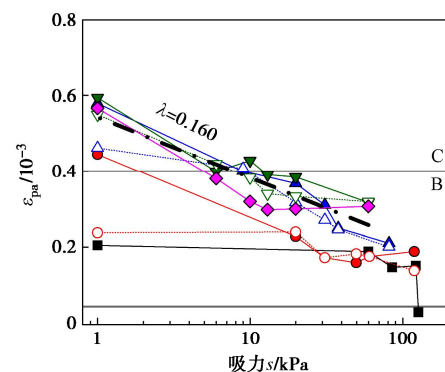
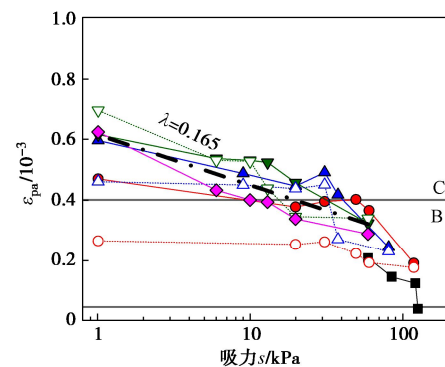
(a)  $\sigma_c = 13.8 \text{ kPa}$ ,  $\sigma_d = 27.6 \text{ kPa}$ (b)  $\sigma_c = 13.8 \text{ kPa}$ ,  $\sigma_d = 41.4 \text{ kPa}$ (c)  $\sigma_c = 13.8 \text{ kPa}$ ,  $\sigma_d = 68.9 \text{ kPa}$ 图 10 不同温湿路径下  $\varepsilon_{pa}$  随  $w$  的变化关系Fig. 10 Variation of  $\varepsilon_{pa}$  with  $w$  for specimens under different moisture and temperature paths

由图 10 可见, 不同温湿路径下,  $\varepsilon_{pa}$  均随含水率、偏应力幅值及冻融循环次数的增加而增加。 $\varepsilon_{pa}$ - $w$  呈非线性关系。在含水率较低时 ( $w \leq w_{opt}$ ),  $\varepsilon_{pa}$  随  $w$  的增长速率较小。在含水率较高时 ( $w > w_{opt}$ ),  $\varepsilon_{pa}$  随  $w$  显著增长。同时,  $\varepsilon_{pa}$ - $w$  关系的斜率随  $N_{FT}$  的增加而增大, 表明冻融循环后压实黏土的累积塑性应变对含水率变化变得更加敏感。

图 10 中基于式 (3) 标出了  $\varepsilon_p$ - $N$  关系不同类型间的界限 (其中 A 指塑性稳定型, B 指塑性过渡型, C 指递增破坏型)。含水率、偏应力或冻融循环次数提高时,  $\varepsilon_p$ - $N$  关系逐渐由塑性稳定型变为塑性过渡型, 再变为递增破坏型。当含水率较高且偏应力较大时, 冻融循环后压实黏土的  $\varepsilon_p$ - $N$  关系更易变为塑性过渡型乃至递增破坏型。

图 11 为  $\varepsilon_{pa}$  与试样初始吸力 (由图 8 中实测 SWCC 确定) 的关系。与图 10 结果对应,  $\varepsilon_{pa}$  随吸力的减小而增大,  $\varepsilon_p$ - $N$  关系逐渐由塑性稳定型变为塑性过渡型再变为递增破坏型。 $N_{FT}$  增加时,  $\varepsilon_{pa}$ - $lgs$  关系曲线变陡, 说明  $\varepsilon_p$  对湿度更加敏感。与非线性的  $\varepsilon_{pa}$ - $w$  关系不同, 经温湿作用后, 特别是  $N_{FT} \geq 3$  时, 试样的  $\varepsilon_{pa}$ - $lgs$  关系总体呈线性特征。对不同应力状态下  $N_{FT}$  为 3, 10 时的  $\varepsilon_{pa}$ - $lgs$  关系进行线性拟合发现, 其斜率 ( $\lambda = d\varepsilon_{pa}/dlgs$ ) 在  $\sigma_d$  较低时 (27.6, 41.4 kPa) 保持稳定, 当  $\sigma_d$  增至 68.9 kPa 时显著增长。可见存在循环荷载阈值 (本研究中阈值在 41.4~68.9 kPa), 当  $\sigma_d$  超过该阈值时  $\varepsilon_{pa}$  对湿度变化变得非常敏感。

综合图 10, 11 所示结果发现, 不同温湿路径作用后的试样的  $\varepsilon_{pa}$  随  $w$ ,  $s$ ,  $\sigma_d$  的变化规律在首次冻融循环时 ( $N_{FT}=1$ ) 表现出一定区别, 但当温湿作用达到平衡时 ( $N_{FT}=10$ ), 各路径试样的  $\varepsilon_{pa}$  的差异性较小, 故可以认为, 长期环境荷载下压实黏土  $\varepsilon_p$  的变化规律与环境荷载作用的温湿路径关系不大。

(a)  $\sigma_c = 13.8 \text{ kPa}$ ,  $\sigma_d = 27.6 \text{ kPa}$ (b)  $\sigma_c = 13.8 \text{ kPa}$ ,  $\sigma_d = 41.4 \text{ kPa}$



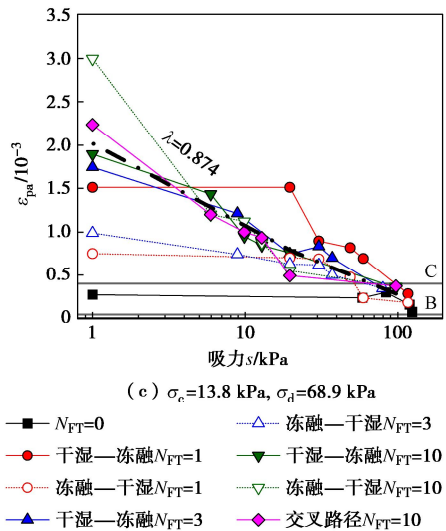


图 11 不同温湿路径下  $\varepsilon_{pa}$  随  $s$  的变化关系

Fig. 11 Variation of  $\varepsilon_{pa}$  with  $s$  for specimens under different moisture and temperature paths

3.2 回弹模量

回弹模量试验中每个试样在不同应力组合下产生 15 个不同的  $M_R$  值。为分析方便，将  $\sigma_c=27.6$  kPa， $\sigma_d=41.4$  kPa（试验中围压和偏应力的平均值）应力组合下测得的  $M_R$  作为代表性回弹模量（ $M_{Rrep}$ ）进行研究。图 12 为  $M_{Rrep}$  随  $w$  的变化关系。代表性回弹模量（ $M_{Rrep}$ ）对湿度的敏感性可根据图中斜率定量描述。无冻融循环时（ $N_{FT}=0$ ）， $M_{Rrep}-w$  关系曲线呈双线性特征，转折点在  $w_{opt}$  附近。在低含水率下， $M_{Rrep}-w$  关系的斜率  $\delta$ （ $\delta=dM_{Rrep}/dw$ ）为 6.23 MPa/%，在高含水率下， $\delta=21.47$  MPa/%。可见，与图 10 所示  $\varepsilon_{pa}-w$  关系类似， $M_{Rrep}$  对在高含水率条件下对湿度变化更加敏感。

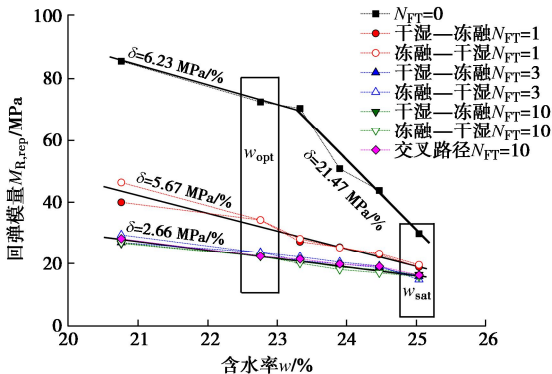


图 12 不同温湿路径下含水率对  $M_{Rrep}$  的影响

Fig. 12 Effects of moisture content on  $M_{Rrep}$  of specimens under different moisture and temperature paths

上述现象与土体的微观结构及持水特性有关：①含水率较高时，黏土中的微观孔隙饱和，宏观孔隙中亦存在毛细水。动、静外荷载一般对宏观孔隙影响显著，对微观孔隙影响很小<sup>[35]</sup>。外荷载可使宏观孔隙压缩或塌陷，进而造成土体吸力的显著下降，甚至产生超孔隙水压力，导致土体骨架应力减小和力学性质衰

化。②含水率较低时，水分一般赋存在微观孔隙中，宏观孔隙中水分很少甚至没有。因此，动、静外荷载及相应的宏观孔隙坍塌现象对于土体吸力的影响较小，不会造成土体骨架应力及力学性质的显著变化。③毛细现象在土体含水率较高时更为显著，即吸力对土体骨架应力的贡献度更大。因此，高含水率条件下土体的力学特性对吸力和含水率更敏感。

冻融循环作用后， $M_{Rrep}-w$  呈线性关系。 $M_{Rrep}$  对湿度的敏感性显著降低，经 3 次冻融循环， $\delta$  降至 2.66 MPa/%并在后续冻融循环中维持不变。这与冻融循环后  $\varepsilon_{pa}$  对湿度敏感性的变化规律正好相反。 $M_R$  代表了土体抵抗动荷载作用的能力， $\varepsilon_p$  代表了土体在动荷载作用下累积的变形和损伤，两者对湿度的敏感性与土体结构的完整性和土颗粒间的连接强度分别呈正相关和负相关关系。2.1 节中微观结构观测结果已表明，温湿作用，特别是冻融循环作用导致土体内部裂隙和宏观孔隙发育。这弱化了土体结构的完整性以及土颗粒之间的连接强度，由此造成了  $M_R$  和  $\varepsilon_p$  对湿度敏感性的相应变化。

图 13 比较了经 3 种温湿路径作用试样在相同  $N_{FT}$  和  $w$  状态下的  $M_R$ 。 $N_{FT}=1$ ， $w=20.76\%$  时冻融—干湿路径和干湿—冻融路径的  $M_R$  差异明显，大部分的数据点在 1:1 线以下，即冻融—干湿路径的  $M_R$  高于干湿—冻融路径的  $M_R$ ，但在其他含水率下测得的  $M_R$  无显著差别。当  $N_{FT}>1$  时，3 种路径下的  $M_R$  非常接近。这与本文所测  $\varepsilon_{pa}$  结果一致，表明长期温湿作用后，压实黏土的动力响应特性变化规律与温湿作用路径无关。

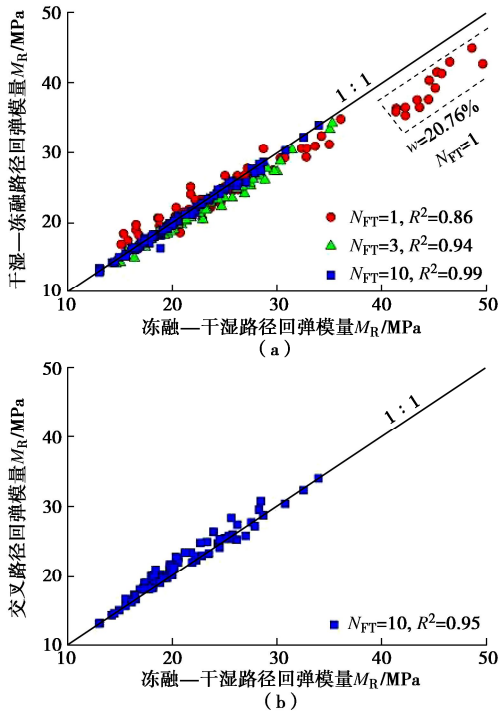


图 13 不同温湿路径下所测  $M_R$  对比

Fig. 13 Comparisons between values of  $M_R$  obtained from specimens under different moisture-temperature paths



## 4 回弹模量预测模型

Han 等<sup>[28]</sup>考虑回弹模量与饱和度  $S_r$  和吸力  $s$  的非线性关系, 基于非饱和土力学原理提出一种预测回弹模量的归一化模型:

$$\frac{M_R - M_{Rsat}}{M_{Ropt} - M_{Rsat}} = \frac{s}{s_{opt}} \left( \frac{S_r}{S_{r_{opt}}} \right)^\xi \quad (4)$$

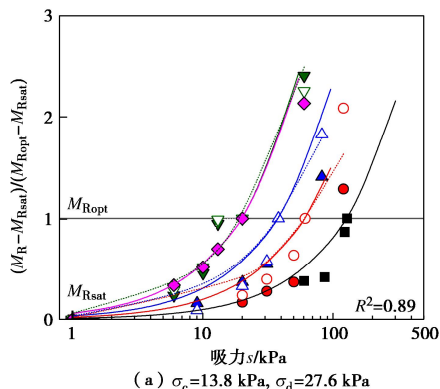
式中: 下标  $opt$  和  $sat$  分别为最优含水率和饱和含水率条件下土体的各物理力学状态量;  $\xi$  为模型参数, 对于无黏性土和黏性土,  $\xi$  分别取值为 1.0, 2.0。冻融循环后, 对于经历反复冻融和干湿作用的黏性土, 其宏观体积对含水率变化一般变得很不敏感, 即试样在湿度变化过程中的体变可以忽略<sup>[9]</sup>。考虑到本研究中大部分试样均经历了多次温湿循环, 故忽略试样在湿度变化过程中的体变, 用下式预测  $M_R$ :

$$\frac{M_R - M_{Rsat}}{M_{Ropt} - M_{Rsat}} = \frac{s}{s_{opt}} \left( \frac{w}{w_{opt}} \right)^\xi \quad (5)$$

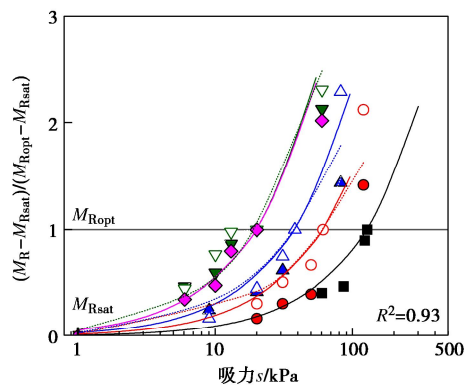
利用该模型预测  $M_R$  时, 仅需测定少量参数, 包括  $M_{Ropt}$ ,  $M_{Rsat}$  和 SWCC。当预估  $M_R-s$  或  $M_R-w$  关系时, 可通过 SWCC 确定  $s$  和  $w$  的对应关系。可见, 该模型具有模型参数少且易获取、适用范围广等优点。

以 3 种应力组合下 ( $\sigma_c$  与  $\sigma_d$  组合与  $\varepsilon_p$  试验一致) 所测  $M_R$  为例, 图 14 显示了不同路径作用后试样归一化的  $M_R$  值随初始吸力 (由图 8 中实测 SWCC 确定) 的变化关系。根据式 (5), 分别对经历不同温湿路径的回弹模量数据点进行拟合, 得到相应拟合曲线。预测中采用图 8 中拟合的 SWCC, 取  $\xi = 2.0$ 。图中符号为实测值, 曲线为模型预测结果。因式 (5) 需基于  $M_{Ropt}$  进行预测, 其预测曲线会严格经过对应的实测数据点中的  $M_{Ropt}$  值, 即  $(M_R - M_{Rsat}) / (M_{Ropt} - M_{Rsat}) = 1$  的点。

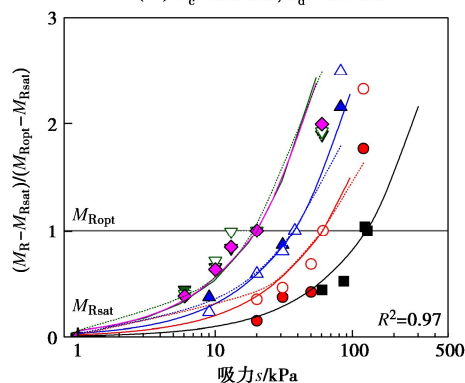
与图 12 所示  $M_R-w$  关系类似, 不同路径作用后压实黏土的  $M_R-s$  关系仅在  $N_{FT}=1$  时表现出一些差异, 在  $N_{FT}=10$  时,  $M_R-s$  关系变为一致, 不受不同温湿路径的影响。同时, 式 (5) 的预测结果与实测值偏差很小, 说明式 (5) 不仅适用于预测未经冻融循环影响的压实黏土的  $M_R$ , 还可以较好地描述经历不同温湿路径作用的压实黏土的非线性  $M_R-s$  关系。



(a)  $\sigma_c=13.8$  kPa,  $\sigma_d=27.6$  kPa



(b)  $\sigma_c=13.8$  kPa,  $\sigma_d=41.4$  kPa



(c)  $\sigma_c=13.8$  kPa,  $\sigma_d=68.9$  kPa

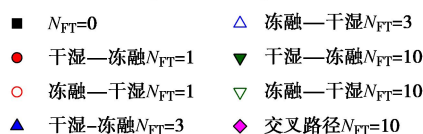


图 14 不同温湿路径下  $M_R$  随  $s$  的变化关系

Fig. 14 Variation of  $M_R$  with  $s$  for specimens under different moisture and temperature paths

## 5 结 论

通过试验研究测定了不同温湿路径作用下压实黏土的微观结构特征、土-水特性和动力响应特性的变化规律。通过比较分析和理论研究得到 4 点结论。

(1) 经历温湿作用后, 压实黏土的宏观孔隙发育, 微观孔隙收缩, 导致土体持水能力降低, 脱湿速率增大。长期温湿作用达到平衡后, 经历不同温湿路径的试样具有相似的微观孔隙结构特征及 SWCC。

(2) 累积塑性应变  $\varepsilon_p$  其累积速率  $\varepsilon_{pa}$  随  $N_{FT}$ ,  $w$ ,  $\sigma_d$  的增加而增大。回弹模量  $M_R$  随  $N_{FT}$  和  $w$  的增加而减小。 $M_R$  随围压  $\sigma_c$  和偏应力  $\sigma_d$  的变化规律受温湿作用后土体结构性变化的影响。

(3) 相比低含水率状态 ( $w < w_{opt}$ ),  $\varepsilon_p$  和  $M_R$  在高含水率状态 ( $w > w_{opt}$ ) 下对湿度变化更加敏感。冻融循环作用后,  $\varepsilon_p$  和  $M_R$  对湿度的敏感性分别显著增加和降低。这与温湿作用后压实土的土-水特性变化规律及土体结构性和土颗粒间连接强度的衰减相关。

(4) 温湿作用后土体的  $\varepsilon_{pa-w}$  和  $M_{R-s}$  关系呈现非线性特征,  $\varepsilon_{pa-lgs}$  和  $M_{R-w}$  关系呈现线性特征。不同温湿路径在冻融循环初期对  $\varepsilon_p$  和  $M_R$  的影响存在一定差异, 但长期温湿作用后, 特别是冻融循环作用达到平衡后, 不同温湿路径对  $\varepsilon_p$  和  $M_R$  的影响差异很小。采用 Han 等<sup>[28]</sup>所提  $M_R$  模型能够较好地预测不同温湿路径和循环荷载作用下压实黏土的  $M_R$  随湿度的变化关系。

## 参考文献:

- [1] BROWN S F. Soil mechanics in pavement engineering[J]. Géotechnique, 1996, **46**(3): 383-426.
- [2] HUANG Y H. Pavement Analysis and Design[M]. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2004.
- [3] JONG D T, BOSSCHER P J, BENSON C H. Field assessment of changes in pavement moduli caused by freezing and thawing[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1998, **1615**(1): 41-48.
- [4] CULLEY R W. Effect of freeze-thaw cycling on stress-strain characteristics and volume change of a till subjected to repetitive loading[J]. Can Geotech J, 1971, **8**(3): 359-371.
- [5] WANG T L, LIU Y J, YAN H, et al. An experimental study on the mechanical properties of silty soils under repeated freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, **112**: 51-65.
- [6] NEWMAN A C D, THOMASSON A J. Rothamsted studies of soil structure III: pore size distributions and shrinkage processes[J]. Journal of Soil Science, 1979, **30**(3): 415-39.
- [7] SARTORI G, FERRARI G A, PAGLIAI M. Changes in soil porosity and surface shrinkage in a remolded, saline clay soil treated with compost[J]. Soil Science, 1985, **139**(6): 523.
- [8] 张英, 郝慧, 杨成松. 基于 SEM 和 MIP 的冻融循环对粉质黏土强度影响机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(增刊 1): 3597-3603. (ZHANG Ying, BING Hui, YANG Chengsong. Study on the influence mechanism of freeze-thaw cycle on the strength of silty clay based on SEM and MIP[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(S1): 3597-3603. (in Chinese))
- [9] DING L Q, VANAPALLI S, ZOU W, et al. Freeze-thaw and wetting-drying effects on the hydromechanical behavior of a stabilized expansive soil[J]. Construction and Building Materials, 2021, **275**: 122162.
- [10] 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 Guitao, HAN Zhong, ZOU Weilie, 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. (in Chinese))
- [11] 万勇, 薛强, 吴彦, 等. 干湿循环作用下压实黏土力学特性与微观机制研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(10): 2815-2824. (WAN Yong, XUE Qiang, WU Yan, et al. Mechanical properties and micromechanisms of compacted clay during drying-wetting cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(10): 2815-2824. (in Chinese))
- [12] BURTON G J, PINEDA J, SHENG D, et al. Microstructural changes of an undisturbed, reconstituted and compacted high plasticity clay subjected to wetting and drying[J]. Engineering Geology, 2015, **193**: 363-373.
- [13] NG C W W, PANG Y W. Experimental investigations of the soil-water characteristics of a volcanic soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**(6): 1252-1264.
- [14] MIAO L C, LIU S Y, LAI Y M. Research of soil-water characteristics and shear strength features of Nanyang expansive soil[J]. Engineering Geology, 2002, **65**(4): 261-267.
- [15] YAO Y, LUO S, QIAN J, et al. Soil-water characteristics of the low liquid limit silt considering compaction and freeze-thaw action[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020(1): 8823666.
- [16] ZHAO G T, ZOU W L, HAN Z, et al. Evolution of soil-water and shrinkage characteristics of an expansive clay during freeze-thaw and drying-wetting cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, **186**: 103275.
- [17] 龚壁卫, 吴宏伟, 王斌. 应力状态对膨胀土 SWCC 的影响研究[J]. 岩土力学, 2004, **25**(12): 1915-1918. (GONG Biwei, WU Hongwei, WANG Bin. Study on the influence of stress state on SWCC of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(12): 1915-1918. (in Chinese))
- [18] 王也, 王建磊, 鲁洋, 等. 南阳膨胀土冻融循环后的土水特征试验研究[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(2): 91-96. (WANG Ye, WANG Jianlei, LU Yang, et al. Experimental research on soil-water characteristics of Nanyang expansive soil subjected to freeze-thaw cycles[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(2): 91-96. (in Chinese))
- [19] CHAMBERLAIN E J, GOW A J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils[J].

- Developments in Geotechnical Engineering, 1979, **26**(C): 73-92.
- [20] XU J, LI Y, REN C Influence of freeze-thaw cycles on microstructure and hydraulic conductivity of saline intact loess[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, **181**: 103183.
- [21] LIU J, ZHANG X, LI L, et al. Resilient behavior of unbound granular materials subjected to a closed-system freeze-thaw cycle[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2018, **32**(1): 1-13.
- [22] ISHIKAWA T, LIN T S, KAWABATA S, et al. Effect evaluation of freeze-thaw on resilient modulus of unsaturated granular base course material in pavement[J]. Transportation Geotechnics, 2019, **21**: 100284.
- [23] NG C W W, ZHOU C, YUAN Q, et al. Resilient modulus of unsaturated subgrade soil: experimental and theoretical investigations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, **50**(2): 223-232.
- [24] RAHMAN M S, ERLINGSSON S. Moisture influence on the resilient deformation behaviour of unbound granular materials[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016, **17**(9): 763-775.
- [25] LEKARP F, ISACSSON U, DAWSON A. State of the Art. II: permanent strain response of unbound aggregates[J]. Journal of Transportation Engineering, 2000, **126**(1): 76-83.
- [26] LU Z, FANG R, CHEN L H, et al. Long-term deformation of highway subgrade under coupling effect of traffic load and drying-wetting cycles[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, **20**(2): 04019168.
- [27] ZHAO Y F, REN S, JIANG D Y, et al. Influence of wetting-drying cycles on the pore structure and mechanical properties of mudstone from Simian Mountain[J]. Construction and Building Materials, 2018, **191**: 923-931.
- [28] HAN Z, VANAPALLI SK. Model for predicting resilient modulus of unsaturated subgrade soil using soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, **52**(10): 1605-1619.
- [29] HAN Z, VANAPALLI S K. Relationship between resilient modulus and suction for compacted subgrade soils[J]. Engineering Geology, 2016, **211**: 85-97.
- [30] HAN Z, VANAPALLI S K, ZOU W L. Integrated approaches for predicting soil-water characteristic curve and resilient modulus of compacted fine-grained subgrade soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, **54**(5): 646-663.
- [31] 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020. (Test Methods of Soils for Highway Engineering: JTG 3430—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese))
- [32] HAN Z, ZHAO G, LIN J, et al. Influences of temperature and moisture histories on the hydrostructural characteristics of a clay during desiccation[J]. Engineering Geology, 2022, **297**: 106533.
- [33] AASHTO, Designation T307—99: Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials[S]. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2015.
- [34] 非饱和土试验方法标准: T/CECS 1337—2023[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023. (Standard for Unsaturated Soil Testing Method: T/CECS 1337—2023[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2023. (in Chinese))
- [35] 公路路基设计规范: JTG D 30—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005. (Specifications for Design of Highway Subgrades: JTG D 30—2004[S]. Beijing: China Communications Press, 2005. (in Chinese))
- [36] BURTON G J, SHENG D, CAMPBELL C. Bimodal pore size distribution of a high-plasticity compacted clay[J]. Géotechnique Letters, 2014, **4**(2): 88-93.
- [37] ZHANG F, CUI Y J, YE W M. Distinguishing macro-and micro-pores for materials with different pore populations[J]. Géotechnique Letters, 2018, **8**(2): 102-110.
- [38] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils1[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**(5): 892.
- [39] WERKMEISTER S, DAWSON A R, WELLNER F. Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept[J]. Transportation Research Record, 2001, **1757**(1): 75-81.