

DOI: 10.11779/CJGE20240593

水汽长期循环下红层泥岩填料力学性能演变规律研究

陈康^{1,2}, 刘先峰^{*1,2}, 蒋关鲁^{1,2}, 袁胜洋^{1,2}, 马杰^{1,2}, 陈忆涵^{1,2}

(1. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 红层泥岩填料水敏性高, 随季节交替, 路基因长期水汽循环导致力学性能不断演变。为研究环境湿度变化下红层泥岩填料力学特性演变规律, 开展了不同幅度的长期水汽循环试验(230 d)、无侧限抗压试验、弯曲元试验和三轴试验。此外, 还开展了连续滴水扫描电镜(SEM)试验观察试样微观结构在增湿—干燥过程中的演变规律。结果表明: 高幅度循环下, 试样在干侧(低湿度)下干燥产生体缩, 强度高于初始状态, 在湿侧(高湿度)下产生体胀, 强度低于初始状态。随循环次数增加, 试样强度、小应变刚度和回弹模量均产生了衰减。低幅度循环下, 试样在干侧和湿侧均产生体胀, 强度和小应变刚度随次数不断降低。所构建的力学性能-累积体变方程能够统一描述不同循环幅度下填料强度和刚度的演变规律。连续滴水 SEM 试验结果表明, 填料在干燥-增湿过程中不可逆的团粒松散崩解和裂缝衍生是导致力学性能下降的主要原因。

关键词: 高速铁路; 红层泥岩填料; 水汽循环; 统一演变方程; 微观结构

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)11-2345-10

作者简介: 陈康(1995—), 男, 博士, 博士后, 主要从事特殊岩土力学特性研究。E-mail: kang-chen@my.swjtu.edu.cn。

Evolution law of mechanical properties of red mudstone fill material under long-term relative humidity cycles

CHEN Kang^{1,2}, LIU Xianfeng^{1,2}, JIANG Guanlu^{1,2}, YUAN Shengyang^{1,2}, MA Jie^{1,2}, CHEN Yihan^{1,2}

(1. Key Laboratory of High-Speed Railway Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Red mudstone fill material (RMF) is highly sensitive to water content. Evolution on mechanical properties of RMF subgrade during long-term relative humidity cycles would be induced by the change of seasons. The long-term relative humidity (RH) cycles (250 days) with various amplitudes are imposed on RMF. After RH cycles, the unconfined compression, bender element tests and cyclic triaxial tests are performed to investigate the degradation on unconfined compression strength and small strain stiffness. In addition, the Scanning Electronic Microscopy (SEM) tests are employed to examine the microstructure evolution of water dripped specimen during wetting and drying. For high amplitude of RH cycles, the specimens on the dry side (low RH) have shown shrinkage that and higher strength compared to the initial state. The swelling and lower strength is observed in specimen on the wet side (high RH). Degradation on the strength, small strain stiffness and resilient modulus have been clearly observed under RH cycles. For the low amplitude, the specimen has swollen on both wet side and dry side, causing a progressive reduction in strength and small strain stiffness. A unified framework is proposed to capture the evolution on strength and stiffness with irreversible volumetric strain under different amplitude of RH cycles. SEM micrograph of continuous water dripping specimen indicates that the degradation on mechanical properties can be mainly ascribed to irreversible slaking of aggregate and crack propagation.

Key words: high-speed railway; red mudstone fill material (RMF); relative humidity cycles; unified damage law; microstructure

0 引言

红层泥岩广泛分布于西南地区, 既有铁路如达成

线和遂渝线均利用红层泥岩作路基填料以解决沿线 A、B 组填料不足的限制^[1]。路基填料强度和刚度是保

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078432, 52168066, 52378463); 国家公派留学项目(202207000096) This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52078432, 52168066, 52378463) and the China Scholarship Council (Grant No.202207000096).

收稿日期(Received): 2024-06-18 修回日期(Revised): 2024-12-12 接受日期(Accepted): 2025-01-08 网络出版日期(Online): 2025-01-09

*通信作者(E-mail: xianfeng.liu@swjtu.edu.cn)

证线路运营安全和平顺性的重要设计参数^[2]。红层泥岩填料水敏性高,含水率对强度和刚度影响显著^[3-4]。西南地区季节变化明显,填料在运营过程中经历增湿-干燥循环过程,路基服役状态随环境变化而改变。因此,阐明红层泥岩填料强度和刚度在环境变化过程中的演变规律是评价路基长期服役性能的关键基础。

模拟岩土材料增湿-干燥过程有两类方法。一类是使材料与水分直接接触,用于模拟降雨-干燥过程,这种方法称为干湿循环^[5-7]。目前来说,干湿循环对泥岩填料力学性能影响的相关研究比较丰富。尤其是在循环方法^[8]、循环次数^[9]和循环幅度^[9-10]上已经有了较为详细的试验成果。现场降雨结果表明,在24 h暴雨条件下,红层泥岩路基浸润深度较浅,干湿循环主要发生在路基表面^[11]。除干湿循环外,大气环境湿度受季节影响不断变化,因环境湿度变化引起路基状态演变的现象一般称为水汽循环^[12-14]。水汽循环过程中泥岩与水分并未直接接触,而是在环境湿度下平衡从而进行增湿和干燥^[15-16]。通常,水汽循环用于模拟长期环境风化作用对整体路基的影响^[17]。Briggs等^[18]基于伦敦铁路网十余年的现场监测数据指出,长期环境湿度改变下路基发生了显著性能劣化,从而引起额外沉降。Pineda等^[19-20]的研究结果则表明水汽循环下泥岩将产生显著结构劣化,从而引导致力学性能大幅衰减。目前,干湿循环在工程中已受到不少关注。相对而言,虽然水汽循环的影响在直观上较为缓慢,在工程上受到的关注也较少,但对于路基填料性能的劣化作用同样不可忽视。此外,由于水力路径不同,既有关于干湿循环的研究成果不能直接用于表述水汽循环下填料力学性能演变规律^[21-22]。目前关于水汽循环下红层泥岩填料力学性能的研究相对较少,相应演变规律和结构变化机理有待进一步明晰,这无疑不利于评价红层泥岩路基的长期服役性能。

本文针对红层泥岩填料开展了一系列长期水汽循环试验(230 d)。此后,通过无侧限抗压试验、弯曲元试验和动三轴试验测定了填料无侧限抗压强度、小应变刚度和回弹模量。推导了归一化性能因子和累积体变的基本关系,提出了力学性能指标随累积体变的统一演变方程。此外,通过连续滴水SEM试验揭示了红层泥岩填料在干燥-增湿过程中微观结构的演变规律。相应成果可为评价和掌握红层泥岩路基长期服役性能提供参考。

1 试验材料

试验所用红层泥岩取自成都天府新区。取回岩块为全风化泥岩,外观呈红色,内部部分为灰绿色。在工程上,小粒径的红层泥岩因水稳性高而更适宜作路

基填料。参考文献[1],将风化岩块用碎土机破碎后过1 mm筛,所得岩粒即为试验材料。基本物性试验结果表明,填料相对质量密度为2.69,液塑限含水率分别为32.5%和18.2%。XRD试验结果表明,填料含大量石英矿物,占比超过60%,且含少量蒙脱石矿物,占比约为2%~3%。其余为非膨胀矿物如高岭石,钠长石和赤铁矿等。由于含少量膨胀矿物,填料自由膨胀率为34%,具有弱膨胀性。

图1粒径分布曲线,该曲线通过马尔文试验获取。从图1可以看出,填料级配连续,主要由粉粒组成,占比为92.1%,含少量黏粒和砂粒,分别占比3.6%和4.3%。参考《土的工程分类标准:GB/T 50145—2007》,结合物性试验结果,可判定所用红层泥岩填料属于低液限细粒粉质填料。重型击试验结果表明,填料最大干密度为2.01 g/cm³,最优含水率为8.7%。因此,试样初始干密度选定为1.91 g/cm³,初始含水率为8.7%,对应路基压实度为95%。

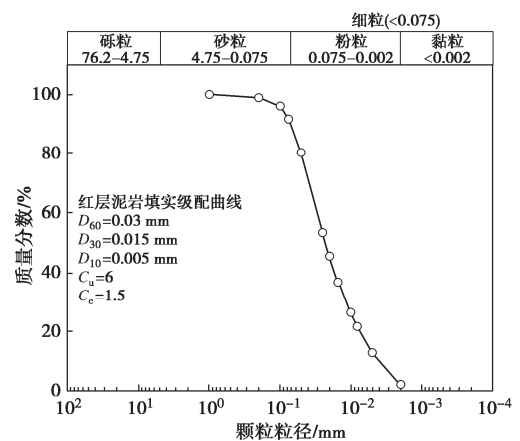


图1 红层泥岩填料粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of RMF

2 试验方案

2.1 水汽循环试验

采用自主研发的水汽循环系统开展试验,示意图如图2所示。系统利用外连控制泵将盐溶液罐中不同湿度空气输入试样罐中。这种方法可以更快达到湿度平衡,且对试样影响程度更低。实际结果表明,红层泥岩填料一次水汽循环所需时间约为45~55 d,总试验时间约为230 d。采用高精度LVDT监测水汽循环过程中试样变形情况。所选LVDT量程为5 mm,精度为0.002 mm。为方便控制,还利用温湿度传感器监测了试验过程中容器内部温度和湿度变化。所有传感器在试验前均进行了标定。环境湿度与试样吸力之间通过Kelvin方程表述^[20]:

$$s = -\frac{RT\rho_w}{M_w} \ln RH \quad (1)$$

式中: s 为试样吸力; R 为气体常数, 取 $8.31 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; ρ_w 为水的密度, 取 $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$; M_w 为水分子的摩尔质量, 取 $18 \text{ g}/\text{mol}$; T 为温度, 室内试验温度控制在 22°C 左右; RH 为相对湿度。式 (1) 表明, 所谓水汽循环就是使试样达到吸力平衡, 实质上也是吸力循环。

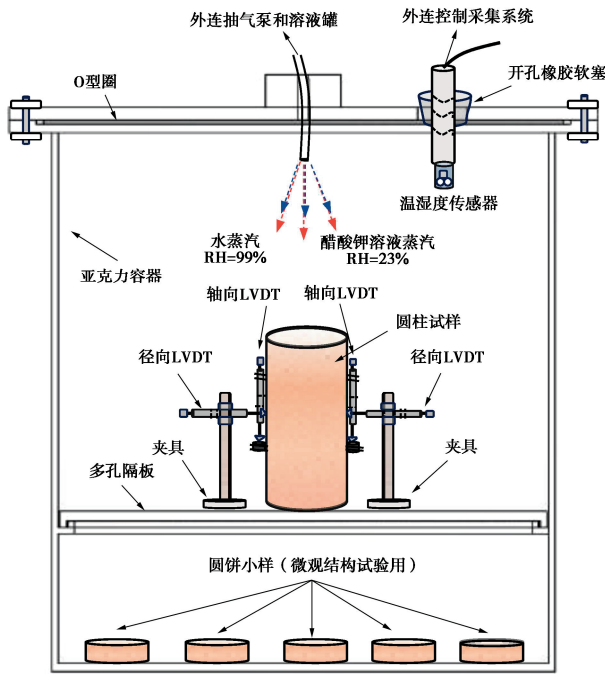


图 2 水汽循环试验系统

Fig. 2 Test system for applying relative humidity cycles

试样为圆柱样, 直径 38 mm , 高度 76 mm 。制样在加载架上进行。制样方法为静压法, 分 5 层制样, 加载速率为 $2 \text{ mm}/\text{min}$ 。制样后密封装袋 7 d 待水分分布均匀后再开始试验。图 3 展示了所施加的湿度值。选择两个循环幅度, 以下分别称为高幅度循环和低幅度循环。高幅度循环是指试样经历 $\text{RH}=99.9\%$ 和 $\text{RH}=23\%$ 湿度循环, 控制溶液分别为蒸馏水和饱和醋酸钾溶液。高循环幅度下, 试样含水率变化区间约为 $2.3\% \sim 14.2\%$ 。低幅度循环是指试样先在 $\text{RH}=99.9\%$ 湿度下平衡后, 然后于空气 (室温约 22°C , 湿度约为 45%) 中干燥至初始含水率。低幅度循环下, 试样含水率变化区间约为 $8.7\% \sim 14.5\%$ 。当试样体积变化低于 $0.02\%/3 \text{ d}$ 时认为平衡完成, 此后, 仍维持水汽循环 $5 \sim 7 \text{ d}$, 使含水率能够分布均匀。详细试验方案如表 1 所示。

表 1 水汽循环后力学试验方案

Table 1 Mechanical test program after RH cycles

力学试验	循环幅度	湿度范围	含水率区间/%	循环次数	所需时间/d
无侧限弯曲元动三轴	高幅度	$23\% \sim 99\%$	$2.3\% \sim 14.2$	6	230
	低幅度	初始值~ 99%	$8.7\% \sim 14.2$	6.5	210

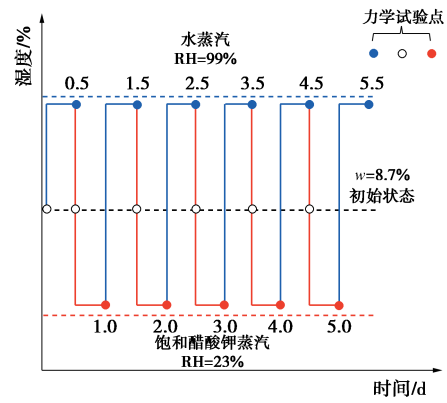


图 3 水汽循环试验示意图

Fig. 3 Applied RH cycles

2.2 力学试验

为探究填料在水汽循环下的力学性能演变规律, 对干湿两侧试样均开展无侧限抗压试验测定强度。加载速率为 $2.5\%/h$, 当加载应力低于峰值强度的 20% 时停止试验。除强度参数外, 还开展了弯曲元试验测定了填料小应变刚度。该试验是指将一对弯曲元芯片嵌入土体, 通过芯片振动发射 S 波, 测定试样 S 波波速后即可计算小应变剪切刚度。弯曲元设备已广泛应用于测定土体小应变刚度, 详细原理和测定方法可参考文献[23]。试验前, 预先标定了元件误差, 即 $3 \mu\text{s}$ 。后续计算中均已考虑该设备误差。

回弹模量同样是计算路基变形的重要设计参数。为此, 还开展了动三轴试验测定了填料回弹模量。试验在 GDS 动三轴仪上开展。参考《土工试验方法标准: GB/T50123—2019》, 以半正弦波加载, 频率为 1 Hz 。如图 4 所示, 动三轴试验按照逐级加载的办法, 每级动应力下振动 $3 \sim 5$ 次, 取平均值作为试验结果。一组试验共加载 $12 \sim 15$ 级动应力, 直至应变振幅超过 10% 时, 认为试样破坏并停止试验。

2.3 微观结构试验

如图 5 所示, 除力学试验外, 还开展了连续滴水 SEM 试验观察试样微观结构变化。试样初始含水率为 8.7% , 采用冷冻干燥法制样。即将圆饼样 (直径 38 mm , 高度 15 mm) 中部用切样刀和线锯切成边长约 1 cm 的立方体小块。随后立即浸入液氮中冷冻。将冷冻后的小样置入冷冻干燥机干燥 48 h , 取出后喷金, 即得 SEM 用样。在拍摄 SEM 照片时, 记录初次观察区域 (图 5 箭头所指)。随后利用滴管在观察面滴入 0.1 mL 蒸馏水 (约 2 滴), 置于空气中干燥 48 h 。再滴入 0.1 mL 蒸馏水, 完成一次滴水试验后再次拍摄 SEM 照片, 观察相同区域试样微观形貌变化。需要注意, 滴水试验中试样含水率变化与水汽循环试验不匹配, 且水分与试样直接接触。该试验主要用于定性说明试样在增湿-干燥过程中的结构变化特征。要进行定量分

析还需开展更多微观结构试验如 MIP 试样和 CT 扫描试验作为补充。

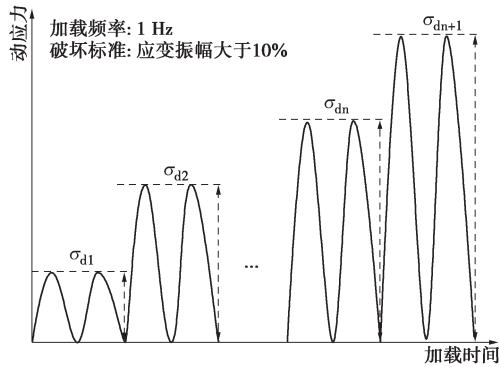


图 4 动三轴试验加载示意图

Fig. 4 Schematic loading history curve of cyclic triaxial tests

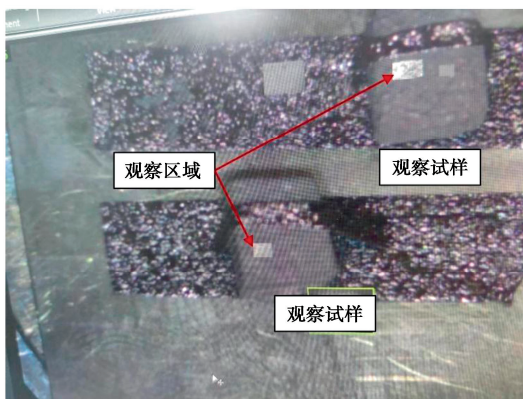


图 5 连续滴水 SEM 试样

Fig. 5 SEM samples for continuous water dripping tests

3 试验结果与分析

3.1 体积变形

图 6 展示了高幅度水汽循环过程中试样累积体变的演变规律。从图 6 可以看出, 经历约 5600 h 水汽循环后, 试样在增湿路径下 (RH=99.9%, 湿侧) 产生体胀, 在干燥路径下 (RH=23%, 干侧) 产生体缩。由于红层泥岩仅有弱膨胀性, 水汽循环中所产生的累积体变较小, 历经 6 次循环的累积体变约为 5.5%。此外还可以发现, 填料第一次干燥产生了约 2.5% 的体缩。随循环次数增加, 即使在相同湿度环境下, 体缩值逐渐减小。直至第 5.5 次循环, 试样在干侧 (含水率 2.3%) 的体积与初始状态 (含水率 8.7%) 接近。这表明即使干燥至低含水率状态, 填料收缩量仍随循环次数增加而不断降低。

图 7 展示了不同幅度下累积体变随循环次数的关系。从图 7 不难看出, 高幅度循环下试样累积体变大于低幅度循环值。此外, 低幅度循环下, 试样干燥后累积体变仍为正值, 即仍产生体胀。因此, 循环幅度不仅影响试样体变数值, 且直接决定试样在湿度平衡后产生体胀或体缩。宏观体积变形必然伴随微观结构

演变。对于红层泥岩而言, 因增湿和脱湿引起的团聚体膨胀/收缩是体积变形的主要成因。填料力学性能改变的本质成因在于微观结构演变, 因此, 累积体变可作为衡量力学性能演变规律的相关指标, 这与 Biglari 等^[24]和 Pineda 等^[20]的结果一致。

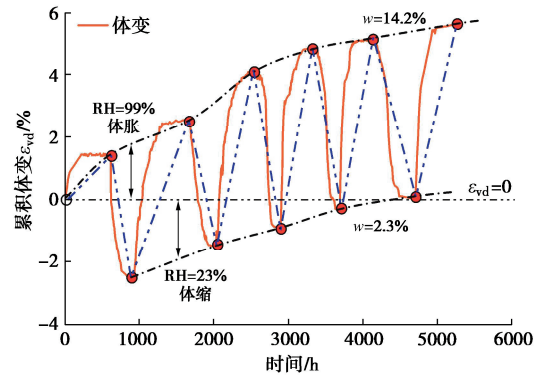


图 6 水汽循环过程中累积体变

Fig. 6 Irreversible volumetric strain during RH cycles

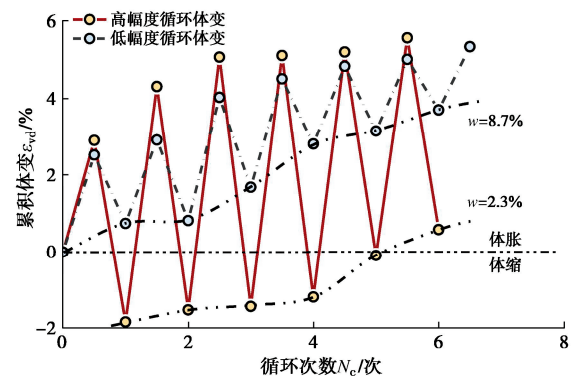


图 7 不同循环幅度下累积体变随次数的变化关系

Fig. 7 Irreversible volumetric strain versus number of cycles under various RH amplitudes

图 8 展示了试样在不同干湿循环次数下的典型样貌, 试样上的裂缝由亮黄色虚线标出。结合体变结果来看, 试样在历经水汽循环后观察到显著的裂缝衍生和团粒崩解现象, 整体形貌产生了明显变化。即使在干燥后, 裂缝仍不会完全闭合。这表明即使产生体缩, 但受非均匀体变影响, 试样仍将产生宏观裂隙。且团粒崩解和裂缝衍生现象不可逆, 导致试样在干侧时体缩量随循环次数增加而减少, 最终转变为体胀。

3.2 强度及刚度演变规律

图 9 展示了不同循环幅度下填料无侧限抗压试验的应力-应变曲线, 图 9 中干侧试样应力应变曲线用红色线标出, 湿侧试样应力应变曲线用蓝色线标出。从图 9 (a) 可以看出, 高幅度循环下, 干侧试样具有明显脆性, 峰值强度点对应的轴向应变较低, 强度高于初始状态。随循环次数增加, 试样峰值强度逐渐降低, 接近初始状态。当试样在湿侧时, 强度和脆性程度均显著减小, 仅 3 次循环后强度就衰减至初始状态的

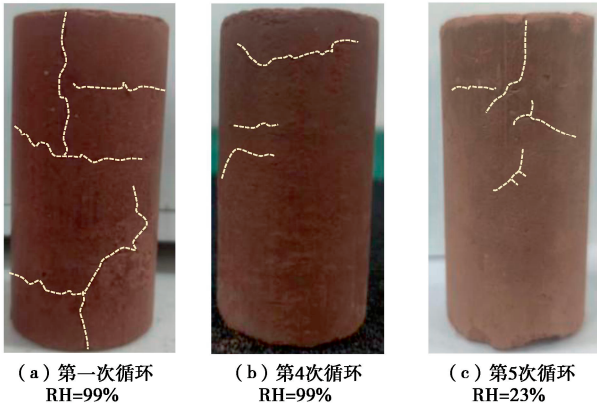


图 8 水汽循环后典型试样形貌

Fig. 8 Typical samples after RH cycles

24%左右。需要说明, 高幅度循环下试样湿度平衡后的吸力为固定值。即仅采用吸力描述试样强度未能考虑湿度循环的影响。从图 9 (b) 可以看出, 低幅度循环下试样强度下降具有连续性。即当试样经历水汽循环回到初始含水率后, 强度相较于初始状态有明显下降。此外, 随循环次数增加, 试样达到峰值强度所需应变值同样增加。这表明仅采用含水率也难以描述水汽循环过程中试样强度演变规律。

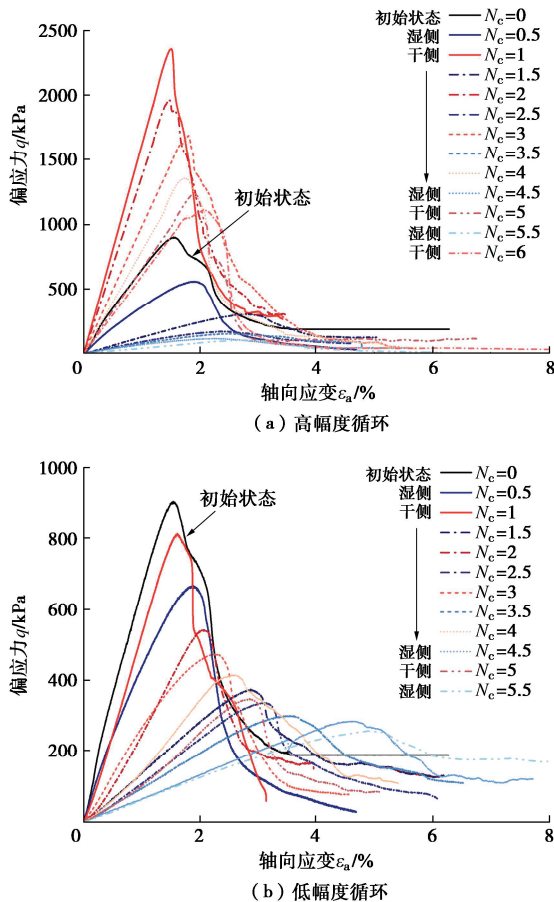


图 9 不同循环幅度下红层泥岩填料无侧限压缩应力-应变曲线
Fig. 9 Unconfined compression stress-strain behavior of RMF under RH cycles with various amplitudes

图 10 展示了弯曲元试验得到的典型波形图。弯曲元试验中, 确定 S 波传播速度是计算试样小应变刚度 G_{max} 的关键。图 10 以广泛应用的时域初达法确定传播时间, 即以波形首次偏转的时刻为传播时间^[25]。Payan 等^[26]对比了共振柱和时域初达法对相同岩土材料的测定结果, 验证了时域初达法的可行性。确定传播时间后, 小应变刚度根据弹性理论计算为^[27]

$$V_s = \frac{L_0}{t_s} \quad (2)$$

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (3)$$

式中: V_s 为 S 波波速; t_s 为 S 波的传播时间; L_0 为弯曲元芯片间的距离, 即试样高度与芯片嵌入深度的差值; ρ 为试样密度。受水汽循环影响, 试样在不同湿度下含水率和体积均产生了变化, 应根据这些变化对式 (2) 进行修正:

$$V_s = \frac{L_0(1 + \epsilon_{ad})}{t_s} \quad (4)$$

$$G_{max} = \rho_d(1 + w)V_s^2 \quad (5)$$

式中: ϵ_{ad} 为湿度平衡后的试样轴向变形, 以体胀为正; ρ_d 为干密度; w 为含水率。弯曲元试验中, 试样初始刻槽深度为 3 mm 左右, 随水汽循环次数增加刻槽深度也产生了变化, 但该变化值较小并且难以测定。因此式 (4) 实际上假定了刻槽深度变化值与试样轴向变形一致, 该假定符合土体变形连续这一基本规律。

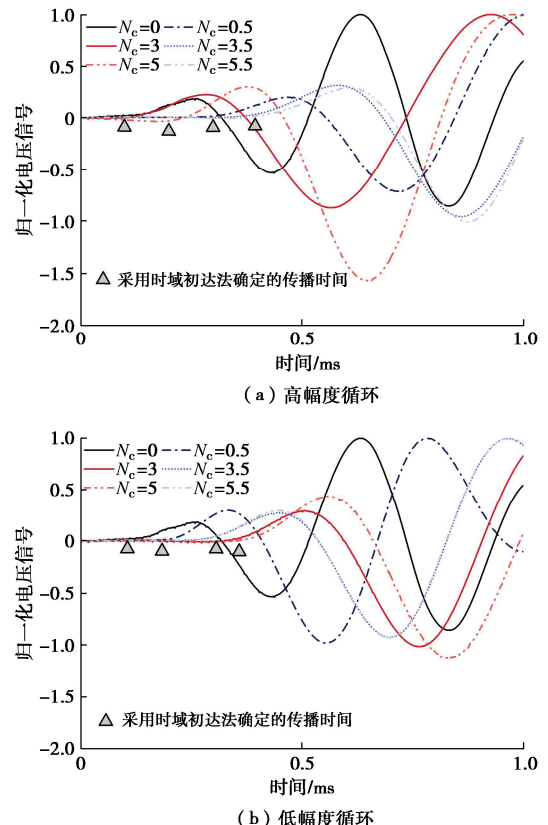


图 10 典型弯曲元波形
Fig. 10 Output signal obtained from bender element tests

图 11 展示了填料峰值强度和小应变刚度随水汽循环次数的演变规律。从图 11 可以看出，不同循环幅度下，湿侧试样 (RH=99%) 峰值强度和小应变刚度值相近。相反，试样在 RH=23% 环境下强度和刚度远大于 RH=45% 的强度和刚度值。随着循环次数增加，相同含水率下干侧试样强度和小应变刚度同样不断降低。经历 6 次水汽循环后，试样在 2.3% 含水率条件下的强度和小应变刚度接近初始状态 (8.7% 含水率)，进一步体现了水汽循环对填料力学性能的劣化影响。结合体变数据图 6 来看，试样在每次干燥下虽然因失水引起收缩，但收缩量随循环次数增加而减小。水汽循环过程中，裂缝衍生和团粒崩解现象不能够完全恢复，从而导致强度和刚度劣化。这样，对于红层泥岩填料而言，试样累积体变与小应变刚度之间同样具有良好相关性。

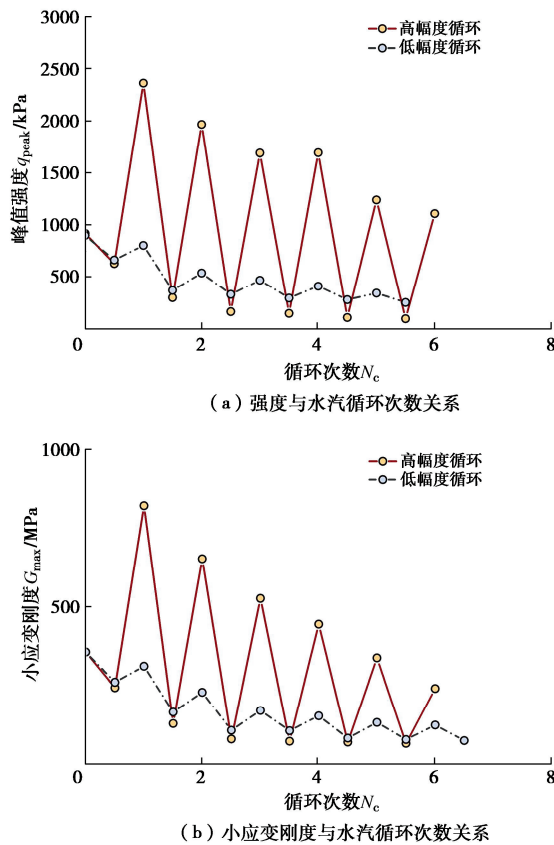


图 11 峰值强度和小应变刚度随水汽循环次数的演变规律
Fig. 11 Evolution of peak strength and small strain stiffness under RH cycles

图 12 展示了通过动三轴试验所获得的典型应力-应变滞回圈及不同水汽循环次数下回弹模量随应变振幅的变化规律。参考文献[28]，图 12 (a) 给出了各动力指标如累积变形，回弹变形，应变振幅，动应力振幅和回弹模量的定义。从图 12 (b) 不难看出，相同应变振幅下，填料回弹模量随循环次数增加而显著衰减。尤其是当应变振幅小于 0.1% 时，填料经历两次水

汽循环后回弹模量衰减幅度超过 60%。路基工程中，通常将应变振幅低于 0.1% 划分为中小应变状态，应变振幅大于 0.1% 为较大应变状态。由图 12 (b) 可知，对于较大应变状态，填料回弹模量因动应力增加而出现快速降低的趋势，此时水汽循环和动应力对填料回弹模量均有显著影响。但由于数据有限，要开展大应变动载-水汽循环的耦合分析还需要开展更多试验作支撑。因此，后续主要讨论中小应变状态 (水汽循环为主要影响因素) 下填料回弹模量的演变规律。

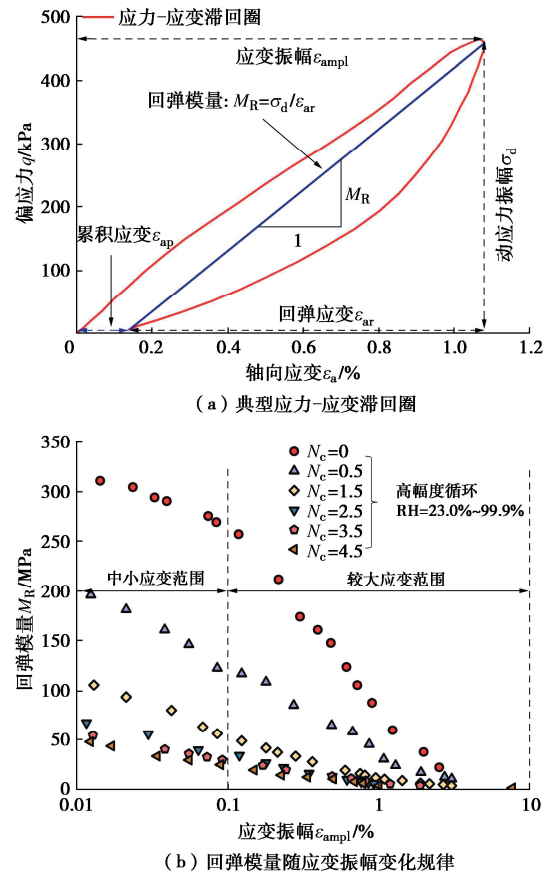


图 12 动三轴试验结果

Fig. 12 Cyclic triaxial test results

3.3 力学性能-累积体变统一演化方程

综合上述分析，试样在水汽循环过程中经历了含水率、吸力的变化，在形貌特征上表现为裂缝衍生和团粒崩解。从微观角度来看，填料结构变化是导致力学性能演变的本质原因。试验结果表明，红层泥岩填料在水汽循环过程中的累积体变是结构变化的宏观表现。试样累积体变越大，强度和小应变刚度衰减程度也越高。因此，可采用累积体变描述试样力学性能指标的演变规律。从损伤力学角度来看，填料力学性能演变可由归一化因子表述，基本规律为

$$S_{nor} = \frac{S}{S_0} = 1 - D_v \quad (6)$$

式中：\$S_{nor}\$ 为归一化力学性能指标；\$S\$ 为水汽循环后填

料力学性能指标; S_0 为各力学性能指标初始值; D_v 为演化因子。试验结果表明, 填料水汽循环力学性能变化与试样体积变化相关, 因此有

$$D_v = f(\varepsilon_{vd}) \quad (7)$$

式中: ε_{vd} 为累积体变, 定义如图 7 所示。具体地, 基于 Schon 的假定^[29], 即演变因子随累积体变的变化率与自身成比例关系:

$$\ln A \frac{dD_v}{d\varepsilon_{vd}} = f'(\varepsilon_{vd}) = \chi D_v \quad (8)$$

式中: $\ln A$ 为模型参数; χ 为速率因子。将式 (8) 做变量归类后得

$$\ln A \frac{dD_v}{D_v} = \chi d\varepsilon_{vd} \quad (9)$$

再将式 (9) 两端积分并作相应变换得

$$AD_v = \exp \chi \varepsilon_{vd} + r \quad (10)$$

式中: r 为模型参数。得到损伤因子和累积体变的基本规律后, 将式 (6) 代入式 (10) 可知

$$\frac{S}{S_0} = 1 - \frac{1}{A} \exp \chi \varepsilon_{vd} - \frac{r}{A} \quad (11)$$

式中: 含有两个模型参数 A 和 r , 它们的具体值可通过两个边界条件求解。以初始状态为参考值, 试样在初始状态累积体变为 0, 即有

$$\left(\frac{S}{S_0} \right)_{\varepsilon_{vd}=0} = 1 \quad (12)$$

当累积体变趋近于无穷大时, 有

$$\left(\frac{S}{S_0} \right)_{\varepsilon_{vd} \rightarrow \infty} = S_{res} \quad (13)$$

式中: S_{res} 为试样经历多次水汽循环后力学性能指标残余值。将力学指标具体化为峰值强度 q_{peak} 、小应变刚度 G_{max} 和回弹模量 M_R , 根据上述推导可得到劣化方程:

$$G_{max} / G_{max0} = (1 - G_{max,res} / G_{max0}) \exp \chi \varepsilon_{vd} + G_{max,res} / G_{max0} \quad (14)$$

$$q_{peak} / q_{peak0} = (1 - q_{peak,res} / q_{peak0}) \exp \chi \varepsilon_{vd} + q_{peak,res} / q_{peak0} \quad (15)$$

$$M_R / M_{R0} = (1 - M_{R,res} / M_{R0}) \exp \chi \varepsilon_{vd} + M_{R,res} / M_{R0} \quad (16)$$

式中: G_{max0} , q_{peak0} 和 M_{R0} 分别为填料初始状态小应变刚度、峰值强度和回弹模量; $G_{max,res}$, $q_{peak,res}$ 和 $M_{R,res}$ 分别为历经多次水汽循环后填料小应变刚度、峰值强度和回弹模量趋于稳定的残余值。

图 13 展示了填料强度、小应变刚度和回弹模量随累积体变的变化规律。在图 13 中, M_{R-i} 为指定应变振幅下的回弹模量, 如 $M_{R-0.01\%}$ 为 0.01% 应变振幅下填料的回弹模量。从图 13 可以看出, 不同试验结果数据可用同一拟合曲线表征, 这说明红层泥岩填料强度和

刚度演变规律是一致的。循环幅度只影响力学性能具体数值, 对于演变曲线的基本形式影响较小。

总地说来, 水汽循环下红层泥岩填料力学特性演变规律可表述为: 填料经历水汽循环后, 因团聚体胀缩、团粒崩解和裂缝导致宏观上的累积体变。所谓累积体变是广义的, 既包含干燥引起的体缩又包含增湿引起的体胀。低湿度下试样体缩对应强度和刚度增长, 而高湿度下试样体胀对应力学性能衰减。因此, 图 13 中给出的性能演变曲线也是广义的, 能够适用于描述填料经历增湿和干燥后的力学性能演变规律。水汽循环幅度只影响填料体变大小和力学性能指标的数值, 对演变曲线形状影响较低。红层泥岩填料强度和刚度可用统一模型表述, 即相同累积体变下填料强度、小应变刚度和回弹模量衰减幅度基本一致。

需要说明, 图 13 中 S_{nor} 在负体变 (体缩时) 大于 1, 这并非是指水汽循环下填料损伤可逆, 而是因为干燥状态与初始 (参考) 状态的含水率差异所致。图 11 已经表明, 相同含水率下试样强度和刚度随循环次数均不断衰减, 这也印证了水汽循环引起的结构损伤是不可逆的。此外, 本文试验条件均为无侧限, 与实际路基情况有一定差别。实际工程中, 干湿循环和水汽循环是同时或交替发生的, 路基填料受二者共同作用。此外, 路基单元体随位置变化所受围压不同, 尤其深度超过 2 m, 填料所受围压可能超过 75 kPa。而围压的存在可能会降低水汽循环的劣化作用。但受试验条件和时间所限, 围压-水汽-干湿循环的耦合影响在文中并未深入讨论, 这也是后续的工作方向。

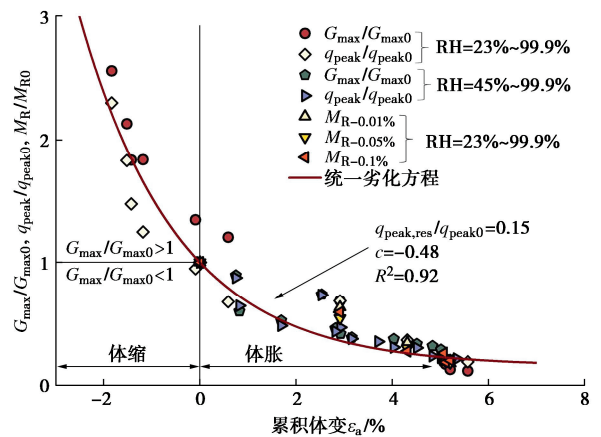


图 13 红层泥岩填料力学性能-体积变形统一演化方程
Fig. 13 Unified model for characterization of mechanical properties-irreversible volumetric strain of RMF

3.4 微观结构

图 14 展示了连续滴水试样 SEM 图。多次滴水后试样崩解比较剧烈, 已无法准确定位观察区域, 因此图 14 展示了两滴水试验的对比结果。从图 14 可以看出, 试样经历两次滴水干燥后, 观察到了大量团粒

崩解。崩解后团粒直径明显减小, 试样表观形貌明显趋于松散, 孔隙数量增多, 孔径不断扩大, 且伴随有裂隙分布。从 SEM 试验结果来看, 填料在干燥-增湿过程中的结构变化主要是由团聚体失水-吸水引起的相应变形所导致。团聚体内部膨胀矿物与水分反应, 导致黏土层松散剥落, 团聚体崩解和粒径减小, 宏观上表现为裂缝衍生。虽然连续滴水 SEM 试验中水分与试样直接接触, 相应结构演变剧烈程度比一次水汽循环更为剧烈, 但试验结果能够定性地说明确干燥-增湿过程对填料形貌的基本影响。

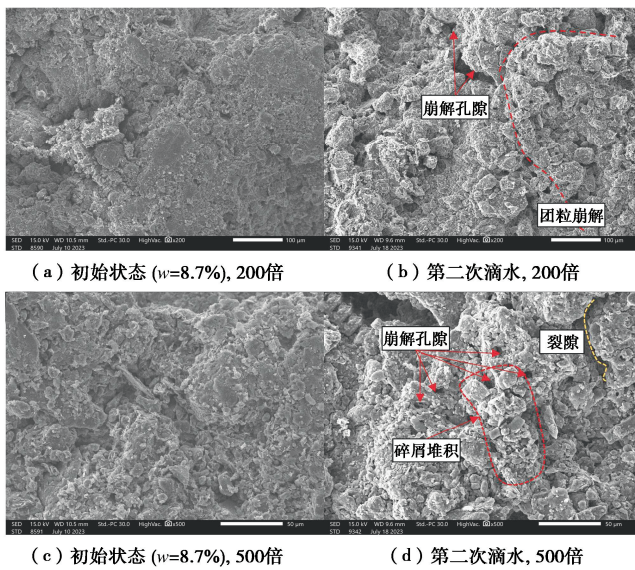


图 14 连续滴水 SEM 电镜照片

Fig. 14 Continuous water dripping SEM micrograph for RMF

4 结 论

本文通过水汽循环试验、无侧限抗压试验、弯曲元试验、动三轴试验和连续滴水 SEM 试验研究了水汽循环下红层泥岩填料强度、刚度变化特征及微观结构演变规律, 主要得到以下 4 点结论。

(1) 高幅度循环下, 试样增湿后较于初始状态产生了不可逆体胀, 干燥后产生不可逆体缩。低幅度循环下, 试样在干侧累积体变仍为正值, 即仍产生体胀。循环幅度不仅影响试样体变数值, 且直接决定试样在湿度平衡后产生体胀或体缩。

(2) 不同循环幅度下, 试样在 RH=99% 环境下平衡后峰值强度和小应变刚度值相近, 高循环幅度下试样各力学指标略低于低循环幅度。相反在干侧, 试样在高幅度循环下强度和小应变刚度远大于低幅度循环值。随着循环次数增加, 干侧试样 (RH=23%) 的强度和小应变刚度同样不断降低。

(3) 填料在经历水汽循环后, 各力学指标演变规律可用统一的演变曲线表述。以初始状态作参考, 试

样体缩对应强度和刚度增长, 而体胀则对应力学性能衰减。水汽循环幅度只影响填料累积体变和力学性能指标具体数值, 对于演变曲线形状影响较小。红层泥岩填料强度、小应变刚度和回弹模量可用统一方程表述。相同累积体变下填料强度和刚度衰减幅度基本一致。

(4) 试样经历两次滴水干燥后, 观察到了大量团粒崩解。崩解后团粒直径明显减小, 产生了许多孔隙和碎屑。试样表观形貌明显趋于松散, 孔隙数量增多, 孔径不断扩大, 且伴随有裂隙分布。填料结构变化主要由于团聚体变形引起。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 陈康开展主要试验和论文的初稿撰写, 刘先峰设计总体研究内容、提供研究指导、参与论文修改, 蒋关鲁提供研究指导, 袁胜洋提供研究指导, 马杰参与实验研究, 陈忆涵参与实验研究, 所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。CHEN Kang was responsible for the manuscript writing and experimental work. LIU Xianfeng designed the research framework, provided academic guidance, and participated in the revision of the manuscript. JIANG Guanlu and YUAN Shengyang offered research supervision. MA Jie and CHEN Yihan contributed to the experimental investigations. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献:

- [1] 陈 康, 刘先峰, 蒋关鲁, 等. 饱和红层泥岩填料动力及耗散能特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(3): 571-579. (CHEN Kang, LIU Xianfeng, JIANG Guanlu, et al. Experimental study on dynamic and dissipated energy behaviors of saturated red mudstone fill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(3): 571-579. (in Chinese))
- [2] 陈 康, 刘先峰, 袁胜洋, 等. 饱和红层泥岩填料累积变形特性及安定界限研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(5): 1261-1268. (CHEN Kang, LIU Xianfeng, YUAN Shengyang, et al. Experimental study of accumulative deformation behaviour and shakedown limit of saturated red mudstone fill material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(5): 1261-1268. (in Chinese))
- [3] 徐 鹏, 蒋关鲁, 任世杰, 等. 红层泥岩及其改良填料路基动力响应试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 678-683, 692. (XU Peng, JIANG Guanlu, REN Shijie, et al. Experimental study of dynamic response of subgrade with red

- mudstone and improved red mudstone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, **40**(2): 678-683, 692. (in Chinese))
- [4] 刘先峰, 潘申鑫, 袁胜洋, 等. 压实红层泥岩填料强度与刚度软化和衰减特性研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, **19**(9): 2629-2636. (LIU Xianfeng, PAN Shenxin, YUAN Shengyang, et al. Study on stiffness softening and attenuation characteristics of compacted red mudstone[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, **19**(9): 2629-2636. (in Chinese))
- [5] YING Z, CUI Y J, BENAHMED N, et al. Changes of small strain shear modulus and microstructure for a lime-treated silt subjected to wetting-drying cycles[J]. *Engineering Geology*, 2021, **293**: 106334.
- [6] BURTON G J, PINEDA J A, SHENG D C, 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.
- [7] 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 Lingwei, ZHANG Xianwei, et al. A multi-scale study on structure damage of granite residual soil under wettingdrying environments[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, **42**(3): 758-767. (in Chinese))
- [8] 尹松, 孔令伟, 张先伟. 炎热多雨气候影响下残积土小应变刚度特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(4): 743-751. (YIN Song, KONG Lingwei, ZHANG Xianwei. Experimental study on stiffness characteristics of residual soil at small strain under hot and rainy climate[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(4): 743-751. (in Chinese))
- [9] 安然, 孔令伟, 黎澄生, 等. 炎热多雨气候下花岗岩残积土的强度衰减与微结构损伤规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, **39**(9): 1902-1911. (AN Ran, KONG Lingwei, LI Chengsheng, et al. Strength attenuation and microstructure damage of granite residual soils under hot and rainy weather[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, **39**(9): 1902-1911. (in Chinese))
- [10] RAMESH S, THYAGARAJ T. Volumetric and hydraulic behaviour of compacted natural clay-sand mixtures during wet-dry cycles[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, **81**(6): 1-16.
- [11] 王智猛, 蒋关鲁, 魏永幸, 等. 达成线红层泥岩路基循环加载试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, **30**(12): 1888-1893. (WANG Zhimeng, JIANG Guanlu, WEI Yongxing, et al. Experimental study on dynamic performance of red mudstone subgrade of Dazhou-Chengdu Railway under cyclic loads[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(12): 1888-1893. (in Chinese))
- [12] XU L F, WONG K K, FABBRI A, et al. Loading-unloading shear behavior of rammed earth upon varying clay content and relative humidity conditions[J]. *Soils and Foundations*, 2018, **58**(4): 1001-1015.
- [13] CHAMPIRÉ F, FABBRI A, MOREL J C, et al. Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, **110**: 70-78.
- [14] ZENG H, TANG C S, ZHU C, et al. Desiccation cracking of soil subjected to different environmental relative humidity conditions[J]. *Engineering Geology*, 2022, **297**: 106536.
- [15] 陶帅, 韦昌富, 陈盼. 饱和度及收缩变形对土体小应变刚度特性的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, **39**(5): 1023-1031. (TAO Shuai, WEI Changfu, CHEN Pan. The effect of saturation and shrinkage deformation on the small strain stiffness of soils[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, **39**(5): 1023-1031. (in Chinese))
- [16] 孙德安, 李宣. 广吸力范围内非饱和粉土动力变形特性[J]. *岩土工程学报*, 2019, **41**(4): 617-624. (SUN Dean, LI Xuan. Dynamic deformation characteristics of unsaturated silt over a wide suction range[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(4): 617-624. (in Chinese))
- [17] HELM P R, SVALOVA A, MORSY A M, et al. Emulating long-term weather-driven transportation earthworks deterioration models to support asset management[J]. *Transportation Geotechnics*, 2024, **44**: 101155.
- [18] BRIGGS K M, HELM P R, SMETHURST J A, et al. Evidence for the weather-driven deterioration of ageing transportation earthworks in the UK[J]. *Transportation Geotechnics*, 2023, **43**: 101130.
- [19] PINEDA J A, ROMERO E, DE GRACIA M, et al. Shear strength degradation in claystones due to environmental effects[J]. *Géotechnique*, 2014, **64**(6): 493-501.
- [20] PINEDA J A, ALONSO E E, ROMERO E. Environmental degradation of claystones[J]. *Géotechnique*, 2014, **64**(1): 64-82.
- [21] 陈少轩. 考虑风化效应的四川盆地红层岩石力学特性试

- 验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022. (CHEN Shaoxuan. Experimental Study on Mechanical Properties of Red-Bedded Rocks in Sichuan Basin Considering Weathering Effects[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022. (in Chinese))
- [22] ALONSO E E, ROMERO E E, ORTEGA E. Yielding of rockfill in relative humidity-controlled triaxial experiments[J]. *Acta Geotechnica*, 2016, **11**(3): 455-477.
- [23] WANG F T, LI D Q, DU W Q, et al. Bender element measurement for small-strain shear modulus of compacted loess[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, **21**(5): 04021063.
- [24] BIGLARI M, D'ONOFRIO A, MANCUSO C, et al. Small-strain stiffness of Zenoz Kaolin in unsaturated conditions[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, **49**(3): 311-322.
- [25] JAFARIAN Y, JAVDANIAN H, HADDAD A. Dynamic properties of calcareous and siliceous sands under isotropic and anisotropic stress conditions[J]. *Soils and Foundations*, 2018, **58**(1): 172-184.
- [26] PAYAN M, KHOSHGHALB A, SENETAKIS K, et al. Small-strain stiffness of sand subjected to stress anisotropy[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, **88**: 143-151.
- [27] KANTESARIA N, SACHAN A. Small-strain shear modulus and yielding characteristics of compacted high-plasticity clay[J]. *Géotechnique*, 2022, **72**(5): 424-437.
- [28] DUONG T V, CUI Y J, TANG A M, et al. Effects of water and fines contents on the resilient modulus of the interlayer soil of railway substructure[J]. *Acta Geotechnica*, 2016, **11**(1): 51-59.
- [29] SCHÖN J H. *Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics*[M]. The Kingdom of the Netherlands: S Treitel, Pergamon Press, 2015.