

长期干湿循环作用下不同细颗粒含量花岗岩 残积土的动力特性*

林沛元^{1,2}, 丁庆峰^{1,2}, 陈洋^{1,2}, 杨翔云^{1,2}

1. 隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室/中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东 珠海 519082

摘要:以典型花岗岩残积土为对象, 制备 10%、30% 和 50% 三种细颗粒含量的重塑试样。通过 1、10、50 和 100 次干湿循环后的饱和固结不排水三轴试验, 分析不同围压条件下累积塑性应变、应力应变滞回特征和回弹模量的演化规律。结果表明: 长期干湿循环下土体动力响应呈显著阶段性和非单调变化, 10% 和 30% 细颗粒含量试样的累积塑性应变表现为由 1 次至 10 次时增大、50 次时减小、100 次后再次增加; 50% 细颗粒含量试样在 10 次干湿循环后变形较大, 在 50~100 次循环后累积塑性应变逐渐减小。应力应变滞回圈面积和回弹模量均表现出与循环历程相关的阶段性调整特征, 这表明干湿循环引起的结构扰动、颗粒重排和再稳定共同控制了土体的动力性能演化。

关键词:花岗岩残积土; 干湿循环; 累积塑性应变; 回弹模量

中图分类号: TU435 文献标志码: A 文章编号: 2097-0137(XXXX)XX-0001-11

Dynamic characteristics of granite residual soil with different fine particle contents under long-term drying-wetting cycles

Lin Peiyuan^{1,2}, Ding Qingfeng^{1,2}, Chen Yang^{1,2}, Yang Xiangyun^{1,2}

1. State Key Laboratory for Tunnel Engineering/School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Zhuhai 519082, China

Abstract: Reconstituted specimens with fine-particle contents of 10%, 30%, and 50% were prepared. Saturated consolidated undrained dynamic triaxial tests were then conducted after 1, 10, 50, and 100 drying-wetting cycles. The evolution of accumulated plastic strain, stress-strain hysteresis behavior, and resilient modulus was analyzed under different confining-pressure conditions. The results show that the dynamic response of the soil exhibits pronounced stage-dependent and non-monotonic characteristics under long-term drying-wetting cycles. For specimens with 10% and 30% fine-particle contents, the accumulated plastic strain increases from 1 to 10 cycles, decreases at 50 cycles, and increases again at 100 cycles. For specimens with 50% fine-particle content, relatively large deformation is observed after 10 drying-wetting cycles, whereas the accumulated plastic strain gradually decreases after 50~100 cycles. Both the area of the stress-strain hysteresis loops and the resilient modulus show stage-dependent variations associated with the drying-wetting history, indicating that structural disturbance, particle rearrangement, and subsequent re-stabilization jointly govern the evolution of the soil's dynamic properties.

* 收稿日期: 2026-05-28

录用日期: 2026-06-29

网络首发日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(52578452, 42561160092)

作者简介: 林沛元(1986年生), 男; 研究方向: 岩土工程; E-mail: linpy23@mail.sysu.edu.cn

通信作者: 陈洋(1994年生), 男; 研究方向: 岩土工程; E-mail: chen2725@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20260139

Key words: granite residual soil; drying-wetting cycles; accumulated plastic strain; resilient modulus

花岗岩残积土广泛分布于我国东南沿海地区(安然等,2020;Xia et al.,2019;Chen et al.,2023),在长期服役过程中,常经历循环剪切与周期性干湿交替(冯雨泉等,2025;康馨等,2024;周宏,2022)。干湿循环能够持续改变土体水分状态及孔隙结构特征(常洲等,2024;许旭堂等,2022)。在渗入过程中,细颗粒可能随水迁移并发生局部沉积,导致土体级配组成、孔隙连通性及渗流通道发生调整(毛强等,2025)。在干燥过程中,颗粒重排及局部胶结变化又会进一步引起土体结构演化(湛文武等,2024)。上述过程不仅影响土体的渗透性和应力传递路径,也会改变颗粒间的接触关系及整体变形特征(刘卫涛等,2021;肖雪等,2023;张新民,2020)。因此,细颗粒含量及其在干湿循环过程中的迁移与重分布是影响土体动力响应的重要因素。

动三轴试验是研究花岗岩残积土动力特性的重要手段(贺斌等,2025;陈志波等,2020;祝方才等,2019)。已有研究显示,干湿循环会对土体结构产生显著扰动,使其动强度、动模量及累积变形呈现复杂演化特征(田小革等,2023;舒志乐等,2020;朱自强等,2019)。与此同时,也有学者从经验模型角度对累积塑性变形及动力参数进行了预测分析(刘越,2023;陈勇等,2017)。总体来看,研究已涉及干湿循环或循环荷载作用下花岗岩残积土动力特性变化(孟佳佳等,2025;许健等,2025;田小革等,2023;舒志乐等,2020),但多集中于短期循环、单一级配状态或单一动力指标。因此,本文以花岗岩残积土为研究对象,设置细颗粒亏损、接近天然级配和细颗粒富集三类状态,开展饱和固结不排水动三轴试验,以揭示长期干湿循环下细颗粒含量对花岗岩残积土动力特性的影响。

1 试验方法

1.1 试验材料

所用花岗岩残积土取自珠海,采样深度为地下5 m。土样整体呈棕红色,局部夹杂灰白色和黄白色颗粒,并含少量植物碎屑。依据土工试验方法标准(GB/T 50123—2019),测得颗粒比重为2.71,天然含水率约为12.0%,液限和塑限分别为49.5%和29.9%,塑性指数为19.6。根据室内测试结果,该土样可归属于低液限粉土。土样粒径分布见图1。

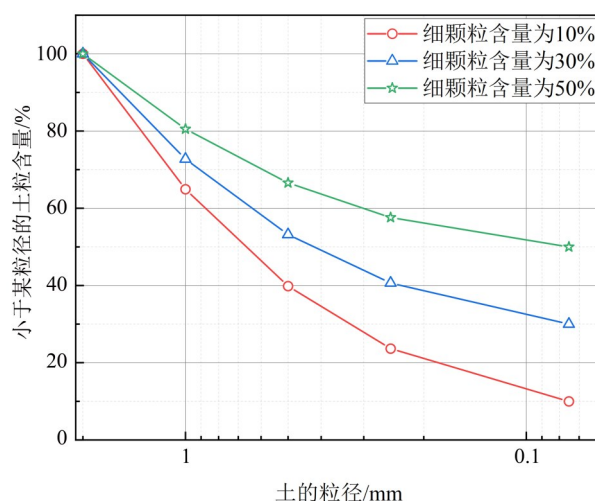


图1 土样粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of the soil sample

1.2 试验准备

1.2.1 试样制备 制备直径为39.1 mm、高度为80 mm的圆柱体。制样前,先将土样置于105℃恒温烘箱中烘干至质量稳定;随后筛除粒径大于2 mm的颗粒,以获得重塑制样所需土料。制样时,根据目标干密度、含水率和细颗粒含量,采用静压法分5层压实成型。每个试样干土质量均为175 g,初始含水率为12%。试验时,仅调整粒径小于0.075 mm部分的细颗粒含量,其余粒级组成保持相对不变。设置10%、30%和50%三个细颗粒含量水平,分别表征细颗粒亏损、接近天然级配和细颗粒富集状态。

1.2.2 干湿循环试样制备 试样制备完成后,用三瓣膜包裹试样,并在上下端放置滤纸和透水石,随后安装于专用饱和装置中。装置组装完成后置于真空容器内,并在0.1 MPa负压条件下抽气60 min,以排除试样孔隙中的空气。之后向真空容器内注水使试样完全浸没,并在解除真空后继续进行负压饱和和处理不少于10 h,以保证试样充分饱和。上述过程作为一次饱和阶段。

饱和完成后,将试样取出并进行干燥处理。当试样达到预设最低饱和度时,视为完成一次干燥阶段。一次干燥阶段与一次饱和阶段共同构成一个完整的干湿循环。试样达到设计循环次数后,再次置于真空容器中浸水饱和至少24 h,随后进行动三轴试验。整个干湿循环过程中,试样饱和度控制在40%~100%之间,对应含水率范围为9.78%~24.44%,如图2所示。

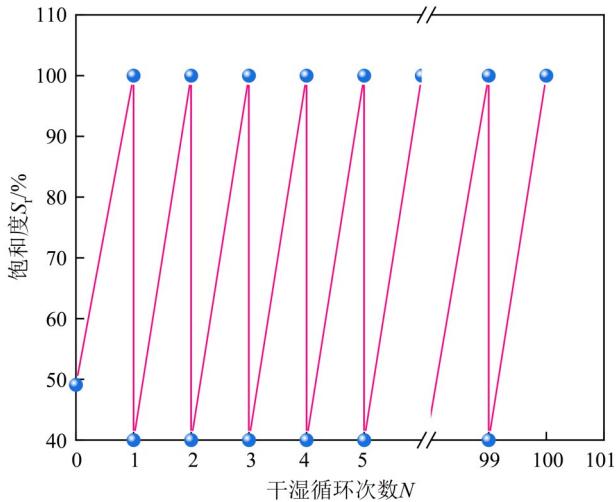


图2 干湿循环过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the drying-wetting cycle process

2 动三轴试验

2.1 加载方案

采用土工动静三轴试验系统,研究不同细颗粒含量、干湿循环次数及围压条件下饱和花岗岩残积土在固结不排水条件下的循环剪切响应。试样首先采用反压饱和,使其达到 $B \geq 0.95$ 的饱和标准,随后进行各向同性固结。固结完成后,采用恒定振幅半正弦波进行单向循环加载。为保证试样在加载过程中始终与加载装置保持接触,设最小偏应力阈值 $q_{\min} > 0$,以获得稳定有效的应力应变响应。加载过程中,波峰至波谷的偏应力差值为循环应力幅值 q_c ,循环应力比 $CSR = q_c / (2\sigma)$ 表征动荷载水平, σ 为有效固结围压。

考虑路基土所受交通荷载通常为低频重复作用,加载频率取1 Hz。加载循环次数取10 000次,以覆盖试样由初始快速变形、持续累积到后期趋于稳定的完整演化过程。 q_c 取50 kPa,加载应力范围为4.13~54.13 kPa。试验围压为20、50和100 kPa,试样饱和度均为100%。考虑到干湿循环次数、围压与细颗粒含量三因素全组合试验工作量较大,本文采用分层试验设计。具体加载方案见表1。

2.2 典型试验结果

图3为细颗粒含量30%、干湿循环次数100、 $\sigma = 50$ kPa时的饱和固结不排水循环剪切试验的结果。可以看出,随着循环次数增加,试样轴向应变逐渐累积;在加载初期,应变增长较快,随后增长速率降低,并在后期趋于稳定。

在循环荷载作用下,累积塑性应变 ε_a 和回弹模量 M_b 是表征土体动力特性的两个关键指标。单次

表1 动三轴循环加载方案

Table 1 Cyclic loading scheme for the dynamic triaxial tests

工况	干湿循环次数	细颗粒含量/%	围压/kPa	CSR
1	1	10	50	0.5
2	1	30	50	0.5
3	1	50	50	0.5
4	10	10	20	1.25
5	10	30	20	1.25
6	10	50	20	1.25
7	10	10	50	0.5
8	10	30	50	0.5
9	10	50	50	0.5
10	10	10	100	0.25
11	10	30	100	0.25
12	10	50	100	0.25
13	50	10	50	0.5
14	50	30	50	0.5
15	50	50	50	0.5
16	100	10	50	0.5
17	100	30	50	0.5
18	100	50	50	0.5

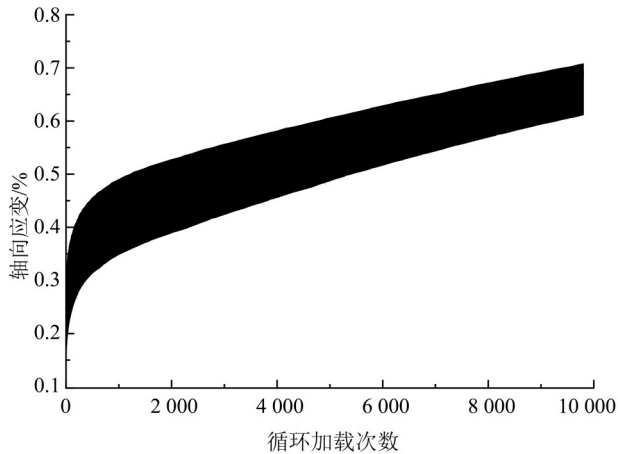


图3 不排水循环剪切试样试验结果

Fig. 3 Test results of the specimen under undrained cyclic shear

循环产生的总应变可分解为可恢复的回弹应变 ε_b 和不可恢复的塑性应变 ε_a 。回弹模量 $M_b = q_c / \varepsilon_b$ 为循环应力幅值与回弹应变之比。图4中,土样回弹模量随循环次数增加呈现较明显的阶段性演化特征。初始阶段,回弹模量快速降低;随后增长速率逐渐减缓,并进入缓慢恢复阶段;后期则基本趋于稳定。这表明,循环荷载作用下土体刚度并非单调变化,而是表现出由初始结构扰动、颗粒重新接触

到后期逐渐稳定的演化过程。

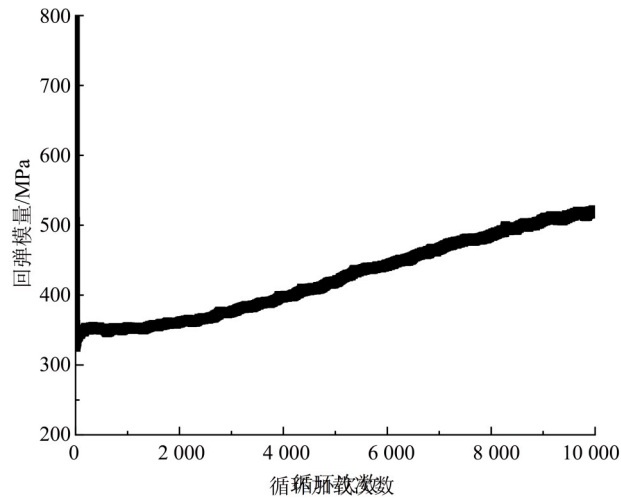


图4 回弹模量随循环次数的变化

Fig. 4 Evolution of resilient modulus with the number of cycles

由图5可知,加载初期试样表现出较明显的滞回环特征。随着循环次数增加,滞回环整体沿应变方向逐步偏移,轴向应变持续累积;同时,滞回环面积减小,循环过程中单位循环的能量耗散不断降低。总体上,前期(循环次数 ≤ 2000)轴向应变增长较快,塑性累积较为明显;后期(循环次

数 > 2000)应变增量逐渐减小,循环响应趋于平稳。这说明,在循环荷载作用下土体内部颗粒接触关系不断调整,结构由初始扰动状态向相对稳定状态演化。

3 试验结果

3.1 累积塑性应变特性

3.1.1 不同细颗粒含量下的累积塑性应变 图6为 $\sigma = 50$ kPa时试样的循环累积塑性应变。对于10%和30%细颗粒含量试样,累积塑性应变在干湿循环次数为1~10次时明显增大,11~50次时减小,100次以上时又出现回升。50%细颗粒含量试样的累积塑性应变在10次干湿循环时达到较高水平,但在50~100次时持续减小(图6c)。与10%和30%细颗粒含量试样相比,50%细颗粒含量试样在长期循环作用下表现出更强的抗变形能力。这可能是因为高细颗粒含量条件下,细颗粒的迁移与重分布使得粗颗粒间的孔隙被填充、土体结构趋于致密,从而限制了颗粒的进一步重排以及循环荷载作用下的塑性变形。总体而言,干湿循环10次时各组试样的累积塑性应变较大,此时土体结构扰动较为明显,更易产生塑性变形(Sun et al., 2025)。

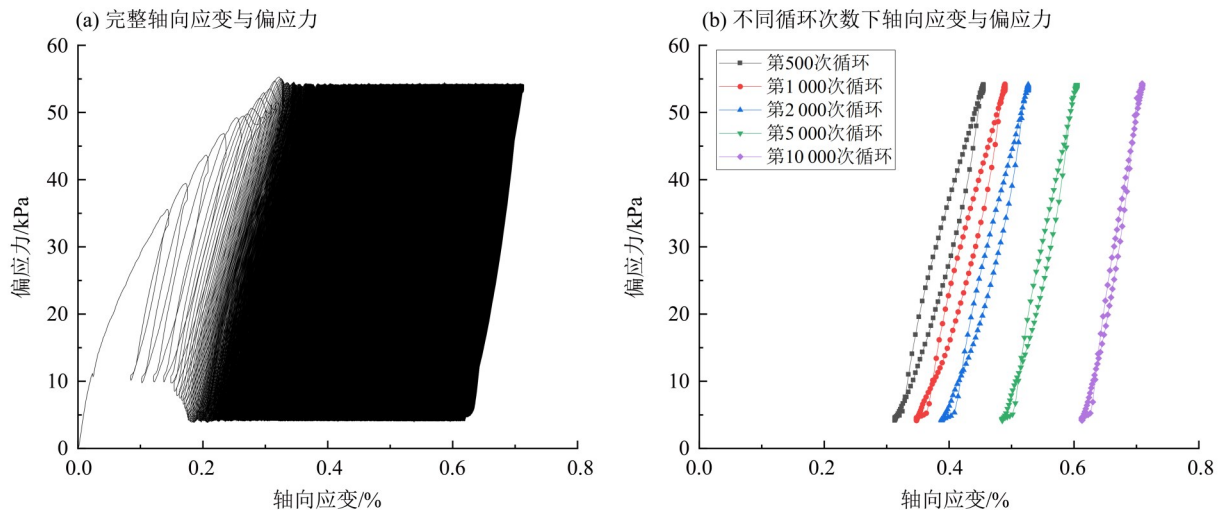


图5 典型试样的应力应变

Fig. 5 Stress-strain of the typical specimen

3.1.2 不同干湿循环次数的累积塑性应变 图7为 $\sigma = 50$ kPa时试样的循环累积塑性应变。在该围压条件下,累积塑性应变未表现出一致的单调变化规律。在干湿循环1次和10次条件下,累积塑性应变大致分为初始波动阶段、快速累积阶段和后期缓

慢稳定阶段(图7)(李泽垚等, 2022)。初始阶段应变增长速率波动较大;中间阶段累积塑性应变快速增加;后期应变曲线斜率明显减小,增长趋于平缓。但,干湿循环50次试样在10 000次循环后累积塑性应变仍快速增长(图7c),这说明土体结构尚未完全

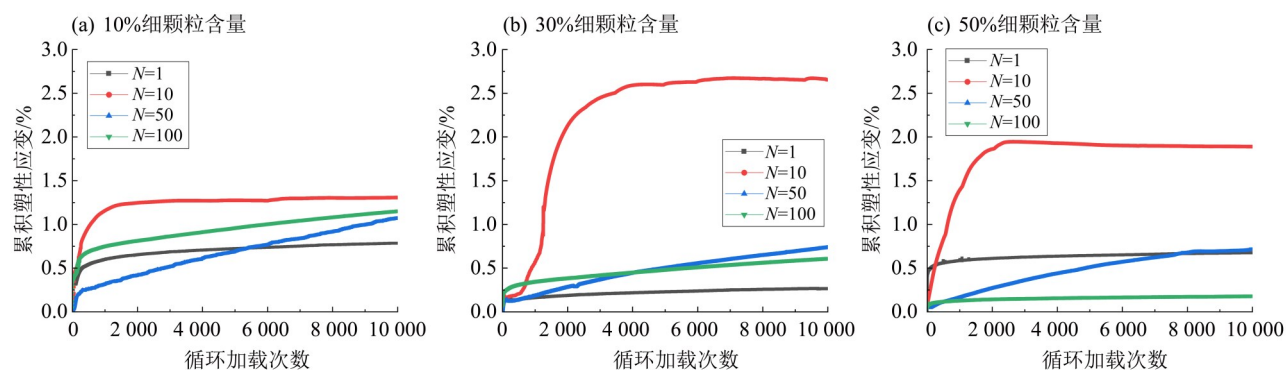


图6 不同细颗粒含量试样的循环累积塑性应变

Fig. 6 Accumulated plastic strain of specimens with different fine particle contents

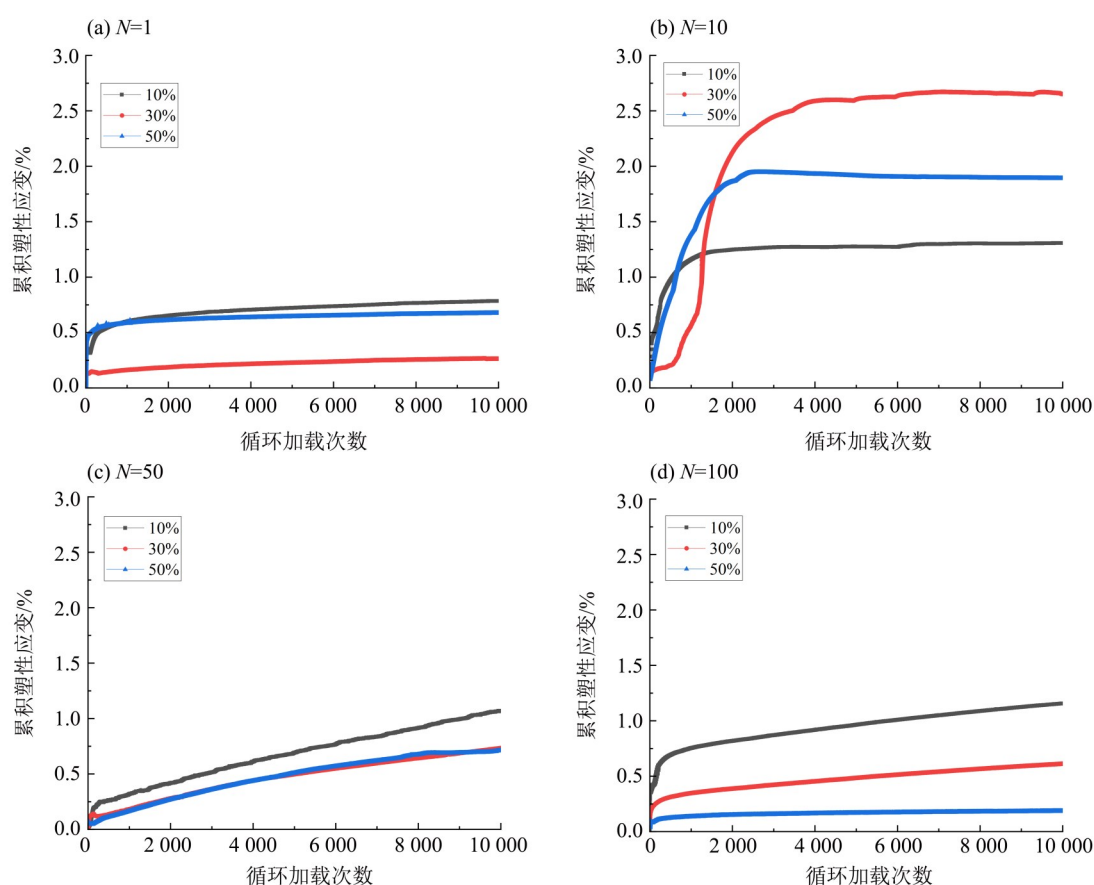


图7 不同干湿循环次数试样的循环累积塑性应变

Fig. 7 Accumulated plastic strain of specimens with different numbers of drying-wetting cycles

稳定。干湿循环 100 次后(图 7d), 累积塑性应变继续增长但速率变缓, 土体在长期干湿循环作用后逐渐形成相对稳定的内部结构。上述结论与王铁行等(2020)的研究一致。

与此同时, 干湿循环 10 次时, 30% 细颗粒含量试样的累积塑性应变相对较大, 而 10% 和 50% 细颗粒含量试样的累积塑性应变较小。干湿循环 50 次后, 不同细颗粒含量试样的累积塑性应变增长速率较为接近。干湿循环 100 次后, 累积塑性应变随细

颗粒含量增加而减小, 这表明在长期干湿循环条件下, 较高细颗粒含量有助于减小土体的可压缩孔隙体积, 从而抑制塑性变形的进一步发展。

3.1.3 不同围压下的累积塑性应变 由图 8 可见, $\sigma = 20, 50 \text{ kPa}$ 时, 累积塑性应变随循环次数增加而增大; $\sigma = 100 \text{ kPa}$ 时, 部分试样的累积塑性应变出现负值, 其中 10% 和 30% 细颗粒含量试样的累积塑性应变先减小至负值、后缓慢回升。这表明在高围压时低细颗粒含量试样的变形模式发生了变化, 试

样在轴向上表现出一定膨胀特征。

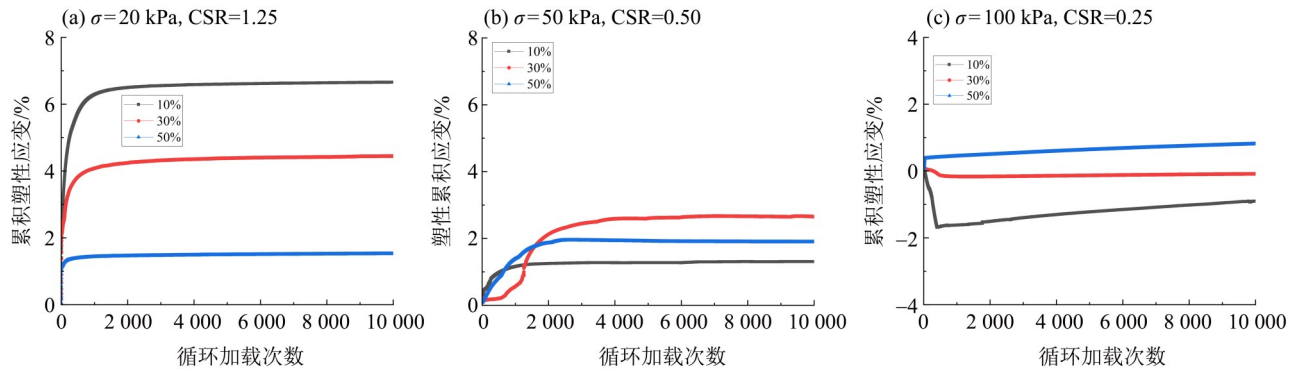


图8 干湿循环10次时试样的循环累积塑性应变

Fig. 8 Accumulated plastic strain of specimens after 10 drying-wetting cycles

进一步地,当 $\sigma = 20$ 时,累积塑性应变随细颗粒含量增加而减小;当 $\sigma = 100$ kPa时,这一趋势发生反转。对于10%和30%细颗粒含量试样,围压变化对其累积塑性应变影响较为明显,随着围压增大,其累积塑性应变整体减小;而50%细颗粒含量试样受围压影响相对较小,此时较高细颗粒含量在一定程度上限制了体积变形的发展。此外,在 $\sigma = 20, 50$ kPa时,各组试样的累积塑性应变在加载后期均逐渐趋于稳定; $\sigma = 100$ kPa时,累积塑性应变在10 000次循环后仍表现出增长的趋势,这说明高围压虽抑制了变形幅值,但并未使试样达到稳定状态。

3.2 应力应变

为比较不同干湿循环次数、细颗粒含量及 σ 下试样的应力应变滞回特征,将各工况下第2 000次循环的滞回圈起点统一平移至原点,不计累积应

变,仅对应力应变滞回曲线形态进行分析。

3.2.1 不同细颗粒含量下的应力应变 图9为 $\sigma = 50$ kPa不同细颗粒含量试样在第2 000次循环时的应力应变。总体来看,不同细颗粒含量试样的应力应变曲线随干湿循环次数变化表现出相近的演化趋势。干湿循环由1次增至10次,以及由50次增至100次时,试样轴向应变幅值及滞回圈面积均有所减小,表明土体抵抗循环变形的能力增强;而干湿循环由10次增至50次时,轴向应变幅值及滞回圈面积增大,该阶段试样对循环荷载的变形抵抗能力有所减弱。从整体来看,干湿循环10次时试样轴向应变幅值和滞回圈面积较小,此时土体在循环荷载作用下变形相对受限;干湿循环50次时,轴向应变幅值和滞回圈面积较大,该阶段土体仍处于较明显的结构调整过程中,第2 000次循环时塑性变形尚未充分发展。

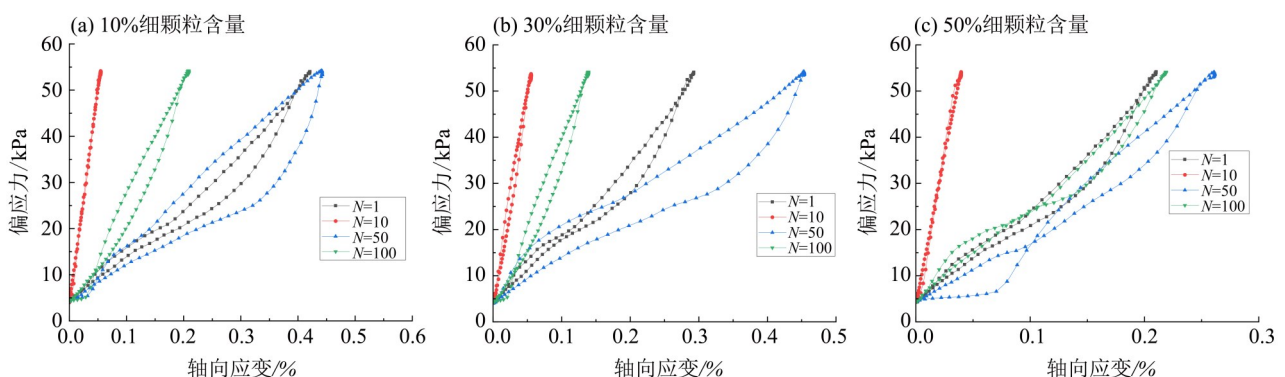


图9 不同细颗粒含量试样的应力应变

Fig. 9 Specimens stress-strain with different fine particle contents

3.2.2 不同干湿循环次数下的应力应变 图10为 $\sigma = 50$ kPa不同干湿循环次数下试样在第2 000次循环时的应力应变。当干湿循环次数不超过50次

时,试样轴向应变幅值和滞回圈面积随细颗粒含量增加而减小,较高的细颗粒含量在一定程度上限制了土体循环变形的发展。当干湿循环次数为10次

和 50 次时, 10% 和 30% 细颗粒含量试样的应力应变较为接近, 两者的结构状态和变形响应差异不大。干湿循环次数为 100 次时, 不同细颗粒含量试样之间的差异明显, 其中 30% 细颗粒含量试样的轴向应

变幅值最小, 表现出较强的变形约束能力; 而 50% 细颗粒含量试样的结构演化更为复杂, 其应力应变响应已不再沿短期循环条件下(干湿循环 1 次时)的变化趋势发展。

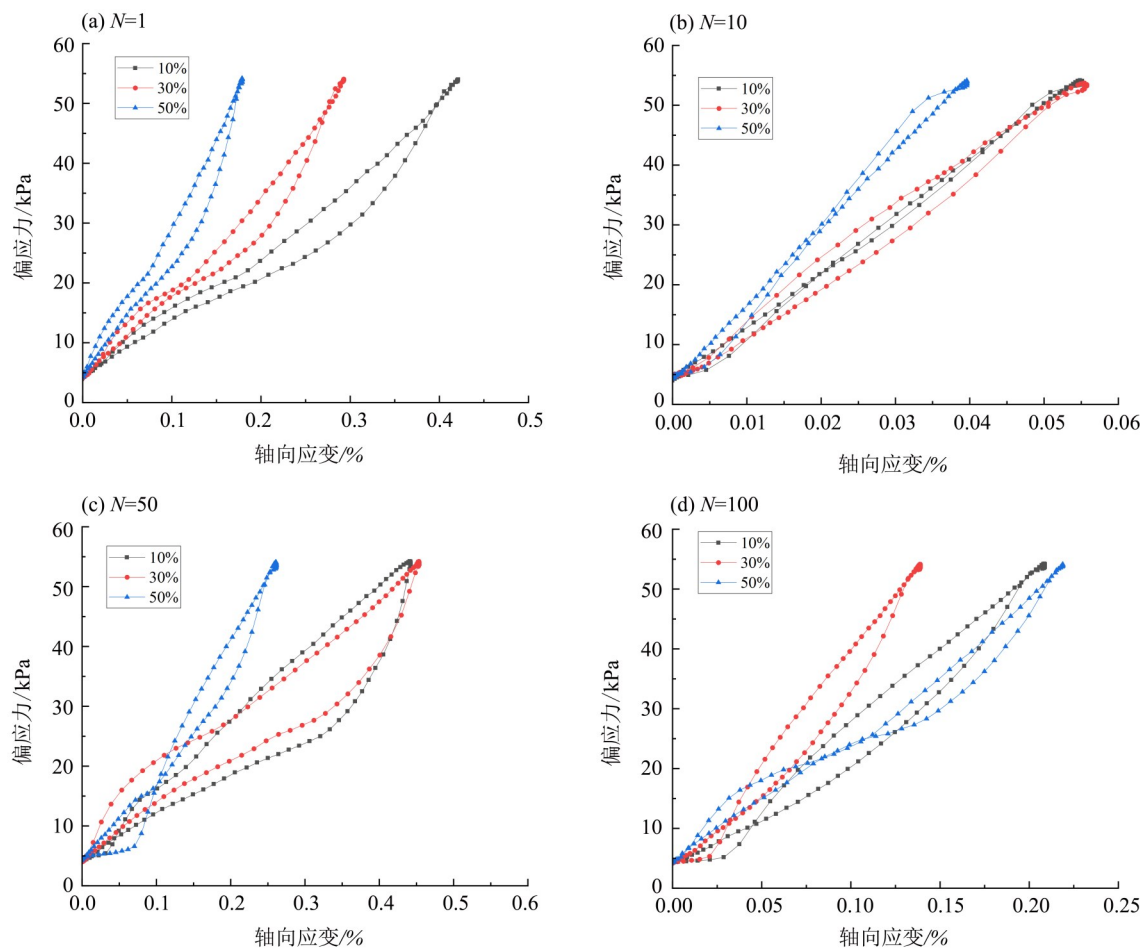


图 10 不同干湿循环次数试样的应力应变 (第 2 000 个循环)

Fig. 10 Stress-strain of specimens with different numbers of drying-wetting cycles

3.2.3 不同围压下的应力应变 图 11 为干湿循环 10 次试样在第 2 000 次循环时的应力应变。50% 细颗粒含量试样在不同围压条件下的轴向应变幅值及滞回圈面积均相对较小, 这表明较高的细颗粒含量有助于限制循环荷载作用下的变形发展。 $\sigma = 100$ kPa 时, 随着细颗粒含量增加, 试样轴向应变幅值及滞回圈面积呈减小的趋势, 土体抵抗循环变形的能力较强; 而 10% 细颗粒含量试样出现了较大的轴向应变幅值, 其变形响应与低、中围压时存在明显差异。 $\sigma = 20, 50$ kPa 时, 30% 细颗粒含量试样的轴向应变幅值相对较大, 土体对循环荷载更为敏感。总体而言, 围压对土体颗粒接触状态和循环变形模式有明显影响。

3.3 回弹模量

3.3.1 不同细颗粒含量下的回弹模量 图 12 为 $\sigma = 50$ kPa 时不同细颗粒含量试样的回弹模量。总体来看, 各组试样的回弹模量均随循环次数增加发生明显变化, 但不同干湿循环次数下的变化趋势并不完全一致。与干湿循环 1 次相比, 干湿循环 10 次试样的回弹模量整体较高, 此时循环荷载促进了颗粒的重新接触与局部密实化, 从而提高了土体刚度。对于干湿循环 50 次和 100 次试样, 回弹模量在循环过程中呈逐步调整并趋于稳定的变化特征。在相同干湿循环次数条件下, 不同细颗粒含量的各组试样的回弹模量差异不大, 但也未表现出一致的单调变化规律。值得注意的是, 在干湿循环 10 次条件下 50% 细颗粒含量试样于后期出现了局部回弹

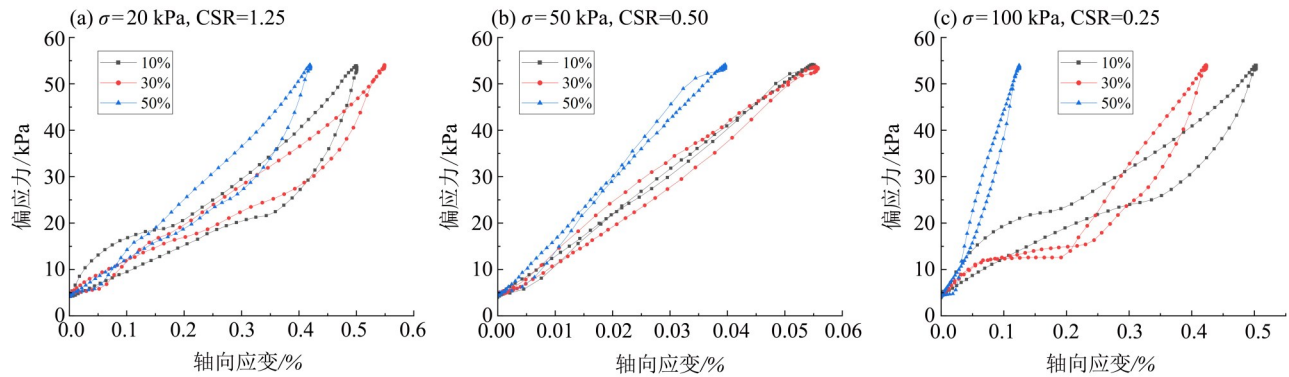


图 11 干湿循环 10 次时试样的应力应变

Fig. 11 Stress-strain of specimens after 10 drying-wetting cycles

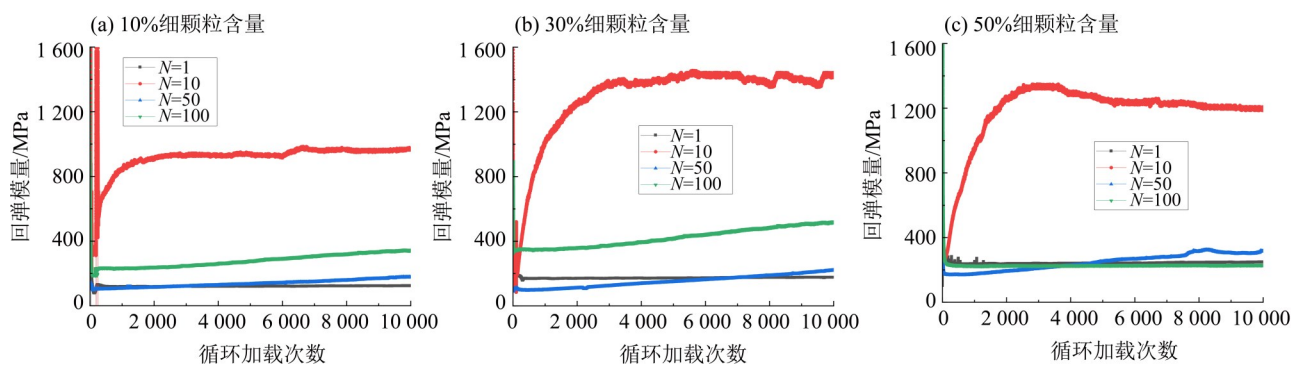


图 12 不同细颗粒含量试样的回弹模量

Fig. 12 Resilient modulus of specimens with different fine particle contents

模量下降的现象(图 14c)。这可能与循环加载过程中颗粒接触状态的再次调整或局部结构损伤有关,但其总体演化趋势仍与前述阶段性规律一致。

3.3.2 不同干湿循环次数下的回弹模量 图 13 为 $\sigma = 50$ kPa 时不同干湿循环次数下试样的回弹模量。干湿循环 1、50、100 次时,试样的回弹模量均在初期快速降低,随后逐渐趋于平稳或略有回升;而干湿循环 10 次时,试样则先降低、后增长、最终趋于稳定,此条件下土体在初始循环作用后的刚度调整更为明显。干湿循环 10 次时,试样处于由初始结构扰动向循环荷载诱导重组过渡的敏感阶段。虽然前期干湿作用使土体结构有所松散,但循环加载可较快促进颗粒重新接触和局部密实化,因此回弹模量整体较高。随着干湿循环进一步增加至 50、100 次,长期循环引起的结构损伤、细颗粒迁移与颗粒重组逐渐达到新的平衡状态,回弹模量未继续显著增大,而是表现出较稳定的演化趋势。

3.3.3 不同围压下的回弹模量 图 14 为干湿循环 10 次条件下不同围压下试样的回弹模量。各组试样的回弹模量均在循环初期发生较明显变化,随后逐渐趋于平稳,但不同围压条件下细颗粒含量对回

弹模量的影响存在差异。 $\sigma = 20, 50$ kPa 时(图 14a 和 14b), 30% 细颗粒含量试样的回弹模量较大,这表明在低、中围压条件下该级配状态下的土体具有较强的变形恢复能力。相比之下, $\sigma = 100$ kPa 时, 50% 细颗粒含量试样的回弹模量最大(图 14c); 10% 细颗粒含量试样次之,而 30% 细颗粒含量试样相对较小。因此,围压条件改变了不同细颗粒含量试样的刚度响应,并与级配状态一起共同影响土体循环刚度演化。

4 讨论与分析

本文结果表明,花岗岩残积土在长期干湿循环与循环荷载共同作用下的动力响应并非随干湿循环次数增加而单调劣化,而是呈现出明显的阶段性和非单调演化特征。这说明干湿循环对土体动力性能的影响并不只是结构损伤过程,还同时伴随着颗粒重排、孔隙填充和循环荷载诱导下的再稳定过程。对于 10% 和 30% 细颗粒含量试样,干湿循环次数由 1 次增至 10 次时,累积塑性应变明显增大,这表明初期的干湿交替可能破坏原有颗粒接触状态,使土体内部可压缩孔隙增多,结构趋于松散;当干

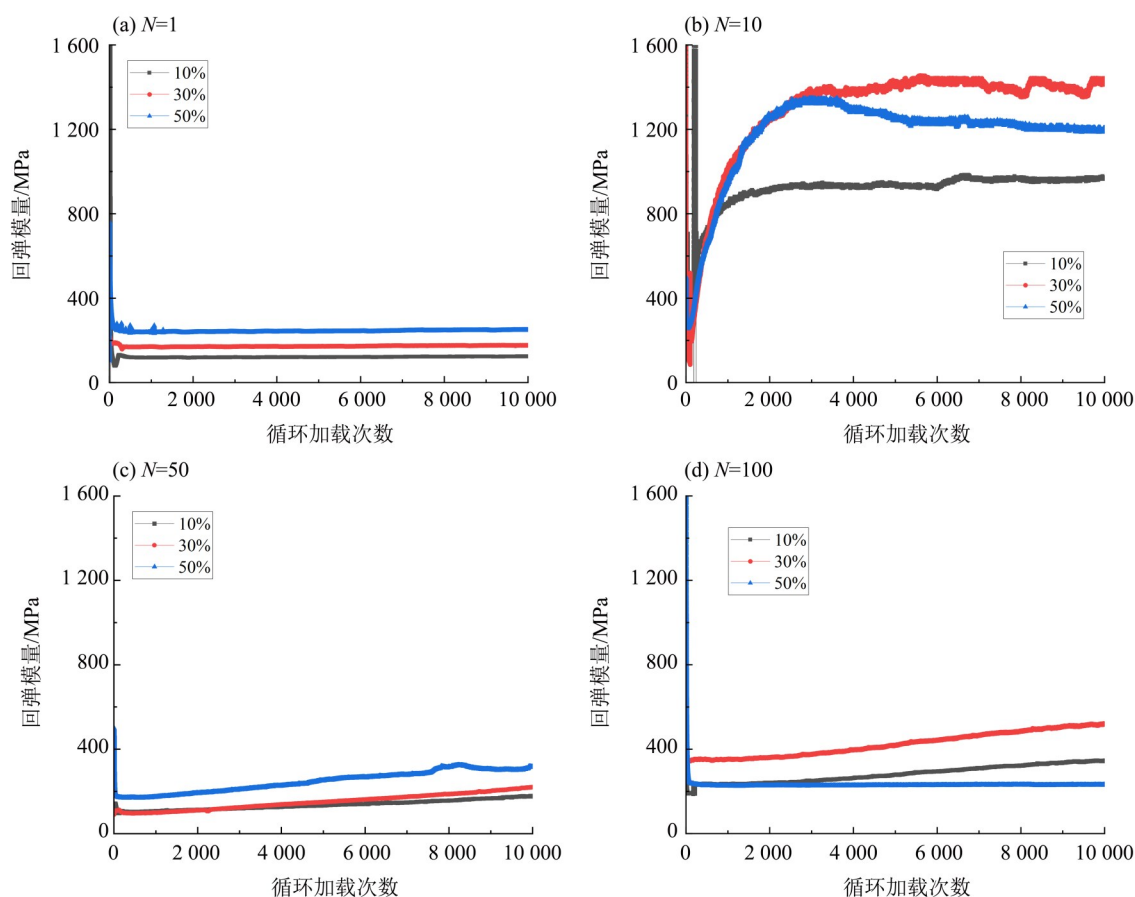


图 13 不同干湿循环次数试样在 50 kPa 围压下的回弹模量

Fig. 13 Resilient modulus of specimens with different numbers of drying-wetting cycles under a confining pressure of 50 kPa

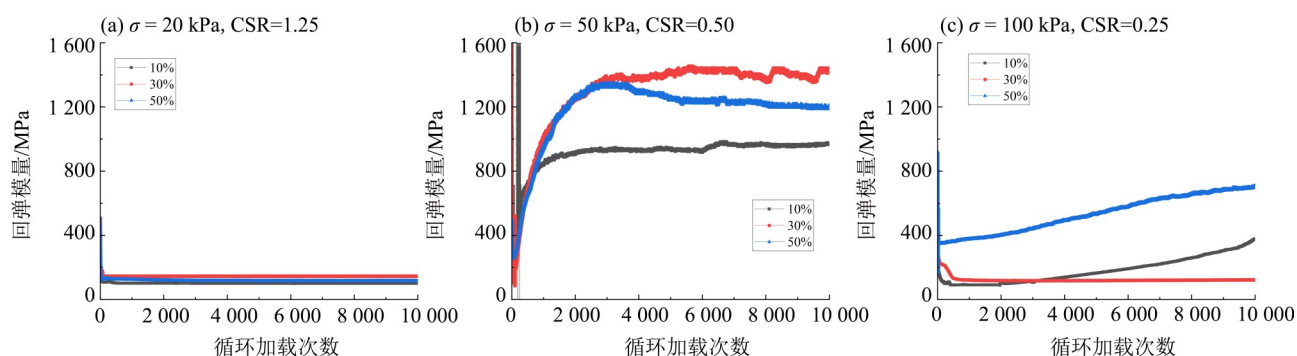


图 14 不同围压下试样的回弹模量

Fig. 14 Resilient modulus of specimens under different confining pressures

湿循环次数增至 50 次时, 累积塑性应变有所减小, 细颗粒迁移、局部沉积和颗粒重新排列促进了部分孔隙填充, 使土体结构趋于相对密实; 继续增至 100 次时, 累积塑性应变再次回升, 这可能与长期干湿扰动引起的局部结构松弛或弱接触破坏有关。50% 细颗粒含量试样在 10 次干湿循环后同样表现出较明显的结构扰动, 但在 50~100 次长期干湿循环后累积塑性应变逐渐减小, 这可能是因为较高的细颗粒含量为孔隙填充和颗粒重排提供了更多细粒材料

来源, 使试样在长期循环后更易形成相对致密和稳定的结构状态。

细颗粒含量对动力响应的影响体现为对孔隙填充、颗粒接触和可压缩空间的调节作用。10% 细颗粒含量试样中细颗粒不足, 粗颗粒间孔隙填充不充分, 但粗颗粒骨架作用相对明显, 仍可提供一定抗变形能力; 30% 细颗粒含量试样接近天然级配状态, 在一定干湿循环阶段内可能形成较多可调整孔隙, 因此对循环荷载更为敏感; 50% 细颗粒含量试

样中细颗粒富集,有利于填充粗颗粒间孔隙,长期干湿循环后可能形成更稳定的密实结构,从而限制塑性变形的进一步发展。图 15 是基于累积塑性应变、应力应变滞回特征和回弹模量变化提出的概念性解释:10%和30%细颗粒含量试样大致经历初期扰动疏松、中期重排密实、长期再次调整的过程,而50%细颗粒含量试样在初期扰动后,随着细颗粒填充和颗粒重排作用增强,整体更趋于致密稳定。

围压条件进一步改变了上述结构演化向宏观

动力响应的转化。在低围压条件下,试样受到的相对循环扰动更强,颗粒重排和塑性变形更容易发展;在高围压条件下,颗粒间接触更紧密,可压缩孔隙空间受到限制,同时较低 CSR 减弱了循环荷载对结构的扰动作用,因此累积塑性变形整体受到抑制。不同细颗粒含量试样在不同围压条件下表现出不同的变形排序和刚度响应,说明级配状态并不是单独控制动力响应,而是通过与应力状态、循环应力比和干湿循环历程耦合共同发挥作用。

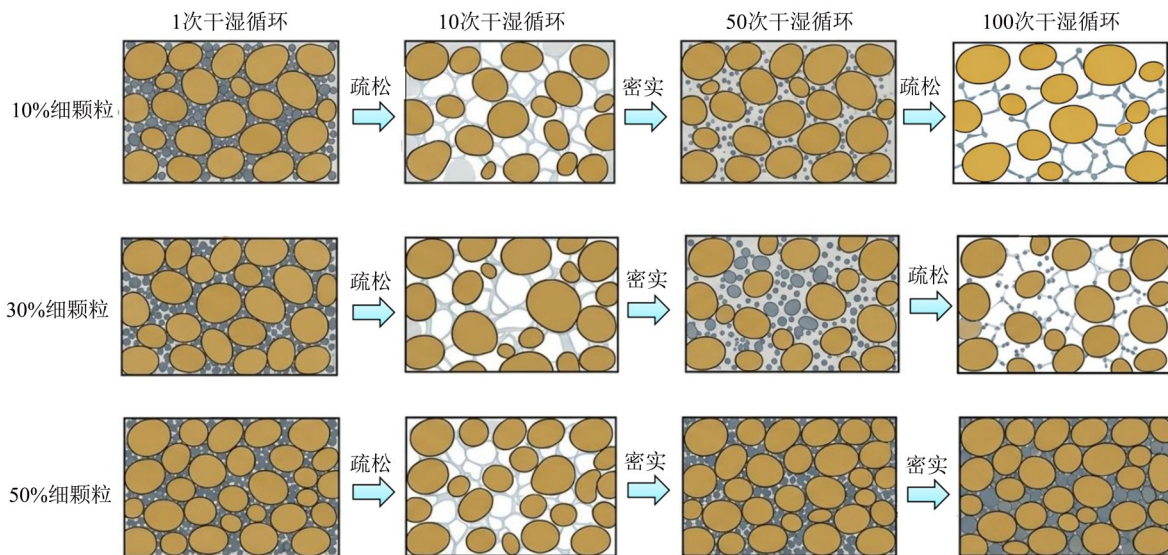


图 15 不同细颗粒含量试样结构演化概念模型

Fig. 15 Conceptual model of structural evolution of specimens with different fine particle contents

5 结 论

1) 在 1 ~ 100 次干湿循环范围内,重塑花岗岩残积土的累积塑性应变、应力应变滞回特征和回弹模量均表现出阶段性与非单调演化特征。10%和30%细颗粒含量试样的累积塑性应变总体表现为在 1 次至 10 次增大、50 次减小、100 次再次回升;50%细颗粒含量试样则在 10 次干湿循环后变形较大,并在 50 ~ 100 次循环后逐渐减小。

2) 细颗粒含量对长期循环变形具有明显调控作用。 $\sigma = 50$ kPa 时,50%细颗粒含量试样在 100 次干湿循环后的累积塑性应变相对较小,因此在长期干湿循环下较高细颗粒含量可能通过孔隙填充

和颗粒重排限制塑性变形发展。

3) 在恒定循环应力幅值条件下, σ 由 20 kPa 增至 100 kPa 时,试样累积变形幅值整体受到抑制,但不同细颗粒含量试样的变形和刚度排序发生了变化,这说明应力约束、循环应力比和级配状态共同控制着土体动力响应。

4) 本文结果表明,残积土路基和地基的长期动力性能评价应关注干湿循环引起的细颗粒迁移和级配偏离效应。需要说明的是,本文结论主要基于重塑试样和既定动三轴加载条件获得,关于细颗粒迁移、孔隙演化和颗粒接触重组的机制解释仍需结合微观结构测试进一步验证。

参考文献:

安然,孔令伟,黎澄生,等,2020.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,39(9):1902-1911.

常洲,晏长根,安宁,等,2024.干湿循环作用下原状黄土渗透性及其对土-水特征曲线的影响[J].长江科学院院报,41(1):143-150+166.

- 陈勇, 赵强, Dave C, 2017. 干湿循环次数对粉质黏土动力特性的影响研究与预测[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 39(6): 52–56.
- 陈志波, 安亚洲, 谢永宁, 等, 2020. 循环荷载作用下原状花岗岩残积土动力特性[J]. 铁道工程学报, 37(11): 25–30.
- 谌文武, 王科玉, 祁强, 等, 2024. 降水与蒸发交替作用下西北土遗址盐分迁移与赋存规律[J]. 岩土力学, 45(8): 2209–2220.
- 范子坚, 刘新喜, 邓宗伟, 等, 2025. 循环荷载作用下残积土力学特性变化规律研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 56(7): 2912–2923.
- 冯雨泉, 朱锐, 周峰, 等, 2025. 考虑干湿效应的土工织物-残积土界面静动力剪切特性[J]. 岩石力学与工程学报, 44(6): 1658–1670.
- 贺斌, 周小文, 李泽健, 2025. 基于动三轴试验的花岗岩残积土结构与动态力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 47(S1): 96–101.
- 康馨, 赵士成, 刘鹏, 2024. 干湿循环下花岗岩残积土胶结物溶蚀-微结构演化规律与力学行为[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 51(1): 159–169.
- 李泽垚, 周洁, 田万君, 等, 2022. 地铁变频荷载循环作用下饱和软黏土累积塑性变形[J]. 上海交通大学学报, 56(4): 454–463.
- 刘鹏, 2023. 干湿循环下花岗岩残积土微观结构与宏观力学特性试验研究[D]. 湖南大学.
- 刘卫涛, 曹文贵, 张运强, 2021. 考虑土体非饱和特性的斜坡降雨入渗模型及边坡稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 38(4): 102–109+117.
- 刘越, 2023. 干湿循环下花岗岩残积土动力变形及微结构损伤机理研究[D]. 厦门大学.
- 毛强, 肖广宁, 吕锴, 等, 2025. 降雨强度对干湿循环作用下花岗岩残积土边坡破坏模式的影响[J]. 水文地质工程地质, 52(5): 184–193.
- 孟佳佳, 吴益平, 晏鄂川, 等, 2025. 基于荷载-干湿循环耦合试验的三峡库区石龙门滑坡滑带土强度特性研究[J]. 岩土力学, 46(5): 1511–1520.
- 舒志乐, 陈昱东, 何宵, 2020. 膨胀土干湿循环作用下的动力特性试验研究[J]. 水电能源科学, 38(6): 133–136.
- 田小革, 李光耀, 窦文利, 等, 2023. 干湿循环和动载作用下粉砂土累积变形研究[J]. 铁道工程学报, 40(9): 1–7+15.
- 王铁行, 郝延周, 汪朝, 等, 2020. 干湿循环作用下压实黄土动强度性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 39(6): 1242–1251.
- 肖雪, 汪时机, 杨寻, 等, 2023. 三峡库区砂质黏性紫色土强度劣化规律试验研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 45(10): 149–159.
- 许健, 刘永昊, 李彦锋, 等, 2025. 干湿循环作用下膨润土改性黄土微观及水力特性[J]. 地下空间与工程学报, 21(5): 1565–1575.
- 许旭堂, 鲜振兴, 杨枫, 等, 2022. 水-力耦合及干湿循环效应对浅层残积土斜坡稳定性的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 33(4): 28–36.
- 尹松, 孔令伟, 张先伟, 2017. 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, 39(4): 743–751.
- 张新民, 2020. 干湿循环对土体级配分形特性影响分析[J]. 水电能源科学, 38(1): 139–142.
- 钟雨薇, 肖文斌, 王文谦, 等, 2025. 双向循环荷载下考虑主应力轴旋转淤泥质粉土动力学响应[J]. 铁道标准设计, 69(10): 167–173+181.
- 周宏, 2022. 广州地区花岗岩残积土长期累积变形特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 18(S2): 627–633+668.
- 朱自强, 刘雨, 陈俊桦, 2019. 干湿循环作用对水泥改良泥质板岩土路基动力响应影响的模型试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 50(10): 2510–2519.
- 祝方才, 邓署冬, 孙德安, 等, 2019. 非饱和花岗岩残积土动力变形特性试验研究[J]. 水利水电技术, 50(1): 142–153.
- Chen Y, Tang L S, Sun Y L, et al, 2023. Physical-mechanical properties and microstructure degradation of acid-alkali contaminated granite residual soil [J]. Geomech Energy Envir, 36: 100501.
- Sun S R, Liu J X, Wei J H, et al, 2025. Understanding the deterioration mechanism of Xiashu loess in dry-wet cycles[J]. B Eng Geol Environ, 84(5): 230.
- Xia J W, Cai C F, Wei Y J, et al, 2019. Granite residual soil properties in collapsing gullies of south China: spatial variations and effects on collapsing gully erosion [J]. Catena, 174: 469–477.

(责任编辑 王海蓉)