浙江理工大学学报,第53卷,第5期,2025年9月
Journal of Zhejiang Sci-Tech University
DOI:10.3969/j.issn.1673-3851(n).2025.05.012

循环荷载下淤泥质黏土的动力特性试验研究

徐诗雨,刘开富
(浙江理工大学建筑工程学院,杭州 310018)

摘　要:针对软黏土在循环荷载等动力作用下可能引发的破坏现象,通过不同围压、动应力幅值、加载频率等因素下淤泥质黏土的动三轴试验,分析淤泥质黏土在循环荷载作用下的超孔隙水压力、累积塑性应变以及应力-应变滞回曲线等演变特征。结果表明:随着循环次数的增加,淤泥质黏土试样的轴向累积塑性应变和超孔隙水压力均逐渐增大;循环荷载应力幅值的提升加速了累积塑性应变的增长,而围压和加载频率的增加对累积塑性应变表现出一定的抑制作用。淤泥质黏土的应力-应变滞回曲线随着循环次数的增加移动幅度逐渐减小;较高的围压会增加滞回曲线的倾斜度;随着循环荷载幅值的增大,应力-应变滞回曲线的形状变得更加细长;荷载频率增加则减小了应力-应变滞回曲线之间的间距。该研究深化了对循环荷载条件下淤泥质黏土动力特性的理解,可为循环荷载长期作用下软土的强度变化与变形机制研究提供参考。

关键词:动三轴试验;淤泥质黏土;循环荷载;轴向累积塑性应变;应力-应变滞回曲线
中图分类号:TU411.8　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1673-3851(2025)09-0697-12
引文格式:徐诗雨,刘开富. 循环荷载下淤泥质黏土的动力特性试验研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2025,53(5):697-708.
Reference Format: XU Shiyu, LIU Kaifu. Experimental investigation on the dynamic characteristics of mucky clay under cyclic loading[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2025, 53(5): 697-708.

Experimental investigation on the dynamic characteristics of mucky clay under cyclic loading

XU Shiyu, LIU Kaifu
(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Considering the possible failure phenomena of soft clay under dynamic actions such as cyclic loading, a series of dynamic triaxial tests were conducted on muddy clay under various confining pressures, dynamic stress amplitudes, loading frequencies, and other factors. The evolution characteristics of excess pore water pressure, cumulative plastic strain, and stress-strain hysteresis curves of muddy clay under cyclic loading were systematically analyzed. The results indicated that with an increasing number of cycles, both the axial cumulative plastic strain and the excess pore water pressure of the muddy clay samples gradually increased. An increase in the cyclic loading stress amplitude accelerated the growth of the cumulative plastic strain, whereas increases in confining pressure and loading frequency exhibited a certain inhibitory effect on the cumulative plastic strain. The movement amplitude of the stress-strain hysteresis curve of muddy clay gradually decreased with the increasing number of cycles. A higher confining pressure increased the inclination of the hysteresis curve, while an increase in the cyclic loading amplitude made the shape of the stress-strain hysteresis curve more slender. Additionally, an increase in loading frequency reduced the spacing between the stress-strain hysteresis curves. This study enhances the understanding of the dynamic characteristics of muddy clay under cyclic loading conditions and provides

收稿日期:2025-02-26　　网络出版日期:2025-04-29
基金项目:国家自然科学基金项目(52078465, 52478370);浙江省公益技术应用研究项目(LGG22E080015)
作者简介:徐诗雨(1999—),女,浙江绍兴人,硕士研究生,主要从事地基处理技术方面的研究。
通信作者:刘开富,E-mail:liukaifu@zstu.edu.cn

valuable reference for investigating the strength changes and deformation mechanisms of soft soil under long-term cyclic loading.

Key words: dynamic triaxial test; muddy clay; cyclic loading; axial cumulative plastic strain; stress-strain hysteresis curve

0 引 言

随着中国经济的快速发展,交通基础设施及海洋工程亦呈现出快速发展的态势。然而,这些工程的地基土体在长期循环荷载作用下的动力特性与静载下的特性显著不同,特别是土体变形及强度变化明显,严重影响工程的长期运维,甚至可能会导致结构失效。软黏土作为地基土体中的一种典型类型,其力学行为对工程安全的影响尤为显著,因此研究在循环荷载作用下黏土的强度变化和变形规律显得尤为重要,这不仅关系到工程的安全性和耐久性,也具有显著的应用价值[1]。

循环荷载作用下土体动力特性研究涉及多种方法,包括室内外试验方法(室内试验、现场试验)和数值模拟方法等,其中动三轴试验是最常用的室内试验手段之一。已有学者采用动三轴试验研究了循环荷载作用下不同土体的孔隙水压力、应变、骨干曲线及动强度等动力特性的变化规律。Nie 等[2]和畅振超等[3]分别对颗粒土和砾性土进行了循环三轴试验,研究了动态加载条件下土体的应力-应变关系及孔隙水压力的变化规律。祝梦柯等[4]利用动三轴试验,研究了围压与动应力幅值对饱和砾性土的轴向累积应变及孔隙水压力的影响规律。代倩等[5]对饱和压实黄土开展了动三轴压缩试验,揭示了循环次数对饱和压实黄土塑性应变累积和孔压累积等影响机制。郭舒洋等[6]采用不排水循环三轴试验,研究了相对密度和循环应力比对饱和珊瑚砂超孔隙水压力、轴向应变及动强度特性的影响规律。Zhang 等[7]通过正交试验探讨了围压对改良土永久变形特性的影响规律,在此基础上构建了基于交通荷载循环次数的永久变形分析模型并通过试验数据验证了模型的准确性。王家全等[8]采用固结不排水动三轴试验,探究了加筋层数对加筋红黏土的轴向累积应变等动力特性的调节作用。章凯等[9]和 Lin 等[10]均对黏土类土体的动力特性进行研究。章凯等[9]采用动三轴循环加载试验,分析了围压对粉质黏土孔压等演化的影响;Lin 等[10]采用动态三轴试验方法,研究了饱和软黏土局部软化特性及软化区应力-应变关系与孔压发展的动态过程。综上可知,关于循环荷载作用下土体的研究主要集中在渗透性较高、颗粒结构较为稳定的土体(如砾性土、粗粒土、砂类土、粉土)等方面,然而对低渗透性、高孔隙比的淤泥质黏土关注不足。淤泥质黏土因其独特的物理力学性质,在循环荷载作用下的动力特性变化规律与其他土体存在显著差异,亟待进一步探索。

近年来,围绕土体动力行为的研究取得了显著进展,相关研究主要集中在围压、动应力幅值和频率对土体孔隙水压力、应变累积、动强度特性等影响。Pandya 等[11]通过一系列应变控制循环三轴试验,探讨了不同加载频率和轴向应变幅值条件下黏性土工材料在土体内的循环响应特性。Xu 等[12]对氯盐渍土开展了不同围压、含水率和加载频率下动态三轴试验,分析了动应力-应变关系等参数。Huang 等[13]研究了不同振动频率比下尾矿砂的动态孔隙水压力发展特征。Liu 等[14]探讨了不同固结应力、加载频率和循环应力下渣土的应力-应变滞后曲线和累积塑性应变的动态变形特性。刘侠等[15]研究了在车辆荷载作用下路基细粒土填料在不同加载频率和应力状态作用下的动力特性。李治朋等[16]和孙淼军等[17]进一步研究了荷载频率对黏土的孔隙水压力变化的影响,发现低频荷载和高频荷载对动孔压的影响存在显著差异。何忠明等[18]、刘帅等[19]和穆锐等[20]通过动三轴试验,分别探讨了围压和动应力幅值对软土、饱和软土及红黏土累积变形的影响,发现累积应变和孔隙水压力随围压和动应力幅值增加呈显著增长趋势。Wang 等[21]通过动三轴试验,研究了阶梯循环荷载作用下围压和循环作用次数对粗粒填土滞后曲线的影响。吴遥杰等[22]开展了粉土的间歇循环加载动三轴试验,研究了不同动应力幅值、含水率和加载振次下的累积变形规律,分析了粉土的动力特性。刘建民等[23]研究了动应力比对软黏土动应变和动孔压的影响。上述研究对不同土的动力特性进行了较为系统的研究,但考虑的因素相对单一。然而,在实际情况下土体动力行为受到多个因素的耦合作用,受力情况相对复杂,因此开展多因素作用下淤泥质黏土动力特性的研究有

重要意义。

本文通过循环荷载作用下的动三轴试验,探讨围压、动应力幅值和加载频率对淤泥质黏土动力特性的影响规律,分析不同围压、动应力幅值和加载频率下孔隙水压力的发展规律、累积塑性应变的变化规律及应力-应变滞回曲线的演化特征,以揭示淤泥质黏土在不同因素作用下的动力特性,为进一步理解循环荷载下淤泥质黏土的力学特性奠定基础。

1　试验材料、试验仪器及试样制备

1.1　试验材料

本文采用的土体为杭州地区重塑的淤泥质黏土。经试验测试,该材料的压缩系数为 0.685 MPa^{-1}(>0.50 MPa^{-1}),表明该土体具有显著的高压缩性特征。通过室内试验,包括密度试验、含水率试验、直剪试验及固结试验,得到淤泥质黏土的基本物理力学指标,见表 1。

表 1　土体基本物理力学指标

土体类型	密度/(g·cm^{-3})	含水率/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa
淤泥质黏土	1.57	45	12.1	10.4	1.46

1.2　动三轴试验

动三轴试验系统能够精确控制动态力加载曲线和动态位移加载曲线。动三轴试验系统由数据采集系统、加压系统和压力室等 3 部分组成,现场照片如图 1 所示。与传统的上加载方式不同,该系统采用下加载方式施加轴压,不仅保留了静三轴试验系统的全部功能,还进一步提升了实验的灵活性和精度。该设备的最大循环动载频率为 5.0 Hz,轴向最大动荷载可达 10 kN。

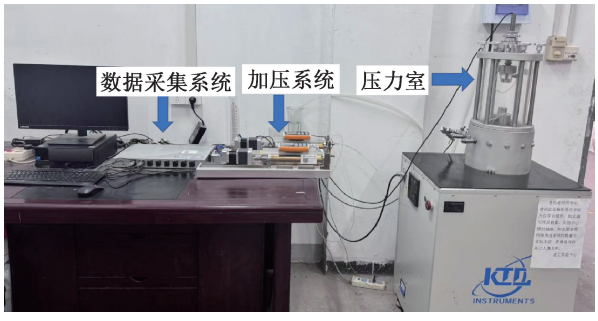


图 1　动三轴试验系统现场照片

1.3　试样制备及试验流程

试样的制备遵循《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)相关规定。重塑淤泥质黏土试样为标准圆柱形,含水率为 45%,直径为 38 mm,高度为 76 mm,其高度与直径比为 2∶1。在试验过程中确保试样受力均匀,同时满足标准中对试样尺寸与土颗粒最大粒径比例的要求,以避免尺寸效应对试验结果的影响。试样制备完成后,采用反压饱和法进行饱和处理,以确保试样在试验过程中处于完全饱和状态。当 B 值(孔隙水压力系数)超过 0.96 时,试样达到饱和状态,然后进行等压固结。在加载阶段,试样处于不排水状态。

在实际工程中,土样所处位置越深,其初始平均有效围压越大。交通循环荷载作用下土体的有效围压通常在 50～200 kPa 范围内[24],这一范围能够覆盖浅层至中等深度土体的应力状态。为了模拟不同深度下的淤泥质黏土在动循环荷载作用下的变形特性,本文采用 50、100 kPa 和 200 kPa 的围压进行试验,分别代表浅层、中层和较深土层的应力条件。加载频率是反映交通荷载特性的关键参数,已有研究表明公路路基的加载频率范围为 0.1～10.0 Hz[25]。因此,试验中循环荷载的加载频率选取 0.5、1.0 Hz 和 2.0 Hz,并采用正弦波形式进行加载[26-27],加载示意图如图 2。所有试验均在不同应力幅值条件下进行,且预设振动次数为 10000 次。试验方案详见表 2。

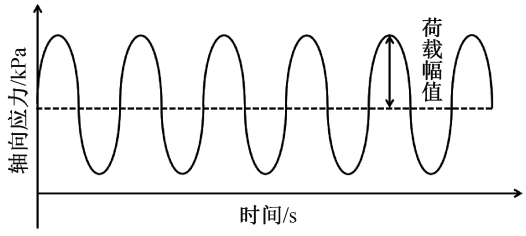


图 2　循环荷载加载曲线

表 2　试验方案

围压/kPa	加载频率/Hz	动应力幅值/kPa
50	0.5	10,15,20
	1.0	10,15,20
	2.0	10,15,20
100	0.5	10,15,20
	1.0	10,15,20
	2.0	10,15,20
150	0.5	10,15,20
	1.0	10,15,20
	2.0	10,15,20

2 循环荷载下淤泥质黏土超孔隙水压力分析

2.1 有效围压对超孔隙水压力的影响

当循环荷载幅值为 10 kPa 时,不同有效围压下淤泥质黏土超孔隙水压力随循环次数变化的曲线如图 3 所示。从图 3 中可看出,淤泥质黏土的超孔隙水压力随循环次数的增加而增大,并随着有效围压的增加而增大;同时,超孔隙水压力的增长速率随循环次数的增加呈现逐渐减缓的趋势。产生这一现象可能是因为有效围压的增加显著提高了淤泥质黏土颗粒间的初始接触应力[28],使土体结构变得更加密实,因而使得淤泥质黏土具有更高的抗压能力,土体的抗剪强度显著提高。随着有效围压的增大,土体的孔隙空间会受到压缩,而孔隙内的水分由于不易压缩导致孔隙水的压力上升。同时超孔隙水压力的累积过程变得更加缓慢,超孔隙水压力增长速率趋于降低。例如,在动应力幅值为 10 kPa、加载频率为 0.5 Hz 的条件下,当有效围压为 100 kPa 时,前 2000 次循环加载作用下超孔隙水压力增加了 2.23 kPa,而最后 2000 次循环仅增加了 2.04 kPa;当有效围压提高至 200 kPa 时,前 2000 次循环加载作用下超孔隙水压力增加了 3.30 kPa,而最后 2000 次循环仅增加了 3.01 kPa。这一现象进一步表明,有效围压的增加显著抑制了超孔隙水压力的累积速率。

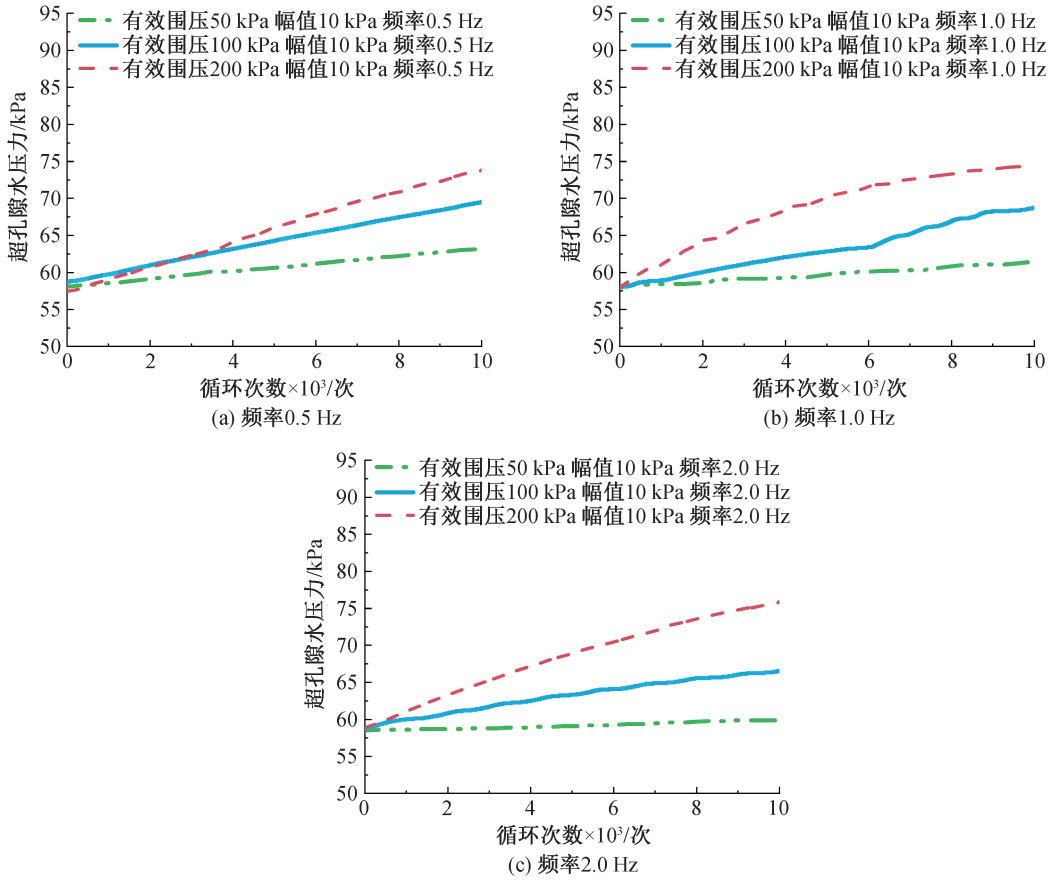


图 3 不同有效围压下淤泥质黏土超孔隙水压力随循环次数的变化曲线

2.2 循环荷载幅值对超孔隙水压力的影响

当加载频率为 0.5 Hz 时,相同围压下不同动应力幅值对超孔隙水压力的影响如图 4 所示。由图 4 可见,随着加载幅值的增加,淤泥质黏土的超孔隙水压力随之增大。当围压为 200 kPa 时,经过 10000 次循环荷载,加载幅值为 10、15 kPa 和 20 kPa 时淤泥质黏土的超孔隙水压力分别为 73.85、75.86 kPa 和 87.99 kPa。这主要是由于外部加载引起的孔隙压缩导致土体孔隙空间缩小,水分无法轻易排出,从而产生较高的超孔隙水压力[29];此外,淤泥质黏土的低渗透性会进一步加剧超孔隙水压力的积累。

2.3 循环荷载频率对超孔隙水压力的影响

当加载幅值为 15 kPa 时,同一围压下不同加载频率对超孔隙水压力的影响如图 5 所示。由图 5 可见,超孔隙水压力的增长速率随着加载频率的增加而逐渐减慢,这与孙森军等[17]的研究结论一致。这是因为在较高加载频率下,每个加载周期的时间较短,淤泥质黏土内部孔隙水压力的积累受到时间限制,孔隙水压力消散难以及时完成,从而使得孔隙水压力增长速率明显降低[30]。此外,由图 5 可见,相

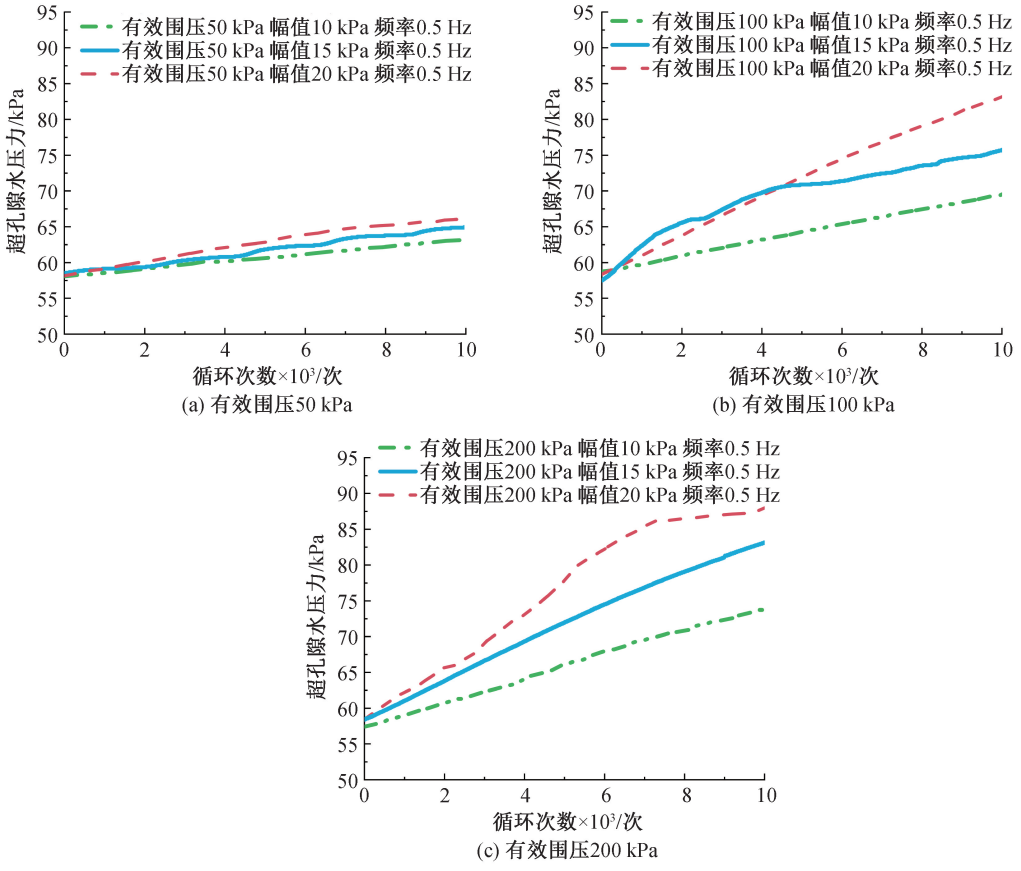


图 4　不同加载幅值下淤泥质黏土超孔隙水压力随循环次数的变化曲线

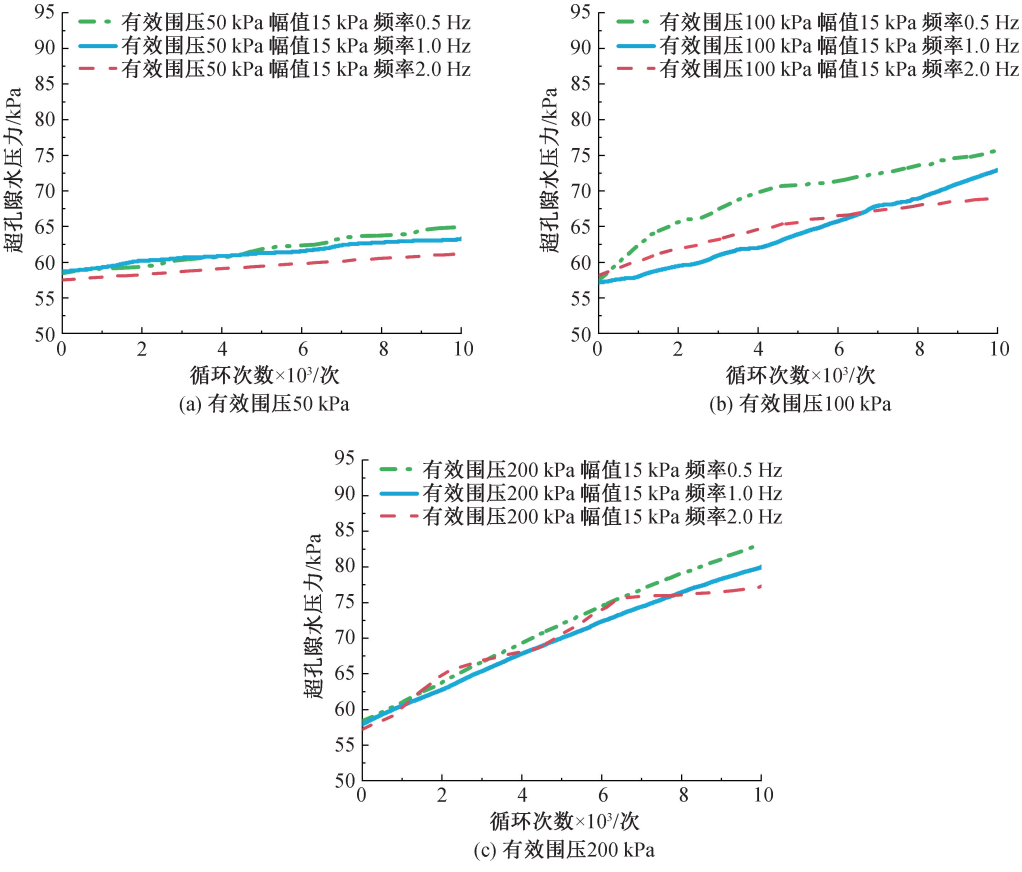


图 5　不同加载频率下淤泥质黏土超孔隙水压力随循环次数的变化曲线

同的加载条件下,整个加载过程中超孔隙水压力积累速率趋于一致。这可能是由于重塑黏土颗粒重新排列能力较弱,最终阻碍了超孔隙水压力的积累。例如,在动围压为 50 kPa、加载幅值为 15 kPa 的条件下,当加载频率为 2.0 Hz 时,前 2000 次循环加载作用下超孔隙水压力增加了 0.77 kPa,而最后 2000 次循环的增加量同样为 0.77 kPa。

3 循环荷载下淤泥质黏土塑性累积应变分析

3.1 有效围压对累积塑性应变的影响

当加载幅值 10 kN 时,不同有效围压对淤泥质黏土累积塑性应变的影响如图 6 所示。由图 6 可见,随着循环荷载次数的增加,淤泥质黏土试样的轴向累积应变逐渐增大。在加载初期,因淤泥质黏土结构较为松散,轴向应变的增长速度较快;随着加载次数的增加,土体颗粒逐渐重新排列,土体结构逐渐变得紧密。此外,淤泥质黏土在循环荷载作用下经历了多个加载和卸载的过程,每次加载和卸载过程均产生不可逆的塑性累积变形增加。随着循环次数的增加,变形逐渐积累,导致轴向累积应变逐步增大[31]。此外,图 6 还表明,在循环加载过程中,施加的有效围压越大,产生的轴向累积应变反而越小。例如,在加载频率为 0.5 Hz、加载幅值为 10 kPa 的条件下,经过 10000 次循环荷载后,围压为 50 kPa 时累积塑性应变为 0.15%;围压为 100 kPa 时累积塑性应变降低至 0.11%;而当围压进一步提高至 200 kPa 时,累积塑性应变进一步减小至 0.06%。这一现象表明,有效围压的增加显著抑制了土体的塑性变形发展。这主要是由于较高的有效围压使得土体在固结阶段被压缩得更加密实[30];而且土体受到竖向循环荷载时颗粒间难以发生相对错动,导致土体刚度和强度增加,因此围压的增大会使得土体轴向应变较小。

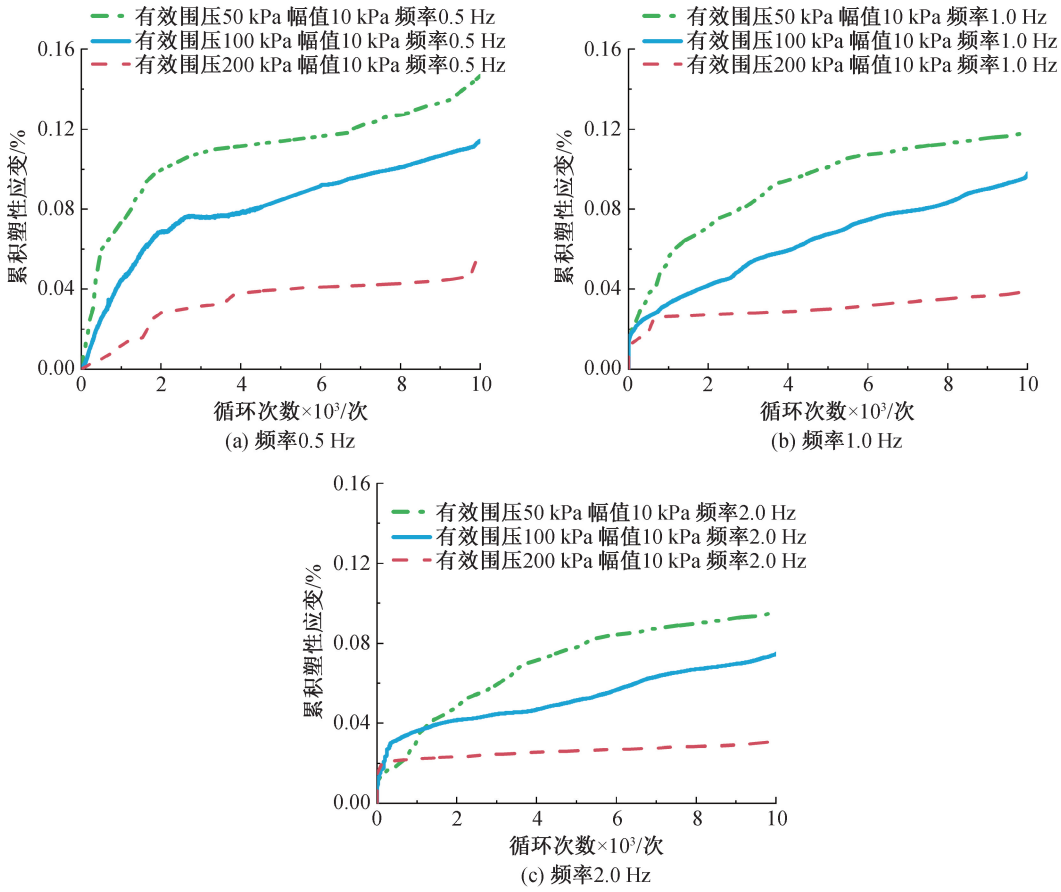
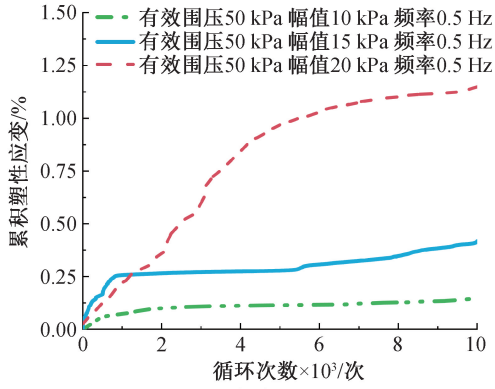


图 6 不同有效围压下累积塑性应变随循环次数的变化曲线

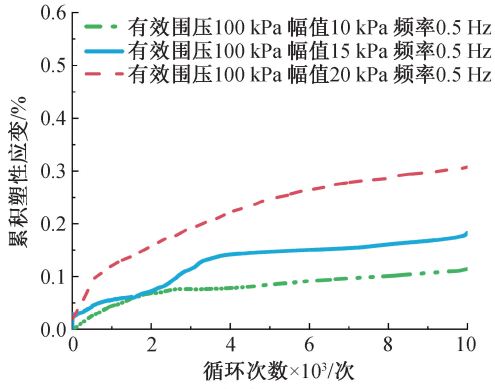
3.2 循环荷载幅值对累积塑性应变的影响

当加载频率 0.5 Hz 时,不同循环荷载幅值对累积塑性应变的影响如图 7 所示。由图 7 可见,相同的循环次数下,淤泥质黏土的累积塑性应变随循环荷载幅值的增大呈非线性增加;这与马少坤等[32]的研究结论一致。以 50 kPa 围压为例,当加载频率为 0.5 Hz 时,循环荷载幅值分别为 10、15 kPa 和 20 kPa 的情况下,经过 10000 次循环后,淤泥质黏土试样的累

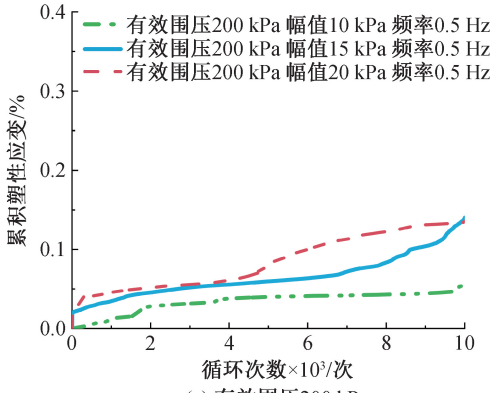
积塑性应变分别为 0.15%、0.42%和 1.15%。这主要是由于循环荷载幅值的增大使得淤泥质黏土试样内部的颗粒重新排列[33],导致其结构和颗粒接触状态发生显著变化,从而加剧了塑性应变的积累,并表现为非线性增长;同时,较大的荷载幅值提高了试样所承受的应力水平,产生了更大的塑性变形。



(a) 有效围压50 kPa



(b) 有效围压100 kPa

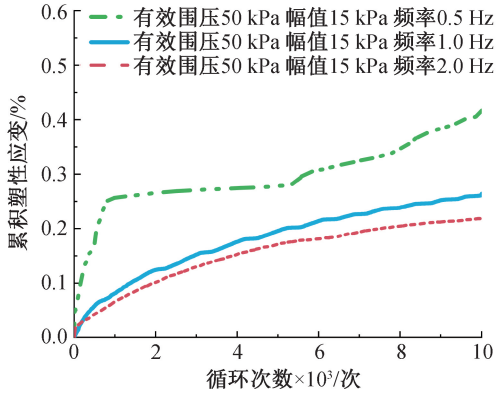


(c) 有效围压200 kPa

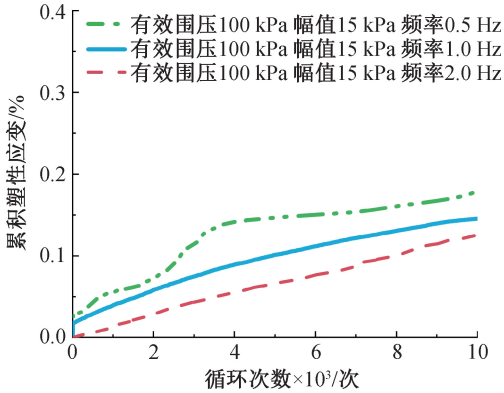
图 7　不同加载幅值下累积塑性应变随循环次数的变化曲线

3.3　循环荷载频率对累积塑性应变的影响

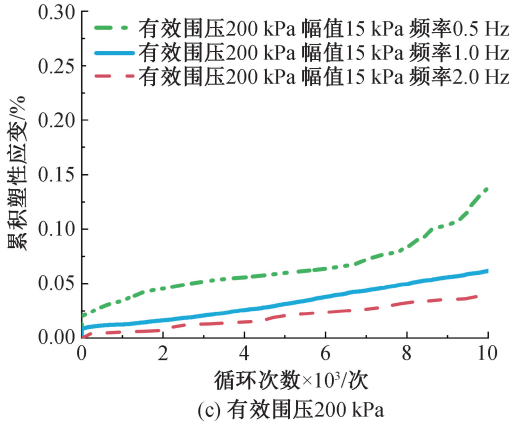
当加载幅值 15 kPa 时,不同循环加载频率对累积塑性应变的影响如图 8 所示。由图 8 可见,随着加载频率的增加,淤泥质黏土的累积塑性应变略有减小,但差异并不显著。在较低的循环加载频率下,正弦波作用时间较长,使得循环荷载在淤泥质黏土中的加卸载过程更为缓慢,土体表现为较大的累积塑性应变;增加循环加载频率会导致循环荷载的作用时间较短[34],土体内部变形不充分,表现出较低的累积塑性应变[35]。此外,随着循环加载频率的增加,其对应变增长的影响逐渐减弱,这主要是由于循环荷载作用下的应变变化存在滞后效应。以围压 50 kPa 为例,在循环荷载幅值为 15 kPa 的条件下,经过 10000 次循环后,加载频率为 0.5 Hz 时,淤泥质黏土试样的累积塑性应变为 0.42%;当加载频率提高至 1.0 Hz 时,累积塑性应变降低至 0.26%;而当加载频率进一步增加至 2.0 Hz 时,累积塑性应变进一步减小至 0.21%。



(a) 有效围压50 kPa



(b) 有效围压100 kPa



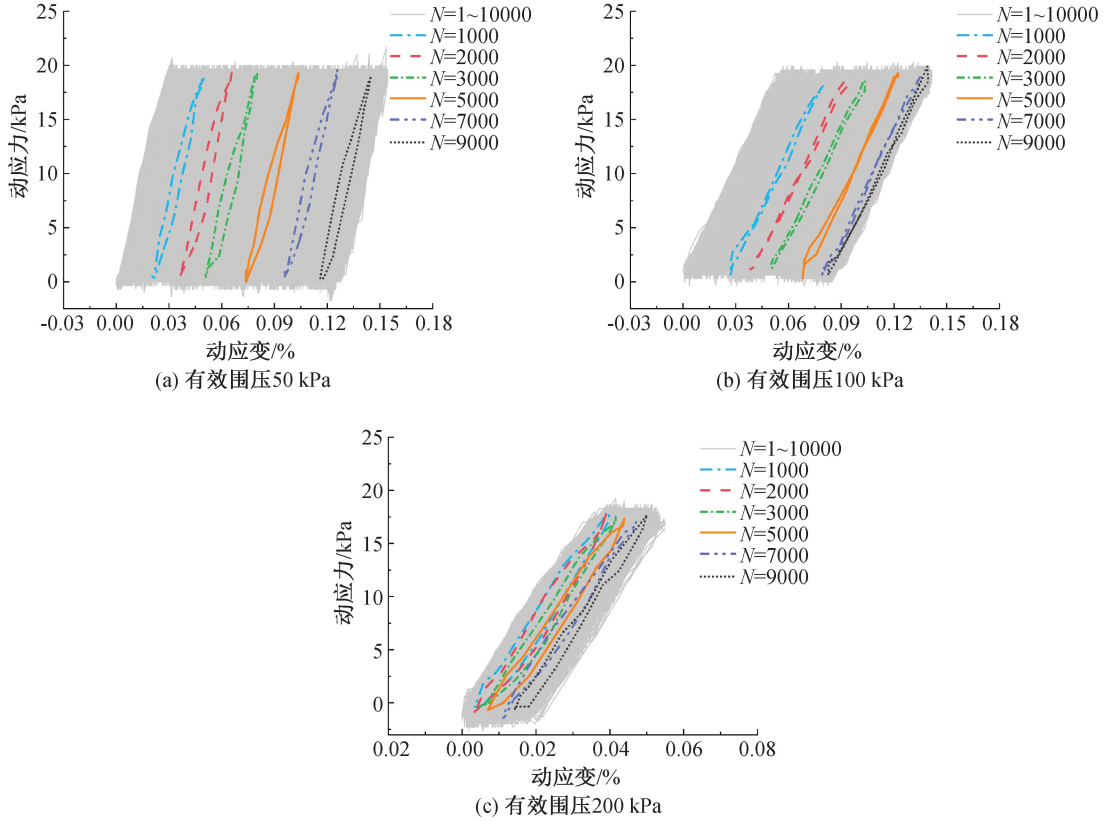
(c) 有效围压200 kPa

图 8 不同加载频率下累积塑性应变随循环次数的变化曲线

4 淤泥质黏土的应力-应变滞回曲线分析

4.1 有效围压对应力-应变滞回曲线的影响

当循环加载幅值为 10 kN 及加载频率为 1.0 Hz 时,不同有效围压条件下淤泥质黏土不同振次(*N*)的应力-应变滞回曲线如图 9 所示。从图 9 可看出,各阶段的滞回曲线的形状相似,呈现出一个封闭的形态,具有两段窄小中间略宽,整体上表现为“长梭状”的特点,这表明淤泥质黏土试样在加卸载过程中发生了部分塑性变形且无法完全恢复。在较低有效围压(50 kPa)下,淤泥质黏土容易发生较大的塑性变形,应力-应变滞回曲线面积较大。这是因为较低的有效围压导致淤泥质黏土受力时能够产生更多的塑性变形,从而导致能量损失较大[36]。有效围压增大时,淤泥质黏土的塑性变形能力受到抑制,因此滞回曲线面积较小。此外,随着有效围压的增大,滞回曲线的倾斜程度逐渐增加,表明淤泥质黏土经历了明显的硬化过程。施加 50 kPa 有效围压时,滞回曲线的变化较为均匀,且加卸载曲线的间距较大,而施加 100、200 kPa 有效围压时加卸载过程中



(a) 有效围压50 kPa (b) 有效围压100 kPa

(c) 有效围压200 kPa

图 9 循环加载幅值 10 kN 加载频率 1.0 Hz 时不同有效围压下应力-应变滞回曲线

的滞回曲线间距较小。在循环加载幅值为 10 kN、加载频率为 1.0 Hz 的条件下,当有效围压为 50 kPa 时,循环次数从 1000 次增加到 2000 次,滞回曲线之间的间距为 0.018%;而在有效围压提升至 100 kPa 时,相同循环次数变化下,滞回曲线的之间的间距进一步减小至 0.014%。这一现象表明,随着有效围压的增加,淤泥质黏土在加载过程产生的变形相对较小。这主要是因为围压的增大限制了淤泥质黏土内部颗粒间的滑移[37],提高了试样的整体强度,抑制了变形的进一步发展。

4.2　循环荷载幅值对应力-应变滞回曲线的影响

当有效围压为 50 kPa 及加载频率为 1.0 Hz 时,不同加载幅值条件下淤泥质黏土不同振次(N)的应力-应变滞回曲线如图 10 所示。从图 10 可看出,循环加载幅值越大,滞回曲线的形状越细长,这与黄小晴等[38]的研究结果一致。当加载幅值较小时,不同循环次数下的应力-应变滞回曲线面积变化不大。在有效围压 50 kPa、加载幅值 10 kPa、加载频率 1.0 Hz 的条件下,随着循环荷载次数从 1000 次增加至 2000 次,滞回曲线面积显著增加了 12.28%。这一结果表明,循环荷载次数的增加显著提升了滞回曲线的能量耗散能力。然而,当加载幅值变大时,应力-应变滞回曲线面积随循环次数的变化更为显著。在有效围压 50 kPa、加载频率 1.0 Hz 的条件下,当加载幅值为 15 kPa 时,随着循环荷载次数从 1000 次增加至 2000 次,滞回曲线面积增加了 26.98%。这是由于循环荷载幅值较小时,在固结作用下淤泥质黏土形成了相对稳定的结构[39],随着循环加载次数的增加,淤泥质黏土的强度、刚度没有明显的减小,应力-应变滞回曲线的差别不大。而在较大加载幅值下,土体结构受到更显著的扰动,导致强度和刚度逐渐降低,滞回曲线面积随循环次数增加而增大。

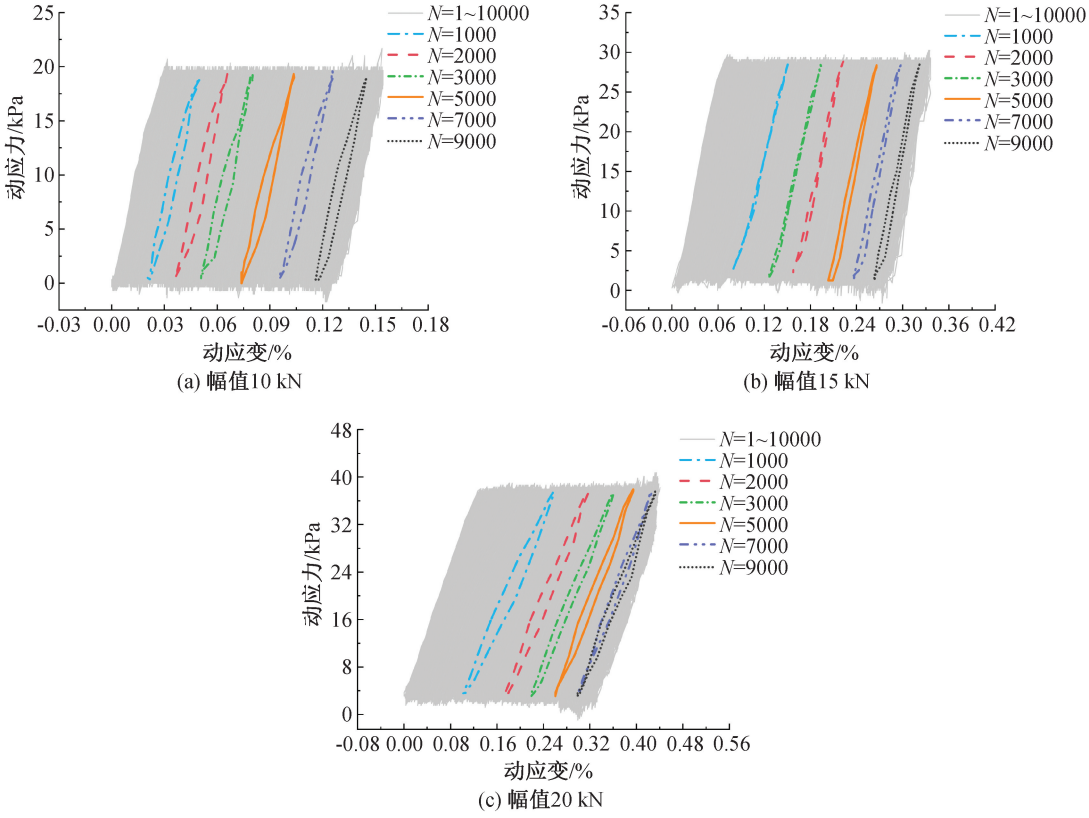


图 10　有效围压 50 kPa 加载频率 1 Hz 时不同加载幅值下应力-应变滞回曲线

4.3　循环荷载频率对应力-应变滞回曲线的影响

当有效围压为 100 kPa 及加载幅值 10 kN 时,不同加载频率条件下淤泥质黏土不同振次(N)的应力-应变滞回曲线如图 11 所示。从图 11 可看出,在较低的加载频率下(0.5、1.0 Hz),应力-应变滞回曲线通常较为规则,且随着循环次数的增加,淤泥质黏土的塑性变形逐渐增大,应力-应变滞回曲线的形状变得扁平,这表明淤泥质黏土进入明显的塑性区,表现为更多的塑性流动和变形。随着加载频率的提高,应力-应变滞回曲线之间的间距通常减小,这与戴世安等[40]报道的结果一致。在循环加载幅值为 10 kN、加载频率为 0.5 Hz 的条件下,当有效围压为 100 kPa 时,循环次数从 1000 次增加到 2000 次,滞回曲线之间的间距为 0.006%;而在有效围

压提升至 100 kPa 时,相同循环次数变化下,滞回曲线之间的间距进一步减小至 0.004%。这是因为增加加载频率会导致淤泥质黏土的应变变化速率较快,滞后响应更加明显,因而每个加载周期内的应变变化幅度变小,应力-应变滞回曲线之间的间距减小。

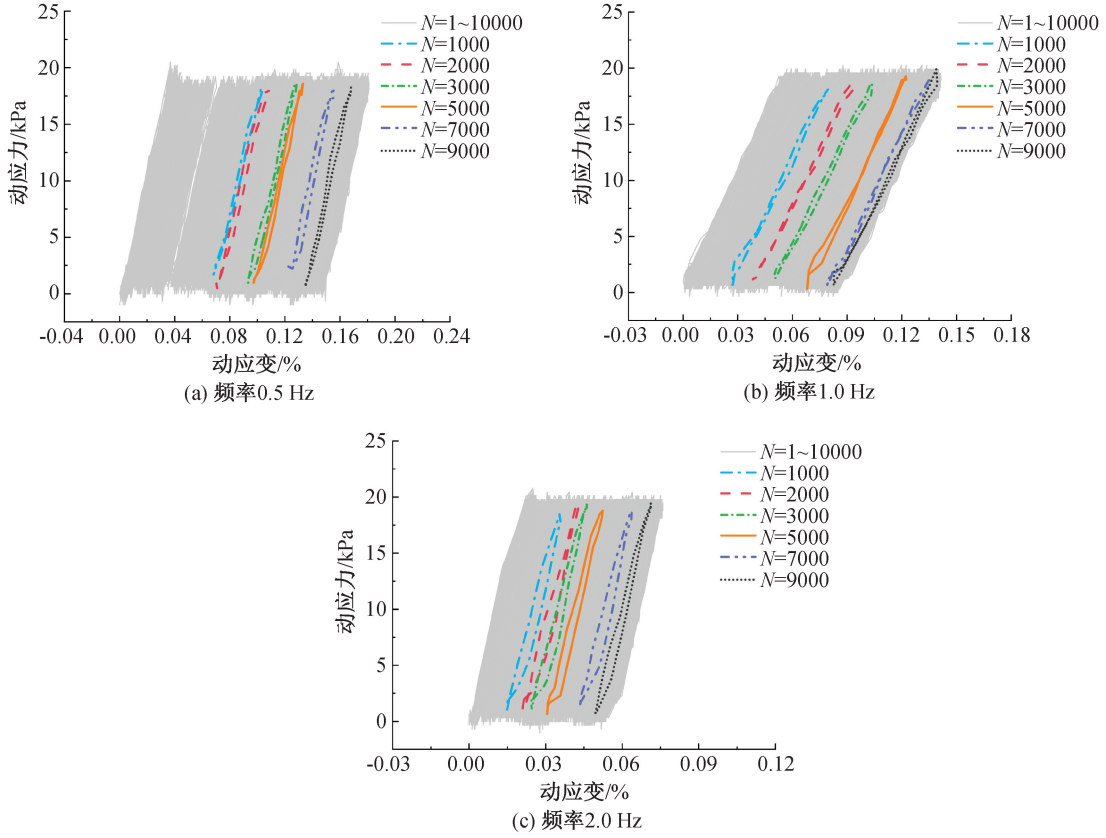


图 11 有效围压 100 kPa 加载幅值 10 kN 时不同加载频率下的应力-应变滞回曲线

5 结 论

本文针对循环荷载下的淤泥质黏土开展了一系列的动三轴试验,探讨了有效围压、动应力幅值及加载频率等因素对淤泥质黏土超孔隙水压力、累积塑性应变和应力-应变滞回曲线的影响,主要研究结论如下:

a)循环加载条件下,淤泥质黏土的超孔隙水压力随循环次数呈非线性增长趋势,在较高有效围压下,超孔隙水压力的增幅更为明显;在循环加载过程中,超孔隙水压力的增长速率呈现逐渐减缓的趋势。随着加载幅值的增加,土体的超孔隙水压力增大;超孔隙水压力的增长速率随着加载频率的增加而逐渐减慢。

b)随着加载次数的增加,淤泥质黏土试样的轴向累积应变逐渐增大;在加载初期,轴向应变增长迅速;随着加载次数的增加,轴向应变增长减慢。动应力幅值的增加导致淤泥质黏土累积塑性应变显著上升;相反,有效围压和加载频率的增加抑制了累积塑性应变的发展。有效围压的增加通过增强土体刚度和强度抑制了塑性变形,而加载频率的提高则因缩短了荷载作用时间,同样限制了塑性应变的发展。

c)较低有效围压下,土体容易发生较大的塑性变形,滞回曲线面积较大,滞回曲线呈现“长梭状”特征;当有效围压增大时,滞回曲线面积减小。随着有效围压的增大,滞回曲线的倾斜程度逐渐增大。循环加载的幅值越大,滞回环的形状越细长;加载幅值较小时不同循环次数下的应力-应变滞回曲线面积变化不大。增大循环荷载加载频率会导致应力-应变滞回曲线之间的间距减小。

本文通过系统的动三轴试验,揭示了有效围压、动应力幅值和加载频率对淤泥质黏土动力特性的耦合影响机制,弥补了当前研究中对多因素交互作用分析的不足。研究结果不仅为交通基础设施及海洋工程在循环荷载作用下的长期稳定性评估提供了可靠的理论支撑和科学依据,而且对保障工程安全具有重要的实践指导意义。

参考文献:

[1] 吕玺琳，方航，张甲峰. 循环交通荷载下软土路基长期沉降理论解[J]. 岩土力学，2016，37(S1)：435-440.

[2] Nie Z B，Chi S C，Gong S. Numerical modeling of cyclic triaxial experiments for granular soil [J]. International Journal of Geomechanics，2017，17(6)：04016147.

[3] 畅振超，王家全，周圆兀，等. 交通动载下砾性土动三轴试验分析[J]. 广西科技大学学报，2019，30(2)：13-19.

[4] 祝梦柯，王家全，张文海，等. 多级循环荷载下饱和砾性土动三轴试验研究[J]. 广西科技大学学报，2020，31(4)：11-18.

[5] 代倩，廖红建，康孝森，等. 动荷载下填方体压实黄土动应变与动孔压变化规律研究[J]. 岩土工程学报，2021，43(S1)：235-240.

[6] 郭舒洋，崔杰，吴杨，等. 饱和珊瑚砂液化特性动三轴试验研究[J]. 地震工程学报，2024，46(1)：84-94.

[7] Zhang H M，Lei J J，Wu Q S，et al. Study on the permanent deformation and dynamic stress-strain of coarse-grained subgrade filler under cyclic loading[J]. Buildings，2024，14(7)：2092.

[8] 王家全，陈家明，唐滢，等. 单幅值动载下加筋红黏土路基动三轴试验分析[J]. 科学技术与工程，2021，21(30)：13032-13038.

[9] 章凯，徐慧，徐玉亭. 二干河道堤防粉质黏土动三轴加载试验研究[J]. 水利科技与经济，2024，30(7)：8-13.

[10] Lin P，Jiao S B，Garg A，et al. Local softening characteristic of soft clay subjected to dynamic loading under low confining pressure[J]. Geotechnical and Geological Engineering，2020，38(5)：5613-5622.

[11] Pandya S，Sachan A. Effect of frequency and amplitude on dynamic behaviour，stiffness degradation and energy dissipation of saturated cohesive soil [J]. Geomechanics and Geoengineering，2022，17(1)：30-44.

[12] Xu A H，Wang P C，Fang J H. Study on the mechanical properties of chlorine saline soil under the interaction of multiple factors[J]. Mathematical Problems in Engineering，2021，2021(1)：6669697.

[13] Huang X，Cai X G，Yang P，et al. Study on the dynamic pore water pressure model of centerline tailings sand based on dynamic triaxial tests[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources，2023，9(1)：79.

[14] Liu Y J，Luo Q Y，Yang X，et al. Experimental study on dynamic deformation properties of muck soil under low frequency cyclic loading [J]. Journal of Vibroengineering，2019，21(4)：1215-1226.

[15] 刘侠，刘依依，鞠建，等. 不同加载频率和应力状态下细粒土路基动力特性研究[J]. 山东交通科技，2023(5)：1-5.

[16] 李治朋，陈雷，马希磊，等. 荷载频率对土体动强度影响分析[J]. 水道港口，2015，36(5)：432-435.

[17] 孙森军，闻怡玲，单治钢，等. 多频段循环荷载下海洋黏土动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报，2024，46(S1)：86-91.

[18] 何忠明，王盘盘，张文周，等. 考虑不同单次加载时长影响的循环荷载作用下软土动力特性[J]. 长安大学学报(自然科学版)，2023，43(5)：30-39.

[19] 刘帅，高志华，胡波，等. 变围压循环荷载作用下珠江三角洲软土动力特性试验研究[J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文)，2023，62(4)：131-138.

[20] 穆锐，黄质宏，姚未来，等. 分级循环荷载下原状红黏土动力特性试验研究[J]. 水文地质工程地质，2022，49(3)：94-102.

[21] Wang P S，Hu W J，Liu P Y，et al. An experimental study on dynamic characteristics of coarse-grained soil under step cyclic loading[J]. Coatings，2022，12(5)：640.

[22] 吴遥杰，周浩东，宫全美. 间歇循环荷载下粉土路基动力特性及累积变形研究[J]. 华东交通大学学报，2022，39(4)：1-9.

[23] 刘建民，付海清，郭婷婷，等. 不同循环荷载作用下软黏土动力特性对比试验研究[J]. 地震工程学报，2020，42(4)：973-981.

[24] 丁智，庄家煌，魏新江，等. 越江地铁荷载作用下软黏土孔压试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2020，39(S1)：3178-3187.

[25] 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.

[26] Zhuang Y，Wang K Y. Finite element analysis on the dynamic behavior of soil arching effect in piled embankment [J]. Transportation Geotechnics，2018，14：8-21.

[27] Liu K F，Xue K R，Wen M J，et al. Investigation on the long-term strain of geogrid in GRPS embankment under cyclic loading[J]. Geosynthetics International，2024，31(4)：440-454.

[28] 陈开南，宋玉鹏，宋丙辉，等. 基于累积耗损能量的黄河口海底粉土液化特性试验研究[J/OL]. 海洋科学进展，2024：1-10. (2024-06-21). https://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1387.p.20240619.1338.002.html.

[29] 杨安晴，温森，孔庆梅，等. 列车荷载作用下复合土样动力特性研究[J/OL]. 华北水利水电大学学报(自然科学版)，2024：1-10. (2024-08-22)[2025-02-17]. https://link.cnki.net/urlid/41.1432.TV.20240821.1623.002.

[30] 丁智，郑勇，魏新江，等. 不同加载频率及循环应力水平对人工冻融软土动力特性影响试验研究[J]. 铁道学报，2020，42(3)：122-128.

[31] 庄心善，杨端，张博文，等. 间歇荷载下黄土路基累积塑性变形及刚度软化[J/OL]. 铁道科学与工程学报，1-13. (2024-08-07)[2025-02-17]. https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20240930.

[32] 马少坤，田发派，黄海均，等. 地铁循环荷载下黏土污染圆砾的大型动三轴试验及动力特性研究[J]. 振动与冲击，2024，43(7)：245-254.

[33] 王梦洁，张莎莎，杨晓华，等. 循环荷载作用下漫灌区粉质黏土的动力特性研究[J/OL]. 岩土力学，1-13. (2025-01-20)[2025-02-17]. https://doi.org/10.16285/j.rsm.2024.0865.

[34] 湛川，李刚，刘莹莹. 南水北调中线工程段弱膨胀土的动力学性质研究[J]. 华北水利水电学院学报，2013，34(3)：70-73.

[35] 赵强，陈勇. 长期循环荷载作用下粉质黏土动力特性及相关模型修正[J]. 长江科学院院报，2018，35(12)：123-128.

[36] 孙建宇，吕颖慧，张贵秀，等. 黄河冲积粉土动三轴试验与动

力特性研究[J/OL]. 济南大学学报(自然科学版), 1-7. (2024-12-25)[2025-02-17]. https://doi.org/10.13349/j.cnki.jdxbn.20241225.003.

[37] 魏子航, 朱义欢, 王涛, 等. 循环荷载下软黏土阻尼比特性及其简化计算方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(5): 204-210.

[38] 黄小晴,张庭风,王小平,等. 循环荷载下岩-砼复合试件疲劳破坏与能量演化研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2022, 44(6): 58-65.

[39] 肖思奇, 黄科锋, 周红波. 基于动三轴试验的软黏土软化系数的分析与预测[J]. 岩土力学, 2024, 45(S1): 133-146.

[40] 戴世安, 崔振东, 廖红建. 间歇固结排水条件下上海原状饱和软黏土的动力特性试验[J]. 世界地震工程, 2024, 40(1): 175-184.

团队介绍

刘开富教授团队专注于软黏土力学、桩网复合地基和桩基工程等领域的研究,致力于解决软土地区交通基础设施沉降控制、海洋桩基工程安全等关键难题。团队在国家自然科学基金面上项目、教育部科技重点项目及浙江省自然科学基金项目等项目的资助下,经过 10 余年的科技攻关,提出了交通荷载下桩网复合地基长期沉降计算方法,揭示了循环荷载下软土地区桩网复合地基的长期沉降机理;提出了循环荷载下海上风电大直径单桩累积变形预测公式,为复杂海洋环境下大直径单桩设计及运营提供依据。团队获省部级科技进步奖 3 项,已授权及申请发明专利 10 余项,出版学术专著 1 部,主编教材 1 部,并在国内外发表学术论文 100 余篇。

(责任编辑:康 锋)