

不同循环荷载频率下软黏土 动力特性试验研究

周盈¹, 孙苗苗², 夏凡^{1*}, 夏唐代¹, 何绍衡³, 李雨杰⁴

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙大城市学院 土木工程系, 浙江 杭州 310015;
3. 香港理工大学 土木与环境工程系, 香港 999077; 4. 浙江大学海南研究院, 海南 三亚 572025)

摘要: 通过开展饱和重塑软黏土 GDS 动三轴试验, 研究了不同频率、循环荷载动应力比和初始有效应力作用下土体不排水累积轴向应变、累积孔压及回弹模量演化规律, 并探明相关作用机理。研究表明: 循环荷载动应力比、初始有效围压和频率对土体累积轴向应变、累积孔压及回弹模量影响较大。土体累积轴向应变、累积孔压与动应力比、初始有效应力呈正相关, 与回弹模量则呈负相关。低循环应力比下, 频率越高, 软黏土产生的轴向累积应变与孔压越大, 试样回弹模量越小; 当动应力比过大时, 软黏土试样则呈现相反的规律。根据上述规律, 提出在不排水循环条件下, 土颗粒吸收振动所产生的能量导致吸附于表面的强弱结合水发生转化, 且在不同频率交通循环荷载下, 软黏土变形受到了频率产生能量与黏土滞后效应的共同影响。研究结论可为交通工程中软土地基的变形计算提供重要参考。

关键词: 循环交通荷载; 软黏土; 振动频率; 回弹模量; 结合水; 滞后效应

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)04-0337-10

Experimental study on dynamic properties of soft clay under different cyclic loading frequencies

ZHOU Ying¹, SUN Miaomiao², XIA Fan^{1*}, XIA Tangdai¹, HE Shaoheng³, LI Yujie⁴

(1. Department of Architecture and Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

2. Department of Civil Engineering, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, Zhejiang, China;

3. Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China;

4. Hainan Institute of Zhejiang University, Sanya 572025, Hainan, China)

Abstract: The GDS dynamic triaxial test was carried out on saturated remolded soft clay to study the evolution of undrained accumulated axial strain, accumulated pore water pressure and resilience modulus of soil under different frequencies, cyclic dynamic stress ratios and initial effective stresses, aiming to explore the relevant mechanisms. Results show that the accumulated axial strain, accumulated pore water pressure and resilience modulus of soil are significantly affected by the cyclic dynamic stress ratio, initial effective confining pressure, and frequency. The accumulated axial strain and accumulated pore water pressure of soil are positively correlated with the cyclic dynamic stress ratio and initial effective stress, while the resilience modulus is negatively correlated. Under low cyclic stress ratio, the higher the frequency, the greater the accumulated axial strain and pore water pressure of the soft clay, and the smaller the resilience modulus. When the dynamic stress ratio is too high, the soft clay sample exhibits the opposite pattern. Based on these observations, it is suggested that in undrained cyclic conditions, soil particles absorb energy generated by vibration, leading to the transformation of strongly and weakly bound water absorbed on the surface. Furthermore, the soft clay deformation is influenced by frequency-induced energy and clay hysteresis effect during cyclic traffic load of varying frequencies. These findings offer valuable insights for predicting deformation in soft soil foundations in traffic engineering applications.

Key words: cyclic traffic load; soft clay; vibration frequency; resilience modulus; bound water; hysteresis effect

收稿日期: 2023-02-16

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (LTGG23E080002)。

作者简介: 周盈 (1998—), 女, 浙江宁波人, 硕士研究生, 主要从事土动力学的工作。E-mail: 22012264@zju.edu.cn。

*通信作者: 夏凡 (1993—), 男, 浙江杭州人, 博士研究生, 主要从事土在动荷载影响下的固结研究工作。E-mail: 2460643719@qq.com。

0 引言

软黏土在我国沿海、内陆湖盆、河流两岸等区域分布广泛，在高速公路、铁路、地铁等各类交通工程路线规划过程中，难以避免会遭遇软土地基^[1]。在此类地基下由车辆等交通设施运行引起的沉降问题和不均匀变形问题尤为显著。而多数交通工程往往对路基变形有着严格规定，这对路基设计、修建与安全运营提出了更高的要求。交通荷载长期循环往复导致的软黏土地基变形累积、强度弱化，为道路运维带来安全隐患，且后期维护成本高昂，甚至导致地基沉降过大、地下结构损害等灾害频发的情况，造成巨大经济损失。因此，系统研究循环荷载作用下软黏土的变形、孔压发展及回弹模量变化规律，可为软基处理设计、管理养护等提供理论依据，具备研究价值。

与地震荷载不同，交通荷载是一种特殊的周期性循环荷载^[2-3]。交通荷载的变化范围较大，不同的交通工具与运行速度使循环荷载的大小、频率存在一定差异。目前，国内外学者对不同循环荷载作用下软土动力特性的相关问题进行了广泛的研究。ZHOU等^[4]用杭州正常固结黏土开展了三轴试验，确定了影响黏土应变的不同因素，如循环应力比、有效围压和频率等。王军等^[5]通过循环三轴试验，探究了循环荷载动应力比、1 Hz 内的频率等因素对土体应变的影响。张茹等^[6]在振动频率为 0.1~6 Hz 的低振次循环荷载下，探究了饱和黏土的动力性能，发现不同频率区间内，频率对于黏土强度的影响不同。王鑫等^[7]通过空心圆柱扭剪仪试验，发现不同动应力比下土体变形随振动频率的变化趋势存在两种情况。而 YASUHARA 等^[8]认为循环荷载频率对土体变形几乎没有影响。

虽然已有较多学者探究了循环荷载应力比、有效围压和频率对于软土动力特性的影响，但仍存在以下问题：目前针对软黏土长期动力特性的研究，试验现象多以宏观力学分析为主，缺乏针对土体微观孔结构演变规律的研究。由于软黏土的特殊结构性，交通循环荷载对于软黏土长期累积变形和累积孔压、回弹模量等动力响应作用机制尚未被揭示。实际交通荷载范围主要为 0~5 Hz，而以往软黏土长期动力特性相关研究的动荷载频率主要集中在 0~1 Hz 的低频率，对于振次较大的 1 Hz 以上动荷载的相关研究仍较少。同时，频率对于软黏土

长期动力响应影响的研究结论并不一致，循环荷载的影响仍不明确，且循环荷载频率对土样变形机理未厘清。因此，本文基于 GDS 动三轴试验，着重探究了循环动应力比和频率对于软黏土在长期循环荷载作用下轴向变形、累积孔压以及回弹模量的影响，并提出了循环荷载作用下土颗粒结构变化和动荷载频率对土样变形的作用机理，对实际工程具有重要参考价值。

1 试验概述

1.1 试样制备及其物理性质

试验土样为重塑软黏土，原状黏土取自台州临海地区，呈灰色。软黏土基本物理指标见表 1。参考相关文献^[9-10]，本研究中重塑软黏土采用分层击实法，通过烘干、碾散、过筛、洒水调整至合适含水率，分 5 层在饱和器内击实后，经过真空饱和获得重塑软黏土土样，所制圆柱体土样尺寸为 50 mm（直径）×100 mm（高）。

表 1 软黏土基本物理指标
Table 1 Basic physical indexes of soft clay

土样类型	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$w/\%$	G_s	$\omega_p/\%$	$\omega_L/\%$	I_p	I_L
软黏土	1.750	51.82	2.769	25.43	45.71	20.28	1.30

1.2 试验仪器和方案

试验采用室内 GDS 动三轴系统，由压力室、轴向激振系统、围压激振系统、数据采集系统、体积控制器组成。GDS 动三轴试验系统控制下的高级加载模块可实现复杂应力路径试验及静力剪切试验等，动态加载模块可实现竖向与水平荷载循环试验，具有高精度、加载稳定的优点，满足本试验要求。

为探究交通循环荷载下软黏土长期动力特性的影响因素，本文主要围绕交通循环荷载动应力比、频率及有效应力开展单向循环不排水试验。在实际交通循环荷载作用下，土体间不存在拉力，采用半正弦波更贴近实际工程^[11]，因此本试验采用半正弦波形，循环偏应力示意图如图 1 所示。用 p 表示土体的平均有效应力； p_0 为固结完成后土体受到的平均有效应力； q 表示偏应力。采用偏压固结模拟实际工程中的 K_0 固结， p_0 取值分别为 50、100、200 kPa，试验施加的动应力比 $\zeta = q_{\text{ampl}}/p'_0$ ， q_{ampl} 为半正弦波的幅值。振动频率 f 分别采用 1、2、3、5 Hz。软黏土单向循环动三轴试验方案见表 2。

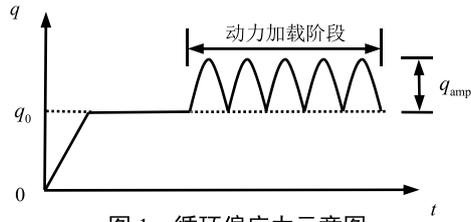


图 1 循环偏应力示意图

Fig. 1 Diagram of cyclic deviatoric stress

表 2 软黏土单向循环动三轴试验方案

Table 2 Unidirectional cyclic dynamic triaxial test schemes on soft clay

试验编号	动应力比	频率 f/Hz	有效应力 p'_0/kPa	试验编号	动应力比	频率 f/Hz	有效应力 p'_0/kPa
A-1	0.20	1.0	100	D-1	0.400	1.0	100
A-2	0.20	3.0	100	D-2	0.400	2.0	100
A-3	0.20	5.0	100	D-3	0.400	3.0	100
B-1	0.30	1.0	100	B-5	0.300	1.0	50
B-2	0.30	2.0	100	B-6	0.300	1.0	200
B-3	0.30	3.0	100	E-1	0.150	1.0	100
B-4	0.30	5.0	100	E-2	0.250	1.0	100
C-1	0.35	1.0	100	E-3	0.375	1.0	100
C-2	0.35	2.0	100	F-1	0.450	1.0	100
C-3	0.35	3.0	100	—	—	—	—

2 试验结果与分析

2.1 循环荷载动应力比、初始有效应力对软黏土长期动力特性的影响

(1) 软黏土轴向累积应变分析

为研究不同循环荷载动应力比的影响规律, 在 100 kPa 有效应力下, 控制振动频率分别为 1、2、3、5 Hz, 开展了多种动应力比下的不排水单向循环三轴加载试验。

图 2 给出了不同循环应力比下软黏土轴向累积应变随循环加载次数的变化, 图 2 中所有曲线规律相似。循环加载初期, 土样的轴向累积应变迅速增加, 随着振动次数逐渐增加, 应变增量逐渐减小, 接近 10 000 振次时, 曲线逐渐趋于稳定。且在不排

水条件下, 相同振次时, 循环动应力越大, 土样轴向累积应变越大, 即荷载的大小将决定循环荷载下地基沉降的快慢。当 $f = 2 \text{ Hz}$ 时, 两组循环动应力比在 $\zeta = 0.35$ 下的试验结果吻合良好, 说明本试验操作标准, 试验结果具有较高可重复性。

工程中土样所处位置越深, 其初始有效应力越大。实际工程中, 交通循环荷载作用下土体的有效应力取值范围约为 50~200 kPa^[12-13]。图 3 给出了不同初始有效应力下软黏土轴向累积应变随循环加载次数的变化。可以发现相同循环振次下, 初始有效应力越大, 试样轴向累积应变越大, 且应变曲线拐点越滞后。这主要是由于相同动应力比下, 围压越大, 振动循环荷载就越大, 相同密度的土样将产生更大的塑性变形。

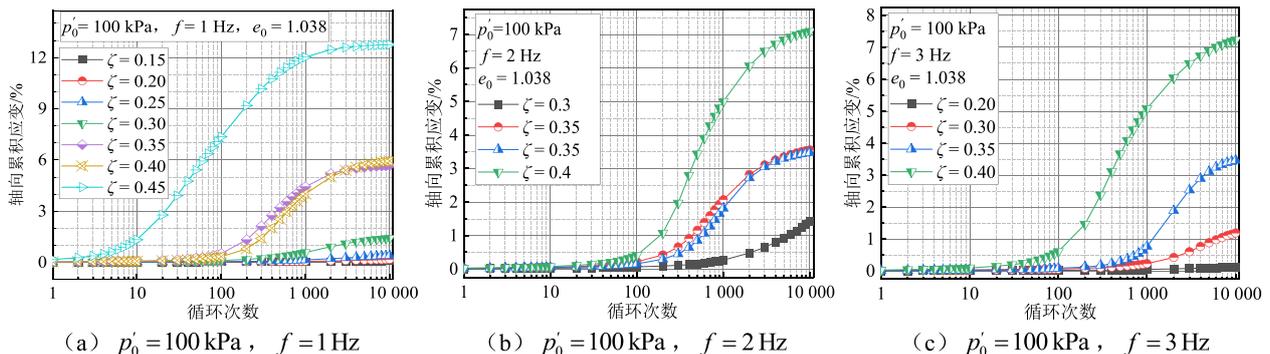


图 2 不同循环应力比下软黏土轴向累积应变随循环加载次数的变化

Fig. 2 Accumulated axial strain of soft clay with cyclic loading times under different cyclic stress ratios

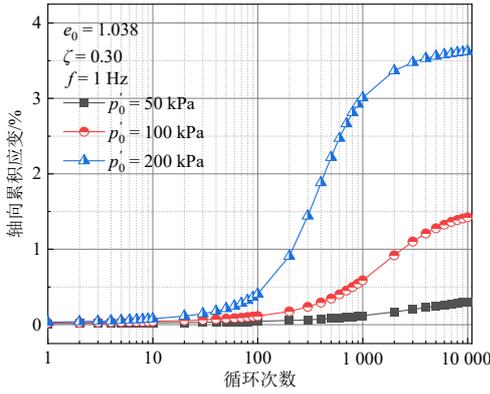
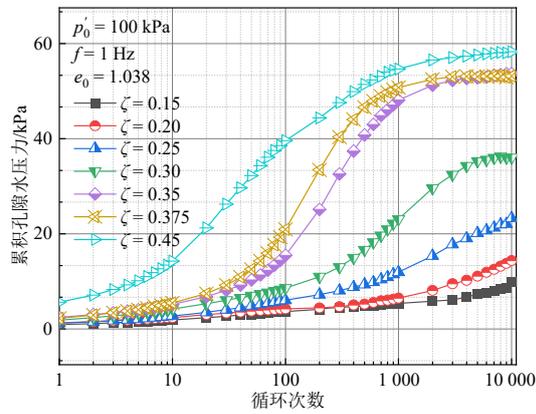


图3 不同初始有效应力下软黏土轴向累积应变随循环加载次数的变化

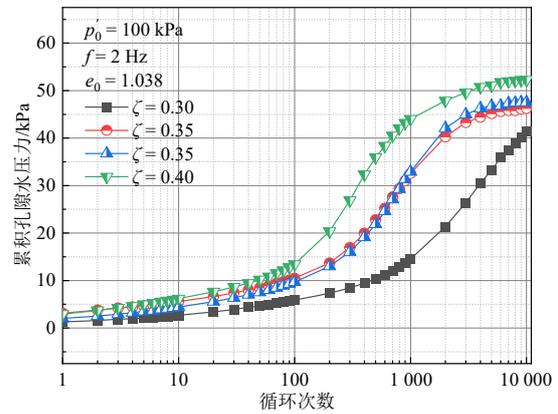
Fig. 3 Accumulated axial strain of soft clay with cyclic loading times under different initial effective stresses

(2) 软黏土累积孔隙水压力分析

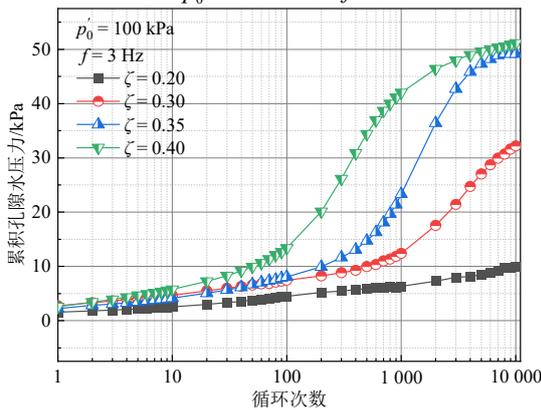
图4为不同平均有效应力和循环应力比下软黏



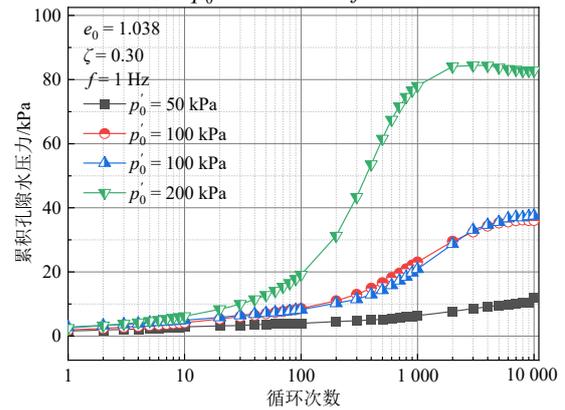
(a) $p'_0 = 100 \text{ kPa}$, $f = 1 \text{ Hz}$



(b) $p'_0 = 100 \text{ kPa}$, $f = 2 \text{ Hz}$



(c) $p'_0 = 100 \text{ kPa}$, $f = 3 \text{ Hz}$



(d) $\zeta = 0.3$, $f = 1 \text{ Hz}$

图4 不同平均有效应力和循环应力比下软黏土累积孔隙水压力随循环加载次数的变化

Fig. 4 Accumulated pore water pressure of soft clay with cyclic loading times under different mean effective stresses and cyclic stress ratios

(3) 软黏土回弹模量分析

回弹模量是实际工程中评估软黏土刚度和循环性能的重要参数。图5展示了不同平均有效应力和循环应力比下软黏土回弹模量随循环加载次数的变化。可以看出，回弹模量随循环加载次数的增

加迅速下降，在不排水循环加载的初始阶段，软黏土的回弹应变迅速增加，当循环加载次数较大时，软黏土的回弹模量降低速度减缓并逐渐趋于稳定。土颗粒随循环加载次数增加不断调整，土体回弹模量在不断降低后，最终具有了稳定性。

土累积孔隙水压力随循环加载次数的变化。可以发现，累积孔隙水压力变化规律与轴向累积应变类似。孔压的发展与循环动应力比呈正相关。随着振动次数增加，土颗粒间孔隙减小，累积孔隙水压力不断上升，最后趋于稳定。以 $N = 10\,000$, $f = 1 \text{ Hz}$ 为例，循环动应力比 $\zeta = 0.15$ 、 0.20 、 0.25 、 0.30 、 0.35 、 0.375 、 0.45 时，累积孔隙水压力分别为 10、14、23、36、53、53、58 kPa。不排水循环荷载试验下，累积孔隙水压力随着循环荷载动应力比和初始有效应力的增加而增长。随着振次的增加，土粒内部结构变化，初期土体变形和孔压大幅增加，当接近结构二次平衡点时，累积孔隙水压力趋于稳定值。动应力比愈大，产生的能量使土体内部损伤愈严重，土颗粒重分布愈彻底，导致不同的累积孔压最终值。

图 5 还表明, 循环应力比越大, 软黏土在循环荷载下的最终回弹模量越小; 而初始有效应力越大, 软黏土在循环荷载下的最终回弹模量越大。在其他条件相同的情况下, 应力比的大小代表了循环荷载的大小, 循环荷载愈大, 土体软化愈明显。较大的初始有效应力使土体更密实, 因此初始振动时的回弹模量大于低有效应力时的试样, 而在振动过

程中, 相同动应力比下, 较大有效应力状态下将产生更大的土体变形与累积孔压, 土体软化严重, 回弹模量下降程度也大于其他试验组。

图 6 中给出了循环加载试验中不同循环应力比条件下软黏土的滞回圈对比, 随着动应力比的增加, 软黏土滞回圈顺时针旋转, 表明软黏土存在循环弱化现象。

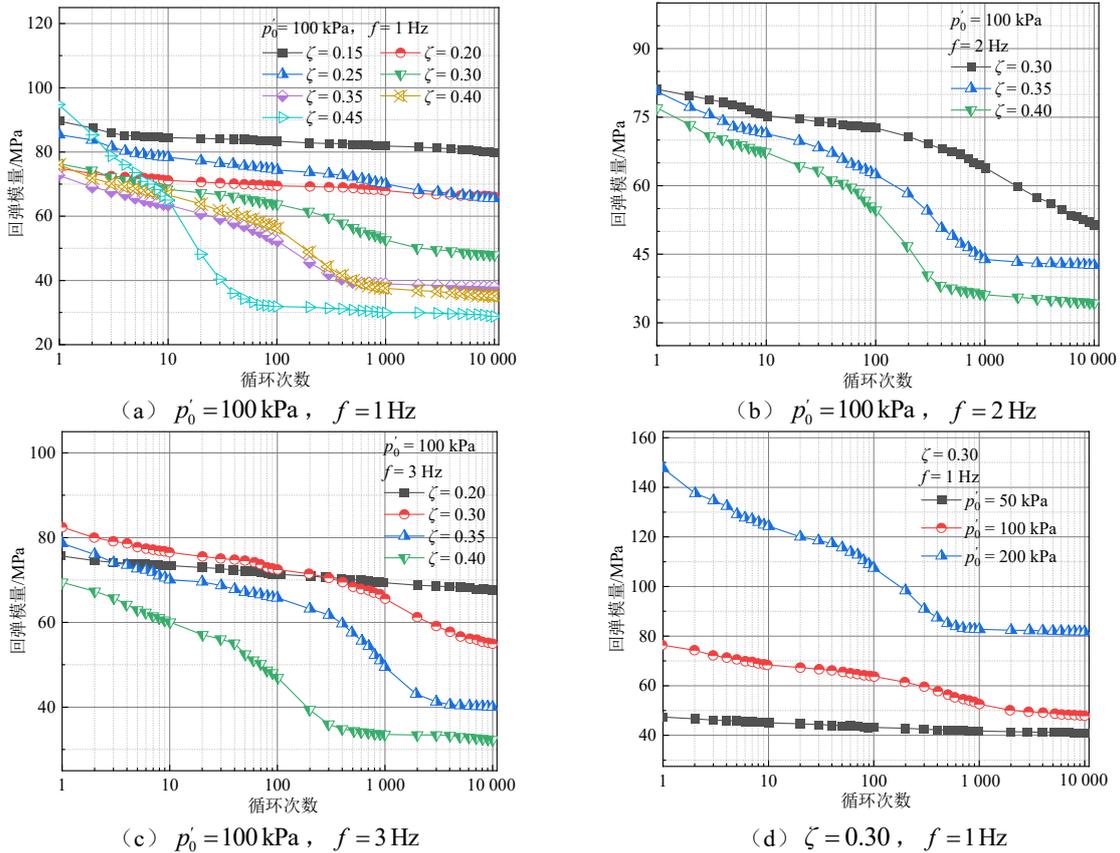


图 5 不同平均有效应力和循环应力比下软黏土回弹模量随循环加载次数的变化

Fig. 5 Variation of resilience modulus of soft clay with cyclic loading times under different mean effective stresses and cyclic stress ratios

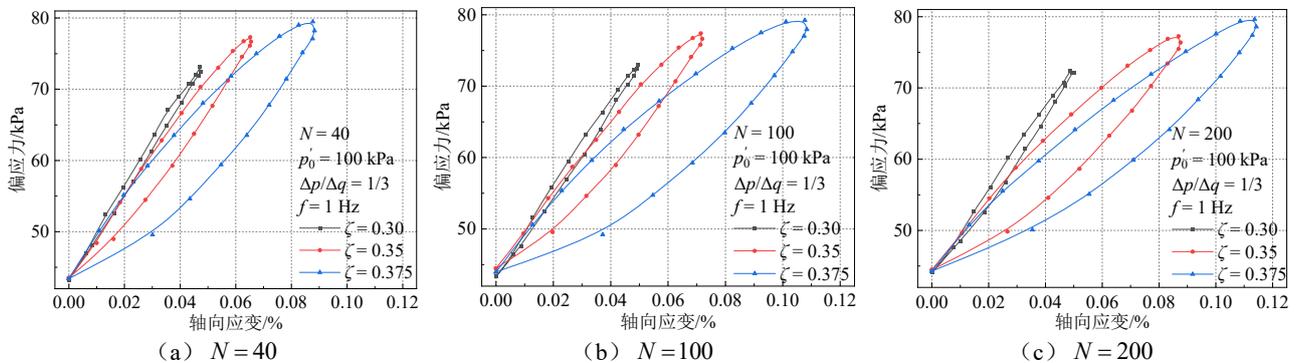


图 6 循环加载试验中不同循环应力比条件下软黏土的滞回圈对比

Fig. 6 Comparison of hysteretic loops of soft clay under different cyclic stress ratios in cyclic loading tests

2.2 循环荷载频率对软黏土长期动力特性的影响分析

在实际交通工程中, 交通荷载对地基产生的振

动频率范围较大, 在 0~5 Hz 较多^[14], 故本文选取循环荷载频率 f 为 1~5 Hz 对软黏土开展动三轴试验。初始有效应力为 100 kPa, 循环应力比 $\zeta = 0.20$ 、

0.30、0.35、0.40。

(1) 变形特性分析

图7给出了不同循环荷载频率下软黏土轴向累积应变与循环加载次数的关系。不排水循环条件下，频率对软黏土形变的影响可能与单次循环的时长、黏土结构、粘滞性等因素有关。由图7可以看出，当循环动应力比较低时，相同振次下，循环荷载频率的增加会导致软黏土的轴向累积应变降低，这与前人的研究一致^[15-16]；当循环应力比 $\zeta = 0.40$ 时，则出现了相反结论。这说明频率对于土体变形的影响可能存在某个临界动应力比 ζ_c 。当动应力比小于 ζ_c 时，相同条件下，频率越高产生的轴向累积

变形越小；而当动应力比大于 ζ_c 时，轴向累积应变随着频率增大而增大。本试验中的临界动应力比 ζ_c 介于0.30~0.40。

这可以解释为循环应力比较低时，其幅值小于土体临界动应力幅值，软土变形和循环周次内动应力对土样的作用与时间有关，加载过程中，土样结构产生响应需要一定时间，因而频率越高，作用过程越短，产生应变量越小；而循环应力比较大时，土样达到破坏标准，轴向应变在前半部分急速累积，变形发展较快，频率较小时，作用于土体的能量较小，变形较小，增加频率会加剧变形，此时振动产生的能量较大，加速试样破坏过程。

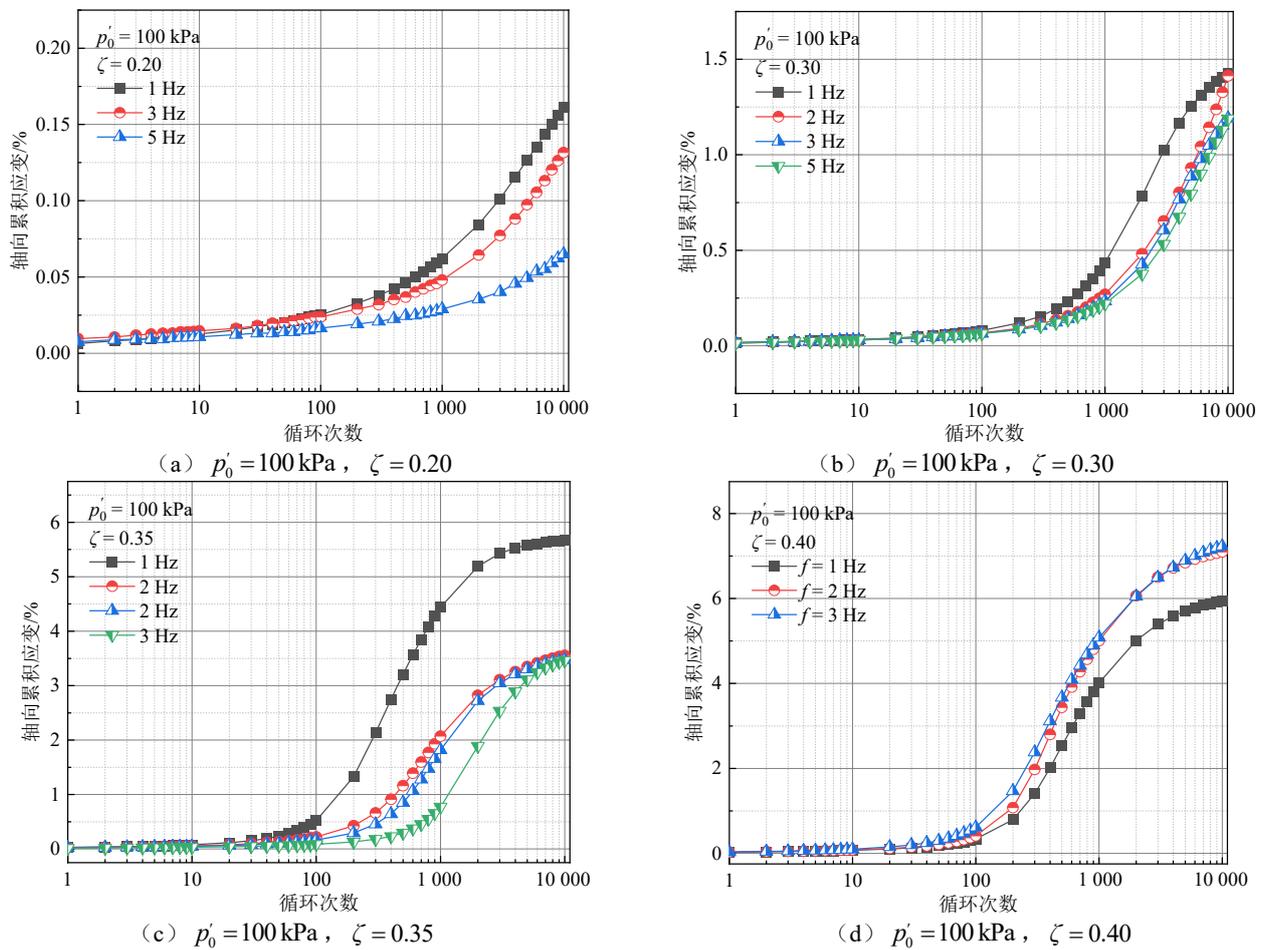


图7 不同循环荷载频率下软黏土轴向累积应变与循环加载次数的关系

Fig. 7 Relationship between accumulated axial strain and cyclic loading times of soft clay under different cyclic frequencies

另外，从图7观察到，随着循环应力比的增长，不同荷载频率影响下的土样轴向累积应变产生了不同的发展模式。当循环应力比较低时 ($\zeta = 0.20$ 、0.30)，轴向累积应变随振次的增加而迅速增长，未出现拐点；而当循环应力比较高时 ($\zeta = 0.35$ 、0.40)，轴向累积应变随振次增加迅速增长，后出现拐点，并达到平稳发展。由于本文试验的最高荷载循环次数为10,000次，循环动应力的增大是否能够

让试样的轴向累积变形提前达到拐点，或是不同动应力是否导致不同变形发展模式仍有待于进一步研究，可通过增加循环振次探究其规律。

(2) 孔压响应规律

不同循环荷载频率下软黏土累积孔隙水压力与循环加载次数的关系如图8所示。相同条件下，频率越小，累积孔隙水压力整体越大。当荷载循环应力比较大时，土样接近破坏^[7]，此时土样在不同

频率 (1、2、3 Hz) 下的累积孔隙水压力较为接近。当荷载动应力比和频率较低时, 对土体产生的能量较低, 土体结构破坏少, 内部孔隙连通性好, 孔压能够稳定上升; 当荷载动应力比和频率较高时, 土体内部结构更易破坏, 孔隙连通性变差后导致无法继续上升。

当荷载循环应力比 $\zeta = 0.30$ 时, 加载频率 $f = 5 \text{ Hz}$ 的累积孔隙水压力发展规律与 $f = 3 \text{ Hz}$ 的情况较为相近, 循环次数接近 10 000 次时, 有超越 $f = 3 \text{ Hz}$ 的累积孔隙水压力的趋势。荷载循环应力比 $\zeta = 0.35$ 、加载频率 $f = 3 \text{ Hz}$, 且同样在循环次数接近 10 000 次时, 有超越 $f = 2 \text{ Hz}$ 的累积孔隙水压

力的趋势。其原因可能是当施加高频波时, 单次循环时间过短, 软黏土无法充分变形, 其内部结构仍发生破坏, 导致孔压在一定振次范围内仍继续增长, 甚至小幅度超越频率小的试验组别。

随着动应力比的增大, 频率对试样累积孔隙水压力的影响逐渐减小。从图 8 (d) 中可以看出, 当 $\zeta = 0.40$ 时, 频率对土样累积孔隙水压力几乎无影响。

孔压与轴向累积应变呈现出相似的发展规律。低循环应力比时, 孔压不断增长, 并不会随着循环次数的增加而出现稳定值; 高循环应力比时, 孔压迅速增长后即达到相对稳定值。

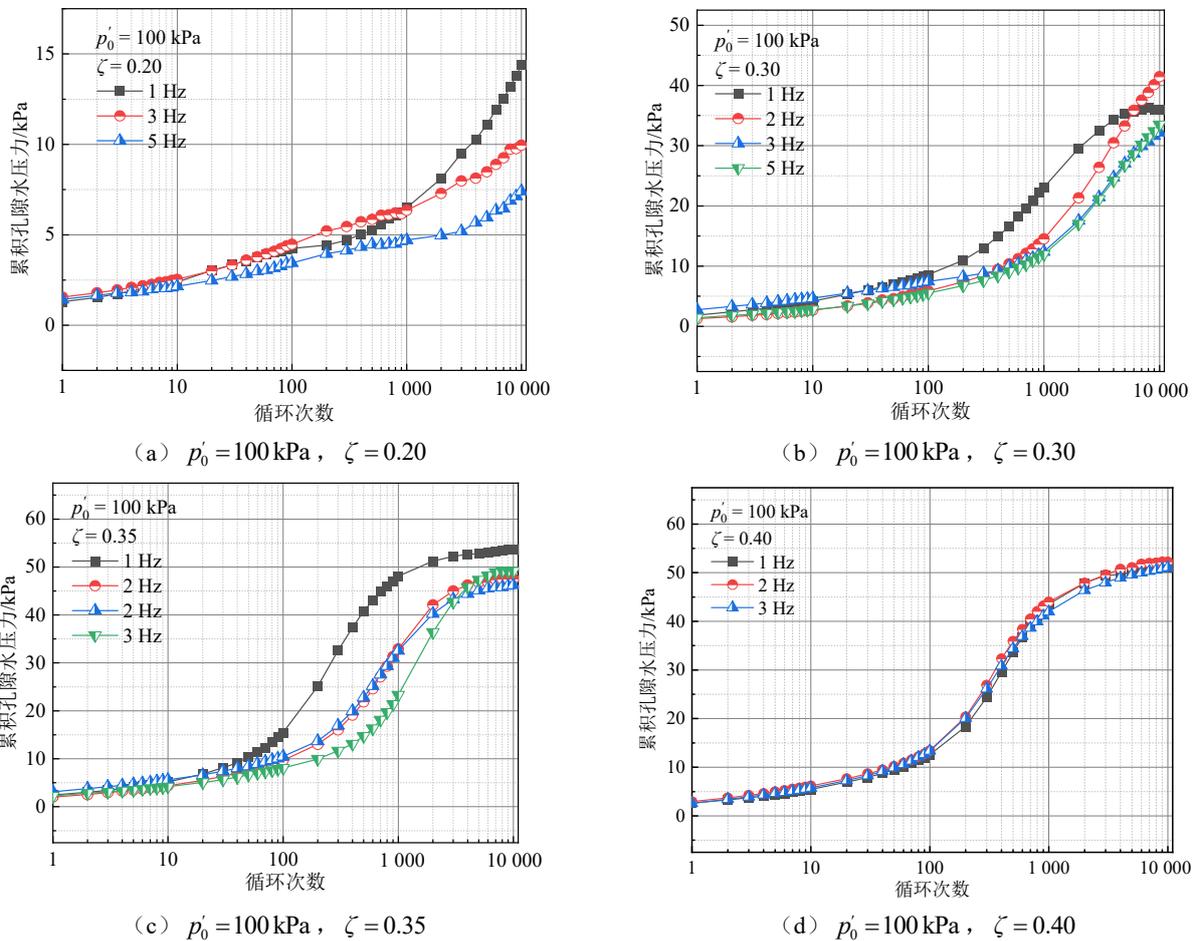


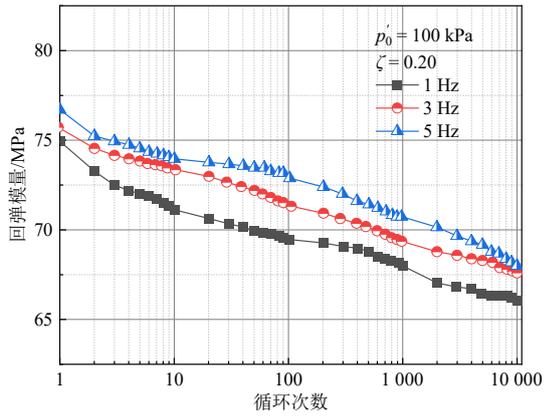
图 8 不同循环荷载频率下软黏土累积孔隙水压力与循环加载次数的关系

Fig. 8 Relationship between accumulated pore water pressure and cyclic loading times of soft clay under different cyclic frequencies

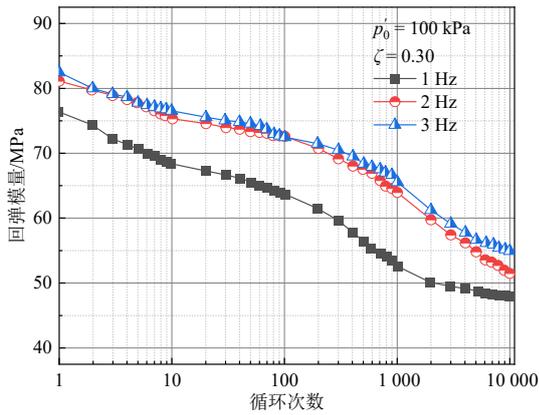
(3) 回弹模量演化

图 9 为不同循环荷载频率下软黏土回弹模量与循环加载次数的关系。初始阶段, 土样回弹模量随循环振次的增加迅速下降。当试样未达到破坏标准时, 循环荷载频率越低, 回弹模量最终值越小。由于动荷载的作用, 土颗粒重排序与重定向, 因而影

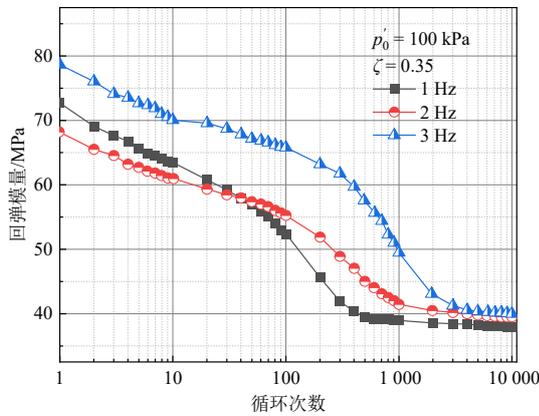
响土体的回弹模量。其宏观性状体现为: 在不排水单向循环荷载作用下, 土体强度下降, 土样发生软化。当施加的循环荷载频率较低时, 由于单振次循环内动荷载对试样作用时间较长, 产生更大应变, 导致黏土颗粒发生剧烈的扰动, 回弹模量下降值更多。



(a) $p'_0 = 100 \text{ kPa}$, $\zeta = 0.20$



(b) $p'_0 = 100 \text{ kPa}$, $\zeta = 0.30$



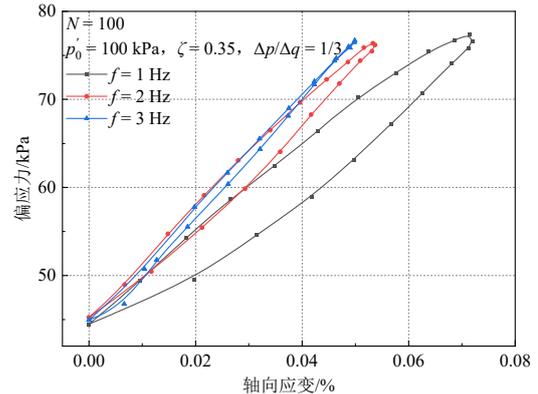
(c) $p'_0 = 100 \text{ kPa}$, $\zeta = 0.35$

图9 不同循环荷载频率下软黏土回弹模量与循环加载次数的关系

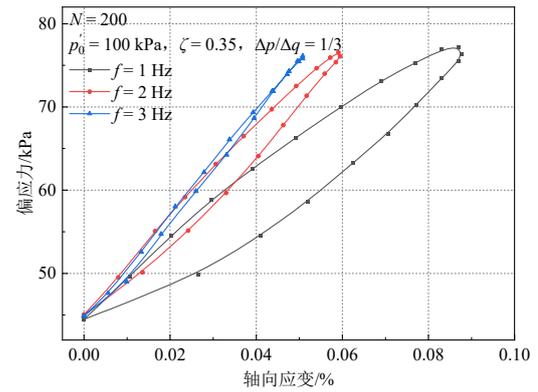
Fig. 9 Relationship between resilience modulus of soft clay and cyclic loading times under different cyclic frequencies

(4) 滞回特性分析

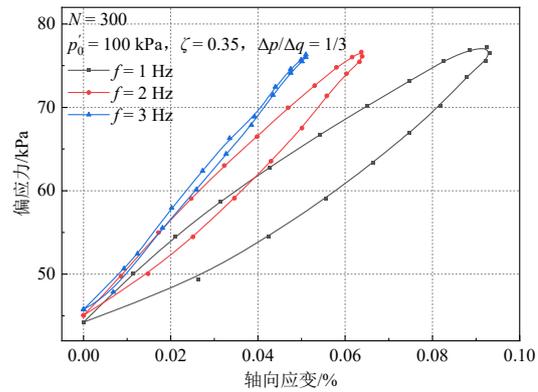
滞回曲线可以较好地反映土体在循环加载过程中的应力-应变关系^[17]。图10给出了循环加载试验中不同频率条件下软黏土的滞回圈对比。通过图10能直观地看出，相同振次下，随着荷载频率的减小，软黏土的滞回圈向顺时针旋转，单个循环周期内滞回圈的面积也更大，表明随着循环荷载频率的降低，软黏土的回弹模量降低，软化程度愈明显。



(a) $N = 100$



(b) $N = 200$



(c) $N = 300$

图10 循环加载试验中不同频率条件下软黏土的滞回圈对比

Fig. 10 Comparison of hysteretic loops of soft clay under different frequencies in cyclic loading tests

3 机理解析

3.1 循环荷载对软黏土的作用机理

在循环不排水试验中，试样的轴向累积变形和累积孔隙水压力普遍呈现出上升趋势，而弹性模量则呈现下降趋势，土体发生软化。本文认为除了循环荷载产生的动应力作用于土体之外，另外可能还有一个重要原因使得土体产生新的轴向变形和超孔隙水压力，即结合水的变化。

从颗粒结构上来看，土颗粒表面通常带负电，

水分子和水化阳离子受到表面电荷电场的作用, 向颗粒周围聚集, 如图 11 所示。紧靠土颗粒表面的为强结合水, 在该层极性水分子和水化阳离子受静电引力最大, 牢牢吸附于土颗粒表面。弱结合水则是紧靠强结合水外围的一层水膜, 受静电引力较小。强弱结合水层与土粒表面负电荷一起构成双电层。

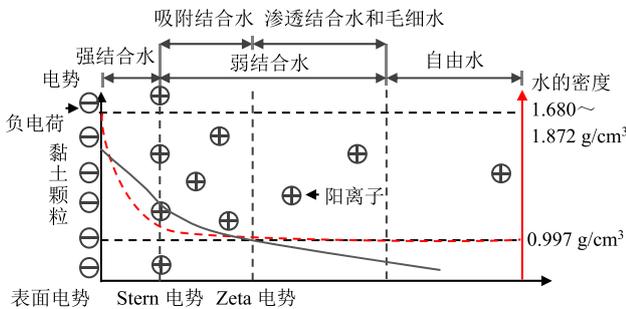


图 11 土颗粒表面水膜示意图

Fig. 11 Schematic diagram of surface water film of soil particles

在循环荷载下, 土颗粒产生了质点振动, 吸收能量, 如下式:

$$E = \frac{1}{2} m \dot{u}^2 \quad (1)$$

$$u = A \sin \omega t \quad (2)$$

式中: m 为质量; u 为位移; A 为振幅; ω 为角频率。吸收能量大小与振幅和周期均有关。因此, 动应力比与频率都会影响土颗粒结构。

土颗粒吸收能量, 电场发生变化, 导致吸附于土颗粒表面的水分子和水化阳离子不断减少, 由强、弱结合水分别向弱结合水和自由水转化。由于 3 种水的密度存在如下关系: $\rho_{\text{强结合水}} > \rho_{\text{弱结合水}} > \rho_{\text{自由水}}$, 所以结合水之间的转换使得孔隙增加, 导致土体体积增加, 自由水的增加导致孔隙水压力增大。在不排水环境下, 随着循环振次的增加, 土体的累积变形、累积孔隙水压力和回弹模量趋于稳定, 此时土体不再吸收能量, 为弹性振动。

3.2 循环荷载频率对软黏土变形的作用机理

本文认为循环荷载动应力比和频率对于软黏土变形的影响, 与单次循环的时长、黏土应变大小、粘滞性导致土体变形滞后有关。土体的应变受到增加的循环偏应力大小、频率带来的能量以及黏土滞后效应影响。用 ε_1 代表由偏应力大小引起的软黏土应变大小; 用 ε_f 代表由频率能量大小引起的软黏土应变大小; 用 $\varepsilon_{\Delta T}$ 代表由黏土滞后效应导致软黏土未能充分发生的应变, 轴向应变可以表示为 $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_f - \varepsilon_{\Delta T}$ 。当处于低循环应力比下, 土体应变较小, 未达到破坏, 此时软黏土的滞后效应明显大

于频率的影响, 产生的应变关系为 $\varepsilon_f \leq \varepsilon_{\Delta T}$, 此时试样土体轴向累积应变和累积孔压发展较缓。高循环应力时, 土体达到破坏, 轴向应变急速累积愈明显, 此时土体滞后效应显得不明显, 高频率给予土体更大的外荷载能量。

4 结 论

本文利用 GDS 动三轴系统, 采用单向循环荷载形式开展交通循环荷载下软黏土长期动力特性的研究, 对软黏土变形、孔压以及回弹模量变化规律进行了系统研究, 并根据试验结果进行了理论分析和机理解释。主要结论如下:

(1) 循环荷载动应力比、初始有效应力是影响软黏土动力特性的重要因素。动应力比和初始有效围压愈大, 循环荷载作用下产生的累积轴向变形和累积孔隙水压力愈大, 回弹模量愈小。

(2) 在频率与动应力比耦合因素下, 存在临界动应力比 ζ_c 。当土体未达到应变破坏标准时, 低循环荷载频率导致土体产生更大的应变量, 单个循环周期内滞回圈斜率减小, 面积增大, 使得回弹模量最终值减小。

(4) 在单向循环不排水试验条件下, 除施加动荷载使得土体产生累积孔压外, 土颗粒在循环振动下吸收能量, 吸附于土颗粒表面的强弱结合水发生转化, 产生超孔隙水压力, 导致土体软化。而随着循环振次的增加, 土体的累积变形、累积孔压和回弹模量趋于稳定, 土体为弹性振动。

(5) 单次循环时长、黏土应变发展和粘滞性都是影响土样变形的重要因素, 试验揭示了单向循环荷载作用下频率对软黏土变形的影响机理, 即低循环应力比下, 软黏土的滞后效应大于频率带来的影响, 高循环应力下则反之。

参考文献

[1] 丁智, 虞健刚, 孙苗苗, 等. 越江地铁循环荷载下软黏土累积应变特性及微观结构特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(3): 948-959.
DING Zhi, YU Jiangan, SUN Miaomiao, et al. Strain accumulation and microstructure characteristics of soft clay under cross-river subway loading[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(3): 948-959.

[2] WANG C J, CHEN Y M, WEN S Y. Train-induced cyclic

- loads in an elastic half-space[C]//Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Shock and Impact Loads on Structures. Singapore: CI-Premier Pte Ltd., 2003: 361-368.
- [3] ISHIHARA K. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics[M]. New York: Oxford University Press, 1996.
- [4] ZHOU J, GONG X N. Strain degradation of saturated clay under cyclic loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(1): 208-212.
- [5] 王军, 蔡袁强. 循环荷载作用下饱和软黏土应变累积模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 331-338.
WANG Jun, CAI Yuanqiang. Study on accumulative plastic strain model of soft clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 331-338.
- [6] 张茹, 涂扬举, 费文平, 等. 振动频率对饱和黏性土动力特性的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 699-704.
ZHANG Ru, TU Yangju, FEI Wenping, et al. Effect of vibration frequency on dynamic properties of saturated cohesive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 699-704.
- [7] 王鑫, 沈扬, 王保光, 等. 列车荷载下考虑频率影响的软黏土破坏标准研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊 1): 32-37.
WANG Xin, SHEN Yang, WANG Baoguang, et al. Failure criteria for soft clay subjected to frequencies under train loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S1): 32-37.
- [8] YASUHARA K, YAMANOUCI T, HIRAO K. Cyclic strength and deformation of normally consolidated clay[J]. Soils and Foundations, 1982, 22(3): 77-91.
- [9] 郑刚, 霍海峰, 雷华阳, 等. 振动频率对饱和黏土动力特性的影响[J]. 天津大学学报, 2013, 46(1): 38-43.
ZHENG Gang, HUO Haifeng, LEI Huayang, et al. Contrastive study on the dynamic characteristics of saturated clay in different vibration frequencies[J]. Journal of Tianjin University, 2013, 46(1): 38-43.
- [10] 霍海峰. 循环荷载作用下饱和黏土的力学性质研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
HUO Haifeng. Research on the mechanical property of saturated silty clay under cyclic loading[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [11] 黄博, 丁浩, 陈云敏. 高速列车荷载作用的动三轴试验模拟[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 195-202.
HUANG Bo, DING Hao, CHEN Yunmin. Simulation of high-speed train load by dynamic triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2): 195-202.
- [12] 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.
DING Zhi, ZHENG Yong, WEI Xinjiang, et al. Experimental study on the effect of different loading frequency and cyclic stress level for dynamic behaviour of artificial frozen-thawed soft soil[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(3): 122-128.
- [13] 张勇, 孔令伟, 李雄威. 循环荷载下饱和软黏土的动骨干曲线模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1699-1704, 1708.
ZHANG Yong, KONG Lingwei, LI Xiongwei. Dynamic backbone curve model of saturated soft clay under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1699-1704, 1708.
- [14] 聂如松, 李亚峰, 冷伍明, 等. 列车间歇荷载作用下路基细粒土填料的塑性变形行为及临界动应力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(4): 828-841.
NIE Rusong, LI Yafeng, LENG Wuming, et al. Plastic deformation and critical dynamic stress of fine-grained soils under intermittent loading of trains[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(4): 828-841.
- [15] 杨爱武, 王亚成. 不同频率影响下结构性软黏土动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊 2): 184-188.
YANG Aiwu, WANG Yacheng. Experimental study on dynamic characteristics of structural soft clay under different vibration frequencies[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S2): 184-188.
- [16] 丁智, 范俊靓, 张孟雅, 等. 地铁列车荷载下原状土孔压及应变模型试验研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(3): 96-103.
DING Zhi, FAN Junliang, ZHANG Mengya, et al. Experimental study on pore pressure and strain model of undisturbed soil under subway dynamic loading[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(3): 96-103.
- [17] 何绍衡. 交通荷载下钙质砂填料的动力特性及其地基长期沉降研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
HE Shaoheng. Dynamic properties of calcareous sand filler and long-term settlement of foundation filled with calcareous sand under traffic loads[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.