

循环荷载作用下重塑饱和粉黏土的刚度弱化特性研究

陈坚, 任青, 喻孟初, 石登登

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 以东海大桥海上风电场项目为课题背景, 通过动三轴系统对重塑饱和粉质黏土开展一系列长期不排水循环加载三轴试验, 分别考虑围压、动应力比和频率3种因素, 特别是对高频($f > 5$ Hz)下土体的动力弱化特性进行了研究。试验结果表明: 累积塑性应变与累积孔压随着循环次数的增加而增大并且趋于稳定, 呈现出应变软化和孔压软化现象。割线动变形刚度模量和割线动弹性刚度模量则随着循环次数的增加, 先急剧降低然后趋于稳定, 从而表现出刚度弱化现象。进一步研究了割线动弹性刚度模量与循环应变幅值的关系, 割线动弹性刚度模量的衰减趋势受动应力比和频率的影响不大, 与围压有关, 围压越大, 割线动弹性刚度模量衰减趋势越慢, 衰减稳定幅值越低。

关键词: 循环荷载; 重塑饱和粉黏土; 动三轴试验; 高频; 刚度弱化特性

中图分类号: TU411.8

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)04-0223-06

The stiffness weakening characteristics of remolded saturated powder clay under cyclic loading

CHEN Jian, REN Qing, YU Mengchu, SHI Dengdeng

(School of Environment & Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on the background of the Donghai Bridge offshore wind farm project, a series of long-term undrained cyclic loading triaxial tests were carried out on the reconstructed saturated silty clay through the dynamic triaxial system. Considering the confining pressure, dynamic stress ratio and frequency, the dynamic weakening characteristics of powder clay under high frequency ($f > 5$ Hz) were studied. The results show that the cumulative plastic strain and cumulative pore pressure increase with the increase of the cycles and tend to be stable, which shows the strain softening and the pore pressure softening. The secant dynamic deformation modulus and the secant dynamic elastic stiffness modulus first decrease sharply with the increase of the cycles, and then become stabilized, which shows the weakening of stiffness. We further discuss the relationship between the secant dynamic elastic stiffness modulus and cyclic strain amplitude, and the dynamic stress ratio and the frequency has little influence on the attenuation trend of secant dynamic elastic stiffness modulus, but the confining pressure has great influence. The higher the confining pressure is, the more slowly the secant dynamic elastic stiffness modulus decay and the lower attenuation stable amplitude is.

Key words: cyclic loading; remolded saturated powder clay; dynamic triaxial test; high frequency; stiffness weaken characteristics

1 研究背景

海上风电场的桩基础结构长期承受如水动力、空气动力和机械动力等循环荷载作用。以往的研究多集中于砂土在循环荷载作用下动应变、动孔压、动强度等液化特性。目前对海洋饱和粉质黏土循环动

力弱化特性的研究还没有像砂土液化那样广泛和深入。在设计诸如海上风电场、石油平台等近海构筑物时须考虑黏土层在地震、波浪等循环荷载作用下的动力特性^[1-3]。王浩等^[4]对台风作用下的苏通大桥进行风致抖振响应的实测研究, 得到加速度响应的功率谱密度, 表明台风产生影响的振动频率主要

集中于0~8Hz。李益^[5]通过ANSYS建立海上风力发电结构的“基础-塔筒”有限元模型,通过模态分析,得到前十阶自振频率集中于0~15.221 Hz,因此本文试验频率在1~15Hz之间。

国内外许多学者对循环荷载作用下饱和黏土的动力弱化特性做过一些试验研究,王军等^[6-8]通过大量的试验确立了循环荷载作用下饱和软黏土的应变软化和累积模型,并且通过大量试验,得出了孔压率与时间关系表达式,此外又通过积分得出了循环荷载作用下饱和软黏土的动孔压模型。黄博等^[9]对京津地区和杭州地区的饱和软黏土的动、静强度特性进行了对比研究。谷川等^[10]通过试验研究了应力路径对软黏土割线模量的影响,指出应力路径改造了土体各向异性从而影响了割线模量。郭林等^[11]针对长期循环荷载下的饱和软黏土变形特性进行了研究。针对模量弱化问题他们提出了“渐近模量”的概念,用来描述模量弱化的幅度。蒋敏敏等^[12]在大量试验基础上研究了循环荷载对粉质黏土的力学性能的影响,并指出循环加载会导致土体表现出超固结土的性质。黄茂松等^[13]利用带弯曲元的三轴仪对软黏土进行循环加载试验,他引入了动偏应力水平参数对强度和刚度弱化参数进行描述。魏新江等^[14]通过大量试验,在现有研究成果的基础上建立了考虑初始固结度、循环应力比、门槛循环应力比的动刚度变化模型。王军等^[15]在大量的试验基础之上推导了反映土体刚度软化规律的经验公式,从而得到了萧山软黏土的破坏刚度比。但是很少有考虑极端条件下土体存在高频($f > 5$ Hz)振动的情况。此外,对海域内的黏土的试验研究较少,并考虑到不同区域土性差异较大,有必要开展长期循环荷载下以及高频循环振动下饱和粉质黏土的变形与刚度弱化特性的试验研究。本文以东海大桥海上风电场项目为课题背景,通过动三轴试验系统对重塑饱和粉质黏土开展了一系列长期不排水三轴试验,研究并总结了试验的相关结果。

2 土样基本特性与试验方案

试验采用的重塑粉质黏土其质量密度为 $\rho = 1.96 \text{ g/cm}^3$,含水率 $w = 20\%$,相对密度 $G_s = 2.69$,土试样均按国家标准制作,试样直径为39.1 mm,高度为80 mm。制作完成的土试样通过抽真空2 h,再静置24 h。装样以后再以120、220、320 kPa的围压进行反压饱和,使得土体试样达到95%以上的饱和度。然后在给定的围压下进行24 h固结,固

结完成后进行试验,试验加载方式为循环加载,波形为正弦波。试验方案如表1所示,共9组实验,分别从围压、动应力比、和加载频率研究该土的刚度弱化特性。

表1 粉质黏土循环三轴试验方案

方案	固结方式	围压 σ'_{3c}/kPa	动应力比	加载频率/Hz	循环次数
C ₁		120	0.32	1	50,000
C ₂		120	0.40	1	50,000
C ₃	偏	120	0.43	1	50,000
C ₄	压	120	0.50	1	50,000
C ₅	固	80	0.43	1	50,000
C ₆	结	200	0.43	1	50,000
C ₇		120	0.43	5	50,000
C ₈		120	0.43	10	50,000
C ₉		120	0.43	15	50,000

3 土的动力变形和动力刚度

3.1 土的动力变形

土体在等幅循环荷载作用下的动力变形可以划分为动应变 ε_d 、累积塑性应变 ε_{acc} 和循环应变幅值 ε_{amp} 3类。循环荷载作用下,由于土体是松散介质,受力后颗粒间的位置不能恢复,因而形成累积塑性应变,累积塑性应变 ε_{acc} 为一个循环振动下土体的平均应变。

3.2 土的动力刚度

图1为长期等幅循环荷载作用下重塑饱和粉质黏土的动应力(q)-动应变(ε)关系曲线,它表现为一系列近似封闭滞回圈,循环次数不断提高,滞回圈逐渐向右移动,在此过程中累积塑性应变也渐渐增大。采用割线动弹性刚度模量 E_{se} 和割线动变形刚度模量 E_{sd} 描述土体动力变形特性。割线动弹性刚度模量 E_{se} 定义为:

$$E_{se} = \frac{2q_{cyc}}{\varepsilon_{dmax} - \varepsilon_{dmin}} \quad (1)$$

式中: q_{cyc} 为循环偏应力幅值, ε_{dmax} 和 ε_{dmin} 分别为同一次循环荷载中最大动应变和最小动应变。Martin等^[16]定义了割线动变形刚度模量 E_{sd} ,其公式为:

$$E_{sd} = \frac{q_{cyc}}{\varepsilon_{dmax}} \quad (2)$$

式中: q_{cyc} 为循环偏应力幅值, ε_{dmax} 为一个循环振动下土体累积塑性应变 ε_{acc} 和循环应变幅值 ε_{amp} 之

和,即每个循环振次下的最大动应变值。由于土体累积塑性应变 ϵ_{acc} 不断累积以及循环应变幅值 ϵ_{damp} 的发展,土体动应变 ϵ_{dmax} 也随之不断增大,因而土体表现出刚度的弱化。

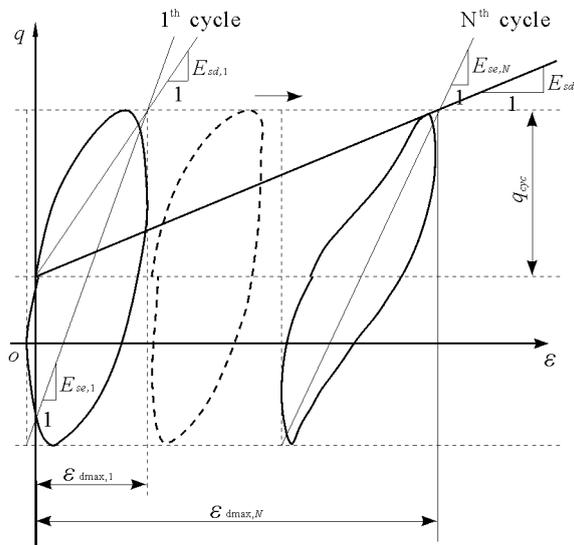


图 1 等幅循环荷载作用下重塑饱和和粉质黏土的动应力—动应变关系曲线

4 试验结果及分析

4.1 重塑饱和和粉质黏土循环三轴试验累积塑性应变

图 2 为重塑饱和和粉质黏土循环三轴试验累积塑性应变图。图 2(a)为不同动应力比下重塑饱和和粉

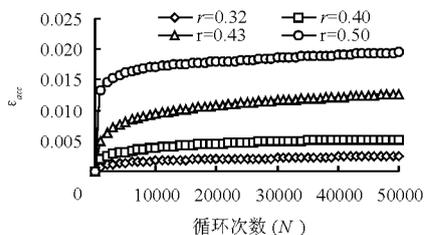
质黏土的累积塑性应变 ϵ_{acc} 与循环次数 N 的关系。随着循环次数的增加,累积塑性应变 ϵ_{acc} 逐渐增加,增长趋势随循环次数的增大而变缓,在循环次数达到 5000 次时,增长趋势逐渐趋于平缓,在经历相同的循环次数时,循环应力比增加,累积塑性应变 ϵ_{acc} 增大,并且增加的速度随之加快。

图 2(b)为不同振动频率下重塑饱和和粉质黏土的累积塑性应变 ϵ_{acc} 与循环次数 N 的关系。随着循环次数的增加,累积塑性应变 ϵ_{acc} 逐渐增加,增长趋势随循环次数的增大而变缓,在循环次数达到 10 000 次时,增长趋势趋于平缓,在经历相同的循环次数时,频率最小的 1 Hz 时的累积塑性应变 ϵ_{acc} 竟然最大,它们随着频率的增加而减小。这与围压和动应力比两种因素的规律是相反的。

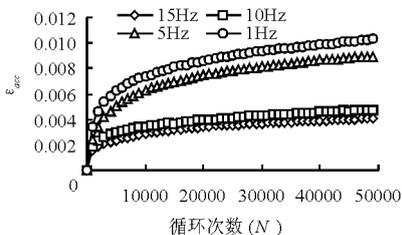
图 2(c)为不同围压下重塑饱和和粉质黏土的累积塑性应变 ϵ_{acc} 与循环次数 N 的关系。可以看出,随着循环次数的增加,累积塑性应变 ϵ_{acc} 逐渐增加,增长趋势随循环次数的增大而变缓,在循环次数达到 5 000 次时,增长趋势趋于平缓,在经历相同的循环次数时,随着围压的增加,累积塑性应变 ϵ_{acc} 增大,增加的速度随之加快,当围压从 120 kPa 增加到 200 kPa 时,累积塑性应变 ϵ_{acc} 大幅度提升,其稳定幅值提高了近 4 倍。

4.2 重塑饱和和粉质黏土循环三轴试验累积孔压

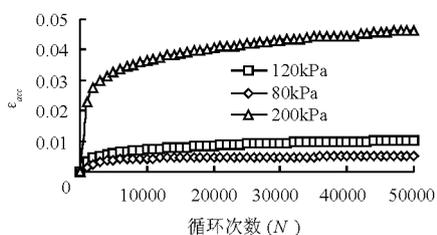
图 3 为重塑饱和和粉质黏土循环三轴试验累积孔压图。



(a) 不同动应力比

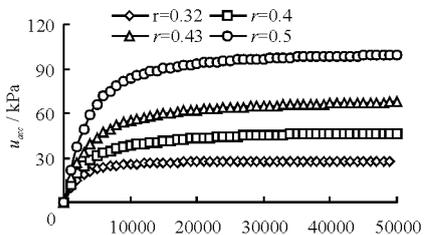


(b) 不同振动频率

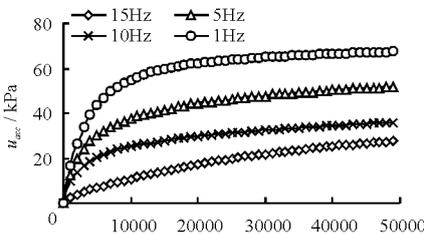


(c) 不同围压

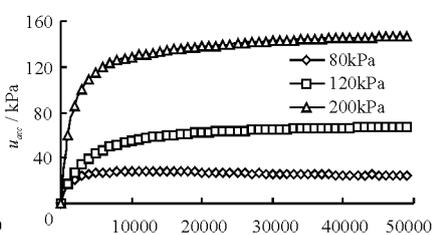
图 2 重塑饱和和粉质黏土累积塑性应变图



(a) 不同动应力比



(b) 不同振动频率



(c) 不同围压

图 3 重塑饱和和粉质黏土累积孔压

图3(a)为不同动应力比下的累积孔压与循环次数的变化曲线。从图3(a)可以看出,重塑饱和粉质黏土在动应力比不同时的累积孔压发展规律相似,但相同循环次数情况下,动应力比增加,累积孔压也随之增加,并且在10000次左右增长趋势减缓并趋近于稳定。

图3(b)为不同振动频率下的累积孔压与循环次数的变化曲线。从图3(b)可以看出,重塑饱和粉质黏土在振动频率不同时,土体累积孔压发展规律与其他不同,相同循环次数情况下,振动频率增大,累积孔压随之减小,并且累积孔压增加趋势随之减缓。

图3(c)为不同围压下的累积孔压与循环次数的变化曲线。从图3(c)可以看出,重塑饱和粉质黏土在围压不同时,土体累积孔压发展规律略有不同,但相同循环次数情况下,围压增大,累积孔压随之增加。围压较小时($\sigma'_{3c} = 80\text{kPa}$),随着循环次数的增加,累积孔压快速增加到峰值,之后缓慢减小。围压较大时($\sigma'_{3c} = 120、200\text{kPa}$),累积孔压不断增加,但随着循环次数的增加,其增长趋势逐渐变缓并

趋于稳定。而且不同围压下的累积孔压和累积塑性应变的稳定幅值增长迅速,说明了围压对累积孔压和累积塑性应变的影响相关性很高。

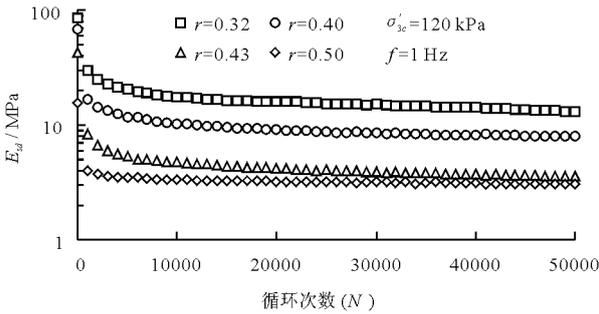
4.3 动力刚度

重塑饱和粉质黏土在不同动应力比情况下的刚度模量如图4(a)、(b)所示:

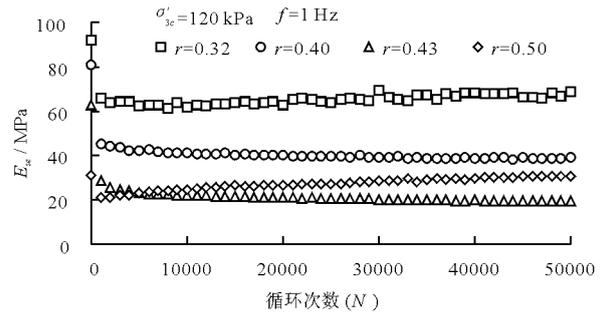
图4(a)为割线动变形刚度模量 E_{sd} 与循环次数 N 相互关系,由图4(a)可知,割线动变形刚度模量 E_{sd} 随着循环次数 N 的增加而衰减,即土体表现出所谓的刚度弱化现象。动应力比越大,土体割线动变形刚度模量越小,并且刚度弱化趋势越快,最后趋于稳定。

图4(b)为土体割线动弹性刚度模量 E_{se} 与循环次数 N 的相互关系,由图4(b)可知,土体割线动弹性刚度模量 E_{se} 随着循环次数 N 的增加可能呈现衰减弱化现象,也可能呈现增加硬化的情况。总体来说,动应力比越大,土体割线动弹性刚度模量越小,但当动应力比过高时,割线动弹性刚度模量反而会逐渐增长。

重塑饱和粉质黏土在不同频率情况下的刚度模量如图5(a)、(b)所示:

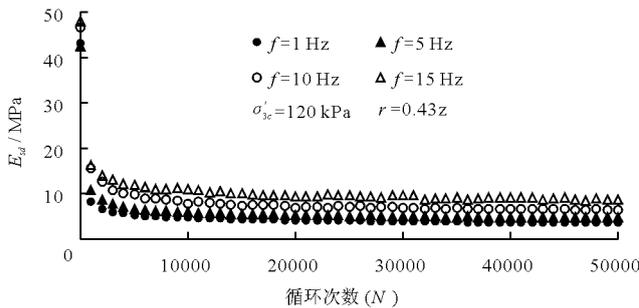


(a) 割线动变形刚度模量

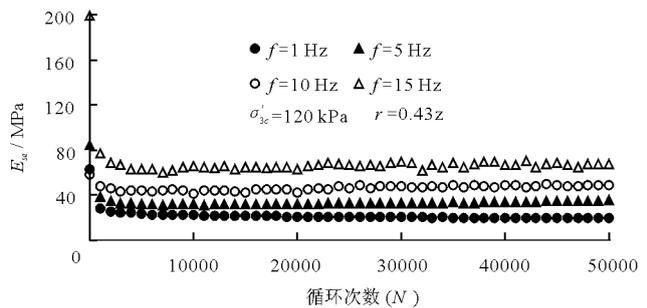


(b) 割线动弹性刚度模量

图4 不同动应力比下的割线动变形刚度模量和割线动弹性刚度模量



(a) 割线动变形刚度模量



(b) 割线动弹性刚度模量

图5 不同加载频率下的割线动变形刚度模量和割线动弹性刚度模量

图5(a)为不同加载频率下割线动变形刚度模量 E_{sd} 与循环次数 N 相互关系,由图5(a)可知,割线动变形刚度模量 E_{sd} 随着循环次数 N 的增加而衰减

弱化。加载频率越大,土体割线动变形刚度模量 E_{sd} 越大。

图5(b)为不同加载频率下土体割线动弹性刚

度量量 E_{se} 与循环次数 N 的相互关系,由图 5(b)可知,土体割线动弹性刚度度量 E_{se} 随着循环次数 N 的增加也呈现出衰减弱化现象。加载频率越大,土体割线动弹性刚度度量 E_{se} 越大,最后趋于稳定。

重塑饱和粉质黏土在不同围压情况下的刚度度量如图 6(a)、(b)所示:

图 6(a)为不同围压下割线动变形刚度度量 E_{sd} 与循环次数 N 相互关系,由图 6(a)可知,割线动变形刚度度量 E_{sd} 随着循环次数 N 的增加而衰减弱化。值得注意的是,相同循环振次时,围压增大,割线动变形刚度度量 E_{sd} 值减小,且割线动变形刚度度量 E_{sd}

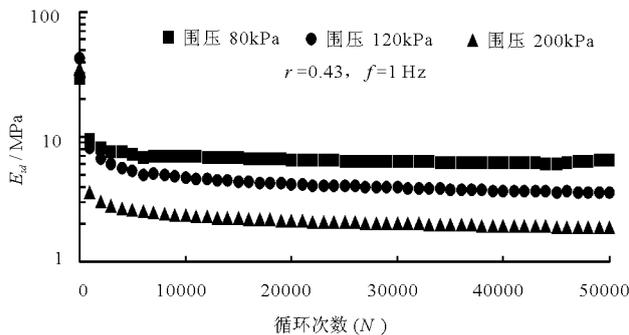
随围压增加衰减弱化的趋势加快。

图 6(b)为不同围压下土体割线动弹性刚度度量 E_{se} 与循环次数 N 的相互关系。

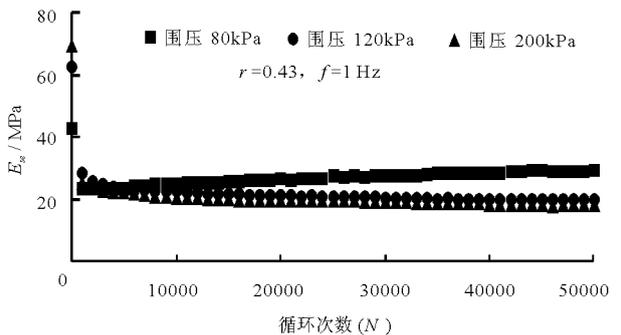
由图 6(b)可知,土体割线动弹性刚度度量 E_{se} 在不同围压下随着循环次数 N 的增加也呈现出近似相同的弱化趋势,其弱化稳定幅值随着围压的增大而减小。

4.4 割线动弹性刚度度量与循环动应变幅值的相互关系

图 7 为割线动弹性刚度度量与循环动应力关系曲线。

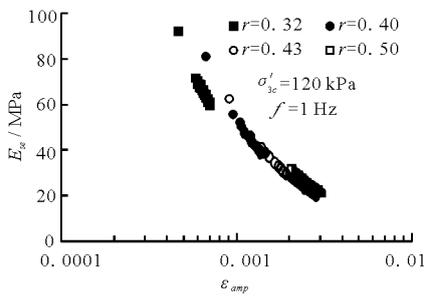


(a) 割线动变形刚度度量

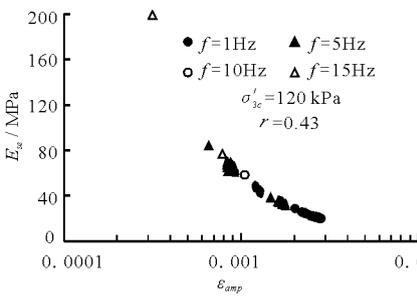


(b) 割线动弹性刚度度量

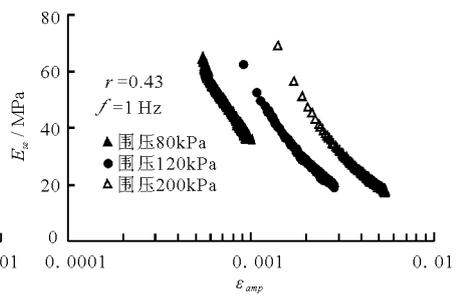
图 6 不同围压下的割线动变形刚度度量 and 割线动弹性刚度度量



(a) 不同动应力比



(b) 不同频率



(c) 不同围压

图 7 不同因素下的割线动弹性刚度度量与循环应变幅值的关系

图 7(a)为土体割线动弹性刚度度量 E_{se} 与循环动应变幅值 ε_{amp} 的相互关系,从图 7(a)中可以看出,不同动应力比下的 $E_{se} - \varepsilon_{amp}$ 半对数坐标散点图近似分布于一条衰减曲线上,即 $E_{se} - \varepsilon_{amp}$ 衰减性质受动应力比大小的影响不大,与循环动应变幅值 ε_{amp} 的大小有关。

图 7(b)为不同加载频率下土体割线动弹性刚度度量 E_{se} 与循环动应变幅值 ε_{amp} 的相互关系,从图 7(b)可以看出,不同加载频率下的 $E_{se} - \varepsilon_{amp}$ 半对数坐标散点图分布于一条衰减曲线上,即 $E_{se} - \varepsilon_{amp}$ 衰减性质受加载频率大小的影响也不大,与循环动应变幅值 ε_{amp} 的大小有关。

图 7(c)为不同围压下土体割线动弹性刚度度量 E_{se} 与循环动应变幅值 ε_{amp} 的相互关系,从图 7(c)可以看出,不同围压下的 $E_{se} - \varepsilon_{amp}$ 半对数坐标散点图分布于 3 条衰减曲线上,即 $E_{se} - \varepsilon_{amp}$ 衰减性质受到围压和循环动应变幅值 ε_{amp} 的影响。从图 7(c)可以明显看出 E_{se} 随着 ε_{amp} 的增大而衰减并且最后趋于稳定,围压越大,割线动弹性刚度度量衰减越慢,衰减稳定幅值也越低,说明了围压在一定程度上影响了 E_{se} 的衰减。

5 结 论

(1)随着循环振次的增加,重塑饱和粉质黏土

累积塑性变形不断累积增大,动应变也随之增大。在小应力水平下,随着循环振次的增加,土体变形最终会趋于稳定状态,发生应变软化现象。

(2) 重塑饱和粉质黏土的累积孔压随着循环振次的增加而呈现幂指数形式的增加,且当循环振次不断增加,累积孔压增长渐缓。累积孔压的增长受到动应力比、振动频率和围压的影响。动应力比越大、振动频率越小以及围压越大,累积孔压越大,且增长速度也越快。

(3) 对于高频率($f > 5$ Hz)环境下,重塑饱和粉质软黏土的累积应变和累积孔压都低于低频环境下的应变和孔压,刚度模量会高于低频情况。而割线动弹性刚度模量在高频情况下,频率对其衰减趋势影响并不大。

(4) 重塑饱和粉质黏土由于累积塑性变形以及累积孔压直接原因,而表现出刚度弱化。割线动变形刚度模量和割线动弹性刚度模量随循环振次增加而衰减弱化。

(5) 在不同动应力比和频率下,割线动弹性刚度模量和循环应变幅值的关系近似为一条曲线,割线动弹性刚度模量的衰减趋势受动应力比和频率的影响不大,而围压越大,割线动弹性刚度模量衰减趋势越慢,并且衰减稳定幅值越低。

参考文献:

- [1] Andersen K H, Lauritzsen R. Bearing capacity for foundation with cyclic loads[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(5):540-555.
- [2] Andersen K H, Kleven A, Heien D. Cyclic soil data for design of gravity structures[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(5):517-539.
- [3] Andersen K H, Pool J, Brown S, et al. Cyclic and static Laboratory test on drammen clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1980, 106(5):499-529.
- [4] 王浩,李爱群,谢群,等. 台风作用下超大跨度斜拉桥抖振响应现场实测研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(7):71-78.
- [5] 李益. 三桩基础海上风力发电结构的自振特性分析[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- [6] 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.
- [7] 王军,蔡袁强,徐长节,等. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8):1713-1719.
- [8] 王军,蔡袁强,潘林有. 双向激振下饱和软黏土应变软化现象试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2):178-185.
- [9] 黄博,史海栋,凌道盛,等. 两种粉质黏土的动静强度特性对比研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3):665-673.
- [10] 谷川,王军,张婷婷,等. 应力路径对饱和软黏土割线模量的影响[J]. 岩土力学, 2013, 34(12):3394-3402.
- [11] 郭林,蔡袁强,王军,等. 长期循环荷载作用下温州结构性软黏土的应变特性研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12):2249-2254.
- [12] 蒋敏敏,蔡正银,曹培,等. 循环荷载对粉质黏土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(S2):204-207.
- [13] 黄茂松,李帅. 长期往复荷载作用下近海饱和软黏土强度和刚度的弱化特性[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10):1491-1498.
- [14] 魏新江,张涛,丁智,等. 循环荷载下不同固结度饱和软黏土刚度变化试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2):675-679.
- [15] 王军,蔡袁强,徐长节,等. 循环荷载作用下软黏土刚度软化特征试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10):2138-2144.
- [16] Martin A, Kuo Y S, Khalid A R. Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(5):725-735.