

DOI: 10.11779/CJGE201712010

超大次循环荷载下超固结黏土的长期不排水力学特性研究

韩 剑^{1,3}, 姚仰平¹, 尹振宇^{*2,3}

(1. 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100191; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 南特中央理工大学土木与力学工程研究所, 南特 法国 44300)

摘要: 风、波浪等荷载具有超大循环次数的特征, 极大影响黏土的长期不排水动力特性, 是黏土地基基础设计的关键问题之一。针对现有动力试验荷载循环次数不足的现状, 以超固结度为4的重塑土试样为研究对象, 展开了一系列不排水三轴动力试验, 研究了在超大次(比如超过 10^6 次)循环加载情况下黏土的相关特性。试验结果表明, 在对称循环加载作用下, 饱和黏土存在循环应力比门槛值为0.44~0.48。在循环加载初期, 试样的轴应变及孔压的变化与前人对黏土动力试验研究结果一致。然而, 随着循环加载次数的增加, 动轴向应变减小, 累积轴向应变增加; 尤其是加载过程中由正孔压降低到负孔压。针对这一新的发现, 增加了一个超固结土的蠕变试验结果进行了分析解释, 为研究超大次循环荷载下超固结黏土的长期不排水力学特性的机理提供了新的思路。

关键词: 黏土; 超大循环次数; 蠕变; 孔隙水压力; 不排水三轴试验

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)12-2219-07

作者简介: 韩 剑(1986-), 男, 湖北荆州人, 博士, 主要从事岩土力学及本构关系方面的研究, E-mail: jianhan@buaa.edu.cn。

Long-term undrained mechanical behavior of overconsolidated clay under cyclic loading with a large number of cycles

HAN Jian^{1,3}, YAO Yang-ping¹, YIN Zhen-yu^{2,3}

(1. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Ecole Centrale de Nantes, Research Institute of Civil and Mechanical Engineering, Nantes 44300, France)

Abstract: The wave and wind loadings applied on structure foundations with a large number of cycles affect the long-term undrained mechanical behavior of clay, which is one of key issues for the foundation design. Owing to lack of cyclic tests with a large number of cycles up to now, laboratory tests on over consolidated clay are performed to study the cyclic behavior with a large number of cycles (e.g., more than one million). Based on the results of reconstituted specimens with $OCR=4$, the possible existence of the threshold stress ratio under the symmetric cyclic loading is confirmed. The value of the threshold stress ratio is 0.44~0.48. At the early stage of cyclic loading, the evolutions of axial strain and pore pressure are similar to the results of the conventional cyclic tests. However, as the number of cycles increases, the cyclic axial strain decreases, whereas the permanent axial strain increases and the pore pressure decreases from a positive to negative value. These new phenomena are analyzed by conducting additional creep tests on the overconsolidated clay, which throws new light on studying the mechanism governing the long-term undrained mechanical behavior of overconsolidated clay under cyclic loading with a large number of cycles.

Key words: clay; a large number of cycles; creep; pore pressure; undrained triaxial test

0 引言

长期循环荷载作用下土的动力特性一直是风力发电机以及近海的钻井平台等工程中需要考虑的重要问题。在风、波浪以及潮汐等长期循环荷载作用下, 黏土地基的长期沉降非常可观, 甚至直接影响工程的正常使

用。因此, 有必要对黏土的长期动力特性进行研究。

基金项目: 国家自然科学基金项目(11672015, 41372285, 51579179);
国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2014CB047001)

收稿日期: 2016-09-01

*通讯作者(E-mail: zhenyu.yin@gmail.com)

近些年来,国内外学者对黏土的动力特性进行了广泛研究,取得了丰硕的成果^[1-16]。上述文献中绝大多数开展的动力试验循环次数在10⁴次以内,只有少数试验能达到10⁵次。然而,风、波浪、潮汐等荷载具有超大循环次数的特点,因此黏土的长期不排水动力特性,特别是受循环次数超过10⁶次的动力荷载作用下的特性,是岩土结构基础设计的一个关键问题。而对这个问题的研究目前来说还比较缺乏,基于一万次循环加载的试验结果来分析和预测长期循环加载下黏土的动力特性不太可靠。因此开展循环加载次数超过一百万次的室内动力试验有实际意义,现有发表的关于长期动力荷载的室内试验研究的一系列文章中,只有20世纪70年代Brown等^[17]和Lashine^[18]发表的文章中针对一种三叠纪淤泥质黏土(Keuper marl)所做的试验研究,最大循环次数达到了10⁶次。上述动力试验的频率 f 为10 Hz,远大于一般波浪、风等的频率($f \leq 0.1$ Hz),动力试验持续比较短(1 d左右),时间效应对超大次数循环荷载作用下黏土动力特性的影响不明显,在上述文献^[17,18]中没有涉及。

因此,本文针对一种超固结黏土(Merville黏土),开展了一系列超大循环次数(超过10⁶次)的动力试验研究,揭示了超固结黏土的长期不排水动力特性及其机理。

1 试验材料及试样制备

本文试验研究所用的超固结黏土(Merville黏土)原状试样取自于法国北部的城市Merville,地表深度5~11 m。在第三纪始新世初期(距今三千万年左右)沉积时,Merville黏土与伦敦土均位于同一海湾,因此两种黏土有许多相似的性质,都是硬黏土^[19]。Merville黏土中主要的黏粒矿物是伊利土,另外有少量的高岭土及蒙脱石,黏土整体呈现为灰棕色。天然Merville黏土的饱和度为100%,天然含水率约为31%,液塑限分别为99%和40%,天然重度为19.5 kN/m³,黏粒含量(<2 μm)约为26%,粉土含量约为74%。为避免颗粒间胶结与裂隙的影响以及得到均质的试验试样,本文按照文献[20]中的方法制备重塑土试样,泥浆的含水率是液限的1.25倍。然后将泥浆倒入固结器皿中进行固结,施加的竖向有效应力为100 kPa,直到试样轴向位移的变化小于每天0.1 mm时,结束固结。整个固结过程持续一个月,确保制成的重塑土样是饱和的以及固结完成的。制备好重塑土试样为圆柱型,高度为70 mm,直径为35 mm。文献^[21]对制备好的重塑试样进行了一维和三维的对比试验(固结试验和三轴试验),结果表明制备的重塑试样均匀性较好。

2 试验方案

本文试验在GDS动力三轴试验仪上进行,采用应力控制加载方式,拟对超固结度为4的重塑土样开展一系列的不排水三轴动力试验,动力试验的加载形式是双向对称加载,即土体承受拉压对称的循环荷载。动偏应力的幅值的选取是按照循环应力比 R_c 来确定的,循环应力比 R_c 定义为动偏应力幅值 q_{cyc} 与重塑土样静偏应力峰值 q_{max} 的比值。 q_{max} 是由超固结度为4的重塑土样的不排水静三轴压缩试验得到,等于194.5 kPa。Merville黏土在压缩与拉伸状态下临界状态线由正常固结重塑土的不排水静三轴剪切试验得到,临界状态线的斜率 M_c 和 M_e 分别为1.0和0.97。

本文动力试验中需要考虑时间效应的影响,因此动力试验的频率不能太大,如10 Hz,这样频率下的循环次数为10⁶次的动力试验不到两天就完成了。风、波浪以及潮汐等荷载的频率普遍比较小,一般在0.1 Hz以下。如果荷载频率按照0.1 Hz来取,即循环加载一个周期就需要10 s,那么做完10⁶次循环加载就需要超过115 d的时间,这显然不符合室内试验的实际情况。长时间试验的中途可能会出现断电、仪器故障等情况,导致无法完成超大次数的动力试验。因此,本文选取的频率为1 Hz,动力试验需要13 d左右完成,这既满足了室内试验的实际情况,也能观测时间效应对黏土的长期动力特性的影响。

所有试样在不排水动力试验前都进行了反压饱和,反压力为400 kPa,孔压系数B值都在0.96以上。反压饱和后,对试样进行等向固结,为得到超固结度为4的重塑土样,试样先在较高的有效固结压力(400 kPa)下进行等向固结,然后将有效固结压力减小到100 kPa下进行等向固结,从而得到相应的超固结土样。本文制备重塑土样的所用的黏土取自地下5~11 m,其实际受到的竖直土压力在74~133 kPa,而且文献^[19]指出该黏土的静止土压力系数(K_0)的值在0.9~1.1之间。因此,基于上述该黏土的实际应力状态,本文在开展的动力室内试验中,选取了有效固结压力为100 kPa, K_0 值为1.0。固结完成后,在不排水条件下进行动力试验。试验过程中,在试样底部有传感器对孔隙水压力进行测量。

3 试验结果与分析

3.1 动力试验结果

制备的重塑土试样为超固结试样,超固结度等于4,试验施加的动力荷载及动力试验结束时的循环加载次数如表1所示。

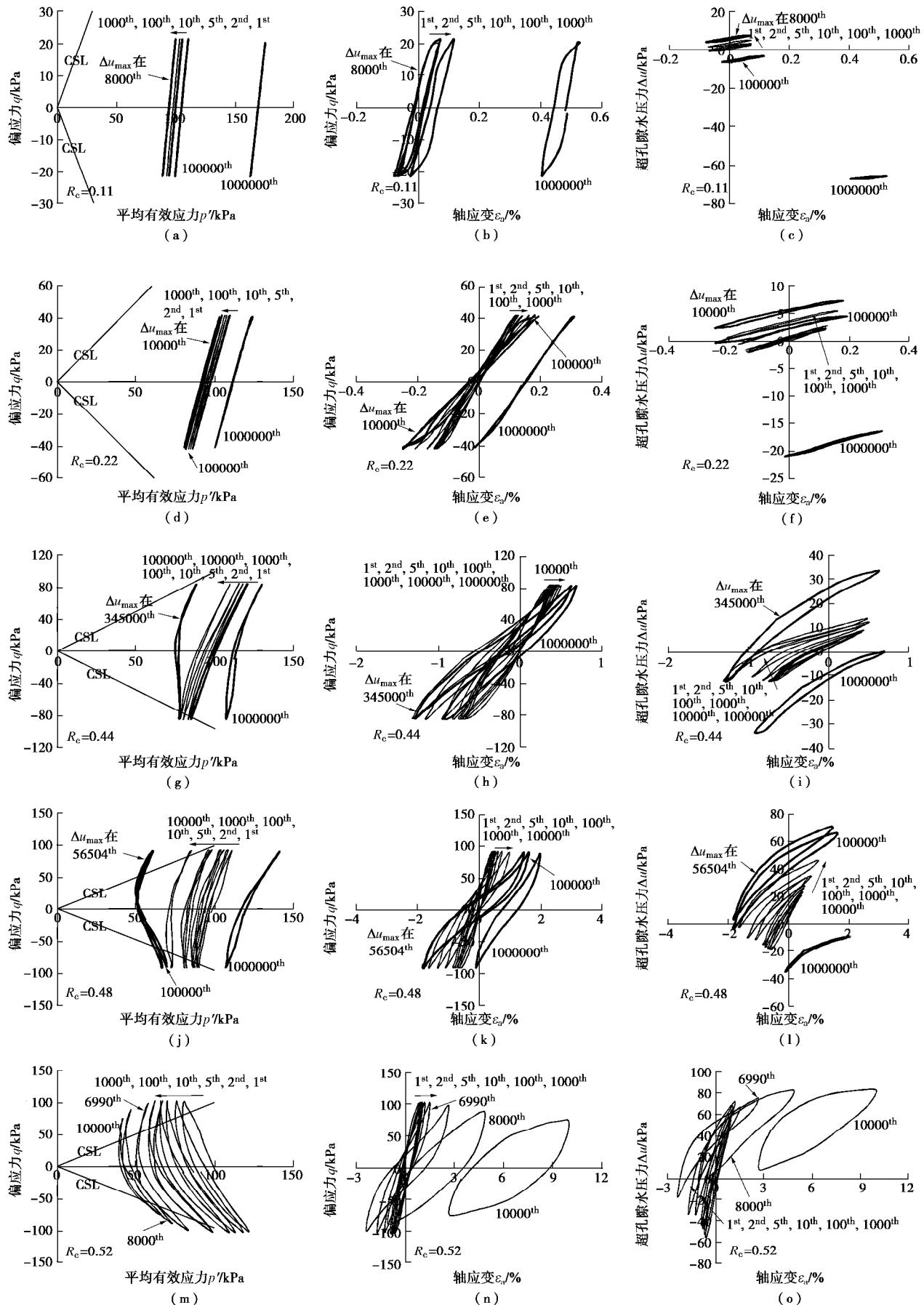


图1 不同循环应力比下超固结比为4的重塑土不排水动力三轴试验结果

Fig. 1 Results of undrained triaxial cyclic tests on specimens with $OCR=4$ under different cyclic stress ratios from 0.11 to 0.52

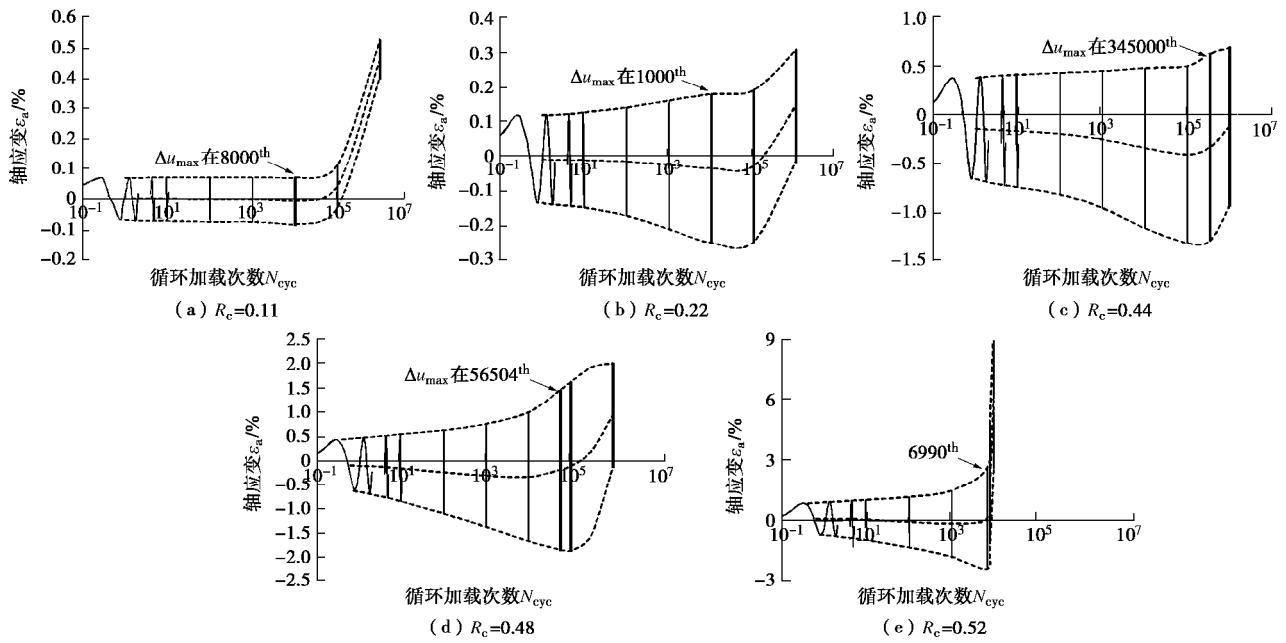


图 2 不同循环应力比下的轴应变与循环加载次数的关系

Fig. 2 Axial strain versus number of cycles under different cyclic stress ratios from 0.11 to 0.52

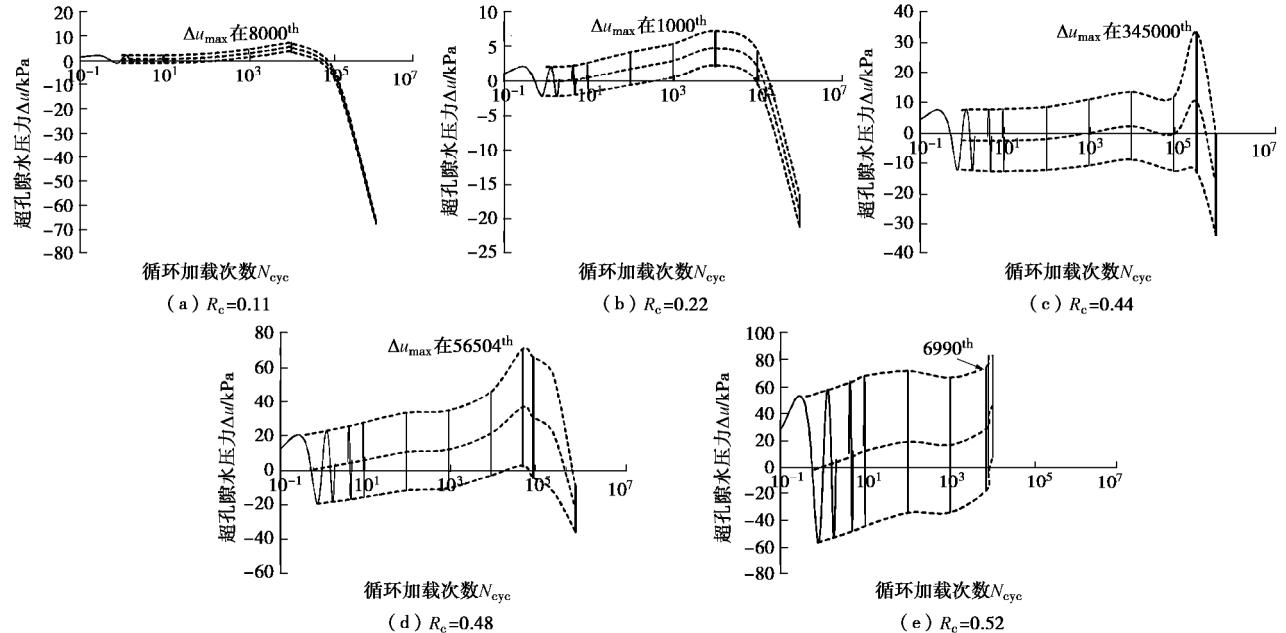


图 3 不同循环应力比下的孔隙水压力与循环加载次数的关系

Fig. 3 Excess pore pressure versus number of cycles under different cyclic stress ratios from 0.11 to 0.52

表 1 中需要说明的是,除了 $R_c=0.52$ 的试验是由试样明显破坏而在循环次数为 10^4 次时停止,其他试验试样在循环次数达到 10^6 次以后并没有明显破坏。由于动力荷载的频率是 1 Hz,因此循环荷载次数就是以秒为单位的加载时间,每个 10^6 次动力试验的时间都在 13 d 左右。

由于超大次数动力循环结果数据量大,选取了有代表性的循环加载次数对应的动力试验结果,如图 1 所示。在低循环应力比情况下(如 $R_c=0.11, 0.22$),动应力路径没有到达压缩或拉伸的临界状态线(图 1

(a), (d)),当 $R_c=0.48, 0.52$ 时,应力路径在压缩和拉伸状态下均到达临界状态线(图 1(j), (m))。

虽然在 $R_c=0.48$ 的试验中,当循环次数超过 10^6 次后,没有观察到试样有结构上的破坏。但工程设计中,循环加载下土体的应变有个破坏标准,当应变达到这个标准时,就认为土体破坏了。

动力试验研究中,对不同的土,判断试样的破坏的应变标准不尽相同,应变幅值从为 2.5% 到 20%,如文献[15]中针对 Ariake 黏土建议峰-峰双幅轴应变达到 5% 时,试样发生破坏;文献[15]中针对 Itsukaichi 黏土建议

峰-峰双幅轴应变达到 10% 或者累积应变峰值达到 10% 时, 试样就破坏; 文献[10]中针对 Drammen 黏土建议累积剪应变达到 15% 或者动剪应变达到 15% 时, 试样发生破坏。

表 1 重塑土样不排水动三轴压缩试验汇总

Table 1 List of undrained triaxial cyclic tests on reconstituted specimens of Merville clay

试验编号	动偏应力 q_{cyc}/kPa	循环应力比 R_c	循环加载次数 N_{cyc}
CYC1	21.4	0.11	1026575
CYC2	41.7	0.22	1060200
CYC3	84.7	0.44	1051480
CYC4	92.8	0.48	1050520
CYC5	101.0	0.52	10000

本文以 $R_c=0.48$ 试验过程峰-峰双幅轴应变达到的最大值 (3.5%) 作为应变破坏标准。从图 2 可以观察到, 试样在循环次数达到 10^5 次左右时发生破坏。在 $R_c=0.52$ 的试验中, 虽然循环次数达到 10^4 次, 但从图 1 (m) 中可以观察到在循环次数在 6990 次左右时, 动偏应力的幅值就不能保持在 101.0 kPa 了。随着循环次数的增加, 动偏应力一直在减小, 试样已经破坏了。

按照应变破坏标准, $R_c=0.52$ 的试验中在循环次数到 1200 次左右时试样发生破坏。当 $R_c=0.44$ 时, 在孔压最大时, 应力路径只是刚达到拉伸临界状态线 (图 1(g)), 试样的双幅应变没有达到应变破坏标准, 认为试样在动力加载过程中没有破坏。

试验结果表明, 在相同的固结条件和围压作用下, 存在一个循环应力比门槛值, 并定义为试样强度不会明显降低而发生破坏的最大循环应力比。根据试验结果可得本文 Merville 黏土的循环应力比门槛值在 0.44~0.48 之间。

对图 1 中循环应力比从 0.11~0.52 的重塑土试样的轴应变和孔隙水压力与循环加载次数的关系分别进行整理, 如图 2, 3 所示。并基于此, 在 3.2 节、3.3 节部分做深入分析。

3.2 应变分析

从图 2 可以观察到, 循环应力比越大, 轴应变的变化 (压缩或拉伸) 越明显。黏土的拉伸临界状态线的斜率要小于压缩状态的, 在施加对称循环荷载的情况下, 土样更容易拉伸破坏, 如超固结度为四的 Drammen 黏土^[10]。本文在开始加载时, 试样轴向应变的拉、压应变幅值都随着循环次数的增大而增大, 拉应变增大的速度要大于压应变, 但到随着循环次数的继续增加后, 拉应变幅值开始减小, 压应变则继续增大。即使是大循环应力比 ($R_c=0.48, 0.52$) 的试样, 最终也是压缩破坏。

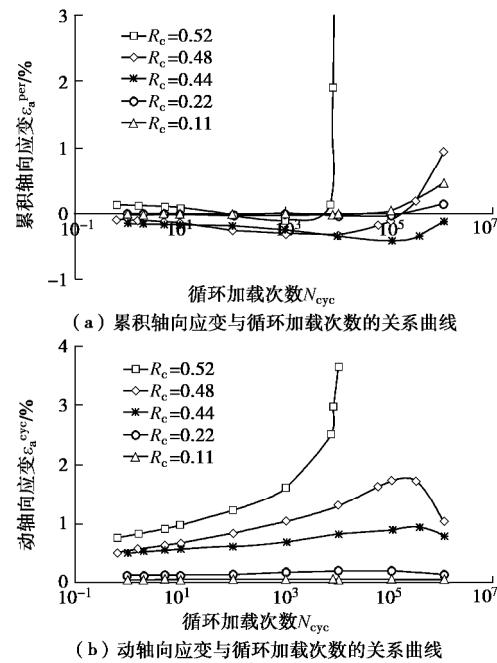


图 4 动力试验结果

Fig. 4 Results of undrained triaxial cyclic tests

整理图 2 的试验结果, 可以得到累积轴向应变 ($\epsilon_a^{per} = (\epsilon_a^{max} + \epsilon_a^{min}) / 2$) 和动轴向应变 ($\epsilon_a^{cyc} = (\epsilon_a^{max} - \epsilon_a^{min}) / 2$) 与循环加载次数的关系, 如图 4 所示。其中, ϵ_a^{max} 代表每一次加载循环中轴应变的最大值, ϵ_a^{min} 为每一次加载循环中轴应变的最小值。

由图 2, 4 可知, 相同循环次数下, 循环应力比越大, 动轴向应变越大。在试验结束时, 大多数的累积应变是正的 (除了 $R_c=0.44$ 的试样)。本文在循环次数较小 (10^4 次以内) 的情况下, 黏土在对称循环加载下, 累积应变比动应变要小很多, 随着循环次数的增加, 动应变越来越小。在循环应力比较小 ($R_c=0.11, 0.22$) 时, 随着循环次数的增大, 累积应变却由拉伸状态发展到压缩, 而且越来越大。

3.3 孔隙水压力分析

图 3 为循环应力比从 0.11~0.52 的 Merville 黏土重塑样的孔隙水压力与循环加载次数的关系图。从图中可以观察到, 循环应力比越大, 孔隙水压力的幅值越大。整理图 3 的结果, 可以得到累积孔隙水压力 ($\Delta u^{per} = (\Delta u^{max} + \Delta u^{min}) / 2$) 和动孔隙水压力 ($\Delta u^{cyc} = (\Delta u^{max} - \Delta u^{min}) / 2$) 与循环加载次数的关系, 如图 5 所示。其中, Δu^{max} 代表每一次加载循环中孔隙水压力的最大值, Δu^{min} 为每一次加载循环中孔隙水压力的最小值。

在循环次数较小时, 所有的孔隙水压力都是一开始增加, 如同黏土的传统动力试验结果^[1-8]。但在超大循环次数后, 孔隙水压力都不同程度的减少了, 这与黏土的一般动力试验中孔压的变化有很大的不同。在认真检查仪器与试样后, 排除了出现试样没有充分饱

和、仪器漏水以及传感器故障等问题的可能。

超大循环次数下试样累积轴向应变由拉伸向压缩状态变化(除 $R_c=0.44$ 外),且越来越大;孔压越来越小,且由正孔压降到负孔压;这些现象与黏土蠕变试验结果^[22]比较一致。可以认为虽然没有受到恒定的静荷载,但由于循环加载时间比较长,在两周左右,上述现象是由超固结土在剪胀条件下的时间效应引起的。

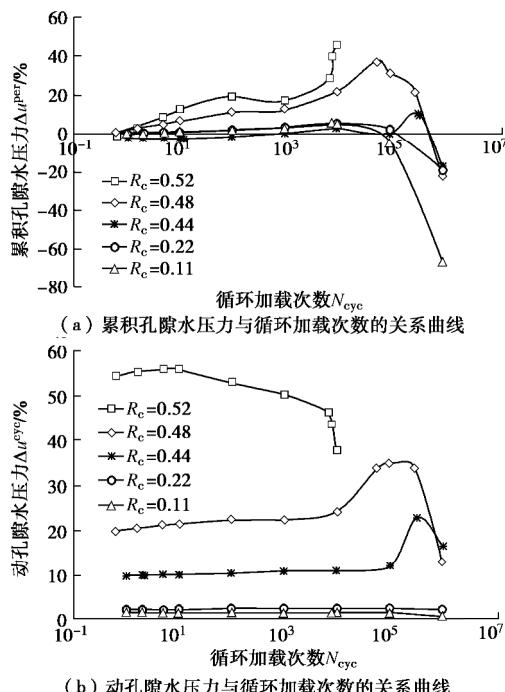


图 5 动力试验结果

Fig. 5 Results of undrained triaxial cyclic tests

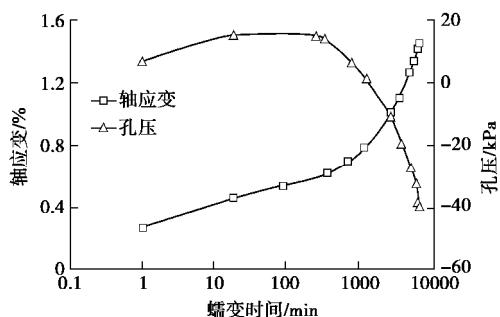


图 6 Merville 重塑土三轴不排水蠕变试验结果: 轴应变和孔压随时间变化的曲线

Fig. 6 Undrained triaxial creep tests on reconstituted specimen: evolutions of axial strain and excess pore pressure with creep time

为验证上述想法,做了一个蠕变试验。重塑试样的制备,饱和,固结过程以及试验所用的仪器都和动力试验一样。在固结完成后,重塑土试样上施加50 kPa的偏应力,持续时间为1 min,保持这个应力,得到轴应变与孔隙水压力随蠕变时间的变化如图6所示。整个蠕变过程中轴应变一直在增加,孔压在初始变化比较平稳,随着蠕变时间的增加,孔压一直在减小,

由初始的正孔压一直降到负孔压。

因此有理由相信,对循环应力比小($R_c=0.11, 0.22, 0.44$)的试验,在动力加载初期,动力荷载的作用起主要作用,轴应变与孔压的变化也符合一般黏土动力试验的结果。随着循环加载次数的增加,即加载时间的增加,虽然是对称循环加载,但加载过程中荷载表现的既有动荷载部分,且一直在减小,表现在轴应变与孔压的峰-幅值一直在减小,即动荷载表现的越来越不明显;也有静压力部分,在动力加载过程中产生蠕变效应。因此,在循环加载后期,轴向累积应变一直在增加,且是由拉伸状态向压缩状态变化(除比较大循环应力比 $R_c=0.44$ 以外),而孔压一直下降,且由正孔压降到负的。这些都与不排水三轴蠕变试验结果(图(6))一致。

4 结 论

本文为了研究超大次循环荷载下超固结黏土的不排水动力特性,制备了超固结度为四的重塑土试样。根据不排水三轴动力试验的结果,得到如下结论:

(1) 在对称循环荷载作用下,按照土体的应变破坏标准,Merville 黏土的超固结重塑土存在一个循环应力比门槛值,在0.44, 0.48之间。小于门槛值的试验在循环加载次数超过 10^6 次后仍没有破坏。

(2) 在循环加载次数比较小(10^4 次以内)的阶段,试样的轴应变及孔压的变化与以往黏土动力试验结果一致。而随着循环加载次数的增加,动轴向应变减小,但累积轴向应变增加;孔压由平稳增长变化到持续减小,且由正孔压降低到负孔压。

(3) 由于动力加载持续时间较长,超高循环次数动力试验过程中的轴应变和孔压的变化与蠕变试验结果比较一致。在循环加载后期,试验过程中有蠕变效应产生。因此,超大循环次数下,本文的试验结果对在实际工程中黏土长期循环荷载作用下动力特性研究具有一定的参考价值。

文中虽然采用具有超固结度为4的土样开展了室内动力试验,但没有进行超固结度对黏土动力特性影响的研究,后续研究工作中将开展不同超固结度下黏土的动力试验。

参 考 文 献:

- [1] 陈颖平,黄博,陈云敏.循环荷载作用下结构性软黏土的变形和强度特性[J].岩土工程学报,2005,27(9): 1065 - 1071. (CHEN Ying-ping, HUANG Bo, CHEN Yun-min. Deformation and strength of structural soft clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,

- 2005, **27**(9): 1065 – 1071. (in Chinese))
- [2] 蔡袁强, 王 军, 海 钧. 双向激振循环荷载作用下饱和软黏土强度和变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(3): 495 – 504. (CAI Yuan-qiang, WANG Jun, HAI Jun. Study on strength and deformation behaviors of soft clay under bidirectional exciting cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(3): 495 – 504. (in Chinese))
- [3] YIN Z Y, CHANG C S, HICHER P Y. Micromechanical modelling for effect of inherent anisotropy on cyclic behaviour of sand[J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, **47**(14/15): 1933 – 1951.
- [4] 黄茂松, 姚兆明. 循环荷载下饱和软黏土的累积变形显式模型[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(3): 325 – 331. (HUANG Mao-song, YAO Zhao-min. Explicit model for cumulative strain of saturated clay subjected to cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(3): 325 – 331. (in Chinese))
- [5] YIN Z Y, XU Q, CHANG C S. Modeling cyclic behavior of clay by micromechanical approach[J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2013, **139**(9): 1305 – 1309.
- [6] JIN Y F, YIN Z Y, ZHANG D M, et al. Unified modelling of monotonic and cyclic behaviours for sand and clay[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2015, **28**(2): 111 – 132.
- [7] 王立忠, 但汉波, 李玲玲. K_0 固结软土的循环剪切特性及其流变模拟[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(12): 1946 – 1955. (WANG Li-zhong, DAN Han-bo, LI Ling-ling. Cyclic shearing behavior of K_0 -consolidated clay and its rheological simulation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(12): 1946 – 1955. (in Chinese))
- [8] 郑 刚, 霍海峰, 雷华阳. 循环荷载后原状与重塑饱和粉质黏土不排水强度性状研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(3): 400 – 408. (ZHENG Gang, HUO Hai-feng, LEI Hua-yang. Undrained strength characteristics of saturated undisturbed and remolded silty clay after cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(3): 400 – 408. (in Chinese))
- [9] 路德春, 姚仰平, 张在明, 等. 循环加载条件下土的应力路径本构模型[J]. 水利学报, 2008, **39**(8): 907 – 916. (LU De-chun, YAO Yang-ping, ZHANG Zai-ming. Constitutive model for soils under the condition of cyclic loading[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, **39**(8): 907 – 916. (in Chinese))
- [10] ANDERSEN K H. Cyclic clay data for foundation design of structures subjected to wave loading[C]// Proceedings of the International Conference on “Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena”. Bochum, 2004: 371 – 387.
- [11] YIN Z Y, CHANG C S, KARSTUNEN M, et al. An anisotropic elastic viscoplastic model for soft soils[J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, **47**(5): 665 – 677.
- [12] YIN Z Y, YIN J H, HUANG H W. Rate-dependent and long-term yield stress and strength of soft Wenzhou marine clay: experiments and modeling[J]. Marine Georesources & Geotechnology, DOI:10.1080/1064119X.2013.797060. 2014.
- [13] YAO Y P, HOU W, ZHOU A N. UH model: three-dimensional unified hardening model for overconsolidated clays[J]. Géotechnique, 2009, **59**(5): 451 – 469.
- [14] HICHER P Y. Contribution à l'étude de la fatigue des argiles[D]. Paris: Ecole Centrale de Paris, 1979.
- [15] HYODO M, YAMAMOTO Y, SUGIYAMA M. Undrained cyclic shear behaviour of normally consolidated clay subjected to initial static shear stress[J]. Soils and Foundations, 1994, **34**(4): 1 – 11.
- [16] YASUHARA K, HIRAO K, HYDE A F L. Effects of cyclic loading on undrained strength and compressibility of clay[J]. Soils and Foundations, 1992, **32**(1): 100 – 116.
- [17] BROWN S F, LASHINE A K F, HYDE A F L. Repeated load triaxial testing of a silty clay[J]. Géotechnique, 1975, **25**(1): 95 – 114.
- [18] LASHINE A K F. Deformation characteristics of a silty clay under repeated loading[C]// Proceeding of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, 1973: 237 – 244.
- [19] JOSSEAUME H. Engineering properties of the Flanders clay at Dunkerque and Calais[J]. Revue Française de Géotechnique, 1998, **84**: 3 – 26.
- [20] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural soils[J]. Géotechnique, 1990, **40**(3): 329 – 378.
- [21] HAN J. Experimental study on the mechanical behavior of a stiff clay subjected to monotonic and cyclic loading[D]. Nantes: Ecole Centrale de Nantes, 2014.
- [22] 尹振宇, 朱启银, 朱俊高, 等. 软黏土蠕变特性试验研究: 回顾与发展[J]. 岩土力学, 2013, **34**(增刊 2): 1 – 17. (YIN Zhen-yu, ZHU Qi-yin, ZHU Jun-gao. Experimental investigation on creep behavior of soft clays: Review and development[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(S2): 1 – 17. (in Chinese))