

文章编号: 1000-4750(2014)10-0167-07

循环荷载水平与加载频率耦合作用下的 软粘土特性研究

倪 静¹, Buddhima Indraratna², 耿雪玉², 陈有亮¹, 朱 颖¹

(1. 上海理工大学土木工程系, 上海 200093; 2. 澳大利亚卧龙岗大学土木工程系, 新南威尔士州 2522)

摘 要: 通过不排水循环三轴试验, 并考虑不同循环应力水平及加载频率的影响, 研究了软粘土在循环荷载作用下的孔隙水压力及变形特性, 分别探讨了这些特性随循环加载时间和加载次数的不同变化规律。研究表明, 对于相同循环应力水平, 相同加载次数下不同加载频率的软粘土特性有所不同, 而相同加载时间下不同加载频率的软粘土特性基本相同。此外, 无论加载频率为何数值, 一旦循环应力水平超过临界值, 软粘土破坏必将发生。为了深入研究应力水平和加载频率的耦合作用, 该文从应力控制循环加载试验中的应变速率着手, 对软粘土的特性进行了分析。结果表明, 在应力水平相同的情况下, 软粘土在不同加载频率下的应变速率是基本相同的, 由此可得对于软粘土在循环荷载作用下特性的影响, 应力水平比加载频率更为重要。

关键词: 软粘土; 循环荷载; 孔隙水压力; 应变; 加载速率

中图分类号: TU411 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.05.0387

EXPERIMENTAL STUDY OF THE COMBINED EFFECT OF CYCLIC STRESS LEVEL AND LOADING FREQUENCY ON THE PERFORMANCE OF SOFT CLAYS

NI Jing¹, INDRARATNA Buddhima², GENG Xue-yu², CHEN You-liang¹, ZHU Ying¹

(1. School of Civil Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Civil Engineering, University of Wollongong, NSW 2522, Australia)

Abstract: Undrained cyclic triaxial tests were conducted on soft clay to investigate the combined effect of cyclic stress level and loading frequency on the generation of excess pore water pressures and axial strains with the number of loading cycles or time. The results indicate that for a given cyclic stress level, the soil properties under various loading frequencies are slightly different if an identical number of loading cycles is considered, whereas they do not deviate from each other if an identical time is considered. In addition, failure occurs when the cyclic stress level exceeds a critical value irrespective of the loading frequency. The combined effect of a cyclic stress level and a loading frequency was studied by analyzing the strain rate in this stress-controlled cyclic loading test. It is shown that for a given cyclic stress level, the strain rate at various loading frequencies are almost same, implying that the influence of a cyclic stress level on the soft clay behavior is stronger compared to a loading frequency.

Key words: soft clays; cyclic loads; excess pore water pressure; strain; loading rate

收稿日期: 2013-05-04; 修改日期: 2014-02-17

基金项目: 上海市教育委员会科研创新项目(14YZ081); 上海高校青年教师培养资助计划项目(slg13027)

通讯作者: 倪 静(1983—), 女, 上海人, 讲师, 博士, 从事软粘土动力特性研究(E-mail: wendy_1943@163.com).

作者简介: Buddhima Indraratna(1960—), 男, 澳大利亚人, 教授, 博士, 博导, 从事岩土动力特性研究(E-mail: indra@uow.edu.au);

耿雪玉(1981—), 女, 山东人, 讲师, 博士, 博导, 从事软土地基加固研究(E-mail: xygen@gmail.com);

陈有亮(1966—), 男, 河北人, 教授, 博士, 硕导, 从事岩土工程方面的研究(E-mail: chenyouliang2011@163.com);

朱 颖(1990—), 女, 山西人, 硕士生, 从事软粘土动力特性研究(E-mail: 35zhuying@sina.com).

在经济发展迅速的沿江、沿海地带广泛分布着软粘土，它通常具有低承载力、高压缩性及低渗透性。尽管关于软粘土受力变形特性的研究由来已久，但仍然受到关注^[1]，特别是在交通荷载作用下，软土地基中的有效应力随着孔隙水压力的增长而减少，并伴随有地基土沉降量的不断累积，可能出现不能继续支持上部结构的情况。因此，软土地基在交通荷载作用下的力学特性一直是国内外工程界和学术领域关注的问题^[2-6]。高速重载是交通发展的一个趋势，由此导致的高循环应力水平和高加载频率可能加剧软土地基性能的恶化，从而影响交通的正常运行和人员的生命安全，因此了解研究软粘土在不同应力水平和加载频率的循环荷载作用下的性能是非常必要的。

早在 20 世纪 50 年代、60 年代，Larew 和 Leonards^[7]、Sangrey 等^[8]就研究了不同循环应力水平对软粘土受力变形的影响，结果表明存在一个临界循环应力水平，一旦应力水平大于此临界值，软粘土的变形在加载过程中将不断累积增长，直至破坏发生。若应力水平小于此临界值，则软粘土在经历初始阶段的变形累积增长以后将达到平衡状态，也就是说继续加载只会引起可恢复的弹性变形，而不会引起新的累积变形。由于临界循环应力水平受超固结比、偏压固结比及固结应力水平等因素的影响，因此 Brown 等^[9]提出循环应力比的概念以减少软粘土自身物理性质对临界循环应力水平的影响，定义循环应力比为循环应力与不排水三轴抗剪强度的比值，临界循环应力比值一般为 0.5 到 0.8^[10-13]。

另一方面，为了尽量准确测量孔隙水压力，早期针对软粘土的循环荷载试验的加载频率控制在 0.001Hz~0.1Hz，这主要是由于两方面的原因：1) 孔隙水压力的滞后效应^[14]；2) 一般孔压传感器被安置在试件顶部、底部或中间，而孔隙水压力数值在试件内部并不一致，因此为了使孔隙水压力在试件内部均等化，加载频率不能过高。然而，交通荷载频率可能远高于上述提到的数值，因此出现大量的科学研究致力于开发更先进的三轴仪、测试技术及数据分析方法，使试验中采用更高的加载频率成为可能。近年来，科研人员通过进行不同加载频率的循环三轴试验，对比分析了加载频率对软粘土性能的影响^[15-16]。然而，在以往对试验数据的分析过程中，常常是基于相同的加载次数研究不同加载频率下的孔隙水压力及轴向应变，并未考虑基于相同的

加载时间来进行对比分析，而本文作者认为这样做恰恰是相当必要的。例如两条铁路线，一条是快车，另一条是慢车，那么在相同运营时间内，快车可能比慢车行驶更多的车次，也就是说两个线路上的循环荷载次数是不同的，但它们的加载时间是相同的，因此有必要就相同的加载时间来分析加载频率对与软粘土力学性能的影响。

此外，本文还研究探讨了在应力控制循环荷载作用下软粘土的应变速率，并从这个侧面讨论了应力水平和加载频率的耦合作用，发现对于软粘土动力特性的影响，荷载水平比加载频率更为重要。

1 不排水循环三轴试验

本文中用于循环加载的试验设备为 GDS 试验仪，试件为高 76mm、直径 38mm 的重塑高岭土，其基本物理指标如表 1 所示。试件固结的轴向应力为 $\sigma_{c1}=40\text{kPa}$ ，偏压固结比为 $\sigma_{c3}/\sigma_{c1}=0.6$ 。

表 1 试验用土的基本物理性质

Table 1 The basic physical properties of the soil

G_s	$w_L /(\%)$	$w_p /(\%)$	C_c	C_s
2.7	55	27	0.42	0.06

本文利用 GDS 试验仪，研究循环应力水平和加载频率对试件内部孔隙水压力累积及变形累积的影响。其中循环应力水平以循环应力比来表示：

$$\text{CSR} = q_{\text{cyc}} / q_f \quad (1)$$

式中： q_{cyc} 为循环应力； q_f 为不排水三轴抗剪强度。

CSR 在本试验中的取值为 0.4、0.6 及 0.8，涵盖了之前提到的临界循环应力比的范围，循环加载形式为正弦函数，见图 1。

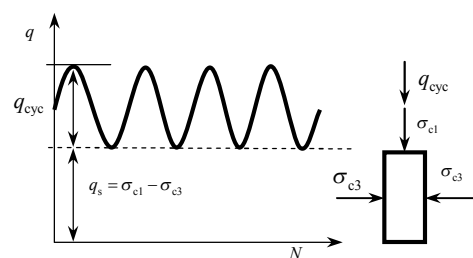


图 1 循环加载形式

Fig.1 Cyclic loading method

试验采用的加载频率为 0.1Hz、1Hz、2Hz 及 5Hz。表 2 给出了所有的不排水循环三轴试验条件，试验终止条件为试件破坏(轴向应变 $\varepsilon_a = 15\%$)或达到了预设的加载次数(对于 $f=1\text{Hz}$ 、 2Hz 及 5Hz ， $N=34466$ ，或对于 $f=0.1\text{Hz}$ ， $N=6000$)。

表 2 试验条件和结果

Table 2 Test conditions and results

试件编号	CSR	加载频率 f	N	加载时间 t	破坏否?
		Hz		min	
U ₀₁	0.4	0.1	6000	1000	否
U ₀₂	0.4	1	34466	574	否
U ₀₃	0.4	2	34466	287	否
U ₀₄	0.4	5	33466	112	否
U ₀₅	0.6	0.1	6000	1000	否
U ₀₆	0.6	1	34466	574	否
U ₀₇	0.6	2	34466	287	否
U ₀₈	0.6	5	34466	112	否
U ₀₉	0.8	0.1	1793	299	是
U ₁₀	0.8	1	10419	174	是
U ₁₁	0.8	2	18537	160	是
U ₁₂	0.8	5	33964	113	是

2 试验结果及分析

表 2 给出了部分试验结果，所有在循环应力比为 0.8 条件下测试的试件都破坏了，并且当加载频率从 0.1Hz 增长到 5Hz，试件从开始加载到破坏所经历的加载次数 ξ_1 从 1793 增长到 33964，这个结果符合 Andersen^[3]和 Takahashi 等^[17]得出的结论：加载频率越高，破坏所需的加载次数越多。另一方面，试件破坏经历的时间可以用 $t_f = N_f(1/f)$ 计算获得，如表 2 所示，当加载频率从 0.1Hz 增长到 5Hz， t_f 从 299min 减少到 113min。此外，当循环应力比为 0.4 或 0.6 时，无论加载频率为何值，试件的受力变形性能稳定，直到试验结束都没有出现破坏的迹象，由此可推断，临界循环应力比可确定在 0.6~0.8。图 2 给出了试验前及试验后(未破坏和破坏)试件的示意图，由图可知当固结应力水平较小时，软粘土试件的破坏形态是鼓胀，试件表面存在许多的破坏滑移面，这一现象与硬粘土和密实砂破坏时的形态十分不同，它们通常只有一个破坏滑移面。



(a) 试验前 (b) 试验后(未破坏) (c) 试验后(破坏)

图 2 试件示意图

Fig.2 The profile of the specimen

2.1 循环应力比的影响

图 3 给出了未破坏和破坏试件，U₀₆ 和 U₁₀ 的

孔隙水压力比(u/p'_{c0} ， p'_{c0} 为有效平均固结应力)和轴向应变(ϵ_a)的发展规律。两个试件的孔隙水压力除了数值不同之外，发展规律差异不大，都是在加载初期增长较快，随后减速增长并趋于稳定。试件 U₁₀ 在 $N=10000$ 时，孔隙水压力比值为 0.65，高于试件 U₀₆ 的数值 0.4。反观两个试件的轴向应变，除了试件 U₁₀ 在 $N=10000$ 时的轴向应变比试件 U₀₆ 更大(前者为 9%，后者为 0.7%)，两者的增长曲线形态也差异较大。在 $N < 1000$ 时，两个试件的轴向应变都有增长率逐渐减小的趋势，但当加载次数达到了 8000 次时，试件 U₁₀ 的轴向应变增长率突然增大，轴向应变迅速增长，预示着试件的破坏。

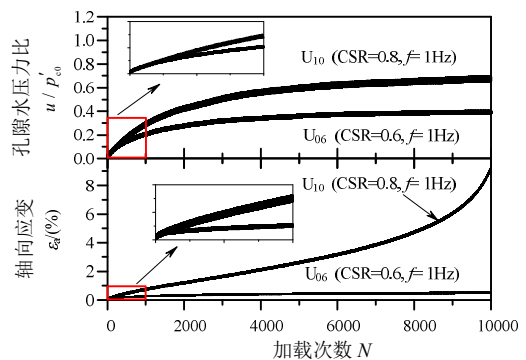


图 3 孔隙水压力比和轴向应变的变化曲线

Fig.3 History of excess pore water pressures and axial strains

为了描述孔隙水压力(在每个加载循环 $q = q_s + q_{cyc}$ 时测量所得)和循环加载次数之间的关系，Sakai 等^[18]提出了以下公式：

$$\frac{u}{u_f} = \frac{4}{\pi} \arctan \left[\left(\frac{N}{N_f} \right)^{(1/\alpha)} \right] \quad (2)$$

式中： u_f 为试件破坏时的孔隙水压力，大致为 $0.65 p'_{c0}$ ； $\alpha = 4.26$ 为试验参数。此外孔隙水压力和轴向应变之间的关系也可由下式表示：

$$\frac{u}{u_f} = \ln[1 + \beta(\epsilon_a / \epsilon_{af})] / \ln(1 + \beta) \quad (3)$$

式中： ϵ_{af} 是试件破坏时的轴向应变，在本文中 $\epsilon_{af} = 15\%$ ； $\beta = 2.31$ 为试验参数。运用式(2)和式(3)，可以得到孔隙水压力比和轴向应变随加载次数变化的曲线，如图 4 所示，对于没有破坏的试件， u_f 、 ϵ_{af} 和 N_f 的值用试验结束时的值来代替。

2.2 加载频率的影响

图 5 给出了加载频率对孔隙水压力比和轴向应变随加载次数变化的影响。当循环应力比为 CSR = 0.4 和 0.6 时，见图 5(a)、图 5(c)，加载频率较小的试件在加载初期($N < 5000$)的孔隙水压力比值增长

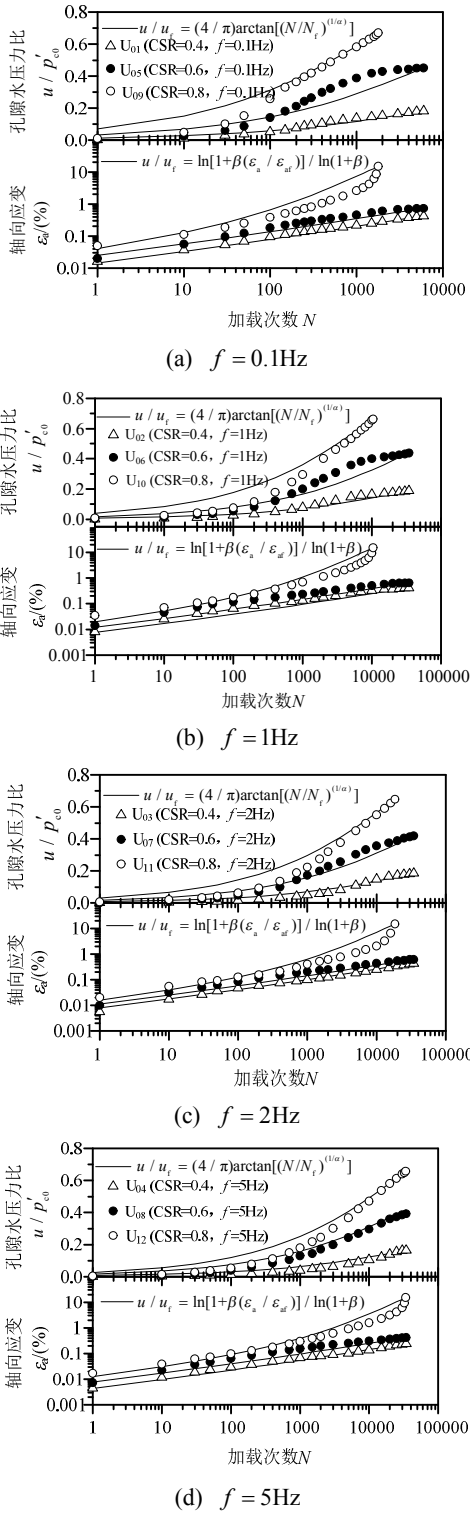


图4 孔隙水压力比和轴向应变的实测与拟合结果

Fig.4 Predicted and measured data of normalized excess pore water pressures and axial strains

较快,且在经历较少加载次数后便能进入之后的稳定发展阶段。当循环应力比为 CSR=0.8 时,见图 5(c),加载频率较小的试件的孔隙水压力增长非常迅速,只需较少加载次数试件就破坏了,另外,孔隙水压力比的增长基本上只有一个阶段,也就是

初期的较快增长阶段,这是因为在进入稳定发展阶段以前,孔隙水压力比值已经大到足够引起试件的破坏,由图 5(c)可知,当 $u/p'_{c0} = 0.5$, 轴向应变开始加速增长,预示着试件已破坏不能再承受循环荷载。试件在 CSR=0.4 和 0.6 时的轴向应变与孔隙水压力比有着相似的发展规律,当循环应力比从 0.6 增长到 0.8 时,轴向应变的增长率从降低转变为升高,试件结构已软化破坏。

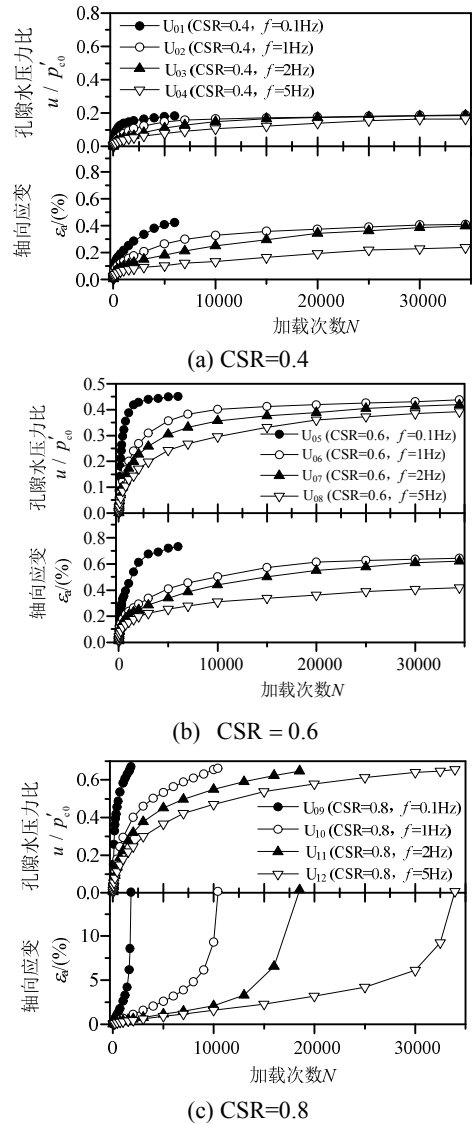


图5 孔隙水压力比和轴向应变随加载次数的变化曲线

Fig.5 Normalized excess pore water pressures and axial strains against the number of cycles

已有的试验结果分析多是基于相同循环加载次数的,但工程实际中一般是基于一段运营时间的,因此有必要把图 5 的横坐标改为加载时间再次分析。如图 6 所示,当 CSR=0.4 或 0.6,孔隙水压力比和轴向应变的数据基本重合,并不随加载频率变化而变,说明当循环应力比小于临界值,频率对

软粘土特性的影响很小。一旦循环应力比大于临界值,图 6(c),随着加载频率的增长,孔隙水压力比和轴向应变加速增长,并且破坏用时减少。

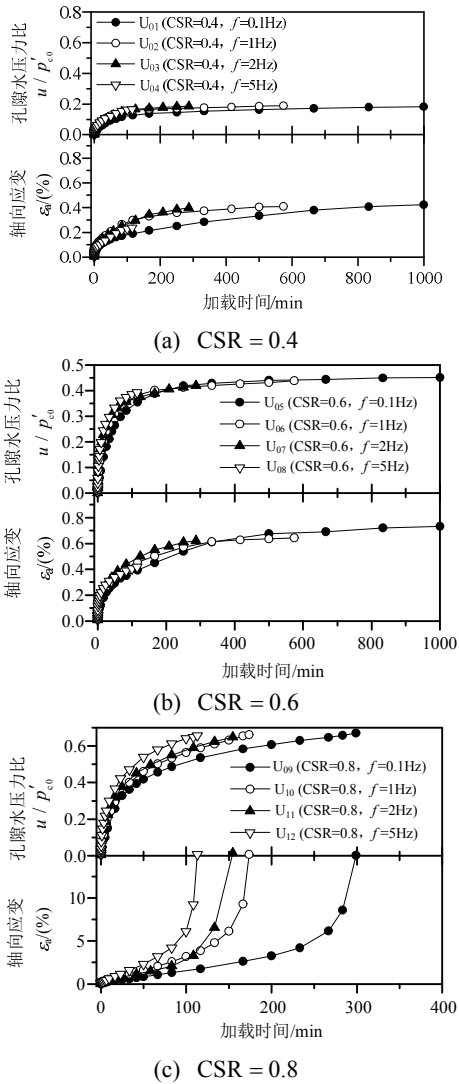


图 6 孔隙水压力比和轴向应变随加载时间的变化曲线
 Fig.6 Normalized excess pore water pressures and axial strains against time

2.3 应力控制循环三轴试验中的应变速率

如上所述,在相同循环加载时间内,加载频率对于软粘土的力学特性影响不大,特别是当循环应力比值较小的时候,另一方面循环应力比决定了试件孔隙水压力比和轴向应变的发展规律,与加载频率无关。因此便产生了这样的问题,是什么机理导致了这个结果?循环应力水平和加载频率的耦合作用究竟是怎样的?

为了回答这个问题,本文作者从加载速率入手研究分析了荷载水平和加载频率的耦合作用。通常加载速率的控制可以分为应力控制和应变控制,本次试验为应力控制的不排水循环三轴试验,因此应

力速率可以直接从试验条件得出:

$$\dot{q}_{cyc} = 2q_{cyc}f \quad (4)$$

值得注意的是,在应用式(4)进行计算时,实际每一次循环加载过程中的加、减速都被忽略了,并且应力速率在整个加载过程中被假设为是不变的。以 U_{01} 和 U_{04} 为例,前者 and 后者的应力速率比为 1 : 50,但这两个试件的受力特性相似,因此应力速率并不能解释试验现象。那么应变速率是否可以给出一个合理的解释呢?此前,很多研究人员^[19-21]发现在静荷载试验中,孔隙水压力的增长及不排水抗剪强度的大小与应变控制加载时的应变速率紧密相关。然而有关在应力控制循环三轴试验中的应变速率问题还没有得到很好的理解,仅有的结论可以参见 Lefebvre 和 LeBoeuf^[22] 以及 Lefebvre 和 Pfendler^[23] 的研究成果,但是他们在试验中只用了 0.1Hz 这一个加载频率,因此并没有能够给出应变速率随加载频率变化的规律。

在本文中,为了计算应变速率,仍然假定在每一次循环加载过程中应变速率是恒定的,应变速率 ($\dot{\epsilon}_{aL,c}$) 可以由下式计算获得:

$$\dot{\epsilon}_{aL,c} = 2 \times \epsilon_{a,cyc} \times f \quad (5)$$

式中, $\epsilon_{a,cyc}$ 为半个循环周期中的应变,也就是轴向应力从最小值增长到最大值期间的应变变化量。表 3 给出了由试验结果计算所得对应于不同加载次数时每一种加载情况下的应变速率。由表 3 可知,应变速率基本上不随加载次数增长而变,因此对应于每一种加载情况的应变速率平均值也被计算并列列表 3 中。

表 3 循环三轴试验中的应变速率
 Table 3 Strain rate for cyclic triaxial tests

应变速率 $\dot{\epsilon}_{aL,c}$ / (%/h)							
N	CSR($f=0.1$ Hz)			N	CSR($f=1$ Hz)		
	0.4	0.6	0.8		0.4	0.6	0.8
150	178	287	578	1500	199	250	513
500	185	290	580	5000	198	260	574
1000	186	282	585	10000	192	256	564
3000	186	265		30000	198	240	
6000	120	270					
平均值	171	278	581	平均值	192	251	550
N	CSR($f=2$ Hz)			N	CSR($f=5$ Hz)		
	0.4	0.6	0.8		0.4	0.6	0.8
1500	172	274	532	1500	216	291	566
5000	167	255	548	5000	220	291	575
10000	163	296	527	10000	217	288	572
30000	165	290		30000	217	289	580
平均值	167	279	536	平均值	218	290	573

图 7 给出了应变速率与循环应力比的对应关系，由图可知应变速率随着循环应力比的增长而增长，而且增长的幅度与循环应力比值有关，例如，当循环应力比从 0.4 增长到 0.6 时，应变速率增长了 100%/h，然而当循环应力比从 0.6 增长到 0.8 时，应变速率增长了 300%/h，这个迅速增长的应变速率揭示了在较高的循环应力比值下，试件抵御循环荷载的能力大幅度减弱，同时也证实了之前的结论，即当循环应力比较大时，如 CSR = 0.8，试件会破坏。值得注意的是，图 7 中不同加载频率的曲线非常接近，因此可以得出这样的结论：加载频率与应变速率无关。

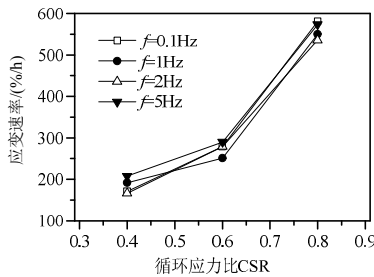


图 7 应变速率与循环应力比的关系

Fig.7 The relationship between strain rates and cyclic stress ratios

孔隙水压力比及轴向应变与应变速率之间的关系(当 $t = 100 \text{ min}$ 时)分别示于图 8 和图 9。由

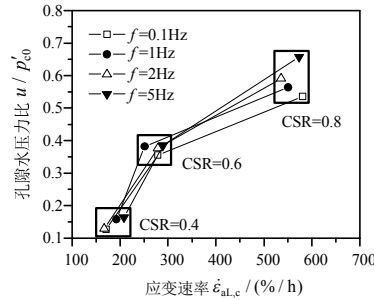


图 8 孔隙水压力比和应变速率的关系

Fig.8 The relationship between normalised excess pore pressures and strain rates

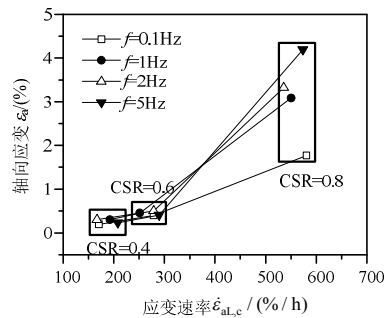


图 9 轴向应变和应变速率的关系

Fig.9 The relationship between axial strains and strain rates

图可知，应变速率越大，孔隙水压力比和轴向应变也越大，鉴于应变速率只与循环应力比有关而与加载频率无关，因此孔隙水压力比和轴向应变随着循环应力比的增大而增大，而与加载频率无关，从而解释了之前的试验现象。

3 结论

本文通过对软粘土进行一系列不排水循环三轴试验，研究了循环应力水平与加载频率对软粘土力学特性的影响，得到了以下结论：

(1) 无论加载频率为何数值，只有在循环应力比为 0.8 条件下测试的试件遭到破坏，因此临界循环应力比可以认为在 0.6~0.8。当加载频率从 0.1Hz 增长到 5Hz，试件破坏时所经历的加载次数 ξ_1 从 1793 增长到 33964，但破坏时经历的时间 t_f 从 299min 减少到 113min。

(2) 在进行加载频率对软粘土力学特性的影响研究时，若分析的前提是相同加载次数，那么加载频率只关系到高循环应力比下的试件经历多少次循环荷载后会破坏，或低应力比下的试件经历多少次循环荷载后进入稳定发展阶段。若分析的前提是相同加载时间，那么无论是孔隙水压力比还是轴向应变的变化发展在低循环应力比时，与加载频率无关，在高循环应力比时稍有差异，频率越高，孔隙水压力比和轴向应变增长越快，破坏发生越早。

(3) 研究探讨了应力控制循环三轴试验中的应变速率问题，并发现应变速率是导致软粘土在不同加载条件下力学特性不同的原因。从试验结果计算得到应变速率越大，孔隙水压力比和轴向应变也越大，由于应变速率只与循环应力比有关而与加载频率无关，因此孔隙水压力比和轴向应变随着循环应力比的增大而增大，而与加载频率无关，因此认为循环应力水平比加载频率更为重要。

参考文献：

[1] 殷杰. 结构性软黏土的修正剑桥模型[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 190—197.
Yin Jie. A modified Cam Clay Model for saturated soft clays [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 190—197. (in Chinese)

[2] Li D Q, Selig E T. Cumulative plastic deformation for fine grained subgrade soils [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(12): 1006—1013.

[3] Andersen K H. Bearing capacity under cyclic loading – offshore, along the coast, and on land. The 21th Bjerrum

- Lecture presented in Oslo, 23 November 2007 [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, 46(5): 513—535.
- [4] Indraratna B, Rujikiatkamjorn C, Ewers B, Adams M. Class A prediction of the behavior of soft estuarine soil foundation stabilized by short vertical drains beneath a rail track [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(5): 686—696.
- [5] Ni J, Indraratna B, Geng X Y, Carter J P, Rujikiatkamjorn C. Radial consolidation of soft soil under cyclic loads [J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, 50: 1—5.
- [6] 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 Maosong, Yao Zhaoming. Explicit model for cumulative strain of saturated clay subjected to cyclic load [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(3): 325—331. (in Chinese)
- [7] Larew H G, Leonards G A. A strength criterion for repeated loads [J]. *Highway Research Board Proceedings*, 1962, 41: 529—556.
- [8] Sangrey D A, Henkel D J, Esrig M I. The effective stress response of a saturated clay soil to repeated loading [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1969, 6: 241—252.
- [9] Brown S F, Lashine A K F, Hyde A F L. Repeated load triaxial testing of silty clay [J]. *Geotechnique*, 1975, 25(1): 95—114.
- [10] France J W, Sangrey D A. Effects of drainage in repeated loading of clays [J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 1977, 103(GT7): 769—785.
- [11] Ausal A M, Erken A. Undrained behavior of clay under cyclic shear stresses [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, 115(7): 968—983.
- [12] 周建, 龚晓南. 循环荷载作用下饱和软粘土应变软化研究[J]. *土木工程学报*, 2000, 33(5): 75—79.
Zhou Jian, Gong Xiaonan. Strain degradation of saturated clay under cyclic loading [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2000, 33(5): 75—79. (in Chinese)
- [13] Pillai R J, Robinson R G, Boominathan A. Effect of microfabric on undrained static and cyclic behaviour of kaolin clay [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(4): 421—429.
- [14] Gibson R E. An analysis of system flexibility and its effect on time-lag in pore-water pressure measurements [J]. *Geotechnique*, 1963, 13(1): 1—11.
- [15] 唐益群, 黄雨, 叶为民, 王艳玲. 地铁列车荷载作用下隧道周围土体的临界动应力比和动应变分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(9): 1566—1570.
Tang Yiqun, Huang Yu, Ye Weimin, Wang Yanling. Critical dynamic stress ratio and dynamic strain analysis of soils around the tunnel under subway train loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(9): 1566—1570. (in Chinese)
- [16] Liu J K, Xiao J H. Experimental study on the stability of railroad silt subgrade with increasing train speed [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(6): 833—841.
- [17] Takahashi M, Hight D W, Vaughan P R. Effective stress changes observed during undrained cyclic triaxial tests on clay [C]// *International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading*, Swansea, 7-11 January. Balkema Publications, Rotterdam: The Netherlands 1980: 201—209.
- [18] Sakai A, Samang L, Miura N. Behaviour of soft soils under undrained cyclic loading with initial shear stress [J]. *Geotechnical Engineering*, 1996, 27(2): 1—22.
- [19] Richardson J M, Whitman R V. Effect of strain-rate upon undrained shear resistance of a saturated remolded fat clay [J]. *Geotechnique*, 1963, 13(4): 310—324.
- [20] Crooks J H A, Graham J. Geotechnical properties of Belfast estuarine deposits [J]. *Geotechnique*, 1976, 26(2): 293—315.
- [21] Graham J, Crooks J H A, Bell A L. Time effects on the stress-strain behavior of soft natural clays [J]. *Geotechnique*, 1983, 33(3): 327—340.
- [22] Lefebvre G, LeBoeuf D. Rate effects and cyclic loading of sensitive clay s [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1987, 113(5): 476—489.
- [23] Lefebvre G, Pfendler P. Strain rate and preshear effects in cyclic resistance of soft clay [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122(1): 21—26.