

# 循环荷载作用下结构性软土微结构演化特性 试验研究

杨爱武<sup>1, 2</sup>, 苟乐宇<sup>1, 2</sup>, 张振东<sup>1, 2</sup>

(1. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384, 2. 天津城建大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384)

**摘要:** 为探讨动荷载作用下结构性软土微结构演化特征, 对天津滨海新区典型结构性软土进行动力三轴试验, 并对特定循环振次下土样进行微结构制样及电镜扫描, 重点研究不同动应力比、不同振次以及不同围压下, 循环荷载作用对软土微结构演化的影响。试验与测试结果表明: 随动应力比、振次以及围压的增加, 颗粒数量和孔隙数量增加, 而颗粒等效直径、颗粒形态比、孔隙等效直径、孔隙形态比减小。当动应力幅值小于临界幅值时, 微观结构随振次增加很快趋于稳定, 当动应力幅值大于或等于临界幅值时, 微观结构随振次增加持续处于变化中。循环荷载作用过程中, 当围压分别在土体固结结构屈服应力前后取值时, 微观结构参数值存在明显变化, 不同微结构参数值与振次均呈对数关系, 相关性较好。

**关键词:** 土力学; 结构性; 软土; 长期动荷载; 微观参数; 演化特性

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2017)01 - 0234 - 09

## Experimental research on microstructure characteristics of structural soft clays under cyclic loading

YANG Aiwu<sup>1, 2</sup>, GOU Leyu<sup>1, 2</sup>, ZHANG Zhendong<sup>1, 2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Key Laboratory of Soft Soil Engineering Characteristics and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** Dynamic triaxial tests are performed for typical soft clays from Binhai New District in Tianjin to study the microstructure characteristics of structural clays under dynamic loads. Soil samples after the specific numbers of loading cycles are sliced and scanned with SEM. The research focuses on the effects of different cyclic stress ratios, the number of cycles and the cell pressures on the microstructure variation of soft clays. The test results show that the numbers of particles and pores increase with the increase of cyclic stress ratio, the number of cycles and the cell pressure, and on the contrary, the equivalent diameter and the shape ratio of particles and pores decrease. The microstructure tends to be stable with the increase of the number of cycles when the cyclic stress amplitude is less than a critical value. However, the microstructure changes constantly with the increase of the number of cycles when the cyclic stress amplitude is greater than or equal to the critical amplitude. Microstructure parameter values have obvious changes during the cyclic loading when the cell pressure is around the consolidation yield stress. Different microstructure parameter values change with the number of cycles logarithmically with good correlation.

**收稿日期:** 2016 - 03 - 29; **修回日期:** 2016 - 06 - 23

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41372291); 天津市科技计划项目(15JCZDJC40600, 15ZCZDSF00220)

Supported by the National Nature Science Fund of China(Grant No. 41372291) and Program of Tianjin Science and Technology plan(Grant Nos. 15JCZDJC40600 and 15ZCZDSF00220)

**作者简介:** 杨爱武(1971 -), 男, 博士, 1994年毕业于长安大学(原西安地质学院)水文地质工程地质专业, 现任教授, 主要从事软黏土力学特性及土体微观结构方面的教学与研究。E-mail: tulilab@163.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0285

**Key words:** soil mechanics; structure characteristics; soft soil; long-term dynamic load; microscopic parameters; evolution characteristics

## 1 引言

目前对循环荷载作用下土体动力特性的研究已取得了一定的成果<sup>[1-3]</sup>。在宏观力学特性方面, 周建等<sup>[4-5]</sup>分析了循环应力比、加荷周数、频率及超固结比对循环荷载作用下, 杭州正常固结饱和软黏土应变和孔压的影响; 杨超等<sup>[6]</sup>针对软黏土在循环荷载作用下的变形特性, 建立了软黏土的黏弹塑性动力本构模型; 张茹等<sup>[7]</sup>通过动三轴试验研究了振动频率  $f$  对黏性土的动强度、动弹模的影响; 王军和蔡袁强<sup>[8]</sup>通过循环三轴试验认为, 软化指数随动应力比的增加而增加, 当循环应力比较小时, 软化指数随固结比的增加而减小; 张勇等<sup>[9]</sup>研究了循环周次和动应力幅值对土体动力特性的影响, 提出更切合实际的含动应力幅值、固结围压和循环周次等影响因素的动骨干曲线模型; 魏新江等<sup>[10]</sup>通过室内动三轴试验, 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; 郑刚等<sup>[11]</sup>通过对天津典型粉质黏土的一系列动、静力三轴试验, 认为循环荷载作用后, 原状土的不排水抗剪强度有所衰减; 蒋军<sup>[12]</sup>对饱和软黏土应变速率进行研究, 认为超固结黏土的应变速率衰减要比正常固结黏土慢。在微结构研究方面也取得了一些成果, 唐益群等<sup>[13-14]</sup>对地铁荷载作用下饱和软黏土微观特性进行研究, 从微观角度解释了土体变形机制, 孔隙分形维数在隧道不同深度处的变化规律可以用不同的循环应力比  $CSR$  来体现。姜岩等<sup>[15]</sup>对交通荷载作用下结构性软土微观结构变化进行了研究, 用分形理论对压汞测试数据进行分析, 认为围压和结构屈服应力的大小关系决定了孔隙大小随频率增加的变化状况。曹洋等<sup>[16]</sup>以杭州原状软土为研究对象, 借助扫描电镜和 PCAS 微观定量测试技术, 采用分形理论对波浪荷载下的饱和软土微观结构进行研究, 探讨不同循环应力比和不同频率条件下孔隙的分布特征及其变化规律。

以上研究表明, 目前对循环荷载作用下土体动

力特性研究主要集中于土体力学特性研究, 其微结构演化虽有涉及, 但还相对较少, 因而开展此方面的研究具有重要的理论与实践意义。本文以天津滨海新区海积软土为试验材料, 通过一系列室内试验以及微结构测试分析, 从本质上揭示循环荷载作用下结构性软黏土微结构演化规律, 为动荷载作用下土体变形特性研究提供理论支持。

## 2 试验方案

### 2.1 土体基本性质

试样取自天津滨海新区临港工业区, 其基本物理力学性质如表 1 所示, 从表 1 可以看出, 天津滨海海积软土含水量高, 压缩性高, 属于典型的软土, 其单轴压缩试验结果如图 1 所示。

图 1 表明, 土体压缩曲线存在应力转折点, 即固结结构屈服应力点, 采用由 R. Butterfield<sup>[17]</sup>提出的  $\ln(1+e)-\lg p$  双对数坐标法来计算土体压缩固结结构屈服应力为 125 kPa。

### 2.2 试验方案

采用 GCTS 动静扭剪仪实现多振次循环荷载作用, 根据固结试验(见图 1)确定固结结构屈服应力 (125 kPa)。本试验设计小于、近似相等和大于固结结构屈服应力的 3 个围压, 即 50, 100, 200 kPa。实际工程中土体在振动条件下不允许发生破坏, 但为了研究振动条件下土体微结构演化特征及其破坏机制, 试验中需要将土体振坏(施加临界型动应力比的动荷载)。通过试验确定临界型动应力比为 0.25, 然后按递减规律设计试验总的动应力比(振幅与围压之比)为 0.05, 0.15, 0.25。再在临界型荷载的基础上施加 1~2 级荷载, 确保土体完全破坏, 其荷载增量大小与稳定型各级增幅一致。循环荷载中频率作为动载的主要特性之一, 对软黏土累计变形特性具有显著影响, 室内试验模拟交通动载的振动频率范围一般为 0.5~5.0 Hz, 结合 GCTS 动静扭剪仪自身工作性能, 本试验加载频率拟采用 1 Hz。试验方案如表 2 所示。

表 1 海积软土物理力学性质指标

Table 1 Physico-mechanical indices of marine soft soil

取样深度 $H/m$	含水量 $w/\%$	密度 $\rho'$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	相对密度 $G_s$	饱和度 $S_r/\%$	孔隙比 $e$	液限 $W_l$	塑限 $W_p$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	灵敏度 $S_t$	压缩模量 $E_{s1-2}/MPa$	结构屈服 应力/kPa
7.0~15.0	40.7	1.82	2.75	100	1.178	40.3	22.1	18.2	1.022	2.88	2.633	125

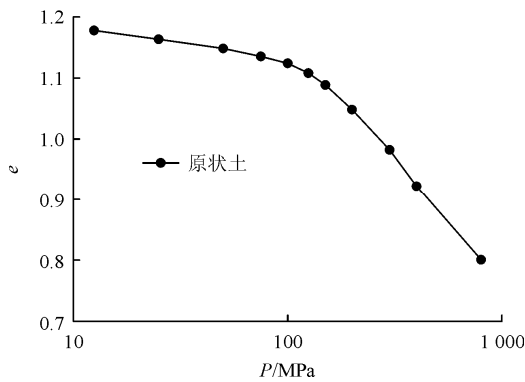


图1 压缩曲线

Fig.1 Compression curve of soil

表2 试验方案

Table 2 Test program

围压/kPa	频率/Hz	动应力比	振次
50, 100, 200	1	0.05, 0.15, 0.25	10 000

对土样分别进行循环动荷载试验,对试验中经历特定振次的土样进行微观结构制样。以往研究表明,每级振幅下动力累积变形在初始3~4 h(即10 000 s内)变形最大,后续基本稳定。因此微观结构取样也主要集中在此阶段,取样点振次为500,1 000,2 000,4 000,10 000,如图2所示。利用扫描电镜(德国产,型号1530VP)对试样进行2 000倍图像拍照,采用LeicaQwin500图像处理系统对微结构照片进行数值处理。

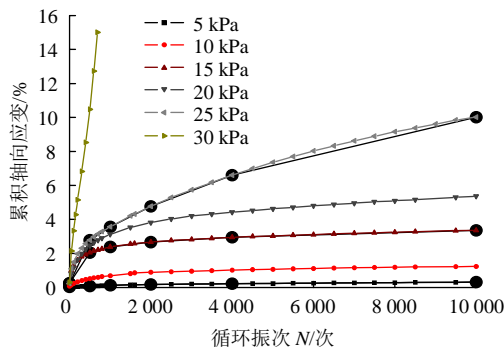
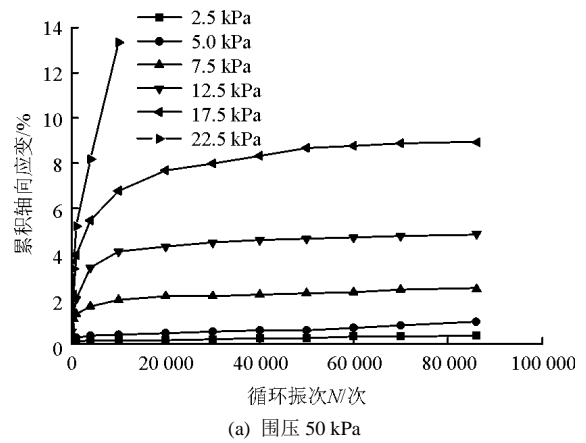


图2 取样点振次示意图

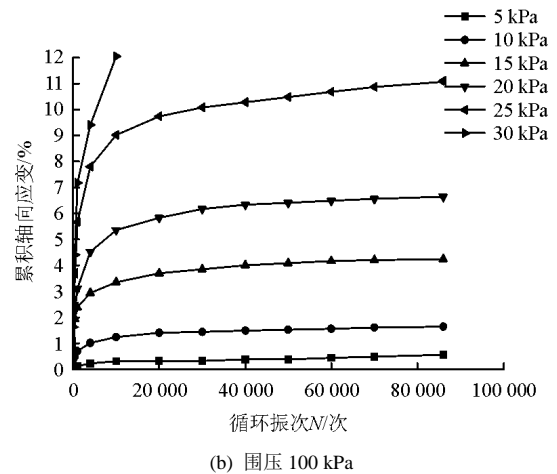
Fig.2 The diagram of sampling points

### 3 循环荷载试验

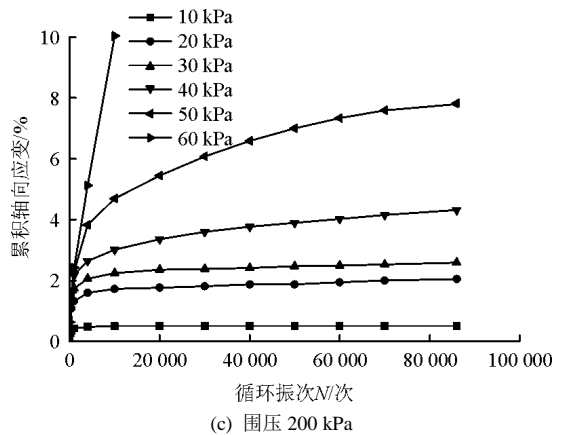
循环荷载作用下,饱和黏土存在临界循环应力(临界振幅),其定义为导致土体破坏的最小循环应力,唐益群等<sup>[18]</sup>的研究已证实了临界振幅的存在。确定临界循环应力的方法有多种<sup>[5, 8]</sup>,本文采用循环荷载试验得到直观的轴向累积应变与循环振次关系,确定临界振幅<sup>[19]</sup>。试验得到的不同围压下累积变形与振次关系如图3所示。



(a) 围压 50 kPa



(b) 围压 100 kPa



(c) 围压 200 kPa

图3 累积应变与振次的关系

Fig.3 Relationships between accumulative strain and loading frequency

由图3可以看出,试验土样存在临界振幅,且围压不同临界振幅大小不同。以围压100 kPa为例,当振幅小于25.0 kPa时,循环荷载作用初期轴向累积应变随振次增加迅速增加,当振次达到2 000时,轴向累积应变基本不随振次增加而增加,即累积应变趋于稳定,同样可知50 kPa围压下,小于12.5 kPa的动应力值均为稳定性振幅,200 kPa围压下,小于50 kPa的动应力值均为稳定性振幅,大于各围压最大稳定型幅值的振幅均为临界振幅。

### 4 微观结构试验结果与分析

#### 4.1 定性分析

对循环加载一定次数后的试样，在试样中间与其横截面呈 45° 角位置切取微观样品，将样品放在 -196 °C 液氮中进行速冻，速冻后再在冷冻真空干燥仪中真空干燥，使土中的非结晶冰直接升华，从而达到既干燥了土样又保持了其原始结构形态的目的，以样品竖直面作为电镜扫描观察面。

限于篇幅，本文选取 100 kPa 围压下不同动应力幅值不同振次循环荷载作用下典型 SEM 照片，如图 4 所示。

由图 4 可以看出，循环荷载作用前，土颗粒骨架排列比较混乱、松散，存在很多架空的结构，单元体之间多半以面 - 边、边 - 边的方式接触，颗粒

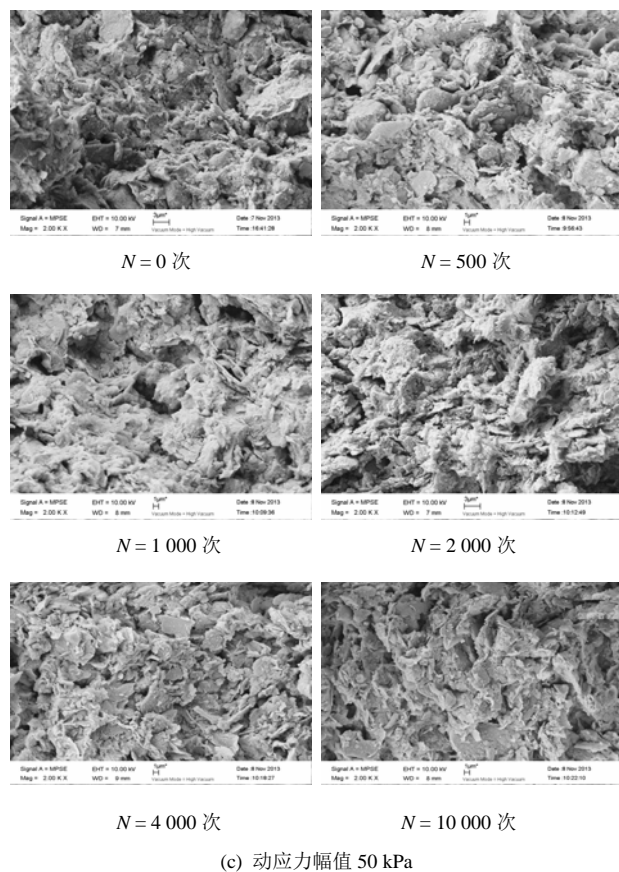
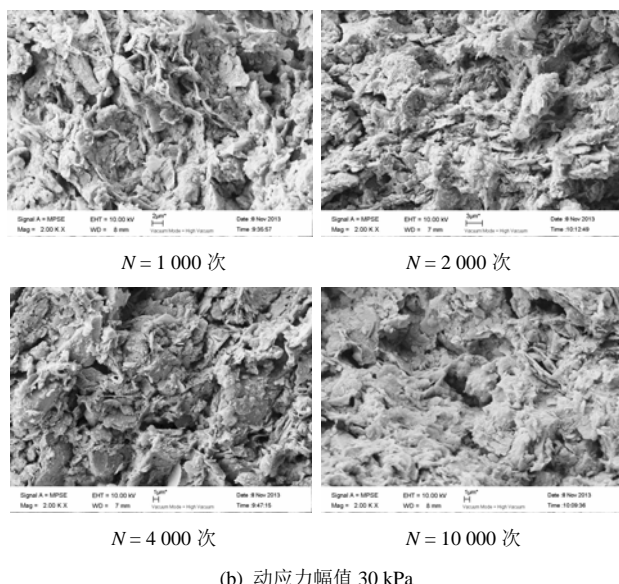
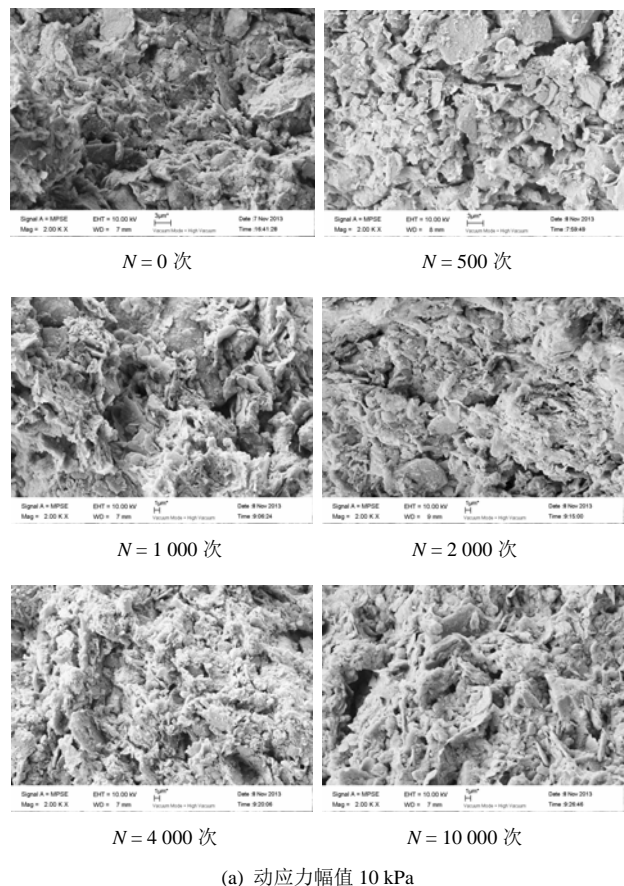


图 4 不同动应力幅值不同振次循环荷载作用下 SEM 照片  
Fig.4 The SEM photographs under different loading frequencies and different stress amplitude

的定向性不明显；孔隙存在的空间形式主要以团粒间孔隙和颗粒间孔隙为主，这也是结构性原状土的微观特征。

从图 4 还可以看出，稳定型振幅下，循环荷载作用初期(振次 < 2 000)，大孔隙明显减少，颗粒和孔隙逐渐破碎，颗粒之间相互靠拢、镶嵌逐渐变成

絮凝结构，即进入稳定阶段；临界型振幅下，大颗粒不断破碎成小颗粒，颗粒间连结更加紧密，出现定向排列趋势。

### 4.2 定量分析

对放大 2 000 倍 SEM 图像进行阈值处理，可以得到众多的软土微结构参数值，本文选取 6 个微结构参数(孔隙的数量、等效直径、形态比，颗粒的数量、等效直径、形态比)作为孔隙和颗粒变化的量化参数，从不同方面反映循环荷载作用下土体孔隙和颗粒大小形态与排列变化。

颗粒(孔隙)数量是指在一定视野范围内土颗粒(孔隙)的总数目，它从另一个侧面反映了颗粒(孔隙)的分布以及相互之间的关系。颗粒(孔隙)等效直径是指与颗粒(孔隙)面积相等的等效圆的直径。颗粒(孔隙)形态比(形态比=  $L/B$ ，其中， $L$ ， $B$  分别为颗粒的长轴和短轴的长度)作为微结构参数，主要表征颗粒的形态，形态比越大，孔隙越趋于长条形；形态比越接近 1，孔隙越接近圆形。

上述参数是通过对二值化图像的孔隙和颗粒识别、标记、边缘跟踪后完成对每个孔隙、颗粒的结构参数计算统计后得出的。微结构参数与振次的关系如图 5 所示。

由图 5 可看出，颗粒与孔隙数量起始值随围压和动应力幅值增大而增大，而颗粒与孔隙等效直径及形态比的起始值则呈相反趋势。这是因为围压、动应力幅值越大，作用在土体中的动剪应力就越大，

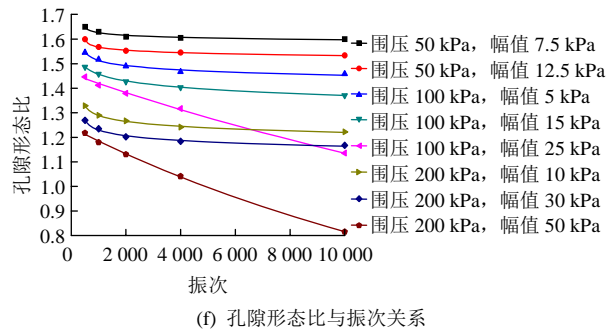
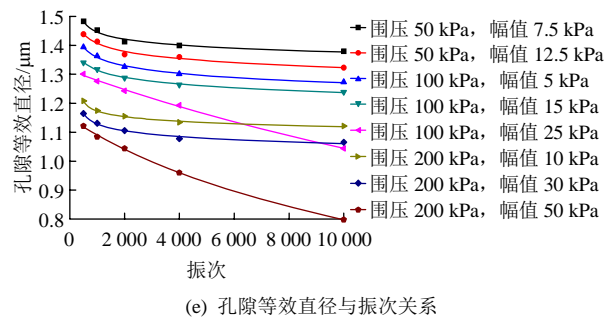
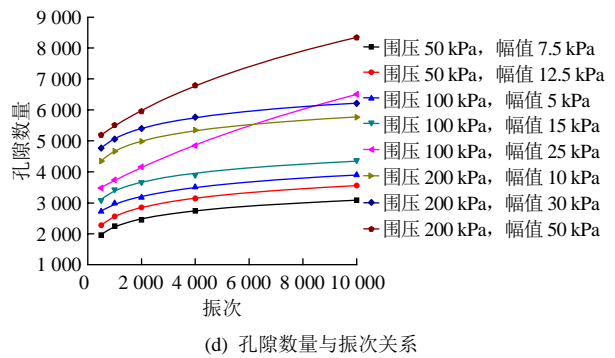
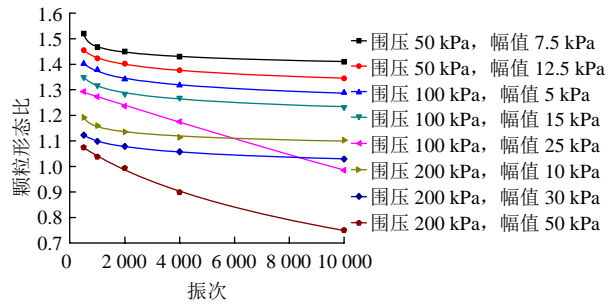
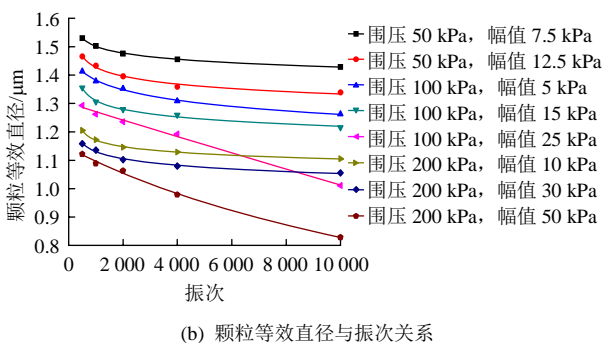
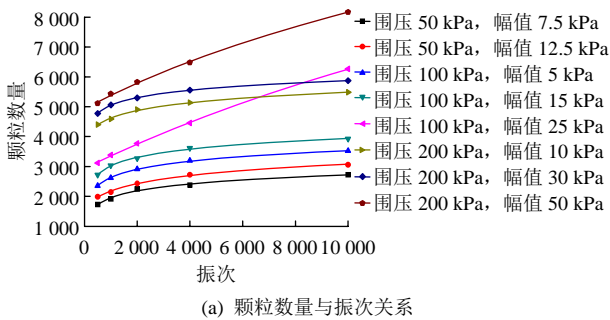


图 5 微结构参数与振次的关系

Fig.5 The relationship between microscopic parameters and loading frequency

荷载作用初期土体结构变化就越大，表现为颗粒与孔隙起始数量多，而其形态比和等效直径则呈相反的趋势。

图 5 还表明，孔隙数量、颗粒数量随围压、振次增加而增加，而孔隙等效直径、孔隙形态比、颗粒等效直径、颗粒形态比呈相反趋势。其次，当围压分别在固结结构屈服应力前、后取值时，对应微

结构参数值差异较大。再次，稳定型振幅下微观参数变化很快趋于稳定，而临界型振幅下微观参数永远属于变化中。上述现象的产生与土体结构变化有关。在循环剪应力作用下，土颗粒不断被破坏，大团粒破坏成小颗粒，颗粒数量增加；破碎的小颗粒不断填充到大孔隙中，使大孔隙数量减少，小孔隙数量增加，总孔隙数量增加。由于小孔隙数量增多，孔隙长轴和短轴长度不断接近，孔隙形态比不断减小。围压对微结构参数的影响体现在对初始结构的影响。当围压小于固结结构屈服应力(125 kPa)时，土体初始结构没有发生破坏，微结构参数发生微弱变化；当围压大于固结结构屈服应力(200 kPa)时，土体初始结构发生破坏，微结构参数发生剧烈变化。振幅的影响也是通过土体内部结构调整起作用，表现为稳定型振幅作用初期，土团粒破坏和小颗粒滑动占主导地位，微结构参数变化较大，随振次增加，土颗粒逐渐达到“最佳级配”，此时循环荷载的挤密作用占主导地位，各微结构参数逐渐趋于稳定。临界型振幅产生较大的剪应力也可以使土颗粒间连接力较强处发生断裂，大颗粒不断破坏成小颗粒，土中颗粒处于“级配不良”状态，此时破坏作用强于挤密作用对土体的影响，所以微参数始终处于变化中，永远达不到稳定状态。

对图 5 中微结构参数与振次关系进行拟合，如下式所示：

$$Y = a + b \ln N(1)$$

式中：Y 表示各微观参数值；N 为振次；a、b 为参数，拟合参数值见表 3。

由表 3 可以看出，各微观结构参数与振次均呈

对数关系，可以用同一拟合函数来表达，拟合相关系数均大于 0.9，相关性较好。

在循环动荷载作用下，土体微结构参数变化与循环应力比密切相关。限于篇幅，本文仅列出围压 100, 200 kPa，动应力比  $R = 0.05, 0.15, 0.25$  情况下微结构参数与动应力比关系，具体如图 6, 7 所示。

图 6, 7 表明，孔隙数量、颗粒数量随动应力比的增大而增加，随振次增加，增大趋势更为明显。孔隙等效直径、孔隙形态比、颗粒等效直径、颗粒形态比随动应力比的增大而减小，随振次的增加，其数值减小的趋势更明显。主要是因为动剪应力作用在土体上，会使土中颗粒产生位移和转向，动剪应力越大，产生的这种趋势越大，当该剪应力大于土体剪切结构屈服应力(土体强度包线转折点对应的剪应力)时，颗粒将发生破坏和滑移，大颗粒破碎成小颗粒，小颗粒填充到孔隙中，颗粒和孔隙的形状在循环剪应力作用下变得圆润。动应力比为 0.25 的循环荷载使颗粒产生的剪应力最大，远大于土体剪切结构屈服应力，所以其微结构产生的变化最大；动应力比 0.15 其次；动应力比 0.05 结构变化最小。

## 5 结 论

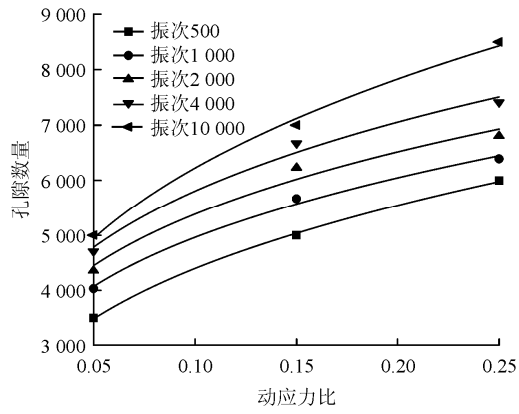
(1) 循环荷载作用下，动应力比、围压、振次对土体微观参数的影响一致，即随振次、动应力比、围压的增加，孔隙与颗粒数量增加，但孔隙与颗粒等效直径及其形态比减小。

(2) 稳定型振幅下微观参数变化很快趋于稳定，

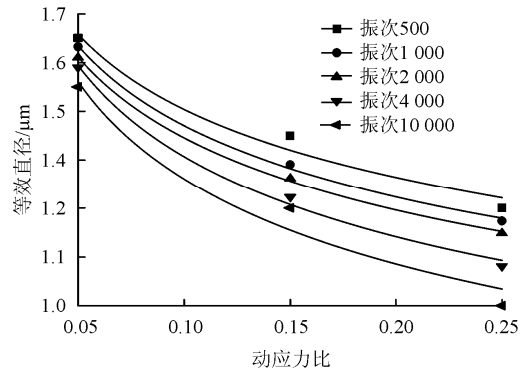
表 3 拟合参数值

Table 3 Parameters of fitting function

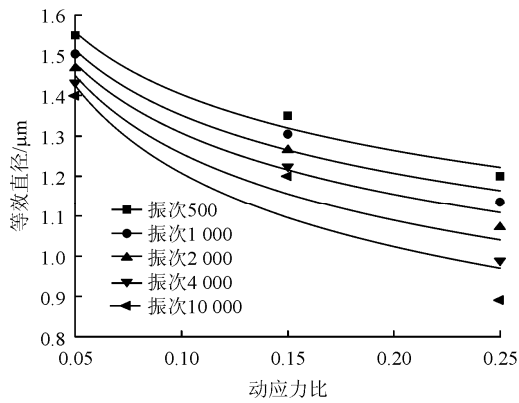
围压/ kPa	幅值/ kPa	颗粒数量			颗粒等效直径			颗粒形态比			孔隙数量			孔隙等效直径			孔隙形态比		
		a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
50	7.5	-213	345	0.965	1.918	-0.07	0.916	1.735	-0.04	0.958	-925.0	537	0.967	1.692	-0.04	0.951	1.746	-0.02	0.879
	12.5	764	415	0.972	1.178	-0.06	0.913	1.642	-0.04	0.970	1748.0	327	0.981	1.683	-0.05	0.971	1.496	-0.02	0.879
100	5.0	-1027	501	0.959	1.684	-0.04	0.851	1.759	-0.05	0.981	-1265.0	618	0.979	1.493	-0.03	0.976	1.700	-0.04	0.967
	15.0	564	421	0.978	1.650	-0.05	0.923	1.581	-0.04	0.960	834.0	452	0.967	1.398	-0.03	0.982	1.559	-0.03	0.983
	25.0	-2781	1001	0.978	1.861	-0.10	0.984	1.861	-0.12	0.937	-176.0	716	0.990	1.642	-0.08	0.961	2.070	-0.12	0.967
200	10.0	-628	403	0.998	1.774	-0.05	0.988	1.734	-0.04	0.961	28.7	404	0.984	1.796	-0.06	0.903	1.635	-0.04	0.969
	30.0	225	328	0.983	1.567	-0.03	0.971	1.619	-0.04	0.961	617.0	354	0.993	1.546	-0.03	0.976	1.635	-0.04	0.970
	50.0	-2301	979	0.953	1.769	-0.09	0.996	1.873	-0.13	0.972	507.0	677	0.955	1.585	-0.07	0.975	1.995	-0.12	0.995



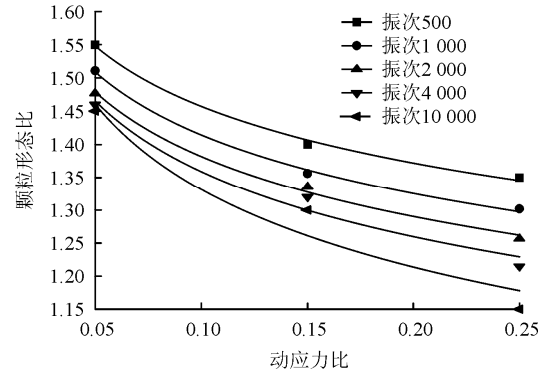
(a) 孔隙数量与动应力比



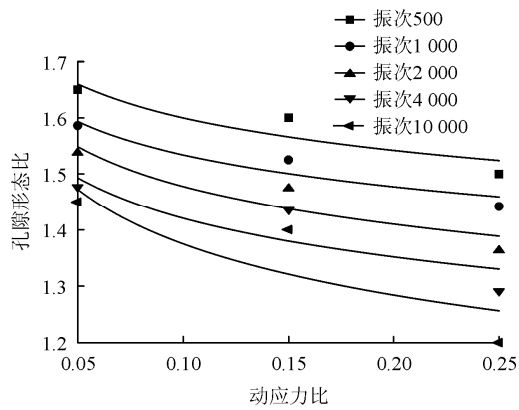
(e) 颗粒等效直径与动应力比



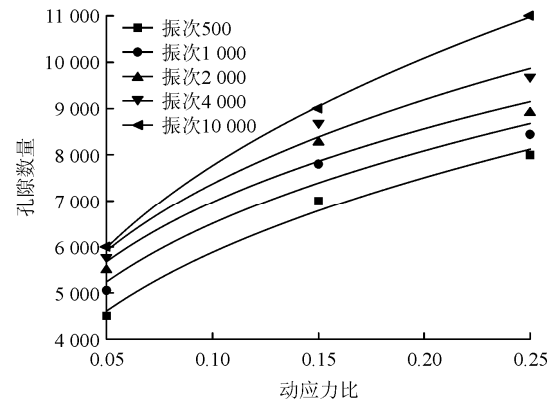
(b) 孔隙等效直径与动应力比



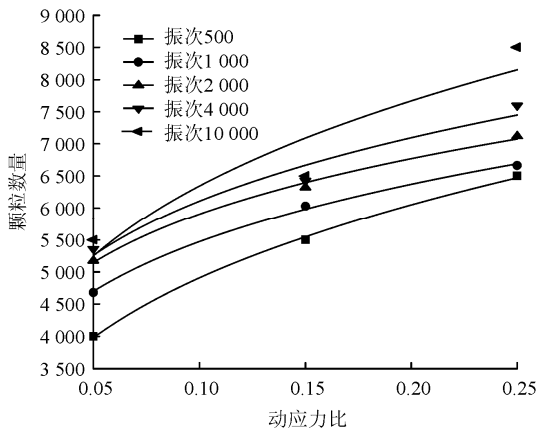
(f) 颗粒形态比与动应力比



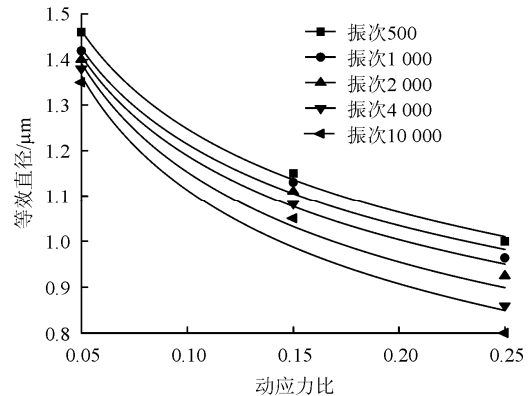
(c) 孔隙形态比与动应力比



(a) 孔隙数量与动应力比



(d) 颗粒数量与动应力比



(b) 孔隙等效直径与动应力比

图6 100 kPa 围压下微结构参数与动应力比的关系  
Fig.6 Relationships between microscopic parameters and dynamic stress ratio under confining pressure of 100 kPa

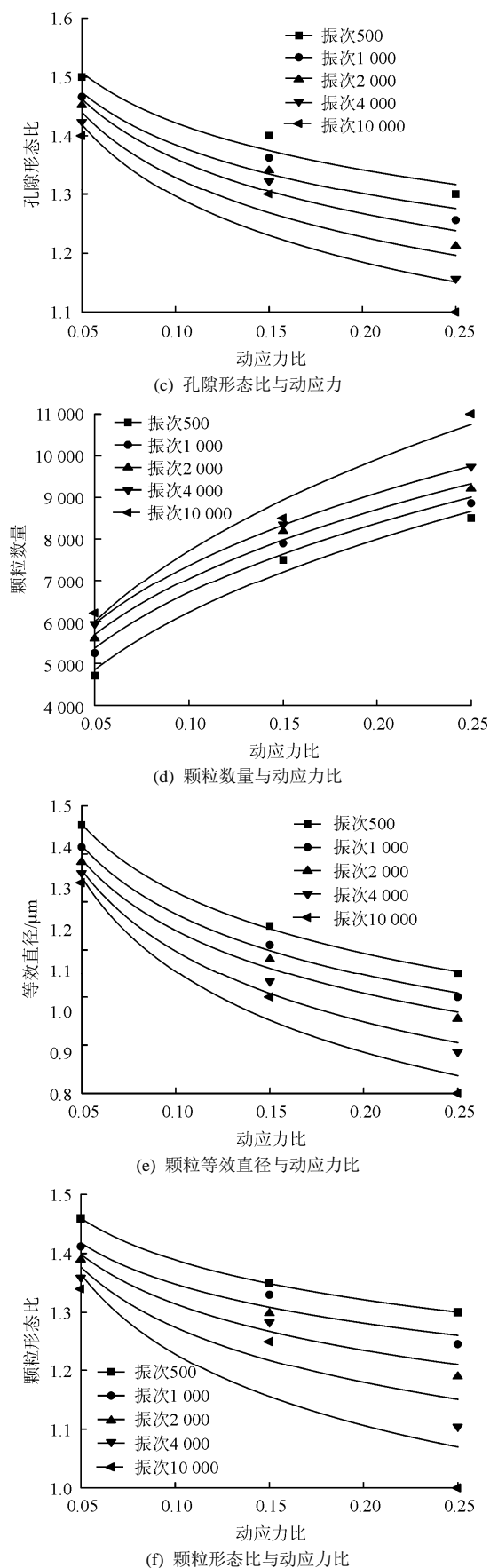


图 7 200 kPa 围压下微结构参数与动应力比的关系  
 Fig.7 Relationships between microscopic parameters and dynamic stress ratio under confining pressure of 200 kPa

临界型振幅下微观参数变化一直处于不稳定状态。

(3) 循环荷载作用下围压对微观结构参数影响表现为，当围压分别在结构屈服应力前后取值时，对应微观结构参数数值差异较大，即存在明显界限。

(4) 微观结构参数值与循环振次均呈对数关系，相关性较好。

参考文献(References):

[1] ALLEN J J. The effects of non-constant lateral pressures on the resilient response of granular materials[Ph. D. Thesis][D]. USA : University of Illinois At Urbana-Champaign, 1973.

[2] LAU JS O. Repeated load testing of a granular material[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1974, 100(GT7): 825 - 841

[3] MONISMITH C L , OGAWA N , FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J]. Transport Research Record, 1975, 537: 1 - 17.

[4] 周 建. 循环荷载作用下饱和和软粘土的孔压模型[J]. 工程勘察, 2000, 28(4): 7 - 9.(ZHOU Jian. Pore water pressure model of saturated soft clay under cyclic loading[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2000, 28(4): 7 - 9.(in Chinese))

[5] 周 建, 龚晓南, 李剑强. 循环荷载作用下饱和和软粘土特性试验研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(11): 43 - 47.(ZHOU Jian, GONG Xiaonan, LI Jianqiang. Experimental study of saturated soft clay under cyclic loading[J]. Industrial Construction, 2000, 30(11): 43 - 47.(in Chinese))

[6] 杨 超, 杨林德, 季倩倩. 软黏土在循环荷载作用下动力本构模型的研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 609 - 614.(YANG Chao, YANG Linde, JI Qianqian. Study on dynamic constitutive model of soft soils under cyclic load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(4): 609 - 614.(in Chinese))

[7] 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.(in Chinese))

[8] 王 军, 蔡袁强. 循环荷载作用下饱和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 accumulative plastic strain model of soft clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 331 - 338.(in Chinese))

[9] 张 勇, 孔令伟, 李雄威. 循环荷载下饱和和软黏土的动骨干曲线模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1 699 - 1 704.(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): 1 699 - 1 704, 1 708.(in Chinese))
- [10] 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(增 2): 675 - 679.(WEI Xinjiang, ZHANG Tao, DING Zhi, et al. Experimental study on stiffness change of saturated soft clay with different degrees of consolidation under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Supp.2): 675 - 679.(in Chinese))
- [11] 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 Haifeng, LEI Huayang. 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))
- [12] 蒋军. 循环荷载作用下黏土应变速率试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 528 - 531.(JIANG Jun. Study on the strain rate of clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 528 - 531.(in Chinese))
- [13] 唐益群, 张曦, 周念清, 等. 地铁振动荷载作用下饱和软黏土性状微观研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(5): 626 - 630.(TANG Yiqun, ZHANG Xi, ZHOU Nianqing, et al. Microscopic study of saturated soft clays behavior under cycle loading[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(5): 626 - 630.(in Chinese))
- [14] 唐益群, 张曦, 赵书凯, 等. 地铁振动荷载作用下隧道周围饱和软黏土分形研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(11): 86 - 91.(TANG Yiqun, ZHANG Xi, ZHAO Shukai, et al. A study on the fractals of saturated soft clay surrounding subway tunnels under dynamic loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(11): 86 - 91.(in Chinese))
- [15] 姜岩, 雷华阳, 郑刚, 等. 动荷载作用下结构性软土微结构变化的分形研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3 075 - 3 080.(JIANG Yan, LEI Huayang, ZHENG Gang, et al. Fractal study of microstructure variation of structured clays under dynamic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3 075 - 3 080.(in Chinese))
- [16] 曹洋, 周建, 严佳佳. 考虑循环应力比和频率影响的动荷载下软土微观结构研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 735 - 743.(CAO Yang, ZHOU Jian, YAN Jiajia. Micro structural study on soft clay under dynamic loading with the effect of cyclic stress ratio and frequency[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 735 - 743.(in Chinese))
- [17] BUTTERFIELD R. A natural compression law for soils(an advance on  $e-\lg p'$ )[J]. Géotechnique, 1979, 29(4): 469 - 480.
- [18] 唐益群, 黄雨, 叶为民, 等. 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): 1 566 - 1 570.(TANG Yiqun, HUANG Yu, YE Weimin, et al. 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): 1 566 - 1 570.(in Chinese))
- [19] 霍海峰. 循环荷载作用下饱和黏土的力学性质研究[博士学位论文][D]. 天津: 天津大学, 2012.(HUO Haifeng. Research on the mechanical property of saturated silty clay under cyclic loading[Ph. D. Thesis][D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.(in Chinese))