

风机荷载作用下频率比对砂土动力响应的影响

张 艳¹, 贾敏才^{1,2}, 蒋明镜^{1,3,4}, 谢志伟¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 同济大学 土木工程防灾减灾国家重点实验室, 上海 200092; 4. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘要: 海上风机在运行过程中风荷载与波浪荷载频率耦合作用对土体动力特性的影响不容忽视, 为了探究这种影响, 采用多向循环动单剪系统(VDDCSS)对砂土进行了一系列试验研究, 分析了双向剪切频率比 f_r 对砂土动应变、动孔压比以及动强度的影响。试验结果表明: 剪应变发展受双向频率耦合及应力组合效应的影响。循环应力比(C_{sr})为 0.15 时, 双向频率耦合效应大于应力组合作用; 随着应力水平的提高($C_{sr} = 0.20$ 或 0.25), 频率耦合效应和应力组合作用均得到了加强。在低应力水平时, 破坏试样的孔压曲线呈“上凹型”且频率比对试样孔压发展影响不大。而随着应力水平增加($C_{sr} = 0.20$ 或 0.25), 孔压最终值 u_{max} 随之增大。除 $f_r = 1.00$ 与 10.00 对应试样外, 土体动强度随 f_r 与 C_{sr} 值增大而减少。 $f_r = 5.00$ 对应试样应变大、孔压值高、强度低的原因与此比值下土体受双向频率耦合与应力组合的叠加效果增强有关。

关键词: 循环单剪; 频率比; 动应变; 动孔压; 动强度

中图分类号: TU4

文献标志码: A

Effect of Frequency Ratio on Dynamic Responses of Sand Under Wind Turbine Loading

ZHANG Yan¹, JIA Mincai^{1,2}, JIANG Mingjing^{1,3,4}, XIE Zhiwei¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The soil sample is subjected to a coupling effect of wind and wave action with various frequencies

during the operation of offshore wind turbines. A series of tests were conducted to investigate the influence of the frequency ratio between wind and wave loads on sand using a multi-directional cyclic simple system (VDDCSS). The effect of frequency ratio on the dynamic strain, pore water pressure, and dynamic strength of sand was analyzed. The test results show that the development of shear strain is affected by the bidirectional frequency coupling and the combination of x and y -direction stress caused by the frequency ratio. At a C_{sr} of 0.15, the bidirectional frequency coupling effect is greater than the stress combination effect. With the increase of the stress level (at a C_{sr} of 0.20 or 0.25), both the frequency coupling effect and the stress combination effect are strengthened. At a low-stress level, the pore pressure curve of the failed specimen is "upward concave" and the frequency ratio has little effect on the pore pressure development of other specimens. As the stress level increases (at a C_{sr} of 0.20 or 0.25), the final value of pore pressure u_{max} increases with increasing C_{sr} . Except for the samples corresponding to a f_r of 1.00 and 10.00, the dynamic strength of others soil samples decreases with the increase of f_r and C_{sr} . At a f_r of 5.00, the sample has a large strain, a high pore pressure value, and a low dynamic strength, which is related to the superposition effect of the two-way frequency coupling and stress combination.

Keywords: cyclic simple shear; frequency ratio; dynamic strain; pore water pressure; dynamic strength

对于海上风机而言, 嵌入海床的基础直接关乎风机整体稳定性与安全性, 是风机设计最重要的一环。目前, 在近海 40m 以内的风机建设中, 大直径单

收稿日期: 2023-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(51639008, 51890911); 同济大学土木工程防灾国家重点实验室自主课题(SL-DRCE19-A-06); 海南省重点研发计划(ZDYF2021SHFZ264)

第一作者: 张 艳, 博士生, 主要研究方向为土动力学、能源与环境岩土工程、宏微观土力学与岩土工程数值分析方法。E-mail: zhangyan1963@tongji.edu.cn

通信作者: 蒋明镜, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为能源与环境岩土工程、宏微观土力学、岩土工程数值分析方法、软土地下工程与岩土边坡工程。E-mail: mingjing.jiang@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

桩基础是应用最为广泛的基础形式。海上单桩的稳定性与桩周土体的动力响应特性紧密相关,准确分析复杂荷载环境下土体动力响应是风机设计的首要任务。海洋工程中研究土体动力特性的方法主要包括以下几种:理论解析法^[1-5]、数值仿真法^[6-11]、试验法^[12-19]。在风机运行过程中,风轮机转动会把风荷载传递给桩基,使桩周土体产生沿桩长方向的剪应力。在风轮机转动过程中,风轮机的旋转会将风荷载传递给桩基,导致桩周土体产生沿着桩长方向的剪切力。沿桩长方向产生的剪应力本质上是上部结构传递下来的风荷载,其与波浪荷载作用频率差异大,从而影响桩周土体力学响应。

以往大多数学者多利用动三轴仪和空心圆柱扭剪仪等探究频率对土体动力特性的影响。许成顺等^[20]针对福建标准砂开展不同振动频率的循环扭剪试验发现:松砂和密砂的液化模式均与加载频率紧密相关,在低频荷载作用下表现出剪胀特性,呈“硬化型”液化模式而在高频荷载作用下表现出剪缩特性,液化模式为“软化型”。曾垂青等^[21]基于动三轴试验探究加载频率对重塑黄土累积塑性应变和刚度衰减的影响。结果表明:加载频率越低,累积塑性应变越大,刚度衰减程度越高,对应的弱化参数随加载频率的增大而减小。Zhu等^[22]分别开展应力控制和应变控制的动三轴试验,分析加载频率对不同密实度砂土液化行为的影响。Araei等^[23]通过三轴试验探究加载频率对饱和岩石填料的刚度及阻尼的影响。近年来,部分学者探究了波浪荷载作用下砂土动力特性。邓海峰等^[24]利用空心扭剪仪和动单剪试验仪分别对饱和砂土进行了循环耦合剪切和动单剪试验,研究比较2种不同方法下,饱和砂土内部孔隙水压力发展规律及其差异。李晶鑫等^[25]基于空心圆柱扭剪试验研究了波浪荷载的振动频率对饱和珊瑚砂竖向应变累积和孔隙水压力发展规律的影响,结果表明:在低振动频率($f=0.100\sim0.175\text{ Hz}$)下,珊瑚砂孔隙水压力呈快速增长—平稳—增长下降的增长模式;当振动频率为 0.200 Hz 时珊瑚砂孔隙水压力呈快速增长—平稳增长的特殊增长模式。关于风、浪频率比对土体动力响应的影响^[26-27]目前还较少。风机运行过程中作用在桩周土体中的风荷载和波浪荷载存在较大频率差,故利用多向循环动单剪系统(VDDCSS)进行一系列循环单剪试验同时施加相互垂直的剪切力探讨风浪频率耦合效应对砂土动应变、动孔压以及动强度的影响。

1 土样制备及试验方案

1.1 试验仪器

采用英国GDS公司生产的伺服电机控制动态循环单剪仪(VDDCSS),如图1所示。该仪器通过伺服电机系统可实现三向独立荷载加载并通过电脑进行实时测点记录。竖向制动器与试样顶部相连,可实现竖向静、动荷载的加载。水平制动器与试样底部相连,可实现单向剪切和多向循环剪切试验。为保证 K_0 (土的静止侧压系数)状态,采用25个高1mm的涂有聚四氟乙烯的圆环(环与环之间的摩擦可忽略不计)对试样进行侧向约束。许多学者认为,循环单剪仪是模拟地震荷载下土体应力状态的最适用的室内仪器。越来越多的学者^[28]发现单剪试验同时也是模拟风机荷载下土单元应力状态的合适试验,因为它能较好地模拟由风荷载及波浪荷载作用所引起的不同频率剪切荷载在土体中产生的应力状态和土体本身的平面应变的边界条件。

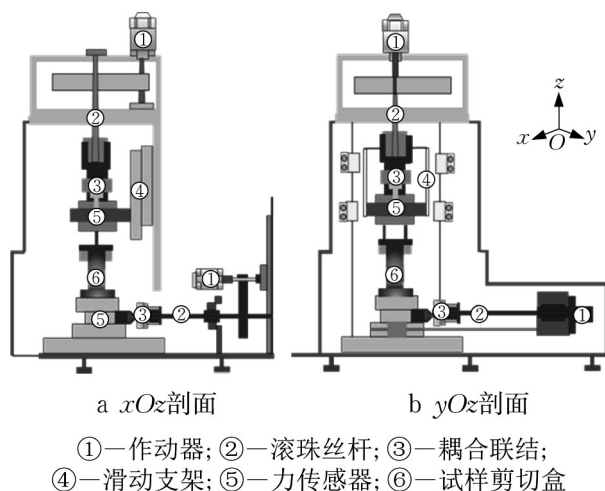


图1 试验仪器

Fig. 1 Testing apparatus

1.2 试验土样及制备

使用重塑砂土试样,表1为砂土基本物理参数,砂土类型为粉砂。土的级配如图2所示。试验前将砂土烘干,过筛将土中杂质去除以保证土质的均匀性。

表1 砂土的基本物理参数

Tab. 1 Physical properties of test samples

D_{50}/mm	G_u	G_s	e_{\max}	e_{\min}
0.22	4.17	2.66	2.09	1.56

土样的制备方法为干沉积法:使用漏斗将固定质量的干砂分5次沉积到模具中,然后用橡胶棒在

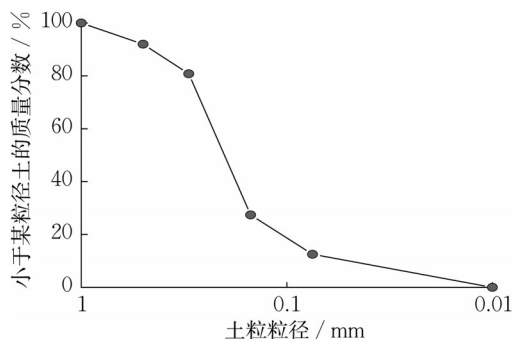


图2 土的级配曲线

Fig. 2 Particle size distribution (PSD)

模具周边均匀地进行击打,以获得要求的制备密度(图3所示)。本试验制备的干砂相对密度 D_r 约为55%。制备仪器见图4,具体的制作步骤为安装橡皮膜及聚四氟乙烯圆环、用自制模具约束圆环及橡皮膜、将装好的试样放置于单剪仪上。本试验制备所得土样尺寸为:直径50mm、高度25mm。

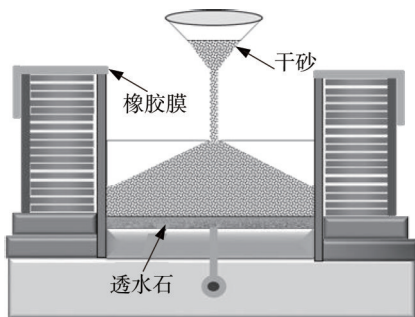


图3 土样制备过程

Fig. 3 Process of sample preparation

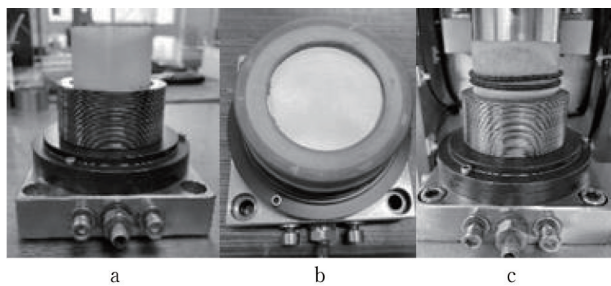


图4 制备土样的仪器

Fig. 4 Sample preparation instrument

1.3 试验方案

装好试样后,在竖向施加100kPa的竖向应力,变形稳定后(竖向位移变化量小于 $0.001 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$),对试样进行常体积剪切试验,试样的受力形式见图5。Matsuda等^[29]进行了一系列干砂与饱和砂的对比试验,发现:常体积剪切试验下干砂与饱和砂的动力响应差异不大,除动强度略大于饱和砂外,动力响应基本一致,因此提出可用干砂试验代替饱和砂试验。

在常体积剪切试验中,通过控制竖向应力的变化以保持试样高度不变,因此剪切过程中产生的孔隙水压力与有效应力的变化值保持一致。

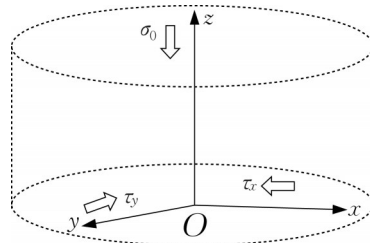


图5 试样受力模式

Fig. 5 Stress mode of soil sample

试验中 x 、 y 向剪切均采用应力控制,波形为不同频率的正弦波,具体的试验方案见表2。表2中循环应力比 C_{SR} 为土样动荷载幅值与初始有效应力的比值,即 $C_{SR} = \tau_d / \sigma_0 = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2} / \sigma_0$,其中 τ_d 为双向耦合剪应力, τ_x 、 τ_y 分别为 x 向和 y 向剪切应力, σ_0 为初始有效应力。参考Arany等^[1]中关于风、浪荷载的作用频率范围的描述,风荷载的频率主要分布在 $0 \sim 0.1 \text{ Hz}$,而波浪荷载的作用频率范围大约为 $0.08 \sim 0.40 \text{ Hz}$ 。设定 x 向波形频率分别为 0.01 Hz 、 0.02 Hz 、 0.04 Hz 、 0.06 Hz 、 0.08 Hz 和 0.10 Hz ,而 y 向频率保持 0.1 Hz 。定义频率比 $f_r = f_x / f_y$,其中 f_x 和 f_y 分别为 x 向与 y 向加载频率。图6为一个周期内双向剪切应力加载波形,从图中可以看出,频率比的施加除了直观地产生双向频率耦合效应,还会改变双向剪应力的组合方式。图7为双向循环单剪下的动剪应力路径。

表2 循环剪切试验的动剪应力条件

Tab. 2 Condition of dynamic cyclic shear test

编号	τ_x / kPa	τ_y / kPa	f_x / Hz	f_y / Hz	σ_0 / kPa	C_{SR}
A1	10.6	10.6	0.01	0.10	100	0.15
A2	10.6	10.6	0.02	0.10	100	0.15
A3	10.6	10.6	0.04	0.10	100	0.15
A4	10.6	10.6	0.06	0.10	100	0.15
A5	10.6	10.6	0.08	0.10	100	0.15
A6	10.6	10.6	0.10	0.10	100	0.15
B1	14.14	14.14	0.01	0.10	100	0.20
B2	14.14	14.14	0.02	0.10	100	0.20
B3	14.14	14.14	0.04	0.10	100	0.20
B4	14.14	14.14	0.06	0.10	100	0.20
B5	14.14	14.14	0.08	0.10	100	0.20
B6	14.14	14.14	0.10	0.10	100	0.20
C1	17.67	17.67	0.01	0.10	100	0.25
C2	17.67	17.67	0.02	0.10	100	0.25
C3	17.67	17.67	0.04	0.10	100	0.25
C4	17.67	17.67	0.06	0.10	100	0.25
C5	17.67	17.67	0.08	0.10	100	0.25
C6	17.67	17.67	0.10	0.10	100	0.25

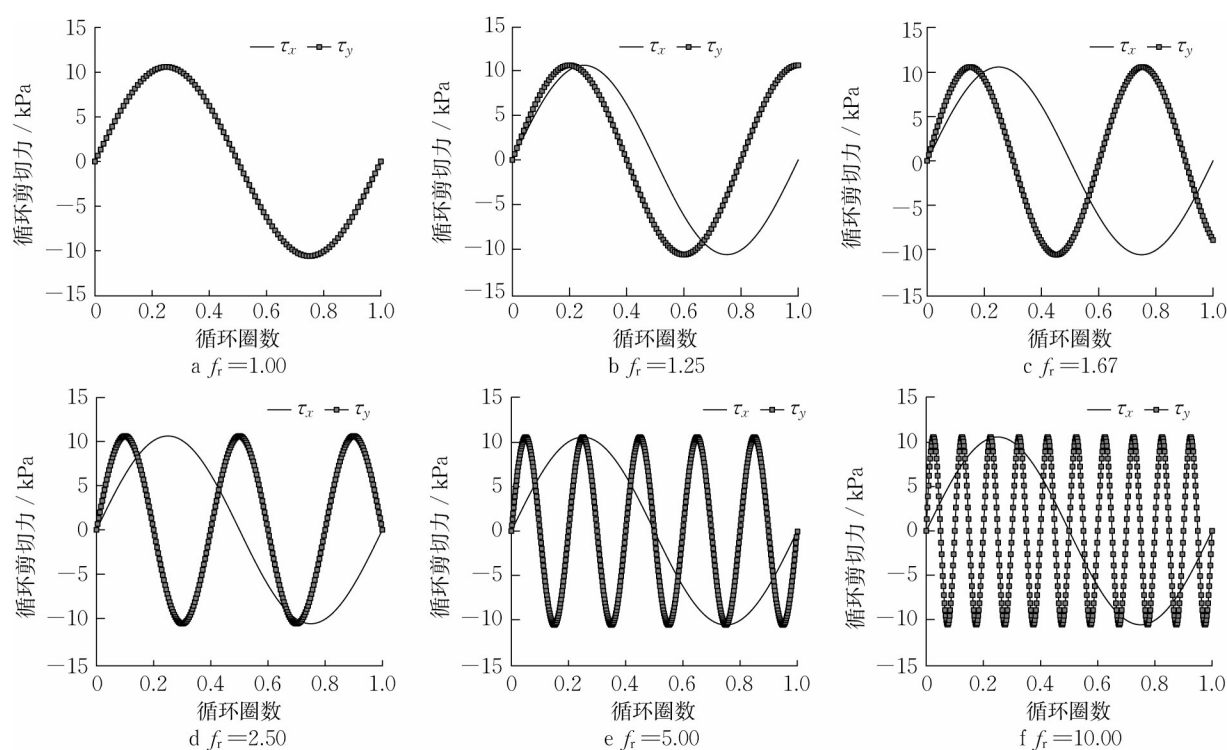
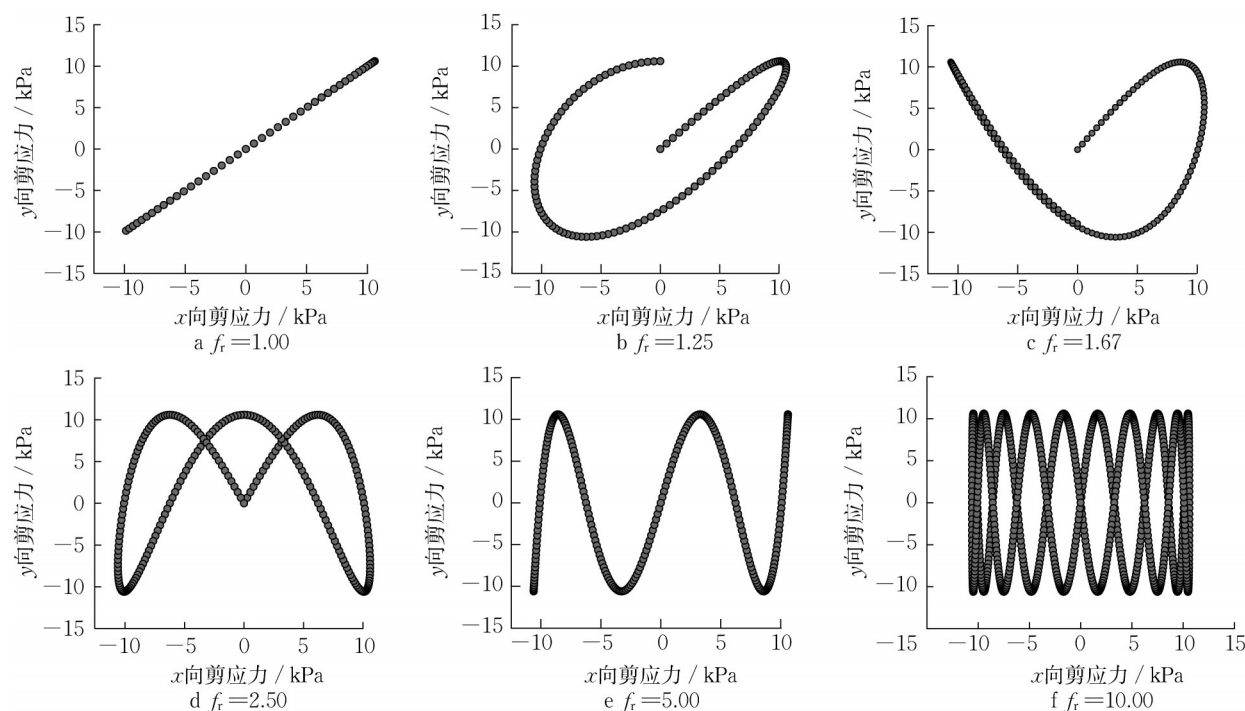
图6 $C_{SR} = 0.15$ 时 x 和 y 向加载方式Fig. 6 Loading modes of x and y position at a C_{SR} of 0.15

图7 不同频率比下的动剪应力路径示意

Fig. 7 Dynamic shear stress paths at different bi-directional shear frequencies

定义剪切应变 $\gamma = D/H$, 其中 D 为土样最大水平位移, H 为土样初始高度。参照文献[30]中对破坏标准的定义方式, 定义剪切总应变, 其中 γ_x 、 γ_y 分别为 x

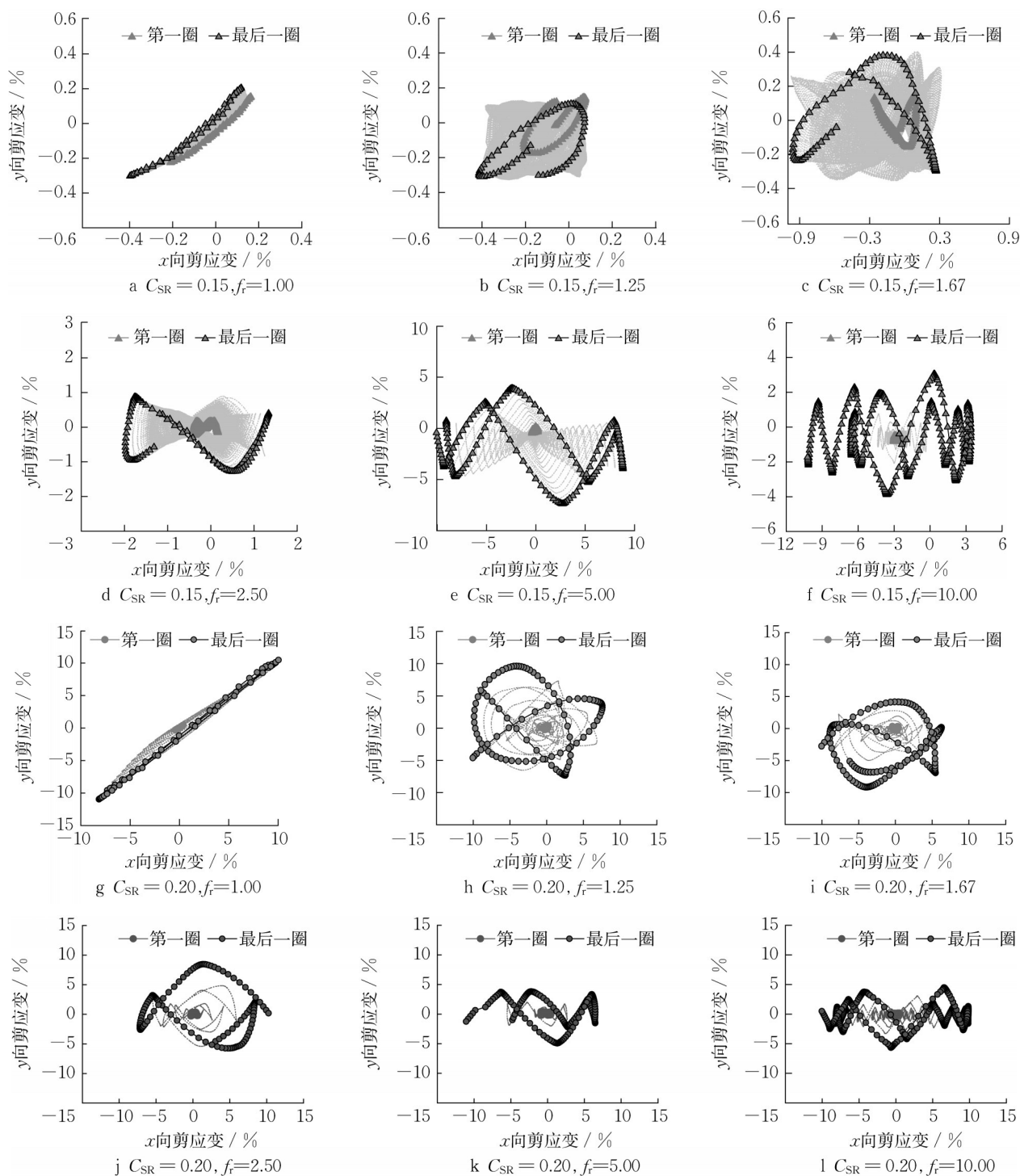
向和 y 向剪切应变 $\gamma_d = (\gamma_x^2 + \gamma_y^2)^{1/2}$ 。 γ_d 达到 10% 时试样破坏并停止试验。若试样在加载 600 圈后仍未发生破坏, 也停止试验。

2 试验结果分析

2.1 应变路径

图8表示循环应力比 C_{SR} 相同情况下不同频率比 f_r 下的应变路径曲线。 $C_{SR} = 0.15$ 时,由于剪应力水平低,不同频率比下的应变路径与预设应力路径基本一致。随着频率比 f_r 的增大,应变路径开始“由密变疏”且双向应变差异值也随之增大,表明剪应变差异值与频率比正相关,即 f_r 越大双向应变差异值越

大。 $C_{SR} = 0.20$ 时,由于应力水平的增加,不同频率比 f_r 下的剪应变均达到10%的破坏标准,表现为应变路径第一圈与最后一圈应变数值差异大,且由频率比所导致的双向耦合作用增强使得双向应变差异值进一步增大,应变路径形状改变。 $C_{SR} = 0.25$ 时,频率耦合效应与应力组合持续作用使不同频率比下的双向应变在较少的循环圈数内达到破坏标准,对应的应变路径变形严重,不再是与应力路径相关的规则图形。



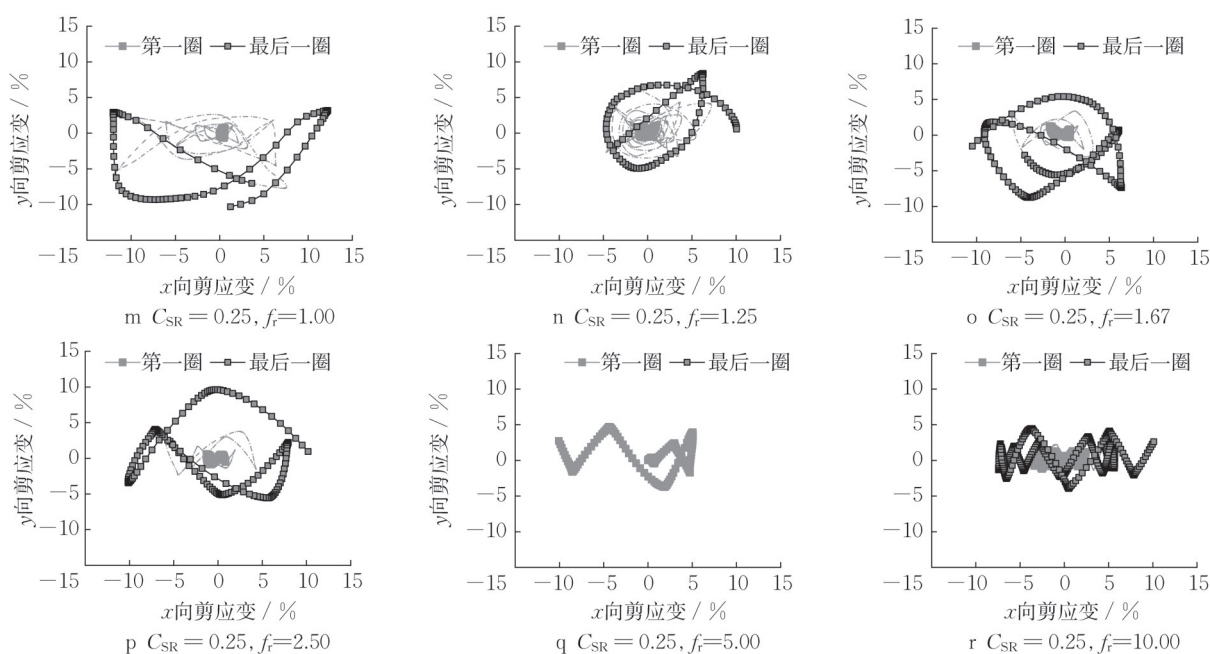


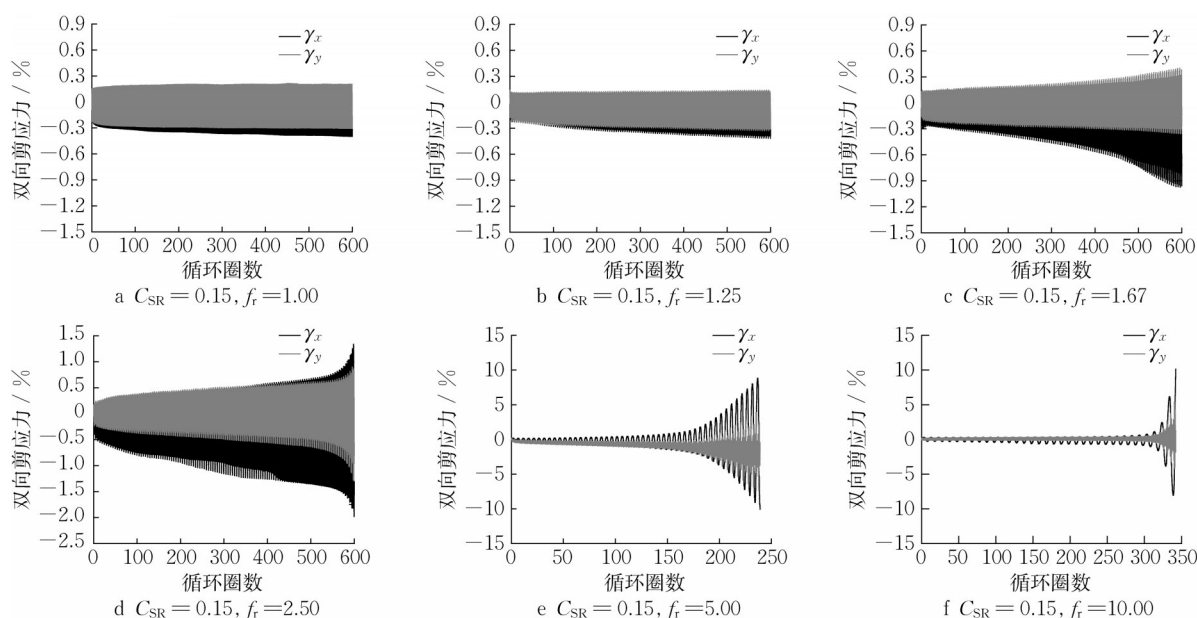
图8 不同循环应力比下应变路径变化

Fig. 8 Strain paths versus different C_{SR} values

2.2 动应变

图9表示循环应力比 C_{SR} 相同情况下频率比 f_r 不同的双向剪应变 γ_x 、 γ_y 与加载周数 N 的关系。可见不同 C_{SR} 值下的双向应变均呈现出相似的发展规律:当 C_{SR} 为0.15时,除了破坏试样外(频率比为5.00或10.00对应试样),其余试样双向应变均随频率比的增大而增大,即 f_r 越大双向应变累积越大。双向应变累积对应的 f_r 从大到小为:5.00、10.00、2.50、1.70、1.25、1.00。产生此种现象的主要原因为:由于剪应力水平较低,双向应变发展主要受双向

频率耦合效应影响且双向变频剪切试验中低频组合更容易导致应变累积^[29],因此 $f_r = 5.00$ 与 $f_r = 10.00$ 对应应变发展速率大于其他试样。而 $f_x = 0.02$ ($f_r = 5.00$)对应试样同时受到频率耦合效应及应力组合作用(剪切幅值点重合),因此 $f_r = 5.00$ 应变发展更迅速。不同频率比下 x 向应变均大于 y 向应变且不同比值下的 y 向应变累积值也不同, f_r 越大, γ_y 越大,这表明双向频率耦合效应使 y 向应变发展受 x 向应变影响且 f_r 越大频率耦合效应越明显。



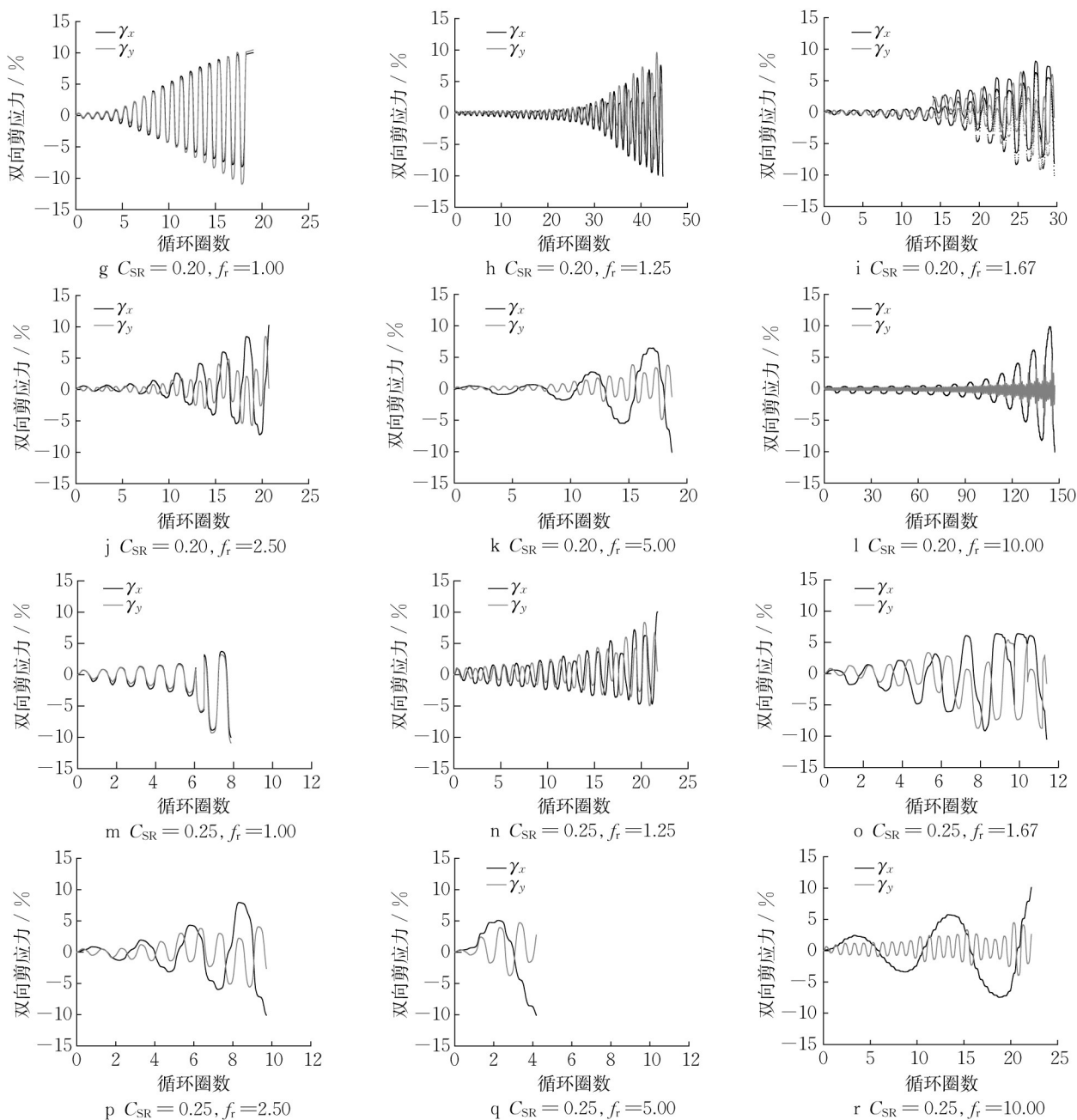


图9 不同循环应力比下应变与循环次数的关系

Fig. 9 Bidirectional strain versus cycles at different cycle stress ratios

当 C_{SR} 值增加至0.20时,双向应变速率对应的 f_r 从快到慢为:1.00、5.00、2.50、1.70、1.25、10.00。对比 $C_{SR}=0.15$ 时应变发展模式发现:在低应力比时,双向应变主要受频率耦合效应的影响,受应力组合作用影响较小;随着 C_{SR} 值增加,双向应力组合逐步起作用; $f_r=1.00$ 时, x 向与 y 向应力组合作用大(幅值点重合),应变发展迅速, $f_r=10.00$ 时($f_x=0.01$)过低的频率使得双向应力组合作用弱。值得注意的是 $f_r=5.00$ 对应试样双向应变值仍很大,主要原因因此频率比下试样不止受到应力组合作用

(由于双向幅值点重合,应力组合作用最大),还受到双向频率耦合效应影响。 $C_{SR}=0.25$ 时,所有试样在 $N=25$ 内达到破坏标准且其双向应变累积速率对应的频率比从快到慢仍为:1.00、5.00、2.50、1.70、1.25、10.00。由于 f_r 导致的双向应变差异值随之增大,其中 f_r 为5.00、10.00、2.50、1.70时甚至出现单向(x 向)破坏的现象。不同 C_{SR} 值下双向应变发展模式不同,是由于双向应变发展受频率比导致的双向频率耦合及 x 、 y 向应力组合的影响。 $C_{SR}=0.15$ 时,双向频率耦合效应大于应力组合作用;

$C_{SR} = 0.20$ 时,频率比为1.00对应双向应力组合作用大,对应双向应变累积速率加快; $C_{SR} = 0.25$ 时,随着应力水平的增加,频率耦合效应和应力组合作用均得到了加强,使试样快速发展至破坏。

图10表示 C_{SR} 为0.15、0.20和0.25时总应变与循环圈数的关系。可见,总应变的发展速度表现出与上述双向应变一致的特性。在0.15循环剪应力比下,总应变累积速率对应的频率比从快到慢为:5.00、10.00、2.50、1.70、1.25、1.00,其中 $f_r = 5.00$ 与 $f_r = 10.00$ 应变发展较快并达到10%破坏标准,其他频率比下的应变累积较慢,应变差异较小。 C_{SR} 为0.20时,总应变累积速率对应的频率比从快到慢为:

1.00、5.00、2.50、1.70、1.25、10.00,不同频率比下试样均达到破坏标准且应变发展出现“分组”现象: f_r 为1.00、5.00、2.50、1.70,应变累积最快,在20圈内达到破坏。 $f_r = 1.25$ 也在40圈内发生破坏。 $f_r = 10.00$ 对应试样应变发展最慢,原因是应力耦合效应最弱。 C_{SR} 为0.25时分组情况更加明显, $f_r = 1.00$ 与 $f_r = 5.00$ 下试样总应变迅速累积并在 $N = 8$ 内发生破坏, $f_r = 2.50$ 与1.70在 $N = 12$ 内发生破坏; $f_r = 1.25$ 与 $f_r = 10.00$ 应变发展较其他频率比慢且差异不大。上述特性表明,当 C_{SR} 较小时,频率耦合作用大于应力组合作用;当 C_{SR} 较大时,频率耦合与应力组合对土体动应变的影响均会被增强。

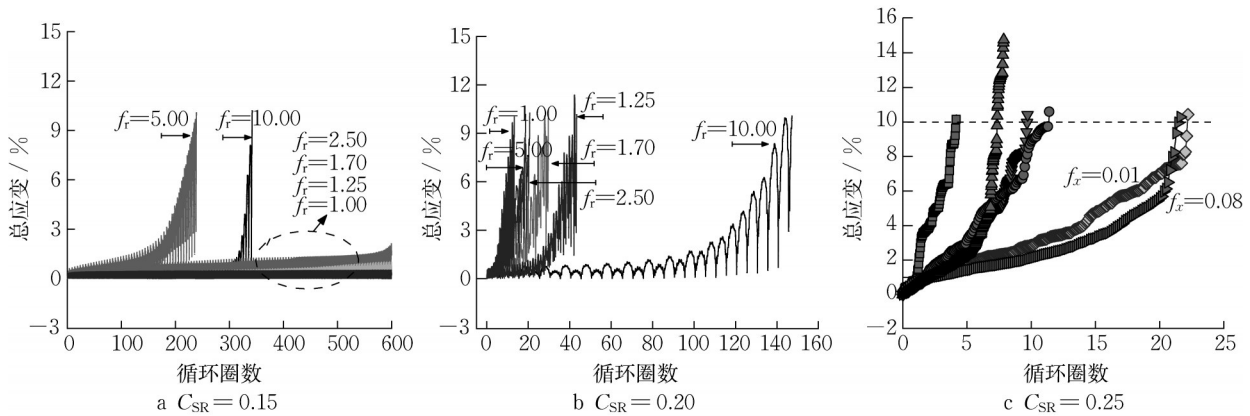


图10 不同循环应力比下总应变与循环圈数的关系

Fig. 10 Total shear strain versus cycles at different cycle stress ratios

2.3 动孔压

常体积剪切试验通过竖向应力的变化控制剪切过程中试样高度保持不变,因此剪切过程中产生的孔隙水压力与有效应力的变化值相同,方向相反,即 $\Delta u = -\Delta \sigma_v$ 。

图11为不同循环剪应力比下各频率比与循环圈数的关系,可见不同 C_{SR} 值下的孔压发展模式完全不同。 C_{SR} 为0.15时, $f_r = 10.00$ 与 $f_r = 5.00$ 对应的孔压曲线呈上凹型。即存在一个上拐点 N_i ,在 N_i 前孔压随循环圈数增加而增加,在 N_i 后,孔压以更快的速率累积直至试样破坏。其他频率比下孔压随循环次数缓慢增加。 $C_{SR} = 0.20$ 时,不同频率比下孔压发展曲线均经历先增加后平稳的过程,其中与动应变特性相对应,孔压累积值对应频率比从大到小为:1.00、5.00、2.50、1.70、1.25、10.00, $f_r = 10.00$ 的孔压增长速率远小于其他频率比时。 C_{SR} 为0.25时,由于试样在较少的循环圈数内破坏,因此孔压累积时间有限。不同频率比下孔压均随循环圈数持续增长,并在25圈内达到90 kPa以上。

由图10、图11知,应变增长越快的试样所对应的孔压最终值越大。当 C_{SR} 为0.20或0.25时,不论频率比如何改变,试样均发生破坏,破坏时所需的循环圈数也较少。故此时孔压的增长主要与发生破坏时所需的循环圈数 N_i 相关: N_i 越大,孔压累积时间越长,对应的最终破坏孔压值也会越大。当循环应力比 $C_{SR} = 0.15$ 时,除破坏试样外,试验所能达到的最大孔压值 u_{max} 约为76 kPa;当 $C_{SR} = 0.20$ 时, u_{max} 约为98 kPa; $C_{SR} = 0.25$ 时, u_{max} 约为90 kPa,由此可得出,不同频率比下的最大孔压同时受循环剪应力比与双向频率比的影响:当循环应力较小(0.15、0.20)时,循环应力比的作用大于频率比,导致最大孔压随 C_{SR} 增大而增大;当 $C_{SR} = 0.25$ 时,应力水平的增加使频率比的作用得到加强。由于 C_{SR} 和频率比的叠加作用使试样均在25圈内即达到破坏标准,此组试样的孔压累积时间小于循环剪应力比为0.15和0.20对应试样,进而导致最大孔压值 u_{max} 仅为90 kPa。由图11a知,除 $f_r = 10.00$ 与 $f_r = 5.00$ 外,其他频率比对孔压的影响较小,而随着循

环应力比的增加(图11b、11c),频率比对孔压的影响越来越显著。除 $C_{SR} = 0.15$ 时的破坏试样,不同循环应力比下孔压累积值与加载圈数满足指数关系,为

$$u = u_0 + A_1(1 - e^{-\frac{\lg N}{t_1}}) + A_2(1 - e^{-\frac{\lg N}{t_2}})$$

式中: u_0 为土样初始孔压值; t_1 和 t_2 是双向频率比变化导致的时间偏移量参数; A_1 和 A_2 是与频率比导

致的双向幅值偏移量有关的参数。另外,值得注意的是 $C_{SR} = 0.15$ 时破坏试样的孔压累积值与循环圈数不满足指数型关系的原因与 N_f 的存在有关, N_f 使得孔压累积速率分2段:在达到 N_f 前,孔压累积速率与未破坏试样基本一致;在达到 N_f 后,孔压快速增长直至接近液化,导致孔压与循环圈数不再呈指数关系。而其他应力比下的孔压增长模式为单调性增长或先增大后平稳的模式。

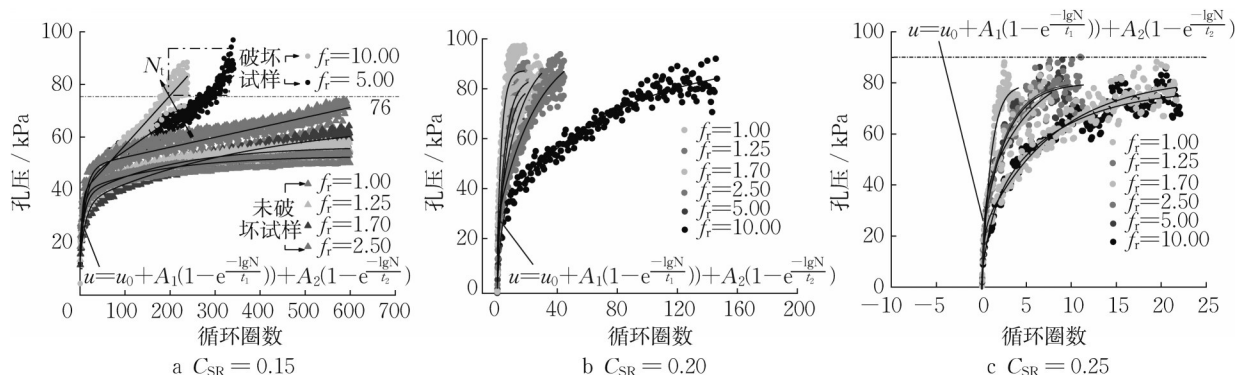


图11 不同循环应力比下孔压与循环圈数的关系

Fig. 11 Pore water pressure versus cycles at different cycle stress ratios

2.4 动强度

试验采用应变破坏标准,即应变达到10%时作为土体的破坏标准,而土样的动强度则为达到该应变时所需的破坏圈数^[31]。图12表示循环应力比 C_{SR} 为0.15、0.20、0.25时土样达到破坏时所需的循环圈数 N_f 与频率比的关系曲线。其中 $C_{SR} = 0.15$ 时,由于 f_r 为2.50、1.70、1.25以及1.00所对应的试样未破坏,其动强度均大于600,在图中为了对比表示,因此其对应 N_f 均取600。 C_{SR} 为0.20和0.25时,除 f_r 为1.00与10.00外,土体动强度随 f_r 的增大而增大。在相同频率比下,土样破坏所需循环圈数随循环剪应力比的增加而增大,即土体动强度与频率比呈正相关,而与循环剪应力比呈负相关。

3 结论

(1)砂土应变路径发展模式受到频率比 f_r 的影响且这种影响随循环剪应力比 C_{SR} 的增大而增强。

(2)双向频率耦合效应及应力组合效应主要受频率比与循环剪应力比的影响。频率比控制双向耦合效应,而应力组合作用既受频率比影响也受循环剪应力比影响;在低应力水平时,双向频率耦合作用起主导作用,在高应力水平时,应力组合与双向频率耦合效应均会增强。

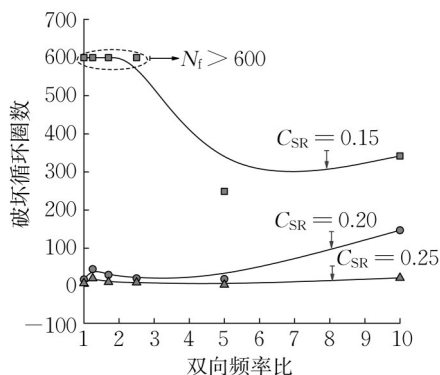


图12 不同循环应力比下动强度与频率比的关系

Fig. 12 Dynamic strength versus frequency ratio at different cycle stress ratios

(3)在低应力水平时,除破坏试样,其余试样孔压与循环圈数呈指数关系,破坏试样不满足此关系与破坏时主要受频率耦合效应有关。在高应力水平下(C_{SR} 为0.20或0.25),孔压与循环圈数满足指数关系是因为这种破坏模式同时受频率耦合和应力组合效应的影响。

(4)除 f_r 为1.00与10.00对应试样外,土体动强度随 f_r 增大而增大,随 C_{SR} 增大而减少; $f_r = 5.00$ 对应试样应变大、孔压值高、动强度低的原因与此比值下土体受到双向频率耦合与应力组合的叠加效果强相关。

作者贡献声明:

张 艳:试验完成、数据处理、论文撰写。

贾敏才:研究思路指导、论文修改。

蒋明镜:项目负责人,论文修改。

谢志伟:辅助完成试验、论文修改。

参考文献:

- [1] ARANY L, BHATTACHARYA S, JOHN H G, *et al.* Closed form solution of eigen frequency of monopile supported offshore wind turbines in deeper waters incorporating stiffness of substructure and SSI [J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2016, (83): 18.
- [2] ARANY L, BHATTACHARYA S, JOHN H G, *et al.* Design of monopiles for offshore wind turbines in 10 steps[J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2017(92): 126.
- [3] SHADLOU M and BHATTACHARYA S. Dynamic stiffness of monopiles supporting offshore wind turbine generators [J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2016(88): 15.
- [4] ARANY L and BHATTACHARYA S. Simplified load estimation and sizing of suction anchors for spar buoy type floating offshore wind turbines [J]. *Ocean Engineering*, 2018 (159): 348.
- [5] 张毅,马永亮,曲先强,等.冰区海上风机的动力响应及疲劳分析[J].*舰船科学技术*, 2018, 40(1): 81.
ZHANG Y, MA Y, QU X Q, *et al.* Dynamic response and fatigue analysis of offshore wind turbine in ice region [J]. *Ship Science and Technology*, 2018, 40(1): 81.
- [6] HETTLER A, GUDEHUS G. Estimation of shakedown displacement in sand bodies with the aid of model tests[C]//*International Symposium on Soils Under Cyclic and Transient Loading*. Swansea; [S.n.], 1980, (1): 3-8.
- [7] GUDEHUS G, HETTLER A. Cyclic and monotonous model tests in sand [C]//*Proceeding of the International Conference On Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Stockholm; [S.n.], 1981, (3): 211-214.
- [8] ACHMUS M, YU S K, KHALID A R. Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load [J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36(5): 725.
- [9] 王俊岭,闫澍旺,霍知亮.复合加载模式下海上风机桩基础破坏机制研究[J].*勘察科学技术*, 2013, (1): 4.
WANG Junling, YAN Shuwang, HUO Zhiliang. Study of failure patterns of monopile foundation for offshore wind turbines under combined loading [J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2013, (1):4.
- [10] ARANY L, BHATTACHARYA S, HOGAN S J. *et al.* An analytical model to predict the natural frequency of offshore wind turbines on three-spring flexible foundations using two different beam models [J]. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 2015, (74): 40.
- [11] 牛壮壮,俞剑,黄茂松.大直径单桩水平循环弱化有限元分析[J].*防灾减灾工程学报*, 2009, 39(1): 5.
NIU Zhuangzhuang, YU Jian, HUANG Maosong. Finite element modelling on degradation of a monopile subjected to cyclic lateral loads [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2009, 39(1): 5.
- [12] LONG J H and VANNESTE G. Effects of cyclic lateral loads on piles in sand [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120(1): 225.
- [13] LOUKIDIS D and SALGADO R. Analysis of the shaft resistance of non-displacement piles in sand [J]. *Geotechnique*, 2008, 58(4): 283.
- [14] BHATTACHARYA S and ADHIKARI S. Experimental validation of soil - structure interaction of offshore wind turbines [J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2011, 31(5/6): 805.
- [15] BHATTACHARYA S, NIKITAS N J, GARNSEY N A, *et al.* Observed dynamic soil - structure interaction in scale testing of offshore wind turbine foundations [J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2013(54):47.
- [16] DOMENICO L, SUBHAMOY B, DAVID M W. Dynamic soil - structure interaction of monopile supported wind turbines in cohesive soil [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013(49): 165.
- [17] TIWARI B and AI-ADHADH A R. Influence of relative density on static soil - structure frictional resistance of dry and saturated sand [J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2014, 32(2): 411.
- [18] VICENTE N, GUTIERREZ M, ESTEBAN D, *et al.* Monopiles in offshore wind: preliminary estimate of main dimensions [J]. *Ocean Engineering*, 2017, 133(15): 253.
- [19] NANDA S, IAIN A, VINAYAGAMOORTHY S, *et al.* Monopiles subjected to uni- and multi-lateral cyclic loading[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 2017, 170 (3): 246.
- [20] 许成顺,王冰,杜修力,等.循环加载频率对砂土液化模式的影响试验研究[J].*土木工程学报*, 2021, 54(11): 10.
XU Chengshun, WANG Bing, DU Xiuliet al. Experimental Study on effect of cyclic loading frequency on liquefaction mode of sand[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(11):10.
- [21] 曾垂青,张吾渝,高义婷,等.循环荷载作用下海北地区原状黄土动力特性试验研究[J].*青海大学学报*, 2021, 39(1): 6.
ZENG Chuiqing, ZHANG Wuyu, GAO Yitinget al. Study on the experiment of dynamic characteristics of undisturbed loess in Haibei area under the cyclic loading [J]. *Journal of Qinghai University*, 2021, 39(1): 6.
- [22] ZHU Z, ZHANG F, QING Y, *et al.* Effect of the loading frequency on the sand liquefaction behavior in cyclic triaxial tests [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 147(2):106779.
- [23] ARAEI A A, RAZEGHI H S, TABATABAE S H, *et al.* Loading frequency effect on stiffness, damping and cyclic

- strength of modeled rockfill materials [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 33(1): 1.
- [24] 邓海峰, 刘振纹, 祁磊, 等. 波浪作用下饱和砂土孔压发展规律试验研究 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2017, 15(3): 5.
DENG Haifeng, LIU Zhenwen, QI Lei, *et al.*, Experimental research on development pattern of pore -water pressure of saturated sand under wave loads [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2017, 15(3): 5.
- [25] 李晶鑫, 方祥位, 申春妮, 等. 波浪荷载作用下频率对饱和珊瑚砂动力特性影响研究 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2018(5): 92.
LI Jingxin, FANG Xiangwei, SHEN Chunni, *et al.* Influences of frequency on the pore water pressure of saturated coral sand under wave loading [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2018(5): 92.
- [26] ARANY LASZLO, BHATTACHARYA S, MACDONALD JOHN H G. Closed form solution of Eigen frequency of monopile supported offshore wind turbines in deeper waters incorporating stiffness of substructure and SSL. [J] *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2016, (83): 18-32. DOI:10.1016/j.soildyn.2015.12.011.
- [27] SALEH J, SUBHAMOY B. Closed form solution for the first natural frequency of offshore wind turbine jackets supported on multiple foundations incorporating soil-structure interaction [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 113: 593. DOI:10.1016/j.soildyn.2018.06.011.
- [28] DEGROOT D J, LADD C C, GERMAINE J T, *et al.* Undrained multidirectional direct simple shear behavior of cohesive soil [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122(2): 91.
- [29] MATSUDA H, HENDRAWAN A P, ISHIKURA R, *et al.* Effective stress change and post-earthquake settlement properties of granular materials subjected to multi-directional cyclic simple shear [J]. *Soil and Foundation*, 2011, 51 (5):873.
- [30] HU X, ZHANG Y, GUO L, *et al.* Cyclic behavior of saturated soft clay under stress path with bidirectional shear stresses [J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2018 (104):319.
- [31] 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.

(上接第 683 页)

- [9] CHEN G, YIN M, WU X, *et al.* Structural performance of laminated-bamboo lumber nailed connection [J]. *Wood Material Science & Engineering*, 2022, 17(6): 989.
- [10] CHEN G, YANG W, ZHOU T, *et al.* Experiments on laminated bamboo lumber nailed connections [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 269: 121321.
- [11] CHEN G, WU X, JIANG H, *et al.* Cyclic response of laminated bamboo lumber nailed connection: theoretical modelling and experimental investigations [J]. *Structures*, 2022, 35: 118.
- [12] LENG Y, XU Q, WANG M, *et al.* Experimental study of withdrawal behavior of self-tapping screws in laminated bamboo [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 363: 129890.
- [13] LI H, QIU H, WANG Z, *et al.* Withdrawal resistance of the self-tapping screws in engineered bamboo scrimber [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 311: 125315.
- [14] American Society for Testing and Materials. Standard test methods for cyclic (reversed) load test for shear resistance of vertical elements of the lateral force resisting systems for buildings: ASTM E2126-11 [S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2018.
- [15] 崔兆彦. 胶合竹钢填板螺栓节点抗火试验及理论研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
CUI Zhaoyan. Experimental and theoretical research on fire resistance of steel-to-laminated bamboo bolted connections with slotted-in steel plates [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [16] JORISSEN A, FRAGIACOMO M. General notes on ductility in timber structures [J]. *Engineering structures*, 2011, 33 (11): 2987.
- [17] 上海市建筑科学研究院有限公司. 工程竹结构设计标准: T/CECS 1101—2022 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2022.
Shanghai Key Laboratory of Engineering Structure Safety. Standard for design of engineered bamboo structures: T/CECS 1101—2022 [S]. Beijing: China Planning Press, 2022.