

振动频率对饱和松砂动力特性影响试验研究

丰土根^{1,2}, 张礼明^{1,2}

(1.河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2.河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 利用 DDS-70 微机控制电磁式振动三轴仪, 在均压固结条件下对福建标准砂进行了不同振动频率的循环三轴试验, 研究了振动频率对其动力特性的影响。研究表明: 在围压相同且均压固结条件下, 饱和松砂的动强度随着振动频率的增大而增大; 达到同一峰值孔压的水平, 振动频率越高, 所需要的振次越多; 对应于相同的轴向动应力, 动轴向应变随着振动频率的增加, 达到 5% 的应变所需的振次增多, 动轴向应变与动孔压的发展不是一致的。振动频率越高, 达到液化所需要的振动时间急剧减少, 较高频率比较低频率的动荷载作用更能迅速地使饱和砂土达到某一变形、孔压和强度发挥水平, 也使饱和砂土产生液化的可能性显著增大。

关键词: 饱和松砂; 振动频率; 动力特性; 动稳态; 振动时间

中图分类号: TU411.8

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2013)03-0011-04

Experimental Study on Effect of Vibration Frequency on Dynamic Behaviors of Saturated Loose Sands

FENG Tu-gen^{1,2}, ZHANG Li-ming^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Geotechnical Engineering Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: A series of cycling triaxial experiments of different vibration frequencies for the standard sand in Fujian are accomplished by using DDS-70 microcomputer control electromagnetic vibration triaxial apparatus under the condition of equal consolidation, so as to study the effect of vibration frequencies on its dynamic behaviors. The study results show that the dynamic strength of saturated loose sands is increased with the increasing of vibration frequency under the condition of same ambient pressure and equal consolidation. The vibration frequency is bigger with higher vibration frequency in order to reach the peak pore pressure. Corresponding to the same axial dynamic stress, the vibration frequency is increased to reach 5% of dynamic axial strain with the increasing of vibration frequency. The development of dynamic axial strain and dynamic pore pressure is not consistent. It takes less time to reach the liquefaction with higher vibration frequency. The dynamic load of high vibration frequency can more quickly make the saturated loose sands reach some level of deformation, pore pressure and strength than that of low vibration frequency. The possibility of liquefaction for saturated loose sands is also much increased.

Keywords: saturated loose sands; vibration frequency; dynamic characteristics; dynamic steady state; vibration time

0 引言

地震是严重的自然灾害,我国是世界上地震灾害最严重的国家之一。在近几年国内发生的几次强烈地震中,都有砂土的堤坝、土坡、地基的破坏实例^[1-2]。地震的大多数砂土破坏发生在地震后数十秒甚至数小时,其原因是地震作用时引起土层中的

孔隙水压力增长,导致有效应力降低、承载能力下降,剩余强度甚至可降为零。目前,国内外学者已经就地震荷载作用下土体动力特性的研究取得了大量成果^[3-4]。影响土的动力特性的因素很多,振动频率就是影响饱和砂土动力特性的重要因素。

国内外许多学者对不同地区砂土的动力特性进行研究,取得了相当进展。Peacock 等^[5]针对砂土进

行的研究结果显示:若实验的振动频率控制在 0.17 Hz ~ 4.00 Hz 范围内,对单剪实验的砂土液化强度的影响规律性不强;顾小芸^[6]进行室内动三轴试验的研究发现频率 0.1 Hz 变为 1.0 Hz 的周期荷载对砂土动力特性的影响不大,而郭莹等^[7]则认为液化强度随着振动频率的增大而增大。张建民等^[8]研究较粗粒径的饱和标准砂发现当振动频率 $f = 1 \text{ Hz} \sim 20 \text{ Hz}$ 时振动频率的大小对砂土液化没有影响。

王星华等^[9-10]采用北京新技术研究所研制的 DDS-70 微机控制动三轴仪研究洞庭湖区砂土发现动荷载的振动频率小于 10 Hz 时,振动频率对砂土液化的极限强度影响不大,并将孔隙水压力与应变、应力路径相联系,总结了各种因素对砂土液化中孔隙水压力发展的影响。各种其它文献^[11-13]也不同程度的提出了这个影响因素的作用效应,并对其进行了评价。

上述针对砂土进行研究的振动频率基本都在 1.0 Hz 以上,而对低于 1.0 Hz 的研究较少。本文采用北京新技术研究所研制的 DDS-70 微机控制动三轴仪对相对密度为 30% 的饱和松砂,来探讨振动频率为 0.05 Hz、0.1 Hz、0.5 Hz、1.0 Hz、2.0 Hz 时对饱和砂土的动力特性的影响。

1 试验设备、材料及方法

1.1 试验设备

本次试验设备为 DDS-70 微机控制电磁式振动三轴试验系统,可做砂土和粉土的液化试验和各种土的动弹模、动强度及阻尼特性试验,配上电控阀,还可做循环荷载试验。此仪器适用直径 39.1 mm,高 80 mm 的圆柱体试样,具有自动采集数据和处理功能。

1.2 试验材料

试验材料采用福建标准砂,制备试样尺寸为 $\Phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 。其材料特性:颗粒比重为 $G_s = 2.643$;最大与最小干密度分别为 $\rho_{d\max} = 1.74 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{d\min} = 1.43 \text{ g/cm}^3$;最大与最小孔隙比分别为 $e_{\max} = 0.848$, $e_{\min} = 0.519$;粒径组成特性参数 $d_{50} = 0.34 \text{ mm}$, $C_u = 1.542$, $C_c = 1.104$ 。级配曲线如图 1 所示。

1.3 试验方案

试验中控制三向均等初始固结条件,周围压力 $\sigma_{3c} = 100 \text{ kPa}$ 。试样在 σ_{3c} 下固结排水,当试样固结稳定后关闭排水阀,然后施加循环应力 σ_d 直至试样液化破坏。方案设置见表 1。

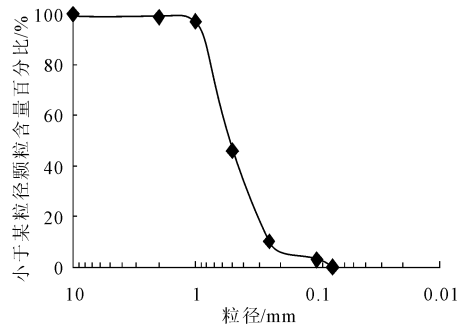


图 1 级配曲线

表 1 试验方案设置

编号	振动频率 f/Hz	轴向动应力 σ_d/kPa	相对密实度/%
A1	0.05	45.8	30
A2	0.10	45.8	30
A3	0.50	45.8	30
A4	1.00	45.8	30
A5	2.00	45.8	30
B1	0.05	50.0	30
B2	0.10	50.0	30
B3	0.50	50.0	30
B4	1.00	50.0	30
B5	2.00	50.0	30
C1	0.05	54.1	30
C2	0.10	54.1	30
C3	0.50	54.1	30
C4	1.00	54.1	30
C5	2.00	54.1	30

1.4 破坏标准

破坏标准分为孔压破坏标准和应变破坏标准,本文取孔压破坏标准,把试样孔压接近固结压力并不再上升时的孔压作为破坏孔压,其相对应的振次为破坏振次 N_f 。

2 试验结果及分析

采用较粗粒径的饱和标准砂,相对密实度为 30%,在振动频率为 0.05 Hz、0.1 Hz、0.5 Hz、1.0 Hz、2.0 Hz,固结压力 $\sigma_{3c} = 100 \text{ kPa}$,进行了固结不排水振动三轴试验。

2.1 振动频率对动强度特性的影响

土的动强度通常定义为一定振动次数(或一定振动应力幅值)条件下使土体达到某一破坏标准所需的动应力幅值(或振动次数)^[14]。不同振动频率下液化强度与破坏振次的关系如图 2 所示。由试验结果可知:在相同围压且均压固结条件下,饱和松砂

的液化强度随着振动频率的增加而增加。这与文献 [5] 试验的振动频率控制在 0.17 Hz ~ 4.00 Hz 范围内,对单剪实验的砂土液化强度的影响规律性不强有差别,但与郭莹等^[7]在 0.05 Hz、0.10 Hz、1.00 Hz 振动频率范围内,饱和松砂的液化强度均随着振动频率的增大而增大相类似。各个振动频率下饱和松砂的动强度均随振动次数的增大而减小。

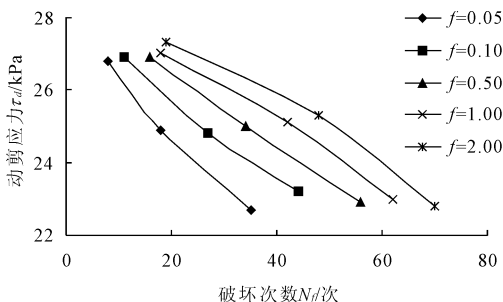


图 2 破坏振次 N_f 和动剪应力 τ_d 的关系曲线

相对密度为 30% 的饱和松砂,在破坏振次分别为 20 次和 30 次、振动频率分别为 0.05 Hz、0.1 Hz、0.5 Hz、1.0 Hz、2.0 Hz,以及在不同围压条件下均压固结的液化强度试验结果如表 2 所示。

表 2 均压固结下松砂的液化强度

频率 f /Hz	20 次/kPa	30 次/kPa
0.05	24.6	23.3
0.1	25.6	24.5
0.5	26.4	25.4
1.0	26.8	26.0
2.0	27.3	26.6

2.2 振动频率对动孔压特性的影响

试验控制轴向动应力 $\sigma_d = 50.0$ kPa,探讨不同振动频率对动孔压变化规律的影响,得到不同振动频率下振次 N 和动孔压 u_d 的关系如图 3 所示。由图 3 可知,在轴向动应力、围压一定且均压固结条件下,频率对饱和松砂循环峰值孔压均具有显著影响,达到同一峰值孔压的水平,频率越高,所需要的振次越多;对于不同频率,动孔压最后时刻不再增大,保持平稳,以平稳段开始所对应的振次 N 为破坏振次 N_f ,振动频率为 0.05 Hz、0.1 Hz、0.5 Hz、1.0 Hz、2.0 Hz 的 N_f 分别为 18、27、34、42、48 次。

2.3 振动频率对动轴向应变特性的影响

试验控制轴向动应力 $\sigma_d = 50.0$ kPa,来探讨不同振动频率对动轴向应变的变化规律的影响。得到不同振动频率下振次 N 和动轴向应变 ϵ_z 的关系如图 4 所示,由图 4 可知,在轴向动应力、围压一定且均压固结条件下,频率对饱和松砂动轴向应变有显

著影响。动轴向应变都是在某一振次 N_p 下突变,当振次 N 小于 N_p 时,应变的发展很缓慢,但当 N 大于 N_p 时,应变的发展加快,直到破坏应变。随着振动频率 f 的增大, N_p 的数值也在增大,最终破坏的振次 N_f 也在增大。

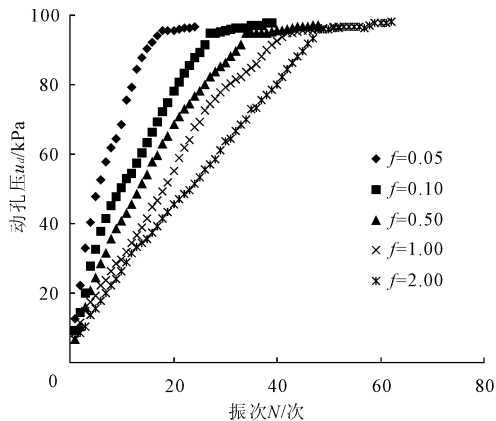


图 3 振次 N 和动孔压 u_d 的关系曲线

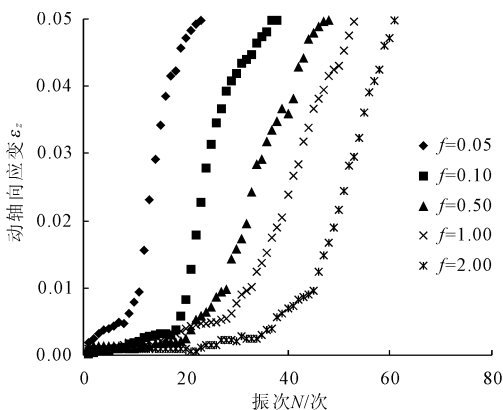


图 4 振次 N 和动轴向应变 ϵ_z 的关系曲线

2.4 动孔压与动轴向应变之间的关系

图 5 为本文试验条件下动孔压与动轴向应变关系曲线。从图 5 中可知,曲线开始,随着振次的增加,动孔隙水压力的增长很快,动轴向应变的增长缓慢,而在后期,动轴向应变的增长很快,动孔隙水压力的增长趋于平缓,基本不再增大,王星华等^[9]称这种状态为动稳态状态。这说明前后的轴向应变引起的体应变不同,开始阶段轴向应变与体应变紧密联系,而后期轴向应变主要是由于某一区域液化而产生的剪切破坏变形,此时,试件的体应变增加并不多。这说明动孔隙水压力与动轴向应变之间有着一定的关系,但变化发展的方向是不一致的。

由于动孔隙水压力增长不到围压水平,基本在 95 kPa 后不再增长,以此不再上升的动孔压为破坏孔压,破坏动孔压所对应的动轴向应变如表 3 所示。由表 3 可知,随着振动频率的增大,饱和松砂达到破

坏动孔压时,所对应的动轴向应变是逐渐变小的。

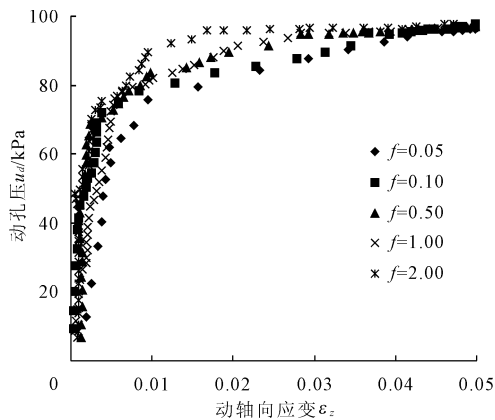


图 5 动孔压 u_d 和动轴向应变 ϵ_z 的关系曲线

表 3 破坏动孔压及对应的动轴向应变

频率 f/Hz	u_d/kPa	$\epsilon_z/\%$	$N_f/\text{次}$
0.05	95.6	4.23	18
0.10	95.0	3.67	27
0.50	94.8	2.84	34
1.00	95.0	2.70	42
2.00	96.0	1.68	48

2.5 振动时间与各动力特性的关系

图 6 为动剪应力 τ_d 与试样达到液化破坏时所需的时间 t_f 的关系曲线,从图 6 可以看出,在其它条件相同情况下,振动频率越高,达到液化所需要的振动时间急剧减少,说明低频长振动时间和高频短振动时间都可以使砂土产生液化。

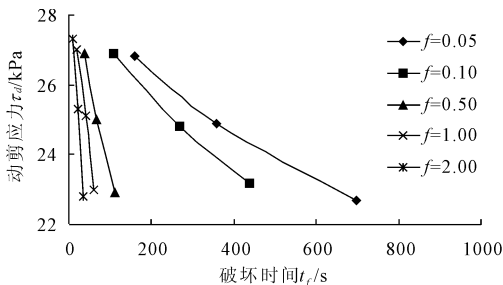


图 6 破坏时间 t_f 和动剪应力 τ_d 的关系曲线

图 7 和图 8 分别是振动时间 t 与动轴向应变 ϵ_z 、动孔压 u_d 的关系曲线。从图中可以看出达到峰值孔压或轴向应变为 5% 时,振动频率大的所需时间少,随着振动频率的减小,所需的时间急剧增多。图 7 的实际意义是,振动持续时间一定时,较高频率比较低频率的动荷载作用下导致饱和砂土发生过量变形而破坏的可能性显著增大。图 8 的实际意义是动荷载的振动频率较低时,引起某一较大孔压水平

所需振动时间较长,则动荷载所引起的孔压还可能发生消散而有所降低,甚至对土体的破坏很小。如果动荷载的振动频率较高,则孔隙水压力发展迅速且不能及时消散,可能导致饱和砂土的动强度急剧下降,最终导致土体动力失稳。所以在实际工程中,对于较高频率的动荷载引起的作用应予以特别注意。

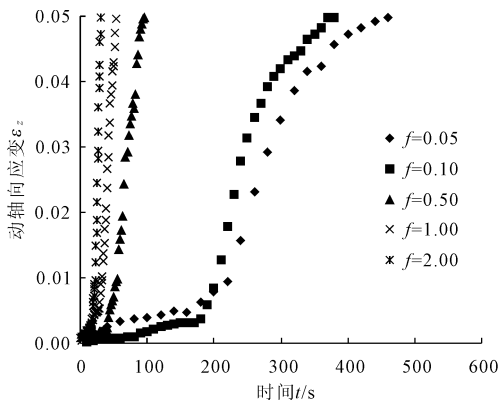


图 7 振动时间 t 和动轴向应变 ϵ_z 的关系曲线

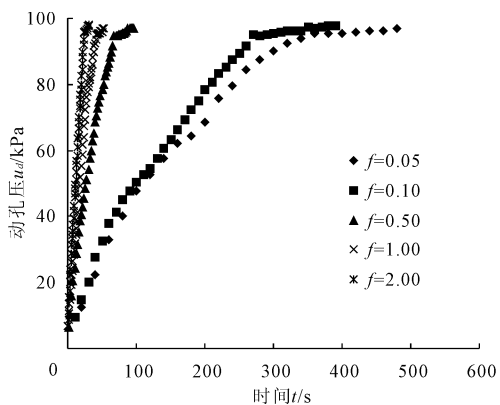


图 8 振动时间 t 和动孔压 u_d 的关系曲线

3 结论

本文采用 DDS-70 微机控制电磁式振动三轴仪,在均等固结条件下进行了不同振动频率对饱和砂土动力特性影响的循环三轴试验,本次试验研究表明:

(1) 在相同围压且均压固结条件下,随着振动频率的增加,饱和砂土的动强度逐渐增大,而各个振动频率下饱和松砂的动强度均随振动次数的增大而减小。

(2) 在轴向动应力、围压一定且均压固结条件下,动孔压随着振动频率的增加,达到峰值动孔压所需的振次增多,各个振动频率达到峰值动孔压后随着振动次数的增加动孔压基本不再变化。