

刘钢,郭文博,赵明志,等.辽宁台安砂土液化特性动三轴试验研究[J].地震工程学报,2022,44(3):558-569.DOI:10.20000/j.1000-0844.20210112001

LIU Gang, GUO Wenbo, ZHAO Mingzhi, et al. Dynamic triaxial test on liquefaction characteristics of sandy soil in Taian, Liaoning Province [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(3): 558-569. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20210112001

辽宁台安砂土液化特性动三轴试验研究

刘 钢^{1,2}, 郭文博^{1,2}, 赵明志^{1,2}, 张 冲^{1,2}

(1. 西华大学土木建筑与环境学院, 四川 成都 610039; 2. 西华大学岩土工程研究所, 四川 成都 610039)

摘要:为探讨台安砂土液化相关特性及发展规律,针对辽宁台安砂土进行一系列不排水动三轴试验,研究台安砂土在动荷载作用下动孔压及动应变变化规律,分析影响台安砂土发生液化的主控因素,揭示动载作用次数下台安砂土动力响应特征。结果表明:动应力水平不同的各相对密度试样 u_d 曲线可分为后期陡增和匀速增长两种类型,动应力幅值较大时, u_d 始终以较快速度增长,呈现匀速增长特征,动应力幅值较小时, u_d 曲线则呈现初期缓增后期陡增的特点;相对密度 D_r 和动应力幅值 CSR 是决定砂土液化的主控因素,在同一里氏震级等效动载作用次数下,随着 D_r 持续发展,液化所需 CSR 增长逐渐加快,当 D_r 足够大时,砂土基本处于密实状态,此时难以发生液化;循环荷载作用下,台安砂土呈现出初期整体受压、中期拉压平衡、后期受拉凸显的动力响应特征,到后期试样拉应变迅速增大,试样易发生受拉破坏。研究成果可为辽宁台安地区建筑物抗震设计提供参考依据。

关键词:饱和砂土;液化特性;动孔压;动应变;滞回曲线

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2022)03-0558-12

DOI:10.20000/j.1000-0844.20210112001

Dynamic triaxial test on liquefaction characteristics of sandy soil in Taian, Liaoning Province

LIU Gang^{1,2}, GUO Wenbo^{1,2}, ZHAO Mingzhi^{1,2}, ZHANG Chong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan, China)

Abstract: To explore the characteristics and development law of sand liquefaction in Taian County, Liaoning Province, a series of undrained dynamic triaxial tests were carried out to study the variation of dynamic pore pressure and dynamic strain of Taian sand under dynamic load. The main factors affecting the sand liquefaction were analyzed, and the dynamic response characteristics of sandy soil under dynamic loads were revealed. The results showed that the u_d curves of samples with different dynamic stress include two types: steep increase in the late stage and uniform increase. When the dynamic stress amplitude is large, the u_d increases at a fast rate, show-

收稿日期:2021-01-12

基金项目:国家自然科学基金(51878560);国家自然科学基金青年基金项目(51408491);教育部春晖计划项目(z2016155)

第一作者简介:刘 钢(1983—),男,博士,副教授,主要从事散粒体岩土材料宏观物理力学性质及土的动力特性方面的研究工作。

E-mail:liugang_leo@126.com。

通信作者:赵明志,男,博士,讲师,主要从事纳米材料改良和砂土液化特性方面的研究。E-mail:1220180013@mail.xhu.edu.cn。

ing the characteristics of uniform increase; when the dynamic stress amplitude is small, the u_d curve slowly increases in the initial stage and steep increases in the later stage. Relative density D_r and dynamic stress amplitude CSR are the main factors that determine the liquefaction of sand soil. Under the equivalent dynamic load, the CSR gradually accelerates with the continuous development of D_r . When the D_r is large enough, the sand soil is basically in a dense state and liquefaction is difficult to occur. Under the action of cyclic load, the dynamic response of Taian sand include three stages, i.e., overall compression, tension-pressure balance and tension in the initial, middle and later stages, respectively. At the later stage, the tensile strain of the specimen increases rapidly, which is prone to tension failure. The research results provide a theoretical support for the seismic design of buildings in Taian area, Liaoning Province.

Keywords: saturated sand; liquefaction characteristics; dynamic pore pressure; dynamic strain; hysteretic curve

0 引言

砂土液化是一种较为常见的震害现象。在外部动荷载作用下,饱和砂土内部孔隙水压力急剧上升,当孔压增至上覆土压力时,有效应力衰减至零,此时砂土颗粒在孔隙水中呈悬浮状态,外荷载全部施加在孔隙水上,土体完全丧失抗剪强度,呈现流动状态,这种现象称为砂土液化^[1]。地震引起的砂土液化,往往会导致地基丧失承载能力,引起上层建筑物下陷、滑坡、倒塌,造成严重的人员伤亡和经济财产损失。

1975年辽宁海城7.3级地震、1976年河北唐山7.8级地震、1999年台湾南投7.6级地震、2008年四川汶川8.0级地震等,在震区中均出现了大面积的砂土液化,直接导致水利农田毁坏,房屋桥梁塌陷。这些破坏现象,得到了国内外岩土工程领域研究学者的广泛关注,砂土液化也成为了震害研究中的热点问题^[2-3]。早在1962年,黄文熙^[4]就使用能够控制反压和围压变化的动三轴仪对砂样进行了试验,得到不同受力状态下饱和砂土的液化性质。1966年,Seed等^[5]采用振动加载三轴试验仪,开始模拟地震荷载下饱和砂土的受力情况,发现在低围压下,高孔隙率的饱和砂样更易发生液化。至此,能够模拟地震荷载的动力学试验,成为研究砂土液化特性的一种重要技术手段。由于受到砂土沉积历史、物理性质及取样环境等诸多因素的影响,砂土液化性质具有区域性差异。因此,国内外均对不同地区砂土的液化性质进行了广泛研究。

国外对地区砂土液化性质的研究中,Robertson等^[6]通过动三轴仪模拟加拿大Ottawa原位砂的剪切波速,在极限稳定状态下建立了该砂土剪切波速与孔隙率、有效围压之间的线性方程,以更真实地得

到原位砂土的液化特性。Saxena等^[7]基于共振柱试验得到了美国加州Monterey标准砂的最大动剪切模量和阻尼比,并首次建立起两者的经验关系式。Díaz-Rodríguez等^[8]考虑相对密度、初始有效围压、循环应力比三个因素对砂土液化性质的影响,对墨西哥的Lázaro Cárdenas砂进行了动单剪试验,发现循环应力比为0.45左右时,相对密度与初始有效围压较大的砂样也能迅速发生液化。

我国是一个多地震灾害国家,目前国内砂土液化特性的研究多针对东南沿海地区砂土。王权民等^[9]对厦门砂土进行了动三轴与共振柱试验,依据液化曲线提出了该砂土的动孔压模型,并发现该砂土动剪切模量随围压增大而增大,阻尼比随围压增大而减小。陈国兴等^[10]基于有效应力路径分析了南京细砂动孔压的发展阶段特征,并将动三轴循环加载过程中砂样所处的状态分别定义为初始压密、压缩和膨胀三种类型。潘华等^[11]在此基础上,利用空心圆柱扭剪仪对液化后的南京细砂进行了静力再加载试验,依据该砂土孔压消散时与偏应力呈现的线性特征,提出了该砂土的孔压消散模型,发现初始有效围压对该模型有较大影响,相对密度则基本没有影响。许成顺等^[12]对不同初始静孔压的福建标准砂开展了循环扭剪试验,发现该砂土初始静孔压越大,其孔压和应变的发展也就越快。由此可见,虽然我国一些地区砂土液化特性研究已经取得一定成果,但是针对液化现象的探讨仍旧没有完全覆盖我国地震易发区域。

考虑到不同地域砂土颗粒尺寸不同,级配特征也存在很大差异,因而易表现出不同的液化特性。然而,东北地区辽河中下游流域虽位于郯城—庐江地震带上,且区域广泛分布粉细砂层,但目前还鲜见

对该区域砂土液化特性的研究。鉴于此,选取辽宁鞍山市台安县云柳村取土场的天然冲洪积砂作为试验材料,研究该区域砂土的液化特性。首先对取样砂土进行了基本物性及颗粒筛分试验,以初步判断该区域砂土发生液化的潜在可能。然后制备不同相对密度的砂样,并进行动三轴试验,分析各砂样的孔压、应变发展规律及其破坏特征。通过各试样液化所需循环次数,得到了该区域砂土的动强度曲线,结合试样的应力应变关系,阐述了该区域砂土的液化特性。研究成果可为该地区建筑抗震设计及砂土液化治理提供参考依据。

1 试验概况

1.1 试验材料

郯城—庐江地震带为华北和东北地区第三、第四活动期强震地震带之一。它南起安徽庐江,经过山东郯城、渤海辽东湾后,在沈阳分为向东方向发展的密山—抚顺断裂带和向西方向发展的依兰—伊通断裂带。郯城—庐江地震带总体上呈现为较缓的“S”形,从南到北总长约为 2 400 km,为巨型走滑断裂带^[13]。试验砂土取自郯庐地震带辽东湾至铁岭段,取土场选自鞍山市台安县云柳村,如图 1 所示。



图 1 台安砂土取样点
Fig.1 Tai'an sand sampling point

为保证试验所用砂土不受周围自然环境的影响,特选取距离地表约 2 m 深的均匀土层进行取样,如图 1 所示。据初步调查后发现,该土层砂土为天然冲洪积砂,外观呈现浅黄色,颗粒较细,但含黏、粉粒较少。考虑到该取样点位置及砂土的特殊性,将该区域砂土定名为台安砂土。

采用丹东浩元 DX-2000 型 X 射线衍射仪测定台安砂土的矿物成分。结果表明,该砂土的主要成分为石英,含量为 69.9%;次要成分为 13.7% 的钾长石和 13.1% 的钠长石。具体矿物成分列于表 1^[14]。

表 1 试验材料矿物成分^[14]

Table 1 Mineral composition of test material^[14]

成分	石英	钾长石	钠长石	α -石英	闪石	绿泥石	不定型成分
含量/%	69.9	13.7	13.1	0.6	0.5	0.3	1.9

台安砂土土粒比重 $G_s = 2.61$,最小干密度平均值 $\rho_{dmin} = 1.370 \text{ g/cm}^3$,最大干密度平均值 $\rho_{dmax} = 1.790 \text{ g/cm}^3$ 。采用水洗法测定台安砂土的粒径分布曲线,如图 2 所示。由图可知,砂样平均粒径 $d_{50} = 0.205 \text{ mm}$,不均匀系数 $C_u = 2.37$,曲率系数 $C_c = 1.36$,为级配不良砂土。

参照 Lee 和 Fitton 得到的实验室易液化砂粒径分布范围^[15](见图 2),试验所用台安砂土粒径分布曲线位于该范围中间位置,可初步判断台安砂土属于易液化砂。

1.2 试验仪器

试验设备采用英国 GDS 公司设计制造的 DYNTTS-10 高级动态三轴试验系统,设备简图如图 3 所示。仪器主要包括:提供动力的驱动装置、试验中提供反压及围压的控制器、安置试样的三轴压力室、用于排水排气和施加水压的整个管线回路、与

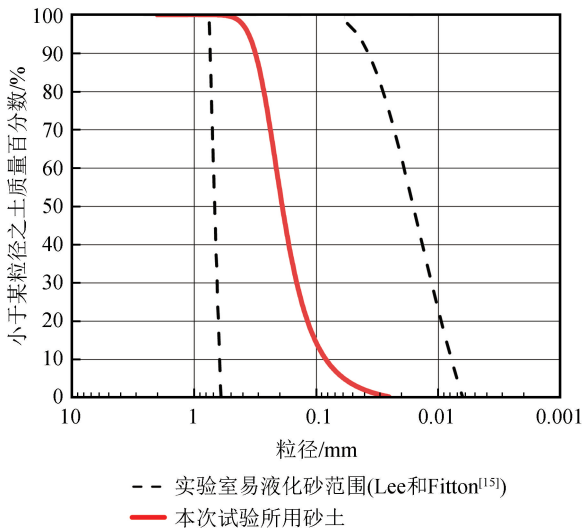


图 2 砂土粒径分布曲线及实验室易液化砂范围
Fig.2 The distribution curve of sand particle size and the range of liquefiable sand in laboratory

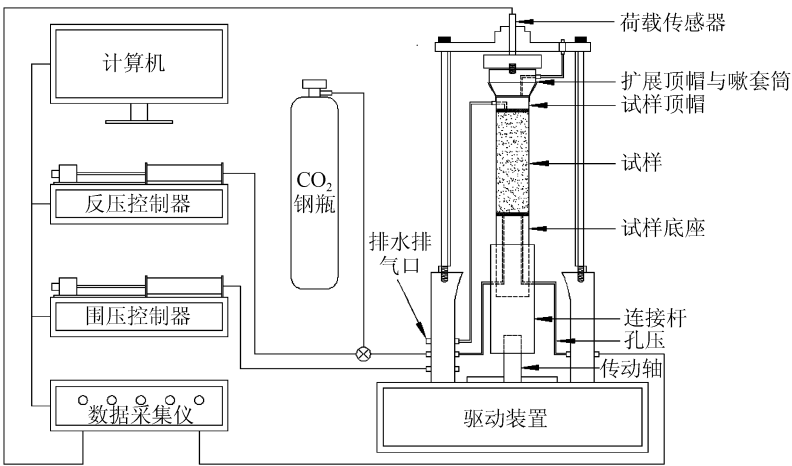


图 3 DYNTTS-10 高级动态三轴试验系统

Fig.3 DYNTTS-10 advanced dynamic triaxial test system

所有控制系统相连的数据采集器以及可供人为操作的计算机。该设备使用高速直流电机作动器,可以通过装有马达驱动的基座螺旋传动,对压力室底座上的试样施加最大 5 Hz、40 kN 的动荷载。试验过程中,围压、反压控制器通过液压管与压力室相连。控制器通过推动蒸馏水进入压力室产生的液压来提供围压与反压,最大可提供 2 MPa 围压和 1 MPa 反压。同时,荷载传感器和位移传感器会自动将采集的数据及时反馈给数据采集系统,由计算机记录下实时荷载及应变。该三轴仪可以对砂土试样进行动三轴试验,适合用于研究饱和砂土的振动液化特性。

1.3 试验方案

动荷载幅值记为 σ_d , 初始有效围压记为 σ'_c , 则 $\sigma_d/2\sigma'_c$ 为循环应力比 CSR。试验考虑试样相对密度 D_r 和循环应力比 CSR 两个因素对砂土液化特性的影响,各个试样参数见表 2。所有试样直径为 50 mm,高度为 100 mm。

表 2 动三轴试样参数

Table 2 Parameters of dynamic triaxial specimens			
试样编号	$D_r/\%$	CSR	σ'_c/kPa
A1	30	0.05	30
A2	30	0.10	30
A3	30	0.15	30
B1	40	0.10	30
B2	40	0.15	30
B3	40	0.20	30
C1	60	0.15	30
C2	60	0.20	30
C3	60	0.25	30

流程进行。由于试验前对试样进行了烘干处理,制样时砂土松散,难以成型,因此在制样过程中通过添加适量蒸馏水增大砂粒间的假黏聚力,以便于成样。制样过程中,重塑砂样按均分的三等份填装,每层填装后使用击实锤均匀地将砂样压实到合适高度。进行第二、三层砂土填装时,需对前一层压实后的砂土表面进行刨毛处理,使各层之间紧密贴合,保证试样密度的均匀性^[16]。试样制样完成后,采用水头饱和和加反压饱和的方法对试样进行饱和,直至孔压系数 B 值大于 0.95 时,认为试样达到饱和状态^[17]。饱和完成后,打开排水阀门,在 30 kPa 有效围压下对试样进行各向同性固结,以模拟浅层砂土的受力情况。当反压体积曲线稳定不变时,认为试样已固结完成。关闭排水阀门,保持有效围压为 30 kPa,对试样施加动荷载,动荷载采用正弦波形,频率为 1 Hz。三轴试样所受应力状态如图 4(a)所示,目标动荷载正弦波形见图 4(b)。试样在动荷载作用下发生初始液化后,继续施加 5~10 个应力循环后停止试验。

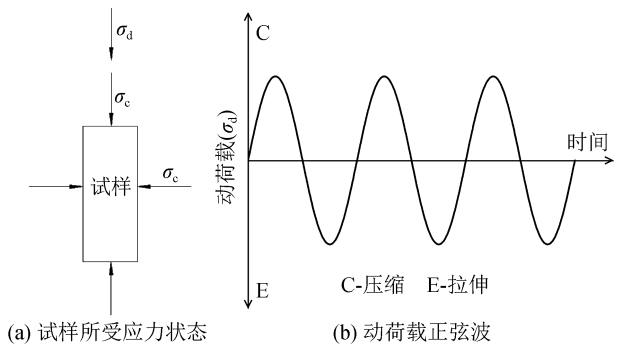


图 4 试样受力状态及动荷载正弦波

Fig.4 Stress state of the sample and sine wave under dynamic load

动三轴试验按照制样、饱和、固结、施加加载的

试样发生初始液化的标准可以分别通过动孔压 u_d 或动应变 ϵ_d 进行判断。试验过程中动孔压发展至初始有效围压(30 kPa)时^[18],可认为试样发生初始液化。采用动应变判断试样初始液化时,存在 2.5% 或 5% 两种应变幅值,具体取值需参考取样砂土上层建筑物的性质^[19-20]。基于研究初期对取土点的调查结果,结合经验选取 $\epsilon_d = 5\%$ 作为判断试样初始液化的标准^[21]。由于动孔压指标是通过有效应力原理得到的,结果较为精确。动应变指标为经验数值判断,存在一定误差。因此试验中主要以动孔压判断试样是否发生初始液化,当动孔压始终未能达到 30 kPa 有效围压时,以动应变作为判断试样初始液化的标准。

1.4 试样饱和方法

我国《土工试验方法标准(GB/T 50123—2019)》、《铁路工程土工试验规程(TB 10102—2010)》、《土工试验规程(SL 237—1999)》对三轴试样饱和均有规定,砂土或粉土可采用水头饱和,水头饱和不能达到饱和要求时,则可进一步采用反压饱和。但国内对反压饱和中每级反压静置时长仍缺乏系统性的讨论。通过研究,发现反压静置时长与反压饱和效率存在紧密联系,因此本节单独讨论台安砂土的饱和方法。试验饱和过程分三步进行:

(1) 通二氧化碳来置换孔隙内的空气。实践表明,仅依靠水头饱和难以完全排尽三轴试样中的孔隙气体,后续还需增加反压来提升气体在孔隙水中的溶解度。考虑到二氧化碳在水中的溶解度远大于空气,故用二氧化碳置换空气,目的在于提升后续反压饱和和步骤的效率。试验时,在 20 kPa 围压条件下,以 5.0~7.5 kPa 的气压将钢瓶内的二氧化碳气体从试样底部通入,持续时间为 1 h。

(2) 水头饱和。完成第一步后,试样孔隙内存在大量的二氧化碳和少量空气,通过从试样底部通入蒸馏水,将孔隙气体从试样顶部挤出。试验时,利用反压控制器提供 10 kPa 的水压(等效为 1 m 水头高度),将蒸馏水从下部阀门压入试样内部,持续时间为 2 h。该阶段完成后,试样孔压系数 B 值约为 0.2,还需继续进行饱和。

(3) 反压饱和。反压饱和过程中,每级反压增加幅值为 30 kPa。首先对台安砂土进行了反压饱和的探索性试验,以获得最高效的饱和方法。图 5 为 $D_r = 60\%$ 的台安砂土试样 B 值随反压级数增长的变化情况。观察图中可以发现,水头饱和完成后,试样 B 值约为 0.18。饱和初期,施加 30~120 kPa

四级反压后,每级反压静置时间 1 h, B 值增至 0.6。再施加 150~210 kPa 三级反压后,每级反压静置时间 1 h, B 值增至 0.7。这表明试样 B 值在达到 0.6 左右时,其增长速度明显减缓,开始进入饱和后期。在 240~330 kPa 四级反压饱和中,将每级反压静置时间提升为 2.5 h,即饱和十小时后, B 值增至 0.9。再加 360、390 kPa 两级反压饱和,每级反压静置时间降为 1 h,发现 B 值没有明显变化,仍在 0.9 左右。最后施加 420、450 kPa 两级饱和,每级反压静置时间再次提升为 2.5 h, B 值增至 0.97,试样完成饱和。从上述反压加载过程可以发现,当 B 值增至 0.6~0.7 以后,进入饱和后期,较长的静置时间有利于试样完成饱和。

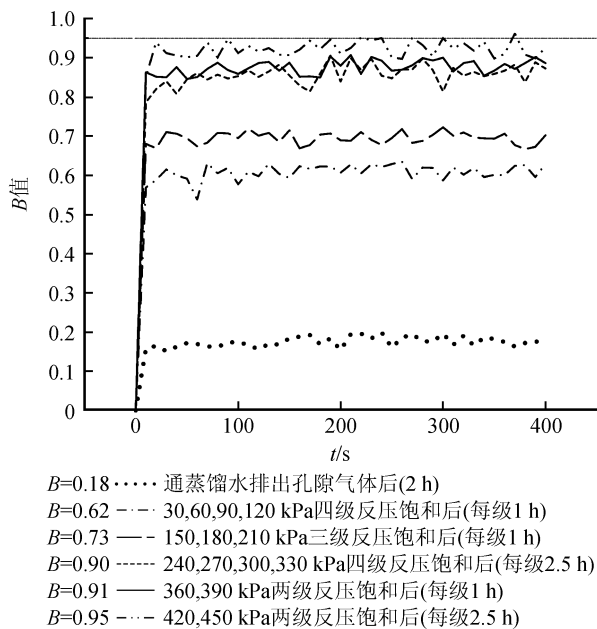


图 5 孔压系数随反压增长的变化情况

Fig.5 Variation of pore pressure coefficient with the increase of back pressure

通过对比反压饱和过程中各阶段 B 值的变化情况发现:在饱和初期,即使反压较小,静置时间较短, B 值也能保持较快的增长速度,迅速增至 0.6~0.7 左右,故该阶段可选取较短的反压静置时间,以提升饱和效率;在饱和后期,虽然反压较大,但反压静置时间较短时,试样 B 值的增长非常有限,故该阶段可选取较长的反压静置时间。鉴于此,为更高效地提升饱和效率,正式试验试样在前八级反压饱和中(第八级反压为 240 kPa),每级反压静置时间预设为 1 h;在第八级反压饱和之后,每级反压静置时间参考饱和情况预设为 2~2.5 h。每加三级反压(90 kPa),监测一次 B 值,直到其大于 0.95 为止。

该方法能有效提升饱和效率,并能防止动载试验时反压过大对试样液化造成的干扰。

2 试验结果

2.1 动孔压

图 6 为各试样动孔压 u_d 随时间 t 的发展曲线。观察图 6 可发现,台安砂土各试样 u_d 曲线按其增长速率可大致分为两类,分别是匀速增长型和后期陡增型。

图 6 中(c)、(e)、(f)、(h)、(i)为匀速增长型动孔压发展曲线。这类曲线在动荷载加载时程内,始终保持动孔压较快增长,并迅速达到 30 kPa,最后在 30 kPa 左右保持稳定波动。由于该类动孔压曲线增长较快,均在 5 s 左右的加载时间里迅速增至 30 kPa,所以整体近似呈现出线性增长的趋势。表明动应力幅值较大时,土体动孔压发展曲线易呈现匀速增长的发展特征。

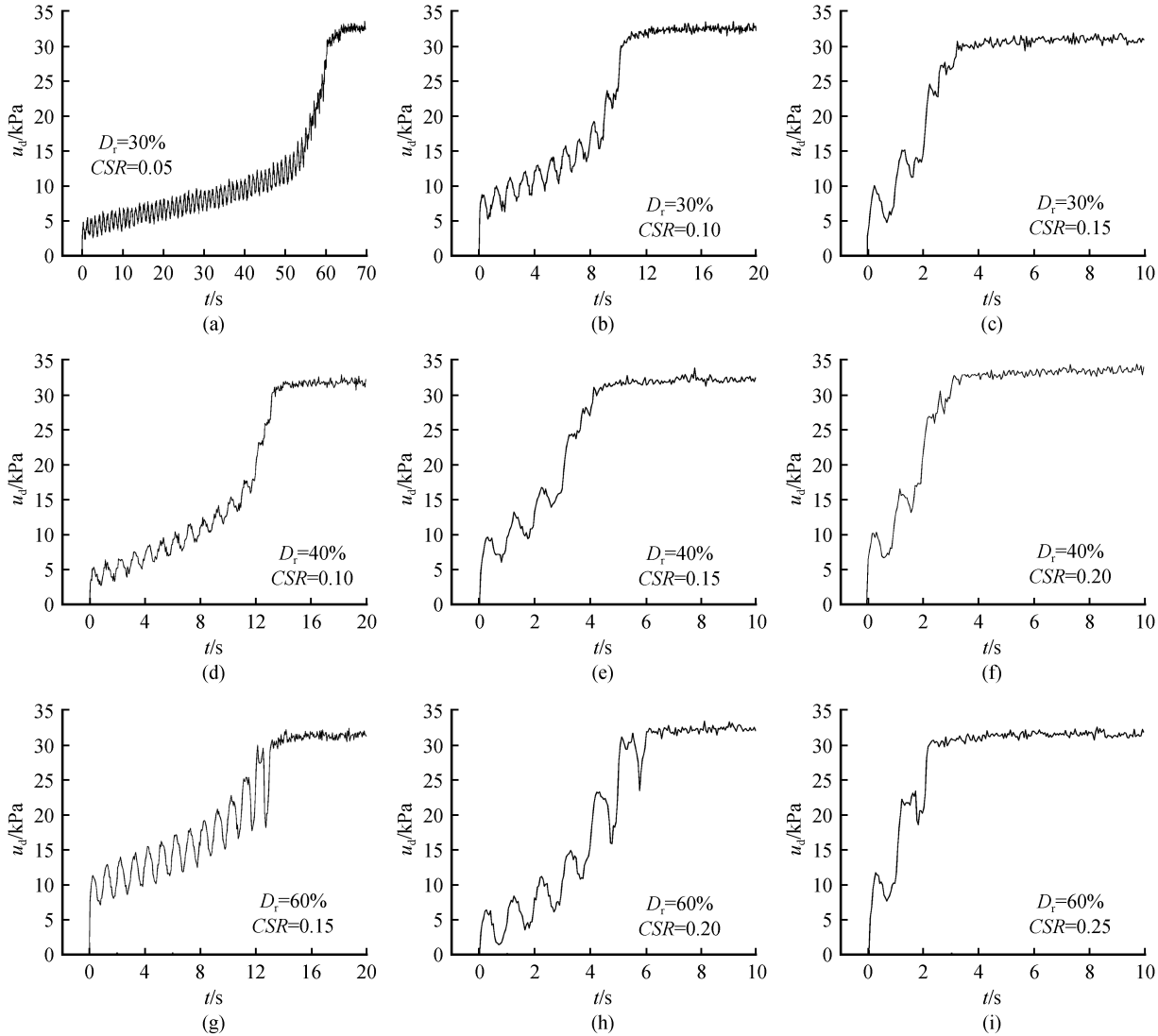


图 6 试样动孔压曲线
Fig.6 Dynamic pore pressure curves of samples

图 6 中(a)、(b)、(d)、(g)则为后期陡增型动孔压发展曲线。在加载初期,该类动孔压发展曲线比第一类曲线整体上增长更为缓慢,但从试样 u_d 发展至 15 kPa 左右起,其增长速率会明显上升。此时,随着动载循环次数的增加,每个加载循环内的波峰波谷偏离中心位置的振幅会开始迅速增大,曲线开始丧失初始的波动形态, u_d 迅速增至 30 kPa,之后在 30 kPa 左右

保持稳定波动。表明动应力幅值较小时,土体动孔压发展曲线易呈现后期陡增的发展特征。

图 6(a)~(c)为 $D_r=30\%$ 试样的 u_d 曲线,将 CSR 从 0.05 增至 0.15 后,试样 u_d 发展至 30 kPa 的所需动载循环次数则从 61 次减小到 4 次。在图 6(d)~(f)中 $D_r=40\%$ 的试样以及图 6(g)~(i)中 $D_r=60\%$ 的试样均与 $D_r=30\%$ 的试样呈现出类似

的变化规律。证明在同一相对密度下,随着 CSR 的增大,试样动孔压增长速率会明显加快。但是通过图 6(c)、(e)、(g)发现,在 $CSR=0.15$ 的应力水平下,随着试样相对密度从 30% 增至 60%, u_d 发展至 30 kPa 的所需动载循环次数则从 4 次增大到 14 次。证明在同一 CSR 下,随着试样相对密度的提

升,试样动孔压增长速率会明显减缓。

2.2 动应变

图 7 为各试样动应变 ϵ_d 随时间 t 的发展曲线。观察图 7 可以发现,台安砂土各试样 ϵ_d 曲线按增长模式也可大致分为两类,第一类是总应变持续发展型,第二类是单幅应变迅速增长型。

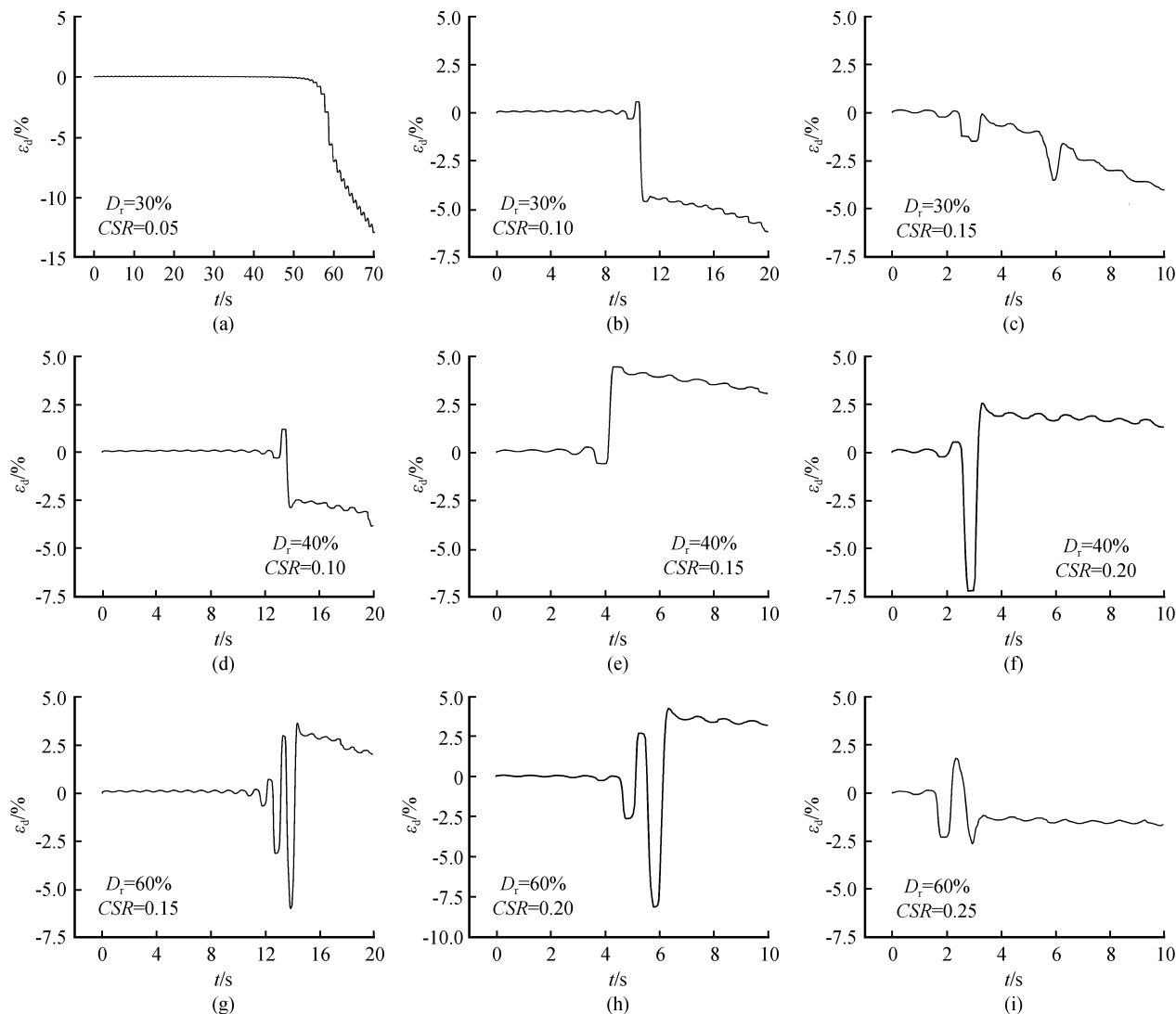


图 7 试样动应变曲线

Fig.7 Dynamic strain curves of samples

图 7(a)、(c)为总应变持续发展型曲线。该类曲线在加载初期单幅应变会在横轴上下稳定波动,总应变基本不变。随着加载次数的增多,虽然单幅应变仍然在中心轴线附近波动,但总应变已经开始迅速累积增长,并持续增大。

图 7(b)、(d)、(e)、(f)、(g)、(h)、(i)均为单幅应变迅速增长型曲线。在加载初期,该类动应变曲线与第一类表现类似,在横轴上下稳定波动,但在接下来几个循环里,动应变波动幅值会急剧增大,并出现

最大单幅应变。之后,试样单幅应变波动偏离横轴,出现以总应变形态持续增长的残余应变,试样发生液化破坏。

观察图 7 中各试样 ϵ_d 发展曲线,能够发现试样 ϵ_d 增长速率同样会受到相对密度和 CSR 的影响,且与 u_d 变化规律类似。以 $D_r=40\%$ 试样为例,其 ϵ_d 曲线如图 7(d)~(f)所示,CSR 从 0.10 增至 0.20 后,试样出现最大单幅应变时所需动载循环次数则从 14 次减小到 3 次。此外,CSR 从 0.15 增至 0.25

后, $D_r=60\%$ 的试样出现最大单幅应变时所需动载循环次数同样也从 14 次减小到 3 次。证明在同一相对密度下,随着 CSR 的增大,试样动应变增长速率也会加快。由于第一类曲线应变持续累积增长,并未出现最大单应变幅值,所以并未与第二类曲线进行对比。但对比图 7(a)、(c),能够发现 CSR = 0.05 的试样保持稳定波动的循环次数远远大于 CSR = 0.15 的试样,同样能够证明上述结论。图 7(b)、(d)中,在 CSR = 0.10 的应力水平下,随着试样相对密度从 30% 增至 40%,出现最大单幅应变时所需动载循环次数从 11 次增大到 14 次。图 7(e)、(g)中,CSR = 0.15 时,试样相对密度从 40% 增至 60%,出现最大单幅应变时所需动载循环次数从 5 次增大到 14 次。证明在同一 CSR 下,随着试样相对密度的提升,试样动应变增长速率也会明显减缓。

对比图 6 和图 7,能够发现试样动孔压与动应变保持稳定发展以及出现剧烈波动的时间点基本一致。由于在初始阶段,试样内部孔压较小,且增长较为缓慢,此时试样具有一定的强度,不会产生太大变形。但当孔压超过一定阈值后,孔压开始迅速增大,有效应力随之减小,导致试样发生较大变形,最终发生液化。综合观察不同 D_r 和 CSR 下试样 u_d 和 ϵ_d 的变化规律,可知台安砂土相对密度越小,施加的动

荷载越大,越容易发生液化。

3 数据分析

3.1 台安砂土液化发展规律分析

通过动孔压时程曲线,可较为准确地确定各个试样初始液化所需的动载循环次数 N_f 。为探讨各试样 N_f 与 u_d 变化的阶段特性,取动孔压 u_d 与初始有效围压 σ'_3 (所有试样均为 30 kPa) 的比值 u_d/σ'_3 为孔压比 r_u ,进而建立孔压比 r_u 与动载循环次数 N 的关系曲线。当试样在动荷载作用下, u_d 增至初始有效围压 30 kPa 时, r_u 为 1.0,据此可判断试样发生初始液化。

图 8 是相对密度分别为 30%、40%、60% 的试样在不同 CSR 下,孔压比 r_u 随动载循环次数 N 的增长曲线。观察图 8(a)中 $D_r=30\%$,CSR = 0.05 的试样,在将动孔压换算为孔压比后,能够更为明显地看出,试样孔压比曲线在第 2~52 次循环作用下保持匀速增长,但增长速率较为缓慢,最后 7~8 次循环以极快的增长速率增至 1.0,呈现出明显的阶段发展特征。但 CSR 为 0.10 和 0.15 时,由于动应力较大,两个试样液化速率较快,孔压比曲线发展阶段特征并不明显。图 8(b)、(c)中 $D_r=40\%$ 、60% 试样的孔压比曲线也表现出类似的发展规律。

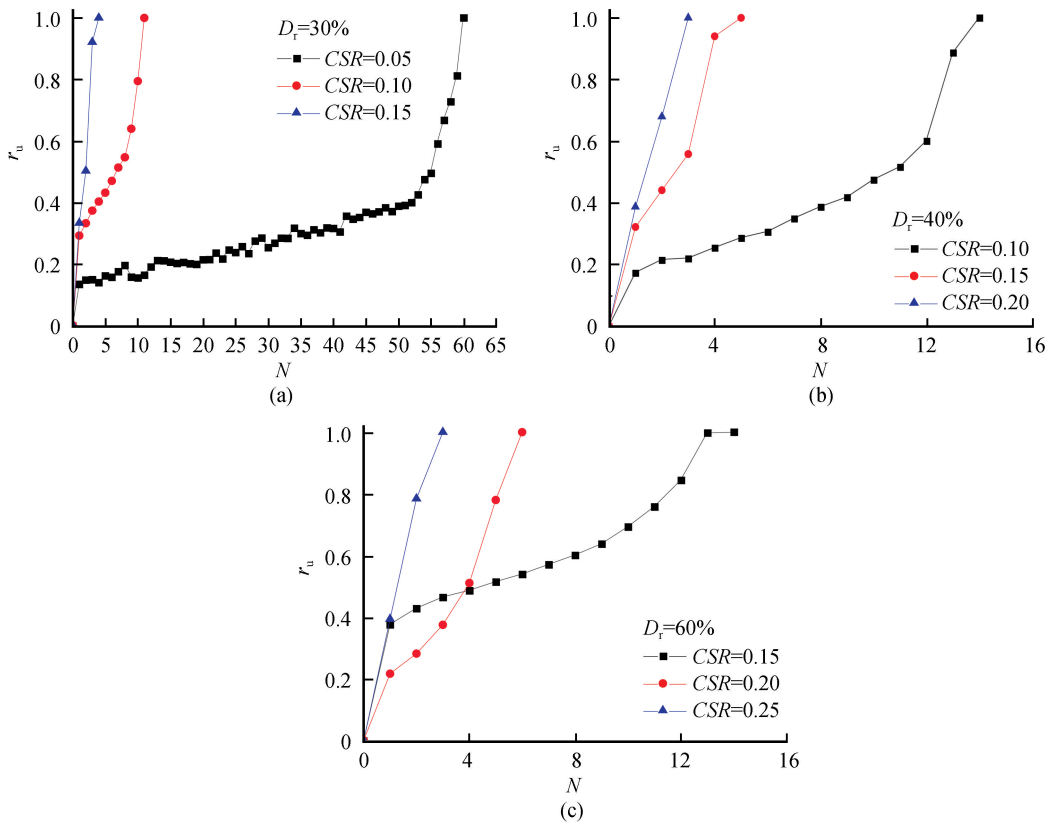


图 8 试样孔压比增长曲线

Fig.8 Growth curves of pore pressure ratio of samples

基于图 8,得到了各相对密度试样液化所需的动载循环次数,见表 3。由分析可知,台安砂土相对密度越小,施加的动荷载越大,越容易发生液化。A3、B2、B3、C2、C3 五个试样液化所需循环次数基本相似,为 3~6 次,极易发生液化。A2、B1、C1 三个试样液化所需循环次数在 11~14 范围内,液化速度较缓,但仍可发生液化。A1 试样液化所需循环次数则增长到 61 次,已基本难以液化。因此, $D_r=30\%$ 、 40% 的试样在 $CSR=0.15$ 左右时就表现出易液化特征, $D_r=60\%$ 的试样则在 $CSR=0.20$ 左右才表现出易液化特征。通过前期调查发现取土点附近砂土层相对密度基本小于 50% 。辽河中下游流域受地震影响,出现液化现象砂土层的相对密度基本小于 55% ^[22]。进而得到,只要 CSR 大于 0.20 ,台安砂土地层就会呈现出易液化的特征。

表 3 各试样液化所需动载循环次数

Table 3 Number of dynamic load cycles required for sample liquefaction			
	$D_r=30\%$	$D_r=40\%$	$D_r=60\%$
$CSR=0.25$	-	-	3
$CSR=0.20$	-	3	6
$CSR=0.15$	4	5	14
$CSR=0.10$	11	14	-
$CSR=0.05$	61	-	-

为进一步探讨台安砂土的液化发展规律,基于表 3 得到了各相对密度试样的动强度曲线,见图 9。从图中可以发现,整体上相对密度越大的试样,曲线位置越向上偏移。在同一 CSR 下,相对密度越大的试样发生液化所需要的动载循环次数越多;同一动载循环次数条件下,相对密度越大的试样发生液化所需的 CSR 越大。同时三种相对密度试样的动强

度曲线近似呈现平行状态,表明三种相对密度试样 N_f 随 CSR 变化所呈现出的发展规律基本一致。由于里氏六、七、八级地震分别会产生 5、12、30 个均匀的应力循环周期^[23],在液化振次 N_f 等同于这三种应力循环周期的条件下,讨论 CSR 与试样 D_r 的关系。表 4 为基于图 9 得到的在同一液化振次条件下,三种相对密度试样发生液化所需的 CSR 值及其增长幅度。观察表 4 能够发现,在里氏六级地震等效动载作用次数($N_f=5$)影响下, $D_r=30\%$ 台安砂土液化所需 CSR 为 0.135 ; $D_r=40\%$ 砂土液化所需 CSR 增至 0.15 ,增长幅度为 11.11% ; $D_r=60\%$ 砂土液化所需 CSR 则增大为 0.21 ,增长幅度为 55.55% 。在 $N_f=12、30$ 次时表现出类似的变化规律。因此在同样的动载作用次数下,随着相对密度 D_r 的持续发展,试样液化所需动应力强度 CSR 增长逐渐加快,但当相对密度 D_r 超过某一阈值后,砂土已经达到足够密实状态,此时难以发生液化现象。

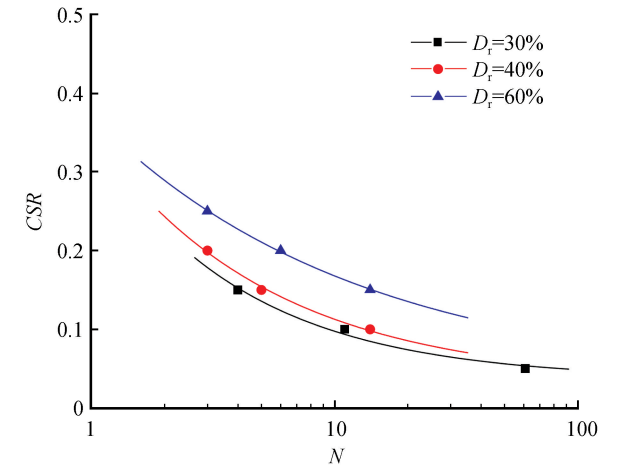


图 9 动强度曲线

Fig.9 Dynamic strength curve

表 4 $N_f=5、12、30$ 时, CSR 与试样 D_r 的关系

Table 4 Relationship between CSR and D_r of samples when $N_f=5、12、30$						
$D_r/\%$	$N_f=5$		$N_f=12$		$N_f=30$	
	CSR	增长幅度/ $\%$	CSR	增长幅度/ $\%$	CSR	增长幅度/ $\%$
30	0.135	-	0.090	-	0.065	-
40	0.150	11.11	0.105	16.67	0.075	15.38
60	0.210	55.55	0.160	77.78	0.120	84.61

3.2 台安砂土动力响应分析

在动三轴试验过程中,动应力 σ_d 与动应变 ϵ_d 会随着循环荷载作用次数的增加而形成闭合圈,即应力-应变滞回曲线。基于试样的滞回曲线,结合该砂土的液化特性,对试样在循环荷载作用下的应力应变关系及其随时间的变化规律进行分析,以探讨该砂土在循环荷载下的动力响应。

由于试样液化较缓时能够更为明显地观察出 ϵ_d 随 σ_d 增长的趋势,因此主要展示动应力幅值较小的 A2、B1、C1 三个试样的滞回曲线。该三个试样液化所需动载循环次数 N_f 分别为 11、14 和 14 次。在试样临近初始液化前 1~2 个循环内,由于试样发生较大变形,已临近弹塑性变形的极限状态,无法形成完整的闭合滞回圈,致使滞回曲线呈现无规律性变化。因

此,图 10(a)、(b)分别用 4 次和 9 次应力循环后的滞回曲线描述 A2 试样液化中期和后期的动力响应特

征,图 10(c)~(f)分别用 6 次和 12 次循环后的滞回曲线描述 B1 和 C1 试样中期和后期响应特征。

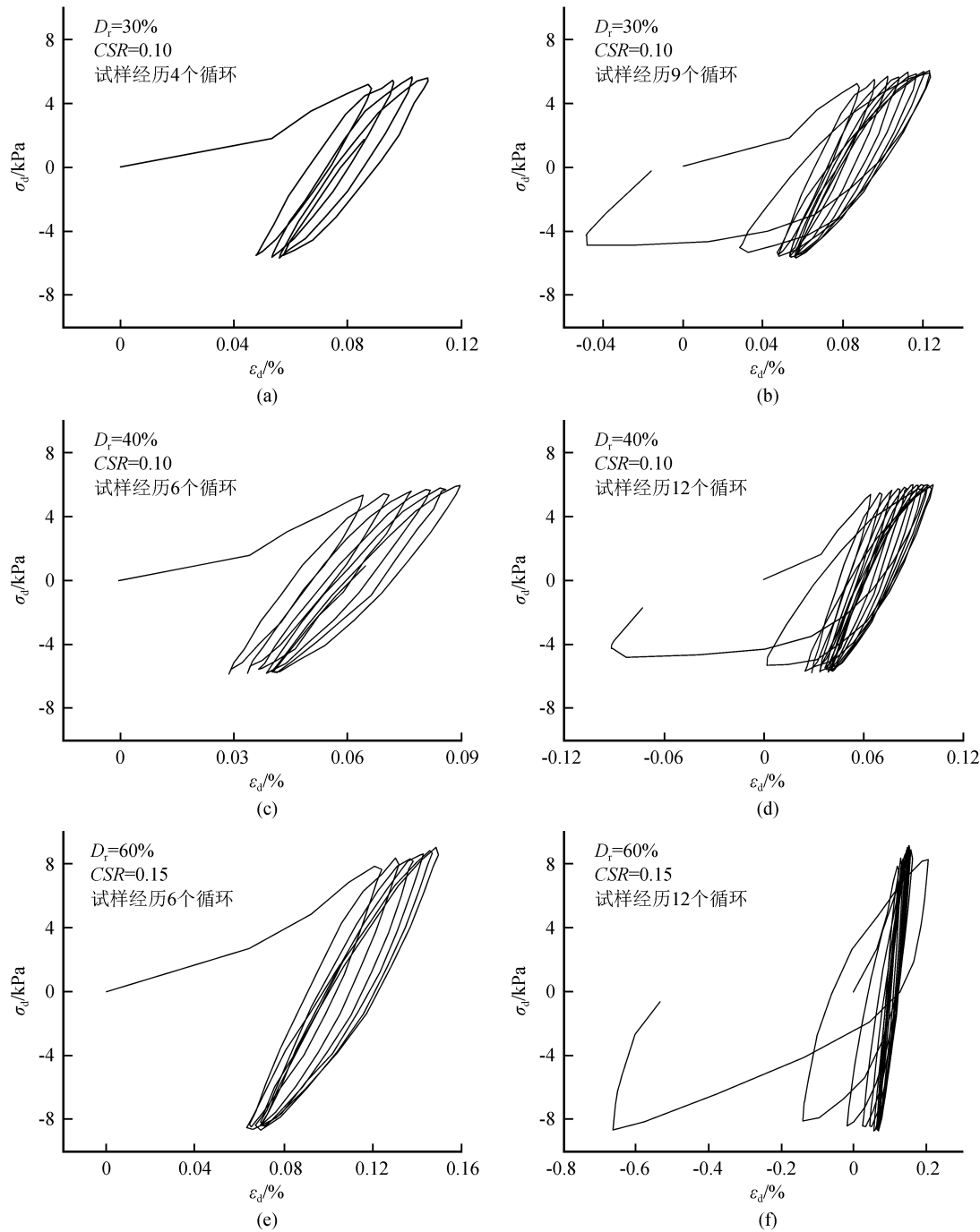


图 10 在动荷载作用下部分砂样滞回曲线发展的阶段特征

Fig.10 Stage characteristics of hysteretic curve development of some sand samples under dynamic load

从图 10 可以看出,三个试样滞回曲线具有相似的变化规律,大体上可以划分为整体受压、拉压平衡和受拉凸显三个阶段。

在整体受压阶段,即动荷载加载初期(动载循环次数 1~3 次),各个试样形成了形状大体相似,且随循环次数向右侧整体平移的“柳叶型”滞回圈,如图

10(a)、(c)、(e)所示。由于滞回圈整体向右侧移动,表明该阶段拉应力对台安砂土试样影响较小,总应变持续向受压方向发展,为整体受压阶段。随着动载作用次数增加,虽然滞回圈顶部仍旧匀速向右平移,但是底部右移速率逐渐放缓,表明拉应力对试样的影响逐渐增强。当动载作用次数到达一定程度

时,即在各个试样液化振次中间值附近(A2 试样为 4 次,B1、C1 试样为 6 次),滞回圈底部不再继续向右侧平移,与前一个循环滞回圈底部出现重叠,并逐渐呈现向左平移的趋势。此时拉应力与压应力对试样的影响基本相同,试样进入拉压平衡阶段。当试样进入液化中后期,试样滞回圈顶部右移速率开始减小,但底部开始向左侧发展。随着动载作用次数的进一步增加,滞回圈底部向左侧发展的速率进一步增大,滞回圈有向水平方向旋转的整体趋势,如图 10(b)、(d)、(f)所示。此时拉应力作用逐渐凸显,试样内部拉应变急剧增长,进入受拉凸显阶段。

4 结论

通过对“三个相对密度”的台安砂土试样开展“三种动应力水平”的动三轴试验,探讨了动孔压和动应变随动载循环次数的发展规律,分析台安砂土的液化发展规律和动力响应特征,得到了以下结论:

(1) 通过动孔压 u_d 与动应变 ϵ_d 两个指标判断台安砂土液化时,得到的液化所需循环次数 N_f 大体一致。以相对密度 $D_r=40\%$ 的三个试样为例,B1 试样 u_d 增至 30 kPa 的时间为 13.2 s, ϵ_d 出现最大动应变幅值的时间为 13.9 s,两个判断标准得到的 B1 试样 N_f 均为 14 次;B2 试样根据 u_d 和 ϵ_d 发展曲线得到的液化时间点分别为 4.15 s 和 4.45 s,试样 N_f 均为 5 次;B3 试样则分别为 2.65 s 和 2.85 s,试样 N_f 均为 3 次。

(2) 相对密度 D_r 和动应力幅值 CSR 是影响砂土液化难易程度的主控因素,其中相对密度对砂土液化发展起到决定性作用。在同一里氏震级的等效动载作用次数下,随着试样相对密度 D_r 的持续发展,液化所需动应力强度 CSR 增长逐渐加快,当 D_r 超过某一阈值后,砂土已足够密实,此时难以发生液化现象。

(3) 循环荷载作用下,台安砂土呈现出初期整体受压、中期拉压平衡、后期受拉凸显的动力响应特征。施加动荷载初期,试样易受压应力作用使总应变持续向受压方向发展,随着动载循环次数增加,拉应力作用逐渐增强,到后期试样拉应变急剧发展,导致试样易发生受拉破坏。

参考文献(References)

[1] 蔡正银,吴诗阳,武颖利,等.高地震烈度区深厚覆盖砂层液化

研究[J].岩土工程学报,2020,42(3):405-412.

CAI Zhengyin, WU Shiyang, WU Yingli, et al. Liquefaction of deep overburden layers in zones with high earthquake intensity [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(3): 405-412.

[2] HUANG Y, YU M. Review of soil liquefaction characteristics during major earthquakes of the twenty-first century [J]. Natural Hazards, 2013, 65(3): 2375-2384.

[3] 李平,田兆阳,薄景山,等.松原 5.7 级地震砂土液化研究[J].土木工程学报,2019,52(9):91-99.

LI Ping, TIAN Zhaoyang, BO Jingshan, et al. Study on sand liquefaction of the magnitude-5.7 Songyuan earthquake [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(9): 91-99.

[4] 黄文熙.砂基和砂坡的液化研究[J].水利水电技术,1962(1):38-39.

[5] SEED H B, LEE K L. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1966, 92(6): 105-134.

[6] ROBERTSON P K, SASITHARAN S, CUNNING J C, et al. Shear-wave velocity to evaluate in situ state of Ottawa sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(3): 262-273.

[7] SAXENA S K, REDDY K R. Dynamic moduli and damping ratios for Monterey No.0 sand by resonant column tests [J]. Soils and Foundations, 1989, 29(2): 37-51.

[8] DÍAZ-RODRÍGUEZ J A, ANTONIO-IZARRARAS V M, BANDINI P, et al. Cyclic strength of a natural liquefiable sand stabilized with colloidal silica grout [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(10): 1345-1355.

[9] 王权民,李刚,陈正汉,等.厦门砂土的动力特性研究[J].岩土力学,2005,26(10):1628-1632.

WANG Quanmin, LI Gang, CHEN Zhenghan, et al. Research on dynamic characteristics of sands in Xiamen City [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10): 1628-1632.

[10] 陈国兴,刘雪珠.循环荷载作用下南京片状细砂的不排水动力性态[J].岩土工程学报,2009,31(10):1498-1504.

CHEN Guoxing, LIU Xuezh. Undrained cyclic behaviors of Nanjing flake-shaped fine sand under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1498-1504.

[11] 潘华,陈国兴,刘汉龙.饱和南京细砂液化后大变形特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(7):1475-1481.

PAN Hua, CHEN Guoxing, LIU Hanlong. Study of behaviour of large post-liquefaction deformation in saturated Nanjing fine sand [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1475-1481.

[12] 许成顺,李艳梅,潘霞,等.初始静孔隙水压力对砂土静动力剪切特性影响的试验研究[J].岩土工程学报,2019,41(6):1050-1057.

XU Chengshun, LI Yanmei, PAN Xia, et al. Experimental

- study on effect of initial static pore water pressure on static and dynamic shear properties of sand[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(6):1050-1057.
- [13] 朱红彬,邢成起,李红,等.华北构造区主要地震带分段与强震活动[J].地震学报,2010,32(6):705-717.
- ZHU Hongbin, XING Chengqi, LI Hong, et al. Segmentation of main seismic belts and strong earthquakes in North China tectonic region[J].Acta Seismologica Sinica,2010,32(6):705-717.
- [14] 张猛.粉细砂路基压实技术对比分析及压实质量检测技术研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- ZHANG Meng. Compaction technology comparison analysis and compaction quality inspection technology research for fine sand roadbed[D].Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [15] LEE KENNETH L, FITTON JOHN A. Factors affecting the dynamic strength of soil[C]//A Symposium Presented at the 71st Annual Meeting, ASTM Vibration Effects of Earthquakes on Soils and Foundations. San Francisco, 1968.
- [16] 王艳丽,王勇.饱和砂土液化后强度与变形特性的试验研究[J].水利学报,2009,40(6):667-672.
- WANG Yanli, WANG Yong. Experimental study on strength and deformation characteristics of saturated sand after liquefaction[J].Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(6): 667-672.
- [17] 王志华,周恩全,陈国兴,等.循环荷载下饱和砂土固-液相变特征[J].岩土工程学报,2012,34(9):1604-1610.
- WANG Zhihua, ZHOU Enquan, CHEN Guoxing, et al. Characteristics of solid-liquid phase change of saturated sand under cyclic loading[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(9):1604-1610.
- [18] 汪闻韶.土体液化与极限平衡和破坏的区别和关系[J].岩土工程学报,2005,27(1):1-10.
- WANG Wenshao. Distinction and interrelation between liquefaction, state of limit equilibrium and failure of soil mass[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 1-10.
- [19] 李广信,张丙印,于玉贞.土力学[M].2版.北京:清华大学出版社,2013.
- LI Guangxin, ZHANG Bingyin, YU Yuzhen. Soil mechanics [M]. 2nd Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [20] 谷川,蔡袁强,王军.地震P波和S波耦合的变围压动三轴试验模拟[J].岩土工程学报,2012,34(10):1903-1909.
- GU Chuan, CAI Yuanqiang, WANG Jun. Coupling effects of P-waves and S-waves based on cyclic triaxial tests with cyclic confining pressure[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(10): 1903-1909.
- [21] EL MOHTAR C S. Evaluation of the 5% double amplitude strain criterion [C]//Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Alexandria, Egypt, 2009: 80-83.
- [22] 朱海之,王立功,高清武,等.下辽河地区砂土液化形成的震害地质问题[J].地震地质,1979,1(2):67-73,98.
- ZHU Haizhi, WANG Ligong, GAO Qingwu, et al. The geological aspect of earthquake hazard caused by liquefaction of sand in the lower Liaohe River region[J].Seismology and Geology, 1979, 1(2): 67-73, 98.
- [23] HUANG Y, WANG L. Laboratory investigation of liquefaction mitigation in silty sand using nanoparticles[J].Engineering Geology, 2016, 204: 23-32.