

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.113



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于双向循环动三轴试验的熔融石英砂 动力特性与液化机制

胡旭辉¹, 罗靖雨², 周航²

(1. 重庆高速公路集团有限公司, 重庆 401121; 2. 重庆大学 土木工程学院; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:透明土物理模型试验技术利用光学透明材料模拟天然土体,通过光学成像与图像处理实现对土体变形与渗流过程的无损、全场可视化观测,是研究地下结构与岩土相互作用及其灾变机理的重要手段。透明土物理模型试验高度依赖材料力学性质的相似性,但现有研究多集中于材料的静力学特性,其动力学响应特性仍亟待深入研究。基于室内双向动三轴试验,对熔融石英砂分别开展轴向循环三轴试验与径向循环三轴试验,系统研究典型透明砂土材料的动力特性,重点分析循环荷载方向与循环应力比(CSR)的影响。结果表明:连续级配砂土的动力响应行为(液化门槛应力比0.10~0.15)与天然砂土高度一致,且当CSR超过门槛值时,液化发展速率随其增大而显著加快;在轴向循环荷载作用下,熔融石英砂的液化响应机制与天然砂土高度相似,孔压增长曲线随动应力幅值由C型逐渐向A型转变;此外,熔融石英砂在不同荷载方向上的动力响应亦存在一定差异。

关键词:透明砂土;熔融石英砂;动力特性;动三轴试验

中图分类号:TU375.4 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(XXXX)XX-0001-12

Dynamic properties and liquefaction mechanism of fused quartz sand based on bidirectional cyclic triaxial tests

HU Xuhui¹, LUO Jingyu², ZHOU Hang²

(1. Chongqing Expressway Group Co., Ltd, Chongqing 401121, P. R. China; 2. School of Civil Engineering; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Transparent soil physical modeling utilizes optically transparent materials to simulate natural soils and, combined with optical imaging and image-processing techniques, enables nondestructive and full-field visualization of soil deformation and seepage processes. This technique has become an important approach for investigating the interaction between underground structures and geomaterials as well as their failure mechanisms. The reliability of transparent soil modeling highly depends on the similarity of mechanical

收稿日期:2025-08-01

基金项目:国家自然科学基金(52278330、52027812)

作者简介:胡旭辉(1982-),男,正高级工程师,主要从事高速公路建设研究,E-mail:huxuhui@cegc.com.cn。

周航(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:zh4412517@163.com。

Received: 2025-08-01

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52278330, 52027812)

Author brief: HU Xuhui (1982-), senior engineer, main research interest: highway construction, E-mail: huxuhui@cegc.com.cn.

ZHOU Hang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zh4412517@163.com.

properties between the model material and natural soil. However, most existing studies primarily focus on the static properties of transparent soil materials, while their dynamic response characteristics remain insufficiently explored. To address this gap, this study employs a laboratory bidirectional dynamic triaxial apparatus to conduct axial and radial cyclic triaxial tests on fused quartz sand, a typical transparent sandy soil material. The dynamic behavior of fused quartz sand is systematically investigated, with particular attention to the effects of cyclic loading direction and cyclic stress ratio (CSR). Test results indicate that the dynamic response characteristics of the continuously graded sand, including a liquefaction threshold CSR of 0.10 - 0.15, are highly consistent with those of natural sands. When the CSR exceeds this threshold, the liquefaction development rate increases significantly with the rising stress amplitude. Under axial cyclic loading, the liquefaction response mechanism of fused quartz sand closely resembles that of natural sands, and the excess pore pressure buildup curve transitions from a Type C pattern to a Type A pattern as the cyclic stress amplitude increases. In addition, noticeable differences in dynamic response are observed for fused quartz sand under different loading directions.

Keywords: transparent sand; fused quartz; dynamic characteristics; dynamic triaxial test

传统物理模型试验方法多依赖侵入式测量手段,如在土体内部预埋传感器以获取单点或局部的变形信息。然而,传感器的埋设不可避免地扰动土体内部结构,破坏其连续性,从而改变岩土体本身的力学性质,并影响其变形破坏模式。此外,岩土体的物理力学性质具有明显的各向异性,其力学参数随空间位置变化而差异显著,导致传统侵入式方法获取的数据呈现强非连续性,难以准确、完整地刻画岩土体的应力与变形场^[1]。相比之下,X射线、断层扫描(CT)、核磁共振(MRI)等非侵入式测量技术能更好地揭示岩土体内部变形与破坏特征,但其成本高昂,难以推广使用^[2-3]。在此背景下,透明土物理模型试验技术逐渐受到关注^[1]。相比于X射线、断层扫描以及核磁共振技术等非侵入式测量技术,透明土物理模型试验技术具有操作简便、易于实施、成本较低等优势,具备更强的可操作性和推广潜力。结合数字图像采集与处理技术,该方法能实现对土体内部变形的非侵入、无扰动、全过程监测,有效弥补了传统侵入式测量的缺陷,为岩土工程灾变机理研究提供了可靠的技术手段。

透明土物理模型试验技术能直观揭示地下空间岩土与结构的变形破坏机理,有助于深化对天然土体变形特性的认识。然而,该技术的应用前提是要确保透明土材料的力学性质与天然土体具有较高的相似性。针对材料力学特性,Mannheimer^[4]及Iskander等^[5-6]利用无定型硅粉制成透明土,并开展了固结沉降和渗流等试验,结果表明,该材料与天然黏土拥有相似的物理力学性质。随后,Iskander等^[7]、SADEK等^[8]提出采用硅胶颗粒模拟天然砂土,拓展了透明土技术的适用范围。吴明喜^[9]提出采用颗粒形态和内部结构更接近天然砂土的熔融石英

代替硅胶颗粒配制透明砂土,并通过三轴试验验证了其应力-应变特征与天然砂土高度一致。此后,众多学者围绕熔融石英砂的物理力学性质开展了大量研究,验证其用于模拟天然砂土的可行性。

孔纲强等^[10]采用玻璃砂制备透明砂土并开展三轴试验,与同等试验条件下的福建标准砂的试验结果进行对比,研究发现玻璃砂透明土的变形特性主要受相对密实度的影响。随后孔纲强等^[11]进一步对玻璃砂透明土的强度特性进行研究,并与标准砂三轴试验结果进行对比,认为标准级配玻璃砂透明土的抗剪强度与标准砂相近,可使用标准级配的玻璃砂透明土模拟天然砂。高岳等^[12]对熔融石英砂进行侧限压缩试验、直剪试验以及三轴试验,结果表明,熔融石英砂透明土在强度和变形上与天然砂土具有相似性。王文国^[13]通过熔融石英砂的直剪试验与固结压缩试验发现,其抗剪强度指标与压缩特性与天然石英砂基本一致。魏静等^[14]通过三轴试验研究也得到了熔融石英砂与天然砂土在力学基本特性上的高度相似性结论。由于熔融石英砂颗粒形状不规则且具有尖角^[15],部分学者指出其抗剪强度高于天然砂土^[16-21]。然而,也有研究表明,当峰值摩擦角小于 40° 时,熔融石英砂的抗剪强度与天然砂土相似^[22-28]。此外,冷先伦等^[29-30]以熔融石英砂为土骨架、气相二氧化硅为黏结剂配制透明胶结土,开展了一系列室内试验,结果表明,通过调整材料比例可使透明胶结土表现出硬化或软化特征,可满足多数天然土体的模拟需求。谢朋等^[31]也使用熔融石英砂与气相二氧化硅制成与隧道软岩的强度特征类似的透明软岩。庄妍等^[32]研究发现,通过试验验证材料在目标工况下的力学性能是材料工程化应用的关键步骤,这一思路同样适用于透明土材料

体系。

在静力荷载作用下,熔融石英砂的力学性质与天然砂土基本一致,具有良好的天然砂土模拟能力,然而目前关于其动力学特性的研究较少,尚缺乏系统的试验验证和本构特性分析。因此,为推动透明土物理模型试验技术在地震荷载、交通荷载等动荷载环境下的应用,亟须明确熔融石英砂与天然砂土在动力响应特性方面的一致性。笔者针对熔融石英砂在循环荷载作用下的动力特性开展循环三轴试验,分析其不同在不同荷载方向及不同循环应力比条件下的动力响应。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验所用材料为熔融石英砂。熔融石英砂可与白油及烷烃类有机溶液配制出透明砂土,是目前透明土物理模型试验中常用的透明砂土骨架材料。该材料由石英经高温熔炼后冷却并破碎形成的,其中SiO₂的含量高达99.9%,相比硅胶颗粒,其颗粒形态和内部结构上都更接近于天然砂土。试验所用熔融石英砂均为江苏新沂万和矿物生产。

有研究表明^[33],较大的最大粒径 d_{max} 、较小的最小粒径 d_{min} 以及较小的平均粒径 d_{50} ,都可能造成熔融石英砂的峰值摩擦角 ϕ_p 和临界状态摩擦角 ϕ_c 增大,而当熔融石英砂的粒径尺寸控制在0.1~2 mm的范围,则可以获得相对较小的峰值摩擦角 ϕ_p 和临界状态摩擦角 ϕ_c ,从而使其抗剪强度参数更接近天然砂土。基于上述考虑,将熔融石英砂的粒径范围限定在0.1~2 mm,以尽可能模拟天然砂土。因此,

在试验中选用0.1~2 mm粒径熔融石英砂组成连续级配试样,级配曲线如图1所示,其基本土性参数见表1。

表 1 熔融石英砂基本土性参数

Table 1 Soil physical characteristics of fused quartz

e_{max}	e_{min}	d_{50}/mm	C_u	C_c
0.752 6	0.404 9	0.70	5.840 2	1.239 6

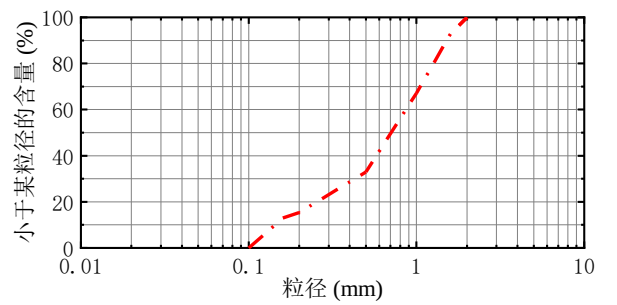


图 1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain size distribution curve of standard sand

需要说明的是,试验选用蒸馏水作为试样的孔隙流体,这是因为混合有机油溶液极易导致仪器内部密封部件老化甚至开裂。同时,已有学者针对不同孔隙流体对熔融石英砂力学性质的影响开展了研究,结果表明,孔隙流体对熔融石英砂的力学性质影响有限^[16,34-37]。

1.2 试验方案

试验采用英国GDS双向动三轴试验系统,系统由围压控制器、反压控制器、DCS数据采集系统、伺服电机系统、动态围压控制器、传感器及计算机等组成。系统的主要技术参数指标见表2,表中FS指传感器满量程。

表 2 双向动三轴主要技术参数指标

Table 2 Main technical parameters of bidirectional dynamic triaxial test

试样尺寸	最大加载频率	最大围压及控制精度	最大反压及控制精度
Φ50 mm×100 mm	5 Hz	2 MPa、1 kPa	2 MPa、1 kPa
孔压传感器量程及精度	轴向力传感器量程及精度	位移传感器量程及精度	动态围压传感器量程及精度
1 MPa、1 kPa	10 kN、0.1%FS	100 mm、0.07%FS	1 MPa、0.1%FS

为探究熔融石英砂在动力荷载条件下代替天然砂土开展可视化模型试验的可行性,综合考虑级配、循环应力比和加载方向对其动力特性的影响,开展了循环荷载试验。

在常规动三轴试验中,通常保持试样围压不变,通过轴向施加循环偏应力,使试样内部某斜截面上产生循环剪应力,以模拟地震荷载。然而,周期性改变试样的轴向循环偏应力时,该斜截面在产生循环剪应力的同时也会受到随之变化的循环正应力,这与真实的地震荷载存在一定差异。此外,

在实际地震中,土体常同时承受显著的水平冲击作用,因此,开展径向循环加载试验,不仅能得到熔融石英砂在水平动荷载作用下的动力响应,还能对比熔融石英砂在不同加载方向下的动力特性差异。

选择有效固结围压为100 kPa,加载频率为0.5 Hz,相对密实度为60%的试样开展轴向及径向循环荷载试验。试样经固结完成后和正式循环加载前的孔隙比及相对密实度如表3和表4所示,在径向循环加载试验中,轴向动偏应力和动围压的加载频率及波形一致,加载幅值相同,但动偏应力与动围

压的加载设置一定相位差 $\phi=\pi$,以保证试样仅受水平向循环荷载,从而探究熔融石英砂在水平向动荷载作用下的动力响应,围压及偏应力波形图如图2所示。具体试验方案见表5。

表 3 试样孔隙比

Table 3 Void ratio of fused quartz

加载方向	状态	CSR=0.1	CSR=0.15	CSR=0.2	CSR=0.3	CSR=0.4
轴向	固结完成后	0.536 423	0.536 942	0.536 824	0.536 643	0.536 581
	循环加载前	0.536 352	0.535 920	0.536 675	0.536 101	0.535 865
径向	固结完成后	0.536 533	0.537 044	0.535 928	0.536 321	0.535 071
	循环加载前	0.536 447	0.535 535	0.535 315	0.535 464	0.533 946

表 4 试样相对密实度

Table 4 Relative density of fused quartz

加载方向	状态	%				
		CSR=0.1	CSR=0.15	CSR=0.2	CSR=0.3	CSR=0.4
轴向	固结完成后	62.17	62.02	62.06	62.11	62.13
	循环加载前	62.19	62.32	62.10	62.27	62.33
径向	固结完成后	62.14	61.99	62.32	62.20	62.56
	循环加载前	62.17	62.43	62.49	62.45	62.89

1.3 试验流程

试验采用落砂法制备尺寸为 $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的试样,制样前按试验设计的相对密实度计算所需干砂的质量 m_s ,将砂土烘干后称取质量为 m_s 的干砂分为5份装入模具,使用击实锤控制每层高度为20 mm即可。具体制样流程如图3所示。

制样完成后即可对试样进行饱和固结工作。

表 5 熔融石英砂循环加载试验方案

Table 5 Schedule of cyclic loading test on fused quartz

序号	加载方向	CSR	动偏应力幅值/kPa	动围压幅值/kPa
1	轴向	0.1	20	
2		0.15	30	
3		0.2	40	
4		0.3	60	
5		0.4	80	
6	径向	0.1	-20	20
7		0.15	-30	30
8		0.2	-40	40
9		0.3	-60	60
10		0.4	-80	80

为增大试样饱和度,对试样依次进行CO₂饱和、水头饱和及反压饱和。其中,CO₂饱和可置换试样中不易溶于水的空气,水头饱和可排出试样内大部分气体,大大减小反压饱和时间,最后在较高的反压下

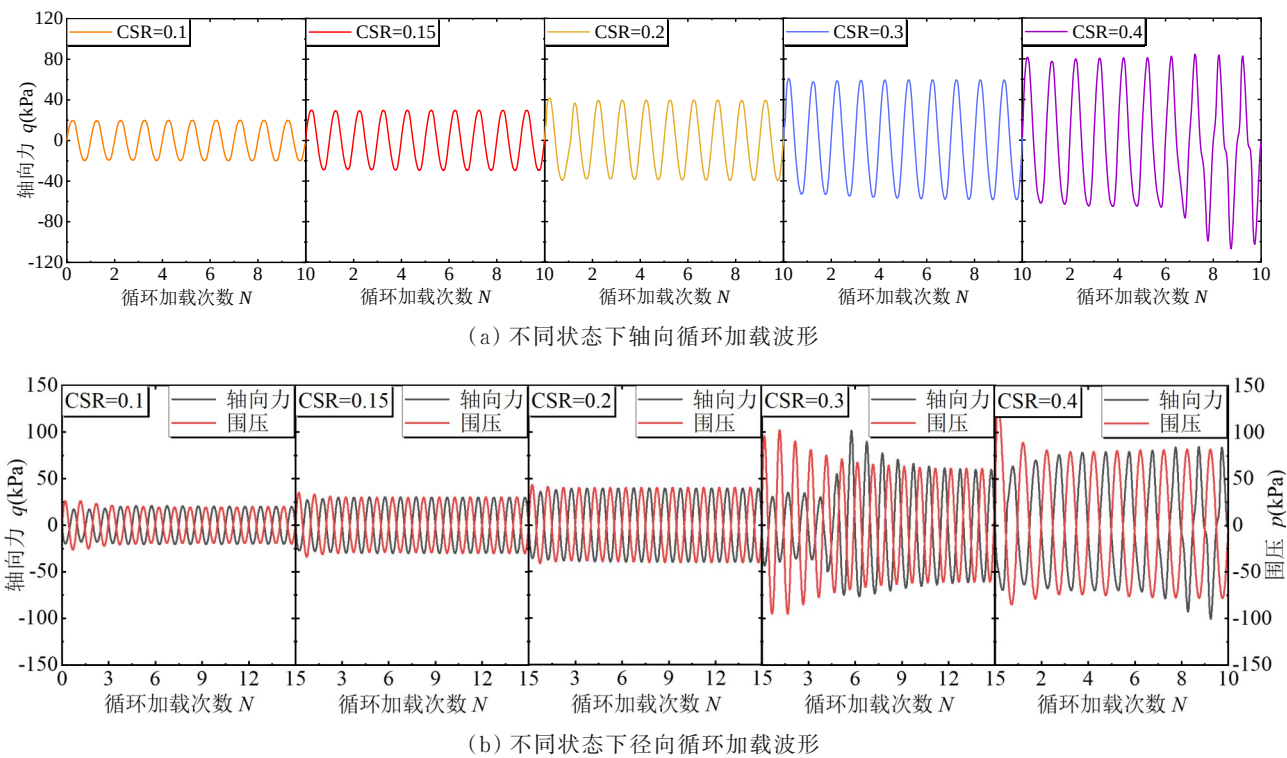


图 2 不同循环应力比下循环加载波形

Fig. 2 Cyclic loading waveforms under different cyclic stress ratios

可溶解残余气体。试验选用 300 kPa 反压进行反压饱和,需要注意的是,反压饱和应分级施加,每级 50 kPa,同时保证围压始终大于反压 20 kPa,避免试样被较大反压冲破。反压饱和完成后进行 *B*-Check,若 *B* 值大于 0.95 即认为试样完全饱和。*B*-Check 结果表明,试验的试样 *B* 值均大于 0.95。饱和完成后对试样进行固结,试验选用有效固结围压为 100 kPa,固结 30 min 后观察试样的轴向应变、反压体积等数据变化,达到稳定后可认为固结完成。

试样饱和和固结完成后,需对试样进行刚度估计,即在正式循环加载前,使用不同的刚度估计值,对试样进行 1~2 次循环加载,以确保加载波形的完整。轴向加载所用刚度估计值为 2,径向刚度估计取值为 1。

随后在不排水条件下进行循环加载试验。在加载过程中,当试样孔隙水压力达到有效固结围压后认为试样发生破坏,此时停止试验。

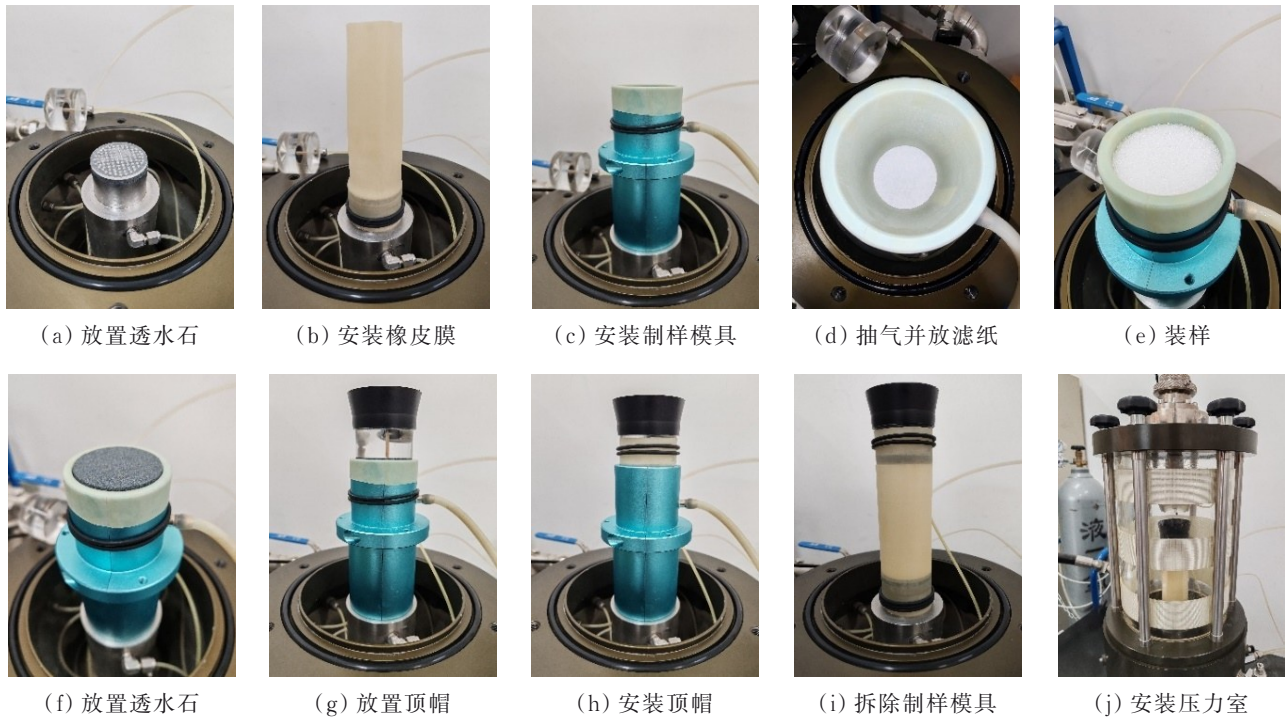


图3 制样流程

Fig. 3 Sample preparation

2 试验结果分析

连续级配试样由 0.1~2 mm 大小的熔融石英砂颗粒组成,含有细小颗粒。选择循环应力比 0.1、0.15、0.2、0.3 和 0.4,分别开展轴向以及径向循环荷载试验。

2.1 动应力-应变曲线

图4为不同 CSR 下连续级配试样的动应力应变曲线,其中蓝色曲线为连续级配试样在不同轴向循环 CSR 下的动应力-应变曲线。从图中可以看出,在较小的动应力幅值($CSR=0.1$)下,试样的应力应变曲线基本呈线性发展,试样几乎处于弹性变形阶段,经 3000 次循环后,滞回曲线仍未发生倾斜,表明试样未出现明显的塑性变形。而当动应力幅值略微提升至 $CSR=0.15$ 后,试样经 1 200 次循环后开始出现塑性应变累积,滞回曲线在循环荷载作用下逐渐倾斜并缓慢向左移动,在第 1 372 次循环

时,峰值应变达到 2%,随后试样发生受拉破坏。当 CSR 增大至 0.2 时,试样的滞回曲线在前 100 次循环内仍保持线性发展,随后滞回曲线开始倾斜倒塌,在第 191 次循环时,峰值应变达到 2%,紧接着试样迅速发生受拉破坏,拉伸方向的塑性应变快速增长。进一步增大动应力幅值至 $CSR=0.3$ 时,试样滞回曲线随振次增加而出现倾斜倒塌,在第 30 次循环时,峰值应变便达到 2%,随后试样迅速出现受拉破坏。当 CSR 增大至 0.4 时,滞回曲线的面积从加载开始便迅速增大,其斜率也快速降低,刚度出现明显衰减,表明试样的塑性变形发展速度极快,仅在第 7 次循环时峰值应变就达到了 2%,随后试样发生受拉破坏。这表明,连续级配试样在动应力幅值较小时无明显塑性变形,试样变形几乎处于弹性阶段,但随着 CSR 的增大,滞回曲线倾斜倒塌的速度加快,塑性应变累积速度显著加快,且峰值应变达

到 2% 的循环次数显著减少,最终导致试样发生明显的受拉破坏。

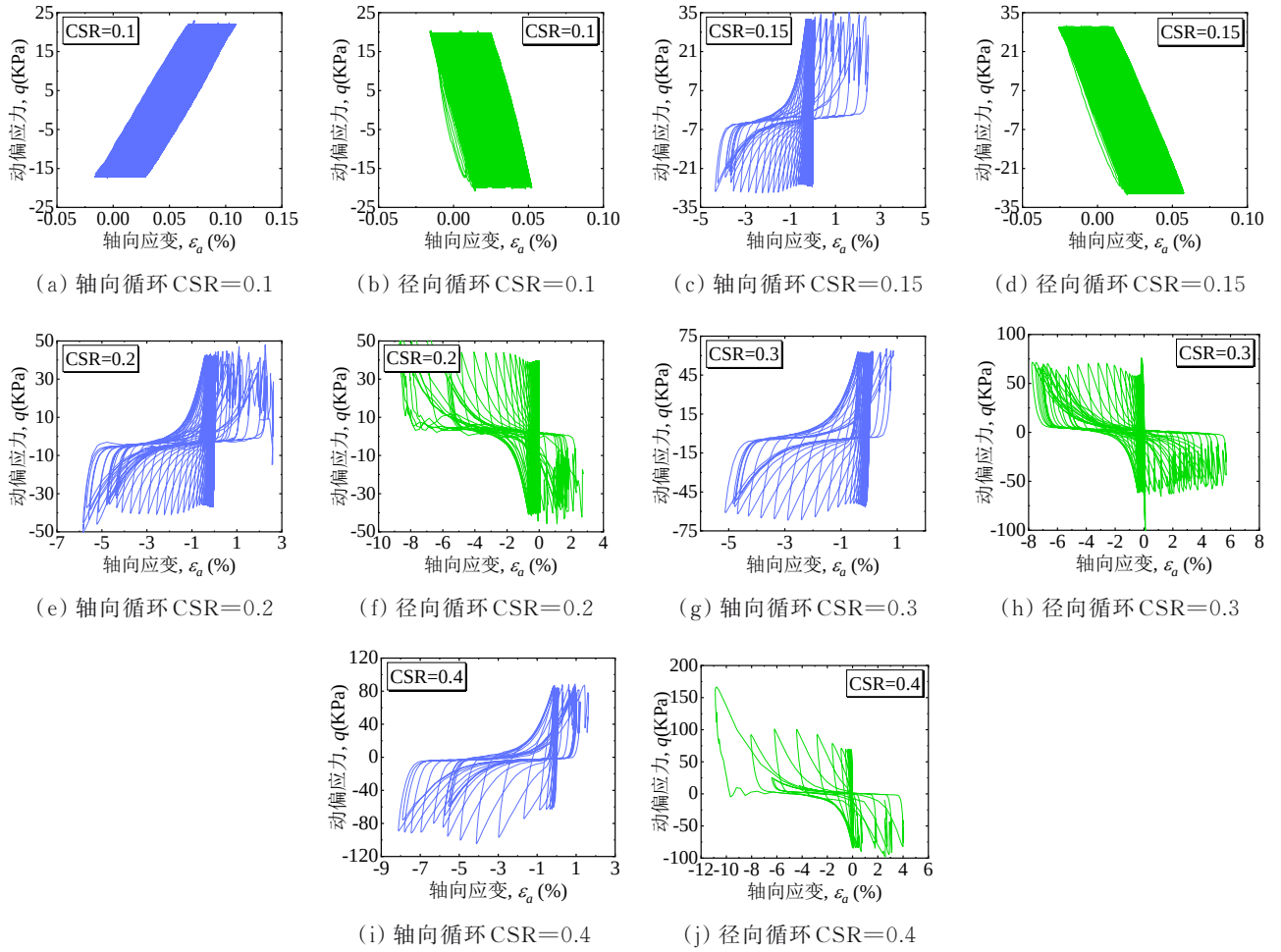


图 4 连续级配试样的动应力应变曲线

Fig. 4 Dynamic stress-strain curves

连续级配试样中含有细小颗粒,在循环振动荷载作用下,试样内细小颗粒逐步落入了大颗粒之间的孔隙中,导致细小颗粒无法起到承担荷载的作用,反而削弱了试样整体的稳定性。同时,细骨料颗粒的填充导致孔隙水压力上升明显,颗粒间的有效应力迅速降低,从而导致试样在一个较低的动应力幅值(CSR=0.15)作用下便出现液化破坏的现象。

不同于常规轴向循环加载的动强度试验,在径向循环加载试验中,试样的轴向压力与围压均在变化,两个动荷载之间应力幅值相同,荷载作用方向相反,且存在相位差 $\phi = \pi$,以保证试样在轴向上保持压力不变,试样仅在横向受循环动荷载作用。

图 4 中绿色曲线为连续级配试样在不同径向循环 CSR 下的动应力-应变曲线。从图中可以看出,当径向循环 CSR 为 0.1 和 0.15 时,试样经 3000 次循环后均未出现明显塑性变形,动应力-应变曲线呈线性发展,试样几乎处于弹性变形阶段。在轴向循环 CSR 为 0.15 时,试样经过 1 373 次循环荷载后

发生了液化破坏,而在相同条件下的径向循环 CSR 为 0.15 时,试样并未发生破坏。这表明试样在水平向承受荷载的能力要高于轴向,试样径向刚度更大。这一现象揭示了试样在不同加载方向上的力学特性差异,进一步说明加载方向对试样动力特性的影响不容忽视。

而当径向循环 CSR 增大至 0.2 时,试样的动应力-应变曲线随着振次的增加而逐渐倾斜,试样的径向刚度逐步下降,在前 30 次循环荷载作用下,动应力-应变曲线呈线性发展,随后逐渐开始出现“倾倒”,直至第 165 次循环,试样的应变幅值达到 2%,试样出现拉伸破坏。进一步增大径向循环 CSR 至 0.3 时,试样在第 6 次循环作用下,滞回曲线开始倾斜,在第 40 次循环作用后,应变幅值达到 2%,随后试样迅速破坏。当径向循环 CSR 增大至 0.4 时,试样的滞回曲线从加载开始便明显出现“倾倒”,刚度逐渐下降,在第 8 次循环时,应变幅值达到 2%,试样发生受拉破坏。通过对比图 4 中发生破坏的几个试样的动应力-应变曲线可以发现,承受水平向荷载的

试样刚度略高于承受轴向荷载的试样。具体表现为,在径向循环 CSR 为 0.15 时,试样经历了 3000 次循环荷载而未发生破坏,而在轴向循环 CSR 为 0.15 时,仅 1 373 次循环便出现液化破坏。此外,在 CSR 较大(0.3 和 0.4)的条件下,受水平向荷载试样的峰值应变达到 2% 的速度也更慢。这表明熔融石英砂在水平向上的刚度和抗变形能力高于轴向,展现出了熔融石英砂在不同加载方向上动力特性的差异。

2.2 应力路径

图 5 为不同 CSR 下连续级配试样的应力路径,其中蓝色曲线为连续级配试样在不同轴向循环

CSR 下的应力路径。在 CSR=0.1 时,随着循环次数的增加,试样的应力路径逐渐向右移动,有效平均应力呈现出增加的趋势。由于试验过程中围压保持不变,仅改变轴向偏应力,平均有效应力的增加说明试样孔隙水压力降低,试样体积反而在增大,可能出现剪胀现象。而当试样的应力幅值略微增至 CSR=0.15 时,试样的应力路径随振次的增加而向左移动,平均有效应力减少,试样孔隙水压力增大,直至试样发生液化破坏。由图 5 可以发现,随着轴向 CSR 的增大,应力路径更加稀疏,向左移动速度加快,意味着试样的破坏速度加快。

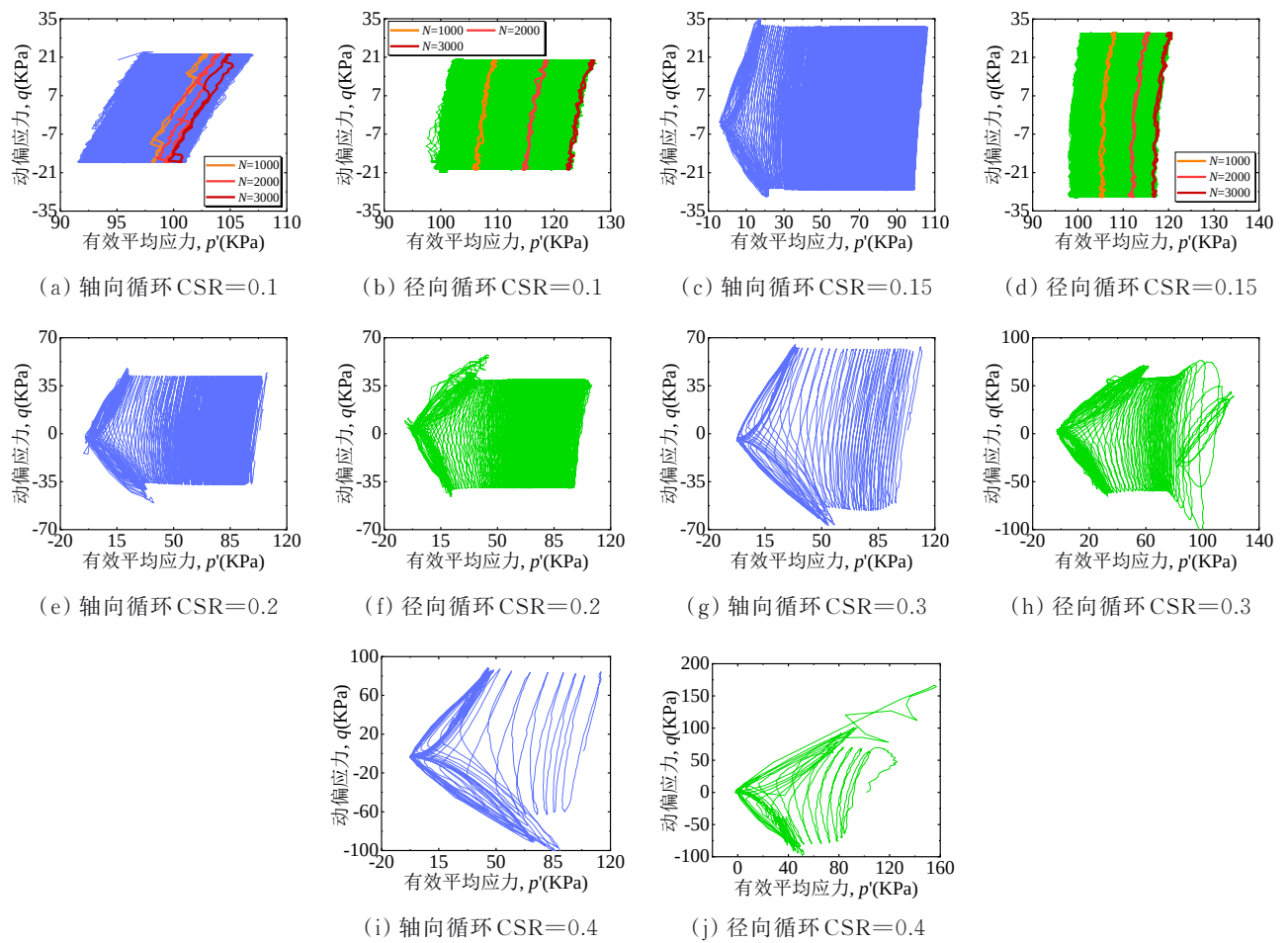


图 5 连续级配试样的应力路径

Fig. 5 Stress path

图 5 中绿色曲线为连续级配试样在不同径向循环 CSR 下的应力路径。与轴向加载相似,对于未发生破坏的两个试样(CSR=0.1 和 CSR=0.15),其应力路径随径向循环次数增加向右移动,平均有效应力增大,孔隙水压力减小,即使经 3000 次循环后试样未能发生破坏。对于其余 3 个试样,应力路径从加载开始便随循环振次的增加而向左移动,平均有效应力逐渐减小,其减小速度间接反映了试样孔隙水压力增大的速度。从图 5(f)、(h)、(j) 可以发

现,随着 CSR 的增大,试样应力路径向左移动速度越快,试样出现液化破坏的速度也越快。说明径向循环 CSR 的增大同样会加速试样的破坏过程,与轴向加载结果一致。其中 CSR=0.3 的试样在加载初期未能稳定,可能是由于刚度估计效果不佳造成,但经少量循环后,伺服加载系统进行反馈修正,应力路径逐渐趋于稳定。

2.3 动应变发展曲线

连续级配试样在循环荷载作用下的轴向应变

发展曲线如图6所示。试样的轴向应变随循环次数的增加而增大,直至试样发生液化破坏。在动应力幅值较小时($CSR=0.1$),试样在3000次循环荷载作用下所产生的累积应变较小,在动荷载作用下的峰值压缩应变约0.1%,循环振动停止后的压缩应变不足0.05%,试样几乎处于弹性状态。小动应力幅值下,试样的弹性压缩变形可能是由于试样内的

细小颗粒在循环振动作用下,逐渐落入大颗粒的孔隙内,未能起到承担动荷载的作用。当动应力幅值增大至 $CSR=0.15$,试样经1200次循环后出现明显塑性变形,砂土试样难以承受拉力而出现拉伸破坏。在最后阶段的循环加载中,试样的拉伸应变迅速增大,且随着动应力幅值的增大,试样出现拉伸破坏的速度明显加快。

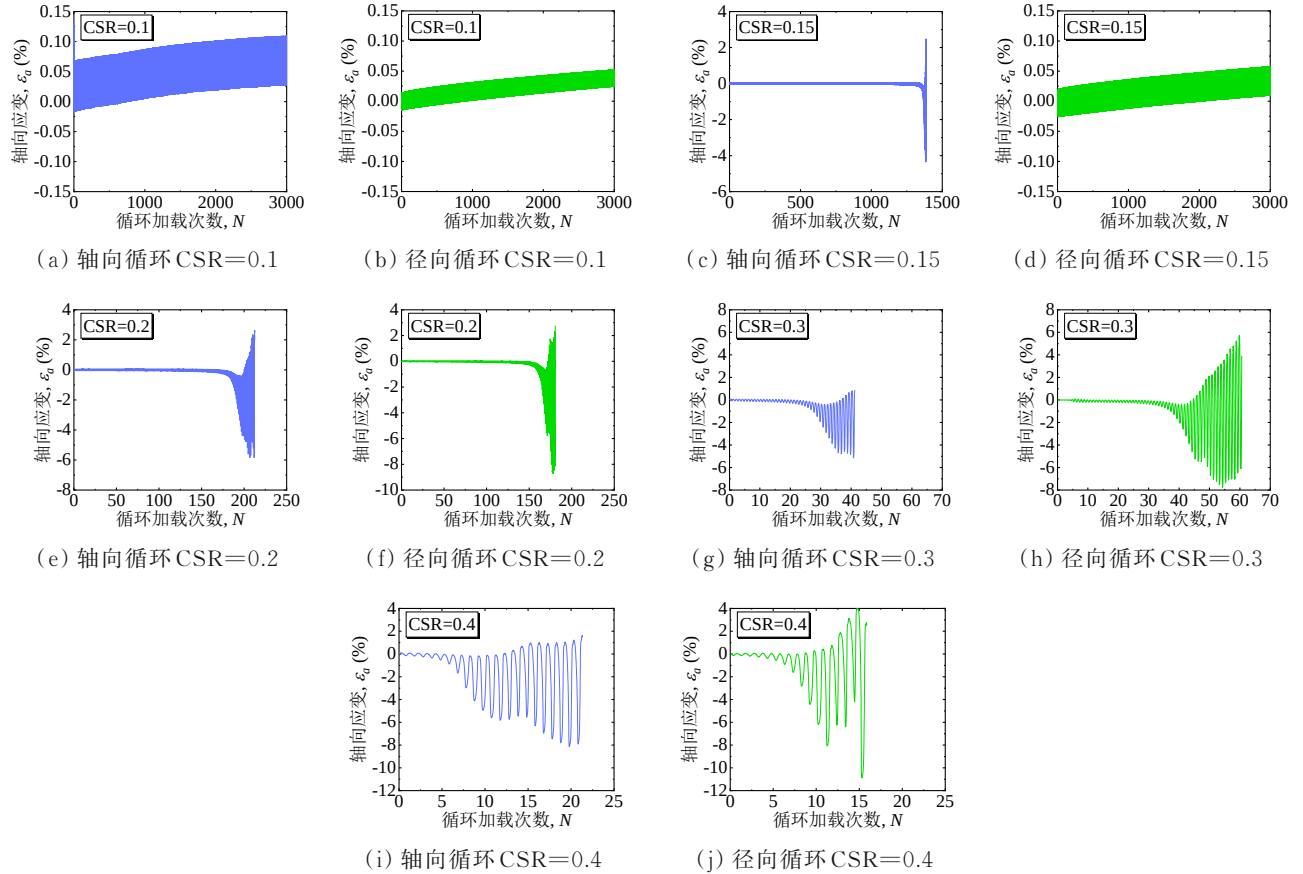


图6 连续级配试样的应变发展曲线

Fig. 6 Strain development curves

在径向动应力幅值较小($CSR=0.1$ 和 0.15)时,在水平振动荷载作用下,试样在轴向被压密,出现一定轴向累积应变,二者累积情况相似,但径向循环 $CSR=0.15$ 时,由于加载动应力幅值更大,因此其应变发展曲线相对更宽。而对于动应力幅值较高($CSR=0.2, 0.3, 0.4$)的试样,在振动初期的应变累积较小,试样仍具有一定承受动荷载的能力。但随着振动次数的增加,试样孔隙水压力上升,颗粒间有效应力降低,围压不足以试样内颗粒提供约束,继而导致试样承载能力下降,试样逐渐产生拉伸破坏。当径向循环 $CSR=0.2$ 时,试样在第165次循环达到2%的应变幅值;径向循环 $CSR=0.3$ 时,仅在第40次循环,试样的应变幅值便达到2%;而进一步增大动应力幅值至 $CSR=0.4$,仅循环8次试样便出现破坏现象。由此可见,随着

动应力幅值的增加,试样破坏所用的振动循环次数也更少。

2.4 动孔压发展曲线

图7展示了连续级配试样在循环荷载作用下的孔隙水压力发展曲线。当动应力幅值较小($CSR=0.1$)时,试样孔隙水压力在振动初期上升速度较快,这是由于试样处于完全饱和状态,土颗粒孔隙中充满了水。当荷载施加时,土颗粒受到压缩作用,孔隙空间迅速减小,导致孔隙水被挤出,从而导致孔隙水压力迅速上升。而后随着循环振次的增加,在拉伸荷载的作用下,试样内颗粒重新排列,被挤出的水逐步回流至孔隙中,孔隙水压力逐渐趋于稳定。同时,由于拉伸可能引起试样体积的轻微增大,因此还观察到试样孔隙水压力下降的现象,这一现象在黄博等^[38]的研究中也有出现,黄博等推测,

这可能是所用动三轴的伺服加载装置控制能力强,精度高,反馈速度快,能及时调节动荷载,能确保施

加到试样上的动荷载基本恒定的缘故。

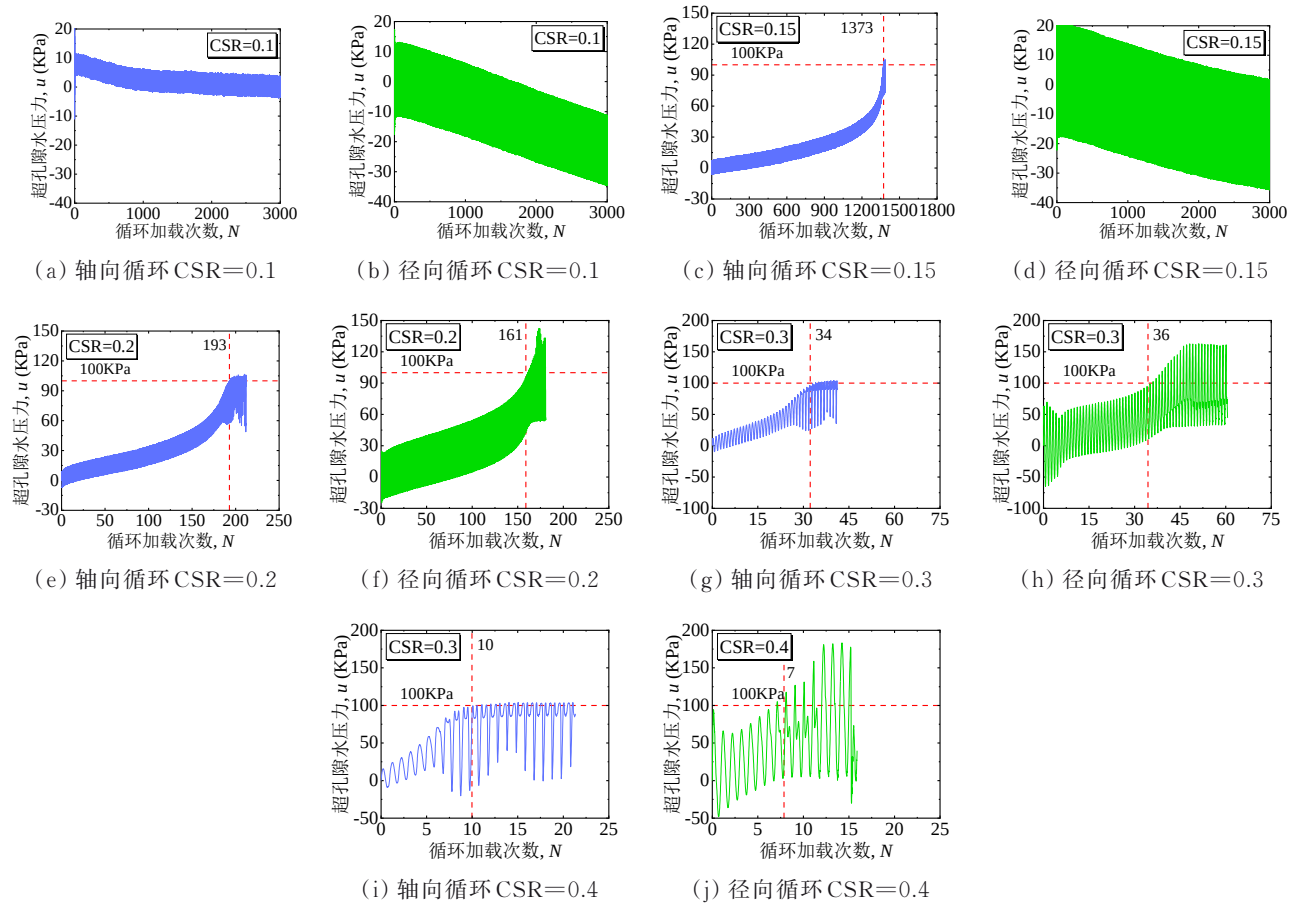


图 7 连续级配试样的孔压发展曲线

Fig.7 Excess pore pressure development curves

而对于受径向荷载的连续级配试样,当动应力幅值较小($CSR=0.1$ 和 0.15)时,试样在振动初期孔压有一定程度的上升趋势,但随着循环次数的增加,试样在拉伸荷载作用下体积增大,发生剪胀现象,导致孔隙水压力不增反降。当动应力幅值增大至 $CSR=0.2$,试样在振动早期处于缓慢发展阶段,孔隙水压力稳定上升,围压对试样的约束作用逐渐减小,在约第140次循环荷载作用后,试样进入快速发展阶段,孔隙水压力迅速上升,并于第161次循环附近进入破坏阶段。当进一步增大动应力幅值至 $CSR=0.3$ 时,试样在加载初期由于刚度估计和伺服系统误差,加载幅值存在小幅波动,试样孔隙水压力出现波动,孔压在加载早期仍处于缓慢发展阶段,随后在第30次循环附近进入快速发展阶段,最终于第36次循环发生液化破坏。当 CSR 继续增大至 0.4 时,试样在较大水平向振动荷载下迅速破坏,仅在第7次循环便发生液化破坏。

2.5 动强度曲线

试验采用孔压判据作为破坏标准,即当试样的

孔隙水压力值达到有效固结围压时,认为试样发生破坏。在此基础上绘制了不同荷载方向下熔融石英砂的动强度曲线,并选用幂函数对熔融石英砂动强度曲线进行拟合如图8所示。

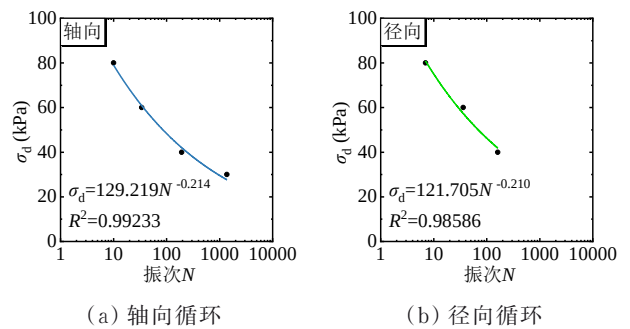


图 8 熔融石英砂动强度曲线

Fig. 8 Dynamic intensity curves of fused quartz

从图8可以发现,轴向循环和径向循环作用下的熔融石英砂动强度曲线均满足幂函数形式的衰减规律,随着震动次数的增加,熔融石英砂动强度衰减速率降低,并趋于平缓。

2.6 液化破坏模式

对于受到轴向循环荷载的连续级配熔融石英砂,其液化破坏现象大致可划分为3个阶段,分别是振动前期的缓慢发展阶段、振动中期的快速发展阶段和振动末期的破坏阶段。

1)缓慢发展阶段:在试样加载的早期,试样颗粒在围压作用下达到稳定,颗粒之间的接触较为紧密,试样处于完全饱和状态,受振动荷载影响,孔隙水压力小幅上升,对试样的有效应力影响较小,围压对试样仍有较大的约束作用,试样内部结构依然稳定。随着加载达到稳定,试样孔隙水压力缓慢上升。

2)快速发展阶段:当孔隙水压力上升到一定值时,有效应力下降,围压不足以对试样提供有效约束,颗粒之间发生错动,部分颗粒无法承担动荷载,试样孔隙水压力迅速上升,出现液化破坏趋势。

3)破坏阶段:随着循环荷载的施加,试样孔隙水压力接近有效固结围压,颗粒间有效应力几乎为0,试样内颗粒处于悬浮状态,试样出现液化破坏,强度基本丧失。

由图7可知,在轴向循环荷载作用下,试样在 $CSR=0.1$ 时未能发生液化破坏。当动应力幅值增大至 $CSR=0.15$ 时,试样在振动前期处于缓慢发展阶段,并在约1200次循环后进入快速发展阶段,孔压迅速增长,在第1373次循环时达到破坏阶段,试样孔隙水压力达到有效固结围压100 kPa,试样出现液化破坏。当动应力幅值进一步增大至 $CSR=0.2$ 时,试样孔压增长速度明显加快,在第120次循环后进入快速发展阶段,孔压增长速度加快,在第193次循环时,试样孔隙水压力达到100 kPa,导致试样液化破坏。而在更高的动应力幅值($CSR=0.3$ 和 0.4)下,试样分别于第34与10次循环时出现液化破坏。这一结果表明,存在一定细颗粒含量的连续级配试样,在相同相对密实度与有效固结围压条件下,产生液化破坏所需的动应力幅值更小,试样更容易在振动荷载作用下丧失承载能力,出现液化破坏的可能性更高。

张建民等^[39]将饱和砂土在循环加载作用下的孔隙水压力模型归纳为A、B、C三类,其曲线如图9(a)所示。张建民等认为,孔压发展曲线类型与土的相对密实度、主应力比、动应力幅值等相关,当仅增大动应力幅值时,孔压曲线将由C型向A型转变。

图9(b)展示了连续级配系列试样出现液化破坏时的归一化峰值孔压曲线。通过与图9(a)对比可以发现,在较小动应力幅值($CSR=0.15$)时,试样的孔压增长模型为C型;而当动应力幅值 CSR 增

大至0.2和0.3时,孔压增长模型转变为B型;进一步增大动应力幅值至 $CSR=0.4$ 时,孔压增长模型转变为A型。这一变化规律与张建民等的研究成果一致,即在相同相对密实度条件下,随着动应力幅值的增大,试样的孔压增长曲线将由C型逐渐向A型进行转变。这也证明了熔融石英砂的动力特性与天然砂土高度相似,进一步验证了熔融石英砂代替天然砂土进行动荷载作用下透明土模型试验的可行性。

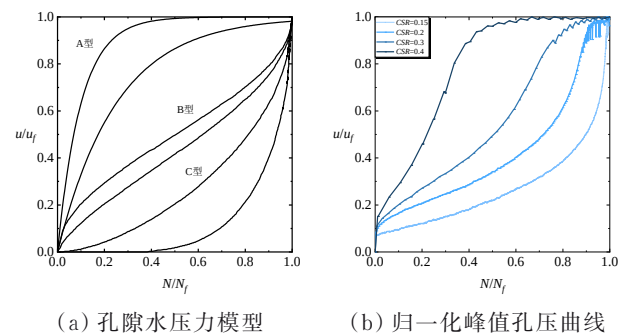


图9 饱和砂土孔隙水压力的发展形态

Figure 9 Development of pore pressure curve in saturated sand

3 结论

通过双向循环动三轴试验,系统研究了熔融石英砂在循环荷载作用下的动力响应特性,初步验证了熔融石英砂代替天然砂土开展动荷载作用下可视化模型试验的可行性,为后续开展透明土动力模型试验提供了基础。主要结论如下:

1)在轴向循环荷载作用下,熔融石英砂的动力响应行为和液化破坏模式与天然砂土高度相似,连续级配试样在循环应力比 CSR 为0.15时便出现液化破坏现象,表明细颗粒易导致试样液化,显著影响其承载能力。

2)在径向循环荷载作用下,连续级配试样在循环应力比为0.15时未发生液化破坏,试样的径向承载能力略高于轴向。表明熔融石英砂试样水平向上的刚度和抗变形能力高于轴向,展现了熔融石英砂动力特性上的各向异性。

3)随着循环应力比的增大,熔融石英砂的孔隙水压力增长曲线由C型逐渐向A型进行转变,表明熔融石英砂的孔隙水压力发展模型与天然饱和砂土高度相似。

参考文献

- [1] 周航,袁井荣,刘汉龙,等.基于球形硅微粉的新型透明黏土基本力学特性试验[J].中国公路学报,2021,34

- (9): 172-180.
- ZHOU H, YUAN J R, LIU H L, et al. Basic mechanical properties of transparent clay made from spherical silica powder: An experimental study [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(9): 172-180. (in Chinese)
- [2] ROSCOE K H, ARTHUR J R F, JAMES R G. The determination of strains in soils by an X-ray method [J]. Civil Engineering and Public Works Review, 1963(58): 873-876.
- [3] MANDAVA S S, WATSON A T, EDWARDS C M. NMR imaging of saturation during immiscible displacements [J]. AIChE Journal, 1990, 36(11): 1680-1686.
- [4] MANNHEIMER R J, OSWALD C J. Development of transparent porous media with permeabilities and porosities comparable to soils, aquifers, and petroleum reservoirs [J]. Groundwater, 1993, 31(5): 781-788.
- [5] ISKANDER M G, LAI J, OSWALD C J, et al. Development of a transparent material to model the geotechnical properties of soils [J]. Geotechnical Testing Journal, 1994, 17(4): 425-433.
- [6] LIU J, ISKANDER M G, SADEK S. Consolidation and permeability of transparent amorphous silica [J]. Geotechnical Testing Journal, 2003, 26(4): 390-401.
- [7] ISKANDER M G. A transparent material to model the geotechnical properties of soils [C]//14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1997: 315-318.
- [8] SADEK S, ISKANDER M G, LIU J Y. Geotechnical properties of transparent silica [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(1): 111-124.
- [9] 吴明喜. 人工合成透明砂土及其三轴试验研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2006.
- WU M X. Study on transparent synthetic sand and its triaxial test [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [10] 孔纲强, 刘璐, 刘汉龙, 等. 玻璃砂透明土变形特性三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1140-1146.
- KONG G Q, LIU L, LIU H L, et al. Triaxial tests on deformation characteristics of transparent glass sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1140-1146. (in Chinese)
- [11] 孔纲强, 刘璐, 刘汉龙, 等. 玻璃砂透明土与标准砂土强度特性对比三轴试验[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(2): 250-255.
- KONG G Q, LIU L, LIU H L, et al. Comparative analysis of the strength characteristics of transparent glass sand and standard sand [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(2): 250-255. (in Chinese)
- [12] 高岳, 隋旺华. 熔融石英型透明砂土及其岩土工程性质[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2016, 31(2): 60-66, 88.
- GAO Y, SUI W H. Geotechnical properties of transparent sand made of fused silica [J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2016, 31(2): 60-66, 88. (in Chinese)
- [13] 王文国. 基于透明土的钻井过程土体位移变形实验研究[D]. 江苏 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- WANG W G. An experimental investigation on soil displacement and deformation of drilling process using transparent soil modeling [D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2016. (in Chinese)
- [14] 魏静, 鲍宁, 魏平, 等. 透明砂土力学性质三轴试验研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(11): 14-19.
- WEI J, BAO N, WEI P, et al. Research on the mechanical properties of transparent sand based on triaxial test [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(11): 14-19. (in Chinese)
- [15] LI Y Z, ZHOU H, LIU H L, et al. Geotechnical properties of 3D-printed transparent granular soil [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(6): 1789-1800.
- [16] EZZEIN F M, BATHURST R J. A transparent sand for geotechnical laboratory modeling [J]. Geotechnical Testing Journal, 2011, 34(6): 590-601.
- [17] GUZMAN I L, ISKANDER M. Geotechnical properties of sucrose-saturated fused quartz for use in physical modeling [J]. Geotechnical Testing Journal, 2013, 36(3): 448-454.
- [18] EZZEIN F M, BATHURST R J. A new approach to evaluate soil-geosynthetic interaction using a novel pullout test apparatus and transparent granular soil [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42(3): 246-255.
- [19] XIAO Y, SUN Y F, YIN F, et al. Constitutive modeling for transparent granular soils [J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(7): 04016150.
- [20] QI C G, ZHANG Q, ZUO D J, et al. Transparent sand experimental method for geotechnical physical modeling using digital imaging of particle image velocimetry [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 43(4): 2013-2020.
- [21] DERKSEN J, FUENTES R, ZIEGLER M. Geogrid-soil interaction: Experimental analysis of factors influencing load transfer [J]. Geosynthetics International, 2023, 30(3): 315-336.
- [22] SUN J Z, LIU J Y. Visualization of tunnelling-induced ground movement in transparent sand [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 40: 236-240.
- [23] KONG G Q, CAO Z H, ZHOU H, et al. Analysis of piles under oblique pullout load using transparent-soil models [J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, 38(5): 20140109.

- [24] ZHANG M X, XU P, LI J W, et al. Mining-induced ground movements and displacements using transparent soil model test [J]. *Geotechnical Research*, 2019, 6(4): 252-264.
- [25] CHEN J F, GUO X P, SUN R, et al. Physical and numerical modelling of strip footing on geogrid reinforced transparent sand [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49(2): 399-412.
- [26] YUAN B X, LI Z H, ZHAO Z Q, et al. Experimental study of displacement field of layered soils surrounding laterally loaded pile based on transparent soil [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(9): 3072-3083.
- [27] LIU C, TANG X W, WEI H W, et al. Visualization investigation of the plugging effect on open-ended pipe pile jacked in transparent sand [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, 22(10): 04022176.
- [28] WANG Z T, LUO G Y, KONG G Q, et al. Centrifuge model tests on anchor pile of single point mooring system under oblique pullout load using transparent sand [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 264: 112441.
- [29] 冷先伦, 王川, 庞荣, 等. 透明胶结土材料强度特性的试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(8): 2059-2068, 2077.
- LENG X L, WANG C, PANG R, et al. Experimental study on the strength characteristics of a transparent cemented soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(8): 2059-2068, 2077. (in Chinese)
- [30] LENG X L, CUI L, DONG Y K, et al. Study on the physical behaviour and strength characteristics of transparent soil under multiple influencing factors [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 16065.
- [31] 谢朋, 李葱葱, 段虎辰, 等. 隧道围岩透明相似材料强度特征与配合比研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2025, 52(1): 219-227.
- XIE P, LI C C, DUAN H C, et al. Study on the strength characteristics and the mix proportion design method of similar materials of transparent cemented soil in tunnel surrounding rock [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2025, 52(1): 219-227. (in Chinese)
- [32] 庄妍, 董晶亮, 李亮华, 等. 碱激发砒砂岩复合胶凝材料在建筑墙体保温系统中的应用技术研究 [J]. *城市建筑*, 2025, 22(22): 208-212.
- Zhuang Yan, Dong Jingliang, Li Lianghua, et al. Study on the Application Technology of Alkali-Activated Pisha Sandstone Composite Cementitious Material in Building Wall Thermal Insulation Systems [J]. *Urbanism and Architecture*, 2025, 22(22): 208-212. (in Chinese)
- [33] LI Y Z, ZHOU H, QI G P, et al. Similarity evaluation of transparent sand and natural sands based on simulation of a hypoplastic constitutive model [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2025, 25(6): 04025089.
- [34] ZHANG Z, XU Q, CHEN J F, et al. Geotechnical properties of a transparent glass sand saturated with a blend of mineral oils [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, 10(24): 534.
- [35] 孔纲强, 李辉, 王忠涛, 等. 透明砂土与天然砂土动力特性对比[J]. *岩土力学*, 2018, 39(6): 1935-1940, 1947.
- KONG G Q, LI H, WANG Z T, et al. Comparison of dynamic properties between transparent sand and natural sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(6): 1935-1940, 1947. (in Chinese)
- [36] KONG G Q, LI H, YANG G, et al. Investigation on shear modulus and damping ratio of transparent soils with different pore fluids [J]. *Granular Matter*, 2018, 20(1): 8.
- [37] CHEN Y M, YAO X F, HAN Y, et al. Effect of different pore fluids on the dynamic behavior of transparent sand [J]. *Acta Geotechnica*, 2025, 20(2): 669-682.
- [38] 黄博, 胡俊清, 施明雄, 等. 单、双向动三轴试验条件下饱和砂动力特性对比[J]. *西北地震学报*, 2011, 33(增刊 1): 137-142.
- HUANG B, HU J Q, SHI M X, et al. Comparison of dynamic properties of saturated sand under unidirectional and two-directional cyclic triaxial tests conditions [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2011, 33(Sup 1): 137-142. (in Chinese)
- [39] 张建民, 谢定义. 饱和砂土振动孔隙水压力增长的实用算法[J]. *水利学报*, 1991, 22(8): 45-51.
- ZHANG J M, XIE D Y. Practical algorithm for increasing vibration pore water pressure in saturated sand [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1991, 22(8): 45-51. (in Chinese)

(编辑 XXX)