

DOI: 10.11779/CJGE20240591

初始剪应力和循环应力方向对饱和密砂液化特性的影响

张迎宾, 覃一巧, 张世豪, 魏江涛*, 熊亦翔, 刘永航

(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 边坡土单元体在地震荷载作用期间同时受到初始剪应力和循环应力的作用, 且初始剪应力和循环应力作用方向往往不同。为探究初始剪应力和循环应力作用方向对饱和密砂液化特性的影响, 对饱和密砂进行了一系列固结不排水多向循环单剪试验。试验结果表明: 饱和密砂的破坏模式主要包括循环活动性和累积塑性应变两种, 破坏模式受初始剪应力大小的影响; 初始剪应力的存在会降低饱和密砂的抗液化强度, 但垂直加载模式下饱和密砂的抗液化强度比平行加载模式下高约 5%~7%; 不同加载模式下均表现出损耗能的累积速率随初始剪应力的增加而增大的现象, 初始剪应力作用下饱和密砂的损耗能累积速率加快是导致其抗液化强度降低的内在原因; 饱和密砂的残余孔压和损耗能的归一化曲线在对数坐标下呈现出线性关系。

关键词: 初始剪应力; 抗液化强度; 能量法; 孔压模型; 多向循环单剪试验

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)11-2246-09

作者简介: 张迎宾(1983—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土地震工程方面的科研与教学工作。E-mail: yingbinz719@swjtu.edu.cn。

Effect of initial static shear stress and cyclic loading direction on liquefaction characteristics of saturated dense sand

ZHANG Yingbin, QIN Yiqiao, ZHANG Shihao, WEI Jiangtao, XIONG Yixiang, LIU Yonghang

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Soil elements of slope are subjected to both initial shear stress and cyclic stress during seismic loading, and the directions of initial shear stress and cyclic stress are often different. In order to investigate the effects of initial shear stress and cyclic stress direction on the liquefaction characteristics of saturated dense sand, a series of consolidated undrained multi-directional cyclic simple shear tests are carried out on saturated dense sand. The test results show that the failure modes of saturated dense sand mainly include cyclic activity and cumulative plastic strain, and the failure modes are affected by the initial shear stress. The existence of initial shear stress will reduce the liquefaction resistance of saturated dense sand, but the liquefaction resistance of saturated dense sand under vertical loading mode is about 5%~7% higher than that under parallel loading mode. It is found that the cumulative rate of energy loss increases with the increase of initial shear stress, which is the internal reason for the decrease of liquefaction resistance of saturated dense sand. The normalized curves of residual pore pressure and energy loss of saturated dense sand show a linear relationship in the logarithmic coordinate.

Key words: initial static shear stress; liquefaction resistance; energy-based method; pore pressure model; multidirectional cyclic simple shear test

0 引言

滑坡是中国地震引发的所有灾害当中发生次数最

多、造成人员伤亡和财产损失最大的灾害之一^[1], 研究地震荷载作用下边坡的液化特性具有重要意义。倾

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2468214, 52378370, 52278372, 52478362); 国家重点研发计划项目 (2024YFE0111900) This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos.U2468214, 52378370, 52278372, 52478362), National Key R&D Program of China (Grant No.2024YFE0111900).

收稿日期(Received): 2024-06-18

修回日期(Revised): 2024-12-12

接受日期(Accepted): 2024-12-19

网络出版日期(Online): 2024-12-20

*通信作者 (E-mail: jtwei@swjtu.edu.cn)

斜的边坡体由于重力作用受到一个静态的剪应力, 即初始剪应力。初始剪应力是边坡不同于水平场地的主要受力特征, 边坡土单元体受到初始剪应力和地震荷载的共同作用, 产生了复杂的应力状态。目前许多学者采用室内试验的方法研究了初始剪应力对循环应力作用下土体液化特性的影响。最早由 Lee 等^[2]通过动三轴试验得到结果表明初始剪应力能提高砂土的抗液化强度, 而 Yoshimi 等^[3]分析试验结果认为初始剪应力会降低土体的抗液化强度。为深入研究初始剪应力的影响, Vaid 等^[4]、Yang 等^[5]、Chiaro 等^[6]分别进行动三轴试验和循环扭剪试验研究不同因素如围压、相对密度、荷载类型等对初始剪应力作用的影响, 认为初始剪应力既能提高也能降低土体的动强度。Park 等^[7]采用循环单剪试验证明初始剪应力的增大会降低砂土的动强度。胡中华等^[8]、Kokusho^[9]、庄海洋等^[10]分别对不同砂土进行循环扭剪试验, 结果表明初始剪应力很大程度上影响了砂土的液化模式。吴杨等^[11]进行动三轴剪切试验研究得到初始剪应力的增大可以提高混合料的抗液化强度。王桂萱等^[12]、温晓贵等^[13]、王军等^[14-15]、周正龙等^[16]分别采用不同试验研究了初始剪应力对黏土的循环强度、孔隙水压力、残余变形、软化特性等的影响并得到了发展规律。

能量法 (energy-based method) 作为一种较为成熟的关于评价土体液化特性的方法, 最早由 Nemat-Nasser 等^[17]使用来评价土体的潜在液化能力。王桂萱等^[12]研究了土的孔隙水压力、残余应变和损耗能的关系并建立了双曲线模型。肖兴等^[18]用能量法探究了海洋黏土的循环破坏准则。Polito 等^[19]研究发现土体初始液化时, 损耗能与应力路径无关。Pan 等^[20]、Jin 等^[21]、Wang 等^[22]分别研究发现孔隙水压力与损耗能高度相关。

已有研究结果表明初始剪应力与土体的液化特性有密不可分的关系, 但目前研究大部分基于循环应力方向平行于初始剪应力方向的情况, 而在实际地震中, 地震荷载作用方向与边坡坡向的不同导致了循环应力与初始剪应力方向的不同, 且有关饱和密砂作为材料的研究仍不充分, 现阶段亟需研究由于实际地震中的地震荷载与边坡坡向的不同对饱和密砂液化特性的影响。本研究基于一系列固结不排水多向循环单剪试验, 采用循环应力方向垂直和平行于初始剪应力方向的方法, 研究了初始剪应力和循环应力方向对饱和密砂液化特性的影响, 在试验结果的基础上从能量法的角度分析循环应力方向垂直和平行于初始剪应力方向时, 饱和密砂的孔隙水压力与损耗能的发展规律, 拟合建

立孔压模型, 为理解砂土液化和研究砂土边坡失稳机理提供科学依据。

1 试验装置及方案

1.1 试验设备

本文试验研究采用多向动态循环单剪试验系统 (MDDCSS) 开展, 如图 1 所示。MDDCSS 可以实现三向 (竖向+两个相互垂直的水平方向) 独立应力或应变控制加载, 竖向和水平方向的最大位移分别为 $\pm 25 \text{ mm}$ 和 $\pm 10 \text{ mm}$ 。同时, 该试验系统配备压力室 (图 1 (b)) 和围压控制器 (最大围压 1 MPa), 可以实现试样反压饱和操作。试验时试样被厚度为 1 mm 的聚四氟乙烯涂层叠环包裹。该系统能够满足本研究对于不同初始剪应力值和循环应力作用方向加载的需求。



图 1 多向动态循环单剪试验系统 (MDDCSS)

Fig. 1 Multi-directional dynamic cyclic simple shear testing system (MDDCSS)

1.2 试验制样和步骤

试验材料为相对密度 $D_r=80\%$ 的丰浦砂, 丰浦砂的基本物理指标和颗粒级配曲线分别见表 1 和图 2。本文采用沉积法制样, 试样直径 50 mm , 高度 20 mm 。在制作试样时, 将一定质量的砂土 5 等分后依次加入被叠环约束的橡胶膜中。随后将试样移动至压力室内依次开展二氧化碳饱和、水头饱和以及反压饱和, 当试样的 B 值大于 0.95 时认为试样完全饱和。试样在初始竖向有效应力 $\sigma'_{v0}=100 \text{ kPa}$ 时进行固结, 当试样的轴向位移基本不变时认为试样固结完成。

1.3 试验方案

固结完成后, 在排水条件下以 5 kPa/min 的速率对试样施加初始剪应力, 本文初始剪应力均施加在 x 轴方向, 随后在不排水条件下开展循环加载试验。荷载频率为 0.05 Hz , 循环应力的大小常用循环应力比 CSR (cyclic stress ratio) 来表征。循环应力比定义为

循环应力 τ_{cyc} 与初始竖向有效应力 σ'_{v_0} 的比值, 即 $\text{CSR}=\tau_{\text{cyc}}/\sigma'_{v_0}$ 。地震荷载作用期间, 边坡中坡身土单元体除了和坡肩土单元体共同受到竖向有效应力 σ_v 、水平有效应力 σ_h 和循环应力 τ_{cyc} 之外, 还会受到初始剪应力 τ_s 的作用。同时基于地震荷载与初始剪应力作用方向不一定相同的事实, 本文设计了 3 种加载模式, 如图 3。图 3 (a) 代表坡肩土单元体, 仅受循环应力作用; 图 3 (b) 代表坡身土单元体且循环应力与初始剪应力同向, 下文中简称“平行加载”; 图 3 (c) 代表坡身土单元体且循环应力与初始剪应力垂直, 下文中简称为“垂直加载”。初始剪应力的大小通常使用初始剪应力比 α 表示, 其定义为初始剪应力与初始竖向有效应力的比值, 即 $\alpha=\tau_s/\sigma'_{v_0}$ 。

表 1 丰浦砂基本物理指标
Table 1 Index properties of Toyoura sand

G_s	最大孔隙比 e_{max}	最小孔隙比 e_{min}	平均粒径 d_{50}/mm
2.656	0.977	0.597	0.202

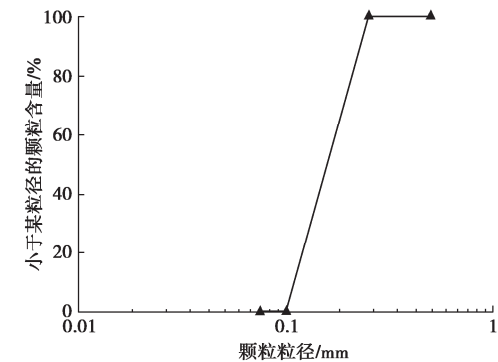


图 2 丰浦砂级配曲线图
Fig. 2 Particle size distribution curve of Toyoura sand

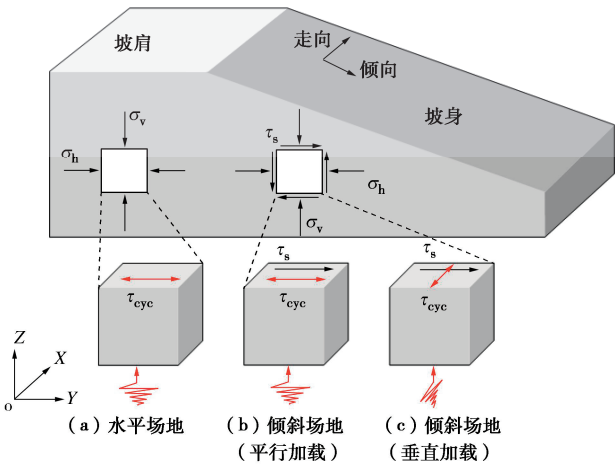


图 3 地震荷载作用期间边坡土单元体受力图

Fig. 3 Stress conditions of soil element in slope under earthquake load
为研究初始剪应力和循环应力方向对饱和密砂液

化特性的影响, 本文基于无初始剪应力 (图 3 (a))、平行加载 (图 3 (b)) 和垂直加载 (图 3 (c)) 3 种加载模式开展了一系列多向循环单剪试验。试验中 CSR 分别取 0.20, 0.22 和 0.25, α 分别取 0.00, 0.05, 0.10 和 0.20, 具体试验方案见表 2。

表 2 试验方案汇总表
Table 2 Summary of test schemes

试验系列	$\sigma'_{v_0} / \text{kPa}$	CSR	α	加载模式
1	100	0.20	0	无初始剪应力
		0.22		
		0.25		
2	100	0.20	0.05, 0.10, 0.20	垂直加载
		0.22	0.05, 0.10, 0.20	垂直加载
		0.25	0.05, 0.10, 0.20	垂直加载
3	100	0.20	0.05, 0.10, 0.20	平行加载
		0.22	0.05, 0.10, 0.20	平行加载
		0.25	0.05, 0.10, 0.20	平行加载

2 试验结果及分析

2.1 初始剪应力下饱和密砂的典型循环响应

破坏标准对砂土的液化特性有重要影响^[23], 本文中选用的破坏标准与 Park 等^[7]一致, 即: 当 $\tau_s \geq \tau_{\text{cyc}}$ 时, 单幅应变 γ_{SA} 超过 7.5% 时认为试样破坏; 当 $\tau_s < \tau_{\text{cyc}}$ 时, 双幅应变 γ_{DA} 超过 7.5% 时认为试样破坏。

以往研究表明饱和砂土在地震荷载作用下的破坏模式主要有 3 种^[5]: ①流动液化 (flow-type failure); ②循环活动性 (cyclic mobility); ③累积塑性应变 (accumulated plastic strain)。平行和垂直加载模式时, 饱和密砂的典型破坏模式分别为循环活动性和累积塑性应变 (图 5 (c)), 这与 Yang 等^[5]、潘坤等^[24]得到的结果一致。

循环活动性破坏模式对应的竖向有效应力路径图 (图 4 (a)) 说明饱和密砂试样液化破坏后, 由于循环应力的作用, 总是表现出趋于剪胀和趋于剪缩的循环往复现象^[5]; 应力应变曲线 (图 4 (b)) 表明循环剪应变产生反转, 试样的剪应变基本呈现对称分布。累积塑性应变破坏模式对应的竖向有效应力路径图 (图 5 (a)) 展示出剪应力在初始剪应力一侧逐渐累积; 应力应变曲线 (图 5 (b)) 表明剪应变同样在初始剪应力一侧累积。在初始剪应力作用下试样无法达到完全液化 ($\sigma_v=0$)。

相同 CSR 下, 垂直加载模式下试样的破坏模式均为循环活动性, 但随着 α 增加, 试样呈现出来的循环活动性越弱 (图 4 (c))。平行加载模式下, 当 $\alpha < 0.20$ 时试样的破坏模式为循环活动性; 但在 $\alpha=0.20$ 的情况下, 试样将会发生累积塑性应变 (图 5 (c))。基于以上分析可以发现: 平行加载模式下仅当 $\alpha=0.20$ 时, 饱和密砂的破坏模式为累积塑性应变, 其余加载情况下

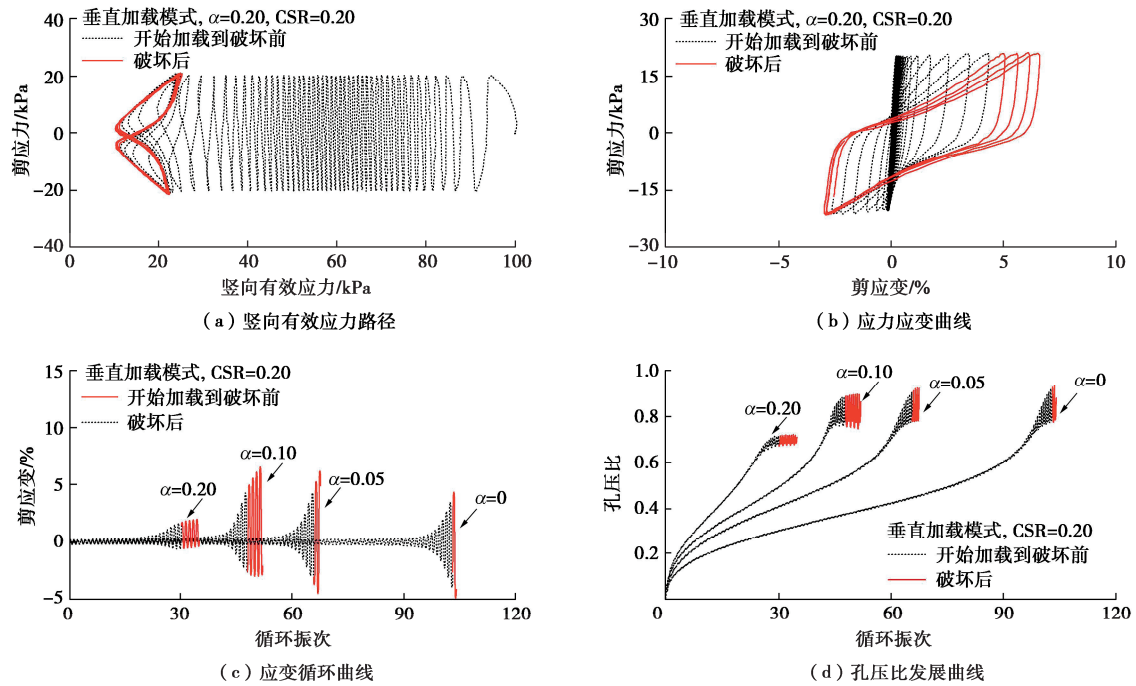


图 4 垂直加载模式下饱和密砂的典型循环响应

Fig. 4 Typical cyclic responses of saturated dense sand under perpendicular loading mode

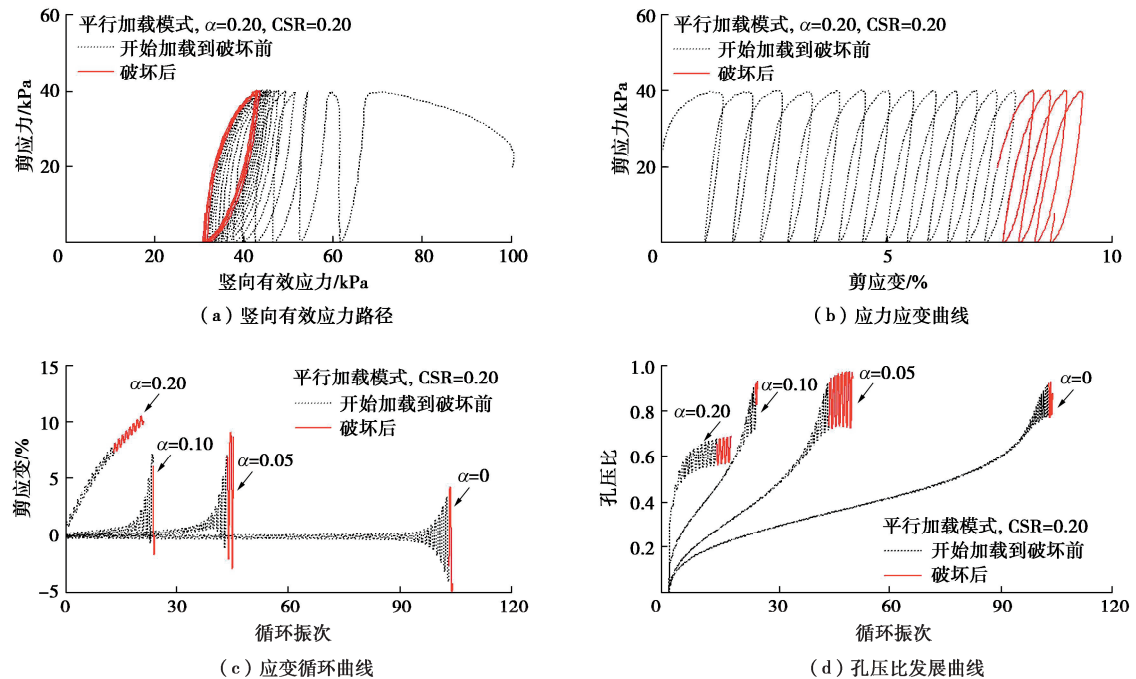


图 5 平行加载模式下饱和密砂的典型循环响应

Fig. 5 Typical cyclic responses of saturated dense sand under parallel loading mode

均为循环活动性。

孔压比 r_u 能直观地展示孔隙水压力的发展情况, 其定义为孔隙水压力 u 与初始竖向有效应力的比值, 即 $r_u = u / \sigma'_{v0}$ 。从图 4 (d) 和图 5 (d) 可以发现, 随着 α 的增加, 试样孔压的增长速率加快, 但稳定时孔压值减小。同时可以发现与垂直加载模式下的试样相比, 平行加载模式下试样的孔压累积速率更快。

2.2 初始剪应力下饱和密砂的抗液化强度

定义试样破坏时的循环应力加载次数为破坏振次

N_f 。CSR 与 N_f 的关系曲线可以通过试验数据进行公式拟合得到^[25], 图 6 展示了不同加载模式下试样的 N_f 和 CSR 关系。从图中可以看出, N_f 随着 CSR 的增大而减小。图 7 展示了不同加载模式下 α 与 N_f 的关系曲线, 可以看出, 在平行与垂直加载模式下, 均表现出 N_f 随着 α 增加而减小的规律, 表明初始剪应力的存在会降低饱和密砂的抗液化强度。

通常采用循环抗力比 CRR (cyclic resistance ratio) 来表征砂土的循环强度。CRR 指试样在一定循环应力

振次 (N) 下达到破坏需要的 CSR, 且 N 与震级相关^[26]。本文中, CRR_{10} 指 $N=10$ 时试样破坏所需要的 CSR。

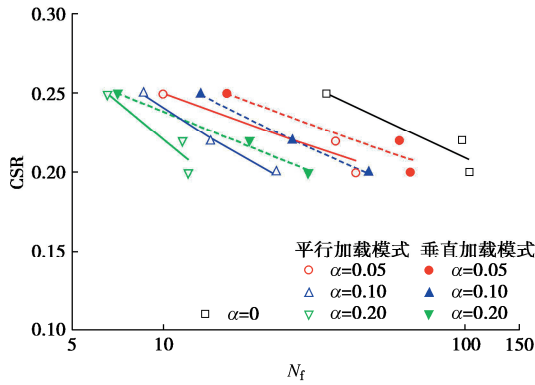


图 6 平行和垂直加载模式下 CSR 与 N_f 拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of CSR and N_f under parallel and perpendicular loading modes

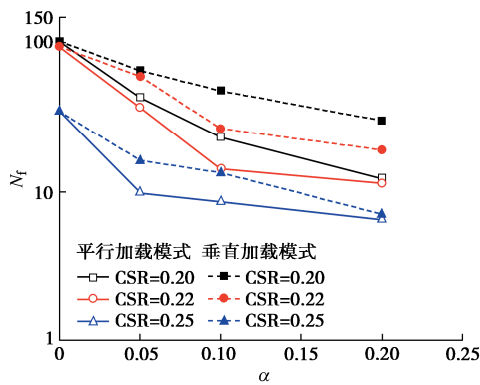


图 7 平行和垂直加载模式下 α 与 N_f 关系曲线

Fig. 7 Relation curves between α and N_f under parallel and perpendicular loading modes

图 8 展示了不同加载模式下初始剪应力对试样动强度的影响。从图中可以看出, 无初始剪应力作用时, 饱和密砂的 CRR_{10} 为 0.31。当 $\alpha=0.05, 0.10, 0.20$ 时, 平行加载模式下饱和密砂的 CRR_{10} 分别为 0.25, 0.24, 0.22; 垂直加载模式下饱和密砂的 CRR_{10} 分别为 0.27, 0.26, 0.24。基于上述分析可以发现, 垂直加载模式下饱和密砂的 CRR_{10} 比平行加载模式下高约 0.02, 说明垂直加载模式下试样的抗液化强度更高。

Seed^[27]提出了初始剪应力系数 K_α (static shear stress correction factor), K_α 定义为初始剪应力作用和无初始剪应力作用时 CRR 的比值, 如下式所示:

$$K_\alpha = \frac{CRR_\alpha}{CRR_{\alpha=0}} \quad (1)$$

通常情况下, K_α 更能够直观地反映出初始剪应力对砂土抗液化强度的影响程度: $K_\alpha < 1$ 时说明初始剪应力降低了砂土的抗液化强度, $K_\alpha > 1$ 时说明初始剪应力提高了砂土的抗液化强度。分析试验结果得到的 α 和 K_α 的关系曲线 (图 9), 从图中可以看出, $\alpha=0.05, 0.10, 0.20$ 时, 平行加载模式下得到的 K_α 较于无初始

剪应力作用时分别下降了 19%, 22%, 29%, 垂直加载模式下得到的 K_α 较于无初始剪应力作用时分别下降了 14%, 15%, 23%。平行加载模式下密砂的抗液化强度更低, 较垂直加载模式低 5%~7%。上述结果说明初始剪应力的存在会降低密砂的抗液化强度, 同时平行加载模式下砂土的抗液化强度低于垂直加载模式下, 这与 Wei 等^[28]通过数值模拟得到的结论一致。

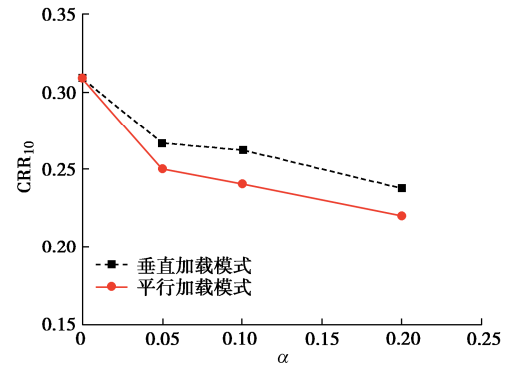


图 8 α 和 CRR_{10} 关系曲线

Fig. 8 Relation curves between α and CRR_{10}

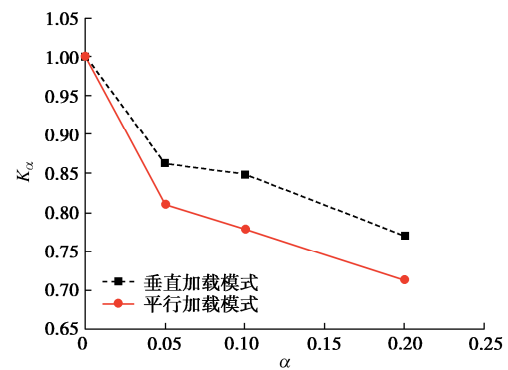


图 9 α 和 K_α 关系曲线

Fig. 9 Relation curves between α and K_α

2.3 基于能量法的孔压发展规律及孔压模型

能量法中定义的损耗能 (the energy dissipation) 通常用 W 表示, 是指单位体积下土体累积耗散的应变能量^[17]。研究发现 W 能够体现循环应力作用下的土颗粒骨架受到的不可逆转的结构损伤^[21-22], 损耗能直接表示为应力应变曲线围成的面积, 计算示意图如图 10, 平行加载模式时损耗能 W 计算公式如下:

$$W = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (\tau_{i+1} + \tau_i) (\gamma_{i+1} - \gamma_i) \quad (2)$$

式中: τ_i 为第 i 个计算增量步剪应力; γ_i 为第 i 个计算增量步剪应变; n 为计算增量步总步数。

垂直加载模式时损耗能 W 计算公式如下:

$$W_x = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (\tau_{x_{i+1}} + \tau_{x_i}) (\gamma_{x_{i+1}} - \gamma_{x_i}) \quad (3)$$

$$W_y = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (\tau_{y_{i+1}} + \tau_{y_i}) (\gamma_{y_{i+1}} - \gamma_{y_i}) \quad (4)$$

$$W = W_x + W_y \quad (5)$$

式中: W_x 为初始剪应力方向上的损耗能, W_y 为循环应力方向上的损耗能。

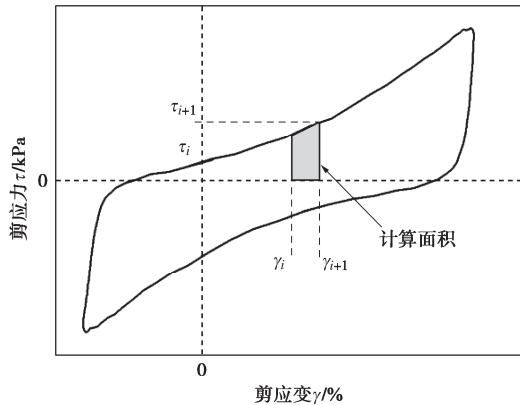
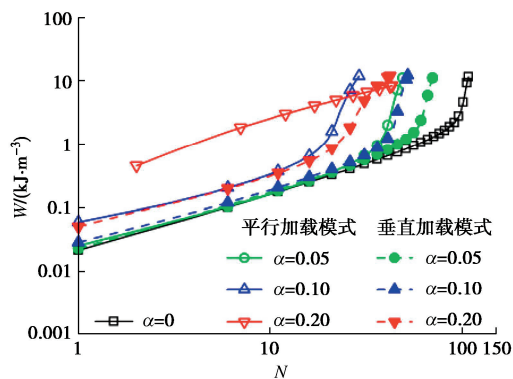


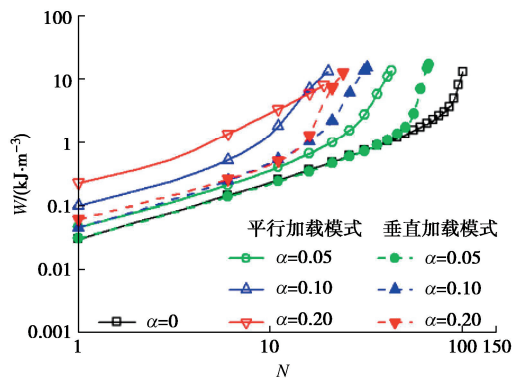
图 10 计算损耗能概化图

Fig. 10 Schematic graph for calculation of energy dissipation

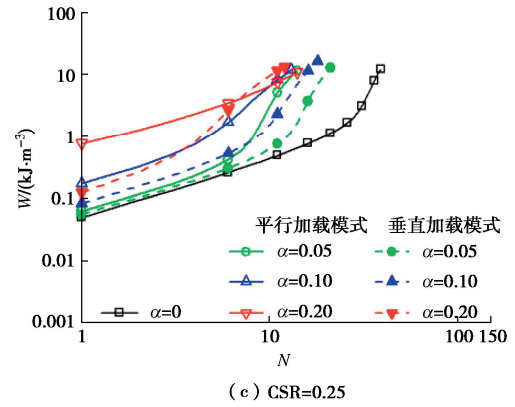
图 11 展示了不同加载模式下损耗能与循环应力振次之间的关系曲线。从图 11 中可以看出, 不同加载模式下的试样均表现出 W 在加载初期缓慢增加, 但当 N 超过某特定振次后 W 的累积速率突然增大的现象。值得一提的是, 平行加载模式下 $\alpha=0.20$ 时, 以及垂直加载模式下 $\text{CSR}=0.25$ 和 $\alpha=0.20$ 时, 试样均在较少的振次下迅速破坏, 导致此时 W 随 N 的变化曲线没有明显拐点。同时可以发现, 随着初始剪应力的增加, 损耗能的累积速率逐渐加快。从损耗能的角度出发, 初始剪应力存在时试样的损耗能累积速率更快从而导致试样更快地达到破坏, 表现为初始剪应力作用下饱和密砂的抗液化强度降低。



(a) $\text{CSR}=0.20$



(b) $\text{CSR}=0.22$



(c) $\text{CSR}=0.25$

图 11 平行和垂直加载模式下 N 与 W 关系曲线

Fig. 11 Relation curves between N and W under parallel and perpendicular loading modes

参考 Yang 等^[29]的研究, 本文中将循环应力为零时对应的孔隙水压力值定义为残余孔隙水压力 Δu_r (图 12)。研究发现 Δu_r 与土体液化能力关系密切^[29-30], Δu_r 能够直观地反映出土体的破坏情况, 许多研究中已经将 Δu_r 与能量法结合建立孔压模型来研究孔隙水压力发展情况^[12, 19-22, 31]。不同加载模式下的 Δu_r 与 W 关系曲线如图 13。随着 W 增加, 当 $\alpha=0.05, 0.10, 0.20$ 时, Δu_r 基本呈现出先增大后趋于稳定的特点; 特别注意到当 α 为 0.20 时, 最终稳定的 Δu_r 显著低于其他情况。

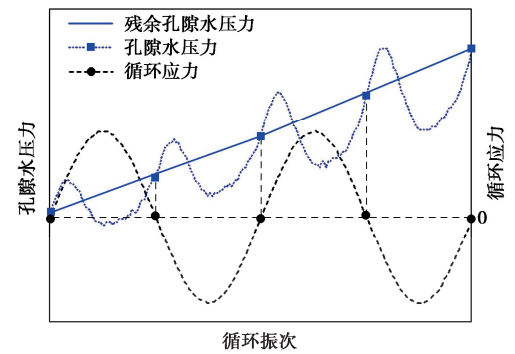
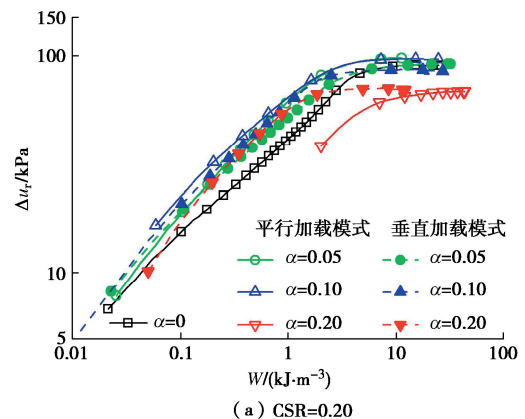


图 12 残余孔隙水压力示意图

Fig. 12 Schematic diagram of residual pore water pressure

为了统一 Δu_r 发展的判定标准, 使用 N_f 对应的破坏残余孔隙水压力 Δu_{rf} 和破坏损耗能 W_f , 分别对 Δu_r 和 W 进行归一化处理得到 $\Delta u_r/\Delta u_{rf}$ 、 W/W_f , 不同加载模式下的 $\Delta u_r/\Delta u_{rf}$ 与 W/W_f 的关系曲线如图 14。



(a) $\text{CSR}=0.20$

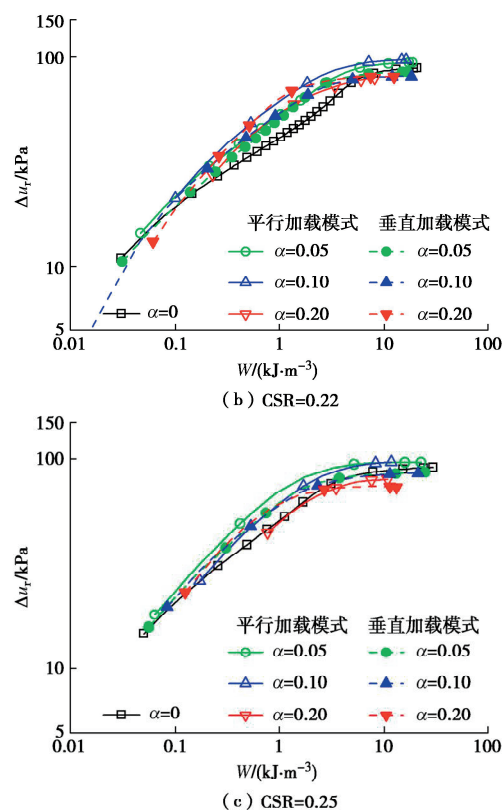


图 13 平行和垂直加载模式下 Δu_r 与 W 关系曲线

Fig. 13 Relation curves between Δu_r and W under parallel and perpendicular loading modes

图 14 中可以发现 $\Delta u_r/\Delta u_f$ 随 W/W_f 的增大表现出先增大后稳定的发展趋势。对比图 13, 14 结果, 发现 CSR 和 α 对 Δu_r 与 W 关系曲线影响显著, 但不影响 $\Delta u_r/\Delta u_f$ 与 W/W_f 之间的关系。

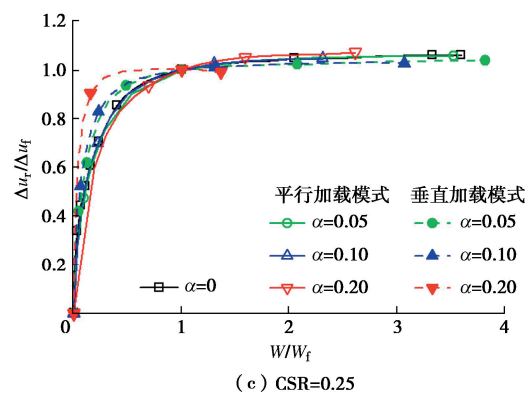
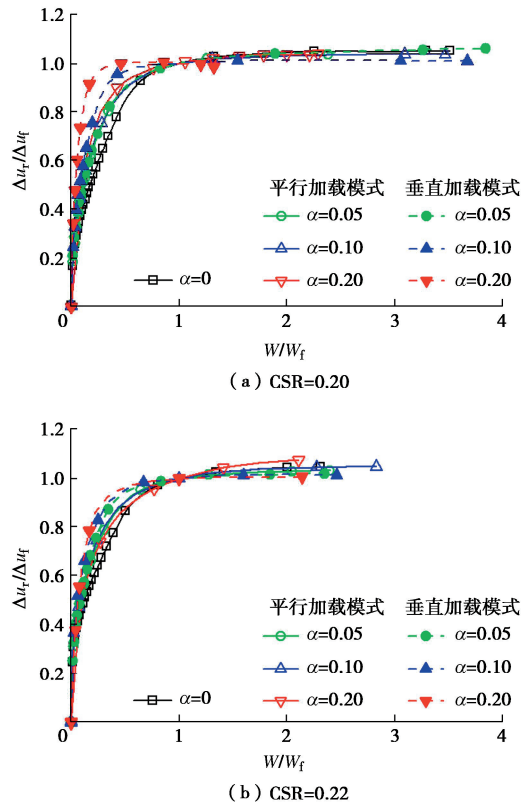


图 14 平行和垂直加载模式下 $\Delta u_r/\Delta u_f$ 和 W/W_f 关系曲线

Fig. 14 Relation curves between $\Delta u_r/\Delta u_f$ and W/W_f under parallel and perpendicular loading modes

将所有归一化得到的结果放入对数坐标系中得到图 15。从图 15 中可以发现不同加载模式下的试验数据点均落在一个狭窄的虚线范围内, 与 Pan 等^[20]得到的结果一致, 不同加载作用下的关系曲线发展相同, 说明 Δu_r 的发展只与 W 有关。根据 Pan 等^[20]提出 $\Delta u_r/\Delta u_f$ 与 W/W_f 表现出幂律分布现象, 即在对数坐标系下呈现线性分布, 可采用下列公式拟合:

$$\lg(\Delta u_r/\Delta u_f) = a \lg(W/W_f) + b \quad (6)$$

式中: a , b 为经验参数, 由试验数据拟合得到。

本次试验数据得到的参数 a , b 分别为 0.365, 0.0637, 公式表示的拟合曲线如图 15 所示。公式表明 $\Delta u_r/\Delta u_f$ 与 W/W_f 存在明显的一致性, α 和 CSR 的大小和方向影响很小。

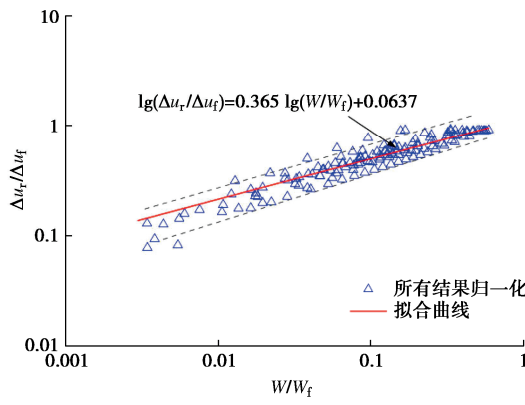


图 15 $\Delta u_r/\Delta u_f$ 和 W/W_f 关系拟合模型曲线

Fig. 15 Fitting curve of $\Delta u_r/\Delta u_f$ and W/W_f

3 结 论

本文通过固结不排水多向循环单剪试验研究并得到了初始剪应力和循环应力方向对饱和密砂液化特性的影响, 重点分析了试验结果并从损耗能的角度解释了初始剪应力对饱和密砂抗液化强度影响的内在原因, 建立了饱和密砂的残余孔压与损耗能之间的归一化关系模型, 主要得到以下 4 点结论。

(1)饱和密砂的破坏模式受初始剪应力和循环应力方向的影响,且主要表现为循环活动性和累积塑性应变。当 $CSR \geq \alpha$ 时,在平行加载模式下, $\alpha < 0.20$ 时,试样出现循环活动性, $\alpha = 0.20$ 时,试样主要表现为累积塑性应变;在垂直加载模式下,试样的破坏模式不受初始剪应力大小的影响,均表现为循环活动性。

(2)初始剪应力的存在会降低饱和密砂的抗液化强度,但垂直加载模式下饱和密砂的抗液化强度比平行加载模式下高 5%~7%。与无初始剪应力作用相比,平行加载和垂直加载模式下饱和密砂的抗液化强度分别下降 19%~29%和 14%~23%。

(3)不同加载模式下饱和密砂的损耗能累积发展具有统一规律,平行加载和垂直加载模式下均表现出试样的损耗能累积速率随初始剪应力的增大而加快。从而可推测初始剪应力作用下饱和密砂的损耗能累积速率加快是导致其抗液化强度降低的内在原因。

(4)饱和密砂的残余孔压累积速率随初始剪应力的增大而显著加快,当 $\alpha = 0.20$ 时试样破坏后的残余孔压值最低。饱和密砂的残余孔压和损耗能的归一化关系不受加载模式(垂直加载和平行加载)、CSR 和 α 的影响,对数坐标下 $\Delta u_r / \Delta u_f$ 与 W / W_f 呈现出线性关系。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 张迎宾和魏江涛参与试验方案设计;覃一巧、张世豪、熊亦翔和刘永航完成试验和数据分析;张迎宾、魏江涛、覃一巧、张世豪参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。The test protocol was designed by ZHANG Yingbin and WEI Jiangtao. All the tests and data analysis were conducted by QIN Yiqiao, ZHANG Shihao, XIONG Yixiang and LIU Yonghang. The manuscript was drafted and revised by ZHANG Yingbin, WEI Jiangtao, QIN Yiqiao and ZHANG Shihao. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023: 257. (National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook 2023[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023: 257. (in Chinese))
- [2] LEE K L, SEED H B. Dynamic strength of anisotropically consolidated sand[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, **93**(5): 169-190.
- [3] YOSHIMI Y, OH-OKA H. Influence of degree of shear stress reversal on the liquefaction potential of saturated sand[J]. Soils and Foundations, 1975, **15**(3): 27-40.
- [4] VAID Y P, CHERN J C. Effect of static shear on resistance to liquefaction[J]. Soils and Foundations, 1983, **23**(1): 47-60.
- [5] YANG J, SZE H Y. Cyclic behaviour and resistance of saturated sand under non-symmetrical loading conditions[J]. Géotechnique, 2011, **61**(1): 59-73.
- [6] CHIARO G, KOSEKI J, SATO T. Effects of initial static shear on liquefaction and large deformation properties of loose saturated Toyoura sand in undrained cyclic torsional shear tests[J]. Soils and Foundations, 2012, **52**(3): 498-510.
- [7] PARK S S, NONG Z Z, LEE D E. Effect of vertical effective and initial static shear stresses on the liquefaction resistance of sands in cyclic direct simple shear tests[J]. Soils and Foundations, 2020, **60**(6): 1588-1607.
- [8] 胡中华, 王 瑞, 庄海洋, 等. 饱和南京砂液化后循环加载的动力表观黏度分析[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(增刊 2): 149-154. (HU Zhonghua, WANG Rui, ZHUANG Haiyang, et al. Apparent kinetic viscosity of saturated Nanjing sand due to liquefaction-induced large deformation in torsional shear tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(S2): 149-154. (in Chinese))
- [9] KOKUSHO T. Earthquake-induced flow liquefaction in fines-containing sands under initial shear stress by lab tests and its implication in case histories[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, **130**: 105984.
- [10] 庄海洋, 胡中华, 王瑞, 等. 饱和南京细砂初始液化后特大流动变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(12): 2164-2174. (ZHUANG Haiyang, HU Zhonghua, WANG Rui, et al. Cyclic torsional shear loading tests on the extremely large post-liquefaction flow deformation of saturated Nanjing sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(12): 2164-2174. (in Chinese))
- [11] 吴 杨, 吴毅航, 马林建, 等. 南海岛礁珊瑚砂砾混合料动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(1): 63-71. (WU Yang, WU Yihang, MA Linjian, et al. Experimental study on dynamic characteristics of calcareous sand-gravel mixtures from islands in the South China Sea[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(1): 63-71. (in Chinese))
- [12] 王桂萱, 桑野二郎, 竹村次朗. 砂质混合粘土的孔隙水压力和残余变形特性研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(3): 342-346. (WANG Guixuan, KUWANO Jiro, TAKEMURA Jiro. Research on pore water pressure and residual shear strain characteristics of sand clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(3): 342-346. (in Chinese))
- [13] 温晓贵, 张 勋, 周 建. 复杂应力路径下影响黏土孔压开展的因素研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(11): 1709-1716. (WEN Xiaogui, ZHANG Xun, ZHOU Jian. Influencing factors

- about pore pressure generated for clay under complex stress path[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(11): 1709-1716. (in Chinese))
- [14] 王 军, 杨 芳, 吴延平, 等. 初始剪应力与加荷速率共同作用下饱和软黏土孔压模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 1): 111-117, 475. (WANG Jun, YANG Fang, WU Yanping, et al. Experiment study of coupling effect of initial shear stress and loading rate on pore water pressure model of soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S1): 111-117, 475. (in Chinese))
- [15] 王 军, 罗 盼, 刘飞禹, 等. 初始剪应力下剪切方向角对软黏土软化特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(5): 1072-1080. (WANG Jun, LUO Pan, LIU Feiyu, et al. Effect of angle between directions of initial shear stress and cyclic load on softening properties of soft clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(5): 1072-1080. (in Chinese))
- [16] 周正龙, 陈国兴, 吴琪. 初始剪应力对饱和粉土液化特性影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(3): 504-509. (ZHOU Zhenglong, CHEN Guoxing, WU Qi. Effect of initial static shear stress on liquefaction behavior of saturated silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(3): 504-509. (in Chinese))
- [17] NEMAT-NASSER S, SHOKOOH A. A unified approach to densification and liquefaction of cohesionless sand in cyclic shearing[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, **16**(4): 659-678.
- [18] 肖 兴, 吉东伟, 吴 琪, 等. 基于能量法的海洋黏土循环破坏准则试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(11): 2361-2370. (XIAO Xing, JI Dongwei, WU Qi, et al. Experimental investigation on cyclic failure criteria for marine clay based on energy method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(11): 2361-2370. (in Chinese))
- [19] POLITO C, GREEN R A, DILLON E, et al. Effect of load shape on relationship between dissipated energy and residual excess pore pressure generation in cyclic triaxial tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, **50**(11): 1118-1128.
- [20] PAN K, PAN C, YANG Z X, et al. Evaluation of the liquefaction potential of sand under random loading conditions: equivalent approach versus energy-based method[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2020, **24**(1): 59-83.
- [21] JIN H X, GUO L, SUN H L, et al. Energy-based evaluation of undrained cyclic behavior of marine soft clay under multidirectional simple shear stress paths[J]. Acta Geotechnica, 2023, **18**(6): 2883-2898.
- [22] WANG J T, YANG Y M, LI X, et al. Energy dissipation in monotonic and cyclic simple shear tests considering initial static shear stress[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, **180**: 108576.
- [23] UMAR M, CHIARO G, KIYOTA T, et al. Deformation and cyclic resistance of sand in large-strain undrained torsional shear tests with initial static shear stress[J]. Soils and Foundations, 2021, **61**(3): 765-781.
- [24] 潘 坤, 李佩佩, 曹 奕, 等. 初始静剪作用下含细粒砂土动力液化特性离散元分析[J]. 岩土工程学报, 2025, **47**(2): 417-427. (PAN Kun, LI Peipei, CAO Yi, et al. Cyclic liquefaction behavior of silty sand considering initial static shear effect: a DEM investigation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, **47**(2): 417-427. (in Chinese))
- [25] SAXENA S K, REDDY K R, AVRAMIDIS A S. Liquefaction resistance of artificially cemented sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, **114**(12): 1395-1413.
- [26] IDRIS IM. An update to the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential[C]// Proc, TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction, Federal Highway Administration, Washington D C, 1999.
- [27] SEED H B. In proceedings of symposium on seismic design of embankments and caverns: Earthquake resistant design of earth dams[C]// American Society of Civil Engineers, New York, 1983.
- [28] WEI J T, XU T J, HE J X. Effect of static shear stress and cyclic loading direction on cyclic behaviors of granular soils by DEM analysis[J]. Computers and Geotechnics, 2024, **167**: 106112.
- [29] YANG Z X, PAN K. Energy-based approach to quantify cyclic resistance and pore pressure generation in anisotropically consolidated sand[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, **30**(9): 04018203.
- [30] KOKUSHO T. Liquefaction potential evaluations: energy-based method versus stress-based method[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, **50**(10): 1088-1099.
- [31] 李宝建, 王 哲, 吕国儿, 等. 复杂荷载作用下饱和钙质砂孔压特性及损耗能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(增刊 2): 37-41. (LI Baojian, WANG Zhe, LÜ Guoer, et al. Experimental study on characteristics of pore water pressure and dissipated energy of saturated calcareous sand under complex loading conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(S2): 37-41. (in Chinese))