

DOI: 10.11779/CJGE2023S20039

# 复杂荷载作用下饱和钙质砂孔压特性及损耗能试验研究

李宝建<sup>1,3</sup>, 王哲<sup>\*2</sup>, 吕国儿<sup>1</sup>, 潘坤<sup>2</sup>, 杨仲轩<sup>3</sup>, 龚晓南<sup>3</sup>

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 浙江工业大学土木工程学院, 浙江 杭州 310014;  
3. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 钙质砂是一种由海洋生物残骸沉积而成的特殊岩土体, 为我国南海岛礁主要的吹填材料, 研究其动力特性意义重大。通过一系列不排水循环剪切三轴试验, 分析饱和钙质砂孔压特性发展规律; 引入能量法, 建立钙质砂孔压和损耗能的内在联系。结果表明, 饱和钙质砂的极限残余孔压比随固结应力比呈先增大后减小的变化趋势, 循环加载过程所累积的损耗能与试样初始静剪应力比及相对密实度有关, 受循环应力比影响极小, 可通过构建的能量模型较好地预测不同试验条件下饱和钙质砂的损耗能。研究成果能为钙质砂地基的稳定性分析提供理论依据和技术支撑。

**关键词:** 钙质砂; 孔压特性; 损耗能; 初始静剪应力; 相对密实度

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S2-0037-05

作者简介: 李宝建(1991—), 男, 博士, 工程师, 主要从事海洋岩土工程方面的研究工作。E-mail: lee6891481@163.com。

## Experimental study on characteristics of pore water pressure and dissipated energy of saturated calcareous sand under complex loading conditions

LI Baojian<sup>1,3</sup>, WANG Zhe<sup>2</sup>, LÜ Guoer<sup>1</sup>, PAN Kun<sup>2</sup>, YANG Zhongxuan<sup>3</sup>, GONG Xiaonan<sup>3</sup>

(1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 2. College of Civil Engineering, Zhejiang

University of Technology, Hangzhou 310014, China; 3. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** Calcareous sand, the special soil, is the main material for the filling of islands and reefs in the South China Sea, which is biogenic sediments and skeletal remains of marine organisms. It is of great importance to study its dynamic characteristics. By a series of undrained cyclic triaxial tests on the calcareous sand, the characteristics of pore water pressure are investigated. Besides, the energy method is used to establish the relation between the pore water pressure and the dissipated energy. The results show that the ultimate residual pore pressure ratio of the saturated calcareous sand increases first and then decreases with the change of consolidation stress ratio. The accumulated dissipated energy during cyclic loading is related to the initial static shear stress ratio and relative density of the sample, and has few influences on the cyclic stress ratio. The dissipated energy of the saturated calcareous sand under different test conditions can be predicted by the energy model. The research provides theoretical basis and technical support for the stability analysis of calcareous sand foundations.

**Key words:** calcareous sand; characteristic of pore water pressure; dissipated energy; initial static shear stress; relative density

## 0 引言

钙质砂是由珊瑚骨骼、贝类、虫黄藻类等海洋生物残骸沉积而成, 其主要组成成分是碳酸钙<sup>[1-3]</sup>, 是我国南海岛礁吹填的主要材料。因其生成环境、成因以及物质组成等因素影响, 钙质砂具有颗粒易破碎、形状极不规则、内孔隙发育、微观结构复杂等显著区别于陆源石英砂的特点<sup>[4-6]</sup>。随着“一带一路”国家战略和建设“海洋强国”政策方针的推进, 研究钙质砂工程力学特性具有重要意义<sup>[7-9]</sup>。

钙质砂作为填方工程的天然材料, 其应力状态复杂多变, 土体受到各向异性应力状态影响而产生初始静剪应力, 在建(构)筑物的自重和动荷载(波浪、

地震和交通荷载等)作用下, 易引起地基强度降低、变形过大以及液化失稳等灾害。实际上, 动荷载作用下剪切应力做功将导致材料损伤效应的累积, 不排水条件下表现为孔压增长。因此, 可以将孔压的升高与土体颗粒在运动或重排过程中所耗损的能量建立关联。损耗能作为标量, 相较于应力、应变等矢量, 可直接数学叠加, 大幅度降低分析难度。Nemat-Nasser等<sup>[10]</sup>首先提出了耗散能量的概念, 建立其与残余孔压

基金项目: 浙江省博士后科研择优资助项目(ZJ2022012); 国家自然科学基金项目(52178362); 浙江省自然科学基金项目(LY23E080009)

收稿日期: 2023-11-30

\*通信作者 (E-mail: wangzsd@zjut.edu.cn)

的关系, 来有效地评估孔隙水压力的产生和发展过程。Kokusho<sup>[11]</sup>和 Pan 等<sup>[12]</sup>提出了土骨架破坏产生的单位体积耗散能与应变和残余孔压累积直接相关, 为评价砂土在不规则循环应力条件下的抗液化能力提供了有效方法。总体而言, 上述研究主要针对石英砂, 能否适用于钙质砂仍需进一步探究。

本文以饱和钙质砂为研究对象, 开展不排水条件下循环剪切三轴试验, 探究相对密实度、初始静剪应力以及循环应力对其孔压发展的影响; 同时, 引入能量法, 建立钙质砂孔压与损耗能之间联系, 提出基于能量损耗的液化评价方法, 为钙质砂地基稳定性分析提供理论依据和技术支撑。

## 1 试验材料与方案

### 1.1 试验材料

本文试验材料为中国南海某岛礁的天然钙质砂, 颗粒多呈灰白色, 形状有片状、块状、棒状等, 颗粒内孔隙多、微观结构复杂, 如图 1 所示。

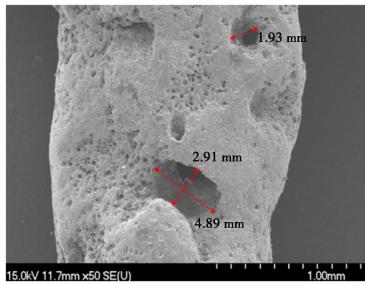


图 1 典型钙质砂颗粒电镜扫描 (SEM) 图像

Fig. 1 SEM image of typical calcareous sand particles

经过现场取材、清水冲洗、烘干等过程后, 对粒径大于 5 mm 的颗粒进行剔除, 处理后颗粒分布级配曲线如图 2 所示, 主要基本物理性质参数见表 1。不难发现, 试样基本不含 0.1 mm 以下的细颗粒, 不均匀系数和曲率系数分别为 6.84 和 0.78, 属于不良级配砂土。

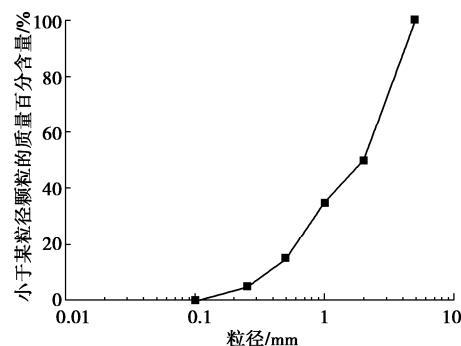


图 2 钙质砂颗粒分级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curve of calcareous sand

表 1 钙质砂物理性质指标

Table 1 Physical properties of calcareous sand

相对密度	$d_{50}/\text{mm}$	不均匀系数	曲率系数	最大孔隙比	最小孔隙比
2.79	2.0	6.84	0.78	1.15	0.87

### 1.2 试验方案

结合实际工况, 采用 CKC 三轴试验系统模拟复杂应力条件下饱和钙质砂循环剪切试验, 先进行有效围压为 100 kPa 的等向固结后再根据试验设计的初始静偏应力状态进行非等向固结, 具体方案如表 2 所示。初始静剪应力比 SSR 和循环应力比 CSR 可通过式(1)和(2)计算。

表 2 不排水循环剪切试验方案

Table 2 Summary of undrained cyclic triaxial tests

试验系列	相对密实度 $D_r$	$q_s / \text{kPa}$	$q_{\text{cyc}} / \text{kPa}$	SSR	CSR	$N_f$
I 70% (密砂)	0	20	0	0.1	232	
	0	25	0	0.125	74	
	0	30	0	0.15	17	
	0	40	0	0.2	6	
	20	30	0.1	0.15	168	
	20	45	0.1	0.225	19	
	20	50	0.1	0.25	3	
	50	50	0.25	0.25	53	
	50	60	0.25	0.3	11	
	50	70	0.25	0.35	6	
	80	70	0.4	0.35	14	
	80	80	0.4	0.4	7	
	-10	25	-0.05	0.125	78	
	-10	30	-0.05	0.15	39	
	-10	35	-0.05	0.175	8	
	-20	20	-0.1	0.1	210	
	-20	25	-0.1	0.125	11	
	-20	30	-0.1	0.15	8	
	-40	20	-0.2	0.1	57	
	-40	25	-0.2	0.125	16	
	-40	30	-0.2	0.15	8	
II 30% (松砂)	0	15	0	0.075	943	
	0	20	0	0.1	120	
	0	25	0	0.125	37	
	0	30	0	0.15	18	
	24	30	0.12	0.15	61	
	24	35	0.12	0.175	16	
	24	40	0.12	0.2	5	
	40	15	0.2	0.075	175	
	40	20	0.2	0.1	9	
	50	12.5	0.25	0.0625	17	
	50	15	0.25	0.075	2	
	-10	12.5	-0.05	0.0625	382	
	-10	15	-0.05	0.075	180	
	-10	20	-0.05	0.1	11	
	-20	10	-0.1	0.05	246	
	-20	12.5	-0.1	0.0625	202	
	-20	15	-0.1	0.075	12	
	-40	5	-0.2	0.025	104	
	-40	7.5	-0.2	0.0375	13	
	-40	10	-0.2	0.05	2	

$$SSR = \frac{q_s}{2p'_0} , \quad (1)$$

$$CSR = \frac{q_{cyc}}{2p'_0} . \quad (2)$$

式中:  $q_s$  为初始静剪偏应力;  $q_{cyc}$  为循环偏应力;  $p'_0$  为平均有效正应力。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 孔压特性发展规律

图 3 给出不同初始偏应力作用下饱和密砂的孔压发展规律曲线。孔隙水压力可分为两类: ①随着循环荷载作用实时变化的孔压, 即实线所示的瞬态孔压, 这种孔压会随着循环荷载的卸载而快速消散; ②每个循环加载结束, 试样未及时恢复的孔压, 即虚线所示的残余孔压。从图 3 (a) 中可以看出, 对于等向固结的试样, 残余孔压在前期随着荷载的施加而逐渐累积, 而在后期快速增长, 直至达到荷载施加前的有效围压,  $u_{lim}=100$  kPa。如图 3 (b) 所示, 在压缩静偏应力作用下, 孔压在加载初期迅速累积, 随着循环荷载持续进行, 残余孔压逐渐趋于稳定,  $u_{lim}=64.6$  kPa。在拉伸静偏应力作用下, 孔压发展与压缩静偏应力时有类似的变化趋势, 孔压在加载初期累积较快而后基本保持不变,  $u_{lim}=34.68$  kPa。

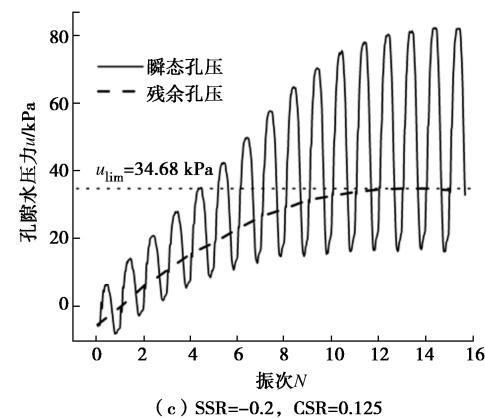
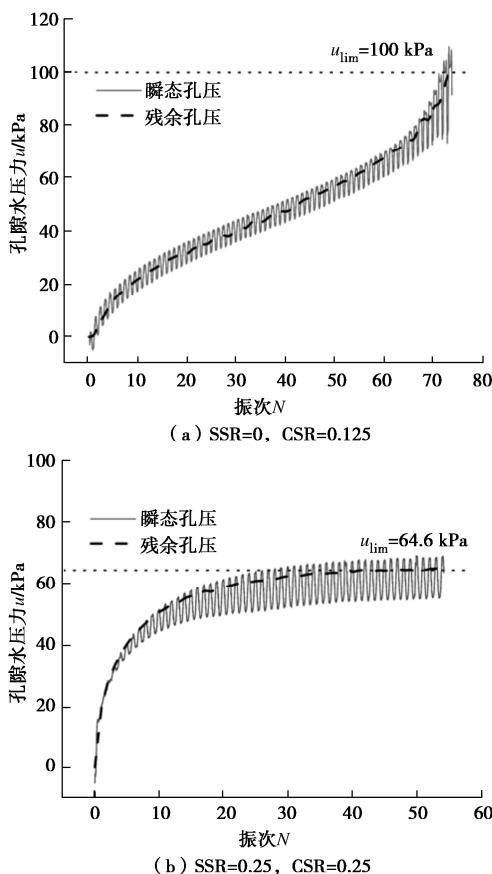


图 3 钙质砂孔压增长变化规律

Fig. 3 Development of pore water pressure of calcareous sand

同时, 通过式 (3) 和 (4) 定义固结应力比  $K_c$  和残余孔压比  $u_r$ 。

$$K_c = \frac{\sigma_{v0}}{\sigma_{h0}} , \quad (3)$$

$$u_r = \frac{u}{\sigma_{h0}} . \quad (4)$$

式中:  $\sigma_{v0}$  和  $\sigma_{h0}$  分别为初始有效竖向应力和水平应力,  $u$  为残余孔压。

图 4 给出了饱和密砂的极限残余孔压比和固结应力比的关系曲线。从图中可以看出, 饱和密砂的极限残余孔压比随着固结应力比的增大呈先增大后减小的趋势, 在  $K_c=1$  (等向固结) 时, 极限残余孔压比达到最大值  $u_{r,lim}=1$ , 且大致上呈线性分布, 与循环应力幅值大小无明显关系。

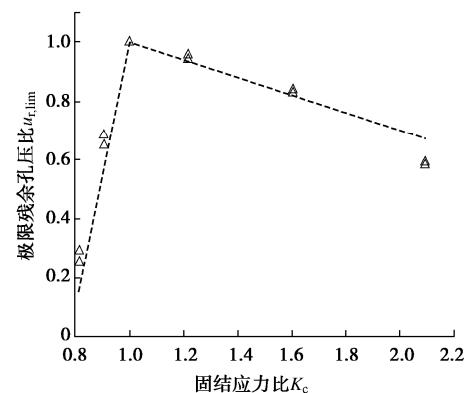


图 4 极限残余孔压比与固结应力比的关系

Fig. 4 Relationship between ultimate residual pore pressure ratio and consolidation stress ratio

对于同一材料的砂土, 其在循环荷载作用下有效应力路径将沿着平行于等向固结线 (ICL) 的方向逐渐靠近临界状态线 (CSL), 而与循环应力幅值无关, 如图 5 所示。因此, 对于给定的初始应力状态 ( $\sigma_{h0}$ ,  $\sigma_{v0}$ ), 会与临界状态线相交于一点, 且理论上初始应力点与最终应力点之间的水平距离  $\Delta u$  为试验中的极

限残余孔压, 如式 (5) 所示。根据  $u_r$  和  $K_c$  定义, 可得到两者关系如式 (6), 符合图 4 所示的线性关系。

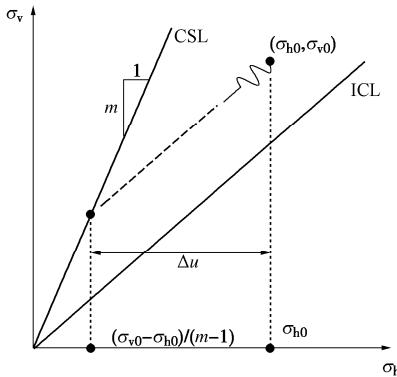


图 5 初始静剪应力状态对残余孔压影响示意图

Fig. 5 Influences of initial static shear stress on residual pore pressure

$$u_{\text{lim}} = \Delta u = \sigma_{h0} - \frac{\sigma_{v0} - \sigma_{h0}}{m-1} , \quad (5)$$

$$u_{r,\text{lim}} = \frac{u_{\text{lim}}}{\sigma_{h0}} = 1 - \frac{K_c - 1}{m-1} . \quad (6)$$

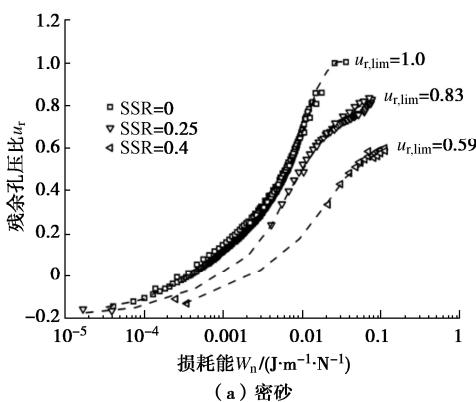
## 2.2 损耗能演化规律

动荷载作用下饱和砂土损耗的能量主要用于颗粒的相对运动和重新排列。因此, 引入能量法, 提出基于损耗能的砂土液化评价方法。循环加载过程中一个振次的损耗能  $W$  可用应力-应变滞回圈的面积表示, 即:

$$W = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (q_{i+1} + q_i) (\varepsilon_{a,i+1} - \varepsilon_{a,i}) . \quad (7)$$

式中:  $n$  为计算增量的总个数,  $q_i$  和  $\varepsilon_{a,i}$  分别为第  $i$  个增量的偏应力和轴向应变。

图 6 分别给出饱和钙质砂在不同初始静偏应力作用下残余孔压比与正交化损耗能的内在关系, 正交化损耗能  $W_n$  为损耗能  $W$  与初始有效水平正应力  $\sigma_{h0}$  的比值。结果显示: 饱和密砂的残余孔压初期增长缓慢, 随着  $W_n$  的增大而较快增长, 最后趋于稳定; 在饱和松砂中也观察到类似的变化趋势。这说明残余孔压与损耗能的关系主要取决于初始应力条件。



(a) 密砂

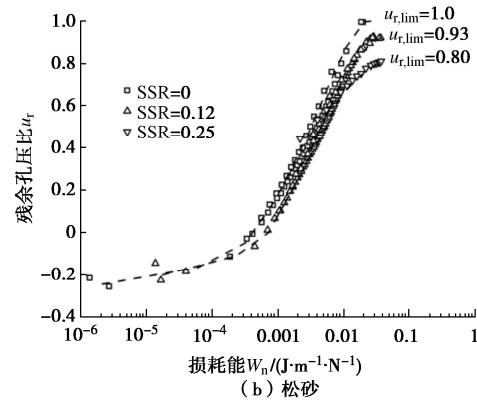


图 6 残余孔压比与损耗能的关系

Fig. 6 Relationship between residual pore pressure ratio and dissipated energy

从图 7 可以看出, 饱和钙质砂在失稳破坏时所积累的损耗能随着初始静剪应力的增加而增加; 对于同一初始应力状态, 密砂所需能量始终大于松砂。研究表明<sup>[13-14]</sup>, 饱和砂土在循环荷载作用下损耗能主要与初始应力和相对密实度有关, 受循环荷载幅值影响极小, 具体可用式 (8) 表示:

$$W' = 10^{a(D_r-0.78)} 10^{b(\text{SSR}-1.0)} . \quad (8)$$

式中:  $a$  和  $b$  为经验参数, 根据本次试验数据可分别取 0.65, 1.5。图 8 对损耗能的试验实测值与通过式 (8) 所得的预测值进行对比, 发现两者基本落在斜率为 1 的对角线两侧, 表明能量模型可较好地预测不同试验条件下饱和钙质砂的损耗能。

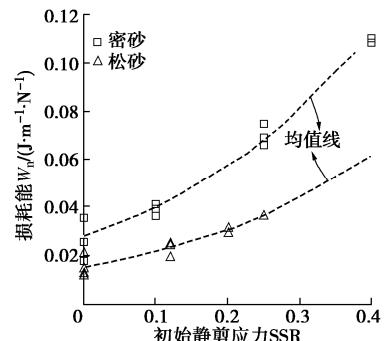


图 7 损耗能与初始静剪应力比的关系

Fig. 7 Relationship between dissipated energy and initial static shear stress ratio

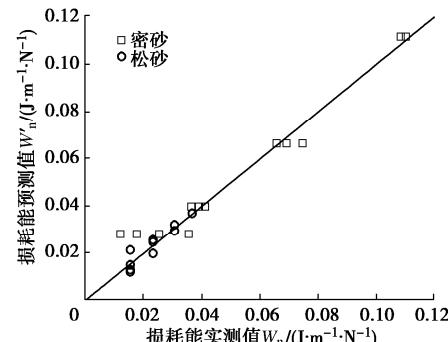


图 8 损耗能实测值与预测值

Fig. 8 Measured and predicted values of dissipated energy

### 3 结 论

(1) 饱和钙质砂的极限残余孔压比随固结应力比呈先增大后减小的趋势, 在  $K_c=1$  时存在最大值, 临界状态理论可以解释此现象。

(2) 不排水循环加载条件下饱和钙质砂的损耗能与试样的初始静剪应力比和相对密实度有关, 受循环应力比影响极小, 可通过构建的能量模型较好地预测不同试验条件下饱和钙质砂所累积的损耗能。

### 参考文献:

- [1] 蔡正银, 陈元义, 朱 涣, 等. 级配对珊瑚砂颗粒破碎与变形特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(4): 661-670. (CAI Zhengyin, CHEN Yuanyi, ZHU Xun, et al. Influences of gradation on particle breakage and deformation characteristics of coral sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(4): 661-670. (in Chinese))
- [2] 汪 稔, 吴文娟. 珊瑚礁岩土工程地质的探索与研究: 从事珊瑚礁研究 30 年[J]. 工程地质学报, 2019, 27(1): 202-207. (WANG Ren, WU Wenjuan. Exploration and research on engineering geological properties of coral reefs: engaged in coral reef research for 30 years[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(1): 202-207. (in Chinese))
- [3] LI B J, LEI G, GUO P P, et al. Experimental investigation into limit void ratio characteristics of calcareous sands considering various factors[J]. Geofluids, 2021: 3686852.
- [4] 王伟光, 姚志华, 李 婉, 等. 侧限高压下珊瑚砂-石英砂混合料的压缩特性及颗粒破碎行为[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(增刊 1): 6-11. (WANG Weiguang, YAO Zhihua, LI Wan, et al. Compression characteristics and particle crushing behavior of coral sand-quartz sand mixture under confined high pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(S1): 6-11. (in Chinese))
- [5] 汪成贵, 束善治, 肖 杨, 等. 考虑钙质砂颗粒破碎的分数阶边界本构模型[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(6): 1162-1170. (WANG Chenggui, SHU Shanzhi, XIAO Yang, et al. Fractional-order bounding surface model considering
- breakage of calcareous sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(6): 1162-1170. (in Chinese))
- [6] COOP M R. The mechanics of uncemented carbonate sands[J]. Géotechnique, 1994, 44(3): 607-6264.
- [7] COOP M R, SORENSEN K K, BODAS FREITAS T, et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand[J]. Géotechnique, 2004, 54(3): 157-163.
- [8] 刘崇权, 汪 稔. 钙质砂物理力学性质初探[J]. 岩土力学, 1998, 19(1): 32-37, 44. (LIU Chongquan, WANG Ren. Preliminary study on physical and mechanical properties of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, 19(1): 32-37, 44. (in Chinese))
- [9] 蔡正银, 侯贺营, 张晋勋. 考虑颗粒破碎影响的珊瑚砂临界状态与本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 989-995. (CAI Zhengyin, HOU Heying, ZHANG Jinxun, et al. Critical state and constitutive model for coral sand considering particle breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 989-995. (in Chinese))
- [10] 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.
- [11] KOKUSHO T. Liquefaction potential evaluations: energy-based method versus stress-based method[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(10): 1088-1099.
- [12] PAN K, YANG Z X. 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.
- [13] LIANG L Q, FIGUEROA J L, SAADA A S. Liquefaction under random loading: unit energy approach[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1995, 121(11): 776-781.
- [14] JAFARIAN Y, TOWHATA I, BAZIAR M H, et al. Strain energy based evaluation of liquefaction and residual pore water pressure in sands using cyclic torsional shear experiments[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 35(2): 13-28.

(编校: 明经平)