

DOI: 10.11779/CJGE2017S1016

# 不规则动荷载作用下砂土孔压特性试验研究

潘 坤, 杨仲轩\*

(浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

**摘 要:** 以多组人工调制的不规则正弦波荷载作为输入荷载, 对饱和松砂开展一系列动三轴试验, 探讨应力时程中不同脉冲幅值和脉冲顺序对砂土孔压特性的影响。试验结果表明, 出现更早、幅值更大的应力脉冲更易导致孔隙水压力的发展, 同时也更易诱发砂土液化。进一步地, 峰值应力之前和之后的脉冲波组对孔压发展的影响有所不同。此外, 不同荷载模式下, 饱和松砂孔压比与振次比存在近似唯一关系。根据砂土孔压特性, 引入单位体积剪切功并考察其与超静孔压的内在关联, 得到了孔压比与正交化剪切功的归一化关系。这一关系具有应力路径无关性, 受动荷载不规则性影响较小, 但与材料特性即土体种类有关。

**关键词:** 不规则动荷载; 脉冲; 动三轴试验; 饱和松砂; 孔压累积

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)S1-0079-06

**作者简介:** 潘 坤(1990-), 男, 安徽安庆人, 博士研究生, 主要从事砂土动力特性等方面的研究。E-mail: pk2013@zju.edu.cn。

## Pore pressure characteristics of sand subjected to irregular loadings

PAN Kun, YANG Zhong-xuan

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** A series of undrained cyclic triaxial tests are conducted under various types of artificial irregular loadings to investigate the combined effect of loading amplitude and sequence on the pore pressure characteristics of saturated loose sand. The results indicate that the earlier the higher-amplitude stress pulses arrive in a time history, the larger the pore pressure generation and thus the lower liquefaction resistance the sand samples display. The stress pulses prior to or after the arrival of the maximum spike stress play different role in the development of the pore pressure. In addition, a fairly unique relationship exists between the accumulated pore pressures and the normalized loading cycles. In view of this, the concept of shear work per unit volume is introduced to investigate the evolutionary trend of the excess pore water pressure generation during irregular loadings. The relationship between the pore pressure ratio and the normalized shear work is barely affected by the amplitude and the sequence of stress pulses in the irregular loadings, but shown to be dependent on the type of sand.

**Key word:** irregular loading; stress pulse; cyclic triaxial test; saturated loose sand; pore pressure accumulation

## 0 引 言

地震荷载、波浪荷载和交通荷载等是岩土工程中常见的动力荷载, 动荷作用下土体的力学特性是这些工程建筑基础的研究重点, 也是土动力学研究热点。由于动荷载作用下土体动孔压的累积易引起土体变形发展和强度衰减, 近年来, 循环荷载作用下饱和砂土的孔压演化特性日益受到人们的关注<sup>[1-4]</sup>。

目前, 对砂土动孔压特性的试验研究大都基于等幅荷载展开, 而实际工程中的动力荷载(如地震荷载)多为随机荷载, 由不规则的动荷脉冲波组成。为有效评估动荷载不规则性对土体液化特性的影响, 并确定较为合理的土工抗震设计指标, Seed等<sup>[5]</sup>最早提出将不规则荷载等效为具有特定幅值的等幅荷载, 使其在

给定振次下对土体产生与不规则荷载相同的损伤效应(相同的残余孔压或液化)。根据现场获得的强震记录和室内试验结果, 他们提出等效谐波的幅值应为地震应力波最大剪应力的65%。随后, Ishihara等<sup>[6]</sup>指出通过该方法确定的等效幅值与不规则脉冲波的荷载类型(振动型或冲击性)有关。谢定义等<sup>[7]</sup>的试验则表明, 不规则动荷载作用下砂土孔压发展还受应力脉冲顺序的影响。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51578499, 51761130078); 国家重点基础研究发展计划项目(“973”计划)(2015CB057801); 国家重点研发计划(2016YFC0800204)

**收稿日期:** 2016-11-28

**\*通讯作者** (E-mail: zxyang@zju.edu.cn)

为了更深刻地揭示动荷载作用下无黏性土液化特性, Nemat-Nasser 等<sup>[8]</sup>从能量的角度分析了饱和砂土的孔压演化机理, 并首次建立了剪切应力功与土体残余孔压的对应关系。能量分析方法为砂土孔压特性研究提供了新的途径, 被越来越多的研究者所采用<sup>[9-11]</sup>, 他们分别探讨了荷载模式、固结条件、试样相对密实度和初始围压水平对砂土孔压-能量关系的影响。实际上, 动力荷载作用下剪切应力做功将导致材料损伤效应的累积, 不排水条件下则表现为孔压增长; 另一方面, 通过相关地震参数可获得地震过程中所释放的能量<sup>[10]</sup>。因此, 开展不规则荷载作用下剪切功与土体孔压累积的研究极具工程意义。目前, 动荷载不规则性对土体孔压-能量关系演化规律的影响仍不明确, 亟需开展进一步研究。同时, 在具有不规则性的复杂应力路径条件下, 与传统的基于等幅荷载的孔压应力模型相比, 引入同时包含应力和应变特性的能量概念可大大简化砂土液化分析方法。

本文通过一系列动三轴试验, 研究了不规则动荷载脉冲幅值和脉冲顺序对饱和松砂孔压特性的影响。试验结果表明, 出现更早、幅值更大的应力脉冲更易引起孔隙水压力的累积。引入单位体积剪切功并获得了孔压比与正交化剪切功的归一化关系。研究发现, 孔压-剪切功关系受动荷载不规则性影响较小, 在不同的荷载模式下表现出很好的一致性。

1 试验方法

1.1 试验设备与试样制备

采用 CKC 自动三轴试验系统, 该系统可对所加荷载进行预先标定, 能实现频率较快且精度较高的动力加载。进行不规则动荷载试验时, 将记录应力脉冲时程信息的数据文件导入控制程序, 通过电气转换器实现由电脑软件控制的三轴加载和数据采集。

试验用砂为丰浦砂, 基本物性指标如表 1 所示<sup>[3]</sup>。采用落砂法制样, 试样直径 70 mm, 高度 140 mm。将烘干砂样通过漏斗分层加入, 施加微小真空, 以检查气密性并加持试样。再依次缓慢通入二氧化碳和无气水, 施加 200 kPa 反压进行反压饱和并检查  $B$  值, 均达到 0.96 以上, 满足饱和度要求。

表 1 丰浦砂基本物性指标

Table 1 Physical properties of Toyoura sand

平均粒径 /mm	不均匀系数	最大 孔隙比	最小 孔隙比	比重
0.17	1.7	0.977	0.597	2.65

1.2 试验方案

对落砂法制备的较松试样 ( $e_0=0.875$ ) 进行等压

固结, 初始有效围压  $p'_0=100$  kPa。由于低围压水平下砂土压缩性较低, 因此固结完成时, 试样孔隙比变化极小 ( $e_1=0.86$ ), 其相对密实度约为 30%。考虑到荷载波形 (正弦波、三角波等) 对土体孔压累积并无显著影响<sup>[4]</sup>, 为了揭示应力脉冲幅值和顺序对砂土孔压演化特性的影响, 特设计以下五种正弦波型动荷载, 如图 1 所示。其中, A, B 和 C 组动荷载均由不规则应力脉冲组成, 其大幅值脉冲数依次减少; A-1 和 A-2 型荷载中脉冲顺序互为逆序, 如图 1 (a)、(b) 所示; 为便于对比, 同时对试样施加正弦波型等幅荷载, 如图 1 (e) 所示。动荷载加载频率为 1 Hz; 加载时, 分别调整不规则荷载峰值脉冲 ( $q_{peak}$ ) 和等幅荷载幅值, 直至土体液化, 具体试验方案如表 2 所示。其中, 输入荷载幅值及相应破坏振次 ( $N_f$ ) 也一并给出。对于不规则动荷载,  $N_f$  指试样发生初始液化<sup>[1]</sup>时一组完整应力脉冲序列的循环次数。

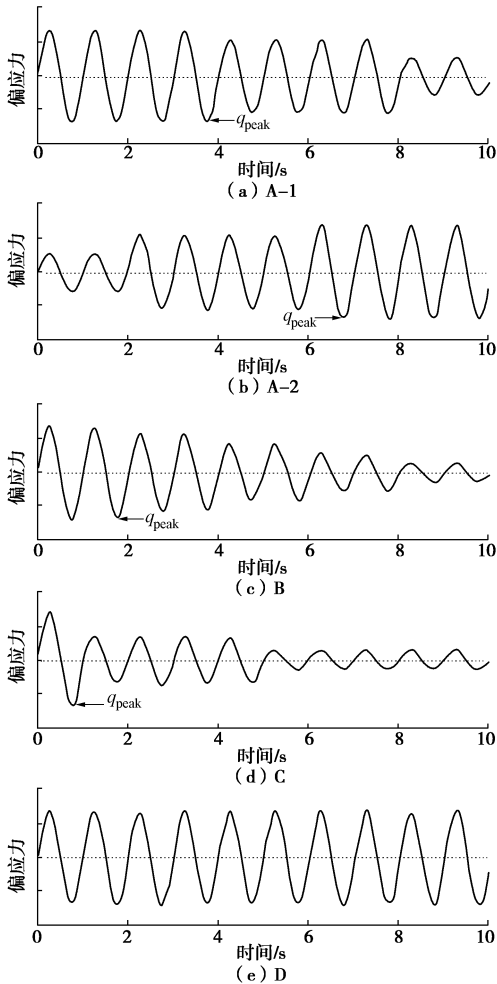


图 1 荷载模式

Fig. 1 Artificial loading waveforms

2 试验结果

图 2~4 给出了三组典型试验的有效应力路径及

孔压时程曲线, 试样分别受 A-1、A-2 及 C 型不规则荷载作用, 其峰值偏应力均为 26 kPa。

表 2 试验方案

Table 2 Test series			
荷载模式	相对密实度	荷载幅值 /kPa	破坏振次
A-1	30%~31%	21, 26, 30	19, 4, 2
A-2	29%~30%	20, 26, 30	37, 8, 3
B	28%~29%	21, 26, 35	26, 9, 3
C	30%~31%	22, 26, 30	67, 19, 7
D	28%~30%	20, 25, 30	40, 16, 7

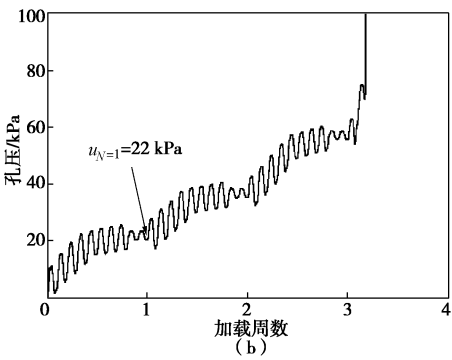
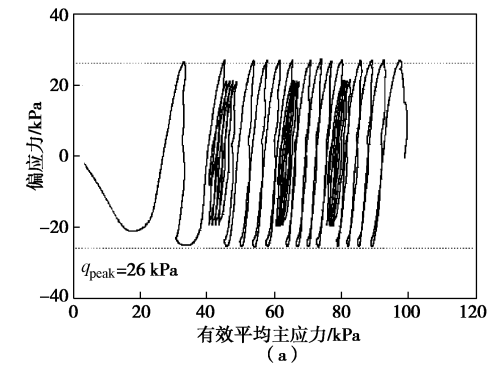


图 2 A-1 型荷载作用下松砂不排水响应

Fig. 2 Undrained behavior during ‘A-1’ type irregular loading

不规则动荷载作用下, 饱和松砂孔压逐渐累积(图 2 (b)), 同时有效应力逐步减小(图 2 (a)), 试样最终液化, 完全丧失强度。从图 2 (b) 中可以看到, 当完成第一个完整脉冲序列的动偏应力加载时 ( $N=1$ ), 残余孔压为 22 kPa。值得注意的是, 每个完整脉冲序列内, 试样动孔压发展渐渐趋于平缓, 这说明幅值更大的应力脉冲更易导致孔隙水压力的发展, 而峰值脉冲之后的小幅值应力脉冲一般不会引起孔压的进一步累积。

对 A-1 型荷载进行相同幅值的逆序加载(图 3 (a)), 可以发现, 孔压累积速率有所减慢(图 3 (b)), 在第一个加载周期结束时残余孔压 ( $u_{N=1}$ ) 约为 17 kPa。进一步地, 图 3 (b) 显示, 随着每个加载周期内脉冲幅值的增大, 动孔压累积速率略有加快。同时, 相较于 A-1 型荷载, 大幅值脉冲出现更晚的 A-2 型动

荷载作用下, 砂土抗液化能力明显提高 ( $N_f=8$ ), 这是因为峰值脉冲之前的小幅值应力脉冲有效延缓了孔压累积。

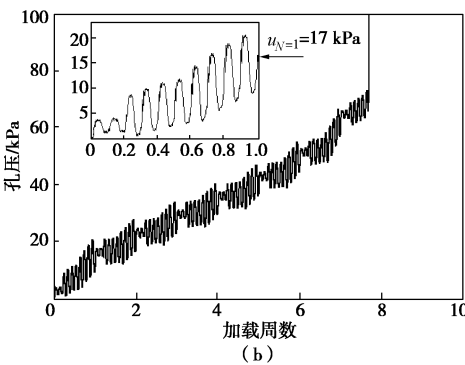
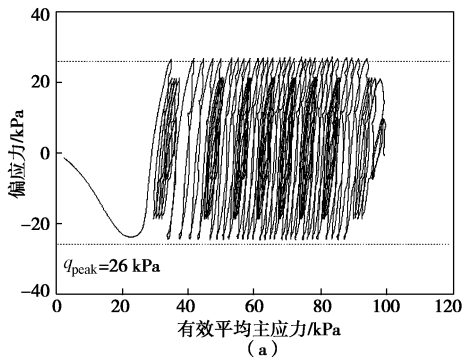


图 3 A-2 型荷载作用下松砂不排水响应

Fig. 3 Undrained behavior during ‘A-2’ type irregular loading

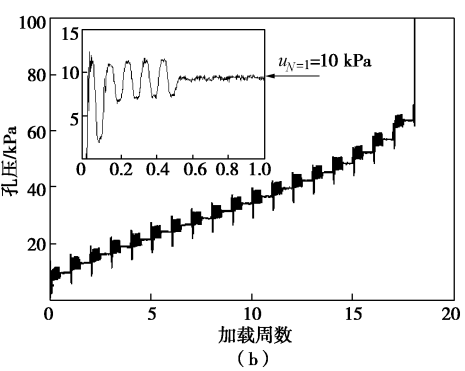
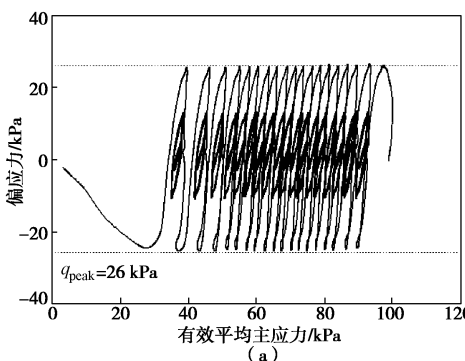


图 4 C 型荷载作用下松砂不排水响应

Fig. 4 Undrained behavior during ‘C’ type irregular loading

图 4 所示 C 型荷载作用下动孔压演化规律总体与

图2, 3类似, 孔压在第19个加载周期突然急剧增长, 试样液化。由于C型荷载时程中小幅值应力脉冲更多, 试样孔压累积速率相对更慢 ( $u_{N=1}=10$  kPa), 抗液化强度也更高 ( $N_F=19$ )。为了更深刻地揭示不规则动荷载作用下砂土孔压发展与演化规律, 后文将引入能量概念展开进一步讨论。

### 3 孔压特性分析

#### 3.1 孔压时程特性

对表2中全部试验所得的孔压时程曲线进行归一化处理, 其动孔压比 ( $u/p'_0$ ) 和振次比 ( $N/N_F$ ) 关系如图5所示。由图可知, 不同荷载模式下动孔压比与振次比的关系曲线可近似地归一。在加载初期, 孔隙水压力迅速增加, 而后累积速率趋于稳定; 当孔压比达到0.7左右时, 孔压急剧增大, 土体发生液化。显然, 对饱和松砂而言, 动荷载模式和幅值对孔压比与振次比间的近似唯一关系无明显影响。Georgiannou等<sup>[12]</sup>通过等幅加载扭剪试验也发现了类似规律, 如图中虚线区域所示。这表明, 当砂土相对密实度较接近时, 其归一化孔压时程特性受试验方法、动荷规则性及砂土种类影响较小。

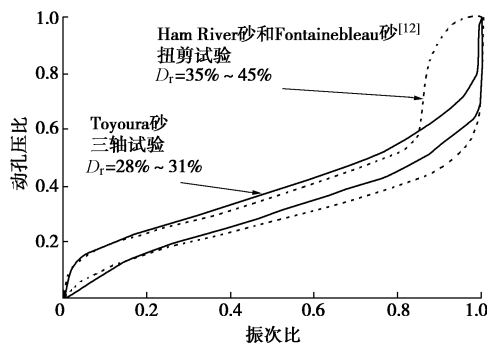


图5 孔压比 - 振次比关系

Fig. 5 Pore water pressure ratios against normalized load cycles

#### 3.2 剪切应力功

一般认为, 不排水条件下土体孔压的产生和累积由剪切应力做功引起。对于室内试验土单元体, 单位体积剪切功的一般表达式为

$$dW = \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_{ij}$  和  $\epsilon_{ij}$  分别为应力张量和应变张量。考虑不排水三轴加载边界条件, 上式修正为

$$dW = q d\epsilon_a \quad (2)$$

其中,  $q$  为偏应力,  $\epsilon_a$  为轴向应变。对式(2)分段积分, 得剪切功计算式如下

$$\Delta W = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (q_{i+1} + q_i) (\epsilon_{a,i+1} - \epsilon_{a,i}) \quad (3)$$

其中,  $q_i$  和  $\epsilon_{a,i}$  分别为第  $i$  个计算步的偏应力和轴向应

变,  $n$  为计算增量步总数。实际上, 剪切过程中的单位体积剪切功即为应力应变滞回圈面积, 如图6所示。

图7给出了一组剪切功计算示例, 加载路径对应于峰值应力为26 kPa的A-2型荷载。每个完整应力脉冲序列所引起的剪切功由黑色柱状图示出。由图可见, 加载前期单位振次剪切功基本趋于稳定, 相应地, 累积剪切功接近匀速增长; 随着加载持续进行, 剪切应力做功迅速增加, 土体瞬间破坏。将每个振次结束时的累积残余孔压绘于图中, 可以发现累积剪切功与残余孔压的演化规律极为相似, 土体液化同时伴随有剪切功和孔压的急剧增大, 这也隐证了动力荷载作用下剪切应力做功与残余孔压累积的相关性。

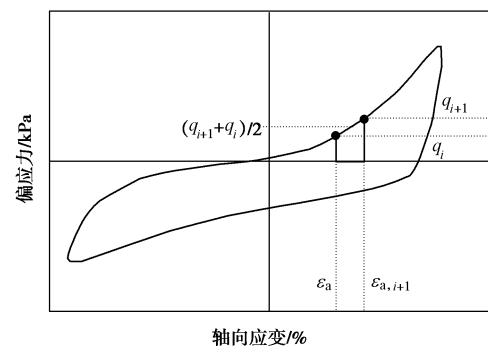


图6 剪切功与应力滞回圈

Fig. 6 Schematic diagram for shear work and hysteresis loop

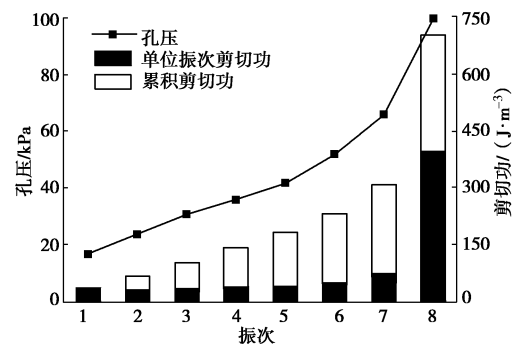


图7 加载过程剪切功累积与孔压发展

Fig. 7 Shear work accumulation and pore pressure generation

#### 3.3 孔压 - 剪切功关系

Law等<sup>[10]</sup>提出了一种同时考虑初始围压、固结比和相对密实度影响的剪切应立功正交化方法, 其在三轴或扭剪条件下的表达式为

$$W_N = (1 - 3 \lg K_c) (10^{-2(D_r - 0.7)}) \frac{W}{p'_0} \quad (4)$$

式中,  $K_c$ ,  $D_r$  和  $p'_0$  分别为固结应力比、相对密实度和初始有效围压。

据此, 对式(3)所得剪切应立功进行正交化处理, 建立其与累积孔压的联系, 如图8(a)所示。可以发现, 孔压比与正交化剪切功之间存在近似唯一性

关系, 且与动荷载脉冲幅值和顺序均无关。Law 等<sup>[10]</sup>基于密实福建砂的动三轴试验也发现了类似规律。对图 8 (a) 进行双对数坐标变换, 如图 8 (b) 所示。可以看到, 无论饱和砂土的种类和密实度是否相同, 也不管动荷载是否规则, 孔压比与正交化剪切功之间均表现出良好的线性关系。另一方面, 本次关于较松丰浦砂试验结果与 Towhata 等<sup>[9]</sup>关于中密丰浦砂试验能较好吻合, 而不同种类的土体之间则存在较大差异。对数坐标下的孔压 - 剪切功关系可用下式拟合:

$$\frac{u}{p'_0} = \alpha W_N^\beta, \quad (5)$$

其中,  $\alpha$  与直线截距有关,  $\beta$  则与斜率有关, 均可视作材料参数, 主要取决于土体种类。该孔压 - 剪切功关系需对不同土体类型分别进行参数标定, 但受动荷载不规则特性影响较小。

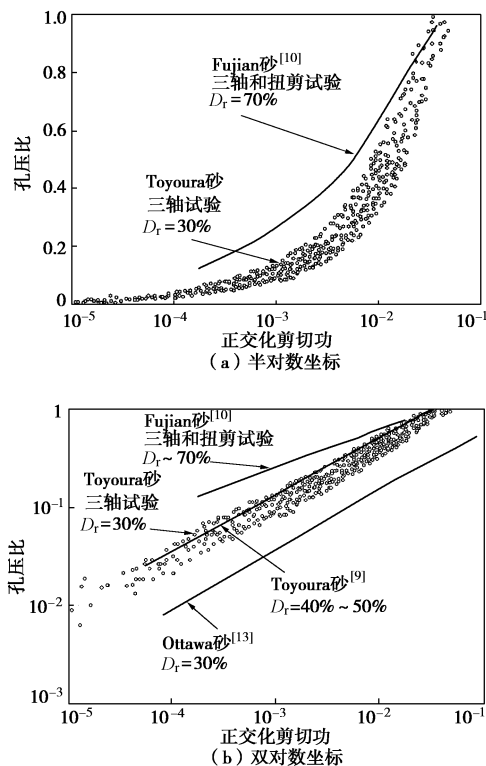


图 8 孔压比 - 剪切功关系

Fig. 8 Pore water pressure ratios against normalized shear work

## 4 结 论

本文开展了一系列动三轴试验, 探讨不规则动荷载脉冲幅值和脉冲顺序对饱和和松砂孔压演化规律和液化特性的影响。主要结论如下:

(1) 应力脉冲的幅值和顺序对饱和和松砂的孔压特性有较大影响。出现更早、幅值更大的应力脉冲更易导致孔隙水压力的累积; 峰值应力之前和之后的脉冲波组对孔压发展的影响也不尽相同。

(2) 不同动荷载模式下孔压比与振次比的关系可近似地归一, 且不受脉冲幅值和顺序影响。同时, 由应力应变滞回特性引起的剪切功与残余孔压的演化规律极为相似, 受动荷载不规则性影响较小。

(3) 饱和和松砂孔压比与正交化剪切功之间存在近似唯一关系, 受动荷载规则性及其应力脉冲幅值和顺序影响较小。这一关系具有应力路径无关性, 但与材料特性即土体种类有关。

本文研究成果揭示了砂土孔压发展的应力路径相关性, 通过建立剪切功与累积孔压的对应关系, 为复杂应力条件下土体液化特性分析提供了新的途径。结合静力触探等现场试验技术, 能有效评估工程荷载作用下建筑地基孔压发展和场地液化特性, 可应用于波浪荷载作用下海床液化及砂土震陷等问题的研究。

## 参考文献:

- [1] ISHIHARA K. Liquefaction and flow failure during earthquakes[J]. *Géotechnique*, 1993, **43**(3): 351 - 415.
- [2] 陈国兴, 刘雪珠. 南京粉质黏土与粉砂互层土及粉细砂的振动孔压发展规律研究[J]. *岩土工程学报*, 2004, **26**(1): 79 - 82. (CHEN Guo-xing, LIU Xue-zhu. Study on dynamic pore water pressure in silty clay interbedded with fine sand in Nanjing[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, **26**(1): 79 - 82. (in Chinese))
- [3] YANG Z X, LI X S, YANG J. Undrained anisotropy and rotational shear in granular soil[J]. *Géotechnique*, 2007, **57**(4): 371 - 384.
- [4] 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.
- [5] SEED H B, IDRISS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 1971, **97**(9): 1249 - 1273.
- [6] ISHIHARA K, YASUDA S. Sand liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation[J]. *Soils and Foundations*, 1975, **15**(1): 45 - 59.
- [7] 谢定义, 巫志辉. 不规则动荷脉冲波对砂土液化特性的影响[J]. *岩土工程学报*, 1987, **9**(4): 1 - 12. (XIE Ding-yi, WU Zhi-hui. Effect of irregular dynamic impulse history on liquefaction characteristics of saturated sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1987, **9**(4): 1 - 12. (in Chinese))
- [8] 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.
- [9] TOWHATA I, ISHIHARA K. Shear work and pore water pressure in undrained shear[J]. Soils and Foundations, 1985, **25**(3): 73 - 84.
- [10] LAW K T, CAO Y L, HE G N. An energy approach for assessing seismic liquefaction potential[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, **27**(3): 320 - 329.
- [11] LIANG L, FIGUEROA J L, SAADA A S. Liquefaction under random loading: unit energy approach[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1995, **121**(11): 776 - 781.
- [12] GEORGIANNOU V N, TSOMOKOS A. Comparison of two fine sands under torsional loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, **45**(12): 1659 - 1672.
- [13] KONSTADINOU M, GEORGIANNOU V N. Cyclic behaviour of loose anisotropically consolidated Ottawa sand under undrained torsional loading [J]. Géotechnique, 2013, **63**(13): 1144 - 1158.

(本文责编 胡海霞)

(上接 226 页)

- [4] 赵 君. 面板堆石坝集中渗流研究[J]. 大连理工大学学报, 1999, **39**(3): 460 - 463, 18 - 23. (ZHAO Jun. Study on the concentrated seepage flow of concrete face rockfill dam[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1999, **39**(3): 460 - 463, 18 - 23. (in Chinese))
- [5] 张玉龙, 赵 华, 董泽荣, 等. 面板堆石坝坝体渗流监测资料分析[J]. 长江科学院院报, 2009, **26**(B10): 140 - 143. (ZHANG Yu-long, ZHAO Hua, DONG Ze-rong, et al. Analysis of seepage monitoring data of the dam body of the face rockfill dam[J]. Journal of the Yangtze River academy of Sciences, 2009, **26**(B10): 140 - 143. (in Chinese))
- [6] 杨得勇, 雍 莉. 混凝土面板砂砾石坝垫层料过渡料渗流及渗透稳定性试验研究[J]. 西北水电, 2002(1): 47 - 50. (YANG De-yong, YONG Li. Concrete faced rockfill dam cushion material transition material seepage and seepage stability test[J]. Northwest Hydropower, 2002(1): 47 - 50. (in Chinese))
- [7] 张有天, 陈 平, 王 镭. 有排水孔的三维渗流场的有限元一边界元耦合分析[J]. 水利学报, 1989(5): 30 - 34. (ZHANG You-tian, CHEN Ping, WANG Lei. Finite element boundary element coupling analysis of three-dimensional seepage field of a drainage hole[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989(5): 30 - 34. (in Chinese))
- [8] SL 60—94 土石坝安全监测技术规范[S]. 北京: 水利电力出版社, 1994. (SL 60—94 technical specifications for safety monitoring of earth rock dams[S]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1994. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)