

DOI: 10.11779/CJGE2023S20038

循环三轴荷载作用下砂土孔隙水压的发展规律

岑 君¹, 彭 好², 魏 晓^{*2}, 杨仲轩³, 杨 峻⁴, 程 延¹

(1. 浙江交工地下工程有限公司, 浙江 富阳 311421; 2. 浙江大学滨海与城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058;

3. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 4. 香港大学土木工程系, 香港)

摘 要: 地震荷载在土体中诱导产生的超孔隙水压发展会导致砂土液化和破坏。准确合理地表征超孔隙水压在循环荷载作用下的发展规律对液化分析至关重要。采用净砂和细粒含量为 10% 的含粉粒砂土开展了一系列不排水循环三轴试验, 基于两种超孔隙水压模型(均匀循环应力模型和能量耗散模型)对数据进行了分析, 提出了一个能更好表征孔隙水压发展的均匀循环应力模型并标定了模型参数, 同时对一个单参数能量耗散模型进行了参数标定和分析。数据表明, 均匀循环应力模型参数主要受到应力循环幅值的影响, 且表现出一定的土体特异性; 能量耗散模型的参数则主要受到土体密实度的影响和土体类型的影响。

关键词: 土体液化; 砂土; 超孔隙水压; 均匀循环应力模型; 能量耗散模型

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S2-0264-06

作者简介: 岑 君(1976—)男, 本科, 高级工程师, 从事土木工程领域的工程研究。E-mail: 335033481@qq.com。

Generation of excess pore pressure in sands subjected to cyclic triaxial loading

CEN Jun¹, PENG Hao², WEI Xiao², YANG Zhongxuan³, YANG Jun⁴, CHENG Yan¹

(1. Zhejiang Communications Construction Group Co., LTD., Fuyang 311421, China; 2. Research Center of Coastal and Urban

Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang

University, Hangzhou 310058, China; 4. Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: The excess pore pressure induced by seismic loading leads to soil liquefaction. Proper characterization of the pore pressure generation due to cyclic loadings is essential for liquefaction analysis of soils. The results of a series of undrained cyclic triaxial tests based on clean sand and silty sand with fines of 10% are introduced. The data are analyzed in the framework of two pore pressure models (uniform cyclic stress model and energy dissipation model). A new uniform cyclic stress model is proposed to better characterize the pore pressure generation, and the model parameters are calibrated. Meanwhile, a one-parameter energy dissipation model is calibrated and analyzed as well. It is found that the parameters of the uniform cyclic stress model are mainly affected by the amplitude of the stress cycles and mildly affected by the fines content, while the parameters of the energy dissipation model are mainly affected by the packing density and soil type.

Key words: soil liquefaction; sand; excess pore pressure; uniform cyclic stress model; energy dissipation model

0 引 言

土体液化致灾相关问题虽然经过数十年研究, 仍然是地震岩土工程领域的热点。在最近的几次大地震中土体液化导致了灾难性后果^[1-3]。在地震作用下, 土体产生超孔隙水压, 引起有效应力降低, 导致土体逐渐丧失刚度和强度, 失去对外部荷载的承载能力, 发生大变形甚至液化。因此, 合理表征超孔隙水压在循环荷载作用下的发展规律对液化分析至关重要。

以往研究提出的多种孔压模型大致可分为三类: 均匀循环应力模型^[4-5]、均匀循环应变模型^[6]和能量耗散模型^[7-8]。均匀循环应力模型和均匀循环应变模型将不规则的地震作用转换为均匀的循环应力和循环应变

施加于土体, 表征孔隙水压随荷载幅值和循环数的变化规律; 能量耗散模型则将残余超孔隙水压与土单元在循环荷载中耗散的能量进行关联。值得注意的是, 以往大多数孔压模型基于中密到密砂的试验结果提出, 这些砂土的主要破坏模式为循环活动(cyclic mobility), 不能很好地表征破坏形态为流动破坏(flow failure)的松散砂土的孔隙水压发展规律。

基金项目: 浙江省重点研发计划(2022C03180); 国家自然科学基金项目(52108351); 浙江省建设厅项目(2022K073); 浙江交协创新联合研究中心项目(ZDJG2021001)

收稿日期: 2023-11-30

*通信作者(E-mail: weixiaos@zju.edu.cn)

国内外大部分研究以细粒含量 (FC) 为 0 的净砂开展试验研究, 但液化的天然砂土通常含有一定量的细颗粒 (粒径小于 0.075 mm)。本研究通过应力控制循环三轴试验测试了不同密实度的净砂和含细颗粒粉砂的液化特性, 研究孔隙水压发展规律, 并基于均匀循环应力模型和能量耗散模型来表征砂土在循环荷载作用下的孔压发展特性。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验采用渥太华(50/70)砂与碎石英粉粒两种基本材料, 分别记为 OS(50/70)与 CS, 其粒径分布见图 1, 基本物理性质见表 1。按细粒含量 FC=10%将碎石英粉粒与 OS(50/70)混合得到含细粒粉砂, 记为 OSS10(50/70)。

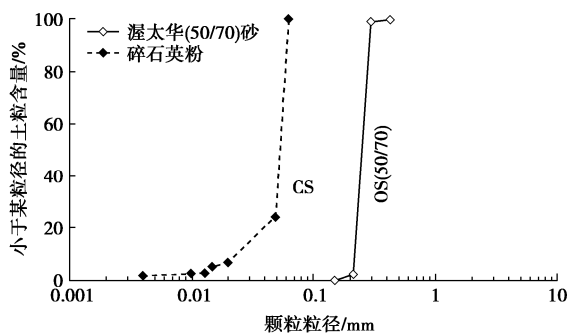


图 1 测试材料的粒径分布

Fig. 1 Grain-size distribution curves of tested materials

表 1 受测材料的主要物理性质

Table 1 Major physical properties of tested materials

材料	D_{50}/mm	U_c	e_{\max}	e_{\min}	G_s
OS(50/70)	0.252	1.20	0.879	0.592	2.66
CS	0.054	2.17	—	—	2.65

注: D_{50} 为中值粒径; U_c 为不均匀系数; e_{\max} 和 e_{\min} 分别为最大、最小孔隙比; G_s 为颗粒相对质量密度。

1.2 三轴试验流程

本研究采用湿击法制样^[9-10]。向烘干冷却后的砂土加入干土质量 5% 的蒸馏水充分搅拌均匀; 称取适量湿土, 加入模具, 并用击实锤击实至预定高度, 划毛上表面, 并重复上述过程, 直至形成直径 71.1 mm 和高度 142.2 mm 试样。

在试样顶部施加 -20 kPa 的负压, 从试样底部通入二氧化碳, 持续至少半小时; 随后保持试样内的负压不变, 从底部通入无气水, 直至试样孔隙被水填充。保持负压并通水一段时间后, 将试样放入三轴设备压力舱, 连接压力控制管线, 开始反压饱和; 反压饱和过程保持有效应力 10 kPa 并同时增加围压和反压, 直至反压达到 300 kPa。在不排水条件下, 升高围压 50 kPa, 测试土样 B 值; 当 $B > 0.95$ 时认为土样饱和,

进行后续步骤; 否则应继续升高围压与反压进行饱和, 直至 B 值满足要求。

对饱和土样进行各向等压固结至有效应力 100 kPa, 完成后对土样施加正弦波形的偏应力循环, 荷载强度用循环应力比 CSR 表示, 其定义如下:

$$CSR = \frac{q_{cyc}}{2\sigma'_{nc}} \quad (1)$$

式中: q_{cyc} 为偏应力循环幅值; σ'_{nc} 为固结后试样最大剪应力平面的有效正应力, 对于各向等压应力条件, σ'_{nc} 等于固结有效应力。受测试样的孔隙比 (e) 和有效应力等信息汇总于表 2。

表 2 试验方案

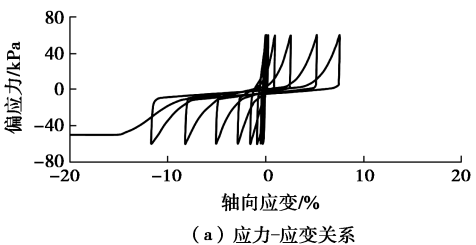
Table 2 Testing programs

材料	FC/%	e	σ'_{nc}/kPa
OS(50/70)	0	0.678	100
	0	0.732	100
	0	0.793	100
	0	0.822	100
OSS10(50/70)	10	0.678	100
	10	0.793	100
	10	0.822	100

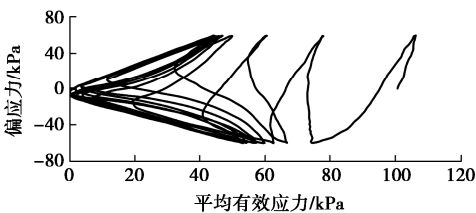
注: 每组测试条件制备至少 3 个试样, 施加不同的 CSR。

2 典型的液化及破坏形式

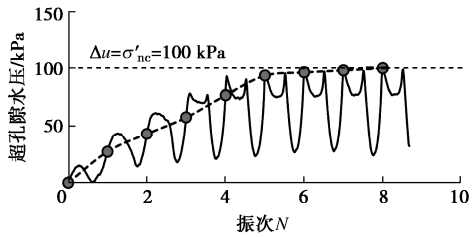
循环活动 (cyclic mobility) 是一种常见于密实砂土的液化形式 (图 2)。超孔隙水压 (Δu) 随循环荷载振次 (N) 增加而周期性增加, 有效应力随之降低, 直至 $\Delta u = \sigma'_{nc}$, 出现有效应力为 0 的液化状态; 土体首次达到的液化状态被定义为“初始液化”。此后, 试样会在每次偏应力 q 变化至 0 时出现瞬时液化, 并伴随出现较大、较快的变形; 孔隙水压会在后续加载过程中逐渐降低, 有效应力逐渐增加, 试样变形减缓、强度增加。这一过程中, 有效应力路径呈现“蝴蝶形”。本文以轴向应变的双向幅值达到 5% 定义此类液化形式的土体破坏。



(a) 应力-应变关系



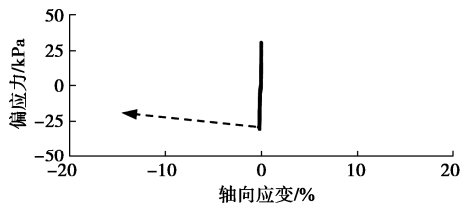
(b) 应力路径



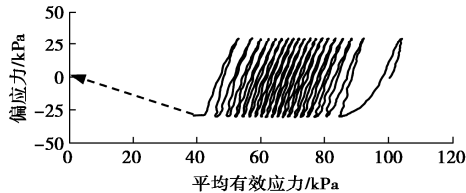
(c) 孔隙水压发展

图 2 循环活动液化形式 (OS(50/70), $e = 0.736$, $\text{CSR} = 0.30$)
Fig. 2 Typical test results from a specimen of OS (50/70) with $e = 0.736$, $\sigma'_{nc} = 100$ kPa, $\text{CSR} = 0.30$, showing cyclic mobility

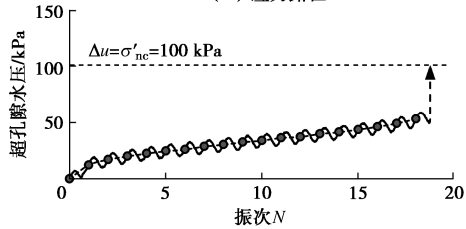
流动破坏 (flow failure) 常见于松散砂土 (图 3)。Δu 随循环荷载周期性增加, 应力路径向有效应力降低的方向逐渐发展。当应力路径达到某个应力状态时, 试样会在极短时间内出现较大变形, 类似于流体流动。当“流动”发生前, 孔隙水压增加量往往不大、试样变形很小, 导致此类破坏难以预警, 具有很强的隐蔽性。对于此类液化形式, 本文以流动破坏的触发点定义土体破坏。



(a) 应力-应变关系



(b) 应力路径



(c) 孔隙水压发展

图 3 流动破坏液化形式 (OS(50/70), $e = 0.822$, $\text{CSR} = 0.15$)
Fig. 3 Typical test results from a specimen of OS (50/70) with $e = 0.822$, $\sigma'_{nc} = 100$ kPa, $\text{CSR} = 0.15$, showing flow failure

3 孔隙水压模型

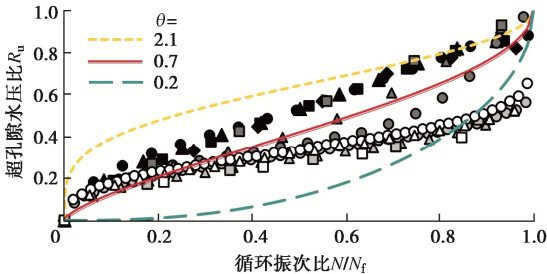
习惯上采用无量纲的孔隙水压比 (R_u) 来表征超孔隙水压的发展情况, 其定义如下:

$$R_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{nc}} \quad (2)$$

3.1 均匀循环应力孔压模型

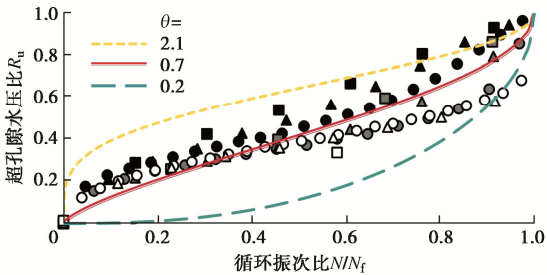
此类模型主要基于 Seed 简易方法 (Simplified

procedures) 提出, 采用应力控制的不排水三轴试验获得土体在均匀循环应力作用下的超孔隙水压数据和达到液化破坏的循环振次 N_f , 进而建立起每个周期结束时的 R_u 与循环振次比 N/N_f 的关系用以表征孔隙水压随振次的发展规律。图 4 是 $\sigma'_{nc} = 100$ kPa 下 OS(50/70) 试样与 OSS10(50/70) 试样的 R_u - N/N_f 数据, 总体上呈现出 R_u - N/N_f 关系随孔隙比的增加而向下移动的趋势。图 4 (a) 中, $e = 0.678$ 的试样数据为上限; $e = 0.793$ 和 0.822 的试样数据为下界; $e = 0.736$ 的试样数据介于两者之间, 随 CSR 降低而向下移动。图 4 (b) 中, $e = 0.678$ 的试样数据占据所有数据的上方区域, 呈现出随 CSR 降低而向下移动的趋势; $e = 0.822$ 的试样数据为下界; $e = 0.736$ 的试样数据介于两者之间, 也随 CSR 降低而向下移动。



● $e=0.678$, $\text{CSR}=0.35$ ▲ $e=0.678$, $\text{CSR}=0.4$ ■ $e=0.678$, $\text{CSR}=0.45$
◆ $e=0.678$, $\text{CSR}=0.5$ ● $e=0.736$, $\text{CSR}=0.25$ ▲ $e=0.736$, $\text{CSR}=0.275$
■ $e=0.736$, $\text{CSR}=0.3$ ○ $e=0.793$, $\text{CSR}=0.15$ ▲ $e=0.793$, $\text{CSR}=0.175$
□ $e=0.793$, $\text{CSR}=0.2$ ○ $e=0.822$, $\text{CSR}=0.125$ ▲ $e=0.822$, $\text{CSR}=0.15$
□ $e=0.822$, $\text{CSR}=0.175$

(a) OS (50/70)



● $e=0.678$, $\text{CSR}=0.25$ ▲ $e=0.678$, $\text{CSR}=0.275$ ■ $e=0.678$, $\text{CSR}=0.3$
● $e=0.736$, $\text{CSR}=0.175$ ▲ $e=0.736$, $\text{CSR}=0.2$ ■ $e=0.736$, $\text{CSR}=0.225$
○ $e=0.822$, $\text{CSR}=0.1$ ▲ $e=0.822$, $\text{CSR}=0.125$ □ $e=0.822$, $\text{CSR}=0.15$

(b) OSS10 (50/70)

图 4 受测试样的 R_u - N/N_f 数据

Fig. 4 R_u - N/N_f relationships of tested specimens

Booker 等^[11]提出了以下公式以表征 R_u 随 N/N_f 的变化规律:

$$R_u = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{2\theta}} \quad (3)$$

式中: θ 是模型参数。图 4 对比了试验数据与该模型的预测曲线 (取 $\theta = 0.2$ 、 0.7 和 2.1)。显然, 该模型难以对本文的 R_u - N/N_f 数据进行合理预测。

下式是一个改进的 R_u-N/N_f 模型:

$$R_u = 1 - \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(1 - \frac{N}{N_f} \right)^\alpha, \quad (4)$$

式中: α 是模型参数。图 5 选取典型数据与该模型标定后的曲线进行对比, 表明该模型能很好拟合不同砂土在各个孔隙比和 CSR 条件下的 R_u-N/N_f 关系。

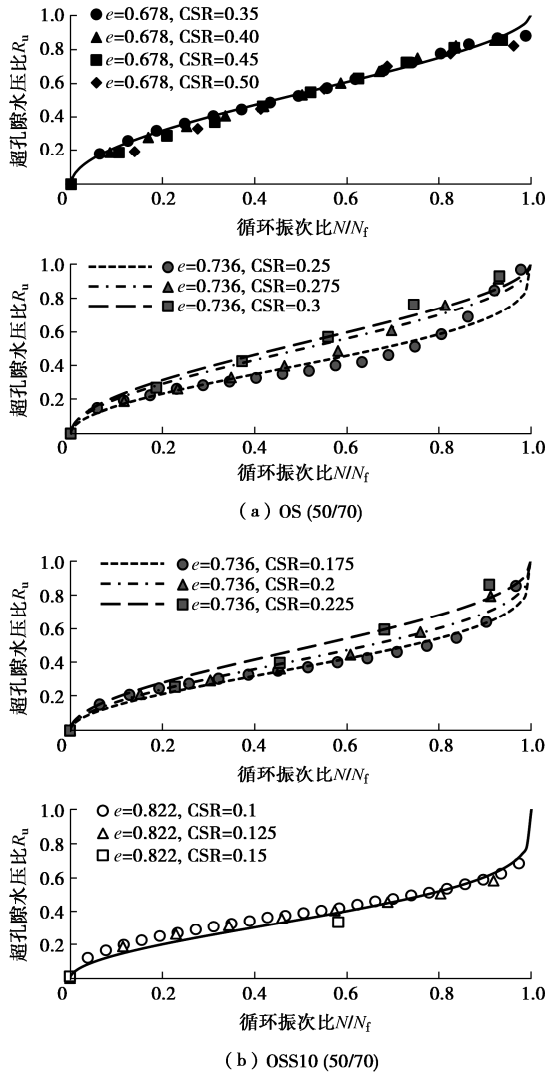


图 5 公式 (4) 所示 R_u-N/N_f 模型的模拟效果

Fig. 5 Comparison between calibrated R_u-N/N_f model (Eq. 4) and experimental data

3.2 能量耗散模型

不排水三轴条件下的累积耗散能密度 W_s 可以通过下式计算:

$$W_s = \frac{1}{2} \sum (q_i + q_{i+1}) \cdot (\varepsilon_{a,i+1} - \varepsilon_{a,i}) \quad (5)$$

式中: 下标 i 和 $i+1$ 代表仪器记录的两个相邻的数据点。利用下式定义无量纲的应力归一化累积耗散能 W_{sn} :

$$W_{sn} = \frac{W_s}{\sigma'_{nc}} \quad (6)$$

图 6 显示了在每个循环结束时的 R_u-W_{sn} 数据。 R_u-W_{sn} 随孔隙比减小而向右移动, 表明密实试样需要

比松散试样耗散更多能量, 才能产生相同的残余超孔隙水压力。在图 6 数据中未能观察到 CSR 对同一孔隙比下的 R_u-W_{sn} 关系存在明确影响, 例如图 6 (b) 中的数据基本不受 CSR 影响。

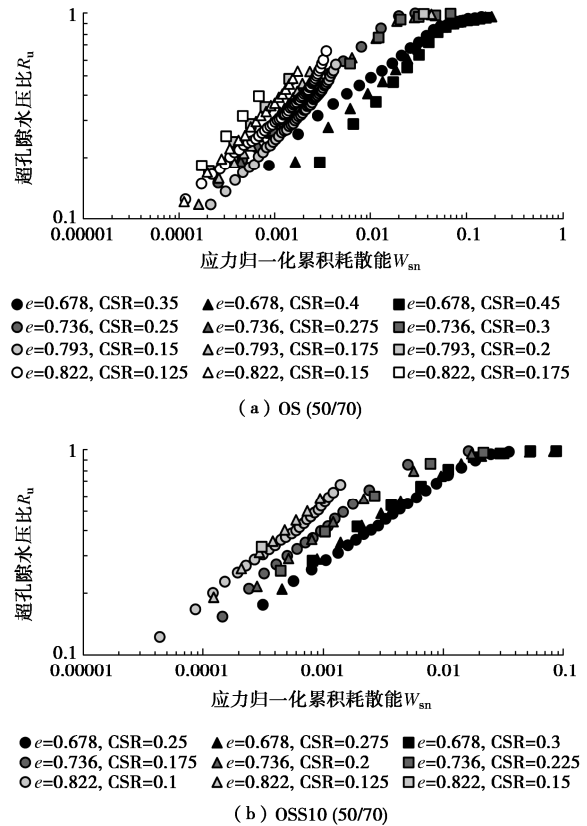


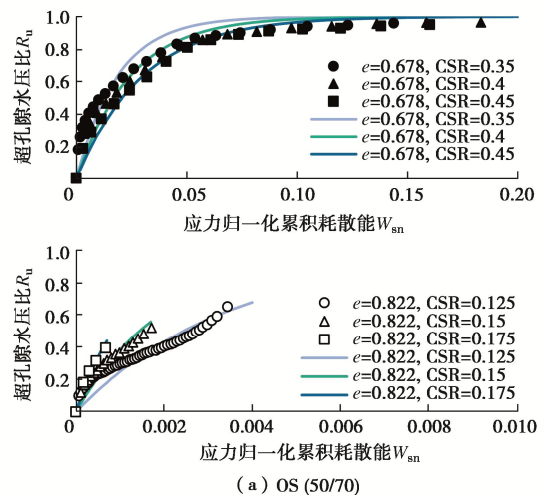
图 6 受测试样的 R_u-W_{sn} 试验数据

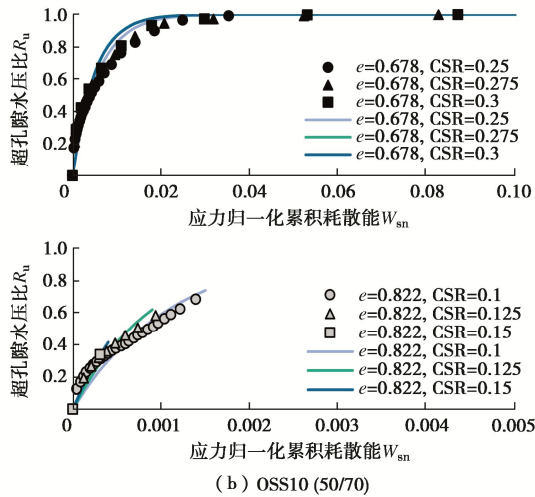
Fig. 6 R_u-W_{sn} relationships of tested specimens

文献中已有多种能量耗散孔隙压力模型, 使用了幂函数、双曲函数、指数函数等不同类型的函数^[7, 12-13]。Davis 等^[13]提出了一个单参数孔隙压力模型, 如下所示:

$$R_u = 1 - \exp(-\Lambda \cdot W_{sn}) \quad (7)$$

式中: Λ 是模型参数。图 7 对比了试验数据与标定后的模型曲线, 表明该模型的模拟效果良好。

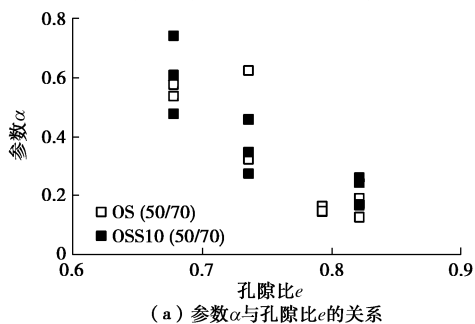
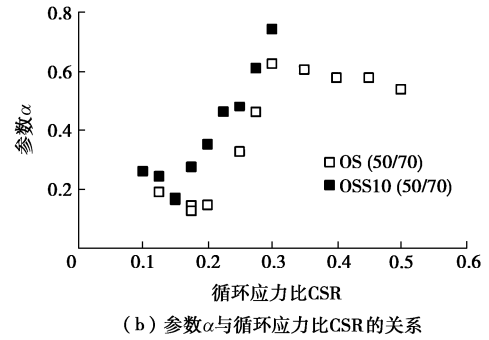
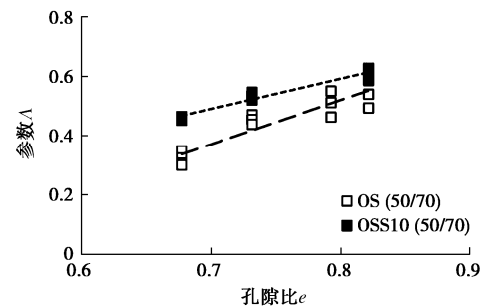
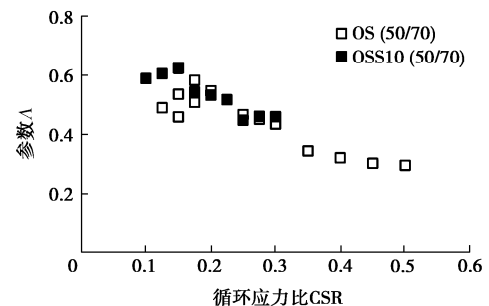


图7 公式(7)所示 R_u - W_{sn} 模型的模拟效果Fig. 7 Comparison between calibrated R_u - W_{sn} model (Eq. 7) and experimental data

4 模型参数

图8是公式(4)所示 R_u - N/N_f 模型标定后的模型参数 α 随孔隙比和 CSR 的变化规律。参数 α 总体上随孔隙比增加而降低,但对于孔隙比相同的试样,其 α 值可能会有较大差异,与 CSR 的大小有关(图8(a))。将参数 α 与 CSR 关联后,发现 OS(50/70)试样和 OSS10(50/70)试样各存在一条近似 S 形的关联曲线(图8(b))。对于给定土体,当 $CSR < 0.2$ 时,参数 α 基本上是一常数,不随 CSR 而变化;当 CSR 在 0.2 至 0.3 之间变化时,参数 α 随 CSR 增加而增加;当 $CSR > 0.3$ 时,参数 α 也基本是一常数,不随 CSR 而变化;并且,参数 α 与 CSR 的关联并不受孔隙比的影响,这表明同一土体的 R_u - N/N_f 关系主要受 CSR 的影响。对于细粒含量不同的土体,细粒含量对参数 α 与 CSR 的关联有影响:含细粒的 OSS10(50/70)试样数据位于不含细粒的 OS(50/70)试样数据的左侧。

图9是公式(7)所示 R_u - W_{sn} 模型标定后的模型参数 λ 随孔隙比和 CSR 的变化规律。参数 λ 随孔隙比增加而增加;相同孔隙比下, OSS10(50/70)的参数值大于 OS(50/70)(图9(a))。如图9(b)所示,当 $CSR > 0.2$ 时,参数 λ 大致随 CSR 增加而降低,且 OS(50/70)与 OSS10(50/70)的趋势基本重合;当 $CSR < 0.2$ 时,参数 λ 与 CSR 不存在明确的变化规律。

(a) 参数 α 与孔隙比 e 的关系(b) 参数 α 与循环应力比 CSR 的关系图8 参数 α 随孔隙比和 CSR 的变化规律Fig. 8 Variation of parameter α with e and CSR(a) 参数 λ 与孔隙比 e 的关系(b) 参数 λ 与循环应力比 CSR 的关系图9 参数 λ 随孔隙比和 CSR 的变化规律Fig. 9 Variation of parameter λ with e and CSR

5 结论

本文基于均匀循环应力模型和能量耗散模型两个孔隙水压模型框架,研究了循环荷载作用下细粒含量不同的两种砂土的孔隙水压力发展规律。主要结论总结如下:

(1) 在均匀循环应力模型框架下, R_u - N/N_f 关系受到土体密实度和循环荷载幅值的复杂影响。

(2) 提出了一个单参数的 R_u - N/N_f 孔压模型,并利用实验数据对模型参数进行了标定,模型参数与 CSR 具有较好关联。

(3) 在能量耗散模型框架下, R_u - W_{sn} 关系主要依赖于试样的孔隙比,而受 CSR 的影响不明显。

(4) 利用实验数据对一个单参数的能量耗散孔压模型进行了标定,模型参数随孔隙比增加而增加,且

受到细粒含量的影响。

参考文献:

- [1] YASUDA S, HARADA K, ISHIKAWA K, et al. Characteristics of liquefaction in Tokyo Bay area by the 2011 Great East Japan Earthquake[J]. *Soils and Foundations*, 2012, **52**(5): 793-810.
- [2] MASON H B, GALLANT A P, HUTABARAT, et al. Geotechnical Reconnaissance: The 28 September 2018 M7.5 Palu-Donggala, Indonesia Earthquake[R]. 2019.
- [3] 袁近远, 王兰民, 汪云龙, 等. 不同设防水准下场地液化震害风险差异性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, **42**(1): 246-260. (YUAN Jinyuan, WANG Lanmin, WANG Yunlong, et al. Study on difference of risk of earthquake liquefaction damages at different fortification levels[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, **42**(1): 246-260. (in Chinese))
- [4] SEED H B, MARTIN P P, LYSMER J. The Generation and Dissipation of Pore Water Pressures During Soil Liquefaction[R]. Berkeley, US, 1975.
- [5] 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 Guoxing, LIU Xuezhu. Study on dynamic pore water pressure in silty clay interbedded with fine sand of Nanjing[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, **26**(1): 79-82. (in Chinese))
- [6] VUCETIC M, DOBRY R. Pore pressure buildup and liquefaction at level sandy sites during earthquakes[R]. Troy, New York, USA, 1986.
- [7] BERRILL J B, DAVIS R O. Energy dissipation and seismic liquefaction of sands: revised model[J]. *Soils and Foundations*, 1985, **25**(2): 106-118.
- [8] 潘 坤, 杨仲轩. 不规则动荷载作用下砂土孔压特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(增刊 1): 79-84. (PAN Kun, YANG Zhongxuan. Experimental study on pore pressure characteristics of sand under irregular dynamic load[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(S1): 79-84. (in Chinese))
- [9] SZE H Y, YANG J. Failure modes of sand in undrained cyclic loading: impact of sample preparation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2014, **140**(1): 152-169.
- [10] WEI X, YANG J. Characterising the effect of particle size disparity on liquefaction resistance of non-plastic silty sands from a critical state perspective[J]. *Géotechnique*, 2023, **73**(4): 323-336.
- [11] BOOKER J R, RAHMAN M S, SEED H B. A Computer Program for the Analysis of Pore Pressure Generation and Dissipation During Cyclic or Earthquake Loading[R]. Berkley, US, 1976.
- [12] PORCINO D D, TOMASELLO G, FARZALIZADEH R. Pore-pressure generation of sands subjected to cyclic simple shear loading: an energy approach[C]// WANG L, ZHANG J M, WANG R. Proceedings of the 4th International Conference on Performance Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering. Cham: Springer, 2022: 1674-1682.
- [13] DAVIS R O, BERRILL J B. Pore pressure and dissipated energy in earthquakes: field verification[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, **127**(3): 269-274.

(编校: 明经平)