

DOI: 10.11779/CJGE201511022

砂砾土抗液化强度的小型土箱振动台试验研究

王炳辉^{1, 2}, 陈国兴^{*2}, 孙 田², 李小军^{3, 2}

(1. 江苏科技大学土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212003; 2. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009;

3. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘 要: 近来数次大地震中出现大量的砂砾土液化震害, 饱和砂砾土的地震液化问题越来越引起重视。针对砂砾土的抗液化强度问题, 开展了 4 种砾含量、3 种相对密度情况下, 饱和砂砾土的小型土箱振动台试验研究。为获得较为合理的抗液化强度结果修正了由加速度计倾斜产生的加速度时程漂移, 并描述了土体中加速度和动孔压发展特性。饱和砂砾土的抗液化强度结果显示: 含砾量和相对密度对饱和砂砾土的抗液化强度均有明显影响。饱和砂砾土的抗液化强度随着含砾量和相对密度的增加明显增大, 增大的趋势越来越明显, 且明显高于相近相对密度的饱和砂土的抗液化强度。
关键词: 砂砾土; 抗液化强度; 振动台试验; 含砾量; 相对密度

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)11-2094-07

作者简介: 王炳辉(1980-), 男, 浙江新昌人, 博士后, 从事土动力学研究。E-mail: wbhchina@126.com。

Liquefaction resistance of sand-gravel soils using small soil-box shaking table tests

WANG Bing-hui^{1, 2}, CHEN Guo-xing², SUN Tian², LI Xiao-jun^{3, 2}

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China; 2. Institute of

Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 3. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration,

Beijing 100081)

Abstract: Due to many cases of the liquefaction of sand-gravel soils induced by recent earthquakes, more and more attention is paid to the liquefaction of sand-gravel soils. Aiming at this problem, the small soil-box shaking table tests are performed using saturated sand-gravel soils with 4 kinds of gravel contents and 3 kinds of relative densities. In the process of analysis, firstly, the acceleration drift caused by the tilt of acceleration sensor is amended in order to obtain the rational results, and then the characteristics of the accelerations and dynamic pore water pressures (DPWP) are described. The results of the liquefaction resistance of the sand-gravel soil show that the gravel content and the relative density of the soil have obvious effects on the liquefaction resistance of sand-gravel soils. The more the gravel content and relative density, the greater the liquefaction resistances of the soils, and the greater the variances of liquefaction resistance. For similar relative density, the liquefaction resistances of saturated sand-gravel soils are obviously greater than those of saturated sand.

Key words: sand-gravel; liquefaction resistance; shaking table tests; gravel content; relative density

0 引 言

近来多次大地震中出现了砂砾土液化震害, 如 1995 年日本兵库县南部地震^[1]、1999 年台湾集集地震^[2]、2008 年中国汶川地震^[3-5]等, 砂砾土地震液化越来越受到重视^[6], 将是今后相当长时间内研究内容之一^[7]。

饱和砂砾土震动液化基本特性的研究方法, 与饱和砂土震动液化的研究方法较为相近, 常采用室内试验方法, 但由于颗粒粒径较大, 且试样尺寸对试样力学性质的测试结果有明显影响^[8-10], 因此采用大直径(如: 直径 71 mm×高 305 mm)试样开展相关试验, 尽量消除试样的尺寸效应。除此之外, 对于大直径饱和砂砾土试样的抗液化强度试验, 还必须注意膜嵌入

效应的影响^[11], 才能获得更合理的抗液化强度试验结果。Kokusho^[12]、Goto 等^[13]、Hatanaka 等^[14]对砂砾土进行了大直径液化试验, 并认为砂砾土与砂土的抗液化强度有较大差异。Ishihara^[15]则认为砂砾土由于其沉积环境的差异, 其液化强度值有比较大的范围。Evan 等^[16]在考虑了膜贯效应的基础上研究了含砾量的不

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172258); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2011CB013601); 国家科技重大专项项目(2011ZX06002-010-15); 国家自然科学基金青年基金项目(51309121); 江苏省基础研究计划青年基金项目(SBK20130463)

收稿日期: 2014-09-08

***通讯作者**

同对砂砾土液化的影响, 得出在相同的相对密度下, 抗液化强度随着砾石含量的增加而增大, 最大增量可达 30% 以上。Kuenza 等^[17]研究认为含砾量有一个阈值, 当砂砾土中含砾量小于该阈值时表现出砂土的强度特性, 当大于该阈值值表现出砾石土的强度特性。而王昆耀等^[18]开展不同含砾量和不同排水条件下的大型动三轴往返加荷试验研究, 得出含砾量不同对不排水饱和砂砾料的抗液化强度影响不大, 在排水条件下, 饱和砂砾料的抗液化强度随含砾量的增大而提高。汪闻韶等^[19]和刘令瑶等^[20]曾开展不同含砾量试件的竖向震动台圆筒排水震动液化试验, 并对比循环三轴试验的结果发现, 砂砾料的抗液化强度随含砾量的增大而有所增大。本文采用小型土箱在水平单向震动的液化试验, 研究饱和砂砾土的抗液化强度, 为进一步认识砂砾土的抗液化强度规律提供理论参考。

1 试验所用的砂砾土

根据调查资料^[21], 历史大地震中发生过地震液化的砂砾土的颗粒分布如图 1 所示, 本次试验采用的砂砾土以汶川地震砂砾土地场的钻孔取样获得的平均颗粒级配曲线为基准, 采用等量替代法^[22], 以粒径 ≥ 5 mm 部分土质量与土总质量的比值(P_5)作为考虑因素之一, 将试验砂砾土的颗粒级配曲线分为 4 组, 分别为 $P_5=20\%$ (P20 组)、 $P_5=37\%$ (P36 组)、 $P_5=45\%$ (P45 组) 和 $P_5=60\%$ (P60 组), 如图 1 所示。试验土样采用重塑土, 详细颗粒组成和主要物理指标如表 1 所示。表中还给出了最大孔隙比 e_{\max} 和最小孔隙比 e_{\min} 的测试结果, e_{\min} 随着含砾量的增大而减小, 而 e_{\max} 随着含砾量的增加先减小后增大。

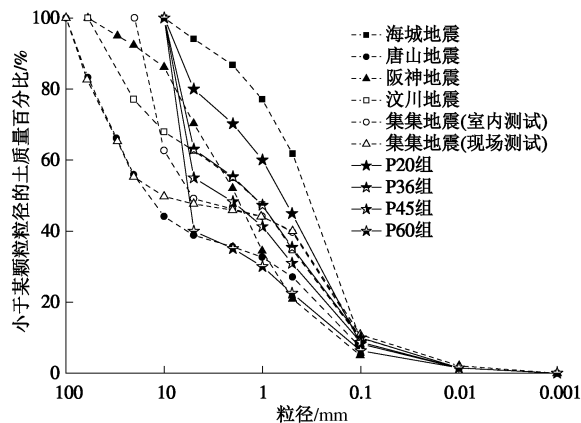


图 1 选用的砂砾土颗粒级配曲线

Fig. 1 Used grain-size distribution curves of gravel

2 试验条件和加载工况

试验设备采用南京工业大学岩土工程研究所自行研制的小型土箱振动台试验设备^[23]。

表 1 试验级配的特征粒径值

Table 1 Characteristic particle sizes of test gradation

组号	P_5 /%	d_{60} /mm	d_{50} /mm	d_{30} /mm	d_{10} /mm	C_u	C_c	e_{\max}	e_{\min}
P20	20.00	1.00	0.61	0.27	0.08	12.50	0.91	0.70	0.47
P36	36.95	3.35	1.32	0.35	0.09	37.22	0.41	0.62	0.45
P45	45.00	5.40	2.74	0.47	0.11	49.09	0.37	0.60	0.41
P60	60.00	6.30	5.65	0.89	0.15	42.00	0.84	0.62	0.33

设计土箱中的砂砾土层厚度 41 cm; 表层黏性土厚度 2 cm, 如图 2 所示。根据试装配, 水沉法装配砂土可达到最小相对密度 0.3。计算需风干的砂砾土质量分别为: 164.2 kg (P20 组)、171.0 kg (P36 组)、173.5 kg (P45 组)、174.5 kg (P60 组)。装配后静止放置 12 h, 之后施加动荷载开展第一次液化试验; 静止放置 12 h 进行动孔压消散, 再测试沉降量及出水量。重复上述加载、消散、测试过程两次, 之后卸土进行下一组试验。一组试验共施加 3 次动荷载, 动荷载采用水平加速度形式, 波形为 4 Hz 正弦波, 且 3 次加速度峰值分别为 0.1g, 0.2g, 0.3g。试验装卸土体共 12 次, 即开展了 12 组 36 个工况的全析因试验。土箱中的传感器埋置与分布如图 3 所示。

试验主要考虑相对密度和含砾量 P_5 这两个土性因素, 因素水平如表 2 所示。砂砾土相对密度因素采用震动密实原理进行设计, 震后土体经孔压消散后, 作为同一组下一级震动试验前的土体, 其相对密度根据量取的出水量等于土体减小的体积进行计算。

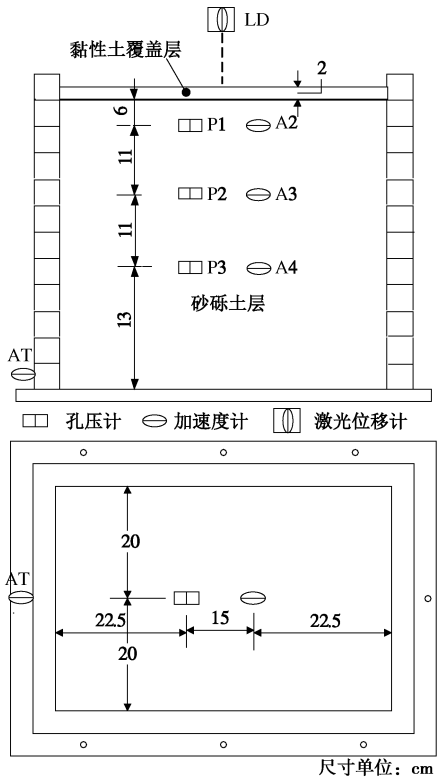


图 2 土层装配和传感器布置图

Fig. 2 Assembly of soil layers and arrangement of sensors

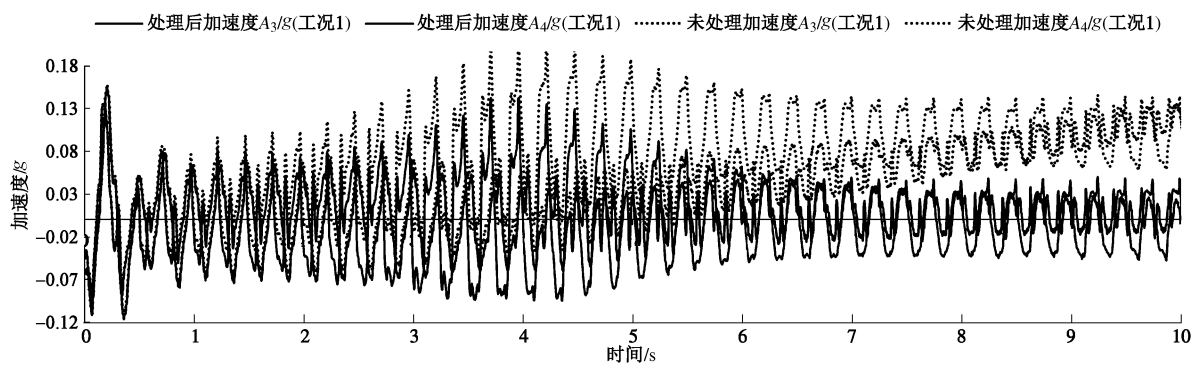


图 3 漂移修正前后的加速度时程

Fig. 3 Drifting-amended accelerations caused by sensor tilt

表 2 液化试验因素水平表

Table 2 Factor levels for liquefaction tests

因素	相对 密实度	含砾量 $P_s/\%$	设计输入 加速度/g
水平	0.3	20	0.1*
	0.5*	37	0.2*
	0.8*	45	0.4*
		60	

*注：该值为相对密度设计值，结果分析时按照实测值为依据。

3 砂砾土中加速度和动孔压的响应

试验过程中，由于土体发生软化，埋设于土体中的加速度计不可避免会发生一定程度的倾斜，导致测得的加速度时程发生一定程度的漂移，如图 3 所示。必须先将测得的加速度时程进行修正，修正方法如下。

将测得的加速度时程视为由两个部分组成：往返震动部分和平均漂移部分，其中平均漂移部分由加速度计的倾斜导致，往返震动部分是试验加载引起，但该值需要进行修正才真正反映往返震动量。通过平均漂移部分获得加速度计的倾斜角度，然后根据倾斜角度修正往返震动部分，最终以修正的加速度往返震动部分作为实际水平震动的加速度。

根据单向加速度计测试原理，倾斜的加速度计测得加速度 a' 是实际水平向加速度 a 在偏转角为 β 处的分量，如图 4 所示，两者之间应有如下关系：

$$a' = a \cdot \cos \beta \quad (1)$$

式中， β 为实际震动方向与加速度测试方向之间的夹角，其值通过加速度计的标定获得。因此，根据倾斜的加速度计测得的加速度 a' 与偏转角 β ，代入式 (1) 可获得实际水平向加速度 a ，如图 4 所示，该修正方法较合理地修正了加速度计倾斜导致的加速度时程漂移现象。下文中的加速度都已经过上述方法修正。

台面输入的加速度时程是幅值较为均匀的谐波，但经过砂砾土传播后加速度的幅值却相差较大，其波形也会产生了较大变化。例如图 5 给出了工况 28 前 15 s 的加速度结果，这个工况的砂砾土的含砾量分别

是 37%。这个工况中，台面加速度 A_1 为幅值均匀 3 m/s^2 的谐波。经过饱和砂砾土，加速度波形在不同时刻出现了含高频成分的“毛刺”。该高频成分并不是波动的瞬态反应，而是砂砾土受到动荷载作用之后自身出现的高频振动，这点在饱和砂土离心振动台试验^[24]及 1g 振动台试验^[25]中也存在，在饱和砂砾土中表现的似乎更为明显。

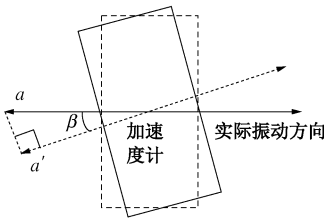


图 4 加速度计倾斜时测得的加速度与实际加速度的关系

Fig. 4 Relationship between acceleration due to sensor tilt and actual acceleration

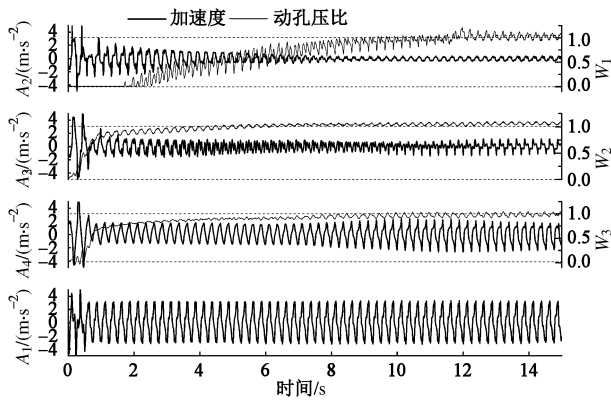


图 5 加速度响应与动孔压的发展（工况 28）

Fig. 5 Acceleration and DPWP responses for model 28

图 5 中还给出了与加速度 A_4 , A_3 , A_2 具有相同深度的动孔压比测试结果。根据给出的测试结果，动孔压比随着作用时间的增长而增长，直至达到一定的动孔压比。含砾量较高的砂砾土试验结果中，在初始加载阶段更易出现明显的负孔压，如图 5 前 0.5 s 中的动

孔压比 W_3 所示。砂砾土中动孔压的累积上升与加速度幅值的明显减小有着相关性, 当动孔压迅速升高时, 往往致使加速度幅值出现逐渐降低的变化。但即使动孔压比达到 1.0, 砂砾土中加速度的最小波动幅值与台面加速度幅值的比值保持在 20% 左右, 说明砂砾土即使在液化状态, 仍具有较高的传播剪切波的能力。(图 5 给出的 GK28 动孔压 W_1 的前 2 s 采集出现了异常, 但之后动孔压的上升发展依然十分明显, 相应的砂砾土中加速度的减小且之后一直保持相同幅值。)动孔压比的累积增长和波动特性还受到砂砾土密实度(砂砾土随加载工况次数增加而变密实)的影响。随着密实度的增加, 动孔压累积增长速度变慢。

在小型土箱振动台试验中, 黏土表面会出现喷砂冒水现象, 无法实现完全不排水条件, 这与实际场地中孔隙水存在渗流的条件更为相近。由于砂砾土中孔隙相对较大, 其中的孔隙水渗流速度相比砂土中的渗流速度更大, 导致砂砾层底部的动孔压比没有完全累积达到 1.0 的情况, 这种情况对于二次加载和三次加载时深部砂砾土的动孔压比更为明显。而对于浅部砂砾土中的动孔压, 由于动孔压的向上传递, 使其动孔压比出现了略超过 1.0 的现象。

本次试验的 36 个工况以 W_2 、 W_3 这两个动孔压测点为例进行分析, 这共计 72 个测点的动孔压的发展可划分为如下 3 种情况: ①动孔压比达到 1.0, 并在震动过程中一直保持, 共有 46 个测点, 占总数的 63.9%; ②孔压比并未达到 1.0, 但达到 0.63 以上, 在震动过程中一直保持或略有降低, 共有 16 个测点, 占总数的 22.2%; ③孔压比一直保持较小值, 共有 10 个测点, 占总数的 13.9%。

4 砂砾土的抗液化强度

4.1 破坏循环周数 N_f 和循环剪应力比 CSR 的确定

液化是从固体状态转变为液体状态的作用、过程和状态。从机理角度分析, 液化的条件为土的抗剪强度趋于零^[26]。从试验研究角度分析, 液化通常有两种标准进行评判: ①孔压比达到某值作为液化破坏标准。对于完全不排水试样的室内试验而言, 通常采用孔压比达到 1.0 作为液化破坏标准, 即初始液化。②动应变幅值达到某一量值, 如动三轴试验中常采用应变幅值达到 5% 作为液化破坏标准。在砂砾土小型土箱振动台试验中, 动孔压为直接测量的量, 采用孔压标准较应变标准更为合理。另外, 因土箱在震动过程中无法实现完全不排水条件, 动孔压受到孔隙水渗流的影响使部分动孔压比无法都达到 1.0。Casagrande^[27]、Poulos 等^[28]、凌贤长^[29]、王炳辉等^[30]、

王志华等^[31]从大变形角度对液化标准进行过探讨, 认为液化未必需要孔压比达到 1.0。

考虑小振动台试验与完全不排水条件的动三轴试验的差异, 并结合试验过程中出现的宏观喷冒现象, 破坏循环周数 N_f 的采用如下方法确定: 对于孔压比达到 1.0 的情况, N_f 为孔压比等于 1.0 时对应的循环周数, 即以孔压比达到 1.0 作为土体破坏标准; 对于孔压比未达到 0.63 时, N_f 作简化处理, 统一采用 1000 周计; 对于介于两者之间的情况, 认为孔压已达到致使土体产生大变形的能力, N_f 采用达到最大孔压值时对应的循环周数, 即以土体具有大变形的能力最大时刻作为土体破坏标准。

在振动台试验中, 目前很难直接测得土体中的动剪应力, 但可采用剪切梁模型通过不同埋深处加速度换算的间接方法获得^[25]。深度 z_i 处的剪应力 τ_i 为

$$\tau_i(t) = \sum_{k=1}^{i-1} \rho_{k-1} \frac{\ddot{u}_k + \ddot{u}_{k-1}}{2} \Delta z_{k-1} \quad (i=2, 3, \dots) \quad (2)$$

式中 下标 i 为深度 z_i 对应的加速度编号; \ddot{u}_i 为深度 z_i 处的加速度; Δz_{i-1} 为第 $i-1$ 个与第 i 个加速度测点之间的土层厚度; ρ_{i-1} 为深度 z_{i-1} 与 z_i 之间的土体平均密度。

不同于室内动三轴试验能通过闭环控制获得稳定幅值的动剪应力比; 小型土箱振动台试验中, 埋设于砂砾土中的加速度时程的幅值在振动过程中存在波动, 由此计算的动剪应力比幅值也存在波动。为确定抗液化强度中的循环应力比 CSR, 考虑动剪应力对动孔压发展的贡献, 采用了平均循环应力比, 计算公式如下:

$$CSR = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} \tau_m(i)}{N_0 \sigma'} \quad (3)$$

式中 $\tau_m(i)$ 为第 i 循环周数时剪应力峰值, N_0 值根据孔压发展情况分类确定: ①孔压比达到 0.63 以上的情况, 动剪应力值采用最大孔压比或孔压比等于 1.0 时刻对应的循环周数; ②孔压比未达到 0.63 的情况, N_0 值取 500。 σ' 为上覆有效应力, 忽略上覆有效应力因动孔压增长而发生的变化, 取初始上覆有效应力进行计算。其中黏土和砂砾土的平均重度分别为 16.0, 18.5 kN/m³。

4.2 循环剪应力比与破坏循环周数的关系

图 6 给出了砂砾土小型土箱振动台试验中第 1 次和第 2 次施加加速度获得的循环剪应力比 CSR 与破坏循环周数 N_f 的关系, 图中实线和虚线分别是试验点对应的趋势线。试验数据点较为离散, 但从趋势线可以看出: 在相同相对密度条件下, 含砾量越大, 饱和砂砾土的抗液化强度也越大; 相对密度较大的饱和砂砾土的抗液化强度曲线相对较高。

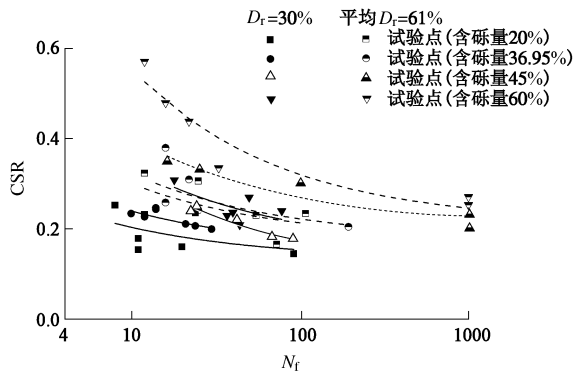


图 6 小型土箱振动台试验的抗液化强度

Fig. 6 Liquefaction resistances using small shaking table tests

4.3 相对密度和含砾量的影响

为了分析相对密度、含砾量对抗液化强度的影响，基于循环剪应力比 CSR 与破坏循环周数 N_f 的曲线关系中的趋势线，获得了给定破坏循环周数 N_f 时循环剪应力比 CSR 与含砾量之间的关系。

图 7 给出了破坏循环周数 $N_f=20$ 时，砂砾土不同相对密度 D_r 情况下的循环剪应力比 CSR 与含砾量 P_s 之间的关系。从中可以看出：随着 P_s 的增加，CSR 逐渐增大。当 $D_r=30\%$ ，平均 $D_r=61\%$ 时 CSR 在 $P_s=37\%\sim 45\%$ 段随 P_s 增加而增大的速度较快，其他段增大速度相对缓慢；当平均 $D_r=76\%$ 时，CSR 随 P_s 增加而增大的速度逐渐加快。其他破坏循环周数条件下，也有相似的规律性。图 7 还出了 Evans 等^[16]采用不同粒径砂砾土的动三轴试验结果，其中 Evans 等采用的砂砾土中砾石的平均粒径 $d_{50}=7\text{ mm}$ ，砂的平均粒径 $d_{50}=0.45\text{ mm}$ 。虽然砂砾土的颗粒粒径有所差异，试验方法有所不同，并且在不同的 N_f 情况下，但规律性具有相似性，即砂砾土的循环剪切应力比 CSR 都是随着含砾量的增加而增大，规律显著。

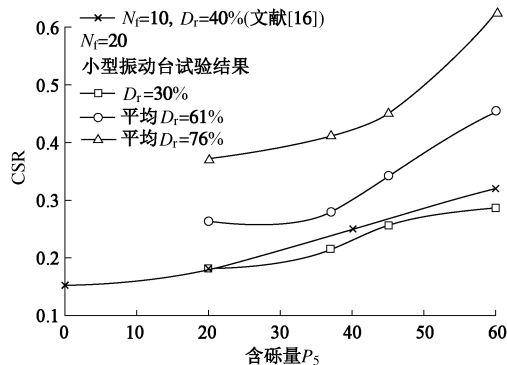


图 7 砂砾土抗液化强度与含砾量的关系

Fig. 7 Relationship between gravel liquefaction resistance and gravel content

图 8 给出了破坏循环周数 $N_f=20$ 时，循环剪应力比 CSR 与相对密度 D_r 之间的关系，并给出了相同砂砾土的动三轴试验结果与 Tatsuoka 等^[32]研究 Toyoura 砂的结果。对于 Toyoura 砂，当相对密度小于 70% 时，

砂土的抗液化强度随相对密度逐渐增加；当相对密度大于 70% 时，砂土的抗液化强度随相对密度的增加而急剧增加。砂砾土的抗液化强度明显高于 Toyoura 砂的抗液化强度。

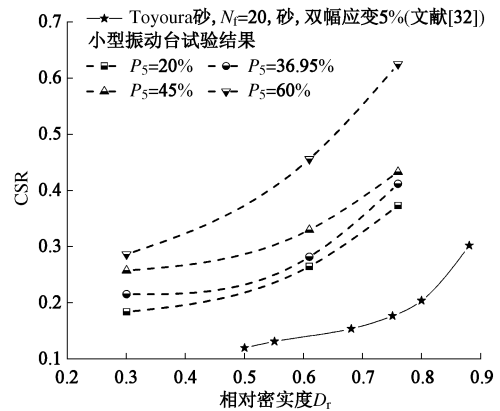


图 8 循环应力比 $CSR_{N_f=20}$ 与相对密度的关系

Fig. 8 Relationship between $CSR_{N_f=20}$ and relative density

4.4 砂砾土与砂土的抗液化强度比较

图 9 给出了相对密度相近的饱和砂砾土与饱和福建标准砂、南京细砂的抗液化强度的比较。从中可以看出：相对密度相近的条件下，不同的土颗粒粒径，特别是含有粗颗粒的土体，其抗液化强度会明显增大。以小型土箱振动台试验的抗液化强度与南京细砂 $D_r=0.60$ 研究结果的对比为例，在破坏循环次数 $N=20$ 次时，南京细砂 $D_r=0.60$ 的 CSR 约为 0.23，而 $P_s=20\%$ ，36.95%，45%，60% 的砂砾土的 CSR 分别约为 0.26，0.28，0.34，0.46；分别是南京细砂的 1.13，1.21，1.48，2.00 倍，因此，砂砾土中随着砾量的提高对其抗液化强度的提高越来越明显。

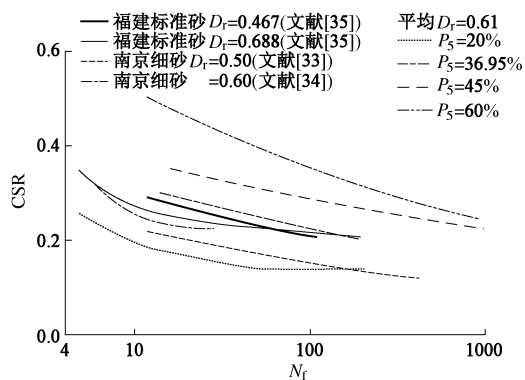


图 9 砂砾土和砂土抗液化强度的对比

Fig. 9 Comparison of liquefaction resistances between gravel and sand

5 结论与讨论

通过修正饱和砂砾土中因加速度计倾斜导致的加速度时程的漂移，得到较为合理的抗液化强度结果，得出如下主要结论：

(1) 砂砾土的抗液化强度随着含砾量的增加而增大, 随着砂砾土相对密度的增加而增大。

(2) 砂砾土相比相近相对密度的砂土, 抗液化强度随着含砾量的增加而提高, 且提高的程度随含砾量的增加而加快。

采用小型土箱开展砂砾土抗液化强度的振动台试验研究, 相比大直径动三轴试验, 有更多的不可控因素, 有更多的不确定性。如土箱中饱和砂砾土在振动过程中喷砂冒水现象出现的位置、孔隙水的渗流路径是不可控因素; 从而在砂砾土中动孔压的发展也存在明显的不确定性。这些不可控因素和不确定性对试验结果的分析增加了难度, 也是试验结果存在较大离散性的主要原因。

参考文献:

- [1] MUNENORI H, AKIHIKO U, JUNRYO O. Liquefaction characteristics of a gravelly fill liquefied during the 1995 hyogo-ken nanbu earthquake[J]. Journal of the Japanese Geotechnical Society, Soils and Foundation, 1997, **37**(3): 107 - 115.
- [2] CHU B L, HSU S C, CHANG Y M. Ground behavior and liquefaction analysis in central Taiwan-Wufeng[J]. Engineering Geology, 2004, **71**(1/2): 119 - 139.
- [3] CAO Z, HOU L, XU H, et al. Distribution and characteristics of gravelly soil liquefaction in the Wenchuan Ms 8.0 earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, **9**(2): 167 - 175.
- [4] 曹振中, 袁晓铭, 陈龙伟, 等. 汶川大地震液化宏观现象概述[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(4): 643 - 650. (CAO Zhen-zhong, YUAN Xiao-ming, CHEN Long-wei, et al. Summary of liquefaction macrophenomena in Wenchuan Earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(4): 643 - 650. (in Chinese))
- [5] 袁晓铭, 曹振中, 孙锐, 等. 汶川 8.0 级地震液化特征初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(6): 1288 - 1296. (YUAN Xiao-ming, CAO Zhen-zhong, SUN Rui, et al. Preliminary research on liquefaction characteristics of wenchuan 8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(6): 1288 - 1296. (in Chinese))
- [6] 陈国兴, 金丹丹, 常向东, 等. 最近 20 年地震中场地液化现象的回顾与土体液化可能性的评价准则[J]. 岩土力学, 2013, **34**(10): 2737 - 2755. (CHEN Guo-xing, JIN Dan-dan, CHANG Xiang-dong, et al. Review of soil liquefaction characteristics during major earthquakes in recent twenty years and liquefaction susceptibility criteria for soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(10): 2737 - 2755. (in Chinese))
- [7] 杜修力, 路德春. 土动力学与岩土地震工程研究进展[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 2): 10 - 20. (DU Xiu-li, LU De-chun. Advances in soil dynamics and geotechnical earthquake engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S2): 10 - 20. (in Chinese))
- [8] CERATO A B, LUTENEGGER A J. Specimen size and scale effects of direct shear box tests of sands[J]. Geotechnical Testing Journal, 2006, **29**(6): 507 - 516.
- [9] CERATO A B, LUTENEGGER A J. Scale effects of shallow foundation bearing capacity on granular material[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(10): 1192 - 1202.
- [10] 王继庄. 粗粒料的变形特性和缩尺效应[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(4): 89 - 95. (WANG Ji-zhuang. Deformation characteristics of coarse aggregate and scale effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(4): 89 - 95. (in Chinese))
- [11] MOHSEN H S, MOHAMMAD R S. Effects of membrane compliance on pore water pressure generation in gravelly sands under cyclic loading[J]. ASTM Geotechnical Testing Journal, 2010, **33**(5): 375 - 384.
- [12] KOKUSHO T. Dynamic properties of gravel layers investigated by in-situ freezing sampling[C]// Proc Ground Failures under Seismic Conditions. 1994: 121 - 140.
- [13] GOTO S, SUZUKI Y, NISHIO S, et al. Mechanical properties of undisturbed tone-river gravel obtained by in-situ freezing method[J]. Soils and Foundations, 1992, **32**(3): 15 - 25.
- [14] HATANAKA M, SUZUKI Y, KAWASAKI T, et al. Cyclic undrained shear properties of high quality undisturbed tokyo gravel[J]. Soils and Foundations, 1988, **28**(4): 57 - 68.
- [15] ISHIHARA K. Soil behavior in earthquake geotechnics[M]. Oxford: Clarendon Press, 1996.
- [16] EVANS M D, ZHOU S. Liquefaction behavior of sand-gravel composites[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **121**(3): 287 - 298.
- [17] KUENZA K, TOWHATA I, ORENSE R P, et al. Undrained torsional shear tests on gravelly soils[J]. Landslides, 2004, **1**(3): 185 - 194.
- [18] 王昆耀, 常亚屏, 陈宁. 饱和砂砾料液化特性的试验研究[J]. 水利学报, 2000(2): 37 - 41. (WANG Kun-yao, CHANG Ya-ping, CHEN Ning. Experimental study on liquefaction characteristics of saturated sandy gravel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(2): 37 - 41. (in Chinese))
- [19] 汪闻韶, 常亚屏, 左秀汉. 饱和砂砾料在振动和往返加荷下的液化特性[M]// 水利水电科学研究院科学研究论文集 (第 23 集). 北京: 水利电力出版社, 1986. (WANG Wen-shao, CHANG Ya-ping, ZUO Xiu-han. Liquefaction

- characteristics of saturated sand-gravel materials under the vibration loading[M]// Science Research Papers of China Institute of Water Resources and Hydropower Research (23th set). Beijing: China Water & Power Press, 1986. (in Chinese))
- [20] 刘令瑶, 李桂芬, 丙东屏. 密云水库白河主坝保护层地震破坏及砂砾料振动液化特性[M]// 水利水电科学研究院科学论文文集(第 8 集). 北京: 水利电力出版社, 1982: 46 - 54. (LI Ling-yao, LI Gui-fen, BING Dong-ping. Earthquake damage of the protective layer of Baihe main dam of Miyun Reservoir and liquefaction characteristics of sand-gravel material[M]// Science Research Papers of China Institute of Water Resources and Hydropower Research (8th set). Beijing: China Water & Power Press, 1982: 46 - 54. (in Chinese))
- [21] CAO Z, LESLIE YOUNG T, YUAN X. Gravelly soils that liquefied during 2008 Wenchuan, China earthquake, $M_s=8.0$ [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, **31**(8): 1132 - 1143.
- [22] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙, 等. 粗粒料大三轴试验研究进展[J]. 岩土力学, 2002, **23**(2): 217 - 221. (LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long, et al. Development of study on a large scale triaxial test of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(2): 217 - 221. (in Chinese))
- [23] 王炳辉, 陈国兴, 王志华, 等. 基于 WFI 动三轴试验仪的小型土箱震动台试验系统研制[J]. 地震工程与工程振动, 2011, **31**(2): 155 - 161. (WANG Bing-hui, CHEN Guo-xing, WANG Zhi-hua, et al. Development in small soil-box shaking table test system based on WFI triaxial test apparatus[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, **31**(2): 155 - 161. (in Chinese))
- [24] BRENNAN A J, THUSYANTHAN N I, MADABHUSHI S P. Evaluation of shear modulus and damping in dynamic centrifuge tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(12): 1488 - 1497.
- [25] 陈国兴, 王炳辉, 孙田. 饱和南京细砂动剪切模量特性的大型震动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(4): 582 - 590. (CHEN Guo-xing, WANG Bing-hui, SUN Tian. Dynamic shear modulus of saturated Nanjing fine sand in large scale shaking table tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(4): 582 - 590. (in Chinese))
- [26] 汪闻韶. 土体液化与极限平衡和破坏的区别和关系[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(1): 1 - 10. (WANG Wen-shao. Distinction and interrelation between liquefaction, state of limit equilibrium and failure of soil mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(1): 1 - 10. (in Chinese))
- [27] CASAGRANDE A. Liquefaction and cyclic deformation of sands: a critical review[C]// Proceedings of the 5th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Buenos Aires, 1975.
- [28] POULOS S J, CASTRO G, FRANCE J W. Liquefaction evaluation procedure[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(6): 772 - 792.
- [29] 凌贤长, 唐亮, 于恩庆. 可液化场地地震振动孔隙水压力增长研究的大型振动台试验及其数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增刊 2): 3998 - 4003. (LING Xian-zhang, TANG Liang, YU En-qing. Large-scale shaking table test and its numerical simulation of research on build-up behaviour of seismically-induced pore water pressure in liquefiable site[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 3998 - 4003. (in Chinese))
- [30] 王炳辉, 陈国兴. 循环荷载下饱和南京细砂的孔压增量模型[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(2): 188 - 194. (WANG Bing-hui, CHEN Guo-xing. Pore water pressure increment model for saturated Nanjing fine sand subjected to cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(2): 188 - 194. (in Chinese))
- [31] 王志华, 周恩全, 陈国兴, 等. 循环荷载下饱和砂土固-液相变特征[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(9): 1604 - 1610. (WANG Zhi-hua, ZHOU En-quan, CHEN Guo-xing, et al. Characteristics of solid-liquid phase change of saturated sand under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(9): 1604 - 1610. (in Chinese))
- [32] TATSUOKA F, OCHI K, FUJII S, et al. Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods[J]. Soils and Foundations, 1986, **26**(3): 23 - 41.
- [33] 潘华. 复杂应力条件下饱和南京细砂动力特性试验研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2011. (PAN Hua. Experimental research on dynamic behavior of saturated nanjing fine sand under complex stress conditions[D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2011. (in Chinese))
- [34] 王炳辉, 刘建达, 陈国兴. 结构性和相对密度对南京细砂抗液化强度的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, **27**(4): 383 - 388. (WANG Bing-hui, LIU Jian-da, CHEN Guo-xing. Effects of relative density and structural properties on liquefaction resistance of Nanjing fine sand[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, **27**(4): 383 - 388. (in Chinese))
- [35] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (CHEN Guo-xing. Geotechnical earthquake engineering[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))