

DOI: 10.11779/CJGE201802009

排水刚性桩单桩抗液化性能的振动台试验研究

杨耀辉^{1, 2, 3}, 陈育民^{*1, 2}, 刘汉龙^{1, 2, 3, 4}, 李文闻^{1, 2}, 江强^{1, 2, 5}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 3. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 4. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 5. 江阴市人民政府重点工程建设办公室, 江苏 无锡 214400)

摘要: 排水刚性桩是一种将竖向排水体与刚性桩相结合的新型桩基。为研究抗液化排水刚性桩的单桩抗液化作用效果, 采用振动台试验对排水刚性桩在动力荷载作用下的排水效果、地基孔压响应、加速度响应以及在上覆荷载作用下桩顶的侧向永久位移等动力响应进行了研究, 并与不设排水体的普通桩作了对比。结果表明: 抗液化排水刚性桩是一种有效的抗液化措施。在排水刚性桩桩身 1 倍桩径范围内, 土体的喷砂冒水现象得到有效控制, 普通桩试样中喷砂冒水现象严重。距离桩身排水通道 0.5 倍桩径处, 排水桩超孔压比峰值约为普通桩超孔压比峰值的 50%, 排水桩可以更快地消散地基内的超孔压, 超孔压比从峰值减小为 0.7 时, 排水刚性桩用时 6 s, 普通桩用时 17 s。排水刚性桩距排水体 0.5 倍桩径处加速度峰值为 0.2g, 相同测点处普通桩加速度峰值为 0.09g, 与排水桩相比, 减少约 100%。随加载过程的持续, 排水桩桩顶震荡幅值基本不表现, 在惯性力作用下, 振动荷载初始时间段内(3 s 时间内), 桩身发生轻微震荡。普通桩桩顶水平震荡幅值为 0.6 cm, 且震荡时间持续整个加载过程中(10 s), 普通桩桩顶的侧向永久位移约为排水桩的 3 倍。

关键词: 排水刚性桩; 振动台试验; 动力响应; 超孔隙水压力; 侧向永久位移

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2018)02-0287-09

作者简介: 杨耀辉(1990-), 男, 山东安丘人, 博士研究生, 从事抗液化排水刚性桩相关研究。E-mail: yangyaohui1905@163.com。

Shaking table tests on liquefaction resistance performance of single rigid-drainage pile

YANG Yao-hui^{1, 2, 3}, CHEN Yu-min^{1, 2}, LIU Han-long^{1, 2, 3, 4}, LI Wen-wen^{1, 2}, JIANG Qiang^{1, 2, 5}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Water Conservancy and Civil
Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 4. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing
400045, China; 5. Jiangyin Construction Project Management Office, Wuxi 214400, China)

Abstract: The rigid-drainage pile is a new type of pile which combines vertical drainage and rigid pile. To investigate the liquefaction resistance, the drainage, response of excess pore water pressure, acceleration and lateral permanent displacement of pile head under upper loads are measured based on shaking table tests. The results are compared with those of ordinary pile tests. It is indicated that the rigid-drainage pile is an effective approach for mitigation of liquefaction. The phenomenon of sand boil is restrained effectively in the range of one time the pile diameter, while sand boil occurs significantly in ordinary pile tests. The peak of excess pore water pressure ratio of rigid-drainage pile tests is 50% of that of ordinary pile ones at a distance of 0.5 time the pile diameter, and the rigid-drainage pile can dissipate the excess pore water pressure more rapidly. It takes 6 s for the peak of excess pore water pressure ratios to decrease to 0.7 in the rigid-drainage pile tests, and in the ordinary pile tests it is 17 s. The peak of acceleration is 0.2g at a distance of 0.5 time the pile diameter, and it is only 0.09g in the ordinary pile tests at the same monitor point, which means that the peak of acceleration in ordinary pile tests is decreased by 100% approximately compared to that of rigid-drainage pile. With the continuation of loading process, the amplitude vibration of rigid-drainage pile head is tiny, and it only occurs in the initial moments (3 s). The peak lateral permanent displacement is 0.6 cm in the ordinary pile tests and the amplitude vibration continues to the end of shaking. The peak lateral permanent displacement is around

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51379067, 51679072); 国家自然科学基金重点项目(地区)合作研究项目(51420102013); 教育部创新团队发展计划项目(IRT_15R17)

收稿日期: 2016-11-23

*通讯作者(E-mail: ymchenhu@163.com)

three times that in the rigid-drainage pile tests.

Key words: rigid-drainage pile; shaking table test; dynamic response; excess pore water pressure; lateral permanent displacement

0 引言

地震作用下,振动液化引发的次生灾害占到地震灾害的 50%以上^[1],地基液化是造成桩基损坏的重要原因之一^[2-4]。因此,地基液化问题历来受到研究人员的关注,寻找一种可靠的地基抗液化处理措施,一直都是岩土地震工程研究的重要方向^[5]。挤密砂桩^[6]及碎石桩^[7-8]作为地基土体抗液化的措施,其效果得到较大肯定。但随着科技日益发展与进步,建筑结构的建设高度不断攀高,建筑荷载不断增大,这些具有排水作用的柔性桩往往不能满足上部荷载的需求。

抗液化排水刚性桩是刘汉龙等^[9-10]提出的一种地基抗液化处理措施。赵楠^[11]对抗液化排水刚性桩进行了小型振动台试验研究,分析了排水刚性桩与普通刚性桩桩周土体的超孔压分布规律。陈育民等^[12-13]采用 FLAC^{3D}技术对抗液化排水刚性桩进行了数值模拟分析,提出了桩周土体内部孔压增长与消散规律。王翔鹰等^[14]对抗液化排水桩现场沉桩过程中的孔压增长及消散规律进行了研究。抗液化排水刚性桩取长补短,既满足了排水功能的要求,同时又可以提供较高的承载力,具有广阔的应用前景。但在工程实践中,排水刚性桩还存在一系列问题。桩径大小的选取、有效作用范围的大小、设置排水通道对桩身承载力的影响等都还不明确,使得排水刚性桩的广泛应用存在一定困难。

国内外许多研究人员对具有排水作用的桩基进行了研究,也表明了这种思路下的工程措施的可行性。一种具有排水作用的钢板(管)桩^[15-17]在日本得到了较为广泛的应用,目前已进入商业化生产阶段。Towhata 等^[18]采用竖向及倾斜排水管对液化地基进行处理,研究了土体孔压变化对上部建筑物沉降的影响。吴永娟等^[19]对不同桩间距砂桩加固液化砂土地基的孔压规律进行了分析,提出了砂桩自身的排水效果与液化地基加固效果之间存在密切关系。本文基于振动台模型试验,对抗液化排水刚性桩在振动作用下的动力响应进行了研究。从土体内部的动孔压响应、加速度幅值变化规律、桩顶的水平震荡位移及侧向永久位移等,对排水刚性桩的抗液化作用效果进行了分析。

1 试验介绍

1.1 振动台参数

本次试验所用振动台为重庆大学岩土实验室的

振动台。台面尺寸为 1.2 m×1.2 m, 配备叠梁式模型箱, 模型箱长 0.95 m, 宽 0.85 m, 高 0.6 m。振动台最大载重量 1000 kg, 频率范围 0~50 Hz, 所采用的加载方式为液压式, 单向振动水平向最大加速度为 2.0g, 单向振动垂直向最大加速度为 2.0g, 单向振动水平最大位移为 100 mm。振动方向可在水平与竖直两个方向同时振动。

1.2 模型简介

试验所用砂土为级配不良的^{#7} 硅砂, 该砂土颗粒级配与丰浦砂接近, 丰浦砂被广泛应用于液化问题的室内试验研究^[20-21]。^{#7} 硅砂基本物理参数如下: 颗粒相对密度 G_s 为 2.64, 不均匀系数 C_u 为 2.11, 曲率系数 C_c 为 1.42, 特征粒径 d_{50} 为 0.17 mm, 最大干密度 $\rho_{d,max}$ 为 1.65 g/cm³, 最小干密度 $\rho_{d,min}$ 为 1.34 g/cm³。^{#7} 硅砂与丰浦砂级配曲线如图 1 所示。

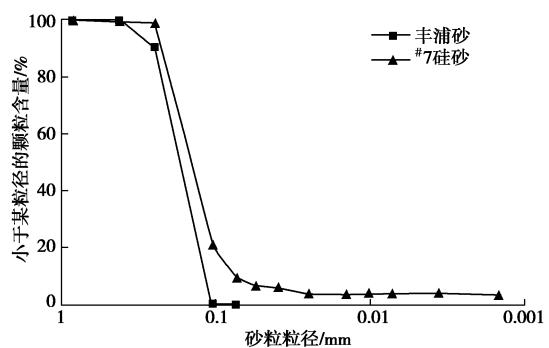


图 1 ^{#7} 硅砂与丰浦砂级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curves of silica sand No. 7 and Toyoura sand

本次模型试验所采用的几何相似比尺为 1:10, 质量密度相似比为 1:1, 桩基础的弹性模量相似比为 1:1。依据 Bingham π 定理及前人^[22-25]的研究基础可计算得出其余各物理量的相似比, 所有物理量相似比尺列于表 1。试验所用模型箱为叠梁式剪切模型箱, 宋二祥等^[26]研究表明, 采用柔性模型箱或剪切式模型箱时, 可较好地模拟自由场地的变形。

抗液化排水刚性桩技术示意图如图 2 所示, 本次试验所用刚性排水桩平面示意图见图 3。试验模型桩采用 1:2 水泥砂浆浇筑而成。与普通刚性桩基础相比, 刚性排水桩在桩侧增设一条方形排水槽或圆形排水槽, 在排水槽内部放置排水板或排水盲沟, 形成竖向排水通道。排水板(排水盲沟)外侧用土工布包裹, 防止土体细颗粒进入到排水板内堵塞排水通道。

表1 振动台模型试验相似比

Table 1 Similitude ratios of shaking table tests

物理量	相似比
几何尺寸 L	1 : 10
质量密度 ρ	1 : 1
弹性模量 E_d	1 : 1
泊松比 μ_d	1 : 1
振动频率 ω	1 : 0.316
上部自重 P	1 : 1000
阻尼系数 R	1 : 333
输入振动持时 T	1 : 3.162
有效土压力 σ_v	1 : 10
重力加速度 g	1 : 1
输入振动加速度 A	1 : 1
动力响应应力 σ_d	1 : 10
动力响应线位移 S_d	1 : 10
动力响应角位移 θ_d	1 : 1
动力响应速度 V_d	1 : 3.162
动力响应应变 ε_d	1 : 1
动力响应加速度 a_d	1 : 1
动力响应孔压 μ_d	1 : 10

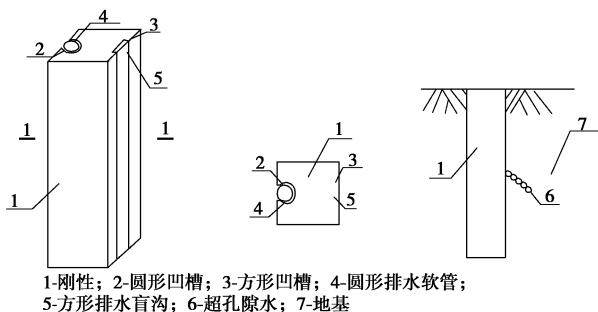


图2 抗液化排水刚性桩技术示意图

Fig. 2 Sketch of liquefaction resistance rigid-drainage pile

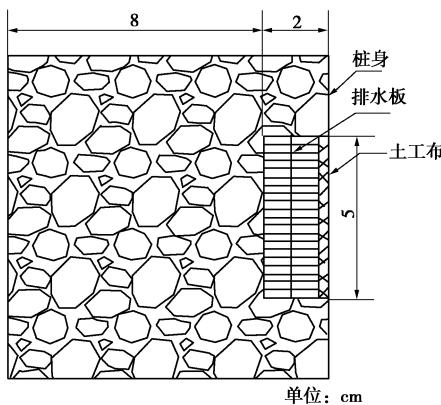


图3 试验用排水刚性桩平面示意图

Fig. 3 Sketch of rigid-drainage pile in tests

1.3 试验工况及试验制备

试验工况布置为排水刚性桩与普通刚性桩两种工况的对比, 两组试验均为单桩工况。模拟桩基础在上部惯性力作用下的动力响应, 依据相似比尺确定试验桩桩顶上部覆土质量为30 kg。试验工况布置方案见表2。

表2 试验工况布置

Table 2 Decoration of tests

工况类别	桩型	加载波形	加速度幅值/g	振动持时/s	振动频率/Hz
工况1	普通桩	正弦波	0.2	10	5
工况2	排水桩	正弦波	0.2	10	5

试样制备采用自制的筛网进行。自制筛网分为两层, 第一层为直径为2 cm, 间距2 cm的大口筛网, 用于控制砂土下落高度及下落速度。第二层筛网采用孔径为3 mm的细筛网, 目的在于保证砂土下落的均匀性。同时, 再次减小砂土下落的速度, 以便获得相对密实度更小的试样。试样制备过程中, 通过不断调整筛网在支架上的位置及加水流量的大小, 使砂土下落高度及水面到模型箱内土层表面的高度始终保持一致, 保证制备的整个砂土试样的均匀性。试验模型平面布置示意图及传感器布置示意图如图4所示。模型试验所采用的动力荷载时程曲线见图5。由于试验加载装置的原因, 输入加速度时程正负幅值与预定输入加速度时程存在一定差异, 正向输入加速度幅值与预定输入加速度幅值相符, 负向加速度幅值比正向加速度幅值稍大。

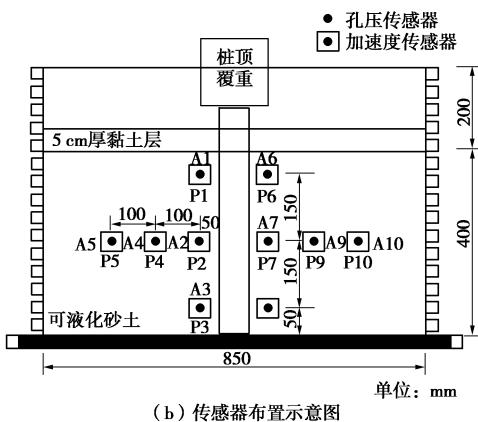
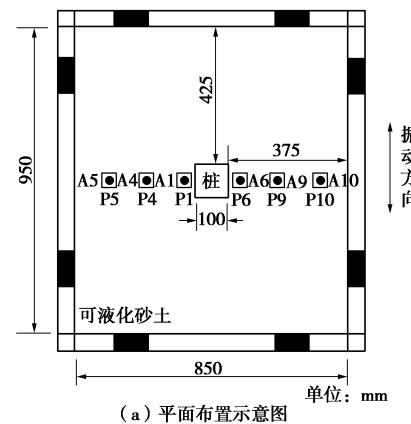


图4 模型布置示意图

Fig. 4 General view of model tests

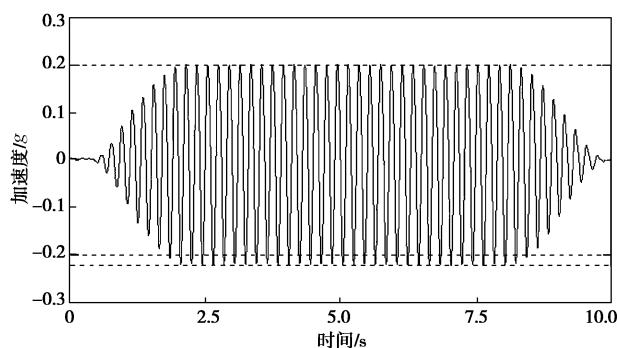


图 5 输入加速度时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of input acceleration

2 试验结果与分析

2.1 试验现象

试样制备完成后,在试样表面覆盖 5 cm 厚的黏土层,将试样表面设置为不排水边界。静置 24 h,待砂土自由固结完成后,加装上部覆重,安装拉线式位移传感器,进行试验。不同试验工况下试验现象见图 6,7。

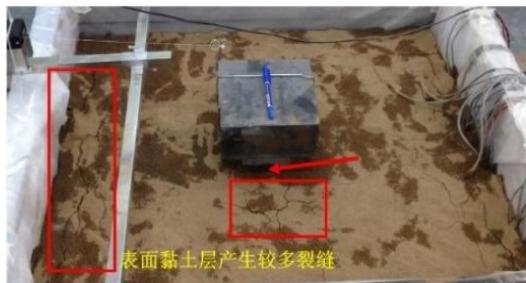


图 6 普通桩工况试验现象 (1 s)

Fig. 6 Phenomenon of ordinary pile tests (1 s)



图 7 排水桩工况试验现象 (1 s)

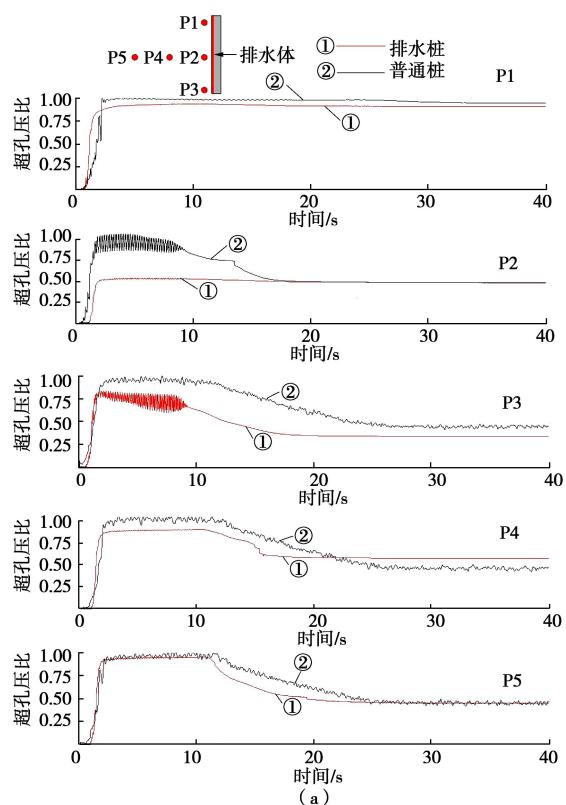
Fig. 7 Phenomenon of rigid-drainage pile tests (1 s)

振动初始时刻 (1 s), 排水桩桩身排水通道内有大量超孔隙水排出,体现出明显的排水作用。振动过程中,桩身排水通道持续排水。在 1 倍桩径范围内的试样土体无喷砂冒水现象。普通刚性桩桩身无排水现象,黏土层表面产生较多裂缝。振动过程中,可明显观察到普通桩试样表面发生严重的喷砂冒水现象。试样土体呈现整体的流动状态,随振动加载过程做周期

性的震荡。试验现象表明:排水刚性桩因其自身排水通道良好的排水作用,将土体内部产生的超孔隙水及时排出,减少土体液化引起的喷砂冒水,很好地限制了地基土体的液化趋势。

2.2 超孔压比试验结果

两组试验工况超孔压比时程曲线见图 8。随测点埋深位置的加深,排水桩对土体内超孔压的消散作用越明显。不同工况中,接近地表处的孔压测点 P1(距离桩身排水通道水平距离 5 cm, 距离地表垂直距离 10 cm.) 的超孔压比峰值为 1.0,且超孔压比持续维持在 1.0 左右,无明显消散过程。排水桩工况中, P2(距离桩身排水通道水平距离 5 cm, 距离地表垂直距离 25 cm.) 测点处超孔压比峰值为 0.5 左右。排水通道的排水作用有效抑制了 P2 测点处超孔压的增长。普通桩工况中, P2 测点处超孔压比峰值达到 1.0,最终超孔压消散稳定后的超孔压比与排水桩工况中超孔压比峰值相同。排水工况中, P3(距离桩身排水通道水平距离 5 cm, 距离地表垂直距离 40 cm) 测点处超孔压比峰值为 0.8,达到峰值后孔压开始消散,超孔压比开始减小,达到稳定后的超孔压比为 0.35。普通桩工况下, P3 测点处超孔压比峰值达到 1.0。最终消散稳定后的超孔压比在 0.45 左右。普通桩超孔压消散的主要途径为地基土体砂沸后产生较多的破坏裂缝,随着破坏裂缝不断发展形成了一系列排水通道,使得土体内部的超孔压得以消散。



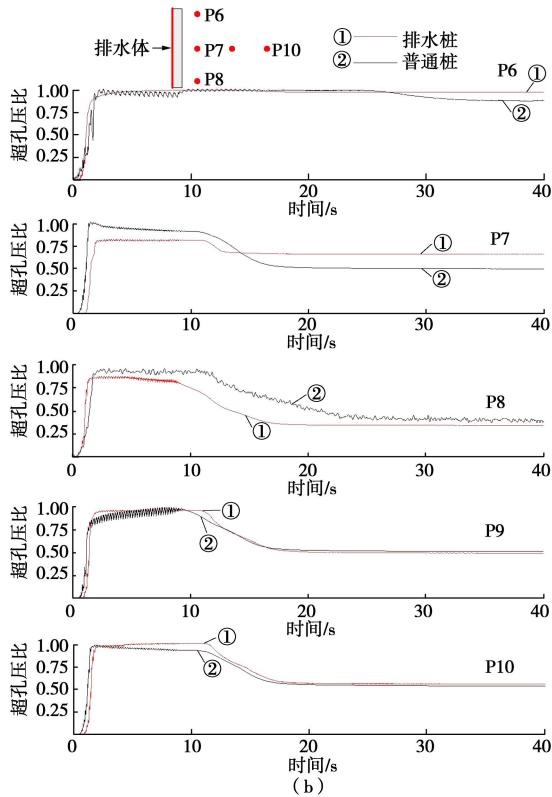
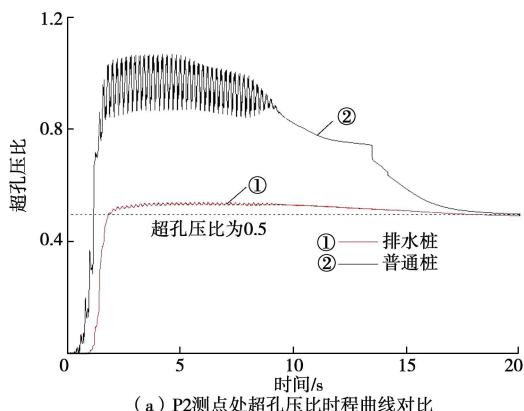


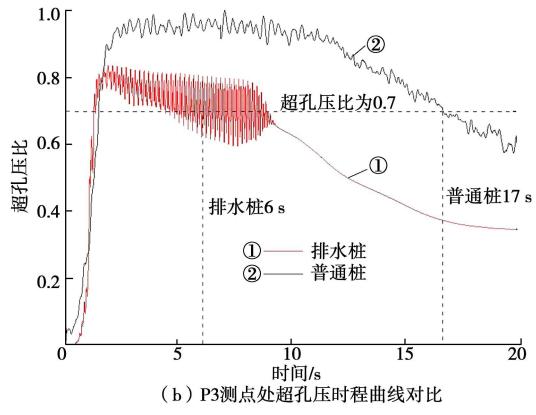
图 8 超孔压比时程曲线

Fig. 8 Time-history curves of excess pore pressure ratio

距离排水体 0.5 倍桩径 P2、P3 测点处的超孔压比时程曲线如图 9 所示。排水桩工况中, P2 测点处超孔压比峰值在 0.5 左右, 与普通桩超孔压比达到稳定状态时的数值基本相同。普通桩工况下, 超孔压比峰值达到 1.0, 在 17 s 左右时, 超孔压比减小到 0.5 左右。两种工况下, P3 测点处超孔压比在相同时刻达到峰值。排水桩工况中超孔压在到达峰值后立即开始消散, 孔压比减小至 0.7 时, 排水桩用时 6 s 左右, 普通桩用时约为 17 s。排水桩工况孔压消散更快, 主要是因为排水通道的渗透系数远大于砂土试样的渗透系数。排水通道周围砂土试样的固结系数更大, 孔压消散的速度更快。Towhata 等^[18]研究表明: 排水作用下, 振动加载过程中, 土体的沉降量较无排水作用情况下更大, 主要是因为排水体的排水作用, 使得超孔压更快消散, 加速了土体的固结。



(a) P2测点处超孔压比时程曲线对比



(b) P3测点处超孔压比时程曲线对比

Fig. 9 Comparison of excess pore pressure ratios

为对比排水桩与普通桩在水平距离上超孔压比峰值值的变化规律, 将试样中相同埋深, 距排水通道不同水平距离处测点的超孔压比峰值进行了对比, 峰值曲线如图 10 所示。图中比例距离 λ 定义为孔压测点到排水通道的水平距离与桩径的比值。普通桩工况中, 桩身两侧超孔压比峰值均接近 1.0, 最小值为 0.92。排水桩工况中, 排水侧比例距离为 0.5 测点处的超孔压比峰值为 0.55, 约为普通桩的 50%左右。当比例距离为 1.5 和 2.5 时, 超孔压比峰值在 0.9 以上, 与普通桩超孔压比峰值接近, 排水通道的影响作用已不明显。在比例距离 0.5 与 1.5 之间, 由于两者之间距离较小, 可简化认为二者之间是线性关系, 内插得到比例距离为 1.0 时的超孔压比峰值约为 0.7。排水桩工况下, 随比例距离的增大, 非排水侧超孔压比峰值逐渐增大, 比例距离为 0.5 时, 超孔压比峰值为 0.8, 排水通道仍存在一定的影响。普通桩工况中超孔压比峰值均接近 1.0。说明排水通道的位置对桩周土体超孔压具有重要影响。排水桩加固范围与排水体有密切的关系。

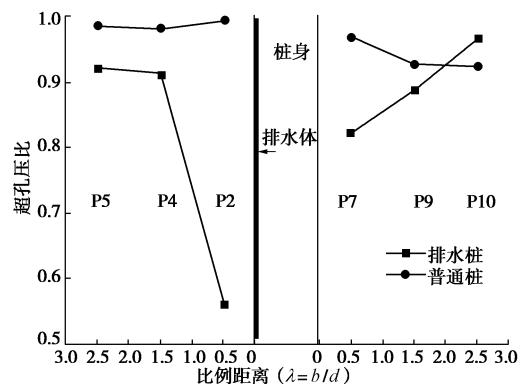


图 10 相同埋深处超孔压比峰值对比

Fig. 10 Comparison of excess pore pressure peaks at same depth

2.3 加速度试验结果

两种不同试验工况中, 加速度响应时程曲线见图 11。土体加速度时程响应与输入加速度时程曲线在时刻上对应一致。两种工况中, 加速度响应时程随加速

度计埋深的增加, 加速度响应越来越强, 加速度时程响应与超孔压比响应表现一致。在振动荷载输入 2 s 时刻以前, 加速度响应不断增大, 2 s 时刻以后加速度响应不断衰减, 表明此时试样土体开始液化。排水桩工况中, 从加速度计测点 A2 (距离排水通道水平距离 5 cm, 距离试样表面垂直距离 25 cm) 和 A8 (位于排水桩排水通道背侧, 距离桩身水平距离 5 cm, 距离试样表面垂直距离 40 cm) 处的加速度时程响应呈现先增强后衰减最后不断增强达到峰值的过程。A2 加速度计测点处加速度响应衰减的时间较短 (约 1 s), A8 加速度计响应衰减的时间较长 (约 5 s)。位于排水通道一侧的加速度计 (A2) 响应衰减时间较短, 峰值恢复较快, 表明排水刚性桩对距离排水通道近处测点的影响作用效果更明显。

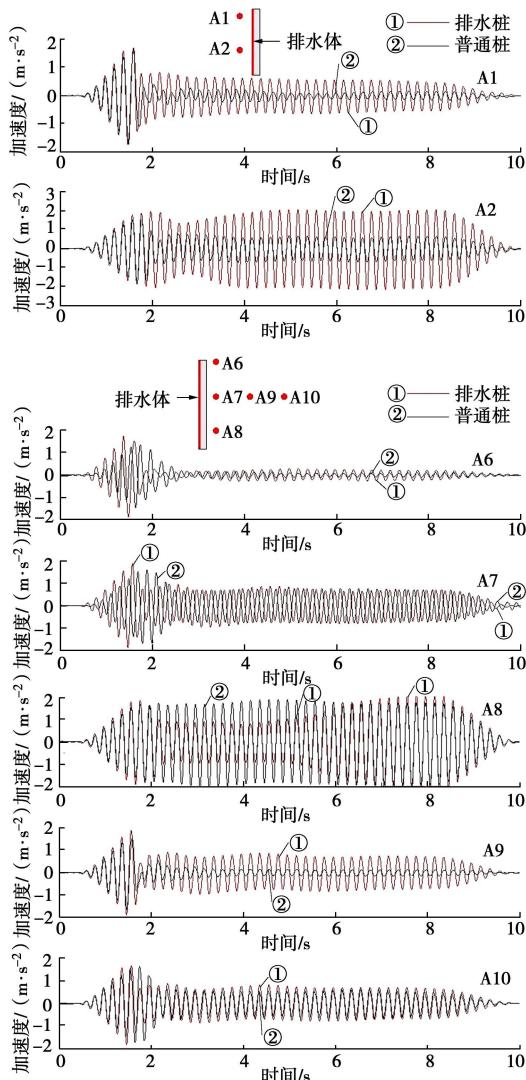


图 11 加速度时程曲线

Fig. 11 Time-history of acceleration

为对比排水桩与普通桩在水平距离上加速度峰值的变化规律, 将试样中相同埋深, 距排水通道不同水

平距离测点处的加速度峰值变化绘制于图 12。两种工况中, A2 测点处加速度峰值差别较大, 排水桩峰值为 $0.2g$, 普通桩峰值为 $0.09g$, 减小约 100%。该测点处加速度试验结果与超孔压比试验结果相吻合。排水桩非排水侧, 加速度峰值试验结果沿水平距离上变化不明显。普通桩工况中, 两侧测点加速度峰值呈现中间大、两侧小的规律。靠近桩身与箱壁测点处, 由于桩-土相互作用与边界效应的影响, 加速度响应更大。

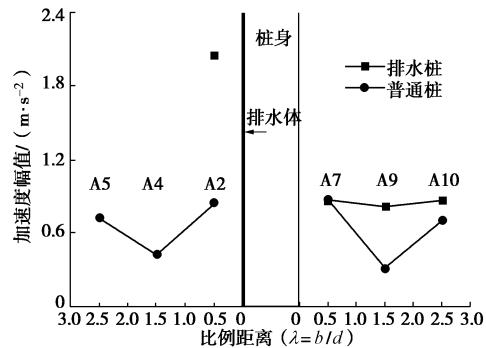


图 12 相同埋深处加速度峰值对比

Fig. 12 Comparison of acceleration peaks at same depth

2.4 水平位移试验结果

两种不同试验工况下的水平位移时程曲线对比如图 13 所示。排水刚性桩侧向永久位移明显更小, 证明了排水刚性桩的抗液化作用效果。普通桩发生的水平永久位移接近 0.6 cm , 而排水桩的侧向永久位移在 0.2 cm 左右, 减少 60%以上。从时程曲线的振荡变化来看, 普通桩工况下, 在加载时间内, 桩体随加载过程做规律性的振荡运动。由于超孔压无法及时消散, 试样土体发生液化, 对桩身的约束作用减弱, 此时, 桩基础已完全丧失承载能力, 极易在可液化与不可液化土层界面处发生剪断破坏。排水桩仅在振动初始 3 s 时间段内存在相对运动过程, 后续加载时间内桩体保持不动。排水桩桩身的排水通道使得土体内部的超孔隙水得以及时排出土体, 桩周土体强度得以保持, 对桩身的侧向阻抗作用较强, 桩-土相对位移较小。

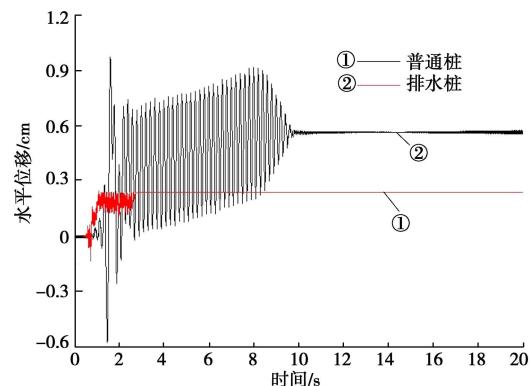


图 13 桩顶水平位移时程曲线

Fig. 13 Time-history curves of lateral displacement

2.5 剪应力 - 应变试验结果

依据前人的研究成果^[27~29], 通过对试样土体内部实测加速度进行处理, 获得了相同测点处的剪应力 - 应变关系曲线。试验结果见图 14。

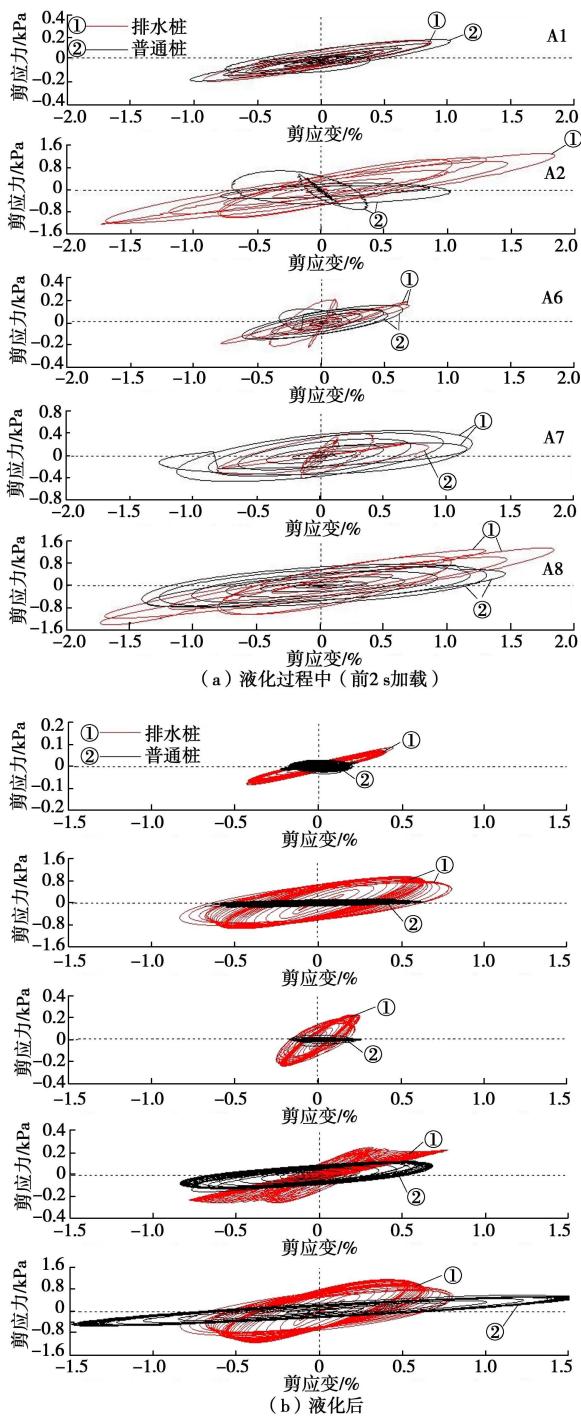


图 14 动剪应力 - 应变关系

Fig. 14 Dynamic shear stress-strain relationship

与超孔压、加速度时程响应对应, 图 14 (a) 中滞回曲线的包络面积更大, 试样土体呈现一定的剪胀特性。两种不同工况下, 在试样土体发生液化之前, 滞回圈大小、形状基本相同。此时, 试样土体的抗剪强度基本一致。当试样土体液化以后, 图 14 (b) 中

所示的剪应力 - 应变滞回圈呈现明显“浅小深大”的分布规律, 由于深部土体的超孔压不断向上部土体迁移, 上部土体始终处于液化状态, 这与超孔压、加速度试验结果表现一致。排水桩与普通桩液化后的应力 - 应变滞回圈存在较大差异。对应相同剪应变情况下, 排水桩对应的剪应力远大于普通桩工况中试样土体的剪应力。在相同动力荷载作用下, 排水桩有效的排水作用, 使得试样土体的抗剪强度得到了有效提高, 从而提高了对桩基础的侧向阻抗作用。

3 结 论

本文通过振动台模型试验, 对抗液化排水刚性桩与普通刚性桩在振动荷载作用下的动力响应进行了研究, 得出了以下 5 点结论。

(1) 抗液化排水刚性桩是一种有效的抗液化地基处理措施。振动初始时刻 (1 s), 排水桩桩身排水通道开始排水, 排水桩桩周土体 1 倍桩径处无喷砂冒水现象。普通刚性桩工况中, 试样土体有严重的喷砂冒水现象发生, 试样土体完全液化。

(2) 排水体对超孔压的消散作用, 随着埋深的增加, 逐渐增强。在 0.5 倍桩径处, 排水桩对超孔压的消散体现出了较为明显的作用, 超孔压消散速率约为普通桩的 3 倍。

(3) 排水桩工况中, 距排水体 0.5 倍桩径处的加速度峰值约为普通桩加速度峰值的 2 倍。排水桩工况中, 加速度时程曲线峰值呈现先衰减后增大的规律, 普通桩工况中加速度峰值衰减后没有增大的过程。

(4) 排水桩工况中, 桩顶侧向永久位移得到有效控制, 普通桩工况中桩顶的侧向永久位移约为排水桩的 3 倍。在振动荷载加载过程中, 排水刚性桩周期震荡时间明显缩短 (3 s), 普通刚性桩周期性震荡位移则持续整个加载过程 (10 s)。

(5) 试验中已经反映出, 抗液化排水刚性桩在处理可液化地基时排水通道的位置对桩周土体的性状存在重要影响, 即排水刚性桩的有效加固范围与排水体关系密切。这方面的研究需要开展更多的试验和理论分析才能确定, 这是下一步工作的主要方向。

致 谢: 本次试验得到重庆大学陈志雄老师、丁选明老师和尹峰博士生的大力支持和帮助, 还有河海大学张鑫磊博士生、黄宏翔硕士生在试验过程中的辛苦付出, 在此表示诚挚的感谢。

参 考 文 献:

- [1] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- YIN Zeng-ze. The mechanism of geotechnic enginnering[M].

- Beijing: China Water and Power Press, 2007. (in Chinese))
- [2] HAMADA M. Engineering for earthquake disaster mitigation[M]. Berlin: Springer, 2014.
- [3] MIWA S, IKEDA T, SATO T. Damage process of pile foundation in liquefied ground during strong ground motion[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, **26**: 325 – 336.
- [4] TOWHATA I. Geotechnical earthquake engineering[M]. Berlin: Springer, 2008.
- [5] 郑 刚, 龚晓楠, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(2): 127 – 146. (ZHENG Gang, GONG Xiao-nan, XIE Yong-li, et al. State-of-the-art techniques for ground improvement in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(2): 127 – 146. (in Chinese))
- [6] SADREKARIMI A, GHALANDARZADEH A. Evaluation of gravel drains and compacted sand piles in mitigating liquefaction[J]. Ground Improvement, 2005, **9**(3): 91 – 104.
- [7] SASAKI Y, TANIGUCHI E. Shaking table tests on gravel drains to prevent liquefaction of sand deposits[J]. Soils and Foundations, 1982, **22**(3): 1 – 14.
- [8] MELOROSE J, PERROY R, CAREAS S. Stabilization of potentially liquefiable sand deposits using gravel drains[J]. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering Division, 1977, **103**(7): 757 – 768.
- [9] 刘汉龙. 一种抗液化排水刚性桩: 中国, CN2873886Y[P]. 2007-02-28. (LIU Han-long. A kind of rigid drainage pile of mitigation of liquefaction: China, CN2873886Y[P]. 2007-02-28. (in Chinese))
- [10] LIU H, CHEN Y M, ZHAO N. Development technology of rigidity-drain pile and numerical analysis of its anti-liquefaction characteristics[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, **15**(S2): 101 – 107.
- [11] 赵 楠. 刚性排水桩的抗液化性状试验与分析[D]. 南京: 河海大学, 2008. (ZHAO Nan. Test and analysis on anti-liquefaction behaviors of rigidity-drain pile[D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [12] 刘汉龙, 陈育民, 赵 楠. 刚性排水桩的技术开发与抗液化特性试验研究[C]// 第一届全国工程安全与防护学术会议. 南京, 2008: 531 – 535. (LIU Han-long, CHEN Yu-min, ZHAO Nan. Development technology of rigidity-drain pile and laboratory test of its anti-liquefaction characteristics[C]// 1st National Conference of Engineering and Safety Protection. Nanjing, 2008: 531 – 535. (in Chinese))
- [13] 陈育民, 刘汉龙, 赵 楠. 抗液化刚性排水桩振动台试验的数值模拟研究[J]. 土木工程学报, 2010, **43**(12): 114 – 119. (CHEN Yu-min, LIU Han-long, ZHAO Nan. Laboratory test on anti-liquefaction characteristics of rigidity-drain pile[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, **43**(12): 114 – 119. (in Chinese))
- [14] 王翔鹰, 刘汉龙, 江 强, 等. 抗液化排水刚性桩沉桩过程中的孔压响应[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(4): 645 – 651. (WANG Xiang-ying, LIU Han-long, JIANG Qiang, et al. Field tests on the response of excess pore water pressures of the liquefaction resistance rigid-drainage pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(4): 645 – 651. (in Chinese))
- [15] OTSUSHI K, KATO T, HARA T, et al. Analytical study on mitigation of liquefaction-related damage to flume channel using sheet-pile with drain[C]// GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design. Florida, 2010: 3062 – 3071.
- [16] MARINUCCI A. Effect of prefabricated vertical drains on pore pressure generation in liquefiable sand[D]. Austin: The University of Texas at Austria, 2010.
- [17] TANAKA H, KITA H, IIDA T. Countermeasure using steel sheet pile with drain capability[C]// Eleventh World Conference on Earthquake Engineering. Mexico City, 1996: 1052 – 1059.
- [18] RASOULI R, TOWHATA I, AKIMA T. Experimental evaluation of drainage pipes as a mitigation against liquefaction-induced settlement of structures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013: 1 – 10.
- [19] 吴永娟, 牛琪瑛, 闫卫泽. 短桩加固液化砂土时孔压比随桩距变化规律分析[J]. 太原理工大学学报, 2008, **39**(6): 613 – 615. (WU Yong-juan, NIU Qi-ying, YAN Wei-ze. Analysis of the change of pore pressure ratio with the pile spacing in the liquefiable sand soil strengthened by short pile[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2008, **39**(6): 613 – 615. (in Chinese))
- [20] OKUR V, Umut S. Energy approach to unsaturated cyclic strength of sand[J]. Bull Earthquake Enginerring, 2013(11): 503 – 519.
- [21] YANG J, SAVIDIS S, ROEMER M. Evaluating liquefaction strength of partially saturated sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, **130**(9): 975 – 979.
- [22] SHI T, CHENG S. Dynamic similitude law design of shaking table model test for high-rise steel structures[C]// 5th

- International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering. 2013: 5 - 9.
- [23] SUSUMU I. Similitude for shaking table test on soil-structure-fluid model 1g gravitational field[R]. Yokosuka: The Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, 1988.
- [24] 詹永祥, 蒋关鲁, 牛国辉, 等. 桩板结构路基动力模型试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2097 - 2102. (ZHAN Yong-xiang, JIANG Guan-lu, NIU Guo-hui, et al. Model experimental research on dynamic performance of pile-plank embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2097 - 2102. (in Chinese))
- [25] 凌贤长, 王臣, 王成. 液化场地桩-土-桥梁结构动力相互作用振动台试验模型相似设计方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 450 - 456. (LING Xian-zhang, WANG Chen, WANG Zhi-qiang, et al. Study on large-scale shaking table proportional model test for free-ground liquefaction arisen from earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(6): 138 - 143. (in Chinese))
- [26] 宋二祥, 武思宇, 王宗纲. 地基-结构系统振动台模型试验中相似比的实现问题探讨[J]. 土木工程学报, 2008, 41(10): 87 - 92. (SONG Er-xiang, WU Si-yu, WANG Zong-gang. A tentative solution for similitude realization in shaking table test of SSI systems[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(10): 87 - 92. (in Chinese))
- [27] ZEGHAI M, ELGAMAL A W, TANG H T, et al. Lotung downhole array II: evaluation of soil nonlinear properties[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(4): 363 - 378.
- [28] 王永志, WILSON D W, KHOSRAVI M, 等. 动力离心模型试验循环剪应力 - 剪应变反演方法对比[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 271 - 277. (WANG Yong-hi, WILSON D W, KHOSRAVI M, et al. Evaluation of cyclic shear stress-strain using inverse analysis techniques in dynamic centrifuge tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 271 - 277. (in Chinese))
- [29] 周燕国, 梁甜, 李永刚, 等. 含黏粒砂土场地液化离心机振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(9): 1650 - 1658. (ZHOU Yan-guo, LIANG Tian, LI Yong-gang, et al. Dynamic centrifuge tests on liquefaction of clayey sand ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(9): 1650 - 1658. (in Chinese))

本刊最新学术影响指标发布

根据中国科学技术信息研究所编制的 2017 年版《中国科技期刊引证报告（核心版）》，我刊的核心总被引频次为 5918，在土木工程类期刊中排名第 3，在中国科技核心期刊中排名第 45；我刊的核心影响因子为 1.147，在土木工程类期刊中排名第 3，在中国科技核心期刊中排名第 201。根据《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司出版的 2017 年版《中国学术期刊影响因子年报（自然科学与工程技术）》，我刊的复合总被引频次为 19509，复合影响因子为 2.060，在 156 本土木建筑工程类期刊中排名第 4。

2017 年《岩土工程学报》被评为中国最具国际影响力学术

期刊。中国最具国际影响力学术期刊是由中国学术文献国际评价研究中心、清华大学图书馆和《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司联合评价发布。2017 年中国最具国际影响力学术期刊共评出 175 本期刊，按国际影响力指数排序，《岩土工程学报》位居 106 位。

在 2017 年中国科协第二届优秀科技论文遴选计划的评选中，我刊 2016 年第 7 期发表的“地层条件对剪胀性砂土边坡地震后延迟变形的影响”（作者：王刚，张建民，魏星）一文被评为优秀论文。2017 年中国科协第二届优秀科技论文遴选计划入选论文共 99 篇。

（本刊编辑部）