

DOI: 10.11779/CJGE2023S10044

珊瑚礁砂场地碎石桩淤堵性离心模型试验研究

樊旭^{1,2}, 王永志^{*1,2}, 梁小丛^{3,4}, 陈平山^{3,4}, 王体强^{1,2}

(1. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

摘要: 多次地震荷载下碎石桩的淤堵性及排水性能变化是目前人工吹填岛礁和港口工程关注的焦点问题之一。开展了珊瑚礁砂碎石桩动力离心模型试验, 通过碎石桩剖面图像观测、试验前后级配测试、超静孔压消散速率变化等分析, 探讨了碎石桩的淤堵性及排水性能变化。结果表明: 7条 $\geq 0.2g$ 强震荷载下, 埋深1.25 m均发生了液化, 孔压比达到1.0, 埋深7.5 m未发生液化; 试验后开挖的9根碎石桩剖面自上而下均未发现明显细粒渗入, 且试验前后测试级配曲线基本一致; 第1和第6次强震荷载下, 埋深1.25 m处超静孔压比消散速率约为 0.027 s^{-1} 、 0.029 s^{-1} , 表明碎石桩未出现淤堵孔隙现象, 同时排水性能未发生明显变化。

关键词: 珊瑚礁砂; 离心试验; 碎石桩; 淤堵性; 消散速率

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S1-0214-04

作者简介: 樊旭(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事地基处理及基础抗液化方面的研究工作。E-mail: 1920789095@qq.com。

Centrifugal model tests on clogging performance of stone columns in coral sand site

FAN Xu^{1,2}, WANG Yongzhi^{1,2}, LIANG Xiaocong^{3,4}, CHEN Pingshan^{3,4}, WANG Tiqiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China; 3. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 4. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China)

Abstract: Change of clogging and drainage performances of stone columns under many earthquakes is one of the focus issues in construction of artificial dredging island reef and port engineering. The dynamic centrifugal model tests on the composite foundation with stone columns in coral sand are carried out, and the change of clogging and drainage performances of stone columns is discussed through the image observation of the excavation profile of the stone columns, the grain-size distribution tests on the stone columns before and after earthquakes, and the change analysis of the dissipation rate of pore water pressure. The results show that liquefaction occurs at the buried point of 1.25 m, the pore pressure ratio reaches 1.0, and no liquefaction occurs at the buried point of 7.5 m under the seven times of intense dynamic loading. After the tests, no obvious fine particle infiltration is found in the sections of the 9 stone columns excavated from top to bottom, and the grain-size distribution curves of the stone columns tested before and after earthquakes are basically consistent, indicating that clogging pores do not appear in the stone columns. At the buried point of 1.25 m, the pore pressure dissipation rates are respectively 0.027 s^{-1} and 0.029 s^{-1} under the first and sixth times of intense dynamic loading, which proves that the drainage performance of the stone columns has not changed significantly.

Key words: coral sand; centrifugal model test; stone column; clogging performance; dissipation rate

0 引言

伴随中国南海岛礁的建设和“一带一路”战略规划的实施, 珊瑚礁砂的液化特性及地基处理方法成为工程界的热点问题之一^[1-4]。碎石桩作为工程常用的一种地基抗液化处理方法, 利用改善地基排水条件和振密桩周土体, 使地基抗液化强度提高。然而, 多次强震荷载下碎石桩长期服役的抗液化性能及淤堵性缺乏

研究; 同时, 珊瑚礁砂地基碎石桩的抗液化有效性也尚待深入探究。

目前, 国内外诸多学者利用单元试验(共振柱、

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项项目(2019EEEEVL0203); 国家自然科学基金项目(51609218); 黑龙江省自然科学基金项目(YQ2019E035)

收稿日期: 2023-07-06

*通信作者(E-mail: yong5893741@163.com)

动三轴等)、振动台和数值分析等手段,对珊瑚礁砂液化特性及地基处理方法开展了大量研究。如:Chen 等^[2]采用不排水循环三轴探讨了珊瑚礁砂的模量阻尼比特性及抗液化强度。Xiao 等^[3]通过动三轴试验论证了 MICP 法处理降低珊瑚礁砂液化风险的有效性。秦志光^[4]基于原位勘察测试方法,分析了强夯、振冲等方法对珊瑚礁砂地基抵抗液化的加固效果;刘凯^[5]联合多种研究手段,研究倾斜场地碎石桩处理地基地震液化变形规律。总之,珊瑚礁砂场地抗液化强度及处理方法有效性,尚有待深入研究,譬如:刘凯^[5]分析动力离心试验碎石桩长期服役性能时,指出碎石桩渗入细粒而发生淤堵,但多次强震下超静孔压消散速率并未明显改变,二者相悖。

本文以东帝汶 Tibar 港口码头工程为背景,开展珊瑚礁砂碎石桩动力离心模型试验,施加序列强震荷载,利用碎石桩剖面图像观测、试验前后级配测试、超静孔压比消散速率变化等分析,探讨多次强震下碎石桩淤堵性及排水性能变化,为评判碎石桩长期服役的有效性和工程建设提供参考。

1 动力离心试验设备与模型设计

1.1 试验设备

本次试验在中国地震局工程力学研究所振动负载 1500 kg 动力离心机上开展,其主机及振动台如图 1 所示。该试验设备的主要技术指标:有效负载 300 g·t,离心加速度 100g,最大半径 5.5 m,振动加速度 30g,振动速度 1 m/s,振动位移 10 mm,振动频宽 10~300 Hz,振动台台面有效尺寸为 1.6 m×0.8 m,配置 160 ch 动态数据采集系统。试验选取柔性剪切模型箱,内尺寸 1.2 m×0.5 m×0.65 m。



(a) 300 g·t 离心机



(b) 1500 kg 离心振动台及柔性剪切箱

图 1 工程力学研究所大型动力离心机

Fig. 1 Geotechnical centrifuge shaking table at IEM

1.2 试验模型材料

本次试验采用 Tibar 港口工程原位珊瑚礁砂,原始土样颗粒级配宽,属于粗粒土,如图 2 所示。动力离心试验作为一种缩尺物理试验,考虑《土工离心模型试验技术规程》(DL/T 5102—2013)^[6]的规定:“对于粗粒土,允许最大粒径应不超过 1/20~1/10 模型宽度,其平均粒径不超过 1/250~1/60 模型宽度”,借鉴以往学者们对珊瑚礁砂试验剔除 2 mm 以上颗粒来避免粒径效应^[7],本文试验保留了 2~5 mm 颗粒,仅剔除>5 mm 颗粒,既能满足《规范》的粒径效应要求,又有助于反映真实的工程土体力学行为,剔除后的试验珊瑚礁砂级配如图 2 所示。

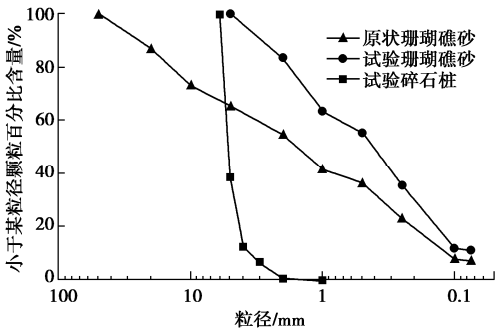


图 2 试验材料级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of test materials

碎石桩的面积置换率、桩型等设计参数与工程原型保持一致,确定碎石桩置换率 14.5%,按正三角形布设,为悬浮桩。并为了避免尺寸效应影响,确定碎石桩直径为 80 mm,由置换率确定桩间距为 200 mm,碎石桩级配考虑其主要依赖快速排水能力实现地基发生液化风险和程度的降低,按工程原型碎石桩与场地土体渗透系数比值 800 作为主要控制参数进行设计,同时考虑粒径效应与碎石桩直径、原型碎石级配相似等因素,设计的碎石桩级配如图 2 所示。试验模型地基和碎石桩材料的基本物理力学参数,见表 1。

表 1 试验材料基本物理力学参数

Table 1 Physical properties of test materials

试验材料	G_s	$\rho_{\max} /$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$\rho_{\min} /$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	e_{\min}	e_{\max}	$k /$ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
珊瑚礁砂	2.785	1.826	1.386	0.525	1.009	5.1×10^{-3}
碎石桩	2.370	1.754	1.446	0.248	0.580	4.443

1.3 模型设计与试验方案

试验模型设计与量测方案如图 3 所示,地基土为 400 mm 厚珊瑚礁砂,相对密实度 50%,采用砂雨法+分层压实法制备。碎石桩桩长 300 mm,相对密实度 70%,采用分层夯实法制备。试验模型地基内布设了一系列加速度和孔压传感器,还在碎石桩表面和桩周地表布设了位移计,以监测模型沉降变化。试验所用加速度计为美国 PCB 传感器,孔压计为中国地震局工程力学研究所自主研制分体式 DSP-II 传感器。

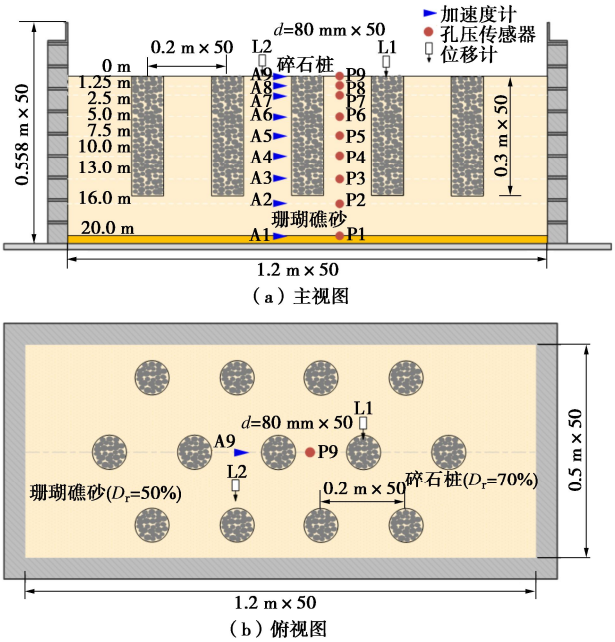


图3 试验模型及传感器布设方案

Fig. 3 Model configuration and layout of instruments

试验离心加速度为 $50g$ ，选取 LEAP 波、安评地震波为输入荷载，台面实测荷载时程如图 4 所示。安评地震波输入峰值分别为 $0.05g, 0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g, 0.53g$ 等工况，LEAP 输入峰值分别为 $0.05g, 0.1g, 0.2g, 0.3g$ 等工况，两种荷载交替输入。

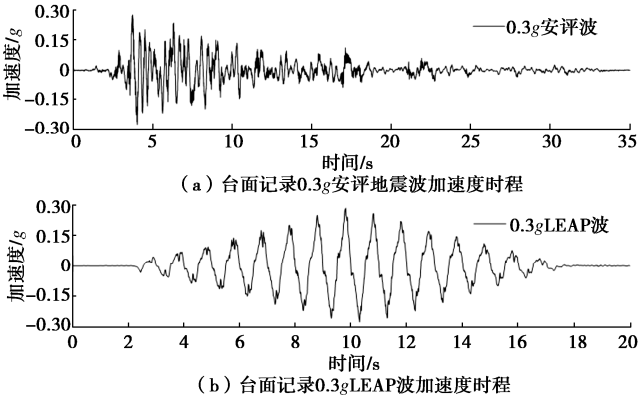


图4 台面实测两种荷载时程

Fig. 4 Records of two shaking motions at shaking table

2 碎石桩淤堵性分析

2.1 强震荷载下地基液化分析

试验模型在 7 条峰值 $\geq 0.2g$ 强震荷载下，埋深 1.25 m 处土体均发生了液化，即超静孔压达到了有效应力，而埋深 7.5 m 处超静孔压随着地震动强度增大而增大，但一直未达到该位置有效应力，未发生液化，如图 5 所示。

2.2 试验后模型开挖及碎石桩剖面

试验完成后沿模型中心剖面进行了开挖，获得了 5 根碎石桩剖面如图 6 所示。仔细观察和对比可发现，

碎石桩在试验过程中保持了良好形态，桩周末包裹珊瑚礁砂细粒，仍具备良好的渗透能力。图 6 给出了 5 根开挖后的代表性碎石桩剖面照片，可以直观看出碎石桩内颗粒分布均匀、色泽与桩周土体区分明显，由粗颗粒组成，均未出现明显细颗粒淤堵现象。

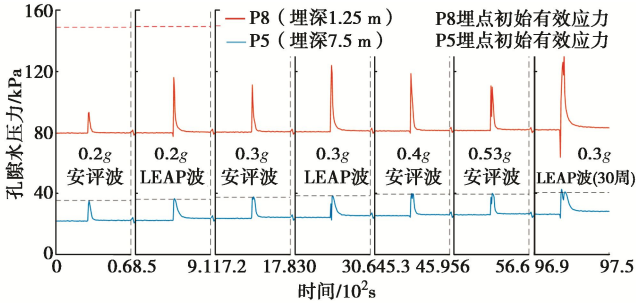


图5 序列强震荷载下孔隙水压力数据

Fig. 5 Records of pore water pressure under sequential strong motions

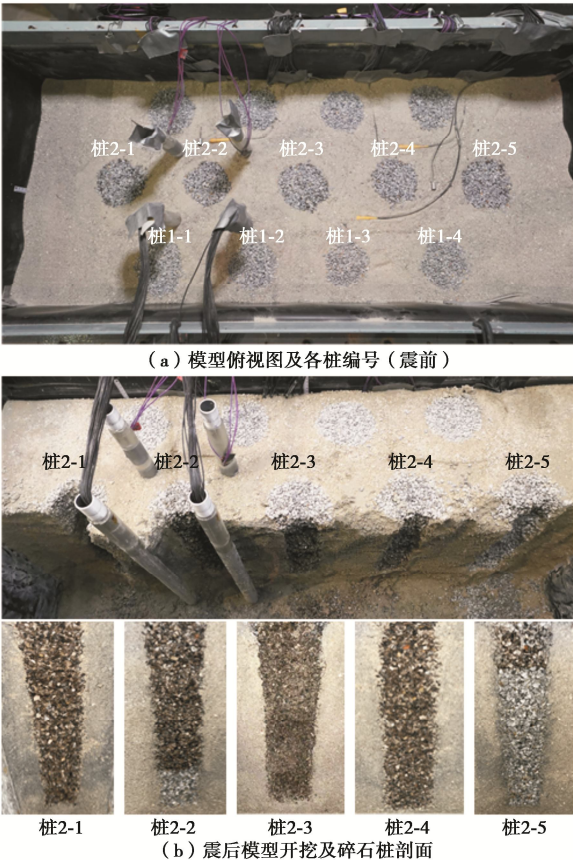


图6 震前试验模型与震后模型开挖及碎石桩剖面图

Fig. 6 Pre- and post-testing model with excavation of stone columns

2.3 试验前后碎石桩颗粒级配对比

以试验前后碎石桩粒组变化差异，判断是否产生了淤堵，试验前后分别作了碎石桩材料筛分试验，结果如图 7 所示，可以发现试验后碎石桩级配与试验前相比基本一致，表明细粒未渗入到碎石桩中，与前面

碎石桩剖面观察结果一致。

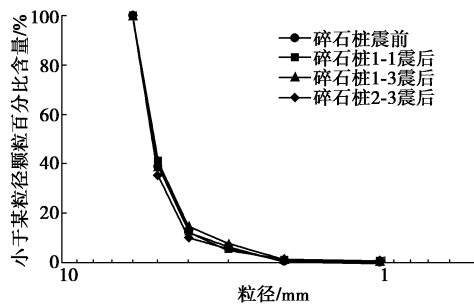


图7 震前、震后碎石桩级配对比

Fig. 7 Comparison of grain-size distribution of stone columns between pre- and post-motions

2.4 超静孔压比消散速率分析

选取图5中第1次0.2g和第6次0.53g安评地震波下埋深1.25 m和7.5 m处超静孔压比记录(如图8所示),计算分析多次强震作用下碎石桩排水性能的变化,以超静孔压比消散速率为表征参数,其公式如下:

$$v = \frac{\Delta r_u}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: Δr_u 为超静孔压比自峰值消散至0.1的变化量; Δt 为与超静孔压比消散对应的时间变化量。

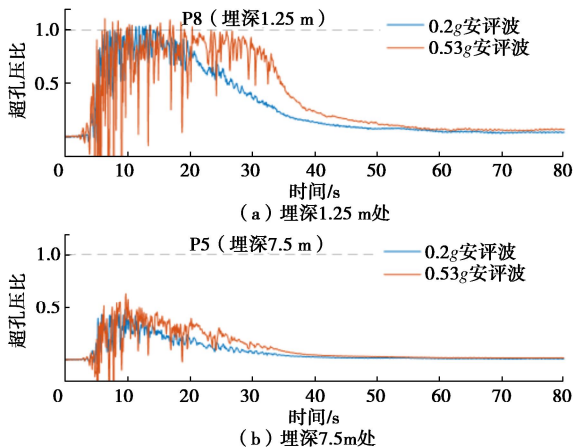


图8 0.2g和0.53g安评波下超静孔压比时程

Fig. 8 Time histories of excess pore pressure ratios induced by earthquake motions of 0.2g and 0.53g

通过式(1)计算,获得0.2g和0.53g安评波下,埋深1.25 m处超静孔压比的消散速率分别为 0.027 s^{-1} , 0.029 s^{-1} ; 7.5 m处超静孔压比消散速率分别为 0.021 s^{-1} , 0.020 s^{-1} ,可得知6次强震荷载下土层超静孔压比消散速率未发生变化,再一次证明了经历多次强震作用后,碎石桩仍能保持良好排水性能;同时,也证明了碎石桩长期服役下的良好抗液化能力。

3 结 论

(1)珊瑚礁砂碎石桩复合地基在7次 $\geq 0.2\text{g}$ 强震

荷载作用下均发生了液化,埋深1.25 m处超静孔压比均达到了1.0;7.5 m处未发生液化,但超静孔压比随着地震动强度的增大而增大。

(2)试验后开挖5根碎石桩剖面,直观观察可发现,碎石桩经历多次强震作用下仍能保持良好形态,且未明显发现细粒渗入碎石桩现象,试验前后获得碎石桩颗粒级配曲线基本一致,无明显变化。

(3)提出以超静孔压比消散速率表征地基排水能力,第1次和第6次安评波荷载下,埋深1.25 m处超静孔压比消散速率分别为 0.027 s^{-1} , 0.029 s^{-1} ,埋深7.5 m处分别为 0.021 s^{-1} , 0.020 s^{-1} ,表明碎石桩经历多次强震作用下仍具备良好的渗透能力,未出现淤堵现象。

参考文献:

- [1] ADALIER K, ELGAMAL A. Mitigation of liquefaction and associated ground deformations by stone columns[J]. Engineering Geology, 2004, 72(3/4): 275-291.
- [2] CHEN G X, LIANG K, ZHAO K, et al. Shear modulus and damping ratio of saturated coral sand under generalized cyclic loadings[J]. Géotechnique, 2022, 1-18.
- [3] XIAO P, LIU H, XIAO Y, et al. Liquefaction resistance of bio-cemented calcareous sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 107: 9-19.
- [4] 秦志光. 珊瑚礁砂地震液化特性与抗液化处理方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2021. (QIN Zhiguang. Seismic Liquefaction Characteristics of Coralline Sand and Its Ground Treatment Methods[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2021. (in Chinese))
- [5] 刘 凯. 倾斜场地碎石桩处理地基地震液化变形机理与评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022. (LIU Kai. Mechanism and Evaluation of Earthquake-Induced Deformation of Stone Column-Improved Liquefiable Sloping Ground[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese))
- [6] 土工离心模型试验技术规程: DL/T 5102—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014. (Specification for Geotechnical Centrifuge Model Test Techniques: DL/T 5102—2013[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014. (in Chinese))
- [7] 梁 珂, 何 杨, 陈国兴. 南沙珊瑚砂的动剪切模量和阻尼比特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 23-31, 38. (LIANG Ke, HE Yang, CHEN Guoxing. Experimental study of dynamic shear modulus and damping ratio characteristics of coral sand from Nansha Islands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 23-31, 38. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)