DOI：10.16285/j.rsm.2022.1354

珊瑚砂振冲密实加固响应室内模型试验研究

赵津桥[1,2]，丁选明[1,2]，刘汉龙[1,2]，欧 强[1,2]，蒋春勇[1,2]

（1. 重庆大学 土木工程学院，重庆 400045；2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室，重庆 400045）

摘 要：随着海洋岛礁工程的大力推进，吹填珊瑚砂地基的密实加固问题开始备受关注。利用自主研发的室内振冲器开展了珊瑚砂饱和砂土地基的室内振冲模型试验研究，深入分析了振冲过程中动孔隙水压力、水平动土压力等动参量的响应规律，探讨了振冲后沉降变形、相对密实度的变化特征。结果表明：松散珊瑚砂地基的密实度在经过两次双点振冲反复加固后均提升至中密。其中相对密实度在振冲点位处的提升效果较其余位置更为明显，并且中层或深层区域的加固效果优于表层区域。在超孔隙水压力方面，其最大值出现在振冲珊瑚砂地基过程中的贯入阶段，并且在留振开始时出现衰减现象。珊瑚砂地基在振冲器上拔过程中超孔隙水压力发生断崖式下跌。在第 2 次贯入时，超孔隙水压力比的峰值较首次出现显著下降。超孔隙水压力比等值线云图表明，振冲过程中的超孔隙水压力比等值线呈现平行分布。珊瑚砂浅层水平土压力随振冲器的贯入与拔出均呈现增加态势，深层水平土压力则呈现减少态势。

关 键 词：振冲法；室内试验；珊瑚砂；相对密实度；孔隙水压力；水平土压力

中图分类号：TU 470 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－7598 (2023) 08－2327－11

Laboratory experiment study on response of vibroflotation compaction of coral sand

ZHAO Jin-qiao[1,2], DING Xuan-ming[1,2], LIU Han-long[1,2], OU Qiang[1,2], JIANG Chun-yong[1,2]

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The treatment of the hydraulic fill coral sand ground starts to attracted a lot of attentions with the development of marine island reef engineering. By using self-developed laboratory vibroflotation instruments, vibroflotation tests on of saturated coral sands ground are conducted to analyze dynamic response regularity during vibro-compaction, such as dynamic pore water pressure and horizontal earth pressure. The characteristics of settlement and relative density are also investigated. The results indicate that loose coral sands can be improved to medium density after two times of double-point vibro-compaction; meanwhile, the most obvious effect to relative density appears at the point where vibrator works, and the middle or deeper areas are better improved than the surface areas. The maximal excess pore water pressure appears at the stage of vibrator penetration. The excess pore water pressure starts to attenuate at the beginning of vibration retention. A significant descend of excess pore water pressure happens when vibrator starts to lift. The peak excess pore water pressure of the second penetration is obviously smaller than that of first penetration. The excess pore water pressure ratio contours exhibits parallel distribution during vibro-compaction. The shallow horizontal earth pressure of coral sands shows an increase with both penetration and extraction of vibrator, while the deep horizontal earth pressure presents a decrease.

Keywords: vibroflotation; laboratory experiment; coral sand; relative density; pore water pressure; horizontal earth pressure

1 引 言

珊瑚砂作为一种广泛分布于热带海洋领域的特殊岩土材料，在我国的岛礁建设大背景下备受关注。珊瑚砂是由珊瑚遗骸或海洋生物骨架沉积而成，其主要成分为碳酸钙。区别于传统石英砂，珊瑚砂具有颗粒形状不规则、颗粒易破碎和内部多孔隙等复杂特性[1-4]。近几年来国内外针对珊瑚砂已开展了

收稿日期：2022-09-02 录用日期：2022-10-12
基金项目：国家自然科学基金（No. 41831282，No. 52108299，No. 51878103）；中国博士后科学基金（No. 2021M693740）。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41831282, 52108299, 51878103) and the Postdoctoral Science Foundation (2021M693740).
第一作者简介：赵津桥，男，1998 年生，硕士研究生，主要从事地基处理方面的研究。E-mail: zjqiao@cqu.edu.cn
通讯作者：丁选明，男，1980 年生，博士，教授，主要从事软土地基及桩基动力学特性方面的研究。E-mail: dxmhhu@163.com

一系列研究并取得了许多成果。Wang[5]、Peng[6]等开展了不同荷载作用下的桩体附近珊瑚砂颗粒破碎规律的相关研究。张鑫磊[7]、Ding[8]、Wu[9]等对珊瑚砂进行了振动台模型试验，研究了珊瑚砂地基在不同状态下的抗液化性能。

随着岛礁建设的发展，陆域吹填已被广泛应用于各种岛礁工程建设中。通过吹填自然形成的珊瑚砂场地含水率高，密实度小，不满足常规建筑物建设所需的地基承载力和沉降要求[10]。因此，有必要对岛礁吹填珊瑚砂地基进行地基密实加固处理。

当前各种地基处理技术发展迅速[11]。夏玉云等[12]研究表明，振动碾压虽对吹填珊瑚砂地基的地基承载力有提升效果，但其最佳处理深度仅为 0.5～1.5 m。贺迎喜等[13]进行了有关吹填珊瑚地基的振冲法和强夯法的现场试验，肯定了振冲法的显著加固效果。Ou[14]和 Ding[15]等研究了加筋土工格栅对珊瑚砂地基的加固作用。此外，国内外诸多学者已对各项地基处理技术的应用条件和加固效果进行了研究[16-18]，并结合大量实际工程后表明，振冲法可有效加固吹填珊瑚砂地基[19-21]。

振冲法是一种依靠振冲器所发出的反复激振力促使砂土发生液化并将砂土振动挤密的地基处理方法，主要分为振冲挤密法和振冲置换法[22]。振冲法自 1937 年在德国面世，由于其施工方便、成本低廉、工程实践性强等优点得到了广泛的推广与应用。李君纯等[23]在现场试验的基础上，将振冲法加固砂土的原理归结为振挤、浮振和固结三种作用原理。邱伟健等[24]对比多种振冲施工工艺应用于珊瑚砂地基后的静力触探试验（cone penetration test，CPT）结果得知，振冲加固后的珊瑚礁砂均具备良好的抗液化能力。周健等[25-26]研究了较差级配对振冲加固效果的影响，并证实在正确的施工工艺下饱和粉细砂仍能获得显著的振冲加固效果。由以上研究可知，振冲法对地基承载力、稳定性、抗液化能力均具有显著的提升效果。

目前，国内外有关振冲法的研究主要针对于振冲法的整体加固原理[27]、理论推导分析[28]和施工工艺对比[19, 21, 25]以及实际工程应用[29]，其中大量成果主要集中于理论研究以及现场工程试验所得到的经验结论。但是，对于振冲加固珊瑚砂场地地基的各项参数的动态响应以及变化规律研究尚不多见[26, 30]。

本文利用自主研发的室内振冲模拟系统[31-32]，对珊瑚砂吹填饱和地基开展了室内振冲模拟试验。通过采集振冲过程中的动孔压、水平土压力等动参量，并对振冲后的相对密实度进行检测，以探究得到珊瑚砂地基在振冲过程中的动力特性并分析振冲前后的场地性能的变化，为珊瑚砂场地地基处理设计提供一定的参考依据。

2 试验介绍

2.1 试验设备

重庆大学自主研发了室内振冲模拟试验系统，该系统包括振冲器、控制柜、吊装系统等。试验所采用的振冲器为变频式室内振冲模拟器。该振冲器直径为 60 mm，长度为 600 mm，振冲器侧壁标尺可控制升降速度，振冲频率范围为 0～50 Hz，主要施加水平振动。本次试验中，振冲器的振冲频率采用 25 Hz。振冲器的启动、停止由振冲模拟器控制柜控制；振冲器的升降由龙门架吊装系统控制。在整个试验过程中，导向器固定振冲位置并确保振冲器实现垂直升降，试验设备见图 1。

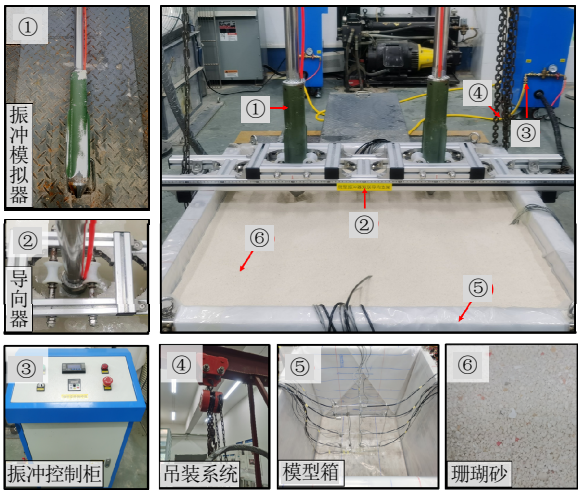


图 1 试验设备示意图

Fig.1 Testing apparatus

本次试验所选取的模型箱尺寸为 0.95 m×0.85 m×0.75 m（长×宽×高）。对试验进行数据采集的动态信号采集系统采用 DHDAS5921 采集仪（64 通道版）。

2.2 模型制备

本次试验采取珊瑚砂的基本物理参数如表 1 所示。珊瑚砂颗粒级配曲线如图 2 所示，所用珊瑚砂颗粒直径大于等于 0.25 mm 的颗粒含量大于总质量的 50%，属于中粗珊瑚砂。

表 1 珊瑚砂基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of coral sands

平均粒径 d_{50} / mm	不均匀系数 C_u	土粒相对密度 G_s	最大干密度 ρ_{dmax} / (g·cm^{-3})	最小干密度 ρ_{dmin} / (g·cm^{-3})
0.454	2.02	2.81	1.582	1.279

Thorburn[33]提出了适用于振冲挤密的颗粒级配的较广范围；在此基础上，Mitchell[34]总结了振冲挤密的最佳颗粒级配范围。由图 2 可知，试验所用颗粒级配绝大部分位于振冲密实的最佳颗粒级配（区域 B）内，区域 A 和区域 C 的颗粒分布分别过细或过粗。

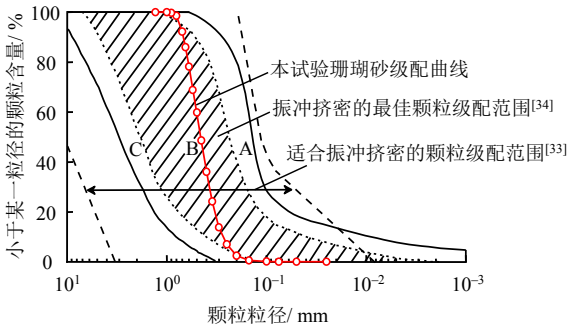


图 2　珊瑚砂颗粒级配曲线

Fig.2　Grain-size distribution curves of coral sands

为确保模型试验不同组的相对密实度一致，采用砂雨法对模型地基进行制备。马险峰等[35]表示，砂雨器与砂面间距离为影响模型地基相对密实度的主要因素。为模拟出接近吹填时的松散状态，砂雨器在制备模型砂土地基过程中始终保持与砂面紧贴。并在此过程中保证其余影响因素如流量、砂雨器移动速度等不变。通过砂雨法将模型地基的砂层厚度填筑至 700 mm。待模型地基制备完成后，对模型地基持续灌水直至液面高于砂体表面，以还原现场振冲施工条件[19]。将饱水状态下的松散模型地基静置 24 h，此时的模型地基可视为充分饱和状态，此举有利于提高振冲加固效果。

计算珊瑚砂地基密度，得到模型地基的相对密实度，同时可以计算得到初始状态下的天然重度与饱和重度。初始模型地基的相关参数见表 2。

表 2　初始模型地基参数

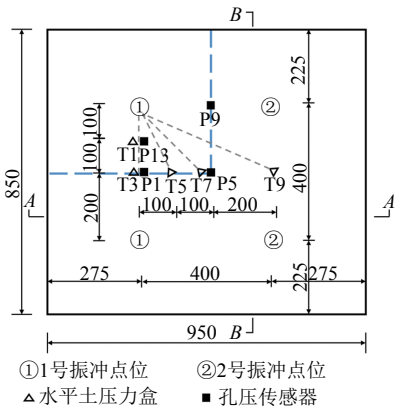
Table 2　Parameters of initial model ground

天然干密度ρ / (g·cm^{-3})	相对密实度 D_r / %	重度γ / (kN·m^{-3})	浮重度γ' / (kN·m^{-3})
1.366 4	28.9	17.01	7.01

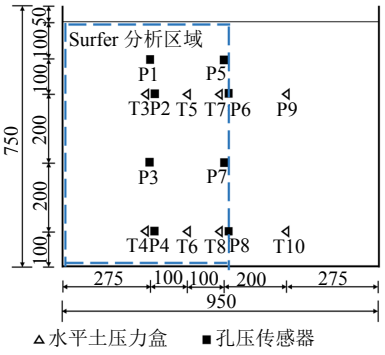
2.3　试验工况与传感器布置

本次室内模拟试验的振冲加固试验平面布置如图 3(a)所示，振冲方式采用双点振冲。振冲前，将导向器固定于 1 号振冲点位，以确保振冲器能在预设点位上下垂直运动。试验开始后，控制两台振冲器以 1 cm/s 同步匀速下降，第 1 次下降深度为 70 cm，并留振 120 s。振冲器留振结束后，以 1 cm/s 同步匀速上升至振冲头离开液面。5～10 s 后，进行第 2 次下降，以相同速度下降 50 cm 后留振 120 s，并匀速上升至振冲头离开液面。第 3 次下降深度为 30 cm，留振时间为 120 s。待 1 号振冲点位完成后，移动导向器至 2 号振冲点位，重复 1 号振冲点位的试验操作流程。

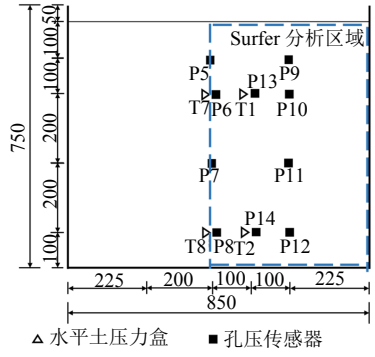
本试验的传感器布置见图 3(b)、3(c)。孔隙水压力计布置于 4 个不同的平面位置，并在深度方向分 4 层布置，记作 P；土压力盒分两层布置，记作 T。如图 3(a)所示，土压力盒统一朝向左上角的 1 号振冲点位。图 3 所示的蓝色虚线框为 3.2 节中的振冲过程超孔压比空间分布的等高线云图分析区域。



(a)　平面布置示意图



(b) *A-A* 剖面布置示意图



(c) *B-B* 剖面布置示意图

图 3　模型布置示意图（单位：mm）

Fig.3　Schematic of the model setup (unit: mm)

3 试验现象

3.1 振冲过程现象分析

图 4 呈现了珊瑚砂场地振冲过程中所发生的宏观现象。试验开始前模型地基表面已充分浸润，确保整体处于饱和状态，如图 4(a)所示。随着振冲器开始工作，积水大量涌出。珊瑚砂因含有少量粉细颗粒而出现浑浊现象，表面伴随大量浮沫出现。振冲 1 号点位时，1 号振冲点位周围砂土发生明显沉降，2 号振冲点位周围砂土几乎没有变化，1 号点位至 2 号点位过渡区域形成边坡状砂面。珊瑚砂在 1 号振冲点位每次留振结束后的地表沉降如表 3 所示。珊瑚砂第 2 次留振结束和第 3 次留振结束后的地表沉降分别为第 1 次的 33%和 13.3%。由此可见，振冲器对松散砂土所造成的最大沉降发生在第 1 次留振过程中，并且沉降高度随留振次数的增加在逐渐减弱。

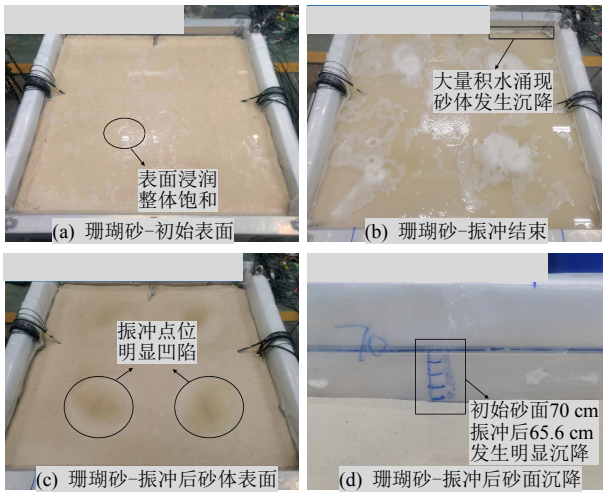


图 4 振冲试验过程场地宏观现象

Fig.4 Macrophenomena of model ground during vibro-compaction

表 3 逐次留振结束后地表沉降（单位: mm）

Table 3 Ground surface settlement after completion of successive vibration retention (unit: mm)

第 1 次留振结束	第 2 次留振结束	第 3 次留振结束	累计
30	10	4	44

振冲结束后，模型地基表面如图 4(b)所示，表面蓄积着大量振冲过程所涌出的水，并可观察到珊瑚砂地基已发生明显沉降。将涌出液体清理后，观察到振冲点位处有明显凹陷，这是由振冲器拔出后砂土自行回填形成的，如图 4(c)所示。试验后珊瑚砂所发生沉降如图 4(d)所示。

3.2 相对密实度变化

珊瑚砂的相对密实度由振冲前的 28.9%提升至振冲后的 59.1%，提高了 104.5%，效果显著。采用环刀取样法对加固后的模型地基进行了不同位置、沿深度方向的相对密实度测量。测量方式为：在不同位置对埋深 10～60 cm 之间每间隔 10 cm 进行环刀取样，通过环刀所测得的干密度换算得到相对密实度。表 4 为珊瑚砂地基振冲后不同平面位置沿深度方向的相对密实度。

表 4 振冲后沿深度的相对密实度

Table 4 Relative density along the depth after vibro-compaction

地基深度 / mm	珊瑚砂相对密实度/%		
	振冲点位	双点振冲中心点	1 号与 2 号振冲中心
初始值	28.9	28.9	28.9
100	54.7	43.9	49.3
200	57.4	53.3	51.7
300	58.9	42.2	47.2
400	56.9	46.8	58.9
500	62.3	48.2	44.3
600	62.5	49.6	46.0

根据表 4 作相对密实度随深度变化曲线，如图 5 所示。

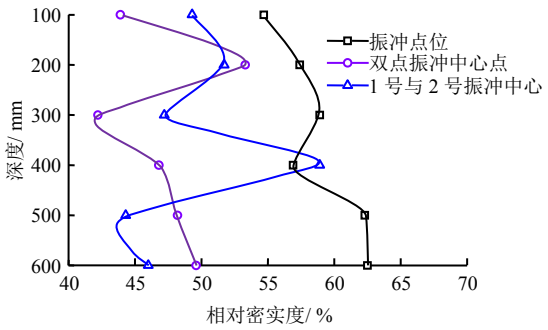


图 5 相对密实度沿深度变化

Fig.5 Variation of relative density along depth

由图 5 可见，在两次双点振冲加固后，珊瑚砂地基的相对密实度在横向的空间分布上均表现出以下特征：①相较于其他两组位置，相对密实度在振冲点位处得到了显著的提升，其中珊瑚砂在振冲点位处的相对密实度约为其他点位的 1.077～1.406 倍；②双点振冲中心点（孔压计 P1～P4 所在位置）的相对密实度在浅层大于两次振冲点位的中间位置（孔压计 P9～P12 所在位置），但在深层前者小于后者。

图 5 同样可以看出，珊瑚砂地基的相对密实度在纵向分布的规律：①振冲加固表层区域（100 mm）

的加固效果普遍比中间加固区域（400 mm）弱，这与现场试验所得出的表层加固效果不佳一致[19]；②不同平面位置的相对密实度在不同深度表现出相同的变化规律。笔者认为，发生上述现象的主要原因是在振冲器抽离过程中，表层加固区域所形成的砂土空缺没有上层砂土对其进行回填补充，从而导致表层加固区域相对于下部较为松散。其次，表层加固区域在振冲器上拔阶段具有振松趋势，并且上覆荷载的不足导致没有足够的外部荷载对振松砂土进行压实稳定。因此，工程上建议在振冲后对表层砂土地基再适当采用其他方式（如夯实）进行加固[23, 36]。

4　试验结果分析

4.1　振冲超孔压（比）时程分析

为了系统研究珊瑚砂振冲过程超孔压（比）随时间的变化趋势，本文选取位于 1 号振冲点位的两台振冲器中心位置埋深 400 mm 处的 P3 测点进行分析。P3 的超孔压（比）时程曲线见图 6，其中超孔压比 $\Delta u / \sigma'$ 是指超孔隙水压力与竖向有效应力的比值。

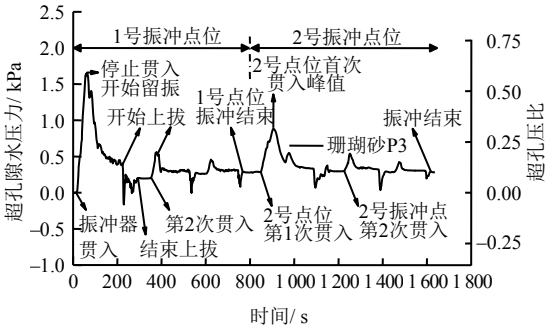


图 6　振冲过程超孔压（比）时程曲线

Fig.6　Time history curve of excess pore water pressure(ratio) during vibro-compaction

每次振冲过程都可分为贯入、留振、上拔 3 个阶段，本次试验振冲器在 1 号振冲点位和 2 号振冲点位分别完成 3 次总计 6 次完整的振冲过程。各阶段已根据实际试验中所对应的时间在图 6 中得到标注。由图可见，珊瑚砂地基的超孔压（比）随振冲过程发生以下几处值得关注的变化规律：

（1）振冲器在 1 号振冲点位开始首次贯入，超孔隙水压力迅速上升，并达到整个加固过程的最大值 1.683 kPa（对应超孔压比 0.6），该值明显高于留振阶段开始后所达到最大的超孔隙水压力 0.56 kPa。

（2）振冲器停止贯入并开始第 1 次留振时，超孔隙水压力持续下降并且下降速率呈现减缓趋势。

（3）开始上拔振冲器瞬间，超孔隙水压力发生断崖式下降，并逐渐上升至稳定值，稳定值均大于 0。

（4）振冲器在 1 号振冲点位的后两次加固过程中，贯入阶段的超孔压峰值较首次贯入出现大幅度下降。但对比后两次贯入峰值可知，第 3 次贯入峰值较第 2 次未出现明显的下降。后两次加固的留振阶段中超孔压陆续出现小幅度的下降。并且在上拔阶段开始时，超孔压均发生断崖式下降，随后持续上升至稳定值。

（5）振冲器在 2 号振冲点位整体作用过程，超孔隙水压力变化规律与作用于 1 号振冲点位时相同，但数值大小较 1 号振冲点位均有降低。

由图 6 所示时程曲线可分析得知：

（1）贯入阶段，振冲器对饱和砂体的挤压作用可产生显著的超孔隙水压力，其数值明显大于留振阶段，此时振冲器对珊瑚砂的加固效应为振挤作用[23, 27]，此举有助于将砂土挤入孔壁，提高土体密实度。

（2）留振阶段，砂体在首次留振开始前仍处于松散状态，超孔隙水压力先出现明显下降趋势。因荷载条件下，相对密实度越低，越易产生超孔隙水压力[20]。振冲器留振过程中，相对密实度提升并逐渐稳定，超孔隙水压力下降趋势开始减缓，此时为振冲加固的预振效应[37]。

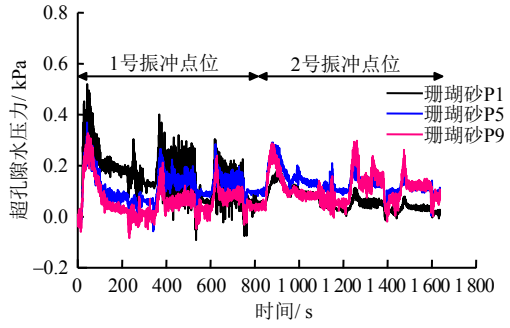
（3）上拔阶段，笔者认为超孔隙水压力出现断崖式下降的原因在于，振冲器上拔会在砂土地基中突然形成原本留振阶段振冲器所占据的空腔，导致原本挤压密实的砂体瞬间变得松散，孔隙水压力计周围孔隙水得以流畅地排出。

（4）将第 2、3 次加固过程与第 1 次加固进行对比，振冲器在第 1 次加固时效果明显，珊瑚砂地基相对密实度得到显著提升，从而出现第 2、3 次加固时超孔隙水压力整体明显下降，这与宏观现象砂面随振冲加固次数的变化规律相对应。

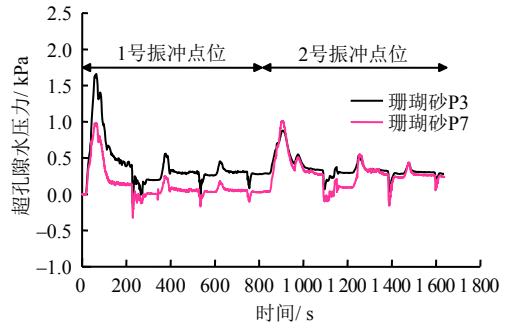
为研究珊瑚砂振冲过程中浅层位置超孔压时程变化规律，本文以埋深均为 100 mm 的 P1、P5、P9 为研究对象，如图 7(a)所示。在 1 号振冲点位作用时，处于两台振冲器作用正中心的 P1 在贯入阶段和留振阶段的超孔压均明显高于距离较远的 P5、P9，而超孔压在 P5 位置高于 P9。因距离变大，P1 位置超孔压在振冲器作用 2 号振冲点位时出现下降。对比而言，处于 1 号振冲点位与 2 号振冲点位中间的 P5、P9 超孔压值大小及变化规律则几乎完全相同。另外，浅层的超孔压峰值随加固次数的增

加而减少的现象较深层减弱。这种现象的产生是由于表层上覆压力小，容易被振冲器反复振松，从而无法达到密实状态，导致超孔压没有明显变化。同时，浅层的超孔压变化均没有明显的断崖式下降现象。这是因为振冲过程中浅层砂土可通过表层排出孔隙水并且振冲器在最后阶段才脱离浅层砂土。

图 7(b)为珊瑚砂场地深层位置的超孔压时程曲线。由图 7(b)可知，与 P3 位置的超孔压时程相比较，P7 在两次振冲作用过程中的超孔压变化规律几乎相同。当振冲器加固 1 号振冲点位时，整体加固范围有限，致使 2 号振冲点位附近仍处于松散状态。当振冲器在加固 2 号振冲点位时，处于两个振冲点位中心的 P7 在整体规律上与加固 1 号振冲点位时基本相同。与此同时，在加固 2 号振冲点位时，P7 三次贯入所产生的超孔压都较 1 号振冲点位偏高。这是由于当振冲器加固 2 号振冲点位时，1 号振冲点位附近已被加固得较为密实，孔隙水向密实砂土地基排出难度比松散地基大，导致超孔压整体增大。



(a) 浅层位置超孔压时程曲线



(b) 深层位置超孔压时程曲线

图 7 珊瑚砂超孔压时程曲线

Fig.7 Time history curves of excess pore water pressure of coral sand

4.2 振冲超孔压（比）空间分布分析

已有研究认为振冲加固砂土很重要的一个作用机制是：通过使砂土层发生短暂液化，从而发生颗粒重分布，从高势能向低势能转移以达到密实状态[22, 30]。进一步，Greenwood 等[38]将振冲器侧壁向外随加速度大小变化分为 5 个区域，依次为剪胀区、流态区、过渡区、挤密区以及弹性区。其中土颗粒在过渡区和挤密区能通过保持联接的砂土骨架传递振动力，为有效加固区域。有研究表明[19]，当超孔压比 $\Delta u/\sigma' = 0.6\sim1.0$ 时，处于加固的过渡区；当超孔压比 $\Delta u/\sigma' = 0.5\sim0.6$ 时，处于加固的挤密区。即 $\Delta u/\sigma' = 0.5\sim1.0$ 为液化机制加固砂土的有效区域。本小节仅分析液化作用在两次双点振冲的不同阶段下对珊瑚砂砂土地基的影响。

图 8 为珊瑚砂地基在不同深度的超孔压比峰值对比图。由图可见，超孔压比峰值在 1 号点位首次贯入时最大，2 号点位首次贯入时次之，1 号点位首次留振阶段最小。

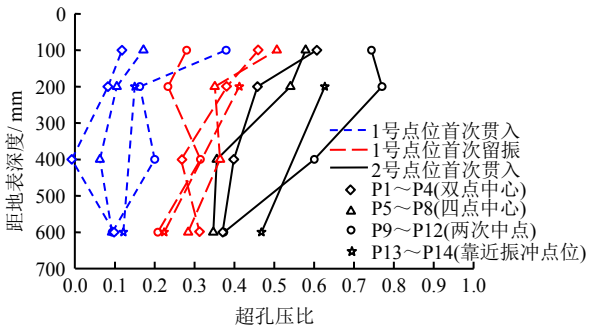


图 8 珊瑚砂不同埋深处超孔压比峰值

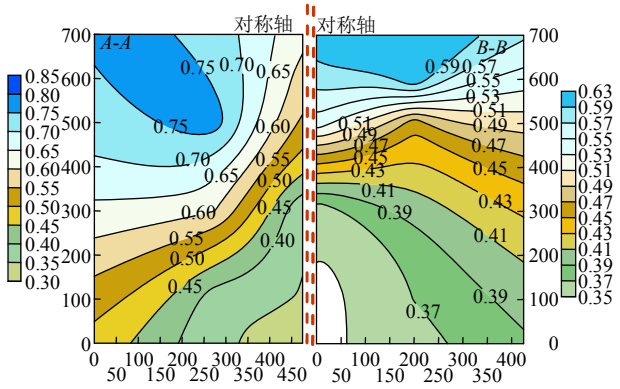
Fig.8 Peaks of excess pore pressure ratio of coral sand at different depths

1 号振冲点位首次贯入的超孔压比峰值如图 8 黑色实线线段所示。在整个贯入阶段，大部分超孔压比大于 0.4，说明松散珊瑚砂地基在加固的首次贯入阶段已开始大范围对砂土有加固效果。在同一水平位置的不同深度，浅层加固区域的超孔压比均高于深层区域。在浅层加固区域，处于双点振冲中心的 P1、P2、P3 的超孔压比明显大于其余位置，甚至大于距离振冲器更近的 P13，这源于两台振冲器的同时挤压。整个过程中，P5～P8 和 P9～P12 的变化规律相似。

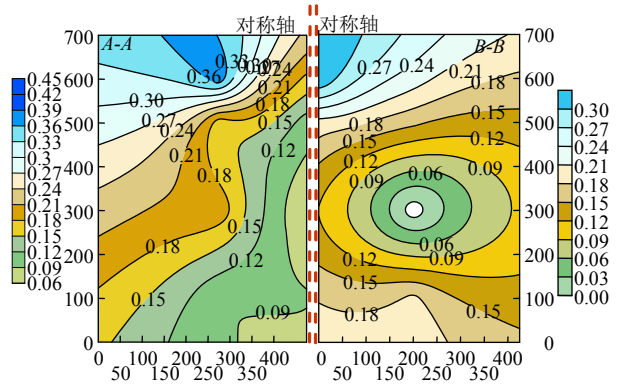
图 8 中短虚线对比了留振阶段不同深度监测点超孔压比峰值，可以清晰看到此时不同水平位置超孔压比的差异。除埋深 100 mm 处仍有显著差异外，埋深 200 mm 处 P2 与 P13 的超孔压比较相近，说明留振过程中振动液化作用在双点振冲中心（P2）与靠近振冲器位置（P13）具有相同的加固效果。埋深 600 mm 的深层加固区域的规律与贯入阶段相似。图 8 中长虚线为振冲器在 2 号振冲点位首次贯入时的峰值超孔压比分布情况。因振冲器移动，

P1～P4 与振源距离增大，导致 P1～P4 整体超孔压比弱于其他位置。此时超孔压比仍存在表层高于深层的现象，此现象与贯入 1 号点位时相似。

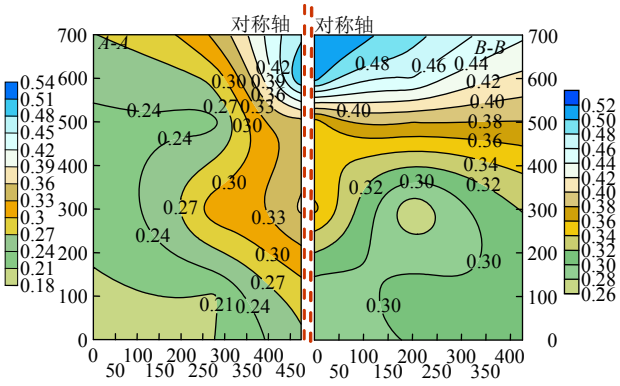
图 9 是采用 Surfer 中的 Kriging gridding 方法所预测的振冲过程超孔压比空间分布的等值线云图。等值线云图可以更清晰地认识超孔压比在振冲过程中随空间的变化规律。由图 9 可知，当振冲器作用于 1 号振冲点位时，如图 9(a)、9(b)所示，*A-A* 截面分析区域的等值线为左低右高式平行排布，表明了



(a) 1 号振冲点首次贯入



(b) 1 号振冲点首次留振



(c) 2 号振冲点首次贯入

注：截面长度单位为 mm。

图 9　超孔压比预测分布等值线图

Fig.9　Contour plots of the predicted distribution of the excess pore pressure ratio

此时超孔隙水压力呈现沿左上方向右下方的衰减趋势，正好符合振冲器作用于 1 号振冲点位时超孔隙水压力由浅到深、从大变小的规律；而当振冲器作用于 2 号振冲点位时，如图 9(c)所示，*A-A* 截面分析区域的等值线为左高右低式平行排布，表明了此时超孔隙水压力沿右上方向左下方的衰减趋势，同时符合振冲器作用于 2 号振冲点位时超孔隙水压力在 *A-A* 截面附近的变化规律。在 *B-B* 截面，3 种情况下的等值线均在振冲点位位置埋深 200～500 mm 处形成平行态势。中部等值线差异是双点振冲中心位置有两台振冲器共同耦合作用的结果。但当位置向边界方向延展时，*B-B* 截面所展示的超孔压比等值线逐渐变为相互平行。

4.3　振冲土压力时程分析

为研究振冲过程对珊瑚砂水平土压力变化的影响，本文选取位于浅层的 T1、T5 和 T9 和位于深层的 T2、T6 和 T10 进行对比分析，土压力时程分布结果如图 10 所示。本次选取珊瑚砂模型地基整体处于初始松散状态的 1 号振冲点位第 1 次振冲的贯入、留振以及上拔阶段，整个过程为振冲器作用的前 350 s。水平土压力的增长主要源于外力的挤压、土体自身压力的增加以及动应力的传递，水平土压力的降低则主要是土体的流失。本小节致力于通过观察振冲过程中砂土地基的水平土压力变化获取振冲致使土体发生的空间位置变化。

由图 10(a)可知，振冲器贯入阶段，浅层的 T1、T5 水平土压力均随振冲器的贯入呈现正向增长趋势，并且随着水平土压力监测点与振源的距离增大，水平土压力峰值从 T1 的 4.257 kPa 下降至 T2 的 1.926 kPa。两台振冲器的同时贯入是 T1、T5 土压力增大的主要原因。留振阶段，T1 与 T5 未发生较大改变。相反，同样位于浅层但距离振冲点位最远的 T9 在贯入阶段和留振阶段水平土压力持续下降，从 0 下降至–1.35 kPa，表明位于 T9 的土体在该时段存在小范围向其他位置转移的趋势。进一步可知 2 号振冲点位有小部分砂土在留振阶段向 1 号点位移动。当振冲器上拔时，浅层水平土压力均有上升，其中上拔阶段对 T1 引起的土压力增加大于贯入阶段，且 T9 水平土压力增大 2.07 kPa。结合 3.1 节超孔压比时程曲线可知，出现上述现象的原因是首次贯入时砂土过于松散，部分土体已处于完全液化状态，应力传递能力有限，当上拔时超孔压比已下降，从而可有效传递振冲器的激振力，使得 T9 的水平土压力在振冲器上拔阶段有明显增加。

深层的水平土压力变化不同于浅层，见图 10(b)，

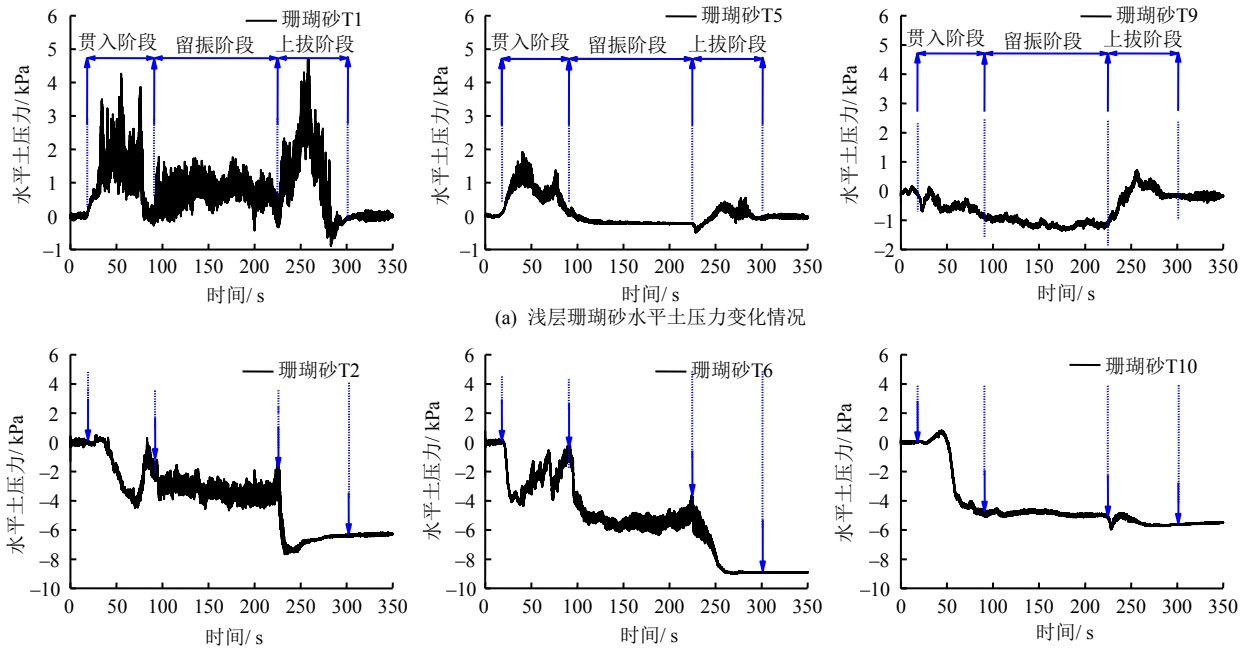


图 10 珊瑚砂水平土压力时程曲线

Fig.10 Time history curves of the horizontal earth pressure for coral sand

T2、T6 在振冲器开始贯入时发生明显下降，且下降幅值均为 4 kPa 左右，T10 在轻微上升 0.8 kPa 后才出现 6 kPa 的下降。T2、T6 发生水平土压力的下降主要是土体的位置变动，后期得到增加是源于振冲器的贯入挤压。留振阶段对于深层的水平土压力影响不大，此时水平土压力始终维持相对稳定。当上拔开始时，T2、T6 都存在着较大的水平土压力减少，但 T2 附近相较于 T6 在土压力减少后存在持续上升趋势，这是因为 T2 在振冲点位附近，存在持续不断的砂土回填和振动加固，使得水平土压力得到了持续提升。总之，不同于浅层的水平土压力增加，深层水平土压力在贯入阶段均出现了较大程度的减少。在上拔阶段，振冲器上拔对处于 1 号振冲点位附近的 T2、T6 有明显的压力变化，但上拔过程对远处的 T10 影响不大。

5 结 论

本文基于自主研发的室内振冲模拟器，开展了珊瑚砂地基振冲密实加固试验研究，分析了振冲加固过程中的宏观现象、超孔隙水压力时程变化、超孔压比空间分布、土压力等变化规律，同时探讨了加固后整体相对密实度和分层相对密实度的变化。主要得出以下结论：

（1）首次振冲贯入留振所产生的沉降最大，是第 2 次振冲结束所产生沉降的 3 倍左右。且随振冲次数的增大，沉降增加量越小。振冲加固使得珊瑚砂地基由初始的疏松状态加固达到中密状态。

（2）平面位置上，振冲点位处经振冲加固后的相对密实度为其他位置的 1.077～1.406 倍。双点振冲中心点与先后两次振冲的中心位置的加固效果无明显差异；沿深度方向上，振冲加固对珊瑚砂地基表层的相对密实度提升效果比中部或底部加固区域的效果偏弱。

（3）振冲器在首次贯入珊瑚砂砂土地基时所产生的超孔隙水压力远大于留振阶段。并且超孔压在首次留振开始时出现大幅度降低。振冲器上拔会伴随超孔隙水压力断崖式下跌的现象出现，但随后超孔隙水压力会持续上升至稳定值。

（4）在珊瑚砂地基的振冲过程中，表层超孔压比始终大于深层。贯入阶段，两台振冲器中心位置的超孔压比最大；留振阶段，双点振冲中心点的超孔压比与振冲器附近超孔压比相同。这表明就抗液化作用而言，双点振冲中心点位置可达到单点振冲附近的加固效果。

（5）珊瑚砂地基的水平土压力在振冲过程中表现为浅层随振冲阶段普遍上升，深层随振冲阶段普遍下降。并且对水平土压力影响最大的是振冲器的贯入与上拔。在振冲器留振阶段，没有观察到水平土压力发生明显的变化趋势。

参 考 文 献

[1] 刘汉龙, 胡鼎, 肖杨, 等. 钙质砂动力液化特性的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(6): 707-711, 725. LIU Han-long, HU Ding, XIAO Yang, et al. Test study on

dynamic liquefaction characteristics of calcareous sand[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2015, 35(6): 707-711, 725.

[2] 刘崇权, 杨志强, 汪稔. 钙质土力学性质研究现状与进展[J]. 岩土力学, 1995, 16(4): 74-84.
LIU Chong-quan, YANG Zhi-qiang, WANG Ren. Current status and development of calcareous soil mechanical properties research[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1995, 16(4): 74-84.

[3] 蒋春勇, 丁选明, 陈信升, 等. 海洋珊瑚黏土岩土特性的室内研究(英文)[J]. **Journal of Central South University**, 2022, 29(2): 572-581.
JIANG Chun-yong, DING Xuan-ming, CHEN Xin-sheng, et al. Laboratory study on geotechnical characteristics of marine coral clay[J]. **Journal of Central South University**, 2022, 29(2): 572-581.

[4] 刘崇权, 汪稔. 钙质砂在三轴剪切中颗粒破碎评价及其能量公式[J]. 工程地质学报, 1999, 7(4): 366-371.
LIU Chong-quan, WANG Ren. Evaluation of particle breakage and energy formula of calcareous sand in triaxial shear[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1999, 7(4): 366-371.

[5] WANG Chun-yan, DING Xuan-ming, YIN Zhen-yu, et al. Mechanical characteristics and particle breakage of coral sand under one-dimensional repeated loading[J]. **Acta Geotechnica**, 2022, 17(7): 3117-3130.

[6] PENG Yu, LIU Han-long, LI Chi, et al. The detailed particle breakage around the pile in coral sand[J]. **Acta Geotechnica**, 2021, 16(6): 1971-1981.

[7] 张鑫磊, 陈育民, 张喆, 等. 微生物灌浆加固可液化钙质砂地基的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1023-1031.
ZHANG Xin-lei, CHEN Yu-min, ZHANG Zhe, et al. Performance evaluation of liquefaction resistance of a MICP-treated calcareous sandy foundation using shake table tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(6): 1023-1031.

[8] DING Xuan-ming, ZHANG Yan-ling, WU Qi, et al. Effects of groundwater level on the seismic responses of coral sand ground and superstructure by shaking table tests[J]. **Acta Geotechnica**, 2022, 17(7): 3047-3066.

[9] WU Qi, DING Xuan-ming, CHEN Zhi-xiong, et al. Shaking table tests on seismic responses of pile-soil-superstructure in coral sand[J]. **Journal of Earthquake Engineering**, 2022, 26(7): 3461-3487.

[10] 夏玉云, 乔建伟, 张炜, 等. 马尔代夫吹填珊瑚砂地基现场试验研究[J]. 工程勘察, 2021, 49(1): 19-24.
XIA Yu-yun, QIAO Jian-wei, ZHANG Wei, et al. Field experimental study of reclaimed coral sand ground in Maldives[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2021, 49(1): 19-24

[11] 刘汉龙, 赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 96-115.
LIU Han-long, ZHAO Ming-hua. Review of ground improvement technical and its application in China[J]. **China Civil Engineering Jounal**, 2016, 49(1): 96-115.

[12] 夏玉云, 乔建伟, 刘争宏, 等. 振动碾压对吹填珊瑚砂地基工程特性影响的试验研究[J]. 地基处理, 2020, 31(4): 277-284.
XIA Yu-yun, QIAO Jian-wei, LIU Zheng-hong, et al. Experimental study on the influence of vibration rolling on engineering behaviors of dredged coral sand foundation[J]. **Chinese Journal of Ground Improvement**, 2020, 31(4): 277-284.

[13] 贺迎喜, 董志良, 王伟智, 等. 沙特 RSGT 码头项目吹填珊瑚礁地基加固处理[J]. 水运工程, 2010(10): 100-104.
HE Ying-xi, DONG Zhi-liang, WANG Wei-zhi, et al. Reinforcement and treatment for coralline ground in port project of Saudi Arabia[J]. **Port & Waterway Engineering**, 2010(10): 100-104.

[14] OU Qiang, LI Yi-fu, YANG Yang, et al. Mechanical property of biomodified geogrid and reinforced calcareous sand[J]. **Geofluids**, 2022(2022): 1-12.

[15] DING Xuan-ming, LUO Zhao-gang, OU Qiang. Mechanical property and deformation behavior of geogrid reinforced calcareous sand[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2022, 50(4): 618-631.

[16] MASSARSCH K RAINER, WERSÄLL CARL, FELLENIUS BENGT H. Horizontal stress increase induced by deep vibratory compaction[J]. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering**, 2020, 173(3): 228-253.

[17] 秦志光, 袁晓铭, 曹振中, 等. 吹填珊瑚礁砂地基处理方法适用性与加固效果应用研究[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(1): 78-88.
QIN Zhi-guang, YUAN Xiao-ming, CAO Zhen-zhong, et al. Applicability and quality evaluation of foundation treatment method for backfilled coral sand site[J]. **Journal of Natural Disasters**, 2021, 30(1): 78-88.

[18] WANG Zeng-liang, ZHOU Hang, FRANZA ANDREA, et al. Numerical evaluation of scour effects on lateral behavior of pile groups in clay[J]. **Computers and Geotechnics**, 2022, 150: 104913.

[19] 陈越峰, 周健, 张庆贺, 等. 深厚吹填粉细砂地基加固试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1387-1392.
CHEN Yue-feng, ZHOU Jian, ZHANG Qing-he, et al. In-situ test research of improving ground on deep filled silty fine sands[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1387-1392.

[20] 何开胜, 过兴发. 吹填粉细砂的无填料振冲密实试验与工程应用[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1129-1133.
HE Kai-sheng, GUO Xing-fa, Test and application of vibro-compaction of dredging silty fine sands without additional backfill materials[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(4): 1129-1133.

[21] 邱伟健, 杨和平, 贺迎喜, 等. 珊瑚礁砂作地基吹填料及振冲加固试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1517-1523.
QIU Wei-jian, YANG He-ping, HE Ying-xi, et al. Experimental study on coral reef sand as hydraulic filling materials for foundation and its vibroflotation compaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(8): 1517-1523.

[22] 周健, 王冠英, 贾敏才. 无填料振冲法的现状及最新技术进展[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 37-42.
ZHOU Jian, WANG Guan-ying, JIA Min-cai. Situation and latest technical progress of vibroflotation without additional backfill treatment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 37-42.

[23] 李君纯, 郦能惠, 朱家谟, 等. 振冲法加固砂壳坝试验研究[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(4): 1-16.
LI Jun-chun, LI Neng-hui, ZHU Jia-mo, et al. Experimental study on reinforcement of sand shell dam by vibrofting method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1982, 4(4): 1-16.

[24] 邱伟健, 杨和平, 刘岩, 等. 振冲挤密加固深厚吹填珊瑚礁砂地基试验研究[J]. 地震工程学报, 2021, 43(2): 459-467.
QIU Wei-jian, YANG He-ping, LIU Yan, et al. Experimental study on the reinforcement of deep filled coral reef sand foundation vibroflotation compaction method[J]. **China Earthquake Engineering Journal**, 2021, 43(2): 459-467.

[25] 周健, 崔积弘, 贾敏才, 等. 吹填细砂软弱地基处理试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 859-864.
ZHOU Jian, CUI Ji-hong, JIA Min-cai, et al. In-situ test study on ground treatment of hydraulic fine soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(4): 859-864.

[26] 周健, 胡寅, 林晓斌, 等. 粉细砂的室内无填料振冲试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 790-794.
ZHOU Jian, HU Yin, LIN Xiao-bin, et al. Laboratory test of vibroflotation on hydraulic backfilled silty and fine sand without backfill[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(5): 790-794.

[27] 郑建国. 振动挤密桩桩距对振密变形的影响[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(增刊 1): 94-99.
ZHENG Jian-guo. Influence of pile spacing on vibration compaction deformation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1992, 14(Suppl.1): 94-99.

[28] 缪林昌, 刘松玉. 振冲动力法加固地基的机理[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(4): 71-74.
MIAO Lin-chang, LIU Song-yu. Mechanism of foundation reinforcement by vibroflot dynamic method[J]. **Jounal of Southeast University (Natural Science Edition)**, 2001, 31(4): 71-74.

[29] MASSARSCH K RAINER, FELLENIUS BENGT H. Evaluation of vibratory compaction by in situ tests[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2019, 145(12): 05019012.

[30] 楼晓明, 于志强, 徐士龙. 振冲法的现状综述[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(3): 61-66.
LOU Xiao-ming, YU Zhi-qiang, XU Shi-long. Review on the present situation of vibroflotation improvement method[J]. **Journal of Civil Engineering and Management**, 2012, 29(3): 61-66.

[31] 刘汉龙. 一种变频振冲模拟设备及使用方法: CN2022-10520337. X[P]. 2023-05-09.
LIU Han-long. The frequency conversion simulation vibrator and its application method: CN202210520337.X[P]. 2023-05-09.

[32] 赵津桥. 一种微型变频振冲器的多功能控制柜: CN202221156407.X[P]. 2022-08-23.
ZHAO Jin-qiao. The multifunctional control cabinet of a frequency conversion micro-vibrator: CN2022 21156407. X[P]. 2022-08-23.

[33] THORBURN S. Building structures supported by stabilized ground[J]. **Geotechnique**, 1975, 25(1): 83-94.

下转第 2349 页