

振动碾压对吹填珊瑚砂地基工程特性影响的 试验研究

夏玉云^{1,2}, 乔建伟^{1,2*}, 刘争宏^{1,2,3}, 张 炜^{2,4}, 郑建国^{1,2}

(1. 国机集团机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 陕西省特殊岩土性质与处理重点实验室, 陕西 西安 710043;
3. 长安大学 地质工程系, 陕西 西安 710043; 4. 中国机械设备工程股份有限公司, 北京 100070)

摘 要: 振动碾压是浅部地基处理的常用方法, 对砂土、粉土和粉质黏土等陆相沉积物碾压效果较好。与陆相沉积物物理性质相差较大的珊瑚砂是岛礁工程的主要持力层, 为探究振动碾压对吹填珊瑚砂地基的处理效果, 本文以马尔代夫房建工程为研究背景, 利用室内试验、标准贯入试验、现场载荷试验和动力触探试验研究了不同振动碾压遍数下吹填珊瑚砂地基的工程特性。试验结果表明: 振动碾压对吹填珊瑚砂地基工程特性影响显著, 随碾压遍数增加, 吹填珊瑚砂地基密实度、承载力和变形模量均不同程度增加, 且不均匀性降低; 振动碾压对浅部地基处理效果好, 最大处理深度约为 2 m; 干密度与碾压遍数存在相关性, 标贯击数与承载力和变形模量存在相关性, 通过分析获得的经验公式可用于快速评价吹填珊瑚砂地基的干密度和承载力。研究结果可为岛礁工程建设的吹填珊瑚砂地基处理提供一定的借鉴和参考。

关键词: 振动碾压; 吹填珊瑚砂; 现场试验; 地基承载力; 评价方法

中图分类号: TU471

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)04-0277-08

Experimental study on the influence of vibration rolling on engineering behaviors of dredged coral sand foundation

XIA Yu-yun^{1,2}, QIAO Jian-wei^{1,2*}, LIU Zheng-hong^{1,2,3}, ZHANG Wei^{2,4}, ZHENG Jian-guo^{1,2}

(1. China JK Institute of Engineering and Design, Xi'an 710043, China;

2. Shanxi Key Laboratory for the Property and Treatment of Special Soil and Rock, Xi'an 710043, China;

3. Department of Geological Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

4. China Machinery Engineering Corporation, Beijing 100070, China)

Abstract: Vibration rolling is a common method for shallow foundation treatment, and it has a good effect on terrestrial sediments, such as sandy soil, silt and silty clay. Coral sand, whose physical properties is quite different from that of the terrestrial sediments, is the main supporting layer of the island and reef project. In order to study the impact of vibration rolling on the foundation treatment of dredged coral sand, and based on the housing construction project in Maldives, the engineering characteristics of the coral sand foundation under different vibration rolling times were studied using indoor tests, standard penetration tests, field load tests and dynamic cone penetration tests. The test results show that vibration rolling has a significant impact on the engineering characteristics of the dredged coral sand foundation. With the increase of rolling times, the density, bearing capacity and deformation modulus of the dredged coral sand foundation, all increase at different degrees and at the same time the uneven settlement decreases. Vibration rolling has a good effect on shallow foundation treatment and the maximum treatment depth is about 2 m. The dry density is correlated with the rolling times and the SPT blow count is correlated with bearing capacity and deformation modulus. Therefore, the empirical formula

收稿日期: 2020-07-29

基金项目: CMEC 科技孵化项目 (CMEC-KJFH-2018-02); 科技部对发展中国家援助项目 (KY201502002); 国机集团科技发展基金 (SINOMACH09); 陕西省“三秦学者”创新团队支持计划资助 (2013KCT-13)。

作者简介: 夏玉云 (1968—), 男, 陕西定边人, 教授级高级工程师, 陕西省勘察设计大师, 长期从事特殊岩土工程性质与地基处理的研究工作。E-mail: xiayy@jk.com.cn。

*通讯作者: 乔建伟 (1990—), 男, 安徽宿州人, 博士, 主要从事地质灾害成因机理与特殊岩土方面的研究工作。E-mail: qiaojw@jk.com.cn。

obtained through analysis can be used to quickly evaluate the dry density and bearing capacity of the dredged coral sand foundation. Hence, the research results can provide a reference for the foundation treatment of the dredged coral sand in island and reef engineering construction process.

Keywords: vibration rolling; dredged coral sand; field test; ground bearing capacity; evaluation methodology

0 引言

珊瑚砂是由珊瑚碎屑和其他海洋生物碎屑在风和水动力作用下原地堆积或近距离搬运异地堆积形成的特殊生物碎屑沉积物,矿物成分主要为文石和高镁方解石,碳酸钙含量高达96%以上,因此又称钙质砂^[1-4]。由于珊瑚砂具有特殊的沉积环境、物质组成和结构特征,使其具有颗粒不规则、易破碎、高内摩擦角和软化性的特点,其物理学性质与陆源砂具有显著的差异性^[5-11]。珊瑚砂主要分布在南北回归线之间的热带海岛中,如我国南海诸岛、马尔代夫群岛和印度尼西亚群岛等^[12-13]。随着人类活动向海洋深入,特别是我国“一带一路”战略的持续推进,岛礁工程建设遇到了大量的吹填造陆工程。鉴于施工的便利性和工程造价,在不破坏珊瑚岛礁生态环境的前提下,以开挖泻湖和航道所取得的珊瑚砂是陆域吹填造陆的重要原材料^[14-16]。现有研究结果表明珊瑚砂表观黏聚力较大,内摩擦角较高,残余强度较高,压缩固结速率偏快,初步证实了珊瑚砂作为地基填充材料的可行性^[17-22]。然而,珊瑚砂大面积吹填造陆后,其干密度和地基承载力会相应减小,未经处理的吹填珊瑚砂地基往往不能满足工程建设的承载力要求,需要采取相应的地基处理措施。

振动碾压法应用广泛,理论成熟,施工便捷,节约成本,是浅部地基处理的常用方法。目前,该方法已在大量工程中付诸实施并得到广泛应用,但珊瑚砂具有颗粒易碎性,该方法对吹填珊瑚砂地基处理效果研究还较少。如王伟光等^[22]对比研究了冲击碾压和振动碾压对吹填珊瑚砂的加固效果,认为振动碾压的加固效果优于冲击碾压,但尚未深入研究不同碾压遍数下吹填珊瑚砂的密度、承载力和变形模量等工程特性的变化规律。鉴于此,本文以马尔代夫吹填珊瑚砂房建工程为研究背景,以吹填珊瑚砂为研究对象,利用室内试验、现场载荷试验、标准贯入试验和动力触探试验,探究并分析了不同碾压遍数下吹填珊瑚砂地基的承载特性和评价方法,可为后期评价

岛礁吹填珊瑚砂地基承载力及类似工程提供借鉴和参考。

1 试验概况

1.1 场地概况

试验场地位于马尔代夫胡鲁马累岛三期住房项目建设工地,属于2012年人工吹填岛,场地地势平坦,地表高程约为1.5 m,场地面积为60 m×40 m,场地中心坐标为N: 4° 13' 44", E: 73° 32' 44" (图1)。

钻探揭示试验场地30 m以内工程地质剖面如图2和表1。其中地下水埋深1.4~1.5 m,类型为潜水并与海水连通。研究区发育6套地层,从上至下分别为细中砂、粗砾砂、淤泥、块状礁灰岩、柱状礁灰岩和块状礁灰岩。其中上部细中砂和粗砾砂为吹填珊瑚砂,中间淤泥层为海水底部原有地层,属于软弱夹层,下部为胶结程度不等的珊瑚礁灰岩。

1.2 试验方案

将试验场地均分为3个区域:A, B, C (图3)。利用36 t压路机以振动频率30 Hz,行进速度为5 km/h在场地B和C开展振动碾压。压遍数为每单程走1遍,每5遍喷洒1次海水。其中场地B碾压10遍,场地C碾压20遍。碾压完成后,在试验场地的3个区域分别开展干密度测试、平板载荷试验、标准贯入试验和动力触探试验,研究并分析不同碾压遍数下的地基处理效果。

平板载荷试验被认为是获取地基承载力最直观、最可靠的现场测试方法。本文在试验场地开展的3个区域分别开展3组平板载荷试验(图3)。试验平压板选择700 mm×700 mm的方形板,使用千斤顶配合高压油泵施加反力,采用混凝土方形块体作为加载反力(图4),实验步骤和要点按《建筑地基基础设计规范》^[24]实施。

标准贯入试验和圆锥动力触探试验重锤重量均为63.5 kg,从76 cm的高度自由下落并击打插入土中的探头,分别测定探头贯入土中30 cm和10 cm所需要的击数。试验步骤和技术要点按《岩



图 1 试验场地位置

Fig. 1 Location of the test site

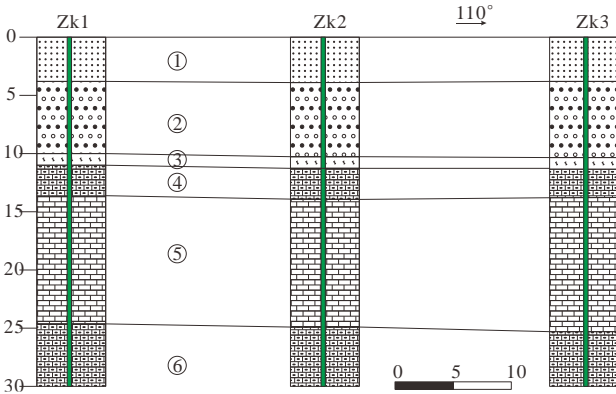


图 2 试验场地地层剖面图

Fig. 2 The geological profile of test site

表 1 试验场地土层特性

Tab. 1 Characteristics of soil layers in test site

地层编号	描述
①	由细中砂组成, 灰白色, 沙质纯净, 局部发育珊瑚枝丫和贝壳
②	由粗砂和砾砂组成, 灰白色, 局部淡黄色, 上部含植物根系, 局部发育块状珊瑚和珊瑚枝丫
③	含淤泥和腐殖层, 灰黑色, 有刺鼻性气味
④	碎块状礁灰岩, 岩芯骨架为粒径 2~5 cm 珊瑚碎块, 充填次级颗粒粒径小于 0.5 cm, 碎块表面发育孔隙
⑤	柱状礁灰岩, 胶结程度较好, 岩芯呈短柱状, 岩芯表面发育孔隙和孔洞
⑥	碎块状礁灰岩, 岩芯骨架为粒径 2~8 cm 珊瑚碎块, 充填次级颗粒粒径小于 0.5 cm

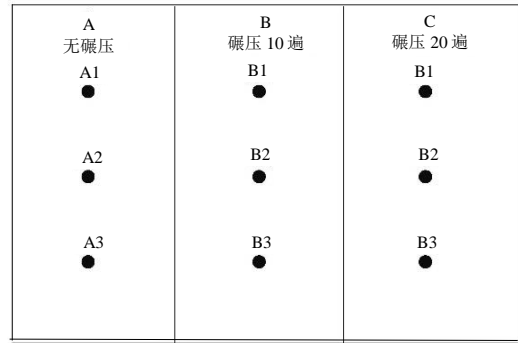


图 3 试验场地平板载荷试验布置

Fig. 3 Layout of plate load test in test site



图 4 现场吹填珊瑚砂地基平板载荷试验

Fig. 4 Plate load test on dredged coral sand

土工程勘察规范》^[23]实施。标准贯入试验测试深度为埋深 0.5 m, 圆锥动力触探试验测试深度为地表至埋深 12 m, 测试方法为连续测试。每个试验区域选择 10 点开展标准贯入试验, 选择一点开展连续动力触探试验。

2 试验结果分析

2.1 干密度测试

由于吹填珊瑚砂地基局部存在珊瑚枝丫和贝壳, 因此, 地基密度测试采用挖大坑灌水法。首先在 3 个试验区域开挖边长 40 cm, 深度 40 cm 的立方体, 挖出的土样带回实验室烘干并称量, 土样的体积采用上覆水法, 然后依据下式 (1) 分别计算吹填珊瑚砂的干密度, 计算结果如表 2 所示。

$$\rho_d = \frac{m_s}{v} \tag{1}$$

式中: m_s 为烘干后珊瑚砂的质量; v 为珊瑚砂的体积; ρ_d 为珊瑚砂干密度。

从表 2 可知, 随着碾压次数的增加, 珊瑚砂干密度的平均值增加且标准差减小, 表明珊瑚砂的

密实度和均匀性提高。其中振动碾压 10 遍, 平均干密度提高至 1.60 g/cm^3 , 提升约 4.6%; 碾压 20 遍, 干密度提升至 1.66 g/cm^3 , 提升约 8.5%。

表 2 干密度测试结果

Tab. 2 Results of dry density

碾压遍数/次	试验点 数/个	平均值/ (g/cm^3)	最大值/ (g/cm^3)	最小值/ (g/cm^3)	标准差
0	10	1.53	1.69	1.34	0.11
10	10	1.60	1.71	1.45	0.07
20	10	1.66	1.73	1.59	0.04

2.2 标准贯入试验

统计 3 个区域的标贯击数如表 3 所示。从表 3 可知, 振动碾压后吹填珊瑚砂地基标贯击数的平均值显著增加, 但其标准差和变异系数相应减小。此外, 标贯击数平均值随着碾压遍数的增加而增加, 而标准差和变异系数随碾压遍数的增加而减小。如碾压 10 遍后, 标贯击数平均值增加 0.79 倍; 碾压 20 遍后, 标贯击数平均值增加 1.32 倍。该结果表明振动碾压不仅可以增加吹填珊瑚砂地基的密实度, 还可以降低吹填珊瑚砂地基的不均匀性, 可作为吹填珊瑚砂地基处理的有效措施。

表 3 标贯试验结果

Tab. 3 Results of SPT

碾压遍数/次	试验点 数/个	平均值/ 击	最大值/ 击	最小值/ 击	标准差	变异系数
0	10	11.7	19	7	3.93	0.34
10	10	20.8	24	16	2.82	0.14
20	10	27.1	30	25	1.64	0.06

2.3 平板载荷试验

利用《工程地质手册》^[25]的最小二乘法对不同场地平板载荷试验数据进行修正, 并绘制修正前后的 $P-s$ 曲线如图 5 所示。从图 5 可知, 吹填珊瑚砂地基的 $P-s$ 曲线可分为 2 个阶段: 直线段和陡降段。通过 $P-s$ 曲线确定吹填珊瑚砂地基的承载力, 并按公式 (2) 计算变形模量, 结果如表 4 所示。

$$E_0 = I_0(1 - \mu^2) \frac{pd}{s} \quad (2)$$

式中 I_0 为刚性承压板的形状系数, 本文取 $I_0=0.886$; μ 为泊松比, 据王伟光等^[22], 取 $\mu=0.2$; d 为承压板的边长, 本文 $d=0.7 \text{ m}$; p 为 $P-s$ 曲线线性段的压力; s 为 $P-s$ 曲线线性段的沉降量。

从表 4 可知, 相同类型地基载荷试验获取的承载力特征值相同, 但变形模量相差较大。根据《建筑地基基础设计规范》^[24], 变形模量取平均值。此外, 地基承载力和变形模量均随碾压遍数的增加而增加; 碾压 10 遍, 地基承载力提高 0.38 倍, 变形模量提高 0.72 倍; 碾压 20 遍, 地基承载力提高 0.97 倍, 变形模量提高 0.93 倍。

根据载荷试验数据, 计算不同地基类型下极限荷载对应的沉降值 (表 5)。从表 5 可知, 极限荷载时吹填珊瑚砂天然地基的沉降量为 $12.58 \sim 24.78 \text{ mm}$, 碾压 10 遍地基的沉降量为 $14.05 \sim 22.28 \text{ mm}$, 碾压 20 遍地基的沉降量为 $21.92 \sim 25.13 \text{ mm}$, 表明吹填珊瑚砂的地基不均匀性较大。但是, 随着碾压遍数的增加, 极限荷载对应沉降量的标准差和变异系数均减小, 表明振动碾压可以降低吹填珊瑚砂地基的不均匀性。

此外, 根据吹填珊瑚砂地基 $Q-s-t$ 曲线 (图 6), 可知各级荷载作用下, 吹填珊瑚砂地基的沉降是瞬时完成的, 且保持稳定, 因此吹填珊瑚砂地基的载荷试验可采用快速加载法, 进而可以提高现场工作效率。

2.4 动力触探试验

3 个区域连续动力触探击数随深度变化曲线如图 7 所示。从图 7 可知随着碾压遍数的提高, 2 m 以上地基的动探击数显著增加, 且在地表以下 $0.5 \sim 1.5 \text{ m}$ 深度内动探击数提高明显, 表明振动碾压可以显著提高浅表部吹填珊瑚砂地基的密实度, 且其处理最大深度约为 2 m, 对 $0.5 \sim 1.5 \text{ m}$ 深度之间珊瑚砂处理效果最好。

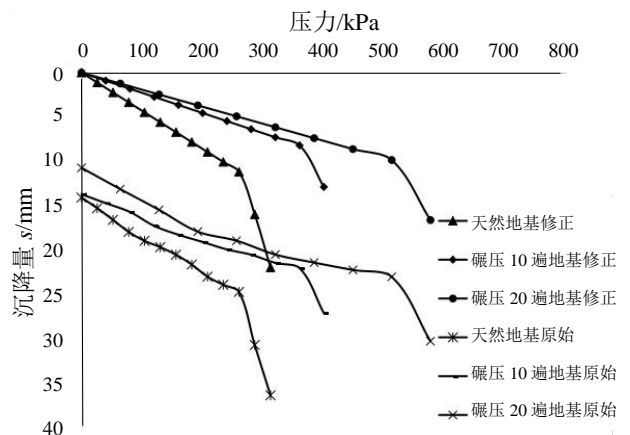


图 5 吹填珊瑚砂地基载荷试验曲线

Fig. 5 Curves of plate load test on dredged coral sand foundation

表 4 平板载荷试验结果
Tab. 4 Results of plate load test

地基类型	试验编号	承载力特征值/kPa	变形模量/MPa	变形模量平均值/MPa
天然地基	A1	130	14.4	15.3
	A2	130	17.1	
	A3	130	14.4	
碾压 10 遍	B1	180	19.1	26.3
	B2	180	20.7	
	B3	180	20.0	
碾压 20 遍	C1	256	26.3	29.6
	C2	256	28.1	
	C3	256	34.4	

表 5 平板载荷试验最大沉降量
Tab. 5 The maximum settlement of plate load test

碾压遍数/次	试验点 数/个	平均值/ mm	最大值/ mm	最小值/ mm	标准差	变异系数
0	3	19.7	24.78	12.58	5.19	0.60
10	3	19.5	22.28	14.05	3.84	0.20
20	3	23.4	25.13	21.92	1.33	0.06

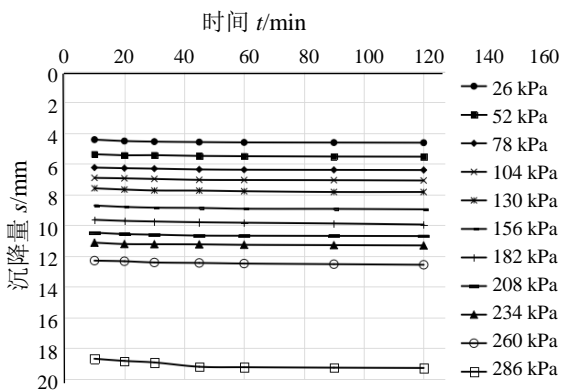


图 6 吹填珊瑚砂地基 Q-s-t 曲线
Fig. 6 Q-s-t curves of dredged coral sand foundation

3 讨 论

3.1 碾压遍数与干密度的对应关系

马尔代夫维拉纳国际机场的机场岛和研究区的胡鲁马累岛均为 2009—2012 年的人工吹填岛, 且两者吹填后的干密度基本相同。刘爱军^[26]通过试验获得维拉纳国际机场吹填珊瑚砂碾压 44 遍干密度为 1.77 g/cm³, 碾压 52 遍干密度为 1.80 g/cm³。为确定干密度与碾压遍数的关系, 将本次试验结果和维拉纳国际机场的碾压结果绘制于图 8, 并利用多项式拟合。试验结果表明, 干密度 (ρ_d) 与碾压遍数 (n) 用三次多项式的拟合

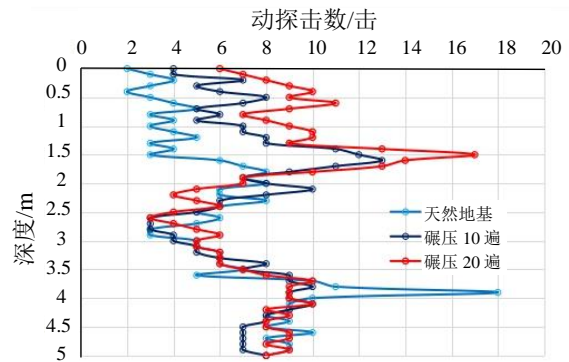


图 7 动力触探试验结果
Fig. 7 Results of dynamic penetration test

效果好, 且拟合优度 R^2 约等于 1。其相应的数学模型表达式如式 (3) 所示。

$$\rho_d = 1.5299 + 0.0076n - 6.2810n^2 + 3.7084n^3 \quad (3)$$

鉴于收集数据的最大碾压遍数为 52 次和吹填珊瑚砂存在最大干密度, 因此本次试验获取的数学模型可用于评价碾压遍数位于 0~52 次之间的珊瑚砂干密度。

3.2 标贯击数与地基承载特性的对应关系

将 3 个试验场地的标贯击数 (N) 与地基承载力特征值 (f_{ak}) 的对应关系绘制于图 9, 结合《工程地质手册》的 Terzaghi 回归式, 利用线性公式对两者关系进行拟合。结果表明, 地基承载力特征值与标贯击数拟合效果较好, 拟合优度 $R^2=0.9020$ 。其相应的数学模型表达式如式 (4) 所示。

$$f_{ak} = 29.9035 + 7.9914N \quad (4)$$

将 3 个试验场地的标贯击数 (N) 与变形模量 (E_0) 的对应关系绘制于图 10, 并对其进行线性拟合。结果表明, 变形模量特征值与标贯击数的拟合效果较好, 拟合优度 $R^2=0.9235$ 。其相应的数

学模型表达式如式(5)所示。

$$E_0=4.8913+0.9484N \quad (5)$$

因此,基于以上公式(4)和公式(5),可用标贯击数初步评价吹填珊瑚砂地基的承载力特征值和变形模量。

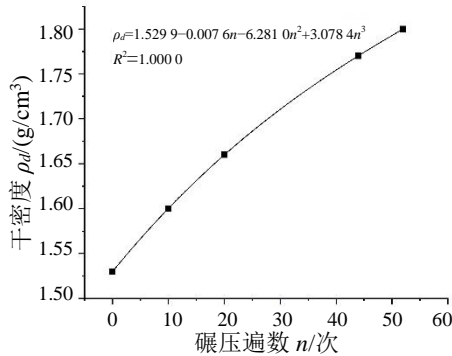


图8 干密度与碾压遍数的关系

Fig. 8 Relationship between dry density and rolling times

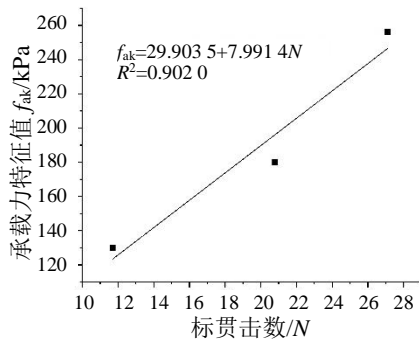


图9 地基承载力特征值(f_{ak})与标贯击数(N)的关系

Fig. 9 Relationship between f_{ak} and N

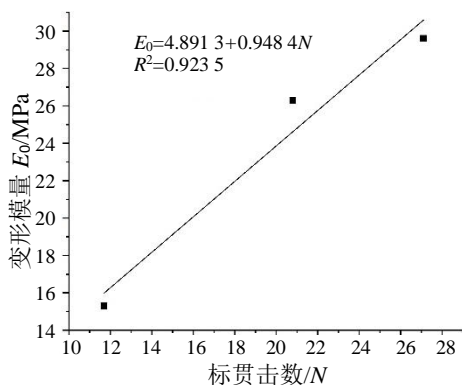


图10 变形模量(E_0)与标贯击数(N)对应关系

Fig. 10 Relationship with E_0 and N

3.3 密实度与地基承载力的对应关系

地基土密实度和含水量是影响地基承载特性的主要因素。Wang et al^[27]已研究了饱和状态和干燥状态下珊瑚砂的承载特性,发现饱和状态下珊瑚砂地基的承载力和变形模量均小于干燥状态,具有较强的软化性,但尚未分析不同密实度与承

载力的对应关系。因此,本文主要分析珊瑚砂初始密实度与地基承载力的对应关系。将不同碾压遍数下密实度与地基承载力特征值的对应关系绘制于图11,并对其线性拟合。结果表明,珊瑚砂地基承载力特征值与干密度拟合效果较好,拟合优度 $R_2=0.9786$ 。其相应的数学表达式如式(6)所示。

$$f_{ak}=938.9831\rho_d-1309.6 \quad (6)$$

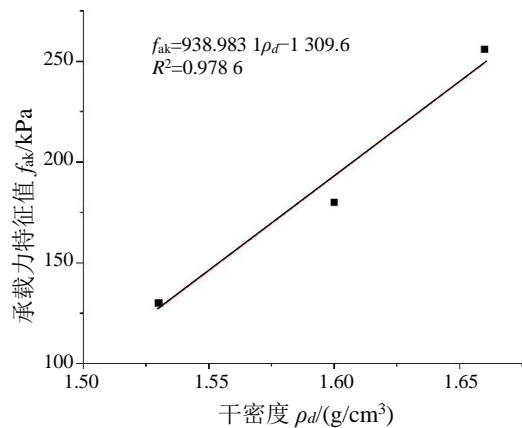


图11 地基承载力特征值(f_{ak})与干密度(ρ_d)的关系

Fig. 11 Relationship between f_{ak} and ρ_d

4 结论与展望

通过室内试验、平板载荷试验、标准贯入试验和动力触探试验对不同振动碾压遍数下的吹填珊瑚砂地基的承载特性开展研究,得到的主要结论如下:

(1) 振动碾压可有效提高吹填珊瑚砂的密实度,其干密度和标贯击数随振动碾压次数的增加而增加。碾压10遍,干密度可提高4.6%,标贯击数增加0.79倍;碾压20遍,干密度提高8.9%,标贯击数增加1.32倍。

(2) 振动碾压不仅可以有效提高吹填珊瑚砂的地基承载力和变形模量,还可降低其不均匀性。碾压10遍,地基承载力提高0.38倍,变形模量提高0.72倍;碾压20遍,地基承载力提高0.97倍,变形模量提高0.93倍。

(3) 振动碾压的最大处理深度约为2m,对0.5~1.5m深度之间珊瑚砂处理效果最好。

(4) 可用吹填珊瑚砂的干密度与碾压次数相关性快速评价不同碾压遍数下吹填珊瑚砂地基的干密度,可用标贯击数与地基承载特性的相关性快速评价吹填珊瑚地基的承载力和变形模量。

珊瑚砂具有内孔隙发育和颗粒易破碎的特

征, 振动碾压过程不仅增加了珊瑚砂的密实度, 还会导致大颗粒发生破碎, 后期研究需要结合室内试验研究振动碾压下珊瑚砂的颗粒破碎规律, 从而分析振动碾压有效提高珊瑚砂地基承载力的加固机制。此外, 现场平板载荷试验根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2011) 根据本级沉降大于前一级沉降量的 5 倍而终止试验并判定 $P-s$ 曲线进入破坏阶段, 由此得出现场试验 $P-s$ 曲线仅有 2 段, 然而李洋洋等^[28]模型试验发现珊瑚砂地基 $P-s$ 曲线可分为 3 段不一致, 分析其原因可能是一定密实度珊瑚砂加压至一定值后颗粒发生破碎, 从而引起较大沉降量, 因此根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2011) 判定现场平板载荷试验终止条件的适用性需要进一步开展研究。本次试验仅研究了 3 种干密度下珊瑚砂的承载力特征值, 后期还需要开展大量研究来获得珊瑚砂干密度与承载力特征值的对应关系, 从而更好的评价珊瑚砂地基承载特性。

致谢: 感谢中国机械设备工程股份有限公司的刘孝达教高, 赵昌朋高工, 贺军兴高工等在试验过程中给予的帮助。

参考文献

- [1] 孙宗勋. 南沙群岛珊瑚砂工程性质研究[J]. 热带海洋, 2000, 19(2): 1-8.
SUN Zong-xun. Engineering properties of coral sands in Nansha Islands[J]. Tropic Oceanology, 2000, 19(2): 1-8.
- [2] 汪稔, 宋朝景, 赵焕庭, 等. 南沙群岛珊瑚礁工程地质[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
WANG Ren, SONG Chao-jing, ZHAO Huan-ting, et al. Nansha Islands coral reef engineering geology[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [3] 许宁. 浅谈珊瑚礁岩土的工程地质特性[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4): 81-88.
XU Ning. Research on the engineering geological characteristics of coral reef rock and soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(4): 81-88.
- [4] 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, 6(4): 74-84.
LIU Chong-quan, YANG Zhi-qiang, WANG Ren. The present condition and development in studies of mechanical properties of calcareous soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 1995, 16(4): 74-84.
- [5] 杨志强, 赵威, 宋朝景. 钙质土层的工程地质调查[J]. 岩土力学, 1994, 15(4): 53-60.
YANG Zhi-qiang, ZHAO Wei, SONG Chao-jing. Geotechnical investigation in calcareous soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 1994, 15(4): 53-60.
- [6] 刘崇权, 汪稔. 颗粒破碎对钙质土力学特性的影响[J]. 岩土力学, 2002, 23(S1): 13-16.
LIU Chong-quan, WANG Ren. Influences of particles crushing on mechanical properties of calcareous soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(S1): 13-16.
- [7] 孙吉主, 汪稔. 钙质砂的耦合变形机制与本构关系探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1263-1266.
SUN Jie-zhu, WANG Ren. Study on coupling deformation mechanism and constitutive for calcareous sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1263-1266.
- [8] 张家铭. 钙质砂基本力学性质及颗粒破碎影响研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2004.
ZHANG Jia-ming. Study on the fundamental mechanical characteristics of calcareous sand and the influence of particle breakage[D]. Chinese Academy of Sciences (Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics), 2004.
- [9] YU H B, SUN Z X, TANG C. Physical and mechanism properties of coral sand in the Nansha Islands[J]. Marine Science Bulletin, 2006, 8(2):31-39.
- [10] WANG X Z, WANG X, JIN Z C, et al. Investigation of engineering characteristics of calcareous soils from fringing reef[J]. Ocean Engineering, 2017, 134: 77-86.
- [11] 王新志, 翁贻令, 王星, 等. 钙质土颗粒咬合作用机制[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3113-3120.
WANG Xin-zhi, WENG Yi-ling, WANG Xing, et al. Interlocking mechanism of calcareous soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(9): 3113-3120.
- [12] 孙宗勋, 黄鼎成. 珊瑚礁工程地质研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, 14(6): 577-581.
SUN Zong-xun, HUANG Ding-cheng. Research progresses on coral reef engineering geology[J]. Advance in Earth Science, 1999, 14(6): 577-581.
- [13] 文哲, 段志刚, 李守定, 等. 中国南海岛礁吹填珊瑚砂剪切力学特性[J]. 工程地质学报, 2020, 28(1): 77-84.
WEN Zhe, DUAN Zhi-gang, LI Shou-ding, et al. Shear mechanical properties of dredged coral sands from South China Sea, China[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(1): 77-84.

- [14] 居炎飞, 明道贵. 珊瑚混合土地基承载力特性评价[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S2): 684-687.
JU Yan-fei, MING Dao-gui. Bearing capacity of coral mixed soil foundation characteristic evaluation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(S2): 684-687.
- [15] 钱琨, 王新志, 陈剑文, 等. 南海岛礁吹填钙质砂渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1557-1564, 1572.
QIAN Kun, WANG Xin-zhi, CHEN Jian-wen, et al. Experimental study on permeability of calcareous sand for islands in the South China Sea[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1557-1564, 1572.
- [16] 王新志, 王星, 刘海峰, 等. 珊瑚礁地基工程特性现场试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 2065-2070, 2079.
WANG Xin-zhi, WANG Xing, LIU Hai-feng, et al. Field test study of engineering behaviors of coral reef foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 2065-2070, 2079.
- [17] 王丽, 鲁晓兵, 王淑云, 等. 钙质砂的胶结性及对力学性质影响的实验研究[J]. 实验力学, 2009, 24(2): 49-59.
WANG Li, LU Xiao-bing, WANG Shu-yun, et al. Experimental investigation on cementation of calcareous sand and its basic mechanical characteristics[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(2): 49-59.
- [18] 马林. 钙质土的剪切特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S1): 309-316.
MA Lin. Experimental study of shear characteristics of calcareous gravelly[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1): 309-316.
- [19] 钱春杰, 李忠平, 谭风雷, 等. 珊瑚砂填料强度特征试验研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 1(1): 133-136.
QIAN Chun-jie, LI Zhong-ping, TAN Feng-lei, et al. Experimental study on strength characteristics of coral sand[J]. Technology of Highway and Transport, 2018, 1(1): 133-136.
- [20] 谭风雷, 闫振国, 曾志军, 等. 珊瑚砂填料压缩特性试验研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 1(1): 137-139.
TAN Feng-lei, YAN Zhen-guo, ZENG Zhi-jun, et al. Experimental study on compression characteristics of coral sand[J]. Technology of Highway and Transport, 2018, 1(1): 137-139.
- [21] WANG X Z, WENG Y L, WEI H Z, et al. Particle obstruction and crushing of dredged calcareous soil in the Nansha Islands, South China Sea[J]. Engineering Geology, 2019, 261: 1-13.
- [22] 王伟光, 郝秀文, 李婉, 等. 碾压方式对珊瑚砂地基工程特性影响的研究[J/OL]. 长江科学院院报, 2019: 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.tv.20190905.1800.012.html>.
WANG Wei-guang, HAO Xiu-wen, LI Wan, et al. Study on the influence of rolling mode on engineering characteristics of coralsand foundation[J/OL]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019: 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.tv.20190905.1800.012.html>.
- [23] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 岩土工程勘察规范: GB 50021-2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [24] 中华人民共和国建设部. 建筑地基基础设计规范: GB 50007-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [25] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册(第五版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [26] 刘爱军. 吹填区珊瑚砂地基压实技术研究[J]. 工程技术, 2019, 12(1): 104-106.
LIU Ai-jun. Study on compaction technology of coral sand foundation in reclamation area[J]. Engineering Technology, 2019, 12(1): 104-106.
- [27] WANG X Z, WANG X, JIN Z C, et al. Investigation of engineering characteristics of calcareous soils from fringing reef[J]. Ocean Engineering, 2017, 134: 77-86.
- [28] 李洋洋, 方祥位, 黄雪峰, 等. 珊瑚砂地基平板载荷模型试验研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017, 31(10): 114-121.
LI Yang-yang, FANG Xiang-wei, HUANG Xue-feng, et al. Study of plate load model test on coral sand foundation[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2017, 31(10): 114-121.