

# 吹填珊瑚砂地基处理技术比较分析

孙兰宁<sup>1</sup> 魏海涛<sup>2</sup>

(1. 中国民航工程咨询有限公司, 北京 101318; 2. 中航勘察设计研究院有限公司, 北京 100098)

**【摘要】** 通过介绍珊瑚砂吹填料工程特性, 结合某岛国机场跑道地基处理工程, 对吹填珊瑚砂地基处理方式进行比选分析, 并针对振动碾压和冲击碾压两种处理方式开展小区试验, 通过分析碾压影响深度及沉降变化, 最终选用振动碾压地基处理方式。该工程已经完工, 取得良好技术经济效益, 可为类似工程提供借鉴。

**【关键词】** 珊瑚砂; 吹填地基; 地基处理; 振动碾压

**【中图分类号】** TU 472

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.03.018

## Comparison and Analysis on Treatment Technology of Dredged Coral Sand Foundation

Sun Lanning<sup>1</sup> Wei Haitao<sup>2</sup>

(1. China Civil Aviation Engineering Consulting Co., Ltd., Beijing 101318, China; 2. AVIC Institute of Geotechnical Engineering Co., Ltd., Beijing 100098, China)

**【Abstract】** The engineering characteristics of dredged coral sand were introduced, and the foundation treatment methods of airport runway in an island country were analyzed and selected. Based on the vibration compaction and impact compaction experiments, the vibration roller compaction method was selected by analyzing the influence depth and settlement variation. The project has been completed and achieved good technical and economic results, which can provide reference for similar projects.

**【Key words】** coral sand; dredged foundation; foundation treatment; vibration compaction

### 0 引言

珊瑚砂是造礁珊瑚死后残骸经过漫长的地质作用形成的一种以碳酸盐为主要矿物成分的特殊岩土介质, 其碳酸钙含量普遍超过 97%, 主要分布于 30°N—30°S 纬度区间的热带或亚热带气候的大陆架和海岸线一带。珊瑚砂因其特殊的物质组成和形成机制, 使其与常规的陆源砂介质存在较大差别。根据现有的研究成果, 珊瑚砂具有多孔隙、易破碎、压缩性大等工程特性<sup>[1-3]</sup>。对于新近吹填的珊瑚砂地基, 由于吹填工艺造成不同区域珊瑚砂粒径分布不均, 厚度不同, 且未经过长期的潮汐作用和固结, 易产生不均匀沉降, 往往不能满足上部建(构)筑物沉降要求, 因此需要采取相应的地基处理措施。

珊瑚砂具有不规则、内摩擦角大、残余强度高特性<sup>[4]</sup>, 对于南北回归线之间需要进行吹填造陆地区, 珊瑚砂可就地取材, 是一种良好的吹填料。结合印度洋某岛国机场吹填珊瑚砂地基工程, 分析对比珊瑚砂

地基压实技术, 为类似项目提供借鉴。

### 1 珊瑚砂特性

#### 1.1 多孔隙性

珊瑚砂主要为珊瑚残体海相沉积形成, 在沉积过程中未经过长距离搬运, 颗粒之间相互碰撞少, 珊瑚虫骨架中的细微孔隙基本没有破坏, 造成珊瑚砂具有多孔隙结构。空隙结构既包含生物骨架中的内部微孔隙, 又包括颗粒表面孔隙, 其孔隙比约为 0.54~2.97, 甚至枝状珊瑚砂为中空, 比常规石英砂孔隙比范围高出较多, 所以珊瑚砂有压缩性大、剪胀率低等特点<sup>[5]</sup>。

珊瑚砂内孔隙约占全部孔隙的 10% 左右, 内孔隙的大量存在导致珊瑚砂最大干密度和最优含水率不易测定, 珊瑚砂压实控制标准采用现场最大干密度指标更为合理。

#### 1.2 不规则性

珊瑚砂是由多孔珊瑚礁经破碎风化而成, 并且

未经过长距离运输,磨圆度差,形状各异,棱角分明且表面孔隙较多。珊瑚砂颗粒形状对其工程性质具有直接影响。粒径 2 mm 以下的颗粒形状有块状、纺锤状、片状和枝状,并以块状和纺锤状为主,占 90% 以上,片状和枝状相对较少<sup>[6]</sup>。

珊瑚砂的不规则性一方面增加了珊瑚砂地基孔隙比,另一方面当受外力作用,颗粒棱角相互咬合,其接触部位更易断裂、破碎,从而影响宏观力学性质。

### 1.3 破碎性

珊瑚砂的多孔结构及钙质矿物成分,造成珊瑚砂容易破碎。珊瑚砂主要矿物成分为方解石(碳酸钙),其含量高达 97%,方解石硬度仅为 3,且具有三组完全解理,而石英硬度为 7,因此珊瑚砂比石英砂强度小,更易破碎。

珊瑚砂力学性能在低围压条件下,主要受颗粒形状影响;高围压条件下,主要受颗粒破碎影响。当围压超过某一定值时,珊瑚砂颗粒破碎将剧烈增加,但其不再影响珊瑚砂强度特征,并且对珊瑚砂残余抗剪强度影响不大,各种实验条件下的残余强度内摩擦角约为 33°<sup>[7-8]</sup>。

### 1.4 显著压缩性

珊瑚砂压缩性,比相同级配、密度下的石英砂压缩性高。珊瑚砂的压缩变形主要由四部分组成:①弹性变形;②颗粒重新排列;③颗粒破碎;④胶体分离。珊瑚砂后两部分变形主要是伴随珊瑚砂破碎、胶结

颗粒压缩而发生,因此珊瑚砂比石英砂的压缩和蠕变更显著。珊瑚砂压缩变形主要是塑性变形,并且当压力超过某一值时,颗粒破碎将对珊瑚砂压缩性起控制作用<sup>[9]</sup>。

### 1.5 易起动性

珊瑚砂颗粒比重较大,干密度较小,孔隙率大并且水下休止角相对较小,因此相对于石英砂在水动力作用下更易起动。珊瑚砂的起动流速较小,水深 20 cm 时的起动流速和起动波高分别为 34 cm/s 和 5.9 cm;水深 60 cm 时的起动流速和起动波高分别为 40.8 cm/s 和 13.2 cm,均低于同样粒径的石英砂<sup>[10]</sup>。珊瑚砂在水动力作用下的易起动特性,使珊瑚砂地基对动力环境或动力处理作用响应更为敏感。

珊瑚砂特殊的工程特性,决定了珊瑚砂地基的处理工艺。工艺的选择应避免过量破碎珊瑚砂,并保持珊瑚砂稳定,以免引起珊瑚砂流动。

## 2 工程实例

### 2.1 工程概述

吹填珊瑚砂造岛,是指沉积在珊瑚岛礁斜坡和泻湖内的礁石、珊瑚砂,通过绞吸船泵送至岛礁礁坪上,在泻流后堆积成出露海平面一定高度的人工岛。

印度洋某岛国机场跑道一部分位于原有陆域区域,一部分位于海域吹填区域(见图 1)。海域吹填深度约 0~10.0 m,其中吹填深度小于 6.0 m 为浅吹填区域,大于 6.0 m 为深吹填区域。

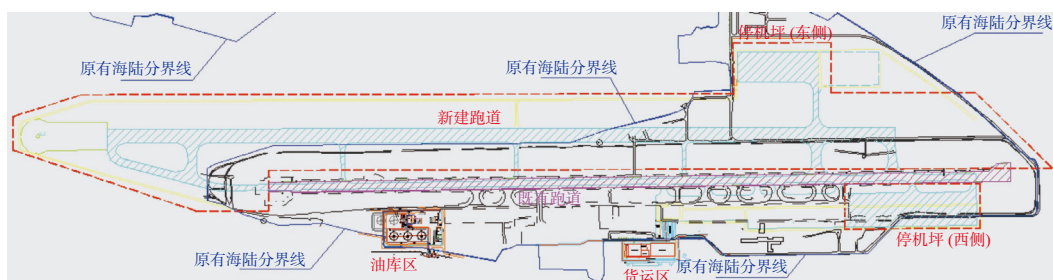


图 1 机场总平面图

### 2.2 地质条件

地层主要分为三层:①吹填珊瑚砂地层,灰白色,湿—饱和,松散,含珊瑚枝丫及珊瑚碎石,且由于吹填工艺,吹填地层不均匀,力学性质差异大;②珊瑚砂地层,灰白色,局部为浅黄色,饱和,稍密—中密,含珊瑚枝丫及珊瑚块碎石,块碎石含量约 10%,粒径约 10~15 cm;③礁灰岩层,灰白色,局部浅黄色,骨架多为 0.5~1.0 cm 及少量 2 cm 珊瑚砾石组成,间夹贝壳屑及不规则放射状方解石结晶珊瑚灰岩;颗粒间胶结发育,多晶状方解石胶结,属弱胶结;岩芯表面粗糙,

成蜂窝状,岩质轻,锤击强度较高。典型地质剖面见图 2,地层力学性质见表 1。

场区地势低平,珊瑚砂地层透水性好、储水条件极差,地下水位较高,位于吹填顶面以下 0.4~1.5 m,地下水与海水联通,水位随潮位变化,变化幅度 0.5~1.0 m。

该吹填珊瑚砂地层较松散,且均匀性很差,不宜直接作为天然地基使用,需进行地基处理。

### 2.3 地基处理要求

根据民用机场相关设计规范,填方地基要求均匀、密实,并达到表 2 具体标准。

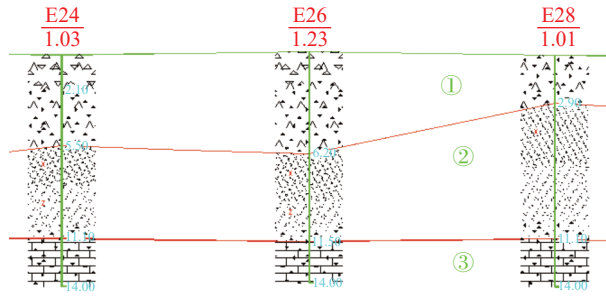


图2 典型地质剖面图

表1 地层力学性质

地层	承载力特征值/kPa	压缩模量 /MPa	重型圆锥动力触探 $N_{63.5}$ /击	渗透系数 $/(m \cdot d^{-1})$
①吹填珊瑚砂	120 ~ 200	12 ~ 20	5 ~ 20	38.67 ~ 93.50
②珊瑚砂层	160 ~ 200	15 ~ 20	10 ~ 20	

表2 地基处理标准

检测项目	标准
土基反应模量	$\geq 60 MN/m^3$
加州承载比	$\geq 8\%$
现场最大干密度	$\geq 1.6 g/cm^3$

### 3 地基处理方案比选

常用吹填粗颗粒地基处理工艺有强夯法、振冲法、冲击碾压、振动碾压等。结合上述珊瑚砂特性,对该跑道地基处理方式分析比选。

#### 3.1 地基处理方案适用性初判

##### (1)强夯法

强夯冲击力对地层进行压缩的同时必然引起超孔隙水压力,在超孔隙水压力作用下,细颗粒珊瑚砂易在大孔隙中流动,孔隙不易填实。且夯锤夯击作用下,珊瑚砂很容易破碎,并且粗颗粒含量越多,粒径越大,越容易破碎。强夯作用下珊瑚砂进行重新排列密实后,表层的大颗粒在继续夯击下首先破碎,进而引起下层珊瑚砂破碎。因此强夯法不宜适用。

##### (2)振冲法

在强大的冲击水压作用下,必然引起细颗粒珊瑚砂的流动,然后在海水动力作用下再次回流填充,因此密实效果未必明显。珊瑚砂颗粒形状不规则,且相互咬合,振冲器下沉过程中必然对珊瑚砂接触部位造成破坏。采用振冲法造价较高、施工慢,因此适用性不强。

##### (3)冲击碾压

冲击能主要来自碾压轮的动能和势能,在其作用下压实地基,冲击实力相对较小,不会造成珊瑚砂过多破碎,可以对地层进行密实处理。但密实处理的持久性相对较弱。其影响深度及处理效果需通过试

验验证。

##### (4)振动碾压

在振动压路机作用下,珊瑚砂位置相互移动、相互填充、密实,并且碾压速度相对较慢,对珊瑚砂地层可以给予相对持久的振动力,便于振动力往深部传递,并且对颗粒破碎影响较小。其影响深度及处理效果需通过试验验证。

通过上述比选分析,对于该吹填珊瑚砂地层,适用的地基处理方式为冲击碾压和振动碾压。

#### 3.2 碾压方案小区试验

为进一步验证冲击碾压和振动碾压的实际处理效果,选取吹填深度小于 6.0 m 区域进行碾压对比试验,其中冲击碾压区长度 100m、宽度 25 m,振动碾压区长度 50 m、宽度 25 m。具体碾压方案见表 3。

表3 试验碾压方案

碾压方式	碾压设备	碾压工艺	碾压要求
振动碾压	26 t振动压路机	高频震动,速度 2 ~ 4 km/h	碾压前洒水,以局部表层见浅层积水为准;洒水后间隔20分钟碾压,来回算一遍;每两遍碾压前洒水
冲击碾压	25 kJ冲击势能	速度 25 km/h	碾压前洒水,以局部表层见浅层积水为准;洒水后间隔20分钟碾压,来回算一遍;每四遍碾压前洒水

碾压前后分别进行重型动力触探,通过锤击数变化表征两种碾压方式的优劣。振动碾压 26 遍后,锤击数变化见图 3;冲击碾压 30 遍后,锤击数变化见图 4。

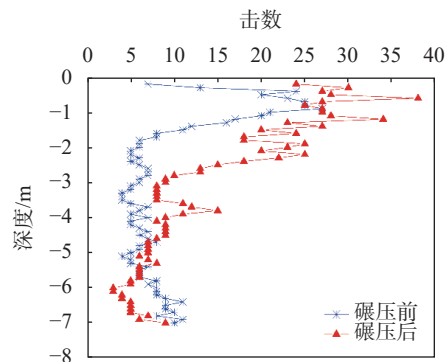


图3 振动碾压区重型动力触探锤击数-深度曲线分析图3、图4 重型动力触探数据可知:

(1)动力触探数据具有高离散性。该现象由吹填工艺造成不同粒径珊瑚砂分布不均匀或锤击击中直径珊瑚碎石所致。

(2)振动碾压效果优于冲击碾压。冲击碾压速度快,为瞬时冲压荷载,不利于冲击能量深部传递;而振动碾压速度慢,振动频率高,有利于振动能量持久往深部传递。



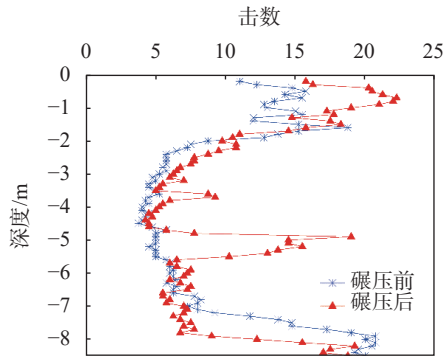


图4 冲击碾压区重型动力触探锤击数-深度曲线

(3)26 t 振动压路机有效影响深度约 4.0 m, 且表层 2.0 m 提高明显, 25 kJ 冲压机有效影响深度约 2.0 m。

(4)超出碾压影响深度后, 碾压前锤击数高于碾压后锤击数。该现象可能是由于吹填不均匀且触探位置未完全重合所致。

试验中于振动碾压区表层设置 2 个沉降观测点, 振动碾压次数与表层累计沉降关系见图 5。

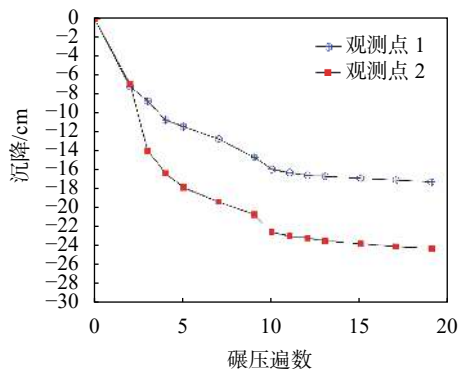


图5 振动碾压区表层累计沉降-碾压遍数曲线

分析图 5 数据可知:

(1)振动碾压前期沉降较大, 碾压 10 遍后, 沉降变化逐步减小, 趋于稳定。

(2)两个观测点的表层沉降量有差异, 根据现场探坑观察, 沉降量小的位置大粒径珊瑚碎石含量高, 表明吹填工艺造成了地层不均匀。

### 3.3 其他检测

现场两种碾压方式完成后, 对碾压表层土基反应模量、加州承载比以及现场最大干密度进行检测, 检测结果均满足设计和相关规范要求。

## 4 压实工艺的确定及处理效果

为满足机场跑道设计要求, 通过前述碾压试验及沉降计算分析, 最终确定采用振动碾压工艺对吹填珊瑚砂地层厚度小于 6.0 m 区域进行地基处理, 其具体施工工艺如下:

碾压前进行洒水处理, 水量以表层出现浅层积水为准, 间歇 20 分钟后进行碾压, 每碾压 2 遍洒水

一次。采用 26 t 振动压路机振动碾压 12 遍(来回算一遍), 碾压速度 2~4 km/h, 高频震动。最后 4 遍表层进行沉降观测, 每 2 遍观测一次, 将每次沉降增量不大于 1.0 cm 作为终止碾压标准, 若未达到, 继续碾压或采用高吨位碾压补强。

工程目前已完工近 3 年, 道面结构完好, 机场运行平稳。地基未出现过大沉降或差异沉降, 满足工程设计需要。

## 5 结论

(1)珊瑚砂具有多孔性、不规则性、破碎性、显著压缩性及易起动性等特殊工程特性。综合考虑珊瑚砂工程特性与地基处理工艺原理, 经适用性比选分析, 初步确定振动碾压和冲击碾压两种地基处理工艺。

(2)现场分区对比试验表明, 采用振动碾压处理珊瑚砂地基, 影响深度与处理效果明显优于冲击碾压。根据现场试验, 确定了珊瑚砂地基振动碾压施工工艺及参数。

(3)采用振动碾压法对该机场跑道珊瑚砂地基进行处理, 处理后的地基检测结果满足设计要求, 竣工后的项目运行状况良好。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 朱长歧, 陈海洋, 孟庆山. 钙质砂颗粒内孔隙的结构特征分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1831-1836.
- [3] 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, 2018, 14(1): 137-139.
- [4] 文兵, 袁内镇, 孔令伟, 等. 吹填珊瑚砂场地高层建筑复合地基工程实践与沉降估算[J]. 土木工程学报, 2021, 57(12): 85-92.
- [5] 汪正金. 钙质砂微结构特征与力学特性的耦合关系研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [6] 陈海洋. 钙质砂的内孔隙研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005.
- [7] 蒋礼. 南海钙质砂破碎力学特性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- [8] 莫洪韵. 岛礁钙质砂、岩混合料工程力学性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [9] 白晓宇. 钙质岩土工程性状研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.
- [10] 王艳红, 陆培东, 曾成杰. 西沙群岛珊瑚砂运动特性试验研究[C]//中国海洋工程学会. 第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 北京海洋出版社, 2013: 893-897.