

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.S2.039

钙质砂的干密度特征及其试验方法研究

王新志¹, 王 星^{1,2}, 翁贻令³, 吕士展¹, 阎 钊¹, 朱长歧¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

摘 要: 最大、最小干密度是评价砂土密实度的重要计算参数。通过钙质砂的最大、最小干密度试验, 揭示了钙质砂颗粒破碎对最大干密度的影响, 分析了最大、最小干密度随粒径和含水率的变化规律, 并总结了钙质砂的最大、最小干密度的测试方法。研究表明, 最大干密度随粒径的增大呈现先减小后增加的趋势; 在最大干密度的测试中存在明显的颗粒破碎现象, 使测试结果偏大; 颗粒破碎量随粒径的增加先增加后减小, 其中粗砂的破碎量最大; 最小干密度随粒径的增大而减小, 单一粒径钙质砂最小干密度的最大值仍然小于级配良好钙质砂的最小干密度, 同一粒径的钙质砂的最小干密度随含水率的增大呈现出略有减小的趋势。建议钙质砂的最大干密度试验宜采用电动相对密度仪法, 最小干密度试验宜采用量筒法。

关 键 词: 钙质砂; 干密度; 颗粒破碎

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 增 2 - 0316 - 07

Characteristics of dry density of calcareous sand and its testing methods

WANG Xin-zhi¹, WANG Xing^{1,2}, WENG Yi-ling³, LÜ Shi-zhan¹, YAN Ke¹, ZHU Chang-qi¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: The maximum and minimum dry densities are important parameters to evaluate the relative density of sand. This paper reveals the effect of particle breakage to the maximum dry density of calcareous sand, and analyzes the correlation between the characteristics of the maximum and minimum dry density and particle size, water content. Judging from the test results, test methods of the maximum and minimum dry densities are summarized and suggestions are drawn. The results show that dry density of calcareous sand firstly decreases and then increases. Particle breakage occurred in the maximum dry density test, which increases the test result of dry density. The amount of particle breakage increases firstly and then decreases with grain size. The minimum dry density decreases with the increasing of particle size; and the minimum dry density is affected by gradation and water content. The maximum dry density of calcareous sand should be tested by electric relative density meter is recommended; and the minimum dry density should be tested by measuring cylinder method.

Keywords: calcareous sand; dry density; particle breakage

1 引 言

钙质砂是海洋生物成因的特殊土, 在我国南海海域分布广泛^[1-3], 其碳酸钙 (CaCO₃) 含量在 90% 以上, 具有颗粒形状不规则、易破碎、高孔隙比等显著区别于陆源砂的特征, 因此钙质砂的最大、最小干密度测试具有一定的特殊性。最大、最小干密

度是计算砂土相对密度必需的参数, 相对密度是衡量砂土密实度的重要物性指标。国内从事钙质砂研究的学者多关注于钙质砂的颗粒形状与破碎特性^[1-3]、桩基承载性能^[4-6]和钙质骨料混凝土的工程特性的研究^[7-8], 对钙质砂所能达到的最大、最小干密度以及试验方法的研究甚少。

我国正在南海珊瑚礁上开展吹填造岛工程, 必

收稿日期: 2016-05-12

基金项目: 科技部 973 计划课题 (No. 2013CB956104); 国家科技支撑计划项目 (No. 2014BAC01B01); 国家自然科学基金 (No. 41572297)。

This work was supported by the National Key Basic Research Program of China (2013CB956104), the National Key Technology R & D Program (2014BAC01B01), and the National Natural Science Foundation of China (41572297).

第一作者简介: 王新志, 男, 1981 年生, 博士, 副研究员, 主要从事珊瑚礁工程地质及岩土力学特性的研究。E-mail: xzwang@whrsm.ac.cn

通讯作者: 王星, 男, 1989 年生, 硕士研究生, 主要从事钙质土的力学特性的研究。Email: 18827069705@163.com

然面临着吹填岛礁地基压实度的评价问题,获取吹填岛礁钙质砂的最大、最小干密度具有十分重要的意义。本次以南海某吹填岛礁的钙质砂为研究对象,在钙质砂颗分曲线的基础上对原始级配的钙质砂的最大、最小干密度进行试验。在最大干密度试验过程中考虑了颗粒破碎的影响,分别进行饱和状态、干燥状态两种情况下的测试,并结合试验前后的颗分曲线对颗粒破碎情况进行分析。进行最小干密度测试时,分别采用了原始级配法和剔除法对干燥状态下的钙质砂最小干密度进行测试。为研究单一粒组最大最小干密度随粒径变化趋势,笔者对单一粒组的钙质砂分别进行最大、最小干密度测试,进行最小干密度测试时考虑了湿度对最小干密度的影响,并对土工规程规范^[9]规定的量筒法和漏斗法两种试验方法的结果进行比较。进行最大干密度测试时分别采用了手动测试和机械电动测试两种试验方法,并结合试验结果对试验过程中的颗粒破碎进行了分析。

2 研究现状

由于粒径限制,对最大干密度的研究主要有两种方法:一种是对实验仪器进行改进,使仪器对粒径的适用范围扩大到能满足实际需要,直接测取最大干密度;另一种是在现有实验设备的基础上,通过对超径颗粒进行处理,间接测取最大干密度。试验设备的限制使得最大干密度的间接测试法成为目前主流的研究方法,朱崇辉等^[10]采用剔除法对超径料进行处理,认为土样的最大干密度与剔除量、剩余量之间存在较强的线性关系。郭庆国等^[11]运用等量替换法计算含有超径粒料的土样的最大干密度,并与实测值进行对比,结果证明计算结果满足精度要求。史彦文^[12]以大粒径砂卵石为研究对象,采用相似级配法在较小的容器内测试土样的最大干密度,并取得比较理想的试验结果。这些学者虽然不是以钙质砂粗粒料为研究对象,但对超径土的处理方法对钙质砂最大、最小干密度的测试具有很好的借鉴意义。对钙质砂最大干密度的测试,大多是采用击实的方法,余强等^[13]在珊瑚礁砾石土压实特性试验研究中采用剔除法对大粒径钙质土进行处理,然后分别分析了粗颗粒含量、击实功和击实层数对最大干密度的影响,但试验中忽视了钙质砂颗粒易破碎的特性,没有分析颗粒破碎对钙质砂最大干密度的影响。

对最小干密度的研究主要集中在具体的试验操作上,范德华等^[14-15]通过对试验仪器的改进和具

体试验步骤的优化,对砂样的最小干密度进行测试,但研究仅限于粒径小于 5 mm 的干燥土样,对粒径超出 5 mm 土样的测试以及最小干密度随含水率的变化情况并没有给出详细说明。

3 最小干密度试验与结果分析

3.1 最小干密度试验设计与方法

本文中的钙质砂均取自南海某岛礁吹填区域,各粒组的钙质砂是在对原有砂样干燥处理的基础上通过筛分处理后取得。

土工试验规程规定可以采用漏斗法和量筒法进行最小干密度测量的粒径范围是不大于 5 mm 的细颗粒,本次试验土样中存在粒径大于 5 mm 的粗颗粒,且根据颗分试验结果可知超过 5 mm 的粗颗粒的质量占试样总量的 7.48%。为对试验样品的最小干密度进行测试,首先根据原始级配选取烘干的钙质砂试样 700 g,使用量筒法进行测试。然后采用剔除法对规范规定以外的粗颗粒进行处理,并与原始级配测试结果进行对比。

当采用原始级配法对不区分粒组的钙质砂进行最小干密度试验时,所用的钙质砂是在颗分曲线的基础上确定各个粒组钙质砂的质量比例,使其质量总和满足规范规定的 700 g,然后对 700 g 的钙质砂进行最小干密度测试。由于原始级配中钙质砂的粒径大小并不局限在 5 mm 以内,原始级配的钙质砂试样不能采用漏斗法进行测试,只能采取量筒法多次测量求平均值的方法。剔除法的实质是将超径颗粒剔除后按照剩余各粒组钙质砂的质量比例组成新的试样,试验土样与土样的颗分曲线如图 1、2 所示,原始级配与采用剔除法处理过后的土样级配参数见表 1。

为测量 5 mm 以下各粒组钙质砂的最小干密度,并探寻各粒组钙质砂的最小干密度与粒径大小之间的关系以及含水率对各粒组最小干密度的影响,将 5 mm 以下的烘干试样依次通过 2、1、0.5、



图 1 不同粒径的试验土样

Fig.1 Soil samples of different grain sizes

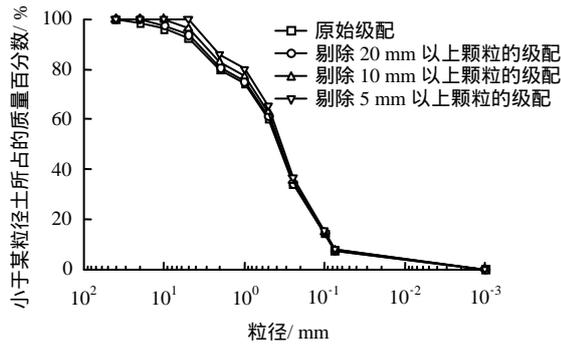


图2 土样颗粒分曲线

Fig.2 Gradation curves of soil samples

表1 土样级配系数

Table 1 Soil sample distribution coefficient

级配	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	级配特征
原始	5.88	1.16	级配良好
剔除 20 mm 以上颗粒后	5.82	1.15	级配良好
剔除 10 mm 以上颗粒后	5.72	1.14	级配良好
剔除 5 mm 以上颗粒后	5.56	1.12	级配良好

0.25、0.075 mm 的土工筛，分别采用漏斗法和量筒法对不同粒组的钙质砂在干燥状态下的最小干密度进行测试，并对漏斗法和量筒法这两种测试方法进行比较。再按照 4% 的湿度梯度向各个粒组的钙质砂中加入适量的水，测试钙质砂在不同含水率状态下最小干密度的变化。

试验所用仪器有分度值为 10 mL 和容量为 1 000 mL 的量筒、长杆漏斗、锥形塞杆和砂面抚平器。锥形塞杆应该具有足够的长度，否则不便于执行边旋转边上升的操作步骤。长杆漏斗和锥形塞在提升的过程中要保持匀速，距离砂面距离恒定，且不要触碰到砂面或碰撞量筒内壁，防止由于振动造成砂体密实。

3.2 试验结果与分析

用量筒法反复对干燥的原始级配、剔除 20 mm 以上颗粒的级配、剔除 10 mm 以上颗粒的级配、剔除 5 mm 以上颗粒的级配的钙质砂试样进行测试，试验结果表明原始级配下钙质砂试样的最小干密度为 1.17 g/cm³。

剔除法所测得的最小干密度与原始级配相比误差在 10% 以内，其中剔除 5 mm 以上颗粒级配试样所测得最小干密度误差仅在 5% 左右，表明在超径颗粒含量较少时可以使用剔除法来量测试样的最小干密度。

用漏斗法和量筒法量测不同粒组的钙质砂试样的最小干密度，如图 3 所示。

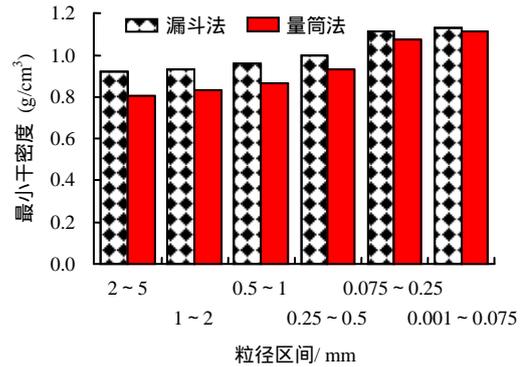


图3 不同粒组钙质砂的最小干密度

Fig.3 Minimum dry densities of calcareous sand in different grain size groups

图 3 的结果表明，随着粒组粒径的减小，钙质砂的最小干密度有上升趋势，是由于粒径越小，颗粒间的孔隙越小，因而干密度越大，但即使是细粒组颗粒的干密度仍然小于同条件下原始级配钙质砂试样的最小干密度。这是因为原始级配下干燥钙质砂试样颗粒级配良好，细颗粒填充粗颗粒之间的孔隙，所以颗粒之间的孔隙相比单一粒组颗粒之间的孔隙小。从图 3 还可以看出，漏斗法比颠倒量筒法测得的体积偏小，是由于两种方法本身的操作不同造成的。由于试验土样的粒径在同一个范围，彼此相差不大，不存在小颗粒填充大颗粒之间的孔隙而引起体积减小的现象，试样宏观上的体积表现在微观上是颗粒本身的体积与颗粒之间的孔隙之和，在颗粒本身体积一定的情况下，只要颗粒之间的孔隙尽可能的大就可以获得试样在固定质量下的最小干密度。使用漏斗法测量试样体积的过程中，颗粒从漏斗里下落有一定的下冲速度，颗粒之间以及颗粒与量筒内壁之间的孔隙较小，尤其是在大颗粒的下落过程中，由于漏斗尺寸的限制，颗粒的下落过程几乎是一个接一个缓慢的下落，在这个过程中试样中的颗粒堆积的较为紧密。使用颠倒量筒法测量试样体积的过程中，由于整个操作过程是缓慢进行的，只是改变了试样内部各个颗粒之间的相对位置，颗粒之间以及颗粒与量筒内壁之间的孔隙较大，尤其是颗粒与量筒内壁之间的孔隙，这种情况在大粒径颗粒中表现的比较明显。因此，在大颗粒的测量中漏斗法与颠倒量筒法的区别较为明显，对于 0.25 mm 以下的细颗粒，由于颗粒与量筒内壁之间的孔隙变化不大，使用两种方法进行的测量所获得的试样的体积差别也不大。

当钙质砂具有一定湿度后砂颗粒与玻璃量筒内壁会产生一定的吸附力，导致在试验过程中出现

较大的体积孔洞,测量结果失真。对粒径小于 0.25 mm 的细颗粒,含水率在 4%时就足以产生较大的孔洞,而粒径在 2~5 mm 之间的钙质粗砾,当含水率达到 16%时也会出现体积测量结果失真的现象(见图 4),具体结果如图 5 所示。从图中可以看出,随着含水率的增加,各个粒组的最小干密度呈现出减小的趋势,相较于细颗粒而言,粗颗粒的趋势较为平缓,但总体上减小的幅度不大。



图 4 最小干密度试验照片

Fig.4 Photo of the Minimum density tests

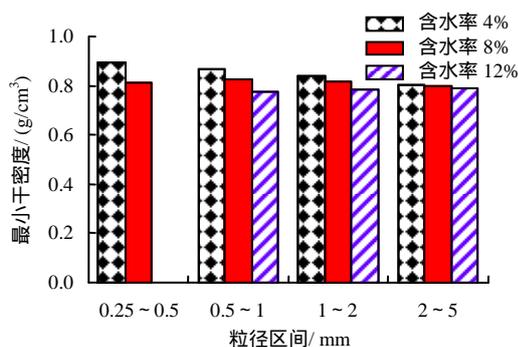


图 5 不同含水率下钙质砂的最小干密度对比

Fig.5 Contrast of minimum dry density of calcareous sand with different water contents

4 最大干密度试验与结果分析

4.1 最大干密度试验设计与方法

钙质砂颗粒具有易破碎特性,进行击实试验过程中若有颗粒破碎现象发生,使粗颗粒的含量减小、细颗粒含量相应增加,所得出的最大干密度必然与原始级配的最大干密度有所差异。本次试验以级配良好的钙质中砂为研究对象,采用表面振动密实的方法,分别对干燥样和饱和样的最大干密度进行测试,并用筛分试验分别量测试验前、后试样颗粒级配的变化,评估钙质砂颗粒在试验中的破碎情况。

根据公路土工试验规程^[16]中关于粗粒土最大干密度试验的规定,对于无黏性自由排水的粗粒土和巨粒土应采用表面振动压实仪法或振动台法进行测定。本试验所用的仪器为表面振动压实仪,仪器型号为 BZYS-4212(见图 6),具体参数:电源电压为 380 V,电机功率 0.75~2.2 kN,振动频率

可达 30~50 Hz,激振力为 10~80 kN,夯板作用在试样表面静压力可达 18 kPa 以上。大试样筒内径为 280 mm,深 335 mm,小振实筒内径为 152 mm,深 215 mm。由于试验用砂含有大于 40 mm 的粗颗粒,故本次试验采用内径为 280 mm、深 335 mm 的大振实筒盛装钙质砂试样。



图 6 表面振动压实仪

Fig.6 Surface vibrating compaction setup

干燥钙质砂试样在振实前先进进行颗粒粒径分析,记录各个粒组钙质砂的含量,然后将土样混合均匀后分成相等的 3 份,分 3 次装入振实筒,每次装入试样后振实 6 min。由于在振实的过程中细颗粒的钙质砂会从振锤与振实筒内壁之间的缝隙飞出,为减少试样在试验过程中的质量损失,振实前可用透明塑料薄膜覆盖在振实筒上部,并紧固于振实筒边缘。在第 1、2 次振实完成后,用毛刷将振锤底部黏连的细颗粒收集起来放入振实筒中,尽可能减小试样的质量损失,第 3 次振实完成后称量、记录振实筒和振实土样的总质量,振锤上部和振实筒边缘溅落的细颗粒砂样收集后,只能用作振实后的筛分试验,不能计入振实筒和振实土样的总质量中。

饱和钙质砂试样在振实前应先将待振实砂样烘干,用筛分试验量测试验前各粒组钙质砂的质量,然后根据干土的质量加入 25%左右的水,并与干土充分搅拌均匀,浸泡放置约 24 h,使砂样处于饱和状态。同样分 3 层振实,且每层振实 6 min;饱和状态的钙质砂由于水分的存在,振动过程中水分会混合细颗粒钙质砂呈泥浆状从筒壁和振锤的缝隙中飞溅出来,此时不仅需要上覆透明塑料薄膜,还需要及时收集从振实筒中流出的泥浆,对这些在试验过程中损失的钙质砂颗粒的处理方法与干燥钙质砂振实操作过程相同。试验结束后,对振实筒内的砂样进行含水率量测,作为试样最终的饱和含水率。

整个试验过程中精度控制的关键是对振实后砂样体积的测量。测量前先用一细绳沿筒直径的方向绷直放置在振实筒筒沿上，然后用钢直尺沿着绷直的细绳量测振实筒顶部到砂面的距离，沿细绳长度方向3等分取3个测点，量测3次。然后将细绳旋转90°方向重新绷直设立于振实筒筒沿上，重复上述操作，再量测3次，计算砂样体积取平均值。

测试单一粒径钙质砂最大干密度的过程中分别采用手动相对密度仪和电动土壤相对密度仪两种方法进行测试，比较两种试验方法的结果，分析最大干密度随粒组粒径变化的规律，并通过筛分试验对电动测试结束后不同粒组的钙质砂破碎情况进行定量分析，具体的操作过程见图7。



图7 最大干密度的手动测试法和电动测试法
Fig.7 Manual and electric test methods of maximum dry density

试验所用的仪器包括 XD-1 型手动土壤相对密度仪和 JDM-I 型电动土壤相对密度仪，金属容器筒容量为 250 mL，内径为 50 mm，高 127 mm。击锤质量为 1.25 kg，落高 15 cm，锤直径为 5 cm，32 次/分钟，振动锤每分钟敲击 155 次，定时范围为 0~15 min，功率为 120 W，电源为 220 V，电机频率为 50 Hz。本次试验分 3 层击实，并将电动土壤相对密度仪的计时器设定为 5 min，每层共锤击 160 下，为增强试验的对比性，在进行手动测试时击锤的锤击数也设定为每层 160 击。

4.2 试验结果与分析

分别对钙质砂进行干燥和饱和状态下的表面振实试验，并对试验前后砂样的颗粒分析，结果见表 2 和如图 8、9 所示。试验结果表明，相对于级配相同的干燥状态下钙质砂试样，饱和样的最大干密度偏小（约 4%），但总体相差不大。干燥状态的钙质砂最大干密度偏大的原因可以从颗粒破碎的角度来分析。从图中可以看出，钙质砂在干燥状态下更易破碎，而饱和状态下的钙质砂几乎没有出现颗粒

表 2 干燥样和饱和样振实试验结果

Table 2 Sample and saturated sample test results

样品	质量 / g	体积 / cm ³	含水率 / %	最大干密度 / (g/cm ³)
干燥	23 940	14 593.33	0	1.64
饱和	22 880	20 627.70	23	1.57

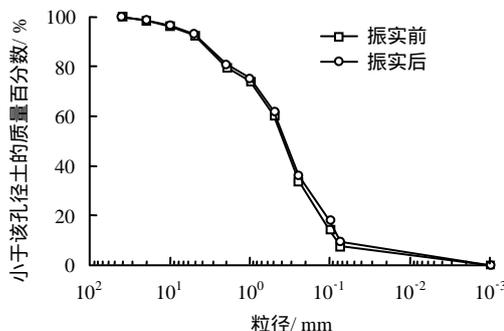


图 8 干燥土样振实前后的颗粒分曲线
Fig.8 Particle size distribution curves of dry sample before and after dry density test

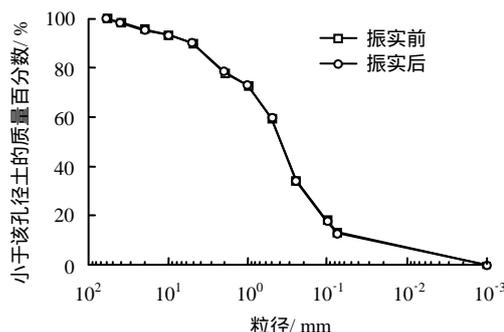


图 9 饱和土样振实前后颗粒分曲线
Fig.9 Particle size distribution curves of saturated sample before and after dry density test

破碎现象，试验前后的颗粒分曲线近乎重合；干燥的钙质砂破碎后会产生小颗粒填充大颗粒之间空隙的现象，级配发生了变化并向更加密实的方向发展。

对 5 mm 以下各粒组的干燥钙质砂分别用手动和电动相对密度仪测其最大干密度，试验结果如图 10 所示。从图中可以看出，干燥状态下各粒组钙质砂的最大干密度随粒径的增大呈现出先减小后上升的趋势，其中粒径在 0.075 mm 以下的钙质砂的干密度最大，粒径分别在 0.25~0.5、0.5~1、1~2 mm 三个区间内的钙质砂的最大干密度处于曲线下降和上升的过渡区域，最大干密度相差不大，在 1.14~1.21 g/cm³ 之间；相较于钙质中粗砂，粒径在 2~5 mm 之间的钙质细砾土最大干密度增幅明显，这是因为钙质细砾土之间的孔隙较大，颗粒破碎以后

有足够的细颗粒填充粗颗粒之间的孔隙，而钙质中粗砂之间的孔隙较小，颗粒破碎在很大程度上只是增多细颗粒的数量，用于填充孔隙的细颗粒较少，所以干密度增加的并不明显。

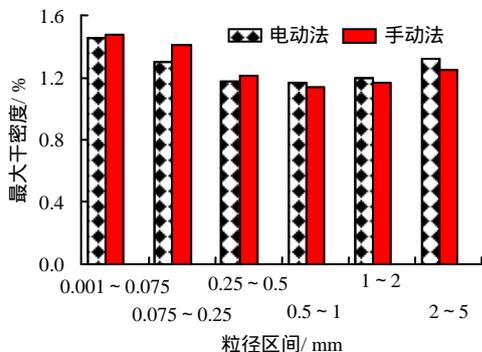


图 10 钙质砂的最大干密度

Fig.10 Maximum dry densities of calcareous sand

手动法和电动法测试结果相差不大，在原位试验的过程中若不具备实施电动法的相关条件，可以用手动法替代电动法，试验结果的精度能够满足工程实践的要求，在实验室中进行最大干密度试验时推荐用电动法进行试验。

对电动法测试完成后的试样通过筛分试验进行破碎量测定，并用式(1)的方法对各粒组钙质砂颗粒的破碎情况进行定量分析。

$$B = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中： B 为各粒组颗粒破碎质量百分数(%)； M_1 为试验前各粒组的质量(g)； M_2 为试验后留筛土的质量(g)。试验结果如图 11 所示。图中的结果表明，使用电动相对密度仪对干燥的钙质砂进行最大干密度测试时，颗粒出现明显的破碎现象，2 mm 以下时随着粒组粒径的增大，破碎量也明显增加，粒径在 2~5 mm 之间的细砾钙质土的破碎量略有减小，5 mm 以下的各粒组钙质砂中粒径在 1~2 mm 的粗砂破碎量最大。可以从颗粒尺寸和密实度变化两方面进行分析，当颗粒粒径在 1 mm 以下时，颗粒的尺寸对颗粒破碎起主导作用，粒径越大越容易破碎，试验后的破碎量也越大；1 mm 以上的颗粒密实度的变化起主导作用，2~5 mm 的粒组相较于 1~2 mm 的粒组区间范围广，颗粒破碎的同时密实度发生增长，在一定程度上起到了阻止颗粒进一步破碎的作用，在 5 mm 以下的粒组中 1~2 mm 的钙质粗砂的破碎量最大。

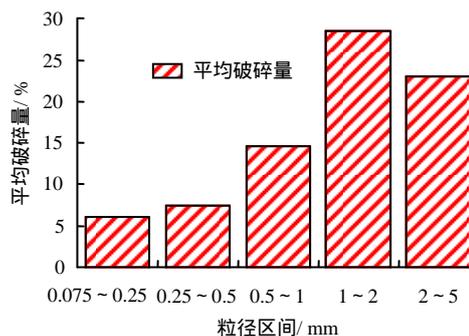


图 11 各粒组钙质砂颗粒破碎百分量

Fig.11 Particle breakage amounts of each granule calcareous sand

5 结 论

(1) 干燥状态下钙质砂各粒组的最小干密度随颗粒粒径的减小而增加，但仍然小于原始级配良好钙质砂的最小干密度。

(2) 钙质砂颗粒在干燥状态下使用量筒法测得的最小干密度普遍比使用漏斗法测得的最小干密度小。

(3) 超过 5 mm 的颗粒含量较少时建议先采用剔除法剔除超径颗粒，再使用量筒法进行试验，测试结果能满足精度要求。

(4) 使用表面振实仪测钙质砂的最大干密度时，相比于饱和状态下的钙质砂，干燥状态下的钙质砂更容易出现颗粒破碎的现象，测试的结果偏高。

(5) 干燥状态下的钙质砂的最大干密度随粒径的增大先减小后增大，颗粒破碎量随粒径的增加先增大后减小，其中以 1~2 mm 的钙质粗砂破碎量最大。

本文对钙质砂最大最小干密度的探讨尚未考虑颗粒形状对干密度的影响，有关钙质砂的颗粒形状对最大最小干密度的影响有待进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] 秦月, 姚婷, 汪稔, 等. 基于颗粒破碎的钙质沉积物高压固结变形分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3123 - 3128.
QIN Yue, YAO Ting, WANG Ren, et al. Particle breakage-based analysis of deformation law of calcareous sediments. under high-pressure consolidation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(11): 3123 - 3128.
- [2] 陈海洋, 汪稔, 李建国, 等. 钙质砂颗粒的形状分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1389 - 1392.
CHEN Hai-yang, WANG Ren, LI Jian-guo, et al. Grain shape analysis of calcareous soil[J]. **Rock and Soil**

- Mechanics**, 2005, 26(9): 1389 - 1392
- [3] 张家铭, 汪稔, 张阳明, 等. 土体颗粒破碎研究进展[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊 2): 661 - 665.
ZHANG Jian-ming, WANG Ren, ZHANG Yang-ming, et al. Advance in studies of soil grain crush[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(Supp.2): 661 - 665.
- [4] 单华刚. 珊瑚礁钙质土中桩基工程承载性状研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 561 - 561
SHAN Hua-gang. Research on bearing behaviour of pile in calcareous soil of coral reef[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(5): 561 - 561.
- [5] 单华刚, 汪稔. 钙质砂中的桩基工程研究进展述评[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 299 - 304.
SHAN Hua-gang, WANG Ren. Development of study on pile in calcareous sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(3): 299 - 304.
- [6] 江浩, 汪稔, 吕颖慧, 等. 钙质砂中模型桩的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 780 - 784.
JIANG Hao, WANG Ren, LÜ Ying-hui, et al. Test study of model pile in calcareous sands[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 780 - 784.
- [7] 陈兆林, 孙国峰, 唐筱宁, 等. 岛礁工程海水拌养珊瑚礁、砂混凝土修补与应用研究[J]. 海岸工程, 2008, 27(4): 60 - 69.
CHEN Zhao-lin, SHUN Guo-feng, TANG You-ning, et al. Study on applications of concretes from coral reef sand mixed with seawater for patching-up in reef engineering[J]. **Coral Engineering**, 2008, 27(4): 60 - 69.
- [8] 陈兆林, 唐筱宁, 孙国峰, 等. 海水拌养混凝土耐久性试验与应用[J]. 海洋工程, 2008, 26(4): 102 - 106.
CHEN Zhao-lin, TANG You-ning, SHUN Guo-feng, et al. Research on durability and application of seawater concrete[J]. **Coral Engineering**, 2008, 26(4): 102 - 106.
- [9] 南京水利科学研究所. SL 237 - 1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
Nanjing Hydraulic Research Institute. SL 237 - 1999 Test methods of soils[S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999.
- [10] 朱崇辉, 严宝文, 刘俊民, 等. 超粒径粗粒土最大干密度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 4090 - 4094.
ZHU Chong-hui, YAN Bao-wen, LIU Jun-min, et al. Experimental study on maximum dry density of overdiameter coarse-grained earth[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.2): 4090 - 4094.
- [11] 郭庆国, 刘贞草. 确定大径粗粒土最大密度的近似方法[J]. 水资源与水工程学报, 1992, 3(1): 12 - 21.
GUO Qing-guo, LIU Zhen-cao. Approximation of maximum density of coarse-grained soils[J]. **Water Resources and Water Engineering**, 1992, 3(1): 12 - 21.
- [12] 史彦文. 大粒径砂卵石最大密度的研究[J]. 土木工程学报, 1981, 28(2): 53 - 58.
SHI Yan-wen. A study on maximum density of large sized sandy gravels[J]. **China Civil Engineering Journal**, 1981, 28(2): 53 - 58.
- [13] 余强, 姜振春. 珊瑚礁砾石土压实特性试验研究[J]. 土工基础, 2015, 29(1): 106 - 109.
YU Qiang, JIANG Zhen-chun. Experimental study of the compaction characteristics of coral gravelly soils[J]. **Soil Engineering and Foundation**, 2015, 29(1): 106 - 109.
- [14] 范孟华, 孔德志. 砂相对密度试验方法的改进[J]. 岩矿测试, 2007, 26(5): 428 - 430.
FAN De-hua, KONG De-zhi. Improvements on method for relative density of sand experiments[J]. **Rock and Mineral Analysis**, 2007, 26(5): 428 - 430.
- [15] 范孟华, 邹正伟. 改进砂的相对密度试验方法的建议[J]. 路基工程, 2007, 25(5): 67 - 68.
FAN De-hua, ZOU Zheng-wei. Suggestions for improving the relative density test method of sand[J]. **Subgrade Engineering**, 2007, 25(5): 67 - 68.
- [16] 交通部公路科学研究所. JTJ 051 - 93 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTJ 051 - 93 Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2003.