

DOI: 10.11779/CJGE202012022

珊瑚砂渗透性的微观机理研究

崔翔^{1,2}, 朱长歧¹, 胡明鉴¹, 汪稔¹, 刘海峰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)

摘要: 珊瑚砂是一种海洋特殊土。特殊的物质来源和形成过程, 导致了其水文物理性质与陆源砂存在差异。文中设置了珊瑚砂和石英砂作为对照组, 通过一系列微观试验, 从微观角度定量研究并揭示了珊瑚砂特殊性质的原因。研究发现, 导致珊瑚砂特殊性质的微观因素包括颗粒表面性质和颗粒形状性质两方面。其中, 颗粒表面性质包括颗粒带电性和表面亲疏水性。颗粒带电性显示, 石英砂较珊瑚砂颗粒更易发生聚集和凝聚; 表面亲疏水性显示, 珊瑚砂较石英砂颗粒表面亲水性差。颗粒形状性质包括颗粒整体形状和颗粒表面粗糙度, 并呈现分段性规律。粒径 ≤ 0.25 mm时, 珊瑚砂较石英砂颗粒形状规则, 且表面光滑; 粒径介于 $0.25\sim 0.75$ mm时, 珊瑚砂较石英砂颗粒形状规则, 但表面粗糙; 粒径 ≥ 0.75 mm时, 珊瑚砂较石英砂颗粒形状不规则, 且表面粗糙。最后, 通过上述微观结论对珊瑚砂和石英砂渗透性差异机理作出合理解释, 并总结出颗粒微观性质对珊瑚砂渗透性影响的分段性规律。

关键词: 珊瑚砂; 石英砂; 微观试验; 颗粒表面性质; 颗粒形状性质

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)12-2336-06

作者简介: 崔翔(1993—), 男, 博士, 主要从事珊瑚吹填岛地下水环境模拟预测及多孔介质水文物理的相关研究工作。E-mail:1745275378@qq.com。

Microscopic mechanism of permeability of coral sand

CUI Xiang^{1,2}, ZHU Chang-qi¹, HU Ming-jian¹, WANG Ren¹, LIU Hai-feng¹

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

Abstract: Coral sand is a kind of special marine soil. The special material source and formation process lead to the difference of hydrophysical properties between coral sand and terrestrial sand. The coral sand and quartz sand are set as the control group. Through a series of microscopic experiments, the reasons for the special properties of coral sand are quantitatively studied and revealed. It is found that the microscopic factors leading to the particularity of coral sand include two aspects: particle surface properties and particle shape properties. The surface properties of particles include particle electrification and surface hydrophilicity. The particle electrification shows that quartz sand is more likely to aggregate and agglomerate than the coral sand. The hydrophilicity of surface shows that the hydrophilicity of coral sand is worse than that of quartz sand. The shape properties of particles include the overall shape of particles and the surface roughness of particles which show a piecewise rule. When the particle size is less than 0.25 mm, the coral sand has relatively regular shape and smooth surface compared with the quartz sand. When the particle size is $0.25\sim 0.75$ mm, the coral sand has relatively regular shape but rough surface compared with the quartz sand. When the particle size ≥ 0.75 mm, the coral sand is relatively irregular in shape and rough in surface compared with the quartz sand. Finally, the mechanism of the difference permeabilities between the coral sand and the quartz sand is reasonably explained by the above microscopic conclusions, and the piecewise rules of the influences of particle microscopic properties on the permeability of the coral sand are summarized.

Key words: coral sand; quartz sand; microscopic experiment; particle surface property; particle shape property

0 引言

珊瑚岛礁地层一般由二元结构组成。上伏的松散或次固结珊瑚砂层, 和珊瑚砂层下面的礁灰岩层。二元结构分界线由岛礁所处位置地质构造决定, 一般位于 $15\sim 25$ m。由于受降雨淡化影响, 珊瑚岛礁地下可

能会产生天然淡水透镜体。而珊瑚砂层即为淡水透镜体形成和演化的唯一载体。因此, 研究珊瑚砂水文物理性质, 对于研究岛礁地下淡水的形成机理是十分重

收稿日期: 2020-04-09

要的。珊瑚砂是一种常分布于海洋区域的特殊土。其物质来源主要包括贝类、藻类、珊瑚和其他海洋生物碎屑^[1]。在经历海洋破碎和搬运作用后,堆积而成^[2]。因其碳酸钙含量超过 90%,又名钙质砂或钙质土。其特殊的物质来源和形成过程导致了其特殊的颗粒性质^[3-4]。从而导致珊瑚砂与陆源砂相比,力学性质和水文物理性质均有所不同。因此,从微观角度研究珊瑚砂颗粒性质,对于揭示珊瑚砂多孔介质的特殊力学和水理性质是十分重要的。本文也针对此问题开展了一系列研究工作。

珊瑚砂颗粒的微观性质研究方面,目前已有学者取得了一些成果。2005年,陈海洋等^[5]利用 Matlab 图像处理软件,对取自光学显微镜的钙质砂颗粒图像进行处理,采用统计和分形理论方法描述了珊瑚砂颗粒形状。2017年,任玉宾等^[6]采用扫描电镜(SEM)与图像处理技术,对三维珊瑚砂颗粒形状进行了描述。蒋明镜等^[7]在进行珊瑚砂连通性孔隙研究时,通过电镜扫描获取了珊瑚砂颗粒的图像参数,然后利用 MATLAB 进行二值化处理,得到了珊瑚砂面孔隙度随粒径的变化规律,以及不同颗粒形状的面孔隙度规律。2018年,吴野等^[8]在研究液体对珊瑚砂颗粒拖曳力时,在显微镜下拍摄获取了 133 个珊瑚砂颗粒图像,利用改进的 Wadell 形状参数对珊瑚砂颗粒形状进行了描述。Yang 等^[9]以南海某礁附近的珊瑚砂为研究对象,研究了三维颗粒形态和级配对珊瑚砂压缩性特征的影响,并提出了一种三维颗粒细观观测和描述方法。2019年,张丙树等^[10]在研究珊瑚砂压缩变形特征时,通过 ST-2000 拍摄仪获取了包含 1200 个颗粒的 60 张照片,然后利用颗粒/裂隙分析系统(PCAS)定量分析了颗粒形态规律。王步雪岩等^[11]利用 PartAn 颗粒扫描仪获取了某一单粒径珊瑚砂颗粒多个投影面的图像并对其进行描述,并将颗粒形状分为枝状、棒状、片状和块状。

上述学者的研究成果,为珊瑚砂微观性质研究做出了巨大贡献,为后来者们的研究奠定了基础,且指明了方向。可知,现有的珊瑚砂颗粒微观研究,主要集中在颗粒形状对力学性质的影响。或受技术限制,集中在某一较大的单粒径形状研究。或受时间和精力限制,只能对数量较少数量的颗粒进行统计分析。本文针对这些问题,开展了一系列工作。研究对象涵盖各个粒径范围的珊瑚砂颗粒,并设置了石英砂作为对照组。珊瑚砂和石英砂每个粒级获取了 30000 多颗粒的 13 种形状参数,完全符合统计分析对数据量的要求。微观研究角度不再局限于颗粒形状,须知颗粒表面性质也是材料微观性质的重要组成部分。研究方法采用多种微观研究手段交叉对比分析的方式,系统研究珊瑚砂颗粒的微观性质。最后,利用珊瑚砂颗粒微

观性质结论,从本质上揭示了珊瑚砂和石英砂渗透性差异的原因。

1 试验原理及方案

1.1 试验原理

本文微观研究从颗粒表面性质和颗粒形状性质两个角度出发。其中颗粒表面性质通过 Zeta 电位试验和接触角试验进行研究。颗粒形状性质通过扫描电镜和 PartAn 颗粒形貌扫描的手段进行研究。本文研究用珊瑚砂取自中国南海某珊瑚岛礁,经室内筛分得到如图 1 所示的 6 个单粒径珊瑚砂。

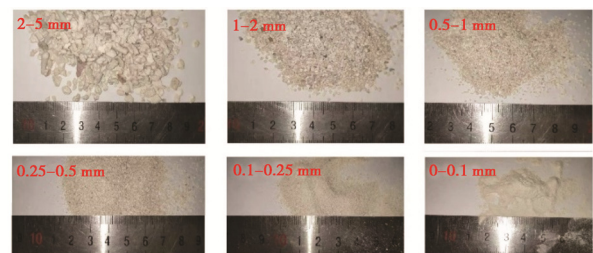


图 1 单粒径珊瑚砂样本

Fig.1 Coral samples with single particle size

(1) Zeta 电位和试验

Zeta 电位 (Zeta potential) 是连续相与附着在分散粒子上的流体稳定层之间的电势差,用于度量颗粒之间相互排斥或吸引力的强度。Zeta 电位的绝对值越高,体系越稳定,即溶解或分散可以抵抗凝聚。反之,Zeta 电位绝对值越低,越倾向于凝聚,即吸引力超过了排斥力,发生凝聚。其中 Zeta 电位绝对值代表其稳定性大小,正负则代表粒子带何种电荷。Zeta 电位与体系稳定性之间的大致关系如表 1 所示。本次试验采用英国马尔文仪器公司生产的 Zetasizer Nano-ZS900 型 Zeta 电位分析仪,可测颗粒粒径范围为 5 nm~10 μm。

表 1 Zeta 电位与体系稳定性关系

Table 1 Relationship between Zeta potential and system stability

Zeta 电位绝对值/mV	颗粒分散系稳定性
0~5	体系不稳定,颗粒快速凝结或凝聚
10~30	体系开始不稳定,颗粒有凝结或凝聚趋势
30~40	体系稳定性一般
40~60	体系稳定性较好
≥61	体系稳定性极好

(2) 接触角试验

接触角 (contact angle) 是指在气、液、固三相交点处所作的气-液界面的切线,此切线在液体一方的与固-液交界线之间的夹角 θ ,如图 2 所示。液体在固体材料表面上的接触角,是衡量该液体对材料表面润湿性能的重要参数。若 $\theta < 90^\circ$,则固体表面为亲水性,即液体较易润湿固体,其角越小,表示润湿性越好;若 $\theta > 90^\circ$,则固体表面为疏水性,即液体不容易润湿

固体，容易在表面上移动^[12-13]。本次试验采用德国 KRUSS 公司生产的 DAS100 型接触角测量仪。

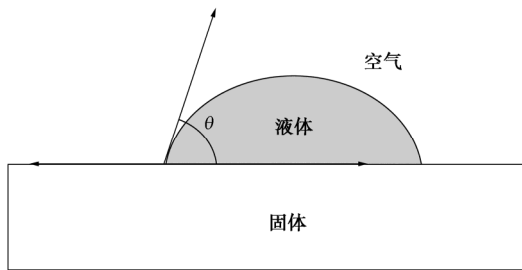


图 2 接触角示意图

Fig. 2 Diagram of contact angle

(3) 扫描电镜试验

本文试验采用美国 FEI 公司生产的 Quanta 250 型扫描电子显微镜。该试验测试分析系统用聚焦电子束在试样表面逐点扫描成像。可测试样为块状或粉末颗粒。电子枪发射出的电流作用在样品表面，产生二次电子。通过信号收集与信号转换映射在屏幕上。因此可看到样品表面的同步扫描照片，实现对样品表面的形貌进行微观表征。

(4) PartAn 颗粒形貌扫描

本文试验采用 Microtrac 公司生产的 PartAn 3D 型颗粒形貌观测仪。内置超高分辨率动态相机，实现下落颗粒连续拍摄。配套系统编号并追踪每一个自由下落的颗粒。内置算法通过获取的图像计算每个颗粒的 30 多种形态参数，其中包括直接由图像处理得到的直接参数和根据直接参数计算得到的间接参数。

本文根据研究需要，选取其中 13 种参数参与分析研究，如表 2 所示。其中名称前标注*的参数，是根据表内其他参数计算得来的间接参数，将直接参与本文的研究与分析。其中，圆度 (Circularity) 和偏度 (Skewness) 是用来评价颗粒与标准球体差距的指标 (颗粒整体形状)；凹度 (Concavity) 和凸度 (Convexity) 是用来评价颗粒表面凹凸程度的指标 (颗粒表面粗糙程度)。圆度值范围为 0~1，取 1 时颗粒为标准球体；偏度值大于等于 1，取 1 时颗粒为标准球体；凹度值范围为 0~1，取 0 时颗粒表面光滑；凸度值范围为 0~1，取 1 时颗粒表面光滑。

表 2 形貌参数表

Table 2 Morphological parameters

参数名称	符号 (单位)	计算公式
圆度	C_{ir}	$C_{ir} = 4\pi A/P^2$
偏度	S_{ke}	$S_{ke} = F_L^2/(F_W \times F_T)$
凹度	C_c	$C_c = (C_A - A)/C_A$
凸度	C_v	$C_v = C_p/P$

注: A 为颗粒面积 (mm^2); P 为颗粒周长 (mm); F_L 为颗粒最大长度 (mm); F_W 为颗粒最大宽度 (mm); F_T 为颗粒最小宽度; C_A 为围绕颗粒的最小凸边界面积 (mm^2); C_p 为围绕粒子的最小凸边界周长 (mm)。

1.2 试验方案

试验方案如表 3 所示。其中 Zeta 电位试验和接触角试验两种试验的测试对象均要求为粉末状颗粒，因此，本文用来进行 Zeta 电位试验和接触角试验的材料为珊瑚砂和石英砂粉土级颗粒。由于此两种试验表征的为颗粒表面性质，因此测试结果适用于各个粒径的表面性质评价。

表 3 微观试验方案

Table 3 Microscopic experiment schemes

试验名称	试样粒径/mm
Zeta 电位	≤ 0.1
接触角	≤ 0.1
扫描电镜	$\leq 0.1, 0.1\sim 0.25, 0.25\sim 0.5, 0.5\sim 1, 1\sim 2$
PartAn 形貌扫描	$0.1\sim 0.25, 0.25\sim 0.5, 0.5\sim 1, 1\sim 2, 2\sim 5$

2 试验结果及分析

2.1 颗粒表面性质

Zeta 电位测试结果如图 3 所示。曲线为测试材料的 Zeta 电位分布曲线，曲线峰值即为测试材料的 Zeta 电位 (mV)。可知，珊瑚砂 Zeta 电位为 -11.4 mV，为负值，颗粒间带负电荷；石英砂 Zeta 电位为 3.34 mV，为正值，颗粒间带正电荷。由表 1 和 Zeta 电位性质可知，因为珊瑚砂 Zeta 电位绝对值大于石英砂，所以珊瑚砂颗粒较石英砂不易聚集。颗粒的聚集将会缩小孔隙尺寸，进而削弱多孔介质的渗透性。因此，在渗透性方面，珊瑚砂较石英砂具有带电性优势。

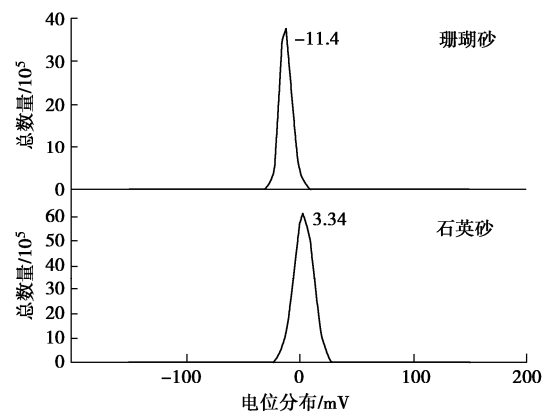


图 3 Zeta 电位分布曲线

Fig. 3 Distribution curves of Zeta potential

接触角测试结果如图 4 所示。由图可知，珊瑚砂接触角为 $27.4^\circ \sim 27.5^\circ$ ，石英砂接触角为 $18.7^\circ \sim 19.9^\circ$ 。根据前文介绍的接触角相关特性可知，接触角小于 90° ，则为亲水表面。接触角越小则亲水性越好。石英砂接触角小于珊瑚砂，则石英砂表面亲水性较珊瑚砂好。颗粒表面的亲水性越强，孔隙液流经孔隙时的所受阻力越大，进而削弱多孔介质的渗透性。

因此, 从颗粒表面亲水性角度出发, 珊瑚砂的颗粒表面较石英砂亲水性差使其更利于渗流液通过, 渗透性更好。

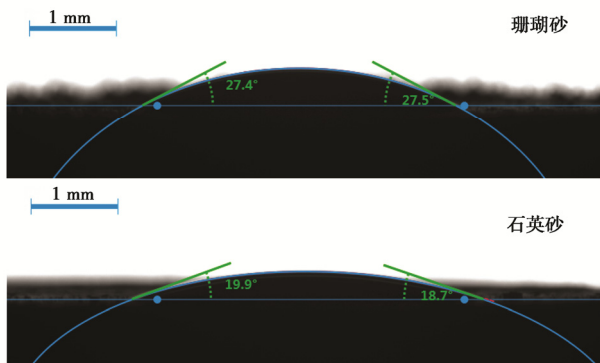


图 4 接触角试验结果

Fig.4 Experimental results of contact angle

2.2 颗粒形状性质

扫描电镜测试结果如图 5 所示。其中 <0.1 mm 组选用了 2000 倍放大倍数, 0.1~0.25 mm 组选用了 800 倍放大倍数, 其他 0.25~0.5 mm 组、0.5~1 mm 组和 1~2 mm 组均选用了 100 倍放大倍数。从颗粒整体形状规则程度和颗粒表面凹凸程度两个角度分析。可知, 颗粒粒径在 <1 mm 和 0.1~0.25 mm 范围内, 珊瑚砂较石英砂颗粒整体形状规则, 表面光滑; 粒径在 0.25~0.5 mm 和 0.5~1 mm 范围内, 珊瑚砂较石英砂颗粒整体形状规则, 但表面粗糙; 粒径在 1~2 mm 范围时, 珊瑚砂较石英砂颗粒整体形状不规则, 且表面粗糙。多孔介质中, 作为组成成分的土颗粒, 其颗粒形状及表面凹凸程度将会影响孔隙的大小及连通性, 进而影响渗透性。扫描电镜结果仅能对珊瑚砂颗粒微观性质进行半定量描述。下文中, 根据颗粒形貌扫描结果, 可已更加准确地对颗粒微观性质进行定量描述。

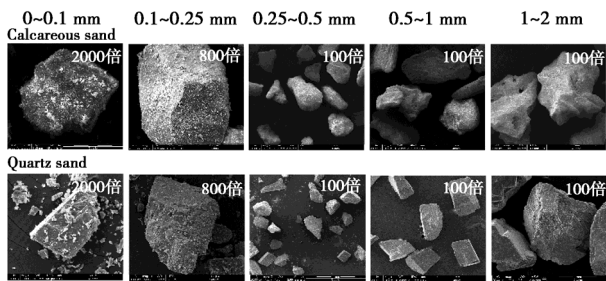


图 5 电镜扫描结果图

Fig. 5 SEM results

PartAn 颗粒形貌扫描结果中, 将各个粒级进行扫描的 30000 颗颗粒的形貌数据取算数平均值, 作为该粒级的综合形貌参数。图 6 为圆度 (Circularity) 和偏度 (Skewness) 在不同粒径范围的变化曲线。图 7 为

凸度 (Convexity) 和凹度 (Concavity) 在不同粒径范围的变化曲线。

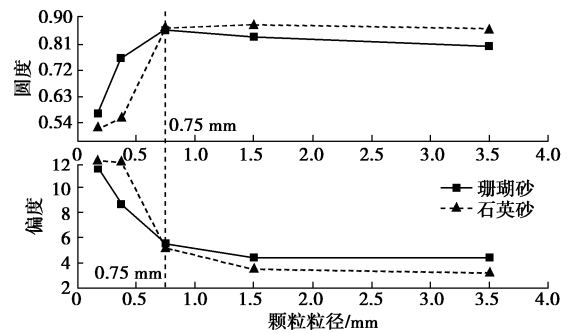


图 6 圆度&偏度-粒径曲线

Fig. 6 Curves of circularity, skewness and particle size

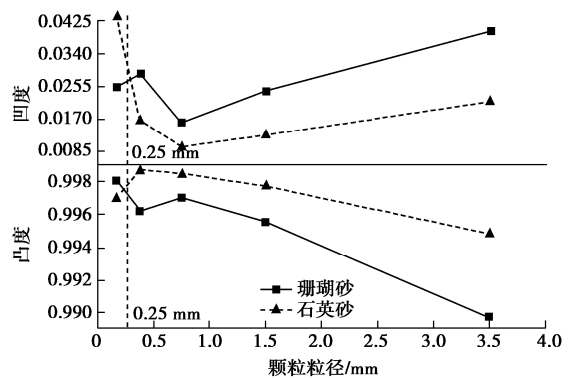


图 7 凹度&凸度-粒径曲线

Fig. 7 Curves of concavity, convexity and particle size

由前文试验原理可知, 圆度值范围为 0~1, 取 1 时颗粒为标准球体; 偏度值大于等于 1, 取 1 时颗粒为标准球体; 凹度值范围为 0~1, 取 0 时颗粒表面光滑; 凸度值范围为 0~1, 取 1 时颗粒表面光滑。所以根据图 5, 粒径 <0.75 mm 时, 珊瑚砂颗粒整体形状较石英砂规则; 粒径 >0.75 mm 时石英砂颗粒整体形状较珊瑚砂规则。根据图 7, 粒径 <0.25 mm 时, 珊瑚砂颗粒表面较石英砂光滑; 粒径 >0.25 mm 时珊瑚砂颗粒表面较石英砂粗糙。所以, 在渗透性方面, 珊瑚砂和石英砂的颗粒形状优势在不同粒径范围内有所不同。

由此可知, 根据 PartAn 颗粒形貌扫描得到的珊瑚砂和石英砂颗粒形状差异性规律与前文电镜扫描结果规律性基本吻合, 且更为精确。总结珊瑚砂颗粒微观性质表如表 4 所示。

表 4 珊瑚砂颗粒微观性质规律表

Table 4 Microscopic properties of coral sand particles

	性质	规律
颗粒形貌	<0.25 mm	珊瑚砂较石英砂颗粒规则, 表面光滑
	0.25~0.75 mm	珊瑚砂较石英砂颗粒规则, 表面粗糙
	>0.75 mm	珊瑚砂较石英砂颗粒不规则, 表面粗糙
颗粒表面	颗粒带电性	珊瑚砂较石英砂不易聚集
	表面亲疏水性	珊瑚砂较石英砂亲水性差

2.3 基于微观性质的渗透性分析

渗透系数 (hydraulic conductivity), 在各向同性介质中, 它定义为单位水力梯度下的单位流量, 表示流体通过孔隙骨架的难易程度。在各向异性介质中, 渗透系数以张量形式表示。渗透系数愈大, 透水性愈强。常用渗透试验分为定水头渗透试验和变水头渗透试验, 前者用于砂质土, 后者用于粉土和黏土的渗透系数测定^[14]。定水头渗透试验中渗透系数常用如下式:

$$K_T = \frac{QL}{AHt}, \quad (1)$$

式中, K_T 为渗透系数 (cm/s), t 为渗透时间 (s), Q 为 t 时间内渗出的水量 (ml), L 为渗流路径长度 (cm), A 为过水断面面积 (cm²), H 为水头损失 (cm)。

变水头渗透试验中渗透系数为

$$k_t = 2.3 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \lg \frac{h_1}{h_2}, \quad (2)$$

式中, k_t 为渗透系数 (cm/s), t_1, t_2 为渗透的开始和结束时间 (s), L 为渗流路径长度 (cm), A 为试样过水断面面积 (cm²), a 为变水头管内横截面积 (cm²), h_1, h_2 为渗透试验开始和结束时的水头高度 (cm), 2.3 为对数转换系数。

本文设置石英砂和珊瑚砂为对照组, 试样粒径为 ≤ 0.1 mm、0.1~0.25 mm、0.25~0.5 mm、0.5~1 mm、1~2 mm 和 2~5 mm 单粒径土。图 8 为试验所得不同粒径的珊瑚砂和石英砂渗透系数曲线。

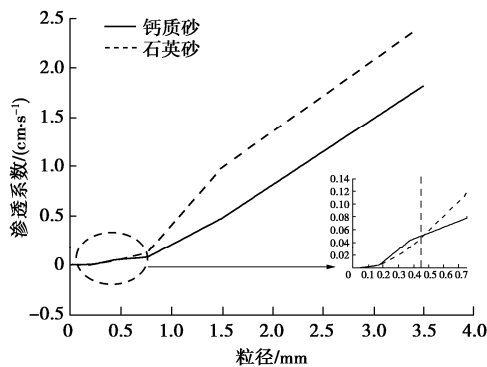


图 8 珊瑚砂&石英砂渗透系数

Fig. 8 Hydraulic conductivities of coral sand and quartz sand

从总体趋势可以看出, 珊瑚砂和石英砂渗透系数均随粒径增大而增大。且石英砂渗透系数大于珊瑚砂。这与前人的研究结论一致。而将曲线局部放大发现, 两种介质渗透性存在分段性规律。粒径 < 0.46 mm 时, 珊瑚砂渗透系数大于石英砂; 粒径 > 0.46 mm 时, 珊瑚砂渗透系数小于石英砂。首先确认 0.46 mm 介于 0.25~0.75 mm。由表 4 可知, 粒径 < 0.25 mm 时, 珊瑚砂颗粒圆且光滑, 形成水力通道有利于孔隙液流动, 且珊瑚砂具有带电性和疏水性优势, 因此珊瑚砂渗透

性大。粒径介于 0.25~0.46 mm 时, 珊瑚砂较石英砂圆, 但表面粗糙, 带电性和疏水性优势仍在, 此时珊瑚砂渗透系数大于石英砂, 说明此范围内珊瑚砂的颗粒形状, 带电性和疏水性作用强于表面粗糙度。粒径 > 0.46 mm 时, 珊瑚砂颗粒形状较石英砂先规则, 后不规则, 颗粒表面粗糙, 带电性和疏水优势仍在。此时珊瑚砂渗透系数小于石英砂, 说明在此范围内, 颗粒形状和表面粗糙度作用强于带电性和疏水性。

综上所述, 颗粒微观性质对珊瑚砂渗透性的影响存在分段性规律, 且在每段范围内各影响因素分为主要因素和次要因素。如表 5 所示。

表 5 珊瑚砂颗粒微观性质与渗透性关系表

Table 5 Relationship between microscopic properties and permeability of coral sand particles

粒径范围	主要因素	次要因素
< 0.46 mm	颗粒整体形状、颗粒带电性、表面亲疏水性	颗粒表面粗糙度
≥ 0.46 mm	颗粒整体形状、颗粒表面粗糙度	颗粒带电性、表面亲疏水性

3 结 论

(1) 从微观角度, 颗粒表面性质和颗粒形状性质是造成珊瑚砂特殊水理性质的原因。

(2) 颗粒表面性质包括颗粒带电性和表面亲疏水性。石英砂较珊瑚砂颗粒体系不稳定, 颗粒更易聚集。珊瑚砂较石英砂颗粒表面亲水性差。

(3) 颗粒形状性质包括颗粒整体形状和颗粒表面粗糙度。 < 0.25 mm 时, 珊瑚砂较石英砂颗粒规则, 表面光滑; 0.25~0.75 mm 时, 珊瑚砂较石英砂颗粒规则, 表面粗糙; > 0.75 mm 时, 珊瑚砂较石英砂颗粒不规则, 表面粗糙。

(4) 微观性质对珊瑚砂渗透性影响存在分段性规律, 且各因素在不同粒径范围内分为主要和次要因素。具体如文中表 5 所示。

参考文献:

- [1] 朱长歧, 周 斌, 刘海峰. 天然胶结钙质土强度及微观结构研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1655 - 1663. (ZHU Chang-qi, ZHOU Bin, LIU Hai-feng. Study on strength and microstructure of natural consolidated calcareous soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1655 - 1663. (in Chinese))
- [2] 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. High

- pressure consolidation deformation analysis of calcareous sediments based on particle fragmentation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(11): 3123 - 3128. (in Chinese))
- [3] 朱长歧, 崔 翔, 胡明鉴, 等. 钙质土电导率和渗透性的相关研究[J]. *岩土力学*, 2018, **39**(增刊 2): 142 - 148. (ZHU Chang-qi, CUI Xiang, HU Ming-jian, et al. Correlation between conductivity and permeability of calcareous soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(S2): 142 - 148. (in Chinese))
- [4] 朱长歧, 周 斌, 刘海峰. 胶结钙质土的室内试验研究进展 [J]. *岩土力学*, 2015, **36**(2): 311 - 319, 324. (ZHU Chang-qi, ZHOU Bin, LIU Hai-feng. Advances in laboratory studies on cemented calcareous soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(2):311 - 319, 324. (in Chinese))
- [5] 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(9): 1389 - 1392. (CHEN Hai-yang, WANG Ren, LI Jian-guo, et al. Shape analysis of calcareous sand particles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005(9): 1389 - 1392. (in Chinese))
- [6] 任玉宾, 王 胤, 杨 庆. 颗粒级配与形状对钙质砂渗透性的影响[J]. *岩土力学*, 2018, **39**(2): 491 - 497. (REN Yu-bin, WANG Yin, YANG Qing. Effects of particle size and shape on the permeability of calcareous sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(2):491 - 497. (in Chinese))
- [7] 蒋明镜, 吴 迪, 曹 培, 等. 基于 SEM 图片的钙质砂连通孔隙分析[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(增刊 1): 1 - 5. (JIANG Ming-jing, WU Di, CAO Pei, DING Zhi-jun. Analysis of connected pores of calcareous sand based on SEM image[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(S1): 1 - 5. (in Chinese))
- [8] 吴 野, 王 胤, 杨 庆. 考虑钙质砂细观颗粒形状影响的液体拖曳力系数试验 [J]. *岩土力学*, 2018, **39**(9): 3203 - 3212. (WU Ye, WANG Yin, YANG Qing. Liquid drag force coefficient test considering the influence of microparticle shape of calcareous sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(9): 3203 - 3212. (in Chinese))
- [9] SHEN Yang, ZHU Ying-hao, LIU Han-long, et al. Macro-meso effects of gradation and particle morphology on the compressibility characteristics of calcareous sand[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2018, **77**(3): 1047 - 1055.
- [10] 张丙树, 顾 凯, 李金文, 等. 钙质砂破碎过程及其微观机制试验研究[J]. *工程地质学报*, 2020, **28**(4): 725 - 733. (ZHANG Bing-shu, GU Kai, LI Jin-wen, et al. Experimental study on calcareous sand crushing process and its microscopic mechanism[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, **28**(4): 725 - 733. (in Chinese))
- [11] 王步雪岩, 孟庆山, 韦昌富, 等. 多投影面下珊瑚砂砾颗粒形貌量化试验研究 [J]. *岩土力学*, 2019, **40**(10): 3871 - 3878. (WANG Bu-xue-yan, MENG Qing-shan, WEI Chang-fu, et al. Quantitative experimental study on the morphology of coral sand and gravel grains under multiple projective surfaces[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, **40**(10): 3871 - 3878. (in Chinese))
- [12] FRANCISCO Zaera. Surface chemistry at the liquid/solid interface[J]. *Surface Science*, 2011, **605**(13/14): 1141 - 1145.
- [13] GIESSEN A E van, BUKMAN Dirk Jan, WIDOM B. Contact angles of liquid drops on low-energy solid surfaces[J]. *Journal of Colloid And Interface Science*, 1997, **192**(1): 257 - 265.
- [14] 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999 [S]. 1999. (Standard for Geotechnical Test Methods: GB/T 50123—1999[S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese))