

DOI: 10.16285/j.rsm.2023.1168

盐溶液环境下钙质砂渗透性影响因素分析

郑思维^{1,2}, 胡明鉴², 霍玉龙³, 黎 宇⁴

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 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;
3. 湖北省地震局, 湖北 武汉 430071; 4. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 渗透性是指溶液在砂土体孔隙中渗透流动的性能, 渗透系数 K 作为衡量土体渗透性的重要指标, 其大小受多种因素综合影响, 目前有关砂土体渗透特性的研究基本在淡水环境下开展, 而钙质砂属于海相沉积砂, 处于具有一定盐浓度的海水环境中。为探究盐溶液环境下, 孔隙比、颗粒粒径及溶液盐含量对钙质砂渗透性的影响, 基于 KAST 土壤饱和水力导度测量仪开展常水头和变水头渗透试验, 并通过 Zeta 电位和接触角试验进行微观探讨。研究结果表明: 钙质砂均值粒径对渗透系数影响最大, 均值粒径变化将导致渗透系数产生数量级上的差异; 渗透系数 K 与渗透液含盐量 P 呈负相关关系, 与孔隙率 n 和均值粒径 d_a 呈正相关关系。通过这些影响因素分析, 建立了考虑渗透液含盐量因素在内的渗透系数计算模型, 该模型可为中国南海人工吹填岛礁渗透性评估、地下淡水演化分析提供参考。

关 键 词: 渗透系数; 含盐量; 孔隙比; 粒径; 计算模型

中图分类号: TU42

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 12-3522-09

Analysis of factors affecting permeability of calcareous sand in salt solution environment

ZHENG Si-wei^{1,2}, HU Ming-jian², HUO Yu-long³, LI Yu⁴

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;
2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. Hubei Earthquake Agency, Wuhan, Hubei 430071, China;
4. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: Permeability is the capacity of a soil for transmitting a fluid, e.g., a salt solution, through soil pores. The permeability coefficient K is an important measurement of the soil permeability, which is affected by various factors. The existing research on the permeability of sandy soil is basically carried out in the freshwater environment. However, the calcareous sand is a typical marine sedimentary sand, which is deposited in the seawater environment with certain salt concentrations. In order to investigate the influence of void ratio, particle size and concentration of the salt solution on the permeability of calcareous sand in a salt solution environment, constant head and falling head permeability tests were carried out using the meter KAST - soil saturated hydraulic conductivity. The microscopic characteristics were investigated through Zeta potential and contact angle tests. The results showed that the mean particle size has the greatest influence on the permeability coefficient of a calcareous sand, and the change of the mean particle size will even lead to the difference in the order of magnitude of the permeability coefficient. The permeability coefficient (K) is negatively correlated with the salinity of the transmitting solution (P), and positively correlated with the porosity (n) and the mean particle size (d_a). A model for predicting the permeability coefficient of calcareous sand taking into account the salt content of transmitting solution has been proposed based on the current experimental studies on the influencing factors. The proposed model can provide a tool for assessing the permeability of artificially reclaimed islands and reefs in the South China Sea and analyzing the evolution of ground freshwater.

Keywords: permeability coefficient; salt content; void ratio; particle size; prediction model

收稿日期: 2023-08-02

录用日期: 2023-10-12

基金项目: 国家重点研发计划课题 (No.2022YFC3102101); 国家自然科学基金面上项目 (No.42377176)。

This work was supported by the National Key Technologies R&D Program of China (2022YFC3102101) and the General Program of National Natural Science Foundation of China (42377176).

第一作者简介: 郑思维, 女, 1999 年生, 硕士研究生, 主要从事工程地质和水文地质方面的测试与分析研究。E-mail: 1396195230@qq.com

通讯作者: 胡明鉴, 男, 1974 年生, 博士, 研究员, 主要从事工程地质和水文地质方面的研究。E-mail: mjhu@whrsm.ac.cn

1 引言

渗透性反映多孔介质内部孔隙传输流体的能力,是评价砂土体性质的重要指标。钙质砂是由珊瑚、贝壳等富含碳酸钙或其他碳酸盐类的物质^[1]在波浪荷载、生物侵蚀、海水溶蚀、颗粒沉积等综合作用下形成的多孔介质岩土材料。钙质砂颗粒形貌极不规则且含有丰富的表面孔隙和内孔隙,特殊的结构使其具有高孔隙比、独特的给水性、容水性、储水性和渗透性。钙质砂作为填海筑岛工程建设的基础材料,其渗透性是工程设计、施工及地下淡水形成演化研究最重要的水文地质参数之一,开展有关钙质砂渗透性及其影响因素的研究,对岛礁基础工程建设、地下淡水演化和生态环境效益都具有重要的意义。

近年来,随着建设海洋强国任务的逐步推进,众多学者对钙质砂渗透性展开了大量的研究。鞠远江等^[2]在不同级配、密实度、水力梯度的条件下分别对中砂、粗砂、砾砂进行渗透试验并对渗液沉淀物进行激光粒度分析,揭示钙质砂颗粒具有黏聚力低、结构松散的特点,致使细颗粒易在渗透条件下流失,流失过程以积聚-破坏-积聚的模式进行,最终形成新的土体结构。Fan 等^[3]基于 CT 扫描和孔隙网络模型,探讨了不同粒径钙质砂的三维孔隙结构和渗透率,认为孔隙数量和孔隙体积分布是影响渗透特性的关键因素。Cui 等^[4]从圆度、粗糙度、颗粒表面带电性、颗粒亲水性等多个微观角度揭示了钙质砂与陆源石英砂的渗透差异性,建立了两种介质渗透系数的转换方程,并通过地下水模拟系统讨论了地层渗透性对淡水透镜体的影响以及渗透性在淡水透镜体形成过程中的敏感性。王新志等^[5]通过变水头渗透试验,在确定钙质粉土渗透性随干密度和初始含水率变化规律的基础上,论证了 Samarasinghe^[6]与 Mesri^[7]等公式计算钙质粉土渗透系数的可靠性,并通过静态吸附试验说明钙质粉土为大孔材料,且在渗透力的作用下更多的微孔和介孔转变为大孔。Wang 等^[8]探讨了不同荷载作用下钙质砂与石英砂渗透性的差异,即随着荷载的增大,钙质砂压缩变形和渗透系数的降低幅度均比石英砂大,建立相对破碎率 B_r 、孔隙度 n 、特征粒径 d_{10} 、不均匀系数 C_u 、曲率系数 C_c 等参数在内的钙质砂渗透系数拟合公式。

通常岩土体处于富含多种盐离子且具有一定酸碱性的溶液环境中^[9],水溶液中的离子在与土体接触过程中会发生一系列吸附、溶蚀、离子交换等

物理化学反应,致使土体颗粒表面性质和内部微观结构发生变化,从而引发土体强度、变形及渗透性的改变^[10],上述渗透试验基本在淡水条件下开展,考虑含盐溶液环境的不多。针对这一问题,李昊等^[11]基于微生物诱导碳酸钙沉淀(microbial-induced calcium carbonate precipitation, MICP)固化技术,通过无侧限抗压强度试验,对比分析了海水、淡水环境下 MICP 固化钙质砂的力学效果,同淡水环境相比, MICP 技术性能在模拟海水环境中能得到更好的发挥。李蓓等^[12]通过三轴排水剪切试验,揭示了温度和盐度对珊瑚砂剪切力学特性的影响规律,相较于温度,珊瑚砂的抗剪强度对盐度更敏感,随盐浓度的增加,黏聚性降低,抗剪强度降低。谌文武等^[13]以氯化钠和硫酸钠盐为研究对象,通过变水头渗透试验,探究盐分对渗透特性的影响,研究结果表明,随着溶液含盐量的增加,土体中起主导作用的孔径减小,土体更密实,渗透系数呈指数型减小。

钙质砂常处于盐度较高的海水环境中,表面粗糙、形状不规则、富含连通性孔隙、内孔隙和表面微孔隙等特殊结构使其更易吸附盐分。上述研究也表明溶液环境对成分以碳酸钙为主且具有生物成因的钙质砂结构、强度等均能产生影响,但目前有关钙质砂在盐溶液环境下渗透特性的研究还很少。为此,本文以粗砂、中砂、细砂、粉砂 4 种不同粒径的钙质砂为研究对象,配制不同浓度盐溶液,基于常水头与变水头室内渗透试验,分析溶液含盐量、孔隙率、粒径等对钙质砂渗透性的影响和规律,结合 Zeta 电位和接触角试验,探讨盐溶液对钙质砂渗透性的微观影响机制,建立包含溶液含盐量因素在内的渗透系数计算模型。

2 试验方案及原理

2.1 试验方案

试验所使用的钙质砂来自南沙群岛某岛礁,试验前按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[14]对钙质砂进行烘干处理,待试样冷却后使用国家标准振筛机完成颗粒筛分试验,将钙质砂筛分为 0.5~1、0.25~0.5、0.075~0.25、0~0.075 mm 共 4 个粒径级别,室内完成相对密度、最大最小干密度等物性试验,结果见表 1。

鉴于氯化钠盐是海水中含量最多的盐类,本试验利用固体氯化钠颗粒与去离子水配制含盐量 P 分别为 0% (去离子水)、2.5%、5%、7.5%、10% 的渗透溶液,以此模拟海水环境下钙质砂的渗透过

程。为分析盐溶液环境下钙质砂渗透性受溶液含盐量、孔隙率及粒径大小的影响,采用 4 个粒径级别、5 组孔隙率和 5 组不同含盐量进行正交渗透试验,共完成 100 个试样组,每个试样组设置 3 个平行样,具体试验方案见表 2,试样级配曲线见图 1。通过 Zeta 电位和接触角试验分析盐溶液环境下颗粒表面性质的变化,探讨盐溶液对钙质砂渗透性的微观影响机制。

表 1 基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of the studied soils

砂样	粒径 d/mm	均值粒径 d_a/mm	最大干密度 $\rho_{d\max}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	最小干密度 $\rho_{d\min}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	相对密 度 G_s
粗砂	0.5~1	0.750 0	1.36	1.09	2.82
中砂	0.25~0.5	0.375 0	1.43	1.15	2.81
细砂	0.075~0.25	0.162 5	1.49	1.20	2.80
粉砂	0~0.075	0.037 5	1.61	1.11	2.81

表 2 渗透试验方案

Table 2 Test program of permeability tests

砂样	孔隙率 n	含盐量 $P/\%$
粗砂	0.565、0.555、0.545、0.535、0.525	
中砂	0.545、0.535、0.525、0.515、0.505	0、2.5、5
细砂	0.525、0.515、0.505、0.495、0.485	7.5、10
粉砂	0.525、0.505、0.485、0.465、0.445	

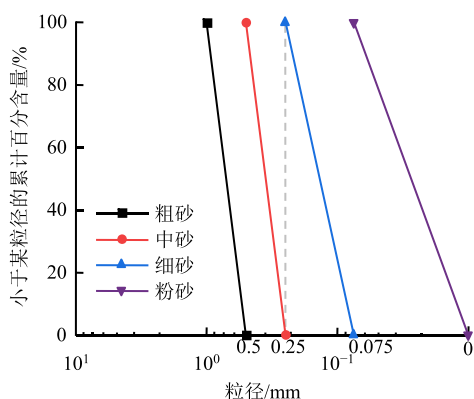


图 1 级配曲线

Fig.1 Grain size distribution curves of studied soils

2.2 试验原理

2.2.1 渗透试验

本试验所采用的仪器为 KAST 土壤饱和和水力导度测量仪 (见图 2), 对渗透性较好的粗砂、中砂、细砂开展常水头渗透试验, 对于渗透性较差的粉砂开展变水头渗透试验。该仪器的渗透环刀内径为 80 mm, 高为 50 mm, 可不考虑边壁效应及尺寸效应对渗透性的影响^[15-16]。

试验操作参照《土工试验方法标准》^[14], 试验前在环刀内壁涂抹适量凡士林, 以防止渗透过程

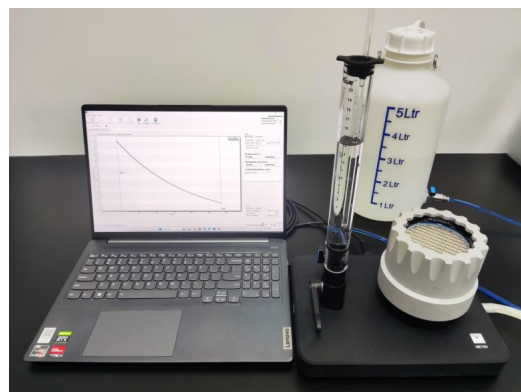


图 2 KAST 土壤饱和水力导度测量仪

Fig.2 Meter KAST - soil saturated hydraulic conductivity

中侧壁漏水而导致测量结果偏大; 依据设计要求称取各粒径钙质砂进行分层装样, 抚平刮毛压实, 致使试样顶部与环刀口齐平; 使用较低的水头将砂样自下而上进行浸水排气饱和; 试验时渗流路径自下而上, 为避免砂样因水头过大而发生变形破坏, 水头高度按照 1、1.1、1.2 cm…逐级增加以此获得可行性水头, 正式试验时常水头试验与变水头试验所采用的水头高度分别为 3、5 cm。

常水头试验利用马氏瓶原理, 水头压力由毛细管浸没水中的深度控制, 且随时间保持恒定。量筒中的水位呈线性下降, KAST 自动记录渗透累积流量, 在视图中设置 2 个以上目标水位点并根据渗流进程进行标记, 最终按照式 (1) 获得渗透系数测量值:

$$K = \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \cdot \frac{Q}{A_{\text{Sample}} t} \cdot \frac{L}{H} \quad (1)$$

式中: K 为渗透系数 (cm/s); t 为渗透时间 (s); Q 为 t 内量筒的稳态流量 (cm^3); A_{Sample} 为砂样的横截面积 (cm^2); L 为渗透液流经的长度, 即砂样高度 (cm); H 为进水口与出水口的水头差 (cm); η_T 为温度 T ($^{\circ}\text{C}$) 时水的动力黏滞系数 ($10^{-6} \text{ kPa} \cdot \text{s}$); η_{20} 为 20°C 时水的动力黏滞系数 ($10^{-6} \text{ kPa} \cdot \text{s}$)。

变水头试验通过 KAST 展开自动测量, 可视化记录数据, 短时间内获得稳定的渗透系数测量值, 渗透系数推导过程如下:

根据量筒内水位变化获得单位面积渗流量:

$$q = \frac{Q}{A_{\text{Sample}}} = \frac{A_{\text{Bur}}}{A_{\text{Sample}}} \cdot \frac{d_H}{d_t} \quad (2)$$

联合达西定律:

$$q = -K \frac{H}{L} \quad (3)$$

可得

$$\frac{1}{H} d_H = -K \cdot \frac{A_{\text{Sample}}}{A_{\text{Bur}}} \cdot \frac{d_t}{L} \quad (4)$$

从时间 $t = 0$ 时的初始状态即 $H = H_0$ ，到时间 t 给出积分：

$$\ln H(t) - \ln H(0) = -K \cdot \frac{A_{\text{Sample}}}{A_{\text{Bur}}} \cdot \frac{t}{L} \quad (5)$$

$$H(t) = H(0) \cdot \exp\left(-K \cdot \frac{A_{\text{Sample}}}{A_{\text{Bur}}} \cdot \frac{t}{L}\right) = a \exp(-bt) \quad (6)$$

将指数函数与观测到的时间序列 $H(t)$ 进行拟合，确定系数 b ，则饱和渗透系数为

$$K = \frac{\eta_r}{\eta_{20}} \frac{A_{\text{Bur}}}{A_{\text{Sample}}} \cdot Lb \quad (7)$$

式中： A_{Bur} 为量筒的横截面积 (cm^2)； t 为渗透时间 (s)； L 为渗透液流经的长度，即砂样高度 (cm)； b 为拟合系数 ($1/\text{s}$)。

2.2.2 Zeta 电位试验

试验采用 Zeta 电位分析仪，其型号为 Malvern Zetasizer Nano ZS90。Zeta 电位代表分散体系颗粒表面与溶液之间的电势差，用于衡量颗粒之间吸引力和排斥力的大小，电位正负代表粒子所带电荷类型，绝对值用于判断分散体系的稳定性。Zeta 电位绝对值越大，粒间排斥力大于吸引力，分散体系越稳定；绝对值越小，粒间吸引力大于排斥力，分散体系越不稳定，颗粒之间易聚集。试验测试要求粉末状样品，本文选取钙质粉砂分别在不同含盐量溶液中进行测试，试验结果适用于对各个粒径钙质砂的表面性质进行评价^[17]。

2.2.3 接触角试验

试验采用接触角测量仪，其型号为 Dataphysics OCA 20。接触角指溶液与固体表面之间的夹角 θ (见图 3)，其大小反映液体分子与固体表面之间的相互作用力，揭示固体表面亲水及疏水性。 $\theta < 90^\circ$ ，固体表面为亲水性，角度越小，液体对固体表面的黏附力越大，润湿性越好；反之， $\theta > 90^\circ$ ，固体表面为疏水性，角度越大，液体对固体表面的黏附力越小，孔隙传输流体的能力越强，渗透系数越大。试验测试要求粉末状样品，本文通过动态接触角试验，得到钙质粉砂在不同含盐量溶液中的亲水性，类似于 Zeta 电位分析，试验结果适用于对各个粒径钙质砂的表面性质进行评价。

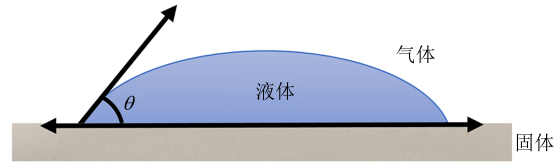


图 3 接触角图示

Fig.3 Graphical illustration of contact angle

3 试验结果与分析

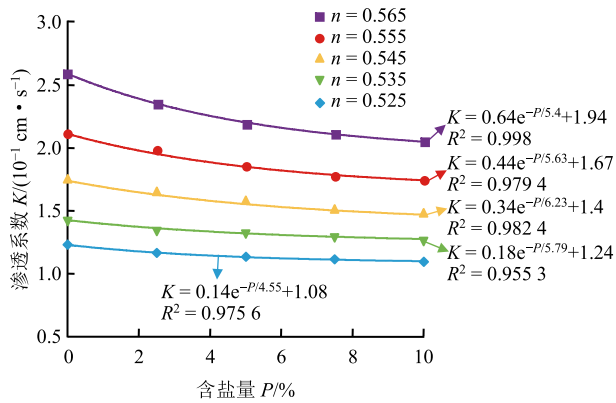
3.1 含盐量对渗透系数的影响

图 4 为渗透系数随溶液含盐量的关系变化曲线。由图可知，渗透系数随盐浓度的增加呈负指数型减小，变化范围在一个数量级以内，二者相关系数均在 0.95 以上，属于高度相关，这与邓友生^[18]和李朋林^[19]等所得结论一致。以粗砂 $n = 0.565$ 为例，当渗透溶液含盐量由 0% 逐步增加至 10% 时，与渗透溶液为去离子水相比，渗透系数分别降低了 9.3%、15.4%、18.5%、20.8%。

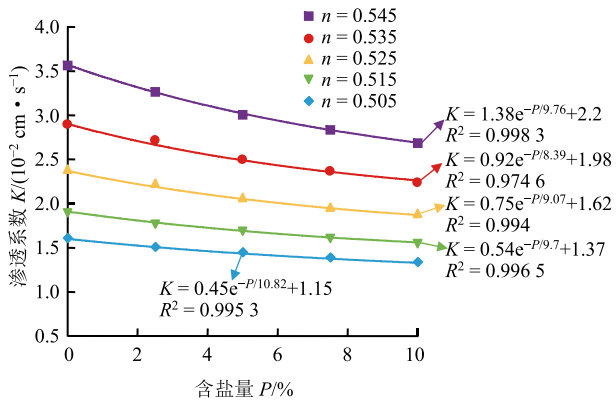
针对盐浓度对渗透系数的影响：溶液黏度影响流体分子之间相互作用的强度；表面张力、接触角影响气-液交界面与固相基质间的毛细作用^[20]；双电子层影响固-液间的吸附作用^[21]。当盐含量增加时，溶液黏度增大，流体分子之间的相互作用力增强，渗透液通过颗粒间孔隙时所受阻力增大，渗流速度降低，渗透系数减小。

表面张力存在于气-液两相界面上，在一定溶液种类和环境条件下，与气-液两相密度差呈正相关关系^[22]。忽略气相密度的变化，当盐度增加时，溶液密度增大，表面张力增大，引起接触角大小改变。如图 5 所示，随盐度增加，固-液面接触角呈减小的趋势，颗粒间孔隙的毛细作用增强，即液体对固体表面的黏附力更大，颗粒表现为更亲水，溶液流经孔隙时所受阻力变大，致使多孔介质的渗透能力减弱，渗透系数降低。

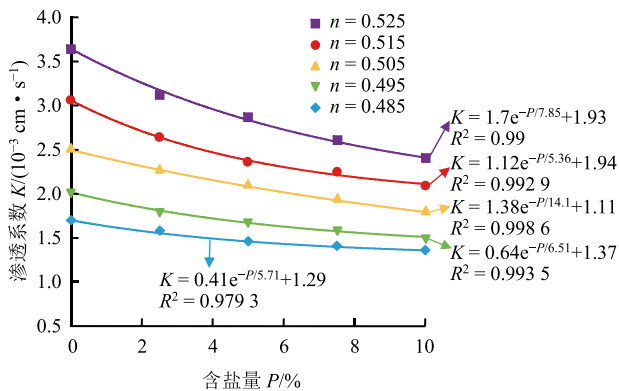
基于 Gouy-Chapman 扩散双电层理论，在盐溶液环境下，渗透液是含有大量离子的电解液，钙质砂颗粒表面携带负电荷，在渗透过程中吸附渗透液中的阳离子而形成双电层（吸附层和扩散层）。在颗粒表面微电场效应作用下，极性水分子定向排列并包裹在颗粒表面，形成具有类似固体性质的黏滞性结合水膜，自由水流动阻力增大，在宏观角度表现为渗流速度减小，渗透系数降低^[23]。结合陈信升等^[24]所得试验结果，随着 NaCl 浓度增大，渗透液中 Na^+ 损失量增加，表明土体在渗透过程中吸附了更多的阳离子，颗粒表面电位升高（见图 6），形成的结合水膜厚度增加，渗流黏滞阻力更大，颗



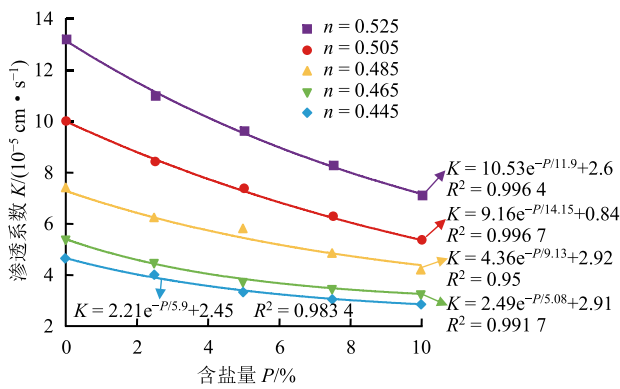
(a) 粗砂



(b) 中砂



(c) 细砂



(d) 粉砂

图 4 渗透系数随含盐量的关系变化曲线

Fig.4 Variation of permeability coefficient with salt content for different soils

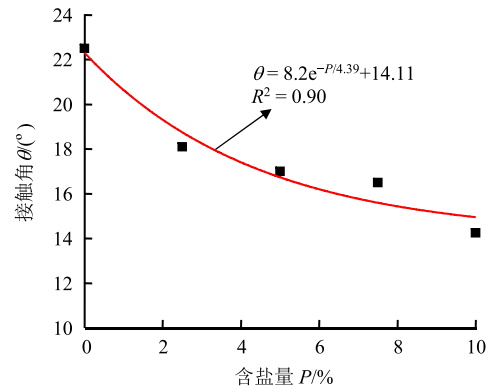


图 5 接触角随溶液含盐量变化图

Fig.5 Variation of contact angle with salt content of solution

粒之间更聚集, 孔隙尺寸减小, 有效孔隙率降低, 渗透系数降低。

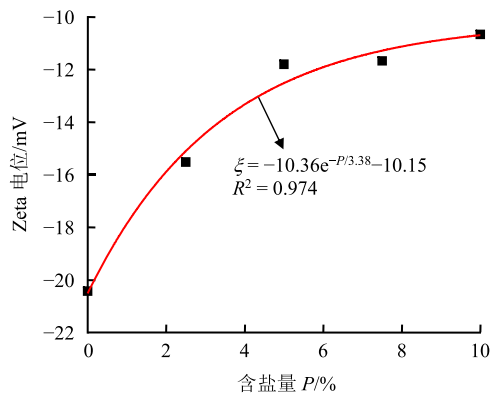


图 6 Zeta 电位随含盐量的关系变化曲线

Fig.6 Variation of Zeta potential with salt content

由图 4 仍可知, 当颗粒粒径一定时, 随溶液盐度增加, 孔隙率越大的试验组渗透系数降低的程度更大。以中砂为例, 当渗透液含盐量 P 为 10%, 孔隙率 n 为 0.545 时, 与渗透液为去离子水相比, 渗透系数降低了 24.65%, 而当孔隙率 n 为 0.505 时, 渗透系数仅降低了 16.88%。这是因为孔隙率增加, 颗粒间孔隙体积增大, 孔隙水含量增多, 盐水的黏滞效应更明显。

为定量说明在孔隙率相同的条件下, 颗粒粒径越小, 渗透系数对盐度变化的反应更敏感, 将粗砂和粉砂进行对比分析。当孔隙率 n 为 0.525, 渗透液含盐量 P 为 10% 时, 与渗透液为去离子水相比, 粗砂的渗透系数降低了 10.57%, 而粉砂的渗透系数降低了 46.14%, 降低程度大约为粗砂的 4.5 倍。究其原因, 构成渗透试样的颗粒越小, 其比表面积更大, 颗粒表面富集电荷, 在颗粒和电解质水溶液的相互作用下, 更多的自由水被束缚在颗粒表

面形成结合水, 渗流黏滞阻力更大, 进而削弱多孔介质的渗透性。对于粗颗粒土, 微电场效应作用下, 颗粒表面结合水膜厚度比孔隙尺度小得多, 对渗流的影响很小。

3.2 孔隙率对渗透系数的影响

图 7 为渗透系数随孔隙率的关系变化曲线。由图可知, 无论在去离子水还是盐溶液环境下, 渗透系数均与孔隙率呈正相关关系, 且随孔隙率增加, 渗透系数呈指数型增大, 二者相关系数均在 0.97 以上, 属于高度相关。这是因为孔隙率越大, 单位土体包含的孔隙体积越大, 孔隙之间连通性更好, 土体结构越松散, 在相同水头下, 渗透液在土体内部孔隙中渗透流动的能力更强, 单位时间内渗透流量增大, 渗透系数增大。

当颗粒粒径相同时, 溶液含盐量越低, 渗透系数随孔隙率变化更明显。以细砂为例, 当孔隙率 n 由 0.485 增至 0.525, 渗流液含盐量 P 为 0% 时, 渗透系数升高 53.3%, 而当 P 为 10% 时, 渗透系数仅升高 43.6%。因为含盐量升高时, 渗透液黏度增大, 致使钙质砂渗透性整体减弱, 渗透系数随孔隙率的变化程度降低。

3.3 粒径对渗透系数的影响

当钙质砂样品孔隙率 n 为 0.525 时, 不同含盐量环境下渗透系数与均值粒径 d_a 的关系曲线如图 8 所示。由图可知, 在相同孔隙率和含盐量的条件下, 颗粒粒径不同, 渗透系数不同, 且渗透系数随粒径增大而呈现数量级上的改变。这是由于孔隙率为孔隙体积与材料总体积之比, 而孔隙率和材料总体积相同, 则孔隙体积相同。均值粒径越小, 颗粒之间的孔隙尺寸越小, 孔隙数量增多, 渗流过程中渗透路径的迂曲程度增大, 水头损失增大, 单位时间的渗流量减小, 渗透系数降低^[25]。此外, 溶液含盐量越低, 渗透系数随均值粒径的变化程度越大, 同 3.2 节所论述一致, 渗透液黏度随含盐量升高而增大, 致使盐溶液环境下钙质砂样品渗透性整体减弱, 渗透系数随粒径区间的变化程度降低。

4 渗透系数计算模型

在实际工程中, 往往需要快速求取某地层的渗透系数、大量试样的渗透系数, 不少学者通过试验和理论分析建立了有效粒径、孔隙比、级配参数、形状参数等因素与渗透系数的关系^[26-27], 但未涉及含盐量参数, 考虑到钙质砂处于一定盐度的海洋环境中, 属于海相沉积砂, 且具有特殊生物成因、颗粒形状极不规则, 富含表面孔隙和内孔隙等

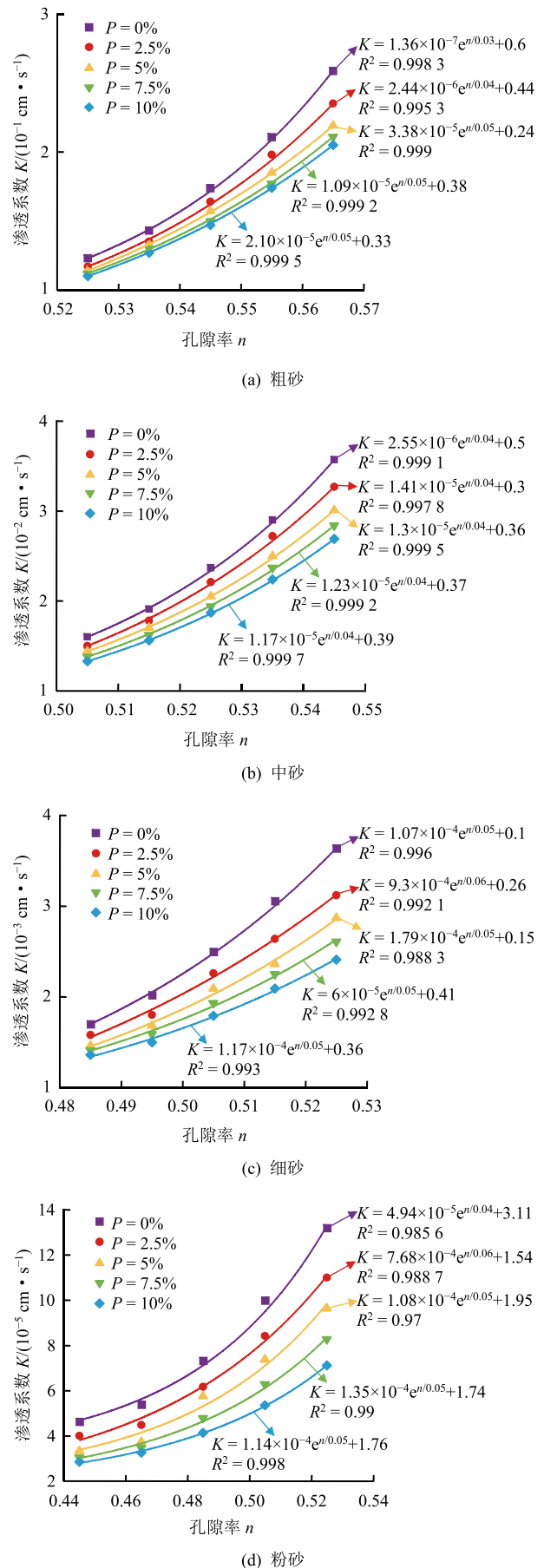


图 7 渗透系数随孔隙率的关系变化曲线
Fig.7 Variation of permeability coefficient with porosity for different soils

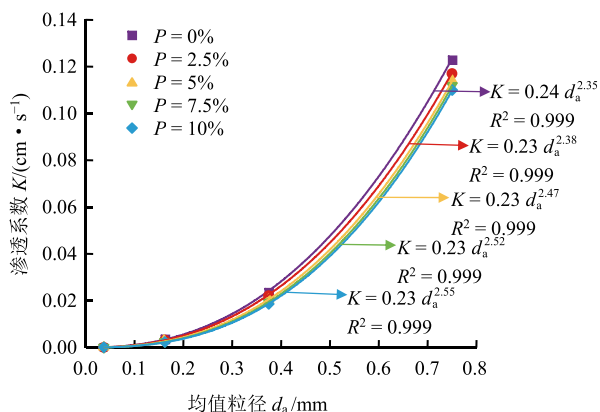


图8 渗透系数随均值粒径的关系变化曲线

Fig.8 Variation of permeability coefficient with mean particle size

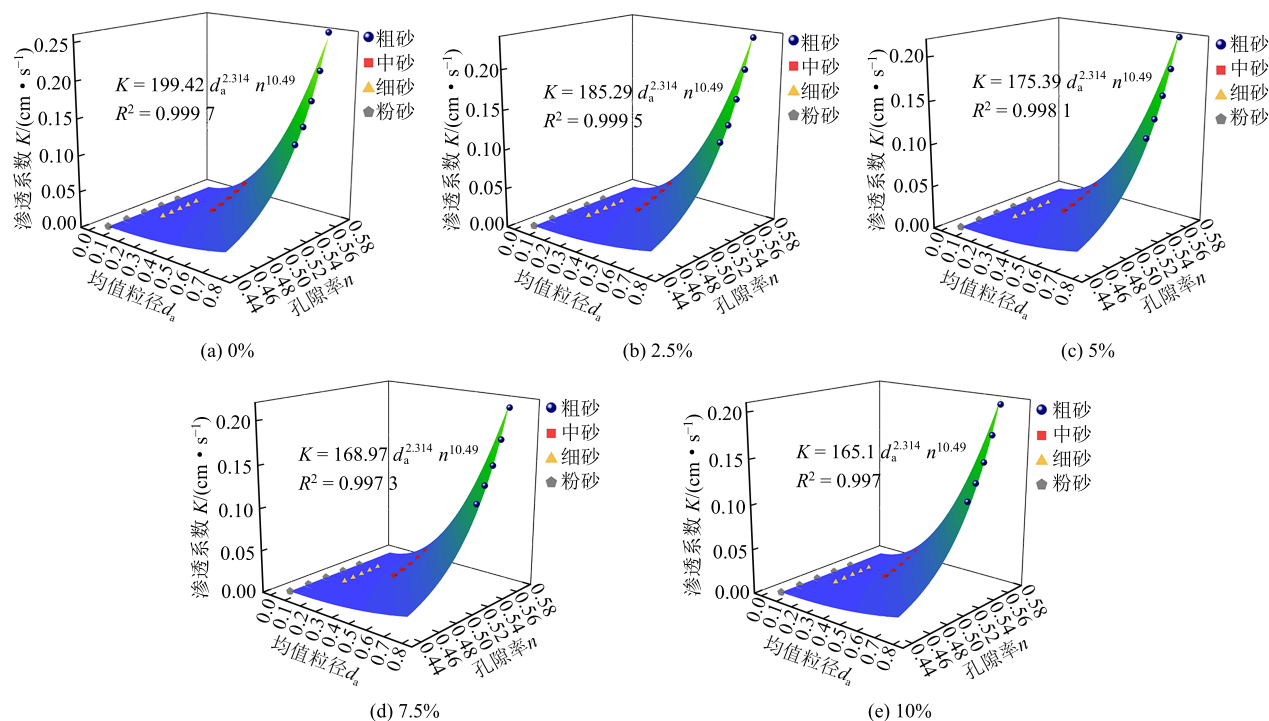


图9 不同盐度下渗透系数随均值粒径与孔隙率的关系变化曲面图

Fig.9 Variation of permeability coefficient as a function of mean particle size and porosity at different salt contents

图 10 为系数 A 随含盐量 P 的关系变化曲线。由图可知, 系数 A 随含盐量 P 的增加呈负指数型减小, 相关系数达 0.99, 属于高度相关。即

$$A = 42.83e^{-P/6} + 156.6 \quad (9)$$

由此得出考虑含盐量因素在内的渗透系数计算模型:

$$K = (42.83e^{-P/6} + 156.6)d_a^{2.314}n^{10.49} \quad (10)$$

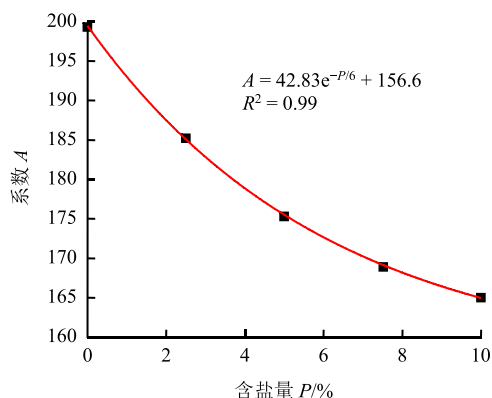
为评估式 (10) 渗透系数计算模型, 通过线性回归分析建立渗透系数实测值与预测值之间的相关关系 (见图 11)。由图可知, 预测值与实测值分布在直线 $y = x$ 附近, 表明该计算模型具有较高的

特殊结构。由上述分析可知, 盐溶液环境下钙质砂渗透系数与含盐量 P 、孔隙率 n 、均值粒径 d_a 3 个因素密切相关, 因此, 在上述分析的基础上, 初步建立了适用于钙质砂且考虑含盐量在内的渗透系数计算模型, 可用于岛礁地层渗透系数的估计:

$$K = Ad_a^B n^C \quad (8)$$

式中: A 为关于含盐量的参数表达式; B 、 C 为模型参数。

图 9 为不同盐度下渗透系数随粒径与孔隙率的关系变化曲面图, 由图可知, 在 5 个盐度梯度下, 渗透系数均与 $Ad_a^{2.314}n^{10.49}$ 呈高相关性, R^2 均在 0.99 以上, 即 $B = 2.314$, $C = 10.49$ 。

图10 系数 A 随含盐量 P 的关系变化曲线Fig.10 Variation of coefficient, A with salt content, P

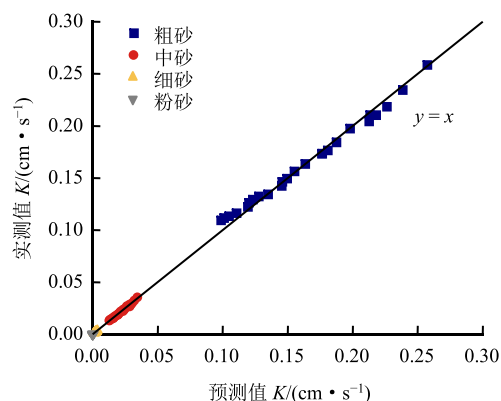


图 11 渗透系数实测值与预测值相关关系

Fig.11 Comparison between measured and predicted permeability coefficients for different soils

预测精度, 适于不同盐溶液下钙质砂渗透系数预测。

5 结 论

(1) 盐溶液环境下, 钙质砂孔隙结构受溶液黏滞度、表面张力、接触角、双电子层等影响, 试样渗透系数随溶液盐浓度的增加呈负指数型减小。孔隙率越大、颗粒粒径越小, 渗透系数对盐度更敏感。

(2) 对于钙质砂, 无论在去离子水还是盐溶液环境下, 试样渗透系数与孔隙率、颗粒粒径均呈正相关关系, 其中颗粒粒径的变化能导致渗透系数产生数量级上的差异。

(3) 综合考虑溶液含盐量、孔隙率、均值粒径对渗透系数的影响, 初步建立了适用于钙质砂且包含含盐量因素在内的渗透系数计算模型, 可用于岛礁地层渗透系数的估计。

参 考 文 献

- [1] 胡明鉴, 蒋航海, 崔翔, 等. 钙质砂电导率与相关问题初探[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊 2): 158-162.
HU Ming-jian, JIANG Hang-hai, CUI Xiang, et al. A preliminary study on the conductivity and correlation problems of calcareous sands[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(Suppl.2): 158-162.
- [2] 鞠远江, 胡明鉴, 秦坤坤, 等. 珊瑚礁岛钙质砂细颗粒渗透运移规律研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1245-1252, 1265.
JU Yuan-jiang, HU Ming-jian, QIN Kun-kun, et al. Study on the infiltration and transportation law of fine particles in calcareous sand on coral reef island[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(5): 1245-1252, 1265.
- [3] FAN Z, HU C, ZHU Q, et al. Three-dimensional pore characteristics and permeability properties of calcareous sand with different particle sizes[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(3): 1-12.
- [4] CUI X, ZHU C, HU M, et al. Permeability of porous media in coral reefs[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(6): 1-16.
- [5] 王新志, 王星, 胡明鉴, 等. 吹填人工岛地基钙质粉土夹层的渗透特性研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3127-3135.
WANG Xin-zhi, WANG Xing, HU Ming-jian, et al. Study on permeability characteristics of calcareous chalk interlayer in the foundation of blown artificial island[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(11): 3127-3135.
- [6] SAMARASINGHE A M, HUANG Y H. Permeability and consolidation of normally consolidated soils[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1982, 108(6): 835-850.
- [7] MESRI G, OLSON R E. Mechanisms controlling the permeability of clays[J]. *Clay and Clay Mineral*, 1971, 19(3): 151-158.
- [8] WANG S, LEI X W, MENG Q S, et al. Experimental study on the influence of load on permeability coefficient of calcareous sand[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 304(5): 052066.
- [9] 赵续月, 颜荣涛, 梁维云, 等. 渗透吸力对饱和黏土变形-强度特性的影响[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(3): 451-455.
ZHAO Xu-yue, YAN Rong-tao, LIANG Wei-yun, et al. Influence of infiltration suction on deformation-strength characteristics of saturated clay[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2017, 37(3): 451-455.
- [10] 张倩. 水化学环境变化对多孔介质强度和渗透性的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
ZHANG Qian. Effects of water chemistry environmental changes on the strength and permeability of porous media[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [11] 李昊, 唐朝生, 刘博, 等. 模拟海水环境下 MICP 固化钙质砂的力学特性[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1931-1939.
LI Hao, TANG Chao-sheng, LIU Bo, et al. Mechanical properties of MICP-cured calcareous sand under simulated seawater environment[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(10): 1931-1939.
- [12] 李蓓, 雷潇, 徐家鹏, 等. 温度和盐度对珊瑚砂抗剪力

- 学性能的影响[J]. 水电能源科学, 2023, 41(1): 155-158, 111.
- LI Bei, LEI Xiao, XU Jia-peng, et al. Effects of temperature and salinity on shear mechanical properties of coral sand[J]. **Hydropower Energy Science**, 2023, 41(1): 155-158, 111.
- [13] 湛文武, 吕海敏, 吴国鹏, 等. 盐分对遗址土体渗透性及孔径的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(8): 2747-2751.
- CHEN Wen-wu, LÜ Hai-min, WU Guo-peng, et al. Effect of salinity on permeability and pore size of site soils[J]. **Journal of Central South University (Natural Science Edition)**, 2016, 47(8): 2747-2751.
- [14] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [15] 刘孟适, 罗强, 蒋良淮, 等. 粗粒土渗透试验边壁孔隙特征及处理层最优厚度研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1787-1796.
- LIU Meng-shi, LUO Qiang, JIANG Liang-wei, et al. Research on pore characteristics of sidewall and optimal thickness of treatment layer in infiltration test of coarse-grained soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(5): 1787-1796.
- [16] 朱国胜, 张家发, 陈劲松, 等. 宽级配粗粒土渗透试验尺寸效应及边壁效应研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2569-2574.
- ZHU Guo-sheng, ZHANG Jia-fa, CHEN Jin-song, et al. Research on size effect and sidewall effect in infiltration test of wide-graded coarse-grained soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(9): 2569-2574.
- [17] 崔翔, 朱长歧, 胡明鉴, 等. 珊瑚砂渗透性的微观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(12): 2336-2341.
- CUI Xiang, ZHU Chang-qi, HU Ming-jian, et al. Research on micro-mechanism of permeability of coral sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(12): 2336-2341.
- [18] 邓友生, 何平, 周成林, 等. 含盐土渗透系数变化特征的试验研究[J]. 冰川冻土, 2006(5): 772-775.
- DENG You-sheng, HE Ping, ZHOU Cheng-lin, et al. Experimental study on the change characteristics of permeability coefficient of salt-bearing soil[J]. **Glacial Permafrost**, 2006(5): 772-775.
- [19] 李朋林. 非饱和土中水盐(NaCl)迁移试验研究与数值模拟[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- LI Peng-lin. Experimental study and numerical simulation of water salt (NaCl) migration in unsaturated soil[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [20] 朱瑶, 赵振. 界面化学基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 1996: 41.
- ZHU Yao, ZHAO Zhen. Fundamentals of interfacial chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1996: 41.
- [21] ISRAELACHVILI J N. Intermolecular and surface forces[M]. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2011: 59-65.
- [22] 高世桥, 刘海鹏. 毛细力学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- GAO Shi-qiao, LIU Hai-peng. Capillary mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [23] 梁健伟. 软土变形和渗流特性的试验研究与微细观参数分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- LIANG Jian-wei. Experimental study on deformation and seepage characteristics of soft soil and analysis of microscopic parameters[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [24] 陈信升, 丁选明, 蒋春勇, 等. 吹填珊瑚岛礁钙质软泥的渗透特性试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(4): 58-66.
- CHEN Xin-sheng, DING Xuan-ming, JIANG Chun-yong, et al. Experimental study on permeability characteristics of calcareous soft mud in blown-in coral reefs[J]. **Journal of Civil and Environmental Engineering**, 2021, 43(4): 58-66.
- [25] 苏立君, 张宜健, 王铁行. 不同粒径级砂土渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1289-1294.
- SU Li-jun, ZHANG Yi-jian, WANG Tie-xing. Experimental study on infiltration characteristics of sandy soils with different grain size grades[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(5): 1289-1294.
- [26] 胡明鉴, 崔翔, 王新志, 等. 细颗粒对钙质砂渗透性的影响试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 2925-2930.
- HU Ming-jian, CUI Xiang, WANG Xin-zhi, et al. Experimental study on the effect of fine particles on the permeability of calcareous sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(8): 2925-2930.
- [27] 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 characteristics of blown-in calcareous sand in South China Sea islands and reefs[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(6): 1557-1564, 1572.