

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221385

# 含钙质砂无粘性土的渗透特性试验及经验模型

钱财富<sup>1</sup>, 宋新江<sup>1</sup>, 马 露<sup>2</sup>

(1. 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 安徽 蚌埠 233000; 2. 安徽科技学院建筑学院, 安徽 蚌埠 233000)

**摘要:** 为进一步分析含钙质砂无粘性土的渗透特性, 采用南海钙质砂与细颗粒石英粉作为试验材料配置试验土样, 利用 GDS 高压三轴仪试验系统和常水头渗透仪, 开展钙质砂含量、初始孔隙比和有效应力对无粘性土的渗透特性影响研究, 并建立考虑有效应力的渗透系数经验模型。试验结果表明, 钙质砂含量低于 40% 时, 土颗粒结构为无粘性土基质, 孔隙结构由细颗粒土决定; 钙质砂土样结构为砂颗粒骨架结构, 渗透系数数量级显著增大; 随有效应力的增加, 试样渗透系数呈幂函数降低; 建立含钙质砂无粘性土的渗透系数经验模型, 模型参数与土样性质关系密切, 计算值与试验值吻合度较好。研究结果可为工程实践提供参考。

**关键词:** 钙质砂; 无粘性土; 渗透系数; 有效应力; 经验模型

**中图分类号:** TV139.11; TU43

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)03-0128-04

## 1 引言

土体的渗透特性是建筑工程建设研究的重要内容之一, 随着我国南海海域的开发建设, 越来越多的建筑工程项目深入海洋, 与传统陆源砂不同, 我国南海地层中含有多孔易碎的钙质砂, 其工程性质与以往研究的硅质砂差异较大<sup>[1]</sup>。钙质砂的特殊内部结构使其渗透性受到细颗粒含量、压实度和颗粒形状的影响<sup>[2-6]</sup>。目前, 关于钙质砂渗透性的研究成果较丰富, 如任玉宾等<sup>[7]</sup>采用 SEM 与图像处理技术, 引入钙质砂颗粒形态指标对渗透性的影响, 发现颗粒形状具有较强的结构性和不均匀性, 同密度下钙质砂渗透系数小于石英砂; 苏立君等<sup>[8]</sup>开展单一粒径和多粒径级砂土的常水头渗透试验, 讨论研究了孔隙率、曲率系数和不均匀系数对渗透性的影响, 并给出了经验公式; 钱锟等<sup>[9]</sup>参照石英砂渗透模型的建立方法, 进一步考虑颗粒级配和水温的影响。但在压缩固结过程中, 含钙质砂土样的渗透系数变化规律鲜有研究。为进一步研究含钙质砂无粘性土的渗透特性, 基于 GDS 高压三轴仪测试系统和 TST-70 型常水头渗透仪, 开展一系列含钙质砂无粘性土的

渗透试验, 研究钙质砂含量、初始孔隙比和有效应力对试验土样渗透系数的影响, 基于试验数据, 建立一种与有效应力相关的渗透系数经验模型, 以为工程实践提供参考。

## 2 渗透试验

### 2.1 试验材料

采用我国南海海域岛礁钙质砂(CS)和无粘性土(破碎的石英砂)作为试验土样的组成材料。无粘性土呈块状, 不易破碎, 最大粒径小于 75  $\mu\text{m}$ , 疏松多孔钙质砂的粒径在 50~100  $\mu\text{m}$  范围内, 渗透试验开始前按试验方案配制不同钙质砂含量的目标试样, 基于广州海洋地质局的勘测数据, 本文四种试样钙质砂含量取为 0%、20%、40%、100%, 颗分曲线见图 1。

为直观观察含钙质砂无粘性土的微观孔隙特征, 对 20% CS 试样进行 CT 图像三维扫描, 见图 2。由图 2 可知, 钙质砂颗粒呈块状, 部分颗粒内孔隙丰富, 部分颗粒内孔隙较少, 主要是由于钙质砂的组成成分包括珊瑚碎、螺和贝壳等的碎块, 碳酸盐含量高, 各组分的内孔隙率差异较大。本文试验钙质砂平均内孔隙比为 0.202。

**收稿日期:** 2022-07-07, **修回日期:** 2022-09-16

**基金项目:** 安徽省教育厅重点研究项目(KJ2021A0020); 安徽省优秀拔尖人才培养项目(gxyq2022052); 安徽科技学院科研发展基金(811500); 2021 博士稳定人才项目(BSWD202104)

**作者简介:** 钱财富(1980-), 男, 高级工程师, 研究方向为岩土工程试验和工程质量检测, E-mail: qianfu66@163.com

**通讯作者:** 马露(1988-), 男, 博士、副教授, 研究方向为地基基础工程, E-mail: mal@ahstu.edu.cn

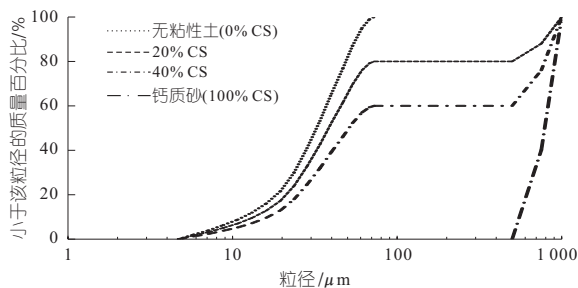


图 1 不同钙质砂含量下试样的颗分曲线

Fig. 1 Particle size curve of samples with different calcareous sand content

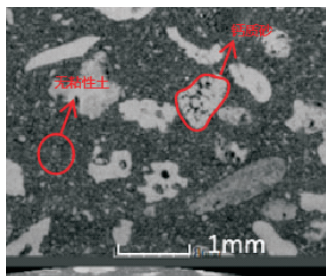


图 2 含钙质砂无粘性土 CT 图像

Fig. 2 CT image of cohesionless soil with carbonate sand

### 2.2 试验方案

分别采用 GDS 高压三轴仪和 TST-70 型常水头渗透仪测量 0%~40% CS 试样和 100% CS 试样的渗透系数,重点研究初始孔隙比、钙质砂含量和有效应力对渗透系数的影响。不同工况下的渗透试验方案见表 1。

表 1 渗透试验方案

Tab. 1 Penetration test scheme

土样	初始孔隙比 $e_0$	有效围压 $p'/\text{MPa}$	试验仪器
0% CS	0.691, 0.731, 0.768	0.2, 0.4, 0.6,	GDS 高压三轴仪
20% CS	0.591, 0.647, 0.683	0.8, 1, 2, 4,	GDS 高压三轴仪
40% CS	0.501, 0.545, 0.635, 0.671	6, 8, 10	GDS 高压三轴仪
100% CS	0.98, 1.03, 1.12		TST-70 型常水头 渗透仪

在 40% CS 以下试样渗透试验中,为满足试样饱和度要求,采用 800 kPa 作为试样反压,且当有效围压达到 10 MPa 时,钙质砂并未发生破碎<sup>[10]</sup>,每一级有效围压施加后,待试样体积变形量小于 0.001 mm<sup>3</sup>/min 时,认为试样达到压缩稳定状态,进而开展渗透试验。在不同水力梯度下,记录固定时间内的流量值,用以计算渗流速度。根据渗流水力梯度与渗流速度,绘点图后,根据达西公式,拟合得到不同有效应力下的渗透系数,及孔隙比与有效应力的关系,并进行下一步分析。达西公式为:

$$v = ki \quad (1)$$

式中,  $v$  为渗流速度, cm/s;  $k$  为渗透系数, cm/s;  $i$  为水力梯度。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 有效应力对渗透系数的影响

土颗粒在有效应力作用下相互嵌挤,孔隙体积明显减小,孔隙结构改变,土样内渗流路径曲折度增加,对渗透系数影响显著。为定量研究有效应力对渗透系数的影响规律,在  $p'-k$  坐标系中,绘制不同钙质砂含量、不同初始孔隙比下,有效应力与渗透系数的关系见图 3。由图 3 可知,随着有效应力的增加,三种砂土在不同初始孔隙比下的渗透系数先快速减小,后趋于稳定,两者呈现幂函数关系。分析原因为有效应力增大情况下,砂颗粒受到挤压作用而发生错动和位移,颗粒间孔隙明显减小,并对孔隙结构及孔喉尺寸有一定影响,进而改变了渗流通道的曲折度,降低渗透系数;当有效应力继续增大时,由于前期的等向固结作用,试样刚度提高,在相同有效应力增幅情况下,土颗粒间的嵌挤作用、重排列作用减弱,渗流路径变化不大,渗透系数趋于稳定。

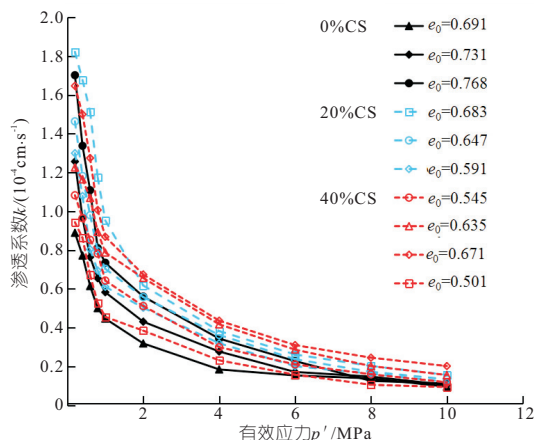


图 3 有效应力与渗透系数的关系

Fig. 3 Relationship between effective stress and permeability

### 3.2 孔隙率对渗透系数的影响

有效应力增大是降低孔隙体积、结构和曲折度的外因,孔隙率  $\varphi$  是孔隙体积的直观指标,如 K-C 渗透模型中  $k$  与  $\varphi^3/(1-\varphi)^2$  呈线性关系<sup>[11]</sup>,根据本文室内试验,分析两者在不同有效应力下的关系,见图 4。

显然,在不同有效应力下,  $k$  与  $\varphi^3/(1-\varphi)^2$  依然呈现较好的线性关系。由图 4 可知,随着有效应力的增加,两者线性关系斜率逐渐减小,分析原因为:①当有效应力较低时,土颗粒接触点少且随机性大,不同孔隙率所对应的孔隙结构差异性较大,渗透系数对孔隙率的变化更敏感,线性关系的斜率大;②随着有效应力的增大,颗粒的接触点

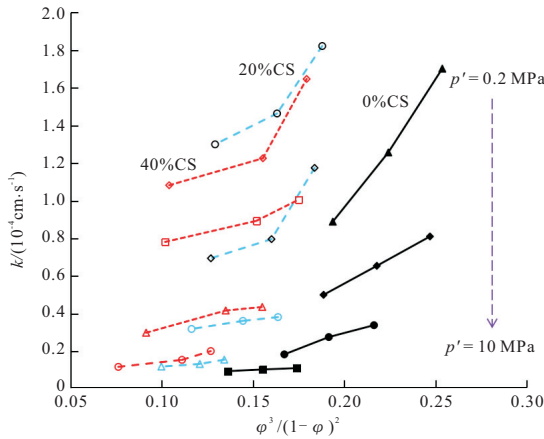


图 4 渗透系数与孔隙率的关系

Fig. 4 Relationship between permeability and porosity

增多,不同孔隙率下孔隙结构的差异性减弱,线性关系斜率变小;③当有效应力足够大时,不同初始状态下土颗粒的接触点基本一致,孔隙结构基本稳定,渗透系数趋于稳定一致。

### 3.3 有效粒径对渗透系数的影响

本文试验材料的有效粒径见表 2。由表 2 可知,试样有效粒径虽然随着钙质砂含量的增加而增加,但 40% CS 以下有效粒径变化很小,说明影响试样孔隙结构的颗粒粒径相似,对比渗透系数量级一致的试验现象,可以推断出此时试样的骨架结构为无粘性土基质,钙质砂“悬浮”在土基质中,试样孔隙结构主要受无粘性土影响。根据试验数据可知,100% CS 试样渗透系数远大于其他组,而中值粒径、有效粒径、限制粒径中仅  $d_{10}$  值与其他试样差别明显,根据已有渗透模型形式<sup>[9,11,12]</sup>,假设  $k$  与  $d_{10}^2$  有一定函数关系。为避免单次试验误差,取试验中的数据组进行分析,绘制  $k$  与  $d_{10}^2$  的关系,并进行拟合(图 5)。由图 5 可知,在同一  $d_{10}^2$  值下,渗透系数并不统一,这是由孔隙比不同造成,从数据组的拟合效果来看, $k$  与  $d_{10}^2$  基本满足线性关系,表明影响渗透系数的主要粒径为有效粒径,适用于本文试验所采用的不同钙质砂含量的试样。

表 2 试样有效粒径

Tab. 2 Effective particle size of sample

土样	$d_{10}/\mu\text{m}$	土样	$d_{10}/\mu\text{m}$
0% CS	11.66	40% CS	16.41
20% CS	13.51	100% CS	562.77

综上所述,分析了渗透系数与有效应力、孔隙率和有效粒径的关系,由于本文试样的初始组构较特殊,不仅影响压缩性质,也影响渗透系数。不同初始孔隙比试样,在相同有效应力下  $k$  与  $\varphi^3/(1-\varphi)^2$  呈现较好的线性关系,与现有研究结论一致。渗透的本质是流体在土颗粒形成的孔隙

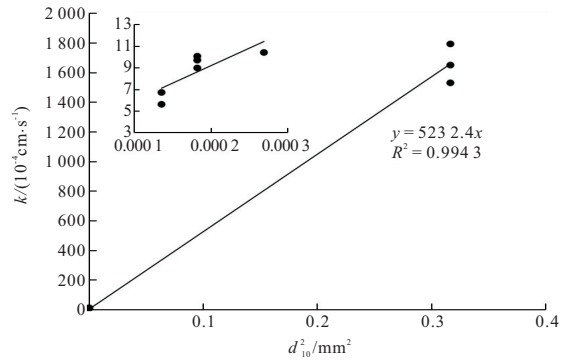


图 5  $k$  与  $d_{10}^2$  的关系

Fig. 5 Relationship between permeability coefficient and effective particle size

通道中流动,孔隙特征及结构对渗透系数的影响最直接,而孔隙特征及结构又受颗粒粒径影响,经分析对比,发现本文试样的渗透系数与有效粒径的平方之间存在较好线性关系,与文献[7]研究结论相似。因此,本文基于渗透试验提出的渗透系数计算模型为:

$$k = A \frac{\varphi^3}{(1-\varphi)^2} d_{10}^2 \quad (2)$$

### 3.4 参数 A 分析

对于公式(2),由试验数据可知,相同有效应力下  $k$  与  $\varphi^3/(1-\varphi)^2$  的线性关系斜率随着有效应力的增加而降低,因此模型参数  $A$  应为有效应力  $p'$  的函数。根据试验数据可拟合得到不同有效应力下的  $A$  值。绘制  $A$  与有效应力  $p'$  的关系,见图 6。由图 6 可知,参数  $A$  随有效应力的增

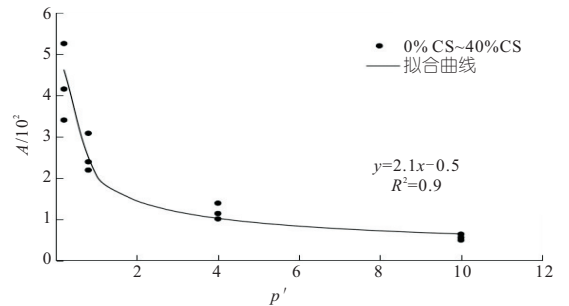


图 6 模型参数  $A$  与有效应力  $p'$  的关系

Fig. 6 Relationship between model parameters and effective stress

加呈幂函数降低,且拟合相关性较好,因此可采用有效应力  $p'$  的幂函数形式代替参数  $A$ 。公式(2)可变换为:

$$k = 2.1 \left( \frac{p'}{p_a} \right)^{-0.5} \frac{\varphi^3}{(1-\varphi)^2} d_{10}^2 \quad (3)$$

式中,  $p_a$  为大气压强。

现利用公式(3)对 0% CS~40% CS 试验渗透试验数据进行拟合分析,绘制不同有效应力下,渗透系数与孔隙率的关系,结果见图 7。

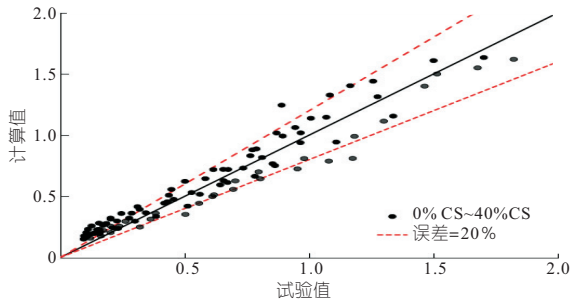


图 7 室内渗透试验值与经验模型计算值对比

Fig. 7 Comparison between indoor permeability test value and empirical model calculation value

综上所述,对于相同有效应力下的渗透系数计算模型(式(3))可较好地预测本文试验砂样渗透系数,其模型参数  $A$  与试样土颗粒结构有关,低钙质砂含量下的颗粒结构为粉土基质, $A$  与有效应力呈负相关,且两者为幂函数关系;而对于 100%钙质砂样,参数  $A$  取值为 100。

## 4 结论

a. 钙质砂含量低于 40%时,土样结构为无粘性土基质。相同初始状态下,粗粒多孔钙质砂含量的增加会增大试样的有效粒径,改变渗流路径属性,增大试样的渗透系数。

b. 有效应力的增加显著降低试样孔隙体积,增加渗流路径的曲折度,试样的渗透系数显著降低,两者呈幂函数关系。

c. 建立考虑有效应力的渗透系数经验模型,计算值与试验值吻合较好,可为相关工程提供参考和借鉴。

## Experimental and Model Study on Permeability Characteristics of Cohesionless Soil with Carbonate Sand

QIAN Cai-fu<sup>1</sup>, SONG Xin-jiang<sup>1</sup>, MA Lu<sup>2</sup>

(1. Anhui & Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Bengbu 233000, China;

2. College of Architecture, Anhui Science and Technology University, Bengbu 233000, China)

**Abstract:** In order to further analyze the permeability characteristics of cohesionless soil containing carbonate sand, South China Sea carbonate sand and fine grain quartz powder were used as test materials to prepare test soil samples. The GDS high-pressure triaxial apparatus test system and constant head permeameter were used to carry out research on the influence of carbonate sand content, initial void ratio and effective stress on the permeability characteristics of cohesionless soil. And then an empirical model of permeability coefficient considering effective stress was established. The test results show that when the content of carbonate sand is less than 40%, the grain structure is cohesionless soil matrix, and the pore structure is determined by fine grained soil; The structure of carbonate sand sample is the skeleton structure of sand particles, and the magnitude of permeability coefficient increases significantly; With the increase of effective stress, the permeability coefficient of the sample decreases significantly. An empirical model for the permeability coefficient of cohesionless soil with carbonate sand was established. The model parameters were closely related to the properties of the soil sample. The calculated values were in good agreement with the test values. The research results can provide reference for practical projects.

**Key words:** carbonate sand; cohesionless soil; permeability coefficient; effective stress; empirical model

## 参考文献:

- [1] 朱长歧,周斌,刘海峰.南海海滩岩的细观结构及其基本物理力学性质研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(4):683-693.
- [2] 廖仁国,周先齐,蔡燕燕,等.钙质砂与石英砂渗透性差异对比试验[J].华侨大学学报(自然科学版),2019,40(5):600-605.
- [3] 邵健伟,鲁程鹏,马克迪,等.压缩过程中粗粒土渗透性变化的试验分析[J].水资源与水工程学报,2016,27(6):217-221.
- [4] 胡明鉴,蒋航海,朱长歧,等.钙质砂的渗透特性及其影响因素探讨[J].岩土力学,2017,38(10):2895-2900.
- [5] 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.
- [6] 马露.无黏性土的压缩特性及模型[J].水文地质工程地质,2021,48(4):72-77.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] MA L, CHIU A C F, CHENG Y P, et al. Effects of particle breakage on the compression behaviour of gap graded carbonate sand-silt mixtures [J]. Géotechnique letters, 2021, 11(1):16-20.
- [11] 张宜健.不同粒径级砂性土渗透特性试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.
- [12] 朱崇辉.粗粒土的渗透特性研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2006.