

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0849

细颗粒对钙质砂渗透性的影响试验研究

胡明鉴¹, 崔翔^{1,2}, 王新志¹, 刘海峰¹, 杜韦³

(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. 湖北交投宜昌高速公路运营管理有限公司, 湖北 宜昌 443000)

摘 要: 钙质砂地基的渗透性是影响人工灰沙岛地下淡水形成的重要因素, 而细颗粒的含量及其赋存状态对渗透性有重要的影响, 为此开展了不同细颗粒含量的钙质砂渗透性试验研究。选用南海某岛的钙质砂, 基于不同细粒配比的钙质砂样常水头渗透试验, 分析细颗粒对钙质砂地层渗透性的影响。试验结果显示, 促使钙质砂渗透性发生明显变化的粒级为 ≤ 0.075 mm 范围。当最小粒径 ≤ 0.075 mm 时, 钙质砂的渗透系数数量级为 10^{-2} cm/s, 呈中透水性。当最小粒径介于 $0.075 \sim 0.500$ mm 时, 渗透系数数量级为 10^{-1} cm/s, 呈高透水性。钙质砂最终稳定渗透系数与细粒含量之间表现出不同的规律: (1) 当细颗粒含量小于 9% 时, 渗透系数随细粒含量的增加而缓慢减小; (2) 当细颗粒含量在 9%~24% 时, 渗透性随细粒含量的增加而迅速减小; (3) 当细颗粒含量大于 24% 时, 渗透性随细粒含量的增加变化不大。影响渗透系数的细粒含量存在着由试样骨架形成的孔隙决定的, 反映孔隙最佳充填时的细粒含量界限值, 充填不佳或过量细粒均可能在渗透作用下发生细粒运移流失。

关键词: 钙质砂; 渗透系数; 细颗粒; 含量; 流失

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 08-2925-06

Experimental study of the effect of fine particles on permeability of the calcareous sand

HU Ming-jian¹, CUI Xiang^{1,2}, WANG Xin-zhi¹, LIU Hai-feng¹, DU Wei³

(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. Yichang Expressway Operation Management Co., Ltd. of HBCI, Yichang, Hubei 443000, China)

Abstract: The permeability of calcareous sand has significant influence on the formation of underground freshwater in coral island. Since the contents and occurrence states of fine particles play important roles on the permeability of calcareous sand, it is necessary to analyze their effects and relationships. Permeability tests with constant hydraulic head were carried out on different fine particle contents and particle size combinations of the calcareous sand collected from an island in South China Sea. Results show that the upper bound of particle size affecting the permeability of calcareous sand is 0.075 mm. When the minimum particle size is less than 0.075 mm, the permeability coefficient of calcareous sand is 10^{-2} cm/s and can be defined as medium permeability according to the permeability coefficient. When the minimum particles size is between 0.075 mm and 0.500 mm, the permeability coefficient is 10^{-1} cm/s, which shows high permeability. The stable permeability coefficients of the calcareous sand change with the increase of fine particle contents, and the relationship shows as the following: 1) When the fine particles contents are less than 9%, the permeability coefficients decrease slowly with the increase of the fine particles contents. 2) When the fine particle contents are within the range of 9%-24%, the permeability coefficients decrease rapidly with the increase of the fine particles contents. 3) The permeability coefficients tend to be in steady state when the fine particles contents are more than 24%. The fine particle content that affects the permeability coefficient is determined by the pores formed by the skeleton, which reflects the limit value of the fine particle content when the pores are optimally filled. Poor packing or excessive fine particles can result in the migration and loss of fine particles under infiltrate process.

Keyword: calcareous sand; permeability coefficient; fine particles; content; loss

收稿日期: 2018-05-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 41572304); 中科院科技先导专项 A 类子课题 (No. XDA13010301)。

This work was supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (41572304) and the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA13010301).

第一作者简介: 胡明鉴, 男, 1974 年生, 博士, 研究员, 主要从事滑坡泥石流研究和地下水动力学方面的工作。E-mail: mjhu@whrsm.ac.cn

1 引言

钙质土是一种生物成因类的特殊土,在我国南海广泛分布。大量的珊瑚虫钙化堆叠,历经漫长的演变过程形成珊瑚礁,珊瑚礁与其他海洋生物遗体如海藻及贝壳等经历各种地质作用后形成礁灰岩或钙质土。钙质土的物质来源为钙化后的珊瑚虫、海藻和贝壳,其主要成分为碳酸钙,含量90%以上。受特殊生物成因影响,钙质土内保留有珊瑚虫骨骼结构,具有棱角度高、形状复杂、易破碎和含有内孔隙的特点^[1-3],这与常见的陆源砂如石英砂在微观结构和物理力学特性上有着明显的差异。

我国南海岛礁建设已经取得巨大成就,岛礁绿色生态建设对地下淡水的需求愈发强烈,钙质砂地层的渗透性是影响地下淡化水形成过程的重要因素,开展钙质土渗透性的系统研究是十分必要的。现场常采用渗压计法、试坑法、单环法、双环法、注水试验和钻孔抽水试验等测试土体的原位渗透系数。目前国内外关于钙质土渗透性的研究方面,1996年 Shinjo^[4]研究了珊瑚礁内钙质沉积物的渗透性与级配和孔隙率的关系,并用有效粒径 d_{30} 对钙质沉积物的渗透性进行了描述。钱琨等^[5]通过室内常水头渗透试验建立钙质砂渗透性与级配和孔隙比的关系,提出了钙质砂渗透系数计算模型;胡明鉴等^[6]以变量 d_4 与限制粒径 d_{60} 之比研究其与钙质砂渗透性的关系,提出一定干密度 ρ_d 和压实度 δ 下的钙质砂的渗透系数关系式;任玉宾等^[7]从颗粒形状和级配的角度研究了其对钙质砂渗透性的影响;王新志等^[8]以人工灰沙岛地下钙质粉土为研究对象,利用室内变水头试验,建立钙质粉土渗透系数与干密度和初始含水率的关系,论证了用 Samarasinghe^[9]与 Mesri^[10]公式计算钙质粉土渗透系数的可靠性,并对对比分析渗透试验前后钙质粉土的孔径变化。这些对钙质土渗透性的研究,旨在寻求建立钙质土级配、密度、含水率和颗粒形状等与渗透系数的关系或参数表征^[11],在工程实际发挥着很好的指导作用。

然而现场大量双环试验的渗透系数随时间变化过程中反映出渗透性存在着随时间先逐渐增加而后趋于稳定的过程^[12-13],钙质砂地层现场钻孔抽水试验同样印证了这个过程,钻孔抽水试验的流量计量三角堰底部积存的颗粒较均匀且很细的钙质粉土或粉细砂,是那些游离或挣脱束缚的细小颗粒在渗流作用下运移而来的,随着这些细小颗粒的运移,而后形成较为稳定的结构,渗透系数也趋于稳定。因而研究钙质砂地层细颗粒含量对渗透性的影响以

及渗透过程中细粒流失评估是十分必要的,有助于深入揭示钙质砂最终稳定渗透系数与细粒含量之间的关系,分析其影响和作用规律。鉴于此,选用南海某吹填岛的钙质砂开展不同细粒配比的钙质砂样常水头渗透试验以及渗出液细粒成分测试,分析试验过程中渗透性变化以及细颗粒含量对渗透性的影响和规律。

2 试验方案

2.1 试验装置

试验装置采用自行研制并获专利授权的拼装式常水头渗透装置^[14](专利号201721692280.2)。该渗透装置采用可分段拆卸模块组装而成,主要由砂桶和测压管两部分组成。渗透段由8个内径185 mm,高10 mm的独立小砂桶通过螺栓法兰连接而成,两砂桶之间有密封垫片和纱网,选用68目纱网既可隔离各砂桶内的砂样,便于对试验后钙质砂逐层烘干筛分,又能使0.25 mm以下粒径颗粒自由通过,不影响细颗粒随渗流运移。装置顶端为蓄水桶,底部设置沉淀桶,蓄水桶设置泄水孔以提供恒定水头,沉淀桶侧壁设置出水管用以收集渗出淀积的钙质砂。装置实物及结构如图1所示,经多次对比测试,该装置测试结果稳定,试验重复性较好。

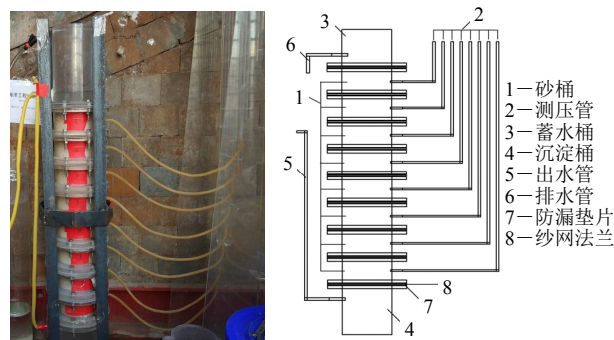


图1 渗透仪实物及结构示意图

Fig.1 Photo and sketch map of the permeameter

2.2 试验方案

试验用钙质砂取自南海某人工岛,烘箱105℃持续烘干10 h,标准筛分次振筛10 min后完成原始试样钙质砂的颗粒级配分析,试样粒径累计曲线和分布柱状图如图2所示,之后分别得到 ≤ 0.075 、 $0.075 \sim 0.100$ 、 $0.100 \sim 0.250$ 、 $0.250 \sim 0.500$ 、 $0.500 \sim 1.000$ 、 $1.000 \sim 2.000$ 、 $2.000 \sim 5.000$ 、 $5.000 \sim 10.000$ 、 > 10 mm等不同粒级试样备用。

受试验仪器尺寸限制,采用等效替代法去除10 mm以上的粒径^[15],并将去除超径颗粒的试样作

为初始试验的原始土样进行渗透试验，之后逐步去除最小粒径土，再向该试样中添加与去除颗粒质量相同的本试样最小粒径土样，逐步去除和等量替换后各试样的颗粒累积曲线，如图 3 所示。根据大量钙质砂相对密度测试结果 G_s 取值 2.81，控制试样孔隙比为 0.9，干密度为 1.479 g/cm^3 。分次进行渗透试验以确定对钙质砂土渗透性影响较大的颗粒粒径。之后保持其余粒径相对占比不变，设置该粒径含量分别为 4%、9%、14%、19%、24%和 35%，分别进行渗透试验分析该粒径含量对钙质砂土渗透性的影响。试验结束逐层进行颗粒分析，并收集渗出淀积的细粒成分，采用激光粒度仪进行粒度分析。

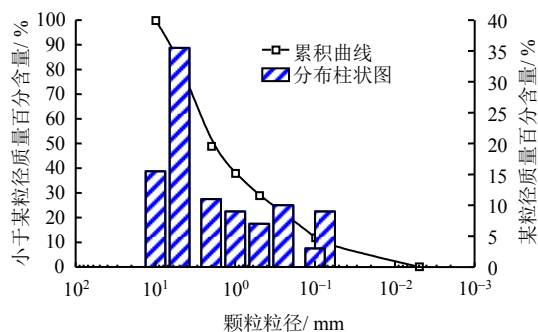


图 2 试验土颗粒累积曲线和分布柱状图
Fig.2 Cumulated curve and distribution histogram of the test soil

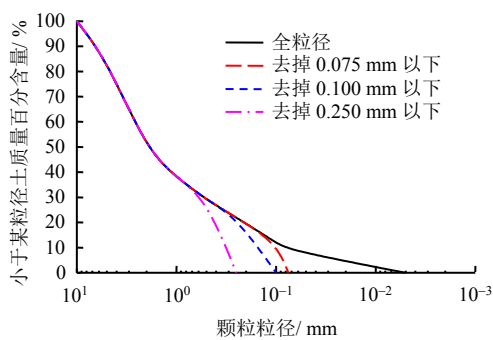


图 3 各级级配曲线
Fig.3 Grading curves of each group

渗透试验时将试样平行配制 8 份，每份试样装填时采用分层压实的方法，每层 2~3 cm，顶层试样填充完毕后在其顶部布置砾石缓冲层，各层从下至上依次编号 1~8，再用塑胶水管链接蓄水桶和蓄水桶。由下部供水使试样饱和并排除试样内的空气，用吸耳球吸气排除气泡直至测压管内出现稳定水柱。保持水循环，设置水头 20 cm，整体静置 24 h 后开始正式试验。试验过程中按规范的读数时间间

隔记录一定时间内出水口出水量及测压管高度，即时计算渗透系数，两次相邻渗透系数变化小于 5% 时结束试验。

3 试验结果分析

为方便表述，将全粒径、去掉 0.000~0.075 mm、去掉 0.000~0.100 mm 和去掉 0.000~0.250 mm 的试样分别编号 1#~4#，根据各组试验整体渗透系数随时间变化结果绘制渗透系数-时间曲线如图 4 所示。由此可知，全粒径钙质砂的渗透性显示为中渗透性，等效去掉 0.075 mm 以下细颗粒试样的渗透系数超过 0.1 cm/s 呈高渗透性，等效去掉 0.10 mm 和 0.25 mm 以下粒径的钙质砂渗透性仍具有高渗透性，因而暂且将粒径 $\leq 0.075 \text{ mm}$ 作为钙质砂土中渗透性和高渗透性的重要影响粒径。根据各组渗透试验过程中试验初期和稳定期的渗透系数结果可以初步反映渗透过程中细颗粒流失程度（见表 1），试验结果显示全粒径土样初始和稳定渗透系数差值最大，而当 0.25 mm 以下颗粒全部去除后的试样，渗透系数初始值和稳定值变化甚小，差值仅 0.1 左右。可能原因是在渗透过程中，随着细颗粒逐渐流失，试样内部孔隙率增加和渗透路径畅通。如去掉的颗粒粒径越小，对渗透系数的影响也越小，渗透系数-时间曲线也越平顺水平。为此特进行细颗粒含量与渗透系数分析。

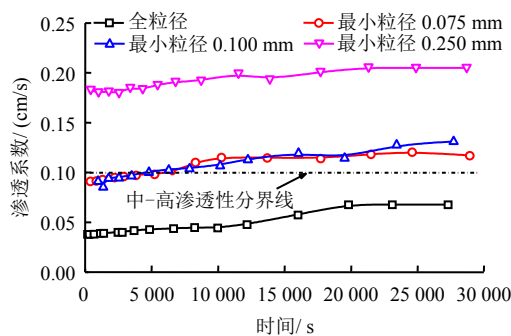


图 4 各组整体渗透系数变化曲线
Fig.4 Variation curves of permeability coefficient of each group

表 1 不同试样渗透系数初始和稳定值差异表
Table 1 Initial and stable values of permeability coefficient of different samples

试样粒径	初始渗透系数 / (cm/s)	稳定渗透系数 / (cm/s)	渗透系数变化幅度 / %
全颗粒组	0.038 0	0.067 8	78.42
去除 0.075 mm 以下组	0.091 5	0.117 1	27.98
去除 0.100 mm 以下组	0.091 7	0.131 1	42.97
去除 0.250 mm 以下组	0.182 9	0.204 8	11.97

3.1 细颗粒含量与渗透系数

根据前述 1[#]~4[#]初步试验确定的钙质砂土中渗透性和高渗透性影响粒径,为后期叙述简便,以下将粒径 ≤ 0.075 mm 简称细颗粒。在保持其余粒级相对占比不变条件下开展该影响粒级含量分别为 4%、9%、14%、19%、24%和 35%的 6 组渗透试验,得到渗透系数随时间变化曲线如图 5 所示。

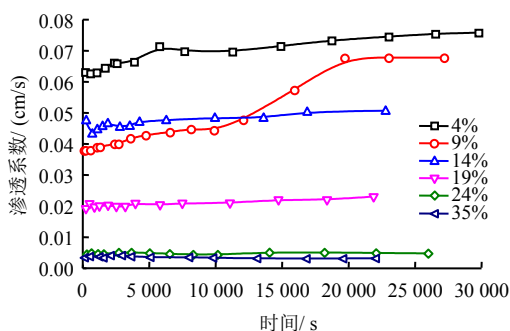


图 5 不同细颗粒含量情况下渗透系数的变化
Fig.5 Permeability coefficient under different fine particle contents

图中显示渗透过程中钙质砂渗透系数多呈先缓慢增大后趋于稳定的特征,其根本原因是可移动颗粒在渗透过程中挣脱颗粒和孔隙束缚,随渗流运移、丢失和结构重组。观察细颗粒含量 4%、9%、14%、19%、24%和 35%的渗透系数曲线,发现细颗粒含量 4%和 9%的渗透系数变化幅度较大,细颗粒含量 14%的渗透系数有一定变化,其余细颗粒含量下渗透系数变化幅度相对较小,尤其当细颗粒含量超过 19%后,渗透系数几乎呈平稳水平直线。究其原因在于,当细颗粒含量比较小时,粗颗粒骨架之间的空隙或孔隙并未完全充填,细颗粒并未受到强烈的包裹和约束,具有一定的自由度并可在一定水力渗透作用下挣脱束缚而发生运移、丢失,使土体实现结构重组,因此,渗透系数变化较大且一般而言渗透系数增大;反之,当细颗粒含量较多时,粗颗粒骨架之间的空隙或孔隙得到充分甚至完全充填,形成致密且稳定的结构,细颗粒受到束缚难以自由运移,渗流作用下整体组成和结构保持较完整,因而渗透系数保持稳定。不同初始细粒含量与渗透系数关系曲线(见图 6)显示,随着细粒含量增加,渗透系数总体呈减小趋势,只是不同细粒含量下渗透系数减小幅度有差异。当细颗粒含量小于 9%时,渗透系数随细粒含量的增加而缓慢减小;细颗粒含量在 9%~24%时渗透性随细粒含量的增加而迅速减小,当细颗粒含量大于 24%时,渗透性随细粒含

量的增加变化不大。从而说明,在由粗粒构成的骨架间的孔隙或空隙未得到充分或完全充填而形成稳定致密结构前,钙质砂中的细粒成分在渗透作用下可能发生迁移和流失,从而影响土体的渗透性,为此拟合出渗透系数和细粒含量关系式。

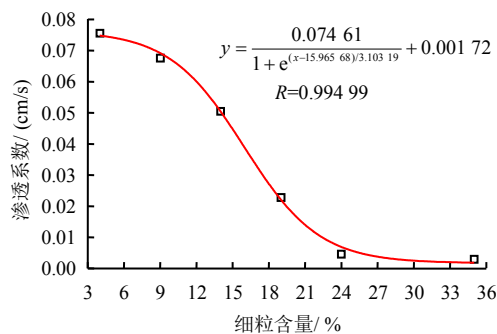


图 6 细颗粒含量与渗透系数的关系
Fig.6 Relationship between fine particle content and permeability coefficient

3.2 细粒流失分析

以粒径 ≤ 0.075 mm 的钙质砂细粒含量 9%的试样为例,取渗透试验中沉淀桶内淀积的渗出土样,采用英国马尔文公司 Mastersizer 2000 激光粒度仪进行粒度分析,该设备可测粒径范围为 0.06~1 000 μm ,采样速率为 1 000 次/s。试验前向土样浑浊液内加入分散剂并充分搅拌,在 General purpose 分析模式下测得颗粒折射率为 1.520,颗粒吸收率为 0.3,分散剂折射率为 1.330,比表面积为 0.852 m^2/g ,表面积平均粒径为 7.039 μm ,体积平均粒径为 84.342 μm ,所得粒径分布曲线如图 7 所示。由此可知,渗出颗粒粒径范围为 0.24~724.44 μm 且主要集中在 20~250 μm ,这与前述 1[#]、2[#]、3[#]和 4[#]组试验的粒径范围较为吻合。图中还反映渗出颗粒中粒径 50~60 μm 的含量最高,印证影响钙质砂渗透性的影响粒径为 0.075 mm 的推断。

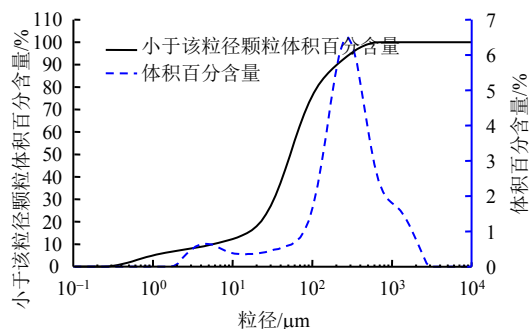


图 7 渗透试验渗出液粒度分析曲线
Fig.7 Particle size curve of the permeability test

渗透试验后的试样经颗粒分析发现, 其内仍存在粒径 ≤ 0.075 mm 的细粒成分, 这些细粒并没有在渗流作用下全部流失。全粒径的渗透试验结果也显示, 即使经过长时间的充分渗透作用, 渗透系数也无法达到相同干密度和人工等效去除细颗粒组试样的渗透系数, 因而渗流过程并不会发生细粒的全部流失。这与粗颗粒骨架间的孔隙、渗透孔径大小和联通性以及钙质砂本身特殊的表明形态等相关。即使很少的细粒含量, 也可能在细小的骨架孔隙中完全充填而形成局部致密且稳定的结构, 这部分细粒将不会因渗流作用而流失; 渗透孔径大小和联通性则对渗透作用下的运移流失有重要的控制作用, 实际上并非所有的渗流通道均能满足细粒的畅通运移且一贯到底, 狭窄位置和喉道的存在往往使细粒受到阻滞而停积。更重要的是这与钙质砂特殊的生物成因和表面形态、孔隙内孔隙结构相关, 钙质砂往往表面凹凸起伏、形状复杂不规则、棱角度高, 经扫描电镜揭示钙质砂独特的孔隙和内孔隙结构(见图8), 这些特殊的结构便于细颗粒驻留, 对细颗粒也具有一定的约束。

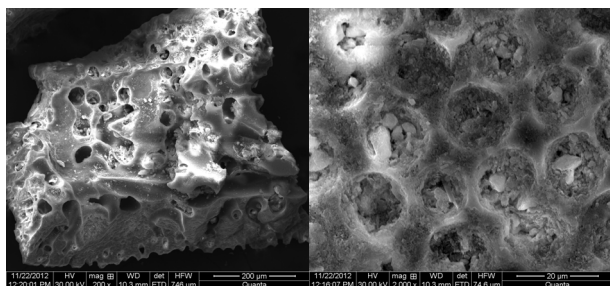


图8 钙质砂特殊的孔隙内孔隙结构
Fig.8 Special porous structure of calcareous sand

保持水头不变情况下, 随渗透进行渗透系数最终将趋于稳定, 试样本身也在渗流作用下达到稳定的状态, 保持较为稳定的结构。对比分析渗透试验前后 ≤ 0.075 mm 颗粒质量百分含量(见表2、图9)发现, 随着试样 ≤ 0.075 mm 颗粒含量增加, 渗透试验后试样内剩余的细颗粒含量并没有同等线性增加, 而是缓慢增加后逐渐趋于稳定值(10%)。由此说明钙质砂中的影响渗透系数的细粒含量存在一定的界限值, 该值由骨架形成的孔隙和试样的孔隙率决定, 反映孔隙最佳充填时的细粒含量。因而当细粒含量少孔隙未能完全充填, 或者细粒含量高, 粗颗粒已被过量的细粒包裹而不接触的状态, 均可能发生细粒运移流失, 最终的细粒含量将是试样达到较为稳定的嵌合状态。

表2 粒径 ≤ 0.075 mm 颗粒渗透前后含量统计表
Table 2 Particle content of particle size ≤ 0.075 mm before and after infiltration

粒径 ≤ 0.075 mm 颗粒初始含量 / %	粒径 ≤ 0.075 mm 颗粒渗透后含量 / %	粒径 ≤ 0.075 mm 颗粒流失量 / %	粒径 ≤ 0.075 mm 颗粒流失率 / %
4	3.26	0.74	18.50
9	8.02	0.98	10.89
14	7.71	6.29	44.93
19	8.74	10.26	54.00
24	9.42	14.58	60.75
35	9.60	25.40	72.57

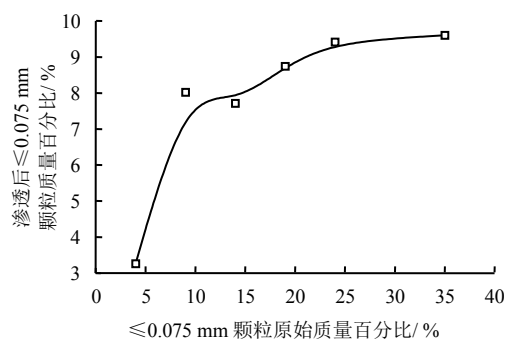


图9 渗透前后细颗粒含量对比曲线
Fig.9 Contrast curve of fine particle content before and after infiltration

4 结论

本文进行了细颗粒对钙质砂的渗透性影响的试验初探, 基于不同细粒含量配比的渗透试验以及试验前后颗粒分析, 得出以下初步结论:

(1) 颗粒粒径 ≤ 0.075 mm 及其含量对钙质砂渗透性有重要影响, 全粒径钙质砂的为中渗透性, 等效去掉 0.075 mm 以下细颗粒后呈高渗透性, 等效去掉 0.1 mm 和 0.25 mm 以下粒径的钙质砂渗透性同样具有高渗透性。

(2) 随着细粒含量增加, 渗透系数总体呈减小趋势, 但不同细粒含量下渗透系数减小幅度有差异, 反映出细粒在粗粒骨架结构和孔隙中的充填状态, 进而拟合出渗透系数和细粒含量关系式。

(3) 钙质砂渗透过程中渗透系数随时间变化的主要原因是土体内细颗粒随渗流发生运移、丢失和结构重构, 流失颗粒粒径主要集中在 20~250 μm , 尤以 50~60 μm 含量最多。影响渗透系数的细粒含量存在着由试样骨架形成的孔隙决定的, 反映孔隙最佳充填时的细粒含量界限值, 充填不佳或过量细粒均可能在渗透作用下发生细粒运移流失。

参考文献

[1] 朱长歧, 陈海洋, 孟庆山, 等. 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.
- ZHU Chang-qi, CHEN Hai-yang, MENG Qing-shan, et al. Microscopic characterization of intra-pore structures of calcareous sands[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(7): 1831—1836.
- [2] 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. State-of-the-art review of developments of laboratory tests on cemented calcareous soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(2): 311—319, 324.
- [3] 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.
- ZHU Chang-qi, ZHOU Bin, LIU Hai-feng. Micro-structures and fundamental engineering properties of beach calcarenite from south china sea[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(4): 683—693.
- [4] SHINJO T. The coefficient of permeability of calcareous sediments in coral reefs[J]. **Science Bulletin of the College of Agriculture University of Ryukyus**, 1996, 43: 73—80.
- [5] 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 of calcareous sand for islands in the South China Sea[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(6): 1557—1564, 1572.
- [6] 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.
- HU Ming-jian, JIANG Hang-hai, ZHU Chang-qi, et al. Discussion on permeability of calcareous sand and its influencing factors[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(10): 2895—2900.
- [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.
- REN Yu-bin, WANG Yin, YANG Qing. Effects of the particle size distribution and shape on permeability of the calcareous sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(2): 491—497.
- [8] 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 of permeability of calcareous silty layer of foundation at an artificial reclamation island[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(11): 3127—3135.
- [9] SAMARASINGHE A M, HUANG Y H. Permeability and consolidation of normally consolidated soils[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1982, 108(NGT6): 835—850.
- [10] MESRI G, ROKHSAR A. Consolidation of normally consolidated clay[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1974, 100(GT8): 889—903.
- [11] 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. Investigation on permeability of sands with different particle sizes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(5): 1289—1294.
- [12] 王志兵, 汪稔, 胡明鉴, 等. 颗粒运移对蒋家沟土体渗透性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2017—2024.
- WANG Zhi-bing, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Effects of particle transport characteristics on permeability of soils from Jiangjiagou ravine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(7): 2017—2024.
- [13] 杨进兵, 陈兴长, 汪惠, 等. 泥石流堆积物中细颗粒含量与渗透系数关系试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3184—3190.
- YANG Jin-bing, CHEN Xing-chang, WANG Hui, et al. An experimental study of relationship between fine grain content and permeability coefficient of debris flow deposits[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(11): 3184—3190.
- [14] 崔翔, 朱长歧, 胡明鉴, 等. 一种研究细粒运移对钙质砂渗透性影响的试验装置: 中国, 201721692280.2[P]. 2018-08-31.
- CUI Xiang, ZHU Chang-qi, HU Ming-jian, et al. One testing device for studying the influence of fine particle migration on permeability of calcareous sand: China, 201721692280.2[P]. 2018-08-31.
- [15] 谢定松, 蔡红, 魏迎奇, 等. 粗粒土渗透试验缩尺原则与方法探讨[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 369—373.
- XIE Ding-song, CAI Hong, WEI Ying-qi, et al. Scaling principle and method in seepage tests on coarse materials[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(2): 369—373.