

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.196

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



吹填珊瑚岛礁钙质软泥的渗透特性试验研究

陈信升, 丁选明, 蒋春勇, 方华强, 王成龙

(重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室; 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 钙质软泥作为吹填珊瑚地基土的一部分, 其渗透特性对于岛礁工程的建设具有重要意义。基于 GDSPERM 全自动环境岩土渗透试验系统对南海某岛礁钙质软泥进行系列固结渗透联合试验, 探究孔隙比、固结历史、固结压力、水力梯度和孔隙液离子浓度对钙质软泥渗透特性的影响, 并对钙质软泥孔隙比与渗透系数之间的非线性关系进行拟合分析, 得出钙质软泥的系列渗透规律。结果表明: 钙质软泥的渗透系数约为 10^{-6} cm/s, 且不随水力梯度的变化而变化, 存在初始水力梯度; 固结历史对钙质软泥渗透性有较大影响, 在孔隙比相同的条件下, 未经固结的土样呈现出更低的渗透性能; 钙质软泥的渗透系数随固结压力的增大而减小, 减小幅度不超过一个数量级; 随着孔隙比的增大, 钙质软泥的渗透系数也相应增大, 两者呈非线性关系, “ $\lg[k_v(1+e)]-\lg e$ ”模型拟合效果较好, 为适用于钙质软泥的最优非线性渗透模型; 钙质软泥的渗透系数随孔隙液 NaCl 浓度的增大而减小。

关键词: 珊瑚岛礁; 钙质软泥; 渗透性; 渗透系数; 渗透试验

中图分类号: TU411.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2020)04-0058-09

Experimental study on permeability characteristics of hydraulic reclamation calcareous clay in coral reef island

CHEN Xinsheng, DING Xuanming, JIANG Chunyong, FANG Huaqiang, WANG Chenglong

(Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education;
School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Calcareous clay is a kind of hydraulic reclamation coral foundation soil, whose permeability is of great significance for the construction of coral reef island projects. Based on the GDSPERM automatic environmental geotechnical permeability test system, a series of consolidation and permeability joint tests of calcareous clay of an reef island in the South China Sea were carried out, and the effects of void ratio, consolidation history, consolidation pressure, hydraulic gradient and pore fluid ion concentration on the permeability characteristics of calcareous clay were studied. The fitting analysis of the nonlinear relationship between the void ratio and the permeability coefficient of the calcareous clay was carried out, and a series of permeability laws of the calcareous clay have been summarized. The results show that the

收稿日期: 2020-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(51878103, 41831282)

作者简介: 陈信升(1997-), 男, 主要从事钙质土渗透性研究, E-mail: 942987677@qq.com.

丁选明(通信作者), 男, 教授, 博士, E-mail: dxmhu@163.com.

Received: 2020-08-30

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51878103, 41831282)

Author brief: CHEN Xinsheng (1997-), main research interest: calcareous soil permeability, E-mail: 942987677@qq.com.

DING Xuanming (corresponding author), professor, PhD, E-mail: dxmhu@163.com.

permeability coefficient of calcareous clay is about 10^{-6} cm/s, and it does not change with the change of hydraulic gradient. There is an initial hydraulic gradient in its permeation; The consolidation history has a great influence on the permeability of calcareous clay. Under the same void ratio, unconsolidated soil samples show lower permeability; The permeability coefficient of calcareous clay decreases with the increase of consolidation pressure, and the decrease does not exceed an order of magnitude; As the void ratio increases, the permeability coefficient of the calcareous clay increases accordingly, and the relationship between the two is nonlinear. The " $\lg[k_v(1+e)]-\lg e$ " model has a better fitting effect, which is considered to be the optimal nonlinear permeability model for calcareous clay; The permeability coefficient of calcareous clay decreases with the increase of NaCl concentration of pore solution.

Keywords: coral reef; calcareous clay; permeability; permeability coefficient; permeation test

南海作为中国第一大海域,凭借其丰富的矿产资源和特殊的地理位置,在经济发展和国防军事上具有着独一无二的战略地位。进入 21 世纪以来,中国对南海地区珊瑚礁及海洋资源的开发已经进入了一个新阶段,钙质软泥也称珊瑚泥,是由细粒珊瑚碎屑组成的一种特殊淤泥状海相软土, $d < 0.075$ mm 的颗粒含量不小于总质量的 50%,主要成分与钙质砂相似,碳酸钙含量高达 90% 以上,其作为吹填土的一部分存在于吹填岛礁工程建设中^[1-2]。钙质软泥作为一种海洋土,长期处于饱和状态,钙质软泥的渗透性对岛礁工程的建设有着极其重要的影响。

渗透性是钙质软泥的重要工程特性之一,在地基排水固结、堤坝渗漏、渗透破坏以及地下水的形成等问题上发挥着主要作用。对于土体的渗透性,学者们已经做了大量的研究工作。Darcy 在对饱和砂土进行过多次试验后揭示了饱和土中水的渗流速度与水力坡降之间的线性关系,也为水在土体中的渗流规律研究打下了坚实的基础^[3-4]。Miller 等^[5]通过对水在粘土中渗流的研究,提出了粘土中水流的阈值梯度的概念。徐家海^[6]通过理论推导归纳了 4 种黏土中液体渗流的渗透速度-水力梯度关系。王江峰等^[7]研究了饱和软土固结系数随其应力历史的变化,提出土体渗透性能会受到其固结历史的影响。王刚等^[8]对压实黏土进行了三轴压缩过程中的渗透试验,并发现压缩过程中黏土的渗透系数变化趋势与其压实度和施加的围压有关。Samarasinghe 等^[9]将针对砂土的渗透系数表达式做了进一步推广,提出了适用于一般正常固结黏土的非线性渗透模型。Tavenas 等^[10]使用三轴试验方法测定软黏土的渗透性,并分析得到了一种简易渗透模型,在工程中被广

泛使用^[11]。房营光等^[12]将适用于多孔介质渗流的 K-C 方程中的比表面积做了进一步修正,使之适用于预测黏土的渗透规律。黎志辉等^[13]研究了饱和软黏土在不同固结压力和不同渗透压力下的渗透特性,并归纳了考虑初始孔隙比的渗透模型。谢康和等^[14-15]、齐添^[16]采用 GDS 高级固结仪对萧山黏土进行了一维固结渗透联合试验,在总结了儿种常用的黏土非线性渗透模型后,提出了一种新的非线性渗透模型。尽管学者们在相关方面做了较详尽的研究,但过去的研究主要针对陆源黏土。鉴于钙质软泥成分的特殊性、所处地质环境的复杂性,以及现场试验条件的限制,钙质软泥的渗透特性研究尚未见报道。

笔者采用 GDS PERM 全自动环境岩土渗透试验系统对南海钙质软泥进行了系列固结渗透联合试验,重点探究了土样的初始孔隙比、孔隙比、固结历史、固结压力与水头差对钙质软泥渗透特性的影响规律,并分析各类非线性渗透模型对钙质软泥的适用性。

1 钙质软泥的基本性质

采用的试验材料取自南海某岛礁(见图 1),依照《土工试验方法标准(GB/T 50123—1999)》对土样先后进行了含水率、密度、土粒比重、界限含水率及击实试验,其中,含水率和密度试验采用天然土样,其余试验采用重塑土样,测得的基本物性指标如表 1 所示。采用激光粒度技术对钙质软泥进行颗粒分析试验,得到颗分曲线如图 2 所示。对钙质软泥土样进行场发射扫描电镜(SEM)试验得到了其天然状态下的电子显微镜照片如图 3 所示。



图 1 南海某岛礁吹填现场的钙质软泥

Fig. 1 Calcareous clay from a flood filling site on an reef in the South China Sea

表 1 钙质软泥的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of calcareous clay

含水率/%	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	比重	不均匀系数	曲率系数
36.41	1.854	2.77	6.86	1.35
液限/%	塑限/%	塑性指数	最大干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	最优含水率/%
27.38	14.67	12.71	1.76	16.57

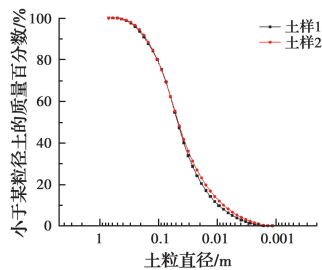
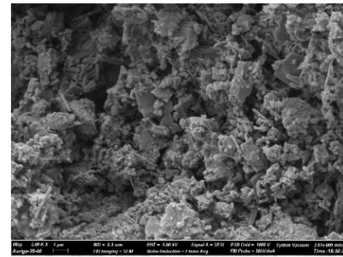


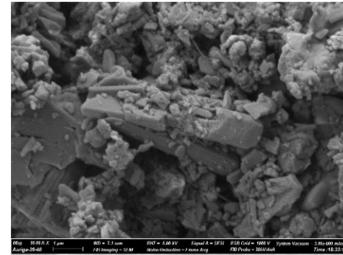
图 2 钙质软泥的粒径分布累积曲线

Fig. 2 Cumulative-size distribution curves of calcareous clay

由图 2 可见,钙质软泥粒径小于 0.075 mm 的颗粒占比大于 70%,其中粉粒含量约占 65%,黏粒含量约占 5%,其塑性指数在 10~17 之间,可定义为粉质黏土。钙质软泥的天然含水率大于液限,是由于其所处的海洋环境,天然存在状态为淤泥状。珊瑚泥的主要成分为碳酸钙,比重比碳酸钙密度(2.93)略小。其不均匀系数不小于 5,曲率系数在 1~3 之间,说明此珊瑚泥土样级配良好。钙质软泥颗粒形态主要为片状及堆叠形成的板块状,颗粒表面附着有大量不规则的团聚体,这种颗粒形态与其作为生物分泌碎屑的产生方式有关,且导致了钙质软泥颗粒排列无法形成稳定的土骨架,内部孔隙较多,但孔隙分布不均匀,使其渗透性能相较于其他陆源土体具有一定的特殊性。



(a)放大倍数5 000



(b)放大倍数10 000

图 3 钙质软泥微观形态扫描电镜图

Fig. 3 SEM images of micro-morphology of calcareous clay

2 钙质软泥渗透试验方法

为了研究钙质软泥的渗透系数随孔隙比、固结压力以及水头的变化规律,使用 GDSPERM 全自动环境岩土渗透试验系统对重塑钙质软泥土样进行系列固结渗透联合试验,分别控制不同变量,测定土样在特定试验条件下的渗透系数。

2.1 试验设备

图 4 为 GDSPERM 全自动环境岩土渗透试验系统。与常规的渗透试验仪器相比,GDSPERM 可以对试样不同围压及不同的应力路径测定土样在特定受力条件下的渗透系数,更加直观地模拟工程实际,且对于钙质软泥这种渗透性能较差、试验周期较长的土体,整体系统在试验过程中均处于一个相对密封的环境下,避免因水分蒸发、流失而造成的试验误差;与常规的固结仪器相比,对于钙质软泥类具有



图 4 GDSPERM 全自动环境岩土渗透试验系统

Fig. 4 GDSPERM automatic environmental rock and soil permeability test system

非线性渗透特定的软黏土,GDSPERM 根据定义自动计算渗透系数,有效避免了固结试验根据太沙基一维固结理论反推渗透系数须假定土体渗透系数不变的逻辑错误,且三轴渗透试验允许土样进行三维等压固结,对于长期处于海洋环境的饱和钙质软泥来说,相较于一维固结试验更接近工程实际。

2.2 试验方法与内容

采用 GDSPERM 全自动环境岩土渗透试验系统对直径为 39.1 mm、高度为 80 mm 的标准渗透钙质软泥土样进行系列固结渗透联合试验。试验分为 5 个控制不同变量的试验组,控制的变量分别为是

否固结、渗透液中 NaCl 含量、初始孔隙比、固结压力和渗透压差也即水头差。由于土样从固结阶段进入渗透阶段时围压保持不变,因此,在进行不固结渗透试验时,也应设置与对照组相同的渗透围压。试验变量参数设置如表 2 所示,其中“/”表示该变量下的阶梯设置,试样编号与参数设置一一对应。钙质软泥的天然孔隙比经计算为 1.03,为了保证与实际工程状态相接近,在改变其他变量时,均将土样的初始孔隙比控制为 1.0;而在设置不同浓度的 NaCl 溶液时,采用的是与海水盐度单位相同的质量百分数(即溶质质量/溶液质量×100%)进行配比。

表 2 试验变量参数设置

Table 2 Parament setting of experimental variables

试样编号	是否固结	渗透液中 NaCl 含量/%	初始孔隙比 e_0	固结压力 (渗透围压)/kPa	渗透压差/kPa
CC01-1/2/3/4/5	是	0	0.6、0.8、1.0、1.2、1.4	100	20
CC02-1/2/3/4	是	0	1.0	50、100、200、400	20
CC03-1/2/3/4/5	是	0	1.0	100	20、40、60、80、100
CC04-1/2/3/4/5	否	0	1.0	100	20、40、60、80、100
CC05-1/2/3/4/5	是	0.4、8、12、16	1.0	100	20

3 试验结果分析

试验可分为 3 个阶段:饱和阶段、固结阶段和渗透阶段。在饱和阶段时,当检测到试样 B 值(孔隙水压力增量与周围压力增量之比)大于 0.98 时,可认为试样完全饱和并进入固结阶段。在固结阶段中,当试样内部孔压消散至与施加的反压相等且试样体积稳定,不再变化时,可认为试样固结完毕并进入渗透阶段。渗透阶段的渗透系数是由 GDSPERM 系统自动计算得出并实时反映,其原理是根据定压和底压控制器在一个单位记录时间内(10 s)的体积变化(也即土样的渗流量 ΔQ)计算得到,该计算方法利用了达西定律以及微分思想(认为土样的渗透系数在微小的单位时间内是不变的)。当试验满足上述所有条件时才可认为试验成功。所有试验结果如表 3 所示,其中,土样孔隙比的变化是考虑了土样在固结阶段的体积变化计算得到,也即土样在进入渗透阶段的实际孔隙比,用 e' 表示。从表中可以看出,钙质软泥的渗透系数均保持在 $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ cm/s}$ 之

间,与常见软黏土相似。

表 3 室内渗透试验结果

Table 3 Permeability of the calcareous clay determined with GDSPERM system

试验组	试样编号	初始孔隙比 e_0	进入渗透时的孔隙比 e'	渗透系数/ ($10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
CC-01	1	0.61	0.60	0.86
	2	0.70	0.66	1.32
	3	0.80	0.74	1.49
	4	0.90	0.83	1.63
	5	1.00	0.93	1.99
CC-02	1	1.00	0.97	2.37
	2	1.00	0.93	1.99
	3	1.00	0.88	1.20
	4	1.00	0.83	0.59
CC-03	1	1.00	0.93	1.99
	2	1.00	0.94	2.22
	3	1.00	0.94	2.52
	4	1.00	0.95	2.57
	5	1.00	0.95	2.62

续表 3

试验组	试样编号	初始孔隙比 e_0	进入渗透时的孔隙比 e'	渗透系数 / ($10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
CC-04	1	1.00	1.00	1.35
	2	1.00	0.94	1.54
	3	1.00	0.94	1.59
	4	1.00	0.94	1.63
	5	1.00	0.95	1.67
CC-05	1	1.01	0.93	2.01
	2	1.00	0.92	1.64
	3	1.00	0.91	1.11
	4	1.00	0.92	1.07
	5	1.00	0.93	0.92

3.1 水力梯度及固结历史对钙质软泥渗透性的影响

表 3 中, CC-03、CC-04 两组试验数据可反映钙质软泥在固结与不固结两种条件下水力梯度的变化对其渗透过程的影响, 为减少因不同试样结构性不一致对试验结果造成的影响, 这两组试验的试验结果均为对一个试样由小到大依次施加系列渗透压差进行渗透所得, 同时, 对其每一个渗透阶段的孔隙比变化进行监测, 监测结果如图 5, 其中, 用 $\Delta p = 0$ 来代表固结阶段。

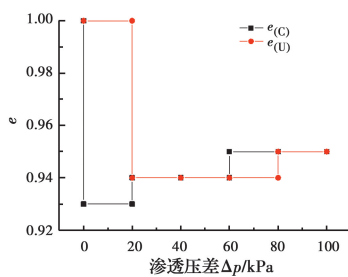


图 5 各渗透压差下试样的孔隙比变化

Fig. 5 Variation of the void ratio of the sample under each osmotic pressure

从图 5 可以看出, 固结试验与不固结试验最大的区别在于固结试验试样的主要孔隙比变化发生在固结阶段, 从 1.00 下降至 0.93, 而不固结试验试样的主要孔隙比变化发生在最开始的渗透阶段, 即 $\Delta p = 20 \text{ kPa}$ 的阶段, 可认为此时土样的固结与渗透在同时进行, 只是该阶段的不固结试验比固结试验耗时要长。但每一个阶段渗透达到稳定后, 两组试样的孔隙比均维持在 0.94~0.95, 可认为两组试验

在同一孔隙比条件下完成渗流, 试验结果具有可比性。经试验数据推算得到两组试验的渗流速度 v - 水力梯度 i 关系如图 6 所示。

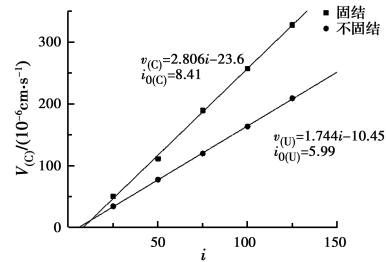


图 6 渗流速度-水力梯度曲线

Fig. 6 Relationship curves between seepage velocity and hydraulic gradient

从图 6 中可以看出, 无论是固结还是不固结试验, 两组数据均可用一条不经过原点的直线很好地拟合, 两组试验共同证明了钙质软泥渗流存在明显的初始水力梯度 i_0 , 其值约在 5~10 之间。当 $i > i_0$ 时, 钙质软泥仍将按照线性渗透规律进行, 水力梯度的改变基本不会对其渗透系数造成影响。这与 Miller 等^[5]提出的 $v = k(i - i_0)$ 黏土渗流模型相似。

对比两组数据可以发现, 在孔隙比基本一致的情况下, 试样在固结后进行的渗透试验所测得的渗透系数大于不固结试验组。这主要是因为钙质软泥土颗粒较细, 粒径小于 0.075 mm 的颗粒占 70% 以上, 未经过固结的土样不能形成稳定的土骨架和孔隙结构, 施加渗透压差后, 水流更易带走土中细颗粒, 造成渗流通道的堵塞, 因此, 尽管渗透稳定后能达到跟固结后土样相同的孔隙比, 但孔隙结构遭到破坏, 导致不固结试验的渗流速度相对较慢, 渗透系数较小。

3.2 固结压力对钙质软泥渗透性的影响

表 3 中 CC-02 试验组数据可反映钙质软泥在不同固结压力下的渗透规律, 为控制变量, 该组试验采用相同初始孔隙比 $e_0 = 1.0$ 的钙质软泥土样, 在不同固结压力下进行固结, 最后在相同的渗透压差下渗透, 得到试验结果。土样在不同固结压力下固结后的孔隙比变化如图 7 所示。

由图 7 可见, 钙质软泥的孔隙比随固结压力的增大而减小, 减小的趋势随固结压力的增大而逐渐趋于平缓, 拟合曲线与一般陆源黏土的 $e-p$ 曲线形状相类似。在不同固结压力下固结后进行渗透, 钙质软泥的渗透系数随固结压力的变化如图 8 所示。

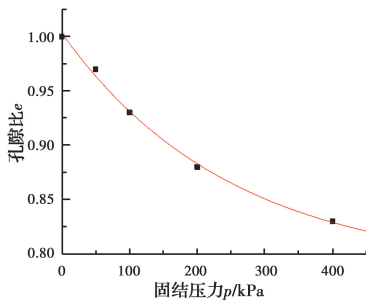


图 7 孔隙比随固结压力的变化

Fig. 7 Variation of void ratio with consolidation pressure

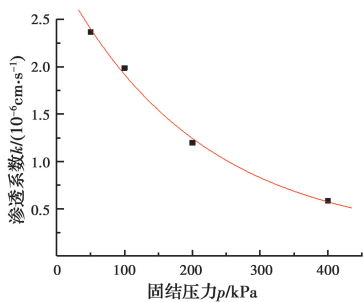


图 8 渗透系数随固结压力的变化

Fig. 8 Variation of permeability coefficient with consolidation pressure

由图 8 可以看出,钙质软泥的渗透系数随固结压力的增大而减小,但减小的幅度并不大,基本保持同一数量级以内。渗透系数减小的主要原因为饱和和土体受力固结,排水的同时也损失了孔隙体积,致使土体内部有效渗流通道进一步减少或被挤压,渗透性能减弱。但渗透性能的变化不明显也能从侧面说明天然孔隙比 $e \approx 1.0$ 是钙质软泥经长时间自重固结后达到的状态,土体的孔隙结构基本稳定,因此,渗透性能不会发生较大变化。

图 9 反映的是钙质软泥土样在不同固结压力下渗透系数随时间的变化规律,总体规律基本是在施加渗透压差后,土样突然受扰动,起始渗透系数较大,随后结构逐渐稳定,渗透系数逐渐下降并趋于平稳。从图 9 中可以看出,固结压力越大时,起始渗透系数越大,这是因为,在不同的固结围压下,施加相同的水头差所需要的力不同,在围压越大的情况下,所施加的力越大,对土体的扰动就越大,因此,起始渗透系数就越大;当固结压力越大时,渗透系数达到稳定所需要的时间就越长,尽管经过固结后的土样能在开始渗透的 1 h 内基本达到稳定,但在固结围压与水头差的作用下,固结围压越大,土体就越容易在渗透时发生微小变形(类似于土体蠕变),因此,渗

透系数就越难达到稳定。

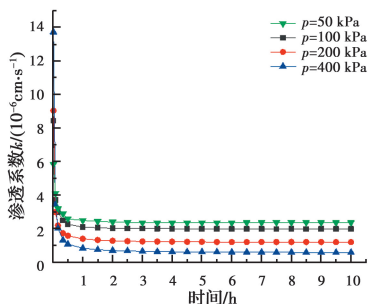


图 9 各固结压力下渗透系数随时间的变化

Fig. 9 Variation of permeability coefficient with time under each consolidation pressure

3.3 孔隙比对钙质软泥渗透性的影响

表 3 中 CC-01 试验组数据可反映不同初始孔隙比的钙质软泥在相同条件下的渗透规律,为了防止固结过程中土样的孔隙比变化对试验规律造成的干扰,在进入渗透阶段时,再次测定了土样的实际孔隙比。钙质软泥的渗透系数随孔隙比的变化规律见图 10。

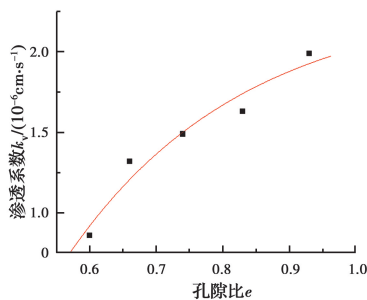


图 10 渗透系数随孔隙比的变化

Fig. 10 Variation of permeability coefficient with void ratio

从图 10 中可以看到,随着孔隙比的增大,钙质软泥的渗透系数也逐渐增大,但增大趋势在逐渐减小,由于土样的孔隙比越大,土体内部能够形成的有效渗流通道就越多,横断面上的有效面积就越大,在相同的渗透压差下,水流的渗透速度越快,渗透系数就越大。为了更好地预测钙质软泥的渗透规律,选用工程中常见的适用于黏土的非线性渗透模型: $\lg[k_v(1+e)] - \lg e$ 模型对试验数据进行回归拟合。

$\lg[k_v(1+e)] - \lg e$ 渗透模型是由 Samarasinghe 等在研究正常固结土的渗透和固结特性时,将 Taylor 总结的针对砂土的渗透系数表达式做了进一步推广,提出的适用于一般正常固结黏土的非线性渗透模型^[17-18]。

$$k_v = \frac{Ce^n}{1+e} \quad (1)$$

也即 $\lg[k_v(1+e)] = \lg C + n \lg e$ 。式中: C 为反映土体性质的参照渗透系数; n 为土体材料参数。

渗透模型的拟合结果见图 11。

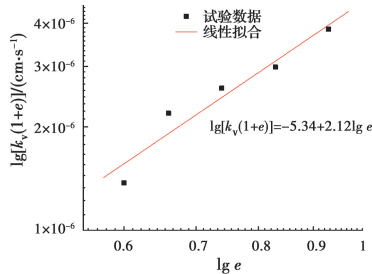


图 11 试验数据拟合结果

Fig. 11 Results of experimental data fitting for formula

由图 11 可知,该渗透模型能很好地拟合钙质软泥的渗透性能,相关系数 R 为 0.96。由于钙质软泥中黏粒含量较低,仅为 5% 左右,且主要成分为碳酸钙,没有足够的黏土矿物成分,黏聚性不强,所以,作为细粒土的一种,在渗透性能上会更偏向于砂土,因此, $\lg[k_v(1+e)] - \lg e$ 渗透模型具有较好的拟合效果,为适用于钙质软泥的最优非线性渗透模型。

3.4 孔隙液离子浓度对钙质软泥渗透性的影响

相同初始状态的钙质软泥在不同 NaCl 浓度的孔隙液下的渗透规律如图 12 所示。总体上,钙质软泥的渗透系数随孔隙液中 NaCl 浓度的增大呈非线性减小趋势,并且趋势明显,减小幅度在一个数量级之内,与一般陆源黏土呈现出相反的趋势^[19-20]。为进一步探究出现这种现象的原因,对渗透过程中进、出水口的孔隙液取样,测检其中主要阳离子浓度,以反映渗透前后孔隙液中离子浓度的变化情况。测检结果见图 13。

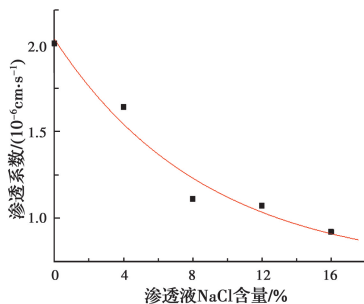
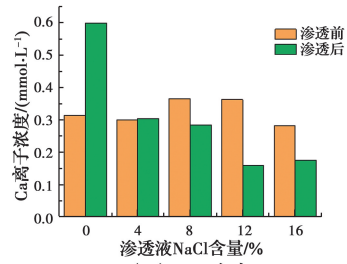
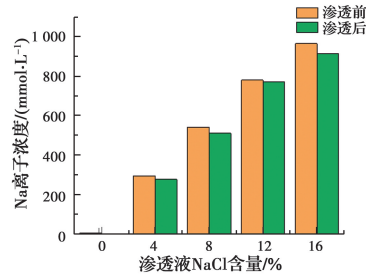


图 12 渗透系数随孔隙液 NaCl 浓度的变化

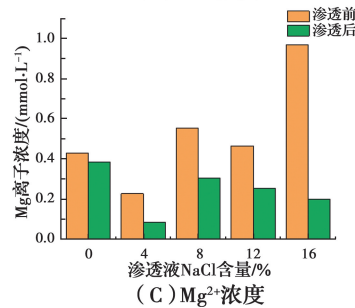
Fig. 12 Variation of permeability coefficient with NaCl solution concentration



(a) Ca²⁺浓度



(b) Na²⁺浓度



(c) Mg²⁺浓度

图 13 渗透前后孔隙液中各离子浓度

Fig. 13 Concentration of each ion in pore solution before and after permeation

由图 13 可知,渗透前后孔隙液中的阳离子浓度均有一定程度减少,而 Ca 离子在去离子水渗透中的增大是低浓度溶液携带部分细小钙质软泥渗出所致。渗透前后孔隙液中阳离子浓度减小的现象可以用 Gouy-Chapman 的扩散双电层理论进行合理解释^[21]。土颗粒表面带有负电荷,在渗透过程中吸附孔隙液中的阳离子形成离子扩散双电层,极性水分子受到微电场影响,定向排列形成结合水膜,从而进一步减小了土颗粒间有效孔隙的面积,使自由水流动的粘滞阻力增大,渗透性减小。从图 14 可以看出,渗透前后孔隙液中主要离子 Na⁺ 的损失量基本上随着 NaCl 浓度的增大而增大,说明随着孔隙液离子浓度的增大,钙质软泥土体在渗透过程中吸附了越多的阳离子,形成的结合水膜厚度增加,展现出更强的粘滞流动阻力,因此,钙质软泥的渗透系数随孔隙液离子浓度的增大而减小。

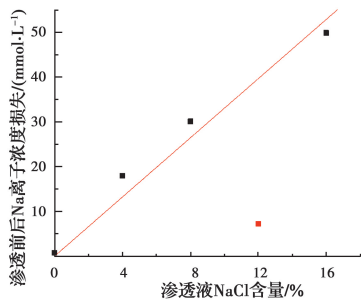


图 14 渗透前后 Na^+ 浓度的损失量随孔隙液 NaCl 浓度的变化

Fig. 14 Variation of loss of Na^+ concentration before and after permeation with NaCl solution concentration

4 结论

采用 GDSPERM 全自动环境岩土渗透试验系统对取自南海某岛礁的钙质软泥进行系列固结渗透联合试验,整理分析了孔隙比、固结历史、固结压力以及水力梯度对钙质软泥渗透特性的影响规律,得到如下结论:

1) 钙质软泥的渗透系数基本不随水力梯度的变化而变化,其渗流速度与水头差之间的 $v-i$ 关系呈一条不经过原点的直线,渗透系数保持在 10^{-6} 数量级上,存在明显的初始水力梯度。

2) 与固结试验得到的渗透系数相比,在保证孔隙比相同的条件下,不固结试验得到的渗透系数更低,其原因为不固结试验未形成稳定土体结构,渗流孔隙通道易发生堵塞。

3) 随着固结压力的增大,钙质软泥的孔隙比呈非线性减小,其渗透系数也相应减小,但总体减小幅度不大,变化范围在一个数量级以内;且固结压力越大,起始渗透系数就越大,最终达到稳定所需的时间就越长。

4) 随着孔隙比的增大,钙质软泥的渗透系数也逐渐增大,两者呈非线性关系;分析发现 $\lg[k_v(1+e)]-\lg e$ 模型适用范围接近土体特性,线性化明显,拟合效果好,为适用于钙质软泥的较优非线性渗透模型。

5) 钙质软泥的渗透系数随渗透液 NaCl 浓度的增大而减小,且渗透前后渗透液中的阳离子明显减小,主要是土体在渗透时吸附阳离子形成扩散双电层阻碍自由水流动所致。

参考文献:

- [1] 沈扬, 冯照雁, 刘汉龙, 等. 初始浓度对南海珊瑚泥沉积浊液面沉降特性影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(Sup2): 22-26.
SHEN Y, FENG Z Y, LIU H L, et al. Experimental study on effects of initial concentration on settling velocity characteristics of turbid surface of South China Sea coral mud [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(Sup2): 22-26. (in Chinese)
- [2] 刘汉龙, 马国梁, 赵常, 等. 微生物加固钙质砂的宏观观力学机理[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(4): 205-206.
LIU H L, MA G L, ZHAO C, et al. Macro-and micro-mechanical regime of biotreated calcareous sand [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(4): 205-206. (in Chinese)
- [3] 丁述基. 达西及达西定律[J]. 水文地质工程地质, 1986, 13(3): 33-35.
DING S J. Darcy and Darcy's law [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1986, 13(3): 33-35. (in Chinese)
- [4] SIMMONS C T. Henry Darcy (1803-1858): Immortalised by his scientific legacy [J]. Hydrogeology Journal, 2008, 16(6): 1023-1038.
- [5] MILLER R J, LOW P F. Threshold gradient for water flow in clay systems [J]. Soil Science Society of America Journal, 1963, 27(6): 605-609.
- [6] 徐家海. 黏土的渗透特性[J]. 水利学报, 1962(5): 44-47.
XU J H. Permeability characteristics of clay [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1962(5): 44-47. (in Chinese)
- [7] 王江锋, 袁威, 何况, 等. 应力历史对饱和软土固结系数的影响[J]. 地球科学, 2020, 45(12): 4640-4648.
WANG J F, YUAN W, HE K, et al. Influence of stress history on consolidation coefficient of saturated soft soil [J]. Earth Science, 2020, 45(12): 4640-4648. (in Chinese)
- [8] 王刚, 韦林邑, 魏星, 等. 压实黏土三轴压缩变形过程中的渗透性变化规律[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 32-38.
WANG G, WEI L Y, WEI X, et al. Permeability evolution of compacted clay during triaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 32-38.

- (in Chinese)
- [9] SAMARASINGHE A M, HUANG Y H, DRNEVICH V P. Permeability and consolidation of normally consolidated soils [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1983, 20(1): 835-850.
- [10] TAVENAS F, JEAN P, LEBLOND P, et al. The permeability of natural soft clays. Part II: Permeability characteristics [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1983, 20(4): 645-660.
- [11] 邵羽, 江杰, 马少坤, 等. 考虑孔隙比和渗透系数随土体当前应力变化的深基坑降水开挖变形分析[J]. *土木建筑与环境工程*, 2015, 37(2): 92-100.
- SHAO Y, JIANG J, MA S K, et al. Deformation of deep foundation pits due to excavation and dewatering considering the change of void ratio and permeability coefficient with current stress of soil [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2015, 37(2): 92-100. (in Chinese)
- [12] 房营光, 陈建, 谷任国, 等. 基于有效比表面积修正的 Kozeny-Carman 方程在黏土渗透中的适用性研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(8): 2547-2554.
- FANG Y G, CHEN J, GU R G, et al. Applicability of clay permeability based on modified Kozeny-Carman equation by effective specific surface area [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(8): 2547-2554. (in Chinese)
- [13] 黎志辉, 陈晓平, 周秋娟. 饱和软黏土渗透特性及对一维大变形固结影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(Sup2): 3746-3752.
- LI Z H, CHEN X P, ZHOU Q J. Permeability of saturated soft clays and its effects on one-dimensional large strain consolidation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(Sup2): 3746-3752. (in Chinese)
- [14] 谢康和, 郑辉, LEO C J. 软黏土一维非线性大应变固结解析理论 [J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(6): 680-684.
- XIE K H, ZHENG H, LEO C J. An analytical theory for 1-D nonlinear large strain consolidation of soft clay [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(6): 680-684. (in Chinese)
- [15] 谢康和, 齐添, 胡安峰, 等. 基于 GDS 的黏土非线性渗透特性试验研究 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(2): 420-424.
- XIE K H, QI T, HU A F, et al. Experimental study on nonlinear permeability characteristics of Xiaoshan clay [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(2): 420-424. (in Chinese)
- [16] 齐添. 软土一维非线性固结理论与试验对比研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- QI T. Theoretical and experimental studies on one-dimensional nonlinear consolidation of soft soil [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- [17] TAYLOR D W. Fundamentals of soil mechanics [J]. *Soil Science*, 1948, 66(2): 161.
- [18] MESRI G, OLSON R E. Mechanisms controlling the permeability of clays [J]. *Clays and Clay Minerals*, 1971, 19(3): 151-158.
- [19] 于泽溪, 李育超, 陈冠年. 钠质膨润土渗透性与膨胀性及可塑性的相关性[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(11): 97-106.
- YU Z X, LI Y C, CHEN G N. Correlation between permeability, swelling, and plasticity of sodium bentonite [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(11): 97-106. (in Chinese)
- [20] 梁健伟, 房营光, 谷任国. 极细颗粒黏土渗流的微电场效应分析[J]. *岩土力学*, 2010, 31(10): 3043-3050.
- LIANG J W, FANG Y G, GU R G. Analysis of microelectric field effect of seepage in tiny-particle clay [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(10): 3043-3050. (in Chinese)
- [21] SOGA K, MITCHELL J K. Fundamentals of soil behavior, [M]. 3rd edition. 2005.

(编辑 王秀玲)