

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.11.007

吹填人工岛地基钙质粉土夹层的渗透特性研究

王新志¹, 王 星^{1,2}, 胡明鉴¹, 朱长歧¹, 孟庆山¹, 汪 稔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: 南海吹填钙质土地基中含有多层粒径小于 0.075 mm 的细颗粒钙质粉土夹层, 这些粉土夹层的渗透性对人工岛地下水淡水的形成具有重要影响。通过室内变水头试验研究了钙质粉土渗透系数与干密度、初始含水率之间的相关性, 论证了 Samarasinghe 与 Mesri 公式在计算钙质粉土渗透系数上的可靠性; 通过静态氮吸附试验对渗透试验前、后钙质粉土的孔径变化特征进行了分析。研究表明: 钙质粉土的渗透系数在初始含水率相同时随着干密度的增大而减小, 在干密度相同时随着初始含水率的增大而增大, 且在饱和时渗透系数达到最大; Samarasinghe 与 Mesri 公式对钙质粉土渗透系数的计算具有较高精度; 钙质粉土为大孔材料, 渗流作用下使更多的微孔和介孔转变为大孔, 孔隙类型以一端开口的均匀圆筒形孔为主。研究成果可为南海的人工吹填岛地下水渗流场的计算分析提供科学依据。

关 键 词: 钙质粉土; 渗透系数; 干密度; 初始含水率; 孔隙结构

中图分类号: TU 411.4

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017)11 - 3127 - 09

Study of permeability of calcareous silty layer of foundation at an artificial reclamation island

WANG Xin-zhi¹, WANG Xing^{1,2}, HU Ming-jian¹, ZHU Chang-qi¹, MENG Qing-shan¹, WANG Ren¹

(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)

Abstract: The silty calcareous soil subgrade in the South China Sea contains fine particle calcareous silt interlayers with a particle size less than 0.075 mm. The permeability of these calcareous silt layers has an important effect on the development of underground fresh water in the islands. This study investigated correlations among the permeability coefficient, dry density and initial water content of calcareous silt through variable-head permeability tests in laboratory. The results demonstrate the reliability of Samarasinghe and Mesri formulas in calculating the permeability coefficient of calcareous silt. The variation of pore size of calcareous silty soil before and after infiltration test was analyzed by static nitrogen adsorption test. The results show that the permeability coefficient of calcareous silt decreases with the increase of the dry density, and increases with the increase of the initial water content. When the dry density is the same, and the permeability coefficient reaches the maximum at saturation. The Samarasinghe and Mesri formulae have high accuracy in calculating the permeability coefficient of calcareous silt. Seepage generates more micropores and transforms mesopores into macropores. The soil mainly shows pores with a uniform cylindrical hole with an opening at one end. This study provides a scientific reference for the calculation and analysis of groundwater seepage field in artificial reclamation island.

Keywords: calcareous silt; permeability coefficient; dry density; initial water content; pore structure

1 引 言

我国南沙群岛的海洋工程建设在国土资源和海洋环境保护、油气资源开采以及海洋科学研究的

发展等各方面都具有重要的战略意义。我国近年来逐步加大对南海珊瑚礁人工岛的建设力度, 通过绞吸、耙吸等方式把珊瑚礁泻湖和航道内沉积的钙质沉积物吹填到礁盘上(见图 1), 填筑成具有一定面

收稿日期: 2016-12-05

基金项目: 科技部 973 计划课题 (No. 2013CB956104); 自然科学基金项目 (No. 41572297, No. 41572304, No. 41372318) 和国家科技支撑计划项目 (No. 2014BAC01B01)

This work was supported by the National Key Basic Research Program of China (2013CB956104), the National Natural Science Foundation of China (41572297, 41572304, 41372318) and the National Key Technology R & D Program (2014BAC01B01).

第一作者简介: 王新志, 男, 1981 年生, 副研究员, 主要从事工程地质及岩土力学特性的研究。E-mail: xzwang@whrsm.ac.cn

通讯作者: 王星, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事钙质土的力学特性研究。E-mail: 18827069705@163.com

积的人工岛。吹填过程中,颗粒自重对不同粒径的钙质土颗粒起到了分选作用,大颗粒首先沉积在底部,粒径较小的粉土颗粒或黏粒在水中悬浮并随着水流流向低洼处,经过一段时间后逐渐沉积下来,形成一定厚度的粉砂、粉土层。由于吹填作业间断施工,颗粒较细的粉土层在地基中呈现间断分布的分层现象(见图2)。珊瑚礁钙质土作为一种碳酸钙含量超过95%的特殊生物成因的海相岩土介质,具有高孔隙比、颗粒形状不规则、颗粒易破碎等显著不同于陆源土的性质,使其成为近年来的研究热点^[1-2]。我国对珊瑚礁钙质土的研究始于20世纪70年代,至今已取得丰硕成果,但这些研究成果主要集中于钙质砂的基本物理力学性质的研究^[3],对钙质砂的渗透特性研究较少^[4-5],尤其在粒径较小的钙质粉土的渗透特性研究方面鲜有涉及。



图1 吹填施工
Fig.1 Filling construction

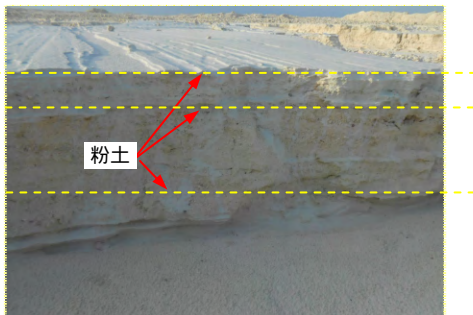


图2 吹填土中的钙质粉土层
Fig.2 Calcareous silt strata in fill soil

人工岛的建设最终要以生态岛为目标,生态建设以淡水为根本。岛上的天然淡水以雨水为主,一部分雨水经过雨水收集系统储存起来,另外一部分降雨入渗到地下,逐渐形成地下淡水。降雨入渗经过珊瑚砂层的过滤作用,最终在低渗透层的封隔作用下形成稳定的地下淡水体。而吹填人工岛中起封隔地下水作用的,应以颗粒较细的钙质粉土层或粉砂层最为明显。本文旨在探讨吹填人工岛地基中普

遍存在的钙质粉土夹层的渗透特性,试图建立符合钙质粉土的渗透系数计算公式,为人工岛地下水渗流场的模拟计算提供科学依据。

渗透系数是描述土体渗透特性的重要参数,无论是对于基坑工程的设计、施工还是人工岛地下水渗流场的计算都十分重要。测定土的渗透系数的方法主要有两种:现场测试,在工程现场通过注水、渗水或抽水试验等方法来测试土层的渗透系数,这种方法十分耗时、成本较高;室内试验,室内通过常水头或变水头试验进行测试,在严格控制试验程序的前提下能达到较高的测试精度^[6-7]。

本文通过室内变水头试验研究钙质粉土的渗透特性,探讨几种主要的物性参数如干密度(或密实度、孔隙比)和初始含水率对渗透系数的影响规律,并通过试样的孔径分析试验从微观角度对试验前、后钙质粉土内部孔径的变化进行分析,为工程实践提供理论支撑,具有一定指导意义。

2 国内外研究现状

对土的渗透性的研究起源于达西定律,但达西定律仅对渗透原理进行了最基本的理论描述,工程实践中需要科研工作者们提供能够根据土样的各种物性参数估算土体渗透系数的计算公式,这就需要对各种岩土介质进行大量而细致的试验研究。砂类土的渗透特性研究已经较为成熟,前人分别从颗粒的级配参数、密实度等方面探究其与砂类土渗透系数的相关关系,并提出了相应的计算公式,为工程实践提供了便利。对于细粒土(如黏性土和粉土)渗透特性的研究,尤其是在黏性土的渗透特性研究方面,国内外大部分学者均采用理论推导与室内试验相结合的方式,提出了大量的计算公式。Samarasinghe等^[8]通过对太沙基^[9]砂土渗透公式的改进,提出了关于正常固结黏土渗透系数计算公式:

$$\lg[k_v(1+e)] = n \lg e + \lg C \quad (1)$$

式中: e 为土的孔隙比; k_v 为土的渗透系数; n 、 C 分别为与土性相关的拟合常数。

Mesri等^[10]提出的 $e - \lg k_v$ 渗透计算公式I为

$$e - e_0 = C_k \lg(k_v / k_{v0}) \quad (2)$$

式中: e 、 e_0 分别为试验结束时的孔隙比和初始孔隙比; k_v 、 k_{v0} 为与 e 、 e_0 相对应的渗透系数; C_k 为与土性相关的参数。

该公式虽然对大部分黏土都适用,但由于该公式的使用需要获取试样在渗透试验进行过程中孔隙

比变化的相关数据，在常规试验条件下很难做到。随后 Mesri 等^[11]提出了 $\lg k_v - \lg e$ 渗透计算公式：

$$\lg k_v = A \lg e + B \tag{3}$$

式中：A、B 分别为与土性相关的常数。

国内学者针对非线性渗透也进行了大量的研究工作。谢康和等^[12-13]提出了土的非线性渗透计算公式，但该公式的使用具有与 $e - \lg k_v$ 公式同样的难度：

$$k_v = k_{v0} \left(\frac{1+e}{1+e_0} \right)^\alpha \tag{4}$$

式中： α 为与土性相关的参数。

高凌霄等^[14]运用 Fredlund 和 Van Genuchten 模型分别研究了重塑非饱和黏土的渗透系数随不同含水率和不同击实功的变化情况；刘维正等^[15]结合大量文献提供的渗透试验数据对 $\lg(1+e) - \lg k_v$ 公式的渗透系数进行了液限修正，使其应用范围更广；赵彦旭等^[16]运用非饱和导水率测定系统对不同干密度的压实黄土的渗透系数进行了量测，试验结果证实了运用 Wind 幂函数模型求取压实黄土的渗透系数的适用性。

上述计算公式虽然适用于大多数细粒土渗透系数的计算，但钙质粉土具有显著区别于其他细粒土的矿物组成、颗粒形状、孔隙比等特征，这些计算公式对钙质粉土的适用性有待考究；而且这些学者提出的计算公式只考虑了初始孔隙比以及试样在压力作用下孔隙比的变化对渗透系数的影响，并没有涉及细粒土的渗透系数随初始含水率的变化规律，试样的初始含水率（或饱和度）对渗透系数影响的大小仍值得研究。鉴于以上原因，本文系统研究钙质粉土的渗透特征，揭示钙质粉土渗透系数随土样物性参数变化的基本规律，探寻适合钙质粉土的渗透系数计算模型，为研究人工岛地下淡水涵养过程和地下水的渗流场的数值模拟提供计算依据。

3 试验材料

本次试验的土样取自南海某吹填岛礁，是吹填后在地势低洼处沉积的层状细颗粒钙质土。试验前按照《土工试验规程》^[17]的规定对土样进行颗粒分析试验，由试验结果（见图 3）可知，试验样品的颗粒级配良好，不均匀系数 C_u 为 12，曲率系数 C_c 为 1.2，小于 0.005 mm 的黏粒含量约在 28% 左右。

对钙质土分别进行液、塑限和轻型击实试验，测得土的物理力学指标和击实曲线分别如表 1 和

图 4 所示。依据土样各种物性参数的大小并结合颗粒分析试验结果定名为粉土；由于其矿物中碳酸钙的含量超过 97%，故定名为钙质粉土。

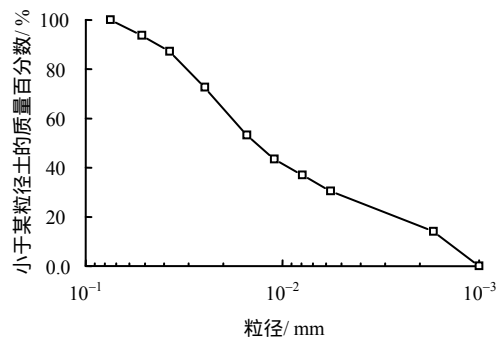


图 3 土样的颗分曲线

Fig.3 Grain size distribution of soil sample

表 1 钙质粉土的物性参数

Table 1 Physical parameters of calcareous silt

塑限 w_p	液限 I_L	塑性指数 I_p	相对密度 G_s	最小干密度 $\rho_{dmin} / (g/cm^3)$	最大干密度 $\rho_{dmax} / (g/cm^3)$	最优含水率 $\omega_{op} / \%$
25.8	35.2	9.4	2.78	1.11	1.73	15.7

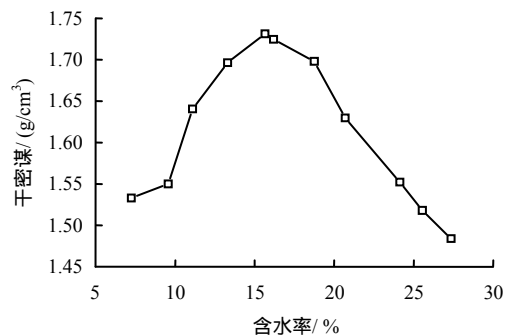


图 4 钙质粉土击实曲线

Fig.4 Compaction curve of calcareous silt

4 试验设计

4.1 试验方案设计

本次试验旨在探究钙质粉土的渗透系数随物性参数的变化规律。采用正交试验，先将试验土样按初始含水率（或饱和度）由小到大分为 5 组，每组试样按干密度（或孔隙比）的不同又分为 7 个试样。干密度的选取参照击实试验的最大干密度 $1.73 g/cm^3$ ，然后按 $0.05 g/cm^3$ 的梯度依次递减直至最小干密度 $1.43 g/cm^3$ ；初始含水率按 14%、12%、10%、8%、6% 制备土样，实际制样含水率经测试为 14.33%、12.00%、10.33%、8.03%、6.25%。整个试验方案共涉及 35 个不同物性状态下的试样，具体试验方案如表 2 所示。

表2 渗透试验方案
Table 2 Scheme of penetration tests

ω /%	$\rho_d / (\text{g}/\text{cm}^3)$						
	1.73	1.68	1.63	1.58	1.53	1.48	1.43
6.25	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
8.03	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
10.33	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
12.00	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
14.33	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7

4.2 试验操作方法与数据处理

试验分组进行, 首先对每个渗透环刀进行编号并称取质量, 通过控制加入一定含水率土样的质量来制备具有不同干密度的环刀样, 由于所制试样的干密度较大, 所以本试验采用压样法制样, 所制试样表面平整, 然后在天平上称取环刀和土样的总质量, 与设计偏差不能超过 1.0 g, 否则应重新制样。然后将制备好的土样分别放入渗透仪内, 并进行编号记录, 为防止试验过程中发生漏水, 在环刀外壁和渗透仪的内壁上涂抹凡士林。装样完毕后用止水夹夹住渗透仪的上出水口和下泄水口, 然后向墙壁上悬挂着的玻璃管中注水, 注水达到一定高度后, 松开下泄水口的止水夹排出渗透仪内残留的气体, 以下泄水口处无气泡冒出、出水速度均匀为准, 此时夹紧下泄水口, 向玻璃刻度管内注水直到最高刻度, 松开上出水口的止水夹, 当出水速度均匀时开始计数。计数要达到规范规定的次数, 并量测每次计数时渗水杯内所渗出水的水温, 对试验数据的处理要按照《土工试验规程》^[17]中规定的公式计算渗透系数:

$$K_{20} = 2.3 \frac{aL}{At} \lg \frac{h_1}{h_2} \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (5)$$

式中: a 为变水头管截面积 (cm^2); L 为渗透路径, 等于试样的高度 (cm); A 为试样横断面积 (cm^2); t 为渗透试验时间 (s); h_1 为每个计量周期内开始时的水头 (cm); h_2 为每个计量周期内结束时的水头, (cm); η_T 为 T 时水的动力黏滞系数 ($\text{kPa} \cdot \text{s} (10^{-6})$); η_{20} 为 20 时水的动力黏滞系数 ($\text{kPa} \cdot \text{s} (10^{-6})$)

本次试验所用仪器为南京土壤仪器厂生产的 TST-55 型渗透仪。环刀内径为 61.8 mm, 高度为 40 mm, 带刻度的玻璃管总长为 1 000 mm, 分度值为 1.0 mm, 内径为 10 mm, 固定在渗透仪旁边的墙壁上。渗透时间是渗透试验进行过程中的记录时间, 根据试样密实度的不同选用不同的记录时间, 具体见表 3 所示。

表3 渗透记录时间表
Table 3 Penetration schedule

干密度 $/ (\text{g}/\text{cm}^3)$	渗透时间 $/ \text{s}$	干密度 $/ (\text{g}/\text{cm}^3)$	渗透时间 $/ \text{s}$
1.73	10	1.53	120
1.68	20	1.48	180
1.63	30	1.43	600
1.58	60		

5 试验结果分析

5.1 干密度对渗透系数的影响

图 5 揭示了初始含水率相同的钙质粉土试样, 其渗透系数随干密度的增大呈现指数型减小。由于试样的干密度越大, 孔隙比就越小, 水流通过试样横断面的孔隙通道就越小, 渗流阻力越大, 在单位水头作用下, 水流的渗透流速就越小, 渗透系数就越小。

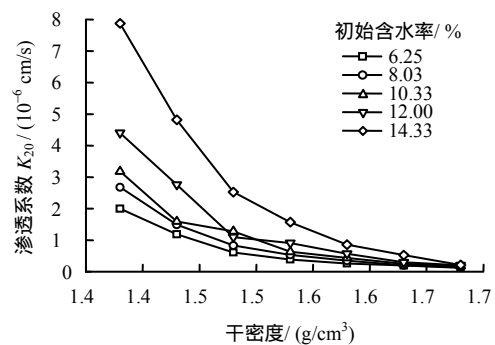


图5 不同初始含水率下渗透系数-干密度关系曲线

Fig.5 Relationships between permeability coefficient and dry density at different initial water contents

与初始含水率高的试样相比, 干密度对初始含水率低的试样的渗透系数影响较小。试样的干密度从 1.43 g/cm^3 递增到 1.73 g/cm^3 的过程中, 初始含水率为 6.25% 的试样的渗透系数下降了 94.98%, 而初始含水率为 14.33% 的试样的渗透系数同样下降了 97.3%。由此可见, 当钙质土的含水率较大时, 通过提高土的密实度, 可显著降低其渗透性, 这对提高地基的渗透稳定性是极为有利的。

5.2 初始含水率对渗透性的影响

钙质粉土在相同的干密度和不同初始含水率下的渗透系数试验结果如图 6 所示。试验结果表明: 同一干密度下, 钙质粉土的渗透系数随初始含水率的增大呈现非线性增大的趋势, 在接近饱和时取得最大值。这是因为试样的初始含水率越大, 试样中所含的自由水就越多, 更容易在土颗粒间形成供水流通过的通道, 因此, 渗透系数较初始含水率低的

试样高。

图 6 还说明：在初始含水率从 6.25%向 14.33% 递增的过程中，干密度 1.73 g/cm³ 的粉土试样的渗透系数从 1.20×10⁻⁶ 递增至 2.12×10⁻⁶，增加了 76.7%，而干密度为 1.43 g/cm³ 的粉土试样的渗透系数从 2.00×10⁻⁵ 递增至 7.87×10⁻⁵，增加了 293.5%。可见，与干密度较高的粉土试样相比，初始含水率对干密度较低的试样的渗透系数影响较大。

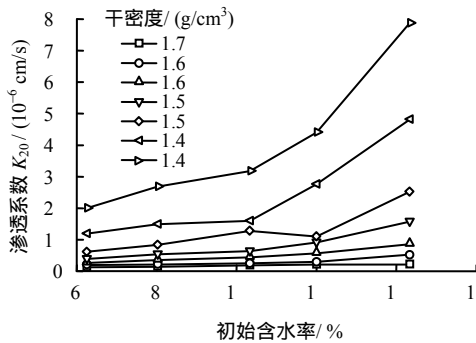


图 6 不同干密度下渗透系数随含水率的关系曲线

Fig.6 Relationships between permeability coefficient and initial water content with different dry densities

6 钙质粉土的非线性渗透计算公式

Mesri 公式 I 和谢康和公式建立了试验前、后孔隙比与渗透系数 K_v 之间的对应关系，渗透系数的计算需要同时获取试验前、后试样的孔隙比。而 Samarasinghe 公式和 Mesri 公式 仅是描述某一密实度状态下细粒土的渗透系数，并不能反映渗流过程中土样孔隙比的变化。《土工试验规程》^[17]中对试验数据的处理时假设试验前、后试样的孔隙比不变，因此，不能用 $e - \lg k_v$ 和 $\lg k_v - \lg e$ 公式对钙质粉土的渗透系数进行计算，故本文对 A、B、C、D、E 5 组试样进行试验，每组 7 个试样，初始含水率相同，干密度在 1.43 ~ 1.73 g/cm³ 范围内以 0.05 g/cm³ 的梯度变化。通过对试验数据的对比分析，使用数值拟合的方法，分别验证了 Samarasinghe 与 Mesri 公式 对钙质粉土渗透系数计算的适用性，并确定相应的计算参数，结果见表 4、5 和图 7、8。

从表 4、5 和图 7、8 可以看出，这两个公式计算钙质粉土的渗透系数和实验室的试验结果非常接近，且拟合的线性关系都非常好，相关系数在 0.98 以上。这说明 Samarasinghe 和 Mesri 公式 都能够适用于钙质粉土的渗透系数计算，所得结果的精度能够满足工程需要。在使用 Samarasinghe 公式进行计算时，参数 n 的变化范围为 6.69 ~ 8.37，参数 C 的变化范围是 $4.99 \times 10^{-5} \sim 2.61 \times 10^{-4}$ ；在使用 Mesri

表 4 Samarasinghe 公式拟合参数与相关系数

Table 4 Fitting parameters and correlation coefficient of Samarasinghe formula

组别	$\lg[k_v(1+e)] - \lg e$		相关系数 R
	系数 n	系数 C	
A	6.690 2	4.99×10^{-5}	0.987 2
B	7.070 1	7.00×10^{-5}	0.995 0
C	6.919 2	8.34×10^{-5}	0.990 2
D	7.390 0	1.20×10^{-4}	0.984 7
E	8.372 0	2.61×10^{-4}	0.994 9

表 5 Mesri 公式 II 拟合参数与相关系数

Table 5 Fitting parameters and correlation coefficient of Mesri formula II

组别	$\lg k_v - \lg e$		相关系数 R
	系数 A	系数 B	
A	6.261 8	$2.514 20 \times 10^{-5}$	0.985 6
B	6.641 6	$3.524 52 \times 10^{-5}$	0.994 6
C	6.490 7	$4.200 49 \times 10^{-5}$	0.989 2
D	6.961 5	$6.052 02 \times 10^{-5}$	0.983 1
E	7.943 7	$1.320 00 \times 10^{-4}$	0.994 1

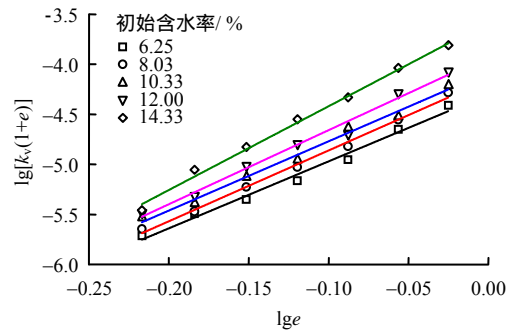


图 7 Samarasinghe 公式计算与试验结果对比图

Fig.7 Comparison of calculation results using Samarasinghe formula and test results

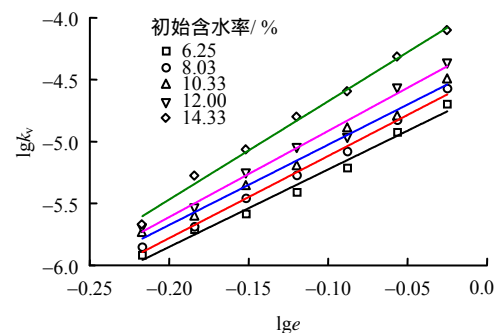


图 8 Mesri 公式计算与试验结果对比图

Fig.8 Comparisons of calculation results using Mesri formula and test results

公式 进行计算时，系数 A 的变化范围是 6.26 ~ 7.96，系数 B 的变化范围是 $4.99 \times 10^{-5} \sim 2.61 \times 10^{-4}$ ，而且无论是 Samarasinghe 公式中的参数 n 、 C ，还是 Mesri 公式 中的系数 A、B，在试样初始含水

率增高时,基本呈现上升趋势。

7 钙质粉土孔径分布特征分析

7.1 孔径分析试验

分别对初始含水率为 14.33%、干密度为 1.73、1.58、1.43 g/cm^3 的钙质粉土进行室内变水头渗透试验,并通过孔径分析试验研究试验前、后钙质粉土孔径的变化。在样品处理的过程中,先对含水率为 14.33% 的钙质粉土制备干密度分别为 1.73、1.58、1.43 g/cm^3 的环刀样各 2 个,对其中一组试样进行渗透试验。待渗透试验结束后,对 3 个渗透试验后的样品和另一组样品分别进行液氮干燥处理,消除孔隙水对孔径分析的影响,干燥处理前、后样品如图 9 所示。

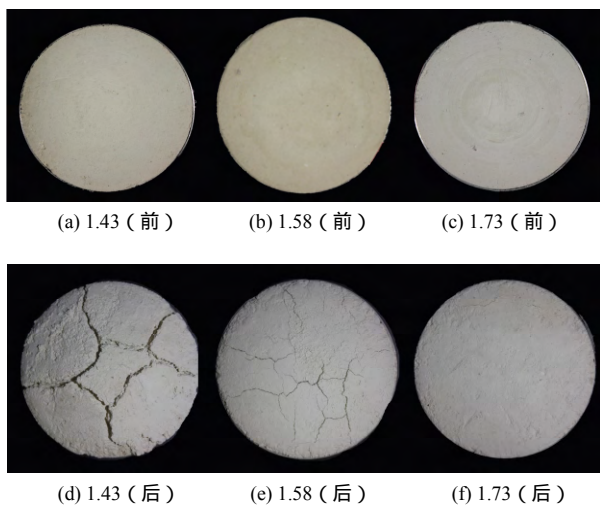


图9 液氮干燥处理前、后的样品

Fig.9 Comparison among samples dried by liquid nitrogen and undried samples

进行渗透试验后的钙质粉土达到近饱和状态,孔隙间几乎充满渗透液,所以在经过液氮干燥后有明显地膨胀现象,这种现象在干密度较小的试样中表现的尤为明显。试验中为尽可能的减小土体干燥后膨胀对孔径测量的影响,选取环刀样中间扰动较小的部位作为本次试验的对象。样品处理完成后,称取样品的质量,并对样品进行脱气处理,脱气的温度为 105 $^{\circ}\text{C}$,脱气时间为 2 h,最后使用静态氮气吸附的方法测量处于真空环境中的样品的孔径。

试验所用的设备为美国康塔公司生产的 NOVA1000e 型孔径分布测量仪,压力传感器的量程为 1 000 mmHg,精度在 1 mmHg 以内,压力传感器的重现性为整个量程的 0.02%,灵敏度小于 1×10^{-7} 摩尔的氮气,真空极限可达到 $1 \times 10^{-3} P/P_0$,比表面测定范围在 0.05 m^2/g 以上,可测孔体积最大

不超过 0.000 1 cc/g ,可测孔径范围在 0.35 ~ 400 nm 之间。

7.2 孔隙结构特征

孔隙结构不同所形成的吸附曲线以及滞回环的类型也不相同,反之可以根据吸附曲线以及滞回环的类型来对试样中孔隙结构进行判断。IUPAC(国际理论化学与应用化学联合会)将吸附等温线分为 6 类,滞回环分为 4 类,它们分别对应不同的孔隙结构。图 10 为渗透试验前、后不同干密度的钙质粉土试样氮吸附-脱附等温线,由图可以看出:6 个样品的等温线均属于 IUPAC 分类中的 III 型,在低压段($P/P_0 = 0 \sim 0.3$)等温线偏向于 X 轴,随着相对压力的增加,氮气吸附量缓慢增加,试样与氮气分子之间的结合力弱于氮气分子之间的结合力,此时主要发生单分子层吸附;在中压段($P/P_0 = 0.3 \sim 0.8$),随着相对压力的升高,氮气吸附量增加速率仍然较缓,该阶段对应发生多分子层吸附;在高压段($P/P_0 = 0.8 \sim 1.0$),氮气的吸附量随着相对压力的增大急剧升高,此阶段主要发生毛细孔的凝聚^[18]。

从图 10 中还可以看出:吸附与脱附曲线近乎重合,滞回环比较小,试样中的孔隙主要为一端开口的圆筒形孔^[19-20]。在低压和中压区,吸附与脱附曲线重合较好,表明土颗粒中的微孔和介孔很少;滞回环起点在相对压力为 0.8 左右,说明试样中可能存在颗粒堆叠所形成的粒间孔隙。

7.3 孔径分布特征分析

干密度分别为 1.43、1.58、1.73 g/cm^3 的钙质粉土渗透试验前、后的积分孔径分布如图 11 所示,从图中可以看出:尽管 3 组钙质粉土试样的干密度存在差异,但试验前、后孔径积分曲线随孔径的变化趋势相同。孔径在 27 nm 以下,积分曲线随孔径的变大而缓慢增长,积分曲线与孔径之间近似呈现线性关系,表明 27 nm 以下各个孔径所对应的孔体积之间相差不大;而在孔径大于 27 nm 的区间内,积分曲线随孔径的变大而急速增长,这是由于试样中可能存在较多的大介孔,这些大介孔所拥有的孔体积远大于 27 nm 以下孔隙的体积,造成孔径积分曲线在超过 27 nm 的部分出现急剧的增长。

从图中还可以看出:当孔径小于 27 nm 时,试验前的孔径积分曲线位于试验后曲线的上方,表明试样在渗流力的作用下较小介孔的总体积并没有增加,反而有减小的趋势;而在孔径大于 27 nm 的区间内,试验后的孔径分布曲线随孔径增长的趋势超过了试验前的曲线,在图 11 中表现为试验后直线段

的斜率大于试验前直线段的斜率，这一方面可能是因为试样中的较小介孔逐渐发展成了较大介孔；另一方面原来的较大介孔体积进一步扩大，也会造成孔径积分曲线增长趋势的变大。而从表 6 中可以看

出：钙质粉土试样在经过渗流力的作用后，无论是孔隙的总体积还是平均孔径都呈现出增长的趋势，干密度的不同可能会对这一趋势造成部分影响，但并不能改变这一趋势。

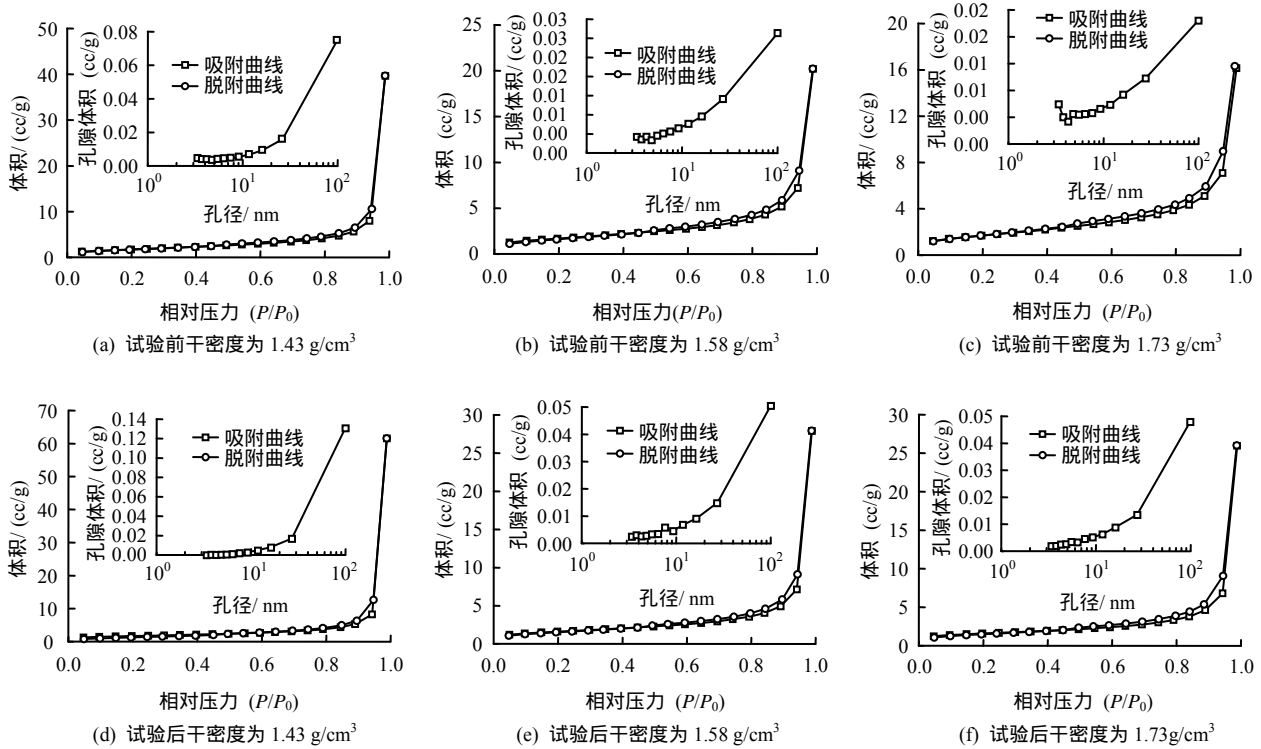


图 10 试验前、后不同干密度的钙质粉土吸附-脱附等温线和孔径分布图

Fig.10 Adsorption-desorption isotherm and pore size distribution of calcareous silt with different dry densities before and after the experiment

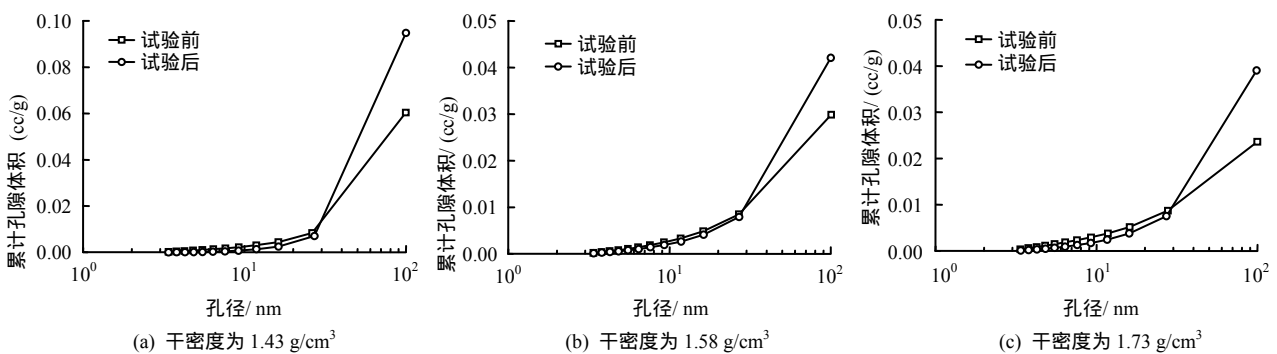


图 11 渗透试验前、后钙质粉土的积分孔径分布图

Fig.11 Integral pore size distributions of calcareous soil before and after permeation test

表 6 渗透试验前、后的孔径参数
Table 6 Aperture parameters before and after penetration test

干密度 /(g/cm ³)	孔的总体积 /(cc/g)	平均孔径 /nm
1.43 (前)	0.060	19.396
1.43 (后)	0.095	32.373
1.58 (前)	0.030	10.371
1.58 (后)	0.042	15.197
1.73 (前)	0.024	8.218
1.73 (后)	0.039	14.809

综上所述，钙质粉土试样中的孔隙体积在经过渗流力的作用下都出现了一定程度的增长，而在渗流过程中孔隙类型发生转变（微孔发展为介孔，较小介孔发展为较大介孔）这可以从表 6 中平均孔径的变化得到解释。试验后试样中介孔的总体积小于试验前的试样，超过 27 nm 的大介孔体积大于试验前的试样，表明试样中由微孔转化为介孔的趋势弱于由较小介孔扩大为较大介孔的趋势。

8 结 论

(1) 南海吹填人工岛地层中含有若干层级配良好的钙质粉土, 其渗透系数的范围在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/s, 渗透性高于一般的陆源粉土约 10 ~ 100 倍, 可见钙质粉土渗透性明显好于陆源粉土。

(2) 钙质粉土具有与普通陆源粉土相似的渗透规律: 渗透系数随着密实度的增大而减小, 随初始含水率(或饱和度)的增大而增大。

(3) Samarasinghe 与 Mesri 公式适用于钙质粉土渗透系数的计算, 且与试验结果吻合较好, 具有较高的计算精度, 可适用于人工岛地基中钙质粉土层渗流场的计算评估。

(4) 钙质粉土是大孔材料, 渗流力的作用使更多的微孔和介孔转变为大孔, 孔隙结构以一端开口的均匀圆筒形孔为主。

(5) 本文对钙质粉土非饱和渗透特性的探讨尚未考虑试验过程中试样孔隙比的变化、渗透液的种类以及细粒土随渗透水流出后土样质量的损失对渗透系数测试结果的影响, 这些因素对钙质粉土渗透系数的影响有待进一步的研究。

参 考 文 献

[1] 汪稔, 宋朝景, 朱长歧, 等. 南沙群岛珊瑚礁工程地质[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
WANG Ren, SONG Chao-jing, ZHAO Huan-ting, et al. Nansha Islands coral reef engineering geology[M]. Beijing: Science Press, 1997.

[2] 孙吉主, 汪稔. 钙质砂的颗粒破碎和剪胀特性的围压效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 641 - 644.
SUN Ji-zhu, WANG Ren. Influence of confining pressure on particle breakage and shear expansion of calcareous sand[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(4): 641 - 644.

[3] 孙宗勋, 黄鼎成. 珊瑚礁工程地质研究进展[J]. 地球科学发展, 1999, 14(6): 577 - 581.
SUN Zong-xun, HUANG Ding-cheng. Research progresses on coral reef engineering geology[J]. **Advance in Earth Sciences**, 1999, 14(6): 577 - 581.

[4] 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): 1 - 8.
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): 1 - 8.

[5] 莫洪韵. 岛礁钙质砂、岩混合料工程力学性能研究. 硕士学位论文[D]. 南京: 东南大学, 2015.
MO Hong-yun. Research on the mechanics characteristics of calcareous sand-limestone mixture[D]. Nanjing: School of Transportation of Southeast University, 2015.

[6] 叶正强, 李爱群, 杨国华, 等. 黏性土的渗透规律研究[J]. 东南大学学报, 1999, 29(5): 121 - 125.
YE Zheng-qiang, LI Ai-qun, YANG Guo-hua, et al. Study of permeability for cohesive soil[J]. **Journal of Southeast University**, 1999, 29(5): 121 - 125.

[7] 陈勇, 单红仙, 贾永刚. 黄河沉积粉土渗透系数变化研究[J]. 海洋湖沼通报, 2005, (4): 15 - 22.
CHEN Yong, SHAN Hong-xian, JIA Yong-gang. A study on the variation in the seepage coefficient of yellow river silt[J]. **Transactions of Oceanology and Limnology**, 2005, (4): 15 - 22.

[8] 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.

[9] TAYLOR D W. Fundamentals of soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons., 1948.

[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] MESRI G, OLSON R E. Mechanisms controlling the permeability of clays[J]. **Clay and Clay Mineral**, 1971, 19(3): 151 - 158.

[12] 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 Kang-he, ZHENG Hui, LEO C J. An analytical theory for one dimensional nonlinear large strain consolidation of soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(6): 680 - 684.

[13] 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 Kang-he, QI Tian, HU An-feng, et al. Experimental study on nonlinear permeability characteristics of Xiaoshan clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(2): 420 - 424.

[14] 高凌霄, 栾茂田, 杨庆, 等. 饱和重塑黏土渗透性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2267 - 2270.
GAO Ling-xia, LUAN Mao-tian, YANG Qing, et al.

- Experimental study of permeability of unsaturated remoulded clays[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2267 - 2270.
- [15] 刘维正, 石名磊, 缪林昌. 天然沉积饱和黏土渗透系数试验研究与预测模型[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2501 - 2507.
- LIU Wei-zheng, SHI Ming-lei, MIAO Lin-chang. Experimental study of permeability coefficient of natural saturated clay and its prediction model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(9): 2501 - 2507.
- [16] 赵彦旭, 张虎元, 吕擎峰, 等. 压实黄土非饱和渗透系数试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1809 - 1812.
- ZHAO Yan-xu, ZHANG Hu-yuan, LU Qing-feng, et al. Experimental study of unsaturated permeability coefficient of compacted loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(6): 1809 - 1812.
- [17] 南京水利科学研究所. SL237 - 1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- Nanjing Hydraulic Research Institute. SL 237-1999 Test methods of soils[S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999.
- [18] 严继民, 张启元. 吸附与凝聚固体的表面与孔[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- YAN Ji-min, ZHANG Qi-yuan. Adsorption and coagulation-surface and pore of solid[M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [19] 陈萍, 唐修义. 低温氮吸附法与煤中微孔隙特征的研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(5): 552 - 556.
- CHEN Ping, TANG Xiu-yi. The research on the adsorption of nitrogen in low temperature and micro-pore properties in coal[J]. **Journal of China Coal Society**, 2001, 26(5): 552 - 556.
- [20] 林海飞, 程博, 李树刚, 等. 新疆阜康矿区煤层孔隙结构特征的氮吸附实验研究[J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(6): 721 - 726.
- LIN Hai-fei, CHEN Bo, LI Shu-gang, et al. Nitrogen adsorption experimental study on pore structure characteristics of coal seams in Xinjiang Fukang mining area[J]. **Journal of Xi'an University of Science and Technology**, 2015, 35(6): 721 - 726.
- [10] 许豪, 肖宏彬, 滕珂. 南宁非饱和膨胀土在剪切条件下剪应力松弛特性的试验研究[J]. 工业建筑, 2011, 41(4): 92 - 96.
- XU Hao, XIAO Hong-bin, TENG Ke. Experimental study on shear stress relaxation characteristics of Nanning unsaturated expansive soil under the condition of shearing[J]. **Industrial Construction**, 2011, 41(4): 92 - 96.
- [11] 田管凤, 汤连生. 侧限压缩条件下土体的侧应力松弛试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 783 - 787.
- TIAN Guan-feng, TANG Lian-sheng. Lateral stress relaxation of soil under confined compression condition[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(3): 783 - 787.
- [12] 肖宏彬, 贺聪, 周伟, 等. 南宁膨胀土非线性剪切应力松弛特性试验[J]. 岩土力学, 2013, (增刊 1): 22 - 27.
- XIAO Hong-bin, HE Cong, ZHOU Wei, et al. Experimental study of nonlinear shear stress relaxation characteristics of Nanning expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, (Supp.1): 22 - 27.
- [13] TONG Fei, YIN Jian-hua. Experimental and constitutive modeling of relaxation behaviors of three clayey soils[J]. **Geotech. Geoenviron. Eng.**, 2013, 139: 1973 - 1981.
- [14] 杜东菊, 杨爱武, 刘举, 等. 天津滨海软土[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- DU Dong-ju, YANG Ai-wu, LIU Ju, et al. Soft soil of Tianjin Binhai area[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [15] 齐杰杰. 天津吹填软土应力松弛特性及其经验模型研究[D]. 天津: 天津城建大学, 2014.
- QI Jie-jie. Study on the stress relaxation characteristic of soft soil in Tianjin and its empirical model[D]. Tianjin: Tianjin Chengjian University, 2014.

上接第 3094 页