

极细颗粒黏土渗流特性试验研究

梁健伟^{1, 2}, 房莹光^{1, 2}

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510641)

摘要: 为深入研究极细颗粒黏土的渗流特性, 采用可调节水头高度的常水头渗透试验装置, 利用不同离子浓度的孔隙液和蒸馏水, 分别对极细颗粒人工土和广州南沙天然软土进行渗透试验。试验结果显现土体渗流的 2 个重要的特性, 一是随着孔隙液离子浓度的增大, 试样的渗透系数随之增加; 二是随着水力梯度的降低, 对于不同离子浓度的孔隙液情况, 试样的渗透系数出现增大或者减小的“异常”现象。试验结果和机制分析认为, 土颗粒表面电荷的微电场作用和渗流孔隙的微尺度效应是影响极细颗粒黏土的渗流特性的重要原因, 而颗粒比表面积、表面电位、孔隙液离子浓度和孔隙尺度则是改变渗流特性的重要影响参数。对上述 2 个渗流特性分别采用“微电场效应”和“微尺度效应”作出解释, 其中对软土渗流“异常”现象的真实原因仍需要更多的试验和进一步的研究探讨。

关键词: 土力学; 极细颗粒黏土; 广州南沙天然软土; “异常”渗流特性; 渗流的微电场效应; 渗流的微尺度效应; 等效渗透系数

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)06 - 1222 - 09

EXPERIMENTAL STUDY OF SEEPAGE CHARACTERISTICS OF TINY-PARTICLE CLAY

LIANG Jianwei^{1, 2}, FANG Yingguang^{1, 2}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China)

Abstract: For further study of the seepage characteristics of tiny-particle clay, variable height and constant-head seepage apparatus are adopted to conduct experiments on tiny-particle artificial soil and natural soft soil from Nansha of Guangzhou with pore water of different ion concentrations and distilled water. The test results show two important characteristics of soil seepage. First, the permeability coefficient increases with the increase of ion concentration of pore water. Second, the permeability coefficients of the samples with pore water of different ion concentrations show abnormal increase or decrease trends with the reduction of hydraulic gradient. The analyses of results and mechanism suggest that the micro-electric field effect caused by surface charge on clay particles and microscale effect of seepage pore are the main reasons that influence the seepage characteristics of tiny-particle clay; and the particle specific surface area, surface potential, ion concentration of pore water and pore scale are important influence parameters that lead to the change of seepage characteristics. Micro-electric field effect and microscale effect are adopted to explain the two seepage characteristics mentioned above. However, more experiments and research are needed to study the real causes of the abnormal soil seepage phenomenon.

收稿日期: 2010 - 02 - 25; **修回日期:** 2010 - 03 - 20

基金项目: 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室自主研究课题资助项目(2008ZA11)

作者简介: 梁健伟(1981 -), 男, 硕士, 2004 年毕业于华南理工大学建筑学院土木工程系水利水电工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土及地下结构方面的研究工作。E-mail: cv_liang@126.com

Key words: soil mechanics; tiny-particle clay; soft soil from Nansha of Guangzhou; abnormal seepage characteristics; micro-electric field effect on seepage(MEFES); microscale effect on seepage(MSES); equivalent permeability coefficient

1 引言

在土体中通过细小而曲折的孔隙流动(渗流)的水受到很大的黏滞阻力,因而流动非常缓慢,出现层流状态。Darcy 通过大量均匀砂的渗流试验,获得层流状态下孔隙水渗流速度 v 与水力梯度 I 成比例关系的达西定律。在普通砂土和粉土中的渗流属于层流范围,达西定律均可适用。但在纯砾以上的粗粒土以及黏性很大的致密黏土中的渗流往往偏离达西定律。前者由于土中存在大孔隙通道,使渗透出现紊流状态而偏离达西定律,后者则因为黏土中水与颗粒表面相互作用使渗流偏离达西定律^[1]。对极细颗粒黏土的试验结果^[2~5]表明,在极细颗粒黏土微孔隙中水的流动明显偏离 N-S 方程描述的流动规律,不符合达西渗流定律,流动速度与压力梯度成明显的非线性关系,且存在起始压力梯度 I_0 ,只有当压力梯度大于 I_0 时孔隙水才开始流动。

近期通过试验研究证实^[6~7],土颗粒表面电荷产生的微电场能显著影响极细颗粒黏土的孔隙渗流特性。黏土的极细颗粒通常为片状亲水矿物颗粒,具有很大的比表面积,颗粒表面电位可达数十至数百 mV^[8];在与之相应的微电场作用下,吸附在土颗粒表面的结合水具有黏度很大的类固体性质,对水的流动产生很大阻力。结合水膜的厚度随土颗粒表面电位的增加和孔隙液离子浓度的减小而变大,使土体中孔隙的等效直径减小,孔隙水的等效黏度系数增加,以致孔隙水的流动阻力增大,在宏观上表现为渗流速度降低,固结变形减小,等效渗透系数降低。上述由于受极细颗粒表面微电场影响而使黏土微孔隙渗流特性改变的现象称为微电场效应。

长期以来,几乎所有经典流体力学和润滑力学的文献中对流体流动的边界条件都有一个相同的重要假设:在固-液界面上没有滑移。然而随着微/纳米科技及相关领域的发展,人们借助于多种先进测试手段如原子力显微镜(AFM)、表面力仪(SFA)、微颗粒图像测速仪(μ -PIV)以及分子动力学模拟(MDS)技术,发现边界滑移在许多情况下有可能发生^[9~11]。极细颗粒黏土中的孔隙非常微小,通常为微米尺度等级^[12,13],水在微孔隙中流动时,会产生

“滑移边界”等一些与宏观流动不同的“微尺度效应”现象。G. Stemme 等^[14~16]对微尺度效应的研究表明,当孔隙的特征尺寸减小到一定尺度时,连续介质假设虽仍能成立,但原来在宏观流动中被忽略的许多因素,可能成为主要因素,从而出现不同于宏观流动的规律;而当孔隙特征尺寸减小到流体粒子平均自由程量级时,基于连续介质的一些宏观概念和规律不再适用,黏性系数等概念也应重新讨论。

目前贾振岐等^[17~19]针对黏土的微孔隙渗流进行了研究,但仍没有对极细颗粒黏土渗流的微电场效应和微尺度效应进行深入的探讨。本研究分别采用人工合成土和广州南沙天然淤泥土进行试验。其中采用人工土样是为了便于对渗流的微电场效应作出分析,因为人工土样易于确定微电场效应分析所需的矿物成分比例、比表面积和表面电荷密度等微观参数。本文在常水头试验的基础上,对极细颗粒黏土渗流的微电场效应和微尺度效应对渗流特性的影响进行探讨,首先测试了不同颗粒表面电位和孔隙液离子浓度的人工土试样的渗透系数,然后测试了南沙天然软土的渗透系数。试验结果表明,随着孔隙液离子浓度的增加,人工土试样的渗透系数随之增大;而随着水力梯度的降低,采用高离子浓度孔隙液的人工土试样的渗透系数随之减小,而采用低离子浓度孔隙液或蒸馏水的人工土试样的渗透系数出现了增大的“异常”现象;在相同的水力梯度范围内,南沙天然软土的渗透系数同样出现类似的“异常”变化趋势。文中利用扩散双电层理论和微尺度效应对试验结果进行分析,解释了极细颗粒黏土渗流的微电场效应和微尺度效应现象。本文的研究对沿海地区的淤泥和淤泥质土以及污染土的处理具有良好的应用前景。

2 人工土试样的渗透特性试验

2.1 试样制备及仪器改进

人工合成土试样为高纯度超细颗粒混合土,由人工高岭土与人工膨润土按照 2:1 的质量比均匀混合制成;土样的主要物理力学参数以及颗粒的比表面积和表面电荷密度如表 1 所示。其中颗粒总比表面积由乙二醇乙醚吸附法(EGME 法)^[20]测得;颗

表 1 人工土试样的主要物理力学参数

Table 1 Main physico-mechanical parameters of artificial soil samples

试样类型	试样编号	孔隙比 e_0	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	饱和含水量 $w/\%$	比表面积 $/(m^2 \cdot g^{-1})$	颗粒表面电荷密度 $/(C \cdot m^{-2})$	塑性指数 $I_p/\%$	孔隙液 NaCl 浓度 $n/(mol \cdot L^{-1})$
66.7% 高岭土	S1	2.20	0.82	82.3				0
	S2	2.20	0.82	82.4				8.3×10^{-3}
	S3	2.20	0.82	82.9	185.1	0.147	41.1	8.3×10^{-2}
33.3% 膨润土	S4	2.20	0.82	82.1				5.0×10^{-1}
	S5	2.19	0.82	83.2				8.3×10^{-1}

注：经激光粒度分析测试，各矿物成分的平均粒径为：膨润土 9.443 μm ，高岭土 3.444 μm 。

粒表面电荷密度由阳离子交换量(CEC)换算求得，阳离子交换量采用乙酸铵交换法^[21]测得。试样制备方法为击样法，试样直径 61.8 mm，高 40 mm，孔隙比保持在 2.20 左右。本次试验共采用 5 组不同孔隙液离子浓度的混合土试样，每组含有 1 个试样，试验所用的孔隙液为 NaCl 溶液，其浓度单位为摩尔浓度，即每升溶液中所含溶质的摩尔数。

对于微孔隙渗流试验，渗流量小，试验时间长，微小流量的外泄都会引起可观的试验误差。为此对本试验使用的 ST55-2 型渗透仪进行了防泄漏处理，在进水口铜管接头加装了 O 型密封圈，并缠绕数层防水生料带后将其旋紧在渗透仪底座上，在进水软胶管与铜管的连接处加设一道套箍，对排气口也作了同样处理，防泄漏处理后能够做到滴水不漏。试验采用常水头试验方法，通过改变渗透仪与供水箱的相对高度获得不同的试验水头，可测试出不同水力梯度下土样的渗透系数，试验装置如图 1 所示。

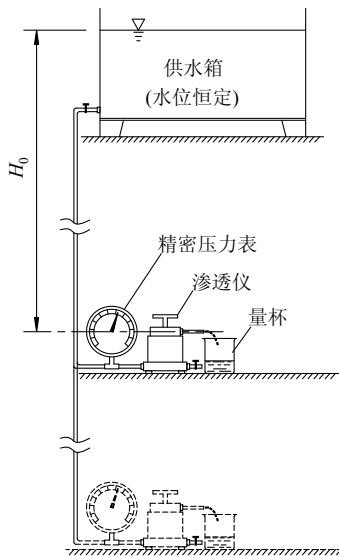


图 1 可升降高度的常水头渗流试验装置

Fig.1 Constant-head seepage apparatus with variable height

2.2 常水头渗透试验结果

本试验采用 ST55-2 型渗透仪，试样在安装完毕并经过排气后进行测试，通过改变水头高度来测定在不同试验水头下试样的渗透系数。表 2 列出了设定的试验水头高度 H_0 与对应的水力梯度 I ， H_0 为某级常水头试验过程的水头高度，可通过与渗透仪连接的精密压力表读数换算得出。各试样的试验条件保持一致，试验按水头从低到高的顺序进行，对各试验水头下的渗流量及其历时进行 3 次以上的测试，将各次试验所得的流量和渗透系数平均值作为该试验水头下的流量和渗透系数，如表 3 所示。

表 2 试验水头与对应的水力梯度

Table 2 Hydraulic head and corresponding hydraulic gradient

H_0/cm	I	H_0/cm	I
25	6.25	525*	131.25*
50	12.50	600	150.00
75	18.75	700*	175.00*
100	25.00	800	200.00
150	37.50	900*	225.00*
200	50.00	1 000	250.00
250	62.50	1 100*	275.00
300	75.00	1 300	325.00
375*	93.75*	1 500	375.00
450	112.50		

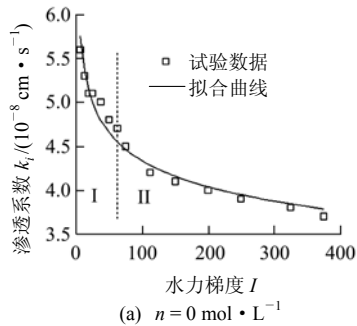
注：1. 人工土试样按表中除“*”号外的水头及对应的水力梯度进行试验；2. 天然土试样按表中除 $H_0 = 1\ 000\ cm$ 外的水头及对应的水力梯度进行试验。

图 2 为对不同浓度 NaCl 孔隙液的试样进行常水头渗透试验得到的渗透系数 - 水力梯度曲线，表 3 为各试验水头(水力梯度)下不同浓度 NaCl 孔隙液的试样相应的渗透系数。表 3 和图 2 表明随着水力梯度的提高，低孔隙液离子浓度(如蒸馏水和 $n = 8.3 \times 10^{-3}\ mol/L$)的人工土试样的渗透系数呈现下降趋势，而高孔隙液离子浓度(如 $n = 8.3 \times 10^{-2}$ ， 5.0×10^{-1} 和 $8.3 \times 10^{-1}\ mol/L$)的人工土试样的渗透系数则

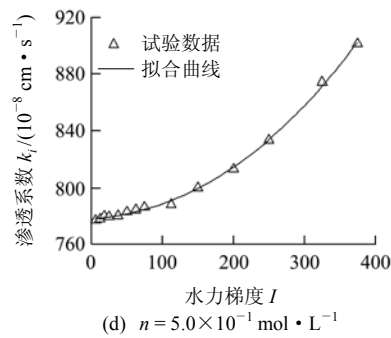
表 3 各试验水头(水力梯度)下人工土试样的流量和渗透系数

Table 3 Flow capacity and permeability coefficient of artificial soil samples under different hydraulic heads(hydraulic gradients)

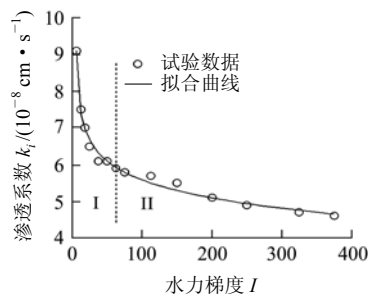
水力梯度 I	S1($n = 0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)		S2($n = 8.3 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)		S3($n = 8.3 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)		S4($n = 5.0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)		S5($n = 8.3 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	
	流量 Q_i /($10^{-5} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	渗透系数 k_i /($10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	流量 Q_i /($10^{-5} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	渗透系数 k_i /($10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	流量 Q_i /($10^{-5} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	渗透系数 k_i /($10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	流量 Q_i /($10^{-5} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	渗透系数 k_i /($10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	流量 Q_i /($10^{-5} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	渗透系数 k_i /($10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
	测值	均值	测值	均值	测值	均值	测值	均值	测值	均值
6.25	1.0	5.6	1.7	9.1	7.9	42.3	145.7	777.0	189.3	1 009.6
12.50	2.0	5.3	2.8	7.5	15.0	40.1	291.6	777.6	379.1	1 010.9
18.75	2.9	5.1	3.9	7.0	22.3	39.6	438.6	779.7	569.3	1 012.0
25.00	3.8	5.1	4.9	6.5	30.0	40.1	584.6	779.4	761.8	1 015.7
37.50	5.6	5.0	6.9	6.1	47.9	42.6	877.5	780.0	1 148.4	1 020.8
50.00	7.3	4.8	9.1	6.1	67.0	44.6	1 174.2	782.8	1 533.9	1 022.6
62.50	8.7	4.7	11.0	5.9	86.8	46.3	1 470.5	784.3	1 932.4	1 030.6
75.00	10.0	4.5	13.0	5.8	115.7	51.4	1 768.9	786.2	2 323.1	1 032.5
112.50	14.2	4.2	19.2	5.7	186.2	55.2	2 659.3	787.9	3 486.8	1 033.1
150.00	18.5	4.1	24.7	5.5	260.0	57.8	3 599.0	799.8	4 739.0	1 053.1
200.00	24.0	4.0	30.4	5.1	367.2	61.2	4 878.2	813.0	6 309.7	1 051.6
250.00	29.5	3.9	36.9	4.9	485.5	64.7	6 248.4	833.1	8 093.3	1 079.1
325.00	36.6	3.8	46.1	4.7	801.8	82.2	8 522.0	874.0	11 037.0	1 132.0
375.00	41.8	3.7	51.6	4.6	1 185.1	105.3	10 135.7	901.0	13 161.2	1 169.9



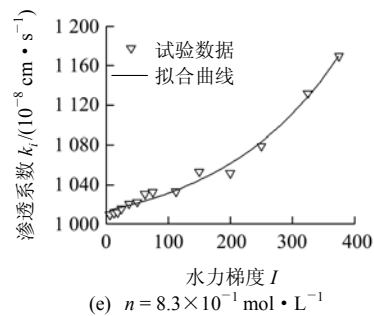
(a) $n = 0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$



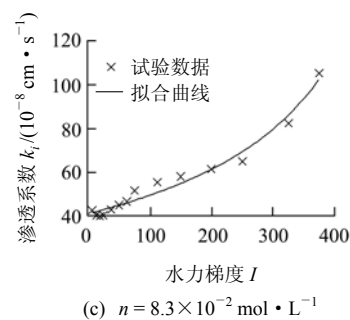
(d) $n = 5.0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$



(b) $n = 8.3 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$



(e) $n = 8.3 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$



(c) $n = 8.3 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

图 2 渗透系数 - 水力梯度曲线

Fig.2 Relationship curves between permeability coefficients and hydraulic gradients

有所上升。

图 3 为取代表性水力梯度 $I = 6.25, 50.00, 250.00$ 和 375.00 时由 NaCl 溶液测得的渗透系数 k_E 与由蒸馏水测得的渗透系数 k_D 的比值随浓度的变化曲线, 表明各水力梯度下人工土试样的渗透系数随着

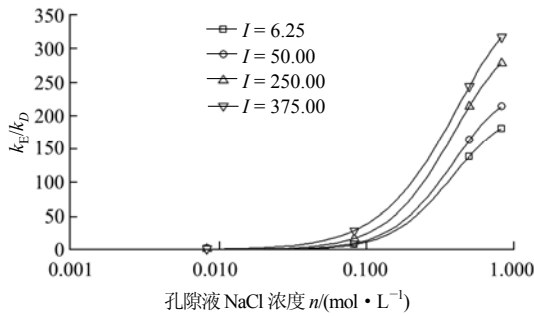


图3 k_E/k_D 随孔隙液 NaCl 浓度变化曲线

Fig.3 Relationship curves between k_E/k_D and NaCl solution concentration

孔隙液离子浓度的提高而不断增大，而且在高水力梯度和高孔隙液浓度下渗透系数增长的速度更快。

2.3 渗透特性与颗粒表面电位的关系

(1) 颗粒表面电位的计算

为了分析土体颗粒表面微电场对渗流特性的影响，测试了土样颗粒的表面电荷密度，并采用图 4 所示的双平板模型，由平板扩散双电层理论计算出颗粒表面电位。

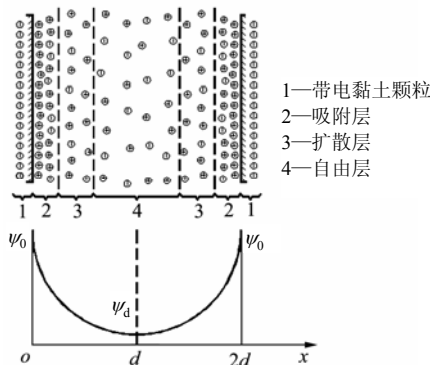


图4 黏土颗粒扩散双电层离子分布模型

Fig.4 Model of the ions distributions in diffuse double layers adjacent to a clay particle surface

根据平板扩散双电层理论，在不同孔隙液离子浓度 n 情况下，黏土颗粒的表面电位 ψ_0 与电荷密度 σ 之间存在以下关系^[8, 22]：

$$\sigma = \left(\frac{\epsilon n k T}{2\pi} \right)^{1/2} (2 \cosh z - 2 \cosh u)^{1/2} \quad (1)$$

其中，

$$\sigma = \frac{\Gamma F}{1000}, \quad z = \frac{ve\psi_0}{kT}, \quad u = \frac{ve\psi_d}{kT} \quad (2)$$

式中： σ 为土颗粒的表面电荷密度(与矿物成分有关，在大多数情况下保持恒定(C/m^2))； Γ 为土颗粒表面单位面积的阳离子交换当量，由试验测得(见表 4)； n 为孔隙液离子浓度； z, u 均为量纲一的参数； ψ_0 为土颗粒表面电位； ψ_d 为两平板间的中间

表 4 不同孔隙液离子浓度时对应的颗粒表面电位
Table 4 Corresponding particle surface potential with different ion concentrations

土样名称	$n/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$\Gamma/(10^{-3} \text{ meq} \cdot \text{m}^{-2})$	ψ_0/mV	ψ_d/mV
	8.3×10^{-3}		164	40
66.7%高岭土	8.3×10^{-2}	1.524	107	3
+ 33.3%膨润土	5.0×10^{-1}		72	0
	8.3×10^{-1}		56	0

电位。计算参数：Faraday 常数 $F = 9.65 \times 10^4 \text{ C/mol}$ ；水介电常数 $\epsilon = 80.0$ ；Boltzmann 常数 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ；电子电荷 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ ；温度 $T = 290 \text{ K}$ (17°C)；离子化合价 $v = \pm 1$ 。由式(1)可计算颗粒表面电位值 ψ_0 。

(2) 渗透系数随颗粒表面电位变化的曲线

利用式(1)可将渗透系数随孔隙液离子浓度变化的试验结果转化为随土颗粒表面电位变化的结果(见图 5)。图 6 为水力梯度 $I = 6.25, 50.00, 250.00$ 和 375.00 时的平均渗流速度随颗粒表面电位变化的曲线。

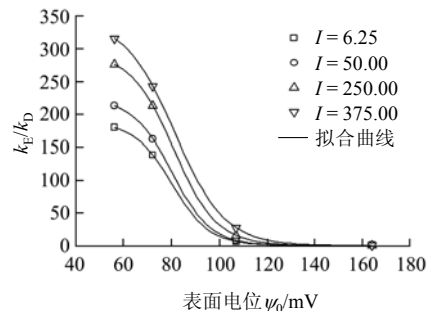


图5 k_E/k_D 随颗粒表面电位变化曲线

Fig.5 Relationship curves between k_E/k_D and particle surface potential

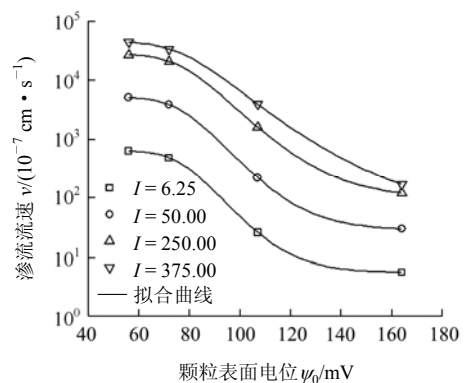


图6 不同水力梯度下渗流流速与随颗粒表面电位变化曲线

Fig.6 Relationship curves between seepage velocity and particle surface potential under different hydraulic gradients

由于颗粒表面电位随着孔隙液离子浓度的提高而降低, 因此图 3 与 5 的变化趋势是一致的, 即渗透系数随着颗粒表面电位的降低(或孔隙液离子浓度的提高)而增大, 而且当表面电位较低时的渗透系数的增长速度较快。图 6 表明试样的平均渗流速度也随颗粒表面电位的降低而提高, 但在高浓度孔隙液下的平均渗流速度逐渐趋于稳定, 不同水力梯度下的曲线形状基本相似。

3 天然土试样的渗透特性试验

对低浓度孔隙液和蒸馏水的人工土试样的渗流试验发现了渗透系数随水头梯度减小而明显增大的“异常”渗流现象, 本节采用广州南沙淤泥质土进行渗透试验, 考察是否同样出现相应的“异常”渗流特性。

3.1 天然土试样的特性

试验所用的土样取自广州南沙龙穴岛上经真空预压加固后的吹填淤泥地基的浅表层, 场地内的原状地基土主要是颗粒细、孔隙小的海相淤泥土, 具有高含水量, 高压缩性, 低强度和低渗透性等工程特性。经真空预压加固后地基土的工程特性得到改善和提高, 土样的主要物理力学参数见表 5。采用蒸馏水对南沙土试样进行不同水头下的渗透试验。

表 5 广州南沙软土的主要物理力学参数

Table 5 Main geotechnical properties of the Nansha soft soil

孔隙比 e_0	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	饱和含水量 /%	比表面积 $/(m^2 \cdot g^{-1})$	颗粒表面电荷密度 $/(C \cdot m^{-2})$
1.02	1.34	38.5	94.2	0.119
颗粒组成/%				
塑性指数 I_p /%	颗粒组成/%			
	粗砂 0.5~2.0 mm	中砂 0.25~0.5 mm	细砂 0.075~0.25 mm	粉粒与黏粒 <0.075 mm
15.8	0.9	1.8	8.3	89.0

3.2 常水头渗透试验结果

采用图 1 所示的常水头渗流试验装置测试南沙软土的渗透系数, 试样的安装、排气与测试等步骤均与人工土试样相同, 各试验水头列于表 2。

对不同试验水头下广州南沙软土试样的渗流量及其历时进行 3 次以上的测试, 将各次试验所得的流量和渗透系数平均值作为该试验水头下的流量和渗透系数。表 6 为试验所得的不同水头(水力梯度)下的广州南沙软土试样的渗透系数; 图 6 为相应的

表 6 各水头(水力梯度)下广州南沙软土试样的流量和渗透系数

Table 6 Flow capacity and permeability coefficient of Nansha soft soil under different hydraulic heads(hydraulic gradients)

水力梯度 I	流量 Q_i $/(10^{-4} cm^3 \cdot s^{-1})$	渗透系数 k_i $/(10^{-6} cm \cdot s^{-1})$	水力梯度 I	流量 Q_i $/(10^{-4} cm^3 \cdot s^{-1})$	渗透系数 k_i $/(10^{-6} cm \cdot s^{-1})$
6.25	5.2	2.79	112.50	61.8	1.83
12.50	8.8	2.35	131.25	71.1	1.81
18.75	12.5	2.22	150.00	80.4	1.79
25.00	15.7	2.10	175.00	90.3	1.72
37.50	22.6	2.01	200.00	98.6	1.64
50.00	29.0	1.93	225.00	106.0	1.57
62.50	35.2	1.88	275.00	122.4	1.48
75.00	42.0	1.87	325.00	125.8	1.29
93.75	51.8	1.84	375.00	136.5	1.21

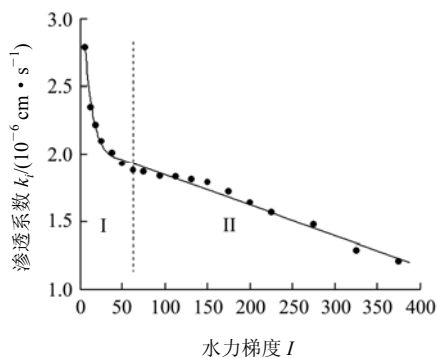


图 7 渗透系数 - 水力梯度曲线

Fig.7 Relationship curves between permeability coefficient and hydraulic gradient

渗透系数 - 水力梯度曲线图, 图 7 中曲线与人工土试样在低浓度孔隙液情况下的变化趋势(见图 2 中 $n = 0$ 和 $8.3 \times 10^{-3} mol/L$ 的曲线)相似, 渗透系数随水力梯度的升高而有所降低, 降幅最高可达 56.6%。

4 试验结果分析

本文的试验结果显现了土体渗流的 2 个重要的特性, 一是土体的渗透系数随土颗粒表面电位的增加而显著减小; 二是对于不同离子浓度的孔隙液情况, 土体的渗透系数随水力梯度的降低出现增大或减小的“异常”现象。本节将对于前者采用“微电场效应”作出合理解释, 而对于后者则采用“微尺度效应”进行解释。

4.1 微孔隙渗流的微电场效应

从人工土试验结果图 5, 6 来看, 渗透试验中孔隙液离子浓度 n 和土颗粒表面电位 ψ_0 对黏土的渗流特性具有显著的影响。例如, 当表面电位从 72 mV 增加到 107 mV 时, 各代表性水力梯度下的渗透系数与平均流速的降幅均超过 88%; 当表面电位从 107 mV 增加到 164 mV 时, 渗透系数与平均流速的降幅均达到 78% 以上, 具体的变化数值见表 7。可见随着土颗粒表面电位的增大, 渗透系数与平均渗流速度都在减小。上述渗透试验的结果表明, 改变孔隙液的离子浓度或土颗粒的表面电位, 将使颗粒表面的微电场发生变化, 并使黏土的宏观渗流特性产生明显的改变。

表 7 表面电位与渗透系数、平均渗流流速的关系

Table 7 Relationships between surface potential, permeability coefficient and average seepage velocity

表面电位 ψ_0 /mV	各代表性水力梯度下渗透系数与平均渗流流速/($10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)			
	$I = 6.25$	$I = 50.00$	$I = 250.00$	$I = 375.00$
56	1 009.6	1 022.6	1 079.1	1 169.9
	(6 310)	(51 131)	(269 777)	(438 707)
72	777.0	782.8	833.1	901.0
	(4 856)	(39 140)	(208 281)	(337 858)
107	42.3	44.6	64.7	105.3
	(264)	(2 232)	(16 184)	(39 502)
164	9.1	6.1	4.9	4.6
	(57)	(303)	(1229)	(1 719)

注: 括号外的数据为渗透系数, 括号内的数据为平均渗流流速。

利用 Gouy-Chapman 的扩散双电层理论, 可以解释颗粒表面微电场对黏土渗透性影响的效应。图 4 为黏土颗粒的扩散双电层离子分布模型。土颗粒表面带有负电荷, 电荷在颗粒表面形成的微电场吸附孔隙溶液中的阳离子在固液界面附近聚集, 形成离子吸附层和扩散层, 水分子是极性分子, 受微电场影响而定向排列; 吸附层的水形成强结合水, 其性质受静电引力控制, 具有很大的黏滞阻力, 几乎不具有流动性; 扩散层的水形成弱结合水, 其性质也受到静电引力的强烈影响, 黏滞阻力也较大, 流动性较低。

结合水的存在减小了土颗粒间孔隙的等效直径, 有效黏度系数增大, 使孔隙中水的流动阻力增大。一般来说, 溶液中的离子浓度越低, 土颗粒的表面电位越高, 表示颗粒表面的微电场越强, 水分子受到静电引力的作用越强烈, 形成的结合水膜就越厚, 因此结合水膜的厚度随颗粒表面电位的增大而增加, 随孔隙溶液离子浓度的增加而减小, 颗粒

表面微电场对黏土渗流宏观特性的影响表现为渗透系数及渗流速度的改变。由于结合水膜厚度的变化只对微小孔隙的等效渗流直径的变化影响很大, 因此上述颗粒表面微电场对黏土渗透性影响的效应一般只在微小孔隙的土体中才显现出来, 因而称为微孔隙渗流的微电场效应, 图 5, 6 所示的试验结果显示了强烈的微电场效应。对于粗颗粒土, 其比表面积远小于细颗粒黏土, 表面带电现象不明显, 双电层厚度较薄, 且颗粒间的孔隙较大, 结合水膜厚度对孔隙的等效渗流直径影响很小, 因而孔隙水的流动几乎不受微电场的影响。

4.2 微孔隙渗流的微尺度效应

孔隙液在极细颗粒黏土微孔隙中流动的空间尺度远小于普通黏土, 其渗流特性除了受微电场效应的影响外, 微尺度效应也是一个不可忽略的重要因素。对于人工土试样, 对图 2 进行比较分析可以发现, 在不同的孔隙液离子浓度 n 或者不同土颗粒表面电位 ψ_0 下试样的渗透系数随水力梯度的变化趋势出现了分化现象。当孔隙液离子浓度大于某一数值时(如 $n = 8.3 \times 10^{-2}$, 5.0×10^{-1} 和 $8.3 \times 10^{-1} \text{ mol/L}$ 情况), 试样的渗透系数随着水力梯度的降低逐渐减小; 而当孔隙液离子浓度小于某一数值时(如对于 $n = 8.3 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 和蒸馏水情况), 试样的渗透系数随着水力梯度的降低而明显增大, 具体的变化数值见表 3。对于广州南沙天然土试样, 随水力梯度的增加, 渗透系数出现下降, 但降幅是逐渐减小的(见图 7)。将人工土与天然土的渗透系数—水力梯度曲线进行对比可以发现, 在低孔隙液浓度和蒸馏水情况下, 两者都存在一个相似的界限水力梯度, 可大致将曲线划分为 2 个区段, 在第 I 区段($I \leq 62.5$), 渗透系数随水力梯度降低而显著增大, 其中人工土的最大增幅为 54.2%, 而南沙软土的最大增幅为 48.4%; 在第 II 区段($I > 62.5$), 渗透系数随水力梯度升高呈线性变化减小, 人工土的最高降低了 22% 左右, 南沙软土最高可降低 35.6%。对于土体试样的渗透系数随水力梯度减小而明显增大(或减小)的“异常”现象的试验结果进行了反复核定, 对同一试样重复进行 3 次以上试验, 每次重复试验都出现相同的“异常”现象。

目前对于出现上述土体渗流“异常”现象的原因还不清楚, 这里采用“微尺度效应”进行解释。在流体力学的研究领域, J. Traube 和 S. H. Whang^[23] 于 1928 年就已经注意到在极低压力的条件下, 当黏

度计管壁经过极性有机化合物如油酸处理后, 水的流量是没有经过处理时的数倍, L. J. Weber 和 H. Neugebauer^[24]将这种现象解释为在经过特殊处理的壁面上水出现了滑移。凌志勇等^[25]报道了低黏度蒸馏水和硅油在内径为 13~100 μm , 长度为 40~100 mm 的微圆管道中渗流试验结果, 当管道特征尺度减小到某一微尺度时出现明显的“微尺度效应”现象, 渗流速度比常规试验显著增大 3.93 倍。极细颗粒黏土渗流试验结果(见图 2 与 7)的“异常”现象也可用“微尺度效应”来解释。极细颗粒黏土的等效孔隙渗流直径随双电层厚度变化, 随着孔隙液离子浓度降低, 双电层厚度增加, 以致等效孔隙渗流直径明显减小而表现出微尺度效应, 产生如图 8 所示的“滑移边界”现象; 当水力梯度较大时, 水力渗流量占优势, 渗透系数随水力梯度的变化不明显; 而当水力梯度较小时, 水力渗流量减小, 因“滑移边界”增大的渗流量的比例增加, 体现为(等效)渗透系数随水力梯度减小而明显增大。当孔隙液离子浓度较高时, 双电层的厚度小而等效孔隙渗流直径较大, 不产生微尺度效应, 孔隙渗流的特性与普通黏土相似, 渗透系数随水力梯度的降低而有所减小。

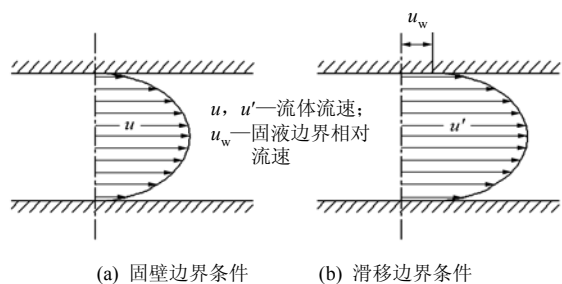


图 8 流体在微管道中的流动边界条件

Fig.8 Flow boundary conditions of liquid in micro channel

微尺度效应产生的“滑移边界”现象解释为, 渗流孔隙的特征尺寸很小时, 孔隙内水分子数量较少而处于“稀薄”状态, 水分子与孔壁的碰撞频率是有限的, 不能满足固-液界面连续和热平衡所要求的流体分子与固壁之间的碰撞频率为无穷大的条件, 从而出现固-液界面的间断性而产生“滑移边界”现象。“滑移边界”现象使孔壁对水分子的吸附力减小, 孔壁对水的流动阻力降低。渗流试验图 2 与 7 的“异常”结果可由微尺度效应产生的“滑移边界”现象作出解释, 但产生“异常”渗流现象的真实原因还有待于更多的试验和进一步的研究作出

证实。

5 结论

通过对人工极细颗粒黏土与广州南沙软土进行的常水头渗透试验, 并结合微孔隙渗流的微电场效应与微尺度效应的分析, 可以得出以下主要结论:

(1) 采用常水头渗流试验装置进行的渗流试验结果, 显现了极细颗粒土的渗透系数随孔隙液离子浓度的减小而显著减小的特性, 以及对于不同离子浓度孔隙液的渗透系数随水力梯度减小出现增大或减小的“异常”现象; 可分别采用“微电场效应”和“微尺度效应”对这些渗流特性作出解释。本文的研究对沿海地区淤泥和淤泥质土的加固, 以及对污染土的处理等具有理论指导意义。

(2) 极细颗粒土的渗透系数随孔隙液离子浓度减小而显著减小的特性可由微孔隙渗流的微电场效应作出解释。颗粒表面电位随着孔隙液离子浓度的下降而升高, 对孔隙水的静电引力增强, 因而带电颗粒的表面微电场与孔隙水相互作用形成结合水膜的厚度增加, 使黏土的等效孔隙渗流直径减小, 从而降低土体的渗透性, 并使渗流特性明显偏离达西水力渗流定律。

(3) 对于不同离子浓度孔隙液的情况, 土体渗透系数随水头梯度减小出现增大或减小的“异常”现象可由微尺度效应产生的“滑移边界”现象作出解释, 但仍然需要更多的试验数据和更进一步的深入研究来探索“异常”渗流现象的真实原因。

参考文献(References):

- [1] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.(HEN Zhongyi, ZHOU Jingxing, WANG Hongjin. Soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.(in Chinese))
- [2] HORSEMAN S T, HIGGO J J W, ALEXANDER J, et al. Water, gas and solute movement through argillaceous media[R]. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development(OECD), 1996.
- [3] BEAR J. Dynamics of fluids in porous media[M]. New York: Dover Publications, Inc., 1972.
- [4] SWARTZENDRUBER D. Non-Darcy flow behavior in liquid-saturated porous media[J]. Journal of Geophysical Research, 1962, 67(13): 5 205 - 5 213.
- [5] PRADA A, CIVAN F. Modification of Darcy's law for the threshold

- pressure gradient[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1999, 22(4): 237 - 240.
- [6] 谷任国. 软土流变的成分影响和渗流的离子效应研究[博士学位论文][D]. 广州: 华南理工大学, 2007.(GU Renguo. The study of composition effects on soft soil creep behavior and ion effects on soft soil seepage[Ph. D. Thesis][D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2007.(in Chinese))
- [7] 谷任国, 房营光. 极细颗粒黏土渗流离子效应的试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(6): 1 595 - 1 598.(GU Renguo, FANG Yingguang. Experiment study of the ion effects on fine grained soil seepage[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(6): 1 595 - 1 598.(in Chinese))
- [8] MITHCELL J K. *Fundamentals of soil behavior*[M]. New York: Wiley, 1976.
- [9] NETO C, EVANS D R, BUTT H J, et al. Boundary slip in Newtonian liquids: a review of experimental studies[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2005, 68(12): 2 859 - 2 897.
- [10] VINOGRADOVA O I. Slippage of water over hydrophobic surfaces[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1999, 56(1): 31 - 60.
- [11] GRANICK S, ZHU Y X, LEE H J. Slippery questions about complex fluids flowing past solids[J]. *Nature Materials*, 2003, 2(4): 221 - 227.
- [12] 陶然, 权晓波, 徐建中. 微尺度流动研究中的几个问题[J]. *工程热物理学报*, 2001, 22(5): 575 - 577.(TAO Ran, QUAN Xiaobo, XU Jianzhong. Several questions in research of micro-scale flow[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2001, 22(5): 575 - 577.(in Chinese))
- [13] 张颖, 王蔚, 田丽, 等. 微流动的尺寸效应[J]. *微纳电子技术*, 2008, 45(1): 33 - 37.(ZHANG Ying, WANG Wei, TIAN Li, et al. Scaling effect of micro fluidic systems[J]. *Micronano-electronic Technology*, 2008, 45(1): 33 - 37.(in Chinese))
- [14] STEMME G, KITTLISLAND G, NORDEN B. A sub micron particle filter in silicon channels[J]. *Sensors and Actuators*, 1990, 431(4): 21 - 23.
- [15] 钟映春, 谭湘强, 杨宜民. 微流体力学几个问题的探讨[J]. *广东工业大学学报*, 2001, 18(3): 46 - 48.(ZHONG Yingchun, TAN Xiangqiang, YANG Yimin. Discussion on several issues in microfluid mechanism[J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2001, 18(3): 46 - 48.(in Chinese))
- [16] 过增元. 国际传热研究前沿——微细尺度传热[J]. *力学进展*, 2000, 30(1): 1 - 6.(GUO Zengyuan. Frontier of heat transfer-microscale heat transfer[J]. *Advances in Mechanics*, 2000, 30(1): 1 - 6.(in Chinese))
- [17] 贾振岐, 王延峰, 付俊林, 等. 低渗低速下非达西渗流特征及影响因素[J]. *大庆石油学院学报*, 2001, 25(3): 73 - 76.(JIA Zhenqi, WANG Yanfeng, FU Junlin, et al. Characteristics of non-Darcy percolation and under the condition of low-permeability and low-velocity[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2001, 25(3): 73 - 76.(in Chinese))
- [18] 朱长军, 周继红, 郝振纯, 等. 地下水非达西渗流的数值模拟研究[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2006, 28(6): 485 - 487.(ZHU Changjun, ZHOU Jihong, HAO Zhenchun, et al. Study of numerical simulation of non-Darcy seepage for groundwater[J]. *Journal of China Three Gorges University(Natural Science)*, 2006, 28(6): 485 - 487.(in Chinese))
- [19] 王秀艳, 刘长礼. 对黏性土孔隙水渗流规律本质的新认识[J]. *地球学报*, 2003, 24(1): 91 - 95.(WANG Xiuyan, LIU Changli. New understanding of the regularity of water seepage in cohesive soil[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2003, 24(1): 91 - 95.(in Chinese))
- [20] LIANG J W, FANG Y G, GU R G. Experiment and analysis of specific surface area of tiny-particle clay[J]. *Science Technology and Engineering*, 2009, 9(9): 2 371 - 2 377.
- [21] 中华人民共和国行业标准编写组. LY/T 1243 - 1999 森林土壤阳离子交换量的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. LY/T 1243 - 1999 Determination of cation exchange capacity in forest soil[S]. Beijing: Standards Press of China, 1999.(in Chinese))
- [22] VANOLPHEN H. 黏土胶体化学导论[M]. 许冀泉译. 北京: 农业出版社, 1982.(VANOLPHEN H. An introduction to clay colloid chemistry[M]. Translated by XU Jiquan. Beijing: China Agricultural Press, 1982.(in Chinese))
- [23] TRAUBE J, WHANG S H. Über reibungskonstante und wandschicht[J]. *Zeitschrift für Physikalische Chemie A*, 1928, 138: 102 - 122.
- [24] WEBER L J, NEUGEBAUER H. Theoretische betrachtungen über das Traube-Whangsche phänomen[J]. *Zeitschrift für Physikalische Chemie A*, 1928, 138: 161 - 168.
- [25] 凌志勇, 杨继昌, 丁建宁, 等. 低黏度液体在微管道中流动特性的试验[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(11): 103 - 105.(LING Zhiyong, YANG Jichang, DING Jianning, et al. Experimental research of flow characteristic of low viscosity fluid flow in micron channels[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(11): 103 - 105.(in Chinese))