

文章编号: 1000-7598-(2008)02-420-05

基于 GDS 的黏土非线性渗透特性试验研究

谢康和¹, 齐 添¹, 胡安峰¹, 夏建中²

(1. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310027; 2. 浙江科技学院, 杭州 310012)

摘 要: 基于黏土渗透性与孔隙比的非线性关系, 讨论和总结了 4 种渗透模型, 即 $\lg[k_v(1+e)]-\lg e$ 渗透模型、 $e-\lg k_v$ 渗透模型、 $\lg k_v-\lg e$ 渗透模型和 $\lg k_v-\lg(1+e)$ 渗透模型。来用 GDS 高级固结仪, 对萧山黏土 8 个试样进行了一维固结渗透联合试验, 使用直接法整理固结压力作用下渗透系数等试验结果, 分析了对应于 4 种非线性渗透模型的土性参数。试验与分析结果表明, 萧山黏土渗透性随固结压力增加呈现非线性减少, 在 50~1 600 kPa 压力作用下其的渗透系数从 $8 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 减少为 $8 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; 4 种非线性渗透模型对萧山黏土都是适用的。

关 键 词: 萧山黏土; GDS 高级固结仪; 渗透性; 孔隙比; 非线性

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Experimental study on nonlinear permeability characteristics of Xiaoshan clay

XIE Kang-he¹, QI Tian¹, HU An-feng¹, XIA Jian-zhong²

(1. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Based on nonlinear relationship between permeability and void ratio of intact natural clay, four theoretical permeability models, i.e. $\lg[k_v(1+e)]-\lg e$ model, $e-\lg k_v$ model, $\lg k_v-\lg e$ model, and $\lg k_v-\lg(1+e)$ model, are introduced and discussed. The 1-D consolidation and permeability combined tests on eight undisturbed Xiaoshan clay samples are carried out by GDS advanced consolidation testing system. Void ratio and directly-measured permeability coefficient obtained from the test results are analyzed to summarize clay parameters of four permeability models. Experimental results show that the permeability of Xiaoshan clay decreases nonlinearly with consolidation pressure increasing; and the permeability coefficient varies from $8 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ to $8 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. It is also shown that all the four nonlinear permeability models are suitable for describing the permeability of Xiaoshan clay.

Key words: Xiaoshan clay; GDS advanced consolidation testing system; permeability; void ratio; nonlinearity

1 引 言

土的非线性渗透特性对土的固结变形和稳定等研究有着重要意义, 因为土的渗透性在固结过程中随土中有效应力的增加(或孔隙比的减少)呈非线性减少, 而并非如常规固结理论所假定的那样是恒定不变的。土的渗透性常规测定可分为间接法和直接法^[1], 前者通常根据常规固结试验结果, 利用太沙基一维固结理论确定固结系数 c_v 和体积压缩系数 m_v (或压缩系数 a_v), 再由公式 $k_v = c_v m_v \gamma_w$ 间接求出土的渗透系数 k_v 。由于间接法的理论依据是假定渗透系数 k_v 不变的线性固结理论, 因此, 这种方

法不适用于土的非线性渗透特性研究, 否则将混淆线性固结理论和非线性固结理论的区别^[2]。后者为常规室内常/变水头试验和室外现场渗透系数测定方法, 缺点是难以测定特定压力 p 作用下的渗透系数 k_v 。

针对黏土的渗透系数与孔隙比的非线性关系, 国内外学者已做了大量研究工作^[3-10], 主要包括 Samarasinghe 等提出的 $\lg[k_v(1+e)]-\lg e$ 渗透模型, Mesri 等提出的 $e-\lg k_v$ 与 $\lg k_v-\lg e$ 渗透模型, 以及本文在谢康和总结的非线性渗透模型基础上提出的 $\lg k_v-\lg(1+e)$ 新模型。但已有土样的渗透试验结果分析表明, 没有哪一种 $e-k_v$ 的渗透模型适用于所有

收稿日期: 2006-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50679074); 浙江省自然科学基金 (No. Y104413; No. Y104463)。

作者简介: 谢康和, 男, 1956 年生, 教授, 博导, 主要从事软黏土力学与地基处理等方面研究。E-mail: zdkhxie@zju.edu.cn

土^[3], 因此有必要借助新型渗透仪器直接测定黏土的渗透系数, 结合非线性渗透模型确定土性参数以及回归模型的适用性。

利用 GDS 高级固结仪^[11,12]可以进行固结渗透联合试验, 即各级荷载 p 作用下固结完成后, 在压力不变条件下设定多组不同常水头差的渗透试验, 直接测定受荷条件下的渗透系数, 从而避免了间接法需利用太沙基一维线性固结理论的缺陷, 并可以通过整理孔隙比和渗透系数的试验数据, 分析土体非线性渗透特性。

本文, 对萧山黏土的 GDS 固结渗透联合试验结果加以回归整理, 验证了黏土的非线性渗透特征, 并分析比较了各种非线性渗透模型对萧山黏土的适用性。

2 黏土渗透性的非线性模型

适用于黏土的非线性渗透模型主要有如下 4 种:

(1) $\lg[k_v(1+e)] - \lg e$ 渗透模型

Taylor^[4]曾总结出砂土的渗透系数表达式:

$$k_v = \frac{Ce^3}{1+e} \quad (1)$$

Samarasinghe et al.^[5]根据式 (1) 提出了适用于一般正常固结黏土的 $e-k_v$ 关系模型:

$$k_v = \frac{Ce^n}{1+e} \quad (2)$$

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

(2) $e - \lg k_v$ 渗透模型

$$e - e_0 = C_k \lg(k_v / k_{v0}) \quad (3)$$

式中: C_k 为渗透指数; e_0 、 k_{v0} 分别为初始孔隙比和初始渗透系数。

式 (3) 为表达渗透系数随孔隙比非线性变化的最常用模型。Mesri et al.^[7]指出, 式 (3) 所表示的 $e - \lg k_v$ 呈直线关系, 对于工程中常见黏土都是适用的。

(3) $\lg k_v - \lg e$ 渗透模型

如果孔隙比的变化范围过大, 式 (3) 可能不适用, Mesri et al.^[8]提出了改进的 $\lg k_v - \lg e$ 模型:

$$k_v = Be^A \quad (4)$$

即 $\lg k_v = A \lg e + \lg B$ 。

式中: A 、 B 为对应的黏土渗透特性参数。

(4) $\lg k_v - \lg(1+e)$ 渗透模型

谢康和等^[10]曾提出以下非线性渗透模型:

$k_v = k_{v0} \left(\frac{1+e}{1+e_0} \right)^2$, 本文据此进一步提出关于渗透系数和孔隙比关系的新模型:

$$k_v = k_{v0} \left(\frac{1+e}{1+e_0} \right)^\alpha \quad (5)$$

即 $\lg \frac{k_v}{k_{v0}} = \alpha \lg \left(\frac{1+e}{1+e_0} \right)$ 。式中 α 为土性参数, 可以通过分析试验数据拟合曲线求得。

3 黏土渗透性试验研究

为了确定萧山黏土在特定固结压力下的渗透系数和分析渗透系数与孔隙比的非线性关系, 对取自地下 10 m 左右深度的原状黏土, 使用 GDS 高级固结仪进行固结渗透联合试验。为减少土体扰动, 采用平铲在同一深度处切取块状土样, 保证土样的均匀性和原位力学性能。试验土样初始含水率 w 为 37.90%~46.67%, 密度 ρ 为 1.674~1.784 g/cm³, 土颗粒比重 d_s 为 2.381~2.723, 初始孔隙比 e_0 为 0.935~1.499。

3.1 试验设备

图 1 为固结渗透联合试验所用的 GDS 高级固结仪系统。图中数字 1 为 8 通道数据采集器; 数字 2 为 Rowe-Barden 型固结容器; 数字 3 为压力/体积控制器; 数字 4 为计算机。

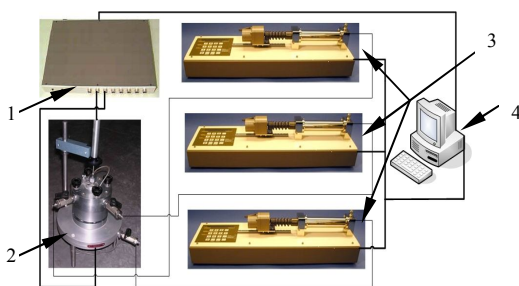


图 1 GDS 高级固结仪系统

Fig.1 DDS advanced consolidation Testing system

在 ROWE-BARDEN 型固结容器中放置直径为 76.2 mm 及高度为 20 mm 的试样, 顶部连接位移传感器测定试样的轴向变形, 底部连接孔压传感器测定试样的底部孔压。GDS 固结渗透联合试验需要 3 个压力/体积控制器来测定和控制反压、轴压和底部压力。与常规固结仪相比, GDS 高级固结仪的主要优点是: 在分级加载固结试验结束后, 可以保持固

结压力不变并设定不同的常水头压力差进行试样的渗透试验,直接测定渗透系数。

3.2 试验步骤

参照规范方法^[13]:切取土样后放入真空缸,启动真空泵抽气饱和,然后安装土样再进行反压饱和,并确保土样饱和度达到 95 %以上。

设置轴压与反压进行分级加载的固结试验,每级加载时间设定为 24 h。固结试验结束以后,保持固结压力不变,通过设置不同的反压与底部压力差值产生常水头差 Δp 进行向下的渗透试验,并保证在黏土试样中形成稳定渗流^[14],每级渗透试验时间设定为 1 h。

3.3 试验结果分析

同一固结压力 p 作用下设置多组常水头差 Δp ,测定各组 Δp 下的渗透系数并加以平均,即得到对应于压力 p 的渗透系数 k_v 。表 1 为萧山黏土 8 个试样的试验结果。各试样的 k_v 和 p 的试验曲线见图 2,分析如下:(1)由 k_v - p 曲线可见,萧山黏土的 k_v 随着 p 的增大而减少,并呈现明显的非线性变化规律。当固结压力小于 300 kPa 时, k_v 递减很快,此后逐渐放慢。(2)萧山黏土的渗透系数 k_v 范围为 $8 \times 10^{-9} \sim 8 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 。固结压力较小如 50 kPa 时,各试样的渗透系数差异较大,随着固结压力的提高,各试样渗透系数差异逐渐减少,至 10^{-8} cm/s 附近。

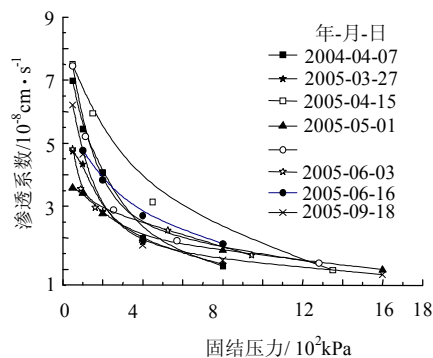


图 2 k_v - p 曲线
Fig.2 k_v - p curves

4 黏土非线性渗透性分析

4.1 单个试样的模型参数分析

分别分析 8 个黏土土样的渗透试验数据,并进行线性拟合,得到 4 种渗透模型的相应参数,结果如表 2 所列。

(1) $\lg[k_v(1+e)]$ - $\lg e$ 模型参数

从表 2 可见,该模型参数 n 变化范围为 2.2~3.6, C 变化范围为 $4 \times 10^{-8} \sim 14 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 。

表 1 萧山黏土渗透试验的数据汇总
Table 1 Permeability test results of Xiaoshan clay

试样 编号	试验日期 / 年-月-日	初始 孔隙比	固结压 力 / kPa	孔隙比	渗透系数 / $10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$
1	2004-04-07	1.499	50	1.45	6.98
			100	1.39	5.45
			200	1.23	4.07
			400	0.980	1.98
			800	0.772	1.10
2	2005-03-27	0.935	50	0.907	4.75
			100	0.869	4.33
			200	0.785	2.82
			400	0.680	1.88
			800	0.583	1.16
3	2005-04-15	1.295	50	1.16	7.49
			150	0.808	5.95
			450	0.597	3.13
			1350	0.414	0.97
4	2005-05-01	1.133	50	1.09	3.58
			100	1.04	3.42
			200	0.948	2.76
			400	0.832	1.98
			800	0.713	1.60
5	2005-05-27	0.970	1600	0.630	0.98
			50	0.942	7.46
			113	0.903	5.21
			253	0.755	2.89
			570	0.615	1.91
6	2005-06-03	1.174	1280	0.512	1.20
			50	1.13	4.82
			90	1.10	3.54
			162	1.03	2.96
			292	0.927	2.24
7	2005-06-16	1.047	525	0.826	2.24
			945	0.732	1.44
			50	1.02	4.77
			100	0.994	4.77
			200	0.882	3.84
8	2005-09-18	1.340	400	0.733	2.70
			800	0.577	1.81
			50	1.30	6.21
			100	1.21	4.64
			200	1.04	2.80
			400	0.83	1.77
			800	0.63	1.29
			1600	0.46	0.84

(2) e - $\lg k_v$ 模型参数

Tavenas et al.^[3]指出,对于大多数黏土试样, e - $\lg k_v$ 模型在 0~20 %应变范围内满足线性关系;应变超过 20 %后表现出一定的偏离。

对萧山黏土 8 个试样的渗透性分析结果表明,当试样最终压缩应变率 $\varepsilon_f \leq 30 \%$ 时, e - $\lg k_v$ 近似满足直线关系,渗透指数 C_k 的变化范围为 0.521~0.984。

(3) $\lg k_v - \lg e$ 模型参数

由基本方程 $\lg k_v = A \lg e + \lg B$ 可线性拟合出各个试样对应的参数, 其中参数 A 变化范围为 1.78~3.24, 参数 B 变化范围为 2.24~7.41。

(4) $\lg k_v - \lg(1+e)$ 模型参数

该模型方程参见式 (5), 8 个试样的参数 α 变化范围为 4.15~7.68。

表 2 各试样的渗透模型参数

Table 2 Permeability model parameters of each soil sample

试样 编号	模型						
	$\lg[k_v(1+e)] - \lg e$		$e - \lg k_v$		$\lg k_v - \lg e$		$\lg k_v - \lg(1+e)$
	n	C $/10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$	C_k	ε_f	A	B $/10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$	
1	3.40	4.50	0.860	0.291	2.88	2.24	5.60
2	3.66	12.95	0.521	0.182	3.24	6.61	7.68
3	2.40	14.13	0.727	0.384	1.99	7.08	4.65
4	2.73	6.14	0.829	0.227	2.28	3.09	4.99
5	3.23	14.98	0.570	0.188	2.82	7.41	6.85
6	2.82	6.29	0.845	0.190	2.33	3.16	4.90
7	2.21	9.54	0.984	0.276	1.78	4.79	4.15
8	2.30	6.24	0.961	0.378	1.86	3.09	4.26

4.2 模型参数综合分析

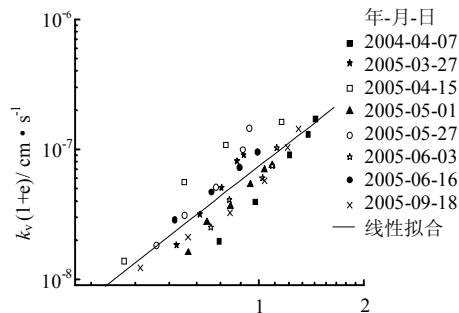
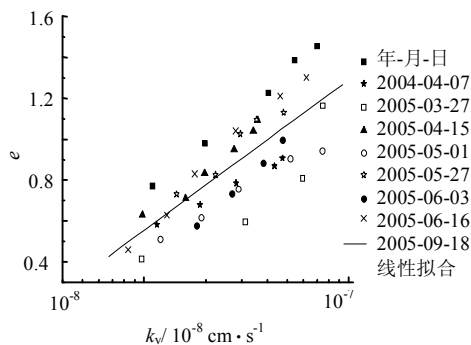
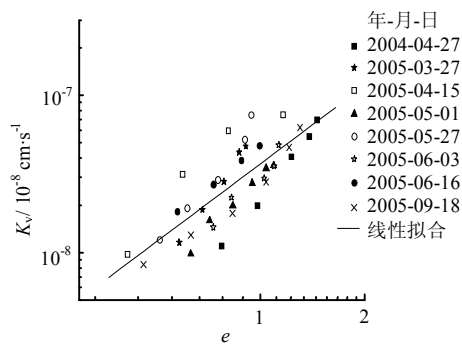
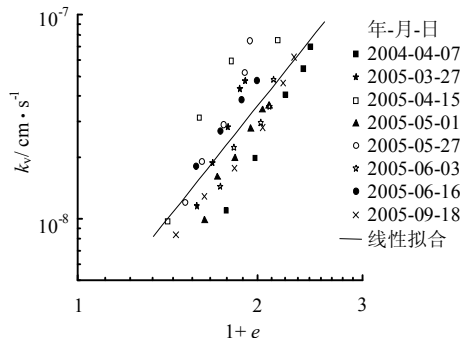
将 8 个试样的试验数据集中于坐标轴中, 应用线性拟合方法进行综合分析, 得到对应于 4 种渗透模型参数的统计回归值和相关系数 R , 结果见表 3 与图 3~6。

表 3 萧山黏土 4 种渗透模型参数及统计回归值

Table 3 Parameters of four permeability models and regressed values of Xiaoshan Clay

模型 编号	渗透 模型	参数 量值	相关系数 R
1	$\lg[k_v(1+e)] - \lg e$	n $C/ \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	2.10 7.36×10^{-8}
2	$e - \lg k_v$	C_k	0.74 0.783 83
3	$\lg k_v - \lg e$	A $B/ \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	1.65 3.66×10^{-8}
4	$\lg k_v - \lg(1+e)$	α	3.67 0.785 61

从表 3 和图 3~6 可见, 试验结果与 4 种渗透模型虽然不可避免地存在一定差距和离散性, 但试验点的直线分布趋势还是很明显, 与各模型的相关系数均达到 0.78 以上, 其中模型 1 略高, 达到 0.86。从工程应用角度出发, 认为 4 种非线性渗透模型对萧山黏土来说都是适合的。

图 3 $\lg k_v(1+e) - \lg e$ 模型Fig.3 $\lg k_v(1+e) - \lg e$ model图 4 $e - \lg k_v$ 模型Fig.4 $e - \lg k_v$ model图 5 $\lg k_v - \lg e$ 模型Fig.5 $\lg k_v - \lg e$ model图 6 $\lg k_v - \lg(1+e)$ 模型Fig.6 $\lg k_v - \lg(1+e)$ model

5 结 论

来用 GDS 高级固结仪, 对萧山黏土进行渗透

固结联合试验, 结合 4 种非线性渗透模型对试验数据整理分析, 得出如下结论:

(1) 萧山黏土的渗透系数 k_v 随着固结压力 p 的增大而减少, 并呈现显著的非线性变化规律。在 50~1600 kPa 固结压力作用下, 渗透系数从 8×10^{-8} 减少到 8×10^{-9} cm/s; 在常见 50~300 kPa 固结压力作用下, k_v 变化范围 $(12.5 \sim 10) \times 10^{-8}$ cm/s。

(2) 对萧山黏土而言, $\lg[k_v(1+e)]-\lg e$ 模型, $e-\lg k_v$ 模型, $\lg k_v-\lg e$ 模型和 $\lg k_v-\lg(1+e)$ 模型等 4 种非线性渗透模型都适用。

参考文献

- [1] TAKEO Moriwaki, KEN Umehara. Method for determining the coefficient of permeability of clays [J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2003, 26(1): 47—56.
- [2] 龚晓南. 高等土力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1996.
- [3] TAVENAS P, JEAN P, LEBLOND P, et al. The permeability of natural soft clays, part II: permeability characteristics[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1983, 20(4): 645—659.
- [4] TAYLOR D.W. Fundamentals of Soil Mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons., 1948.
- [5] SAMARASINGHE A M, HUANG Y H. Permeability and consolidation of normally consolidated soils [J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, ASCE, 1982, 108(GT6): 835—850.
- [6] 林鹏, 许镇鸿, 徐鹏, 等. 软土压缩过程中固结系数的研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 106—108.
LIN Peng, XU Zheng-hong, XU Peng, et al. Research on coefficient of consolidation of soft clay under compression [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(1): 106—108.
- [7] MESRI G, ROKHSAR A. Consolidation of normally consolidated clay[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, ASCE, 1974, 100(GT8): 889—903.
- [8] MESRI G, OLSON R E. Mechanisms controlling the permeability of clays[J]. **Clay and Clay Mineral**, 1971, 19(3): 151—158.
- [9] NARASIMHA Raju P S R, PANDIAN N S, NAGARAJ T S. Determination of the coefficient of consolidation from independent measurement of permeability and compressibility[J]. **Geotechnical Engineering ICE**, 1997, 125(10): 224—229.
- [10] 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 Huei, LEO C J. An analytical theory for 1D nonlinear large strain consolidation of soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(6): 680—684.
- [11] 谢康和, 庄迎春, 李西斌. 萧山饱和软黏土的渗透性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 591—594.
XIE Kang-he, ZHUANG Ying-chun, LI Xi-bin. Laboratory investigation of permeability characteristics of Xiaoshan clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(5): 591—594.
- [12] 齐添, 谢康和, 李西斌. 软土的一维非线性固结计算参数及其测定[J]. 浙江大学学报 (工学版), 2006 40(8): 1 388—1 392.
QI Tian, XIE Kang he, LI Xi-bin. Laboratory determination of one-dimensional nonlinear consolidation computational parameters of soft soil [J]. **Journal of Zhejiang University: Engineering Science**, 2006 40(8): 1 388—1 392.
- [13] 南京水利科学研究院. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [14] LEE P K K, XIE K H, A laboratory investigation of the permeability characteristics of Hong Kong marine clay [C]// Recent Advances in Soft Soil Engineering: Proceedings of the International Conference on Soft Soil Engrg (ICSSE). Guangzhou: Science Press, 1993: 2—127.