

蓝藻藻泥固结特性的试验研究

钱勇进^{1a}, 朱伟¹, 孙政², 龚淼^{1b}

(1. 河海大学 a. 岩土工程科学研究所; b. 环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏中泰工程勘测有限公司, 江苏 江阴 214400)

摘要: 蓝藻藻泥的脱水减量处理已成为湖泊治理的一个新的问题, 脱水的本质是藻泥的固结排水过程。因此通过藻泥的固结试验研究其固结特性, 对于提高藻泥的脱水效率具有重要意义。通过对固结仪进行改进, 对 1 种蓝藻藻泥和 1 种湖泊淤泥进行试验, 研究藻泥的固结特性及区别。结果表明: 藻泥的固结排水时间很长, 孔压消散非常慢; 藻泥的固结系数及渗透系数非常小, 并随着固结压力的增加而减小的非常明显; 通过分析认为藻泥中的生物质细胞体是造成固结时间长、水分排出缓慢的主要原因。

关键词: 藻泥; 淤泥; 固结试验; 固结系数; 渗透系数; 孔隙水压力

中图分类号: TV16; TU41 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2014)02-0136-04

Experiment on consolidation properties of cyanobacterial

QIAN Yongjin^{1a}, ZHU Wei¹, SUN Zheng², GONG Miao^{1b}

(1. a. Geotechnical Research Institute; b. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Zhongtai Engineering Co. Ltd, Jiangyin 214400, China)

Abstract: The treatment of cyanobacterial dewatering and reduction has become a new issues in lakes improvement. The essence of dewatering of cyanobacterial is a process of consolidation and drainage; therefore, the investigation of the consolidation behavior of cyanobacterial by consolidation experiment is important to the enhancement of dewatering effects. Based on the improvement of oedometer by setting additional piezometer and displacement sensor, one type of cyanobacterial and one type of dredged materials were studied for their difference of consolidation characteristics. The results indicated that consolidated time of cyanobacterial was very long and the excess pore water pressure dissipated very slowly. The coefficient of consolidation and coefficient of permeability of cyanobacterial is extremely low, and have great changed in the consolidation process. Meanwhile, the main reason of long time consolidating and extremely slow for drainage is a large number of organic matter cells in cyanobacterial.

Key words: cyanobacterial; dredged materials; consolidation experiment; coefficient of consolidation; coefficient of permeability; pore water pressure

藻泥是一种特殊的泥类物质, 它是由湖泊爆发水华而产生的。水体富营养化导致各种藻类水华的爆发, 如太湖、巢湖、滇池等, 其中蓝藻是引起藻类水华污染的主要藻类^[1]。目前对于水华爆发后的主要处理措施就是对水体表面的藻类进行打捞, 以太湖水华爆发为例, 每年太湖周边的城市都要组织上百艘打捞船对湖面上的蓝藻进行打捞, 2011 年累计蓝藻打捞量达到 97 万 t^[2]。蓝藻藻液是含有大量微囊藻细胞的液体糊状物质, 它具有极高含水率、高有机质含量的特点, 同时富集了丰富的 N、P 营养元

素^[3-4]。打捞上来的藻液都要被送进专门的藻水分离站中进行处理, 分离出的水分离回湖泊中, 藻液进一步脱水形成高含水率的藻泥^[5]。由于藻水分离站处理能力有限, 每年约 50% 的藻液需要存放在湖边的堆场堆积处理, 最后也变成泥状物, 占用了大量的土地。因此对蓝藻藻泥的脱水减量处理已成为湖泊处理的一个新的问题。

目前, 对于藻泥处理的研究主要针对藻泥中藻毒素的去除以及后续的堆肥处理等方面, 如王利娟等^[6]研究了不同填充剂以及复合微生物菌剂对蓝

收稿日期: 2013-12-01; 修回日期: 2013-12-07

基金项目: 江苏省重点基金项目(BK2011025); 国家自然科学基金项目(50979028); 国家重点基础研究发展规划 973 项目(2012CB719804)

作者简介: 钱勇进(1990-), 男, 江苏灌云人, 硕士研究生, 研究方向: 环境岩土工程。

藻堆肥效果的影响;江君等^[7]以蓝藻藻泥为原料,研究米糠、麦麸、酒糟作为填充剂对蓝藻堆体的养分含量、发芽指数和微囊藻毒素含量的影响。对于藻泥的力学方面的研究非常少,藻泥在后续处理利用中,较为重要的特性是其脱水性能,而机械脱水的过程类似于土力学中粘土的固结排水过程,利用土力学的基本原理研究富含生物质藻泥的固结特性,既具有一定的理论意义,而且对实际应用提供参考。本文以蓝藻的藻泥作为研究对象,与湖泊淤泥做对比,开展固结试验,考察了藻泥与淤泥固结特性的差异,研究藻泥的固结排水特性。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

藻泥是取自太湖藻水分离站打捞出的新鲜蓝藻藻液,试样取回后便放入冰箱中进行保鲜储存。而淤泥来自于江苏淮安白马湖的清淤工程。试验用的 2 种材料的基本物理性质见表 1。

试样名称	%, g/cm ³				
	含水率	湿密度	比重	有机质含量	孔隙比
藻泥	1011.10	1.036	1.320	99.41	13.30
淤泥	134.90	1.467	2.857	4.92	3.57

1.2 试验方法

根据《土工试验方法标准》^[8],试样含水率测定中淤泥采用烘箱在 105℃ 的恒温下烘至恒量,而藻泥采用在 65℃ 左右的恒温下烘至恒量,密度采用环刀法测得,比重采用比重瓶法进行测定,考虑到藻泥中含较高有机质,采用中性液体(煤油)代替纯水;有机质含量的测定采用灼烧法(温度控制在 600℃,灼烧至恒量)。由测定的物理性质指标可以推算,高含水率的藻泥及淤泥处于饱和状态,制样时直接分层填入固结容器。

由于 2 种泥样含水率极高,采用常规固结试验仪进行试验容易导致泥样从侧壁缝隙挤出。为了避免由于泥样挤出带来的影响,对常规固结仪进行改进^[9],减小了初级荷载值并且改用了轻质加压盖板,避免了由于较大压力的突然施加而使泥样挤出的问题。同时增加了环刀高度,改进后环刀高度为 4cm。固结容器底部密封,试样在单面排水条件下固结,配备了数据采集系统记录下试验过程中孔压及沉降量的变化,试验装置见图 1,试验室内安装了空调,保持温度的恒定,保证试验过程不受温度影

响。试样均在饱和状态下进行固结试验,以试样孔隙水消散到 0 作为固结稳定的标准^[10],固结加载压力采用 3.125,6.25,12.5 及 25 kPa 逐级成倍的加载,研究 2 种泥样在小固结压力下的固结特性。

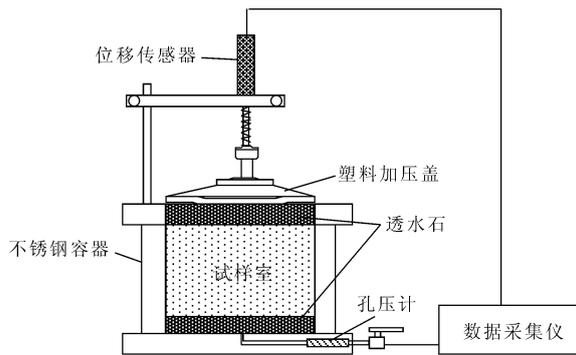


图 1 改进后的固结仪示意图

2 试验结果

2.1 压缩特性

由固结试验测得在每一级荷载下的沉降量,在固结压力相同时,藻泥和淤泥的压缩特性存在较为显著的差异,为表达试样间的差异,取固结压力为 3.125 和 12.5 kPa 下的沉降曲线制成图 2。

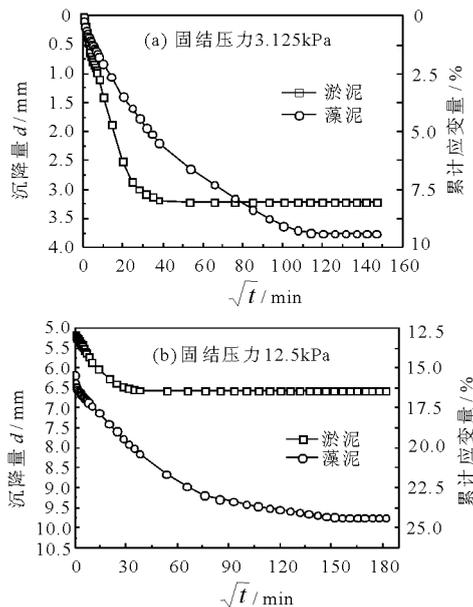


图 2 固结沉降随时间的变化

从图 2 可以看出,在第一级荷载(3.125 kPa)作用下,淤泥最先达到沉降稳定,稳定需要约 1 d 左右,而藻泥的固结完成时间要长的多,约需要 10 d 左右。同时,在第一级荷载作用下,2 种泥样稳定时的沉降量较大,应变量为 9% 左右。随着固结压力的增大,藻泥始终保持较高的压缩特性,如图 2(b)

所示,在第三级荷载(12.5 kPa)作用下,淤泥的累计变形量达到了17%,而藻泥的累计变形量则达到27%,同时可以看出,随着固结压力的增加,藻泥的固结完成时间就越长。

固结试验中得到的压缩系数见表2。从表2中可以发现在相同的固结压力作用下藻泥的压缩系数要比淤泥的大得多,随着固结压力的增加,藻泥的压缩系数急剧降低,并且其减小量比淤泥要大得多。藻泥及淤泥在第四级荷载作用下的压缩系数分别为一级荷载下的15.8%及20.8%,这体现出两种泥样超高压缩性的特点,而藻泥的压缩性比淤泥还要高。

表2 压缩系数随固结压力的变化 MPa^{-1} , kPa

试样	固结压力			
	0~3.125	3.125~6.25	6.25~12.5	12.5~25
淤泥	115.2	70.4	25.6	24.0
藻泥	435.2	313.6	185.6	68.8

为进一步了解藻泥的压缩特性,将固结试验结果整理成 $e - \log P$ 曲线,见图3。与淤泥相比,藻泥的初始孔隙比非常大,淤泥为3.57,而藻泥则达到13.3,这与藻泥中所含有机质有一定的关系。在固结应力作用下,藻泥的孔隙比变化也比淤泥要大。由于前期应力历史的作用,一般软粘土的曲线会在前期固结应力处出现拐点,但淤泥、藻泥在曲线上均表现出直线状态,这与它们的重塑制样的特点有密切的关系,拟合试验数据后得到以下公式:

$$e = C \ln P + e_0 \quad (1)$$

$$C_c = C \ln 10 \quad (2)$$

式中: e_0 是初始孔隙比; C_c 为压缩指数, $e - \ln P$ 曲线上直线段的斜率。

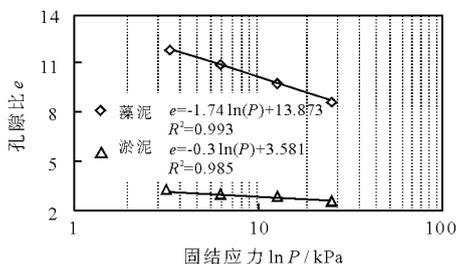


图3 固结压力与孔隙比的关系

2.2 孔隙水压力消散特性

由固结试验中测得4级荷载下的孔隙压力消散曲线,结果发现每一级荷载下均具有相同的变化趋势,因此取固结压力为3.125 kPa下的孔压消散曲线分析,在固结压力相同时,藻泥及淤泥的孔压消散情况存在显著差异,在3.125 kPa压力作用下,淤泥

中的孔隙水压力能够快速(1 d)消散完成,而藻泥中的孔压则需要10 d左右才可以完全消散,藻泥的孔压消散速率要比淤泥缓慢得多,这种差异在4级荷载中全部明显地出现。

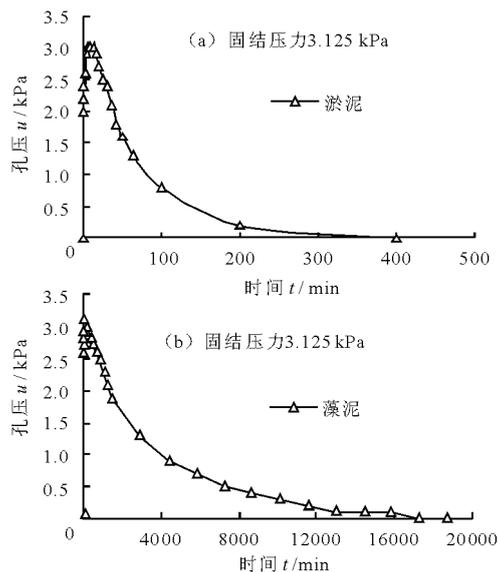


图4 孔压随时间的变化

2.3 固结特性

根据试验中得到的沉降量与时间关系曲线,采用时间平方根法计算每级荷载的固结系数并进行整理,得到图5所示的 $C_v - p$ 曲线。

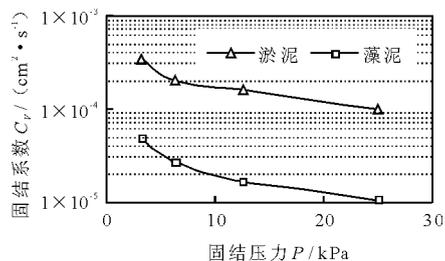


图5 固结压力与固结系数关系

在不考虑初始含水率等因素影响的情况下进行对比分析,可以发现,藻泥与淤泥的固结系数相差在一个数量级上,淤泥的固结系数在 $1.0 \times 10^{-4} \sim 3.47 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 范围,而藻泥的固结系数在 $1.07 \times 10^{-5} \sim 4.79 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 的范围。随着固结压力的增大,二者的固结系数减小都非常明显。

2.4 渗透特性

根据得到的藻泥及淤泥的固结系数,利用固结系数的表达式,可以计算出在每级荷载下的平均渗透系数,计算结果见图6。可以发现,淤泥的渗透系数在 $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ cm/s}$ 的数量级上,藻泥在 $10^{-7} \sim 10^{-9} \text{ cm/s}$ 的数量级上。同时,在每级荷载作用下,

藻泥的渗透系数始终要小于淤泥,两者的渗透系数随着固结压力的增加而减小。在前三级荷载的作用下,藻泥及淤泥的渗透系数减小幅度较为接近,但在第四级荷载作用下,淤泥的渗透系数变化趋于稳定,而藻泥的渗透系数仍以较大幅度进行变化。

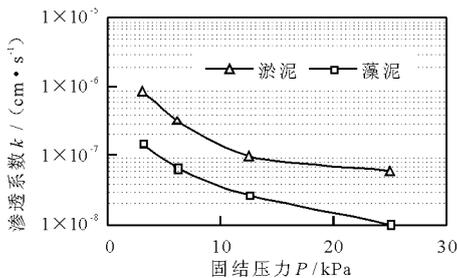


图 6 固结压力与渗透系数关系

3 讨论

藻泥及淤泥都是高含水率,结构非常松散,孔隙很大的流塑性物质,在经过固结作用前,两者颗粒间的有效应力几乎为零。在经过荷载加压固结作用后,两种泥样颗粒之间均出现了有效应力。在初级荷载作用过程中,藻泥及淤泥的压缩变形量没有较大的差异,但在排水过程中,藻泥的排水时间要比淤泥的排水时间长的多,约 10 倍左右;从第二级荷载开始,淤泥的压缩变形量较之前有一定的减小,但藻泥仍然以很大的变形量继续发生固结沉降,随着固结压力的增加,藻泥的变形量持续增加。

分析藻泥与淤泥的差异,发现两者最大的区别为藻泥中的固体物质均是富含生物质的蓝藻细胞体,这些细胞体可看成是具有弹性的有机颗粒。而淤泥中基本上全是无机颗粒,其中的水分可以大致分为颗粒间的孔隙水以及颗粒表面的结合水。藻泥中除了具有孔隙水及表面结合水外,还存在有细胞内部的细胞水(也称生物水)。从固结试验结果来看,藻泥的固结沉降会在一级荷载下以很小的变形速率长期的发生,并且持续很长时间,而淤泥的沉降则快速的完成。从颗粒形态上分析,在固结应力的作用下,淤泥颗粒间的孔隙减小,颗粒不发生变形,有效应力增加,而藻泥不仅仅存在有机颗粒间孔隙的逐渐减小,同时还存在有机颗粒在有效应力作用下的体积变形(从孔隙比在荷载作用下急剧降低中推测出),使得总体积逐渐减小,这可能是藻泥在较小的固结应力作用下,以很小的变形长期的发生的

原因。而藻泥的孔隙比远大于淤泥,但是渗透系数却远小于淤泥(相差近一个数量级),孔隙水压力消散非常缓慢。由于藻泥与淤泥的本质差异在于藻泥中有大量的生物质细胞体,因此分析得出,生物质细胞体中的水分变化对藻泥水分排出缓慢,固结时间非常长产生重要的影响。

4 结 语

(1) 藻泥的固结排水过程非常的缓慢,在一级荷载下固结排水需要 10 d 以上,并且随着固结压力的增大,固结完成时间逐步增加。

(2) 藻泥具有很高的压缩特性,压缩指数为 4.0,同时固结试验计算得到的固结系数在 $1.07 \times 10^{-5} \sim 4.79 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 范围,表现出相当小的渗透特性,渗透系数在 $10^{-7} \sim 10^{-9} \text{ cm/s}$ 范围。

(3) 藻泥中的生物质细胞体是造成藻泥固结时间长、水分排出缓慢的主要原因。

参考文献:

- [1] Havens K E. Cyanobacteria blooms: Effects on aquatic ecosystems[J]. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 2008, 619: 733 - 747.
- [2] 徐 劫,樊燕超. 江苏统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2012.
- [3] 陈 艳,俞顺章,林玉娣,等. 太湖流域水中微囊藻毒素含量调查[J]. *中国公共卫生*, 2002, 18(12): 1455 - 1456.
- [4] 伊学农,赵 青,殷娣娣,等. 微囊藻毒素的毒性和去除研究进展[J]. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(6): 39 - 42.
- [5] 吕锡武,稻森悠平,丁国际. 有毒蓝藻及藻毒素生物降解的初步研究[J]. *中国环境科学*, 1999, 19(2): 138 - 140.
- [6] 王利娟,谢利娟,杨桂军,等. 不同填充剂及复合微生物菌剂对蓝藻堆肥效果的影响[J]. *环境工程学报*, 2009, 3(12): 2261 - 2265.
- [7] 江 君,杜 静,常志州,等. 蓝藻堆肥中养分及微囊藻毒素含量变化[J]. *江苏农业学报*, 2012, 28(2): 314 - 319.
- [8] 中华人民共和国水利部. GB/T50123 - 1999 土工试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社,1999.
- [9] 周宣兆,朱 伟,孙 政. 清淤淤泥的固结特性试验研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(1): 69 - 72.
- [10] O'Kelly B C. Effect of biodegradation on the consolidation properties of a dewatered municipal sewage sludge[J]. *Waste Management*, 2008, 28: 1395 - 1405.