

文章编号: 1000-7598 (2013) 01-0115-08

处置库污泥工程特性测试研究

冯 源, 罗小勇, 林伟岸, 詹良通, 柯 瀚, 陈云敏

(浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310058)

摘 要: 对某填埋场污泥库中取样的污泥进行了岩土工程特性测试, 包括有机质含量、含水率、界限含水率、颗粒级配、渗透系数、压缩固结特性及抗剪强度等。试验结果表明, 与常规淤泥相比, 污泥库中经一段时间降解后污泥有机质含量及含水率较高, 平均值分别为 45% 和 520%; 污泥在历时 2 a 的生物降解作用下, 污泥含水率、有机质含量沿深度呈较为明显的减少趋势; 污泥具有极高的压缩性, 压缩系数 $a_{100-200}$ 高达 7 MPa^{-1} ; 污泥的固结表现为非线性大变形特性, 其固结系数在 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$, 比淤泥低 1~2 个数量级, 固结系数随压力的增加而显著减少; 污泥的抗剪强度参数较小, 其黏聚力为 0, 内摩擦角为 14.7° 。有机质含量高是污泥高含水率、高液塑性指数、高压缩性, 低渗透性、低固结系数及低抗剪强度的本质原因。以上成果可为污泥库的固化处置、稳定分析等提供必要的参数。

关 键 词: 污泥; 污泥库; 有机质含量; 含水率; 固结系数; 抗剪强度

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Geotechnical properties measurement of sewage sludge at a disposal site

FENG Yuan, LUO Xiao-yong, LIN Wei-an, ZHAN Liang-tong, KE Han, CHEN Yun-min

(MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310058 China)

Abstract: Laboratory tests are conducted to investigate geotechnical properties of sewage sludge in a sludge reservoir of a landfill, including organic content, water content, limit content, grain-size distribution, permeability coefficient, shear strength and consolidation coefficient. Test results show that the sewage sludge in the reservoir has much higher organic content and water content than the muddy soil. The average value of organic content is 45% and water content is 520%, respectively. As a result of biodegradation with a period of two years, both organic content and water content of the sewage sludge in the sludge reservoir show a decreasing trend with the depth. The sewage sludge had a very high compressibility, and the value of $a_{100-200}$ is 7 MPa^{-1} . The consolidation of the sewage sludge shows a nonlinear large deformation behavior; and the coefficient of consolidation is of the order $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$, showing a significant decreasing trend with an increase of normal stress. The shear strength parameters are low with a cohesion of 0 kPa and an internal friction angle of 14.7° . The high organic content is the essential reason for the high values in water content, plasticity index and compressibility as well as the low values in permeability, consolidation coefficient and shear strength. The experimental results provide necessary parameters for the disposal of sludge reservoir and analysis of stability.

Key words: sewage sludge; sludge reservoir; organic content; water content; consolidation coefficient; shear strength

1 引 言

污泥是污水处理过程中形成的以有机物为主要成分的泥状物质, 容易腐化发臭、颗粒较细、密度较小、含水率高且不易脱水, 呈胶状结构的亲水性物质^[1]。目前, 我国城市污水处理厂每年排放污泥 $2\ 200 \times 10^7 \text{ t}$, 且以每年约 10% 的速度增长, 污泥处

置问题日益严重。污泥处置是指污泥经过处理后, 弃置于自然环境中(地面、地下、水中)或再利用, 能够达到长期稳定并对生态环境无不良影响并最终消纳方式。目前, 污泥的处置方式主要有卫生填埋、土地利用、投海、焚烧等多种方式^[2]。填埋处置投资少、运行费用低、消纳量大, 是目前我国污泥处置的主要方式。污泥填埋分为单独填埋和混合填埋,

收稿日期: 2011-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51010008); 基本科研业务费专项资助项目(No. 2010KYJD006); 浙江省重点创新团队支持计划资助(No. 2009R50050)。

第一作者简介: 冯源, 男, 1984 年生, 博士研究生, 主要从事污泥电渗脱水、环境岩土工程等方面的研究工作。E-mail: fy_zju@yahoo.com.cn

通讯作者: 詹良通, 男, 1972 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土力学、环境岩土工程和边坡工程等方面的教学与科研工作。E-mail: zhanlt@zju.edu.cn

欧洲国家一般采用污泥与城市垃圾混合填埋, 美国多数采用单独填埋。目前, 我国主要进行简易的单独填埋, 即污泥经过简单脱水、消化处理后, 直接倾倒入生活垃圾填埋场中的低地或谷底, 形成污泥坑或污泥库, 如成都长安、深圳下坪、上海老港、南昌麦园及苏州七子山等填埋场中均采用这种方式。由于污泥特殊的岩土工程性质, 易造成垃圾堆体发生失稳事故, 如深圳下坪垃圾填埋场由于在污泥坑上进行垃圾填埋而造成污泥污水外涌和垃圾堆体局部滑移事故。另外, 由于污泥颗粒小、含水率较大及黏度高, 易堵塞渗沥液收集和导排管, 并增加渗沥液产量。随着我国污泥产量的快速增长, 不断进入填埋库区的污泥对填埋场正常运行的影响日趋严重, 不仅减小了填埋库区的库容, 还增加了填埋场的稳定安全隐患。同时, 我国垃圾产量也以 $8\% \sim 10\%$ 的速度增加, 已达 2.4×10^8 t, 居世界之首, 造成填埋场库容日趋紧张。污泥库的加固处置和填埋库容的恢复是我国目前许多填埋场亟需解决的难题, 以便在其上方填埋垃圾, 恢复库容。

目前, 国内外针对污泥的研究主要集中在新鲜脱水污泥性质以及污泥化学固化等方面, 如张华等^[3]对新鲜脱水污泥进行了土工性质研究, 得到污泥各种土工参数与含水率的变化关系; O'Kelly^[4-7]研究了新鲜污泥在不同含水率状态下的干燥、击实、收缩、脱水、抗剪强度、压缩固结等特性, 以及不同生物降解程度对污泥工程性质的影响; 曹永华等^[8]研究了污泥在加入不同配比的石灰、土、粉煤灰后的工程性质及微观结构特征; 郑修军^[9]、朱伟^[10]、李磊^[11]等研究了污泥经过常用硅酸盐固化材料、碱性固化材料及黏性土辅助材料改性后, 干湿循环、生物化学作用对固化污泥性质的影响。然而, 据笔者所知, 目前针对污泥库自然降解后污泥土工性质的测试数据很少, 以至污泥库的原位加固处理及分析缺乏必要的土工参数。本文以成都某填埋场污泥库中污泥为研究对象, 进行了一系列室内土工试验, 获得了污泥的物理、力学性质指标等土性参数及其随深度的分布规律, 为污泥库的真空预压等原位加固处置提供压缩指数、固结系数、抗剪强度等土工参数, 为处置方案设计提供依据。

2 工程概况

成都某垃圾填埋场位于成都市龙泉驿区洛带镇, 该地属亚热带季风性湿润气候, 气候温和、雨量充沛, 日照较少, 潮湿多雾, 多年平均气温为 16°C , 年总降雨量 918.2 mm , 年蒸发量为 $841.1 \sim$

$1\,066.1\text{ mm}$ 。污泥库在填埋场 2 期库区中部, 占用了填埋场库容, 为市政污泥的临时处置设施, 如图 1、2 所示。该污泥库于 2009 年初开始填埋, 截止 2011 年 5 月已填入约 $5 \times 10^5\text{ m}^3$ 污泥。污泥库池面呈 D 形, 长约 300 m , 宽约 100 m , 表面面积约 $2.5 \times 10^4\text{ m}^2$, 深度约 $12 \sim 17\text{ m}$ 。由于污泥独特的物理力学性质, 并长期暴露在大气中, 污泥表面呈流塑状, 无法在其上方直接填埋生活垃圾, 显著地减少了原有库容, 已无法满足接下来一年生活垃圾填埋的需求, 污泥库急需处置, 以尽快恢复库容。



图 1 填埋场内的污泥库
Fig.1 Sludge reservoir in landfill

3 试验方案

3.1 现场取样

利用钻机在污泥库不同位置沿深度进行取样。污泥取样先在指定位置将套管直接插入污泥库底部, 然后采用能够自如闭合的荷叶式钻头携带敞口薄壁取土器, 利用快速、连续的静压方式将取样器贯入。贯入过程中, 钻头荷叶打开, 污泥进入岩芯管内的取土器, 提钻过程中, 荷叶封闭, 待提出污泥表面后, 打开荷叶, 将污泥样装入样桶内。污泥沿深度每 1 m 取一个样, 试样直径为 100 mm , 高为 200 mm 。布置了 5 个勘探点, 共计取污泥样 76 桶。勘察点大致沿污泥库的轴线布置, 主要分布在靠近污泥倾倒口的一侧, 如图 2 所示。由取样过程可知, 所取污泥试样为扰动样, 但由于污泥库中表层以下污泥为泥浆状, 呈流态, 扰动样与原状样工程性质的差异很小, 可以忽略扰动对试样性质的影响。

3.2 试验安排

由于钻孔之间的差异性不大及篇幅所限, 本文仅介绍位于中间位置 ZW3 钻孔的污泥的工程特性测试结果。对 ZW3 所有 14 个污泥试样进行有机质含量、含水率测试; 对每间隔 4 m 深度的污泥试样做 4 组渗透试验; 对深度分别为 1 、 5 、 9 m 污泥试样做 3 组固结试验; 对深度分别为 4 、 8 m 的污泥

试样做2组慢剪试验;对深度分别为3、6 m的污泥试样做2组颗粒分析试验。

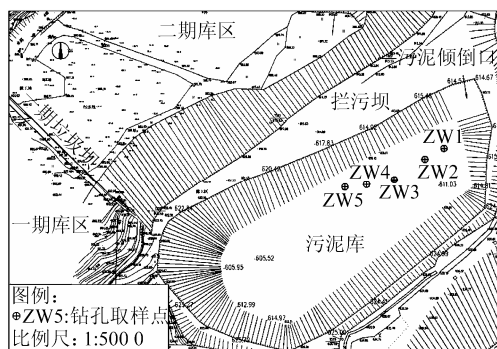


图2 污泥库取样点布置

Fig.2 Layout of sampling in sludge reservoir

3.3 试验方法

污泥含水率、颗粒级配及渗透系数等测试采用常规土工试验方法^[12]。其中,含水率测试时,烘干温度控制在60~70℃,烘干至恒重。烘干后的污泥再进行有机质含量试验。污泥颗粒较细,颗粒分析试验和渗透系数试验分别采用甲种比重计法和变水头渗透试验法。有机质含量测试方法参照城市污水处理厂污泥有机质含量测试方法^[13],试验采用较大体积的陶瓷瓶,将70℃下烘干的污泥样在550℃马弗炉灼烧至恒重,燃烧前后的质量差为有机质质量,与燃烧前烘干污泥样的质量之比为有机质含量。

3.3.1 固结试验

污泥呈流塑状,初始孔隙比较大,采用标准固结仪进行试验,其试样压缩后最终高度仅为2~3 mm,易造成试验结果失真。因此,笔者自主研制了3套气压固结仪,如图3所示。该固结仪样桶直径为100 mm,高为300 mm,采用气压缸推动带联动杆的活塞进行加载,利用调压阀控制压力大小,实现分级加载。将直径为100 mm、高为200 mm的污泥试样整体压入固结仪内,固结仪上下双面排水,施加的各级压力依次为12.5、25、50、100、200、400、800 kPa,每级压力下变形稳定的标准为每小时变形不大于0.05 mm。每级压力下均测定固结系数,施加每级压力时按规范^[10]规定的时间间隔测量试样高度变化。

3.3.2 慢剪试验

将原状污泥试样直接安装于剪切盒内时,当施加垂直固结应力时污泥极易从上、下剪切盒之间的缝隙挤出,或污泥试样固结完成后由于变形过大造成最终的厚度小于10 mm而无法进行剪切试验。为此,先将高200 mm的污泥试样装入气压固结仪样

桶中分级加载至预定应力,垂直应力分别选择100、200、300、400 kPa。待固结完成后,推出试样,采用环刀取样,并装于剪切盒内,再施加与用气压固结仪固结时相同的垂直应力,待稳定后以0.02 mm/min的剪切速度进行剪切试验。



图3 大变形气压固结仪

Fig.3 Large deformation consolidation oedometer

4 试验结果及分析

4.1 物理特性指标

4.1.1 有机质含量

污泥有机质含量的测试结果如图4所示。由图可知,污泥库内污泥的有机质含量最大可达50.8%,最小为25.1%,大部分在40%~50%的范围内,平均值为45%,而运至污泥库时新鲜污泥初始有机质含量高达55.6%。由图中有机质含量趋势线可以看出,污泥的有机质含量随埋深增加而减少,埋深大于8 m后减少尤为明显,由50.8%左右降低至25%左右。可见,污泥有机质含量与污泥的降解程度密切相关,污泥埋深越深,意味着填埋时间越长,降解程度高,有机质含量越低;另外,无机颗粒的自然沉淀可能是有机质含量降低的另一个原因。Imhoff等^[14]测得某污水处理厂中等降解程度污泥的有机质含量为70%,而深度降解程度污泥的有机质含量为45%~55%;O'Kelly^[5]测得的中等降解程度污泥的有机质含量也为70.0%,经过室外2.5 a的自然降解后污泥的有机质含量减少为58%。本文污泥库中污泥自然降解龄期为2~3 a,未降解污泥的初始有机质含量相对较低,这与污泥的来源及处理工艺等因素有关。

4.1.2 颗粒级配

污泥的颗粒分析试验所得的颗粒级配曲线如图5所示。由图可知,污泥中大于0.075 mm粒径的百分含量为25%,小于0.02 mm粒径的百分含量

为 58%，平均粒径 d_{50} 为 0.014 mm。污泥是高吸水性物质，干污泥浸水煮沸后其颗粒粒径增大为原来的 5~6 倍，因此，约有 25% 的颗粒难以通过 0.075 mm 的洗筛漏斗。Campbell 等^[15]研究认为，污泥主要由小于 0.1 mm 的有机质颗粒组成，且粒径在 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ mm 之间的颗粒占主要部分，当过洗筛时，约有 90% 的颗粒能过 0.075 mm 筛孔，本文所测结果略大于其粒径。

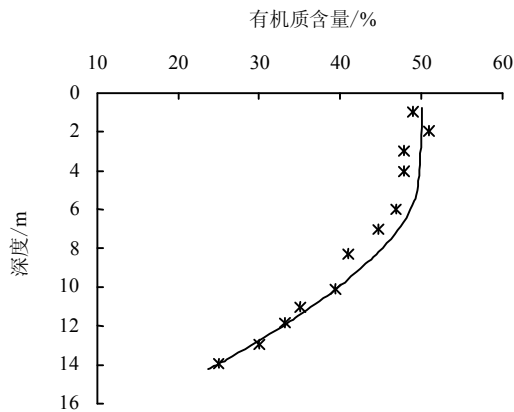


图 4 有机质含量与深度关系曲线

Fig.4 Variations of organic matter content and embedment depth

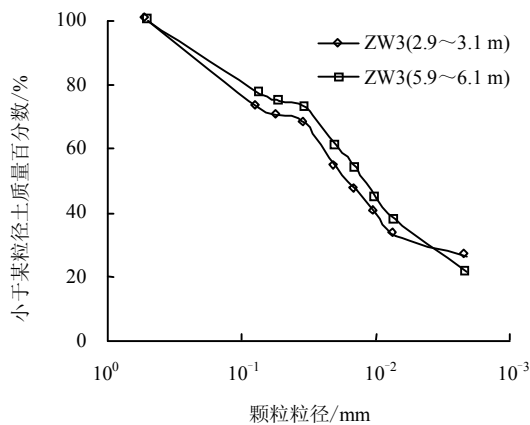


图 5 污泥颗粒分析级配曲线

Fig.5 Grain-size distribution curves with sludge

4.1.3 界限含水率

由液、塑限联合测定法的试验结果可知，污泥液限为 353%，塑限为 106%，塑性指数为 247，液限指数为 2.5，大于 1，说明污泥处于流塑状态，与现场污泥库污泥的状态相符合。与常规淤泥液、塑限分别为 50%~60%、20%~30%相比，污泥的液、塑限非常高。由塑性图可知，降解后的污泥仍为高液限有机质土。O'Kelly^[4]测得新鲜污泥液塑限为 490%，塑限为 240%，降解后污泥的液、塑限分别降为 315%和 55%，与本文测试结果较为接近，与

Chen 等^[16]报道的膨润土液塑性相当。O'Kelly^[4]认为，导致污泥高塑性指数的原因有：①污泥含有高亲水性物质；②污泥中的有机质含量高；③在化学凝结过程中分散污泥颗粒的不稳定性。

4.1.4 含水率

污泥含水率测试结果如图 6 所示。由图可知，污泥含水率最大可达 630%，最小为 190%，平均值为 520%。一般新鲜脱水污泥的含水率约为 400%，O'Kelly^[5]报道的关于中等降解程度市政污泥的含水率为 720%，强烈降解市政污泥的含水率为 510%，而一般软土的含水率为 80%~120%。由图中含水率趋势线可以看出，污泥含水率随埋深增加而减小。在埋深 8 m 内，含水率变化较小，约为 600%；埋深大于 8 m 后，含水率减小显著，由 600%左右降低至 300%左右，与有机质含量的变化规律保持一致。因污泥颗粒大多为亲水性物质，极易吸水，有机质含量越高，吸水量越大，含水率越高。可见，含水率的变化规律可归结于有机质含量随埋深的规律；另外，污泥降解造成有机质内部的结合水变成了自由水，并由污泥库场底的渗沥液导排层排走，也是污泥含水率随深度减小的原因之一。

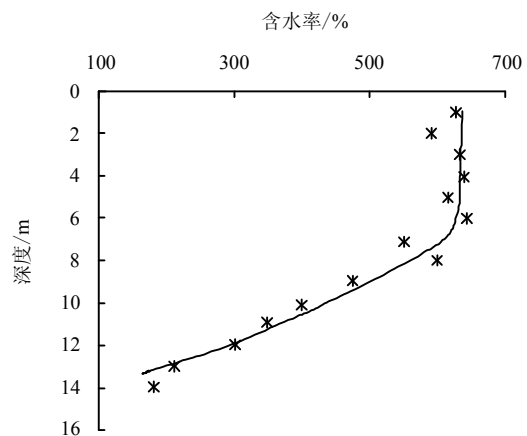


图 6 含水率随深度变化曲线

Fig.6 Variations of water content with embedment depth

4.1.5 初始孔隙比

污泥库中污泥为饱和状态，经测试，污泥相对密度平均值为 1.79。根据含水率和相对密度计算，得到的初始孔隙比结果如图 7 所示。由图可知，初始孔隙比最大可达 11.8，最小值为 4，平均值为 9，远大于常规淤泥的 1.5~2.5，且孔隙比随深度的增加而减小。在埋深 8 m 内，孔隙比减少幅度小；埋深大于 8 m 后，孔隙比随深度增加而减少明显。由上述分析可知，有机质含量、含水率、初始孔隙比

等随深度的变化曲线相似, 其原因为污泥主要由含结合水的有机质分子组成, 有机质含量越高, 含水率越大, 孔隙比越大, 三者呈对应一致的关系。

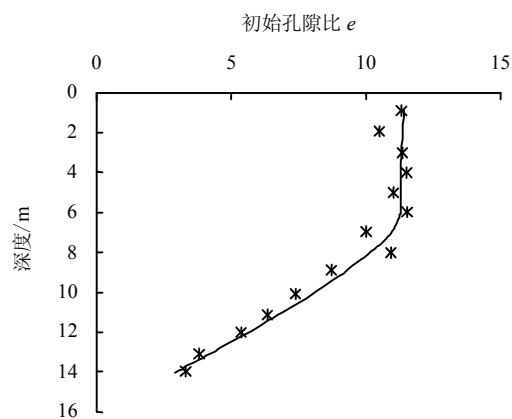


图7 初始孔隙比随深度变化曲线

Fig.7 Variations of initial porosity ratio with embedment depth

4.2 渗透系数

不同深度处污泥试样的渗透系数测试结果如图8所示。由图可知, 渗透系数测试值在 $1.6 \times 10^{-7} \sim 6.6 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 之间, 平均为 $1.0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$, 与常规淤泥的渗透系数为同一数量级, 且随埋深增加而逐渐变小。污泥的含水率很高, 初始孔隙比很大, 一般为 10~12, 但这并未导致其渗透系数相应的增大, 其本质原因为: ①污泥颗粒细小, 含有大量有机质, 具有很强的吸水膨胀性; ②污泥颗粒的结合水膜较厚, 堵塞污泥颗粒之间的孔隙, 与膨润土类似, 污泥内可供水流通的通道受到限制, 导致其渗透系数较低。另外, 随着填埋深度的增加, 污泥含水率和初始孔隙比减小, 渗透系数相应降低。O'Kelly^[6]报道的污泥渗透系数为 $10^{-7} \sim 10^{-9} \text{ cm/s}$, 其值比本文所测结果偏低。

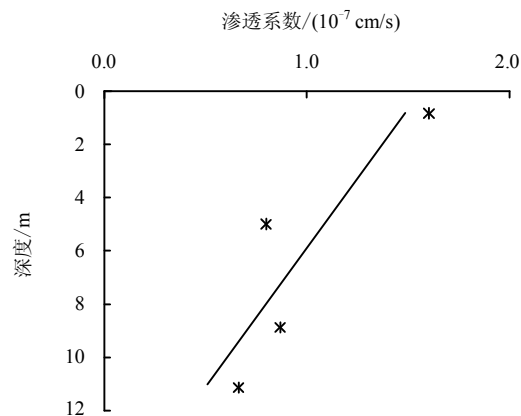


图8 渗透系数与深度关系曲线

Fig.8 Variations of permeability coefficient with embedment depth

4.3 压缩固结特性

4.3.1 压缩特性

由不同深度污泥压缩试验得到的典型 $e-p$ 曲线和 $e-\lg p$ 曲线分别如图9、10所示, 在 12.5、25.0、50.0、100.0 kPa 压力作用下, 污泥孔隙比随压力的增大迅速减小, 特别是在的第1级压力 (12.5 kPa) 作用下污泥孔隙比减小尤为明显, 从 11.8 降到 7.0; 当压力增加至 100.0 kPa 时, 孔隙比降至 3.5, 降低趋势变缓, 试样完成大部分压缩; 在大于 100.0 kPa 的压力作用下, 污泥的压缩变形速率小, 孔隙比随压力增大减少缓慢。由 $e-p$ 曲线计算污泥在各级压力范围内的压缩系数、压缩模量如表1所示。施加前几级小荷载时, 污泥试样孔隙比变化大, 相应的压缩模量小, 压缩系数大; 随着荷载的增大, 污泥的变形逐渐减小, 压缩系数也随之减小, 压缩模量则随之增大。在同一级压力作用下, 污泥的压缩系数、压缩模量随着取样深度的增大变化较小, 为同一数量级水平。由 $e-\lg p$ 曲线可知, 孔隙比与压力对数的关系呈内凹曲线, 与传统 $e-\lg p$ 曲线前段为平缓的抛物线, 后段为较陡的直线差异很大, 这表明污泥不存在前期固结压力, 属欠固结土。

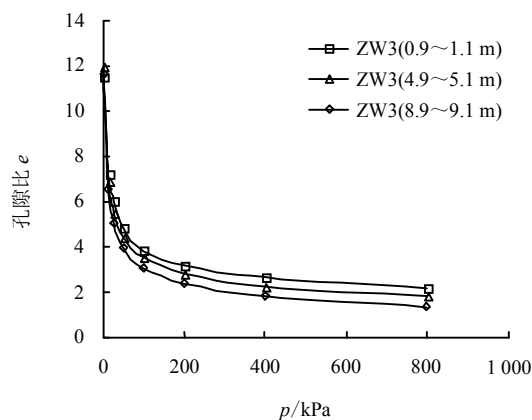


图9 污泥 $e-p$ 关系曲线

Fig.9 $e-p$ curves for sludge

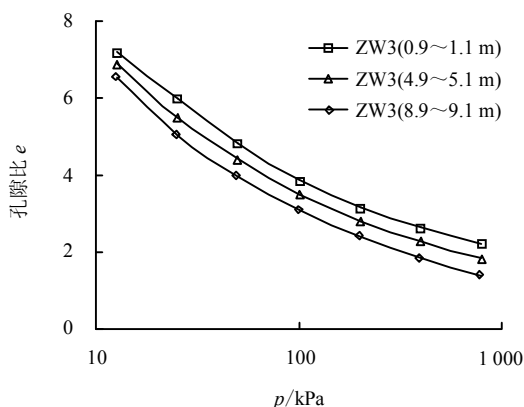


图10 污泥 $e-\lg p$ 关系曲线

Fig.10 $e-\lg p$ curves for sludge

表 1 在各级压力作用下的压缩系数、压缩模量、固结系数

Table 1 Compression coefficient, compression modulus and coefficient of consolidation in pressures

压力范围 /kPa	ZW3(0.9~1.1 m)			ZW3(4.9~5.1 m)			ZW3(8.9~9.1 m)		
	压缩系数 /MPa ⁻¹	压缩模量 /MPa	固结系数 /(10 ⁻⁶ cm ² /s)	压缩系数 /MPa ⁻¹	压缩模量 /MPa	固结系数 /(10 ⁻⁶ cm ² /s)	压缩系数 /MPa ⁻¹	压缩模量 /MPa	固结系数 /(10 ⁻⁶ cm ² /s)
0~12.5	405.3	0.032	24.0	352.9	0.036	21.0	343.1	0.036	22.0
12.5~25.0	111.4	0.116	8.1	128.9	0.097	11.0	97.1	0.129	13.0
25.0~50.0	43.3	0.299	5.5	46.1	0.272	6.3	46.6	0.268	8.6
50.0~100	17.8	0.727	4.6	19.3	0.649	5.3	19.6	0.637	6.3
100.0~200.0	7.0	1.849	3.5	7.4	1.693	4.3	6.9	1.810	5.2
200.0~400.0	2.7	4.700	3.0	3.0	4.200	4.1	2.6	4.800	4.5
400.0~800.0	1.1	11.900	2.4	1.3	10.000	3.3	1.1	11.500	4.2

4.3.2 固结特性

根据污泥在各级压力下固结过程中变形（每级压力下的压缩变形量与试样初始高度之比）与时间平方根的关系曲线，如图 11 所示，在初始压力 12.5 kPa 作用下，污泥的压缩变形很大。在后续压力作用下，污泥的变形逐渐减小。利用时间平方根法求得不同深度污泥试样在各级压力状态下的固结系数（见表 1）。与常规淤泥固结系数的 $5.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 左右相比，污泥的固结系数很低，在 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 量级。污泥固结系数随固结压力的变化曲线如图 12 所示，在第 1、2 级压力作用下，污泥初始为流塑状态，对所施加的荷载极其敏感，施加很小的固结压力情况下，固结系数减少显著，从 $5.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 降低到 $6.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ ；随着固结压力的不断增加，固结系数虽有减小的趋势，但变化幅度减小，约 $4.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，属于典型的大变形非线性固结特性。污泥在压缩固结过程中固结系数随压力递减的趋势，其根本原因在于固结压力作用过程中孔隙比的减小。根据污泥在各级压力作用下对应的孔隙比和固结系数，得到固结系数随孔隙比变化的关系曲线，如图 13 所示，固结系数随孔隙比的减小而减小。谢新宇^[17]提出，饱和土体一维大变形固结系数在固结过程中有 3 种变化规律：①单调递增；②单调递减；③先减小后增大。高岭土、钙蒙脱土和马斯纳黏土的固结系数变化规律分别与以上 3 种情况相符合，而本文污泥的固结系数变化则类似于钙蒙脱土。一般真空预压法处理软土地基时，真空度一般在 80~90 kPa 范围，从 0 kPa 到该真空度区间范围内污泥固结系数变化大，如固结系数采用常数进行固结度计算，必然会造成与实际情况有较大出入的结果。

4.4 抗剪强度特性

由污泥慢剪试验得到的典型剪应力与剪切位移关系曲线如图 14 所示。可见，污泥的应力-应变关系曲线呈现理想弹塑性模型。通过 2 组试验所得到

抗剪强度与垂直压力的关系如图 15 所示，污泥库中的污泥呈流塑状，可见在正应力为 0 时污泥的抗剪强度为 0，污泥的黏聚力可为 0，经拟合可得，污泥内摩擦角的分布范围为 $13.8^\circ \sim 15.1^\circ$ ，平均值为 14.9° ，小于普通软土（ 20° ）。Diliunas 等^[18]通过室内直剪试验得到不同填埋年龄污泥的有效抗剪强度参数，新鲜污泥黏聚力为 2 kPa，内摩擦角为 2° ，而填埋 2~3 a 污泥的黏聚力为 4 kPa，内摩擦角为 17° ，与本文测试的结果相接近。

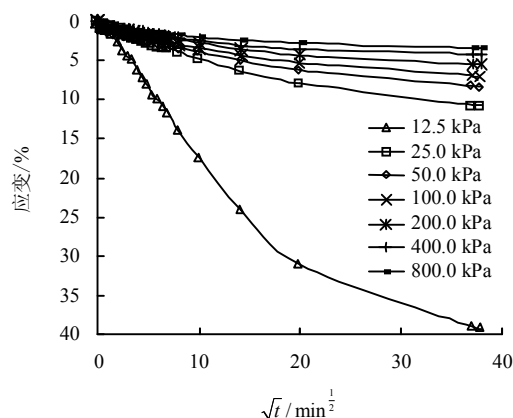


图 11 应变与时间平方根关系曲线
Fig.11 Curves of strain vs. elapsed square root of time

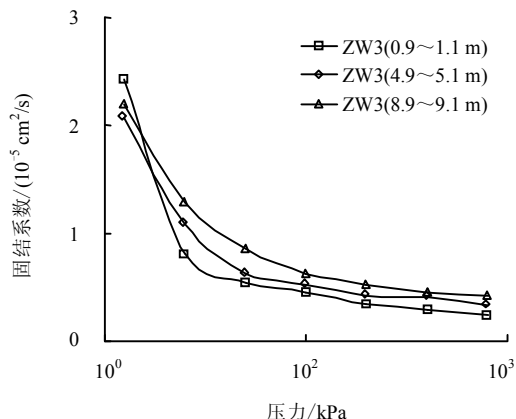


图 12 固结系数随压力的变化曲线
Fig.12 Curves of consolidation coefficient vs. stress

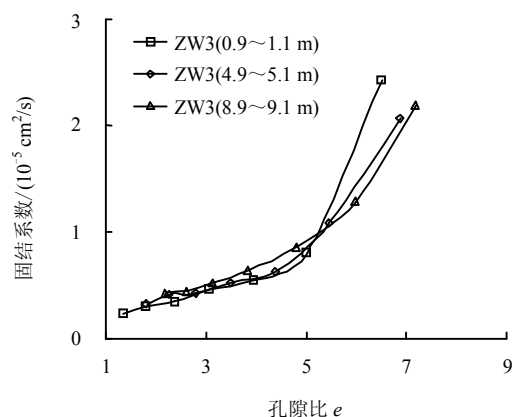


图13 固结系数随孔隙比变化曲线

Fig.13 Curves of consolidation coefficient vs. void ratio

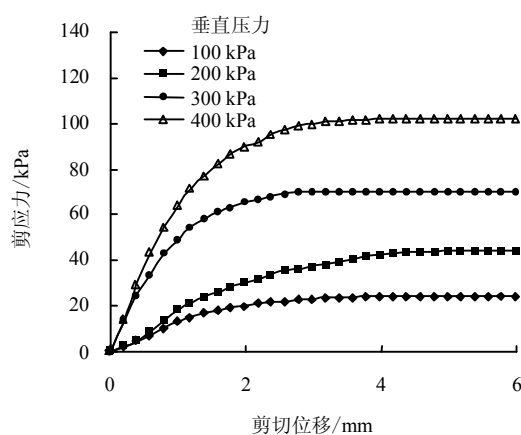


图14 剪应力与剪切位移关系曲线

Fig.14 Curves of shearing stress vs. shear displacements

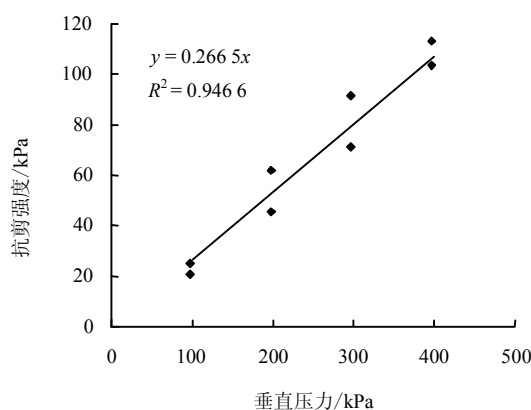


图15 抗剪强度与垂直压力关系曲线

Fig.15 Curve of shear strength vs. vertical compression

5 结 论

(1) 与常规软土相比, 污泥库中一定降解程度污泥有机质及含水率含量较高, 平均值分别为 45% 和 520%, 且随深度的增加、生物降解程度的提高而降低。

(2) 有机质含量高是污泥高含水率、高液塑性

指数、高压缩性、低渗透性、低固结系数、低抗剪强度的内在原因, 污泥是一种高液塑、限有机质土。

(3) 污泥具有极高的压缩性, $a_{100-200}$ 高达 7 MPa^{-1} ; 污泥固结表现为非线性大变形特性, 其固结系数在 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 量级, 压缩系数和固结系数均随压力的增加而显著减小, 特别是在 $0 \sim 100 \text{ kPa}$ 压力范围。

(4) 污泥的抗剪强度较低, 黏聚力为 0, 内摩擦角为 14.7° 。

参 考 文 献

- [1] 杨国清. 固体废弃物处理工程[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 污泥无害化、减量化、资源化处理新技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] 张华, 范建军, 赵由才. 基于填埋处置的污水厂脱水污泥土工性质研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(3): 361—365.
ZHANG Hua, FAN Jian-jun, ZHAO You-cai. Geotechnical characterization of dewatered sewage sludge for landfilling[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2008, 36(3): 361—365.
- [4] O'XELLY BREDNDAN C. Geotechnical properties of a municipal water treatment sludge incorporating a coagulant[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, 45(5): 715—725.
- [5] O'XELLY BREDNDAN C. Geotechnical properties of municipal sewage sludge[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2006, 24(4): 833—850.
- [6] O'XELLY BREDNDAN C. Consolidation properties of a dewatered municipal sewage sludge[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42(5): 1350—1358.
- [7] O'XELLY BREDNDAN C. Mechanical properties of dewatered sewage sludge[J]. *Waste Management*, 2005, 25(1): 47—52.
- [8] 曹永华, 闫瀚旺, 赵乐军. 固化污泥的工程性质及微观结构特征[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 740—744.
CAO Yong-hua, YAN Shu-wang, ZHAO Le-jun. Engineering properties and microstructure feature of solidified sludge[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(5): 740—744.
- [9] 郑修军, 朱伟, 李磊, 等. 污泥固化材料优选试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊): 571—574.

- ZHENG Xiu-jun, ZHU Wei, LI Lei, et al. Optimization experiment study of sludge solidifying materials[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(Supp.): 571—574.
- [10] 朱伟, 李磊, 林城. 生物化学作用对污泥固化体渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 933—936.
- ZHU Wei, LI Lei, LIN Cheng. Biochemical effects on permeability of solidified sludge[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(6): 933—936.
- [11] 李磊, 朱伟, 林城, 等. 干湿循环条件下固化污泥的物理稳定性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 1778—1782.
- LI Lei, ZHU Wei, LIN Cheng, et al. Study of wet and dry properties of solidified sludge[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 1778—1782.
- [12] 中华人民共和国建设部. GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [13] 中华人民共和国建设部. CJ/T221—2005 城市污水处理厂污泥检验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [14] IMHOFF K, MULLER W J, THISTLETHWAYTE D K B. disposal of sewage and other water Borne Wastes[M]. London: Butterworth Co., Ltd., 1971.
- [15] CAMPBELL H W, RUSH R J, TEW R. Sludge dewatering design manual research report[R]. Burlington: Ontario Ministry of the Environment, 1978.
- [16] CHEN YUNMIN, LIN WEIAN, TONY L, et al. Investigation of mechanisms of bentonite extrusion from GCLs and related effects on the shear strength of GCL/GM interfaces[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2010, 28(1): 63—71.
- [17] 谢新宇, 夏建中, 朱向荣, 等. 饱和土体一维大变形固结系数研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 1998, 32(3): 319—324.
- XIE Xin-yu, XIA Jian-zhong, ZHU Xiang-rong, et al. The research on the one dimensional large strain coefficient of consolidation for saturated soil[J]. **Zhejiang University (Engineering Science)**, 1998, 32(3): 319—624.
- [18] DILIUNAS JONAS, DUNDULIS KASTYTIS, GADEIKIS SAULIUS, Arunas Jurevicius. Mykolas. Kaminskas. Geotechnical and hydrochemical properties of sewage sludge[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2010, 69(4): 575—582.
-
- 上接第 114 页
- [13] 吴迪, 简文彬, 徐超. 残积土抗剪强度的环剪试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2045—2050.
- WU Di, JIAN Wen-bin, XU Chao. Research on shear strength of residual soils by ring shear tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(7): 2045—2050.
- [14] 徐超, 孟凡祥. 剪切速率和材料特性对筋—土界面抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3101—3106.
- XU Chao, MENG Fan-xiang. Effects of shear rate and material properties on shear strength of geosynthetic-soil interface[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3101—3106.
- [15] 孙涛, 洪勇, 栾茂田, 等. 采用环剪仪对超固结黏土抗剪强度特性的研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2000—2005.
- SUN Tao, HONG Yong, LUAN Mao-tian, et al. Shear strength behavior of over-consolidated clay in ring shear tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 2000—2005.
- [16] 中华人民共和国建设部. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [17] 胡明鉴, 汪发武, 程谦恭. 基于高速环剪试验易贡巨型滑坡形成原因试验探索[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1602—1606.
- HU Ming-jian, WANG Fa-wu, CHENG Qian-gong. Formation of tremendous Yigong landslide based on high-speed shear tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(10): 1602—1606.
- [18] 张明, 胡瑞林, 殷跃平, 等. 滑坡型泥石流转化机制环剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 822—832.
- ZHANG Ming, HU Rui-lin, YIN Yue-ping, et al. Study of transform mechanism of landslide-debris flow with ring shear test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(4): 822—832.