

DOI: 10.11779/CJGE201501021

固化污泥压缩特性研究

李 磊¹, 徐 菲¹, 周灵君², 边 博², 张春雷³

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省环境科学研究院, 江苏 南京 210036;
3. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 固化技术是污泥进行填埋处置常用的处理技术之一, 固化污泥的压缩参数是进行填埋场库容计算和稳定性评价的重要指标。选用水泥作为固化材料, 开展了不同材料添加量和不同养护时间条件下固化污泥的压缩特性研究, 并从固化污泥水分形态和转化角度对压缩性变化机理进行了探讨。结果表明, 即使水泥添加量达到30%, 固化污泥的压缩指数也高达0.71, 是一种高压缩性的土。水泥的添加量在10%~20%时, 固化污泥压缩指数降低显著, 但是超过20%以后, 压缩指数变化趋于稳定。其原因主要在于污泥中的水分具有较高的结合势能, 过多的水泥并不能获得更多的自由水发生水化反应。固化污泥的压缩指数随着养护时间的增加而降低, 当达到14 d时趋于稳定, 但60 d以后压缩指数又出现降低趋势, 其原因主要是微生物逐步分解污泥结合水中的碳氢化合物, 有机质含量下降, 导致压缩指数降低。

关键词: 污泥; 固化; 压缩指数; 水分形态

中图分类号: TU447; X172 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)01-0171-06

作者简介: 李 磊(1976-), 男, 河南信阳人, 博士, 副教授, 从事环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: lilei@hhu.edu.cn。

Compression characteristics of solidified sewage sludge

LI Lei¹, XU Fei¹, ZHOU Ling-jun², BIAN Bo², ZHANG Chun-lei³

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, China; 3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The solidification technology is a general disposal method for sewage sludge landfills, and the compression parameter is an important factor for volume calculation and stability evaluation of landfills. The sewage sludge is solidified by using cement. The researches on the compression characteristics are carried out under different cement contents and curing period conditions. In addition, the compression mechanism is investigated from the viewpoints of water forms and transform. The results show that if the cement content is 30%, the solidified sludge is highly compressed and its compression index is 0.71. The compression index greatly decreases with the cement content of 10%~20%, and it tends to be stable when the cement content is more than 20%. The reason is that the cement can not get more free water for reaction because the water forms are mainly the bound water in the sewage sludge. With the curing period extended, the compression index decreases and becomes stable after 14 days. But the compression index is declined after 60 days, which is caused by decomposed hydrocarbon and decrease of organic contents by the microorganism action.

Key words: sewage sludge; solidification; compression index; water form

0 引言

污泥是污水处理厂对污水进行处理后产生的以有机物为主的泥状物质, 含有大量的微生物、病原体、重金属以及有机污染物等。根据《国家环境保护“十二五”规划》, 脱水污泥产量将达到 6000×10^4 t/a。污泥在生活垃圾填埋场进行填埋是国内外常用的处置技术途径之一^[1-2]。2009年颁布实施的《城镇污水处理厂污泥处置混合填埋用泥质》(GB/T 23485—2009)也为污泥混合填埋处置提供了技术指导和依据。

由于污泥的含水率过高、物理性质差, 如果不经

预处理直接进入填埋场进行填埋处置容易引起填埋场工程灾害以及区域环境污染问题。如国内某大型填埋场混合填埋污泥和垃圾时污泥受压挤渗入周边垃圾和衬垫系统中导致堆体抗剪强度降低^[1]。2009年发生填埋场失稳事故。英国戴顿填埋场由于污泥降解过程产生的填埋气增加了孔隙水应力, 导致填埋场失稳^[3]。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB719804); 国家自然科学基金项目(51278172, 51478167); 江苏省自然科学基金项目(BK2012883)

收稿日期: 2014-03-21

为改善污泥的物理力学性质, 目前比较常用的方法是在污泥中添加水泥、石灰及各种固化剂, 通过固化剂与污泥中产生一系列的水化反应, 达到降低含水率、提高污泥的力学性质、稳定污染物的目的, 避免产生填埋场失稳破坏等工程灾害。目前关于污泥固化处理方面的研究主要集中在固化材料的选择、强度、长期材料稳定性以及二次污染评价等方面, 以满足污泥预处理及填埋施工等方面的要求^[4-6]。污泥进入填埋场进行填埋, 除了需要解决上述问题之外, 压缩沉降特性是关系到填埋场库容和安全运营的重要课题, 但是目前关于固化污泥压缩特性的研究鲜有报道, 关于污泥压缩特性的研究主要集中在未经处理的污泥方面。相关研究表明污泥较一般的软土有更高的压缩性, 但是不同学者研究的结果也具有较大的差异: 如 O'Kelly 研究表明压力范围 3~800 kPa 下, 压缩指数从 3.7~2.5^[7]; Zhan 研究了填埋场中弃置的污泥, 压力范围 12.5~800 kPa 情况下, 污泥的压缩指数从 5.5~1.5, 而且污泥的 $e - \lg p$ 压缩曲线孔隙比与压力对数的关系呈内凹曲线, 与一般的软土压缩曲线差异很大^[8]。固化污泥在材料性质上与未经处理的污泥及垃圾土在物质组成、结构等方面有着本质的区别, 未经处理污泥和垃圾土的压缩特性研究结果不完全适用于固化污泥。

为了明确污泥固化处理后的压缩性问题, 针对目前污泥固化处理实际工程中主要存在的两个关键控制因素——材料添加量和养护时间, 通过室内压缩试验开展不同材料添加量和不同养护时间条件下固化污泥的压缩特性研究, 并从固化污泥中水分转化的角度对压缩特性的变化机理进行了分析, 研究结果能够为固化污泥填埋处置工程提供设计参数和运营方案指导。

1 试样材料与试验方案

1.1 试样材料

试验所用的污泥为某城市污水厂的脱水污泥, 污泥基本性质: 含水率为 251.5 %, 密度为 1.14 g/cm³, 比重为 2.21, 孔隙比为 5.45, 液限为 132%, 塑限为 96%, 有机质为 30.28%。从数据可以看出, 污泥的含水率和有机质含量远较一般的软土、淤泥质土高, 而且初始孔隙比大。图 1 为污泥的 XRD 图, 其主要矿物成分为石英。所选用的水泥为 #325 普通硅酸盐水泥。

1.2 试验方案

选取具有代表性的水泥基固化材料, 研究材料添加量和不同养护时间对固化污泥压缩特性的影响。水泥添加量按 0%, 10%, 20%, 30% 的质量比与污泥混合搅拌均匀后装入直径为 6.18 cm, 高度为 2.0 cm 的钢制环刀内。制好后的试样放入温度为 20±2°C, 湿度大于 90% 的恒温恒湿养护箱中养护至 7 d; 20% 水泥添加量的固

化污泥再继续养护至 14 d, 30 d, 60 d, 120 d, 180 d 后进行压缩试验。另至一批试样直接放入养护箱中进行养护, 进行水分转化试验及其它指标测试。

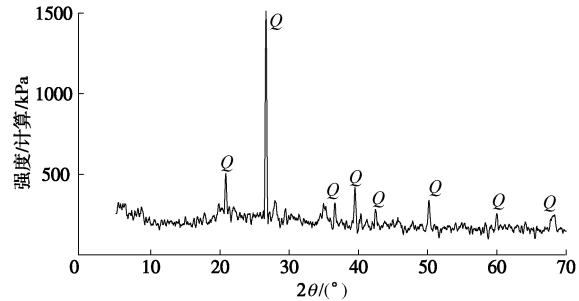


图 1 污泥 XRD 图

Fig. 1 XRD for sewage sludge

压缩试验采用 WG 型固结仪, 考虑到污泥及低添加量下固化污泥物理力学性质较差, 采用常规加载荷载易导致污泥挤出, 因此对加载方式进行了改进, 减小了初级荷载: 对于原泥初级荷载为 3.125 kPa, 加荷率为 1, 最后一级荷载为 200 kPa; 对于 10% 水泥添加量的固化污泥初级荷载为 6.25 kPa, 加荷率为 1, 最后一级荷载为 400 kPa; 20% 和 30% 水泥添加量的固化污泥初级荷载为 12.5 kPa, 单向压缩试验荷载率取为 1, 最后一级荷载为 1600 kPa。

水分形态测试采用 Himac 高速冷冻离心机, 将样品放入环刀中 (内径 4.99 cm, 高 5.09 cm), 环刀地面贴上滤纸后放入旋杯中。分别在转速 n 为 1000, 3000, 6000, 7000, 8000, 10000 rpm 进行离心机试验, 在每级转速运行 3 h 后质量基本稳定时称量环刀与湿泥样的质量, 测量旋杯顶面到试样表面的距离 h , 之后在下一级设定转速下运行; 最后在转速结束后, 将环刀连同湿土在 105°C 下烘干 (时间 > 12 h), 测量环刀与干泥样重。不同转速下的 p_F 值根据下式计算:

$$p_F = 2 \lg n + \lg(r_0 - r_1) + \lg \frac{r_0 + r_1}{2} - 4.95 \quad (1)$$

式中, n 为离心机的转速 (rpm); r_0 为旋杯底即试样底到离心机转盘中心距离 (9.8 cm); r_1 为试样中心到离心机旋转中心距离 (cm), $r_1 = r_0 - (5.09 - h)/2$; h 为旋杯顶到试样表面的距离, 试验量测值 (cm)。

根据不同转速下获得的含水率以及相应的 p_F 值, 即可获得相应的水分势能与含水率的关系。

2 压缩试验

2.1 水泥添加量对压缩性的影响

试验选取了原泥以及 10%, 20%, 30% 水泥质量添加量下, 养护 7 d 时间的固化污泥研究不同材料添加量条件下压缩性的变化。结果如图 2, 3 所示。

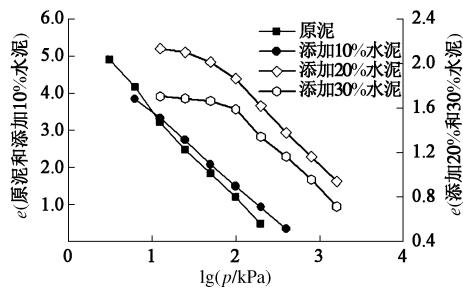
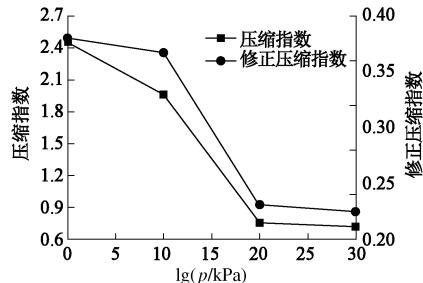
图 2 不同水泥添加量下 e - $lg p$ 曲线Fig. 2 e - $lg p$ curves under different cement contents

图 3 压缩指数及修正压缩指数与水泥添加量的关系

Fig. 3 Relationship among compression index, modified compression index and cement contents

原泥和 10% 水泥添加量的固化污泥与正常土的 e - $lg p$ 压缩曲线不同, 其压缩曲线基本为直线型, 表明污泥不存在前期固结压力, 而添加 10% 水泥的固化污泥水化反应程度较低, 不能形成较为完整的固化体, 压缩曲线也基本为直线型, 属于欠固结土。而随着水泥添加量的增加, 其压缩曲线逐步向正常土体的 e - $lg p$ 压缩曲线转变, 表明水泥的加入使得污泥逐步形成团聚化的结构, 出现类似“固结应力”的作用。从图 3 中可以看出, 无论是原泥还是固化污泥, 其压缩性都相当的高, 原泥的压缩指数达到了 2.45, 即使添加 30% 水泥的固化污泥, 压缩指数也达到了 0.71, 属于典型的高压缩性土。一般的软黏土压缩指数小于 0.5^[7], 河道淤泥的压缩指数约 0.516^[9], 垃圾土的修正压缩指数约为 0.1~0.37^[10-11], 本文原泥及不同水泥添加量下固化污泥修正压缩指数分别为 0.38, 0.36, 0.23, 0.22, 和垃圾土较为接近。而且当水泥添加量超过 20% 以后, 压缩指数的降低呈现变缓的趋势。

与一般的固化土强度产生机理类似, 固化污泥也是一种人工结构性土, 相对于天然结构性土而言, 固化土亦可以称之为人造结构性土, 其压缩屈服应力即为结构屈服应力^[12]。Butterfield 首先提出采用双对数坐标确定结构屈服应力的方法^[13], 并证实 2 直线的交点就是屈服应力^[14-15]。本文也采用 Butterfield 提出的双对数坐标方法($\ln(1+e)$ - $lg p$) 确定固化污泥的结构屈服应力。因原泥和添加 10% 水泥的固化污泥无结构屈服应力, 因此图 4 中为 20% 和 30% 水泥添加量下固化污泥的结构屈服应力。

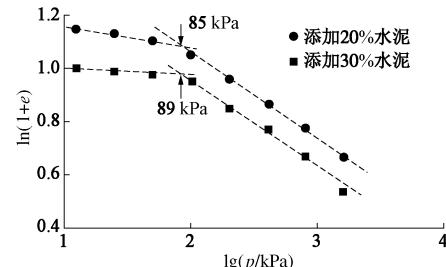


图 4 不同水泥添加量下固化污泥双对数压缩曲线

Fig. 4 Bilogarithmic compression curves of solidification sludge under different cement contents

从图 4 中可看出, 随着水泥量的增加, 20% 和 30% 水泥添加量下的固化污泥结构屈服应力变化很小, 仅略有增加。这与其压缩指数的变化结果较为一致。而且两种添加量下屈服前后的双对数压缩指数也没有显著的差异。这就意味着水泥增加了 50%, 但是其水化反应产生的水化产物并未显著增加, 造成两种添加量下固化污泥的结构性差异并不显著。后面将从水分形态转化的角度对该结果进行进一步解释。另外, 屈服前后双对数压缩指数变化非常显著, 即固化污泥一旦发生结构屈服之后, 其压缩性将出现大幅度的增加。这意味着在填埋场中填埋时, 其上部堆填的填埋体超过一定的高度, 可能将产生较大的压缩沉降问题。在实际的填埋工程设计中可进一步结合应力 - 应变关系的变化趋势, 对工程中由于这种结构性破坏造成的沉降问题进行分析。

2.2 养护时间对压缩性的影响

选取 20% 水泥添加量下的固化污泥, 在标准养护条件下养护 7 d, 14 d, 30 d, 60 d, 120 d, 180 d。压缩试验结果及压缩指数变化如图 5, 6。

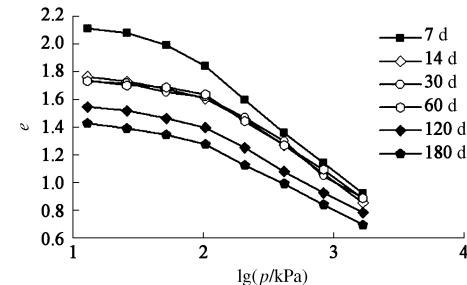
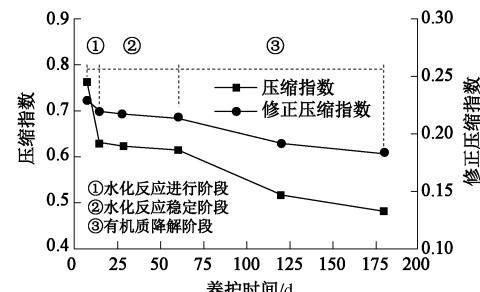
图 5 不同养护时间下 e - $lg p$ 曲线Fig. 5 e - $lg p$ curves under different curing period

图 6 压缩指数及修正压缩指数与养护时间的关系

Fig. 6 Relationship among compression index, modified compression index and curing period

从图 6 可以看出, 即使经过 180 d 的养护, 固化污泥的压缩指数依然高达 0.6, 为高压缩性土。在 14 d 之前, 固化污泥的压缩指数随养护时间出现降低趋势; 在 14 d~60 d 基本维持不变; 60 d 再次后出现缓慢降低的趋势。从 e - $\lg p$ 曲线也可以看出, 14 d~60 d 的压缩曲线基本重合。这表明养护时间达到 14 d 后固化污泥的压缩性基本处于一种稳定的状态。但是 60 d 以后压缩性变化较为显著, 其原因可能是结构发生改变。另一方面, 固化污泥中含有大量有机质, 有机质降解也会对其力学性质产生一定的影响^[16]。为了验证是否因结构变化而导致压缩性的改变, 采用双对数坐标方法($\ln(1+e)$) - $\lg p$ 确定固化污泥的结构屈服应力, 如果固化污泥的结构发生改变, 势必也会导致其屈服应力会随养护时间而发生改变。不同养护时间的固化污泥双对数压缩曲线如图 7 所示。

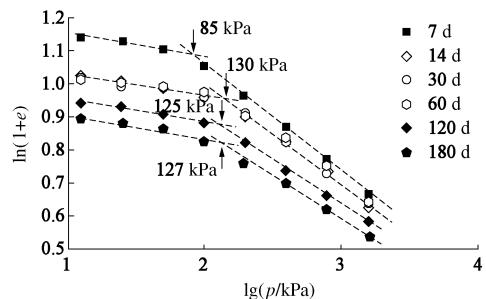


图 7 不同养护时间下固化污泥双对数压缩曲线

Fig. 7 Bilogarithmic compression curves of solidification sludge under different curing periods

从图 7 中可以看出, 固化污泥养护时间到 14 d 以后, 其结构屈服应力基本维持不变, 这也就意味着随着养护时间的增加, 固化污泥的结构并未发生显著变化, 其水化反应形成的水化产物在第 14 天时候已经基本完成, 在实际工程中再增加养护时间对固化污泥的结构以及压缩性已经不产生影响。因此, 固化污泥压缩性在 60 d 以后发生改变显然不是固化污泥结构发生变化引起的。

图 8 为不同养护时间的固化污泥进行完压缩试验后测定的有机质含量。从图中可以看出, 固化污泥的有机质在 60 d 养护时间以后出现了显著的降低趋势, 在此之前有机质含量基本维持不变。相关的研究也表明, 污泥经过固化处理虽然生化条件发生了一定的变化, 但其中的微生物活性并未丧失, 仍然可以逐步降解污泥中的有机物, 并对力学性质产生一定的影响^[16]。综合有机质试验结果和结构屈服应力研究结果, 养护时间对固化污泥压缩性影响主要集中在水化反应阶段, 水化反应完成后, 养护时间对压缩性已经基本不存在影响, 但是后期有机质降解所造成的压缩性降低将是一个长期的过程。

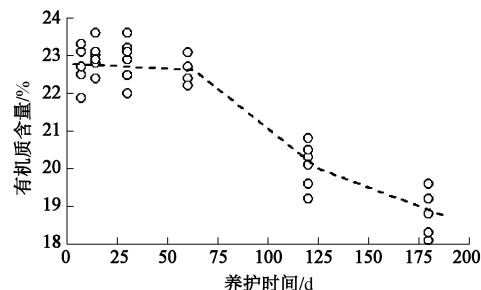


图 8 有机质含量与养护时间的关系

Fig. 8 Relationship between organic content and curing period

3 水分形态转化试验

固化污泥力学性质变化的根本原因在于水泥与污泥中的水分发生水化反应, 生成相应的水化产物。水分形态决定了固化反应进行程度以及固化土的力学性质^[17]。研究从固化污泥水分形态转化角度出发, 揭示不同水泥添加量和养护龄期条件下固化污泥中的水分形态的转化情况, 并与宏观压缩试验结果相对应, 从水分形态转化的角度对压缩性的变化机理进行揭示。

根据 Lebedev 的研究成果, 土水势 p_F 值 3.8 作为区分结合水与自由水的分界点^[18], 对于 p_F 值大于 7 的矿物水, 作为固体来考虑^[19]。未处理的污泥中结合水量 m_c , 可以通过前述 p_F 离心试验测定, 自由水量 m_f 为 105℃ 下测定的含水率 m_w 减去结合水量, 即

$$m_w = m_f + m_c \quad (2)$$

为了反映不同材料添加量以及不同养护龄期条件下污泥中结合水和自由水的变化, 定义固化污泥中自由水百分含量为 w_f , 结合水百分含量为 w_c , 固化污泥中的污泥质量为 m_s , 污泥与水泥混合搅拌过程中水分蒸发的质量为 m_e , 则

$$w_f = \frac{(m_f + m_e)}{m_s} \times 100\% \quad , \quad (3)$$

$$w_c = \frac{m_e}{m_s} \times 100\% \quad . \quad (4)$$

蒸发水的质量测定根据混合搅拌前后质量差计算, 每次混合搅拌完成 30 min 后固化污泥基本不再发热, 此时的质量损失作为蒸发水量。养护过程中的湿度高达 90%, 蒸发量可以忽略不计。

3.1 水泥添加量对固化污泥水分形态的影响

根据式 (3)、(4) 获得的不同水泥添加量条件下自由水和结合水百分含量的变化如图 9 所示。

从图 9 中可以看出随着水泥添加量的增加, 污泥中的自由水含量降低幅度较大, 从原泥中的 38.2% 降低至 26.2%, 降低幅度为 31%; 而结合水变化幅度相当小, 在 61%~56% 之间波动, 降低幅度仅为 7.2%。这表明水泥主要是与污泥中的自由水产生水化反应, 而结合水含量较高的结合水参与水化反应的量是非常少

的。自由水在添加量<10%时降低幅度较小, 表明水泥添加量过低, 水化反应程度较低。对应的压缩指数减小幅度也相对较小; 水泥添加量在10%~20%阶段, 自由水显著降低, 表明水化反应能够持续进行; 但是超过添加量20%以后, 自由水降低幅度又开始减小, 意味着添加过多的水泥并不能显著的改善污泥力学性质。其原因主要在于污泥中的大部分水分以较高的结合势能形态存在, 水泥难以获得污泥中的水分维持其水化反应的进程^[20]。上述水分形态研究的结果与固化污泥的压缩特性较为一致: 水泥添加量在10%之前, 压缩指数降低不明显, 在10%~20%之间急剧降低, 但是超过20%降低趋势减缓。压缩性的这种变化主要是由于水化反应进行程度所决定的。

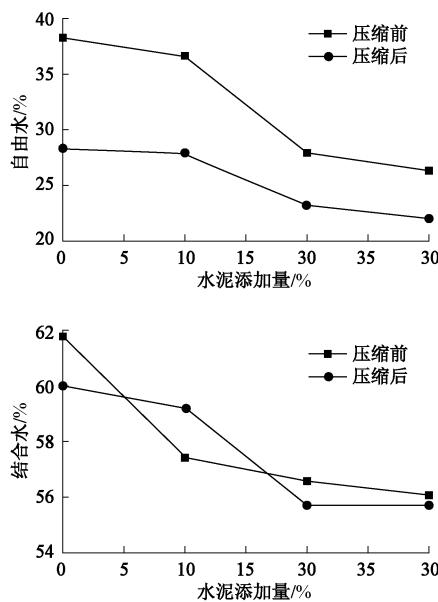


图9 污泥中水分形态与水泥添加量的关系

Fig. 9 Relationship between water forms and cement contents

另外, 压缩前后自由水减小十分显著, 而结合水压缩前和压缩后差异不明显。表明固化污泥压缩过程中孔隙的减小主要来自于自由水的排除, 而其中结合势能较高的结合水难以排除。

3.2 养护时间对固化污泥水分形态的影响

不同养护时间固化污泥中水分形态变化见图10。

自由水在养护时间14 d内急剧降低, 14~60 d基本处于稳定状态。表明水化反应在14 d内已经基本完成, 图6中压缩指数的变化也证实了这一点, 在实际工程中养护时间最长可以设定为14 d。

60 d以后自由水出现了上升趋势, 结合水则在60 d以后出现了较为显著的下降趋势。根据相关研究结果, 污泥中结合势能较高的结合水难以参加水化反应, 在材料种类、添加量都未改变的条件下, 其大幅度降低显然不是因为参与了水化反应。污泥中的结合水主要是大量的胞内和胞外结合水, 其成分主要以多糖、

脂肪、蛋白质等碳水化合物形式存在^[21-22], 结合图8中有机质在60 d后出现降低趋势的结果, 可以推断结合水的降低是由于其中的胞内、胞外碳水化合物的降解所引起, 降解后的一部分碳水化合物转化为H₂O、CO₂、CH₄等, 引起自由水的增加。

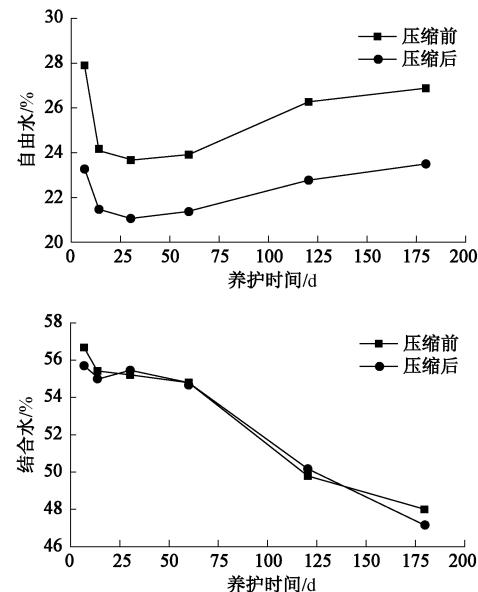


图10 污泥中水分形态与养护时间的关系

Fig. 10 Relationship between water forms and curing periods

4 结论

(1) 固化污泥是一种高压缩性土, 其压缩性大于一般的软黏土、河道淤泥, 与垃圾土较为接近。

(2) 水泥添加量对固化污泥压缩性的影响在低添加量和较高添加量时均不显著: 水泥添加量小于10%时水化反应进行的程度很低, 压缩性与原泥差异不大; 水泥添加量在10%~20%之间水化反应程度较高, 压缩指数出现显著降低; 水泥添加量大于30%以后, 污泥中没有更多的低结合势能的水参与水化反应, 压缩指数下降趋势趋缓。

(3) 养护时间对压缩性的影响有限, 本文的研究中当养护时间达到14 d时, 水化反应已经基本完成, 压缩指数已经基本稳定。但是60 d后压缩指数再次出现降低, 主要是因为微生物活动分解了部分胞内和胞外结合水中的碳水化合物, 减少了固化污泥中的有机质含量, 降低了固化污泥的压缩性。

(4) 固化材料除了水泥之外, 还有生石灰等材料, 不同材料对固化污泥压缩性的影响需要进一步探讨; 另外, 污泥的初始含水率、长期的有机质降解等因素, 对压缩性有何种影响需要开展相关的研究进行明确。

参考文献:

- [1] 詹良通, 罗小勇, 管仁秋, 等. 某垃圾填埋场污泥坑外涌及

- 其引发下游堆体失稳机理[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(7): 1189 – 1196. (ZHAN Liang-tong, LUO Xiao-yong, GUAN Ren-qiu, et al. Failure mechanism of sludge pit and downstream waste slope of a MSW landfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(7): 1189 – 1196. (in Chinese))
- [2] 施建勇, 王娟. 污泥掺入生活垃圾后的力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(11): 3208 – 3212. (SHI Jian-yong, WANG Juan. Mechanical behavior test study of sludge mixed with municipal solid waste[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(11): 3208 – 3212. (in Chinese))
- [3] RUSSELL H. Race to clear sludge landslide[C]// New Civil Engineer, Institution of Civil Engineers, London, 20th. London, 1992.
- [4] CHENG Lin, WEI Zhu, JIE Han. Strength and leachability of solidified sewage sludge with different additives[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, **25**(11): 1594 – 1601.
- [5] 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**(10): 3001 – 3004. (LI Lei, ZHU Wei, LIN Cheng, et al. Study of wet and dry properties of solidified sludge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(10): 3001 – 3012. (in Chinese))
- [6] 朱春鹏, 吴海清, 刘汉龙, 等. 纸浆渣烧结灰基本特性及其在污泥固化中的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(10): 2979 – 2984. (ZHU Chun-peng, WU Hai-qing, LIU Han-long, et al. An experimental study on basic properties of paper sludge ash and solidified sludge using paper sludge ash[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(10): 2979 – 2984. (in Chinese))
- [7] O'KELLY B C. Geotechnical properties of a municipal water treatment sludge incorporating a coagulant[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008a, **45**(5): 715 – 725.
- [8] ZHAN T L T, ZHAN X J, LIN W A, et al. Field and laboratory investigation on geotechnical properties of sewage sludge disposed in a pit at Changan landfill, Chengdu, China[J]. Engineering Geology, 2014, **170**: 24 – 32.
- [9] 黄英豪. 固化淤泥的流动性及压实后力学性质[D]. 南京: 河海大学, 2011. (HUANG Ying-hao. Flowability of solidified dredged material and its mechanical behavior after compaction[D]. Nanjing: Hohai University, 2011. (in Chinese))
- [10] CHEN Yun-min, ZHAN Liang-tong, WEI Hai-yun, et al. Aging and compressibility of municipal solid wastes[J]. Waste Management, 2009, **29**(1): 86 – 95.
- [11] HOSSAIN M S, GABR M A, BARLAZ M A. Relationship of compressibility parameters to municipal solid waste decomposition[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(12): 1151 – 1158.
- [12] 丁建文. 高含水率疏浚淤泥流动固化土的力学性状及微观结构特征研究[D]. 南京: 东南大学, 2011. (DING Jian-wen. Mechanical properties and microstructure characteristics of solidified dredged clays at high water content[D]. Nanjing: Southeast University, 2011. (in Chinese))
- [13] BUTTERFIELD R. A natural compression law for soils[J]. Géotechnique, 1979, **29**(4): 469 – 480.
- [14] SRIDHARAN A, ABRAHAM B M, JOSE B T. Improved technique for estimation of preconsolidation pressure[J]. Géotechnique, 1991, **41**(2): 263 – 268.
- [15] HONG Z S, ONITSUKA K A. A method of correcting yield stress and compression index of Ariake clays for sample disturbance[J]. Soils and Foundations, 1998, **38**(2): 211 – 222.
- [16] 李磊, 朱伟, 吉顺健, 等. 微生物对固化/稳定化污泥长期强度的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(12): 1778 – 1782. (LI Lei, ZHU Wei, JI Shun-jian, et al. Influence of micro-organism on long-term strength of solidified/stabilized sludge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(12): 1778 – 1782. (in Chinese))
- [17] ZHU W, ZHANG C L, ABRAHAM C F, Chiu. Soil-Water transfer mechanism for solidified dredged materials[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2007, **133**(5): 588 – 598.
- [18] LEBEDEV A F. Soil and groundwaters[M]. Moscow: The Academy of Sciences of the USSR, 1936.
- [19] 张春雷. 基于水分转化模型的淤泥固化机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (ZHANG Chun-lei. Study of dredged sediments solidification mechanism based on water transfer mode[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [20] 孙晓辉. 固化污泥早期强度发展机理及早强固化材料研究[D]. 南京: 河海大学, 2012. (SUN Xiao-hui. Study on mechanism of early-strength of solidified sludge and binders with high early-strength for sludge treatment[D]. Nanjing: Hohai University, 2012. (in Chinese))
- [21] SMITH J K, VESILIND P A. Dilatometric measurement of bound water in waste water sludge[J]. Water Research, 1995, **29**(12): 2621 – 2626.
- [22] WERTHER J, OGADA T. Sewage sludge combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1999, **25**: 55 – 116.