

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.03.012



# 污泥与城市生活垃圾混填的力学特性 及稳定性

于小娟

(盐城工学院 土木工程学院, 盐城 224051)

**摘要:**工业污水和生活污水排放量日益增多,污水处理厂污泥产量日趋加大,污泥填埋关键技术问题已成为当今环境工程以及环境岩土工程的热点问题之一。污泥和垃圾混合填埋在其他国家已得到应用,但由于目前中国关于污泥及其城市生活垃圾混合样的基础性室内试验成果不多,对污泥与城市垃圾混合样的工程力学特性及其混合填埋的适宜比例等不甚了解,从而导致中国污泥垃圾混合填埋工程事故频繁发生。对不同配比的污泥与城市生活垃圾混合样进行了固结压缩实验、三轴固结不排水实验、无侧限抗压强度实验,得出污泥与城市生活垃圾混合样的工程力学特性;同时,用 ANSYS 数值模拟方法,对不同配合比的污泥城市生活垃圾混合填埋边坡的稳定性进行分析,而对污泥与城市生活垃圾混合填埋的适宜配合比及其稳定安全问题提出理论支撑。

**关键词:**污泥;城市生活垃圾;混合填埋;物理与工程力学特性;稳定性

**中图分类号:**TU4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)03-0080-10

## Mechanical properties and stability analysis of sludge-municipal solid waste mixture landfill

Yu Xiaojuan

(School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, P. R. China)

**Abstract:** With the increase of sludge production of wastewater treatment plants, sludge treatment has become one of the hot topics in environmental engineering and environmental geotechnical engineering. Sludge-municipal solid waste (MSW) mixture landfill has been applied abroad. But the current domestic foundational laboratory test result of MSW mixture sample is not much, there is a lack of understanding on its mechanical properties and the appropriate proportion of mixed landfill. Hence domestic sludge-municipal solid waste (MSW) mixture landfill engineering accidents occur frequently. Consolidation compression experiments, three axis consolidated undrained tests and unconfined compressive strength tests are conducted to discuss the mechanical properties of different mixing ratio of sludge-municipal solid waste (MSW) mixture. At the same time, ANSYS numerical simulation is operated to analyze the slope stability of landfill with different mixing ratio of sludge-municipal solid waste (MSW) mixture. The theoretical support on the appropriate proportion of mixed landfill and stability security of sludge-municipal solid waste

**收稿日期:**2015-12-25

**基金项目:**江苏省社会发展项目(BE2011729)

**作者简介:**于小娟(1969-),女,教授,博士,主要从事环境岩土工程研究,(E-mail)flyingfish7101@126.com。

**Received:**2015-12-25

**Foundation item:**Social Development Project of Jiangsu Province(No. BE2011729)

**Author brief:** Yu Xiaojuan (1969-), professor, PhD, main research interest: environmental geotechnical engineering, (E-mail)flyingfish7101t@126.com.

mixture landfill is proposed.

**Keywords:** sludge; municipal solid waste (MSW); mixture backfilling; mechanical properties; slope stability

随着社会经济快速发展和城市化水平的不断提高,工业污水和生活污水的排放量日益增多,污水处理厂污泥产量急剧增加,据中国住房和城乡建设部2013年2月公布的数据,截止2012年底,中国设市城市、县累计建成城镇污水处理厂共3340座,污水处理能力约1.42亿 $\text{m}^3/\text{d}$ ,假设污水处理负荷率为75%,每万吨污水产生6t含水率为80%的污泥,则中国每天将产生含水率80%的污泥6.39万 $\text{t}^{[1]}$ 。2010年10月的“京城环保第一大案”,以及随后的“深圳污泥坑管涌威胁自然生态”、“重庆污泥不治污水处理系统将崩溃”等相继见诸媒体的报道,揭开了中国在污泥处理上的严重缺口,污泥处置问题已成为中国亟待解决的环境问题。

目前,污泥处置与利用的方式主要有填埋、焚烧、农用以及资源化利用等<sup>[2]</sup>。由于污泥卫生学指标、重金属指标难以满足农用标准,污泥焚烧存在汞汽化和二噁英污染等问题未能得到有效解决,污泥填埋因其有投资少、容量大、见效快的优势,已逐渐成为国内外污泥处置的主要途径之一。

与污泥填埋相关的土工性质或力学性质的研究在其它国家70年代已经开始进行,主要在污泥用作填埋场覆盖材料方面有较为深入研究<sup>[3-4]</sup>。近年来的研究成果研究表明,将城市生活垃圾与污泥进行混合,其降解稳定过程比单独填埋时明显加快。比如,单华伦<sup>[5]</sup>的研究表明,污泥和生活垃圾进行混合填埋可以促进垃圾降解和填埋体沉降,对加速填埋场稳定及扩大填埋库容有利。徐华亭<sup>[6]</sup>通过造纸污泥与生活垃圾混合填埋的模拟实验,提出添加适量的造纸污泥可加速生活垃圾降解过程,提高垃圾降解效率。吴正松等<sup>[7]</sup>通过生活垃圾与污泥一体化处理反应器试验后提出,生活垃圾与污泥一体化处理,对污泥和垃圾的减量及稳定效果良好。Kavitha等<sup>[8]</sup>研究指出,活化污泥可提高城市生活垃圾生物降解能力,促进其稳定化进程。另外,Martin<sup>[9]</sup>对垃圾与污泥均匀混合填埋,加速填埋层进入稳定的甲烷化阶段的机理进行了理论分析。Kong等<sup>[10]</sup>对城市生活垃圾与污泥混合物汽化动力学特性及其活化能和指前因子等参数进行了研究。Fang等<sup>[11]</sup>进行了造纸污泥与城市生活垃圾混合的共热解热重量分析。Zuhaih等<sup>[12]</sup>对污泥加速城市生活垃圾进入甲烷化阶段的最优组分比进行

了实验分析。彭晨<sup>[1]</sup>利用城市生活垃圾堆肥的热量可作为维持污泥中温厌氧消化这一特性,对城市生活垃圾和污水厂污泥一体化反应器小件模型试验进行了研究,试验结果确定污泥的最优运行投配率为25%。李耕宇<sup>[13]</sup>进行了不同污泥负荷下常温厌氧活性污泥对生活垃圾填埋渗滤液处理效果研究,指出当污泥培养温度为21 $^{\circ}\text{C}$ ,渗滤液pH为7.6时,厌氧反应池中污泥负荷约为7.83 $\text{kgCOD}/\text{kgMLSS}\cdot\text{d}$ 时,反应器处理效果最佳。另外,朱英等<sup>[14]</sup>对填埋物质分别为污泥、污泥+牛粪、污泥+铁刨花以及准好氧填埋方式的加速稳定化过程进行了研究。谢震震等<sup>[15]</sup>研究表明,污泥和粉煤灰混合填埋比污泥单独填埋能够加大有机物的降解速率,从而缩短稳定化时间。

尽管以上研究成果表明污泥城市生活垃圾混合填埋可加速污泥稳定化进程,减少污泥对垃圾填埋场稳定的不利影响,但目前的研究成果多数停留在城市垃圾与污泥混合填埋对加快填埋场降解与稳定过程有促进作用的描述上,中国具体的工程应用鲜有报道。相比而言,国外的污泥与城市垃圾混合填埋技术相对成熟些<sup>[16]</sup>。国外也有将污泥与城市生活垃圾或泥土混合填埋的应用:与生活垃圾混合填埋时,将污泥撒布在城市垃圾上面,混合均匀后铺放于填埋场内,压实覆土。污泥与垃圾的混合比为1.4-1:7,中间覆土层厚度0.15~0.3m,填埋容量为900~7900 $\text{m}^3/\text{ha}^{[17]}$ 。由于中国的城市垃圾种类比国外的要复杂得多,中国污水处理厂对污泥固化/稳定预处理的标准、经费投入等与国外的相差巨大,因而国外污泥与垃圾混合填埋技术的具体参数不适用于中国国情。目前,中国对于污泥与城市垃圾土混合样的土力学性质还了解不多,对污泥与城市垃圾混合样的抗剪强度(内摩擦角、粘聚力)、固结特性(压缩指数、固结系数)等工程力学性质认识不足,从而对混合填埋时污泥与城市垃圾的适宜混合比例以及填埋的极限容量等问题不甚了解,而中国鲜有现成的资料可供借鉴,国外的又不适用于中国,从而导致中国污泥被大肆倾倒入MSW填埋场的现象屡见不鲜,填埋场工程安全隐患丛生,工程事故频繁发生,不仅造成了惨重的人员伤亡和财产损失,也给当地带来了巨大的环境灾难。比如,潮州市鸡笼山垃圾填埋场的垃圾崩塌滑坡事故、深圳下坪固体废弃

物填埋场污泥坑管涌事故,以及由于污泥倾倒引发的广州大王岗垃圾填埋场崩塌事故等。

为解决上述问题,进行了污泥及其城市生活垃圾混合样室内试验的基础性研究工作,获取了污泥与城市生活垃圾土混合样的物理、力学性质等土性参数,为全面了解污泥城市垃圾混合样的土工性质提供重要基础数据。同时,对污泥与城市垃圾混合样的变形、强度随污泥掺入量的变化规律进行实验与分析,从而对混合填埋时污泥与城市生活垃圾的

适宜混合比作了探索性研究。最后,用数值模拟方法对不同配合比的污泥城市生活垃圾混合边坡的稳定性进行了分析。

## 1 污泥与城市生活垃圾混合样的工程力学特性室内实验研究

### 1.1 污泥物理性质指标及城市生活垃圾样制备

实验中的污泥取自盐城市城东污水处理厂,污泥的物理力学指标如表 1 所示。

表 1 污泥物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of sewage sludge

含水率/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	有机质含量/%	液限指数	塑限指数	C/kPa	φ/(°)	E <sub>s1-2</sub> /MPa
86.3	1.22	32.5	5.4	26.8	8.14	8.30	0.405

根据盐城市区城市生活垃圾的现场取样,测得垃圾样平均含水率  $\omega = 49.92\%$ ,  $\rho = 1.69 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_d = 1.13 \text{ g/cm}^3$ 。

实验中的城市生活垃圾,根据盐城市区城市生活垃圾的分拣资料,进行了人工配制,城市生活垃圾各组分如表 2 所示。根据中华人民共和国行业标准《土工试验规程》(SL237—1999)中对试验材料尺寸规定,将废纸,木材,塑料等材料用剪刀剪碎,并控制其尺寸在试样尺寸的 1/5~1/10,测定各种材料初始含水率,结果列于表 3。

根据表 2 和表 3 中的资料配制垃圾土。

表 2 MSW 组成(干物质)

Table 2 Composition of MSW (based on dried mass)

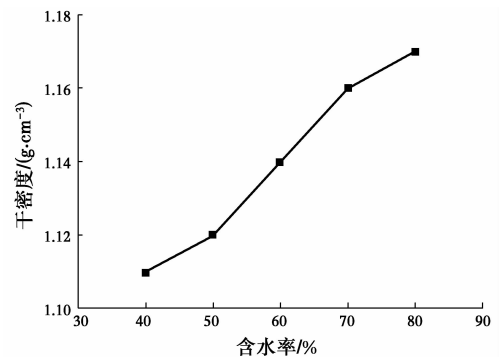
成分	含量/%
厨余	24.89
废纸	17.76
木材	3.22
塑料	15.98
金属	1.4
玻璃、土、废石	36.63

表 3 MSW 各组分初始含水率

Table 3 the initial water content of composition of MSW

成分	初始含水率/%
厨余	21.4
废纸	7.2
木材	11.2
塑料	0
金属	0
玻璃、土、废石	5.0

在现场,垃圾填埋工程都要进行碾压,机械碾压所达到的压实程度以及通过碾压所获得的密实度是实验室模拟现场状态时所面临的两个重要问题,为此,分别配置不同含水率的垃圾样,进行室内标准击实试验。根据《土工试验规程》,进行室内标准击实试验。击实试验结果见图 1。



注: —■— 干密度

图 1 城市生活垃圾样的室内击实曲线

Fig. 1 Compaction curve of MSW

击实实验,含水率越高,干密度越大,曲线无显著下降,造成这一现象的原因是垃圾土与正常土体性质上的差异。城市固体废弃物(MSW)以其特殊的物理、力学及工程特性而显著有别于无机土,虽然其高压缩性与泥炭和有机质土有相似之处,但其变形机制以及生物降解特性与现有天然土体有本质的差别。

### 1.2 污泥与城市生活垃圾混合样固结压缩实验研究

将填埋场准入污泥(含水率小于 60%)与城市生活垃圾样按照不同配比混合进行固结压缩实验,固结压缩实验共分 5 组,纯污泥以及污泥与城市垃圾混合样,污泥与垃圾湿重百分比分别为 10%、20%、30%、

40%,每组两个平行样。纯污泥及其污泥垃圾混合样加荷等级分别为 100、200、300 kPa。

污泥及其与城市生活垃圾混合样的压缩模量,压缩系数及次固结系数分别见表 4~8。

从表 4~8 可知,污泥的次固结系数大,主固结压缩变形后表现有较大的蠕变特性;污泥与城市生活垃圾混合后,其次固结系数大为减小,污泥的蠕变特性得到较大改善。

表 4 污泥固结压缩指标

Table 4 Consolidation compression index of sewage sludge

荷载/kPa	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	压缩系数 $\alpha/\text{MPa}^{-1}$	次固结系数
100	0.405	0.014	2.89
200	0.516	0.014	1.32
300	0.590	0.006	0.75

表 5 污泥与垃圾混合比为 10%混合样固结压缩指标

Table 5 Consolidation compression index of sludge-MSM mixture samples 10 wt % sludge (based on wet weight)

荷载/kPa	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	压缩系数 $\alpha/\text{MPa}^{-1}$	次固结系数
100	0.553	0.011	1.09
200	0.590	0.014	0.51
300	0.631	0.006	0.25

表 6 污泥与垃圾混合比为 20%混合样固结压缩指标

Table 6 Consolidation compression index of sludge-MSM mixture samples 20 wt % sludge (based on wet weight)

荷载/kPa	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	压缩系数 $\alpha/\text{MPa}^{-1}$	次固结系数
100	0.557	0.011	0.93
200	0.645	0.010	0.48
300	0.782	0.008	0.18

表 7 污泥与垃圾混合比为 30%混合样固结压缩指标

Table 7 Consolidation compression index of sludge-MSM mixture samples 30 wt % sludge (based on wet weight)

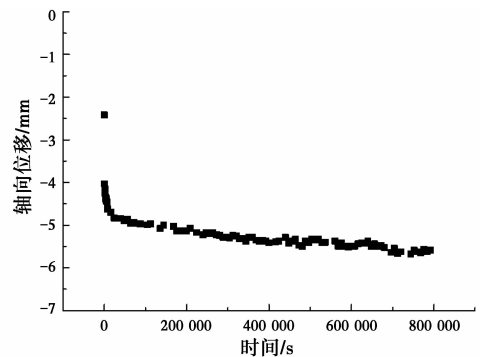
荷载/kPa	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	压缩系数 $\alpha/\text{MPa}^{-1}$	次固结系数
100	0.537	0.014	1.11
200	0.559	0.014	0.56
300	0.615	0.009	0.28

表 8 污泥与垃圾混合比为 40%混合样固结压缩指标

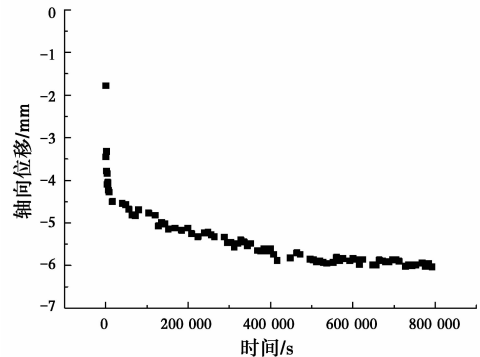
Table 8 Consolidation compression index of sludge-MSM mixture samples 40 wt % sludge (based on wet weight)

荷载/kPa	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	压缩系数 $\alpha/\text{MPa}^{-1}$	次固结系数
100	0.541	0.013	1.23
200	0.631	0.009	0.65
300	0.711	0.007	0.19

固结实验纯污泥(实测含水率分别为 56%和 60%)轴向位移与时间的关系图如图 2 所示。



(a) 污泥含水率56%



(b) 污泥含水率60%

图 2 纯污泥固结压缩量与时间关系图

Fig. 2 Relationship between consolidation compression and time of sewage sludge (a) 56% water content (b) 60% water content

图 2 表明:纯污泥具有高压缩性,土体在短时间的加压下有很大的轴向位移,随着时间的增加,污泥在后期更表现出蠕变特性。含水率大的纯污泥,其固结压缩量要大于含水率小的纯污泥

污泥(含水率为 60%,与垃圾湿重百分比分别为 10%、20%、30%、40%)的混合样的固结压缩实验结果如图 3(a)、(b)、(c)、(d)所示。

由图 3 可见,湿重百分比为 10%、20%、30%、40%时的污泥-垃圾土混合样的压缩性均比纯污泥要低;随着污泥湿重百分含量的增加,混合样的固结压缩量增大;混合样,在加载初期,固结压缩量迅速

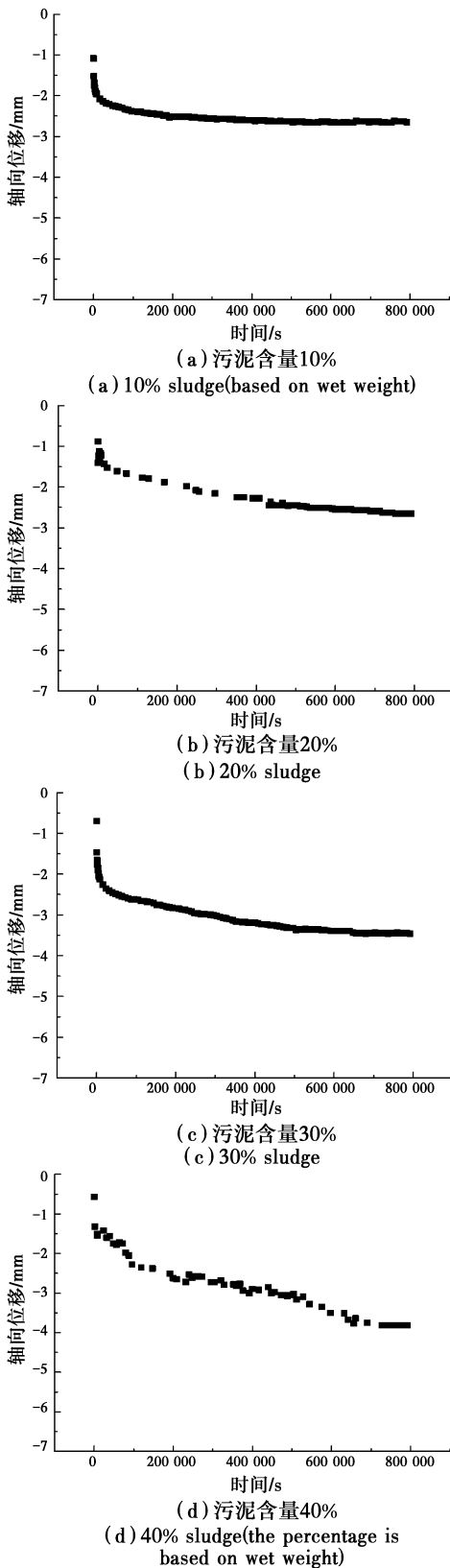


图 3 污泥/垃圾混合样固结压缩量与时间关系图

Fig. 3 Relationship between consolidation compression and time of sludge-MSM mixture samples

增大,随着时间的增加,其固结压缩量变为缓慢增加,后趋于稳定。

对于纯污泥以及污泥与垃圾混合样,其次固结系数与污泥与垃圾湿重百分含量的关系如图 4 所示。

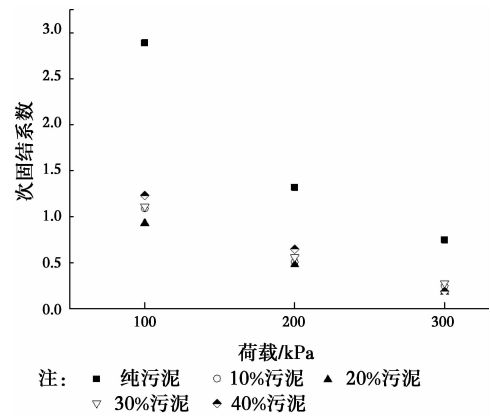


图 4 纯污泥以及不同湿重百分比的污泥垃圾混合样次固结系数与荷载关系图

Fig. 4 the relation between the secondary consolidation coefficient and load of sludge and sludge-MSM mixture samples

图 4 显示,污泥垃圾混合样的次固结系数均远小于纯污泥的次固结系数;随着污泥湿重百分比的增加,混合样的次固结系数普遍增大。

以上固结压缩实验结果表明,污泥与城市生活垃圾混合,可较好地改善污泥的固结压缩特性,但要控制污泥的填入量,污泥含量增大,混合样的压缩性会增大;污泥与城市生活垃圾混合,可较大地减小纯污泥的次固结系数,污泥与垃圾湿重百分比小时,次固结系数小,表明合宜比例的污泥与垃圾混合,可较大地改良污泥的流变特性。

### 1.3 污泥与城市生活垃圾混合样强度特性实验研究

在三轴固结不排水实验和无侧限抗压强度实验,污泥与城市垃圾混合样中污泥与垃圾湿重百分比分别为 10%、20%、30%、40%、50%,其中污泥含水率为 60%。

三轴固结不排水实验结果见表 9 所示。实验可得到污泥与垃圾混合样强度参数与污泥含量的关系,如图 5、6 所示。

表 9 污泥及污泥与垃圾混合样固结不排水实验结果  
Table 9 Cohesive force and internal friction angle of sludge and sludge-MSM mixture samples under consolidated undrained condition

	纯污泥	污泥与垃圾湿重百分比/%				
		10	20	30	40	50
C/kPa	8.14	8.71	10.32	12.65	13.26	10.73
$\varphi/(^{\circ})$	8.3	12.04	10.63	10.34	10.24	9.3

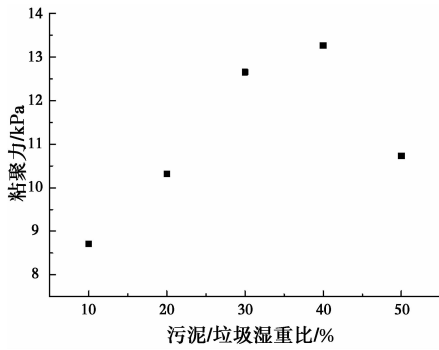


图 5 污泥/垃圾混合样粘聚力与污泥/垃圾湿重比关系图

Fig. 5 Cohesive force of sludge-MSM mixture samples under consolidated undrained condition

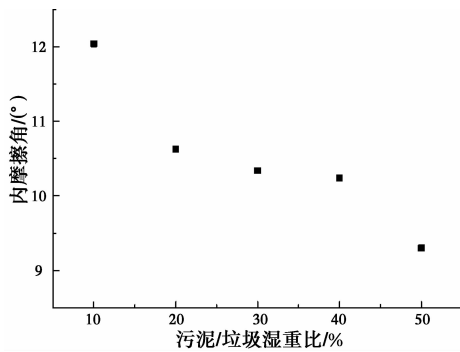


图 6 污泥/垃圾混合样内摩擦角与污泥/垃圾湿重比关系

Fig. 6 internal friction angle of sludge and sludge-MSM under consolidated undrained condition

从表 9 可知,污泥与城市垃圾混合后,混合样的粘聚力和摩擦角均要大于纯污泥的,表明污泥与城市垃圾混合,可较好改善污泥的抗剪强度。表 9 及图 5、6 显示,混合样的粘聚力随着污泥含量的增加而增加,但当污泥含量超过某一数量(本实验为 40%)时,混合样粘聚力又将较大幅度降低,而混合样内摩擦角随着污泥含量的增加而减小,表明污泥含量较高时,混合样的粘聚力和摩擦角均较小,其强度较低。

对以上结果进行解读:城市垃圾中,掺入污泥时,污泥会包附在垃圾土的颗粒表面,形似类似的“膜”,随着污泥含量的增大,这层“膜”会越来越完整,污泥在垃圾混合样中所发挥的作用将越来越大。有机质的黏性性质大约只有粘性土的几分之一,污泥含量越高,混合样中的有机质含量就越大,从而导致高污泥含量混合样的粘聚力相比低污泥含量的混合样必将大为降低。另外,污泥中的有机质在混合样的土颗粒之间会起到“润滑剂”的作用,因此,随

着污泥含量的增大,有机质增多,此润滑作用将越显著,从而混合样的摩擦角将随着污泥含量的增加而降低。三轴固结不排水主应力差与轴向应变关系曲线如图 7 所示。从图 7 的主应力差与轴向变形曲线可以看出,在试验的应变范围内混合试样并没有出现明显的破坏面,且应力-应变曲线为加工硬化形,主应力差随着轴向变形的增大而持续变大,在试验范围内未出现峰值,其应力-应变曲线接近于垃圾土的性质。

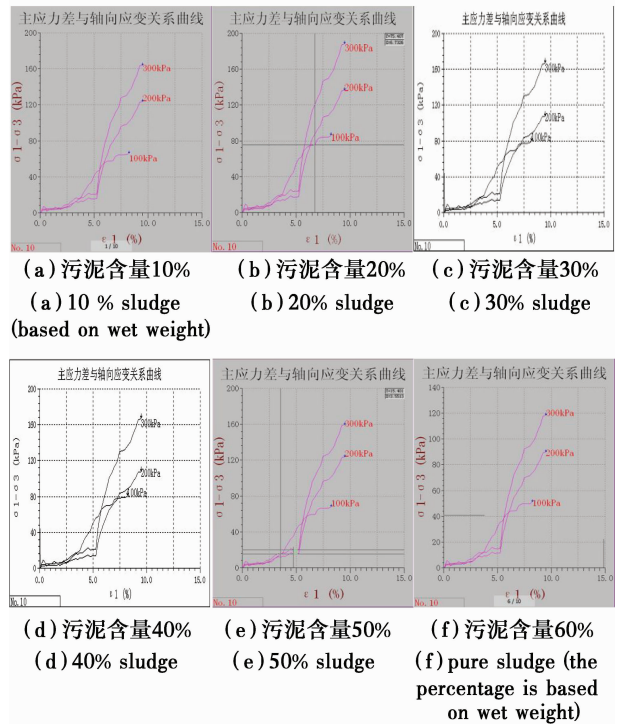


图 7 三轴固结不排水主应力差与轴向应变关系  
Fig. 7 The main differential stress and axial strain of sludge-MSM mixture samples under consolidated undrained condition

无侧限抗压强度实验:共分 6 组,每组 3 个平行样。尺寸:直径 40 mm,高度 10 cm。无侧限抗压强度实验结果如表 10 和图 8 所示。

表 10 污泥及污泥-垃圾混合样的无侧限抗压强度  
Table 10 The unconfined compressive strength of sludge and sludge-MSM mixture samples

	污泥与垃圾湿重百分比/%					
	纯污泥	10	20	30	40	50
$q_u$ /kPa	3.01	3.46	3.51	3.56	3.60	3.54

上述图表显示,随着污泥含量的增加,混合样的无侧限抗压强度增大,但增加到一定值后,随着污泥

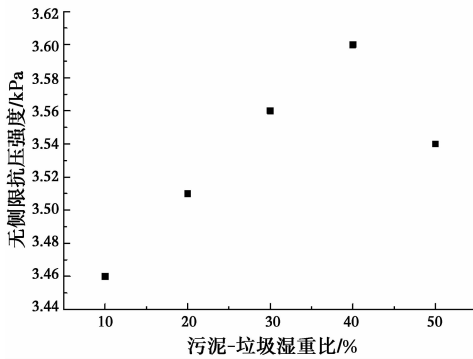


图 8 污泥-垃圾混合样的  
无侧限抗压强度

Fig. 8 the unconfined compressive strength of  
sludge-MSM mixture samples

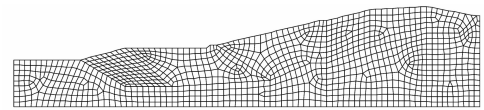


图 10 网格划分图

Fig10 Grid partitioning of the model

表 11 垃圾混合样参数

Table 11 The parameters of sludge-MSM  
mixture sample

污泥百分比/%	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$C/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$
10	13.2	8.71	12.04
20	14.3	10.32	10.63
30	15.1	12.65	10.34
50	15.9	10.73	9.30

含量的进一步增加,其  $q_u$  值会显著降低。解读:污泥填入城市生活垃圾,污泥含量不高时,随着污泥含量的增加,流动性较强的污泥细颗粒能更好地填充垃圾土颗粒之间的空隙,促进各组分间能更紧密排列,从而使混合样粘聚力增大,无侧限抗压强度增大;但随着污泥含量的增大,污泥在混合样中的作用将渐趋呈主导,污泥的“膜”作用及其有机质的润滑作用将越趋增大,从而导致其无侧限抗压强度显著下降。

## 2 污泥与垃圾混填边坡的 ANSYS 数值模拟分析

污泥与垃圾混填边坡的 ANSYS 数值模拟,坡角为  $15.5^\circ$ ,边坡形状及计算模型如图 9 所示。弹性模量  $E=15 \text{ MPa}$ ,泊松比 0.3。计算范围取坡脚向左延伸 40 m,深度取坡脚以下 30 m,模型总宽 280 m。左、右边界仅约束水平位移,底部边界约束水平和竖直位移。网络划分见图 10 所示。Plane42 单元,分成 1 139 个单元,1 233 个节点。模型按平面应变考虑。

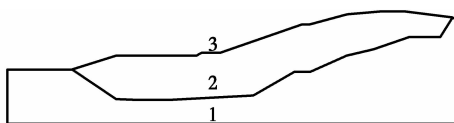


图 9 边坡计算模型

Fig. 9 Calculation model of slope

污泥与垃圾混填边坡的计算参数见表 11,表中的参数取自固结不排水实验结果,其中的强度指标如表 9 所示。

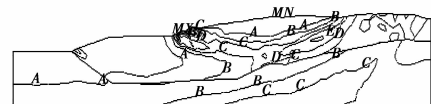
不同混合比数值模拟如下:

当混合比为 10% 时,破坏时等效塑性应变、变形图如图 11~13,软件计算得安全系数  $F_s=2.1$ 。

当混合比为 20% 时,破坏时等效塑性应变、变形图如图 14~16,软件计算得安全系数  $F_s=2.03$ 。

当混合比为 30% 时,破坏时等效塑性应变、变形图如图 17~19,软件计算得安全系数  $F_s=2.13$ 。

当混合比为 50% 时,破坏时等效塑性应变、变形图如图 20~22,安全系数  $F_s=1.56$ 。



注:  $A=0.006488$ ;  $B=0.019463$ ;  $C=0.032439$ ;  
 $D=0.045414$ ;  $E=0.05839$ ;  $F=0.071365$ ;  
 $G=0.084341$ ;  $H=0.097316$ ;  $I=0.110292$

图 11 混合比 10% 破坏等效塑性应变

Fig. 11 Plastic strain of the equivalent destruction  
of the sludge-MSM mixture sample (10% wet sludge)

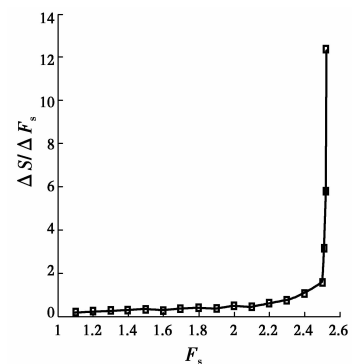


图 12 混合比 10%  $\Delta S/\Delta F_s$  与  $F_s$  关系

Fig. 12 The relationship between  $\Delta S/\Delta F_s$   
and  $F_s$  (10% wet sludge)

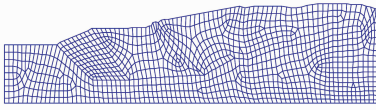


图 13 混合比 10%破坏时变形图

Fig. 13 Deformation of the destruction of the sludge-MSM mixture sample (10% wet sludge)



注: A=0.006 39; B=0.019 171; C=0.319 52;  
D=0.044 732; E=0.057 513; F=0.070 293;  
G=0.083 074; H=0.095 855; I=0.108 635

图 14 混合比 20%破坏等效塑性应变  
Fig. 14 Plastic strain of the equivalent destruction (20% wet sludge)

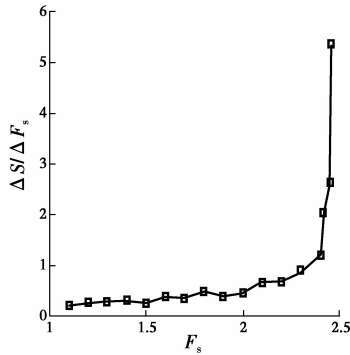


图 15 混合比 20%ΔS/ΔFs 与 Fs 关系  
Fig. 15 The relationship between ΔS/ΔFs and Fs (20% wet sludge)

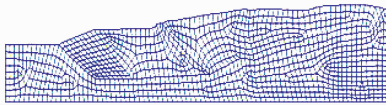


图 16 混合比 20%破坏时变形图

Fig. 16 Deformation of the destruction of the sludge-MSM mixture sample (20% wet sludge)



注: DMX=3.762;SMX=-.141 815;A=0.007 879;  
B=0.023 636;C=0.039 393;D=0.055 15;  
E=0.070 907;F=0.086 665;G=0.102 422;  
H=0.118 179;I=0.133 936

图 17 混合比 30%破坏等效塑性应变  
Fig. 17 Plastic strain of the equivalent destruction of the sludge-MSM mixture (30% wet sludge)

由上述的数字模拟分析结果可知,污泥含量为 10%、30%左右的混填边坡的安全系数较高,但当污

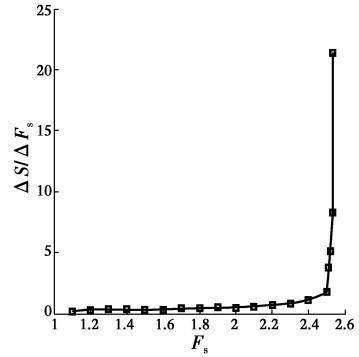


图 18 混合比 30%ΔS/ΔFs 与 Fs 关系  
Fig.18 The relationship between ΔS/ΔFs and Fs (30% wet sludge)

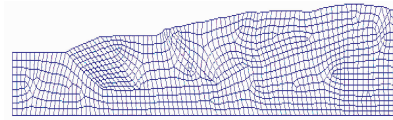


图 19 混合比 30%破坏时变形图

Fig. 19 Deformation of the destruction of the sludge-MSM mixture sample (30% wet sludge)



注: A=0.012 307;B=0.036 921;C=0.061 536;  
D=0.086 15;E=0.110 764;F=0.135 379;  
G=0.159 993;H=0.184 607;I=0.209 222

图 20 混合比 50%破坏等效塑性应变  
Fig. 20 Plastic strain of the equivalent destruction of the mixture (50% wet sludge)

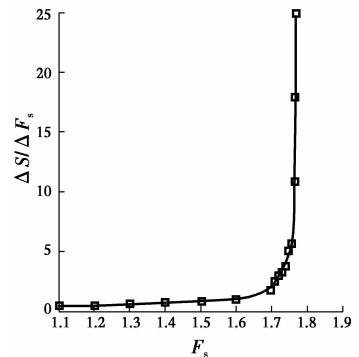


图 21 混合比 50%ΔS/ΔFs 与 Fs 关系  
Fig. 21 The relationship between ΔS/ΔFs and Fs (50% wet sludge)

泥含量增大到 50%时,其安全系数会激剧下降。因此,污泥与垃圾混合填埋时,一定要控制污泥的掺入量,以确保填埋体边坡的稳定安全。



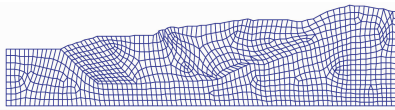


图 22 混合比 50%破坏时变形图

Fig. 22 Deformation of the destruction of the sludge-MSM mixture sample(50% wet sludge)

### 3 结 论

1)通过污泥及其与城市生活垃圾土混合样的压缩及强度等实验,获取了污泥及其与城市生活垃圾土混合样的物理、力学性质指标,为全面了解污泥城市垃圾混合样的土工性质提供重要基础数据。

2)对污泥与城市垃圾混合样的变形、强度随污泥掺入量的变化规律进行实验与分析,从而对混合填埋时污泥与城市生活垃圾的适宜混合比作了探索性研究:合宜比例的污泥与垃圾混合,可较好地改善污泥的流变特性和强度。

3)通过污泥与垃圾混填边坡的 ANSYS 数值模拟分析可知,污泥含量为 10%、30%左右的混填边坡的安全系数较高,但当污泥含量增大到 50%时,其安全系数会骤然下降。因此,污泥与垃圾混合填埋的实际工程,一定要结合混合样的固结压缩特性、强度特性试验和边坡稳定计算结果,控制污泥的适宜掺入比例,以确保填埋体边坡的稳定安全。

#### 参考文献:

- [1] 彭晨. 城市生活垃圾与污水厂污泥一体化处理试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.  
PENG C. Study on the integrated treatment of municipal solid waste and sewage sludge [D], Chongqing: Chongqing University,2013. (in Chinese)
- [2] 胡佳佳,白向玉,刘汉湖,等. 国内外城市剩余污泥处置与利用现状[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2009,24(2):45-49.  
HU J J, BAI X Y, LIU H H, et al. Analysis of urban residual sludge disposal and utilization of both home and abroad [J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology(Natural Sciences Edition), 2009, 24(2): 45- 49. (in Chinese)
- [3] JUAN Q D, PICKER S T, THOMAS Z F. Evaluation of paper sludge landfill cover settlement [J]. Geotechnical Special Publication,2000,105: 16-31.
- [4] JUAN Q D. Shear strength, slope stability and consolidation behavior of paper mill sludge landfill Covers [M]. Rensselaer Polytechnic Institute,

USA, 2000.

- [5] 单华伦. 污泥和生活垃圾混合填埋及淋滤液回灌对填埋体稳定化影响[D]. 南京:河海大学,2007.  
SHAN H L. Effects on stabilization of body of landfill co-disposal of municipal solid waste and sewage sludge leachate recirculation [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese)
- [6] 徐华亭. 造纸白泥与生活垃圾混合填埋研究[D], 济南: 山东轻工业学院,2012.  
XU H T. Research on co-landfilling of lime mud from paper-making and municipal solid waste [D]. Jinan: Shandong Institute of Light Industry, 2012. (in Chinese)
- [7] 吴正松,智悦,何强,等. 城镇生活垃圾与污水厂污泥一体化处理反应器开发[J]. 重庆大学学报,2013, 36(1): 127-132.  
WU Z S, ZHI Y, HE Q, et al. Development of integrated reactors for domestic garbage and town sludge [J]. Journal of Chongqing University, 2013,36 (1):127-132 (in Chinese)
- [8] KAVITHA S, KUMAR S A, KALIAPPAN S, et al. Improving the amenability of municipal waste activated sludge for biological pretreatment by phase-separated sludge disintegration method [J]. Bioresource Technology, 2014,169:700-706.
- [9] MARTIND J. A novel mathematical model of solid-state digestion [J]. Biotechnology Letters, 2000, 22 (1):91-94.
- [10] KONG S T, CAI P, ZHAO L J, et al. Gasifying kinetics analysis on mixing municipal solid waste and sludge [J]. Advanced Materials Research, 2013, 650: 629-633.
- [11] FANG S W. Thermogravimetric analysis of the co-pyrolysis of paper sludge and municipal solid waste [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 101 (1):626-631.
- [12] ZUHAIB S. Optimisation of biomethane production admixing organic fraction of municipal solid waste and sewage sludge [J]. NED University Journal of Research,2012(1):73-80.
- [13] 李耕宇. 不同污泥负荷下常温厌氧活性污泥对生活垃圾填埋渗滤液处理效果研究 [D]. 西安:长安大学,2013.  
LI G Y. Experiment research on different sludge loading of anaerobic activated sludge treatment of landfill leachate [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)

- [14] 朱英,张华,赵由才. 污泥循环卫生填埋技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.  
ZHU Y, ZHANG H, ZHAO Y C, Sewage sludge recycling technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2010. (in Chinese)
- [15] 谢震震,张华. 污泥和粉煤灰混合填埋稳定化过程模拟实验研究[J]. 资源节约与环保,2015(2):18.  
XIE Z Z, ZHANG H. Simulation experiment study on stabilization of sludge and fly ash mixed landfill [J]. Resource Saving and Environmental Protection, 2015 (2):18. ( in Chinese )
- [16] IRENE M C L, ZHOU W W, LEE K M. Geotechnical characterization of dewatered sewage sludge for landfill disposal [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39 (5):1139-1149.
- [17] 张华. 污泥改性及其在填埋场中的稳定化过程研究 [D]. 上海:同济大学,2007.  
ZHANG H. Geotechnical properties transformation and stabilization process of sewage sludge in lysimeters[D]. Shanghai:Tongji University, 2007. (in Chinese)

(编辑 胡 玲)