

填埋污泥固化改性作回填土工程特性与环境风险

王磊^{1,2}, 谭学军¹, 郑晓光¹

[1.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092; 2.上海申环环境工程有限公司, 上海市 200092]

摘要:上海某城镇污水处理厂自2004年开始填埋脱水污泥,2010年填埋场封场,近期拟征用填埋场土地,需将污泥挖出进行二次处理。针对填埋污泥开展固化改性研究,分析改性产物用作回填土的技术可行性和环境风险,得到以下主要结论:填埋污泥7d无侧限抗压强度仅为0.1MPa,不满足机械作业要求,且无法压实。参加5%固化剂后,污泥强度提高至0.9MPa,可满足机械作业以及各种不同等级道路路基要求,碾压后较为平整密实。进一步提高固化剂比例至7.5%,强度提高至1.9MPa,碾压后平整度更好。污泥中重金属含量均低于建设用地筛选值以及园林绿化用泥质标准限值,硫酸根离子、碳酸氢根离子、氯离子、镁离子的腐蚀等级均为微,用作回填土的环境风险较小。污泥填埋过程中经过10余年降解,有机物含量从50%~55%降低至32.90%,仍然高于建筑地基基层材料对有机质的要求,不宜直接用于有压实要求的回填区域。

关键词:污水厂;污泥;填埋;固化;回填土

中图分类号: TU992.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)01-0192-05

0 引言

城镇污水处理过程伴随产生大量的副产物污泥,2020年我国污水处理厂产生污泥干固体总量达到1162.77万t^[1]。早期我国污泥以填埋为主,侵占了大量土地资源^[2]。随着城镇化建设推进,许多填埋场面临着二次开发问题,历史填埋的污泥亟需寻找出路。

上海某城镇污水处理厂自2004年开始在厂内填埋脱水污泥,2010年填埋场覆膜封场。近来由于污水厂改扩建亟需征用填埋场土地,拟将填埋污泥挖出进行二次处理处置。污泥处置方式主要包括焚烧、土地利用和建材利用^[3]。经过长时间填埋,污泥中有机物逐渐降解^[4],热值相应大幅降低,焚烧经济效益较差。填埋污泥中仍然富集有重金属等污染物,农用、园林绿化等土地利用存在环境风险,且消纳量随季节波动稳定性差。污泥建材利用主要将污泥作为辅料烧制水泥熟料、制砖、制陶粒等^[5],极度依赖水泥窑、砖窑等设施,且污泥掺加比例较低^[6],消纳量有限。与新鲜污泥相比填埋污泥处理处置更加困难^[7],然而目前污泥处理处置技术研究主要聚焦于新鲜污泥^[8,9],关于填埋污泥的研究却鲜有报道。

与此同时,该污水厂改扩建过程中场地平整、景观造坡、道路施工、管槽回填需要大量回填土,外购

土方既增加经济成本,土方开采过程还会破坏生态环境。利用填埋污泥制备回填土有利于破解污泥出路缺乏和工程土方短缺两大困境^[10]。河道疏浚底泥固化改性制备填方材料、回填土、路基材料目前已有较多研究^[11-13],而针对填埋污泥的研究却较少。因此,本研究针对该污水厂填埋污泥进行固化改性研究,对改性产物的工程特性和环境风险进行分析,论证填埋污泥固化改性后用作回填土的技术可行性。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用污泥取自上海某城镇污水厂的污泥填埋场。该填埋场建成于2004年,底部及四壁铺设防渗膜,填埋对象为污水厂脱水污泥,污泥含水率为80%左右,2010年该污泥填埋场覆膜封场。2021年从该填埋场取泥,用清水稀释至含水率92%,参加PAM和FeCl₃进行化学调理,然后采用隔膜压滤机进行深度脱水,进泥压力为0.8MPa,压榨压力为1.5MPa,压榨时间为120min。隔膜压滤机卸泥口所采集泥饼性质见表1。

污泥固化改性试验所用药剂为专利药剂申环固土16土壤固化剂(NOWA-SH),属钙基活性激发类复合型土壤固化剂,以钙基无机类活性材料、激发剂与外加剂为原料,经调配而成。

1.2 试验方法

污泥隔膜压滤脱水泥饼呈块状,使用ALUU破碎筛分斗进行泥饼破碎,破碎后粒径不大于10mm。

收稿日期: 2022-10-26

作者简介: 王磊(1989—),男,硕士,高级工程师,从事污泥资源化利用与土壤修复研究工作。

表 1 污泥性质		
序号	指标	数值
1	含水率 /%	(57.40 ± 0.20)
2	有机物含量 /%	(32.90 ± 0.04)
3	液限 /%	(162 ± 3)
4	塑限 /%	(93 ± 3)
5	液性指数	0.53 ± 0.17
6	塑性指数	69.5 ± 1.7
7	压缩系数	2.17 ± 0.32
8	压缩模量	2.29 ± 0.25
9	粘聚力 /kPa	6.47 ± 2.55
10	内摩擦角 /(°)	5.51 ± 1.25

将破碎后污泥分成体积约 20 m³ 的 3 个堆体,按照 0%、5%、7.5%三个药剂投加比例(药剂质量占污泥干重的比例),分别向污泥中掺加药剂并混合均匀,堆置反应 3 h,取样进行检测分析。

将污泥分别摊铺成长 10 m、宽 2 m 的条状,采用宝马格 XMR403 压路机(型号 ZN490B,工作质量 4 t)进行分层碾压,每层最大压实厚度为 200 mm,且不小于 100 mm。每层污泥均碾压 10 遍(5 个来回),下层污泥碾压完成后,摊铺上层污泥碾压,直至污泥最终总厚度达到 500~600 mm,考察污泥压实效果。

现场试验过程照片见图 1。



图 1 试验过程照片

1.3 检测方法

检测项目和检测方法见表 2。

2 结果与讨论

2.1 最大干密度与最优含水率

土工击实试验过程将不同含水率的土样分别击实,再将击实后的土样分别检测干密度,其中最大干密度土样的含水率称为最优含水率。含水率低于最优含水率时,土中的粘粒扩散层不能够充分发展,团

表 2 检测方法		
检测项目	测定方法	方法来源
含水率①	重量法	CJ/T 221
有机物含量	重量法	CJ/T 221
最优含水率	击实试验	T0131—2007
最大干密度		
无侧限抗压强度	无侧限压缩试验	JTG E51—2009
总镉	石墨炉原子吸收分光光度法	GB/T17141—1997
总汞	冷原子吸收分光光度法	GB/T17136—1997
总铅	石墨炉原子吸收分光光度法	GB/T17141—1997
总铬	火焰原子吸收分光光度法	GB/T17137—1997
总砷	硼氢化钾—硝酸银分光光度法	GB/T17135—1997
总铜	火焰原子吸收分光光度法	GB/T17138—1997
总锌	火焰原子吸收分光光度法	GB/T17138—1997
总镍	火焰原子吸收分光光度法	GB/T17139—1997
钙离子、镁离子	EDTA 配位滴定法	T0156—1993
氯离子	硝酸银滴定法	T0155—1993
硫酸根离子	EDTA 间接配位滴定法	T0159—1993
碳酸(氢)根离子	易溶盐碳酸根及碳酸氢根的测定	T0154—1993
钠离子和钾离子	火焰光度法	T0160—1993

注:①含水率 = 水分质量 / 干土质量 × 100%

粒结构间作用力强,土体很难压实;含水率高于最优含水率时,团粒间作用力减小,颗粒趋于定向排列,孔隙比增大,密度减小^[11]。土方回填时,应尽可能使填料含水率接近最优含水率,填筑压实后才能达到最佳效果。

本研究分别针对不掺加固化剂和掺加 5% 固化剂的污泥开展击实试验,结果见图 2。不掺加固化剂的污泥通过标准击实试验测得最大干密度为 0.92 g/cm³,最优含水率为 57.4%;掺加 5% 固化剂后,最大干密度为 0.99 g/cm³,最优含水率为 51.4%,与不掺加固化剂相比最大干密度提高了 7.6%,最优含水率降低了 10.4%。易进翔等^[14]利用普通硅酸盐水泥固化污水厂脱水污泥,也发现固化污泥的干密度随着水泥材料掺加量的增加而增加、孔隙比随着掺加量的增加而减少。

2.2 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度是试样在无侧向压力情况下,

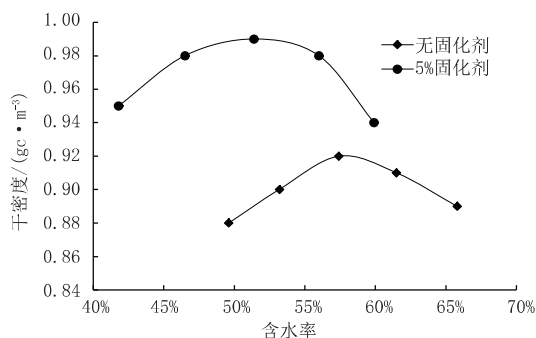


图2 击实试验结果

抵抗轴向压力的极限强度。目前尚无标准规范对回填土的强度进行规定,林安珍等^[11]提出回填土的强度应不小于 0.2 MPa,以满足车辆、机械等进场作业要求。《城镇道路路面设计规范》(CJJ 169—2012)对基层材料强度进行了严格规定,石灰稳定类材料用于轻交通的下基层材料时 7 d 无侧限抗压强度值应不小于 0.7 MPa,而用于重、中交通的下基层材料时强度值应不小于 0.8 MPa。

参加不同比例固化剂后污泥 7 d 无侧限抗压强度检测结果见图 3。不参加固化剂的污泥强度很低,仅为 0.1 MPa,无法满足车辆、机械进场作业要求。参加 5%比例固化剂之后,污泥强度提高至 0.9 MPa;进一步提高药剂比例至 7.5%,强度提高至 1.9 MPa。随着固化剂掺量提高,污泥的强度呈现明显的升高趋势,不仅可满足车辆机械作业要求,还可满足道路下基层材料的强度要求。

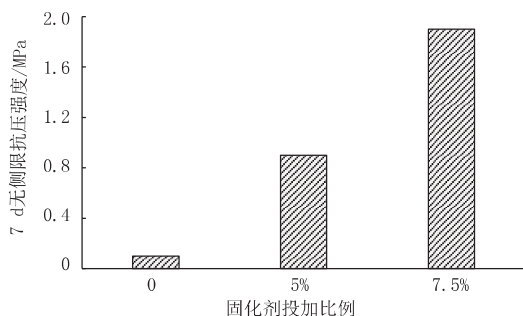


图3 无侧限抗压强度检测结果

2.3 现场压实效果

参加不同比例药剂后污泥压实效果见图 4。不参加固化剂工况下,污泥较为松软,碾压过程中弹性较大,无法压实,且污泥极易粘结在压路机滚轮上,碾压后污泥表面粗糙龟裂。参加 5%和 7.5%固化剂后,污泥抗压强度显著增强,碾压过程中粘结滚轮现象明显改善,碾压后污泥较为密实,表面也较为平整光滑。药剂投加量越大,碾压后密实度和平整度越好。

2.4 有机物含量

研究对象污水厂新鲜污泥有机物含量约 50%~



图4 污泥压实表现效果

55%,而本研究所取填埋污泥有机物含量为 32.90%,这可能是由于污泥经过 10 余年填埋过程,易降解有机物发生了厌氧生物降解。朱英等^[14]研究发现,污泥填埋 700 d 后挥发性有机物和总有机碳的含量分别从 44.7%和 23.5%降低至 24.2%和 13.5%。齐文杰等^[15]认为,污泥在填埋场中经过长期的降解后达到稳定化,形成矿化污泥,污泥填埋场达到稳定化所需时间约为 3 a。本研究污泥填埋时间长达 10 余年,推测污泥已经达到稳定化,剩余有机物主要以难生物降解有机物为主。因此,污泥固化改性作为回填土后,有机物短时间内迅速降解产生大量甲烷、恶臭气体的可能性较小。

《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2018)规定:临时性建筑设计使用年限为 5 a,易于替换结构构件的建筑设计使用年限为 25 a,普通房屋和构筑物的设计使用年限为 50 a。在较长的时间尺度下,污泥中残留的难降解有机物在微生物的作用下仍然会发生缓慢的降解。冉孟胶等^[16]研究发现,填埋固化污泥用作地基土时,因有机质降解引起的不均匀沉降不可忽略,需考虑地基长期稳定性。《土方及爆破工程施工及验收规范》(GB 50201—2012)规定:有机质含量大于 8%的土,不应用于有压实要求的回填区域。本研究中填埋场污泥有机物含量为 32.90%,参加固化剂后有机物含量略微降低至 27.73%,但仍然无法满足建筑地基要求,只能用于没有压实要求的回填区域。

2.5 重金属含量

污泥中重金属含量是制约处置出路的重要因素。重金属检测结果见表 3,各项重金属的检出浓度均低于《城镇污水处理厂污泥泥质》(GB 28188—

2009)中相应限值,与该污水厂处理对象为生活污水的特点相一致。掺加固化剂后污泥中重金属含量略有降低,这可能是由于固化剂对污泥产生了稀释作用。

目前国内尚无针对回填土的重金属评价标准。《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600—2018)规定了保护人体健康的建设用地土壤污染风险筛选值,第一类用地筛选值适用于居

表 3 污泥重金属含量检测结果

项目	GB 28188—2009 污水厂污泥泥质	GB /T 23486—2009 园林绿化用泥质		GB 36600—2018 建设用地筛选值		固化剂掺加比例		
		pH<6.5	pH≥6.5	第一类用地	第二类用地	0	5%	7.5%
总镉	<20	<5	<20	20	65	1.81	1.60	1.60
总铅	<1 000	<300	<1 000	400	800	75	67	65
总铬	<1 000	<600	<1 000	—	—	120	104	89
总镍	<200	<100	<200	150	900	55	63	33
总锌	<4 000	<2 000	<4 000	—	—	1 192	1 038	1 022
总铜	<1 500	<800	<1 500	2 000	18 000	417	370	365
总汞	<25	<5	<15	8	38	1.70	1.60	1.59
总砷	<75	<75	<75	20	60	5.87	5.78	5.80

注:“—”代表无相应评价标准。

住用地、中小学用地、医疗卫生用地、社区公园等,第二类用地筛选值适用于工业用地、物流仓储用地、道路与交通设施用地等。建设用地筛选值中未对总铬和总锌含量进行规定,其余重金属指标含量均不超过第一类用地和第二类用地限值,可满足各种建设用地要求。此外,考虑到部分区域土方回填之后可能会种植绿化植物,因此与《城镇污水处理厂污泥处置园林绿化用泥质》(GB /T 23486—2009)进行比对,结果表明污泥各项重金属指标均可满足园林绿化用泥质要求。

2.6 易溶盐含量

污泥中含有易溶盐,作为回填土存在腐蚀建筑材料的风险,例如硫酸根离子、碳酸氢根离子、镁离子等会腐蚀混凝土结构,氯离子会腐蚀钢筋混凝土中的钢筋。因此,本研究针对改性前后污泥中易溶盐含量进行分析,并根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)进行腐蚀性评估,结果见表 4。污泥固化改性前后各易溶盐指标相差不大,碳酸根离子、碳酸氢根离子、硫酸根离子、氯离子、镁离子的腐蚀等级均为微,对混凝土、钢筋等建筑材料的腐蚀性较小。

2.7 可行性分析

研究对象污泥取自上海某城镇污水厂的污泥填埋场,该污水厂主要处理市政污水,自 2004 年至 2010 年产生的污泥脱水至含水率 80%左右,进行填埋封存。因污水厂改扩建亟需用地,拟将填埋污泥挖出,深度脱水后进行固化改性,用作场地平整、景观

表 4 易溶盐含量检测结果 单位:mg/kg

药剂 投加 比例	碳酸 根离 子	碳酸 氢根 离子	硫酸 根离 子	氯离 子	钙离 子	镁离 子	钠离 子	钾离 子
0%	0.00	0.46	1.98	0.25	3.72	1.42	40.23	42.37
5%	0.00	1.41	1.93	0.27	3.90	2.07	46.83	53.99
7.5%	0.00	1.25	1.78	0.10	3.52	1.83	50.37	57.99
腐蚀 等级	微	微	微	微	—	微	—	—

注:“—”代表无相应评价标准。

造坡、道路施工、管槽回填等回填土。本研究对改性产物的工程特性和环境风险进行分析,论证填埋污泥固化改性后用作回填土的技术可行性。

(1)工程特性

污泥中粉性土或粘性土等细粒土含量偏高,抗剪切强度较低,回填过程中挖土机、装载车等机械难以直接在污泥上进行施工操作,回填后也无法压实。掺加固化剂后,污泥的 7 d 无侧限抗压强度明显提高,不仅可满足车辆机械作业要求,还可满足各种不同等级道路路基对填料强度的要求,现场碾压过程中污泥粘结滚轮现象明显改善,碾压后污泥较为平整密实。掺加 5%固化剂后,污泥最大干密度为 0.99 g/cm³,最优含水率为 51.4%,污泥强度提高至 0.9 MPa,可满足各种不同等级道路路基层位对填料强度的要求。进一步提高药剂比例至 7.5%,强度提高至 1.9 MPa,碾压后密实度和平整度更好。

然而,填埋污泥有机物含量为 32.90%,在较长的时间尺度下,污泥中残留的难降解有机物仍然会发生缓慢的降解,可能影响填土基础的稳定性,只能用

于没有压实要求的回填区域,如场地平整、景观造坡、绿化填土或临时设施垫层等,无法作为永久性建构筑物、道路、管沟的垫层,应用场景较为有限。将污泥与黄土、石灰、建筑渣土等无机材料混合可以降低有机物含量,扩大适用回填范围。程冠军等^[17]向污泥中掺加 30% 的黄土和 6%~10% 的水泥基改性固化剂,实验发现污泥改性处理后其强度完全满足道路填料要求。

(2) 环境风险

污泥填埋时间长达 10 余年,现场从填埋场取泥时,填埋区存在明显的泥水分界面,污泥层上部有 1.0~2.2 m 深的污泥水,污泥水上部与覆膜之间的污泥气存在明显臭味,经检测致臭组分主要为氨气(154 mg/m³)和甲硫醇(6.8 mg/m³),但污泥本身散发臭味并不明显,结合类似研究推测污泥已经达到稳定化^[4,15],剩余有机物主要以难生物降解有机物为主。污泥固化改性作为回填土后,有机物短时间内迅速降解产生大量甲烷、恶臭气体,进而造成安全和环境风险的可能性较小。

污泥中各项重金属指标可满足第一类和第二类建设用地筛选值以及园林绿化用泥质标准限值,可用于各种类型建设用地。此外,污泥填埋过程中重金属的生物可利用性会进一步降低^[18],因此重金属污染风险相对较小。污泥固化改性前后各易溶盐指标相差不大,碳酸根离子、碳酸氢根离子、硫酸根离子、氯离子、镁离子的腐蚀等级均为微,对混凝土、钢筋等建筑材料的腐蚀性较小。

3 结 论

(1) 填埋污泥较为松软,7 d 无侧限抗压强度仅为 0.1 MPa,碾压过程中弹性较大,无法压实。掺加 5% 固化剂后,污泥最大干密度为 0.99 g/cm³,最优含水率为 51.4%,污泥强度提高至 0.9 MPa,可满足机械作业以及各种不同等级道路路基对填料强度的要求,碾压后污泥较为平整密实。进一步提高药剂比例至 7.5%,强度提高至 1.9 MPa,碾压后平整度更好。

(2) 污泥中各项重金属均可满足第一类和第二类建设用地筛选值以及园林绿化用泥质标准限值,可用于各种类型建设用地。污泥固化改性前后各易溶盐含量相差不大,碳酸根离子、碳酸氢根离子、硫酸

根离子、氯离子、镁离子的腐蚀等级均为微,对混凝土、钢筋等建筑材料的腐蚀性较小。

(3) 污泥经过 10 余年填埋过程,有机物从 50%~55% 降低至 32.90%,散发臭味已不明显,但有机物含量仍然较高,只能用于没有压实要求的回填区域。

参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部.2020 年城乡建设统计年鉴[EB].北京,2020.
- [2] 赵乐军,戴树桂,辜显华.污泥填埋技术应用进展[J].中国给水排水,2004,20(4):27-31.
- [3] 何强,吉芳英,李家杰.污泥处理处置及资源化途径与新技术[J].给水排水,2016,52(2):1-3.
- [4] 朱英,赵由才,李鸿江,等.污泥填埋稳定化过程中的物理、化学性变化[J].生态环境学报,2009,18(4):1207-1212.
- [5] 涂兴宇,朱南文,袁海平.污泥建材利用途径与评价[J].净水技术,2014,33(4):30-35.
- [6] 钱觉时,谢从波,谢小莉,等.城市生活污水污泥建材利用现状与研究进展[J].建筑材料学报,2014,17(5):829-836,891.
- [7] WU Y,ZHANG X,ZHANG X,et al.Novel insights into enhanced de-waterability and consolidation characteristics of landfill sludge and fresh sludge conditioned by Fe²⁺ activated sodium persulfate [J]. Journal of Environmental Management,2021,296:113196.
- [8] 杨芸,张华.上海市污水污泥填埋的改性剂与工程应用[J].环境卫生工程,2008,16(5):43-46.
- [9] 马培东,王里奥,黄川,等.改性污泥用作垃圾填埋场日覆盖材料的研究[J].中国给水排水杂志,2007,23(23):38-42.
- [10] 郑晓光,水亮亮,任奇.工程渣土在道路工程中的资源化利用与性能分析[J].上海公路,2020,4(4):65-67,150.
- [11] 林安珍,郑荣跃,黄亦真.固化疏浚泥作为填方材料的试验研究[J].宁波大学学报(理工版),2006,19(4):525-528.
- [12] 聂怀军,赖伟信,彭芳鹏,等.粉煤灰-疏浚泥协同固化制备回填土的研究[J].粉煤灰综合利用,2020,34(6):74-78.
- [13] 丁慧,孙秀丽,刘文化,等.固化疏浚泥作路基材料工程特性试验研究[J].土木建筑与环境工程,2017,39(2):11-18.
- [14] 易进翔,杨康迪.固化污泥填埋处置中的压实特性研究[J].水利与建筑工程学报,2013,11(1):70-73.
- [15] 齐文杰.对青凝侯污泥填埋场可持续发展的思考[J].城市,2011(10):49-52.
- [16] 冉孟胶,林署炯,陈剑尚,等.填埋固化污泥的物质组成及物理力学性质——以深圳福永污泥填埋场为例[J].桂林理工大学学报,2018,38(1):106-111.
- [17] 程冠军,程钰.污泥填筑路基的路用性能初步研究[J].工程建设与设计,2020(19):155-157.
- [18] SWATI A.,HAIT S.Fate and bioavailability of heavy metals during vermicomposting of various organic wastes—A review [J].Process Safety & Environmental Protection,2017,109: 30-45.