

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.01.012

改良垃圾焚烧底渣固化疏浚淤泥性能试验研究

王瑞彩^{1,2}, 吴 腾^{1,2}

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学疏浚技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于以废治废理念, 提出了用改良垃圾焚烧底渣固化疏浚淤泥的新思路, 并开展了室内试验研究, 测定了固化淤泥试样的含水率、无侧限抗压强度及抗剪强度指标。试验结果表明: 垃圾焚烧底渣磨细粉和未研磨的原渣按 1:1 比例混合时, 具有最优的固化性能; 在最优混合比条件下, 固化淤泥的无侧限抗压强度、黏聚力和内摩擦角均随龄期和改良垃圾焚烧底渣掺入比的增加而增大, 含水率则相反; 当改良垃圾焚烧底渣掺入比为 35% 时, 固化淤泥 28 d 无侧限抗压强度达到了 58.4 kPa, 含水率由 67.4% 降至 38.0%, 采用改良垃圾焚烧底渣固化疏浚淤泥是可行的。

关键词: 疏浚淤泥固化; 垃圾焚烧底渣; 含水率; 无侧限抗压强度; 黏聚力; 内摩擦角

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)01-0093-08

Experimental study on the performance of solidified dredged sludge by improved municipal solid waste incineration bottom ash

WANG Ruicai^{1,2}, WU Teng^{1,2}

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Engineering Research Center of Dredging Technology of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the concept of treating waste with waste, this paper proposes a new idea to solidify the dredged sludge with the improved municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash. Laboratory tests were carried out to measure the moisture content, unconfined compressive strength and shear strength parameters of solidified dredged sludge. The results show that the best solidification effect is obtained when the pulverized powder and the unground powder of the MSWI bottom ash are mixed at 1:1. Under the condition of the optimal mixture ratio, the unconfined compressive strength, cohesion and internal friction angle of the solidified dredged sludge increase with the increase of the curing times and the content of improved MSWI bottom ash, while the change trend of moisture content is on the contrary. When the content of the improved MSWI bottom ash is 35%, the unconfined compressive strength of solidified sludge after 28 curing days can reach 58.4 kPa, and the moisture content decreases from 67.4% to 38.0%, which proves the feasibility of using the improved MSWI bottom ash to solidify the dredged sludge.

Key words: dredged sludge solidification; MSWI bottom ash; moisture content; unconfined compressive strength; cohesion; internal friction angle

由于大规模工程建设及河流湖泊治理, 我国每年都会产生大量的疏浚淤泥^[1-4], 这些淤泥具有含水率高、力学性能差等特点, 内陆地区主要采用陆上抛泥处置法进行处理, 需要占用大量土地, 且会破坏周围的生态环境。此外, 抛泥区存在固化周期长及力学强度低的问题^[5-6], 可通过向疏浚淤泥中添加水泥、石灰、粉煤灰、磷石膏等固化材料的方法^[7-13] 缩短其固化周期、降低含水率、提高力学强度, 同时可减小固化淤泥的干缩, 但水泥、石灰、粉煤灰等作为主材固化剂成本较高, 会造成资源浪费, 而磷石膏会带来环境污染问题。

垃圾焚烧底渣是城市生活垃圾经过高温焚烧之后留下的剩余物, 具有含水率低和疏松多孔的特点, 含有一定量的火山灰活性成分, 加入淤泥后可以起到一定的固化作用^[14]。作为一种固体废弃物, 垃圾焚烧底渣的浸出毒性小于危险废弃物浸出毒性标准值, 对环境污染小, 因此可以进行资源化利用^[15], 用于固化疏浚淤

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52179061)

作者简介: 王瑞彩(1973—), 女, 讲师, 博士, 主要从事疏浚土资源化处理和港航结构研究。E-mail: ruicai_wang@hhu.edu.cn

通信作者: 吴腾(1979—), 男, 副教授, 博士, 主要从事生态航道研究。E-mail: wuteng@hhu.edu.cn

引用本文: 王瑞彩, 吴腾. 改良垃圾焚烧底渣固化疏浚淤泥性能试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 93-100.

WANG Ruicai, WU Teng. Experimental study on the performance of solidified dredged sludge by improved municipal solid waste incineration bottom ash[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(1): 93-100.

泥能够起到以废治废的效果。陈萍等^[16-17]将垃圾焚烧底渣作为污泥的骨架材料,通过添加水泥、石灰、石膏等固化材料来研究污泥的性能,发现适量添加垃圾焚烧底渣可以形成淤泥骨架,有效降低淤泥含水率。梁冰等^[18]用不同级配的垃圾焚烧底渣固化淤泥,发现级配良好的垃圾焚烧底渣固化效果更好。胡学涛等^[19]研究表明,垃圾焚烧底渣粗颗粒的骨架作用明显,且固化体的无侧限抗压强度和内摩擦角随着垃圾焚烧底渣颗粒粒径的增大而增大,而固化体黏聚力随着垃圾焚烧底渣粒径的增大而减小。

垃圾焚烧底渣固化淤泥的效果随着粒径的变化而变化,而垃圾焚烧底渣具有一定的火山灰活性,粉碎后其比表面积将增大,能够加速火山灰反应速率,促进胶凝物质的产生。基于此,本文提出一种垃圾焚烧底渣固化疏浚淤泥的新思路:将部分垃圾焚烧底渣进行研磨得到磨细粉(以下简称“底渣磨细粉”),和未研磨的垃圾焚烧底渣(以下简称“原渣”)按一定比例混合,通过改变粗细颗粒比例的方法,使细颗粒的火山灰活性和粗颗粒的骨架性达到最佳效果,从而提高垃圾焚烧底渣的固化效果,降低疏浚淤泥的固化成本,为疏浚淤泥资源化利用提供参考。

1 试验方法

1.1 试验材料

试验所用疏浚淤泥取自南京江心洲江边岸滩,初始含水率为 67.4%,外观为黑灰色流塑态,无摇振反应,其颗粒粒径分布曲线如图 1 所示,主要矿物成分如图 2 所示,基本物理性质如下:比重 2.7,塑限 28.3%,液限 42.7%,塑性指数 14.0,砂粒、粉粒和黏粒的质量分数分别为 0.0%、81.3% 和 18.7%。

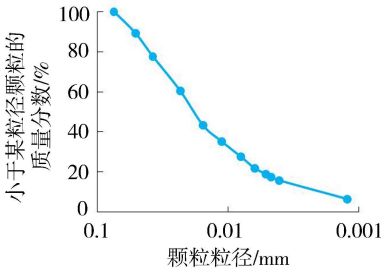


图 1 疏浚淤泥颗粒粒径分布曲线

Fig.1 Particle size distribution curve of dredged sludge

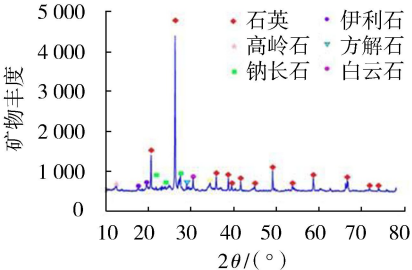


图 2 疏浚淤泥 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of dredged sludge

试验所用垃圾焚烧底渣为南京市某垃圾焚烧发电厂焚烧炉产出的底渣,不含飞灰成分,其含水率为 5.9%,主要由砂石、玻璃、陶瓷、熔融物、铁以及未燃烧的有机物组成,由颗粒筛分试验得到不同粒径组(≥ 10 mm、 $5 \sim < 10$ mm、 $3 \sim < 5$ mm、 $2 \sim < 3$ mm、 $1 \sim < 2$ mm、 $0.5 \sim < 1$ mm、 $0.25 \sim < 0.5$ mm、 < 0.25 mm)颗粒的质量分数分别为 6.5%、11.1%、8.3%、10.4%、14.3%、18.2%、14.6% 和 16.6%。垃圾焚烧底渣基本化学成分的质量分数为:Na₂O 4.4%、MgO 2.3%、Al₂O₃ 6.1%、SiO₂ 31.6%、P₂O₅ 5.7%、CaO 33.7%、Fe₂O₃ 6.6%、其他氧化物 9.7%。

1.2 试样制备

无侧限抗压强度试验土样模具为 80 mm 高的钢制三瓣模,快剪土样模具为内径 80 mm 的 PVC 管切割而成,每段长度 30 mm,采用塑料底盖和顶盖密封。无侧限抗压强度和抗剪强度指标分别采用南京土壤仪器厂的无侧限压力仪和应变控制式直剪仪测定,含水率采用烘箱和电子天平测定。

试验前先去掉垃圾焚烧底渣中的大块玻璃并过 10 mm 筛。试样制备前先将部分垃圾焚烧底渣研磨至 200 目(0.075 mm)备用,然后将底渣磨细粉与原渣按一定比例放入机械搅拌器中搅拌均匀,得到改良的垃圾焚烧底渣(下文简称“改良底渣”),将改良底渣与疏浚淤泥按一定比例放入机械搅拌器中搅拌均匀,按照 SL237—1999《土工试验规程》方法制作试样并养护。

试样养护到规定龄期后,分别测定固化淤泥的无侧限抗压强度、抗剪强度指标,并用快剪试验切下的余料测定固化淤泥的含水率。

同步制备纯淤泥试样,测得纯淤泥试样 28 d 龄期的含水率、无侧限抗压强度、内摩擦角、黏聚力分别为 60.5%、16.6 kPa、10.0°和 15.3 kPa,孔隙比为 1.8。

1.3 试验方案

胡学涛等^[19]的研究表明,不同粒径的垃圾焚烧底渣对市政污泥的固化效果不同,基于此,本文试验研究内容主要包括确定改良底渣的最优混合比(底渣磨细粉质量占改良底渣总质量的百分比)和分析改良底渣固化淤泥的特性两个方面,设计 S1 和 S2 两个试验组:①S1 试验组为底渣磨细粉与原渣按照不同比例进行混合,以 20% 的掺入比(改良底渣与淤泥干基质量的比值)掺入疏浚淤泥中,测试不同龄期(3、7、28 d)、不同混合比(0、25%、30%、50%、75%、100%)对疏浚淤泥固化效果的影响,确定最优混合比;②S2 试验组为在最优混合比条件下,按照不同改良底渣掺入比掺入疏浚淤泥中,研究不同龄期(3、7、14、28 d)、改良底渣不同掺入比(10%、15%、20%、25%、30%、35%)对疏浚淤泥固化效果的影响规律。

2 试验结果与分析

2.1 混合比对淤泥固化效果的影响

2.1.1 对含水率的影响

改良底渣掺入比为 20% 时,不同龄期固化淤泥含水率随混合比的变化规律如图 3 所示。疏浚淤泥中掺入垃圾焚烧底渣后,无论龄期是 3、7 d 还是 28 d,固化淤泥的含水率均随着混合比的增大逐渐降低。28 d 龄期纯淤泥试样的含水率为 60.5%,淤泥中分别掺入 20% 原渣、20% 底渣磨细粉固化后,其含水率分别降至 44.9% 和 42.4%,比纯淤泥的含水率分别降低了 25.8% 和 29.9%;掺入底渣磨细粉试样的含水率比掺入原渣的降低了 5.6%。说明垃圾焚烧底渣的掺入能够有效降低疏浚淤泥的含水率,相对于原渣而言,底渣磨细粉对降低淤泥含水率的效果更好。这主要是因为垃圾焚烧底渣的含水率低(5.9%),掺入疏浚淤泥后,疏松多孔的底渣能够吸收淤泥中的水分,底渣中的活性成分也会发生水化反应消耗一部分水分。相比于原渣,底渣磨细粉颗粒变小,比表面积增大,其中具有活性的 SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量增大,使得底渣的活性增强,水化反应能够消耗更多的水分,表现为相同质量下底渣磨细粉固化的淤泥含水率比原渣的更低。混合比越高,改良底渣中的活性成分越多,水化反应消耗的水分也越多,表现为随着混合比的增大,固化淤泥含水率降低越多。

2.1.2 对无侧限抗压强度的影响

无侧限抗压强度是疏浚淤泥固化的重要指标,图 4 为改良底渣掺入比为 20% 时,不同龄期固化淤泥的无侧限抗压强度随混合比的变化规律。结果显示:掺入垃圾焚烧底渣后,龄期为 3 d 的固化淤泥无侧限抗压强度只有 4.1~5.7 kPa,随着混合比的增大无侧限抗压强度略微降低。这主要是由于龄期为 3 d 时底渣磨细粉的水化反应仍在继续,其水化生成物引起的无侧限抗压强度增长量小于原渣中粗颗粒引起的无侧限抗压强度增长量,表现为随着混合比的增大无侧限抗压强度增长趋势是减小的。

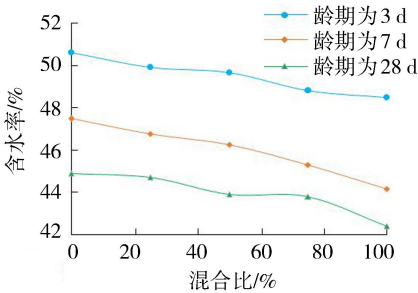


图 3 固化淤泥含水率与混合比的关系

Fig.3 Relationship between water content of solidified dredged sludge and mixture ratio

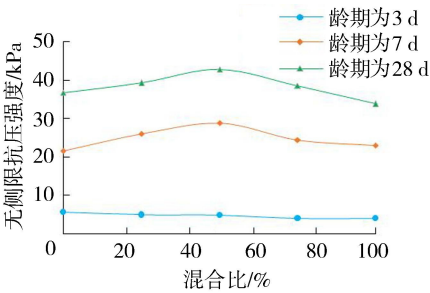


图 4 固化淤泥无侧限抗压强度与混合比的关系

Fig.4 Relationship between UCS of solidified dredged sludge and mixture ratio

龄期为 7 d 和 28 d 的固化淤泥,在混合比低于 50% 时,无侧限抗压强度随着混合比的增大而增大,当混合比超过 50% 时,无侧限抗压强度随着混合比的增大呈现降低趋势。这是因为当混合比较低时,改良底渣中粗颗粒占比较大,虽然粗颗粒在淤泥中起骨架作用,但底渣中具有活性的 SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量较小,水化产物少,强度增长较小;随着混合比的增大,等质量下改良底渣中具有活性的 SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量增大,水化反应增强,生成的水化物如水化硅酸钙凝胶和水化铝酸钙晶体等,起到黏结淤泥颗粒和底渣颗粒的作用,表现为固化淤泥的无侧限抗压强度逐渐变大;当混合比超过 50% 后,虽然改良底渣的活性增强,但等质量下改良底渣中的粗颗粒比例逐渐减小,反而导致固化淤泥的无侧限抗压强度逐渐降低。

从28 d龄期的试验结果看,纯淤泥试样的无侧限抗压强度为16.6 kPa。改良底渣掺入比20%条件下,原渣固化的淤泥无侧限抗压强度为36.8 kPa,比纯淤泥的提高了1.2倍;底渣磨细粉固化的淤泥无侧限抗压强度为33.8 kPa,比纯淤泥的提高了1.0倍;混合比为50%的改良底渣固化的淤泥无侧限抗压强度为42.8 kPa,比纯淤泥的提高了1.6倍。说明垃圾焚烧底渣固化疏浚淤泥是有效的,其固化效果与混合比有关,当混合比为50%时,无侧限抗压强度增长值最大,为最优混合比。

2.1.3 对抗剪强度指标的影响

改良底渣掺入比为20%时,不同龄期固化淤泥抗剪强度指标随混合比的变化规律如图5所示。从图5(a)可以看出:在混合比低于50%时,固化淤泥的黏聚力随混合比的增大而增大,当混合比超过50%时,黏聚力随着混合比的增大呈现降低趋势,但当混合比超过75%时,黏聚力又逐渐呈现增大的趋势,其中混合比为50%时黏聚力达到最大值。28 d龄期纯淤泥试样的黏聚力为15.3 kPa,原渣试样、纯底渣磨细粉试样、混合比为50%的试样的黏聚力分别为12.1、15.6、18.0 kPa,与纯淤泥相比,黏聚力分别降低了20.9%和提高了2.0%和17.6%。说明改良垃圾焚烧底渣固化疏浚淤泥对淤泥的黏聚力有影响,该影响与混合比有关,其中单独掺入原渣会降低淤泥的黏聚力,而掺入混合比为50%的改良底渣对淤泥黏聚力的提高效果最优。

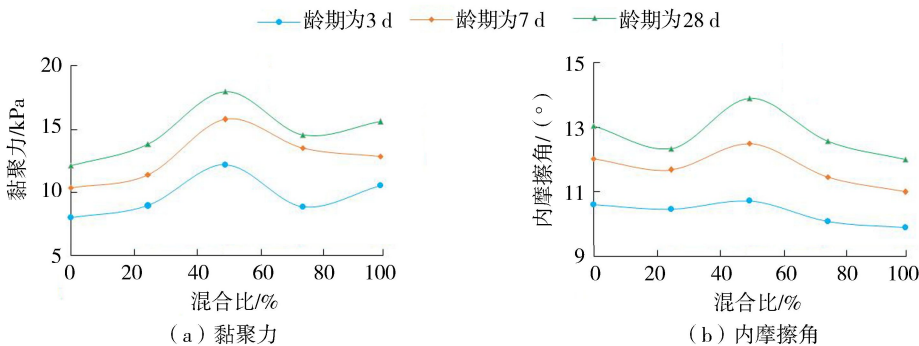


图5 固化淤泥抗剪强度指标与混合比的关系

Fig.5 Relationship between shear strength parameters of solidified dredged sludge and mixture ratio

黏聚力取决于淤泥颗粒间的各种物理化学作用力。当混合比较低时,改良底渣中粗颗粒较多,淤泥颗粒间的胶结作用力较小,黏聚力小。随着混合比的增大,底渣磨细粉含量增大,改良底渣的活性增大,生成的水化产物增多。水化产物以粗颗粒为骨架相互黏结,包裹淤泥颗粒,形成更稳固的结构,增大了黏聚力,并在混合比为50%时固化淤泥的黏聚力达到最大;随着混合比的继续增大,改良底渣所生成的水化产物虽然继续增多,但缺少粗颗粒,黏结结构较为脆弱,其固化淤泥的黏聚力较50%时小。

内摩擦角随混合比的变化规律见图5(b),混合比低于50%时,固化淤泥的内摩擦角先减小再增大,在混合比为50%时达到最大,随后随着混合比的增大逐渐减小。相比于同为28 d龄期的纯淤泥试样内摩擦角(10.0°),改良底渣掺入比为20%条件下,原渣试样内摩擦角为13.1°,比纯淤泥的提高了31.0%;混合比为50%试样的内摩擦角为13.9°,比纯淤泥的提高了39.0%;纯底渣磨细粉的内摩擦角为12.0°,比纯淤泥的提高了20.0%。说明掺入垃圾焚烧底渣能够增大内摩擦角,尤以混合比为50%的改良底渣对淤泥内摩擦角的提高效果最优。

内摩擦角反映了颗粒之间的摩擦特性,包含了颗粒表面之间的摩擦和颗粒之间的嵌入与连锁作用。在混合比为0时,掺入的原渣全部为粗骨料,颗粒之间的摩擦、相互嵌入和连锁作用比较大,表现为内摩擦角较大;随着混合比的增大,粗颗粒比例减小,细颗粒比例增大,与此同时细颗粒水化作用生成的水化产物增大了摩擦,这是一个动态过程,表现为内摩擦角随着混合比的增大先减小而后增大,在混合比达到50%时这种摩擦作用达到了最大,此时的内摩擦角最大。而后随着混合比的继续增大,粗颗粒成分进一步减少、水化产物继续增多,这种粗颗粒减少导致摩擦作用的减小比水化产物增多导致摩擦作用的增大更明显,从而显示随着混合比的增大,内摩擦角逐渐减小。

图4和图5结果表明,掺入改良底渣可以有效提高疏浚淤泥的无侧限抗压强度和抗剪强度指标,当底渣磨细粉和原渣按1:1混合时,可以使细颗粒的火山灰活性和粗颗粒的骨架性达到最佳效果,从而提高垃圾焚烧底渣的固化效果,使得固化淤泥的无侧限抗压强度和抗剪强度指标达到峰值,是最优混合比。

2.2 龄期对淤泥固化效果的影响

2.2.1 对含水率的影响

图 6 为最优混合比条件下固化淤泥含水率随龄期的变化规律,无论改良底渣掺入比如何变化,固化淤泥的含水率均随着龄期的增大而降低,含水率降低速率在龄期 0~3 d 时最大,3~7 d 时次之,7~14 d 时有变缓的趋势,14 d 以后渐趋变缓。以改良底渣掺入比 35% 为例,3、7、14、28 d 龄期时的含水率分别降至 43.2%、40.7%、38.8%、38.0%,与淤泥初始含水率 67.4% 相比,降幅分别为 35.9%、39.6%、42.4% 和 43.6%;以 28 d 龄期含水率降低幅度为基准,前 3、7、14 d 的含水率降幅分别完成了 82.3%、90.8% 和 97.3%。这是因为在固化初期,淤泥中的水分一部分由含水率极低的改良底渣吸收,另一部分由具有活性的 SiO_2 和 Al_2O_3 的水化反应消耗掉,表现为前期含水率降幅更大;随着龄期的增大,淤泥中水分主要由改良底渣中活性成分水化反应所消耗,而水化反应到后期逐渐变缓,表现为后期含水率降低幅度逐渐变小。

2.2.2 对无侧限抗压强度的影响

图 7 为最优混合比条件下固化淤泥无侧限抗压强度随龄期的变化规律,无论改良底渣掺入比如何变化,固化淤泥的无侧限抗压强度均随龄期的增大而增大,在龄期 3~7 d 时增速最快,7~14 d 时增速稍减,14~28 d 时增速明显下降,但总体趋势上仍然在增大。以改良底渣掺入比 35% 为例,3、7、14、28 d 龄期时的无侧限抗压强度分别增长至 19.0、46.5、53.5、58.4 kPa;以 28 d 无侧限抗压强度为总增长量基准,则 3、7、14 d 龄期时的增长幅度分别为 32.5%、79.6%、91.6%,可以看出无侧限抗压强度增长主要发生在前 14 d。

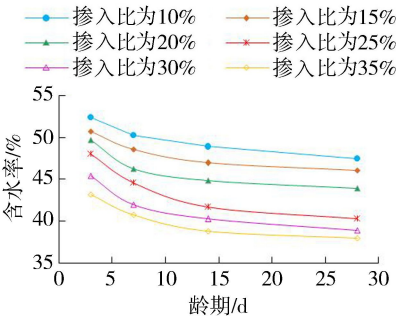


图 6 固化淤泥含水率与龄期的关系

Fig. 6 Relationship between water content of solidified dredged sludge and curing age

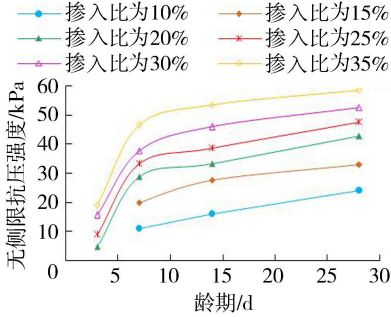


图 7 固化淤泥无侧限抗压强度与龄期的关系

Fig. 7 Relationship between UCS of solidified dredged sludge and curing age

早期无侧限抗压强度的增长主要体现在两个方面,一是改良底渣本身能够提升淤泥强度,二是底渣水化反应的生成物使得淤泥的强度增大。水化反应早期速度比较快,随着水化产物的增多,逐渐包裹底渣粗颗粒和淤泥颗粒,使得后期水化反应越来越慢,表现为 14 d 后无侧限抗压强度虽有增长,但增长缓慢。

2.2.3 对抗剪强度指标的影响

图 8 为最优混合比条件下固化淤泥抗剪强度指标随龄期的变化规律,无论改良底渣掺入比如何变化,固化淤泥的黏聚力和内摩擦角均随着龄期的增大而增大,在龄期 3~7 d 时增速最快,7~14 d 时增速减缓,14~28 d 时增速明显下降,但总体趋势上仍然在增大。若以 28 d 龄期抗剪强度指标为基准,改良底渣掺入比为 35% 的固化淤泥,其 14 d 龄期的黏聚力和内摩擦角分别达到了 28 d 龄期的 87.0% 和 95.6%。早期黏聚力增

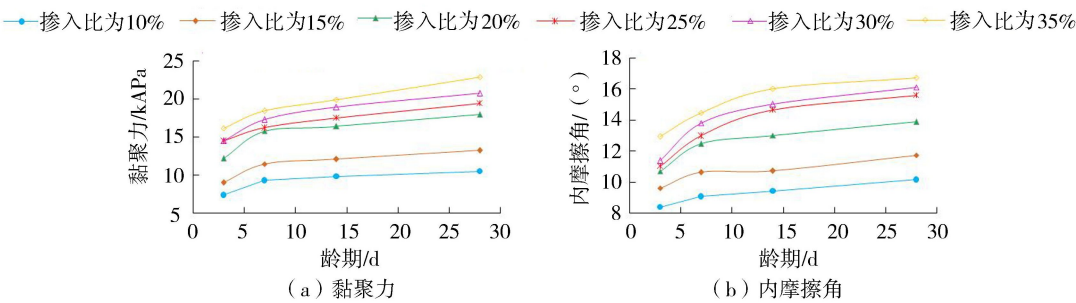


图 8 固化淤泥抗剪强度指标与龄期的关系

Fig. 8 Relationship between shear strength parameters of solidified dredged sludge and curing age

大占主导作用的是改良底渣吸水性引起的淤泥含水率降低,早期内摩擦角增大占主导作用的则是改良底渣导致的淤泥颗粒粒径变化;后期黏聚力和内摩擦角的增大则主要是由于改良底渣中活性成分的水化作用,生成了具有水硬性胶凝能力的水化物引起的。随着龄期的增大水化反应渐趋变缓,因此黏聚力和内摩擦角随着龄期的增大增速逐渐变缓。

由图 6~8 的试验结果可以看出,以 28 d 龄期为基准,固化淤泥含水率降幅在 14 d 龄期时已达到了 28 d 龄期的 97.3%,无侧限抗压强度和抗剪强度指标增幅在 14 d 龄期时已达到 28 d 龄期的 87.0% 以上。从工程角度考虑,若工期较紧,可以 14 d 龄期作为开展下一步工序的控制条件。

2.3 改良底渣掺入比对淤泥固化效果的影响

2.3.1 对含水率的影响

图 9 为最优混合比条件下固化淤泥含水率随改良底渣掺入比的变化规律,无论处于哪个龄期段,固化淤泥的含水率均随着改良底渣掺入比的增大而降低,尤其是 14 d 和 28 d 龄期的试样,改良底渣掺入比位于 20%~30% 之间的含水率的变化率较大。从降低固化淤泥含水率的角度考虑,在此区间可以寻找一个合适的改良底渣掺入比,既能起到降低固化淤泥含水率的目的,又能尽量少用底渣,降低工程造价。

2.3.2 对无侧限抗压强度的影响

图 10 为最优混合比条件下固化淤泥无侧限抗压强度随改良底渣掺入比的变化规律,固化淤泥的无侧限抗压强度随改良底渣掺入比的增大而单调增大,且各龄期增长趋势线的斜率大致相同。基于此规律,在最优混合比条件下,可以通过调整改良底渣掺入比的办法提高固化淤泥的无侧限抗压强度。

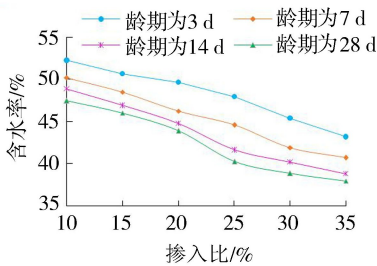


图 9 固化淤泥含水率与改良底渣掺入比的关系

Fig. 9 Relationship between water content of solidified dredged sludge and ratio of improved MSWI bottom ash

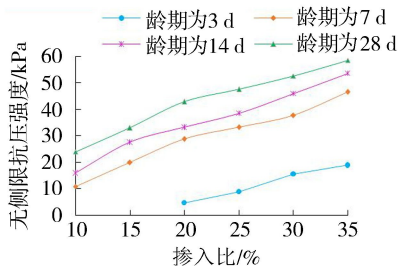


图 10 固化淤泥无侧限抗压强度与改良底渣掺入比的关系

Fig. 10 Relationship between UCS of solidified dredged sludge and ratio of improved MSWI bottom ash

根据胡学涛等^[19]的研究,底渣掺入比超过 45% 时,可满足市政污泥经固化处理后无侧限抗压强度达到 50.0 kPa 的填埋要求,本文采用的改良底渣在掺入比为 30% 时,28 d 龄期的无侧限抗压强度即可达到 52.6 kPa,减少了底渣使用量。

2.3.3 对抗剪强度指标的影响

图 11 为改良底渣最优混合比条件下固化淤泥抗剪强度指标随改良底渣掺入比的变化规律,无论处于哪个龄期段,固化淤泥的黏聚力和内摩擦角均随着改良底渣掺入比的增大而增大。这是由于随着改良底渣掺入比的增大,粗颗粒原渣和细颗粒磨细粉的数量均增多,使得磨细粉产生的水化产物量变多,与淤泥颗粒的黏结更紧密,粗颗粒的骨架作用更显著,形成稳定结构,表现为黏聚力和内摩擦角随改良底渣掺入比的增大而增大。

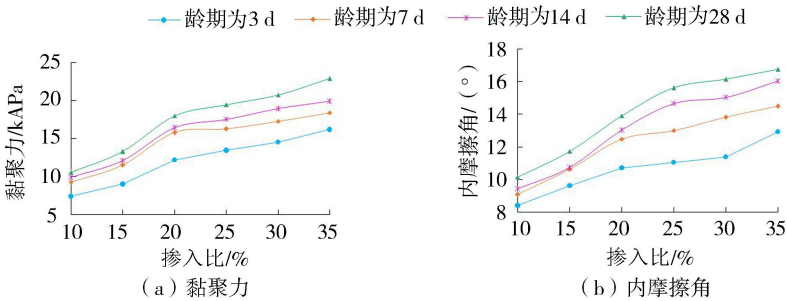


图 11 固化淤泥抗剪强度指标与改良底渣掺入比的关系

Fig. 11 Relationship between shear strength parameters of solidified dredged sludge and ratio of improved MSWI bottom ash

由图 9~11 的试验结果可以看出,改良底渣掺入比的增大有利于淤泥强度的提高和含水率的降低,从工程角度考虑,可以选取符合工程需求的合适掺入比进行疏浚淤泥的固化处理。

3 固化淤泥强度预测

在最优混合比条件下,不同掺入比的改良底渣固化疏浚淤泥后,其 28 d 龄期的无侧限抗压强度、黏聚力和内摩擦角的趋势线如图 12 所示。由图 12 可知:固化淤泥 28 d 龄期的无侧限抗压强度、黏聚力和内摩擦角均呈现二次多项式相关关系,依据回归分析 R^2 最大的原则,分别以无侧限抗压强度、黏聚力和内摩擦角为因变量,以改良底渣掺入比为自变量,得到如下固化淤泥强度预测的二次多项式模型:

$$q_{u28} = - 0.0245\alpha^2 + 2.4467\alpha + 2.2174 \tag{1}$$

$$c_{28} = - 0.0119\alpha^2 + 1.0268\alpha + 1.2806 \tag{2}$$

$$\theta_{28} = - 0.0082\alpha^2 + 0.6403\alpha + 4.3666 \tag{3}$$

式中: q_{u28} 为固化淤泥 28 d 无侧限抗压强度,kPa; c_{28} 为固化淤泥 28 d 的黏聚力,kPa; θ_{28} 为固化淤泥 28 d 的内摩擦角, (°); α 为固化淤泥中改良底渣掺入比, $10\% \leq \alpha \leq 35\%$ 。式(1)(2)(3)的 R^2 分别为 0.995 2、0.982 9 和 0.990 7。

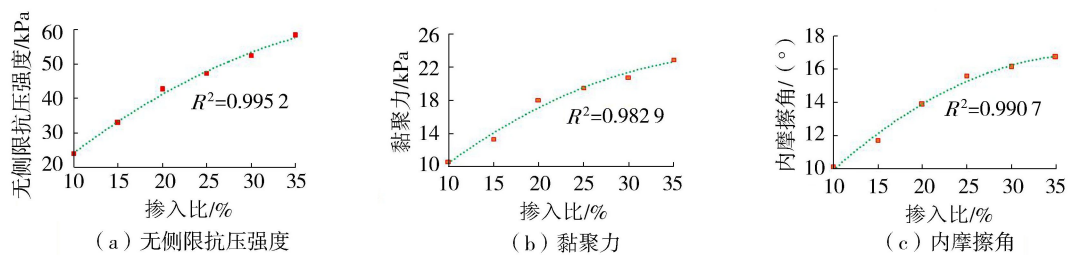


图 12 固化淤泥强度预测曲线

Fig. 12 Strength prediction curves of solidified dredged sludge

根据式(1)(2)(3),当改良底渣掺入比为 26.6% 时,固化淤泥 28 d 龄期的无侧限抗压强度可达到 50.0 kPa,与胡学涛等^[19]的底渣掺入比超过 45% 时无侧限抗压强度可达 50.0 kPa 的填埋要求相当。此时固化淤泥的黏聚力达到 20.2 kPa,内摩擦角达到 15.6°,比纯淤泥 28 d 的无侧限抗压强度增大了 33.4 kPa、内摩擦角增大了 5.7°、黏聚力增大了 4.9 kPa;从图 9 的试验规律预估含水率可降低至 40% 左右。

综上,疏浚淤泥经过改良底渣的固化,其强度的提高和含水率的降低效果显著,说明采用改良垃圾焚烧底渣对疏浚淤泥进行固化处理是可行的。

固化淤泥强度预测二次多项式模型(式(1)(2)(3))是基于最优混合比条件和改良底渣掺入比为 10%~35% 得到的结论,更广泛的掺入比范围和固化淤泥的其他特性有待进一步试验研究,以达到工程应用的目的。

4 结 论

- a. 改良垃圾焚烧底渣能够显著降低疏浚淤泥的含水率,提高其无侧限抗压强度和抗剪强度指标,随着混合比的增大,固化淤泥的含水率逐渐减小,无侧限抗压强度和抗剪强度指标先明显增大而后逐渐减小,当垃圾焚烧底渣磨细粉与未研磨原渣按照 1:1 比例混合时,对疏浚淤泥的固化效果最好,为最优混合比。
- b. 在最优混合比条件下,固化淤泥的含水率随着龄期的增大逐渐降低,无侧限抗压强度和抗剪强度指标则相反,且早期变化速率均较大,14 d 龄期的含水率降幅达到 97.1%,而无侧限抗压强度和抗剪强度指标增幅则在 87.0% 以上。
- c. 在最优混合比条件下,固化淤泥的含水率随着改良底渣掺入比的增大逐渐降低,无侧限抗压强度和抗剪强度指标则相反,且固化淤泥 28 d 无侧限抗压强度、黏聚力和内摩擦角与改良底渣掺入比均呈现二次多项式相关关系。当改良底渣掺入比为 35% 时,固化淤泥 28 d 无侧限抗压强度达到了 58.4 kPa,含水率由初始的 67.4% 降至 38.0%,表明采用改良底渣固化疏浚淤泥是可行的。

参考文献:

[1] 邓东升,张铁军,张帅,等. 南水北调东线工程高含水量疏浚淤泥材料化处理方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),

- 2008,36(4):559-562. (DENG Dongsheng,ZHANG Tiejun,ZHANG Shuai,et al. Technique for utilization of high-water-content dredged clayey soil as fill material for the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2008,36(4):559-562. (in Chinese))
- [2] SIGUA G. Current and future outlook of dredged and sewage sludge materials in agriculture and environment[J]. Journal of Soils and Sediments,2005,5(1):50-52.
- [3] 汪顺才,张春雷,黄英豪,等. 堆场疏浚淤泥含水率分布规律调查研究[J]. 岩土力学,2010,31(9):2823-2828. (WANG Shuncai,ZHANG Chunlei,HUANG Yinghao,et al. Study of diversification of water contents in dredged sediment storage yard[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(9):2823-2828. (in Chinese))
- [4] 包建平,朱伟,闵佳华. 中小河道治理中的清淤及淤泥处理技术[J]. 水资源保护,2015,31(1):56-62. (BAO Jianping,ZHU Wei,MIN Jiahua. Technology of dredging and sludge treatment in small and medium-sized river regulation[J]. Water Resources Protection,2015,31(1):56-62. (in Chinese))
- [5] 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.
- [6] 赵子荣,徐建勇,陈永辉,等. 压实时间对固化土强度影响试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(6):531-535. (ZHAO Zirong,XU Jianyong,CHEN Yonghui,et al. Experimental study on influence of compaction period on strength of solidified soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(6):531-535. (in Chinese))
- [7] 丁建文,刘铁平,曹玉鹏,等. 高含水率疏浚淤泥固化土的抗压试验与强度预测[J]. 岩土工程学报,2013,35(增刊2):55-60. (DING Jianwen,LIU Tieping,CAO Yupeng,et al. Unconfined compression tests and strength prediction method for solidified soils of dredged clays with high water content[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(Sup2):55-60. (in Chinese))
- [8] 杨爱武,王韬,许再良. 石灰及其外加剂固化天津滨海软土的试验研究[J]. 工程地质学报,2015,23(5):996-1004. (YANG Aiwu,WANG Tao,XU Zailiang. Experimental study on lime and its additional agent to cure tianjin marine soft soil[J]. Journal of Engineering Geology,2015,23(5):996-1004. (in Chinese))
- [9] 赵余. 废弃钢渣的硅系与复合系激发及其在固化软土中的应用[D]. 南京:东南大学,2017.
- [10] 杨爱武,肖敏,周玉明. 石灰粉煤灰固化天津滨海软土试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(1):60-67. (YANG Aiwu,XIAO Min,ZHOU Yuming. Experimental study on lime-fly ash to cure Tianjin marine soft soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2019,15(1):60-67. (in Chinese))
- [11] 王东星,徐卫亚. 大掺量粉煤灰淤泥固化土的强度与耐久性研究[J]. 岩土力学,2012,33(12):3659-3664. (WANG Dongxing,XU Weiya. Research on strength and durability of sediments solidified with high volume fly ash[J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33(12):3659-3664. (in Chinese))
- [12] 黄英豪,戴济群,徐锴. 新拌固化淤泥的流动性和黏滞性试验研究[J]. 岩土工程学报,2022,44(2):235-244. (HUANG Yinghao,DAI Jiqun,XU Kai. Flowability and viscosity of freshly solidified dredged materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2022,44(2):235-244. (in Chinese))
- [13] 胡孝彭,赵仲辉. 固化淤泥的干燥收缩试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(1):39-43. (HU Xiaopeng,ZHAO Zhonghui. Experimental study of drying shrinkage of solidified dredged material[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2015,43(1):39-43. (in Chinese))
- [14] 崔广强,常方强. 垃圾焚烧底灰固化污水厂污泥的岩土工程性质实验[J]. 环境工程学报,2013,7(6):2367-2370. (CUI Guangqiang,CHANG Fangqiang. Test of geotechnical engineering parameters of sewage sludge solidified by municipal solid waste incineration bottom ash[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2013,7(6):2367-2370. (in Chinese))
- [15] 冯彬,陈萍,詹良通,等. 污泥-焚烧底灰混合固化配方及强度增长机理[J]. 环境科学学报,2016,36(2):590-598. (FENG Bin,CHEN Ping,ZHAN Liangtong,et al. Optimal material proportion for co-solidification of sewage sludge and MSWI bottom ash and its strength promotion mechanism[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2016,36(2):590-598. (in Chinese))
- [16] 陈萍,冯彬,詹良通. 以垃圾焚烧底灰为骨料的脱水污泥固化试验[J]. 中国环境科学,2014,34(10):2624-2630. (CHEN Ping,FENG Bin,ZHAN Liangtong. Solidification of dewatered sewage sludge using bottom ash of MSWI as skeleton material[J]. China Environmental Science,2014,34(10):2624-2630. (in Chinese))
- [17] 陈萍,高炎旭,马美玲. 疏浚淤泥与焚烧底灰混合固化方法的试验研究[J]. 水利学报,2015,46(6):749-756. (CHEN Ping,GAO Yanxu,MA Meiling. Experimental study on solidification method for dredged mud mixed with MSWI[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2015,46(6):749-756. (in Chinese))
- [18] 梁冰,胡学涛,陈亿军,等. 不同级配垃圾焚烧底渣固化市政污泥工程特性分析[J]. 环境工程学报,2017,11(2):1117-1122. (LIANG Bing,HU Xuetao,CHEN Yijun,et al. Engineering characteristics analysis of sewage sludge solidified by different gradations municipal solid waste incineration bottom ash[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2017,11(2):1117-1122. (in Chinese))
- [19] 胡学涛,梁冰,陈亿军,等. 不同粒径垃圾焚烧底渣对固化市政污泥工程特性的影响[J]. 环境工程学报,2015,9(11):5567-5572. (HU Xuetao,LIANG Bing,CHEN Yijun,et al. Influence of municipal solid waste incineration bottom ash with different grain sizes on engineering characteristics of sewage sludge solidification[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2015,9(11):5567-5572. (in Chinese))