

城市河道淤泥基本土工特性与资源化利用对策

——以南京市内秦淮河中段为例

徐 杨,肖建宇,陈 昊

(金陵科技学院建筑工程学院, 江苏 南京 211169)

摘 要:为了掌握城市河道淤泥的基本土工特性,以南京市内秦淮河中段为例,在河段上游、中游、下游分别采集S、Z、X淤泥,开展了矿物成分分析、化学成分分析、热重差热分析、基本物理性质试验、击实试验、压缩试验、直剪试验等。结果表明:1)淤泥以石英为主要矿物,黏土矿物以伊利石为主,化学成分以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 为主。2)从研究区域的上游到下游,S、Z、X淤泥有机质含量从7.7%增加到14.2%,土体相对密度从2.58减小到2.39,砂粒含量明显增加,粉粒含量逐渐下降,黏粒含量略有下降,平均粒径逐渐增大,S、Z淤泥级配良好,X淤泥级配不良。3)随着有机质含量的增加,城市河道淤泥最大干密度逐渐降低,最优含水率逐渐增加,压缩性逐渐增加,均为中等压缩性土。以上研究为城市河道淤泥的填埋处置及资源化利用提供了参考。

关键词:城市河道淤泥;土工特性;资源化利用;有机质含量;内秦淮河

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672-755X(2021)04-0067-07

Basic Geotechnical Characteristics and Resource Utilization Countermeasures of Urban River Sediments: Taking the Middle Section of Inner Qinhuai River in Nanjing as an Example

XU Yang, XIAO Jian-yu, CHEN Hao

(Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: In order to understand the basic geotechnical characteristics of the urban river sediments, taking the middle section of inner Qinhuai river in Nanjing as an example, S, Z and X sediments are collected in the upper, middle and lower reaches of the river section respectively. Their mineral composition, chemical composition, thermogravimetric differential thermal, basic physical properties, compaction characteristics, compression and shear strength are investigated. The results show that: 1) the main mineral composition and clay mineral composition are Quartz and Illite, respectively. The chemical composition is mainly SiO_2 , Al_2O_3 and CaO . 2) From the upstream to the downstream of the study area, the organic matter content of S, Z and X sediments increases from 7.7% to 14.2%, the relative density of soil decreases from 2.58 to 2.39, the coarse sediments content obviously increases, the powder content gradually decreases, the clay content slightly decreases, and the average particle size gradually increases. S and Z sediments are well graded, and X sediments is poorly graded. 3) As the organic matter content increases, the maximum dry density of urban river sediments decreases, the optimal water content increases, and the compressibility increases, all of which are medium compressible soils. The research conclusions can provide a reference for the landfill disposal and resource utilization of urban river sediments.

Key words: urban river sediments; geotechnical characteristics; resource utilization; organic matter content; inner Qinhuai river

在长三角、珠三角地区,许多城市分布着数量众多的景观河道,它们不仅承担着蓄水行洪的功能,还具

收稿日期:2021-10-27

基金项目:江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB170013);金陵科技学院高层次人才科研启动基金(jit-b-201621);金陵科技学院校级孵化基金项目(jit-fhxm-201803)

作者简介:徐杨(1987—),男,重庆合川人,讲师,博士,主要从事环境岩土工程方面的研究。

有美化城市环境的作用。为满足河流水质和蓄水能力的标准,需定期清淤,这将产生大量城市河道淤泥。据统计,广州、南京等城市河道淤泥年均清出量超过 100 万 m^3 。如何有效处置淤泥是城市可持续发展面临的一大问题,若处置不当,将产生不良的社会环境影响。淤泥的自身性质直接影响处理方法的有效性,例如在堆场填埋处理中,淤泥的性质对填埋场污染物的渗漏、沉降及稳定性均会产生影响。因此,十分有必要研究淤泥的基本土工特性。

针对淤泥的处理及利用,许多学者开展了大量的研究工作。夏磊等^[1]以苏州某河道疏浚淤泥为研究对象,制备了淤泥气泡混合土,探讨了酸雨对其工程性质的影响;朱婧等^[2]对比研究了污泥、淤泥和黏性土的压缩特性,提出了污泥排水的三阶段特征,为填埋处置提供了参考;谢新宇等^[3]对浙江宁波前塘河淤泥进行电渗-固化试验,揭示了其联合加固机理;王江营等^[4]针对高含水率湖相水库淤泥,通过 FLAC 3D 模拟了固化淤泥的填筑性能;许英等^[5]创新性地引入黄马纤维和聚乙烯醇引入淤泥的资源化利用中,为复合固化剂的工程应用提供了参考;Park 等^[6]通过压实试验、渗透试验和三轴固结不排水试验系统讨论了固化淤泥作坝体材料的适用性;Houlihan 等^[7]针对海湾海相疏浚淤泥,通过地聚物改良制备路基填料,展示出良好的应用前景;Bhairappanavar 等^[8]以美国克利夫兰地区疏浚淤泥为原料,制备了免烧砖,并探讨了砖体的力学性质和耐久性;Wei 等^[9]研究了牡蛎壳、港口疏浚淤泥和钢渣粉煤灰等混合制备轻质骨料的可行性,通过烧结,轻质骨料重金属的浸出浓度能满足相关要求。上述研究为疏浚淤泥的资源化利用提供了重要参考,而淤泥来源各异,针对城市河道淤泥的研究还比较少。同时,淤泥性质的表征较多关注有机质含量、液塑限和粒径分布等,而压实性、压缩性和抗剪强度方面的研究鲜有报道。全面掌握淤泥的基本土工特性有助于提高填埋处置的有效性,也可为其他资源化利用方式提供参考。本文以南京市内秦淮河中段为例,对不同位置淤泥的矿物成分、化学成分、热重曲线、基本物理性质、压实性、压缩性及抗剪强度等进行基本土工试验,研究城市河道淤泥基本土工参数的变化规律,提出了资源化利用对策。

1 材料与方法

1.1 试验材料

研究区域南京市内秦淮河中段,是江苏省南京市水体污染控制与治理重大专项研究的示范河段。如图 1 所示,内秦淮河中段地处城市闹市区,东起桃叶渡,西至铁窗棂泵站,全长约 2.9 km,周边无污染性工厂,均为居民区和商业区。经过治理后,河道水质得到了明显改善,为研究淤泥性质随河流沉积环境的变化规律,对淤泥淤积现状进行调查^[10],按水流方向选取 3 个典型取样点对城市河道淤泥的基本土工特性进行研究。利用挖泥船进行取样,3 个取样点位置分别位于淮清桥、中山南路桥和张公桥附近,代表研究区域的上、中、下游。试验淤泥依次简称为 S 淤泥、Z 淤泥和 X 淤泥。河道沿线自上游而下游,人口居住密度有所增加,水流速度则有所降低。

1.2 试验方法

采用 X 射线衍射仪测定试样矿物成分,采用 X 荧光光谱仪测定化学成分,采用空气加热试验测定热重差热,参考《土工试验标准方法》(GB/T 50123—1999)对试样的初始含水率、相对密度、界限含水率、天然密度等物理性质进行测试,颗粒级配采用密度计法和筛分法进行联合测试,有机质含量通过高锰酸钾氧化法进行测定。通过击实试验、单轴压缩试验和直接剪切试验分别获得淤泥的击实曲线、压缩性和抗剪强度,每组 3 个试样,结果取其平均值。

2 结果与分析

2.1 矿物成分分析

图 2 为试验淤泥 X 射线衍射图谱。由图 2 可知,石英、长石、伊利石和白云母的衍射峰比较明显,3 种淤泥的衍射强度差异不大,矿物种类及含量比较接近,表明它们具有共同的物质来源。石英衍射峰最强,是淤泥的主要矿物成分,黏土矿物的主要成分为伊利石。

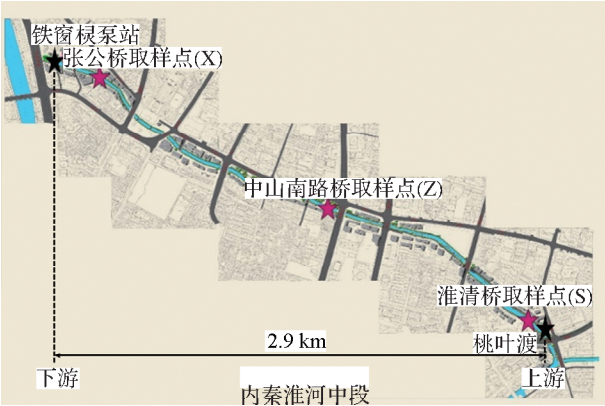


图 1 淤泥取样点

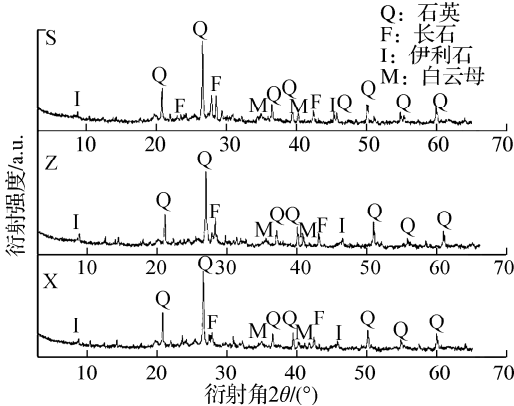


图 2 淤泥 X 射线衍射图谱

2.2 化学成分分析

通过 X 射线荧光光谱仪对淤泥常量化学成分和重金属污染物(砷、铅、镍、铬、锌、钡、铜)等微量元素进行了定量分析,试验结果分别见表 1 和表 2。SiO₂ 是城市河道淤泥的主要化学成分,其含量在 55%~60%,S 淤泥的 SiO₂ 含量最高,与陶粒和烧结砖生产原料的 SiO₂ 含量比较接近^[11]。3 种淤泥的烧失量为 10%~20%,Z 淤泥的烧失量最高,明显高于一般疏浚淤泥^[3-5],可能与城市河道淤泥有机质含量偏高有关。沿水流方向(S 取样点至 X 取样点),重金属含量逐渐增高,说明淤泥处理的二次污染风险也逐渐增大。该河段处于城市中心,周边是居民生活区,无污染企业,重金属可能来源于废弃电池等生活垃圾以及上游的重金属等。表 2 所列举的重金属元素均超过了标准的限定值^[12],淤泥的资源化处理需考虑其环境影响。

表 1 淤泥的主要元素氧化物含量

淤泥 编号	主要元素氧化物含量/%										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	烧失量
S	59.51	11.53	5.12	4.62	1.65	1.22	1.80	0.73	0.50	0.07	12.56
Z	55.97	9.94	5.20	4.25	1.74	1.32	1.60	0.67	0.65	0.06	18.04
X	55.56	11.06	5.17	5.15	1.77	1.10	1.65	0.68	0.76	0.06	16.51

注:氧化物含量用质量分数表示。

表 2 淤泥的重金属元素含量

淤泥编号	重金属元素含量/(mg·L ⁻¹)						
	As	Pb	Ni	Cr	Zn	Ba	Cu
S	9.21	94.2	40.5	66.4	387	568	116
Z	9.30	104.0	45.0	73.4	511	622	134
X	12.70	126.0	55.8	97.3	798	721	192
限定值	5.00	5.0	5.0	15.0	100	100	100

2.3 热重差热分析

淤泥的热重差热曲线能反映淤泥在加热过程中的质量变化和可能发生的相变反应,为淤泥的热处理提供参考。图 3 给出了 3 种淤泥的热重差热分析曲线。示差扫描量热法(differential scanning calorimetry,DSC)曲线反映样品在加热过程中与标准样品的热量补偿,曲线的波峰向上表示吸热,波峰向下表示放热;热重分析(thermogravimetric analysis,TG)曲线反映样品在加热过程中的质量变化。

S 淤泥主要有三段质量损失,温度区间分别为 20~194℃、194~608℃、608~776℃,质量损失分别为 2.88%、7.59%和 3.00%。从 DSC 曲线上可以看到 2 个吸热峰(81℃和 721℃)和 1 个放热峰(309℃)。第一阶段的质量损失 2.88%对应 81℃的吸热峰,主要是淤泥中结合水和结晶水的减少,这是

一个吸热脱湿过程。第二阶段为 194~608 °C, 质量损失最多, 达 7.59%, 在 309 °C 处有一明显的放热峰, 代表这一阶段主要为有机质的烧失, 还包含了部分黏土矿物的相变转化。第三阶段的质量损失为 608~776 °C, 所对应的吸热峰在 721 °C, 主要是碳酸盐和硫酸盐的分解。

相比于 S 淤泥, Z 淤泥的总质量损失较高。第一阶段为 25~179 °C, 失重 3.53%, 在 DSC 曲线上对应 2 个明显的吸热峰, 失重的主要原因是结合水和部分矿物的结晶水的蒸发和分解。第二阶段的失重为总失重的重要部分, 为 179~545 °C, 2 个明显的放热峰在 309 °C 和 466 °C, 这主要是由于淤泥中有机质的烧失而放出了大量的热量, 这部分能量可以作为淤泥热处理过程中的热量来源, 从而减少能源消耗。545~774 °C 时, 试样失重 4.25%, 对应的 2 个吸热峰分别为 571 °C 和 742 °C, 前者可能为黏土矿物的相变转化, 后者可能为碳酸盐和硫酸盐的分解, 排出 CO₂ 和 SO₂ 气体。

X 淤泥的失重过程可分为 3 个阶段。20~183 °C 时, 失重 3.39%, 对应的 2 个吸热峰分别位于 80 °C 和 134 °C, 主要是淤泥中的结合水和结晶水的蒸发。第二阶段为 183~552 °C, 对应一个主要的放热峰 326 °C, 还有一个较小的放热峰位于 519 °C, 这部分的质量损失占 13.4%, 主要是有机质的烧失。第三阶段为 552~760 °C, 质量损失为 4.37%, 对应一个明显吸热峰位于 746 °C, 主要源于碳酸盐和硫酸盐的分解。此外, 在 571 °C 的吸热峰并不是非常明显, 说明黏土矿物在 X 淤泥中的相变转化并不是很强烈。

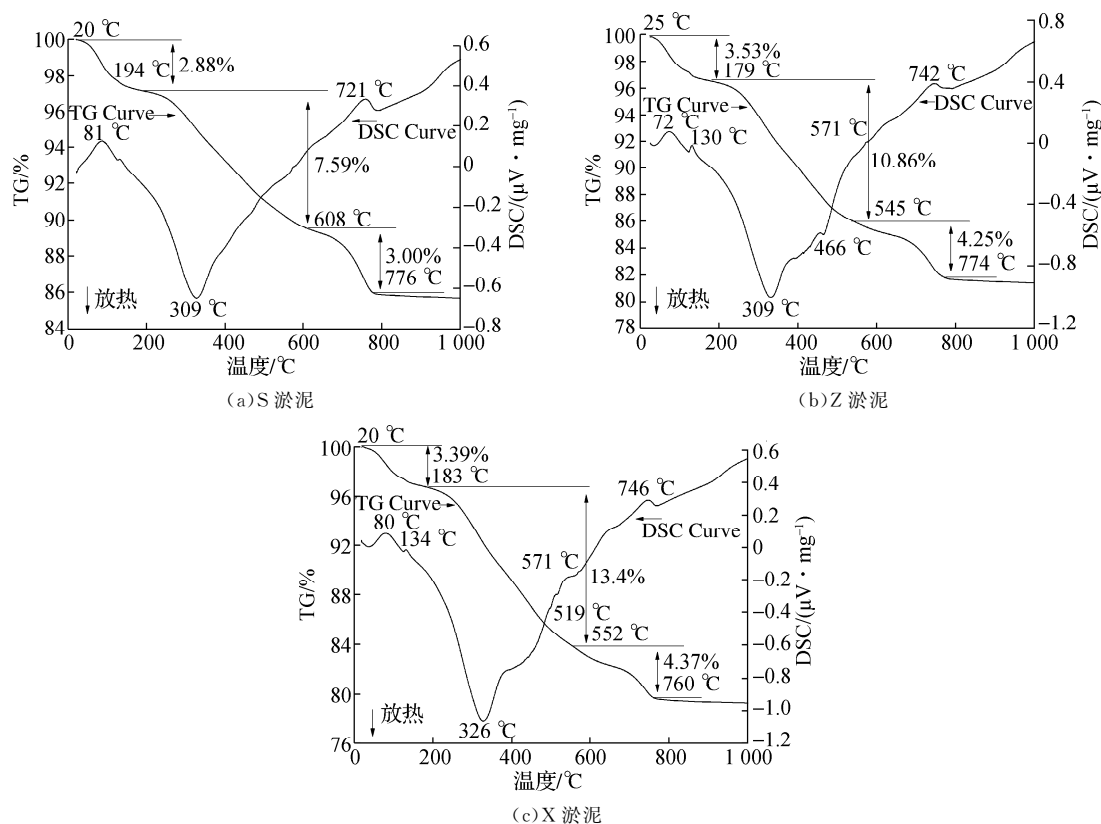


图 3 淤泥热重差热分析曲线

综上可知, S、Z、X 淤泥的总质量损失不断增大。其中, 造成第二段质量损失的主要原因是有机质的加热分解, 从 S 淤泥的 7.59% 增加到 X 淤泥的 13.4%, 表明它们的有机质含量有所增加。而第一段的质量损失反映的是淤泥的脱水过程, 从 S 淤泥到 X 淤泥仅有小幅增加, 反映试样的风干含水状态。

2.4 基本物理性质分析

淤泥基本物理性质如表 3 所示。城市河道淤泥的相对密度为 2.39~2.58, 明显小于常见土体密度 (2.65~2.70)。从上游至下游, 淤泥的液限和塑限均逐渐增加, 有机质含量明显增加, 而塑性指数稳定维持在 20 左右。在不同程度的人类活动影响下, 从研究区域的上游到下游, 有机质含量从 7.7% 增加到 14.2%, 显著高于一般湖相淤泥^[4]、海相淤泥^[7]。有机质成分复杂, 性质活跃, 对城市河道淤泥的基本物理

性质有显著影响。一方面,部分有机质具有较强的吸附性和亲水性,随着有机质含量的增加,淤泥的液限和塑限将明显提高;另一方面,有机质的相对密度一般在 1.70 左右^[13],当土体矿物成分变化不大时,土颗粒的相对密度(2.70 左右)基本稳定,随着有机质含量增加,淤泥相对密度逐渐减小,表 3 的试验结果也显示了有机质含量与淤泥相对密度之间的负相关关系。

表 3 淤泥基本物理性质

淤泥编号	初始含水率/%	天然密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	相对密度	液限/%	塑限/%	塑性指数	有机质含量/%
S	>100	<1.4	2.58	52.76	32.88	19.88	7.7
Z	>100	<1.4	2.44	61.89	42.56	19.33	11.7
X	>100	<1.4	2.39	67.13	47.13	20.00	14.2

试验淤泥的粒径分布曲线如图 4 所示,从图 4 可以提取淤泥的特征粒径 d_{10} 、 d_{30} 、 d_{50} 和 d_{60} ,通过特征粒径可计算出曲率系数 C_c 和不均匀系数 C_u ,如表 4 所示。各粒组的百分含量沿水流方向的变化规律如图 5 所示。沿水流方向,砂粒含量逐渐增加,由 19.58% 增加到 51.52%。根据碎屑物质的沉积规律,砂粒属于粗颗粒,在城市河道较小的水流条件下(一般为 $0.2 \sim 0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,汛期可达 $2 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),砂粒易快速沉积,搬运距离一般较短,主要来源为排污水和雨水地表径流所携带的碎屑颗粒。根据现场调查结果,沿线分布着 14 个较大的排污口,且主要集中在中下游,这与砂粒含量增加有一定的相关性。黏土颗粒粒径很小,电化学性质显著,在絮凝过程中伴随着物理化学作用,沉积速度缓慢,而由于粉粒和砂粒具有较快的沉积速度,导致胶粒和黏粒的相对含量有所降低,因此,胶粒和黏粒的相对含量沿水流方向逐渐减小,其中 Z 淤泥与 X 淤泥的胶粒和黏粒相对含量都比较接近。总体来看,试验淤泥的平均粒径(d_{50})由 0.021 8 mm 增加到 0.097 1 mm,表明沿河流方向沉积物颗粒有粗化的趋势。S、Z 和 X 淤泥的不均匀系数分别为 14.81、19.05 和 36.19,曲率系数分别为 1.54、1.39 和 0.72,S 淤泥和 Z 淤泥级配良好,X 淤泥级配不良。

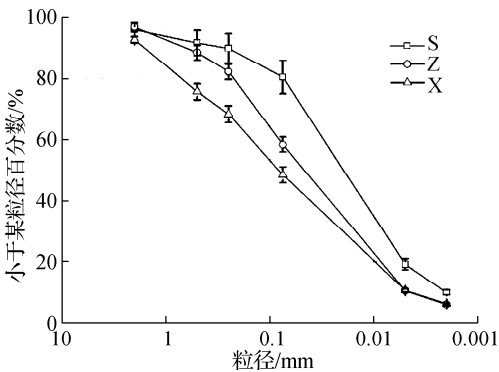


图 4 淤泥粒径分布曲线

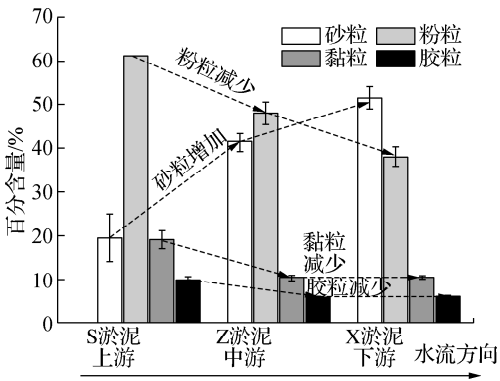


图 5 沿水流方向淤泥各粒组的百分含量

表 4 淤泥粒径分布特征值

淤泥编号	砂粒含量/%	粉粒含量/%	黏粒含量/%	胶粒含量/%	d_{10}/mm	d_{30}/mm	d_{50}/mm	d_{60}/mm	C_u	C_c
S	19.58	61.32	19.10	9.84	0.000 3	0.001 0	0.021 8	0.032 2	14.81	1.54
Z	41.56	47.99	10.45	5.92	0.004 9	0.024 6	0.062 4	0.092 3	19.05	1.39
X	51.52	37.97	10.51	6.18	0.004 8	0.024 4	0.097 1	0.176 7	36.19	0.72

2.5 击实特性分析

通过标准击实试验获得 3 种淤泥的击实曲线,如图 6 所示。它们均具有明显单峰特征,与一般黏性土的击实曲线特征一致。S、Z、X 淤泥的最大干密度从 $1.32 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 下降到 $1.05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,最优含水率则由 29.2% 增加到 40.5%。值得注意的是,城市河道淤泥的最大干密度显著低于一般黏性土的最大干密度

($1.6 \sim 1.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 主要原因是淤泥中存在大量有机质, 随着有机质含量增加, 最大干密度下降, 两者呈现负相关关系^[14-15]。有机质成分具有一定弹性变形特征, 将降低土体压实性。此外, 有机质的强吸附性促使土体团聚体的形成, 土体孔隙比增加, 密实度降低。3 条击实曲线在含水率低于最优含水率时, 干密度随含水率的增加而缓慢增大, 曲线形态平滑, 这与 Aragon 等^[14] 和 Paradelo 等^[16] 对富含有机质土击实特性的研究结果相同。

2.6 压缩性分析

对击实淤泥进行一维压缩试验, 压缩曲线如图 7 所示。由于 3 种淤泥压实性的差异, X 淤泥初始孔隙比 e 最大, S、Z、X 淤泥的压缩性依次增加, 100~200 kPa 的压力对应的压缩模量 E_s 分别为 8.50、3.55、3.34 MPa, 均属于中等压缩性。压缩性的变化规律主要受到淤泥中有机质含量的影响。

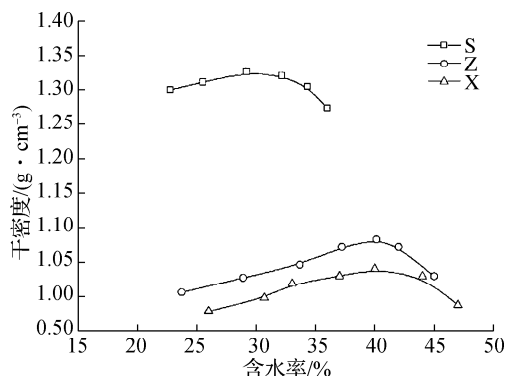


图 6 淤泥击实曲线

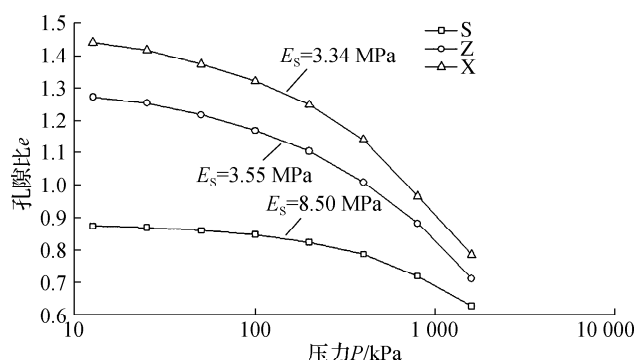


图 7 淤泥压缩曲线

2.7 抗剪强度分析

通过直接剪切试验获得 3 种淤泥的抗剪强度参数, 竖向应力与抗剪强度的关系如图 8 所示。S 淤泥的黏聚力最大, 而摩擦角最小, Z 淤泥的摩擦角最大。土体抗剪强度的影响因素主要包括密实度、颗粒性状、矿物成分和粒径级配等, S 淤泥细粒含量最多, 粒间范德华力和静电力较强, 因而具有较大的黏聚力。随着粒径的逐渐增加, 粒间的物理化学作用减弱, 黏聚力下降, 如 Z 淤泥和 X 淤泥。同时, 粒径增加可能导致粒径咬合作用增强, 进而增加土体内摩擦角。值得注意的是, Z 淤泥和 X 淤泥具有较为接近的成分特征, 而抗剪强度参数却有较大差异, 这很可能与其有机质含量有关。

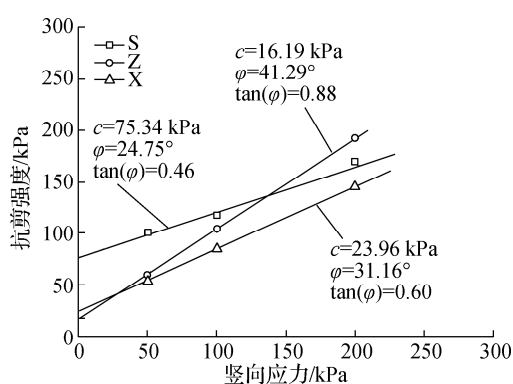


图 8 淤泥抗剪强度与竖向应力的关系

3 城市河道淤泥资源化利用对策

基于土工特性试验结果, 与其他来源淤泥^[1-6] 相比, 城市河道淤泥具有粗粒含量高、黏粒含量低、有机质含量高的特点。同时, 其重金属含量超过危险废物限定值, 存在污染风险。富含有机质和重金属超标是城市河道淤泥资源化过程中亟须解决的关键问题。有机质成分将降低土体密实度, 增加土体压缩性和吸附性, 阻碍固化剂水化反应, 热处理时将变为气体逃逸。重金属稳定效果需要结合毒性浸出试验进行验证, 确保相关利用技术环境友好。本文主要介绍热处理和固化处理两大类方法。

从化学成分看, 城市河道淤泥与烧结砖和陶粒生产原料的化学成分较为接近, 塑性参数能满足砖坯生产的要求。将淤泥作为次要原料, 与黏土共同制备烧结砖是可行的^[17], 但其烧结工艺需要根据淤泥和黏土的性质进行具体研究。城市河道淤泥是一种富含有机质的土体, 有机质在烧结过程中, 具有成孔作用, 并能降低砖体密度。Xu 等^[18] 的研究结果表明将城市河道淤泥作为主要原料制备轻质保温砖是可行的, 砖体强度等级能达到 MU10。

固化处理技术被认为是一种适用于大量疏浚淤泥处理且经济有效的方法, 与其他的一些处理方法相比, 具有成本较低、施工方便、处理后土体力学性质较好和可有效阻碍生物降解等优点, 处理后的淤泥可以

广泛应用于道路、堤防、低洼地填方、建筑地基填方等工程。有机质成分是城市河道淤泥的敏感性土性因素,将严重阻碍固化剂的水化反应,降低固化土的工程性质,需要通过高温预处理和化学预处理的方法将其部分去除,以降低不利影响。

4 结 语

本文较为系统地研究了城市河道淤泥的基本土工特性,提出了资源化利用对策,总结如下:1)城市河道淤泥继承了周围第四系沉积物的特征,主要矿物为石英,主要黏土矿物为伊利石,化学成分主要由 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 等组成,重金属含量超过危险废物限定值,存在重金属浸出风险。2)城市河道淤泥的失重可分为3个阶段,第一阶段为自由水、结合水的蒸发;第二阶段主要为有机质的烧失;第三阶段主要为碳酸盐、硫酸盐的分解。S、Z、X淤泥3个阶段的质量损失均逐渐增加。3)从研究区域的上游到下游,受人类活动影响程度的不同,S、Z、X淤泥有机质含量逐渐增加,土粒相对密度逐渐减小,砂粒含量明显增加,粉粒含量逐渐下降,黏粒含量略有下降,平均粒径逐渐增大。4)S、Z和X淤泥的不均匀系数分别为14.81、19.05和36.19,曲率系数分别为1.54、1.39和0.72,S淤泥和Z淤泥级配良好,X淤泥级配不良。5)S、Z、X淤泥的城市河道淤泥最大干密度逐渐下降,最优含水率逐渐增大,压缩性逐渐增加,均为中等压缩性土,抗剪强度参数 C 、 φ 分别为75.34 kPa、 24.75° ,16.19 kPa、 41.29° ,23.96 kPa、 31.16° 。6)城市河道淤泥具有砂粒含量高、黏粒含量低、有机质含量高的特点,可通过热处理和固化处理进一步加以资源化利用。

参考文献:

- [1] 夏磊,顾欢达.酸雨对河道淤泥气泡混合土工程性质的影响[J].土木建筑与环境工程,2018,40(6):76-84
- [2] 朱婧,洪宝宁,刘鑫.污泥、淤泥和黏性土的压缩特性对比试验研究[J].科学技术与工程,2018,18(4):328-332
- [3] 谢新宇,朱侠达,朱德良,等.河道淤泥电渗-固化室内试验研究[J].土木工程学报,2019,52(S2):66-72
- [4] 王江营,阳滔,张贵金,等.超高含水率湖相淤泥固化试验及填筑性能分析[J].硅酸盐通报,2020,39(8):2691-2698
- [5] 许英,莫建兵,李丁丁.新型复合固化剂固化淤泥的强度特性试验研究[J/OL].工程地质学报,(2021-06-22)[2021-10-15].https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=GCDZ20210621000&uniplatform=NZKPT&v=f5QKiS-XlnfGG7TVaQdggWW0RMDcDFCDDX4_bzOn0Lhi0T6csCvAkNpnO0VSmb0
- [6] PARK J,SON Y,NOH S,et al. The suitability evaluation of dredged soil from reservoirs as embankment material[J]. Journal of Environmental Management,2016,183:443-452
- [7] HOULIHAN M,BILGEN G,DAYIOGLU A Y,et al. Geoenvironmental evaluation of RCA-stabilized dredged marine sediments as embankment material[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2021,33(1):04020435
- [8] BHAIAPPANAVAR S,LIU R,SHAKOOR A. Eco-friendly dredged material-cement bricks[J]. Construction and Building Materials,2021,271:121524
- [9] WEI Y L,KUO P J,YIN Y Z,et al. Co-sintering oyster shell with hazardous steel fly ash and harbor sediment into construction materials[J]. Construction and Building Materials,2018,172:224-232
- [10] 徐杨,段焜,曹磊.内秦淮河中段底泥淤积规律分析[J].砖瓦,2020,20(12):95-96
- [11] 胡名卫,俞毅,周聪聪,等.河道淤泥基本性能及资源化利用的研究[J].砖瓦,2019(7):25-28
- [12] 国家环境保护总局.危险废物鉴别标准(浸出毒性鉴别):GB 5085.3—2007[S].北京:中国环境出版社,2007
- [13] 殷宗泽.土工原理[M].北京:中国水利水电出版社,2007
- [14] ARAGÓN A,GARCÍA E G,FILGUEIRA R R,et al. Maximum compactibility of argentine soils from the proctor test: the relationship with organic carbon and water content[J]. Soil and Tillage Research,2000,56:197-204
- [15] THOMAS G W,HASZLER G R,BLEVINS R L. The effects of organic matter and tillage on maximum compactibility of soils using the proctor test[J]. Soil Science,1996,161:502-508
- [16] PARADELO R,BARRAL M T. Influence of organic matter and texture on the compactability of technosols[J]. Catena,2013,110:95-99
- [17] SAFHI A E,BENZERZOUR M,RIVARD P,et al. Development of self-compacting mortars based on treated marine sediments[J]. Journal of Building Engineering,2019,22:252-261
- [18] XU Y,YAN C H,XU B T,et al. The use of urban river sediments as a primary raw material in the production of highly insulating brick[J]. Ceramics International,2014,40(6):8833-8840

(责任编辑:谭彩霞)