

# 城市河道淤泥特性及改良试验初探

徐 杨, 阎长虹, 许宝田, 邵 勇, 阮晓红  
(南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093)

**摘要:** 以南京内秦淮河疏浚淤泥为例, 通过土工试验、XRD 和 X 射线荧光光谱试验等方法, 研究了城市河道淤泥的物理性质、矿物成分、化学成分等特性。试验结果显示: 秦淮河淤泥粘粒含量低、有机质含量极高, 矿物成分主要有石英和少量粘土矿物等。为了实现淤泥的资源化处理, 运用水泥、石灰无机固化材料对淤泥进行固化改良试验及改性土无侧限抗压强度试验, 结果表明随着水泥掺量增加, 水泥固化土由塑性破坏向脆性破坏过渡, 破坏应变在 1.8% ~ 2.2%, 而石灰固化土均表现为脆性破坏, 且破坏应变小于水泥土, 为 1% 左右。水泥固化土 28d 强度为 670kPa, 固化效果优于石灰, 但略低于处理一般软土的固化土强度。研究结果对处置城市河道淤泥有一定参考价值。

**关键词:** 城市河道淤泥; 矿物成分; 化学成分; 改性处理; 无侧限抗压强度

**中图分类号:** P642.13<sup>+</sup>3; P642.16<sup>+</sup>4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3665(2013)01-0110-05

因水利工程等建设和维护需要, 我国每年都要对河道进行大规模的疏浚清淤, 从而产生大量的疏浚淤泥。淤泥具有含水率高、孔隙比大、压缩性大、强度低等特点, 在工程建设中很难直接利用。如何通过资源化处理将其转化成土工材料、建筑材料等是目前这一领域的研究热点<sup>[1]</sup>。

借鉴软土处理的经验, 将石灰、水泥等固化材料加入淤泥改善其物理力学性质的研究很多。如朱伟等<sup>[2]</sup>对海洋疏浚淤泥固化处理土的基本力学性质进行了研究, 通过对大亚湾海洋疏浚淤泥不同水泥掺量和龄期的试验, 研究了固化土的强度、破坏应变随水泥掺加量的变化规律。张铁军、吉锋等<sup>[3-4]</sup>研究了生石灰处理高含水量淤泥含水率和干密度的变化规律, 提出了含水率、干密度降低率的概念和预测公式。赵仲辉等<sup>[5]</sup>对疏浚淤泥固化土的屈服剪切特征进行了研究, 分析了不同水泥掺量、龄期、初始含水量对应力、应变的影响。范昭平、冯志超等<sup>[6-7]</sup>对有机质含量、粘粒含量对淤泥固化强度的影响进行了研究, 分析了淤泥成分对固化土强度的影响。他们主要针对湖泊相、海相淤泥研究了固化材料掺量、含水量、淤泥成分对固化土

的物理力学性质的影响, 但对城市河道淤泥特性及其固化处理效果的研究还不多。

不同水系的河道淤泥性质差别很大<sup>[8]</sup>, 相同的固化材料加固不同种类的淤泥效果也有很大差异。由于物质来源和沉积环境不同, 城市河道淤泥的性质和湖海相淤泥性质有很大不同, 有必要对城市河道淤泥进行专门研究。本文以南京秦淮河淤泥为例, 着重研究了城市河道淤泥的物理性质、矿物成分、化学成分等特性, 基于这些特点, 采用水泥、石灰传统固化材料探究对城市河道淤泥的固化效果。

## 1 城市河道淤泥特性

### 1.1 基本物理性质

淤泥试样取自南京市内秦淮河中段(桃叶渡至铁窗棂泵站), 取样深度为河底 0 ~ 0.5m, 该段河道淤积深度 20 ~ 100cm。根据土工试验标准方法(GB/T 50123-1999)<sup>[9]</sup>, 对淤泥的基本物理性质进行相关试验, 结果如表 1 所示。

表 1 淤泥基本物理指标

Table 1 Physical properties of the dredged material

| 天然含<br>水率(%) | 土粒比重<br>$G_s$ | 重度<br>$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 塑限<br>$\omega_p$ (%) | 液限<br>$\omega_L$ (%) | 塑性指数<br>$I_p$ |
|--------------|---------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------|---------------|
| > 100        | 2.60          | 11.76                               | 29.52                | 45.27                | 16.75         |

淤泥由于长期处于水下, 结构松散, 孔隙比很大, 其含水率非常高, 达 120% ~ 180%, 远大于淤泥的液限, 加之淤泥天然结构强度非常低, 所以淤泥常处于流塑和流动状态。

**收稿日期:** 2012-02-20; **修订日期:** 2012-06-04

**基金项目:** 水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07317-007-02); 江苏省科技厅项目(BE2011772); 教育部高等学校科技创新工程重大项目培育资金项目(708043)

**作者简介:** 徐杨(1987-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为城市环境岩土工程。

E-mail: xuyang870808@163.com

淤泥的颗粒累积百分含量粒径分布曲线如图 1 所示,由颗粒分析筛分法和密度计法联合测定。从图 1 可以看出,该淤泥的粘粒含量 ( $< 0.005\text{mm}$ ) 为 16.7%,粉粒含量 ( $0.005 \sim 0.074\text{mm}$ ) 为 74.7%,砂粒含量 ( $> 0.074\text{mm}$ ) 为 8.6%。结合淤泥的液塑限值,根据土样分类塑性图,该淤泥为有机质低液限粉土 (MLO)。

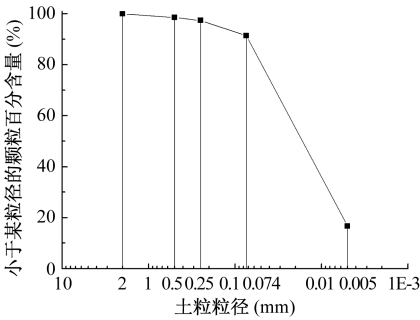


图 1 淤泥颗粒分布曲线  
Fig. 1 Grain-size distribution curves  
for the dredged material

表 2 列举了不同地区淤泥部分物理性质指标值<sup>[2-3]</sup>。由表可知,从界限含水率的角度来看,塑限含水率差异不大,秦淮河淤泥的液限比其他的要小;而秦淮河淤泥的有机质含量高于湖相和海相淤泥,其中海相淤泥含量最小,湖相淤泥次之;与之相反的是秦淮河淤泥的粘粒含量均小于湖相和海相淤泥,这使得城市河道淤泥的颗粒比表面积减小,颗粒吸附能力降低,表现为颗粒间粘结力较差。因此,对于城市河道淤泥的固化处理难度更大。

表 2 不同地区淤泥部分物理性质对比  
Table 2 Some of the physical properties of different  
regions of the dredged material

| 取样点   | 有机质<br>含量 (%) | 粘粒含<br>量 (%) | 液限<br>(%) | 塑限<br>(%) | 塑性<br>指数 |
|-------|---------------|--------------|-----------|-----------|----------|
| 南京秦淮河 | 8.6           | 16.7         | 45.27     | 29.52     | 16.75    |
| 哈德逊河  | -             | 24           | 100       | 38        | 62       |
| 淮安白马湖 | 4.2           | 30.2         | 66.7      | 29.3      | 37.4     |
| 深圳大亚湾 | 1.39          | 40           | 73.4      | 29.3      | 44.1     |

1.2 矿物成分分析

淤泥矿物分析衍射图谱如图 2 所示,从图中可以看出矿物成分以石英为主,而主要粘土矿物高岭石、蒙脱石、伊利石的衍射峰较难辨认,峰值较低,表明粘土矿物含量较低。

1.3 化学成分分析

取具有代表性的 2 个土样进行化学成分分析。试

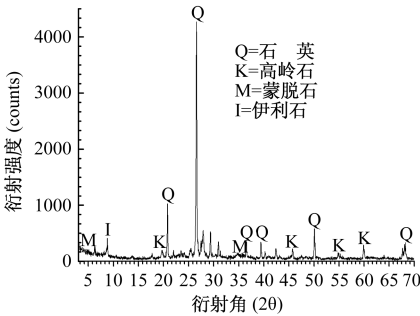


图 2 淤泥 XRD 衍射图  
Fig. 2 XRD patterns for the dredged material

验采用美国热电 ARL9800XP + 型 X 射线荧光光谱仪,结果见表 3,其中百分含量均为质量分数。从表 3 可以看出,秦淮河淤泥  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$  平均含量分别为 61.365%、4.76%,与一般粘土比较相近;而  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$  的含量稍低于一般粘土。一般来说,粉粒中物质成分以石英为主,石英的化学成分为  $\text{SiO}_2$ ,该淤泥中粉粒含量为 74.7%,但其  $\text{SiO}_2$  含量并非特别高。分析原因是,淤泥中的粉粒沉积条件较为特殊且主要物质来源为城市的建筑垃圾。

表 3 试验淤泥的化学成分  
Table 3 Chemical compositions for the dredged material

| 成分 (%)                  | 样品 1  | 样品 2  | 平均值    | 一般粘土        |
|-------------------------|-------|-------|--------|-------------|
| $\text{SiO}_2$          | 61.33 | 61.40 | 61.365 | 55.9 ~ 67.1 |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 11.71 | 11.57 | 11.64  | 13.4 ~ 20.7 |
| $\text{CaO}$            | 4.74  | 4.78  | 4.76   | 0.5 ~ 12.2  |
| $\text{FeO}$            | 4.69  | 4.55  | 4.62   | 5.6 ~ 7.6   |
| $\text{MgO}$            | 1.99  | 2.07  | 2.03   | 0.9 ~ 6     |
| $\text{SO}_3$           | 1.26  | 1.29  | 1.275  | -           |
| $\text{K}_2\text{O}$    | 2.04  | 2.12  | 2.08   | -           |
| IL                      | 2.96  | 2.83  | 2.895  | -           |
| 烧失量                     | 9.28  | 9.39  | 9.335  | -           |

2 改良试验研究

2.1 试验方案

将淤泥取回实验室风干(风干含水率为 2.62%)粉碎,过 2mm 筛备用。分别以水泥、石灰为固化材料加入淤泥对其进行固化试验,试验方案如表 4 所示,固化材料百分含量为固化剂与淤泥干土质量百分比。由于经环保式清淤工艺机械脱水后,淤泥试样的含水率在 40% 左右,所以在混合固化材料和风干淤泥材料时,根据风干含水率计算所需水量加入混合土样使含水率为 40%。试验的制备方法是先将过筛土与固化材料人工混合均匀,配置含水率为 40% 的混合样,人工搅拌均匀后,采用静压法分 3 层装入内径 3.91cm、高

8.0cm 的钢制模具内。淤泥试样装入模具后放入  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度  $>95\%$  的养护箱中养护,1d 后脱模,继续养护至相应龄期进行无侧限抗压强度试验,每组 3 个试样,结果取其平均值。

表 4 各试样固化材料掺量

Table 4 Additive content of each sample

| 编号 | 水泥 (%)          | 石灰 (%) |
|----|-----------------|--------|
| C  | 5,8,10,12,15,20 | 0      |
| S  | 0               | 6,9,12 |

## 2.2 试验结果分析

采用水泥作为固化剂进行淤泥处理的固化土无侧限抗压强度试验结果见图 3。由图可以看出,随着水泥掺量增加,固化土的无侧限抗压强度不断增加,且水泥掺量为 10%~20% 范围比 5%~10% 范围固化土强度增长速率大,随着龄期增加,这种增强效果越明显。所以,加大水泥用量可以明显提高固化土强度,但当然也会提高处理造价。掺量 20% 固化土 28d 龄期强度仅 670kPa,低于一般软土的水泥固化土强度<sup>[10~11]</sup>。分析其原因是试验淤泥的有机质含量极高所致,有机质能有效吸收  $\text{Ca}^{2+}$ ,随着有机质含量增加,对  $\text{Ca}^{2+}$  的吸收能力越强<sup>[12]</sup>。水泥水化反应产生的主要产物为水化硅酸钙(CSH)和水化铝酸钙(CASH),CSH/CASH 将土颗粒胶结为较大团粒形成一定结构强度。内秦淮河中段淤泥有机质含量较高,将吸收大量  $\text{Ca}^{2+}$ ,使得水泥水化反应没有充足的  $\text{Ca}^{2+}$ ,从而阻碍了水泥水化物 CSH/CASH 的生成。CSH/CASH 对颗粒的胶结作用和膨胀充填空隙的作用没有充分发挥,因而水泥固化的淤泥土强度偏低。

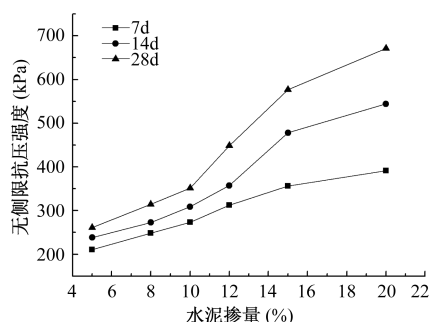


图 3 水泥试样无侧限抗压强度随掺量的变化

Fig. 3 Effect of cement content on UCS

采用生石灰作为固化剂进行淤泥处理的固化土无侧限抗压强度试验结果见图 4。由图可以看出,随着石灰掺量的增加,试样强度不断增加;同样随着龄期不断增加,石灰不同掺量的固化土强度也均不断增大,由

龄期 28d 的固化土来看,石灰掺量从 6% 提高到 9%,强度从 0.3MPa 提高到 0.42MPa,强度增长 40%,而石灰掺量从 9% 提高到 12%,强度仅从 0.42MPa 提高到 0.44MPa,强度增长 4.76%,显然采用生石灰进行固化处理其掺量不宜过高,以 9% 的掺量为宜。以生石灰进行固化处理过程中,主要有以下几种反应<sup>[13]</sup>:  $\text{Ca}^{2+}$  在粘土颗粒表面发生离子交换,降低土体塑性;石灰在水环境下与  $\text{CO}_2$  反应生成  $\text{CaCO}_3$  晶体;石灰与土体中活性  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  发生火山灰反应生成水化硅酸钙和水化铝酸钙,这两种水化物对固化土强度增长起主要作用,而生成的  $\text{CaCO}_3$  晶体非常有限。因此,随着石灰掺量不断增加,火山灰反应中石灰提供充足的  $\text{CaO}$ ,但是土体中活性  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量有限,火山灰反应受限制,所以石灰掺量继续增加,固化土强度提高不明显。

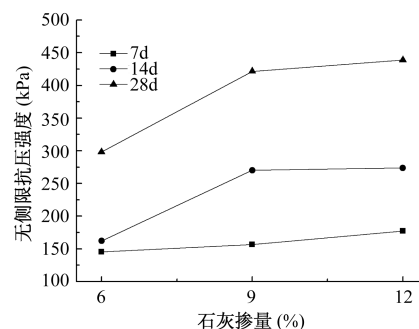


图 4 石灰试样无侧限抗压强度随掺量的变化

Fig. 4 Effect of lime content on UCS

对 2 种固化土进行压缩变形试验,其应力-应变曲线分别如图 5、6 所示。从水泥固化土的应力-应变关系曲线可以看出,随着水泥掺量增加,固化土的变形破坏特征表现为从塑性变形向弹-塑性变形过渡,且破坏时对应的应变有小幅度减小,破坏应变为 1.8%~2.2%。当水泥固化土处于小应变变形范围内 ( $\varepsilon < 1\%$ ),其应力应变关系近似为线弹性,随着变异性继续增大,水泥固化土出现塑性变形。通过对不同水泥掺量的固化土应力-应变曲线分析,发现水泥掺量 10% 是一个很有意义的界限值,当水泥掺量小于 10% 时,水泥固化土的变形破坏特征表现为塑性材料的变形破坏特点;当水泥掺量大于 10% 时,水泥土则表现为脆性材料的变形破坏特点。

从石灰固化土的应力-应变关系曲线(图 6)可以看出,3 种掺量下的石灰固化土的变形破坏表现为脆性材料的变形破坏特征,且破坏应变较小,在 1% 附近,明显小于水泥土的破坏应变。石灰掺量从 9% 增

加到12%,其应力应变曲线形态极为相似,强度并无明显提升,这也说明当石灰掺量超过9%时,继续增加石灰掺量对固化土的强度增长并无显著效果。

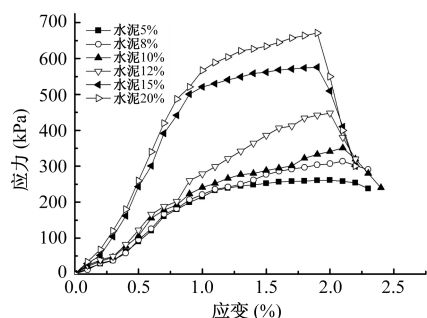


图5 水泥土28天龄期应力-应变关系曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of different cement contents (28d)

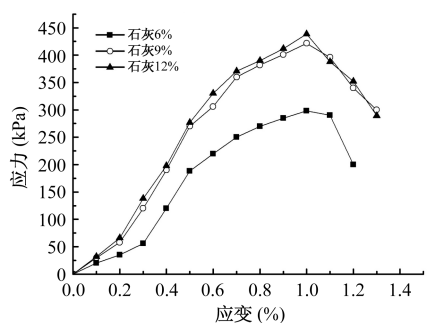


图6 石灰土28天龄期应力-应变关系曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of different lime contents (28d)

### 3 结论

(1) 对比不同地区淤泥基本物理性质,城市河道淤泥主要特征为粉粒含量高,粘粒含量低,塑性指数  $I_p = 16.75$ ,属于有机质低液限粉土;有机质含量高,达到8.6%,高于一般湖相和海相淤泥。

(2) 矿物成分和化学成分试验结果显示:秦淮河淤泥矿物成分主要有石英和少量粘土矿物等;化学成分以  $\text{SiO}_2$  为主,各组分含量与一般粘土相差不大。

(3)  $\text{Ca}^{2+}$  是水泥等固化剂水化反应的必需元素,由于有机质对  $\text{Ca}^{2+}$  有很大的吸附能力,该淤泥中大量有机质势必会对固化剂的水化反应起阻碍作用,因此水泥和石灰固化效果欠佳;随着水泥掺量增加,水泥固化土变形破坏特征表现为由塑性向弹-塑性变形破坏过渡,破坏应变在1.8%~2.2%,而石灰固化土均表现为脆性变形破坏特征,且破坏应变小于水泥固化土,为1%左右。

(4) 对于秦淮河淤泥的有机质含量不同河段有一定差别,还有待进一步研究。由于有机质的影响,掺量

20%的水泥固化土28d强度为670kPa,低于一般软土固化处理的强度。研究结果对秦淮河淤泥处置有一定参考价值。

### 参考文献:

- [1] 朱伟,张春雷,刘汉龙,等. 疏浚泥处理再生资源技术的现状[J]. 环境科学与技术, 2002, 25(4): 39-41. [ZHU W, ZHANG C L, LIU H L, et al. The status of dredged spoils utilization [J]. Environmental Science and Technology, 2002, 25(4): 39-41. (in Chinese)]
- [2] 朱伟,张春雷,高玉峰,等. 海洋疏浚泥固化处理土基本力学性质研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2005, 39(10): 1561-1565. [ZHU W, ZHANG C L, GAO Y F, et al. Fundamental mechanical properties of solidified dredged marine sediment [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39(10): 1561-1565. (in Chinese)]
- [3] 吉锋,张铁军,张帅,等. 高含水量疏浚淤泥填料化处理土的干密度变化规律[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2010, 40(4): 840-843. [JI F, ZHANG T J, ZHANG S, et al. Variation of dry density of high-water-content dredged clays treated with quick lime [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(4): 840-843. (in Chinese)]
- [4] 桂跃,杜国庆,张勤羽,等. 高含水率淤泥生石灰材料化土击实方法初探[J]. 岩土力学, 2010, 31(增1): 127-136. [GUI Y, DU G Q, ZHANG Q Y, et al. Study of compaction method of lime-stabilized high water content sludge [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1): 127-136. (in Chinese)]
- [5] Chiu C F, Zhu W, Zhang C L. Yielding and shear behaviour of cement-treated dredged materials [J]. Engineering Geology, 2008, 103: 1-12.
- [6] 冯志超,朱伟,张春雷,等. 粘粒含量对固化淤泥力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 3052-3057. [FENG Z C, ZHU W, ZHANG C L, et al. Influence Of Clay Content On Mechanical Properties Of Solidified Silt [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 3052-3057. (in Chinese)]
- [7] 范昭平,朱伟,张春雷. 有机质含量对淤泥固化效果影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1327-1334. [FAN Z P, ZHU W, ZHANG C L. Experimental study on influence of organic matter content on solidified dredging [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1327-1334. (in Chinese)]

- Chinese) ]
- [ 8 ] 邵玉芳,何超,楼庆庆. 西湖疏浚淤泥的固化试验 [J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2007, 28(5): 442 - 445. [ SHAO Y F, HE C, LOU Q Q. Stabilization of dredged silt from West Lake [J]. Journal of Jiangsu University : Natural Science Edition, 2007, 28(5): 442 - 445. (in Chinese) ]
- [ 9 ] GB/T 50123 - 1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. [ GB/T 50123 - 1999 Standard For Soil Test Method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese) ]
- [ 10 ] 李志斌,叶观宝,徐超. 水泥土添加剂室内配比试验的模糊正交分析[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(4): 117 - 119. [ LI Z B, YE G B, XU C. Fuzzy orthogonal analysis on lab mixing proportion test of cement soil additive [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(4): 117 - 119. (in Chinese) ]
- [ 11 ] 兰凯,黄汉盛,鄢泰宁. 掺入矿渣的水泥土强度模型试验研究及其配方优化[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(5): 115 - 119. [ LAN K, HUANG H S, YAN T N. Model test research on compressive strength of cement-soil with slag and mix proportion optimization [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(5): 115 - 119. (in Chinese) ]
- [ 12 ] Erdem O Tastan, Tuncer B Edil, Craig H Benson, *et al.* Stabilization of Organic Soils with Fly Ash [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 9: 819 - 833.
- [ 13 ] F G Bell. Lime stabilization of clay minerals and soils [J]. Engineering Geology, 1996, 42: 223 - 237.

## A study on the properties and modification test of the dredged material of an urban river

XU Yang, YAN Chang-hong, XU Bao-tian, SHAO Yong, RUAN Xiao-hong

(School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** The dredged material (DM) of Qinhuai River, Nanjing, was taken as an example. Through the basic geotechnical tests with XRD and X-ray fluorescence spectrometer, the basic physical properties, mineral composition, chemical compositions of the material were studied, respectively. The results show that the DM of the Qinhuai River has a very low content of clay, its organic matter content is very high; mineral composition are mainly composed of quartz and clay minerals. In order to study resource-reusing treatment of DM, cement and lime were added to solidify the soil for comparison. The unconfined compressive strength (UCS) tests indicate that with the increasing cement content, the failure of cement-solidified soils are converted from plasticity to brittle in failure strain of 1.8% to 2.2%, while all the lime-solidified soils of about 1%. The UCS value of 28d cement-solidified soil is only 670 kPa. The curing effect of cement is better than that of lime, but its strength is lower than the cement-solidified strength of general soft clay. The research result is beneficial to the disposal of DM of urban river.

**Key words:** dredged material of urban river; mineral composition; chemical composition; modification treatment; unconfined compressive strength

责任编辑:汪美华