

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.02.002



# 固化疏浚淤泥作路基材料工程特性试验研究

丁慧, 孙秀丽, 刘文化, 张志超, 张伟, 宋碧颖

(江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:**为了探讨粉煤灰和工业矿粉固化疏浚淤泥作路基材料的可行性,通过一系列室内实验研究了不同固化剂配比对固化淤泥击实特性、水稳定性、承载力和抗剪强度的影响。实验结果表明,不同固化剂配比下固化淤泥的最大干密度均超过  $1.50 \text{ g/cm}^3$ ,最优含水率约为  $20\sim 21\%$ ;淤泥固化处理后浸水 4 d 的膨胀率均不超过  $1.1\%$ ,水稳性大幅提升;矿粉含量越高,粉煤灰含量越低, CBR (California Bearing Ratio) 值越高,土样的承载力越高,抗剪强度也越高。不同工况浸水 4 d 的 CBR 值均达到了较高的水平,工况 SD10FA20MP(淤泥:粉煤灰:矿粉=7:1:2) CBR 值最高,达到了  $34.8\%$ ,是规范中高速、一级公路路基填料要求最低 CBR 值的 4.35 倍,作路基填料使用可行。

**关键词:**固化;疏浚淤泥;粉煤灰;矿粉;抗剪强度;路基填料

中图分类号: TU411 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2017)02-0011-08

## Experimental analysis of engineering properties of solidified sludge as roadbed filling material

*Ding Hui, Sun Xiuli, Liu wenhua, Zhang Zhichao, Zhang wei, Song biying*

(School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214000, Jiangsu, P. R. China)

**Abstract:** To discuss the feasibility of using the fly ash and industrial slag solidified dredged sludge as roadbed material, a series of laboratory tests were performed to investigate the effect of curing agent ratios on the compaction properties, water stability, bearing capacity and shear strength. The test results showed that the maximum dry density of the solidified sludge with different curing agent ratios are higher than  $1.50 \text{ g/cm}^3$ , and the optimum moisture content are about  $20\% \sim 21\%$ . The soaking induced expansion rate with the soaking time of 4 days are less than  $1.1\%$ , which indicates the water stability are ameliorated after solidification. With the decrease of fly ash and the increase of mineral powder, the CBR (California bearing ratio) and the shear strength are greatly increased. The solidified sludge with different curing agent ratios

收稿日期: 2016-06-27

基金项目: 国家自然科学基金(51609102); 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放基金(LP1613); 国家级大学生创新训练(201510295065)

作者简介: 丁慧(1995-), 女, 主要从事固体废弃物安全处理处置及资源化利用化利用研究, (E-mail) dingding5072@126.com。

孙秀丽(通信作者), 女, 副教授, (E-mail) sunxiuli@jiangnan.edu.cn。

Received: 2016-06-27

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51609102); State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology (No. LP1613); National College Students Innovation Training Program (No. 201510295065)

**Author brief:** Ding Hui(1995-), main research interests: safe disposal of municipal solid waste and resource utilization, (E-mail) dingding5072@126.com.

Sun Xiuli (corresponding author), associate professor, (E-mail) sunxiuli@jiangnan.edu.cn.

have high CBR after soaking for 4 days. The sample of SD10FA20MP has the highest CBR (34.8), which is 4.35 times of lowest requirement of roadbed filling of highway. It is concluded that it is feasible to use the fly ash and industrial slag solidified dredged sludge as roadbed filling material.

**Keywords:** solidification; dredged sludge; fly ash; mineral powder; shear strength; roadbed filling material

随着湖泊和河流的治理、航道疏浚等清淤工程的开展,疏浚淤泥的产量迅速增加<sup>[1]</sup>。传统的吹填和抛泥处置淤泥会占地,引起环境问题,同时也会造成资源的浪费。基于淤泥含水率高、黏粒含量低、强度低的特点,在开发利用前必须对其进行处理。同时,燃煤电厂排出的粉煤灰逐年增长,不仅占用土地,而且污染大气和水系,甚至还会对人体和生物造成危害。2015年,中国粉煤灰产量达到6.2亿t,居世界首位。然而,对环境危害极大的粉煤灰综合利用率目前实际只有30%左右。因此,如果将河湖淤泥和粉煤灰,矿渣等工业废料再生资源化利用并将它作为路基等填土材料使用,在降低成本、保护环境的同时,还能够解决道路、桥梁等工程经常遇到的构筑物填筑材料短缺的问题。

化学固化淤泥是通过向淤泥中加入固化材料对其固化从而改善其工程特性的方法,具有处理量大,施工简便灵活的特点<sup>[2-3]</sup>。该技术可利用废弃矿渣和粉煤灰等废弃物的火山灰和潜在胶凝特性,既能保护环境,又能实现废弃物的再生利用,达到可持续发展的目的。很多学者已经针对固化土的物理属性、力学特性和变形规律等方面开展了对疏浚淤泥固化处理的研究,分析了强度增长机制和影响因素,还有学者给出了强度与固化剂掺量及龄期的预测数学关系式<sup>[4-7]</sup>。Lucena等<sup>[8]</sup>采用水泥、石灰和乳化沥青乳液固化污泥,通过力学实验研究表明固化土可作为路基(路面)工程用土。Bai等<sup>[9]</sup>采用石灰、矿渣和建筑垃圾粉作为固化材料固化河道淤泥,通过室内实验和现场路基实验证实固化后河道淤泥满足路基填料性能要求。O'KELLY<sup>[10]</sup>研究了淤泥在不同含水率状态下的干燥、击实、抗剪强度、压缩固结等物理力学特性。桂跃等<sup>[11]</sup>研究了磷石膏固化淤泥的强度和渗透性,得到了各组分最佳掺量比例,是一种“以废治废”的方法。白兴兰等<sup>[12]</sup>采用水泥、粉煤灰和石灰固化淤泥,固化土后期强度满足填土要求。陈萍等<sup>[13]</sup>采用焚烧底灰和疏浚淤泥混合做填土工程材料,30%的焚烧底灰掺量和4%水泥掺量对初始含水率为50%~70%的疏浚淤泥的固化效果可以满足填土材料的强度要求。黄英豪等<sup>[14]</sup>研

究了击实对不同水泥添加量和不同养护龄期下固化淤泥的密度、干密度、CBR和无侧限抗压强度的影响规律。章培培等<sup>[15]</sup>通过对微观构造的观察分析来研究淤泥混合土的强度特性和破坏机理。

目前研究中用粉煤灰作固化剂的相关数据很少,以致粉煤灰和矿粉在固化处理淤泥理论和工程应用方面缺乏必要的土工参数。本着“以废治废”的原则,以太湖疏浚淤泥为研究对象,用粉煤灰、矿粉作固化剂,研究了固化淤泥的力学特性、水稳定性和抗剪强度,以及用于道路路基填筑的可行性。致力于实现废弃淤泥与工业废弃物双重资源化利用,达到可持续发展的目标。

## 1 试验材料及配比

### 1.1 试验淤泥

试验所用淤泥取自无锡市太湖疏浚淤泥,其基本物理性质指标如表1所示。淤泥的含水率达到68.9%,液限达到62.4%,根据土的分类方法,试验用泥属于高含水率高液限黏土<sup>[16]</sup>。

表1 无锡市太湖疏浚淤泥物理特性  
Table 1 Physical properties of dredged sludge

| 含水率<br>$\omega/\%$ | 密度<br>$\rho/\text{cm}^3$ | 液限<br>$\omega_L/\%$ | 塑限<br>$\omega_P/\%$ | 有机质<br>含量/ $\%$ | 塑性指<br>数 $I_P$ | 液性指<br>数 $I_L$ |
|--------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|-----------------|----------------|----------------|
| 68.9               | 2.66                     | 62.4                | 27.7                | 4.4             | 34.7           | 1.19           |

### 1.2 固化材料

试验采用粉煤灰和矿粉作淤泥固化材料。粉煤灰和矿粉的级配曲线如图1所示。

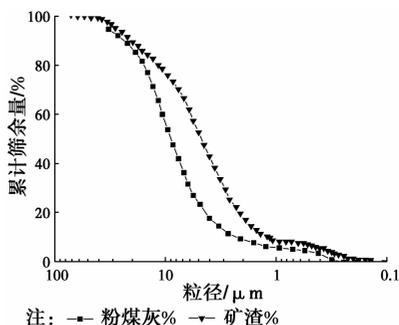


图1 粉煤灰和矿粉颗粒分析曲线

Fig. 1 The grain distribution of fly ash and mineral powder

由图1可知,粉煤灰的颗粒粒径主要集中在5~20 μm,矿粉的颗粒粒径主要集中在2~5 μm,粉煤灰的平均粒径较矿粉大。

粉煤灰和矿粉的主要化学成分见表2。粉煤灰主要化学成分为SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,含量分别占总质量的50.44%,32.14%和6.49%,且Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>与SiO<sub>2</sub>质量分数大于70%,依据《用于波特兰水泥混凝土掺合料的粉煤灰和原状或煅烧的天然火山灰》(ASTMC 618—2003),试验所用粉煤灰是F类粉煤

表2 粉煤灰和矿粉的主要化学成分

Table 2 The main chemical compositions of fly ash and slag

| 成分  | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | CaO   | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | SO <sub>3</sub> | LOSS  |
|-----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|-------|
| 粉煤灰 | 50.44            | 32.14                          | 6.49                           | 0.69 | 5.79  | 1.33             | 0.34              | 1.27             | 0.48            | 2.12  |
| 矿粉  | 34.94            | 17.25                          | 0.64                           | 8.32 | 34.64 | 0.52             | 0.14              | 0.74             | 2.20            | 0.004 |

### 1.3 固化剂配比

以粉煤灰、矿粉的掺量为变量,设置4个工况,分别为SD25FA5MP、SD20FA10MP、SD15FA15MP、SD10FA20MP,各固化剂掺加量见表3,淤泥、水玻璃掺量不变,分别为混合料总干质量的70%和2%。

表3 固化淤泥各组分含量

Table 3 Components of solidified sediments

| 编号 | 工况         | 淤泥/<br>% | 粉煤<br>灰/% | 矿粉/<br>% | 水玻<br>璃/% |
|----|------------|----------|-----------|----------|-----------|
| 1  | SD25FA5MP  | 70       | 25        | 5        | 2         |
| 2  | SD20FA10MP | 70       | 20        | 10       | 2         |
| 3  | SD15FA15MP | 70       | 15        | 15       | 2         |
| 4  | SD10FA20MP | 70       | 10        | 20       | 2         |

注:FA(fly ash)指粉煤灰;MP(mineral powder)指矿粉

## 2 试验方法

根据《土工试验规程》<sup>[17]</sup>进行液塑限实验、击实实验、承载比实验和直剪实验。通过液塑限联合测定仪进行液塑限实验,求出各组工况的塑限值,并通过塑限值预估击实试验最优含水量,按照表3所示设计配比添加粉煤灰、矿粉、水玻璃进行干法制样后

灰。F类粉煤灰本身不具水硬性,需要通过碱性激发剂激发潜在活性产生水硬性。

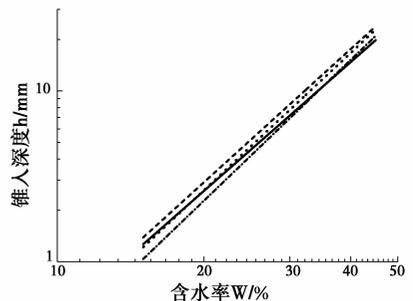
矿粉既可充当固化剂与淤泥发生反应,又可充当碱活性剂与粉煤灰中的活性Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>发生火山灰反应。矿粉中的铝、钙、硅等氧化物可以作为土骨架的组成部分,CaO、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>可以与土壤发生胶结作用,提高路基的承载力。水玻璃作碱激发剂,激发固化剂的活性。

进行击实试验,测定各工况试样的最优含水量及干密度。在击实实验的基础上,进行最优含水量条件下的承载比(CBR)实验和直剪实验。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 固化淤泥的液塑限

锥入度与含水率的关系曲线( $h-w$ )如图2所示,取 $h=17$  mm处含水率为液限, $h=2$  mm处含水率为塑限。最终测得4个工况的液塑限值如图3所示。由图可知,淤泥的液塑限和塑性指数大幅度降低,液性指数稍有降低,粉煤灰掺量对固化淤泥物理状态的有一定的影响。按照土的分类方法,固化淤泥属于硬塑态粘土。



注: --- SD10FA20MP ..... SD15FA25MP  
— SD20FA10MP - · - · SD25FA5MP

图2 混合物锥入深度与含水率关系曲线

Fig. 2 Relationship of penetration depth and moisture content of mixture

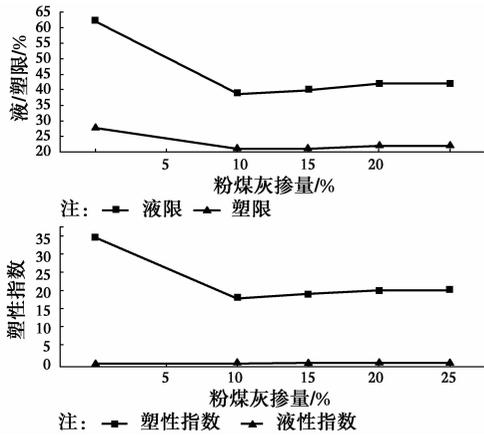


图 3 固化淤泥物理状态指标变化曲线

Fig. 3 Curves of physical state index of solidified sediments

### 3.2 固化淤泥的击实特征

固化淤泥击实曲线,即干密度随含水率的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知,含水率低于最优含水率时,含水量低,土中的粘粒扩散层不能够充分发展,团粒结构间作用力强,土体很难压密;含水率高于最优含水率时,含水量升高,粘粒扩散层充分发展,粒间作用力减小,击实作用使得团粒被挤压,颗粒趋于定向排列,孔隙比增大,密度减小。

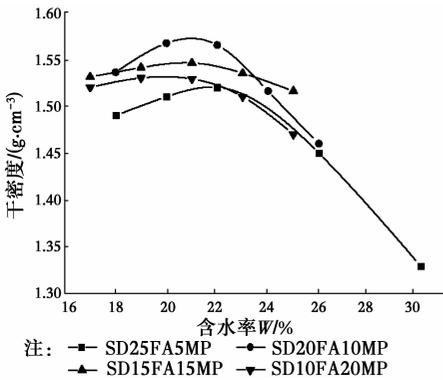


图 4 固化淤泥的击实曲线

Fig. 4 Compaction curves of solidified sediments

固化淤泥最大干密度和最优含水率的变化曲线如图 5 所示。通过图 5 可以直观地看出,最大干密度几乎没有变化;在一定范围内,随着粉煤灰含量升高,矿粉含量降低,固化淤泥的最优含水率稍有增大。这是因为粉煤灰颗粒中含有较多的碳粒,造成粉煤灰吸水性与矿粉相比相对较强,所以随着粉煤灰含量增加,矿粉含量降低,固化土达到最优含水率的需求量相对有所增加。

另外,还可以发现最大干密度和最优含水率的变化幅度均很小,最大干密度保持在  $1.55 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$ ,最优含水率保持在  $20\% \sim 21\%$  左右。Kamata 等<sup>[18]</sup>在现场用生石灰加固淤泥发现,虽然加固后的含水量降低了,但是固化淤泥的密度变化很小。可见固

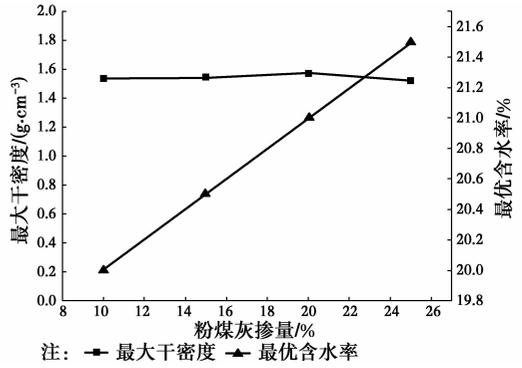


图 5 固化淤泥最大干密度(最优含水率)与粉煤灰含量的变化曲线

Fig. 5 Curves of maximum dry density (optimum moisture content) and fly ash content

化剂对比对固化土击实特性的影响较小。

### 3.3 固化淤泥的 CBR 值

3.3.1 水稳性 当浸水后试件发生剪切移动时,并不是土体颗粒之间发生摩擦,而是通过颗粒周围的水层相互摩擦。水层具有润滑作用,水层越厚,摩擦力越小,得到的 CBR 值越小。浸水 4 d 后得到的固化淤泥的 CBR 值对于地下水丰富或多雨地区的路基材料的水稳性具有重要的指导意义。

固化淤泥膨胀率与粉煤灰掺量的关系如图 6 所示,不同工况土样的膨胀率均不超过  $1.1\%$ ,固化淤泥水稳性良好,符合规范要求。随着粉煤灰含量升高、矿粉含量降低,固化淤泥的膨胀率先增大后减小。这是因为粉煤灰吸水性强,含量越高,吸水量越大,土体膨胀率越大,但由于粉煤灰含量增大,最优含水量也稍有增大,可能引起粉煤灰吸水成分先期吸水膨胀,当粉煤灰含量增大到一定值后,先期吸水率与膨胀率相互抵消,所以造成工况 SD25FA5MP 的膨胀率反而相对有所降低;矿粉活性较高,水化作用和火山灰反应过程中生成了较多胶结物质,颗粒间胶结力增大,土样膨胀率降低,从而提高了固化土的稳定性<sup>[19]</sup>。

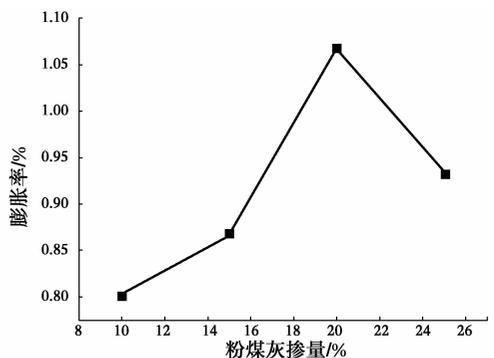


图 6 膨胀率与粉煤灰掺量的关系

Fig 6 Curves of the inflation rate and the content of fly ash

3.3.2 CBR 与固化材料掺量的关系 固化淤泥浸水 4 d 后的贯入曲线如图 7 所示。固化淤泥的贯入度随单位压力的升高而增长,且速率逐渐变大,这主要是因为压力削弱土粒间物理化学作用力,土中贯入相同深度时所需力越小。

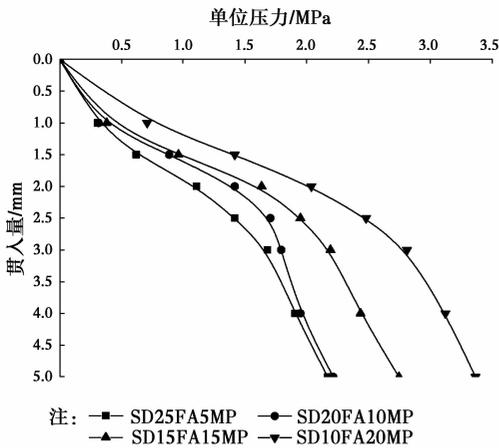


图 7 固化淤泥的贯入曲线

Fig. 7 Penetration curves of solidified sludge

不同工况固化淤泥的 CBR 值如图 8 所示。由图 8 可知,粉煤灰和矿粉的掺量对试样的 CBR 值影响很大,粉煤灰含量越低,矿粉含量越高, CBR 值越高,土样的承载力越高。从 4.4 中直剪试验的结果可以看出粉煤灰含量降低,矿粉含量升高引起土样颗粒间黏聚力增大;吸水量减少,水膜厚度降低,摩擦力增大,因此,土样 CBR 值升高。

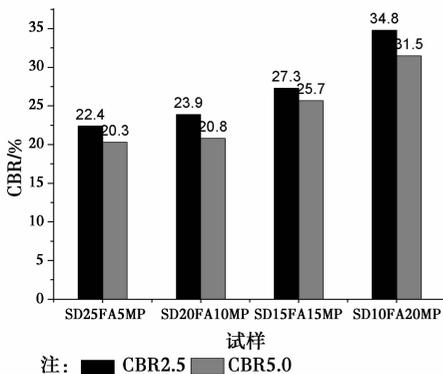


图 8 固化淤泥 CBR 值

Fig. 8 The CBR value of solidified sludge

3.3.3 CBR 与膨胀率的关系 由图 9 可见,随着膨胀率升高, CBR 值先快速降低后缓慢升高。这是因为土体含水量增加,颗粒间水膜变厚,颗粒间距离增大,粘结力减小,并且水膜加厚使颗粒间的摩擦力减小。当土体含水量达到一定值后,土体颗粒间填

满了水,土体原有结构破坏, CBR 值迅速减小。

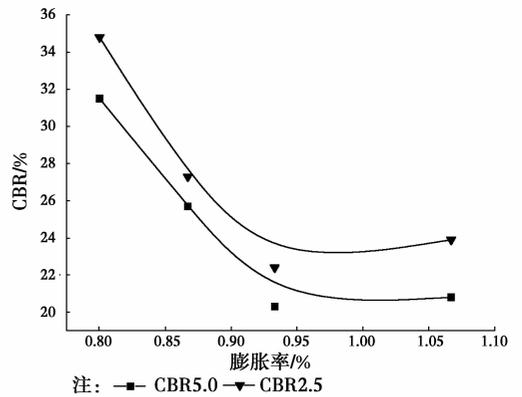


图 9 CBR 值与膨胀率的关系

Fig. 9 Curves of CBR and inflation rate

随着膨胀率变化,可以发现, CBR 有一个下限值,从这点可以看出掺粉煤灰等固化剂对土体稳定性的改良效果。根据土的膨胀变形规律,可以大致预测路基的变形情况,这为研究路基的变形提供了新的思路。

3.3.4 固化淤泥作路基材料的可行性 CBR 值是路基和稳定土路面底基层广泛应用的设计参数,根据公路路基设计规范(JTGD 30—2004)<sup>[20]</sup>和公路路基施工技术规范(JTGF 10—2006)<sup>[21]</sup>中公路路基最小强度要求,对比试验所得 CBR 值(如图 8 所示),可见所有配比下的 CBR 值均能够满足设计要求。其中当粉煤灰含量 10%,矿粉含量 20%时,固化淤泥的 CBR 值最高, CBR2.5 达到 34.8%, CBR5 达到 31.5%,是《规范》中高速、一级公路路基填料要求最低 CBR 值的 4.35 倍,是二级公路路基填料要求最低 CBR 值的 5.8 倍,作路基填料使用完全可行。

### 3.4 固化淤泥的抗剪强度

不同轴向压力下剪切力与剪切位移的关系曲线如图 10~13 所示。由图可知,在土体剪切破坏前,随着剪切位移的增大,剪切力先增后减,产生相同剪切位移时所需的剪切力越来越小。矿粉含量越高,粉煤灰含量越低,抗剪强度越高。固化淤泥内摩擦角与粘聚力的变化曲线如图 15 所示,随着矿粉含量升高,内摩擦角变化很小,而黏聚力不断增大,试样 SD10FA20MP 的黏聚力达到试样 SD25FA5MP 的 3.3 倍。

抗剪强度与轴向压力关系曲线如图 14 所示,土体的抗剪强度主要由黏聚力和摩擦力组成,黏聚力主要为颗粒间静电引力和胶结力,摩擦力主要为颗

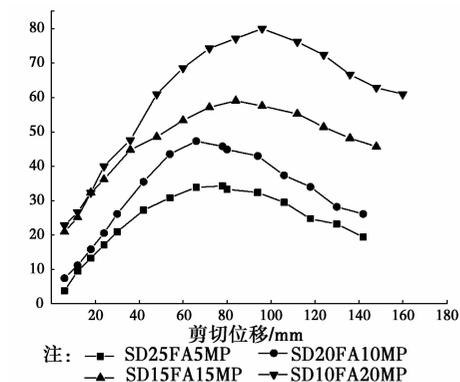


图 10 轴向压力为 50 kPa 时剪切力与剪切位移关系曲线

Fig. 10 Curves of shear strength and shear displacement ( $N=50$  kPa)

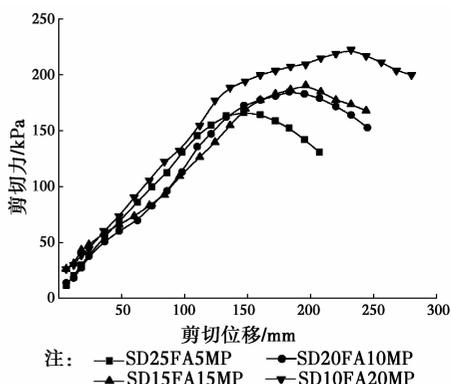


图 13 轴向压力为 300 kPa 时剪切力与剪切位移关系曲线

Fig. 13 Curves of shear strength and shear displacement ( $N=300$  kPa)

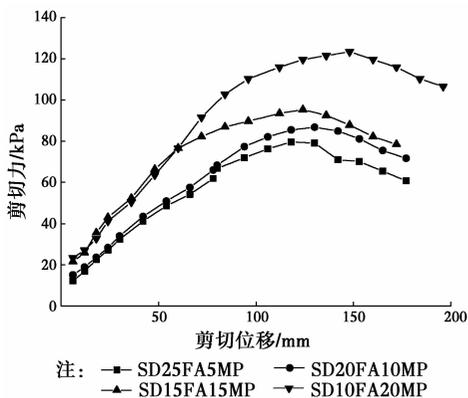


图 11 轴向压力为 100 kPa 时剪切力与剪切位移关系曲线

Fig. 11 Curves of shear strength and shear displacement ( $N=100$  kPa)

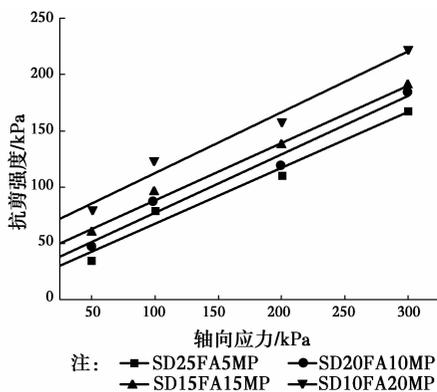


图 14 抗剪强度与轴向压力关系曲线

Fig. 14 Relationship of shear strength and vertical compression

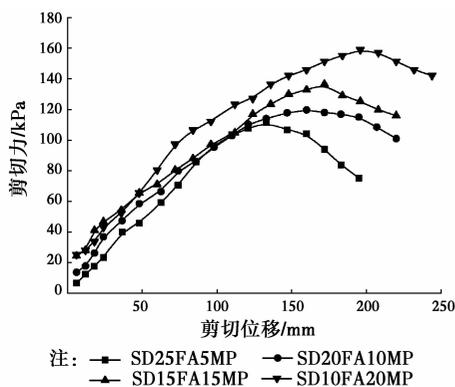


图 12 轴向压力为 200 kPa 时剪切力与剪切位移关系曲线

Fig. 12 Curves of shear strength and shear displacement ( $N=200$  kPa)

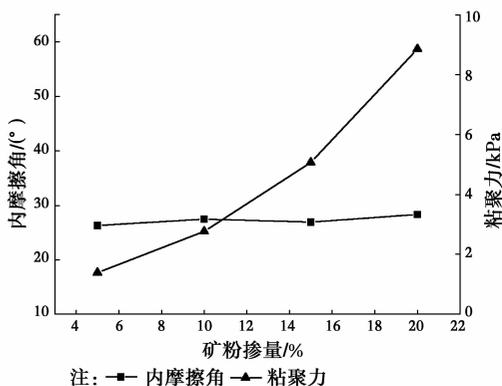


图 15 固化淤泥内摩擦角与粘聚力随矿粉含量的变化曲线

Fig. 15 Curves of shear angle and cohesion with the content of mineral powder

粒间的滑动摩擦力。

矿粉含量增加,粉煤灰含量减少时,土体抗剪强度增大,CBR 值也逐渐增大。主要是矿粉的活性远大于粉煤灰的活性,矿粉含量增加,水化产物增多,增强了固化淤泥的胶结结构强度,表现为粘聚力显著增大。

## 4 结论

1) 击实试验结果表明,固化剂掺量对固化淤泥的密度和最优含水率的影响不大,最大干密度保持在  $1.55 \pm 0.03$  g/cm<sup>3</sup>,最优含水率在 20%~21%

之间。

2) CBR 浸水试验结果表明,不同工况土样的膨胀率均不超过 1.1%,符合规范要求,固化处理能够大幅度提升淤泥的水稳性。

3) 粉煤灰和矿粉作固化剂固化淤泥具有良好的固化效果,粉煤灰和矿粉的掺量对试样的 CBR 值和抗剪强度影响很大,矿粉含量越高,粉煤灰含量越低, CBR 值越高,土样的承载力越高,土样胶结强度也越高。

4) 不同固化剂掺量下的固化淤泥均能够满足路基填土的强度要求,其中固化剂配比为粉煤灰 10%,矿粉 20% 时 CBR 值最高,达到试样 SD25FA5MP 的 1.55 倍,是《规范》中高速、一级公路路基填料要求最低 CBR 值的 4.35 倍,是二级公路路基填料要求最低 CBR 值的 5.8 倍,是较为理想的路基填料。

#### 参考文献:

- [ 1 ] DUBOIS V, ANRIAK N E, ZENTAR R, et al. The use of marine sediments as a pavement base material [J]. Waste Manage, 2009, 29 (2): 774-782.
- [ 2 ] 王国才, 吴旻炯. 滩涂淤泥固化土力学特性试验研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2015, 43(4): 468-472.  
WANG G, WU M. An experimental study on the mechanical properties of aolidified beach silt soil [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2015, 43 (4): 468-472. (in Chinese)
- [ 3 ] MEEGODA J N, PARTYMILLER K, RICHARDS M K et al. Re-mediation of chromium contaminated soils pilot-scale investigation [J]. Practice of Periodical of Hazardous. Toxic and Radioactive Waste Management, 2000, 4 (1): 7-15.
- [ 4 ] KADAMA K, ZEN K, IWATAKI K. Undrained shear strength of cement-treated soils [J]. Soils and Foundation, 2006, 46 (2): 221-232.
- [ 5 ] HORPIBUKSUK S, MIURA N, BERGADO D T. Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130 (10): 1096-1105.
- [ 6 ] HORPIBUKSUK S, MIURA N, NAGARAJ T S. Clay-water/cement ratio identity for cement admixed soft clays [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2005, 131 (2): 187-192.
- [ 7 ] FENG T W, LEE J Y. Consolidation behavior of a soft mud treated with small cement content [J]. Engineering Geology, 2001, 59 (3/4): 327-335.
- [ 8 ] LUCENA L C D F L, JUCA J F T, SOARES J B, et al. Potential uses of sewage sludge in highway construction [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26 (9): 1-7.
- [ 9 ] BAI F, SONG H, CAO L, et al. Research on the technique of utilizing river sludge as road fill [J]. Sustainable Transportation Systems, 2012(5): 532-540.
- [10] O'XELLY B C. Geotechnical properties of municipal sewage sludge [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, 24(4): 833-850.
- [11] 桂跃, 余志华, 张庆, 等. 固化磷石膏-疏浚淤泥混合土的工程性质研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(3): 147-153.  
GUI Y, YU Z, ZHANG Q. Study on the engineering properties of stabilized phosphogypsum-dredged material blend [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Editon), 2014, 46 (3): 147-153. (in Chinese)
- [12] 白兴兰, 杨尊儒, 魏东泽. 航道疏浚淤泥管中固化处理试验研究 [J]. 水利水电技术, 2016, 47(5): 134-137.  
BAI X L, YANG Z R, WEI D Z. Experimental study on in-pipe solidification of sediment dredged from waterway [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(5): 134-137. (in Chinese)
- [13] 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 P, GAO Y X, MA M L. Experimental study on solidification method for dredged mud mixed with MSWI [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46 (6): 749-756. (in Chinese)
- [14] 黄英豪, 董婵, 关云飞, 等. 击实对固化淤泥物理力学性质的影响 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1728-1733.  
HUANG Y H, DONG C, GUAN Y F, et al. Effect of compaction on physical and mechanical properties of solidified dredged materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1728-1733. (in Chinese)
- [15] 章培培, 顾欢达, 顾冬青. 河道淤泥气泡混合土微观结构及力学性质相关性 [J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(6): 78-86.  
ZHANG P P, GU H D, GU D Q. Correlation and analysis of microscopic structure and the mechanical properties about foamed mixture lightweight soil using

- river sludge [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37 (6): 78-86. (in Chinese)
- [16] 童琦. 粉煤灰-矿粉固化疏浚淤泥力学特性及机理研究 [D]. 唐山:河北联合大学, 2014.  
TONG Q. Mechanical characteristics and mechanisms of dredged silt solidified by fly ash and slag [D]. Tangshan: Hebei United University, 2014. (in Chinese)
- [17] 土工试验方法标准:GB/T50123—1999[S]. 1999.  
Code for test of soil mechanics: GB/T50123-1999 [S]. 1999
- [18] KAMATA H, AKUTSU H. Deep mixing method for site experience [J]. Journal of Japanese Society of Soil Mechanical and Foundation Engineering, (Tsuchi to Kiso), 1976, 24(12): 43-50.
- [19] 黄新, 周国钧. 水泥加固土硬化机理初探[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(1): 163-168.  
HUANG X, ZHOU G J. Hardening mechanism of cement stabilized soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16 (1): 163-168. (in Chinese)
- [20] 公路路基设计规范: JTG D30—2004[S]. 北京:人民交通出版社, 2004.  
Specifications for design of highway subgrades: JTG D30-2004 [S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese)
- [21] 公路路基施工技术规范: JTG F10—2006[S]. 北京:人民交通出版社, 2006.  
Technical specification for construction of highway subgrade: JTG F10-2006 [S]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese)

(编辑 胡玲)