

文章编号: 1000-7598 (2012) 12-3659-06

大掺量粉煤灰淤泥固化土的强度与耐久性研究

王东星^{1,2,3}, 徐卫亚^{1,2}

(1. 河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098; 2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098;
3. 国立杜埃高等矿业学院 土木与环境工程学院, 杜埃 59500, 法国)

摘要: 基于传统水泥和石灰固化处理方法, 提出了利用大掺量低钙粉煤灰、水泥和石灰固化剂进行淤泥固化处理的方法, 以期改善淤泥的强度和耐久性, 达到淤泥和粉煤灰双重资源化利用的目的。通过一系列室内试验, 探讨了该方法处理后固化淤泥的击实特征、强度特性、水稳性和耐久性。试验结果表明: 淤泥固化后最优含水率有所降低、最大干密度则略有增加; 弹性模量、无侧限抗压强度和抗拉强度均有不同程度的增加, 水泥掺量越大, 养护时间越长, 强度和弹性模量越大; 固化后淤泥水稳性得到明显改善; 浸水软化和冻融循环导致固化土抗压强度显著劣化, 冻胀融缩导致设计混合料的无侧限抗压强度减小约 22%。

关键词: 大掺量粉煤灰; 固化淤泥; 强度; 水稳性; 冻融循环

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

Research on strength and durability of sediments solidified with high volume fly ash

WANG Dong-xing^{1,2,3}, XU Wei-ya^{1,2}

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Civil and Environmental Engineering Department, Ecole des Mines de Douai, Douai 59500, France)

Abstract: Based on the traditional cement-treatment and lime-treatment methods, the stabilizers by using high volume low-calcium fly ash, lime and cement are proposed, in order to improve the strength and durability of marine sediments and to achieve the resource utilization of marine sediment and low-calcium fly ash. A series of laboratory tests were performed to investigate the variation of compaction characteristic, strength property, water stability and durability of solidified marine sediments. The experimental results show that the addition of designed stabilizers causes a decrease in optimum water content and a very slight increase in maximum dry density compared to untreated sediments. The elastic modulus, unconfined compressive strength and tensile strength increase to different levels, while the strength and elastic modulus increases more significantly with higher cement content and longer curing time. The water stability can be greatly ameliorated after solidification treatment compared to untreated sediments. Finally, the strength performance of solidified sediments could be significantly decreased by water immersion damage and thawing-freezing cycles, and the unconfined compressive strengths of designed materials are decreased by about 22% due to the thawing-freezing cycles.

Key words: high volume fly ash; solidified sediments; strength; water stability; thawing-freezing cycles

1 引言

疏浚淤泥处理处置问题是世界范围内许多国家共同面临的亟待解决的问题。在我国, 仅珠三角地带的年淤泥疏浚量就达到 $8 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。在法国, 仅 6 个自治港和 17 个内河港的淤泥疏浚量就达到 $2.5 \times$

$10^7 \sim 4.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ (干料体积)^[1]。在美国, 江河湖海航道中的淤泥疏浚量达 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中约 $5 \times 10^7 \text{ m}^3$ 淤泥直接倾倒入海洋^[2]。因此, 需要采取行之有效的措施处理如此大量的废弃疏浚泥, 以避免淤泥堆积造成占用土地和污染环境。

目前, 在海洋倾倒和陆地抛填等常规方法受到

收稿日期: 2011-08-05

基金项目: 中国国家留学基金管理委员会资助。

第一作者简介: 王东星, 男, 1984 年生, 博士研究生, 主要从事环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: dongxing-wang@163.com

越来越多国家质疑的同时,淤泥固化稳定化技术由于其成本低、效率高、效果好和可再生填土材料等优点而备受推崇。该方法既可有效解决淤泥占用土地和污染环境的问题,又可为沿海地区工程建设提供大量工程填料。国内许多学者针对疏浚淤泥固化处理进行了一系列深入研究^[3-5]。他们研究了固化土的物理属性、力学特性和变形规律,分析了强度增长机制和影响因素,其中部分学者还给出了强度与固化剂掺量及龄期的预测数学关系式。对于固化剂的探索,学者们除研究无机复合材料外^[4,6-8],如专用固化剂、粉煤灰、炉渣和磷石膏等,还有部分学者^[9]尝试利用高分子无机材料设计新型固化材料固化淤泥。

燃煤发电厂排出的粉煤灰长期大量积压堆放,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。文献[10]指出,粉煤灰排放已经成为中国工业固体废物的最大单一污染源;2009年,中国粉煤灰产量达到 3.75×10^8 t,体积达到 4.24×10^8 m³。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。

基于以废治废的思想,本文在传统水泥和石灰固化方法的基础上利用大掺量低钙粉煤灰、水泥和石灰进行海相淤泥固化处理,以期改善淤泥的力学性质和耐久性特征,达到废弃淤泥和粉煤灰双重资源化利用的目的。研究旨在:(1)分析大掺量粉煤灰淤泥固化土的击实特征与强度特性;(2)研究未固化淤泥及大掺量粉煤灰淤泥固化土的水稳性;(3)研究冻融循环对淤泥固化土的破坏作用。

2 试验材料

2.1 试验淤泥

试验淤泥取自法国敦刻尔克海港东部港区底泥疏浚工程,其基本物理性质指标如表1所示。根据土的分类方法,试验用泥属高液限黏土,其塑性图如图1所示。底泥挖出后,立刻放入预备的塑料桶中,其初始含水率为液限的1.71倍。

2.2 固化材料

研究采用低钙粉煤灰、水泥和石灰作淤泥固化材料。低钙粉煤灰中CaO含量小于1%,且SiO₂+Al₂O₃含量大于70%,归为F类粉煤灰,其基本物理性质见表2。

水泥和石灰既可作为固化剂与淤泥发生多种反应,又可充当碱激活剂与低钙粉煤灰发生火山灰反应。水泥主要化学成分为CaO、SiO₂和Al₂O₃,含量分别占总质量的63.3%、21.4%、3.3%。石灰主要

化学成分为CaO,其含量大于90%。

表1 海相淤泥物理性质指标

Table 1 Physical properties of marine sediments

初始 含水率 /%	重度 /(kN/m ³)	相对 密度	砂粒 ^① 含量 /%	黏粒 ^② 含量 /%	液限 /%	塑限 /%	有机质 ^③ /%
129.9	13.6	2.5	10.8	14.5	76.1	35.3	4.7

注:①为粒径>63 μm;②为粒径<2 μm;③为双氧水氧化法。

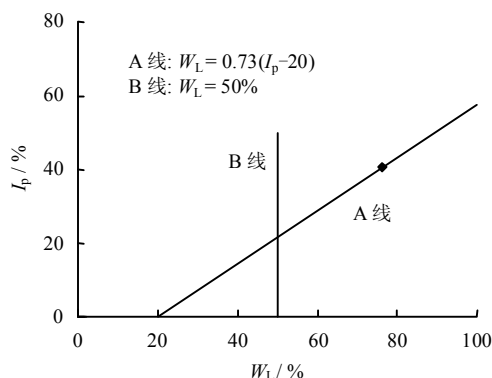


图1 海相淤泥塑性图

Fig.1 Plasticity chart of marine sediments

表2 低钙粉煤灰物理性质指标

Table 2 Physical properties of low-calcium fly ash

初始 含水率 /%	相对 密度	不同粒径(μm)颗粒含量/%			含碳量 ^① /%	pH 值	CaO /%
		63	2~63	<2			
0	2.2	17.7	68.7	13.6	5.5	8.6	<1.0

注:①为975℃灼烧1h。

3 试验方法

文献[11]中明确规定了石灰、水泥等固化土室内干法击实试验方法。首先将高含水率淤泥试样风干粉碎,测定其实际含水率;将土样均分成5~7份,并加水至预定含水率之后分别掺加石灰、水泥和粉煤灰;机械搅拌后将试样放入塑料袋中按规范规定时间进行闷料,然后进行重型标准击实试验。各固化剂掺加量见表3,粉煤灰掺量较大,固定为混合料总干质量的20%。

表3 混合料配比

Table 3 Mixture design

试样	淤泥干重 /%	石灰 /%	水泥 /%	粉煤灰 /%
SD	100			
SD10L20FA	70	10		20
SD5L5C20FA	70	5	5	20
SD10C20FA	70		10	20

根据击实试验确定的最大干密度和最优含水率,制备直径为 50 mm、高度为 100 mm 的圆柱体试样,并放入特制密封塑料盒中。将试样标准养护(温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$,相对湿度 98%) 28、90 d 之后,进行无侧限抗压强度试验和劈裂法间接抗拉强度试验。强度试验采用 INSTRON 5500R 4206-006 型微机控制电子万能试验机,且对每个类型试样至少做 3 次平行试验。

为模拟潮湿和多雨环境下淤泥试样的水稳性,依据文献[12]进行浸水软化试验。将标准养护 28 d 的试样置入去离子水中浸泡 32 d,水外温度维持常温 20°C ,之后将试样取出沥水 1 h,进行无侧限抗压强度试验。

依据文献[13],在实验室密闭系统内进行冻融循环试验,可以模拟在没有水分交换情况下淤泥试样抵抗冬夏季节温度骤变的能力。将标准养护 28 d 的试样浸入去离子水 1 d 以饱和试样,之后取出沥水 1 h。用密封塑料薄膜包裹试样,放入密闭系统中进行 20 个冻融循环,之后进行无侧限抗压强度试验。单个冻融循环持续 24 h,具体过程如下:在 10°C 维持 4 h,之后 4 h 内匀速下降至 -10°C ,在 -10°C 维持 14 h,最后 2 h 内匀速上升至 10°C 。

4 试验结果与分析

4.1 淤泥固化土的击实特征

未固化淤泥和淤泥固化土的击实曲线,即干密度随实测含水率变化曲线,如图 2 所示。由此确定未固化淤泥和淤泥固化土的最大干密度和最优含水率见表 4。对于未固化淤泥,其最大干密度为 1.61 g/cm^3 ,最优含水率为 21.6%。掺入大量粉煤灰等固化剂后,引起淤泥固化土的最优含水率降低,最大干密度略有增加。这种现象与单掺石灰和水泥导致固化土最优含水率增大和最大干密度降低的结论相反^[14-16]。他们^[14-16]认为,主要是由于水泥和石灰的水化作用而导致固化土需水量增加、干密度变化。

尽管单掺石灰和水泥会导致需水量增加,但对于掺加大量低钙粉煤灰的情况,则必须考虑粉煤灰的形态效应。粉煤灰中含有大量的粒径分布不均的玻璃微珠,粒形完整,表面光滑,质地致密。这种形态对土体而言,无疑能起到减水和填充致密作用,原有充水的孔隙则被粒径很小的玻璃微珠和碎屑占据。因此,相对于未固化淤泥,大量低钙粉煤灰的掺加使淤泥固化土的最优含水率降低,最大干密度略有增加。

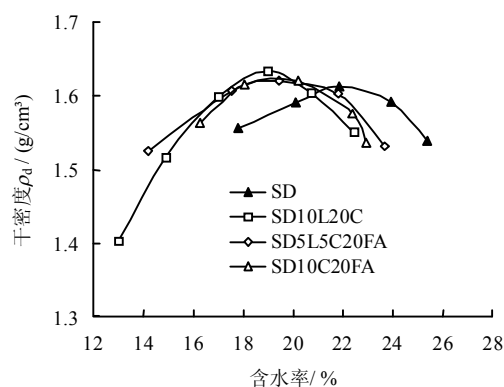


图 2 未固化淤泥和淤泥固化土的击实曲线

Fig.2 Compaction curves of untreated and solidified sediments

表 4 未固化淤泥和淤泥固化土的最大干密度和最优含水率

Table 4 Maximum dry density and optimum water content of untreated and solidified sediments

试样	最优含水率 / %	最大干密度 /(g/cm^3)
SD	21.6	1.61
SD10L20FA	19.1	1.63
SD5L5C20FA	19.2	1.62
SD10C20FA	19.3	1.62

由表 4 可知,对于混合料 SD10L20FA、SD5L5C20FA 和 SD10C20FA,在石灰被同掺量水泥取代的过程中,尽管设计混合料的最大干密度和最优含水率发生变化,但其变化幅度很小。

4.2 淤泥固化土的模量和强度特性

未固化淤泥和淤泥固化土的弹性模量、无侧限抗压强度和抗拉强度,如图 3~5 所示。对于未固化淤泥,弹性模量、无侧限抗压强度和抗拉强度在龄期 28、90 d 时均变化不大,近乎恒定。这主要是由于密封贮存条件下,试样的含水状态几乎保持不变。对于淤泥固化土,当养护时间从 28 d 延续至 90 d 时,弹性模量、无侧限抗压强度和抗拉强度均明显增加,且三者变化规律一致。这主要是由于火山灰反应或水化反应生成硅酸钙和铝酸钙凝胶体等产物,粘结土颗粒而形成网络状骨架结构,导致淤泥固化土的整体结构性增强,宏观上表现为固化土的强度和模量增加。

对比这 3 种大掺量粉煤灰固化土,其弹性模量和强度特性较未固化淤泥均有不同程度的提高。水泥掺量越高,28、90 d 龄期时固化土的弹性模量和抗压强度增加越明显;相反,石灰掺量越高,28、90 d 龄期时固化土的强度和模量降低越明显。可见,水泥掺量增加是大掺量粉煤灰固化土强度明显改善

的决定性因素。对于石灰-粉煤灰固化土,在化学反应初期,粉煤灰、火山灰效应并未充分发挥,导致其早期强度改善并不明显。这也符合混凝土领域中碱激发剂对粉煤灰早期火山灰反应无明显促进作用的结论。尽管石灰-粉煤灰固化土后期强度和弹性模量增长较明显,但仍不及水泥-粉煤灰固化土。

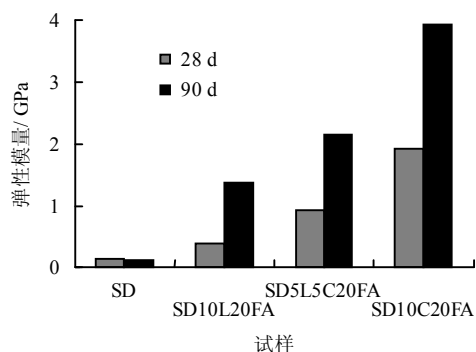


图3 未固化淤泥和淤泥固化土的弹性模量
Fig.3 Elastic modulus of untreated and solidified sediments

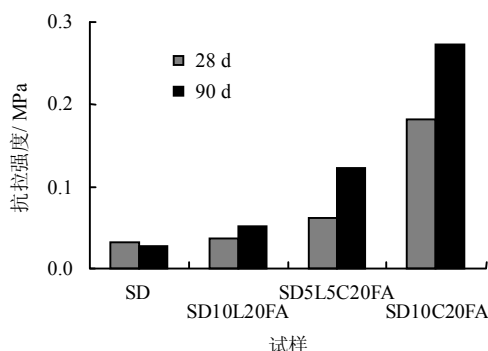


图4 未固化淤泥和淤泥固化土的抗拉强度
Fig.4 Tensile strength of untreated and solidified sediments

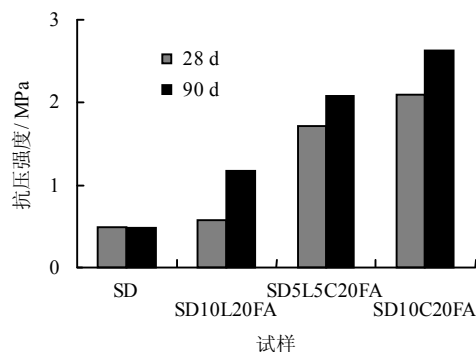


图5 未固化淤泥和淤泥固化土的抗压强度
Fig.5 Compressive strength of untreated and solidified sediments

4.3 未固化淤泥和固化淤泥的水稳性

通过 32 d 浸水试验,可评价淤泥固化土相对于

未固化淤泥水稳性的变化。对于未固化淤泥试样,完全浸水数小时之后便开始发生崩解,图 6 展示了淤泥试样在 5、8、24 h 和 4 d 的崩解过程。将完整试样置入水中淹没后,水分子立刻渗入试样的表面孔隙和表面微裂纹中至饱和状态,弱化土粒间的各种物理化学作用力。如图 6(a)~(c)所示,表面微裂纹扩展而形成表面裂缝,并向纵深扩展;扩展到一定程度后,裂缝周围土粒失去黏结力,土块便在自身重力作用下某一时刻突然爆炸式崩塌。这样,大块体分解成小块体,小块体继续分解成细颗粒。在浸水 4 d 后,试样如散沙状分布,完全崩解,如图 6(d)所示。

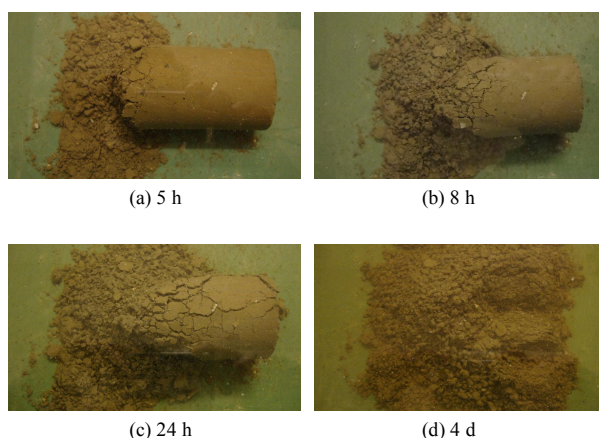


图6 未固化淤泥试样的崩解过程
Fig.6 Collapse of untreated sediments

掺入固化剂淤泥固化后,固化土试样完全浸水 32 d 后仍然完好无损,如图 7 所示,从而直观地反映出掺水泥、石灰和粉煤灰的固化处理技术能明显改善淤泥的水稳性。淤泥固化土水稳性改善主要归功于水化作用或火山灰反应生成的胶结物质,通过胶结作用相互粘结土颗粒形成空间网状骨架结构,从而增强固化土的整体结构性和稳定性。



图7 浸水 32 d 后的淤泥固化土试样
Fig.7 Solidified sediment samples suffered from 32 d water immersion

从无限抗压强度的角度量化淤泥固化土的水稳性,结果如图 8 所示。对比浸水前后试样的抗压强度,浸水软化效应导致固化土的无侧限抗压强度

明显降低。对于混合料 SD10L20FA，其抗压强度大幅度降低，降幅为 45%。SD5L5C20FA 和 SD10C20FA 的抗压强度降幅相对较小，分别降低了 12%、15%。这主要由于 SD10L20FA 早期火山灰反应速度较慢，胶结物质的生成量远小于掺加水泥的 SD5L5C20FA 和 SD10C20FA。

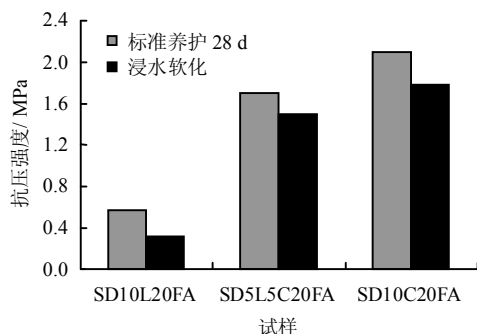


图 8 浸水软化对固化土强度影响

Fig.8 Effect of water immersion on solidified sediments

4.4 冻融循环对固化土强度影响

未固化淤泥试样在浸水数小时后便开始崩解，因此，无法对未固化淤泥进行冻融循环试验。对于混合料 SD10L20FA 试样，虽然未在浸水过程中崩解，但试样在冻融循环过程中便发生破坏，如图 9 所示，无法量化冻融循环后该试样的抗压强度。试样养护至 28 d 时，石灰与粉煤灰发生火山灰反应生成少量的硅酸盐胶结物质而未能形成致密完整的空间网状结构。这点可借助图 4、5 所示的 28 d 龄期时 SD10L20FA 试样的抗压强度和抗拉强度改善不明显的现象证实。

冻融循环试验之前，试样处于饱水状态。试验过程中，当温度降低时，土体孔隙中水逐渐转化为冰而体积膨胀，引起土颗粒位移和孔隙体积增大，破坏土颗粒之间的相互咬合和胶结作用。当温度升高时，冰逐渐融化成水而体积减小，但土颗粒间黏聚力的存在导致增大的孔隙体积并不能完全恢复。多次循环往复后，粒间孔隙相互贯通在连结较弱处形成较大裂缝，最终导致试样断裂，如图 9(a)所示。之后若试样继续经受冻胀融缩作用，会导致表面土体大量剥落甚至完全崩解，如图 9(b)所示。

淤泥固化土 SD5L5C20FA 和 SD10C20FA 试样经历冻融循环后的抗压强度如图 10 所示，并与标准养护 28 d 时试样抗压强度对比。图 10 表明，冻融循环对淤泥固化土有明显的破坏效应。由于冻胀融缩往复作用，两种混合料的无侧限抗压强度减小幅度约为 22%。水泥水化反应生成的水化硅酸盐胶体

形成网状骨架结构，进而增强固化土的整体结构性，是冻融循环后固化土保持较高强度的主要原因。

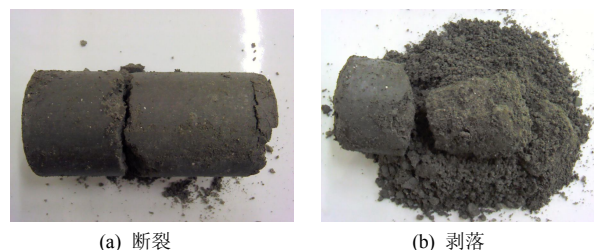


图 9 SD10L20FA 试样的冻融崩解

Fig.9 Collapse of SD10L20FA samples after thawing-freezing

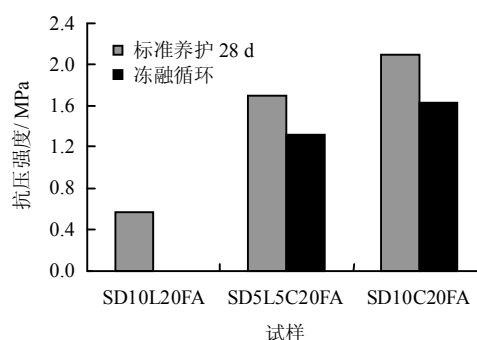


图 10 冻融循环前后固化土强度对比

Fig.10 Comparison of compressive strength for solidified sediments before and after thawing-freezing

5 结 论

(1) 相比未固化淤泥，大掺量粉煤灰淤泥固化土的最优含水率降低、最大干密度略有增加。石灰与水泥之间同掺量替换，不会引起混合料最大干密度和最优含水率的显著变化。

(2) 相比未固化淤泥，固化土弹性模量、无侧限抗压强度和抗拉强度均有不同程度增加。水泥掺量越大，养护时间越长，强度和模量越大。粉煤灰早期火山灰效应对石灰-粉煤灰固化土的强度特性无明显改善效果。

(3) 分析浸水作用下未固化淤泥的崩解过程及机制，直观地表明其水稳性明显劣于淤泥固化土。浸水软化导致固化土无侧限抗压强度明显降低。

(4) 分析冻胀融缩作用对固化土的破坏作用和破坏机制，冻胀融缩导致设计混合料的无侧限抗压强度减小约 22%。

参 考 文 献

- [1] ALZIEU C. Dragages et environnement marin[M]. Paris: [s. n.], 1999.

- [2] AMIRAN M, WILDE C L, HALTMEIER R L, et al. Advanced sediment washing for decontamination of New York/New Jersey harbor dredged materials[C]// Proceedings of Nineteenth Western Dredging Association Annual Meeting and Conference and Thirty-first Texas A& M University Dredging Sediment. [S. l.]: [s. n.], 1999.
- [3] 朱伟, 张春雷, 高玉峰, 等. 海洋疏浚淤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 Wei, ZHANG Chun-lei, GAO Yu-feng, et al. Fundamental mechanical properties of solidified dredged marine sediment[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2005, 39(10): 1561—1565.
- [4] 汤峻, 朱伟, 李明东, 等. 砂土 EPS 颗粒混合轻质土的物理力学特性[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1045—1049.
- TANG Jun, ZHU Wei, LI Ming-dong, et al. Physico-mechanical properties of sand EPS beads-mixed lightweight soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(5): 1045—1049.
- [5] 邓东升, 张铁军, 洪振舜. 河道疏浚废弃淤泥改良土的强度变化规律探讨[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(2): 167—170.
- DENG Dong-sheng, ZHANG Tie-jun, HONG Zhen-shun. Undrained strength behavior of treated dredged clays with quick lime[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2008, 28(2): 167—170.
- [6] 姬凤玲, 朱伟, 张春雷. 疏浚淤泥的土工材料化处理技术的试验与探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1999—2002.
- JI Feng-ling, ZHU Wei, ZHANG Chun-lei. Study of treatment technology of dredging sludge with geosynthetizing method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(12): 1999—2002.
- [7] SHEN W G, ZHOU M K, ZHAO Q L. Study on lime-fly ash-phosphogypsum binder[J]. **Construction and Building Materials**, 2007, 21(7): 1480—1485.
- [8] 丁建文, 张帅, 洪振舜, 等. 水泥-磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2817—2822.
- DING Jian-wen, ZHANG Shuai, HONG Zhen-shun, et al. Experimental study of solidification of dredged clays with high water content by adding cement and phosphogypsum synchronously[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2817—2822.
- [9] 曹玉鹏, 卞夏, 邓永锋. 高含水率疏浚淤泥新型复合固化材料试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 321—326.
- CAO Yu-peng, BIAN Xia, DENG Yong-feng. Solidification of dredged sludge with high water content by new composite additive[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.1): 321—326.
- [10] 杨爱伦, 江雍年, 赵星敏, 等. 2010 煤炭的真实成本——中国粉煤灰调查报告[R]. 北京: 绿色和平, 2010.
- [11] Association Française de Normalisation. Soils: Investigation and testing-Determination of the compaction characteristics of a soil - standard proctor test-modified proctor test[S]. Paris: Association Française de Normalisation, 1999.
- [12] Association Française de Normalisation. Soils: Investigation and testing-Soil treated with hydraulic binder, possible combined with lime, for use as a selected fill-Part 2: Methodology of laboratory formulation studies[S]. Paris: Association Française de Normalisation, 2001.
- [13] Association Française de Normalisation. Tests relating to pavements: Freezing behaviour of material treated with hydraulic binders-Part 1: Freezing-thawing test of stabilized gravel or sand[S]. Paris: Association Française de Normalisation, 1992.
- [14] OSULA D O A. A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite[J]. **Engineering Geology**, 1996, 42(11): 71—81.
- [15] HOSSAIN K M A, LACHEMI M, EASA S. Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua new Guinea[J]. **Resources, Conservation and Recycling**, 2007, 51(4): 711—731.
- [16] AL-AMOUDI O S B, KHAN K, AL-KAHTANI N S. Stabilization of a Saudi calcareous marl soil[J]. **Construction and Building Materials**, 2010, 24(10): 1848—1854.