

DOI: 10.11779/CJGE2017S1036

海砂-海泥混合料作为海堤填料的可行性试验研究

张福海^{1, 2}, 陈 庆^{1, 2}, 张晓阳^{1, 2}, 丰土根^{1, 2}, 李文斌³

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098;
3. 福建省水利规划院, 福建 福州 350001)

摘要: 提出海砂-海泥混合料作为海堤填筑材料。通过室内试验对不同掺合比的海砂海泥混合料的土体强度参数、压缩性能以及渗透性能进行对比分析, 结果表示海砂-海泥按质量比 1.5:1 掺合时, 混合料的物理力学性质指标最接近工程要求。为改善混合料工程性质, 采用水泥作为固化剂, 通过一系列室内试验对掺合比 1.5:1 的固化混合物的强度特性、压缩特性、渗透特性进行研究。结果表明: 随着水泥掺量和龄期的增加, 固化混合料的无侧限抗压强度、抗剪强度均有很大提高; 存在 7 d 的早期强度; 应力应变曲线在水泥掺量为 8%与 10%时具有明显的峰值, 且脆性破坏特征明显; 渗透系数大幅度降低; 水泥掺量为 6%时, 28 d 龄期固化混合料便属于低压缩性土范畴。

关键词: 海砂-海泥; 固化处理; 强度特性; 渗透特性; 掺合比

中图分类号: TU441 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0182-05

作者简介: 张福海(1970-), 男, 内蒙古人, 副教授, 主要从事软土地基处理和岩土工程测试方面的研究。E-mail: fhaizhang@hhu.edu.cn。

Experimental study on feasibility of sea sand-mud mixture used as seawall filler

ZHANG Fu-hai^{1, 2}, CHEN Qing^{1, 2}, ZHANG Xiao-yang^{1, 2}, FENG Tu-gen^{1, 2}, LI Wen-bin³

(1. Key Laboratory for Geotechnical Engineering of Ministry of Water Resource, Nanjing 210098, China; 2. Research Institute of

Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Fujian Provincial Planning Institute of Water Resources, Fuzhou 350001, China)

Abstract: The sea sand-mud mixture used as filling material is proposed. The strength parameters and compression performance and permeability of soils are compared and analyzed through laboratory tests with different blending ratios of the mixed soils. The results indicate that when the sea sand-mud is blended with mass ratio of 1.5:1, its physical and mechanical properties are the closest to the engineering requirements. In order to improve the engineering properties of the mixture, cement is considered. A series of laboratory tests are performed to study the unconfined compressive strength, shear strength of solidified mixture. It is indicated that with the increase of cement content, the unconfined compressive strength and shear strength of solidified mixture are significantly improved, and there exists 7 d early strength. There is a peak value in the stress-strain curves of soils stabilized by cement with the cement content of 8% and 10%, and there is significant brittle fracture. The permeability coefficient has a significant reduction. Under the cement content of 6%, 28 d age solidified mixture belongs to the low-compression soils.

Key words: sea sand-mud; solidification treatment; strength property; permeability; mixture ratio

0 引言

修建海堤等基础防护设施可以有效地提高中国沿海地区抵抗台风、海啸等不可测自然灾害的能力, 对保障沿海地区持续快速发展具有重要意义。《海堤工程设计规范》^[1]中也明确海堤填筑材料采用黏性土较为合适, 但在沿海许多地区, 禁止开山取土作为海堤填料, 从内陆取土也由于运费问题受到制约, 显然, 优质填料的欠缺已成为海堤建设的关键因素。沿海近海域内海砂储量较为丰富可以考虑作为堤身材料, 但是

沿海风浪大海堤护坡经常会被冲毁, 砂自身无黏聚力, 从而导致堤身填砂易被掏空。另一方面, 中国每年的清淤工程, 造成大量高含水率疏浚淤泥堆积^[2-3], 疏浚淤泥含水率高, 强度低, 在工程上难以直接利用而作废弃处理, 造成了资源的浪费和土地的占用^[4]。

固化海砂海泥混合料作为海堤填料, 必须考虑固化混合物的力学性质, 土的强度和变形作为岩土工程最为关注的问题当然必不可少^[5], 孟庆山等^[6]、丁建

文等^[7]采用水泥等固化材料对高含水率淤泥土的强度以及变形进行了研究取得了较好的效果并得到了一些规律。

基于前人的研究与变废为宝的思想, 并结合海砂和淤泥的力学特性, 探讨海砂海泥混合料作为堤身填筑材料的可行性。希望改善海砂无黏聚力的缺点, 同时克服淤泥强度低, 压缩性大等不足之处, 增强混合物的骨架强度, 经济、合理地将海砂海泥转化为优质填料。

1 试验研究方法

1.1 试验材料

水泥固化海沙海泥混合料(以下简称混合料)是一种多相复合材料, 试验所用淤泥取自福建省福州市琅岐岛东侧闽江入海口处, 其基本的物理力学性质指标见表 1。海砂取自福州市江阴镇吹填海砂堆场, 其基本的物理力学为: 含水率 w 为 8%, 土颗粒相对密度 G_s 为 2.73, 孔隙比 $e=0.67$, 最大孔隙比 $e_{\max}=0.76$, 最小孔隙比 $e_{\min}=0.52$, 颗粒直径 $d=0.075\sim 5$ mm。水泥为南京市江南水泥有限责任公司生产的“钟山牌”32.5#普通硅酸盐水泥。

表 1 试验淤泥物理性质指标

Table 1 Physical properties of dredging samples

含水率 $w/\%$	重度 G_s ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙比 e	塑限 $w_L/\%$	液限 $w_p/\%$	有机质 含量/%
65	2.67	16.1	1.73	24.4	41.4
					3.6

1.2 试验方案

本文首先通过试验研究不同掺合比(海砂与海泥质量比分别为 2.5:1, 2:1, 1.5:1, 1:1, 1:1.5, 1:2, 1:2.5)混合料的强度指标、压缩性和渗透性以确定最佳掺合比。众多研究表明, 水泥作为固化剂可以很好地提高淤泥强度, 所以拟采用水泥作为固化剂, 并考虑水泥掺量为 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 和养护龄期为 3, 7, 14, 28 d, 通过直剪和无侧限抗压强度试验分析水泥掺量及养护龄期对固化混合料强度特性的影响。在最大干密度确定过程中, 考虑混合料中海砂为砂性土, 海泥为黏性材料, 因此采用相对密实度测定试验和击实试验两种方法相互结合, 当海砂所占比例大于等于 50%时采用相对密实度试验, 反之用击实试验, 并选用振动台法进行验证。不同掺合比式的含水率、最大干密度见表 2。

表 2 不同配比试样的含水率及最大干密度

Table 2 Moisture contents and maximum dry densities of samples with different proportions

掺合比	2.5:1	2:1	1.5:1	1:1	1:1.5	1:2	1:2.5
含水率 $w/\%$	42.1	38.3	35.8	30.4	25.6	22.7	18.3
最大干密度 $\rho_{\max}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.77	1.80	1.81	1.83	1.82	1.79	1.76

2 试验结果与分析

2.1 掺合比确定

通过对不同掺合比的混合料进行强度试验、压缩试验以及渗透试验研究, 得出合适的掺合比。

(1) 不同掺合比的强度特性

通过固结快剪、三轴 CU 试验得出不同掺合比的混合料试验的强度指标, 结果如表 3 所示。

从表中结果可以看出: 两种试验得出的内摩擦角均随着海砂配比的增加而增加, 而黏聚力指标呈现先增大后减小的趋势, 但不同试验黏聚力达到峰值的海砂海泥配比及峰值大小各不相同。其中三轴 CU 试验中, 海砂海泥掺合比为 1.5:1 时, 黏聚力达到峰值, 大小为 15.05 kPa; 固结快剪试验中, 掺合比为 1:1.5 时, 峰值大小为 41.84 kPa。

表 3 不同配比试样的强度指标

Table 3 Strength parameters of samples with different proportions

海砂/海泥	固结快剪		三轴 CU	
	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$
2.5:1	14.87	25.00	12.10	25.10
2:1	16.58	21.18	13.57	21.00
1.5:1	21.18	19.61	15.03	15.20
1:1	28.95	16.05	8.06	10.60
1:1.5	41.84	13.16	7.40	8.90
1:2	39.87	10.13	5.60	6.80
1:2.5	38.03	8.55	4.90	5.32

(2) 不同掺合比的压缩、渗透特性

在进行海堤建设的过程中, 应严格监控堤身的自身沉降变形。堤身沉降变形不仅与地基材料的压缩性能有关, 同时也应考虑堤身填筑材料抵抗压缩变形的能力。图 1 为混合料压缩系数随掺合比的变化曲线图, 从中可以看出: 随着海泥的比重增加, 压缩系数逐渐增大。其中以掺合比为 1:1 混合料的压缩系数为分界点, 当海砂掺量小于等于 50%时, 压缩系数均小于 0.5 MPa^{-1} , 为中压缩性土, 且压缩系数大小随海泥含量增加基本呈线性增长。当海泥比重超过 50%时, 压缩系数明显提高, 但是随着海泥继续增加, 压缩系数几乎不变。

图 2 为混合料渗透系数随掺合比的变化曲线图, 从图中可以看出: 海砂海泥质量比大于 1.5:1 时, 渗透系数在 10^{-4} cms^{-1} 量级, 质量比为 1.5:1 时, 渗透系数在 10^{-5} cms^{-1} 量级范围, 而当质量比小于 1.5:1 后渗透系数小于 10^{-5} cms^{-1} 量级。所以就不同掺合比的渗透系数而言, 掺合比应该小于 2:1。

鉴于以上分析, 综合考虑不同试验的强度指标、渗透性和压缩性, 认为海沙海泥的掺合比为 1.5:1 比较适宜, 并以 1.5:1 的海砂海泥混合料进行水泥固化

试验研究。

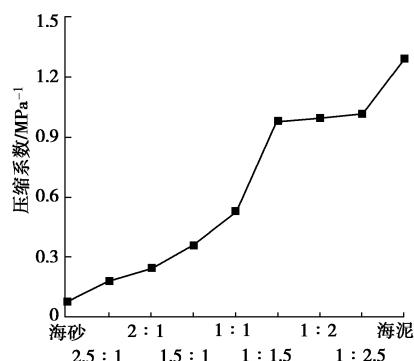


图 1 压缩系数与掺合比的关系

Fig. 1 Relationship between compression coefficient and mixture ratio

ratio

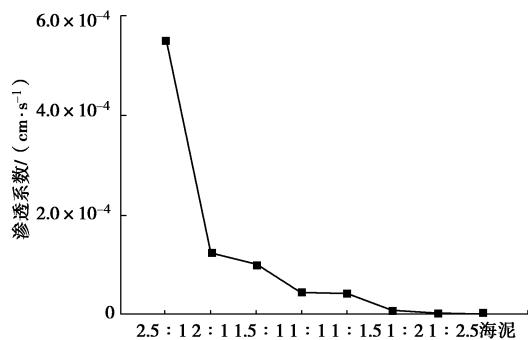


图 2 渗透系数随掺合比的关系

Fig. 2 Relationship between permeability coefficient and mixture ratio

2.2 水泥固化混合料强度特性分析

(1) 水泥掺量对抗压强度的影响

图 3 给出了不同龄期的水泥固化混合料无侧限抗压强度和水泥掺量之间的关系。从图中可以看出：不同龄期的固化试样的无侧限抗压强度均随着水泥掺量的增加而增加，但强度值增长速率有所不同，其中 3 d 龄期强度增长趋势接近线性且最为缓慢，28 d 龄期强度增长速率最大。同时，无侧限抗压强度在 4%~6% 掺量时，强度增长趋势明显增大，随着水泥掺量继续增加，均近似呈线性关系。

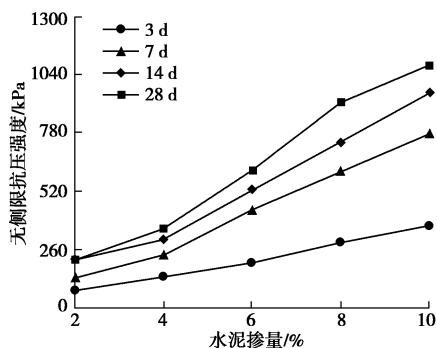


图 3 无侧限抗压强度与水泥掺量的关系

Fig. 3 Relationship between unconfined compressive strength and cement content

(2) 龄期对试样无侧限抗压强度的影响

图 4 为不同水泥产量下水泥固化混合料无侧限抗压强度与养护龄期的关系。从图中可以看出：不同水泥掺量固化试样的无侧限抗压强度随着龄期增长较为明显，但增长幅度有所减小。经计算，7 d 龄期时，水泥掺量为 2%，4%，6%，8%，10% 的试样的无侧限抗压强度与 28 d 无侧限抗压强度的比分别为 61.3%，66.7%，70.8%，66.2%，71.3%。说明采用水泥固化时，早期强度很高。这主要是由于水泥掺入时其水解水化所生成的氢氧化钙会迅速溶于水中，使得水泥继续向着正反应方向进行，同时氢氧化钙的溶解浓度有限，过多的氢氧化钙会形成凝胶析出，有利于固化土骨架的加固，同时水化产物铝酸盐以及铁铝酸盐等成分构成了其固化的早期强度。

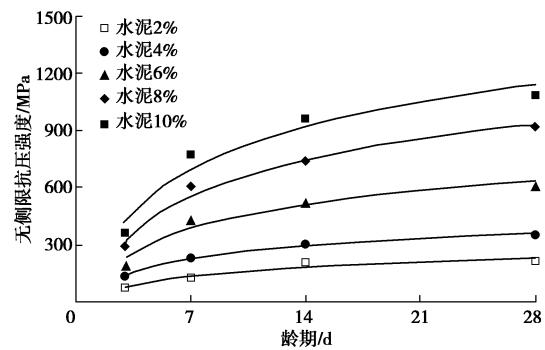


图 4 无侧限抗压强度与养护龄期的关系

Fig. 4 Relationship between unconfined compressive strength and curing time

2.3 水泥固化混合料变形特性分析

图 5 为 28 d 龄期水泥固化混合料的单轴应力应变曲线。从图中可以看出：曲线具有明显的峰值，破坏之前应力基本上呈线性增长，破坏之后，承载能力明显下降，脆性特征明显，在水泥掺量达到 4% 之后愈加明显。水泥掺量为 8% 与 10% 时，固化混合料强度较高，表现出明显的脆性破坏特征。

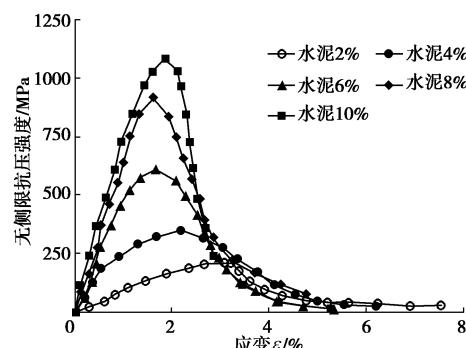


图 5 28 d 龄期固化混合料的单轴应力应变曲线

Fig. 5 Uniaxial stress-strain curves of typical tests at age of 28 d

2.4 固化混合料抗剪强度参数研究

(1) 水泥掺量对直剪强度参数的影响

图 6 为内摩擦角随水泥掺量变化的曲线, 图 7 为黏聚力随水泥掺量的变化曲线。从图 6, 7 可以看出, 内摩擦角与黏聚力均随固化剂掺量的增加而增加, 这主要是由于, 固化土的强度关键在于水化产物的掺量。相同龄期内所生成的水化产物越多, 土体颗粒逐渐被水化产物包裹, 形成相比原土体骨架更加坚固的链状结构。选取 7 d 龄期进行定量分析, 水泥掺量为 2%, 4%, 6%, 8%, 10% 的试样摩擦角分别相比未固化快剪试验结果, 摩擦角分别提高了 2.1 倍、2.3 倍、3.2 倍、3.5 倍、4.3 倍, 黏聚力则分别提高了 8.5 倍、12.7 倍、21.9 倍、30.8 倍、33.1 倍, 可以看出固化试样的强度随水泥掺量增加得到明显的提高, 且掺量在 6% 过渡到 8% 时, 强度提高很快, 之后提高速度减缓。

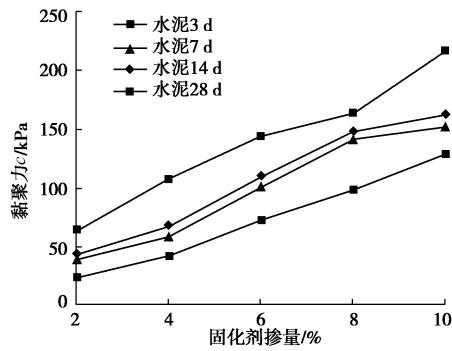


图 6 黏聚力与水泥掺量的关系

Fig. 6 Relationship between cohesive force and cement content

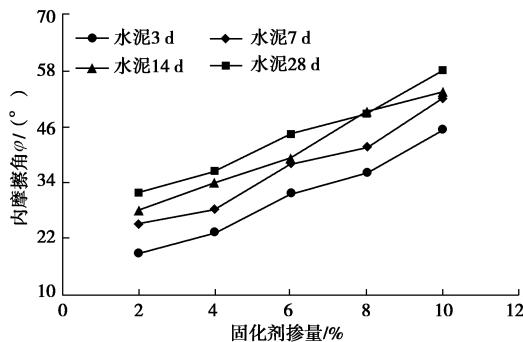


图 7 内摩擦角与水泥掺量关系曲线

Fig. 7 Relationship between internal friction angle and cement content

(2) 养护龄期对固化混合料直剪强度参数的影响

图 8 为黏聚力与养护龄期的关系曲线, 图 9 为内摩擦角与养护龄期的关系曲线。从图 8, 9 可以看出, 黏聚力与内摩擦角均随着养护龄期的增加一直呈增长趋势。内摩擦角在养护前期增长很大, 后期增长缓慢; 而黏聚力前期增大很大, 后期仍有一定程度的增大。同时, 在 7 d 龄期时, 内摩擦角及黏聚力已达到 28 d

龄期的 70% 以上, 说明水泥固化的强度增长主要集中在养护前期。

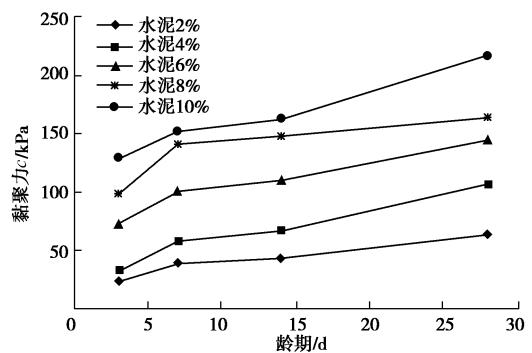


图 8 黏聚力与养护龄期的关系

Fig. 8 Relationship between cohesive force and age

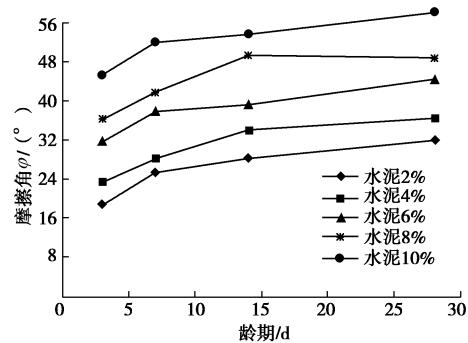


图 9 内摩擦角与养护龄期的关系

Fig. 9 Relationship between internal friction angle and age

2.5 固化混合料压缩特性

对固化混合料压缩特性的研究主要采用 28 d 龄期不同水泥掺量的固化混合物进行单轴压缩试验, 试验结果如表 4 所示。

表 4 不同水泥掺量单轴压缩系数

Table 4 Uniaxial compression factors with different cement contents

水泥掺量/%	2	4	6	8	10
压缩系数/MPa ⁻¹	0.155	0.145	0.098	0.069	0.040

从表 4 可以看出: 混合料中固化剂掺量越高, 其压缩系数越小。海砂海泥直接按 1.5:1 比例混合所得试样其固结系数为 0.360 MPa^{-1} , 属于中压缩性土; 而当采用水泥固化之后, 28 d 龄期固结系数中, 掺量为 2% 时, 压缩系数为 0.155 MPa^{-1} , 明显小于未经固化的混合料, 掺量达到 6% 时, 其固结系数为 0.098 MPa^{-1} , 已经属于低压缩性土范畴。

2.6 固化混合料渗透特性

混合料的渗透系数可能成为重要的工程指标。淤泥土渗透系数在 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 数量级, 砂质土在 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 数量级。原状海泥的渗透系数为 $1.57 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 海砂的渗透系数为 $3.64 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,

未固化混合料渗透系数 $9.98 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据《堤防工程设计规范》^[1], 当海堤或堤基土渗透系数 $k \geq 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 应计算渗透量。而采用水泥固化后, 固化混合料的渗透系数达到 $10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 渗透性极低, 如图 10 所示。

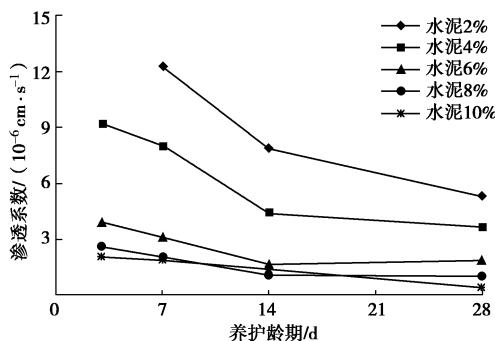


图 10 渗透系数与龄期关系

Fig. 10 Relationship between permeability coefficient and age

3 结 论

强度特性、变形特性以及渗透特性是评价海堤安全的重要指标。对福州市琅岐岛东侧闽江入海口处的海泥与福州市江阴镇吹填海砂混合料采用水泥进行固化处理, 并通过一系列室内试验进行研究, 研究表明: 水泥固化海砂海泥混合料可作为海堤填筑材料, 并得到以下 4 点结论。

(1) 试验海砂与海泥海砂按照质量比 1.5:1 进行掺合, 其物理力学指标更贴近工程要求。

(2) 水泥作为固化剂, 对海砂海泥混合料的无侧限抗压强度、抗剪强度有明显提高。存在 7 d 早期强度且 7 d 强度可以达到 28 d 强度的 70% 左右。

(3) 随着水泥掺量的增加, 渗透系数得到大幅度减小, 在 $10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 数量级, 满足堤防工程要求。

(4) 水泥掺量为 8% 时, 强度提高效率最大。

参考文献:

- [1] SL453—2008 海堤工程设计规范[S]. 2008. (SL453—2008 Seawall engineering design specifications[S]. 2008. (in Chinese))

- [2] 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 Wei, ZHANG Chun-lei, LIU Han-long, et al. The status quo of dredged spoils utilization[J]. Environmental Science and Technology, 2002, 25(4): 39–41. (in Chinese))
- [3] 陈萍, 张振营, 李小山, 等. 废弃淤泥作为再生资源的固化技术与工程应用研究[J]. 浙江水利科技, 2006, 148(6): 1–3. (CHEN Ping, ZHANG Zhen-ying, LI Xiao-shan, et al. Solidification technology of dredged sediment for reuse as civil engineering materials[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2006, 148(6): 1–3. (in Chinese))
- [4] 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. Change rule of water cement of dredged clays by adding cement and quick lime[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2817–2822. (in Chinese))
- [5] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 100–111. (SHEN Zhu-jiang. Engineering properties of soft soils and design of soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 100–111. (in Chinese))
- [6] 孟庆山, 杨超, 雷学文, 等. 武汉东湖淤泥早强固化试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 707–712. (MENG Qing-shan, YANG Chao, LEI Xu-wen, et al. Experimental study of early solidification of sludge in East Lake, Wuhan[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 707–712. (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 Jian-wen, LIU Tie-ping, CAO Yu-peng, et al. Unconfined compression tests and strength prediction method for solidified soils of dredged clays with high water content[J]. Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 55–60. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)