

海堤填筑料固结特性研究

李文斌¹, 谢康^{2,3}, 周坤^{2,3}, 丰土根^{2,3}, 王超然^{2,3}, 张箭^{2,3}, 张福海^{2,3}

(1. 福建省水利规划院, 福建 福州 350001; 2. 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;
3. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 试验以海泥, 山土, 10%、15%、20% 三种水泥掺量的海泥搅拌水泥(桩)土作为海堤填筑料。从固结特性方面研究出最适用于海堤填筑的材料, 通过基本物理力学性质试验和标准固结试验获取试样的基本物理力学参数、压缩系数和固结系数, 再从固结压缩变形和固结速率的角度对试样作出分析。结果表明: (1) 天然海泥压缩变形最大, 固结速率最小。 (2) 天然山土的压缩变形最小, 但固结速率低于海泥搅拌水泥(桩)土。 (3) 随着水泥掺量的增加, 海泥搅拌水泥(桩)土的压缩变形最小, 相比海泥、山土, 固结速率也最小, 但水泥掺量对海泥搅拌水泥(桩)土的固结速率影响不大。故从固结特性角度得出, 水泥掺量为 20% 的海泥搅拌水泥(桩)土是最适用于海堤填筑的材料。

关键词: 基本物理力学性质试验; 标准固结试验; 压缩系数; 固结系数

中图分类号: TU441

文献标识码: A

Study on Consolidation Characteristics of Embankment Filling Materials

LI Wenbin¹, XIE Kang^{2,3}, ZHOU Kun^{2,3}, FENG Tugen^{2,3}, WANG Chaoran^{2,3},
ZHANG Jian^{2,3}, ZHANG Fuhai^{2,3}

(1. Fujian Water Conservancy Planning Institute, Fuzhou, Fujian 350001, China;

2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Key Laboratory for Geotechnical Engineering of Ministry of Water Resource, Nanjing 210098, China)

Abstract: In the experiment, sea mud, mountain soil, 10%, 15%, 20% of sea mud mixed with cement (pile) soil were used as embankment filling materials. In this paper, the most suitable material for embankment filling material was studied from the aspect of consolidation characteristics. The basic physical and mechanical parameters, compression coefficient and consolidation coefficient of the sample were obtained through the basic physical and mechanical property test and standard consolidation test. Then the sample was analyzed from the angle of consolidation compression deformation and consolidation rate. The results show that: (1) the compression deformation of natural sea mud is the largest, and the consolidation rate is the smallest. (2) The compression deformation of natural mountain soil is the smallest, but the consolidation rate is lower than that of cement (pile) soil mixed with sea mud. (3) With the increase of cement content, the compression deformation of cement (pile) soil mixed with sea mud is the smallest, and the consolidation rate is the smallest compared with that of sea mud and mountain soil, but the cement content has the least effect on cement mixed with sea mud. The consolidation rate of soil (pile) has little effect. Therefore, from the perspective of consolidation characteristics, it is concluded that the cement (pile) soil mixed with 20% cement is the most suitable material for embankment filling.

Key words: basic physical and mechanical properties test; standard consolidation test; compressibility coefficient; consolidation coefficient

收稿日期: 2020-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51009054); 教育部科学技术研究重点项目(109077); 江苏省科学基金资助项目(BK2010513); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014B04914)

作者简介: 李文斌(1973-), 男, 福建福州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水利水电工程设计与研究。

* 通讯作者: 谢康(1996-), 男, 安徽马鞍山人, 硕士研究生, 从事岩土工程方面的研究。

福建省沿海海堤大多采用山土、砂性土填筑。然而沿海地区多缺乏山土、砂性土,随着环境保护要求日益增高,从内陆山区开采,运输距离远,导致工程造价高、工期长,且为了水土保持,许多地区禁止土料开采^[1]。而沿海地区海泥储量丰富,适量水泥和海泥掺合形成海泥搅拌水泥(桩)土从原则上可用于海堤填筑。

在淤泥固结机理方面,国内外的学者们做了很多研究,如郝斌^[2]应用 SEM-EDS-XRD 技术进行微观结构研究,结合宏观固结特性试验,确定滨海软土微观物理结构与宏观结构强度关系。王亮等^[3]利用研制的沉积固结试验方法研究淤泥自重固结性质。王洪圆等^[4]对软土的固结曲线进行全面分析,可确定出主固结系数和次固结系数的临界点。张福海等^[5]分析淤泥的沉降与固结机理,采用沉降柱试验模拟淤泥颗粒的沉降与固结过程。崔伟^[6]等总结前人淤泥自重固结过程,阐述了淤泥的固结过程是淤积物的物理化学作用。本文拟通过科学试验等方法系统地研究淤泥、山土、海泥搅拌水泥(桩)土固结特性,通过对比分析得出材料固结变形的相关规律,进而从固结变形的角度进一步探讨淤泥、山土、海泥搅拌水泥(桩)土作为海堤堤身填料的可行性。

1 试验内容

1.1 试验材料

材料采用的是从福建省琅岐岛取得的海泥,以及附近山区的山土。海泥土初始含水率高,压缩性高;山土的含水率较低,粘性较大。试验所用水泥采用“钟山牌”32.5#复合硅酸盐水泥,水泥产自南京市江南水泥有限责任公司。试验按相应比例分别取不同质量的原始含水率海泥与水泥进行掺和。将海泥和水泥按照水泥掺量为 10%、15% 和 20% 掺合在一起再装入塑料袋中,置于养护室内闷料 24 h,同时所有过程应尽快完成,防止水分蒸发。

1.2 基本物理力学性质试验

1.2.1 含水率试验

从试样袋中取代表性海泥土样 15~30 g,放入小铝盒内,盖好盒盖保证材料含水率为现场含水率,运回实验室,用烘干法测定其在天然状态下的含水率。温度控制在 105 ℃~110 ℃ 的恒温下烘至恒量,进行三组平行实验取平均值后,获得各材料的含水率如表 1。

1.2.2 密度试验

采用环刀法取原状土样,先在环刀内壁涂一薄层凡士林,刀口向下放在土样上,将环刀垂直下压,并用切土刀沿环刀外侧切削土样,边压边削至土样高出环刀。根据试样的软硬采用钢丝锯或切土刀整平环刀两端土样,擦净环刀外壁,称环刀和土的总质量,进行三组平行实验取平均值后,获得各材料的干、湿密度如表 1。

1.2.3 比重试验

采用 100 mL 比重瓶利用比重瓶法测定海泥、山土、海泥搅拌水泥(桩)土的比重,进行三组平行实验取平均值后,获得各材料的比重如表 1。

1.3 标准固结试验

步骤一:将去除过杂物的材料按工程需要制成天然土,选择面积为 30 cm² 的切土环刀,环刀内壁涂上一薄层凡士林,刀口应向下放在海泥和山土的天然扰动土上,切取土样时应与天然状态时垂直方向一致。

步骤二:小心边压边削,注意避免环刀偏心入土,应使整个土样进入环刀并凸出环刀为止,然后用钢丝锯或修土刀将两端余土削去修平,擦净环刀外壁。

步骤三:测定土样密度,并在余土中取代表性土样测定其含水率,然后用圆玻璃将环刀两端盖上,防止水分蒸发。

步骤四:在固结仪的固结容器内装上带有试

表 1 材料含水率、密度和比重

Tab.1 Moisture content, density and specific gravity of materials

材料	含水率/%	湿密度/(g·cm ⁻³)	干密度/(g·cm ⁻³)	比重
海泥	63.26	1.69	1.03	2.70
山土	12.50	1.43	1.30	2.72
10%	63.14	1.74	1.07	2.76
15%	42.58	1.76	1.24	2.77
20%	34.74	1.77	1.33	2.79

注:10%、15% 和 20% 是指海泥搅拌水泥(桩)土的水泥掺量。

样的切土环刀(刀口向下),在土样两端应贴上洁净而润湿的滤纸,放上透水石,然后放入加压导环和加压板以及定向钢球,安装千分表。

本次试验定为 50、100、200、400、800 kPa (1 kPa=0.001 N/mm²) 五级荷载累计数值,分三组平行试验平均取值。时间按照 6 s、15 s、1 min、2 min 15 s、4 min、6 min 15 s、9 min、12 min 15 s、16 min、20 min 15 s、25 min、30 min 15 s、36 min、42 min 15 s、49 min、64 min、100 min、200 min、400 min、23 h、24 h 记录千分表读数,直至稳定为止。所有过程应尽快完成,防止水分蒸发。经过普通高压固结仪 TKA-STC-3H(图 1)试验后,获得不同固结压力作用下试验结果。



图 1 普通高压固结仪 TKA-STC-3H
Fig.1 Ordinary high pressure Consolidator TKA-STC-3H

2 试验结果分析

2.1 压缩变形分析

各材料经过普通高压固结仪 TKA-STC-3H 试验在各级压力作用下固结后获得结果如图 2。

从图 2 中可以看出,在相同固结压力作用下,随着固结时间的增加,各材料的变形量开始段变化量增加速率大,最终变形量减小,而且在每级荷载开始的 100~200 min 内就基本达到峰值。随着固结压力的增加,各材料的变形量的增加幅度逐渐减小,但每级固结压力作用下达到峰值的时间基本一致。海泥的最终固结变形最大,山土最小,而海泥搅拌水泥(桩)土随着水泥掺量的增加,最终压缩变形逐渐减小。这是由于当水泥与高含水率海泥充分拌和后,水泥颗粒表面的矿物很快与海泥中的水发生水解和水化反应,经过 24 h 养护后生成氢氧化钙、含水硅酸钙、含水铝酸钙及含水铁酸钙等化合物。这些化合物形成了悬浮的溶液,具有胶结作用,凝结后形成水泥土的胶结强度,随着时间的进行,水解和水化反应越充分,胶结作用越强,后期变形量越小。

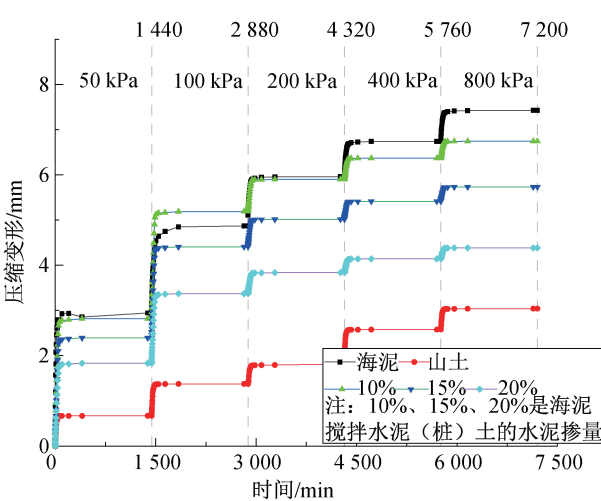


图 2 固结压缩变形在各级压力下随时间变化曲线
Fig.2 Time varying curves of consolidation compression deformation under various pressures

2.2 压缩曲线分析

固结压缩特性是土体性质的重要方面,将海泥、山土以及海泥搅拌水泥(桩)土作为工程材料,必须考虑其压缩变形特性。从工程施工的角度来看,既需要满足固结速率快,又需要满足相应的压缩性能。工程中常采用 100~200 kPa 压力区间对应的压缩系数 a_{1-2} 评价土的压缩性,当 $a_{1-2} \leq 0.1 \text{ MPa}^{-1}$ 时为低压缩性土, $0.1 \text{ MPa}^{-1} < a_{1-2} \leq 0.5 \text{ MPa}^{-1}$ 时为中压缩性土, $a_{1-2} > 0.5 \text{ MPa}^{-1}$ 时属于高压缩性土。

通过标准固结试验得到的固结数据,得到海泥、山土以及不同水泥掺量海泥搅拌水泥(桩)土的初始孔隙比 e_0 ,并绘制各材料的 $e-p$ 曲线,如图 3,得到材料的初始孔隙比见表 2,材料在 100~200 kPa 下的压缩系数 a_{1-2} 如表 3。

表 2 材料的初始孔隙比	
Tab.2 Initial void ratios of materials	
材料	初始孔隙比
海泥	1.62
山土	1.14
10%	1.57
15%	1.23
20%	1.10

注:10%、15%和 20%是指海泥搅拌水泥(桩)土的水泥掺量。

从图 3 中可以看出,海泥固结压缩变形最大,初始孔隙比为 1.62,800 kPa 固结压力作用 24 h 后,孔隙比减小了 0.97。山土的固结压缩变形最

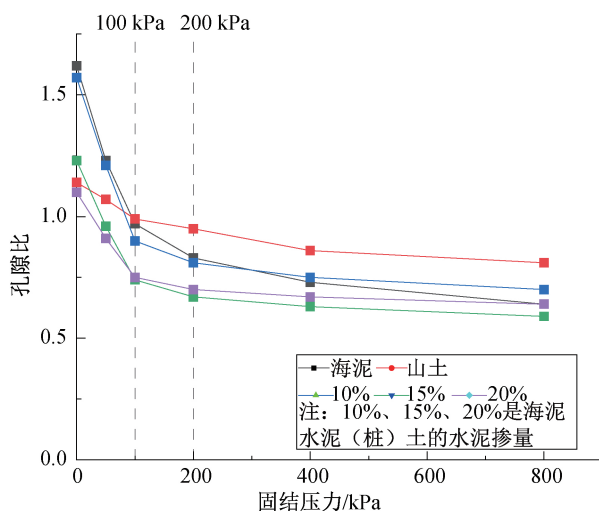


图3 材料 e-p 曲线

Fig.3 e-p curves of materials

小,初始孔隙比为 1.14,800 kPa 固结压力作用 24 h 后,孔隙比只减小了 0.33。水泥掺量为 10%、20%、30% 的海泥搅拌水泥(桩)土从初始孔隙比分别为 1.57、1.23、1.10,800 kPa 固结压力作用 24 h 后孔隙比依次减少了 0.84、0.64、0.46。即随着水泥掺量的逐渐增加,海泥搅拌水泥(桩)土孔隙比变化也逐渐变小。

表 3 100~200 kPa 固结压力下材料的压缩系数

Tab.3 Compression coefficient of materials under consolidation pressure of 100~200 kPa

材料	压缩系数/ MPa^{-1}
海泥	1.40
山土	0.15
10%	0.90
15%	0.70
20%	0.21

注:10%、15%和 20%是指海泥搅拌水泥(桩)土的水泥掺量

从表 3 中可以看出,海泥的压缩系数为 1.40 MPa^{-1} ,属于高压缩性土;山土的压缩系数为 0.15 MPa^{-1} ,属于中压缩性土。水泥掺量为 10%、15%、20% 的海泥搅拌水泥(桩)土的压缩系数依次是 0.90、0.70、0.21 MPa^{-1} 。随着水泥掺量的增加,海泥搅拌水泥(桩)土在 100~200 kPa 的压缩系数越来越小,最终的固结压缩变形越来越小。

2.3 固结系数分析

固结系数是反应受侧限土体在荷载作用下固结速度的一个标量。其大小反映土固结快慢的程度,即固结系数为反映土层固结特性的参数。

Taylor 根据一维固结理论分析发现,固结度 U

与时间因数的曲线在固结度 $U < 60\%$ 时很接近抛物线,并指出在变形-时间平方根曲线中确定与 $U = 90\%$ 相对应的时间,由此计算固结系数。该方法的主要优点在于确定 t_{90} 所需时间很短,可以减小次固结压缩对试验结果的影响,方法也比较简便。其缺点主要是对试验前期沉降读数精度要求较高,若前期沉降读数精度低,数据点的离散性较大,呈非理想形状。该压力下固结系数:

$$C_v = \frac{0.848h^2}{t_{90}} \quad (1)$$

式中: C_v —固结系数 (cm^2/s); h —最大排水距离,等于某一压力下试样初始与终了高度的平均值之半 (cm); t_{90} —固结度达 90% 所需的时间 (s)。

对于工程上常用 100~200 kPa 压力下的固结系数衡量固结压缩性能,时间平方根法以量表读数 $d(\text{mm})$ 为纵坐标,时间平方根 $\sqrt{t}(\text{min})$ 为横坐标,绘制 $d-\sqrt{t}$ 曲线如图 4 所示。

从时间平方根法绘制的曲线可知,各材料达到 90% 的固结度所需要的时间。各材料达到 90% 固结度具体时间和固结系数如表 4。

从表 4 中可以看出,海泥和山土达到 90% 固结度的固结系数大于 0.02,固结速度慢。相同固结压力条件下,三种水泥掺量为 10%、15%、20% 的海泥搅拌水泥(桩)土达到 90% 固结度的固结系数均在 0.008 左右,说明三种材料经过焖料养护后的固结速度相差不大。

3 结论

1) 从海泥、山土以及海泥搅拌水泥(桩)土的含水率和干密度的角度来看,山土初始含水率较小,干密度也较大;海泥搅拌水泥(桩)土随着水泥掺量的增加,初始含水率逐渐减小,干密度也逐渐增加。

2) 海泥的压缩系数大于 0.5 MPa^{-1} ,属于高压缩性土;山土的压缩系数在 0.1 MPa^{-1} 和 0.5 MPa^{-1} 之间,属于中压缩性土。随着水泥掺量的增加,海泥搅拌水泥(桩)土的压缩系数逐渐减小。水泥掺量为 20% 的海泥搅拌水泥(桩)土的压缩系数最小。

3) 海泥和山土达到 90% 固结度的固结系数均大于 0.02,固结速度慢。海泥搅拌水泥(桩)土在达到 90% 固结度时固结系数均相差不大,即海泥搅拌水泥(桩)土固结系数的大小随水泥掺量的变

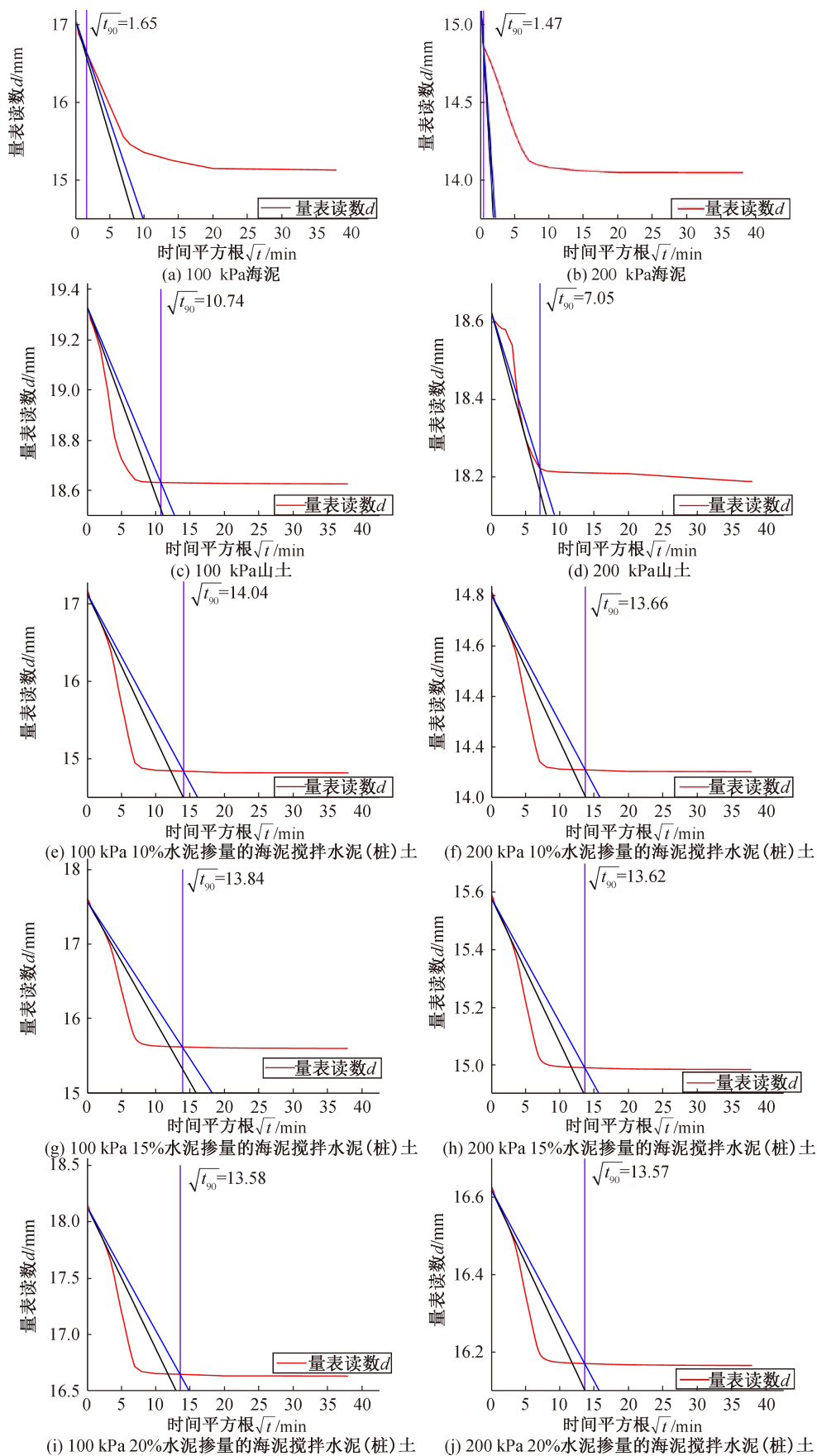
图4 时间平方根法求 t_{90} Fig.4 Time square root method to seek t_{90}

表 4 材料达到 90%固结度所需时间及固结系数

Tab.4 Time and coefficient of consolidation for materials to reach 90% degree of consolidation

材料	荷载/kPa	时间/min	固结系数
海泥	100	2.72	0.548
	200	2.16	0.552
山土	100	115.35	0.024
	200	49.7	0.033
10%	100	197.12	0.007
	200	186.6	0.008
15%	100	191.55	0.008
	200	185.5	0.008
20%	100	184.42	0.008
	200	184.14	0.008

注:10%、15%和 20%是指海泥搅拌水泥(桩)土的水泥掺量。

化没有明显的区分。

综上所述,工程中常采用 100~200 kPa 压力区间的压缩系数和固结系数来衡量材料的固结压缩性能,根据试验结果分析得出,当海泥搅拌水泥(桩)土的水泥掺量为 20%时,在 10%、15%和 20%三种水泥掺量中压缩系数最小,固结系数为 0.008,三者基本一致。故水泥掺量为 20%的海泥搅拌水泥(桩)土固结变形最小,固结速度也最快,最适合作为海堤填筑材料,山土则次之。

参考文献:

[1] 张从联,朱峰,李维涛,等.上海、浙江、福建三省市海堤

现状调查[J].水利水电科技进展,2008(2):51-55.

[2] 郝斌.滨海淤泥质软土微观结构及固结特性试验研究[J].市政技术,2019,37(1):221-225.

[3] 王亮,黄英豪,张春雷,等.吹填淤泥自重固结性质试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(3):444-451.

[4] 王洪圆,邢国建.深层淤泥质软土高压固结试验研究[J].中国水运:下半月,2018,18(6):242-243.

[5] ZHANG Fuhai, GUO Shuaijie, WANG Baotian. Silt Soil Sediment and Consolidation Mechanisms [P]. Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE), 2011 International Conference on, 2011.

[6] 崔伟,邵宇阳,童朝锋.淤泥自重固结过程研究综述[J].泥沙研究,2019,44(1):67-72.

(责任编辑 王利君)