

文章编号:1674-599X(2022)04-0016-06

吹填泥浆快速处理方法的室内试验研究

刘龙武¹,周斌^{1,2},宁泽宇¹

(1.长沙理工大学土木工程学院,湖南长沙410114;2.湖南省勘测设计院有限公司,湖南长沙410000)

摘要:为探讨高含水泥浆快速处理的方法,本研究提出联合化学絮凝、真空预压和二次掺灰3种方法于一体的处理方法,并对其进行室内试验验证其效果。试验结果表明:先掺入1%聚合氯化铝的泥浆,絮凝沉降1d后,泥浆含水率可从300%降至100%;再对试样采取真空预压,泥浆含水率可降低至40.52%;最后,采用二次掺灰改性处理,泥浆含水率可降低至35.40%,达到可塑状态。此时,泥浆的无侧限抗压强度可达到60kPa以上,满足普通地基的承载力要求。吹填泥浆的传统处理方法需耗时2~3a,该方法仅需4~5d,大幅度缩短工期。絮凝-真空预压-二次掺灰改性的联合处理方法是一种高效、价格低廉且能快速降低泥浆含水率的处理方法,可为类似工程提供借鉴。

关键词:吹填泥浆;絮凝;真空预压;改性土;含水率

Experimental study on rapid treatment method for dredged slurry

LIU Longwu¹, ZHOU Bin^{1,2}, NING Zeyu¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Hunan Survey Designing Institute Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: In order to improve the rapid treatment method for high water content mud, a novel treatment method was proposed. The chemical flocculation, vacuum preloading and secondary ash mixing were combined in the method, the test was performed to verify the effect. The results show that the water content of slurry added with 1% polyaluminium chloride decreases from 300% to 100% after one day of flocculation sedimentation. And the water content can decrease to 40.52% by vacuum preloading. Furthermore, the moisture content of the slurry will decrease to 35.40% after the secondary ash mixing modification treatment, the treatment slurry can be plasticized at this time. The unconfined compressive strength can exceed 60 kpa, meeting the bearing capacity requirement of ordinary foundation. The traditional treatment method of dredged slurry will take 2 ~ 3 years, only 4 ~ 5 days are needed using the proposed method. The construction period will be cut down significantly. Those indicates the combined treatment is an efficient, low-cost and rapid method to reduce the water content of slurry. This method can provide reference for similar projects.

Key words: dredged slurry; flocculation; vacuum preloading; modified soil; water content

近些年,随着我国大力发展基础设施建设,吹填工程产生的吹填泥浆日益增多,泥浆处理成了工程处置的一大难题。传统做法是先将泥浆置于堆场自然风干(这需要占用大量场地长达2~3年的时间才能形成表面的硬壳层),再进行真空预压处理。

但由于吹填泥浆的渗透性差、含水量高、排水固结速度慢、抗剪强度低。未经处置的泥浆不能直接弃置或用作填土。但该方法过长的工期常常难以满足工程建设的需求,且该方法不适宜多雨地区。

目前,泥浆处理方法主要有化学絮凝,真空预

收稿日期:2021-04-14

作者简介:刘龙武(1961—),男,长沙理工大学教授,博士。

压和机械脱水等^[1]。国内一些学者也进行了相关研究。詹良通^[2]等人使用堆载真空预压工艺,在30 d内将泥浆的含水率从450%降到95%,但仍远达不到工程的需求。张吕林等人^[3]研究了通过化学絮凝剂的方法来解决泥浆处理的问题,将阴离子型聚丙烯酰胺(apam aninoic polycrylamide, 简称为APAM)加入泥浆中,最终泥浆含水率从500%降到200%,只花费了1 d的时间,效果显著,但处理后200%的泥浆含水率依然远未达到工程需求。

因此,单一的真空预压和絮凝沉降泥浆的处理方法均难以满足工程需要,必须研究一种综合处理的新方法提高泥浆处理效率。

本研究综合了各泥浆处理方法,提出了絮凝-真空预压-二次掺灰改性联合处理方法,并进行了室内试验研究。

1 试验材料

试验所用泥浆取自湘江长沙段淤泥,其天然含水率约为120%,泥浆含砂量较高,且含微量有机质,根据《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019)测得其物理性质指标,具体为:湿密度1.18 g/cm³、塑限21.3%、液限52.5%、黏粒含量38.7%、粉粒含量48.5%、砂含量12.8%。

1.1 絮凝剂的选择

泥浆是胶体分散体系,具有一定的化学稳定性,其土颗粒主要是黏粒和粉粒,自然沉降速度缓慢。通过加入化学絮凝剂,可破坏泥浆体系中的化学稳定性,促使水与固体颗粒分离,达到泥浆轻量化和干化的目的。各类泥浆由于组成成分差异较大,物理化学性质差异较大,盲目地使用絮凝剂不仅处理效果不佳,还会造成环境污染等问题。因此,选择有针对性的絮凝剂既能达到最佳效果,又可节约资源和保护生态环境。絮凝剂分为无机试剂和有机试剂两种,常见絮凝剂有:生石灰、石膏、聚合氯化铝(polyaluminum chloride, 简称为PAC)、聚合硫酸铝(polyaluminum sulfate, 简称为PAS)、聚合氯化铁(polymeric ferric chloride, 简称为PFC)和聚丙烯酰胺(polyacrylamide, 简称为PAM)等^[4]。

本试验选择生石灰、石膏、PAC、APAM和阳离子型聚丙烯酰胺(cationic polycrylamide, 简称为CPAM)5种典型絮凝剂进行絮凝沉降试验,优选出最适宜处理湘江长沙段疏浚淤泥的絮凝剂。

2.2 试验方法与结果分析

本研究采用直接观测沉降界面法^[5]进行试验,选取6个容量为1 L的量筒并加入1 000 g湘江长沙段疏浚泥浆,往各量筒内加入不同的絮凝剂,匀速搅动5 min,观察泥水分界面的高度变化,记录试验数据并对比分析。

试验数据如图1~2所示。根据试验数据计算各量筒在絮凝沉降24 h后的含水率,结果分别如图3~4所示。

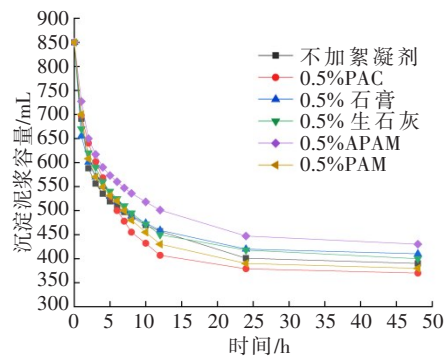


图1 0.5%絮凝剂掺量的试样沉降过程

Fig. 1 Settling process of sample with 0.5% flocculant content

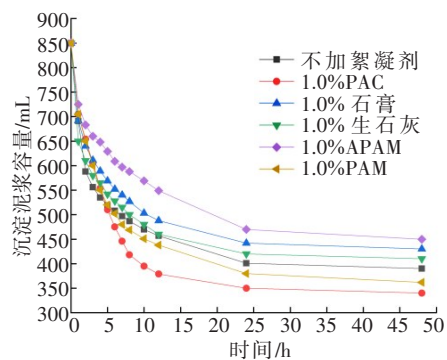


图2 1%絮凝剂掺量的试验沉降过程

Fig. 2 Settling process of sample with 1% flocculant content

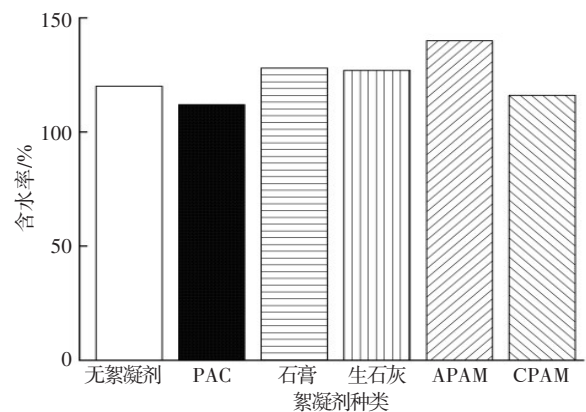


图3 0.5%絮凝剂掺量的试样24 h沉降结果

Fig. 3 Settlement result of sample with 0.5% flocculant content after 24 h

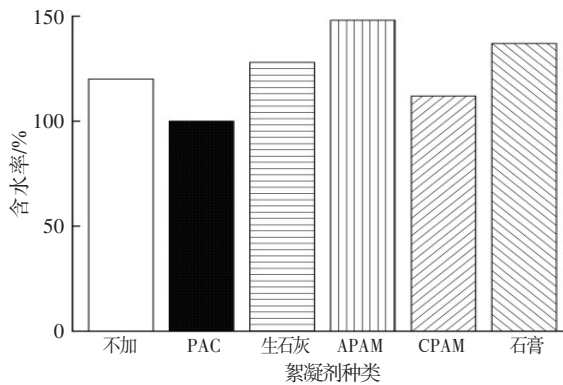


图4 1.0%絮凝剂掺量的试样24h沉降结果

Fig. 4 Settlement result of sample with 1% flocculant content after 24 h

从图3~4可以看出:

1) 在絮凝沉降试验开始后的前24 h内, PAC和CPAM等阳离子型絮凝剂能显著提高泥浆的沉降效率。其中, 分别加入1%的PAC、CPAM的两组试样的最终含水率分别为100%和110%; 对比空白组(不添加絮凝剂组), 沉降效果分别提升了16.7%和8.3%。PAC对泥浆的絮凝效果优于CPAM的。

2) APAM等阴离子型絮凝剂的絮凝沉降效果不佳, 甚至对泥浆的沉降产生了阻碍作用, 使其沉降效率降低。这是因为黏土颗粒表面带负电荷, 由于电荷中和作用, 只有阳离子型絮凝剂才能使泥浆更好地沉降絮凝^[6]。

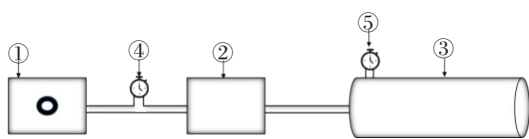
3) 在试验的前8 h内, 各泥浆试样的沉降速度均较快, 在12~24 h内沉降速度放缓, 而24 h后沉降速度较慢。

本研究旨在提升300%含水率的泥浆处理效率, 选取能使泥浆含水率在24 h内降至100%以下的PAC絮凝剂。当泥浆絮凝沉降处理效果达到工艺要求后, 进行真空预压脱水工序。

2 真空预压脱水试验

2.1 试验设备

自制真空预压脱水模型由真空泵、水气分离装置、泥浆脱水管和监测系统四部分构成, 如图5所示。



①真空泵 ②水气分离装置 ③泥浆脱水管 ④真空度表I ⑤真空度表II

图5 真空预压试验模型

Fig. 5 The model for vacuum preload test

水气分离装置由三轴仪压力室制成。监测系统由两个真空度表组成, 其中, 真空度表I测量水气分离置的真空负压, 真空度表II测量泥浆脱水管中砂装垫层的真空负压。泥浆脱水管由聚氯乙烯(polyvinyl chloride, 简称为PVC)管制成, 直径20 cm, 长80 cm, 内部结构如图6所示。

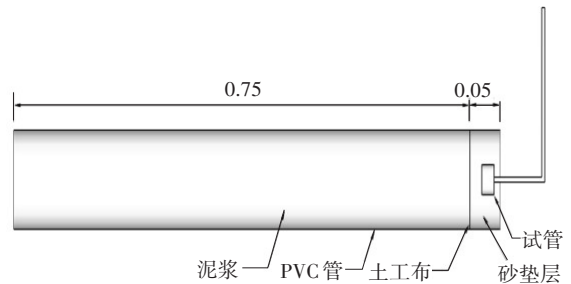


图6 泥浆脱水管内部结构图(单位:m)

Fig. 6 Internal structure diagram of mud dewatering pipe (unit: m)

各部分用高强度塑料硬管有序连接, 组成完整的真空预压脱水模型。通过抽真空, 让泥浆脱水管内外形成气压差, 管内负压将水从土体中孔隙水排出, 降低孔隙水压力, 使土体固结、密实。

2.2 试验方案

将絮凝沉降后泥浆的泥水分界面的上层清液抽出, 将剩余泥浆填入泥浆脱水管指定位置, 并用PVC盖板密封。密封完成后启动真空泵, 使泥浆脱水管中砂垫层的真空负压保持在-70 kPa以下, 对泥浆脱水管管口的泥浆含水率和密度进行实时监测和记录。泥浆密度、含水率与沉降速率分别如图7~9所示

2.3 试验结果与分析

从图7~9中可以看出, 泥浆脱水量随时间变化可分为三个阶段: ①在试验前6 h内, 抽水速率极快, 泥浆中的水分以水流的形式从泥浆脱水管内被抽出, 水流有些许浑浊, 脱水量随时间快速增长, 此阶段为快速脱水阶段; ②在试验6~30 h内, 随着时间的增加, 抽水速率放缓, 泥浆中的水分以水沫的形式被抽出, 水沫较为清澈, 泥浆脱水量随时间稳定增长, 此阶段为稳定脱水阶段; ③在试验进行30 h后, 抽水速率继续减小, 无明显水分被抽出, 泥浆脱水量缓慢增长, 泥浆含水率和密度变化较小, 此阶段为缓慢脱水阶段。

分析发现, 随着真空预压试验的进行, 泥浆脱水效率不断降低, 含水率减小, 脱水速率放缓, 这是透水土工布中空隙被土颗粒堵塞导致的。在试验初期, 泥浆呈流塑状态, 水分大多为自由水且处于

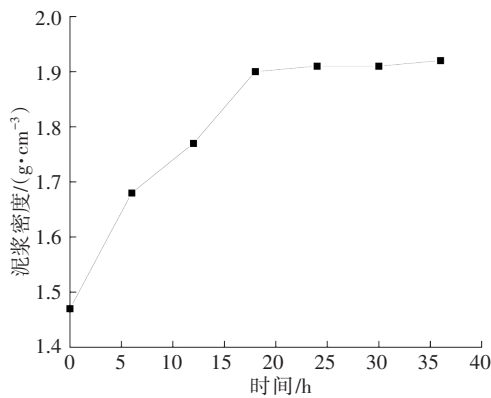


图7 泥浆密度变化

Fig. 7 The change graph of mud density

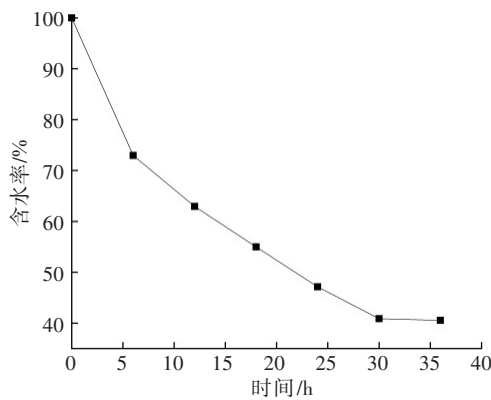


图8 泥浆含水率与时间变化

Fig. 8 The curve of mud water content - time

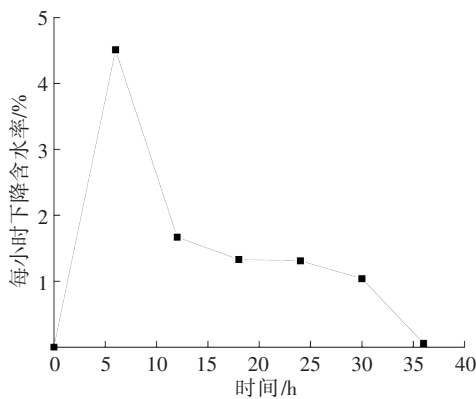


图9 沉降速率变化

Fig. 9 The change graph of settlement rate

流动状态,土颗粒间有效应力为0 kpa,真空形式的压力能在泥浆中有效传递。随着试验的进行,泥浆中自由水被逐渐抽出,土颗粒在真空负压的作用下向砂垫层方向聚集、相互接触,土颗粒间有效应力增加,渗透路径不断减小,使透水土工布空隙逐渐堵塞,最终在土工布表面形成淤堵层,此时泥浆脱水效率接近于0。

试验持续进行30 h后,泥浆脱水管内的泥浆开始进入缓慢脱水阶段,此时,土工布表面虽已形成

淤堵层,但泥浆脱水管内的泥浆已从初始的流动状态转变为软塑状态,含水率降至40.52%,较初始含水率大幅降低,处于液限和塑限状态之间,这说明处理效果显著。此后,真空预压脱水效率将明显降低,进入下一泥浆处理阶段。

3 二次掺灰改性试验

3.1 试验材料与方案

试验土料取自湘江长沙段淤泥。将天然土料烘干、研磨后,按45%初始含水率配制试验土样。

按改性土二次掺灰方案^[7]进行试验。将土样分为3组(每组两个试样测量,所测结果取平均值),分别掺入1%、2%和3%的生石灰并搅拌均匀,焖料1 d后测量各组的含水率、液限和塑限指数,再在各组试样中掺入2%的水泥并搅拌均匀,养护1 d后分别测量各组试样的含水率和无侧限抗压强度。

3.2 试验结果与分析

第一和第二掺灰后各组测量结果分别见表2~3,各组无侧限抗压强度结果如图10所示。

表1 第一次掺灰后土样的物理性质

Table 1 Physical properties of soil samples after first lime mixing

编号	生石灰掺量/%	液限/%	塑限/%	含水率/%	塑性指数 I_p	液性指数 I_L
1	1	51.13	22.05	41.4	29.08	0.665
2	2	48.51	24.20	39.5	24.31	0.629
3	3	46.02	26.63	38.1	19.39	0.591

表2 第二次掺灰后土样的含水率

Table 2 Water content of soil sample after the second lime mixing (%)

编号	含水率
1	37.3
2	36.5
3	35.4

由表1~2可知:随着生石灰掺量的增加,土样的液限和含水率逐渐降低,塑限逐渐升高。第3组试样经焖料1 d后,其塑性指数为19.39,液性指数为0.591,试样从软塑状的淤泥转变成可塑状的粉质黏土。这是由于生石灰与土中水发生熟化反应消耗水分,反应产生的热量加速水分的迁移和土样的脱湿^[8-9]并同时产生砂化效应,反应产物使土颗粒胶结凝聚,形成更大粒径的土颗粒^[10]。

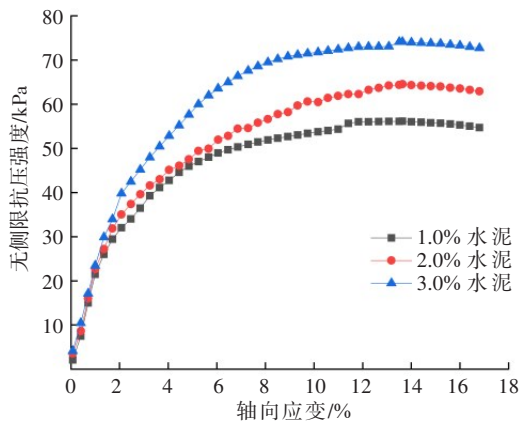


图10 无侧限抗压强度与轴向应变的关系

Fig. 10 Relationship between unconfined compressive strength and axis stress

从图10可以看出,在泥浆中掺入水泥后,水泥与土中水分发生水化反应和火山灰反应,其反应生成物C-S-H,促进土颗粒进一步胶结凝聚^[11],最终形成稳定的土骨架。经养护1 d后试样的塑性指数与稠度较改性前降低,而强度大大提高。第2和第3组这两组试样在掺入2%的水泥并经养护1 d后,无侧限抗压强度均能达到60 kPa以上,满足大部分轻型施工机械的承载力和施工要求,可以用作沿海地区的港口填土。

综上所述,从经济角度考虑,可选择生石灰和水泥作为泥浆二次掺灰方案。

4 结论

本研究提出一种絮凝-真空预压-二次掺灰改性的联合处理方法,并对其进行了室内试验研究,所得结论为:

1) 阳离子型絮凝剂能显著提高泥浆沉降效率,而阴离子型絮凝剂会对泥浆沉降产生阻碍作用。PAC为处理湘江长沙段淤泥的最佳絮凝剂。在初始含水率为300%的泥浆中掺入1%的PAC沉降24 h后,其含水率可降至100%。

2) 在真空预压脱水试验中,泥浆脱水量随时间变化可分为三个阶段:快速脱水阶段、稳定脱水阶段和缓慢脱水阶段。在前两个阶段中,泥浆脱水效率较高,土颗粒渗透路径较大,泥浆含水率可从100%降至40%左右;而在缓慢脱水阶段,泥浆脱水效率很低。

3) 泥浆经先掺石灰,焖料后,再进行掺入水泥

的二次掺灰改性处理后,其塑性指数与稠度降低,含水率降至36.5%,强度显著提高,无侧限强度达到60 kPa以上,改性效果较好。

4) 本研究提出的联合处理方法分三个阶段进行,工艺流程如下:第一阶段为絮凝沉降阶段,通过在泥浆中掺入合适的絮凝剂(PAC),待泥浆含水率降至约100%时结束;第二阶段为真空预压脱水阶段,当泥浆进入缓慢脱水阶段或含水率降至40%左右时结束;第三阶段为二次掺灰改性阶段,选择合适的生石灰和水泥经掺入,改性处理后的泥浆无侧限抗压强度可达60 kPa以上。

5) 经过本联合方法处理后的泥浆含水率大幅降低,强度显著提高,能直接用于沿海地区港口填土,可解决沿海地区土料缺失问题。本方法处理流程可在4~5 d内完成,缩短了泥浆处理的施工工期,且符合环保标准。

参考文献(References):

- [1] 胡保安. 环保疏浚泥浆脱水干化技术研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(4): 132-136. (HU Baoan. Research progress on the dewatering technologies for environmental dredge sediment [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(4): 132-136. (in Chinese))
- [2] 詹良通, 张斌, 郭晓刚, 等. 废弃泥浆底部真空-上部堆载预压模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3245-3254. (ZHAN Liangtong, ZHANG Bin, GUO Xiaogang, et al. Physical modeling study on treatment of waste slurry with vacuum preloading at bottom combined with upper surcharge loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(10): 3245-3254. (in Chinese))
- [3] 张吕林, 龚习炜, 张苏皖, 等. 粘粉土地层工程废弃泥浆絮凝脱水试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2020, 37(4): 20-25, 33. (ZHANG Lyulin, GONG Xiwei, ZHANG Suwan, et al. Experimental study on flocculating and dewatering of engineering waste mud in clay silt soil layer [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2020, 37(4): 20-25, 33. (in Chinese))
- [4] 王国锋, 杨庆光, 李毛毛, 等. 吹填泥浆沉降特性的室内试验研究[J]. 湖南工业大学学报, 2018, 32(2): 8-12. (WANG Guofeng, YANG Qingguang, LI Maomao, et al. Indoor experimental study on the coagulation-

- sedimentation properties of hydraulic-dredged mud [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2018, 32(2):8-12. (in Chinese))
- [5] 周兴龙,张文彬,王文潜. 量筒内进行矿浆沉降试验的方法[J]. 有色金属(选矿部分), 2005(5): 30-32, 25. (ZHOU Xinglong, ZHANG Wenbin, WANG Wenqian. Methods for settlement experiment of slurry in the measuring cylinder [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing), 2005(5): 30-32, 25. (in Chinese))
- [6] 杨春英,徐薇,白晨光. 施工废弃泥浆絮凝脱水试验及机理分析[J]. 环境科技, 2013, 26(5): 15-17, 21. (YANG Chunying, XU Wei, BAI Chenguang. The mud flocculation dehydration test and mechanism analysis[J]. Environmental Science and Technology, 2013, 26(5): 15-17, 21. (in Chinese))
- [7] 冯旭松,孙衣春,王保田,等. 基于二次掺灰法的改良膨胀土施工工艺与检测方法[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 6-8. (FENG Xusong, SUN Yichun, WANG Baotian, et al. Construction and detecting methods for stabilized expansive soil using two-step lime-cement mixing [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 6-8. (in Chinese))
- [8] 邵玉娟,施斌,刘春,等. 黏性土水理性质温度效应研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1576-1582. (SHAO Yuxian, SHI Bin, LIU Chun, et al. Temperature effect on hydro-physical properties of clayey soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1576-1582. (in Chinese))
- [9] 李彦龙,王俊,王铁行. 温度梯度作用下非饱和土水分迁移研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2839-2844. (LI Yanlong, WANG Jun, WANG Tiehang. Moisture migration of unsaturated soil due to thermal gradients[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(10): 2839-2844. (in Chinese))
- [10] 陈一新,王保田,张永奇,等. 石灰改良淤泥质土的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(34): 273-277. (CHEN Yixin, WANG Baotian, ZHANG Yongqi, et al. Experimental study on lime improved mucky soil [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(34): 273-277. (in Chinese))
- [11] 刘新,冯攀,沈叙言,等. 水泥水化产物:水化硅酸钙(C-S-H)的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(9): 9157-9167. (LIU Xin, FENG Pan, SHEN Xuyan, et al. Advances in the understanding of cement hydrate—Calcium silicate hydrate(C-S-H)[J]. Materials Reports, 2021, 35(9): 9157-9167. (in Chinese))
- [12] 黄英豪,董婵. 淤泥处理技术原理及分类综述[J]. 人民黄河, 2014, 36(7): 91-94. (HUANG Yinghao, DONG Chan. Principles and classifications for treatment of dredged material[J]. Yellow River, 2014, 36(7): 91-94. (in Chinese))
- [13] 杨福麟,周治江,刘永林. 浅层加固超软土技术的应用与研究[J]. 工程勘察, 2013, 41(2): 13-17, 22. (YANG Fulin, ZHOU Zhijiang, LIU Yonglin. Application and research of improvement technology of shallow ultra-soft soil [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(2): 13-17, 22. (in Chinese))
- [14] 卢圣武. 真空预压法在吹填厚砂层软基处理中的应用[J]. 珠江水运, 2015(13): 70-71. (LU Shengwu. Application of vacuum preloading method in soft foundation treatment of dredger fill thick sand layer[J]. Pearl River Water Transport, 2015(13): 70-71. (in Chinese))
- [15] 张钦喜,陶韬,王晓杰,等. 钻孔灌注桩废弃泥浆处理的试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(S1): 40-45. (ZHANG Qinxu, TAO Tao, WANG Xiaojie, et al. Experimental study on treatment of waste slurry in cast-in-situ bored pile[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(S1): 40-45. (in Chinese))
- [16] 张明敏. 低液限粉土路基复掺改良试验研究[J]. 公路与汽运, 2020(5): 55-57, 60. (ZHANG Mingmin. Experimental study on improvement of low liquid limit silt subgrade by compound mixing [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(5): 55-57, 60. (in Chinese))
- [17] 周志刚,刘鑫,孙绪康. 低剂量水泥改性级配碎石抗剪强度分析[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(1): 8-14. (ZHOU Zhigang, LIU Xin, SUN Xukang. Analysis of shear strength of the low-dose cement-modified graded crushed rock [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(1): 8-14. (in Chinese))
- (责任编辑:李脉;校对:罗容 欧兆虎;英文编辑:陈璐)