

石振明, 薛丹璇, 彭铭, 等. 2018. 泥水盾构隧道废弃泥浆改性固化及强度特性试验[J]. 工程地质学报, 26(1): 103-111. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2018.01.012

Shi Zhenming, Xue Danxuan, Peng Ming, et al. 2018. Experiment on modified-curing and strength properties of waste mud from slurry shield tunnel[J]. Journal of Engineering Geology, 26(1): 103-111. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2018.01.012

泥水盾构隧道废弃泥浆改性固化及强度特性试验*

石振明^{①②} 薛丹璇^{①②} 彭铭^{①②} 陈亿军^③

(^①同济大学地下建筑与工程系 上海 200092)

(^②同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室 上海 200092)

(^③中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071)

摘要 泥水盾构隧道施工产生大量的废弃泥浆,可能带来环境污染、侵占土地等问题,影响城市的正常运转。本文以厦门市某隧道施工现场产生的废弃泥浆为研究对象,采用化学固化技术处置泥浆,测试不同影响因素(固化剂种类、固化剂掺入比、泥浆初始含水率)对改性固化后泥浆抗压强度、pH值、含水率等特性的影响,分析固化机理并解释相关现象,获取最优固化剂种类、掺入比、泥浆初始含水率。对比试验结果表明最优固化剂种类为CERSM泥浆固化剂II,掺入比为10%,泥浆初始含水率为100%。在此基础上,本文进一步探讨改性固化后泥浆的强度特性,28d后固化泥浆抗压强度可达1.5MPa,是普通水泥固化泥浆强度的4倍,可用做建筑填料,解决环境污染问题,并实现废弃泥浆的资源化利用。

关键词 隧道废弃泥浆; 改性固化; 固化剂; 强度特性

中图分类号: TU411 文献标识码: A doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2018.01.012

EXPERIMENT ON MODIFIED-CURING AND STRENGTH PROPERTIES OF WASTE MUD FROM SLURRY SHIELD TUNNEL

SHI Zhenming^{①②} XUE Danxuan^{①②} PENG Ming^{①②} CHEN Yijun^③

(^①Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

(^②Ministry of Education Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

(^③State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

Abstract Slurry shield tunnel construction produces a large amount of waste mud. If these engineering muds cannot be properly disposed, they probably bring environmental pollution, occupation of land and other issues, highly disturbing the normal operation of cities. The waste mud in this experiment is collected in the construction site of tunnel projects in Xiamen. In order to dispose the waste mud safely and effectively, chemical solidification technology is used to achieve the optimal curing effect through comparative tests. In these tests, different values of curing agent type, agent mixing ratio, and mud initial water content lead to different values of compressive strength, pH value, and water content of modified-curing mud samples. The optimum curing agent type, agent

* 收稿日期: 2016-09-21; 收到修改稿日期: 2017-04-26.

基金项目: 国家自然科学基金(41372272, 41402257), 上海市科技人才计划项目(41502275) 资助.

第一作者简介: 石振明(1968-) 男, 博士, 教授, 水文地质与工程地质专业, 主要从事地质灾害与环境工程研究方面的教学与研究工作.

Email: shi_tongji@tongji.edu.cn

通讯作者简介: 彭铭(1981-) 男, 博士, 助理研究员, 主要从事地质灾害和堰塞湖的溃坝模型、溃坝风险评估与动态决策方面的研究工作. Email: pengming@tongji.edu.cn

mixing ratio and initial water content of waste mud are obtained with the analysis of curing mechanism and related data. These tests are divided into 3 parts. The first part is curing agent types comparative test, which includes 425[#] ordinary Portland cement (S1), CERSM mud curing agent I (C1), CERSM mud curing agent II (C2) and quick lime (L1). The second part is curing agent mixing ratio comparative test, which includes 3%, 5%, 7%, 10%, 15% agent mixing ratio. The last part is mud initial water content comparative test, which includes 100%, 125%, 150%, 180% mud initial water content. Then the optimum curing agent type, mixing ratio and initial water content of slurry are obtained respectively by testing the effects of different factors (agent types, agent ratio and mud initial water content) on compressive strength, pH value, and water content of modified-curing mud samples. Based on the compressive strength, sample water content and pH value of the above three aspects, the curing effect of curing agent from high to low is ranked as CERSM mud curing agent II (C2), 425[#] ordinary Portland cement (S1), CERSM mud curing agent I (C1) and quick lime (L1) from highest to the lowest. Compressive strength increases with the increase of the curing agent ratio, sample water content decreases with the curing agent ratio increasing, and pH value increases with the increase of the curing agent ratio, decreases with age. Compressive strength decreases with the increase of mud initial water content, sample water content increases with the increase of mud initial water content, and the pH of the modified-curing mud sample has nothing to do with mud initial water content. In engineering, CERSM mud curing agent II, 10% ratio, and 100% mud initial water content are finally chosen. The compressive strength of modified-curing mud sample after 28 d is up to 1.5 MPa, which is 4 times of the strength of ordinary cement solidified slurry sample. Moreover, as the growth of the age, the shear strength of modified-curing mud sample has a substantial increase, the cohesion of sample increases to 262 kPa, and internal friction angle increases to 38.65°, and modified-curing mud can be used as building filler. The presented technology can be used to dispose waste mud, which can not only solve the environmental pollution problem, but also help to realize the resource utilization of the waste mud.

Key words Tunnel waste mud; Modified-curing; Curing agent; Strength properties

0 引言

随着中国城市化进程的加快,地面交通拥堵问题加剧,修建地铁已经成为各大城市解决城市交通问题的主要手段。相关数据显示,截止到2015年底,中国内地已有25个城市拥有了110条建成并运营的城市轨道交通线路,运营总里程达3293 km。盾构施工法是城市地铁区间隧道施工的主要方法之一,特别是在软土地区应用广泛。在隧道盾构施工中,隧道开挖产生大量土体,与泥水混合形成泥浆,通过排浆泵或管道输送至地面进行进一步处理,泥水盾构的出浆量一般为隧道挖土体积的2~3倍(常鸽等,2012),伴随着隧道盾构施工产生大量的废弃泥浆。由于城市储存场地有限、人员密度大,如果处置不当,会造成环境污染、侵占土地等问题,甚至对整个城市的正常运行产生巨大影响(苏清贵等,2012)。

目前处理废弃泥浆的方法有直接排放法(张瑞云,2003)、焚烧法(刘豫东等,2007)、化学固化法

(吴志红等,2008)、机械处理法(房凯等,2011)和化学絮凝沉淀法(表1)。直接排放法、焚烧法不能使泥浆回收利用且对环境造成污染;机械处理法处理范围有限,只能处理分离出来的渣土;化学絮凝沉淀法对高密度的泥浆处理效果较差,泥浆固相不易絮凝沉淀;化学固化处理法直接在泥浆中加入固化剂,使泥浆性质得到改善,利于废弃泥浆的资源化利用。综上所述,本文采用化学固化法对盾构隧道废弃泥浆进行处理。目前国内外学者对泥浆固化的研究如下:固化后土样无侧限抗压强度与固化剂种类、龄期、掺入比密切相关,实验结果表明无侧限抗压强度与龄期之间存在一定的指数关系(董邑宁等,2008)。钻井废弃泥浆的处理一般采用化学固化的方法(吴志红等,2008),针对不同的泥浆组成成分及气候条件,分析固化机理,选取最佳泥浆固化配方,确定经济有效的固化处理技术,Leonard et al. (2010)采用粉煤灰为固化剂处理废弃泥浆,并分析其作用机理与效果。软土采用单一水泥固化的效果较差,添加外掺剂可以显著提高固化土强度,选取可提高水化后土样中氢氧化钙饱和度的外掺剂,在不

表1 废弃泥浆处理方法对比
Table 1 Comparison of waste mud treatment

方法	简述	优点	缺点	说明
直接排放法	将废弃泥浆运至指定地点直接废弃或简单填埋	操作简单,无技术要求	造成环境污染,不能回收利用,影响工程填埋场安全。运输成本高,选购废弃场地花费高	已逐渐减少或被禁止使用,只能用于渣土处理
焚烧法	用高温蒸发掉泥浆中的水分而分离出固相	周期短,占地面积小,选址灵活	造成空气污染,分离出的固相要处理,能耗大,需要专门的转窑	在经济不发达的国家和地区占的份额始终很小
机械处理法	用振筛、旋流器、离心机等机械设备处理泥浆,筛选分离出固相成分,外运废弃	减少外运成本和购买废弃地成本,减少环境污染	设备投资高,处理量有限	泥浆颗粒细微,黏滞性强,机械方法无法使泥浆颗粒和水分离,只能处理渣土
化学絮凝沉淀法	加入絮凝沉淀剂使泥浆悬浮颗粒凝聚成絮凝体沉淀,再进行固液分离	泥浆固液分离效果好,减少泥浆体积	絮凝剂加药量高,成本高,需与固液分离设备配套使用,且固相物质需进一步处理	在高密度泥浆中加絮凝剂处理效果较差,固相物质不易絮凝沉淀
化学固化法	在泥浆中加入固化剂,使泥浆直接固化	固化后泥浆成为有一定强度的固体,可资源化利用,利于环境保护	有机固化剂成本高,容易产生二次污染	在实际固化中,一般选用无机固化剂,价格低廉、使用方便、固化效果好

同饱和度下外掺剂对固化软土强度的影响不同(邓晓轩等,2011),此外,固化土无侧限抗压强度与固化剂掺量、土样初始含水率有关,强度与固化剂掺量呈近似线性递增关系,强度与初始含水率呈近似线性递减关系,强度与龄期呈现近似的对数增长关系(丁建文等,2013)。杨爱武(2015)等研究表明用石灰作为主要固化剂,水泥、石膏作为外加剂来固化天津滨海软土,软土无侧限抗压强度比原状土有明显提高,固化效果很好。工业废渣也可作为固化剂,以粉煤灰和高炉矿渣作为主要固化剂,石灰为添加剂处理黏性土,可有效提高土体无侧限抗压强度,且固化土的pH值均大于12(章定文等,2013)。污泥的固化处理目前采取污泥固化/稳定化技术,对污泥种类、固化剂种类、固化机理、关键技术等方面分析可知,污泥分为河湖、市政、工业污泥3类,固化剂分为有机和无机两类,固化剂及其水化产物在污泥中形成骨架,与污泥颗粒胶结并填充孔隙,提高固化后土样的整体强度,污泥固化/稳定化技术两个关键技术指标为无侧限抗压强度和浸出毒性(王鹏等,2016),固化后污泥的无侧限抗压强度与污泥的初始含水率、龄期、固化剂种类和掺入比等多方面因素有关(Dong et al., 2007)。

现有固化研究主要针对钻井泥浆、软土、污泥等,对盾构隧道废弃泥浆固化研究相对较少。盾构隧道废弃泥浆具有黏性大、有机质含量较少、含有添加剂、产量大等特点,已有研究在技术和经济上不一定适用于盾构隧道废弃泥浆固化。

本文进行不同固化剂、掺入比、泥浆初始含水率的泥浆固化试验,测定无侧限抗压强度、含水率、pH

值等相关指标,通过分析固化机理和相关数据,确定最优固化剂种类和掺入比,以及最优泥浆初始含水率。并对固化后泥浆的强度特性进行研究,探讨其作为建筑填料的可行性。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 泥浆材料

试验采用的泥浆,取自厦门轨道交通1号线一期工程的莲坂站—莲花路口站区间施工现场沉淀池底部泥浆。本区间起于湖滨南路莲坂转盘国贸大厦前,沿嘉禾路布设,止于莲花南路北侧庐山大厦前。场地西北侧为筲箕内湖,地貌主要为滨海海积阶地及残积台地,地形较平坦,地面高程4~10m。隧道为单线单洞圆形隧道,采用盾构法施工长度为893.4m,线路埋深15.2~16.4m,掘土体积为1010m³,盾构出浆量约为2021~3032m³,从而产生大量的废弃泥浆。

场区地层有第四系覆盖层,岩性、分布、厚度及性能变化较大。场区沿线基岩埋藏于第四系地层之下,受区域地质构造和风化作用,基岩全、强风化带的厚度较大,中等-微风化岩埋藏较深。本区段隧道穿越地层主要为粗砾砂、粉质黏土、残积土、全风化、散体状强风化花岗岩及碎裂状强风化花岗岩。

图1为本文试验所用泥浆取样点。在隧道盾构过程中,经过设备分离后的泥浆通过汇浆槽至沉淀池,整个沉淀池由多级不同坡度的分离池组成,经沉淀后的上部泥浆进入调浆池循环利用,底部泥浆晒

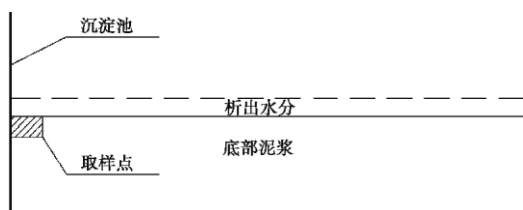


图1 取样位置示意图

Fig. 1 Sampling point

干后挖出废弃,造成资源浪费。废弃泥浆原样取自沉淀池底部泥浆,呈橙红色,因沉淀池底部温度过高,水分蒸发,因而流动性较差,初始含水率过低,甚至呈现出塑性体特征。由MS3000型激光衍射法粒度分析仪测出泥浆的土粒组成(图2),颗粒大小主要集中在 $1\ \mu\text{m}$ 至 $100\ \mu\text{m}$ 之间,泥浆颗粒由黏粒、粉粒和细砂组成,无中砂及以上粒径颗粒。表2为泥浆原样的物理化学性质。泥浆原样含水率较低,流动性差,有机质含量介于5%和10%之间,为有机质土,呈碱性。

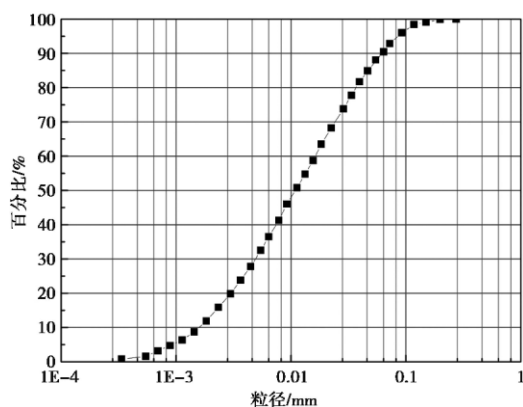


图2 土的粒度成分累计分布曲线

Fig. 2 Cumulative distribution curve of grain size composition of soil

表2 泥浆原样的物理化学性质

Table 2 Physicochemical properties of initial mud

含水率 /%	湿密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	干密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	有机质含量 /%	pH值
46.03	1.74	1.19	7.26	8.90

1.1.2 固化剂材料

本试验选择425#普通硅酸盐水泥(S1)、CERSM泥浆固化剂I(C1)、CERSM泥浆固化剂II(C2)和生石灰(L1)作为固化剂。

S1由CaO、SiO₂、Al₂O₃和Fe₂O₃等组成,其含量在95%以上,此外还含有MgO、SO₃、TiO₂、Mn₂O₃、

P₂O₅、Na₂O、K₂O等。S1能够与水相互作用并生成水化物,当水化物性质稳定且数量足够多时,具有胶凝能力和硬化并形成人造石的能力。

C1以硫铝基水泥为基础,添加泥浆固化剂及其他成分配制而成,使固结后的泥浆获得较高早期强度。固化机理为发生水化反应,其产物主要为钙矾石晶体及水化硅酸钙胶体等,适量的钙矾石的膨胀可以填充固化土的孔隙,产生增强作用。

C2以325#普通硅酸盐水泥为主要成分,添加黏土固化剂、粒化高炉矿渣及微量激活元素配置而成,主要用于固化矿浆和工程废弃泥浆。固化机理(彭美勋等,2011)为发生水化反应,硅酸三钙和硅酸二钙水化反应生成的水化硅酸钙不溶于水,以胶体微粒析出,并逐渐凝聚成凝胶体,构成强度很高的空间网络结构。

L1主要是石灰石煅烧后的产品,主要成分为CaO。磨细后的生石灰同泥浆拌和后,在颗粒表面立即开始水化,生成Ca(OH)₂。

1.2 试验设备

试样制备仪器:BSA2202S-CW型电子天平(感量0.01g)、QZ-10型砂浆搅拌机、修土刀、环刀($\Phi 50\ \text{mm}\times 50\ \text{mm}$)、烧杯、玻璃棒。

化学物理性质测试仪器:用DHG-9203A型电热恒温鼓风干燥箱烘干铝盒中的试样,计算含水率;DKZ-3型恒温振荡水槽震荡广口瓶中的土悬液,DZS-708型多参数分析仪测得pH值。

力学性质测试仪器:用WDW-50型微机控制电子式万能试验机测试固化后试样的抗压强度;抗剪强度由ZJ(DSJ-2)型应变控制式直剪仪(四联)测得,由剪切盒、垂直加载设备、剪切传动装置、测力计和位移量测系统组成,环刀($\Phi 61.8\ \text{mm}\times 20\ \text{mm}$),位移量测设备为百分表。

1.3 试样制备

试样制备过程(图3),首先按设计比例称量好泥浆,向其中添加相应比例的固化剂,手动搅拌均匀后,再用水泥胶砂搅拌机先慢搅2min后快搅2min至均匀,然后将混合泥浆填入 $\Phi 50\ \text{mm}\times 50\ \text{mm}$ 的环刀,表面用修土刀刮平,然后用薄膜封闭,静置1d后脱模,并置于温度为20℃、相对湿度90%养护箱中进行标准养护,养护期间试样用薄膜封闭,保证试样内水分无法蒸发。共制作了144块试样,其中120块用于不同固化剂种类和掺入比试验,24块用

于不同泥浆初始含水率试验。图 4 为脱模前后的试样。

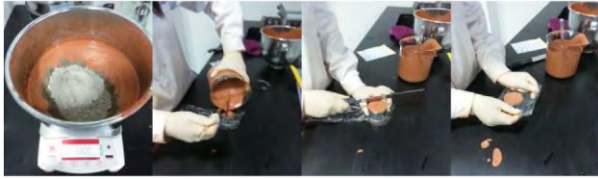


图 3 试样制备过程

Fig. 3 Samples prepare process



图 4 脱模前后的试样

Fig. 4 Samples before and after demold

1.4 试验方法

如图 5 试验流程图所示, 试样制备完成后开展固化试验。首先是固化剂种类及掺入比对改性固化的影响试验。由于泥浆原样含水率为 46%, 泥浆流动性差, 搅拌困难, 不利于固化剂与泥浆均匀混合, 先配置含水率 180% 的泥浆进行试验。固化剂种类为 S1、C1、C2、L1, 掺入比为 3%、5%、7%、10%、15%, 通过对固化后泥浆试样抗压强度、含水率、pH 值的测定, 确定最优固化剂种类和掺入比。

开展泥浆初始含水率对改性固化的影响试验, 重新配置 100%、125%、150%、180% 初始含水率的泥浆, 通过相关试验确定最优泥浆初始含水率。

强度测试: 将养护到 3 d、7 d、14 d、28 d 的试样从养护箱中取出, 用微机控制电子式万能试验机测得固化后泥浆试样的无侧限抗压强度, 用应变控制

式直剪仪(四联) 测得试样抗剪强度。含水率测试: 取压坏试样中间部分放入铝盒, 用电热恒温鼓风干燥箱烘干试样然后测定含水率。pH 值测试: 称取通过 1 mm 筛的风干土样 10 g, 放入具塞的广口瓶中, 加水 50 mL, 在振荡器上振荡 3 min, 静置 30 min, 然后将 25~30 mL 的土悬液盛于 50L 烧杯中, 将该烧杯移至电磁搅拌器上, 然后将已校正完毕电极插入杯中, 开动电磁搅拌器搅拌 2 min, 用多参数分析仪测得烘干试样的 pH 值。将养护 28 d 的试样取出, 在温度为 45 °C 烘箱中烘干, 观察干燥后试样的体积变化及开裂情况, 并比较分析。

根据上述试验得到的结果, 开展改性固化泥浆作为填料的强度特性研究试验, 包括抗压强度和抗剪强度, 并研究固化后试样强度特性的改善情况。

2 结果与分析

分析上述试验结果, 确定最优固化剂种类、掺入比及泥浆初始含水率, 并对固化剂固化机理进行分析。

2.1 固化剂种类对比试验

图 6 为普通硅酸盐水泥(S1)、CERSM 泥浆固化剂 I(C1)、CERSM 泥浆固化剂 II(C2) 3 种固化剂固化试样抗压强度随龄期变化图, 而生石灰(L1) 在最大掺入比 15% 时, 固化试样仍未能固结成型, 故未在图中反映。但随着掺入比的增大, 生石灰固化泥浆的固结程度有所提高, 分析原因可能为试验配置泥浆含水率过高, 生石灰的用量不足以与所有的泥浆反应, 导致泥浆试块未能固结成型。

由图 6 可知, C1 固化试样抗压强度提升幅度较小, 固化效果不稳定, 不满足应用要求。S1、C2 固化试样的抗压强度随着时间的增长而增长。在增长速率、增长幅度、固化效果方面 C2 均优于 S1, 且 14 d 后 S1 固化试样的抗压强度趋于稳定, C2 仍保持增

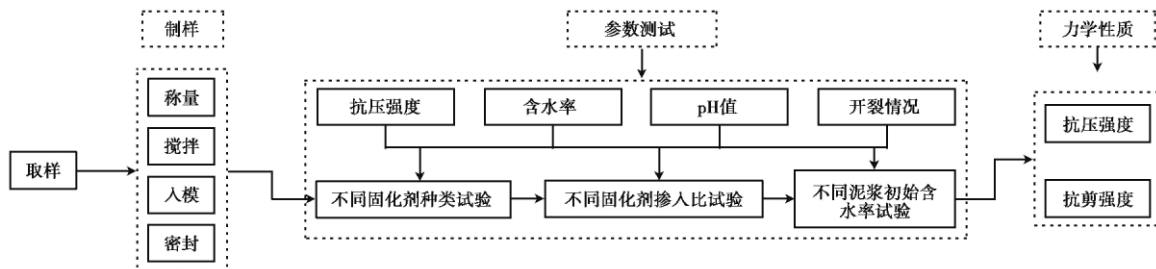


图 5 试验流程图

Fig. 5 Test flow chart

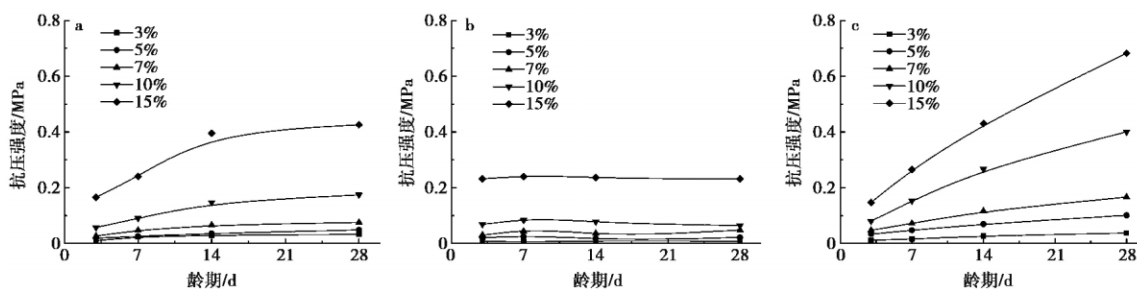


图6 抗压强度随龄期变化图

Fig. 6 Compressive strength change with age

a. S1 抗压强度随龄期变化图; b. C1 抗压强度随龄期变化图; c. C2 抗压强度随龄期变化图

长趋势。因此,从抗压强度方面来说,固化剂可以采用 C2,即 CERSM 泥浆固化剂 II。

S1、C1、C2 固化试样的含水率随龄期变化情况(图7)。C1 固化试样的含水率变化不明显,效果不好,分析原因可能为 C1 在工程中主要用于固化钻井废弃泥浆、污泥等有机质含量高的泥浆,与有机质发生聚合反应从而达到固化效果,因此更适用于固化有机质含量高的泥浆。S1、C2 试样的含水率随龄期呈下降趋势:7 d 之前,C2 下降速率大于 S1;7 d 之后,C2、S1 下降速率相当。最终,固化泥浆含水率的降幅大小 C2 大于 S1,从干化效果看,C2 较好。

S1 和 C2 固化试样的 pH 值随龄期变化结果(图8)。S1 和 C2 固化试样的 pH 值均随龄期呈下降趋势。相同龄期相同掺入比时,C2 试样 pH 值小于 S1,且随龄期的增长下降幅度大。综合比较,C2 固化剂在提高抗压强度、降低含水率、控制 pH 值方面效果优于其他 3 种固化剂,可选择 C2。

C2 与泥浆发生的主要反应为水化反应,固化剂与试样中的水分反应,使试样含水率降低。硅酸三钙和硅酸二钙生成的水化硅酸钙不溶于水,以胶体微粒析出,并逐渐凝聚成凝胶体,构成强度很高的空间网络结构,从而使试样抗压强度提高。水化反应生成氢氧化钙,使试样 pH 值增大。

2.2 固化剂掺入对比试验

图6显示试样抗压强度均随掺入比的增大而增大。但当添加比例为 3% 时,抗压强度基本保持不变,因此存在最低添加比例,它不受龄期的影响,当固化剂掺入比低于这个数值时,没有固化效果。而当掺入比较低时,抗压强度提升幅度较低。当掺入比从 7% 变为 10% 时和由 10% 变为 15% 时,抗压强度增长幅度大致相等,但固化剂掺入比分别提高了 3% 和 5%,且从图 12 可以看出,当固化剂掺入比为 10% 时,试样抗压强度可达 1.5 MPa,满足作为建筑填料的强度要求。考虑经济节约的原则可选取掺入比 10%。

试样含水率随掺入比的增大而下降,掺入比越大,下降速率和幅度越大(图7)。当固化剂掺入比为 7% 及以下时,干化效果不显著,下降比例为 20% 至 30%。当掺入比为 10% 和 15% 时,试样含水率有大幅度下降,下降比例可达 40% 到 45%。从干化角度,掺入比可选择 10% 或 15%。

从试样 pH 值变化图 8 来看,低掺入比时,C2 固化试样下降速率先快后慢,后期基本保持下降趋势,当掺入比为 10% 时,后期仍保持较小的下降趋势,而当掺入比为 15% 时,14 d 之后 pH 值基本不变。

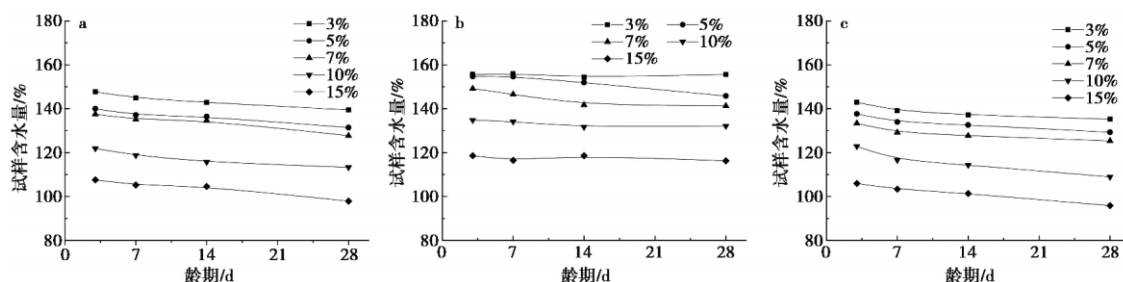


图7 试样含水率随龄期变化图

Fig. 7 Water content of samples change with age

a. S1 含水率随龄期变化图; b. C1 含水率随龄期变化图; c. C2 含水率随龄期变化图

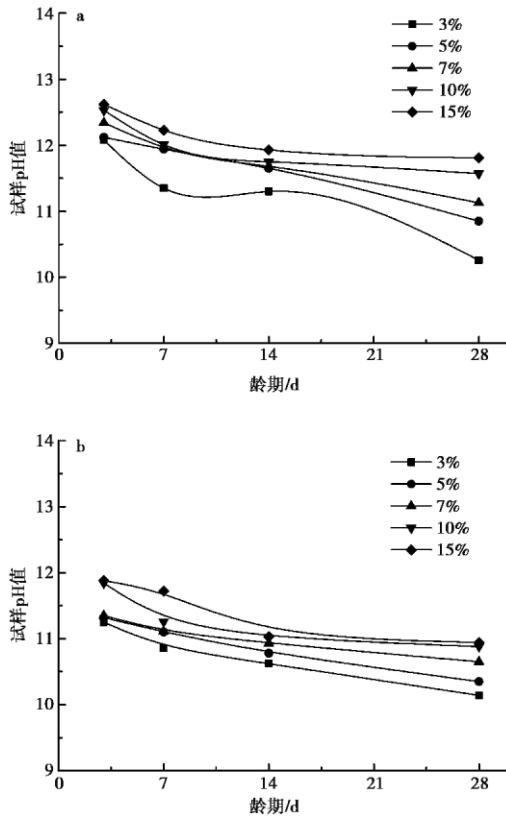


图 8 试样 pH 值随龄期变化图

Fig. 8 PH value change with age

a. S1 试样 pH 值随龄期变化图; b. C2 试样 pH 值随龄期变化图

故从 pH 值看, 掺入比可选择 3%~10%。

通过对 28 d 后干燥试样的体积收缩和表面裂缝观察, 当掺入比为 10% 和 15% 时, 试样体积基本不发生收缩, 而低掺入比时体积发生不同程度的收缩。基于抗压强度、含水率、pH 值以及开裂状况的综合考虑, 选取 CERSM 泥浆固化剂 II, 掺入比为 10%。

2.3 泥浆初始含水率对比试验

为了测试不同泥浆初始含水率对泥浆固化效果的影响, 配置不同初始含水率的泥浆, 采用掺入比为 10% 的 CERSM 泥浆固化剂 II 固化泥浆。试样抗压强度随龄期变化(图 9)。

试样抗压强度随龄期的增加而增加, 且 28 d 后仍保持增长趋势。抗压强度随含水率的增大而减小, 试样中水分的增加使单位体积内凝聚物比例减少, 水化产物间彼此连接的程度不够, 使得固化泥浆的凝聚力降低, 故抗压强度降低。含水率从 100% 升至 125% 时, 抗压强度下降幅度最小。从抗压强度上看, 可选择泥浆含水率为 100% 或 125%。

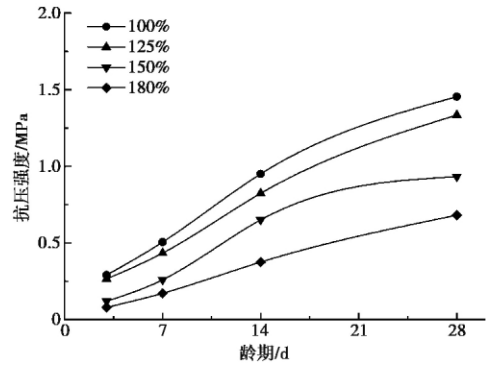


图 9 抗压强度随龄期变化图

Fig. 9 Compressive strength change with age

不同初始含水率泥浆试样含水率随龄期增大而减小(图 10)。固化后试样含水率一直在下降, 说明固化剂和泥浆的水化反应一直在进行, 初期速度快, 后期变慢。虽然初始含水率越大, 试样含水率下降幅度越大, 但初始含水率为 100% 时, 28 d 试样含水率最低, 泥浆初始含水率越低, 干化效果越好, 故可选择泥浆初始含水率为 100%。

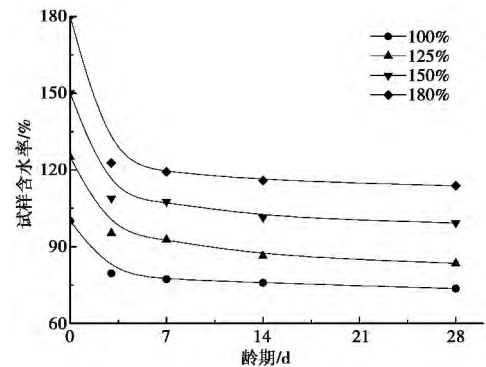


图 10 试样含水率随龄期变化图

Fig. 10 Water content of samples change with age

图 11 显示, 试样的 pH 值随龄期的增长而减小, 与之前试验所测结果的规律一致。不同含水率的泥浆试样相同龄期的 pH 值接近, 所以泥浆含水率对试样 pH 值影响不大。泥浆中的 pH 值主要由水化反应产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 控制, 水分的增加可促进水化反应进行, 但同时导致水化产物在单位体积中的数量较少, 故 pH 值随含水率提高无规律性变化。

根据 28 d 干燥后试样的体积变化和开裂情况, 从而进一步确定最优含水率。从试样体积收缩和表面裂缝方面来说, 泥浆含水率为 150% 和 180% 时, 干燥后试样表面裂缝很多; 其他含水率时, 表面裂缝较少。从泥浆流动性方面来说, 泥浆含水率为 100% 及以上时, 泥浆流动性较好, 搅拌方便, 利于施

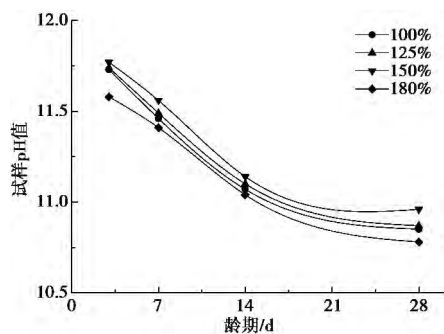


图 11 pH 值随龄期变化图

Fig. 11 pH value change with age

工。基于抗压强度、含水率、pH 值以及开裂状况的综合考虑,选取泥浆含水率为 100%。

3 强度特性研究

根据上文试验结果,本文配置 100% 含水率的泥浆,采用 CERSM 泥浆固化剂 II 固化,掺入比为 10%,分别测定了固化试样 3 d、7 d、14 d、28 d 的抗压强度和抗剪强度,对改性固化后泥浆的强度特性进行研究。

3.1 抗压强度

如图 12 所示,CERSM 泥浆固化剂固化泥浆试样的抗压强度随龄期的增大而增大,28 d 可达 1.5 MPa,而普通硅酸盐水泥固化试样 28 d 抗压强度仅为 0.4 MPa,CERSM 泥浆固化剂 II 固化试样的抗压强度约是普通硅酸盐水泥固化试样的 4 倍,固化效果显著提高。固化后泥浆抗压强度达 1.5 MPa,可用于建筑填料。

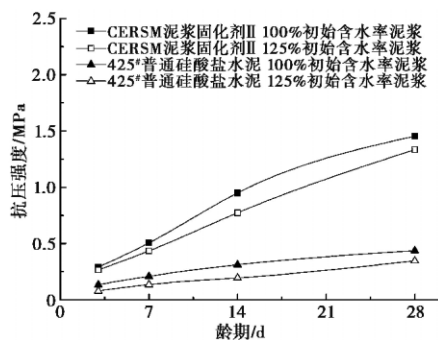


图 12 抗压强度随龄期变化对比图

Fig. 12 Contrast of compressive strength changes with age

3.2 抗剪强度

含水率为 100% 和 125% 时抗压强度相差不大,

且由于时间原因,抗剪强度选取泥浆初始含水率 125%。从图 13 可以看出,试样的抗剪强度随垂直压力的增大而增大。随着龄期的增长,试样抗剪强度增大,试样的黏聚力增至 262 kPa,内摩擦角增至 38.7°。因为在试样养护过程中,固化剂与试样中的水分反应,生成水化物,从而使试样的黏聚力和内摩擦角增大。

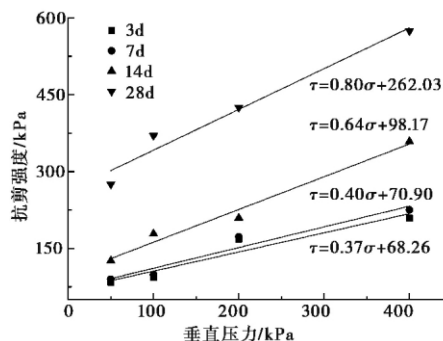


图 13 抗剪强度随垂直压力变化图

Fig. 13 Contrast of shear strength changes with vertical press

4 结论

本文选取厦门市轨道交通 1 号线一期工程的盾构隧道废弃泥浆为研究对象,以资源化利用为目标,对泥浆原样进行了物理化学力学性质的比较分析,确定了最优固化剂种类、掺入比和泥浆初始含水率。通过上述研究,本文主要得出了以下结论:

(1) 选用 CERSM 泥浆固化剂 II,10% 掺入比,100% 泥浆初始含水率,泥浆固化效果最优,固化泥浆试样 28 d 抗压强度可达 1.5 MPa,约是普通硅酸盐水泥固化试样的 4 倍。随着龄期的增长,试样抗剪强度有大幅度增长,试样的黏聚力增至 262 kPa,内摩擦角增至 38.65°。

(2) 在抗压强度、试样含水率和 pH 值 3 个方面,固化效果从高到低依次为 CERSM 泥浆固化剂 II (C2)、425# 普通硅酸盐水泥 (S1)、CERSM 泥浆固化剂 I (C1)、生石灰 (L1)。C2 的固化机理为水化反应,使试样含水率降低;硅酸三钙和硅酸二钙生成的水化硅酸钙不溶于水,以胶体微粒析出,并逐渐凝聚成凝胶体,构成强度很高的空间网络结构,使试样抗压强度提高;水化反应生成氢氧化钙,使试样 pH 值增大。

(3) 抗压强度随固化剂掺入比的增大而增大,试样含水率随固化剂掺入比的增大而减小,pH 值随固化剂添加比例的增大而增大,随龄期而减小,高掺

入比时 28 d 干燥试样体积基本未收缩, 裂缝数量最少, 最优固化剂掺入比为 10%。

(4) 抗压强度随初始泥浆含水率的增大而减小, 试样含水率随泥浆初始含水率的增大而增大, 试样的 pH 值与泥浆初始含水率无相关关系。在工程中, 选用 CERSM 泥浆固化剂 II, 10% 掺入比, 含水率为 100% 时废弃泥浆固化效果最优。

参 考 文 献

- Chang G, Li C J, Ding G Y, et al. 2012. Coagulation and separation of waste slurry from Qianjiang River Tunnel shield [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering 6(10): 3752-3756.
- Deng X X, Huang X X, Ning J G. 2011. Influence of admixture on strength of stabilized soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 33(10): 1628-1633.
- Ding J W, Liu T P, Cao Y P, et al. 2013. Unconfined compression tests and strength prediction method for solidified soils of dredged clays with high water content [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 35(S2): 55-60.
- Dong Y N, Zhang Q E, Xu R Q, et al. 2008. The experimental research of strength with solidifying agent on clay [J]. Rock and Soil Mechanics 29(2): 475-478.
- Dong W K, Feng J H, Yang X Q. 2007. Synthesis and Crystal Structure of a Five-Coordinated Cu(II) Dimer with 4,4'-dibromo-2,2'-ethylenedioxybis(nitromethylidene)diphenol [J]. Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic and Nano-Metal Chemistry, 37(3): 189-192.
- Fang K, Zhang Z M, Liu X W, et al. 2011. Pollution of construction waste slurry and prevention measures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 33(S2): 238-241.
- Liu Y D, Wang H X. 2007. Slurry treatment and separation for a slurry shield [J]. Modern Tunnelling Technology 44(2): 56-60, 71.
- Peng M X, Jiang J H, Wang Z H, et al. 2011. Study on preparation, microstructure and solidifying mechanism of backfill materials from mud solidification [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 30(6): 1294-1298.
- Leonard S A, Stegemann J A. 2010. Stabilization/solidification of petroleum drill cuttings: leaching studies [J]. Journal of Hazardous Materials, 174(1): 484-491.
- Su Q G, Zhai Z G, Deng H Y. 2012. Treatments of waste slurry of slurry shield machine [J]. Tunnel Construction 32(S2): 222-226.
- Wu Z H, Ding Z J. 2008. Research and application of solidification treatment technology of waste drilling mud [J]. Petrochemical Industry Application 27(6): 44-47.
- Wang P, Tang C S, Sun K Q, et al. 2016. Advances on solidification/stabilization of sludge disposal [J]. Journal of Engineering Geology, 24(4): 649-660.
- Yang A W, Wang T, Xu Z L. 2015. Experimental study on lime and its additional agent to cure Tianjin marine soft soil [J]. Journal of Engineering Geology 23(5): 996-1004.
- Zhang R Y. 2003. Regenerative modulation and waste treatment of engineering mud [J]. Railway Engineering, (3): 42-43.
- Zhang D W, Cao Z G. 2013. Strength characteristics of stabilized soils using industrial by-product binders [J]. Rock and Soil Mechanics, 34(S1): 54-59.
- 常鸽, 李春杰, 丁光莹, 等. 2012. 钱江隧道盾构废弃泥浆的混凝分离 [J]. 环境工程学报 6(10): 3752-3756.
- 邓晓轩, 黄新, 宁建国. 2011. 外掺剂对水泥固化土强度的影响 [J]. 岩土工程学报 33(10): 1628-1633.
- 丁建文, 刘铁平, 曹玉鹏, 等. 2013. 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 35(S2): 55-60.
- 董邑宁, 张青娥, 徐日庆, 等. 2008. 固化剂对软土强度影响的试验研究 [J]. 岩土力学 29(2): 475-478.
- 房凯, 张忠苗, 刘兴旺, 等. 2011. 工程废弃泥浆污染及其防治措施研究 [J]. 岩土工程学报 33(S2): 238-241.
- 刘豫东, 王洪新. 2007. 泥水加压盾构泥水分离与处理方法及模式 [J]. 现代隧道技术 44(2): 56-60, 71.
- 彭美勋, 蒋建宏, 王正红, 等. 2011. 泥浆固化充填材料的制备、微结构及其固化机理的研究 [J]. 硅酸盐通报 30(6): 1294-1298.
- 苏清贵, 翟志国, 邓亨义. 2012. 泥水盾构施工废弃泥浆的环保处理技术 [J]. 隧道建设 32(S2): 222-226.
- 吴志红, 丁忠健. 2008. 钻井废弃泥浆固化处理技术的研究与应用 [J]. 石油化工应用 27(6): 44-47.
- 王鹏, 唐朝生, 孙凯强, 等. 2016. 污泥处理的固化/稳定化技术研究进展 [J]. 工程地质学报 24(4): 649-660.
- 杨爱武, 王韬, 许再良. 2015. 石灰及其外加剂固化天津滨海软土的试验研究 [J]. 工程地质学报 23(5): 996-1004.
- 张瑞云. 2003. 工程泥浆的再生调制与废弃处理 [J]. 铁道建筑, (3): 42-43.
- 章定文, 曹智国. 2013. 工业废渣加固土强度特性 [J]. 2013. 岩土力学 34(增1): 54-59.