

DOI: 10.11779/CJGE20230828

减水剂对流态固化淤泥流动性的影响试验研究

王文翀¹, 黄英豪^{*1}, 王硕¹, 彭广益², 王淮²

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏南京 210024; 2. 苏州市港航事业发展中心, 江苏苏州 215002)

摘要: 相比传统回填材料, 可控性能流态固化回填料(Performance-controlled fluidized solidified backfill material, PCFS 材料)具有高流态、自密实等特点, 能够有效避免因压实不充分导致的工程问题, 特别适用于狭窄区域的回填。以淤泥为原材料, 水泥为固化材料制备强度、流动性和凝结时间等性能可控的 PCFS 材料, 通过流动度试验探讨了不同初始条件对 PCFS 的流动性的影响规律, 为提升 PCFS 的流动性能, 选择了木钙、萘系、聚羧酸 3 类减水剂, 对 3 类减水剂提升 PCFS 流动性的效果进行对比分析。试验结果表明: PCFS 的流动度和初始含水率之间存在线性正相关关系; 水泥的掺入会导致 PCFS 流动度明显降低, 且主要发生在水泥掺量 $\leq 2\%$ 时。3 类减水剂对 PCFS 流动度的提升幅度从大到小依次为聚羧酸>萘系>木钙, 其中聚羧酸和木钙的掺入会引入气泡, 萘系和木钙的“饱和掺量”分别为 2%, 4%。水泥掺量不同又会使得 3 类减水剂提升流动度的效果产生明显差异, 水泥掺量的增大使得木钙的提升效果降低, 对于聚羧酸的影响则较小, 而对于萘系则表现出了“反常效应”。最后讨论了“饱和掺量”和“反常效应”的成因, 并提出了初始含水率 $2w_L$ 、5% 水泥掺量条件下 PCFS 的流动度表达公式。

关键词: 淤泥; PCFS; 减水剂; 流动度; 表达公式

中图分类号: TU44 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)08-1605-08

作者简介: 王文翀(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事疏浚淤泥流动固化方面的研究工作。E-mail: wchongwang@126.com。

Experimental study on influence of plasticizer on fluidity of convection-solidified silt

WANG Wenchong¹, HUANG Yinghao¹, WANG Shuo¹, PENG Guangyi², WANG Huai²

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Suzhou Port and Shipping Development Center, Suzhou 215002, China)

Abstract: Compared with the traditional backfill materials, the performance-controlled fluidized solidified (PCFS) backfill materials are characterized by high flow state and self-compaction, which can effectively avoid engineering problems caused by insufficient compaction, especially for backfill in narrow areas. Using silt as raw materials and cement as curing materials, the PCFS materials with controllable properties such as strength, fluidity and setting time are prepared. The influences of different initial conditions on the fluidity of the PCFS materials are discussed through the flow tests. In order to improve the flow performance of the PCFS materials, three water reducing agents, calcium lignosulfonate, naphthalene superplasticizer and polycarboxylate superplasticizer, are selected, and the effects of three water reducing agents on improving the flow of the PCFS materials are compared and analyzed. The results show that there is a positive linear correlation between the fluidity of the PCFS materials and the initial water content. The addition of cement will lead to a significant decrease in the fluidity of the PCFS materials, which mainly occurs when the cement content is less than 2%. The increasing range of fluidity of the PCFS materials by the three water-reducing agents is from large to small in the order of polycarboxylate superplasticizer > naphthalene superplasticizer > calcium lignosulfonate, wherein the incorporation of polycarboxylate superplasticizer and calcium lignosulfonate will introduce bubbles, and the "saturated content" of naphthalene superplasticizer and calcium lignosulfonate is 2% and 4%, respectively. Different cement contents will make the three kinds of water-reducing agent to improve the flow effects have a significant difference. The increase of cement content reduces the effects of the calcium lignosulfonate, has small effects on the polycarboxylate superplasticizer, and shows "anomalous effects" on the naphthalene superplasticizer. Finally, the causes of "saturation content" and "anomalous effects" are discussed, and the expression formula for fluidity of the PCFS materials under the initial water content of $2w_L$ and cement content of 5% is proposed.

基金项目: 苏州市水运工程建设指挥部科研专项项目 (CHSX-FW-CHSXYJ1-2023-18); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (Y322002)

收稿日期: 2023-08-28

*通信作者 (E-mail: yhuang@nhri.cn)

Key words: silt; PCFS; plasticizer; fluidity; fluidity expression formula

0 引言

随着中国对环境和生态的日益重视,全国大小航道及河湖底泥陆续开展疏浚工程,产生了大量的疏浚淤泥。例如太湖第一轮清淤已经将3600万m³污染底泥全部清除,而正在开展的太湖第二轮清淤,疏浚工程量仍然高达1800万m³。根据中国的底泥疏浚国情,固化方法仍是处理大量淤泥的重要手段^[1]。中国的固化处理主要以低含水率水平下固化再进行适当碾压为主,处理过程中需要“临时堆场”将固化处理后的淤泥放置其中,待有工程需要时再对固化土开挖破碎和碾压填筑。“临时堆场”仍不可避免占用大量土地资源,且碾压后固化土的强度损失较大,浪费了水泥的胶凝作用^[2-3]。

近年来,随着建筑行业对可持续替代材料的需求不断增加,世界各国对工业废料的资源化利用进行了大量研究,其中,将工业废料转化为可控低强度材料为一种很好的资源化利用方法^[4]。可控低强度材料,又称为流动回填材料,是一种水泥自密实材料,可替代回填土中的压实土壤,用于不同用途,例如结构、地基、路面基层、管道垫层和沟槽的回填等^[5]。该回填材料既能消纳大量废弃物,又能有效避免传统回填材料压实不够致密,在一些狭窄回填区域易存在压实死角等问题^[6]。国内外相关学者已先后将水泥窑灰^[7]、海洋疏浚泥^[8]、油砂^[9]、建筑渣土^[10]、底灰^[11]、粉煤灰^[12]、高炉矿渣^[13]等废弃物引入到该材料的制备中,并取得了一定成果。

Lachemi等^[7]以水泥窑灰为原材料,对比了不同类型的水泥窑灰制得回填材料的性能,发现水泥窑灰含量的增加会使得其流动性降低。Lee等^[8]采用海洋疏浚泥制备回填材料,其强度可满足管道回填材料的要求且能够大大降低地下管道所承受的土压力。Mneina等^[9]将油砂废物作为粉煤灰的替代品应用于新型回填材料的制备,提高了混合物的流动性。谭正日等^[10]研究了不同类型减水剂对渣土基高流态回填材料性能的影响,发现减水剂可提高渣土基高流态回填材料的流动性能。目前采用淤泥制备流态回填材料的研究较少,由上述研究可知保证强度和流动性是制备流态回填材料的关键。在此之前,黄英豪等^[11]研究了不同初始含水率和不同固化材料添加量下固化淤泥的流动性能,发现少量水泥的添加就会显著降低淤泥的流动性能。丁建文等^[14]提出了疏浚淤泥流动固化土的抗压强度预测方法,明确其强度随水泥掺量的增加而增大。因此,本文借鉴上述研究成果,拟采用淤泥为原材料,水泥为固化材料,减水剂来调节流动性,制备出强度、流动性等性能可控的流态回填料,将其命

名为可控性能流态固化回填料(performance-controlled fluidized solidified backfill material, PCFS材料)。

目前国内外相关学者对于淤泥固化土的研究多集中在水泥对其强度的影响方面,而对其流动性能方面的研究较少。本文针对流态固化淤泥的流动性能展开研究,主要探讨了PCFS流动性能的基本影响因素,研究了不同减水剂对PCFS流动性能的影响规律,以期对淤泥的流动固化施工技术发展有所助益。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

试验用淤泥取自江苏省某大型疏浚清淤工程,淤泥的主要物理性质指标见表1,粒径分布曲线见图1。固化材料采用海螺牌普通硅酸盐水泥P.O 42.5,减水剂发展到现在共诞生了三代产品:以木钙为代表的第一代普通减水剂、以萘系为代表的第二代高效减水剂、以聚羧酸系为代表的第三代高性能减水剂,本文分别选用了聚羧酸减水剂、萘系减水剂、木质素磺酸钙。其中,聚羧酸减水剂购自苏州弗克技术股份有限公司,萘系减水剂购自巩义市元亨净水材料厂,木钙减水剂购自济南顺鑫化工有限公司,三者均为固体粉末。

表1 试验用淤泥主要物理性质指标
Table 1 Main physical property indexes of test silt

w/ %	G _s	黏粒含 量/%	w _L / %	w _P / %	I _P / %	有机质含 量/%
80.5	2.72	27.9	56.2	20.7	35.5	0.75

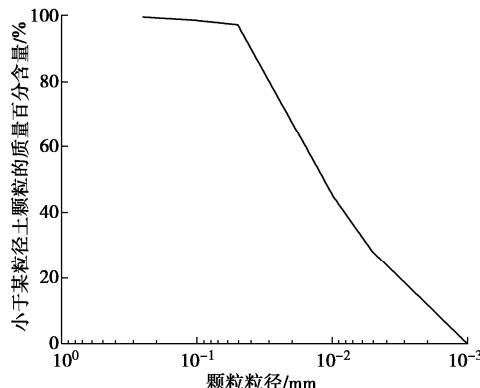


图1 淤泥的颗粒粒径分布曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of silt

1.2 试验方法

流动性测试采用的是新鲜搅拌的PCFS。搅拌仪器采用NJ-160型电动搅拌机(容量2.5L,见图2(a))。试验时先将淤泥按照既定含水率调配,然后再掺入水泥和减水剂使用自动控制程序进行搅拌(240s),经预试验测试,淤泥和水泥及外加剂按自动控制程序(240s)搅拌一次即混合均匀,刚搅拌完成的PCFS

立即进行流动性的测试。

固化淤泥流动性测试目前在中国尚没有标准方法, 本文参考日本建设省制定的《エアモルタル及びエアミルクの試験方法: JHS A313—1992》, 采用圆柱筒容器(上下口直径 80 mm, 高 80 mm, 见图 2(b))测量水平扩展度。试验时把圆柱筒放置在水平玻璃板上, 将新拌的 PCFS 装入到圆柱筒中, 装入的过程不进行振捣, 完全靠自身重力作用来流动充满圆柱筒, 用刮泥刀削平圆柱筒上表面流出的 PCFS, 将圆柱筒垂直向上轻轻提起, 测定 PCFS 在互相垂直两个方向的流动直径, 取其平均值作为 PCFS 的流动度。



图 2 试验仪器

Table 2 Test instruments

1.3 试验方案

首先从初始含水率和水泥掺量两个方面对 PCFS 流动度的影响进行试验研究, 随后在初始含水率和水泥掺量两基本影响因素条件下引入第 3 个影响因素——减水剂, 探究 3 类不同减水剂及其掺量对 PCFS 流动度的影响规律, 试验方案设计见表 2, 3。

表 2 淤泥初始含水率和水泥掺量设计

Table 2 Design of initial water content of silt and cement content

初始含水率	水泥掺量/%					
	0	1	2	5	10	15
2.0 w_L	0	1	2	5	10	15
2.5 w_L	0	1	2	5	10	15
3.0 w_L	0	1	2	5	10	15
4.0 w_L	0	1	2	5	10	15

注: 水泥掺量为占淤泥总质量的百分数。

表 3 减水剂种类及其掺量设计

Table 3 Types and dosage design of water reducing agents

减水剂名称	掺量设置/%
木钙减水剂	0, 1, 2, 3, 4
萘系减水剂	0, 0.5, 1, 1.5, 2, 3
聚羧酸减水剂	0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1

注: 减水剂掺量为占淤泥总质量的百分数。

2 结果与分析

2.1 PCFS 流动度基本影响因素分析

PCFS 的基本组成为水、土颗粒、水泥和外加剂, 其中水和水泥是其流动度的基本影响因素。为考察两者对 PCFS 流动度的影响, 在控制其他变量相同的条件下, 分别设置不同的初始含水率和水泥掺量进行试验。

(1) 初始含水率

图 3 给出了不同含水率 PCFS 典型的流动度的试验照片, 定义流动度 D 为淤泥或 PCFS 坍落后在水平面内投影的直径(单位为 mm, 精确到 0.1 mm)。图 3 (a) 显示在初始含水率 $1.75w_L$ 和水泥掺量 1% 条件下, PCFS 拌合料无法靠自重作用从搅拌锅脱落, 认为其失去流动性, 因此下文对 PCFS 流动度的考察从初始含水率 $2w_L$ 开始。对试验结果进行分析, 发现以下规律: ①如图 3 所示, PCFS 的流动度随初始含水率的升高而增大, 其形态呈现出由圆台状→圆饼状→薄圆饼状的变化。②由图 4 可见, 在原泥状态下, 随初始含水率的升高 PCFS 流动度不断增加, 但是流动度的增加量越来越小。③观察图 4, 发现在掺入水泥状态下, PCFS 的流动度值近似在一条直线上, 尝试对图 4 中不同水泥掺量下的关系曲线进行回归分析, 拟合结果见表 4, 拟合函数为

$$D(w) = a \frac{w}{w_L} + b \quad \left(2.0 \leq \frac{w}{w_L} \leq 4.0 \right) \quad (1)$$

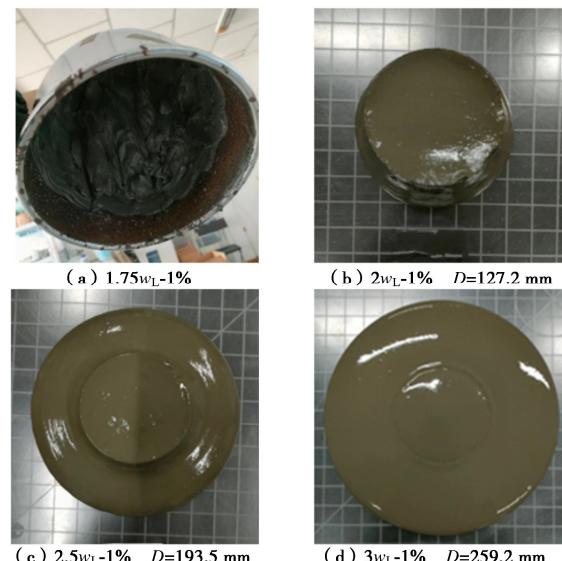


图 3 不同含水率下 PCFS 流动度的试验照片

Fig. 3 Test photos of fluidity of PCFS under different water contents

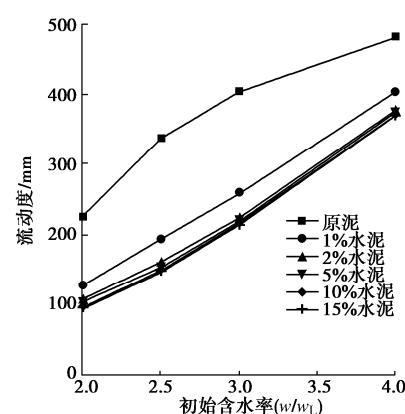


图 4 原泥和 PCFS 流动度与初始含水率的关系

Fig. 4 Relationship between fluidity of silt and PCFS and initial water content

表 4 PCFS 流动度-含水率的线性关系拟合结果

Table 4 Fitting results of linear relationship between fluidity and water content of PCFS

水泥掺量/%	式 (1)		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
1	138.5	-152.8	0.999
2	138.5	-186.2	0.993
5	138.5	-194.0	0.992
10	138.5	-198.5	0.993
15	138.5	-199.3	0.993

由式 (1) 可以看出, 在初始含水率处于 $2.0w_L \sim 4.0w_L$ 时, PCFS 的流动度和初始含水率之间存在简单的线性正相关关系, 其中 *a* 值的物理意义为 PCFS 的流动度随初始含水率变化的快慢; *b* 值的绝对值随水泥掺量的增加逐渐增大, 下文将继续分析水泥掺量对 PCFS 流动度的影响规律。

(2) 水泥掺量

为了进一步考察不同水泥掺量对 PCFS 流动度的影响, 在相同初始含水率条件下向淤泥中掺入不同的水泥量, 试验照片如图 5 所示, 试验结果如图 6 所示。①随着水泥掺量的增加, PCFS 的流动度逐渐减小, 其形态呈现出由薄圆饼状→圆饼状→圆台状的变化, 与含水率变化带来的影响恰好相反; ②水泥掺量对流动度的影响主要发生在掺量小于 2% 的阶段, 这表明少量的水泥掺入就会显著降低 PCFS 的流动性能。该结果与黄英豪等^[1]的研究结果相近, 仔细观察图 6 发现, 流动度随水泥掺量的变化总体表现为指数降低的形式, 采用 ExpDec 函数进行拟合, 得到拟合曲线见图 6, 拟合结果见表 5, 拟合函数为

$$D(x) = D_0 + A e^{-x/0.7} \quad (0 \leq x \leq 15) \quad (2)$$

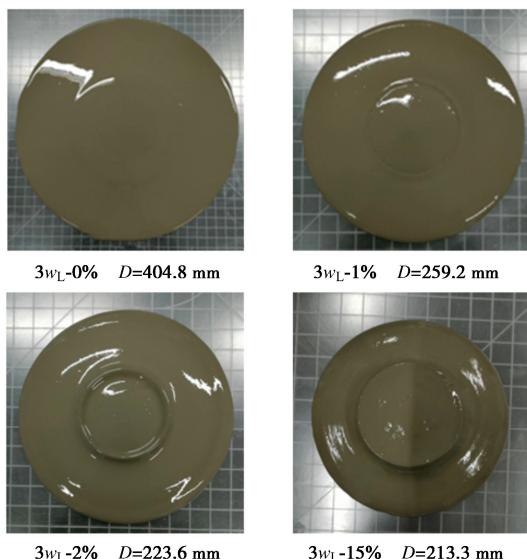


图 5 不同水泥掺量下 PCFS 流动性的试验照片

Fig. 5 Test photos of fluidity of PCFS under different cement content

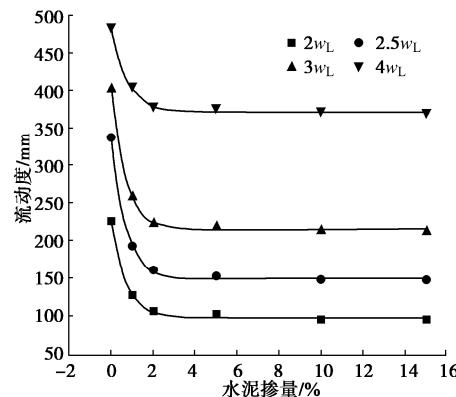


图 6 PCFS 流动度与水泥掺量的关系

Fig. 6 Relationship between fluidity of PCFS and cement content

表 5 PCFS 流动度与水泥掺量关系拟合结果

Fig. 5 Fitting results of relationship between fluidity of PCFS and cement content

初始含水率	式 (2)		
	<i>D</i> ₀	<i>A</i>	<i>R</i> ²
$2.0w_L$	97.7	128.0	0.997
$2.5w_L$	149.0	188.6	0.999
$3.0w_L$	215.7	189.1	0.998
$4.0w_L$	371.5	111.0	0.997

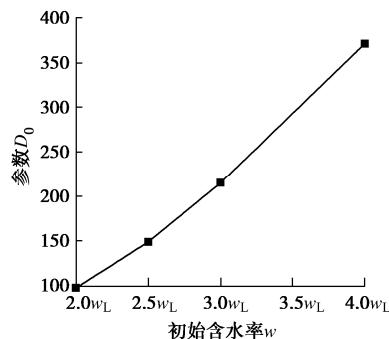
图 7 参数 *D*₀ 的变化曲线

Fig. 7 Change curve of parameter *D*₀

对式 (2) 中参数进行分析, 如图 7 所示, *D*₀ 随初始含水率的增加近似线性关系, 对 *D*₀ 与初始含水率进行回归分析, 可得线性关系式如下:

$$D_0(w) = 138.5 \frac{w}{w_L} - 190.5 \quad (3)$$

将式 (3) 代入式 (2) 可得 PCFS 流动度与初始含水率及水泥掺量的关系式:

$$D(w, x) = 138.5 \frac{w}{w_L} + A e^{-x/0.7} - 190.5 \quad (4)$$

式中: *D* (*w*, *x*) 为流动度 (mm); *w* 为初始含水率 (%), $2.0 \leq w/w_L \leq 4.0$; *x* 为水泥掺量, $0 \leq x \leq 15$; *A* 为与初始含水率相关的参数。

2.2 3 类减水剂及其掺量对 PCFS 流动度的影响

前文对 PCFS 流动度的基本影响因素进行了分析研究, 发现初始含水率和水泥带来的影响正好相反。

其中, 少量水泥掺入就会显著降低淤泥的流动性能, 如在 $2w_L$ 条件下, 掺入 5% 水泥, PCFS 的流动度就已降低至 102.4 mm, 而根据《エアモルタル及びエアミルクの試験方法: JHS A313—1992》, 流动化回填料若要满足自流平、自密实的要求, 其流动度需处于 180 \pm 20 mm, 低于 160 mm 则不利于实际工程应用, 因此, 本文拟通过掺入减水剂来提升低含水率条件下 PCFS 的流动度以满足工程要求。分别选取木质素磺酸钙、萘系减水剂、聚羧酸减水剂来进行试验, 试验结果分析如下。(在 3 个初始含水率 $1.75w_L$, $2.0w_L$, $2.5w_L$, 3 个水泥掺量 1%, 5%, 15%, 共 9 种初始条件下进行了大量的流动度试验, 为方便对比, 2.2 节中 PCFS 的初始条件均为 $2.0w_L$ 、5% 水泥)

(1) 木钙

木钙减水剂作为第一代普通减水剂, 具有减水、缓凝、引气作用^[15]。在试验过程中, 木钙的掺量范围设置为淤泥总质量的 0%~4%, 试验结果如图 8 所示。①对原泥来讲, 随着木钙掺量的增加, 原泥流动度出现了小幅提升, 由 225.8 mm 提升到 243.9 mm, 提升了 0.08%, 但是在木钙掺量达到 1% 之后, 流动度不升反降, 当掺量达到 4% 时, 流动度降低至 180 mm。②PCFS 的流动度随木钙掺量的增加逐渐增大, 当掺量达到 3% 时, 流动度由 102.4 mm 提升到 204.4 mm, 提升了 99.6%, 但是在掺量达到 3% 后, PCFS 的流动度没有继续提升。

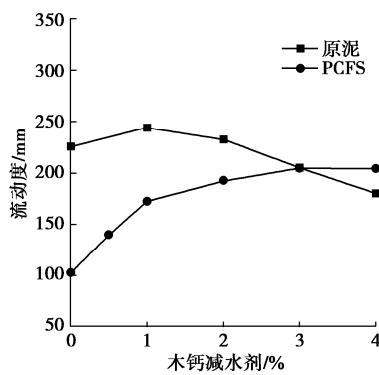


图 8 木钙减水剂对 PCFS 流动度的影响

Fig. 8 Influences of calcium lignosulfonate on fluidity of PCFS

此外, 在试验过程中, 木钙掺量达到 3% 时, 能够观察到原泥和 PCFS 表面均会出现少量气泡, 这是由于木钙的引气特性, 木钙作为表面活性剂, 其能降低液气界面张力^[16], 使其更容易形成新的界面, 因此 PCFS 在机械搅拌过程中会产生少量气泡。

(2) 萘系

萘系减水剂作为第二代高效减水剂, 减水效果较好, 引气量少^[17]。在试验过程中其掺量范围设置为 0%~3%, 试验结果如图 9 所示。①对原泥来讲, 随着萘系减水剂掺量的增加, 原泥的流动度得到较大幅

度的提升, 当掺量达到 1% 时, 原泥流动度达到最大值, 由 225.8 mm 提升至 313.4 mm, 提升了 38.8%, 而在 1% 掺量之后, 原泥流动度不再提升甚至出现下降趋势。②PCFS 的流动度首先随着萘系减水剂的掺入得到大幅提升, 在萘系减水剂掺量达到 2% 时, PCFS 的流动度由 102.4 mm 提升到 393 mm, 提升了 283.8%, 而在 2% 掺量之后, PCFS 流动度随萘系掺量的增加开始出现小幅下降, 当掺量达到 3% 时, PCFS 流动度下降至 380.9 mm, 下降了 0.03%。注意观察, 在萘系减水剂掺量达到 1.5% 时, 流动度出现了“反常现象”, PCFS 流动度超越了原泥流动度, 该现象表明, 水泥对萘系减水剂提升流动度的效果起到了某种提高作用, 下文将具体讨论。

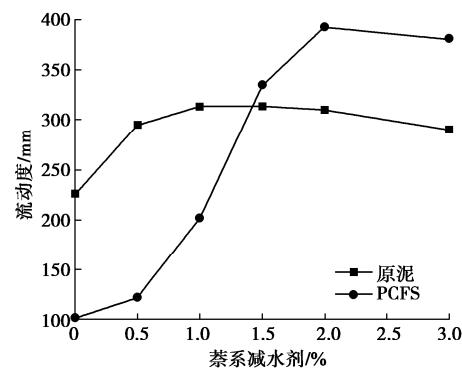


图 9 萘系减水剂对 PCFS 流动度的影响

Fig. 9 Influences of naphthalene superplasticizer on fluidity of PCFS

(3) 聚羧酸

聚羧酸减水剂作为第三代减水剂, 具有减水率高、掺量低、引气等特点^[18]。由于聚羧酸减水剂的高性能, 其掺量设置在所选的三类减水剂中是最小的, 为淤泥总质量的 0%~1%, 试验结果如图 10 所示。①对原泥来讲, 在掺量达到 0.4% 之前, 聚羧酸的增加会导致原泥流动度的降低, 掺量在 0.4% 时, 流动度由最初的 225.8 mm 降低至 168.5 mm, 降低了 25.4%; 在掺量达到 0.4% 之后, 原泥流动度随聚羧酸的掺入得到明显提升, 当聚羧酸掺量达到 1% 时, 原泥流动度达到 492 mm, 和初始流动度相比提升了 118%。②反观 PCFS 流动度的变化, 在掺量达到 0.2% 之前, 其流动度随聚羧酸的掺入出现小幅提升, 由 102.4 mm 提升至 113 mm, 在掺量达到 0.2% 之后, PCFS 流动度开始大幅提升, 当掺量达到 1% 时, 其流动度达到 524 mm, 提升了 411.7%。结合试验过程分析判断, 在聚羧酸减水剂的作用下, PCFS 流动度的大幅提升与试验过程中观察到的气泡密不可分, 如图 11 所示, 掺量达到 0.6% 时出现了大量气泡, 其滚珠作用进一步提升了 PCFS 的流动性。③结合上文中木钙和萘系减水剂的试验结果进行分析, 发现聚羧酸减水剂与木钙和萘系减水剂

的表现有很大不同，即在聚羧酸减水剂的作用下，原泥和 PCFS 表现出了相近的流动度变化规律，该现象表明，聚羧酸减水剂对于 PCFS 流动度的提升作用受水泥掺入的影响较小。

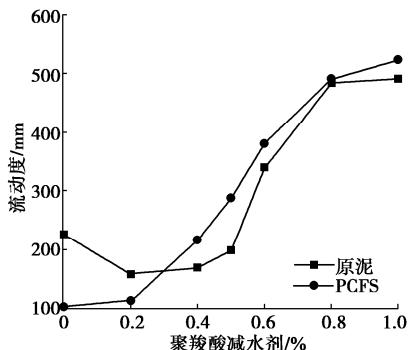


图 10 聚羧酸减水剂对 PCFS 流动度的影响

Fig. 10 Influences of polycarboxylate superplasticizer on fluidity of PCFS

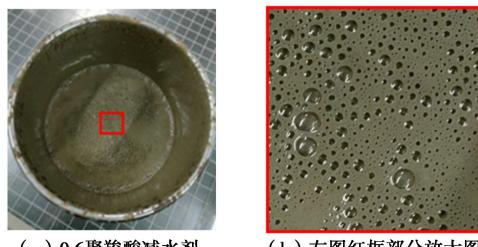


图 11 PCFS 试验过程照片（掺入聚羧酸）

Fig. 11 Photos of test process of PCFS (adding polycarboxylate superplasticizer)

2.3 3类减水剂的效果比较

为考察 3 类减水剂对 PCFS 流动度的影响，在 $2w_L$ 、5% 水泥和 15% 水泥两种初始条件下分别掺入 3 类减水剂，得到试验结果如图 12 所示。①两种水泥掺量条件下，流动度随减水剂的变化趋势基本一致，这里仅做一次分析即可。5% 水泥掺量时，PCFS 的初始流动度为 102.4 mm，在木钙减水剂、萘系减水剂、聚羧酸减水剂的作用下，其流动度分别能够提升到 204.4, 393, 524 mm，流动度提升百分比分别为 99.6%，283.8%，411.7%。其中，聚羧酸对于流动度的提升幅度最大，且随着其掺量的增加，PCFS 的流动度有着持续提升的趋势；反观萘系与木钙，随着掺量的增加，PCFS 的流动度提升幅度越来越小甚至出现下降趋势。②根据《エアモルタル及びエアミルクの試験方法：JHS A313—1992》，PCFS 流动度处于 180 ± 20 mm 时，能够满足自流平、自密实要求。由图 11 可以看出，当 PCFS 的流动度达到 180 mm 时，5% 水泥掺量条件下木钙、萘系、聚羧酸三类减水剂的掺量分别约为 2.33%，0.87%，0.33%；15% 水泥掺量条件下分别约为 4.00%、1.01%、0.35%。③水泥对 3 类减水剂提升流动度的效果有不同程度的影响，比较图 12 中实心与

空心两条数据曲线可以发现，水泥掺量的增大使得木钙的提升效果降低，对于聚羧酸的影响较小，而对于萘系则表现出了提高作用。

性能方面，3 类减水剂对 PCFS 流动度的提升效果从大到小依次为聚羧酸>萘系>木钙，但是聚羧酸的掺入会引入大量气泡，而萘系与水泥之间的提高作用在工程应用中具有明显优势。经济方面，3 类减水剂的市场价格分别约为聚羧酸 15000 元/t、萘系 2500 元/t、木钙 1300 元/t，聚羧酸单价远高于萘系和木钙，经济效益较低。综上所述，三类减水剂的综合效益从大到小依次为萘系>木钙>聚羧酸。

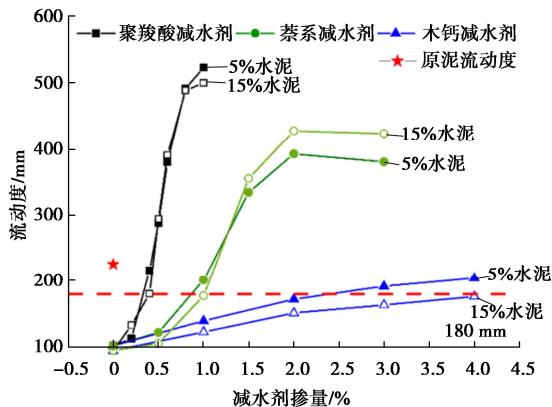


图 12 三类减水剂对 PCFS 流动度的提升效果

Fig. 12 Improvement effects of three types of water-reducing agents on fluidity of PCFS

3 结果讨论

3.1 减水剂的“饱和掺量”

减水剂作为混凝土外加剂，大都存在一个饱和掺量。在本文中，定义 PCFS 流动度不再提升时的掺量为减水剂的“饱和掺量”，超过此掺量，其流动度不再明显提升甚至开始下降。试验中，木钙的“饱和掺量”在 4% 左右，萘系的“饱和掺量”在 2% 左右。目前，减水剂在水泥浆体体系中的吸附分散作用等机理已有大量研究^[19-20]，对于减水剂在水泥-水界面之间的吸附作用，目前存在两种不同的看法：①认为是疏水基团吸附在水泥颗粒表面，而亲水基通过氢键等方式与水分子结合从而形成一层稳定的水膜，使颗粒之间更容易滑动；②认为减水剂分子通过带电基团（-SO₃R 和 RCOO⁻等）的静电作用或极性基团（-OH）的氢键作用与水泥颗粒相互吸附。由马保国等^[21]的研究可知，减水剂分子同样会在黏土矿物表面进行吸附。综合上述分析，由于淤泥颗粒本身带负电荷，淤泥颗粒的吸附作用更倾向于①看法；而由于水泥颗粒自身带正电荷，其对于减水剂的吸附作用更倾向于②看法。因此，减水剂在掺入 PCFS 体系后，可能会吸附在淤泥颗粒表面形成一层稳定的水膜，使颗粒之间更容易

滑动, 吸附在水泥颗粒表面使之带上相同电荷, 颗粒间产生静电斥力从而分散, 而饱和掺量的出现可能是减水剂在淤泥颗粒表面和水泥颗粒表面的吸附量达到了饱和, 继续掺入减水剂, PCFS 的流动度不再提升且会出现下降趋势。

3.2 水泥对萘系减水剂的“反常效应”

结合上文提到的减水剂的吸附作用, 在 2.2 (2) 节中, “反常现象”的出现说明水泥对萘系减水剂提升流动度的效果具有“反常效应”。图 12 中在萘系减水剂掺量大于 1.2% 时, PCFS 流动度 (15% 水泥) > PCFS 流动度 (5% 水泥), 该现象再次说明水泥掺量的增加对萘系减水剂提升流动度的效果具有“反常效应”。水泥作为水硬性胶凝材料, 往往会使得含水浆体的流动度下降, 而对于 PCFS 体系, 在一定掺量的萘系减水剂作用下, 水泥的掺入反而会使得其流动度得到提升。结合上文提到的减水剂的吸附作用分析有两种可能性: ①水泥掺入 PCFS 体系后, 由于其胶凝作用会降低该体系的流动度, 但与此同时, 可能会提高萘系减水剂的吸附性能, 使得固相颗粒表面吸附的减水剂分子量增大, 颗粒间的静电斥力作用增强, 从而 PCFS 的流动度得到提高。②15% 掺量的水泥掺入 PCFS 体系, 配合萘系减水剂的作用, 相当于在体系中加入了大量促进分散和流动的颗粒, 从而 PCFS 的流动度得到提高。

3.3 流动度表达公式

在进行了大量的流动度试验后, 对现有试验数据进行回归分析构造了函数表达式:

$$D(x) = A_2 + \frac{(A_1 - A_2)}{1 + e^{\frac{(x - B_1)}{B_2}}} \quad (5)$$

式中: $D(x)$ 为流动度 (mm); x 为减水剂掺量 (%); A_1 , A_2 , B_1 , B_2 为拟合参数。

其对萘系减水剂和聚羧酸减水剂是比较适用的, 但对 15% 水泥掺量的木钙减水剂不适用, 其中部分拟合曲线见图 13。

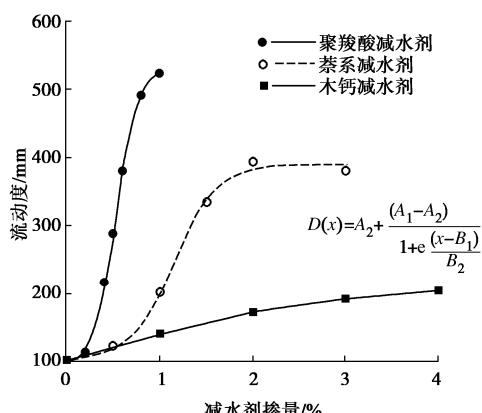


图 13 $2WL$ 、5% 水泥初始条件下的拟合曲线

Fig. 13 Fitting curves under initial water content of $2WL$ and cement content of 5%

4 结 论

采用东部地区典型疏浚淤泥, 水泥作为固化材料, 选择木钙、萘系和聚羧酸 3 类代表性减水剂, 通过大量流动度试验, 研究了 PCFS 的流动性基本影响因素和 3 类减水剂对 PCFS 流动性的提升效果, 得到以下 6 点结论。

(1) 初始含水率对 PCFS 的流动度影响显著, 具有明显的提升作用, 且其流动度和初始含水率之间存在线性正相关关系; 而对于原泥来说, 其流动度也随初始含水率的增加而提升, 但提升的幅度越来越小。

(2) 水泥的掺入会导致 PCFS 流动度显著降低, 初始含水率相同时, 水泥掺量越大, PCFS 的流动度越小, 且水泥对 PCFS 流动度的影响主要发生在水泥掺量 $\leq 2\%$ 范围内。

(3) 3 类减水剂均对 PCFS 的流动度具有提升作用, 提升幅度从大到小依次为聚羧酸 > 萘系 > 木钙, 考虑经济因素时, 3 类减水剂的综合效益从大到小依次为萘系 > 木钙 > 聚羧酸。

(4) 3 类减水剂提升 PCFS 流动度的过程中, 木钙的掺入会引入少量气泡, 聚羧酸在掺入量较大时会引入大量气泡; 木钙和萘系存在“饱和掺量”, 分别为 4%, 2%。

(5) 水泥掺量不同使得 3 类减水剂提升流动度的效果产生明显差异, 水泥掺量的增大使得木钙的提升效果降低, 对于聚羧酸的影响较小, 而对于萘系则表现出了“反常效应”。

(6) 基于本文试验数据, 总结得到了分别掺加 3 种典型减水剂时 PCFS 流动度的表达式, 希望能给后续研究者提供参考和验证。

参考文献:

- [1] 黄英豪, 戴济群, 徐 锴. 新拌固化淤泥的流动性和黏滞性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2022, 44(2): 235-244. (HUANG Yinghao, DAI Jiqun, XU Kai. Experimental study on fluidity and viscosity of newly mixed solidified sludge[J]. Chinese Journal Geotechnical Engineering, 2022, 44(2): 235-244. (in Chinese))
- [2] 黄英豪, 朱 伟, 董 婵, 等. 固化淤泥结构性力学特性的试验研究 [J]. 水利学报, 2014, 45(增刊 2): 130-136. (HUANG Yinghao, ZHU Wei, DONG Chan, et al. Experimental study on structural mechanical properties of solidified silt[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(S2): 130-136. (in Chinese))
- [3] 黄英豪, 董 婵, 关云飞, 等. 击实对固化淤泥物理力学性质的影响 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1728-1733.

- (HUANG Yinghao, DONG Chan, GUAN Yunfei, et al. Effect of compaction on physical and mechanical properties of solidified silt[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(9): 1728-1733. (in Chinese))
- [4] DEVARAJ V, MANGOTTIRI V, BALU S. Sustainable utilization of industrial wastes in controlled low-strength materials: a review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, **30**(6): 14008-14028.
- [5] ALIZADEH V. Influence of cementing paste volume on properties of controlled low strength materials[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, **30**(3): 04017305.
- [6] LING T C, KALIYAVARADHAN S K, POON C S. Global perspective on application of controlled low-strength material (CLSM) for trench backfilling: an overview[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, **158**: 535-548.
- [7] LACHEMI M, HOSSAIN K M A, SHEHATA M, et al. Controlled low strength materials incorporating cement kiln dust from various sources[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008, **30**(5): 381-392.
- [8] LEE K H, KIM J D. Performance evaluation of modified marine dredged soil and recycled in-situ soil as controlled low strength materials for underground pipe[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2013, **17**(4): 674-680.
- [9] MNEINA A, SOLIMAN A M, AHMED A, et al. Engineering properties of controlled low-strength materials containing treated oil sand waste[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, **159**: 277-285.
- [10] 谭正日, 谭洪波, 吕周岭, 等. 不同类型减水剂对渣土基高流态回填材料性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2022, **41**(9): 3227-3233. (TAN Zhengri, TAN Hongbo, LÜ Zhouling, et al. Effect of plasticizer type on properties of construction spoil based high-fluid backfill materials[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2022, **41**(9): 3227-3233. (in Chinese))
- [11] LEE K J, KIM S K, LEE K H. Flowable backfill materials from bottom ash for underground pipeline[J]. *Materials*, 2014, **7**(5): 3337-3352.
- [12] KIM Y S, DO T M, KIM H K, et al. Utilization of excavated soil in coal ash-based controlled low strength material (CLSM)[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, **124**: 598-605.
- [13] HWANG C L, CHIANG C H, HUYNH T P, et al. Properties of alkali-activated controlled low-strength material produced with waste water treatment sludge, fly ash, and slag[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, **135**: 459-471.
- [14] 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 Jianwen, LIU Tieping, CAO Yupeng, et al. Compressive test and strength prediction of soil solidified by dredged silt with high moisture content[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(S2): 55-60. (in Chinese))
- [15] 邱学青, 杨东杰, 吴湘伟, 等. 不同分子量木素磺酸钙减水剂的性能研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 1999(3): 7-10. (QIU Xueqing, YANG Dongjie, WU Xiangwei, et al. Study on properties of calcium sulfonate water reducing agents with different molecular weight[J]. *Concrete and Cement Products*, 1999(3): 7-10. (in Chinese))
- [16] 陈科, 杨长辉, 于泽东, 等. 不同减水剂及其复掺对碱矿渣水泥性能的影响[J]. *土木建筑与环境工程*, 2012, **34**(1): 124-129. (CHEN Ke, YANG Changhui, YU Zedong, et al. Effects of different water reducing agents and their mixtures on properties of alkali slag cement[J]. *Civil, Architecture and Environmental Engineering*, 2012, **34**(1): 124-129. (in Chinese) (in Chinese))
- [17] 胡红梅, 马保国, 何柳. 萘系高效减水剂的优化合成与改性[J]. *武汉理工大学学报*, 2005(9): 38-41. (HU Hongmei, MA Baoguo, HE Liu. Optimal synthesis and modification of naphthalene superplasticizers[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2005(9): 38-41. (in Chinese))
- [18] 魏金, 丁向群, 沈洁, 等. 聚羧酸系高效减水剂的制备及其性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2012, **31**(1): 42-45. (WEI Jin, DING Xiangqun, SHEN Jie, et al. Research on synthesis and properties of polycarboxylic superplasticizer[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2012, **31**(1): 42-45. (in Chinese))
- [19] JOLICOEUR C, SIMARD M A. Chemical admixture-cement interactions: Phenomenology and physico-chemical concepts[J]. *Cement and Concrete Composites*, 1998, **20**(2-3): 87-101.
- [20] 刘经强, 冯竟竟, 李涛, 等. 混凝土外加剂实用技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.10: 45-46. (LIU Jingqiang, FENG Jingjing, LI Tao, et al. *Practical Technical Manual of Concrete Admixture*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.10: 45-46. (in Chinese))
- [21] 马保国, 杨虎, 谭洪波, 等. 水泥和黏土矿物对不同减水剂的吸附特性[J]. *硅酸盐学报*, 2013, **41**(3): 328-333. (MA Baoguo, YANG Hu, TAN Hongbo, et al. Adsorption characteristics of different superplasticizers on cement and clay minerals[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2013, **41**(3): 328-333. (in Chinese))