

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.107



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



静停时间对长江下游蒸养疏浚砂浆特性的影响

吴朝国^{1a}, 陈徐东^{1a}, 宁英杰², 张伟^{1b,3}, 冯璐^{1a}

(1. 河海大学 a. 土木与交通学院; b. 水利水电学院, 南京 210098; 2. 浙江交工集团股份有限公司, 杭州 310051; 3. 扬州水利局, 江苏扬州 225000)

摘要:长江下游航道疏浚产生大量疏浚砂,疏浚砂的资源化利用受到重视。利用疏浚砂部分取代机制砂制备砂浆,研究不同静停时间对疏浚砂浆特性的影响,测试不同龄期的抗压强度,通过X射线衍射、扫描电镜、压汞技术,分析不同静停时间、不同疏浚砂取代率砂浆的微观特性。结果表明:随着静停时间的增加,90 d抗压强度逐渐增加,抗渗性能得到明显改善;掺入疏浚砂使得砂浆的抗压强度有所提高,且随疏浚砂取代率的增加先增大后减小;疏浚砂浆的抗压强度与疏浚砂取代率有较大关系,其影响程度与静停时间有关,疏浚砂对低静停时间有较突出的增强效果;疏浚砂有效改善了由蒸养造成的孔结构粗化和孔隙增大等问题,适宜的疏浚砂取代率对蒸养砂浆性能的改善效果明显。

关键词:疏浚砂;超细砂;砂浆;静停时间;力学性能;微观结构

中图分类号:TU521.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2024)04-0193-09

The influence of static stop time on the characteristics of steam dredged mortar in the Yangtze River

WU Chaoguo^{1a}, CHEN Xudong^{1a}, NING Yingjie², ZHANG Wei^{1b,3}, FENG Lu^{1a}

(1a. College of Civil Engineering and Transportation; 1b. College of Water Resources and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China; 2. Zhejiang Communications Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310051, P. R. China; 3. Yangzhou Water Resources Bureau, Yangzhou 225000, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: Due to the large amount of dredged sand produced by dredging in the lower reaches of the Yangtze River, the resource utilization of dredged sand has been given attention. The mortar was prepared by partially replacing manufactured sand with dredged sand, and the influence of different static stop time on the characteristics of dredged sand mortar was studied, the compressive strength at different ages was tested, through X-ray diffraction, scanning electron microscopy, and mercury pressing technology, the micro characteristics of different static stop time different dredged sand replacement rate mortar. The results show that with the increase of static stop time, the 90 d compressive strength increases gradually, and the impermeability

收稿日期:2022-07-12

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2600200);国家自然科学基金(51979090);国家重点实验室开放基金(2019CEM002)

作者简介:吴朝国(1999-),男,主要从事绿色高性能混凝土材料研究,E-mail:wcg19991116@163.com。

陈徐东(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:cxdong1985@163.com。

Received: 2022-07-12

Foundation items: National Key R & D Program of China (No. 2021YFB2600200); National Natural Science Foundation of China (No. 51979090); State Key Laboratory of High-Performance Civil Engineering Materials (No. 2019CEM002)

Author brief: WU Chaoguo (1999-), main research interest: high performance green concrete materials, E-mail:wcg19991116@163.com.

CHEN Xudong (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: cxdong1985@163.com.

is also significantly improved; The compressive strength of mortar increases with the addition of dredged sand, and increases first and then decreases with the increase of replacement rate of dredged sand; The compressive strength of dredged sand mortar has a great relationship with the replacement rate of dredged sand, and its influence degree is related to the static stop time. The dredged sand has a prominent strengthening effect on the low static stop time; dredged sand can effectively improve the problems of pore structure coarsening and pore enlargement caused by steam curing. Appropriate replacement rate of dredged sand has obvious improvement effect on the performance of steam curing mortar.

Keywords: dredged sand; superfine sand; mortar; static stop time; mechanical properties; microstructure

长江是中国内陆地区的主要航道,水下砂体的不断堆积和变化运移直接影响长江下游深水航道的正常运行。为保证航道的通航能力,需定期对航道进行疏浚作业,每年疏浚产生的废弃砂土量达到8000万 m^3 ^[1]。以往是在指定地点进行抛弃处理,但这会产生环境污染,因此,急需一种环境友好的解决方案。近些年,展开了对疏浚砂的资源化利用研究,李水江等^[2]利用真空预压-逐级加能动力压实联合电渗法克服了传统联合法处理疏浚淤泥的缺陷;张伟等^[3]利用炉渣粉、粉煤灰代替大量的水泥作为胶凝材料,通过不同配比的正交试验筛选出最优的固化剂配比;Van等^[4]研究了疏浚沉积物对混合水泥的早期水化和自生变形行为的影响,结果表明其对混合水泥的早期水化影响和粉煤灰相似;Snellings等^[5]通过闪蒸将疏浚沉积物加工并替代胶凝材料,结果表明随着替代率的提高,强度发展较慢,且疏浚沉积物具有明显的火山灰活动;李升涛等^[6]利用疏浚砂作为细骨料,设计并制备出碱激发矿渣混凝土;秦拥军等^[7]利用沙漠砂作为细骨料制备混凝土,结果表明混凝土的抗压强度得到了有效提高;梅军帅等^[8]研究了珊瑚砂浆的力学性能,以及矿物掺合料对珊瑚砂浆的改性作用,结果表明珊瑚砂浆的力学强度低于标准砂浆,加入复合矿物掺合料后能提高珊瑚砂浆的力学性能。另外,还有沙漠砂、海砂等细砂充当混凝土细骨料的研究^[9-12],但是关于长江下游疏浚砂的研究还较少。

在冬季气温极低的情况下,预制工厂会对护坡砖、沉排、鱼巢砖等砂浆预制构件采用蒸汽养护,虽然能满足预制构件快速化生产的要求,但会出现水化产物分布不均匀、孔结构粗化、后期强度和耐久性较差等问题。试件成型入模到蒸汽养护升温之前进行标准养护的时间,称为静停时间,一定的静停时间能有效降低蒸养带来的不利影响。Zdeb^[13]探究了90℃蒸汽养护条件下静停时间为0、3、6、12、24 h时活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC)的强度,结果表明静停6 h时RPC的强度最

大;张耀煌等^[14]探究了预养时间为0、1、2、3 h的普通混凝土抗压强度,结果表明,预养时间越长,抗压强度越高;Shi等^[15]研究了2、4、6、8 h静停时间对早期微结构形成的影响,延长静停时间有利于蒸养混凝土的长期性能。

在水泥基材料中将疏浚砂作为一种细骨料代替机制砂,既丰富了疏浚砂的处理方案,也让水泥基材料细骨料的选择更加广泛;通过蒸养制备疏浚砂预制构件,可以实现废弃资源的有效利用,提高预制构件的生产效率。笔者设计3种不同的疏浚砂取代率配合比,在不同静停时间下进行蒸养试验,并对其力学性能和微观特性进行研究。

1 试验方案

1.1 原材料

试验原材料包括:P·O 52.5级普通硅酸盐水泥;F类Ⅱ级粉煤灰,活性指数为80%,密度为2080 kg/m^3 ,其化学成分如表1所示;S95矿粉,密度为2870 kg/m^3 ,活性指数95%,其化学成分如表2所示;江苏苏博特新材料公司生产的聚羧酸减水剂;机制砂和长江下游疏浚超细砂,物理性能参数如表3所示,化学成分如表4所示,细度模数分别为3.2、0.5,相比于机制砂,疏浚砂的粒径较小,表观密度较大,吸水率较大。疏浚砂的微观形貌和级配曲线如图1所示,其圆润度较低,砂浆的工作性能容易下降。

表1 粉煤灰化学成分

Table 1 Chemical composition of fly ash

									%
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	
1.47	55.78	34.69	0.25	1.74	1.17	0.02	1.32	3.56	

表2 矿粉化学成分

Table 2 Chemical composition of mineral powder

									%
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	SO ₃	MnO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	
39.19	26.31	16.17	9.99	2.18	3.71	1.04	0.38	1.03	

表3 疏浚砂与机制砂物理性能参数

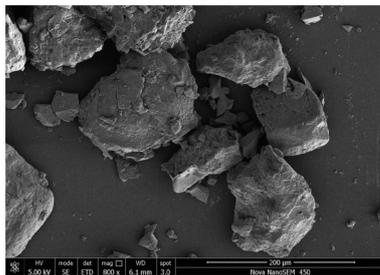
Table 3 Physical property parameters of dredged sand and manufactured sand

砂	表观密度/(kg/m ³)	堆积密度/(kg/m ³)	粒径/mm	空隙率/%	细度模数
疏浚砂	2 690	1 365	0~0.6	12.3	0.5
机制砂	2 591	1 484	0~4.75	43	3.2

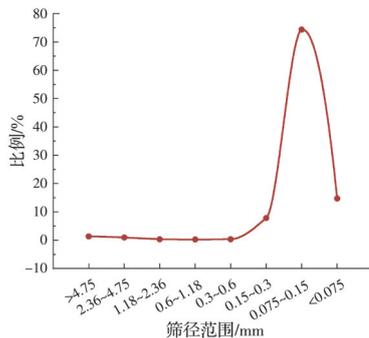
表4 疏浚砂与机制砂化学成分

Table 4 Chemical composition of dredged sand and manufactured sand

砂	质量分数/%										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	LOI
疏浚砂	63.61	13.38	4.86	4.69	2.84	2.59	1.41	0.59	0.22	0.26	5.55
机制砂	71.91	14.58	0.82	1.41	0.76	5.11	3.94	0.15	0.04	0.06	1.22



(a) 疏浚砂的微观形貌



(b) 疏浚砂的级配曲线

图1 疏浚砂的微观形貌和级配曲线

Fig. 1 Micromorphology and gradation curve of dredged sand

1.2 配合比

针对上述疏浚砂,当疏浚砂取代率达到25%时,其工作性能降低^[6]。研究根据疏浚砂占细骨料的质量百分比等质量替代机制砂,最终确定了3种疏浚砂取代率 k ,分别为零取代率0%、低取代率15%、高取代率50%,具体配合比如表5所示。

表5 砂浆配合比

Table 5 Mortar mix ratio

疏浚砂 取代率/%	砂浆配合比/(kg/m ³)							流动度/mm
	水泥	粉煤灰	矿粉	疏浚砂	机制砂	水	减水剂	
0	322	264.7	150	0	1 035	279.3	3.3	217.74
15	322	264.7	150	155.25	879.75	279.3	3.3	210.27
50	322	264.7	150	517.5	517.5	279.3	3.3	177.92

1.3 养护制度

采用两种养护制度,一种为标准养护,另一种为恒温时间5 h、养护温度60℃的蒸汽养护。根据《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—2021)^[16]中的方法拌制砂浆,入模之后,其中3组放入标养室进行标养,另外9组分别静停3、6、18 h之后放入蒸养箱,升温速率和降温速率均为30℃/h。蒸汽养护结束之后,待试件降至室温进行拆模标号,随后进行标准养护。部分试件编号如表6所示,试件编号以“疏浚砂取代率DS-静停时间”的规则进行命名。

1.4 试验方法

砂浆抗压强度试验参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—2021),利用微机控制电液伺服抗压抗折试验一体机对砂浆的7、28、90 d抗压强度进行测定,试验采用40 mm×40 mm×160 mm的棱柱体,每组3个试件。毛细吸水试验采用同样的试件,在达到28 d龄期时进行试验,试验开始前将待测试件烘干至恒重后称量,精确至0.1 g;随后将试件浸入20℃水中并计时,保持液面高出试件底面5 mm,间隔固定时间取出,用毛巾擦拭并迅速称重,重复该过程直至24 h。采用美国FEI Quanta 250FEG真空扫描电镜和帕纳科的X'Pert3 Powder分析砂浆界面区结构的微观形貌和水化产物,采用美国Micromeritics AutoPore V全自动压汞仪测试孔径分布。

表 6 试件编号

Table 6 Specimen number

试件编号	静停时间/h	k/%
0DS-b	b	0
15DS-3	3	15
50DS-6	6	50
0DS-18	18	0

注:表中“b”表示标养。

2 试验结果与分析

2.1 抗压性能分析

图 2 所示为 $k=0\%$ 时,不同静停时间下,砂浆抗压强度随龄期变化的情况,随着静停时间的增加,试件的 7、28、90 d 抗压强度逐渐增大,静停时间为 18 h 时最大,相比于同龄期的标养对照组,7、28 d 抗压强度提升不大,且 90 d 抗压强度有所降低,过长的静停时间对纯机制砂浆后期强度的发展作用不大。

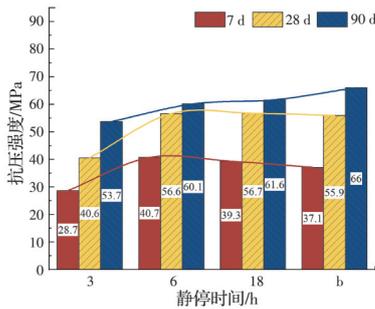


图 2 $k=0\%$ 时不同静停时间下砂浆的抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of mortar at different static stop times when $k=0\%$

图 3 所示为 $k=15\%$ 时,随着静停时间的增加,试件的 7、28 d 抗压强度先增大后减小,静停时间为 6 h 时最大,相比于同龄期的标养对照组,7 d 抗压强度最大能提升 13.2%,28 d 抗压强度最大能提升 5%,随着静停时间的增加,90 d 抗压强度也随着增大,静停时间为 18 h 时最大,相较于同龄期下的 15DS-b,能提升 8.6%,因此,静停时间对蒸养后期强度发展有不可忽视的作用。从 7 d 抗压强度来看,蒸养能提高 15% 取代率砂浆的早期抗压强度,最大能提升 13.2%;到 28 d 龄期时,15DS-3 抗压强度明显低于标养对照组,此时,静停时间太短使得砂浆内部结构并不具备足够的强度来抵抗蒸养时的湿热作用,内部结构损伤严重,对后期抗压强度产生不良影响;到 90 d 龄期时,15DS-3 依然低于标养对照组,而 15DS-6 和 15DS-18 高于标养对照组,最大提升了 8.6%。这说明静停时间达到一定数值时,可以提高砂浆试件抵抗湿热作用的能力,抵消蒸养对后期抗压强度发展的不良影响,甚至能小幅

度提高后期强度,且疏浚超细砂颗粒小,也能对内部孔结构起到填充作用,进一步提高密实度。

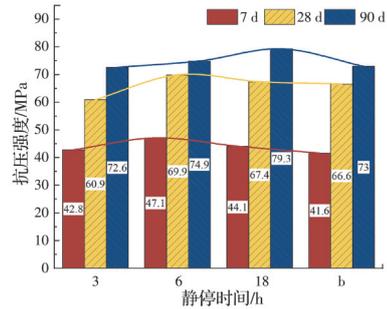


图 3 $k=15\%$ 时不同静停时间下砂浆的抗压强度

Fig. 3 Compressive strength of mortar at different static stop times when $k=15\%$

图 4 所示为 $k=50\%$ 时,随着静停时间的增大,试件的 7、28、90 d 抗压强度逐渐增大,静停时间为 18 h 时最大,相比于同龄期的标养对照组,7 d 抗压强度最大能提升 31.2%,28 d 抗压强度最大能提升 22.1%,90 d 抗压强度提升幅度不大,不到 1%。从 7 d 抗压强度来看,蒸养能提高 50% 取代率砂浆的早期强度,最大提升 31.2%;到 28 d 龄期时,50DS-3 抗压强度和标养对照组相差不大;到 90 d 龄期时,50DS-3 抗压强度明显低于标养对照组,下降了 8.3%,而 50DS-6 和 50DS-18 抗压强度和标养对照组相差不大。可以看出,虽然前期强度增长很快,但是后期强度与标养对照组相比并没有太大的变化。

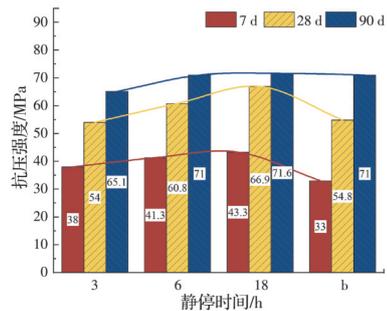


图 4 $k=50\%$ 时不同静停时间下砂浆的抗压强度

Fig. 4 Compressive strength of mortar at different static stop times when $k=50\%$

总体而言,随着静停时间的增大,90 d 抗压强度在逐渐增长,但过长的静停时间对后期强度的提升不明显。

图 5 所示为不同疏浚砂取代率下的 90 d 抗压强度,随着疏浚砂取代率的增大,90 d 抗压强度先增大后减小,且掺入疏浚砂的 90 d 抗压强度始终大于未掺入疏浚砂的。标养下,取代率为 15%、50% 的砂浆 90 d 抗压强度较 0% 分别提高了 10.6%、7.6%;18 h 静停时间下,分别提高了 28.7%、16.2%;6 h 静

停时间下,分别提高了 24.6%、18.1%;3 h 静停时间下,分别提高了 35.2%、21.2%。疏浚砂浆的抗压强度与疏浚砂取代率有较大关系,其影响程度和静停时间有关,疏浚砂对低静停时间有较突出的增强效果。

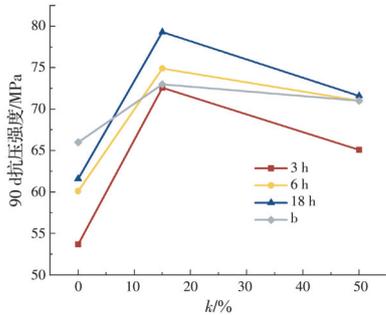


图 5 不同疏浚砂取代率下的 90 d 抗压强度

Fig. 5 90 d compressive strength under different dredged sand replacement rates

疏浚砂粒径极细,适量掺入能改善砂浆细骨料级配,当疏浚砂和机制砂的不同粒径近似满足 Horsfield 密实堆积理论,在砂浆振捣成型时能达到最佳密实状态。机制砂颗粒之间的空隙被疏浚砂颗粒填充(见图 6(a)),有效改善了由蒸养造成的孔结构粗化和孔隙增大等问题(见图 6(b))。当疏浚砂取代率过高时,会导致细骨料级配不良,形成更多的孔隙^[17]。另外,细骨料颗粒之间的传力路径会发生改变,如图 6(c)所示,最后,相比于普通砂,疏浚砂的比表面积更大,吸水量更大,砂浆流动性降低,在振捣过程中不易密实,将会产生大的孔隙^[17-18];同时砂浆中的胶浆减少,无法完全包裹砂颗粒,将会导致抗压强度下降。

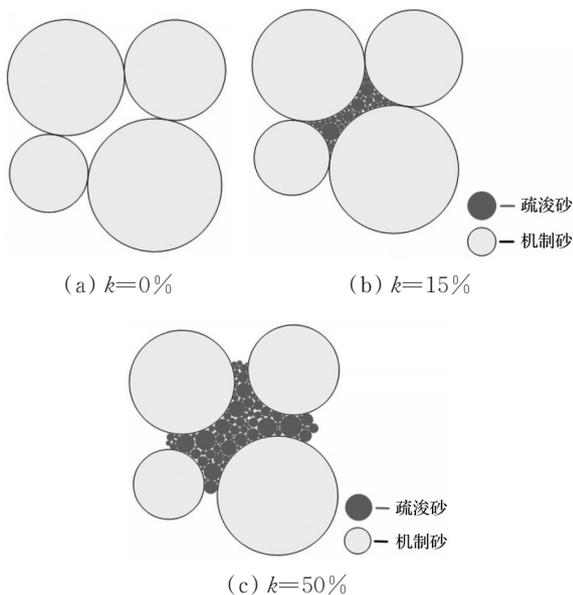


图 6 疏浚砂填充机理示意图

Fig. 6 Chart of filling mechanism of dredged sand

2.2 水化产物分析

采用 XRD(X-ray Diffraction)技术对 $k=50\%$ 时不同静停时间下的水化产物进行分析,图 7 所示为不同静停时间下的 28 d 水化产物 XRD 图谱。从图中可以看出, $k=50\%$ 时,砂浆的水化产物主要是 SiO_2 、 CaCO_3 、C-S-H 凝胶,还有少量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,蒸养并没有改变水化产物主要组成成分。50DS-3 的 CaCO_3 衍射峰明显大于其余 3 个试件组,但 C-S-H 凝胶的衍射峰最低,这可能是由于水化受阻;标养对照组的 C-S-H 凝胶衍射峰同样很低,随着静停时间的增加, CaCO_3 衍射峰逐渐下降,C-S-H 凝胶衍射峰却在逐渐上升,说明较长的静停时间能使水化程度更高,提高内部结构的密实度,且蒸养相比于标养能提高水化程度,C-S-H 凝胶能使孔结构更加地致密,从而提高疏浚超细砂浆的抗压强度;而且 50DS-3 的 SiO_2 衍射峰同样大于其余 3 个试件组,这主要是因为静停时间较短,进行蒸养之后,在高温的作用下,水化速度非常快,生成的凝胶粒子与大量的超细砂颗粒连接在一起,在外部形成了致密的屏蔽膜,阻碍了水化向里进行^[19],内部残留大量的 SiO_2 ,从而导致 28 d 抗压强度较低。

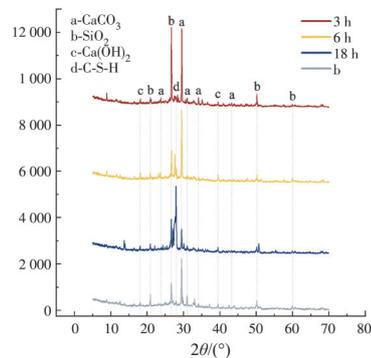


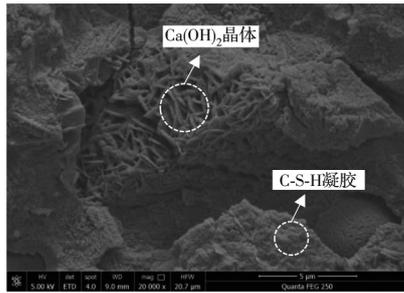
图 7 $k=50\%$ 时砂浆的 28 d 水化产物 XRD 图谱

Fig. 7 XRD patterns of 28 d hydration products of mortar when $k=50\%$

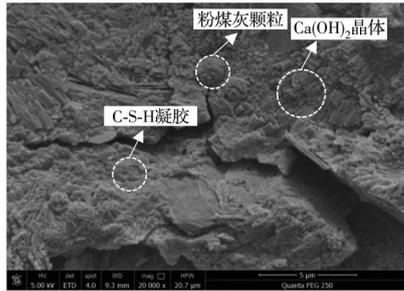
2.3 微观形貌分析

一定的静停时间有利于水泥更充分地反应,从而生成较细的水化产物,在蒸养之前形成更加致密的内部结构,图 8 所示为 $k=50\%$ 时不同静停时间下的 28 d 水化产物 SEM(Scanning Electron Microscope) 图像。

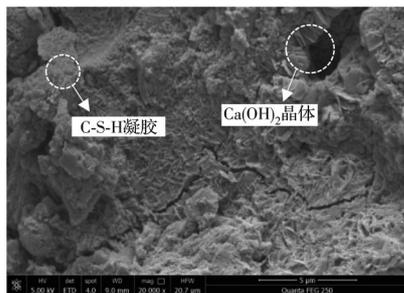
从图 8 可以看出,经过蒸养之后,SEM 图像中有很明显的微裂缝,且孔结构粗化,随着静停时间的增加,内部孔结构越来越致密。50DS-b 的密实度介于 50DS-6 和 50DS-18 之间,从图中可以看出,絮状物为 C-S-H 凝胶,片状物为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体。从图 8(a)中可以看出,50DS-3 结构多孔洞裂隙,有大量的方块 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体存在,呈不定向层状堆叠,孔隙



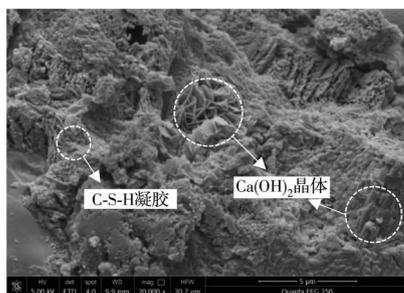
(a) 50DS-3



(b) 50DS-6



(c) 50DS-18



(d) 50DS-b

图8 $k=50\%$ 时砂浆的28 d水化产物SEM图像Fig. 8 SEM images of 28 d hydration products of mortar when $k=50\%$

较大,水化产物分布不均匀,进而影响其抗压强度;从图8(b)可以看出,50DS-6结构存在明显的裂隙, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体小范围减少,而絮状物C-S-H凝胶开始增多,且 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体多呈叠片状,排列致密均匀,粉煤灰颗粒表面有明显的刻蚀痕迹,说明蒸养使粉煤灰开始二次水化反应,而C-S-H凝胶的产生有助于提高密实度,减小孔隙率;从图8(c)中可以看出,50DS-18结构中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体已经不明显,主要为C-S-H凝胶,C-S-H凝胶能填充孔隙,使内部

结构更加密实,孔隙率进一步降低,这也说明50DS-18的水化程度非常高,消耗了大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$;从图8(d)可以看出,50DS-b中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体一部分呈不定向层状堆叠,还有一部分呈叠片状,C-S-H凝胶分布范围不及50DS-18,水化速度稍慢;随着静停时间的增加,C-S-H凝胶在图像中越来越明显,这也证明了随着静停时间的增加,水化程度越高,内部孔隙结构会更加密实,增加静停时间,能有效地降低孔隙率,提高内部结构的密实度,这将进一步提高砂浆的抗压强度。

2.4 孔结构分析

采用压汞技术对不同静停时间下疏浚超细砂浆的28 d孔结构进行分析,50DS-3的孔隙率为17.92%;50DS-6的孔隙率为15.32%;50DS-18的孔隙率为12.95%;50DS-b的孔隙率为16.60%,且孔隙率对抗压强度的影响要大于孔径分布^[20]。随着静停时间的增加,疏浚超细砂浆的孔隙率越来越小,砂浆的密实度越来越高,说明在一定的静停时间之后,砂浆具备了一定的强度来抵抗蒸养时的湿热作用,内部结构得到了加强,内部孔隙率得到了控制,密实度增加,强度也得到了提高。根据孔径对水泥基材料的影响将其分为^[21]凝胶孔($<10\text{ nm}$)、过渡孔($10\sim 100\text{ nm}$)、毛细孔($100\sim 1\ 000\text{ nm}$)、大孔($>1\ 000\text{ nm}$), $k=50\%$ 时不同静停时间下砂浆的孔径分布微分曲线和孔径分布图如图9、图10所示。

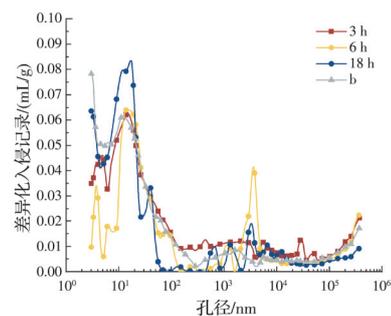
图9 $k=50\%$ 时砂浆的28 d孔径分布微分曲线Fig. 9 Differential curve of 28 d pore size distribution of mortar when $k=50\%$

图9中曲线的峰值为出现概率最大的孔径,被称为最可几孔径^[22]。从图中可以看出,50DS-3和50DS-6的最可几孔径为13.7 nm,50DS-18的最可几孔径为17 nm,50DS-b的最可几孔径为11 nm。由图10可知,相较于50DS-b,50DS-3的凝胶孔比例下降了23.07%,大孔比例增加了12.54%,50DS-6的凝胶孔比例下降了12.21%,大孔比例增加了5.88%,这可能是快速的水化反应使得水化产物的密度快速增加且分布不均,造成了内部气孔和孔隙

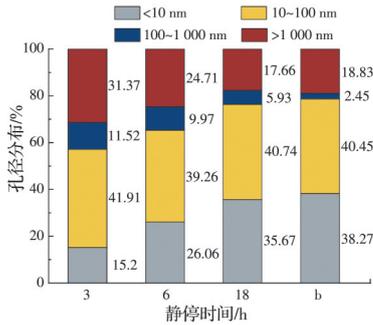


图 10 k=50%时砂浆的 28 d 孔径分布

Fig. 10 28 d pore size distribution of mortar when k=50%

粗化^[23],这些气孔大部分转为大孔,对砂浆的抗压强度造成了不良影响。而 50DS-18 的凝胶孔比例下降了 2.6%,毛细孔比例增加了 3.48%,大孔比例下降了 1.17%,这意味着经过 18 h 的静停,砂浆内部结构得到了加强,蒸养时气孔转为凝胶孔,毛细孔和大孔的产生遭到了抑制,砂浆的孔隙率降低,变得更加密实,这与微观形貌分析结果一致。

2.5 毛细吸水率分析

采用毛细吸水试验进一步验证 k=50% 时砂浆的孔结构变化规律,通过分析吸水量和吸水率两阶段的规律,进一步探讨疏浚超细砂浆的孔结构特征。如图 11、图 12 所示,两种养护条件下,吸水率和时间平方根曲线均存在二阶段效应。韩松等^[24]认为,二阶段效应分别对应毛细孔的填充(阶段 I)和凝胶孔的渗透(阶段 II)。总体上,不同静停时间试件组的吸水量均随着时间的延长呈不断增大的趋势,与标养对照组的趋势一样,但不同静停时间的增长速率明显不同,呈现出 3 h>6 h>标养>18 h 的结果,3 h 时吸水量最大,为 2.3 g,18 h 时吸水量最小,为 1.7 g,静停时间对毛细吸水率的影响较大。与标养相比,蒸养条件下的水化程度更高,随着静停时间的增加,毛细孔进一步细化,但静停时间太短,会导致大孔进一步粗化,进而影响砂浆的抗压强度。从压汞试验结果可以看出,50DS-18 的大孔比例最小,水化程度更高,毛细孔细化程度最高,凝

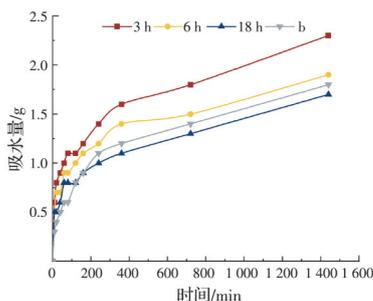


图 11 k 为 50% 时吸水量随时间的变化规律

Fig. 11 Law of variation of water regain with time when

k is 50%

胶孔比例较大;50DS-6 的大孔比例明显增多,水化程度较高,但蒸养使得大孔进一步增多;50DS-3 的大孔比例最大,其次是 50DS-6,静停时间较短,会导致大孔进一步粗化,削弱了砂浆的抗压强度;50DS-b 的大孔比例较小,但水化程度较低,其吸水量也较低。综上所述,当静停时间达到 18 h 时,抗渗性能得到明显提升,毛细孔细化为凝胶孔,吸水量较少,静停时间较短,毛细吸水量会增大,对毛细吸水率影响较大,而标养下对毛细吸水量的影响不大,试验结果与孔结构分析和微观形貌分析结果相印证。

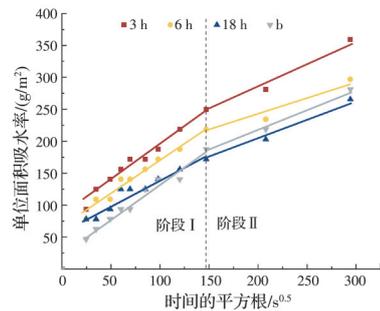


图 12 k 为 50% 时吸水率随时间平方根的变化规律

Fig. 12 Law of variation of water absorption with square root of time when k is 50%

3 结论

1) 疏浚砂浆随静停时间的增加,90 d 抗压强度逐渐增大,抗渗性能也得到明显改善,但过长的静停时间对后期强度的提升不明显。疏浚砂浆随取代率的增加,90 d 抗压强度先增大后减小,适量掺入疏浚砂,能提高抗压强度,过量则反之。

2) 疏浚砂浆的抗压强度与疏浚砂取代率有较大关系,其影响程度和静停时间有关,掺入疏浚砂能有效地改善由蒸养造成的孔结构粗化和孔隙增大等问题,疏浚砂对低静停时间有较突出的增强效果。

3) 对于疏浚砂浆,不同的静停时间会影响孔隙率的大小,较短的静停时间对孔隙的细化作用有限,大孔比例远大于标养,静停时间较长时,气孔经过蒸养转化为凝胶孔,毛细孔和大孔的产生受到了抑制,有效降低了孔隙率,提高密实度。

4) 掺入适量疏浚砂对蒸养砂浆性能的改善效果明显,根据笔者试验结果,考虑时间成本、原料成本和抗压性能,静停时间应不小于 6 h,疏浚砂取代率为 50% 时较好。

参考文献

[1] 李青云. 推进长江航道疏浚砂综合利用:《关于促进砂

- 石行业健康有序发展的指导意见》解读[N]. 中国水运报, 2020-04-01(1).
- LI Q Y. Promoting the comprehensive utilization of dredged sand in the Yangtze River waterway [N]. China Shipping News, 2020-04-01(001). (in Chinese)
- [2] 李水江, 汤家郗, 李校兵, 等. 真空预压联合逐级动力压实和电渗法处理疏浚淤泥试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(6): 143-150.
- LI S J, TANG J X, LI X B, et al. Vacuum preloading combined with step-by-step dynamic compaction and electroosmosis treatment of dredged sludge experimental study [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(6): 143-150. (in Chinese)
- [3] 张伟, 刘晓强, 李顺群, 等. 天津临港疏浚土固化特性及强度预测分析[J]. 水利水电技术, 2020, 51(4): 20-26.
- ZHANG W, LIU X Q, LI S Q, et al. Analysis on prediction of solidifying characteristics and strength of dredged soil in port-vicinity area of Tianjin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(4): 20-26. (in Chinese)
- [4] VAN BUNDEREN C, SNELLINGS R, VANDEWALLE L, et al. Early-age hydration and autogenous deformation of cement paste containing flash calcined dredging sediments [J]. Construction and Building Materials, 2019, 200: 104-115.
- [5] SNELLINGS R, HORCKMANS L, VAN BUNDEREN C, et al. Flash-calcined dredging sediment blended cements: Effect on cement hydration and properties [J]. Materials and Structures, 2017, 50(6): 241.
- [6] 李升涛, 陈徐东, 张伟, 等. 基于长江下游超细疏浚砂的碱激发矿渣混凝土力学性能[J]. 复合材料学报, 2022, 39(1): 335-343.
- LI S T, CHEN X D, ZHANG W, et al. Mechanical properties of alkali activated slag concrete with ultra fine dredged sand from Yangtze River [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(1): 335-343. (in Chinese)
- [7] 秦拥军, 张亮亮, 渠长伟, 等. 碳纤维沙漠砂混凝土梁受弯力学性能试验[J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5599-5610.
- QIN Y J, ZHANG L L, QU C W, et al. Experimental study on flexural mechanical properties of steel fiber desert sand concrete beams [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5599-5610. (in Chinese)
- [8] 梅军帅, 吴静, 王罗新, 等. 珊瑚砂浆的力学性能与微观结构特征[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2): 263-270.
- MEI J S, WU J, WANG L X, et al. Mechanical properties and microstructural characteristics of coral sand mortar [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2): 263-270. (in Chinese)
- [9] PENG X, ZHOU Y, JIA R, et al. Preparation of non-sintered lightweight aggregates from dredged sediments and modification of their properties [J]. Construction and Building Materials, 2017, 132: 9-20.
- [10] 刘霞, 李峰, 余殷鹏. 玄武岩纤维增强聚合物筋增强珊瑚礁砂混凝土柱轴压试验[J]. 复合材料学报, 2020, 37(10): 2428-2438.
- LIU X, LI F, SHE Y P. Axial compression test of basalt fiber reinforced polymer reinforced coral reef and sand aggregate concrete column [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(10): 2428-2438. (in Chinese)
- [11] 吴琪, 丁选明, 陈志雄, 等. 不同密实度珊瑚砂地基地震响应特性试验研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(Sup1): 1-5.
- WU Q, DING X M, CHEN Z X, et al. Study on seismic characteristics of coral sand with different relative density [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(Sup1): 1-5. (in Chinese)
- [12] 董伟, 肖阳, 苏英, 等. 风积砂混凝土轴心受压力学性能研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(3): 86-92.
- DONG W, XIAO Y, SU Y, et al. Study on axial compression performance of aeolian sand concrete [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(3): 86-92. (in Chinese)
- [13] ZDEB T. An analysis of the steam curing and autoclaving process parameters for reactive powder concretes [J]. Construction and Building Materials, 2017, 131: 758-766.
- [14] 张耀煌, 孙红, 李晓, 等. 蒸养制度对混凝土抗压强度的影响及其预测研究[J]. 材料导报, 2015, 29(Sup2): 554-558, 564.
- ZHANG Y H, SUN H, LI X, et al. Study of steam-cured system impact on concrete compressive strength and prediction of strength model [J]. Materials Review, 2015, 29(Sup2): 554-558, 564. (in Chinese)
- [15] SHI J Y, LIU B J, ZHOU F, et al. Heat damage of concrete surfaces under steam curing and improvement measures [J]. Construction and Building Materials, 2020, 252: 119104.
- [16] 水泥胶砂强度检验方法(ISO法): GB/T 17671—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Test method of cement mortar strength (ISO method): GB/T 17671—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [17] 李玉根, 张慧梅, 刘光秀, 等. 风积砂混凝土基本力学性能及影响机理[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(5): 1212-1221.
- LI Y G, ZHANG H M, LIU G X, et al. Mechanical properties and influence mechanism of aeolian sand concrete [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5): 1212-1221. (in Chinese)

- [18] 郭东, 苏春义, 彭自强, 等. 海水拌和珊瑚礁砂混凝土力学性能及微观结构[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(1): 41-46.
GUO D, SU C Y, PENG Z Q, et al. Mechanical properties and microstructure of concrete prepared with coral reef sand and sea water [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(1): 41-46. (in Chinese)
- [19] 李松, 焦楚杰, 甘元初. 废玻璃粉混凝土力学性能研究[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(5): 199-205.
LI S, JIAO C J, GAN Y C. Study on mechanical properties of waste glass powder concrete [J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(5): 199-205. (in Chinese)
- [20] 杨世玉, 赵人达, 靳贺松, 等. 粉煤灰地聚物砂浆早期强度的影响参数研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(6): 162-169.
YANG S Y, ZHAO R D, JIN H S, et al. Research on influence parameters of early strength of fly ash-based geopolymer mortar [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(6): 162-169. (in Chinese)
- [21] 薛翠真, 申爱琴, 郭寅川. 基于孔结构参数的掺CWCPM混凝土抗压强度预测模型的建立[J]. 材料导报, 2019, 33(8): 1348-1353.
XUE C Z, SHEN A Q, GUO Y C. Prediction model for the compressive strength of concrete mixed with CWCPM based on pore structure parameters [J]. Materials Reports, 2019, 33(8): 1348-1353. (in Chinese)
- [22] 于本田, 刘通, 王焕, 等. 花岗斑岩石粉含量对混凝土性能及微观结构的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(5): 1052-1062.
YU B T, LIU T, WANG H, et al. Influence of granite porphyry stone powder content on properties and microstructure of concrete [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(5): 1052-1062. (in Chinese)
- [23] BAHAFID S, GHABEZLOO S, DUC M, et al. Effect of the hydration temperature on the microstructure of Class G cement: C-S-H composition and density [J]. Cement and Concrete Research, 2017, 95: 270-281.
- [24] 韩松, 崔叶富, 郑玉飞, 等. 低水胶比水泥浆体的力学性能与水泥石微结构[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(2): 153-160.
HAN S, CUI Y F, ZHENG Y F, et al. Mechanical properties and pore-structure of hardened cement paste with low water-binder ratio [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(2): 153-160. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)