

文章编号:1671-6833(2025)03-0090-07

# 自密实混凝土内掺淤泥的生态护坡材料

张鑫玉<sup>1</sup>, 冯威<sup>2</sup>, 孙啸<sup>1</sup>, 赵云鹏<sup>1</sup>, 芦浩<sup>3</sup>

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国能源建设集团浙江省电力设计院有限公司, 浙江 杭州 310012; 3. 南京水利科学研究院材料结构研究所, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 针对预制生态砖护坡现场人工拼装劳动力需求大、转运损耗高等难题, 同时考虑淤泥废弃物的资源化利用, 提出了一种利用淤泥取代水泥胶凝材料制备自密实混凝土 (SCC) 作为非结构生态护坡替代预制生态砖护坡, 从而起到降本增效的作用。首先, 分析了淤泥的物理化学性质; 其次, 研究了淤泥掺量对工作性能、力学性能和孔隙结构的影响规律。结果表明: 单掺淤泥使 SCC 工作性能下降, 为满足 SCC 规范和施工要求, 需相应增加减水剂用量。力学性能与淤泥掺量呈反相关, 28 d 抗压强度、劈拉强度和弹性模量均降低; 淤泥的掺入影响 SCC 的孔结构, 导致累积孔体积和孔隙率的增加。研究结果表明: 内掺 10% 淤泥的 SCC 在坍落扩展度为 700 mm 的情况下, 强度可达到 C30, 验证了其作为生态护坡材料的可行性。

**关键词:** 淤泥; 自密实混凝土; 生态护坡; 工作性; 强度; 孔隙结构

**中图分类号:** TV431 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2024.06.018

随着我国人口数量的不断增长, 人们对水土资源的大规模开发导致全国各地出现了不同程度的水土流失现象, 各河道的水域面积不断地减少, 水生态开始失衡, 因此建设生态渠道迫在眉睫<sup>[1-2]</sup>。

目前常用的生态护坡技术为预制生态砖护坡, 苏慧等<sup>[3]</sup>提出了铰链式混凝土砌块生态护坡技术, 应用表明该结构实现了河道防洪的功能, 又改善了生态环境。邵琪等<sup>[4]</sup>提出了一种三维生态联锁块的结构形式, 发现其在保证亲水性和生态性的前提下, 能更好地发挥抗冲和抗滑的性能。张从从<sup>[5]</sup>设计了插合式正六边形生态砖和插合式四边形空心生态砖, 并进行河道边坡稳定敏感性分析。

虽然预制生态砖取得一定的研究成果, 但人工铺设预制生态砖需要大量劳动力, 并且在铺设和运输过程中会有损耗。此外, 预制生态砖的应用也受到坡度限制, 适用于缓坡护坡工程。

同时, 河道、水库淤泥量逐年增加, 严重影响生态环境、通航安全和工作效能。与其他废弃物相同, 淤泥也可采用固化方法加以资源化利用, 如, 童丽萍

等<sup>[6]</sup>将黄河淤泥应用到多孔砖砌体中, 研究其抗压承载力和变形性能, 为黄河淤泥多孔砖砌体结构设计和施工提供依据。张莎莎等<sup>[7]</sup>利用不同细粒土配置砂类硫酸盐渍土, 进行盐胀和力学试验, 研究发现掺入细粒土对抗剪强度表现出先增大后减小的趋势。高鹏等<sup>[8]</sup>将淤泥制成免烧建筑陶粒, 分析陶粒内部物相组成和微观结构的变化机制, 获得了淤泥基免烧陶粒的最佳配比和制备工艺参数。陆晓燕等<sup>[9]</sup>将长江淤泥与粉煤灰结合制作全淤泥陶粒泡沫混凝土砌块应用到墙体保温, 保温效果明显改善。以上结果表明, 将淤泥用于轻质材料、建筑砖块、泡沫混凝土等已有先例, 将淤泥应用在生态渠道相关领域鲜见报道。

本文以淤泥作为胶凝材料按照等重量来部分取代水泥, 制备不同淤泥掺量的自密实混凝土 (SCC)<sup>[10-11]</sup>, 以期现场成型渠道护坡, 从而降低施工劳动力需求和转运拼装损耗。考虑到淤泥对 SCC 核心性能的影响尚不明晰, 本研究着重探究其工作性能、力学性能和孔隙结构的关联, 评估淤泥作为胶凝材料替代水泥的可行性。

收稿日期: 2024-05-17; 修订日期: 2024-06-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52279131)

通信作者: 孙啸 (1986—), 男, 浙江杭州人, 河海大学副教授, 博士, 主要从事水利水电新技术、新材料研究, E-mail: xiaos@hhu.edu.cn。

引用本文: 张鑫玉, 冯威, 孙啸, 等. 自密实混凝土内掺淤泥的生态护坡材料[J]. 郑州大学学报(工学版), 2025, 46(3): 90-96. (ZHANG X Y, FENG W, SUN X, et al. Ecological slope protection material with self-compacting concrete incorporated with silt[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2025, 46(3): 90-96.)

1 试验

1.1 原材料

水泥选用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,其比表面积为  $369\text{ m}^2/\text{kg}$ 。粉煤灰选用Ⅱ级粉煤灰,比表面积为  $606\text{ m}^2/\text{kg}$ 。细骨料为天然河砂,细度模数为 2.45,表观密度为  $2\,620\text{ kg}/\text{m}^3$ 。粗骨料为砾石,粒径范围为  $3\sim6\text{ mm}$ ,堆积密度为  $1\,734\text{ kg}/\text{m}^3$ 。减水剂采用普通型 PCA®-I 型聚羧酸高性能减水剂,固含量为 25.33%。淤泥取自江苏省连云港,比表面积为  $1\,740\text{ m}^2/\text{kg}$ ,采用系统化的工艺步骤对淤泥进行处理,首先利用阳光和自然风力进行淤泥干化,以降低其含水量至 20% 左右,再经过人工操作和多功

能破碎机对干化后的淤泥进行破碎,再将淤泥粉末通过振动筛进行筛分,获得粒径  $0\sim400\text{ }\mu\text{m}$  的淤泥粉末,试验前将其放置在  $60\text{ }^\circ\text{C}$  的烘箱中干燥 12 h。上述胶凝材料的主要化学成分见表 1。由表 1 可知,本研究中淤泥的二氧化硅含量与粉煤灰基本相同,氧化铝含量为粉煤灰的 50%,氧化钙含量为水泥的 10%,可以取代水泥作为胶凝材料。

采用 MASTERSIZER 2000 激光粒度分析仪对淤泥进行粒度分析,粒径分布如图 1 所示。其中 90% 淤泥颗粒在  $47.2\text{ }\mu\text{m}$  以下,颗粒粒径集中分布于  $3\sim14\text{ }\mu\text{m}$ 。采用 X 射线衍射仪(XRD)对淤泥物相组成进行分析,如图 2 所示。淤泥的主要物质成分为石英、白云母、方解石、钠长石等。

表 1 胶凝材料的主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of cementitious materials								%
材料	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{Na}_2\text{O})$	$w(\text{K}_2\text{O})$	$w(\text{SO}_3)$
水泥	17.88	66.65	6.35	4.72	0.61	0.12	0.85	2.66
粉煤灰	54.63	5.20	34.81	3.04	0.97			0.96
淤泥	53.42	6.91	16.64	3.93	1.55	2.42	5.66	0.51

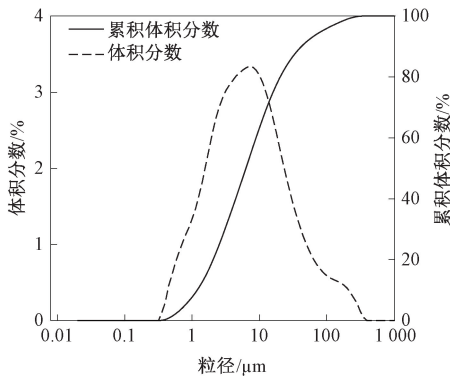


图 1 淤泥的粒度分布曲线

Figure 1 Particle size distribution curve of silt

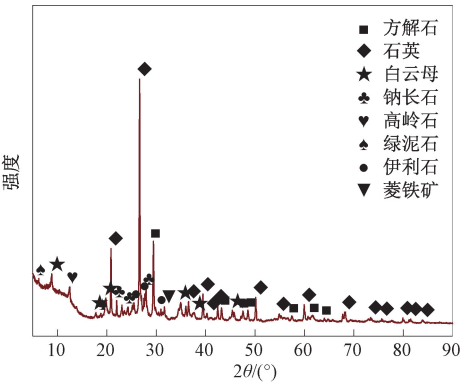


图 2 淤泥的 X 射线衍射图谱

Figure 2 X-ray diffractogram of silt

1.2 试验制备与测试

1.2.1 配合比方案

本试验根据 CCES 02—2004《自密实混凝土设

计与施工指南》<sup>[12]</sup>进行标准试块的混凝土配合比设计,其中水胶质量比为 0.35:1,砂率为 50%,淤泥最大掺量(质量分数,下同)为 10%,如表 2 所示。表 2 中,样品编号 S-i 表示淤泥以质量分数为  $i\%$  替代水泥,并设 S-0 为基准组配合比。需要说明的是,为防止 SSCC 离析和泌水,并且改善其流动性,本试验内掺 20% 粉煤灰。

表 2 SSCC 配合比

Table 2 SSCC mix proportion								$\text{kg}/\text{m}^3$
样品编号	水泥	淤泥	粉煤灰	砂	石	水	减水剂	
S-0	421.60	0	105.4	685.1	685.1	185	5.27	
S-2	411.10	10.54	105.4	685.1	685.1	185	5.27	
S-4	400.50	21.08	105.4	685.1	685.1	185	5.27	
S-6	389.98	31.62	105.4	685.1	685.1	185	6.85	
S-8	379.44	42.16	105.4	685.1	685.1	185	8.43	
S-10	368.90	52.70	105.4	685.1	685.1	185	9.49	

1.2.2 试件制备与养护

为确保淤泥自密实混凝土(SSCC)的工作性能,充分发挥减水剂的性能,在搅拌时延迟加入减水剂。先将水泥、粉煤灰、淤泥、砂、和石子倒入搅拌机中进行干拌 60 s;将 50% 的水均匀缓慢地加入,搅拌时间为 60 s;将减水剂融入剩余水中,搅拌中均匀缓慢地加入,最后再搅拌 120 s,将拌合物装入试模。置于标准养护室下 24 h 后拆模,养护至规定龄期后进行试验。

1.2.3 测试方法

SSCC 的工作性能试验按照 CCES 02—2004《自

密实混凝土设计与施工指南》<sup>[12]</sup>进行坍落扩展度试验、 $T_{500}$  流动时间试验和 L 型仪试验。力学性能按照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》<sup>[13]</sup> 测试强度,强度试验采用 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试件,每组测试 3 个取平均值。采用电液伺服万能试验机分别对养护 3,7,28 d 混凝土试件进行抗压强度和劈拉强度测定,抗压强度的加载速度为 0.5 MPa/s,劈拉强度的加载速度为 0.05 MPa/s。弹性模量试验采用应变片法,采用 100 mm×100 mm×300 mm 棱柱体试件,每组测试 3 个取平均值,其中加载速度与抗压试验相同。采用 AutoPore IV 9500 型全自动压汞测孔仪测试孔隙结构,将养护 28 d 的样品放入异丙醇 48 h 以上,通过溶剂置换法终止水泥水化,再将终止水化后的试块放置 60 ℃ 的烘箱中干燥 24 h,进行压汞实验。

## 2 结果与分析

### 2.1 工作性能

图 3 表示淤泥掺量对坍落扩展度和 L 型仪高度比的影响。由图 3 可知,随着淤泥掺量的增加,拌合物的坍落扩展度和高度比逐渐减小,测试过程中发现 S-8 和 S-10 两组拌合物没有进行扩展,并且在 L 型仪水平部分中没有流动,当淤泥掺量达到 6% 时,扩展度和高度比大幅度降低,这是由于淤泥比表面积约为水泥的 4.7 倍,表面能吸附更多的水和减水剂,从而降低拌合物中自由水和有效减水剂的含量,阻碍其流动性,并且淤泥的掺入导致拌合物黏性增大,从而减缓了拌合物流动速度。而自密实混凝土坍落扩展度要求为 550~750 mm<sup>[14]</sup>,为了保证 SSCC 的工作性能,需要增加减水剂用量至 1.3% (S-6)、1.6% (S-8) 和 1.8% (S-10)。

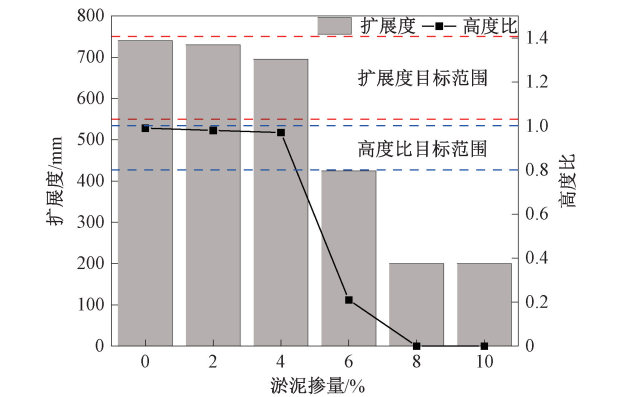


图 3 淤泥掺量对 SSCC 扩展度和高度比的影响  
Figure 3 Effect of silt admixture on expansion and height ratio of SSCC

图 4 表示淤泥掺量对工作性能的影响,其中包

括坍落扩展度、 $T_{500}$  流动时间和 L 型仪高度比。由图 4 可知,所测不同 SSCC 拌合物的工作性能满足 CCES 02—2004《自密实混凝土设计与施工指南》<sup>[12]</sup> 的要求。当减水剂掺量较大时,流动性明显增加,扩展度和高度比随之增加, $T_{500}$  流动时间降低,使得 S-10 拌合物在流动过程中更容易通过 L 型仪中的钢筋栅。鉴于此,淤泥会降低 SSCC 的工作性能,而减水剂可显著提高 SSCC 拌合物的工作性能,在淤泥掺量和减水剂用量之间找到平衡点,确保混凝土拌合物满足工作性能要求是配合比设计的关键。

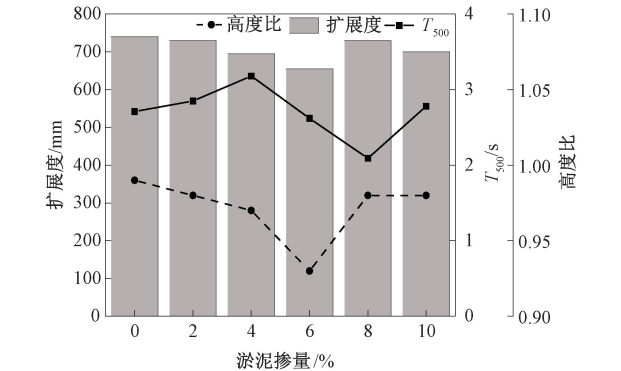


图 4 淤泥掺量对 SSCC 工作性能的影响  
Figure 4 Effect of silt mixing on SSCC workability

图 5 表示减水剂用量与淤泥掺量间的关系。由图 5 可知,当淤泥掺量较大时,需要更多的减水剂来改善 SSCC 的工作性能。淤泥掺量  $x$  和减水剂用量  $y$  具有良好的相关性,其拟合公式为  $y = 0.0098x^2 - 0.011x + 0.979$ ,  $R^2$  为 0.97。

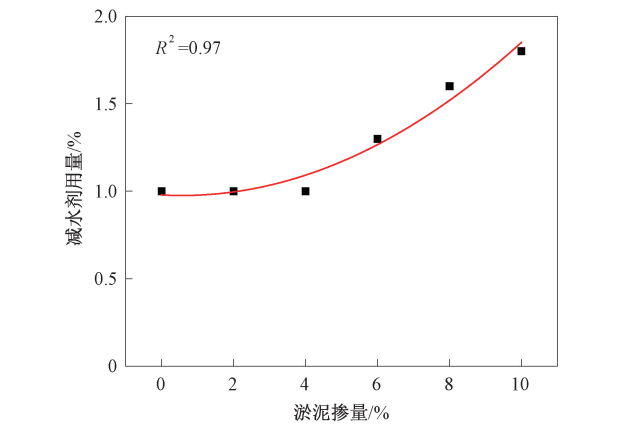


图 5 淤泥掺量与减水剂用量关系  
Figure 5 Relationship between silt dosage and water reducing dosage

### 2.2 力学性能

#### 2.2.1 抗压强度

图 6 为不同淤泥掺量下 SSCC 在 3,7,28 d 时抗压强度变化规律。由图 6 可知,淤泥掺量越高,SSCC 硬化抗压强度下降越明显。淤泥掺量为 2%,

4%,6%,8%,10%的 28 d 强度分别降低了 2.4%,3.7%,20.6%,22.7%和 25.7%。根据 Jiang 等<sup>[15]</sup>的试验结果,抗压强度随淤泥掺量的增加而降低,与本研究结果一致。这是因为淤泥的加入导致胶凝材料体系中的水化产物变少,抗压强度随之降低。

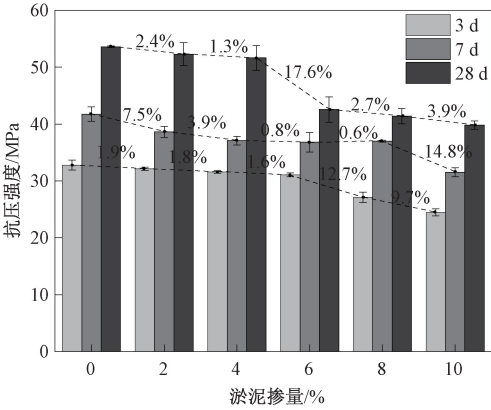


图 6 不同龄期 SSCC 拌合物的抗压强度  
Figure 6 Compressive strength of SSCC at different ages

2.2.2 劈裂抗拉强度

图 7 为不同淤泥掺量下 SSCC 在 3,7,28 d 劈拉强度变化规律。当掺入 2%的淤泥时劈拉强度会增加,7 d 和 28 d 强度分别增加了 2.5%和 7.4%,但随着淤泥掺量的增加,劈拉强度持续降低。与基准相比,在 7 d 和 28 d 时,淤泥掺量为 4%,6%,8%,10%的劈拉强度分别降低了 0.7%和 4.7%,18.7%和 14.3%,30.6%和 15.1%,35.8%和 25.5%,可见淤泥的掺入对 SSCC 劈拉强度具有较为显著的影响。

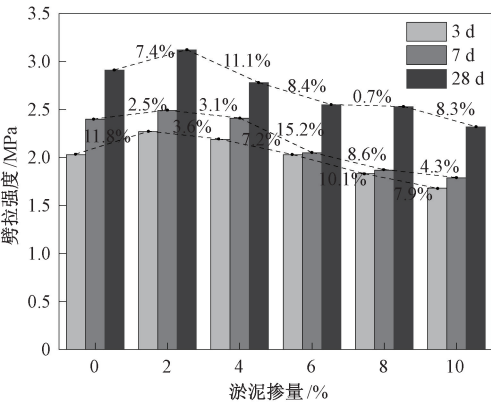


图 7 不同龄期 SSCC 拌合物的劈拉强度  
Figure 7 Split tensile strength of SSCC at different ages

2.2.3 拉压比

拉压比是劈拉强度 ( $T_s$ ) 与抗压强度 ( $C_s$ ) 的比值,用来反映混凝土的抗脆性断裂性能。该比值越高,反映混凝土抗裂性越好<sup>[16]</sup>。混凝土  $T_s/C_s$  值一般为 0.05~0.10。图 8 为 SSCC 的劈拉强度与抗压强度的关系。SSCC 在 3,7,28 d 的  $T_s/C_s$  值为 0.051~0.071,平均值为 0.061,且在不同淤泥的掺

量下, $T_s/C_s$  值变化不大,说明淤泥掺量对 SSCC 抗裂性影响较小。

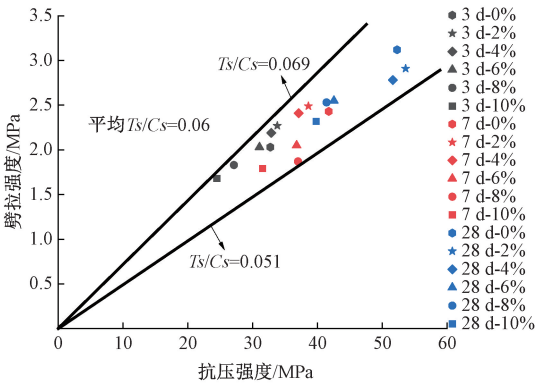


图 8 抗压强度与劈拉强度之间的关系  
Figure 8 Relationship between compressive strength and split tensile strength

2.2.4 弹性模量

3,7,28 d 的弹性模量测试结果如图 9 所示。由图 9 可知,SSCC 的弹性模量随着淤泥掺量的增加而减少,与基准相比,淤泥掺量为 2%,4%,6%,8%,10%的 28 d 弹性模量分别降低了 29.4%,31.1%,32.8%,40.3%和 40.6%。与 Zhang 等<sup>[17]</sup>的结论相同,只增加淤泥的掺量,弹性模量会随之下降,平均下降 2.6%。这是因为淤泥使拌合物的孔隙率增大,当试件受压时,由于孔隙率及内部微裂缝的影响使应变增大,导致弹性模量降低。

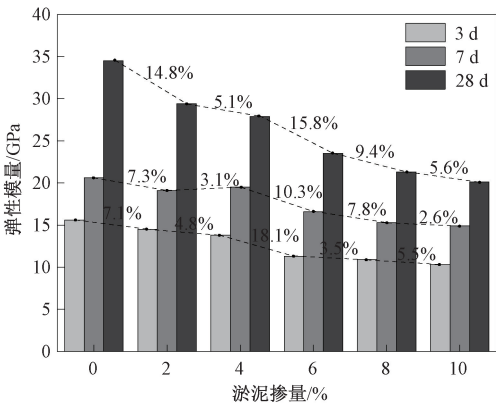


图 9 不同龄期 SSCC 拌合物的弹性模量  
Figure 9 Modulus of elasticity of SSCC at different ages

2.3 孔隙结构

压汞 (MIP) 分析如图 10~13 所示。从图 10 中可以看出,硬化浆体汞侵入率和总汞侵入量均显著增加,浆体结构内部互连孔隙数量增加,所有淤泥净浆试块孔隙率均高于基准组的孔隙率。随着淤泥掺量增加到 10%,试块孔隙率在基准组基础上分别上升了 25.33%,61.85%和 46.18%。淤泥对孔隙率的影响呈增加的趋势,这是因为随着淤泥替代水泥比



例越大,可供水化反应的胶凝材料减少,导致 SSCC 的孔隙增多。分析图 10 和图 11,S-0 和 S-10 的最可几孔径为 69.13 nm,S-4 和 S-6 的最可几孔径为 69.04 nm,S-0、S-4、S-6 和 S-10 的临界孔径分别为 120.83,120.86,120.86,120.77 nm,淤泥的掺入对最可几孔径和临界孔径基本无影响,表明淤泥替代水泥并没有引起水泥浆内孔隙级配的显著变化,相比这两种参数,孔隙率更能反映淤泥对浆体微观结构影响。

图 12 为不同淤泥掺量下的孔隙率-强度-扩展度的关系,根据 Jiang 等<sup>[18]</sup>的研究结果,掺入淤泥后的抗压强度随孔隙率的增加而降低,这与本研究的规律基本吻合,不同的是 S-6 比 S-10 的强度大,但其孔隙率上升 1 百分点,这是因为 S-10 比 S-6 的扩展度和高度比分别增加了 9.4% 和 2%,流动度增强导致孔隙含量减少。

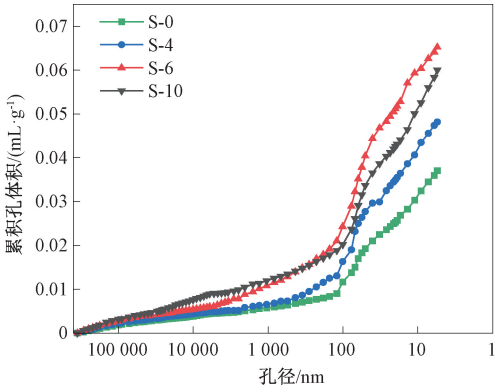


图 10 累积孔径分布曲线

Figure 10 Cumulative pore size distribution curve

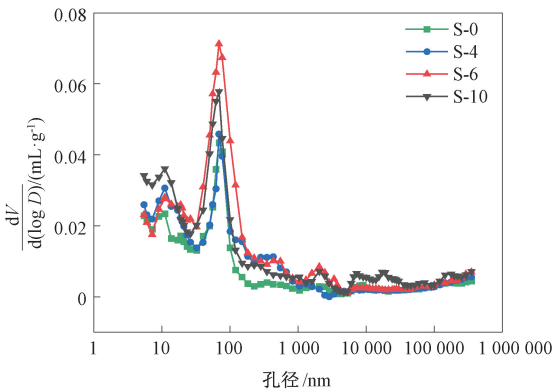


图 11 增量孔径分布曲线

Figure 11 Incremental pore size distribution curve

吴中伟院士将孔分类为无害孔 (<20 nm)、微害孔 (20 ~ 50 nm)、有害孔 (50 ~ 200 nm) 和多害孔 (>200 nm)<sup>[19]</sup>。为进一步量化淤泥对不同孔隙等级影响,绘制了不同浆体样品孔隙占比,如图 13 所示。与基准组相比,>200 nm 孔径的体积分数随淤泥掺量增加而上升,淤泥掺量为 10% 时,多害孔体

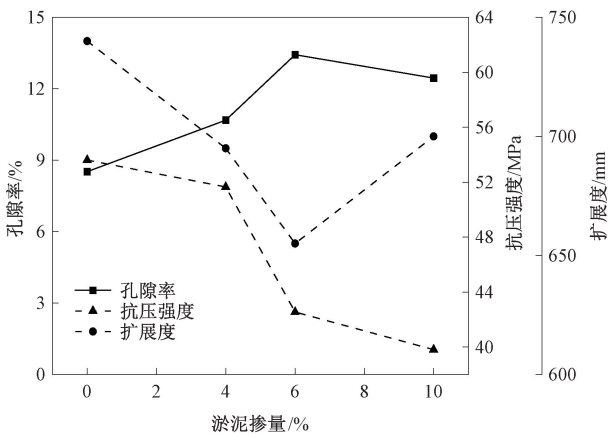


图 12 不同淤泥掺量的孔隙率-抗压强度-扩展度关系

Figure 12 Relationship between porosity, compressive strength and expansibility of different silt content

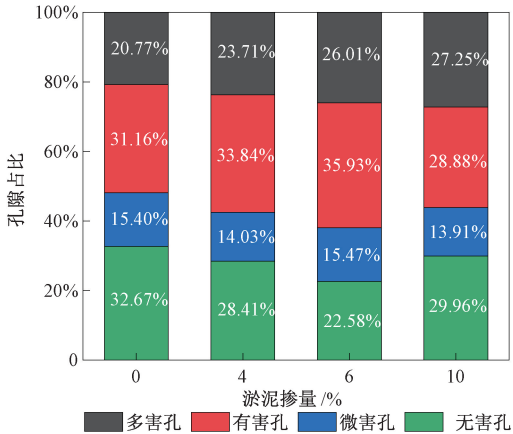


图 13 不同淤泥掺量下孔隙占比

Figure 13 Pore fraction at different silt dosages

积增加了 31%,此时强度降低了 26%(图 6)。正如 Jiang 等<sup>[18]</sup>发现的那样,当淤泥掺量达到 10% 时,随着淤泥含量的增加,有害孔的比例也呈增加的趋势。相比较其余孔径区间,多害孔体积分数是影响浆体宏观力学性能的主要因素<sup>[20]</sup>,符合宏观力学性能的规律。另外,S-10 在 5 ~ 20 nm 的体积分数大于 S-4 和 S-6,这是因为聚羧酸减水剂会改善混凝土的孔结构,随着减水剂掺量增多,无害孔的含量也随之增加<sup>[21]</sup>,与宏观工作性能规律一致。

3 结论

根据本研究对 SSCC 工作性能和力学性能的测试结果,结合孔隙结构的规律,可以得出以下结论。

(1) 淤泥的加入使 SSCC 拌合物流动性降低,对工作性能有较大削弱,坍落扩展度和  $T_{500}$  流动时间随淤泥含量的增加而升高,高度比降低;增加减水剂用量可使 SSCC 拌合物满足规范工作性能要求,减水剂用量与淤泥掺量呈非线性相关关系。

(2) 淤泥等质量替代水泥后抗压强度、劈拉强

度和弹性模量均降低,淤泥替代水平越高,降低幅度越大,当替代率为 10%时,28 d 龄期的抗压强度、劈拉强度和弹性模量分别降低 25.7%, 20.3% 和 41.7%。淤泥替代水泥虽然存在强度损失,但是本研究主要是将 SSCC 应用到强度要求较低(20 MPa)的非结构生态护坡中,而替代 10%的试验结果仍能满足要求。

(3)淤泥的掺入增加了多害孔体积分数,其中多害孔对水泥浆力学性能影响最为关键,直接影响浆体内部孔隙率,随着淤泥替代掺量的增加,多害孔体积分数在基准浆体基础上提升了 14.16%, 25.23%和 31.20%,与 SSCC 的宏观力学性能规律一致。

参考文献:

[1] 杜技能,王中珏,段继琪,等.生态护坡理论及技术研究现状综述[J].水利与建筑工程学报,2023,21(6):211-220.

DU J N, WANG Z J, DUAN J Q, et al. Review of the current status of research on ecological slope protection theory and technology[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2023, 21(6): 211-220.

[2] 何蓓,陈德春,魏文白.生态护坡及其在城市河道整治中的应用[J].水资源保护,2005,21(6):56-58.

HE H, CHEN D C, WEI W B. Ecological bank and its application in regulation of urban rivers[J]. Water Resources Protection, 2005, 21(6): 56-58.

[3] 苏慧,孙玉松,颜建,等.铰链式混凝土砌块生态护坡技术在工程中的应用研究[J].水利与建筑工程学报,2013,11(3):70-72.

SU H, SUN Y S, YAN J, et al. Research on ecological slope protection technology of hinge-type concrete blocks applied in engineering[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, 11(3): 70-72.

[4] 邵琪,沈建霞,钟华林,等.一种用于护岸的混凝土三维生态联锁块[J].水运工程,2017(2):89-93.

SHAO Q, SHEN J X, ZHONG H L, et al. Three-dimensional ecological concrete interlocking block used for revetment[J]. Port & Waterway Engineering, 2017(2): 89-93.

[5] 张从从.新型生态砖护坡对河道边坡稳定性的影响研究[D].扬州:扬州大学,2020.

ZHANG C C. Study on the influence of new ecological brick slope protection on the stability of river slope[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020.

[6] 童丽萍,熊凤鸣,刘伟.黄河淤泥多孔砖砌体正交试验的设计及分析[J].郑州大学学报(工学版),2007,28(3):1-4,8.

TONG L P, XIONG F M, LIU W. Design and analysis of orthogonal experiment for Yellow River silt cellular bricks[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2007, 28(3): 1-4, 8.

[7] 张莎莎,张超,王旭超,等.含泥量对砂类硫酸盐渍土工程特性的影响分析[J].郑州大学学报(工学版),2024,45(1):98-106.

ZHANG S S, ZHANG C, WANG X C, et al. Analysis of the influence of mud content on the engineering characteristics of sand sulfate saline soil[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(1): 98-106.

[8] 高鹏,徐悦清,曹云,等.淤泥基免烧陶粒的制备及性能影响因素[J].硅酸盐通报,2021,40(3):889-899.

GAO P, XU Y Q, CAO Y, et al. Preparation and performance influencing factors of silt-based non-sintered ceramsite[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(3): 889-899.

[9] 陆晓燕,陈宇峰,朱爱东,等.全淤泥陶粒泡沫混凝土砌块墙体的热工性能研究[J].混凝土,2012(12):96-99.

LU X Y, CHEN Y F, ZHU A D, et al. Thermal performance study of the whole sludge ceramsite foam concrete block wall[J]. Concrete, 2012(12): 96-99.

[10] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.自密实混凝土应用技术规程:JGJ/T 283—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical specification for application of self-compacting concrete: JGJ/T 283—2012[S]. Beijing: Architecture & Building Press, 2012.

[11] OKAMURA H, OUCHI M. Self-compacting concrete[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003, 1(1): 5-15.

[12] 中国土木工程学会.自密实混凝土设计与施工指南:CCES 02—2004, [S].北京:中国建筑工业出版社,2004.

China Civil Engineering Society. Guide to design and construction of self-compacting concrete: CCES 02—2004 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2004.

[13] 中国建筑科学研究院.混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2020.

China Academy of Building Science. Standard for mechanical properties of concrete: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2020.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.

[15] JIANG Z Y, ZHANG J T, NIE Z Y, et al. The application of seabed silt in the preparation of artificial algal reefs [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(20): 7279.

[16] BEHNOOD A, GHANDEHARI M. Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures[J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(8): 1015–1022.

[17] ZHANG H B, LIU M P, YU J T, et al. Mechanical and physical properties of silt-based foamed concrete with different silt types[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2022, 47(10): 12803–12815.

[18] JIANG S, XU J X, SONG Y B, et al. Alkali-activated fly ash foam concrete with Yellow River silt: Physico-mechanical and structural properties [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 373: 130879.

[19] 赵铁军, 朱金铨, 冯乃谦. 混凝土孔隙分析中的表征参数[M]//水泥基复合材料科学与技术. 北京: 中国建材工业出版社, 1999: 99–102.  
ZHAO T J, ZHU J Q, FENG N Q. Characterization parameters in concrete pore analysis [M] // *Science and Technology of Cementitious Composite Materials*. Beijing: China Building Materials Industry Press, 1999: 99–102.

[20] 董金美, 肖学英, 李颖, 等. 原料质量配比对盐湖磷酸钾镁水泥性能和微观结构的影响[J]. *材料导报*, 2020, 34(10): 10041–10045.  
DONG J M, XIAO X Y, LI Y, et al. Influences of raw materials mass ratio on properties and microstructure of salt lake magnesium potassium phosphate cement [J]. *Materials Reports*, 2020, 34(10): 10041–10045.

[21] 王可良, 宋芳芳, 刘玲. 聚羧酸减水剂对混凝土结构影响[J]. *材料导报*, 2014, 28(18): 117–120.  
WANG K L, SONG F F, LIU L. Influence of polycarboxylate superplasticizer on concrete structure [J]. *Materials Review*, 2014, 28(18): 117–120.

Ecological Slope Protection Material with Self-compacting Concrete Incorporated with Silt

ZHANG Xinyu<sup>1</sup>, FENG Wei<sup>2</sup>, SUN Xiao<sup>1</sup>, ZHAO Yunpeng<sup>1</sup>, LU Hao<sup>3</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Energy Engineering Group Zhejiang Electric Power Design Institute Company, Hangzhou 310012, China; 3. Institute of Material Structure, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of large labor demand and high transport loss in manual assembly of prefabricated ecological brick slope protection site, and considering the resource utilization of silt waste, a method of using silt as a cementitious material to prepare self-compacting concrete (SCC) for non-structural ecological slope protection was proposed. This approach replaced prefabricated ecological bricks and could reduce costs while increasing efficiency. In this study, the physicochemical properties of silt were analyzed and the effects of silt admixture on working properties, mechanical properties, and pore structure was investigated. The results indicated that the working performance of SCC declined with the addition of silt. To meet SCC specifications and construction requirements, the amount of water reducing agent increased correspondingly with the increase in silt mixing. The mechanical properties of the material decreased as the amount of silt increases. Specifically, the 28-day compressive strength, split tensile strength, and modulus of elasticity were all reduced. This was due to the effect of silt on the pore structure of SCC, which led to an increase in cumulative pore volume and porosity. The results of this study showed that SCC with 10% silt incorporated could reach the strength of C30 at a slump extension of 700 mm, which verified its feasibility as an ecological slope protection material.

**Keywords:** silt; self-compacting concrete; ecological slope protection; workability; strength; pore structure