



海水海砂混凝土在港口工程应急抢修抢建的研究现状与应用展望^{*}

刘靖晗^{1,2}, 高屹¹, 李凌峰¹, 董琪³, 唐廷¹, 张星²

(1. 海军勤务学院, 天津 300450; 2. 91292 部队, 河北 保定 071000; 3. 91053 部队, 北京 100000)

摘要: 港口工程作为现代交通设施的重要组成部分, 在平时或战时可能由于毁坏需要快速抢修或抢建, 以海水和海砂作为建筑原料配制的海水海砂混凝土具有就地取材、早强速凝的特点, 在港口工程应急抢修抢建领域有较高应用价值和发展潜力。结合国内外关于海水海砂混凝土的研究现状, 总结海水和海砂对混凝土性能的影响机理, 分析海水海砂混凝土的抗压强度、凝结速度和工作性能。结果表明: 针对港口工程应急抢修抢建任务的需求特点, 采用天然海水和海砂配制的海水海砂混凝土能缩短工期、降低成本, 海水海砂混凝土在配制时无需淡化处理, 仅需控制海砂取代率在 50% 以内, 或通过预处理降低海砂中贝壳、珊瑚砂等杂质含量, 通过掺加适量的辅助胶凝材料和纳米材料调控海水海砂混凝土初凝和终凝时间, 进一步提升其工程抢修抢建适应能力。相较海水海砂混凝土, 纤维增强复合材料海水海砂混凝土和超高性能海水海砂混凝土力学性能更好、耐久性更强, 在极端环境港口工程抢修抢建领域具有广阔的应用前景。

关键词: 海水海砂混凝土; 港口工程; 抢修抢建; 辅助胶凝材料; 纤维增强聚合物材料; 超高性能海水海砂混凝土

中图分类号: U654; O383

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0062-13

Research status and application prospect of seawater sea-sand concrete in emergency repair and rapid construction for port engineering

LIU Jinghan^{1,2}, GAO Yi¹, LI Lingfeng¹, DONG Qi³, TANG Ting¹, ZHANG Xing²

(1. Naval Logistics Collage of PLA, Tianjin 300450, China;

2. No. 91292 Unit of PLA, Baoding 071000, China; 3. No. 91053 Unit of PLA, Beijing 100000, China)

Abstract: As a crucial component of modern transportation infrastructure, port engineering requires emergency repair and rapid construction during peacetime or wartime due to potential damage. Seawater sea-sand concrete(SSC), which made from seawater and sea-sand, demonstrates significant application value and development potential in emergency port engineering rehabilitation due to its local material availability, early strength development, and rapid setting characteristics. On the basis of the current research status on SSC both domestically and internationally, we summarize the mechanisms by which seawater and sea-sand influence concrete properties, and analyze the key properties of SSC to focus on in emergency repair and rapid construction for port engineering, including compressive strength, setting rate, and workability. The results show that, natural seawater and sea-sand can effectively shorten construction periods and reduce costs for port emergency repair and rapid construction, with SSC preparation requiring no desalination treatment. It is necessary to control the replacement rate of sea-sand within 50%, or to reduce the content of impurities such as shells and coral sand in sea-sand through pretreatment. Incorporating appropriate supplementary cementitious materials and nanomaterials can regulate the initial/final setting time of SSC

收稿日期: 2025-04-01 录用日期: 2025-05-06

*基金项目: 海军勤务学院科研发展基金资助立项项目(2024-17)

作者简介: 刘靖晗(1992—), 男, 博士, 讲师, 从事海洋结构物、港口工程、防护工程研究工作。

and enhance its adaptability for emergency repair and rapid construction. Compared with SSC, fiber reinforced SSC and ultra-high performance SSC exhibit excellent superior mechanical properties and durability, presenting broad application prospects in the emergency repair and rapid construction for port engineering.

Keywords: seawater sea-sand concrete; port engineering; emergency repair and rapid construction; supplementary cementitious material; fiber reinforced polymer material; ultra-high performance seawater sea-sand concrete

传统港口工程混凝土施工需要大量淡水、河砂、矿石等半成品资源。据统计,全球工程施工淡水消耗约占工业淡水用量的 9%^[1];中国作为全球基建大国,在 2024 年砂石产量达到了 168.35 亿 t,占全球砂石产量的 42%。淡水和砂石资源的工程建设消耗不仅需要大量运输成本作为支撑,而且不利于资源的可持续发展。海水、海砂作为储量丰富的自然资源,早在 20 世纪 20 年代,外国学者就开始进行海水海砂混凝土(seawater sea-sand concrete,SSC)的相关研究^[2],并应用于军事和民事工程建筑。港口工程应急抢修和抢建需要大量土工建材,如能“就地取材”采用海水、海砂作为工程应急抢修抢建建材,能够极大节省运输成本、提升抢修抢建作业速度。美国在第二次世界大战期间采用海水、海砂配制的混凝土在西太平洋海岛上建造了军港、机场、道桥等建筑设施,取得了显著成效;日本沿海 90%以上的民用建筑大量使用海砂代替普通砂制备混凝土^[3];据统计,我国在近海 5~50 m 范围、粒度大于中细砂的海砂资源估算为 3 880 亿 m³^[4],海砂资源储备丰富,价格仅为河砂的 1/4~1/3,但国内关于海水海砂混凝土的研究起步相对较晚,因此国内对其的开发利用和应用推广仍落后于世界发达国家。

考虑到海水海砂混凝土具有凝结硬化快、早期强度高、耐久性差的材料特性,将其应用于应战、应急情况下的抢修抢建工程能够规避其劣势,发挥其优势,并且海水、海砂在港口附近可就地取材,能够节省大量的材料成本和运输成本,因此海水海砂混凝土在港口工程抢修抢建领域有着巨大的应用价值和发展潜力。

本文结合近些年国内外关于海水海砂混凝土的研究现状,总结海水、海砂对混凝土性能的影响,着重分析应用于港口工程抢修抢建所需重点

关注的海水海砂混凝土的强度、凝结速度和工作性能,探讨海水、海砂在纤维增强聚合物混凝土、超高性能混凝土和新型胶凝材料混凝土等新型混凝土材料的研究现状和应用展望,为进一步开展海水海砂混凝土在港口工程抢修抢建应用研究提供有益参考。

1 港口工程抢修抢建需求分析

港口内各类工程设施作为国家经济和军事的重要基础,在自然灾害、恐怖袭击或军事打击中可能遭到破坏。港口工程抢修抢建是快速恢复港口内码头、防波堤、护岸等工程设施功能使用的主要途径,须做到急时应急、战时应战^[5]。港口工程抢修抢建涉及港区陆域道路以及码头、防波堤等设施的水上、水下结构,作业区域处于盐雾、潮汐、波浪等不利环境,往往还面临灾后救援通道重建、战时建材运输困难、施工作业时间紧迫等难题,具有工程实施突然、作业工期紧迫、施工环境复杂、材料运输困难等特点。混凝土作为港口工程建设的核心材料,远距离运输时易出现泌水、离析等问题,添加缓凝剂虽然能解决远距离运输问题,但是会延缓混凝土强度发展,与工程快速抢修抢建要求冲突。因此,工程抢修抢建通常采用现场拌制混凝土,可根据工程需要灵活调整混凝土配合比。

港口工程抢修抢建所用混凝土的运输效率和抢修抢建性能直接决定了抢修抢建的速度和效果,普通混凝土(ordinary concrete,OC)存在运输效率低、早期强度发展慢、工作性能较差等不足,无法满足港口工程应急抢修和临时抢建,特别是海岛港口工程应用时,匮乏的淡水资源和高昂的材料运输成本制约着工程抢修抢建的速度和质量,就地采用海水、海砂分别作为混凝土配制所需的水和细集

料，能够极大缩短材料运输的时间和成本，而海水海砂混凝土的抗压强度、凝结速度和工作性能则是影响其在港口工程抢修抢建应用的主要因素。

2 海水和海砂对混凝土性能的影响

2.1 海水的影响

水是混凝土中不可或缺的组分，在混凝土形成过程中起着重要的水化作用和养护作用，海水中的盐含量较淡水更高，见表 1，天然海水中的 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等含量均超过了钢筋混凝土用水标准^[6]，这些过量的离子均会对混凝土性能产生不利影响。氯盐会加速硅酸三钙(C_3S)的水化反应，氯离子浓度的增加会加速氢氧根和铝酸三钙(C_3A)生成水合铝钙氯化物，见式(1)、(2)；水合铝钙氯化物不溶于水，同时会促进 C_3A 的水合反应，见式(3)。在混凝土凝结初期，上述水化产生的水合铝钙氯化物等固相化合物填补了空隙，从而提高了海水拌和混凝土的早期强度，但随着固相化合物的持续增加，就会引起混凝土内部膨胀导致力学强度下降。

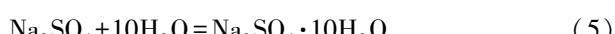
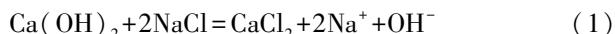
海水中硫酸根离子对混凝土的腐蚀作用可分为化学腐蚀和物理腐蚀，化学腐蚀是指硫酸根离子侵入水泥基材料并与水化产物发生化学反应，硫酸根离子与单硫型水合铝酸钙反应生成腐蚀性产物，主要包括钙矾石($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)和石膏，从而导致混凝土膨胀、开裂和剥落，其腐蚀机制见式(4)。硫酸根离子对混凝土的物理侵蚀，又称盐结晶侵蚀，是由于干湿交替环境中硫酸盐在孔隙中结晶而引起混凝土体积膨胀^[7]，见式(5)、(6)，导致混凝土内部结构恶化，更加有利于生成钙矾石和石膏类膨胀产物。

表 1 天然海水离子含量与混凝土用水标准值

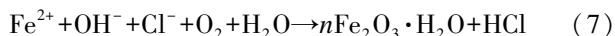
Tab. 1 Seawater ion content and concrete

water standard values g/L

类型	可溶物 含量	Mg^{2+} 含量	Cl^- 含量	SO_4^{2-} 含量
天然海水	28.50~30.30	1.00~1.45	15.78~20.80	1.68~3.42
混凝土用水 标准值	≤ 5.00	≤ 1.20	≤ 1.00	≤ 2.00



海水不仅会影响混凝土的早期强度、凝结速度和耐久性，而且会引发混凝土中钢筋的锈蚀^[8]。海水中的游离氯化物扩散至钢筋表面时会破坏钢筋表面的钝化膜，在钢筋与钝化膜之间形成易溶于水的氯化铁，形成坑蚀，在钢筋腐蚀过程中充当阳极去极化剂，引发钢筋的电化学腐蚀，见式(7)。Dashar 等^[9]使用电化学的方法测试海水混凝土中钢筋的腐蚀情况，结果表明：使用海水配制和养护的混凝土，由于氯离子含量的增加，会导致混凝土中钢筋的腐蚀状态由被动腐蚀转变为主动腐蚀。近些年，国内外学者通常采用纤维增强聚合物材料(fiber reinforced polymer, FRP)筋代替钢筋。经海南省海口市天然海水环境下玄武岩纤维(basalt fiber reinforced polymer, BFRP)增强海水海砂混凝土试验发现，SSC 中 BFRP 的拉伸强度保留率在 50 a 后的预测值能够达到 75.6%^[10]。



综上所述，海水中的氯盐和硫酸盐是影响混凝土早期强度增长和后期耐久性下降的主要因素，虽然天然海水中的离子浓度因海域不同而存在差异，但是海水中过量的氯盐和硫酸盐均会促进混凝土的水化反应，使用海水拌和混凝土有利于加快港口工程应急抢修抢建速度，而其导致的耐久性下降对于应急抢修和临时抢建工程的影响较小。

2.2 海砂的影响

砂是混凝土细集料的主体材料，其级配和质量均会影响混凝土的工作性能。GB/T 14684—2022《建设用砂》^[11]、JGJ 52—2006《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》^[12]、JGJ 206—2010《海砂混凝土应用技术规范》^[13]等标准对混凝

土用砂的质量均有明确要求。海砂的主要成分为石英和长石, 其矿物组成和地质成因与普通混凝土传统细集料的河砂相似^[14], 具有稳定连续的级配曲线, 但是海砂颗粒更细、更光滑, 其力学性能由于内部多孔结构较河砂也更差。

除此之外, Hasdemir 等^[15]认为海砂和河砂表面的纹理差异是影响海砂与水泥黏结强度的主要原因。国内外沿海地区的天然海砂粒级分布与混凝土用砂标准的差异见图 1, 我国陆架海域虽然储备有大量的海砂资源, 但是国内一些地区海砂粒径由于过细, 不满足 JGJ 206—2010《海砂混凝土应用技术规范》Ⅱ区海砂的颗粒级配, 并不适合建筑工程使用。天然海砂中还包含海底淤泥、珊瑚砂、贝壳等杂质, 国内外采用天然海砂替代细集料配制混凝土, 经试验研究发现, 这些杂质会造成混凝土性能不同程度的下降^[16-17]。这是由于贝壳和珊瑚砂虽然质地坚硬, 但是脆性大、表面光滑, 导致黏结力差, 因此 JGJ 52—2006《普通混凝土用砂、石质量及检验办法》对混凝土用海砂的贝壳含量有特别要求。降低海砂中贝壳含量不仅降低混凝土孔隙率、提高混凝土的强度, 而且能够提升混凝土的工作性能、弹性模量和耐久性。天然海砂的材料特性会由于地域不同有细微差异, 朱德举等^[18]、耿健智等^[19]选取山东胶州、福建漳州、广西钦州三地海砂, 完成 15%、25% 和 50% 的取代率下混凝土性能试验(文中有关混凝土配合比掺量均为质量分数, 后文不再赘述), 试验发现不同地域海砂本身的差异对混凝土强度的影响较小, 50% 内的海砂取代率均能够满足工程应用。

与海水类似, 海砂较河砂也包含更多的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等, 根据 GB 55008—2021《混凝土结构通用规范》^[20]要求, 钢筋混凝土用砂的 Cl^- 含量不应大于 0.03%, 预应力混凝土用砂的 Cl^- 含量不应大于 0.01%, 当混凝土用砂的 Cl^- 含量大于 0.003% 时, 水泥的 Cl^- 含量不应大于 0.025%, 拌和用水的 Cl^- 含量不应大于 250 mg/L, 然而全球海水中

Cl^- 的含量通常在 10 000~26 000 mg/L, 无法满足上述要求。国内外通常会对海砂进行脱盐处理, 然后用于混凝土施工, 但是基于上述国内外研究发现, 未经脱盐处理的海砂虽然由于过量氯化物会造成 SSC 耐久性下降, 但是也会导致 SSC 的早期强度更高、凝结速度更快, 能够满足港口工程应急抢修和临时抢建要求。

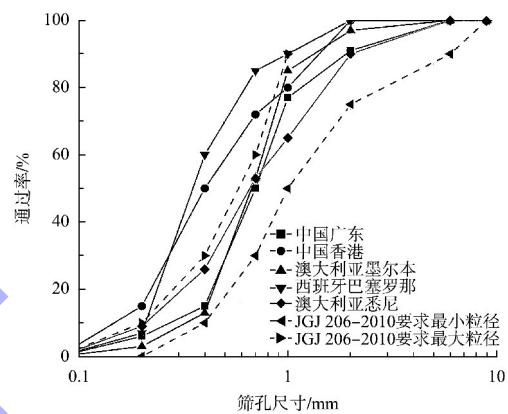


图 1 天然海砂粒径分布曲线和混凝土用砂标准值
Fig. 1 Sea-sand particle size distribution and concrete sand standard values

3 海水海砂混凝土的性能分析

3.1 抗压强度

混凝土的抗压强度是混凝土最重要的力学性能之一, 其中海水海砂混凝土的早期强度以及强度增长速度对于港口工程应急抢修抢建应用尤为重要。国内外学者普遍认为, SSC 的早期抗压强度高于 OC, 且后期抗压强度也与 OC 相差不大。Xiao 等^[21]针对不同强度等级(C20~C50)的 SSC 和 OC 研究抗压强度增长规律, 试验结果表明, SSC 的 7 d 立方体抗压强度比 OC 高 13%~60%, 28 d 抗压强度满足等级要求, 90 和 180 d 抗压强度略微高于 OC; Pan 等^[22]对比不同龄期(3、7 和 28 d) SSC 和 OC 的抗压强度, 同样发现 SSC 在 3 d 抗压强度较 OC 提高了 23.3%, 7 和 28 d 抗压强度分别降低了 1.9% 和 7.6%。海砂是影响 SSC 抗压强度的重要因素之一, 刘伟等^[23]采用珠江口天然海砂作为混凝土细集料, 通过减水剂使得混凝土坍落

度满足(220 ± 20)mm, 得到的C20~C80混凝土的3和28 d抗压强度见图2, 海砂混凝土的早期强度和标准强度均满足使用要求。但是值得注意的是, 一旦海砂中贝壳、珊瑚砂等杂质的含量超过一定限值后会造成SSC抗压强度降低, 甚至导致其早期强度低于OC^[24-25], 分析其原因主要是贝壳、珊瑚砂等成分本身强度较低, 容易造成混凝土内部缺陷, 导致其抗压强度下降。

国内外研究发现, 添加矿物外加剂是优化混凝土内部孔隙、提升混凝土力学性能的重要途径, Karthikeyan等^[26]研究硅灰(silica fume, SF)、矿粉和粉煤灰(fly ash, FA)对SSC抗压强度的影响, 发现矿物外加剂能够有效改善SSC的力学性能, 其中FA对提高SSC后期强度的影响尤为显著; Shi等^[27]研究偏高岭土(metakaolin, MK)对SSC的水合作用和微观结构的影响, 结果表明, 试验配制的SSC较OC 28 d抗压强度提高了52%; Katano等^[28]将高炉矿渣(ground granulated blast-furnace slag, GGBS)、SF、FA等矿物外加剂掺入SSC, 通过试验发现, SSC 7 d和28 d抗压强度较OC分别提高了60%和30%, 其中GGBS能够有效减缓SSC后期强度下降的趋势; 朱寿永等^[29]研究矿粉、FA和MK的不同混合形式对珊瑚砂混凝土强度的影响, 发现MK等矿物外加剂会导致混凝土早期水化更充分, 它们比表面积大, 可填充混凝土内部的微孔结构, 使混凝土结构更加紧凑, 从而提升混凝土的强度。混凝土的养护条件同样对混凝土的强度增长有着重要影响, 特别是港口干湿循环频繁、盐离子多、氧气充分等环境特点。Li等^[30]通过试验发现, SSC在干湿循环条件下的强度变化较小, 能够满足港口工程浪溅区的工程质量要求; Dong等^[31]通过干湿循环水箱模拟测试潮汐干湿循环条件和海水浸泡条件下FRP加固的SSC梁的力学性能, 研究发现6个月以上的SSC梁的破坏模式由混凝土受压破坏转变为剪切破坏, 6和9个月下BFRP加固的SSC梁的承载能力保持率分别为

88%和79%; 周锐等^[32]通过试验研究自然环境和海水浸泡环境对BFRP-SSC的力学性能, 发现经过55 °C海水浸泡60 d后BFRP的黏结强度出现明显下降, BFRP-SSC的抗剪强度下降了33.13%。由此可以发现, 虽然港口工程的养护和工作环境会导致SSC长期的剪切强度和黏结强度下降, 但短期内的强度影响并不大。由此可知, 海砂中贝壳和珊瑚砂等杂质的含量以及矿物外加剂是影响海水海砂混凝土早期抗压强度的主要因素, 养护条件主要影响其长期力学性能。

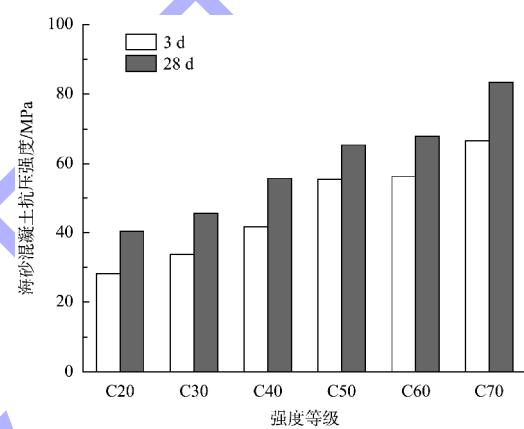


图2 海砂混凝土3和28 d抗压强度

Fig. 2 3 and 28 d compressive strength of sea-sand concrete

3.2 凝结速度

混凝土的凝结速度决定了工程抢修抢建施工工序和起止时间, 抢修抢建工程对混凝土的凝结速度要求较高。Ghorab等^[33]、Sarah等^[34]通过试验发现, 在相同的养护条件下, SSC和OC试样的初始和最终凝结时间见图3, SSC的初始和最终凝结时间较OC试样分别减少了8%~25%和10%~22%, SSC的初凝和终凝时间分别比OC缩短90和135 min。Li等^[35]采用热重分析技术分析海水和淡水与水泥基的水化过程, 结果表明, 采用海水时水泥达到水化峰值的时间较淡水缩短了36%, 放热峰值增加了44%。分析海水、海砂对混凝土凝结时间的内部机理发现, 决定海水和海砂对混凝土凝结时间缩短影响的主要因素是氯化物的浓度^[36], 海水和海砂中的Cl⁻加速了水泥水化, 缩短

了混凝土的凝结时间, 而使用活性较低的辅助胶凝材料代替水泥能够一定程度延迟混凝土凝结时间^[37], 同时提升混凝土的工作性能, 对于工程抢修抢建应用有利有弊。

在此基础上, Saleh 等^[38]通过研究发现, 当 50% 的水泥被 GGBS 和 SF 取代时, SSC 的水化速度反而更快, 分析其原因主要是由于填料效应, 小颗粒 SF 充当水泥颗粒之间的填料, 为水化产物的形成提供成核位点, 从而加快水泥的早期水化速度; 刘哲等^[39]通过试验同样发现, 纳米 SiO_2 同样能够大幅缩短混凝土的终凝时间, 1.5% 的纳米 SiO_2 掺入量能够使 SSC 终凝时间缩短 43%, 3 d 抗压强度提升 110%。由此可知, 通过掺入辅助胶凝材料和纳米材料可以改变 SSC 的初凝时间和终凝时间, 从而配合抢修作业要求, 具体改性材料以及掺入量的选择还需要结合抢修抢建施工工艺进一步研究。

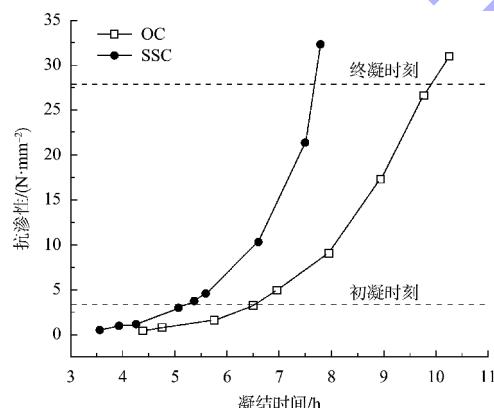


图 3 OC 和 SSC 初凝时间和终凝时间对比
Fig. 3 Initial and final setting time of OC and SSC

3.3 工作性能

混凝土的工作性能影响着混凝土搅拌、运输、浇筑等多个施工工序, 它包括混凝土的流动性、黏聚性、保水性等多个方面的综合性技术指标。港口工程应急抢修抢建施工条件受限、作业环境

复杂, 抢修抢建现场可能缺乏大型设备, 需要人工或简易机械化完成振捣、浇筑、养护等施工工序, 对混凝土的工作性能有更高要求。国内外学者对海水海砂混凝土研究普遍发现, SSC 的流动性较 OC 稍差, 其原因主要是由于海水和海砂中的盐分、海砂中的贝壳和悬浮固体杂质增加了水泥浆的黏度^[40]。Agostini 等^[41]研究 33%、66% 和 100% 海砂替代率的混凝土, 发现随着海砂含量的增加, 混凝土的需水量增加、流动性降低; 肖建庄等^[42]通过研究发现, 混凝土强度对 SSC 坍落度也有一定影响, C20 和 C30 的 SSC 的坍落度较 OC 降低约 20%, 而 C40 和 C50 的 SSC 的坍落度较 OC 提高了 10% 左右。不同配合比的 SSC 和 OC 的坍落度见图 4, 国内外学者通过试验发现海水和海砂造成混凝土坍落度的降低幅度在 18.92%~40.00%^[43], 考虑到过低的坍落度导致 SSC 在损伤部位的抢修质量差、抢建浇筑的混凝土孔隙缺陷多、混凝土密实度不够而强度下降, 因此, 需重点关注 SSC 的坍落度。

贝壳含量是导致 SSC 坍落度下降的重要因素之一^[44], Limeira 等^[45]通过研究发现, 水泥砂浆的坍落度会随着海砂和贝壳含量的增加而降低, 其中贝壳的影响更为显著; 宁博等^[46]在试验中同样发现, 海砂中不规则的贝壳颗粒在与水泥基体混合时增加了摩擦力, 从而降低了 SSC 的坍落度, 但是只要控制海砂中 Cl^- 和贝壳的含量, 其对 SSC 坍落度的影响可以忽略。为了提升 SSC 的工作性能, 通过掺加辅助胶凝材料以及高效减水剂、缓凝剂、引气剂和缓蚀剂等外加剂均可改善 SSC 材料性能, 其中辅助胶凝材料、高效减水剂、缓凝剂和引气剂能够改善其和易性, 高效减水剂能够改善其机械性能, 缓蚀剂能够改善其耐腐蚀性^[47-48]。

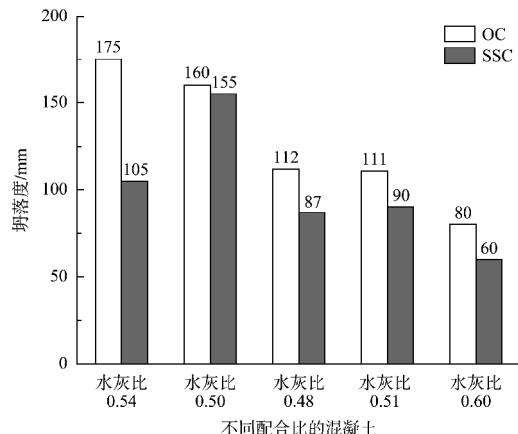


图 4 不同配合比 OC 和 SSC 的坍落度

Fig. 4 Slump of OC and SSC with different proportions

4 新型海水海砂混凝土的应用展望

4.1 纤维增强筋海水海砂混凝土

由于海水、海砂中过量的氯化物会加速 SSC 中钢筋的腐蚀，大幅降低 SSC 的耐久性^[49]。因此，使用不受氯盐腐蚀的连续纤维增强体配制 FRP 海水海砂混凝土，可在提升耐久性的同时，改良其力学性能。与普通钢筋相比，FRP 筋质量更轻、更坚固、耐腐蚀性更佳，能够有效抵抗海水和海砂的腐蚀^[50]。FRP 根据所用纤维类型可分为：碳纤维增强聚合物 (carbon fiber reinforced polymer, CFRP)、BFRP、玻璃纤维增强聚合物 (glass fiber reinforced polymer, GFRP) 和芳纶纤维增强聚合物 (aramid fiber reinforced polymer, AFRP)。Wang 等^[51]通过试验发现，BFRP 筋在 SSC 中的拉伸强度损失速率略高于碱性条件下的 OC，BFRP 筋的抗拉强度损失速率会随着环境温度的升高而升高。针对不同环境温度，Guo 等^[52]通过试验记录在 25、40 和 60 ℃海水和海砂共同作用下 6 个月内 CFRP、BFRP 和 GFRP 筋的性能变化情况，结果表明，SSC 中 CFRP 筋具有最佳的耐久性能，其次是 GFRP 和 BFRP 筋，CFRP 筋的抗拉强度保持率最好，GFRP 和 BFRP 筋次之，在不同混凝土强度中，GFRP 与 C55 和 C80 强度的 SSC 中均表现出更好的 GFRP-SSC 黏结强度，C55 强度下 SSC 在 28 d 后黏结强度较 OC 增加了 15.5%，而 C80 强度下 SSC 黏结强度较 OC 增加 3.2%。

FRP 筋与混凝土的界面黏结性能是影响 FRP 增强混凝土的机械性能和修复性能的重要因素，Jiang 等^[53]、高婧等^[54]通过试验分别研究 BFRP-SSC 和 CFRP-SSC 的黏结性能，发现在相同体积分数下，BFRP 筋和 CFRP 筋的外形对其黏结强度影响很大，更深、更宽的肋纹设计表现出更高的黏结强度，采取不同尺度的 BFRP 配合使用能够取得更好的 SSC 加固效果，较钢筋具有更好的黏结性能。试验表明，纳米纤维可以显著提升 SSC 的劈裂强度和黏结强度，联合使用膨胀剂和 GFRP 能够使 SSC 的初始和失稳黏结韧性最大提高 101% 和 82%^[55]。

除 FRP 筋材质选择外，FRP 筋配筋率和截面面积对 SSC 结构的力学性能也存在显著影响，适当提高配筋率能够提高 SSC 结构的承载性能，减少应变与裂缝宽度，适当减小筋材直径有助于减小裂缝宽度^[56]。Chen 等^[57]通过试验结合数值模拟研究 GFRP-SSC 梁的力学性能，发现 SSC 较 OC 微观结构更为致密，导致 GFRP-混凝土界面处摩擦力更高，海砂 50% 替代率下的 GFRP-SSC 梁显示出更高的抗弯承载力和更好的机械性能^[58]。

4.2 超高性能海水海砂混凝土

超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 作为一种新型水泥基工程材料在国内中环线金沙江路地道整修、G15 嘉浏段拓宽改建、上海国际赛车场方舱医院抢建等工程中多次应用，最快能够实现 2 h 通车使用。超高性能海水海砂混凝土 (ultra-high performance seawater sea-sand concrete, UHPSSC) 是一种以海水和海砂为原材料的新型 UHPC，表现出极低的孔隙率和非连续的孔隙结构，具有优异的力学性能、机械性能和耐久性；同时海水、海砂的加入提升了其早期强度。Li 等^[59]通过试验发现，海水改变了 SF、GGBS 与水泥的相互作用，有利于 UHPSSC 的水化反应，提高其早期强度，3 d 抗压强度增长 1.7%~4.9%，同时 UHPSSC 的低渗透性减少水、氧和氯离子的扩散，有效减轻海盐引起的化学腐蚀，延缓钢筋的腐蚀。UHPSSC 在 28 d 前表现出较高的强度增

长速率, 尤其是在 1~7 d 内强度增长很快, UHPSSC 在 7 d 时抗压强度达到约 100 MPa, 在 28 d 时超过 120 MPa。Teng 等^[60]通过试验已成功制备 28 d 抗压强度超过 180 MPa 的 UHPSSC。相较于 SSC, UHPSSC 超低的水灰比能够减缓强度退化^[61], 通过掺入适量的纤维还可显著提高其韧性^[62]。

海水和海砂的掺入虽然提升了 UHPC 的早期强度, 但是降低其工作性能。国内外学者研究发现, 在 UHPSSC 基础上掺加胶凝材料和纳米材料是改善其工作性能的重要手段, Li 等^[63]使用海砂和 3.5% 浓度氯化钠的模拟海水, 采用水泥、硅灰和粉煤灰作为胶凝材料, 并添加减水剂制备了海水海砂高性能混凝土 (seawater sea-sand high performance concrete, SHPC), SHPC 在实验室和西沙群岛海洋环境使用的 1 a 时间内均表现出很好的力学性能和耐久性能; 朱德举等^[64]在实验室中按照一定配合比的水泥-硅灰-粉煤灰作为胶凝材料配制 UHPSSC, 发现掺入钢纤维或 CFRP 能够提升其力学性能, 但是降低其工作性能; Hussain 等^[65]在常规 UHPSSC 基础上添加了纳米炭黑材料 (nanostructure carbon black, NCB) 作为导电填料, 配制出具有传感能力的超高性能海水海砂混凝土, 发现虽然 NCB 会降低 UHPSSC 的力学性能, 但是具有较好的机械性能和压阻性能, 不仅能够实现工程抢修抢建, 而且能够实现抢修抢建部位的损伤监测和健康评估。

4.3 海水海砂混凝土辅助胶凝材料

辅助胶凝材料 (supplementary cementitious material, SCM) 与水泥配合使用往往能够改善混凝土的工作性能, 与海水、海砂配合使用能够进一步改良其抢修抢建性能。国内外学者通过试验发现, SCM 的使用对 SSC 的力学性能、工作性能和水化反应均有显著影响, 采用 FA、GGBS、MK、SF 等 SCM 代替水泥能够改变混凝土的工作性能, 其替代率通常在 5% ~ 50%, SCM 能够让 SSC 具有更均匀和紧凑的微观结构, 从而提升其流动性、工作性能、机械性能^[66] 和耐久性^[67]。

SCM 对混凝土水化作用的影响明显, 常用的 FA、MK 和 GGBS 会降低混凝土水化热, 其中 FA 会延迟混凝土水化热峰值, MK 会加速混凝土水化热峰值^[68]。余百炼等^[69]采用石灰石粉-偏高岭土复合胶凝材料配制钢筋混凝土, 通过海淡水交汇处的暴露试验、吸附平衡方法和电化学加速钢筋锈蚀方法检验其耐腐蚀性, 结果表明一定掺量的石灰石粉-偏高岭土能够提升混凝土抗氯离子渗透性, 提升其耐腐蚀性。SCM 配合比是影响其改性效果的重要因素, 王德辉等^[70]基于 SCM 对碱硅酸反应的影响, 发现 50% 水泥+25% 偏高岭土+25% 粉煤灰胶凝配合比能够显著细化 SSC 孔结构、降低膨胀、提升其耐久性; Xu 等^[71]在海水珊瑚集料混凝土中掺加碱激活 GGBS, 对其进行显微分析、强度和弹性模量测试, 证实其在远离大陆的海岛工程建设和工程加固中有一定应用价值; Cheng 等^[72]研究 MK 和粒化 GGBFS 以及海水对轻集料混凝土性能的影响, 发现 MK 和 GGBFS 会提升轻骨料混凝土的抗氯离子渗透性和干缩性, 对其耐久性有一定提升。对于 UHPSSC, SCM 的使用不仅能够降低 UHPSSC 的制造成本, 而且能够改良其内部孔结构、提高其致密性, 缓解钢纤维腐蚀问题^[73]。

5 结论

1) 港口工程应急抢修和临时抢建具有工期紧迫、环境复杂、运输困难等突出特点, 采用海水、海砂分别代替淡水和细集料能够极大缩短材料运输的时间和成本, SSC 具有早期强度高、凝结速度快的优势, 有利于快速恢复港口工程功能。

2) 海砂中过量的贝壳、珊瑚砂等杂质是造成 SSC 抗压强度、黏结性能和工作性能下降的主要原因, 采用 50% 以内海砂取代率或对海砂进行预处理等方法能够规避其不利影响, 港口工程的养护环境对 SSC 的短期强度影响不大。

3) 海水和海砂中过量的 Cl⁻ 是造成 SSC 早期

强度高、凝结速度快、耐久性下降、钢筋锈蚀的主要原因，考虑到港口工程抢修抢建的应急和应战需求，无需对海水、海砂进行淡化处理；CFRP、BFRP、GFRP 等 FRP 与 SSC 有着较好的黏结性能，能够满足港口工程抢修抢建的强度和耐久性要求。

4) UHPC 具有力学性能好、耐久性高等优点，使用海水和海砂配制能够进一步提升其早期强度，在极端环境下港口工程应急抢修和临时抢建领域具有广阔应用前景，不过海水和海砂会降低其工作性能和耐久性，需通过掺入外加剂和矿物掺合料的方式改良其工作性能。

5) 掺加适量的 SCM 和纳米材料能够调节 SSC 初凝和终凝时间，同时提升 FRP-SSC、UHPSSC 的工作性能。辅助胶凝材料是影响 SSC 的重要因素之一，SSC 的配合比受现场环境影响大，下一步还需要针对不同港口的环境特点和周围海砂材料特性，通过现场试验，进一步确定 SCM 的选用和配合比，以提升 SSC 的工程应用价值。

参考文献：

- [1] MILLER S A M, HORVATH A, MONTEIRO P J M. Impacts of booming concrete production on water resources worldwide[J]. Nature sustainability, 2018, 1(1): 69-76.
- [2] ABRAMS D A. Tests of impure waters for mixing concrete [J]. ACI structural journal, 1924, 20(2): 442-486.
- [3] GE L C, FENG Z X, SAYED U, et al. Research on the performance of seawater sea-sand concrete: a review [J]. Construction and building materials, 2023, 409: 133921.
- [4] 曹雪晴, 张勇, 何拥军, 等. 中国近海建筑用海砂勘查回顾与面临的问题 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008(3): 121-125.
CAO X Q, ZHANG Y, HE Y J, et al. Retrospect and discussion of surveys for construction sand in China offshore area [J]. Marine geology & quaternary geology, 2008(3): 121-125.
- [5] 刘靖晗, 高屹, 唐廷, 等. 梁板式高桩码头爆炸毁伤效应研究现状及应急抢修方法 [J]. 水运工程, 2025 (4): 45-56.
LIU J H, GAO Y, TANG T, et al. Research status of blasting damage effects and emergency repair methods for beam-slab pile-supported wharf subjected to explosion [J]. Port & waterway engineering, 2025 (4): 45-56.
- [6] 混凝土用水标准: JGJ 63—2006[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
Standard of water for concrete: JGJ 63-2006 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.
- [7] VEIGA K K, GASTALDINI A L G. Sulfate attack on a white Portland cement with activated slag [J]. Construction and building materials, 2012, 34: 494-503.
- [8] DASAR A, PATAH D, HAMADA H, et al. Applicability of seawater as a mixing and curing agent in 4-year-old concrete [J]. Construction and building materials, 2020, 259: 119692.
- [9] DASAR A, HAMADA H, SAGAWA Y, et al. Corrosion evaluation of reinforcing bar in sea water mixed mortar by electrochemical method [J]. Proceedings of the Japan Concrete Institute, 2013, 35(1): 889-894.
- [10] 修林鹏, 常宇飞, 周智, 等. 真实海水环境下海水海砂混凝土内 FRP 筋性能退化研究 [J]. 海南大学学报(自然科学版), 2022, 40(3): 300-308.
XIU L P, CHANG Y F, ZHOU Z, et al. Degradation of FRP bars covered with seawater and sea sand concrete in a real marine environment [J]. Natural science journal of Hainan University, 2022, 40(3): 300-308.
- [11] 建设用砂: GB/T 14684—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
Sand for construction: GB/T 14684-2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [12] 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准: JGJ 52—2006[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
Standard of technical requirements and test method of sand and crushedstone(or gravel) for ordinary concrete: JGJ 52-2006 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.
- [13] 海砂混凝土应用技术规范: JGJ 206—2010[S]. 北京:

- 中国建筑工业出版社, 2010.
- Technical code for application of sea sandconcrete: JGJ 206-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [14] DHONDY T, REMENNIKOV A, NEAZ M. Properties and application of sea sand in sea sand-seawater concrete[J]. Journal of materials in civil engineering, 2020, 32(12): 04020392.
- [15] HASDEMIR S, TUGRUL A, YILMAZ M. The effect of natural sand composition on concrete strength [J]. Construction and building materials, 2016, 112: 940-948.
- [16] QI X B, HUANG Y J, LI X W, et al. Mechanical properties of sea water sea sand coral concrete modified with different cement and fiber types [J]. Journal of renewable materials, 2020, 8(8): 915-937.
- [17] LIU J M, OU Z W, PENG W, et al. Literature review of coral concrete [J]. Arabian journal for science and engineering, 2017, 43(4): 1529-1541.
- [18] 朱德举, 周琳林, 耿健智, 等. 不同地域海砂取代率对混凝土力学性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(11): 237-244.
- ZHU D J, ZHOU L L, GENG J Z, et al. Effect replacement rate of sea sand from different regions on mechanical properties of concrete [J]. Journal of Hunan University (natural sciences), 2022, 49(11): 237-244.
- [19] 耿健智, 朱德举, 郭帅成, 等. 基于不同地域海砂的海水海砂混凝土力学性能试验研究 [J]. 材料导报, 2022, 36(3): 146-153.
- GENG J Z, ZHU D J, GUO S C, et al. Experimental study on the mechanical properties of seawater sea-sand concrete with sea-sands from different regions [J]. Materials reports, 2022, 36(3): 146-153.
- [20] 混凝土结构通用规范: GB 55008—2021 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- General code for concrete structures: GB 55008-2021[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.
- [21] XIAO J Z, QIANG C B, NANNI A, et al. Use of sea-sand and seawater in concrete construction: current status and future opportunities [J]. Construction and building materials, 2017, 155: 1101-1111.
- [22] PAN D, YASEEN S A, CHEN K Y, et al. Study of the influence of seawater and sea sand on the mechanical and microstructural properties of concrete [J]. Journal of building engineering, 2021, 42: 103006.
- [23] 刘伟, 谢友均, 董必钦, 等. 海砂特性及海砂混凝土力学性能的研究 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(1): 15-22.
- LIU W, XIE Y J, DONG B Q, et al. Study on characteristics of dredged marine sand and the mechanical properties of concrete made with dredged marine sand [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33 (1): 15-22.
- [24] CUI M, MAO J Z, JIA D G, et al. Experimental study on mechanical properties of marine sand and seawater concrete [C]//Proceedings of the 2014 International Conference on Mechanics and Civil Engineering. Paris: Atlantis Press, 2014: 106-111.
- [25] YANG E I, YI S T, LEEM Y M. Effect of oyster shell substituted for fine aggregate on concrete characteristics: part I. fundamental properties [J]. Cement and concrete research, 2005, 35(11): 2175-2182.
- [26] KARTHIKEYAN M, NAGARAJAN V. Feasibility study on utilization of marine sand in concrete for sustainable development [J]. Indian journal of geo-marine sciences, 2016, 45(2): 313-318.
- [27] SHI Z G, SHUI Z H, LI Q, et al. Combined effect of metakaolin and sea water on performance and microstructures of concrete [J]. Construction and building materials, 2015, 74: 57-64.
- [28] KATANO K, TAKEDA N, ISHIZEKI Y, et al. Properties and application of concrete made with sea water and un-washed sea sand [C]//Proceedings of Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Coventry: Coventry University, 2013: e172.
- [29] 朱寿永, 水中和, 余睿, 等. 多元矿物掺合料对珊瑚砂混凝土性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36 (12): 3951-3957.
- ZHU S Y, SHUI Z H, YU R, et al. Influence of mineral

- admixtures on the properties of coral sand concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(12): 3951-3957.
- [30] LI Y T, ZHOU L, JIANG M, et al. Experimental study on mechanical property of concrete based on seawater and sea sand [J]. Advanced materials research, 2013, 641/642: 574-577.
- [31] DONG Z Q, WU G, ZHAO X L, et al. Durability test on the flexural performance of seawater sea-sand concrete beams completely reinforced with FRP bars [J]. Construction and building materials, 2018, 192: 671-682.
- [32] 周锐, 朱德举. 玄武岩纤维复材筋海水海砂混凝土梁抗剪性能 [J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(9): 3396-3405.
- ZHOU R, ZHU D J. Shear behavior of BFRP bars reinforced seawater sea-sand concrete beam [J]. Journal of railway science and engineering, 2023, 20 (9): 3396-3405.
- [33] GHORAB H Y, HIAL M S, ANTAR A. Effect of mixing and curing waters on the behaviour of cement pastes and concrete part 2: properties of cement paste and concrete [J]. Cement and concrete research, 1990, 20(1): 69-72.
- [34] SARAH A Y, GHADAH A Y, CHI S P, et al. Influence of seawater on the morphological evolution and the microchemistry of hydration products of tricalcium silicates (C_3S) [J]. Construction and building materials, 2019, 211: 837-846.
- [35] LI Y L, ZHAO X L, RAMAN SINGH R K, et al. Experimental study on seawater and sea sand concrete filled GFRP and stainless steel tubular stub columns [J]. Thin-walled structures, 2016, 106: 390-406.
- [36] WANG X F, DONG C Y, XU S Y, et al. Influence of seawater and sea sand on early-age performance and cracking sensitivity of concrete [J]. Journal of building engineering, 2023, 79: 107811.
- [37] LI H W, WANG R, WEI M W, et al. Mechanical properties and hydration mechanism of high-volume ultra-fine iron ore tailings cementitious materials [J]. Construction and building materials, 2022, 353: 129100.
- [38] SALEH S, LI Y L, HAMED E, et al. Workability, strength, and shrinkage of ultra-high-performance seawater, sea sand concrete with different OPC replacement ratios [J]. Journal of sustainable cement-based materials, 2022, 12(3): 271-291.
- [39] 刘哲, 张基斌, 牟雨龙, 等. 纳米 SiO_2 对海水海砂混凝土性能的影响 [J]. 材料导报, 2023, 37(S2): 232-234.
- LIU Z, ZHANG J B, MU Y L, et al. Influence of nano- SiO_2 on the properties of seawater sea sand concrete [J]. Materials reports, 2023, 37(S2): 232-234.
- [40] CUI Y X, JIANG J F, FU T F, et al. Feasibility of using waste brine/seawater and sea sand for the production of concrete: an experimental investigation from mechanical properties and durability perspectives [J]. Sustainability, 2022, 14(20): 13340.
- [41] AGOSTINI F, SKOCYLAS F, LAFHAJ Z. About a possible valorisation in cementitious materials of polluted sediments after treatment [J]. Cement and concrete composites, 2007, 29(4): 270-278.
- [42] 肖建庄, 张鹏, 张青天, 等. 海水海砂再生混凝土的基本力学性能 [J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(2): 16-22.
- XIAO J Z, ZHANG P, ZHANG Q T, et al. Basic mechanical properties of seawater sea-sand recycled concrete [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2018, 35(2): 16-22.
- [43] LI H W, LIU F, PAN Z Z, et al. Use of supplementary cementitious materials in seawater-sea sand concrete: state-of-the-art review [J]. Construction and building materials, 2024, 425: 136009.
- [44] BRAHIM S, MOHAMMED S, ABDELHAKIM D, et al. The use of seashells as a fine aggregate (by sand substitution) in self-compacting mortar (SCM) [J]. Construction and building materials, 2015, 78: 430-438.
- [45] LIMEIRA J, AGULLO L, ETXEVERRIA M. Dredged marine sand in concrete: an experimental section of a harbor pavement [J]. Construction and building materials,

- 2010, 24: 863-870.
- [46] 宁博, 欧阳东, 温喜廉. 利用海砂制备高性能混凝土试验研究[J]. 混凝土, 2012(1): 88-90, 93.
- NING B, OUYANG D, WEN X L. Experimental study on sea sand high-performance concrete [J]. Concrete, 2012(1): 88-90, 93.
- [47] KHATIBMASJEDI M, RAMANATHAN S, SURANENI P, et al. Compressive strength development of seawater-mixed concrete subject to different curing regimes [J]. ACI materials journal, 2020, 117(5): 1-10.
- [48] SALEH S, MAHMOOD A H, HAMED E, et al. The mechanical, transport and chloride binding characteristics of ultra-high-performance concrete utilising seawater, sea sand and SCMs[J]. Construction and building materials, 2023, 372: 130815.
- [49] HU X L, XIAO J Z, ZHANG K J, et al. The state-of-the-art study on durability of FRP reinforced concrete with seawater and sea sand [J]. Journal of building engineering, 2022, 51: 104294.
- [50] 郭丹, 沈才华, 吕世明, 等. 氯离子侵蚀下混合纤维增强钢筋混凝土损伤规律[J]. 水运工程, 2022(2): 30-36, 45.
- GUO D, SHEN C H, LYU S M, et al. Damage law of mixed fiber reinforced concrete under chloride ion erosion[J]. Port & waterway engineering, 2022(2): 30-36, 45.
- [51] WANG Z K, ZHAO X L, XIAN G j, et al. Tensile properties of basalt-fibre reinforced polymer (BFRP) bars within seawater and sea sand concrete environment [C]// Proceedings of the 7th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2016). Hong Kong: [s. n.], 2016: 791-796.
- [52] GUO F, AL-SAADI S, SINGH RAMAN R K, et al. Durability of fiber reinforced polymer (FRP) in simulated seawater sea sand concrete (SWSSC) environment [J]. Corrosion science, 2018, 141: 1-13.
- [53] JIANG K D, WANG X, BEN Q G, et al. Bond behavior of BFRP bars in ultra-high performance seawater sea-sand concrete reinforced by non-metallic fibers [J]. Engineering structures, 2024, 318: 118699.
- [54] 高婧, 范凌云. CFRP 筋与海水海砂混凝土粘结性能试验与机制分析[J]. 复合材料学报, 2022, 39(3): 1194-1204.
- GAO J, FAN L Y. Experiment on bond performance between CFRP bar and seawater sea sand concrete and its working mechanism [J]. Actamateriae compositae sinica, 2022, 39(3): 1194-1204.
- [55] 林敏, 吴海英, 张湘伟, 等. 基于深度学习的纳米纤维海水海砂混凝土粘结机理分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 1147-1151.
- LIN M, WU H Y, ZHANG X W, et al. Analysis of the bonding mechanism of nanofiber seawater and concrete based on deep learning [J]. Building structure, 2022, 52(S2): 1147-1151.
- [56] 吴沛宗, 江振兴, 杨泽铭, 等. FRP 增强海水海砂混凝土结构研究进展[J]. 混凝土, 2024(8): 48-54, 62.
- WU P Z, JIANG Z X, YANG Z M, et al. Research progress of FRP reinforced seawater sand concrete structure[J]. Concrete, 2024(8): 48-54, 62.
- [57] CHEN Z P, HUANG Y M, ZHOU J, et al. Parametric study, finite element analysis, and load capacity calculation for flexural behaviour of seawater and sea sand concrete beams reinforced with GFRP bars [J]. Structures, 2024, 63: 106424.
- [58] KE L Y W, WANG P, LEUNG C K Y. Early-age microstructure and hydrothermal-aged bond performance at glass fiber reinforced polymer (GFRP) bar - seawater sea-sand concrete (SWSSC) interface [J]. Construction and building materials, 2024, 433: 136709.
- [59] LI H, FARZADNIA N, SHI C J. The role of seawater in interaction of slag and silica fume with cement in low water-to-binder ratio pastes at the early age of hydration[J]. Construction and building materials, 2018, 185: 508-518.
- [60] TENG J G, XIANG Y, YU T, et al. Development and mechanical behaviour of ultra-high-performance seawater sea-sand concrete[J]. Advances in structural engineering,

- 2019, 22(6): 3100-3120.
- [61] JIANG K D, WANG X, CHEN Z Y, et al. Effect of constituent content on mechanical behaviors of ultra-high performance seawater sea-sand concrete[J]. Construction and building materials, 2022, 351: 128952.
- [62] LIU X H, CHEN Z X, YU Z C, et al. A review on ultra-high performance seawater sea sand concrete: hydration, microstructure and properties [J]. Construction and building materials, 2024, 438: 136945.
- [63] LI T Y, LIU X Y, ZHANG Y M, et al. Preparation of sea water sea sand high performance concrete (SHPC) and serving performance study in marine environment [J]. Construction and building materials, 2020, 254: 119114.
- [64] 朱德举, 李龙飞, 周琳林, 等. 超高性能海水海砂混凝土的组成设计与纤维增强增韧[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(1): 128-136.
- ZHU D J, LI L F, ZHOU L L, et al. Composition design and fiber reinforcement of ultra-high performance seawater and marine sand concrete[J]. Journal of Hunan University (natural sciences), 2023, 50(1): 128-136.
- [65] HUSSAIN A, YU T, ZOU F X. Nanocarbon black based ultra-high-performance seawater sea-sand concrete (UHPSSC) with self-strain sensing capability [J]. Cement and concrete composites, 2025, 157: 105895.
- [66] LIU J, AN R, JIANG Z L, et al. Effects of w/b ratio, fly ash, limestone calcined clay, seawater and sea-sand on workability, mechanical properties, drying shrinkage behavior and micro-structural characteristics of concrete[J]. Construction and building materials, 2022, 321: 126333.
- [67] EBEAD U, LAU D, LOLLINI F, et al. A review of recent advances in the science and technology of seawater-mixed concrete[J]. Cement and concrete research, 2022, 152: 106666.
- [68] LIU W W, JIANG Z L, LU M Y, et al. Effects of seawater, NaCl, and Na₂SO₄ solution mixing on hydration process of cement paste[J]. Journal of materials in civil engineering, 2021, 33(5): 04021057.
- [69] 余百炼, 王雷冲, 水中和, 等. 海水-淡水交汇处石灰石粉-偏高岭土复合胶凝材料体系的护筋性[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(10): 3244-3251.
- YU B L, WANG L C, SHUI Z H, et al. Rebar-protecting properties of limestone powder-metakaolin cementitious materials system under seawater-freshwater intermixed environment[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(10): 3244-3251.
- [70] 王德辉, 张奇志, 龚青南, 等. 辅助性胶凝材料对海水海砂混凝土碱硅酸反应特性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(11): 2955-2965.
- WANG D H, ZHANG Q Z, GONG Q N, et al. Influence of supplementary cementitious materials on Alkali-Silicate reaction characteristics of seawater and sea sand concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(11): 2955-2965.
- [71] XU W Y, YANG S T, XU C J, et al. Study on fracture properties of alkali-activated slag seawater coral aggregate concrete [J]. Construction and building materials, 2019, 223: 91-105.
- [72] CHENG S K, SHUI Z H, SUN T, et al. Effects of seawater and supplementary cementitious materials on the durability and microstructure of lightweight aggregate concrete[J]. Construction and building materials, 2018, 190: 1081-1090.
- [73] WANG J H, HUANG Y. Mechanical properties and hydration of ultra-high-performance seawater sea-sand concrete (UHPSSC) with limestone calcined clay cement (LC3) [J]. Construction and building materials, 2023, 376: 130950.

(本文编辑 王璁)