

引文格式:张凯建,王琳. FRP 筋增强海水海砂混凝土材料与构件耐久性能综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(2): 17-30.

ZHANG Kaijian, WANG Lin. Review on durability of FRP bar reinforced seawater sea-sand concrete materials and components[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(2): 17-30.

DOI:10.19815/j.jace.2023.08055

FRP 筋增强海水海砂混凝土材料与构件耐久性能综述

张凯建, 王琳

(福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘要:将纤维增强复合材料(FRP)应用在海水海砂混凝土(SSC)中可避免氯离子引起的钢筋腐蚀,但 FRP 增强海水海砂混凝土(FRP-SSC)结构在恶劣环境中仍存在耐久性问题。依据现有文献研究成果,梳理了海洋环境下 FRP 筋、SSC 以及 FRP-SSC 构件的耐久性。结果表明:在混凝土的碱性环境以及海水海砂中盐离子的共同作用下,FRP 筋的力学性能退化程度与变异性提高,FRP 筋与 SSC 的黏结强度降低;海水和海砂中盐离子的引入加快了水化反应,提高了 SSC 的密实度与耐久性,提高了 SSC 的耐久性;海洋环境作用导致 FRP 筋力学性能退化及 FRP 筋/钢-FRP 复合筋(SFCB)与 SSC 的黏结强度降低,削弱了 SSC 构件承载力,改变了构件破坏模式,SSC 构件承载力随再生粗骨料(RCA)取代率提高而降低;建议以 FRP 筋与 SSC 力学性能变异性量化和基于时变可靠度的构件设计方法作为今后进一步研究的方向。

关键词:FRP 筋;耐久性;海水海砂混凝土;破坏模式转变;钢-FRP 复合筋

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)02-0017-14

Review on durability of FRP bar reinforced seawater sea-sand concrete materials and components

ZHANG Kaijian, WANG Lin

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China)

Abstract: The application of fiber reinforced polymer (FRP) in seawater sea-sand concrete (SSC) can avoid the corrosion of steel bars induced by the chloride ion, but FRP reinforced seawater sea-sand concrete (FRP-SSC) structures still have durability issues in harsh environments, which is one of the hot and difficult issues of current research. Based on the existing literature, the durability of FRP bars, SSC and FRP-SSC components in marine environments was sorted out. The results show that under the combined effect of the alkaline environment of concrete and salt ions in seawater and sea-sand, the degradation and variability of mechanical properties of FRP bars increase, and the bonding strength of FRP bars and SSC decreases. The addition of salt ions in seawater and sea-sand accelerates the hydration reaction, thus improving the compactness and durability of SSC. The effect of marine environment leads to the deterioration of the mechanical

properties of FRP and the reduction of bonding strength between FRP/steel-FRP composite bars (SFCB) and SSC, which weakens the bearing capacity of SSC components and changes the failure mode of SSC components. The bearing capacity of SSC components decrease with the increase of recycled coarse aggregate (RCA) replacement rate. It is suggested that the quantification of variability of mechanical property of FRP bars and SSC, and the time-dependent reliability-based design methods of components should be taken as the direction of further research in the future.

Key words: FRP bar; durability; seawater sea-sand concrete; transformation of failure mode; steel-FRP composite bar

Author resume: ZHANG Kaijian(1989-), male, PhD, associate professor, E-mail: kaijian. zhang@fzu. edu. cn.

0 引言

相关统计显示,2022 年中国商品混凝土总产量达 $26.51\times10^8\text{ m}^3$ ^[1]。天然砂石开采造成的资源枯竭与环境问题均不可忽视^[2]。全球混凝土制备的年耗水量达 $16.6\times10^8\text{ m}^3$,约占全球工业年耗水量的 18%,建筑业庞大的耗水量加剧了淡水资源危机^[3]。

开发利用海水、海砂是缓解淡水与河砂资源紧缺的有效途径之一^[4]。据统计,中国近海拥有约 $388\times10^8\text{ m}^3$ 的海砂储备量,多为中砂且颗粒级配良好,适合作为建筑用砂^[5-6]。海水、原状海砂在传统钢筋混凝土结构中的应用受阻,归因于海水、原状海砂中氯盐破坏了钢筋钝化膜,钢筋加速腐蚀导致结构使用寿命缩短。中国在淡化海砂方面仍存在市场监管机制不完善与淡化技术不成熟问题,滥用海砂导致的“海砂屋”问题限制了淡化海砂的应用推广^[7]。纤维增强复合材料(FRP)拥有轻质高强、耐腐蚀性能良好等优点^[8-9],可作为钢筋替代品^[10]应用于海水海砂混凝土(SSC)中。

FRP 筋在服役期间存在的耐久性问题是阻碍其广泛应用的主要原因之一^[11]。湿热条件下,混凝土包裹形成的强碱性(pH 值约为 13)环境^[12-13]将导致 FRP 筋受强碱作用概率增大。因此 FRP 筋在碱性环境下的耐久性问题是当前研究的热点与难点之一^[14]。本文以 FRP 增强海水海砂混凝土(FRP-SSC)结构的工程背景为基础,系统归纳了 FRP 筋、SSC 以及 FRP-SSC 构件在海洋环境中的耐久性研究现状。

1 FRP 筋长期力学性能退化

1.1 海水海砂混凝土中 FRP 筋的力学性能退化

研究人员将 FRP 筋浸泡于模拟 SSC 孔隙液中,观察其力学性能的退化情况。Wang 等^[15]研究

发现,玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)筋在 25、40、55 ℃ 的 SSC 孔隙液浸泡 84 d 后,其层间剪切强度保留率分别为 87.0%、15.2%、0.2%。Su 等^[16]研究发现,BFRP 在 SSC 孔隙液中碱离子和盐离子共同作用下,其抗拉强度退化加剧。由于海水和海砂中存在较高含量的氯化物,BFRP 中的铝、铁和镁离子与其发生化学反应,导致 BFRP 筋的退化速率加快^[17],故 BFRP 筋的耐久性劣于玻璃纤维增强复合材料(GFRP)筋。GFRP 筋经 3 000 h 冻融循环及在 SSC 孔隙液中暴露 90 d 后,抗弯、抗压和抗拉强度保留率分别为 65%、52%、63%^[18]。图 1 为不同环境下 FRP 筋抗拉强度保留率曲线。可以看出,随着暴露时间和温度的增加,FRP 筋力学性能退化程度有所提高^[14,19-21]。

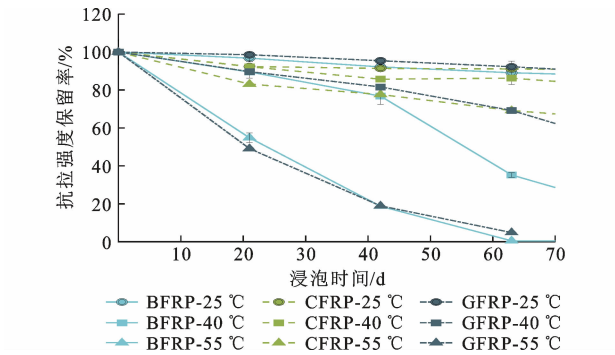


图 1 不同环境下 FRP 筋抗拉强度保留率^[14,20-21]
Fig. 1 Tensile strength retention rate of FRP bars in different environments^[14,20-21]

此外,研究人员将 FRP 筋内置于混凝土(或者砂浆)后,再将试件浸泡于溶液环境中,以模拟 FRP 筋的实际服役环境。Lu 等^[22-24]指出,SSC/砂浆包裹厚度越大碱性越强,BFRP 筋退化程度加剧。Morales 等^[25]研究发现,内置于海水混凝土中的 GFRP 筋抗拉强度在 25 ℃ 和 71% 相对湿度环境(FC)中降低 1.3%~14%,在海水环境(SW)中降低

26.5%~30%。Liang 等^[26]根据预测模型,得到 BFRP 筋在高温高湿条件下服役 50、100、200 年后,抗拉强度折减系数分别为 0.77、0.75、0.73。相关研究结果^[27-28]表明,碱溶液对 BFRP 筋强度的影响大于海水和自来水。图 2 为溶液浸泡下 BFRP 筋的 FTIR 结果。可以看出,波长 $1\ 040\text{ cm}^{-1}$ (代表树脂中的酯键)处峰强度越大则 FRP 筋树脂降解程度越低,而碱溶液中的峰强度明显低于海水与自来水中的峰强度,树脂基体的水解是 FRP 筋性能退化的原因之一。

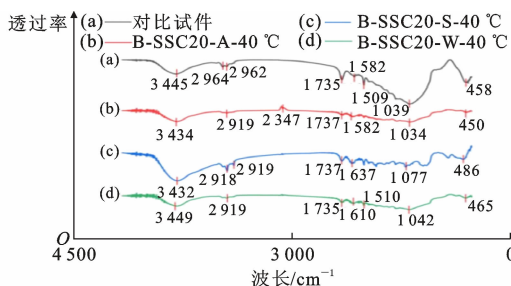


图 2 溶液浸泡下 BFRP 筋的 FTIR 结果^[27]

Fig. 2 FTIR results of BFRP bars soaked in solution^[27]

众多学者^[12,15,22,26,29]根据获得的试验数据研究发现,长期暴露下 FRP 筋的强度均出现较大程度的退化。SSC 孔隙液浸泡方面,Xian 等^[12]根据 Arrhenius 理论将 GFRP 筋浸泡在碱性溶液中以模拟 SSC 环境,预测结果显示 GFRP 筋在室温条件下浸泡 50 年后,其抗拉强度保留率仅为 24.5%。Wang 等^[15]预测了 BFRP、GFRP 和 CFRP 筋在 SSC 溶液中的长期层间剪切强度性能,预测结果比现场数据更为保守。SSC 包裹环境方面,Lu 等^[22]研究发现,内置于 SSC 中的 FRP 筋在海水长期浸泡下的抗拉强度退化呈现明显的尺寸效应,保护层厚度为 10 mm 的 FRP 筋在海水中浸泡 10 年后的抗拉强度保留率为 38.6%,而保护层厚度为 20 mm 的 FRP 筋仅浸泡 10 年后抗拉强度下降为 0。修林鹏^[29]通过预测得到,腐蚀环境中暴露 50 年后,内置于 SSC 中的 BFRP 筋力学性能退化程度均大于 GFRP 筋。

FRP 筋强度的退化属于多因素共同作用,可以从物理作用与化学反应两个角度进行解释,众多学者已展开相关研究。Wang 等^[15]研究发现,CFRP 筋在 pH 值为 12.7、13.4 的 SSC 环境中暴露 84 d 后,吸湿率分别为 0.92% 和 4.31%。Guo 等^[17]研究发现,GFRP 筋在 pH 值为 12.7、13.4 的 SSC 环境中暴露 180 d 后,吸湿率分别为 0.27% 和 1.10%。Yi 等^[30]同样发现类似规律,即 FRP 筋吸水率随

SSC 造成的碱性程度增大而提高。SEM 扫描结果显示^[17,30],SSC 内部较大的 pH 值明显影响 FRP 筋降解,主要表现为 FRP 筋纵向表面腐蚀严重、缠绕层溶解、纤维间树脂溶解、树脂-纤维界面结合层严重损伤。综上,FRP 筋强度退化的物理作用原因主要是水分子进入 FRP 筋的树脂基体,破坏了筋材结构的完整性与界面结合状态^[31]。化学反应原因主要是 SSC 造成了碱性环境, OH^- 入侵筋材内部,造成三方面损伤:① OH^- 与树脂基体的交联节点处发生化学反应而断裂,引起了树脂网状结构损伤,最终导致树脂降解而失去宏观力学性能;② OH^- 破坏纤维中的 Si-O 键,导致纤维损伤;③与纤维失效类似, OH^- 破坏了纤维-树脂界面处 Si-O 键,纤维与树脂之间的连接被破坏,从而影响二者的协同工作^[21,32]。其中,第三种损伤被认为是最主要原因^[33-34]。

1.2 FRP 筋力学性能变异性

材料的变异性会影响构件承载力的变异性,只有进行材料变异性的分析,才能定量描述构件承载力的概率模型及进行相关可靠性计算来评价构件的承载力。本文中 FRP 筋的变异性指的是不同环境作用后,其强度出现不同程度的降低,因此抗拉强度呈现高度离散性。计算 FRP 筋退化后抗拉强度的平均值与标准差,将标准差与平均值的比值定义为 FRP 筋的变异系数。树脂基体在水分子作用下会发生水解,纤维-树脂界面与纤维分子结构在 OH^- 离子渗透作用下会存在脱黏、破坏等^[35-37],上述微/细观损伤导致 FRP 在湿热环境和碱性环境下的长期性能离散性增大。Liu 等^[38]采集了 1 900 余个 FRP 力学性能试验数据,发现试验数据呈高度离散(图 3)。FRP 筋内置于 SSC 时,其层间剪切强度变异系数最大值为 15.1%^[15]。SSC 环境和持续荷载耦合作用下,FRP 筋抗拉强度变异系数最大值可达 12.5%^[39]。Morales 等^[25]研究发现,嵌入海水混凝土中 GFRP 筋在海洋环境作用下,抗拉强度呈明显的统计学差异。Ramanathan 等^[40]研究发现,GFRP 筋嵌入混凝土并在海洋环境中服役 18 年后,GFRP 筋水平剪切强度变异系数为 15.0%。Duo 等^[41]归纳了 557 组试验数据,发现盐溶液和碱溶液中 GFRP 筋变异系数随温度升高呈增大趋势,最大值分别为 23.3% 和 21.3%。

如上所述,FRP 筋替代钢筋能够避免氯离子腐蚀问题,但 SSC 包裹形成的碱性环境引起 FRP 筋出现纤维 Si-O 键断裂、树脂基体水解、纤维-树脂界面黏结力降低,最终造成其力学性能退化及变异

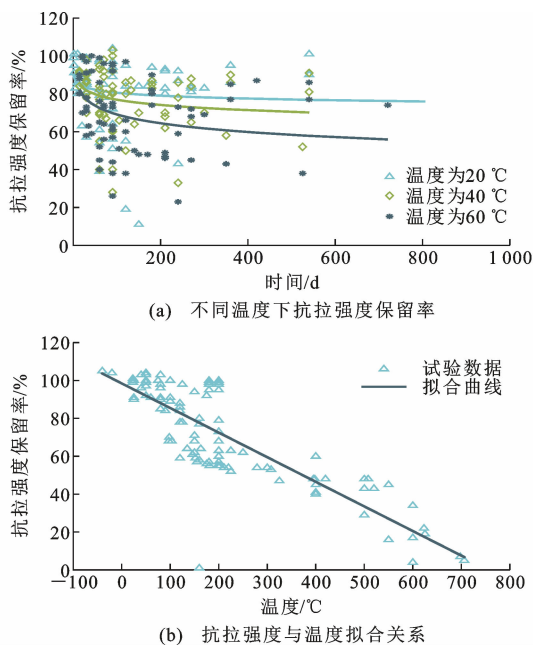


图3 FRP筋抗拉强度保留率^[38]

Fig. 3 Tensile strength retention rate of FRP bars^[38]

性增大。因此,为提高FRP筋在海洋环境中服役的耐久性,降低混凝土碱度是一种可行的解决方案。未来的工作应在保证SSC具有合适性能的基础上,进一步探究低碱度SSC的制备以及FRP筋在低碱度SSC中力学性能变异性的量化,以促进FRP筋在海洋工程中的广泛应用。

2 海水海砂混凝土耐久性能

SSC通常在高温、高湿、高盐等恶劣环境中服役,且海水、海砂中也存在着大量盐分,因此,SSC耐久性问题受到众多学者关注。本文主要从抗硫酸盐腐蚀、抗氯盐侵蚀、抗碳化三方面对SSC耐久性能进行介绍。

2.1 抗硫酸盐腐蚀

硫酸盐腐蚀是海洋环境中影响SSC耐久性的主要因素之一,对SSC的力学性能存在不利影响。硫酸盐溶液浸泡条件下,SSC抗硫酸盐腐蚀系数最大降低1.4%^[42]。与浸泡条件相比,硫酸盐浸烘循环腐蚀条件下的淡化海砂混凝土(DSC)动弹性模量退化程度增大^[43]。

除不利作用之外,海水与海砂的掺入能够提高混凝土抗硫酸盐腐蚀能力^[44-46]。掺入海水、海砂浸泡7、28、90 d后SSC的抗压强度损失率为0.28%~8.82%,而掺入淡水、河砂情况下SSC的强度降低0.84%~9.90%^[46]。Cui等^[47]研究发现,决定硫酸盐离子渗透性的大毛细孔数量随盐度增加而减少,

水灰比为0.65的盐海水砂混凝土(BSC)、SSC、普通混凝土(OC)的大毛细孔贡献度分别为1.34%、4.92%、6.20%,即BSC与SSC抗硫酸盐腐蚀能力高于OC(图4)。归因于较细海砂制备的混凝土具有较低的渗透性,且海水促进了Friedel盐的形成,进而降低了混凝土的孔隙率^[46]。

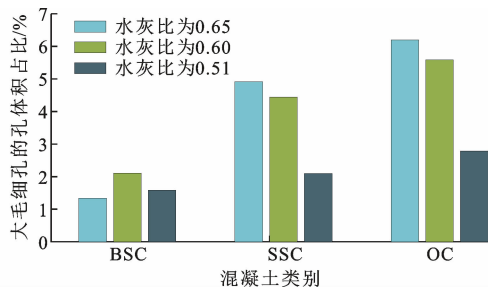


图4 混凝土大毛细孔的孔体积占比^[47]

Fig. 4 Percentage of pore volume of large capillaries in concrete^[47]

2.2 抗氯盐侵蚀

SSC中存在的大量氯盐会导致混凝土的耐久性发生不可逆转的破坏。Yin等^[48]基于模型预测结果,得到海砂混凝土(SC)氯离子扩散系数随水灰比或每立方米耗水量的增加而增大,随标准固化时间的增加而降低。王云^[49]测定了海砂混凝土在0%、3%、6%、8%浓度NaCl溶液中的氯离子6 h迁移电量,发现随着环境氯离子浓度的提高,3、7、14、28 d迁移电量的最大提高幅度分别为20.5%、19.5%、54.5%、73.0%。刘斯凤等^[50]研究了水胶比以及不同氯离子含量海砂对混凝土抗氯离子性能的影响,发现水胶比增大导致SC的电通量提高。

海水与海砂的掺入能够提高SSC抗氯离子侵蚀能力。Ting等^[46]研究发现,硅锰熔渣海水海砂混凝土(Mix6)、石灰石海水海砂混凝土(Mix5)的90 d电通量分别比相应普通混凝土(Mix2、Mix1)低11.6%、9.2%(图5)。这是因为海水对胶凝材料水化的加速作用促进了混凝土孔结构细化,较细的海砂颗粒能够提高混凝土的密实度,由此提高了混凝土抗氯离子侵蚀能力^[46,51]。

2.3 抗碳化性能

混凝土碳化是指水泥水化产物与环境中的CO₂发生化学反应,生成CaCO₃或者其他物质,导致混凝土碱性降低。蒋真等^[52]对SC与OC开展加速碳化试验发现,OC抗碳化能力在试验初期高于SC,随碳化时间增加,二者抗碳化能力趋于相似。SSC碳化后生成的CaCO₃填补了水泥基体和骨料之间的空隙(图6),覆盖在原始混凝土表面,使混凝土更

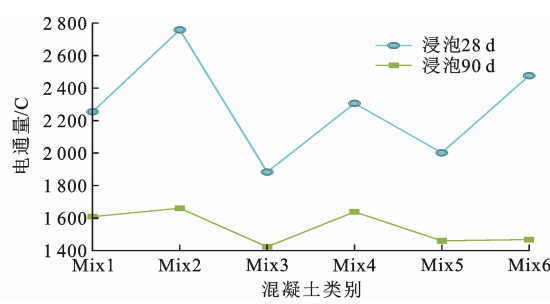
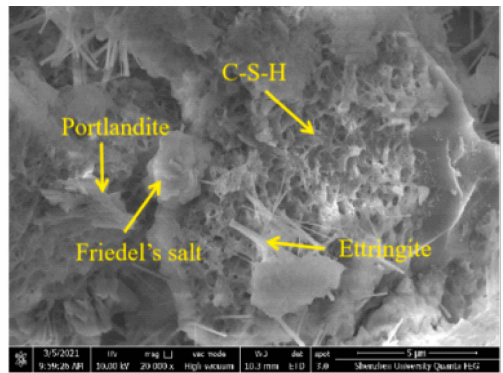
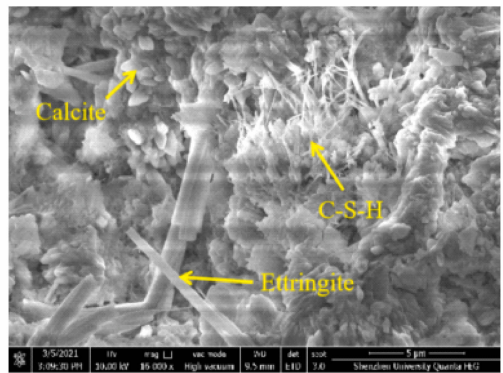


图 5 氯离子电通量^[46]

Fig. 5 Electric flux of chloride ions^[46]



(a) 未碳化的海水海砂混凝土



(b) 碳化后的海水海砂混凝土

图 6 海水海砂混凝土的 SEM 图像^[54]

Fig. 6 SEM images of SSC concretes^[54]

加密实,进而提高了混凝土的抗压强度与抗碳化性能^[53-54]。

海水、海砂的掺入对混凝土性能也有有利的一面。Dang 等^[55]研究表明,加速碳化 182 d 后 SC 的抗压强度与弹性模量相较于 DSC 分别提高 5.2%、5.3%,碳化系数降低。Liu 等^[56]试验结果表明,疏浚海砂中氯化物降低了水泥浆体的孔隙率,使混凝土的碳化程度降低至原来的 50%~80%。相关机理可以总结为:海水、海砂能够优化混凝土的孔径分布,氯离子促进 Friedel 盐的形成,在混凝土的孔隙中起到填充作用,细化了混凝土的微观结构,从而提高混凝土抗碳化性能^[55,57]。

较细海砂提高了混凝土抗渗透性,海水、海砂携带的氯离子与水泥水化产物化学或物理结合形成 Friedel 盐,填充了混凝土的孔隙,提高了混凝土的密实度,是 SSC 抗硫酸盐、氯盐腐蚀以及抗碳化性能提高的主要原因。此外,SSC 碱性环境是 FRP 筋力学性能退化的重要原因之一,而 SSC 碳化可减少 SSC 内部 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量,降低 SSC 的碱度,能够延缓 FRP 筋在 SSC 中力学性能的退化。因此,有必要对 SSC 的碳化性能开展进一步研究,以期 FRP 筋与 SSC 结合的推广应用提供参考。

3 FRP 筋与海水海砂混凝土黏结性能退化

黏结性能是 FRP 筋与 SSC 组合使用的关键因素,决定了混凝土结构在扭转、剪切、弯曲等情况下的力学性能。卢亦焱等^[58]研究发现,FRP-混凝土界面断裂能服从正态分布,随海水腐蚀时间增加,界面黏结性能可靠度指标降低速度减缓。Dong 等^[59-60]研究发现,环境作用导致 BFRP 与混凝土的黏结破坏模式由 BFRP 与混凝土界面的剪切破坏转变为 BFRP 表面剥落。通过预测得到在干燥、潮湿、水分饱和条件下暴露 50 年后,二者黏结强度保留率分别约为 93%、78%、47%^[59]。各材料在不同环境下的黏结强度保留率如图 7 所示(WD 表示干湿循环,I 表示海水浸泡,SFCB 为钢-FRP 复合筋)。可以看出,FRP 筋与混凝土的黏结强度在海水浸泡环境中呈降低趋势^[60-62]。吕柏行^[63]研究发现,海水浸泡后 BFRP 筋树脂强度降低,削弱了 BFRP 筋与混凝土之间的摩擦力,导致二者的黏结强度降低。Chang 等^[64]研究发现,海水浸泡后 GFRP 与 SSC 黏结性能退化是含有水分子和氢氧根离子的孔隙溶液对筋肋破坏引起的。荷载作用放大了 FRP 筋缺陷,有害物质加速进入筋材内部,导致二者黏结性能退化加剧(图 8)。Kazemi 等^[65]研究发现,海水浸泡和海水干湿循环 250 d 后,海水混凝土与 GFRP 筋黏结强度分别降低 20%和 8%。于志力等^[61]预测 GFRP 筋在海洋环境、室外环境及室内环境服役 50 年后,极限黏结强度退化因子分别是 0.56、0.35 与 0.21。吴云飞等^[62]根据预测模型同样发现高湿度对黏结性能不利,潮湿海洋环境、一般室外环境及室内环境暴露 50 年后,BFRP 筋与 SSC 的极限黏结强度分别降低 68.58%、42.85%、25.15%。

一些研究表明,海水与海砂的掺入能够改善二者的黏结性能。BFRP 筋与 SSC 早期黏结强度较

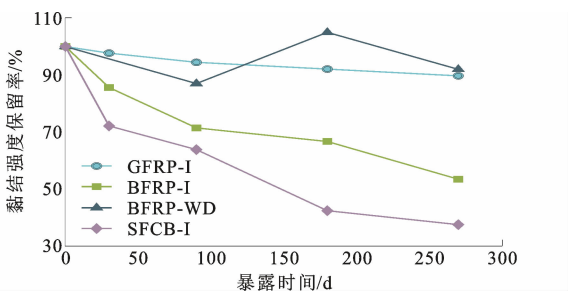


图 7 不同环境下黏结强度保留率^[60-62]

Fig. 7 Retention rate of bonding strength in different environments^[60-62]

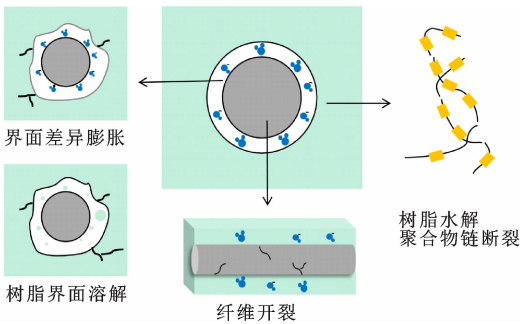


图 8 GFRP 筋肋黏结性能退化^[38]

Fig. 8 Bonding performance deterioration of GFRP ribs^[38]

高,这是因为 SSC 中的氯离子促进了早期水化反应速率^[63]。海水中的微粒填充了 SSC 孔隙,导致二者黏结强度提高^[66]。但也有研究得出相反结论,Soares 等^[67]研究发现,海水的使用总体上削弱了 GFRP 筋与混凝土的黏结性能。海砂中贝壳等杂质的存在对黏结强度的影响不利^[68]。

综上,海洋环境长期作用下,FRP 筋纤维变得松散,树脂基体的水解不利于树脂与纤维之间的应力传递(筋材内部结构受 OH⁻ 与水分子破坏),导致 FRP 筋与 SSC 黏结性能呈退化趋势。而 FRP 筋与 SSC 在海洋环境长期作用下的黏结性能是影响构件耐久性及安全性的重要因素,因此需要进一步研究提高二者黏结强度的因素,如筋材表面粗糙程度、尺寸、外加黏结剂种类等。

4 FRP 筋/SFCB 海水海砂混凝土构件长期性能

4.1 FRP 筋海水海砂混凝土构件

FRP 筋性能优良,作为新型结构材料被广泛用于 SSC 中,其组合形式丰富多样,本文主要对 FRP-SSC 梁与柱进行介绍。

FRP-SSC 梁方面,Dong 等^[69]研究发现,BFRP 筋混凝土梁在海洋环境中暴露 6、9、12 个月后,极限

承载力分别降低 22%、33%、42%。海洋环境长期作用后,FRP-SSC 梁的破坏模式逐步由混凝土压碎破坏转变为剪压破坏^[70-71]。原天^[72]研究发现随龄期增长,自然暴露环境下的 FRP-SSC 梁破坏模式由适筋破坏(FRP 筋拉断的同时梁顶部混凝土压碎或接近压碎值)转变为少筋破坏,极限荷载和开裂荷载降低。Dong 等^[73]研究发现,浸泡和干湿循环环境中试验 6 个月和 9 个月后,BFRP-SSC 梁的破坏模式由弯剪区混凝土压碎破坏代替了中间纯弯曲段混凝土压碎破坏,梁极限承载能力最大降幅达 30%。李炳男^[74]研究发现,GFRP-SSC 梁的破坏模式在海水浸泡与荷载耦合作用下发生变化,GFRP 筋的拉断破坏代替了受压区混凝土压碎破坏。陈泽贤^[75]、Chang 等^[76]研究发现,FRP-SSC 梁的破坏模式随持续荷载增加发生转变,由混凝土破坏转变为 FRP 筋破坏,持续荷载加剧了氯离子扩散作用,导致 FRP 筋与 SSC 黏结强度退化^[75]。Lu 等^[77]研究发现,BFRP-SSC 梁在模拟海水和自来水中浸泡 180 d 后,极限承载力分别下降 37.1% 和 25.8%,BFRP 筋表面退化引起 BFRP 筋与混凝土界面黏结强度降低,导致抗弯承载力下降。图 9 为 BFRP 筋海水海砂混凝土梁在海水中的破坏模式^[78]。

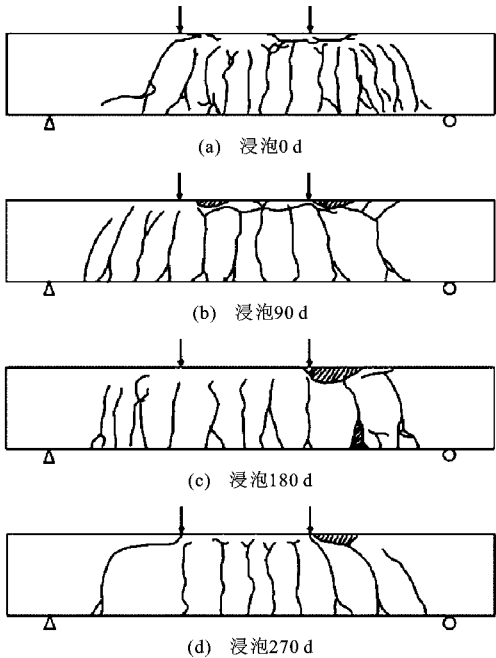


图 9 BFRP 筋海水海砂混凝土梁在海水中的破坏模式^[78]

Fig. 9 Failure modes of SSC beams reinforced with BFRP bars in sea water^[78]

FRP-SSC 柱方面,Zhou 等^[79]研究发现,海水中氯离子质量浓度从 0% 增加到 1.57% 的条件下,FRP 约束海水混凝土柱的抗压强度退化程度可达

40%。安迪^[80]探究了配筋类型与布置方式对混凝土柱耐久性的影响,发现海水干湿循环后,配置 BFRP 筋与钢筋的混凝土柱极限荷载降低, SFCB 混凝土柱表现出良好的耐久性。薛禹^[81]研究发现,随着溶液浸泡时间的增加, GFRP 筋混凝土柱的极限承载力降低,破坏形态由轴压破坏变为劈裂破坏;相较于溶液浸泡环境,耦合作用下的 GFRP 筋混凝土柱的承载力先下降后提高。图 10 为环境作用下 GFRP 筋混凝土柱极限荷载曲线,其中 B&S 代表 BFRP 筋与钢筋, L 代表荷载。孙丽等^[82]研究发现,高浓度海水环境浸泡 180 d 后, GFRP 筋、钢筋混凝土柱的极限承载力分别降低 13.5%、29.8%。

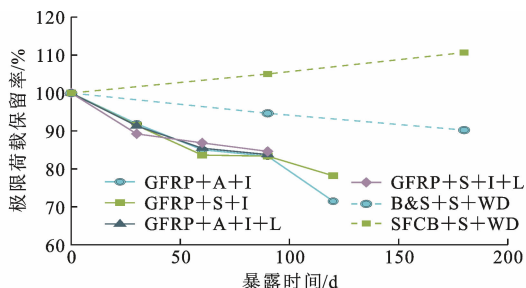


图 10 环境作用下 GFRP 筋混凝土柱极限荷载^[80-81]

Fig. 10 Ultimate load of GFRP reinforced concrete columns under environmental action^[80-81]

4.2 SFCB 海水海砂混凝土梁

相较于钢材, FRP 具有抗拉强度较高、延性较差及耐久性良好等特点, 已有学者组合两种材料以实现性能的互补。图 11 为混凝土包裹 SFCB 试件示意图^[83], 其中钢-FRP 复合筋(SFCB)内芯为普通钢筋, 外芯为纵向连续纤维, 结合了钢筋与 FRP 筋的优点, 具有替代钢筋在 SSC 构件中使用的可能性。Dong 等^[60, 69-70, 84-86]模拟了实际海洋环境中 SFCB 与 SSC 的黏结性能以及 SFCB-SSC 梁的承载力。相较于海水浸泡, 干湿循环加剧了 SFCB 与混凝土黏结强度的退化^[60, 84]。而氯离子的引入则能够改善干湿循环环境中 SFCB 与海砂混凝土的黏结性能^[84]。图 12 为 SFCB 海水海砂混凝土梁极限荷载, 其中 SFCB-WD* 代表 SFCB-海砂混凝土梁。可以看出, 随着龄期增长, 干湿循环以及海水浸泡后 SFCB-SSC 梁的极限荷载出现下降^[70, 84]。SFCB-SSC 梁在 50 °C 海水中浸泡 9 个月后, SFCB 抗拉强度降幅可达 50.6%^[70], 导致梁破坏模式由受压区混凝土压碎破坏向 SFCB 破裂转变^[69-70]。李炳男^[74]研究发现, 对于海水浸泡后的 SFCB-SSC 梁, SFCB 表层纤维拉断破坏代替了 SFCB 混凝土压碎。Han

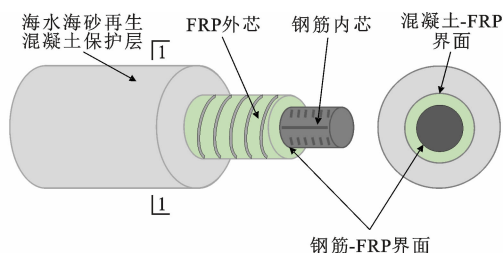


图 11 混凝土包裹 SFCB 试件示意图^[83]

Fig. 11 Schematic diagram of concrete-wrapped SFCB^[83]

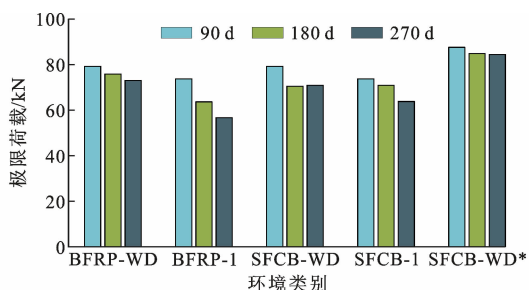


图 12 SFCB 海水海砂混凝土梁极限荷载^[70, 84]

Fig. 12 Ultimate load of SFCB reinforced SSC beams^[70, 84]

等^[87]研究发现, 剪力滞后导致的应变分布不均问题对 SFCB 中钢筋与 FRP 协同工作造成负面作用, 提高配筋率能够改善 SFCB-SSC 梁初始刚度较低的缺陷。相较于 FRP 筋混凝土梁, SFCB-SSC 梁拥有更强的裂缝控制能力^[87]。相较于钢筋混凝土梁, 采用等刚度设计方法设计的 SFCB-SSC 梁屈服前具有相似的破坏模式和相同的荷载-挠度性能, 承载能力提高了 14.3%~54.5%, 延性系数提高了 47.0%~189.1%^[88]。

综上所述, FRP 筋混凝土构件在海洋环境中服役后, 由于 FRP 筋性能退化及其与 SSC 的黏结强度降低(FRP 筋退化机理见 1.1 节), 导致破坏模式改变, 承载能力下降。因此, 量化 FRP 筋力学性能变异性对 SSC 构件承载力的退化和随机性的影响具有重要意义。SFCB 混凝土/SSC 构件延性和屈服后刚度表现良好; 混凝土孔隙碱性溶液导致表面 FRP 层降解速率加快, 从而引起 SFCB 力学性能呈退化趋势, 进而改变了构件破坏模式, 削弱了构件承载力。

5 FRP 增强海水海砂混凝土构件拓展

利用海水、海砂、再生粗骨料(RCA)生产海水海砂再生混凝土(SSRAC)被认为是解决天然砂石及淡水资源短缺问题的有效途径之一, 也是建筑垃圾资源化利用的有效措施^[4, 89]。力学性能方面, 由于 RCA 表面附着残留砂浆及孔隙率较大, 相较于

SSC, SSRAC 的 7、28、90、180 d 立方体抗压强度降低 2.8%~29.5%, 弹性模量降低 3.0%~21.2%, 劈裂抗拉强度降低 3.7%~19.1%^[90]。谢钢^[91]、Huang 等^[92]、Ying 等^[93]研究发现, RCA 的掺入总体上降低了 SSRAC 的立方体抗压强度以及弹性模量。RCA 对裂纹特征和扩展、轴向变形有显著影响, 导致混凝土应力-应变曲线的下降段脆性增加^[92-93]。耐久性方面, 江明超^[94]研究发现海水浸泡 180 d 内, SSC 的轴心抗压强度增长率随 RCA 增加而减小, 归因于 RCA 的掺入削弱了界面过渡区强度, 进而造成混凝土强度的损失。Lu 等^[95]研究发现, RCA 的高取代率对 SSRAC 力学性能不利, 海水长期浸泡下, RCA 吸水量的增加导致混凝土压裂量增加。

RCA 的掺入影响了 SSC 的各项性能, 因此学者针对 RCA 对 SSRAC 构件受力行为的影响展开试验研究。Younis 等^[96]的试验结果显示, GFRP-SSRAC 梁的承载能力比普通钢筋混凝土梁高约 25%, 而变形与开裂性能则明显劣于普通钢筋混凝土梁。Zhang 等^[97-98]以 OC 和工程水泥基复合材料 (ECC) 为外壳约束 SSRAC 柱进行研究发现, 轴压和偏压作用下 OC-SSRAC 柱与 ECC-SSRAC 柱的承载力基本相似, 但 ECC-SSRAC 柱性能强于 OC-SSRAC 柱。谢钢^[91]、徐焕林^[99]研究发现, 混凝土强度等级为 C30 时, RCA 取代率的提高导致 GFRP 管约束 SSRAC 长柱、GFRP 管约束 SSRAC 短柱极限承载力下降 (图 13), 海水、海砂的掺入导致 GFRP 管约束 SSRAC 长柱极限环向应变降低。Li 等^[100-101]研究发现, RCA 的掺入导致 CFRP 管、双层管约束 SSRAC 柱的极限承载力下降, 海水、海砂的掺入可改善 RCA 对混凝土早期强度造成的不利影响。Huang 等^[102]研究发现, 随着 RCA 取代率的提高, GFRP 管约束海砂再生混凝土的承载力降低, 峰值应变提高, 海砂能够弥补 RCA 对混凝土造成的不利影响。

仇亚东^[103]研究发现, SFCB-SSRAC 梁的短期抗弯性能较好, 二次刚度稳定, 混凝土中碱性环境和氯盐加速了 SFCB 树脂的老化, 使得树脂溶胀进而削弱了筋材性能, 导致纤维和树脂界面间的黏结力下降。Zhou 等^[104]研究发现, SFCB-SSRAC 梁的破坏模式分为两种: 一是内部钢筋屈服后外围 FRP 破裂, 然后混凝土压碎; 另一种是钢筋屈服后混凝土压碎, 而外围 FRP 未破裂。SFCB-SSRAC 梁的峰值载荷与屈服载荷之比为 1.5~3.1, 具有显著的屈服

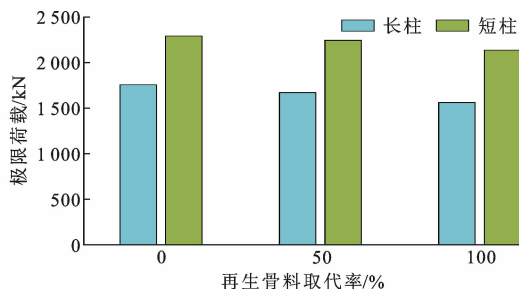


图 13 GFRP 管海水海砂再生混凝土柱极限荷载^[91,99]

Fig. 13 Ultimate load of GFRP tube seawater and sea-sand recycled reinforced concrete columns^[91,99]

后行为; 与普通混凝土梁相比, SSRAC 梁的抗弯承载力降低, 但延性相当。

RCA 自身的缺陷导致构件极限承载力随 RCA 取代率的增加而降低, 而海水、海砂的掺入则一定程度弥补了 RCA 对构件性能的劣化作用。海洋环境作用下, SSRAC 的耐久性能研究较少, FRP-SSRAC 构件耐久性降低的原因之一是筋材内部缺陷的出现加速侵蚀物质的入侵, 引起其力学性能退化, 导致其与 SSRAC 黏结强度下降。此外, 国内外关于 SF-CB-SSRAC 构件的研究几乎空白, 诸多方面研究需要进一步拓展。

6 结 语

(1) 由于海水海砂中存在的氯离子与混凝土包裹形成的碱性环境, 纤维-树脂界面黏结性能退化以及树脂基体水解程度增加, 导致 FRP 筋力学性能退化与变异性提高。暴露时间、温度与 SSC 孔隙液碱性程度的增加加剧了 FRP 筋力学性能退化。选用耐腐蚀性能良好的 FRP 筋以及制备低碱度的 SSC, 能够延缓 FRP 筋的退化速率。

(2) 海水、海砂的掺入对提高混凝土耐久性有利, 这是因为海水、海砂中盐离子的存在促进了 Friedel 盐的形成, 膨胀类软物质填充了混凝土的孔隙, 改善了混凝土的微观结构, 较细海砂的掺入提高了混凝土抗渗透性。

(3) FRP 筋与 SSC 早期黏结强度的提高归因于盐离子促进 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的溶解和析出, 促进了早期水化反应。海洋环境长期作用下, FRP 筋与混凝土黏结性能的退化主要是 FRP 筋树脂强度降低与筋肋损伤造成的。通过掺入合适外加黏结剂、增大 FRP 筋表面粗糙程度等措施能够提高 FRP-SSC 构件的耐久性与安全性。

(4) 海洋环境作用下, 影响 FRP-SSC 构件破坏模式以及极限承载力的因素包括: FRP 筋力学性能

的退化、FRP筋与SSC黏结强度的降低。SFCB力学性能退化,龄期增长导致SFCB-SSC梁屈服后二次刚度降低,极限承载力削弱,破坏模式由受压区混凝土压碎破坏转变为SFCB表层纤维拉断破坏。

(5) RCA取代率的提高削弱了SSRAC构件承载力,海水和海砂的掺入能够改善RCA对黏结性能、构件承载力造成的不利影响。SSRAC耐久性能与FRP-SSRAC构件受力行为的研究较少。

(6) 建议在以下方面开展进一步研究:①FRP筋、SSC力学性能变异性量化及其对SSC构件承载力的退化和随机性的影响;②SFCB中外包FRP与钢筋内芯的腐蚀演变过程中两者的交互作用及其对SFCB力学性能退化的影响规律,SFCB-SSC构件破坏模式转变的影响机制、构件承载力退化发展过程和相关设计方法;③海水海砂理化特性、RCA质量的不稳定性对水化反应与SSRAC内部微观结构长期性能发展规律的影响,以及基于时变可靠度分析的FRP筋环境影响折减系数取值。

参考文献:

References:

- [1] 中国混凝土网. 2022年中国各省市商品混凝土产量及市场分析[EB/OL]. (2023-06-05). <http://www.cnrmc.com/news/show.php?itemid=123557>. China Concrete Network. Production and market analysis of commercial concrete in China's provinces and cities in 2022[EB/OL]. (2023-06-05). <http://www.cnrmc.com/news/show.php?itemid=123557>.
- [2] BENDIXEN M, BEST J, HACKNEY C, et al. Time is running out for sand[J]. Nature, 2019, 571(7763): 29-31.
- [3] USAMA E, DENVID L, FEDERICA L, et al. A review of recent advances in the science and technology of seawater-mixed concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2022, 152: 106666.
- [4] 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.
- [5] 曹雪晴, 张勇, 何拥军, 等. 中国近海建筑用海砂勘察回顾与面临的问题[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(3): 121-125.
CAO Xueqing, ZHANG Yong, HE Yongjun, et al. Retrospect and discussion of surveys for construction sand in China offshore area[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(3): 121-125.
- [6] 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 Wei, XIE Youjun, DONG Biqin, 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.

- [7] 冯鹏, 王杰, 张泉, 等. FRP与海砂混凝土组合应用的发展与创新[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(12): 13-18.

FENG Peng, WANG Jie, ZHANG Xiao, et al. Development and innovation on combining frp and sea sand concrete for structures[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(12): 13-18.

- [8] 徐新生, 郑永峰. FRP筋力学性能试验研究及混杂效应分析[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(6): 705-710.

XU Xinseng, ZHENG Yongfeng. Hybrid effect analysis and experimental study on mechanical properties of the FRP bar[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(6): 705-710.

- [9] 王磊, 毛亚东, 陈爽, 等. GFRP筋与珊瑚混凝土黏结性能的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2): 286-292.

WANG Lei, MAO Yadong, CHEN Shuang, et al. Experimental research on bond performance between GFRP bars and the coral concrete[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2): 286-292.

- [10] 李趁趁, 王英来, 赵军, 等. 高温后FRP筋纵向拉伸性能[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(6): 1076-1081.

LI Chenchen, WANG Yinglai, ZHAO Jun, et al. Longitudinal tensile properties of FRP bars after high temperature[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(6): 1076-1081.

- [11] 董志强, 吴刚. FRP筋增强混凝土结构耐久性性能研究进展[J]. 土木工程学报, 2019, 52(10): 1-19, 29.

DONG Zhiqiang, WU Gang. Research progress on durability of FRP bars reinforced concrete structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(10): 1-19, 29.

- [12] XIAN G J, LI H, SU X S. Water absorption and hygrothermal ageing of ultraviolet cured glass-fiber reinforced acrylate composites[J]. Polymer Composites, 2012, 33(7): 1120-1128.

KARBHARI V M, ABANILLA M A. Design factors, reliability, and durability prediction of wet layup carbon/epoxy used in external strengthening[J]. Composites Part B: Engineering, 2007, 38(1): 10-23.

- [14] 王自柯. FRP筋在模拟海水-海砂混凝土孔溶液浸泡

- 下的耐久性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- WANG Zike. Study on the durability performances of fiber reinforced polymer (FRP) bars exposed to simulated seawater and sea sand concrete pore solution [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [15] WANG Z K, ZHAO X L, XIAN G J, et al. Durability study on interlaminar shear behaviour of basalt-, glass- and carbon-fibre reinforced polymer (B/G/CFRP) bars in seawater sea sand concrete environment[J]. Construction and Building Materials, 2017, 156:985-1004.
- [16] SU C, WANG X, DING L N, et al. Effect of carbon nanotubes and silica nanoparticles on the durability of basalt fiber reinforced polymer composites in seawater and sea sand concrete environment[J]. Polymer Composites, 2021, 42(7):3427-3444.
- [17] 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.
- [18] BAZLI M, ZHAO X L, JAFARI A, et al. Durability of glass-fibre-reinforced polymer composites under seawater and sea-sand concrete coupled with harsh outdoor environments[J]. Advances in Structural Engineering, 2021, 24(6):1090-1109.
- [19] AHMED A, GUO S C, ZHANG Z H, et al. A review on durability of fiber reinforced polymer (FRP) bars reinforced seawater sea sand concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 256:119484.
- [20] ZHAO Q, ZHANG D X, ZHAO X L, et al. Modelling damage evolution of carbon fiber-reinforced epoxy polymer composites in seawater sea sand concrete environment[J]. Composites Science and Technology, 2021, 215:108961.
- [21] 赵 齐, 张大旭, 赵晓林, 等. 环氧基 GFRP 筋在海水海砂混凝土孔溶液环境下的损伤演化试验与模型研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(9):25-41.
- ZHAO Qi, ZHANG Daxu, ZHAO Xiaolin, et al. Experimental and modelling studies on damage evolution of epoxy-based GFRP bars in pore solution environment of seawater sea-sand concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(9):25-41.
- [22] LU Z Y, LI Y C, XIE J H. Durability of BFRP bars wrapped in seawater sea sand concrete[J]. Composite Structures, 2021, 255:112935.
- [23] 陆中宇, 李永超, 谢建和. 海水海砂混凝土内玄武岩纤维增强复材筋性能退化研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(9):18-21.
- LU Zhongyu, LI Yongchao, XIE Jianhe. Study on the degradation of BFRP bars wrapped in seawater sea sand concrete [J]. Industrial Construction, 2019, 49(9):18-21.
- [24] LU Z Y, SU L Z, TAN S R, et al. Long-term shear performance of bare and cement mortar-coated BFRP bars in corrosive environments[J]. Construction and Building Materials, 2020, 237:117658.
- [25] MORALES C N, CLAURE G, EMPARANZA A R, et al. Durability of GFRP reinforcing bars in seawater concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 270:121492.
- [26] LIANG X Z, YIN S, HU C S. Environmental reduction factors of BFRP bars in coral aggregate concrete in high temperature and high humidity environments [J]. Structures, 2021, 33:3017-3024.
- [27] XIE J H, LI Y C, LU Z Y, et al. Effects of immersion in water, alkaline solution, and seawater on the shear performance of basalt FRP bars in seawater-sea sand concrete[J]. Journal of Composites for Construction, 2022, 26(2):4021071.
- [28] 李文超, 周广发, 温福胜, 等. 混凝土环境中 GFRP 筋性能衰退的规律及机理[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(2):156-162.
- LI Wenchao, ZHOU Guangfa, WEN Fusheng, et al. Degradation law and mechanism of GFRP bars in concrete environment[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(2):156-162.
- [29] 修林鹏. 真实海水环境下水海砂混凝土内的 FRP 筋耐久性[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- XIU Linpeng. Durability of FRP bars in seawater sand concrete under real seawater environment [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [30] YI Y, GUO S C, LI S, et al. Effect of alkalinity on the shear performance degradation of basalt fiber-reinforced polymer bars in simulated seawater sea sand concrete environment[J]. Construction and Building Materials, 2021, 299:123957.
- [31] WU W W, HE X J, YANG W R, et al. Durability and microstructure degradation mechanism of FRP-seawater seasand concrete structures: a review [J]. Construction and Building Materials, 2023, 391:131825.
- [32] EL-HASSAN H, EL MAADDAWY T. Microstructure characteristics of GFRP reinforcing bars in harsh environment[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 2019:1-19.
- [33] WU G, DONG Z Q, WANG X, et al. Prediction of

- long-term performance and durability of BFRP bars under the combined effect of sustained load and corrosive solutions[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2015, 19(3): 4014058.
- [34] KIM H Y, PARK Y H, YOU Y J, et al. Short-term durability test for GFRP rods under various environmental conditions [J]. *Composite Structures*, 2008, 83(1): 37-47.
- [35] CHEN Y, DAVALOS J F, RAY I. Durability prediction for GFRP reinforcing bars using short-term data of accelerated aging tests[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2006, 10(4): 279-286.
- [36] SEN R, MULLINS G, SALEM T. Durability of E-glass/vinylester reinforcement in alkaline solution [J]. *ACI Structural Journal*, 2002, 99(3): 369-375.
- [37] AL-SALLOUM Y A, EL-GAMAL S, ALMUSALLAM T H, et al. Effect of harsh environmental conditions on the tensile properties of GFRP bars[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 45(1): 835-844.
- [38] LIU T Q, LIU X, FENG P. A comprehensive review on mechanical properties of pultruded FRP composites subjected to long-term environmental effects[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 191: 107958.
- [39] WANG Z K, ZHAO X L, XIAN G J, et al. Effect of sustained load and seawater and sea sand concrete environment on durability of basalt-and glass-fibre reinforced polymer (B/GFRP) bars [J]. *Corrosion Science*, 2018, 138: 200-218.
- [40] RAMANATHAN S, BENZECRY V, SURANENI P, et al. Condition assessment of concrete and glass fiber reinforced polymer (GFRP) rebar after 18 years of service life[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2021, 14: e00494.
- [41] DUO Y Y, LIU X G, LIU Y, et al. Environmental impact on the durability of FRP reinforcing bars [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 43: 102909.
- [42] ZHANG Z H, SANG Z Q, ZHANG L Y, et al. Experimental research on durability of concrete made by seawater and sea-sand [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 641/642: 385-388.
- [43] 苏卿, 陈艾荣. 硫酸盐对淡化海砂混凝土的腐蚀研究[J]. *混凝土*, 2013(1): 21-23, 27.
SU Qing, CHEN Airong. Research on corrosion to washed sea sand concrete attacked by sulfate[J]. *Concrete*, 2013(1): 21-23, 27.
- [44] 韩世文. FRP-钢筋复合筋海水海砂混凝土梁的受弯性能及设计方法 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- HAN Shiwen. Flexural behavior and design method of seawater sea-sand concrete beam reinforced with FRP-steel composite bars [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [45] 刘伟, 谢友均, 董必钦. 海砂混凝土抗硫酸盐侵蚀性能研究[J]. *工业建筑*, 2014, 44(8): 131-135, 143.
LIU Wei, XIE Youjun, DONG Biqin. Study of the resistance to sulfate attack of concrete made with dredged marine sand [J]. *Industrial Construction*, 2014, 44(8): 131-135, 143.
- [46] TING M Z Y, WONG K S, RAHMAN M E, et al. Mechanical and durability performance of marine sand and seawater concrete incorporating silicomanganese slag as coarse aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 254: 119195.
- [47] 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.
- [48] YIN H G, LI Y, LV H L, et al. Durability of sea-sand containing concrete; effects of chloride ion penetration [J]. *Mining Science and Technology (China)*, 2011, 21(1): 123-127.
- [49] 王云. 高抗氯离子侵蚀海砂混凝土的制备及性能研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
WANG Yun. Study on preparation and properties of high resistance to chloride penetration for sea sand concrete [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [50] 刘斯凤, 孙振平, 蒋正武, 等. 海砂混凝土的抗氯离子性能研究 [J]. *新型建筑材料*, 2020, 47(1): 18-20, 46.
LIU Sifeng, SUN Zhenping, JIANG Zhengwu, et al. Study on chloride resistance of sea sand concrete [J]. *New Building Materials*, 2020, 47(1): 18-20, 46.
- [51] LI Q, GENG H N, HUANG Y, et al. Chloride resistance of concrete with metakaolin addition and seawater mixing: a comparative study [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 101: 184-192.
- [52] 蒋真, 赵铁军, 宋晓翠. 海砂混凝土碳化性能研究 [J]. *工程建设*, 2009, 41(4): 11-14.
JIANG Zhen, ZHAO Tiejun, SONG Xiaocui. Study on carbonation performance of sea sand concrete [J]. *Engineering Construction*, 2009, 41(4): 11-14.
- [53] 李田雨, 刘小艳, 张玉梅, 等. 海水海砂制备活性粉末混凝土的碳化机理 [J]. *材料导报*, 2020, 34(8): 8042-8050.
LI Tianyu, LIU Xiaoyan, ZHANG Yumei, et al. Car-

- bonization mechanism of reactive powder concrete with sea-water and sea sand[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(8): 8042-8050.
- [54] LIU J, FAN X, LIU J Y, et al. Investigation on mechanical and micro properties of concrete incorporating seawater and sea sand in carbonized environment [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 307: 124986.
- [55] DANG V Q, OGAWA Y, BUI P T, et al. Effects of chloride ions on the durability and mechanical properties of sea sand concrete incorporating supplementary cementitious materials under an accelerated carbonation condition[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 274: 122016.
- [56] LIU W, CUI H Z, DONG Z J, et al. Carbonation of concrete made with dredged marine sand and its effect on chloride binding [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 120: 1-9.
- [57] LIU J, LIU J Y, JIN H S, et al. Evaluation of the pore characteristics and microstructures of concrete with fly ash, limestone-calcined clay, seawater, and sea sand [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2022, 47(10): 13603-13622.
- [58] 卢亦焱, 杨 婷, 李 杉, 等. 海洋环境下 FRP-混凝土界面粘结退化的可靠性分析[J]. *武汉理工大学学报*, 2014, 36(9): 79-84.
- LU Yiyan, YANG Ting, LI Shan, et al. Reliability analysis of deterioration of FRP-concrete bonded interface in sea environment[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2014, 36(9): 79-84.
- [59] DONG Z Q, WU G, XU B, et al. Bond durability of BFRP bars embedded in concrete under seawater conditions and the long-term bond strength prediction [J]. *Materials & Design*, 2016, 92: 552-562.
- [60] DONG Z Q, WU G, ZHAO X L, et al. Long-term bond durability of fiber-reinforced polymer bars embedded in seawater sea-sand concrete under ocean environments[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2018, 22(5): 4018042.
- [61] 于志力, 常宇飞, 王珍珍, 等. 真实海水浸泡下 FRP 筋与海水海砂混凝土的粘结耐久性[J]. *海南大学学报 (自然科学版)*, 2022, 40(4): 382-392.
- YU Zhili, CHANG Yufei, WANG Zhenzhen, et al. Bond durability of FRP bars and seawater sea sand concrete under real seawater immersion [J]. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2022, 40(4): 382-392.
- [62] 吴云飞, 常宇飞, 于志力, 等. 海水环境下 BFRP 筋-海水海砂混凝土粘结耐久性[J/OL]. *海南大学学报 (自然科学版)*, 2023: 1-7. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1013.N.20230519.1657.004.html>.
- WU Yunfei, CHANG Yufei, YU Zhili, et al. Bond durability of BFRP bar and sea sand concrete in seawater environment [J/OL]. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2023: 1-7. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1013.N.20230519.1657.004.html>.
- [63] 吕柏行. 海水环境下玄武岩纤维筋及其增强混凝土梁的耐久性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- LV Baihang. Durability study of BFRP bars and their reinforced concrete beam immersed in seawater [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [64] CHANG Y F, WANG Y L, WANG M F, et al. Bond durability and degradation mechanism of GFRP bars in seawater sea-sand concrete under the coupling effect of seawater immersion and sustained load [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 307: 124878.
- [65] KAZEMI H, YEKRANGNIA M, SHAKIBA M, et al. Bond-slip behaviour between GFRP/steel bars and seawater concrete after exposure to environmental conditions [J]. *Engineering Structures*, 2022, 268: 114796.
- [66] SENA-CRUZ J, PEREIRA E, FREITAS N, et al. Bond behaviour between GFRP rods and concrete produced with seawater: an experimental research [C]//CICE. Proceedings of the 9th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2018). Paris: CICE, 2018: 1-8.
- [67] SOARES S, FREITAS N, PEREIRA E, et al. Assessment of GFRP bond behaviour for the design of sustainable reinforced seawater concrete structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 231: 117277.
- [68] 佟广权. FRP 筋与海水海砂混凝土粘结性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- TONG Guangquan. Experimental research on the bond performance of FRP bars in seawater and sea sand concrete [D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [69] DONG Z Q, WU G, LIAN J L. Experimental study on the durability of FRP bars reinforced concrete beams in simulated ocean environment [J]. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2018, 25(6): 1123-1134.
- [70] 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.
- [71] 董志强. FRP筋增强混凝土结构耐久性能及其设计方法研究[D]. 南京:东南大学, 2018.
- DONG Zhiqiang. Study on the durability of FRP bars reinforced concrete structures and its design method [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [72] 原天. 自然暴露时间对FRP筋海水海砂混凝土梁受弯性能的影响[D]. 广州:广州大学, 2019.
- YUAN Tian. Influence of natural exposure on flexural property of FRP rods and concrete beams made of sea water and sea sand[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019.
- [73] DONG Z Q, WU G, ZHAO X L, et al. The durability of seawater sea-sand concrete beams reinforced with metal bars or non-metal bars in the ocean environment [J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23(2): 334-347.
- [74] 李炳男. 海水浸泡与荷载耦合作用下FRP筋海水海砂混凝土梁抗弯耐久性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 2020.
- LI Bingnan. Durability of flexural behaviors of FRP bars reinforced seawater and sea sand concrete beams under the coupled effects of seawater immersion and sustained load[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [75] 陈泽贤. GFRP筋海水海砂混凝土梁耐久性研究[D]. 广州:广州大学, 2022.
- CHEN Zexian. Research on durability of GFRP bars reinforced seawater sea sand concrete beam [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022.
- [76] CHANG Y F, WANG Y L, LI B N, et al. GFRP bar-reinforced seawater sea-sand concrete beam under the combined influence of seawater exposure and sustained load: durability and degradation mechanism[J]. Structures, 2022, 43: 1503-1515.
- [77] LU Z Y, LI W K, ZENG X Y, et al. Durability of BFRP bars and BFRP reinforced seawater sea-sand concrete beams immersed in water and simulated seawater[J]. Construction and Building Materials, 2023, 363: 129845.
- [78] 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.
- [79] ZHOU A, QIN R Y, CHOW C L, et al. Structural performance of FRP confined seawater concrete columns under chloride environment [J]. Composite Structures, 2019, 216: 12-19.
- [80] 安迪. 海洋环境BFRP筋-钢筋混合配筋混凝土柱耐久性能研究[D]. 南京:东南大学, 2020.
- AN Di. Research on the durability of concrete column with hybrid reinforcement of BFRP bars and steel bars in marine environment [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [81] 薛禹. 环境与荷载作用下GFRP筋混凝土柱的受压性能[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2016.
- XUE Yu. Compression behavior of GFRP reinforced concrete columns under load and environment [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2016.
- [82] 孙丽, 杨泽宇, 居理宏, 等. GFRP筋混凝土柱海水环境受压性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(5): 188-193.
- SUN Li, YANG Zeyu, JU Lihong, et al. Compression performance of GFRP reinforced concrete columns under seawater environment [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(5): 188-193.
- [83] 段珍华, 邓琪, 肖建庄, 等. 再生混凝土冲击磨耗性能与调控方法[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(11): 1136-1142.
- DUAN Zhenhua, DENG Qi, XIAO Jianzhuang, et al. Abrasion resistance of recycled aggregate concrete and its control method [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(11): 1136-1142.
- [84] DONG Z Q, WU G, XU Y Q. Experimental study on the bond durability between steel-FRP composite bars (SFCBs) and sea sand concrete in ocean environment [J]. Construction and Building Materials, 2016, 115: 277-284.
- [85] DONG Z Q, WU G, XU Y Q. Bond and flexural behavior of sea sand concrete members reinforced with hybrid steel-composite bars presubjected to wet-dry cycles [J]. Journal of Composites for Construction, 2017, 21(2): 40160952.
- [86] DONG Z Q, WU G, ZHAO X L, et al. Bond durability of steel-FRP composite bars embedded in seawater sea-sand concrete under constant bending and shearing stress [J]. Construction and Building Materials, 2018, 192: 808-817.
- [87] HAN S W, ZHOU A, OU J P. Relationships between interfacial behavior and flexural performance of hybrid steel-FRP composite bars reinforced seawater sea-sand concrete beams [J]. Composite Structures, 2021, 277: 114672.

- [88] HAN S W, FAN C C, ZHOU A, et al. Simplified implementation of equivalent and ductile performance for steel-FRP composite bars reinforced seawater sea-sand concrete beams: equal-stiffness design method [J]. *Engineering Structures*, 2022, 266: 114590.
- [89] ZHANG K J, ZHANG Q T, XIAO J Z. Durability of FRP bars and FRP bar reinforced seawater sea sand concrete structures in marine environments [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 350: 128898.
- [90] 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 Jianzhuang, ZHANG Peng, ZHANG Qingtian, et al. Basic mechanical properties of seawater sea-sand recycled concrete [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2018, 35(2): 16-22.
- [91] 谢 钢. GFRP 管约束的海水海砂再生混凝土长柱的轴压性能研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- XIE Gang. Axial compression test of GFRP tube confined seawater and sea sand recycled concrete long columns [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020.
- [92] HUANG Y J, HE X J, WANG Q, et al. Mechanical properties of sea sand recycled aggregate concrete under axial compression [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 175: 55-63.
- [93] YING J W, HUANG Y J, GAO X, et al. Effects of coarse and fine aggregates on long-term mechanical properties of sea sand recycled aggregate concrete [J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2021, 15(3): 754-772.
- [94] 江明超. 再生骨料海水海砂混凝土耐久性研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- JIANG Mingchao. Durability of recycled aggregate seawater sea-sand concrete [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.
- [95] LU Z Y, LIU G H, WU Y F, et al. Recycled aggregate seawater-sea sand concrete and its durability after immersion in seawater [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 65: 105780.
- [96] YOUNIS A, EBEAD U, SURANENI P, et al. Short-term flexural performance of seawater-mixed recycled-aggregate GFRP-reinforced concrete beams [J]. *Composite Structures*, 2020, 236: 111860.
- [97] ZHANG Q T, XIAO J Z, ZHANG P, et al. Mechanical behaviour of seawater sea-sand recycled coarse aggregate concrete columns under axial compressive loading [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 229: 117050.
- [98] ZHANG Q T, XIAO J Z, ZHANG K J, et al. Mechanical behavior of seawater sea-sand recycled concrete columns confined by engineered cementitious composite under eccentric compression [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 45: 103497.
- [99] 徐焕林. GFRP 管约束海水海砂再生混凝土短柱轴压性能试验研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- XU Huanlin. Experimental research on axial compression performance of GFRP tube restrained seawater and sea sand recycled concrete short columns [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020.
- [100] LI P D, YANG T Q, ZENG Q, et al. Axial stress-strain behavior of carbon FRP-confined seawater sea-sand recycled aggregate concrete square columns with different corner radii [J]. *Composite Structures*, 2021, 262: 113589.
- [101] LI P D, ZHOU Y W, YANG T Q, et al. Axial compressive behavior of seawater sea-sand recycled aggregate concrete-filled double-skin non-corrosive tubular columns with square cross-section [J]. *Thin-walled Structures*, 2021, 167: 108213.
- [102] HUANG Y J, XIAO J Z, QIN L, et al. Mechanical behaviors of GFRP tube confined recycled aggregate concrete with sea sand [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2021, 24(6): 1196-1207.
- [103] 仇亚东. 复合筋增强再生骨料海砂海水混凝土梁受弯性能和耐久性研究 [D]. 深圳: 深圳大学, 2019.
- QIU Yadong. Study on bending behavior and durability of SFCB reinforced concrete beam [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2019.
- [104] ZHOU Y W, GAO H, HU Z H, et al. Ductile, durable, and reliable alternative to FRP bars for reinforcing seawater sea-sand recycled concrete beams: steel/FRP composite bars [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 269: 121264.