

混凝土漂浮结构的设计简介及其可持续性提升建议

肖建庄^{1,2}, 周子晗¹, 夏冰¹, 胡晓龙¹, 刘曙光¹, 肖绪文¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 气候变化与城镇化进程使得各国土地资源日渐紧缺, 漂浮结构为向海图强和城镇绿色发展提供了新思路。整理了混凝土漂浮结构在城镇民用建筑、可再生能源设施与交通设施领域的应用现状, 阐明漂浮结构具有拓展用地空间、缩短施工时间、减少建设成本并降低环境影响的综合效益。同时, 总结了漂浮结构传统设计模式下的技术要点: 运动与受力分析; 安全性校验; 模块化设计。在总体评估的基础上提出了从结构再利用、材料再循环和组合混凝土衍生漂浮结构设计三个层面提升漂浮结构的可持续性, 建议推广再生混凝土、海水海砂混凝土与组合混凝土衍生结构在漂浮结构中的应用。

关键词: 漂浮结构; 再生混凝土; 海水海砂混凝土; 组合混凝土衍生结构; 可持续性

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

A Critical Review and Suggestions for Sustainability Improvement of Floating Concrete Structures

XIAO Jianzhuang^{1,2}, ZHOU Zihan¹, XIA Bing¹, HU Xiaolong¹, LIU Shuguang¹, XIAO Xuwen¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Land resources are gradually becoming limited due to urbanization and climate change. The advent of floating structures provides new opportunities for bolstering maritime capabilities and promoting eco-friendly urban development. The use of floating concrete structures in public buildings, renewable energy facilities, and transportation infrastructures is summarized in this paper. Floating structures efficiently expand landmass, shorten construction period, reduce costs, and minimize impacts on the ecology. Moreover, three technical aspects of floating structures are given, including kinematic and mechanical analysis, safety

verification, and module design. Furthermore, based on the overall evaluation, it is recommended to improve the sustainability of floating structures from three approaches structure reuse, material recycling, and optimized design of composite concrete floating structures. Correspondingly, the applications of recycled aggregate concrete, seawater sea-sand concretes, and composite concrete structures are suggested in building floating structures.

Key words: floating structure; recycled aggregate concrete; seawater sea-sand concrete; composite concrete structures; sustainability

海洋是影响世界人口分布的关键因素之一,也是地球上重要的生态圈系统。沿海地区以不到陆地 10 % 的面积,容纳了超过世界 50 % 的人口^[1]。世界上超过 3/4 以上的大型城市分布在沿海地区,随着世界范围内城镇化的进程加快,诸多地区的城镇用地紧缺严重制约了城镇发展,许多沿海城镇试图通过加大对海洋的开发力度缓解这一问题。为促进城镇公共区域的迁移拓展,许多国家在海洋资源开发中粗放式地采用了围海造陆的方案,这造成了近海生态遭破坏、海洋生物多样性丧失、海洋灾害风险明显增大等新问题,与可持续发展理念背道而驰。此外,近百年来人类工业文明发展深刻影响了地球气候。如图 1 所示,以 1961 年—1990 年世界平均地表温度 13.97 °C 和平均降雨量 1 033 mm 为基准值可见,温室气体的超量累积排放导致了全球平均温度呈加速上升趋势,造成海平面持续上升^[2];而逐年波动增大的降雨量和频发的极端天气则可能导致内陆河道水位出现明显变化。可以预见,气候变化将对沿海、沿江城镇的建(构)筑物的建设与长期使用产生不利影响。

收稿日期: 2023-02-02

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51325802)

第一作者: 肖建庄,教授,工学博士,主要研究方向为再生混凝土材料与结构基础。E-mail: jzx@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

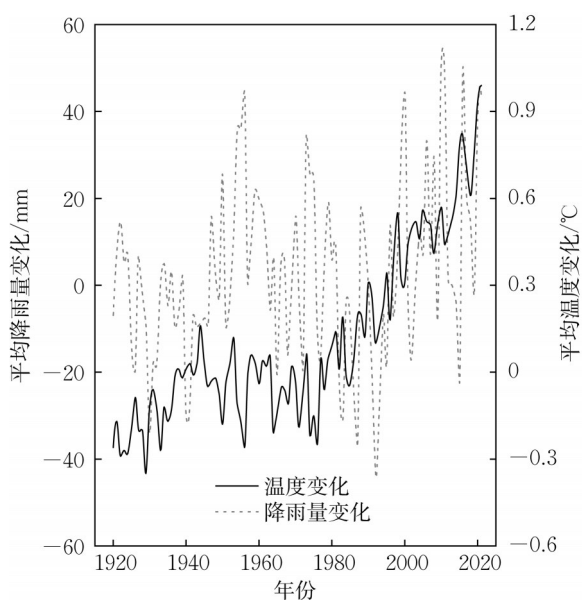


图1 1920—2021全球地表平均温度与平均降雨量变化
Fig. 1 Changes in average global surface temperatures and precipitation from 1920 to 2021

为应对上述问题,漂浮结构已成为沿海城镇进行海洋资源开发和城镇绿色发展的有效新路径。漂浮结构是指在海面或内陆水域上,由浮体、上部结构、防波堤和系泊系统等组成的具有一定功能性的浮动型结构^[3-4]。漂浮结构的应用,既可扩大城镇用地范围,又使结构与水体共存,缓解了水面高度变化对建筑使用环境带来的影响。漂浮结构系统组成、结构性能和动力学分析等相关的既有研究与工程应用,已为漂浮结构的安全性及稳定性提供了有效保障。

当前,全球仍面临严峻的气候问题,迫切需要各行业向绿色低碳的发展范式转变。对于建筑业,既有研究表明结构的建设使用与自然环境间存在相互影响的耦合关系^[5],针对陆上混凝土结构,目前已从原材料与构件的循环、结构无损拆解和结构可持续性设计^[6]等层面开展了绿色建造研究。漂浮结构可将绝大部分人类活动所需功能转移至水上,有望成为未来重要的结构形式之一,且在降低碳排放与建造成本、提高施工速度与减轻生态环境破坏^[7]方面兼具优势。因此,进一步总结漂浮结构已有的应用与技术经验并从可持续发展的角度提供结构建设新思路对建筑业的绿色转型具有重要意义。

本文剖析了漂浮结构在城镇公共建筑、可再生能源设施与交通设施上的应用案例;从漂浮结构经典设计模式下的若干技术要点进行了分析;最后,在总体评估漂浮结构可持续性的基础上从结构再利用、材料再循环和组合混凝土衍生漂浮结构设计三

个层面提出了建议。

1 漂浮结构应用场景

1.1 城镇民用建筑

在不同土地类型中,耕地、林地和草地能通过植被对空气中的 CO_2 产生碳汇效果。但因城镇发展的土地有限,这些用地常被侵占为城镇用地而失去其碳汇生态作用。为缓解这一现象,拓展海洋以及大型水域的使用空间是可行的选择。由于水上空间常位于城镇的核心区域,将大型民用公共建筑置于水面上不仅可以有效减轻城镇的用地压力,也为建设开发与后期使用带来了便利。目前已建成有漂浮式清真寺、漂浮公园、漂浮酒店和漂浮体育场等民用建筑,能允许结构移动至新位置,不仅开创了新的运营模式,还拓延了结构生命周期。此外,漂浮式公共建筑在施工时间与建造成本上也具有明显优势。新加坡建成了世界最大的浮动舞台,尺寸为 $120\text{ m} \times 80\text{ m}$,仅用时13个月便交付,相较陆上设计方案省时50%~70%以上^[7]。美国漂浮式公寓的成本估算结果表明,通过模块化方法建造的漂浮式社区住房每平方英尺成本仅为传统住房的40%~64%^[8]。随着海平面不断上升,考虑到漂浮式结构的优势,一些沿海国家开始设想在海洋上建立可容纳一定人口规模作为长期栖息地的综合性漂浮城市^[9]。联合国人居署公布的Oceanix漂浮城市设计,由多个独立的六边形模块组成,可容纳超过10 000名居民,以应对气候问题下的沿海城镇空间逐渐短缺的问题。

漂浮结构有助于拓展与保护城镇土地资源,能在不受海平面上升影响下保证城市发展的灵活性,且在降低施工时长与建设成本中占有明显优势。漂浮城市的概念为构建环境友好型城镇提供了一种思路,即通过在海洋补充和拓展城镇民用建筑设施,但仍需考虑结构建设与使用阶段对水体环境的影响,通过在水下布置水质监测系统并设立附属设施完成城镇内物质、能源自循环,达到对外的低碳和低污染排放。此外,大型漂浮结构仍存在立法边界不明的问题,其设计要求介于船只和海上设施之间,结合既有工程建设经验,各国有望逐步提出与完善针对漂浮结构建设使用的相关规范。

1.2 可再生能源设施

提高可再生能源在能源供应系统中的比例,是降低温室气体排放量的重要途径。其中,海上风电已被世界上许多国家与地区作为未来可再生能源系

统的重要组成部分。日本环境部^[10]评估了陆地、浅海与深海的风能潜力,结果表明深海区域的平均风速远高于其他区域,深海风电也具有更高的发展潜力。相较于传统的底部固定式发电机,漂浮式风力发电机在远距离运输、大水深固定方面具有更低的成本,使其在离岸远海的风能资源开发中具有更好的经济效益;世界第一台漂浮式海上风力发电机 Hywind 在挪威率先投入使用^[11],随后在英国、美国陆续扩展建设商业风电场。如图 2 所示,不同能源供应方式下的温室气体排放量对比表明漂浮风电也是相同发电量下碳排放量最低的能源形式之一^[12]。

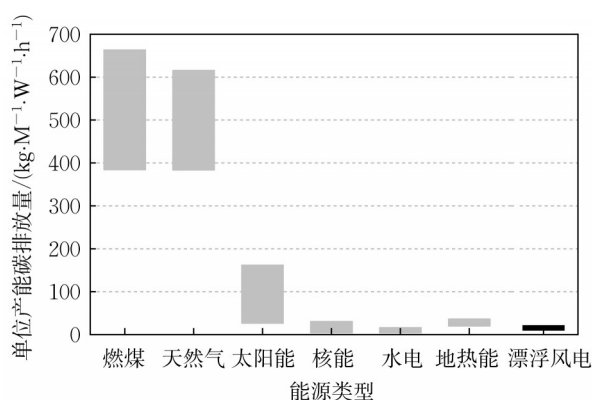


图 2 不同能源类型的二氧化碳排放量^[12]

Fig. 2 CO₂ emissions from various energy sources^[12]

漂浮式设计便于将能源设施广泛布置于湖泊、水库以及待开发能源潜力最丰富的海洋,节约了城镇及郊区土地资源,拓展了清洁能源的有效利用空间,并有助于提升开发效率和提升清洁能源在总能源系统中的占比。但由于结构的设计规模较大、建造地点偏远,建设过程中材料的消耗较多、运输阶段产生的碳排放量较高,可考虑使用低碳再生材料或多次循环利用结构单元,进一步提高结构建设与运营阶段的可持续性。对于远海能源设施,还面临相较近海更多的台风、巨浪和风暴潮等各类灾害的挑战,应通过合理选址和设立特殊的防护装置,使结构能够抵御设计风速下的自然灾害。

1.3 交通设施

大型桥梁结构是跨越水域、连接岛屿或城镇的重要交通工程设施。传统桥梁建设的最大跨度受限于材料性能,且对桥墩所处地基有一定要求,而浮桥结构由于浮筒受到的浮力可抵消部分自重荷载,在建设可行性、施工难度和通航能力上均具有优势。美国拟建的华盛顿湖交通大桥,由于湖深较深,且湖底淤泥难以支撑上部荷载,漂浮式桥梁被认定为最

具成本效益的设计方案,最终建成由 20 个预应力混凝土浮桥模块刚性连接在一起的浮桥,且成本仅为大跨度固定桥梁或隧道的 20 %~30 %^[13]。在挪威,利用导管架技术与混凝土浮筒相结合,建成了一座钢管桁架浮桥,通过漂浮式的设计避免了海底开挖的工程量,减轻了桥面与支撑结构的腐蚀,且保证了当地生态的稳定^[14]。如图 3 所示,在日本大阪港,两个填海岛屿之间建设了一座横跨水道的可摆动浮桥,使用两个浮筒作为支撑,还可以围绕主梁一端附近的轴线摆动,以允许大型船只在特殊条件下通航^[15],使用浮桥方案在河道运输和土地利用方面具有突出优势。

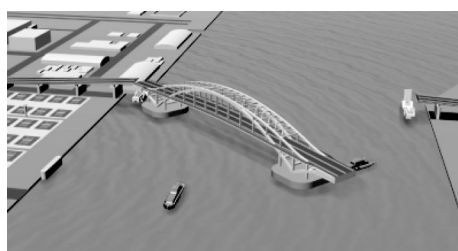


图 3 日本可摆动浮桥^[15]

Fig. 3 Design of floating bridge in Japan^[15]

作为交通设施,混凝土浮桥在建设难度、施工时间和维护成本上均具有显著优势。但为保证在风、海浪和车辆荷载作用下混凝土的高强度与稳定性和设立在水体环境中混凝土的致密性,通常需要添加改性材料,这不可避免地提高了材料成本与碳排放量。可行的解决措施包括使用组合混凝土设计以降低不可再生原材料使用量,同时加强维护,延长浮桥的使用寿命,以更低的维护成本补偿建设过程中的成本增量。

2 漂浮结构传统设计要点

2.1 运动与受力分析

漂浮结构通过浮箱或水下潜体产生的浮力维持自重平衡^[16],由于漂浮结构在工作过程中,施加的荷载会导致其在空间内三个方向上分别产生位移和旋转,共计 6 个自由度(图 4 a)。因此,漂浮结构需要使用系泊系统保证结构不因风、浪或海流(水流)影响发生漂移或侧翻^[3]。同时,因漂浮结构水平方向上尺寸远大于垂直方向尺寸,且浮力可视为作用于结构的表面力,诸多学者^[3, 17-18]将漂浮结构视为弹性地基上的各向异性板或梁进行受力分析(图 4 b),图中, l 为结构分析长度。

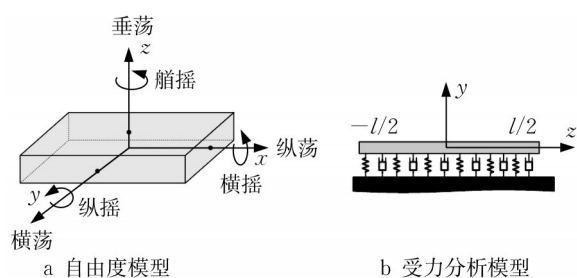


图4 漂浮结构自由度与力学分析

Fig. 4 Degrees of freedom and mechanical analysis of floating structures

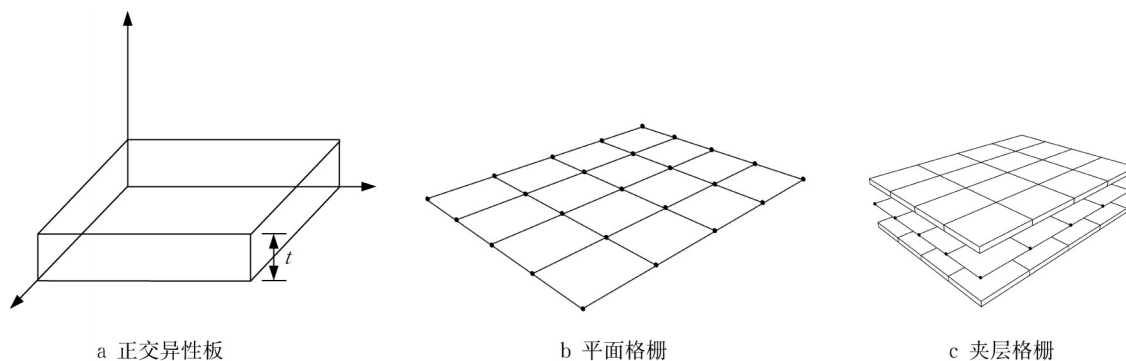


图5 漂浮结构计算模型图

Fig. 5 Computational model of floating structures

2.2 安全性检验

漂浮结构通常需要长期服役在气象环境复杂的岛屿和远海附近,且易受台风、大浪的影响而遭到破坏。由于漂浮结构体型庞大、所处位置偏远,故难以躲避极端灾害,维修维护工作也不便开展。因此,基于科学的力学分析,采用合理的安全性校验方法有助于进行漂浮结构的优化设计,构建安全、经济与低碳协同的结构建造模式。

由于目前缺乏漂浮结构通用的安全性校验规范,学者通常参考世界各国船级社颁布的半潜式平台规范评估结构的整体强度。在对平台进行强度分析时,首先需考虑其承受的永久载荷和环境载荷,其中影响最为显著的是波浪荷载,应选取百年一遇的波浪进行分析计算。Sivakumar^[19]通过直接计算法和半潜平台进行整体强度分析,发现立柱、横撑与下浮体连接处是结构中的典型高应力区。董佳欢^[20]在分析确定结构高应力区的基础上,对关键构件和连接器分别进行了极限承载能力和静强度分析。此外,不同危险工况的选择对漂浮结构安全性校验具有重要影响。

相比于陆地,海洋漂浮结构要面临更频繁的由台风与剧烈海浪引起的冲击破坏风险,保证台风工况下的安全是漂浮结构设计需考虑的重要因素。部

为得到更符合实际的结构响应,学者在受力模型的基础上对漂浮结构建立了拟合度更高的计算模型,包括各向同性板模型、正交异性板模型、平面格栅模型和夹层格栅模型和三维壳体有限元模型等,如图5所示。其中,平面格栅与夹层格栅模型都是基于欧拉伯努利梁/板方程的格栅网建立的,且后者带顶板与底板;三维有限元模型则可以反映整体弯曲、剪切和扭转刚度以及质量的真实分布,从而提供更准确的结果。

分漂浮结构通过选址在海洋灾害较少的赤道地区或采取特殊构造在台风期间降低迎风面以期降低受台风的危害。日本的漂浮式风电机组使用泊链与泊绳共同组成的系泊系统,在服役期间曾安全经历了“布拉万”和“三巴”两次最大风力超过了15级的强台风影响,且根据现场记录数据,结构在经受超过了设计波高的剧烈海浪作用下并未发生实质性结构破坏^[10]。日本大阪湾的一座浮动拱桥使用带可移动反作用力墙和橡胶护舷的系船墩作为防护系统,最高可抵御风速为 $42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的强台风,该值比附近的普通型桥梁的设计风速值($20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)高出一倍以上^[21]。

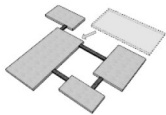
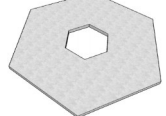
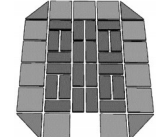
2.3 模块化设计

模块化设计是指在工厂预制漂浮结构设施的基本单元,随后运输至指定地点进行连接与组装,该方案具有低污染、低成本、高灵活性、可重复性与可异地建设性等优势。漂浮结构通常采用模块化设计制备并在现场安装,以减少大型机械设备使用,降低建设难度,提高结构布置的灵活性。由于采用海运方式运输漂浮结构模块至现场建设,过程中碳排放量仅分别为公路或铁路运输的13%和50%^[22];模块化设计特有的可重复性,简化了漂浮结构的建设规划阶段的工作量;同时,预制化的生产方式可有效加快40%以上施工速度并降低50%以上的总建设

成本^[8]。

漂浮结构的模块化布局还允许分布空间的动态变化,即能够轻松地在结构中增加或替换某一部分单元。表 1 归纳了水平方向漂浮结构模块不同分布方式与形状的特征与示意图。其中,模块单元的平面分布类型会对结构内力的大小与分布产生影响;同时,各模块在形状设计上通常采用可镶嵌平面的正多边形,以满足不同尺寸与设计形状的漂浮平台的通用化要求。Jiang 等^[23]测试了矩形与六边形模

块浮动结构的全局响应情况,结果表明两者临界弯曲应力对应的波浪周期相同,但六边形模块的弯曲应力幅度要大得多,且最大应力值通常随着全局结构纵横比的增加而增大。Dai 等^[24]评估了采用矩形与三角形组合、仅正方形与仅正六边形的模块建设漂浮平台的差异,全部采用正六边形设计的方案成本相较于前两者分别降低 13 %与 8 %,这得益于其单一的标准化形状。

表 1 漂浮模板不同平面分布与形状类型特点 ^[24-25]		
Tab. 1 Characteristics of different plane distributions and shapes of floating elements ^[24-25]		
种类	特征	示意图
平面分布类型	孤岛式 ● 模块间需要大量连接与系泊构件 ● 较方便地进行增减、更换模块	
	分支式 ● 易于运输 ● 需要型号相同的模块 ● 主干部分模块单体难以移动	
	复合式 ● 较好的抗变形、抗侧移能力 ● 相邻模块间存在联系,更好抵御外荷载	
	单体式 ● 无需连接构件 ● 结构布局基本固定	
形状类型	正方形、矩形和三角形组合 ● 连接区域具有最低的弯矩 ● 具有最高的总成本	
	仅正方形模块 ● 连接区域具有最高的内力 ● 需要更多的材料	
	仅正六边形模块 ● 由于具有斜边,可建造性不佳 ● 具有高弯曲应力	

3 漂浮结构可持续性提升

3.1 可持续性评估

可持续发展理论认为,人类活动应顺应自然。对于结构工程的可持续性设计可基于 3R 原则,即减量化(Reduce)设计、构件再利用(Reuse)与材料再生循环(Recycle)^[26],并协调考虑结构与环境之间的作

用关系。

漂浮结构最重要的优势之一是其能与水体和谐共存。一方面,漂浮结构可以随水位发生升降,并对海平面上升与洪涝灾害有抵御作用,结构对环境的波动变化是动态自适应的;另一方面,由于使用系泊系统而非固定地基,漂浮结构对河床、海床的破坏与对水体流向的改变几乎可忽略,将结构对环境的影响

响降至最低。此外,气候变化和能源消耗对可持续性有重大影响,漂浮结构对提升多种类型的可再生能源在所有能源中的比例具有重要贡献,提高和促进了诸如深海风能、水上太阳能与海洋波浪能等的开发利用效率,降低了化石能源的使用量与温室气体的排放,优化了能源结构。同时,排放更少的建筑垃圾、可回收与可再定位使用以及提升周边地区宜居度等特性也体现了漂浮结构综合的可持续性。

漂浮结构的减碳效益体现在加大了海洋能源的开发力度,从而大幅减少了化石能源的使用。挪威和印度建设了总面积达数千平方千米的漂浮式能源设施开发深海能源,每年预计可减少超过20万t的二氧化碳排放量,相当于10万辆轿车的年排放量^[27]。此外,漂浮式设计相比其他建设形式,大大降低了施工与运输阶段的碳排放。研究表明漂浮式能源发电设备提供1 MWh的电力,其生命周期内仅产生约15 kg CO₂当量的温室气体排放,相比于使用天然气等化石燃料,降低幅度约为92 %^[12]。

3.2 结构再利用

由于漂浮结构普遍采用各单元通过连接器,保持相互连接形成整体结构的布置形式,相比于陆地建筑更容易在局部单元遭破坏或达到使用寿命后,拆解失效单元,对剩余仍具备可用性的结构进行二次利用。采用可拆装式连接器是该方案的关键,不仅能避免单元分离时的损伤,还能进一步简化模块单元的拆卸、安装和新结构的成型,以提高资源的利用率,延长漂浮结构的生命周期。

Lei^[28]提出了一种静摩擦刚性连接器,通过结构间静摩擦进行锁定并最大限度地减少浮筒之间的相对运动,该设计采用了低于25 kg重量的锁定键,可实现人工手动拆装。但在此连接器设计中,较大的刚度会导致巨大的垂直弯矩和难以控制的疲劳问题。Xia等^[29]提出了空气弹簧连接器模型,通过改变空气弹簧气压调节连接器刚度至最优刚度,可大幅降低连接器内力与模块间位移。由Shi等^[30]改进的新型面接触式连接器则克服了传统铰链连接方式的缺点,该设计通过液压装置释放接头,必要时可在10 s内实现快速分离与安装,有助于在更汹涌的海面上实现模块拆卸;此外,面接触式连接实现了低应力集中,使连接器具有更长的使用寿命。

通过改变连接模式与选取合适的刚度,可拆装式连接器能抵抗较大的应力应变,减少模块间相对运动;同时,此类型连接器使模块具备无损、快捷拆装的特性,方便了结构的重新布局与回收利用,提高

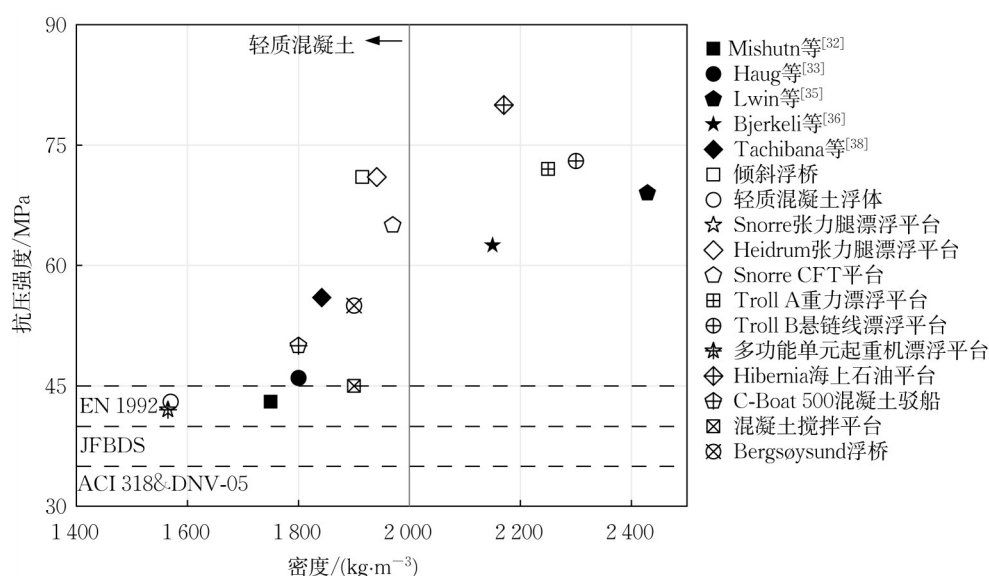
了布置的灵活性并延长了整体结构的使用寿命。

3.3 材料再循环

混凝土因较低的成本和适应海洋环境使用的性能,是漂浮结构使用最广泛的材料。在材料的各项性能中,混凝土的密度、抗压强度与抗渗性能是结构设计中重点考虑的因素。其中,降低混凝土密度有助于减轻结构自重、减少漂浮结构吃水深度以获得更大的空间或跨度并提高结构稳定性^[31]。由比普通骨料轻20 %以上的人造轻骨料制成的轻质骨料混凝土是漂浮结构体的理想材料,其密度通常低于2 000 kg·m⁻³。Mishutn等^[32]和Haug等^[33]分别使用了轻质混凝土建造了薄壁漂浮建筑与海上漂浮石油开采平台,在减轻建筑物自重的同时提高了结构承重量。图6展示了部分漂浮结构相关文献与工程应用中使用的混凝土材料密度与28 d抗压强度密度分布,虚线部分参考了挪威(DNV-05)、欧盟(EN 1992)、美国(ACI 318)与日本(JFBDs)规范中对海上混凝土的最低抗压强度要求。此外,混凝土材料还需具有足够的抗压强度与良好的抗渗性能。前者保证结构足够承担漂浮平台及附属物自重荷载以及风、雪、海浪等环境作用;后者则避免结构在海洋环境中混凝土内部钢筋遭受侵蚀。因此,漂浮结构通常采用掺入粉煤灰与硅灰等辅助性胶凝材料的高性能混凝土以同时满足力学性能与耐久性能的要求^[34]。

轻质高性能混凝土是适合漂浮结构使用的建造材料,但目前仍存在以下问题:漂浮结构建设过程中需要消耗大量混凝土,这将加剧当前天然骨料短缺的问题;当前气候变暖的趋势导致混凝土碳化率与钢筋腐蚀速率的提高;混凝土的改性措施与材料较远的运距造成生产过程成本和碳排放量的增加。如何在保证结构性能的前提下,提高漂浮结构的经济性、低碳性与可持续性是当前亟待解决的重大问题。

对此,作者认为使用废弃混凝土回收、破碎和分选后的再生骨料取代天然骨料作为原料的再生混凝土(recycled aggregate concrete, RAC)适合作为漂浮结构的未来材料方案。当前,世界经济和社会发展过程中产生了大量建筑固废,对此的回收和资源化利用率各国大不相同,发达国家的利用率可超过70 %,而发展中国家的平均利用率为10 %~15 %左右^[39]。相比于焚烧或填埋,制备再生混凝土是对建筑固废进行资源回收的有效方式,其在降低碳排放、提高生态效益上具有明显优势。既有研究表明,再生混凝土的密度相比普通混凝土(normal aggregate concrete, NAC)要低3 %~5 %^[40],原因是再生骨料中黏附有密度较低、孔隙率较大的老砂浆,

图6 部分漂浮结构混凝土密度与抗压强度^[31-33, 35-38]Fig. 6 Densities and compressive strengths of concrete in floating structures^[31-33, 35-38]

进而能降低自重,减少漂浮结构的吃水深度以获得更大的可用空间。然而,如表2所示,再生混凝土在海洋环境下短期养护与长期监测的结果表明,海洋环境会造成再生混凝土力学性能与耐久性能的劣化,建议在原材料制备阶段对再生骨料采取适当的改性措施或添加辅助性胶凝材料以制备高性能再生混凝土,并在结构设计阶段考虑性能劣化的影响^[41],以保证结构具有足够的安全性。此外,使用再生混凝土可通过降低原材料阶段与运输阶段的成本,以补偿结构设计中因其性能劣化造成的成本增量。Mikhasek等^[42]的研究表明,使用再生混凝土可在节省运输成本和材料成本的基础上,提高施工效率;在Wijayasundara等^[43]的综合评估(考虑经济、直接环境、间接环境与社会影响)中,再生混凝土的净现值(net present value, NPV)可占使用普通混凝土成本的16%以上,据换算可降低每单位体积混凝土4.1%~6.1%的平均价格。由此可见,再生混凝土仍具有较好适应海洋环境的潜力,在满足漂浮结构建设与使用基本要求的前提下,有望取得社会、经济与环境的综合效益。作者建议考虑将陆上建筑拆除后的废混凝土回收制备为再生骨料后用于近海漂浮结构建设,一方面有效消纳陆上既有结构拆除产生的建筑固废,减轻垃圾填埋压力;另一方面降低海洋漂浮结构建设过程的碳排放,提高资源的利用率,构建“陆、海、拆、建”间的协调发展新范式。

此外,使用海水海砂混凝土(seawater sea-sand concrete, SWSSC)与纤维增强复合材料(fiber

reinforced polymer, FRP)也是一种符合结构可持续性要求的方案,且对于改善海洋漂浮结构耐久性具有更大作用。海水海砂混凝土是指使用海水与海砂作为原料拌合的特殊混凝土,其力学性能和耐久性能与普通混凝土差距不大,但材料中的氯盐更容易对钢筋产生腐蚀作用^[49]。FRP是由纤维与基体材料混合后由模具挤压拉拔而成的高性能材料,具有轻质、高强度与耐腐蚀的特点,可在结构在代替钢筋使用。对于海水与海砂,得益于其在开采、处理与运输阶段总成本的降低,使用海水海砂混凝土建设的海工结构具有更低的生命周期成本;对于FRP材料,在建设可减少57%的劳动力施工成本,基本抵消其造价的差距;此外,对于漂浮结构,尤其是应用于海洋的工程来说,制备海水海砂混凝土的原材料可就地、就近取得,不仅缓解了原料运输的压力,还降低了混凝土生产过程的碳排放与环境污染;最重要的是,由于FRP材料不受混凝土碳化与氯盐环境侵蚀的影响^[50],使用海水海砂混凝土与FRP材料组合可降低气候变化对结构的不利影响,降低项目运营维护成本。

图7显示了既有研究中不同类型混凝土各阶段的碳排放量比例,使用再生混凝土与海水海砂混凝土的碳排放量绝对值较普通混凝土平均降低9%,在运输阶段平均降幅甚至可达32%,这归功于再生骨料或海砂处理厂相较于天然骨料开采厂离施工现场的运距更短,对于有需求建设漂浮结构的滨海地区而言,这一优势依然存在甚至更为明显。综上,再

表2 海洋环境下的再生混凝土性能

Tab. 2 Properties of recycled aggregate concrete in marine environment

作者	监测环境	监测时间	取代率/%	抗压强度损失率/%	氯离子渗透深度增长率/%	其他结论
Yue ^[44]	海洋潮汐带	4个月	30	5.5	9.1	1、海洋环境中再生混凝土的应力-应变曲线形状仍与天然骨料混凝土的形状相似,可按常规混凝土结构模式进行设计 2、再生混凝土力学性能与耐久性能损失随取代率增加与龄期增长而提升,应在结构设计时予以重点考虑 3、再生混凝土处于海洋环境会导致骨料磨损与咬合程度下降,应采取加强或预防措施以延长海洋环境中的使用寿命
			60	10.8	8.3	
		8个月	30	6.1	9.5	
			60	12.0	15.2	
		12个月	30	4.3	11.5	
			60	12.8	16.2	
		16个月	30	9.0	17.2	
			60	14.3	16.0	
		28 d	50	2.2	17.7	
			100	6.7	21.5	
Thomas ^[45]	天然海洋	28 d	50	2.2	17.7	1、海洋环境下再生混凝土的力学性能与耐久性能损失量小于标准环境中的损失量,表明再生混凝土具有良好抗海洋环境能力
Ben Nakhi ^[46]	实验室海水	28 d	30	6.1		1、在短期内,不同取代率的再生混凝土在海水中的力学性能与普通混凝土非常接近,强度损失率可忽略不计
			50	3.5		
			100	2.3		
Ismail ^[47]	实验室海水	90 d	60	18.2		1、再生混凝土在海水会产生力学性能损失,但在可接受范围内 2、通过预处理改性再生骨料生产的再生混凝土在海水中强度能接近甚至超过普通混凝土
		180 d	60	10.5		
		300 d	60	6.2		
Chalee ^[48]	海洋潮汐带	7年	100	42.2		1、较长时间处于海洋环境的再生混凝土会产生严重的力学性能损失 2、使用15%~25%的粉煤灰能有效降低海洋环境引起的性能损失

注:抗压强度损失率(%)与氯离子渗透深度增长率(%)表示同配比、同龄期、同养护条件的再生混凝土与普通混凝土性能间的差值

生混凝土、海水海砂混凝土与FRP材料有望替代普通混凝土与钢筋成为漂浮结构未来建设材料,以缓解现存的资源短缺与环境破坏问题,提供一种更具可持续性的漂浮结构建设方案。

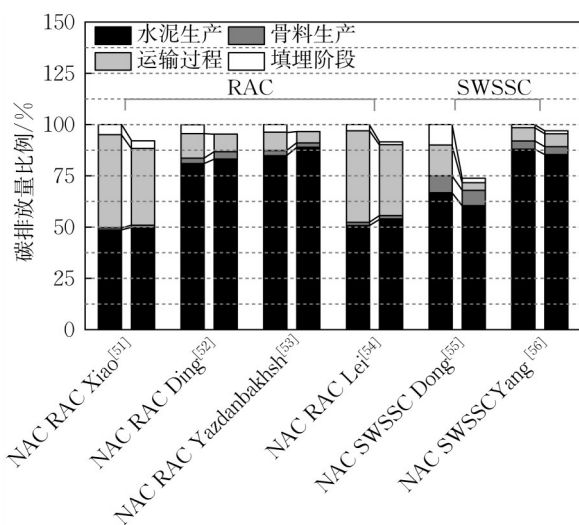


图7 普通混凝土、再生混凝土与海水海砂混凝土各阶段碳排放比例^[51-56]

Fig. 7 Carbon emission ratios of NAC, RAC, and SWSSC at each stage

3.4 组合混凝土衍生漂浮结构设计

为使不同类型和性能的混凝土材料发挥彼此优

势,在满足功能需求的同时最大程度地减少资源的消耗,作者建议从材料和结构层面,将再生混凝土与其他混凝土在漂浮结构中组合使用,进一步提升混凝土结构的可持续性。材料层面的结合方向有:(1)使用再生粗骨料与海水海砂组合的海水海砂再生骨料混凝土,可同时减少漂浮结构建设所需粗细骨料与拌合水生产运输阶段的成本与碳排放,且海水海砂的使用可提高再生混凝土的抗压强度和弹性模量等力学性能^[57]。(2)使用大尺寸再生骨料与普通骨料组合的再生块体混凝土,可节约废混凝土破碎所需能耗并减少大量水泥使用,对离岸较远的深海漂浮结构还可实现“即拆即用”的混凝土资源自循环;此外,研究表明再生块体混凝土强度随特征比(块体尺寸与构件尺寸之比)的增大而减小,由于漂浮结构体量较大,相较于陆上构件更适合采用较大尺寸再生块体进行建造,消纳建筑固废的潜力巨大。

漂浮结构外围由于与水环境长期接触,对混凝土抗渗性能有较高要求;结构上部通常要满足货物运输、车辆流动乃至飞机起降等特殊功能要求,需要良好的耐磨性能与较高的强度;除此之外,结构中大多数的混凝土仅需保证基本承载力,若统一使用高性能混凝土建设将造成性能的浪费。因此,建议在结构层面使用再生混凝土与超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)的组合,即

在漂浮结构单元外层使用超高性能混凝土满足较高的力学与耐久性能要求,内部则使用适宜强度的再生混凝土,充分发挥两者的优势,优化资源合理配置的效益。同时,该方案可全面利用废混凝土拆除破碎后不同粒径的再生骨料,其中再生细骨料与再生粉体已被证明可用于取代超高性能混凝土中的天然砂与水泥,在再生骨料取代率不超过50%时强度和抗渗性能均与普通超高性能混凝土相当,并能明显降低材料生产过程的能耗^[58];结构内部由于受力较小且受超高性能混凝土保护,则可使用再生粗骨料混凝土乃至全再生混凝土与FRP材料进行填充(图8)。

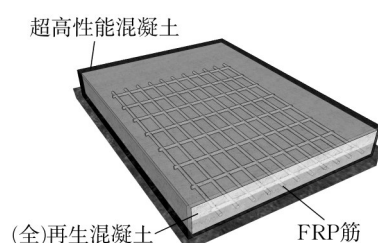


图8 漂浮结构中使用组合混凝土示意图

Fig. 8 Schematic diagram of composite concrete used in floating structures

进行组合混凝土衍生漂浮结构设计,可将最合适的材料用于最需要的地方^[59]以发挥各自的性能特点,大大减少了结构建设过程中高质量骨料和水泥等材料的用量,且消纳了足量的建筑固废,可充分提高资源的利用效率。

4 结语

本文从土木工程未来发展的角度总结了漂浮结构在各领域的应用场景,对漂浮结构传统设计中的技术要点做出了深入剖析,并对漂浮结构可持续性提升提出建议方案,主要结论如下:

(1) 漂浮结构能有效地将城镇功能迁移至水面,拓展城镇的用地空间,节约有限的土地资源,实现向海图强。此外,漂浮式结构形式能便于材料的运输、降低施工成本和减轻对环境的影响,基于这些优点,漂浮结构有望为未来人类进行海上生活生产提供支撑。

(2) 受力与安全性分析是漂浮结构整体规划和设计的基础,保证结构在不同工况下的正常运行。模块化设计是大尺度漂浮结构建设的基本思路,各模块单元通过工厂预制并运输至现场安装的方式,

达到降低生产成本、实现低碳建造的目的。使用不同平面分布与形状类型的模块单元会对结构内力、生产所需材料和布置方案产生影响。以上要点有助于达成漂浮结构建设的安全、高效和低碳协同。

(3) 漂浮结构与环境间的相互和谐是可持续性的集中体现。在单元间使用可拆装连接器,对结构进行二次利用,可降低漂浮结构的生命周期成本并避免新结构生产和建造所需的额外碳排放。

(4) 漂浮结构中混凝土的关键性能要求为低密度、高强度与良好的抗渗性能。使用高性能再生混凝土替代普通混凝土可缓解天然骨料资源短缺和建筑固废处理问题,并取得经济与环境效益;使用海水海砂混凝土与FRP材料可减轻气候变化与海洋环境对结构的不利影响;同时,两者均可有效降低漂浮结构运输过程和全过程碳排放量。

(5) 组合混凝土衍生漂浮结构设计能满足性能要求,减少不必要资源的消耗,建议使用超高性能混凝土与再生混凝土结合以充分发挥材料性能,有效利用建筑固废并提高结构可持续性。

作者贡献声明:

肖建庄:论文选题、思路、大纲、指导和修改。

周子晗:整理收集文献和论文撰写。

夏冰:协助完善论文内容和论文修改。

胡晓龙:协助完善论文内容和论文修改。

刘曙光:提供研究思路和论文修改。

肖绪文:论文技术指导。

参考文献:

- [1] SETO K C, FRAGKIAS M, GÜNERALP B, *et al.* A meta-analysis of global urban land expansion [J]. *PloS One*, 2011, 6 (8): e23777.
- [2] VERMEER M, RAHMSTORF S. Global sea level linked to global temperature [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(51): 21527.
- [3] WANG C, TAY Z. Very large floating structures: applications, research and development [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 14: 62.
- [4] XIA D, KIM J, ERTEKIN R C. Review on conceptual designs and key technologies of very large floating structures [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2000, 24(6): 135.
- [5] XIA B, XIAO J, DING T, *et al.* Probabilistic sustainability design of structural concrete components under climate change [J]. *Structural Safety*, 2021, 92: 102.
- [6] XIA B, XIAO J, LI S. Sustainability-based reliability design for reuse of concrete components [J]. *Structural Safety*, 2022, 98: 102241.

- [7] KOH H, LIM Y. Floating performance stage at the Marina Bay, Singapore [M]//Large Floating Structures. Singapore: Springer Singapore, 2015: 37-59.
- [8] KHANGURA J, HANEY J. Floating modular housing to address demand and affordability [C]//WCFS2020: Proceedings of the Second World Conference on Floating Solutions. Rotterdam:[s.n.], 2022: 43-66.
- [9] GIURGIU I C. Floating cities and equitable grafting onto marine ecosystems [C]//WCFS2020: Proceedings of the Second World Conference on Floating Solutions. Rotterdam:[s.n.], 2022: 423-432.
- [10] UTSUNOMIYA T, SATO I, SHIRAIISHI T, *et al.* Floating offshore wind turbine, Nagasaki, Japan [M]//Large Floating Structures. Singapore: Springer Singapore, 2015: 129-155.
- [11] NILSSON D, WESTIN A. Floating wind power in Norway—analysis of future opportunities and challenges [D]. Lund: Lund University, 2014.
- [12] BANG J, MA C, TARANTINO E, *et al.* Life cycle assessment of greenhouse gas emissions for floating offshore wind energy in California [D]. California: University of California Santa Barbara, 2019.
- [13] LWIN M M. The Lacey V. murrow floating bridge, USA [J]. Structural Engineering International, 1993, 3(3): 145.
- [14] SOLLAND G, HAUGLAND S, GUSTAVSEN J H. The bergsøysund floating bridge, Norway [J]. Structural Engineering International, 1993, 3(3): 142.
- [15] WATANABE E, MARUYAMA T, TANAKA H, *et al.* Design and construction of a floating swing bridge in Osaka [J]. Marine Structures, 2000, 13(4/5): 437.
- [16] LAMAS-PARDO M, IGLESIAS G, CARRAL L. A review of very large floating structures (VLFS) for coastal and offshore uses [J]. Ocean Engineering, 2015, 109: 677.
- [17] WANG C, WANG B. Great ideas float to the top [M]//Large Floating Structures. Singapore: Springer Singapore. 2015: 1-36.
- [18] WATANABE E, WANG C, UTSUNOMIYA T, *et al.* Very large floating structures: Applications, analysis and design [J]. CORE Report, 2004, 2: 104.
- [19] SIVAKUMAR M. Analysis of very large floating structure using ansys [J]. International Journal of Engineering Sciences and Research Technology, 2015, 4(3): 11.
- [20] 董佳欢. 超大型海上浮式结构物总体强度和关键结构极限强度研究 [D]: 镇江: 江苏科技大学, 2016.
DONG Jiahuan. Global strength study of very large floating structure and ultimate strength study of key component [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2016.
- [21] WATANABE E, MARUYAMA T, UEDA S, *et al.* Yumemai floating swing arch bridge of Osaka, Japan [M]//Large Floating Structures. Singapore: Springer Singapore, 2015: 61-90.
- [22] HECHT J. The environmental effects of freight [J]. Organization for Economic Co-operation and Development, 1997, 20: 11.
- [23] JIANG D, TAN K H, DAI J, *et al.* Behavior of concrete modular multi-purpose floating structures [J]. Ocean Engineering, 2021, 229: 108971.
- [24] DAI J, HELLAN Ø, WATN A, *et al.* Modular multi-purpose floating structures for space creation [C]//WCFS2020: Proceedings of the Second World Conference on Floating Solutions. Rotterdam:[s.n.], 2022: 257-271.
- [25] ADNAN A. Floating cities from concept to creation: A discussion of the challenges that are pending the floating city through literature review [D]. Vancouver: University of British Columbia, 2020.
- [26] 肖建庄, 夏冰, 肖绪文. 工程结构可持续性设计理论架构 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(6): 1.
XIAO Jianzhuang, XIA Bing, XIAO Xuwen. Theoretical framework for sustainability design of engineering structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(6): 1.
- [27] RAVICHANDRAN N, PANNEERSELVAM B. Floating photovoltaic system for Indian artificial reservoirs—An effective approach to reduce evaporation and carbon emission [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2022, 19(8): 7951.
- [28] LEI H H. Securing of marine platforms in rough sea [J]. Recent Patents on Engineering, 2007, 1(1): 103.
- [29] XIA S, XU D, ZHANG H, *et al.* On retaining a multi-module floating structure in an amplitude death state [J]. Ocean Engineering, 2016, 121: 134.
- [30] SHI Q, XU D, ZHANG H, *et al.* A face-contact connector for modularized floating structures [J]. Marine Structures, 2022, 82: 103.
- [31] KIM M O, QIAN X, LEE M K, *et al.* Determination of structural lightweight concrete mix proportion for floating concrete structures [J]. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 2017, 29(6): 315.
- [32] MISHUTN A, KROVIKOV S, PISHEV O, *et al.* Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures [J]. Tehnički glasnik, 2017, 11(3): 121.
- [33] HAUG A K, FJELD S. A floating concrete platform hull made of lightweight aggregate concrete [J]. Engineering Structures, 1996, 18(11): 831.
- [34] KIM M O, JUSTNES H, QIAN X. Application of structural lightweight aggregate concrete in floating marine concrete structures—A review [C]//The Twenty-Ninth KKHTCNN Symposium on Civil Engineering Decembe. Hong Kong: [s.n.], 2016: 3-5.
- [35] LWIN M M, BRUESCH A W, EVANS C F. High performance concrete for a floating bridge [C]//Proceedings of the Fourth International Bridge Engineering Conference. Washington D C:[s.n.], 1995: 155-162.
- [36] BJERKELI L, MUNKEBY J, ROSENDAHL F, *et al.* High

- performance concrete—an ideal material for large floating structures [C]//Proceedings of the 3rd International Workshop on Very Large Floating Structures. Hawaii: [s. n.], 1999: 316-321.
- [37] KROVIKOV S, MISHUTN A. Production technology of modified expanded clay lightweight concrete for floating structures [J]. The Scientific Journal of Cihan University, 2017, 1(4): 2.
- [38] TACHIBANA D, IMAI M, OKADA T. Qualities of high-strength lightweight concrete used for construction of arctic offshore platform [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1990, 112(1): 27.
- [39] ZHANG C, HU M, DI MAIO F, *et al.* An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe [J]. Science of the Total Environment, 2022, 803: 149892.
- [40] XIAO J, LI J, ZHANG C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(6): 1187.
- [41] XIAO J, ZHANG K, DING T, *et al.* Fundamental issues towards unified design theory of recycled and natural aggregate concrete components [J]. Engineering, 2023, 29: 188.
- [42] MIKHASEK A A, GALITSKOVA Y M, TUTOVA O A. The use of crusher-run aggregates of reinforced concrete frames when reconstructing hydraulic structures [J]. Procedia Engineering, 2016, 153: 456.
- [43] WIJAYASUNDARA M, MENDIS P, CRAWFORD R H. Integrated assessment of the use of recycled concrete aggregate replacing natural aggregate in structural concrete [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 174: 591.
- [44] YUE P, TAN Z, GUO Z. Microstructure and mechanical properties of recycled aggregate concrete in seawater environment [J]. Scientific World Journal, 2013, 2013: 306714.
- [45] THOMAS C, SETIEN J, POLANCO J A, *et al.* Influence of curing conditions on recycled aggregate concrete [J]. Construction and building Materials, 2018, 172: 618.
- [46] BEN NAKHI A, ALHUMOUD J M. Effects of recycled aggregate on concrete mix and exposure to chloride [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 13: 1.
- [47] ISMAIL S, RAMLI M. Mechanical properties of concrete using treated recycled concrete aggregate in marine environment [J]. Key Engineering Materials, 2020, 841: 138.
- [48] CHALEE W, CHEEWAKET T, JATURAPITAKKUL C. Utilization of recycled aggregate concrete for marine site based on 7-Year field monitoring [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2021, 15(1): 1.
- [49] XIAO J, QIANG C, 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.
- [50] DHONDY T, REMENNIKOV A, SHIEKH M N. Benefits of using sea sand and seawater in concrete: a comprehensive review [J]. Australian Journal of Structural Engineering, 2019, 20(4): 280.
- [51] XIAO J, WANG C, DING T, *et al.* A recycled aggregate concrete high-rise building: Structural performance and embodied carbon footprint [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 199: 868.
- [52] DING T, XIAO J, TAM V W. A closed-loop life cycle assessment of recycled aggregate concrete utilization in China [J]. Waste Management, 2016, 56: 367.
- [53] YAZDANBAKHSI A, BANK L C, BAEZ T, *et al.* Comparative LCA of concrete with natural and recycled coarse aggregate in the New York City area [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2018, 23(6): 1163.
- [54] 雷颖, 肖建庄, 王春晖. 太原市再生混凝土建筑结构碳排放研究 [J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(1): 97.
- LEI Ying, XIAO Jianzhuang, WANG Chunhui. Research on carbon emission of recycled aggregate concrete structures in Taiyuan [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(1): 97.
- [55] DONG S, LI C, XIAN G. Environmental impacts of glass-and carbon-fiber-reinforced polymer bar-reinforced seawater and sea sand concrete beams used in marine environments: An LCA case study [J]. Polymers, 2021, 13(1): 154.
- [56] YANG B, XIE T, YU Y, *et al.* Mechanical properties and environmental performance of seawater sea-sand self-compacting concrete [J]. Advances in Structural Engineering, 2022, 25(15): 3114.
- [57] XIAO J, ZHANG Q, ZHANG P, *et al.* Mechanical behavior of concrete using seawater and sea-sand with recycled coarse aggregates [J]. Structural Concrete, 2019, 20(5): 1631.
- [58] YU L, HUANG L, DING H. Rheological and mechanical properties of ultra-high-performance concrete containing fine recycled concrete aggregates [J]. Materials, 2019, 12(22): 3717.
- [59] 肖建庄, 张青天, 余江滔, 等. 混凝土结构的新发展——组合混凝土结构 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 147.
- XIAO Jianzhuang, ZHANG Qingtian, YU Jiangtao, *et al.* A novel development of concrete structures—Composite concrete structures [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(2): 147.