



混凝土结构低碳设计理论前瞻

肖建庄^{1,2,4,5*}, 夏冰¹, 肖绪文¹, 李岩^{3,4}, 薛松涛^{1,2}, 周颖^{1,2}, 卢昱杰^{1,5}, 许碧莞^{1,5}

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;
3. 同济大学航空航天与力学学院, 上海 200092;
4. 同济大学先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804;
5. 同济大学工程结构性能演化与控制教育部重点实验室, 上海 200092

* 联系人, E-mail: jzx@tongji.edu.cn

2022-01-10 收稿, 2022-03-10 修回, 2022-03-10 接受, 2022-03-11 网络版发表

国家杰出青年科学基金(51325802, 11625210, 52025083, 59925820)资助

摘要 国家“双碳”战略和建筑业低碳发展共识, 呼唤混凝土结构的低碳设计理论. 本文通过简述混凝土行业低碳转型的历史与趋势, 提出气候变化挑战下混凝土结构-环境共生系统的设计新需求; 在混凝土结构-环境动态耦合关系的量化表征中, 剖析了低碳设计从考虑可持续性的结构可靠性设计, 到以双向设计为特征的结构可持续性设计的演进, 将现有混凝土结构可持续性相关分析与设计方法融入低碳设计范畴, 为气候变化下混凝土结构生命周期内的低碳排放与可靠服役性能提供保障; 为实施低碳设计调控, 结合本团队十余年的理论探索与实践, 构筑混凝土结构3R⁺减碳技术体系, 挖掘现有典型低碳技术的减排潜力与推广前景. 进一步, 提出未来研究方向与建议, 推动混凝土结构低碳设计创新发展与应用.

关键词 混凝土结构, 气候变化, 碳排放, 低碳设计理论, 结构可持续性, 结构-环境共生

气候变化对21世纪人类社会造成深刻危机^[1]. 巴黎协定制定了将相较于前工业化时期的全球平均温升控制在1.5~2°C^[2]的深远目标, 为此人类命运共同体需携手进一步强化碳减排的举措. 2020年, 我国提出了“2030年碳达峰、2060年碳中和”的重大战略决策, 对各行业低碳转型提出紧迫需求, 也成为建筑业高质量发展的机遇与挑战.

建筑业碳排放占全球人类总碳排放量的40%^[3], 且排放量仍呈现上升趋势, 成为碳减排的主阵地之一. 随着能源结构转型与建筑节能技术的推广, 建筑运行过程中碳排放将逐渐降低, 而建筑建造过程相关的密集碳排放将成为建筑业低碳转型的主要瓶颈^[4]. 混凝土结构是应用最为普遍的建(构)筑物结构形式(砖混结构

与钢筋混凝土结构占结构工程总量的70%以上)^[5,6], 且因其力学与耐久性能、适用性及经济性良好, 仍将在当前及未来的气候适应型城市建设中发挥关键作用^[7]. 然而, 混凝土结构的主要原材料水泥与钢筋均为碳排放密集型产品, 大宗材料运输与现场施工也为碳排放密集型过程, 致使在当前建设热潮与未来城市更新热潮下, 混凝土结构传统建造模式成为人类碳排放持续上升的主要诱因之一^[8].

因此, 降低混凝土结构碳排放成为建筑业乃至社会低碳转型的重点任务, 亟须研发混凝土结构低碳设计理论, 从以人类需求为中心的单一视角, 转向兼顾混凝土结构与环境系统的同步可持续需求, 为混凝土结构生命周期碳减排提供先行保障. 本文从结构与环境

引用格式: 肖建庄, 夏冰, 肖绪文, 等. 混凝土结构低碳设计理论前瞻. 科学通报, 2022, 67: 3425–3438

Xiao J Z, Xia B, Xiao X W, et al. Prospects for low-carbon design theory of concrete structures (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 3425–3438, doi: 10.1360/TB-2022-0055

共生视角,建立应对气候变化挑战的混凝土结构低碳设计方法,通过梳理混凝土结构先进低碳建造技术,构建面向减碳的3R⁺(碳减量、碳再用、碳循环)低碳技术体系,提供低碳设计的结构可持续性调控路径,促进混凝土结构减碳降耗,助力保障人类社会可持续发展需求。

1 混凝土结构的发展与挑战

1.1 混凝土材料发展与经典结构设计理论

早在古罗马时期,生石灰、火山灰和骨料的组合在结构建造中得到应用,但直至1824年波特兰水泥的发明才促使混凝土性能发生了质的飞跃。在其后的近200年间,混凝土因其原料来源广泛、价格相对低廉、生产便利与性能易调控,且经合理设计后具有优良的力学与耐久性能,在土木工程中得到大规模应用,并逐步成为仅次于水的人类社会第二大商品^[9]。

人们对混凝土材料的性能提升与应用潜力挖掘未曾停息(图1)。20世纪中叶以来,摩天大楼的建设热潮催生了高强混凝土(high-strength concrete, HSC)的研究^[10]。随着对混凝土结构服役特点的明晰,研究视野逐步拓宽到混凝土的耐久性、工作性、体积稳定性和经济合理性等,使高性能混凝土(high performance concrete, HPC)成为研究热点^[11]。近年来,两类高性能混凝土材料因其特殊性能受到广泛关注:由纤维增强混凝土(fiber-reinforced concrete, FRC)^[12]发展而来的超高韧性水泥基复合材料(engineered cementitious composite, ECC)^[13],其表现出优异的拉伸变形能力与应变硬化特征^[14,15];由活性粉末混凝土(reactive powder concrete, RPC)发展而来的超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC),其强度和密实性得到大幅提升^[16]。然而,混凝土行业的巨量天然资源消耗、高碳排放与可持续发展理念相违背,引起了社会各界与业内人士的关注与反思,由此混凝土材料与结构研究重点逐步从单一的性能提升转变为性能与环境友好的同步提升。21世纪以来,采用工业废料^[17]、再生材料^[18,19]与植物纤维^[20]为原料研发了一系列新型混凝土,如绿色混凝土^[17,21]、绿色高性能混凝土(green high performance concrete, GHPC)^[22]、地聚合物混凝土^[23]和生物质复合混凝土^[20],推动着混凝土行业的低碳演进。

对混凝土结构性能认知的不断清晰和调控手段的不断丰富也推动了混凝土结构设计方法的进步。安全

性是混凝土结构设计的起点。19世纪初以来,基于力学原理的结构设计理论不断完善,使工程结构设计从工程师经验主导上升至科学理论^[24]。满足安全需求的前提下,正常使用与长期使用性能成为结构设计的延伸需求。为此,结构裂缝、变形控制、结构性能退化机理与调控措施等得到深入研究,安全性、适用性和耐久性共同构成结构可靠性的基本内涵,保障结构可靠性成为当前主流设计目标^[25,26]。进一步,为适应结构的定制化需求,提出了基于性能的结构设计思路^[27,28]。同时,对结构失效风险的不断重视使研究人员逐渐认知了混凝土构件的非孤立性,并尝试在时空维度的拓展下,防范结构未来风险与系统风险。由此,时变可靠性设计^[29]、结构整体可靠性设计^[30,31]与城市系统设计理念^[31,32]兴起,使混凝土结构设计在保障人类安全和功能需求的道路上不断迈进(图1)。

然而,前述的设计方法发展仍主要停留在以人类需求为中心的单一视角,在环境关切层面,结构设计方法仍滞后于低碳材料与建造技术的创新,亟须发展低碳设计理论,量化研判低碳技术的效益特点,有的放矢地改善混凝土结构超量碳排放现状。

1.2 混凝土结构的碳排放与碳吸收

混凝土结构碳排放多指建筑材料生产、加工运输、施工及拆除等建设过程中产生的碳排放,即隐含碳排放,与结构的使用情况无关^[4]。隐含碳排放又包括直接碳排放和间接碳排放,前者指施工过程的直接排放或一次能源消耗的排放,后者指输入产品或二次能源对应的隐含碳排放^[33]。对于建筑而言,隐含碳排放占生命周期碳排放的10%~80%,建筑使用阶段的节能技术进步将提高隐含碳排放占比^[4];对于路、桥等基础设施,隐含碳排放占其生命周期总量的90%以上^[33]。

混凝土结构建设具有碳排放密集的特点,通常认为碳排放来源主要为:材料生产与制备(75%~85%)、运输过程(10%~18%)、施工过程(5%~10%)^[34,35]。水泥与钢材的生产分别造成了7%~10%^[36,37]与7%~9%^[38]的全球年碳排放量,而全球约68%的水泥^[39]与约23%的钢材(数据来源: www.worldsteel.org/)用于混凝土结构的建造中,是混凝土结构高碳排放现状的主因。此外,当前天然骨料短缺,机制骨料的应用增大了骨料生产碳排放^[40]。运输过程碳排放受材料产地与施工场地的区位因素影响,随着大城市天然骨料资源限采,材料运距显著增大,成为碳排放的另一个主要贡献因素^[41,42]。虽

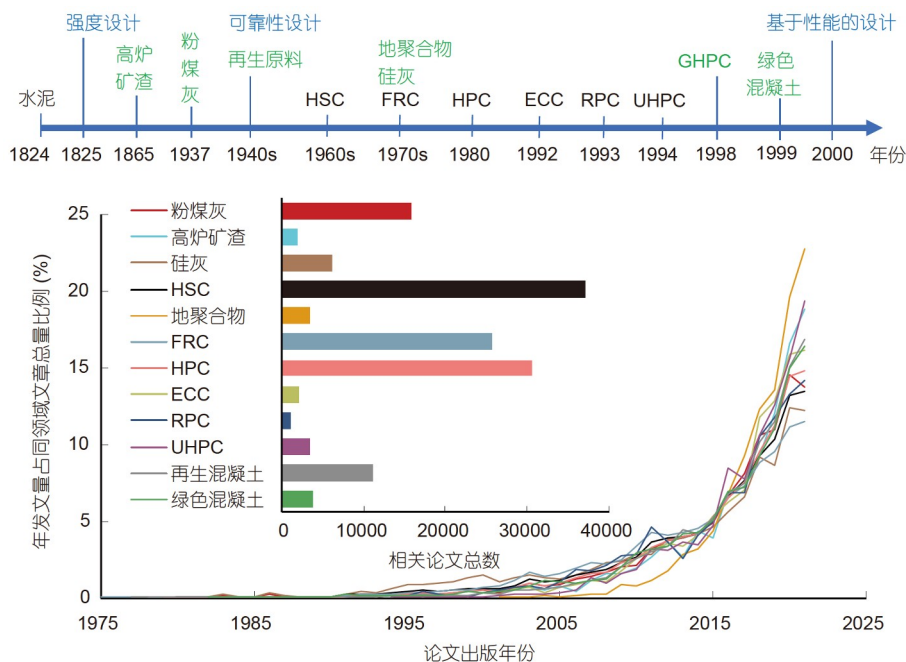


图1 混凝土材料与结构设计方法发展(论文数据来源: Web of Science, 检索日期: 2021-12-31)

Figure 1 Development of concrete materials and structural design methods (Data source of papers: Web of Science; retrieval date: December 31, 2021)

然普遍认为预制装配建造模式具有碳减排效益, 但其也将增大运输阶段碳排放^[35,43]。施工过程碳排放主要来自施工机具与现场运输能耗^[44], 虽然在生命周期中占比较小, 但计量较为繁杂, 且显著影响前端和后端的碳排放。此外, 混凝土材料生产与建造还伴随着氧化亚氮的生成, 由于其单位质量造成的辐射强迫较大^[1], 虽排放量不大, 但仍将对全球变暖造成不可忽视的影响^[45]。在研究主流表述中, 碳排放量通常代指用当量二氧化碳(carbon dioxide, CO₂)排放量表征的全球增温潜势(global warming potential, GWP), 而非单指CO₂的排放量。

混凝土碳化在耐久性研究领域早已备受关注, 如20世纪90年代初, 希腊学者Papadakis等人^[46]阐明了大气中CO₂与混凝土组分的反应规律。但过去研究多从人的需求出发关注碳化的负面影响, 却忽视了碳化对环境的有益作用。近年, 多项前沿研究揭示了水泥基材料与混凝土结构的巨大碳汇潜力^[39,47,48]。就水泥水化进程而言, 水泥基材料通过碳化反应理论上可以将熟料生产过程中释放的CO₂尽数吸收。然而, 混凝土结构构件体量较大, 比表面积相对小, 且混凝土表面覆盖的涂料、瓷砖等装饰材料会延缓混凝土的碳化进程^[49], 限制了构件的碳吸收, 其中所含水泥熟料生产过程的相

关碳排放仅17%能在结构正常服役期得到吸收^[39], 因而混凝土结构的碳汇潜力仍有待挖掘。

1.3 混凝土结构与环境共生系统

即使考虑碳吸收能力, 当前混凝土结构建造的净碳排放量仍是巨大的, 成为近20年来全球总碳排放量持续上升与气候变化的重要诱因^[8]。而气候变化将加速混凝土结构的耐久性退化, 如因碳化或氯离子侵蚀所导致的耐久性失效概率大幅增长^[5,50], 同时引发的极端气象灾害加剧也将危害结构的正常服役^[51,52]。这将进一步引发城市更新加速, 带来更频繁的集中碳排放。因此, 气候变化使混凝土结构与环境系统间构成了具有动态耦合效应的双向影响^[53,54](图2), 也催生了在结构设计中量化与调控这一动态耦合影响的新科学问题。一方面, 结构安全可靠仍为混凝土结构设计所需保障的核心目标之一, 但需补充量化气候变化所造成服役环境与荷载非稳态的影响, 准确预测结构生命周期内的服役性能; 另一方面, 混凝土低碳技术进步与高碳汇潜力赋予混凝土结构在应对气候变化中的碳减排新使命, 结构生命周期碳排放的调控与量化评价将成为混凝土结构设计的又一重点任务, 由此防范结构-环境共生系统中的长期系统性风险。

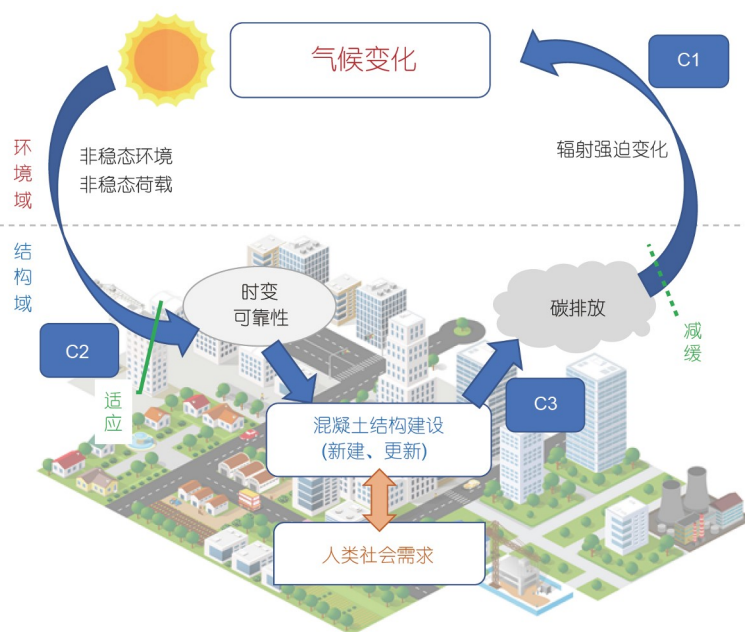


图 2 (网络版彩色)结构-环境共生系统的双向动态耦合影响

Figure 2 (Color online) Bidirectional dynamic coupling effects of structure-environment symbiosis

传统混凝土结构设计未将气候变化影响纳入结构服役环境边界,对碳排放目标缺少有效调控,使当前建造模式的密集环境影响推动了结构-环境共生系统中的非良性循环。因此,气候变化挑战下呼唤混凝土结构设计方法的革新,可依托“适应”与“减缓”这两类应对气候变化的主要策略开展^[55]:适应策略帮助结构抵御潜在的气候变化影响,避免结构域的未知风险,保障设计年限内功能需求的满足;减缓策略倡导通过混凝土结构生命周期碳排放的有效降低,协同抑制气候变化,通过减少环境域损害,减弱风险来源(图2)。

2 混凝土结构低碳设计理论

混凝土结构低碳设计提供了一类同时关注人类与环境需求的设计、评价与调控方法,采用可持续性表征结构满足气候变化下人类与自然同步可持续发展需求的能力,作为低碳设计的关键属性。可持续的理念最早于1713年由Carlowitz在森林管理与林业改革中提出^[56],1987年联合国*Our Common Future*报告明确了可持续发展的定义与目标^[57],为1992年《里约宣言》各国环境义务的确立提供基础。同于1992年提出的汉诺威原则^[58]首次明确了面向可持续性的设计,并梳理了其具体特征,在人类社会可持续发展的基础上,引入了对自然系统当前与未来需求的考量,倡导对人类社会

与自然相互影响的分析。

近年来,为应对严峻的气候变化危机,混凝土结构低碳提升在新材料、结构与建造模式研发中得到广泛开展,形成了考虑可持续性的混凝土结构可靠性设计理念,并逐步发展至以双向设计为特征的混凝土结构可持续性设计,即从针对经验性减碳策略的可靠性保障,过渡至明确减碳目标下的结构可靠性与碳排放量级同步控制。上述进程实质是在结构设计中,对结构-环境共生系统动态耦合关系表征方法由定性到定量不断充实的过程。

2.1 结构-环境耦合的碳排放表征

结构低碳设计将视角从结构本体拓展至结构-环境共生系统,需纳入结构与环境交互关系的量化,而交互的显著性需通过时域累积体现:混凝土结构长期服役的性能退化与累积碳排放造成的气候变化。为此,需对常规结构可靠性设计开展时空边界延拓,补充对结构生命周期碳排放量级的评价。而鉴于混凝土结构生命周期碳排放与碳吸收的双面特征,应以净碳排放量作为量化指标,并根据材料与结构应用特性选用开环或闭环评价方法^[34]。另一方面,需在与混凝土结构总体碳排放水平相一致的预期气候变化场景下,分析非稳态服役环境中混凝土结构的性能演化规律,研判为满足

人类社会长期使用需求的混凝土结构新建与更新状况,并辅助混凝土结构建设相关碳排放量化对象的更新。

由此,我们构建了由结构可靠性和碳排放指标介导、受气候变化与结构性能演化自然规律驱动的结构-环境动态耦合模型(图2)。C1和C2分别表征混凝土结构建设碳排放对气候变化的影响,以及气候变化对结构服役可靠性的反馈影响;C3表征结构本体可靠性与其碳排放间的关系,由结构设计方案决定。考虑可持续性的混凝土结构可靠性设计,从被动视角关注特定技术下的C2表征;结构可持续性设计在其基础上进一步拓展C1与C3的量化表征,构筑可持续发展所需的结构可靠与低碳双重设计目标,并开展多策略的调控与设计,通过对碳排放量化目标实现的主动干预,促进共生系统的良性循环。

2.2 考虑可持续性的混凝土结构可靠性设计

考虑可持续性的混凝土结构可靠性设计,为低碳技术在混凝土结构中的可靠应用提供基础。为推动可持续转型,低碳混凝土材料与结构建造过程节能减排得到推广^[59],从经济性优化角度发展的结构减量化技术^[60]也兼有良好的碳减排效果。针对上述技术开展的低碳材料性能测试与校验、结构优化设计与功能提升、低碳建造模式的全流程管控与基于全寿命周期的结构设计^[61]等,均可保障或提升低碳策略应用后的结构抗力水平,为考虑可持续性的结构可靠性设计提供基础。

此外,考虑可持续性的结构可靠性设计关注气候变化适应(C2量化表征),主要包含两类影响:(1)非稳态服役环境对结构耐久性退化的加速;(2)非稳态荷载造成的结构效应与失效风险加剧。因此,气候变化下结构可靠度计算可表达为

$$P(R \geq S) = P[R(c_c) \geq S(c_c)] = \int_{G(c_c)} f_{\Omega}(\omega) d\omega, \quad (1)$$

式中, $P(\cdot)$ 为括号内事件发生的概率; R 和 S 分别为描述结构抗力与效应的随机变量, Ω 为 R 和 S 联合分布的样本空间, G 为样本空间中结构安全随机事件的子集(结构安全域); $R(c_c)$ 、 $S(c_c)$ 、 $G(c_c)$ 表示考虑三类变量随气候变化场景 c_c 的变化,气候状况恶化将使结构安全域缩小; ω 为 G 中的基本事件(安全事件), $f_{\Omega}(\omega)$ 为其概率密度函数。

对于一般大气环境或侵蚀环境下服役的混凝土结构,可在基于扩散理论的数值模型引入气候变化环境

边界,分析侵蚀介质对结构退化的影响。相应地,为便于结构设计,在简化设计公式中,采用增量^[62]或积分^[50]方法刻画耐久性退化速率变化的修正方法应运而生。气候变化主要通过气温上升对钢筋锈蚀造成影响,常通过Arrhenius公式反映锈蚀速率变化^[63]。由此,气候变化对混凝土结构耐久性的影响可从理论层面建立,但当前仅有少量研究针对上述现象开展了试验验证^[64]。气候变化还将提升洪水、强风等极端灾害的发生频率与强度^[1],可通过在结构时变可靠性分析的荷载模型中,引入时变的偶然荷载频率与强度参数进行表征与组合^[51,52],避免对气候变化下结构可靠性的高估。

考虑可持续性的混凝土结构可靠性设计为低碳策略的安全应用与推广提供了理论支撑,推动了混凝土结构的低碳转型,但也因其缺少对结构生命周期碳排放的量化分析,难以定量保障减碳目标的明确实现,不利于低碳方案的定量优选或新型低碳策略的构建。

2.3 以双向设计为特征的混凝土结构可持续性设计

碳排放量化评价是近年来混凝土结构领域应对气候变化迈出的重要一步,生命周期评价(life cycle assessment, LCA)方法得到了广泛应用^[65,66]。然而,混凝土材料与建造过程的碳排放因子具有显著不确定性特征^[67]。为实现碳排放量级的可靠控制,部分学者建立了碳排放典型参数的概率模型,并开展概率化碳排放评价与校核^[67-69]。应指出,当前混凝土结构LCA研究的分析对象多为生命周期内保持安全服役的结构或构件,然而当失效发生时,应急处置与救援造成的碳排放将远超LCA结果。即便在安全状态下,特定结构方案的碳排放状况(如维修需求、服役寿命等)也受服役期内结构可靠性的演化影响(C3),而单次LCA通常仅得到单一安全事件下的碳排放结果。通过安全域统计可得出结构可靠度与碳排放量同时满足要求的概率如下:

$$P(I \leq I_{cr}, R \geq S) = \int_G P\{I_{Safe}[r(\omega), s(\omega)] \leq I_{cr}\} f_{\Omega}(\omega) d\omega, \quad (2)$$

式中, I 为结构生命周期碳排放量, I_{cr} 为结构生命周期碳排放限值; $r(\omega)$ 和 $s(\omega)$ 分别为安全事件 ω 对应的结构抗力与效应; $I_{Safe}[r(\omega), s(\omega)]$ 为结构在安全事件 ω 发生时的LCA碳排放结果。

在结构可靠性设计或生命周期管理的基础上拓展碳排放评价环节,并依托多策略评价结果的方案优选^[37,70-72]或基于限值目标的设计校核^[68,73],推动了结

构可持续性的量化. 然而, 上述评价或设计均为单向运行, 对结构-环境耦合的表征常遗漏C1环节, 致使结构碳排放水平与其可靠性分析的预期环境边界难以匹配, 可能造成未知风险或设计冗余. 直接将气候变化复杂模型纳入结构设计目前是不现实的, 结构对气候变化的影响通过结构群体长期碳排放体现, 可通过行业碳排放目标约束其碳排放水平, 并与社会减碳政策及气候变化预期场景建立对应联系(图3). 为此, 我们提出依据混凝土结构预期服役年限设定减碳相对值目标, 并映射至典型气候变化场景的社会减碳目标^[1,54], 提供刻画C1的可行途径, 同时也将宏观层次的结构-环境共生系统动态耦合关系映射至结构单体设计中(图3), 从而可将式(2)变为

$$P(I \leq I_{cr}, R \geq S) = \int_{G(c_c)} P\{I_{Safe}[r(\omega), s(\omega)] \leq I_{cr}(c_c)\} f_{\Omega}(\omega) d\omega, \quad (3)$$

式中, $I_{cr}(c_c)$ 为气候变化场景 c_c 对应的结构生命周期碳排放限值. 由此, 可同时考虑结构碳排放及其对结构自身的反馈影响, 形成以双向设计为特征的混凝土结构可持续性设计方法.

事实上, 结构碳排放满足要求的概率还需综合失

效状态评估, 即

$$P(I \leq I_{cr}) = P(I \leq I_{cr}, R \geq S) + P(I \leq I_{cr} | R < S)P(R < S), \quad (4)$$

式中, $P(I \leq I_{cr} | R < S)$ 为结构失效状态下, 其生命周期碳排放满足限值要求的概率. 然而, 当前仍鲜见对结构失效所致碳排放(通常远高于结构安全服役状况)的量化方法, 现有基础设施可持续性评价研究中曾提出采用结构修复碳排放衡量^[72], 但这一量值相比于真实后果而言偏低, 失效所致碳排放还受到结构在区域系统的重要程度, 以及管理者的应急保障能力等诸多不确定性因素影响. 诚然, 因失效造成的次生影响较大, 可以保守地认为该场景下碳排放满足限值的概率为0, 即采用联合概率(式(3))表征碳排放满足目标的全概率, 但这种近似高估了临时结构(可靠度水平相对较低)的碳排放水平, 实际上, 不同重要性结构或构件在不同失效模式下的可靠度目标存在差异, 这蕴含了失效后果严重性. 采用条件概率描述在结构安全前提下, 其生命周期碳排放满足减碳目标需求的概率, 可在数值上弥补上述漏洞. 结构设计以安全为起点, 可靠性设计近年来取得了长足发展, 且领域内学者仍在不断攀登高峰. 因此, 为表征结构与环境共生能力, 在默认可靠性设计能够保障结构预期服役寿命内使用性能满足需求的前提下, 结构本体的可持续性^[54]可采用如下条件概率刻画:

$$P(I \leq I_{cr} | R \geq S) = \frac{P(I \leq I_{cr}, R \geq S)}{P(R \geq S)}, \quad (5)$$

式中, $P(I \leq I_{cr} | R \geq S)$ 为结构安全状态下, 其生命周期碳排放满足限值要求的概率, 即结构可持续性概率.

由此, 结构可持续性设计致力于两类任务: (1) 通过面向气候变化适应的优化可靠性设计(C2), 最大限度地保障设计服役期内的结构安全; (2) 通过面向气候变化减缓的多策略碳减排量化调控(C3), 使结构碳排放满足可持续发展既定目标要求. 前者通过考虑可持续性的结构可靠性设计得到实现, 而为实现后者, 还需在碳排放评价的基础上深化C3的量化. 结构可靠性对其碳排放的影响可分为以下三种类型.

(1) 碳排放与结构可靠度相关. 结构生命周期管理中, 维护需求受其可靠性演化状况影响^[74], 而这也同时影响结构服役期内额外碳排放需求^[70]; 此外, 结构时变可靠度决定其耐久性最大寿命, 当假定结构可在其最大寿命内充分服役时, 满足长期使用需求的结构平均碳排放量级也随可靠度水平变化^[37].

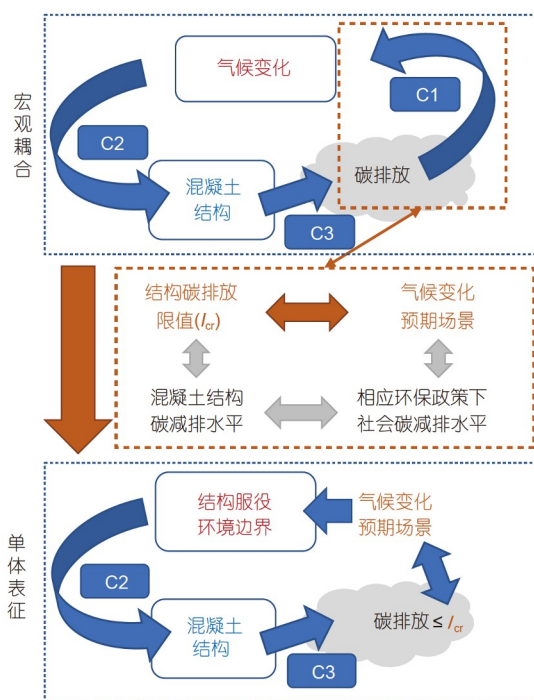


图3 (网络版彩色) 依托混凝土结构碳排放限量化C1
Figure 3 (Color online) Quantification of C1 based on the carbon emission limit for concrete structures

(2) 碳排放仅与结构抗力相关. 当前常用结构设计方法不考虑结构服役期内荷载水平受气候变化的影响, 此时类型(1)中结构可靠度演化仅与时变抗力相关^[75]; 此外, 在混凝土结构或构件再利用中, 常基于抗力这一再利用潜能表征将构件隐含碳排放放在多个结构生命周期间分配, 促进环境义务公平^[54,76].

(3) 碳排放与结构可靠度不相关. 在传统结构设计方案中, 结构生命周期与其设计使用寿命重合, 期间可靠性由初始设计保障, 服役过程无须维护, 结构碳排放仅受其设计建造方案影响.

上述类型中结构可靠性演化与其生命周期碳排放的相关程度递减. 当前, 基础设施对维护管养需求较大, 多对应类型(1); 建筑混凝土结构在无偶然荷载下大都无须修复, 多对应类型(3). 但随着结构生命周期管理能力的不断提升, 结构延寿与构件再利用策略因充分利用承载与耐久性能, 预期得到推广, 因而类型(1)和(2)将在建筑业可持续发展中不断增加.

3 混凝土结构低碳技术

低碳设计理论的落地依赖于相关技术的研发与推广. 低碳技术致力于调控结构本体可靠性与其生命周期碳排放的关系(C3), 而这两者在较多状况下存在相互拮抗的特征. 例如, 保守的结构设计可提升结构的时变可靠性却造成过大环境影响, 混凝土碳化对环境有益却损害混凝土结构耐久性. 不同设计策略往往同时对结构可靠度与其碳排放量值造成影响, 为保障混凝土结构满足可持续发展需求, 与结构可持续性设计的任务一致, 需不断探索在维持结构可靠性能前提下的

低碳技术进步, 减少社会尺度下为满足长期使用功能需求的混凝土结构碳排放.

3R原则, 即减量化(reduce)、再利用(reuse)和再循环(recycle)于20世纪70年代兴起^[77], 为环保行动提供指导. 在其引导下, 可围绕混凝土结构碳排放与碳吸收特点, 构筑混凝土结构低碳技术体系的3R⁺C原则, 将典型低碳技术分类为碳减量(carbon reduction)、碳再用(carbon reuse)与碳循环(carbon recycling)技术, 分别在材料生产方式、结构建造模式、废弃物处置管理中得到实施, 主要量化减碳效益分别体现在产品隐含碳排放降低、碳排放分配、碳吸收优化等, 且类别间的减碳效益可叠加.

3.1 碳减量技术

碳减量可从碳排放强度降低和材料用量降低两个角度实现:

(1) 水泥是混凝土隐含碳排放量中占比最大的原料. 自1990年以来, 通过生产工艺与能源转型, 水泥熟料生产实现了约12%的碳减排(GNR数据库, www.gccassociation.org/gnr/). 但由于水泥熟料煅烧过程能耗及反应生成的CO₂不可避免, 进一步的高效减碳还依赖于设计优化. 当前, 粉煤灰、矿渣等辅助胶凝材料部分取代水泥已得到广泛推行, 通过降低水泥熟料在胶凝材料中的占比, 减少了约24%的水泥相关碳排放(GNR数据库)(图4). 然而, 随着工业转型, 这些常规辅助胶凝材料的产量将持续降低. LC³水泥提供了一种新的可能, 通过石灰石粉、煅烧黏土和硅酸盐水泥的三元混合物替代水泥, 提供良好胶凝特性的同时减少了煅烧能耗, 相较

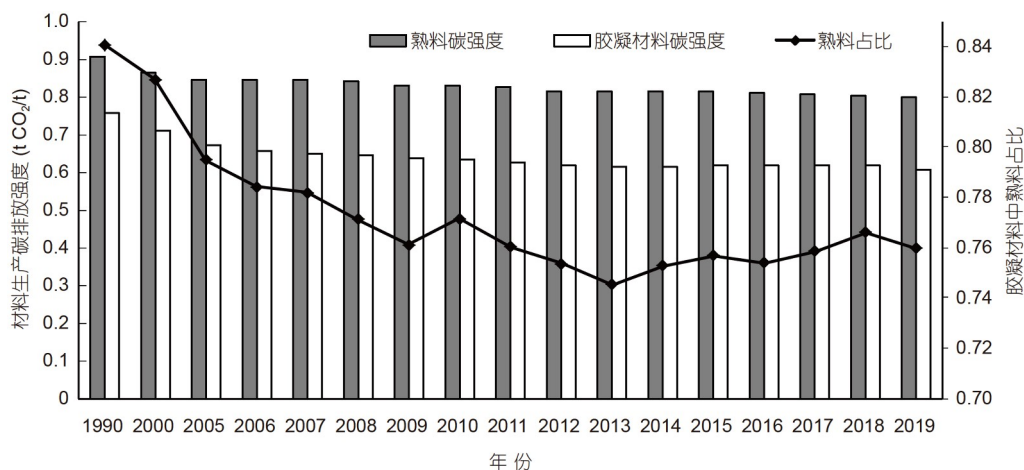


图4 水泥工业碳强度变化状况

Figure 4 Variation of carbon intensity in cement industry

于普通硅酸盐水泥可实现约30%的碳减排^[78],原料的来源广泛性为这一技术提供了良好的前景。胶凝体系的革新蕴藏着更大的碳减量潜力。通过水与强碱激发铝硅酸化合物材料(如偏高岭土、粉煤灰、矿渣等),使其解构后重新聚合可生成具有胶凝特性的地聚合物,相较于普通硅酸盐水泥可实现超60%的碳减排^[79]。

(2) 高性能混凝土的研发提供了材料减量路径,如ECC、UHPC通过掺入纤维、活性粉末等实现高效增强增韧,减少了混凝土与钢筋用量需求,为轻量化、减量化与无筋化建造构建技术基础,实际工程中证实可降低14%~33%的结构生命周期隐含碳排放^[80,81];同时,通过密实度提升还提高了混凝土耐久性^[16],可进一步减少面向长期结构使用需求的建材生产需求。然而,骨料占比小、水泥用量大限制了ECC与UHPC的碳减量效益。结构构件不同部位(截面、纵向)的受力与功能状况常存在差异,组合混凝土通过功能需求的精细化分析,设计材料、构件与结构层次的不同性能混凝土梯度化应用^[82],通过物尽其用减少了结构总体碳排放。骨料嵌锁混凝土则在材料层次上强化混凝土骨料骨架^[83],减少胶凝材料总量,可使混凝土材料制备相关碳排放降低约18%^[84]。此外,不同类别材料与结构组合也可提升混凝土性能,如钢管混凝土结构采用钢管约束改善了混凝土脆性问题,实现了混凝土强度与塑性增长,提升了传统混凝土使用效率,材料用量降低^[85],碳减排效益显著^[86]。

3.2 碳再用技术

基于全寿命周期的结构设计理念^[61]的逐步推广,使混凝土结构得到长寿命与高性能提升,为既有混凝土结构部品的再利用提供了有力支撑。通过既有结构、子结构及构件的再利用,可构建混凝土产业内循环,使结构隐含碳排放在城市更新的功能需求更迭中流动并得到充分利用,而非一次利用、直接“销毁”。根据对结构功能更新需求程度,由低到高可采用修复加固、结构移位、构件再利用等方式实现。

修复加固方法通过检测评定结构性能退化与损伤状态,并对风险区域进行局部加固^[87,88],为既有结构服役寿命延长提供安全保障,通过与适应性再生方法^[89]相结合,可使既有结构得到充分利用。结构移位是改变结构区位以适应城市规划的方法,通过同步顶升、旋转、平移等控制技术^[90],可实现上部结构微损乃至无损状态下的移动与整体再利用。然而,城镇化快速发展

带来的结构功能变更需求常较大,且建筑部品耐久性存在较大差异^[91],导致结构整体再利用在大量更新情景下难以被接受。“拆建协同”^[92]使结构拆解与新建相配合,将原结构中混凝土构件逐件拆卸,并保障拆后构件的完整性^[93],进而依托结构可拆装设计^[94]或既有构件的再利用节点构造,应用于新建结构建设中,为城市更新中碳再用的实现提供了更为灵活的路径。

碳再用策略下,构件隐含碳排放在其服役的多个结构生命周期内的分配量受分配规则的影响,通常再利用阶段分担的碳排放低于首次使用阶段^[76],从满足长期结构功能需求的角度,碳再用可实现约40%的碳减排^[34,95]。

3.3 碳循环技术

混凝土的碳化反应可吸收水泥煅烧反应释放的CO₂,形成基于化学反应的碳循环^[48]。在上述被动碳吸收效应下,通过在水泥生产过程中开展主动的碳捕捉与储存^[96],有望构建水泥基材料的负碳排放路径。然而,正常服役的混凝土结构在其生命周期内平均仅实现了17%的化学过程碳吸收^[39],但从促进使用阶段碳化出发增加碳吸收,从结构安全耐久角度常不合理。混凝土破碎后,比表面积显著增大,其中所含水泥基胶凝材料的CO₂吸收速率得到大幅提升^[97]。然而,废弃混凝土破碎过程本身也需消耗额外能耗,并造成附加碳排放。所幸破碎产生的再生原料可用于混凝土生产,从而减少天然材料开采与生产需求。过去20余年,为应对严峻的资源短缺与城市固废消纳问题,再生粗骨料混凝土已形成较为完整的理论、技术体系^[19],工程应用已大范围铺开^[98];再生细骨料^[99]、再生粉体^[100,101]相关研究方兴未艾,结合3D打印再生混凝土^[102]等技术拓宽了应用场景;全再生混凝土的研究正处于起步阶段,再生原料的全组分复掺可提升废弃混凝土的资源化率。再生混凝土带来的废弃物附加值提升,促进了混凝土破碎生产与全产业链推广应用,助推了混凝土材料碳循环的实现。

废弃混凝土破碎过程的碳排放与天然骨料生产相近,再生混凝土碳排放较天然混凝土的差异主要在于水泥用量微增、运输距离减少和骨料储存阶段的碳吸收。过去研究多关注前两类因素,得出的再生混凝土碳排放量级与天然混凝土相近,减排效果存在争议^[34,40~42]。进一步,重点关注再生原料碳吸收效益,可发掘混凝土碳汇潜力,并体现再生混凝土减排优势。在

不超过3个月的储存时间内,再生原料即可实现11 kg CO₂/t的碳吸收,从而减少约5.5%的混凝土结构生命周期隐含碳排放^[103];采用优化的废弃物管理机制可进一步促进再生原料的充分碳化,使水泥煅烧释放CO₂的吸收比例提高约80%^[97],相当于降低约20%的混凝土结构隐含碳排放。同时,碳化产物可填充再生骨料附着老砂浆的孔隙,改善骨料品质^[104],提升再生骨料混凝土新老砂浆结合界面过渡区的性能^[105];碳化还有助于提升再生粉体在混凝土中的胶凝作用^[106,107]。由此,与碳循环相结合的再生混凝土研发可在结构-环境共生系统中创造双赢。

4 展望

当前,混凝土结构低碳设计对结构-环境共生系统动态耦合真实图景的刻画尚存在不足,面向明确减排目标的结构低碳调控仍存在障碍和盲区,期待科学理论、设计方法与技术推广方面的提升。

从理论出发,还需发掘更多科学证据,论证结构-环境共生系统动态耦合的量化联系:(1)当前的C1量化仅采用简单的比例对应关系,气候变化场景、全球碳排放变化趋势受混凝土结构碳排放量级变化影响的敏感性程度还需进一步揭示;(2)气候变化对结构性能退化及荷载量级的影响仍有待进一步大量实证论证;(3)结构可持续性设计以结构安全为基底进行碳排放调控,得益于当前结构可靠性设计的低失效概率保障,但复杂结构或结构群系统可能存在较大的未知风险,此时对失效后果的评估与调控将成为结构可持续性设计的重要任务。

设计方法层面,混凝土结构碳排放基准与目标还需进一步明确:(1)碳排放因子具有显著区域差异与不确定性,需进一步明确以提升碳排放量化精度,并由此核定区域碳排放基准,为混凝土结构碳排放管理提供科学依据;(2)混凝土结构碳减排目标缺失是制约减碳行动的要因,零碳或碳中和目标将推动建筑业减碳目标的设立,需针对混凝土结构生命周期特点进一步分解建筑业减碳目标,构建可行且满足可持续发展需求的混凝土结构碳减排时程路径与分段限值,并编制分析软件辅助既定目标下的低碳策略优化。

减碳技术研发中,碳减量可重点从低碳水泥、植物纤维增韧等方向入手进一步研发高性能低碳材料,并揭示其性能机理;碳再用需限制结构的非必要性拆除,充分利用结构耐久性剩余寿命,并推广可拆装与构

件再利用相结合的“拆建协同”建造模式;碳循环需进一步构建原料生产过程的碳捕捉与储存路径,并普及再生原料的综合管理,保障充分碳吸收,同时推广全再生混凝土,构筑全组分循环利用通路,充分开发混凝土结构的碳汇潜力。此外,还需加强对现有技术减碳效益的认知,充实低碳设计的可用策略。

5 总结

近200年来,混凝土的发展与应用改变了人类社会面貌,但混凝土结构建设的巨大碳排放使其成为气候变化问题中不可忽视的碳排放增长驱动因素。为应对气候变化挑战,混凝土领域研究从以人类需求为中心向兼顾人与自然同步可持续转型,低碳技术的快速进步赋予了混凝土结构碳减排新使命,低碳转型从理论研究向工程应用的演进已箭在弦上。然而,当前混凝土结构设计的环境考量仍滞后于低碳技术的发展。基于混凝土结构碳排放和碳吸收的双重特征,从混凝土结构与环境共生系统的视角出发,开展面向低碳的结构设计思路革新,成为“双碳”战略背景下混凝土结构高质量发展的难得创新机遇。

气候变化使混凝土结构与环境系统的交互作用更为显著,催生了以碳排放为重点的混凝土结构设计新科学问题,即结构-环境共生系统双向动态耦合影响(包含结构碳排放对气候变化的影响、气候变化对结构服役可靠性的反馈影响、结构本体可靠性与其碳排放间关系)的量化与调控。为实现混凝土结构和环境系统的同步可持续,基于结构可靠性与碳排放量级构建了以条件概率表征的结构可持续性新指标。现有以低碳技术为分析对象的气候变化“适应”研究,支撑了考虑可持续性的混凝土结构可靠性设计方法;环境影响评价研究为安全服役结构的碳排放量化与调节提供了基本方法。本文基于以上思想,搭建了以双向设计为特征的结构可持续性设计,构筑了保障结构可靠与低碳排放的两类设计任务,并将现有混凝土结构气候变化“适应”与“减缓”研究融入设计框架,构建从结构生命周期设计方案到结构与环境相容状况的分析,辅助气候变化下结构-环境共生系统良性循环的早日实现。

低碳设计的落地有赖于在结构设计中融入低碳新技术,科学调控结构本体可靠性与其生命周期碳排放的关系。分别从产品隐含碳排放降低、碳排放分配、碳吸收优化等出发,创新性提出类别间减碳效益可叠加的混凝土结构低碳技术3R⁺C原则(碳减量、碳再用、

碳循环), 并与混凝土结构典型低碳技术对接, 明确现有低碳技术的减排潜力与应用前景, 为混凝土结构低碳设计调控提供保障. 进一步, 提出混凝土结构低碳设计

未来研究建议, 期待构筑科学、明确、高效的分析、设计与调控机制及平台软件, 助推建筑业低碳快速发展.

参考文献

- 1 IPCC AR5. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014
- 2 UNFCCC. Adoption of the Paris Agreement. Paris: United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015
- 3 IEA. Global Status Report for Buildings and Construction 2019. Paris: International Energy Agency, 2019
- 4 Ibn-Mohammed T, Greenough R, Taylor S, et al. Operational vs. embodied emissions in buildings—A review of current trends. *Energy Build*, 2013, 66: 232–245
- 5 Stewart M G, Wang X, Nguyen M N. Climate change impact and risks of concrete infrastructure deterioration. *Eng Struct*, 2011, 33: 1326–1337
- 6 Yang D, Guo J, Sun L, et al. Urban buildings material intensity in China from 1949 to 2015. *Resour Conserv Recycl*, 2020, 159: 104824
- 7 Concrete needs to lose its colossal carbon footprint. *Nature*, 2021, 597: 593–594
- 8 Creutzig F, Agoston P, Minx J C, et al. Urban infrastructure choices structure climate solutions. *Nat Clim Change*, 2016, 6: 1054–1056
- 9 Monteiro P J M, Miller S A, Horvath A. Towards sustainable concrete. *Nat Mater*, 2017, 16: 698–699
- 10 Bennett E W, Muir S E S J. Some fatigue tests of high-strength concrete in axial compression. *Mag Concrete Res*, 1967, 19: 113–117
- 11 Aïtcin P-C. High Performance Concrete. London: CRC Press, 1998
- 12 Zollo R F. Fiber-reinforced concrete: An overview after 30 years of development. *Cement Concrete Compos*, 1997, 19: 107–122
- 13 Li V C, Leung C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites. *J Eng Mech*, 1992, 118: 2246–2264
- 14 Li V C, Wang S, Wu C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC). *ACI Mater J*, 2001, 98: 483–492
- 15 Xu S L, Li H D. A review on the development of research and application of ultra high toughness cementitious composites (in Chinese). *China Civ Eng J*, 2008, 41: 45–60 [徐世烺, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用. *土木工程学报*, 2008, 41: 45–60]
- 16 Shi C, Wu Z, Xiao J, et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Constr Build Mater*, 2015, 101: 741–751
- 17 Liew K M, Sojebi A O, Zhang L W. Green concrete: Prospects and challenges. *Constr Build Mater*, 2017, 156: 1063–1095
- 18 Hansen T C. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. *Mater Struct*, 1986, 19: 201–246
- 19 Xiao J. Recycled Aggregate Concrete Structures. Berlin: Springer, 2018
- 20 Xiao J, Han N, Li Y, et al. Review of recent developments in cement composites reinforced with fibers and nanomaterials. *Front Struct Civ Eng*, 2021, 15: 1–19
- 21 Meyer C. The greening of the concrete industry. *Cement Concrete Compos*, 2009, 31: 601–605
- 22 Wu Z W. Green high performance concrete and innovation (in Chinese). *J Build Mater*, 1998, 1: 1–7 [吴中伟. 绿色高性能混凝土与科技创新. *建筑材料学报*, 1998, 1: 1–7]
- 23 Davidovits J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *J Therm Anal*, 1991, 37: 1633–1656
- 24 Li J. On the third generation of structural design theory (in Chinese). *J Tongji Univ (Nat Sci)*, 2017, 45: 617–624, 632 [李杰. 论第三代结构设计理论. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45: 617–624, 632]
- 25 Zhao G F, Gong J X, Zhao S C. Developments of reliability research for civil engineering structure in China (in Chinese). *J Dalian Univ Technol*, 2000, 40: 253–258 [赵国藩, 贡金鑫, 赵尚传. 我国土木工程结构可靠性研究的一些进展. *大连理工大学学报*, 2000, 40: 253–258]
- 26 GB 50153-2008. Unified Standard for Reliability Design of Engineering Structures (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press, 2008 [中华人民共和国国家标准 GB 50153-2008. 工程结构可靠性设计统一标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008]
- 27 Ghobarah A. Performance-based design in earthquake engineering: State of development. *Eng Struct*, 2001, 23: 878–884
- 28 Zhou Y, Song G, Huang W. Performance-based damage evaluation of hybrid joints. *Bull Earthq Eng*, 2020, 18: 3781–3816
- 29 Mori Y, Ellingwood B R. Reliability-based service-life assessment of aging concrete structures. *J Struct Eng*, 1993, 119: 1600–1621
- 30 Li J. Advances in global reliability analysis of engineering structures (in Chinese). *China Civ Eng J*, 2018, 51: 1–10 [李杰. 工程结构整体可靠性分析研究进展. *土木工程学报*, 2018, 51: 1–10]
- 31 Ghosn M, Duenas-Osorio L, Frangopol D M, et al. Performance indicators for structural systems and infrastructure networks. *J Struct Eng*, 2016, 142: F4016003

- 32 Lu X Z, Tian Y, Xu Z, et al. A new urban earthquake disaster simulation method: City-scale nonlinear time-history analysis (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 1055–1062 [陆新征, 田源, 许镇, 等. 一种新型城市地震灾害模拟方法: 城市抗震弹塑性分析方法. 科学通报, 2020, 65: 1055–1062]
- 33 Huang L, Krigsvoll G, Johansen F, et al. Carbon emission of global construction sector. *Renew Sustain Energy Rev*, 2018, 81: 1906–1916
- 34 Xia B, Ding T, Xiao J. Life cycle assessment of concrete structures with reuse and recycling strategies: A novel framework and case study. *Waste Manage*, 2020, 105: 268–278
- 35 Dong Y H, Jaillon L, Chu P, et al. Comparing carbon emissions of precast and cast-*in-situ* construction methods — A case study of high-rise private building. *Constr Build Mater*, 2015, 99: 39–53
- 36 IEA. Technology Roadmap — Low-carbon Transition in the Cement Industry. Paris: International Energy Agency, 2018
- 37 Wang J J, Wang Y F, Sun Y W, et al. Life cycle sustainability assessment of fly ash concrete structures. *Renew Sustain Energy Rev*, 2017, 80: 1162–1174
- 38 World Steel Association. Climate Change and the Production of Iron and Steel. Brussels: World Steel Association, 2021
- 39 Xi F, Davis S J, Ciais P, et al. Substantial global carbon uptake by cement carbonation. *Nat Geosci*, 2016, 9: 880–883
- 40 Hossain M U, Poon C S, Lo I M C, et al. Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. *Resour Conserv Recycl*, 2016, 109: 67–77
- 41 Marinković S, Radonjanin V, Malešev M, et al. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Manage*, 2010, 30: 2255–2264
- 42 Ding T, Xiao J, Tam V W Y. A closed-loop life cycle assessment of recycled aggregate concrete utilization in China. *Waste Manage*, 2016, 56: 367–375
- 43 Xiao X W, Cao Z W, Liu X, et al. Status, problems and countermeasures of prefabricated buildings in China (in Chinese). *Build Struct*, 2019, 49: 1–4, 24 [肖绪文, 曹志伟, 刘星, 等. 我国建筑装配化发展的现状、问题与对策. 建筑结构, 2019, 49: 1–4, 24]
- 44 Bilec M, Ries R, Matthews H S, et al. Example of a hybrid life-cycle assessment of construction processes. *J Infrastruct Syst*, 2006, 12: 207–215
- 45 Jähren P, Sui T. Concrete and Sustainability. Boca Raton: CRC Press, 2013
- 46 Papadakis V G, Vayenas C G, Fardis M N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. *ACI Mater J*, 1991, 88: 363–373
- 47 Churkina G, Organschi A, Reyher C P O, et al. Buildings as a global carbon sink. *Nat Sustain*, 2020, 3: 269–276
- 48 Cao Z, Myers R J, Lupton R C, et al. The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle. *Nat Commun*, 2020, 11: 3777
- 49 Lo T Y, Liao W, Wong C K, et al. Evaluation of carbonation resistance of paint coated concrete for buildings. *Constr Build Mater*, 2016, 107: 299–306
- 50 Bastidas-Arteaga E, Schoefs F, Stewart M G, et al. Influence of global warming on durability of corroding RC structures: A probabilistic approach. *Eng Struct*, 2013, 51: 259–266
- 51 Dong Y, Frangopol D M. Probabilistic time-dependent multihazard life-cycle assessment and resilience of bridges considering climate change. *J Perform Constr Facil*, 2016, 30: 04016034
- 52 Lee J Y, Ellingwood B R. A decision model for intergenerational life-cycle risk assessment of civil infrastructure exposed to hurricanes under climate change. *Reliability Eng Syst Saf*, 2017, 159: 100–107
- 53 Xiao J Z, Xia B, Xiao X W. Theoretical framework for sustainability design of engineering structures (in Chinese). *China Civ Eng J*, 2020, 53: 1–12 [肖建庄, 夏冰, 肖绪文. 工程结构可持续性设计理论架构. 土木工程学报, 2020, 53: 1–12]
- 54 Xia B, Xiao J, Ding T, et al. Probabilistic sustainability design of structural concrete components under climate change. *Struct Saf*, 2021, 92: 102103
- 55 Klotz L, Weber E, Johnson E, et al. Beyond rationality in engineering design for sustainability. *Nat Sustain*, 2018, 1: 225–233
- 56 Caradonna J L. Sustainability: A History. London: Oxford University Press, 2014
- 57 WCED. Our common future. Published as Annex to General Assembly Document A/42/427, Development and International Co-operation: Environment. New York: World Commission on Environment and Development, 1987
- 58 McDonough W, Braungart M. The Hannover Principles. Charlottesville: William McDonough Architects, 1992
- 59 Xiao X W. State and development strategy for green construction (in Chinese). *Constr Technol*, 2018, 47: 1–4, 40 [肖绪文. 绿色建造发展现状及发展战略. 施工技术, 2018, 47: 1–4, 40]
- 60 Yang P C, Xue S T, Xie L Y. Dynamic reliability analysis of passive energy dissipation devices subjected to seismic excitations (in Chinese). *China Civ Eng J*, 2016, 49(Suppl 1): 114–118, 130 [杨朋超, 薛松涛, 谢丽宇. 地震动作用下耗能构件的动力可靠性分析. 土木工程学报, 2016, 49(增刊1): 114–118, 130]
- 61 Han L H, Yang Y F, Yang H, et al. Life-cycle based analytical theory of concrete-filled steel tubular structures and its applications (in Chinese).

- Chin Sci Bull, 2020, 65: 3173–3184 [韩林海, 杨有福, 杨华, 等. 基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论及其应用. 科学通报, 2020, 65: 3173–3184]
- 62 Jiang C, Gu X, Huang Q, et al. Carbonation depth predictions in concrete bridges under changing climate conditions and increasing traffic loads. *Cement Concrete Compos*, 2018, 93: 140–154
- 63 Otsuki N, Madlangbayan M S, Nishida T, et al. Temperature dependency of chloride induced corrosion in concrete. *J Adv Concr Technol*, 2009, 7: 41–50
- 64 Talukdar S, Banthia N, Grace J R. Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change – Part 1: Experimental results and model development. *Cement Concrete Compos*, 2012, 34: 924–930
- 65 ISO 14040. Environmental Management — Life Cycle Assessment Principles and Framework. Geneva: International Organization for Standardization, 2006
- 66 Li D, Cui P, Lu Y. Development of an automated estimator of life-cycle carbon emissions for residential buildings: A case study in Nanjing, China. *Habitat Int*, 2016, 57: 154–163
- 67 Hong J, Shen G Q, Peng Y, et al. Uncertainty analysis for measuring greenhouse gas emissions in the building construction phase: A case study in China. *J Clean Prod*, 2016, 129: 183–195
- 68 Lepech M D, Geiker M, Stang H. Probabilistic design and management of environmentally sustainable repair and rehabilitation of reinforced concrete structures. *Cement Concrete Compos*, 2014, 47: 19–31
- 69 Yeo Z, Ng R, Song B. Technique for quantification of embodied carbon footprint of construction projects using probabilistic emission factor estimators. *J Clean Prod*, 2016, 119: 135–151
- 70 Flint M M, Baker J W, Billington S L. A modular framework for performance-based durability engineering: From exposure to impacts. *Struct Saf*, 2014, 50: 78–93
- 71 de la Fuente A, Blanco A, Armengou J, et al. Sustainability based-approach to determine the concrete type and reinforcement configuration of TBM tunnels linings. Case study: Extension line to Barcelona Airport T1. *Tunn Undergr Sp Tech*, 2017, 61: 179–188
- 72 Padgett J E, Tapia C. Sustainability of natural hazard risk mitigation: Life cycle analysis of environmental indicators for bridge infrastructure. *J Infrastruct Syst*, 2013, 19: 395–408
- 73 Sakai K, Shibata T, Kasuga A, et al. Sustainability design of concrete structures. *Struct Concrete*, 2016, 17: 1114–1124
- 74 Frangopol D M. Life-cycle performance, management, and optimisation of structural systems under uncertainty: Accomplishments and challenges. *Struct Infrastruct Eng*, 2011, 7: 389–413
- 75 Zhang K, Xiao J. Time-dependent reliability analysis of recycled aggregate concrete beams. *J Build Eng*, 2021, 43: 102659
- 76 Xia B, Xiao J, Zhang Q. Quantitative justification of a resistance-based environmental impact allocation for concrete component reuse. In: Zhao B, Lu X, eds. Proceedings of the FIB Symposium 2020. Shanghai: Fédération Internationale du Béton, 2020. 85–91
- 77 The Council of the European Communities. Council Directive 75/442/EEC of 15 July 1975 on waste. *Offic J Eur Commun*, 1975, 194: 39–41
- 78 Scrivener K, Martirena F, Bishnoi S, et al. Calcined clay limestone cements (LC3). *Cement Concrete Res*, 2018, 114: 49–56
- 79 McLellan B C, Williams R P, Lay J, et al. Costs and carbon emissions for geopolymers pastes in comparison to ordinary portland cement. *J Clean Prod*, 2011, 19: 1080–1090
- 80 Keoleian G A, Kendall A, Dettling J E, et al. Life cycle modeling of concrete bridge design: Comparison of engineered cementitious composite link slabs and conventional steel expansion joints. *J Infrastruct Syst*, 2005, 11: 51–60
- 81 Sameer H, Weber V, Mostert C, et al. Environmental assessment of ultra-high-performance concrete using carbon, material, and water footprint. *Materials*, 2019, 12: 851
- 82 Xiao J Z, Zhang Q T, Yu J T, et al. A novel development of concrete structures: Composite concrete structures (in Chinese). *J Tongji Univ (Nat Sci)*, 2018, 46: 147–155 [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. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46: 147–155]
- 83 Shen W. Preparation and properties of high strength and high performance coarse aggregate interlocking concrete. *J Chin Ceram Soc*, 2007, 35: 624–628
- 84 Shen W G, Tan Y, Wu L, et al. Life cycle assessment of concrete prepared by three kinds of placing process (in Chinese). *Concrete*, 2012, (7): 21–25 [沈卫国, 谭昱, 吴磊, 等. 三种浇筑工艺制备混凝土的生命周期评价. 混凝土, 2012, (7): 21–25]
- 85 Han L H, Mou T M, Wang F C, et al. Design theory of CFST (concrete-filled steel tubular) mixed structures and its applications in bridge engineering (in Chinese). *China Civ Eng J*, 2020, 53: 1–24 [韩林海, 牟廷敏, 王法承, 等. 钢管混凝土混合结构设计原理及其在桥梁工程中的应用. 土木工程学报, 2020, 53: 1–24]
- 86 Su S, Li X, Wang T, et al. A comparative study of environmental performance between CFST and RC columns under combinations of compression and bending. *J Clean Prod*, 2016, 137: 10–20
- 87 Zhang X, Li A Q, Zhao K Z. Advances in assessment and retrofitting of building structures (in Chinese). *Eng Mech*, 2011, 28: 1–11, 25 [张鑫, 李

- 安起, 赵考重. 建筑结构鉴定与加固改造技术的进展. *工程力学*, 2011, 28: 1–11, 25]
- 88 Xiao J Z, Qin C C, Liu Z H, et al. Experimental study on shear strengthening of R.C. beams (in Chinese). *J Tongji Univ (Nat Sci)*, 1999, 27: 407–411 [肖建庄, 秦灿灿, 刘祖华, 等. 钢筋混凝土梁抗剪加固试验研究. *同济大学学报(自然科学版)*, 1999, 27: 407–411]
 - 89 Langston C, Wong F K W, Hui E C M, et al. Strategic assessment of building adaptive reuse opportunities in Hong Kong. *Build Environ*, 2008, 43: 1709–1718
 - 90 Zeng L, Xiao J Z, Chen L H, et al. Research on basic methods of building rotation and moving technology (in Chinese). *J Archit Civ Eng*, 2021, 38: 57–64 [曾亮, 肖建庄, 陈立浩, 等. 建筑旋转平移的基本方法探究. *建筑科学与工程学报*, 2021, 38: 57–64]
 - 91 Salama W. Design of concrete buildings for disassembly: An explorative review. *Int J Sustain Built Environ*, 2017, 6: 617–635
 - 92 Xiao J Z, Zeng L, Xia B, et al. Theoretical framework and fundamental method for deconstruction engineering (in Chinese). *J Build Struct*, 2022, 43: 197–206 [肖建庄, 曾亮, 夏冰, 等. 拆解工程学理论架构与基本方法. *建筑结构学报*, 2022, 43: 197–206]
 - 93 Xia B, Xiao J Z, Lu F W, et al. Mechanical analysis and fundamental philosophy for deconstruction of structures (in Chinese). *J Tongji Univ (Nat Sci)*, 2020, 48: 1083–1092, 1198 [夏冰, 肖建庄, 吕凤梧, 等. 结构拆解力学分析基础与基本方法. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48: 1083–1092, 1198]
 - 94 Xiao J, Ding T, Zhang Q. Structural behavior of a new moment-resisting DfD concrete connection. *Eng Struct*, 2017, 132: 1–13
 - 95 Akbarnezhad A, Ong K C G, Chandra L R. Economic and environmental assessment of deconstruction strategies using building information modeling. *Automat Constr*, 2014, 37: 131–144
 - 96 Wang D, Xiao J, Duan Z. Strategies to accelerate CO₂ sequestration of cement-based materials and their application prospects. *Constr Build Mater*, 2022, 314: 125646
 - 97 Andersson R, Fridh K, Strippel H, et al. Calculating CO₂ uptake for existing concrete structures during and after service life. *Environ Sci Technol*, 2013, 47: 11625–11633
 - 98 Xiao J, Wang C, Ding T, et al. A recycled aggregate concrete high-rise building: Structural performance and embodied carbon footprint. *J Clean Prod*, 2018, 199: 868–881
 - 99 Liu Q, Singh A, Xiao J, et al. Workability and mechanical properties of mortar containing recycled sand from aerated concrete blocks and sintered clay bricks. *Resour Conserv Recycl*, 2020, 157: 104728
 - 100 Xiao J, Ma Z, Sui T, et al. Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste. *J Clean Prod*, 2018, 188: 720–731
 - 101 Duan Z, Hou S, Xiao J, et al. Study on the essential properties of recycled powders from construction and demolition waste. *J Clean Prod*, 2020, 253: 119865
 - 102 Xiao J, Zou S, Yu Y, et al. 3D recycled mortar printing: System development, process design, material properties and on-site printing. *J Build Eng*, 2020, 32: 101779
 - 103 Kikuchi T, Kuroda Y. Carbon dioxide uptake in demolished and crushed concrete. *J Adv Concr Technol*, 2011, 9: 115–124
 - 104 Li L, Xiao J, Xuan D, et al. Effect of carbonation of modeled recycled coarse aggregate on the mechanical properties of modeled recycled aggregate concrete. *Cement Concrete Compos*, 2018, 89: 169–180
 - 105 Wang C, Xiao J, Zhang G, et al. Interfacial properties of modeled recycled aggregate concrete modified by carbonation. *Constr Build Mater*, 2016, 105: 307–320
 - 106 Fang X, Xuan D, Zhan B, et al. A novel upcycling technique of recycled cement paste powder by a two-step carbonation process. *J Clean Prod*, 2021, 290: 125192
 - 107 Qin L, Gao X. Recycling of waste autoclaved aerated concrete powder in Portland cement by accelerated carbonation. *Waste Manage*, 2019, 89: 254–264

Summary for “混凝土结构低碳设计理论前瞻”

Prospects for low-carbon design theory of concrete structures

Jianzhuang Xiao^{1,2,4,5*}, Bing Xia¹, Xuwen Xiao¹, Yan Li^{3,4}, Songtao Xue^{1,2}, Ying Zhou^{1,2}, Yujie Lu^{1,5} & Biwan Xu^{1,5}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;³ School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China;⁴ Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;⁵ Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structures, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China* Corresponding author, E-mail: jzx@tongji.edu.cn

Industrial civilization causes huge carbon emissions, accelerates climate change, and hinders the sustainable development of human society. The construction industry causes about 40% of annual global anthropogenic carbon emissions, within which the massive construction of concrete structures alone accounts for more than 10% of the global emissions. China's national goals for carbon peaking, neutrality, and the low-carbon development consensus call for the low-carbon design theory of concrete structures in the construction industry. Starting from the scientific issues with the concrete structure-environment symbiotic system, this paper clarifies the indicators, design methods and tuning means of low-carbon structural design, aiming to lay a foundation and provide suggestions for the development of low-carbon design, and promote the sustainable development of concrete industry.

By briefly reviewing the history of the concrete industry, we illustrate the trend of low-carbon transitions, for which it is urgently needed to shift the perspective of structural design from only centering on human needs to meeting the sustainable needs of the integrated system of concrete structures and environments. Based on the characteristics of carbon emissions and uptake of concrete structures, the significance of regulating concrete structures' net embodied carbon emissions for climate change mitigation is clarified. Further, to cope with climate change, we put forward the scientific issues and design requirements for the concrete structure-environment symbiotic system.

To facilitate the sustainable development of the concrete structure-environment symbiotic system, we focus the low-carbon design method on the quantitative characterization of structure-environment dynamic coupling. The structural sustainability indicator is established to simultaneously reflect the structural reliability and carbon emission level of concrete structures. Further, we sort out relevant evaluation and design methods into the evolution of low-carbon design from the structural reliability design considering sustainability to the sustainability design characterized by a bidirectional perspective, which means the design methodology has developed from the reliability guarantee of qualitative low-carbon strategies facing climate change to quantitative carbon emission target guarantee in the form of conditional probability control, which ensures both low-carbon emissions and reliable service performance during the life cycle of concrete structures under climate change.

Further, in order to assist the low-carbon design regulation, we put forward the carbon emission-based 3R^{+C} principles, i.e., carbon reduction, carbon reuse, and carbon recycling, to construct a low-carbon design technology system with superimposable carbon emission reduction benefits among categories. Typical low-carbon technologies for concrete structures are classified following the three principles according to their main emission reduction advantages, i.e., embodied carbon reduction in material production, embodied carbon allocation by construction mode transition, and carbon uptake with a developed end-of-life management system, and their emission reduction potential and promotion prospects are explored.

A lot of future work is needed for the innovative development and promotion of low-carbon design of concrete structures, which includes clarifying the carbon emission benchmarks and goals for the concrete industry, strengthening the identification and management of failure risks and possible failure consequences under climate change, enriching and improving available low-carbon design technologies, and developing codes and software for integrated low-carbon design.

concrete structures, climate change, carbon emissions, low-carbon design theory, structural sustainability, structure-environment symbiosis

doi: [10.1360/TB-2022-0055](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0055)