

临海区装配式建筑结构耐久性提升关键技术研究与应用

张辉灿, 武孔珏, 夏川, 罗潜潜, 刘万
中国建筑第四工程局有限公司, 广东 东莞 523000
DOI:10.61369/UAID.2025010022

摘要： 临海地区建筑面临复杂的侵蚀环境，建筑物的过渡区、浪溅区和潮差区等建筑物同时受到地上、地下环境的侵蚀，加之干湿交替使氯盐浓缩，氧气和水分供应充分，且每日的潮汐作用还会使这些区域受到冻融循环，综合物理和化学破坏，混凝土腐蚀和钢筋锈蚀尤为突出。随着科技的发展，装配式建筑新型结构体系、质量检测技术和高效连接技术不断研发与应用，形成了多种装配式剪力墙技术体系，有效抵抗氯盐、硫酸盐等的侵蚀，防止混凝土结构开裂、钢筋锈蚀，保证建筑结构的稳定性和安全性，减少因结构破坏导致的安全事故，降低经济损失，因而提升装配式建筑耐久性对临海地区建筑安全、经济以及可持续发展具有重要意义。

关键词： 装配式建筑；耐久性；低能耗；高韧性

Research and Application of Key Technologies for Improving the Durability of Prefabricated Building Structures in Linhai District

Zhang Huican, Wu Kongjue, Xia Chuan, Luo Qianqian, Liu Wan

China Construction Fourth Engineering Division Corp. LTD. Dongguan, Guangdong 523000

Abstract： Buildings in coastal areas face complex erosion environments, with transitional zones, splash zones, and tidal zones being simultaneously eroded by both above ground and underground environments. In addition, the alternation of dry and wet conditions concentrates chloride salts, providing sufficient oxygen and water supply. Daily tidal effects also subject these areas to freeze-thaw cycles, resulting in comprehensive physical and chemical damage, with concrete corrosion and steel reinforcement corrosion being particularly prominent. With the development of technology, new structural systems, quality inspection technologies, and efficient connection technologies for prefabricated buildings are constantly being developed and applied, forming various prefabricated shear wall technology systems that effectively resist the erosion of chloride salts, sulfates, etc., prevent concrete structure cracking and steel corrosion, ensure the stability and safety of building structures, reduce safety accidents caused by structural damage, and minimize economic losses. Therefore, improving the durability of prefabricated buildings is of great significance for the safety, economy, and sustainable development of buildings in coastal areas.

Keywords： prefabricated building; durability; low energy consumption; high resilience

一、临海区装配式建筑结构现状研究

在建筑行业不断发展的当下，装配式建筑以其高效、环保、可重复利用等显著特点，成为了建筑领域的研究热点与发展趋势。随着临海区城市化进程的加速，建筑需求持续增长，装配式建筑因其能够有效缩短施工周期、降低施工现场污染、提高建筑质量稳定性等优势，被广泛应用于各类建筑项目中^[1]。然而，随之产生的临海区环境对装配式建筑结构耐久性的影响，直接关系到建筑的使用寿命、安全性以及后期维护成本，成为制约其进一步推广应用的关键因素。

二、临海区环境特点对装配式建筑结构耐久性的影响

临海地区因高湿度、强盐雾、台风频发等环境特点，对装配

式建筑结构耐久性构成多重挑战，具体影响及作用机制如下：盐雾腐蚀、高湿度环境、台风荷载、温度梯度以及地质与海洋生物作用。

1. 盐雾腐蚀：氯离子侵蚀的“隐形杀手”通过混凝土孔隙渗透，破坏钢筋表面钝化膜，引发电化学腐蚀；外露钢筋节点（如螺栓、预埋件）在盐雾环境中年腐蚀速率可达0.1–0.5mm，是内陆环境的3–5倍（如铝合金连接件腐蚀电位差增大，易发生电偶腐蚀）^[2]。

2. 在高湿度环境下混凝土吸湿膨胀，长期湿度>80%时，混凝土内部凝胶体吸水膨胀，导致微裂缝扩展，抗渗性能下降30%–50%；同时连接件电化学腐蚀：预制构件接缝处因密封失效进水，形成“氧浓差电池”，加速钢–混凝土界面腐蚀（如灌浆套筒内积水导致钢筋锈蚀）^[3]。

3. 台风荷载：台风（风速 $\geq 24.5\text{m/s}$ ）引发的结构振动，使

预制构件连接节点承受交变应力，导致螺栓松动、焊缝疲劳裂纹（如螺栓连接节点疲劳寿命可缩短至设计值的60%）；同时噪声接缝密封失效，如强风负压作用下，外挂墙板接缝密封材料易被撕裂，盐分随雨水渗入结构内部，加剧腐蚀（如某项目台风后外墙板接缝渗漏率从0.3%升至2.1%）^[4]。

4.温度梯度是结构开裂的“应力源”。材料热胀冷缩差异，临海地区昼夜温差可达10–15℃，混凝土（线膨胀系数 $1\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ）与钢材（ $1.2\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ）的变形差异易在节点处产生应力集中，导致裂缝（如叠合楼板拼缝年扩展量可达0.2–0.5mm）^[5]。

5.地质与海洋生物作用构成基础与表层的“双重威胁”，具体表现为：①软土地基沉降：临海地区多为冲淤积平原，地基承载力低（如上海淤泥质土承载力 $< 60\text{kPa}$ ），装配式建筑基础不均匀沉降易导致结构开裂（如预制柱底因沉降产生水平裂缝）。②海洋生物附着腐蚀：近海建筑表面易被藤壶、苔藓等生物附着，其分泌的酸性物质加速混凝土表面剥落（如某码头装配式挡墙5年表面粗糙度增加40%）^[6]。

在研究成果应用与实践方面，临海区已有多多个装配式建筑项目将耐久性研究成果融入到设计、施工和运维管理中。通过优化结构形式、改进连接节点设计、采用高性能材料等措施，有效提高了建筑的耐久性，同时加强了对装配式建筑的运维管理，定期检测和维护，及时发现并修复问题，延长了建筑使用寿命。

三、装配式建筑结构材料耐久性的选用与优化

（一）高性能混凝土的选用与优化

临海环境适配设计原则：针对高盐雾、高湿度特点，高性能混凝土需满足“三低一高”标准：低水胶比（ ≤ 0.35 ）、低氯离子渗透系数（ $\leq 1\times 10^{-12}\text{ m}^2/\text{s}$ ）、低收缩率（ $\leq 300\times 10^{-6}$ ）、高密实度（抗渗等级 $\geq \text{P}12$ ）。以深圳裕璟幸福家园项目为例，其配合比设计如下表（表1）：

表1 临海区装配式建筑混凝土配合比设计

材料组分	(kg/m^3)	作用机制
P·O 52.5水泥	300	提供基础胶凝强度，控制C3A含量 $< 8\%$ 以降低氯离子吸附
硅灰	60（占胶凝材料20%）	填充混凝土孔隙，降低孔隙率至15%以下，提升抗渗性；硅灰中 SiO_2 含量 $> 95\%$ ，与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成C-S-H凝胶
磨细矿渣微粉	120（占胶凝材料40%）	延缓水化热峰值，减少温度裂缝；矿渣玻璃体结构吸附氯离子，降低自由氯离子浓度
机制砂	750	细度模数2.8–3.0，棱角性指数 $< 11\%$ ，提升界面过渡区密实度
碎石	1050	粒径5–25mm连续级配，压碎值 $< 8\%$ ，降低混凝土收缩率
减水剂	（减水率28%）	降低拌合用水量，改善工作性能；含气量控制在2%–4%，提升抗冻融能力
聚丙烯纤维（HPP）	1.2	直径 $18\mu\text{m}$ ，长度12mm，乱向分布形成三维骨架，抑制早期塑性裂缝（裂缝宽度减少60%以上）

关键性能指标

- 抗氯离子侵蚀：采用RCM法测试，28d氯离子扩散系数 $0.8\times 10^{-12}\text{ m}^2/\text{s}$ ，低于《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）中“严重盐雾环境”限值（ $1.5\times 10^{-12}\text{ m}^2/\text{s}$ ）。
- 抗冻融循环：经300次冻融循环后，质量损失率1.8%，动弹性模量保留率88%，满足F300抗冻等级要求。
- 收缩性能：90d干燥收缩率 260×10^{-6} ，较普通混凝土降低40%，减少因收缩导致的裂缝风险。

（二）耐候钢材与表面防护处理

耐候钢（如Q355NH、09CuPCrNi–A）通过合金化设计（含Cr 0.5%–1.2%、Ni 0.2%–0.6%、P 0.07%–0.15%），在表面形成致密的 $\alpha\text{-FeOOH}$ 锈层，其厚度仅为普通钢锈层的1/3，但电阻值提高5–8倍，可阻止氧气和水分渗透，使腐蚀速率降至 $0.01\text{mm}/\text{a}$ 以下（普通钢在盐雾环境中腐蚀速率 $0.05\text{--}0.1\text{mm}/\text{a}$ ）。如雄安市民服务中心钢结构采用Q355NH耐候钢+电弧喷涂锌铝涂层，经3年沿海盐雾环境测试，表面锈层厚度仅 0.03mm ，腐蚀速率为普通钢的1/6，维护周期从传统工艺的5年延长至15年^[7]。

四、装配式建筑结构连接节点耐久性的设计与提升

（一）节点构造优化设计

现有节点薄弱点分析（如表2）：

表2 现有建筑连接节点薄弱点分析

节点类型	临海环境典型问题	失效机制
焊接节点	焊缝锈蚀开裂（如某项目3年焊缝锈胀宽度达 0.8mm ）	盐雾渗入焊缝微裂纹，形成电化学腐蚀电池，焊缝金属年腐蚀量 $0.05\text{--}0.1\text{mm}$
灌浆套筒连接	套筒内积水导致钢筋锈蚀（检测发现含水率超15%时，锈蚀率每年增加8%）	密封失效后雨水渗入，套筒内部形成缺氧环境，加速钢筋锈蚀
螺栓连接	螺栓松动、螺纹腐蚀（某项目5年螺栓扭矩损失达30%）	盐雾腐蚀螺纹表面，风荷载引发的振动导致预紧力衰减
叠合板拼缝	拼缝开裂渗漏（传统坐浆法渗漏率2.3%）	混凝土收缩差与温度变形导致拼缝张开，盐分随水流渗入钢筋保护层

（二）预应力–后浇组合连接（适用于框架结构）构造形式

预制构件预留预应力孔道，安装后穿入精轧螺纹钢（强度等级 $\geq \text{PSB}830$ ），通过后张法施加预应力（张拉控制应力 $0.75\sigma_b$ ），再浇筑C40补偿收缩混凝土。

- 优化要点：
 - 节点区混凝土保护层厚度增至 35mm ，内置 $\Phi 4@50$ 钢筋网片，抗裂性能提升40%；
 - 预应力筋采用镀锌钢绞线（锌层重量 $\geq 300\text{g}/\text{m}^2$ ），孔道采用真空压浆工艺（浆体氯离子含量 $\leq 0.06\%$ ）。
 - 工程效果：深圳某沿海公寓项目应用该节点，经5年监测，节点裂缝宽度 $< 0.05\text{mm}$ ，螺栓未出现锈蚀，抗风承载力提升30%。

（三）可拆卸式螺栓-销轴组合节点（适用于钢结构与模块化建筑）构造形式

上、下构件通过高强螺栓（10.9级不锈钢螺栓，抗拉强度 $\geq 1000\text{MPa}$ ）与销轴（直径 $\geq 30\text{mm}$ ，材质42CrMo）连接，形成“抗剪销轴+抗拉螺栓”双传力路径。

— 优化要点：

— 螺栓孔采用沉头设计，密封胶填充螺栓头与构件表面间隙（深度 $\geq 5\text{mm}$ ）；

— 销轴表面进行达克罗涂层处理（厚度 $8\text{--}12\mu\text{m}$ ），盐雾试验2000h无腐蚀。

— 工程效果：海南某模块化酒店应用该节点，单节点拆卸时间 < 30 分钟，经台风（风速 28m/s ）考验，节点位移 $\leq 2\text{mm}$ ，螺栓扭矩损失 $< 5\%$ 。

（四）叠合板企口+排水槽构造（适用于楼盖体系）构造形式

预制叠合板边缘设倒梯形企口（深度 20mm ，坡度 $1:2$ ），拼缝底部预留宽 30mm 、深 15mm 排水槽，槽内设置 $\Phi 20$ 透水管（开孔率 15% ）。

— 优化要点：

— 企口处涂刷界面剂（粘结强度 $\geq 1.5\text{MPa}$ ），后浇层配置 $\Phi 6@100$ 钢筋网片；

— 排水槽坡度 $\geq 5\%$ ，末端接入楼层排水系统，实现“导水-排水”一体化；

— 工程效果：厦门某临海住宅项目应用该构造，拼缝渗漏率从 2.3% 降至 0.2% ，混凝土碳化深度较传统节点减少 12mm 。

五、装配式建筑结构环境适应性及智能监测

1. 湿度传感器预埋：在节点密封层内侧设置分布式湿度传感器（精度 $\pm 3\%\text{RH}$ ），间距 $\leq 2\text{m}$ ，当湿度 $> 85\%$ 时触发预警。

2. 红外热成像检测：定期（每季度一次）对节点区域进行红外扫描，通过温度异常（温差 $> 2^\circ\text{C}$ ）识别渗漏隐患，定位精度 $\leq 0.5\text{m}^2$ 。

未来方向：开发“自感知-自修复”一体化节点，如内置形状记忆合金（SMA）螺栓，当节点因腐蚀或振动松动时，通过加热激活SMA恢复预紧力；结合3D打印技术制造带仿生排水通道的预制节点，模拟贝壳表面纹理降低盐雾附着率，进一步提升临海环境下的节点耐久性^[8]。

六、发展趋势与挑战

1. 绿色材料：生物基胶凝材料、再生骨料混凝土等低碳材料的研发与应用，目标降低碳排放 30% 以上。

2. 智能运维：基于物联网（IoT）与数字孪生的耐久性监测系统，实现结构健康状态的实时感知与智能决策^[9]。

3. 模块化设计：通用化、可重构的预制构件体系，提升建筑适应功能变化的能力。

七、总结

国内装配式建筑耐久性研究已从单一材料优化转向多学科交叉创新，工程应用覆盖超高层、公共建筑及工业领域。未来需进一步突破极端环境适应性、智能运维及成本控制等瓶颈，推动装配式建筑向“长寿命、低能耗、高韧性”方向发展^[10]。例如，雄安新区的“百年住宅”项目与深圳的超高层实践，已为行业提供了可复制的技术路径，标志着我国装配式建筑耐久性技术进入国际先进行列。

参考文献

- [1] 林宏新. 临海异形建筑基坑开挖施工的分区分区优化研究 [J]. 山西建筑. 2023, 49 (06): 109–113.
- [2] 黄韵仪; 黄若绮; 庞玥. 基于可持续旅游的粤西海岛渔村公共建筑策略研究——以碇洲岛南港村为例 [J]. 安徽建筑 2023, 30 (11): 22–25+61.
- [3] 潘莹. 基于产业类型的粤西碇洲岛海岛聚落景观研究 [J]. 中国园林. 2022, 38 (12): 70–75.
- [4] 徐宏超. 土地利用变化对京津冀热环境时空演变的影响 [J]. 中国环境科学. 2023, 43 (03): 1340–1348.
- [5] 马永欢等. 基于局地气候分区的城市热环境分析——以北京市为例 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版). 2022, 58 (06): 901–909.
- [6] 刘琳等. 街区尺度城市气候图绘制方法研究及应用 [J]. 建筑科学. 2022, 38 (02): 171–180.
- [7] 吴娱; 彭昌海. 村镇形态要素对水体微气候冷却效应的影响分析 [J]. 东南大学学报 (自然科学版). 2022, 52 (01): 179–188.
- [8] 冯叶涵; 陈亮; 贺晓冬. 基于百度街景的SVF计算及其在城市热岛研究中的应用 [J]. 地球信息科学学报. 2021(11).
- [9] 朱荣鑫等. 城市热岛效应对我国不同气候区既有居住建筑采暖空调能耗的影响研究 [J]. 南方建筑. 2020 (05): 16–20.
- [10] 罗炜宇. 湛江市碇洲岛地下水资源评价及开发利用对策研究 [J]. 地下水. 2020, 42 (05): 95–98.