建筑钢筋混凝土结构耐久性影响因素分析

徐宝战　李　磊　路子业　李　亚　陈　堂
中国中元国际工程有限公司 北京 100089

【摘　要】：钢筋混凝土结构耐久性直接关系建筑物服役寿命、维修成本及长期安全，其劣化过程受材料孔隙特征、钢筋保护层、裂缝状态、施工缺陷和环境侵蚀共同影响。针对碳化、氯离子迁移、冻融循环及钢筋锈蚀等典型问题，从混凝土密实性、保护层有效厚度、裂缝宽度与连通性等关键参数出发，分析耐久性能衰减机理，并将施工阶段形成的蜂窝、离析、早期收缩裂缝纳入长期损伤评价。研究认为，耐久性控制应由单纯提高强度等级转向材料性能、构造细节、环境作用和服役维护的综合协调，尤其应重视侵蚀介质传输路径及钢筋锈蚀启动条件控制，以增强结构全寿命周期内的稳定性和耐久储备。

【关键词】：钢筋混凝土；结构耐久性；混凝土碳化；氯离子侵蚀；钢筋锈蚀

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.059

钢筋混凝土兼具较高承载能力与良好整体性，但其耐久性具有时间累积特征。工程投入使用后，二氧化碳、氯盐、水分和温度变化作用于混凝土表层，并沿毛细孔、界面过渡区及裂缝向内部迁移。当碳化前沿接近钢筋表面，或氯离子含量达到破坏钝化膜的临界水平后，钢筋腐蚀会改变局部应力状态，锈胀裂缝又会进一步提高介质渗透速度，形成持续劣化过程。部分结构早期出现耐久性问题，并非单由环境严酷造成，而与水胶比偏大、保护层偏差、养护不足及构造薄弱部位处理不当密切相关。因而，识别不同因素的作用阶段、传递路径及相互影响，是提高结构耐久设计和维护针对性的基础。

1 材料与构造因素

（1）混凝土材料性能：混凝土内部孔隙结构影响水分、氧气、二氧化碳及氯离子的迁移速度，水胶比、胶凝材料组成和骨料级配因而成为耐久性控制中的基础参数[1]。普通建筑结构配合比设计中，若水胶比长期处于 0.50 以上，硬化浆体毛细孔连通程度增加，吸水率、渗透系数和氯离子扩散速率随之上升；地下室外墙、屋面板及沿海建筑等高湿或侵蚀环境构件，较多将水胶比控制在 0.40～0.45，并掺入粉煤灰、粒化高炉矿渣粉或硅灰调整浆体结构。粉煤灰有利于改善后期水化和工作性，矿渣粉可降低氯离子渗透速率，硅灰凭借微填充效应细化界面过渡区孔隙，但掺量偏高时会增加早期收缩敏感性，需与保湿养护制度同步匹配。粗细骨料宜控制含泥量、针片状颗粒比例及级配连续性，避免浆体局部富集、泌水及弱区形成；对耐久性要求较高的构件，宜同时考察抗渗等级、吸水率、氯离子扩散系数和表层密实度，使材料评价由单一抗压强度转向多指标综合判定。

（2）钢筋锈蚀与保护层：钢筋埋入高碱性混凝土后，表面会形成相对稳定的钝化膜，正常状态下腐蚀速率较低；当碳化前沿抵达钢筋位置，孔隙液 pH 下降，或氯离子在钢筋表面累积达到临界浓度后，钝化膜局部破坏并形成阳极、阴极反应区，水和氧气参与后产生持续电化学腐蚀。锈蚀产物体积大于原钢材，会沿钢筋周边产生径向胀压力，早期多表现为顺筋裂缝，继续发展后可引起保护层空鼓、剥落、钢筋有效截面积减少及粘结性能下降。保护层过薄会缩短二氧化碳、氯离子和水分到达钢筋表面的距离，而盲目增厚又可能增加表层收缩及温度裂缝风险，工程中通常依据环境类别、构件类型和设计使用年限确定保护层厚度。施工阶段可利用定位筋、塑料垫块或高强砂浆垫块控制钢筋位置，并重点检查梁底、板底、柱角及外墙迎水面等偏差高发部位；验收时宜采用保护层测定仪抽检实际厚度，并记录锈蚀变化，对局部偏薄区域及时处理，以免外观合格而内部耐久储备不足。

（3）裂缝与构造缺陷：裂缝对耐久性的影响取决于宽度、深度、贯通程度及所处环境，表面微细裂缝若长期受雨水、盐雾或氯盐作用，会逐渐成为侵蚀介质进入内部的优先通道[2]。梁板受弯区多见荷载裂缝，墙板与大面积楼板更易产生温度裂缝和干缩裂缝，施工缝、后浇带、预留洞口及截面突变部位则容易因约束不均形成局部应力集中；当裂缝宽度持续增大并向内部延伸时，碳化和氯离子迁移不再完全依赖浆体孔隙，钢筋失钝时间会明显提前。结构构造设计中，较多采用缩小钢筋间距、配置温度筋、设置后浇带及诱导缝等方法分散约束应力，地下外墙和屋面板还需兼顾防水层、止水钢板、穿墙套管节点及密封材料处理。若钢筋过密、保护层垫块布置不均或振捣棒难以进入，节点区容易形成蜂窝、孔洞与夹渣；此类缺陷虽未必立即降低承载力，却会削弱局部抗渗能力，并加快水

分和腐蚀性离子进入结构内部，因而需在施工验收阶段结合外观检查与必要局部检测及时处理。

2 环境与施工因素

（1）环境侵蚀作用：环境介质进入混凝土后，其作用往往具有持续性和叠加性。大气中的二氧化碳由表层向内部扩散，与氢氧化钙等水化产物反应后降低孔隙液碱度，碳化深度受环境湿度、混凝土密实度、养护质量和服役龄期共同影响，在中等湿度且孔隙连通度较高时发展更快。沿海建筑、盐雾区及使用融雪盐的停车场需重点关注氯离子侵入，氯盐可沿毛细孔、界面过渡区和裂缝迁移，并在钢筋附近逐步富集，即使碳化前沿尚未抵达钢筋表面，也可能因局部氯离子浓度升高引发点蚀。寒冷地区构件经历反复冻融后，孔隙水冻结产生膨胀压力，浆体与骨料界面微裂纹逐渐增多，表层砂浆剥蚀，动态弹性模量和抗压性能随循环次数增加而下降。地下结构若长期接触硫酸盐地下水，还需考虑硫酸根与水化产物反应生成膨胀性产物，引起开裂和强度衰减；若同时存在渗漏或干湿循环，侵蚀介质迁移还会加快。不同环境下材料选配、防护层类型和保护层厚度宜分别确定，并结合暴露面、排水条件进行校核，避免仅靠提高混凝土强度等级抵御多种侵蚀作用。

（2）荷载与温湿作用：结构长期受力后，裂缝并不会保持浇筑完成时的初始状态，持续荷载会引起混凝土徐变、钢筋应变重分配及受弯裂缝扩展，车辆荷载、设备振动和风荷载形成的反复作用还会促使局部微裂纹累积[3]。楼板、悬挑构件及大跨梁若长期处于较高使用荷载水平，裂缝宽度与挠度变化会增加水分、氧气及二氧化碳进入内部；外墙、屋面和露天构件同时受到太阳辐射、昼夜温差及季节温差影响，表层升降温速度快于内部，变形受到约束后容易产生温度应力和表面裂纹。高湿环境能够维持钢筋电化学腐蚀所需的电解质条件，而频繁干湿交替又会推动盐分在混凝土表层反复溶解、迁移和结晶，沿海外露构件在雨淋、蒸发和盐雾交替作用下，局部损伤更复杂。若排水坡度不足或节点长期积水，局部含水率持续偏高，裂缝周边更容易形成腐蚀活跃区。服役评估中宜同步考察荷载水平、裂缝变化、温度梯度和环境湿度，并结合挠度、裂缝宽度及含水状态变化判断劣化趋势，使耐久评价由静态强度检测延伸到长期环境与受力共同作用分析。

（3）施工与养护质量：耐久性缺陷常在施工阶段形成，并在投入使用数年后逐步显现。混凝土运输或现场等待时间偏长时，若靠额外加水恢复流动性，会提高实际水胶比，使抗压强度、抗渗性和表层密实度同步下降；浇筑过程中漏振容易形成蜂窝、孔洞和夹渣，振捣时间过长又可能造成粗骨料下沉、浆体上浮及局部离析。梁柱节点、剪力墙暗柱和钢筋密集区宜采用分层浇筑，并配合小直径振捣棒控制振捣间距和插入深度，减少施工冷缝及内部空隙。保护层垫块若数量不足或固定不牢，振捣后还可能出现钢筋偏位，使局部保护层减薄；模板拼缝不严时，漏浆会造成边角密实度下降。早期养护同样影响耐久性，楼板和墙体拆模后若迅速失水，表层尚未充分水化便容易形成塑性收缩及干缩裂缝，后期即使强度达标，抗渗性能仍可能偏低。施工中较多采用薄膜覆盖、保湿毡洒水或养护剂维持湿度，大体积构件可设置测温点控制内外温差和降温速率，并依据环境温度和构件厚度调整养护时间；迎水面和节点部位宜结合拆模检查处理蜂窝、孔洞及早期裂缝。

3 耐久性控制措施

（1）优化耐久性设计：耐久性设计宜从环境类别、设计使用年限和构件暴露条件出发确定材料与构造参数，避免在主体结构计算完成后再零散补设耐久措施[4]。地下室外墙、屋面、阳台、地下车库出入口及沿海外露构件长期受水分、盐雾或干湿循环影响，可采用低水胶比混凝土，并合理掺入矿渣粉、粉煤灰或硅灰改善浆体孔隙结构，同时控制氯离子含量、总碱量、骨料含泥量和外加剂适配性。氯盐侵蚀较重区域，可结合构件重要程度选用环氧涂层钢筋、不锈钢钢筋或阻锈剂，并在迎水面设置连续防水层、止水带及节点密封材料，降低侵蚀介质沿接缝进入结构内部的概率。构造设计还需校核保护层厚度、裂缝宽度和钢筋间距，墙板类构件适当增加分布筋，降低温度收缩产生的集中应力；截面突变、洞口边缘和后浇带交接处，则宜加强局部配筋并控制构造缝位置。对于设计使用年限较长的公共建筑及重要结构，材料指标还宜纳入氯离子扩散系数、抗冻等级、抗渗等级和吸水率等参数，并结合暴露面朝向、排水条件及维护可达性进行校核，使材料性能、构造细节与实际环境暴露水平相匹配，并为后续检测、维修及耐久性能复核预留条件。

（2）强化施工质量控制：施工质量控制的核心是把设计阶段确定的材料性能、保护层厚度和裂缝控制要求落实到构件实体。原材料进场后需核验水泥强度、骨料含泥量、矿物掺合料活性及外加剂适配性，混凝土到场时结合坍落度、扩展度、出机时间和运输时长判断工作状态，避免靠现场加水恢复流动性。浇筑前检查钢筋间距、保护层垫块、模板拼缝和预埋件位置，

梁底、柱角、剪力墙暗柱及外墙迎水面可增加保护层抽检点；垫块宜采用与构件耐久等级相适应的高强砂浆或专用塑料制品，避免位置偏移造成局部保护层不足。混凝土宜分层连续浇筑，分层厚度与振捣棒有效作用半径匹配，钢筋密集区采用小直径振捣棒辅助，减少蜂窝、夹渣和施工冷缝。继续浇筑施工缝前清除浮浆和松散骨料，并保持界面洁净湿润。拆模后重点观察表面失水、温差和早期裂缝，大体积构件可结合测温记录控制内外温差，普通楼板则以覆盖保湿和连续养护减少塑性收缩。对持续发展的裂缝需先判明成因，再采用封闭、灌浆或结构补强措施，使配合比、钢筋定位、振捣、拆模和养护形成连续质量控制。施工记录还需完整留存，便于后续质量追溯与耐久复核。

（3）完善检测维护机制：服役期管理宜依据环境侵蚀等级、构件重要程度和既往病害情况确定检测频率，外墙、屋面、地下室、车库坡道及受氯盐影响区域可列为重点部位[5]。常规巡检记录裂缝位置与宽度、渗水、剥落、锈迹和修补层变化，专项检测则可采用回弹法或钻芯法评价混凝土强度，利用保护层测定仪核查钢筋位置，以酚酞法测定碳化深度，并分层取粉检测氯离子含量。存在钢筋锈蚀疑虑时，可结合半电池电位、电阻率和局部开凿结果判断腐蚀范围，必要时增加钢筋截面损失和粘结状态检查，避免单一指标造成误判。对表层轻微碳化或渗水构件，可采用硅烷浸渍、聚合物涂层及裂缝封闭降低水分和盐分继续进入；局部钢筋已经锈蚀时，则需凿除松散混凝土、清理锈层，必要时补配钢筋，再以聚合物修补砂浆恢复保护层。维修完成后还应复查修补界面的空鼓、裂缝及防护层连续性，并将检测结果与历年记录对照，判断病害发展速率。若裂缝、剥落或截面损失已影响承载性能，处理方案还需结合结构鉴定采用增大截面、粘贴纤维复合材料或局部置换，使维修时点与损伤程度匹配，防止局部耐久问题继续扩展，并形成连续维护记录。

4 总结

钢筋混凝土结构耐久性受材料组成、构造细节、环境侵蚀和施工质量共同制约，其劣化常由介质迁移、混凝土碳化、氯离子累积及钢筋锈蚀叠加形成。工程控制中，单纯提高混凝土强度等级难以解决服役问题，更需关注水胶比、保护层厚度、裂缝宽度及早期养护等关键参数。针对沿海、高湿、冻融和化学侵蚀环境，宜结合暴露条件调整材料体系与构造措施，并严控钢筋定位、振捣密实度和养护质量。结构投入使用后，还需依据裂缝、碳化深度、氯离子含量及钢筋锈蚀状态开展检测和修复。将设计、施工、检测与维护贯穿服役全过程，有助于延缓耐久损伤扩展，减少维修成本，并维持结构长期安全与使用性能。

参考文献：

[1] 张凯,过民龙,杨永民,等.腐蚀环境中既有裂缝对钢筋混凝土结构耐久性影响规律研究[J].仲恺农业工程学院学报, 2024,37(3):39-43.

[2] 王艳,吴杰,张少辉,等.高地热环境多因素影响混凝土模拟孔溶液中钢筋腐蚀行为[J].硅酸盐学报,2024,52(11):3583-3593.

[3] 刘剑辉,王猛生,杨玉柱,等.混凝土抗冻融破坏性能研究进展[J].硅酸盐学报,2025,53(1):190-211.

[4] 赵辛玮.氯离子在混凝土中双时变扩散分析研究[J].中国市政工程,2022(4):59-63,124.

[5] 周佳骏,李丹.混凝土结构钢筋锈蚀无损检测方法研究进展[J].现代交通与冶金材料,2024,4(2):62-76.