

混凝土结构耐久性检测技术研究

文 / 巫巧燕 深圳市水务工程检测有限公司

摘要：混凝土结构作为建筑工程的核心，其耐久性直接关系到建筑物的寿命与安全。在经历起步、探索、规范化、大基建时期后，慢慢步入对既有建筑物的检测、鉴定、维护时期。本文系统阐述了影响混凝土结构耐久性的主要因素（碳化、氯盐侵蚀、冻融破坏、碱骨料反应、化学侵蚀、钢筋锈蚀等），汇总当前主流的混凝土结构无损检测技术（回弹法、超声法、超声回弹综合法、雷达法）、微破损检测技术（钻芯法、拔出法）以及针对钢筋锈蚀的电化学检测技术的原理、应用特点及局限性，展望新技术的发展方向。

关键词：混凝土结构；耐久性；无损检测；钢筋锈蚀；评估方法

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.20.031

引言

混凝土因成本低、可塑性强、抗压强度高优势，广泛应用于建筑、桥梁、隧道等工程。混凝土构筑物构成了现代社会的物质骨架，但这些坚固的结构持续承受着复杂多变的环境侵蚀（如大气中的CO₂、水分、冻融循环、海水中的氯盐、工业环境中的硫酸盐等）以及内部材料自身潜在的老化劣化风险（如碱骨料反应），这些因素共同作用，导致混凝土结构性能下降，最终可能引发开裂、剥落、保护层失效、钢筋锈蚀膨胀甚至结构承载力丧失等严重后果，不仅造成巨大的经济损失，更对安全构成严重威胁。因此，对新建建筑以及既有建筑的耐久性指标进行检测是重要环节。

一、影响混凝土结构耐久性的主要因素及对应的检测方法

混凝土结构的耐久性失效是一个复杂的物理化学过程，其表现形式多样，主要原因在于材料在环境因素作用下的劣化、荷载作用下的损伤变形、及钢筋的锈蚀等。主要劣化因素包括：混凝土碳化、氯离子侵蚀、冻融循环、碱骨料反应、化学侵蚀、钢筋锈蚀等，这些劣化因素往往是共同作用的，如冻融循环和氯盐侵蚀都会损害混凝土的结构完整性，氯盐的存在会降低混凝土的抗冻性，冻融循环和碳化也会相互影响，这些相互作用使得混凝土更加脆弱，加剧了混凝土结构的损伤进程。因此，混凝土结构检测需要结合多种方法综合评定。

（一）混凝土碳化

混凝土碳化是空气中二氧化碳扩散至混凝土内部，与氢氧化钙发生化学反应生成碳酸钙和水的过程。碳化深度作为评估混凝土保护层质量和预测钢筋起锈时间的关键指标，会影响数据的判定。

（二）钢筋锈蚀与氯盐侵蚀

钢筋锈蚀作为耐久性失效主要形式，源于碳化导致的pH值降低或氯离子引发的电化学腐蚀。锈蚀产物膨胀达原体积2.2-4倍，致使保护层开裂、钢筋截面积缩减，最终削弱结构承载力。氯离子通过扩散、毛细吸附或渗透侵入混凝土内部。当钢筋表面氯离子浓度达到临界阈值时，即使混凝土仍呈高碱性，钝化膜也将被破坏并引发局部点蚀。此类侵蚀速度快且危害性极大。

（三）冻融循环破坏

寒冷潮湿环境中，渗入混凝土孔隙的水反复冻融产生体积膨胀，对孔壁施加巨大静水压力与渗透压力。当压力超过混凝土抗拉强度时，将引发内部微裂纹萌生扩展，最终表现为表面剥落、骨料裸露，严重削弱混凝土强度与密实性。

（四）碱骨料反应

水泥中的碱金属离子与活性骨料在水分作用下反应，生成吸水膨胀的碱硅酸凝胶。凝胶吸水后体积膨胀数倍，在混凝土内部产生巨大膨胀应力，导致无规律网状开裂及强度下降，其发展缓慢但破坏不可逆。

（五）化学侵蚀

在工业或富含硫酸盐环境中，混凝土遭受硫酸盐、酸及镁盐侵蚀。硫酸根离子生成膨胀性钙矾石或石膏导致开裂；酸性物质溶解水泥石组分；镁盐反应形成无胶凝性产物，共同降低混凝土强度与密实度。

二、混凝土结构质量主要检测技术

通过分析影响混凝土结构耐久性的主要因素，如何通过检测准确获取混凝土结构的内部质量情况，主要检测方法可分为无损检测、微破损检测和针对钢筋锈蚀的专项检测技术。

（一）无损检测技术

无损检测技术能在不破坏或轻微影响结构构件使用性能的前提下，获取其内部或表面的有关信息，是耐久性普查和长期监测的首选。

1. 外观检查与裂缝监测

原理：最基础直观的方法，通过目视、望远镜、相机、裂缝显微镜等工具，记录结构表面的损伤形态（如裂缝宽度、长度、分布模式、剥落区域、渗漏痕迹、变色区域、析出物等）。

应用：定性判断损伤类型、严重程度和发展趋势。对关键裂缝进行长期监测至关重要。

优点：简便、快速、成本低、覆盖面广。

局限性：主观性强，依赖经验；只能反映表面状况，难以探测内部损伤；对细微或隐蔽裂缝识别能力有限。

2. 回弹法

原理：利用弹簧驱动的重锤以恒定动能撞击混凝土表面，测量重锤的回弹高度（回弹值）。回弹值与混凝土

土表面的硬度相关，而硬度在一定程度上反映表层混凝土的抗压强度（通常建立测强曲线），在年限较长的混凝土表面，需结合钻芯法进行修正。

应用：快速普查混凝土表层的相对强度均匀性，辅助判断是否存在表层疏松、风化、冻融损伤或碳化导致的表层性能变化。常与其他方法结合使用。

优点：操作简单快捷，仪器轻便，成本低，测试效率高。

局限性：仅反映表面（约20-30mm深度）硬度；受表面状况（光洁度、干湿、碳化层厚度）、骨料类型、测试角度影响显著；不能直接反映内部质量和耐久性劣化（如内部钢筋锈蚀）；精度相对较低，需建立地区或特定配合比的专用测强曲线。

3. 超声法

原理：向混凝土发射超声波脉冲，接收并分析穿透混凝土或在其表面传播的声波信号。主要测量声速（纵波速度 V ）、首波振幅衰减、波形频谱等参数。声速 V 与混凝土的动弹性模量、密度密切相关，是评价混凝土均匀性、内部缺陷（孔洞、裂缝、离析）和强度的重要指标。

应用：探测内部空洞、裂缝深度与走向、损伤层厚度、密实度变化；评估混凝土匀质性；辅助强度推定。

优点：可探测内部信息；对结构无损伤；设备相对便携。

局限性：需要良好的声耦合（表面平整度要求高）；钢筋对声波传播路径干扰大（需避开钢筋或修正）；测试结果受含水率影响；对垂直于声波传播方向的裂缝敏感，对平行裂缝不敏感；定量解释复杂，需要经验。

4. 超声回弹综合法

原理：结合回弹值（ R ）和超声声速（ V ）两个参数，利用建立的双参数经验公式或图表来推定混凝土强度。通常比单一方法精度更高、适用范围更广。

应用：主要用于混凝土强度推定，精度优于单一回弹法或超声法。在一定程度上也能反映表层和内部质量的综合信息。

优点：一定程度上抵消了单一方法的某些局限性（如表面状况对回弹的影响部分被内部声速信息补偿），提高强度推定可靠性。

局限性：仍需建立地区性或特定配合比的专用曲线；受钢筋和测试条件影响；主要目标仍是强度，对深层劣化或钢筋锈蚀的直接反映有限。

5. 雷达法

原理：通过向混凝土发射电磁波，当遇到电磁性质不同的缺陷或钢筋时，将产生反射电磁波，接收此反射电磁波得到波形图，根据波形图获得混凝土内部缺陷状况及钢筋位置等信息，以此来探测混凝土结构内钢筋位置、保护层厚度以及酥松层、孔洞、裂缝等缺陷。

应用：非金属定位钢筋位置、保护层厚度；探测内部孔洞、较大裂缝、分层离析区域；评估混凝土内部含水量分布（含水率高则介电常数大）；辅助判断冻融损伤层厚度等。

优点：检测速度快，可连续扫描成像，直观显示内部结构；对钢筋定位精度高；可穿透非金属覆盖层。

局限性：分辨率受天线频率限制，钢筋密集区信号复杂难以分辨，潮湿混凝土或含盐分时信号衰减大，对微小缺陷识别能力有限，数据解释需要专业知识。

6. 保护层厚度（电磁感应法）

原理：探头发射电磁场，通过钢筋扰动磁场强度计算埋深（精度 $\pm 1 \sim 3\text{mm}$ ）

优点：便携高效

局限性：密集钢筋网干扰精度，不适用非磁性筋（FRP筋）

（二）微破损检测技术

这类技术会在混凝土表面造成局部微小损伤，但通常不会显著影响结构的整体承载力和使用功能，可提供更直接、可靠的信息。

1. 钻芯法

原理：使用金刚石钻头在结构上钻取圆柱形芯样（常用直径70-100mm）。对芯样进行加工（磨平端面）后，进行抗压强度试验，这是目前评定混凝土抗压强度最可靠的方法之一。



应用：精确测定现场混凝土抗压强度；观察芯样内部的裂缝、孔洞、离析、分层、碳化深度、氯离子侵入轮廓、钢筋锈蚀状况等；可取样进行后续实验室化学分析（如氯离子含量、硫酸盐含量、碱含量）。

优点：结果直接、可靠（强度、内部状况）；可进行多种后续理化分析。

局限性：对结构有局部损伤，需修补；操作相对复杂、费时、成本较高；取芯位置和数量受限制（避开主筋、重要部位）。

2. 拔出法

原理：分为预埋和后装两种。常用后装法：在混凝土表面钻孔，嵌入锚固件（如胀栓或粘接锚栓），然后用专用拉拔仪将锚固件拔出，记录拔出破坏时的拔出力。拔出力与混凝土的抗拔强度相关，进而可推定混凝土的抗压强度。

应用：主要用于现场推定混凝土抗压强度，尤其适用于无法取芯或取芯困难的情况（如薄壁结构）。

优点：比回弹法精度高；测试速度比钻芯法快；损伤比钻芯法小（孔洞小）。

局限性：仍会造成局部破损需修补；测试结果受孔边混凝土局部质量影响较大；需建立可靠的拔出力-强度关系；对表层混凝土质量敏感。

（三）钢筋锈蚀专项检测技术

钢筋锈蚀是混凝土结构耐久性失效的核心环节和主要表现形式，其发展往往具有隐蔽性，一旦表面出现明显锈胀裂缝，内部钢筋可能已严重受损。因此，发展并应用科学、有效的钢筋锈蚀专项检测技术，对于评估结构当前状态、预测剩余寿命、制定维修加固策略至关重要。目前，钢筋锈蚀的检测主要采用剔凿检测方法、电化学测试方法和综合分析判断方法三大类。这些方法各有其适用条件、精度范围和优缺点，适用于不同的检测环境（如构件位置、可接近性、环境湿度、检测目的等）。在实际工程检测中，根据结构特点、锈蚀预期程度、检测资源及精度要求，选择合适的一种或多种方法组合应用，能够显著提高检测的准确性、可靠性和效率，为结构耐久性评估提供关键数据支撑。

1. 剔凿检测

原理：该方法特别适用于锈蚀已较严重、出现顺筋裂缝或保护层局部剥落的区域，或需要获取绝对基准数据以验证其他无损/微损方法结果的情况。通常选择在结构非关键受力部位或已破损区域进行。

优点：结果直观、准确、量化程度高，可直接获取钢筋状态的一手信息。

局限性：具有破坏性，会损伤结构局部；操作相对费时费力；代表性依赖于选点位置，需多点检测才能反映整体情况；对结构外观有影响，检测后需及时修复。

2. 电化学检测

原理：通过测量钢筋/混凝土电极系统的电化学参数（如电位、电流、电阻、极化阻力等）来间接推断钢筋发生锈蚀的可能性、速率或状态。主要方法有半电池电位法、极化电阻法/线性极化法等。

优点：基本无损，可进行大面积快速普查，能提供锈蚀活性和速率的空间分布信息，部分方法可定量评估锈蚀速率。

局限性：结果多为间接推断，解释需要经验和专业知识；受多种因素干扰，精度相对剔凿法低；通常需要配合剔凿检测进行校准和验证，尤其是在关键区域或结果存疑时；对测试环境（湿度、温度）和操作规范性要求较高。

3. 综合分析判定法

根据裂缝形态、混凝土保护层厚度、混凝土强度、碳化深度、混凝土中有害物质含量等检测数据判定钢筋的锈蚀情况。

三、基于检测结果的耐久性评估方法

混凝土结构耐久性现场检测与评定，一般情况下属于结构性能检测的检测与评定。混凝土结构的耐久性检测与评定应对结构构件所处的环境类别进行调查确定，并据此制定检测方案，确定检测部位和检测项目。获得

各种检测数据后，进行建模分析，对结构的当前耐久性状态和未来发展趋势进行科学评估。

四、当前检测技术面临的挑战与发展趋势

（一）主要挑战

1. 技术集成度低，单一检测方法往往只能反映结构某一方面或局部的信息（如回弹法仅表层强度，电位法仅锈蚀倾向）。缺乏能够有效融合多种检测数据，并进行综合分析、挖掘深层次关联和提升评估精度的平台或系统。数据分散，难以形成对结构整体耐久性状态的全面、准确认知。

2. 智能化与自动化程度不高：大量检测工作仍依赖人工操作和主观经验判断（如裂缝观测、雷达图像解读、电位图分析）。

3. 特殊环境与复杂结构适用性：对于极端环境（超低温、高温高湿、强辐射、深海）、新型混凝土材料及复杂结构形式的耐久性检测，现有技术的适用性、精度和可靠性面临更大挑战。

4. 对于隐蔽工程，比如桩基础，缺乏长期的监测，缺乏隐蔽后准确有效的检测方法。

（二）发展趋势

1. 多技术融合与长期监测：发展多传感器、多物理场（声、光、电、磁、热）协同检测技术平台，实现数据同步采集与深度融合。对隐蔽工程重要节点预埋分布式光纤等，进行长期监测。

2. 大数据分析 with 寿命预测：建立混凝土结构耐久性数据库，汇集材料性能、环境暴露条件、设计参数、检测结果、维修历史等全生命周期数据。

3. 新型检测技术与仪器研发：持续探索和开发基于新原理、新材料的检测技术。

结语

混凝土结构的耐久性是影响建筑物安全、使用寿命和经济效益的核心要素，没有任何单一检测技术能够全面、精准地捕捉混凝土结构复杂多样的耐久性劣化状态。实际工程中，必须依据结构类型、环境条件、预期劣化模式以及检测目标，科学选择和组合多种检测方法，形成优势互补的综合检测方案，才能对混凝土结构状态有准确的把控。

展望未来，混凝土结构检测技术的发展方向清晰而明确，通过持续的技术创新和标准引领，我们能够更早地发现隐患、更准确地评估风险、更科学地制定维修策略，最终提升工程的安全性、经济性与可持续性。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家标准 .GB/T 50344-2019, 建筑结构检测技术标准 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2019。
 [2] 中华人民共和国行业标准 .JGJ/T 23-2011 回弹法检测混凝土抗压强度技术规程 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011。
 [3] 中华人民共和国行业标准 .JGJ/T 152-2019 混凝土中钢筋检测技术标准 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2019。