

# 地震后框架结构节点损伤的超声回弹综合检测技术优化

文 / 吕泽聪 深圳市盐田港建筑工程检测有限公司

**摘要：**地震灾害对建筑结构，尤其是框架结构的梁柱节点区域，构成严重威胁。节点区域的隐性损伤难以通过肉眼观测准确评估，给震后建筑安全鉴定与修复决策带来巨大挑战。超声法与回弹法作为两种成熟的无损检测技术，分别对混凝土内部缺陷和表面强度敏感，但单一方法在评估地震后复杂的节点损伤时存在局限性。本文旨在探讨如何优化超声回弹综合法，通过两种技术的优势互补与信息融合，建立一套更精准、更可靠的地震后框架结构节点损伤评估体系。论文首先分析了地震作用下框架节点典型的损伤类型与特征，继而阐述了单一超声法和回弹法的原理及其在损伤检测中的不足。核心部分重点论述了综合检测技术的优化策略，包括测点布置方案、数据采集流程的标准化、基于损伤机理的数据关联分析模型的构建，以及检测结果的综合判定分级。通过引入案例分析与优化前后的对比，验证了所提优化方案的有效性。研究表明，优化后的超声回弹综合法能够显著提高对节点区域裂缝、疏松、强度劣化等损伤的识别精度与量化水平，为震后建筑结构的科学处置提供强有力的技术支撑。

**关键词：**框架节点；损伤检测；超声回弹综合法；技术优化；无损评估

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.016

## 引言

地震是极具破坏性的自然灾害，其强大的能量释放导致地面剧烈运动，对建筑物产生复杂的动力作用。在框架结构中，梁柱节点作为连接水平构件与竖向构件的关键传力枢纽，承受着巨大的弯矩、剪力和轴力的共同作用，是结构体系中最为关键的部分之一<sup>[1]</sup>。在地震往复荷载下，节点核心区常因抗剪能力不足、箍筋配置不当或混凝土施工质量缺陷等原因，率先出现损伤<sup>[2]</sup>。这些损伤可能表现为微观裂缝的扩展、混凝土的压碎剥落、钢筋的屈服乃至粘结滑移<sup>[3]</sup>。震后，结构工程师需迅速对建筑物的安全状况做出判断。对于明显坍塌或严重破坏的结构，决策相对简单。然而，大量建筑可能仅存在“隐性损伤”，即外部表象不显著，但内部材料性能已严重劣化，承载力与延性大幅下降。框架节点正是此类隐性损伤的高发区。若不能及时发现并修复，将严重削弱结构的整体性和抗震能力，在余震或未来地震中引发灾难性后果。因此，发展一种快速、准确、可靠的无损检测技术，用于定量评估地震后框架节点区域的损伤程度，具有极其重要的工程意义。它不仅是实现科学救灾、避免次生灾害的关键，也是进行针对性修复加固、节约社会资源的基础。

## 一、地震后框架节点损伤特征与检测需求

### （一）框架节点的地震损伤模式

在地震作用下，框架节点的损伤呈现出多种交织并存的复杂模式。节点核心区在巨大往复剪力作用下，混凝土常出现呈“X”形的交叉斜裂缝，这是最典型的剪切破坏特征。与此同时，在应力集中区域，混凝土保护层会发生压碎、剥落，严重时甚至导致核心区混凝土被完全压溃。在钢筋与混凝土的相互作用方面，梁柱纵筋在节点边缘往往会发生屈服，并在节点区内产生粘结滑移，导致裂缝宽度进一步扩展。此外，当箍筋配置不足时，如间距过大或弯钩锚固不完善，箍筋可能被拉直甚至崩

开，从而丧失对核心区混凝土的约束作用。这些从微观到宏观、从表面到内部、从材料到构件的损伤形式，在空间上相互关联，在时间上相互影响，共同构成了节点区域的复杂损伤场，严重影响节点的承载力、刚度及耗能能力，最终导致结构整体抗震性能的退化。

### （二）对无损检测技术的需求

针对上述复杂交织的损伤特征，理想的无损检测技术需具备多方面的综合能力<sup>[4]</sup>。首先，必须具备足够的内部探测能力，能够有效穿透钢筋混凝土构件，准确识别节点核心区内部的微观裂缝、空洞及疏松等隐蔽缺陷；其次，需要具备可靠的强度评估能力，能够定量判断因损伤导致的混凝土强度劣化程度；同时，该技术还应具备损伤量化与定位能力，能够对损伤程度进行分级评价并确定其空间分布范围。此外，理想的检测技术必须满足震后现场的特殊要求：设备需要便携可靠，操作流程应简洁高效，以适应震后复杂环境下的快速部署与检测需求。最重要的是，整个检测过程必须保证绝对的非破坏性，避免对已受损结构造成任何二次损害。超声回弹综合法在理论上具备同时满足这些需求的潜力，但其传统应用模式在测点布置、数据采集和结果分析等方面都需要系统性的优化与改进，才能更好地适应震后框架节点损伤检测的特殊性与复杂性。

## 二、超声法与回弹法的基本原理及局限性

### （一）超声法原理与局限性

混凝土超声检测通常采用穿透法，通过发射换能器发出高频超声波，并接收穿过混凝土后的信号，依据声时、波幅和主频等参数的变化判断材料内部状况<sup>[5]</sup>。具体而言，超声波在致密、高强度混凝土中传播速度较快，而遇裂缝、空洞或疏松等缺陷时，因需绕行或仅在固体介质中传播，声程增加导致声速降低；同时，波在缺陷界面处发生散射与反射，引起能量衰减，表现为波幅下降和主频向低频漂

移。然而，该方法在节点损伤检测中存在明显局限性：一是多解性，声速降低可能源于裂缝，也可能由强度偏低或骨料差异导致，难以准确判别；二是受表面状况影响，震后节点表面不平整会干扰换能器耦合效果，显著增大波幅测量误差；三是受钢筋干扰，节点区钢筋密集，超声波在钢筋中传播速度远高于混凝土，易形成“信号短路”，使声速测量值偏高，从而掩盖真实损伤。

### (二) 回弹法原理与局限性

回弹法的工作原理是借助弹簧驱动弹击杆冲击混凝土表面，并通过测量重锤的回弹距离来获取回弹值，该数值反映了混凝土的表面硬度，进而可依据其与抗压强度之间的统计关系推定强度。然而，该方法在应用于节点损伤检测时存在明显局限：首先，其检测结果对表面状态极为敏感，碳化、湿度、平整度及震后常见的轻微剥落都会导致回弹值失准；其次，其有效探测深度仅限于表层约 20 - 30 毫米，无法识别节点核心区可能存在的内部裂缝或疏松等损伤；此外，粗骨料的种类与粒径等材料因素也会显著影响回弹值与强度之间的换算关系，从而引入额外的不确定性。

## 三、超声回弹综合检测技术的优化策略

### (一) 测点布置方案的优化

针对传统方法测点布置随意、难以捕捉节点区域损伤梯度的问题，优化方案强调遵循“网格化、立体化、对称比对”的原则。具体而言，网格化布点要求在节点核心区及相邻梁端、柱端划定规则检测网格（如图 1），以 100 - 200mm 的典型间距确保数据的空间连续性与可对比性；立体化探测则需在梁、柱多个可及侧面及底面同步布点，构建节点区域的立体检测数据场，以判断损伤在截面内的分布情况；此外，对称比对原则利用结构对称性，将受损节点数据与未受损对称节点及假定完好的梁柱本体数据进行横向与纵向比对，从而有效消除材料自身变异性影响，精准凸显损伤引起的信号异常。

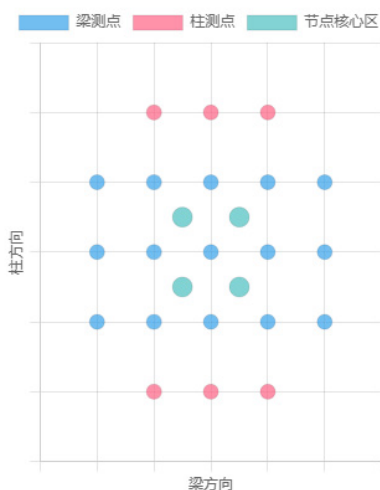


图 1：框架节点区域优化测点布置示意图

### (二) 数据采集流程的标准化与增强

为减少人为误差与环境干扰，需制定并执行一套严格的标准操作流程。该流程首先规定了对检测区域表面进行统一处理。如使用砂轮磨平浮浆与不平处，但不改变其本质结构，并详细记录表面碳化、剥落等状况；其次，在耦合环节强制要求使用同品牌、同型号的耦合剂，并确保耦合层均匀且无气泡。在数据采集维度上，超声数据除声时外，还必须同步记录并存储波幅与完整波形；回弹数据则要求在每个测点连续回弹 16 次，经剔除 3 个最大值和 3 个最小值后，取剩余 10 次的平均值作为有效回弹值。此外，流程还强调记录测点位置的钢筋分布可借助钢筋扫描仪、表观裂缝宽度与走向等辅助信息，为后续数据分析提供全面的背景依据。

### (三) 数据分析模型的优化：从强度推定到损伤识别

本次优化的核心在于摒弃单一的强度换算公式，转而构建一个多参数、分层次的损伤综合指数。该模型首先进行数据预处理与基线化，即利用从“完好参照区”获取的数据计算出基准声速与回弹值，并将节点区的测量值与之比较，计算相对变化率以消除材料本底变异。随后，进入多参数关联分析阶段：通过绘制“声速 - 回弹值”关联图，分析数据点的分布模式来判定损伤类型——例如，位于“低回弹、低声速”区域（区域 C）是地震节点典型严重损伤的特征；同时，结合波幅的异常衰减与接收波形的畸变，为内部损伤提供进一步证据。最终，基于声速变化率、回弹值变化率、波幅衰减率及波形畸变等级等参数，通过一个融合函数构建损伤综合指数。该指数作为一个无量纲值，并非精确的物理量，而是用以综合反映相对损伤程度，从而实现从强度推定向损伤识别的根本性转变。

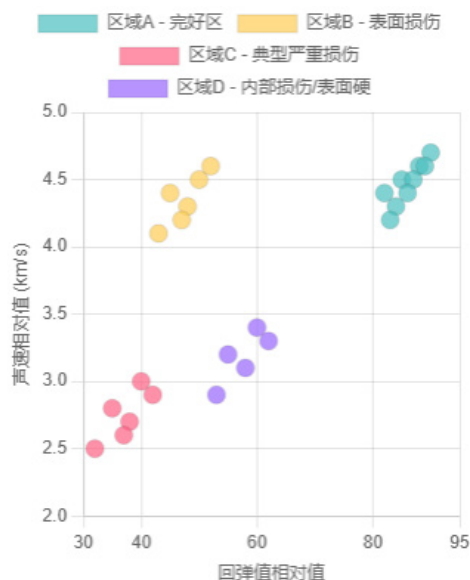


图 2 基于“声速 - 回弹值”关联图的损伤类型判别

(四) 检测结果的综合判定与可视化

基于计算得到的损伤综合指数 (DI)，通过在节点区域网格图上进行插值，可生成如图 3 所示的损伤云图，从而直观展示损伤的空间分布、严重程度与集中区域。结合 DI 值及其在“声速 - 回弹值”关联图中的分布模式，可对损伤等级进行判定：I 级（轻微损伤）表现为 DI 值低且数据点集中于“区域 A”，结构性能未受影响；II 级（中度损伤）表现为 DI 值中等，数据点开始向“区域 B”或“区域 C”漂移，或波幅出现局部衰减，表明存在微观裂缝或局部疏松，需引起注意并可能需修复；III 级（严重损伤）表现为 DI 值高，数据点大量分布于“区域 C”且伴有波幅严重衰减与波形畸变，表明内部已存在宏观裂缝、混凝土压碎或严重疏松，承载力显著下降，必须立即加固；IV 级（危险损伤）则表现为 DI 值极高，并常伴有混凝土剥落、钢筋屈曲等宏观现象，结构已处于危险状态。

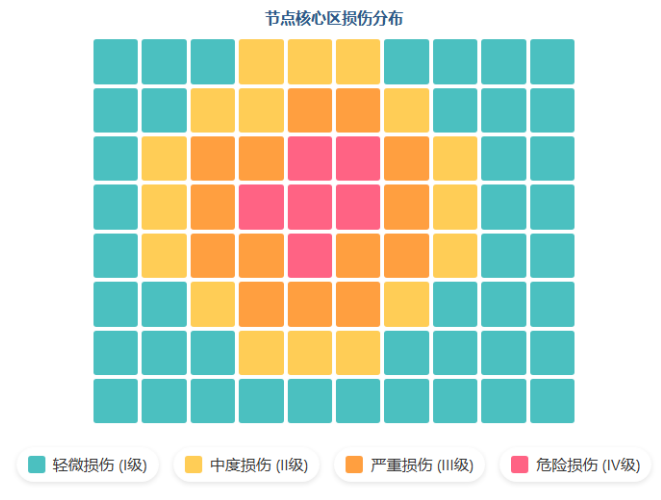


图 3：节点区域损伤云图可视化示例

四、优化技术应用的概念性案例

为清晰展示优化后技术的应用流程，现以一个震后框架结构中间层边节点的损伤评估为例进行说明。首先进行现场勘查与准备，记录节点表观裂缝，并利用钢筋扫描仪定位钢筋，确保超声测点布设能避开主筋或保持对称。随后执行优化检测方案：依据图 1 所示网格，在节点区及作为参照区的相邻梁、柱本体共布设 50 个测点，严格按标准流程使用数字超声仪和回弹仪采集各测点的声时、波幅、波形及回弹值。数据分析阶段，先计算参照区基准声速与回弹值，进而将所有测点数据归一化并绘制“声速 - 回弹值”关联图；结果显示节点核心区多数测点落入“区域 C”，且波幅衰减超过 50%、波形明显畸变，而梁、柱本体测点则集中于“区域 A”，据此计算各测点的损伤综合指数 (DI)。最终，

通过生成节点损伤云图输出结果，云图中节点核心区呈现大范围橙色与红色，与表观斜裂缝位置高度吻合，而梁、柱本体为绿色，据此判定该节点核心区存在严重内部损伤与强度劣化，传力性能已受到严重影响，建议立即采取外包钢或粘贴纤维复合材料等加固措施。

结语

本文系统研究了地震后框架节点损伤的超声回弹综合检测优化问题，得出以下核心结论：单一无损检测方法在评估震后节点复杂损伤时存在固有局限，而优化后的超声回弹综合法通过网格化立体布点、标准化数据采集、多参数关联分析及损伤综合指数与云图可视化，实现了从“强度推定”到“损伤识别”的范式转变。该方案的核心在于发挥两种技术的互补性——回弹法识别表面强度劣化，超声法探测内部缺陷，再通过与基准数据比对，能够有效区分损伤类型、量化损伤程度并定位损伤区域，从而为震后建筑结构的应急评估与加固设计提供科学、直观的决策依据。

未来研究可从以下方面深化：一是建立标准数据库，通过大量实验室试验与真实案例，明确不同损伤模式与超声回弹信号的对应关系，为损伤综合指数的量化提供统计基础；二是引入人工智能技术，利用深度学习对波形数据进行自动特征提取与模式识别，实现智能诊断；三是推动多技术融合，将本方法与红外热像、探地雷达等技术结合，构建多尺度立体检测体系；四是开发集成化设备与软件平台，实现数据自动采集、云端分析与报告生成，全面提升现场检测效率。

参考文献

[1] 侯光烈. 基于超声回弹综合法的公路工程质量无损检测技术研究 [J]. 产业创新研究, 2024, (24): 99-101.

[2] 芦琴玲. 基于超声回弹综合法的钢筋混凝土框架柱检测技术 [J]. 科学技术创新, 2024, (15): 171-174.

[3] 邓龙龙, 赵苏玲, 段小玲. 基于超声回弹综合法的钢筋混凝土框架柱检测技术试验研究 [J]. 能源研究与管理, 2023, 15 (03): 96-101. DOI: 10.16056/j.2096-7705.2023.03.015.

[4] 王中委. 超声 - 回弹综合法检测混凝土抗压强度技术的探讨 [J]. 住宅与房地产, 2018, (08): 201.

[5] 杨允泉. 超声回弹法在检测桥梁中的技术应用研究 [J]. 黑龙江交通科技, 2015, 38 (10): 82-83.

作者简介：吕泽聪，1997 年 05 月，男，汉族，广东汕头，大专，研究方向：建筑工程检测。