超声波法检测混凝土裂缝深度的误差分析

和雪梅

丽江市建设工程质量检测有限公司 云南 丽江 674100

【摘　要】：超声波法用于混凝土裂缝测深时，测得结果由声传播路径、首波到时、构件表面状态和声速取值决定。裂缝尖端绕射信号较弱，表面粗糙、耦合层不稳、钢筋或孔洞反射叠加时，测距关系会偏离理想几何模型，测深值随之产生系统偏差或随机波动。误差分析应把检测布点、仪器触发、材料非均质性和计算假设放在同一链条中识别，并以测面处理、测距校验、波形复读和多点比较降低单次读数的偶然性。

【关键词】：超声波法；混凝土裂缝；裂缝深度；误差分析；无损检测

DOI:10.12417/2811-0528.26.21.018

引言

混凝土结构服役期间受收缩、温度梯度、荷载扰动和施工缺陷影响，表层裂缝可能向内部继续延伸。裂缝深度关系到构件耐久性评估、修补范围确定和后续监测频次安排，单靠目测宽度难以判断裂缝尖端位置。超声波法利用声波绕过裂缝尖端后的传播时间差推算测深值，具有不破坏构件、现场布置灵活和结果形成较快等特点。超声测深对测面状态、探头耦合、声速代表性和首波识别较敏感，任何一个环节的偏差都会被带入计算结果，误差来源及检测要点应在作业前、中、后连续识别。

1 超声波法检测混凝土裂缝测深关系

1.1 裂缝尖端绕射声程计算关系

超声波法测深以裂缝对声传播路径的阻断为出发点，发射探头和接收探头分别布置在裂缝两侧时，直达波难以沿表面短路径完成有效传递，绕过裂缝尖端的声程成为主要识别对象。裂缝较浅、测距较小且混凝土表层均匀时，接收波首波清晰，时差和测距之间能够形成稳定几何关系；裂缝倾斜、尖端钝化或内部伴随微裂区时，声线并不只沿一个理想折线路径传播，首波可能来自局部绕射、侧向散射或钢筋附近反射，计算值随路径假设改变而偏移[1]。检测人员应记录裂缝走向、表面宽度、两侧测点对称性和构件厚度，并识别裂缝是否沿测线外侧偏转，否则公式中的测距看似准确，实际声程已经改变。裂缝深度可按声程差形成的几何关系用式（1）表达。

$$d = \frac{1}{2}\sqrt{v^2t^2 - L^2} \quad （1）$$

式（1）中，d 为裂缝测深值，单位为 mm；v 为混凝土超声波声速，单位为 mm/μs；t 为绕射波传播时间，单位为μs；L 为裂缝两侧探头中心距，单位为 mm。v 或 t 被高估时，根号项随之放大，计算值会偏大；L 测量偏大时，根号项被压缩，浅裂缝更容易出现低估。

1.2 测面布点条件下声速取值代表性

混凝土不是均一弹性介质，粗骨料、砂浆界面、孔隙和含水状态会改变局部声速，裂缝附近还可能存在未完全贯通的微损伤带。声速若只取自远离裂缝的完整区域，所得值更接近健全部位；声波实际绕过裂缝尖端时却经过损伤更集中的区域，两者差异会直接进入测深计算。测点布置也会放大这种差异，探头中心线没有垂直裂缝走向、两侧距离不对称或耦合面高低不平时，仪器记录的传播时间已经混入斜向传播和接触延迟。较稳妥的做法是在裂缝两侧布设多组对称测点，以相邻测距下的波形变化检验声速取值是否稳定，并把表面浮浆、修补层和潮湿斑带排除在代表性声速测区之外；当同一构件不同位置声速差异较大时，检测结论应把测区材料状态与裂缝位置共同描述，避免完整区参数替代裂缝区传播条件。

2 混凝土裂缝超声检测误差来源分析

2.1 首波到时识别偏差形成过程

首波到时是超声测深中最容易被人为判断影响的变量。混凝土内部骨料界面会让波形前沿出现低幅振动，裂缝尖端绕射波又常弱于表面散射波，若仪器增益设置过高，噪声尖峰可能被误认为首波；增益过低时，真正首波前沿被压在阈值以下，读数会落到后续较强波包。裂缝向内延伸较长或表面粗糙时，接收信号前沿更缓，人工游标移动一个小段时间就会使测深结果发生明显变化。检测记录不能只保存最终时间值，还应保留波形截图、增益档位和触发阈值，使同一测点在复读时能够回到相近判定位置[2]。自动拾取算法虽然能减少人工游标差异，但它仍依赖噪声滤波、门限位置和波形平滑参数。裂缝附近存在钢筋、蜂窝或孔洞时，局部反射会在首波前后形成多个小峰，算法可能把能量较强的反射峰当成有效到时。人工复读与自动拾取之间出现差别，并不一定说明某一方错误，而是提示测点传播路径已经复杂化。对这类波形应调整探头位置或扩大测距序列，观察到时变化是否随测距单调延长；若相邻测点的波形

形态突然改变，检测人员应把此处作为可疑读数处理，回查测面状态、配筋走向和裂缝分叉情况。

2.2 耦合条件变化下内部干扰响应

探头与混凝土表面之间的耦合层决定声能进入构件的稳定程度。裂缝检测常在既有结构表面进行，测面可能存在灰尘、涂层、浮浆、凹凸点或潮湿差异，耦合剂厚薄不一会使声波起始相位和幅值发生变化。幅值降低后，首波前沿更难识别；耦合层局部过厚时，探头接触延迟也会混入传播时间。钢筋靠近裂缝时，金属界面对声波的反射和导向效应会改变接收波包，孔洞或蜂窝则可能让波线绕行，造成检测结果在相邻测点之间离散增大。误差传递还会呈现节点层级、箭头方向、颜色区分和裂缝剖面位置上的差别：表面因素先改变耦合，内部因素直接扰动波形，到时判断和声速取值再共同影响计算。上述耦合状态、内部干扰和测深计算之间的误差传递关系见图 1。

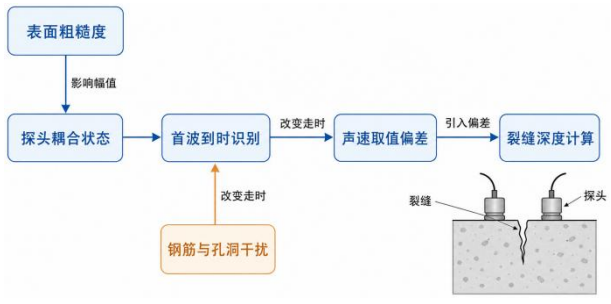


图 1 混凝土裂缝超声测深误差传递关系

图 1 把表面粗糙度放在上游节点，说明其先改变探头耦合状态，再影响首波幅值；钢筋与孔洞干扰由下方橙色节点进入首波到时识别，箭头方向显示内部反射主要改变走时判定，最终和声速取值偏差一起传入测深计算。

3 超声波法检测混凝土裂缝测深要点

3.1 测点序列布设下波形复读要点

误差控制应从测点序列开始，而不是在计算完成后再筛掉不合意结果。裂缝两侧测点要沿垂直裂缝方向布置，中心距递增时保持探头压力、耦合剂厚度和表面处理方式一致，使相邻测点的传播时间变化具有可比性[3]。每一个测点至少应完成发射与接收方向互换后的波形复读，若首波位置、主峰形态和背景噪声明显不同，应先判断耦合面、钢筋位置或裂缝走向是否改变，而不是直接求平均。测点序列中个别结果偏离相邻点时，现场记录应说明波形异常和构件表面条件，后续测深判断按可解释的连续趋势取值；当裂缝边缘破碎或表面存在旧修补层时，测点应避开材料突变带，保留同一类表面条件下的读数。

3.2 声速校验条件下测深结果表达

声速校验要贴近裂缝所在构件和检测面。若在同一构件完整区取得声速，校验位置应避开露筋、修补层、潮湿边界和明显蜂窝麻面；若构件厚度或配筋条件导致直达声速难以取得，可选择与裂缝区域材料状态相近的侧面或邻近构件进行比对，但结果表达应说明声速代表范围。测深结果不宜只给一个孤立数值，更应结合裂缝走向、测点离散程度和波形可信度写成区间或等级判断。对于首波难辨、声速差异大、测距序列不连续的部位，结论应提示检测不确定性来源，并建议采用钻芯、开槽或其他验证方式确认处治范围。仪器读数、计算结果和工程判断分层表述，波形质量较低的测点不能与稳定测点放在同一可信等级中。

4 结语

超声波法检测混凝土裂缝深度的误差，是声传播模型、现场接触条件和人工波形识别共同作用后的结果。测点距裂缝过近时绕射路径差不足，过远时首波幅值衰减，声速取值又会受到含水率、骨料级配和裂缝附近缺陷影响，测深值不能被理解为单一仪器读数。检测作业应在裂缝两侧形成稳定测距、保持耦合层一致、记录首波判定依据，并用多点结果检查异常离散。只有把误差来源写入布点和计算环节，超声测深结果才能更稳妥地服务混凝土裂缝处治判断；对波形畸变、测面条件差或构件内部缺陷复杂的部位，还应把验证方式提前纳入检测记录。

参考文献：

[1] 吴章勤,王兴文,吴影.超声双波法检测螺栓应力的误差分析[J].中国科技纵横,2025,(21):86-88.

[2] 池奥,肖帮,费洪磊,等.超厚钢管柱自密实混凝土无损检测技术研究[J].工程质量,2026,44(S1):97-101.

[3] 徐春广,栗双怡,黄院生,等.基于扭矩法和超声法检测螺栓预紧力的误差分析[J].电子机械工程,2023,39(2):1-4.