

水运工程施工技术标准与 质量控制检测验收规范 实用手册

◎ 主编 陈路 ◎

北京电子出版物出版中心

水运工程施工技术标准与质量控制 检测验收规范实用手册

主编 陈 路

四

卷

北京电子出版物出版中心

检测目的	方法名称	测试量	换算原理(一)
混凝土的内部缺陷与损伤程度	超声脉冲法	声时、波高、波形、频谱、反射回波	波的绕射、衰减、叠加等
	声发射法	声发射信号、事件记数、幅值分布能谱等	声发射源的定位, 声发射的凯塞效应
	脉冲回波法	应力波的时域、频域图	从时域、频域的综合分析确定应力波的反射位置
	射线法	穿透缺陷区后射线强度的变化	不同介质对射线吸收的差异
	雷达法	雷达反射波	不同反射物的雷达波反射强度的差异
	红外热谱法	热发射	缺陷区热发射强度的变化
其他性能	共振法	固有频率、品质因数	振动参数分析及其与混凝土弹性、非弹性、脆性及耐久性之间的关系
	敲击法	固有频率、对数衰减率	
	超声法	声速、衰减系数、频谱	应力波分析及其与混凝土弹性、非弹性等性能之间的关系
	透气法	气流变化	孔隙渗透性
	磁测法	磁场强度	钢筋对磁场的影响
	电测法	混凝土的电阻率及钢筋的半电池电位	电阻率与含水率及厚度的关系, 及钢筋锈蚀与半电池电位的关系
	射线法	射线穿过钢筋区后的强度变化	射线摄影分析
	中子散射法	子中散射强度	散射强度与氢原子含量的关系
	中子活化法	β 射线与 γ 射线的强度、半衰期等	同位素与相应的稳定元素与射线特征值的关系

(二) 超声法检测混凝土缺陷

1. 混凝土浅裂缝检测

所谓浅裂缝,系指局限于结构表层,开裂深度不大于 500mm 的裂缝。当然实际检测工作中事先不会知道裂缝的深浅。一般情况下可根据结构物的断面尺寸和裂缝在结构表面的宽度,大到估计被测的是浅裂缝还是深裂缝,对于一般工程结构中的梁、柱、板和机场跑道出现的裂缝,都属于浅裂缝。

根据被测结构的实际情况,浅裂缝可分为单面平测法和对穿斜测法。

(1) 平测法

当结构的被测部位只具有一个表面可供超声检测时,可采用平测法进行裂缝深度检测,如混凝土路面、飞机跑道、洞窟建筑及其他大体积结构的浅裂缝检测。

如图 7-2-17 所示,首先将发射换能器 T 和接收换能器 R 置于裂缝同一侧,并将 T 耦合好保持不动,以 T、R 两个换能器内边缘间距 l'_i 为 100、150、200……(mm),依次移动 R 并读取相应的声时值 t_i 。以 l' 为纵轴、 t 为横轴绘制 $l'-t$ 坐标图,如图 7-2-18 所示。也可以用统计法求 t 与 l' 之间的加归直线式 $l' = A + Bt$

式中 A 、 B ——待求的回归系数。

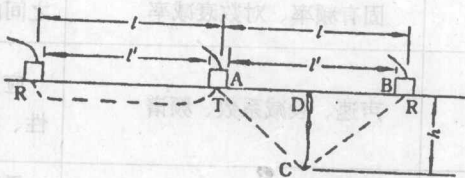


图 7-2-17 单面平测裂缝

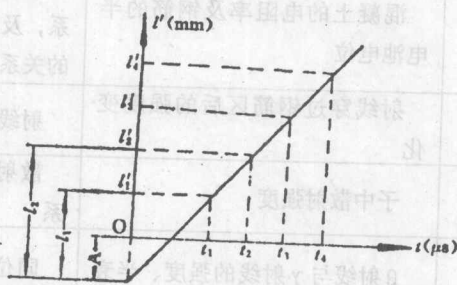


图 7-2-18 平测“时-距”

每一个测点的超声实际传播距离 $l = l' + A$ 。考虑“ A ”是因为声时读取

过程中存在一个声时初读数 t_0 及首波信号并非沿混凝土表面直接传播, 所以“ A ”是一个声程的综合修正值。

第二步进行跨缝的声时的测量。将 T 、 R 换能器分别置于以裂缝为轴心的对称两侧, 以 l' 为 10、150、200…… (mm), 分别读取声时值 t_{ci} 。该声时值便是脉冲波绕过裂缝末端传播的时间, 根据几何原理, 可推算出如下关系式:

$$\overline{DC}^2 = \overline{AC}^2 - \frac{1}{4}\overline{AB}^2 \quad (7-2-23)$$

$$\overline{AC} = \frac{1}{2}vt_c = \frac{1}{2}\frac{l \cdot t_c}{t} \quad (7-2-24)$$

式中 $\overline{DC}$ ——即为裂缝深度 h ;

v ——无缺陷处混凝土的声速;

t_c ——脉冲波绕过裂缝传播的时间;

$\overline{AB}$ ——无缺陷混凝土的超声传播距离 (l);

t ——无缺陷混凝土的声时。

于是可将 (7-2-23) 式改写成:

$$h = \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{t_c}{t}\right)^2 - 1} \quad (7-2-25)$$

该式便是目前国内外广泛用于单面平测法计算裂缝深度的公式。

此法是基于裂缝中完全充满空气, 脉冲波只能绕过裂缝末端到达接收换能器, 当裂缝中填充水或泥浆, 脉冲波便经水耦合层穿过裂缝直接到达接收换能器, 不能反映裂缝的真实的深度。因此检测时, 要求裂缝中不得填充水和泥浆。若裂缝中的水无法排除, 可采用横波换能器进行检测, 因横波不能在水中传播, 因而排除了水的干扰。

当有钢筋穿过裂缝时, 如果 T 、 R 换能器的连线靠近该钢筋, 则沿钢筋传播的脉冲首先到达接收换能器, 测试结果也不能反映裂缝的深度。

试验试明, 当有钢筋穿过裂缝时, 换能器必须离开钢筋一定距离, 方能避免钢筋的影响。如图 7-2-19 所示, 若换能器附近无钢筋影响, 则脉冲波绕过裂缝所需的声时 t_c 为:

$$t_c = \frac{1}{v} \cdot \sqrt{4h^2 + l^2} \quad (7-2-26)$$

当有钢筋时, 脉冲波通过钢筋所需要的声时 t_s 可按下式计算:

$$t_s = 2a\sqrt{\frac{v_s^2 - v^2}{v_s^2 \cdot v^2}} + \frac{1}{v_s} \quad (7-2-27)$$

欲使钢筋对裂缝深度检测不造成影响, 必须使 $t_s \geq t_c$, 所以应有:

$$2a\sqrt{\frac{v_s^2 - v^2}{v_s^2 \cdot v^2}} + \frac{1}{v_s} \geq \frac{1}{v} \sqrt{4h^2 + l^2} \quad (7-2-28)$$

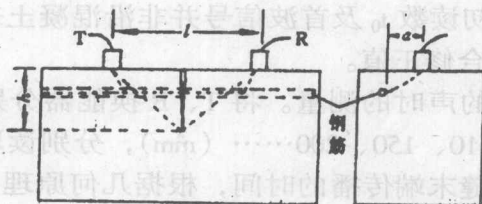


图 7-2-19 平时避免钢筋的影响

上式经简化得：

$$a \geq \frac{v_s \sqrt{4h^2 + l^2} - v \cdot l}{2 \sqrt{v_s^2 - v^2}} \quad (7-2-29)$$

式中 v_s ——钢筋声速；

v ——混凝土声速；

l ——两个换能器之间的距离；

h ——裂缝深度；

a ——为避免钢筋影响，换能器距钢筋的最小距离。

由于混凝土的声速不是固定值，钢筋的声速又受其直径及周围混凝土质量的影响，也并非固定值，所以“ a ”也是随钢筋直径及混凝土质量而变化的一个数。对于一般的混凝土和钢筋来说，可粗略考虑成 $a \geq 1.5h$ 。

试验表明，由式 (7-2-25) 计算的裂缝深度 (h)，随换能器至裂缝的距离 ($\frac{1}{2}$) 不同而有所不同，一般情况下换能器至裂缝的距离与裂缝深度接近时，计算的 h 值较可靠。但是在实际检测中事先无法判别裂缝深度，因此只能以各次计算的平均值依据，当平均值大于某一组测试的 l 值时，说明该组的换能器至裂缝的距离太近，计算的 h 值误差较大，应将该组数据舍弃，取余下各组 h 的平均值，作为裂缝的判定深度值。

南京水利科学研究院，曾用 $300 \times 300 \times 1200\text{mm}$ 试件弯折至开裂。从侧面测量裂缝的深度为 186mm ，再用超声脉冲波作单面测裂缝的深度，结果见表 4-2-12。

表 4-2-12

两个换能器内边缘之间距离 (mm)

测试项目	两个换能器内边缘之间距离 (mm)							
	150	200	250	300	350	400	450	500
不跨缝声时值 $t (\mu\text{s})$	54.9	67.8	79.2	91.5	103.0	115.8	127.8	139.9

测试项目	两个换能器内边缘之间距离 (mm)							
	150	200	250	300	350	400	450	500
跨缝声时值 t_c (μ s)	98.0	120.6	126.0	131.0	144.4	154.6	160.9	171.0
计算缝深 h (mm)	168	204	203	194	210	211	202	203

由表中 8 个 h 值的平均值为 199mm, 大于第一组的 h 值, 故舍弃 168 后取余下 7 个 h 平均值为 204mm 与实际裂缝深度的误差为 9.7%。

2. 斜测法

由于实际裂缝中不可能被空气完全隔开, 总是存在个别连通的地方, 因此单面平测时, 脉冲波的一部分绕过裂缝末端, 另一部分穿过裂缝中的连通部位, 以不同声程到达接收换能器, 在仪器的接收信号首波附近形成一些干扰波, 严重影响首波起始点的辨认, 如操作人员经验不足, 便产生较大的测试误差。所以当结构物的裂缝部位具有一对相互平行的表面时, 宜优先选用对穿斜测法。

一般的钢筋混凝土梁、柱、板等构件都具有一对平行表面, 可按图 7-2-20 所示的方法布置换能器, 进行裂缝深度检测。

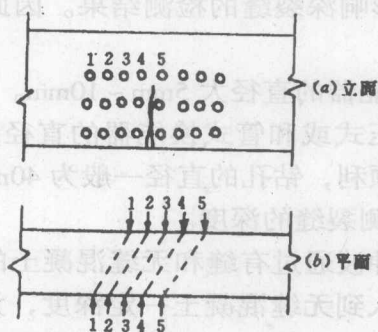


图 7-2-20 斜测裂缝深度

该方法的基本点是保持 T、R 换能器的连线通过缝和不通过缝的测试距离相等、倾斜角一致的条件下, 读取相应的声时、波幅和频率值。当 T、R 换能器的连线通过裂缝时, 由于混凝土失去了连续性能在裂缝界面上产生很大衰减, 接收到的首波信号很微弱, 其波幅和频率与不过缝的测点相比较, 存在显著差异。据此便可判定裂缝的深度及是否在水平方向贯通。

这种检测方法较直观, 测试结果较可靠, 一般工业与民用建筑的混凝土构件裂缝检测多用此方法。

2. 混凝土深度裂缝检测

所谓深裂缝,系指混凝土结构物表面开裂深度在 500mm 以上的裂缝。在实际检测中,深裂缝和浅裂缝并没有严格的界限,尤其是大体积混凝土结构,即使是深度小于 500mm 的裂缝,也可以按深度裂缝的检测方法进行测试,因为事先很难断定它不是深裂缝。

对于水坝、桥墩、大型设备基础等大体积混凝土结构,在浇筑混凝土过程中,由于水泥的水化热散失较慢,混凝土的内部温度比表面高,使结构断面形成较大的温度梯度,当由温差引起的拉应力大于混凝土的抗拉强度时,便在混凝土表面产生裂缝。温差越大,形成的拉应力越大,裂缝越深。因此,大体积混凝土在施工过程中,往往因施工管理不善而造成较深的裂缝。

(1) 测试方法

深裂缝的检测不能用单面平测法,对于大体积的混凝土来说,即使具有一对平行表面,也因其测距太大,测试灵敏度满足不了要求而不能在平行表面进行测试。一般是在裂缝两侧钻测试孔,用径向振动式换能器置于钻孔中进行测试。

① 测试孔

如图 7-2-21 所示,用于电钻或在裂缝两侧分别钻测试孔 A、B。为了便于声学参数的比较,可在裂缝的一侧多钻一个较浅的孔 C。

测试孔的质量直接影响深裂缝的检测结果。因此,对测试孔有如下技术要求:

A. 孔的直径应比换能器的直径大 5mm ~ 10mm。

目前国内生产的增压式或和管式换能器的直径多数在 27mm ~ 35mm,为使换能器在测孔中移动顺利,钻孔的直径一般为 40mm ~ 50mm。

B. 孔的深度大于被测裂缝的深度。

本测试方法是以脉冲波通过有缝和无缝混凝土的波幅变化来判定裂缝的深度,因此测孔必须深入到无缝混凝土一定深度,为便于判别,深入到无缝混凝土的测点应不少于 3 点。当然,事先不知道裂缝深度,一般凭经验先钻至一定深度,经测试,如发现测孔未超过裂缝的深度,应加深钻孔。

C. 对应的两个测孔应始终位于裂缝两侧,且其轴线保持平行。

因声时值和波幅值随测试距离的变化而变化,如果两个测孔轴线不平行,各测点的测试距离不一致,读取的声时和波幅值缺乏可比性,将给测试数据的分析和裂缝深度判定带来困难。

D. 对应测孔的间距宜为 2m 左右,同一结构各对应测孔的间距应相同。

根据目前一般超声仪器和径向振动式换能器的灵敏度及工程实测经验表明,测孔间距过大,脉冲波的接收信号很微弱,过缝与不过缝进行测试的波幅差异不太明显,不利于测试数据的比较和裂缝的判断。若测孔间距过小,

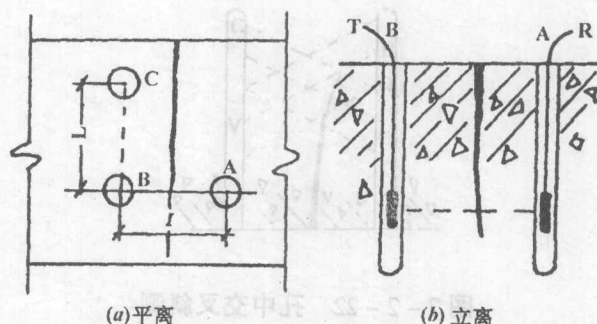


图 7-2-21 钻孔测裂缝深度

测试灵敏度虽然提高了,但是延伸的裂缝有可能位于两个测孔的连线之外,造成漏检。

E. 孔中的粉尘碎屑应清理干净

如果测孔中存在粉尘碎屑,注水后便形成悬浮液,使脉冲波在孔中大量散射而衰减,影响测试结果。

F. 横向测孔的轴线应具有一定倾斜角

当需要在混凝土结构物的侧面钻横向测孔时,为了保证测孔中能蓄满水,应使孔口高出孔底一定高度。必要时可在孔口做一“围堰”,以提高测孔的水位。

②测试

首先向测孔注满清水,并检查是否有漏水现象,如果漏水较快,说明该测孔与裂缝相交,此孔不能用于测试。经检查测孔不漏水,可将 T、R 换能器分别置于裂缝同侧的 B、C 孔中,以相同高度等间距地同步向下移动,并读取相应声时和波幅值。再将两个换能器分别置于裂缝两侧对应的 A、B 测孔中,以同样方法同步移动两个换能器,逐点读取声时、波幅和换能器所处的深度。换能器每次移动的间距一般为 200mm ~ 300mm,当初步查明裂缝的大致深度时,为便于准确判定裂缝深度,当换能器位于裂缝末端附近时,移动的间距应减小。

如果需要确定裂缝末端的具体位置,可按图 7-2-22 所示的方法,将 T、R 换能器相差一个固定高度,然后上下同步移动,在保持每一个测点的测距相等,测线的倾角一致的条件下,读取相应的声时的波幅值及两个换能器的位置。

(2) 裂缝深度及末端位置判定

①裂缝深度判定

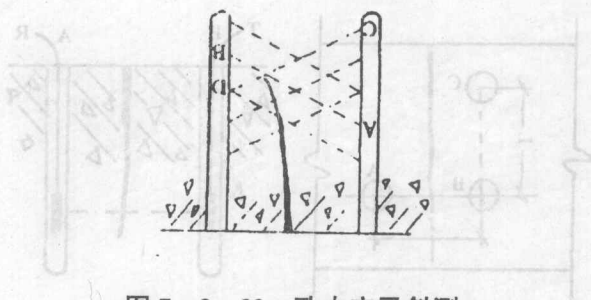
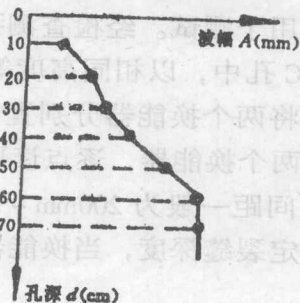


图 7-2-22 孔中交叉斜测

钻孔测裂缝深度的方法，主要以波幅测值作为判据。以裂缝两侧相对应的一对测孔所测得的波幅值和相应的孔深作图进行判别。其方法如下：换能器所处深度 d 为纵坐标，对应的波幅值 A 为横坐标，绘制 $d-A$ 坐标图，如图 7-2-23 所示，随着换能器位置的下移，波幅逐渐增大，当换能器下移至某一位置后，波幅达到最大并基本保持稳定，该位置对应的深度，便是该裂缝的深度值 h 。

在混凝土结构物上产生的裂缝总是表面较宽，越向里深入越窄，直至闭合，而且裂缝两侧的混凝土不可能被空气完全隔开，问题在个别地方被石子、砂粒等固体介质所连通。裂缝越宽，连通的地方越少，相反，裂缝越窄，连连通的地方越多，因此脉冲波通过裂缝时，一部分被空气层反射，一部分经连通点穿过裂缝传播到接收换能器。所以通过缝和不通过缝的测点声时差异不明显，而波幅差异却很大，且随着裂缝宽度减小，波幅值增大，直至测线超过裂缝末端，波幅值达到最大值。

图 7-2-24 $d-A$ 坐标图

②裂缝末端位置判定

如图 7-2-23 所示，当两个换能器的连线（测线）超过裂缝末端后，波幅测值将保持最大值，根据这种情况可以确定达到裂缝末端的两条测线 AB

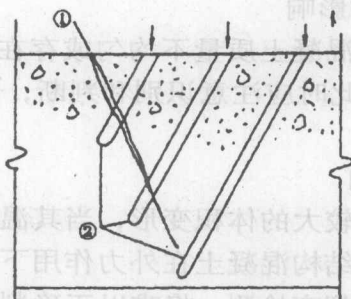


图 7-2-25 压水法测裂缝深度

①裂缝；②压水孔

和 CD 的位置，该二线的交点便是裂缝末端的位置。

实践证明，钻孔测裂缝深度的方法可靠性相当高，与传统的压水法和渗透法检验相比较，超声脉冲法能反映出极细微的裂缝，所以比其他方法检测的结果深一些。

例如南京水利科学研究院等单位曾在某水利枢纽工程质量检测中，采用钻孔进行超声脉冲波对测的方法，测了 70 多条裂缝的深度，设计和施工部门据此进行了补救处理。当时为了验证检测结果，对部分裂缝采用压水法复验其深度，如图 7-2-25 所示。以一定压力先后向每一斜孔中压水，如某一孔穿过裂缝，压水试验时，水无处渗透，水压基本保持不变，由此可判定该裂缝的深度。由于压水孔不可能钻很多，两个斜孔的高度差较大，测量结果误差较大，而且对于微细裂缝，由于渗水量极少，对裂缝末端的判断十分困难，故一般压水法测得的结果浅于裂缝的实际深度。现将几个裂缝的两种方法检测的结果列于表 7-2-13 进行对比。

表 7-2-13

裂缝检测对比

部 位	1号厂房 16-17孔	2号厂房 14-15孔	3号船闸 5号缝	右墙右侧 7号缝	右墙 左侧	左墙 左侧
缝 深 (m)						
方 法						
压水法	3.35	4.00	3.22	3.50	4.30	7.91
超声法	3.75	4.30	3.30	5.50	5.75	10.70

应用此法时，应注意以下几个问题：

A. 混凝土不均匀性的影响

当一对测试孔之间的混凝土质量不均匀或存在不密实和空洞时,将使 $d-A$ 曲线偏离原来趋向,此时应注意识别和判断,以免产生对裂缝深度的误判。

B. 温度和外力的影响

由于混凝土本身存在较大的体积变形,当其温度升高而膨胀时,其裂缝变窄甚至可能完全闭合,结构混凝土在外力作用下,其受压区也会产生类似情况。在这种情况下进行超声检测,将难以正确判别裂缝深度。因此,最好在气温较低的季节或者结构卸荷状态下进行裂缝检测。

C. 钢筋的影响

与浅裂缝测试的道理的一样,当有主钢筋穿过裂缝且靠近一对测孔时, T 、 R 换能器处于该钢筋的高度时,大部分脉冲波沿钢筋传播至接收换能器,波幅测值将难以反映裂缝的存在,测试时应注意判别。

当裂缝充水,脉冲波很容易穿过裂缝传播到接收换能器,有裂缝和无裂缝的波幅值无明显差异,难以判别裂缝深度。因此,检测时被测裂缝中不应填充水或泥浆。

3. 混凝土不密实区和空洞检测

混凝土和钢筋混凝土结构物在施工过程中,有时因漏振、漏浆或因石子架空在钢筋骨架上,导致混凝土内部形成蜂窝状不密实或空洞。尤其是体积较大的结构或构件,因混凝土浇灌量较大,又要求连续的浇筑,管理上稍有疏忽,便会产生漏振或混凝土拌和物离析的现象。对于一般工业与民用建筑的混凝土构件,处于钢筋较密集的部位(如框架结构的梁、柱连接处),在施工工艺上如不采取一定措施,往往会产生石子架空的现象。这种陷蔽于结构内部的缺陷,如不查出并进行技术处理,其后果是非常可怕的。

(1) 测试方法

混凝土内部的隐蔽缺陷情况,无法凭直觉判断,一般根据现场施工记录和外观质量情况,或者在结构的使用过程中出现了质量问题而怀疑混凝土内部可能存在的缺陷,其位置只是大致的,因此这类缺陷的测试区域,一般总要大于所怀疑的范围,或者首先作大范围的粗测,根据粗测情况再着重对可疑区域进行细测。

①平面对测

当结构被测部位具有两对平行表面时,可采用一对厚度振动式换能器,分别在两对互相平行的表面上进行对测。如图 7-2-26 所示,先在测区的两对平行表面上,分别画出间距为 200mm~300mm 的网格,并逐点编号,定出对应测点的位置,然后将 T 、 R 换能器经耦合剂分别置于对应测点上,逐点读取相应的声时 (t_i)、波幅 (A_i) 和频率 (f_i),并量取测试距离 (l_i)。

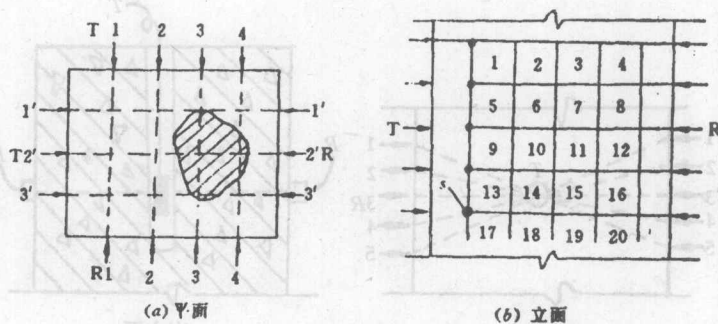


图 7-2-26 对测法换能器布置

②平面斜测

当结构物的被测部位只有一对平行表面可供测试，或被测部位处于结构的特殊位置，可采用厚度振动式换能器在任意两个表面进行交叉斜测。测点布置如图 7-2-27 所示。

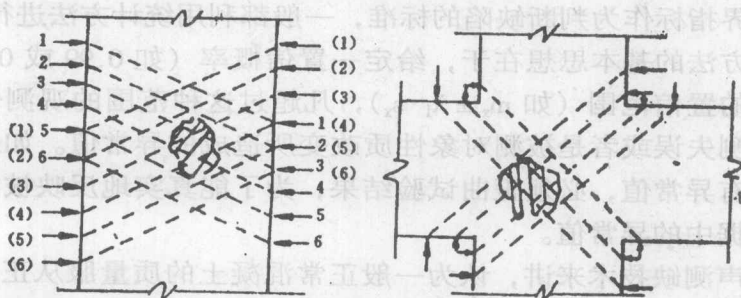


图 7-2-22 斜测法测缺陷

③钻孔测法

对于大体积混凝土结构，由于其断面尺寸较大，如直接进行平面对测，接收到的脉冲信号很微弱，甚至无法识别首波的起始位置，不利于声学参数的读取和分析。为了缩短测试距离，提高检测灵敏度，可在结构适当的位置钻一个或多个平行于侧面的测孔。测孔的直径一般为 40mm ~ 50mm，测孔深度视检测需要而定。结构的侧面采用厚度振动式换能器，一般用黄油耦合，测孔中用径向振动式换能器，用清水作耦合剂。换能器的布置如图 7-2-28 所示。检测时根据需要，可以将孔中和侧面的换能器置于同一高度，也可以将二者保持一定的高度差，同步上下移动，逐点读取声时、波幅和频率值，并记下孔中换能器的位置。

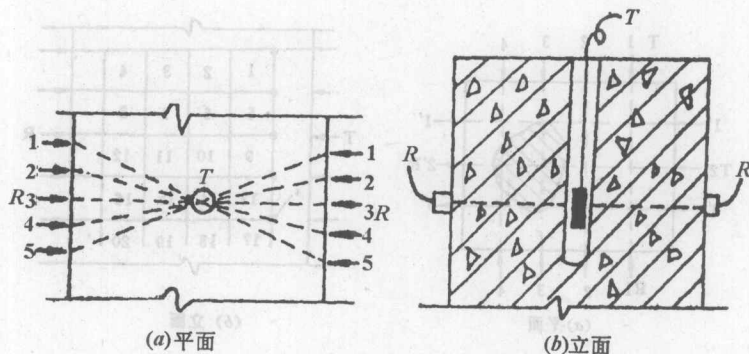


图 7-2-28 钻孔测法换能器布置图

(2) 不密实区和空洞的判定

由于混凝土本身的不均匀性即使是没有缺陷的混凝土，测得的声时、波幅等参数值也在一定范围波动，更何况混凝土的原材料品种、用量及混凝土的湿度和测距等因素都不同程度的影响着声学参数值。因此，不可能确定一个固定的临界指标作为判断缺陷的标准，一般都利用统计方法进行判别。

统计学方法的基本思想在于，给定一置信概率（如 0.99 或 0.95），并确定一个相应的置信范围（如 $m_x \pm \lambda_1 \cdot s_x$ ），凡超过这种范围的观测值，就认为它是由于观测失误或者是被测对象性质改变所造成的异常值。如果在一系列观测值中混有异常值，必须歪曲试验结果，为了能真实地反映被测对象，应剔除测试数据中的异常值。

对于超声测缺技术来讲，认为一般正常混凝土的质量服从正态分布，在测试条件基本一致，且无其他因素影响的条件下，其声速、频率和波幅观测值也基本属于正态分布。在一系列观测数据中，凡属于混凝土本身质量的不均匀性或测试中的随机误差带来的数值波动，都应服从统计规律，在给定的置信范围以内。当某些观测值超过了置信范围，可以判断它是属于异常值。

在超声检测中，凡遇着读数异常的测点，一般都要检查其表面是否平整、干净或是否存在别的干扰因素，必要时还要加密测点进行重复测试。因此，应该说不存在观测失误的问题，出现的异常测值，必然是混凝土本身性质改变所致。这就是利用统计学方法判定混凝土内部存在不密实和密洞的基本思想。

① 混凝土声学参数的统计计算

一个构件或一个测区的混凝土声时（或声速）、波幅及频率等声学参数的平均值和标准差应分别按下式计算：

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7-2-30)$$

$$S_x = \sqrt{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \cdot m_x^2) / (n-1)} \quad (7-2-31)$$

式中 m_x 、 S_x ——分别代表某一声学参数的平均值和标准差；

x_i ——第 i 点某一声学参数的测值；

n ——参与统计的测点数。

②异常值的判别

在数理统计学中，判别异常观测值的方法有许多种，其中较曲型的几种方法是：

A. 拉依达法

该方法的基本点是，对 n 次测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，计算其平均值 m_x 和标准差 S_x ，当某个测值 $x_k > m_x + 3S_x$ ，则认为 x_k 是含粗大误差的异常值，应予以剔除。

此法较简单，曾在国内外广泛应用，但是只有在观测次数 n 足够大，且被测对象离散性较小时，判别异常值较为有效，当 n 较小时不易判出异常值，往往造成漏判。

B. 肖维勒法

该法是在 n 次测量中，取不可能发生的个数为 $\frac{1}{2}$ ，那么对正态分布而言，误差不可能出现的概率为：

$$1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} -\text{amexp}\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = \frac{1}{2n} \quad (7-2-32)$$

根据标准正态分布函数的定义，则有：

$$\phi(\omega_m) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{2n}\right) + 0.5 = 1 - \frac{1}{4n} \quad (7-2-33)$$

利用标准正态函数表，可以求出不同的 n 的不同 ω_n 值。若某一测量值 $x_k > m_x + \omega_n S_x$ ，则 x_k 判为异常值，应剔除。

此法克服了拉依达法的缺点，在测量次数 n 较小时也能判出异常值，但试验表明，对于非匀质混凝土来说，漏判的可能性也很大。

C. 格拉布斯法

该法先将 n 个测量值依大小顺序排列 $x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \dots \leq x_n$ ，假设可疑值是 x_n ，则计算 n 个测量值的 m_x 和 S_x ，并以 $\lambda(a, n) = \lambda'$ ， $(a, n) \sqrt{\frac{n-1}{n}}$ ，列出 n 和某一置信水平 a 下的对应 λ 值。

若 $X_n > m_x - \lambda(a, n) \cdot S_x$ ，则判 x_n 为异常值。

此法被认为是一个较好的判别方法，尤其对统计数中仅有一个异常值的判出功效较高。

D. 狄克逊法

该法也是先将 n 个测量按大小顺序排列, $x_1 \leq x_2 \leq x_3 \cdots \leq x_n$, 用极差比进行异常值判别。同样以其概率密实度函数, 求出某一置信水平 α 和统计值个数 n 的临界值 $f(\alpha, n)$ 。当认为 x_1 可疑时, 极差比 $f'_0 = \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1}$, 若 $f'_0 > f(\alpha, n)$, 则判 x_1 为异常值, 予以剔除。当认为 x_n 可疑时, 极差比 $f_0 = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1}$, 若 $f_0 > f(\alpha, n)$, 则判断 x_n 为异常值。人们认为此法定的判别异常值的临界值较宽, 适用于有多个异常值的情况。

上述四种判别异常值的方法, 都是以被测对象均匀一致为条件, 判别因观测失误造成的异常值。而混凝土缺陷检测。则是在尽可能避免观测失误的条件下, 判别因被测对象本身性质改变所产生的异常值, 两者之间有较大差异。由于混凝土的不均匀性, 就是不存在缺陷, 其声学参数观测值也会出现一定离散, 统计的标准差 S_x 一般比较大, 硬套上述某一种差别方法, 都易造成缺陷的漏判。因此我们参考了肖维勒的格拉布斯法, 综合混凝土缺陷检测的特点, 制订了如下判别异常值的方法:

a. 将测区各测点的声时值 t_i 按大小顺序排列, $t_1 \leq t_2 \leq t_3 \cdots \leq t_n$, 视排于后面明显偏大的声时为可疑值, 将可疑值中最小的一个数同其前面的声时值进行平均值 (m_t) 和标准差 (S_t) 的统计, 以 $x_0 = m_t + \lambda_1 \cdot S_t$ 为异常值的临界值。

当参与统计的可疑值 $t_n \geq x_0$ 时, 则 t_n 及排列于其后的声时值均为异常值。若 $t_n < x_0$, 再将 t_{n+1} 放进去统计和判别, 其余类推。

b. 将测区各测点的波幅 (A_i)、频率 (f_i) 或由声时换算成的声速 (v_i) 按大小顺序排列为 $x_1 \geq x_2 \geq x_3 \cdots \leq x_n$, 视排于后面明显小的数为可疑值, 将可疑值中最大的一个连同其前面的数进行平均值 (m_x) 和标准差 (S_x) 的统计。

以 $x_0 = m_x - \lambda_1 S_x$ 为异常值的临界值, 当参与统计的可疑值 $x_n \leq x_0$ 时, 则 x_n 及排列于其后的参数值均为异常值。若 $x_n > x_0$, 再将 x_{n+1} 放进去统计和判别。

其中 λ_1 为异常值判定系数, 可根据概率函数中 $(\lambda_1) = \frac{1}{n}$, 由正态分布函数表查出对应于统计个数 n 的 λ_1 值 (见表 7-2-14)。

表 7-2-14 统计数的个数 n 与对应的 λ_1

n	14	16	18	20	22	24	26	28	30
λ_1	1.47	1.53	1.59	1.64	1.69	1.73	1.77	1.80	1.83
n	32	34	36	38	40	42	44	46	48
λ_1	1.86	1.89	1.92	1.94	1.96	1.98	2.00	2.02	2.04
n	50	52	54	56	58	60	62	64	66
λ_1	2.05	2.07	2.09	2.10	2.12	2.13	2.14	2.16	2.17
n	68	70	72	74	76	78	80	82	84
λ_1	2.18	2.19	2.20	2.21	2.22	2.23	2.24	2.25	2.26
n	86	88	90	92	94	96	98	100	102
λ_1	2.27	2.28	2.29	2.30	2.30	2.31	2.32	2.32	2.33

③不密实混凝土和空洞范围的判定

一个构件或一个测区中,某些测点的声时,(或声速)、波幅或频率被判为异常值,可结合异常测点的分布及波形状况,判定混凝土内部存在不密实区和空洞的范围。

值得注意的是,在进行混凝土内部缺陷判定时,不仅依靠检测数据的分析和判别,还包含着检验人员的实践经验。经验不足者,容易产生漏判和误判。另外,实践证明,波幅测量值(A_i)虽然对缺陷的反映很敏感,但由于受声耦合状态的影响较大,一般不太服从正态分布,在统计和判别过程中是作为正态分布来处理的,若以波幅(A_1)为判定缺陷的主要依据时,应特别注意。尤其在耦合条件较差,难以保证波幅的准确测量时,更应慎重。

下面举例说明混凝土内部缺陷的检测方法和判定方法。

某机械厂框架柱,由于梁与柱交接处,横向、竖向钢筋交叉处分布,排列十分密集,混凝土浇筑结束脱模后,发现部分梁、柱交接处存在蜂窝,凿开其中一个,发现柱头内部石子架空较严重,由此怀疑所有柱头的混凝土内部质量,经超声检测,有的柱头虽然表面存在蜂窝麻面,但内部不一定有空洞。可是有个别柱子表面很光洁,内部却存在蜂窝架空。现以最典型的 J27 号为例,说明判定过程。

该柱的测距为 510mm,测点布置如图 7-2-25 所示,各测点的声时和波幅测值分别按大小顺序排列,示于表 7-2-15。