第一篇

既有建筑结构检测篇

第 2 章　既有钢筋混凝土结构检测的基本规定和方法

既有钢筋混凝土结构的检测，主要包括混凝土强度的检测、混凝土缺陷和裂缝的检测以及混凝土耐久性检测，其中，耐久性检测包括对混凝土碳化深度的检测和钢筋的锈蚀。

2.1　混凝土强度的检测

对已有建筑物混凝土抗压强度的测试方法很多，大致可以分为局部破损法和非破损法两类。局部破损法主要包括取芯法、小圆柱劈裂法、压入法和拔出法等。非破损法主要包括表面硬度法（回弹法、印痕法）、声学法（共振法、超声脉冲法）等。这些方法可以按不同组合形成多种多样的综合法。

2.1.1　回弹法测定混凝土的强度

1. 回弹法简介

回弹法测定混凝土强度属于非破损检测方法。自 1948 年瑞士工程师施密特（Schmidt）发明回弹仪以来，该仪器经过不断改进，已比较成熟，在国内外应用比较广泛。我国已制定了《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》（JGJ/T 23—2011）。

由于受回弹法所必需的测强曲线的代表性的限制，现行《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》（JGJ/T 23—2011）规定：回弹法只适用于龄期为 14～1 000 d 范围内自然养护、评定强度在 10～50 MPa 的普通混凝土，不适用于内部有缺陷或遭化学腐蚀、火灾、冰冻的混凝土和其他品种混凝土。

测定回弹值的仪器叫回弹仪。回弹仪有不同的型号，按冲击动能的大小分为重型、中型、轻型、特轻型四种。在进行建筑结构检测时一般使用中型回弹仪。如图 2.1 所示为回弹仪。

（a）轻型混凝土回弹仪

（b）中型混凝土回弹仪

（c）重型砂浆回弹仪

图 2.1　回弹仪

2. 测强曲线

通过一系列的大量试验建立的回弹值与混凝土强度之间的关系称为测强曲线。

测强曲线根据制定曲线的条件和使用范围可以分为三类：统一曲线、地区曲线和专用曲线。统一曲线由全国有代表性的材料、成型和养护工艺配制的混凝土试块，通过大量的破损与非破损试验所建立，适用于无地区曲线或专用曲线时检测符合规定条件的混凝土构件强度，平均相对误差$\delta \leq \pm 15.0\%$，相对标准差 $e_r \leq 18.0\%$；地区曲线由本地区常用的材料、成型和养护工艺配制的混凝土试块，通过较多的破损与非破损试验所建立，适用于无专用曲线时检测符合规定条件的混凝土构件强度，平均相对误差$\delta \leq \pm 14.0\%$，相对标准差$e_r \leq 17.0\%$；专用曲线由与被测构件相同的材料、成型和养护工艺配制的混凝土试块，通过一定数量的破损与非破损试验所建立，适用于检测与该构件相同条件的混凝土强度，平均相对误差$\delta \leq \pm 12.0\%$，相对标准差 $e_r \leq 14.0\%$。

3. 测区的布置

测区是指每一个构件，例如一根梁一根柱的测试区域，每个测区相当于该试样同条件混凝土的一个试块。规程规定，取一个构件作为评定混凝土强度的最小单元，每个构件测区数不少于 10 个，对长度小于 4.5 m 且高度低于 0.3 m 的构件，测区数可适当减小，但不应少于 5 个，并尽可能均匀布置；相邻两测区的间距不宜大于 2 m，且离构件边缘的距离不宜大于 0.5 m，且不宜小于 0.2 m。测区最好布置在试样的两个对称的测试面，如不能满足也可选择在一个测面上；测区应优先考虑布置在混凝土浇筑的侧面；测区必须避开位于混凝土保护层附近的钢筋或预埋构件；测区表面应清洁、平整、干燥，不应有接缝、饰面层、粉刷层、浮浆、油垢、蜂窝、麻面等。必要时可用砂轮清除疏松层和杂物，且不应留有残余粉末。测试的构件必须具有一定的刚度和稳定性，对于体积小、刚度差以及测试部位厚度小于 100 mm 的构件，应设置临时支撑加以固定。测区应标有清晰的编号，并在记录纸上描述测区的布置示意图。

4. 回弹值的测定

测试时回弹仪应始终与测试面垂直，并不得打在气孔和外露石子上。每个测区的两个测面用回弹仪各弹击 8 点，共 16 点（如一个测区只有一个测面，该测面需回弹 16 点）。回弹点宜在测面范围内均匀分布，点与点间距不得小于 20 mm，回弹点距构件边缘或外露钢筋、铁件的距离不得小于 30 mm。同一回弹点只允许弹击一次，每一测点的回弹值读数精确到 1。

5. 数据处理及回弹值的修正

首先将每一个测区的 16 个回弹值中剔除其中 3 个最大值和 3 个最小值后，余下的 10 个回弹值的算术平均值即为该测区的回弹平均值 R_m。

由于回弹法测强的经验公式是根据回弹仪水平方向测试混凝土构件侧面的实验数据回归

统计得出的，因此当测试中无法满足上述条件时需要根据测试时回弹仪轴线与水平方向的角度 α 对测得的回弹值进行修正（图 2.2）。

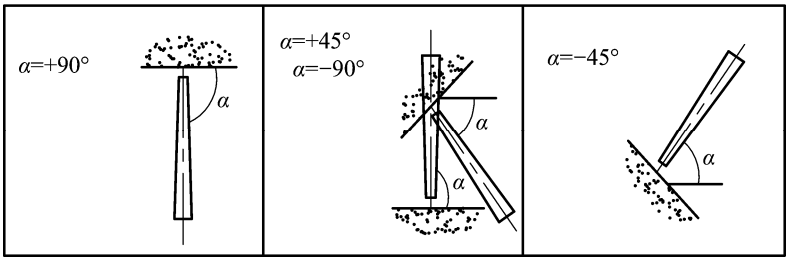

图 2.2　测绘角度示意图

换算公式为：

$$R_{\mathrm{m}} = R_{\mathrm{m}\alpha} + R_{\mathrm{a}\alpha} \tag{2.1}$$

式中　$R_{\mathrm{m}\alpha}$ ——回弹仪与水平方向成 α 角测试时测区的平均回弹值，计算至 0.1；

$R_{\mathrm{a}\alpha}$ ——按表 2.1 查出的不同测试角 α 的回弹值修正值，计算至 0.1。

当使用回弹仪水平方向测试混凝土浇筑表面和底面时，应利用测得的数据分别计算出测区平均回弹值 $\bar{R}_{\mathrm{t}}$ 和 $\bar{R}_{\mathrm{b}}$，再换算为测试混凝土浇筑侧面的测区平均回弹值 $\bar{R}$。

表 2.1　不同测试角度 α 的回弹值修正值 $R_{\mathrm{a}\alpha}$

$R_{\mathrm{m}\alpha}$	测试角度 α							
	＋90°	＋60°	＋45°	＋30°	－30°	－45°	－60°	－90°
20	－6.0	－5.0	－4.0	－3.0	＋2.5	＋3.0	＋3.5	＋4.0
30	－5.0	－4.0	－3.5	－2.5	＋2.0	＋2.5	＋3.0	＋3.5
40	－4.0	－3.5	－3.0	－2.0	＋1.5	＋2.0	＋2.5	＋3.0
50	－3.5	－3.0	－2.5	－1.5	＋1.0	＋1.5	＋2.0	＋2.5

注：表中未引入相应 $\bar{R}_{\mathrm{a}}$ 的 ΔR_{a} 修正值，可用内插法求得，精确至一位小数。

$$\bar{R} = \bar{R}_{\mathrm{t}} + \Delta R_{\mathrm{t}}\ ;\ \bar{R} = \bar{R}_{\mathrm{b}} + \Delta R_{\mathrm{b}} \tag{2.2}$$

式中　$\bar{R}_{\mathrm{t}}$、$\bar{R}_{\mathrm{b}}$ ——回弹仪测试混凝土浇筑表面和底面时的测区平均回弹值，计算至 0.1；

ΔR_{t}、ΔR_{b}——不同浇筑面的回弹值修正值，计算至 0.1，见表 2.2。

表 2.2　不同浇筑面的回弹值修正值

$\bar{R}_{\mathrm{t}}$ 或 $\bar{R}_{\mathrm{b}}$	表面修正值 ΔR_{t}	底面修正值 ΔR_{b}
20	＋2.5	－3.0
25	＋2.0	－2.5
30	＋1.5	－2.0
35	＋1.0	－1.5
40	＋0.5	－1.0

45	0	−0.5
50	0	0

注：表中未引入的相应于 $\overline{R}_t$ 或 $\overline{R}_b$ 的 ΔR_t 或 ΔR_b 修正值可用内插法求得，精确至一位小数。

如测试时仪器既非水平方向而测区又非混凝土的浇筑侧面，则应对回弹值先进行角度修正，然后再进行浇筑面修正。

根据修正后的测区的平均回弹值和碳化深度，查阅测强曲线，即可得到该测区的混凝土强度换算值 f_{cu}^{c}。

结构或构件的混凝土强度推定值（$f_{cu,e}$）应按下列公式确定：

① 当该结构或构件的测区数少于 10 个时：

$$f_{cu,e} = f_{cu,min}^{c} \tag{2.3}$$

式中　$f_{cu,min}^{c}$ ——构件中最小的测区混凝土强度换算值。

② 当该结构或构件的测区强度值中出现小于 10.0 MPa 时：

$$f_{cu,e} < 10.0\ \text{MPa}$$

③ 当该结构或构件测区数不少于 10 个或按批量检测时，应按下列公式计算：

$$f_{cu,e} = m_{f_{cu}^{c}} - 1.645 s_{f_{cu}^{c}} \tag{2.4}$$

式中　$m_{f_{cu}^{c}}$ ——测区混凝土强度的平均值；

$s_{f_{cu}^{c}}$ ——测区混凝土强度的标准差。

6. 回弹法测定混凝土强度流程

采用回弹法测定既有建筑混凝土强度具体流程如图 2.3 所示。

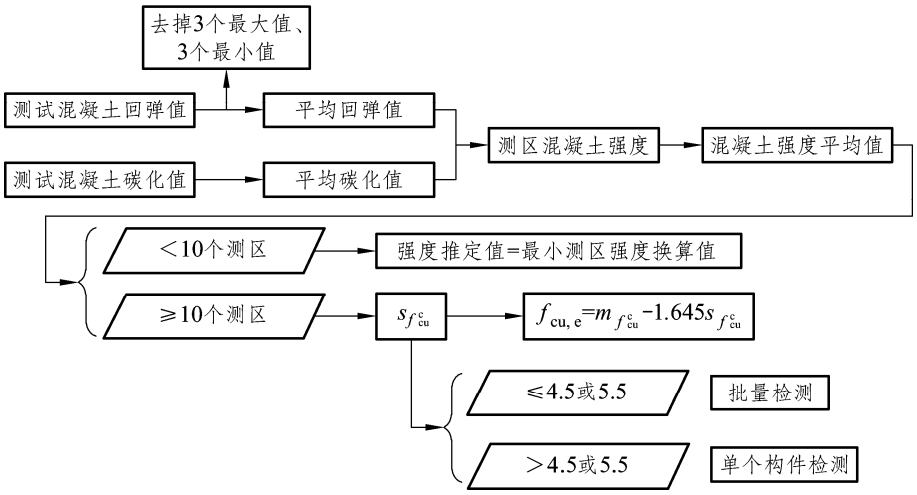

图 2.3　回弹法测定混凝土强度流程

2.1.2 超声法检测混凝土的强度

超声法与回弹法相类似，也是通过相关性来间接测定混凝土强度的一种方法，也是建立在混凝土的强度与其他物理特征值的相关关系基础上。

混凝土强度与其弹性模量、密度等密切相关，而根据弹性波动理论，超声波在弹性介质中的传播速度又与弹性模量、密度这些参数之间存在以下关系：

$$v = \frac{E_{\mathrm{d}}(1-\nu)}{\rho(1-\nu)(1-2\nu)} \tag{2.5}$$

式中 E_{d} ——介质的动弹性模量；

ρ ——介质的密度；

ν ——介质的泊松比。

因而，混凝土强度与超声波在其中的传播速度具有一定的相关性。建立了混凝土强度与波速之间的定量关系后，即可根据检测到的超声波波速推定混凝土强度，这就是超声波法检测混凝土强度的基本原理。混凝土强度越高，其波速越快。

由于混凝土是一种非匀质、非弹性的复合材料，因此，其强度与波速之间的定量关系受到混凝土自身各种技术条件，如水泥品种、骨料品种和粒径大小、水灰比、钢筋配置等因素的影响，具有一定的随机性。由于这种原因，目前尚未建立统一的混凝土强度和波速的定量关系曲线。许多国家在有关规程和方法中都规定必须以一定数量的相同技术条件的混凝土立方体试块，预先建立该种混凝土的 $f_{\mathrm{cu}}^{\mathrm{c}}$-$v$ 曲线，然后用来推算其强度，并进行有关影响因素的修正。

超声波法检测混凝土强度时一般采用发、收双探头法。在被测构件上每隔 200～300 mm 布一对测点，每对测点必须相互对齐，每个试样测点不得少于 10 对。测区应尽量避开有钢筋的部位，尤其要避开与声通路平行的钢筋部位。测试前先将混凝土表面磨光，并将污物除去。在每个测点处涂一些凡士林或软肥皂（以防探头与混凝土表面之间有空隙），然后将发射器和接收器压紧于相互对应的一对测点，从仪表中读出超声波经过试样所需的时间，换算成速度，最后取各点数据的平均值，即可由 $f_{\mathrm{cu}}^{\mathrm{c}}$-$v$ 曲线查出混凝土强度。

采用超声法测定混凝土的强度在实际工程的应用中局限性较大，因为除混凝土的强度外还有很多因素影响声速，例如混凝土中骨料的品种、粗骨料的最大粒径、砂率、水泥品种、水泥用量、外加剂、混凝土的龄期、测试时的温度和含水率等。因此最好是用较多的综合指标来测定混凝土的强度。目前应用较多的超声-回弹综合法就是这样一种方法。

2.1.3 超声-回弹综合法测定混凝土强度

超声-回弹综合法是 20 世纪 60 年代发展起来的一种非破损综合检测方法，在国内外已得到广泛应用，我国已制定了《超声-回弹综合法检测混凝土强度技术规程》（CECS02：2005）。

超声-回弹综合法的基本思想是利用超声声速值 v_{a} 和回弹值 R_{a} 这两个参数同时与混凝土强度建立相关关系。

规程中采用的相关曲线为：

$$f_{cu}^{c} = A(v_a)^B (R_a)^C \tag{2.6}$$

式中　f_{cu}^{c} ——混凝土的推算强度；

v_a——声速；

R_a——回弹值；

A、B、C ——由对比实验测得的系数，规程推荐的系数值与粗骨料的品种有关，见表 2.3。

表 2.3　混凝土粗骨料系数

粗骨料品种	A	B	C
卵石	0.038	1.23	1.95
碎石	0.008	1.72	1.57

用超声-回弹法综合检测混凝土强度时，测区布置同回弹法。测区内先进行回弹测试，再进行超声测试。在每个测区内相对测试面上，各布置 3 个测点，发射和接受换能器的轴线应在同一轴线上。测试的声时值应精确至 0.1 μs，声速值应精确至 0.01 km/s，超声测距的测量误差应不大于±1%。测区声速按下式计算：

$$v = \frac{3l}{t_1 + t_2 + t_3} \tag{2.7}$$

式中　v ——测区声速值（km/s）；

l ——超声测距（mm）；

t_1、t_2、t_3——测区中 3 个测点的声时值。

当测试面是混凝土浇筑的顶面或底面时，测区声速值按下式进行修正：

$$v_\alpha = \beta v \tag{2.8}$$

式中　v_α——修正后的测区声速值；

β ——超声测试面修正系数，在混凝土浇筑顶面或底面时β＝1.034，在混凝土浇筑侧面测试时β＝1.0。

每个测区根据修正后的回弹值 R_a 及修正后的声速值 v_α，利用式（2.6）即可得到该测区的混凝土强度换算值 f_{cu}^{c}。

用超声-回弹综合法检测时，构件混凝土强度推定值的确定方法与回弹法相同。

2.1.4　锚杆拔出法测定混凝土的强度

锚杆拔出法是混凝土结构的半破损检测方法。半破损检验法是在不影响结构总体使用性能的前提下，在结构物的适当部位取样进行强度试验，或直接在结构物的适当部位进行局部的破损性试验。前者通常又叫取芯法，后者常用的有拔拉法。

锚杆拔出法测强是检测构件表层混凝土的抗拉力与抗剪力，以此推断混凝土抗压强度的一种测试方法。

锚杆拔出法测强是在已硬化的混凝土表面钻直径为 2cm、深为 5cm 左右的小孔，插入短锚杆，然后拔出锚杆，记录其拔出力，由拔出力再推算混凝土抗压强度。由于拔出锚杆时，锚杆环向混凝土的胀力大，所以这种方法只适用于体积较大的混凝土构件，不宜在梁、柱、屋架等小截面构件上应用。

2.1.5 钻芯法检测混凝土的强度

钻芯法也是一种半破损的现场检测混凝土强度的方法。它是在结构物上直接钻取混凝土试样进行压力检测，测得的强度值能真实反映结构混凝土的质量。但它的试验费用较高，目前国内外都主张把钻芯法与其他非破损方法结合起来使用，一方面利用非破损法来减少钻芯的数量，另一方面又利用钻芯法来提高非破损法的可靠性。这两者的结合使用是今后的发展趋势。

采用钻芯法测强，除了可以直接检验混凝土的抗压强度外，还有可能在芯样试体上发现混凝土施工时造成的缺陷。

钻芯法测定结构混凝土抗压强度主要适用于：

（1）对试块抗压强度测试结果有怀疑时。

（2）因材料、施工或养护不良而发生质量问题时。

（3）混凝土遭受冻害、火灾、化学侵蚀或其他损害时。

（4）需检测经多年使用的建筑结构或建筑物中混凝土强度时。

钻芯法测定混凝土强度的步骤为：钻芯取样、芯样加工、芯样试压和强度评定。

1. 钻取芯样

钻芯法取样一般采用旋转式带金刚石钻头的钻机。取样应选择构件受力较小的部位，如受弯构件 1/3 跨度外截面高度方向的中部，并避开钢筋位置。芯样钻取方向应尽量垂直于混凝土成型方向。芯样试件的尺寸对强度值有明显的影响。我国的规程规定：钻取的芯样直径不宜小于骨料最大粒径的 3 倍，最小不得小于骨料粒径的 2 倍，并规定以直径 100 mm 和 150 mm 作为抗压强度的标准芯样试件。

2. 芯样加工

芯样钻取后用锯切机加工成规定的芯样试件。规程规定的芯样试件长度与直径之比（长径比）为 1～2，并以长径比 1 作为标准。当长径比为其他数值时，强度需要进行修正，修正系数见表 2.4。芯样切割时要求端面不平整度在 100 mm 长度内不大于 0.1 mm，如果不满足需进行处理。处理方法有磨平法和补平法。端面补平材料可采用硫黄胶泥或水泥砂浆，前者的补平厚度不得超过 1.5 mm，后者不得超过 5 mm。芯样试件的尺寸偏差及外观质量应满足下列条件：芯样试件长度 $0.95d \le l \le 2.05d$；沿芯样长度任一截面直径与平均直径相差在 2 mm 以内；芯样端面与轴线的垂直度偏差不超过 2°；芯样没有裂缝和其他缺陷。

表 2.4　芯样试件混凝土强度长径比修正系数

长径比 l/d	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
修正系数 α	1.0	1.04	1.07	1.10	1.13	1.15	1.17	1.19	1.20	1.22	1.24

芯样试件加工时应注意芯样的湿度环境。当实际混凝土构件的工作条件比较干燥时，芯样试压前应在自然条件下干燥 3 d；如果工作条件比较潮湿，芯样应在（20±5）°C 的清水中浸泡 48 h。

3. 芯样试压

芯样试件的抗压试验按照现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》（GB/T 50081—2002）中立方体试块抗压试验方法进行，混凝土抗压强度按下式计算：

$$f_{\mathrm{cu}}^{\mathrm{c}} = \alpha \frac{4F}{\pi d^2} \tag{2.9}$$

式中 $f_{\mathrm{cu}}^{\mathrm{c}}$ ——混凝土芯样试件抗压强度换算值（MPa）；

F——芯样试件抗压试验测得的破坏荷载（N）；

d ——芯样试件的平均直径（mm）；

α ——不同长径比芯样试件混凝土强度修正系数，按表 2.4 取值。

长径比为 1 的标准芯样试件抗压强度与边长为 150 mm 的立方体试块抗压强度相当，因而按式（2.9）算得的强度值可直接代表混凝土立方体抗压强度值。

4. 强度评定

混凝土强度的评定根据检测的目的分为以下情况：第一种是了解某个最薄弱部位的混凝土强度，以该部位芯样强度的最小值作为混凝土强度的评定值。第二种是单个构件的强度评定，当芯样数量较少时，取其中较小的芯样强度作为混凝土强度评定值；当芯样较多时，按同批抽样评定其总体强度。具体方法可查阅《混凝土强度检验评定标准》（GB/T 50107—2010）。

2.2 混凝土缺陷和裂缝的检测

用于检测混凝土内部缺陷的方法有声脉冲法和射线法两大类。射线法是运用 X 射线、γ 射线透过混凝土，然后照相分析，这种方法穿透能力有限，在使用中需要解决人体防护的问题。在声脉冲法中有超声波法和声发射法等，其中超声波法技术比较成熟。本节介绍超声波检测混凝土内部缺陷的基本方法。

由于超声波传播速度的快慢与混凝土的密实程度有直接关系，声速高则混凝土密实，相反则混凝土不密实。用超声波检测混凝土缺陷的基本依据是，利用脉冲波在技术条件相同（指混凝土的原材料、配合比、龄期和测试距离一致）的混凝土中传播的时间（或速度）、接收波的振幅和频率等声学参数的相对变化，来判断混凝土的缺陷。当有空洞或裂缝存在时，混凝土的整体性便被破坏了，声波只能绕过空洞或裂缝传播到接收换能器，因此传播的路程增大，

测得的声时偏长，其相应的声速降低。超声波通过混凝土时，以超声声速、首波衰减和波形变化来判断混凝土中存在缺陷的性质、范围和位置。

2.2.1 混凝土内部缺陷检测

深埋在混凝土内部的单个小孔，对超声波声时和波幅的影响很小，无法测出来，而结构混凝土中的不密实区或孔洞是可以用超声波检测出来的。

先在被测构件上画出网格。用对测法测出每一点的超声波声速 v_i、波幅 A_i 或接收频率 f_i（图 2.4）。若某测区某些测点的声速 v_i 和波幅 A_i 明显偏低，则可认为这些测点区域的混凝土内部存在空洞或不密实。为了判断不密实区或孔洞在结构内部的具体位置，可在测区的两个相互平行的测试面上，分别画出交叉测试的两组测点位置。图 2.5 即为斜测法检测缺陷的位置和范围。

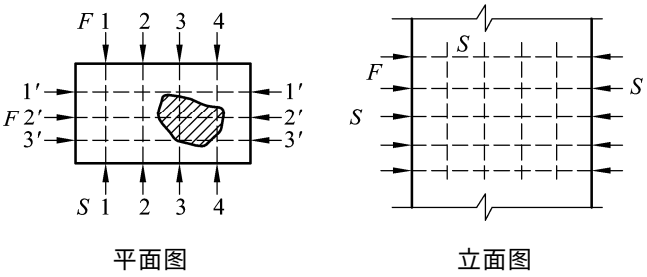

图 2.4　对测法测缺陷测点布置

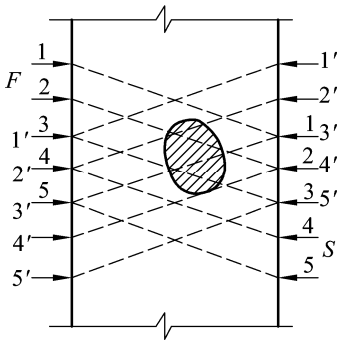

图 2.5　斜测法测缺陷测点布置立面图

由于各测点超声波的传播路线平行，测距相同，若混凝土内部不存在缺陷，则混凝土质量基本符合正态分布，所测得的声学参数也基本符合正态分布。若混凝土内部存在缺陷，则声学参数必然出现明显差异，运用数理统计原理，当某些声学参数超出了一定的置信范围，可以判定它为异常数据。异常数据测点在构件表面围成的区域可以看作内部缺陷在表面上的投影。异常数据按以下方法判别：

将各测点的声时值 t_i 按由小至大顺序排列，$t_1 \le t_2 \le t_3 \le \cdots \le t_{n-1} \le t_n \cdots$，假定中间某个数据 t_n 明显偏大，该数据及排列其后的所有数据均被视为可疑数据，将最小可疑数据及排列其前的所有数据进行统计分析，计算平均值 m_t 和标准差 s_t，则异常数据的临界值为：

$$t_0 = m_t - \lambda_1 \cdot s_t \tag{2.10}$$

式中，λ_1 为异常值判定系数，可由正态分布函数表（表 2.5）查出。把假定的最小可疑数据 t_n 与临界值 X_0 进行比较：若 $t_n > t_0$，则 t_n 及排列其后的所有数据均确定为可疑数据；若 $t_n \le t_0$，则对 t_n 作为可疑数据的假定有误，应重新假定排列在 t_n 之后的某个数据为可疑数据，按同样的方法重新判断。

表 2.5　统计数的个数 n 与对应的 λ_1 值

n	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38

λ_1	1.47	1.53	1.59	1.65	1.69	1.73	1.77	1.80	1.83	1.86	1.89	1.92	1.94
n	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64
λ_1	1.96	1.98	2.00	2.02	2.04	2.05	2.07	2.09	2.10	2.12	2.13	2.14	2.15
n	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90
λ_1	2.17	2.18	2.19	2.20	2.21	2.22	2.23	2.24	2.25	2.26	2.27	2.28	2.29
n	92	94	96	98	100	105	110	115	120	125	130	135	140
λ_1	2.30	2.30	2.31	2.31	2.32	2.35	2.36	2.38	2.40	2.41	2.43	2.44	2.45

当采用波幅作为测量参数时，将各测点的波幅 A_i，按由大至小顺序排列，$A_1 \geq A_2 \geq \cdots \geq A_n \geq A_{n+1} \geq \cdots$，假定中间某个数据 A_n 明显偏小，该数据及排列其后的所有数据均视为可疑数据，将最大可疑数据及排列其前的所有数据进行统计分析，计算平均值 m_A 和标准差 S_A，则异常数据的临界值为：

$$A_0 = m_A - \lambda_1 \cdot S_A \tag{2.11}$$

把假定的最大可疑数据 A_n 与临界值 A_0 进行比较：若 $A_n < A_0$，则 A_n 及排列其后的所有数据均确定为可疑数据；若 $A_n \geq A_0$，应将排列在 A_n 之后的某个数据假定为可疑数据，按同样的方法重新判断。

对于大体积混凝土内部的不密实区和孔洞检测，由于测试距离大，用对测法检测，其检测灵敏度低。为此，可每隔一定距离，钻孔放入径向振动式换能器，也可以采用钻孔放入径向振动式换能器检测和对测相结合的方式，检测大体积混凝土内部的不密实区或孔洞。

为确认超声波检测缺陷的正确性，可在认为混凝土内部存在不密实区或孔洞的部位，钻孔取芯，直接观察和验证。

2.2.2 混凝土浅层裂缝检测

当混凝土出现裂缝时，裂缝空间充满空气，由于固体与气体界面对声波构成反射面，通过的声能很小，声波绕裂缝顶端通过（图 2.6），以此可测出裂缝深度。

先在混凝土的无缝处测定该混凝土平测时的声波速度。把发、收换能器放置于裂缝附近有代表性的、质量均匀的混凝土表面，以换能器边缘间距离 l' 为准，取 l'=100 mm、150 mm、200 mm、250 mm 和 300 mm，改变两换能器之间的距离，分别测读超声波穿过的时间 t'。以距离 l' 为横坐标，时间 t' 为纵坐标，将数据点绘在坐标纸上（图 2.7）。如被测处的混凝土质量均匀、无缺陷，则各点应大致在一条直线上。按图形计算出这条直线的斜率，即为超声波在该处混凝土中的传播速度。

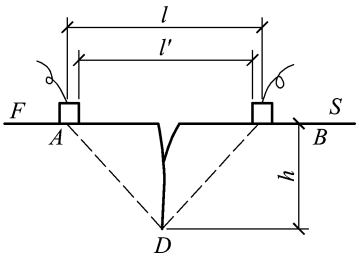

图 2.6　超声检测混凝土垂直裂缝

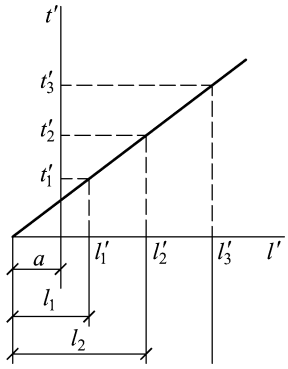

图 2.7　平测时的时间-距离图

按算出的传播速度和测得的传播时间可求出超声波传播的实际距离 $l_i = vt_i' + a$（l_i 略大于 l_i'）。

将发、收换能器置于混凝土表面裂缝的两侧（图 2.6），并以裂缝为轴线相对称，即换能器中心的连线垂直于裂缝的走向。取 l'=100 mm、150 mm、200 mm、250 mm、300 mm 等，改变换能器之间的距离，在不同 l_i' 时测读超声波传播时间 t_i，并计算出超声波传播的实际距离 l_i。

按下式计算垂直裂缝深度：

$$h_i = \frac{l_i}{2}\sqrt{\left(\frac{t_i}{t_i'}\right)^2 - 1} \tag{2.12}$$

式中　h_i ——垂直裂缝深度（mm）；

l_i ——无缝平测换能器之间第 i 点的超声波实际传播距离（mm）；

t_i——过缝平测时第 i 点的声时值（μs）；

t_i' ——无缝平测时第 i 点的声时值（μs）。

按上式可计算出一系列 h 值。若计算的 h 值大于相应的 l_i 值时则舍去该数据，取余下 h 值的平均值作为裂缝深度的判定值。如余下的 h 值少于 2 个时，需增加测试的次数。

声波在混凝土中通过，会受到钢筋的干扰。当有钢筋穿过裂缝时，发、收换能器的布置应使换能器的连线离开钢筋轴线或与钢筋轴线成一定角度。若钢筋太密无法避开，则不能采用超声波法测量裂缝深度。

这种方法适用于裂缝深度小于 500 mm 的混凝土结构裂缝的检测。

2.2.3　混凝土深层裂缝检测

在大体积结构混凝土中，当裂缝深度在 500 mm 以上，可采用钻孔放入径向振动式换能器进行检测。

先在裂缝两侧对称地钻两个垂直于混凝土表面的检测孔，两孔口的连线应与裂缝走向垂直。孔径大小应以能自由地放入换能器为宜。钻孔冲洗干净后再注满清水。将发、收径向振动式换能器分别置于两钻孔中，两换能器沿钻孔徐徐下落的过程中要使其与混凝土表面保持相同距离，用超声波波幅的衰减情况判断裂缝深度（图 2.8）。换能器在孔中上下移动进行测

量，当发现换能器达到某一深度，其波幅达到最大值，再向下测量，波幅变化不大时，换能器在孔中的深度即为裂缝的深度。为便于判断，可绘制孔深与波幅的曲线图（图 2.9）。

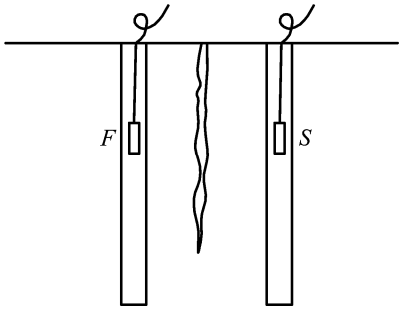

图 2.8　深裂缝检测示意图

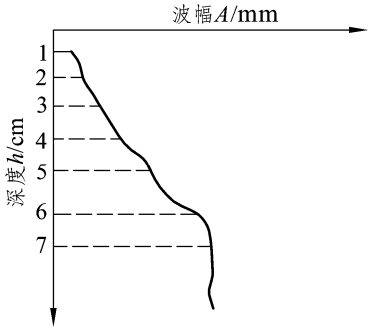

图 2.9　裂缝深度-波幅曲线图

若两换能器在两孔中以不等高度进行交叉斜测，根据波幅发生突变的两次测试的交点，可判定倾斜裂缝末端的所在位置和深度。

2.3　混凝土耐久性检测

在自然界的各种物理、化学因素作用下，混凝土的各种性能受到影响并随着时间的推移可能发生下降。这种随时间的延长渐渐损坏的过程可称之为“老化”。混凝土抵抗“老化”的能力被称为混凝土的耐久性。

引起混凝土结构耐久性下降的原因比较复杂，主要原因有混凝土结构裂缝的出现、混凝土的碳化、有害介质的侵蚀、碱-骨料反应、冻融循环、钢筋的锈蚀等，而一般建筑结构耐久性的检测主要有两项内容：混凝土碳化深度的测量和钢筋锈蚀的检测。

2.3.1　混凝土碳化深度的测量

在选定的混凝土检测位置上凿孔。凿孔可用电锤、冲击钻，测孔的直径为 12～25 mm，视碳化深度的大小而定，并用皮老虎将孔内清扫干净后，向孔内喷洒 1%浓度的酚酞试液。喷洒酚酞试液后，未碳化的混凝土变为红色，已碳化的混凝土不变色，测量变色混凝土前缘至构件表面的垂直距离即为混凝土碳化深度，如图 2.10 所示。

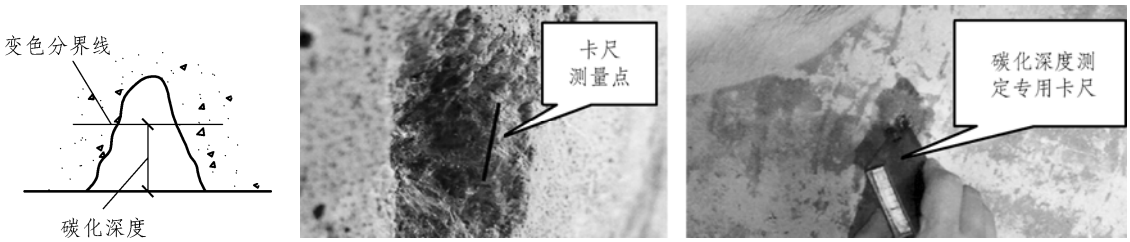

图 2.10　混凝土碳化深度测定

酚酞试液的配制：每克酚酞指示剂加 75 g 浓度为 95%的酒精和 25 g 蒸馏水。

碳化测区应选在构件有代表性的部位，一般应布置在构件中部，并避开较宽的裂缝和较

大的孔洞。每个测区应置 3 个测孔，取 3 个测试数据的平均值作为该测区碳化深度的代表值。

测出混凝土实际碳化深度后，可利用式（2.13）计算钢筋保护层的剩余碳化时间 $t_1(D_0 < D_1)$：

$$t_1 = t_0\left(\frac{D_1^2}{D_0^2} - 1\right) \tag{2.13}$$

式中 t_1——剩余碳化时间，即从测定时算起的碳化达到钢筋表面所需要的时间；

t_0——构件已使用的时间；

D_0——实测碳化深度（mm）；

D_1——钢筋保护层厚度（mm）。

2.3.2 钢筋锈蚀的检测

通常混凝土结构中的钢筋是决定和影响承载能力的关键因素，因此钢筋的检测是十分重要的。钢筋的检测包括钢筋的数量、直径和位置的检测。当钢筋发生锈蚀时，还应对锈蚀的程度进行检测。

1. 钢筋的直径、数量和位置的检测

钢筋位置和数量可用混凝土保护层厚度测定仪器检测。检测时使测定仪探头长向与构件中钢筋方向平行；钢筋直径挡调至最小，测距挡调至最大；横向摆动探头，仪器指针摆动最大时，探头下就是钢筋位置。钢筋位置确定后（标出所有钢筋位置即可确定钢筋数量），按图纸上的钢筋直径和等级调整仪器的钢筋直径、钢筋等级挡，按需要调整测距挡；将探头远离金属物体，旋转调旋钮使指针回零；将探头放置在测定钢筋上，从刻度盘上读取保护层厚度。对于钢筋直径可将混凝土保护层凿开后用卡尺测量。

2. 钢筋锈蚀的检测

钢筋锈蚀可采用三种方法检测：直观检查法、局部凿开法和自然电位法。直观检测法是观察混凝土构件表面有无锈痕、是否出现了沿钢筋方向的纵向裂缝，顺筋裂缝的长度和宽度可以反映钢筋的锈蚀程度；局部凿开法是敲掉混凝土保护层，露出钢筋，直接用卡尺测量锈层厚度和钢筋剩余直径，或截取一段在实验室进行量测。局部凿开法对结构有局部损伤，一般适用于混凝土表面已出现锈痕、顺筋裂缝，或保护层被胀裂、剥落处。自然电位法是测定钢筋与周围介质所形成的稳定电位，电位值大小能反映出钢筋状态。当钢筋处于钝化状态时，电位一般较低；当钢筋钝化状态破坏后，自然电位负向增大。自然电位法属非破损检测，操作简单，适合大面积普查，可以用来对钢筋锈蚀做初步的定性判断，但精度不是很高。要求准确判断钢筋锈蚀程度需要与局部凿开法等其他方法配合。