

中国工程建设标准化协会标准

**超声回弹综合法
检测混凝土强度技术规程**

CECS 02: 2005

条文说明

2005 北京

目 次

- 1 总则
- 2 术语、符号
 - 2.1 术语
 - 2.2 主要符号
- 3 回弹仪
 - 3.1 一般规定
 - 3.2 检定要求
 - 3.3 维护保养
- 4 混凝土超声波检测仪器
 - 4.1 一般规定
 - 4.2 换能器技术要求
 - 4.3 校准和保养
- 5 测区回弹值和声速值的测量及计算
 - 5.1 一般规定
 - 5.2 回弹测试及回弹值计算
 - 5.3 超声测试及声速值计算
- 6 结构混凝土强度推定
- 附录 A 建立专用或地区混凝土强度曲线的基本要求
- 附录 B 超声波角测、平测和声速计算方法
 - B.1 超声波角测方法
 - B.2 超声波平测方法
- 附录 C 测区混凝土强度换算
 - C.1 测区混凝土强度换算表（卵石）
 - C.2 测区混凝土强度换算表（碎石）
- 附录 D 综合法测定混凝土强度曲线的验证方法
- 附录 E 用实测空气声速法校准超声仪
- 附录 F 超声回弹综合法检测记录表
- 附录 G 结构混凝土抗压强度计算表

1 总 则

1.0.1 本条所指回弹仪系标准状态下弹击锤冲击能量为 2.207J，示值系统为指针直读式或数字显示与指针直读一致的数字式回弹仪。低频超声波检测仪系指工作频率范围为 10～500kHz 的模拟式、数字式低频超声仪。普通混凝土系指密度为 2400kg/m³ 左右的混凝土。

超声回弹综合法（以下简称综合法）是二十世纪 60 年代研究开发出来的一种无损检测方法。由于测试精度较高，已在我国建工、市政、铁路、公路系统已广泛应用。实践证明，以超声波穿透试件内部的声速值和反映试件表面硬度的回弹值来综合检测结构混凝土的抗压强度，与单一方法比较，其精度高，适应范围广。

1.0.2 在正常情况下，混凝土质量检查应按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 和《混凝土强度检验评定标准》GB 50107 的规定，采用标准试件的抗压强度来检验混凝土的强度质量，不允许采用本规程的方法取代国家标准的要求。

但是，由于种种因素导致试件与结构的混凝土质量不一致，或混凝土试件强度评定不合格，以及对使用中的结构需要检测届时的混凝土强度时，可按本规程的规定对结构或构件的混凝土强度进行检测推定，并作为判断结构是否需要处理的一个依据。

1.0.3 本规程适用于密度为 2400kg/m³ 左右的结构混凝土。不适用于下列情况的结构混凝土：混凝土在硬化期间遭受冻害，或结构遭受化学侵蚀、火灾、高温损伤，这些情况不符合结构混凝土性能表里基本一致的前提。此时，直接按本规程方法检测已不适用，但可采用从结构中钻取混凝土芯样的方法来检测。

1.0.4 按本规程进行测试操作、数据处理及强度推定，都是技术性较强的工作，操作人员如未经专门的技术培训，将严重影响混凝土强度检测结果的可靠性。因此，采用综合法进行工程检测的人员，应通过专门的技术培训，并持有相应的资质证书。

1.0.5 凡本规程涉及的其他有关方面问题，如施工现场测试、高空作业、现场用电等，均应遵守国家现行有关强制性标准的规定。

2 术语、符号

编写本章术语时，主要参考了现行国家标准《工程结构设计基本术语和通用符号》GBJ 132 等。

关于检测单元，对于房屋建筑结构，是指按各层轴线间或同层平面内轴线间的混凝土梁、板、柱、墙等结构单元。对于铁路、公路的桥梁、桥墩，可将整榀桥梁（墩）视为一个检测单元。布置测区时，需要考虑分段浇筑的龄期，均匀布置，且每个单元设 10 个以上测区。对于大体积混凝土结构，可按混凝土体积、混凝土龄期等，均匀布置测区，且每个单元设 10 个以上测区。

3 回弹仪

3.1 一般规定

3.1.1~3.1.3 与现行行业标准《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ/T23 第 3 章第 3.1 节一致。

3.1.3 综合法采用的回弹仪系由机械零部件组成，检测环境和测试条件不满足检测要求将会带来测试偏差。当环境温度低于-4℃时，混凝土中的自由水结冰，体积增大，将导致回弹值偏高而产生较大的测试误差。

3.2 检定要求

3.2.1~3.2.3 与现行行业标准《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ/T23 第 3 章第 2 节一致。

3.3 维护保养

3.3.1~3.3.3 与现行行业标准《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ/T23 第 3 章第 3 节一致。

4 混凝土超声波检测仪器

4.1 一般规定

4.1.1 当前，用于混凝土检测的超声波检测仪有多种型号，其技术性能应符合现行行业标准《混凝土超声波检测仪》JG/T5004 的规定。为了确保测试数据的可靠性，无论使用哪种型号的超声波检测仪器，都必须通过正式技术鉴定，并具有产品合格证和仪器检定证。超声波检测仪送计量单位进行检定后，有效期为一年。

4.1.2 原规程编制过程中，我国尚无数字式混凝土超声波检测仪，有关超声检测设备的技术要求是按当时模拟式非金属超声仪的技术性能提出的。近年来，国内先后研制生产了性能好、功能多的数字式非金属超声波检测仪。为了使本规程能适应这两类混凝土超声波检测仪的使用，在修订时，除了保留两类仪器的共性要求外，还分别对模拟式和数字式超声波检测仪的技术性能提出了要求。这两类混凝土超声波检测仪的特点是：

1 模拟式仪器的接收信号为连续模拟量，通过时域波形由人工读取声学参数。其中，声时采用游标或整形关门信号关断计数电路来测读脉冲波从发射到计数电路被关断所经历的时间，并经译码器和数码管显示出来。波幅读数是通过人工调节，读取衰减器的“dB”数或首波高度“格”数。

2 数字式仪器是将所接收的信号经高速 A/D 转换为离散的数字量并直接输入计算机，通过相关软件进行分析处理，自动读取声时、波幅和主频值并显示于仪器屏幕上。具有对数字信号采集、处理、存储等高度智能化的功能。

4.1.3 超声波检测仪应按现行行业标准《混凝土超声波检测仪》JG/T 5004 的要求进行质量检定，每项指标均应满足规定的要求，并在规定的检定有效期内使用。

4.1.4 两类超声波检测仪应满足下列通用技术要求：

1 混凝土强度检测主要利用超声波传播速度，获得可靠的声速值是靠准确测量声时和声传播路程。因此，为了准确测量声时，超声仪须具有稳定、清晰的波形显示系统。

2 声时最小分度是声时测量精度的决定因素，因此超声检测仪应满足这个要求。

3 由于不同首波高度下测量的声时值存在一定差异，因此在声时测量中宜采用衰减器先将首波调至一定高度后再进行测读。超声波检测仪应具有最小分度为 1dB 的衰减器。

4 仪器接收放大器的频响范围应与混凝土超声检测中所采用的换能器的频率相适应。检测混凝土所采用的换能器一般为 20~250kHz（混凝土强度检测为 50~100kHz），所以接收放大器在此频响范围内可以满足电气性能要求。对仪器不能单纯追求接收放大器的增益，应

同时考虑其噪声水平，采用信噪比达到 3: 1 时的接收灵敏度较为适当，可以直观地反映出仪器的真实测试灵敏度。

5 仪器对电源电压有一个适应范围，当电压在此范围内波动时，仪器的技术指标仍能满足规定的要求。

4.1.5 对于模拟式超声波检测仪，除了满足上述要求外还应满足下列技术要求：

1 模拟式超声波检测仪必须具备手动游标读数功能，以便准确判读首波声时。自动整形声时读数功能一般仅能适应强信号、弱噪声条件。当信号较弱或信噪比较低时，自动整形读取的声时值偏大甚至丢波，会造成很大的测试误差，应谨慎使用。

2 模拟式仪器数码显示的稳定性是准确测量声时的基础。现场测试时一般要求仪器连续工作 4h 以上，在此工作期间，仪器性能必须保持一定的稳定性。

4.1.6 对数字式超声波检测仪还应满足以下技术要求：

1 采集、存储数字信号并按检测要求对数据进行计算处理，是数字式超声波检测仪应具有的基本功能。

2 数字式仪器以采用自动判读为主，在大距离测试或信噪比极低的情况下，需要用手动游标读数。不管手动还是自动判读声时，在同一测试条件下，测读数值都应具有一定的重复性。重复性越好，说明声时读数越准确可靠，故应建立一个声时测量重复性的检查方法。在重复测试中，首波起始点的样本偏差点数乘以样本时间间隔，即为声时读数的差异。

3 在自动判读声时的过程中，仪器屏幕上应显示判读的位置，这样可及时检查自动读数是否有误。

4.1.7 综合法采用的超声仪由电子元器件组成，检测环境和测试条件如不满足检测要求，就会带来测试偏差。当环境温度低于 0℃ 时，混凝土中的自由水结冰，体积增大，可导致声速值偏高而产生较大的测试误差。当环境温度高于 40℃ 时，超过了仪器例行的使用温度，因电子元件性能改变，也会产生测试误差。

4.2 换能器的技术要求

4.2.1 大量模拟试验表明，由于超声脉冲波的频散效应，采用不同频率换能器测量的混凝土中声速有所不同，且声速有随换能器频率增高而增大的趋势。当换能器工作频率为 50~100kHz 时，所测声速偏差较小，所以本规程对换能器的工作频率作了限制。

4.2.2 换能器的实际频率与标称频率应尽量一致。若实际频率与标称频率差异过大，则测读的声时值会产生较大误差，以致测出的声速值难以反映混凝土的真实强度值。

4.3 校准和保养

4.3.1 由物理学可知，在常温下空气中的声速值除了随温度变化而有一定变化外，受其它因素的影响很小。因此，用测量空气中声速的方法定期检验仪器性能，是一种简单易行的方法。此方法不仅可检验仪器的计时机构是否可靠，还验证了仪器操作者的声时读取方法是否正确。

4.3.2 在声时测量过程中有一个声时初读数 t_0 ，而 t_0 除了与仪器的传输电路有关外还与换能器的构造和高频电缆长度有关。因此，每次检测时，应先对所用仪器和按需要配置的换能器、电缆线进行 t_0 测量。

4.3.3 为确保仪器处于正常状态，应定期对超声仪进行保养。仪器工作时应注意防尘、防震；仪器应存放在阴凉、干燥的环境中；对较长时间不用的仪器，应定期通电排除潮气。

5 测区回弹值和声速值的测量及计算

5.1 一般规定

5.1.1 本条第 1、2、5 项资料系检测结构或构件混凝土强度时应具有的必要资料。如需对结构进行鉴定计算，委托方还应提供设计（建筑、结构）图纸。

5.1.2 单个构件是指各层轴线间或同层平面内轴线间的混凝土梁、板、柱、墙等构件，检测时随混凝土龄期和混凝土设计强度等级不同而划分检测批。采用超声回弹综合法检测混凝土构件的强度时，检测构件的编号为框架柱（A-1）、框架梁（A-3-4）、混凝土板（A-B-3-4），以轴线间对应的构件为检测构件。本条规定了超声回弹综合法检测结构或构件测区布置的基本原则。所谓测区是指在结构或构件上同时进行超声、回弹测试的一个检测单元。

本规程规定，构件抽样数不应少于同批构件的 30%，此规定严于现行国家标准《建筑结构检测技术标准》GB/T50344 的规定。当用于一般施工质量检测和结构性能检测时，可按照《建筑结构检测技术标准》GB/T50344 规定的 A、B 检测类型抽样，见下表。

建筑结构抽样检验的最小样本容量

检测批 容量	检测类别和样本最小容量			检测批 容量	检测类别和样本最小容量		
	A	B	C		A	B	C
2-8	2	2	3	501-1200	32	80	125
9-15	2	3	5	1201-3200	50	125	200
16-25	3	5	8	3201-10000	80	200	315
26-50	5	8	13	10001-35000	125	315	500
51-90	5	13	20	35001-150000	200	500	800
91-150	8	20	32	150001-500000	315	800	1250
151-280	13	32	50	>500000	500	1250	2000
281-500	20	50	80				

5.1.3 按批抽样检测时，符合 1~4 项条件的构件才可作为同批构件。

5.1.4~5.1.5 本条规定了在被测构件或结构上布置测区的具体要求。

5.1.6~5.1.7 本条是对综合法测试顺序和测区混凝土强度计算的规定。

5.2 回弹测试及回弹值计算

5.2.1 因建立测强曲线时是将回弹仪置于水平方向测试混凝土试件的成型侧面，所以在一般情况下，均应按此要求进行现场回弹测试。当结构或构件不能满足这一要求时，也可将回弹仪置于非水平方向（如测试屋架复杆、基础坡面等），或混凝土成型的表、底面（如测试

混凝土顶板,或已安装好的预制构件)进行测试,但测试时回弹仪的轴线方向应始终与结构或构件的测试面相垂直。回弹值按本规程第 5.2.5 条和第 5.2.6 条的规定进行修正。

5.2.2~5.2.3 本条规定测区的测点数量和位置。

5.2.4 本条规定了测区回弹代表值的计算方法。从 16 个回弹值中剔除 3 个最大值和 3 个最小值,取余下 10 个回弹值的平均值作为测区回弹代表值。此种计算方法与其它国家有所不同,本方法的测试和计算十分简捷,不必在测试现场计算和补点,且标准差较小。按此法计算,与建立测强曲线时的计算方法一致,不会引进新的误差。

5.2.5~5.2.6 由于现场检测条件的限制,有时只能沿非水平方向检测混凝土浇筑方向的侧面,或者沿水平方向检测构件浇灌的表面或底面,此时对所测得的回弹值需按不同测试角度或不同测试面进行修正。

5.2.7 当回弹仪测试采用非水平方向且测试面为非混凝土浇筑方向的侧面时,回弹值应先进进行角度修正,再对按角度修正后的回弹值进行测试面修正。测区回弹值取最后的修正结果。

5.3 超声测试及声速值计算

5.3.1 3 个超声测点应布置在回弹测试的同一测区内。超声测试应采用对测或角测,当被测构件不具备对测或角测条件时(如地下室外墙面、底板),可采用单面平测法。平测时两个换能器的连线应与附近钢筋的轴线保持 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 夹角,以避免钢筋的影响。大量实践证明,平测时测距宜采用 350~450mm,以使接收信号首波清晰易辨认。角测和平测的具体测试方法见附录 B。

5.3.2 使用耦合剂是为了保证换能器辐射面与混凝土测试面达到完全面接触,排除其间的空气和杂物。同时,每一测点均应使耦合层达到最薄,以保持耦合状态一致,这样才能保证声时测量条件的一致性。

5.3.3 本条对声时读数和测距量测的精度提出了严格要求。因为声速值准确与否,完全取决于声时和测距量测是否准确可靠。

5.3.4、5.3.5 规定了测区混凝土中声速代表值的计算和修正方法。测区混凝土中声速代表值是取超声测距除以测区内 3 个测点混凝土中声时平均值。当超声测点在浇筑方向的侧面对测或斜测时,声速不做修正。如只能沿构件浇灌的表面和底面对测时,测得的声速偏低,试验表明,沿此方向测得的声速需要乘以修正系数 1.034。当只能在构件浇灌的表面或底面平测时,由于混凝土浇灌表面浮浆多,相对于侧面来说砂浆含量多石子含量少,因此测得的声速偏低;由于混凝土浇灌、振捣过程中石子下沉而导致底面层石子含量增多,因此测得的

声速偏高。对比试验表明，与在侧面平测的声速相比较，在浇灌表面平测的声速约偏低 5% 左右，在浇灌底面平测的声速约偏高 5% 左右。

6 结构混凝土强度推定

6.0.1 本规程的强度换算适用于符合本条规定的普通混凝土。当与本条的规定有差异时，可从被测构件上钻取不少于 4 个 $\phi 100 \times 100\text{mm}$ 混凝土芯样进行修正。

6.0.2 结构或构件的测区混凝土抗压强度换算值，是由相应测区修正后的回弹代表值和声速代表值按测强曲线计算得出的。为提高混凝土强度换算值的准确性和可靠性，应优先采用专用或地区测强曲线进行计算。当无专用或地区测强曲线时，通过验证试验后可按本规程附录 C 进行抗压强度换算值的计算。

本规程修订后的全国统一测强曲线收集补充了一批泵送混凝土、长龄期和高强混凝土等方面的测试数据。数据来源有：

1 原综合法规程的测强数据

根据查阅到的原测强曲线的数据资料，当时是按不同水泥（矿渣硅酸盐、普通硅酸盐）、粗骨料（卵石、碎石）和超声仪器（JC-2 型、CTS-25 型、SC-2 型、英国 PUNDIT 型）测试的数据计算处理的，且对原数据强度进行了 5% 的调整。

2 收集了北京泵送混凝土数据

从全市 70 多个站中选择了在近郊东、南、北区分布的 20 个商品混凝土供应站，为制定北京地区泵送混凝土测强曲线提供了 2363 组数据（北京地区的泵送混凝土地方标准已发布实施）。

3 收集了长龄期和高强混凝土数据

陕西院提供了 17 年、52 年的长龄期混凝土数据；贵州中建院提供了 16、18、22 年的长龄期混凝土数据；浙江院提供了高强和泵送混凝土数据；中国建研院收集了高强和泵送混凝土数据；广西院和安徽院提供了综合法测强数据等。

4000 多组数据的综合分析计算表明，本规程中卵石和碎石的测强曲线适用于：掺或不掺外加剂、粉煤灰、泵送剂；人工或一般机械搅拌、成型的混凝土、泵送混凝土；龄期为 7~2000d 的混凝土；强度为 10~70MPa 的结构或构件混凝土的强度检测推定。综合法测强曲线的系数值和统计分析指标见下表。

序号	骨料种类	试件数量	回归系数			相关系数 (r)	标准差 (s)	相对误差 (%)	平均相对误差 (%)
			a	b	c				
1	卵石	4157	0.005599	1.438657	1.768646	0.9148	5.51	15.7	13.1
2	碎石	4390	0.016183	1.655800	1.406373	0.9122	5.33	15.3	12.5

6.0.2 本规程的强度换算适用于符合本条规定的普通混凝土。当与本条的规定有差异时，可从被测构件上钻取不少于 4 个 $\phi 100 \times 100\text{mm}$ 混凝土芯样进行修正。

6.0.3 试验表明，由于卵石和碎石的表面状态完全不同，混凝土内部界面的粘结状况也不相同。在相同的配合比时，碎石因表面粗糙，与砂浆界面粘结较好，因而混凝土的强度较高；卵石因表面光滑影响粘结，混凝土强度低。不同石子品种中超声波声速不相同，即使是同一石子品种而产地不同声速也有差别。许多科研单位进行了大量的试验结果表明，当石子品种不同时，应分别建立测强曲线。本规程按不同品种的粗骨料，分别建立了强度换算公式。

6.0.4 由于我国幅员辽阔，材料分散，混凝土品种繁多，生产工艺又不断改进，所建立的全国统一曲线很难适应全国各地的情况。因此，凡有条件的省、自治区、直辖市，可采用本地区常用的有代表性的材料、成型养护工艺和龄期为基本条件，制作一定数量的混凝土立方体试件，进行超声、回弹和抗压试验，建立本地区曲线或大型工程专用测强曲线。这种测强曲线，对于本地区或本工程来说，它的适应性和强度推定误差均优于全国统一曲线。本规程规定，专用测强曲线相对误差 $e_r \leq 12\%$ ；地区测强曲线相对误差 $e_r \leq 14\%$ 。

6.0.5 结构或构件混凝土强度的平均值和标准差是用各测区的混凝土强度换算值来计算。当按批推定混凝土强度时，如测区混凝土强度标准差超过本规程第 6.0.6 条规定，说明该批构件的混凝土制作条件不尽相同，混凝土强度质量均匀性差，不能按批推定混凝土强度。

6.0.6 当现场检测条件与测强曲线的适用条件有较大差异时，须用同条件立方体试件或在测区钻取的混凝土芯样试件进行修正。修正的方法有修正系数法和修正量法，本规程采用修正系数法。在确定修正系数时，试件数量应不少于 4 个。工程实践和理论分析表明，修正系数估计的准确程度与确定修正系数的试件数量 n 有关，修正系数的标准差与试件数量的平方根 \sqrt{n} 成反比。作为确定修正系数的试件取 3 个太少，但由于取芯工作量大，且不宜在结构上钻取过多数量的芯样，因此，综合考虑修正系数估计的准确度和取芯工作量，规定取样数量不少于 4 个。然后按公式 (6.0.6-1) 或 (6.0.6-2) 计算修正系数。

如从被测构件中钻取的混凝土芯样尺寸不符合本条的规定，则采用式 (6.2.6-2) 计算 η 时尚应按现行协会标准《钻芯法检测混凝土强度技术规程》CECS 03 的规定考虑芯样强度与立方体试件强度的换算关系。

6.0.7 按本规程检测推定的混凝土抗压强度不等于施工现场取样成型并标准养护 28d 所得的试件抗压强度。因此，在正常情况下混凝土强度的验收与评定，应按现行国家标准执行。

当构件测区数少于 10 个时，应按式 (6.0.7-1) 计算推定抗压强度。当构件测区数不少

于 10 个时，应按式 (6.0.7-2) 计算推定抗压强度。当按批推定构件混凝土抗压强度时，也应按式 (6.0.7-2) 计算，但此时的强度平均值和标准差应采用该检验批中所有抽检构件的测区强度来计算。

当结构或构件的测区抗压强度换算值中出现小于 10.0MPa 的值时，该构件混凝土抗压强度推定值 $f_{cu,e}$ 应取小于 10MPa。

如测区换算值小于 10.0MPa 或大于 70.0MPa，因超出了本规程强度换算方法的适用范围，故该测区的混凝土抗压强度应表述为“<10.0 MPa”，或“>70.0MPa”。如构件测区中有小于 10.0 MPa 的测区，因不能计算构件混凝土的强度标准差，则该构件混凝土的推定强度应表述为“<10.0 MPa”；如构件测区中有大于 70.0MPa 的测区，也不能计算构件混凝土的强度标准差，此时，构件混凝土抗压强度的推定值取该构件各测区中最小的测区混凝土抗压强度换算值。

6.0.8 对按批量检测的构件，如该批构件的混凝土质量不均匀，测区混凝土强度标准差大于规定的范围，则该批构件应全部按单个构件进行强度推定。

本条中，混凝土抗压强度平均值 $m_{f_{cu}^c} \leq 50\text{MPa}$ 时标准差 $s_{f_{cu}^c}$ 的限值，系按原规程的规定。
 $m_{f_{cu}^c} > 50\text{MPa}$ 时 $s_{f_{cu}^c}$ 的限值，是参考北京地区四个大型商品混凝土搅拌站生产的 C50~C60 混凝土的标养抗压强度统计数据确定的，见下表：

序	单位名称	试件组数	平均值(MPa)	标准差 (MPa)
1	中思成	1340	63.8	6.32
2	科实恒			
3	城建四公司			
4	建工六建公司			

注：每组三个试件取其平均值。

由表可见，C50~C60 混凝土的抗压强度标准差为 6.32MPa。所以，当结构或构件混凝土抗压强度平均值大于 50.0 MPa 时，限制 $s_{f_{cu}^c}$ 不大于 6.50MPa 是合适的。

附录 A 建立专用或地区混凝土强度 曲线的基本要求

建立专用或地区测强曲线的目的，是为了使测强曲线的使用条件尽可能地符合本地区或某一专项工程的实际情况，以减少工程检测中的验证和修正工作量，同时也可避免因修正不当带入新的误差因素，从而提高综合法检测混凝土强度的准确性和可靠性。因此，建立专用或地区测强曲线时，除了采用专项工程的混凝土原材料或本地区常用原材料，以及混凝土配合比外，还应严格控制试件的制作、养护及超声、回弹和抗压强度试验等每一操作环节，并注意观察、记录试验过程中的异常现象（如试件测试面是否平整、试件是否标准立方体、测试时试件表面干湿状态、抗压破坏是否有偏心受压、混凝土中的石子含量偏多或偏少及分布是否均匀等），对明显异常的数据，应认真分析其原因再确定取舍。根据声速代表值、回弹代表值和试件抗压强度实测值进行回归分析、相关分析和误差分析，可得到混凝土强度曲线。根据回归方程的误差分析结果，也可针对误差特别大的个别数据进行分析判断，若系试验过程中带进的较大误差，可以剔除该数据后再进行回归分析。总之，建立测强曲线是一个技术性很强的工作，必须认真仔细、严肃对待。

除本规程附录 A 式 (A. 0. 8-1) 推荐的回归方程形式外，如有其他更好的形式，只要满足第 6. 0. 4 条的要求都可以采用。

附录 B 超声波角测、平测和声速计算方法

B.1 超声波角测方法

B.1.1 有时被测构件旁边存在墙体、管道等障碍物，只有两个相邻表面可供检测，此时仍然可以进行综合法测强，即在两个相邻表面的对应位置布置超声测点，采用丁角方法测量混凝土声速。

B.1.2 为使超声波能充分反映构件内部混凝土的质量，同时还要尽可能避开钢筋的影响，布置超声测点时最好使换能器尽量离开构件边缘远一些（图 B.1.2）。计算分析表明，换能器中心点与构件边缘的距离只要不小于 200mm，即使混凝土声速小到 3.50~3.80km/s 也不会受钢筋的影响。在检测中可能会遇到一个表面较窄另一表面较宽的构件，所以布置测点时不要求 l_1 与 l_2 相等，但二者相差不宜大于 2 倍。

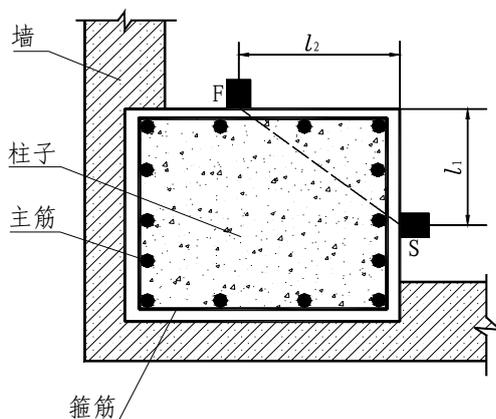


图 B.1.2 超声波角测示意

B.1.3~B.1.4 大量对比试验表明，可采用 F、S 换能器中心点与构件边缘的距离 l_1 、 l_2 ，按几何学原理计算超声测距 l ；用此测距 l 与角测的声时值计算所得的声速值，与对测的声速值没有明显差异，不需作任何修正。

B.2 超声波平测方法

B.2.1 原规程没有规定平测方法，但在实际工程检测中有时遇到被测构件只能提供一个测试表面（如道路、机场跑道、楼板、隧道、挡土墙等）。为了使本规程能适应各种类型构件的测试需要，这次修订增加了平测方法。所谓超声波平测法，就是将发射和接收换能器耦合于被测构件的同一表面上进行声时测量。因平测法只能反映浅层混凝土的质量，所以厚度较大的板式结构（如混凝土承台、筏板等）不宜用平测法，可沿结构表面每隔一定距离钻一个 $\phi 40\text{mm} \sim \phi 50\text{mm}$ 的超声测试孔，采用径向振动式换能器进行声速测量。

B.2.2 因为板式结构或构件的表面内侧常分布有钢筋网片，为了避开钢筋的影响，布置超声

测点时应使发射和接收换能器的连线与测点附近钢筋的轴线保持一定夹角,一般可取 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 。大量实践证明,平测时测距过小或过大,超声接收信号的首波起始点难以辨认,测读的声时误差较大。一般将发射、接收换能器中对中距离保持在 $350 \sim 450\text{mm}$,首波起始点较易辨认,便于进行声时测量。

B.2.3 模拟试验和在工程检测中所做的平测与对测比较表明,平测声速 v_p 与对测声速 v_d 之间存在差异,且差异并非固定值。平测声速受测试表面质量好坏的影响较大。当测试部位混凝土质量表里一致(表面光洁、平整且未受任何损伤)时,平测与对测的声速值差异不大,一般 $v_d/v_p = 1.00 \sim 1.03$;如果混凝土测试表面粗糙、疏松或存在微裂缝,则 v_p 与 v_d 之间的差异较大,一般 $v_d/v_p = 1.04 \sim 1.15$ 。在工程检测中,如有条件在同一测试部位(如剪力墙门洞附近)做平测和对测比较,则可求出实测修正系数 λ ,可按 λ 对平测声速进行修正。

B.2.4 当无条件做对比测试时,可选取结构或构件有代表性的部位,改变发射和接收换能器之间的测距,逐点读取相应声时值,然后以测距 l_i 与对应的 t_i 求回归直线 $l = a + bt$,其中回归系数 b 相当于对测时的混凝土声速 v_d ,然后以 v_d 与各测点平测声速 v_p 的平均值进行比较,即可求出该状态下的平测声速修正系数 λ 。

下面是几个平测实例的回归分析结果:

测点	测距(mm)	200	250	300	350	400	450	500	平均值
1	声时(μs)	54.6	63.4	72.2	85.0	97.8	109.8	113.8	
	平测声速(km/s)	3.66	3.94	4.16	4.12	4.09	4.10	4.39	4.07
	回归方程	$l = -48.85 + 4.68t \quad r = 0.9947 \quad \lambda = 4.68/4.07 = 1.151$							
2	声时(μs)	54.6	71.8	82.6	97.8	114.6	120.6	126.0	
	平测声速(km/s)	3.66	3.48	3.63	3.58	3.49	3.73	3.97	3.65
	回归方程	$l = -28.74 + 3.97t \quad r = 0.9872 \quad \lambda = 3.97/3.65 = 1.088$							
3	声时(μs)	73.8	91.4	105.8	127.4	129.8	139.4	157.0	
	平测声速(km/s)	2.71	2.74	2.84	2.75	3.08	3.23	3.18	2.93
	回归方程	$l = 83.97 + 3.68t \quad r = 0.9862 \quad \lambda = 3.68/2.93 = 1.257$							
4	声时(μs)	48.2	64.6	80.6	87.4	98.6	111.4	125.0	
	平测声速(km/s)	4.15	3.87	3.72	4.00	4.06	4.04	4.00	3.98
	回归方程	$l = -6.84 + 4.06t \quad r = 0.9954 \quad \lambda = 4.06/3.98 = 1.020$							

注:测点2表面较好,修正系数 $\lambda = 1.02$;测点1表面较差, $\lambda = 1.151$;测点3表面较疏松,且有不规则微裂缝, $\lambda = 1.257$ 。

B.2.5 平测时混凝土声速的计算,应根据所测构件测试面的实际情况求出修正系数 λ 并对声速进行修正,然后进行混凝土抗压强度计算。

附录 C 测区混凝土抗压强度换算

本规程测强曲线中新增加了长龄期混凝土、高强混凝土和泵送混凝土的数据，故适用于符合第 6.0.2 条规定条件的普通混凝土。大量研究表明，混凝土粗骨料的品种和材质对综合法测强有较大影响，但全国不同地区的粗骨料岩石种类和材质差异很大，不可能逐一建立测强曲线，因此本规程提供的全国统一综合法测强曲线，只有卵石和碎石两个品种。当该两种测强曲线能适应某些地区的材质条件时，混凝土强度的测试误差将较小，当与某些地区的材质条件不能适应时，混凝土强度的测试误差将很大，因此，使用该曲线前必须先通过验证，不得盲目套用。

测区混凝土的抗压强度换算，可根据同一测区的声速修正代表值和回弹修正代表值直接从强度换算表中查得，也可采用强度换算曲线公式计算。如出现测区换算强度值小于 10.0MPa 或大于 70.0MPa，即超出换算曲线的适应范围时，该测区的抗压强度应表述为“< 10.0 MPa”或“>70.0MPa”。

附录 D 综合法测定混凝土强度曲线的验证方法

当缺乏专用或地区测强曲线而需采用本规程规定的全国统一测强曲线时，应先按本附录的规定进行验证。

附录 E 用实测空气声速法校准超声仪

由物理学可知，空气中的声速除了随温度而变化外，受其它因素的影响很小。所以，采用测量空气中声速的方法定期检验仪器的性能，是一种简单易行的方法。该方法不仅检验仪器的计时机构是否可靠，还检验了仪器操作者的声时读取方法是否正确。一般说来，只要超声仪正常，操作人员的测试操作也准确无误，测试结果的相对误差 e_r 应不超过 $\pm 0.5\%$ 。

如果出现 e_r 超过 $\pm 0.5\%$ 的情况，应首先复核测试操作是否正确，否则属于仪器计时系统不正常。

附录 F 超声回弹综合法检测记录表

附录 G 结构混凝土抗压强度计算表

两种表格供现场检测和数据汇总，以及留档存查之用。

附录 F 中，测区回弹代表值 R 应取 10 个测点有效回弹值 R_i 的平均值；测区声速代表值 v

应取 3 个测点声速值 ($v_i = \frac{l_i}{t_i - t_0}$) 的平均值。

对测区数多于 10 个的构件，仍可利用附录 F、G 的表，只需在测区栏的序号上加一个“十”位数字而成为 11，12，……20 等即可。