



CECS 02 : 2005

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

Technical specification for detecting strength of
concrete by ultrasonic-rebound combined method



中国计划出版社

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

Technical specification for detecting strength of
concrete by ultrasonic-rebound combined method

CECS 02 : 2005

主编单位:中国建筑科学研究院

批准单位:中国工程建设标准化协会

施行日期:2005年12月1日

中国计划出版社

2005 北 京

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

☆

中国建筑科学研究院 主编

中国计划出版社出版

(地址:北京市西城区木樨地北里甲 11 号国宏大厦 C 座 4 层)

(邮政编码:100038 电话:63906433 63906381)

新华书店北京发行所发行

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

850×1168 毫米 1/32 2.5 印张 63 千字

2005 年 12 月第一版 2005 年 12 月第一次印刷

印数 1—8100 册

☆

统一书号:1580058·673

前 言

根据中国工程建设标准化协会(2000)建标协字第 15 号文《关于印发中国工程建设标准化协会 2000 年第一批推荐性标准制、修订计划的通知》的要求,对原规程进行了修订。

本规程在《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》CECS 02:88的基础上,吸收了国内外超声检测仪器的最新成果和超声检测技术的新经验,结合我国工程建设中混凝土质量检测的实际需要进行了修订。

本规程的主要内容是:1 总则,2 术语、符号,3 回弹仪,4 混凝土超声波检测仪器,5 测区回弹值和声速值的测量及计算,6 结构混凝土强度推定。

本规程主要修订的内容是:规定了混凝土回弹仪的检定方法;增加了超声波角测、平测及其声速计算方法;扩大了测强曲线的适用范围;改变了结构混凝土强度的推定方法。

根据国家计委计标[1986]1649 号文《关于请中国工程建设标准化委员会负责组织推荐性工程建设标准试点工作的通知》的要求,现批准发布协会标准《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》,编号为 CECS 02:2005,推荐给工程建设设计、施工和使用单位采用。自本规程施行之日起,原规程 CECS 02:88 废止。

本规程由中国工程建设标准化协会混凝土结构专业委员会 CECS/TC 5 归口管理,由中国建筑科学研究院结构研究所(北京北三环东路 30 号,邮政编码:100013)负责解释。在使用中,如发现需要修改或补充之处,请将意见和资料径寄解释单位。

主 编 单 位: 中国建筑科学研究院

参 编 单 位: 陕西省建筑科学研究设计院

广西区建筑科学研究设计院

湖南大学土木工程学院

贵州中建建筑科研设计院

浙江省建筑科学设计研究院

山东省乐陵市回弹仪厂

主要起草人：邱 平 张治泰 张荣成 李杰成 黄政宇
袁海军 张 晓 徐国孝 王明堂

中国工程建设标准化协会

2005 年 11 月 1 日

目次

1	总 则	(1)
2	术语、符号	(2)
2.1	术语	(2)
2.2	主要符号	(3)
3	回弹仪	(5)
3.1	一般规定	(5)
3.2	检定要求	(5)
3.3	维护保养	(6)
4	混凝土超声波检测仪器	(8)
4.1	一般规定	(8)
4.2	换能器技术要求	(9)
4.3	校准和保养	(9)
5	测区回弹值和声速值的测量及计算	(10)
5.1	一般规定	(10)
5.2	回弹测试及回弹值计算	(11)
5.3	超声测试及声速值计算	(13)
6	结构混凝土强度推定	(15)
附录 A	建立专用或地区混凝土强度曲线的基本要求	(19)
附录 B	超声波角测、平测和声速计算方法	(23)
附录 C	测区混凝土抗压强度换算表	(26)
附录 D	综合法测定混凝土强度曲线的验证方法	(41)
附录 E	用实测空气声速法校准超声仪	(42)
附录 F	超声回弹综合法检测记录表	(44)
附录 G	结构混凝土抗压强度计算表	(45)

本规程用词说明 (46)

附:条文说明 (47)

1 总 则

1.0.1 为了统一采用中型回弹仪、混凝土超声波检测仪综合检测并推断混凝土结构中普通混凝土抗压强度的方法,做到技术先进、安全可靠、经济合理、方便使用,制定本规程。

1.0.2 在正常情况下,混凝土强度的验收和评定应按现行有关国家标准执行。当对结构中的混凝土有强度检测要求时,可按本规程进行检测,并推定结构混凝土的强度,作为混凝土结构处理的一个依据。

1.0.3 本规程不适用于检测因冻害、化学侵蚀、水灾、高温等已造成表面疏松、剥落的混凝土。

1.0.4 按本规程进行工程检测的人员,应通过专业培训并持有相应的资格证书。

1.0.5 采用超声回弹综合法检测及推定混凝土强度,除应遵守本规程外,尚应符合国家现行有关强制性标准的规定。

2 术语、符号

2.1 术 语

2.1.1 检测单元 detective element

按照检测要求确定的混凝土结构的组成单元。

2.1.2 测区 detecting region

在进行结构或构件混凝土强度检测时确定的检测区域。

2.1.3 测点 detecting point

测区内的检测点。

2.1.4 超声回弹综合法 ultrasonic-rebound combined method

根据实测声速值和回弹值综合推定混凝土强度的方法。本方法采用带波形显示器的低频超声检测仪,并配置频率为 50~100kHz 的换能器,测量混凝土中的超声波声速值,以及采用弹击锤冲击能量为 2.207J 的混凝土回弹仪,测量回弹值。

2.1.5 超声波速度 velocity of ultrasonic wave

在混凝土中,超声脉冲波单位时间内的传播距离。

2.1.6 波幅 amplitude of wave

超声脉冲波通过混凝土被换能器接收后,由超声波检测仪显示的首波信号的幅度。

2.1.7 测区混凝土抗压强度换算值 conversion value for the compression strength of concrete at detecting region

根据测区混凝土中的声速代表值和回弹仪代表值,通过测强曲线换算所得的该测区现龄期混凝土的抗压强度值。

2.1.8 混凝土抗压强度推定值 inferable value for compression strength of concrete

根据测区混凝土抗压强度换算值推定的结构或构件中现龄期

混凝土的抗压强度值。

2.2 主要符号

- e_r —— 相对误差；
- $f_{cu,i}^c$ —— 结构或构件第 i 个测区的混凝土抗压强度换算值；
- $f_{cu,e}^c$ —— 结构混凝土抗压强度推定值；
- $f_{cu,min}^c$ —— 结构或构件最小的测区混凝土抗压强度换算值；
- f_{cu}^o —— 混凝土立方体试件的抗压强度实测值；
- f_{cor}^o —— 混凝土芯样试件的抗压强度实测值；
- l_i —— 第 i 个测点的超声测距；
- $m_{f_{cu}^c}$ —— 结构或构件测区混凝土抗压强度换算值的平均值；
- n —— 测区数，测点数，立方体试件数，芯样试件数；
- R_i —— 第 i 个测点的有效回弹值；
- R —— 测区回弹代表值；
- R_a —— 修正后的测区回弹代表值；
- R_{α} —— 测试角度为 α 时的测区回弹修正值；
- R_a^c, R_a^b —— 测量混凝土浇筑顶面或底面时的测区回弹修正值；
- $s_{f_{cu}^c}$ —— 结构或构件测区混凝土抗压强度换算值的标准差；
- T_k —— 空气的摄氏温度；
- t_i —— 第 i 个测点的声时读数；
- t_0 —— 声时初读数；
- v —— 测区混凝土中声速代表值；
- v_a —— 修正后的测区混凝土中声速代表值；
- v_k —— 空气中声速计算值；
- v^o —— 空气中声速实测值；
- v_i —— 第 i 个测点的混凝土中声速值；
- α —— 回弹仪测试角度；
- β —— 超声测试面的声速修正系数；

η ——修正系数；
 λ ——平测声速修正系数。

3 回 弹 仪

3.1 一 般 规 定

3.1.1 所采用的回弹仪应符合国家计量检定规程《混凝土回弹仪》JJG 817 的要求,并通过技术鉴定,必须具有产品合格证和检定证,并应具有中国计量器具制造 CMC 许可证标志。

3.1.2 所采用的回弹仪应符合下列标准状态的要求:

1 水平弹击时,在弹击锤脱钩的瞬间,回弹仪弹击锤的冲击能量应为 2.207J;

2 弹击锤与弹击杆碰撞的瞬间,弹击拉簧应处于自由状态,检定器上指针滑块刻线应置于“0”处;

3 在洛氏硬度 HRC 为 60 ± 2 的钢砧上,回弹仪的率定值为 80 ± 2 。

3.1.3 回弹仪使用时,环境温度应为 $-4 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 。

3.2 检 定 要 求

3.2.1 回弹仪有下列情况之一时,应经检定单位检定后方可使用:

- 1 新回弹仪启用前。
- 2 超过检定有效期。
- 3 累计弹击次数超过 6000 次。
- 4 经常规保养后,钢砧率定值不合格。
- 5 遭受严重撞击或其他损害。

3.2.2 回弹仪应由有资格的检定单位按照现行国家计量检定规程《混凝土回弹仪》JJG 817 的规定进行检定。

3.2.3 在下列情况之一时,回弹仪应在钢砧上进行率定试验;

- 1 回弹仪当天使用前、后。
- 2 测试过程中对回弹仪性能有怀疑时。

当回弹仪率定值不在 80 ± 2 范围内时,应按本规程 3.3 节的要求,对回弹仪进行常规保养后再进行率定。若再次率定仍达不到要求,则应送检定单位检定。

3.2.4 回弹仪率定试验宜在干燥、室温 $5 \sim 35^{\circ}\text{C}$ 条件下进行。率定时,钢砧应稳固地平放在刚度大的物体上。测定回弹值时,取连续向下弹击三次的稳定回弹值计算平均值。弹击杆应分三次旋转,每次宜旋转 90° 。每旋转一次弹击杆,率定平均值应为 80 ± 2 。

3.3 维护保养

3.3.1 回弹仪有下列情况之一时,应进行常规保养:

- 1 弹击超过 2000 次。
- 2 对检测值有怀疑时。
- 3 钢砧上的率定值不符合要求。

3.3.2 回弹仪的常规保养应符合下列规定:

1 使弹击锤脱钩后取出机芯,卸下弹击杆,取出缓冲压簧,并取出弹击拉簧和拉簧座;

2 清洗机芯各零部件,重点清洗中心导杆、弹击锤和弹击杆的内孔和冲击面。清洗后在中心导杆上薄薄涂抹钟表油,其他零部件均不得抹油;

3 清理机壳内壁,卸下刻度尺,并检查指针,其摩擦力应为 $0.5 \sim 0.8\text{N}$;

- 4 不得旋转尾盖上已定位紧固的调零螺丝;
- 5 不得自制或更换零部件;
- 6 保养后按本规程 3.2.4 条的要求进行率定试验。

3.3.3 回弹仪使用完毕后,应使弹击杆伸出机壳,清除弹击杆、杆前端球面、刻度尺表面和外壳上的污垢、尘土。回弹仪不使用时,

应将弹击杆压入仪器内,经弹击后用按钮锁住机芯,将回弹仪装入仪器箱,平放在干燥阴凉处。

4 混凝土超声波检测仪器

4.1 一般规定

4.1.1 所采用的混凝土超声检测仪应通过技术鉴定,必须具有产品合格证和检定证。

4.1.2 用于混凝土的超声波检测仪可分为下列两类:

1 模拟式:接收的信号为连续模拟量,可由时域波形信号测读声学参数;

2 数字式:接收的信号转化为离散数字量,具有采集、储存数字信号、测读声学参数和对数字信号处理的智能化功能。

4.1.3 所采用的超声波检测仪应符合现行行业标准《混凝土超声波检测仪》JG/T 5004 的要求,并在计量检定有效期内使用。

4.1.4 超声波检测仪应满足下列要求:

1 具有波形清晰、显示稳定的示波装置;

2 声时最小分度值为 $0.1\mu\text{s}$;

3 具有最小分度值为 1dB 的信号幅度调整系统;

4 接收放大器频响范围 $10\sim 500\text{kHz}$,总增益不小于 80dB ,接收灵敏度(信噪比 $3:1$ 时)不大于 $50\mu\text{V}$;

5 电源电压波动范围在标称值 $\pm 10\%$ 情况下能正常工作;

6 连续正常工作时间不少于 4h 。

4.1.5 模拟式超声波检测仪还应满足下列要求:

1 具有手动游标和自动整形两种声时测读功能;

2 数字显示稳定,声时调节在 $20\sim 30\mu\text{s}$ 范围内,连续静置 1h 数字变化不超过 $\pm 0.2\mu\text{s}$ 。

4.1.6 数字式超声波检测仪还应满足下列要求:

1 具有采集、储存数字信号并进行数据处理的功能;

2 具有手动游标测读和自动测读两种方式。当自动测读时,在同一测试条件下,在 1h 内每 5min 测读一次声时值的差异不超过 $\pm 0.2\mu\text{s}$;

3 自动测读时,在显示器的接收波形上,有光标指示声时的测读位置。

4.1.7 超声波检测仪器使用时,环境温度应为 $0\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。

4.2 换能器技术要求

4.2.1 换能器的工作频率宜在 $50\sim 100\text{kHz}$ 范围内。

4.2.2 换能器的实测主频与标称频率相差不应超过 $\pm 10\%$ 。

4.3 校准和保养

4.3.1 超声波检测仪的声时计量检验,应按“时-距”法测量空气中声速实测值 v° (附录 E),并与按下列公式计算的空气中声速计算值 v_k 相比较,二者的相对误差不应超过 $\pm 0.5\%$ 。

$$v_k = 331.4 \sqrt{1 + 0.00367 T_k} \quad (4.3.1)$$

式中 331.4 —— 0°C 时空气中的声速值 (m/s);

v_k —— 温度为 T_k 时空气中的声速计算值 (m/s);

T_k —— 测试时空气的温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

4.3.2 检测时,应根据测试需要在仪器上配置合适的换能器和高频电缆线,并测定声时初读数 t_0 。检测过程中如更换换能器或高频电缆线,应重新测定 t_0 。

4.3.3 超声波检测仪应定期保养。

5 测区回弹值和声速值的测量及计算

5.1 一般规定

5.1.1 测试前宜具备下列资料：

- 1 工程名称和设计、施工、建设、委托单位名称；
- 2 结构或构件名称、施工图纸和混凝土设计强度等级；
- 3 水泥的品种、强度等级和用量，砂石的品种、粒径，外加剂或掺合料的品种、掺量和混凝土配合比等；
- 4 模板类型，混凝土浇筑、养护情况和成型日期；
- 5 结构或构件检测原因的说明。

5.1.2 检测数量应符合下列规定：

- 1 按单个构件检测时，应在构件上均匀布置测区，每个构件上测区数量不应少于 10 个；
- 2 同批构件按批抽样检测时，构件抽样数不应少于同批构件的 30%，且不应少于 10 件；对一般施工质量的检测和结构性能的检测，可按照现行国家标准《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344 的规定抽样。

3 对某一方向尺寸不大于 4.5m 且另一方向尺寸不大于 0.3m 的构件，其测区数量可适当减少，但不应少于 5 个。

5.1.3 按批抽样检测时，符合下列条件的构件可作为同批构件：

- 1 混凝土设计强度等级相同；
- 2 混凝土原材料、配合比、成型工艺、养护条件和龄期基本相同；
- 3 构件种类相同；
- 4 施工阶段所处状态基本相同。

5.1.4 构件的测区布置宜满足下列规定：

1 在条件允许时,测区宜优先布置在构件混凝土浇筑方向的侧面;

2 测区可在构件的两个对应面、相邻面或同一面上布置;

3 测区宜均匀布置,相邻两测区的间距不宜大于 2m;

4 测区应避开钢筋密集区和预埋件;

5 测区尺寸宜为 200mm×200mm;采用平测时宜为 400mm×400mm;

6 测试面应清洁、平整、干燥,不应有接缝、施工缝、饰面层、浮浆和油垢,并应避开蜂窝、麻面部位。必要时,可用砂轮片清除杂物和磨平不平整处,并擦净残留粉尘。

5.1.5 结构或构件上的测区应编号,并记录测区位置和外观质量情况。

5.1.6 对结构或构件的每一测区,应先进行回弹测试,后进行超声测试。

5.1.7 计算混凝土抗压强度换算值时,非同一测区内的回弹值和声速值不得混用。

5.2 回弹测试及回弹值计算

5.2.1 回弹测试时,应始终保持回弹仪的轴线垂直于混凝土测试面。宜首先选择混凝土浇筑方向的侧面进行水平方向测试。如不具备浇筑方向侧面水平测试的条件,可采用非水平状态测试,或测试混凝土浇筑的顶面或底面。

5.2.2 测量回弹值应在构件测区内超声波的发射和接收面各弹击 8 点;超声波单面平测时,可在超声波的发射和接收测点之间弹击 16 点。每一测点的回弹值,测读精确度至 1。

5.2.3 测点在测区范围内宜均匀布置,但不得布置在气孔或外露石子上。相邻两测点的间距不宜小于 30mm;测点距构件边缘或外露钢筋、铁件的距离不应小于 50mm,同一测点只允许弹击一次。

5.2.4 测区回弹代表值应从该测区的 16 个回弹值中剔除 3 个较大值和 3 个较小值,根据其余 10 个有效回弹值按下列公式计算:

$$R=\frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10}R_i \tag{5.2.4}$$

式中 R ——测区回弹代表值,取有效测试数据的平均值,精确至 0.1;

R_i ——第 i 个测点的有效回弹值。

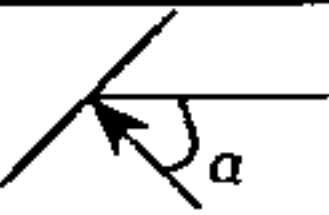
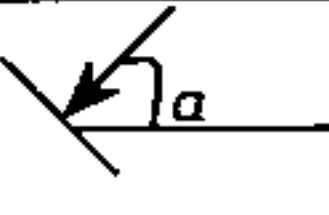
5.2.5 非水平状态下测得的回弹值,应按下列公式修正:

$$R_a=R+R_{aa} \tag{5.2.5}$$

式中 R_a ——修正后的测区回弹代表值;

R_{aa} ——测试角度为 α 时的测区回弹修正值,按表 5.2.5 的规定采用。

表 5.2.5 非水平状态下测试时的回弹修正值 R_{aa}

<div>测试 角度</div> <div>R_{aa}</div> <div>R</div>	<div>  回弹仪向上 </div>				<div>  回弹仪向下 </div>			
	+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
25	-5.5	-4.5	-3.8	-2.8	+2.3	+2.8	+3.3	+3.8
30	-5.0	-4.0	-3.5	-2.5	+2.0	+2.5	+3.0	+3.5
35	-4.5	-3.8	-3.3	-2.3	+1.8	+2.3	+2.8	+3.3
40	-4.0	-3.5	-3.0	-2.0	+1.5	+2.0	+2.5	+3.0
45	-3.8	-3.3	-2.8	-1.8	+1.3	+1.8	+2.3	+2.8
50	-3.5	-3.0	-2.5	-1.5	+1.0	+1.5	+2.0	+2.5

注:1 当测试角度等于 0 时,修正值为 0; R 小于 20 或大于 50 时,分别按 20 或 50 查表;

2 表中未列数值,可采用内插法求得,精确至 0.1。

5.2.6 在混凝土浇筑的顶面或底面测得的回弹值,应按下列公式修正:

$$R_a=R+(R_a^t+R_a^b) \tag{5.2.6}$$

式中 R_a^t ——测量混凝土浇筑顶面时的回弹修正值,按表 5.2.6 的规定采用;

R_a^b ——测量混凝土浇筑底面时的回弹修正值,按表 5.2.6 的规定采用。

表 5.2.6 测试混凝土浇筑顶面或底面时的回弹修正值 R_a^t 、 R_a^b

测试面 R 或 R_a	顶面 R_a^t	底面 R_a^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:1 当测试角度等于 0 时,修正值为 0; R 小于 20 或大于 50 时,分别按 20 或 50 查表;

2 当先进行角度修正时,采用修正后的回弹代表值 R_a ;

3 表中未列数值,可采用内插法求得,精确至 0.1。

5.2.7 测试时回弹仪处于非水平状态,同时测试面又非混凝土浇筑方向的侧面,则应对测得的回弹值先进行角度修正,然后对角度修正后的值再进行顶面或底面修正。

5.3 超声测试及声速值计算

5.3.1 超声测点应布置在回弹测试的同一测区内,每一测区布置 3 个测点。超声测试宜优先采用对测或角测,当被测构件不具备对测或角测条件时,可采用单面平测(附录 B)。

5.3.2 超声测试时,换能器辐射面应通过耦合剂与混凝土测试面良好耦合。

5.3.3 声时测量应精确至 $0.1\mu\text{s}$,超声测距测量应精确至 1.0mm ,且测量误差不应超过 $\pm 1\%$ 。声速计算应精确至 0.01km/s 。

5.3.4 当在混凝土浇筑方向的侧面对测时,测区混凝土中声速代表值应根据该测区中 3 个测点的混凝土中声速值,按下列公式计算:

$$v = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{l_i}{t_i - t_0} \quad (5.3.4)$$

式中 v ——测区混凝土中声速代表值(km/s);

l_i ——第 i 个测点的超声测距(mm)。角测时测距按本规程附录 B 第 B.1 节计算;

t_i ——第 i 个测点的声时读数(μ s);

t_0 ——声时初读数(μ s)。

5.3.5 当在混凝土浇筑的顶面或底面测试时,测区声速代表值应按下列公式修正:

$$v_s = \beta \cdot v \quad (5.3.5)$$

式中 v_s ——修正后的测区混凝土中声速代表值(km/s);

β ——超声测试面的声速修正系数,在混凝土浇筑的顶面和底面对测或斜测时, $\beta=1.034$;在混凝土浇筑的顶面或底面平测时,测区混凝土中声速代表值应按本规程附录 B 第 B.2 节计算和修正。

6 结构混凝土强度推定

6.0.1 本规程规定的强度换算方法适用于符合下列条件的普通混凝土:

1 混凝土用水泥应符合现行国家标准《硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥》GB 175、《矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥及粉煤灰硅酸盐水泥》GB 1344 和《复合硅酸盐水泥》GB 12958 的要求;

2 混凝土用砂、石骨料应符合现行行业标准《普通混凝土用砂石质量标准及检验方法》JGJ 52 的要求;

3 可掺或不掺矿物掺合料、外加剂、粉煤灰、泵送剂;

4 人工或一般机械搅拌的混凝土或泵送混凝土;

5 自然养护;

6 龄期 7~2000d;

7 混凝土强度 10~70MPa。

6.0.2 结构或构件中第 i 个测区的混凝土抗压强度换算值,可按本规程第 5.2 节和第 5.3 节的规定求得修正后的测区回弹代表值 R_{ai} 和声速代表值 v_{ai} 后,优先采用专用测强曲线或地区测强曲线换算而得。

6.0.3 当无专用和地区测强曲线时,按本规程附录 D 通过验证后,可按附录 C 规定的全国统一测区混凝土抗压强度换算表换算,也可按下列全国统一测区混凝土抗压强度换算公式计算:

1 当粗骨料为卵石时

$$f_{cu,i}^c = 0.0056 v_{ai}^{1.439} R_{ai}^{1.769} \quad (6.0.3-1)$$

2 当粗骨料为碎石时

$$f_{cu,i}^c = 0.0162 v_{ai}^{1.656} R_{ai}^{1.410} \quad (6.0.3-2)$$

式中 $f_{cu,i}$ ——结构或构件第 i 个测区混凝土抗压强度换算值 (MPa), 精确至 0.1MPa。

6.0.4 专用测强曲线或地区测强曲线应按本规程附录 A 的规定制定, 并经工程质量监督主管部门组织审定和批准实施, 专用或地区测强曲线的抗压强度相对误差 e_r 应符合下列规定:

专用测强曲线相对误差 $e_r \leq 12\%$;

地区测强曲线相对误差 $e_r \leq 14\%$;

其中, 相对误差 e_r 应按式(A.0.8-2)计算。

6.0.5 当结构或构件中的测区数不少于 10 个时, 各测区混凝土抗压强度换算值的平均值和标准差应按下列公式计算:

$$m_{f_{cu}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cu,i} \quad (6.0.5-1)$$

$$s_{f_{cu}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{cu,i})^2 - n(m_{f_{cu}})^2}{n-1}} \quad (6.0.5-2)$$

式中 $f_{cu,i}$ ——结构或构件第 i 个测区的混凝土抗压强度换算值 (MPa);

$m_{f_{cu}}$ ——结构或构件测区混凝土抗压强度换算值的平均值 (MPa), 精确至 0.1MPa;

$s_{f_{cu}}$ ——结构或构件测区混凝土抗压强度换算值的标准差 (MPa), 精确至 0.01MPa;

n ——测区数。对单个检测的构件, 取一个构件的测区数; 对批量检测的构件, 取被抽检构件测区数的总和。

6.0.6 当结构或构件所采用的材料及其龄期与制定测强曲线所采用的材料及其龄期有较大差异时, 应采用同条件立方体试件或从结构或构件测区中钻取的混凝土芯样试件的抗压强度进行修正。试件数量不应少于 4 个。此时, 采用式(6.0.3)计算测区混凝土抗压强度换算值应乘以下列修正系数 η 。

1 采用同条件立方体试件修正时:

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{\text{cu},i}^{\circ} / f_{\text{cu},i}^{\text{c}} \quad (6.0.6-1)$$

2 采用混凝土芯样试件修正时:

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{\text{cor},i}^{\circ} / f_{\text{cu},i}^{\text{c}} \quad (6.0.6-2)$$

式中 η ——修正系数,精确至小数点后两位;

$f_{\text{cu},i}^{\text{c}}$ ——对应于第 i 个立方体试件或芯样试件的混凝土抗压强度换算值(MPa),精确至 0.1MPa;

$f_{\text{cu},i}^{\circ}$ ——第 i 个混凝土立方体(边长 150mm)试件的抗压强度实测值(MPa),精确至 0.1MPa;

$f_{\text{cor},i}^{\circ}$ ——第 i 个混凝土芯样($\phi 100 \times 100\text{mm}$)试件的抗压强度实测值(MPa),精确至 0.1MPa;

n ——试件数。

6.0.7 结构或构件混凝土抗压强度推定值 $f_{\text{cu},e}$,应按下列规定确定:

1 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,该构件的混凝土抗压强度推定值 $f_{\text{cu},e}$ 取小于 10MPa。

2 当结构或构件中测区少于 10 个时:

$$f_{\text{cu},e} = f_{\text{cu},\min}^{\text{c}} \quad (6.0.7-1)$$

式中 $f_{\text{cu},\min}^{\text{c}}$ ——结构或构件最小的测区混凝土抗压强度换算值(MPa),精确至 0.1MPa。

3 当结构或构件中测区数不少于 10 个或按批量检测时:

$$f_{\text{cu},e} = m_{f_{\text{cu}}}^{\text{c}} - 1.645s_{f_{\text{cu}}}^{\text{c}} \quad (6.0.7-2)$$

6.0.8 对按批量检测的构件,当一批构件的测区混凝土抗压强度标准差出现下列情况之一时,该批构件应全部按单个构件进行强度推定:

1 一批构件的混凝土抗压强度平均值 $m_{f_{\text{cu}}}^{\text{c}} < 25.0\text{MPa}$,标准

差 $s_{f_{cu}} > 4.50\text{MPa}$;

2 一批构件的混凝土抗压强度平均值 $m_{f_{cu}} = 25.0 \sim 50.0$ MPa, 标准差 $s_{f_{cu}} > 5.50\text{MPa}$;

3 一批构件的混凝土抗压强度平均值 $m_{f_{cu}} > 50.0\text{MPa}$, 标准差 $s_{f_{cu}} > 6.50\text{MPa}$ 。

附录 A 建立专用或地区混凝土强度曲线的基本要求

A.0.1 采用中型回弹仪,并应符合本规程第 3.1 节的各项要求。

A.0.2 采用低频超声波检测仪,并应符合本规程第 4.1 节的各项要求。

A.0.3 选用的换能器应符合本规程第 4.2 节的各项要求。

A.0.4 混凝土用水泥应符合现行国家标准《硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥》GB 175、《矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥及粉煤灰硅酸盐水泥》GB 1344 和《复合硅酸盐水泥》GB 12958 的要求,混凝土用砂、石应符合现行行业标准《普通混凝土用砂石质量标准及检验方法》JGJ 52 的要求。

A.0.5 选用本地区常用水泥、粗骨料、细骨料,按常用配合比制作混凝土强度等级为 C10~C60 的、边长 150mm 的立方体试件。

A.0.6 试件准备应按下列步骤进行:

1 试模应采用符合相关标准要求的钢模;

2 每一混凝土强度等级的试件数宜为 21 块,采用同一盘混凝土均匀装模振动成型;

3 试件拆模后如采用自然养护,宜先放置在水池或湿砂堆中养护 7d,然后按“品”字形堆放在不受日晒雨淋处,以备在各龄期测试用;如采用蒸气养护,则试件的养护制度应与构件预设的养护制度相同;

4 试件的测试龄期宜分为 7d、14d、28d、60d、90d、180d 和 365d;

5 对同一强度等级的混凝土,在每个测试龄期测 3 个试件

(一组)。

A.0.7 试件的测试应按下列步骤进行：

1 整理条件。将被测试件 4 个浇筑侧面上的尘土、污物等擦拭干净,以同一强度等级混凝土的 3 个试件作为一组,依次编号;

2 在试件测试面上标示超声测点。取试件浇筑方向的侧面为测试面,在两个相对测试面上分别画出相对应的 3 个测点(图 A.0.7);

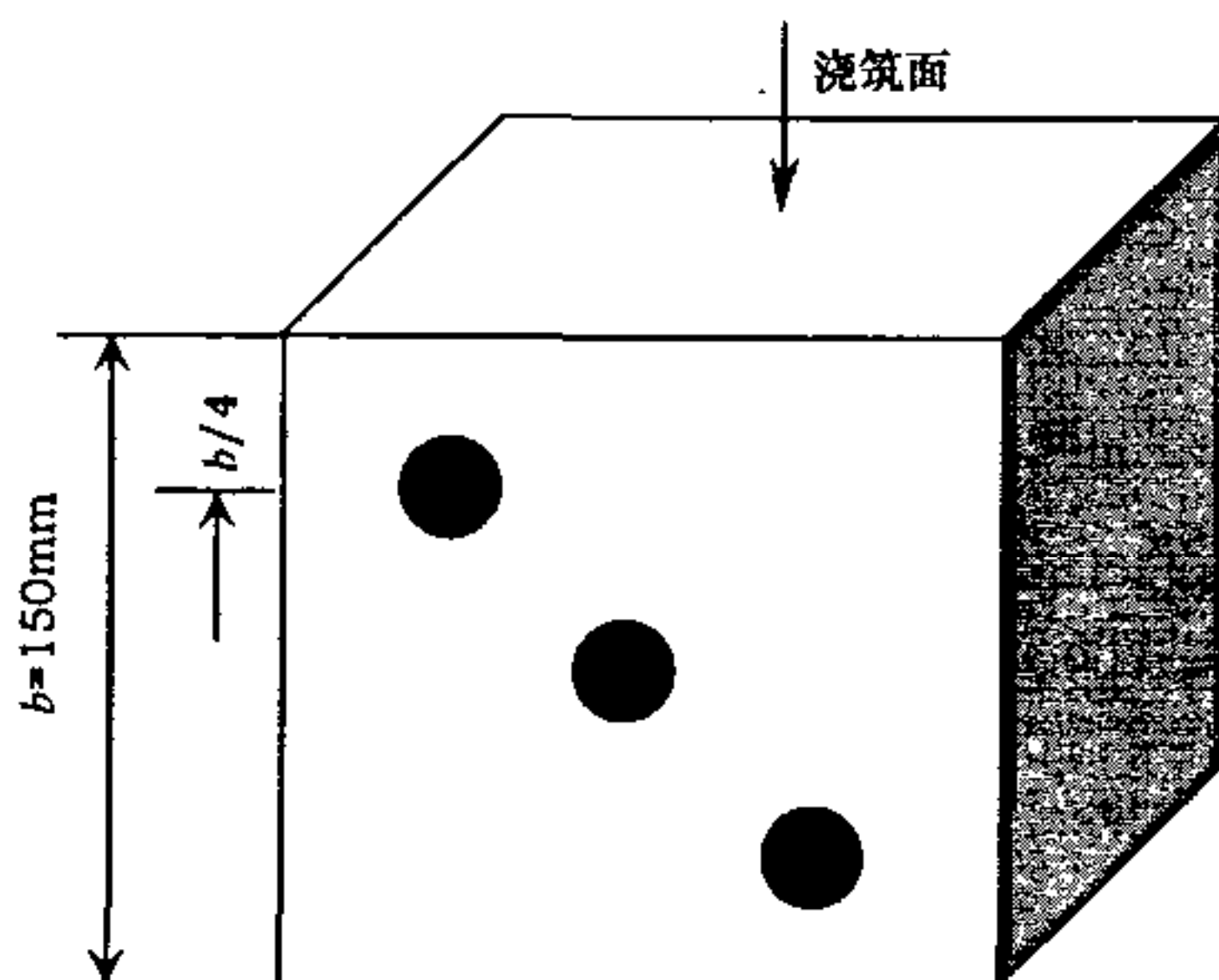


图 A.0.7 声时测量测点布置示意

3 测量试件的超声测距。采用钢卷尺或钢板尺,在两个超声测试面的两侧边缘处逐点测量两测试面的垂直距离,取两边缘对应垂直距离的平均值作为测点的超声测距值 l_1 、 l_2 、 l_3 ;

4 测量试件的声时值。在试件两个测试面的对应测点位置涂抹耦合剂,将一对发射和接收换能器耦合在对应测点上,并始终保持两个换能器的轴线在同一直线上。逐点测读声时读数 t_1 、 t_2 、 t_3 ,精确至 $0.1\mu\text{s}$;

5 计算声速值。分别计算 3 个测点的声速值 v_i 。取 3 个测点声速的平均值作为该试件的混凝土中声速代表值 v ,即

$$v = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{l_i}{t_i - t_0} \quad (\text{A.0.7})$$

式中 v ——试件混凝土中声速值(km/s),精确至 0.01km/s;
 l_i ——第 i 个测点的超声测距(mm),精确至 1mm;
 t_i ——第 i 个测点混凝土中声时读数(μ s),精确至 0.1 μ s;
 t_0 ——声时初读数(μ s)。

6 测量回弹值。应先将试件超声测试面的耦合剂擦试干净,再置于压力机上下承压板之间,使另外一对侧面朝向便于回弹测试的方向,然后加压至 30~50kN 并保持此压力。分别在试件两个相对侧面上按本规程第 5.2.1 条规定的水平测试方法各测 8 点回弹值,精确至 1。剔除 3 个较大值和 3 个较小值,取余下 10 个有效回弹值的平均值作为该试件的回弹代表值 R ,计算精确至 0.1。

7 抗压强度试验。回弹值测试完毕后,卸荷将回弹测试面放置在压力机承压板正中,按现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081 的规定速度连续均匀加荷至破坏。计算抗压强度实测值 f_{cu}^o ,精确至 0.1MPa。

A.0.8 测强曲线应按下列步骤进行计算:

1 数据整理汇总。将各试件测试所得的声速值 v 、回弹值 R 和试件抗压强度实测值 f_{cu}^o 汇总;

2 回归分析。宜采用下列形式的回归方程式计算:

$$f_{cu}^c = \alpha v^b R^c \quad (A.0.8-1)$$

式中 α ——常数项;

b, c ——回归系数;

f_{cu}^c ——混凝土试件抗压强度换算值(MPa)。

3 误差计算。测强曲线的相对误差 e_r 应按下列公式计算:

$$e_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{cu,i}^o}{f_{cu,i}^c} - 1 \right)^2}{n}} \times 100\% \quad (A.0.8-2)$$

式中 e_r ——相对误差;

$f_{cu,i}^o$ ——第 i 个立方体试件的抗压强度实测值(MPa);

$f_{cu,i}^c$ ——第 i 个立方体试件按式(A. 0. 8-1)计算的抗压强度换算值(MPa)。

A. 0. 9 回归方程式的误差如符合本规程第 6. 0. 4 的要求,则经有关部门批准后,可作为专用或地区测强曲线。

A. 0. 10 可根据回归方程(A. 0. 8-1),按系列回弹仪代表值和声速代表值计算出混凝土抗压强度换算值,列出“测区混凝土抗压强度换算表($f_{cu}^c-v_a-R_s$)”,供速查用。

A. 0. 11 测区混凝土抗压强度换算表只限于在建立测强曲线的立方体试件强度范围内使用,不得处延。

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 当结构或构件被测部位只有两个相邻表面可供检测时,可采用角测方法测量混凝土中声速。每个测区布置 3 个测点,换能器布置如图 B.1.1 所示。

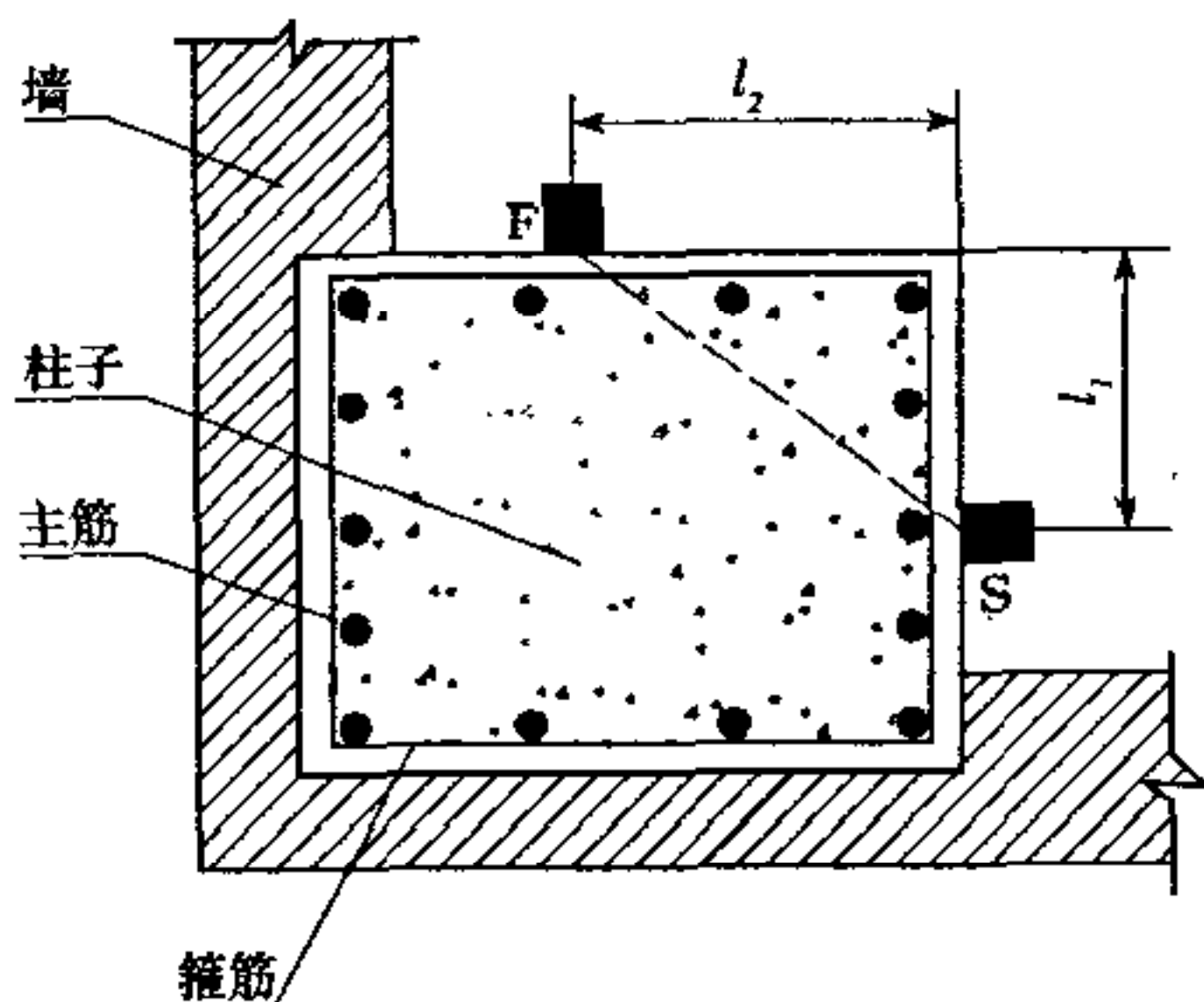


图 B.1.1 超声波角测示意

B.1.2 布置超声角测点时,换能器中心与构件边缘的距离 l_1 、 l_2 不宜小于 200mm。

B.1.3 角测时超声测距应按下列公式计算:

$$l_i = \sqrt{l_{1i}^2 + l_{2i}^2} \quad (\text{B.1.3})$$

式中 l_i ——角测第 i 个测点换能器的超声测距(mm);

l_{1i} 、 l_{2i} ——角测第 i 个测点换能器与构件边缘的距离(mm)。

B.1.4 角测时,混凝土中声速代表值应按下列公式计算:

$$v = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{l_i}{t_i - t_0} \quad (\text{B. 1. 4})$$

式中 v ——角测时混凝土中声速代表值(km/s);

t_i ——角测第 i 个测点的声时读数(μs);

t_0 ——声时初读数(μs)。

B. 2 超声波平测方法

B. 2. 1 当结构或构件被测部位只有一个表面可供检测时,可采用平测方法测量混凝土中声速。每个测区布置 3 个测点。换能器布置如图 B. 2. 1 所示。

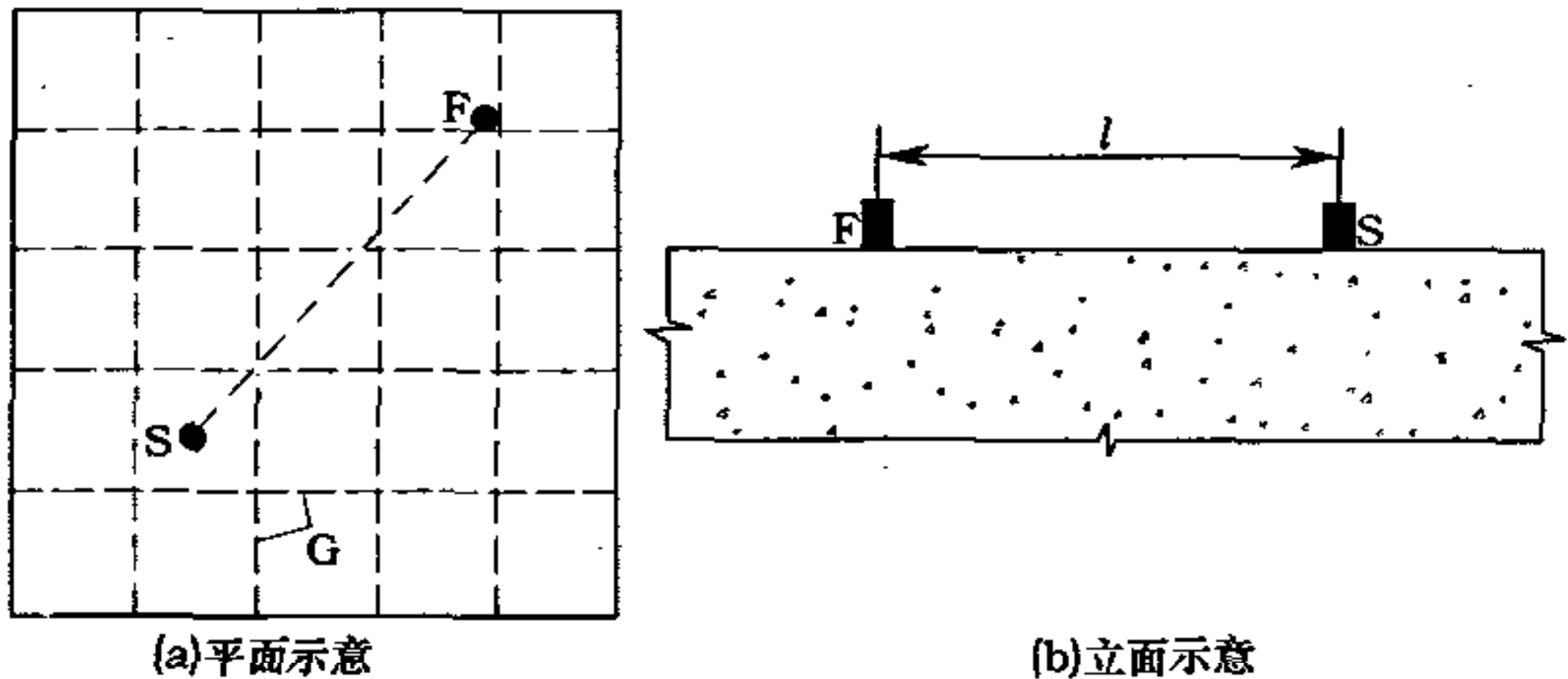


图 B. 2. 1 超声波平测示意

F—发射换能器; S—接收换能器; G—钢筋轴线

B. 2. 2 布置超声平测点时,宜使发射和接收换能器的连线与附近钢筋轴线成 $40^\circ \sim 50^\circ$, 超声测距 l 宜采用 350~450mm。

B. 2. 3 宜采用同一构件的对测声速 v_d 与平测声速 v_p 之比求得修正系数 λ ($\lambda = v_d / v_p$), 对平测声速进行修正。

B. 2. 4 当被测结构或构件不具备对测与平测的对比条件时,宜选取有代表性的部位,以测距 $l = 200\text{mm}$ 、250mm、300mm、350mm、400mm、450mm、500mm,逐点测读相应声时值 t ,用回归

分析方法求出直线方程 $l=a+bt$ 。以回归系数 b 代替对测声速 v_a ，再按本规程第 B.2.3 条的规定对各平测声速进行修正。

B.2.5 平测时，修正后的混凝土中声速代表值应按下列公式计算：

$$v_a = \frac{\lambda}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{l_i}{t_i - t_0} \quad (\text{B.2.5})$$

式中 v_a ——修正后的平测时混凝土中声速代表值(km/s)；

l_i ——平测第 i 个测点的超声测距(mm)；

t_i ——平测第 i 个测点的声时读数(μs)；

λ ——平测声速修正系数。

B.2.6 平测声速可采用直线方程 $l=a+bt$ ，根据混凝土浇筑的顶面或底面平测数据求得，修正后混凝土中声速代表值应按下列公式计算：

$$v = \frac{\lambda\beta}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{l_i}{t_i - t_0} \quad (\text{B.2.5})$$

式中 β ——超声测试面的声速修正系数，顶面平测 $\beta=1.05$ ，底面平测 $\beta=0.95$ 。

附录 C 测区混凝土抗压强度换算表

C.0.1 采用卵石的测区混凝土抗压强度换算(见表 C.0.1)。

表 C.0.1 测区混凝土抗压强度换算表(卵石)

ν_a f_{cu} R_a	3.80	3.82	3.84	3.86	3.88	3.90	3.92	3.94	3.96	3.98	4.00	4.02	4.04
23.0	—	—	10.0	10.0	10.1	10.2	10.3	10.3	10.4	10.5	10.6	10.6	10.7
24.0	10.6	10.6	10.7	10.8	10.9	11.0	11.1	11.1	11.2	11.3	11.4	11.5	11.5
25.0	11.4	11.4	11.5	11.6	11.7	11.8	11.9	12.0	12.1	12.1	12.2	12.3	12.4
26.0	12.2	12.3	12.4	12.5	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9	13.0	13.1	13.2	13.3
27.0	13.0	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5	13.6	13.7	13.8	13.9	14.0	14.1	14.2
28.0	13.9	14.0	14.1	14.2	14.3	14.4	14.5	14.6	14.7	14.8	14.9	15.1	15.2
29.0	14.8	14.9	15.0	15.1	15.2	15.3	15.4	15.6	15.7	15.8	15.9	16.0	16.1
30.0	15.7	15.8	15.9	16.0	16.2	16.3	16.4	16.5	16.6	16.8	16.9	17.0	17.1
31.0	16.6	16.7	16.9	17.0	17.1	17.3	17.4	17.5	17.6	17.8	17.9	18.0	18.2
32.0	17.6	17.7	17.8	18.0	18.1	18.2	18.4	18.5	18.7	18.8	18.9	19.1	19.2
33.0	18.6	18.7	18.8	19.0	19.1	19.3	19.4	19.6	19.7	19.8	20.0	20.1	20.3
34.0	19.6	19.7	19.9	20.0	20.2	20.3	20.5	20.6	20.8	20.9	21.1	21.2	21.4
35.0	20.6	20.8	20.9	21.1	21.2	21.4	21.5	21.7	21.9	22.0	22.2	22.3	22.5
36.0	21.7	21.8	22.0	22.1	22.3	22.5	22.6	22.8	23.0	23.1	23.3	23.5	23.6
37.0	22.7	22.9	23.1	23.2	23.4	23.6	23.8	23.9	24.1	24.3	24.5	24.6	24.8
38.0	23.8	24.0	24.2	24.4	24.6	24.7	24.9	25.1	25.3	25.5	25.7	25.8	26.0
39.0	24.9	25.1	25.3	25.5	25.7	25.9	26.1	26.3	26.5	26.7	26.9	27.1	27.2
40.0	26.1	26.3	26.5	26.7	26.9	27.1	27.3	27.5	27.7	27.9	28.1	28.3	28.5
41.0	27.3	27.5	27.7	27.9	28.1	28.3	28.5	28.7	28.9	29.1	29.3	29.6	29.8
42.0	28.4	28.7	28.9	29.1	29.3	29.5	29.7	30.0	30.2	30.4	30.6	30.8	31.1
43.0	29.7	29.9	30.1	30.3	30.6	30.8	31.0	31.2	31.5	31.7	31.9	32.2	32.4
44.0	30.9	31.1	31.3	31.6	31.8	32.1	32.3	32.5	32.8	33.0	33.2	33.5	33.7
45.0	32.1	32.4	32.6	32.9	33.1	33.4	33.6	33.9	34.1	34.3	34.6	34.8	35.1
46.0	33.4	33.7	33.9	34.2	34.4	34.7	34.9	35.2	35.4	35.7	36.0	36.2	36.5
47.0	34.7	35.0	35.2	35.5	35.8	36.0	36.3	36.6	36.8	37.1	37.4	37.6	37.9

续表 C.0.1

f_{cu} \ ν_a	3.80	3.82	3.84	3.86	3.88	3.90	3.92	3.94	3.96	3.98	4.00	4.02	4.04
R_a													
48.0	36.0	36.3	36.6	36.8	37.1	37.4	37.7	37.9	38.2	38.5	38.8	39.1	39.3
49.0	37.4	37.6	37.9	38.2	38.5	38.8	39.1	39.4	39.6	39.9	40.2	40.5	40.8
50.0	38.7	39.0	39.3	39.6	39.9	40.2	40.5	40.8	41.1	41.4	41.7	42.0	42.3
51.0	40.1	40.4	40.7	41.0	41.3	41.6	41.9	42.2	42.5	42.9	43.2	43.5	43.8
52.0	41.5	41.8	42.1	42.4	42.8	43.1	43.4	43.7	44.0	44.4	44.7	45.0	45.3
53.0	42.9	43.2	43.6	43.9	44.2	44.6	44.9	45.2	45.5	45.9	46.2	46.5	46.9
54.0	44.4	44.7	45.0	45.4	45.7	46.1	46.4	46.7	47.1	47.4	47.8	48.1	48.5
55.0	45.8	46.2	46.5	46.9	47.2	47.6	47.9	48.3	48.6	49.0	49.3	49.7	50.0

注:1 表中未列数值可采用内插法求得,精确至 0.1MPa;

2 表中 ν_a (km/s) 为修正后的测区声速代表值, R_a 为修正后的测区回弹代表值;

3 采用对测和角测时,表中 ν_a 用 ν 代替;当在侧面水平回弹时,表中 R_a 用 R 代替;

4 f_{cu} 为测区混凝土抗压强度换算值,也可按公式(6.0.3-1)计算。

续表 C.0.1

f_{cu} \ ν_a	4.06	4.08	4.10	4.12	4.14	4.16	4.18	4.20	4.22	4.24	4.26	4.28	4.30
R_a													
21.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10.0
22.0	10.0	10.0	10.1	10.2	10.2	10.3	10.4	10.5	10.5	10.6	10.7	10.8	10.8
23.0	10.8	10.9	10.9	11.0	11.1	11.2	11.2	11.3	11.4	11.5	11.6	11.6	11.7
24.0	11.6	11.7	11.8	11.9	12.0	12.0	12.1	12.2	12.3	12.4	12.5	12.5	12.6
25.0	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9	12.9	13.0	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5	13.6
26.0	13.4	13.5	13.6	13.7	13.8	13.9	14.0	14.1	14.2	14.3	14.4	14.4	14.5
27.0	14.3	14.4	14.5	14.6	14.7	14.8	14.9	15.0	15.1	15.2	15.3	15.4	15.6
28.0	15.3	15.4	15.5	15.6	15.7	15.8	15.9	16.0	16.1	16.3	16.4	16.5	16.6
29.0	16.2	16.4	16.5	16.6	16.7	16.8	16.9	17.1	17.2	17.3	17.4	17.5	17.6
30.0	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.9	18.0	18.1	18.2	18.4	18.5	18.6	18.7
31.0	18.3	18.4	18.5	18.7	18.8	18.9	19.1	19.2	19.3	19.5	19.6	19.7	19.9
32.0	19.3	19.5	19.6	19.7	19.9	20.0	20.2	20.3	20.4	20.6	20.7	20.9	21.0
33.0	20.4	20.6	20.7	20.9	21.0	21.1	21.3	21.4	21.6	21.7	21.9	22.0	22.2
34.0	21.5	21.7	21.8	22.0	22.1	22.3	22.4	22.6	22.8	22.9	23.1	23.2	23.4
35.0	22.7	22.8	23.0	23.1	23.3	23.5	23.6	23.8	24.0	24.1	24.3	24.4	24.6

续表 C.0.1

f_{cu} R_a	ν_a	4.06	4.08	4.10	4.12	4.14	4.16	4.18	4.20	4.22	4.24	4.26	4.28	4.30
36.0		23.8	24.0	24.2	24.3	24.5	24.7	24.8	25.0	25.2	25.4	25.5	25.7	25.9
37.0		25.0	25.2	25.4	25.5	25.7	25.9	26.1	26.2	26.4	26.6	26.8	27.0	27.2
38.0		26.2	26.4	26.6	26.8	27.0	27.1	27.3	27.5	27.7	27.9	28.1	28.3	28.5
39.0		27.4	27.6	27.8	28.0	28.2	28.4	28.6	28.8	29.0	29.2	29.4	29.6	29.8
40.0		28.7	28.9	29.1	29.3	29.5	29.7	29.9	30.1	30.3	30.5	30.8	31.0	31.2
41.0		30.0	30.2	30.4	30.6	30.8	31.0	31.3	31.5	31.7	31.9	32.1	32.3	32.6
42.0		31.3	31.5	31.7	32.0	32.2	32.4	32.6	32.8	33.1	33.3	33.5	33.8	34.0
43.0		32.6	32.8	33.1	33.3	33.5	33.8	34.0	34.2	34.5	34.7	34.9	35.2	35.4
44.0		34.0	34.2	34.4	34.7	34.9	35.2	35.4	35.7	35.9	36.2	36.4	36.6	36.9
45.0		35.3	35.6	35.8	36.1	36.4	36.6	36.9	37.1	37.4	37.6	37.9	38.1	38.4
46.0		36.7	37.0	37.3	37.5	37.8	38.1	38.3	38.6	38.8	39.1	39.4	39.6	39.9
47.0		38.2	38.4	38.7	39.0	39.3	39.5	39.8	40.1	40.4	40.6	40.9	41.2	41.5
48.0		39.6	39.9	40.2	40.5	40.7	41.0	41.3	41.6	41.9	42.2	42.5	42.7	43.0
49.0		41.1	41.4	41.7	42.0	42.3	42.6	42.8	43.1	43.4	43.7	44.0	44.3	44.6
50.0		42.6	42.9	43.2	43.5	43.8	44.1	44.4	44.7	45.0	45.3	45.6	45.9	46.3
51.0		44.1	44.4	44.7	45.0	45.4	45.7	46.0	46.3	46.6	46.9	47.3	47.6	47.9
52.0		45.6	46.0	46.3	46.6	46.9	47.3	47.6	47.9	48.3	48.6	48.9	49.2	49.6
53.0		47.2	47.5	47.9	48.2	48.6	48.9	49.2	49.6	49.9	50.2	50.6	50.9	51.3
54.0		48.8	49.1	49.5	49.8	50.2	50.5	50.9	51.2	51.6	51.9	52.3	52.6	53.0
55.0		50.4	50.8	51.1	51.5	51.8	52.2	52.6	52.9	53.3	53.7	54.0	54.4	54.7

续表 C.0.1

f_{cu} R_a	ν_a	4.32	4.34	4.36	4.38	4.40	4.42	4.44	4.46	4.48	4.50	4.52	4.54	4.56
20.0		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10.0
21.0		10.0	10.1	10.2	10.2	10.3	10.4	10.4	10.5	10.6	10.6	10.7	10.8	10.8
22.0		10.9	11.0	11.0	11.1	11.2	11.3	11.3	11.4	11.5	11.6	11.6	11.7	11.8
23.0		11.8	11.9	11.9	12.0	12.1	12.2	12.3	12.3	12.4	12.5	12.6	12.7	12.7
24.0		12.7	12.8	12.9	13.0	13.1	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5	13.6	13.7	13.7
25.0		13.7	13.8	13.8	13.9	14.0	14.1	14.2	14.3	14.4	14.5	14.6	14.7	14.8
26.0		14.6	14.7	14.8	14.9	15.0	15.1	15.2	15.3	15.4	15.5	15.6	15.7	15.8

续表 C.0.1

f_{cu} R_a	u_a	4.32	4.34	4.36	4.38	4.40	4.42	4.44	4.46	4.48	4.50	4.52	4.54	4.56
27.0		15.7	15.8	15.9	16.0	16.1	16.2	16.3	16.4	16.5	16.6	16.7	16.8	16.9
28.0		16.7	16.8	16.9	17.0	17.1	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8	17.9	18.0
29.0		17.8	17.9	18.0	18.1	18.2	18.4	18.5	18.6	18.7	18.8	19.0	19.1	19.2
30.0		18.9	19.0	19.1	19.2	19.4	19.5	19.6	19.7	19.9	20.0	20.1	20.3	20.4
31.0		20.0	20.1	20.3	20.4	20.5	20.7	20.8	20.9	21.1	21.2	21.3	21.5	21.6
32.0		21.1	21.3	21.4	21.6	21.7	21.9	22.0	22.1	22.3	22.4	22.6	22.7	22.9
33.0		22.3	22.5	22.6	22.8	22.9	23.1	23.2	23.4	23.5	23.7	23.8	24.0	24.1
34.0		23.5	23.7	23.9	24.0	24.2	24.3	24.5	24.6	24.8	25.0	25.1	25.3	25.4
35.0		24.8	24.9	25.1	25.3	25.4	25.6	25.8	25.9	26.1	26.3	26.4	26.6	26.8
36.0		26.0	26.2	26.4	26.6	26.7	26.9	27.1	27.3	27.4	27.6	27.8	28.0	28.1
37.0		27.3	27.5	27.7	27.9	28.1	28.3	28.4	28.6	28.8	29.0	29.2	29.4	29.5
38.0		28.7	28.8	29.0	29.2	29.4	29.6	29.8	30.0	30.2	30.4	30.6	30.8	31.0
39.0		30.0	30.2	30.4	30.6	30.8	31.0	31.2	31.4	31.6	31.8	32.0	32.2	32.4
40.0		31.4	31.6	31.8	32.0	32.2	32.4	32.6	32.9	33.1	33.3	33.5	33.7	33.9
41.0		32.8	33.0	33.2	33.4	33.7	33.9	34.1	34.3	34.5	34.8	35.0	35.2	35.4
42.0		34.2	34.4	34.7	34.9	35.1	35.4	35.6	35.8	36.0	36.3	36.5	36.7	37.0
43.0		35.7	35.9	36.1	36.4	36.6	36.9	37.1	37.3	37.6	37.8	38.1	38.3	38.5
44.0		37.1	37.4	37.6	37.9	38.1	38.4	38.6	38.9	39.1	39.4	39.6	39.9	40.1
45.0		38.6	38.9	39.2	39.4	39.7	39.9	40.2	40.5	40.7	41.0	41.2	41.5	41.8
46.0		40.2	40.4	40.7	41.0	41.3	41.5	41.8	42.1	42.3	42.6	42.9	43.2	43.4
47.0		41.7	42.0	42.3	42.6	42.9	43.1	43.4	43.7	44.0	44.3	44.5	44.8	45.1
48.0		43.3	43.6	43.9	44.2	44.5	44.8	45.1	45.4	45.6	45.9	46.2	46.5	46.8
49.0		44.9	45.2	45.5	45.8	46.1	46.4	46.7	47.0	47.3	47.6	48.0	48.3	48.6
50.0		46.6	46.9	47.2	47.5	47.8	48.1	48.4	48.8	49.1	49.4	49.7	50.0	50.3
51.0		48.2	48.5	48.9	49.2	49.5	49.8	50.2	50.5	50.8	51.1	51.5	51.8	52.1
52.0		49.9	50.2	50.6	50.9	51.2	51.6	51.9	52.3	52.6	52.9	53.3	53.6	53.9
53.0		51.6	52.0	52.3	52.7	53.0	53.3	53.7	54.0	54.4	54.7	55.1	55.4	55.8
54.0		53.4	53.7	54.1	54.4	54.8	55.1	55.5	55.9	56.2	56.6	56.9	57.3	57.7
55.0		55.1	55.5	55.9	56.2	56.6	57.0	57.3	57.7	58.1	58.5	58.8	59.2	59.6

续表 C.0.1

f_{cu} R_a	u_a 4.58	4.60	4.62	4.64	4.66	4.68	4.70	4.72	4.74	4.76	4.78	4.80	4.82
20.0	10.0	10.1	10.1	10.2	10.3	10.3	10.4	10.5	10.5	10.6	10.6	10.7	10.8
21.0	10.9	11.0	11.1	11.1	11.2	11.3	11.3	11.4	11.5	11.5	11.6	11.7	11.7
22.0	11.9	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2	12.3	12.4	12.5	12.5	12.6	12.7	12.8
23.0	12.8	12.9	13.0	13.1	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5	13.6	13.6	13.7	13.8
24.0	13.8	13.9	14.0	14.1	14.2	14.3	14.4	14.4	14.5	14.6	14.7	14.8	14.9
25.0	14.9	15.0	15.0	15.1	15.2	15.3	15.4	15.5	15.6	15.7	15.8	15.9	16.0
26.0	15.9	16.0	16.1	16.2	16.3	16.4	16.5	16.6	16.7	16.8	16.9	17.0	17.1
27.0	17.0	17.1	17.2	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8	17.9	18.0	18.1	18.2	18.3
28.0	18.2	18.3	18.4	18.5	18.6	18.7	18.8	19.0	19.1	19.2	19.3	19.4	19.5
29.0	19.3	19.4	19.5	19.7	19.8	19.9	20.1	20.2	20.3	20.4	20.5	20.7	20.8
30.0	20.5	20.6	20.8	20.9	21.0	21.2	21.3	21.4	21.6	21.7	21.8	22.0	22.1
31.0	21.7	21.9	22.0	22.2	22.3	22.4	22.6	22.7	22.8	23.0	23.1	23.3	23.4
32.0	23.0	23.1	23.3	23.4	23.6	23.7	23.9	24.0	24.2	24.3	24.5	24.6	24.8
33.0	24.3	24.4	24.6	24.7	24.9	25.1	25.2	25.4	25.5	25.7	25.8	26.0	26.1
34.0	25.6	25.8	25.9	26.1	26.2	26.4	26.6	26.7	26.9	27.1	27.2	27.4	27.6
35.0	26.9	27.1	27.3	27.5	27.6	27.8	28.0	28.1	28.3	28.5	28.7	28.8	29.0
36.0	28.3	28.5	28.7	28.9	29.0	29.2	29.4	29.6	29.8	29.9	30.1	30.3	30.5
37.0	29.7	29.9	30.1	30.3	30.5	30.7	30.9	31.1	31.2	31.4	31.6	31.8	32.0
38.0	31.2	31.4	31.6	31.8	32.0	32.2	32.4	32.5	32.7	32.9	33.1	33.3	33.5
39.0	32.6	32.8	33.0	33.3	33.5	33.7	33.9	34.1	34.3	34.5	34.7	34.9	35.1
40.0	34.1	34.3	34.6	34.8	35.0	35.2	35.4	35.6	35.9	36.1	36.3	36.5	36.7
41.0	35.7	35.9	36.1	36.3	36.6	36.8	37.0	37.2	37.5	37.7	37.9	38.1	38.4
42.0	37.2	37.4	37.7	37.9	38.1	38.4	38.6	38.9	39.1	39.3	39.6	39.8	40.0
43.0	38.8	39.0	39.3	39.5	39.8	40.0	40.3	40.5	40.8	41.0	41.2	41.5	41.7
44.0	40.4	40.7	40.9	41.2	41.4	41.7	41.9	42.2	42.4	42.7	43.0	43.2	43.5
45.0	42.0	42.3	42.6	42.8	43.1	43.4	43.6	43.9	44.2	44.4	44.7	45.0	45.2
46.0	43.7	44.0	44.3	44.5	44.8	45.1	45.4	45.6	45.9	46.2	46.5	46.8	47.0
47.0	45.4	45.7	46.0	46.3	46.5	46.8	47.1	47.4	47.7	48.0	48.3	48.6	48.9
48.0	47.1	47.4	47.7	48.0	48.3	48.6	48.9	49.2	49.5	49.8	50.1	50.4	50.7
49.0	48.9	49.2	49.5	49.8	50.1	50.4	50.7	51.0	51.3	51.7	52.0	52.3	52.6
50.0	50.6	51.0	51.3	51.6	51.9	52.2	52.6	52.9	53.2	53.5	53.9	54.2	54.5
51.0	52.5	52.8	53.1	53.4	53.8	54.1	54.4	54.8	55.1	55.4	55.8	56.1	56.5
52.0	54.3	54.6	55.0	55.3	55.7	56.0	56.3	56.7	57.0	57.4	57.7	58.1	58.4
53.0	56.1	56.5	56.9	57.2	57.6	57.9	58.3	58.6	59.0	59.4	59.7	60.1	60.4
54.0	58.0	58.4	58.8	59.1	59.5	59.9	60.2	60.6	61.0	61.3	61.7	62.1	62.5
55.0	60.0	60.3	60.7	61.1	61.5	61.8	62.2	62.6	63.0	63.4	63.8	64.1	64.5

续表 C.0.1

f_{cu} R_a	u_a	4.84	4.86	4.88	4.90	4.92	4.94	4.96	4.98	5.00	5.02	5.04	5.06	5.08
20.0		10.8	10.9	11.0	11.0	11.1	11.2	11.2	11.3	11.4	11.4	11.5	11.6	11.6
21.0		11.8	11.9	12.0	12.0	12.1	12.2	12.2	12.3	12.4	12.5	12.5	12.6	12.7
22.0		12.8	12.9	13.0	13.1	13.1	13.2	13.3	13.4	13.4	13.5	13.6	13.7	13.8
23.0		13.9	14.0	14.0	14.1	14.2	14.3	14.4	14.5	14.5	14.6	14.7	14.8	14.9
24.0		15.0	15.1	15.1	15.2	15.3	15.4	15.5	15.6	15.7	15.8	15.9	16.0	16.0
25.0		16.1	16.2	16.3	16.4	16.5	16.6	16.7	16.8	16.9	17.0	17.1	17.2	17.3
26.0		17.2	17.3	17.5	17.6	17.7	17.8	17.9	18.0	18.1	18.2	18.3	18.4	18.5
27.0		18.4	18.5	18.7	18.8	18.9	19.0	19.1	19.2	19.3	19.4	19.5	19.7	19.8
28.0		19.7	19.8	19.9	20.0	20.1	20.2	20.4	20.5	20.6	20.7	20.8	21.0	21.1
29.0		20.9	21.0	21.2	21.3	21.4	21.5	21.7	21.8	21.9	22.0	22.2	22.3	22.4
30.0		22.2	22.3	22.5	22.6	22.7	22.9	23.0	23.1	23.3	23.4	23.5	23.7	23.8
31.0		23.5	23.7	23.8	24.0	24.1	24.2	24.4	24.5	24.7	24.8	25.0	25.1	25.2
32.0		24.9	25.0	25.2	25.3	25.5	25.6	25.8	25.9	26.1	26.2	26.4	26.5	26.7
33.0		26.3	26.5	26.6	26.8	26.9	27.1	27.2	27.4	27.6	27.7	27.9	28.0	28.2
34.0		27.7	27.9	28.0	28.2	28.4	28.5	28.7	28.9	29.0	29.2	29.4	29.6	29.7
35.0		29.2	29.4	29.5	29.7	29.9	30.0	30.2	30.4	30.6	30.8	30.9	31.1	31.3
36.0		30.7	30.9	31.0	31.2	31.4	31.6	31.8	32.0	32.1	32.3	32.5	32.7	32.9
37.0		32.2	32.4	32.6	32.8	33.0	33.2	33.3	33.5	33.7	33.9	34.1	34.3	34.5
38.0		33.7	33.9	34.1	34.4	34.6	34.8	35.0	35.2	35.4	35.6	35.8	36.0	36.2
39.0		35.3	35.5	35.8	36.0	36.2	36.4	36.6	36.8	37.0	37.2	37.5	37.7	37.9
40.0		37.0	37.2	37.4	37.6	37.8	38.1	38.3	38.5	38.7	38.9	39.2	39.4	39.6
41.0		38.6	38.8	39.1	39.3	39.5	39.8	40.0	40.2	40.5	40.7	40.9	41.2	41.4
42.0		40.3	40.5	40.8	41.0	41.2	41.5	41.7	42.0	42.2	42.5	42.7	42.9	43.2
43.0		42.0	42.2	42.5	42.7	43.0	43.3	43.5	43.8	44.0	44.3	44.5	44.8	45.0
44.0		43.7	44.0	44.3	44.5	44.8	45.0	45.3	45.6	45.8	46.1	46.4	46.6	46.9
45.0		45.5	45.8	46.1	46.3	46.6	46.9	47.1	47.4	47.7	48.0	48.2	48.5	48.8
46.0		47.3	47.6	47.9	48.2	48.4	48.7	49.0	49.3	49.6	49.9	50.2	50.4	50.7
47.0		49.2	49.4	49.7	50.0	50.3	50.6	50.9	51.2	51.5	51.8	52.1	52.4	52.7
48.0		51.0	51.3	51.6	51.9	52.2	52.5	52.8	53.2	53.5	53.8	54.1	54.4	54.7
49.0		52.9	53.2	53.5	53.9	54.2	54.5	54.8	55.1	55.4	55.8	56.1	56.4	56.7
50.0		54.8	55.2	55.5	55.8	56.1	56.5	56.8	57.1	57.5	57.8	58.1	58.5	58.8
51.0		56.8	57.1	57.5	57.8	58.1	58.5	58.8	59.2	59.5	59.9	60.2	60.5	60.9
52.0		58.8	59.1	59.5	59.8	60.2	60.5	60.9	61.2	61.6	61.9	62.3	62.7	63.0
53.0		60.8	61.2	61.5	61.9	62.2	62.6	63.0	63.3	63.7	64.1	64.4	64.8	65.2
54.0		62.8	63.2	63.6	64.0	64.3	64.7	65.1	65.5	65.8	66.2	66.6	67.0	67.4
55.0		64.9	65.3	65.7	66.1	66.5	66.8	67.2	67.6	68.0	68.4	68.8	69.2	69.6

续表 C.0.1

f_{co} R_s	ν_s	5.10	5.12	5.14	5.16	5.18	5.20	5.22	5.24	5.26	5.28	5.30	5.32	5.34
20.0		11.7	11.8	11.8	11.9	12.0	12.0	12.1	12.2	12.2	12.3	12.4	12.4	12.5
21.0		12.7	12.8	12.9	13.0	13.0	13.1	13.2	13.3	13.3	13.4	13.5	13.5	13.6
22.0		13.8	13.9	14.0	14.1	14.2	14.2	14.3	14.4	14.5	14.5	14.6	14.7	14.8
23.0		15.0	15.1	15.1	15.2	15.3	15.4	15.5	15.6	15.6	15.7	15.8	15.9	16.0
24.0		16.1	16.2	16.3	16.4	16.5	16.6	16.7	16.8	16.9	17.0	17.1	17.2	17.2
25.0		17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8	17.9	18.0	18.1	18.2	18.3	18.4	18.5
26.0		18.6	18.7	18.8	18.9	19.0	19.1	19.2	19.3	19.4	19.5	19.7	19.8	19.9
27.0		19.9	20.0	20.1	20.2	20.3	20.4	20.6	20.7	20.8	20.9	21.0	21.1	21.2
28.0		21.2	21.3	21.4	21.6	21.7	21.8	21.9	22.0	22.2	22.3	22.4	22.5	22.6
29.0		22.6	22.7	22.8	22.9	23.1	23.2	23.3	23.5	23.6	23.7	23.8	24.0	24.1
30.0		24.0	24.1	24.2	24.4	24.5	24.6	24.8	24.9	25.0	25.2	25.3	25.5	25.6
31.0		25.4	25.5	25.7	25.8	26.0	26.1	26.2	26.4	26.5	26.7	26.8	27.0	27.1
32.0		26.8	27.0	27.2	27.3	27.5	27.6	27.8	27.9	28.1	28.2	28.4	28.5	28.7
33.0		28.4	28.5	28.7	28.8	29.0	29.2	29.3	29.5	29.6	29.8	30.0	30.1	30.3
34.0		29.9	30.1	30.2	30.4	30.6	30.7	30.9	31.1	31.2	31.4	31.6	31.8	31.9
35.0		31.5	31.6	31.8	32.0	32.2	32.4	32.5	32.7	32.9	33.1	33.3	33.4	33.6
36.0		33.1	33.3	33.4	33.6	33.8	34.0	34.2	34.4	34.6	34.8	34.9	35.1	35.3
37.0		34.7	34.9	35.1	35.3	35.5	35.7	35.9	36.1	36.3	36.5	36.7	36.9	37.1
38.0		36.4	36.6	36.8	37.0	37.2	37.4	37.6	37.8	38.0	38.2	38.5	38.7	38.9
39.0		38.1	38.3	38.5	38.7	39.0	39.2	39.4	39.6	39.8	40.0	40.3	40.5	40.7
40.0		39.8	40.1	40.3	40.5	40.7	41.0	41.2	41.4	41.7	41.9	42.1	42.3	42.6
41.0		41.6	41.9	42.1	42.3	42.6	42.8	43.0	43.3	43.5	43.8	44.0	44.2	44.5
42.0		43.4	43.7	43.9	44.2	44.4	44.7	44.9	45.2	45.4	45.7	45.9	46.2	46.4
43.0		45.3	45.5	45.8	46.0	46.3	46.6	46.8	47.1	47.3	47.6	47.9	48.1	48.4
44.0		47.2	47.4	47.7	48.0	48.2	48.5	48.8	49.0	49.3	49.6	49.8	50.1	50.4
45.0		49.1	49.3	49.6	49.9	50.2	50.5	50.7	51.0	51.3	51.6	51.9	52.1	52.4
46.0		51.0	51.3	51.6	51.9	52.2	52.5	52.8	53.0	53.3	53.6	53.9	54.2	54.5
47.0		53.0	53.3	53.6	53.9	54.2	54.5	54.8	55.1	55.4	55.7	56.0	56.3	56.6
48.0		55.0	55.3	55.6	55.9	56.3	56.6	56.9	57.2	57.5	57.8	58.1	58.5	58.8
49.0		57.1	57.4	57.7	58.0	58.3	58.7	59.0	59.3	59.6	60.0	60.3	60.6	61.0
50.0		59.1	59.5	59.8	60.1	60.5	60.8	61.1	61.5	61.8	62.2	62.5	62.8	63.2
51.0		61.2	61.6	61.9	62.3	62.6	63.0	63.3	63.7	64.0	64.4	64.7	65.1	65.4
52.0		63.4	63.7	64.1	64.5	64.8	65.2	65.5	65.9	66.3	66.6	67.0	67.3	67.7
53.0		65.5	65.9	66.3	66.7	67.0	67.4	67.8	68.2	68.5	68.9	69.3	69.7	70.0
54.0		67.7	68.1	68.5	68.9	69.3	69.7	—	—	—	—	—	—	—
55.0		70.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

C.0.2 采用碎石的测区混凝土抗压强度换算(见表 C.0.2)。

表 C.0.2 测区混凝土抗压强度换算(碎石)

f_{cu} R_a	ν_a	3.80	3.82	3.84	3.86	3.88	3.90	3.92	3.94	3.96	3.98	4.00	4.02	4.04
20.0		10.1	10.2	10.3	10.3	10.4	10.5	10.6	10.7	10.8	10.9	11.0	11.1	11.2
21.0		10.8	10.9	11.0	11.1	11.2	11.3	11.4	11.5	11.6	11.7	11.8	11.9	12.0
22.0		11.5	11.6	11.7	11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.3	12.5	12.6	12.7	12.8
23.0		12.3	12.4	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9	13.0	13.1	13.3	13.4	13.5	13.6
24.0		13.0	13.2	13.3	13.4	13.5	13.6	13.7	13.8	14.0	14.1	14.2	14.3	14.4
25.0		13.8	13.9	14.1	14.2	14.3	14.4	14.5	14.7	14.8	14.9	15.0	15.2	15.3
26.0		14.6	14.7	14.9	15.0	15.1	15.2	15.4	15.5	15.6	15.8	15.9	16.0	16.2
27.0		15.4	15.5	15.7	15.8	15.9	16.1	16.2	16.3	16.5	16.6	16.8	16.9	17.0
28.0		16.2	16.3	16.5	16.6	16.8	16.9	17.1	17.2	17.4	17.5	17.6	17.8	17.9
29.0		17.0	17.2	17.3	17.5	17.6	17.8	17.9	18.1	18.2	18.4	18.5	18.7	18.8
30.0		17.9	18.0	18.2	18.3	18.5	18.6	18.8	19.0	19.1	19.3	19.4	19.6	19.8
31.0		18.7	18.9	19.0	19.2	19.4	19.5	19.7	19.9	20.0	20.2	20.4	20.5	20.7
32.0		19.6	19.7	19.9	20.1	20.3	20.4	20.6	20.8	20.9	21.1	21.3	21.5	21.7
33.0		20.4	20.6	20.8	21.0	21.1	21.3	21.5	21.7	21.9	22.1	22.2	22.4	22.6
34.0		21.3	21.5	21.7	21.9	22.1	22.2	22.4	22.6	22.8	23.0	23.2	23.4	23.6
35.0		22.2	22.4	22.6	22.8	23.0	23.2	23.4	23.6	23.8	24.0	24.2	24.4	24.6
36.0		23.1	23.3	23.5	23.7	23.9	24.1	24.3	24.5	24.7	24.9	25.1	25.4	25.6
37.0		24.0	24.2	24.4	24.6	24.9	25.1	25.3	25.5	25.7	25.9	26.1	26.4	26.6
38.0		24.9	25.1	25.4	25.6	25.8	26.0	26.2	26.5	26.7	26.9	27.1	27.4	27.6
39.0		25.9	26.1	26.3	26.5	26.8	27.0	27.2	27.5	27.7	27.9	28.1	28.4	28.6
40.0		26.8	27.0	27.3	27.5	27.7	28.0	28.2	28.5	28.7	28.9	29.2	29.4	29.7
41.0		27.7	28.0	28.2	28.5	28.7	29.0	29.2	29.5	29.7	30.0	30.2	30.5	30.7
42.0		28.7	29.0	29.2	29.5	29.7	30.0	30.2	30.5	30.7	31.0	31.3	31.5	31.8
43.0		29.7	29.9	30.2	30.5	30.7	31.0	31.2	31.5	31.8	32.0	32.3	32.6	32.8
44.0		30.7	30.9	31.2	31.5	31.7	32.0	32.3	32.5	32.8	33.1	33.4	33.6	33.9
45.0		31.6	31.9	32.2	32.5	32.7	33.0	33.3	33.6	33.9	34.2	34.4	34.7	35.0
46.0		32.6	32.9	33.2	33.5	33.8	34.1	34.4	34.6	34.9	35.2	35.5	35.8	36.1
47.0		33.6	33.9	34.2	34.5	34.8	35.1	35.4	35.7	36.0	36.3	36.6	36.9	37.2
48.0		34.7	35.0	35.3	35.6	35.9	36.2	36.5	36.8	37.1	37.4	37.7	38.0	38.4
49.0		35.7	36.0	36.3	36.6	36.9	37.2	37.6	37.9	38.2	38.5	38.8	39.2	39.5
50.0		36.7	37.0	37.3	37.7	38.0	38.3	38.6	39.0	39.3	39.6	40.0	40.3	40.6

续表 C.0.2

f_{cu} R_a	v_a	3.80	3.82	3.84	3.86	3.88	3.90	3.92	3.94	3.96	3.98	4.00	4.02	4.04
51.0		37.7	38.1	38.4	38.7	39.1	39.4	39.7	40.1	40.4	40.8	41.1	41.4	41.8
52.0		38.8	39.1	39.5	39.8	40.2	40.5	40.8	41.2	41.5	41.9	42.2	42.6	42.9
53.0		39.8	40.2	40.5	40.9	41.2	41.6	42.0	42.3	42.7	43.0	43.4	43.7	44.1
54.0		40.9	41.3	41.6	42.0	42.3	42.7	43.1	43.4	43.8	44.2	44.5	44.9	45.3
55.0		42.0	42.4	42.7	43.1	43.5	43.8	44.2	44.6	45.0	45.3	45.7	46.1	46.5

注:1 表内未列数值可采用内插法求得,精确至 0.1MPa;

2 表中 v_a (km/s) 为修正后的测区声速代表值, R_a 为修正后的测区回弹代表值;

3 采用对测和角测时,表中 v_a 用 v 代替;当在侧面水平回弹时,表中 R_a 用 R 代替;

4 f_{cu} (MPa) 为测区混凝土抗压强度换算值,也可按公式(6.0.3-2)计算。

续表 C.0.2

f_{cu} R_a	v_a	4.06	4.08	4.10	4.12	4.14	4.16	4.18	4.20	4.22	4.24	4.26	4.28	4.30
20.0		11.3	11.3	11.4	11.5	11.6	11.7	11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.3	12.4
21.0		12.1	12.2	12.3	12.3	12.4	12.5	12.6	12.7	12.9	13.0	13.1	13.2	13.3
22.0		12.9	13.0	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5	13.6	13.7	13.8	13.9	14.0	14.2
23.0		13.7	13.8	13.9	14.0	14.2	14.3	14.4	14.5	14.6	14.7	14.8	15.0	15.1
24.0		14.6	14.7	14.8	14.9	15.0	15.1	15.3	15.4	15.5	15.6	15.8	15.9	16.0
25.0		15.4	15.5	15.7	15.8	15.9	16.0	16.2	16.3	16.4	16.6	16.7	16.8	17.0
26.0		16.3	16.4	16.6	16.7	16.8	17.0	17.1	17.2	17.4	17.5	17.6	17.8	17.9
27.0		17.2	17.3	17.5	17.6	17.7	17.9	18.0	18.2	18.3	18.5	18.6	18.7	18.9
28.0		18.1	18.2	18.4	18.5	18.7	18.8	19.0	19.1	19.3	19.4	19.6	19.7	19.9
29.0		19.0	19.2	19.3	19.5	19.6	19.8	19.9	20.1	20.3	20.4	20.6	20.7	20.9
30.0		19.9	20.1	20.3	20.4	20.6	20.8	20.9	21.1	21.2	21.4	21.6	21.8	21.9
31.0		20.9	21.0	21.2	21.4	21.6	21.7	21.9	22.1	22.3	22.4	22.6	22.8	23.0
32.0		21.8	22.0	22.2	22.4	22.5	22.7	22.9	23.1	23.3	23.5	23.6	23.8	24.0
33.0		22.8	23.0	23.2	23.4	23.5	23.7	23.9	24.1	24.3	24.5	24.7	24.9	25.1
34.0		23.8	24.0	24.2	24.4	24.6	24.8	25.0	25.2	25.3	25.5	25.7	25.9	26.1
35.0		24.8	25.0	25.2	25.4	25.6	25.8	26.0	26.2	26.4	26.6	26.8	27.0	27.2
36.0		25.8	26.0	26.2	26.4	26.6	26.8	27.0	27.3	27.5	27.7	27.9	28.1	28.3
37.0		26.8	27.0	27.2	27.4	27.7	27.9	28.1	28.3	28.6	28.8	29.0	29.2	29.5

续表 C.0.2

f_{cu} R_s	ν_s	4.06	4.08	4.10	4.12	4.14	4.16	4.18	4.20	4.22	4.24	4.26	4.28	4.30
38.0		27.8	28.0	28.3	28.5	28.7	29.0	29.2	29.4	29.7	29.9	30.1	30.4	30.6
39.0		28.9	29.1	29.3	29.6	29.8	30.0	30.3	30.5	30.8	31.0	31.2	31.5	31.7
40.0		29.9	30.1	30.4	30.6	30.9	31.1	31.4	31.6	31.9	32.1	32.4	32.6	32.9
41.0		31.0	31.2	31.5	31.7	32.0	32.2	32.5	32.7	33.0	33.3	33.5	33.8	34.0
42.0		32.0	32.3	32.6	32.8	33.1	33.3	33.6	33.9	34.1	34.4	34.7	35.0	35.2
43.0		33.1	33.4	33.7	33.9	34.2	34.5	34.7	35.0	35.3	35.6	35.9	36.1	36.4
44.0		34.2	34.5	34.8	35.0	35.3	35.6	35.9	36.2	36.5	36.7	37.0	37.3	37.6
45.0		35.3	35.6	35.9	36.2	36.5	36.8	37.0	37.3	37.6	37.9	38.2	38.5	38.8
46.0		36.4	36.7	37.0	37.3	37.6	37.9	38.2	38.5	38.8	39.1	39.4	39.7	40.0
47.0		37.5	37.8	38.1	38.5	38.8	39.1	39.4	39.7	40.0	40.3	40.6	41.0	41.3
48.0		38.7	39.0	39.3	39.6	39.9	40.3	40.6	40.9	41.2	41.5	41.9	42.2	42.5
49.0		39.8	40.1	40.5	40.8	41.1	41.4	41.8	42.1	42.4	42.8	43.1	43.4	43.8
50.0		41.0	41.3	41.6	42.0	42.3	42.6	43.0	43.3	43.7	44.0	44.4	44.7	45.0
51.0		42.1	42.5	42.8	43.2	43.5	43.8	44.2	44.5	44.9	45.3	45.6	46.0	46.3
52.0		43.3	43.6	44.0	44.3	44.7	45.1	45.4	45.8	46.1	46.5	46.9	47.2	47.6
53.0		44.5	44.8	45.2	45.6	45.9	46.3	46.7	47.0	47.4	47.8	48.1	48.5	48.9
54.0		45.7	46.0	46.4	46.8	47.2	47.5	47.9	48.3	48.7	49.1	49.4	49.8	50.2
55.0		46.8	47.2	47.6	48.0	48.4	48.8	49.2	49.6	49.9	50.3	50.7	51.1	51.5

续表 C.0.2

f_{cu} R_s	ν_s	4.32	4.34	4.36	4.38	4.40	4.42	4.44	4.46	4.48	4.50	4.52	4.54	4.56
20.0		12.5	12.6	12.7	12.8	12.9	13.0	13.0	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5	13.6
21.0		13.4	13.5	13.6	13.7	13.8	13.9	14.0	14.1	14.2	14.3	14.4	14.5	14.6
22.0		14.3	14.4	14.5	14.6	14.7	14.8	14.9	15.0	15.1	15.3	15.4	15.5	15.6
23.0		15.2	15.3	15.4	15.5	15.7	15.8	15.9	16.0	16.1	16.2	16.4	16.5	16.6
24.0		16.1	16.2	16.4	16.5	16.6	16.7	16.9	17.0	17.1	17.3	17.4	17.5	17.6
25.0		17.1	17.2	17.3	17.5	17.6	17.7	17.9	18.0	18.1	18.3	18.4	18.5	18.7
26.0		18.1	18.2	18.3	18.5	18.6	18.7	18.9	19.0	19.2	19.3	19.5	19.6	19.7
27.0		19.0	19.2	19.3	19.5	19.6	19.8	19.9	20.1	20.2	20.4	20.5	20.7	20.8

续表 C.0.2

f_{cu} R_a	u_a	4.32	4.34	4.36	4.38	4.40	4.42	4.44	4.46	4.48	4.50	4.52	4.54	4.56
28.0		20.0	20.2	20.3	20.5	20.7	20.8	21.0	21.1	21.3	21.4	21.6	21.8	21.9
29.0		21.1	21.2	21.4	21.5	21.7	21.9	22.0	22.2	22.4	22.5	22.7	22.9	23.0
30.0		22.1	22.3	22.4	22.6	22.8	22.9	23.1	23.3	23.5	23.6	23.8	24.0	24.2
31.0		23.1	23.3	23.5	23.7	23.8	24.0	24.2	24.4	24.6	24.8	24.9	25.1	25.3
32.0		24.2	24.4	24.6	24.8	24.9	25.1	25.3	25.5	25.7	25.9	26.1	26.3	26.5
33.0		25.3	25.5	25.7	25.8	26.0	26.2	26.4	26.6	26.8	27.0	27.2	27.4	27.6
34.0		26.4	26.6	26.8	27.0	27.2	27.4	27.6	27.8	28.0	28.2	28.4	28.6	28.8
35.0		27.5	27.7	27.9	28.1	28.3	28.5	28.7	28.9	29.2	29.4	29.6	29.8	30.0
36.0		28.6	28.8	29.0	29.2	29.4	29.7	29.9	30.1	30.3	30.6	30.8	31.0	31.2
37.0		29.7	29.9	30.1	30.4	30.6	30.8	31.1	31.3	31.5	31.8	32.0	32.2	32.5
38.0		30.8	31.1	31.3	31.5	31.8	32.0	32.3	32.5	32.7	33.0	33.2	33.5	33.7
39.0		32.0	32.2	32.5	32.7	33.0	33.2	33.5	33.7	34.0	34.2	34.5	34.7	35.0
40.0		33.1	33.4	33.6	33.9	34.2	34.4	34.7	34.9	35.2	35.5	35.7	36.0	36.2
41.0		34.3	34.6	34.8	35.1	35.4	35.6	35.9	36.2	36.4	36.7	37.0	37.3	37.5
42.0		35.5	35.8	36.0	36.3	36.6	36.9	37.1	37.4	37.7	38.0	38.3	38.5	38.8
43.0		36.7	37.0	37.3	37.5	37.8	38.1	38.4	38.7	39.0	39.3	39.6	39.8	40.1
44.0		37.9	38.2	38.5	38.8	39.1	39.4	39.7	40.0	40.3	40.6	40.9	41.2	41.5
45.0		39.1	39.4	39.7	40.0	40.3	40.6	40.9	41.2	41.6	41.9	42.2	42.5	42.8
46.0		40.4	40.7	41.0	41.3	41.6	41.9	42.2	42.5	42.9	43.2	43.5	43.8	44.1
47.0		41.6	41.9	42.2	42.6	42.9	43.2	43.5	43.9	44.2	44.5	44.8	45.2	45.5
48.0		42.9	43.2	43.5	43.8	44.2	44.5	44.8	45.2	45.5	45.8	46.2	46.5	46.9
49.0		44.1	44.5	44.8	45.1	45.5	45.8	46.2	46.5	46.9	47.2	47.5	47.9	48.2
50.0		45.4	45.7	46.1	46.4	46.8	47.1	47.5	47.9	48.2	48.6	48.9	49.3	49.6
51.0		46.7	47.0	47.4	47.8	48.1	48.5	48.8	49.2	49.6	49.9	50.3	50.7	51.0
52.0		48.0	48.3	48.7	49.1	49.5	49.8	50.2	50.6	50.9	51.3	51.7	52.1	52.5
53.0		49.3	49.7	50.0	50.4	50.8	51.2	51.6	52.0	52.3	52.7	53.1	53.5	53.9
54.0		50.6	51.0	51.4	51.8	52.2	52.5	52.9	53.3	53.7	54.1	54.5	54.9	55.3
55.0		51.9	52.3	52.7	53.1	53.5	53.9	54.3	54.7	55.1	55.6	56.0	56.4	56.8

续表 C.0.2

f_{cu} R_s	ν_a	4.58	4.60	4.62	4.64	4.66	4.68	4.70	4.72	4.74	4.76	4.78	4.80	4.82
20.0		13.7	13.8	13.9	14.0	14.1	14.2	14.3	14.4	14.5	14.6	14.7	14.8	14.9
21.0		14.7	14.8	14.9	15.0	15.1	15.3	15.4	15.5	15.6	15.7	15.8	15.9	16.0
22.0		15.7	15.8	15.9	16.1	16.2	16.3	16.4	16.5	16.6	16.7	16.9	17.0	17.1
23.0		16.7	16.9	17.0	17.1	17.2	17.3	17.5	17.6	17.7	17.8	18.0	18.1	18.2
24.0		17.8	17.9	18.0	18.2	18.3	18.4	18.5	18.7	18.8	18.9	19.1	19.2	19.3
25.0		18.8	19.0	19.1	19.2	19.4	19.5	19.6	19.8	19.9	20.1	20.2	20.3	20.5
26.0		19.9	20.0	20.2	20.3	20.5	20.6	20.8	20.9	21.1	21.2	21.3	21.5	21.6
27.0		21.0	21.1	21.3	21.4	21.6	21.7	21.9	22.0	22.2	22.4	22.5	22.7	22.8
28.0		22.1	22.2	22.4	22.6	22.7	22.9	23.0	23.2	23.4	23.5	23.7	23.9	24.0
29.0		23.2	23.4	23.5	23.7	23.9	24.0	24.2	24.4	24.6	24.7	24.9	25.1	25.2
30.0		24.3	24.5	24.7	24.9	25.0	25.2	25.4	25.6	25.8	25.9	26.1	26.3	26.5
31.0		25.5	25.7	25.9	26.0	26.2	26.4	26.6	26.8	27.0	27.2	27.4	27.5	27.7
32.0		26.7	26.8	27.0	27.2	27.4	27.6	27.8	28.0	28.2	28.4	28.6	28.8	29.0
33.0		27.8	28.0	28.2	28.4	28.6	28.8	29.1	29.3	29.5	29.7	29.9	30.1	30.3
34.0		29.0	29.2	29.5	29.7	29.9	30.1	30.3	30.5	30.7	30.9	31.2	31.4	31.6
35.0		30.2	30.5	30.7	30.9	31.1	31.3	31.6	31.8	32.0	32.2	32.5	32.7	32.9
36.0		31.5	31.7	31.9	32.2	32.4	32.6	32.8	33.1	33.3	33.5	33.8	34.0	34.2
37.0		32.7	32.9	33.2	33.4	33.7	33.9	34.1	34.4	34.6	34.9	35.1	35.3	35.6
38.0		34.0	34.2	34.5	34.7	34.9	35.2	35.4	35.7	35.9	36.2	36.4	36.7	37.0
39.0		35.2	35.5	35.7	36.0	36.2	36.5	36.8	37.0	37.3	37.5	37.8	38.1	38.3
40.0		36.5	36.8	37.0	37.3	37.6	37.8	38.1	38.4	38.6	38.9	39.2	39.5	39.7
41.0		37.8	38.1	38.3	38.6	38.9	39.2	39.5	39.7	40.0	40.3	40.6	40.9	41.1
42.0		39.1	39.4	39.7	40.0	40.2	40.5	40.8	41.1	41.4	41.7	42.0	42.3	42.6
43.0		40.4	40.7	41.0	41.3	41.6	41.9	42.2	42.5	42.8	43.1	43.4	43.7	44.0
44.0		41.8	42.1	42.4	42.7	43.0	43.3	43.6	43.9	44.2	44.5	44.8	45.1	45.4
45.0		43.1	43.4	43.7	44.0	44.4	44.7	45.0	45.3	45.6	45.9	46.3	46.6	46.9
46.0		44.5	44.8	45.1	45.4	45.8	46.1	46.4	46.7	47.1	47.4	47.7	48.0	48.4
47.0		45.8	46.2	46.5	46.8	47.2	47.5	47.8	48.2	48.5	48.8	49.2	49.5	49.9
48.0		47.2	47.5	47.9	48.2	48.6	48.9	49.3	49.6	50.0	50.3	50.7	51.0	51.4
49.0		48.6	49.0	49.3	49.7	50.0	50.4	50.7	51.1	51.4	51.8	52.2	52.5	52.9

续表 C.0.2

f_{cu} R_a	ν_a	4.58	4.60	4.62	4.64	4.66	4.68	4.70	4.72	4.74	4.76	4.78	4.80	4.82
50.0		50.0	50.4	50.7	51.1	51.5	51.8	52.2	52.6	52.9	53.3	53.7	54.0	54.4
51.0		51.4	51.8	52.2	52.5	52.9	53.3	53.7	54.0	54.4	54.8	55.2	55.6	56.0
52.0		52.8	53.2	53.6	54.0	54.4	54.8	55.2	55.5	55.9	56.3	56.7	57.1	57.5
53.0		54.3	54.7	55.1	55.5	55.9	56.3	56.7	57.1	57.5	57.9	58.3	58.7	59.1
54.0		55.7	56.1	56.5	56.9	57.4	57.8	58.2	58.6	59.0	59.4	59.8	60.2	60.7
55.0		57.2	57.6	58.0	58.4	58.9	59.3	59.7	60.1	60.5	61.0	61.4	61.8	62.2

续表 C.0.2

f_{cu} R_a	ν_a	4.84	4.86	4.88	4.90	4.92	4.94	4.96	4.98	5.00	5.02	5.04	5.06	5.08
20.0		15.1	15.2	15.3	15.4	15.5	15.6	15.7	15.8	15.9	16.0	16.1	16.2	16.3
21.0		16.1	16.2	16.3	16.5	16.6	16.7	16.8	16.9	17.0	17.1	17.2	17.4	17.5
22.0		17.2	17.3	17.5	17.6	17.7	17.8	17.9	18.1	18.2	18.3	18.4	18.5	18.7
23.0		18.3	18.5	18.6	18.7	18.8	19.0	19.1	19.2	19.3	19.5	19.6	19.7	19.9
24.0		19.5	19.6	19.7	19.9	20.0	20.1	20.3	20.4	20.5	20.7	20.8	21.0	21.1
25.0		20.6	20.8	20.9	21.0	21.2	21.3	21.5	21.6	21.8	21.9	22.0	22.2	22.3
26.0		21.8	21.9	22.1	22.2	22.4	22.5	22.7	22.8	23.0	23.1	23.3	23.5	23.6
27.0		23.0	23.1	23.3	23.5	23.6	23.8	23.9	24.1	24.3	24.4	24.6	24.7	24.9
28.0		24.2	24.4	24.5	24.7	24.9	25.0	25.2	25.4	25.5	25.7	25.9	26.0	26.2
29.0		25.4	25.6	25.8	25.9	26.1	26.3	26.5	26.6	26.8	27.0	27.2	27.4	27.5
30.0		26.7	26.8	27.0	27.2	27.4	27.6	27.8	28.0	28.1	28.3	28.5	28.7	28.9
31.0		27.9	28.1	28.3	28.5	28.7	28.9	29.1	29.3	29.5	29.7	29.9	30.1	30.3
32.0		29.2	29.4	29.6	29.8	30.0	30.2	30.4	30.6	30.8	31.0	31.2	31.4	31.6
33.0		30.5	30.7	30.9	31.1	31.3	31.5	31.8	32.0	32.2	32.4	32.6	32.8	33.0
34.0		31.8	32.0	32.2	32.5	32.7	32.9	33.1	33.3	33.6	33.8	34.0	34.2	34.5
35.0		33.1	33.4	33.6	33.8	34.0	34.3	34.5	34.7	35.0	35.2	35.4	35.7	35.9
36.0		34.5	34.7	35.0	35.2	35.4	35.7	35.9	36.1	36.4	36.6	36.9	37.1	37.4
37.0		35.8	36.1	36.3	36.6	36.8	37.1	37.3	37.6	37.8	38.1	38.3	38.6	38.8
38.0		37.2	37.5	37.7	38.0	38.2	38.5	38.7	39.0	39.3	39.5	39.8	40.1	40.3
39.0		38.6	38.9	39.1	39.4	39.7	39.9	40.2	40.5	40.7	41.0	41.3	41.5	41.8
40.0		40.0	40.3	40.5	40.8	41.1	41.4	41.7	41.9	42.2	42.5	42.8	43.1	43.3
41.0		41.4	41.7	42.0	42.3	42.6	42.8	43.1	43.4	43.7	44.0	44.3	44.6	44.9
42.0		42.8	43.1	43.4	43.7	44.0	44.3	44.6	44.9	45.2	45.5	45.8	46.1	46.4
43.0		44.3	44.6	44.9	45.2	45.5	45.8	46.1	46.4	46.7	47.1	47.4	47.7	48.0

续表 C.0.2

f_{cu} R_s	U_a	4.84	4.86	4.88	4.90	4.92	4.94	4.96	4.98	5.00	5.02	5.04	5.06	5.08
44.0		45.8	46.1	46.4	46.7	47.0	47.3	47.6	48.0	48.3	48.6	48.9	49.2	49.6
45.0		47.2	47.6	47.9	48.2	48.5	48.9	49.2	49.5	49.8	50.2	50.5	50.8	51.2
46.0		48.7	49.0	49.4	49.7	50.1	50.4	50.7	51.1	51.4	51.8	52.1	52.4	52.8
47.0		50.2	50.6	50.9	51.2	51.6	51.9	52.3	52.6	53.0	53.3	53.7	54.0	54.4
48.0		51.7	52.1	52.4	52.8	53.2	53.5	53.9	54.2	54.6	55.0	55.3	55.7	56.0
49.0		53.3	53.6	54.0	54.4	54.7	55.1	55.5	55.8	56.2	56.6	56.9	57.3	57.7
50.0		54.8	55.2	55.5	55.9	56.3	56.7	57.1	57.4	57.8	58.2	58.6	59.0	59.4
51.0		56.3	56.7	57.1	57.5	57.9	58.3	58.7	59.1	59.5	59.9	60.3	60.6	61.0
52.0		57.9	58.3	58.7	59.1	59.5	59.9	60.3	60.7	61.1	61.5	61.9	62.3	62.7
53.0		59.5	59.9	60.3	60.7	61.1	61.5	61.9	62.4	62.8	63.2	63.6	64.0	64.4
54.0		61.1	61.5	61.9	62.3	62.8	63.2	63.6	64.0	64.5	64.9	65.3	65.7	66.2
55.0		62.7	63.1	63.5	64.0	64.4	64.8	65.3	65.7	66.1	66.6	67.0	67.5	67.9

续表 C.0.2

f_{cu} R_s	U_a	5.10	5.12	5.14	5.16	5.18	5.20	5.22	5.24	5.26	5.28	5.30	5.32	5.34
20.0		16.4	16.5	16.6	16.7	16.8	17.0	17.1	17.2	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7
21.0		17.6	17.7	17.8	17.9	18.0	18.2	18.3	18.4	18.5	18.6	18.7	18.9	19.0
22.0		18.8	18.9	19.0	19.1	19.3	19.4	19.5	19.6	19.8	19.9	20.0	20.1	20.3
23.0		20.0	20.1	20.3	20.4	20.5	20.6	20.8	20.9	21.0	21.2	21.3	21.4	21.6
24.0		21.2	21.4	21.5	21.6	21.8	21.9	22.1	22.2	22.3	22.5	22.6	22.8	22.9
25.0		22.5	22.6	22.8	22.9	23.1	23.2	23.4	23.5	23.7	23.8	24.0	24.1	24.3
26.0		23.8	23.9	24.1	24.2	24.4	24.5	24.7	24.9	25.0	25.2	25.3	25.5	25.6
27.0		25.1	25.2	25.4	25.6	25.7	25.9	26.0	26.2	26.4	26.5	26.7	26.9	27.0
28.0		26.4	26.6	26.7	26.9	27.1	27.2	27.4	27.6	27.8	27.9	28.1	28.3	28.5
29.0		27.7	27.9	28.1	28.3	28.4	28.6	28.8	29.0	29.2	29.4	29.5	29.7	29.9
30.0		29.1	29.3	29.5	29.6	29.8	30.0	30.2	30.4	30.6	30.8	31.0	31.2	31.4
31.0		30.5	30.6	30.8	31.0	31.2	31.4	31.6	31.8	32.1	32.3	32.5	32.7	32.9
32.0		31.8	32.1	32.3	32.5	32.7	32.9	33.1	33.3	33.5	33.7	33.9	34.2	34.4
33.0		33.3	33.5	33.7	33.9	34.1	34.3	34.6	34.8	35.0	35.2	35.4	35.7	35.9
34.0		34.7	34.9	35.1	35.4	35.6	35.8	36.1	36.3	36.5	36.7	37.0	37.2	37.4
35.0		36.1	36.4	36.6	36.8	37.1	37.3	37.6	37.8	38.0	38.3	38.5	38.8	39.0
36.0		37.6	37.8	38.1	38.3	38.6	38.8	39.1	39.3	39.6	39.8	40.1	40.3	40.6
37.0		39.1	39.3	39.6	39.8	40.1	40.4	40.6	40.9	41.1	41.4	41.7	41.9	42.2
38.0		40.6	40.8	41.1	41.4	41.6	41.9	42.2	42.4	42.7	43.0	43.2	43.5	43.8

续表 C.0.2

f_{cu} R_a	v_a	5.10	5.12	5.14	5.16	5.18	5.20	5.22	5.24	5.26	5.28	5.30	5.32	5.34
39.0		42.1	42.4	42.6	42.9	43.2	43.5	43.7	44.0	44.3	44.6	44.9	45.1	45.4
40.0		43.6	43.9	44.2	44.5	44.8	45.0	45.3	45.6	45.9	46.2	46.5	46.8	47.1
41.0		45.2	45.5	45.8	46.1	46.3	46.6	46.9	47.2	47.5	47.8	48.1	48.4	48.7
42.0		46.7	47.0	47.3	47.6	47.9	48.3	48.6	48.9	49.2	49.5	49.8	50.1	50.4
43.0		48.3	48.6	48.9	49.2	49.6	49.9	50.2	50.5	50.8	51.2	51.5	51.8	52.1
44.0		49.9	50.2	50.5	50.9	51.2	51.5	51.9	52.2	52.5	52.8	53.2	53.5	53.8
45.0		51.5	51.8	52.2	52.5	52.8	53.2	53.5	53.9	54.2	54.5	54.9	55.2	55.6
46.0		53.1	53.5	53.8	54.2	54.5	54.9	55.2	55.6	55.9	56.3	56.6	57.0	57.3
47.0		54.8	55.1	55.5	55.8	56.2	56.5	56.9	57.3	57.6	58.0	58.4	58.7	59.1
48.0		56.4	56.8	57.1	57.5	57.9	58.3	58.6	59.0	59.4	59.7	60.1	60.5	60.9
49.0		58.1	58.5	58.8	59.2	59.6	60.0	60.4	60.7	61.1	61.5	61.9	62.3	62.7
50.0		59.8	60.1	60.5	60.9	61.3	61.7	62.1	62.5	62.9	63.3	63.7	64.1	64.5
51.0		61.4	61.8	62.2	62.6	63.0	63.5	63.9	64.3	64.7	65.1	65.5	65.9	66.3
52.0		63.1	63.6	64.0	64.4	64.8	65.2	65.6	66.0	66.5	66.9	67.3	67.7	68.1
53.0		64.9	65.3	65.7	66.1	66.6	67.0	67.4	67.8	68.3	68.7	69.1	69.6	70.0
54.0		66.6	67.0	67.5	67.9	68.3	68.8	69.2	69.7	—	—	—	—	—
55.0		68.3	68.8	69.2	69.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—

附录 D 综合法测定混凝土强度曲线的 验证方法

D.0.1 当缺少专用或地区测强曲线时,可采用本规程规定的全国统一测强曲线,但使用前应进行验证。

D.0.2 测强曲线可按下列方法进行验证:

1 选用本地区常用的混凝土原材料,按最佳配合比配制强度等级为 C15、C20、C30、C40、C50、C60 的混凝土,制作边长为 150mm 的立方体试件各 3 组(共 18 组),7d 潮湿养护后再用自然养护;

2 采用符合本规程第 3.1 节各项要求的回弹仪和符合本规程第 4.1 节各项要求的超声波检测仪;

3 按龄期为 28d、60d 和 90d 进行综合法测试和试件抗压试验;

4 根据每个试件测得的回弹值 R_a 、声速值 v_a ,由附录 C 表 C.0.1 或表 C.0.2 查出该试件的抗压的抗压强度换算值 f_{cu} ;

5 将试件抗压试验所得的抗压强度实测值 f_{cu} 和按附录 C 和表 C.0.1 或表 C.0.2 查得的相应抗压强度换算值 $f_{cu,i}$,代入式 (A.0.8-2) 进行计算,如所得相对误差 $e_r \leq 15\%$,则可使用本规程规定的全国统一测强曲线;如所得相对误差 $e_r > 15\%$,则应另行建立专用或地区测强曲线。

附录 E 用实测空气声速法校准超声仪

E.0.1 空气中声速的测试步骤如下:

取常用平面换能器一对,接于超声波仪器上,开机预热 10min。在空气中将两个换能器的辐射面对准,依次改变两个换能器辐射面之间的距离 l (如 50、60、70、80、90、100、110、120mm……),在保持首波幅度一致的条件下,读取各间距所对应的声时值 t_1 、 t_2 、 t_3 …… t_n 。同时测量空气温度 T_K ,精确至 0.5°C 。

测量时应注意下列事项:

- 1 两个换能器辐射面的轴线始终保持在同一直线上;
- 2 换能器辐射面间距的测量误差不应超过 $\pm 1\%$,且测量精度为 0.5mm;
- 3 换能器辐射面宜悬空相对放置;若置于地板或桌面上,必须在换能器下面垫以吸声材料。

E.0.2 实测空气中声速可采用下列两种方法之一计算:

1 以换能器辐射面间距为纵坐标,声时读数为横坐标,将各组数据点绘在直角坐标图上。穿越各点形成一直线,算出该直线的斜率,即为空气中声速实测值 v° 。

2 以各测点的测距 l 和对应的声时 t 求回归直线方程 $l = a + bt$ 。回归系数 b 便是空气中声速实测值 v° 。

E.0.3 空气中声速计算值 v_k 可按式(4.3.1)求得。

E.0.4 误差计算。

空气中声速计算值 v_k 与空气中声速实测值 v° 之间的相对误差 e_r ,可按下列公式计算:

$$e_r = (v_k - v^\circ) / v_k \times 100\% \quad (\text{E.0.4})$$

按式(E.0.4)计算所得的 e_r 值不应超过 $\pm 0.5\%$ 。否则,应检查仪器各部位的连接后重测,或更换超声波检测仪。

附录 F 超声回弹综合法检测记录表

工程名称: 构件名称: 回弹仪 率定值 超声仪 换能器 kHz; t_0 环境温度 °C;
回弹测试面 测试角度 ° 超声测试方式: 对测(侧, 顶-底); 平测(侧, 顶, 底); 角测

共 页第 页

构件 编号	测 区	测点回弹值 R_i								测区回弹 代表值 R	测点测距 L_i /声时 t_i			测区声速 代表值 v (km/s)	备 注
		1	2	3	4	5	6	7	8		1	2	3		
	1														
	2														
	3														
	4														
	5														
	6														
	7														
	8														
	9														
	10														

复核: 计算: 记录: 检验: 测试日期: 年 月 日

附录 G 结构混凝土抗压强度计算表

构件名称和编号：

共 页 第 页

计算项目		测 区									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
回弹值	测区代表值										
	角度修正值										
	角度修正后										
	浇筑面修正值										
	浇筑面修正后										
声速值 (km/s)	测区代表值										
	修正系数 β, λ										
	修正后的值										
强度修正系数值 η											
测区强度换算值(MPa)											
强度推定值(MPa) $n =$		$m_{f_{cu}}^c =$ MPa			$s_{f_{cu}}^c =$ MPa			$f_{cu,e} =$ MPa			
使用的测区强度 换算表		规程,地区,专用				备 注					

复核：

计算：

计算日期： 年 月 日

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

1)表示很严格,非这样做不可的:

正面词采用“必须”;

反面词采用“严禁”。

2)表示严格,在正常情况下均应这样做的:

正面词采用“应”;

反面词采用“不应”或“不得”。

3)表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:

正面词采用“宜”;

反面词采用“不宜”;

4)表示有选择,在一定条件下可以这样做的:

正面词采用“可”;

反面词采用“不可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行时,写法为“应按……执行”或“应符合……的要求(或规定)”。非必须按所指定标准执行时,写法为“可参照……执行”。

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

目 次

1 总 则	(51)
2 术语、符号	(53)
3 回弹仪	(54)
3.1 一般规定	(54)
3.2 检定要求	(54)
3.3 维护保养	(54)
4 混凝土超声波检测仪器	(55)
4.1 一般规定	(55)
4.2 换能器技术要求	(57)
4.3 校准和保养	(57)
5 测区回弹值和声速值的测量及计算	(59)
5.1 一般规定	(59)
5.2 回弹测试及回弹值计算	(60)
5.3 超声测试及声速值计算	(61)
6 结构混凝土强度推定	(62)
附录 A 建立专用或地区混凝土强度曲线的基本要求	(66)
附录 B 超声波角测、平测和声速计算方法	(67)
附录 C 测区混凝土抗压强度换算表	(70)
附录 D 综合法测定混凝土强度曲线的验证方法	(71)
附录 E 用实测空气声速法校准超声仪	(72)
附录 F 超声回弹综合法检测记录表	(73)
附录 G 结构混凝土抗压强度计算表	(73)

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20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》GBJ 107 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,由于种种原因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 等规定。

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/T 23 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°C 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/T 23 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/T 23 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/T 5004 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。波幅读数是通过对人工调节,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，超声仪需具有稳定、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°C 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测试误差。当环境温度高于 40°C 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 $50\sim 100\text{kHz}$ 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,受其他因素的影响很小。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 款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/T 50344 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/T 50344-2004 规定的 A、B 检测类型抽样,见表 1。

表 1 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 款条件的构件才可作为同批构件。

5.1.4、5.1.5 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 提出了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面(如测试屋架复杆、基础坡面等),或混凝土成型的表面、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垂直。回弹值按本规程第 5.2.5 条和 5.2.6 条的规定进行修正。

5.2.2、5.2.3 规定了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 个较大值和 3 个较小值,取余下 10 个回弹值的平均值作为测区回弹代表值。此种计算方法与其他国家有所不同,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,不会引入新的误差。

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、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。如只能沿构件浇筑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。当只能在构件浇筑的表面或底面平测时,由于混凝土浇筑表面浮浆多,相对于侧面来说砂浆含量多石子含量小,因此测得的声速偏低;由于混凝土浇筑、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,在浇筑表面平测的声速约偏低5%左右,在浇筑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

从北京市 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

陕西省建科院提供了 17、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;广西区建科院和安徽省建研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表 2。

表 2 综合法测强曲线的系数值和统计分析指标

序号	骨科种类	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

6.0.3 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,建立本地区测强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 6.0.6 条规定,说明该批构件的混凝土

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,需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,试件数量不应少于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(6.0.6-2)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个小时,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“<10.0MPa”,或“>70.0MPa”。如构件测区中有小于10.0MPa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“10.0MPa”;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 $m_{f_{cu}} \leq 50\text{MPa}$ 时标准差 $s_{f_{cu}}$ 的限值,系按原规程的规定。 $m_{f_{cu}} > 50\text{MPa}$ 时 $s_{f_{cu}}$ 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,见表 3。

表 3 C50~C60 混凝土标养抗压强度统计数据

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 50.0MPa 时,限制 $s_{f_{cu}}$ 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、试件是否为标准立方体、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 中式(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.1.1)。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。

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(表 4):

表 4 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(μ s)	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(μ s)	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(μ s)	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(μ s)	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,使用该曲线前必须选通过验证的,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“ $<10.0\text{MPa}$ ”或“ $>70.0\text{MPa}$ ”。

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,受其他因素的影响很小。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 不应超过 $\pm 0.5\%$ 。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、附录 G 中的表,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。