



T/CECS 02-2020

中国工程建设标准化协会标准

**超声回弹综合法
检测混凝土抗压强度技术规程**

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

(报批稿)

(复审 V3.0, 终稿)

中国建筑工业出版社

中国工程建设标准化协会标准

超声回弹综合法 检测混凝土抗压强度技术规程

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

T/CECS 02-2020

主编单位：中国建筑科学研究院有限公司

贵州中建建筑科研设计院有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：2020 年 X 月 X 日

中国建筑工业出版社

2020 北 京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2017 年第一批工程建设协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字〔2017〕014 号）的要求，标准编制组经深入调查研究，认真总结实践经验，吸收了国内外回弹仪和混凝土超声波检测仪的最新成果，结合我国建设工程中混凝土质量检测的实际需要，并在广泛征求意见的基础上，修订本规程。

本规程是对《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》CECS 02：2005 的修订。

本次修订的主要内容有：

1. 取消了模拟式混凝土超声波检测仪的相关内容；
2. 回归了新的全国测强曲线；
3. 修订了回弹值的取值方法；
4. 采用钻取混凝土芯样或同条件试件对测区混凝土抗压强度换算值进行修正时，修正方法由修正系数法调整为修正量法；
5. 修订了超声角测、平测和声速计算方法；
6. 增加了建立专用测强曲线或地方测强曲线时的混凝土试件制作数量。

本规程共分为 6 章和 9 个附录，主要技术内容包括：总则、术语和符号、回弹仪、混凝土超声波检测仪、回弹值和声速值的测量及计算、混凝土抗压强度推定等。

请注意本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

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归口管理，由中国建筑科学研究院有限公司负责具体内容的解释。本规程在执行过程中如有需要修改或补充之处，请将有关资料和建议寄送解释单位（地址：北京市北三环东路 30 号，邮政编码：100013），以供修订时参考。

主编单位：中国建筑科学研究院有限公司

贵州中建建筑科研设计院有限公司

参编单位：建研科技股份有限公司

深圳中建院建筑科技有限公司

上海同济检测技术有限公司
广西壮族自治区建筑科学研究设计院
云南大学云南特斯泰工程检测鉴定有限公司
北京智博联科技股份有限公司
湖南大学
乐陵市回弹仪厂
中建二局第三建筑工程有限公司
陕西省建筑科学研究院有限公司
浙江省建筑科学设计研究院有限公司
山东省建筑科学研究院有限公司
深圳市福田区建设工程质量检测中心
浙江省诸暨市宏泰建设工程检测所
建研建硕（北京）科技发展有限公司
山西省建筑科学研究院有限公司
云南云岭高速公路工程咨询有限公司
北京市建设工程质量第一检测所有限责任公司
北京市建设工程质量第五检测所有限公司
四川省交通运输厅工程质量监督局
四川省公路规划勘察设计研究院有限公司
河北天博建设科技有限公司
济南朗睿检测技术有限公司
北京市燕通建筑构件有限公司

主要起草人：李智斌 邱 平 张 晓 石 永 冉 群 朱跃武
童寿兴 张荣成 李杰成 吕 龙 管 钧 黄政宇
王 帅 李 军 李乃平 翟延波 崔士起 袁广州
郦 挺 邵康节 徐福泉 程 骐 郭 庆 李文军
李 翀 熊 军 王 勤 江 凌 李 蒙 周 科
王 磊 王 群

主要审查人：文恒武 黄志刚 左中杰 谭盐宾 高雪梅 施新荣
徐 劲 孙志东 张卓群

目 次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	3
3	回弹仪	5
3.1	一般规定	5
3.2	检定和校准	5
3.3	维护保养	6
4	混凝土超声波检测仪	7
4.1	一般规定	7
4.2	换能器	8
4.3	检定、校准和保养	8
5	回弹值和声速值的测量及计算	9
5.1	一般规定	9
5.2	回弹测试及回弹值计算	10
5.3	超声测试及声速值计算	11
6	混凝土抗压强度推定	13
6.1	一般规定	13
6.2	全国测强曲线	13
6.3	专用测强曲线或地区测强曲线	13
6.4	混凝土抗压强度推定	14
附录 A	混凝土超声波检测仪自校准方法	18
附录 B	非水平状态检测时的回弹值修正值	19
附录 C	浇筑面的回弹值修正值	20
附录 D	超声角测、平测和声速计算方法	21
附录 E	全国测强曲线的验证方法	23
附录 F	混凝土抗压强度换算表	24
附录 G	建立专用测强曲线或地区测强曲线的基本要求	30
附录 H	混凝土抗压强度记录表	33

附录 J 混凝土抗压强度计算表..... 34

本规程用词说明 35

引用标准名录 36

附：条文说明..... 37

Contents

1	General provisions.....	1
2	Terms and symbols.....	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	3
3	Rebound tester.....	5
3.1	General requirements.....	5
3.2	Verification and calibration	5
3.3	Maintenance.....	6
4	Concrete ultrasonic tester	7
4.1	General requirements.....	7
4.2	Transducer	8
4.3	Verification, calibration and maintenance	8
5	Rebound value and sound velocity value measurement and calculation.....	9
5.1	General requirements.....	9
5.2	Rebound test and rebound value calculation	10
5.3	Ultrasonic test and sound velocity calculation	11
6	Concrete compressive strength presumption.....	13
6.1	General requirements.....	13
6.2	National strength curve.....	13
6.3	Special curve or regional strength curve.....	13
6.4	Concrete compressive strength presumption	14
Appendix A	Self-calibration method for concrete ultrasonic tester	18
Appendix B	Rebound value modification value under non horizontality test	19
Appendix C	Rebound value modification value for pouring surfaces	20
Appendix D	Ultrasonic goniometry, boning and sound velocity measurement method	21
Appendix E	National strength curve proof technique	23
Appendix F	Concrete compressive strength conversion table.....	24

Appendix G Basic requirements for establishing special strength curve or regional
strength curve 30

Appendix H Concrete compressive strength record table 33

Appendix J Concrete compressive strength computation table..... 34

Explanation of wording in this specification..... 35

List of quoted standards..... 36

Addition: Explanation of provisions 37

1 总 则

1.0.1 为规范采用超声回弹综合法检测混凝土抗压强度的技术要求，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 本规程适用于普通混凝土抗压强度的检测。本规程不适用于因冻害、化学侵蚀、火灾、高温等已造成表面疏松、剥落的混凝土抗压强度的检测。

1.0.3 采用超声回弹综合法检测混凝土抗压强度，除应执行本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 测区 testing zone

按超声回弹综合法要求布置的，有若干个测点的区域。

2.1.2 测点 testing point

在测区内，取得检测数据的检测点。

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

通过测定混凝土的超声波声速值和回弹值检测混凝土抗压强度的方法。

2.1.4 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。

2.1.5 专用测强曲线 special strength curve

由与构件混凝土相同的材料、成型养护工艺配制的混凝土试件，通过试验所建立的曲线。

2.1.6 地区测强曲线 regional strength curve

由本地区常用的材料、成型养护工艺配制的混凝土试件，通过试验所建立的曲线；

2.1.7 全国测强曲线 national strength curve

由全国有代表性的材料、成型养护工艺配制的混凝土试件，通过试验所建立的曲线。

2.1.8 测区混凝土抗压强度换算值 conversion value of concrete compressive strength for the testing zone

根据测区混凝土的声速代表值和回弹代表值，通过测强曲线计算所得的测区现龄期混凝土抗压强度值。

2.1.9 混凝土抗压强度推定值 reference value for concrete compressive strength

对测区混凝土抗压强度换算值进行统计分析并应用一定规则得到的代表构件中现龄期混凝土抗压强度总体评价的统计值。

2.2 符号

- e_r —— 相对标准差；
- f_{cu}^c —— 测区混凝土抗压强度换算值；
- $f_{cu,i}^c$ —— 第 i 个测区的混凝土抗压强度换算值；
- $f_{cu,i}^0$ —— 第 i 个立方体试件混凝土抗压强度实测值；
- $f_{cu,e}$ —— 构件混凝土抗压强度推定值；
- $f_{cu,min}^c$ —— 构件最小的测区混凝土抗压强度换算值；
- $f_{cor,m}$ —— 芯样试件混凝土抗压强度平均值；
- $f_{cu,m}$ —— 同条件试件混凝土抗压强度平均值；
- $f_{cu,m0}^c$ —— 对应于芯样部位或同条件立方体试件测区混凝土抗压强度换算值的平均值；
- $f_{cor,i}$ —— 第 i 个混凝土芯样试件的抗压强度；
- $f_{cu,i}$ —— 第 i 个混凝土立方体试件的抗压强度；
- $f_{cu,i0}^c$ —— 第 i 个测区修正前的混凝土强度换算值；
- $f_{cu,i1}^c$ —— 第 i 个测区修正后的混凝土强度换算值；
- l —— 超声测距；
- l_i —— 第 i 个测点的超声测距；
- l_{1i} 、 l_{2i} —— 角测时第 i 个测点换能器与构件边缘的距离；
- $m_{f_{cu}^c}$ —— 测区混凝土抗压强度换算值的平均值；
- n —— 测区数，测点数，芯样试件数，立方体试件数；
- 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；

$R_{a\alpha}$ —— 测试角度为 α 时的测区回弹修正值；

R_a^t —— 测量混凝土浇筑表面时的测区回弹修正值；

R_a^b —— 测量混凝土浇筑底面时的测区回弹修正值；

R_{ai} —— 第 i 个测区修正后的测区回弹代表值；

$s_{f_{cu}^c}$ —— 测区混凝土抗压强度换算值的标准差；

T_k —— 测试时空气的温度；

t_i —— 第 i 个测点的声时读数；

t_0 —— 声时初读数；

v_a —— 修正后的测区混凝土中声速代表值；

v_{ai} —— 第 i 个测区修正后的测区声速代表值；

v_d —— 对测测区混凝土中声速代表值；

v_j —— 角测测区混凝土中声速代表值；

v_p —— 平测测区混凝土中声速代表值；

v_{pp} —— 平测时代表性构件混凝土中平测声速；

v_k —— 空气中声速计算值；

v^0 —— 空气中声速实测值；

δ —— 平均相对误差；

α —— 回弹仪测试角度；

β —— 超声测试面的声速修正系数；

λ —— 平测声速修正系数；

Δ_{tot} —— 测区混凝土抗压强度修正量；

Δ —— 空气中声速计算值(v_k)与空气中声速实测值(v^0)之间的相对误差。

3 回弹仪

3.1 一般规定

3.1.1 回弹仪可为数字式的，也可为指针直读式的。

3.1.2 回弹仪应具有产品合格证、检定或校准证书，并应在回弹仪的明显位置上有名称、型号、制造商、出厂编号、出厂日期等标识。

3.1.3 回弹仪除应符合现行国家标准《回弹仪》GB/T 9138 的有关规定外，尚应符合下列规定：

- 1 水平弹击时，弹击锤脱钩的瞬间，回弹仪的标称能量应为 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，且弹击锤起跳点应位于指针指示刻度尺上的“0”处；
- 3 在洛氏硬度 HRC 为 60 ± 2 的钢砧上，回弹仪的率定值应为 80 ± 2 ；
- 4 数字式回弹仪应带有指针直读示值系统，数字显示的回弹值与指针直读示值相差不应超过 1。

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

3.2 检定和校准

3.2.1 有下列情况之一时，回弹仪应按现行行业标准《回弹仪检定规程》JJG 817 的有关规定检定或校准后方可使用：

- 1 新回弹仪启用前；
- 2 超过检定或校准有效期；
- 3 经常规保养后，钢砧上的率定值不合格；
- 4 回弹仪遭受严重撞击或其他损害；
- 5 数字式回弹仪数字显示的回弹值与指针直读示值相差大于 1。

3.2.2 有下列情况之一时，回弹仪应在钢砧上进行率定试验：

- 1 回弹仪当天使用前；
- 2 测试过程中对回弹仪性能有怀疑时

3.2.3 回弹仪的率定试验应符合下列规定：

- 1 率定试验应在 $5^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下进行；
- 2 钢砧表面应干燥、清洁，并应稳固地平放在刚度大的物体上；
- 3 率定试验应分四个方向进行，弹击杆每次应旋转 90° ，每个方向连续弹击三次稳定回弹值的平均值应为 80 ± 2 。

3.2.4 当回弹仪率定值超出 80 ± 2 的范围时，应按本规程第 3.3 节的要求，对回弹仪进行常规维护保养后再进行率定。

3.2.5 回弹仪率定试验所采用的钢砧应符合现行国家标准《回弹仪》GB/T 9138 的有关规定。

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 钢砧上的率定值不满足要求。

3.3.2 回弹仪的常规保养应符合下列规定：

- 1 指针的摩擦力应为 $0.5\text{N}\sim 0.8\text{N}$ ；
- 2 保养时，不得旋转尾盖上已定位紧固的调零螺丝，不得自制或更换零部件；
- 3 对于数字式回弹仪，还应按产品要求的维护程序进行维护；
- 4 保养后应按本规程第 3.2.3 条的规定进行率定试验。

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

4.1 一般规定

4.1.1 混凝土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的有关规定。

4.1.2 混凝土超声波检测仪应具有产品合格证、检定或校准证书，混凝土超声波检测仪的明显位置上应有名称、型号、制造商、出厂编号、出厂日期等标识。

4.1.3 混凝土超声波检测仪宜为数字式，并应符合下列规定：

- 1 可对接收的超声波波形进行数字化采集和存储；
- 2 应具有波形显示清晰、稳定的示波装置；
- 3 应具备手动游标测读和自动测读两种声参量测读功能，且自动测读时可标记出声时、幅度的测读位置；
- 4 应具备对各测点的波形和测读的声参量进行存储功能。

4.1.4 数字式混凝土超声波检测仪的性能指标应符合下列规定：

- 1 声时测量范围宜为 $0.1\mu\text{s} \sim 999.9\mu\text{s}$ ，声时分辨力应为 $0.1\mu\text{s}$ ，实测空气声速的相对测量允许误差应为 $\pm 0.5\%$ ；在 1h 内每 5min 测读一次的声时允许误差应为 $\pm 0.2\mu\text{s}$ ；
- 2 幅度测量范围不宜小于 80dB；幅度分辨力应为 1dB；
- 3 仪器的信号接收系统的频带宽度应为 10kHz $\sim$ 250kHz；
- 4 信噪比为 3：1 时，接收灵敏度不应大于 $50\mu\text{V}$ 。

4.1.5 混凝土超声波检测仪应能在下列条件下正常工作：

- 1 环境温度为 $0^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ ；
- 2 空气相对湿度不大于 80%；
- 3 电源电压波动范围为标称值 $\pm 10\%$ ；
- 4 连续工作时间不少于 4h。

4.2 换能器

4.2.1 换能器的标称频率宜在 50kHz~100kHz 范围内。

4.2.2 换能器的实测主频与标称频率相差的允许误差应为 $\pm 10\%$ 。

4.3 检定、校准和保养

4.3.1 有下列情况之一时，混凝土超声波检测仪应进行检定或校准：

- 1 新混凝土超声波检测仪启用前；
- 2 超过检定或校准有效期；
- 3 仪器修理或更换零件后；
- 4 测试过程中对声时值有怀疑时；
- 5 仪器遭受严重撞击或其他损害。

4.3.2 混凝土超声波检测仪可按本规程附录 A 的有关规定进行自校准。

4.3.3 混凝土超声波检测仪的保养应符合下列规定：

- 1 若仪器在较长时间内停用，每月应通电 1 次，每次不宜少于 1h；
- 2 仪器检测完毕，应擦干仪器表面的灰尘，放入机箱内，并应存放在通风、阴凉、干燥处，无论存放或工作时，均应防尘；
- 3 在搬运过程中应防止碰撞和剧烈振动；
- 4 换能器应避免摔损和撞击，工作完毕应擦拭干净单独存放。换能器的耦合面应避免磨损，不得随意拆装。

5 回弹值和声速值的测量及计算

5.1 一般规定

5.1.1 检测前宜收集下列资料：

- 1 工程名称及建设、勘察、设计、施工、监理、委托单位名称；
- 2 构件名称、设计图纸；
- 3 水泥的安定性、品种规格、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；混凝土配合比、拌合物坍落度和混凝土设计强度等级等；
- 4 模板类型；混凝土浇筑情况、养护情况、浇筑日期和气象温湿度等；
- 5 混凝土试件抗压强度测试资料及相关的施工技术资料；
- 6 构件存在的质量问题或检测原因。

5.1.2 检测数量应符合下列规定：

1 构件检测时，应在构件检测面上均匀布置测区，每个构件上的测区数不应少于 10 个。对于检测面一个方向尺寸不大于 4.5m，且另一个方向尺寸不大于 0.3m 的构件，测区数可适当减少，但不应少于 5 个；

2 当同批构件按批进行一次或二次随机抽样检测时，随机抽样的最小样本容量宜符合表 5.1.2 的规定。

表 5.1.2 随机抽样的最小样本容量

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

注：1 检测类别 A 适用于施工或监理单位一般性抽样检测，也可用于既有结构的一般性抽样检测；

2 检测类别 B 适用于混凝土施工质量的抽样检测，可用于既有结构的混凝土强度鉴定检测；

3 检测类别 C 适用于混凝土结构性能的检测或混凝土强度复检，可用于存在问题较多的既有结构混凝土强度的检测。

5.1.3 按批抽样检测时，满足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 构件的测区布置应符合下列规定：

1 在条件允许时，测区宜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相对面、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 测试面应为清洁、平整、干燥的混凝土原浆面，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；

7 测试时可能产生颤动的薄壁、小型构件，应对构件进行固定。

5.1.5 测区应进行编号，并应记录测区位置和外观质量情况。

5.1.6 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，回弹仪的轴线应始终保持垂直于混凝土检测面，测试时应缓慢施压、准确读数、快速复位。宜首先选择混凝土浇筑方向的侧面进行水平方向测试。若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表面或底面。

5.2.2 测点宜在测区范围内均匀布置，不得布置在气孔或外露石子上。相邻两个测点的间距不宜小于 20mm；测点与构件边缘、外露钢筋或预埋件的距离不宜小于

30mm。

5.2.3 超声对测或角测时，回弹测试应在测区内超声波的发射面和接收面各测读 5 个回弹值。超声平测时，回弹测试应在测区内超声波的发射测点和接收测点之间测读 10 个回弹值。每一测点的回弹值，测读应精确至 1，且同一测点应只允许弹击 1 次。

5.2.4 测区回弹代表值应从测区的 10 个回弹值中剔除 1 个最大值和 1 个最小值，并应用剩余 8 个有效回弹值按下式计算：

$$R = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (5.2.4)$$

式中： R —— 测区回弹代表值，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，应按下式修正：

$$R_a = R + R_{a\alpha} \quad (5.2.5)$$

式中： R_a —— 修正后的测区回弹代表值；

$R_{a\alpha}$ —— 测试角度为 α 时的测区回弹修正值，可按本规程附录 B 采用。

5.2.6 在混凝土浇筑的表面或底面测得的回弹值，应按下列公式修正：

$$R_a = R + R_a^t \quad (5.2.6-1)$$

$$R_a = R + R_a^b \quad (5.2.6-2)$$

式中： R_a^t —— 测量混凝土浇筑表面时的测区回弹修正值，可按本规程附录 C 采用；

R_a^b —— 测量混凝土浇筑底面时的测区回弹修正值，可按本规程附录 C 采用。

5.2.7 测试时回弹仪处于非水平状态，同时测试面又是非混凝土浇筑方向的侧面，测得的回弹值应先进行角度修正，然后对角度修正后的值再进行表面或底面修正。

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，每一测区应布置 3 个测点。超声测试宜采用对测，当被测构件不具备对测条件时，可采用角测或平测。超声角测、平测和声速计算方法应符合本规程附录 D 的有关规定。

5.3.2 超声测试应符合下列规定：

- 1 应在混凝土超声波检测仪上配置满足要求的换能器和高频电缆；

- 2 换能器辐射面应与混凝土测试面耦合；
- 3 应先测定声时初读数（ t_0 ），再进行声时测量，读数应精确至 $0.1\mu\text{s}$ ；
- 4 超声测距（ l ）测量应精确至 1mm ，且测量允许误差应为 $\pm 1\%$ ；
- 5 检测过程中若更换换能器或高频电缆，应重新测定声时初读数（ t_0 ）；
- 6 声速计算值应精确至 0.01km/s 。

5.3.3 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按下列式计算：

$$v_d = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{l_i}{t_i - t_0} \quad (5.3.3)$$

式中： v_d —— 对测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 ）；

t_i —— 第 i 个测点的声时读数（ μs ）；

t_0 —— 声时初读数（ μs ）。

5.3.4 当在混凝土浇筑的表面或底面对测时，测区声速代表值应按下列式修正：

$$v_a = \beta \cdot v_d \quad (5.3.4)$$

式中： v_a —— 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，取 1.034。

6 混凝土抗压强度推定

6.1 一般规定

6.1.1 本规程规定的混凝土抗压强度推定方法适用于符合下列条件的普通混凝土：

- 1 混凝土采用的水泥、砂石、外加剂、掺合料、拌合用水符合国家现行标准的有关规定；
- 2 自然养护或蒸汽养护后经自然养护 7d 以上，且混凝土表层为干燥状态；
- 3 龄期为 7d~2000d；
- 4 混凝土抗压强度为 10MPa~70MPa。

6.1.2 混凝土抗压强度换算值可采用专用测强曲线、地区测强曲线或全国测强曲线计算。

6.1.3 使用超声回弹综合法检测混凝土抗压强度的地区和部门，宜制定专用测强曲线或地区测强曲线，经审定和批准后实施。各检测单位应按专用测强曲线、地区测强曲线、全国测强曲线的次序选用测强曲线。

6.2 全国测强曲线

6.2.1 全国统一测区混凝土抗压强度换算可按下列公式计算：

$$f_{cu,i}^c = 0.0286 v_{ai}^{1.999} R_{ai}^{1.155} \quad (6.2.1)$$

式中： $f_{cu,i}^c$ ——第*i*个测区的混凝土抗压强度换算值（MPa），精确至 0.1MPa；

R_{ai} ——第*i*个测区修正后的测区回弹代表值；

v_{ai} ——第*i*个测区修正后的测区声速代表值。

6.2.2 当无专用测强曲线或地区测强曲线时，按本规程附录 E 的有关规定通过验证后，可按本规程附录 F 的有关规定对测区混凝土抗压强度进行换算，也可按本规程第 6.2.1 条规定进行计算。

6.3 专用测强曲线或地区测强曲线

6.3.1 专用测强曲线或地区测强曲线应按本规程附录 G 的有关规定制定。

6.3.2 专用测强曲线或地区测强曲线的抗压强度平均相对误差(δ)、相对标准差(e_r)应符合下列规定:

1 专用测强曲线的平均相对误差(δ)不应大于 10%, 相对标准差(e_r)不应大于 12%;

2 地区测强曲线的平均相对误差(δ)不应大于 11%, 相对标准差(e_r)不应大于 14%;

3 平均相对误差(δ)、相对标准差(e_r)应按本规程式(G.0.7-2)、式(G.0.7-3)计算。

6.3.3 专用测强曲线或地区测强曲线应与制定测强曲线相同的混凝土相适应, 不得超出测强曲线的适用范围。

6.4 混凝土抗压强度推定

6.4.1 构件第*i*个测区的混凝土抗压强度换算值($f_{cu,i}^c$), 可按本规程第 5.2 节和第 5.3 节的有关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, 采用本规程第 6.1.2 条规定的测强曲线换算而得。

6.4.2 当构件所采用的材料及龄期与制定测强曲线所采用的材料及龄期有较大差异时, 可采用在构件上钻取混凝土芯样或同条件立方体试件对测区混凝土抗压强度换算值进行修正。

6.4.3 混凝土芯样修正时, 芯样数量不应少于 4 个, 公称直径宜为 100mm, 高径比应为 1。芯样应在测区内钻取, 每个芯样应只加工 1 个试件, 并应符合现行行业标准《钻芯法检测混凝土强度技术规程》JGJ/T 384 的有关规定。

6.4.5 同条件立方体试件修正时, 试件数量不应少于 4 个, 试件边长应为 150mm, 并应符合现行国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081 的有关规定。

6.4.6 计算时, 测区混凝土抗压强度修正量及测区混凝土抗压强度换算值的修正应符合下列规定:

1 修正量应按下列公式计算：

$$\Delta_{\text{tot}} = f_{\text{cor},m} - f_{\text{cu},m0}^c \quad (6.4.6-1)$$

$$\Delta_{\text{tot}} = f_{\text{cu},m} - f_{\text{cu},m0}^c \quad (6.4.6-2)$$

$$f_{\text{cor},m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{\text{cor},i} \quad (6.4.6-3)$$

$$f_{\text{cu},m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{\text{cu},i} \quad (6.4.6-4)$$

$$f_{\text{cu},m0}^c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{\text{cu},i}^c \quad (6.4.6-5)$$

式中： Δ_{tot} —— 测区混凝土抗压强度修正量（MPa），精确至 0.1MPa；

$f_{\text{cor},m}$ —— 芯样试件混凝土抗压强度平均值（MPa），精确至 0.1MPa；

$f_{\text{cu},m}$ —— 同条件试件混凝土抗压强度平均值（MPa），精确至 0.1MPa；

$f_{\text{cu},m0}^c$ —— 对应于芯样部位或同条件立方体试件测区混凝土抗压强度换算值的平均值（MPa），精确至 0.1MPa；

$f_{\text{cor},i}$ —— 第*i*个混凝土芯样试件的抗压强度；

$f_{\text{cu},i}$ —— 第*i*个混凝土立方体试件的抗压强度；

$f_{\text{cu},i}^c$ —— 对应于第*i*个芯样部位或同条件立方体试件测区回弹值和声速值的混凝土抗压强度换算值，按本规程附录 F 取值；

n —— 芯样或试件数量。

2 测区混凝土抗压强度换算值的修正应按下列公式计算：

$$f_{\text{cu},i1}^c = f_{\text{cu},i0}^c + \Delta_{\text{tot}} \quad (6.4.6-6)$$

式中： $f_{\text{cu},i0}^c$ —— 第*i*个测区修正前的混凝土强度换算值（MPa），精确至 0.1MPa；

$f_{\text{cu},i1}^c$ —— 第*i*个测区修正后的混凝土强度换算值（MPa），精确至 0.1MPa。

6.4.7 构件混凝土抗压强度推定值（ $f_{\text{cu,e}}$ ）的确定，应符合下列规定：

1 当构件的测区混凝土抗压强度换算值中出现小于 10.0MPa 的值时，构件的混凝土抗压强度推定值（ $f_{\text{cu,e}}$ ）应为小于 10.0MPa。

2 当构件中测区数少于 10 个时，应按下式计算：

$$f_{cu,e} = f_{cu,min}^c \quad (6.4.7-1)$$

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

3 当构件中测区数不少于 10 个或按批量检测时，应按下列公式计算：

$$f_{cu,e} = m_{f_{cu}}^c - 1.645 s_{f_{cu}}^c \quad (6.4.7-2)$$

$$m_{f_{cu}}^c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cu,i}^c \quad (6.4.7-3)$$

$$s_{f_{cu}}^c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{cu,i}^c)^2 - n(m_{f_{cu}}^c)^2}{n-1}} \quad (6.4.7-4)$$

式中： $f_{cu,i}^c$ —— 第*i*个测区的混凝土抗压强度换算值 (MPa)，精确至 0.1MPa；

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

$s_{f_{cu}}^c$ —— 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。对于单个检测的构件，取构件的测区数；对批量检测的构件，取所有被抽检构件测区数之总和。

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

1 测区混凝土抗压强度换算值的平均值 ($m_{f_{cu}}^c$) 小于 25.0MPa，测区混凝土抗压强度换算值的标准差 ($s_{f_{cu}}^c$) 大于 4.50MPa；

2 测区混凝土抗压强度换算值的平均值 ($m_{f_{cu}}^c$) 不小于 25.0MPa 且不大于 50.0MPa，测区混凝土抗压强度换算值的标准差 ($s_{f_{cu}}^c$) 大于 5.50MPa；

3 测区混凝土抗压强度换算值的平均值 ($m_{f_{cu}}^c$) 大于 50.0MPa，测区混凝土抗压强度换算值的标准差 ($s_{f_{cu}}^c$) 大于 6.50MPa。

6.4.9 混凝土抗压强度记录和计算应按本规程附录 H 和附录 J 的有关规定执行。

6.4.10 检测报告应包括下列内容：

1 工程名称、工程地址、设计、施工、监理、建设和监督单位以及委托方信息；

- 2 工程概况；
- 3 构件名称、数量及设计要求的混凝土强度等级；
- 4 施工时模板、浇筑工艺、养护情况及成型日期等；
- 5 抽样方案；
- 6 抽样数量及抽样方法；
- 7 检测设备；
- 8 检测依据；
- 9 现场检测环境条件（温度等）；
- 10 检测人员及检测日期；
- 11 构件及测区平面布置示意图；
- 12 检测结果，包括平均值、标准差、混凝土抗压强度推定值。

附录 A 混凝土超声波检测仪自校准方法

A.0.1 声速的测试应按下列步骤进行：

- 1 取平面换能器一对，与混凝土超声波检测仪连接，开机预热 10min；
- 2 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 ，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 ）。同时测量测试时空气的温度（ T_k ），精确至 0.5℃。

A.0.2 声速的测试应符合下列规定：

- 1 两个换能器辐射面的轴线应始终保持在同一直线上；
- 2 换能器辐射面间距的测量允许误差应为±0.5%，且测量精度应为 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，应在换能器下面垫以吸声材料。

A.0.3 应以各测点的测距和对应的声时，采用回归分析方法求出下式直线方程：

$$l = a + bt \quad (\text{A.0.3})$$

式中： b ——空气中声速实测值（ v^0 ）。

A.0.4 空气中声速计算值应按下式计算：

$$v_k = 0.3314\sqrt{1 + 0.00367T_k} \quad (\text{A.0.4})$$

式中： v_k ——空气中声速计算值（km/s）；

T_k ——测试时空气的温度（℃）。

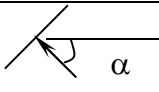
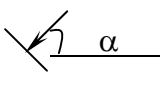
A.0.5 空气中声速计算值与空气中声速实测值之间的相对误差（ Δ ），可按下式计算：

$$\Delta = (v_k - v^0) / v_k \times 100\% \quad (\text{A.0.5})$$

A.0.6 按本规程式（A.0.5）计算所得的相对误差范围应为-0.5%~0.5%。否则，应检查仪器各部位的连接后重测，或更换混凝土超声波检测仪。

附录 B 非水平状态检测时的回弹值修正值

表 B 非水平状态检测时的回弹值修正值

测试 角度 $R_{a\alpha}$ R	 回弹仪向上				 回弹仪向下			
	+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
21	-5.9	-4.9	-4.0	-3.0	+2.5	+3.0	+3.5	+4.0
22	-5.8	-4.8	-3.9	-2.9	+2.4	+2.9	+3.4	+3.9
23	-5.7	-4.7	-3.9	-2.9	+2.4	+2.9	+3.4	+3.9
24	-5.6	-4.6	-3.8	-2.8	+2.3	+2.8	+3.3	+3.8
25	-5.5	-4.5	-3.8	-2.8	+2.3	+2.8	+3.3	+3.8
26	-5.4	-4.4	-3.7	-2.7	+2.2	+2.7	+3.2	+3.7
27	-5.3	-4.3	-3.7	-2.7	+2.2	+2.7	+3.2	+3.7
28	-5.2	-4.2	-3.6	-2.6	+2.1	+2.6	+3.1	+3.6
29	-5.1	-4.1	-3.6	-2.6	+2.1	+2.6	+3.1	+3.6
30	-5.0	-4.0	-3.5	-2.5	+2.0	+2.5	+3.0	+3.5
31	-4.9	-4.0	-3.5	-2.5	+2.0	+2.5	+3.0	+3.5
32	-4.8	-3.9	-3.4	-2.4	+1.9	+2.4	+2.9	+3.4
33	-4.7	-3.9	-3.4	-2.4	+1.9	+2.4	+2.9	+3.4
34	-4.6	-3.8	-3.3	-2.3	+1.8	+2.3	+2.8	+3.3
35	-4.5	-3.8	-3.3	-2.3	+1.8	+2.3	+2.8	+3.3
36	-4.4	-3.7	-3.2	-2.2	+1.7	+2.2	+2.7	+3.2
37	-4.3	-3.7	-3.2	-2.2	+1.7	+2.2	+2.7	+3.2
38	-4.2	-3.6	-3.1	-2.1	+1.6	+2.1	+2.6	+3.1
39	-4.1	-3.6	-3.1	-2.1	+1.6	+2.1	+2.6	+3.1
40	-4.0	-3.5	-3.0	-2.0	+1.5	+2.0	+2.5	+3.0
41	-4.0	-3.5	-3.0	-2.0	+1.5	+2.0	+2.5	+3.0
42	-3.9	-3.4	-2.9	-1.9	+1.4	+1.9	+2.4	+2.9
43	-3.9	-3.4	-2.9	-1.9	+1.4	+1.9	+2.4	+2.9
44	-3.8	-3.3	-2.8	-1.8	+1.3	+1.8	+2.3	+2.8
45	-3.8	-3.3	-2.8	-1.8	+1.3	+1.8	+2.3	+2.8
46	-3.7	-3.2	-2.7	-1.7	+1.2	+1.7	+2.2	+2.7
47	-3.7	-3.2	-2.7	-1.7	+1.2	+1.7	+2.2	+2.7
48	-3.6	-3.1	-2.6	-1.6	+1.1	+1.6	+2.1	+2.6
49	-3.6	-3.1	-2.6	-1.6	+1.1	+1.6	+2.1	+2.6
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。

附录 C 浇筑面的回弹值修正值

表 C 浇筑面的回弹值修正值

R 或 R_a	测试面	
	表面 R_a^t	底面 R_a^b
20	+2.5	-3.0
21	+2.4	-2.9
22	+2.3	-2.8
23	+2.2	-2.7
24	+2.1	-2.6
25	+2.0	-2.5
26	+1.9	-2.4
27	+1.8	-2.3
28	+1.7	-2.2
29	+1.6	-2.1
30	+1.5	-2.0
31	+1.4	-1.9
32	+1.3	-1.8
33	+1.2	-1.7
34	+1.1	-1.6
35	+1.0	-1.5
36	+0.9	-1.4
37	+0.8	-1.3
38	+0.7	-1.2
39	+0.6	-1.1
40	+0.5	-1.0
41	+0.4	-0.9
42	+0.3	-0.8
43	+0.2	-0.7
44	+0.1	-0.6
45	0	-0.5
46	0	-0.4
47	0	-0.3
48	0	-0.2
49	0	-0.1
50	0	0

- 注：1 在侧面测试时，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。

附录 D 超声角测、平测和声速计算方法

D.1 角测

D.1.1 当构件只有两个相邻测试面可供检测时，可采用角测法（图 D.1.1）测量混凝土中的声速。每个测区应布置 3 个测点，并应与相应测试面对应的 3 个测点的测距保持基本一致。

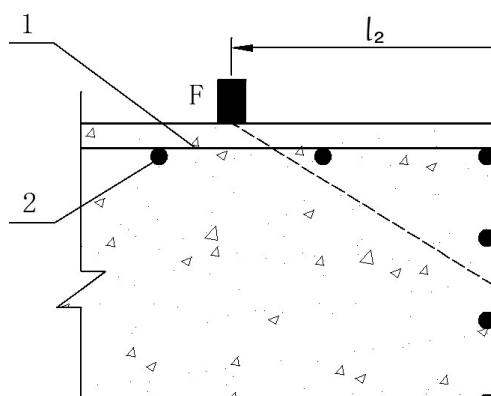


图 D.1.1 角测示意图

1—箍筋；2—主筋；F—发射换能器；S—接收换能器

D.1.2 布置超声角测点时，换能器中心与构件边缘的距离 l_{1i} 、 l_{2i} 不宜小于 300mm。

D.1.3 超声测距应按下式计算：

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

式中： l_i —— 第 i 个测点的超声测距（mm）；

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

D.1.4 角测测区混凝土中声速代表值应按下式计算：

$$v_j = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{l_i}{t_i - t_0} \quad (\text{D.1.4})$$

式中： v_j —— 角测测区混凝土中声速代表值（km/s）；

t_i —— 第 i 个测点的声时读数（ μs ）；

t_0 —— 声时初读数（ μs ）。

D.2 平测

D.2.1 当构件只有一个测试面可供检测时，可采用平测法测量混凝土中的声速。

D.2.2 布置平测测点时，每个测区应布置一排超声测点，发射和接收换能器的连线

与附近钢筋轴线宜呈 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ (图 D.2.2)。应以两个换能器内边距分别为 200mm、250mm、300mm、350mm、400mm、450mm、500mm 进行平测，逐点测读相应声时值 (t)，并用回归分析方法求出下列直线方程：

$$l = a + ct \quad (\text{D.2.2})$$

式中： c ——平测测区混凝土中声速代表值 (v_p)。

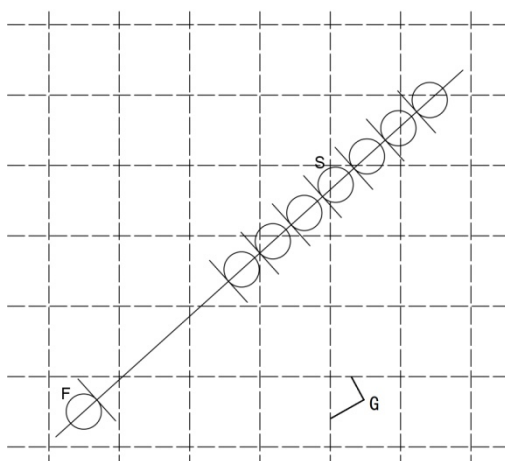


图 D.2.2 平测示意图

F—发射换能器；S—接收换能器；G—钢筋轴线

D.2.3 应选取有代表性且具有对测条件的构件，将平测测区混凝土中声速代表值 (v_p) 修正为对测测区混凝土中声速代表值 (v_d)。在构件上采用对测法得到对测测区混凝土中声速代表值 (v_d)，并采用平测法得到平测时代表性构件混凝土中平测声速 (v_{pp})，按下式计算平测声速修正系数：

$$\lambda = v_d / v_{pp} \quad (\text{D.2.3})$$

式中： v_d —— 对测测区混凝土中声速代表值 (km/s)；

v_{pp} —— 平测时代表性构件混凝土中平测声速 (km/s)；

λ —— 平测声速修正系数。

D.2.4 平测法修正后的测区混凝土中声速代表值应按下式计算：

$$v_a = \lambda v_p \quad (\text{D.2.4})$$

式中： v_a —— 修正后的测区混凝土中声速代表值 (km/s)；

v_p —— 平测测区混凝土中声速代表值 (km/s)

λ —— 平测声速修正系数。

附录 E 全国测强曲线的验证方法

E.0.1 当缺少专用测强曲线或地区测强曲线时，可采用本规程规定的全国测强曲线，但使用前应先进行验证。

E.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，按常用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，采用自然养护；

2 采用符合本规程第 3 章规定的中型回弹仪和符合本规程第 4 章规定的混凝土超声波检测仪；

3 按龄期为 28d、60d 和 90d 进行超声回弹综合法测试和试件混凝土抗压试验；

4 根据每个试件测得的回弹值和声速值，按本规程附录 F 查得试件的混凝土抗压强度换算值；

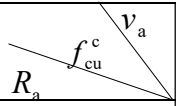
5 将试件的混凝土抗压强度换算值和混凝土抗压强度实测值代入本规程式（G.0.7-2）和式（G.0.7-3）进行计算，若所得平均相对误差（ δ ）不大于 12%，且相对标准差（ e_r ）不大于 15%，则可使用本规程规定的全国测强曲线。否则，应另行建立专用测强曲线或地区测强曲线。

附录 F 混凝土抗压强度换算表

表 F 混凝土抗压强度换算表

$\begin{matrix} \nearrow v_a \\ f_{cu}^c \\ \nwarrow R_a \end{matrix}$	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
15.0	—	—	—	—	—	—	10.0	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	10.6
16.0	10.1	10.2	10.4	10.5	10.6	10.7	10.8	10.9	11.0	11.1	11.2	11.3	11.5
17.0	10.9	11.0	11.1	11.2	11.3	11.5	11.6	11.7	11.8	11.9	12.1	12.2	12.3
18.0	11.6	11.7	11.9	12.0	12.1	12.2	12.4	12.5	12.6	12.7	12.9	13.0	13.1
19.0	12.4	12.5	12.6	12.8	12.9	13.0	13.2	13.3	13.4	13.6	13.7	13.8	14.0
20.0	13.1	13.3	13.4	13.5	13.7	13.8	14.0	14.1	14.3	14.4	14.5	14.7	14.8
21.0	13.9	14.0	14.2	14.3	14.5	14.6	14.8	14.9	15.1	15.2	15.4	15.5	15.7
22.0	14.7	14.8	15.0	15.1	15.3	15.4	15.6	15.7	15.9	16.1	16.2	16.4	16.6
23.0	15.4	15.6	15.7	15.9	16.1	16.2	16.4	16.6	16.7	16.9	17.1	17.3	17.4
24.0	16.2	16.4	16.5	16.7	16.9	17.1	17.2	17.4	17.6	17.8	17.9	18.1	18.3
25.0	17.0	17.2	17.3	17.5	17.7	17.9	18.1	18.3	18.4	18.6	18.8	19.0	19.2
26.0	17.8	18.0	18.1	18.3	18.5	18.7	18.9	19.1	19.3	19.5	19.7	19.9	20.1
27.0	18.6	18.8	19.0	19.2	19.3	19.5	19.8	20.0	20.2	20.4	20.6	20.8	21.0
28.0	19.4	19.6	19.8	20.0	20.2	20.4	20.6	20.8	21.0	21.2	21.4	21.7	21.9
29.0	20.2	20.4	20.6	20.8	21.0	21.2	21.4	21.7	21.9	22.1	22.3	22.6	22.8
30.0	21.0	21.2	21.4	21.6	21.9	22.1	22.3	22.5	22.8	23.0	23.2	23.5	23.7
31.0	21.8	22.0	22.2	22.5	22.7	22.9	23.2	23.4	23.6	23.9	24.1	24.4	24.6
32.0	22.6	22.8	23.1	23.3	23.5	23.8	24.0	24.3	24.5	24.8	25.0	25.3	25.5
33.0	23.4	23.6	23.9	24.1	24.4	24.6	24.9	25.2	25.4	25.7	25.9	26.2	26.4
34.0	24.2	24.5	24.7	25.0	25.3	25.5	25.8	26.0	26.3	26.6	26.8	27.1	27.4
35.0	25.0	25.3	25.6	25.8	26.1	26.4	26.7	26.9	27.2	27.5	27.8	28.0	28.3
36.0	25.9	26.1	26.4	26.7	27.0	27.3	27.5	27.8	28.1	28.4	28.7	29.0	29.2
37.0	26.7	27.0	27.3	27.6	27.8	28.1	28.4	28.7	29.0	29.3	29.6	29.9	30.2
38.0	27.5	27.8	28.1	28.4	28.7	29.0	29.3	29.6	29.9	30.2	30.5	30.8	31.1
39.0	28.4	28.7	29.0	29.3	29.6	29.9	30.2	30.5	30.8	31.1	31.4	31.8	32.1
40.0	29.2	29.5	29.8	30.2	30.5	30.8	31.1	31.4	31.7	32.1	32.4	32.7	33.0
41.0	30.1	30.4	30.7	31.0	31.3	31.7	32.0	32.3	32.7	33.0	33.3	33.6	34.0
42.0	30.9	31.2	31.6	31.9	32.2	32.6	32.9	33.2	33.6	33.9	34.3	34.6	34.9
43.0	31.8	32.1	32.4	32.8	33.1	33.5	33.8	34.2	34.5	34.8	35.2	35.6	35.9
44.0	32.6	33.0	33.3	33.7	34.0	34.4	34.7	35.1	35.4	35.8	36.1	36.5	36.9
45.0	33.5	33.8	34.2	34.5	34.9	35.3	35.6	36.0	36.4	36.7	37.1	37.5	37.8
46.0	34.3	34.7	35.1	35.4	35.8	36.2	36.5	36.9	37.3	37.7	38.1	38.4	38.8
47.0	35.2	35.6	36.0	36.3	36.7	37.1	37.5	37.8	38.2	38.6	39.0	39.4	39.8
48.0	36.1	36.5	36.8	37.2	37.6	38.0	38.4	38.8	39.2	39.6	40.0	40.4	40.8
49.0	36.9	37.3	37.7	38.1	38.5	38.9	39.3	39.7	40.1	40.5	40.9	41.3	41.8
50.0	37.8	38.2	38.6	39.0	39.4	39.8	40.2	40.7	41.1	41.5	41.9	42.3	42.7
51.0	38.7	39.1	39.5	39.9	40.3	40.8	41.2	41.6	42.0	42.4	42.9	43.3	43.7
52.0	39.6	40.0	40.4	40.8	41.3	41.7	42.1	42.5	43.0	43.4	43.8	44.3	44.7
53.0	40.4	40.9	41.3	41.7	42.2	42.6	43.0	43.5	43.9	44.4	44.8	45.3	45.7
54.0	41.3	41.8	42.2	42.6	43.1	43.5	44.0	44.4	44.9	45.3	45.8	46.3	46.7
55.0	42.2	42.7	43.1	43.6	44.0	44.5	44.9	45.4	45.8	46.3	46.8	47.2	47.7

续表 F

	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
15.0	10.7	10.9	11.0	11.1	11.2	11.3	11.4	11.5	11.6	11.7	11.8	11.9	12.1
16.0	11.6	11.7	11.8	11.9	12.0	12.2	12.3	12.4	12.5	12.6	12.7	12.9	13.0
17.0	12.4	12.5	12.7	12.8	12.9	13.0	13.2	13.3	13.4	13.5	13.7	13.8	13.9
18.0	13.3	13.4	13.5	13.7	13.8	13.9	14.1	14.2	14.3	14.5	14.6	14.7	14.9
19.0	14.1	14.3	14.4	14.5	14.7	14.8	15.0	15.1	15.3	15.4	15.5	15.7	15.8
20.0	15.0	15.1	15.3	15.4	15.6	15.7	15.9	16.0	16.2	16.3	16.5	16.6	16.8
21.0	15.8	16.0	16.2	16.3	16.5	16.6	16.8	17.0	17.1	17.3	17.4	17.6	17.8
22.0	16.7	16.9	17.1	17.2	17.4	17.6	17.7	17.9	18.1	18.2	18.4	18.6	18.8
23.0	17.6	17.8	18.0	18.1	18.3	18.5	18.7	18.8	19.0	19.2	19.4	19.6	19.7
24.0	18.5	18.7	18.9	19.0	19.2	19.4	19.6	19.8	20.0	20.2	20.4	20.5	20.7
25.0	19.4	19.6	19.8	20.0	20.2	20.3	20.5	20.7	20.9	21.1	21.3	21.5	21.7
26.0	20.3	20.5	20.7	20.9	21.1	21.3	21.5	21.7	21.9	22.1	22.3	22.5	22.7
27.0	21.2	21.4	21.6	21.8	22.0	22.2	22.5	22.7	22.9	23.1	23.3	23.5	23.8
28.0	22.1	22.3	22.5	22.8	23.0	23.2	23.4	23.6	23.9	24.1	24.3	24.6	24.8
29.0	23.0	23.2	23.5	23.7	23.9	24.2	24.4	24.6	24.9	25.1	25.3	25.6	25.8
30.0	23.9	24.2	24.4	24.6	24.9	25.1	25.4	25.6	25.8	26.1	26.3	26.6	26.8
31.0	24.9	25.1	25.3	25.6	25.8	26.1	26.3	26.6	26.8	27.1	27.4	27.6	27.9
32.0	25.8	26.0	26.3	26.5	26.8	27.1	27.3	27.6	27.8	28.1	28.4	28.6	28.9
33.0	26.7	27.0	27.2	27.5	27.8	28.0	28.3	28.6	28.9	29.1	29.4	29.7	30.0
34.0	27.6	27.9	28.2	28.5	28.7	29.0	29.3	29.6	29.9	30.2	30.4	30.7	31.0
35.0	28.6	28.9	29.2	29.4	29.7	30.0	30.3	30.6	30.9	31.2	31.5	31.8	32.1
36.0	29.5	29.8	30.1	30.4	30.7	31.0	31.3	31.6	31.9	32.2	32.5	32.8	33.1
37.0	30.5	30.8	31.1	31.4	31.7	32.0	32.3	32.6	32.9	33.2	33.6	33.9	34.2
38.0	31.4	31.7	32.1	32.4	32.7	33.0	33.3	33.6	34.0	34.3	34.6	34.9	35.3
39.0	32.4	32.7	33.0	33.4	33.7	34.0	34.3	34.7	35.0	35.3	35.7	36.0	36.3
40.0	33.4	33.7	34.0	34.3	34.7	35.0	35.4	35.7	36.0	36.4	36.7	37.1	37.4
41.0	34.3	34.7	35.0	35.3	35.7	36.0	36.4	36.7	37.1	37.4	37.8	38.1	38.5
42.0	35.3	35.6	36.0	36.3	36.7	37.0	37.4	37.8	38.1	38.5	38.9	39.2	39.6
43.0	36.3	36.6	37.0	37.3	37.7	38.1	38.4	38.8	39.2	39.5	39.9	40.3	40.7
44.0	37.2	37.6	38.0	38.3	38.7	39.1	39.5	39.9	40.2	40.6	41.0	41.4	41.8
45.0	38.2	38.6	39.0	39.4	39.7	40.1	40.5	40.9	41.3	41.7	42.1	42.5	42.9
46.0	39.2	39.6	40.0	40.4	40.8	41.2	41.6	41.9	42.3	42.8	43.2	43.6	44.0
47.0	40.2	40.6	41.0	41.4	41.8	42.2	42.6	43.0	43.4	43.8	44.2	44.7	45.1
48.0	41.2	41.6	42.0	42.4	42.8	43.2	43.6	44.1	44.5	44.9	45.3	45.8	46.2
49.0	42.2	42.6	43.0	43.4	43.8	44.3	44.7	45.1	45.6	46.0	46.4	46.9	47.3
50.0	43.2	43.6	44.0	44.4	44.9	45.3	45.8	46.2	46.6	47.1	47.5	48.0	48.4
51.0	44.2	44.6	45.0	45.5	45.9	46.4	46.8	47.3	47.7	48.2	48.6	49.1	49.5
52.0	45.2	45.6	46.1	46.5	47.0	47.4	47.9	48.3	48.8	49.3	49.7	50.2	50.7
53.0	46.2	46.6	47.1	47.5	48.0	48.5	48.9	49.4	49.9	50.4	50.8	51.3	51.8
54.0	47.2	47.6	48.1	48.6	49.1	49.5	50.0	50.5	51.0	51.4	51.9	52.4	52.9
55.0	48.2	48.7	49.1	49.6	50.1	50.6	51.1	51.6	52.1	52.6	53.0	53.5	54.0

续表 F

$\begin{matrix} v_a \\ f_{cu}^c \\ R_a \end{matrix}$	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
15.0	12.2	12.3	12.4	12.5	12.6	12.7	12.8	13.0	13.1	13.2	13.3	13.4	13.6
16.0	13.1	13.2	13.3	13.5	13.6	13.7	13.8	14.0	14.1	14.2	14.3	14.5	14.6
17.0	14.1	14.2	14.3	14.4	14.6	14.7	14.8	15.0	15.1	15.3	15.4	15.5	15.7
18.0	15.0	15.2	15.3	15.4	15.6	15.7	15.9	16.0	16.1	16.3	16.4	16.6	16.7
19.0	16.0	16.1	16.3	16.4	16.6	16.7	16.9	17.0	17.2	17.3	17.5	17.7	17.8
20.0	17.0	17.1	17.3	17.4	17.6	17.8	17.9	18.1	18.2	18.4	18.6	18.7	18.9
21.0	17.9	18.1	18.3	18.4	18.6	18.8	19.0	19.1	19.3	19.5	19.6	19.8	20.0
22.0	18.9	19.1	19.3	19.5	19.6	19.8	20.0	20.2	20.4	20.5	20.7	20.9	21.1
23.0	19.9	20.1	20.3	20.5	20.7	20.9	21.1	21.2	21.4	21.6	21.8	22.0	22.2
24.0	20.9	21.1	21.3	21.5	21.7	21.9	22.1	22.3	22.5	22.7	22.9	23.1	23.3
25.0	21.9	22.1	22.4	22.6	22.8	23.0	23.2	23.4	23.6	23.8	24.0	24.2	24.4
26.0	23.0	23.2	23.4	23.6	23.8	24.0	24.3	24.5	24.7	24.9	25.1	25.4	25.6
27.0	24.0	24.2	24.4	24.7	24.9	25.1	25.3	25.6	25.8	26.0	26.3	26.5	26.7
28.0	25.0	25.2	25.5	25.7	25.9	26.2	26.4	26.7	26.9	27.1	27.4	27.6	27.9
29.0	26.0	26.3	26.5	26.8	27.0	27.3	27.5	27.8	28.0	28.3	28.5	28.8	29.0
30.0	27.1	27.3	27.6	27.8	28.1	28.4	28.6	28.9	29.1	29.4	29.7	29.9	30.2
31.0	28.1	28.4	28.7	28.9	29.2	29.5	29.7	30.0	30.3	30.5	30.8	31.1	31.3
32.0	29.2	29.5	29.7	30.0	30.3	30.6	30.8	31.1	31.4	31.7	31.9	32.2	32.5
33.0	30.2	30.5	30.8	31.1	31.4	31.7	31.9	32.2	32.5	32.8	33.1	33.4	33.7
34.0	31.3	31.6	31.9	32.2	32.5	32.8	33.1	33.4	33.7	34.0	34.3	34.6	34.9
35.0	32.4	32.7	33.0	33.3	33.6	33.9	34.2	34.5	34.8	35.1	35.4	35.7	36.1
36.0	33.4	33.7	34.1	34.4	34.7	35.0	35.3	35.6	36.0	36.3	36.6	36.9	37.3
37.0	34.5	34.8	35.2	35.5	35.8	36.1	36.5	36.8	37.1	37.4	37.8	38.1	38.5
38.0	35.6	35.9	36.3	36.6	36.9	37.3	37.6	37.9	38.3	38.6	39.0	39.3	39.7
39.0	36.7	37.0	37.4	37.7	38.0	38.4	38.7	39.1	39.4	39.8	40.1	40.5	40.9
40.0	37.8	38.1	38.5	38.8	39.2	39.5	39.9	40.2	40.6	41.0	41.3	41.7	42.1
41.0	38.9	39.2	39.6	39.9	40.3	40.7	41.0	41.4	41.8	42.2	42.5	42.9	43.3
42.0	40.0	40.3	40.7	41.1	41.4	41.8	42.2	42.6	43.0	43.4	43.7	44.1	44.5
43.0	41.1	41.4	41.8	42.2	42.6	43.0	43.4	43.8	44.1	44.5	44.9	45.3	45.7
44.0	42.2	42.5	42.9	43.3	43.7	44.1	44.5	44.9	45.3	45.7	46.2	46.6	47.0
45.0	43.3	43.7	44.1	44.5	44.9	45.3	45.7	46.1	46.5	46.9	47.4	47.8	48.2
46.0	44.4	44.8	45.2	45.6	46.0	46.5	46.9	47.3	47.7	48.2	48.6	49.0	49.4
47.0	45.5	45.9	46.3	46.8	47.2	47.6	48.1	48.5	48.9	49.4	49.8	50.2	50.7
48.0	46.6	47.0	47.5	47.9	48.4	48.8	49.2	49.7	50.1	50.6	51.0	51.5	51.9
49.0	47.7	48.2	48.6	49.1	49.5	50.0	50.4	50.9	51.3	51.8	52.3	52.7	53.2
50.0	48.9	49.3	49.8	50.2	50.7	51.2	51.6	52.1	52.6	53.0	53.5	54.0	54.4
51.0	50.0	50.5	50.9	51.4	51.9	52.3	52.8	53.3	53.8	54.2	54.7	55.2	55.7
52.0	51.1	51.6	52.1	52.6	53.0	53.5	54.0	54.5	55.0	55.5	56.0	56.5	57.0
53.0	52.3	52.8	53.2	53.7	54.2	54.7	55.2	55.7	56.2	56.7	57.2	57.7	58.2
54.0	53.4	53.9	54.4	54.9	55.4	55.9	56.4	56.9	57.4	57.9	58.5	59.0	59.5
55.0	54.6	55.1	55.6	56.1	56.6	57.1	57.6	58.1	58.7	59.2	59.7	60.2	60.8

续表 F

$\begin{array}{c} v_a \\ \swarrow \\ f_{cu}^c \\ \searrow \\ R_a \end{array}$	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
15.0	13.7	13.8	13.9	14.0	14.2	14.3	14.4	14.5	14.6	14.8	14.9	15.0	15.1
16.0	14.7	14.9	15.0	15.1	15.2	15.4	15.5	15.6	15.8	15.9	16.0	16.2	16.3
17.0	15.8	15.9	16.1	16.2	16.4	16.5	16.6	16.8	16.9	17.1	17.2	17.4	17.5
18.0	16.9	17.0	17.2	17.3	17.5	17.6	17.8	17.9	18.1	18.2	18.4	18.5	18.7
19.0	18.0	18.1	18.3	18.4	18.6	18.8	18.9	19.1	19.2	19.4	19.6	19.7	19.9
20.0	19.1	19.2	19.4	19.6	19.7	19.9	20.1	20.2	20.4	20.6	20.8	20.9	21.1
21.0	20.2	20.3	20.5	20.7	20.9	21.1	21.2	21.4	21.6	21.8	22.0	22.1	22.3
22.0	21.3	21.5	21.7	21.8	22.0	22.2	22.4	22.6	22.8	23.0	23.2	23.4	23.6
23.0	22.4	22.6	22.8	23.0	23.2	23.4	23.6	23.8	24.0	24.2	24.4	24.6	24.8
24.0	23.5	23.7	23.9	24.1	24.4	24.6	24.8	25.0	25.2	25.4	25.6	25.8	26.1
25.0	24.7	24.9	25.1	25.3	25.5	25.8	26.0	26.2	26.4	26.6	26.9	27.1	27.3
26.0	25.8	26.0	26.3	26.5	26.7	26.9	27.2	27.4	27.6	27.9	28.1	28.3	28.6
27.0	27.0	27.2	27.4	27.7	27.9	28.1	28.4	28.6	28.9	29.1	29.4	29.6	29.9
28.0	28.1	28.4	28.6	28.9	29.1	29.4	29.6	29.9	30.1	30.4	30.6	30.9	31.1
29.0	29.3	29.5	29.8	30.0	30.3	30.6	30.8	31.1	31.4	31.6	31.9	32.2	32.4
30.0	30.4	30.7	31.0	31.2	31.5	31.8	32.1	32.3	32.6	32.9	33.2	33.4	33.7
31.0	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
32.0	32.8	33.1	33.4	33.7	34.0	34.2	34.5	34.8	35.1	35.4	35.7	36.0	36.3
33.0	34.0	34.3	34.6	34.9	35.2	35.5	35.8	36.1	36.4	36.7	37.0	37.3	37.6
34.0	35.2	35.5	35.8	36.1	36.4	36.7	37.0	37.4	37.7	38.0	38.3	38.6	39.0
35.0	36.4	36.7	37.0	37.3	37.7	38.0	38.3	38.6	39.0	39.3	39.6	40.0	40.3
36.0	37.6	37.9	38.2	38.6	38.9	39.2	39.6	39.9	40.3	40.6	40.9	41.3	41.6
37.0	38.8	39.1	39.5	39.8	40.2	40.5	40.8	41.2	41.5	41.9	42.2	42.6	43.0
38.0	40.0	40.4	40.7	41.1	41.4	41.8	42.1	42.5	42.8	43.2	43.6	43.9	44.3
39.0	41.2	41.6	41.9	42.3	42.7	43.0	43.4	43.8	44.1	44.5	44.9	45.3	45.7
40.0	42.4	42.8	43.2	43.6	43.9	44.3	44.7	45.1	45.5	45.8	46.2	46.6	47.0
41.0	43.7	44.1	44.4	44.8	45.2	45.6	46.0	46.4	46.8	47.2	47.6	48.0	48.4
42.0	44.9	45.3	45.7	46.1	46.5	46.9	47.3	47.7	48.1	48.5	48.9	49.3	49.7
43.0	46.1	46.5	47.0	47.4	47.8	48.2	48.6	49.0	49.4	49.8	50.3	50.7	51.1
44.0	47.4	47.8	48.2	48.6	49.1	49.5	49.9	50.3	50.7	51.2	51.6	52.0	52.5
45.0	48.6	49.1	49.5	49.9	50.3	50.8	51.2	51.6	52.1	52.5	53.0	53.4	53.9
46.0	49.9	50.3	50.8	51.2	51.6	52.1	52.5	53.0	53.4	53.9	54.3	54.8	55.2
47.0	51.1	51.6	52.0	52.5	52.9	53.4	53.8	54.3	54.8	55.2	55.7	56.2	56.6
48.0	52.4	52.9	53.3	53.8	54.2	54.7	55.2	55.6	56.1	56.6	57.1	57.5	58.0
49.0	53.7	54.1	54.6	55.1	55.5	56.0	56.5	57.0	57.5	58.0	58.4	58.9	59.4
50.0	54.9	55.4	55.9	56.4	56.9	57.3	57.8	58.3	58.8	59.3	59.8	60.3	60.8
51.0	56.2	56.7	57.2	57.7	58.2	58.7	59.2	59.7	60.2	60.7	61.2	61.7	62.2
52.0	57.5	58.0	58.5	59.0	59.5	60.0	60.5	61.0	61.6	62.1	62.6	63.1	63.6
53.0	58.7	59.3	59.8	60.3	60.8	61.3	61.9	62.4	62.9	63.5	64.0	64.5	65.1
54.0	60.0	60.6	61.1	61.6	62.1	62.7	63.2	63.8	64.3	64.8	65.4	65.9	66.5
55.0	61.3	61.8	62.4	62.9	63.5	64.0	64.6	65.1	65.7	66.2	66.8	67.3	67.9

续表 F

R_a	f_{cu}^c	v_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
15.0	15.3	15.4	15.5	15.6	15.8	15.9	16.0	16.2	16.3	16.4	16.6	16.7	16.8		
16.0	16.4	16.6	16.7	16.9	17.0	17.1	17.3	17.4	17.6	17.7	17.8	18.0	18.1		
17.0	17.6	17.8	17.9	18.1	18.2	18.4	18.5	18.7	18.8	19.0	19.1	19.3	19.4		
18.0	18.8	19.0	19.2	19.3	19.5	19.6	19.8	20.0	20.1	20.3	20.4	20.6	20.8		
19.0	20.1	20.2	20.4	20.6	20.7	20.9	21.1	21.2	21.4	21.6	21.8	21.9	22.1		
20.0	21.3	21.5	21.6	21.8	22.0	22.2	22.4	22.5	22.7	22.9	23.1	23.3	23.4		
21.0	22.5	22.7	22.9	23.1	23.3	23.5	23.6	23.8	24.0	24.2	24.4	24.6	24.8		
22.0	23.8	24.0	24.2	24.4	24.6	24.8	25.0	25.2	25.4	25.6	25.8	26.0	26.2		
23.0	25.0	25.2	25.4	25.6	25.8	26.1	26.3	26.5	26.7	26.9	27.1	27.3	27.6		
24.0	26.3	26.5	26.7	26.9	27.1	27.4	27.6	27.8	28.0	28.3	28.5	28.7	28.9		
25.0	27.5	27.8	28.0	28.2	28.5	28.7	28.9	29.2	29.4	29.6	29.9	30.1	30.3		
26.0	28.8	29.1	29.3	29.5	29.8	30.0	30.3	30.5	30.8	31.0	31.2	31.5	31.7		
27.0	30.1	30.4	30.6	30.9	31.1	31.4	31.6	31.9	32.1	32.4	32.6	32.9	33.2		
28.0	31.4	31.7	31.9	32.2	32.4	32.7	33.0	33.2	33.5	33.8	34.0	34.3	34.6		
29.0	32.7	33.0	33.2	33.5	33.8	34.1	34.3	34.6	34.9	35.2	35.4	35.7	36.0		
30.0	34.0	34.3	34.6	34.8	35.1	35.4	35.7	36.0	36.3	36.6	36.9	37.2	37.5		
31.0	35.3	35.6	35.9	36.2	36.5	36.8	37.1	37.4	37.7	38.0	38.3	38.6	38.9		
32.0	36.6	36.9	37.2	37.5	37.8	38.2	38.5	38.8	39.1	39.4	39.7	40.0	40.3		
33.0	38.0	38.3	38.6	38.9	39.2	39.5	39.9	40.2	40.5	40.8	41.2	41.5	41.8		
34.0	39.3	39.6	39.9	40.3	40.6	40.9	41.3	41.6	41.9	42.3	42.6	42.9	43.3		
35.0	40.6	41.0	41.3	41.6	42.0	42.3	42.7	43.0	43.4	43.7	44.0	44.4	44.7		
36.0	42.0	42.3	42.7	43.0	43.4	43.7	44.1	44.4	44.8	45.1	45.5	45.9	46.2		
37.0	43.3	43.7	44.0	44.4	44.8	45.1	45.5	45.9	46.2	46.6	47.0	47.3	47.7		
38.0	44.7	45.0	45.4	45.8	46.2	46.5	46.9	47.3	47.7	48.1	48.4	48.8	49.2		
39.0	46.0	46.4	46.8	47.2	47.6	48.0	48.3	48.7	49.1	49.5	49.9	50.3	50.7		
40.0	47.4	47.8	48.2	48.6	49.0	49.4	49.8	50.2	50.6	51.0	51.4	51.8	52.2		
41.0	48.8	49.2	49.6	50.0	50.4	50.8	51.2	51.6	52.0	52.5	52.9	53.3	53.7		
42.0	50.1	50.6	51.0	51.4	51.8	52.2	52.7	53.1	53.5	53.9	54.4	54.8	55.2		
43.0	51.5	52.0	52.4	52.8	53.2	53.7	54.1	54.5	55.0	55.4	55.9	56.3	56.8		
44.0	52.9	53.4	53.8	54.2	54.7	55.1	55.6	56.0	56.5	56.9	57.4	57.8	58.3		
45.0	54.3	54.8	55.2	55.7	56.1	56.6	57.0	57.5	58.0	58.4	58.9	59.4	59.8		
46.0	55.7	56.2	56.6	57.1	57.6	58.0	58.5	59.0	59.4	59.9	60.4	60.9	61.4		
47.0	57.1	57.6	58.0	58.5	59.0	59.5	60.0	60.5	60.9	61.4	61.9	62.4	62.9		
48.0	58.5	59.0	59.5	60.0	60.5	60.9	61.4	61.9	62.4	62.9	63.4	63.9	64.4		
49.0	59.9	60.4	60.9	61.4	61.9	62.4	62.9	63.4	63.9	64.5	65.0	65.5	66.0		
50.0	61.3	61.8	62.3	62.9	63.4	63.9	64.4	64.9	65.5	66.0	66.5	67.0	67.6		
51.0	62.8	63.3	63.8	64.3	64.8	65.4	65.9	66.4	67.0	67.5	68.0	68.6	69.1		
52.0	64.2	64.7	65.2	65.8	66.3	66.9	67.4	67.9	68.5	69.0	69.6	—	—		
53.0	65.6	66.1	66.7	67.2	67.8	68.3	68.9	69.4	70.0	—	—	—	—		
54.0	67.0	67.6	68.1	68.7	69.3	69.8	—	—	—	—	—	—	—		
55.0	68.5	69.0	69.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		

续表 F

$\begin{array}{c} \nu_a \\ f_{cu}^c \\ R_a \end{array}$	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
15.0	17.0	17.1	17.2	17.4	17.5	17.6	17.8	17.9	18.0	18.2	18.3	18.4	18.6
16.0	18.3	18.4	18.5	18.7	18.8	19.0	19.1	19.3	19.4	19.6	19.7	19.9	20.0
17.0	19.6	19.7	19.9	20.1	20.2	20.4	20.5	20.7	20.8	21.0	21.2	21.3	21.5
18.0	20.9	21.1	21.3	21.4	21.6	21.8	21.9	22.1	22.3	22.4	22.6	22.8	22.9
19.0	22.3	22.4	22.6	22.8	23.0	23.2	23.3	23.5	23.7	23.9	24.1	24.2	24.4
20.0	23.6	23.8	24.0	24.2	24.4	24.6	24.8	24.9	25.1	25.3	25.5	25.7	25.9
21.0	25.0	25.2	25.4	25.6	25.8	26.0	26.2	26.4	26.6	26.8	27.0	27.2	27.4
22.0	26.4	26.6	26.8	27.0	27.2	27.4	27.6	27.8	28.1	28.3	28.5	28.7	28.9
23.0	27.8	28.0	28.2	28.4	28.6	28.9	29.1	29.3	29.5	29.8	30.0	30.2	30.4
24.0	29.2	29.4	29.6	29.9	30.1	30.3	30.6	30.8	31.0	31.3	31.5	31.7	32.0
25.0	30.6	30.8	31.1	31.3	31.5	31.8	32.0	32.3	32.5	32.8	33.0	33.3	33.5
26.0	32.0	32.2	32.5	32.8	33.0	33.3	33.5	33.8	34.0	34.3	34.6	34.8	35.1
27.0	33.4	33.7	33.9	34.2	34.5	34.7	35.0	35.3	35.6	35.8	36.1	36.4	36.6
28.0	34.9	35.1	35.4	35.7	36.0	36.2	36.5	36.8	37.1	37.4	37.6	37.9	38.2
29.0	36.3	36.6	36.9	37.2	37.4	37.7	38.0	38.3	38.6	38.9	39.2	39.5	39.8
30.0	37.7	38.0	38.3	38.6	38.9	39.2	39.5	39.8	40.2	40.5	40.8	41.1	41.4
31.0	39.2	39.5	39.8	40.1	40.4	40.8	41.1	41.4	41.7	42.0	42.3	42.7	43.0
32.0	40.7	41.0	41.3	41.6	42.0	42.3	42.6	42.9	43.3	43.6	43.9	44.2	44.6
33.0	42.1	42.5	42.8	43.1	43.5	43.8	44.1	44.5	44.8	45.2	45.5	45.9	46.2
34.0	43.6	44.0	44.3	44.6	45.0	45.3	45.7	46.0	46.4	46.7	47.1	47.5	47.8
35.0	45.1	45.5	45.8	46.2	46.5	46.9	47.2	47.6	48.0	48.3	48.7	49.1	49.4
36.0	46.6	47.0	47.3	47.7	48.1	48.4	48.8	49.2	49.6	49.9	50.3	50.7	51.1
37.0	48.1	48.5	48.8	49.2	49.6	50.0	50.4	50.8	51.2	51.5	51.9	52.3	52.7
38.0	49.6	50.0	50.4	50.8	51.2	51.6	52.0	52.4	52.8	53.2	53.6	54.0	54.4
39.0	51.1	51.5	51.9	52.3	52.7	53.1	53.5	53.9	54.4	54.8	55.2	55.6	56.0
40.0	52.6	53.0	53.5	53.9	54.3	54.7	55.1	55.6	56.0	56.4	56.8	57.3	57.7
41.0	54.1	54.6	55.0	55.4	55.9	56.3	56.7	57.2	57.6	58.0	58.5	58.9	59.4
42.0	55.7	56.1	56.6	57.0	57.4	57.9	58.3	58.8	59.2	59.7	60.1	60.6	61.0
43.0	57.2	57.7	58.1	58.6	59.0	59.5	59.9	60.4	60.9	61.3	61.8	62.2	62.7
44.0	58.7	59.2	59.7	60.1	60.6	61.1	61.5	62.0	62.5	63.0	63.4	63.9	64.4
45.0	60.3	60.8	61.2	61.7	62.2	62.7	63.2	63.6	64.1	64.6	65.1	65.6	66.1
46.0	61.8	62.3	62.8	63.3	63.8	64.3	64.8	65.3	65.8	66.3	66.8	67.3	67.8
47.0	63.4	63.9	64.4	64.9	65.4	65.9	66.4	66.9	67.4	67.9	68.5	69.0	69.5
48.0	65.0	65.5	66.0	66.5	67.0	67.5	68.0	68.6	69.1	69.6	—	—	—
49.0	66.5	67.0	67.6	68.1	68.6	69.2	69.7	—	—	—	—	—	—
50.0	68.1	68.6	69.2	69.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—
51.0	69.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
52.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
53.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
54.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
55.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注：1 表内未列数值可采用内插法求得，精确至 0.1MPa；

2 表中 ν_a 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}^c 也可按本规程式（6.2.1）计算。

附录 G 建立专用测强曲线或地区测强曲线的基本要求

G.0.1 建立专用测强曲线或地区测强曲线时，采用的仪器设备应符合下列规定：

- 1 采用中型回弹仪，并应符合本规程第 3.1 节的规定；
- 2 采用混凝土超声波检测仪，并应符合本规程第 4.1 节的规定；
- 3 选用的换能器应符合本规程第 4.2 节的规定。

G.0.2 建立专用测强曲线时，混凝土试件应采用与被检测混凝土相同的原材料和成型养护工艺及强度等级。

G.0.3 建立地区测强曲线时，混凝土采用的水泥、砂石、外加剂、掺合料、拌合用水应符合国家对相关产品的质量规定。

G.0.4 建立地区测强曲线时，应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 C15、C20、C30、C40、C50、C60 的标准试件。

G.0.5 试件准备应符合下列规定：

- 1 试模应符合现行行业标准《混凝土试模》JG 237 的有关规定；
- 2 每一混凝土强度等级的试件，应采用同一盘或同一车混凝土中取出均匀装模振动成型，边长为 150mm×150mm×150mm 的立方体试件；
- 3 试件拆模后应浇水养护 7d，然后按“品”字形堆放在不受日晒雨淋处自然养护；
- 4 试件的测试龄期宜分为 14d、28d、60d、90d、180d 和 365d；
- 5 对同一强度等级的混凝土，应一次成型完成；
- 6 建立专用测强曲线和地区测强曲线的混凝土试件制作最小数量和测试时间要求应符合表 G.0.5 规定，其中建立专用测强曲线试件应按实际使用强度等级制作。

表 G.0.5 混凝土试件制作最小数量和测试时间要求

强度等级	龄期						合计
	14d	28d	60d	90d	180d	365d	
C15	30 个	30 个	30 个	30 个	30 个	30 个	180 个
C20	30 个	30 个	30 个	30 个	30 个	30 个	180 个
C30	30 个	30 个	30 个	30 个	30 个	30 个	180 个
C40	30 个	30 个	30 个	30 个	30 个	30 个	180 个
C50	30 个	30 个	30 个	30 个	30 个	30 个	180 个
C60	30 个	30 个	30 个	30 个	30 个	30 个	180 个

G.0.6 试件的测试应按下列步骤进行：

- 1 整理试件。将被测试件四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 标注测点。在试件测试面上标示超声测点（图 G.0.6），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；

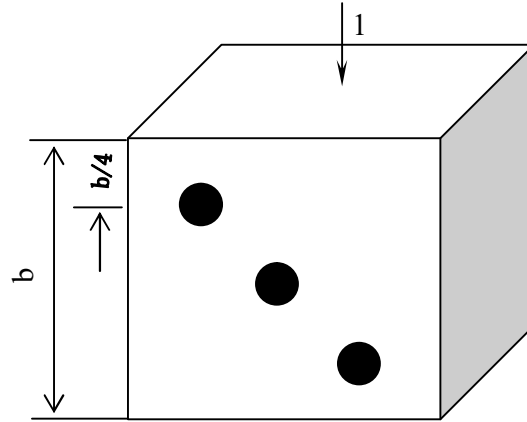


图 G.0.6 声时测量测点布置示意图

1—浇筑面

3 测量试件的超声测距 (l)。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 (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 计算试件混凝土中声速代表值。取 3 个测点混凝土中声速代表值的平均值作为试件的混凝土中声速代表值，按下式计算：

$$v = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{l_i}{t_i - t_0} \quad (\text{G.0.6})$$

式中： v —— 试件混凝土中声速代表值 (km/s)，精确至 0.01 km/s ；

l_i —— 第 i 个测点超声测距 (mm)，精确至 1 mm ；

t_i —— 第 i 个测点的声时读数 (μs)，精确至 $0.1 \mu\text{s}$ ；

t_0 —— 声时初读数 (μs)。

6 测量回弹代表值。先将试件超声测试面的耦合剂擦拭干净，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 $60 \text{ kN} \sim 80 \text{ kN}$ 并保持压力。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 5 点回弹值，精确至 1。剔除 1 个最大值和 1 个最小值，取余下 8 个有效回弹值的平均值作为试件的回弹代表值 (R)，计算精确至 0.1。

7 试件抗压强度试验。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《混凝土物理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。计算试件抗压强度实测值，精确至 0.1MPa。

G.0.7 测强曲线计算应符合下列规定：

1 应将各试件测试所得的混凝土中声速代表值（ v ）、回弹代表值（ R ）和试件抗压强度实测值汇总；

2 测强曲线宜采用下式计算：

$$f_{cu}^c = av^b R^c \quad (G.0.7-1)$$

式中： a —— 常数项；

b 、 c —— 回归系数；

f_{cu}^c —— 试件混凝土抗压强度换算值（MPa）。

3 测强曲线的平均相对误差（ δ ）、相对标准差（ e_r ）应按下列公式计算：

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{f_{cu,i}^c}{f_{cu,i}^0} - 1 \right| \times 100\% \quad (G.0.7-2)$$

$$e_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{cu,i}^c}{f_{cu,i}^0} - 1 \right)^2} \times 100\% \quad (G.0.7-3)$$

式中： δ —— 平均相对误差（%），精确至 0.1%；

e_r —— 相对标准差（%），精确至 0.1%；

$f_{cu,i}^c$ —— 第 i 个立方体试件按式（G.0.7-1）计算的混凝土抗压强度换算值（MPa），精确至 0.1MPa；

$f_{cu,i}^0$ —— 第 i 个立方体试件混凝土抗压强度实测值（MPa），精确至 0.1MPa；

n —— 制定回归方程式的试件数。

G.0.8 回归方程式的误差若符合本规程第 6.3.2 条的要求，则经有关部门批准后，可作为专用测强曲线或地区测强曲线。

G.0.9 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，不得外延。

附录 H 混凝土抗压强度记录表

表 H 混凝土抗压强度记录表

工程名称_____构件名称_____

设 备: 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		1	2	3		
	1											
	2											
	3											
	4											
	5											
	6											
	7											
	8											
	9											
	10											

复核: _____ 计算: _____ 检测: _____ 测试日期: _____ 年 月 日

附录 J 混凝土抗压强度计算表

表 J 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										
强度修正量 Δ_{tot} (MPa)											
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		全国，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，采用“可”

2 条文中指明应按其他有关标准执行时的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081

《回弹仪》GB/T 9138

《钻芯法检测混凝土强度技术规程》JGJ/T 384

《混凝土试模》JG 237

《混凝土超声波检测仪》JG/T 5004

《回弹仪检定规程》JJG 817

中国工程建设标准化协会标准

超声回弹综合法 检测混凝土抗压强度技术规程

T/CECS 02-2020

条文说明

目 次

1 总则	39
3 回弹仪	40
3.1 一般规定	40
3.2 检定和校准	41
3.3 维护保养	42
4 混凝土超声波检测仪	43
4.1 一般规定	43
4.2 换能器	44
4.3 检定、校准和保养	44
5 回弹值和声速值的测量及计算	45
5.1 一般规定	45
5.2 回弹测试及回弹值计算	45
5.3 超声测试及声速值计算	46
6 混凝土抗压强度推定	47
6.1 一般规定	47
6.2 全国测强曲线	47
6.3 专用测强曲线或地区测强曲线	48
附录 A 混凝土超声波检测仪自校准方法	50
附录 D 超声角测、平测和声速计算方法	51
附录 F 混凝土抗压强度换算表	53
附录 G 建立专用测强曲线或地区测强曲线的基本要求	54

1 总 则

1.0.1 超声回弹综合法是二十世纪六十年代研究开发出来的一种无损检测方法。该方法采用回弹仪和混凝土超声检测仪，在混凝土同一测区，测量反映混凝土表面硬度的回弹值，并测量超声波穿透混凝土内部的声速值，然后用已建立起来的测强公式综合推定测区混凝土抗压强度，并进而推定构件混凝土抗压强度，这样能有效减少龄期和含水率的影响，综合回弹和超声两者的优点，能比较全面地反映构件混凝土的实际质量。

实践证明，与单一方法比较，超声回弹综合法具备测试精度高、适用范围广的特点，受到工程界的广泛认可，已在我国建工、市政、铁路、公路系统广泛应用。本规程规定了超声回弹综合法检测混凝土抗压强度的术语和符号、回弹仪和混凝土超声波检测仪技术要求、检测技术、回弹值和声速值的测量及计算、混凝土抗压强度推定等等，将有效规范超声回弹综合法检测混凝土抗压强度技术的应用，做到技术先进、安全可靠、经济合理、方便使用。

1.0.2 本条所指的普通混凝土系主要由水泥、砂石、外加剂、掺合料和水配制的质量密度为 $1950\text{kg/m}^3 \sim 2500\text{kg/m}^3$ 的混凝土。

本规程不适用于下列情况的混凝土：混凝土在硬化期间遭受冻害，或遭受化学侵蚀、火灾、高温损伤等。这些情况下混凝土表面与内部质量有较大差异，不符合超声回弹综合法要求混凝土性能表里基本一致的检测前提。

1.0.3 凡本规程涉及的其他有关方面工作，如钻芯取样，高空、深坑作业，施工现场测试，现场用水用电，劳动保护等，均应符合国家现行有关标准的规定。

3 回弹仪

3.1 一般规定

3.1.1 随着光电子技术在回弹仪上的应用，国内数字式回弹仪的技术水平有了很大提高，技术上已经成熟，我国一些回弹仪企业生产的数字回弹仪性能已相当稳定。为了推广和应用先进技术，提高工作效率，减少人为产生的读数、记录、计算等过程出现的差错，本条规定可使用数字式回弹仪，也可使用传统的指针直读式回弹仪。

3.1.2 采用合格的回弹仪，是保证检测结果准确的前提，因此要求在回弹仪的明显位置标明名称、型号、制造商（或商标）、出厂编号、出厂日期等，是十分有必要的。

3.1.3 回弹仪的质量及测试性能直接影响混凝土抗压强度推定结果的准确性。

回弹仪的标准状态是统一仪器性能的基础，是使回弹法广泛应用于现场的关键所在。只有采用质量统一、性能一致的回弹仪，才能保证测试结果的可靠性，并能在同一水平上进行比较。在此基础上，提出了下列回弹仪标准状态的各项具体指标：

1 水平弹击时，弹击锤脱钩的瞬间，回弹仪的标称能量 E ，即弹击拉簧恢复原始状态所作的功为：

$$E = \frac{1}{2}KL^2 = \frac{1}{2} \times 784.532 \times 0.075^2 = 2.207J$$

式中： K ——弹击拉簧的刚度（N/m）；

L ——弹击拉簧工作时的拉伸长度（m）。

2 弹击锤与弹击杆碰撞瞬间，弹击拉簧应处于自由状态，此时弹击锤起跳点应位于刻度尺上的“0”处。要满足这两个要求，必须使弹击拉簧的工作长度为 0.0615m；弹击拉簧的冲击长度（即拉伸长度）为 0.075m。此时，弹击锤应相应于刻度尺上的“100”处脱钩，也即在“0”处起跳。

试验表明，当弹击拉簧的工作长度、拉伸长度及弹击锤的起跳点不符合以上规定，即不符合回弹仪工作的标准状态时，则各仪器在同一试件上测得的回弹值的极差高达 7.82 分度值，经调为标准状态后，极差为 1.72 分度值。

3 检验回弹仪的率定值是否符合 80 ± 2 的作用是：检验回弹仪的标准能量是否为 2.207J；回弹仪的测试性能是否稳定；机芯的滑动部分是否有污垢等。

4 现有绝大多数数字式回弹仪都是在传统机械构造和标准技术参数的基础上

实现回弹值的数字化采样的，即现有数字式回弹仪所得到的回弹值采样系统都是把回弹仪的指针示值实现数字化采样。也只有这种形式的数字回弹仪才符合现行回弹法技术规程的使用要求。

保留人工直读示值系统能使数字回弹仪的操作者在实际检测过程中随时核对数字回弹仪所显示的采样值是否与指针示值相同，及时发现仪器采样系统的故障。如数字回弹仪不保留人工直读示值系统，检测单位或操作人员将难以及时发现和判断数字回弹仪采样系统的故障，极易造成检测结果错误，严重时将影响混凝土抗压强度的推定结果。

因此，规定数字式回弹仪应带有指针直读系统，这是保证数字式回弹仪的数字显示与指针显示一致性的基本要求。

3.1.4 超声回弹综合法采用的回弹仪系由机械零部件组成，环境温度低于 -4°C 或高于 40°C 时，对回弹仪的性能有较大影响，并带来测试偏差，故本条规定了回弹仪使用时的环境温度。

3.2 检定和校准

3.2.1 检定回弹仪的单位应按照现行国家计量检定规程《回弹仪》JJG 817 进行检定或校准。开展检定工作要备有回弹仪检定器、拉簧刚度测量仪等设备。本条规定了回弹仪应进行检定或校准的五种情况。目前，国内外回弹仪生产不能保证每台新回弹仪均为标准状态，特别是一些国外进口仪器未按我国有关标准生产及检定，因此新回弹仪在使用前必须检定或校准。

3.2.2 本条给出了回弹仪的率定要求，是为了保证在使用过程中及时发现和纠正回弹仪的非标准状态。

3.2.4 当钢砧上的率定值超出 80 ± 2 的范围时，不允许用混凝土试件上的回弹值予以修正，也不允许旋转调零螺丝人为地使其达到 80 ± 2 值。试验表明上述方法不符合回弹仪测试性能，并破坏了零点起跳亦即使回弹仪处于非标准状态。此时，可按本规程第 3.3 节的要求进行常规维护保养。若保养后仍不合格，则需要检定或校准。

3.2.5 回弹仪率定试验所采用的钢砧，表面状态会随着弹击次数的增加而变化，钢

毡材料、制作、重量、直径、硬度、表面状态等应符合现行国家标准《回弹仪》GB/T 9138 的规定。

3.3 维护保养

3.3.2 本条规定了回弹仪保养的具体要求。进行常规保养时，必须先使弹击锤脱钩后再取出机芯，否则会使弹击杆突然伸出造成伤害。取机芯时要将标尺向上轻轻抽出，以免造成指针片折断，卸下弹击杆，取出缓冲压簧，并取出弹击锤、弹击拉簧和拉簧座。清洗机芯各零部件，并应重点清洗中心导杆、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。不能在指针轴上抹油，否则，使用中由于指针轴的污垢，将使指针摩擦力变化，直接影响检测结果。清理机壳内壁，卸下刻度尺，并检查指针，摩擦力应为 $0.5\text{N}\sim 0.8\text{N}$ 。数字式回弹仪结构和原理较复杂，生产厂商又提供了使用和维护手册，应按相关要求进行维护和保养。

3.3.3 回弹仪每次使用完毕后，应及时清除表面污垢。不用时，应将弹击杆压入仪器内，必须经弹击后方可按下按钮锁住机芯，如果未经弹击而锁住机芯，将使弹击拉簧在不工作时仍处于受拉状态，极易因疲劳而损坏。存放时回弹仪应平放在干燥阴凉处，如存放地点潮湿将会使仪器锈蚀。数字式回弹仪长期不用时，需要取出电池。

4 混凝土超声波检测仪

4.1 一般规定

4.1.2 为了确保测试数据的可靠性，无论使用哪种型号的混凝土超声波检测仪，均需要具有产品合格证、检定或校准证书。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 的要求进行检定或校准。

4.1.3 原规程中所采用的混凝土超声波检测仪为模拟式和数字式，但目前国内几乎均使用数字式，为鼓励技术进步，本规程规定宜采用数字式混凝土超声波检测仪，且应满足相关功能要求。

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

数字式混凝土超声波检测仪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。

2 混凝土抗压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。

3 具备手动游标测读和自动测读两种声参量测读功能，是为了能对正常和畸变的接收波形均能可靠地进行声参量测读；当接收波形较好时，利用自动测读功能可以提升检测效率；当接收波形畸变、且无法自动测读时，利用手动游标测读功能也能准确测读声参量；自动测读时，仪器可以自动标记测读位置，可避免对声参量的误判和错判。

4.1.4 本条对数字式超声波检测仪的性能指标作出了规定。

1 参考现行行业标准《混凝土超声波检测仪》JG/T 5004 对声时测量范围的要求，综合考虑声波的穿透距离，规定此声时测量的最小范围，符合实际应用情况；声时分辨力是声时测量精度的决定因素，在测量小尺寸构件（或试件）时，为保证声时测量精度，混凝土超声波检测仪应满足这个要求；对实测空气声速相对测量误差的要求，既保证了仪器校准的需要，同时也能保证仪器工作正常；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。

2 仪器的幅度测量范围越大，表征仪器接收若信号的能力越强，综合考虑应用需要和仪器现发展水平，规定了幅度测量指标。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试。混凝土超声波检测仪应具有最小分度为 1dB 的衰减器。

3 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频率相适应。检测混凝土抗压强度所采用的换能器一般为 50kHz~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。

4 对仪器不能单纯追求接收放大器的增益，应同时考虑仪器的噪声水平，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。

4.1.5 规定了仪器使用的温湿度要求是综合考虑到现场需要和当前仪器水平，混凝土超声波检测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。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，仪器的技术指标仍应能满足规定的要求。

4.2 换能器

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。当换能器标称频率为 50kHz~100kHz 时，所测声速偏差较小，所以本规程对换能器的标称频率作了限制，目前测强所用换能器的标称频率一般为 50kHz。

4.2.2 换能器的实际频率尽量与标称频率保持一致。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 检定、校准和保养

4.3.3 为确保仪器处于正常状态，需要定期对超声仪进行保养。仪器工作时要注意防尘、防振；仪器需要存放在阴凉、干燥的环境中；对较长时间不用的仪器，还需要定期通电排除潮气。

5 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 1~6 款内容系检测构件混凝土抗压强度时宜具有的必要资料,是为了对被检测的构件有全面、系统的了解。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。

5.1.3 按批抽样检测时,符合全部 1~4 项条件的构件才可作为同批构件。

5.1.4 本条规定了在被测构件上布置测区的具体要求。

测区布置时,要选在构件两个相对的可测面上,但不强调一个测区要在构件的两相对检测面上布置基本对称的检测面。可以一个测区布置在构件的一个检测面上。

测试面应为混凝土原浆面,已经粉刷的需将粉刷层除净,注意不可误将砂浆粉刷层当作混凝土原浆面进行检测。

对于薄壁小型构件,如果约束力不够回弹时产生颤动,会造成回弹能量损失,使检测结果偏低。因此需要加以可靠支撑使之有足够的约束力方可检测。

5.1.5 记录测区位置和外观质量(例如有无裂缝、孔洞、蜂窝麻面、漏浆等情况),目的是以备推定和分析构件混凝土抗压强度时参考。

5.1.6 本条对超声回弹综合法测试顺序进行了规定,即先回弹后超声,不可颠倒。

5.1.7 本条对测区混凝土抗压强度计算进行了规定,即应使用同一测区内的回弹值和声速值,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 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

轴线方向应始终与构件的测试面相垂直，缓慢施压、不能冲击，否则回弹值读数将不准确。

5.2.3、5.2.4 从 10 个回弹值中剔除 1 个最大值和 1 个最小值，取余下 8 个回弹值的平均值作为测区回弹代表值（ R ）。此种计算方法与单一回弹法有所不同，这是考虑到超声回弹综合法检测混凝土抗压强度综合运用了回弹与超声两种方法，且本次修订时也经过大量数据分析，发现误差较小，故从原来的 16 个回弹值简化为 10 个回弹值。

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筑的表面或底面，此时对所测得的回弹值需按不同测试角度或不同浇筑面进行修正。

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。这种先后修正的顺序不能颠倒，更不允许分别修正后的值直接与原始回弹值相加减。

5.3 超声测试及声速值计算

5.3.2 换能器辐射面与混凝土测试面耦合，能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，每一测点的耦合层达到最薄，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。

同时，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。

5.3.3、5.3.4 本条规定了对测测区混凝土中声速代表值（ v_d ）的计算和修正方法。测区混凝土中声速代表值是取测区内 3 个测点混凝土声速平均值。当超声测点在浇筑方向的侧面对测时，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。

6 混凝土抗压强度推定

6.1 一般规定

6.1.1 本条对本规程规定的混凝土抗压强度推定方法适用的普通混凝土进行了详细的规定。其中,混凝土中各种材料需要执行的国家现行标准包括:《通用硅酸盐水泥》GB 175、《建设用砂》GB/T 14684、《建设用卵石、碎石》GB/T 14685、《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52、《混凝土用水标准》JGJ 63 等。

6.1.2 由于我国幅员辽阔,气候悬殊,混凝土品种繁多,工程及材料分散,施工条件和水平不一,且生产工艺又不断改进,欲在全国城乡建设工程中推广采用超声回弹综合法,除统一仪器标准、测试技术、数据处理、强度推定方法外,还应尽量提高测强公式的精度,发挥各地区技术的作用。所建立的全国测强曲线很难适应全国各地的情况,各地除可使用全国测强曲线外,也应因地制宜结合具体条件和工程对象,制定和采用专用测强曲线或地区测强曲线。

6.1.3 使用超声回弹综合法检测检测混凝土抗压强度的地区和部门,建议制定专用测强曲线或地区测强曲线,这两类曲线在经审定和批准后方可实施,并按专用测强曲线、地区测强曲线、全国测强曲线的次序选用。为提高混凝土抗压强度换算值的准确性和可靠性,规定先采用专用测强曲线或地区测强曲线进行计算。

6.2 全国测强曲线

6.2.1、6.2.2 当无专用测强曲线或地区测强曲线时,通过验证试验后可按本规程附录 F 进行抗压强度换算值的计算。

本规程规定的全国测强曲线收集了北京、山东、上海、四川、云南、广西六个地区 17713 组测试数据,其中碎石数据 16887 组、卵石数据 826 组。数据剔除 26 组人为因素错误数据,由于卵石的使用量较少所以其余 17687 组数据均参与回归计算。采用初步回归计算后剔除大于 2 倍标准差 34%数据后进行二次回归的方式进行计算。本规程规定的全国测强曲线相关指标见下表:

剔除前 数量	剔除后 数量	回 归 系 数			相关系数 (r)	相对误差 (%)	平均相对误差 (%)
		a	b	c			
17687	16369	0.0286	1.999	1.155	0.92	15.2	12.35

6.3 专用测强曲线或地区测强曲线

6.3.2 凡有条件的地区，可采用本地区常用的有代表性的材料和成型养护工艺，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测强曲线。

6.3.3 专用测强曲线或地区测强曲线制定并批准实施使用后，应注意适用范围只能在制定曲线时的试件条件范围内，例如龄期、原材料、外加剂、强度区间等等，不允许超出适用范围。这些测强曲线均为经验公式制定，因此绝不能仅仅根据测强公式而任意外推，以免得出错误的计算结果。

6.4 混凝土抗压强度推定

6.4.1 构件的测区混凝土抗压强度换算值 (f_{cu}^c)，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。

6.4.2~6.4.6 当现场检测条件与测强曲线的适用条件有较大差异时，可在构件上钻取混凝土芯样或同条件立方体试件进行修正。修正的方法有修正系数法和修正量法，本规程采用修正量法。

在确定修正量时，试件数量不应少于 4 个。作为确定修正量的试件取 3 个太少，但由于取芯工作量大，且不宜在构件上钻取过多数量的芯样。因此，综合考虑修正量估计的准确度和取芯工作量，规定取样数量不应少于 4 个，然后按式 (6.4.6-1) ~ 式 (6.4.6-5) 计算修正量。

6.4.7 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抗压强度的验收与评定，应按现行国家标准执行。

当构件的测区抗压强度换算值中出现小于 10.0MPa 的值时，构件混凝土抗压强度推定值 ($f_{cu,c}$) 应取小于 10.0MPa。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构件各测区中最小的测区混凝土抗压强度换算值。

构件混凝土抗压强度的平均值和标准差是用各测区的混凝土抗压强度换算值来计算。当按批推定混凝土抗压强度时，如测区混凝土抗压强度标准差超过本规程第 6.4.8 条规定，说明构件的混凝土制作条件不尽相同，混凝土抗压强度质量均匀性差，不能按批推定混凝土抗压强度。

6.4.8 对按批量检测的构件，当测区混凝土抗压强度标准差大于规定的范围时，说明已有某些偶然因素起作用，例如构件不是同一强度等级，龄期差异较大等，构件的混凝土质量不均匀，因此不能按批进行强度推定，需要全部按单个构件进行强度推定。

附录 A 混凝土超声波检测仪自校准方法

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。因此，采用测量空气中声速的方法检验仪器的性能，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。

声速测试时，取平面换能器一对，与混凝土超声波检测仪连接，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 100mm, 125mm, 150mm, 175mm, 200mm, 225mm, 250mm, 275mm, 300mm.....，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)。同时测量测试时空气的温度 (T_k)，精确至 0.5℃。

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，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 (Δ) 应不超过 $\pm 0.5\%$ 。如果出现空气中声速计算值 (v_k) 与空气中声速实测值 (v°) 之间的相对误差 (Δ) 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。

在声时测量过程中有一个声时初读数 (t_0)，而声时初读数 (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、电缆线进行声时初读数 (t_0) 测量。

附录 D 超声角测、平测和声速计算方法

D.1 角测

D.1.1 有时被测构件旁边存在墙体、管道等障碍物，只有两个相邻测试面可供检测，此时仍然可以进行超声回弹综合法测强，即在两个相邻测试面的对应位置布置超声测点，采用角测法测量混凝土中的声速。

D.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。当换能器中心与构件边缘的距离 l_{li} 、 l_{2i} 大于 300mm 时，可减弱换能器直径的影响。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_{li} 与 l_{2i} 相等，但二者相差不宜大于 1.5 倍。

D.1.3、D.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_{li} 、 l_{2i} ，按几何学原理计算超声测距 l_i ；用此测距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，可不作修正。

D.2 平测

D.2.1 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），可采用平测法检测混凝土抗压强度。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）不建议直接采用平测法，可沿构件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。

D.2.2 由于构件内常分布有网状钢筋，为了避开钢筋的影响，布置超声测点时需要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，一般取 $40^\circ \sim 50^\circ$ 。

如图 D.2.2 所示布置换能器，以两个换能器内边距逐点测读相应的声时值。用回归分析方法求得直线方程中的斜率 (c) 即为平测测区混凝土中声速代表值 (v_p)。但需要注意的是：此时，不能将平测测区混凝土中声速代表值 (v_p) 直接代入超声～

回弹公式计算混凝土抗压强度值。

D.2.3、D.2.4 采用平测法检测的工程，应具备最少一个或者多个有代表性且具有对测以及平测对比条件的构件（如剪力墙门洞附近），在构件上分别采用对测法得到对测测区混凝土中声速代表值（ v_d ）以及采用平测法得到平测测区混凝土中声速代表值（ v_p ），则可求出平测声速修正系数（ λ ），并对平测测区混凝土中声速代表值（ v_p ）进行修正，然后进行混凝土抗压强度计算。模拟试验和在工程检测中所做的平测与对测比较表明，平测测区混凝土中声速代表值（ v_p ）与对测测区混凝土中声速代表值（ v_d ）之间存在差异，且差异并非固定值。平测测区混凝土中声速代表值（ v_p ）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 $v_d/v_p = 1.00 \sim 1.03$ ；当混凝土测试表面粗糙、疏松或存在微裂缝，则平测与对测的声速值的差异较大，一般 $v_d/v_p = 1.04 \sim 1.15$ 。

附录 F 混凝土抗压强度换算表

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。若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，测区的抗压强度应表述为“<10.0MPa”或“>70.0MPa”。

附录 G 建立专用测强曲线或地区测强曲线的基本要求

由于各地区或某一专项工程的气候条件、混凝土原材料、施工工艺及技术水平等存在差异，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，建立专用测强曲线或地区测强曲线，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，从而提高超声回弹综合法检测混凝土抗压强度的准确性和可靠性。因此，建立专用测强曲线或地区测强曲线时，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，可得到混凝土抗压强度曲线。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。

除式（G.0.7-1）推荐的回归方程形式外，如有其他更好的形式，只要满足第 6.3.2 条的要求都可以采用。