

# 混凝土结构



# 无损检测与故障处理 及修复加固

## 技术手册

徐邦学 主编



当代中国音像出版社

# 混凝土结构无损检测与故障 处理及修复加固技术手册

主编 徐邦学

中

卷

---

当代中国音像出版社

## 第四章 超声法检测混凝土强度

### 第一节 概 述

#### 一、超声法检测混凝土强度的依据

混凝土材料是弹粘塑性的复合体,各组分的比例变化、制造工艺条件不同,以及硬化混凝土结构随机性等,十分错综复杂地影响了凝聚体的性质,采用一种普通的数学模型,严密定量地描述结构混凝土强度是比较困难的。工程上,为了解燃眉之急,国内外专业人员都十分注重检测和评价结构混凝土的性能,超声波检测结构混凝土的强度便是内容之一。

超声波检测混凝土的强度基本的依据是超声波传播速度与混凝土的弹性性质的密切关系。超声声速与固体介质的弹性模量之间的数学关系在第三章中已列出,在实际检测中,超声声速又通过混凝土弹性模量与其力学强度的内在联系,与混凝土抗压强度建立相关关系并藉以推定混凝土的强度。

超声测强以混凝土立方试块 28 天龄期抗压强度为基准,大体是把这种混凝土当做弹性体看待,而原材料品种规格、配合比、施工工艺等影响着超声检测参数,所以采用预先校正方法建立超声测强的经验公式。国内外采用统计方法建立专用曲线或数学表达式有如下几种:

前苏联、捷克和前民主德国采用:

$$f_{cu} = Q_v^4$$

荷兰、罗马尼亚采用:

$$f_{cu}^e = Ae^{Bv}$$

法国采用  $f_{cu}^e = \frac{E_d^2}{A^2}$ , 该公式与前苏联采用的相似 ( $v^2 \propto E_d$ )。波兰采用  $f_{cu}^e = Av^2 + Bv + C$ 。

在国内,  $v \sim f_{cu}^e$  相关曲线基本上采用:

$f_{cu}^e = Av^B$  和  $f_{cu}^e = Ae^{Bv}$  两种非线性的数学表达式。

式中  $E_d^2$ ——动力弹性模量;

$Q、A、B、C$ ——经验系数。

可见,国内外实际应用的经验公式,采用超声声速参量便是突出了超声弹性波特性与混凝土弹性模量及强度的相关性。

## 二、超声法检测混凝土强度的技术途径

混凝土超声测强曲线因原材料的品种规格和含量、配合比和工艺条件的不同而有不同的试验结果,因此,建立按常用的原材料品种规格、不同的技术条件和测强范围进行试验,大量的试验数据经适当的数学拟合和效果分析,建立超声声速  $v_t$  与混凝土抗压强度的相关关系,取参量的相关性好、统计误差小的曲线作为基准校正曲线;并经验证试验,测强误差小的经验公式作为超声测强之用。

超声测强有专用校正曲线、地区曲线和统一曲线。校正曲线和地区曲线在试验设计中一般均考虑了影响因素,而校正试验的技术条件与工程检测的技术条件基本相同,曲线的使用,一般不要特殊的修正,因此,建议优先使用。在没有专用或地区测强曲线的情况下,如果应用统一的测强曲线,则需验证,按不同的技术条件提出修正系数,使推算结构混凝土的精度控制在许可的范围内。这些修正系数也可根据各种不同的影响因素分项建立,以扩大适用范围。

由于超声法测强精度受许多因素的影响,测强曲线的适应范围受到较大限制。为了消除影响,扩大测强曲线的适应性,除了采用修正系数法外还可采用水泥净浆声速换算法和水泥砂浆声速换算法,其基本方法是把混凝土声速换算成砂浆或水泥净浆声速,再由较匀质的砂浆或水泥净浆声速与混凝土强度建立相关关系,以便消除骨料的影响,扩大所建立的相关关系的适用范围,并提高测强精度。

## 三、混凝土超声法测强的特点与技术稳定性

### 1. 超声法的特点

- (1) 检测过程无损于材料、结构的组织和使用性能;
- (2) 直接在构筑物上检测试验并推定其实际的强度;
- (3) 重复或复核检测方便,重复性良好;
- (4) 超声法具有检测混凝土质地均匀性的功能,有利于测强测缺的结合,保证检测混凝土强度建立在无缺陷、均匀的基础上合理地评定混凝土的强度;
- (5) 超声法采用单一声速参数推定混凝土强度。当有关影响因素控制不严时,精度不如多因素综合法,但在某些无法测量回弹值及其他参数的结构或构件(如基桩等)中,超声法仍有其特殊的适应性。

### 2. 技术稳定性

混凝土超声测强技术稳定性是一个综合性的技术指标。为了保证技术稳定性,除继续深入开展技术完善和评价方法的研究之外,就广泛研究证实和工程检测的经验,归纳起来有如下方面需加以控制:

- (1) 理解超声仪器设备的工作原理,熟悉仪器设备的操作规程和使用方法;
- (2) 正确掌握超声声速测量技术和精度误差的分析;
- (3) 建立校正曲线务必精确,技术条件和状况尽可能与实际检测的接近;

(4) 从混凝土材质组分和组织构造上理解影响超声声速及测量的原因,并在实测中加以排除或作必要的修正;

(5) 研究和确定超声检测“坏值”(指混凝土缺陷的指标)区别处理方法,以保证在混凝土材质均匀基础上推定强度值。

## 第二节 超声法检测混凝土强度的主要影响因素

超声法检测混凝土强度,主要是通过测量在测距内超声传播的平均声速来推定混凝土的强度。可见,“测强”精度高低与超声声速读取值的准确与否是密切相关的,换句话说,正确运用超声声速推定混凝土强度和评价混凝土质量,从事检测工作的技术人员必须熟悉影响声速测量的因素,在检测中自觉地排除这些影响。

超声声速可能受到混凝土性能无关的某些因素的影响,且不可避免地要受到混凝土材料组分与结构状况差异的许多因素的影响。根据国内外科学研究和实际检测的经验总结,这些影响大致归纳如下诸方面:

### 一、横向尺寸效应

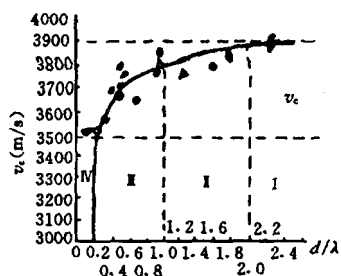


图 3-4-1 声速随试件横向尺寸的变化

关于试件横向尺寸的影响,在测量声速时必须注意。通常,纵波速度是指在无限大介质中测得,随着试件横向尺寸减小,纵波速度可能向杆、板的声速或表面波速度转变,即声速比无限大介质中纵波声速为小。

图 3-4-1 表示在不同横向尺寸的试件上测得声速的变化情况。

当横向最小尺寸  $d > 2\lambda$  ( $\lambda$  为波长) 时,传播速度与大块体中纵波速度值相当(图 3-4-1 中 I 区)。

当  $\lambda < d < 2\lambda$  时,可使传播速度降低 2.5—3% (见 II 区)。

当  $0.2\lambda < d < \lambda$  时,传播速度变化较大,约降低 6~7%,在这个区间(III 区)里测量时,估计强度的误差可能达 30~40%,这是不允许的。

IV 区为  $d < 0.2\lambda$  这是属于波在杆件中的传播。

Jones 等对不同测距、最小断面尺寸和探头固有频率的选择参见表 3-4-1。

表 3-4-1 不同测距最小断面尺寸和探头固有频率的选择

| 穿透长度<br>(mm) | 探头固有频率<br>(kHz) | 混凝土构件最小横向尺寸<br>(mm) |
|--------------|-----------------|---------------------|
| 100~700      | $\geq 60$       | 70                  |

续表

| 穿透长度<br>(mm) | 探头固有频率<br>(kHz) | 混凝土构件最小横向尺寸<br>(mm) |
|--------------|-----------------|---------------------|
| 200 ~ 1500   | ≥40             | 150                 |
| > 1500       | ≥20             | 300                 |

## 二、温度和湿度的影响

混凝土处于环境温度为 5℃—30℃ 情况下,因温度升高引起的速度减小值不大;当环境温度在 40℃—60℃ 范围内,脉冲速度值约降低 5%,这可能是由于混凝土内部的微裂缝增多所致。

温度在 0℃ 以下时,由于混凝土中的自由水结冰,使脉冲速度增加(自由水的  $v = 1.45\text{km/s}$ ,冰的  $v = 3.5\text{km/s}$ )

当混凝土测试时的温度处于表 3-4-2 所列的范围内时,可以允许修正;如果混凝土遭到受过冻融循环下的冻结,则不允许修正。

表 3-4-2

超声波传播速度的温度修正值

| 温度(℃) | 修正值(%) |       |
|-------|--------|-------|
|       | 存放在空气中 | 存放在水中 |
| +60   | +5     | +4    |
| +40   | +2     | +1.7  |
| +20   | 0      | 0     |
| 0     | -0.5   | -1    |
| < -4  | -1.5   | -7.5  |

混凝土的抗压强度随其含水率的增加而降低,而超声波传播速度  $v$  随孔隙被水填满而逐渐增高。饱水混凝土的含水率增高 4%,传播速度  $v$  相应增大 6%。速度的变化特性取决于混凝土的结构,随着混凝土孔隙率的增大,干混凝土中超声波传播速度的差异也增大。

在相同的力学强度下,水中养护的混凝土比空气中养护的混凝土具有更高的超声传播速度。水下养护混凝土的强度最大,其传播速度高达 4.60km/s;而相同强度但暴露在空气里养护的混凝土的传播速度约 4.10km/s。

湿度对超声波传播速度的影响可以解释为:

(1) 水中养护的混凝土具有较高的水化度并形成大量的水化产物,超声波传播速度对此产物的反映大于空气中硬化的混凝土;

(2) 水中养护的混凝土,水分渗透并填充了混凝土的孔隙,由于超声在水里传播速度为 1.45km/s,在空气中仅 0.34km/s,因此,水中养护的混凝土具有比在空气中养护的混

凝土大得多的超声波传播速度,甚至掩盖了随着混凝土强度增长而提高的声速的影响。

### 三、结构混凝土中钢筋的影响与修正

钢筋中超声传播速度比普通混凝土的高 1.2 倍—1.9 倍。因此测量钢筋混凝土的声速,在超声波通过的路径上存在钢筋,测读的“声时”可能是部分或全部通过钢筋的传播“声时”,使混凝土声速计算偏高,这在推算混凝土的实际强度时可能出现较大的偏差。

钢筋的影响分两种情况:一是钢筋配置的轴向垂直于超声传播方向;二是钢筋轴向平行于超声传播的方向。对第一种情况,在一般配筋的钢筋混凝土构件中,钢筋断面所占整个声通路径的比例较小,所以影响较小(对于高标号混凝土影响更小)。钢筋轴向平行超声传播的方向,在作超声“声时”测量时,可能影响较大,应设法加以避免或修正。钢筋轴向垂直和平行于超声传播方向的布置对超声声速的影响分述如下:

#### 1. 钢筋的轴线垂直于超声传播的方向

图 3-4-2 表示钢筋的轴线垂直于声通路。当超声波完全经过钢筋的每个直径时,仪器测量的超声脉冲传播时间  $t$  用下式表示:

式中  $L$ ——两探头间的距离;

$L_s$ ——钢筋直径的总和( $= \sum di$ );

$v_c$ 、 $v_s$ ——分别为混凝土、钢筋中的超声传播的速度。

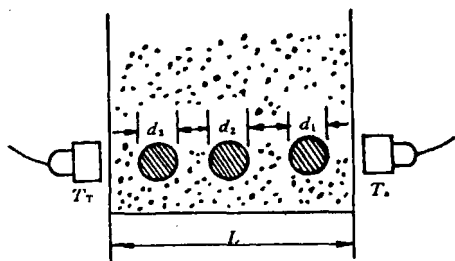


图 3-4-2 钢筋轴线垂直于超声波传播方向

用  $t = \frac{L}{v}$  代入上式  $v$ ——钢筋混凝土中实测的超声波传播速度):  $\frac{L}{v} = \frac{L - L_s}{v_c} + \frac{L_s}{v_s}$  则得

$$\frac{v_c}{v} = \frac{1 - \frac{L_s}{L}}{1 - \frac{L_s \cdot v}{L \cdot v_s}} \quad (4-1)$$

为了找出混凝土中实际的传播速度  $v_c$ , 需要对测得的速度  $v$  乘以某个系数, 这个系数取决于脉冲穿过钢筋所经的路程与总路程之比  $L_s/L$  及测得的速度, 以及测得的速度与钢筋中传播速度之比  $v/v_s$ 。此系数列于表 3-4-3, 实际上, 校正系数  $v_c/v$  稍大于表 3-4-3 中所列的值, 因为发射—接收的路径与钢筋的分布线不完全重合, 即实际通过钢筋的距离  $< L_s$ 。

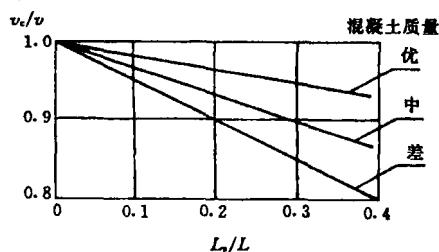


图 3-4-3 钢筋对超声脉冲速度的影响

修正系数还可以根据图 3-4-3 曲线查出, 对实测的传播速度  $v$  进行修正。例如  $L_s/L$  为 0.2, 并且认为混凝土质量是差的, 则混凝土中钢筋影响  $v_c/v$  的修正系数为 0.9, 这样, 测得的脉冲速度乘以 0.9 就得出素混凝土

的脉冲速度。

## 2. 钢筋轴线平行于超声传播方向

图 3-4-4 为超声传播与钢筋轴线平行,且探头靠近钢筋轴线的情况。超声波从发射探头 A 发出,先经 AB 在混凝土中传播,然后沿钢筋 BC 段传播,再经 CD 段在混凝土中传播而到达接收探头 D。

表 3-4-3 钢筋影响的修正值 (钢筋垂直于超声传播方向)

| $L_r/L$ | $v_c/v = \frac{\text{超声波在混凝土中的传播速度}}{\text{超声波在钢筋混凝土中实测的传播速度}}$ |                                    |                                   |
|---------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
|         | 质量差的混凝土<br>$v_c = 3000\text{m/s}$                               | 质量一般的混凝土<br>$v_c = 4000\text{m/s}$ | 质量好的混凝土<br>$v_c = 5000\text{m/s}$ |
| 1/12    | 0.96                                                            | 0.97                               | 0.99                              |
| 1/10    | 0.95                                                            | 0.97                               | 0.99                              |
| 1/8     | 0.94                                                            | 0.96                               | 0.99                              |
| 1/6     | 0.92                                                            | 0.94                               | 0.98                              |
| 1/4     | 0.88                                                            | 0.92                               | 0.97                              |
| 1/3     | 0.83                                                            | 0.88                               | 0.95                              |
| 1/2     | 0.69                                                            | 0.78                               | 0.90                              |

设: $v_c$  为混凝土的声速; $v_s$  为钢筋的声速; $l$  为两探头间距离; $a$  为探头与钢筋轴线的距离。

则超声波在混凝土中的传播时间为: $2t_1 = \frac{2\sqrt{a^2 + x^2}}{v_c}$

超声波在钢筋中的传播时间为: $t_2 = \frac{l - 2x}{v_s}$

总的传播时间: $t = 2t_1 + t_2 = \frac{2\sqrt{a^2 + x^2}}{v_c} + \frac{l - 2x}{v_s}$  (4-2)

欲求超声波到达接收探头的最短时间,即求  $t$  的最小值,

需对  $x$  求导并令其为零,即: $\frac{dt}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \frac{2\sqrt{a^2 + x^2}}{v_c} + \frac{l - 2x}{v_s} \right) = 0$

得: $\frac{2}{v_c} \cdot \frac{1}{2} \frac{2x}{\sqrt{a^2 + x^2}} - \frac{2}{v_s} = 0$

经整理后得  $x = \frac{a^2}{\sqrt{v_s^2 - v_c^2}} \cdot v_c$  (只取正值)

将  $x$  代入(4-2)式,得最短传播时间:

$$t = 2a \sqrt{\frac{v_s^2 - v_c^2}{(v_s \cdot v_c)^2}} + \frac{1}{v_s} \quad (4-3)$$

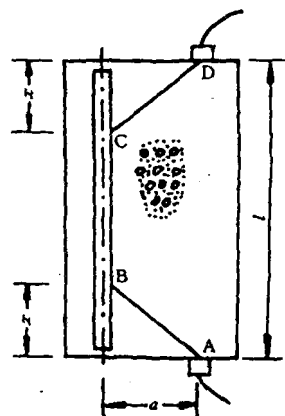


图 3-4-4 超声波平行于钢筋轴线传播

理论上要避免混凝土中传声受钢筋的影响,根据(4-3)式得到混凝土的真正声速为:

$$v_c = \frac{2av_s}{4a^2 + (v_s t - 1)^2}$$

令:  $t_1 = l/v_c$  为超声波直接在混凝土中传播所需要的时间。

则  $t_2 = 2a \sqrt{\frac{v_s^2 - v_c^2}{(v_s \cdot v_c)^2}} + \frac{1}{v_s}$  为经由钢筋折线的传播时间。欲避免钢筋的影响,应使  $t_1 = t_2$ , 即  $\frac{l}{v_c} \leq 2a \sqrt{\frac{v_s^2 - v_c^2}{(v_s \cdot v_c)^2}} + \frac{1}{v_s}$  整理后得:

$$\alpha > \frac{l}{2\sqrt{\frac{v_s - v_c}{v_s + v_c}}} \quad (4-4)$$

即当探头距离钢筋大于  $\frac{l}{2\sqrt{\frac{v_s - v_c}{v_s + v_c}}}$  之后, 由于经由钢筋传播的信号落在直接由混凝土中传播的信号之后, 于是钢筋的存在就不会影响混凝土声速的测量, 一般当超声测量线离开钢筋轴线约  $1/8 - 1/6$  测距时, 就可以避开钢筋的影响。

素混凝土中的传播速度  $v_0$  根据图 3-4-5 曲线中查出修正系数, 对实测的超声传播速度  $v$  加以修正。例如钢筋混凝土中的  $a/L$  值为 0.1, 并认为混凝土是一般的, 那么混凝土中钢筋影响的修正系数  $v_c/v$  为 0.80, 最后将测得的脉冲速度乘以 0.80, 即为素混凝土的脉冲速度。

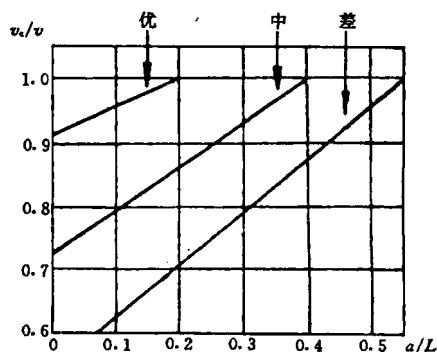


图 3-4-5 钢筋轴向平行于脉冲传播方向声速修正系数

#### 四、粗骨料品种、粒径和含量的影响

每立方米混凝土中骨料用量的变化、颗粒组成的改变对混凝土强度的影响要比水灰比、水泥用量及标号的影响小得多,但是,粗骨料的数量、品种及颗粒组成对超声波传播速度的影响却十分显著,甚至稍微增加一些碎石的用量或采用较高弹性模量的骨料,敏感性最强的是超声脉冲的声速。比较水泥石、砂浆和混凝土三种试体的超声检测,在强度值相同的情况下,混凝土的超声脉冲声速最高,砂浆次之,水泥石最低。差异的原因主要是超声脉冲在骨料中传播的速度比混凝土中传播速度快。声通路上粗骨料多,声速则高;反之,通路上粗骨料少,声速则低。

##### 1. 粗骨料品种不同的影响

表 3-4-4 为不同品种粗骨料的声速值。由于骨料的声速比混凝土中其它组分的声速要高的多,它在混凝土中所占比例又高达 75% 左右。因此,骨料声速对混凝土总声速度具有决定性的影响。

表 3-4-4

不同品种粗骨料的声速值

| 骨料品种 | 比重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 纵波速度( $\text{km}/\text{s}$ ) | 横波速度( $\text{km}/\text{s}$ ) |
|------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 花岗岩  | 2.66                         | 4.77                         | 2.70                         |
| 辉长岩  | 2.99                         | 6.46                         | 3.50                         |
| 玄武岩  | 2.63                         | 5.57                         | 3.40                         |
| 砂岩   | 2.66                         | 5.15                         | 1.97                         |
| 石灰岩  | 2.65                         | 5.97                         | 2.88                         |
| 石英岩  | 2.64                         | 6.60                         | 2.75                         |
| 重晶石  | 4.38                         | 4.02                         | —                            |
| 页岩   | 2.74                         | 5.87~6.50                    | 2.80~3.61                    |
| 河卵石  | 2.78                         | 5.0~5.58                     |                              |
| 陶粒   | 0.56~0.67                    | 2.4~2.8                      |                              |

不同品种的骨料配制混凝土对  $f_{cu}-v$  关系曲线的影响如图 3-4-6 所示。

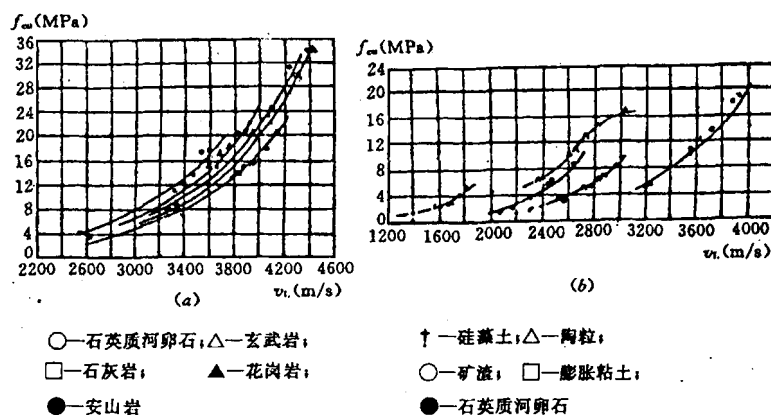


图 3-4-6 不同品种骨料混凝土

(a) 重骨料混凝土  $v_l \sim f_l$  关系曲线; (b) 轻骨料混凝土  $v_l \sim f_l$  关系曲线

由图可见,若不注意粗骨料品种的影响,简单地采用某一特定的混凝土强度与相应的超声声速关系曲线,在确定混凝土强度时将会造成很大的误差。

经研究和实际检测表明,卵石和卵碎石这两种骨料配制的混凝土,一般来说,当声速相同时,卵碎石混凝土的抗压强度比卵石混凝土的强度高出 10—20%。其原因是当各种配比条件均相同时,卵碎石的表面粗糙,有利于水泥石与骨料的粘结,因此强度可略高于表面光滑的卵石混凝土,而由于石质基本相同,卵石较为坚实,可导致声速略为提高。

## 2. 粗骨料最大粒径的影响

图 3-4-7 表示不同最大粒径的粗骨料配制的混凝土,抗压强度与超声声速的关系曲线。它表明了骨料粒径越大,则单位体积混凝土中骨料所占有的声程随之增加,即混凝土的声速随骨料最大粒径的增大而增加。换句话说,对于某一给定的超声声速所对应的混凝土抗压强度则较低,其原因是骨料的超声传播速度比混凝土中超声的传播速度要快,

骨料粒径增大使混凝土中超声传播速度的增加,比混凝土强度测定值增加更快。

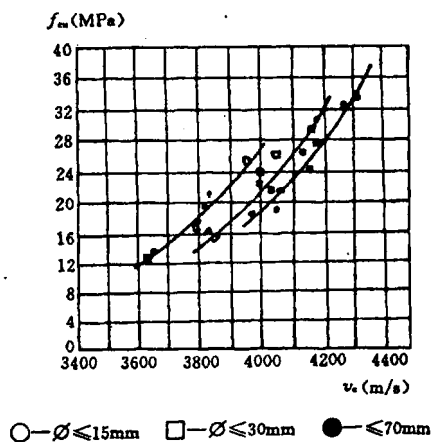


图 3-4-7 不同粒径骨料混凝土  $f_{cu} - v$  关系曲线

### 3. 粗骨料含量的影响

图 3-4-8 表示骨料品种相同时,不同含石量对混凝土中超声脉冲传播速度的影响。一般相同强度的混凝土其超声声速随粗骨料含量增加而提高的趋势。实际上,在混凝土的组合料中,砂率变化、骨灰比的大小,对混凝土中超声声速影响仍然是粗骨料含量起主导作用。

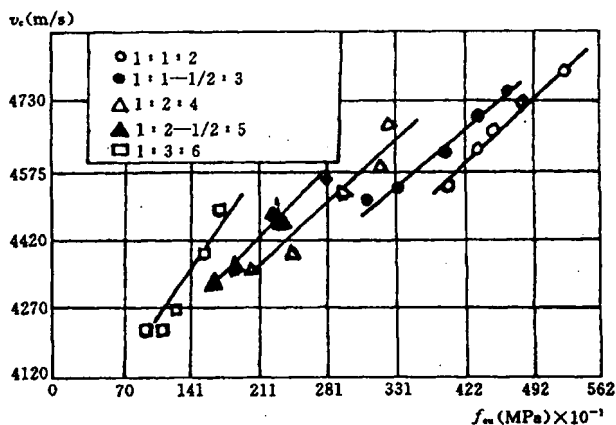


图 3-4-8 骨灰比对  $f_{cu} - v$  相关性的影响

不同标号的混凝土,超声声速不同,低标号混凝土的超声声速较高,因为低标号混凝土相对的粗骨料含量多,或者说骨灰比大所引起的。

图 3-4-9 表示不同水灰比,骨灰比超声声速的影响。可见,忽视骨灰比的影响,采用声速估算混凝土强度的误差很大。

图 3-4-10 表示混凝土中不同砂率对  $f_{cu} - v$  关系的影响。从图中可见,同一强度的

混凝土,砂率越低,声速越大。因此,不考虑砂率的影响,用声速的单一指标推算混凝土的抗压强度,有可能产生 5~15% 的误差。

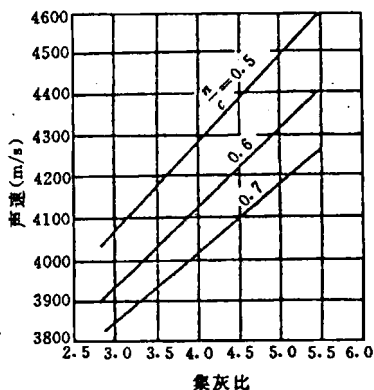


图 3-4-9 集灰比对声速的影响

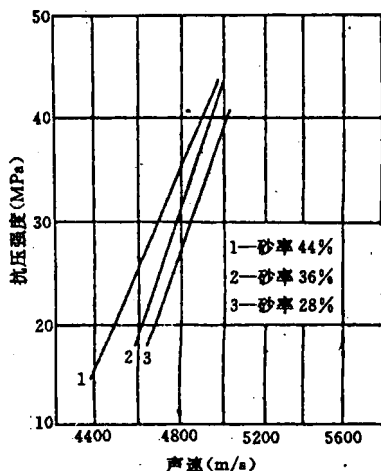


图 3-4-10 砂率对  $f_{cu}-v$  关系的影响

### 五、水灰比及水泥用量的影响

混凝土的抗压强度取决于水灰比,随着  $w/c$  降低,混凝土的强度、密实度以及弹性性质则相应提高,超声脉冲在混凝土中的传播速度也相应增大;反之,超声脉冲速度随着  $w/c$  的提高而降低(图 3-4-11)。

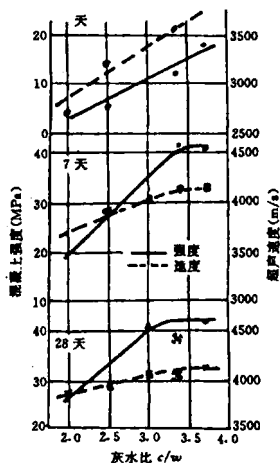


图 3-4-11 不同灰水比混凝土的  $f_{cu}-v$  关系曲线

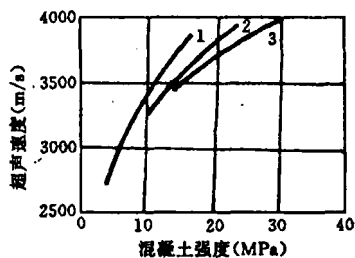


图 3-4-12 不同水泥用量的混凝土  $f_{cu}-v$  关系曲线

1—水泥用量 260kg/m<sup>3</sup>; 2—水泥用量 350kg/m<sup>3</sup>;  
3—水泥用量 550kg/m<sup>3</sup>

水泥用量的变化,实际上改变了骨灰比的组分。图 3-4-12 表示混凝土中水泥用量不同的  $f_{cu}-v$  的关系曲线。在相同的混凝土强度情况下,当粗骨料用量不变时,水泥用量越多,则超声声速越低。

六、混凝土龄期和养护方法的影响

图 3-4-13 表示不同龄期的  $f_{cu}-v$  关系曲线。试验证明,在硬化早期或低强度时,混凝土的强度  $f_{cu}-v$  的增长小于声速  $v$  的增长,即曲线斜率  $\frac{df_{cu}}{dv}$  很小,声速对强度的变化十分敏感。随着硬化进行,或对强度较高的混凝土,

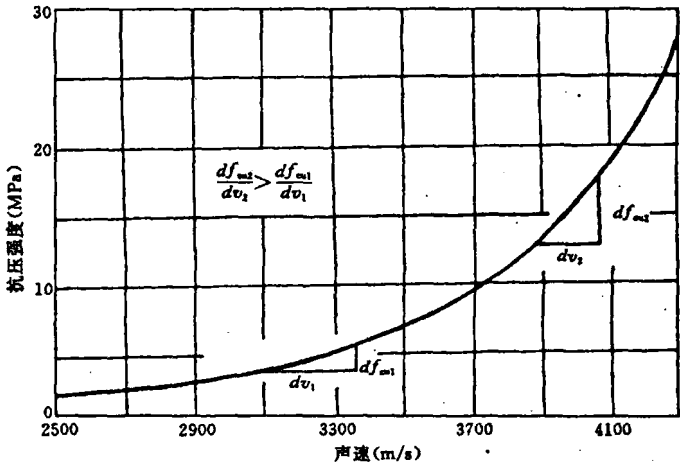


图 3-4-13 不同龄期混凝土的  $f_{cu}-v$  关系曲线

分敏感。随着硬化进行,或对强度较高的混凝土,  $\frac{df_{cu}}{dv}$  值迅速增大,即  $f_{cu}$  值迅速增长大于  $v$  值的增长,甚至在强度达到一定值后,超声传播速度增长极慢,因而采用超声声速来推算混凝土的强度,必须十分注意声速测量的准确性。

不同龄期混凝土的  $f_{cu}-v$  关系曲线是不同的(见图 3-4-14),当声速相同时,长龄期混凝土的强度较高。混凝土试体养护条件不同,所建立的  $f_{cu}-v$  关系曲线也是不同的。通常,当混凝土相同时,在空气中养护的试件,其声速比水中养护的试件的声速要低得多,主要原因可解释为:在水中养护的混凝土水化较完善,以及混凝土空隙充满了水,水的声速比空气声速大 4.67 倍,所以,相同强度的试件,饱水状态的声速比干燥状态的声

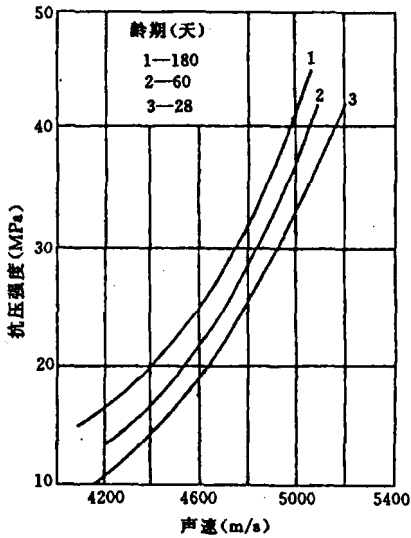


图 3-4-14 龄期对  $f_{cu}-v$  关系的影响

速大。此外,干燥状态中养护的混凝土因干缩等原因而造成的微裂缝也将使声速降低。

### 七、混凝土缺陷与损伤对测强的影响

采用超声检测和推定混凝土的强度时,只有混凝土强度波动符合正态分布的条件下,才能进行混凝土强度的推定。这就是要求混凝土内部不应存在明显缺陷和损伤。如果把混凝土缺陷或损伤的超声参数参与强度的评定,有可能使检测结果不真实或承担削弱安全度的风险。

在网格式布点普测的基础上,对区域性的低强度点,当 $f_{cu} < mf_{cu} - Sf_{cu}$  ( $Sf_{cu}$ 为标准差)时,建议单独标记或推定强度,对于 $f_{cu} < mf_{cu} - 3Sf_{cu}$ 时,应明确定为缺陷区。综合检测指标均较差,且又出现在重要的受力区,为了保证安全,即使其它区域检测指标均较好,则不宜做为整体评定强度。

鉴于目前建立混凝土超声测强曲线时,立方试件是在不受力的状态下测试的,而结构混凝土包括混凝土自重已不同程度地承受了载荷,这种受力状态的构件究竟对超声检测有否影响,即超声检测值要不要进行修正,已有的国内外研究证明,荷载超过某一定范围对超声检测影响是存在的,一般认为构件受力超过30—50%的极限破坏应力时,混凝土内部不同程度地产生损伤,超声声速将随受力增大而降低,虽然目前还没有建立定量的修正的标准,但对从事结构混凝土超声测强的技术人员,应注意这是影响超声测强精度的一个因素。

## 第三节 各种影响因素的显著性分析

上面通过各种试验资料,初步分析了各种因素对混凝土“强度——声速( $f_{cu} - v$ )”关系的影响。但是,各种因素影响的显著性是不完全一致的。当各种因素的变化范围不同时,其影响也是不同的。此外,当各种因素同时出现时,由于其间相互作用,它们的影响显著程度又往往与单一因素时不同。而且各种因素影响的显著性,还与 $f_{cu} - v$ 关系本身所要求的误差范围有关。当某种因素所造成的偏差在 $f_{cu} - v$ 关系允许的误差范围以内时,该因素的影响属于不显著之列,可不予置理。但当 $f_{cu} - v$ 关系允许的误差范围减小时,该因素所造成的偏差则有可能超出允许范围,而必须予以修正。因此,影响因素的显著性分析是个错综复杂的问题,单从试验资料的直观分析中是难以得出明确答案的。为此,我们不妨采用正交设计和方差分析的方法加以解决。关于正交设计和方差分析的原理,不是本节所论内容,这里仅举例说明其使用方法:

### 一、选定影响因素和变化水平

根据已有的资料和经验选定需要试验验证的主要影响因素,同时根据本单位或本地区这些因素的大概变化范围,以便选定这些因素在试验中所取的不同值。在正交设计中,这些因素中所取的不同值称为“水平”。

设本例中所要求验证的是当水灰比在 0.45、0.55、0.65、0.74 等四个“水平”上变化时,水泥品种(矿渣水泥和普通水泥两个“水平”)及粗骨料品种(河卵石和石灰石碎石两个“水平”)影响的显著性。本例所选定的因素和水平列于表 3-4-5。

表 3-4-5 选定的因素与水平

| 因 素 | A    | B    | C     |
|-----|------|------|-------|
| 水平号 | 水灰比  | 水泥品种 | 粗骨料品种 |
| 1   | 0.45 | 矿渣水泥 | 河卵石   |
| 2   | 0.55 | 普通水泥 | 石灰石碎石 |
| 3   | 0.65 |      |       |
| 4   | 0.74 |      |       |

## 二、选用正交表、确定试验方案

正交表是正交试验设计中合理安排试验,并对数据进行统计分析的重要工具。正交表选得合适,表头设计合理,则可用较少的试验次数得到较满足的结果。正交表的选用十分灵活,但一般说应遵循下面的原则:即需分析验证的因素及它们之间交互作用的自由度总和,必须不大于所选正交表的总自由度。

正交表的总自由度 $f_{\text{总}}$ 为

$$f_{\text{th}} = nm - 1 \quad (4-5)$$

式中  $n$  为试验次数。

各因素的自由度 $f_{\text{因}}$ 为

$$f_{\text{固}} = m - 1 \quad (4-6)$$

式中  $m$  为某因素的水平数。

本例中各因素自由度总和为

$$\Sigma f_{\text{閑}} = f_A + f_B + f_C = (4 - 1) + (2 - 1) + (2 - 1) = 5$$

由于表 3-4-5 中所选定的各因素水平数不等,所以我们使用混合型正交表  $L_8(4^1 \times 2^4)$ 。其试验次数  $n$  为 8,根据(4-5)式所算出的总自由度  $f_{\text{总}} = 7$ 。所以各因素自由度总和  $\Sigma f_{\text{因}}$  小于该正交表的总自由度  $f_{\text{总}}$ 。

表 3-4-6

 $L_8(4^1 \times 2^1)$  正交试验方案

| 试验号因素 | A     | B     | C     | D     | E     |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | 木灰比   | 水泥品种  | 粗骨料品种 | 空     | 空     |
| 1     | $A_1$ | $B_1$ | $C_1$ | $D_1$ | $E_1$ |
| 2     | $A_1$ | $B_2$ | $C_2$ | $D_2$ | $E_2$ |
| 3     | $A_2$ | $B_1$ | $C_2$ | $D_1$ | $E_2$ |
| 4     | $A_2$ | $B_2$ | $C_1$ | $D_2$ | $E_1$ |
| 5     | $A_3$ | $B_1$ | $C_2$ | $D_1$ | $E_2$ |
| 6     | $A_3$ | $B_2$ | $C_1$ | $D_2$ | $E_1$ |
| 7     | $A_4$ | $B_1$ | $C_2$ | $D_1$ | $E_1$ |
| 8     | $A_4$ | $B_2$ | $C_1$ | $D_2$ | $E_2$ |

该表共有五列,其中两个空列用来计算试验误差。根据该表所确定的试验方案如表 3-4-6 所示。表中与因素的代号及水平的下标与表 3-4-5 所列内容相对应。

然后,根据表 3-4-6 所确定的试验方案,设计出 8 次试验的混凝土配合比。并按试验要求制作试件和测出试件的声速  $v$  和抗压强度  $f_{cu}$ 。

### 三、对试验结果进行极差分析或方差分析

若以混凝土的声速值  $v$  与实测抗压强度  $f_{cu}$  之比 ( $v/f_{cu}$ ) 作为衡量指标  $y_i$  ( $i$  为水平号)。试验结果的极差分析和方差分析方法如下:

#### 1. 极差分析

将试验结果列于表 3-4-7 中。并算出各列的  $K_i$ ,  $\bar{K}_i$  及极差  $W$ 。

若以  $j$  为列数,以  $i$  为水平号,则:

第  $j$  列的  $K_i$  等于第  $i$  中相同的“ $i$ ”所对的结果  $y_i$  之和;

第  $j$  列的  $\bar{K}$  等于第  $j$  列的  $K_i$  除以第  $j$  列中“ $i$ ”的重复次数;

第  $j$  列的极差  $W$  等于第  $j$  列中  $\bar{K}$  的最大值与最小值之差。

将计算结果填入表 3-4-7 中。

比较各列的极差,极差大则表示该因素在所变化的水平范围内所造成的差别大,是影响试验指标的主要因素,极差小的则是次要因素。空列极差代表试验误差,此外低于空列极差可认为不是由于因素水平变化所引起的偏差,而是试验误差,因此也可计入试验误差平均值。

就本例而言,三个因素的次序是:

$$W_A > W_C > W_B$$

即水灰比的影响最明显,其次是粗骨料品种。水泥品种变化所造成的偏差小于试验误差,可计入试验误差。

表 3-4-7 极差分析表

| 列号 <i>j</i>           | 1                     | 2                     | 3                     | 4                     | 5                     | 试验结果                                                                           |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 试验号<br>因素             | <i>A</i><br>水灰比       | <i>B</i><br>水泥品种      | <i>C</i><br>粗骨料品种     | <i>D</i><br>空         | <i>E</i><br>空         | $Y_i = \frac{C_i}{R_i} \frac{V_i}{f_{cu}} (-10)$                               |
| 1                     | <i>A</i> <sub>1</sub> | <i>B</i> <sub>1</sub> | <i>C</i> <sub>1</sub> | <i>D</i> <sub>1</sub> | <i>E</i> <sub>1</sub> | 0.52                                                                           |
| 2                     | <i>A</i> <sub>1</sub> | <i>B</i> <sub>2</sub> | <i>C</i> <sub>2</sub> | <i>D</i> <sub>2</sub> | <i>E</i> <sub>1</sub> | 1.27                                                                           |
| 3                     | <i>A</i> <sub>2</sub> | <i>B</i> <sub>1</sub> | <i>C</i> <sub>2</sub> | <i>D</i> <sub>2</sub> | <i>E</i> <sub>1</sub> | 3.29                                                                           |
| 4                     | <i>A</i> <sub>2</sub> | <i>B</i> <sub>2</sub> | <i>C</i> <sub>1</sub> | <i>D</i> <sub>1</sub> | <i>E</i> <sub>1</sub> | 4.50                                                                           |
| 5                     | <i>A</i> <sub>3</sub> | <i>B</i> <sub>1</sub> | <i>C</i> <sub>2</sub> | <i>D</i> <sub>1</sub> | <i>E</i> <sub>1</sub> | 0.48                                                                           |
| 6                     | <i>A</i> <sub>3</sub> | <i>B</i> <sub>2</sub> | <i>C</i> <sub>1</sub> | <i>D</i> <sub>1</sub> | <i>E</i> <sub>1</sub> | 5.81                                                                           |
| 7                     | <i>A</i> <sub>4</sub> | <i>B</i> <sub>1</sub> | <i>C</i> <sub>2</sub> | <i>D</i> <sub>1</sub> | <i>E</i> <sub>1</sub> | 11.7                                                                           |
| 8                     | <i>A</i> <sub>4</sub> | <i>B</i> <sub>2</sub> | <i>C</i> <sub>1</sub> | <i>D</i> <sub>1</sub> | <i>E</i> <sub>1</sub> | 10.56                                                                          |
| <i>K</i> <sub>1</sub> | 1.79                  | 24.29                 | 20.18                 | 24.44                 | 22.61                 | $\Sigma y_i = 46.51$<br>$[\Sigma y_i]^2 = 2163.18$<br>$\Sigma y_i^2 = 392.923$ |
| <i>K</i> <sub>2</sub> | 7.87                  | 22.22                 | 26.33                 | 22.07                 | 23.9                  |                                                                                |
| <i>K</i> <sub>3</sub> | 14.59                 |                       |                       |                       |                       |                                                                                |
| <i>K</i> <sub>4</sub> | 22.26                 |                       |                       |                       |                       |                                                                                |
| $\bar{K}_1$           | 0.895                 | 12.145                | 10.09                 | 12.22                 | 11.305                |                                                                                |
| $\bar{K}_2$           | 3.935                 | 11.11                 | 13.165                | 11.035                | 11.95                 |                                                                                |
| $\bar{K}_3$           | 7.295                 |                       |                       |                       |                       |                                                                                |
| $\bar{K}_4$           | 11.13                 |                       |                       |                       |                       |                                                                                |
| <i>W</i>              | 10.24                 | 1.035                 | 3.075                 | 1.185                 | 0.645                 |                                                                                |

2. 方差分析

用表 3-4-5 中的试验结果算出总的偏差平方和  $S_{\text{总}}$ 、各因素的偏差平方和  $S_{\text{因}}$  及试验误差  $S_{\text{误}}$ ，其计算公式和本例的计算结果如下：

$$\begin{aligned} S_{\text{总}} &= \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^{2/n} \\ &= \sum_{i=1}^n y_i^2 - CT \end{aligned} \tag{4-7}$$

$$\begin{aligned} S_{\text{因}} &= r \sum_{i=1}^n (\bar{K}_i - \bar{y})^2 = r \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{K_i}{r} \right)^2 - m \left[ \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right]^2 \right] \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n K_i^2}{r} - CT \end{aligned} \tag{4-8}$$

$$S_{\text{误}} = S_{\text{总}} - (\sum S_{\text{因}}) = S_{\text{空}} \tag{4-9}$$

式中  $CT$ ——修正项， $CT = \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^{2/n}$ ；

$n$ ——试验号， $n = mr$ ；

$m$ ——水平数；

$r$ ——水平重复数。