

〔苏联〕И.С.瓦依斯托克 著

叶恒健 楊景华 譯

无线电电子学 在装配式钢筋混凝土生产中的应用

中国工业出版社

无 綫 电 电 子 学

在装配式鋼筋混凝土生产中的应用

[苏联] И. С. 瓦依斯托克 著

叶恒健 楊景华 译



中国工业出版社

本书阐述了在工业上采用各种无线电电子学方法检验混凝土、钢筋混凝土、硅酸盐混凝土和它们的组成材料等质量的实际应用及其发展前途。它探讨了利用超声波作为材料加工的一种手段的可能性，例如制造乳状润滑油和清洗钢筋等。

本书介绍了一些最新式电子仪器，这些仪器的作用原理是以测量超声或放射性同位素的参数作为依据。同时描述在自动检测或控制生产工艺过程中，采用电子仪器的一些问题。

本书可供装配式钢筋混凝土工程技术人员及科学研究人员参考。

И.С.Вайншток
**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА В ПРОИЗВОДСТВЕ
СБОРНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА**
ГОССТРОЙИЗДАТ
Москва 1961

* * *

无线电电子学
在装配式钢筋混凝土生产中的应用
叶恒健 楊景华 譯 孟广頤 校

*

建筑工程部图书编辑部編輯(北京西郊百万庄)

中国工业出版社出版(北京阜成门内大街10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $4^{11/16}$ ·字数117,000

1965年6月北京第一版·1965年6月北京第一次印刷

印数0001—2,340·定价(科五)0.65元

*

統一书号: 15165·3930(建工-468)

序

本书系統和概括地闡述了作者1954至1961年間所进行的科学研究工作的成果，这些工作目的在于探索在生产装配式鋼筋混凝土时应用电物理檢驗方法的可能性。

本书的主要优点是，除了闡述这些測量方法本身的理論基础外，也描述了最新的电子測量設備的主要結構特性。

本书的主要篇幅用于闡述发展前途比較大的檢驗混凝土强度的超声脉冲法。书中的一些章节是順序地介紹了超声波的基本性质、各种因素对超声速度的影响、超声脉冲法的实质和在装配式鋼筋混凝土結構中用来大批檢驗混凝土强度的可能性，以及用来自动檢驗混凝土强度在养护过程中的增长情况。

书中所描述的一些超声脉冲仪器（ПИК-6, ПИК-7, АИС-1, 声弥散器）已为許多鋼筋混凝土构件厂所采用。广泛地应用这些仪器，会使构件制造工艺有重大的改变，并且将得到显著的技术經濟效果。

同样，用輻射和电学方法研究混凝土和它的組成材料也是很有意思的。無論是在試驗各种材料，或者是在生产过程中放射性輻射能和电子学方法的实际应用已很广泛，并显示出它有广闊的发展前途。

И. С. 瓦依斯托克所著的这本书一定会引起装配式鋼筋混凝土工业广大工程技术人员以及科学研究单位的极大兴趣。

鋼筋混凝土研究所
副 所 长

И. К. 巴拉捷耶夫

目 录

序

前言	1
第一章 混凝土的声学試驗法	2
1. 超声波的性质	3
2. 超声脉冲法	7
3. 影响混凝土中超声传播速度的因素	10
4. 在工厂中用超声法检测混凝土强度	18
5. 檢驗混凝土在蒸汽养护过程中强度的增长	24
6. 檢驗硅酸盐混凝土强度	32
7. 结构及构筑物的試驗	38
8. 混凝土的敲击及共振檢驗法	47
1) 敲击法	47
2) 共振法	49
第二章 超声脉冲的試驗設備	53
1. 电子仪器的作用原理	53
2. 超声换能器	62
1) 压电换能器	63
2) 磁致伸缩换能器	67
3. ПИК-3型超声脉冲仪	70
4. 高精确度的超声脉冲仪器	77
1) ПИК-5型仪器	78
2) ПИК-7型仪器	80
3) 确定混凝土强度在蒸汽养护时增长程度的自动仪器(АИС-1型)	82
5. 用脉冲仪器测量超声速度方法	91
第三章 工艺过程的超声应用	93
1. 在声場中制作乳化液	93
2. 超声清洗金屬	96
第四章 应用放射性同位素試驗混凝土	100

VI

1. 关于 γ 射线的一些知識	100
2. 用 γ 射线測量混凝土的密度	102
3. 用 γ 射线檢驗混凝土密度的設備	107
4. 混凝土的 γ 探伤	113
5. 用中子法測量混凝土混合料和骨料的含水量	119

第五章 用确定电学特性方法檢驗混凝土及其

組成材料的质量	127
---------------	-----

1. 測量砂的含水量	127
2. 用电导率法測量混凝土混合物的密实度	134
3. 确定多孔混凝土的含水量	136

参考文献	140
------------	-----

前 言

工业上采用无线电电子学方法試驗和处理各种材料，为生产过程的自动化开辟了广阔的前途。

近年来，无线电电子学在建筑业和装配式钢筋混凝土工厂中开始广泛地应用。在評定混凝土质量、实行自动檢驗和控制生产过程时采用超声、放射性同位素、电子技术是非常有效的，并且能采用新的、完善的工艺方案。

应用声学方法，尤其是超声脉冲法直接在結構和构筑物上測定混凝土的强度是最有效的。

在工业中采用超声技术的新方向，是混凝土在蒸汽养护过程中自动檢驗它的强度增长情况。直接在加热設備中实行这种檢驗，能增加其周轉能力，使整个工艺程序自动化，并且提高生产水平。书中詳細地闡述了1954至1960年期間钢筋混凝土研究所进行研究的結果；在装配式钢筋混凝土生产中应用无线电电子学的可能性，并且提出新型的高精度的电子設備結構。本书的主要部分是敘述了混凝土强度的超声脉冲試驗，也扼要地闡述了輻射和电学檢驗法的实质。

В.И.索洛克尔教授，С.А.斯特列尔科夫教授，П.К.巴拉捷耶夫和О.Э.波弗拉米尔技术科学副博士在审閱书稿时提供了許多宝贵的意見，作者以感激的心情，接受和採納了这些意見。

第一章 混凝土的声学試驗法

众所周知，目前构件的混凝土强度是以混凝土立方体試块試驗結果而定的。但是，立方体强度与构件的混凝土强度經常是不符合的，尤其当构件与检查的試块的捣实及养护条件不能完全相同时，在如制作混凝土构件常用的立式模板法、振动压軋法、离心法以及电热养护法时常有这种現象。

除上述外，用立方体試块試驗方法，还要求制作和貯存大量的混凝土立方体試块。

总之，上述的混凝土立方体試块的破損試驗法，实际上测定构筑物中混凝土强度及质量不均匀性；裂縫及沙眼等是不可能的。

因此，长期以来，世界各国都在研究直接在构筑物和构件上确定混凝土强度的各种方法，并根据确定混凝土的弹性或硬度而提出了一些試驗方法（用有球和彈簧的錘子、摆錘仪、冲孔器等方法）。但是，这些方法的缺点是只能反映混凝土表面层的质量。在这方面，上述方法远不如声学方法。

早在1928年С.Я.索柯洛夫教授就提出用超声法研究金屬材料，而在1929年Ю.А.尼林捷尔和И.М.拉宾諾維奇两位教授用声波共振方法測量混凝土的对数衰减。

苏联广泛地研究了声学檢驗法的特性及其实际应用的前途。研究的单位有：鋼筋混凝土研究所，新建筑材料研究所，苏联建筑科学院混凝土及鋼筋混凝土研究所，苏联道路研究所，建筑設計院，莫斯科公路学院，拉脫維亞科学院所屬研究所，乌克兰建筑科学研究院，К.Д.巴姆菲洛夫公用事业科学院，国立莫斯科大学，苏联建筑科学院建筑施工組織、机械化及技术协作科学研究所，以及其它許多研究和生产单位。

在1950至1960年十年間，苏联曾发表了几十篇有关上述問題的論文。

應該指出，在1949至1951年間，И.В. 札修克和В.Л. 巴契諾夫斯克曾創造了优质的超声脉冲仪，有 ПИК-1型和 ПИК-2型，而且鋼筋混凝土研究所的工作人員于1953年进行了大量的用超声方法測定混凝土质量的工作。

国外也有許多国家研究应用声学方法的尝试，如美国、丹麦、英国、法国、加拿大、捷克斯洛伐克、波兰等国家。

对这种檢驗方法发生兴趣并不是偶然的，因为它能直接測定构件中混凝土的强度，不仅能保証产品可靠的检测，并且在統計数据积累的基础上，能重新标定其現有的强度安全系数。

这种方法的根据是超声波具有独特的性能和穿透能力。

1. 超声波的性质

波的类型及其速度 超声波为材料介质的弹性振动引起的波动，它的頻率比人能听到的声波頻率要高。在工程中，介质振动所产生的声波其頻率高于16千赫芝的，才叫超声波。

如果要使任一材料介质产生超声波，就必须使这一介质与振动的物体接触。

在振动物体中产生的超声波，随着所接触的介质不同，其传播的末速度是不同的。

超声波波长与其頻率以及速度的关系如下：

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad (1)$$

式中 C —— 超声传播速度，米/秒；

f —— 頻率，赫芝。

在不同介质中传播的超声波可能产生几种波型（图1）。

在气体及液体中只有纵波。在粘滯液体中还有横波。在固体中則有纵波、横波和表面波。

不同的超声波波型，使介质质点沿着确定的軌迹移动。如果

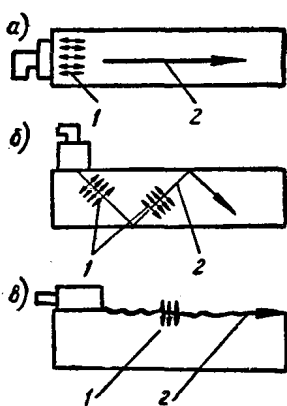


图 1 波的类型

a—纵波；b—横波；c—表面波；
1—振动的方向；2—波传播的方向

介质质点移动是与波的传播方向平行就叫纵波。在物体中，由任意表面沿法线方向振动便激发起这种纵波。

横波（切变波）的特点是介质质点移动垂直于波的传播方向，它的传播速度大约为纵波传播速度的一半。在交替的切力作用下产生横波，它不是平行于物体的表面。

同样，表面波类似于水面上的波。表面波的传播速度比横波的传播速度小10%，它是伴随纵波与横波而产生。

超声波的传播速度决定于介质的密度及弹性，一般近似的计算公式为

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

式中 E ——弹性模量；

ρ ——介质密度。

这一公式计算棒状物体中的超声波传播速度是正确的，而块状物体中超声波传播速度则按下式来确定：

$$C = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (3)$$

式中 μ ——泊松系数。

块状或无限介质系指其尺寸大大超过于传播的超声波的波长。

有限介质是指长和宽为有限的物体，如棒状物体就是这种情况。

当超声波在棒状物体中传播时，其速度比在巨块中要小，这是由于轴向和径向振动的相互作用所引起。

在棒状物体中，超声波沿轴向传播时，由于压缩及拉伸的交替变化，它产生横向尺寸的变化而引起径向振动。当有径向变形时，则轴向的弹性力就要减弱；沿轴向传播的波则成为纯纵波，这纵波速度比无限介质中的速度要小。除此以外，在这种情况下惰性增加，棒状物体的固有频率降低，纵波传播速度也就减小。

超声波的反射 超声波在不同介质中穿过时，它在两种介质交界面上反射（如金属与空气，金属与液体等）。声波反射的强度决定于相接触两介质的声阻抗。当声波垂直入射于界面时，反射的声强与入射的声强有下列关系

$$I = I_0 \left(\frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \right)^2 \quad (4)$$

式中 I ——反射声强；

I_0 ——入射声强；

ρ_1, ρ_2 ——两种介质的密度；

C_1, C_2 ——在两种介质中的声速。

ρC 为介质的声阻抗。

当声波由空气到固体时，声能量几乎100%反射回来。

当声波成某一角度入射到两介质交界面上时，则产生折射。

折射角按下式计算

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{C_1}{C_2} \quad (5)$$

式中 θ_1 ——在第一种介质中声波的入射角；

θ_2 ——在第二种介质中声波的折射角；

C_1, C_2 ——在两种介质中的声速。

当入射角 $\theta = 0$ 时，声波则不折射，在液体和固体交界面上，当入射角大于 15° 时，则声波全部被反射回来，不能由一个介质穿到另外一个。

由于上述声波折射的特性，因此可以采用类似光学上的声透镜，能聚积声的能量。

在任何介质中，从声源辐射的超声波，以一定声束扩张的角

度来传播。

当声源为圆形时，超声波束扩张角决定于 $\lambda : D$ 。 λ ——波长， D ——声源直径。

超声波在传播过程中可能遇到一些障碍物（即如具有不同声阻抗的物质）。

如果障碍物的尺寸比声波波长小或大小差不多，则产生明显的反射。如尺寸比波长小，则无明显的反射，在这种情况下，超声波绕过了障碍物（称为绕射）。这样，弹性波的频率愈高，则引起声能反射的障碍物尺寸愈小。

超声波的吸收 这一过程主要决定于介质的非完全弹性，以及它的热传导性而引起有超声波能量的损耗。

由于介质压缩和拉伸的结果，温度升高，但各质点的弹性性质不同而产生不同的温度变化，这样便引起超声能量的损失。

但是，由于介质的热传导性使温度趋于平衡，这样，引起的热损失导致声波的吸收。

共振与驻波 每一种振动物体都具有振动的固有频率，固有频率取决于物体的几何尺寸。如将具有与物体固有频率相同的振动声源加于物体，则此系统发生共振，物体的振动振幅达到最大。这时的振幅比非共振时要大得多。

当物体厚度为有限，并为半波长的整数倍时，共振则可产生。在这种情况下，需要超声振动源的能量最少。

在介质中，由于共振现象的作用而形成所谓驻波。它是由入射波及反射波迭加而成。这样在有限尺寸的物体中某一点，波的入射及反射同相位时振动振幅增加，而另一方面，相位相反时振幅便减少。如果振幅的各个值保持不变，此时在物体中超声波不再传播，而形成驻波。

为了减少驻波影响（探伤时必须消除），实际上常采用变频振动声源（频率调制）。同样，试件表面置以吸声材料，如多孔橡皮，毛织品等其它物质，也可降低驻波的影响。

超声波的传播速度、共振频率、反射及吸收的程度的测量是

試驗混凝土不同声学方法的基础。

2. 超 声 脉 冲 法

在声学检测法中，以超声脉冲法为最好，目前，这一方法广泛地应用于检测混凝土强度。这种方法的实质就是测量超声脉冲在混凝土中传播速度，以便判断构件中混凝土强度的指标。

这种方法的原理大致如图 2。在专门的超声设备中有产生短促电脉冲的发生器。由此脉冲发生器供给装在专门探头的酒石酸钾晶体。这晶体换能器将电脉冲变成超声脉冲，并将超声振动传给混凝土。

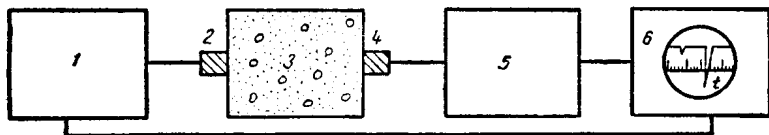


图 2 测量混凝土中超声速度示意图

1—电脉冲发生器；2—超声波辐射器(换能器)；3—混凝土；4—超声波接收器(换能器)；5—放大器；6—超声通过时间的记录器

超声振动通过所研究的构件到达接收器，接收器又将声讯号转变成电讯号。最后经过放大而到电子射线管，在那里显出所接收的讯号。接收讯号与发射讯号之间的距离决定于声速及试件长度。超声脉冲传播速度按照时标读数确定。根据构件长度及脉冲传播时间，用下式可确定声速

$$C = \frac{l}{t} \quad (6)$$

式中 C ——超声脉冲传播速度，米/秒；

l ——超声脉冲传播途径的长度，米；

t ——超声脉冲传播的时间，秒。

采用超声方法的出发点是：混凝土在硬化过程中的强度增长及混凝土弹性常数的改变与超声波在硬化的混凝土中传播速度的变化是一致的。

因为超声波在混凝土中传播速度与介质的弹性及密度有关，所以用此法可确定动态弹性模量。在混凝土中激发的弹性振动及其传播速度而得到的弹性模量，是相当于很小振幅振动时非常快地施加荷载所得的动态弹性模量。因为振动的传播并不引起材料的内部破裂，所以可能得到恒定的弹性模量，而与压力无关。

对于棒状试件，动态弹性模量与超声传播速度之间的关系如下：

$$E = \rho C^2 \quad (7)$$

式中 E ——动态弹性模量，公斤/平方厘米；

ρ ——密度，等于 $\frac{\gamma}{g}$ (γ ——容重，公斤/立方厘米；

g ——重力加速度，为981厘米/秒²)。

对于无限介质的动态弹性模量，则由公式(3)求得。

泊松系数可根据混凝土棱柱体超声传播速度及纵向振动的固有频率计算而得。

$$\left(\frac{C}{2f_{on}l} \right)^2 = \frac{1 - \mu}{(1 - 2\mu)(1 + \mu)} \quad (8)$$

式中 C ——超声传播速度，厘米/秒；

f_{on} ——试件纵向振动固有频率，赫芝；

l ——试件长度，厘米。

这样，测得超声传播速度，可以得出混凝土的两个弹性特性；即弹性模量及泊松系数。

为了保证超声脉冲法测定混凝土强度的可靠性，在测超声脉冲传播速度特性的同时，还应测量声波的衰减，以确定混凝土的非弹性特性，确定衰减能说明研究的材料质量的变化。

衰减振幅系数按下式确定

$$\alpha = \frac{1}{x} \ln \frac{A_1}{A_2} \quad (9)$$

式中 α ——振幅衰减系数；

x ——超声波通过的距离；

A_1 ——在点 x_1 处的振幅；

A_2 ——在点 x_2 处的振幅。

显然，测定动态弹性模量是非常有意义的。通过动态弹性模量确定混凝土的抗压强度的可能性，研究者曾給以很高的评价。

由图3表示的曲线看出，虽然在各研究者实验中得出超声速度与混凝土抗压强度之间的关系曲线，然而不同的混凝土强度可能获得同一的超声速度值。

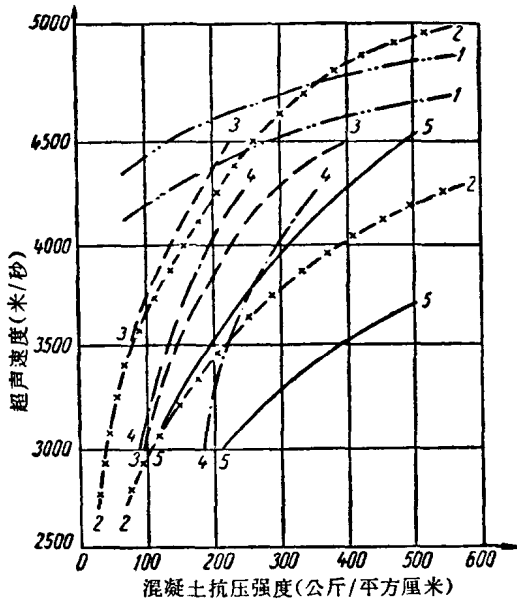


图3 混凝土抗压强度与超声传播速度的关系

1—琼斯研究得出的曲线；2—钢筋混凝土研究所得出的曲线；3—安捷尔逊得出的曲线；4—文彩尔得出的曲线；5—舍夫捷维尔得出的曲线

各研究者在研究中得出的关系曲线的不同，是由于测量超声传播速度的介质不同。

如果混凝土为均匀的材料（而不是不均匀的材料），则用声速是可以判断混凝土强度的，当混凝土配合比相同时，这种情况由前述的关系式所证实。

但是，混凝土配合成分是可变的，对于弹性振动来说，在具

有不同的机械弹性振动物质的混凝土中，声波传播速度就有改变，而混凝土的抗压强度或弹性特性几乎没有什么改变。这样，用超声法判断混凝土强度就有局限性，甚至有时就不能采用。

但目前仍广泛采用的超声脉冲法，可较准确地判断混凝土强度。它比共振法优越，因为共振法受试件尺寸限制，不能测定生产的构件或很大尺寸构件的质量。

因此用超声脉冲法判断混凝土强度时，必须研究：第一，确定影响超声波传播速度的因素，以及影响动态弹性模量的因素；第二，各因素变化时，超声速度与混凝土强度的关系。

3. 影响混凝土中超声传播速度的因素

分析影响超声传播速度的因素，应考虑混凝土本身参数的影响（龄期、硬化条件、混凝土的配合比和各成分的质量），以及钢筋混凝土结构的影响因素（如钢筋；结构中混凝土的温度和湿度；构件尺寸及断面等）。

关于第二种影响因素，在以后的章节中将详细论述。这里仅讨论钢筋混凝土结构用正确的试验方法时，虽有钢筋的存在而并不影响超声法采用的可能。

在钢中的超声传播速度大于5,000米/秒，而在混凝土中则在2,000到4,500米/秒的范围（决定于混凝土的强度）。所以当混凝土强度很小时，超声波沿着钢筋传播，由于构件上检测点的超声速度比其在混凝土中的速度急剧地增加，是可以很容易被发现的。

诚然，当为配筋密的构件而又为高强度混凝土时，用超声法检测可能产生一些麻烦。但是只有当钢筋直径与超声辐射器直径相同时钢筋才有较大的影响。而辐射器直径为60~70毫米，所以这种情况是很罕见的。

在试验室做的配筋密的试件中，当用的钢筋直径由10到20毫米时，超声速度增加1~3%。当钢筋直径由25到50毫米时，超声速度增加5~8%。当顺着钢筋方向测混凝土中超声速度时，

如果鋼筋端部尺寸大于20毫米，可以得到两个脉冲，第一个是先到达鋼筋上并穿过鋼筋的脉冲，其特征将是脉冲前沿比較延伸，振幅减小。

因此，在做鋼筋混凝土結構試驗时，檢驗点的选择要尽可能使声传播方向不横过鋼筋，并避开沿着鋼筋方向传播。

硬化的延續時間 許多研究者发现，在混凝土硬化过程中，超声脉冲的传播速度逐漸增加。

图4表示超声传播速度与硬化時間的关系曲綫（在标准养护条件下）。这曲綫的数据是用在試驗室做的 $30 \times 30 \times 30$ 厘米試驗块，時間由30分钟到6小时所做試驗而得。

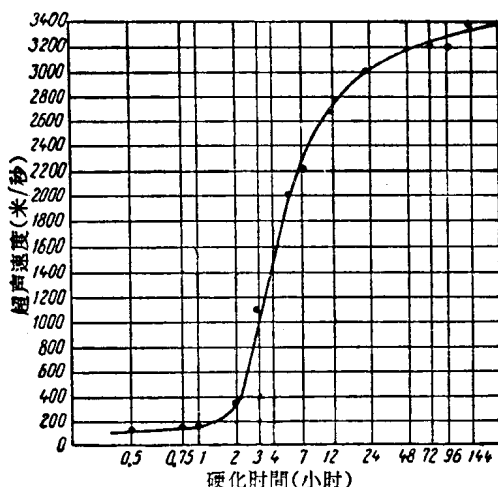


图4 混凝土齡期和超声速度的关系

显然，混凝土在硬化过程中，超声速度是改变的。超声脉冲速度由于材料的弹性性质变化而增长。

根据超声速度的变化，可以定出混凝土三个硬化阶段：

a) 初凝（誘导）阶段：在前1~2小时，超声速度大致不变在150~200米/秒的范围；

6) 凝結阶段：在后来的4~6小时，超声速度突然增长到