

英国无损检测技术及 有关规范译文集

交通部公路科学研究所

一九八七年九月

前 言

为执行中英公路桥梁无损检技术合作项目英国泰华工程公司(Taywood Engineering Ltd)受英国海外发展署委托来我国举办了无损检测技术讲座并结合北京市的两座公路桥梁的检测演示了有关仪器设备的操作使用方法。实践证明这些技术基本上对我国的钢筋混凝土或预应力混凝土桥梁都是适用的,为我国进一步开展公路桥梁检查评定和养护维修提供了良好的技术和装备条件。技术讲座由于条件关系国内仅有少数单位参加。为了贯彻合作项目的精神,推动无损检测技术在我国公路桥梁的应用,故将技术讲座的主要内容连同有关的英国标准规范译成本文集,供有关单位的参考。

译文集中的规范有多种是英国近年颁布的,如用以代替BS4408第5部分,1974的《混凝土中超声脉冲速度测量建议》(BS1881第203部分)是1986年出版的;用以代替1965年版的《无损检测技术术语英国标准字汇,超声探伤》(BS3683第4部分)是1985年出版的;几种关于混凝土的标准规范多为1983年版本;关于保护层测定的规范尚未见到最新版本,因多次实用该仪器,测量结果颇为满意,故将其规范(BS4408第1部分)译出,虽出版年代较早(1969年),仍不失其指导作用。所介绍的各种检测方法亦都具有特点,混凝土氯化物含量滴定计法是可与粉末或芯样的实验室分析法相结合使用的一种快速法,十分便利现场应用;内窥镜经过实用,认为有很高的窥视清晰度并可摄取相片,是检查预应力管道和其他隐蔽部位的一种十分有效工具;激光测量术在混凝土桥中应用,取得精度较高的桥梁挠度测量结果,可解决桥下设测点困难的问题。英国TRRL所作的预应力管道内部状况检测报告为我国桥梁检测工作提供了一个实例。

本译文集由公路所卢世深、国天逵、任天毅等翻译整理,由卢世深主编校阅。译文中不当和错误之处,请读者批评指正,并请函告交通部公路科学研究所桥涵研究室(北京市北环西路12号)。

译 者

1987年9月

目 录

1. 混凝土中超声脉冲速度测量建议.....	1
2. 无损检测技术术语英国标准字汇第四编超声波探伤.....	20
3. 确定混凝土芯样抗压强度的方法.....	34
4. 确定结硬混凝土密度的方法.....	43
5. 结硬混凝土分析.....	48
6. 评估现有结构混凝土强度的指示.....	67
7. 混凝土中钢筋的半电池电位试验标准方法.....	81
8. 混凝土无损试验方法建议——电磁式保护层测量装置.....	87
9. 混凝土的耐久性和破坏机理.....	90
10. 外观检查方法.....	95
1. 检测的步骤.....	97
12. 混凝土内钢筋的电位测量.....	101
13. 用于测量钢筋锈蚀电位的电位轮.....	105
14. 电阻率测试法.....	108
15. 碳化和氯化物.....	112
16. 现场氯化物分析.....	115
17. 混凝土样品实验室分析.....	118
18. 远端直观检查的内窥镜.....	128
19. 结构物裂缝及其检测仪器.....	133
20. 预应力管道检测的真空抽气加压设备.....	142
21. 7000A 型激光测量系统.....	145
22. 红外线摄影术.....	151
23. 600 型热录像系统.....	153
24. 海产骨料氯化物含量的现场测定.....	157
25. 后张预应力混凝土桥的管道内部状况检测.....	160
26. 阴极防护——扩展性聚合物薄膜的应用.....	169
27. 用射线照相监测混凝土结构中的钢筋.....	176
28. 用现场无损动力法诊断结构.....	180

混凝土中超声脉冲速度测量建议

(英国标准BS1881第203部分, 1986年)

前 言

英国标准BS1881第203部分是在水泥、石膏、骨料和毛石制品标准委员会的指导下编制的, 用以代替现已撤销的英国标准BS4408第5部分1974。从新制混凝土的取样到结构混凝土的评定等混凝土试验的各个方面都和英国标准BS1881第5部分一样包括在本标准中。第201部分是关于无损试验方法选择的简要指示, 可供选用超声脉冲速度测量的补充测量方法时参考。

混凝土的超声试验在许多国家的试验室、预制的和现浇的混凝土中已有多年的应用历史。

通常的应用方法是根据在分开设置的发射换能器同接收换能器之间通过混凝土中一定距离的脉冲声时来测定超声波群速度。这样做, 可测得沿声径的弹性刚度同密度的比值; 业已发现此一比值是混凝土质量的一个很有用的指标。

这一速度是混凝土制品和结构所固有的配合组成、捣实程度、龄期和自由水量等的函数。在一定的条件下, 对于确定的某些材料种类范围, 可以在速度和例如弹性模量、强度等之间建立起有用的相关关系。

本项超声技术和通常用于金属中局部缺陷检测的脉冲—回声技术完全不同。金属检测中需用的高频波不能通过混凝土, 因为这种波由于混凝土中骨料粒子以及空隙而迅速地散射和扩散。但是, 这种波如果足够强大到能增加其有效路径长度或完全切除信号以影响其脉冲声时, 那么个别的缺陷仍能检测得出。

所有穿过混凝土的超声脉冲都有一定程度的衰减, 此衰减量依超声波频率和混凝土性质而定。这一衰减很不容易测得, 以这种方式传播脉冲的技术未曾获得广泛应用, 但是它在某些情况下可以得到有用的补充资料。应参阅有关的专门文献。

本标准论及通过混凝土发射的纵向超声脉冲速度的测量, 希望通过其应用对此项测量技术有进一步的理解。本标准包含关于试验结果判读解释以及试验结果同强度、弹性模量等试验的相关关系等的若干项建议。

遵守英国标准并不免除使用标准的人的法律义务。

1. 范围

英国标准BS1881第203部分提出素混凝土、钢筋混凝土和预应力混凝土的试件、预制构件和结构采用超声脉冲速度测量的无损试验的建议(1, 2)

注1: 方括弧内数字为附录A中参考文献的编号。

注2: 本标准所参考的有关的英国标准名称见封里所载。

2. 定义

本标准第203部分中所用的定义见英国标准BS3683第4部分和BS6100第6部分，另见下述：

- 2.1 声时 指由发射换能器起，通过混凝土到达接收换能器止的超声脉冲传播时间。
- 2.2 始点 指由测量仪器检测到的脉冲前缘。

3. 应用

通过混凝土的纵向振动的超声脉冲测量有下面的几个用途，详见第8~12节：

- (a) 确定构件中或构件间的混凝土均匀性(3、4、5)，第8节；
- (b) 检测有无裂缝、空隙和其他缺陷及其大致范围(6、7、8)，第9节；
- (c) 测量混凝土性质随时间的变化(9、10、11)，第10节；
- (d) 测定脉冲速度同强度的相关关系，作为混凝土质量的一个量度(12、13、14)，第11节；
- (e) 确定混凝土的弹性模量和动泊松比(15、16)，第12节。

超声脉冲速度受到对混凝土弹性刚度和力学强度起决定性作用的某些特性的影响。沿着结构中不同路径所测得的一系列的脉冲速度的变化反映了混凝土状态的相应变化（见第8节）。

当所检测的混凝土中有低密度区、空隙或受损伤的材料，计算的脉冲速度就会有相应的降低，这样就能确定缺陷的大致范围（见第9节）。由于混凝土品质的增强或衰退，在其结构中所出现的随着时间增长而发生的变化，分别被反映为脉冲速度的增加或减少。通过一定时间间隔进行多次试验就能监测到这些变化。

混凝土结构的脉冲速度测量也可作为质量控制之用。和质控试件如立方块或圆柱体等的力学试验相比较，脉冲速度测量具有和结构混凝土直接发生关系的优点，它不是和常常不能真实地代表浇灌于结构中混凝土的试件发生关系。

理想的做法应是把脉冲速度和结构部件上所作的试验结果连系起来，而且当和这些部件的强度或所需的其他指标能够建立起相关关系的话。那么利用脉冲速度就是值得的。这种相关关系对预制件是很容易建立起来的，对现浇结构也能找到这种相关关系（见第11节）。

在脉冲速度和混凝土的静力和动力两种弹性模量或混凝土强度之间可能建立一些经验关系。后面的一种关系受到像水泥品种、水泥用量、掺合料、骨料种类和尺寸、混凝土养生条件和龄期等因素的影响。所以，当用脉冲速度试验结果来表达强度或弹性性质时，特别当强度超过60MPa时，应该谨慎对待。

4. 原理

和被测混凝土表面保持接触的电一声换能器发出纵向振动的脉冲。这一脉冲在混凝土中传播了一段已知距离 L 后，由另一具换能器将其转换为电信号，而脉冲经历的时间 T （称为声时）可由记时电路测得。

脉冲速度 V (以 km/s 或 m/s 表示) 可由下式给出

$$V=L/T \quad (1)$$

式中: L —路径 (称为声径) 长度;

T —脉冲通过该路径所需的时间。

应用超声频率而不是声频率振动脉冲有如下两个理由:

(a) 为了使脉冲有一个明显始点;

(b) 为了在脉冲传播方向产生最大的能量。

当脉冲由换能器送入混凝土时, 它在混凝土中多相材料的各个界面产生了多次反射, 产生了在混凝土中各个方面传播且包含了纵波和剪切波的复杂应力波系统。

5. 测量仪器

5.1 概述

仪器主要由一具电脉冲发生器、一对换能器、一具放大器和测量由发射换能器发出电脉冲的始点起到接收换能器接收到脉冲始点止的时间间隔的电记时装置等组成。有两种电记时仪器和显示, 一种利用阴极射线管, 它按适当的时标显示出接收到的脉冲, 另一种为直接数字读数显示的计时器。

5.2 性能特点

仪器应具有以下特点。

(a) 应能测量声径为 100mm 到 3m 范围内的声时 (见第5.7节)。按第5.6节所述的测量精度应达到 1% 。

(b) 施加的电激发脉冲的上升时间不得大于发射换能器固有周期的 $1/4$ 。这是为了保证获得显明的脉冲始点。

(c) 连续的前后两个脉冲应有足够长的间隔, 以保证小的混凝土试验样品中接收到的信号始点不受前面一个脉冲工作循环所产生的混响干扰。

(d) 在仪器制造者所指定的环境温度、湿度和电源电压等范围内, 仪器应能保持其性能。

5.3 换能器

5.3.1 种类 能在第5、3、2节所述的频率范围内操作的任何种适宜的换能器都可应用。通常采用压电式和磁致伸缩式的换能器, 后一种对频率范围中较低部分更为适用。

5.3.2 换能器的固有频率 换能器的固有频率一般应为 $20\text{kHz} \sim 150\text{kHz}$, 但对极长的声径可用低达 10kHz 的频率; 而在另一极端情况, 对砂浆和灌浆可用高达 1MHz 的频率。

高频脉冲虽可获得明确的始点, 但是它通过混凝土时的衰减比低频脉冲快得多。所以, 对短的声径宜用高频换能器, 对长的声径宜用低频换能器。对于一般用途, 频率 $50\text{kHz} \sim 60\text{kHz}$ 的换能器是合宜的。

5.4 脉冲始点到达时间的确定

5.4.1 概述 目的是要确定脉冲始点通过混凝土所需的时间。如5.3、2节所阐明,脉冲一路进入混凝土时,其始点显现得不再那么明确。所以,仪器必须能够检测出脉冲最早到达的那一部分。虽然在信噪比小于1的情况下,技术上有可能将信号同背景噪声区分开来,而实测声时所需的1%精度要求却只能在信噪比大于1时方能获得。

5.4.2 阴极射线示波器 在采用阴极射线显示作为记时装置的情况下,应把接收到的脉冲放大到可能的最高水平,以时基轨迹显示中不出现“茅草”干扰为限度。应取信号曲线同初始水平的时基线切点作为脉冲始点。或者取曲线上的明确特徴点(例如第一个交叉)作为脉冲始点。

5.4.3 数字式仪器 对于数字式仪器,接收的脉冲应放大到或赋形到触发数字记时器所分别需要的水平和上升时间为止。

记时器应从脉冲前缘的某点开始,在相应于5.2节规定的精度范围的时间内触发。但是,仪器的绝对精度却总是受信噪比的限制。

当采用数字式指示装置时,也会发生不是第一个脉冲而是第二个脉冲波触发仪器的情况。应检查试验结果的总的趋势,以便消除由此原因产生的判读错误。

5.5 记时设备调零

必须调整好仪器的正确零读数,因为所显示的实测值受到脉冲在换能器的材料中通过以及电信号沿着换能器电缆通过这两种过程所产生的时间延迟的影响。仪器应备有适当的时间延迟调整,以便使读数不受上述两项影响。

把两具换能器各连接于已知其精确声时的参考棒两端来测定时间延迟。参考棒详见第5.6节。应以相同的办法将换能器连接于参考棒,这一点是很重要的。可施用少量的耦合剂并将换能器紧贴于参考棒端部。像把换能器以滑动的方式贴装于参考棒端部的办法会给出极为不同的零读数,应避免采用。

每次使用仪器时,都要做上述的零读数调整。换能器互换位置、应用其他换能器时和电缆长度有变化时,都要做零读数调整。按照电路或电缆的稳定性情况,可能还需经常检查仪器是否调零。

5.6 检查声时测量精度

脉冲声时测量精度取决于用来测量时间间隔的电子装置的精度及其检测脉冲始点的灵敏度。

仪器的总的性能应通过两根参考棒所作的测量来加以检查,这两根参考棒的精确声时都为已知。

注1有必要时,由参考棒示出的声时的精度可请国家物理试验室加以校核。

这两根参考棒的脉冲声时应分别为 $25\mu\text{s}$ 和 $100\mu\text{s}$ 。较短的一根参考棒应用来照第5.5节所阐述进行仪器的调零。较长的一根参考棒应该用来检查该仪器的脉冲声时测量的精度。如第5.4节所述的做法,在这两根参考棒端部分别放置换能器进行测量,取得声时读数。一般并不一定要做较长一根参考棒的测量,因为可以认为仪器制造厂已按上述方法检定仪器。

检查结果和参考棒已知值相差应不大于 $\pm 0.5\%$ 。

注2参考棒制造厂常指定脉冲声时的精度为 $\pm 0.2\mu\text{s}$ 。

5.7 声径长度测量精度

测量精度应高于 $\pm 1\%$ 。在不可能作声径长度直接测量的部位，可采用设计人员规定的公称尺寸并考虑其容限，且应在试验报告中加以说明。按此办法试验小于300mm的声径长度时，将会产生不可接受的误差。

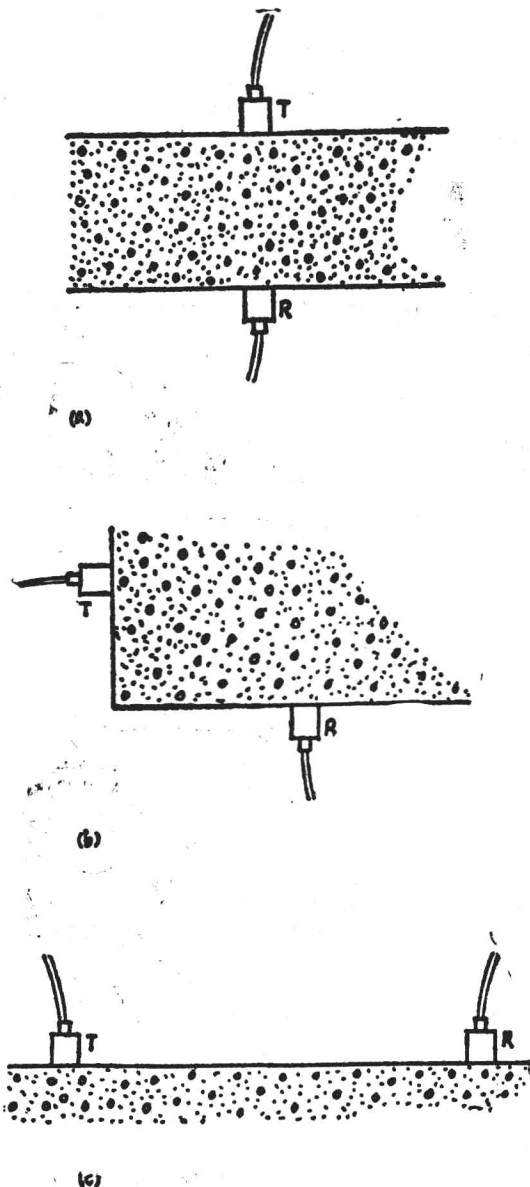


图1 超声脉冲传播和接收方式

- (a) 直接传播，(b) 半直接传播，
(c) 间接的或表面的传播
(T) —表示发射，(R) —表示接收

6. 脉冲速度的确定

6.1 换能器的布置

接收换能器检测出最早到达的脉冲分量。这一分量通常是纵向振动的前缘。尽管所传播的最大能量的方向是垂直于发射换能器的表面，但是可能在其他的一些方向检测到通过混凝土传播的脉冲。因此，可能按下面三个方式之一来布置两具换能器以测量脉冲速度：

(a) 两具换能器面对面布置（直接传播）；

(b) 两具换能器在相邻面布置（半直接传播）；

(c) 两具换能器布置在同一表面（间接传播或表面传播）。

三种方式如图1 (a) — (c) 所示。图1 (a) 的换能器面对面布置。但是，有时这两具换能器布置在两相对的表面却必须错开一点布置，这种布置按半直接传播方式看待。

6.2 直接传播时脉冲速度的确定

在可能时，应该采用直接传播的布置方式，因为两具换能器之间的能量传递为最大，因之所确定的速度精度主要只受声径长度测量精度的影响。所用的耦合剂应尽可能摊铺得薄，以避免由于耦合剂和混凝土两者声速不同而产生端部效应。

6.3 半直接传播时脉冲速度的确定

这种布置方式的灵敏度介于其它两种布置的灵敏度之间。一般认为取两具换能器表面中心之间的实测距离作为声径长度已属相当精确，尽管这样测量声径长度的精度可能有一定的降低。

6.4 间接或表面传播时脉冲速度的确定

这种方式只应在混凝土仅有一个表面可以安装仪器时，或当要确定表面裂缝深度时以及当相对于混凝土整体质量来说表面混凝土质量更宜重视时，才予以采用（见第9节）。

这是一种最不灵敏的布置，而且当声径长度给定时，这种布置在接收换能器处产生的信号幅值大约只有直接传播方式所产生的2~3%。此外，这种布置测得的脉冲速度通常要受表层混凝土的影响；而这一部位常常和构件内部混凝土具有不同的成分，试验结果可能不具有代表性。在同一混凝土构件中，间接方式的速度一定比直接方式的速度低，差值可达5~20%，主要取决于被测试混凝土的质量。可能时，对这一差值要作现场测定。

因为换能器和混凝土的接触面积很大，用间接传播方式时，声径长度很不明确。因此，宜把两具换能器的间距改变，作多次的测量以消除这一不确定性。做法是，把发射换能器放在固定的一点X并同混凝土表面接触，然后沿表面上某一直线按不变的增量 X_n 多次设置接收换能器。将记录的传播时间同相应的两具换能器间距绘成如图2中的(b)线，量得(b)线的斜度为沿所选直线上的平均脉冲速度。按此方法实测得到的图上各点不成直线时，可能有表面裂缝存在，或表层混凝土质量低劣；在此情况下，实测的速度是不可靠的。

6.5 换能器同混凝土的耦合

为了保证把发射换能器产生的超声脉冲送入混凝土并被接收换能器检测到，混凝土同两具换能器接触面之间的充分声耦合是很重要的。多数混凝土的竣工表面是足够平滑，在施用耦合介质并将换能器抵紧混凝土面后，足可保证良好的声接触。典型的耦合剂有矿脂、牛油、软肥皂和高岭土/甘油膏。只应有很薄的一层耦合剂把换能器同混凝土接触面隔开即可，这一点是很重要的。为此，要使耦合剂薄薄地摊铺开并反复多次读取声时值，直到获得最小值为止。

应尽可能把换能器同混凝土靠模板的一面或浇灌于模型中的一面相接触。用像钹刀抹平等方法作成的表面可能具有和整体混凝土不同的性质。如有必要在此种表面上施测时，应在比平常所用的声径更长的距离取测量读数。当有一处表面为非模型制成时，对直接传播方式建议采用的最小声径长度为150mm；对间接传播方式，建议采用最小声径长度为400mm。

当混凝土表面十分粗糙不平时，在拟设置换能器的部位应予以修整平坦光滑，也可铺设一层像快凝环氧树脂或膏，但是必须保证混凝土表面同此类整平材料之间的粘结力，使脉冲能够正确地传入被测定的混凝土。很重要的一点是要保证整平材料尽可能薄地铺设。必须形成有明显效果的组合，然后把整平材料的脉冲速度考虑在内。

为了避免在换能器和不光滑的混凝土表面之间施用薄层耦合剂以取得良好声接触的问题，曾研制了通过整体化探头（有6mm直径的尖端）以给出或拣拾脉冲的换能器。曾查得具有半球形尖端的接收换能器十分成功。但是，这种形状的发射换能器却不能够把足够能量给与混凝土表面以保证在任何声径长度（短声径长度例外）的传播需要。还为某些特殊情况

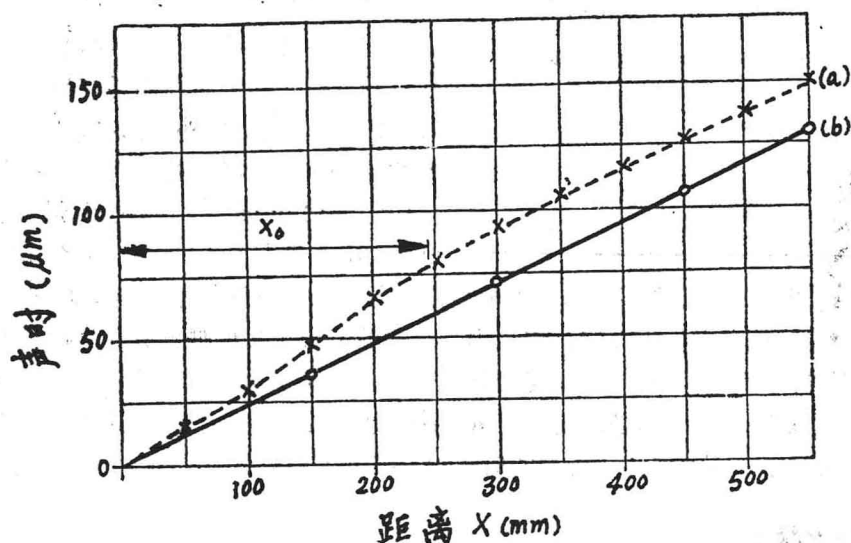
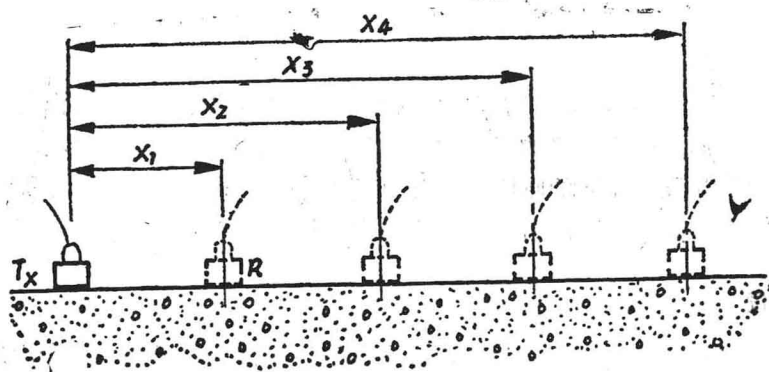


图2 间接传播时脉冲速度的确定

- (a) 表面50mm为质量低劣混凝土的测试结果 (见第9.4节)
 (b) 匀质混凝土的测试结果 (见第6.4节)

研制了其他形状的换能器。应该指出，当用特殊换能器时，几乎都一定需要作零读数调整。安装设置得不好的换能器经常表现出过度的“摆动”，而耦合程度满意时，数字读数会很快稳定。

7. 影响脉冲速度测量的因素

7.1 概述

为了提供能够反复测得相同的脉冲速度，并且它只基本上取决于被测混凝土的各项性质，就有必要考虑那些会影响脉冲速度的因素及其同混凝土的各项物理性质的相关关系。

7.2 温度

湿度对脉冲速度有两方面影响,即化学的和物理的。它们的效应对估计混凝土强度的相关关系的形成是很重要的。养生适当的标准立方试块和同一混凝土浇成的结构部件两者之间的脉冲速度会有显著的差异。差异的原因一部分由于水泥水化时的养生条件不同,另一方面由于空隙中有自由水存在。估计强度时考虑这些效应是很重要的。

7.3 混凝土温度

业已查明 $10^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 之内的混凝土温度变化不会产生什么大的变异,不会出现相应的强度或弹性性质的变化。只当温度变化超出上述范围才应对脉冲速度测值作修正,修正值如表1。

温度对脉冲传播的影响 表 1

温 度 $^{\circ}\text{C}$	脉冲速度修正值 (%)	
	气干混凝土	水饱和混凝土
60	+0	+4
40	+2	+1.7
20	0	0
0	-0.5	-1
-4	-1.5	-7.5

7.4 声径长度

测量脉冲速度的声径应有足够长度,以便不受混凝土非匀质性的显著影响。除了第7.5节所述的情况之外,建议对骨料公称最大尺寸为20mm及以下的混凝土,最小声径长度应定为100mm,对骨料公称最大尺寸为20~40mm的混凝土,最小声径长度应定为

150mm。虽然电子记时装置会表现出速度随着声径长度的增加而略有降低的倾向,但是脉冲速度一般不受声径长度变化的影响。这是因为脉冲的高频分量比低频分量衰减得更多,而随着传播路径的增长,脉冲始点的形状变得更圆钝些。于是,由于难以精确地确定脉冲始点,就发生了脉冲速度的表观降低,而此降低取决于确定始点时所用的具体方法。速度的这种表观降低通常很小,且在第5.2节所述的时间测量精度容限之内。

7.5 试件的形状和尺寸

除非试件的最小横向尺寸小于某一最小值,振动的短脉冲速度同它所通过的试件尺寸和形状是无关的。但是小于某一最小值时,脉冲速度会显著降低。降低幅度主要取决于脉冲振动波长对试件最小横向尺寸之比,如此比值小于1,则降低幅度就微不足道了。表2列出混凝土中脉冲速度、换能器频率和试件最小的容许横向尺寸的关系。

如果最小的横向尺寸小于波长或者采用了间接传播方式,传播模式就有变化,因之实测速度就不同。当比较尺寸显著不同的几个混凝土部件时,这一点特别重要。

试件尺寸对脉冲传播的影响 表 1

换 能 器 的 频 率 (KHz)	混凝土中的脉冲速度 (Km/s)		
	V _c =3.5	V _c =4.0	V _c =4.5
	试件的最小容许横向尺寸 (mm)		
24	146	167	188
54	65	74	83
82	43	43	55
150	23	27	30

7.6 钢筋的影响

7.6.1 概述 在钢筋混凝土中靠近钢筋的地方测得的脉冲速度通常比同一配合比的素混凝土中的测值高。这是因为钢中的脉冲速度可能高达素混凝土中脉冲速度的两倍,而且在某些情况下,到达接收换能器的第一个脉冲一部分是在钢筋中通行,另一部

分是在混凝土中通行。

脉冲速度的表观增大取决于测点同钢筋的靠近程度、钢筋的直径和根数以及钢筋走向同脉冲传播方向的相对位置关系等(17)。脉冲速度和钢筋表面状况两者都可能对钢筋影响速度测量的程度有关系,考虑钢筋影响而对实测值所作的修正将降低混凝土中的估计脉冲速度的精度。所以,应尽可能在两具换能器之间的直接通路上没有钢筋或不贴近钢筋的情况下进行测量。电磁式保护层厚度测量装置(见英国标准BS1881第204部分)可用来查定钢筋位置。

7.6.2 钢筋纵轴同传播方向平行 选择声径位置时,应尽可能避免它和平行于声径方向的钢筋靠近。如果不可能这样做,则应将实测脉冲速度值修正,以考虑钢筋存在的影响。修正值取决于声径线到最近的钢筋边缘的距离、钢筋直径和周围混凝土中的脉冲速度。

混凝土中的脉冲速度 V_c (km/s) 由下式求得

$$V_c = 2av_s / \sqrt{4a^2 + (TV_s - L)^2} \quad (2)$$

假如 $V_s \geq V_c$,

式中: V_s —钢筋中的脉冲速度 (km/s);

a —偏距,由钢筋表面到最靠近测点的两具换能器之间连线的距离 (mm), (见图3);

T —声时 (μs);

L —两具换能器之间的直达通路的长度 (mm)。

当 $\frac{a}{L} > \frac{1}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_c}{V_s + V_c}}$ 时,钢筋就不发生影响,于是式(2)就不再适用。这样,钢筋可能影响测值的区域范围取决于钢筋中脉冲速度同混凝土中脉冲速度之比,但是在低质量混凝土中有大直径钢筋时可望获得约为0.25的 $\frac{a}{L}$ 值高限。对于高质量混凝土, $\frac{a}{L}$ 极限值不大可能大于0.15,但当钢筋直径为12mm及以下时,此值可能小得很多。在实际情况中,直径为6mm及以下的钢筋实际上不可能被检测出来,所以可不予考虑。

应用式(2)的主要困难在于 V_s 值的确定,因为此值受钢筋直径和周围混凝土中脉冲速度两者的影响。一般可沿着埋置的钢筋纵轴传播一道脉冲并考虑其两端处的混凝土保护层厚度来求得 V_s 的量值。

式(2)可方便地改写成下式:

$$V_c = kV_m \quad (3)$$

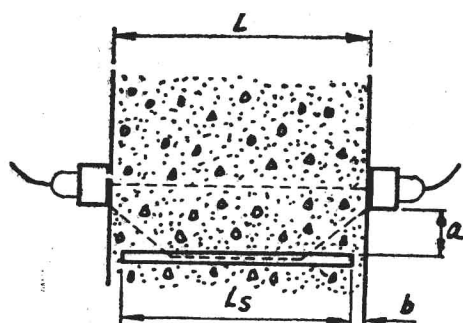
式中: V_m ——实测的表观脉冲速度 (L/T) (km/s);

k ——为下式给出的修正系数

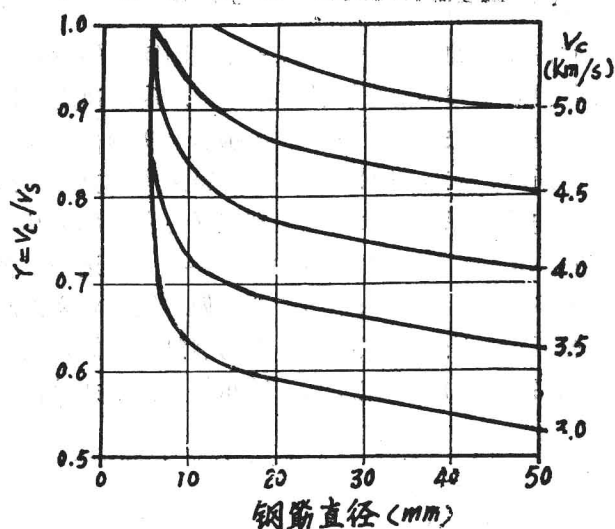
$$k = \gamma + 2 \left(\frac{a}{L} \right) \sqrt{1 - \gamma^2}$$

其中 $\gamma = \frac{V_c}{V_s}$ 。当脉冲频率约为54kHz时,对于常见的 V_s 值和钢筋直径值的典型 γ 值示如图3。

由此图查得的 γ 值(对某一假定的 V_s 值)同图4结合使用,可求得用于式(3)中的估计 k 值,必要时可用多次迭代方法求得可靠的 V_s 估计值。



(a)



(b)

图3 钢筋对脉冲速度的影响：钢筋平行于声径方向。
(a) 混凝土横截面，内置有横向钢筋，(b) 钢筋直径同速度比的关系

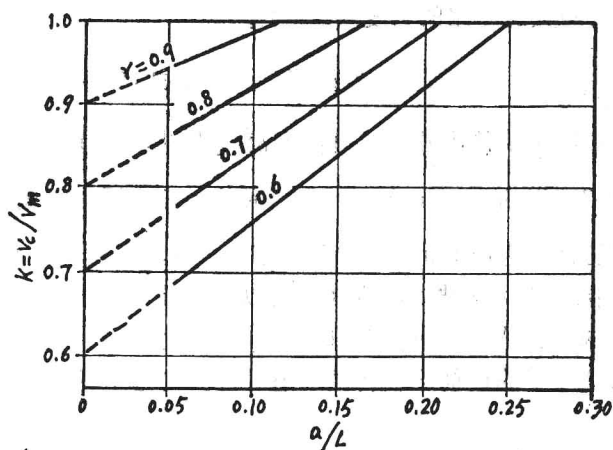


图4 钢筋对脉冲速度的影响：钢筋平行于声径方向
($a > 2b$) (见图3(a)) 时的修正系数

这些方程式只在偏距 a 值大于钢筋端点处混凝土保护层厚度大约二倍以上时才是有效的。当偏距较小时，脉冲很可能通过钢筋全长传播。如钢筋就埋置在两具换能器的连线上，则修正系数由下式给出：

$$k = 1 - \frac{L_s}{L} (1 - \gamma) \quad (4)$$

式中： L_s —钢筋的长度 (mm)；

如果钢筋和混凝土粘结良好且在被测区内没有裂缝，则估计的 V_s 值可能精确到 $\pm 3\%$ 。

应谨慎应用经过修正的脉冲速度测量值，因为这一速度值只和靠近换能器的混凝土及钢

筋有关，并不代表沿着换能器连线上的混凝土。

7、6、3 钢筋纵轴同传播方向垂直 可假定脉冲传播时通过每根钢筋整个直径长度来从理论上计算有钢筋时的最大影响，如图5所示。钢筋对脉冲的影响复杂，钢筋中的表观脉

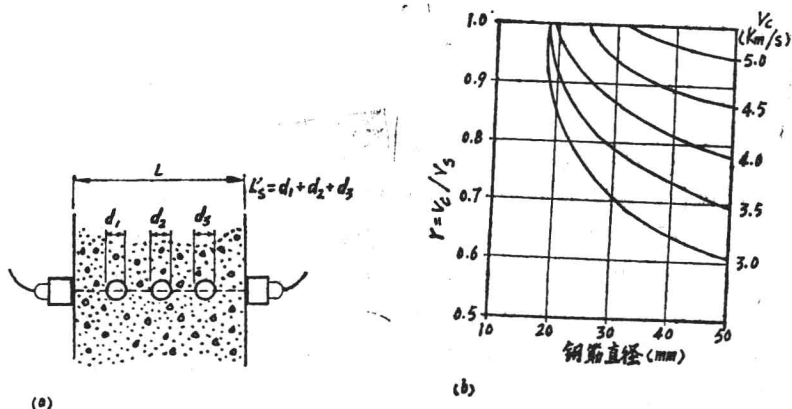


图5 钢筋对脉冲速度的影响：钢筋垂直于脉冲声径方向，
(a) 混凝土截面，内置有纵向钢筋。(b) 钢筋直径同速度比的关系。

冲速度将降低到沿着更小一些直径的钢筋纵轴传播所会出现的速度值以下。

对于采用54kHz换能器的情况，为了实用目的，可不考虑直径小于20mm钢筋的影响，因为它们的影响是微不足道的。对于粘结得很好且直径为20~50mm的钢筋，可将其作为总声径长度 L'_3 的等代纵向钢筋考虑，来求得其平均影响的估计值（见图5）。第7、6、2节所述用以处理埋置在换能器连线上的钢筋的方法（式4），同由图5求得的考虑钢中速度降低的 γ 值结合应用，可用来进行上述的估计。由于粘结力不够，横向钢筋的影响可能会降低，如果这类钢筋并不直接埋置在换能器的连线上的话，如要以一定的精度来评定其影响则是很困难的。

8. 混凝土均匀性的确定

构件内部或各构件之间的混凝土不均匀性引起脉冲速度的差异，这种差异又和质量的差别相关连。脉冲速度的测量为研究匀质性提供了手段，而为达此目的，就得选定足以均匀地布满该结构混凝土一定体积的若干测点。

测点数目取决于结构尺寸、要求的精度和混凝土的变异性。在相当匀质混凝土的大区间中，采用1m的方格进行测试就已足够，但是对小的区间或有变异的混凝土，可能需用更小方格布点。应该指出，如果在全部测试中的声径长度都相同，那么实测到的声时就可用来评定混凝土的均匀性，不必将其换算为速度。这种做法特别适用于按间接传播方式进行测试的地方。

可以用整个方格的脉冲速度测值求出的标准差或变差系数等统计参数来表达匀质性。但是，这类参数只能适当地用来比较尺寸大致近似的区间混凝土的差异。

脉冲速度的差异受声径长度值的影响，因为声径长度值决定着每次试验中受到检测的混凝土试件的有效尺寸范围。应联系被检测的结构构件所要求的性能预料会因这些差异而产生的影响来判断这些差异的重要程度，这一般意味着构件内质量分布所容许的容限应该或者同

临界工作荷载条件下构件内的应力或者同结构暴露条件联系起来。

9. 缺陷的检测

注：见参考文献〔18〕

9.1 概述

用超声脉冲速度技术检测内部缺陷并确定其范围的工作应限由对测试结果的判读解释具有经验的合格人员执行，超声脉冲速度测量应由有经验的并受过此项技术训练的人来实施和判读解解。应十分警惕由单个结果下结论的潜在危险。当超声脉冲穿过混凝土而遇到混凝土一空气界面时，通过这个界面传送的能量是微不足道的。这样，正好位于两具换能器之间的任何充满空气的裂缝或空隙在空隙的投影长度大于换能器宽度或所用声波的波长时，就会遮断直通的超声波束。当遇到这种情况时，要到达接收换能器的第一个脉冲就将沿着缺陷的周边被绕射出去，其声时就将比没有缺陷的类似混凝土中的声时长。

所以有可能利用这一效应来确定直径或深度大约超过100mm的裂缝、空隙或其它缺陷的位置。比较小的缺陷对传播时间只有很小的影响或没有影响。小缺陷也可能在工程上是不重要的。绘制等速线常会给出被测混凝土区间质量的有关资料。

在开裂构件中，由于承受了压力的缘故，开裂面会紧密接触在一起，于是脉冲能量会无阻碍地通过裂缝。例如，这种情况会在开裂的竖向受压桩中出现。如果裂缝中充满传递超声能量的液体，例如在海洋结构中，那么用数字式读数设备就不能检测出裂缝。在这些情况中，测量衰减，可能给出有价值的资料。

对检测缺陷的试验结果所作的判读解释的建议见第9.2~9.4节，但应强调指出其中的假设业已作了简化。

9.2 大空隙或空洞的检测

在混凝土构件上画出方格，使方格的各交叉点之间的距离相当于将对混凝土性能有显著影响的空隙的尺寸。在各交叉点进行测量，测定脉冲在两具换能器之间传播的声时，而换能器则放置得使空洞正好位于换能器之间的声径上。按脉冲将在换能器之间最短路径通过和绕着空洞周围通过的假定，就可估计出空洞的大小。只当空洞周围的混凝土密实度均匀且可在这部分混凝土测得脉冲时，这种估计才是有效的。

9.3 表面裂缝深度的估计

按换能器在表面上的两种不同布置并分别测量通过裂缝的声时，就可估计出表面可见的裂缝的深度。一种适宜的布置如图6(a)所示，其中发射换能器和接收换能器分别位于裂缝的一侧并和裂缝有相等的距离 x 。选用两个不同的 x 值并分别测量其相应的声时。常用的 x 值为150mm和300mm。如果采用这两个值，则充满空气的裂缝的深度为 C (mm)，其值如下：

$$C = 150 \sqrt{\frac{(4t_2^2 - t_1^2)}{(t_2^2 - t_1^2)}} \quad (5)$$

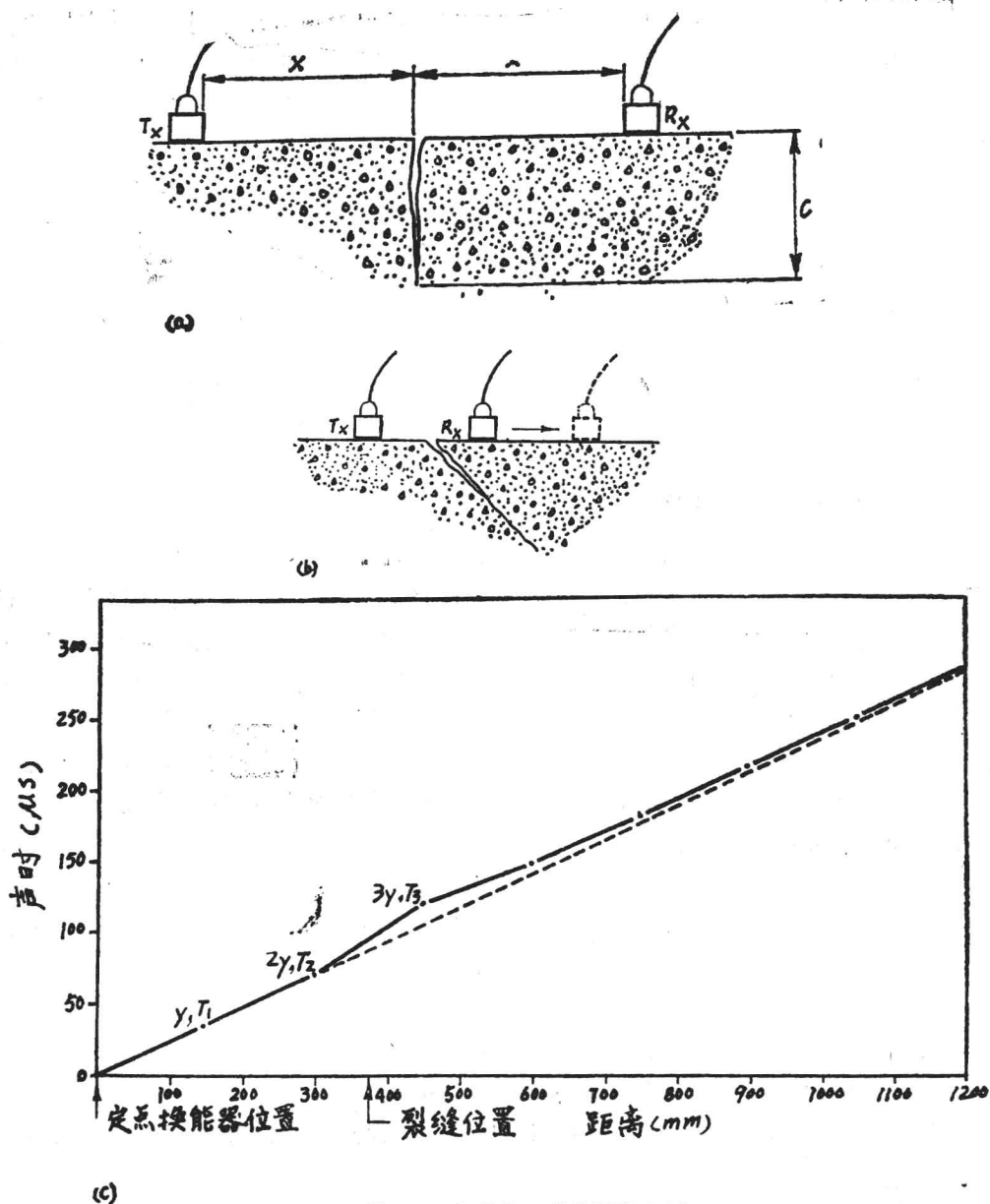


图6 确定裂缝深度的测量布置

(a) 裂缝垂直于混凝土表面, (b) 斜裂缝, (c) 裂缝对表面测量的影响

式中: t_1 ——当 x 为150mm时的声时 (μs);

t_2 ——当 x 为300mm时的声时 (μs);

式 (5) 是按裂缝平面和混凝土表面相垂直且裂缝附近的混凝土是相当匀质的假定而推导得出的。

可作如下的检查来评定裂缝平面是否和混凝土表面垂直: 把两具换能器置于靠近裂缝的地方, 如图 6 (b) 所示。然后依次将其中之一的换能器移离裂缝。如果当移离一具换能器而发现声时有所减少时, 这表明裂缝向该换能器移动的方向斜伸。

另一种布置是把发射换能器置于裂缝一侧并和裂缝中心相距 $2.5y$, 然后把接收换能器

在朝着裂缝的方向依次放在离发射换能器为 y 、 $2y$ 和 $3y$ 等三个地方并分别测得其声时值。将声时值和三次的距离绘成如图6(c)，其中的 y 值为150mm。如果 (y, T_1) 点和 $(2y, T_2)$ 点的连线能通过图中原点，那么就没有隐藏不现的裂缝，而表面见到的裂缝深度 C (mm) 由下式求得：

$$C = \frac{y}{2} \sqrt{\left[\left(\frac{2T_2^2 + 3T_3^2}{T_2 T_3} \right)^2 - 25 \right]} \quad (6)$$

式中： T_2 ——相距为 $2y$ 时的声时 (μs)；

T_3 ——相距为 $3y$ 时的声时 (μs)。

图6(c)还表明，当接收换能器不断地移离裂缝时，声时值就将不断地接近于不开裂混凝土所应有的声时值。

9.4 低劣混凝土层的厚度估计

可能怀疑混凝土有质量低劣的表面层。这种情况可能由于浇灌混凝土时产生的或因火灾、霜冻和硫酸盐侵蚀等原因引起的。可沿混凝土表面进行超声声时测量来估计这种混凝土层的厚度。可用第10节所述的方法并将其结果绘成如图2的图线，只要两具换能器相距不远，脉冲就将在表面层通过，因之测试得到的图线的斜度就可给出表面层混凝土中的脉冲速度。两具换能器之间的距离超过某一定值时，则第一个到达的脉冲就已是通过下卧的较高质量混凝土表面的了，而且这些测点连线斜度给出的是较高质量混凝土中的脉冲速度。图2中斜度改变点的距离 x 。连同各该两层混凝土中的实测脉冲速度能给出估计的表面层厚度 t (mm)，如下式所示：

$$t = \frac{x_0}{2} \sqrt{\frac{(v_s - v_d)}{(v_s + v_d)}} \quad (7)$$

式中： v_d ——被损坏的混凝土中的脉冲速度 (km/s)；

v_s ——下卧的良好混凝土中的脉冲速度 (km/s)；

x_0 ——斜度改变时，测点到发射换能器的距离 (mm)。

上述方法在质量低劣混凝土形成了厚度相当均匀的一大片明显层次且 v_d 小于 v_s 很多的情况下适用。

有局部蜂窝或有损伤的混凝土较难测出，但是如果直接传播和表面传播两种方式都被采用的话，也有可能推求出这类局部缺陷混凝土的大致厚度。

10. 混凝土性质变化的确定

由于水化过程、环境因素的影响或超载等引起的混凝土性质随时间的变化可通过不同时间的多次脉冲速度测量来确定，各次测量应采用同一换能器并设置于同一地点。脉冲速度变化的测量通常可表示强度的变化，且具有在整个测定时期内可对同一试验部件按时进行测量的优点。

脉冲速度测量对追踪硬化过程，特别是浇灌混凝土后36小时期间内是特别有用的。这时，脉冲速度的急速变化和水泥浆膏结构中的物理化学变化相关联，故最好按1~2小时的间