

混凝土超声波检验法

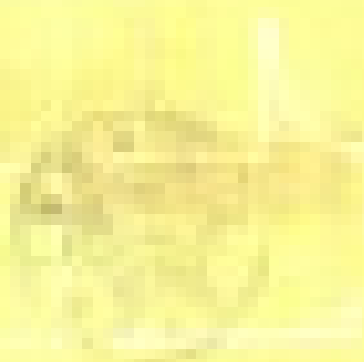
Я. 瓊斯 E. И. 盖特菲尔德 著

建筑工程出版社



混凝土超声波检测法

● 著者 日本国国土交通省 著



土木学会 出版

混 凝 土 超 声 波 檢 驗 法

孔令时 荣庆誌 譯

建 筑 工 程 出 版 社 出 版

• 1 9 6 0 •

Testing Concrete by an Ultrasonic Pulse Technique

R. JONES, B. Sc, Ph. D.

AND

E. N. GATFIELD

本書根据俄譯本 “Ультразвуковой импульсный способ
испытания бетона” (1957年苏联国家
建筑材料出版社版) 譯出

混凝土超声波檢驗法

孔令时 榮庆誌 譯

1960年6月第1版

1960年6月第1次印刷

3,050册

787×1092 $\frac{1}{32}$ • 44 千字 • 印張 2 $\frac{1}{2}$ • 定价 (11) 0.40元

建筑工程出版社印刷厂印刷 • 新华書店发行 • 審号: 2061

建筑工程出版社出版 (北京市西郊百万庄)

(北京市書刊出版业营业許可証出字第052号)

俄 譯 本 序

R. 瓊斯博士由于在混凝土的脉冲超声波試驗方面做出了許多貢獻而知名。他的工作大多是和 E. N. 盖特菲尔德一起进行的。盖特費尔德曾經为这些試驗制成了具有独創性的超声波仪器和电子仪器。

这本小册子是这两位学者共同劳动的成果，也是他們在这方面七年多来的工作总结。其中叙述到許多試驗成果，这些試驗是研究多数因素对超声波縱波速度与混凝土制品的弯曲和压缩强度之間的影响，以及对利用超声波法所确定的某些其他建築材料的彈性性能的影响。

應該指出：在苏联，这种研究工作同英国是同时开始的。但是，苏联是利用一些另外的研究方法（按精确的标记測定時間，利用低頻率等）和与英国不同的仪器（ПИК、ИКЛ 型仪器、精密指示器等）。所得的結果在很大程度上和这本小册子中所叙述的是一致的。在校訂本書譯本时，对于一些有爭論的或是在苏联得到不同結果的問題，均在附注中作了說明。

了解到在英国所进行的这些工作，并且将它与另外一些类似的工作进行比较以后，就可以更深刻地熟悉混凝土的脉冲超声波檢驗法，从而可以更快地将这一新的先进的混凝土及鋼筋混凝土制品質量檢查法运用到我們日益发展的建築材料工业中去。

俄譯本校訂者 И. 扎修克 (И. Зашук)

目 录

俄譯本序

概 述.....	(1)
縱波傳播速度的測量.....	(4)
縱波速度与混凝土强度的关系	(5)
脉冲超声波在混凝土檢驗中的应用.....	(21)
构筑物中整体混凝土的檢驗	(21)
混凝土中裂紋或損毀的发现	(28)
泊松比的計算	(45)
脉冲技术在其它建筑材料中的应用.....	(47)
結 語.....	(48)
附 录.....	(50)
参考文献.....	(74)

概 述

关于“混凝土質量”的概念，是难于精确规定的，因为它完全决定于混凝土结构的用途。根据使用条件可以对混凝土提出下列要求：較高的压缩或弯曲强度，較高的或較低的彈性模量，較大的密度，滲水性低，表面光整，耐冻，耐久，或者还可以提出較高的疲劳强度。另外，設計人員在計算构筑物时，总是把某些特性作为重要的考虑因素，而这些因素的选择也就影响着对混凝土質量的估价。在多数民用建筑方面，混凝土的質量是用該項建筑结构的混凝土特制的試样（棒状試样或立方块試样）根据其压缩或弯曲强度来评价的。直到現在，一般还只能試驗特制的試样，而要确定已浇筑好的混凝土强度則是困难的。

比較試样和构筑物本身的强度值可以发现：試样的紧密性很好且强度也很高，但是构筑物中的混凝土却不够紧密，其强度也很低。显然，在这种情况下，試样是不能說明构筑物的混凝土質量的，它只能判定所用混凝土的潛在强度（потенциальная прочность）。目前，在实际工作中，还没有直接对构筑物中的混凝土（in situ）^①进行不破坏构筑物的强度檢驗方法。因此，就产生了这样一个問題：即以測定与混凝土强度有关的某一物理特性为基础，拟定一种无需破坏材料的檢驗方法。

① 瓊斯于 1949 年在这方面引用的拉丁語“in situ”，我們全換为“构筑物中的混凝土”。——俄譯本校訂者（除中譯者注和原注外，凡俄譯本校訂者注，均不再注明）

在美国, 为此目的〔1~3〕, 以混凝土的强度变化与其动力弹性模量的变化有关这一现象为基础, 采用了一种试样的共振检验法^①, 动力弹性模量本身是根据混凝土试样横向振动频率的测量结果而确定的。

动力弹性模量 $E_{\text{动}}$ 也可以根据试样的纵向振动条件按下式计算:

$$E_{\text{动}} = 4 f^2 l^2 \rho \quad (1)$$

式中: f ——基本谐振频率(赫芝)^②;

l ——试样长度;

ρ ——混凝土的密度。

这一检验方法是布利坦斯基·斯坦达尔特(B. S 1881~1952)〔4〕采用的。它特别适用于实验室内研究时效对混凝土强度及其破坏情况的影响。比起一般的强度试验方法来, 不破坏试样是这种方法的最大优点, 因为未被破坏的试样可以用来进行多次试验。

实际上是不用这种共振法来研究大构件的。实际构件的动力弹性模量也难以按该法确定。在所有可能的测量中, 纵波速度是最容易确定的, 它是根据某些短的“波束”或脉冲振动通过混凝土中一定区域需要的时间计算而得。朗葛, 库尔茨和桑介那夫〔3〕首先把脉冲技术^③用于构筑物的混凝土检验中。混凝土中的脉冲可以由锤击激起。纵波速度

① 共振法在苏联是由鲁舒克和其他人〔26〕发展起来的, 用于这种试验的仪器已成批生产〔27〕。

② 原文中的非标准代号都改为苏联的通用代号, 例如频率代号 n 换为 f 。

③ 严格说来, 此词应叫冲击法, 而不是脉冲法。首先采用冲击法的是格里木〔38〕、什米特〔31〕和奥斯特罗夫斯基〔32〕, 而采用脉冲法的则为 С. Я. 索克洛夫〔34〕、契司明〔9〕及其他学者〔10、28〕。

(V)可在混凝土表面上測量。假設泊松比(σ)取為0.15,則動力模量($E_{\text{動}}$)可由式(2)算出:

$$E_{\text{動}} = \frac{V^2 \rho (1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}{1 - \sigma} \quad (2)$$

式中: ρ ——混凝土的密度。

但是,泊松比并不是固定不變的,它可能与數值0.15有很大的出入。

上述方法的另一缺點是:波速是在表面或靠近表面處測得的,而在不同深度處的速度變化是沒有考慮的。鐵道研究試驗室(Road Research Laboratory)研究了在混凝土板中利用縱波速度的測量結果,一方面可作為確定混凝土質量的準則,另一方面也作為測定板厚的方法。該試驗室還發展了利用測量通過混凝土的超聲波脈沖^①傳播速度來確定建築物中混凝土質量變化的方法。本書介紹的,就是該法在試驗室中的研究情況及其在試驗混凝土和其他建築材料而不破壞它們時的使用情況。

用該法也可確定混凝土路面層的厚度,利用發向路面層的短超聲脈沖,測出其自進入混凝土表面到出現底面反射訊號為止的時間。測得了脈沖傳播時間,知道了超聲波在混凝土中的速度大小,就可以確定出路面層的厚度。在這方面早期的工作表明:測量混凝土的厚度(5)是有很多困難的。但是以後研究出了許多超聲波換能器的新材料^②,在很大程度上簡化了這一測量。反射技術雖可利用,但有其局限性,即此法要在下部板面平滑勻整的條件下方可運用。

① 脈沖振蕩要重複很多次。

② 這裡所說的換能器即通常所指的探頭,其作用是將高頻振蕩的电波變為高頻振蕩的超聲波,下面換能器均譯為探頭。——中譯者

脉冲技术不仅可用于混凝土，而且也可以用来进行其它材料的試驗。現代的脉冲式超声仪可以非常方便地用于非均質的（多相的）或多孔性的材料，如木材、石头或陶瓷等。而将仪器稍加改装还可以用来探测金屬中的缺陷。

縱波傳播速度的測量

現在要提出的方法是測量短的縱波振蕩脉冲在安裝于混凝土相對的兩表面上的探頭間的傳播時間。傳播時間是根據電子射綫示波器記錄訊号的位移和標準的時間記号相比較測得的。這時，此二探頭：1）彼此接觸或2）為被測的混凝土試樣分開^①。

測量時將接收訊号的前沿與一標準時間記号的前邊相吻合。這種吻合是通過帶有標準刻度盤的延遲調節裝置而實現的。標準刻度盤用以保證在規定的時間標記間進行內插計算。這一操作的準確性取決于通過混凝土的接收訊号邊沿的陡度，這裡所指的訊号就是寬頻帶頻譜中的脉冲。頻譜的高頻部分由於混凝土中存在阻尼^②，因而限制了它的使用範圍。但利用固有頻率高的探頭時，接收訊号邊沿的陡度卻能得到改善^③。

超声振動所輻射的能量，當頻率為 f 赫芝時^④，以半錐

① 1) 可用單探頭或雙探頭工作——脉冲反射法；2) 為雙探頭工作——脉冲穿透法。——中譯者

② 即弥散現象，也就是說：在混凝土中不同的頻率有不同的傳播速度，就象在所有的彈性粘滯體中一樣。

③ 這只適用於大試樣（約1米左右），對於小試樣（立方試樣）在此二情況下都必須使訊号標準化。

④ ……傳播具有一定的方向性，因而……。

体角形式降落到零。如下式所示：

$$\sin H = \frac{1.22 V}{fd} \quad (3)$$

式中：H——角度；

V——縱波在該媒質中的傳播速度；

d——发射体直徑。

公式(3)对于始发脉冲起点的頻率范围是不精确的。但是，它可以帮助我們确定发射体的方向性和表明使用固有頻率高的超声波探头的必要性。

所用頻譜的上限頻率在混凝土中很快就衰減了。所以实际应用的是固有頻率为50到200千赫芝^①或更低頻率的探头。

脉冲的重复頻率規定为50赫芝，这是为了使脉冲間的間隔足够大，以消除交混回响和避免以后的脉冲干扰。

縱波速度测量的准确性取决于脉冲所通过路程的長度和被测材料的性質。檢驗混凝土时，其准确度一般高于0.5%。这对于脉冲通过的路程長度約10厘米(4")的試块來說，其誤差相当于±0.1微秒。当脉冲通过更長的路程同时并保証訊号的振幅足够大时，可以达到更高的准确性。通过的路程越長，测量的精度就越高。

在本書的附录中，对实验技术进行了詳細的叙述。

縱波速度与混凝土强度的关系^②

水泥和集料(指加入的砂子、碎石、鉄屑和重晶石等)

① 苏联采用的固有頻率在20千赫芝以上(見(30))。

② 瓊斯在本書和以前所有的論文中，对縱波速度和混凝土强度的关系使用的名詞是“relation”(关系(связь)、依从性(зависимость))，見1944年出版的 Мюллер 編的字典第572頁)，我們采用了該詞的前一意思。

按一定比例配制成的混凝土，其質量取决于混入其中的空气和水分所形成的气孔率。气孔越多，質量就越低。如果把混凝土視為含有球形气孔的彈性固体，那么由混凝土密度变化所决定的縱波速度的变化就可以根据馬凱茲〔6〕的理論計算。計算結果如表1所示。无气孔的材料（基本材料）的泊松比取为0.24、0.29和0.33。

由表1的計算結果可以看出：随着密度在10%的範圍內的变化，波速的变化^①約在6.5%的範圍內。显然，混凝土不是理想的固体，实际上混于其中的空气或水分所形成的气孔含量的变化，就可能引起其密度的变化。

密度变化与縱波速度的关系

表 1

没有气孔的基本材料的泊松比	实际密度与基本材料的密度比	实际速度与基本材料的速度比
0.24	0.90	0.945
	0.80	0.884
	0.70	0.812
0.29	0.95	0.968
	0.90	0.938
	0.80	0.877
0.33	0.90	0.926
	0.80	0.858
	0.70	0.790

图1所示为在直徑50毫米的圓柱形試样中，縱波速度和混凝土密度的变化情形。試样是由路面呈的不同深度上切割出来的。这些試样的密度随着深度的不同变化很大，縱波速度的变化也具有同样的特点。如果把图1中所示的密度数值

① 沒有特殊說明的都是指縱波。

与縱波速度的数值相比較，則可得到直線关系（图 2）。由此图可以看出：当密度变化10%时，就引起速度12%的变化。由于混凝土本身独特的性質，可以認為，在密度变化10%时，速度变化12%是完全符合理論上推导出的变化6.5%的結果的。

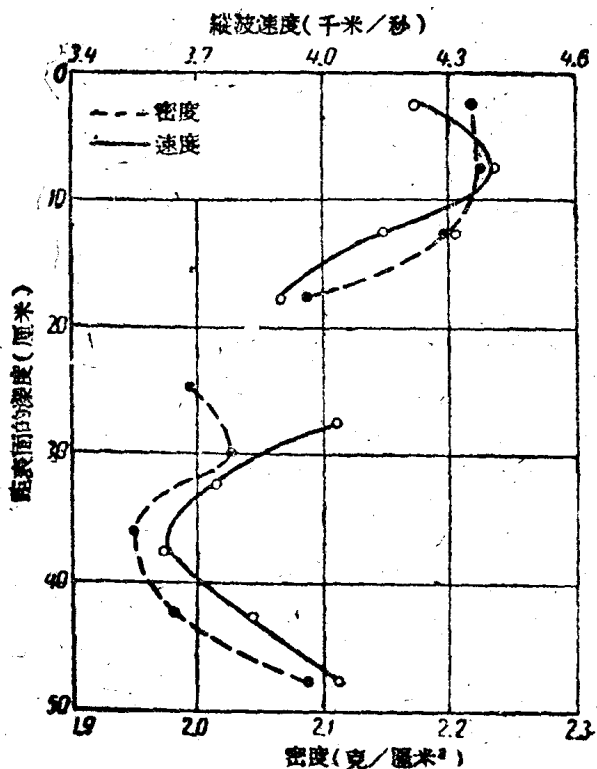


图 1 不同深度路面层取出的試样的縱波速度和密度

在檢驗过程中很容易看出，超声波通过不同的密度区域时，其訊号振幅是不同的。在質量良好的混凝土中，始发訊号有着較大的突然出現的振幅；而在多孔的混凝土中，訊号

振幅就相当小并且也不显著。但是，混凝土質量的定量数据（混凝土标号）还不能以訊号衰減的測量為根据^①。这一問題的產生，一方面是由于探头和混凝土之間的重复接触点难以获得，另一方面也是由于在水分較少的介質中衰減会增强。

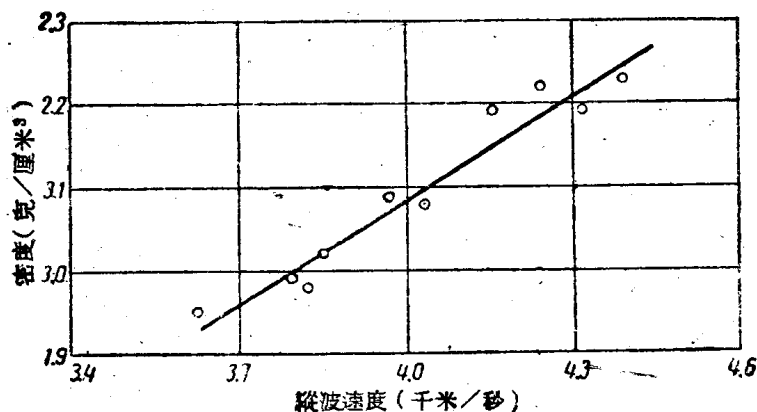


图 2 取自路面层中的試样密度与縱波速度的关系

英国最流行的混凝土强度試驗方法，是将边長为10或15厘米（4~6"）的立方体試样压碎。立方体試样的压縮强度約比同样混凝土制成的圓柱形試样大33%。有理由認為，材料的强度和其中傳播的波速之間存在着一定的关系。这一关系已在道路研究試驗室的第五号报告中〔7〕說明。其中談到：材料密度的变化与其强度的变化同时发生。为了确定不同的速度标志着什么样的混凝土的質量，必須将在同一个試样的試驗过程中确定的速度值和压縮或弯曲的强度值进行比

① 一般說这是不正确的。純技术原因（“声学接触”）只是稍許增加了这一測量的困难。容量衰減的准确数值可以較全面地來估計混凝土的質量。

較。所以，这就規定了試驗目的必須是用来研究下列因素的影响，在实际条件下，这些因素都可能改变混凝土的質量：

1. 混凝土齡期；
2. 水灰比；
3. 填料和水泥的比例；
4. 填料的型式；
5. 含水量；
6. 低碳鋼筋；
7. 氯化鈣；
8. 吸入的空气；
9. 水泥类别。

各种不同因素的影响

在試样上測出縱波速度之后，应立即进行靜力試驗，同时并确定上述諸因素对縱波速度和混凝土質量关系的影响。試样应在水中养护，但在已确定了水含量和有低碳鋼鋼筋的情况下則例外，这时試样是在饱和介質中进行試驗。試样由普通的波特兰水泥制成，但在試驗是为了确定水泥类别的影响时例外。吸入空气的混凝土只用来測量吸入空气的影响。

試驗是用不同混合料組成的立方体試样和梁状試样进行。一般是在立方体試样的底部測量速度，因为这一部分最为紧实^①。

混凝土齡期。图 3 是在边長为10厘米的立方体試样上重复試驗所获得的結果。試样是以 $1:1\frac{1}{2}:3$ ，水灰比=0.40

① 混凝土試样的各向異性，可以在其任一部分上用精确的超声波測量发现，所以在立方体試样的許多区段上进行測量并取其平均值是有意义的。

的混合料制成。

由图 3 可以看出：縱波速度随着混凝土最初的硬化而迅速增加。混凝土凝固一天之后，速度繼續增加，但增加的程度已較小。图 4 为三个边長为 7.5 厘米的立方体試样試驗的平均值，它們是用 $1:1\frac{1}{2}:3$ 和 $1\frac{1}{4}:1:3$ 成分的混合物制成。在图 5 上給出了相应的压縮强度数值，这些数值是在超

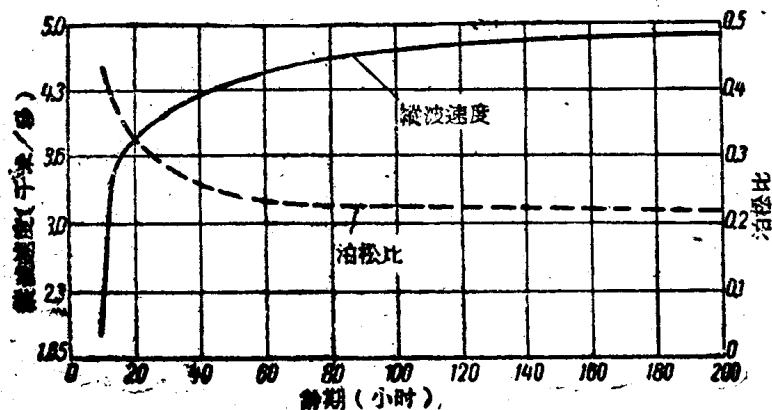


图 3 随混凝土龄期不同縱波速度和泊松比的变化

声波試驗后直接試驗得出的。图 4 和图 5 上的曲綫形状相似，这就指出了混凝土压縮强度和縱波速度之間是存在着一定关系的。图 6 中的曲綫表示了縱波速度和混凝土压縮强度之間的关系，这一关系与它的龄期无关。前已指出，类似的关系在弯曲强度与速度之間也同样存在。

关于龄期对速度的影响問題，在丹麦的昂介尔新和涅林斯特〔8〕的著作中有更加詳細的闡述。

水灰比。如果所有其他的因素都不变，那么水灰比值的增長将导致由于水分而形成的气孔的增加，因而就降低了縱

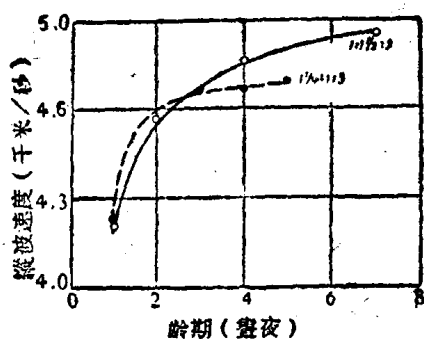


图 4 龄期为 1~7 晝夜的混凝土內縱波速度的增加

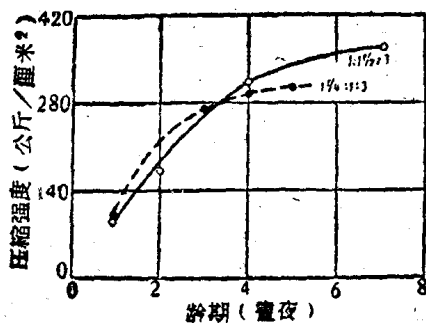


图 5 龄期为 1~7 晝夜的混凝土压縮强度的增加

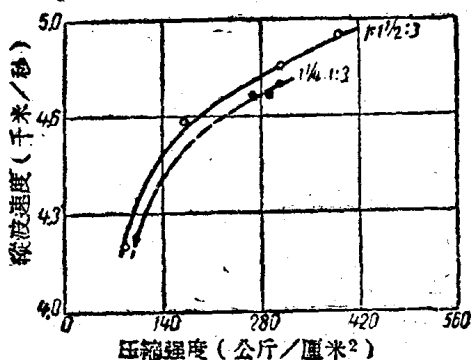


图 6 縱波速度和混凝土压縮强度間的关系