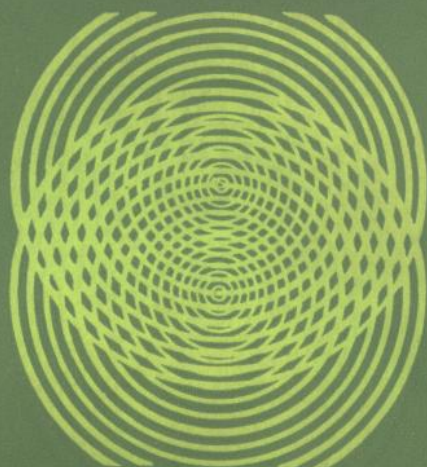


〔英〕 R. 琼斯 〔罗〕 I. 弗格瓦洛 著

季光泽 钱普殷

陈纪萱 译



混凝土非破损试验法

中国建筑工业出版社

混凝土非破损试验法

[英]R.琼斯 [罗]I.弗格瓦洛 著

季光泽 钱普殷 陈纪萱 译

季直仓 校

中国建筑工业出版社

本书较系统地叙述了目前国外常用的混凝土质量非破损试验方法,包括共振法、超声脉冲法、表面波法、表面硬度力学法、辐射法、电磁法及综合法等七章。每章中都分别介绍了关于测试方法的原理、测试设备、测试技术及实际应用等。内容比较丰富,方法比较具体,并且除介绍作者本人及罗马尼亚在混凝土质量非破损检验方面的研究成果外,还阐述了其他国家的大量研究资料以及某些测试实例和测试结果的分析。

本书可供建工、建材以及交通、水利等土建部门的工程技术人员和从事混凝土质量非破损检验的科技人员阅读。

НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ БЕТОНОВ

Р.Джонс И.Фэкэару

Стройиздат Москва—1974

* * *

混凝土非破损试验法

季光泽 钱普股 陈纪萱 译

季直仓 校

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 10½ 字数: 282 千字

1982年4月第一版 1982年4月第一次印刷

印数: 1—5,900 册 定价: 1.30元

统一书号: 15040·4157

中 译 本 序

采用非破损试验法直接检验制品或结构混凝土的强度、缺陷及其他物理力学性能指标，可以确保工程质量，节约材料，提高劳动生产率和加快施工进度，特别是用于确定遭受火灾、冰冻、地震以及在化学侵蚀介质作用下的混凝土建筑物的损害程度，研究和评价同一试样随时间而变异的各种性能等，其优越性较之传统的破损方法更为突出。因此，这项新技术具有很大的现实意义和广阔的发展前途。

在国外，混凝土非破损测试技术的研究工作已有近三十年的历史，特别是近十年来，由于研究工作日益深入，测试技术和测试仪器得到不断的改进，这项新技术的应用十分广泛，有不少国家已制订了关于采用非破损试验法检验混凝土质量的技术规程，在实际应用中取得了良好的技术与经济效果。国际间的学术交流也较活跃，近十年来，曾多次召开过专业性会议，并成立了相应的专业组织。目前各国趋向于将混凝土质量的非破损检验作为衡量一个国家土建测试技术水平的一项重要标志。

我国自五十年代末对混凝土质量的非破损检验进行应用研究以来，曾采用回弹法、超声脉冲法及综合法着重在现场解决具体混凝土工程的质量，积累了不少宝贵的经验和资料。关于共振法、辐射法及电磁法的研究和应用，也曾进行过一些工作。各种测试仪器的研制水平也在不断的提高。目前关于在土建工程中采用非破损测试技术的问题，愈来愈引起人们的重视。

本书系译自英国 R. 琼斯 (R. Jones) 博士 (曾任国际材料与结构实验室联合会 RILEM 非破损试验委员会第一任主席) 和罗马尼亚 I. 弗格瓦洛 (I. FĂCĂOARU) 博士 (现仍任委员会第二任主席) 合著的 « ÎNCERCAREA NEDISTRUCTIVĂ A

ВЕТОНУЛУИ》一书的俄译本《НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИИ БЕТОНОВ》——苏联国家建筑图书出版社1974年出版，В.М.玛斯拉博依希科娃（В.М.МАСЛОБО-ИЩИКОВА）译，并由科学编辑、科学技术副博士Г.Я.波奇托维克（Г.Я.ПОЧТОВИК）加注。

原著的特点是：在混凝土质量非破损检验方面，涉及的领域较广，叙述比较系统，引用的资料比较丰富，测试方法的介绍比较具体，并着重叙述了作者本人及罗马尼亚建筑及建筑经济科学研究院（INCERC）的研究成果以及有关实际应用方面的有益经验；其中关于罗马尼亚所独创的以影响系数法为基础的回弹法，超声脉冲法，特别是用综合法测定混凝土强度的方法，曾经受到各国科技工作者的重视，并且罗马尼亚也据此编制了有关的国家规程。因此，本书对我们在土建工程中研究和应用混凝土质量非破损检验方法，进一步提高我国在这方面的技术水平，具有一定的参考价值。

原著中未包括某些国家近年来发展起来的新的非破损测试技术，如：温索尔（Windsor）探针法，剪切断裂法，混凝土成熟度法，光学纤维探伤法，超声频谱分析法和相关分析法以及声发射技术等。据报导，这些测试方法，有的测试技术比较简便，有的测试精度较高，有的探测方法比较可靠，有的可作动态检测等等，较之目前通用的非破损试验法可能更为优越。此外，原著中在介绍各国具有代表性的测试设备和换能器方面，相对说来，有其一定的局限性。至于有关混凝土非破损检验理论的研究，由于目前各国都仍处于探索阶段，原著中所涉及的也不多。

但是，关于目前在混凝土质量非破损检验方面所存在的某些有争议的问题，如：共振法在实际配筋混凝土构件中的应用，超声脉冲法中的讯号频率和试件尺寸对脉冲速度的影响，基于超声脉冲最短几何路程的混凝土探伤技术，超声衰减测量技术在实测中的应用，混凝土中微裂缝形成时如何设置超声换能器的问题，表面波法在探测深层混凝土质量特别是探测除裂缝和多层结构外

的混凝土质量时的应用，测试设备的标定及对测试数据的修正，以及非破损试验法的测定精度及其表达形式和可靠性问题等，原著中都介绍了作者本人的研究结果，或引入较新的文献资料，并提出了自己的见解。

上述问题都是我国从事这项新技术应用的科技工作者值得加以研究和发展的。

鉴于俄译本略去了原著中有关综合法的具体应用部分，为使本书内容完整起见，我们特将罗马尼亚建筑和建筑经济科学研究院1976年提供的英文单行本《In-Situ Concrete Strength Determination by Combined Ultrasonic Pulse Velocity-Rebound Index Method》译出，作为本书的附录。

此外，有关俄译本中的图、表、公式和数据等，我们都曾与罗文原著进行核对，并经参阅作者曾经发表过的有关论文、罗马尼亚的有关技术规程以及近年来国际专业会议的部分文献资料，对俄译本某些章节中的有关部分，作过一些必要的订正。尽管如此，限于我们的外文水平和业务水平，译文中错误和不妥之处一定不少，希望读者指正。

季光泽 钱普殷 陈纪董

俄 译 本 序

呈献给读者面前的是 R. 琼斯 (R. Jones) 和 I. 弗格瓦洛 (I. Făcăoaru) 所著《混凝土非破损试验法》一书的译本, 内容包括在混凝土制作过程中以及直接在结构和构筑物上检验混凝土性能和状态用的各种现代化非破损试验法的系统化研究成果和实际应用方法。

R. 琼斯和 I. 弗格瓦洛所著的这本书的重要意义, 在于它广泛地反映了国际材料与结构实验室联合会 (RILEM) 非破损试验委员会所总结的经验, 以及作者 (欧洲著名的混凝土非破损试验专家) 本人的经验。

从本书的实际方向, 书中有关新型试验法在生产中应用的大量实例以及较系统、详尽的介绍来看, 本书和 R. 琼斯过去出版的著作 (1962 年剑桥大学出版社出版, 1967 年埃依罗利、巴黎出版) 完全不同。

在有关超声脉冲法、表面波法、辐射法和综合法等叙述中, 都列入了作者本人的研究成果。对苏联读者来说, 意义特别重大的是关于阐述苏联从未采用过的用兰姆波检测道路和飞机场路面的试验法, 以及超声衰减试验法等章节。读者也可以从有关阐述辐射法、电磁法和综合法等章节中看到很多新的方法。

作者所研究的某些实用的试验法 (如: 辐射性探伤法、用超声法检测材料的弹性等), 已超出混凝土和钢筋混凝土试验的范畴, 可推广应用于其它的材料。

I. 弗格瓦洛所研制的、以所谓影响系数为基础的、用非破损法精确预测混凝土强度的一种独创的方法, 在罗马尼亚已制订出标准, 这种方法对苏联读者也有着重大的现实意义。

本书对非破损试验法系按下列顺序分章节叙述，即：共振法，超声脉冲法，表面波法，表面硬度力学法，辐射法，电磁法和非破损综合法等。

作者对每章的内容均按如下的顺序叙述，即：试验法的物理学原理、仪器设备、测试技术描述、试验结果处理、测试数据评价等；并分析研究了有关混凝土非破损试验法的各种特殊应用情况。

当然，罗马尼亚出版发行R.琼斯和I.弗格瓦洛所著的这本书，其目的是在于总结本国建筑业中的应用经验和适应建筑业的需要。尽管如此，其中也有不少资料是说明国外有关混凝土非破损试验法的发展情况的。

作者也反映了苏联在非破损试验方面的部分经验。但整个说来，对苏联近十年来关于非破损测定混凝土质量方面的研究工作进展中某些有代表性的科研工作，以及各项科研成果在建筑工程中的应用等等，还反映得不够。因此我们认为有必要在脚注中对苏联科学工作者的著作，作一些补充的引证。

科学技术副博士Л.Б.皮罗日尼科夫（Л.Б.Пирожников）在原文的翻译中和某些词义的确定方面，曾给予很大的帮助；科学技术副博士Г.Б.什马科夫（Г.Б.Шмаков）在本书准备出版的过程中，曾提供很多宝贵意见，我们认为有必要向他们深表谢意。

科学编辑：科学技术副博士Г.Я.波奇托维克
（Г.Я.ПОЧТОВИК）

目 录

中译本序

俄译本序

绪论	1
第 1 章 共振法	3
1-1 共振法的原理	3
1-2 纵向振动共振法	5
1-3 弯曲振动共振法	9
1-4 扭转振动共振法	12
1-5 振动衰减的测量	15
1-6 共振法的测试设备	18
1-7 共振法的应用	23
1-7-1 混凝土硬化过程的研究	23
1-7-2 研究含水量对混凝土硬化的影响	25
1-7-3 测定动弹性模量及其与静弹性模量的关系	27
1-7-4 测定动泊松系数及其与静泊松系数的关系	33
1-7-5 混凝土抗冻性试验	37
1-7-6 侵蚀性介质作用下的混凝土试验	39
1-7-7 根据振动衰减研究混凝土的性能	40
1-7-8 混凝土力学强度的测定	41
1-7-9 研究变号荷载下的混凝土性能	44
1-7-10 打入桩的混凝土质量检验	45
1-7-11 应用弯曲振动试验预应力钢筋混凝土梁	47
1-7-12 混凝土板厚度的测定	48
1-7-13 立方体试块的纵向共振	49
第 2 章 超声脉冲法	52
2-1 概述	52

2-2	超声脉冲法的原理	53
2-2-1	超声脉冲在混凝土中的传播	53
2-2-2	脉冲的产生过程	54
2-2-3	混凝土的非匀质性、粘弹性、各向异性和试件的几何 形状对脉冲传播的影响	56
2-3	超声脉冲法的测试设备	58
2-3-1	使用两个接收器的冲击法测试仪	58
2-3-2	使用一个接收器的冲击法测试仪	58
2-3-3	超声脉冲仪	60
2-4	超声脉冲法的测试技术	62
2-4-1	换能器的布置	62
2-4-2	换能器的选择	63
2-4-3	测试部位的选择	63
2-4-4	测试部位的处理, 耦合剂	65
2-4-5	仪器的操作	66
2-5	超声脉冲法的应用	72
2-5-1	讯号频率和试件尺寸对脉冲传播速度的影响	72
2-5-2	含水量和温度对超声波在混凝土中传播速度的影响	75
2-5-3	钢筋对超声波在混凝土中传播速度的影响	78
2-5-4	超声波检测水泥混凝土和其他胶结材料混凝土的硬化 情况	82
2-5-5	混凝土动弹性常数的测定	87
2-5-6	混凝土的超声脉冲法探伤	89
2-5-7	混凝土多层结构损坏层厚度的测定	94
2-5-8	混凝土和砂浆在侵蚀性介质作用下的性能	98
2-5-9	混凝土结构在加荷过程中的变化	102
2-5-10	超声波传播速度与混凝土抗压强度之间的关系	106
2-5-11	超声波传播速度与混凝土弯曲抗拉强度之间的关系	132
2-5-12	脉冲衰减与混凝土抗压强度之间的关系	137
2-5-13	打入桩的混凝土质量检验	141
2-5-14	混凝土匀质性的检验	143
2-5-15	装配式构件的混凝土质量检验	148
2-5-16	在建筑工地检验混凝土的质量	150

第3章 表面波法	158
3-1 表面波法的原理	158
3-2 表面波法的测试设备	165
3-3 表面波法的测试技术	168
3-4 表面波法的应用	172
3-4-1 材料弹性的测定	173
3-4-2 构筑物的混凝土质量检验	173
3-4-3 混凝土强度的测定	174
3-4-4 混凝土结构随时间的变化	177
3-4-5 混凝土在延伸区段的质量变化	179
3-4-6 混凝土板厚度的测定	180
第4章 表面硬度力学法	184
4-1 回弹法	186
4-1-1 回弹法的原理	186
4-1-2 回弹法的测试设备	186
4-1-3 回弹法的测试技术	190
4-1-4 混凝土抗压强度的测定	191
4-1-5 混凝土匀质性的检验	204
4-2 印痕法	206
4-2-1 印痕法的原理	206
4-2-2 印痕法的测试设备	209
4-2-3 印痕法的测试技术	212
4-2-4 混凝土强度的测定	213
4-3 钢筋射入法和拔出法	217
4-3-1 钢筋射入法	217
4-3-2 钢筋拔出法	219
第5章 辐射法	224
5-1 概述	224
5-2 穿透辐射法	224
5-2-1 穿透辐射法的原理	225
5-2-2 穿透辐射的产生和测试设备	233
5-2-3 穿透辐射法的应用	240
5-3 中子法	261

5-3-1	中子法的原理	261
5-3-2	中子法的测试设备	264
5-3-3	中子法的应用	266
第6章 电磁法		271
6-1	电磁波吸收法	271
6-1-1	电磁波吸收法的原理	271
6-1-2	电磁波吸收法的测试设备	276
6-1-3	电磁波吸收法的测试技术	277
6-1-4	电磁波吸收法的应用	278
6-2	电磁感应法	281
6-2-1	电磁感应法的原理	281
6-2-2	电磁感应法的测试设备及测试技术	282
6-2-3	电磁感应法的应用	284
第7章 综合法		289
7-1	概述	289
7-2	叠加综合法	291
7-3	“超声波传播速度—回弹值”综合法	294
7-3-1	罗马尼亚采用的标准综合法	295
7-3-2	影响“综合非破损法测试参数—混凝土强度”关系的因素	297
7-3-3	施工现场的应用	303
7-3-4	装配式构件的检验	307
7-4	“超声波传播速度—表面硬度”综合法 (E·什拉赫塔—L·布鲁纳尔斯基法)	310
7-5	“超声波传播速度—超声波衰减值”综合法	311
7-5-1	“超声波传播速度—接收波前沿衰减值”综合法	311
7-5-2	“超声波传播速度—超声波衰减系数”综合法	313
7-6	“超声波传播速度— γ -射线吸收”综合法	314
7-6-1	“超声波传播速度— γ -射线衰减系数”综合分析法	315
7-7	复式综合法	316
附录 应用“超声脉冲速度—回弹值”综合法测定现场混凝土强度的方法		319

绪 论

混凝土非破损试验法的分类

关于分类问题，应注意以下两点：一是必须考虑制订试验法所依据的物理学原理；二是必须考虑混凝土的性能，因为混凝土的性能可以用一种方法测定，也可以用若干种方法测定。

图 1 说明各种试验法按物理学原理的分类。这种分类方法为最好，本书中采用的就是这种方法。可以看出，非破损试验法都是以物理学的各个分支，即力学、声学、电磁学和原子物理学等的原理为依据的。

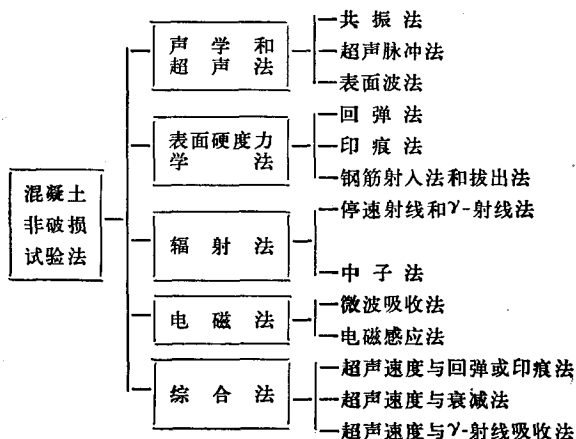


图 1

专业人员如果想把现有的各种试验方法在实践中加以运用，通常都须进行分析和解决其中哪些试验方法可用于测定混凝土的某种性能，我们建议采用图 2 的一般分类方法。

依据这种分类方法，可采用两组或两组以上的试验方法。图 2 中的分类方法系按参考资料确定，并已通过试验检验。

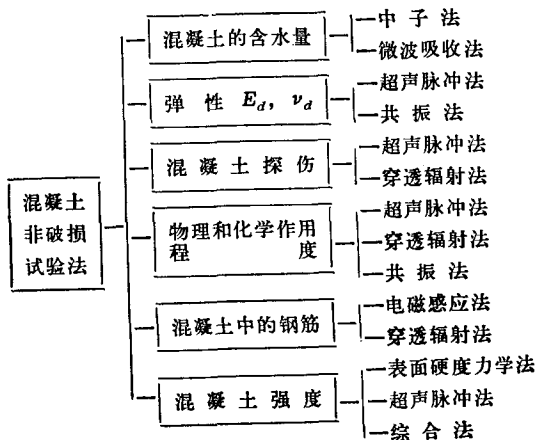


图 2

第1章 共振法

共振法目前仍处于研究阶段，仅能供实验室应用，因为在结构构件中激发振动所需的能量，已超出现有各种激振器的可能。

试验用棱柱体和圆柱体试件，其长度 l 建议按下述条件确定：

$$l \geq 4a \quad (1-1)$$

式中 a ——试件的横截面。

依据条件式 (1-1)，可易于确定试件的固有频率，并可减小其计算修正量。

由于对短棱柱体、立方体和圆板状试件等的试验方法，在目前已经从理论上作过研究^[1]，因此进行测量这类试件的共振现象时，就可减少很多的困难。

在下述应用范围内，共振法可以取得满意的结果：

研究混凝土的硬化过程和影响硬化过程的参数；

测定混凝土的动弹性特征；

研究混凝土在反复冻融循环下和侵蚀介质中的性状；

测定试件混凝土的密度和强度。

1-1 共振法的原理

杆状试件可以在外部脉冲的作用下，按某种规律自由振动，这种规律几乎可以普遍应用于具有一个自由度的力学系统，而不考虑其损失，即：

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (1-2)$$

式中 m ——系统的质量；

k ——系统的弹性常数；

x ——位移。

方程 (1-2) 的一般解为:

$$x = A \sin \omega_n t + B \cos \omega_n t \quad (1-3)$$

式中

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1-4)$$

称为力学系统固有振动的圆周频率, 圆周频率与振动频率 f_n 的关系式如下:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (1-5)$$

如果有振动频率为 ω 的外部振源存在, 则方程 (1-2) 可写成:

$$m\ddot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (1-6)$$

方程 (1-6) 系按齐次方程 (1-2) 的一般解和非齐次方程 (1-6) 的特解求得:

$$x = A \sin \omega_n t + B \cos \omega_n t + \frac{\frac{F_0}{k}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}} \sin \omega t \quad (1-7)$$

应当指出, 振幅 x 将在下列条件下达到其最大值, 即:

$$\omega = \omega_n \quad (1-8)$$

或

$$f = f_n \quad (1-9)$$

对于上述条件下的共振现象, 可用电子设备或声学设备进行记录。凡测量力学系统的固有振动频率 f_n 时, 通常都利用其共振现象。

共振法目前还研究得不够细致, 它只能提供振动试件的简图, 为共振试件推导出共振计算方程。方程解答的结果代表了整个试件的特征, 而共振频率的测量值, 系属于听觉临界范围。

在实践中采用共振法时, 必须考虑到共振法本身并不能应用于测试整个建筑物或其组成构件^①。并且, 对采用的试件, 必须

① 在这个问题上, 我们不同意作者的意见。关于整个建筑物在受迫振动方式下的振动试验(共振试验), 很早就已得到成功的应用。1923年, 苏联曾开始进行过这种试验——俄译本注,

满足如下的要求:

试件应为等截面;

试件的形状应有一个方向较长(呈杆状);

试验时试件的支承,应与测量谐波的激振方法相适应。

应用共振法试验时,必须具备试件的足够完整的资料,而且试件本身不应有任何缺陷。

1-2 纵向振动共振法

测量试件的固有振动频率是最普遍的一种方法,这种方法系在试件中激发拉伸—压缩波型的纵向振动。为此应在棱柱状试件端面设置振动发射器(激振器) E ,激振器的轴线应平行于试件的轴线,并且频率应能改变。试件中产生了由激振器 E 向接收器 R (拾音器)传播的拉伸—压缩波型的振动(拾音器应设置在相对的一端)。为避免试件弯曲,试件应支承在中央。

由于激振器振动频率的变化,便可产生波长 λ 与试件长度 l 大致相同的振动。在这种情况下,声波就可一直传播到试件受迫振动与固有振动因干涉而形成驻波系统为止。这时便可观察到共振,即干扰力频率与杆件基本固有频率相同的现象。

要确定这种频率非常容易,因为这时的振幅为最大[在理论上为无穷大,见公式(1-7)]。

从振幅变化的性质可以说明,试件中部有节点存在。目前已经证实了如下的结论,即:在这一点上可以设置支承,以便使声振动沿试件进行。

棱柱体长度可按下列等式计算:

$$l = \frac{\lambda_{L_1}}{2} \quad (1-10)$$

$$\text{或} \quad l = \frac{v_D}{2f_{L_1}} \quad (1-11)$$

式中 v_D ——拉伸—压缩波,即纵波的速度;