

混凝土无损检测技术

国家建筑工程质量监督检验中心 主编

中国建材工业出版社

混凝土无损检测技术

国家建筑工程质量监督检验中心 主编

中国建材工业出版社

(京)新登字 177 号

内容提要

本书系统的介绍了结构混凝土强度及缺陷的无损检测方法。内容包括：概论；回弹法测强；超声检测技术基础；超声法测强及测缺；综合法测强；钻芯法及拔出法测强；检测数据分析处理等九章。全书内容密切联系工程实际，并列举了典型工程实例，供读者参考。

本书可作为质检人员的培训教材，也可供建筑设计、施工、监理、检测人员以及高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土无损检测技术/国家建筑工程质量监督中心编.

北京：中国建材工业出版社，1996.10

ISBN 7-80090-552-7

I. 混… II. 国… III. 混凝土-产品质量-无损检验-技术 IV. TU528.07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 18194 号

混凝土无损检测技术

国家建筑工程质量监督检验中心 主编

责任编辑：周永厚 高峰

*

中国建材工业出版社出版 (北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经售

北京密云红光印刷厂印刷

*

开本：850×1168 毫米 1/32 22.5 印张：564 千字

1996 年 9 月第 1 版 1999 年 7 月第 2 次印刷

印数：0001—5001~8000 定价：45 元

前 言

混凝土是我国建筑工程中最主要的用量最大的建筑材料之一。它的质量直接关系到建筑结构的安全。加强混凝土质量的监控和检测,保证和提高混凝土质量,是当今建筑工程中的重要课题。

混凝土无损检测技术,是在不破坏结构构件的情况下,直接从结构物上测试或钻取芯样测试,推定混凝土强度及缺陷,它既适于工程施工过程中混凝土质量的监测,又适于工程的竣工验收和建筑物使用期间混凝土质量的检定。上述优点,使得混凝土无损检测技术在建筑工程中得到了日益广泛的应用。

为了适应建设事业的发展,提高混凝土无损检测技术水平和人员素质,加强混凝土无损检测规程的宣传贯彻,保证检测工作质量和工程质量,国家建筑工程质量监督检验中心组织有关专家编写了这本《混凝土无损检测技术》教材。

本书主要是围绕我国现行的以下五本技术规程编写的:《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T23—92)、《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》(CECS 02:88)、《钻芯法检测混凝土强度技术规程》(CECS 03:88)、《超声法检测混凝土缺陷技术规程》(CECS 21:90)、以及《后装拔出法检测混凝土强度技术规程》(CECS 69:94)。本书还介绍了上述规程编写的一些背景材料、国内外混凝土无损检测的工程实践经验以及近年来的科研成果。本书除可作为培训教材外,还可供工程质量管理、检测、监理人员以及高等院校有关专业师生参考。

参加本书编写的人员有:王安坤、邱平、吴新旋、张仁瑜(中国建筑科学研究院结构所)、吴慧敏(湖南大学)、陈丽霞、张治泰(陕西省建研院)、罗骥先(南京水利科学研究院)、李为杜

(同济大学)。全书由邱平、王安坤、吴慧敏负责总校。

本书在编写过程中曾得到有关单位的大力支持和帮助，深表谢意。书中不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

国家建筑工程质量监督检验中心

何星华 王汉明

1996年6月

目 录

第一章 概论	1
第一节 结构混凝土无损检测技术的形成和发展	1
第二节 结构混凝土无损检测技术的工程应用	4
第三节 结构混凝土常用无损检测方法的分类和特点	8
第四节 结构混凝土无损检测技术的研究动向	15
第二章 回弹法检测混凝土强度	28
第一节 概述	28
第二节 回弹仪	33
第三节 回弹仪检测混凝土强度的影响因素	47
第四节 回弹法测强曲线的建立	61
第五节 检测技术及数据处理	71
第六节 结构或构件混凝土强度的计算	76
第三章 混凝土超声检测技术基础	86
第一节 概述	86
第二节 声学基础	87
第三节 超声换能器	122
第四节 超声仪	139
第五节 混凝土声学参数测量技术	149
第四章 超声法检测混凝土强度	175
第一节 概述	175
第二节 超声法检测混凝土强度的主要影响因素	178
第三节 各种影响因素的显著性分析	192
第四节 建立超声测强曲线的方法	198
第五节 声速换算法	202

第六节	结构混凝土强度检测与推定	213
第五章	超声法检测混凝土缺陷	216
第一节	概述	216
第二节	混凝土浅裂缝检测	220
第三节	混凝土深度裂缝检测	225
第四节	混凝土不密实区和空洞检测	231
第五节	两次浇筑的混凝土之间结合质量的检测	244
第六节	表面损伤层检测	247
第七节	混凝土匀质性检验	252
第八节	混凝土钻孔灌注桩的质量检测	255
第六章	超声回弹综合法检测混凝土强度	275
第一节	概述	275
第二节	综合法测强的影响因素	277
第三节	综合法测强曲线	283
第四节	综合法检测混凝土强度技术	292
第五节	结构或构件混凝土强度的推定	296
第六节	综合法的实际应用	299
第七章	钻芯法检测混凝土强度	308
第一节	概述	308
第二节	钻芯机及配套设备	311
第三节	芯样钻取技术	329
第四节	芯样加工及端面的修整	340
第五节	芯样中含有钢筋对抗压强度的影响	348
第六节	芯样试件抗压试验及强度计算	350
第七节	钻芯法的实际应用	354
第八章	混凝土强度拔出法检测技术	364
第一节	概述	364
第二节	预埋拔出法	368

第三节	后装拔出法	375
第四节	测强曲线的建立	382
第五节	工程检测要点	384
第六节	拉剥试验	388
第九章	检测数据分析处理	390
第一节	误差的估计	390
第二节	检测数据的回归分析	406
第三节	采用计算器进行数据处理	432
第四节	采用 PC-1500 计算机进行数据处理	444
第五节	采用 IBM PC/286、386、486 微机计算	462
附件		468
附件一	回弹法检测混凝土抗压强度技术规程 JGJ/T 23—92	468
附件二	超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程 CECS 02: 88	515
附件三	钻芯法检测混凝土强度技术规程 CECS 03: 88	585
附件四	超声法检测混凝土缺陷技术规程 CECS 21: 90	621
附件五	后装拔出法检测混凝土强度技术规程 CECS 69: 94	680

第一章 概 论

第一节 结构混凝土无损检测技术的形成和发展

混凝土是当代建筑工程中最主要的结构材料之一。由于混凝土通常是在工地进行配料、搅拌、成型、养护,所以每一个环节稍有不慎都将影响其质量,危及整个结构的安全。因此,加强混凝土的质量监测与控制成为当今建筑工程技术中的重要课题。众所周知,混凝土的主要质量指标历来是以标准试件的抗压强度为依据的。试件抗压强度试验在全世界已延用 80 多年,成为混凝土与钢筋混凝土结构的设计、施工及验收的基本依据。近年来我国所制定的《普通混凝土力学性能试验方法》(GBJ 181—85)及《混凝土强度检验评定标准》(GBJ 107—87),对这一试验法作出了明确的规定,为按试件强度进行混凝土质量监控奠定了基础。但必须看到,混凝土标准试件的抗压试验对结构混凝土来说,毕竟是一种间接测定值。由于试件的成型条件、养护条件及受力状态都不可能和结构物上的混凝土完全一致,因此,试件测量值只能被认为是混凝土在特定的条件下的性能反映,而不能代表结构混凝土的真实状态,至少在下述情况下,混凝土试件抗压强度不可能如实反映结构混凝土的性能:

(1) 当混凝土施工中发现某一施工环节存在问题,对结构混

注:本章由吴慧敏编写。

凝土强度产生怀疑时；

(2) 当试件的取样、制作、养护等未按规定进行，对其可信度产生怀疑时；

(3) 当结构混凝土受自然环境的侵蚀或受灾害性因素而损害时。

我国《混凝土强度检验评定标准》(GBJ 107—87)中规定：“当对混凝土试件强度的代表性有怀疑时，可用从结构中钻取试样的方法或采用非破损检验方法，按有关标准的规定对结构或构件中混凝土的强度进行推定”，这里所说的非破损检验方法，就是指在不影响结构或构件受力性能或其他使用功能的前提下，直接在结构或构件上通过测定某些适当的物理量，并通过这些物理量与混凝土强度的相关性，进而推定混凝土强度、均匀性、连续性、耐久性等一系列性能的检测方法。

早在 30 年代初，人们就已开始探索和研究混凝土无损检测方法，并获得迅速的发展。1930 年首先出现了表面压痕法。1935 年格里姆 (G. Grimet)、艾德 (J. M. Ide) 把共振法用于测量混凝土的弹性模量。1948 年施米特 (E. Schmid) 研制成功回弹仪。1949 年加拿大的莱斯利 (Leslie) 和奇斯曼 (Cheesman)、英国的琼斯 (R. Jones) 等运用超声脉冲进行混凝土检测获得成功。接着，琼斯又使用放射性同位素进行混凝土密实度和强度检测，这些研究为混凝土无损检测技术奠定了基础。随后，许多国家也相继开展了这方面的研究。如前苏联、罗马尼亚、日本等国家在 50 年代都曾取得许多成果。60 年代，罗马尼亚的弗格瓦洛 (I. Făcăoaru) 提出用声速、回弹法综合估算混凝土强度的方法，为混凝土无损检测技术开通了多因素综合分析的新途径。60 年代声发射技术被引入混凝土检测体系，吕施 (H. Rüsch)、格林 (A. T. Green) 等人先后研究了混凝土的发射特性，为声发射技术在混凝土结构中的应用打下了基础，此外，无损检测的另一个分支—钻芯法、拔出法、射击法等半破损法也得到了发展，从而形成了一个较为完整

的混凝土无损检测方法体系。

随着混凝土无损检测方法日臻成熟，许多国家开始了这类检测方法的标准工作，如美国的 ASTM、英国的 BSI 均已颁布或正准备颁布有关标准，其中以 ASTM 所颁布的有关标准最多，这些标准有《硬化混凝土射入阻力标准试验方法》(C803—82)、《结构混凝土抽样与检验标准方法》(C823—83)、《混凝土超声脉冲速度标准试验方法》(C597—83)、《硬化混凝土回弹标准试验方法》(C805—85)、《就地灌注圆柱试样抗压强度标准试验方法》(C873—85)、《硬化混凝土拔出强度标准试验方法》(C900—87)、《成熟度估算混凝土强度的方法》(C1074—87) 等。此外，国际标准化组织 (ISO) 也先后提出了回弹法、超声法、钻芯法、拔出法等相应国际标准草案。这些工作对结构混凝土无损检测技术的工程应用起了良好的促进作用。

80 年代以来，这方面的研究工作方兴未艾，尤其值得注意的是，随着科学技术的发展，无损检测技术也突破了原有的范畴，涌现出一批新的测试方法，包括微波吸收、雷达扫描、红外热谱、脉冲回波等新技术。而且，测试内容由强度推定、内部缺陷探测等扩展到更广泛的范畴，其功能由事后质量检测，发展成事前的质量反馈控制。

混凝土无损检测技术的发展虽然时快时慢，但由于工程建设的实际需要，它始终具有生命力，许多国家逐步将其标准化，成为法定的检测手段之一。可以预料，随着科学术的发展和工程建设规模的不断扩大，无损检测技术的发展前景是广阔的。

我国在这一领域的研究工作始于 50 年代中期，开始引进瑞士、英国、波兰等国的回弹仪和超声仪，并结合工程应用开展了许多研究工作。60 年代初即开始批量生产回弹仪，并研制成功了多种型号的超声检测仪；在检测方法方面也取得了许多进展。70 年代以后，我国曾多次组织力量合作攻关，大大推进了结构混凝土

土无损检测技术的研究和应用。现已使回弹法、超声回弹综合法、钻芯法、拔出法、超声缺陷检测法等主要无损检测技术规范化。已制定的规程有《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T23—92)、《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》(CECS 02—88)、《后装拔出法检测混凝土强度技术规程》(CECS 69—94)、以及《超声法检测混凝土缺陷技术规程》(CECS 21—90),有关仪器的研究也发展迅速,仪器的标准也在制定中。总的来说,我国在这一领域中的研究工作起步较早、基础广泛、成果丰硕,应用普及率高,在常用的结构混凝土无损检测技术方面的研究和应用水平已处于国际领先地位,但在新的无损检测技术的开拓方面却比较落后,有待进一步努力。

第二节 结构混凝土无损检测技术的工程应用

一、结构混凝土无损检测技术的适用范围

混凝土整个测试技术体系由宏观力学性能及其它宏观性能测试技术、细观结构的观察和分析技术、微观结构的观察和分析技术等三部分组成。虽然无损检测技术在这三个层次的测试技术中都有用武之地,但作为工程应用,则主要用于结构安全直接有关的宏观力学性能及宏观缺陷的测试方面。结构混凝土无损检测技术工程应用的主要目的有结构混凝土的强度、内部缺陷及其它性能检测。

(一) 结构混凝土的强度检测

需直接在结构物上运用无损检测方法推定混凝土实际强度:

(1) 由于施工控制不严,或施工过程中某种意外事故可能影响混凝土的质量,以及发现预留试块的取样、制作、养护、抗压试验等不符合有关技术规程或标准所规定的条款,怀疑预留的试

块强度不能代表结构混凝土的实际强度时，应采用无损检测方法（包括半破损检测方法）检测和推定混凝土强度，作为结构混凝土合格性评定及验收依据。

(2) 当需要了解混凝土在施工期间的强度增长情况，以便满足结构或构件的拆模、出养护池、出厂、吊装、预应力筋张拉或放张，以及施工期间负荷对混凝土强度的要求时，可运用无损检测方法连续监测结构混凝土强度的发展，以便及时调整施工进度。在确保质量的前提下加快施工进度，加速场地周转降低能耗。同时，也可以用无损检测作为施工过程中的质量监视和质量控制的重要手段，以便迅速反馈给下道工序，及时调整工艺参数。

(3) 对已建成结构需要进行维修、加层、拆除等决策时，或受灾害性因素影响时，可采用无损检测方法对原有混凝土进行强度推定，以便提供改建、加固设计时的基本强度参数和其它设计依据。

(二) 结构混凝土内部缺陷的检测

由于施工不慎等原因，在结构混凝土中会出现一些外露或隐蔽的内部缺陷。即使整个结构或构件的混凝土的普遍强度已达到设计要求，这些缺陷的存在也会使结构或构件的整体承载力严重下降，因此，必须探明缺陷的部位、大小和性质，以便采取切实的修补措施，排除工程隐患。

混凝土缺陷的成因十分复杂，检测要求也各不相同，大体上有以下四种情况：

(1) 施工中混凝土未捣实或模板漏浆，以及施工缝粘结不良等原因，造成局部疏松、蜂窝、孔洞、灌浆粘合不全、施工缝结合不良等缺陷，需要检测缺陷位置、范围和性质。

(2) 施工中因温度变形及干燥收缩，以及早期施工过载所形成的早期裂缝，需检测其开展深度和走向。

(3) 结构混凝土受环境侵蚀或灾害性损害，产生由表及里的层

状损伤，需检测受损层的厚度与范围。

(4) 混凝土承载后产生受力损伤，形成裂缝，需检测裂缝的开展深度。

(三) 结构混凝土其他性能检测

所谓其他性能，主要是指与结构物使用功能有关的各种性能。例如，耐久性、钢筋锈蚀、抗渗性、受冻层深度、脆性等等。由于混凝土的其它性能往往与抗压强度有某种相关性，因而通常认为在强度验收中已予体现。但是，由于现代工程结构物所处的环境越来越复杂，对其他性能的要求越来越高，人们也越来越清楚地认识到其他性能与强度相关性的局限性很大，强度高未必其它性能就好，因此，其他性能的无损检测的技术正在引起重视。随着研究工作的深入，它将成为无损检测的重要功能之一。

以上所述无损检测技术的适应范围是指总体而言，每种方法的适应范围则应根据各种方法特点而定。

二、结构混凝土强度无损检测的基本定义

混凝土的强度是指混凝土受力达到破坏极限时的应力值。因此，要准确测量混凝土的强度，必须把混凝土试件或构件加载至破坏极限，取得试验值后试件已被破坏。而结构混凝土强度的无损测试方法，就是要在不破坏结构或构件的情况下，取得破坏应力值，因此只能寻找一个或几个与混凝土强度具有相关性，而测试时又无损于混凝土受力功能的物理量作为混凝土强度的推算依据。所以无损检测方法所得强度值，实际上是一个间接推算值，它和混凝土实际强度的吻合程度，取决于该物理量与混凝土强度之间的相关性。

所谓混凝土的“实际强度”是一个不严谨的概念，因为任何一个强度试验值都与试件制作条件、形状、尺寸、龄期、加荷速度等因素有关。我国标准规定“检验评定混凝土强度用的混凝土试件，其标准成型方法、标准养护条件及强度试验方法均应符合

现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法》(GB 81—85)的规定。即以按标准方法制作和养护的,边长为150mm的立方体试件,在28天龄期,用标准试验方法测得抗压强度值为该试件的标准强度。就一批混凝土而言,其强度标准值是一个统计概念的特征量,它是一批用标准方法测试的标准强度总体分布中的一个值,强度低于该值的百分率不超过5%。混凝土强度等级就按该强度标准值划分。所以,在无损检测中,当我们采用某一物理量(如回弹值、声速值等)与混凝土强度值建立相关关系时,所指的强度值应是标准强度。根据所建立的相关关系所推算的无损检测结果应是混凝土标准强度的推算值。用一批标准强度推算值,并按统计概念所确定的被测混凝土的强度值应是强度的标准值的推定值。

还必须指出,通常进行无损检测的结构或构件,在养护条件、测试龄期等方面,都不可能与标准立方体试件的试验条件相同,所以,即使各种无损检测方法所使用的相关公式是根据物理量与标准强度之间的相关性而建立的,但推定结果仍不能与标准强度及强度标准值等同。为此,我们又将强度标准值的推定值称为特征强度,以区别于强度标准值。

在工程中进行结构混凝土强度无损检测时,通常是要对结构或构件中的混凝土作出合格性评定。在《混凝土强度检验评定标准》(GBJ 107—87)中已明确规定,可采用统计法和非统计法进行。在无损检测方法的现有规程中,都采取统计法推定混凝土的特征强度值,其推定原则与《混凝土强度检验评定标准》(GBJ 107—87)相一致,但鉴于各种无损检测方法的特点,推定的具体方法和取值有所不同。

三、结构混凝土缺陷无损检测的基本定义

混凝土是多相复合体系,在混凝土中存在着许多各相之间的界面。如果把混凝土内部构造分成微观、细观、宏观三个层次,则

混凝土中存在着微观缺陷、细观缺陷和宏观缺陷。一般认为，微观和细观缺陷是由于材料形成过程中的必然产物，是混凝土的固有缺陷。例如，各复合相界面，原生的胶孔、毛细孔及早期非受力变形所造成的微裂缝等，都属于这类缺陷。这些缺陷对混凝土总体性质将造成影响，是混凝土总体力学行为的根源。而宏观缺陷则是由于成型过程振捣不实，或因为受力及腐蚀性破坏所造成的大缺陷。这类缺陷包括蜂窝、孔洞、裂缝、不密实区、腐蚀破坏层等。当结构或构件受力时，这些部位将导致应力集中而首先破坏。在采用无损检测技术时，主要检测这类缺陷。

混凝土中缺陷危害程度与被测结构或构件尺度有关。例如一个直径数米的钻孔灌注桩中，如果有一个直径数厘米的孔洞并不影响总体受力性能，但同样尺度的孔洞若出现在一小构件中，则不能允许，换言之，缺陷检出的灵敏度应与该缺陷对结构与构件危害程度相关联。

综上所述，所谓混凝土的内部缺陷，是指那些在宏观材质不连续、性能参数有明显变异，而且对结构或构件的总体承载能力和其他功能产生影响的区域。检测的灵敏度（可检出缺陷的最小尺度）应与缺陷的危害程度相关联。

第三节 结构混凝土常用无损检测方法 方法的分类和特点

由于结构混凝土无损检测技术能反映结构物中混凝土的强度、均匀性、连续性等各项质量指标，对保证新建工程质量，以及对已建工程的安全性评价等方面具有无可替代的重要作用，因而越来越受到人们的重视。从现有的报道来看，结构混凝土无损检测技术的方法、构思、所涉及的基础理论，都已达到前所未有的新水平。为了便于了解其全貌，我们按检测的主要目的，以及

其所依据的基本原理作如下分类。

一、混凝土强度的无损检测方法

这类方法根据其原理可分为三种。

(一) 半破损法

半破损法以不影响结构或构件的承载能力为前提，在结构或构件上直接进行局部破坏性试验，或直接钻取芯样进行破坏性试验，然后根据试验值与结构混凝土标准强度的相关关系，换算成标准强度换算值，并据此推算出强度标准值的推定值或特征强度。属于这类方法的有钻芯法、拔出法、拔脱法、板折法、射击法、就地嵌注试件法等。这类方法的特点是以局部破坏性试验获得结构混凝土的实际抵抗破坏的能力，因而直观可靠，测试结果易为人们所接受。其缺点是造成结构物的局部破坏，需进行修补，因而不宜用于大面积的全面检测。

(1) 钻芯法在我国已广泛应用，并已制订了《钻芯法检测混凝土强度技术规程》(CECS 03: 88)。该法由于要造成结构或构件局部破坏，不宜在同一结构中大面积使用，因此，国内外都主张把钻芯法与其它非破损方法结合使用。一方面利用非破损方法检测混凝土的均匀性，以减少钻芯数量，另一方面又利用钻芯法来校正非破损法的检测结果，以提高可靠性。

(2) 我国对拔出法也已进行了许多研究，并已制定了拔出法检测混凝土强度技术规程。拔出法比钻芯法简便易行、费用较低，但由于拔出法强度的离散性往往较大，可靠性不如钻芯法。先装拔出法在北美和北欧应用广泛，主要用于混凝土强度发展程度的检测，以确定合适的拆模、起吊、预应力张拉、装配的时间。此法可作为一种施工控制手段。

(3) 射击法采用一种称为温泽探针(Windor probe)的射击装置，是将一硬质合金棒打入混凝土中，用棒的外露长度作为阻力的度量。这种方法适宜于混凝土早期强度发展情况的测定，也适