

新编混凝土无损检测技术

(应用新规范)

《新编混凝土无损检测技术》编写组

中国环境科学出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

新编混凝土无损检测技术/邱平等编, —北京: 中国环境科学出版社, 2002.3
ISBN 7-80163-275-3

I. 新… II. 邱… III. 混凝土—检测

IV. TU528.07

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; 钻芯法及后装拔出法测强; 检测数据分析处理; 高强混凝土强度的无损检测技术等十章。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。

中国环境科学出版社出版发行
(100036 北京海淀区普惠南里 14 号)
北京市联华印刷厂印刷
各地新华书店经售

*

2002 年 4 月第 一 版 开本 787×1092 1/16

2002 年 4 月第一次印刷 印张 27.25

印数 1—5000 字数 650 千字

定价: 48.00 元

前 言

混凝土是当代建筑工程中最主要的结构材料之一,它的质量直接关系到建筑结构的安全。也是关系国家建设和社会经济发展的大事,与广大民众的工作生活息息相关,一直受到有关部门的高度重视。

我国《混凝土强度检验评定标准》和《混凝土结构工程施工及验收规范》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,按有关标准规定对结构或构件中混凝土的强度进行推定”,这里所讲的非破损检验方法,也称无损检测方法,是在不影响结构或构件受力性能或其他使用功能的前提下,直接推定混凝土强度或评估混凝土缺陷,它既适于建筑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检定。由于混凝土无损检测技术具有直接、快速、灵活、重复、可靠、经济等优点,已成为建筑工程一项自成体系的测试技术,得到了日益广泛的应用。

工程质量检测是一项技术性很强的工作。为了适应建筑事业的发展,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,我们组织主编混凝土无损检测规程、负责研究检测技术课题的专家编写了这本《新编混凝土无损检测技术》一书。

本书主要是按我国现行的技术规程编写的。这些规程包括《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T23-2001)、《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 21:2000)、《后装拔出法检测混凝土强度技术规程》(CECS 69:94)、《回弹法检测高强混凝土强度技术规程》(Q/JY17-2000),以及《针贯入法检测高强混凝土强度技术规程》(Q/JY23-2001)。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:第一章 概论(吴慧敏 湖南大学)、第二章 回弹法检测混凝土强度(陈丽霞 陕西省建筑科学研究设计院)、第三章 混凝土超声检测技术基础(罗骥先 南京水科院)、第四章 超声法检测混凝土强度(李为杜 同济大学)、第五章 超声法检测混凝土缺陷(张治泰 陕西省建筑科学研究设计院、吴慧敏 湖南大学)、第六章 超声回弹综合法检测混凝土强度(王安坤、邱平、吴新璇 中国建筑科学研究院)、第七章 钻芯法检测混凝土强度(王安坤、吴新璇 中国建筑科学研究院)、第八章 混凝土强度拔出法检测技术(张仁瑜 中国建筑科学研究院)、第九章 检测数据分析处理(邱平 中国建筑科学研究院)、第十章 高强混凝土强度的无损检测技术(张荣成 中国建筑科学研究院)。全书由邱平统编。

本书在编写过程中曾得到有关单位的大力支持和帮助,谨致由衷的谢意。书中不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

《新编混凝土无损检测技术》编写组

20001 年 10 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.....	(2)
第三节 结构混凝土常用无损检测方法的分类和特点.....	(5)
第四节 结构混凝土无损检测技术的研究动向.....	(8)
第二章 回弹法检测混凝土强度	(16)
第一节 概述	(16)
第二节 回弹仪	(19)
第三节 回弹仪检测混凝土强度的影响因素	(26)
第四节 回弹法测强曲线的建立	(36)
第五节 检测技术及数据处理	(41)
第六节 结构或构件混凝土强度的计算	(44)
第三章 混凝土超声检测技术基础	(50)
第一节 概述	(50)
第二节 声学基础	(50)
第三节 超声换能器	(72)
第四节 超声仪	(82)
第五节 混凝土声学参数测量技术	(88)
第四章 超声法检测混凝土强度	(102)
第一节 概述.....	(102)
第二节 超声检测混凝土强度的主要影响因素.....	(103)
第三节 各种影响因素的显著性分析.....	(112)
第四节 建立超声测强曲线的方法.....	(116)
第五节 声速换算法.....	(118)
第六节 结构混凝土强度检测与推定.....	(123)
第五章 超声法检测混凝土缺陷	(125)
第一节 概述.....	(125)
第二节 混凝土裂缝深度检测.....	(127)
第三节 混凝土不密实区和空洞检测.....	(133)
第四节 两次浇筑的混凝土之间结合质量的检测.....	(142)
第五节 表面损伤层检测.....	(144)

第六节	钢管混凝土缺陷·····	(148)
第七节	混凝土匀质性检验·····	(149)
第八节	混凝土钻孔灌注桩的质量检测·····	(150)
第六章	超声回弹综合法检测混凝土强度·····	(162)
第一节	概述·····	(162)
第二节	综合法测强的影响因素·····	(163)
第三节	综合法测强曲线·····	(166)
第四节	综合法检测混凝土强度技术·····	(171)
第五节	结构或构件混凝土强度的推定·····	(174)
第六节	综合法的实际应用·····	(176)
第七章	钻芯法检测混凝土强度·····	(181)
第一节	概述·····	(181)
第二节	钻芯机及配套设备·····	(183)
第三节	芯样钻取技术·····	(192)
第四节	芯样加工及端面修整·····	(198)
第五节	芯样中含有钢筋对抗压强度的影响·····	(202)
第六节	芯样试件抗压试验及强度计算·····	(203)
第七节	钻芯法的实际应用·····	(205)
第八章	混凝土强度拔出法检测技术·····	(212)
第一节	概 述·····	(212)
第二节	预埋拔出法·····	(214)
第三节	后装拔出法·····	(218)
第四节	测强曲线的建立·····	(222)
第五节	工程检测要点·····	(223)
第六节	拉剥试验·····	(225)
第九章	检测数据分析处理·····	(227)
第一节	误差的估计·····	(227)
第二节	检测数据的回归分析·····	(237)
第三节	采用计算器进行数据处理·····	(257)
第四节	采用 PC-1500 计算机进行数据处理 ·····	(265)
第五节	采用微机处理·····	(278)
第十章	高强混凝土强度的无损检测技术·····	(282)
第一节	概述·····	(282)
第二节	回弹法测强曲线的建立·····	(282)
第三节	超声回弹综合法测强曲线的建立·····	(284)
第四节	针贯入法测强曲线的建立·····	(286)

第五节	后装拔出法测强曲线的建立.....	(288)
附件		
附件一	回弹法检测混凝土抗压强度技术规程 *	(291)
附件二	超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程 *	(316)
附件三	钻芯法检测混凝土强度技术规程.....	(352)
附件四	超声法检测混凝土缺陷技术规程 *	(370)
附件五	后装拔出法检测混凝土强度技术规程 *	(389)
附件六	回弹法检测高强混凝土强度技术规程 *	(406)
附件七	针贯入法检测混凝土强度技术规程 *	(418)

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或搅拌站进行配料、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。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:“当对混凝土强度试件的代表性有怀疑时,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(Chesman)、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发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声发射特性,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,发展成事前的在线检测和质量反馈控制。

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,随着科学技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/T23-2001)、《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)、《超声法检测混凝土缺陷技术规程》(CECS 21-2000),以及《基桩低应变动力检测规程》(JGJ/93-95),有关仪器的研究也发展迅速,并制定了有关仪器标准。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范围是结构混凝土的强度、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,作为结构混凝土是否应进行处理的依据。

(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。

混凝土缺陷的原因十分复杂,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,强度高未必其他性能就好,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,其强度标准值得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。由于各种基准曲线的强度换算误差不同,在使用统计方法推定混凝土的特征强度值时,如何计入无损检测方法本身的换算误差尚待研究。

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。我国《后装拔出法检测混凝土强度技术规程》(CECS 69:94)中规定:当对结构或构件的混凝土有怀疑时,或旧结构混凝土强度需要检测时,可用拔出法进行检测,检测结果可作为评价混凝土质量的一个主要依据。

此外,美国 ASTM C873 所采纳的就地嵌注试件法(Cast-in-place cylinders)也有类似性。它是将试模嵌入结构或构件中一起浇注成型,以使试件与结构具有同等成型和养护条件,然后取出试件进行抗压试验。

(3) 射击法采用一种称为温泽探针(Windor probe)的射击装置,是将一硬质合金棒射入混凝土中,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,也适用于同一结构不同部位混凝土强度的相对比较,但试验结果受骨料影响十分明显。

(二) 非破损法

非破损法以混凝土强度与某些物理量之间的相关性为基础,检测时在不影响结构或构件混凝土任何性能的前提下,测试这些物理量,然后根据相关关系推算被测混凝土的标准强度换算值,并据此推算出强度标准值的推定值或特征强度。属于这类方法的有回弹法,超声脉冲法、射线吸收与散射法、成熟度法等等。这类方法的特点是测试方便、费用低廉,但其测试结果的可靠性主要取决于被测物理量与强度之间的相关性。因此,必须在测试前建立严格的相关

公式或校准曲线。由于这种相关关系往往受许多因素的影响。所以,所建立的相关公式有其局限性,当条件变化时,应进行种种修正,以保证推算结果的可靠性。

(1) 回弹法和超声法在我国已普遍用于工程检测,并已制定相应的技术规程。成熟度法已有研究和应用报道,它主要以“度时积” $M(t) = \sum (T_s - T_0) \Delta t$, 式中 $M(t)$ 为成熟度; T_0 为基准温度; T_s 为时间 Δt 区间内混凝土的平均温度;作为推定强度的依据。主要用于工地上控制早期混凝土强度发展水平,作为施工质量控制手段,一般不用于已成结构长龄期混凝土的强度推定。

(2) 射线法主要根据 γ 射线在混凝土中的穿透衰减或散射强度推算混凝土的密实度,并据此推定混凝土的强度。这种方法由于涉及射线防护等问题,我国应用较少。

(三) 综合法

所谓综合法就是采用两种或两种以上的无损检测方法,获取多种物理参量,并建立强度与多项物理参量的综合相关关系,以便从不同角度综合评价混凝土的强度。由于综合法采用多项物理参数,能较全面地反映构成混凝土强度的各种因素,并且还能抵消部分影响强度与物理量相关关系的因素,因而它比单一物理量的无损检测方法具有更高的准确性和可靠性。许多学者认为综合法是混凝土强度无损检测技术的一个重要发展方向。目前已被采用的综合法有超声回弹综合法、超声钻芯综合法、声速衰减综合法……等等,其中超声回弹综合法已在我国广泛应用,并已制定相应的技术规程(CECS 02:88)。

二、混凝土缺陷的无损检测方法

这类方法主要有超声脉冲法、脉冲回波法、雷达扫描法、红外热谱法、声发射法等等。

(1) 超声脉冲法检测内部缺陷分为穿透法和反射法。穿透法是根据超声脉冲穿过混凝土时,在缺陷区的声时、波高、波形、接收信号主频率等参数所发生的变化来判断缺陷的,因此它只能在结构物的两个相对面上进行或在同一面上平测。目前超声脉冲穿透法已较为成熟,并已普遍用于工程实测,我国已编制了相应的技术规程。反射法则根据超声脉冲在缺陷表面产生反射波的现象进行缺陷判断。由于它不必像穿透法那样在两个测试面上进行,因此对某些只能在一个测试面上检测的结构物(如球罐等密闭容器、洞室护壁、路面等)具有特殊意义,我国已有研究成果,并已有工程应用实例。

(2) 脉冲回波法是采用落球、锤击等方法在被测物件中产生应力波,用传感器接收回波,然后用时域或频域分析回波反射位置,以判断混凝土中的缺陷位置的方法。其特点是激励力足以产生较强的回波,因而可检测较大的构件,例如深度达数十米的基桩等。同时只要适当调整激励频谱,也可测厚度数厘米的板。

(3) 雷达扫描法是利用电磁波反射的原理,其特点是可迅速对被测结构进行扫描,适用于道路、机场等结构物的大面积快速扫描。

(4) 红外热谱法是测量或记录结构混凝土热发射的方法,当混凝土中存在缺陷时,缺陷区的热传导受到阻抑,因而可判断缺陷的位置和大小。

(5) 声发射技术是利用混凝土受力时因内部微区破坏而发声的现象,根据声发射信号分析混凝土损伤程度的一种方法,这种方法常用于混凝土受力破坏过程的监视,用以确定混凝土的受力历史和损伤程度。

三、以检测结构混凝土其它性能为目的的无损检测方法

除了强度和缺陷检测以外,结构混凝土还有许多其它性能可用无损检测方法予以测定。主要有弹性和非弹性性能、耐久性、受冻层深度、含水率、钢筋位置与钢筋锈蚀、水泥含量等等。常

用的方法有共振法、敲击法、磁测法、电测法、微波吸收法、中子散射法、中子活化法、渗透法等。

(1) 共振法和敲击法是用周期外力或脉冲力激励混凝土试件或构件的稳态或瞬态振动,记录其振动参数,根据基振频率及振动衰减系数可推算混凝土的弹性和非弹性性质,而且可作为混凝土耐久性试验中的一个测试指标,并可得出混凝土脆性性质的相对值。

(2) 磁测法是根据钢筋及预埋铁件会影响磁场现象而设计的一种方法,常用于检测钢筋位置和保护层厚度。

(3) 电测法是根据电流通过不同材料时具有不同阻抗特性的原理进行检测,目前已用于混凝土中钢筋锈蚀程度及层状结构厚度的测量,也可用于混凝土含湿量与透湿性的测量。

(4) 微波吸收法根据微波(波长 1mm, 频率约为 10^{12} Hz 的电磁波)反射、衍射和吸收特性进行混凝土性能测量。由于水对微波有吸收作用,因此,常用微波束穿过混凝土的衰减特性测定混凝土的含水量。

(5) 中子散射法是利用混凝土中氢原子对中子能量衰减作用来测量混凝土含水量的一种方法。中子活化法则基于以下原理,即大多数元素在中子轰击下成为放射性同位素,这些同位素并不稳定,会以 β 射线和 γ 射线的形式释放出能量,通过这两种射线的特征能量和半衰期,可定出放射性同位素及其相应的稳定元素的名称。根据这一原理,中子活化法可用来测定混凝土中水泥的含量。

随着混凝土功能的多样化,这类与各种功能的检测要求相适应的检测方法必将随之迅速发展。上述无损检测方法分类列于表 1-1 中。

表 1-1 无损检测方法分类表

检测目的	方法名称	测试量	换算原理
混凝土强度	钻芯法	芯样的抗压强度	局部区域的抗压、抗拔或抗冲击强度换算成混凝土标准强度的换算值
	拔出法	拔出力	
	压痕法	压力及压痕直径或深度	
	射击法	探针射入深度	
	嵌注试件法	嵌注试件的抗压强度	
	回弹法	回弹值	根据混凝土应力应变性质与强度的关系,将声速、回弹、衰减等物理量换算成混凝土标准强度推算值
	超声脉冲法	超声脉冲传播速度	
	超声回弹综合法	回弹值和声速	
	声速衰减综合法	声速和衰减系数	
混凝土强度	射线法	射线的吸收和散射强度	根据吸收和散射强度与混凝土密实度的关系,推算混凝土强度
	成熟度法	度、时积	根据度、时积与强度的关系,推算混凝土标准强度换算值
混凝土的内部缺陷与损伤程度	超声脉冲法	声时、波高、波形、频谱、反射回波	波的绕射、衰减、叠加等
	声发射法	声发射信号、事件记数、幅值分布能谱等	声发射源的定位,声发射的凯塞效应
	脉冲回波法	应力波的时域、频域图	从时域、频域的的综合分析确定应力波的反射位置及传播特征。
	射线法	穿透缺陷区后射线强度的变化	不同介质对射线吸收的差异
	雷达法	雷达反射波	不同反射物的雷达波反射强度的差异
	红外热谱法	热辐射	缺陷区热辐射强度的变化

续表

检测目的	方法名称	测试量	换算原理
其他性能	共振法	固有频率、品质因数	振动参数分析及其与混凝土弹性、非弹性、脆性及耐久性之间的关系
	敲击法	固有频率、对数衰减率	
	超声法	声速、衰减系数、频谱	应力波分析及其与混凝土弹性、非弹性等性能之间的关系
	透气法	气流变化	孔隙渗透性
	磁测法	磁场强度	钢筋对磁场的影响
	电测法	混凝土的电阻率及钢筋的半电池电位	电阻率与含水率及厚度的关系, 及钢筋锈蚀与半电池电位的关系
其他性能	射线法	射线穿过钢筋区后的强度变化	射线摄影分析及射线强度分析
	子中散射法	子中散射强度	散射强度与氢原子含量的关系
	中子活化法	β 射线与 γ 射线的强度、半衰期等	同位素与相应的稳定元素与射线特征值的关系

第四节 结构混凝土无损检测技术的研究动向

结构混凝土无损检测技术是多学科紧密结合的高技术产物。现代材料科学和应用物理学的发展为无损检测技术奠定了理论基础, 现代电子技术和计算机科学的发展为无损检测技术提供了现代化的测试工具, 同时, 现代土木工程中迅速发展的新设计、新材料、新工艺又对无损检测技术不断地提出新的更高的要求, 起着积极的促进作用。所以, 它已成为混凝土测试技术体系中的一个重要分支, 是建筑工程测试技术现代化的重要发展方向。

近年来, 在该领域的研究工作蓬勃发展, 成果丰硕。现从以下几方面对无损检测技术的研究和发展动向作粗略的介绍。

一、结构混凝土无损检测技术基本理论方面的探索和发展

无损检测方法必须建立在混凝土的某项性能与适当物理量之间的相互关系的基础上。以混凝土强度为例, 为了寻找与混凝土强度密切相关, 而又能在结构或构件上用无损方法直接测量的物理量, 往往采用两种方法。一种是归纳法, 就是在大量试验的基础上, 用回归分析的方法确定某物理量与强度之间的经验关系。这种方法试验工作量大, 常有一定的盲目性。而且由于试验条件及原材料等众多因素对试验结果有明显影响, 所得经验关系往往只局限于某种条件或某一地区适用, 而没有广泛的适用性。另一种是演绎法, 它是根据混凝土强度与某些物理量之间的理论联系进行逻辑推演, 从理论上确定其间的互相关系, 然后再作适当的试验验证。这种方法所得的结果往往是以基础科学的基本原理为理论依据, 因而具有较好的普适性。但要进行这种推演必须建立在理论指导的基础上。由于以往对强度与物理量的关系研究较少, 目前, 在上述两种方法中用得较多的仍然是前一种方法。近年来随着基础科学的发展, 为混凝土性能与物理量之间理论关系的研究奠定了基础。

目前, 混凝土无损检测基础理论方面的研究主要集中在两个方面, 其一是混凝土强度理论及无损检测常用物理量的关系; 其二是混凝土中波的传播机理。

(一) 关于混凝土强度理论及其与物理量的关系

常用的无损检测强度的方法多是通过混凝土应力应变性质或密实度和孔隙率来推算混凝

土强度的。因此,必须建立混凝土应力应变性质及孔隙率与强度的理论关系。

在建立混凝土应力应变性质与强度关系方面,前苏联的乌兰素姆采夫(Ю. С. уржумцев)做了开创性的工作,它把混凝土应力应变的过程模型化,随后我国湖南大学进行了进一步研究,提出了强度与应力应变性质的理论关系,其理论公式为:

$$f = \frac{1}{3} E_d \epsilon_r + \frac{4kv_1}{3E_d} (1 - e^{-\frac{E_d}{2k}t}) \quad (1-1)$$

式中 f ——混凝土的抗压强度;
 E_d ——混凝土的动力弹性模量;
 ϵ_r ——混凝土的极限应变值;
 k ——为混凝土塑性变形系数;
 v_1 ——加荷速度;
 t ——加荷时间。

该式说明了混凝土强度非但是弹性性质的函数,而且还是塑性性质和试验条件的函数,要提高无损检测精度,必须同时反映这两个因素。

在进一步研究了应力应变参数与超声检测参数相互关系的基础上,得出下式:

$$f = \frac{\rho \epsilon_r}{3\phi} v^2 + \frac{2v_1}{3\alpha v} \quad (1-2)$$

式中 ρ ——混凝土密度;
 ϕ ——试件形状修正系数;
 v ——超声传播速度;
 α ——超声衰减系数。其余各项同前。

这些研究从理论上论证了强度与声学参数的相互关系。虽然,由于推导过程中的多重假定,这些式子还不能用于测试结果的直接计算,但它为无损检测强度时合理选择物理量和提高检测精度指明了方向。同时,也为混凝土弹性及非弹性性能的无损检测开劈了新的途径。

在建立混凝土强度与孔隙的关系方面,同济大学做了较深入的研究,研究证明,混凝土强度与混凝土内部各不同结构层次的孔隙率与孔隙结构形态有密切关系,其理论关系如下:

$$f = [K_1 K_2 K_3 K_4] [K_2 K_3 (S - 1)(1 - P) K_3 S + K_4] \left[\frac{1 - P}{1 + 2P} \right] \quad (1-3)$$

式中 f ——水泥石的抗压强度;
 P ——总孔隙率;
 S ——孔隙的相对比表面积;
 K_1-K_4 ——材料常数。

该式右侧的第一部分是水泥石的潜在强度,决定于原子分子层次的组分与结构;第二部分是微观和细观层次孔结构对强度的影响;第三部分为细观宏观层次上应力集中对强度的影响。

这些研究成果表明,要用材料密度或孔隙率指标测定混凝土强度时,虽然孔隙率是强度的主要影响因素,但单反映孔隙率是不够的,还必须把材料潜在强度和孔结构作为重要参考要素,才能提高检测精度。从而为某些以孔隙率为推算强度依据的无损检测方法,例如射线法、渗透法等,指明了方向。

混凝土无损检测技术是一门实用技术,它需要基本理论的指导才能顺利发展,尽管基本理

论的研究难度大、见效慢,但它是无损检测技术总体研究中不可缺少的组成部分,应予以重视。

(二) 关于混凝土中波动传播特点的研究

混凝土无损检测技术,尤其是内部缺陷探测技术,大多是以波动传播为基础的,其中包括机械波和电磁波等。因此,近年对波在混凝土中的传播特性的研究越来越深入。例如,关于超声场和界面反射,及界面能量交换方面的研究;关于混凝土的滤波作用及相频、幅频变化的研究;关于混凝土声发射源及发射波在混凝土中传播规律的研究;关于雷达波及微波、红外光与混凝土性能关系的研究等等,都对无损检测技术起到了推动作用。

总而言之,由于无损检测技术是多学科综合的一门应用技术,是建立在基础学科的基础之上的,因此,应从基础理论中不断吸收养分才能不断完善和发展。无损检测技术的研究工作者,应善于把基础理论与工程实践结合起来,才能完善现有方法和开辟新的途径。我国在材料科学和应用物理学等基础学科方面的研究已有许多进展,但这些研究与工程应用方面的研究却缺乏联系的桥梁,这是一个值得注意的缺憾。

二、结构混凝土无损检测领域中检测方法的探索和发展

(一) 混凝土强度的无损检测方面

近年来,混凝土强度的无损检测方面,并无新的方法出现或新的重大突破。研究工作主要集中在以下两点:

(1) 原有方法的进一步完善。例如回弹法、超声法,进行各种影响因素的分析研究,以便予以消除或修正。我国在这方面做了大量研究,对全国的原材料、配合比、期龄等方面的影响进行了细致的分析,并提出了许多有效的修正措施,例如回弹法中用碳化深度消除龄期的影响就是一例。

(2) 采用两种以上方法进行多参数的综合强度测定,即所谓综合法。许多学者认为,综合法可从不同的检测参数中获取较多的信息,并可消除部分不利因素的影响,因而误差较小,是今后检测强度方法的主要研究方向。目前应用最多的是超声回弹综合法,此外,还提出了一些多因素综合法的设想和成果,其中有超声与半破损综合法,超声衰减综合法等等。

(二) 混凝土内部缺陷的无损检测方面

1. 超声脉冲缺陷检测技术的发展动向

目前最常用的缺陷检测方法是超声脉冲法,通常使用超声脉冲穿过缺陷区时的声时、波幅、波形的变化作为判断依据。近年的研究中有两个动向值得注意。

(1) 进行接收波形的信号分析。一种是进行接收波的频谱分析,建立频谱与缺陷的关系,使通常的波形观察量值化。另一种是检取接收波形中相频和幅频的突变点,分析发射振源所产生的一次波与在一次振源作用下在缺陷界面所发生的二次振源所产生的二次波对一次波的干扰作用,用以分析缺陷的位置。

(2) 超声脉冲反射法的运用。在金属超声探伤中,主要利用超声脉冲在缺陷处的反射的信号作为判断的依据。但在混凝土检测缺陷中,由于采用的发射频率较低,脉冲持续时间较长,以及混凝土中不均质界面的影响,使反射法显得十分困难。近年来已在克服这些困难方面取得进展,其方法是一方面研制短余振换能器和组合式换能器,以增强缺陷反射信号及其清晰度,另一方面采用信息处理技术,从繁杂的信号中检出缺陷反射信号。

2. 脉冲回波技术

脉冲回波法的研究和应用,是近年来无损检测缺陷技术的重要发展。它是用一钢球或力

棒打击构件表面,所击发的脉冲应有适当的频宽。它在构件内部产生应力波,再用适当的传感器记录波动信号,从中通过时域和频域分析,得到缺陷反射信号和底面反射信号。这种方法首先在混凝土基桩中应用,根据所接收的信号可分析出断桩等缺陷的位置,甚至可从接收信号中算出桩土体系的动力刚度,从而推算桩的承载能力。近年,伽利诺(Nicholas J. Garino)等已将脉冲回波法用于检测板状构件的厚度、内部缺陷、混凝土凝结时间以及早期强度的增长情况等。这一方法的关键在于冲击方式和频宽的选择,以及接收波的信息分析技术,以免杂波干扰分析。

3. 高速自动检测缺陷技术的发展

某些工程结构,如机场跑道、高速公路等,需检测的面积极大,一般逐点检测方式已不能满足需要,因而提出了高速检测技术。由于高速检测时传感器需在被测构件或结构上高速移动,因此不能沿用与被测物接触的传感方式,通常采用辐射法达到这一目的。最典型的例子就是雷达探伤技术的发展。它利用雷达波穿过混凝土、土壤、岩石等结构材料,根据微米波(100~1200MHz)穿透不同材料时的速度、电绝缘度等参数的变化,导致反射波极性变化的现象,分析出不同材料品种的层厚变化及材料内部的分离、孔洞及其他不连续缺陷。这种方法由于通电磁波传导信息,传感器可在不与被测结构接触的状态下高速扫描,移动速度可达17km/h,即以约5m/s的速度检测。

目前,尤其在道路检测中,高速自动检测技术已有较大发展。除雷达波以外,还有红外热谱、激光、超声等辐射方式的检测方法出现。

一般认为,这类依靠远程(非接触式)辐射传递信息的高速检测技术是一种很有前途的高科技领域,但由于分析技术复杂,设备昂贵等原因,在一般工程中应用尚有一定困难,但其发展前景是良好的。

(三) 其他性能无损测试技术的发展

随着结构功能的多样化,对混凝土性能的要求也超出了抗压强度、缺陷等传统质量指标,为适应这种需要,无损检测技术的使用领域,也已扩展到其他性能方面。例如,以往我们采用共振法或敲击法测定混凝土在冻融循环过程中的动力弹性模量变化,作为混凝土的耐久性测试指标。这种方法虽然对试件而言可算是一种无损检测方法,但是就结构混凝土而言,共振法则无能为力。因此必须研究一种能用间接方法反映结构混凝土耐久性的无损检测方法。近年发展起来的渗透法就是这类方法的一种,它以混凝土阻止液体或气体渗透的能力,间接反映结构混凝土耐久性。丹麦已利用气体渗透技术制成手提式渗透测定仪。

又如高强混凝土的脆性一直是高强混凝土应用的严重障碍。目前,材料科学已从理论上提出若干能反映脆性的定量指标,但这些指标的测试需要刚性试验机等昂贵设备。1984年湖南大学吴慧敏教授提出了振动内耗与脆性相关的理论,并用振动或超声法测出混凝土振动阻尼系数,即可求得混凝土的相对脆性指标。试验简便、快捷、无损于试件、甚至可以在结构物现场直接测量结构混凝土脆性的相对指标。

此外,用中子散射法及微波吸收法测定混凝土的含水率,用中子活化法测定混凝土中的水泥含量等,都属于这一类型的新的测试方法。含水量和水泥用量虽然不是混凝土质量的考核指标,但是准确测量这些参数,往往可作为强度检测的修正因素,以便消除含水量、水泥用量等对强度与声速、回弹等物理量之间相关关系的影响,以提高强度的检测精度。因而这些成果仍具有重要意义。