

结构混凝土 现场检测技术

吴慧敏 编著

湖南大学出版社

前 言

混凝土是当今最重要的结构工程材料之一。所谓结构混凝土是指已用于结构中的硬化混凝土，它的质量直接关系到结构物的安全。结构混凝土质量的传统检查方法，是以按规定取样制作的立方体试件为基础的。但由于试件的制作条件、养护环境、受力状态等都与结构混凝土不同，用试件试验所测得的混凝土性能指标，往往与结构物中实际混凝土的性能有一定差别。因此，直接在结构物中检测混凝土质量的现场检测技术，已成为混凝土工程质量管理的重要手段，越来越受到世界各国的普遍重视。我国《钢筋混凝土工程施工及验收规范》(GBJ204—83)中明确规定，当试件试验结果不符合混凝土强度验收的评定标准所规定的要求时，“可以在结构物中钻取混凝土试样或采取非破损试验方法进行检查，”从而，在我国技术法规中，正式确立了现场检测技术的重要意义和合法地位。近年来，广大科技工作者对如何加强混凝土质量控制和检测进行了大量研究，已将我国工程质量检测和评价技术水平提高到一个新的高度，全国各地普遍建立了工程质量监督机构，使整个质量保证系统日臻完善。

本书编著的目的，就在于为广大工程质量检测和监督人员提供一本既能反映我国实际情况和研究水平，又便于实际应用的参考资料。同时，也希望能作为土木工程类学生的选修教材，以及在职人员进行专业培训的教材和读物。

本书所述的结构混凝土现场检测技术，可分为三个内容：第一部分是结构混凝土强度的非破损及半破损检测。内容涉及回弹法，超声法、综合法、取芯法、拔出法等等（包括第二、三、四、五章）；第二部分是结构混凝土内部缺陷的探测和损伤程度的诊断与监视。内容涉及超声探伤及声发射技术（包括第六、七章）；第三部分是混凝土性能的动态测量。内容涉及共振法、敲击法测量动弹性模量及非弹性性质等（包括第七、八章）。这三部分内容，大体上反映了目前结构混凝土现场检测常用技术概貌。

书中除编入作者本人历年的研究成果外，还广泛引用了许多单位提供的宝贵资料。在此，对给予热情支持的同志们谨致由衷的谢意。在本书编著过程中，吴新璇、罗骐先、李为杜、邱平等同志给予了许多指正和帮助，中国建筑学会建筑施工委员会结构混凝土质量控制与非破损检测学组的同仁们，以及湖南大学土木系的老师们给予了关心和鼓励，湖南大学图书馆吴金蕉同志为本书做了大量工作，在此一并致谢。

限于作者水平，不妥之处，敬请指教。

编著者

1987年12月于湖南大学

内 容 简 介

本书较全面地介绍了目前结构混凝土现场检测的常用技术，内容包括结构混凝土强度的非破损及半破损检测方法，内部缺陷的探测和损伤程度的诊断与监视方法，混凝土性能的动态测量方法等。每种方法均介绍了理论依据，仪器设备及实际应用要点，适用于房屋建筑工程、道路与桥梁工程、水利工程及地下桩基工程。本书可作为工程设计、施工、质量检测和管理人员，以及混凝土材料科学研究人员的实用参考书，也可作为土木工程类专业学生和硕士研究生的选修教材，或在职人员的专业培训教材。

结构混凝土现场检测技术

吴慧敏 编 著

☆

湖南大学出版社出版发行

(长沙市岳麓山)

湖南省新华书店经销 湖南大学印刷厂印刷

☆

787×1092 16开 17.25印张 387.5千字

1988年6月第1版 1988年6月第1次印刷

印数：0001—4000册

ISBN 7—314—00225—8/T·39

定价：4.70元

目 录

第一章 导论

- § 1.1 混凝土测试技术体系的形成和发展.....(1)
- § 1.2 结构混凝土现场检测的基本依据.....(5)
- § 1.3 结构混凝土现场检测方法的分类.....(12)

第二章 结构混凝土强度的回弹法检测

- § 2.1 回弹法的基本原理和发展概况.....(15)
- § 2.2 回弹仪.....(17)
- § 2.3 回弹值的测量.....(20)
- § 2.4 影响 R—N 关系的主要因素.....(22)
- § 2.5 回弹法测强的基准曲线.....(28)
- § 2.6 结构或构件混凝土特征强度的推定.....(30)

第三章 结构混凝土强度的超声脉冲法检测

- § 3.1 概述.....(32)
- § 3.2 关于超声波的若干基本概念.....(32)
- § 3.3 混凝土超声检测仪.....(42)
- § 3.4 声速测量技术.....(55)
- § 3.5 影响混凝土强度与声速关系的因素.....(71)
- § 3.6 用声速推定混凝土强度的方法.....(85)

第四章 结构混凝土强度的综合法检测

- § 4.1 综合法的基本指导思想和综合指标的选择原则.....(99)
- § 4.2 超声——回弹综合法..... (100)
- § 4.3 声速——衰减系数综合法..... (111)
- § 4.4 其它综合法..... (122)

第五章 结构混凝土强度的半破损法检测

- § 5.1 概述..... (124)
- § 5.2 拔出法试验..... (126)

§ 5.3 钻芯法试验..... (133)

§ 5.4 半破损法与非破损法的综合使用..... (140)

§ 5.5 砌体强度的半破损法检测..... (141)

第六章 结构混凝土的超声脉冲法探伤

§ 6.1 概述..... (143)

§ 6.2 混凝土内部缺陷的判别方法..... (144)

§ 6.3 深埋桩基内部缺陷的探测..... (151)

§ 6.4 频谱分析在探伤中的应用..... (158)

§ 6.5 混凝土承载时微裂缝增生过程的测量..... (159)

第七章 混凝土损伤程度的声发射诊断

§ 7.1 概述..... (161)

§ 7.2 声发射诊断的基本原理..... (162)

§ 7.3 声发射仪简介..... (170)

§ 7.4 混凝土的声发射特性..... (172)

第八章 混凝土弹性性质的动态测量

§ 8.1 概述..... (179)

§ 8.2 共振法..... (179)

§ 8.3 敲击法..... (207)

第九章 混凝土非弹性性质的动态测量

§ 9.1 概述..... (217)

§ 9.2 关于振动衰减的几个概念..... (218)

§ 9.3 阻尼系数的测量..... (220)

§ 9.4 混凝土脆性性质的动态测量..... (228)

附录一 常用仪器与设备.....(232)

附录二 回弹法测强用表.....(239)

附录三 超声——回弹综合法测强用表.....(246)

附录四 钻芯法测强用表.....(256)

附录五 共振法与敲击法测量动力弹性模量用表.....(257)

附录六 混凝土现场检测中常用的回归分析方法.....(264)

参考文献.....(267)

第一章 导 论

第一节 混凝土测试技术体系的形成和发展

混凝土是一种用量很大、历史悠久、而又正在蓬勃发展的工程材料。近年来，混凝土材料科学的发展，对测试技术提出了新的要求，因此，也必然促进混凝土测试技术的发展。

测试技术是科技发展的基础之一。在各学科和不同的技术领域，所采用的测试技术，有其共性也有其特性。目前，混凝土材料科学所采用的测试技术，很多来自某些基础学科或其它技术领域，但各项移植的测试技术都必需使之适应于混凝土的结构特点，从而逐渐形成了混凝土特有的测试技术体系。认识、分析这一体系，从而自觉地发展这一体系，对混凝土材料科学的发展，以及控制和提高工程质量都有巨大意义。本书虽然仅限于论述结构混凝土的工程现场质量检测，但粗略地了解混凝土整个测试技术体系的概貌，对于加深现场检测方法的理解，仍十分必要。

一、混凝土测试体系的构成

混凝土是一种多相复合体系，各相随机地交织在一起，形成极为复杂的内部结构。为了研究这些内部结构的特点，以及各结构成分对总体性能的影响，从四十年代起，许多学者，例如列宾捷尔 (П.П.Резиндер)、米哈依洛夫 (Н.В.Михайлов)，维特曼 (F.H.Wittmann)^[4] 以及我国的黄蕴元教授和吴中伟教授等，都在这些方面进行了大量研究。吴中伟提出了“中心质假说”^[1]，黄蕴元提出了按宏观、细观和微观三个不同层次来研究混凝土材料内部结构特性的观点^[2,3,4,5]。这些学说阐明了混凝土材料研究的基本方法，同时也对测试技术提出了明确的要求。

纵观已被采用的各项混凝土测试技术，实际上都是为了观察和测量混凝土中不同层次的结构状态和特性指标。因此，各项测试技术也可按其不同层次的测试对象加以分类。大体上可分为以下三大类：

(一) 混凝土宏观力学性能及其它宏观性能测试技术。这一类测试技术是随着混凝土在工程结构物中的广泛应用发展起来的。它所测试的具体指标是材料内部结构的总体体现，并直接运用于设计和施工，是工程材质评价和质量控制的基本依据。

这类测试技术，包括各种试件强度的破坏性试验、快速试验、非破损试验等。当然，混凝土拌合物试验及硬化混凝土的各项物理性能试验，也应属于这一范畴。值得注意的是，随着混凝土材料科学的发展，以及结构设计对材料性能的许多新要求的不断提出，正在出现一系列新的宏观性能指标，如脆性指标、断裂性能等。所以，这一类试验技术虽然包含大部分传统的试验项目，同时，新的试验项目也在不断涌现。由于混凝土内部结构及试验条件等的复杂影响，使宏观性能的测试结果带有极大的随机性，因此，以统计数学为

基础的数据处理方法，已成为这类试验技术不可分割的一部分。

(二) 混凝土细观结构的观察和分析技术。由于细观结构往往成为混凝土工程性能的重要影响因素，因此，近年来在混凝土材料科学的研究中，很重视这一层次的观察和分析。所谓细观级的尺度范围很宽，所以测试方法也是多种多样的。目前常用的有孔结构测量、显微硬度测量及微裂缝及其扩展的观察等等。

(三) 微观结构的观察和分析。材料的微观结构是构成细观和宏观结构的基础。包括电子光学形貌分析和微区成分分析、X光结构分析及其它光谱分析等。混凝土这一层次的试验技术与其它材料领域所采用的微观分析方法基本相同。

二、混凝土宏观性能试验技术及其发展

首先被采用的混凝土宏观性能试验方法是“试件试验”。早在1911年，英国皇家建筑学院 (RIBA) 的报告中，就已把立方体抗压强度试验列为推荐项目^[6]，此后迅速为各国所采用，并一直沿用至今。除立方体抗压试验外，抗拉、劈裂、抗折等试验都应属于“试件试验”方法之列。这类方法以试件破坏时的实测值作为判断混凝土性能的依据，比较直观。但由于试件中的混凝土与结构物中的混凝土在质量、受力状态等各种条件都不可能完全一致，所以试件实测值只能被认为是混凝土在特定条件下的性能反映。只能用于各种混凝土在相同条件下性能的相对比较，而不能完全确切地代表结构混凝土的质量状况。但“试件试验”延用了数十年，已成为混凝土结构设计、施工及验收规范的基本依据，所以它尽管有很大的局限性，但在今后相当长的时期内，必将仍然是宏观性能试验的基础。近年来，我国制订了《普通混凝土拌合物性能试验方法》(GBJ80—85)、《普通混凝土力学性能试验方法》(GBJ81—85)、《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GBJ82—85) 等国家标准，这一工作必将使我国混凝土宏观性能试验方法更趋统一。

试件试验以标准养护28天龄期作为标准龄期，但28天以后的试验数据，显然不能及时反馈于施工质量控制和工艺调整，所以近年来在试件试验的基础上形成了一个重要分支——快速试验，用以早期推定混凝土强度。快速试验有两类，一类以水灰比定律为基础，进行混凝土混合物快速分析（包括配合比的全分析和某一成分的滴定分析）。以实测的水灰比，按水灰比定律估算混凝土强度。若采用较自动的分析仪器，分析过程仅5分钟即可取得推算结果。另一类方法是快速养护法，这类方法以快速养护（如蒸气养护、蒸压养护或加促凝剂等）的试件强度与标准养护的试件强度的相关关系为基础。试验过程约需24或8小时，采用特殊措施可使时间缩短到1~2小时。快速测定混凝土强度的各种方法，基本上仍然是经验性的方法，但它适应了施工质量控制中及时反馈的要求，因而受到重视。

从三十年代开始，混凝土非破损试验方法逐渐发展起来。1930年出现了表面压痕法，1935年格赖姆 (G.Grime) 和艾德 (J.M.Ide) 把共振法用于测量混凝土的弹性模量。1948年斯密特 (E.Schmidt) 设计出回弹仪。1949年加拿大的利斯莱 (Leslie) 和奇斯曼 (Cheesman)，英国的琼斯 (R.Jones) 和盖特菲尔德 (E.N.Gatfield) 运用超声脉冲进行混凝土检测，接着琼斯又使用放射性同位素进行混凝土的密实度和强度测

量。同时苏联、罗马尼亚、日本等国也进行了许多研究，其中罗马尼亚弗格瓦洛(I. Făcăoaru)提出的，多因素综合估算混凝土强度的方法，受到各国重视。为了提高非破损方法的可靠性，近年来钻芯法、拔出法等半破损的方法又重新被广泛采用。我国自五十年代中期就已开展现场检测技术的研究，七十年代以后发展尤为迅速，目前已广泛用于工程测试，并已制订了若干部级技术规程，如《回弹法评定混凝土强度技术规程》(JGJ23—85)，《“超声——回弹”综合法检测混凝土抗压强度规程》(草案)，《钻芯法检测混凝土强度技术规程》(草案)等。非破损试验技术不仅可用于结构混凝土的现场测强、测缺(探场)，而且还可用于混凝土性能变化过程的连续观察。此外，如放射性同位素及超声脉冲等方法还可用于混凝土成型、养护等施工过程中质量的控制，因而也是混凝土施工“在线检测”的重要手段。

随着混凝土材料科学的发展，一些新的概念和新的指标有待测试。例如，高强混凝土的采用，混凝土脆性指标的测量问题，已成为高强混凝土设计、应用、改性的关键之一。因而近年来许多研究者在如何测量混凝土应力——应变全曲线及弹性和塑性应变能等方面，进行了大量研究。在普通试验机上，由于刚性不够，在混凝土“破坏”瞬间，试验机自身的应变能迅速释放，无法做到等应变加荷，因而导致应力——应变曲线严重畸变。所以如何提高试验机刚性或创造等应变加荷条件等问题引人注目。在这方面，湖南大学土木系采用普通试验机，增加“刚性元件”的方法，取得良好的效果^[6]，同时，我国自制的电子伺服式试验机也已问世。

混凝土的断裂性能，受力历史以及损伤程度，也是近年引起广泛重视的新指标，它们对工程设计及已建工程使用寿命的评估等都有重大意义。声发射技术是测定这些指标的重要手段^[7]，该项技术是本世纪四十年代开始研究的，五十年代初，凯塞(J. Kaiser)研究了金属材料的声发射特性，促进了声发射技术的应用。六十年代开始用于混凝土的研究。现在，已用于重要结构的安全监视。我国声发射技术的研究工作始于1973年，但在混凝土中的应用还刚刚起步。

总之，随着混凝土使用领域的扩大，对其性能的要求越来越高，必须提供一系列相应于新性能指标的测试技术，这是当前测试技术发展中的新趋势。

三、混凝土细观结构的分析与观察方法

在均质材料中，微观结构直接控制材料的宏观性能，但在混凝土等多相复合材料中，微观结构对宏观性能的决定性作用，往往被细观结构的影响掩盖。所以就混凝土而言，细观结构是宏观性能的重要基础。一般认为，细观结构是指结构单肢线度自 10^{-4} 厘米至几个厘米的范围。由于细观级结构的研究中所提出的问题很多。可以说，该级测试技术是上述三级测试技术中的薄弱环节。

现有细观级测试技术大体上可分为两种类型：一类是直接观察，主要运用各种不同放大倍数的显微镜，如微孔测量显微镜、金相显微镜、偏光显微镜、电子显微镜等。这类方法在历来的研究中起了重要作用，但鉴于混凝土细观结构的不均匀性，局部区域的显微观察虽然很直观，但往往会有“唯见一斑，未及全豹”之虞。另一类是通过某些物理及化学参数，测量混凝土细观结构的特征指标。例如孔级配测量，微裂缝的超声和声

发射测量，振动内耗测量及显微硬度测量等等，它们通过实测的物理、化学及力学参数，间接地计算出混凝土细观结构的特征指标。这些特征指标是细观结构的统计反映，虽不直观但能反映总体状态。下面简述几种常用的细观测试技术：

（一）孔结构分析

1. 光学方法，用光学显微镜在经过磨平处理的试样上进行观察，放大倍数可达1000~1500倍，适用于10μ以上孔系的测量，如配上图象分析仪，运用微处理技术，则可对观察结果进行统计处理^[8]。

2. 压汞法，将汞用不同的压力压入孔系，从而反映出孔级配。一般认为压汞法最适宜的被测孔隙平均半径约为10nm~10μm。在压汞法的计算中，以假定孔隙均为圆形截面，汞的表面张力为48帕斯卡，汞与孔壁的接触角为140°作为基本参数，但实际孔系形状很复杂，汞的表面张力等参数随汞的纯度而异，所以有较大误差^[8]。

3. 吸附法，根据水蒸气或氮气体在不同相对压力下，在孔壁上的吸附和凝聚现象，计算孔系结构，适用孔径范围约为300Å~5Å^[10]。

4. 近年来还提出一些新的孔系测量方法，主要有渗透法，半弹性或非弹性中子散射法，氦流法及氦比重法，这些方法已有应用报导。

（二）混凝土固有微裂缝及相界结构的观测

混凝土固有微裂缝及相界面的结构和分布状态，往往是宏观力学行为的重要根源，但其观测方法却很不成熟。目前可采用的方法有以下几种：

1. 光学显微镜及电子显微镜的直接观测。它只能反映视野中的局部状态，而且试样制备中应注意不影响其原貌^[11]。

2. 显微硬度法。用显微硬度计在界面两侧测出硬度，从而分析界面结构。

3. 超声脉冲法。利用适当频率的超声脉冲在材料内部界面上的能量损耗，根据声速、衰减、接收信号频谱等参数反映细观结构，但其定量关系有待进一步研究。

4. 振动内耗法。将内部微裂缝、界面等均视为内耗源，根据振动内耗值反映细观结构。其定量关系也有待研究。

5. 声发射技术。在材料受力时，微裂缝等都是声发射源，按声发射参数分析其内部结构。

6. X—射线技术。采用X射线照片完整地反映混凝土中的微裂缝，其方法比显微镜法省时，并易于掌握^[12]。

四、混凝土微观结构的观察和分析

随着混凝土材料科学的发展，微观分析手段的运用越来越普及。这类试验方法基本上都是材料科学研究中的通用技术，但由于试验方法、仪器设备及结果分析都比较复杂，每种方法几乎都可成为独立的专门技术，概括而言，目前常用的主要有以下三种：

（一）电子显微技术。即使用电子显微镜观察和分析。由于电子束的波长约为0.5Å（可见光波长约为4000~7000Å），所以利用电子光学原理，分辨率达2~10Å是有可能的。现代电子显微镜不仅可作形貌分析，而且还可以根据电子束在试样表面所激发的次级发射谱，进行微区成分分析。

(二) X射线结构分析。早在1912年劳厄 (Laue) 就从实验方面证实了用X射线衍射现象分析各种晶体结构的可能性。至今该项技术已普遍用于水泥石的研究。它非但可用于定量分析, 还可采用谱线强度的直接比较法或内部标准法进行定量分析。

(三) 摄谱法。它利用物质和电磁辐射的相互作用进行分析, 常用的方法有电子发射, 原子吸收、红外光谱、X射线荧光及电子探针等。

以上所述即为整个混凝土测试技术体系的三个组成部分。在以下的章节中, 我们将只限于讨论结构混凝土现场质量检测的问题, 它应是宏观性能测试技术中的一个分支。

第二节 结构混凝土现场检测的基本依据

所谓结构混凝土, 是指已用于结构物或结构构件的硬化混凝土。结构混凝土需检测的项目包括力学强度、弹性及塑性性质、断裂性能、缺陷(施工中形成的“蜂窝”、孔洞等)、损伤(因干缩、温度收缩、荷载等因素所造成的裂缝)以及耐久性预测等等。但作为一般建筑结构的質量评价和验收, 或作为老建筑结构损伤程度的评估, 结构混凝土现场检测的主要项目应是, 混凝土强度检测和缺陷及损伤探测两项。而且, 这两项测试的具体方法, 必须以不损伤结构混凝土本身的使用性能为前提。也就是说, 测试方法必须是非破损的或半破损的。

就强度而言, 混凝土的强度就是混凝土抵抗破坏的能力, 其值为在一定的受力状态和工作条件下, 混凝土所能承受的最大应力。因此, 所谓非破损测定混凝土强度的方法, 就是要在混凝土所受的力, 尚未达到最大应力之前, 即能推算其强度值。为此, 必须寻找与混凝土强度有关, 而又能在结构物上直接测量, 并且不损坏结构物本身的物理量。然后根据其间的理论关系或经验关系, 推定混凝土的强度。该物理量的选择, 将直接影响非破损测强结果的精确度, 是结构混凝土现场检测的关键所在。这些物理量与强度之间的相互关系, 就是各种现场检测方法的基本依据。

为了寻找与混凝土强度密切相关, 而又能在结构物上用非破损方法直接测量的物理量, 往往采用两种方法。一种方法即所谓归纳法, 就是在大量试验的基础上, 用回归分析的方法, 确定某一物理量与混凝土强度之间的经验关系。例如, 进行大量试验, 建立起混凝土表面回弹值与强度的关系, 或超声脉冲传播速度与强度的关系等等。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因素对试验结果影响很大, 所得试验结果往往只局限于某种条件或某一地区适用, 而没有普遍性。

另一种方法即演绎法, 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相互关系, 然后再作适当的试验验证。这种方法所得结果, 往往以基础科学的基本原理为依托, 因而具有较好的普遍性。但要进行这种推演, 必须建立在混凝土强度理论的基础上。众所周知, 混凝土的强度理论是一个尚待进一步研究的复杂问题, 有许多未知因素需要解决。显然, 要在结构混凝土现场检测的各种试验方法中, 都采用演绎法建立基本关系是有困难的。因此, 目前常用的检测方法中, 仍以归纳法作为建立强度与物理量之间相互关系的主要方法。

为了尽可能地把结构混凝土现场检测技术置于材料科学基本理论的基础之上, 以加

深对现场检测技术基本依据的理解，我们不妨在本节中，就与混凝土相关的物理量，作如下定性的分析：

一、材料的理论强度与断裂强度

材料的理论强度可以定义为拉开单位断裂面两侧的相邻原子所需要的力。利用双原子模型，可导出如下公式

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{E\gamma}{a_0}} \tag{1-1}$$

式中 σ_t 为材料的理论强度；
 E 为弹性模量；
 γ 为表面能；
 a_0 为原子或离子处于平衡位置时的间距。

(1-1) 式从理论上反映了材料强度与弹性模量、表面能、原子间距等因素的相互关系。但是，它是以无缺陷的理想材料为基础的，而真实材料中存在着许多缺陷。这些缺陷导致材料因应力集中而破坏，使材料的实际强度远远低于理论强度。葛利菲斯 (Griffith) 考虑了缺陷对材料的影响，从能量平衡的角度研究了材料中裂纹扩展的规律，以线弹性理论为基础，导出了如下公式：

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c}} \tag{1-2}$$

式中 σ_f 为材料中有长度为 $2c$ 的裂缝时的材料断裂强度；
 c 为原始裂缝长度的一半；
其余各项同前。

在葛利菲斯的推导中，是以假定材料发生弹性变形后即发生脆性开裂为前提的，而实际上，象混凝土等材料，在受力后尚有塑性变形，吸收了部分弹性应变所积蓄的部分能量。为此，艾温 (Irwin) 和奥罗温 (Orowan) 修正了葛利菲斯公式 (1-2)，修正后的公式如下

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E(\gamma + \gamma_p)}{\pi c}} \tag{1-3}$$

式中 γ_p 为塑性变形所吸收的能量，其余各项同前。

从 (1-1) (1-2) (1-3) 三个公式中，我们至少可作如下定性分析，即混凝土的强度取决于以下四个方面：

- (一) 式中 E 值及 γ_p 值说明，强度与应力应变性质有关；
- (二) 式中的 γ 值说明，强度与水泥石的表面能及骨料与基质界面的表面能有关，而且还与混凝土的环境条件，如含水状态等因素有关。
- (三) 式中的 c 值说明，强度与混凝土中的孔隙、裂缝、界面等缺陷的数量和状态有关。
- (四) 式中的 a_0 值说明，强度与水泥石中凝胶体的凝聚状态有关，而凝聚状态又与水灰比、密实程度等因素有关。

从以上公式可见，若能全面测出各项参数，进行综合分析，应能较确切地反映混凝土的强度特性。但是在现场检测技术中，无法在一种试验中全面反映这些参数，因此，总是取其中的一种或几种参量，与强度建立经验关系，而将其它参量作为固定值处理。正因为如此，现有现场检测方法所测得的强度值，往往有较大误差。

目前，在现场检测技术中，最常用的物理参数，是孔隙率和应变性质两项，这两项参量又通过超声脉冲传播速度、能量衰减、表面回弹、射线吸收等物理量予以间接测量。

二、混凝土孔隙率与强度的关系

一般认为，固体材料的总孔隙率与强度之间有如下的经验关系^[13]

$$\sigma = \sigma_T(1-p)^n \quad (1-4)$$

式中 σ 为固体材料的抗压强度， σ_T 为没有孔隙时的理论强度， p 为总孔隙率， n 为常数。

就混凝土而言，强度与孔隙率之间有如图 1-1 所示的实验关系^[14]。因此，孔隙状况一直是研究混凝土强度理论的重要参数。早在 1896 年法国的菲莱特 (R. Feret) 就提出了水泥空隙比的学说，其表达式为

$$R = K \left(\frac{c}{c+W+a} \right)^2 \quad (1-5)$$

式中 R 为混凝土抗压强度， c 、 w 、 a 分别水泥、水、空气的容积， k 为实验常数。

若将 (1-5) 式改写成如下形式，即

$$R = K \left(1 - \frac{W+a}{c+W+a} \right)^2 \quad (1-6)$$

式中 $W+a$ 决定了水泥石

中的总孔隙量， $\frac{W+a}{c+W+a}$ 即为水泥石的总孔隙率。

由于混凝土中的孔隙，除了成型密实的因素外，主要取决于水灰比的大小。因此，在混凝土强度与孔隙率的关系中，常以水灰比的形式表达。1919 年美国的阿伯拉姆斯 (D. Abrams) 在实验的基础上，提出了混凝土强度与水灰比的关系。

$$R = \frac{K_1}{K_2^{w/c}} \quad (1-7)$$

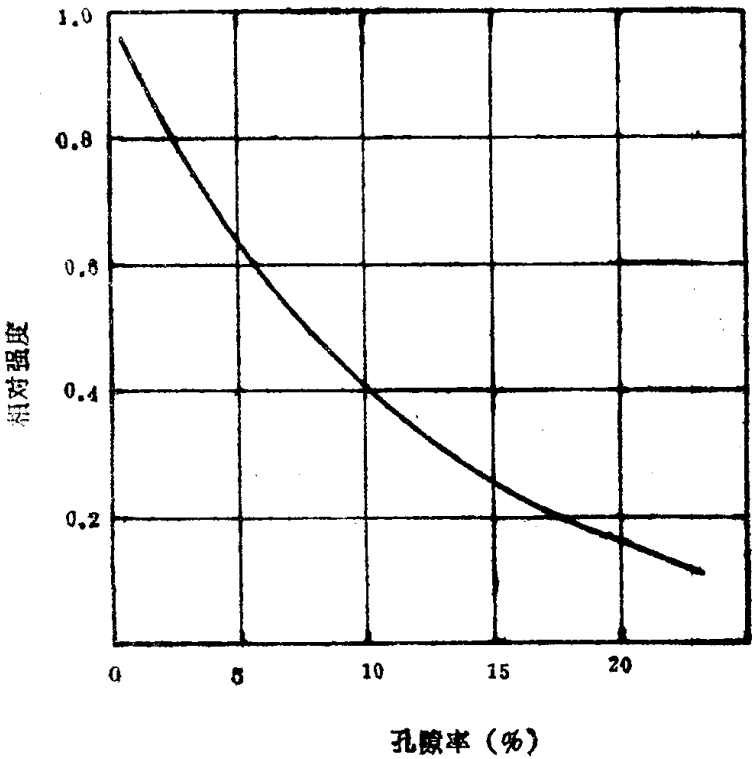


图 1-1 混凝土强度与孔隙率之间的关系

式中 W/c 即水灰比（容积比）， K_1, K_2 是决定于水泥质量等因素的实验常数。这就是著名的水灰比定律，后来被修改为多种不同形式，至今仍被作为混凝土强度的基本依据。目前我国最常用的形式，是瑞士混凝土专家保罗米于1925年发表的灰水比直线公式，并按我国实际情况修改为如下公式

$$R_{28}=AR_c\left(\frac{C}{W}-B\right) \tag{1-8}$$

式中 R_{28} 为混凝土立方体28天龄期的抗压强度， R_c 为水泥强度， C/W 为灰水比（重量比）， A, B 为实验常数。

由于 W/c 与水泥石的孔隙率有着一定的相关关系（见图1-2），所以水灰比定律实质上仍然是孔隙率与强度关系的一种形式。

随后，美国鲍威斯（T. C. Powers）采用了强度与孔隙之间更为直接的关系，即

$$R=AX^m \tag{1-9}$$

式中 X 为胶孔比，即水泥石中凝胶容积与凝胶容积加毛细孔容积及气孔容积之和的比值； m

为实验常数，约为2.5~3； A 为水泥凝胶的固有强度。

以上各式都只反映了混凝土强度与孔隙总量的经验关系，但是混凝土中的孔隙是非常复杂的，近年的研究表明，非但孔隙的量对强度有影响，而且孔隙的大小和形状不同时，对强度的影响也不同。因此，自二十年代以来，以水灰比为控制参数的宏观强度理论，发展到八十年代，逐步建立了包括不同层次的组分、结构的多参数混凝土强度理论。我国黄蕴元教授认为，水泥石强度与孔结构的关系可用下式表示：

$$R=\underbrace{\left[K_1K_2^{(K_3K_4)\approx 3}\right]}_{(1)}\cdot \underbrace{\left[K_2^{K_3(S-1)}(1-p)^{K_3S+K_4}\right]}_{(2)}\cdot \underbrace{\left[\frac{1-p}{1+2p}\right]}_{(3)} \tag{1-10}$$

式中 R 为水泥石的强度， p 为总孔隙率， s 为孔隙的相对比表面积， $K_1\sim K_4$ 为由实验确定的材料常数。（1-10）右侧的第（1）部分为水泥石的潜在强度，决定于原子—分子层次的组分与结构。第（2）部分为微观—细观层次的孔结构对强度的影响。第（3）部分为有软包体的多相分散体系，在细观—粗观层次上的应力集中对强度的影响^[15]。

以上这些研究成果说明，从非破损地检测结构混凝土强度的角度来看，若所选用的

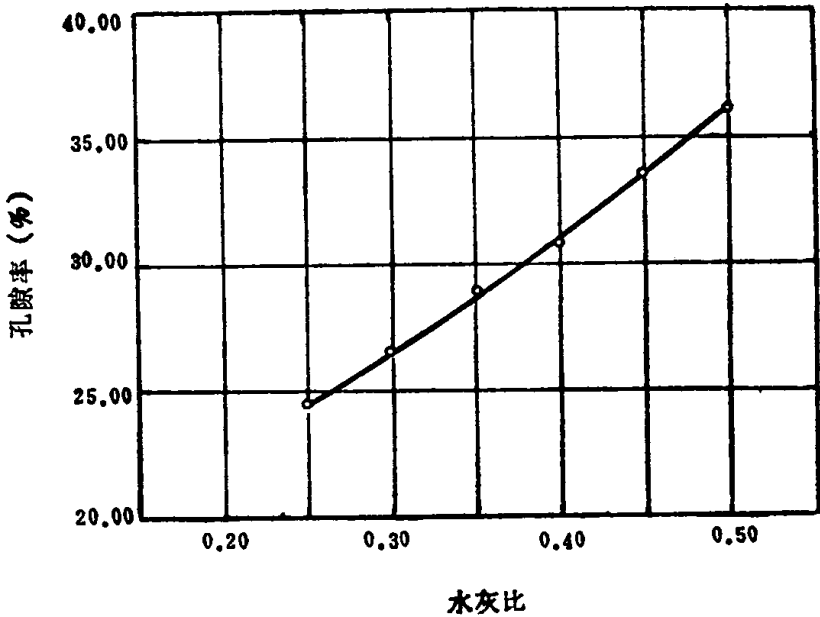


图1-2 水泥石的水灰比与孔隙率的关系

方法能确切反映混凝土的孔隙率，甚至反映孔隙结构等参数，则检测结果应能推算出混凝土的强度。这一点正是结构混凝土现场检测中射线穿透、吸收及振动和声波衰减等方法的基本依据。

三、混凝土应变性质与强度的关系

图 1-3 为不同强度的混凝土的应力—应变全曲线。从图中可见，混凝土的整个应力应变行为是弹性性质和非弹性性质的综合表现，其中非弹性性质随着应力的不断增大而逐渐明显。此外，混凝土的应变曲线还受加荷速度的明显影响(见图1-4)，说明其应变性质非但与应力有关，而且还是时间的函数。因此混凝土是一种弹—粘—塑性材料。

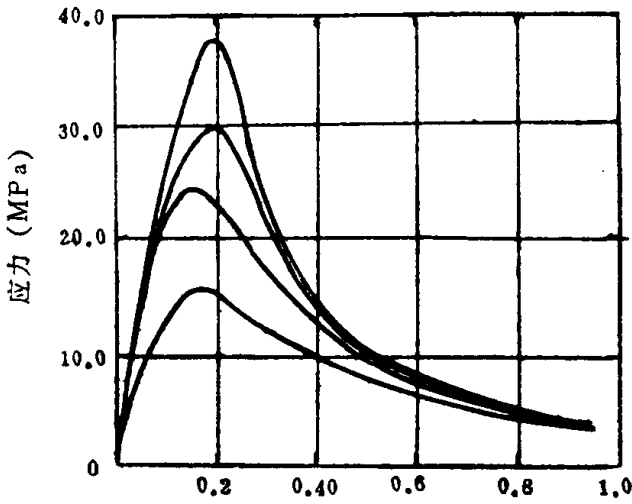


图1-3 混凝土应力—应变全曲线

为了求得应变性质与强度的关系，我们引用流变学复合模型加以推导。一般认为，混凝土的应变性能，可以近似地用图1-5所示的模型来表示^{[16] [17] [18]}。

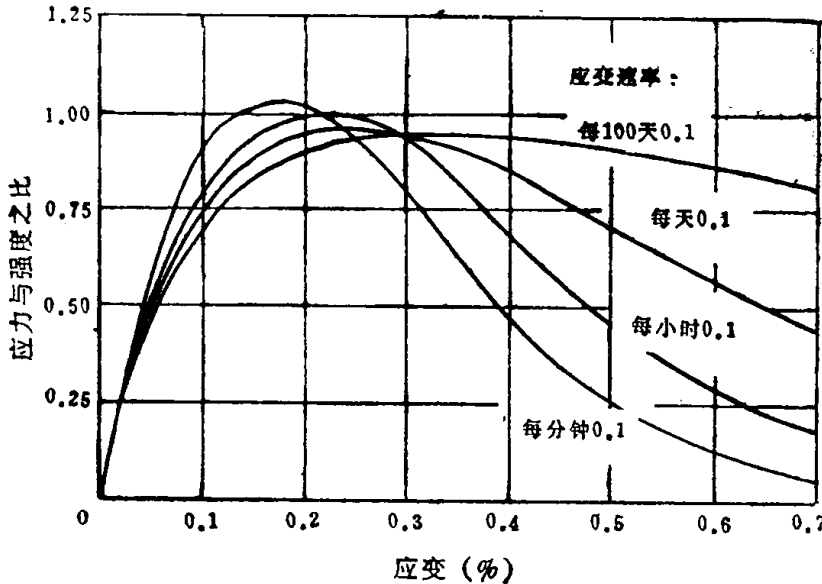


图1-4 应变速率(或加荷速度)对混凝土应力—应变曲线的影响

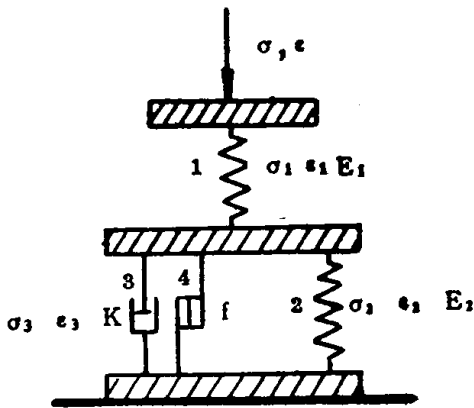


图1-5 混凝土流变性质的复合模型

复合模型由弹性元件1、2及粘性和塑性元件3、4所组成。其中粘性元件3引起部分变形的滞后。塑性元件4中的滑移力f，控制了塑性变形的起始应力和卸荷后产生残余变形。因混凝土的塑性是一种“假塑性”，即依靠本身微裂缝的扩展形成的，实验证

明，在很小的应力就有这种“假塑性”的表现，所以 f 值很低，而我们所讨论的将是极限应力的问题，为简化起见，略去 f ，上述模型简化为三元件模型。

如果在模型上施加外力 σ ，相应的总应变为 ε 。这时模型内部各元件也相应地产生应力和应变。设元件1、2、3上的应力分别为 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ，应变分别为 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 。并设弹性元件1、2的弹性模量各为 E_1 、 E_2 ，粘性元件的粘滞系数为 K ，则根据模型可列出下列方程组：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= E_1 \varepsilon_1 \\ \sigma_2 &= E_2 \varepsilon_2 \\ \sigma_3 &= K \frac{d\varepsilon_3}{dt} \\ \sigma &= \sigma_1 = \sigma_2 + \sigma_3 \\ \varepsilon &= \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_3 \end{aligned} \right\} \quad (1-20)$$

从 (1-20) 中消去各元件的应力和应变值，则得如下方程：

$$\frac{E_1 K}{E_1 + E_2} \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \varepsilon = \frac{K}{E_1 + E_2} \frac{d\sigma}{dt} + \sigma \quad (1-21)$$

令

$$\left. \begin{aligned} \frac{E_1 K}{E_1 + E_2} &= q_1 \\ \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} &= q_2 \\ \frac{K}{E_1 + E_2} &= q_3 \end{aligned} \right\} \quad (1-22)$$

则 (1-21) 式可写成：

$$q_1 \frac{d\varepsilon}{dt} + q_2 \varepsilon = q_3 \frac{d\sigma}{dt} + \sigma \quad (1-23)$$

当我们进行立方体抗压试验时为匀速加荷。设加荷速度为 V_1 ，则在 t 时刻加在试件上的应力为

$$\sigma = V_1 t \quad (1-24)$$

将 (1-24) 代入 (1-23) 式，并已知初始条件为 $t=0$ 时 $\varepsilon=0$ ，解 (1-23) 式得：

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{q_2} - \frac{V_1}{q_2} \left(\frac{q_1}{q_2} - q_3 \right) \left(1 - e^{-\frac{q_2}{q_1} t} \right) \quad (1-25)$$

由 (1-25) 式求得

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{q_2}{1 - \left(1 - \frac{q_2 q_3}{q_1} \right) e^{-\frac{q_2}{q_1} t}} \quad (1-26)$$

因当 $\varepsilon=0$ 时，应力—应变曲线的切线斜率即为原点切线模量，或动力弹性模量，用 E_d 表示，则

$$E_d = \left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=0} \quad (1-27)$$

而且在原点加荷时间 t 为零, 即 $\varepsilon=0$, $\sigma=0$, $t=0$ 。根据 (1-26) (1-27) 式得:

$$E_d = \left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=0} = \frac{q_1}{q_3} \quad (1-28)$$

将 (1-22) 式代入 (1-28) 式:

$$E_d = \frac{q_1}{q_3} = \frac{\frac{E_1 K}{E_1 + E_2}}{\frac{K}{E_1 + E_2}} = E_1 \quad (1-29)$$

根据霍内斯特 (E. Hognested) 的研究指出^[74], 若混凝土在破坏时的应变值为 ε_r , 则在 $0 < \varepsilon < \varepsilon_r$ 的区段内, 混凝土的应力应变关系可近似地用下式表示

$$\frac{\sigma}{\sigma_{max}} = 2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_r} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_r} \right) \quad (1-30)$$

式中 σ_{max} 为破坏应力;

ε_r 为应力 σ 达到 σ_{max} 时的应变值。

所以原点切线弹性模量 E_d 应为

$$E_d = \left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=0} = 2 \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon_r} \quad (1-31)$$

式中 $\sigma_{max}/\varepsilon_r$ 即应力为 σ_{max} 时的割线弹性模量, 而 E_2 由于粘性元件的制约, 直到 σ_{max} 时才完全反映出来。为使问题简化, 我们十分粗略地认为 E_2 即 σ_{max} 时的割线弹性模量, 因此

$$E_d = 2 \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon_r} = 2E_2 \quad (1-32)$$

将 (1-29) (1-32) 及 (1-22) 代入 (1-25) 式, 得

$$\sigma = \frac{1}{3} E_d \varepsilon_r + \frac{4KV_1}{3E_d} \left(1 - e^{-\frac{E_d}{2K}t} \right) \quad (1-33)$$

当 $\varepsilon = \varepsilon_r$ 时, $\sigma = \sigma_{max} = R$, (1-33) 式可写成

$$R = \frac{1}{3} E_d \varepsilon_r + \frac{4KV_1}{3E_d} \left(1 - e^{-\frac{E_d}{2K}t} \right) \quad (1-34)$$

该式就是混凝土强度与应力—应变性质的关系式, 它明确地说明, 如果我们要用应力—应变性质间接地反映混凝土的抗压强度, 则必须全面反应式中的各项指标, 这些指标构成了用应力—应变性质反映混凝土抗压强度时的几个要素:

- (一) 混凝土的弹性性质 E_d ;
- (二) 混凝土的非弹性性质 K ;
- (三) 混凝土的试验条件 V_1 和 t 。

在这三个要素中 E_d 的影响是主要的, V_1 和 t 可取标准值, K 的影响与 V_1 关联, 当 V_1 很大, 即振动或冲出荷载时 K 的影响不可忽视。但就标准强度而言, V_1 很小 (C30 级的混凝土 $V_1 = 0.3 \sim 0.5 \text{ MPa/S}$; $> \text{C30}$ 级的混凝土 $V_1 = 0.5 \sim 0.8 \text{ MPa/s}$), K 的影响则不显著。

上述三要素中，弹性性质和非弹性性质均可用振动法或声学方法测量，因此是十分适用于现场非破损检测的物理量^[19]。

第三节 结构混凝土现场检测方法的分类

在整个混凝土测试技术体系中，结构混凝土的现场检测方法是一个重要分支。由于它能直接反映结构物中混凝土的强度等质量指标，对保证工程质量有重要意义，因而越来越受到人们的重视。从现有的报导来看，方法之多样，构思之广泛，所涉及的基础理论之深刻，都已达到新的水平。^{[20] [21] [22] [23] [24]}

就检测的目的而言，结构混凝土现场检测方法大体上可分为四类：

第一类，以检测强度为目的。通常把按标准规定的条件制作和养护的试块，并按标准方法试验所得到的混凝土强度，称为**标准强度 (Standard strength)**，这里所说的标准方法即《普通混凝土力学性能试验方法》(GBJ81—85)。显然，标准强度与结构物中的混凝土强度是不同的。在国际标准草案中曾建议，将结构物另一强度概念称为**标准特征强度 (Characteristic standard strength)**，它是这样一个标准强度值：在该批混凝土的所有测值中低于该值的组数不应超过总试验组数的5%，即保证率达95%。它是某批标准强度值中的一个特征值，相当于混凝土的标号。此外，在国际标准建议草案中，把在结构中直接检测的强度称为**参考强度 (Reference strength)**，有些资料又称为**现场强度 (In sit strength)**。由于目前所有国家都以标准强度作为结构设计的依据，也以标准强度作为检验混凝土质量和进行合格性评定的依据，因此，结构混凝土现场检测的强度值，必须换算成相应的标准强度值后，才能用以进行合格性推定。^[25] 必须指出，现场检测不可能统一在28天进行，因此，现有各种现场检验的方法中，仅仅是把现场检测值换算成立方体试块强度而已，并非标准强度，用这些换算值所得的，保证率为95%的特征值，我们在下文中称之为**特征强度**，它有别于标准特征强度。

现有的某些现场检测的技术规程中，往往以特征强度代替标准特征强度，作为评定混凝土强度值的依据，显然是不严格的。在以下论述具体方法的章节中，我们仍以有关规程为准，谨将“评定”改为“推定”或“推算”，以示其中的差异。

结构混凝土强度的现场检测又可分为叁种。一种称半破损法，它以在不影响结构物承载能力的前提下，在结构物上直接进行局部破坏试验，或直接取样试验所得的值，并换算成特征强度，作为检测结果。属于半破损法的有**钻芯法**、**拔出法**、**拔脱法**、**扳折法**、**射击法**等。目前钻芯法和拔出法使用较多。

另一种称非破损法，它以某些物理量与混凝土标准强度之间的相关性为基本依据，在不破坏结构混凝土的前提下，测出混凝土的某些物理特性，并按相关关系推算出混凝土的特征强度作为检测结果。属于非破损法的主要有**表面压痕法**、**回弹法**、**超声脉冲法**、**回弹—超声综合法**、**振动法**、**射线法**等。其中回弹法及回弹—超声综合法已广泛用于工程检测，我国已制订相应的技术规程。

除上述两种方法外，第三种方法是半破损法与非破损法的综合使用，这两者的合理综合，可同时提高检测效率和检测精度，因而受到广泛重视。^[26]