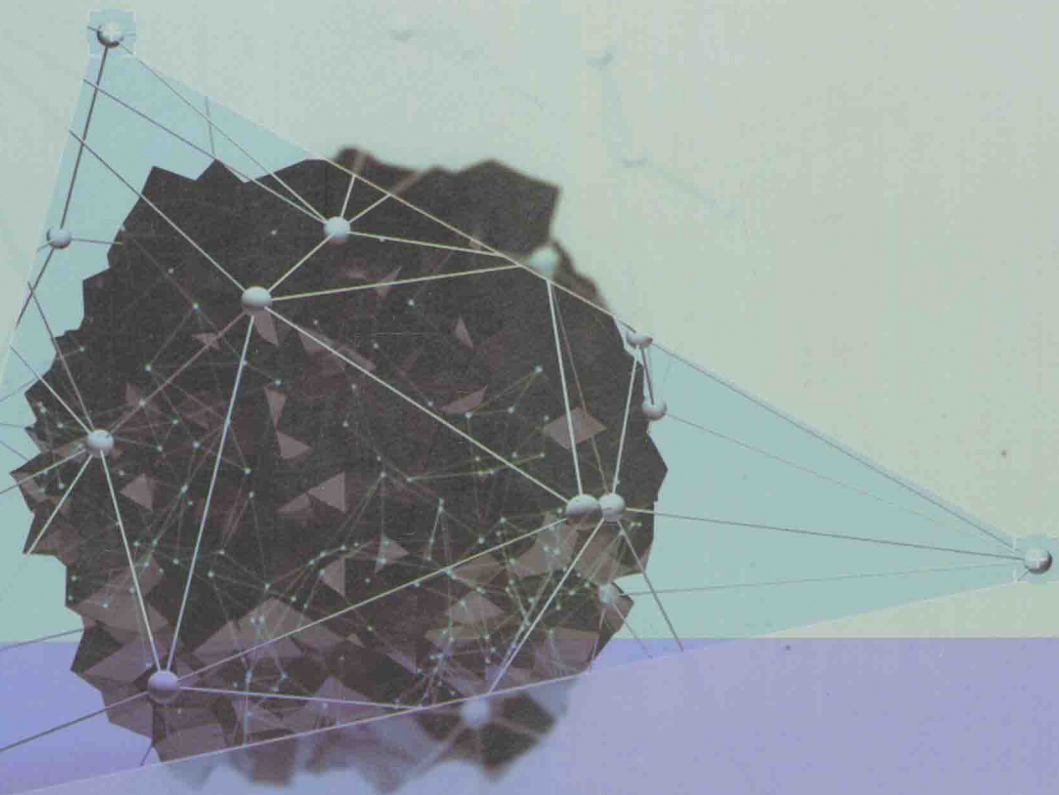


混凝土强度

无损检测及评定方法

Nondestructive Testing and Assessment
Method of Concrete Strength

陈海彬 宋晓胜 刘 晓 佟晓君 著



中国建筑工业出版社

混凝土强度无损检测及评定方法

陈海彬 宋晓胜 刘 晓 佟晓君 著

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土强度无损检测及评定方法/陈海彬等著. — 北京:
中国建筑工业出版社, 2014. 5
ISBN 978-7-112-16570-4

I. ①混… II. ①陈… III. ①混凝土强度-无损检验
IV. ①TU528.07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 052582 号

本书在无损检测技术及结构可靠度基本理论的基础上, 结合数据分析处理重点介绍了混凝土无损检测技术测强曲线的建立方法及强度评定方法。本书介绍了混凝土强度无损检测测强曲线确定方法、逆回归融合法、检测结果评定方法、间接检测中的区间方法、确定正态母体百分位值置信限的小样本方法。

本书适用于无损检测技术人员、科研人员以及教学人员参考学习。

* * *

责任编辑: 杨 杰 张伯熙

责任设计: 张 虹

责任校对: 姜小莲 刘 钰

混凝土强度无损检测及评定方法

陈海彬 宋晓胜 刘 晓 佟晓君 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京市密东印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 12½ 字数: 300 千字

2014 年 5 月第一版 2014 年 5 月第一次印刷

定价: 35.00 元

ISBN 978-7-112-16570-4

(25417)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

混凝土无损检测技术作为试验技术及数据分析、处理技术等多学科交叉的研究领域，是一门新兴的学科分支及高新技术，有着重要的应用价值和发展前景。特别是随着科学技术和国民经济的发展，钢筋混凝土结构的广泛应用成为工程的研究热点。国内外的专家、学者做了大量的研究工作，但至今还没有一本全面介绍其计算方法以及实现计算过程得出计算结果，并能用于实际应用方面的专著。近年来我们在这一领域进行了一些探索性的研究，取得了一些阶段性的研究成果，在此整理成书供读者参考。

我们的研究工作得到了国家自然科学基金（51278164、51378170、51378172）、河北省重点项目（14965406D）以及河北省自然科学基金（E2014209089）的支持，在此对他们表示衷心的感谢。同时得到了本领域许多专家、教授的教诲和指导，本书也引用了国内外同行专家、学者的研究成果，在此一并表示感谢。

本书在无损检测技术及结构可靠度基本理论的基础上，结合数据分析处理重点介绍了混凝土强度无损检测测强曲线的建立方法及强度评定方法。全书共分为6章。第一章绪论主要介绍混凝土无损检测及结构可靠度的基本概念、目前研究的现状、存在的问题以及后续的研究方向展望。第二章混凝土无损检测测强曲线的研究。第三章介绍了推定混凝土强度的超声回弹回归融合法。第四章介绍了混凝土强度随机检测结果评定方法。第五章介绍了间接检测中的区间方法。第六章介绍了确定正态母体百分位值置信限的小样本方法。

无损检测的研究涉及面宽，各项内容起点高度不一，要在有限的篇幅内全面地论述与介绍这方面的研究内容也很困难，书中列入的参考文献也可以给读者提供一些信息，以便读者进一步的研究。限于作者的水平，错误之处在所难免，欢迎读者批评指正。

作者

二〇一四年

于河北联合大学建筑工程学院
河北省地震工程研究中心

目 录

第一章 绪论	1
第二章 混凝土无损检测测强曲线的研究	3
2.1 无损检测技术研究现状	3
2.2 回弹测强曲线三参数幂函数拟合法	7
2.3 超声回弹综合法测强曲面五参数幂函数拟合法	16
2.4 试验数据检验	22
第三章 推定混凝土强度的超声回弹回归融合法	41
3.1 混凝土强度的超声回弹逆回归融合法研究现状	41
3.2 直接测量值数据融合	48
3.3 间接测量值数据融合方法	52
3.4 超声回弹逆回归融合法推定测区混凝土强度	58
3.5 唐山地区超声回弹逆回归融合法测强曲线的制定	63
第四章 混凝土强度随机检测结果评定方法	76
4.1 混凝土强度随机检测结果评定方法研究现状	76
4.2 随机检测结果评定理论	81
4.3 强度特征为正态母体百分位值时的评定公式	85
4.4 强度特征为间接检测测量时的评定公式	88
4.5 减少待定区间长度的技术途径	91
4.6 工程应用	95
附录 A 非中心 t 分布下百分位值	102
第五章 间接检测中的区间方法	114
5.1 间接检测技术研究现状	114
5.2 理论公式的建立	119
5.3 蒙特卡罗方法论证	122
5.4 实例分析及工程应用	145
第六章 确定正态母体百分位值置信限的小样本方法	157
6.1 小样本技术研究现状	157
6.2 小样本技术理论公式的建立	162
6.3 蒙特卡罗方法检验	174
6.4 小样本技术工程应用	186

第一章 绪 论

混凝土无损检测是一门综合性的应用科学技术，是在不改变或不影响被检测对象性能的前提下，检测与分析混凝土结构或构件的物理力学性能的一种方法。混凝土无损检测技术发展至今，其内容越来越丰富，种类也越来越多，目前，较常见的无损检测有：回弹法、超声脉冲法、超声一回弹综合法、钻芯法、拔出法等方法，其中回弹法和超声一回弹综合法是混凝土现场检测中最常用的两种方法。多年来混凝土无损检测技术以其易于操作、成本低廉、费时少的优势在建筑工程质量检测中获得很大的应用。一方面它是防止灾难性事件的重要手段，另一方面它的应用可以使旧有建筑物的维修保养减少盲目性；同时它也是对正在施工的建筑物实施质量监控的重要手段。总之混凝土无损检测技术已在监督、诊断、检测、评价和保证工程质量中起到了重要作用。由于无损检测在工程检测中的广泛应用，世界上许多国家如美国、德国、英国、保加利亚、匈牙利、波兰等都对其进行研究并制定了相应规范。我国于 20 世纪 50 年代中期开始对无损检测技术进行研究，并于 1985 年颁布了第一部无损检测混凝土强度的技术规程——《回弹法评定混凝土抗压强度技术规程》JGJ 23—85。回弹法、超声一回弹综合法是通过混凝土表面硬度或声速与混凝土强度之间的相关关系，利用测强曲线推定混凝土强度值，而不是直接测定其强度，因此，现场混凝土推定结果的可靠性取决于测强曲线的精度，需要具有更大的自由度，更高的拟合精度，从而提高现行技术规程的精确度，为进一步完善国家技术新规程提供理论基础。

在对工程结构进行检测中，需要通过检测结果对结构强度的合格性进行评定。由于受众多因素的影响，其检测结果是随机的，我们只能在给定置信度下确定被测真值存在的范围，这就给做出合格或不合格的最终评定带来困难，而评定结果又关系到结构的安全性和经济性。因此，寻求科学合理的评定方法是工程上亟待解决的问题，也是目前研究的热点。由于其检测目的和工程重要性的不同，其评定的理念和方法也应该不同。在对结构材料强度进行安全性评定中，对于诸如原子反应堆、机场道面板以及承重结构的重要构件，由于一旦失效将带来灾难性的后果，对此应以高概率得到合格的判定结果（强合格条件），即使出现误判（误将合格判为不合格），仅会导致不必要的加固处理所造成的经济损失。对于某些次要结构或次要构件，即使发生失效仅会降低其适用性，对此应以高概率得到不合格的判定结果（强不合格条件），这样可以避免造成不必要的经济损失，即使出现误判（误将不合格判为合格）也不会导致过大的安全隐患；另一方面，在对结构材料强度进行常规现场检测中（例如混凝土结构），当我们根据工程监理提供的施工纪录、预留同条件试块抗压试验结果以及结构的外观质量等，对结构材料强度有较充分信任时，应以高概率得到不合格的判定；当工程监理提供的施工纪录不完整、预留同条件试块抗压试验数量不足以及结构的外观质量不良等，我们对结构材料强度缺乏信任时，则应以高概率去得到合格的判定。

对直接检测而言，由于测量值和被测量值通常是同一物理量，检测结果精度较高。但

在获取检测样本时需要对被测物体进行破损或半破损处理，因此，检测成本很高，如果被测物体属于工程结构，可能会带来安全隐患。对间接检测而言，由于测量值和被测量值不是同一物理量并且测量值和被测量值之间不具有完全确定的关系，因此检测结果精度较低。但在获取现场检测值时所选用的物理量可以不对被测物体造成损伤，因此，检测成本就会降低，适合于对工程结构进行大范围的检测。

由于这些原因，间接检测方法在工程上有着广泛的应用，特别是对诸如大坝、桥梁、建筑物的主承力构件、压力容器等重要结构，间接检测是可采用的唯一方法。因此如何针对不同的检测问题依照随机的测量结果推定出高置信度、高精度的被测值置信区间，一直是工程上研究的热点问题。

在实际工程中，被测物体的性能指标随着被测物形成而固化，而间接检测的测量值将随着测量仪器、测量人、检测点的位置等不同而随机变化。文中将根据测量结果的统计规律和测量值与被测量值之间的相关关系，就如何确定被测值置信区间在理论上进行深入探讨。被测物体可能满足均匀性假设（各处的性能指标相同），对此仅需要确定被测值的均值；也可能不满足均匀性假设（各处的性能指标不相同），对此不仅需要确定被测值的均值，而且需要确定被测值的百分位值。

目前，统计分析的数据大部分仅局限于当前试验数据，未能充分利用以往数据和经验提供的信息。在这种情况下，要提高统计推断和预测精度，必须增加试验数量；而当试验数量降低时，精度相应地将降低。这就使得统计推断和预测精度与试验数据量之间的矛盾越来越突出。因此，在保证预测精度的前提下，如何综合利用以往积累的信息和实验数据，减少当前试验数量和试件个数是亟待解决的问题。如果现有的信息量不足，通过补充（借用）其他信息的方法，使总信息量增加，以达到提高统计推断和预测精度的目的，这就是小样本技术的本质。小样本技术就是对数据中的“共性信息”进行充分的挖掘、开发和利用，使得在当前试样数量一定的前提下，可用信息远远多于传统方法，进而提高预测精度。

采用小样本技术可能是解决这一问题的可靠途径，将提高相同置信度的较小样本容量下 X_R 的区间估计的精度。其结果可应用于金属材料疲劳寿命测定、混凝土强度标准值推定、钻芯法检测混凝土强度的工程实际当中。

第二章 混凝土无损检测测强曲线的研究

混凝土是建筑工程中大量使用的结构材料,因此提高对结构实体构件混凝土强度的检测水平和准确性不但对确保工程质量有意义,而且也能够得到较大的经济效益。长期以来,验评标准规定以标准养护试块强度评定混凝土及钢筋混凝土质量,即通过抽样制作试块或构件进行破坏检验等。自 20 世纪 30 年代发展起来的无损检测方法,如今已广泛受到人们重视,而且越来越多的运用到实际中去。

混凝土无损检测,是一门综合性的应用科学技术,是在不改变或不影响被检测对象性能的前提下,检测与分析混凝土结构或构件的物理力学性能的一种方法。混凝土无损检测技术发展至今,其内容越来越丰富,种类也越来越多,目前,较常见的无损检测有:回弹法、超声脉冲法、超声-回弹综合法、钻芯法、拔出法等方法,其中回弹法和超声-回弹综合法是混凝土现场检测中最常用的两种方法。

由于无损检测在工程检测中的广泛应用,世界上许多国家如美国、德国、英国、保加利亚、匈牙利、波兰等都对其进行研究并制定了相应规范。我国于 20 世纪 50 年代中期开始对无损检测技术进行研究,并于 1985 年颁布了第一部无损检测混凝土强度的技术规程——《回弹法评定混凝土抗压强度技术规程》JGJ 23—85。回弹法、超声-回弹综合法是通过混凝土表面硬度或声速与混凝土强度之间的相关关系,利用测强曲线推定混凝土强度值,而不是直接测定其强度,因此,现场混凝土推定结果的可靠性取决于测强曲线的精度。本课题对目前常用的测强曲线拟合方法和回归方程进行了深入的研究和探讨,归纳出了一类含有位置参数的回归方程和与其相适应的数值计算方法。这种新回归方程与传统的回归方程相比较,具有更大的自由度,更高的拟合精度,可以提高现行技术规程的精确度,为进一步完善国家技术新规程提供了理论基础,因此具有一定的理论价值和工程应用价值。

2.1 无损检测技术研究现状

2.1.1 无损检测技术简介

2.1.1.1 无损检测技术的产生背景^[1-6]

混凝土是建筑工程中最主要的且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,是当今建筑工程中的重要课题。而传统控制混凝土质量指标主要定性在标准养护试件的抗压强度上,即按规定的取样方法,制作标准立方体试件,在规定的温度、湿度环境下,养护 28 天时按标准试验方法测得的试件抗压强度来评定结构构件的混凝土强度。用试件试验测得的混凝土性能指标,由于其养护条件和受力情况的不同,往往与结构物中混凝土的性能有一定差别。因此,标准试件的抗压强度仅反映混凝土在特定条件下的性能,并不能代表结构混凝土的真实状态;此外,当对试件试验所测定的值产生怀疑时而又无复验试件。

因此,无损检测技术就应运而生了,混凝土无损检测技术,是在不破坏结构构件的情况下,利用测试仪器获取有关混凝土质量而无损于混凝土受力功能的物理量,因该物理量与混凝土质量(强度、混凝土缺陷)之间有良好的相关关系,可采用获取的物理量去推断混凝土质量(强度、混凝土缺陷)。由于混凝土在成型过程振捣不实,或受力及腐蚀性破坏,将造成混凝土蜂窝、孔洞、裂缝等缺陷,所以当结构和构件受力时,这些部位将导致应力集中而首先破坏。混凝土无损检测可以检测这些质量缺陷,从而为提高混凝土质量、改善混凝土施工工艺提供科学依据。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鉴定。

2.1.1.2 无损检测技术的特点^[3]

- (1) 对混凝土结构构件不破坏,可以获得人们需要的混凝土物理量信息;
- (2) 测试操作简单,测试费用低;
- (3) 不受结构物的形状与尺寸限制,可以进行多次重复试验;
- (4) 可对重要结构部位长期监测。

2.1.1.3 无损检测方法的概述及常用方法

无损检测方法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,进而推断混凝土的强度、均匀性、连续性、耐久性等一系列性能的检测方法。

无损检测技术主要由测强、测缺和测其他性能构成。测强检测分为半破损法、非破损法和综合法三类,主要有钻芯法、回弹法、超声法和超声-回弹综合法等方法。测缺检测主要有超声法、脉冲回波法、雷达扫描法等方法。检测混凝土其他性能分为弹性和非弹性性能、耐久性、钢筋位置和含水率等混凝土的性能,常用方法有共振法、磁测法、中子散射法等。

2.1.2 无损检测技术在国外的发展及应用

2.1.2.1 无损检测技术在国外的发展概述^[5,7]

早在20世纪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。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提出用声速、回弹法综合估算混凝土强度的方法;同时,声发射技术被引入混凝土检测体系。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,目前,先装拔出法在北美和北欧应用较多,主要检测混凝土强度的发展程度。

2.1.2.2 无损检测技术在国外应用

随着混凝土无损检测方法日渐成熟,许多国家制订这方面的标准。其中以美国的ASTM所颁布的标准最多,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)、《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。^[4]

2.1.3 无损检测技术在国内的发展及应用

2.1.3.1 无损检测的理论基础^[3,4]

我国在无损检测技术领域的研究工作始于20世纪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。20世纪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。20世纪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。其中,湖南大学提出了强度与应力应变性质的理论关系,其理论公式为:

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

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 ——混凝土塑性变形系数;
 v_l ——加荷速度;
 t ——加荷时间。

该式主要说明混凝土强度不仅与弹性性质有关,而且还与塑性性质和试验条件有关,所以要提高无损检测精度,必须同时注意这两个因素。

在进一步研究了应力应变参数与超声检测参数相互关系,还得出公式:

$$f = \frac{\rho\epsilon_r v^2}{3\phi} + \frac{2v_l}{3\alpha v}$$

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。

此外,同济大学在建立混凝土强度与孔隙的关系方面作了较深入的研究,并证明了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,理论公式为:

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

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;
 $K_1 \sim K_4$ ——材料常数。

2.1.3.2 无损检测在国内的应用

我国除了在混凝土无损检测技术基本理论方面研究外,还对回弹法、超声回弹综合法、钻芯法、拔出法、超声缺陷检测法等制定了技术规程。已经制定的规程有《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》(CECS02—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损技术规程》(CECS21—90)、《后装拔出法检测混凝土强度技术规程》(CECS69—94)、《回弹法检测高强混凝土强度技术规程》(Q/JY 17—2000)、《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T23—2001)等等。

总之,我国混凝土无损检测技术领域中的研究工作起步较早、基础广泛、成果较多、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。^[8]

2.1.4 混凝土测强曲线的建立和分类

2.1.4.1 测强曲线的分类

目前,混凝土的抗压强度与非破损参数之间还没有建立一种精确的关系,只能利用回归的方法建立测强曲线。测强曲线是指用混凝土的抗压强度与非破损参数之间所建立起来的相关曲线。它的制定方法,是在试验室中制作一定数量的、不同强度、不同材料、不同龄期的各种立方体试块,测定其参数(如回弹值、超声值、碳化深度和抗压强度等),然后选择相应的数学模型来拟合它们之间的相关关系,确定经验公式并绘出测强曲线。混凝土测强曲线按它的适用范围可以分为:全国统一测强曲线、地区测强曲线和专用测强曲线。一般常用测强曲线有 $f-R$ 曲线和 $f-v-R$ 曲线。^[9]

2.1.4.2 混凝土测强曲线的建立

(1) 全国统一测强曲线的建立,是用全国具有代表性的材料、成型养护工艺来配制的混凝土试块,通过大量的破损与非破损试验,将所得数据进行处理,然后进行曲线拟合后得到的相关关系曲线。它是在综合全国许多地区曲线的基础上,经过大量的分析研究和计算汇总后才建立的,所以它适用于无地区测强曲线和专用测强曲线的单位,具有一定的现场适应性,但精度不高。它的验证标准是其平均相对误差 $\delta \leq \pm 15\%$,相对标准差 $e_r \leq 18\%$ 。

(2) 地区测强曲线的建立,是用本地区通常使用具有代表性的材料、成型养护工艺来配制的混凝土试块,通过大量的破损与非破损试验,进行回归分析,得到的拟合较好、相关系数较大的相关关系曲线,所以这类曲线适用于无专用测强曲线的工程测试,其现场适应性和强度测试精度均优于全国统一测强曲线。它的验证标准是平均相对误差 $\delta \leq \pm 14\%$,相对标准差 $e_r \leq 17\%$ 。

(3) 专用测强曲线的建立,是针对某一工程,使用与被测工程相同的材料、成型养护工艺和龄期来配制的混凝土试块,通过大量的破损与非破损试验进行回归分析,得到的拟合最好、相关系数最大的相关关系曲线,所以此类曲线针对性较强,精度也较高。但测强曲线完成后,应注明建立曲线的技术条件(如粗骨料种类、水泥品种、混凝土的强度等级、龄期等),它仅适用于建立此曲线时的技术条件下使用,一般不得外推。它的验证标准是平均相对误差 $\delta \leq \pm 12\%$,相对标准差 $e_r \leq 14\%$ 。

三类曲线的选用,在有条件的情况下,优先选用专用测强曲线,其次选用地区测强曲线,如果没有条件使用专用测强曲线和地区测强曲线,只能使用全国统一测强曲线,但要

注意加以修正^[10,11]。

2.1.5 无损检测技术研究展望

混凝土无损检测技术中最基础问题就是建立测强曲线,建立方法是先建立数学模型,然后对检测数据进行回归分析确定待定系数。用传统回归模型建立的测强曲线的相关系数较小、精度较低。而测强曲线精度的高低直接关系到评定混凝土结构或构件的质量结果。所以寻求一种更有效地回归模型,建立高精度测强曲线是工程上迫切需要的。

针对目前国内外对测强曲线的研究的现状,本文对回弹测强曲线提出三参数幂函数公式:

$$f = A(R - R_0)^B$$

即:

$$\ln f = \ln A + B \ln(R - R_0)$$

式中的待定系数是通过选定相关系数为目标函数,然后取线性相关系数最大值对数据进行回归分析而求得。用此方法拟合的回弹测强曲线可以使 $f-R$ 曲面试验数据在对数坐标系 $\ln f - \ln(R - R_0)$ 中最大限度的呈现线性关系,相关系数最大,精度较高,平均相对误差和相对标准差比传统的方法都小。^[12,13]

另一方面,对超声回弹综合法测强曲线提出了五参数幂函数公式:

$$f = A(v - v_0)^B(R - R_0)^C$$

即:

$$\ln f = \ln A + B \ln(v - v_0) + C \ln(R - R_0)$$

然后对试验数据进行拟合,并用线性相关系数最大值,求解非线性方程组来确定待定系数,得到超声回弹综合法测强曲线。此方法确定的测强曲线比传统的测强曲线具有较高的自由度,相关系数可达到最大,更有效,对超声回弹综合法检测混凝土强度有重要的应用价值^[14]。

此外,在用上述两种新方法进行回归分析的过程中,由于方程组的参数较多,且较复杂,曾尝试着用传统的牛顿迭代法、梯度法和下降法来求解非线性方程组,在求解过程中非线性方程组易发散或收敛速度较慢,本文运用二分法去求解非线性方程组,此方法收敛速度较快,且不易发散^[15]。

2.2 回弹测强曲线三参数幂函数拟合法

2.2.1 回弹法的发展

自从1948年瑞士人施米特(E. Schmit)发明了回弹仪以来,回弹法的应用已有50多年的历史了。在这50年中不断出现新的其他无损检测方法,但是由于回弹法仪器构造简单、方法简便、测试值在一定条件下与混凝土强度有较好的相关性、测试费用低廉等特点,被国际学术界公认为混凝土无损检测的基本方法之一。我国自20世纪50年代中期开始,采用回弹法测定现场混凝土抗压强度,在经过一个停滞期后直到20世纪70年代后期,国家建委才将混凝土无损检测技术研究列入了建筑科学发展计划,并组成了以陕西省建筑科学研究设计院为组长的全国性的协作研究组,对回弹法检测混凝土进行了一系列研究,并先后推出了85、92、2001规程。现在回弹法已成为我国应用最广泛的无损检测技术之一^[16]。

2.2.2 回弹法基本原理

回弹法是用一弹簧驱动的重锤，通过弹击杆（传力杆），弹击混凝土表面，并测出重

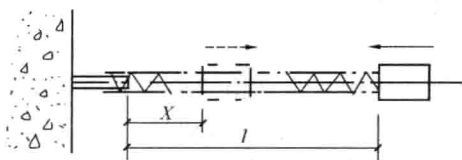


图 2-1 回弹原理示意图

锤被反弹回来的距离以回弹值（反弹距离与弹簧初始长度之比）作为与强度相关的指标，来推定混凝土强度的一种方法。由于测量在混凝土表面进行，所以回弹法属于表面硬度法的一种。

图 2-1 为回弹法的原理示意图。当重锤被拉到起始状态时，若重锤的质量等于 1，则这时重锤所具有的势能 e 为：

$$e = \frac{1}{2} E_s l^2 \quad (2-1)$$

式中 E_s ——拉力弹簧的刚度系数；

l ——拉力弹簧起始拉伸长度。

混凝土受冲击后产生瞬时弹性变形，其恢复力使重锤被弹回到 x 位置时所具有的势能 e_x 为：

$$e_x = \frac{1}{2} E_s x^2 \quad (2-2)$$

式中 x ——重锤反弹位置或重锤弹回时弹簧的拉伸长度。

所以重锤在弹击过程中，所消耗的能量 Δ_e 为：

$$\Delta_e = e - e_x \quad (2-3)$$

将式 (2-1) 和式 (2-2) 代入式 (2-3) 得：

$$\Delta_e = \frac{E_s l^2}{2} - \frac{E_s x^2}{2} \quad (2-4)$$

令

$$R = \frac{x}{l} \quad (2-5)$$

在回弹仪中， l 为定值，所以 R 与 x 成正比，称为回弹值。将 R 代入式 (2-4) 得：

$$R = \sqrt{1 - \frac{\Delta_e}{e}} = \sqrt{\frac{e_x}{e}} \quad (2-6)$$

从式 (2-6) 中可知，回弹值 R 等于重锤冲击混凝土表面后剩余的势能与原有势能之比的平方根。简而言之，回弹值 R 是重锤冲击过程中能量损失的反映。

能量主要损失在以下三个方面：

- (1) 混凝土受冲击后产生塑性变形所吸收的能量；
- (2) 混凝土受冲击后产生振动所消耗的能量；
- (3) 回弹仪各机构之间的摩擦所消耗的能量。

2.2.3 回弹法的仪器及其使用

1. 回弹法检测混凝土强度的仪器为回弹仪，它主要分为 L 型（小型）、N 型（中型）、P 型（摆式）和 M 型（大型），其中 N 型应用最广泛。回弹仪如图 2-2 所示：



图 2-2 回弹仪

回弹仪的构造如图 2-3 所示：

2. 回弹仪的操作：将弹击杆顶住混凝土的表面，使仪器的轴线垂直于构件混凝土的表面，轻压仪器，松开按钮，弹击杆徐徐伸出。使仪器对混凝土表面缓慢均匀施压，待弹击锤脱钩冲击弹击杆后，带动指针向后移动并停留在某一位置上，继续顶住混凝土表面并在读取和记录回弹值后，逐渐对仪器减压，使弹击杆由仪器内伸出，重复进行上述操作，可以测得被测构件或结构的回弹值。

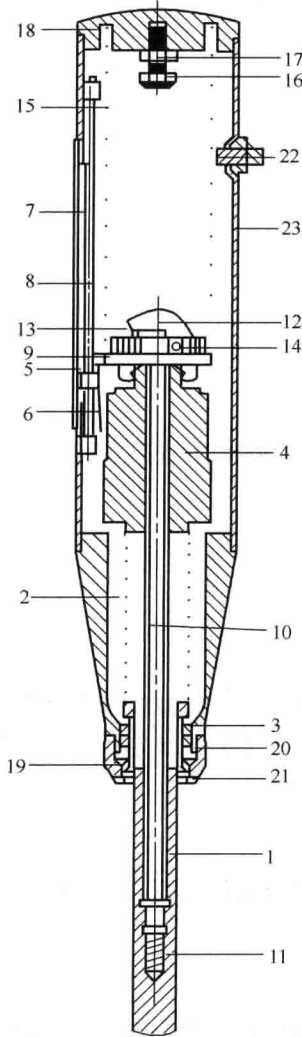


图 2-3 回弹仪构造图

- 1—弹击杆；2—弹击拉簧；3—拉簧座；4—弹击锤；5—指针块；6—指针片；7—指针轴；8—刻度尺；9—导向法兰；10—中心导杆；11—缓冲压簧；12—挂钩；13—挂钩压簧；14—挂钩销子；15—压簧；16—调零螺钉；17—紧固螺母；18—尾盖；19—盖帽；20—卡环；21—密封毡帽；22—按钮；23—外壳

3. 回弹仪的保养和校验：使用回弹仪检测完混凝土后，要清除弹击杆、刻度尺及外壳上的脏物。有必要时应对应机芯进行清洗。由于回弹仪出厂时不能保证标准状态或仪器超过检定有效期等原因，应对回弹仪进行校验。衡量校验合格标准为：

- (1) 水平弹击时，弹击锤脱钩的瞬间，仪器的标称动能应为 2.207J，此时在钢砧上的率定值应为 80 ± 2 ；
- (2) 弹击拉簧的工作长度 61.5mm，弹击锤的冲击长度（拉簧的拉伸长度）应为 75mm，弹击锤在刻度尺上的“100”处脱钩，此时弹击锤与弹击杆碰撞的瞬间，弹击拉簧应处于自由状态，弹击锤起跳点应在相应于刻度尺上推算的“0”处，如图 2-4 所示；
- (3) 指针块上的指示线至指针片端部的水平距离为 20mm，指针块在指针轴全长上的摩擦力为 0.5—0.8N；
- (4) 弹击杆前端的曲率半径为 25mm，后端的冲击面为平面；
- (5) 操作轻便、脱钩灵活^[3,4]。

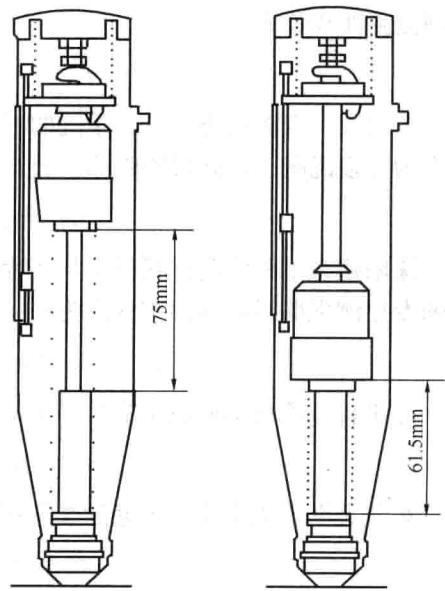


图 2-4 弹击锤脱钩前、后的状态

2.2.4 常用回弹测强曲线

回弹法测定混凝土强度的基本依据,就是回弹值与混凝土抗压强度之间的相关性,这种相关关系体现就是经验公式或测强曲线。目前,常用试验归纳法,建立混凝土强度 f_{cu}^c 与回弹值 R 及主要影响因素(例如,碳化深度 l)之间的二元回归公式。这些回归的公式可采用各种不同的函数方程形式,根据大量试验数据进行回归拟合,择其相关系数较大者作为实用经验公式^[17-21]。目前常见的形式主要有以下几种:

$$\text{直线方程} \quad f_{cu}^c = A + BR \quad (2-7)$$

$$\text{幂函数方程} \quad f_{cu}^c = AR^B \quad (2-8)$$

$$\text{抛物线方程} \quad f_{cu}^c = A + BR + CR^2 \quad (2-9)$$

$$\text{二元方程} \quad f_{cu}^c = AR^B \cdot 10^{C \cdot l} \quad (2-10)$$

式中 f_{cu}^c ——混凝土测区的推算强度;

R ——测区平均回弹值;

l ——测区平均碳化深度值;

A 、 B 、 C ——常数项,视原材料条件等因素不同而不同。

2.2.5 国内外对回弹测强曲线的研究

华东交通大学的李立玲等把回弹法检测混凝土强度回归方程的精度进行了比较,提出了一种在中低强度区用直线式回归方程^[22]:

$$f_{cu}^c = A + BR$$

在中高强度区用幂函数回归方程:

$$f_{cu}^c = AR^B$$

的方法来提高推测混凝土强度的精度。

武汉交通科技大学船舶与土木工程学院的周晖等运用非线性回归,曲线拟合和遗传算法的优化拟合等算法对全国通用回弹测强曲线进行修正,并提出了幂函数形式的现场修正回弹测强曲线公式为^[9]:

$$f_{cu}^c = 0.13237R^{1.55888};$$

东北大学资源与土木工程学院的谷伟等提出高强混凝土回弹测强曲线,采用线性函数型作为高强混凝土回弹仪测强曲线公式^[23]:

$$f_{cu}^c = 2.461R - 27.575;$$

沈阳建筑工程学院材料科学与工程系的余红发提出了回弹法检测潮湿混凝土的抗压强度的专用测强曲线,回归方程式为^[2]:

$$f_{cu}^c = 6.21 \times 10^{-3} R^{2.36} \cdot e^{-0.01l} \cdot e^{0.005w};$$

辽宁省建设科学研究院建立了十年龄期的回弹法回归方程(碎石)^[24]:

$$f_{cu}^c = 0.06083 \times R^{1.702} \times 10^{-0.006529l};$$

东北大学资土学院土木系的李宏军提出了十七年龄期的回弹测强曲线形式为^[24]:

$$f_{cu}^c = 0.591977 \times R^{1.134278} \times 10^{-0.00598l};$$

一些地区基准曲线形式如^[25]:

北京地区：
$$f_{cu}^c = AR^B$$

陕西地区：
$$f_{cu}^c = (AR - B) \times 10^C$$

重庆地区：
$$f_{cu}^c = AR^2 + BR - C$$

$$f_{cu}^c = AR - B$$

成都地区：
$$f_{cu}^c = AR - B$$

我国《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23—2011)中推荐使用测强曲线的形式为^[26]：

$$f_{cu}^c = AR^B 10^C$$

此外，北京市建设工程质量检测中心的任容等提出了一种以芯样修正回弹值的方法能有效的提高检测混凝土的精度^[27]；中国水利水电科学研究院的吕小彬等建立了长龄期混凝土的专用测强曲线等^[28]。

国外一些国家回弹测强曲线的形式：

意大利回弹曲线的回归形式为^[29]：

$$f_{cu}^c = 0.000135 \times R^{3.4424} ;$$

波兰采用的回弹回归方程为^[30]：

$$f_{cu}^c = (1.1 - 1.4) (0.040R^2 - 0.915R + 7.4) ;$$

英国采用的回弹回归方程为^[31]：

$$f_{cu}^c = 0.0126(R + 29.8) - 21.1。$$

2.2.6 三参数幂函数式回弹测强曲线

2.2.6.1 理论公式^[32-37]

专用回弹测强曲线的回归方程式按每一标准试件测得的回弹值 R 和抗压强度值 f_{cu} 数据，采用最小二乘原理，按如下回归方程进行拟合。

$$f_{cu} = AR^B \quad (2-11)$$

即
$$\ln f_{cu} = \ln A + B \ln R \quad (2-12)$$

大量计算表明 $f_{cu} - R$ 曲线在 $\ln f_{cu} - \ln R$ 坐标系中线性关系不能令人满意，采用上式计算误差较大。因此选用三参数幂函数：

$$f_{cu} = D(R - R_0)^\alpha \quad (2-13)$$

$$\ln f_{cu} = \ln D + \alpha \ln (R - R_0) \quad (2-14)$$

进行拟合，可以使 $f_{cu} - R$ 曲线试验数据在双对数坐标系 $\ln f_{cu} - \ln (R - R_0)$ 中最大限度地呈现线性关系，式中 D 、 R_0 和 α 均为待定参数，可以通过取线性相关系数最大值来求得。经计算，采用本方法数据拟合程度均很好。

三参数幂函数 $f_{cu} - R$ 曲线拟合：设回弹法测强曲线可表达为三参数幂函数式 (2-13) 和 (2-14)， f_{cu} 为标准混凝土试块的抗压强度值， R 为试块的回弹值。

式中 D 、 R_0 和 α 均为待定参数，它们可按下述方法求得：

令
$$A = \ln D, B = \alpha \quad (2-15)$$

$$Y = \ln f_{cu}, X = \ln (R - R_0) \quad (2-16)$$

则
$$Y = A + BX \quad (2-17)$$

因为式 (2-17) 中 X 和 Y 之间成线性关系, 所以我们可以根据已知的一组试验数据 $(f_{cu,i}, R_i) i = 1, 2, \dots, n$, 通过式 (2-16) 相应求得一组数据 $(X_i, Y_i) i = 1, 2, \dots, n$, 再由线性回归分析确定出待定参数 A 、 B 和线性相关系数 r 。

$$A = \bar{Y} - B\bar{X} \quad (2-18)$$

$$B = \frac{L_{XY}}{L_{XX}} \quad (2-19)$$

$$r = \frac{L_{XY}}{\sqrt{L_{XX}L_{YY}}} \quad (2-20)$$

式中
$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln f_{cu,i} \quad (2-21)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(R_i - R_0) \quad (2-22)$$

$$L_{YY} = \sum_{i=1}^n \ln^2 f_{cu,i} - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \ln f_{cu,i} \right)^2 \quad (2-23)$$

$$L_{XX} = \sum_{i=1}^n \ln^2(R_i - R_0) - \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \ln(R_i - R_0) \right]^2 \quad (2-24)$$

$$L_{XY} = \sum_{i=1}^n \ln f_{cu,i} \ln(R_i - R_0) - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \ln f_{cu,i} \right) \left[\sum_{i=1}^n \ln(R_i - R_0) \right] \quad (2-25)$$

由上面各式可见, $\bar{X}$ 、 L_{XX} 和 L_{XY} 均与 R_0 有关, 是 R_0 的函数, 因此 A 、 B 和 r 也都是 R_0 的函数, 即 $A(R_0)$ 、 $B(R_0)$ 和 $r(R_0)$, 我们只要确定了 R_0 , 其他待定参数就确定了。

R_0 必须使线性相关系数绝对值取最大, 即 $|r(R_0)|$ 取最大, 所以可由下式求出 R_0 :

$$\frac{d|r(R_0)|}{dR_0} = 0 \quad (2-26)$$

即
$$\frac{dr^2(R_0)}{dR_0} = 0 \quad (2-27)$$

因为
$$\frac{dr^2(R_0)}{dR_0} = \frac{2L_{XY}^2}{L_{XX}L_{YY}} \left(\frac{1}{L_{XY}} \frac{dL_{XY}}{dR_0} - \frac{1}{2L_{XX}} \frac{dL_{XX}}{dR_0} \right) \quad (2-28)$$

所以
$$\left(\frac{1}{L_{XY}} \frac{dL_{XY}}{dR_0} - \frac{1}{2L_{XX}} \frac{dL_{XX}}{dR_0} \right) = 0 \quad (2-29)$$

令
$$L_{Y0} = \frac{dL_{XY}}{dR_0} = - \sum_{i=1}^n \frac{\ln f_{cu,i}}{R_i - R_0} + \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \ln f_{cu,i} \right) \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i - R_0} \right) \quad (2-30)$$

$$L_{X0} = \frac{dL_{XX}}{dR_0} = -2 \sum_{i=1}^n \frac{\ln(R_i - R_0)}{R_i - R_0} + \frac{2}{n} \left[\sum_{i=1}^n \ln(R_i - R_0) \right] \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i - R_0} \right) \quad (2-31)$$

将式 (2-30) 和式 (2-31) 代入式 (2-29) 得:

$$\left(\frac{L_{Y0}}{L_{XY}} - \frac{L_{X0}}{L_{XX}} \right) = 0 \quad (2-32)$$

令
$$E(R_0) = \frac{L_{Y0}}{L_{XY}} - \frac{L_{X0}}{L_{XX}} \quad (2-33)$$