

工程结构加固薄层拔出法现场 检测抗压强度技术

卜良桃 王伍生 侯琦◎著

中国建筑工程工业出版社

工程结构加固薄层拔出法现场 检测抗压强度技术

卜良桃 王伍生 侯 琦 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程结构加固薄层拔出法现场检测抗压强度技术/
卜良桃, 王伍生, 侯琦著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 3

ISBN 978-7-112-20475-5

I. ①工… II. ①卜…②王…③侯… III. ①工程结
构-加固-抗压强度-检测 IV. ①TU746.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 037240 号

本书是根据《拔出法检测水泥砂浆和纤维水泥砂浆强度技术规程》CECS 389—2014 编写的技术指南。全书分为 6 章, 书中首先介绍了拔出法检测技术的发展概况和进展, 然后分别介绍了拔出法检测砌体结构水泥砂浆加固薄层强度、先装拔出法检测混凝土基层纤维水泥砂浆加固薄层强度、后装拔出法检测混凝土基层纤维水泥砂浆加固薄层强度 3 种检测技术, 并对拔出法检测纤维水泥砂浆破坏形态及影响因素进行了分析, 最后根据工程实际情况撰写了拔出法检测水泥砂浆和纤维水泥砂浆抗压强度算例。

本书内容丰富, 脉络清晰, 其目的是为了帮助广大读者熟悉规范的理论基础, 了解规范编制的过程和工程应用方法。本书可供建筑结构检测鉴定的检测人员、研究人员和高校土建专业师生阅读, 对建筑工程质量检测和监督管理人员也有很大的帮助。

责任编辑: 王华月 范业庶

责任设计: 谷有稷

责任校对: 王宇枢 李美娜

工程结构加固薄层拔出法现场检测抗压强度技术

卜良桃 王伍生 侯琦 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

唐山龙达图文制作有限公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 8 $\frac{3}{4}$ 字数: 208 千字

2017 年 6 月第一版 2017 年 6 月第一次印刷

定价: 29.00 元

ISBN 978-7-112-20475-5

(29938)

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

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2010年第一批工程建设协会标准制订、修订计划〉的通知》(建标协字〔2010〕27号)的要求,由湖南大学等单位编制的《拔出法检测水泥砂浆和纤维水泥砂浆强度技术规程》,经中国工程建设标准化协会建筑物鉴定与加固专业委员会组织审查,已批准发布,编号为CECS 389—2014,自2015年5月1日起施行。

《拔出法检测水泥砂浆和纤维水泥砂浆强度技术规程》CECS 389—2014主要内容有:拔出法检测水泥砂浆和纤维水泥砂浆强度的基本规定、拔出法检测装置、先装拔出检测技术、后装拔出检测技术、水泥砂浆和纤维水泥砂浆强度换算及推定、建立测强曲线的基本要求等。

本书是对拔出法检测水泥砂浆和纤维水泥砂浆强度技术理论分析的详细说明,是对《拔出法检测水泥砂浆和纤维水泥砂浆强度技术规程》CECS 389—2014正文及其条文说明的进一步扩展。

本书由卜良桃、王伍生、侯琦著,书中包含了研究生李静媛、陈送送、何瑶、王宇晗、侯琦、张欢、刘德成的研究成果,周云鹏编排和校对了全部书稿。本书还结合了标准编制团队的试验研究成果,在此,谨向规范编制组各位专家致以衷心的感谢!

书中不妥与疏漏之处在所难免,敬请读者拨冗指正,必以空杯之心,虚怀以纳之。书中有部分案例是作者在工程实践中对标准研究成果的应用总结,对标准的公式作了验证,供读者参考借鉴。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 工程结构加固薄层拔出法检测技术的背景	1
1.2 纤维水泥砂浆加固概述	2
1.2.1 纤维水泥砂浆钢筋网加固原理	2
1.2.2 发展概述	2
1.2.3 技术特点	4
1.3 非破损检测技术的形成	5
1.3.1 结构检测概况	5
1.3.2 无损检测常用方法的分类和特点	6
1.3.3 应用比较广泛的无损检测方法	6
1.3.4 应用比较广泛的半破损检测方法	9
1.4 拔出法概述	10
1.4.1 拔出法国外状况	11
1.4.2 拔出法国内现状	12
1.5 工程结构加固薄层拔出法检测技术的内容和意义	13
参考文献	13
第 2 章 拔出法检测砌体结构水泥砂浆加固薄层强度	17
2.1 砌体结构加固技术	17
2.2 砌体结构砂浆强度检测方法	17
2.3 拔出法应用到水泥砂浆加固薄层强度检测的相关研究	19
2.4 拔出法检测水泥砂浆加固薄层测强曲线的建立	20
2.4.1 先装拔出法现场检测水泥砂浆测强曲线	20
2.4.2 后装拔出法现场检测水泥砂浆测强曲线	43
2.5 拔出法检测水泥砂浆强度与检测混凝土强度测强曲线比较	53
2.6 小结	55
参考文献	55
第 3 章 先装拔出法检测混凝土基层纤维水泥砂浆加固薄层强度	57
3.1 聚乙烯醇纤维水泥砂浆加固薄层先装拔出法测强曲线的建立	57
3.1.1 试验方案设计	57
3.1.2 试验过程	58

3.1.3 试验结果	60
3.1.4 试验数据分析	63
3.1.5 结论	70
3.2 聚丙烯纤维水泥砂浆加固薄层先装拔出法测强曲线的建立	71
3.2.1 试验方案设计	71
3.2.2 试验过程	72
3.2.3 试验结果	72
3.2.4 数据分析	74
3.2.5 结论	79
3.3 钢纤维水泥砂浆加固薄层先装拔出法测强曲线的建立	79
3.3.1 试验方案	79
3.3.2 拔出试验	80
3.3.3 试验数据	80
3.3.4 回归分析	83
3.3.5 结论	87
参考文献	87

第4章 拔出法检测水泥砂浆与纤维水泥砂浆破坏形态及影响因素分析 90

4.1 混凝土拔出试验破坏形态	90
4.2 先装拔出法破坏形态	91
4.2.1 普通水泥砂浆先装拔出法破坏形态	91
4.2.2 纤维水泥砂浆先装拔出法破坏形态	92
4.3 后装拔出法破坏形态	93
4.3.1 普通水泥砂浆后装拔出法破坏形态	93
4.3.2 纤维水泥砂浆后装拔出法破坏形态	94
4.4 拔出法破坏形态分析	95
4.5 拔出法破坏机理分析	96
4.6 影响水泥砂浆拔出力的因素	99
4.6.1 客观因素	100
4.6.2 主观因素	106
4.7 测强曲线对比	107
4.7.1 先装拔出法与后装拔出法检测水泥砂浆试验结果对比	107
4.7.2 先装拔出法检测纤维砂浆与水泥砂浆试验结果对比	108
4.7.3 后装拔出法与先装拔出法检测纤维砂浆结果对比	108
4.8 本章小结	112
参考文献	112

第5章 拔出法检测水泥砂浆和纤维水泥砂浆抗压强度实例 114

5.1 先装拔出法检测水泥砂浆抗压强度实例	114
5.2 先装拔出法检测合成纤维水泥砂浆抗压强度实例	116

5.3 先装拔出法检测钢纤维水泥砂浆抗压强度实例 119

5.4 后装拔出法检测水泥砂浆抗压强度实例 122

5.5 后装拔出法检测合成纤维水泥砂浆抗压强度实例 1 124

5.6 后装拔出法检测合成纤维水泥砂浆抗压强度实例 2 127

5.7 后装拔出法检测钢纤维水泥砂浆抗压强度实例 129

第1章 绪 论

1.1 工程结构加固薄层拔出法检测技术的背景

纵观人类工程建设史,砌体结构、混凝土结构已是一种常见的结构类型,而混凝土结构真正投入使用仅有百余年的历史。虽然如此,混凝土结构却已发展成为当今世界上用途最广,用量最大的建筑结构形式^[1-2]。与其他结构形式相比,砌体结构、混凝土结构具有:就地取材、节约钢材、耐久、耐火、可模性好的优点;但它们也具有下述主要缺点:自重大、抗裂性差、性质脆。且结构在使用过程中,由于设计和施工的缺陷以及使用过程中的老化破坏,加上自然灾害造成的结构承载力不足、开裂等一系列耐久性问题,会严重影响建筑物的正常使用,甚至危害人民的财产安全。

随着我国土木建设工程的不断发展,越来越多的建筑物和构筑物已经进入或即将进入老龄化阶段,结构加固修补已成为我国乃至世界建筑业一个新的发展热点。据有关部门统计,自新中国成立以来,特别是改革开放以来,我国便迎来了一个建筑业的高峰期,各种房屋建筑、隧道、桥梁、道路以及城市基础设施像雨后春笋,大量涌现。我国目前现存各种建筑的总面积估计在 100 亿 m^2 以上,砌体结构混凝土结构占绝大多数,而且其中有 50% 以上的建筑已经投入使用超过 20 年。因此,结构的老化病害问题已经是摆在我国建筑业面前一个不容忽视的问题,这些建筑由于各种原因很多存在安全隐患,需要对其进行安全排查,问题严重则需加固修补。

高性能复合砂浆钢筋网加固方法作为一种新型加固方法由湖南大学尚守平、黄政宇、卜良桃等教授所研究开发,目前已广泛地应用于工程中,并取得了满意的效果^[3-6]。高性能复合砂浆钢筋网加固法是在结构构件表面绑扎钢筋网,用抗剪锚钉作为锚固,以增加阻力,再用纤维水泥砂浆覆盖在构件表面,使其共同工作,从而提高结构承载力的一种加固方法。纤维水泥砂浆还起到一定的保护作用,能够减缓里层混凝土或砌体的碳化。在实际中应用比较广泛的加固用纤维水泥材料主要包括:聚丙烯纤维水泥砂浆、聚乙烯醇纤维水泥砂浆、钢纤维水泥砂浆等^[7-9]。

随着加固工程越来越多,国家对于工程质量的管控力度也越来越大,对加固效果进行准确评估已成为加固领域中的一个重要课题,寻找一种准确度较高、操作简便易行的检测方法,并在此基础上建立起相应的技术操作规程和标准成为了一项刻不容缓的工作。但目前国内尚没有可靠的检测方法及标准来检验实际加固工程中砂浆薄层的强度。

鉴于混凝土与水泥砂浆这两种材料具有很大的相似性,笔者考虑参考混凝土抗压强度现场检测的方法,如回弹法、超声法、钻芯法、超声回弹综合法、拔出法等^[10],从中选择一种适合于砂浆薄层强度检测的方法进行试验研究。

上述各种检测方法各有各的优点,但都存在着不足。回弹法操作简单,不容易引起结构损伤,速度较快,费用也低,但回弹法仅仅是一种经验数据总结,与材料本身强度无

关，实际操作中由于各方面影响如：回弹仪与测试面不垂直、测试面表面不平整等，易引起误差，精度较低，而且一般情况下，回弹法仅仅考虑了混凝土表面碳化对回弹值的影响，而其他方面对回弹值的影响并未纳入考虑，如混凝土早期龄期碳化的影响等，所有这些导致使用回弹法检测混凝土强度精度偏低，效果不理想。所以在一些西方国家的检测规范中已经规定：回弹法只能作为一种辅助手段来进行强度推定，且目前也没有专门用于检测纤维水泥砂浆强度的回弹仪。相比较而言，钻芯法作为一种精度最高、最为可靠的混凝土强度检测方法，却也由于其自身的一些缺点而不适合用于纤维水泥砂浆的强度检测，因为钻芯法要求钻入混凝土结构超过 10cm，对结构构件会造成较大的损坏，因此钻芯法在布置测点时就要受到很多限制，不能将测点过多地布置在结构的受力区和一些薄弱环节，同时试验时间长、成本较高，同样不适用于加固用纤维水泥砂浆强度的检测。正是由于纤维水泥砂浆材料成分的组成与加固用纤维水泥砂浆加固薄层状况的特殊性，上述两种混凝土抗压强度的检测方法并不能直接应用于纤维水泥砂浆的现场检测中。综合考虑，采用拔出法检测纤维水泥砂浆抗压强度不仅较为符合加固用纤维水泥砂浆现场检测实际，且较回弹法更为精确，能够较准确地测定加固用纤维水泥砂浆的实际强度，操作简便，对构件的表面破坏性小。

1.2 纤维水泥砂浆加固概述

1.2.1 纤维水泥砂浆钢筋网加固原理

纤维水泥砂浆钢筋网加固法是指先对待加固的结构构件进行表面凿毛处理，然后在构件的表面植入抗剪销钉、绑扎钢筋网，最后分两次涂抹纤维水泥砂浆，总厚度 25～40mm，使原结构与加固层复合共同受力，大大提高原结构的承载力及韧性的一种加固方法^[11]。这与增大截面加固法的工作原理是一样的，即通过在结构构件表面配置钢筋，以此增强原结构的强度和刚度等其他力学性能。不一样的地方是：增大截面法顾名思义是增大构件的截面来增加结构的承载力，既然依靠增大截面来增加承载力则其截面增大的尺寸就应该很大，这就对房屋的外观和空间产生较大的影响，相反纤维水泥砂浆钢筋网加固法对结构构件截面增大很小，不会影响房屋的使用。

纤维水泥砂浆加固法除以上优点之外，还有很多其他优点：纤维水泥砂浆与抗剪销钉以及钢筋网能够与原结构很好地结合在一起，共同承受外力作用；且整个加固过程施工工艺简单，由于纤维水泥砂浆有很好的和易性，使得其可用于多种结构形式和结构构件中^[12]。

1.2.2 发展概述

目前使用广泛的混凝土类材料，主要包括混凝土和水泥砂浆。但由于这类材料的一些原始缺陷，使得其具有抗拉强度低、韧性小等弱点，影响了该类材料的使用范围。现代复合材料技术的实验研究表明，在混凝土中加入一定量的短纤维^[13-14]，能够很大程度地增强其抗拉强度和韧性。此类材料的工作机理为：由于纤维的限制作用，使得材料在承受荷载的过程中，在水泥基体和纤维之间产生应力重分布，因此水泥基体产生裂缝较少，且纤维对于裂缝的发展也起到一定的限制作用，从而大大提高了原基体的强度和韧性。

在 1000 多年以前，人类就开始在建筑工程中应用纤维。当时的人们主要是把一些纤

纤维素纤维经过简单的处理就用于砌筑工程中。例如把秸秆折断掺入黏土中做成黏土砖用来建造房屋等,把马、羊、牛等动物的鬃毛掺入石膏、石灰中使得物品的开裂现象大为减少。可见在无机胶凝材料中掺加纤维以增强材料的力学性能古已有之,不是现代人的独创,这也为纤维水泥砂浆钢筋网加固法提供了重要依据。

1879年,人们开始在水泥中掺入石棉纤维,石棉纤维的掺入使得水泥的性能得到很大的提高,因此很快这种石棉纤维水泥便推广开来;但由于石棉这种材料在被人吸入后会引起很多呼吸系统疾病,甚至会致癌,严重危害人类健康,所以目前很多国家已经在规范和法律中限制使用,虽然如此,但这也极大地促进了“纤维水泥”的开发与应用。

1910年,H. F. Porter发表了一份关于纤维增强类混凝土的报告。同时“钢纤维混凝土”的概念首次出现在人们的眼前。在之后的几年里,西方的一些国家的专家学者对于钢纤维混凝土进行了一系列深入的研究,推动了纤维混凝土的发展。

1963年,J. P. Romualdi和J. B. Batson两位学者发表了“关于纤维混凝土增强理论研究报告”,提出了纤维间距理论,从此,纤维在混凝土中的应用研究发展速度快了起来^[15]。

在20世纪80年代中期,Swamy提出了将钢筋网水泥用于建筑工程的修复维护工程^[16-17];

Hoff等人在道路、桥梁的加固工程的试验中,掺入钢纤维,明显增强了路面的承载力,以及抗裂性能^[18-20];

到2011年,Tuğçe Sevil等通过大量试验得出:在加固砌体时,可在水泥砂浆掺入钢纤维,且钢纤维体积分数为2%^[21]。

至于另外几种纤维,例如聚乙烯醇纤维和聚丙烯纤维在水泥中的应用则是从20世纪90年代开始的,而且由于其低廉的价格,目前其研究应用比较广泛。最早提出在水泥中掺加聚乙烯醇纤维的是美国密歇根大学教授Victor C. Li。他在读博的过程中对聚乙烯醇纤维水泥砂浆进行了基础理论研究^[22],他的研究主要从纤维的弹性模量出发:纤维在水泥之中受到应力作用会被拉伸,这种拉伸更有利于纤维强度的利用^[23];并从微观力学层面出发,得出不同长度及截面积的纤维对于其与水泥之间的粘结强度是不同的,他们之间存在一个最佳的比例关系^[24]。

随着现代建筑业的发展,我国对于建筑领域的研究也越来越重视,在材料领域对纤维水泥方面的研究也越来越多。

关于纤维水泥砂浆(主要是指聚乙烯醇纤维与聚丙烯纤维),林水东等人进行了一系列的研究,其研究重点主要在于如何利用纤维来限制水泥砂浆在凝结过程中因塑性收缩产生的裂缝。试验研究表明:在纤维长度一致的情况下,纤维对于水泥砂浆抗裂性能的提高主要跟以下因素有关:纤维的掺入量、纤维的截面尺寸、纤维的种类等,纤维长度越长则对于水泥砂浆抗裂性能提高越显著,若太短则对于裂缝的产生与发展无明显的限制作用;纤维掺量较小时,随着纤维掺量的增加,水泥砂浆的抗裂性会有很明显的提高,但掺量到达 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 后,则纤维掺量的影响就会大大减弱;同时聚丙烯纤维对于水泥砂浆抗裂性的增加效果要优于聚乙烯醇纤维^[25]。

北京工业大学教授邓宗才等也参与了关于纤维水泥砂浆等一系列研究,其研究重点主要是针对聚乙烯醇纤维,通过对不同聚乙烯醇纤维掺量的混凝土试块进行冲击试验,

指出掺入聚乙烯醇纤维的混凝土韧性以及抗冲击性能有了较为显著的提高,其主要是因为聚乙烯醇纤维的掺入使得水泥基底的粘结强度大大提高,从而使得混凝土的延性得以改善^[26]。

聂建国等人的研究主要是集中在纤维水泥砂浆钢筋网加固效果方面,通过对加固过的混凝土梁进行一系列试验,来研究纤维水泥砂浆钢筋网加固对于加固构件抗弯以及抗剪性能的影响。通过试验我们可以看出:纤维水泥砂浆钢筋网加固法能明显提高加固构件的强度和刚度,同时对于加固构件在使用过程中因各种外力作用产生的裂缝有较好限制作用,提高了加固构件的耐久性^[27]。

相比于其他纤维种类来说,将聚丙烯纤维掺入水泥砂浆用于加固工程领域是最早投入研究的,(湖南大学相关团队)制作混凝土梁、柱构件,利用聚丙烯纤维水泥砂浆对其进行加固处理,通过荷载施加装置对加固构件施加压力,以检验其加固效果^[28-31]。从加固构件在试验中的表现可以看出:其加固效果还是很显著的,能使加固构件的极限承载力得到较大幅度提高,并能很好地提高构件的韧性^[32-34]。

其他纤维种类用于钢筋网水泥加固技术目前尚处于研究阶段,工程实际应用较少。

1.2.3 技术特点

随着建筑加固领域的兴起,作为一种新型建筑结构加固补强方法——纤维水泥砂浆钢筋网加固法的应用也越来越广泛。纤维水泥砂浆加固法是指在构件表面绑扎钢筋网或者钢丝网,在其表面涂抹纤维水泥砂浆,通过钢筋网与原构件构成一个整体,使其共同工作整体受力,在加固砂浆薄层的保护下,构件的承载力和耐久性得到提高。在构件表面布置钢筋实质是一种体外配筋方法,这样使得原构件的配筋率得到提高,从而相应提高了结构构件的强度和刚度,这很类似于加大截面加固法,但与增大截面法不同的是纤维水泥砂浆钢筋网加固法加固时对于截面增大并不明显,只有25~40mm,因此对房屋的使用空间以及对结构的外观影响不是很大。与其他加固方法如粘贴碳纤维、粘贴钢板等相比,纤维水泥砂浆钢筋网加固法具有明显的优势^[35]:

- (1) 施工简便,施工效率较高,对于施工机具要求简单,现场也无需设置固定设施。
- (2) 耐腐蚀性能及耐久性能俱佳。试验和实践证明,加固薄层对于原构件表面能起到很好的保护作用,基本能抵抗一般情况下建筑物受到的各种外界作用。
- (3) 适用面广。纤维水泥砂浆钢筋网加固法修补混凝土结构可广泛适用于各种结构类型(如建筑物、构筑物、桥梁、隧道、涵洞等)、各种结构形状(如矩形、圆形、曲面结构等)、各种结构部位(如梁、板、柱、节点、拱、壳等)的加固修补。
- (4) 施工可靠度高,质量有保证。即使加固构件的结构表面有破损不是非常平整,也可以起到很好的固定作用,且对原构件表面起到一定的保护作用。
- (5) 对结构尺寸和外观影响较小。纤维水泥砂浆钢筋网加固薄层,一般只有25~40mm左右,不显著增加原结构尺寸,不影响原结构的外观和使用。
- (6) 价格低廉。纤维水泥砂浆钢筋网加固法所用材料主要是水泥和砂子,纤维掺量很少,其综合单价相比其他加固方法如粘贴碳纤维加固法,只有其1/10~1/5。
- (7) 具有较强的防火性能。作为一种无机胶凝材料,纤维水泥砂浆钢筋网,其本身属于不燃物,耐火极限以及耐高温性能均高于碳纤维加固法。

1.3 非破损检测技术的形成

1.3.1 结构检测概况

1. 国外概况

早在 20 世纪 30 年代初,人们就已经开始探索和研究混凝土非破损检测方法,并获得迅速的发展^[36-37]。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 年施密特 (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. Johns) 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,如苏联、罗马尼亚的弗格瓦洛提出用声速、回弹法综合评估混凝土强度的方法,为混凝土无损检测技术开通了多因素综合分析的新途径。20 世纪 80 年代声发射技术被引入混凝土无损检测体系,吕施 (H. Rusch)、格林 (A. Tgreen) 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,从而形成了一个比较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完善,许多国家开始了这类检测方法的标准工作,如美国、英国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检验方法》C823—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,国际标准组织也先后提出了回弹法、超声法、钻芯法、拔出法等相应的标准草案。这些工作对结构混凝土非破损检测的应用起了良好促进作用。

2. 国内概况

我国在无损检测领域的研究工作始于 20 世纪 50 年代,从瑞士、英国等国引进回弹仪和超声仪,并结合实际工程开展了许多研究工作。20 世纪 60 年代初开始自行批量生产回弹仪,并研制成功了多种规格的超声仪,在检测方法方面也取得了多项进展。20 世纪 70 年代中期相继完成了回弹法、超声法、回弹—超声综合法等课题的研究,并在工程检测中推广应用。20 世纪 80 年代初,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,包括钻芯法、拔出法、射钉法等局部破损方法和微波吸收、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,发展到事前的质量回馈控制。同时,与检测技术相适应的检测仪的研制与生产工作也发展很快,不少性能较好、自动化程度较高的仪器设备被广泛采用,快速处理数据的微机系统也逐渐被开发利用。

半个世纪以来,我国的结构检测技术经历了从无到有、从单项到全面、从局部构件到整体结构的发展过程。特别是最近 20 多年,结构的检测技术得到快速的发展,其应用对象已从开始阶段的单层破旧民居扩展到建设工程中的各类结构。关于混凝土强度的检测已有回弹法、超声法、钻芯法、拔出法等,以及由上述基本方法组合而成的超声回弹综合

法、钻芯回弹综合法等。在我国的《混凝土结构工程施工质量验收规范》中明确规定“凡对混凝土试件强度代表性有怀疑时，可采用非破损试验方法或从结构、构件中钻取芯样的方法，按有关标准规定，对结构构件中混凝土强度进行推定，作为是否应进行处理的依据。”较为成熟的混凝土强度和缺陷检测方法也已经有了全国性的检测技术规程，如：《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ/T 23^[38]、《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》CECS 02、《钻芯法检测混凝土强度技术规程》CECS 03、《后装拔出法检测混凝土强度技术规程》CECS 69、《超声法检测混凝土缺陷技术规程》CECS 21。

除上述这些规程外，冶金、水利和交通等部门也编制了本行业的标准，一些省市还编写了适应当地材料特点的地方规程。混凝土强度的检测技术已基本成熟，成熟的标志在于测试理论的完善和测试仪器性能的提高，如：“回弹值→碳化深度→强度”关系，反映了回弹值与混凝土强度之间的基本规律。在混凝土强度的检测方面，我国与经济发达国家已没有明显的差距。

综上所述，混凝土无损检测技术的发展虽然时快时慢，但由于工程建设的需要，它始终具有很大的发展空间，因而许多国家都将其标准化，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，无损检测技术具有广阔的发展前景。

1.3.2 无损检测常用方法的分类和特点

现场检测混凝土的方法有部分破损法和非破损法。前者包括钻芯法、拔出法和射钉法等，后者包括回弹法、超声法和超声回弹综合法等。混凝土无损检测技术是指在不破坏混凝土结构构件条件下，在混凝土结构构件原位上对混凝土结构构件的混凝土强度和缺陷进行直接定量检测的技术。混凝土强度非破损检测技术是应用电子学、物理学为基础的测试仪器，直接在材料试件或结构物上，无破损地测量材料的力学性能以及与结构质量有关的物理量，以此来确定或评价材料的非弹性性质、均匀性与密度、强度以及性能变化过程的一种新型的测试方法。无损检测技术还包括钻芯、拔出、射钉等局部破损的检测方法。实践表明，运用非破损检测技术评价工程混凝土质量，是衡量一个国家工程质量检验和技术管理水平高低的标志。在我国当前，非破损技术研究材料性能是迎头赶上世界先进水平所必需的。非破损检测技术在混凝土施工质量控制和事故处理以及老建筑物鉴定等方面具有常规混凝土标准试块破坏试验所无法比拟的优点，它已经成为混凝土测试技术体系的重要分支，且属于建筑工程测试技术领域的重要研究方向。

对于混凝土非破损检测方法的分类，在国际上主要有以下两种分法：一是按检测的目的可分为两大类：一类是混凝土强度检测方法，另一类是混凝土内部缺陷等强度以外的检测方法；二是按检测原理可分为：物理方法和化学方法。

1.3.3 应用比较广泛的无损检测方法

(1) 回弹法

回弹法是一种非破损检测方法，也是现场检测混凝土强度最常见的方法。利用回弹仪检测普通混凝土结构构件抗压强度的方法简称回弹法。回弹法是用回弹仪测定混凝土表面硬度来推定混凝土强度的，由于混凝土强度不同，其回弹硬度也随之变化。因为所用回弹仪是瑞士工程师施密特于 1948 年发明的，所以也叫施密特锤法。该试验方法非常简便，许多国家都制定了试验标准和推荐性测强曲线。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。20 世纪 60 年代初,我国开始自行生产回弹仪,并开始推广应用。1978 年,国家建委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单位的全国性的协作研究组。

我国现在是基于混凝土表面硬度与抗压强度的相关关系并考虑表面碳化因素影响而制定的回弹测强统一曲线。但是此方法受混凝土表层质量的影响,因而难以精确推定混凝土的内部强度。回弹值大小反映了与冲击能量有关的回弹能量,而回弹能量反映了混凝土表层硬度与混凝土抗压强度之间的函数关系,反过来说,混凝土强度是以回弹值 R 为变量的函数。

回弹法没有一个明晰的理论公式,由于测强曲线的制作条件与实际工程存在差距、碳化深度现场测量存在的偏差以及各地材料、施工水平参差不齐等原因,对于一项具体的工程,不同的检测单位同样采用回弹法检测的混凝土强度或同一个检测单位采用回弹法选择不同的测强曲线检测混凝土强度,得到的结果往往不尽相同。此外,因为声波在不同密度和不同弹性模量的混凝土内传播速度也不同,所以根据波速与混凝土强度的相关关系来推定混凝土的强度得到的结果与实际结合较差。由国内外二十几年的研究表明:超声波速度与混凝土强度的相关性不是很高,所以用这种方法测定强度时,将受到一定的限制。

(2) 超声脉冲法

混凝土超声检测是混凝土非破损检测技术中的一个重要方面。用声学的方法检测结构混凝土可以追溯到 20 世纪 30 年代,那时以锤击作为振源,测量声波在混凝土中的传播速度,粗略地判断混凝土质量。目前所采用的这种超声脉冲法始于 20 世纪 40 年代后期。20 世纪 40 年代末 50 年代初,加拿大、德国、英国和美国的学者相继进行了简单的模拟试验,当时由于受仪器灵敏度低、分辨率差的限制,加上混凝土超声检测的影响因素尚未弄清楚,因此难以普遍用于工程实测。自 20 世纪 70 年代末期以来,随着电子技术的发展,混凝土质量超声检测技术发展很快。检测仪器发展到智能化的多功能型;测量参数由单一的声速发展到声速、波幅和频率等多参数;缺陷检测范围由单一的大空洞或浅裂缝检测发展到多种性质的缺陷检测;缺陷的判定由大致定性发展到半定量或定量的程度。不少国家已将超声脉冲法检测混凝土缺陷的内容列于结构混凝土质量检测标准。目前,超声脉冲检测技术已成为检测工程结构质量的重要手段之一。

我国自 20 世纪 50 年代开始研究这一技术,经过半个多世纪的发展,已取得丰硕成果。1990 年颁布了《超声法检测混凝土缺陷技术规程》CECS 21—90,使这项检测技术实现规范化,更有利于推广应用。该规程实施以来,在消除工程隐患、确保工程质量、加快工程进度等方面取得了显著的社会经济效益。根据该规程的实施现状及我国建设工程质量控制和检验的实际需要,1999 年对该规程进行了修订和补充,并由中国工程建设标准化协会批准为《超声法检测混凝土缺陷技术规程》CECS 21—2000。修订后的规程吸收了国内外超声检测设备最新成果和检测技术最新经验,使其适应范围更宽,检测精度更高,可操作性更好,更有利于超声法检测技术的推广应用。

混凝土超声波检测技术的基本原理是用人工的方法在被测混凝土结构中激发出一定频率的弹性波,然后以各种不同的频率在材料或结构内部传播并通过仪器接收,再通过分析研究所接收的信号,就可以了解材料与结构的力学特性和缺陷分布情况。信号中包含了传播的时间(或速度),振幅和频率等。和其他的均匀介质不同,混凝土是一种弹—黏—塑

性体，各项之间有较强的声阻抗差异并存在许多声学界面，所以超声波在其中传播（即透射）时会有较强的反射、散射、吸收和波形畸变等一系列声学现象。对不同的物质形态，其声学现象具有不同的特点，由于超声脉冲波传播速度的快慢，与混凝土的密实度有直接关系，当有空洞或裂缝存在时便破坏了混凝土的整体性，超声脉冲波只能绕过空洞或裂缝传播到接收换能器，因此传播的路程增大，测得的声时必然偏大或声速降低；由于空气的声阻抗率远小于混凝土的声阻抗率，脉冲波在混凝土中传播时，遇到蜂窝、空洞或裂缝等缺陷，便在缺陷界面发生反射和散射，声能被衰减，其中频率较高的成分衰减得更快，因此接收信号的波幅明显降低，频率明显减小（后者频率谱中的高频成分明显减小）；再者经缺陷反射或绕射缺陷传播的脉冲信号与直达波信号之间存在声程和相位差，叠加后互相干扰，致使接收信号的波形发生畸变。所以说信号仿佛是混凝土内部特性信息的载体，将混凝土内部的材料性质、缺陷、结构等信息传递到物体表面。将接收信号中所携带的信息提取出来，进行反演分析，这就是超声波检测缺陷的全过程。用超声波检测混凝土缺陷时，声时、振幅和频率等超声参量就是我们所要提取的信息，因这些信息的变化与混凝土的密实度、均匀性和局部缺陷的状况有密切的关系，用上述的超声参量作为判断混凝土质量的依据。

从上述分析中可知，通过试验建立混凝土超声波声速与混凝土强度的相关关系，它是一种经验公式，与混凝土强度等级、混凝土成分、试验数量等因素有关，混凝土中超声声速与混凝土强度之间通常呈非线性关系，在一定强度范围内也可采用线性关系。但是，混凝土内超声声速传播速度受许多因素影响，如原材料的影响、配合比的影响、成型工艺的影响、养护方法的影响、龄期的影响、碳化的影响、含水率的影响、混凝土内钢筋配置的影响等，这些影响因素如不经修正都会影响检测误差大小问题，建立超声检测混凝土强度曲线时应加以综合考虑影响因素的修正。超声法的实验结果能较好地反映整个结构的质量，测试工作有较好的灵活性，在同一部位可进行多次重复测试。但是，超声法要求有两个相对的可测面，测试数据受耦合条件和钢筋影响较明显，要求有较高专业素养的技术人员进行检测工作。

（3）超声回弹综合法

该法是同时利用超声法和回弹法对混凝土同一测区进行检测的方法。超声回弹综合法通过混凝土抗压强度与混凝土超声波传播速度和表面回弹之间存在的统计相关关系，来检验建筑结构和构筑物中的普通混凝土抗压强度。超声回弹综合法是综合法中经实践检验的一种成熟可行的方法。它兼有超声法和回弹法的优点，同时还具有测试精度高的优点。例如龄期增长，混凝土表面碳化，使回弹值增大，而混凝土内部出现的许多微裂缝又使声速值减小；相反，超声法的声速值是取决于整个断面的动弹性，主要以其密实性来反映混凝土强度，这种方法可以较敏感地反映出混凝土的密实性、混凝土内骨料组成以及骨料种类。此外，超声法检测强度较高的混凝土时，声速随强度变化而不敏感，由此粗略剖析可见，超声回弹综合法可以利用超声声速与回弹值两个参数检测混凝土强度，弥补了单一方法在较高强度区或在较低强度区各自的不足。但是超声回弹也有一定的局限性，一是要求结构有两个相对的可测面，测试数据受耦合条件和钢筋影响较明显，要求有较高专业素养的技术人员进行测试工作；二是需要考虑配合比或碳化深度的影响。

(4) 电磁感应法

电磁感应法是人工向混凝土构件发射脉冲电磁波并对其内部的金属物（如钢筋）产生电磁感应作用，从而使该金属物产生感应电流，于是在其周围形成二次电磁场，通过专业仪器观测感应电磁场的变化或异常即可确定混凝土内部钢筋的位置和埋深（即保护层厚度）。现场施测首先选定待测混凝土构件，并在该构件上确定测试面，然后使探针轴线平行于设计钢筋走向并从混凝土测试面的边部或任意一点在垂直探针轴线的方向上移动探针来测定钢筋位置和保护层厚度。如果混凝土内分布有主筋和箍筋时应分别测定，首先圈定主筋（或箍筋）的位置和展布情况，然后在两个相邻箍筋（或主筋）的中间部位顺其走向进行测试，即可精确测定主筋（或箍筋）的位置和保护层厚度。

1.3.4 应用比较广泛的半破损检测方法

半破损法是以不影响结构或构件的承载力为前提，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，然后根据实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或特征强度。属于这种方法的有钻芯法、拔出法、射钉法等。

(1) 钻芯法

钻芯法是利用专用钻芯机从被检测的结构或构件上直接钻取圆柱形的混凝土芯样，通过芯样抗压强度直接推定结构构件的强度或缺陷，是较为直观可靠的检测混凝土强度或观察混凝土内部质量的局部半破损现场检测方法。在已建混凝土结构上钻取芯样进行抗压强度试验是目前直观检验构件内部状况和强度评定的最好方法。芯样试件在进行抗压强度试验后，常被用作化学分析和物理性能分析的样品，如水泥成分，还可以用作混凝土密度、吸水性样品，以及用劈裂法间接试验测定混凝土抗拉强度及变形特征等。钻芯法为许多国家所采用，俄罗斯、美国、英国、日本、法国等都制定了各自的标准，国际标准化组织也提出了相应国际标准草案（ISO/D IS7034）。我国从 20 世纪 80 年代开始，对钻芯法钻取芯样检测混凝土强度开展了广泛研究，目前我国已广泛应用并能配套生产供应钻芯机、人造金刚石薄壁钻头、切割机及其他配套机具，钻机和钻头规格可达十几种。1988 年颁布了《钻芯样法测定结构混凝土抗压强度技术规程》YBJ 209—86，中国工程建设标准化协会发布了《钻芯法检测混凝土强度技术规程》CECS 03—88。钻芯法除用以检测混凝土强度外，还可通过钻取芯样方法检测结构混凝土受冻、火灾损伤深度、裂缝深度以及混凝土接缝、分层、离析、孔洞等缺陷。

钻芯法在原位上检测混凝土强度与缺陷是其他无损检测方法不可取代的一种有效方法。但是钻芯法虽然是一种可靠的也是被广泛接受认可的检测强度的方法，但是同样有自身的局限性，比如关于芯样直径的选择：英国、美国以及中国的标准规定是 $D=100\text{mm}$ 或 $D=150\text{mm}$ ，澳大利亚规定是 $D=75\text{mm}$ 。2006 年修订的《钻芯法检测混凝土强度技术规程》中也提出了混凝土抗压试验的芯样试件可以采用小直径芯样，但其直径应为 $70\sim 75\text{mm}$ ，且不得小于骨料最大粒径的 2 倍的观点。 100mm 直径芯样，适用于最大粒径不超过 25mm ； 75mm 直径芯样，适用于骨料粒径小于 20mm 的混凝土构件。芯样直径的选择，还受到芯样试件长度的变化影响。芯样高度为直径的 $0.95\sim 2$ 倍，一般宜采用 1 倍。因此，国内外都主张把钻芯法与其他无损检测方法结合使用，一方面利用无损检测方法检测混凝土均匀性，以减少钻芯数量，另一方面又利用钻芯法来校正其他方法的

检测结果，以提高检测的可靠性。

(2) 拔出法

拔出法是一种新型的微破损检测技术，它将预埋在或者后装在混凝土中的特殊锚固件拔出，测出极限拔出力，利用已建立的极限拔出力和混凝土强度间的相关关系，推定被测混凝土结构构件的混凝土强度的方法。拔出法一般分为两种：一种是预埋拔出法；另一种是后装拔出法。这种方法在国际上已有五十余年历史，预埋拔出法是指预先将锚固件埋入混凝土中的拔出法，它适用于成批的、连续生产的混凝土结构构件，按施工程序要求，按预定检测目的预先预埋好锚固件。后装拔出法指混凝土硬化后，在现场混凝土结构上后装锚固件进行拉拔试验的方法。前者在国外应用较多，国内则以后装拔出法为主，特别适用于已建混凝土结构的检测试验。

两种拔出方法均存在不足之处：预埋拔出法需在浇筑混凝土前将预埋件埋设在预定位置，因此无法随时随地对结构混凝土进行现场检测；后装拔出法虽可在混凝土具有一定强度时随时随地进行检测，但用切槽机在已钻的孔内壁切槽时，若遇较硬粗骨料，切除的环形沟槽完整性差、尺寸偏差较大且槽内混凝土损伤较为严重。因而测试结果离散性较大，操作难度大。

(3) 射钉法

射钉法检测混凝土强度是通过精确控制的动力将一支特制的钢钉射入预检测的混凝土中，根据贯入阻力大小来推定混凝土的强度。由于被测试的混凝土在射钉的冲击作用下产生综合压缩、拉伸、剪切和摩擦等复杂应力状态，要在理论上建立贯入阻力与混凝土强度的相关关系是很困难的。但基本原理可以理解：为发射枪对准混凝土表面发射子弹，弹内火药燃烧释放出来的能量推动钢钉高速进入混凝土中，一部分能量消耗于钢钉与混凝土之间的摩擦，另一部分能量由于混凝土受挤压，破碎而被消耗，子弹爆发的初始动能被全部吸收，因而阻止了钢钉的回弹作用。如果发射枪引发的子弹初始动能是固定的，钢钉的尺寸形状不变，则钢钉贯入混凝土中的深度取决于混凝土的力学性质。因此测量钢钉外露部分的长度即可确定混凝土的贯入阻力。通过试验，建立贯入阻力与混凝土强度的经验关系式，现场检测时则根据已建立的相关关系式推定混凝土的实际强度。该方法主要受子弹药量、钢钉尺寸以及发射枪与骨料直径的影响。钢钉尺寸均匀性良好，对混凝土贯入阻力不致产生显著性影响，试件龄期和发射枪对射钉外露长度有显著性影响，而骨料最大粒径的影响不明显。

其他无损检测技术还包括冲击回波法、雷达法、红外成像等多种无损检测方法，随着科学研究的不断深入以及技术的不断进步，越来越多的检测技术会逐步从试验室阶段走向实际工程当中。

1.4 拔出法概述

先装拔出法即预埋拔出法，是一种混凝土强度检测方法，是在浇筑混凝土结构之前把螺栓等预埋件预先埋设在模板上，或在混凝土终凝之前将螺栓等预埋件埋设在混凝土表面，待混凝土结硬后，通过拔出仪拔出锚固件，根据测得的拔出力的大小来推定被拔试件混凝土强度的一种方法。该试验方法费用低廉，操作简单方便，适用范围很广，除了一些强度等级特别低的混凝土外都可适用，是混凝土质量现场控制的一种非常有效的手段。