

郭晓潞 施惠生 编著

# 建筑物

## 无损检测技术

JIANZHUWU  
WUSUN JIANCE JISHU



化学工业出版社

郭晓潞 施惠生 编著

# 建筑物 无损检测技术

JIANZHUWU  
WUSUN JIANCE JISHU



化学工业出版社

· 北京 ·

元 20.00 价 定

无损检测技术不仅具有非破损、原位检测的特性,且简便易行、快速高效,是工程检测的实用技术,也是提高建筑物质量的保证和构建节约型社会的重要环节。

本书围绕混凝土建筑物中的结构材料和功能材料,针对其原位检测和现场检测,系统介绍了无损检测技术的发展与应用、混凝土强度无损检测技术、混凝土缺陷无损检测技术、混凝土弹性和非弹性性质的动态测量、钢管混凝土与混凝土灌注桩的质量检测、火灾混凝土建筑物损伤检测技术、建筑外墙饰面质量检测技术、以及建筑物节能体系检测技术等。

本书可供建筑工程设计、施工、监理、检测、管理等各类技术人员参考使用,也可作为高等院校相关专业的教学参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

建筑物无损检测技术/郭晓潞,施惠生编著. —北京:  
化学工业出版社,2014.4  
ISBN 978-7-122-19905-8

I. ①建… II. ①郭…②施… III. ①建筑物-无损检  
验-中国 IV. ①TU

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 036594 号

---

责任编辑:吕佳丽

装帧设计:史利平

责任校对:宋 玮

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张17¼ 字数406千字 2014年6月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:59.00 元

版权所有 违者必究





无损检测技术应用的广泛程度可以反映出一个国家的科学技术水平。无损检测技术不仅具有非破损、原位检测等特性,且简便易行、快速高效,是在建筑物原位上获得其真实质量的唯一途径,也是土木工程检测的实用技术和提高建筑物质量的保证。无损检测技术在土木工程中的应用一直受到国家和科技工作者的高度重视。

近年来,随着我国工程建设质量管理的加强,无损检测技术的作用日益明显,从而也促进了该项技术的迅猛发展。不仅已有的检测方法更趋成熟和普及,而且新技术日新月异、新方法不断涌现,无损检测技术标准、规范相继更新和颁布。为适应时代的发展需求,与时俱进,本书在广泛吸收国内外建筑物无损检测技术最新成就的基础上,重视传统检测技术,吸纳新兴的先进检测技术及国内外最新标准,具有较强的针对性、实用性、新颖性和规范性。

同济大学以土木工程专业见长并闻名于世,我们编写此书以期为我国的土木工程建设发展和建筑物质量检测评估尽绵薄之力。本书围绕建筑物中的结构材料和功能材料,针对其原位检测和现场检测,系统介绍了无损检测技术的发展与应用、混凝土强度无损检测技术、混凝土缺陷无损检测技术、混凝土弹性和非弹性性质的动态测量、钢管混凝土与混凝土灌注桩的质量检测、火灾混凝土建筑物损伤检测技术、建筑外墙饰面质量检测技术以及建筑物节能体系检测技术等内容。

本书可供建筑工程设计、施工、监理、检测、管理等各类技术人员参考使用,也可作为高等院校相关专业的教学参考用书。

本书由同济大学郭晓潞副教授、施惠生教授编著,特别感谢同济大学童寿兴副教授、张雄教授对本书编写工作的指导与帮助,此外在编写过程中还得到了徐名凤、胡文佩、刘顺帆、吴凯、沙丹丹、张振武等的支持与帮助,在此一并表示衷心的感谢。

鉴于编者水平的局限性,本书不当之处在所难免,诚请广大读者批评指正。

编者

2014年4月于同济新园



## ◎ 第 1 章 概述

1

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 1.1 混凝土建筑的无损检测技术 .....       | 1  |
| 1.1.1 回弹法 .....              | 3  |
| 1.1.2 超声法 .....              | 3  |
| 1.1.3 超声回弹综合法 .....          | 4  |
| 1.1.4 钻芯法 .....              | 5  |
| 1.1.5 拔出法 .....              | 5  |
| 1.1.6 冲击回波法 .....            | 6  |
| 1.1.7 雷达法 .....              | 6  |
| 1.1.8 红外成像法 .....            | 7  |
| 1.1.9 磁测法 .....              | 7  |
| 1.2 混凝土建筑无损检测技术的发展 .....     | 7  |
| 1.2.1 混凝土建筑无损检测方法的发展 .....   | 8  |
| 1.2.2 混凝土无损检测仪器的更新 .....     | 10 |
| 1.2.3 混凝土无损检测技术标准的变革 .....   | 11 |
| 1.2.4 混凝土无损检测学术交流的强化 .....   | 13 |
| 1.3 混凝土无损检测技术应用途径与发展趋势 ..... | 13 |
| 1.3.1 混凝土无损检测技术应用途径 .....    | 13 |
| 1.3.2 混凝土无损检测技术发展趋势 .....    | 16 |

## ◎ 第 2 章 混凝土强度无损检测技术

19

|                      |    |
|----------------------|----|
| 2.1 回弹法检测混凝土强度 ..... | 19 |
| 2.1.1 概述 .....       | 19 |
| 2.1.2 混凝土回弹仪 .....   | 20 |
| 2.1.3 回弹法检测技术 .....  | 27 |

|            |                       |           |
|------------|-----------------------|-----------|
| 2.1.4      | 回弹法测强曲线               | 30        |
| 2.1.5      | 混凝土强度换算及推定            | 33        |
| 2.1.6      | 回弹法检测混凝土强度的影响因素       | 35        |
| <b>2.2</b> | <b>超声脉冲法检测混凝土强度</b>   | <b>43</b> |
| 2.2.1      | 概述                    | 43        |
| 2.2.2      | 混凝土超声检测仪              | 44        |
| 2.2.3      | 超声测试及声速计算             | 60        |
| 2.2.4      | 超声法测强曲线               | 67        |
| 2.2.5      | 声速换算法                 | 69        |
| 2.2.6      | 混凝土强度的推定              | 73        |
| 2.2.7      | 超声脉冲法检测混凝土强度的影响因素     | 74        |
| 2.2.8      | 各影响因素的显著性分析           | 82        |
| <b>2.3</b> | <b>超声回弹综合法检测混凝土强度</b> | <b>86</b> |
| 2.3.1      | 综合法原理及参数选择            | 86        |
| 2.3.2      | 超声回弹综合法的基本依据          | 87        |
| 2.3.3      | 超声回弹综合法检测技术           | 87        |
| 2.3.4      | 超声回弹综合法测强曲线           | 88        |
| 2.3.5      | 混凝土强度的换算及推定           | 90        |
| 2.3.6      | 超声回弹综合法检测混凝土强度的影响因素   | 91        |
| 2.3.7      | 回弹法、超声法、超声回弹综合法的比较    | 93        |
| <b>2.4</b> | <b>拔出法检测混凝土强度</b>     | <b>94</b> |
| 2.4.1      | 概述                    | 94        |
| 2.4.2      | 拔出法检测装置               | 96        |
| 2.4.3      | 预埋拔出法                 | 97        |
| 2.4.4      | 后装拔出法                 | 98        |
| 2.4.5      | 拔出法测强曲线               | 100       |
| 2.4.6      | 混凝土强度换算及推定            | 101       |

## ◎ 第3章 混凝土缺陷无损检测技术

103

|            |                          |            |
|------------|--------------------------|------------|
| <b>3.1</b> | <b>超声法检测混凝土缺陷</b>        | <b>103</b> |
| 3.1.1      | 概述                       | 103        |
| 3.1.2      | 混凝土裂缝深度检测                | 106        |
| 3.1.3      | 不密实区和空洞检测                | 114        |
| 3.1.4      | 混凝土结合面质量检测               | 122        |
| 3.1.5      | 超声法其他应用                  | 124        |
| <b>3.2</b> | <b>冲击回波法检测混凝土内部缺陷及厚度</b> | <b>124</b> |
| 3.2.1      | 概述                       | 124        |
| 3.2.2      | 测试原理                     | 125        |



|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 3.2.3 试验装置及试验流程 ..... | 126 |
| 3.2.4 波形采集及采样参数 ..... | 129 |
| 3.2.5 冲击回波法的应用 .....  | 130 |

## ◎ 第4章 混凝土弹性和非弹性性质的动态测量

132

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| 4.1 概述 .....                                      | 132 |
| 4.2 共振法 .....                                     | 134 |
| 4.2.1 共振法的原理 .....                                | 134 |
| 4.2.2 杆状试件固有频率 $\omega_0$ 与动力弹性模量 $E_d$ 的关系 ..... | 135 |
| 4.2.3 共振频率的测量装置 .....                             | 140 |
| 4.2.4 试件的支承 .....                                 | 144 |
| 4.2.5 激振换能器与接收换能器的安装 .....                        | 146 |
| 4.2.6 共振法的应用 .....                                | 146 |
| 4.3 敲击法 .....                                     | 152 |
| 4.3.1 脉冲力激振的试件振动 .....                            | 152 |
| 4.3.2 敲击法动弹模量测定仪 .....                            | 154 |
| 4.3.3 阻尼对测量结果的影响及敲击法的适应范围 .....                   | 156 |
| 4.3.4 敲击法与共振法测量精度的比较 .....                        | 157 |
| 4.3.5 敲击法的试验条件和计算方法 .....                         | 158 |
| 4.3.6 敲击法的应用 .....                                | 158 |
| 4.4 振动衰减 .....                                    | 160 |
| 4.5 阻尼系数的测量方法 .....                               | 161 |
| 4.5.1 频率响应曲线品质因数法 .....                           | 161 |
| 4.5.2 激励和响应相位差法 .....                             | 161 |
| 4.5.3 共振峰值法 .....                                 | 162 |
| 4.5.4 阻尼自由振动的对数衰减率法 .....                         | 163 |
| 4.5.5 共振与敲击综合法 .....                              | 165 |
| 4.6 混凝土脆性性质的动态测量 .....                            | 166 |
| 4.6.1 混凝土振动滞后回线与应力-应变曲线的类比 .....                  | 166 |
| 4.6.2 $B_d$ 值与振动衰减参数之间的关系及其测量 .....               | 167 |
| 4.6.3 $B_d$ 与混凝土抗压强度 $f$ 的关系 .....                | 168 |

## ◎ 第5章 钢管混凝土与混凝土灌注桩的质量检测

170

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 5.1 钢管混凝土的质量检测 ..... | 170 |
| 5.1.1 概述 .....       | 170 |
| 5.1.2 缺陷判断 .....     | 171 |
| 5.1.3 使用方法 .....     | 173 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| <b>5.2 混凝土灌注桩的质量检测</b> | 179 |
| 5.2.1 概述               | 179 |
| 5.2.2 混凝土灌注桩超声检测的原理和方法 | 182 |
| 5.2.3 检测数据的处理与数值判断     | 189 |
| 5.2.4 数值判据的判断实例        | 198 |
| 5.2.5 其他判断方法           | 201 |
| 5.2.6 桩身混凝土强度的推定       | 205 |

## ◎ 第6章 火灾混凝土建筑物损伤检测技术

207

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>6.1 火灾结构混凝土损伤检测技术</b>    | 207 |
| 6.1.1 火灾对钢筋混凝土的危害与损伤特征      | 207 |
| 6.1.2 火灾混凝土损伤机理研究进展         | 210 |
| 6.1.3 火灾混凝土损伤检测技术研究进展       | 211 |
| 6.1.4 火灾混凝土损伤程度评估体系         | 216 |
| <b>6.2 红外热像-电化学综合分析技术</b>   | 217 |
| 6.2.1 红外热像检测技术原理及分析模型       | 217 |
| 6.2.2 电化学检测原理及分析判据          | 219 |
| 6.2.3 钢筋机械性能及其与混凝土黏结强度的损伤推定 | 220 |
| 6.2.4 综合评估模型                | 220 |
| 6.2.5 检测评估程序                | 221 |
| <b>6.3 混凝土损伤层超声法检测技术</b>    | 222 |
| 6.3.1 基本概念及原理               | 222 |
| 6.3.2 测试方法                  | 223 |
| 6.3.3 数据处理及判断方法             | 224 |

## ◎ 第7章 建筑外墙饰面质量检测技术

225

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| <b>7.1 拉拔法检测技术</b>       | 225 |
| 7.1.1 外墙饰面砖黏结强度的检测       | 225 |
| 7.1.2 建筑外墙基层与保温材料黏结强度的检测 | 226 |
| 7.1.3 黏结强度拉拔试验检测过程       | 226 |
| <b>7.2 红外热像检测技术</b>      | 229 |
| 7.2.1 概述                 | 229 |
| 7.2.2 基本原理               | 230 |
| 7.2.3 常用仪器               | 230 |
| 7.2.4 外墙饰面检测             | 230 |
| 7.2.5 检测实例               | 231 |



第 8 章 建筑物节能体系检测技术 233

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 8.1 建筑外墙保温隔热体系质量检测技术 .....     | 234 |
| 8.1.1 外墙保温体系及其缺陷 .....         | 234 |
| 8.1.2 缺陷对外墙保温体系的影响 .....       | 235 |
| 8.1.3 现场检测技术 .....             | 236 |
| 8.2 建筑节能红外热成像检测技术 .....        | 238 |
| 8.2.1 红外热成像基本原理 .....          | 238 |
| 8.2.2 红外热成像技术在建筑节能检测中的应用 ..... | 238 |

附录 242

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 附录 A 非水平状态检测时的回弹修正值 .....     | 242 |
| 附录 B 不同浇筑面的回弹值修正值 .....       | 243 |
| 附录 C 非泵送混凝土测区混凝土强度换算表 .....   | 244 |
| 附录 D 测区泵送混凝土强度换算表 .....       | 249 |
| 附录 E 超声回弹综合法测区混凝土抗压强度换算 ..... | 253 |

参考文献 265

# 第 1 章

## 概述

### 1.1 混凝土建筑的无损检测技术

混凝土无损检测技术是指在不破坏混凝土结构构件的条件下,在混凝土结构构件原位上对其强度和缺陷进行直接定量检测的技术。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定的混凝土立方体抗压强度标准值是指按照标准方法制作、养护的边长为 150mm 的立方体试件,在 28d 或设计规定龄期以标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度值。虽然这种严格理想的约束条件在实际工程中并不存在,但又必须予以考虑,因为这是衡量混凝土结构设计可靠度的基本要求。为建立以上 5 个条件与实际结构构件混凝土强度之间的转换关系,《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB 50204—2002, 2011 年版)规定,混凝土结构构件同条件的试块的抗压强度应满足日平均温度逐日累计达到  $600^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  时对应龄期的强度,且不小于设计规范规定的混凝土抗压强度标准值乘以系数 1.1。混凝土同条件养护试块抗压强度的验收条件是制定无损检测混凝土强度曲线,以及混凝土结构与施工规范比较时应加以考虑的重要条件,也是混凝土无损检测技术重要的出发点与依据。

依据混凝土建筑无损检测技术的检测目的,通常可将无损检测方法分为七大类:

- (1) 检测结构构件混凝土强度值;
- (2) 检测结构构件混凝土内部缺陷,如混凝土裂缝、不密实区和孔洞、混凝土结合面质量、混凝土损伤层等;
- (3) 检测几何尺寸,如钢筋位置、钢筋保护层厚度、板面和道面及墙面厚度等;
- (4) 结构工程混凝土强度质量的匀质性检测和控制;
- (5) 建筑热工、隔声、防水等物理特性的检测;
- (6) 建筑外墙饰面的检测;
- (7) 建筑物节能体系的检测等。

应当指出,从当前的无损检测技术水平与实际应用情况出发,为达到同一检测目的,



无损检测工作者可以选用多种具有不同检测原理的检测方法,并可依据条件与趋利避害原则加以选用。例如,结构构件混凝土强度的无损检测,可以利用回弹法、超声回弹综合法、超声脉冲法、拔出法、钻芯法、射钉法等。按照混凝土建筑无损检测技术的检测目的、检测原理及方法综合分类,见表 1-1。

表 1-1 混凝土建筑无损检测技术综合分类

| 按检测目的分类                            | 按检测原理及方法的名称分类 | 测试指标与参数            |
|------------------------------------|---------------|--------------------|
| 混凝土强度的检测                           | 压痕法           | 压力及压痕直径或深度         |
|                                    | 射钉法           | 探针射入深度             |
|                                    | 回弹法           | 回弹值                |
|                                    | 钻芯法           | 芯样抗压强度             |
|                                    | 拔出法           | 拔出力                |
|                                    | 超声脉冲法         | 超声脉冲传播速度           |
|                                    | 超声回弹综合法       | 声速值和回弹值            |
|                                    | 声速衰减综合法       | 声速值和衰减系数           |
|                                    | 射线法           | 射线吸收和散射强度          |
|                                    | 成熟度法          | 度、时积               |
| 混凝土内部缺陷的检测                         | 超声脉冲法         | 声时、波高、波形、频谱、反射回波   |
|                                    | 声发射法          | 声发射信号、事件记数、幅值分布能谱等 |
|                                    | 脉冲回波法         | 应力波的时域、频域图         |
|                                    | 射线法           | 穿透缺陷区后射线强度的变化      |
|                                    | 雷达波反射法        | 雷达反射波              |
|                                    | 红外热谱法         | 热辐射                |
| 混凝土几何尺寸的检测(如混凝土的厚度、钢筋位置、钢筋保护层厚度检测) | 冲击波反射法        | 应力波时域              |
|                                    | 电测法           | 混凝土的电阻率及钢筋的半电池电位   |
|                                    | 磁测法           | 磁场强度               |
|                                    | 雷达波反射法        | 雷达反射波              |
| 混凝土质量均匀性检测与控制                      | 回弹法           | 回弹值                |
|                                    | 敲击法           | 固有频率、对数衰减率         |
|                                    | 声发射法          | 声发射信号、幅值分布能谱等      |
|                                    | 超声脉冲法         | 超声脉冲传播速度           |
| 建筑热工、隔声等物理特性检测                     | 红外热谱法         | 热辐射                |
|                                    | 电测法           | 混凝土的电阻率            |



续表

| 按检测目的分类        | 按检测原理及方法的名称分类 | 测试指标与参数                         |
|----------------|---------------|---------------------------------|
| 建筑热工、隔声等物理特性检测 | 磁测法           | 磁场强度                            |
|                | 射线法           | 射线穿过被测体的强度变化                    |
|                | 透气法           | 气流变化                            |
|                | 中子散射法         | 中子散射强度                          |
|                | 中子活化法         | $\beta$ 射线与 $\gamma$ 射线的强度、半衰期等 |
| 建筑外墙饰面的检测      | 拉拔法           | 饰面砖黏结强度                         |
|                | 红外热像法         | 饰面层黏结缺陷                         |
| 建筑物节能体系的检测     | 红外热像法         | 建筑围护结构热工缺陷                      |
|                |               | 热(冷)桥检测                         |

现将表 1-1 所列重要的无损检测方法的主要特点分别概述如下。

### 1.1.1 回弹法

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。回弹仪是一种直锤击式仪器。回弹值的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。回弹值使用的仪器为回弹仪,回弹仪的质量及其稳定性是保证回弹法检测精度的重要技术关键。这个技术关键的核心是科学地规定并保证回弹仪工作时所应具有的标准状态。国内回弹仪的构造及零部件和装配质量必须符合国家计量检定规程《回弹仪》(JJG 817—2011)的要求。回弹仪按回弹冲击能量大小分为重型、中型和轻型及特轻型回弹仪。影响回弹法检测混凝土强度的因素较多,通过实践与专门试验研究发现,回弹仪的质量是否符合标准状态要求是保证稳定的检测结果的前提。在此前提下,混凝土抗压强度与回弹法、混凝土表面碳化深度有关,即不可忽视混凝土碳化深度对混凝土抗压强度的影响。此外,对长龄期混凝土,即对旧建筑的混凝土还应考虑龄期的影响。

为规范回弹法检测混凝土抗压强度,保证必要的检测质量,我国住房和城乡建设部先后颁布、实施了《回弹法评定混凝土抗压强度技术规程》(JGJ 23—85)、《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23—92、JGJ/T 23—2001 和 JGJ/T 23—2011)。

### 1.1.2 超声法

超声法检测混凝土缺陷是指利用带波形显示功能的超声波检测仪和常用频率为 30~100kHz 的声波换能器,测量与分析超声脉冲波在混凝土中的传播速度(声速)、首波幅度(波幅)、接受信号主频率(主频)等声参数,并根据这些参数及其相对变化,以判定混凝土中的缺陷情况。

混凝土结构因施工过程中管理不善或者因自然灾害影响,致使在混凝土结构内部产生不同种类的缺陷。按其对接结构构件受力性能、耐久性能、安装使用性能的影响程度,混凝土内部缺陷可区分为有决定性影响的严重缺陷和无决定性影响的一般缺陷。鉴于混凝土材



料是一种非匀质的弹黏性各向异性材料,混凝土中不能存在严重缺陷,如有严重缺陷应及时处理。

超声法检测混凝土缺陷的目的不是在于发现有无缺陷,而是要求通过检测判别出各种缺陷种类和缺陷程度,这就要求对缺陷进行量化分析。混凝土的严重缺陷包括混凝土内部有明显的不密实区或空洞、存在大于 0.05mm 宽度的裂缝,表面或内部有损伤层或明显的蜂窝麻面区等。混凝土严重缺陷是混凝土建筑易发生的质量通病,常常引起甲乙双方争执,因此,超声法检测混凝土缺陷受到了广大检测人员的关注。20 世纪 50 年代,加拿大的 Leslied、Cheesman 和英国的 Jones、Gatfield 率先把超声脉冲检测技术用于混凝土检测,开创了混凝土超声检测这一领域。由于技术的不断发展与进步,超声仪已由笨重的电子管单示波显示型超声仪发展到日前半导体集成化、数字化、智能化的轻巧仪器,而且测量参数也已从单一的声速发展到声速、波幅和频率等多测量参数,从定性检测发展到半定量或定量检测的水平。

我国于 1990 年发布了《超声法检测混凝土缺陷技术规程》(CECS 21: 90),2000 年发布了《超声法检测混凝土缺陷技术规程》(CECS 21: 2000)。这是当前超声法检测混凝土缺陷的技术依据。

通过超声法检测混凝土的实践发现,超声法在混凝土中传播的声速与混凝土抗压强度值有密切的相关关系,混凝土弹性性质在相当程度上可以反映强度大小。通过试验,建立混凝土超声声速与混凝土强度的相关关系,以推断混凝土的抗压强度。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。它是一种经验公式,与混凝土强度等级、试验数量等因素有关。

显而易见,混凝土内超声声速传播速度受许多因素影响,如混凝土内钢筋配置方向影响、不同集料及粒径影响、混凝土水灰比、龄期及养护条件影响以及混凝土强度等级影响,这些影响因素如不经修正都会影响检测精度,建立超声检测混凝土强度曲线时应应对影响因素加以综合考虑并予以修正。

### 1.1.3 超声回弹综合法

综合法检测混凝土抗压强度是指应用两种或两种以上单一无损检测方法(力学的、物理的),获取多种参数,并建立抗压强度与多项参数的综合相关关系,以便从不同角度综合评价混凝土强度。

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。顾名思义,该法是利用超声法和回弹法对混凝土同一测区进行检测的方法。它可以弥补单一方法固有的缺欠,做到互补。例如,回弹法中的回弹值主要受表面硬度影响,但当混凝土强度较低时,由于塑性变形增大,表面硬度反应不敏感;又如当构件尺寸较大或内外质量有差异时,表面硬度和回弹值难以反映构件实际强度。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、混凝土内集料组成以及集料种类。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。因此,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。通过试验,可以建立超声波脉冲速度-回弹值-抗压强度之间的相关关系。



超声回弹综合法首先由罗马尼亚建筑及建筑经济科学研究院提出,并编制了有关技术规程,同时在罗马尼亚推广应用。我国从罗马尼亚引进这一方法,结合我国实际进行了大量试验,并在混凝土工程检测中广泛应用。在此基础上,1988年由中国工程建设标准化委员会组织编制并发布了《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》(CECS 02:88),并于2005年将该标准更新为《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》(CECS 02:2005)。

综合法的最大优点就是提高了混凝土抗压强度检测精度和可靠性。许多学者认为综合法是混凝土抗压强度无损检测技术的一个重要发展方向。目前,除超声回弹综合法已在我国广泛应用外,已被采用的综合法还有超声钻芯综合法、回弹钻芯综合法、声速衰减综合法等。

### 1.1.4 钻芯法

利用钻芯机、钻头、切割机及配套机具,在结构构件上钻取芯样,通过芯样的抗压强度直接推定结构构件抗压强度或缺陷。它的优点是直观、准确、代表性强;缺点是对结构构件有局部破损,芯样数量不可太多,而且价格也比较昂贵。钻芯法在国外的应用已有几十年的历史,一般来说发达国家均制定有钻芯法检测混凝土抗压强度的规程,国际标准化组织(ISO)也颁布了《硬化混凝土芯样的钻取检查及抗压试验》(ISO/DIS 7034)国际标准草案。

我国从20世纪80年代开始,对钻芯法检测混凝土抗压强度开展了广泛研究。目前,我国已广泛应用,并且已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。中国工程建设标准化委员会颁布了《钻芯法检测混凝土强度技术规程》(CECS 03:88),从2000年开始又对该技术规程进行修订,并于2007年将标准更新为《钻芯法检测混凝土强度技术规程》(CECS 03—2007)。

钻芯法除用以检测混凝土强度外,还可用于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。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。

### 1.1.5 拔出法

拔出法是指将安装在混凝土中的锚固件拔出,测出极限拔出力,利用事先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。这种方法在国际上已有五十余年应用历史,比较成熟。拔出法分为预埋(或先装)拔出法和后装拔出法。顾名思义,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埋好锚固件。例如,确定现浇混凝土结构拆模时的混凝土强度;确定现浇冷却塔混凝土结构的拆模强度;确定预应力混凝土结构预应力张拉或放张时的混凝土强度;预制构件运输、安装时的混凝土强度;冬季施工时混凝土养护过程中的混凝土强度等。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,可按不同目的检测现场混凝土结构构件的混凝土强度的方法。

尽管对于极限拔出力与混凝土拔出破坏机理的看法还不一致,但试验证明,在常用混凝土范围( $\leq C60$ ),拔出力与混凝土强度有良好的相关关系,检测结果与立方体试块强度相比,其离散性较小,检测结果令人满意。

拔出法在北欧、北美国家得到广泛应用,被认为现场应用方便、检测费用低廉,尤其适用于现场控制。

国际上不少国家和国际组织发布了拔出法检测规程类文件。例如,美国材料与试验协会(American Society for Testing Materials, ASTM)先后发布的《硬化混凝土拔出强度标准试验方法》(ASTMC 900—99 和 ASTM C 900—2006),国际标准化组织(ISO)发布了《硬化混凝土拔出强度的测定》(ISO/DIS 8046),中国工程建设标准化委员会先后发布了《后装拔出法检测混凝土强度技术规程》(CECS 69: 94)和《拔出法检测混凝土强度技术规程》(CECS 69—2011)。

尽管拔出法是一种微破损检测混凝土强度方法,但具有进一步推广与发展的前景。

### 1.1.6 冲击回波法

在结构表面施以微小冲击产生应力波,利用应力波在结构混凝土中传播时遇到缺陷或底面产生回波的情况,通过计算机接收后进行频谱分析并绘制频谱图。频谱图中的峰值即是应力波在结构表面与底面间或结构表面与内部缺陷间来回反射所形成的。由此,根据其最高的峰值处的频率值可计算出被测结构的厚度,根据其他峰值处频率可推断有无缺陷及其所处深度。

冲击回波法是20世纪80年代中期发展起来的一种无损检测新技术,这种方法是利用声穿透(传播)、反射的原理,不需要两个相对测试面,而只需在单面进行测试即可测得被测结构如路面、护坡、衬砌等厚度,还可检测出内部缺陷(如空洞、疏松、裂缝等)的存在及其位置。

美国在20世纪80年代研究了利用冲击回波法检测混凝土板中缺陷、预应力灌浆孔道中的密实性、裂缝深度、混凝土中钢筋直径、埋设深度等,均取得了令人满意的检测结果。

我国南京水利科学研究院在20世纪80年代末研制成功IES冲击反射系统,并在大型模拟试验板及工程实测实践中取得了成功,使冲击回波法在我国进入实用阶段。

### 1.1.7 雷达法

雷达法是利用近代军事技术的一种新检测技术。“雷达”是“无线侦察与定位”的缩写。由于雷达技术始于军事需要,受外因限制,雷达技术用于民用工程检测,在国内起步很晚,一直到20世纪90年代才开始。最早的是上海用探地雷达探测地下管线、旧老建筑基础的地下桩基、古河道、暗浜等。

雷达法是以微波作为传递信息的媒介,依据微波传播特性,对被测材料、结构、物体的物理特性、缺陷做出无破损检测诊断的技术。雷达法的微波频率为300MHz~300GHz,属电磁波,处于远红外线至无线电短波之间。雷达法引入无损检测领域内,大大增强了无



损检测能力和技术含量。

利用雷达波对被测物体电磁特性敏感特点,可用雷达波检测技术检测并确定城市市政工程地下管线位置、地下各类障碍物分布、路面、跑道、路基、桥梁、隧道、大坝混凝土裂缝、孔洞、缺陷等质量问题;是配合城市顶管、结构等施工工程不可缺少的有效手段。可以想象,雷达波测检技术会在今后城市地下空间开发领域大有用武之地。我国已在路面、跑道厚度检测,市政工程建设中开始应用并取得良好效果。

### 1.1.8 红外成像法

红外成像无损检测技术是建设工程无损检测领域又一新的检测技术。将红外成像无损检测技术移植进建设工程领域是建设工程无损检测技术进步的一个生动体现,也是必然的发展结果。

红外线是介于可见红光和微波之间的电磁波。红外成像无损检测技术是利用被测物体连续辐射红外线的原理,概括被测物体表面温度场分布状况形成的热像图,显示被测物体的材料、组成结构、材料之间结合面存在的不连续缺陷。这就是红外成像无损检测技术原理。

红外成像无损检测技术是非接触的检测技术,可以对被测物体上下、左右进行非接触的连续扫描、成像,这种检测技术不仅能在白天进行,而且在黑夜也可正常进行,故这种检测技术非常实用、简便。

红外成像无损检测技术,检测温度范围为 $-50\sim 2000^{\circ}\text{C}$ ,分辨率可达 $0.1\sim 0.02^{\circ}\text{C}$ ,精度非常高。

红外成像无损检测技术在民用建设工程中,可用于电力设备、高压电网安全运营检查、石化管道泄漏、冶炼设备损伤检查、山体滑坡检查、气象预报。在房屋工程中对房屋热能损耗检测,对墙体围护结构保温隔热性能,气密性、水密性检查更是具有其他方法无法替代的优点;利用红外成像无损检测技术是贯彻实施国家住房和城乡建设部实现建筑节能65%要求的有力和有效的检测手段。

### 1.1.9 磁测法

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。目前,常用于检测钢筋的位置和保护层的厚度。

## 1.2 混凝土建筑无损检测技术的发展

目前,随着世界各国经济的不断发展,我国的基础设施建设事业也日新月异,但是,由于建设项目的不断复杂化,我们在实践的过程中发现各种各样的因素都会对施工项目本身产生不同程度的影响,这些结构中就包含了很多不易被发现的缺陷和问题。我国很多基础项目的建设规模往往很大,例如,大型水坝、桥梁、高层建筑、高速公路,等等。它们同时也是关系到国家经济和国防建设的保障基础,在漫长的服役过程中,在不同因素的影响和侵蚀下,其基本结构和功能都会发生隐性或者显性的变化,如果不对这些问题给予足够的重视,就有可能给我们带来灾难性的后果。正所谓“千里之堤毁于蚁穴”。从理论上



说, 每一项工程的内部都存在着一些缺陷, 而某些缺陷的程度是不能够准确判断和准确测量的, 这就是潜在的可以积累的风险。由此来看, 对于相关检测技术的研究, 尤其是针对混凝土结构安全性能评价的无损检测技术研究对工程实践具有重要的理论意义和现实意义。因此, 自 19 世纪初问世以来, 人们就对混凝土无损检测技术进行了系统的研究和改善。

### 1.2.1 混凝土建筑无损检测方法的发展

混凝土作为一种最重要、用量最大的工程材料, 已有近 200 年的历史。在漫长的发展过程中, 如何赋予它一些明确的性能指标, 以及如何获得和控制这些性能, 一直是人们在实际应用中不断探索的问题之一。如何测定这些性能, 则是上述探索的基础。首先被采用的混凝土性能试验方法是“试件试验”。早在 1911 年英国皇家建筑学院 (RIBA) 的研究报告中, 就已把立方体抗压强度试验列为推荐方法, 此后迅速被各国采用, 并一直沿用至今。这类方法以试件破坏时的实测值代表混凝土的性能指标。“试件试验”方法已沿用近一百年, 已成为混凝土结构设计施工及验收规范的基本依据。但是, 由于试件中的混凝土与结构物中的混凝土质量、受力状态, 混凝土成型和养护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, 而不能完全确切地代表结构物原位混凝土的质量状况。尤其是对已建成的老建筑以及受灾害因素影响的建筑物, 当需要对其安全性作出评估时, “试件试验”就更无法满足要求。因此, 人们一直希望找到一种能在建筑物原位直接测量混凝土各项性能指标的方法。

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, 致使该方法取得了迅速的发展。1930 年首先出现了表面压痕法。1935 年 G. Grimet、J. M. lde 把共振法应用于混凝土弹性模量的测量。1948 年 E. Schmidt 成功研制了回弹仪。1949 年加拿大的 Leslied 和 Cheesman、英国的 R. Jones 等运用超声脉冲进行混凝土检测获得成功。接着, R. Jones 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、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 I. Facaoaru 提出了用声速、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辟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, H. Rusch、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。80 年代中期, 美国的 Mary Sansalone 和 Nicholas J. Carino 实现了在水泥混凝土等集结型非金属、复合材料中使用机械波反射法进行无损检测的目标。此外, 无损检测的另一个分支——钻芯法、拔出法、射钉法等半破损法也得到了发展。90 年代以来, 随着科学技术的快速发展, 涌现出一批新的测试方法, 如微波吸收、雷达扫描、红外线谱、脉冲回波等方法, 从而形成了一个较为完整的混凝土建筑无损检测方法体系。

在 20 世纪 50 年代中期, 随着基本建设规模的扩大, 我国混凝土无损检测技术就已引起工程界的重视。与建设工程有关的主要研究院所及高等院校都开展了这方面的研究工作, 并将研究内容列入了我国新中国成立以来的第一个科技发展规划, 即《十二年科技规划》。

20 世纪 60 年代初, 我国已能生产回弹仪, 并对回弹法的研究日趋成熟。