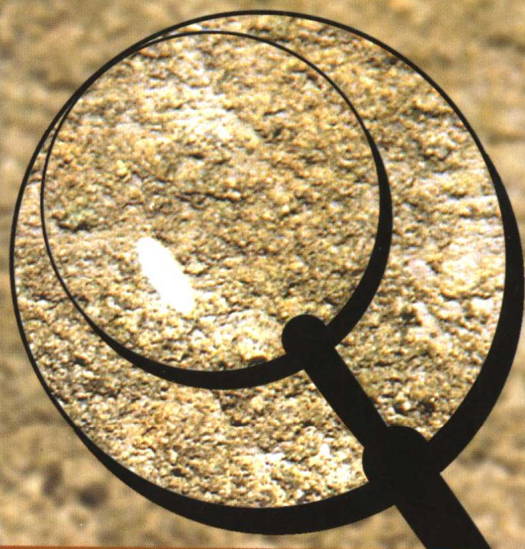




孙志恒 鲁一晖 岳跃真 编著

水工混凝土建筑物的 检测、评估与缺陷 修补工程应用

SHUIGONG HUNNINGTU JIANZHUWU
DE JIANCE PINGGU YU QUEXIAN
XIUBU GONGCHENG YINGYONG

SHUI GONG



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水工混凝土建筑物的 检测、评估与缺陷修补工程 应用

孙志恒 鲁一晖 岳跃真 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书采用理论与实际相结合的方式,将水工混凝土建筑物的检测、评估及修补方法与工程实例有机地结合,论述了水工混凝土建筑物缺陷产生的原因、检测技术与方法、水工混凝土建筑物的评估方法与程序,以及缺陷修补的新材料、新技术和新方法。通过大量工程实例,系统地介绍了水工混凝土结构的伸缩缝、隧洞渗漏、抗冲磨、防碳化、表面保温、裂缝处理、冲蚀坑处理、大面积防渗及结构补强加固等方面的技术与应用。

本书可为从事水工混凝土建筑物和其它混凝土建筑物的检测、评估和修补的科研、设计、施工、运行管理及高等院校的有关人员,提供借鉴与参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

水工混凝土建筑物的检测、评估与缺陷修补工程应用/
孙志恒等编著. —北京: 中国水利水电出版社, 2004
ISBN 7-5084-1777-1

I. 水… II. 孙… III. 水工结构: 混凝土结构-
建筑物 IV. TV331

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 100710 号

书 名	水工混凝土建筑物的检测、评估与缺陷修补工程应用
作 者	孙志恒 鲁一晖 岳跃真 编著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 16.75 印张 397 千字
版 次	2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—3600 册
定 价	45.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

新中国成立以来,我国兴建了大量的水利水电工程,它们在水力发电、防洪减灾、工农业用水、航运、水产和环保旅游等方面,发挥了巨大的社会效益和经济效益。

水利水电枢纽工程一般位于大江大河之上、高山峡谷之中,自然条件极为复杂与恶劣。水工混凝土建筑物如大坝、水闸等均为混凝土表面无装饰保护的裸露工程,素面朝夭、经风雨历寒暑,运行环境与一般市政工程、工业及民用建筑相比,要恶劣得多。因此,在荷载及恶劣环境的交变、持续作用下,更容易引起混凝土的衰变与老化,甚至产生众多的病害,严重的将威胁到水工混凝土建筑物的安全运行。同时,由于技术与认识的局限,规范不完善、设计欠妥、施工材料选择不当、施工质量不佳、结构基础和建筑物本身存在问题以及地震影响等,加之运行条件变化、运行年限增加、运行管理存在问题等诸多不利因素的综合作用,致使为数不少的水工混凝土建筑物存在不同程度的病害,有些已严重影响工程安全运行。

据2001年初统计,在全国水利系统管理的83725座水库中,共有病险库30381座,其中大型水库143座,中型1092座,分别占大、中型水库的42%和41%。据原国家电力公司大坝安全监察中心统计,由我国电力部门负责管理的水电站大坝有130多座,其中大多数为高坝大库,其总库容约2000亿 m^3 ,约占全国8万多座水库总库容的2/5,130多座水电站的发电装机容量约4000万kW,约占全国目前水电站总装机容量的3/5。自1987年开始至1998年底,全国共有96座大、中型水电站大坝进行了检查和评价工作,其中有2座评为险坝,其它坝也都不同程度地存在一些不安全因素。表0-1是96座大、中型水电站大坝重大缺陷和隐患的分项统计。

表 0-1 96 座大、中型水电站大坝重大缺陷和隐患统计表

序号	缺陷或隐患	大坝数量 (座)	比例 (%)
1	防洪标准偏低,不满足现行规范的规定,有的大坝在运行中曾发生洪水漫过坝顶事故,造成巨大损失	38	39.6
2	坝基存在重大隐患,断层、破碎带和软弱夹层(红层)未做处理或处理效果差,有的在运行中局部发生性状恶化,使大坝的抗滑稳定安全度明显降低	14	14.6
3	坝体稳定安全系数偏低,不满足现行规范的规定	5	5.2
4	结构强度不满足要求,坝基、坝体在设计荷载组合下出现超过允许值的拉、压应力	10	10.4
5	坝体裂缝破坏大坝的整体性和耐久性,有的裂缝贯穿上、下游,渗漏严重,有的裂缝规模大且所在的部位重要,已影响到大坝的强度和稳定	70	72.9

续表

序号	缺陷或隐患	大坝数量 (座)	比例 (%)
6	坝基扬压力或坝体浸润线偏高, 坝基或坝体渗漏量偏大, 有的坝体大量钙质析出	32	33.3
7	泄洪建筑物磨损、气蚀损坏严重, 有的大坝的坝后冲刷坑已影响到坝体的稳定	23	24
8	混凝土强度低, 混凝土遭受冻融破坏严重, 表层混凝土剥蚀或碳化较深, 有的大坝在泄洪时溢流面发生大面积混凝土被冲毁事故	10	10.4
9	近坝区上、下游边坡不稳定, 有的曾发生较大规模的滑坡	10	10.4
10	水库淤积严重	10	10.4
11	水工闸门和启闭设备存在重大缺陷, 有的已不能正常挡水和启闭运行, 影响到安全度汛	27	28.1
12	大坝安全监测设施陈旧、损坏严重, 测值精度低、可靠性差, 部分大坝缺少必要的监测项目和设施		80 以上

从表 0-1 中可以看出, 约有 40% 的大坝防洪标准低于现行规范的要求。有 60 多座坝呈现出明显的老化现象, 其主要表现为: 坝基帷幕防渗降压能力随着时间的推移而衰减, 坝基扬压力和渗漏量逐渐增大; 混凝土坝体从排水孔或裂缝析出大量钙质; 泄洪建筑物磨损、气蚀破坏严重; 表层混凝土剥蚀或碳化较深; 反复遭受冻融、冻胀破坏后, 混凝土变得疏松脆弱; 约占总数 73% 的混凝土建筑物存在较多裂缝, 有的裂缝对结构强度产生显著危害, 有的裂缝不仅降低大坝稳定安全度, 而且有大量渗漏水。水库及水电站建筑物存在病险隐患, 不仅威胁防洪安全, 而且严重影响水库兴利及水电站效益的发挥。

水工混凝土建筑物的各种病害、缺陷, 大多始发于或显露于结构的外表, 如裂缝、剥落、磨损、破碎、钙质析出、渗漏、钢筋锈蚀、气蚀、碳化、脱空、碱骨料反应及结构变形等。有些病害的起因比较简明, 仅从现场观察及简单的测量就可以较容易地做出诊断。但也有些病害的情况很复杂, 同一个建筑物可能同时存在多种病害, 有些病害是在混凝土内部, 仅从结构表面是无法检测到的。为了及时掌握水工混凝土建筑物的运行状态, 保证结构的正常安全运行, 延长结构的使用年限, 需要在不影响结构安全运行的前提下进行一系列的现场检测, 为下一步对建筑物的安全评估与修补加固处理提供科学依据。现场检测需要结合具体工程条件, 采用先进的检测设备, 由专门从事检测的工程技术人员进行现场检测和室内试验, 然后提出反映建筑物现实状况的检测分析报告。

由于水工混凝土建筑物长期遭受到高压渗流、溶蚀、冲刷、冻融、冻胀等有害作用, 还可能遭遇超标准洪水和大地震的破坏, 运行条件比较恶劣, 建筑物性态会向不利方向变化, 在日常的运行和管理过程中, 必须要对建筑物的工作质量进行检查。这种检查可以及时发现建筑物在严重事故将要发生以前所发生的变化。由运行管理人员和专家相结合, 对现场进行认真的观察和检测, 以及对监测资料进行全面综合分析, 解读工程运行的监测资料所反映的潜在信息。

依靠有丰富经验的工程技术人员, 研究与分析工程设计、施工、监理文件和工程运行

的监测资料，了解工程运行管理的状况。然后，凭他们的实践经验，对观察资料做出正确的分析；凭他们从类似工程或处理类似情况得来的经验，对建筑物总体老化演变各阶段进行定量的信息分析；依照现行规范与标准进行验算复核，综合分析、判断得出评价建筑物安全的评估结论。

在新材料、新工艺和新技术发展日新月异的伟大时代，应优先考虑采用新材料、新工艺、新技术维修存有缺陷、带病运行的水工建筑物，延长建筑物的工作寿命，并把不断更新的技术与材料应用于新的水利水电工程的建设中。

在本书中作者结合自身的工作实践，采用理论与实际相结合的方式，将水工混凝土建筑物的检测、评估及修补方法与工程实例有机结合，论述了水工混凝土建筑物缺陷产生的原因、检测技术与方法、水工混凝土建筑物的评估方法与程序，以及缺陷修补的新材料、新技术和新方法。通过大量工程实例系统地介绍了水工混凝土结构的伸缩缝、隧洞渗漏、抗冲磨、防碳化、表面保温、裂缝处理、冲蚀坑处理、大面积防渗及结构补强加固等方面的技术与应用。此书系集体智慧的结晶，书中的内容除作者本人的研究成果和工程实践外，还引用了中国水利水电科学研究院有关同志的研究成果，因篇幅有限，未一一列出，在此深表感谢。希望此书的出版能推动我国水工混凝土建筑物检测、评估和修补加固事业的发展，为从事水工混凝土建筑物和其它混凝土建筑物的检测、评估和修补的科研、设计、施工、运行管理与高等院校有关人员提供借鉴与参考。

水工混凝土建筑物的检测、评估和修补加固，是一项复杂而综合性的学科，多年来一直为国内外水工界所关注与重视。伴随着新技术、新材料的迅速发展，其科学研究与工程实践均发展得很快。限于作者水平与时间，不足之处，在所难免，热忱期望读者批评指正。

作者

2003年7月

目 录

前 言

第一章 水工混凝土建筑物的检测	1
第一节 水工混凝土建筑物的检测方法	1
第二节 混凝土无损检测的新型设备	31
第三节 探地雷达快速检测技术及应用.....	37
第四节 大坝的水下检测与分析技术	40
第五节 水工混凝土建筑物无损检测工程实例	44
第二章 水工混凝土建筑物的安全评估	76
第一节 水工混凝土建筑物安全评估的内容与程序	76
第二节 水工混凝土建筑物的结构安全评估	82
第三节 水工混凝土建筑物安全评估实例	95
第三章 水工混凝土缺陷及修补新材料与技术	112
第一节 水工混凝土建筑物的缺陷	112
第二节 水工混凝土建筑物缺陷修补新材料	117
第三节 喷涂聚脲弹性体技术	129
第四节 水工混凝土水下裂缝修补	137
第五节 混凝土结构的补强加固新技术	151
第六节 混凝土大坝土工膜防渗技术	161
第四章 水工混凝土缺陷修补工程应用	164
第一节 混凝土变形缝（伸缩缝）的修补实例	164
第二节 混凝土输水隧洞渗漏处理实例	174
第三节 泄洪孔（洞）混凝土防冲磨修补实例	193
第四节 混凝土大面积防渗补强处理实例	202
第五节 混凝土面板坝大面积防渗处理实例	210
第六节 混凝土冲蚀坑修补实例	217
第七节 混凝土补强加固修补实例	225
第八节 钢筋混凝土防碳化处理实例	239
第九节 水工建筑物混凝土表面保温抗裂防护喷涂工程实例	244
第十节 混凝土结构防渗及加固综合处理实例	246
第十一节 国外大坝水下土工膜防渗技术应用实例	251
参考文献	260

第一章 水工混凝土建筑物的检测

第一节 水工混凝土建筑物的检测方法

水工混凝土建筑物的检测内容包括混凝土的强度、内外部缺陷和其它性能。一般是根据外观的缺陷情况,决定混凝土建筑物的重点检测部位。针对不同的水工混凝土建筑物,在重点检测部位进行混凝土强度、混凝土抗冻标号、混凝土的剥蚀程度、冲蚀程度、混凝土碳化深度、钢筋锈蚀、混凝土氯离子含量、混凝土的抗渗系数、混凝土的密实度、混凝土的裂缝、混凝土底板是否脱空、衬砌混凝土的厚度及外水压力等全部或部分项目的检测。

混凝土无损检测技术和方法的研究始于 20 世纪 30 年代初,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) 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) 等运用超声脉冲技术进行混凝土检测获得成功。接着,英国的琼斯又使用放射性同位素进行混凝土密实度和强度的检测。这些研究为混凝土无损检测技术奠定了基础。

20 世纪 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、探地雷达扫描、红外热谱、脉冲回波、面波等新技术。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,发展成事前的质量反馈控制。

我国在这一领域的研究工作始于 20 世纪 50 年代中期,通过引进瑞士、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,现已使回弹法、超声回弹综合法、钻芯法、拔出法、超声缺陷检测法等无损检测技术规范化。已制定的规程有 CECS02—88《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》,CECS69—94《后装拔出法检测混凝土强度技术规程》,CECS21—90《超声法检测混凝土缺陷技术规程》,CECS03—88《钻芯法检测混凝土强度技术规程》,以及最新出版的 DL/T5150—2001《水工混凝土试验规程》和 JGJ/T23—2001《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》等等,在常规的混凝土结构无损检测技术方面的研究和应用水平已达到或接近国际先进水平。

一、混凝土建筑物的普查

水工混凝土建筑物的各种缺陷,大多始发于或显露于建筑物的外表,现场普查的目的是从外表确定混凝土结构损坏的种类和范围。普查内容主要包括:

(1) 观察外观缺陷。通过仔细检查,详细记录缺陷的位置、性质、程度、外貌、尺寸、颜色,画出相应的草图,并对全部检查区域拍照。

(2) 描述裂缝的分布、量测裂缝长度、宽度、深度及数量,了解裂缝的变化情况,初

步判断裂缝随时间的变化规律。

(3) 记录暴露于自然环境中的状态——损伤、冻融、剥蚀、脱落及冲蚀（空蚀和磨蚀）。

(4) 记录渗漏情况，点、线或面渗漏的痕迹及描述。

(5) 描述伸缩接缝的工作状态及变形情况。

(6) 记录高应力区域的情况，有无混凝土压碎的部位。

(7) 记录基础和结构的变形或倾斜的情况。

(8) 向施工、管理单位有关人员了解施工、运行情况及存在的问题。收集建筑物在设计、施工、运行期间的有关记录和资料。

(9) 在普查的基础上，确定下一步工作内容和数量，确定重点检测部位，为分析缺陷产生的原因及确定正确的处理方案提供可靠依据。

重点检测一般是由专业技术人员、采用专用设备对重点部位的混凝土进行诸如混凝土强度、抗冻标号、剥蚀程度、冲蚀程度、碳化深度、钢筋锈蚀、氯离子含量、抗渗系数、密实度、裂缝、脱空、厚度等项目的检测，以下介绍检测的具体方法。

二、混凝土强度的检测

混凝土强度是结构应力及稳定复合计算的重要参数。强度检测的方法大致可分为无损检测和有损检测两类。无损检测是指在不破坏混凝土结构整体性的情况下通过测定某些与混凝土抗压强度具有一定相关关系的物理参量来推定混凝土的强度，适用于对混凝土结构进行大面积的检测。目前国内外比较成熟、应用较广泛的方法有回弹法、超声回弹综合法、表面波法等。这几种方法的比较见表 1-1。

有损检测是指在混凝土被检测部位进行局部破坏以推算混凝土强度的方法，常用的方法有芯样强度法、射钉法和拔出法。下面分别介绍混凝土强度检测常用的几种方法。

表 1-1 几种无损检测方法的比较

方法	中介物理参量	相关方程式	相关性	混凝土含水量影响	精度	简便性	对检测人员要求	适用规范
回弹法	表面硬度 (回弹值 N)	$R_c = aN^b$	一般	大	一般	好	一般	有
超声回弹综合法	表面硬度 纵波波速	$R_c = aN^b V_p^c$	一般	中	一般	一般	高	有
表面波法	表面波速	$R_c = aV_R^c$	一般	小	一般	一般	高	无

注 a 为常数项系数；b、c 为回归系数； R_c 为抗压强度计算值，MPa； V_p 为纵波波速，km/s； V_R 为表面波速，km/s。

(一) 芯样强度法

芯样强度检测的优点是可以对当前水工建筑物混凝土的强度进行最准确、最直观的判断，当然它的前提是必须要有一定的芯样数量和合理的取芯位置，这是以对原混凝土结构的整体性造成一定破坏为代价的。钻取芯样的直径一般为 10~15cm，芯样高度取决于混凝土厚度和岩芯获取率。检测步骤如下：

(1) 用专用取芯机在被检测部位钻取混凝土芯样，芯样的直径一般应为骨料最大粒径

的 3 倍，至少也不得小于 2 倍。

(2) 将混凝土芯样按长直比（长度与直径的比值）不小于 1.0 的尺寸要求截取试件，抗压试验以三个试件为一组。

(3) 将按长直比为 1.0 制作的试样两端在磨石机上磨平，或用稠水泥浆（砂浆）抹平，端面平整度误差不应大于直径的 1/10，两端面应与中轴线垂直，并作为试件的承压面。试件四周不得有缩颈、鼓肚或其它缺陷（如裂缝等）。

(4) 在试件侧面不同位置量测长度两次，准确至 1mm，取两个测值的平均值作为试件的长度；在试件中部量测直径两次（两次测量方向相垂直），准确至 1mm，取两个测值的平均值作为试件的直径。

(5) 试件在试验前需泡入水中 4d，使其达到饱和，然后按混凝土立方体抗压强度试验方法进行芯样试件的抗压强度试验。

抗压强度按式 (1-1) 计算（准确至 0.1MPa）：

$$f_c = \frac{4P}{\pi D^2} = 1.273 \frac{P}{D^2} \quad (1-1)$$

式中 f_c ——芯样试件抗压强度，MPa；

P ——破坏荷载，N；

D ——试件直径，mm。

关于芯样强度换算成同条件下 15cm×15cm×15cm 立方体试件抗压强度，建设部 CECS03—88《钻芯法检测混凝土强度技术规程》规定 $\phi 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 与 $\phi 15\text{cm} \times 15\text{cm}$ 芯样强度测试值可直接作为混凝土强度的换算值，并未强调试件的比尺效应。而电力行业标准 DL/T5150—2001《水工混凝土试验规程》第 6.6.4 条规定，长直比为 1.0 的芯样试件抗压强度，换算成 15cm×15cm×15cm 立方体的抗压强度，应乘以一换算系数 A ：

$$f_{cc} = Af_c \quad (1-2)$$

式中 f_{cc} ——15cm×15cm×15cm 立方体试件的抗压强度，MPa；

f_c ——长直比为 1.0 的芯样试件抗压强度，MPa；

A ——换算系数，见表 1-2。

表 1-2 芯样和 15cm×15cm×15 cm 立方体试件之间抗压强度换算系数值

芯样尺寸 (mm)	$\phi 100 \times 100$	$\phi 150 \times 150$	$\phi 200 \times 200$
换算系数 A	1.00	1.04	1.18

(二) 回弹法

回弹法是应用历史最长、应用范围最广的无损检测方法。由于它是根据表面硬度来推测混凝土的强度，因此，其检测范围应限于内外均质的混凝土。回弹检测推定的是构件测区在相应龄期时的抗压强度，以边长为 15cm 的立方体试件抗压强度表示。目前水利水电行业尚无此项检测规程，电力行业标准 DL/T5150—2001《水工混凝土试验规程》及建设部 JGJ/T23—2001《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》是最新标准，也是我们目前检测的依据。

DL/T5150—2001《水工混凝土试验规程》规定，采用回弹法检测混凝土抗压强度，适

用于强度等级为 C10~C40 的混凝土。

测定回弹值的仪器，可以采用示值系统为指针直读式的混凝土回弹仪，也可以采用数显式混凝土回弹仪。直读式混凝土回弹仪按其标称动能可分为：中型回弹仪，标称动能为 2.2J；重型回弹仪，标称动能为 29.4J。

1. 检测步骤

(1) 在被测混凝土结构或构件上均匀布置测区，测区数不少于 10 个。用中型回弹仪的测区面积为 400cm²；用重型回弹仪的测区面积为 2500cm²。

(2) 根据混凝土结构、构件厚度或骨料最大粒径，选用回弹仪：

1) 混凝土结构或构件厚度小于等于 60cm，或骨料最大粒径小于等于 40mm，宜选中型回弹仪。

2) 混凝土结构或构件厚度大于 60cm，或骨料最大粒径大于 40cm，宜选重型回弹仪。

2. 检测结果处理

(1) 从测区的 16 个回弹值中，舍弃三个最大值和三个最小值，将余下的 10 个回弹值按式 (1-3) 计算测区平均回弹值 m_N (准至 0.1)：

$$m_N = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} N_i \quad (1-3)$$

式中 m_N ——测区平均回弹值；

N_i ——第 i 个测点回弹值 ($i=1, 2, 3, \dots, 10$)；

i ——测点数，为 10。

(2) 当回弹仪在非水平方向测试时，将测区平均回弹值 $m_{N\alpha}$ 换算成水平方向测试的测区平均回弹值 m_N (准至 0.1)：

$$m_N = m_{N\alpha} + \Delta N_\alpha \quad (1-4)$$

式中 $m_{N\alpha}$ ——回弹仪与水平方向成 α 角测试时测区的平均回弹值；

ΔN_α ——按表 1-3 查出的不同测试角度 α 的回弹修正值。

表 1-3 回 弹 修 正 值 ΔN_α

$m_{N\alpha}$	测 试 角 度 α							
	+90°	+60°	+45°	+30°	-30°	-45°	-60°	-90°
20	-6.0	-5.0	-4.0	-3.0	+2.5	+3.0	+3.5	+4.0
30	-5.0	-4.0	-3.5	-2.5	+2.0	+2.5	+3.0	+3.5
40	-4.0	-3.5	-3.0	-2.0	+1.5	+2.0	+2.5	+3.0
50	-3.5	-3.0	-2.5	-1.5	+1.0	+1.5	+2.0	+2.5

注 本表取自 DL/T5150—2001《水工混凝土试验规程》。

(3) 推定混凝土强度的回弹值应是水平方向测试的回弹值 m_N 。

(4) 混凝土强度换算值可采用以下三类测强曲线计算，宜优先采用本地区或本部门的测强曲线和专用混凝土强度公式。

1) 统一测强曲线。由全国有代表性的材料、成型养护工艺配制的混凝土试件，通过试验所建立的曲线。

2) 地区测强曲线。由本地区常用的材料、成型养护工艺配制的混凝土试件，通过试验所建立的曲线。

3) 专用测强曲线。由与结构或构件混凝土相同的材料、成型养护工艺配制的混凝土试件，通过试验所建立的曲线。

当无专用混凝土强度公式时，DL/T5150—2001《水工混凝土试验规程》中规定，可根据回弹仪型号，采用下列公式推定混凝土强度。

1) 中型回弹仪。

普通混凝土强度：

$$f_{ccN0} = 0.02497m_N^{2.0108} \tag{1-5}$$

引气混凝土强度：

$$f_{ccN0} = 1.5m_N - 15.2 \tag{1-6}$$

2) 重型回弹仪。

$$f_{ccN0} = 7.7e^{0.04m_N} \tag{1-7}$$

式中 f_{ccN0} ——混凝土抗压强度，MPa；

m_N ——测区平均回弹值。

(5) 当混凝土结构或构件碳化至一定深度时，须将推定的混凝土抗压强度按式(1-8)修正：

$$f_{ccN} = f_{ccN0}C \tag{1-8}$$

式中 f_{ccN} ——碳化深度修正后的混凝土抗压强度值，MPa；

f_{ccN0} ——按公式推定的混凝土抗压强度值，MPa；

C ——查表 1-4 的碳化深度修正值。

表 1-4 碳化深度修正值 C

测区强度 (MPa)	碳化深度 (mm)					
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	≥6.0
10~19.5	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70
20~29.5	0.94	0.88	0.82	0.75	0.73	0.65
30~39.5	0.93	0.86	0.80	0.73	0.68	0.60
40~50	0.92	0.84	0.78	0.71	0.65	0.58

注 本表取自 DL/T5150—2001《水工混凝土试验规程》。

根据各测点区的混凝土强度 f_{ccN} ，计算构件的平均强度 $m_{f_{ccN}}$ 、标准差 σ 和变异系数 C_V ，可评估构件的混凝土强度和均匀性。

3. 注意事项

(1) 回弹仪具有下列情况之一时应送检定单位检定。

1) 新回弹仪启用前。

2) 超过检定有效期限（有效期为半年）。

3) 累计弹击次数超过 6000 次。

4) 经常规保养后钢砧率定值不合格。

5) 遭受严重撞击或其它损害。

(2) 回弹仪具有下列情况之一时应进行常规保养。

1) 弹击超过 2000 次。

2) 对检测值有怀疑时。

3) 在钢砧上的率定值不合格。

(三) 超声波法

超声波是机械振动产生的一种弹性波,频率高于 20kHz。用超声波检测混凝土的原理是:将电能通过发射探头转换成机械能,发出超声波穿透混凝土结构,然后经接收探头拾取而转换成微弱电信号。此信号经放大后的波形显示在示波管上,声波历时(声时)由数码显示器给出,并可打印数值。根据超声波在混凝土中的传播速度(简称波速)来推求结构混凝土强度。超声波不宜单独测强,因为波速与强度之间并不存在密切的关系。在强度较低时(小于等于 30MPa),声速随混凝土强度改变变化很灵敏,但强度较高时声速变化较迟钝,它只能反映混凝土的内部缺陷。采用超声回弹综合法,从原理上讲基本可以抵消混凝土湿度状态、龄期及内部密实度对其强度推定值造成的影响。超声波法不宜用于强度等级在 C30 以上或在超声传播方向上钢筋布置太密的混凝土。使用超声波法的测量有如下步骤。

1. 超声波检测仪零读数的校正

仪器零读数指的是当发、收换能器之间仅有耦合介质的薄膜时仪器的时间读数,以 t_0 表示。对于具有零校正回路的仪器,应按照仪器使用说明书,用仪器所附的标准棒在测量前校正好零读数,然后测量(此时仪器的读数已扣除零读数)。对于无零校正回路的仪器应事先求得零读数值 t_0 ,从每次仪器读数中扣除 t_0 。

2. 建立强度—波速关系

建立强度—波速关系包括试件制作、试件的测试(超声波测试和抗压强度测试)和结果整理(建立强度与波速之间的关系)。试件的波速按式(1-9)计算:

$$v = \frac{L}{t} \times 1000 \quad (1-9)$$

式中 v ——超声波速度, km/s;

L ——超声波在试件上的平均传播距离, m;

t ——超声波在试件上的传播时间, μ s。

波速或强度均取一组三个试件测值的平均值作为一个数据,以强度为纵坐标,波速为横坐标,绘制强度—波速关系曲线。较精确的方法是根据实测数据,以最小二乘法计算出曲线的回归方程式。对于方程式的函数形式,推荐二次函数式(1-10)、指数函数式(1-11)和幂函数式(1-12)三种,可根据回归线的相关性和精度来选用。

$$f_{cc} = a + bv + cv^2 \quad (1-10)$$

$$f_{cc} = ae^{bv} \quad (1-11)$$

$$f_{cc} = av^b \quad (1-12)$$

式中 f_{cc} ——混凝土抗压强度, MPa;

v ——超声波速, km/s;

a 、 b 、 c ——方程式的系数,用最小二乘法统计算得。

3. 现场检测

在建筑物相对的两面均匀地划出网格, 网格的交点即为测点。在测点处涂上耦合剂, 将换能器压紧在相对的测点上。调整仪器增益, 使接收信号第一个半波的幅度至某一幅度 (与测试试件时同样大小), 读取传播时间 t 。按式 (1-9) 计算该点的波速。

4. 检测结果处理

将现场测得的波速加以必要的修正后, 按强度—波速关系式 (或曲线) 换算出各测点处的混凝土强度。并按数理统计方法计算平均强度 ($m_{f_{cc}}$)、标准差 (σ) 和变异系数 (C_v) 三个统计特征值, 用以比较各部位混凝土的均匀性。

5. 注意事项

(1) 被测体与换能器接触处应平整光滑, 若混凝土表面粗糙不平而又无法避开时, 应将表面铲磨平整, 或用适当材料 (熟石膏或水泥浆等) 填平、抹光。

(2) 在测量过程中应注意波形的变化和波速的大小, 如发现异常波形和过低的波速时, 应反复测量并检查测点的平整度和耦合是否良好。

(四) 表面波检测法

1. 表面波无损检测法的基本理论

表面波 (亦称瑞利波) 是沿介质表层传播的一种弹性波, 其基本理论可概括为以下几方面。

(1) 在半无限弹性介质表面进行垂直激振, 可在介质中产生表面波。表面波振动方向垂直于介质表面, 沿表面平行传播, 波阵面呈圆柱形。

(2) 在各向同性弹性介质半空间垂直激振产生的能量, 表面波占 67%, 横波占 26%, 纵波占 7%。表面波占总输入能量的 2/3。

(3) 表面波振幅离振源随距离 r 的衰减比横波慢, 表面波振幅与 $\frac{1}{\sqrt{r}}$ 成比例衰减, 横波振幅与 $\frac{1}{r}$ 成比例衰减。因而对于表面层表面波具有重要意义。

(4) 稳态振动产生频率为 f 的表面波在介质中传播的深度范围约等于一个波长 λ , 但从能量分布考虑可认为其速度 V_R 代表 $\frac{\lambda}{2}$ 深度范围内介质的平均性质。因此得到关系式: $V_R = 2fD$, $D = \frac{\lambda}{2}$, 随着频率的减小, 表面波传播深度增加, 改变频率, 可得到反映不同深度材料的平均力学特性。

(5) 表面波与横波具有相似的性质, 由于材料中孔隙水不能传递剪力, 因而与横波一样受材料中的含水量影响很小。

(6) 表面波传播速度在理论上与材料的弹性模量、剪切模量之间具有数学表达式, 而通过试验还可以确定表面波速度与材料干密度、抗压强度等具有良好的相关性。因此, 用它来检验结构混凝土材料的力学性能及存在的缺陷具有重要意义。

2. 利用面波检测混凝土强度的原理

利用面波传播速度与介质物理力学性质的相关性, 可检测混凝土强度。研究表明表面波传播速度 V_R 与材料的动态弹性模量 E_d 、动态剪切模量 G_d 、动态泊松比 ν_d 、密度 ρ_d 有如下关系:

$$E_d = \frac{2(1 + \nu_d)^3}{(0.87 + 1.12\nu_d)^2} \rho_d V_R^2 \quad (1-13)$$

$$G_d = \left(\frac{1 + \nu_d}{0.87 + 1.12\nu_d} \right)^2 \rho_d V_R^2 \quad (1-14)$$

在实际工程中,一般不用 E_d 或 G_d 作为强度指标,通常采用抗压强度,抗压强度 R_c 与 V_R 具有下列幂函数关系:

$$R_c = aV_R^b \quad (1-15)$$

式中 R_c ——抗压强度换算值, MPa;

V_R ——面波传播速度, km/s;

a 、 b ——关系系数。

因此,利用一定数量的 R_c 与 V_R 值就可以用数理统计分析方法得出系数 a 、 b , 建立回归方程式, 换算出抗压强度。

3. 表面波检测仪

中国水利水电科学研究院工程安全监测中心研制成功的 BZJ—3H 型表面波混凝土质量检测仪是由控制检测装置、激振器、接收传感器和充电器组成。在现场检测混凝土质量时, 将激振器和信号接收传感器安装在结构物表面。当检测仪用给定频率 f (Hz) 使激振器向结构物垂直激振时, 产生的表面波在材料中按一定深度传播, 由接收传感器接收振动信号, 经放大器放大, 滤波器滤波后, 由相关检测器检测出接收信号与参考信号的时间差 Δt (μs), 当激振器与信号接收传感器之间距离为 L (m), 调整参考信号初始相位与激振器信号同步时, 则可计算得到表面波在距离为 L 范围内的传播速度 $V_R = \frac{L \times 10^6}{\Delta t}$ (m/s)。利用混凝土强度 R_c 与面波波速 V_R 的相关方程式 $R_c = f(V_R)$, 可计算得到混凝土强度。

BZJ—3H 型表面波混凝土质量检测仪的技术指标如下。

- (1) 频率范围: 500~4000Hz。
- (2) 检测深度: 0.2~1m。
- (3) 检测半径: 0.3~1.0m。
- (4) 采样次数: $N=n^2$ ($n=5、6、7、8、9$ 共 5 档)。
- (5) 波速测试精度 (用标定器检验): 0.4%。
- (6) 显示器: 16×2 行字符液晶显示器。
- (7) 仪器尺寸: 激振器 $\phi 110\text{mm} \times 125\text{mm}$, 传感器 $\phi 66\text{mm} \times 78\text{mm}$, 控制检测仪尺寸 $270\text{mm} \times 230\text{mm} \times 200\text{mm}$;
- (8) 仪器重量: 12kg。

当混凝土建筑物只有一个可测面时, 可以考虑采用表面波检测法。由于表面波质点振动介于横波和纵波之间, 它与横波具有相似的性质, 由于混凝土中孔隙水不能传递剪力, 因此, 从理论上讲混凝土含水量对表面波影响较小。表面波波速 V_R 可以反映 1/2 波长深度范围内介质的平均性质, 因此, 要想使探测深度加大, 可以减小发射频率、增大发射功率。

(五) 拔出试验法

预埋拔出法是在混凝土表层以下一定距离处预先埋入一个钢制锚固件, 混凝土硬化以后, 通过锚固件施加拔出力。当拔出力增至一定限度时, 混凝土将沿着一个与轴线呈一定

角度的圆锥面破裂，并最终拔出一个类似圆锥体。

有资料表明拔出力与抗压强度之间有良好的相关关系，其相关系数可达 0.95 以上。丹麦的 LOK 试验技术便是预埋拔出法中有代表性的、得到世界上许多国家广泛公认的一种使用方法，它是丹麦技术大学于 20 世纪 60 年代后期研制成的。我国研制的 TYL 型混凝土拔出试验仪与丹麦的 LOK 试验仪基本相同。

预埋拔出装置包括锚头、拉杆和拔出试验仪的支承环，拔出试验简图及尺寸关系见图 1-1。拔出装置的尺寸为拉杆直径 $d_1 = 7.5\text{mm}$ (LOK 试验) 或 $d_1 = 10\text{mm}$ (TYL 试验)，锚头直径 $d_2 = 25\text{mm}$ 、支承环内径 $d_3 = 55\text{mm}$ 、锚固深度 $h = 25\text{mm}$ 。

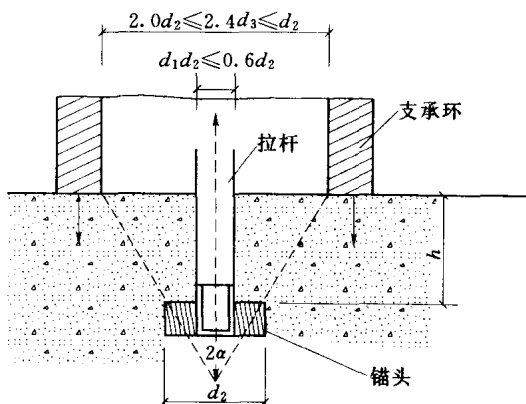


图 1-1 拔出试验简图

预埋拔出试验的操作步骤可分为：安装预埋件，浇筑混凝土，拆除连接件，拉拔锚头。

拔出力与抗压强度之间的试验相关关系，可以用具有一般代表性测强曲线来表示：

$$F_P = A f_{cu} + B \quad (1-16)$$

式中 F_P ——拔出力，kN；

f_{cu} ——立方体试件强度，MPa；

A 、 B ——系数。

拔出试验法同其它无损检测一样，属于从一个物理量来推定另一个物理量的方法，必须在建筑物修建时或运行后取芯标定相关方程式。由于拔出试验法拔出深度较浅，一般在 20~40mm 之间，不能反映内部混凝土的质量。

(六) 射钉法

射钉法是混凝土强度的又一种无损检测法，又称贯入阻力试验法。这种方法适用于混凝土早期强度发展的测定，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。

1. 基本原理

射钉法试验的基本原理是利用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。子弹发射的初始动能是固定的，钢钉的尺寸形状和机械性能一致性很好，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。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、剪切和摩擦等复杂的应力状态，要在理论上建立贯入阻力与混凝土强度之间的相关关系很困难。一般是通过试验，建立贯入阻力与混凝土强度的经验关系式，现场检测时，可根据事先建立的关系式推定出混凝土的实际强度。试验证明，混凝土抗压强度与射钉外露长度之间存在着良好的线性关系。

2. 测量设备与操作方法

(1) 测量设备。射钉法测量的全套设备包括发射枪、子弹、钢钉和测量卡尺。

1) 发射枪。引发火药实现射击的装置,火药燃烧后产生的气体推动钢钉,将其射入混凝土中。试验用的发射枪分为低速枪和高速枪两种。低速枪火药燃烧的气体不是直接作用于钢钉,而是作用在枪内的活塞上,能量通过活塞传递给钢钉。低速枪发射的能量较低,适用于强度为 40MPa 以下的混凝土测试,如果强度过高,可能使钢钉嵌入不牢或者发生弯钉现象。高速枪则取消了枪管里的活塞,火药燃烧的气体直接推动钢钉,由于发射的能量大,使用的钢钉直径粗,钉身不易弯曲,适用于高强度混凝土的测试。

两种发射枪都配有安全保险装置,对空不能发射,也不会穿透混凝土使射钉飞向远处,可保证操作安全,并可以在各种方位发射。

2) 子弹。弹内装有标准重量的火药,与发射枪配套使用。火药性能和每个子弹的药量必须均匀一致,用一药垫将火药压紧固定在弹壳内以便使发射枪转动时火药保持固定。

3) 钢钉。由硬质合金材料制成,机械性能稳定,外形尺寸要求控制在一定的标准误差内,特别是头部形状必须具有良好的一致性。

4) 测量卡尺。测量深度用的游标卡尺,测量范围 0~100mm,精度 0.02mm。为了便于测量,用一标准厚的不锈钢圆板套入射钉,平稳地置于混凝土表面,测量射钉外露长度以此圆板为基础,计算时将圆板厚度计入。

5) 拔钉器。辅助工具,可将射入混凝土中的射钉拔出。

(2) 操作方法。

1) 低速枪的发射。将钢钉自发枪管口装入,用送钉器推至发射管底部,使钢钉顶面与管内活塞杆端面贴紧。拉出送弹器装上子弹,再将其推回原位,然后将发射枪垂直对准标定的射击点,解除保险,扣动扳机,把钢钉射入混凝土中。

2) 高速枪的发射。握紧枪柄,转动枪体,可将枪膛打开,将钢钉放入枪管,然后再把子弹放入,注意要用手指压一下,使之达到固定位置。然后合起枪膛,转动枪体销紧即可发射。

钢钉射入混凝土后,应检查嵌入是否牢固,嵌入不牢固的需重新发射。在检查过的钢钉上套入不锈钢圆板,测量钢钉外露部分长度,以“mm”计,并作记录。

每次发射 3 个射钉为 1 组,取 3 个射钉外露长度值的平均值作为本次试验结果,少于 3 个试验值时应进行补充试验。

为了保证试验的精度,应由专人用同一支发射枪和量具进行试验,并使 1 组内 3 个测值的最大极差不超过表 1-5 中的规定。

表 1-5 测值的容许极差

骨料最大粒径	3 个测值的容许极差 (mm)
砂 浆	6
20mm 骨料混凝土	8
40mm 骨料混凝土	11
80mm 骨料混凝土	15
150mm 骨料混凝土	15

如果 3 个测值的极差超出了表 1-5 给定的范围,则不能用这 3 个测值进行平均。这时应发射第 4 个射钉,去掉与 4 个测值的平均值之差最大的那个数据,用其余 3 个测值的平均值作为测试结果,如果其余 3 个测值仍不能满足规定要求,可再发射第 5 个射钉,并按上述方法进行处理。如果 1 次测试连续