文章编号：1672-3031(2018)05-0472-07

水工结构混凝土质量检测冲击弹性波技术的研发和应用

王荣鲁，吕小彬，李　萌
（中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室，北京 100038）

摘要：针对我国水工建筑物的老化病害状况和耐久性问题，介绍了水工混凝土建筑物混凝土质量与老化性状的常规检测方法和手段，并分析了各种方法的优缺点和研究应用进展。针对现场检测和安全评估中存在的突出问题和难题，研发了基于冲击弹性波的水工混凝土结构无损检测技术体系，包括弹性波层析成像技术、表面波法、冲击回波法及冲击弹性波测试混凝土动弹性模量技术。工程实践证明，该技术可为各类水工混凝土工程的健康诊断、修补加固及安全运行提供技术支撑。

关键词：水工结构；混凝土；冲击弹性波；质量检测
中图分类号：TV431 **文献标识码**：A **doi**：10.13244/j.cnki.jiwhr.2018.05.017

1 引言

混凝土是目前水工建筑物的最主要原材料之一，相对于其它结构，水工领域混凝土的工作条件更加严酷，它不但承受巨大的水荷载作用，而且还要受到众多内部和外部破坏因素的影响—如冻融循环、干湿交替、碳化、温度变化、溶蚀、碱骨料反应、侵蚀环境的物理化学作用(如硫酸盐侵蚀和其它腐蚀性离子侵蚀)等，因此极易发生混凝土耐久性劣化[1-2]。

新中国成立以来，我国兴建了数以万计不同标准和类型的水库大坝及水闸。这些水库大坝和水闸在运行一定年限后，大多存在一定程度的老化病害现象，已成为威胁人民生命财产安全的重大隐患[3]。在我国以往的水利工程修补加固实践中，一些工程在未对混凝土耐久性劣化的范围、程度和发展趋势做出正确判断的情况下就开始修补方案的制定和实施。由于修补措施针对性不强并缺乏对混凝土劣化现状的准确评估，经常出现“坏了就修，哪坏哪修，修了还坏，坏了再修”的情况。已建成和新建的混凝土建筑物也将会陆续出现老化病害现象。因此，如何对它们的老化病害状况进行识别和诊断是一个重要的课题，但是长期以来一直都未得到很好的解决。

2 水工混凝土建筑物的常规检测方法

在水工建筑物混凝土质量与老化性状的检测方面，目前国内广泛开展的工作有混凝土的强度、内部质量均匀性、混凝土内部缺陷、裂缝深度、混凝土碳化深度、钢筋保护层厚度、钢筋锈蚀及混凝土耐久性的检测，特殊情况下，还进行混凝土弹性模量、抗拉强度、极限拉伸等力学性能的检测及混凝土结构脱空的检测等[4]。这些检测的方法大多已列入规程规范，并在水利水电工程建设的质量控制和混凝土建筑老化病害的检测与评定方面发挥了重要作用。但这些检测方法在应用中存在着检测范围有限、检测精度不高和检测效率低等问题，不能满足评估水工混凝土建筑物老化病害状态和程度，从而评估结构安全水平的需要。

2.1 混凝土强度的检测 我国在混凝土结构无损检测的研究工作始于1950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，至今在检测方法方

收稿日期：2017-11-28
基金项目：中国水科院科研专项(SM0145B632017)
作者简介：王荣鲁(1979-)，男，山东临沂人，高级工程师，主要从事水工建筑物检测评估研究。E-mail：wangrl@iwhr.com

面已取得了很大进展。目前在水工行业已将回弹法和超声回弹综合法等无损测强方法纳入规范。

其他还有射钉法、拔出试验法、拉拔试验法等，由于操作稍显复杂，实际工程中应用不多[5-7]。

目前，我国水利工程混凝土强度质量检测中，回弹法在使用的过程中，不仅拥有较小的技术难度，同时使用者在对其应用的过程中只需要进行简单的操作即可。但是全国回弹曲线和个别地区的回弹曲线差异较大，需要根据实际情况选用合适的测强曲线，同时对浇筑面、碳化深度、回弹角度等都需要进行修正。

超声法也被称之为超声回弹综合法，在对这一技术进行应用的过程中，需要对数字超声仪进行充分的利用，相关操作规程是超声法充分发挥自身功能的关键。但是，在应用这一方法展开混凝土强度质量测试的过程中，工作人员需要面对复杂的操作流程，任何一个环节产生误差，都将对检测结果产生严重影响。

钻芯法是典型的有损检测，在水工混凝土结构中钻取一定数量的芯样，进行抗压强度试验以实测混凝土的强度。但由于现场条件及结构情况的限制取样困难，加工出的芯样和标准芯样的要求相去甚远(如垂直度、平整度及高径比等的差距)，需要较严格的加工修补方可进行抗压试验。工程中经常出现检测各方(工地试验室、质监站、施工方和第三方检测机构)抗压强度出现差异的情况就是芯样加工和后期抗压试验存在差异造成的。钻芯法是最直接的反映现场混凝土的施工质量，但是其对构件有破损，不适宜工程的大量普查之用。还有一个更为严重的问题是芯样的评定标准现在各个规范没有明确的规定，如何评定是考验参建各方的难题之一。目前越来越多的工程采用高强混凝土，2013年颁布的高强混凝土强度检测技术规程(JGJ/T 294-2013)针对高强混凝土强度检测相关内容进行了规定，要求使用专用的高强回弹仪进行检测，针对1000 d以上龄期的混凝土，需要取芯进行修正，而水利水电行业的标准均未对高强混凝土的检测进行规定。

针对普通水工混凝土，目前行之有效的方式是综合采用回弹法、超声回弹综合法之后，选择少数部位取芯，建立专用的曲线进行校核之用。

2.2　钢筋锈蚀及碳化深度检测　目前国内外广泛采用的判断混凝土中钢筋锈蚀的电化学状态的方法是自然电位法，也称为半电池电位，水工混凝土试验规程中规定了半电池电位的方法，通过测定混凝土中由于钢筋锈蚀的电化学反应而引起的电位变化来判定钢筋锈蚀状态。实际检测中不适用混凝土已饱水和接近饱水状态。但是，最新的国外检测仪器不仅可以检测当前的锈蚀状态，还可以对钢筋腐蚀速率进行分析，能定量预测钢筋的剩余寿命，开发的新型传感器设计可用于分析潮湿或浸没在水中的结构，还可用于分析正在运行的阳极保护系统。相对国内现有的设备和技术都具有极大的先进性。

混凝土碳化是指空气中的酸性气体CO_2与混凝土中的液相碱性物质发生反应，使得混凝土碱性下降和混凝土中化学成分改变的中性化反应过程。碳化本身对混凝土没有破坏作用，其危害是由于混凝土碱性的降低，使钢筋表面在高碱环境下形成的对钢筋起到保护作用的致密氧化膜遭到破坏，伴随着水和空气等因素的共同作用，使钢筋产生锈蚀。现有的规程规定碳化深度值测量采用浓度为1 %的酚酞酒精溶液滴在孔洞内壁的边缘处，当已碳化与未碳化界限清楚时，再测量已碳化与未碳化混凝土交界面到混凝土表面的垂直距离。检测时碳化深度的检测主要目的之一进行混凝土强度的修正，其二是判断碳化深度是否大于钢筋保护层厚度，以确定钢筋锈蚀的诱因和程度。

2.3　钢筋保护层厚度及钢筋直径的检测　混凝土结构及构件中的钢筋间距、保护层厚度及公称直径通过电磁感应法和雷达法进行检测，前者通过电磁感应原理检测，后者通过发射和接收到的毫微秒级电磁波来探测。目前针对水工薄壁结构中钢筋的检测，手持式钢筋混凝土雷达技术已经成熟，最大的特点是小型、轻便，探头和天线一体化，可以实现单手操作，实时显示钢筋的位置，部分设备还可以实现三维图像重现。完成以上测试以后，碳化深度检测也需要进行，其作用一是对回弹强度测试进行碳化深度的修正，二是对比碳化深度和钢筋实际保护层的厚度。如果碳化深度大于钢筋保护层厚度，那么腐蚀现象很容易产生于构件内、钝化膜中的钢筋中，说明工程的安全性降低。反之，当构件混凝土碳化测量值小于钢筋保护层的厚度值时，则说明锈蚀现象没有发生。如果条件允许，还需要凿开混凝土，用游标卡尺测量保护层厚度和钢筋直径，肉眼观察钢筋锈蚀情况，以校核

仪器测量的准确性。

2.4　混凝土裂缝深度的检测　裂缝深度检测目前国内外主要采取钻孔取芯结合无损检测的方式进行，钻孔取芯是最直观、最有效的方法，检测时沿裂缝骑缝钻孔取芯、压风、注水、孔内电视录像、物探，追踪裂缝的发展。取芯法检测裂缝深度及发展对结构破坏较大，且费时费力，另外，需要在相邻钻孔之间对裂缝的性态进行推断。混凝土裂缝的无损检测方法有超声波法、表面波法、声波、物探方法[4]等。无损检测方法的特点是快速、方便、省事省力，对结构不造成损伤，但无损检测的结果受钢筋、缝内填充物、缝内干湿状况等的影响，规范中规定的超声波平测法测缝深，探测深度小于50 cm。工程检测中由于缝内充填物、裂缝不规则等原因，实际深度往往大于探测深度。目前还无法完全依靠无损检测的手段检测混凝土坝的深层裂缝。在今后一段时间内，国内外仍将采取钻孔取芯结合无损检测的方式检测混凝土大坝的深层裂缝，但随着无损检测技术和设备的发展，钻孔取芯的数量将不断减少。

2.5　超声波检测混凝土内部缺陷　目前在我国广泛应用于混凝土内部缺陷检测的方法是超声波法，已被建筑、交通、港口、水利等行业列入规范。测量方法主要有直接传递法、半直接传递法和表面传递法。但是这种方法的缺点也十分明显[8-9]：(1)超声波的频率一般在20 kHz以上，这么高频率的波在混凝土中传播能量衰减非常快，通常情况下在1～2 m厚度时透过波信号已经十分微弱，不适合对大体积混凝土结构进行检测，而且易受介质内其它杂散波的影响，给接收波的分辨和处理带来很大麻烦，极易产生较大误差；(2)如果要增加超声波的穿透深度，就必须增大激振能量，其代价就是激振端换能器尺寸和结构的复杂化，带来的结果就是操作麻烦，不适合大面积快速检测的要求；(3)超声法激振端和接收端换能器一般采用压电陶瓷，对混凝土表面的平整度要求很高，处理难度大。

2.6　图像学在混凝土缺陷检测中的应用　近年来，基于图像分析技术的混凝土裂缝检测、识别方法不断发展。主要采用图像灰度化、棋盘格角点求解像素率、滤波除噪、边缘检测等图像处理算法对裂缝长度、宽度及缺陷面积进行检测，采用Visual C++6.0语言和Matlab等编制程序进行后处理。实际上，由于空间的限制以及其他环境干扰的客观存在，使得裂缝图像采集过程中难以保证得到严格的正拍图像，因此通过图像法准确获取裂缝宽度目前主要用于室内和小面积试验阶段，工程检测中，由于拍摄距离、光线及角度等问题，该方法尚未广泛应用于工程中。

2.7　存在问题和不足　通过对我国水工行业混凝土无损检测技术的调研，目前存在的主要问题是虽然检测方法众多，但规范的制定与检测水平不相适应，具体如下：(1)目前被《水利水电工程物探规程》(SL326–2005)采纳的检测方法如电法勘探、探地雷达、地震勘探、弹性波测试、层析成像、水声勘探、放射性测量等大部分都没有在水工混凝土检测相关规范中得到引用；(2)在我国目前的国家标准和各行业标准中涉及到混凝土结构无损检测的规范很多年都没有更新，依然停留在回弹、射钉、超声波、回弹超声波综合法的范畴内；(3)目前水工行业新的混凝土检测方法很多，典型的包括电磁波(地质雷达)、红外线、放射线等，但几种方法检测得出的结果和参数并不能与混凝土最重要的一些性能指标(强度、耐久性等)建立明确、直接的物理关系，在特定项目中作为辅助检测手段(比如检测混凝土内部严重缺陷、面板脱空、衬砌厚度、钢筋定位、渗漏等)是可以的，但完全依靠它们在现阶段是不可取的，因为这些方法从理论到实践上还没有达到相应的技术水平。

3　基于冲击弹性波的水工结构混凝土质量检测技术

中国水科院结构材料所结合现场检测和安全评估中存在的突出问题和难题，历经8年，结合水利部“948”项目、中国水科院重点研发等项目，通过新型检测设备的自主研发和国外先进设备、技术的引进，结合无损检测理论和技术的消化和吸收，形成一套完备的基于冲击弹性波的水工混凝土结构无损检测技术体系，主要包括基于敲击振源的冲击弹性波CT技术、大坝CT(混凝土坝内部缺陷诊断系统)、基于冲击弹性波卓越波长的瞬态表面波技术，稳态和变幅稳态表面波技术等的应用[8-9]。

3.1　冲击弹性波的特点[9-12]　根据冲击弹性波激发信号的特点，采用不同的信号接收和处理方式，可

以实现不同的混凝土无损检测方法，包括P波测试、R波测试、冲击回波测试、S波测试等。适用于水工混凝土结构的主要还是前三种。与传统的超声波相比，冲击弹性波主要具有如下特点：(1)冲击弹性波由冲击锤激发，能量大且集中，测试深度明显提高，能够穿透10 m以上的混凝土；(2)冲击弹性波的卓越频率一般在几百到几千赫兹左右，波长较长，受混凝土骨料颗粒散射影响小，受外界杂散波影响小；(3)现场适用性强，操作方便，适合对大体积混凝土结构进行快速、全面检测；(4)频谱特性好，适合于IE、SASW等有限元数值模拟分析。

3.2　冲击弹性波层析成像(CT)技术　当被测结构具有两个(或以上)相对的可测临空面时，可以采用弹性波CT技术对其内部混凝土质量分布状况进行检测。根据结构尺寸以及信号激振和接收方式的不同，可以分为大体积混凝土结构(如混凝土坝)弹性波CT和大尺寸混凝土构件(如墙、墩、基础等)弹性波CT[13-15]。

弹性波CT技术应用于混凝土结构的缺陷检测在西方国家如美国、日本、意大利等开展的比较普遍，但在我国尤其是在水工混凝土缺陷检测领域还处在一个比较初始的阶段，目前见诸报道的只有如丰满等极少数几个工程，而且应用情况不甚理想，效果并未得到工程实践的检验[16-18]。弹性波CT技术在检测数据后处理方面基本上大同小异，采用的大多是基于弹性波走时反演的数值分析算法，不同之处主要在于激发振源的类型和激振信号的采集方式。用于大体积混凝土检测的有采用爆炸振源(意大利)、电磁线圈振源(美国)和敲击振源(美国、日本)等，其中尤以敲击振源最为简便、灵活、适应性好，在美国和日本等西方国家应用很广泛。但敲击振源的最大难点是对激发信号的控制，即如何同步、准确地扑捉和分析敲击产生的振动信号。大体积混凝土结构(如混凝土坝)弹性波CT技术已经在云南漫湾大坝、辽宁白石重力坝及辽宁观音岩重力坝得到了现场应用，效果良好，项目组还研究改进了算法，自主开发图形后处理软件，最大检测深度可达50 m，解决了不降低库水大坝内部大体积、大断面的无损检测技术难题[19]。某大坝弹性波CT检测断面及CT图像见图1、图2。

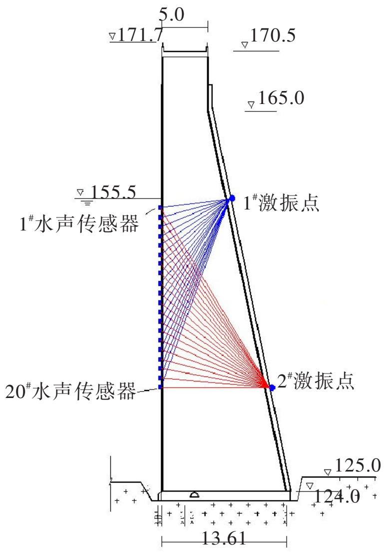

图1　某大坝CT检测断面（单位：m）

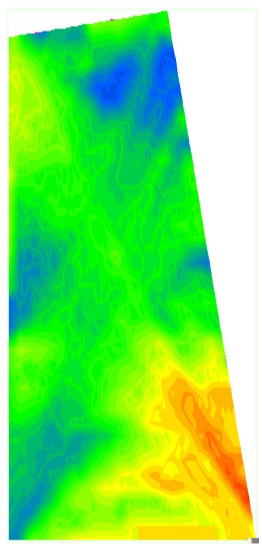

图2　某大坝典型检测断面CT图像

大尺寸混凝土构件(如墙、墩、基础等)弹性波CT在山西西龙池抽水蓄能电站厂房机组混凝土基础检测、南水北调大型渡槽混凝土缺陷检测中得到应用。

3.3　表面波方法　当被测结构只有一个可测临空面时，可以采用瞬态表面波的频散特性对表面下内部混凝土的质量进行检测。此类结构在工程中非常普遍，如面板、底板、衬砌、溢洪道、边墙以及大坝上、下游面等。瞬态表面波法中应用最多的是表面波谱分析即SASW方法。在北京市海子水库溢洪道底板实现了成功检测。在此基础上，研发了稳态和变幅稳态表面波技术，主要是通过电磁式或压电式稳态激振源激发固定频率的稳态表面波，能够最大程度地避免因同相位点判读错误而造成的R

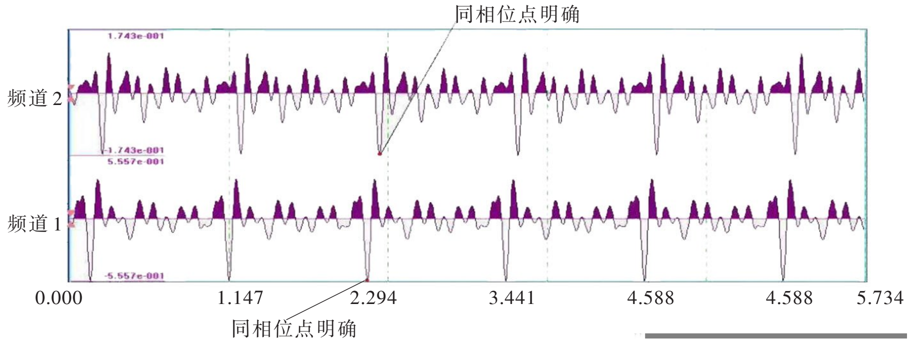

图3　SW-50A激振器产生的稳态变幅R波信号

波速度测试误差，图3为为两道传感器接收到的SW-50A激振器激发的变幅稳态表面波信号，同相位点清晰、明确，此项技术获得了国家发明专利授权，在新安江大坝溢流面检测中得到良好应用。

3.4　冲击回波(IE)方法　对于面板、楼板、墙、衬砌和渡槽槽壁等板状薄壁混凝土结构，可以采用冲击回波的方法检测整个板厚度范围内混凝土的质量以及判断结构内部可能存在的缺陷。冲击回波法是基于瞬态应力波的一种无损检测技术，自从1980年代兴起以来，已成功的运用到许多不同类型混凝土建筑物的缺陷检测和质量评价中[20-23]。我国自2000年以来逐渐引进了该技术和相关的国外检测设备，在桥梁、铁路路基等领域进行了检测，2017年5月，JGJ/T411-2017《冲击回波法检测混凝土缺陷技术规程》首次颁布。该法通过一次短暂-持续的力学冲击(通常为小钢球敲击，接触时间为15～80μs)用来产生低频应力波并传播到内部结构，在缺陷处和外部边界中来回反射而引起瞬态共振响应。这些波反射引起的表面位移将会被靠近冲击位置的一个传感器所记录，位移随时间变化的结果会转化为振幅随频率变化的结果，即时域分析转化为频域分析。瞬态共振响应和振幅频谱图是由结构的几何尺寸和应力波波速所决定的。因此，可以通过频域分析确定实体结构的弹性波波速或厚度，进而确定结构的完整性及缺陷的位置[24-25]。规范中对混凝土构件厚度及内部缺陷、有粘结后张法预应力孔道灌浆缺陷、隧道衬砌背后注浆缺陷及混凝土结合面质量等4类不同的建筑物进行了规范。根据冲击回波的原理还可以衍生出基桩、锚杆和锚索等检测方法。南水北调某暗涵混凝土质量评估、风电混凝土基础缺陷项目都利用该技术进行了缺陷检测。

3.5　冲击弹性波测试混凝土动弹性模量技术　虽然我国水利水电工程建设一直以来对水工混凝土的耐久性问题非常重视，国家、行业、地方也都制定了相应的技术规范来保证混凝土材料的这一重要性能，但是，对于水工混凝土耐久性劣化的评价长期以来都没有得到很好的解决，水工混凝土材料耐久性的研究仍主要局限于试验室内。最主要的原因是缺乏准确、有效的在现场检测混凝土耐久性的方法。目前我国水工界比较通用的方法是通过标准棱柱体试件在快速冻融条件下动弹性模量的变化来测试混凝土的抗冻性，抗冻性指标已经不仅仅局限于反映混凝土抵抗冻融破坏的能力，更主要的是用来评价混凝土的耐久性。很多工程后期通过钻芯取样得到圆柱体抗冻芯样，抗冻标号F300的混凝土在试验室达不到50个冻融循环就产生破坏，这显然是不合理的。

利用冲击弹性波检测方法获得的都是结构内部混凝土弹性波(P波或R波)速度的数值大小及分布状况的信息[20,23]。弹性波速度(V_P和V_R)与混凝土的动弹性模量E_d之间具有直接的理论相关关系，因此采用相同检测方法对结构混凝土弹性波速度的变化情况进行长期监测，就能够跟踪混凝土动弹性模量的变化趋势，实现对混凝土耐久性劣化的监测。本技术通过室内试验和数值模拟分析计算得到了成功验

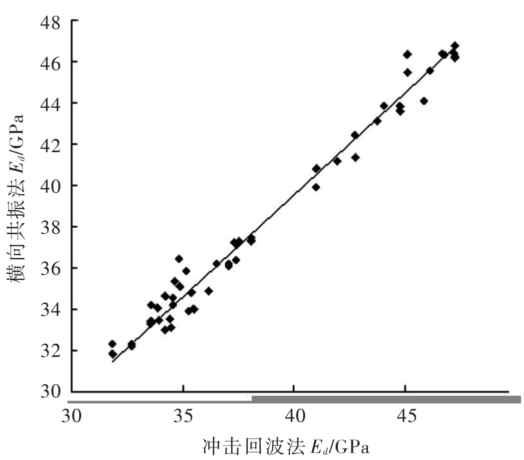

图4　冲击弹性波法与常规自振频率法测试动弹性模量比较

证，得出了冲击回波法和常规横向自振频率法测试3组混凝土的相对动弹性模量随冻融循环次数变化规律[24-25]，两种方法相关性良好，具体见图4。在结构使用过程中对其混凝土的弹性波速度进行定期的现场检测从理论上讲就能够实现混凝土耐久性劣化的监测。

4 结论

本文针对我国水工建筑物的老化病害状况和耐久性问题，重点介绍了当前水工混凝土建筑物混凝土质量与老化性状的常规检测方法和手段，并分析了其优缺点和研究应用进展。针对现场检测和安全评估中存在的突出问题和难题，研发了基于冲击弹性波的水工混凝土结构无损检测技术体系。其中，弹性波CT技术可对大体积建筑物乃至几十米厚的大坝的内部混凝土质量分布状况进行检测；采用表面波的频散特性对单一可测临空面下内部混凝土的质量进行检测；采用冲击回波法对堆石坝面板、水电站楼板、隧洞衬砌和渡槽槽壁等板状薄壁结构检测内部质量、结构厚度和结合面情况等；通过大量室内试验和数值模拟分析计算，得出了冲击回波法和常规横向自振频率法测试多组混凝土的相对动弹性模量随冻融循环次数变化规律，两种方法相关性良好。上述检测评估技术都经过室内试验、数值模拟和几十个项目现场应用，效果良好，推广应用前景广阔。

目前，众多大坝业主和运行管理单位对混凝土耐久性问题缺乏应有的重视，现有的检测评估都是出现险情或运行问题后才被动实施的。因此应充分意识到对水工混凝土结构进行定期“体检”的重要性，摒弃以往“应急”式质量检测的管理模式。通过定期检测，及时掌握水工混凝土材料真实性能及演变规律、定量确定混凝土耐久性状态，评估混凝土结构的运行状况，使水工结构健康运行。

参 考 文 献：

[1] 李金玉，曹建国．水工混凝土耐久性的研究与应用[M]．北京：中国电力出版社，2004．

[2] 陈改新．混凝土耐久性的研究、应用和发展趋势[J]．中国水利水电科学研究院学报，2009，7(2)：280-285．

[3] 杨启贵．病险水库安全诊断与除险加固新技术[J]．人民长江，2015(10)：30-35．

[4] 孙志恒，鲁一晖，岳跃真．水工混凝土建筑的检测、评估与缺陷修补工程应用[M]．北京：中国水利水电出版社，2004．

[5] 金帮琳．基于水工混凝土抗压强度无损检测技术探讨--以回弹法检测为例[C]//全国建设工程无损检测技术学术会议论文集．2013．

[6] 水工混凝土试验规程：SL352-2006[S]．北京：中国水利水电出版社，2006．

[7] 魏光辉，余芳，罗世良，等．无损检测技术在水利工程质量检测与控制中的应用[J]．西北水电，2015(2)：68-71.

[8] 中国水利水电科学研究院．基于冲击弹性波的水工结构混凝土质量检测评估技术[R]．2017．

[9] 吕小彬，吴佳晔．冲击弹性波理论与应用[M]．北京：中国水利水电出版社，2016．

[10] 吕小彬，吴佳晔，王荣鲁，等．基于卓越波长的瞬态表面波法的应用[J]．水利水电技术，2014，45(10)：129-134．

[11] LEE Hoi-Keun，YIM Hyunjune，LEE Kwang-Myong．Velocity-strength relationship of concrete by impact-Echo Method[J]．ACI Materials Journal，2003，100(1)：49-54．

[12] LIN Yiching，LAI Chao-Peng，YEN Tsong．Prediction of ultrasonic pulse velocity（UPV）in concrete[J]．ACI Materials Journal，2003，100(1)：21-28．

[13] 吕小彬，孙其臣，鲁一晖，等．基于冲击弹性波的CT技术的原理及在水工混凝土结构无损检测中的应用[J]．水利水电技术，2013，44(10)：107-112．

[14] 王浩全，韩焱，殷黎．基于超声CT的混凝土质量阵列检测方法研究[J]．计算机工程与应用，2010，46(15)：239-241．

[15] 樊瑶．超声CT技术在混凝土无损检测中的应用研究[D]．西安：长安大学，2008．

[16] 李珍照．国外大坝监测几项新技术[J]．大坝观测与土工测试，1997，21(1)：16-18．

[17] 王伍平，宋人心，傅翔，等．声波CT测试系统及其在大坝混凝土质量探测中的应用[J]．水利水电技术，

2004, 35(10): 56-57.
[18] 余志雄, 薛桂玉, 周洪波, 等. 大坝CT技术研究概况与进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1394-1397.
[19] 王荣鲁, 何兰超, 吕小彬. 大坝CT技术在碾压混凝土坝检测评估中的应用[C]//第七届全国特种混凝土技术. 中国土木工程学会混凝土质量专业委员会, 南通, 2016.
[20] LÜ Xiaobin, SUN Qichen, FENG Wei, et al. Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 231-239.
[21] LÜ Xiaobin, MA Fengling, ALLYN Luke, et al. Assessing frost resistance of concrete by impact-echomethod [J]. Magazine of Concrete Research, 2015, 67(6): 317-324.
[22] WU Jia-ye, TERU Yoshida, TAKESHI Ikejiri, et al. Impact Based Testing Technique for Measuring Moduli of Geomaterials[C]//Geotechnical Special Publicatiion, ASCE, 2011, 215: 132-140.
[23] 孙其臣, 吕小彬, 岳跃真, 等. 冲击回波法检测水工混凝土耐久性的试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(8): 196-201.
[24] LÜ Xiaobin, JIA Jinsheng, MA Fengling, et al. Quality Control of CSG with P-Wave Speed Measurement[C]// Modern Technologies in Materials Mechanics and Intelligent Systems. Trans. Tech. Publication, 2014, (1049-1050): 497-504.
[25] LÜ Xiaobin, WU Jiaye, LI Xiulin, et al. Dynamic Responses of Different Concrete Specimens under Elastic Impacts[C]//International Conference on Civil, Urban and Environmental Engineering (CUEE 2014). WIT Press, 2014.

Development and application of impact elastic wave testing in hydraulic concrete structure

WANG Ronglu[1,2], LÜ Xiaobin[1,2], LI Meng[1,2]

(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038, *China*;
2. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin*, *Beijing* 100038, *China*)

Abstract: Combining with aging condition and durability of hydraulic structures in China, the routine non-destructive testing methods and means of quality and aging properties of hydraulic concrete structures are introduced in this paper. Then, the advantages and disadvantages of various methods andresearch progress are analyzed. In view of the outstanding problems and problems existing in on-site inspection and safety assessment, we have developed a non-destructive testing technology system for hydraulic concrete structures based on impact elastic wave, including elastic wave tomography, surface wave method, impact echo method and impact elastic wave test concrete dynamic modulus of elasticity technology. The engineering practice has proved that this system can provide technical supports for the healthe diagnosis, repair and reinforcement, and safe operation of various types of hydraulic concrete projects.

Keywords: hydraulic structure; concrete; impact elastic wave

（责任编辑：李福田）